

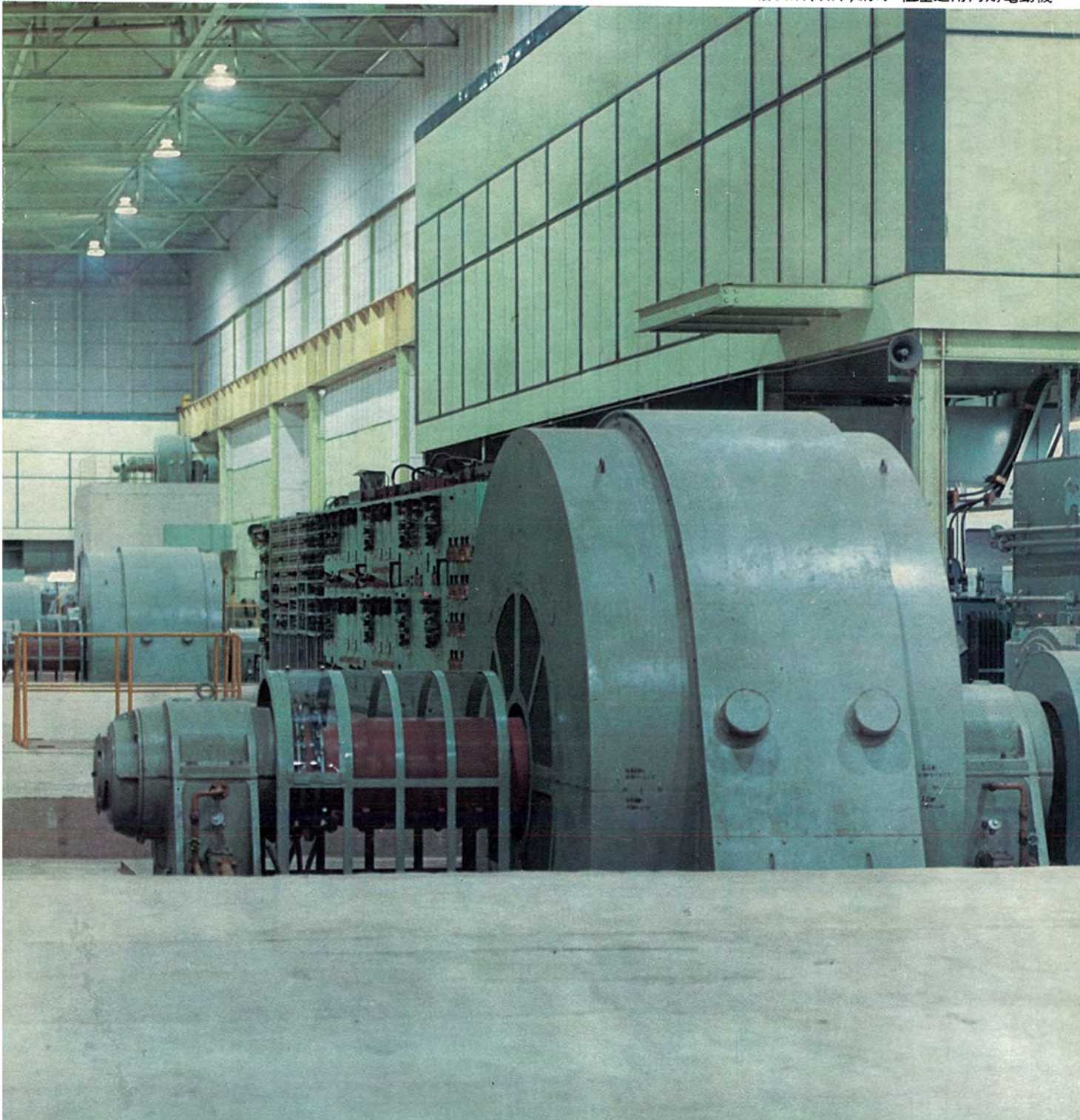
MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol.43 July 1969

モートル特集

7

八幡製鉄(君津)納め 粗圧延用同期電動機





モートル特集

目次

《特集論文》

最近の大容量同期電動機	山口 孝・成 清 正・福本紀久男	895
最近の大容量誘導電動機	東 覚 里 志	904
一般工業用直流電動機	大川 明 久	914
かご形クレーンモートル—ハイストロックモートル—	小島 敏男・森 田 清・堀 内 勝 彦	917
NB プレーキ付モートル	三 富 孜・松 谷 英 治	922
リミストップクラッチモートル—ミシン針自動定位置装置付クラッチモートル—	横 山 昌 弘	925
交流電動機速度制御方式	山下隆三郎・栗 田 静 夫	930
単相誘導電動機のサイリスタによる速度制御	前 川 善 六・小 野 健 一	940

《普通論文》

方向性けい素鋼帯の磁気ひずみ	土 屋 英 司・岡 田 将	947
両方向直流高速度しゃ断器	渡 辺 睦 夫	955
うず電流問題の差分法による解析	野 村 達 衛	964
安全ブレーカ	松 浦 清	970
静電結合形固定記録装置	小 島 一 男・蒲 生 容 仁・南 部 元	972
コークス押出機の自動運転装置	今 堀 信 彦	977
航空機用電動バルブ	杉 山 昌 司・奥 田 安 男・福 津 豊 良	982
深海潜水艇用油入均圧直流電動機	河 村 博 敏	990
中性子チョッパ	渡 辺 光 人	996

《技術講座》

システム理論—(I)基礎	伊 藤 貴 康	1002
--------------	---------	------

《新製品紹介》

新形“三菱オイルポンプ”シリーズ完成・テクスねじ用電気ドライバー・MEL-PACK5001-ガスアーク溶接機・携帯用電気みぞ切機・放電加工機用最適制御装置「オブティマイザ」	1010
--	------

《ニュースフラッシュ》

可変プログラム方式総括制御装置 MELMAC・輪転機リールスタンド周速計用 高精度 IC 化 DA 形速度変換器完成・自動検針装置	1015
---	------

《表紙》

八幡製鉄(君津)納め粗圧延用同期電動機

近年各製鉄会社で競って設備の増強,あるいは新設が行なわれてきたが,八幡製鉄君津製鉄所もその内の一つの最新鋭製鉄所である。写真は同製鉄所に熱間粗圧延用として納められた一連の同期電動機群で,10,000 kW 2台を始め,スケールブレーカを含めて全6台の同期電動機よりなる。

これら電動機は負荷の性質上いずれも350%という高脱出トルクで設計されており,またその制御はサイリスタによる速応励磁系を採用し所内の系統電圧を管理するよう複雑な制御を行なっている。

同設備は本年1月より順調に実動を開始し,その威力を発揮している。





SPECIAL EDITION FOR MOTORS

CONTENTS

SPECIALLY COLLECTED PAPERS

The Latest Large Capacity Synchronous Motors.....	T. Yamaguchi • T. Narikiyo • K. Fukumoto...	895
Recent Large-Capacity Induction Motors.....	S. Tōkaku...	904
Standard Industrial DC Motors.....	A. Okawa...	914
Squirrel Cage Induction Motor for Crane Use —HISTLOC Motor—.....	T. Kojima • K. Morita • K. Horiuchi...	917
Type NB Brake Motors.....	T. Mitomi • E. Matsutani...	922
LIMI-STOP Clutch Motors —Needle Positioner—.....	M. Yokoyama...	925
Speed Control of AC Motors.....	R. Yamashita • S. Kurita...	930
Speed Control of Single-phase Induction Motors by Thyristors.....	Z. Maekawa • K. Ono...	940

TECHNICAL PAPERS

Magnetostriction of Grain Oriented Silicon Steel Strips.....	H. Tsuchiya • M. Okada...	947
Non-Polarised DC High Speed Air Circuit Breakers.....	M. Watanabe...	955
Analysis of Eddy Current Problem by the Finite-Difference Method.....	T. Nomura...	964
Safety Breakers.....	K. Matsuura...	970
A Capacitor Read-Only Memory.....	K. Kojima • Y. Gamō • H. Nanbu...	972
Automatic Program Control of Coke Pusher.....	N. Imahori...	977
Motor Operated Valves for Aircraft.....	M. Sugiyama • Y. Okuda • K. Nezu...	982
Oil-filled Direct Current Motors for Deep-Sea Vehicles.....	H. Kawamura...	990
Neutron Chopper.....	M. Watanabe...	996

TECHNICAL LECTURE

Mathematical System Theory —(I) Basic Concepts.....	T. Itō...	1002
---	-----------	------

NEW PRODUCT.....	1010
------------------	------

NEWS FLASH.....	1015
-----------------	------

COVER EXPLANATION

Synchronous Motors delivered to the Yawata Iron and Steel Manufacturing Co.

All steel mill nowadays are emulating one another with the reinforcement of existing equipment or the extension of present facilities.

Kimitsu plant of the Yawata Iron & Steel Manufacturing Company is the newest powerful mill falling under the category. The picture shows a group of synchronous motors delivered there for use with hot roughing rolls. It consists of two 10,000 kW motors and others totaling six units including those for scale breakers. From the character of the load the motors are each designed with such a high pull-out torque of 350 %. For their control is employed a quick response exciting system by means of thyristors and complicated control is made so as to regulate its system voltage. The facilities began to operate from last January and are operating in full swing.

UDC 621.313.323

最近の大容量同期電動機

山口 孝・成清 正・福本紀久男

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7 P895~903

近年各種産業界において、生産性の向上・合理化をはかることから設備が大規模化しこれにともなって駆動用電動機の単機容量が増加し高速化する傾向にある。したがってこれらを駆動する電動機には十分信頼性の高い電動機が要求される。同期電動機は古くより数多く使用されてきたが技術的問題も残されていた。最近に至りこれまで、同期電動機の弱点とされていた点がブラシレス同期電動機、ダンパレス同期電動機などの適用によって容易に解決できるようになり十分信頼性の高い同期電動機が製作容易となった結果同期電動機の適用範囲が大幅に増加している。○以下このような点を中心に同期電動機の最近の動向にてのべる。

UDC 621.313.3〔621-59〕

NBブレーキ付モートル

三富 孜・松谷英治

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 922~924

生産性の向上、自動化などの観点から、最近の機械はますます高効率化・高速化の傾向にあるが、これらの高速化・高効率化が進むにつれて、機械の急停止、寸動などの動作を正確に行ない、しかも高ひん度・高エネルギーの使用に耐え、かつ保守・点検・調整が容易な電磁ブレーキの要求がしだいに多くなってきている。NBブレーキ付きモートルは、これらの目的を達成するために製作したブレーキ付きモートルで、本文では、その仕様・特長・動作原理・操作電磁石およびブレーキ特性（電磁石特性・停止特性・制動トルク・ひん度特性・摩耗特性）について概説○したものである。

UDC 621.313.333

最近の大容量誘導電動機

東覚里志

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 904~913

誘導電動機は産業界全般における動力源として広く使用されてきたが、最近のプラントの大形化にともなって駆動用電動機はますます大容量、高速化してきている。大容量高速電動機においては回転子鉄心の機械的強度、振動、冷却について、巻線形においてはさらにスリップリング部および短絡装置について、たゆまぬ研究を続けてきた結果、製作限界をますます拡大することができた。当社では6,000kW 2極、11,000kW 4極、11,000kW 12極などを製作して次々に記録を更新してきた。一方プラントの電源容量が強化されてきた結果、大容量かご形電動機が採用される○傾向になってきた。その一例として当社では現在7,300kW 4極種を製作中である。

UDC 621.313.3〔621・838〕

リミストップ クラッチモートル—ミシン針自動定位停止装置付クラッチモートル—

横山昌弘

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 925~928

繊維産業の最終工程ともいえる縫製加工におけるミシン作業の合理化・自動化は技術的に非常にむずかしく、かつ零細企業が多く、十分な設備投資もできず、近代化が遅れていた。

しかし最近の人手不足と人件費の上昇にともなって、合理化・自動化に対する認識が高まってきた。当社リミストップクラッチモートルは、このミシン作業の自動化の基本となるミシン針の自動定位停止を目的とし、外国技術に依存することなく自社技術で開発されたもので、停止の瞬間を電子制御によるクラッチ操作のみで位置決め○停止する世界的にも画期的な方式である。本文でこの装置の原理・構造・特色・用途などについて述べる。

UDC 621.313.2

一般工業用直流電動機

大川明久

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 914~916

直流電動機はそのすぐれた制御性能のためますます広く工業全般にわたって使用されてきている。当社はこのようなはん用化の動向にいち早く対処し、一般工業用直流電動機標準化シリーズとして、昭和37年よりJEM1170に準拠したスーパーラインD形およびこれより大きいスーパーラインM形を発表した。その間新しい材料の導入、設計製作技術の開発を順次進め性能は一段と向上している。さらに最近サイリスタ電源の実用化が本格的になり、サイリスタ電源に起因する種々の問題にも研究を進めている。本文では一般工業用直流電動機の使用にあたって、実際○的な問題について説明するとともに最近の動向についてもその概要を述べた。

UDC 621.313.3〔621.316.718〕

交流電動機速度制御方式

山下隆三郎・栗田静夫

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 930~939

交流電動機は過去においては、定速度電動機として使用される場合が多かった。最近の制御技術の進歩とりわけ十年ほど前に誕生したサイリスタ素子とその応用技術の進歩はめざましいものがあり、交流電動機速度制御分野においてもその技術が駆使され、多数の有効な速度制御方式が開発された結果、従来の定速電動機という観念は一掃された。交流電動機は堅牢で保守が容易であるという特長があるので、今後は従来直流電動機が使用されてきた分野にも使用されるであろう。ここでは、交流電動機の各種速度制御方式を紹介する。○

UDC 621.313.3〔621.87〕

かご形クレーンモートル(ハイスロックモートル)

小島敏男・森田 清・堀内勝彦

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 917~921

最近クレーンの電機品の構造を簡単にし、クレーン全体の構造を合理化する検討が広く行なわれている。これらの要求を満足するため、あらゆる角度から研究を重ね画期的なかご形クレーンモートル（ハイスロックモートル）の新系列を開発完了した。このモートルは従来のアルミダイカストロータとパーロータの形状および製造方法を巧みに組合せた特殊回転子を有し、出力・極数・形式などはJEM1202に準拠させ定格表示も新しく負荷時間率(%ED)を採用し、起動ひん度や負荷の慣性についての標準使用条件を設定し、利用者に対するの便宜を計っている。○ここではその特長・標準仕様・トルク特性・構造・応用例などについて述べる。

UDC 621.313.333:621.316.718

単相誘導電動機のサイリスタによる速度制御

前川善六・小野健一

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 940~944

単相誘導電動機の種々の特長に加えて、半導体の応用によって、広範囲かつ安定に速度制御ができるようになった。本稿では当社の双方向性サイリスタBCR(Bidirectional Controlled Rectifier)を用いた位相制御により、フィードバックのある簡単な速度制御回路を紹介し、特に制御系の安定性について検討し、さらにこの種の制御器の実用化に際しての問題点をあげ簡単に説明を加えた。

安定性の検討をするためには、まず各部の伝達関数を実験・計算によって求め、具体的な数値例によって○ナイキストの測定法に従って安定が否かを明確に判定できることを示した。

UDC 538.652:669.15'782

方向性けい素鋼帯の磁気ひずみ

土屋英司・岡田 将

三菱電機技報 Vol.43.No.7・P 947~954

変圧器騒音の一因である磁気ひずみを理解するため、磁気ひずみ自体の発生因や方向性けい素鋼帯の磁区構造とOrientationによる磁気ひずみの現われ方について検討している。ついで、実用上の問題として考えられる応力印加状態における磁気ひずみ測定装置の試作例について述べ、この装置によって、変圧器鉄心に加わると考えられる、各種応力印加状態での磁気ひずみの測定結果について報告している。これらの結果から、張力を除き他の外部応力はすべて磁気ひずみの増大につながることを示している。磁気ひずみと騒音の関係を見いだすためには、こうした応力印加状態における磁気ひずみについてよく理解することが大切であると述べている。

UDC 681.142.04:159.953

静電結合形固定記憶装置

小島一男・蒲生容仁・南部 元

三菱電機技報 Vol.43・No.7・P 972~976

計算機用固定記憶装置としては各種のものが発表されている。今回、多層プリント基板を記憶素子として用いた静電結合形固定記憶装置の開発に成功した。記憶容量は2kW、1語40ビット、サイクルタイム200ns、アクセスタイムは最大で110nsである。記憶素子はガラスエポキシを誘電体とする平行板コンデンサで、静電容量は約2pFである。1枚のメモ리카ードは16語より成り、接せんを介して周辺回路に接続されているので、記憶情報の書き換えはメモ리카ードの交換だけで容易に行なえる。特に十分なノイズマージンを有し、信頼性と保守性にすぐれた高速固定記憶装置であるので、製品化計画をもっている。

UDC 621.316.575.064.024

両方向直流高速度しゃ断器

渡辺睦夫

三菱電機技報 Vol.43・No.7 P 955~963

両方向しゃ断器の開発に伴ない、このしゃ断器の構造・動作および性能の概要について述べ、その運用例を紹介する。このしゃ断器はすでに多数の製作実績をもつ、BHF-30形正方向直流高速度しゃ断器の電磁保持、衝撃開放形を基本構造とし、両方向に対する引きはし特性を付与するために、保持電磁石とは別に引きはし電磁石を付加したしゃ断器であり、しゃ断性能にすぐれ、その電流目盛は正・逆方向に対する対称目盛および非対称目盛の設定が可能である。また、非対称電流目盛のとき、正方向目盛の設定値いかにかわらず、逆方向目盛をほぼ一定に保つことができる。

UDC 662.814/.815(621-5)

コークス押出機の全自動運転装置

今堀信彦

三菱電機技報 Vol.43・No.7・P 977~981

コークス炉における作業機械(押出機、装入車、コークガイド車、消火車)は一定の作業工程に従って運転される。この押出機の自動運転装置は押出作業が5門飛びに行なわれるため、地上に設置の指令装置より2進法の押出炉番信号をリールケーブルにて自動的に送信し、機上では現在位置2進可逆カウンタ(永久記憶式)と、押出作業またはならし作業における炉番号を比較演算して自動的に加速、減速し定位置に±5mmの精度で停止させることができる。

走行電動機はリアクトル制御を行ない、自動運転回路にはトランジスタカードを使用している。

UDC 621.313.011.2

うず電流問題の差分法による解析

野村達衛

三菱電機技報 Vol.43・No.7・P 964~969

最近の電子計算機の発達によって複雑な境界条件を有する電磁界の問題も数値計算が可能となってきた。電気機器などにおける磁界の問題も差分法による数値計算が解析の有力な手段となってきている。本論文ではうず電流を含む磁界問題の差分法による解析手法と計算例を述べる。さらに差分法における誤差についても述べ、差分法の適用法について論ずる。うず電流を含む問題に対する差分法については、境界内に存在する導体が多数個となっても適用できる手法に拡張しその適用例を示す。例として回転機によく現われる鉄心スロット内の導体のうず電流分布計算例を示し、また誤差についてはスロット内の問題について解析した。

UDC 621.64(621-5)629.13

航空機用電動バルブ

杉山昌司・奥田安男・杉津 堂良

三菱電機技報 Vol.43・No.7・P 982~989

航空機用電動バルブは従来ほとんどを輸入品に依存していたが、当社は昨年これら電動バルブの国産化に着手し、このほどZ機種の開発を完了し、引続いて数機種を開発中である。これらのバルブは航空機の燃料、潤滑油および作動油系統の流量制御に使用されるが、航空機用としての特殊性から高い信頼度が要求され、その性能はMIL規格を適用した厳格な認定試験で確認している。またこれらのバルブは小形、高性能の特長を生かして、今後一般民需用としても、流体移送の自動化などに多くの需要が期待される。本文では現在までに認定試験を完了し量産中のものおよび開発中のものについて用途、仕様、構造および性能などについてその概要を紹介する。

UDC 621.316.57

安全ブレーカ

松浦 清

三菱電機技報 Vol.43・No.7・P 970~971

安全ブレーカは一般家庭用の配線用しゃ断器として多く使用されるようになった。配線用しゃ断器の動作特性はJISC 8370に規定されているが、最近の家庭用電気機器はモータ応用品が増加しており、また大容量化の傾向があるので起動電流を考慮する必要がある。

当社安全ブレーカについて、電線の保護および負荷機器の起動電流などに対する協調特性が良好であることを説明する。

UDC 621.313.2.048.82-9

深海潜水艇用油入均圧直流電動機

河村博敏

三菱電機技報 Vol.43・No.7・P 990~995

海洋開発がクローズアップされ、深海潜水艇の必要が迫られている。深海潜水艇では耐圧強度を増加し、水中運動性を向上させるため推進電動機を殻外に設け艇を小形化する必要がある。水中電動機としては誘導電動機が適しているが、電池を電源とする潜水艇では周波数変換器が余分に必要になるため、寸法・価額の点で不利である。一方直流電動機には整流子・刷子などの裸導電部があるため水中電動機にすることが困難で、船外装備には不適当と考えられていた。このたび内部に油を封入し、内外圧力を均圧させるためにベローズを使用した、油入均圧直流電動機を開発し、深海潜水艇の推進電動機として実用化の見通しが得られたので、その概要を報告する。

UDC 621.039

中性子チョップ

渡辺光人

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 996～1,001

スリット有効長さ250mm, 重量約16kgのKモネル製ロータを, 30,000rpm で回転させる中性子チョップの概要・設計・運転結果について述べる。ロータは高速回転に耐えるように, 従来の円板状ロータの低応力部を削りとした特殊形状を採用し, 局部的には塑性変形を許容した極限設計を行なっている。高速回転装置の構成要素として, グリース潤滑による単列深みぞ形ベアリング, および真空軸封装置については単体試験を行ない, 高速性能の確認を行なっている。回転装置の運転結果では, ロータの振動振幅 30μ 以下, 真空度 $(8\sim 10)\times 10^{-2}$ torr, 各部の温度上昇 35°C 以下であり, 無人運転が可能である。

UDC 005; 6.501

システム理論 (I) 基礎

伊藤貴康

三菱電機技報 Vol. 43・No. 7・P 1,002～1,009

システム理論は, 従来, 制御理論の延長としてとらえられている傾向が強いが, 本来はより広範な科学理念としてとらえられるべきである。現在, われわれはcomputer-ageにはいりつゝあるが, 本文ではこのような立場から, 計算機の数学的モデルであるオートマトン理論と現代制御理論との融合の下にシステム理論の基礎概念の解説を行なった。2章でシステムが数学的には, どのように定義されるかを説明し, 3～6章で, 線形システム, 有限オートマトン, 線形システムの可制御性, 可観測性, 固定, 推定で7章で線形オートマトンへのシステム概念の応用, 8章で確率的オートマトン, Fuzzyオートマトンについて概説し, 最後に本文で述べなかったシステム理論のトピックスをリストしておいた。

最近の大容量同期電動機

山口 孝*・成 清 正*・福本紀久男*

The Latest Large Capacity Synchronous Motors

Nagasaki Works

Takashi YAMAGUCHI・Tadashi NARIKIYO・Kikuo FUKUMOTO

In various industrial fields elevation and rationalization of productivity are considered in earnest recently, bringing about a trend of increasing the single unit capacity of driving motor and raising their speeds so as to enlarge its scale of the equipment. This makes it necessary to have motors of high reliability. Synchronous motors have been used many years, but they have a number of technical problems left unsolved. However, advent of brushless synchronous motors and damperless ones have come to solve problems considered the drawbacks, and it has become practicable to manufacture highly reliable motors of the kind. As a result a range of the application of synchronous motors has extended a great deal. This articles describes the recent tendency of them with the above point taken as a main topic.

1. ま え が き

近年各種産業界において、生産性の向上・合理化をはかることから設備が大規模化し、これにともなって機械を駆動する電動機の単機容量も増加し高速化する傾向にある。またこのような機械は、ほとんどが工場の最も重要な機器であるため、これを駆動する電動機には信頼性の高い電動機が要求される。同期電動機は交流電動機の応用分野において、そのすぐれた特性のために古くから数多く使用されてきたが、ブラシおよびスリップリングがありこれの保守点検が必要であり、高速度で GD^2 の大きい負荷の場合かご形起動巻線が過熱するおそれがあるなどの技術的問題も残されていた。しかしながら最近このような従来同期電動機の弱点とされていた点がブラシレス同期電動機、ダンパレス同期電動機などの適用によって容易に解決できるようになり、さらに工場の受電容量の増大、電力系統の安定化と相まって十分信頼性の高い同期電動機が製作容易となった結果、その適用範囲が大幅に増加する傾向にある。

以下最近の大形同期電動機の外被形式、主要部分の構造について述べるとともにブラシレス同期電動機およびダンパレス同期電動機の概要を紹介し各位のご参考に供する。

2. 電動機の外被形式

大形同期電動機に多く用いられる通風方式には、主として次にあげるような外被形式がある。この中でどの外被形式を採用するかについては、電動機が設置される周囲条件、電動機が周囲におよぼす影響等を、十分考慮して決定することが大切である。

2.1 全閉内冷形

全閉内冷形の特長は、通風路内の空気が完全に外気と断された構造であり、じんあいの多い場所での使用に適し騒音も低い。

冷却水の補給が簡単にできれば、他の形式に比べ最もすぐれているため、高速度同期電動機に最近多く利用されるようになった。全閉内冷形は、普通図 2.1 に示すように電動機の基礎にピットを設け、そこに空気冷却器を置き、これによって電動機中央部から吐き出される熱風を冷却する。冷却器で冷やされた空気はピット下部で、実線矢印のように軸方向左右に分れて上り、両側のエンドカバーからふたたび電動機内部に吸い込まれて、電動機内部を冷却する。冷却風の循環は通常電動機の内部ファンにより行なわれる。冷却器は図

2.2 に示すものであり、特に冷却水管には、使用される冷却水の水質に応じた材料を使用している。もし断水などの事故が起こり、負荷の性質上電動機を停止することができないときは、図 2.1 のダンパ A, B, C を開き、B, C を B', C' の位置に倒し、点線のように B, C から外気を吸い込み熱風を A から吐き出し、開放防滴形

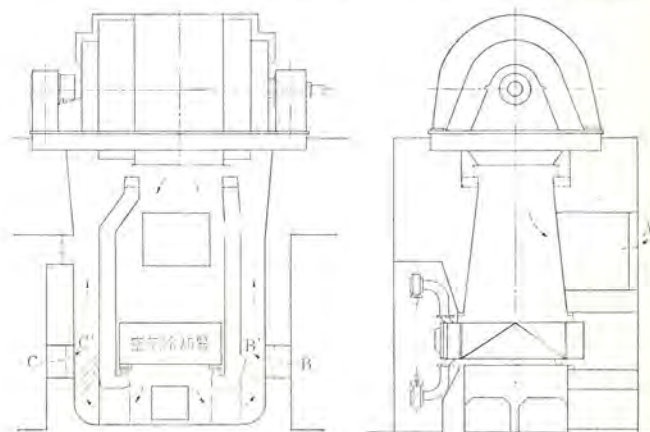


図 2.1 全閉内冷形通風説明
Ventilation of totally enclosed water-air cooled type motor.



図 2.2 全閉内冷形の空気冷却器
Air cooler for totally enclosed water-air cooled motor.

として運転を続けることができる。空気冷却器を固定子両側に取り付けたサイドマウント形の場合、据付面積は若干広くなるが、基礎にビットを設ける必要がないため建屋の費用が安価となる。また出力のあまり大きくないものは、空気冷却器を電動機上部に取付けた、いわゆるトップマウント形のものもある。

2.2 管他力通風形

電動機を設置する場所にじんあいが多いにもかかわらず、冷却水が使用できず全閉内冷形にできない場合には管他力通風形が用いられる。この場合電動機の吸気はじんあいの少ない所からダクトを通じて行なうが、ダクトが長くなると、風損が大きくなるため電動機の内部ファンのみでは、冷却に必要な風量が送れずダクトの途中に外部ファンを置き、強制通風とすることが多い。吸気側・排気側ともにダクトのついているものが全閉管他力通風形であり、吸気側または排気側のいずれか一方のみダクトがついているのが、開放管他力通風形、または防滴管他力通風形である。

2.3 開放保護形・防滴保護形

じんあいが比較的少ない場所で、かつ騒音があまり問題にならない場所には開放保護形か防滴保護形を用いる。これらの形は他の形式に比べて寸法重量が小さく価格も安いので低速機に多く用いられる。

2.4 その他

(1) サイレンサー

高速度電動機は通風音が高いため2.1節の全閉内冷形以外では

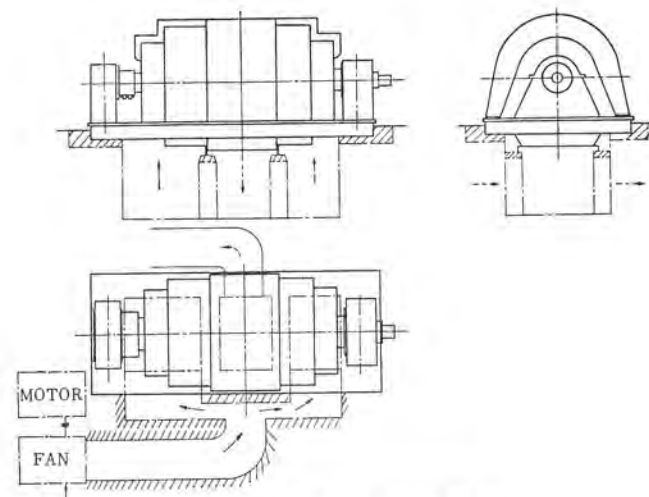


図 2.3 全閉管他力通風形
Totally enclosed forced ventilation type.



図 2.4 防滴保護形(サイレンサ付)同期電動機
4,100 kW 6 P 3,300 V, 1,000 rpm
4,100 kW drip-proof protected synchronous motor
equipped with silencer.

サイレンサーを吸排気口に取付けることがある。

(2)

爆発性ガスが漏れる可能性がある場所、例えば化学工場等に電動機を設置するときには、その設置条件に応じて安全増防爆形・内圧防爆形などを採用する。

3. 大形同期電動機の構造

3.1 電動機の内部通風

同期電動機の内部通風は、高速機の場合図3.1に示す様式と、低速機の場合の図3.2に示す様式とに大別できる。普通大容量で4, 6極機および8極機では鉄心長が長く、固定子、回転子とも中央部の冷却が不十分となり、この部分の温度が高くなる。これを解決するために大容量高速機には、図3.3のように軸流ファンが採用されている。

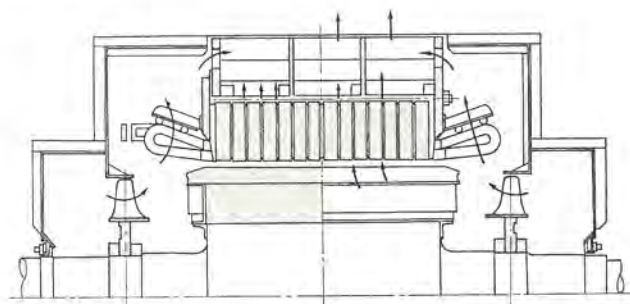


図 3.1 高速同期電動機の通風
Ventilation system for high speed synchronous motor.

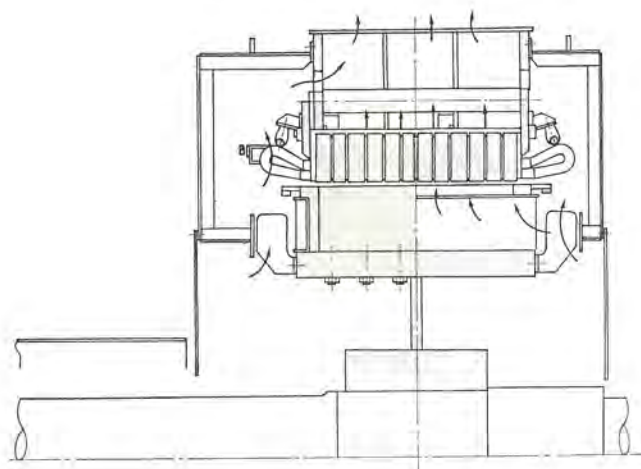


図 3.2 低速同期電動機の通風
Ventilation system for low speed synchronous motor.



図 3.3 高速同期電動機の回転子
Rotor construction for high speed synchronous motor.

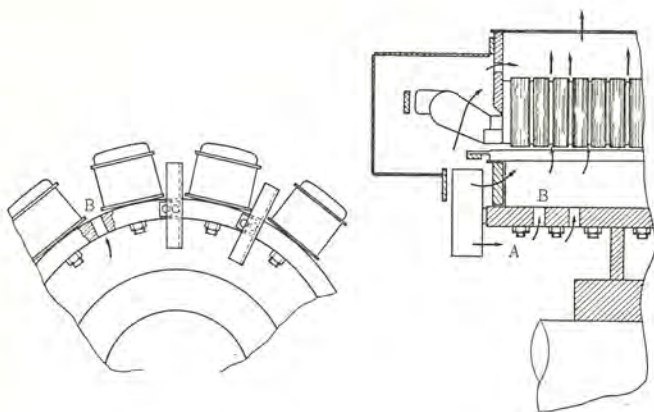


図 3.4 低速同期電動機の通風
Air pass for low speed synchronous motor.



図 3.5 同期電動機の固定子
Stator of synchronous motor.

すなわち、図 3.1 で電動機内部に吸込まれた風の一部は、電動機の内部ファン（軸流ファン）により、固定子コイルエンドを冷却し固定子鉄心背部を通してフレーム外部へ吐き出される。軸流ファンより、軸方向に吐出された他の一部は、界磁鉄心間を通り、界磁鉄心自身のファン作用も加わり固定子ダクトを通り、コイルエンド部を通った風と固定子鉄心背面で合流してフレーム外部へ出る。図 3.2 に示す低速機においては、ファンの特性ならびに構造上より高速機と異なりラジアルファンを採用している。

一般的に固定子のコイルエンドを冷却する通風経路は高速機と同じであるが、回転子は比較的鉄心長が短いものと、長いものでは一部異なっている。鉄心長が短いものでは普通のラジアルファンを使用しても、十分その目的は達せられるが、鉄心長が長いものでは、高速機と同様鉄心中央部の冷却効果を大きくする必要がある。そのためには、強制的に軸方向に冷却風を送り込むと同時に、界磁鉄心のファン作用をフルに利用できる構造とする必要がある。

図 3.4 はその点を加味した構造で、寸法的制約がないかぎりこの構造を採用している。図で説明すると A のように、ファンにより風は一部スパイラルの内周を軸方向へ吐き出され、リムの通風穴 B を通り回転子、固定子の中央部を十分冷却できる構造となっている。

3.2 固定子

固定子フレーム、エンドカバーは軟鋼板を溶接して作られており、電源投入時の大きな衝撃トルクにも十分耐える強度を有している。固

定子鉄心には、けい素含有量が多く鉄損の少ない高級けい素鋼板を扇形に打抜いて使用している。これらは鉄損を極力少なくして電動機効率の向上をはかるため、焼きなましののち各抜板間をワニスで絶縁している。

また固定子鉄心の軸方向の両外側には、非磁性の歯形押えを当て強固で均一な鉄心の締付けを行なうとともに、磁束の集中を避けて漂遊損の減少をはかっている。大容量同期電動機は、工場において最も重要な機械を駆動するためきわめて高い信頼性を要求されるので、固定子コイルの絶縁には、当社独特のすぐれた特性を持つダイラスタック絶縁を採用している。

ダイラスタック絶縁とは、マイカテープを絶縁基材とし、これにダイレジンと称するポリエステルレジンに真空圧入含浸したのち、加熱重合反応を行なわせたものである。ダイレジン は、無溶剤レジンであり、加熱硬化剤、すなわちコイルに含浸させた状態では、低粘度で絶縁基材内によく含浸し、また加熱硬化に際してはダイレジンとマイカボンドとが重合反応を起こし、完全に一体となり、溶剤の揮発に伴うピンホールボイドがなくすぐれた絶縁特性を有している。すなわち、絶縁耐力・絶縁抵抗がきわめて大きく、さらに耐湿性・耐油性・耐アルカリ性に富み悪条件のふんい気に対しても十分信頼性を保証できる。また、抗張力が大きく弾性に富み、熱的に安定であるため長い寿命を保証できる。

同期電動機においては、電源投入時ならびに同期入れ時に突入電流が流れ固定子コイル端部に大きな電磁力が作用するので、コイル端部の長さを極力短くするとともに、コイル変形を防止するため、コイル間に間隔片を入れ固定子鉄心端部に取り付けられた非磁性締付け片を用いてコイル端部を強固に押えている。端子電圧 6,600 V 以上の同期電動機では、固定子コイルのスロット部分ならびにスロット出口部分に、コロナ防止処理を施し電位傾度の均一化をはかり、コロナ発生・絶縁破壊を防止している。

3.3 回転子

同期電動機の軸材には、一般に炭素鋼鍛鋼品を使用しているが、4極機または6極機でとくに過酷な負荷を駆動するものに対しては、とくに高張力炭素鋼鍛鋼品を使用している。軸は回転機では最も重要な部分であり、超音波探傷試験で検査するとともに両端面から試験片をとり、厳重に試験を行なっている。さらに材料の降伏点を十分下まわるよう設計を行ない、大きなトルクにも十分耐えるものとしている。

大形同期電動機の界磁コイルでは断面積の大きな導体が必要となり、二重ガラス巻銅線を使った形巻界磁コイルの製作は工作上困難になってくるので、多くの場合素線は、厚さ数 mm で幅数十 mm というような扁平な平角銅線を使用したいわゆる平打巻コイルを採用する。コイル製作にあたってはこの広幅銅線を水圧機にかけて厚みの不同をなくし、層間に薄い絶縁物を焼き付け、運転時に受ける遠心力よりはるかに高い圧力で押し固め、合成樹脂系のサーモセットワニスで十分処理する。

このコイルは表面が外気に直接露出し、また幅方向に素線が一層であるから鉄心に近い内部も外部も温度上昇の差がほとんどなく、また冷却効果も非常によいという利点がある。しかし外部が露出しているので、ほこりやガスの多いふんい気で長期間運転すると導電性ほこりでなくても吸湿によりメガ低下をひき起こすおそれがある。この対策として当社では、図 3.6 に示すような直接界磁コイルの裸露出部分にガラスローピングを合成樹脂で予備含浸処理したものを張力

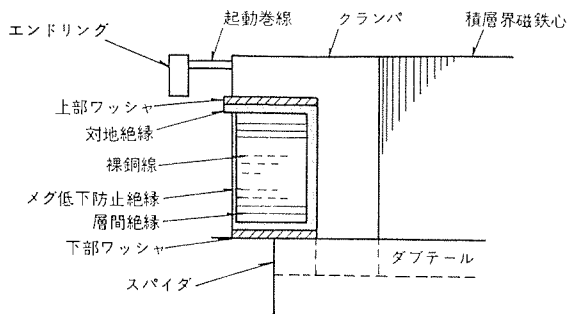


図 3.6 界磁 コイル (平打巻)
Field coil (edgewise).

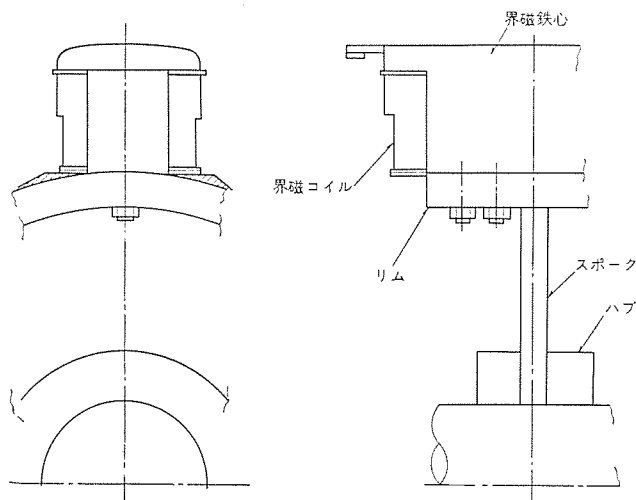


図 3.7 ボルト式 スパイダ
Bolted spider.

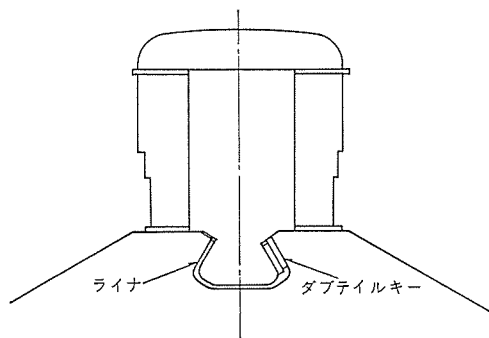


図 3.8 ダブテイル式 スパイダ
Dovetailed spider.

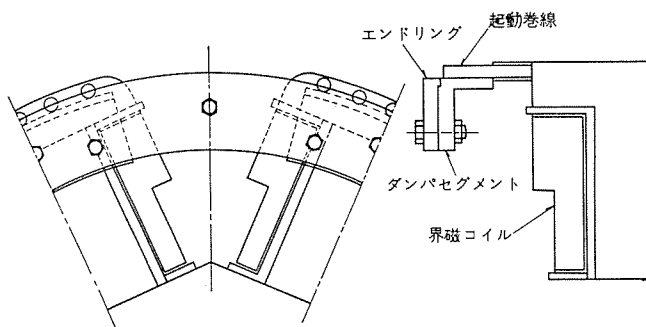


図 3.9 リング式 起動巻線の構造
Construction of ring method starting winding.

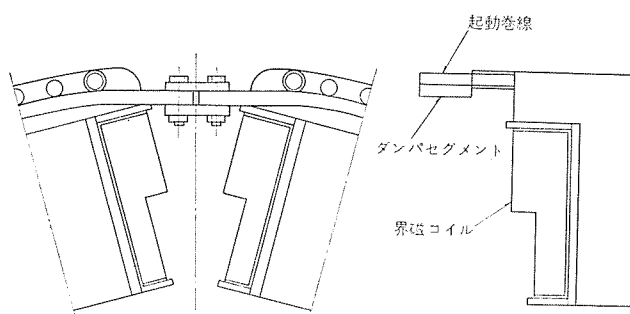


図 3.10 バット式 起動巻線の構造
Construction of bat method starting winding.

脂の性能とあいまって固いしかも熱伝達のすぐれた絶縁層を形成している。界磁鉄心の取付方式には、ボルト締付式、ダブテイル式がある。

低速大容量機は回転子外径が大きい割に回転子の遠心力が比較的小さいので、応力値に応じたボルト材質によりボルト締付式を採用している。スパイダは図 3.7 に示すようにトルクに対して十分耐え、しかもボルト締付が容易な構造とし、その材料は溶接用圧延鋼材、および炭素量の比較的少ない構造用炭素鋼等を超音波探傷試験により選別している。さらにそれらの製作にあたってはカラーチェック、サルファプリント等を実施し、溶接部の欠陥、材料の層割れがないことを確認している。溶接構造のこの方式のスパイダには、用途に応じてすべてを二つ割りにしたもの、またはハブおよびスポーク部分のみを二つ割りしたものもある。いずれも回転子の締付方法は上記のボルト締付方式である。

高速機は回転体の遠心力が回転数の 2 乗に比例し、半径、重量に比例するので、回転子には非常に大きな遠心力が作用する。そのため低速機に用いられたボルト方式では、強度的に使用不可能なばかりでなく、回転子外径が小さくなるためスペース的にも採用困難なことがある。したがってこの場合は軸と一体のスパイダか、もしくは厚鋼板を積層したダブテイル方式のスパイダーとなる。回転子の取付は鉄心のダブテイルをスパイダのダブテイルみぞに図 3.8 のようにダブテイルキーとライナーにより、界磁鉄心の偏心によるアンバランスがないように強固に取付けている。

同期電動機で最も普遍的に使用されているかご形起動巻線付同期電動機は、突出磁極片に黄銅、特殊合金などのかご形起動巻線（ダンパ棒）を設け、その両端をエンドリングで接続している。本構造は後述のダンパレス同期電動機と比較して、運転中の効率が高いこと、負荷の反抗トルク特性に合わせて電動機の起動時トルク特性を任意に設計できること、また同期運転時の制動作用が良好であるなどの特長を有する。かご形起動巻線には起動時非常に大きな熱応力加わるため、これに十分耐える材料を使用せねばならない。

エンドリングは周速により図 3.9 のリング式と図 3.10 のバット式とがある。リング式は逆 L 字形に鍛造されたセグメントをダンパ棒にろう付けした構造である。これを軟鋼の円板状エンドリングに強固に締付け、遠心力によるダンパ棒の応力を極力低減する構造としている。低速機に用いられているバット式は、平角銅線を磁極片のダンパ棒にろう付けし、これに極間接続片をボルトでしめつけリング状に組合わせた構造である。

スリップリングは特殊鋼製でマイカ絶縁をへだててスリップリングボスに焼きはめした構造であるが、同期電動機では界磁放電抵抗の値、いかんによっては起動時に高い電圧が発生し、また同期投入時に大きな電流が流れることがあるのでその構造、絶縁には十分に注意をはら

をかけてまきつけ、かつ、まきつけ中に加熱して予備含浸の合成樹脂を溶融し、薄い絶縁層を表面に密着させることにより、冷却効果をそこなうことなくメグ低下を防止する方法を採用している。なおこの絶縁層はガラス基材の繊維であるため機械的に強じんで、合成樹

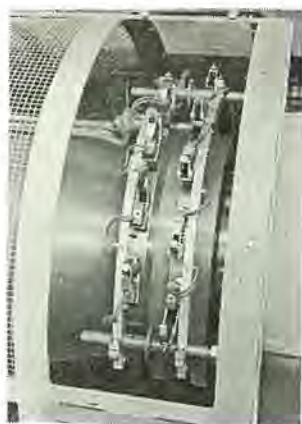


図 3.11 スリップリングとブラシホルダ
Slipring and brush holders.

ている。リングの外周には、らせん状のみぞを切って冷却効果としゅう(摺)動特性をよくし、ブラシの過熱ならびに異常摩耗を防止している。

ブラシホルダは、ブラシが摩耗してもブラシ圧を均一に保てる構造とし、ブラシの異常摩耗およびスリップリングの荒損を防止している。

3.4 軸受

大容量同期電動機に用いられている軸受は、スリーブ軸受でありオイルリング方式と強制給油方式の2種類がある。一般に強制給油の場合でもオイルリングを併用しているが、4極機、6極機の一部では強制給油のみでオイルリングを併用していないものもある。軸受メタルは、高速機および大容量の低速機では全面的に球面坐を使用しているが、球面坐を使用しないものでも軸の片当たりを防止し、軸のたわみに対し軸がなじみやすい軸受構造としている。

軸受の設計にあたって重要なことは、軸受の直径(D)および長さ(L)をいかに決めるかということである。軸受の直径は軸のたわみ、振動からも制約をうけ、長さは軸受負荷を大きく、軸受損失はなるべく少なくなるようにきめている。低速機の場合はL/D比は、1.2~1.4、高速機の場合は0.8~1.0くらいに選ばれることが多い。強制給油とオイルリング方式は、軸受周速と軸受負荷により詳細設計の上きめている。

同期電動機では軸電流が発生しないようなセグメント数を選ぶが、さらに万全を期し、ベドスタルの下、または軸受メタル裏面を絶縁し、軸電流の流路を形成しないようにしている。両側の軸端に負荷を直結した電動機では絶縁カップリングを用い、軸電流により負荷機械の軸受が焼損するのを防止することもある。

4. ブラシレス同期電動機

半導体整流器の著しい進歩により、十分信頼性の高いブラシレス同期電動機が製作可能となり、多数のブラシレス同期電動機が一般に使用されるようになった。とくに化学工場における使用実績は最近急速にブラシレス化の一途をたどっている。表4.1は当社がこれまでに製作納入したブラシレス同期電動機を示す。

4.1 ブラシレス同期電動機の特長

ブラシレス同期電動機は従来の同期電動機からスリップリング、ブラシなどのしゅう動部分を取り除いたまったく新しい励磁方式で、次のような特長がある。

(1) ブラシおよびスリップリングの保守が不要である。

ブラシの取換え、スリップリング部の点検、清掃などブラシやスリップ

表 4.1 ブラシレス同期電動機納入実績表
List of brushless synchronous motors supplied.

納入先	同期電動機仕様						納入年月	備考
	出力 kW	電圧 V	力率	極数	回転数 rpm	台数		
三洋酸素	4,100	3,300	0.9	6	1,000	1	42/8	コンプレッサ
化成(水島)	510	3,300	1.0	22	327	2	42/11	コンプレッサ
三菱油化 (四日市)	4,200	6,600	1.0	40	180	1	43/9	コンプレッサ
三菱油化 (四日市)	500	6,600	1.0	40	180	1	43/9	コンプレッサ
日本鋼管	8,700	11,000	0.9	8	900	1	44/3	ダンパレス 焼結ブロー
三菱石油	650	3,300	1.0	22	327	1	44/4	コンプレッサ
化成(黒崎)	1,800	3,300	1.0	22	327	2	製作中	コンプレッサ

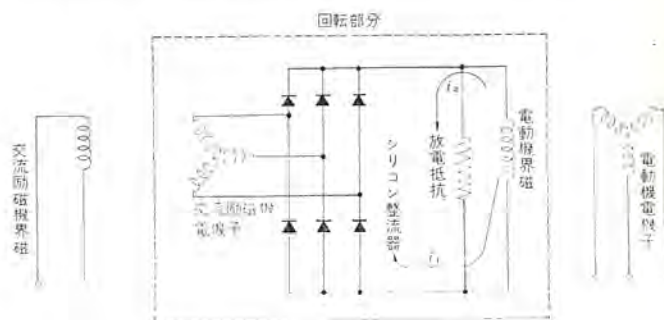


図 4.1 ブラシレス同期電動機の基本励磁回路
Basic brushless excitation circuit.

リングに関する保守が不要となるため、保守の負担が軽減される。

(2) ふん囲気が悪いところでの使用に耐える。

化学工場などのように爆発性ガスが存在するところでは、従来スリップリングに内防爆形の防爆構造を採用していたが、ブラシレス同期電動機ではこれらの必要性がまったくない。またブラシの良好なしゅう動特性を得ることが、困難な周囲条件でもブラシに関するトラブルはいっさい生じない。

(3) 交流励磁機は一種の回転増幅器であるため励磁装置が小形軽量となる。

(4) 運動の信頼性が増す。

4.2 ブラシレス励磁回路の動作特性

最も基本的なブラシレス同期電動機の励磁回路を図4.1に示す。同期電動機は起動時界磁コイルに発生する交番高電圧を吸収するとともに加速トルクを増加させるために、適当な放電抵抗を通じて界磁回路を短絡する必要がある。この目的のために図4.1では放電抵抗を界磁コイルに並列に接続している。図4.1で起動時界磁回路に誘起される電流は、正の半サイクル(運転時の界磁電流と同方向に誘起される電流を正方向とする)ではシリコン整流器によって直接短絡されるが、負の半サイクルではシリコン整流器によって阻止されるため放電抵抗を通して流れる。

このようにシリコン整流器のスイッチング作用により起動時界磁誘起電流には直流分が生じることになるが、界磁コイルに直流分が流れると制動トルクが発生し起動時のトルクを減少させることとなる⁽¹⁾。この直流分の大きさは界磁巻線の抵抗と放電抵抗の比によって決まるため、直流分を減少させるには放電抵抗の値を小さくする必要がある。一方放電抵抗の値を小さくすることは同期運転中、整流器からの直流出力の内、放電抵抗回路への分流分が増加しそれがすべて

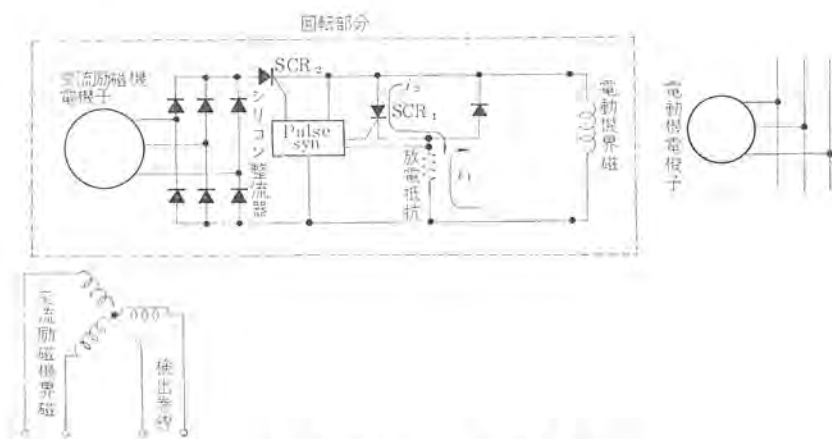


図 4.2 ブラシレス励磁回路
Mitsubishi brushless excitation circuit.

放電抵抗で熱損失となって消費されるため、電動機の効率が低下するうえに交流励磁機の容量を増加させる結果となる。

このようにこの回路では、相反する二つの特性が放電抵抗に要求されるという根本的な欠点を有するため、これらを改善する必要がある。当社ではこれまで以上のような欠点をなくするために、ゼナダイオードとサイリスタを組合わせた励磁回路を使用してきたが⁽²⁾、このたびさらにすぐれたブラシレス励磁回路を完成させ実用化にいたった。このブラシレス励磁方式は同期電動機の同期化を最適速度、最適位相で行なえるようにしたもので、図 4.2 に示されるのがその回路である。

同期電動機を同期化する場合最適速度、最適位相の状態では直流励磁を与えれば同期化トルクも大きく電源に与えるじょう乱もなくスムーズに同期化できる。図 4.2 に示される励磁回路は同期化のための最適速度、最適位相の検出を“PULSE SYN”という制御要素で動作せしめるようにしたものである。

図 4.2 において起動時サイリスタ SCR_2 は不導通の状態にあるため、界磁回路に誘起される電流は、正の半サイクルでは放電抵抗、シリコン整流器を通して流れ、負の半サイクルでは PULSE SYN からパルスゲート電流が流れてサイリスタ SCR_1 が導通するため、 SCR_1 と放電抵抗の回路が形成される。このようにして起動時界磁回路に誘起される交番電流は正の半サイクル、負の半サイクルとも放電抵抗を通して流れるため制動トルクを発生することもなく、従来のスリップリング付き同期電動機の起動特性と何ら変わることもなく同期化速度近傍まで加速される。

また一方放電抵抗の両端から信号を得ている PULSE SYN は、界磁誘起電圧の大きさと界磁周波数から最適速度と最適位相を検出して、これが両立した時点でパルスサイリスタ SCR_2 のゲートへ流し SCR_2 を導通せしめる。このとき交流励磁機の出力側には電圧が発生しているので、電動機界磁に直流電流が流れ同期引込みを行なう。サイリスタ SCR_1 はサイリスタ SCR_2 が導通する前に不導通となるよう設計されているため同期化後は放電抵抗に界磁電流は流れない。このように当社のブラシレス同期電動機は起動特性、運転特性ともすぐれた特性を発揮できる最も進歩したブラシレス方式といえる。

4.3 ブラシレス同期電動機の構造

ブラシレス同期電動機は、電動機本体、回転整流装置(シリコン整流器、サイリスタ)、PULSE SYN、放電抵抗、交流励磁機より構成されているが、これらは電動機の空間を有効に利用して取り付け電動機の軸長が伸びないように考慮している。



図 4.3 回転整流装置
Rotating rectifier.

4.3.1 交流励磁機

交流励磁機は回転電機子形の三相同期発電機で、その出力、電圧については電動機の最大励磁電流によって決定する。周波数は主機の周波数に一致させる必要もないので任意に選定している。交流励磁機の界磁(固定子)には、励磁コイルのほかに運転中のシリコン素子故障を検出するためのシリコン故障検出巻線を設けている。

4.3.2 回転整流装置

回転整流装置はシリコン整流器、サイリスタおよびヒートシンクより構成されている。回転整流装置はブラシレス励磁回路の心臓部であるため、電気的特性はもちろんのこと機械的にも遠心力に対する耐力、耐衝撃性、震動耐力、取付構造などにつきあらゆる角度から検討を加え万全を期している。さらに構造を簡素化するために、シリコン整流器には通電方向がリードからベースに向う順方向性素子と通電方向がこれと反対の逆方向性素子を組合わせて使用している。図 4.3 は回転整流装置を示す。

4.3.3 PULSE SYN (パルスシン)

PULSE SYN は同期電動機が起動より同期引込れに至るまでに最も重要な働きをなすもので、これにはゲートモジュール、同期化モジュール、ポストモジュールの三つがある。ゲートモジュールは図 4.2 でサイリスタ SCR_1 にゲート信号を与える装置、同期化モジュールはサイリスタ SCR_2 にゲート信号を与える装置である。ポストモジュールは同期化モジュールより SCR_2 にゲート信号が与えられない状態、つまり同期電動機が自己のとつ(凸)極トルクで同期化してしまったような場合に、サイリスタ SCR_2 にゲート信号を与える役割を果たす。

PULSE SYN はトランジスタ論理要素と抵抗、コンデンサの充放電回路で構成されているため構造の簡素化、絶縁劣化の防止、機械強度の向上を計るため一体形にモールドされ、機械的に丈夫で大きな遠心力にも十分耐える構造としている。図 4.4 はモジュールの一例を示す。

4.3.4 放電抵抗

放電抵抗は前述のように、電動機の起動特性改善と起動時界磁コイル両端に発生する高電圧を吸収するもので、放電抵抗を設計する場合この点を十分考慮しなければならない。放電抵抗には耐熱性抵抗線を特殊な粉末状無機質絶縁物で加圧焼成し、その周囲をステンレス鋼板でおおったシース抵抗体を使用している。また放電抵抗は電動機が起動する際これに流れる最大電流から放電抵抗によって発生する熱損失を求め、放電抵抗の温度上昇が許容値を越えないよう考

慮している。図 4. 5 は放電抵抗およびこれの取付け状態を示す。

4. 4 信頼性

ブラシレス同期電動機の信頼性は回転整流装置の信頼性によってきまる。整流素子の劣化は初期不良さえなければほとんど半永久的に使えその信頼性は非常に高い。一般に素子劣化は故障率で表わされるが、この故障率は 10^{-7} 個/時間より小さいことが実証されている⁽³⁾。このことは 50 個の整流素子を使用した場合、電動機を連続運転したとして 20 年に 1 個の素子劣化があるということを意味し、信頼性が非常に高いことを示している。

4. 5 ブラシレス同期電動機の制御・保護方式

ブラシレス同期電動機は交流励磁機を無励磁状態で起動し、同期速度付近まで加速したあと交流励磁機に励磁を加えると PULSE SYN の働きにより同期引込みが行なわれ同期運転にはいる。同期運転にはいったあとは、交流励磁機の界磁電流を調整することによって手動および自動の力率調整が可能である。保護方式としては通常過電流継電器、低電圧継電器、同期はずれ検出装置、界磁喪失用電磁リレーを備えてそれぞれ過負荷、低電圧、同期はずれ、起動渋滞、界磁喪失などの保護を行なうとともに、交流励磁機の検出巻線からの信号で動作する回転整流器故障検出装置を設けている。

同期はずれ検出装置は同期電動機が同期はずれ状態にはいったことを同期電動機端子電圧と電機子電流の位相差より検出し、同期再投入の機会を与えながら警報表示、運転停止を行なわせる装置である。また回転整流器故障装置は回転子内に組込まれたシリコン整流器が故障し、交流励磁機の三相出力に不平衡が生じたり、短絡電流

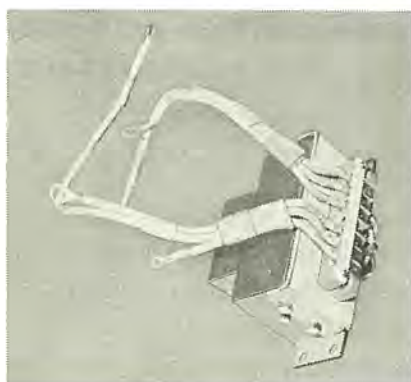


図 4. 4 モジュール
Module.

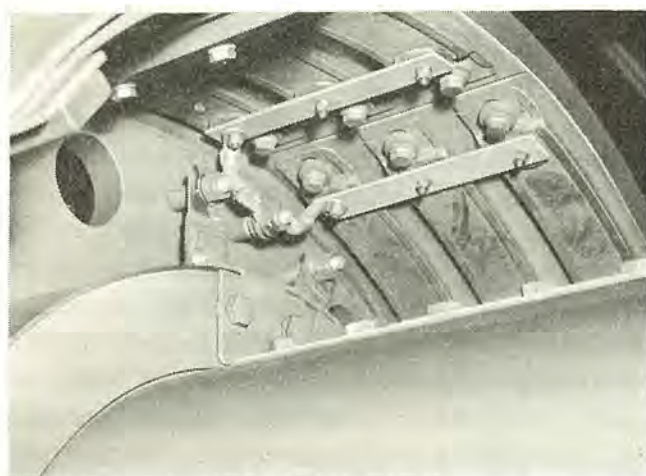


図 4. 5 放電抵抗
Discharge resistor.

が流れたりした場合に交流励磁機の検出巻線に現われるピーク電流を捕え、主回路を速やかに開放しブラシレス同期電動機の事故増大を防ぐ装置で、いずれもブラシレス同期電動機特有の保護方式である。

その他減電圧起動装置を設けた場合は、これの切換渋滞検出回路を設け起動用リアクトル、単巻変圧器などが規定の時間以上使用されないよう保護し、必要に応じ差動リレー、接地リレーなどを設け主電動機電機子巻線の事故、主回路の接地事故を検出する。

5. ダンパレス同期電動機

最近、突極形同期電動機で起動巻線（ダンパ巻線）を有せず、界磁鉄心を塊状（ソリッド状）とし、その磁極表面の渦電流を利用して、自己起動するダンパレス同期電動機が、製鉄用のブロウや化学工場のターボコンプレッサなどに広く利用されるようになった。ダンパレス同期電動機は、従来のかご形起動巻線付き同期電動機では得られなかったすぐれた特長を備えているため、用途によっては今後数多く採用されよう。ダンパレス同期電動機はダンパ付同期電動機に比べ、現象は一段と複雑であるが当社では技術的問題はすべて解決し、すでに表 5. 1 に示すように多くの製作実績を有している。

5. 1 ダンパレス同期電動機の特長とその適用

同期電動機は負荷を起動する場合、誘導電動機として起動するが、その際、回転子の起動回路に発生する熱量は次の式で表わされる⁽⁴⁾。

$$E = 2.74 \times GD^2 \left(\frac{N_s}{1,000} \right)^2 \left(0.5 + \int_0^1 \frac{ST'}{T - T'} ds \right) \dots \dots \dots (5. 1)$$

E = 回転子に発生する熱量 (kW・s)

GD^2 = 電動機と負荷 GD^2 の総和 (kg・m²)

N_s = 同期速度 (rpm)

T' = 負荷反応トルク (単位法)

T = 電動機発生トルク (単位法)

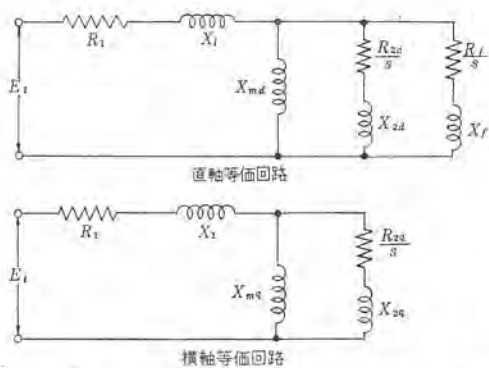
S = スリップ (単位法)

この発生熱量による起動巻線の温度上昇は、発生熱がすべてダンパ巻線に貯えられるとすると次式となる。

$$\theta = \frac{E}{CW} \dots \dots \dots (5. 2)$$

表 5. 1 ダンパレス同期電動機納入実績表 (1,000 以上)
List of damperless synchronous motors supplied.

納入先	同期電動機仕様						納入年月	備 考
	出力 kW	電 圧 V	力率	極数	回転数 rpm	台数		
当社名古屋製作所	1,500	3,300	80	8	900	1	35/12	
富士鉄(広畑)	4,500	11,000	100	8	900	1	40/5	焼結ブロウ
住 金(和歌山)	9,200	11,000	100	2	3,600	1	39/11	ターボタイプ 高炉ブロウ
住 金(和歌山)	7,000	11,000	100	2	3,600	1	40/1	ターボタイプ 高炉ブロウ
八幡製鉄(君津)	5,300	11,000	100	6	1,000	1	43/9	焼結ブロウ
神 船(ソ連)	4,000	6,000	100	4	1,500	1	44/4	コンプレッサ
日新製鋼 (呉)	4,200	6,600	90	6	1,200	1	43/12	焼結ブロウ
日本鋼管(福山)	8,700	11,000	90	8	900	1	44/3	ブラシレス 焼結ブロウ
八幡製鉄(君津)	7,000	11,000	100	6	1,000	1		製作中 焼結ブロウ
富士鉄(広畑)	2,300	11,000	100	4	1,800	1		製作中 コンプレッサ



R_1 —一次抵抗
 X_1 —一次漏れリアクタンス
 X_{md} —直軸相互リアクタンス
 X_{mq} —横軸相互リアクタンス
 R_{2d} —直軸二次抵抗
 X_{2d} —直軸二次リアクタンス
 R_{2q} —横軸二次抵抗
 X_{2q} —横軸二次リアクタンス
 R_f —界磁巻線抵抗
 X_f —界磁巻線リアクタンス

図 5.1 突極ダンパレス同期電動機等価回路
Equivalent circuit of damperless synchronous motor.

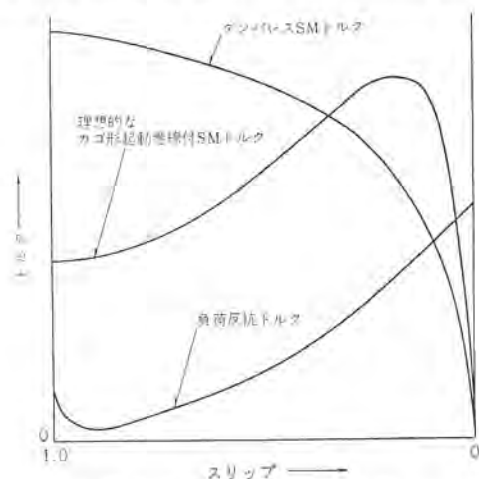


図 5.2 電動機トルク曲線
Motor torque curves.

θ = 起動巻線の温度上昇値 (°C)

C = 起動巻線の比熱 (kW/s/kg°C)

W = 起動巻線の重量 (kg)

式 (5.1), (5.2) より, 電動機発生トルク, 負荷反応トルクを一定と考えた場合, 起動巻線の温度上昇は, 回転部分の GD^2 に比例し回転数の 2 乗に比例することがわかる。かご形起動巻線は材料によって許容される温度上昇値が若干異なるが, 大体 200°C 前後であるため GD^2 の大きな負荷, あるいは回転数の高い電動機ではかご形起動巻線の温度上昇値を上記値に押えることが困難な場合がある。

これに対しダンパレス同期電動機は, 磁極が単一鋼塊であるため起動時の熱容量が普通のかご形起動巻線の熱容量よりはるかに大きく, さらに磁極表面に発生した熱はすみやかに磁極全体に伝達されるので, 最も温度が高くなる磁極表面温度を十分に低い温度に押えることができる。このようにダンパレス同期電動機は, 回転子の熱容量が大きいので, 負荷の GD^2 が大きいプロワなどの駆動用として, あるいは GD^2 の比較的小さい場合でも起動ひん度の高い用途に最も適している。また後述のように, 構造が簡潔で機械的にもがん(頑)丈であるため 4 極機などの高速度大容量機でも信頼性の高い同期電動機を得ることができる。

5.2 起動特性・運転特性

ダンパレス同期電動機を電源に投入して自己起動を行なう場合, トルクは回転子の磁極に流れる渦電流によって発生する。一般に, 同期

電動機の起動時の等価回路は図 5.1 に示され, これらの等価回路を直軸, 横軸おのおのについて解くことにより, 起動時の電流・起動力率・トルクなどすべての値を求めることができる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。当社ではこれらの計算に高速度電子計算機を用いて起動時の諸特性を解析している。ダンパレス同期電動機の起動特性は図 5.2 に示されるように, 高抵抗かご形起動巻線付き同期電動機の特性に類似し, その特性は回転子磁極の電気的特性によって左右される。ダンパレス回転子には, 普通, 炭素鋼を使用するためかご形起動巻線のようにその固有抵抗, サイズを変更して負荷の反抗トルクに合ったトルク特性を得ることは不可能で, ほぼ一定の特性を示す。このように起動時のトルク特性を負荷の反抗トルクに合わせて自由に変えられないことがダンパレス同期電動機の欠点となっている。

ダンパレス形の磁極は積層されておらず, 固定子スロット開口部などの原因によって生ずる脈動磁束により, 同期運転中にも渦電流が磁極表面に流れ, 効率を著しく低下させることがある。このことは一般に空隙が狭く固定子みぞ幅の広い場合, みぞ周波数が高い場合に大きく影響する。したがってこの影響が著しい進み力率の電動機や低速機ではとくに電流回路のインピーダンスを増加させるため, 磁極表面に半径方向のスロットを切るなどの対策をほどこしている。

5.3 起動時の回転子温度上昇⁽⁷⁾

前述のように, 同期電動機を自己起動する場合には回転子に式 (5.1) で示される熱量を発生し回転子の温度を上昇せしめる。したがってプロワなどのように, その回転系の単位慣性定数 (H : constant) が 20.0 近くに達するものでは, 回転子の表面温度が相当高くなるため負荷の GD^2 の大きさによって電動機のフレームサイズがきまる場合が多い。ダンパレス回転子においては, 起動時回転子電流は磁極表面に層状をなして流れ, その浸透深さ δ (cm) は次式で表される。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho H}{\omega B}} \dots\dots\dots (5.3)$$

H = 回転子磁化力 (AT/cm)

ρ = 回転子磁極の比抵抗 (Ω -cm)

ω = 回転子角速度 (rad/s), $\omega = 2\pi sf$

s = すべり (単位法)

f = 電源周波数 (Hz)

B = 回転子磁束密度

また回転子電流による回転子単位表面積当たりの損失 L (W/cm²) は,

$$L = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{\rho H}{\delta} = \frac{8}{3\pi} \cdot H^{3/2} \cdot \left(\frac{\rho \omega B}{2}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (5.4)$$

となる。このように回転子電流の浸透深さならびに発生熱量は回転子周波数(すべり周波数)に関係し, 回転子速度とともに変化する。

磁極表面近くに発生した熱量は, 時間とともに大部分は磁極表面より磁極体, スパイダ部へと伝達されるが, 一部は磁極表面より冷却空気によって持ち去られる。これらの諸点を考慮し熱微分方程式を解くことによって, 起動時の磁極表面における温度上昇値を正確に求めることができる。当社ではプロワ焼結などのように GD^2 の大きい負荷に対しては起動時の磁極表面温度, およびその温度分布の差によって生じる熱応力につき検討を加え, 起動時の磁極表面温度によるトラブルが発生しないよう注意をはらっている。図 5.3 は磁極表面近傍での温度分布の一例を示す。

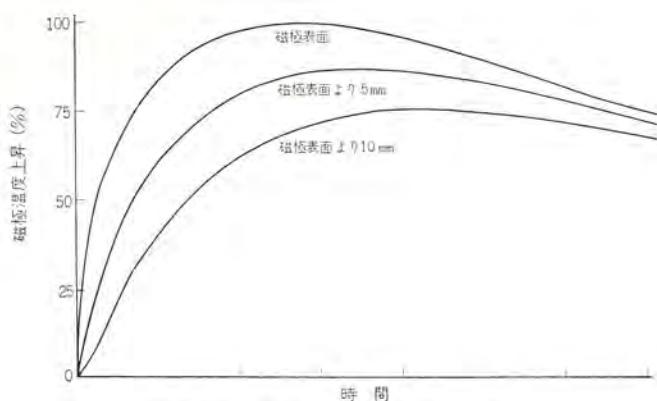


図 5.3 起動時磁極温度上昇
Temperature rise of pole shoe during starting.

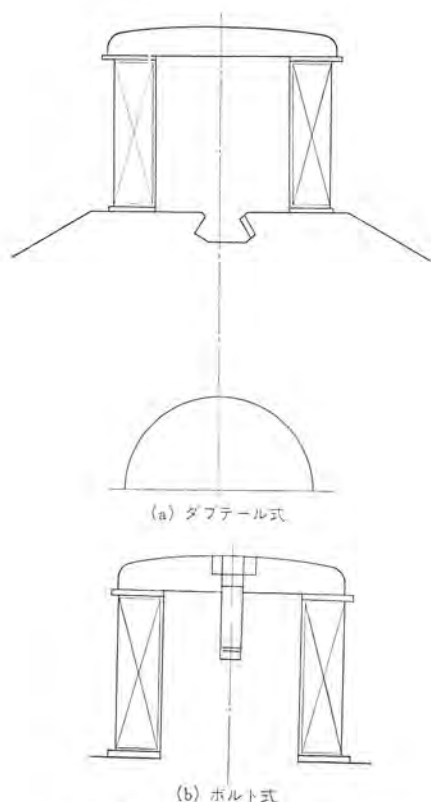


図 5.4 ダンプレス回転子構造
Construction of damperless rotor.

5.4 ダンプレス回転子の構造

ダンプレス回転子の標準構造は高速機では、図 5.4 (a) のように 1 個の鍛鋼品か複数個の厚鋼板を溶接またはボルトで 1 体化した磁極をダブテールによって、スライダまたは軸に強固に取付けた構造となっている。低速機では同図 (b) のように磁極片を厚鋼板で形成し、同様に厚鋼板で形成された磁極体にボルトで取付ける構造となっている。起動時磁極表面には多くの渦電流が流れ加熱されるので、その熱応力の吸収と、同期運転中の固定子スロットによる空隙磁束の高調波成分による磁極表面の渦電流損を減少させるため、図 5.5 のように、磁極表面に数 mm 深さのみぞを加工している。図 5.6 に 6 極ダンプレス形回転子の実例を示す。

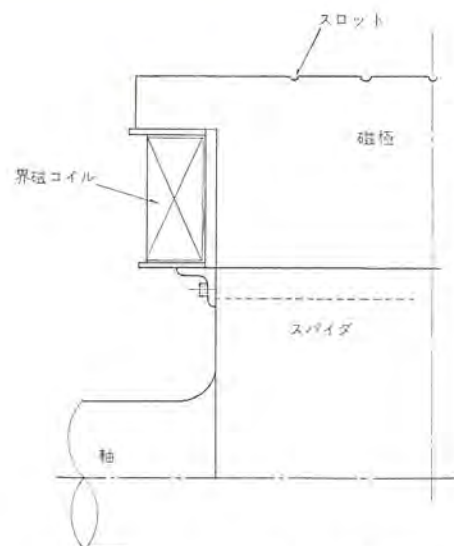


図 5.5 ダンプレス回転子の構造
Construction of damperless rotor.



図 5.6 ダンプレス同期電動機回転子
Rotor of damperless synchronous motor.

6. む す び

以上大形同期電動機の外被形式・構造について概説し、さらに最近その特長が認められ産業界の各方面に広く利用されるようになったブラシレス同期電動機、ダンプレス同期電動機についてのべた。電力応用の分野において、同期電動機はそのすぐれた特長のために数多く使用されてきたが、上述のように新しいタイプの同期電動機が開発されるにいたり、今後ますますその応用分野が拡大されることは明らかである。本文が多少なりとも同期電動機を理解する上においてご参考になれば幸いである。当社は今後とも新しい技術の開発に努め、よりすぐれた同期電動機を製作するよう努力する所存である。

参 考 文 献

- (1) B. J. Chalmers, J. Richardson : Steady-state asynchronous characteristics of salient-pole motors with rectifiers in the field circuit, *PIEE*, 115, No. 7, July (1968)
- (2) 東海林 : 三菱電機技報, 40, No. 6 (昭 41)
- (3) 仁藤 : 電気計算, 36, No. 1 (昭和 43)
- (4) 松村 : 三菱電機技報, 35, No. 4 (昭和 36)
- (5) 東海林 : 三菱電機技報, 41, No. 2 (昭 42)
- (6) G. F. T. Widger, B. Adkins : Starting performance of synchronous motors with solid salient poles, *PIEE*, 115, No. 10, October (1968)
- (7) 高原 : 三菱電機技報, 39, No. 8 (昭 40)

最近の大容量誘導電動機

東 覚 里 志*

Recent Large-Capacity Induction Motors

Nagasaki Works

Satoshi TOKAKU

Induction motors have been extensively used for the source of driving power in the industrial world in general. As the scale of recent industrial plants enlarges, the capacity and speed of driving motors increase more and more. Untiring study has been carried on about the mechanical strength of rotor cores, vibration and cooling with large capacity high speed motors. As for wound rotor type motors, further investigation has been made on the slip rings and short circuit devices. As a result, manufacturing limitation of the machine has been greatly extended. Mitsubishi has built 6,000 kW 2 pole, 11,000 kW 4 pole and 11,000 kW 12 pole motors, renewing the records one after another. On the other hand large squirrel cage type motors have come into use to cope with a requirement of powerful driving sources in plants.

As an example, 7,300 kW 4 pole motors are now under construction by Mitsubishi.

1. ま え が き

誘導電動機は産業界全般における動力源として広く使用されてきたが、最近のプラントの大形化にともない駆動用電動機の大容量化、高速化の傾向はいじめるしい。

大容量誘導電動機のうちで、とくに2極、4極の高速度誘導電動機においては回転子鉄心に使用するけい素鋼板の機械的強度、振動、冷却に、さらに巻線形高速大容量誘導電動機においてはスリップリング部および短絡装置に、かご形においては回転子導体の機械的強度について十分に検討しておかなくてはならない。

これらの各部分についての基礎研究と実物大のモデルテストを行ない、また材料の進歩等により大容量誘導電動機の製作限界をますます拡大することができ、きわめて信頼性が高く、高性能な大容量電動機を製作することができるようになった。当社ではすでに6,000 kW 2極、11,000 kW および9,500 kW 4極、8,500 kW 8極、11,000

kW 12極などを製作しつぎつぎに記録を更新してきた(図1.1, 1.2)。

最近ではプラントの電源容量が大きくなった結果、大容量かご形電動機が採用される気運になってきた。当社では現在7,300 kW 4極を製作中である。本文では主として2,000 kW 程度以上の大形誘導電動機に主眼をおいて、最近の動向、外被形式、構造、選定法等について説明しご参考に供したい。

2. 大形誘導電動機の最近の動向

2.1 絶縁性能の進歩

最近の合成化学の著しい進歩につれて絶縁技術はめざましい発展を遂げつつある。新しい絶縁材料の開発、これらの新材料を用いた複合絶縁組織の機能評価試験が行なわれ、その結果耐熱性、耐湿性、耐電圧、 $\tan \delta$ 、絶縁抵抗等の絶縁性能のすぐれた絶縁が開発されてきた。

当社では定格電圧6.6 kVまでの高圧大形回転機用の絶縁としてダイエポキシ絶縁(DF絶縁)を開発した。

この絶縁方式はコイルを鉄心に入れ、ウェッジ打込、結線、コイルの緊縛を行ない巻線を完成し、この完成した固定子を真空圧入タンクに入れ、高真空のもとでエポキシレジンを含浸圧入する。したがってコイルおよびつなぎ線を含め巻線全体として絶縁層を形成している。

主絶縁にはマイカを使用し、マイカボンドおよび含浸レジンにエポキシレジンを用い、含浸レジンとマイカボンドの共重合により硬化反応させて、マイカを固着し、レジンとマイカとを一体にし(緻)密な絶縁組織としたものである。DF絶縁は次のような特長をもっている。

- (1) エポキシレジンにはF種絶縁の耐熱性を有しているが、これをB種用として使用しているため絶縁寿命、信頼性が向上している。
- (2) 固定子全体をエポキシレジンで真空圧入含浸しているため、コイルのみでなく、結線やつなぎ部分も耐水、耐塩害にすぐれている。
- (3) 耐薬品性、耐溶剤性に非常にすぐれている。
- (4) 耐電圧強度がすぐれている。
- (5) 絶縁組織が強固に一体化されており、導体の膨張、収縮に十分に順応し、機械的な振動や衝撃に対して強く、長年月にわたって絶縁にき裂発生のおそれがない。



図 1.1 11,000 kW 4極 50 Hz, 6,000 V 全閉内冷形、巻線形 誘導電動機
11,000 kW 4 pole 50 Hz 6,000 V induction motor.



図 1.2 11,000 kW 12極 50 Hz 11,000 V 開放他力通風形、巻線形 誘導電動機
11,000 kW 12 pole 50 Hz 11,000 V induction motor.

DF 絶縁の適用範囲は真空圧入タンクの大きさから制限がでてくるが、現在のタンクで、4極機で5,000~6,000 kW 程度まで可能である。これ以上大容量のものと、11 kV 級の電動機にはダイヤスチック絶縁 (DR 絶縁) を採用している。

DR 絶縁は主絶縁層を形成するマイカテープまたはマイカラップの接着材としてポリエステルまたはポリエステルビニル系のボンドを用い強力な接着力と半永久的な柔軟性をもちたせるとともに、ダイレジン[®]の真空含浸によりボンドとの結合が行なわれ共重合反応が起こり、マイカ片とともに混然一体の絶縁層を形成するので、反応後は適切な弾力性とともに熱その他に侵されない不溶不融の固体絶縁である。

DR 絶縁が開発されて以来、この絶縁を採用した大形電動機が多数納入され、そのすぐれた絶縁性能を十分に発揮している。

高圧機の絶縁は、国内、国外とも最近になってB種絶縁が標準となってきたが、近い将来においてはさらに耐熱性の高いF種絶縁が主流になるものと考えられる。

2.2 かご形誘導電動機の大容量化

最近、プラントの大形化にともない、電源容量も著しく大きくなってきて、数千 kW のかご形誘導電動機が採用されるようになってきた。巻線形電動機に比較してかご形電動機は構造が簡単で、価格も安いこと、スリップリングやブラシ、短絡装置がなく、また起動用二次抵抗器が不用であるので保守が容易であること、据付寸法が小さく重量も軽いこと等の利点をもっている。

かご形電動機はポンプ、ターボ圧縮機のようにGD²が比較的小さく、起動トルクを大きく必要としない用途には適している。当社では現在、圧縮機駆動用として7,300 kW 4極 60 Hz かご形電動機を製作中である。

欧米ではすでに10,000 kW を越す大容量かご形電動機が多数製作されているが国内においてもますます大容量かご形電動機の適用範囲が拡大するものと考えられる。

2.3 大容量、高速化

各種プラントの大形化、高性能化にともない、回転機械はますます大容量、高速化の途を歩んでいる。これら高速回転機械を駆動する電動機は大容量となり、2極機または4極機が大部分を占めてきている。負荷の回転数が2極機の同期速度である3,600 rpm または3,000 rpm 以上であるときは、いずれにしろ増速装置を必要とするので、むしろ効率、力率、寸法、重量の点で有利な4極機を採用する傾向にある。

2.4 低騒音化

誘導電動機の騒音に関して、以前は主としてビルやホテルなどに設置されるターボ冷凍機用電動機を主体に関心が寄せられていたが、最近では電力、石油化学、製鉄その他のプラントにおいても、回転機の高速度大容量化にともなって、電動機を含めた各種機械の騒音が公害問題として重要視されてきた。

大容量誘導電動機の騒音源は、回転部分から出るファンおよびダクトの通風音である。低騒音電動機として、とくに高速大容量機には騒音源を密閉する全閉内冷形が多く採用される傾向にある。

2.5 速度制御

従来は速度制御法として二次抵抗制御方式・クレーマ方式・(セルビウス方式)等が使用されてきたが、最近では半導体素子の著しい進歩により、静止セルビウス方式をはじめとして種々の速度制御方式が開発され、実用化されてきている。当社ではポンプ用として静止セルビウス方式の大形電動機を製作し納入している。ヨーロッパでは火力発

電所のボイラー給水ポンプ用電動機として6,000~8,000 kW の静止セルビウス方式により速度制御を行ない、プラント効率を上げた例も発表されている。

3. 外被の形式

ここでは大容量誘導電動機に採用される代表的な外被形式について説明する。

3.1 全閉内冷形

全閉内冷形は電動機の内部空気を外気とシャ断して、内部空気を循環させて、この循環通路に水冷式の空気冷却器を設置し、この空気冷却器によって熱損失を奪う方式である。したがって全閉内冷形は、じんあい、腐食性ガスの多い場所や、低騒音を要求される場所、室内排気による室温の上昇を嫌う場合あるいは屋外設置に適している。

冷却水には工業用水、海水のいずれでもよく、冷却水が確保できれば、大容量電動機では他の形式に比較して最もすぐれた形式である。最近はこの全閉内冷形の長所が認識されてきて、大容量電動機ではこの形式が多く採用されてきつつある。

ベドスタル形電動機では一般に図3.1に示すように、基礎にピットを掘って、ここに空気冷却器を設置する。電動機の内気は実線矢印で示すとおり電動機中央下部より吐き出され、これが空気冷却器により冷却されて底部で両側に分れてピットから上り、両側のエンドカバーからふたたび電動機内へ吸い込まれる。

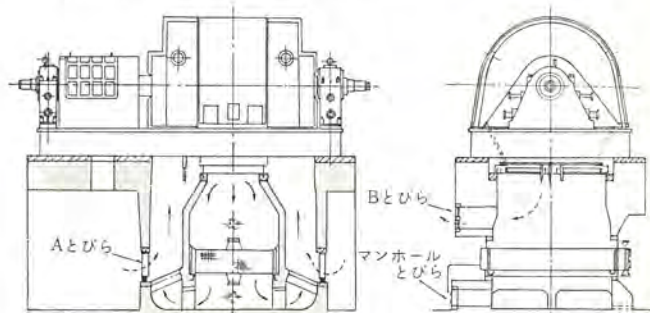


図 3.1 ベドスタル形電動機的全閉内冷形通風説明図
Ventilation of totally enclosed inner cooled type induction motor.



図 3.2 空気冷却器
Air cooler for water cooled motor.

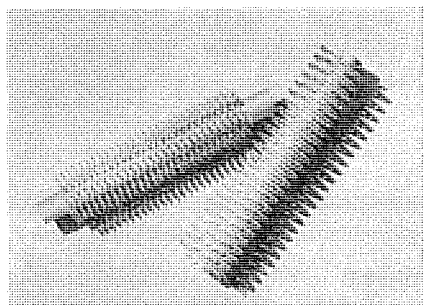


図 3.3 Uフィン管 U fin tubes.

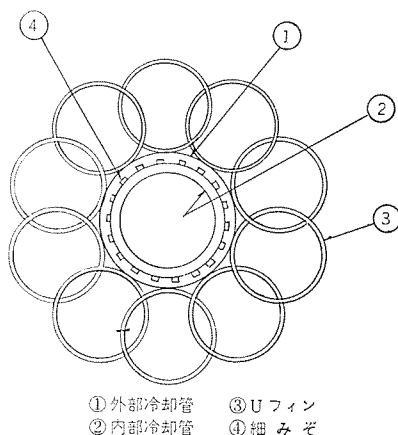


図 3.4 二重管 U フィンの断面図
Double tube with U fins.

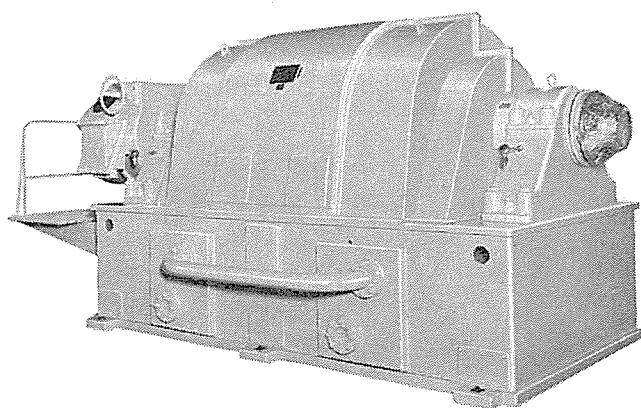


図 3.5 全閉内冷形誘導電動機（空気冷却器を台床に内蔵したもの）2,550 kW 4 P 6,600 V 60 Hz
Totally enclosed inner cooled type motor.

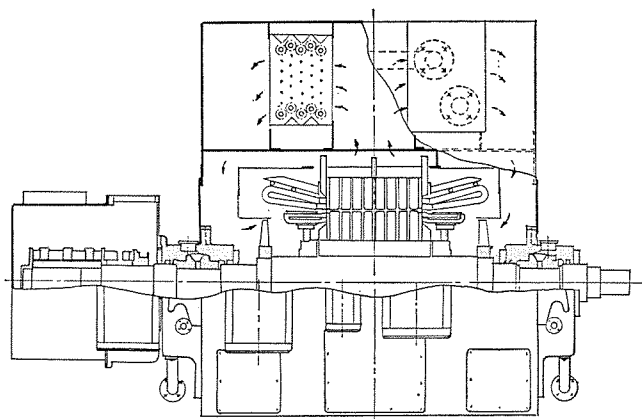


図 3.6 全閉内冷形誘導電動機（空気冷却器をトップマウントしたもの）
Totally enclosed inner cooled type motor.

冷却風の循環は回転子に取りつけられた自己ファンで十分である。

もし断水などの事故が起こった場合は図 3. 1 のとびら A, B を開けば A より外気を吸込み, B より熱風を吐き出し, 開放防滴形として運転を続行することができる。

空気冷却器は電動機の発生する熱損失と空気冷却器の許容圧力損失の大きさ, 水温等から配列, 寸法を決める。電動機出力が非常に大きくなってくると, 図 3. 2 に示すように 2 個に分割し, これ以下では 1 個にしている。管の表面には図 3. 3, 3. 4 に示すように, 水対空気の冷却管としては熱伝達がきわめてよく, 通風抵抗の少ない U フィンをはんだ付けしている。

管は単管を標準としているが, 水質および冷却器の配置位置によっては図 3. 4 のような二重管も使用している。材質は復水器用縦目なし黄銅管 (BsTF 2 または 3) を, 水質によっては脱酸銅, キュロニッケルなども使用している。

ペダスタル形電動機でも出力のあまり大きくないものには図 3. 5 に示すように空気冷却器を台床に 2 個内蔵させたり, 電動機上部に設けたりする例もある。しかしながら大容量, 高速度になるにしたがって振動に対する安定性がわるくなってくるので, 基礎にピットを掘って, ここに設置するのが有利となる。

ブラケット形電動機では図 3. 6 に示すようにクーラーは 2 個とし, これを電動機上部 (トップマウント) に設ける。

3. 2 全閉管通風形, 開放管通風形

吸気側, 排気側ともにダクトをつけたのが全閉管通風形であり, 吸気側または排気側のいずれか一方にのみダクトをつけたのが開放管通風形である。

電動機を設置する場所にじんあい, 腐食性ガス, 爆発性ガスなどが多く, その空気を冷却空気として使用できないとき, 冷却器用の水がなくて全閉内冷却形にできないとき等によく採用される。また, 冷却後の空気を室内に排気すると室温が上って困るときには室内から吸気, 室外へ排気する開放管通風形あるいは室外から吸気し, 室外へ排気する全閉管通風形が採用される。

じんあいの多いときは吸気をじんあいの少ない所からダクトを通して行なうか, あるいは吸気側のダクトの途中にエアフィルタを設けてじんあいを取り除いた空気を吸込む。

3. 3 全閉他力通風形, 開放他力通風形

管通風形でダクトが長かったり, ダクト寸法が小さかったり, エアフィルタの圧力損失が大きかったりすると電動機の自己ファンだけでは必要な風量を送れなくなるので, ダクトの途中に別置ファンをおいて強制通風する。また電動機を速度制御するとき, 低速時の冷却が自己ファンでは不十分になるので他力通風にすることもある。

大容量電動機では発生熱損失が大きいので, 管通風形, 他力通風形とも室内排気は室内温度を高めるので好ましくない。

また強制ファン, エアフィルタを使用するときはこれらの保守が余分にかかる欠点がある。

3. 4 開放形, 防滴保護形

じんあいや有害ガスの少ない屋内によく用いられる形式で, 冷却空気は電動機周囲の室内空気を吸込んで, 室内に吐き出す。

大容量電動機, とくに高速機においては騒音が非常に大きくなるので図 3. 7 に示すように電動機上部にサイレンサーを設ける。

この形式は他の形式に比較して冷却効果がよいので, 寸法が小さく重量は軽く経済的である。

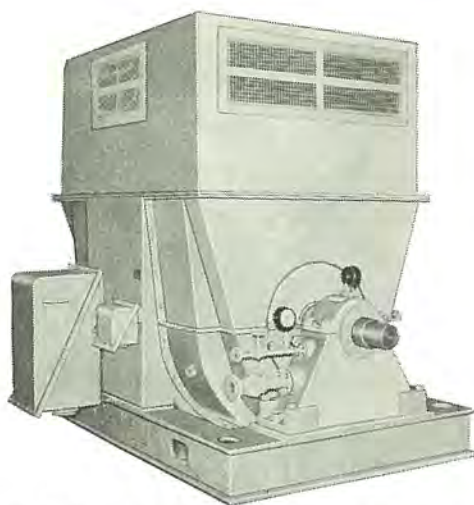


図 3.7 防滴保護サイレンサー 付かご形 電動機
2,810 kW 2 P 3,600 rpm 6,600 V 60 Hz
Dripproof protected squirrel cage motor with silencer.

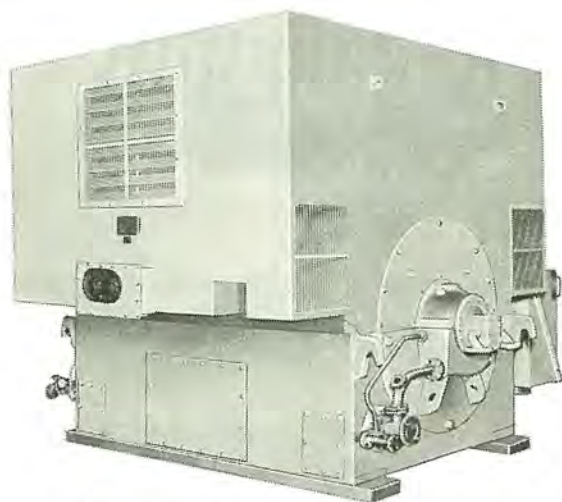


図 3.8 開放屋外形かご形 電動機
3,250 kW 4 P 1,800 rpm 4,000 V 60 Hz
Weather protected machine type II.

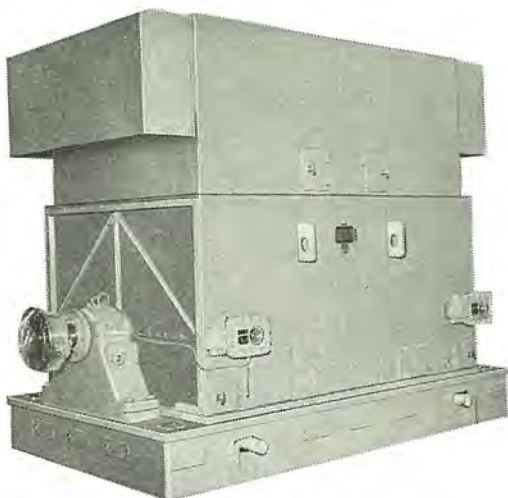


図 3.9 全閉外扇形かご形 電動機
2,500 kW 2 P 3,600 rpm 2,300 V 60 Hz
Totally enclosed fan cooled squirrel cage motor (TEFC).

3.5 開放屋外形

開放屋外形には NEMA 規格に Type I と Type II が規定されているが、当社では信頼性の高い方の Type II で製作している。その外観を図 3.8 に示している。

耐湿性、耐塩害性にすぐれた絶縁が開発されるにつれて、開放屋外形の適用範囲が広まりつつある。とくに火力プラントに多数納入している。この形式はじんあいの多い場所や有害ガスの多い場所には不適であり、このときは全閉外扇形または全閉内冷形にすべきである。

3.6 全閉外扇形

電動機の据付場所にじんあいや有害ガスが多く開放形電動機ではコイルに悪影響を及ぼすと考えられる場合で、容量的にもあまり大きくないとき、または冷却水を確保できないときに全閉外扇形が広く使用される。

全閉外扇形は空気の熱交換をするので冷却効果が悪く、したがって大容量になるにつれて他の形式に比べて寸法、重量が大きくなり不経済となる。しかしながら付帯設備が不要で保守が容易であり、信頼性は高い。

大容量、高速機になると外部ファンによる騒音が非常に大きくなるので、当社では図 3.9 に示すように電動機上部にサイレンサーを設け騒音を下げている。

冷却管はフレームに全周 4～6 段配置して内部空気の圧力損失を小さくし冷却効果を高めている。

最近火力プラントの大容量化にともない屋外設置されるファン用電動機として大容量の全閉外扇形が多くなりつつある。その例として、3,450 kW 4 P 6.6 kV 50 Hz 1,500 rpm かご形、3,200 kW 10 P 4 kV 50 Hz 600 rpm かご形を製作中である。

4. 電動機内部の通風冷却方式

大容量誘導電動機に採用されている通風冷却方式は大別して、単式放射通風方式（シングルラディアル 通風）と複式放射通風方式（マルチラディアル 通風）の 2 種類がある。

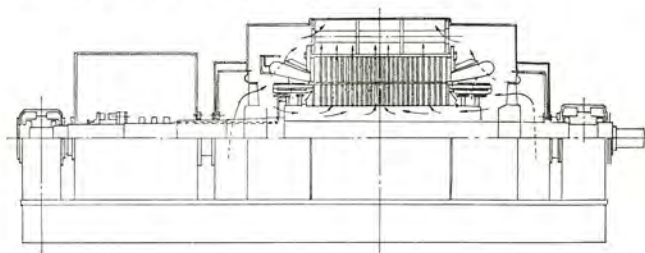


図 4.1 単式放射通風方式説明図（ペDESTAL 形二軸受、
バインド 線方式）
Single radial ventilation system.

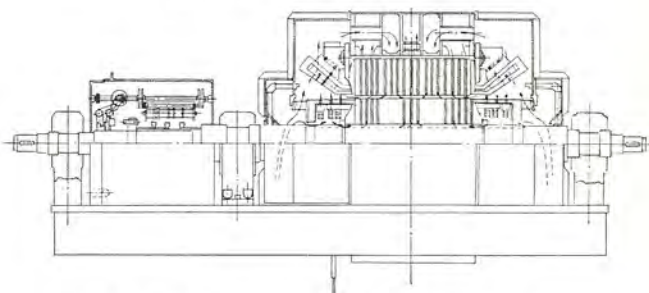


図 4.2 複式放射通風方式のときの固定子 スロット
Stator slot for multiple radial ventilation system.

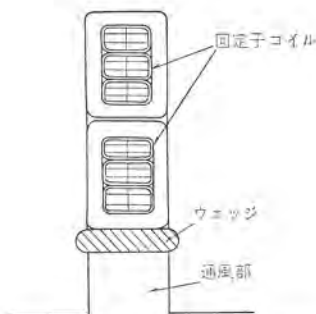


図 4.3 複式放射通風方式のときの固定子スロット
Stator slot for multiple radial ventilation system.

2極機の1,000 kW程度以上に複式放射通風方式を採用し、これ以外は単式放射通風方式にしている。

図4.1と図4.2に吸気口、排気口が下側にあるベドスタル形大容量電動機の単式放射通風式と複式放射通風方式について説明している。

単式放射通風方式の冷却空気の径路を図4.1に実線矢印で示している。内部ファンによりエンドカバー下部より吸込まれた冷却風の一部はコイルエンドを冷却して固定子フレームの側板の通風孔を通して、固定子鉄心背部に抜ける。他の一部は回転子コイルエンドの下を通り、次に回転子内径と軸の間に設けられた通風路を通して回転子ダクトに分岐してゆき、回転子ダクトのファン作用により固定子ダクトに押し込まれて固定子鉄心背部に抜ける。この間に回転子コイルの銅損・固定子コイルの銅損・鉄心の鉄損を奪う。

固定子鉄心背部でコイルエンドを冷却した熱風と、回転子を通して固定子ダクトに抜けた熱風が合流して、フレーム下部から排気される。

2極大容量機になると回転子内径が他の極数に比べて著しく小さくなり、逆に鉄心長は長くなるので、軸に切った通風溝の面積だけでは回転子と固定子を冷却するのに必要な風量が通らなくなり、特に固定子の冷却が著しく悪くなる。したがって固定子の冷却効果を改善するために採用されたのが複式放射通風方式であり、図4.2に冷却風の径路を実線矢印で示している。内部ファンによって圧入された冷却風は固定子コイルエンド部を冷却したのちフレームに設けられた通風管を通して吸気ゾーンにはいる。この吸気ゾーンにはいった冷却風は鉄心背部から固定子ダクトを内径方式に圧入されて空げき(隙)に出る。そして軸方向に空げき部を流れて隣の排気ゾーンにはいり、固定子ダクトを外径方向に流れて鉄心背部に出る。回転子の冷却風径路は単式放射通風方式と同一であるが、回転子のダクトは固定子の排気ゾーンに向いあった部分だけに設け吸気ゾーンに向いあった部分には設けない。

誘導機は同期機に比較して空げき長が非常に小さいので、この複式放射通風方式を採用するものでは図4.3に示すように固定子スロットを深くとりウェッジの下に相当大きな通風路をとらないと、空げきを軸方向に流れる抵抗が大きくなり冷却効果が悪くなる。

5. 各部の構造

5.1 固定子

5.1.1 固定子フレームおよび鉄心

フレームは通風方式によって種々の形状となるが、いずれも鋼板を溶接した構造としている。固定子鉄心には特に層間抵抗の高い高級けい素鋼板を使用して、鉄損の減少、効率の向上をはかっている。大容量電動機では固定子鉄心外径が大きくなるので図5.2に示す



図 5.1 11,000 kW 4極 6,000 V ベドスタル形誘導電動機
の固定子
11,000 kW induction motor stator.



図 5.2 固定子扇形鉄心
Stator segment core.

ような扇形鉄心(セグメントコア)を固定子内径に設けたコアボルトを通して積層し、フィンガープレートおよびクランプによって鉄心全面にわたって均一な圧力で締付ける。セグメント数は軸電流が発生しないように極数により選定している。

固定子鉄心および回転子鉄心には通風ダクトを配列しているが、この配列法は巻線温度、鉄心温度が均一になり、しかも最も冷却がよくなるように考慮している。

5.1.2 固定子コイル

2.1節で説明したように、11 kV級および6.6 kV級の大容量機ではB種ダイヤラシック絶縁を、6.6 kV級以下の比較的中容量(4極機で5,000~6,000 kW程度まで)のものにはB種ダイヤエポキシ絶縁を採用している。11 kV級で大容量機にはハーフコイルを、その他のものにはフルコイルを採用している。

6 kV級以上のコイルにはスロット部分ならびにスロット出口部分にコロナ防止処理を施し電位傾度の均一化をはかりコロナ発生を防止している。大容量になるにつれて1コイル当たりの巻回数が少なくなり、導体断面積が大きくなるのでターン間絶縁を強化し、さらに表皮効果による渦電流損を防止するためにトランスポジションを行なって効率をよくまた巻線温度上昇を下げている。

コイルエンド部は通風冷却に十分な間隔を設けて配列し、さらに電源投入時、母線切換時等に突入電流が流れてコイルエンド部に働く大きな電磁力に十分に耐えられるように、コイル間に間隔片を入れコイルささえに強固に固定している。

大容量機では一般にスロット内の上口コイルと下口コイルの間にサーチコイルまたはサーモカップルを埋込んで、固定子コイルの温度を測定するとともに自動記録、警報またはトリップを行なわせ、コイルの過熱を防止している。

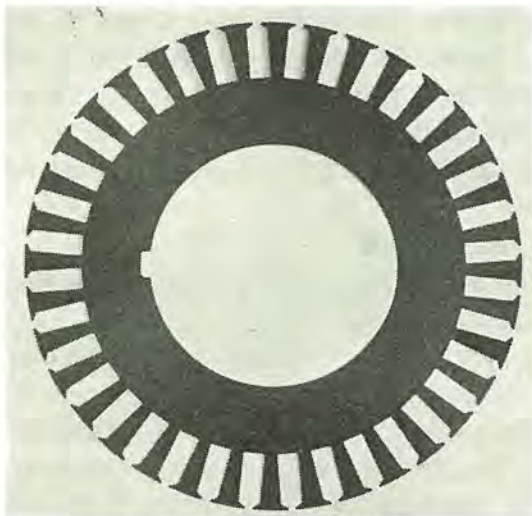


図 5.3 巻線形回転子の円形鉄心
Core punching of wound rotor.

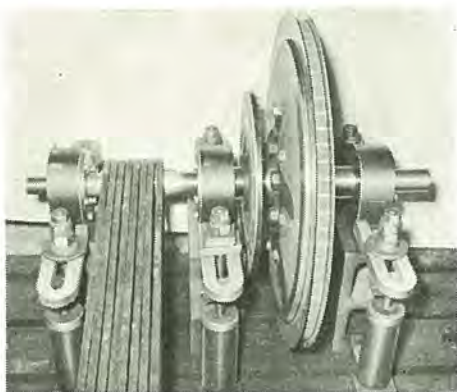


図 5.4 高速度大形回転子の起動停止 モデル 試験装置
Start and stop model testing apparatus of high speed large rotor.



図 5.5 ピンタイプ回転子の扇形鉄心
Rotor segment core of pin type unit.

5.2 回転子

5.2.1 回転子鉄心

高速大容量誘導電動機には図 5.3 に示すような円形鉄心を使用する。高速大容量誘導電動機では起動・停止によって回転子鉄心には非常に大きな応力が繰返されるので、回転子鉄心の疲れ強度について十分に検討しておかななくてはならない。

特に回転子内径のキーみぞ部分、回転子スロット底部分には非常に大きな応力集中を生ずるので、これらの部分の応力解析を光弾性法、電子計算機により有限要素法を用いた数値解、モデルローターによる実測等を行ない、キーの形状、スロット底の形状を設計している。当社では 2 極機の 5,000 kW 程度以上の大容量のものでは内径のキーを廃し、軸と鉄心の締めしろ(代)を十分大きくとることによってトルクを伝える方式にしている。

回転子に使用する鉄心には磁気特性はもちろん、特に機械的な降伏点、疲れ強度、伸びの高い材料を選定して使用している。最近で



図 5.6 回転子用 ハーフコイル
Rotor coil (half coil).



図 5.7 リテーニングリング方式の回転子 6,000 kW 2 極 3,600 rpm
Wound rotor with retaining rings.



図 5.8 バインド線方式の回転子 11,000 kW 4 極 1,500 rpm
Wound rotor with binding wires.

は、

(a) けい素鋼板の機械的強度も相当高いものが安定した品質で入手できるようになったこと

(b) けい素鋼板の疲れ試験を行なうことによって、疲れ強度を正確には握ることができたこと。

(c) 図 5.4 に示すように実物の直径で、応力条件が実機とまったく同じになる回転子モデル試験装置により起動、停止させて、この耐用試験を行なって確認することができたこと。

等により製作限界は 2 極機で 20,000 kW 以上も可能となってきた。

次に大容量低速誘導電動機では回転子外径が大きくなるため、図 5.5 のような扇形抜き板を使用している。回転子スパイダーの外径に設けられた鉄心ボルトにこの扇形鉄心を通して積層し、ロックピンを打込み、締付ける。この方式では鉄心の締付圧による鉄心層間の摩擦とロックピンのせん(剪)断によって遠心力を受けもっている。

5.2.2 回転子コイル

巻線形回転子コイルの導体には硬質裸銅帯を使用し、これにダイラシック絶縁を施している。コイルはスロットに入れたのち機械的強度が高く耐熱性にすぐれたエポキシガラス系のウエッジを打込んでコイルをおさえている。

回転子コイルの鉄心からの突出長さは高速大容量機になると相当長くなり、しかも回転による遠心力がきわめて大きくなるので、この部分の保持には十分な検討が必要である。当社ではこの保持法として 2 極機で 4,000 kW 程度以上、4 極機では 15,000 kW 程度以上をリテーニングリング方式とし、これ以下のものをバインド線方式としている。

リテーニングリング材質には高抗張力非磁性材を採用している。リテーニングリングにはきわめて大きな応力が働き、さらに通風孔をあけているので応力集中を生ずる。当社ではテストピースによる低繰返し疲れ試験と、実物直径のリテーニングリングを油圧により応力を繰返して耐

用試験も行なって十分安全な設計を行なっている。

次にバインド線には高抗張力非磁鋼線を使用している。高速機においては上口コイル、下口コイルをそれぞれ別々に3～4層づつ巻き、またコイルエンド部分の冷却をよくする目的と、もれ磁束による渦電流損を減らすために軸方向の巻幅を2分割にしている。

コイルのつなぎ、結線つなぎにはろう付けまたは高温はんだにより、つなぎ部分の機械的強度、高温強度を上げ、またこの部分の構造については合理的なものを採用しているのだから信頼性が高い。

5.2.3 かご形回転子

高速度かご形電動機の回転子バーの形状は図5.10(a)に示すようなくさび形にしている。高速機になるにしたがって、また大容量になるにしたがって起動特性が低下するので、くさび形にして起動時の表皮効果を大きくして起動時のトルク特性を改善している。

低速かご形電動機には図5.10(b)に示す長方形のものを使用している。いずれもスロットに打込んでからスウェッジング機械によってバーの上部をスウェッジしてバー上面部を鉄心に完全に密着させている。スウェッジすることによって

(a) バー上部が確実に鉄心に密着して固定されるので運転中にバーがスロット内で振動することを防止できる。

(b) 起動時には表皮効果によってバー上部に電流が集中して流れるので、そのためにバー上部の温度上昇がきわめて高くなる。スウェッジによってバー上部が鉄心に密着しているとこの部分の鉄心への熱伝達率がきわめて大きくなり、その結果図5.11に示すようにバー上部の最高温度が大幅に下がる。またバー上下間の温度差による熱応力も小さくなる。

(c) バーの軸方向への熱膨張を均一に固定できる。

回転子バーとエンドリングの材質と断面積は起動時の温度上昇と熱応力により選定している。特に重慣性負荷を起動する高速大容量機においては高温強度の高い特殊銅合金を採用して万全を期している。

次にエンドリングと回転子バーの接続には高周波ろう付け法によって均一に加熱し、銀ろうでろう付けし、ろう付け後超音波探傷法等によってろう付けが確実であることを検査している。

起動時のバー、エンドリングの熱膨張による熱応力と遠心力による応

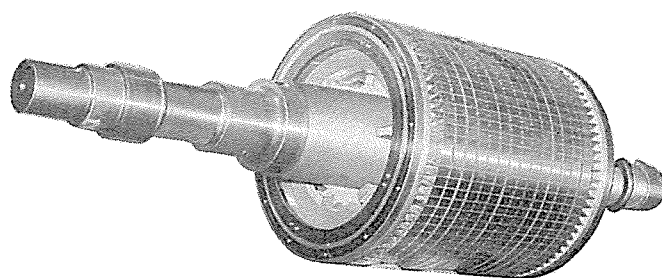


図 5.9 かご形回転子 3,600 kW 4極 1,800 rpm
Squirrel cage rotor.

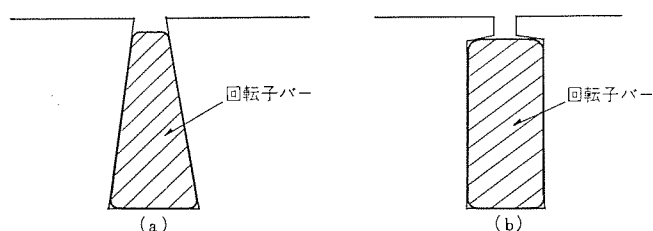


図 5.10 回転子バーの形状
Shape of rotor bar.

力とで、バーとエンドリングのろう付け部分に疲れ破壊（バー切れ）を起こすことがあるので、特にエンドリングの温度上昇は低く設計することが重要である。高速機ではさらに図5.12(a), (b)に示しているようにエンドリング押えをエンドリングに焼ばめして、エンドリングの半径方向変位と角変位を拘束してろう付け部分の応力を緩和させている。

5.3 軸受および潤滑

大容量電動機の軸受はスリーブ軸にし、潤滑法はほとんどのものを強制給油方式にしている。

軸受メタルは高速機のものでは図5.13に示すような球面自動調心式にして軸の片当たりをなくし、軸のたわみになじみやすくしている。軸受支持方式にブラケット形とペダスタル形の2種類があるが、当社では2極かご形では2,000～2,500 kW程度、巻線形では1,000 kW程度、4極機では3,000～4,000 kW程度以上をペダスタル形で、これら以下の容量のものをブラケット形で製作している。

軸受の数はブラケット形、6極以上のペダスタル形、かご形のすべて

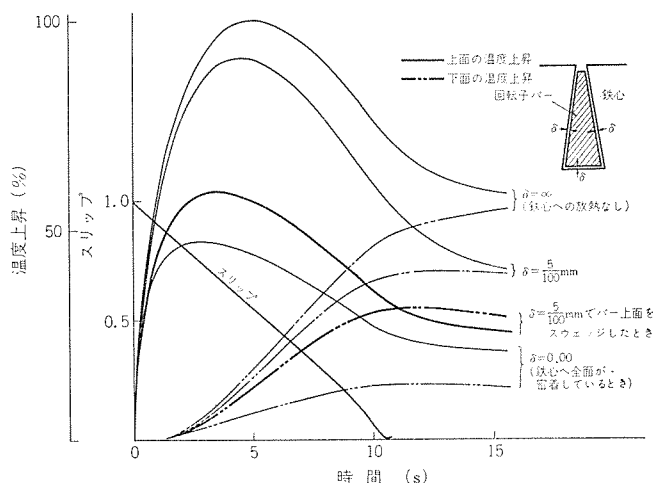


図 5.11 起動時の回転子バーの温度上昇
Temperature rise curves of rotor bar at start.

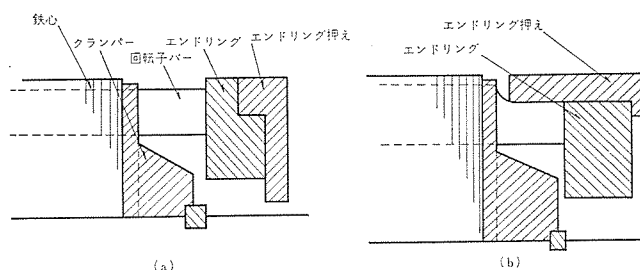


図 5.12 高速度かご形回転子のエンドリング支持方法
Endring support of high speed squirrel cage rotor.

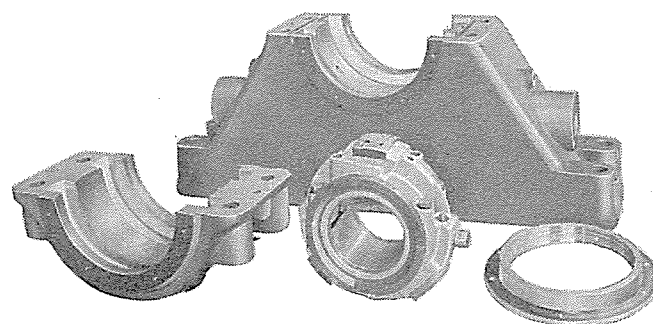


図 5.13 軸受メタル (球面自動調心式), 軸受台 ラビンス
Sleeve metal, pedestal.

は2個とし、2極、4極の巻線形については2個と3個の使い分けをしている。この使い分け方は主として回転子の振動について検討して決めている。

回転子の危険速度と各回転数における振幅は軸受油膜の弾性と減衰効果、軸受台等の支持系の弾性効果を考慮して電子計算機により求めている。

定格速度と危険速度との位置関係については6極以上の低速機では危険速度を定格速度より上に、4極機については剛性軸にしたときと弾性軸にしたときの両方について同一アンバランス量に対する定格速度における振幅を比較して、その振幅の小さくなる方式を採用している。

2極機では軸径が細く、そして回転子長さが長いのでほとんどのものが弾性軸である。弾性軸の場合、軸受の油膜の自励現象によるオイルウィップが1次危険速度の2倍以上の速度で起こりやすい。したがって1次危険速度の2倍以上で運転される機械はオイルウィップを防止するように軸寸法、軸受寸法、軸受構造、潤滑法を考えておかなくてはならない。

大形電動機では軸電流が発生しないように固定子および回転子のセグメント数を選ばなくてはならないと先に述べたが、さらに万全を期してペダスタルの下または軸受メタル裏面を絶縁し、軸電流の回路を形成しないようにしている。両軸に負荷をつなぐときは絶縁カブラリングを用い、軸電流による負荷機械の軸受を焼損するのを防止することもある。

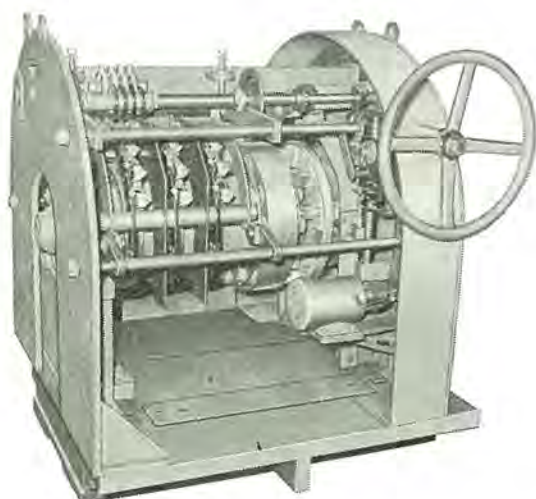


図 5.14 スリップリングおよび短絡装置、ブラシ 揚装置
Slipring, and short-circuit apparatus.

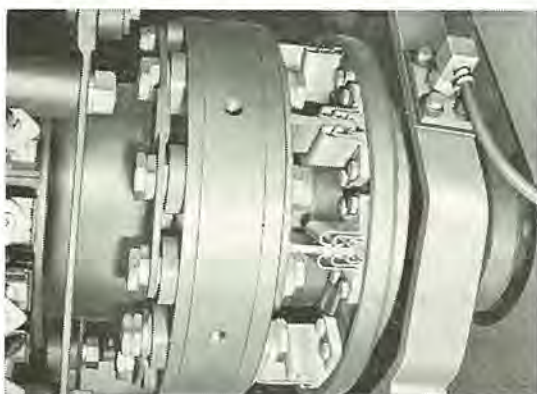


図 5.15 短絡用接触子片の構造
Contact pieces for short circuit.

5.4 スリップリングおよび短絡装置

大容量機になると二次電圧、二次電流とも大きくなり、高速機においては大きな遠心力が働くので、スリップリング部の構造、絶縁、通風冷却が問題となってくる。スリップリングには特殊鋼または特殊銅合金を使用し十分な耐摩耗性を与え、リング両端部の通風穴とスパイラルグループによってスリップリングおよびブラシの冷却効果を高めている。速度制御のないものには短絡装置を設け、起動完了後二次回路を短絡し、ブラシ引上げ装置によりブラシを引上げてブラシの摩耗を防いでいる。

高速大容量電動機では二次短絡する接触子片(短絡つめ、はさみ)の接触不良による過熱、焼損の防止、短絡リングと軸とのしゅう(摺)動面のフレットイングコロージョンの防止、さびの発生防止、じんあいの付着防止等については細心の注意を払って製作している。

接触子片について、当社では新構造のもの数種類を試作し、基礎試験、実機へ組込んでの試験を続けてきたが、その結果、図 5.15 に示すような3段式のはさみを採用することによって信頼度が格段と向上してきた。(実用新案申請中)

はさみには高温強度、高温でのばね特性にすぐれ、電気抵抗の小さい特殊銅合金を使用している。

次に短絡リングと軸の間のしゅう動面のフレットイングコロージョンの防止、さびの発生防止、じんあいの付着防止について、モデルテストを長期間行なった結果、軸表面の材質および硬度と短絡リング内面の材質、硬度の組合わせ、クリアランスの適正な値、しゅう動面の構造、短絡リングの構造等についてデータを得ることができ、その結果、大幅な改良を加えることができ、この部分での問題点はまったく解消することができた。

6. 大容量誘導電動機の選定について

一般的に電動機の選定にあたっては、電動機および関連機器を含めて次に述べる事項を比較検討しなくてはならない。

- (a) 負荷の要求する特性
- (b) 電動機自体の特性(効率、力率、制御性など)
- (c) 設備費
- (d) 運転費
- (e) 信頼性、保守の難易

等である。これらのうちどれを重視するかは個々の場合によって異なる。

6.1 回転子形式の選定

かご形電動機と巻線形電動機を比較すると、電動機自体については価格、構造・保守・寸法・重量においてかご形が有利である。

しかしながらかご形では速度制御は一般には不可能であること、起動特性(起動電流、起動トルク、力率など)が著しく悪いこと、起動可能な負荷 GD^2 に制限がつくこと等の欠点をもっている。したがってかご形電動機を選定するときには次の項目を十分チェックしておかなくてはならない。

- (a) 速度制御の有無
- (b) 電源容量
- (c) 負荷の GD^2 の大きさ
- (d) 負荷の所要起動トルクと起動途中における反抗トルクの大きさ。

まず速度制御を必要とするときには、大容量誘導電動機においては現在のところ巻線形を採用しなくてはならない。一般に速度制御

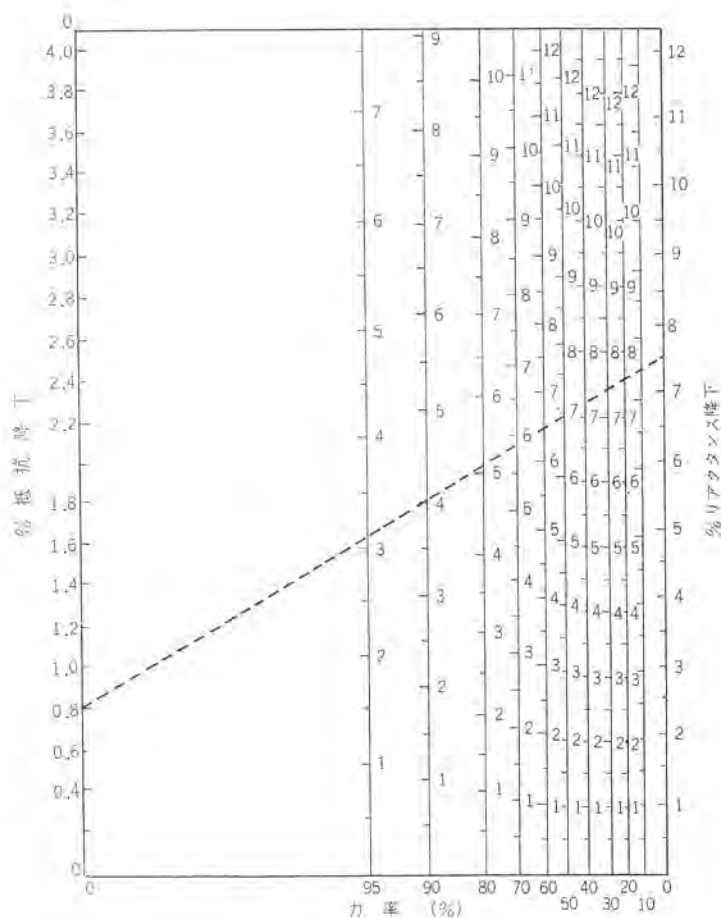


図 6.1 変圧器の電圧降下計算図表
Voltage drop calculation diagram of transformers.

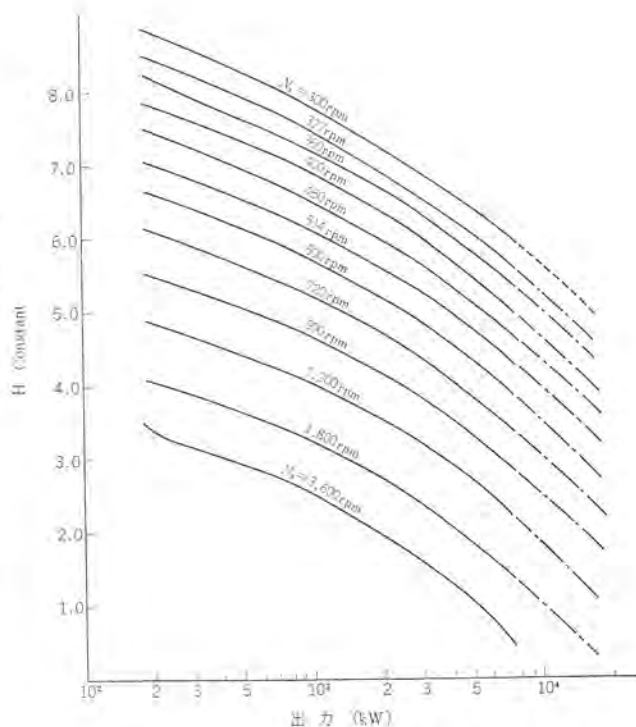


図 6.2 NEMA 規格に示された許容 H constant と出力の関係
Relation of allowable H constant and output kW.

方式としては定トルク特性制御のセルピウス方式、定出力制御のクレーマー方式、二次抵抗制御方式が採用されている。最近では半導体素子の著しい進歩により大容量誘導電動機は速度制御方式として静止セルピウス方式を採用してプラント効率の向上と保守の簡易化をはかる傾向にある。

製鉄所のイルグナーセット駆動用電動機やミル駆動用電動機のように急激な負荷がかかり、フライホイールの回転エネルギーを有効に利用する用途にはやはり巻線形を使用しなくてはならない。これら用途の制御方式としてクレーマー方式を採用して効率を上げた例もある。

次に電源容量として問題になるのは、起動時における変圧器の電圧降下である。巻線形電動機では二次抵抗起動によってトルク効率(%トルクと%電流の比)をほぼ100%まで上げることができ、しかも力率も非常によい。また起動トルクを大きく要求される負荷には最大トルクまでのトルクを出させることもできる。したがって巻線形を採用すれば電源容量はかご形の場合より大幅に小さくてすむことになる。

かご形電動機の起動法としては全電圧直入起動方式のほかに、減電圧起動方式として電動機にかかる電圧の比の2乗に比例してトルクも電流も下る単巻トランスを用いた起動補償器方式、トルクは2乗、電流は比例して下がるリアクタ方式がある。起動補償器方式を使用するときは電源から電動機をきりはなさないコンドルファー方式とすることが望ましい。

その他に1/2容量のかご形電動機を2台直結して、その

うちの1台で起動する方法もとられている。また起動用専用の短時間定格で小容量の巻線形電動機を直結しておいて、これで起動する方法(このときは起動電流を小さくおさえることはもちろんのこと、負荷GD²も大きなものまで起動できる)、別にM-Gセットを置いて、これによる低周波起動する方式も考えられる。

一般的にかご形電動機では高速機になるにともない、また大容量機になるにともなって起動時のトルク効率が悪くなるので、負荷の反抗トルクカーブと電動機の出すトルクカーブについて十分検討して、起動不能、加速時間の著しい延長による電動機の過熱損傷を起こさないように注意しなくてはならない。大容量高速度を要求する負荷はポンプ、ターボコンプレッサ等であり、起動中の反抗トルクとGD²が比較的小さいのでかご形で問題になることはない。

変圧器の電圧降下の計算には図6.1を用いると便利である。変圧器の%抵抗と%リアクタンスの間を直線で結び力率線と交わった点が電圧降下を表わしている。たとえば0.8%抵抗、7.5%リアクタンスの15,000kVAのトランスで、起動kVA 25,000kVA、起動力率20%のかご形モーターを起動したとすると図6.1から $7.6 \times \frac{25,000}{15,000} = 12.7$ %の電圧降下となる。電動機端子での電圧降下を求めるときは、さらにケーブルでの電圧降下を加算しなくてはならない。

次にかご形モーターに対する負荷GD²の許容値について説明する。負荷のGD²の大きさを評価する一つの目安としてH constantが用いられる。このH constantの意味は負荷の反抗トルクをゼロと仮定したときの、起動完了するまでに回転子に発生する熱損失(kW・s)

の電動機出力 1 kW 当たりの値である。また加速トルクを 100 % と仮定したときの起動時間が、この H の 2 倍(秒)となる。

NEMA 規格には標準のかご形電動機を用い、室温から引続き連続して 2 回起動ができる許容負荷 GD^2 の値が示されている。これを示したのが図 6.2 であり、出力が大きくなるにともない、また高速機になるにともない許容される H は小さくなっている。高速機、特に 2 極機では電動機自身の有する H が大きくなり、また回転子の熱容量が小さくなるために、負荷に許容できる H が小さくなっている。図 6.2 で出力、極数によって決まる H から

$$\text{許容負荷 } GD^2 = \frac{73 \times H \times kW}{\left(\frac{N_s}{100}\right)^2} \text{ (kg-m}^2\text{)}$$

として求めることができる。たとえば 4,000 kW 4 極 ($N_s=1,800$) では、

$$\text{許容負荷 } GD^2 = \frac{73 \times 2.05 \times 4,000}{\left(\frac{1,800}{100}\right)^2} = 1,850 \text{ kg-m}^2$$

となる。電動機を特殊設計すればこの値の (1.5~2.0) 倍くらいの GD^2 までは起動特性・寸法・重量をあまり増さずに支障なく起動することができる。これ以上の GD^2 になるときは技術的に不可能になることもでてくるし、また可能であるとしても、起動時の温度上昇を下げるために電動機が大きくなり、起動特性、運転特性も低下するので、極数変換方式にするとか、巻線形になるなど十分に比較検討することが必要である。

6.2 電圧の選定

電動機の電圧は、個々の電動機単独の価格・特性を比較して決めるのではなく、プラント全体の電動機・変圧器・配線・スイッチ等の設備全体を含めて設備費・運転費の比較をして決めるべきである。

大容量電動機の電圧としては一般に 3 kV 級、6 kV 級、11 kV 級が使用されている。

電動機単体について考えてみると、電圧が高くなるにともなって絶縁の層が厚くなり絶縁材料、製作の手数がます。導体断面積を一定とすればコイルの外形寸法が大きくなり、そのため電動機寸法が大きくなり価格も高くなる。また特性(効率、力率)は高電圧になるにしたがって一般には悪くなるが、大容量になるにしたがってその差は小さくなる。

以上の見地からすればなるべく低電圧のほうが有利ということになるが、大容量機を低電圧にするとコイルの導体断面積が大きくなり巻回数が少なくなり設計上巻数の選定が困難になり、極端な場合

は高電圧の機械よりも大きくなることすらある。電動機の製作上無理がないと考えられている電圧と出力範囲の関係は極数によって異なるがほぼ下記のとおりである。

3 kV 級……40~5,000 kW

6 kV 級……250~12,000 kW

11 kV 級……4,000 kW 以上

6.3 極数の選定

大容量誘導電動機、特に高速機については、その極数を選定するにあたって次のような点を考慮しなくてはならない。

(a) 製作限界……2 極巻線形電動機の製作限界は 20,000 kW 程度まで可能であり、それ以上の容量では 4 極以上にすべきである。2 極かご形電動機では出力よりむしろ GD^2 と起動時における負荷の反抗トルクから制限がつく。低周波起動方式や起動用巻線形電動機により起動する方式では 30,000 kW 程度まで可能である。

(b) 振動……定格速度においては極数に関係なくほぼ同程度におさえることはできるが、高速度になるにともなって軸剛性が弱くなるので少しのアンバランスに対して鋭敏になる。

(c) 特性……2 極、4 極を比較すると 4,000 kW 程度以上では効率・力率とも 4 極のほうが多少よい。6 極以上では極数がますます力率は悪くなり、また効率も多少悪くなる傾向にある。

(d) 寸法・重量……2 極と 4 極を比較すると回転子外径は当然 2 極機の方が小さいが固定子外径は両者大差ない。全体の長さは 2 極機の方が長くなることが多いし、重量も一般に 2 極機が重くなる。6 極機以上になると 2 極、4 極よりも寸法、重量とも大きくなる。

(e) 負荷の回転数との関係……負荷側の回転数が 3,000 rpm または 3,600 rpm であるときは 2 極機を採用した方が増速ギヤの損失がなく、また全体の据付寸法が小さく、付帯設備も少なくて有利である。しかし負荷の回転数が 3,000 または 3,600 rpm 以上であるときは 4 極を採用して増速した方が有利である。

(f) 騒音……同一形式なら当然極数が多いほど小さくなる。

6.4 保護方式

3 章の外被の形式で説明したのでここでは説明を省略する。

7. む す び

以上最近の大容量誘導電動機について最近の動向と構造に中心をおいて概要を記したが、当社では今後とも新しい材料の開発、冷却法、振動、強度、剛性、特性の改善等の研究を引き続き行なって、より使用条件に適した信頼度の高い電動機を製作してゆくための努力を重ねてゆく所存である。

一般工業用直流電動機

大 川 明 久*

Standard Industrial DC Motors

Kobe Works Akihisa ÔKAWA

DC motors have come to industrial use because of their excellent control performance. To make promptly preparation for this trend of adaptability to general purposes of them, Mitsubishi has made presentation of Super-line D designed in conformity to JEM-1170 and Super-line M which is larger in size than the former since 1962 as standardized DC motor series for industrial use. After this time, their performance have been improved gradually to introduce new material and development manufacturing technique and to elevate gradually their performance. Moreover, we study various problems caused by the thyristor power supplies so that the use of thyristors for DC power sources is acknowledged as regular methods. This article explains practical problems on the use of standard industrial DC motors and the latest tendency.

1. ま え が き

最近の生産設備の自動化、作業のスピードアップ、品質の向上、均一化などともない、直流電動機はそのすぐれた制御性能のためますます広く工業全般にわたって使用されてきている。

当社はこのようなはん用化の動向にいち早く対処し、一般工業用直流電動機標準化シリーズとして昭和 37 年より JEM 1170 に準拠した、スーパーライン D 形およびこれより大きいスーパーライン M 形を発表した。以来すでに各方面に多数納入し、使用者各位の好評を得ている。

その間新しい材料の導入、設計製作技術の開発を暫次進め性能は一段と向上している。さらに最近はサイリスタ電源の実用化が本格的になり、サイリスタ電源に起因する種々の問題にも研究を進め、十分な対策を講じますますその真価を高めている。

2. 特 性

直流電動機の基本式は次のように表わされる。

$$N = K_1 \frac{V - IR}{\phi}, \quad T = K_2 \phi I, \quad P = K_3 \phi I N$$

ここに

N : 回転速度

T : トルク

P : 出 力

V : 端子電圧

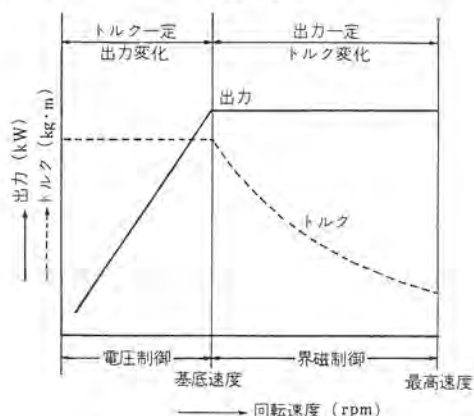


図 2.1 直流電動機（他励）の速度出力トルクの関係
Speed output torque characteristics of DC motor.

I : 電 流

R : 電機子抵抗

ϕ : 界磁磁束

K_1, K_2, K_3 : 定 数

他励磁の場合のこの関係を図 2.1 に示す。

このように他励直流電動機は速度制御法として電機子電圧を変える電圧制御法と界磁磁束を変える界磁制御法の 2 とおりがあり、これを組み合わせれば非常に広範囲に速度を変えることができる。電圧制御範囲は理論的にはゼロスピードからできるはずであるが、電圧 V が低くなると IR ドロップの影響が大きく制御上不都合な面があるので、実際には 1:20 程度までに押えられることが多い。

界磁制御範囲は整流との関連で表 2.1 に示すように最高 1:4 までが一応の限度であるが特殊な設計をすれば 1:6 まで製作するこ



図 2.2 スーパーライン D 直流電動機（防滴保護形）
Super-line D DC motor (drip proof type).

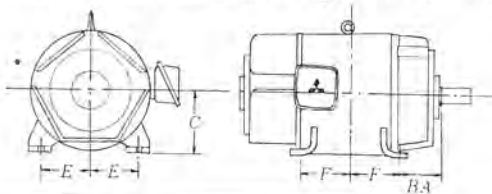


図 2.3 スーパーライン M 直流電動機
Super-line M DC motor (duct ventilated).

表 2.1 SD および SM 形直流電動機の標準定格とわく番 (防滴保護形)
Standard ratings and frame numbers (dripproof type) of types SD and SM DC motors.

出力 (kW)	回転速度 (rpm)	標準基底速度と弱め界磁による標準最高回転速度および適用わく番号								
		→ 3,500	2,500	1,750	1,150	850	650	500	400	300
0.37						3,000 112 L	2,600 132 L	2,000 132 M	1,600 130 M	
0.55						3,000 112 M	2,600 132 M	2,000 132 M	1,600 132 L	
0.75				3,500 112 L	3,200 112 L	2,800 112 L	2,600 132 M	2,000 132 L	1,600 160 L	
1.1				3,500 112 L	3,000 132 M	2,800 132 M	2,600 132 L	2,000 160 M	1,600 160 L	
1.5	4,000 112 L	4,000 112 L	3,300 112 L	3,000 132 M	2,800 132 L	2,600 160 M	2,600 160 M	2,000 160 L	1,600 180 L	1,200 180 L
2.2	4,000 132 M	3,700 112 L	3,300 132 M	2,800 132 L	2,600 160 M	2,600 160 L	2,000 180 L	1,600 180 L	1,200 200 L	1,200 200 L
3.7	3,700 132 M	3,700 112 M	3,000 132 L	2,800 160 L	2,600 180 M	2,400 180 L	2,000 200 M	1,600 225 M	1,200 225 L	1,200 250 M
5.5	3,500 132 L	3,500 132 L	3,000 160 M	2,800 180 M	2,600 180 L	2,400 200 L	2,000 225 M	1,600 225 L	1,200 250 M	1,200 250 M
7.5	3,500 160 M	3,500 160 M	3,000 180 L	2,800 180 L	2,500 200 M	2,200 225 M	2,000 225 L	1,600 250 M	1,200 280 S	1,200 280 S
11	3,500 160 L	3,300 160 L	3,000 180 L	2,600 200 L	2,500 225 M	2,200 225 L	2,000 250 M	1,600 280 M	1,200 280 M	1,200 280 M
15	3,500 180 M	3,300 180 L	3,000 200 M	2,600 225 M	2,400 225 L	2,200 250 M	1,800 280 S	1,600 280 M	1,200 315 M	1,200 315 M
18.5		3,100 180 L	3,000 200 L	2,600 225 L	2,400 250 S	2,000 280 S	1,800 280 M	1,600 315 S	1,200 355 M	1,200 355 M
22		3,100 200 M	3,000 200 L	2,600 225 L	2,400 250 M	2,000 280 M	1,800 280 M	1,600 315 M	1,200 355 M	1,200 355 M
30		3,100 200 L	2,700 225 L	2,400 250 S	2,200 280 S	2,000 315 S	1,800 315 M	1,600 355 M	1,200 355 L	1,200 400 M
37			2,700 225 L	2,400 280 S	2,200 280 M	2,000 315 S	1,800 355 M	1,600 355 L	1,200 400 M	1,200 400 L
45			2,400 250 S	2,200 280 M	2,000 315 S	1,800 355 M	1,600 355 L	1,400 400 M	1,200 450 L	1,200 450 L
55			2,400 250 S	2,200 280 M	2,000 315 S	1,800 355 M	1,600 400 M	1,400 450 L	1,200 500 M	1,200 500 M
75			2,200 280 M	2,000 315 S	1,800 355 M	1,600 400 L	1,400 450 M	1,200 500 L	1,000 560 S	1,000 560 S
90			2,000 280 M	2,000 315 M	1,800 355 L	1,600 400 L	1,400 450 L	1,200 500 L	1,000 560 L	1,000 560 L
110			2,000 315 S	2,000 355 M	1,800 355 L	1,600 400 L	1,400 450 M	1,200 500 M	1,000 560 L	1,000 560 L
150			1,900 355 M	1,800 355 L	1,700 400 M	1,600 450 M	1,400 500 M	1,200 560 M	1,000 560 L	1,000 560 L
185				1,700 400 M	1,600 400 L	1,500 450 M	1,400 500 L	1,200 560 M	1,000 560 L	1,000 560 L
220				1,600 400 L	1,500 450 M	1,400 500 L	1,200 560 M	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L
300				1,500 450 M	1,400 500 L	1,200 560 M	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L
370				1,500 450 L	1,400 500 L	1,200 560 M	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L
450				1,500 500 M	1,300 560 S	1,200 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L
520				1,300 500 L	1,200 560 M	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L
600				1,250 550 S	1,200 560 M	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L	1,000 560 L

表 2.2 スーパーライン 直流電動機の基本外形寸法
Standard outline dimensions of super-line DC motors.



スーパーライン D : 略称 SD					対応 NEMA わく番
わく 番 号	寸 法 (mm)				
	C	E	F	BA	
112 L	112	95	79.5	70	185 A
132 M	132	108	89	89	215 A
132 L			101.5		216 A
160 M	160	127	105	108	254 A
160 L			127		256 A
180 M	180	139.5	120.5	121	284 A
180 L			139.5		286 A
200 M	200	159	133.5	133	324 A
200 L			152.5		326 A
225 M	225	178	155.5	149	365 A
225 L			178		366 A
250 S	250	203	155.5	168	404 A
250 M			174.5		404 A
280 S	280	228.5	184	190	444 A
280 M			209.5		445 A
315 S	315	254	203	216	504 A
315 M			288.5		505 A
IEC Publication No. 72-1 による					

IEC Publication No. 72-1 による

スーパーライン M : 略称 SM				
わく 番号	寸法 (mm)			
	C	E	F	BA
355 S			225	
355 M			250	
355 L			260	
400 S			280	
400 M	400	335	300	300
400 L			315	
450 S			300	
450 M	450	375	315	335
450 L			335	
500 S			325	
500 M	500	425	355	375
500 L			400	
560 S			385	
560 M	560	475	410	410
560 L			450	

寸法はメーカ標準である

とも可能である。

3. わく番選定にあたっての注意

表 2.1 は JEM 1170 に定められている標準仕様に基づく防滴保護形のわく番を記載しているが、強制通風形にも適用できる。しかし、次のような使用条件ではわく番が大きくなることがあるので注意を要する。

(1) 低速度運転

電圧制御法により基底速度以下で連続運転する場合、防滴保護形など内蔵ファンで自己通風するものは、通風効果が悪くなるので温度上昇に注意せねばならない。わく番との関連もあるが、基底速度の高いところでは、基底速度の約 1/2 まではトルク (すなわち電機子電流) を減ずることなしに安全温度範囲内で運転することができる。

(2) 過負荷耐量

JEM 1170 では 150%、1 分間となっているのでこれより大きい場合

(3) 過電圧運転

電圧制御により電圧を定格電圧より上げて使用する場合で、整流、整流子間電圧、機械的条件が苦しくなる。

(4) 界磁制御範囲

2 章にも述べたように界磁制御範囲が表 2.1 より大きい場合

(5) 電圧

電圧は下記を標準としているのでこの標準と異なる場合

7.5 kW 以下 110 V および 220 V

11 kW~150 kW 220 V および 440 V

185 kW~600 kW 440 V および 600 V

(6) 周囲温度

JEM 1170 では周囲温度 40° 以下となっているのでこれを越える場合

(7) サイリスタ電源の場合

4. 最近の動向

4.1 絶縁材料の進歩

絶縁材料の進歩には目をみはらせるものがある。従来の天然材料に代わって、次第に合成樹脂材料を基調としたものへと移りつつある。絶縁階級はB種としているが、一部にはエポキシ樹脂・合成マイカ・フィルム樹脂などB種以上の絶縁性能を有するものも使用しており、温度上昇に余裕をもたせ、寿命・信頼性を高めている。さらには湿気・じんあい・腐食性ガス・塩害などの悪ふんい気に対しては耐化学性ワニス塗布して十分に保護し、絶縁保守の軽減をはかっている。

4.2 整流能力の向上

直流電動機の整流能力は従来からも重要な問題であったが、とくにサイリスタ電源では脈動電流が流れるため整流は苦しくなる。整流能力向上の手段としては種々あるが

(1) 磁気回路の断面積を十分に吟味し、過負荷時に磁気飽和の影響を受けないようにし、過渡時や脈動電流に対しては補極磁束の時間的おくれを小さくするため全わく番にわたって補極鉄心を積層し、必要に応じヨークも積層している。

(2) ブラシおよびブラシ保持器は電気的・機械的性能を十分吟味したものを使用している。ブラシはスプリットブラシまたはタンデムブラシを使用し、さらに中容量機では整流子円周方向にブラシタガをすることもある。

(3) 可能なかぎり整流子片枚数を多くし、電機子コイルの巻数を少なくし、リアクタンス電圧を下げるよう考慮を払っている。さらに必要に応じ電機子回路を当社独特のバランス結線として整流性能の向上をはかっている。

ここで注意すべきは整流火花についての考え方である。中小容量機の整流子の条こん(痕)などの荒損は、軽負荷のためブラシの電流密度が低くなり整流子面が冷えすぎるのが原因となっていることが多く、むしろ若干の整流火花が存在する機械は条こんが発生しにくいことを経験している。すなわち整流火花は実害との関係で判断されるべきで、あまりに神経質になる必要はないといえる。

4.3 保守・取扱いに対する配慮

直流機はブラシや整流子という摩耗部分をもつため本質的に他の交流機に比べ保守・取扱いに慎重な配慮を必要とするが、省力化の要請に応えるためできるだけ保守・取扱いが容易になるよう構造上にも工夫をこらしている。たとえば、

(1) 需要の多いスーパーラインD形の軸受には、小形誘導電動機と同じく長期間の連続運転に適した密封形軸受を使用し、グリスの補給・排出を不要なものとしている。

(2) 整流子点検窓はヒンジ付として簡単に開閉できる構造としたり、あるいは透明プラスチック板とするなど要望に応じて製作している。

(3) ブラシ寸法・材質もできるだけ統一し、保守に便利のようにしている。

直流機のトラブルは運転開始後1年以内に発生する場合が大半を占めていることに注目していただきたい。運転初期における整流子酸化皮膜の形成には十分留意し、負荷状態に見合った通風量に調整し、ちりやほこりがつかないように定期的な清掃をするなど日常の保守が故障を少なくし、寿命を延ばすことにもなる。

4.4 サイリスタ電源

直流電動機の電源として、そのすぐれた制御性能によりこれまでの直流発電機(すなわちM-G)に代わり、サイリスタが登場しすでに完全に実用段階にはいった。サイリスタ電源には脈動電圧・電流を含んでいるため次のような問題が発生する。

(1) 整流悪化

(2) 温度上昇

(3) 騒音・軸電圧・振動・界磁巻線への高周波電圧など

この中で中小容量機では(2)、(3)項はほとんど影響を与えないことを確認しており、(1)項については4.2節で述べているような整流能力の向上で十分カバーできるが、使用定格条件の難易に応じて主回路へのリアクトルそう入の可否を決定する。

5. む す び

以上直流電動機の現状について概略を述べたが、絶縁材料・設計・製作技術の向上でなおいっそうの小形軽量化が進み、近い将来にはF種絶縁への全面的な移行も間近となっている。

今後とも標準化・合理化に努め、よりいっそうすぐれた電動機を製作していく所存である。とくに標準品の選定については需要者各位のご協力をお願いするとともに、三菱直流電動機に対するご批判を希望するものである。

参 考 文 献

- (1) 小山ほか：三菱電機技報, 36, 1,320 (昭37)
- (2) 高月ほか：三菱電機技報, 38, 836 (昭39)
- (3) 高月ほか：三菱電機技報, 40, 945 (昭41)

かご形クレーンモートル (ハイストロックモートル)

小島 敏男・森田 清・堀内 勝彦*

Squirrel Cage Induction Motors for Crane Use (HISTLOC Motor)

Nagoya Works Toshio KOJIMA・Kiyoshi MORITA・Katuhiko HORIUCHI

Study is going on to rationalize the construction of cranes by simplifying their electric apparatus. As a result of painstaking effort to satisfy the requirement, a new series of epochal squirrel cage induction motors (HISTLOC MOTORS) has been brought to completion. They have a special rotor constructed through the ingenious combination of the shape and manufacturing technique of conventional aluminium die-cast and ordinary bar rotor. Their output, pole number and type are made to conform to JEM 1202. A loading time rate % ED is newly employed for the indication of their ratings; standard working conditions are set up for the starting frequency and the inertia of load, thus affording facility to the users. This article describes their features, standard specification and examples of application.

1. ま え が き

かご形モートルは、構造が堅固、保守点検が容易、かつ安価で経済性も高いなど数多くの利点を備えているが、反面起動・停止のひん度が高い、クレーンあるいは負荷慣性モーメントの大きい遠心分離機・ブローなどのように、スイッチ投入から起動完了まで起動時間が長くなるような用途に対しては、回転子に大きな熱損失が発生するため使用に耐えぬ場合が多い。従来このような場合には高抵抗かご形モートルや、巻線形モートルが使用されてきたが、高抵抗かご形モートルでは起動時の発生損失はおさえることはできても運転効率が悪く、また、変動負荷に対する速度変動率が大きくなる欠点がある。さらに、巻線形モートルでは、特性的には理想的な値が得られても制御装置が複雑となったり、同時に保守点検を多く必要として経済性に欠けるなど、特殊用途に誘導電動機を使用するうえで問題点が数多く残されていた。今回これらの特性、構造上の諸問題を一気に解決すべき数多くの基礎研究を行なって、画期的なハイストロックモートル (HISTLOC Motor) の開発を完了した。

ハイストロックモートルは、起動時高抵抗かご形モートルと同様高起動トルク、低起動電流特性を持ち、運転時には普通かご形モートル特性を備えて、巻線形モートルに置き換えが可能な理想的な誘導電動機といえよう。

2. ハイストロックモートルの特長

誘導電動機で任意のスピードトルク特性を得るためには、回転子の抵抗およびリアクタンスを任意に変化させることが設計上必要となるが、従来から用いられているアルミダイキャスト回転子では、導電率が限定されるので、その範囲を広く選定することはむずかしい。

あるいは、回転子導体およびエンドリングに銅・黄銅・リン青銅のような特殊材質を適宜組み合わせ、溶接すれば比較的広い範囲の二次抵抗を得ることもできるが、作業性悪く、コスト的にも高価となる。

ハイストロックモートルでは、従来のバー回転子とダイキャスト回転子との形状と製造方法を巧みに組み合わせて、経済性高く、同時に任意のスピードトルク特性が容易に得られることを大きな特長としている。今、回転子鉄心みぞに固有抵抗 p_1 、断面積 S_1 の導体を収納した後、固有抵抗 p_2 、その有効断面積を S_2 となるような鋳造物によって一

体鋳造すれば、回転子の抵抗は見かけ上 $\frac{p_1 p_2}{S_2 p_1 + S_1 p_2}$ に比例することになるので、そう入導体と鋳造物の形状または材質による固有抵抗の比を適当に選べば、モートルのスピードトルク特性は二次抵抗によって比例推移するので、任意の特性を持たせることができるわけである。(特許申請中)

ハイストロックモートルは、この画期的なアイデアによって初めて可能となった新機種であり、次のような特長を有している。

- (1) 起動トルクが大きく、加速性が良い。
- (2) 起動電流が低く、高ひん度の起動停止運転に耐える。
- (3) 運転効率が良く、速度変動率が少ない。
- (4) 構造が簡単で堅固である。
- (5) 保守点検が容易である。
- (6) IEC 寸法に準拠して標準モートルと寸法的な互換性がある。
- (7) 巻線形に比べて著しく小形軽量化されている。

これによって、過酷な運転条件を必要とするクレーンモートルとしての機能を十分備えることが可能となり、標準かご形クレーンモートルとして7機種のハイストロックモートルのシリーズ化を完了することができた。

3. ハイストロックモートルの仕様

クレーン横行・走行用モートルは高起動ひん度に耐え、加速トルクの大きいことが要求されるが、ハイストロックモートルについてもこれらに十分適合するように標準仕様を決定する必要がある。

これらの標準使用条件を決定するために、モートルの使用率・出力・極数・電圧・周波数などは、日本電機工業会標準規格 JEM 1202『クレーン用全閉外扇巻線形低圧三相誘導電動機』に準拠させ、起動ひん度は、日本機械学会荷役および運搬機械部門専門委員会のクレーンの運転状況調査を参考にした。また、この場合の負荷の慣性 (GD_L^2) については、モートル単体の慣性 (GD_M^2) と等しいとし、JEM 1202 によって表示すれば、 $C = \frac{GD_M^2 + GD_L^2}{GD_M^2} = 2$ を標準仕様とした。

起動トルクは機械の摩擦トルクの大きさによって異なり、一般には定格トルクの 100~150% あれば実用上問題ないときれているが、電源電圧の変動や制御の点を考慮し、200% 以上を標準仕様とした。

反抗負荷トルクや負荷の慣性 (GD_L^2) が小さく、起動時のショックで荷振れを起こすような場合には、電気的には一次抵抗起動や、機

表 3.1 ハイストロックモートルの標準仕様
Standard specification of HISTLOC motor.

形 式	出 力 kW	電 圧 V	周波数 Hz	極 数	標準 %ED	絶 縁 種 別	わく番号	適用使用条件
KCF-E	1.5	200/220	50/60	6	40	E	132 S	$GDL^2 = GDM^2$ 起動ひん度 180 回/h
KCF-E	2.2	200/220	50/60	6	40	E	132 S	$GDL^2 = GDM^2$ 起動ひん度 180 回/h
KCF-E	3.7	200/220	50/60	6	40	E	132 M	$GDL^2 = GDM^2$ 起動ひん度 180 回/h
KCF-E	5.5	200/220	50/60	6	40	E	160 M	$GDL^2 = GDM^2$ 起動ひん度 180 回/h
KCF-E	7.5	200/220	50/50	6	40	E	160 L	$GDL^2 = GDM^2$ 起動ひん度 180 回/h
KCF-E	11	200/220	50/60	6	40	E	180 M	$GDL^2 = GDM^2$ 起動ひん度 180 回/h
KCF-E	15	200/220	50/60	6	40	E	180 L	$GDL^2 = GDM^2$ 起動ひん度 180 回/h

械的には粉体継手などを併用させ十分な性能を得るように配慮されている。すべりに対しても、減速機の選定が容易なように、約 10 % 前後の値を目標値として限定した。

以上のような点を考慮して、ハイストロックモートルの標準仕様は表 3.1 のように決められている。

4. ハイストロックモートルの特性

ハイストロックモートルは次に述べるようなすぐれた起動特性および運転特性を有しており、標準かご形モートルや従来の高抵抗かご形モートルでは得られなかったもので、巻線形モートルに匹敵するすぐれた特性を持っている。

4.1 特 性

起動トルク 200 % 以上

起動電流 350 % 以下

定格運転時のすべり 約 10 %

などの特性を基準値としており、効率・力率も一般低圧かご形モートルの規格 JIS-C 4210 とほぼ同等である。

4.2 ハイストロックモートルと他のかご形モートルの特性比較

ハイストロックモートルの特性と、従来から使用されている普通かご形モートルおよび高抵抗かご形モートルの電流トルク特性を 3.7 kW, 6 P 200 V 50 Hz を一例として比較したのが図 4.1 である。図 4.1 から (2) のハイストロックモートルは普通かご形モートル (1) のすべりが小さく効率のよい運転特性と、高抵抗かご形モートル (3) の高起動トルク、低起動電流の特性をかね備えていることがわかる。これらのことから起動停止の激しい用途に適していることが理解できると考えられるが、さらにハイストロックモートルの速度・トルク特性は起動時から運転時に至るまで、ほぼ一定に近いトルク特性をもっているため、大きな加速トルク特性を得ることが可能である。さらに起動電流 350 % 以下という値は、一般のかご形モートルでは得ることのできない低い値で、モートルばかりでなく、制御器および配線関係の容量を小さくすることができ、非常に経済的な機械構造の設計

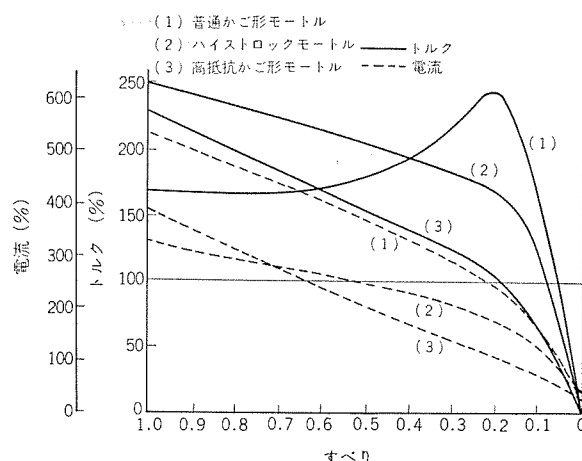


図 4.1 ハイストロックモートルと一般かご形モートルおよび高抵抗かご形モートルのトルク電流特性 (3.7 kW 6 P 200 V 50 Hz)
Torque, current characteristics of HISTLOC motor and general squirrel cage motor, and high resistance squirrel cage motor.

表 4.1 ハイストロックモートルと一般かご形モートルおよび高抵抗かご形モートルの比較 (試験値)
Comparison of HISTLOC motor and general squirrel cage motor, and high resistance squirrel cage motor (measured values).

特 性	3.7 kW 6 P		一般かご形モートル		高抵抗かご形モートル	
	200 V 50 Hz	220 V 60 Hz	200 V 50 Hz	220 V 60 Hz	200 V 50 Hz	220 V 60 Hz
全負荷電流 (A)	18.3	16.0	16.5	14.5	18.0	16.0
効 率 (%)	81.5	82.2	84.0	85.0	74.0	74.5
力 率 (%)	71.8	73.8	78.0	79.0	81	82
す べ り (%)	8.4	8.1	5.4	4.7	17.0	14.3
起動電流 (A)	59	55	84	82	69	68
起動トルク (%)	250	283	176	172	235	230
起 動 階 級	C	C	G	G	F	F

が可能となり、その貢献度は大きいものと考えている。

5. ハイストロックモートルの構造

モートル形式は JEM 1202 に準拠して全閉外扇屋内形・両軸タイプを標準とし、各種締付ボルトはすべて新しい JIS メートルねじ (ISO ネジ) を採用し完全なゆるみ止めを施し、過酷な運転条件にも十分耐える構造となっている。

5.1 固定子コイル

固定子コイルは E 種絶縁を標準とし、負荷時間率 (% ED) の高いものについては F 種絶縁を採用している。

5.2 回転子

回転子は特殊導体をダイカストにより一体铸造し、強度的にも十分な考慮を払い、過激な起動停止や正逆転に耐える回転子構造である。

5.3 ベアリング

ベアリングは油漏れがなく摩擦損失の少ない非接触形のゴムシールドボールベアリングを使用し、封入グリスには潤滑性能・耐湿性のすぐれたリチウム系グリスを使用しているので、長寿命を保つことが可能である。

5.4 軸端キー止め座

クレーンの構造規格に基づき、軸端にはキー抜け止め座を設けホイールやカップリングの取付けに対し十分安全性を持たせている。ハイスト

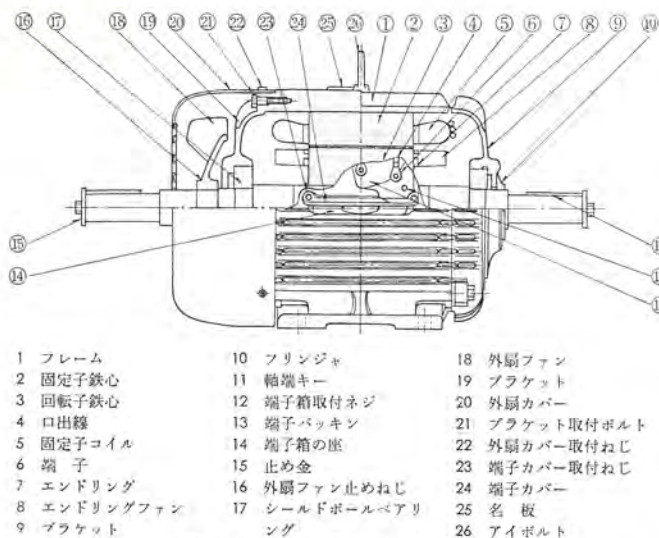


図 5.1 KCF-E 形 構造図
Construction of type KCF-E.

ロックモートルの構造図は図 5.1 に示している。寸法は JEM 1202・JEM 1180 を参考にして決められており、図 6.1 に示すとおりである。また、図 6.2 はフランジ形の標準寸法を示すものである。

6. ハイストロック モートルの適用範囲と応用例

6.1 わく番号適用表

標準使用率は 40 % ED であるが、同一出力で % ED を変化させた場合のわく番号の摘要が要求されることがあるので参考用としてあげると表 6.1 のようになる。JEM 1202 のように % ED が大きくなった場合、出力を低減することによっても、温度的に補正できるが、かご形の場合には巻線形と異なり二次抵抗を可変にできないので、出力を低減すれば、定格電流の値も減るので逆に起動電流の百分率が大きくなる。したがってハイストロックモートルでは出力当たりの起動電流を押えるため絶縁階級をあげるように標準仕様を決定した。

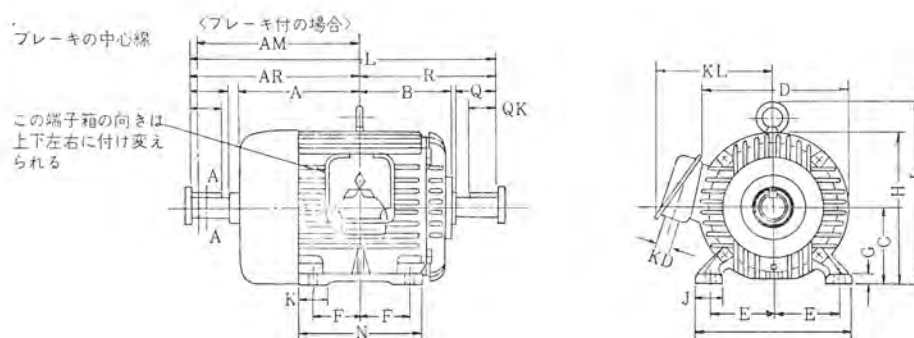
6.2 慣性増加率・起動ひん度と出力の関係

慣性増加率 (c)、起動ひん度 (z) が許容値より大きくなる場合には、温度的に出力を低減する必要がある。このため % ED を一定としたときの cz と出力低減率 m との関係を求めておけば、電動機の選定上非常に便利であるので、これについて説明を加える。

6.2.1 計算式の誘導

計算式の誘導に当たっては次の仮定をおく

(1) 運転時の銅損は出力の 2 乗に比例する。

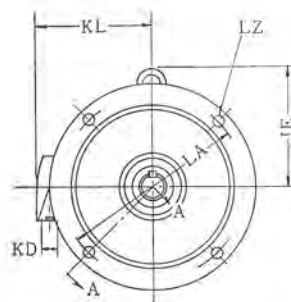
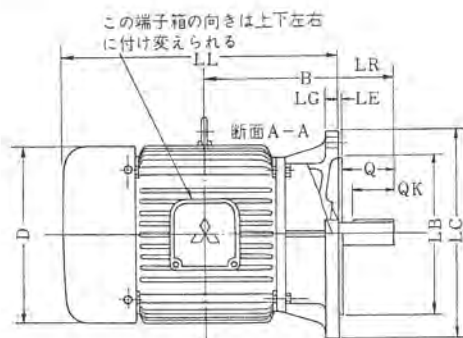


kW	極数	わく番号	電								動								機							
			A	B	※C	D	E	F	G	H	I	J	K	KD	KL	L	M	N	AR	R						
1.5	6	132 S	205.5	152	132	257.5	108	70	17	261	302.5	45	50	35	216	544	240	180	305	239						
2.2	6	132 S	205.5	152	132	257.5	108	70	17	261	302.5	45	50	35	216	544	260	180	305	239						
3.7	6	132 M	224.5	171	132	257.5	108	89	17	261	302.5	45	50	35	216	582	260	218	324	258						
5.5	6	160 M	263	205	160	315.5	127	105	20	318	367.5	55	60	35	264	721	310	260	398	323						
7.5	6	160 L	285	227	160	315.5	127	127	20	318	367.5	55	60	35	264	765	310	304	420	345						
11	6	180 M	304.5	228.5	160	370	139.5	120.5	22	361.5	421.5	70	70	35	288	791.5	350	300	440	351.5						
15	6	180 L	323.5	247.5	180	370	139.5	139.5	22	361.5	421.5	70	70	35	288	829.5	350	338	459	370.5						

kW	極数	わく番号	軸 端			重量 kg	GD ² kg-m ²	ベアリング	
			◎S	Q	QK			負荷側	反負荷側
1.5	6	132 S	32	80	63	54	0.12	6308	6308
2.2	6	132 S	32	80	63	60	0.15	6308	6308
3.7	6	132 M	32	80	63	70	0.20	6308	6308
5.5	6	160 M	42	110	90	111	0.49	6309	6309
7.5	6	160 L	42	110	90	125	0.58	6309	6309
11	6	180 M	48	110	90	188	1.10	6311	6311
15	6	180 L	48	110	90	215	1.34	6311	6311

備考 1. ※軸中心高の上下寸法差は 0
-0.500
である
2. ◎軸径の上下寸法差は日本工業規格
(JIS) B 0401 はめあい "m 6" に
よる

図 6.1 KCF-E 形 外形寸法図
Outline dimensions of type KCF-E.



kV	極 数	わ く 番 号	電 動 機												軸 端		
			B	D	IE	KD	KL	LA	※LB	LC	LE	LG	LL	LZ	LR	Q	QK
1.5	6	L 5-132 S	194	258	171	35	209	265	230	300	4	20	400	15	80	80	63
2.2	6	L 5-132 S	194	258	171	35	209	265	230	300	4	20	400	15	80	80	63
3.7	6	L 5-132 M	213	258	171	35	209	265	230	300	4	20	438	15	80	80	63
5.5	6	L 5-160 M	248	316	208	35	258	300	250	350	5	20	511	19	110	110	90
7.5	6	L 5-160 L	270	316	208	35	258	300	250	350	5	20	555	19	110	110	90
11	6	L 5-180 M	281.5	370	239.5	35	283	350	300	400	5	20	584	19	110	110	90
15	6	L 5-180 L	300.5	370	239.5	35	283	350	300	400	5	20	624	19	110	110	90

kW	極 数	わ く 番 号	重 量 kg	GD ² kg-m ²	ベアリング	
					負 荷 側	反 負 荷 側
1.5	6	L 5-132 S	58	0.12	6308	6306
2.2	6	L 5-132 S	64	0.15	6308	6306
3.7	6	L 5-132 M	74	0.20	6308	6306
3.5	6	L 5-160 M	117	0.49	6309	6308
7.5	6	L 5-160 L	130	0.58	6309	6308
11	6	L 5-180 M	193	1.10	6311	6310
15	6	L 5-180 L	220	1.34	6311	6310

備考 1. ※フランジはめ込部径の上下寸法差は日本工業規格 (JIS)
B 0401 はめあい式 "h7"

図 6.2 KCF-EF 形 (フランジ形) 外形寸法図
Outline dimensions of type KCF-EF (Flange type).

表 6.1 ハイストックモートルのわく番適用表
Frame selection chart of HISTLOC motor.

わく番号	負荷時間率 出力 絶縁		15%ED、25%ED [40%ED]		60%ED		100%ED		極 数
	kW	絶 縁 クラス	kW	絶 縁 クラス	kW	絶 縁 クラス			
132 S	1.5	E 種	1.5	E 種	1.5	E 種	6		
132 S	2.2	E 種	2.2	E 種	2.2	E 種	6		
132 M	3.7	E 種	3.7	E 種	3.7	E 種	6		
160 M	5.5	E 種	5.5	F 種	5.5	F 種	6		
160 L	7.5	E 種	7.5	F 種	7.5	F 種	6		
180 M	11	E 種	11	F 種	11	F 種	6		
180 L	15	E 種	15	F 種	15	F 種	6		

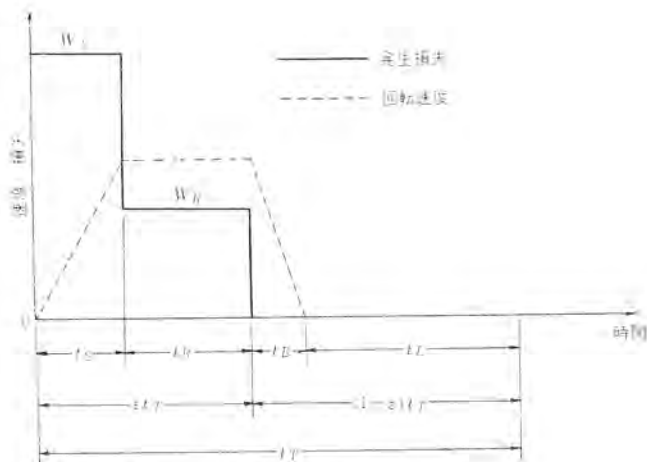


図 6.3 Duty-cycle の例
Example of duty-cycle.

(2) 起動加速中の二次鉄損の影響は無視する。

(3) ブレーキは機械ブレーキとする。

(4) 負荷反抗トルクは不変とする。

Duty-cycle の一例を図 6.3 のように考える。

(a) 起動時に発生する熱量

$$W_s = \frac{C \cdot GD_M^2 \cdot N^2}{730} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \left(\frac{T_M}{T_M - T_L} \right) = k_1 C \quad \dots \dots (6.1)$$

ここで $GD_T^2 : GD_L^2 + GD_M^2$ (kg-m²)

T_M : 電動機平均トルク (kg-m)

T_L : 負荷反抗トルク (kg-m)

$$C : \text{慣性増加率} = \frac{GD_M^2 + GD_L^2}{GD_M^2}$$

(b) 運転時に発生する損失

運転時に発生する損失には

一次銅損+二次銅損 $= W_c$ (W)

一次鉄損 $= W_L$ (W)

がある。ここで出力低減率を m とすれば、定格出力 P_r より mP_r に出力が変化した場合には仮定よりこのときの銅損は $m^2 W_c$ とな

る。

(c) 起動時間および制動時間

起動時間: t_S

$$t_S = \frac{C \cdot GD_M^2 \cdot N}{375(T_M + T_L)} = k_2 c \quad (6.2)$$

制動時間: t_B

$$t_B = \frac{C \cdot GD_M^2 \cdot N}{375(T_M + T_B)} = k_3 c \quad (6.3)$$

ここで T_B : 制動トルク (kg-m)

運転時間: t_R

負荷時間率 ε として図 6.3 を考えれば

$$\varepsilon = \frac{t_S + t_R}{t_T}$$

また, 単位時間当たりの起動ひん度を z とすれば

$$z = \frac{3,600}{t_T}$$

であるから

$$t_R = \frac{3,600 \cdot \varepsilon}{z} - t_S \quad (6.4)$$

となる。

(d) Duty-cycle 運転時の平均損失 W_a

$$W_a = \frac{W_S + m^2 \cdot W_C \cdot t_R + \varepsilon \cdot W_I \cdot t_T}{\alpha(t_S + t_R) + t_R + \beta\{(1-\varepsilon)t_T - t_B\}} \quad (6.5)$$

ここで α : 加減速時の冷却係数

β : 停止時の冷却係数

このモートルの出力 Pr (kW) の連続運転時の温度上昇を θ_r (deg) で, そのときの発生損失を W_r (W) であるとし, そのモートルの許容温度上昇値を θ_m とすれば

$$W_a \leq \frac{\theta_m}{\theta_r} \cdot W_r = k_4 W_r \quad (6.6)$$

が成立する必要がある。

上記の各式より出力低減率 m を求めると次のようになる。

$$m = \sqrt{\frac{1}{W_C} \left[k_4 W_r + \frac{[k_4 W_r \{\alpha k_2 - (\alpha - \beta) k_3\} - k_1] c z + \{k_4 W_r \beta (1 - \varepsilon) - W_I \varepsilon\} 3,600}{3600 \varepsilon - k_3 c z} \right]} \quad (6.7)$$

6.2.2 計算結果

計算した結果は図 6.4 のとおりである。図 6.4 によれば出力が小さいほど許容 cz が大きく, 出力が大きくなれば許容 cz も小さくなり, 15 kW 程度で標準使用状態の $cz=360$ に接近してくる。これから反覆運転におけるかご形モートルの熱的な製作限界が決まってくる事が理解できる。

6.3 実用例

開発以来多数の納入実績があり, 各方面から好評を得ている。図 6.5 は天井クレーン横行用として取付けられたハイドロック・モートル

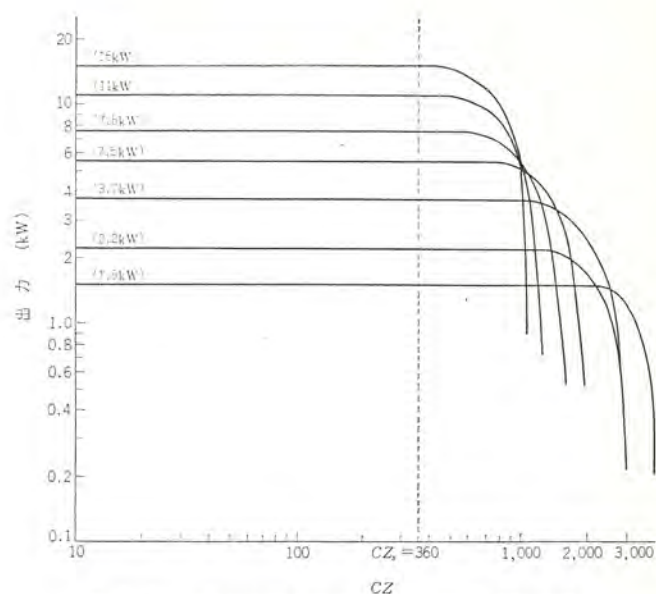


図 6.4 起動ひん度と出力の関係 (40 % ED の場合)
Relation of starting cycles with output (at 40 % ED).

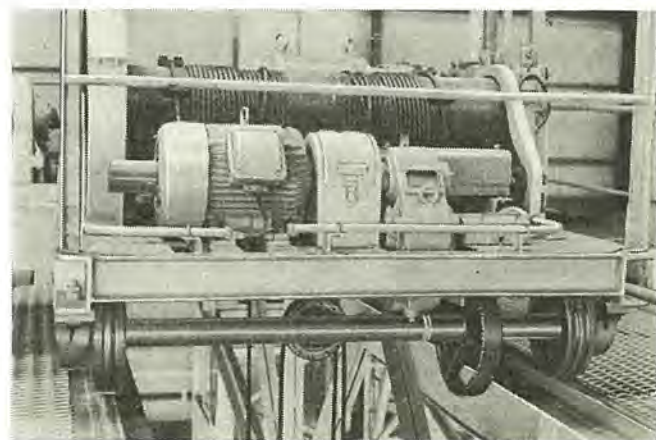


図 6.5 実用例
Example of practical use.

2.2 kW 6P の例である。

7. む す び

以上, ハイドロックモートルの紹介と従来品との比較などについて述べたが, ハイドロックモートルは単にクレーンのみでなく, 特殊用途に対してもその利用範囲はひじょうに広範囲なものが期待される。本論文をもとにしてより効果的な電動機の選定が行なわれ, それぞれの機械の合理化および性能が十分に発揮されるように活用されれば幸甚と考える。

NB ブレーキ付モートル

三 富 孜*・松谷 英治*

Type NB Brake Motor

Nagoya Works Tsutomu MITOMI・Eiji MATSUTANI

From the viewpoint of the elevation of productivity and the automatization of facilities, machines nowadays tend to call for higher efficiency and higher speed. To meet these requirements quick stop and inching of apparatus with exactness in operation are indispensable requisites, which can be only realized with electromagnetic brakes withstanding the operation of high frequency and high energy yet with ease of maintenance, inspection and adjustment. Motors equipped with type NB brake are built to answer the purposes.

This article outlines their specification, features, operation principle and performance of operating electro-magnets and brakes (performance of the magnet, breaking performance, braking torque, frequency characteristic and friction characteristic).

1. ま え が き

生産性の向上、自動化などの観点から最近の機械は、ますます高効率化・高速化の傾向にあるが、これら高速化・高効率化が進むにつれて、機械の急停止・寸動などの動作を正確に行ない、しかも高ひん度・高エネルギーの使用に耐え、かつ保守調整が容易な電磁ブレーキの要求がしだいに多くなってきている。NB ブレーキ付モートルは、これらの目的を達成するために製作された交流多板式電磁ブレーキ付モートルで、数多くのすぐれた特長をもっているが、以下その概要について述べる。

2. 仕様および特長

2.1 仕様

電動機

全閉外扇形三相誘導電動機
防滴保護形三相誘導電動機
足取付形およびフレンジ取付形
E種絶縁 連続定格
200, 200, 220 V
50, 60, 60 Hz
出力: 4 極 200 W~15 kW
6 極 100 W~11 kW

ブレーキ

NB 形三相交流電磁ブレーキ
スプリング制動式(無励磁制動式)
制動トルク: 150 %
E種絶縁: 連続定格
200, 200, 220 V
50, 60, 60 Hz

2.2 特長

(1) モートル部分は、IEC 寸法に準拠した小形・軽量の、はん用 E 種モートルを採用し、ブレーキ部分もきわめて小形・軽量となっている。

(2) モートル部分の小形化により、回転子の慣性 (GD^2) が小さくなり、そのうえ、ブレーキ部分は独自の方式による強力な電磁力と簡単な制動機構になっているため、惰行時間がきわめて小さく迅速で正確な急停止が得られる。

(3) ブレーキライニングは、耐摩耗性のすぐれた材料を使用し、多板式にして制動面積を大きく取り、さらに、冷却効果のよい構造を採用しているので、大きな制動仕事量に耐えることができ、摩耗もわずかで済む。

(4) 制動用スプリングの圧縮量を調整できる構造になっているので、簡単な操作でブレーキトルクを調整することができる。

(5) 手動で位置調整をしたり、停電時に軸を回転させる場合のブレーキ解放は、外部に設けられた手動開放ハンドルを 1 回転させるだけで容易にできる。

(6) ブレーキ部分はモートルの保護形式にかかわらず、完全な全閉構造となっているので、ライニング摩耗粉が外部に出たり、逆に外部の異物が侵入してブレーキ動作に異常を起したり、ライニングが外気にふれて悪影響を受けることがない。

(7) 回転体 GD^2 が小さく、ライニングの許容制動仕事量が大きくさらに、ブレーキ動作が迅速であるので高ひん度な使用が可能である。

3. 構造および動作原理

3.1 構造および動作原理

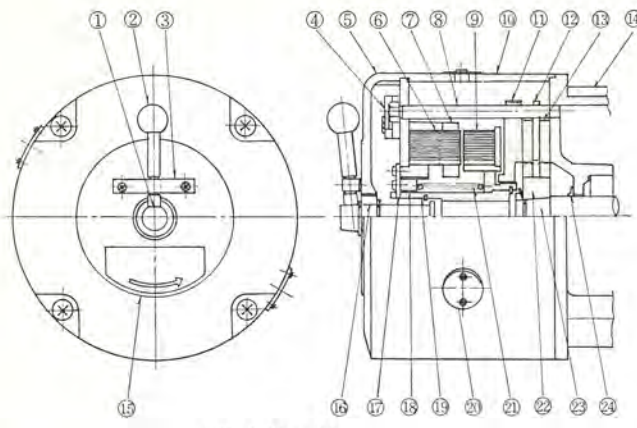
NB 形ブレーキはスプリング制動の励磁解放式となっており、常時ブレーキがかかる形式で安全ブレーキとなっている。図 3.1 にその構造を示す。

ブレーキに電源を入れると、電磁石に吸引力が発生し、可動鉄心をスプリング圧力に打勝って吸引する。可動鉄心には、ブレーキ板が一体となっておりねじで固定されており、ブレーキ板に押し付けられていたライニングは、自由になり、モートル軸は回転する。次に制動動作は、ブレーキ電源を切ると電磁石の吸引力は、急激に消滅し、制動用スプリングの圧力によってブレーキ板がライニングを押しつけ、ブレーキトルクを発生する。

3.2 操作用電磁石

交流電磁石には、うなり、脈動的な吸引力があるので一般にはこれらの問題のない直流電磁石がブレーキ操作用電磁石として用いられてきている。NB 形電磁石は、交流電磁石にありがちな上記の問題を解決するため新しく図 3.4 に示したような円形電磁石を採用している。いま図 3.2 の結線図において、図 3.3 に示した二相のベクトルを考える。磁束 ϕ_2 が、磁束 ϕ_1 に対して位相が $\pi/2$ 進んでいるとすると、

$$\phi_1 = \phi_m \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (3.1)$$



- (NB-0.8形以上)
- | | | | |
|-----------|---------|---------------------|------------------|
| ① 手動解放ロッド | ⑦ コイル | ⑬ ライニング | ⑲ 調整軸
(摩耗調整用) |
| ② 解放ハンドル | ⑧ 特殊ボルト | ⑭ プラケット | ⑳ ふた |
| ③ バインド | ⑨ 可動鉄心 | ⑮ 注意名板 | ㉑ スプリング |
| ④ 端子板 | ⑩ ブレーキ箱 | ⑯ 特殊ナット | ㉒ ハブ |
| ⑤ ブレーキカバー | ⑪ ブレーキ板 | ⑰ 回り止め板 | ㉓ モートル軸 |
| ⑥ 固定鉄心 | ⑫ 停止円板 | ⑱ 調整ナット
(トルク調整用) | ㉔ フリンジ |

注 NB-0.8には停止円板は付属せず、ライニングは一枚のみ使用しています。

図 3.1 構造および部品名称一覧表
Construction and a list of parts.

$$\phi_2 = \phi_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots (3.2)$$

各磁束 ϕ_1, ϕ_2 について、それぞれの吸引力 f_1, f_2 は

$$f_1 = \frac{\phi_1^2}{2\mu s} = \frac{\phi_m^2 \sin^2 \omega t}{2\mu s} = \frac{\phi_m^2}{4\mu s} (1 - \cos 2\omega t) \dots\dots\dots (3.3)$$

$$f_2 = \frac{\phi_2^2}{2\mu s} = \frac{\phi_m^2 \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}{2\mu s} = \frac{\phi_m^2}{2\mu s} \times \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t) \dots\dots\dots (3.4)$$

となり、したがって ϕ_1, ϕ_2 により生ずる合成力を式 (3.3) (3.4) より求めると

$$\text{合成力 } f = \frac{\phi_m^2}{2\mu s} \left\{ \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) + \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t) \right\} \dots\dots\dots (3.5)$$

となる。また式 (3.5) の振動項は 0 となって消去されるから、けっきょく、電磁石の吸引力は次式で表わすことができる。

$$f = \frac{\phi_m^2}{2\mu s} \dots\dots\dots (3.6)$$

ここに

- f : 吸引力 μ : 透磁率 ϕ : 磁束
 ω : 角速度 ($2\pi n$) ϕ_m : 最大磁束 t : 時間
 s : 磁極面積式

式 (3.6) に示すように振動項は消去され、交流電源における磁束変化は位相に関係なく、鉄心磁極面は、直流と同様に常時一定の力で吸着しており、うなりの生ずる原因がなくなる。図 3.4 に示したように、鉄心の磁極番号 #1~#8 のうち偶数番号 (図中 #2, #4, #6, #8) の磁極は、同位相で吸引し、これより位相が $\pi/2$ 遅れて、奇数番号 (#1, #3, #5, #7) の磁極も同位相で吸引する。この二つの吸引力は互いに合成され、前にも述べたとおり、鉄心の吸着面は振動しなくなる。鉄心の吸着力は磁極面の任意の部分では、すべて一定であり、特に吸引力の作用点が機械的に最も安定した位置、円の中心にあるので常にバランスした吸引力が得られる。

次に電磁石の構造であるが、可動鉄心・固定鉄心は、けい素鋼板製の巻鉄心を使用している。固定鉄心は、鉄心円を 8 等分したコイル

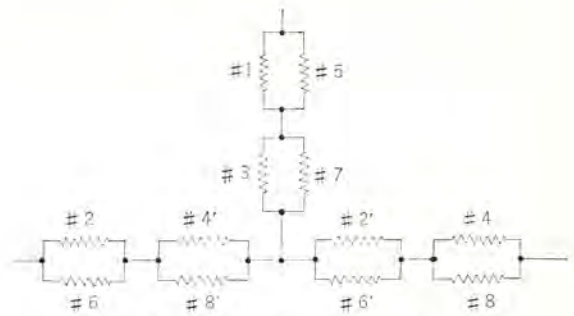


図 3.2 円形型電磁石コイル結線図
Coil wiring diagram for circular magnet.

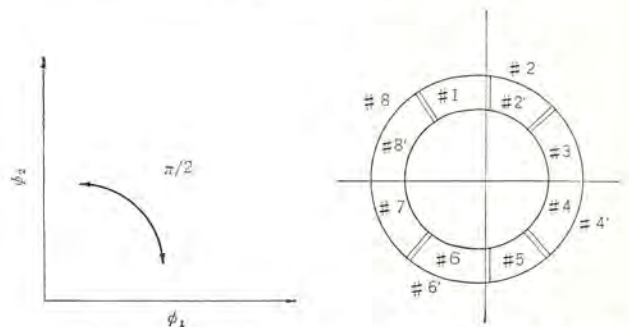


図 3.3 磁束 ϕ_1, ϕ_2 のベクトル図
Vector diagram of magnetic flux.

図 3.4 鉄心の磁極番号
Pole number of magnet.

みぞを設けて、その中にコイルを入れ、図 3.2 のような結線方法で各コイルは接続されている。コイルは、鉄心がが一体にモールドして固定してあるので、吸引時における衝撃には十分耐えることができる。巻鉄心構造は他の成層構造のものと異なり、成層する際のかしめびょうやピンなどは使用していないので、かしめ部に生ずる渦電流損が少ないため温度上昇も非常に小さくなっている。

4. 特性

4.1 電磁石特性および NB ブレーキ仕様

電磁石特性およびブレーキ仕様を表 4.1 に示す。

4.2 停止特性

電源を切ってから停止に至るまでには、可動鉄心がブレーキディスクに接触するまでの動作時間、電磁開閉器の動作遅れ時間およびブレーキディスクに接触し始めてから完全に停止に至る時間に分けられる。全停止時間はその和で与えられ、可動鉄心がディスクに接触するまでの時間と電磁開閉器の動作遅れ時間を合計した時間を惰行時間とよび、その値を表 4.1 に示す。

停止時間は式 (4.1) および式 (4.2) により計算される。

$$t = t_0 + t_b = t_0 + \frac{(GD_M^2 + GD_L^2) \times N}{375} \times \frac{T_B}{T_B + T_R} \text{ (s)} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$t_0 = \sqrt{\frac{2W\delta}{gP}} + K \text{ (s)} \dots\dots\dots (4.2)$$

t : 全制動時間 (s) t_0 : 惰行時間 (s) t_b : 制動時間 (s)

GD_M^2 : モートル自体の GD^2 (kg-m²)

GD_L^2 : 負荷のモートル軸換算 GD^2 (kg-m²)

T_B : ブレーキ動トルク (kg-m) T_R : 負荷の反抗トルク (kg-m)

K : 電磁開閉器の動作遅れ N : モートル全負荷回転数 (rpm)

W : 可動鉄心重量 (kg) δ : 電磁石ギャップ (mm)

g : 重力の加速度 P : スプリング力 (kg)

表 4.1 NBブレーキ仕様一覧
Specification of NB Brake.

形 名	制動トルク kg-m	ライニング許容制動仕事量 kg-m/min	許容摩擦厚 mm	電磁石特性*		吸引ギャップ mm	慣行時間* s	ブレーキ重量 kg
				入力 W	電流 V			
NB-0.2	0.2	80	6	9.5	0.27	0.6	0.06	5
				7.5	0.2		0.06	
NB-0.4	0.4	80	6	10	0.4	0.6	0.05	5
				8.5	0.28		0.05	
NB-0.8	0.8	170	4	34	0.53	0.5	0.09	9
				17	0.2		0.09	
NB-1.5 A	1.5	340	6	34	0.53	0.5	0.12	10
				17	0.2		0.12	
NB-2.2	2.2	420	7	43	0.69	0.5	0.20	17
				25	0.42		0.19	
NB-4	4	550	7	82	1.11	0.5	0.20	18
				60	0.55		0.19	
NB-7.5	7.5	750	7	91	1.4	0.5	0.23	30
				71	0.8		0.21	
NB-15	15	1,050	8	160	2.8	0.5	0.38	40
				130	1.8		0.35	

* : (上段 200 V 50 Hz 下段 200 V 60 Hz)

電源 OFF よりブレーキ動作開始までの惰行時間 t_0 は、ブレーキ電磁石の接続方法によって変化する。その接続方法を図 4.1 に示したように、内部接続同時切りと外部接続別切りがあり、その代表的機種である NB 2.2 についての特性オシロを図 4.2 に示す。

オシロの特性でわかるように、外部接続別切り回路の惰行時間は、内部接続同時切り回路の惰行時間よりはるかに短くなっている。これは、電磁石のコイルインダクタンスと電動機回路のインダクタンスの間に、磁気エネルギーが授受されているためである。

4.3 制動トルク

定格ブレーキトルクは静摩擦トルクで表わし、ブレーキ形番は定格トルクで表わしている。標準品は、モートル定格トルクの 150 % 以上に設定してある。ブレーキトルクは、定格電圧の -15 % 電圧で支障なく動作するよう十分な余裕をもっている。

4.4 ひん度特性

起動ひん度特性は、ライニングの制動仕事量およびモータ特性によって決まってくる。ブレーキライニングの制動仕事量は、ライニング許容制動仕事量を越えないように選定すべきであり、NB ブレーキライニング許容制動仕事量は表 4.1 に示す。式 (4.3) で表わされるブレーキ制動仕事量が、許容仕事量を越えるとライニングは過熱、焼損の原因となる。

$$E = \frac{(GD_M^2 + GD_L^2) \times N^2}{7150} \times \frac{T_B}{T_B + T_R} \cdot n \text{ (kg-m/min)} \dots\dots (4.3)$$

ここに

E : 毎分あたりの制動仕事量 (kg-m/min)

n : 毎分あたりのひん度 (回/min)

4.5 摩擦特性

ライニングの摩擦は、ブレーキの制動仕事量に比例し次の式 (4.4) で表わされる。

$$\Delta t = \frac{V \times (GD_M^2 + GD_L^2) \times N^2 \times n}{A \times 7150} \text{ (mm)} \dots\dots (4.4)$$

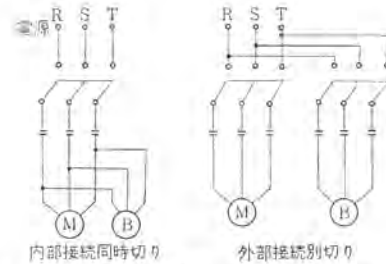


図 4.1 内部接続同時切りおよび外部接続別切り
Internal connection. External connection.

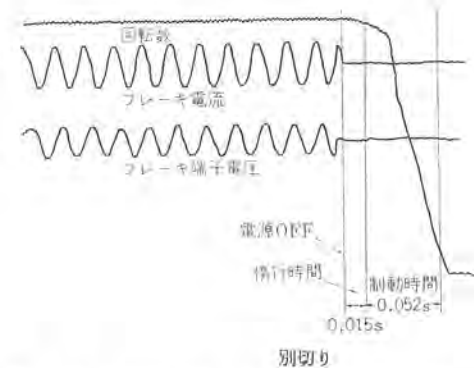
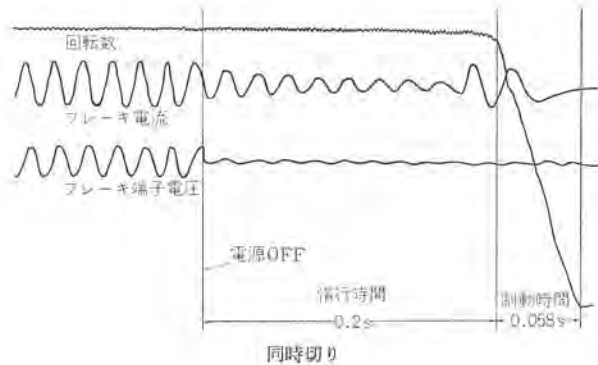


図 4.2 NB 2.2 200 V 50 Hz についての同時切り、別切りの特性オシロ
Internal Connection. External Connection.

Δt : ライニング全体の摩擦量 (mm)

V : ライニングの摩擦率 ($\text{mm}^3/\text{kg-m}$)

A : ライニングの全制動面積 (mm^2)

NB 形ブレーキは、多板式で制動面積が大きく非常に摩擦が少なく、長時間の使用に対しては摩擦調整およびライニングの交換が必要となる。

5. む す び

以上 NB 形電磁ブレーキは、モートルの概要について紹介したが、多くのすぐれた性能・特長を有しているので各種用途に利用できる。たとえば、旋盤軸の急停止、フライス盤、テーブル送りの位置決め、リニアアクチュエータの位置決めなどその応用範囲はきわめて広いものがあり、各種機械の合理化、生産性の向上に役立つものと思われる。なお、今回は NB 形ブレーキ付、モートルの主として NB 形電磁ブレーキの概略的な紹介にとどめたが、詳細なブレーキの選定・応用例などについては、別の機会に述べることにしたい。

リミストップクラッチモートル —ミシン針自動定位停止装置付クラッチモートル—

横山 昌弘*

LIMI-STOP Clutch Motors —Needle Positioner—

Nagoya Works Masahiro YOKOYAMA

It is very difficult to rationalize and automatize the sewing machine operation which may be said the final stage in textile industry. This kind of work is mostly carried out by industrialists of small capital, who can hardly make sufficient investment to modernize the equipment. However, recent labor shortage and rise of wages have come to call for the rationalization and automatization of the work more and more. To cope with it, Mitsubishi has developed LIMI-STOP clutch motors by the Company's unique technique, aiming at automatic positioning of sewing machine needles. They have a wordly epochal system of instant positioning by clutch operation of electronic control.

This article describes the principle, construction, features and application of the device.

1. ま え が き

当社リミストップクラッチモートルは特に自動化のむずかしい縫製業界で最も合理化を必要とされているミシン作業の効率化、すなわちミシン針棒を上下所定の位置に自動停止させミシンのか(稼)動率を上げさらには自動運転化による省力化へつながる製品として開発されたものである。

特に電子制御技術を応用した三菱独自の自動定位停止の制御方式は画期的なもので他社に先がけて自主技術による国産化に成功し縫製業界の多年の要請にこたえた。

ここでは三菱自動定位停止クラッチモートル、すなわち三菱リミストップクラッチモートルの製品紹介を行なった。

2. 原 理

図2.1は三菱リミストップクラッチモートルによるミシン針定位停止装置の概略構造を示すもので、ミシン針の速度と位置を検出する検出器と特殊なクラッチ操作機構を付けたクラッチモートルとこれらを作業者の操作にもとづいて電氣的に制御する制御盤から構成されている。

高速度で回転しているミシンを所定の定位位置に停止させるためには、クラッチモートルの機械的ブレーキにより、いったん数十分の一程度の低速度にまで急速に減速させ、その状態で低速駆動を行ないミシン針の位置を検出し、再びブレーキをかけ停止させるもので、このときのミシンの回転エネルギーは数百分の一程度であるため、十分精度の高い位置決めができる。図2.2はこの方法によるミシン針軸の停止特性の理論曲線である。

2.1 動作原理

(a) 高速度運転からの定位停止

図2.1において作業者が足踏みペダルを停止の状態に戻すと、クラッチ車は可動軸受に組込まれたブレーキパネによって右に移動し、ブレーキシューに接触、ミシンを急速に減速させる。

ここでミシン針棒の位置と速度を検出する検出器にて、ミシンの速度が下がり指速発電機の発生電圧が所定の150 rpm 相当の電圧に下がると制御盤内の制御回路において半導体制御素子 (TRIAC) が働き、クラッチ操作電磁石が励磁され、クラッチ車ははずみ車の回転面

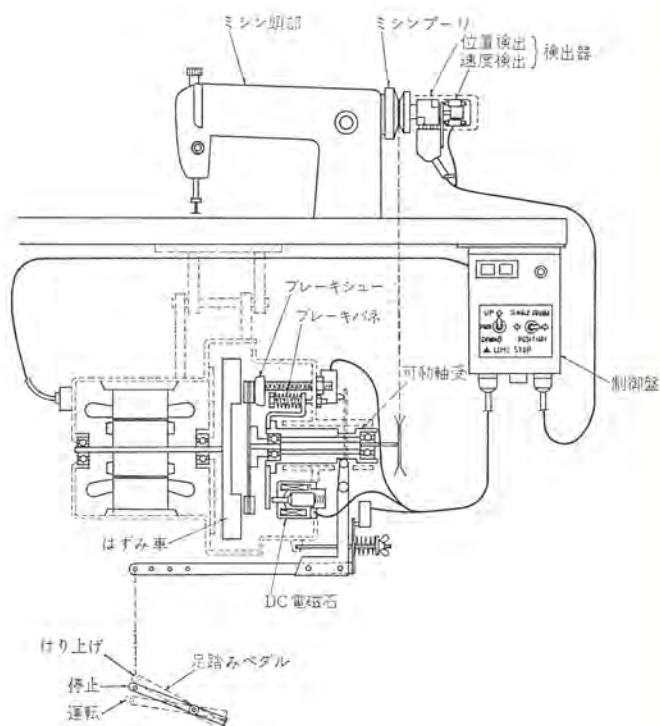


図 2.1 三菱リミストップクラッチモートルの概略構造
Outlined construction of Mitsubishi LIMI-STOP needle positioner.

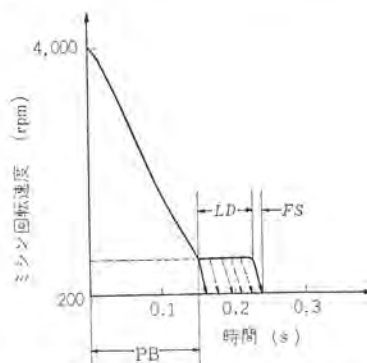


図 2.2 ミシン針の停止特性曲線
Positioning characteristic curve.

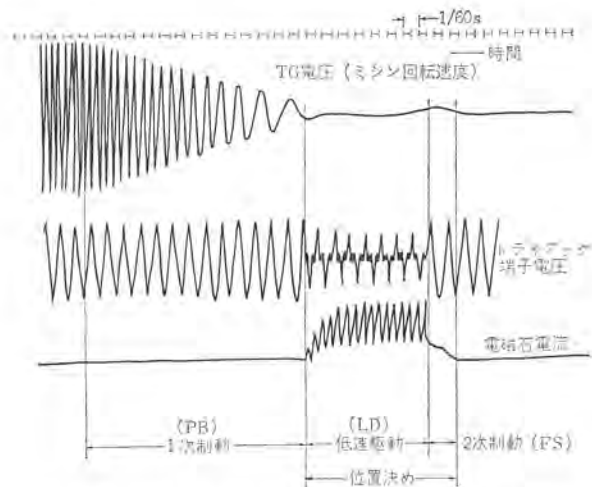


図 2.3 三菱 リミ ストップクラッチモートル による定位置停止のオシロ特性
Example of oscillograms of positioning by Mitsubishi LIM-STOP clutch motor.

に接触させる、したがってミシンは再び駆動されるが、上記指速発電機を含む速度制御回路によって図 2.2 に示すようにほぼ一定の低速回転を維持する。

このような低速回転によりミシン針が所定の定位置に近づくとき位置検出器の回路が開き、電磁石の制御が断たれるので、再びブレーキパネによってクラッチ車にブレーキがかかり、ミシン針はほぼ所定の位置に停止する。図 2.3 はリミ ストップクラッチモートルによる停止特性の実例を示すオシロ線図である。

一般に停止までの回転角度または停止位置のずれは、速度の自乗と負荷慣性の積に比例し、ブレーキトルクに反比例するが、実際に位置検出回路、電磁石などの電気制御部のわずかな遅れのばらつきおよびブレーキトルクの微妙な変化などの不安定性により停止位置がばらつく。この影響を少なくし十分な精度で停止するには位置検出時の速度を低くかつ安定化し、またブレーキトルクを大きくすることが必要である。

実際には位置決め速度は縫製能率から速いことが望まれるが、一般には糸切り装置との連動も考え 150~200 rpm 程度の回転が選ばれている。またブレーキトルクは作業者のペダル操作力に影響し、疲労度を少なくするという点から小さいほどよいが停止性をよくするためには少なくともベルトがスリップしない程度の大きさにするのが望ましく、通常ブレーキトルクの値は 0.3~0.5 kg-m 程度が適当である。

(b) 制御方式

図 2.4 は当社 リミ ストップの制御系のスケルトンダイアグラムを示し、図 2.5 はこの基本回路を示す。

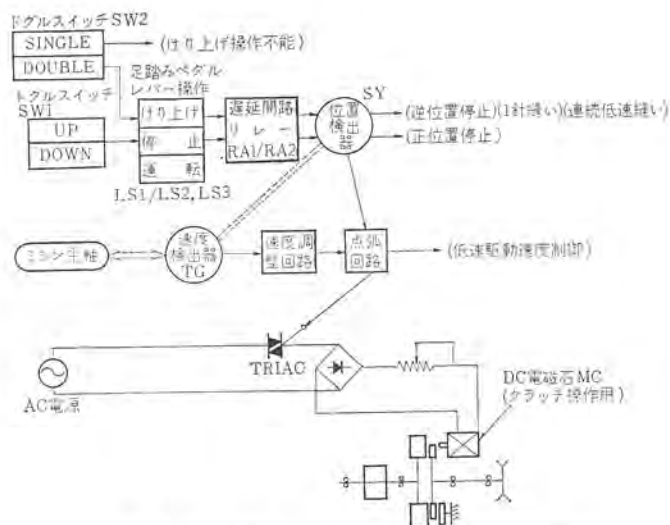


図 2.4 三菱 リミ ストップクラッチモートルの制御系
Block diagram of control system in Mitsubishi LIM-STOP clutch motor.

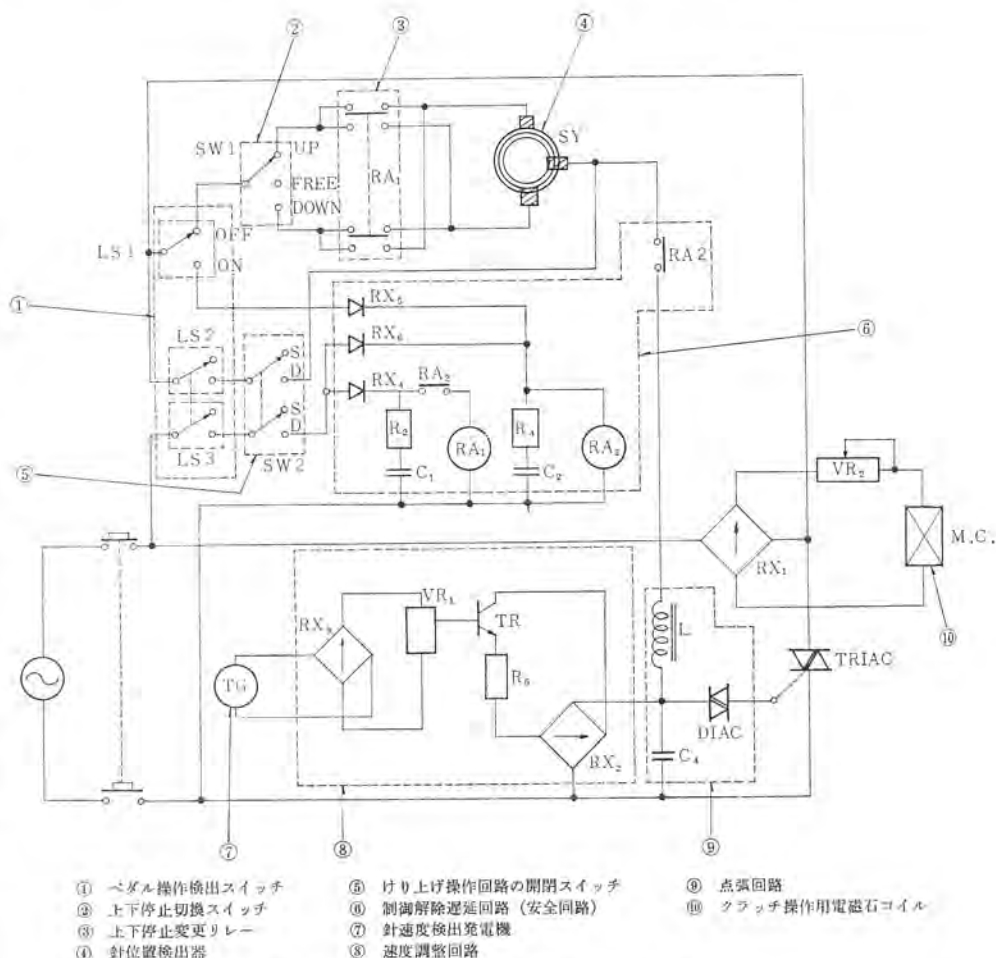


図 2.5 三菱 リミ ストップクラッチモートル 制御回路
Fundamental circuits of Mitsubishi LIM-STOP clutch motor.

この回路は大別すると針停止位置を自在に選定する UP-DOWN 切換え回路とミシン針を低速運転させるための速度制御回路から成っている。

とくに後者の速度制御回路は リミ ストップクラッチモートルの駆動メカニズムと合わせて画期的なもので、機械的な減速装置や補助駆動装置を用いず、クラッチを電氣的に操作制御するだけで所定の低速回転力を直接的に連続して取り出すことができ、さらに制御回路の簡単な

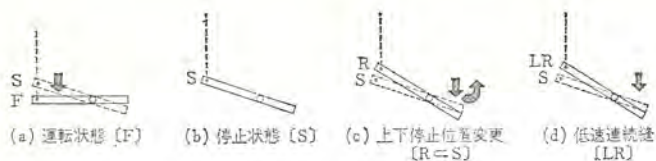


図 2.6 ペダル操作とミシン針の動き
Threading operation.

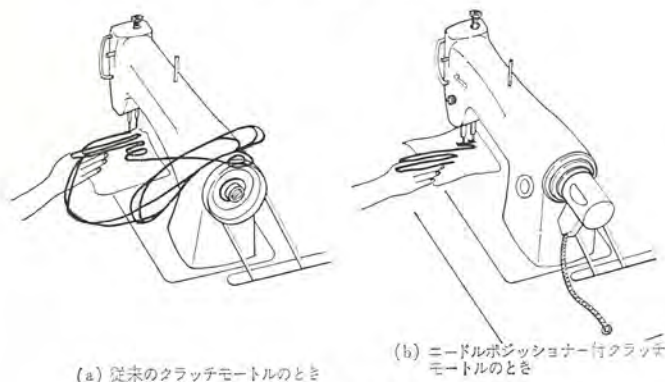


図 2.7 縫製作業における作業者の手の運動
Locus of hand movement.

調整で自由な低速回転が得られるなどすぐれた制御性をもっている。

当社制御系には上記二つの基本回路のほかに取扱い上の安全性を考えた制御解除回路および縫製作業の多様性を考えた上下瞬時変更回路やペダル（蹴）り上げ操作回路が含まれている。とくに前者はミシン針が所定の定位置に停止後速やかに上記制御回路を開くのでミシンプーリの手動調整操作が可能であるばかりでなく、モータの再起動時に不意にミシン針が定位置に戻るような危険がなく、常に正規のペダル操作を行わないと定位置停止の制御が働かないようになっている。このことは同時に起動トルクの小さい単相クラッチモータを常に無負荷状態で起動させることを保証している。後者はミシン針の停止位置を図 2.1 のようにペダル操作のみで上下変更や 1 針縫い、低速連続縫いなどを自在に行なわせるもので、複雑な縫製作業におけるミシン針の動きを手を使わずに足操作のみで行なうことができ作業能率の向上に大きく寄与するものである。

2.2 運転操作

図 2.6 は足踏ペダルの操作とミシン針の動きを示す。ミシン針停止位置の選定は制御盤の UP-DOWN スイッチで予め設定しておくことができる。しかし SINGLE-DOUBLE スイッチで DOUBLE を指定すると、図 2.6 に示した各種ペダルの操作ができミシン針の動きを自由に調整できる。通常のミシンの運転は一般のクラッチモータと同じ要領で図 2.6 (a) のようにペダルの先を踏む、なお足踏力を加減すれば従来の半クラッチ操作も可能である。ミシンの停止はペダルを元の静止位置 [S] に戻すだけで、前述の制御順序によりあらかじめ設定した定位置に停止する。縫製作業中および定位置に停止後の上下位置の瞬時変更は図 2.6 (c) のようにペダルの元の方を瞬時けり上げるだけで変更できる。またけり上げを続けるとこの間ミシン針は連続して低速運転される。しかしこれらのペダル操作を必要としないところではペダル操作を単純化するために SINGLE-DOUBLE 切換スイッチを SINGLE にしてけり上げ回路を開くことができる。

図 2.7 は縫製作業における作業者の手先の動きの軌跡を示したもので (a) の従来のクラッチモータによる作業に比べ、(b) のリモストップクラッチモータによるものでは針位置調整のための無駄な動きは完全になくなっており、作業能率の向上と疲労の軽減に大きな効

果がある。

3. 特 色

当社リモストップクラッチモータは電気的なクラッチ操作のみで直接位置決めを行なうため、余計な減速機構や補助モータがなく構造的に簡単ばかりでなく、世界的にもユニークな独創的製品であり、目下世界各国に特許出願中である。

3.1 特 長

(1) クラッチによる画期的な直接減速位置決め方式であるため、モータ部分の構造が非常に簡単で、世界一軽量、コンパクトである。また取付寸法、大きさともに従来の普通クラッチモータと同一である。

(2) ミシンの針速度を直接検出し、クラッチ操作を自動制御するフィードバック回路を持っているので、ミシンの運転速度を変更しても位置決め時の低速回転は常に所定の最適速度を維持できる。

またこのフィードバック回路を調整することによって上記の低速回転速度をも自在に変更でき縫製作業の内容に適した速度で位置決めができる。

(3) クラッチ操作用電磁石の電流制御および開閉は半導体制御素子 (TRIAC) により間接的に行なうため、高ひん度の使用に対して信頼性が高く、位置検出器回路の開閉時のアークも少なく、カーボンブラシの寿命も長くなる。

(4) ミシン針停止位置の変更は制御盤スイッチにおける手操作のほかに、ペダル操作による瞬時変更もできる。さらに低速駆動による 1 針縫い、連続縫いなどの実際の縫製作業の内容によって針の動きを自由に制御できる便利な制御回路になっている。

(5) この回路は作業者がペダルを操作したときに働き、ペダルを元の静止位置に戻すと、リレーに並列にはいつているコンデンサによってほぼ一秒間保持されるが、その後は制御回路が開き、無動作になるので、たとえばミシン針を手動で調整しても不意に動き出さないような安全回路にしてある。

3.2 標準仕様

図 3.1 は当社リモストップクラッチモータを工業用ミシンに取付けた状態を示す。

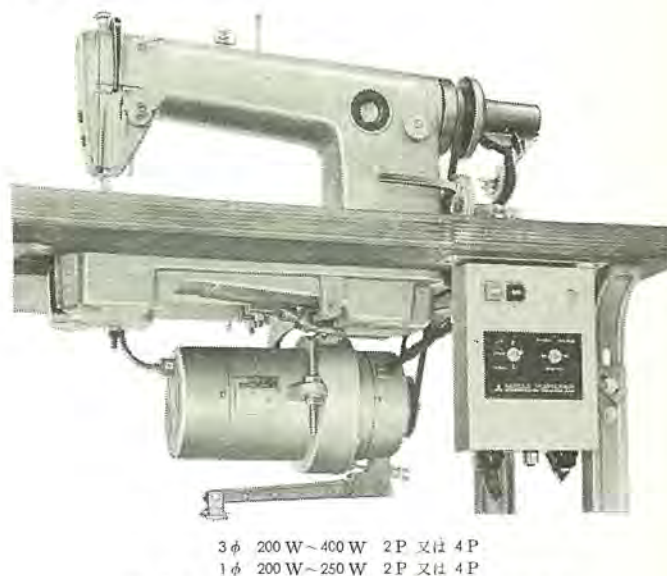


図 3.1 三菱リモストップクラッチモータの使用例
(工業用高速 1 本針本縫ミシンに使用)

Application of Mitsubishi LIM-STOP clutch motor for industrial high speed sewing machine.



図 3.2 制御盤
Control switch-board.



図 3.3 検出器
Needle positioning
synchronizer.



図 3.4 リミ ストップクラッチモートル
LIM-STOP clutch motor.

装置としてはリミストップクラッチモートル、制御盤、検出装置および付属品が一式となっている。(図 3. 2, 3. 3, 3. 4)

4. 用 途

労働集約的縫製産業にとって、この数年間の人件費の急騰と、労働人口の不足は、従来の低労働賃金に立脚した原価に対する考え方、あるいは品質に対する考え方を、大きく転換せざるを得ない状況にきており、とくに縫製作業の合理化、自動化に対する設備投資に業界の積極的な姿勢がみられるようになってきた。

当社 リミストップクラッチモートル は、ミシンのか動率を高め、しかも、未熟練作業者にも品質のそろった製品を熟練者並に生産できる点に多くの期待が寄せられ、すでに工業用高速度本縫ミシンをはじめとし、各種の特殊ミシンに数多く使用されており、縫製作業の合理化および自動化に一役を荷っている。また一部では外国製糸切り装置と組合わせてさらにか動率を上げており、将来国産糸切り装置付ミシンが普及すればさらにこの傾向が一般化するだろう。

また工業用ミシン以外にも各種軽機械の定位置停止に使用できることはもちろんで、とくに当社リミ・ストップクラッチモートルはレバー操作によらなくても、すでに組込まれている電磁石によってクラッチ操作ができるので構造的にさらにコンパクトになりすぐれた操作性をもっている。

5. む す び

業種の如何を問わず、製造部門の省力化、自動化が進められてきたが、中でも大きな繊維産業の最終工程ともいべき縫製加工におけるミシン作業工程は非常に多様かつ複雑で、さらに同じ機械でも使う作業者の能力如何によって製品の質と量に大きな差がでるほどで、最も自動化のむずかしい部門として、また中小、零細企業が多く、思い切った設備投資もむずかしいこともあって自動化に取り残されてきた。

したがって当社リミストップクラッチモートルは当面ミシン作業の自動化の基本となるミシン針自動定位置停止を目的とし、安価な装置で、ミシンのか動率の向上をねらったものもあるが、近い将来、安価で信頼性の高い各種の自動操作のできる装置も開発してゆきたい。

最後に、このリミストップクラッチモートルの国産化、実用化に多大の協力をいただいたユーザー、販売店、および中央研究所、所内関係者各位に謝意を表する。

最近登録された当社の実用新案

名 称	登 録 日	登 録 番 号	考 案 者	関 係 場 所
ロケット用資料回収装置	43- 4- 9	844776	大久保 一・渡 辺 太 郎	相模製作所
電熱布	43- 4- 9	844777	中 村 富 家・大 竹 操	群馬製作所
濾過装置	43- 4-27	846557	諏 訪 寧・柳下儀兵衛	大船製作所
電気冷蔵庫のドレン水加熱蒸発装置	43- 4-27	846559	木 下 忠 男	静岡製作所
換気扉	43- 4-27	846562	田 口 幹 雄	中津川製作所
冷蔵ショーケース	43- 4-27	846568	高 妻 光 昭・酒 井 孝 三 山 越 明 秀	日本建鉄共同
冷蔵庫	43- 4-27	846569	中 島 智 信	静岡製作所
温水器	43- 4-27	846570	奥 田 文 一・鶴 谷 嘉 正	群馬製作所
蛍光灯器具	43- 4-27	846571	井 上 員 成	大船製作所
電気歯ブラシ	43- 4-27	846572	小 川 昇・熊 田 泰 治	群馬製作所
電気ストーブの発熱体保持装置	43- 4-27	846575	馬 淵 公 作・慶 野 長 治	群馬製作所
変流器	43- 5- 6	846717	長 野 光 佑	伊丹製作所
半導体整流装置	43- 5-11	846843	加 藤 又 彦	伊丹製作所
直流電源装置	43- 5-11	846849	万 谷 広・有 働 星 一	神戸製作所
電源開閉装置	43- 5-11	846943	成 木 利 正・寺 田 武 田 中 武 夫	郡山製作所
時間関数発生装置	43- 5-11	846972	桑 田 博	鎌倉製作所
コード押えを兼ねるコード結束バンド	43- 5-11	846989	田村弘治郎	郡山製作所
冷水器利用の冷却函	43- 5-14	847114	大 畑 晃 一	和歌山製作所
冷水器	43- 5-14	847115	三 津 沢 武 夫	和歌山製作所
冷温水機	43- 5-14	847116	三 津 沢 武 夫	和歌山製作所
水冷却器	43- 5-14	847117	西 本 嘉 尹	和歌山製作所
換気扇のシャッター緩衝装置	43- 5-21	847597	田 口 幹 雄	中津川製作所
締結具	43- 5-21	847598	永 野 幸 信	静岡製作所
消弧室	43- 5-27	847948	木 村 雅 夫	名古屋製作所
エレベータの調速機試験装置	43- 5-27	847951	日並由季雄	菱電サービス
機関始動用電動機のピニオン移行装置	43- 5-27	847952	釘 本 範 雄	姫路製作所
開閉器	43- 5-27	847953	中 島 治 男	名古屋製作所
内燃機関始動用電動機	43- 5-27	847954	釘 本 範 雄	姫路製作所
電気器具の自動回路切換装置	43- 5-27	847955	奥 田 文 一・東 邦 弘	群馬製作所
ワイアレコーダ	43- 5-27	847957	伊 藤 晃 徳	商品研究所
浮子開閉器	43- 5-27	847960	小 島 敏 男・奥 田 安 男	名古屋製作所
内燃機関点火装置	43- 5-27	847961	日 野 利 之	姫路製作所
配線保持具	43- 5-27	847962	山 崎 肇・井 上 員 成	大船製作所
洗濯機の洗剤入れ箱	43- 5-27	847963	酒 井 忠 義	中津川製作所
箱形制御装置	43- 5-27	847964	福 田 耕 作	長崎製作所
制御棒駆動装置	43- 5-27	847965	岸 田 公 治・阿 部 康 宏 前 田 登 美 男	伊丹製作所
冷凍ショーケース	43- 5-27	847966	山 越 明 秀・立 原 文 雄	日本建鉄共同
時限装置	43- 5-27	847968	大 賀 隆 文	伊丹製作所
高圧配線用自動電圧調整装置	43- 5-27	847969	桐 生 悠 一	名古屋製作所
電気カミソリの付属品収納装置	43- 5-27	847970	福 田 興 司・川 合 輝 一	群馬製作所
電気かみそり	43- 5-27	847971	武 井 久 夫・小 川 昇	群馬製作所
電気かみそり	43- 5-27	847972	武 井 久 夫・小 川 昇	群馬製作所
電気かみそり	43- 5-27	847973	武 井 久 夫・福 田 興 司	群馬製作所
電気かみそり用剃毛掃除具	43- 5-27	847974	日 比 野 好 伸・福 田 興 司	群馬製作所
可動接触子	43- 5-27	847975	立 石 俊 夫	神戸製作所
電解積分器	43- 5-27	847976	泰 卓 也・松 岡 宏 昌	中央研究所
電気カミソリ	43- 5-28	848221	小 川 昇・福 田 興 司	群馬製作所
放電灯用安定器鉄心	43- 5-28	848222	萩 原 大 義	大船製作所
ワイアレコーダ	43- 5-28	848223	伊 藤 晃 徳	商品研究所
パルス発生装置	43- 5-28	848227	平 林 庄 司・山 口 南 海 夫	中央研究所
順次負荷切換装置	43- 5-28	848228	倉 橋 浩 一 郎	中央研究所
自動車ラジオの操作軸取付装置	43- 5-28	848229	岡 本 春 樹	京都製作所
電磁誘導機器	43- 5-28	848230	神 谷 友 清・丸 谷 領 一	伊丹製作所

交流電動機の速度制御方式

山下 隆三郎*・栗田 静夫*

Speed Control of AC Motors

Nagasaki Works

Ryuzaburo YAMASHITA • Shizuo KURITA

AC motors were mostly used as constant speed machines in the past. Remarkable is the progress of the latest technique of speed control. In particular, thyristors that came into the world about a decade ago and their applications to the field of speed control are really outstanding.

A number of effective speed control systems have been developed, and as a result an old idea of constant speed motors has been swept away with the induction machines. Because of their distinctive feature of sturdiness and easy maintenance, induction motors are coming into the sphere of DC motors in future.

Herein are introduced various speed control systems of AC motors.

1. ま え が き

交流電動機としては、誘導電動機および同期電動機が広く用いられており、機械的構造が堅固で保守も容易であることは従来から知られている。このうち速度制御を行なう交流電動機としては、誘導電動機が主としてその対象に考えられてきたが、昔は制御方式が発達していなかったために交流電動機は一定速度に適しており、可変速度の制御には向かないかのように考えられていた。しかしながら最近の半導体技術の発達に伴い、その制御方式も急速に発達し、もはや直流電動機と変わらぬ制御性能を有するに至った。

このように、最近の交流電動機は速度制御方式の動向としては、サイリスタを中心とする半導体制御技術を十分に駆使した方式の発達であるが、用途によっては、従来から用いられてきた制御方式も将来とも使用されると考えられるので、本文では、下記の分類により交流電動機の各種制御方式の説明を行ないたいと思う。

表 1.1 交流電動機の速度制御方式
Speed control of AC motors.



2. 速度制御方式

2.1 二次抵抗制御

2.1.1 金属抵抗制御

図 2.1 に示すような金属抵抗による二次抵抗制御は、誘導電動機の制御方式としては最も簡単なものであり、コンタクトを MC1, MC2……MC4 の順に閉じていくに従って、電動機のトルク曲線

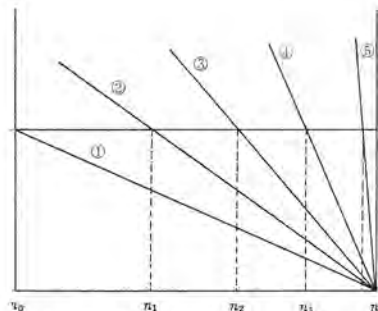
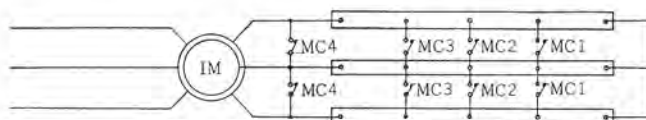


图 2.1 金属抵抗器制御
Speed control with metallic resistors.



圖 2.2 風冷式金屬抵抗器
Air cooled metallic resistors.

は①→②→③→④→⑤と変化し、速度も $n_0 \rightarrow n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_3 \rightarrow n_4$ と変化する。本方式による制御では速度が段階的に変わり、また負荷の大きさが変われば速度も変動し、低速における速度変動率がとくに大きい。速度変動率は次式で表わすことができる。

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta T}{T}$$

S : スペリ
T : トルク

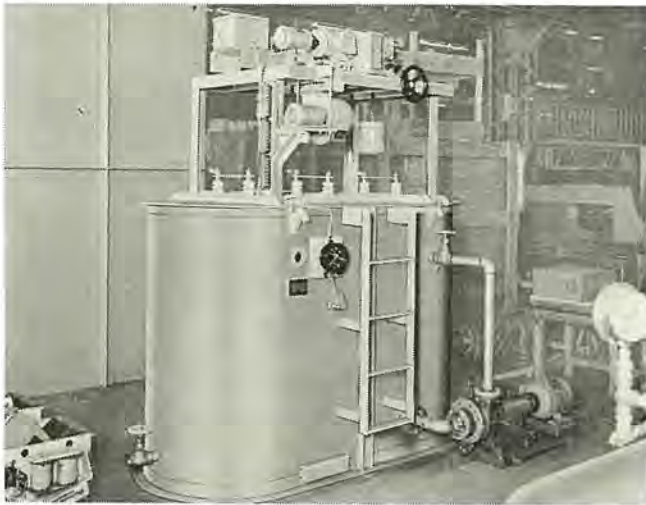


図 2.3 液体抵抗器
Liquid rheostat.

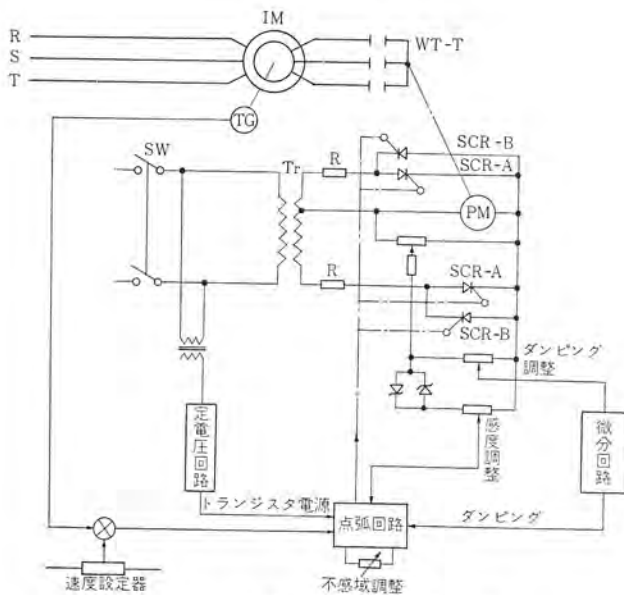


図 2.4 液体抵抗器制御回路
Control circuit of liquid rheostat.

本方式の問題点は金属抵抗中に発生する熱の処理法であるが、当社では図 2.2 に示すように、冷却ファンによって抵抗器を冷やすことによって外形を小さくしている。

本方式は、一次、二次のリアクトル、サイリスタ制御と組合せて使用されることが多い。

2.1.2 液体抵抗器制御

金属抵抗器による制御が段階的であったのに比べ、液体抵抗器による制御は、速度を連続的に変えることができる。図 2.3 に液体抵抗器の外形を、また図 2.4 に制御回路を示す。

液体抵抗器による制御を行なう場合に注意すべきことは、最高速度と速度制御範囲の選定である。金属抵抗器による制御の場合は電動機の二次側を短絡することによって、電動機の回転数を二次短絡速度にまであげることができるが、液体抵抗器の場合は、可動電極と固定電極間の距離をゼロとすることができないために、両電極間の距離を最小にしたときにもある程度の残留抵抗が残る。このため液体抵抗器のみによる二次抵抗制御の場合には、最高速度は電動機単独の二次短絡速度よりは数%下まわることになる。

次に速度制御範囲の選定にあたって注意すべきことは、図 2.5

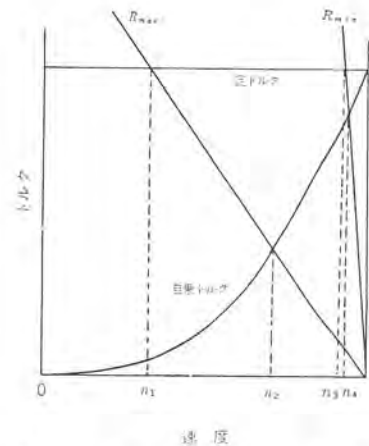


図 2.5 液体抵抗器による制御
Speed control liquid rheostat.

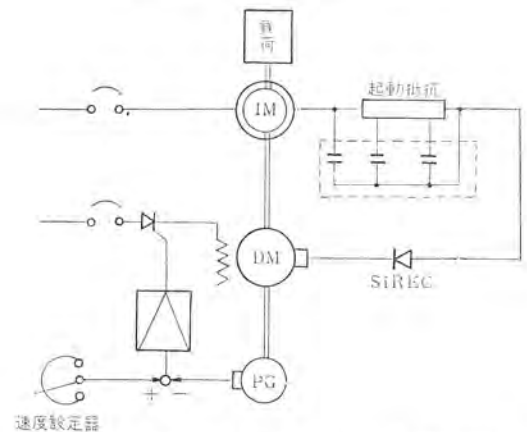


図 2.6 直結レクチフロードライブ原理図
Basic diagram of rectiflow drive.

に示すように、液体抵抗器の最大、最小抵抗値の比である。可動電極が上限にあるときに抵抗値は最大となり、下限にあるときに最小となる。したがって最大抵抗値と最小抵抗値の比は可動電極のストロークで決まる。図 2.5 で、キルンや押出機のように定トルク負荷の場合は、 $n_1 \sim n_3$ 間の速度制御が可能であり、ポンプやファンのような 2 乗トルク負荷の場合には、 $n_2 \sim n_4$ 間の速度制御が可能である。制御装置としては操作用直流電動機をサイリスタによって制御しているため非常にすぐれた制御性を持っている。

2.2 二次励磁方式

前節の二次抵抗速度制御方式における二次抵抗電圧降下に相当する電圧を二次回路に印加し、その大きさと極性を変えれば、誘導電動機を同期速度の上下にわたって制御することができる。この方式を二次励磁方式といい、二次回路に接続された回転機あるいは静止形変換装置により、すべり損失を有効に回収しつつ高効率で連続的な制御ができることを特長とする。

この方式ですべり電力を機械的に回収するものをクレマ方式（直結レクチフロードライブ）といい、電気的に回収するものをセルブス方式（変形レクチフロードライブ および静止セルブス方式）といっている。これらはいずれも同期速度以下での制御であり、同期速度の上下で制御できる超同期セルブスも最近開発されている。

2.2.1 直結レクチフロードライブ

直結レクチフロードライブは図 2.6 に示すように巻線形誘導電動機とこれと同一軸に結合された直流電動機、誘導電動機の二次電力を整流して直流電動機の電機子に直流電力を供給するシリコン整流器お

よび直流電動機の界磁制御回路により構成され、直流電動機の界磁電流を変化させることにより、速度制御を行なう。誘導電動機の入力、出力、すべりをそれぞれ P_i 、 P_o 、 S とすれば

$$P_o = P_i(1-S)$$

SP_i は二次抵抗制御では熱損失として失われるが、レクチフロードライブではこの SP_i を整流して直流電動機に与え、機械的出力として回収することができる、それ故速度制御範囲全域にわたって効率が良い。

SP_i と直流電動機の効率 η_D の積が実際の回収電力となる。したがってレクチフロードライブの出力は

$$P_o = P_i(1-S) + \eta_D SP_i$$

となり、定出力特性を有している。

誘導電動機の二次誘起電圧は、すべりに比例して直線的に増加する。二次誘起電圧を整流して直流電動機の電機子に印加すると、両者の電圧差により誘導電動機の二次回路および直流電動機電機子回路に電流が流れ、両者は負荷トルクを分担して運転する。速度の調整は直流電動機逆起電力を変えること、すなわち界磁電流の調整により行なう。界磁電流を減ずれば速度が上昇し、増加すれば減速する。

シリコン整流器および直流電動機の容量は速度制御範囲によって定まる。最低速度における二次誘起電圧を SE_2 、定格電流を I_2 とすれば、シリコン整流器および直流電動機の定格は次式により概算できる。

$$\text{電 圧 } E_d = 1.35 \times SE_2$$

$$\text{電 流 } I_d = 1.22 \times I_2 \times 1.1$$

ただし、1.1 は高調波分の影響を考慮した係数。

大容量、広範囲な制御を行なう場合はシリコン整流器および直流電動機の定格を下げるために、電動機二次に単巻変圧器を介し低速域で単巻変圧器を使用し、高速域で切り離すようにする方式とすることもできる。この方式は直結レクチフロードライブにおいては定トルク負荷に有効な場合がある。

おもな特長をあげれば

- (1) 広い速度制御範囲にわたって連続的に高能率の運転ができる。
- (2) 分巻特性をもち、自動速度制御装置なしでも安定した運転を行なうことができる。
- (3) 起動トルクは直流電動機と誘導電動機の両者から与えられるので、少ない起動電流で大きな起動トルクが得られる。

2.2.2 変形レクチフロードライブ

この方式では直結形の直流電動機を誘導電動機から機械的には分離し、シリコン整流器を介して電氣的にのみ接続する。二次誘起電圧と直流電動機電機子逆起動力の関係は直結の場合と同様となるが、直流電動機に誘導発電機を直結し、すべり電力は誘導発電機により電力として電源へ返還される。直流電動機は誘導電動機の回転数とは無関係に、誘導発電機の極数で定まる一定回転数で運転する。速度制御は直結の場合と同様、直流電動機の界磁電流を制御することにより行なう。

機械的出力は $P_i(1-S)$ となり、本質的には定トルク特性を持っている。誘導発電機があるため、直結形よりやや効率は低下する。特長は直結形の(1)、(2)に加えて

- (1) 直流電動機が機械的に直結されないため、据付の自由度が高い。
- (2) 直流電動機は負荷回転数には無関係の任意の回転数に選べるので2極機のような高速電動機にも使用できる。

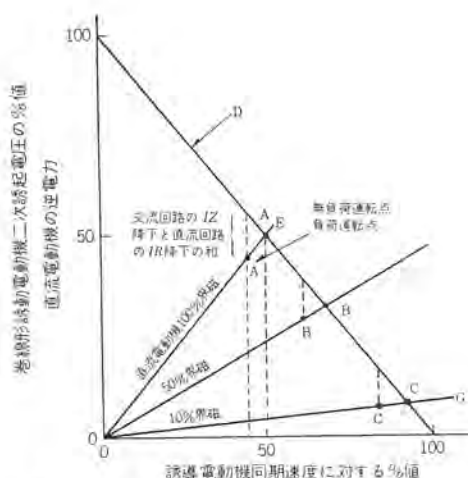


図 2.7 レクチフロードライブ電圧-速度特性
Voltage-speed characteristic of rectiflow drive.

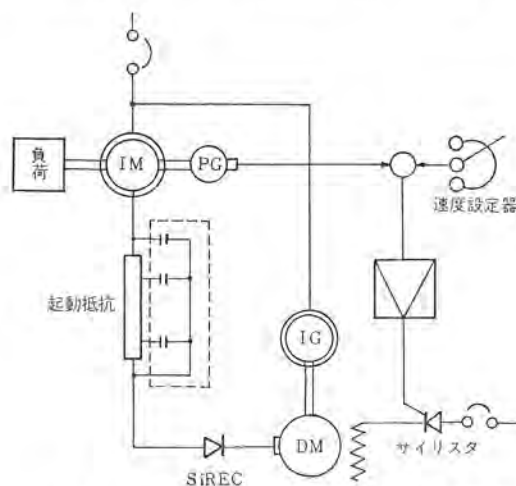


図 2.8 変形レクチフロードライブ原理図
Basic diagram of modified rectiflow drive.

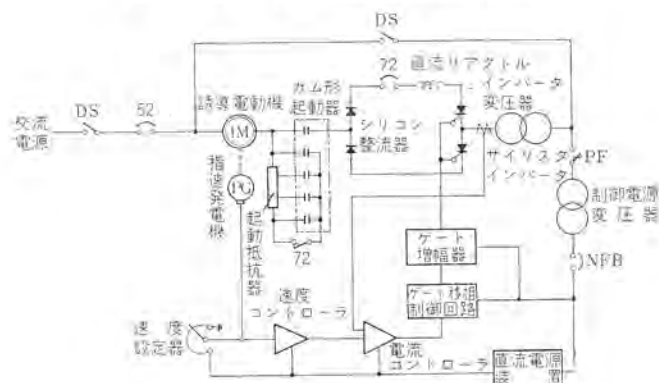


図 2.9 静止セルビウス装置
Circuit diagram of static Scherbius.

2.2.3 静止セルビウス

静止セルビウス装置は図 2.9 に示すように、負荷を駆動する巻線形誘導電動機と誘導電動機のすべりに比例した二次出力を直流に変換するためのシリコン整流器、平滑用直流リアクトル、直流に変換された二次出力をふたたび電源周波数の交流出力として回収し、電源へ返還するためのサイリスタ他励インバータ、および返還トランスにより構成される。誘導電動機の二次電圧はすべりに比例して変化する。(図 2.10 E_2d)

サイリスタインバータの直流側の平均電圧 E_d は、速度には無関係にサ

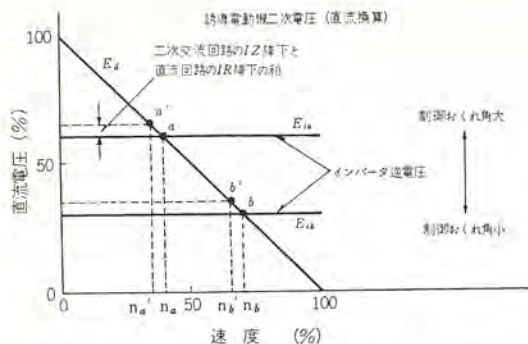


図 2.10 静止セルビウス装置の速度-電圧関係
Voltage-speed characteristic of static Scherbius.

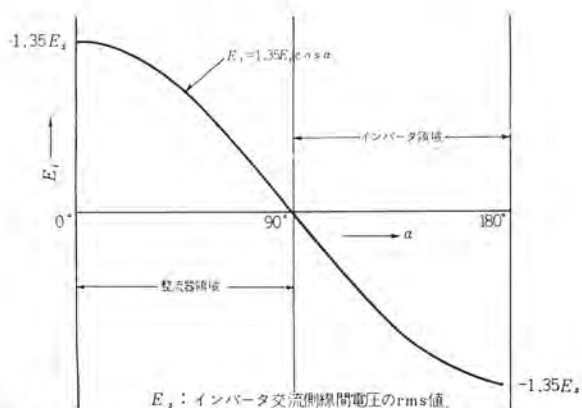


図 2.11 サイリスタインバータ 直流電圧 (E_i) と制御おくれ角 (α) の関係曲線
DC voltage-firing angl (α) curve of the thyristor inverter.

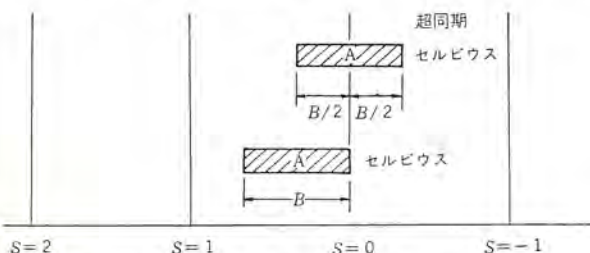


図 2.12 運転範囲とインバータ容量
Speed control range and inverter capacity.

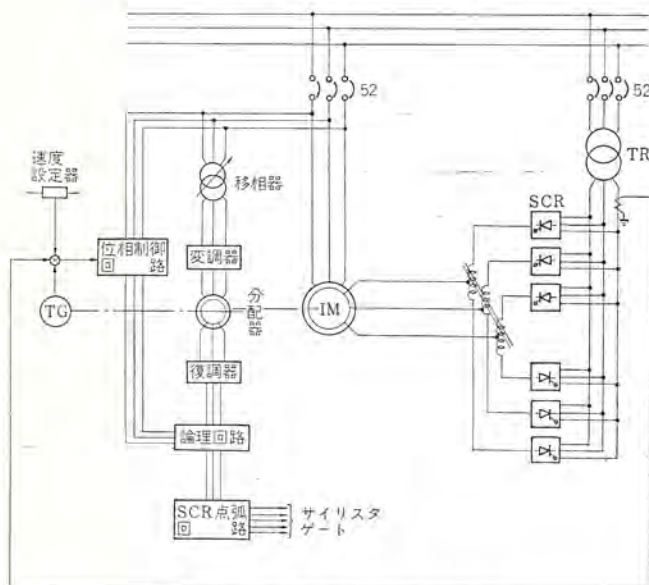


図 2.13 超同期セルビウス方式
Super synchronous static Scherbius.

シリスタの点弧角によってのみ変わり、制御おくれ角 α に対して、図 2.11 のように変化し、 $\alpha=90^\circ \sim 180^\circ$ ではシリコン整流器の出力電圧 E_d に対向する逆電圧を発生する(インバータ動作領域)。 α が大きくなるほど逆電圧は高くなる。

インバータ逆電圧が E_{1a} の場合、速度 na 以上では $E_d < E_{1a}$ となり、差電圧により電流が流れトルクを発生する。速度が低下すれば差電圧が大となり電流が増加する。速度 na からたとえば速度 na' まで減速して、負荷トルクに見合うトルクを発生する電流値となり安定する。すなわちインバータの点弧角を制御することにより、二次励磁により速度制御を行ない、同時に二次すべり電力を電源へ返還する。レクチフロードライブと同様に分巻特性を有し、自動速度制御を行なわなくとも速度変動率は 5~6% に収まる。

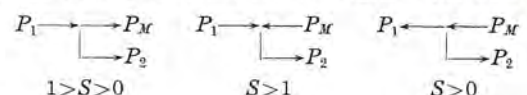
自動制御を行なえば非常に高い速度精度を得ることができる。速度制御回路は、指速発電機からの実速度信号と設定器からの基準信号を比較し、その偏差を増幅し、サイリスタインバータの点弧位相を制御し、電動機速度を制御する速度制御系をメインループとする。これに電動機二次電流を制御する電流制御回路をマイナーループとして付属する。速度制御回路の出力信号が電流回路の電流基準値を与えるように構成し、リミッタを設け速度制御回路の出力電圧を制限し、設定または負荷が急変しても過大な電流基準値を与えないようにして過電流を防止する。電流制御回路は主回路電流に比例した電圧信号と速度制御回路からの電流基準値を比較し、偏差を増幅しその出力をゲート位相制御回路に与える。

制御系は回転系の慣性以外はほとんど時間おくれのない系から構成されるので、速応性に富んだ制御ができる。特長はレクチフロードライブの(1)、(2)の他に

- (1) 制御装置がすべて静止器であるため据付保守が容易である。
- (2) 誘導電動機二次短絡速度をわずかに下まわる程度的高速まで運転制御ができる。

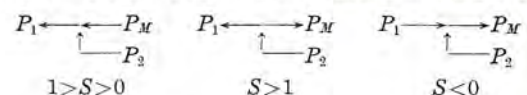
2.2.4 超同期セルビウス

従来のセルビウス装置では、一次入力 P_1 、機械的出力 P_M 、二次出力 P_2 の流れとしては、下記の 3 とおりの運転が可能であった。



つまり電動運転は $1 > S > 0$ の間で可能であり、制動運転は $2 > S > 1$ または $S < 0$ にて可能であった。

ここで述べる超同期セルビウスは、電動機の二次側において電源との間で電力の授受を行なうことによって、同期速度以上の運転を可能とするのみならず、下記の 3 とおりの運転をも可能とする。



すなわち、超同期セルビウスにおいては $1 > S > 0$ においても再生運転が可能となり、全運転領域において電動トルクのみならず制動トルクを発生させることができる。したがって、本制御方式は非常にすぐれた速応性を有する。

さらに本方式の特長とするところは、同一の速度制御範囲を得るためのインバータ、コンバータの容量が、従来の静止セルビウスに比べて $1/2$ となることである。これは図 2.12 において、A なる範囲の速度制御を行なうためのインバータの容量が、従来の静止セルビウスでは $1 > S > 0$ の範囲で B であったのに比べ、超同期セルビウスにおいては、

$S=0$ (同期速度) を中心として上下 $B/2$ の容量ですむからである。このことはインバータ、コンバータの容量を $1/2$ とするのみならず、帰還変圧器、系統の無効電力を $1/2$ にすることを意味し、その意義は大きい。

図 2.13 にサイクロコンバータを用いた制御回路を示す。 $S<0$ にて運転するために、電動機の二次側の電圧位相を検出するために特殊な分配器を必要とする。当社は、分配器の一次側に 10 kHz によって商用電源電圧波形を変調した電圧を加え、二次側で再度復調するような分配器を用いることによって、 $S=0$ の点でも安定に運転できるようにしている。(特許出願中)

2.3 一次、二次電圧位相制御

2.3.1 一次電圧制御

誘導電動機の発生トルクは磁束と二次電流の積で表わされる。供給電圧を変化させると磁束と電流はともに変化し、したがってトルクは供給電圧の 2 乗に比例する。一次電圧制御はこの性質を利用したものであり、可飽和リアクトル制御方式とサイリスタ制御方式とがある。

当社は巻上機、クレーン、ロープウェイなどでリアクトル制御の多くの実績を持っているが、最近になってサイリスタ素子の大容量化高耐圧化が進み、かつサイリスタが高信頼性で小形であるため、リアクトルに代わってサイリスタ制御が実用化されている。サイリスタ制御はリアクトル制御に比較して制御性、電圧降下、装置重量等の点ですぐれている。サイリスタ制御の主回路結線は図 2.13 に示すとおり一相、二相および三相制御があり、いずれも素子は逆並列接続されている。さらに図 2.15 (e) (f) のように接続することもできる。

一相制御は単相トルクから三相トルクまで制御するもので、二相、三相制御はトルクゼロから三相トルクまでを制御できる。一相制御は制御範囲がせまいため、また三相制御はサイリスタの点弧制御が複雑となるため通常は 2 相制御が行なわれる。速度制御は速度基準電圧とパイロット発電機の出力信号との偏差を増幅し、各相のサイリスタ点弧回路により点弧位相を制御する。制御系は一次遅れ系となり、本質的に安定性にすぐれている。したがって制御系のループゲインを高く取ることができるため、負荷変動による速度変動率を十分小さくすることができ、速応性に富んだ制御が可能である。

誘導電動機は速度により力率が変わるので、点弧回路に特殊な配慮を必要とする。すなわちサイリスタの電流が力率に相当する分だけ遅れて流れるので、これと逆並列に接続された素子に点弧信号を与えても、信号の幅がせまければ先に流れていた電流のため点弧することができない。このため点弧パルス幅を十分ひろくするか、あるいは逆並列に接続された相手の素子の電流がゼロとなったことを検出し、さらに点弧すべき素子に順電圧がかかった場合のみ点弧パルスを与えるようにすればよい。後者のやり方ではパルス幅はせまいものでよいが、検出回路が比較的複雑となるきらいがある。

図 2.16 は可逆制御回路例である。正転から逆転に移る場合に正方向サイリスタと逆方向サイリスタが同時に点弧し、相間短路を生じないように逆方向サイリスタ信号を一定時間遅らせるか、電流が完全にゼロになったことを検出して逆転信号を与えるかしなければならない。すべりに比例した損失が発生するので低速域では効率が高い。

2.3.2 二次位相制御

誘導電動機の二次回路に可飽和リアクトルまたはサイリスタをそう入し、二次出力電圧を位相制御して速度制御を行なう方式である。二次側を位相制御すれば二次力率が変化し、したがって発生トルクが変化し速度を調整することができる。図 2.17 は主回路結線の一例

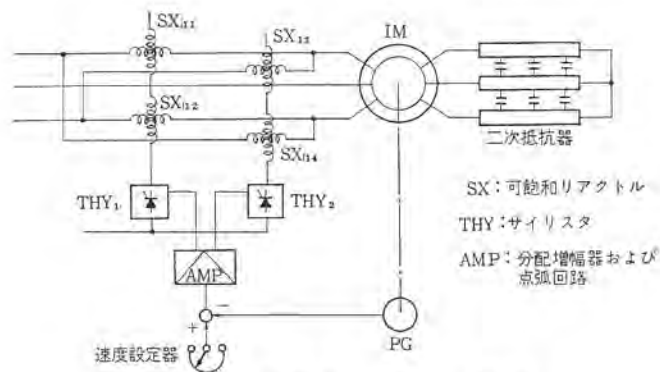


図 2.14 可飽和リアクトル制御
Circuit diagram of reactor control.

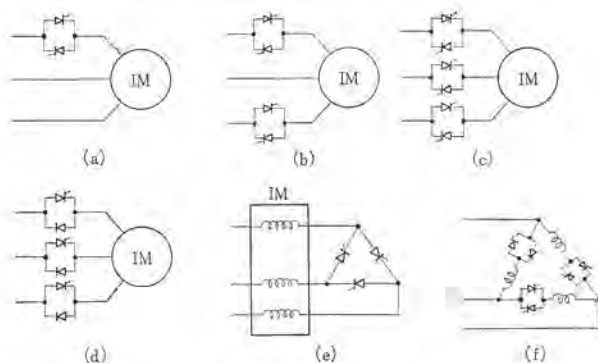


図 2.15 サイリスタ主回路結線
Connection of primary circuit.

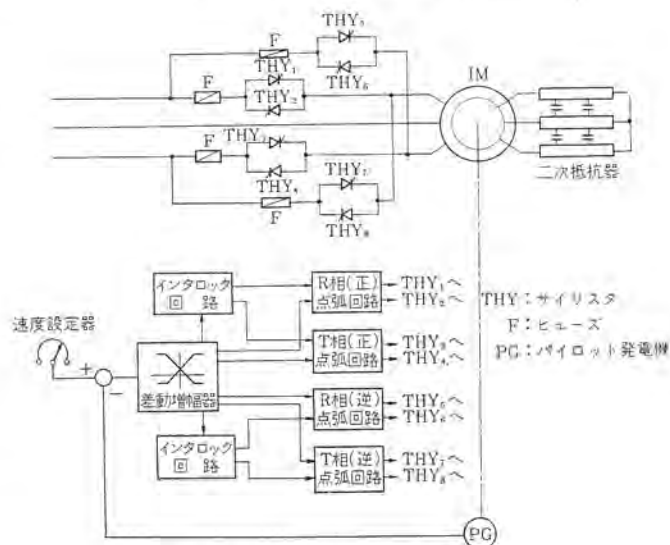


図 2.16 サイリスタ一次制御
Circuit diagram of thyristor primary control.

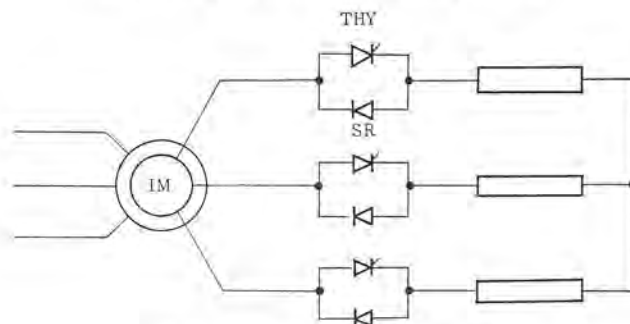


図 2.17 二次位相制御
Connection of secondary circuit.

であって、速度制御方式は一次制御の方法と同様に行なえばよい。
この方式は一次側が高圧のときに有効な場合がある。

2.4 過電流継手制御 (AS モータ)

定速度で運転するかご形誘導電動機とうず(渦)電流継手とを組合せ、うず電流継手に与える直流励磁電流を制御することによって、負荷の回転数を制御することができる。すなわち、うず電流継手は、直流励磁された磁極により生じる磁束と磁極・ドラム間の相対速度により誘起されたうず電流とが電磁作用により吸引力を発生し、この吸引力によって機械的には完全に独立した2個の回転軸の間に電磁的にトルクを伝達する。伝達トルクは図2.18に示すように、直流励磁電流によって変化し、伝達トルクと負荷トルクが平衡した点で電動機は運転される。うず電流継手の伝達するトルクは次式で表わされる。

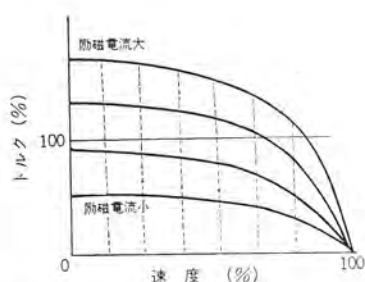


図 2.18 速度—トルク 特性
Speed-torque characteristics.



図 2.19 AS モータ
AS motor.



図 2.20 AS モータ制御装置
AS motor control equipment.

$$P_2 = T_{\omega D} \left(1 - \frac{\omega P}{\omega D} \right) = P_1 S$$

$$P_u = P_1 - P_2 = P_1 (1 - S)$$

ここで P_1 : うず電流継手入力 (W)

P_u : うず電流継手出力 (W)

P_2 : うず電流損失

S : すべり

上式からわかるように、うず電流継手のドラム中には、速度(すべり)に関係したうず電流損失 $P_1 S$ が生じる。速度対うず電流損失の関係は図3.2のようになり、負荷の種類によってその様子が異なる。押出機、キルンなどの定トルク負荷の場合には、うず電流損失はすべり S に比例するため低速度になるほどその値は大きくなり、またファン、ポンプなどの自乗トルク負荷の場合にはうず電流損失は、 $S(1-S)^2$ に比例する。このようにしてうず電流継手のドラム中に発生する損失は熱となって放散させる必要があり、これをいかに行なうかによってうず電流継手の製作限界が決まる。

当社ではうず電流継手を AS カップリングと呼び、これとかご形誘導電動機とを1体化したものを AS モータと呼んでいる。図2.19、2.20に AS モータおよび制御装置を示す。図2.21は当社の基本的 AS モータ制御回路を示す。図中のサイリスタ (SCR) によって、AS カップリングの磁極に与える直流電流を制御し速度を制御する。図2.21の基本的制御回路に図2.22、2.23、2.24、2.25に示すように、制御装置を追加することによって種々の応用制御を行なうことができる。

うず電流継手による速度制御は比較的安価に広範囲の速度制御が行なうことができるため、うず電流損失を問題としない小容量機分野では広く用いられている。精度を要求される速度制御や、うず

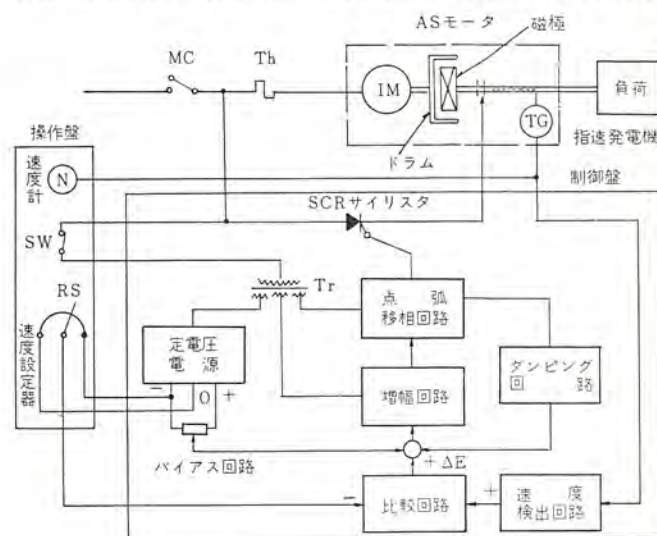


図 2.21 AS モータ制御回路
AS motor control circuit.

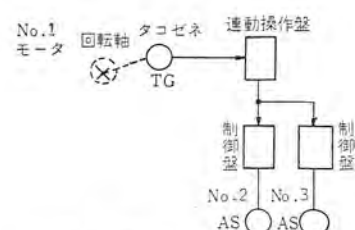


図 2.22 連動運転
Parallel running.

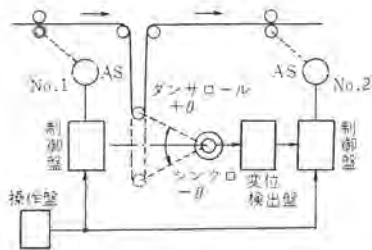


図 2.23 揃速制御
Synchronized drive.

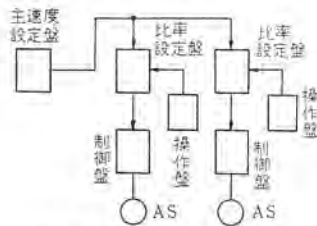


図 2.24 比率制御
Pre-set ratio drive.

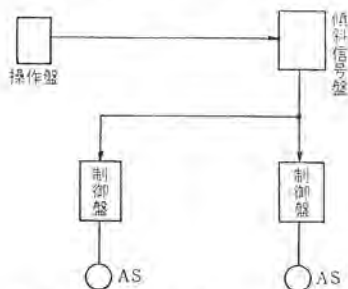


図 2.25 揃速発停クッションスタート
Synchronized start and stop cushion start.

電流損失によって生じる運転費損失が問題となる中・大容量機については、他の制御方式を検討する必要がある。

2.5 周波数制御

誘導電動機は速度制御のうち二次抵抗制御、うず電流継手制御、二次励磁方式、一次電圧制御、二次位相制御などは、いずれも電動機の固定子周波数と負荷駆動軸周波数の相対速度を制御するために、速度制御範囲を広くすればするほど、二次すべり損失も大きくなる。

これに比べて、誘導電動機の一次周波数を制御すれば、誘導電動機のトルク曲線は図 2.26 のように移動するため、固定子周波数と負荷駆動軸周波数の比は一定に保たれ、速度を低下させても二次すべり損失が増大することはない。このため使用する電動機の形式はかご形がよく、構造、保守上好ましい。

図 2.27 は、インバータによってかご形誘導電動機を制御する方式を示している。この場合、インバータは外部から与えられた周波数の電圧をモータに供給し、インバータ中のサイリスタ間の転流はインバータに内蔵された転流回路によって行なう。現在のところインバータの価格が、他の制御方式に比べて高価であるため、まだ中・大容量機には用いられていないが、複数台の電動機を揃速制御するような用途には、すでに広く用いられている。

図 2.28 はサイクロコンバータによる誘導電動機は速度制御回路の一例である。インバータが、

交流→直流→可変周波数交流

の変換を行なうのに対して、サイクロコンバータの場合には、

交流→可変周波交流

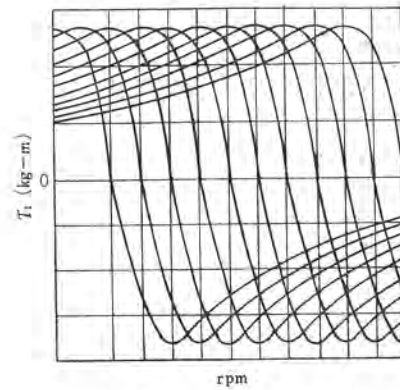


図 2.26 トルク特性曲線
Torque characteristic curves.

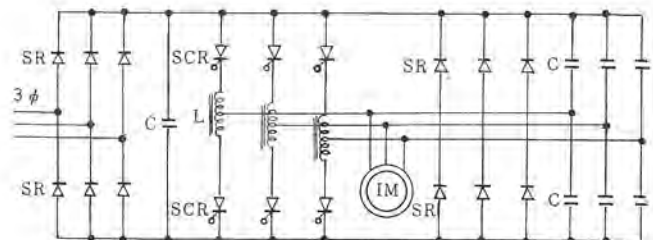


図 2.27 可変周波数制御
Variable frequency inverter.

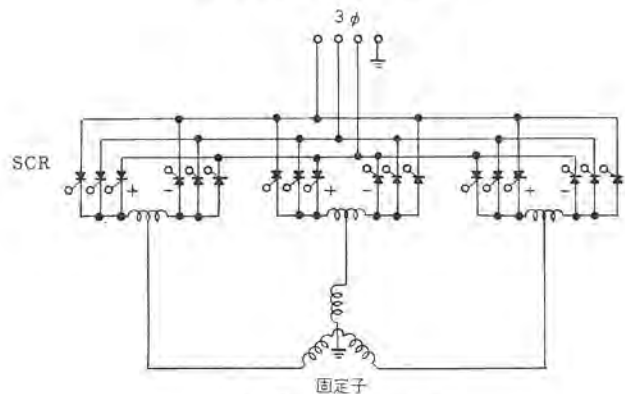


図 2.28 サイクロコンバータ
Cycloconverter.

の変換を行なうものである。図 2.28 には 18 個のサイリスタを用いる方式を示しているが、この場合には、電源周波数の約 1/3 の周波数まで電動機の回転数をあげることができる。したがって、商用周波 60 Hz 電源の場合には電動機の周波数は 20 Hz 付近まで可能であり、2 極機を用いれば 1,200 rpm 付近までの回転数を得ることができる。また航空機、交流電気機関車のように、400 Hz 程度の点周波電源を有するものでは、電動機の周波数を 100 Hz 以上にすることも可能であり、高速運転が可能である。

サイクロコンバータにおけるサイリスタ間の転流は電源電圧によって行なわれるために、インバータのように転流のための回路をとくに必要とはしない。またいったん転流失敗した場合にも 1/3 サイクル後には自動的に再復帰するために、信頼性が高い特長を有している。

2.6 無整流子電動機

直流電動機の整流子より電動機側についてみれば、同期機と考えることができる。また従来と全く問題の多かった整流子は、サイリスタを用いて置き換えることができる。図 2.29 は、このように従来の整流子の役目とするサイクロコンバータと同期機との組合せによる、無整流子電動機の回路を示している。同期機の構造としては、従来

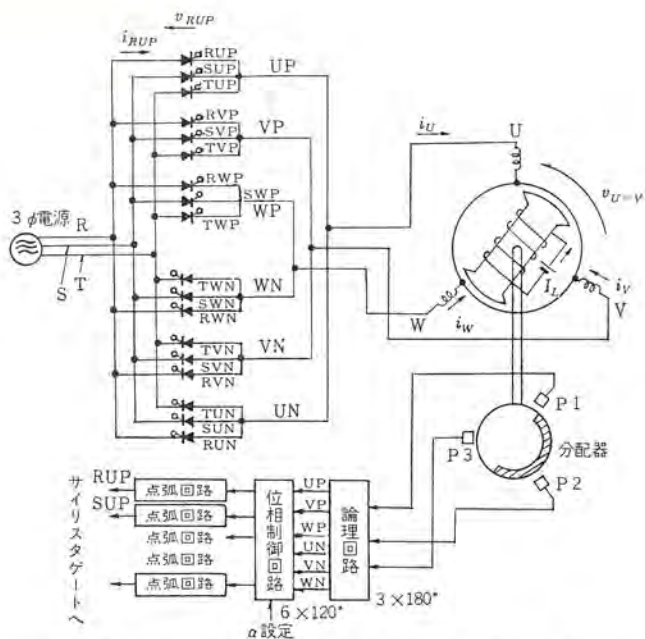


図 2.29 三相サイクロコンバータ式リリスタ電動機結線
Circuit diagram of three phase cycloconverter type thyristor motor.

の同期機とほとんど変わらないが、電機子反作用を打消すための特別の工夫を必要とする。

サイクロコンバータ式の無整流子電動機の特長とするところは、転流のために特別の回路を必要としないことである。すなわち低速においては電源電圧による転流を行ない、高速になるにしたがい電動機の逆起電力によって転流を行なう。したがってサイクロコンバータではたとえ転流失敗が起っても、1/3 サイクル 後には自動的に再復帰することが可能であり、インバータにない安定性がある。

制御方式としては、分配器によって電動機の U, V, W 相の端子に接するサイリスタ群を選択し、基準設定速度値と指速発電機との比較によって生じる誤差信号によって、それぞれのサイリスタの点弧位相を制御して電動機に加わる電圧を制御することによって、速度制御を行なう。また一方、電動機の界磁電流を制御することによって速度制御を行なうこともできる。このように無整流子電動機の特性は従来の可逆静止レオナードに匹敵するもので、容易に正、逆転運転、再生運転を行なうことができる。

また起動特性を改善するためには、起動時は転流進み角 (γ) をゼロ付近にしておき、定常運転中は $\gamma=30^\circ \sim 45^\circ$ 程度となる運転方式が望ましい。(特許出願中)

3. 交流電動機の世界制御方式の選定

交流電動機の世界制御方式の選定上考慮すべき点としては、下記の事項が考えられる。

- (1) 制御性能
- (2) 信頼性
- (3) 価格 (イニシャルコスト、運転費)
- (4) 据付面積
- (5) 保守、点検

この中で本文では、とくに3項の問題について少し触れてみたいと思う。

3.1 誘導電動機のエネルギーの流れ

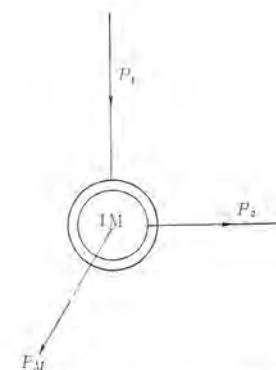


図 3.1 エネルギーの流れ
Energy flow chart.

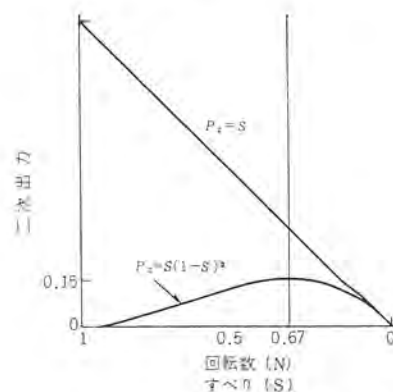


図 3.2 二次出力特性
Secondary output.

誘導電動機の一次、二次回路の鉄損、銅損ならびに風損、鉄損などを無視すれば、エネルギーの流れは図 3.1 に示すようになる。図 3.1 では、一般に用いられる $1>S>0$ の範囲の電動運転の場合についてエネルギーの流れを示している。すなわち、電動機の一次側から与えられたエネルギーのうち、1部は機械的エネルギーとなって負荷を駆動し、残りのエネルギーは電氣的エネルギーとして二次側から流出する。一次入力を P_1 とすると、機械的出力 P_M ならびに電氣的二次出力 P_2 は次式で表わされる。

$$P_M = P_1(1-S) \quad (3.1)$$

$$P_2 = SP_1 \quad (3.2)$$

3.2 交流電動機の各種負荷トルクと二次損失

3.1 節からわかるように、誘導電動機の二次側に発生するすべり損失は式 (3.2) で表わされる。また機械的出力 (負荷トルク) P_M と一次入力 P_1 との関係は式 (3.1) で表わされるので、式 (3.1), (3.2) から二次すべり損失と負荷トルクの間には次の関係式が成立つ。

$$P_2 = \frac{S}{1-S} P_M \quad (3.3)$$

したがって、定トルク負荷および自乗トルク負荷の場合の二次出力は、次式で表わされる。

$$\text{定トルク負荷} \quad P_2 = S$$

$$\text{自乗トルク負荷} \quad P_2 = S(1-S)^2$$

ただし $S=0$ のときの $P_M=1$ とする。

これを図示すると、図 3.2 のようになる。

3.3 イニシャルコスト運転費

誘導電動機の発生する二次出力を回収しないような制御方式 (二次抵抗制御、うず電流継手制御、一次電圧制御、二次位相制御) で

は、図 3.2 に示す二次出力はすべて熱として消費される。一方、二次出力を電氣的、機械的に回収する制御方式(直結 レクチフロー、変形 レクチフロー、静止 セルビウス、超同期 セルビウス)では、二次出力のうち、わずかのエネルギーが回収装置中で熱として消費されるにすぎず効率良い運転が可能である。

また本質的に大きな二次出力を発生しない周波数制御方式や、無整流子電動機も効率がよい。今 1,000 kW の誘導電動機について負荷トルク特性が定トルク、平均運転速度を 70 % ($S=0.3$)、1 年間の運転時間を 8,000 時間とすると、このときの二次損失は 300 kW となる。回収率を 90 % とすると、二次出力を回収する場合としない場合とでは 270 kW の消費電力差がでる。kW あたりの電力料金を

4 円とすると年間あたりの運転費の差は、
 $4 \times 270 \times 8,000 = 7,560,000$
すなわち 756 万円となる。

一方 インシャルコスト について考えてみると、二次損失を回収するような制御方式のほうが一般的に高い。今 インシャルコスト の差を X 万円とし、借金または預金していたものとする Y 年後の金額は、

$$Z = X(1+h)^Y \quad h: \text{年利}$$

このようにして、インシャルコスト 差と運転費を比較してみることによって、何年間でインシャルコスト 差が回収されるかがわかる。

従来は、インシャルコスト に重点を置いて、装置の価格比較が行なわれがちであったが、運転費の問題も十分検討する必要がある。電動

表 3.1 交流電動機各種速度制御方式比較表

No.	速度制御方式	速度制御法		速度変化	速度変動率	速度制御範囲	速度トルク特性	トルク電流特性
		制御対象	調整法					
1	二次抵抗制御 (金属抵抗)	IM 二次抵抗値を調整する	手動バンドルまたは電動操作、通常自動としない	段階的、段階は制御器のノッチでできる	$\frac{\Delta n}{n_0} = S \frac{\Delta T}{T_0}$ 低速域で変動大となる	最高二次短絡速度 最低 (定トルク負荷) $S=0.7$ (2 乗トルク負荷) $S=0.5$	定トルク	$T \propto I$
2	二次抵抗制御 (液体抵抗)	同上	手動(ハンドル電動)、自動いずれも可	連続的	手動時 $\frac{\Delta n}{n_0} = S \frac{\Delta T}{T_0}$ 自動時 $\frac{\Delta n}{n_0} = 0.05 \frac{\Delta T}{T_0}$	最高 $S=0.05 \sim 0.1$ 最低 (定トルク負荷) $S=0.5 \sim 0.7$ (2 乗トルク負荷) $S=0.4 \sim 0.7$	同上	$T \propto I$
3	一次リアクトル制御	リアクトルの DC 励磁電流と二次抵抗を調整する	通常自動のみ手動なし	同上	自動時 $\frac{\Delta n}{n_0} = 0.02 \frac{\Delta T}{T_0}$	最高 $S=0.1$ 最低 $S=0.9$	同上	$T \propto I$ (ほぼ比例) T_0 を I_0 の 120 ~ 150 % で発生する
4	二次リアクトル制御	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
5	一次サイリスタ制御	サイリスタ点弧位相と二次抵抗を調整する	同上	同上	同上	同上	同上	同上
6	二次サイリスタ制御	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
7	AS モータ (かご形 IM+過電流継手)	AS カップリングの励磁電流を調整する	同上	同上	$\frac{\Delta n}{n_0} = 0.02 \frac{\Delta T}{T_0}$	最高 $S=0.2 \sim 0.3$ 最低 $S=0.9$	同上	$T \propto I$
8	直結レクチフロードライブ (クレーマ)	DM の界磁電流を調整する	手動自動いずれも可	同上	手動時 $\frac{\Delta n}{n_0} = 0.06 \frac{\Delta T}{T_0}$ 自動時 $\frac{\Delta n}{n_0} < 0.02 \frac{\Delta T}{T_0}$	最高 $S=0.07 \sim 0.1$ 最低 $S=0.7$ (原理的に $S=1.0$ では不可)	定出力	$T \propto \frac{I}{1-S}$
9	変形レクチフロードライブ (回転セルビウス)	同上	同上	同上	同上	最高 $S=0.07 \sim 0.1$ 最低 $S=0.7 \sim 0.8$ (原理的に $S=1.0$ まで可)	定トルク	$T \propto I$
10	静止セルビウス装置 (サイリスタ式)	サイリスタインバータの点弧位相を調整する	通常は自動のみ	同上	手動時 $\frac{\Delta n}{n_0} = 0.06 \frac{\Delta T}{T_0}$ 自動時 $\frac{\Delta n}{n_0} < 0.01 \frac{\Delta T}{T_0}$	最高 $S=0.03 \sim 0.06$ 最低 $S=0.7 \sim 0.8$ (原理的に $S=1.0$ まで可)	同上	同上
11	超同期静止セルビウス (SSSS)	サイリスタインバータとコンバータの点弧位相を調整する	自動	同上	$\frac{\Delta n}{n_0} < 0.01 \frac{\Delta T}{T_0}$	最高 $S < 0$ 最低 $S=1.0$ まで可能	同上	同上
12	可変周波インバータ駆動 (VVVF+IM)	インバータの電圧と周波数を調整する	同上	同上	同上	最高 数千回転 最低 0 rpm	同上	同上
13	サイクロコンバータ駆動 IM (CCI)	サイリスタの点弧時点と位相を調整する	同上	同上	同上	最高 電源周波数, 1/3 ~ 1/2 最低 0 rpm	同上	同上
14	無整流子電動機 (CCS)	同上	同上	同上	同上	最高 5,000 rpm 程度 最低 0 rpm	同上	同上

機の容量が大きくなるにしたがって、インシャルコストの差額は案外短期間のうちに運転費によって回収されるものである。

4. む す び

以上、交流電動機速度制御方式について、従来から広く用いられてきた方式および半導体を中心とした今後の方式について述べた。今後の方向としては、半導体技術を中心とした制御方式がさらに発展を続けるであろうが、従来から用いられた方式にも改良が加えられよう。このような観点からみると、交流電動機はあらゆる用途に對しいかなる制御をも行ない得るようになってきており、従来直流機の用いられた分野への進出が期待される。

参 考 文 献

- (1) 川合ほか：クレーンにおける交流電動機の制御と最近の実例 三菱電機技報, 41, No. 7 (昭42)
- (2) 大野ほか：サイクロコンバータ式サイリスタ電動機 三菱電機技報, 40, No. 6 (昭41)
- (3) 中野ほか：サイリスタ静止セルビウス装置 三菱電機技報, 42, No. 4 (昭43)
- (4) 武田ほか：レクチフロードライブ 三菱電機, 35, No. 11 (昭36)
- (5) 大野, 赤松：自励式インバータによる誘導電動機の二次励磁 電気学会誌, 88-10, No. 961

Comparison table of AC motor speed control methods.

過渡応答 (自動時)	電 力	力 率	効 率	起 動 ト ル ク	適 用 容 量	据 付	保 守	用 途	特 長
—	トルクに比例した入力すべりに比例した損失	良 好 トルクに關係	すべりに比例して低下	IMの最大トルクまで可能	750 kW～ 1,000 kW まで	容 易	最も容易	ファン, ポンプ, ブロワー, 巻上機, etc	安 価
比較的遅い。 電極速度で決 る	同 上	同 上	同 上	同 上	100 kW 以 上	ややめんどろ	ややめんどろ	ファン, ポンプ, ブロワー, セメントキルン, etc	No. 1より制御性良好 安 価
速 い	同 上	悪 い 速度トルクに 關係	同 上 No. 1, 2より やや低い	IMの最大トルクの 2/3まで(リアクト ルそう入のとき)	750 kW 以 下	容 易	容 易	クレーン, 巻上機, ロー プウェイ, 押出機, ファ ン, ポンプ, etc	無接点化
同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上
同 上	同 上	同 上	同 上	サイリスタの容量ア ップすれば最大トル クまで可	300 kW (440 V) 以 下	最も容易	同 上	同 上	無接点化 No. 3, 4より諸特性良好
同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	300 kW 以 下	同 上	同 上	同 上	同 上
同 上	同 上	良 好 速度トルクに 關係	すべりに比例 して低下	駆動IMの最大トル クまで可能	風冷は, 損失 22 kW まで	同 上	容 易 (水冷式はや やめんどろ)	ファン, ポンプ, 押出機 コンベア, etc	大容量は水冷とする
同 上	出力に比例し た入力	No. 1, 2より やや悪い	良 好 No. 10より やや低い	$\frac{1}{n_{min}} \times I_1$ ($n_0=1$)	制限なし	ややめんどろ	ややめんどろ	セメントキルン, 押出機 etc	効率・制御性良好
同 上	同 上	同 上	同 上	IMの最大トルクま で可能	同 上	同 上	同 上	ファン, ポンプ, コンブ レッサ, 押出機, ブロ ワー, etc	同 上
同 上	同 上	悪い, 速度制 御範囲と速度 トルク特性に 關係	良 好	同 上	同 上	容 易	容 易	ファン, ポンプ, コンブ レッサ, 押出機, ブロ ワー, etc	効率・制御性とも No. 8, 9より良好
同 上	同 上	No. 10より もよい	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	ファン, ポンプ, コンブ レッサ, 押出機, ブロ ワー, etc	同 上 同期速度の上下で制御可 能
同 上	同 上	良 好	同 上	同 上	理論的には制 限はない。現在 の所, 数10kW	同 上	同 上	繊維, 紡績, その他一般	制御性, 効率良好 高 価
同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	制限なし	同 上	同 上	AC DEL その他一般	制御性, 効率良好 高 価
同 上	同 上	同 上	同 上	直流機と同等のトル クが可能	同 上	同 上	同 上	巻上機, 圧延機, 製紙機 械その他一般	制御性, 効率良好 直流電動機と類似の特性 を有する

単相誘導電動機のサイリスタによる速度制御

前川 善六*・小野 健一*

Speed Control of Single Phase Induction Motors by Thyristors

Consumer Products Research Laboratory Zenroku MAEKAWA・Kenichi ONO

Application of semi-conductors in addition to various features of single phase induction motors has made it possible to control the speed in a wide range and steadily. This paper introduces simple speed control circuits with feedback by phase control using the Company's bidirectional thyristor, BCR. Special study is made on the stability of the control system and some problems encountered in putting the devices to practical use, are briefly explained. It elucidates that, to study the stability, a transfer function of each part is to be obtained by experiments and calculations first of all and according to the Nyquist criterion definite answer for typical numerical values shall be made available.

1. ま え が き

単相誘導電動機は各種工業や家庭電気品を中心に広く応用されており構造が簡単で取扱いも容易なうえ、価格も安いことなどのすぐれた特長に加え、半導体を応用した速度制御技術の進歩により、いっそう広い分野において、より高い技術的な要求に応えることができるようになりつつある。

当社においても 双方向性サイリスタ BCR の信頼性の向上をはかるとともに合理的な製造技術による量産化を進め、低価格化に努めてきた。それと同時に電動機はじめ各種の機器への応用技術の開発も行われてきた。

本文では前回の報告⁽¹⁾に続いて、出力 100 W 程度の単相誘導電動機について BCR を用いた簡易な速度制御回路を紹介するとともに制御系の安定性に関する実験考案を中心に報告する。

2. 単相誘導電動機速度制御

サイリスタによって位相制御を行ない、負荷に印加される電圧を等価的に変化させ出力を連続的に変化できることは周知のとおりである。コンデンサモートルなど単相誘導電動機においては出力トルクは印加電圧のほぼ 2 乗に比例する。図 2. 1 に示すような回路において、モートル M を BCR (トライアック) のような双方向性位相制御素子 Q₁ によって位相制御した場合にはその速度—トルク曲線 (T—N 曲線) は図示の A₁, A₂, A₃ のようになる。したがって導通角 (電流が流れている電気角) φ を制御することによって出力トルクを連続的に調節できる。なお Q₂ は 2 端子トリガダイオード (当社形名 BS-68) である。

純抵抗負荷に対しては正弦波電圧 $E_P \sin \omega t$ を位相制御したときの導通角を φ とすれば、負荷の電圧波形のフーリエ級数表示は次式

で表わされる。

$$e_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \{a_{2n-1} \cos(2n-1)\omega t + b_{2n-1} \sin(2n-1)\omega t\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに

$$a_{2n-1} = \frac{E_P}{\pi} \left\{ \frac{\cos 2n\varphi - 1}{2n} - \frac{\cos 2(n-1)\varphi - 1}{2(n-1)} \right\}$$

$$b_{2n-1} = \frac{E_P}{\pi} \left\{ \frac{\sin 2(n-1)\varphi}{2(n-1)} - \frac{\sin 2n\varphi}{2n} \right\}$$

なお、式 (2.1) の基本波分のみの実効値 E_1 は次式で表わされる。

$$E_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

$$= \frac{E_P}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} (1 - \cos 2\varphi - 2\varphi \sin 2\varphi + 2\varphi^2)} \dots\dots\dots (2.2)$$

また e_0 の実効値は次式のように求められる。

$$E_T = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right)} \dots\dots\dots (2.3)$$

図 2. 2 は式 (2.2) および式 (2.3) の計算結果を示す。

電動機負荷の場合は力率および逆起電力の影響が複雑になり数値計算は困難である。しかし実測結果からみると、電流の流れている期間を導通角 φ とし式 (2.3) によって計算した実効値と出力トルクの関係をプロットしてみるとトルクはほぼ実効電圧の 2 乗に比例していることがわかる。図 2. 3 は 4 P, 100 V, 100 W のコンデンサモートルについての実測例で、正弦波のまま定格電圧より低い電圧で運転したときのトルクおよび正弦波を位相制御したときのトルクをそれ

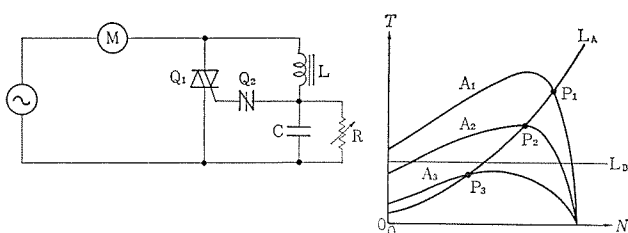


図 2. 1 位相制御回路と T—N 特性
Phase control of motor and its torque-speed curve.

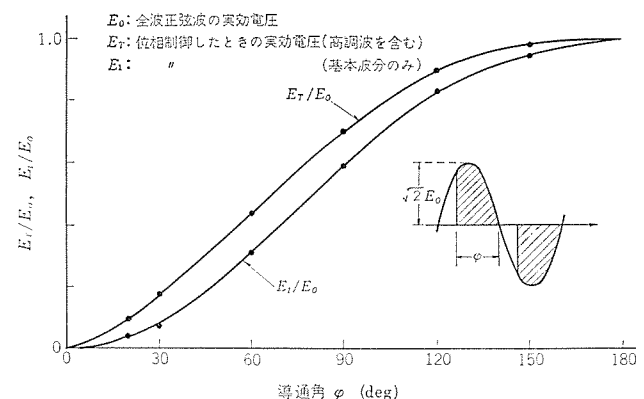
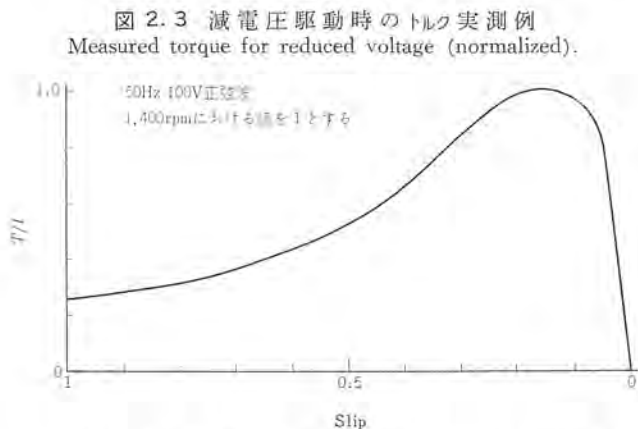
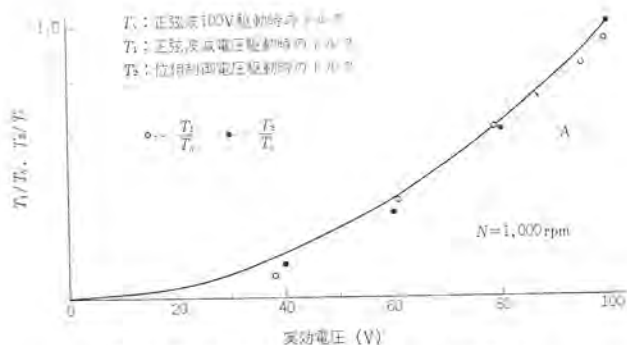


図 2. 2 位相制御時の実効電圧
Calculated r. m. s. voltage vs. conduction angle (for resistor load).



それぞれ基準化して示したもので、曲線Aは実効電圧の2乗の関係を参考までに示したものである。

以上のようにして出力トルクを制御できるが低速運転時には、単位入力電流当たりのトルクが減少し、モータの2次損失はスリップに比例して増加するから、モータの発熱が大となる。単位入力電流当たりのトルクの測定例を図2.4に示した。

3. 負帰還を有する速度制御回路

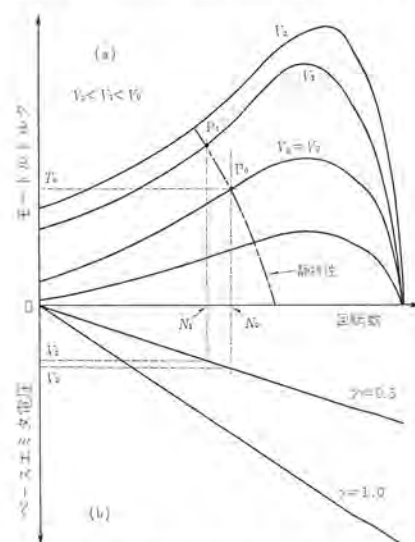
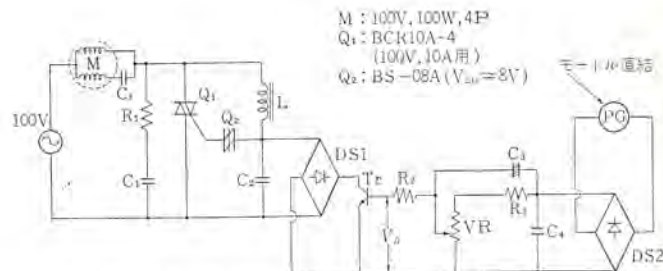
定格電圧より低い電圧でモータを運転したときの $T-N$ 特性が図2.1に示したようなものであるとすると、負荷の特性が L_A で示すものに対しては P_1 , P_2 , P_3 などが安定点となるから問題ない。扇風機はこのような負荷特性をもつものの一例である。しかしこのような場合でも、負荷変動の激しいもの、または L_B で示される定トルク特性をもつ負荷に対してはなんらかの負帰還を施して速度を安定化することが必要である。

3.1 回路構成と動作

図3.1は負帰還を有する速度制御回路構成図の一例で、その動作をつぎに述べる。モータ M , Q_1 , Q_2 などより成る部分はすでに説明した。モータには速度発電機 PG が直結され、その出力は全波整流・平滑回路および速度設定用のポテンシオメータ (VR) を介しトランジスタ Tr のベースエミッタに印加される。この電圧を V_B とすると、回転数 N が大となると V_B も大となり Tr を流れる電流も大となるから C_2 の充電速度が小さくなり、点弧位相が遅れることによりモータに印加される電圧は小となる。このような負帰還作用によって負荷の変動にもかかわらず、ほぼ一定の速度で運転することができる。速度帰還回路については後に詳述する。

3.2 静特性

図3.1によってどのような $T-N$ 特性が得られるかを考えてみる。系が線形ではなく、かつ影響する要素が多いので数式的な検討



は実際上困難であるから図式的に検討することにする。図3.2の上半分(a)は系を開いて、 V_B をパラメータとして示したモータの $T-N$ 特性である。これを実験的に求めることは容易であって、速度発電機の代りに他の独立した電源によって V_B を与えればよい。

また図3.2の下半分(b)は PG および整流平滑回路の特性をポテンシオメータの分圧比 (γ) をパラメータとして示したもので、この特性も PG を他の駆動装置を用いて駆動することにより実測することができる。

さて今 VR の分圧比を $\gamma=0.5$ と設定したときの閉ループ特性を図3.2に従って求めてみると、まず回転数 N_0 に対してベースエミッタ電圧は V_0 となり、 $T-N$ 特性を示す曲線のうち $V_B=V_0$ の線から P_0 が定まる。このときの発生トルクは T_0 となる。同様に N_1 に対して P_1 が定まる。結局一定の分圧比 $\gamma=0.5$ に対して図3.2において鎖線で示した静特性が得られる。他の分圧比に対しても連続的に $T-N$ 曲線を想定することができるから、最大導通角のときのモータの出力トルクの範囲内において、任意の負荷に対して任意の回転数で安定に運転することができる。

実際の回路において達成できる最大導通角は速度帰還回路を開放したときの導通角であり、大きいほうが望ましいが、起動時に $130^\circ \sim 140^\circ$ 程度である。負荷が変動したときの速度変動率(レギュレーション)は小さいほうが望ましいのは当然であるが、このような簡易な回路ではルーラゲインに限度があり、安定性の面からも制限され大略 $-2 \sim -4 \text{ rpm/g-m}$ であった。

なおここに説明した回路によれば、低速設定の時ほどレギュレーションが良く、また $N=0$ の場合は速度設定(分圧比 γ) の値に関せず常に $V_B=0$ となるから、一定の起動トルクが得られるのが特色で、

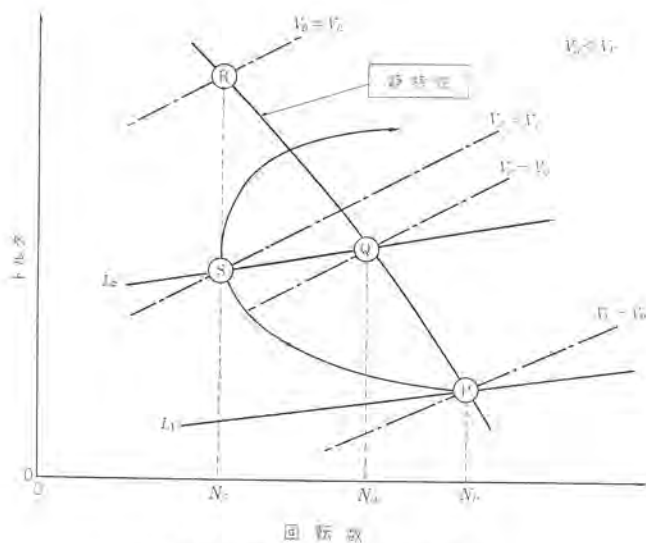


図 3.3 制御動特性の説明
Explanation for transient performance.

多くの応用の場合に対して望ましい特性である。

3.3 動特性

速度設定の変更または負荷変動に対する応答、および安定性の検討をするためには動特性（過渡特性）も考慮しなければならない。それには自動制御理論が有力な手段となるが、ここではまず上述した静特性における動作点の移動のしかたに注目して物理的意義を考えてみる。

図 3.3 は静特性において動作点近傍を拡大して示したもので、曲線 L_1 , L_2 は負荷の $T-N$ 特性、 $V_P \sim V_R$ はベース・エミッタ電圧 V_B がそれぞれ $V_P \sim V_R$ であるときの開ループにおけるモータの $T-N$ 特性を示す。動作点が P にあって平衡状態にあるとき負荷が L_1 から L_2 に急変したとする。このとき動作点が直ちに Q に移動すればよいが、実際には種々の遅れのために P から S に向って移動する。

すなわち負荷の増大によって減速トルクが生じ回転数 N は低下するが V_B は平滑回路の時定数による遅れのために N の変化に追従できず初めは V_B がほぼ一定のまま N は低下しその後 V_B も低下し始めるから、 $V_B = V_S$ となって負荷 L_2 に見合ったトルクを発生するようになり動作点は S となる。しかし S は安定点ではなく今度はこれから N が上昇することになる。なぜなら分圧比が一定に保たれたままであるため、回転数 N_S に対する V_B は定常状態において V_R なる値をとるべきであるから、 V_B はさらに下降しそれに伴って発生トルクも大となり、負荷の要求するトルクを上回るので加速される。このようにして加速減速を繰返しながら最終的には L_2 と静特性の交点 Q が新しい動作点となって安定に運転する場合と、周期的変動が持続する不安定な場合とがある。後者の場合、振動、騒音を発生するほか種々の不具合が発生するため、実用に当たっては、安定化には特に留意しなければならない。

4. 制御系の解析

制御系解析のおもな目的はつぎのようなことを検討することである。(1) 過渡応答、(2) 周波数特性、(3) 系の安定性、(4) 定常偏差。これらは互いに関連し合っており、どれが重要であると一概に言うことはできないが、多くの場合(3)の系の安定性の検討が主たる対象になる。そしてこれに対してはいくつかの手法が提案されているが、簡単な制御系に対しては、ボード線図、ナイキスト線図による

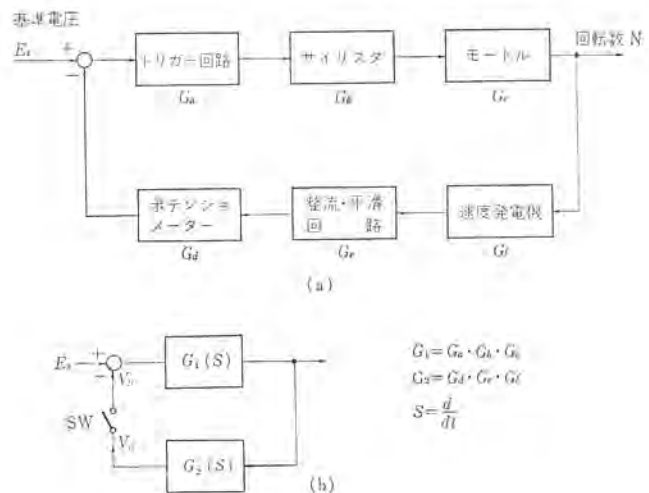


図 4.1 速度制御系のブロック線図
Block diagrams of closed-loop speed control.

のが最も簡明かつ有力な手段とされており、以下これについて詳述する。

4.1 ブロック線図

図 4.1 は制御系のブロック線図である。速度制御を行なうフィードバック系では通常の場合、基準電圧 E_S を変化させて速度設定を行なうが、図 3.1 の制御系では E_S は一定に保ったまま帰還回路のポテンシオメータの分圧比、すなわち帰還部のゲインを変化させて設定速度を決定している。このような構成では、一般的にいう回路が簡単になるほか前述のように速度設定の値に関係なく一定の起動トルクが得られるなどの特長がある。

さて安定性の検討をする場合一巡の伝達関数を知る必要があるが図 4.1 (a) に示したブロック線図を(b)のように G_1 , G_2 の二つに分けて考える。ここで $G_1(S)$ はトリガ回路・サイリスタ・モータを総合したもの、また $G_2(S)$ は速度発電機・整流平滑回路およびポテンシオメータを総合したものの伝達関数を示す。

このように規定した $G_1(S)$, $G_2(S)$ はすでに示した図 3.2 の(a), (b)にそれぞれ対応するものである。すなわち図 4.1 の(b)において SW を開いて V_B を入力とし N を出力としたときの特性から $G_1(S)$ を、また N を入力とし V_B を出力としたときの特性から $G_2(S)$ を求めることができる。こうして $G_1(S)$, $G_2(S)$ の形が決定されると次式で示される特性方程式が得られる。

$$1 + G_1(S) \cdot G_2(S) = 0 \dots \dots \dots (4.1)$$

自動制御理論によると、式(4.1)の根の中に、実部が正である根が存在するときその系は不安定であることが示される。

4.2 各部の伝達関数

制御系各要素の非直線性のため、動作範囲の全域にわたっての特性を記述する伝達関数を規定することは得策ではないから、ある動作点の近傍において狭い範囲内では線形であるという仮定のもとに以下の考察を進める。

(1) $G_1(S)$ の求め方：位相制御したことによるむだ時間、およびモータの電気的時定数を無視すれば、この部分は回転体の慣性性能率に基づく一次おくれ要素と考えることができる。しかし $T-N$ 曲線の傾斜の正負によって著しく特性に差異が生じ本質的に不安定な一次要素となる場合があることに注意しなければならない。

今この部分の伝達関数を求めるため、図 3.2 (a) に示したように V_B をパラメータとするモータの $T-N$ 曲線（ただし実際には発生

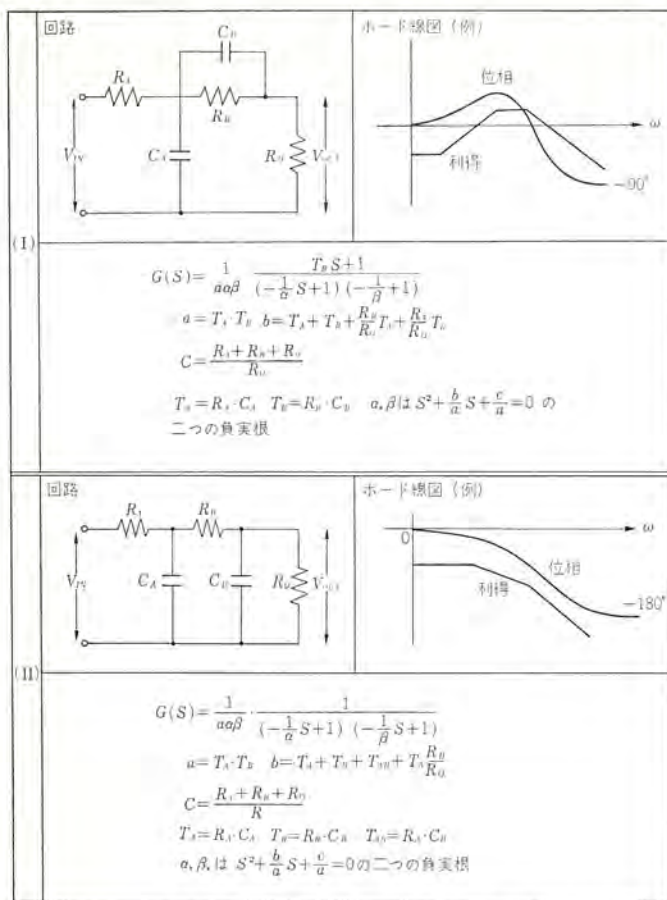


図 4.2 帰還回路の等価回路
Equivalent circuits for feedback elements and their transfer characteristics.

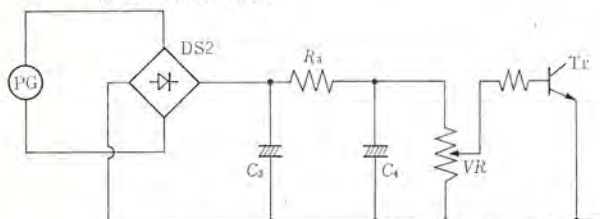


図 4.3 位相進め回路のない制御回路
Control circuit without phase lead network.

トルクから負荷トルクを差引いたものについて T - N 曲線を作図する) について動作点 P_0 を設定し N および V_B が変化したときのトルクの変動を考え $K_N = \partial T / \partial N$, $K_V = -\partial T / \partial V_B$ とすれば次式を得る。

$$G_1(S) = \frac{K_V / K_N}{2\pi J / g S - 1} \quad (4.2)$$

ここに、 J : 慣性モーメント [$\text{g}\cdot\text{m}^2$] g : 重力加速度 [m/s^2] 上式において K_V は常に正であるが、 K_N は T - N 曲線の傾斜であって動作点によってその符号も変わる。 $K_N < 0$ のときには伝達関数の形が $K/(TS+1)$ のように自己平衡性を持つ安定な一次形であるのに反し、 $K_N > 0$ のときには $K/(TS-1)$ のように不安定な一次形となる。それは制御理論からみれば、分母 $= 0$ とおいた方程式が、実部が正である根を持つからであり、また物理的意味としては回転数が大となるほど、トルクが大となり内部的正帰還作用として働いて不安定になることができる。

今具体的な数値例として $N=1,400 \text{ rpm}$, $T=40 \text{ g}\cdot\text{m}$ の点において $K_V=2 \text{ g}\cdot\text{m}/\text{mV}$, $K_N=0.06 \text{ g}\cdot\text{m}/\text{rpm}$, $J=1 \text{ g}\cdot\text{m}^2$ とすると、式 (4.2) によって次式ようになる。

$$G_1(S) = \frac{33}{0.15S-1} [\text{rpm}/\text{mV}] \quad (4.3)$$

(2) $G_2(S)$ の求め方: この部分の特性を実測によって求めることは容易であるが、それをもとにして解析に便利のように数式化することは困難である。そこで近似的な考え方として直流発電機で速度を検出するものとして、ダイオードがないものとする単に平滑回路の応答を検討すればよいから解析が容易である。このような仮定の理論的根拠やその近似精度については問題がないともいえないが、実測値との比較は可能であり、単に系が安定か、否かを実際の運転状況と対比させながら検討するには十分である。

さて図 3.1 に示した制御回路の帰還部の伝達関数は上述のような仮定により図 4.2 (I) の等価回路によって求めることができるが R_0 は分圧用ポテンシオメータとトランジスタのベースからみた等価抵抗との並列抵抗によって定まるものであり、また R_A は速度発電機の内部抵抗を示すものである。回路定数が定まると図 4.2 に付記した計算式によって伝達関数を計算することができる。今、具体的な数値例として式 (4.3) を求めたときの条件 ($N=1,400 \text{ rpm}$, $T=40 \text{ g}\cdot\text{m}$) を与える分圧比を想定して計算しこれに PG の電圧特性によって定まる定数 $12 \text{ V}/1,800 \text{ rpm}$ を乗じると

$$G_{21}(S) = \frac{0.70(0.08S+1)}{(0.03S+1)(0.008S+1)} [\text{mV}/\text{rpm}] \quad (4.4)$$

となる。なおサフィックス [I] は図 4.2 の (I) に関したものであることを示すものとする。

また図 4.2 (II) に示した回路は図 4.3 に示したような π 形のフィルタを持った制御回路に対するもので、時定数を大きくして発電機整流リップルを小さくできるが位相おくれが大きくなる。これについても数値例を式 (4.5) に示す。

$$G_{22}(S) = \frac{0.70}{(0.03S+1)(0.004S+1)} [\text{mV}/\text{rpm}] \quad (4.5)$$

なお式 (4.5) も式 (4.4) を求めたときとほぼ同様の動作点を与える分圧比を想定して計算したものである。

4.3 ナイキスト線図による判定

以上のようにして各部の伝達関数が求められれば式 (4.1) の検討ができる。ここでは部品のばらつきによる影響等を直感的にとらえることができ、かつ簡明な方法でもあるナイキスト線図による判定を適用してみる。式 (4.3), 式 (4.4) より一巡伝達関数 $G_1(S)$ は式 (4.6) で表わされる。

$$G_1(S) = \frac{88 \times 0.70(0.08S+1)}{(0.15S-1)(0.03S+1)(0.008S+1)} \quad (4.6)$$

同様に式 (4.3) および式 (4.5) より

$$G_{22}(S) = \frac{33 \times 0.70}{(0.15S-1)(0.03S+1)(0.004S+1)} \quad (4.7)$$

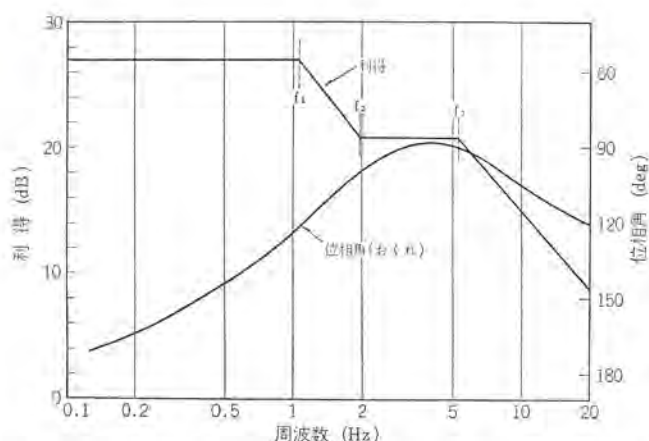
が得られる。

図 4.4 は式 (4.6) に示した関係をボード線図に示したもので利得については折線近似で示し、位相角については数値計算してプロットしたものを示してある。図 4.5 は二つの回路例についてのナイキスト線図であるが、作図の都合上非比例尺である。

ナイキストの理論によれば特性方程式の根のうち右半面 (実部が正) にあるものの数 R は次式によって求めることができる。

$$R = N + P \quad (4.8)$$

ただし N : $-1+j0$ の点から Γ をみて $\omega = -\infty$ から $+\infty$ まで一巡したときのベクトルの回転の数 (時計方向を正)



運転条件 60 Hz $N=1,400 \phi\text{m}$ $\gamma=0.15$			位相角 (おくれ)		
折点周波数			$\omega(\text{rad})$	$f(\text{Hz})$	$\angle G(\text{deg})$
	周波数 (Hz)	時定数 (ms)			
f_1	1.06	150	1	0.16	168
f_2	1.99	80	2	0.32	155
f_3	5.30	30	5	0.80	132
f_4	19.90	8	10	1.59	106
			20	3.18	90
			50	7.95	99
			120	19.20	127

図 4.4 $G_1(S)$ のボード線図
Bode diagram of $G_1(S)$.

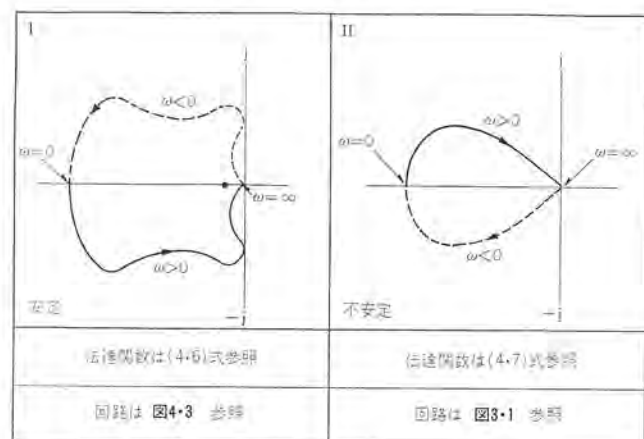


図 4.5 ナイキスト線図 Nyquist diagram.

P : $G(S)$ の極 (pole) のうち右半面にある数

Γ : $G(S)$ のベクトル軌跡すなわちナイキスト線図

上記の方法によれば図 4.5 の視察により明かなように (I) については $R=0$ で安定, (II) については $R=2$ で不安定と判定することができる。

以上に述べたように実測および計算をもとにして伝達関数を推定しナイキスト線図を作図し式 (4.8) によって容易に安定・不安定の判断をすることができるが、実際の応用に当たってはこの方式による判定結果のみによって制御系全体の良否を直ちに決定できるものではなく多少の不安定さはあっても、その振動周期や振幅の大小などを実際の機器に即して許容されるものであるか否かの判断を下さなければならない場合には、上に述べた方法がその際の有力な根拠となるものであることを実験的に確認できた。

なお以上においては制御系の不安定現象の原因として、制御系各部の位相おくれによるもののみに限定して考察をしたが、制御系を不安定にする要素としてはこのほかに、速度帰還電圧のリプル、トリガ回路の電源同期の不良、さらには半導体の特性の正負方向の非

対称性などについても考慮しなければならないことを付記しておく。

5. 応用上の問題点

半導体を用いた速度制御系の安定性について述べたが、具体的に商品化するに当たって他に検討すべき事項のうち、一般的かつ重要な事項について若干ふれておく。

(1) モータルの温度上昇：低速運転により 2 次損失が大となるほか、通風効果が悪くなる。モータルの効率の改善には限度があり結局放熱・通風効果を改善するほか、ときには外扇を設けるなどにより極力温度上昇をおさえる。さらに絶縁階級を上げるなどしなければならない場合もある。2 次抵抗の値は温度上昇とともに $T-N$ 曲線の形とも関連した重要な検討事項である。

(2) 位相制御素子の定格：定常的な電流電圧定格は電動機を拘束した状態および電源電圧の変動を考慮して決定しなければならない。また転流時 (素子が ON から OFF に移行するとき) に素子に急しゅんな立上りの電圧が印加され、動作不良または素子破壊の原因ともなるので注意を要する。一般の商用電源で用いられる時には素子に並列に $R=100 \Omega$, $C=0.1 \mu\text{F}$ 程度の CR アブソーバ (図 3.1 の R_1, C_1) を付することにより実用上の問題は解消されることが多い。

(3) 振動・騒音およびラジオ障害 (R. F. I.)

位相制御のために電源高調波が多くなり、第 3・第 5 高調波が発生するが実用上振動・騒音が特に大きくなることはほとんどない。

これに反し R. F. I. の発生は避け難く、とくに中波帯に対する受信障害となり、家庭用電気品の場合、なんらの対策が必要となる場合が多い。このためには LC フィルタを電源回路にそう入すること、およびサイリスタを中心として制御回路全体を金属ケースでシールドすることが効果的である。

(4) 部品の信頼性

制御回路に用いる部品はその機器の使用環境において、その機器の寿命に見合った十分な寿命を有していなければならない。最近では半導体をはじめ電子部品の信頼性は急速に向上し適切な部品の選択と使用法によって、性能・価格とも十分要求に応えられる製品が製作されている。

(5) 使い勝手と安全性

これは家庭用商品にあって特に重要な問題で、製造者としての立場からだけでなく、一般使用者の立場に立ってより良い製品の追求が常に続けられている。安全性の問題に関しては単に正常な使用に對してだけでなく、誤った使用法や、悪環境のもとでの使用、さらに万一制御装置がなんらかの故障をきたしたときに対しても安全であることが要求される。

6. む す び

単相誘導電動機の速度制御に双方向性サイリスタ BCR を用いた回路例を示し、モータルの $T-N$ 特性と速度帰還回路の特性の検討により制御系の安定性を論じた。今後このような速度制御回路は各種家庭用商品を中心に応用が拡大していくものと予想される。

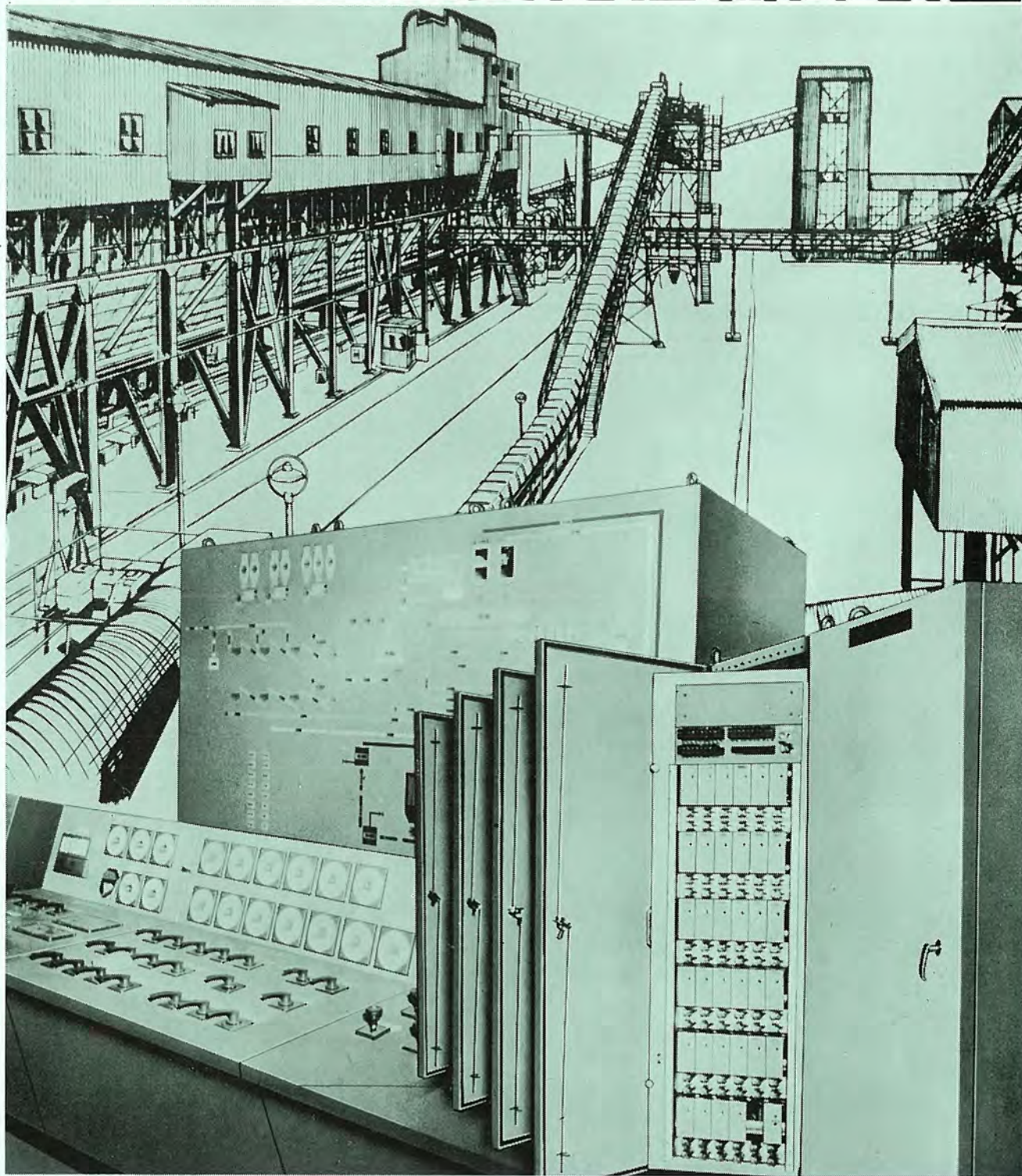
なお本文を作成するに当たって、モータルおよび制御器の製作・実験などの面で、当社名古屋製作所その他の関係者の方々より多大の協力をいただいたことを付記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

(1) 前川、遠藤：三菱電機技報, 41, 1,499 (昭 42)

食品工業から高炉まで—プラントの自動化・省力化に—

MELMAC 三菱総括制御装置



●用途

高炉・焼結設備・原料処理設備・材料
輸送設備・食品工場・水道プラント・
ガス工場・自動車工場・各種組立ライ
ン・セメント工場・選炭設備

●特長

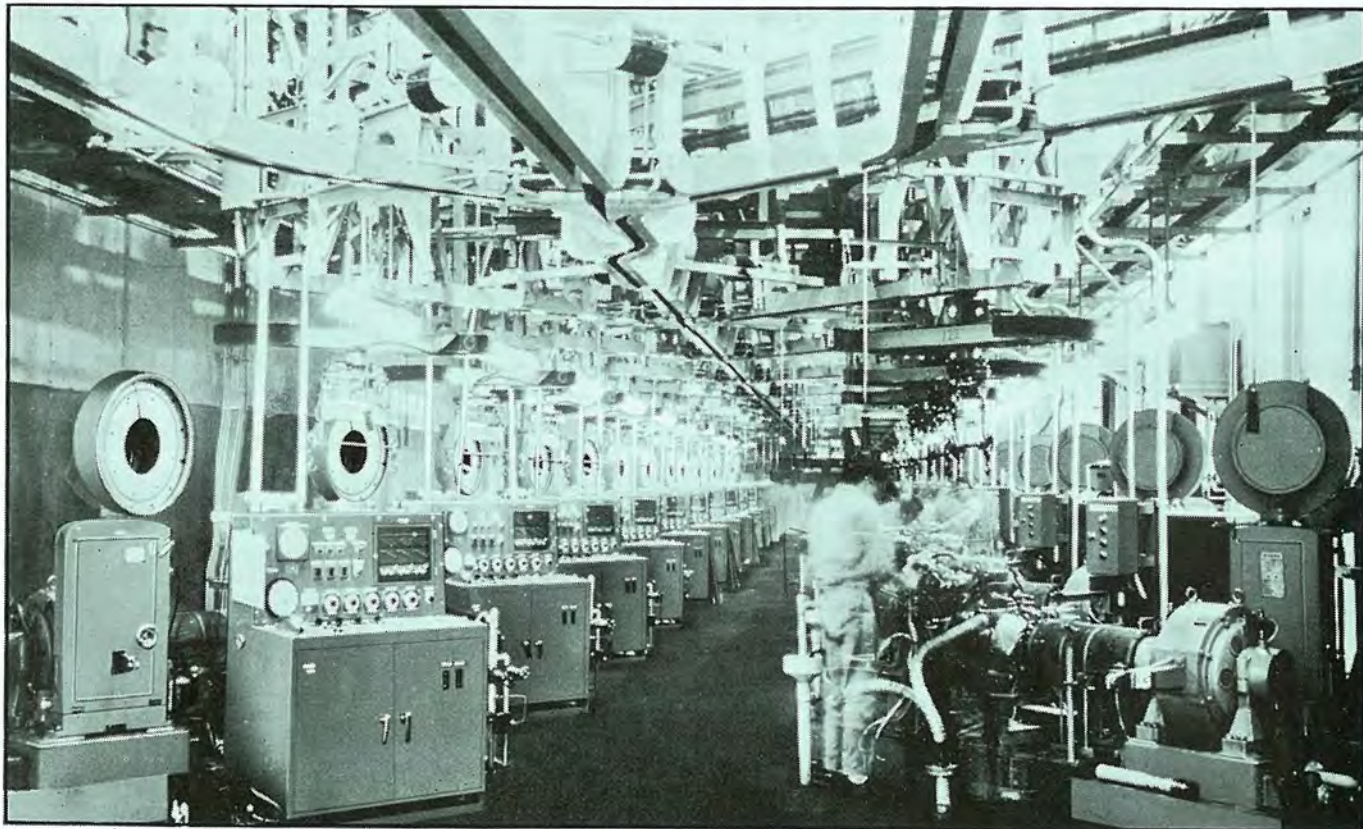
- (1)高信頼性……………定評ある三菱半導体を使用
- (2)独自のユニット方式……………点検、保守が簡単
- (3)可変プログラム方式……プラントの変更が容易
- (4)コンパクト……プリント板を採用 床面積が小さい
- (5)豊富な製作実績



三菱電機株式会社

東京都千代田区丸の内2-12<三菱電機ビル> 100 東京03<212>6111大代表

現在の人手でエンジン試験の能力を数倍にできる 三菱電気動力計



エンジンの自動制御に当社の誇る総合制御技術を徹底的に応用しました。高速、大出力、高精度の動力計が必要な際もご相談ください。

■標準定格

ED形うず電流式動力計

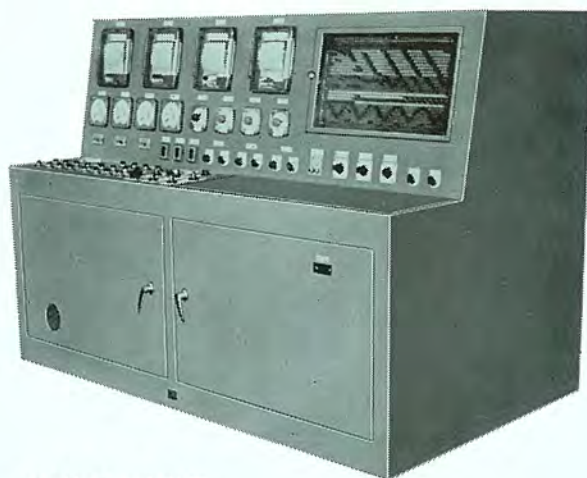
ED- 3形	22kW	(30PS)
ED- 7形	55kW	(75PS)
ED-10形	75kW	(100PS)
ED-15形	110kW	(150PS)
ED-20形	150kW	(200PS)
ED-30形	220kW	(300PS)
ED-50形	375kW	(500PS)
ED-100形	750kW	(1,000PS)

直流式電気動力計

3.7, 7.5, 15, 30, 55, 75, 110, 150, 220, 375, 550, 750, 1,000, 1,000kW以上

■製作例

- 立形直流動力計 750kW 900~1,200rpm
- 超高速直流動力計 460kW 50,000rpm
- 超高速うず電流式動力計 300kW 4,500~45,000rpm
- シャープダイナモメータ 110kW 5t 200km/hなど各種
- プログラム制御自動運転装置（ディーゼルエンジン、ガソリンエンジン、変速機、自動ギヤチェンジ）



プログラム制御装置
(ディーゼルエンジン、ガソリンエンジン共用)

今日もあなたと共に



お問合せは…三菱電機(株)電機第一部/東京都千代田区丸の内2-12/
東京<212>6111<大代表>
神戸製作所営業部/神戸市兵庫区和田崎町3丁目/神戸<67>5041
またはもよりの営業所へ/
大阪・名古屋・福岡・札幌・仙台・富山・広島・高松・新潟

方向性けい素鋼帯の磁気ひずみ

土屋 英司*・岡田 将*

Magnetostriction of Grain Oriented Silicon-Steel Strips

Central Research Laboratory Hideshi TSUCHIYA・Masaru OKADA

To get understanding of magnetostriction that is a cause of transformer noises, review has been made on the matters known up to date on the mechanism of producing the magnetostriction itself, and the dependence of the magnetostriction of grain of oriented silicon steel strips on its magnetic domain structure and preferred orientation. Mention is made herein on a measuring device developed of magnetostriction in the state of stress being applied which is considered to be a practical problem. And reports are made on measured results of magnetostriction under a state of various stress applications. These results show that applied stresses other than tension applied along rolling direction are all connected to the increase of magnetostriction. Then it is pointed out, suggested that to get better understanding of the magnetostriction under the state of stress application is important to find the relation between this phenomenon and noises.

1. ま え が き

近年、大都市周辺に大容量変圧器が設置されるにおよんで、変圧器騒音は公害問題として関係者の注目を集めており、変圧器製造関係者は騒音を低減するため種々な対策を施している。しかしこれらの対策は、おもに変圧器鉄心——特に磁気ひずみ——によって発生する騒音レベルはそのままとして、変圧器の周囲に適切な吸音用の囲いを設けて、外部へ出る騒音レベルを低減することに向けられている。低周波での騒音レベルの低減の困難さにもかかわらず、こうした研究は相当進んでおり、現に多くの低騒音変圧器が完成されている。一方、鉄心自体からの騒音レベルを低減するための研究も各国で行なわれているが、その持っている問題の多様性と複雑さのため、筆者らの知る限り現時点ではまだ具体的な成果として現われていないようである。

変圧器鉄心から発生する騒音は二つの基本的な原因によって生じる。その一つはけい素鋼鉄心内を磁束が移動することによって積層した板の間に働く電磁力であり、今一つは磁化の変化に付随する長さの変化、すなわち磁気ひずみである。そして電氣的、機械的に適当な注意を払って鉄心を設計すれば、前者の影響は避けることができるので、変圧器騒音は磁気ひずみによるものが多いといわれている。したがって、変圧器騒音を低減するためには鉄心の磁気ひずみを小さくすることが必要であり、そのためには現在変圧器鉄心として使用されている方向性けい素鋼帯の磁気ひずみをよく理解することが必要であろう。

方向性けい素鋼帯は周知のように板面に(011)面、圧延方向に[100]軸を持つ、いわゆる Goss Texture をとる多結晶体である。そして非常に Orientation のすぐれているものは単結晶に近いと考えられ、この材料は非常に Stress Sensitive であることが知られている。

ここでは、この方向性けい素鋼帯の磁気ひずみを理解するため、まず磁気ひずみ自体の発生因について述べるとともに、方向性けい素鋼帯の磁気ひずみを2～3の模形について考察した。つぎにこのけい素鋼帯の磁気ひずみを測定するため試作した交流磁気ひずみ測定装置を紹介するとともに、この装置を使用して、現実的な問題として考えられる磁気ひずみと Stress の関係を測定したのでその結

果を報告し、最後に応力印加により騒音が増大する様相を簡単な模形により考察した。

2. 磁気ひずみ

磁気ひずみとは強磁性体を磁化したときに磁性体の外形が変化する現象である。この変形による $\Delta l/l$ は一般に非常に小さく、今問題としている方向性けい素鋼帯では $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 程度である。強磁性体のある方向に磁界を加えていくと、磁化方向に伸び(縮み)ついに飽和する。このように磁化の変化とともに外形が変化する理由は、もともと強磁性体内の一つの磁区の内部で結晶が磁化方向にひずんでいるためである。外部磁界の作用によって、磁化の方向を揃えると各磁区内の結晶のひずみは磁化の変化に伴ってその向きを変えるので、全体として、外形が変化するのである。

この現象を方向性けい素鋼帯に適用して考えてみる。この材料の磁区構造は周知のように 180° 磁区と 90° 磁区で構成されている。今、この材料を外部磁界によって磁化した場合を考える。その磁化過程は一般に磁壁移動、回転磁化の順序で行なわれる。磁壁移動による磁気ひずみは、 180° 磁壁移動の場合その相対的体積は変化しないので0であり、 90° 磁壁移動の場合は正である。一方、回転磁化による場合は負の磁気ひずみを生じる。したがって磁気ひずみ λ と磁束密度 B の関係は定性的に図 2.1(a) のような変化を示すことになる。最初は磁壁移動による正の磁気ひずみのため λ は増大し、 B がある値以上になると回転磁化による負の磁気ひずみのため λ は減少する。磁気ひずみが 90° 磁壁移動のときは、正、回転磁化のと

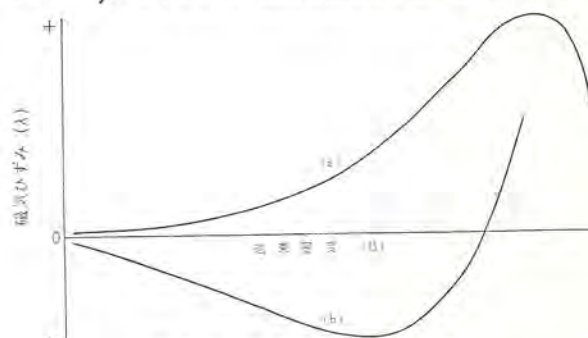


図 2.1 磁気ひずみ曲線
Magnetostriction curves.

き負となるのは、後に述べるが Si-Fe 立方晶の磁気ひずみ定数 λ_{100} ([100] 方向の飽和磁気ひずみ) と λ_{111} ([111] 方向の飽和磁気ひずみ) の符号が異なる。不等方磁気ひずみ (大きさの異なる場合にも使われる) のためである⁽¹⁾。

方向性けい素鋼帯は、その磁区構造が 180° 磁区のみでできており、圧延方向に完全な Orientation を持てば、この方向に対する磁気ひずみは発生しないことになる。現在市販されている方向性けい素鋼帯の磁気ひずみは適当なひずみと焼鈍を行なえば、ほとんどものが低磁場では負、高磁場では正となっている。この様子を示したのが図 2.1 (b) である。これはすでに述べたことから、定性的に低磁場で 180° 磁壁移動を伴った回転磁化が生じ、高磁場で 90° 磁壁移動が生じていることを示している。

普通、高磁場で回転磁化が生じるのは自発磁化の方向に依存するエネルギー、すなわち磁気異方性エネルギーが大きいためであるが、静磁エネルギーが大きくなれば低磁場でも回転磁化が可能になるといわれている。これを説明するためには方向性けい素鋼帯の磁区構造と Orientation を明らかにしなければならないが、これについては 4 章で述べることにし、次章では磁気ひずみの発生機構を簡単に示して、さきに述べた 90° 磁壁移動と回転磁化による磁気ひずみの値を定量的に求めるために必要な Becker と Döring の磁気ひずみの方程式を求める。

3. 磁気ひずみの発生機構と磁気ひずみの方程式

強磁性体の磁区内のスピンの相互作用によるエネルギーは、スピンを結ぶ方向とスピンのなす角を ϕ とし、スピン間の距離を r とすれば、 ϕ と r の関数である。したがって相互作用が r の関数であれば、強磁性の発生とともにこの相互作用によって結晶格子はひずまなければならない。また相互作用が ϕ の関数であることはこの相互作用による結晶のひずみが自発磁化の方向によって変化することを示している。

したがって結晶はスピン間の相互作用が角 ϕ の関数であることによって生じる異方性エネルギー E_K 、結晶のひずみとスピン間の相互作用との組合わせによって生じる磁気弾性エネルギー E_{ME} と結晶がひずむことによって結晶中に貯えられる弾性エネルギー E_{EL} を持つことになるので結晶のひずみはこれらの全エネルギー

$$E = E_K + E_{ME} + E_{EL}$$

が極小となる条件で決まることになる。

さて磁気ひずみの発生機構がわかったので、次に解析的に磁気ひずみの大きさを求めてみよう⁽²⁾。

今、磁性体中のひずみのない結晶の一点を考え、その位置を任意にとった原点からのベクトルによって示すことにする。このベクトルの長さを r_0 、結晶軸に関するそのベクトルの各成分を x_0, y_0 および z_0 とする。もしこの結晶が変形を受けた場合、このひずみを受けた結晶に関するベクトルの各成分がおのおの r, x, y および z に変わったとすれば、これらは弾性理論によれば次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + A_{11}x_0 + A_{12}y_0 + A_{13}z_0 \\ y &= y_0 + A_{21}x_0 + A_{22}y_0 + A_{23}z_0 \\ z &= z_0 + A_{31}x_0 + A_{32}y_0 + A_{33}z_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ここに A_{ij} はひずみのテンソル成分である。ひずみを受けていない結晶に関するベクトルの方向余弦をおのおの β_1, β_2 および β_3 とすれば

$$\beta_1 = x_0/r_0, \quad \beta_2 = y_0/r_0, \quad \beta_3 = z_0/r_0$$

これらを式 (3.1) に代入すれば式 (3.2) が得られる。

$$\left. \begin{aligned} x &= r_0(\beta_1 + \sum A_{1j}\beta_j) \\ y &= r_0(\beta_2 + \sum A_{2j}\beta_j) \\ z &= r_0(\beta_3 + \sum A_{3j}\beta_j) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

式 (3.2) よりひずみを受けた結晶のベクトルの長さは A_{ij} の高次の項を無視すれば式 (3.3) のようになる。

$$r = r_0(1 + \sum_{ij} 2A_{ij}\beta_i\beta_j)^{1/2} \quad (3.3)$$

また

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{r - r_0}{r_0}$$

であるから、結局磁気ひずみは式 (3.4) であらわされる。

$$\frac{\Delta l}{l} = \sum_{ij} A_{ij}\beta_i\beta_j \quad (3.4)$$

今、結晶のひずみが、結晶軸に関する自発磁化の方向についての方向余弦 α_1, α_2 および α_3 に依存すると仮定すれば A_{ij} は α のべき級数で表わすことができる。Becker と Döring は磁気ひずみの発生因のところで述べた結晶の自由エネルギーが極小となる条件からこれを導いている。すなわち自由エネルギーは $E = E_K + E_{ME} + E_{EL}$ で表わせるので $\partial E / \partial A_{ij} = 0$ で結晶のひずみが定まる。ここに異方性エネルギー E_K は α_i のみの関数である。磁気弾性エネルギー E_{ME} は α_i と A_{ij} の関数である。弾性エネルギーは弾性理論から明らかのようにひずみのテンソル成分 A_{ij} のみの関数である。

したがって、さきに述べた極小の条件より、ひずみのテンソル成分 A_{ij} と方向余弦 α_i を関係づけることができる。今その高次の項を無視すれば、

$$\left. \begin{aligned} A_{ii} &= a + b\alpha_i^2 \\ A_{ij} &= c\alpha_i\alpha_j \quad (i \neq j) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

として示され、この A_{ii} と A_{ij} を式 (3.4) に代入すれば式 (3.6) が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta l/l &= 3a + b(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2) \\ &\quad + c(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) \quad (3.6) \end{aligned}$$

消磁状態では磁区は Random に配列しており、系の全磁気モーメントの和は 0 であるので

$$\Delta l/l = 0$$

またこのとき $\alpha_i^2 = 1/3, \alpha_i\alpha_j = 0$ であるから式 (3.6) は式 (3.7) のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta l/l &= h_1(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3) \\ &\quad + 2h_2(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) \quad (3.7) \end{aligned}$$

いま、 I_S が [100] を向いたときのひびを λ_{100} とすれば式 (3.7) で $\alpha_1 = \beta_1 = 1, \alpha_2 = \alpha_3 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ とおけばよいから

$$\lambda_{100} = \frac{2}{3}h_1$$

同様に [111] に磁化したときのひびを λ_{111} とすれば、これは $\alpha_1 = \beta_1 = 1/\sqrt{3}$ とすればよいから

$$\lambda_{111} = \frac{2}{3}h_2$$

が得られる。この λ_{100} と λ_{111} を使って式 (3.7) を表現すれば、Becker と Döring の磁気ひずみの方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta l/l &= 3/2\lambda_{100}(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3) \\ &\quad + 3\lambda_{111}(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) \quad (3.8) \end{aligned}$$

ここに α_i は結晶軸に関する自発磁化の方向の方向余弦

β_i は結晶軸に関する磁気ひずみが測定される方向の方向余弦

表 3.1 飽和磁気ひずみ
Values of saturation magnetostriction.

材 料	磁気ひずみ定数 $\times 10^6$	
	λ_{100}	λ_{111}
Fe	20.7	-21.2
3% Si-Fe	25	-6
6.5% Si-Fe ⁽⁴⁾	2.8	2.5

表 3.1 に Fe, 3% Si-Fe および 6.5% Si-Fe の磁気ひずみ定数を示した。

4. 磁壁移動と回転磁化による磁気ひずみ

4.1 方向性けい素鋼帯の磁区構造

磁性体が磁区構造をとるのは結晶の Spin-Orbit 相互作用により生じる自発磁化のためである。この自発磁化はもしこれらがすべて一方向に向いていると表面に生じる磁極のため大きな静磁エネルギーを生じることになる。これを図 4.1 の (a) に示した。この静磁エネルギーの発生を防ぐためには、図 4.1 (b) に示したように自発磁化により内部磁路を閉じた磁区構造になればよい。

これらの還流磁区は自発磁化が互いに 90° の方向をとることによって弾性的なひずみを引き起こす。このひずみに関するエネルギーを低減するには 90° 磁区量を低減すればよい。これは磁区が図 4.1 (c) のように細分割されれば可能である。しかしこれにも限界がある。というのは磁壁はエネルギーを持つので、磁壁の体積が増大すれば、これによるエネルギーが増大するからである。したがって磁区構造はこれらのエネルギーが極小となるつりあいの条件で定まると考えられている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

実際の磁区構造は材料内部の空孔、きょう(夾)雑物、内部応力および結晶粒界などの影響を受けて相当複雑になっている。したがって、このような磁区構造をとる方向性けい素鋼帯の磁化過程は通常の動作磁束密度では磁壁移動によるので、磁気ひずみは正となり、その大きさは 90° 磁区を含む割合に比例する。

一方、近年の方向性けい素鋼帯は圧延方向に非常にすぐれた Orientation を持っている。その磁区構造も従来考えられていた図 4.1 の磁区構造とは相当異なっていることが見出されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

図 4.2 は Orientation のよい方向性けい素鋼の表面に見られる磁区模様で、一般に磁性体の表面に見られる還流磁区は存在せず、大きな 180° 磁区の内部に自発磁化の符号が異なった Spike 磁区 (Reverse-Domain Spike) が規則正しく配列されている。これらの磁区の自発磁化の方向は圧延面に対してある角度 φ ($\varphi < 10^\circ$) をなしている。

一般に強磁性体の表面に還流磁区が存在しないのは MnBi 合金のように高い結晶異方性エネルギーを持ち、かつ一軸異方性を示す結晶

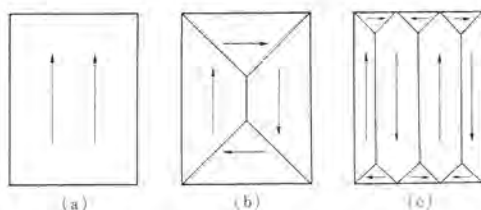


図 4.1 磁区構造による静磁エネルギーの低減⁽⁵⁾⁽⁶⁾
Reduction of static energy in magnetic domain structure.

に限られると考えられるがかならずしもそうではない。もし立方晶の表面が 3 容易磁化軸を切れれば、表面に平行な容易磁化方向は存在せず、表面に磁極が現れわたる。還流磁区は表面の磁極による静磁エネルギーを低減するが、図 4.2 のような磁区構造をとる場合でも Reverse-Domain Spike の存在が自発磁化の閉磁路を構成するので、同様に静磁エネルギーを低減することになる。

このような磁区構造をとる材料の磁気ひずみが負となるのは 90° 磁区を含まないということと、圧延面に対して自発磁化の方向、すなわち [100] 軸が角度 φ だけ傾いていることに原因があると考えられている。

4.2 磁壁移動による磁気ひずみ⁽⁶⁾

図 2.1 (a) のような磁気ひずみ曲線を描く材料の磁気ひずみは、一般的な変圧器の動作磁束密度 ($B=15\sim 17\text{ kG}$) までは、その磁化過程はほぼ磁壁移動によって行なわれるであろう。今、外部磁界に最も近い [100] 方向に、90° 磁区の自発磁化が回転することによって 90° 磁区が消失するときの磁気ひずみは式 (3.8) の Becker と Döring の方程式から導くことができる。

(a) 消磁状態 ($B=0$) における磁気ひずみを λ_A とする。

このとき自発磁化は結晶軸 [100] に向いているので $\alpha_1=1$, $\alpha_2=\alpha_3=0$ である。一方、 β_1 , β_2 および β_3 は結晶の Orientation を示す。

(b) $B=15\sim 17\text{ kG}$ のときの磁気ひずみを λ_B とする。

この場合、自発磁化は 90° 磁壁移動により他の結晶軸 [001] に向いているので $\alpha_1=\alpha_2=0$, $\alpha_3=1$, β_1 , β_2 および β_3 は (a) と同様結晶の Orientation を示す。

よって磁気ひずみは消磁状態を基準にとるのでこの 90° 磁壁移動による磁気ひずみは $\Delta\lambda=\lambda_B-\lambda_A$ である。

$$\Delta\lambda=\lambda_B-\lambda_A=3/2\lambda_{100}(\beta_3^2-\beta_1^2) \dots\dots\dots (4.1)$$

β_1 と β_2 を関係づけるため、 $\beta_2=0$, $\beta_1=\beta_2$ という二つのケースを仮定すると式 (4.1) はおのの次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\lambda &= 3/2\lambda_{100}[2\beta_3^2-1]_{\beta_2=0} \\ \Delta\lambda &= 3/2\lambda_{100}[3/2\beta_3^2-1]_{\beta_1=\beta_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.2)$$

磁性体が 90° 磁区を含む割合を q とすれば磁気ひずみ λ は $\lambda=q\Delta\lambda$ となる。したがって、90° 磁壁移動による磁気ひずみは 90° 磁区含有量と結晶の Orientation β_3 の関数である。

完全な Orientation を持つ場合には $\beta_3=1$, $\beta_1=\beta_2=0$ となり、磁性体は 90° 磁区を含まないことになる。また β_3 は、物理的に $1/\sqrt{3}$ より小さくはなりえない。なぜならばこの値以下になると、 β_3 はもはや外部磁界に最も近接した方向の方向余弦ではなくなるからである。

q と β_3 との関係を定性的にもとめるために $\beta_3=1$ のとき $q=0$ で Orientation が悪くなるにつれて、すなわち β_3 が小さくなるにつれ

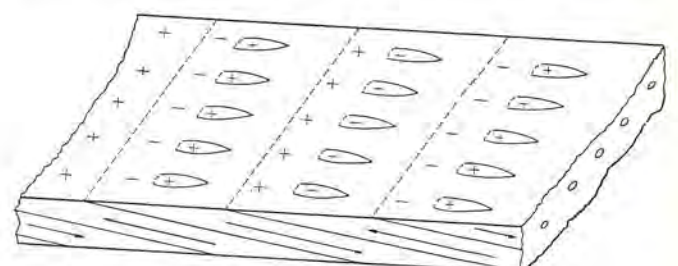


図 4.2 スパイク状磁区のモデル⁽³⁾⁽⁴⁾
Complete magnetic domain model of reverse-domain spikes.

で q が増大するものとする。しかしながら実際に 90° 磁区含有量と q の関係を定量的に求めるのは非常にむづかしいので、ここでは q が β_3 の 1 次関数であるとして $\theta_3(\cos^{-1} \beta_3)$ と λ の関係を求めたのが図 4.3 である。

4.3 回転磁化による磁気ひずみ (高磁界)

$B=15\sim 17$ kG 付近から飽和磁束密度までの磁気ひずみは負になることを考えて見よう。初期条件としては 4.2 節に記した $B=15\sim 17$ kG の磁気ひずみ λ_B である。

$$\lambda_B = 3/2 \lambda_{100} \left(\beta_3^2 - \frac{1}{3} \right) \dots\dots\dots (4.3)$$

今、 λ_C を自発磁化が回転磁化により磁界方向に飽和したときの磁気ひずみとする。このとき $\alpha_1=\beta_1$, $\alpha_2=\beta_2$ および $\alpha_3=\beta_3$ となるから

$$\lambda_C = 3/2 \lambda_{100} \left(\beta_1^4 + \beta_2^4 + \beta_3^4 - \frac{1}{3} \right) + 3\lambda_{111} (\beta_1^3\beta_2^2 + \beta_2^3\beta_3^2 + \beta_3^3\beta_1^2) \dots\dots\dots (4.4)$$

であるので動作磁束密度から飽和磁化まで磁化が回転磁化によるものであると考えれば、そのときの磁気ひずみ $\delta\lambda$ は $\delta\lambda = \lambda_C - \lambda_B$ である。

$$\begin{aligned} \delta\lambda &= \lambda_C - \lambda_B \\ &= 3/2 \lambda_{100} \left(\beta_1^4 + \beta_2^4 + \beta_3^4 - \frac{1}{3} \right) \\ &\quad + 3\lambda_{111} (\beta_1^3\beta_2^2 + \beta_2^3\beta_3^2 + \beta_3^3\beta_1^2) \dots\dots\dots (4.5) \end{aligned}$$

q と β_3 の関係を 4.2 節で仮定したと同様に考えれば、 $\delta\lambda$ と θ_3 の関係は図 4.4 のようになり、磁気ひずみは全域で負となる。したがって、図 4.3 と図 4.4 を合成すれば、図 2.1 (a) のような磁気ひずみ曲線が得られる。

さて、つぎに図 2.1 (b) の磁気ひずみ曲線を説明するにはこの回転磁化が低磁場でおこることを示さなければならない。

4.4 低磁場における回転磁化⁽⁷⁾

方向性けい素鋼帯の磁区構造は Orientation のよい場合、図 4.2 に示したように Reverse-Domain-Spike を含んだ 180° 磁区で構成されることが知られている。この軸区模様様の Orientation は角 ϕ , β および α を持った Parameter で表示することができる。ここに

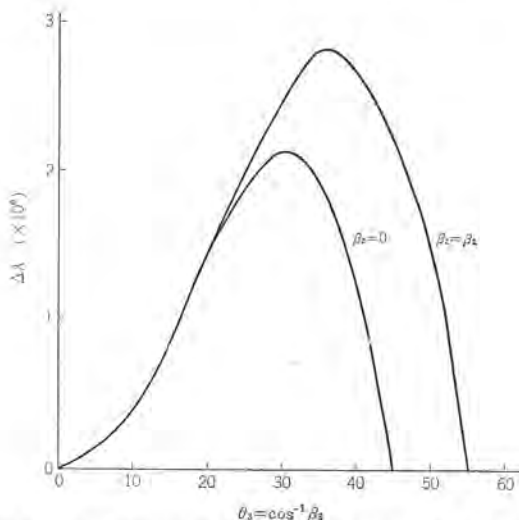


図 4.3 90° 磁区の消失による磁気ひずみの変化⁽⁶⁾
Changes in magnetostriction $\Delta\lambda$ due to disappearance of 90° domains, as a function of θ_3 between the field direction and the nearest $[100]$ direction.

$\phi < 10^\circ$, $\beta = \alpha \approx 0$ であることが実験的にたしかめられている。

この磁区模様を Schematic に示したのが図 4.6 である。今、この材料における回転磁化が低磁場で発生することを理論的に説明すれば、低磁場における負の磁気ひずみを理解することができる。

さて、外部磁界 H_i を印加した結果、自発磁化 I_s が $[100]$ 軸から θ だけ回転して釣り合ったと考えれば、この系の単位体積あたりの全エネルギーは次のようになる。

$$\begin{aligned} E_T(\theta, q) &= 2\pi I_s^2 \sin^2(\phi - \theta) (1 - q)^2 + \frac{8I_s^2 D \sin^2(\phi - \theta)}{\pi^2 \alpha_0} f(q) \\ &\quad + K_1/4 (\sin^2 2\theta + \sin^4 \theta) + E_7/D \\ &\quad - H_i I_s \cos(\phi - \theta) (1 - q) \dots\dots\dots (4.6) \end{aligned}$$

ここに

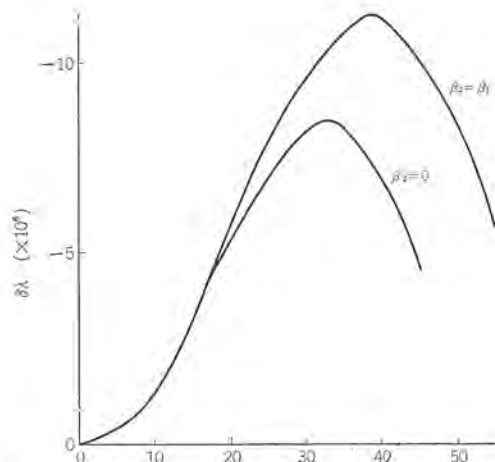


図 4.4 磁界印加方向に磁化ベクトルが回転することによる磁気ひずみの変化⁽⁶⁾

Changes in magnetostriction $\delta\lambda$ due to magnetization vector turning to the field direction as a function of the angle θ .

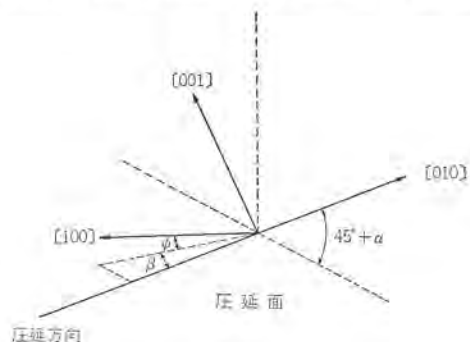


図 4.5 圧延方向に対する結晶軸の位置⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁷⁾
Positions of the crystallographic axes with respect to the rolling direction.

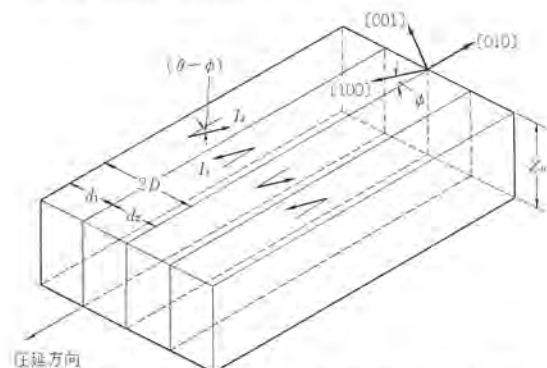


図 4.6 180° 磁区を持つ試料のモデル⁽⁷⁾
Model used to represent specimen containing 180° domains.

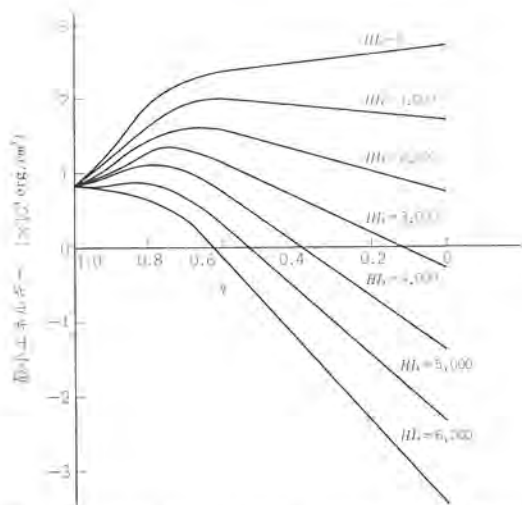


図 4.7 q の値に対する最小エネルギーの変化⁽⁷⁾
Variation of minimum energy in sections of given q .

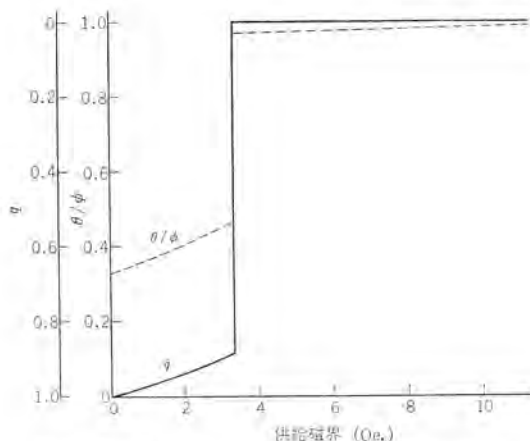


図 4.8 供給磁界による q と θ の変化
Variation of q and θ with applied field.

- 第 1 項と第 2 項：結晶表面に直角な自発磁化成分 $I_s \sin(\phi - \theta)$ 成分のために現われる単位体積あたりの静磁エネルギー
- 第 3 項：[100] 軸から磁区の自発磁化のベクトルが角 θ だけ回転することにより発生する単位あたりの結晶磁気異方性エネルギー
- 第 4 項：単位体積あたりの磁壁のエネルギー
- 第 5 項：外部磁界 H_l により与えられる相互エネルギーであって、また

$$f(q) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1 - \cos m\pi q}{m^2}, \quad 2D = d_1 + d_2, \quad q = \frac{d_2}{D}$$

として示される。式 (4.6) は θ と q の関数であるので q をパラメータにとれば、系の最小エネルギーの条件は

$$\partial E_T / \partial \theta = 0 \quad (4.7)$$

で与えられる。この式 (4.7) を式 (4.6) に代入し、 $\sin \phi \approx \phi$ 、 $\sin \theta \approx \theta$ 、 $\cos \phi \approx \cos \theta \approx 1$ と考えれば次式が得られる。

$$\theta = \phi - \frac{4\pi I_s^2 (1-q)^2 + \frac{16I_s^2 D}{\pi^2 \epsilon_0} f(q) + H_l I_s (1-q)}{4\pi I_s^2 (1-q)^2 + \frac{16I_s^2 D}{\pi^2 \epsilon_0} f(q) + H_l I_s (1-q) + 2K_1} \quad (4.8)$$

したがって、この式 (4.8) は与えられた q および外部磁界 H_l において、系のエネルギーが最小となる自発磁化 I_s の回転角 θ を示している。ゆえにこの θ を式 (4.6) に代入すれば、与えられた q および H_l における最小のエネルギーを求めることができる。図 4.7 にこの

関係を示した。消磁状態では最小のエネルギーの位置は $q=1$ の点にある。外部磁界が増大して $H_l I_s$ が 2,000 以上になると最小エネルギーの位置は $q=0$ の点になる。しかし、 $H_l I_s$ が 5,000 のあたりまで、 $q=1$ と $q=0$ の間に最大的位置があるので、この最小のエネルギーを達成することができない。 $H_l I_s$ を 5,500 を越えると曲線から最大的位置が消え、つりあいの位置で $q \approx 0.9$ から $q=0$ まで急激な跳躍が生じる。この後 q は H_l の増大に応じて徐々に減少していく。この過程における θ と q の関係は式 (4.8) から求めることができる。図 4.8 は外部磁界 H_l に関する θ と q の変化を示したものである。 $q=0$ のとき $\theta=0.98\phi$ で、 $\theta=\phi$ になるまで自発磁化を回転させるためには相当に外部磁界を増大せねばならない。

また $H_l=0$ のときのつりあいの位置は $q=1$ 、 $\theta=0.3\phi$ によって与えられる。これは消磁状態においてさえ自発磁化が [100] 軸から回転しようとすることを示している。外部磁界が 3.34 Oe のときの θ の変化は 3.8° であるが、もしこの回転が結晶磁気異方性エネルギーに抗して生ずるとすれば、外部磁界 H_l の大きさは 3,600 Oe 程度となる。

つまり Orientation のすぐれた方向性けい素鋼帯の磁区構造を支配する要因は静磁エネルギーであり、このエネルギーを最小にする要求が低磁場における回転磁化を可能にしているように思われる。

このときの磁気ひずみは自発磁化の回転角を θ ($\theta \leq \phi$) とすれば次のようになる。

$$\Delta l/l = 3/2 \lambda_{100} (\cos^4 \theta - \cos^2 \theta + 1/2 \sin^4 \theta) + 3\lambda_{111} (\cos^2 \theta \sin^2 \theta + 1/4 \sin^2 \theta) \leq 0$$

5. 交流磁気ひずみ測定器

方向性けい素鋼帯の磁気ひずみ現象によって生じる微小変位を測定するために多くの方法が使用されている。静磁気ひずみ測定法の代表的なものとして Optical Lever 法、Strain Gauge 法ほかがある。交流磁気ひずみ測定法としては前述の Strain Gauge も使えるが、その他圧電現象を利用した Crystal Pick Up 法、キャパシタンス変化を利用した可変容量法、鉄心の変位を電圧の変化として取り出す差動トランス法などが代表的なものである。

当所には従来から静磁気ひずみ測定器として Optical Lever 法があり、今日まで数多くの磁気ひずみの測定を行ってきたが、当測定器の測定原理から考えて、交流磁気ひずみの測定には適用できず、そのため磁気ひずみの測定にかなりの時間を要する。またこの方法では感度と精度の面で 10^{-7} 程度の磁気ひずみを測定するためには非常に細くて真円度のよいミラー軸が必要である。もしこれらの要求をすべて満たしてもそれにつれて測定の困難さが増大することが予想される。こうしたあい (隘) 路を開闢するため、今回差動トランスを利用し、機械的応力印加のもとでも磁気ひずみが測定できる交流磁気ひずみ測定器を試作した。

5.1 交流磁気ひずみの測定原理

図 5.1 に磁気ひずみの測定原理を示す Block Diagram を示した。磁化コイルの中に入れた試料 (3 cm × 30 cm Epstein Sample) を所要の磁束密度に磁化し、磁束密度に比例した電圧を試料全長に巻かれた B Pick Up 用二次コイル ($N_2=1,120$ T) で検出し、積分増幅した後、Brown 管オシロの水平軸に入れる。磁気ひずみ λ は試料と直結した差動トランスの磁心の変位にかえる。この変位に比例した電圧は微小電圧であるため、周波数 6 kHz の搬送波で変調し、これを搬送波増幅器で増幅し、磁気ひずみの正負を判別するため、リング復調

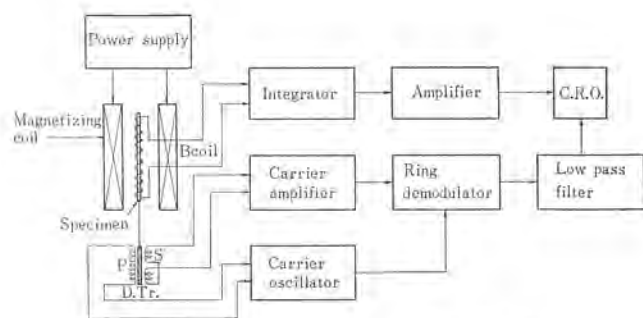


図 5.1 磁気ひずみ測定器のブロック線図
Block diagram of magnetostrictometer.

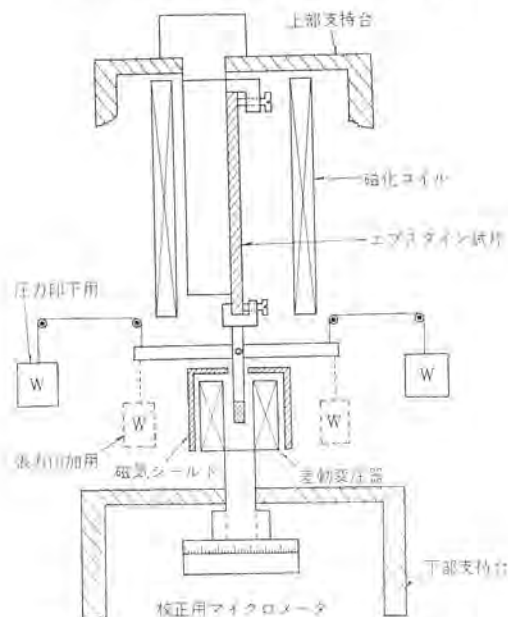


図 5.2 磁気ひずみ検出部の機構
Mechanism for detection of magnetostriction.

器で位相検波し、低域系(低)波器に入れ、高調波成分を除去した後、Brown 管オシロの垂直軸に加えれば Brown 管オシロ上に磁気ひずみ λ と磁束密度 B のリザージュ図形 (Butterfly Loop) を描かせることができる。

5.2 磁気ひずみ測定器の検出部

次に磁気ひずみ測定器の検出部について考察を加える。当装置では磁気ひずみ測定用 Epstein Strip の板面に垂直な方向に加わる電磁力によって Strip が振動するのを防ぐため、Strip を保持するためのベークライ板と Strip の間に油を塗布した。油と Strip 間の吸引力は表面張力に関する次式によって求めることができる。

$$P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) (g/cm^2)$$

今、膜の厚さを d 、 $1/R_2 \approx 0$ と置けば、吸引力は $P = 2\sigma/d$ である。ここに $\sigma \approx 3 \times 10^{-2} [g/cm]$ $d \approx 0.1 \sim 0.01 [mm]$ とすれば、吸引力は $6 \sim 60 g/cm^2$ 程度となるが、このような大きな電磁力が Strip の板面に垂直な方向に加わるとは考えられないので十分であろう。

つぎに油を塗布したことにより Strip には磁気ひずみによる伸びを押えようとする抗力 τ が働く。この力は Strip の速度を u 、粘性係数を η とすれば、次式で求めることができる。

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial x}$$

油膜の厚さを d 、磁気ひずみの最大振幅を a 、磁気ひずみの振動周波数を f とすれば、 τ の最大値は近似的に次式のようになる。

$$\tau = \eta \frac{2\pi f a}{d}$$

今、この式に $f = 120 \text{ Hz}$ $a = 10^{-4} (cm)$ $d = 10^{-2} \sim 10^{-3} (cm)$ として $\eta = 5 \times 10^{-4} g \cdot s/cm^2$ を代入すれば、抗力の最大値はほぼ $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-6} g/cm^2$ となり、磁気ひずみによる力に比べて非常に小さく、この影響は考えられないので油膜を塗布することによる磁気ひずみ測定に対するいかなる障害も考えられず、むしろ電磁力の影響を防ぐため非常に有効である。

方向性けい素鋼帯が変圧器鉄心として組立てられた状態では、かなりの外部応力が鋼帯に加わっていることが考えられる。この観点から応力と磁気ひずみの関係を調べるため、図 5.2 に示したように本測定装置では圧延方向に Tension と Compression を印加できるようにになっている。この機構により Tension は実用範囲内でも印加できるが、Compression を印加する場合には限界がある。

その Critical Compression は油を塗布しない場合は理論的に 1 kg/cm^2 程度であるが油を塗布することにより 10 kg/cm^2 まで伸びる。しかしこれ以上になると Strip は座屈するので測定不能となる。

実機の変圧器鉄心に加わっている加圧力は $3 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ 程度と考えられるので、この程度の Compression までで十分であろう。これ以上に Compression を印加する場合には現状のような方法、すなわち 1 枚の Strip の圧延方向に Compression をかけるだけでは達成できないので、系の慣性モーメントを上げるような工夫、たとえば 4 枚の Strip で角筒構造にするようなことをしなければならない。

差動変圧器の Calibration はドラム形のマイクロメータのヘッドを差動変圧器の磁心に直結して、マイクロメータの変位によって行なうようにした。この測定に用いた Philips 社製差動変圧器 (PR 9310 形) の公称分解能は 0.1μ である。磁気ひずみ測定の有効測定長は 28 cm であるので、この意味から感度は 3.6×10^{-7} である。測定感度にはこのほかに振動系や増幅系からの雑音も関係するが、これによる感度の制限は適当な注意をはらえば、相当改善することができる。ここでは 1×10^{-7} 以下に押えた。したがって、差動変圧器の分解能が公称値よりよいものと考えれば 1×10^{-7} の磁気ひずみの測定も可能である。

一般に磁気測定は磁束正弦波条件で行なうのを原則とするが、本測定装置は開磁路形の磁路構成を採用しているため、比較的低磁束密度で磁束波形がひずむことが考えられる。現状では $B = 15 \text{ kG}$ では問題はないが $B = 17 \text{ kG}$ になると波形は幾分ひずんで測定上問題があるので、一次と二次の間に波形率補正器をそう (挿) 入して負帰還技術によってこの改善を行なった。 $B = 17 \text{ kG}$ 程度までは本方法によって改善できるが、これ以上になると本方法にも限界があるので高磁束密度で測定するためには磁路構成は閉磁路形にしなければならないであろう。なお、磁束密度は有効試料の長さ全体に巻かれた二次コイルから検出する平均磁束法によった。

6. 測定結果

6.1 磁気ひずみのばらつき

この交流磁気ひずみ測定器を使用して、方向性けい素鋼帯 G11 (0.35 mm As Recived) の 60 Hz における磁気ひずみの諸特性を測定した。磁気ひずみの大きさは Brown 管オシロ上の Butterfly Loop

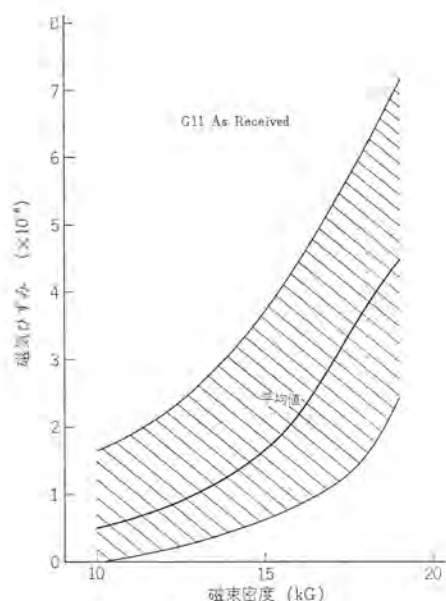


図 6.1 磁気ひずみのバラツキ
Variation of magnetostriction.

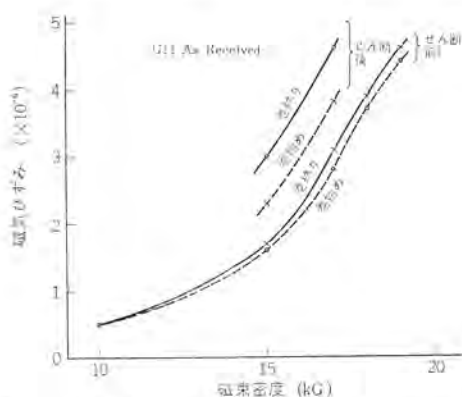


図 6.2 せん断加工による磁気ひずみの変化
Changes of magnetostriction due to shearing stress.

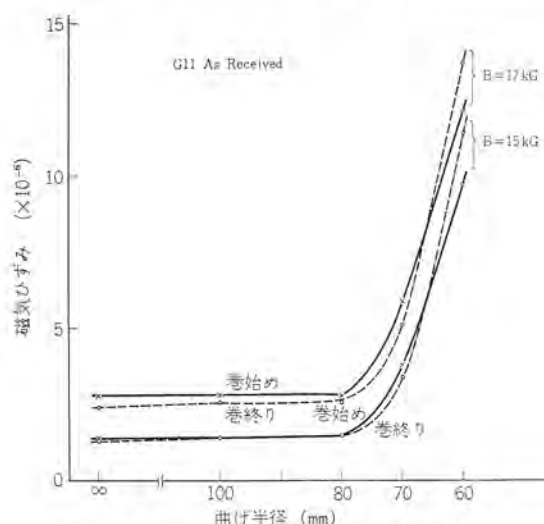


図 6.3 曲げ加工による磁気ひずみの変化
Changes of magnetostriction due to bending.

の Peak to peak の値をとった。巻き始めと巻き終わり各 27 枚の磁気ひずみを測定し、ばらつきと共に図 6.1 に示した。巻き始めと巻き終わりの差はほとんどなかった。測定試料が As Recieved の材料のため磁気ひずみの値はすべて正であった。

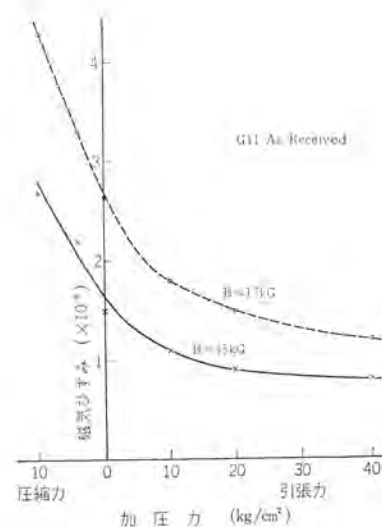


図 6.4 引張りおよび圧縮による磁気ひずみの変化
Changes of magnetostriction due to tension and compression.

6.2 磁気ひずみの応力特性

図 6.2 は Shearing Stress による磁気ひずみの劣化の度合いを知るため、Epstein Strip の両端 1 mm を Shearing した前後における磁気ひずみの測定を行なったものである。B=15 kG および B=17 kG で各々 66 % および 42 % 磁気ひずみは増大した。

次に弾性曲げと磁気ひずみの関係を知るため半径がおのの 100, 80, 70, および 60 mm のマイカルタチューブを用意し、円周方向に沿って、各 Strip を 5 秒間保持することにより曲げ応力を加えた後、磁気ひずみの測定を行ない図 6.3 に示した。0.35 mm 厚さの板についての弾性限界と考えられる R=100 mm では磁気ひずみは変わらず、R=80 mm までは磁気ひずみは増大しなかったが、R=80 以下になると著しく磁気ひずみは増大した。

引張り応力と曲げ応力を同時に加えれば（たとえば巻取り時）磁気ひずみは R=80 mm 以上でも増大することが予想されるが、今回はその実験は行なわなかった。

図 6.4 は Strip の圧延方向に Tension および Compression を印加したときの磁気ひずみの測定結果である。予想されたように磁気ひずみは Tension によって小さくなり、Compression によって増大した。そして Tension による減少より Compression による増大の割合の方が著しいことがわかる。巻き終わりの各 Strip は 10 kg/cm² の Compression によって座屈した（弾性係数が巻き始めの Strip より小さいためであろう）ので、この点での磁気ひずみの測定を行なうことができなかった。図 6.4 の曲線は巻き始めと巻き終わりの各値を平均したものである。

これらの実験結果より応力印加状態の磁気ひずみは Non Stress のそれより相当変化する。方向性けい素鋼帯は元来非常に Stress Sensitive な材料であることから容易に推定できることであるが、外部応力は Tension を除いて磁区の Disorientation をおこすため磁気ひずみを相当に増大させることを示している。この Tension と Compression による磁気ひずみの変化は磁区の Orientation の面から定性的に次のように考えることができよう。

方向性けい素鋼板の圧延方向に Tension が加えられるならば、鋼板には通常の弾性ひずみと圧延方向に平行および反平行に回転する自発磁化によって生じる磁気ひずみがたくわえられる。これらによって自発磁化が [100] 軸方向にあるとき、内部にたくわえられるエネルギーは小さくなるので自発磁化は [100] 軸方向にさらに回転す

結果、圧延方向の磁気ひずみは小さくなる。したがって、すべての自発磁化が [100] 軸方向と回転するように十分な Tension を圧延方向に加えれば、これをこの方向に磁化したとき、その磁化過程はまったく 180° 磁壁移動によるため磁気ひずみは 0 となる。

圧延方向に Compression を受けた場合はこれとは逆に自発磁化は [010] 軸と [001] 軸に回転するため、磁区の Disorientation が生じ磁気ひずみは増大する。

実際の変圧器鉄心には Tension と Compression がほぼ等しくかかっていることが考えられるが、磁気ひずみは Tension による減少の割合より Compression による増大の割合のほうが著しく大きいので一般に鉄心に加えられる応力は磁気ひずみに対して非常に有害であるといえる。

7. 鉄心に加わる加圧力の影響

変圧器の鉄心構造は積み高さ H (cm) で、鉄心の上面に P_0 (kg/cm²) の荷重がかかっている簡単な図 7.1 のような模型で考えることができる。

P_0 荷重のかかっている面から y の点には鉄心の自重が加わっており、鉄心の密度を ρ とすれば、単位面積あたりの荷重 P は式 (7.1) で表わされる。

$$P = P_0 + y\rho \quad (7.1)$$

実際は磁気ひずみと Stress の関係は Non Linear であるが、今、Compression によって磁気ひずみが Linear に増大するものと考えれば、磁気ひずみと Compression の関係は

$$\lambda = \alpha P_C + \lambda_0$$

ここに P_0 は Compression, λ_0 は Stress のかかっていないときの磁気ひずみである。今、図 7.1 に示した模型鉄心の Stress の加わっているときと、加わっていないときの磁気ひずみによる音響パワーの比を求める。仮に加圧力がすべて Compression に変わったとすれば、音響パワーは λ の自乗に比例するので次のように示すことができる⁽¹⁰⁾。

$$K = \frac{\frac{1}{H} \int \lambda^2 dh}{\lambda_0^2} = \frac{\frac{1}{H} \int \{\alpha(P_0 + h\rho) + \lambda_0\}^2 dh}{\lambda_0^2}$$

ここに各定数を次のように定めれば

$P_0 = 3$ kg/cm², $\rho = 7.65 \times 10^{-3}$ kg/cm², $H = 150$ cm, $\alpha = 0.12$, $\lambda_0 = 1.5$, (α と λ_0 は図 6.4 の $B = 15$ kG の曲線より求めた) $K \approx 1.65$ となり、

$B = 15$ kG における模型鉄心の磁気ひずみによる音響パワーは加圧

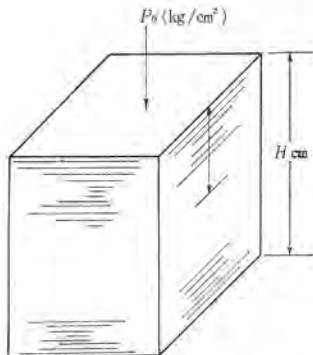


図 7.1 応力解析モデル
Model of stress analysis.

力によって 65 % 増大する。

同様のことを試みに鉄損について求めて見る。G 13 についてのデータでは鉄損は加圧力 P kg/cm² のもとで無加圧時の鉄損を W_0 w/kg とすれば $W = W_0(1 + 0.35P)$ の式で増大する⁽⁹⁾。今、前述と同様の模型鉄心についてその鉄損の増大を求めれば、これは約 11 % 程度となる。

8. む す び

変圧器鉄心として使われる冷間圧延方向性けい素鋼帯は圧延面に [011] 面を、圧延方向に [100] 結晶軸をもち(いわゆる Goss Texture)、圧延方向にすぐれた Orientation を示す結晶の強磁性体である。もしこの材料の Orientation が完全であれば、磁化過程はすべて 180° 磁壁移動によるのでその相対的体積は磁化の前後で変わらないから磁気ひずみは 0 である。しかし、現在鉄心として使用されている大部分のけい素鋼帯はこのような完全なものでなく、Orientation の悪い結晶や還流磁区が存在するため少量の 90° 磁区を含んでいる。90° 磁区を比較的多く含んでいる材料の磁化過程は 90° 磁壁移動によるので、その磁気ひずみは正となる。もしほとんど 90° 磁区を含んでいない場合、Orientation のすぐれた材料は [100] 結晶軸が圧延面と一致しておらず、ある傾き角をもっているためにその磁化過程には低磁場での回転磁化を伴うので磁気ひずみは負となる。

これらは Becker と Döring の磁気ひずみ方程式と結晶のエネルギ-を考慮することによって理論的に説明することができる。

実際にこれらの材料が変圧器の鉄心として組込まれた場合、その磁気ひずみは Static な磁気ひずみとは相当異なったものになることが予想されるので、交流の磁気ひずみ測定器を試作して、60 Hz における各種応力印加状態での磁気ひずみの測定を行なった。Shearing Stress によって磁気ひずみは相当劣化した。弾性曲げ応力の影響については臨界弾性曲げ半径 ($R = 80$ cm, GII, Os Received) まで磁気ひずみは変化しなかった。また磁気ひずみは圧延方向に加えられた Compression によって著しく増大し、Tension によって少し改善された。

もし変圧器騒音が主に磁気ひずみによるものとするならば、これらの応力印加状態における磁気ひずみについての理解が必要であろう。(昭和 44-1-10 受付)

参 考 文 献

- (1) 近角：強磁性体の物理(昭 34) 裳華房
- (2) A. H. Morrish: The Physical Principle of Magnetism (1965) John Wiley & Sons Inc.
- (3) W. S. Paxton & T. G. Nilan: J. Appl. Phys. 26, 994 (1955)
- (4) J. B. Goodenough: Phys. Rev., 102, 356 (1956)
- (5) C. Kittel: Rev. of Modern Phys., 21, 541 (1949)
- (6) E. J. Langham: Brit. J. Appl. Phys., 14, 16 (1963)
- (7) C. M. Brownsey & G. C. Maples: Proc. I. E. E. 113, No. 11, 1855 (1966)
- (8) D. Brown, et al: Proc. I. E. E., 111, (1964)
- (9) 野口：昭 38 連大 シンポジウム 予稿 S. 3-4
- (10) 高透磁率磁気材料専門委員会：電気学会技術報告, No. 34, 1, (昭 34)

両方向直流高速度しゃ断器

渡 辺 睦 夫*

Non-Polarised DC High-Speed Air Circuit Breaker

Kobe Works Mutsuo WATANABE

For the rational protection of ever enlarging DC power circuits, non-polarised DC high speed air circuit breakers have been developed. This report deals with an outline of structure, operation and characteristics of type BHB-30 non-polarised DC high speed air circuit breakers, introducing a few examples of application. The fundamental mechanism of the circuit breaker consists in magnetic holding and collision opening with tripping magnets separated from holding magnets to provide bi-directional tripping characters. The breaker except the tripping magnet is identical with type BHF-30 forward directional high speed air breakers now in the market with good reputation.

The breaker has excellent interrupting characteristics such that the calibration can be made symmetrically or asymmetrically in both directions. In addition, when set up symmetrically it maintains the approximately constant tripping point for reverse current operation in spite of setting value of tripping point for forward current operation.

1. ま え が き

一般に直流高速度しゃ断器といえ、常規電流方向の過電流に対して自動しゃ断する正方向高速度しゃ断器、あるいは常規電流方向と逆方向になった事故電流に対して自動しゃ断する逆方向高速度しゃ断器が考えられ、それぞれの主目的によって前記いずれかのしゃ断器が選定され、従来より、電気鉄道・電気化学・製鉄ミルなどの直流回路保護用に多用されてきた。たとえば、水銀整流器の逆弧保護用として逆方向高速度しゃ断器が、シリコン整流器の過負荷保護用として正方向高速度しゃ断器が一般に使用されてきたが、前者はしゃ断器の負荷側に短絡が起これば、後者はしゃ断器の整流器側に短絡が起これば、その事故電流はしゃ断器の自動しゃ断方向と逆方向になり、しゃ断器は自動しゃ断しないことになる。このため、このような事故に対する保護用として、前者は過負荷継電器を設置し、後者は逆流継電器を設置して、その継電器の動作を介して直流高圧電源を停止させるのが普通であったが、継電しゃ断は大きな短絡事故に対して十分な保護が期待できない欠点がある。また、最近負荷の増大に対処するため、電源設備容量の増大が急務になっており、このため電源の並列運転が多く使用されるようになってきたが、これら電源用正極母線を適正な電源群に区分し、しゃ断器を介して接続すれば、事故時、これらの電源をしゃ断分離することができる。このしゃ断器として、従来の一方向高速度しゃ断器を使用したのでは、しゃ断器が2台必要であり設備費が高価につく欠点がある。

これらの欠点を補うためには、正・逆両方向の事故電流に対して自動しゃ断し、従来の一方向高速度しゃ断器と同様の限流特性を有するとともに、正方向に対しては従来の正方向高速度しゃ断器と同様の高い電流目盛が設定でき、逆方向に対しては従来の逆方向高速度しゃ断器と同様の、低い電流目盛が設定できる正逆方向に対する非対称電流目盛特性、あるいは正逆方向に対して等しい電流目盛の設定ができる、正・逆方向に対する対称電流目盛特性を有する両方向高速度しゃ断器が必要であり、とくに電気鉄道からその電源設備合理化運用のために、強くその開発を要望されていたものである。

これらの要望に応ずるため、当社では、すでに多数の製作実績を

もち、そのすぐれた性能を認められている BHF-30 形直流高速度しゃ断器の電磁保持・衝撃開放形を基本構造とし、両方向引きはずし特性を付与するために、保持電磁石とは別に引きはずし電磁石を付加した BHB 形両方向直流高速度しゃ断器を開発した。以下に BHB-30 形両方向直流高速度しゃ断器の構造、諸性能の概要およびおもな運用例について述べる。

2. 定 格

BHB-30 形高速度しゃ断器のおもな定格は次のとおりである。

形 式:	BHB-30 形
定格電圧:	DC 1,500 V
定格電流:	3,000 A
方 向 性:	両方向性
定格しゃ断容量:	50,000 A (突進率 3×10^6 A/s の回路における推定短絡電流最大値)
定格投入操作圧力:	5 kg/cm ² (空気投入操作方式)
定格投入操作電圧:	DC 100 V, 200 V (電気投入操作方式)
標準動作責務:	0-1 分-CO
重 量:	550 kg (電気投入操作方式, 引出形)

3. 特 長

BHB-30 形高速度しゃ断器は、前記 BHF-30 形高速度しゃ断器と同様電磁保持・衝撃開放形であり、また、その操作方式に空気または電気のいずれでも採用可能なしゃ断器であり、従来の一方向高速度しゃ断器における保持鉄心・目盛装置・保持コイルおよび自動引きはずしコイルからなる保持電磁石装置を、保持鉄心および保持コイルからなる保持電磁石装置と、引きはずし鉄心・目盛装置・自動引きはずしコイルおよび正・逆方向に非対称電流目盛が要求された場合に、必要なバイアスコイルからなる引きはずし電磁石装置とに分離して設置したしゃ断器であり、次の特長を有している。

(1) 電磁保持・衝撃開放形の機構採用、軽量の可動部分の構成および適切な構造の大容量消弧室の使用により、しゃ断容量が大きく、限流特性にすぐれ、しゃ断特性は安定している。

(2) アーク接触子は可動接触子側でフォローをもたせる構造であるため、その動作は安定・確実であり、大電流のシャ断に際しても主接触子の溶損はほとんどない。

(3) 制御回路は主回路電位から十分絶縁されている。

(4) シャ断器の接触子装置と引きはずし装置とは機械的に隔離された構造であるため、シャ断器の投入に際して、引きはずし機構に衝撃を与えることがない。したがってシャ断器の投入に際して、保持電磁石の強励磁その他電流目盛に影響を与えるような緩衝装置などを必要とせず、故障回路を投入したときも正確な電流目盛値で動作する。

(5) 本体機構を利用した小電流シャ断用空気吹付装置を備えているので、小電流シャ断も確実に行なわれる。

(6) 据付方式は引出形・固定形のいずれでも製作できる。

(7) シャ断器は小形軽量であり、可搬性にすぐれ、保守点検に便利な構造である。

(8) 投入操作方式は一部部品の交換により空気または電気のいずれでも採用できる。

(9) 引出形として使用するときのシャ断器引出装置は、低位置であるシャ断器の取付台に装着されているが、その操作軸は自在継手により適当な位置に延長されているため操作しやすく、また主回路電位を受ける部分から十分離れた安全な状態でシャ断器の引出し・そう入ができる。

(10) 正・逆方向に対する対称電流目盛および非対称電流目盛の設定が可能であり、非対称電流目盛のとき、正方向目盛の設定値いかににかかわらず、逆方向目盛値をほぼ一定に保つことができる。(特許申請中)

(11) 保持電磁石内を主回路電流が通らないため、保持電磁石の磁束は主回路電流の変化による影響を受けることなく、したがって不要動作をしない。

(12) 事故電流によるシャ断器の開放力は引きはずし電磁石の可動鉄心吸引力が開放ばねによる開放力に加算されて与えられるため、その開放力は事故電流の大きさにともなって増大する。このことは、事故電流をシャ断器の開放力に有効に利用するものであり、事故電流が大きいくほどシャ断器の開極時間が早くなり、よりすぐれた限流特性を発揮することを意味している。

(13) 2種類の電流目盛装置を備えているため、その一方をパラメータとした二重目盛の設定が可能である。(特許申請中)

なお、両方向高速度シャ断器の運用上から次の特長があげられる。すなわち、

両方向高速度シャ断器は電流方向に無関係に事故電流に応動して自動シャ断するため、本来、一方向高速度シャ断器を2台必要とした回路に1台の使用でよく、経済的にその回路の保護を行なうことができる。また、従来一方向高速度シャ断器の非動作方向事故電流に対するその回路の保護を、継電器によって行なっていたのに比べ、両方向高速度シャ断器の使用はその回路の保護を格段に向上させることができる。

4. 構造および動作

4.1 構造の概要

図4.1は引出形高速度シャ断器の外形写真であり、主回路および制御回路は簡単に着脱できる構造になっている。シャ断器の下部取付台には移動用車輪がついており、また引出装置・投入装置・補

助スイッチなどが装着されている。引出装置の操作軸は自在継手により操作しやすい適当な位置に延長され、その先端には引出操作ハンドル受けを備えている。このハンドル受けに引出用ハンドルをそう入することにより、シャ断器の引出し、そう入操作は主回路電位を受ける部分から十分離れた安全な状態で行える。取付台の上部には絶縁支持がいしを介して、主回路電位を受ける主要機構部分が単体の鋳物で作られたフレームに強固に内装されている。最上部は大電流シャ断を考慮して設計した大容量消弧室である。消弧室は接触部の点検を容易にするため開閉できる構造になっている。

図4.2はこのシャ断器の外形図であり、電気投入操作方式引出形を示している。

図4.3は主要部の構造説明図である。この図はシャ断器の開放状態を示しているが、閉合状態では可動・固定両接触子が接触し、接触ばねにより通電に必要な接触圧力が与えられ、常時、負荷電流は下部端子から入り、引きはずし電磁石を貫通する並列の自動引きはずしコイルを通り、可とう銅帯・可動接触子・固定接触子および接触部の内側に並列に巻かれた吹消コイルを通して上部端子に至る。接触部は主接触子とアーク接触子とから構成され、主接触子には銀接点、主接触子に遅れて開離するアーク接触子には銀タングステン耐弧合金接点を使用している。またアーク接触子は可動接触子側でフォローをもたせる構造である。これは接触部の開離に際してアーク接触子の慣性を追従動作に積極的に利用するものであり、そのフォロー寸法は比較的小きくても、その動作は安定・確実であり、大電流シャ断に際しても主接触子の溶損はほとんどない。

また、図4.4はこのシャ断器の動作説明図であり、図4.4(a)は閉合状態、図4.4(b)は開放状態、図4.4(c)は投入過程の状態を示している。なお、図4.4(a)および図4.4(c)には電磁ソレノイドを備えた電気投入操作方式を示したが、図4.4(b)には空気投入操作方式の場合に使用する電磁弁と前記電磁ソレノイドを並記して示した。図4.3および図4.4からわかるように、このシャ断器の主要機構部分は、固定・可動接触子、接触子腕、接触ばねなどからなる接触子装置、接触子装置と機械的に隔離され接極子・接極子腕・開放ばねおよび引きはずし電磁石などからなる引きはずし装置、前記接触子装置の閉合に際し引きはずし装置を付勢するように作動するとともに、その間、接触子装置を開離状態に鎖錠保持するための操作装置、引きはずし装置を常時保持し、異常電流に応じて解放するための保持電磁石装置、小電流シャ断用空気吹付装置、



図4.1 BHB-30形直流高速度シャ断器
DC 1,500 V 3,000 A
Type BHB-30 DC high-speed circuit breaker

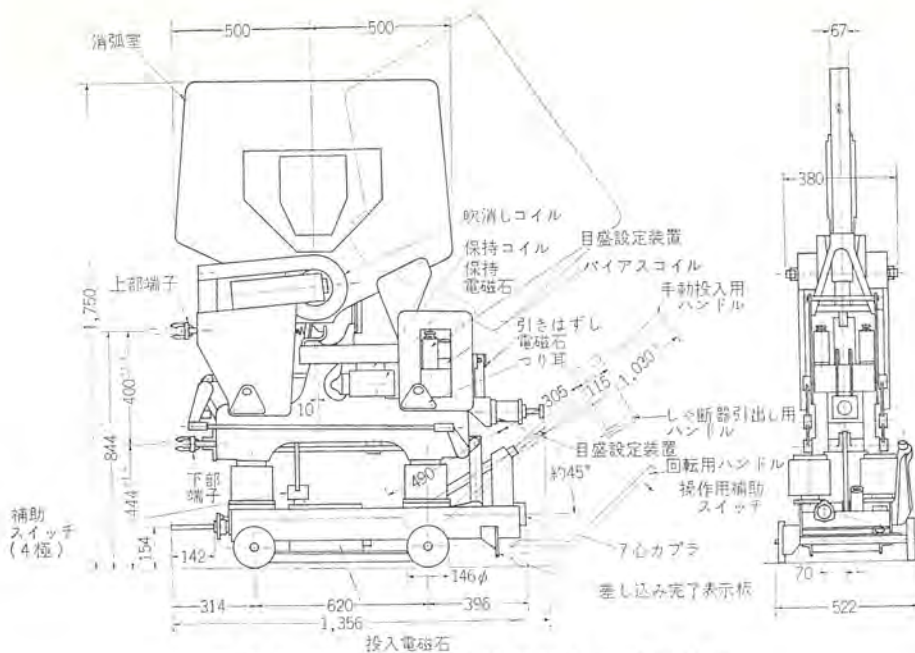


図 4.2 BHB-30 形直流高速度しゃ断器外形
The outline of type BHB-30 high-speed circuit breaker.

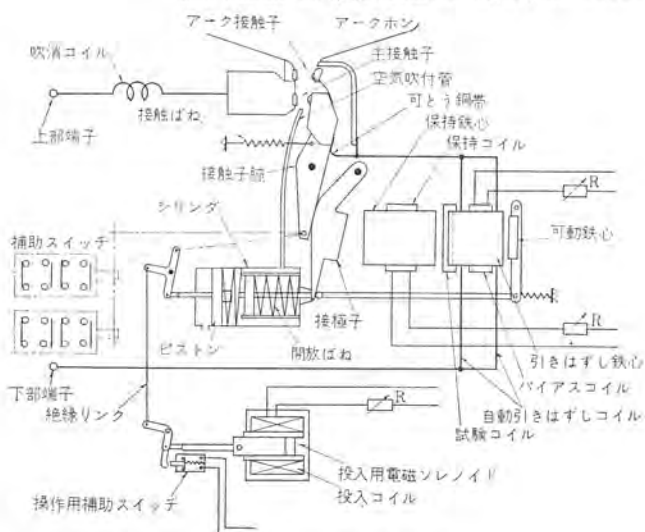


図 4.3 構造説明図
Construction diagram.

および電磁ソレノイドとそれに連結されるリンク機構からなる電気投入装置、または電磁弁とその配管からなる空気投入装置から構成され、これらの装置が巧みに組合わされた構造である。

次にこのしゃ断器の大きな特長の一つである引きはずし機構について説明する。

4.2 引きはずし機構

図 4.5 は BHB 形高速度しゃ断器の引きはずし機構説明図である。この図は理解しやすくするため、保持電磁石および引きはずし電磁石を実際の状態から 90 度回転して示した。

図 4.5 からわかるように、引きはずし機構は保持鉄心 1 と保持コイル 2 からなる保持電磁石装置および引きはずし装置から構成され、引きはずし装置は軸 3 の回りに回転自在な接極子腕 4 と接極子腕に取付けられた接極子 5 とからなる接極子装置、接極子腕 4 の自由端に係合するプルロッド 6、ピストン 7、開放ばね 8 などからなり、前記保持電磁石装置の一定保持力 P_H に対して、一定開放力 P_O を与えるための開放ばね装置、および主回路電流すなわち自動引きはずしコイル 21・22 を流れる電流の大きさに応じて、前記開放力 P_O に加わ

る開放力 P_F を与えるための引きはずし電磁石装置から構成される。また、引きはずし電磁石装置は引きはずし鉄心 11、バイパス鉄心 12、可動鉄心 13、一端がこの可動鉄心に連結され他端は前記プルロッド 6 に係合するトリップロッド 14、可動鉄心 13 を常に動作方向に付勢するための目盛ばね 15、引きはずし電磁石を並列に貫通し、一方には選択特性を付与するための誘導鉄心 23 を備えた自動引きはずしコイル 21・22、正・逆方向非対称目盛のときその一方にあらかじめ磁束を偏向させておくためのバイスコイル 24、試験コイル 25 および電流目盛調整装置から構成される。

電流目盛調整装置は種類設置されており、その一つは前記目盛ばね 15、ばね押え 16、目盛ばね 15 の伸縮を調整し可動鉄心 13 の初期付勢力を調整するための調整ねじ 17、この調整ねじおよびばね押え 16 のガイド 18 および調整ねじ 17 を調整後、その位置に固定するためのナット 19 から構成されるばね圧調整式目盛装置であり、他の一つは高速度しゃ断器の保持電磁石装置に從來から多用されている方式と同じであり、引きはずし電磁石装置にそう入される目盛鉄心 20 の抜き差しにより、引きはずし鉄心 11 におけるその磁路の磁気抵抗を調整する磁気抵抗調整式目盛装置である。

前者はおもに正・逆方向対称電流目盛に対する目盛調整用であり、磁気回路を一定しておくため、前記バイスコイルがない場合対称電流目盛が得られ、後者は正・逆方向非対称電流目盛に対する目盛調整用であり、後述のように磁気回路を適正に選定することにより、正方向電流目盛の設定値いかにかわらず、逆方向電流目盛値をほぼ一定に保つことができる。また、前者を採用するときは後者はそのための最適条件に設定され、後者を採用するときは前者はそのための最適条件に設定されるため、このしゃ断器の電流目盛として二重目盛など変化に富んだ目盛特性を与えることができる。

以上の説明をさらに理解しやすくするため、引きはずし電磁石の磁気回路を等価的に電気回路に置き換えれば、図 4.6 (a) および図 4.6 (b) のようになる。これらの図はバイスコイルを備えた正・逆方向非対称電流目盛の場合を示しており、図 4.6 (a) は自動引きはずしコイルに正方向電流が流れている場合、すなわち、バイスコイルを流れる電流による磁束と、自動引きはずしコイルを流れる電流による磁束とが可動鉄心の磁路においてたがいに逆向きになる場合を示し、図 4.6 (b) は自動引きはずしコイルに逆方向電流が流れている場合、すなわち、バイスコイルに流れる電流による磁束と、自動引きはずしコイルに流れる電流による磁束とが、可動鉄心の磁路においてたがいに同方向になる場合を示している。

図 4.6 (a) および図 4.6 (b) の電気回路を解けば、正・逆方向電流による起磁力すなわちこのしゃ断器の最小動作電流 I_F , I_R はそれぞれ

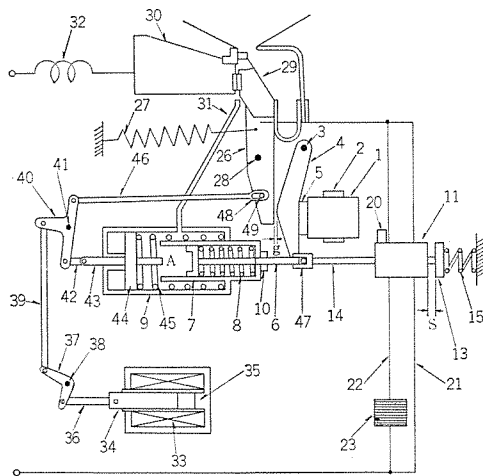
$$I_F = \{[(1+\alpha)R_A + R_B]\phi_A + I_B\} / (\alpha + \beta) \quad (4.1)$$

$$I_R = \{[(1+\alpha)R_A + R_B]\phi_A - I_B\} / (\alpha + \beta) \quad (4.2)$$

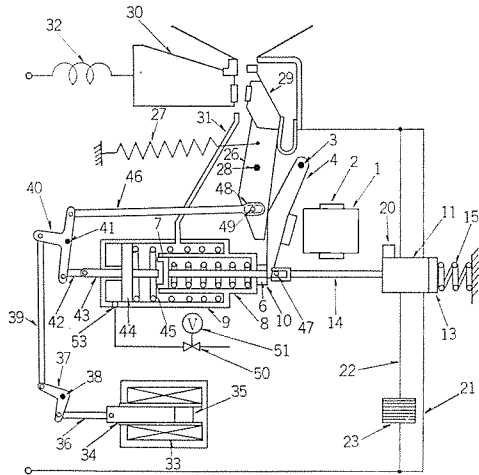
となる。

ただし

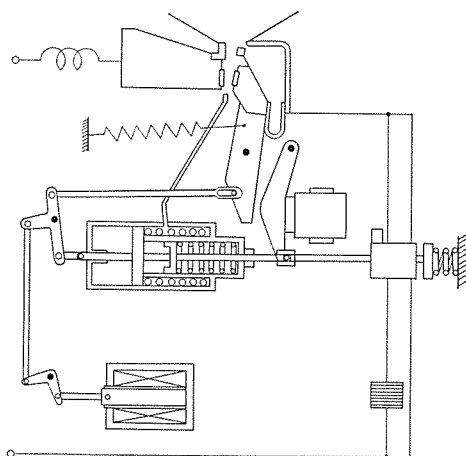
$$I_F: \text{正方向最小動作電流における起磁力 } (I_A + I_C)$$



(a) 閉合状態



(b) 開放状態



(c) 投入過程の状態

- | | | |
|------------|---------------|-----------|
| 1 保持鉄心 | 19 ナット | 37 レバー |
| 2 保持コイル | 20 目盛鉄心 | 38 軸 |
| 3 軸 | 21 自動引きはずしコイル | 39 リンク |
| 4 接極子腕 | 22 自動引きはずしコイル | 40 レバー |
| 5 接極子 | 23 誘導鉄心 | 41 軸 |
| 6 ブルロッド | 24 バイパスコイル | 42 リンク |
| 7 ピストン | 25 試験コイル | 43 ロッド |
| 8 接触ばね | 26 接極子腕 | 44 ピストン |
| 9 シリンダ | 27 閉合ばね | 45 復帰ばね |
| 10 ストップ | 28 軸 | 46 リンク |
| 11 引きはずし鉄心 | 29 可動接極子 | 47 ローラ |
| 12 バイパス鉄心 | 30 固定接極子 | 48 長手穴 |
| 13 可動鉄心 | 31 空気吹付管 | 49 ピン |
| 14 トリップロッド | 32 吹消コイル | 50 電磁弁 |
| 15 目盛ばね | 33 投入コイル | 51 電磁弁コイル |
| 16 ばね押え | 34 可動鉄心 | 52 配管 |
| 17 調整ねじ | 35 固定鉄心 | 53 流通口 |
| 18 ガイド | 36 リンク | |

図 4.4 動作説明図
Diagram showing operating cycle.

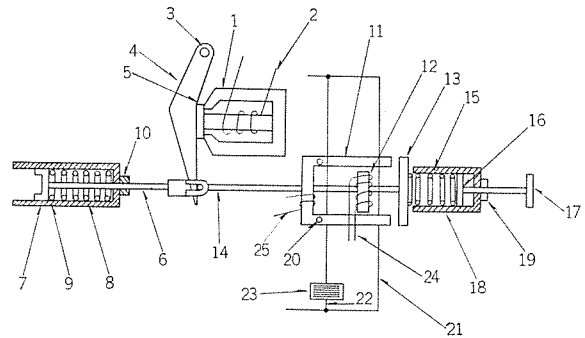
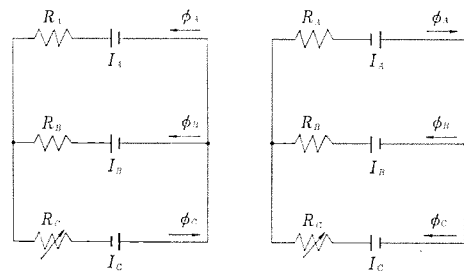


図 4.5 引きはずし機構説明
Diagram showing tripping mechanism.



(a) 主回路電流正方向のとき (b) 主回路電流負方向のとき

図 4.6 引きはずし電磁石の等価電気回路
Equivalent electric circuit of tripping magnet.

I_R : 逆方向最小動作電流における起磁力 ($I_A + I_C$)

I_A : 自動引きはずしコイル 21 に流れる電流による可動鉄心磁路の起磁力

I_C : 自動引きはずしコイル 22 に流れる電流による目盛鉄心磁路の起磁力

I_B : バイパスコイル 24 により与えられる バイパス 鉄心磁路の起磁力
 ϕ_A, ϕ_B, ϕ_C : 可動鉄心部, バイパス 鉄心部および 目盛鉄心部各磁路のそれぞれの磁束

R_A, R_B, R_C : 同上各磁路それぞれの磁気抵抗

$\alpha = R_B/R_C$

$\beta = I_A/I_F$ または $\beta = I_A/I_R$

である。

式 (4.1) および式 (4.2) からこのしゃ断器の動作電流 I_F, I_R は、 α すなわち バイパス 鉄心部磁路と目盛鉄心部磁路との磁気抵抗比により変わり、また β すなわちしゃ断器の端子間を流れる全電流に対する自動引きはずしコイル 21 を流れる電流の割合によっても変わることが容易に理解できる。前者は 目盛鉄心 20 の抜き差しにより漸進電流に対する電流目盛の調整に使用し、後者は誘導鉄心 23 の積厚調整により突進電流に対する選択性を付与するのに使用する。

次に、これらの式について引きはずし電磁石装置がある条件に設定した場合の正・逆方向の最小動作電流を考えてみると、バイパスコイルの電流は一定であるから I_B は一定、前記保持電磁石装置の保持力 P_H が一定であり、開放ばねによる開放力 P_O および目盛ばね 15 による開放力 P_C が一定であるから、しゃ断器が開放動作を開始する点の引きはずし電磁石装置の開放力 P_T も一定であり、したがって ϕ_A が一定である。また、 ϕ_A が一定であることから R_A も一定であり、漸進電流に対しては β も一定である。しかし α および R_B は ϕ_C および ϕ_B が異なることから、鉄心の磁気飽和により I_F, I_R に対して当然異なった値を示す。この性質を利用して I_F すなわち正方向動作電流の設定値いかにかわらず、 I_R すなわち逆方向動

作電流値をほぼ一定に保つことができる。すなわち、 I_F を大きくする場合を考えれば、式 (4.1) から α を小さくしなければならない。 α を小さくすることは R_C を大きくすることであり、目盛鉄心 20 を抜いて引きはずし鉄心 11 のその磁路の有効断面積を縮小し、その磁路の磁気抵抗を増大させることである。一方、このときの逆方向電流 I_R について考えてみれば、 I_R は一般に I_F の数十%であり、鉄心はある磁束密度において最大の透磁率を示すことから、 I_F 増大のために引きはずし鉄心 11 における目盛鉄心部磁路の有効断面積を縮小したことが、必ずしも I_R に対するその磁路の磁気抵抗増大を意味せず、引きはずし電磁石装置の各磁路の大きさ、目盛ばねの付勢力、 I_B などの大きさを適正な値に選定することにより、前述のように正方向電流目盛値の大きさに関係なくほぼ一定の逆方向電流目盛値を与えることができる。

また、この引きはずし電磁石装置からバイアスコイル 24 を除けば、式 (4.1) および式 (4.2) は式 (4.3) に書き換えられ、 $I_F = I_R$ すなわち正・逆方向に対して対称な電流目盛となることわかる。

$$I_F = \{(1 + \alpha)R_A + R_B\} \phi_A / (\alpha + \beta) = I_R \dots \dots \dots (4.3)$$

しかし、これは引きはずし電磁石装置の起磁力が自動引きはずしコイルを流れる電流のみによって与えられると考えた場合であり、両方向高速度シャ断器に対する完全な対称電流目盛特性を得るためには、前記説明をもう一步突込んで考えなければならない。すなわち、引きはずし電磁石装置における起磁力の大部分は自動引きはずしコイルを流れる電流によって与えられるが、その一部はシャ断器内部を通る他の導電部を流れる電流によっても与えられ、またこの電流によって保持電磁石装置の保持磁束も多少の影響を受けるのが普通である。したがって、両方向高速度シャ断器に完全な正逆方向対称電流目盛を与えるためには、保持電磁石装置、引きはずし電磁石装置など引きはずし機構の磁気回路の配置および形状を考慮しなければならない。また、いったん適正な状態に設定した引きはずし機構の磁気回路を目盛調整のために変更してその形状をくずし、前記適正条件をくずさないようにしなければならない。

このシャ断器の引きはずし機構はこれらが十分考慮されたものであり、正逆方向対称目盛のときは、引きはずし電磁石装置の磁気抵抗調整式目盛装置を適正な位置に設定したのち、それをその位置に固定し電流目盛の調整には前記ばね圧調整式目盛装置を使用するため、正逆方向に対してほとんど等しい対称電流目盛特性を得ることができる。また、ばね圧調整式目盛装置による場合、目盛ばね 15 のばね定数を適正に選定することにより、比較的広範囲の電流目盛を得ることができる。さらに、磁気抵抗調整式目盛装置の目盛鉄心 20 を正逆方向対称電流目盛になる条件を考慮した他の適正な位置に変更することにより、前とは異なった範囲の電流目盛値を得ることができる。

すなわち、この方法によれば、磁気抵抗調整式目盛装置の目盛鉄心位置をパラメータとした二重または多重目盛特性を得ることができ、目盛装置の調整を前記とは逆に使用する場合は、ばね圧調整式目盛装置の目盛ばね 15 の圧力をパラメータとした磁気抵抗調整式目盛装置による正逆方向非対称電流目盛の場合の多重目盛特性を得ることができる。これら多重目盛特性は、たとえば、電気鉄道において将来き電電圧が直流 600 V から直流 1,500 V に変更されるような場合に有効であり、製作時、あらかじめそれを予定した二重目盛特性をシャ断器に与えておけば、その場で直ちに目盛切換えができ、時間上・費用上多大の利点を有している。

この引きはずし機構を採用した BHB 形高速度シャ断器は以上のようなすぐれた電流目盛特性を有しているほか、さらに次の特長を備えている。

すなわち、従来の高速度シャ断器における保持電磁石は、その一部磁路に自動引きはずしコイルが直接巻かれており、その電流により保持コイルの保持磁束は打消されてシャ断器が開放される構造であったが、この構造では突進率の大きい事故電流が自動引きはずしコイルに流れた場合、その電流により保持磁束は逆転して事故電流による逆吸引力が接極子に働かし、接極子の開離を遅らせ、したがって可動接触子の初期開離速度および開極時間を遅らせるおそれがあった。このことは自己保持電流の低い高速度シャ断器ではとくに考慮しなければならない問題であり、自己保持電流の低い高速度シャ断器に対して非常に大きな突進率の事故電流が流れた極端な場合には、シャ断器が開極に至らない場合も考えられる。

これに対し、このシャ断器の保持電磁石には主回路電流による磁束が直接作用せず、その開放力は引きはずし電磁石を貫通する自動引きはずしコイルを流れる電流により、可動鉄心 13 の吸引力として追加されて与えられるため、事故電流の大きさおよび突進率の大きさにより前記逆吸引力を考える必要はなく、事故電流の大きさがそのまま有効にシャ断器の開放力として利用される。このことは、このシャ断器の開離速度および開極時間は事故電流が大きいほど速くなりすぐれた限流特性を発揮することを意味している。

4.3 開放動作

図 4.4 についてこのシャ断器の開放動作を説明する。前述の説明からすでに明らかなように、図 4.4 (a) に示すシャ断器の閉合状態において、接触子腕 26 は接触ばね 27 により軸 28 を中心に反時計方向に回動付勢され、接触子腕 26 の上端に取付けられた可動接触子 29 は固定接触子 30 と接触している。一方、保持鉄心 1 は保持コイル 2 による保持磁束により接極子装置の接極子 5 を吸着している。接極子腕 4 の自由端にはプルロッド 6 を介して開放ばね 8 による開放力 P_0 およびトリップロッド 14 を介して引きはずし電磁石装置の目盛ばね 15 による開放力 P_c 、および自動引きはずしコイル 21・22 を流れる常規電流により可動鉄心 13 が引きはずし鉄心 11 に吸引されようとして働らく開放力 P_T が作用している。この状態において接触子腕 26 の下端と接極子腕 4 の自由端とは図のように間げき g を介して対向している。主回路に故障電流が流れると、前記開放力 P_T が増大し保持鉄心 1 は接極子 5 を保持し得なくなると接極子は解放される。その結果、接極子腕 4 は前記開放力 P_0 、 P_c および故障電流により増大した開放力 P_T により急速に時計方向に駆動されて、所定の蓄勢間げきを運動の後接触子腕の下端に衝突する。この衝突により接触子腕 26 は接極子系が間げき g を運動する間に蓄勢したエネルギーによって可動接触子、接触子腕の慣性および接触ばね 27 の付勢力に対し急速に時計方向に回動付勢され、可動接触子 29 ついでアーク接触子は大きな初開離速度をもって開離方向に駆動される。また、接極子 5 の解放によるプルロッド 6 およびピストン 7 の左方移動によりピストン 7 は空気室 A の大気圧空気を圧縮する。この圧縮された空気は吹付管 31 を介して、アーク接触子の開放により両者間に発生するアークに吹付けられ、直列吹消コイル 32 による磁気吹消が期待できない小電流をも確実にシャ断する。シャ断動作が完了すると図 4.4 (b) に示す状態となる。

4.4 投入動作

このシャ断器には前述のように電磁ツレノイドによる投入装置また

は圧縮空気による投入装置のいずれでも付属させることができるが、まず電磁ソレノイドによる投入動作について説明する。

電磁ソレノイドの投入コイル33を付勢すると、その可動鉄心34は固定鉄心35に吸引され右方に移動する。可動鉄心34の右方への移動はリンク36を介してレバー37をその軸38の回りに反時計方向に回動させ、さらにリンク39を介してT字形レバー40をその軸41の回りに反時計方向に回動させることになる。レバー40の回動はリンク42を介してロッド43およびピストン44を復帰ばね45の付勢力に対して右方に移動し、一定距離移動の後ピストン7と衝合し、ピストン7を開放ばね8の付勢力に対して右方に移動するとともに、リンク46を左方に移動する。ピストン7の移動により、プルロッド6の先端に回転自在にかん合されたローラ47は、接磁子腕4自由端との係合を断ち、右方へ移動し、接磁子腕4はその自重により反時計方向に回動して、接磁子5は保持鉄心1の吸着面に接触する。保持鉄心1の吸着面には保持コイル2による保持磁束が存在しているので、接磁子5は保持鉄心1に確実に保持される。またこのとき、プルロッド6はトリップロッド14を介して、引きはずし鉄心11に接合していた可動鉄心13をシャ断器閉合状態における正常位置、すなわち引きはずし鉄心11との間げきが図示S寸法になる位置に復帰させる。

一方、前記ローラ47が接磁子腕4との係合を断つことにより、接触子腕26は接触ばね27の付勢力によって軸28の回りに反時計方向に回動し、可動接触子29が固定接触子30に接近しようとするが、リンク46の左方への移動によりリンク46の長手穴48が、接触子腕26の下端に定着したピン47と係合することにより、接触ばね27の付勢力に対して可動接触子29は開放状態に保持される。この状態を示したのが図4.4(c)である。前記可動鉄心34が全行程移動すると、そのリンク機構に連動された図4.3に示す操作補助スイッチが動作し、投入コイル33が消勢される。したがって復帰ばね45および接触ばね27の付勢力により、ピストン44および可動鉄心34は復帰し、引きはずし機構は開放可能な状態に整定され、接触子腕26は接触ばね27の付勢力により反時計方向に回動して接触部を閉合し、図4.4(a)に示す閉合状態となる。

次に圧縮空気による投入動作について説明する。

電磁弁50のコイル51を付勢すると、圧縮空気源からの圧縮空気が配管52を通過してシリンダ9の流通口53に供給される。この圧縮空気によりピストン44は右方に移動し、前記T字形レバー40をその軸41の回りに反時計方向に回動させることになる。したがって、以下電磁ソレノイドの可動鉄心34がその固定鉄心35に吸引されたと同様の作動により、図4.4(c)に示す状態となり、この状態で前記同様操作補助スイッチにより電磁弁コイル51が消勢される。電磁弁コイルが消勢されると、流通口53から供給されたシリンダ9内の圧縮空気は、流通口53・配管52を通過して電磁弁50の排気口から排出される。したがって、前記電磁ソレノイドの投入コイルが消勢されたと同様の作動によりシャ断器の投入動作は完了し、図4.4(a)に示す閉合状態となる。

以上の説明からわかるように、このシャ断器の引きはずし装置に与えられる開放力は、接触部の接触圧力に無関係であり、接触部閉合時の速度の大小、衝撃力の大小にはまったく関係しないため、シャ断器の投入に際して保持電磁石の強励磁その他の緩衝装置は必要なく、また負荷投入時の動作電流と通常の動作電流値とは一致する。またシャ断器の開放時、引きはずし装置の運動量は、接触部にアークのこう着時間を短縮するのに有効な大きな初開離速度を与えるが、

その後、接触ばね27の伸長、小電流シャ断用空気室Aの圧縮などにより減衰するため、引きはずし装置のストップ10の容量は比較的小さくてすみ、また構造部に与える衝撃力も小さくなり、このシャ断器は小形軽量に構成される。さらにシャ断器接触部の接触圧力は接触ばね27によってのみ与えられ、接触ばねのばね定数を小さく、そのばね容量を大きく選定しているため、長年の使用による接触部の損耗に対しても接触圧力はほとんど変わらず、接触圧力は安定している。

5. 性能

BHB-30形両方向直流高速度シャ断器のおもな性能および試験結果について述べる。

5.1 引きはずし特性

ばね圧調整式目盛装置による目盛ばねの圧縮量と動作電流との関係の一例を図5.1に示す。横軸は目盛ばねの調整可能範囲における目盛ばねの最小圧縮量を0とし、最大圧縮量を100とした目盛ばねの圧縮行程比を示し、縦軸はそのときの動作電流を示している。また、曲線A・Bはそれぞれ異なった磁気抵抗調整式目盛装置の目盛鉄心位置における特性曲線である。これらの特性はバイスコイルの電流を0にした場合の特性であり、正・逆方向に対して安定した多重の対称電流目盛が得られることを実証している。なお、目盛ばねのばね定数を変えることにより、その圧縮量と動作電流との関係を変更することも可能である。

図5.2は磁気抵抗調整式目盛装置による目盛鉄心のそう入量と動作電流との関係の一例を示す特性曲線であり、横軸は目盛鉄心の調整可能範囲における目盛鉄心の最小そう入量を0とし、最大そう入量を100とした目盛鉄心のそう入行程比を示し、縦軸はそのときの動作電流を示している。また、曲線A・Bはそれぞれ異なったばね圧調整式目盛装置の目盛ばね圧縮量における特性曲線である。これらの特性はバイスコイルに一定電流を流して引きはずし磁束を一方に偏向させた場合であり、正方向電流目盛に関係なくほぼ一定の逆方向電流目盛が得られる特長をもち、しかも逆方向動作電流値は比較的小さく、4.2節で説明したようにすぐれた逆方向電流目盛特性を有していることがわかる。一般的には、このシャ断器

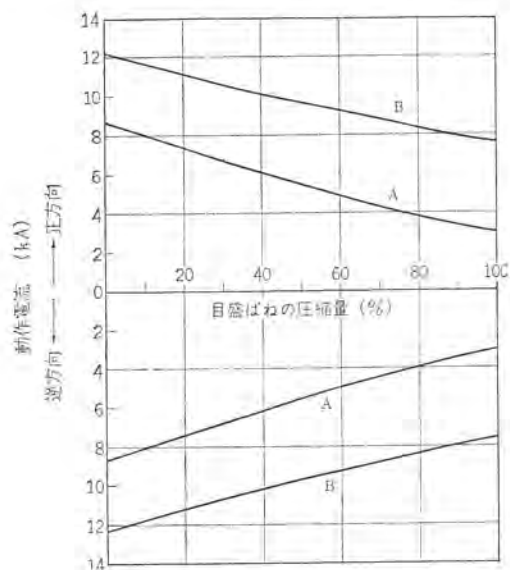


図 5.1 動作特性その1
Calibration curves (1).

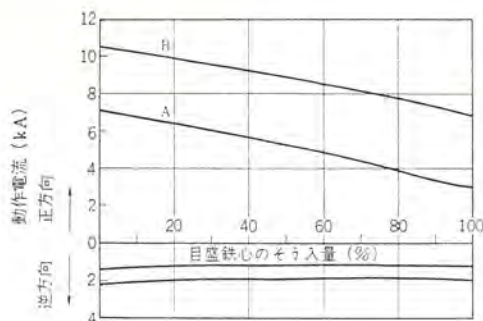


図 5.2 動作特性その 2
Calibration curves (2).

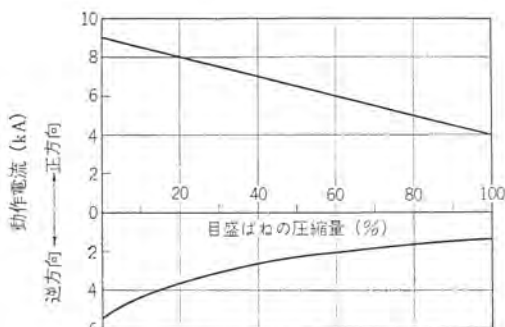


図 5.3 動作特性その 3
Calibration curves (3).

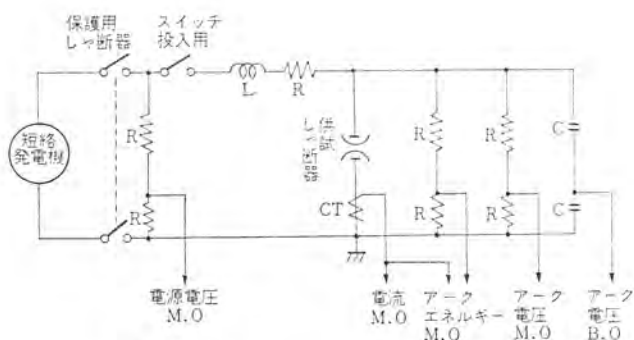


図 5.4 交流等価しゃ断試験回路
Circuit of AC equivalent interrupting test.

の逆方向電流目盛値は、正方向最大目盛値の 25 % 以下を標準としている。

また、図 5.3 は目盛鉄心がある位置に固定し バイアスコイルに一定電流を流したときのばね圧調整式目盛装置による目盛ばねの前記同様圧縮量と動作電流の関係を示す一例である。この特性は正方向電流目盛が大きくなるにつれて、逆方向動作電流も増大するが、その増加割合は目盛ばねの圧縮量が大きい間は比較的小さく、目盛ばねの圧縮量が小さくなるにつれて、急激に正方向動作電流に近づくことを示している。これは、このしゃ断器の逆方向電流目盛を比較的小さく、ほぼ一定に保つためには、バイアス電流の大きさも含め、前述のように磁気回路の諸定数が適正に選定されなければならないことを意味している。

5.2 シャ断性能

(1) 大電流しゃ断性能

BHB-30 形直流高速度しゃ断器のしゃ断性能を確認するため、50 MVA 交流短絡発電機を使用し交流等価しゃ断試験を実施した。この試験は前記発電機を約 10 Hz で運転し、その電源電圧波高値 1,750 V、供試しゃ断器に対する給与電圧および回復電圧が、1,500 V 以上になるよう位相制御を行なったものである。このときの試験回路を図 5.4 に示す。図 5.5 は推定短絡電流最大値 51,000 A のときの O 動作しゃ断試験オシログラム、図 5.6 は推定短絡電流 51,000 A のときの CO 動作しゃ断試験オシログラム、図 5.7 は推定短絡電流 100,000 A のときの CO 動作オシログラムである。また図 5.8 は推定短絡電流 100,000 A をしゃ断したときの状況を撮影した写真である。

(2) 手動しゃ断性能

回路インダクタンス 7.6 mH および 15.4 mH のときの手動しゃ断試験結果を表 5.1 に示す。図 5.9 は回路インダクタンス 15.4 mH シャ

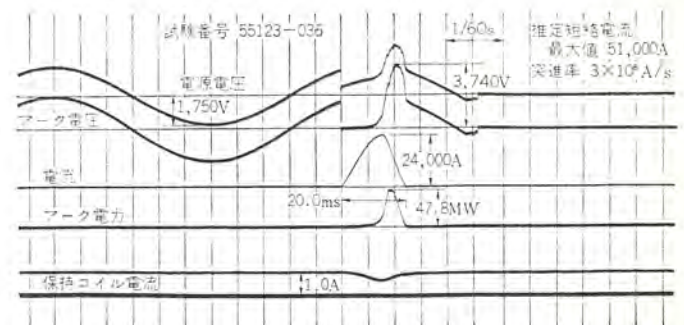


図 5.6 交流等価しゃ断試験オシログラム
(推定短絡電流最大値 51,000 A CO 動作)
Oscillogram of AC equivalent interrupting test
(Maximum prospective fault current 51,000 A).

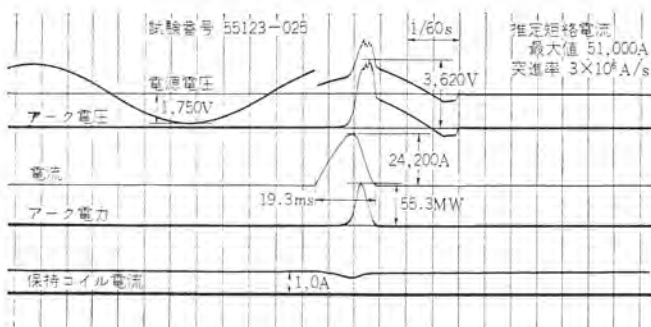


図 5.5 交流等価しゃ断試験オシログラム
(推定短絡電流最大値 51,000 A O 動作)
Oscillogram of AC equivalent interrupting test
(Maximum prospective fault current 51,000 A).

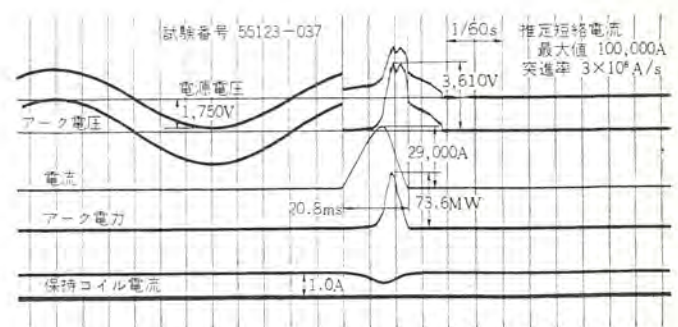


図 5.7 交流等価しゃ断試験オシログラム
(推定短絡電流最大値 100,000 A CO 動作)
Oscillogram of AC equivalent interrupting test
(Maximum prospective fault current 100,000 A).



図 5.8 交流等価試験のしゃ断状況
(突進率 3×10^3 A/S 推定短絡電流最大
値 100,000 A)
AC equivalent interrupting test.

表 5.1 手動しゃ断試験結果
DC interrupting test data.

試験電圧 V	しゃ断電流 A	回 路 インダクタンス mH	アーク電圧 最大 値 V	アーク時間 ms
1,500	6,000	7.6	3,100	27.9
1,500	7,500	7.6	3,580	33.5
1,500	4,000	15.4	3,740	34.7

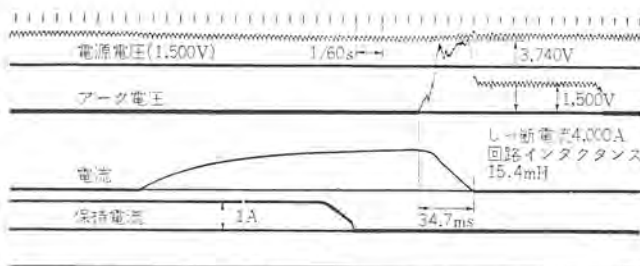


図 5.9 手動しゃ断試験オシログラム
Oscillogram of DC interrupting test.

表 5.2 絶縁耐力試験
Dielectric strength test.

測 定 部	試 験 電 圧 kV	
	商用周波 (1分間)	衝撃電圧
主接触子相互間	5.5	20
主導電部と操作装置の導電部および接地部の間	5.5	20
操作装置の導電部と接地部の間	1.5	5

断電流 4,000 A のときのオシログラムである。

(3) 小電流しゃ断性能

大電流しゃ断試験後通電方向を逆にして小電流しゃ断試験を行ない、小電流しゃ断用空気吹付装置の効果を確認した。この試験で 10 A の電流をしゃ断したときのアーク時間は約 21 ms、5 A の電流をしゃ断したときのアーク時間は約 15 ms であった。

5.3 通電容量および絶縁耐力

連続開閉試験および大電流しゃ断試験後、このしゃ断器の温度上昇試験を実施したが、このしゃ断器は連続定格および短時間定格に対して十分な通電容量をもっていることを確認した。また絶縁耐力試験は商用周波耐電圧試験および衝撃耐電圧試験を表 5.2 の値で行ない、いずれの部分にも問題はなかった。

6. 両方向直流高速しゃ断器の運用例

BHB-30 形両方向高速しゃ断器は前述のようにすぐれたしゃ断特性および電流目盛特性を有しているため、従来一方向高速しゃ断器が使用されていた直流回路に使用できるほか次の用途に使用し、直流回路の保護を合理的に行なうことができる。

6.1 き電区分所用

電気鉄道において変電所区間が長大な場合、電圧降下の救済、事故電流の選択、き電停止区間の細分化などを目的としてき電区分を設置する場合があるが、き電区分所用しゃ断器として従来の一方向高速しゃ断器を使用すれば 2 台必要であるが、両方向高速しゃ断器を使用すれば 1 台でよい。

6.2 母線区分用

最近大都市およびその近郊における電気鉄道はその輸送力を増大するため、既設変電所の容量増加をよぎなくされており、このため新電源設備を追加して、これと既設電源とを母線で連絡し、両電源を並列に運転するケースが多くなってきた。また、電源に対する負荷のバランスを考慮して隣接する変電所を母線で接続する場合もある。このような場合、これらの電源を接続する母線の中間に両方向高速しゃ断器を設置しておけば、事故時、両電源をしゃ断分離することができ、健全な系統の電源で運転を継続させることができる。また、電源容量およびその回路の事故点によっては、しゃ断器の定格しゃ断容量を相当上回る事故電流が流れる場合も予想されるが、その場合両方向高速しゃ断器の動作により並列電源は自動的にしゃ断分離されるため、事故の拡大を未然に防止することができる。

6.3 き電区間延長用

電気鉄道において深夜または早朝など負荷がきわめて少ない場合、変電所の間引き運転を行なう場合があるが、軽負荷時き電を休止する変電所に両方向しゃ断器を使用し、電流目盛を適正に選定すればその変電所はき電区分所に置き換えられる。

6.4 整流器保護用

従来、水銀整流器の保護用として逆方向高速しゃ断器が、シリコン整流器の保護用として正方向高速しゃ断器が一般に使用されてきたが、これら整流器の保護用としては、まきがきで述べたように両方向高速しゃ断器を使用するのが合理的である。

6.5 共用しゃ断器

電気鉄道変電所において断路器を介してき電用しゃ断器と並列に設置され、き電用しゃ断器の予備用またはその保守・点検時の代用として使用される共用しゃ断器は、従来一方向しゃ断器が使用されていたため、き電用しゃ断器の共用としてしか使用できなかったが、この共用しゃ断器に両方向しゃ断器を使用すれば、図 6.1 (b) に示すようにき電用しゃ断器および整流器正極用しゃ断器の共用しゃ断器として使用することができ、共用しゃ断器としてより合理的な運用ができる。図 6.1 (a) は一方向しゃ断器を使用した共用しゃ断器の従来の設置例である。(実用新案出願中)

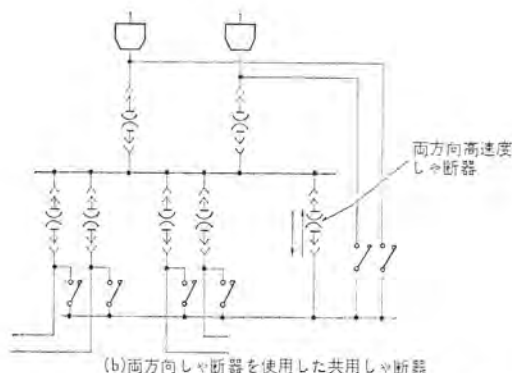
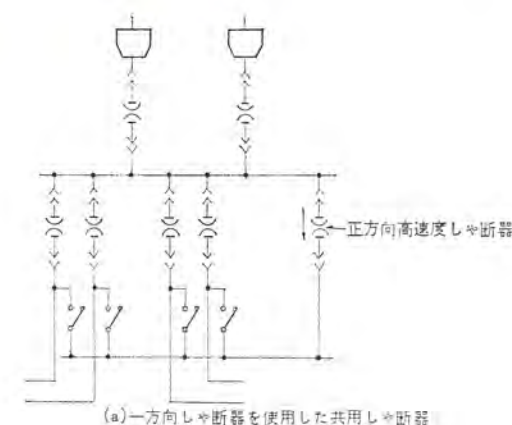


図 6.1 両方向高速しゃ断器の使用例
Application of non-polarised high-speed circuit breaker.

6.6 製鉄ミル用

製鉄工業分塊圧延などにおける可逆運転用電動機およびその回路の保護に使用されるしゃ断器は、両方向しゃ断器が必要であり、従来からこのしゃ断器としておもに普通の気中しゃ断器が使用されてきたが、最近これらの電源に、比較的過負荷耐量の小さいサイリスタ

装置が使用されるようになったため、この電源保護用として限流特性のすぐれた高速しゃ断器が必要になってきた。このしゃ断器として従来の一方向しゃ断器を使用したのでは2台必要であるが、両方向高速しゃ断器を使用すれば1台で済み経済的である。

7. む す び

以上述べたように今回開発した BHB-30 形両方向直流高速しゃ断器はすぐれたしゃ断性能を有し、主回路電流の急減に対しても不要動作することなく、その電流目盛は正・逆方向に対して対称目盛および非対称目盛の設定が可能であり、必要に応じてこれらの目盛を二重にすることも可能である。また、その投入操作方式として空気または電気のいずれでも採用でき、その据付方式として引出形・固定形のいずれでも製作できる。これらのため、このしゃ断器は従来一方向しゃ断器が使用されていた一般直流回路の保護目的により効果的に使用できるほか、従来一方向しゃ断器では2台必要であった回路に1台の使用で、その回路の保護目的を達することができ、経済的にかつ安全にその回路を保護することができる。

なお、当社では、以上述べた BHB-30 形について、定格電流 5,000 A の両方向直流高速しゃ断器 BHB-50 形をすでに開発済みであり、変電所間の母線連絡用あるいは製鉄ミル用として、正・逆方向対称電流目盛、およびシリコン整流器の正極用として、正・逆方向非対称電流目盛の両方向直流高速しゃ断器をそれぞれ多数納入済みである。

終わりにこのしゃ断器の交流等価しゃ断試験に当たり、多大のご協力をいただいた当社伊丹製作所の関係各位に厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 岩垂, 渡辺: 三菱電機技報 34, 393 (昭 35)
- (2) 渡辺: 三菱電機技報 39, 650 (昭 40)

うず電流問題の差分法による解析

野村 達衛*

Analysis of Eddy Current Problems by the Finite-Difference Method

Central Research Laboratory

Tatsuei NOMURA

The recent development of electronic computers has made it practicable to have numerical calculation of problems on electromagnetic fields with complicated boundary condition. Numerical calculation by the finite-difference method has come to offer a powerful means for the analysis of the problems on the magnetic field of electric apparatus. This paper describes an analytical process by the finite-difference method on problems concerning magnetic fields including eddy current, and also examples of calculation. Errors in this method and the application of the method also discussed. As for the above method in which eddy current is involved, herein is given a method extended to permit application even to the case where many conducts exist within the boundary; examples of the application for eddy current problems of slots in rotating apparatus are also quoted. About errors problems inside the slots are analyzed.

1. ま え が き

最近の電子計算機の発達によって複雑な境界条件を有する電磁界の問題の数値計算が可能になってきた。電気機器などは差分法による電磁界の数値計算が解析の有力な手段となり得る。本文はうず電流を含む磁界問題の差分法による解析手法について述べる。

差分法はラプラスの式あるいはポアソンの式の基本微分方程式を近似差分式で表わし、これを緩和法などで計算する方法である。差分法の静電界あるいは静磁界などの問題に対する適用はよく知られており⁽¹⁾⁽²⁾比較的容易である。うず電流が存在する磁界を差分法によって計算する手法はすでに J. Roberts⁽³⁾や R. S. Mamak⁽⁴⁾などが発表している。しかし実際に計算を行なった例⁽⁵⁾は少ない。本文ではすでに知られているこれらの手法を磁界の中に多数の導体が存在する場合に拡張して述べる。

差分近似によって作られた多元連立一次方程式の計算には緩和法(Relaxation Method)が使われ、静磁界の問題では緩和法による計算は容易である⁽²⁾。しかしうず電流が含まれる問題では効率よく収束させることがむずかしいようである。筆者の経験では静磁界の場合より相当計算時間を要し収束解を得られないことが多かった。この緩和法についてはさらに研究を要する。本文では筆者の経験を述べ、よりよい計算手法の研究に対する一助としたい。

最後に微分方程式を差分近似することによって生ずる誤差についてスロット内の問題について調べた結果⁽⁶⁾を示し、誤差推定について述べる。

2. 差分法によるうず電流解析方法

すでに発表されているうず電流を扱う差分法においては磁界中の導体がただ一つの場合について述べられている。筆者は多数の導体のある問題を解析できる手法に拡張し、電気機器におけるより広範囲の問題に適用できるようにした⁽⁶⁾。

2.1 差分近似式

変位電流を無視できる低周波交流において磁界の基礎微分方程式は、

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A}\right) = -\mathbf{J}$$

である。電流が z 方向に無限の長さで流れている二次元磁界と考え計算の領域では透磁率 μ が一定であるとする、直交座標系においては、

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z \quad (2.1)$$

ただし、 J_z は z 方向電流密度、 A_z は z 方向ベクトルポテンシャルである。磁束密度 $\mathbf{B}$ と電界の強さ $\mathbf{E}$ の関係は、

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

であるから J_z は次のようになる。

$$J_z = j\omega\sigma A_z + C \quad (2.2)$$

ただし、 ω は角周波数、 σ は電気伝導度、 C は導体の条件などにより定まる定数である。

ここで図 2.1 に示すような磁界内に多数の導体がある問題を考えると定数 C は各導体によって異なっている。筆者は次のようにした。第 k 番の導体の平均のベクトルポテンシャルを $\bar{A}_k$ とし、導体 k の平均電流に対応する電位こう配を $g \text{ rad } \phi_k$ とおくすなわち k の平均電流の電流密度を $-\sigma g \text{ rad } \phi_k$ とし、電流密度を

$$J_z = \sigma \{-j\omega(A_z - \bar{A}_k) - g \text{ rad } \phi_k\} \quad (2.3)$$

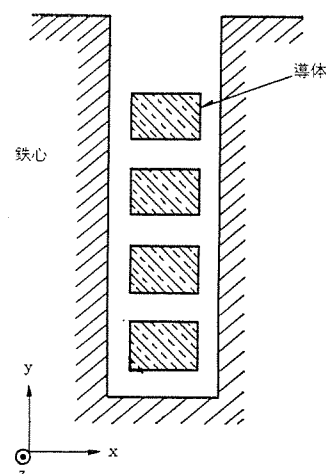


図 2.1 多数の導体のある問題例(鉄心スロット内の導体)
An example of the problems with several conductors.
(Cross-section of an iron slot)

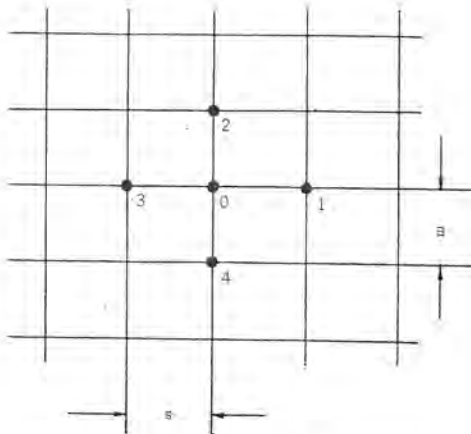


図 2.2 部分的に示した網目格子
Mesh system shown partially.

と表わす。したがって基本微分方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = ja^2(A_z - \bar{A}_k) + \mu\sigma g \text{ rad } \phi_k \quad (2.4)$$

ただし、 $\alpha = \sqrt{\mu\omega\sigma}$

導体一つだけの場合、式(2.2)の定数 C を零にした場合が一般に用いられてきた。この場合には次の関係式が成立する。

$$\bar{A}_k = g \text{ rad } \phi_k / j\omega \quad (2.5)$$

導体が複数となれば、すべての導体において式(2.5)を成立させられない。後述のように一つの導体で $\bar{A}_k$ を定めると系のベクトルポテンシャルの基準が定まることになる。したがって、式(2.5)はポテンシャルの基準を与えることになる。

基本微分方程式(2.4)に対する差分近似式は、図2.2の如く磁界を長方形格子でおおいその一点0において次のように表わす。

$$\frac{1}{S^2}(A_1 + A_3 - 2A_0) + \frac{1}{w^2}(A_2 + A_4 - 2A_0) = ja^2(A_0 - \bar{A}_k + \mu\sigma g \text{ rad } \phi_k) \quad (2.6)$$

ただし、 A_i は点 i のポテンシャルを表わす。他の網目格子点においても同様な差分式が成立し、これらに差分近似した境界条件を加えた多元連立一次方程式を解くことに帰着する。

2.2 ポテンシャルの基準設定と境界条件

ここでベクトルポテンシャルの意味について説明すると、二次元磁界においてはベクトルポテンシャルは磁束を表わしておりたとえば、任意の二点間の磁束はベクトルポテンシャルの差である。また等ポテンシャル線は磁力線を表わしているわけである。

ベクトルポテンシャルと電流との間で式(2.3)の関係を定めた場合ベクトルポテンシャルの基準を別に定める必要が生ずる。ポテンシャルの基準は $\bar{A}_k$ の一つあるいは等ポテンシャル線の境界の一つにおける値のどちらかによって定めるのがよい。

境界条件については、静磁界の問題をベクトルポテンシャルで扱う場合と同様である。この方法で注意すべき点は、等ポテンシャルの境界においてこの境界のポテンシャルを基準に定めないときはこの境界に関係する条件が必要なことである。この境界に沿う磁界の強さを積分したもの系の中に含まれる全電流との関係を用いる方法や、境界の1点において磁束密度の値を与える方法などがある。この条件式は問題に応じて適切な方法を選ぶ必要がある。

2.3 緩和法による計算

差分式よりなる多元連立一次方程式の計算は、掃出法あるいは緩和法により電子計算機によって行なう。掃出法は計算機の記憶容量



図 2.3 緩和法による計算フローチャート
Flow chart for calculation by the successive over relaxation method.

が網目交点数の二乗に比例して必要となりました。計算の有効けた(桁)数は方程式の元数が大きくなると少なくなる欠点を有する。緩和法は収束の可能性と速さに問題があるが、記憶容量が比較的少なくても網目交点数が相当大きく取り得る。過緩和法(Successive Over Relaxation)は長円形偏微分方程式の差分近似式の計算にも有効であり⁽⁷⁾非常に収束を速めることができる。図2.3は緩和法による計算のフローチャートである。加速定数の設定は文献⁽⁷⁾の方法を適用してみた結果、うず電流問題に対しても実用的であった。収束に対しては初期値の設定が非常に影響し初期値が不適当であると収束しない。初期値を零とすると必ずしも収束は速くないが収束の確率は高い。また緩和法による計算においてポテンシャルが既知の境界すなわち第1種境界条件*が多いような場合は収束しやすく、一方法線方向のポテンシャルの微分 $\partial A/\partial n$ が与えられる境界すなわち第2種境界*が多いときには収束しにくいといわれている。磁界問題に含まれる鉄心表面は第2種境界であるため、収束性がしばしば困難となる。これらの問題点はさらに研究が必要である。また加速定数の設定については、最初から2に近い値を用いた報告⁽¹⁰⁾があるが、最初の加速定数を大きくすると発散することが多かったため、一般には小さくしておくほうがよいと思われる。

3. 計算例

図3.1に示す半閉スロット内に二つの導体がある問題を例としてとりあげる。二つの導体はスロットの両端で互いに結合してはなく、独立であるとし、底部にある導体1には外部から電流を供給し、導体2には電流を供給しない場合を計算する。計算の領域は中心線より右側半分のみとし、鉄心面と中心線は $\partial A/\partial n = 0$ の境界にとる。スロットの開口部には適当な位置に等ポテンシャル線を設定する。このような境界条件のもとに 15×40 の網目を設定して解いた例を以下に示す。図3.2は磁束分布すなわち等ポテンシャル線を示している。

* この表現は文献(8)によった。

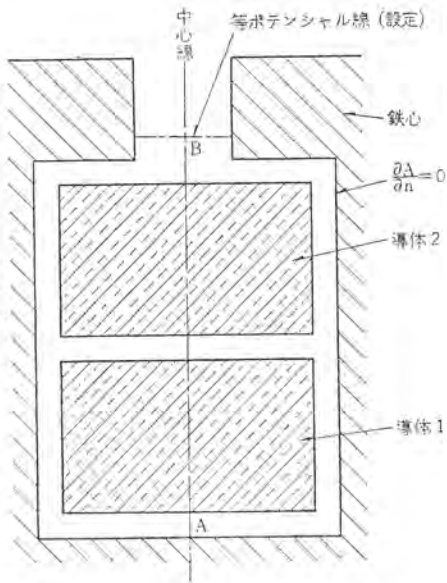


図 3.1 計算例のスロット断面
Cross-section of the slot for an example of calculation.

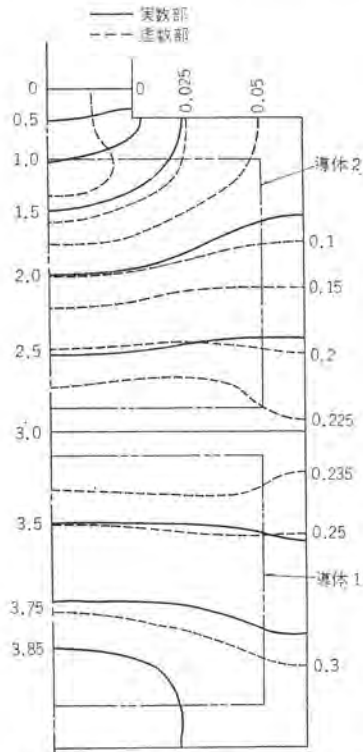


図 3.2 半閉スロット内の磁束分布
Magnetic flux distribution in the semi-closed slot.

図 3.3 は中心線に面する網目線 A-B 上のポテンシャル分布を示している。電流密度は斜線で示す大きさ $\{j\omega\sigma(A_c - \bar{A}_c)\}$ である。ベクトルポテンシャルの実数部の電流の虚数部、ポテンシャルの虚数部は電流の実数部におおの対応する。導体1には、図 3.3 に示した以外の外部供給電流が存在している。

図 3.4 は先の計算例の計算途中における残差の最大値の減少経過を示している。Liebmann 法と過緩和法を比較してみると過緩和法は残差が減少し始めると急速に収束することがわかる。なお加速定数は文献⁽⁷⁾の方法を用いた。収束の経過を示すためにポテンシャル分布の変化の例を図 3.5 に示す。図は先の例の中心線上 A-B における虚数部の分布の経過を示している。初期値は零とし、等ポテン

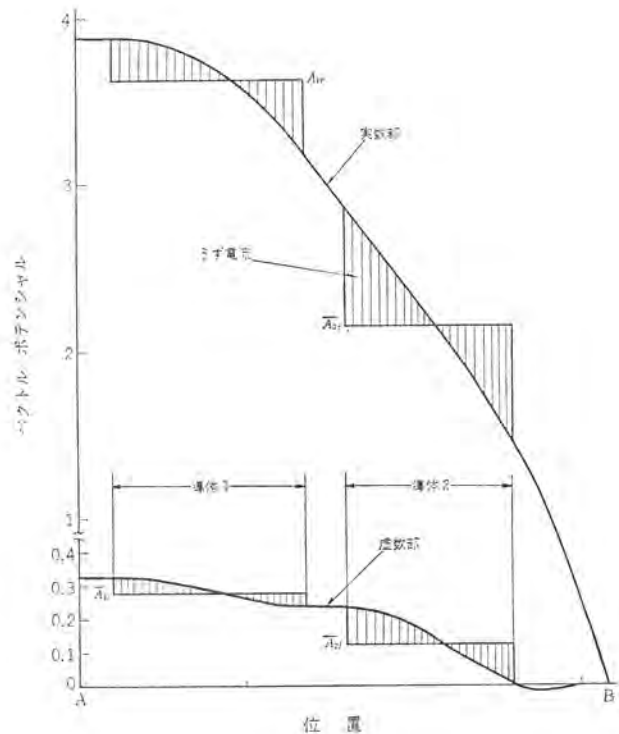


図 3.3 ベクトルポテンシャルの分布と渦電流分布の関係
Relation between the vector-potential and the eddy current.

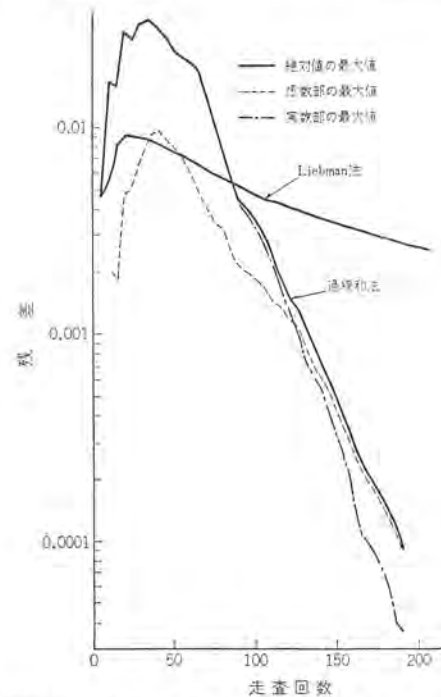


図 3.4 計算途中における残差の最大値の減少経過
Reduction of the maximum residual in the computation.

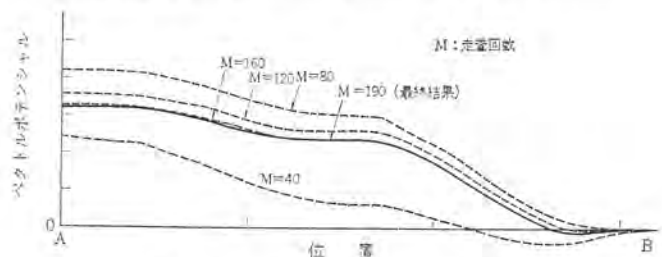


図 3.5 ポテンシャル分布の途中経過
Change of the potential distribution in the computation.

ヤルを設定したB点を固定した。走査回数の増加とともに分布が変化し、約160回の走査でほぼ収束している。実数部も同様であり図を省略している。この例でもわかるように緩和法では残差すなわち修正値が積み重ねられながら解に近づく経過をたどるのであり残差が小さくても収束しているとはいえない。しかし、残差が小さいかどうかは収束しているかどうかの目安となる。ポテンシャル分布の一部の変化状態から収束したかどうか確かめるのが最も簡単で確実である。文献⁽¹⁰⁾では収束状況をうず電流損失の変化状態から判断したと述べている。

4. 誤差の考察

うず電流の問題の中で鉄心スロット内導体の問題は基本的でありまた、大抵の問題はスロット内の問題と類似と考えられる。したがってここではスロット内の問題の誤差について考察し一般的問題における誤差推定について述べる。

4.1 開放スロット内問題の一次元解析の誤差

誤差に関する基本的性質を一次元解析の例で述べる。誤差は微分方程式の解とその差分近似式の解析解との比較によって求めることができ、一次元の問題ではこれが容易に行なえる。

図4.1に示すような開放スロットの問題は一次元の問題として従来から解析されている。微分方程式の解の式は、

$$A_z = \frac{\mu I_b}{\gamma} \cdot \frac{\cos h\gamma y}{\sin h\gamma d} \quad (4.1)$$

ここに $\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$, I_b はスロットの単位幅当たりの全電流である。

一方差分式の解は導体表面に対する網目配置によって解析解が異なる。図4.1(b)に対して、点*i*のポテンシャルは

$$A_i = \frac{\mu I_b}{\gamma \cos h\theta} \cdot \frac{\cos h2i\theta}{\sin h2n\theta} \quad (4.2)$$

ただし、

$$\theta = \sin^{-1}(\gamma S/2) \quad (4.3)$$

図4.1(c)の場合には

$$A_i = \frac{\mu I_b}{\gamma} \cdot \frac{\sin h(2i-1)\theta}{\sin h2n\theta} \quad (4.4)$$

これらの解析解を数値計算することによって誤差を調べてみる。誤差は導体の上面において大きいので導体上面で考えることにする。導体上面のベクトルポテンシャル A_s と実効抵抗 R_e および導体中に分布する磁束による実効リアクタンス X_e は

$$(R_e + jX_e)I_b = j\omega A_s \quad (4.5)$$

の関係にあるので、ベクトルポテンシャルのかわりに実効抵抗と実効リアクタンスの誤差を考える。図4.2に積々の厚さの導体と網目幅に対する誤差率を示す。またベクトルポテンシャル絶対値の誤差を図4.3に示す。

ここで誤差を表わす近似式を求める。式(4.3)から θ と $\gamma S/2$ の関係を調べると、網目幅が表皮厚さ $\delta (= \sqrt{2/\mu\omega\sigma})$ に比べ小さければ θ は $\gamma S/2$ にほぼ等しいとみなすことができる。この仮定のもとに誤差の近似式を求めてみる。差分式の解式(4.2)の点*i*における値と、または式(4.4)の点*i*と(*i*+1)の平均値と、微分方程式の解(4.1)との差を ΔA_i とすれば、

$$\begin{aligned} \frac{\Delta A_i}{A_z} &= \left(\frac{1}{\cos h\theta} - 1 \right) \text{ または } (\cos h\theta - 1) \\ &\approx \mp j \frac{1}{4} \left(\frac{S}{\delta} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

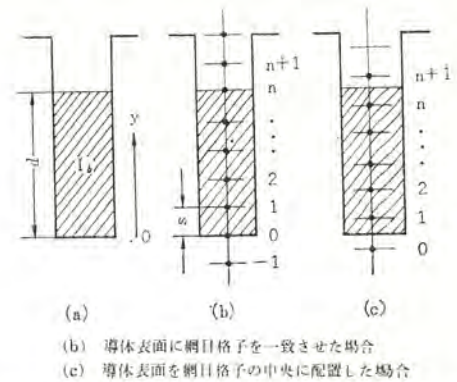
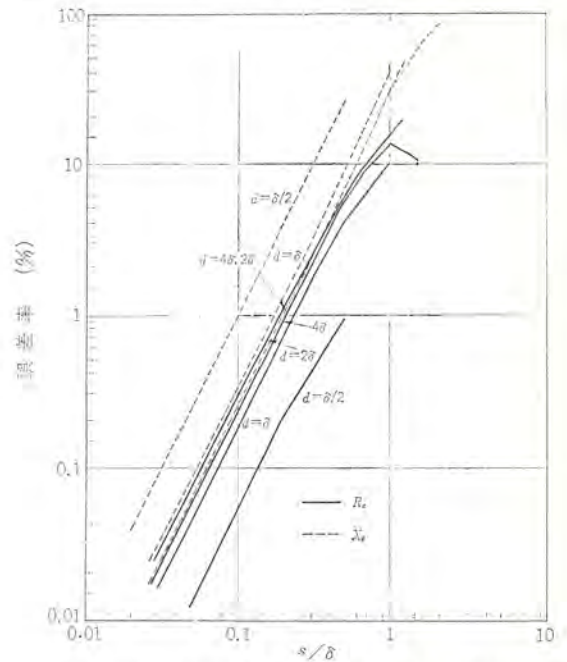
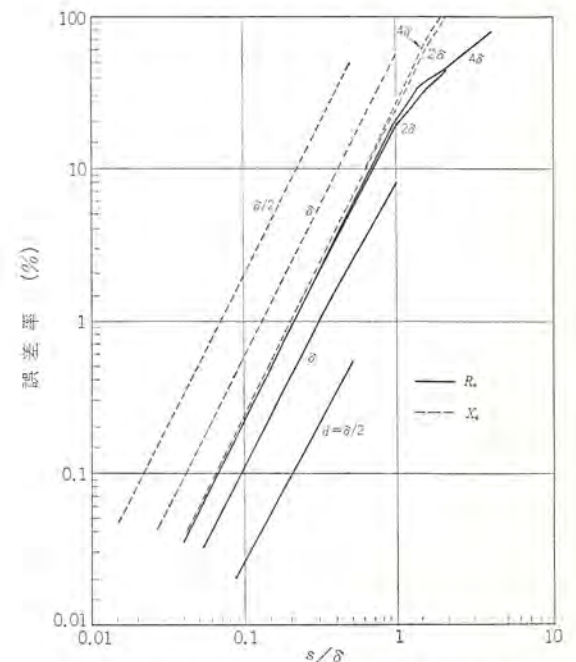


図4.1 開放スロット内問題の一次元解析
One dimensional analysis for an open slot problem.



(a) 導体表面に網目格子を一致させた場合 (図9(b)の場合)



(b) 導体表面を網目格子の中央に配置した場合 (図9(c)の場合)

図4.2 実効抵抗と実効リアクタンスの誤差率
Relative errors of effective resistance and reactance.

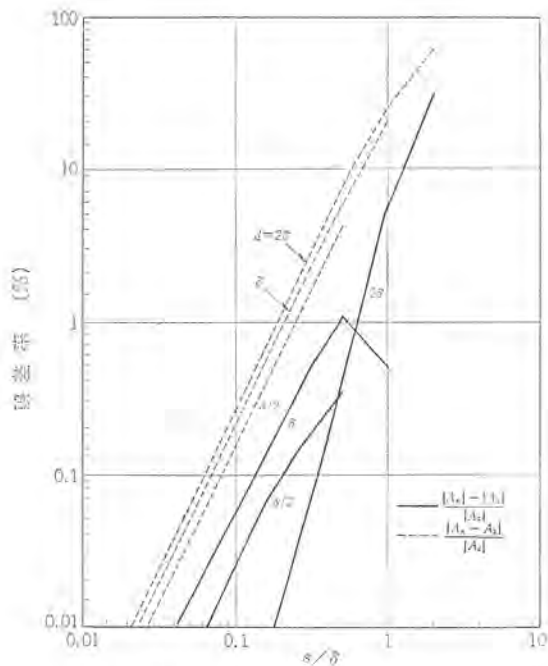


図 4.3 ベクトルポテンシャルの誤差
Relative error of the vector-potential.

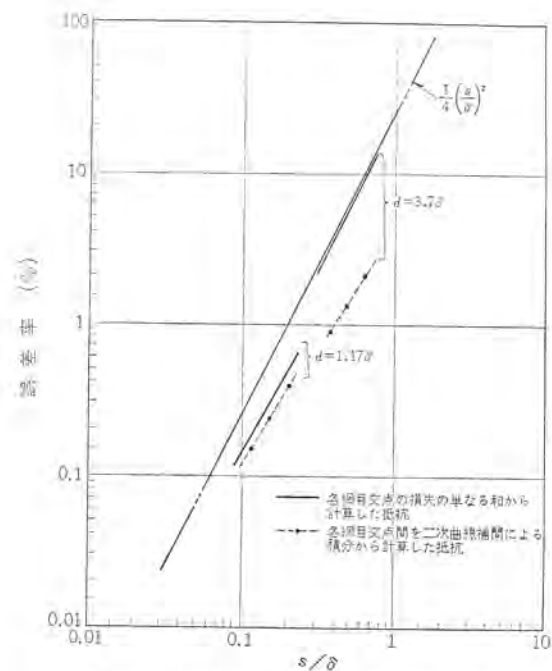


図 4.4 損失分布から計算した実効抵抗の誤差
Error of effective resistance calculated from the distribution of losses.

となる。実数部と虚数部（おのおの r と j で示す）は、

$$\frac{\Delta A_{1r}}{A_{2r}} = \pm \frac{1}{4} \frac{A_{2j}}{A_{2r}} \left(\frac{S}{\delta} \right)^2, \quad \frac{\Delta A_{1j}}{A_{2j}} = \pm \frac{1}{4} \frac{A_{2r}}{A_{2j}} \left(\frac{S}{\delta} \right)^2 \quad (4.7)$$

実効抵抗と実効リアクタンスの誤差は

$$\frac{\Delta R_e}{R_e} = \pm \frac{1}{4} \frac{X_e}{R_e} \left(\frac{S}{\delta} \right)^2, \quad \frac{\Delta X_e}{X_e} = \pm \frac{1}{4} \frac{R_e}{X_e} \left(\frac{S}{\delta} \right)^2 \quad (4.8)$$

となる。ここで式 (4.6) ~ (4.8) の右辺の符号は上が図 4.1 (b),

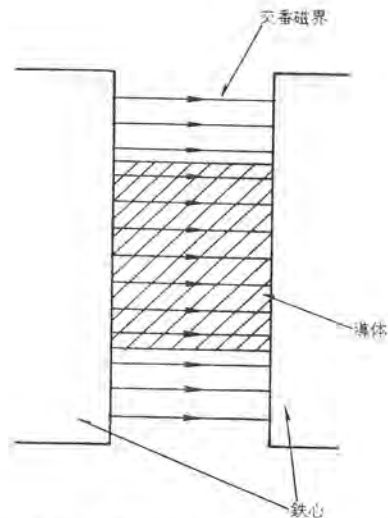


図 4.5 交番磁界が導体に交さる問題
Sinusoidally time-variant flux crosses the conductor.

下が図 4.1 (c) に対応する。この近似式と図の曲線とはよく一致しており誤差の性質はこれらの式からわかる。たとえば、導体が厚い場合には R_e と X_e はほぼ等しくなるので誤差率は共に $(S/\delta)^2/4$ に近づき、また導体が薄い場合には $R_e > X_e$ となるので実効抵抗の誤差率が $(S/\delta)^2/4$ より小さく、実効リアクタンスの相対誤差が上記の値より大きくなる。またベクトルポテンシャルの絶対値は、図 4.3 に示すように誤差が $(S/\delta)^2/4$ よりも小さい。誤差の式を調べてみると

$$\frac{|A_n| - |A_s|}{|A_s|} = \frac{1}{|\cos h\theta|} - 1 = (S/\delta)^2 \text{ or } 4/8 \dots \dots \dots (4.9)$$

となる。式 (4.9) は $|1/\cos h\theta|$ の近似の仕方により $(S/\delta)^2/8$ と $(S/\delta)^2/4$ のどちらにでも考えることができる。この近似式からもベクトルポテンシャルの絶対値については誤差が小さいことがわかる。

図 4.4 は網目交点のうず電流損失の分布から計算した実効抵抗の誤差を示す。網目交点の損失の単なる和から求めた場合に比較して網目間を二次曲線で補間し積分して求めた実効抵抗の誤差は非常に小さい。なお単なる和から求めた値は式 (4.8) の誤差近似式を有する。

図 4.5 に示すような交番磁界中の導体の問題を一次元解析した場合にも先と同様に計算することができる。誤差の近似式は式 (4.8) となる⁽⁶⁾。

4.2 半閉スロットの問題

微分方程式と差分近似式の両方ともに解析解を求めることができる半閉スロットの問題を二次元の問題の一例として考察する。図 4.6 に示す半閉スロットの問題の微分方程式の解は文献⁽¹⁰⁾に求められている。一方差分近似式の解も求めることができる⁽⁶⁾。ここでは計算結果だけを示す。図 4.6 の点 p におけるベクトルポテンシャルの誤差を図 4.7 に示す。点 p のベクトルポテンシャルの実数部は実効リアクタンスに対応し、虚数部は実効抵抗に対応する。一次元の場合と比較すると実数部は厚さ d が薄い場合に誤差が大きくなる傾向が強く、虚数部については一次元の場合とさほど変わりはない。実数部の誤差が大きいのはスロット開口部の磁束密度すなわちポテンシャルの実数部のこう配が大きいためであって、この例は誤差の大きくなる例と考えられる。

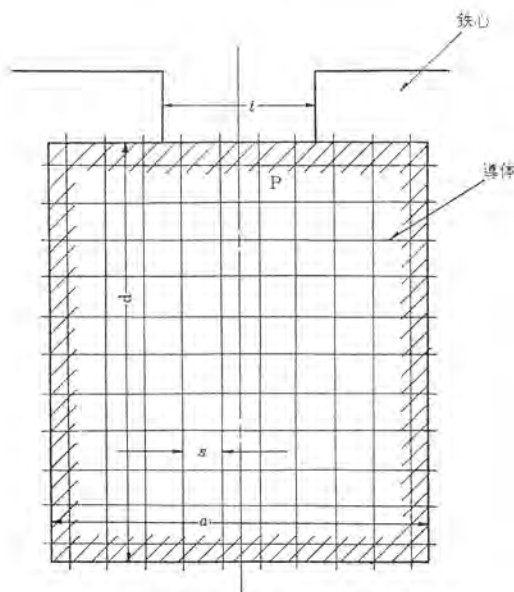


図 4.6 半閉スロットの問題
Semi-closed slot problem.

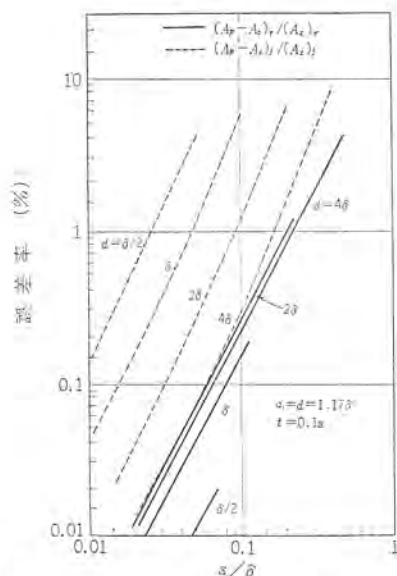


図 4.7 半閉スロットの問題における誤差
Error in the semi-closed slot problem.

5. む す び

多数の導体がある二次元磁界のうず電流問題の差分法による解析方法を述べ、緩和法による計算例を示した。

緩和法の収束については、残差の最大値が減少していてもあるいはうず電流の分布が収束していても、かならずしも全体的に計算値が収束しているとはいえず計算値の全体的変化状況から判断すべきことを明らかにした。また緩和法における加速定数は文献⁽⁷⁾による方法が、うず電流問題にも効果的であるが、必ずしも適切な方法とはいえず、さらに研究する必要がある。

開放スロットの一次元解析と半閉スロットの二次元解析において微分方程式の差分近似に基づく誤差を計算し網目幅に対する誤差の目安を与えた。一次元解析においてはベクトルポテンシャルの誤差率が大体 $(S/\delta)^{3/4}$ (S は網目幅, δ は導体の表皮厚さ) となり、実数部と虚数部に分離した場合の誤差率はおおのこのポテンシャルの実数部と虚数部の大きさに比に関係する。さらに導体の厚さが表皮厚さ δ に比べ小さい場合には、実数部の誤差が大きくなり、虚数部の誤差は小さくなる。また、導体の厚さが厚くなれば実数部虚数部ともに大体 $(S/\delta)^{3/4}$ となる。半閉スロットの二次元解析の例では上述の例と同様の傾向を示すが、導体寸法が小さい場合の実数部の誤差が非常に大きくなる。一般の問題においてもポテンシャルの実数部は誤差率が大きいと予想される。しかし、ポテンシャルの実数部は導体のリアクタンスに対応しており、導体寸法が小さいときの導体中の磁束にもとづく自己リアクタンスは小さいので、誤差率が大きくても問題にならないであろう。またベクトルポテンシャルの絶対値の誤差率は上述の値に比べ非常に小さい。したがって誤差率は $(S/\delta)^{3/4}$ を目安として考えてよいであろう。

実効抵抗の計算は各網目交点間の値を二次曲線で補間して積分する方法が精度よい計算値を得る。

最後に本研究を進めるに当たり有益なご意見をたまわった当所岩本研究員に謝意を表します。(昭和 43-12-20 受付)

参 考 文 献

- (1) 正野重方：緩和法入門，(昭 38) 朝倉書店
- (2) 二見次郎：信学誌，42, 1,203 (昭 34)
- (3) J. Roberts : I. E. E. Monograph No. 341 M, 11 (1959)
- (4) R. S. Mamak et al : ibid, No. 418 U, 252 (1960)
- (5) R. L. Stoll : Proc. I. E. E., 114 (1967)
- (6) 野村：電学誌，88, No. 12 (昭 43)
- (7) K. E. Kulruid : Communication of ACM, 4 (1961)
- (8) 加藤，橋本等：微分方程式の近似解法Ⅱ，岩波書店 (昭 32)
- (9) Peaceman Rachford : J. Soc. Indust. Appl. Math., 3, 28 (1955)
- (10) S. A. Swann et al : Proc. I. E. E. 110, 1,656 (1967)

安全ブレーカ

松 浦 清*

Safety Breakers

Fukuyama Works

Kiyoshi MATSUURA

For the protection of low voltage indoor circuits fuses have been most extensively used. No-fuse breakers, however, have come into use gradually because of their safety and ease in handling, now being about to displace the former. In ordinary homes safety breakers are now employed in a big number. The operation characteristics of breakers for use on distribution lines are under the prescription of JIS C 8370. Home electric appliances of late are mostly the applications of electric motors and their capacities are on the trend of increase. This will bring about the necessity of attention to their starting currents.

This article describes Mitsubishi safety breakers, commenting on their good coordination characteristics for the protection of wires and against the starting current of machines loaded.

1. ま え が き

低圧屋内電路の保護器としては、従来からヒューズが多く使用されてきたが、近年は取扱いが便利で安全なノーヒューズしゃ断器に代わりつつある。一般家庭においても昭和 30 年ごろから安全ブレーカが使われはじめ、現在では急速に普及している。安全ブレーカは使用目的から次の 2 種類に大別される。

(1) 電流制限器

電力会社と需用家の間で契約された最大使用電流を制限するために使用されるもの。

(2) 配線用しゃ断器

主として配線の保護を目的として使用され、過負荷および短絡事故の際に電線や電気機器の焼損を防止するもの。

両者は構造的にはほとんど同一であるが、特性面において若干異なる。以下配線用しゃ断器の特性をもつ安全ブレーカについて種類、性能などを述べる。

2. 種 類

当社で製作している安全ブレーカのうち、配線用しゃ断器として使

表 2.1 安全ブレーカの種類
List of safety breakers in production.

形 式	BU-1E	BU-2
極および素子数	2 極 1 素子	2 極 2 素子
引きはずし方式	熱 動 式	電 磁 式
定 格 電 圧 V	AC 110	AC 110/220
定 格 電 流 A	10, 15, 20, 30	5, 10, 15, 20, 30
しゃ断容量 A	1,000	2,500
製 品 重 量 g	80	250



図 2.1 BU-1E 形 外観
Exterior view of type BU-1E.



図 2.2 BU-2 形 外観
Exterior view of type BU-2.



図 2.3 BU-2 形 内部構造
Interior construction of type BU-2.

用されるおもなものに表 2.1 に示すような種類がある。

3. 動 作 特 性

配線用しゃ断器の特性は JIS C 8370 によれば、(定格電流 30 A 以下の場合)

- (1) 定格電流を連続通電して動作しないこと。
- (2) 定格電流の 125 % で 60 分以内に自動しゃ断すること。
- (3) 定格電流の 200 % で 2 分以内に自動しゃ断すること。

と規定されている。また実用上からは次の二つの条件を満足する必要がある。

(a) 配電線を保護するために、電線の熱特性(過電流と許容時間の関係)としゃ断器の動作特性が協調していること。

(b) 負荷機器の起動電流で誤動作しないこと。

図 3.1 はしゃ断器に 20 A を使用した場合のこの関係を表わしたもので、図中の電線の熱特性は 600 V ビニル電線を周囲温度 30°C から通電し、30 deg の温度上昇を許容した場合の通電時間を示す。

(電線の熱特性は厳密には使用条件により異なるが、本特性はがい(碍)子引き配線したときの特性を示した)この場合においてこれらの電線を保護するためには、しゃ断器の動作特性が電線の熱特性より図のように下側にあることが必要である。

電気機器の起動特性は使用する機器の種類、容量の大きさにより異なるが、最近の傾向である大容量化、またクーラー、冷蔵庫などモータを応用した機器が増加するにつれて、今までのような電灯、電熱器具が大部分の負荷であったところに比べ、その電気回路の起動特性も起動電流は大きく、起動時間も長くなってきた。したがってしゃ断器の特性もこの点考慮しなければならない。

図 3.2~図 3.4 はクーラー、カラーテレビ、そうじ機の起動電流を測定したオシログラフである。

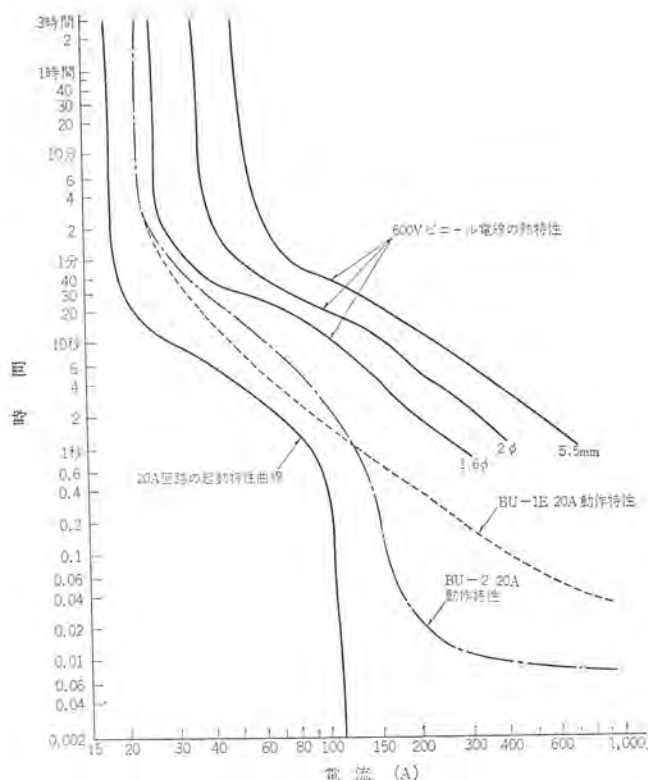


図 3.1 電線の熱特性と安全ブレーカの動作特性
Time-current characteristics of electric wires and safety breakers.

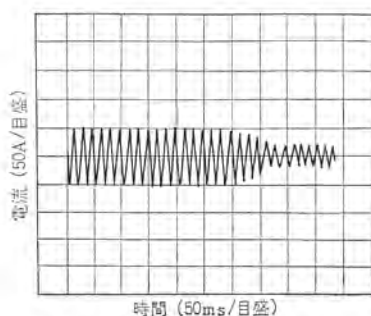


図 3.2 クーラーの起動電流
Starting current of room air conditioner.

これら機器の起動電流・起動時間より推定すると、一般にこの機器が接続されている電気回路の起動特性曲線は図 3.1 のようになることが考えられる。しゃ断器が負荷機器の起動電流で誤動作しないためには、しゃ断器の動作特性が図 3.1 のように起動特性曲線より上側にあることが必要である。

しゃ断器は一般に小形化の傾向にありその動作特性は、動作時間が短くなってきているが、当社の BU-1E および BU-2 形安全ブレーカにおいては、図 3.1 のとおりしゃ断器の動作特性が電線の熱特性と起動特性曲線の中間にあり、二つの条件を満足している。

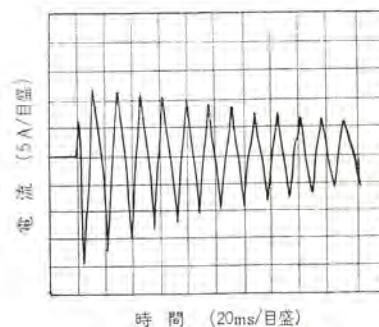


図 3.3 カラーテレビの起動電流
Starting current of color TV.

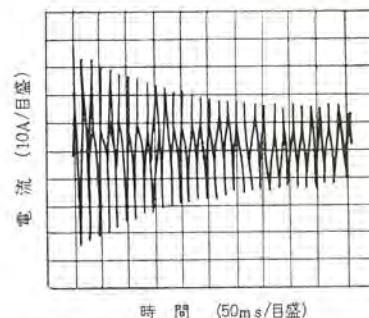


図 3.4 そうじ機の起動電流
Starting current of electric cleaner.

4. しゃ断性能

一般的に 100 V 級および 200 V 級電路に使用する定格電流 30 A 以下のしゃ断器については、最低 1,500 A、ただし 100 V 級 2 線式電路に使用する 2 極同時しゃ断のしゃ断器については 1,000 A のしゃ断容量が必要とされている。必要なしゃ断容量は、配電用変圧器の容量と電路のインピーダンスから推定できるが、一般家庭については配電用変圧器からかなり離れており、配線のインピーダンスにより短絡電流は制限され、あまり大きくならないことが知られている。しかし、配電設備容量は増大する傾向にあり、将来はしゃ断容量の大きいものが必要となってくるであろう。

5. むすび

以上述べたように家庭用の配線用しゃ断器として安全ブレーカは、電線の熱特性および家庭用電気機器の起動電流に対して協調のとれた特性を備えなければならないが、当社製品について検討した結果良好な特性をもっていることを確認できた。

参考文献

- (1) 電線工業会・電線過電流調査委員会：電気学会雑誌，74-791 (昭 29-8)
- (2) 日本電気協会・電気技術基準調査会：電設工業雑誌 (昭 43-3)

静電結合形固定記憶装置

小島 一男*蒲生 容仁*南部 元*

A Capacitor Read-Only Memory

Kamakura Works

Kazuo KOJIMA • Yoshimi GAMÔ • Hajime NANBU

As a read-only memory of computers various kinds have been made public. Now it is successful in developing a capacitor read-only memory using a multi-layered laminated board for the memory element. The memory capacity is 2kW, one word is made of 40 bits, the cycle time is 200 ns and the access time is 110 ns at the maximum. The memory element is a parallel plate condenser with epoxy-glass used as dielectric, the capacitance being about 2pF. One memory card consists of 16 words and is connected to peripheral circuits via a card connector so as to facilitate the rewriting of memory information by changing memory cards only. Particularly, it has sufficient noise margins to prove it to be an excellent high speed read-only memory in the reliability and maintainability. A plan is on foot to turn it to a regular product.

1. ま え が き

固定記憶装置とは、一時記憶装置と異なり、情報の書き換えをひんぱんに行なわず、固定化された情報を何度も繰返して読み出す記憶装置である。したがって、読取専用記憶 (Read Only Memory……ROM と略称する) と呼ばれ、電子計算機においては、制御信号発生用のマイクロプログラムの記憶や、コード変換等に用いられる。

固定記憶装置に要求される特性は、一時記憶装置の数倍の読出し速度と廉価性および信頼性である。そしてまた、情報の書き換えも、ある程度は容易でなければならない。これらの要求を満たす記憶素子としては、きわめて多種多様なものが発表されている⁽¹⁾。すなわち、一時記憶素子が、コアや薄膜などの磁性材料であるのに反し、固定記憶素子としては、抵抗・コンデンサ・トランスなどの線形素子、ダイオード・トランジスタ・磁性材料などの非線形素子、マイクロフィルム・ホログラムなどを用いた光学素子などがある。一般に、高速性においては線形素子がすぐれ、大容量性においては他の素子がすぐれている。

静電結合形固定記憶装置 (C-ROM と略称する) とは、記憶素子としてコンデンサを用いたものである。すなわち、コンデンサの有無によって、“1” “0” を記憶するのである。これにも二つの方式があって、その一つは、コンデンサを構成する電極板を機械的に除去することによって “0” を記憶する方式⁽¹⁾⁽²⁾であり、他の一つは、電極板間にシールド板を入れることによって “0” を記憶する方式である。

今回、前者の方式で、多層プリント基板を利用して、2kW、1語40ビットのC-ROMの開発を完了し、サイクルタイム200nsで動作することを確認したので報告する。

2. 動作原理

記憶素子は、語配列方式でマトリックス状に配列される。すなわち、図2.1に示す如く、互いに平行な駆動線 (語線) 群と、これに直交する互いに平行な感知線 (ビット線) 群とがあって、その交点にコンデンサが配置されるか否かによって “1” “0” が記憶される。したがって、図2.1においては、駆動線Bに駆動パルスが加えられると、感知線1、2および4には交点のコンデンサを介して記号出力が得られるが、感知線3には交点にコンデンサがないので信号出力は現



図 2.1 コンデンサマトリクス
Capacitor matrix.

われない。よって、“1” “1” “0” “1” なる記憶情報が読み出される訳である。しかしながら、感知線3には、図2.1に点線で示す通路を通して、いわゆる“まわり込み雑音”が現われる。まわり込み雑音の通路はこの他にもたくさんある。そして、まわり込み雑音は、一つの交点だけが “0” で、他のすべての交点は “1” であるというパターンのときに最大となる。このパターンを Max “0” パターンと言う。まわり込み雑音は記憶容量の増加とともに増大し、大容量化の最大の障害となるものである。内部雑音にはこのほかに、交点における残留結合 (コンデンサの電極板を除去したあとに残っている静電結合) によるもの、駆動線相互間の静電結合によるものおよび感知線相互間の静電結合によるものがある。信号出力とこれらの雑音の比が S/N を与え、記憶装置の性能を決める要素となる。

3. 設計と試作

3.1 記憶素子

試作にあたり、電気的特性、信頼性、工作性および保守性を考慮した結果、次のような形式の記憶素子を採用することにした。

(1) 記憶素子は平行板コンデンサを用い、情報の書き込みは平行板コンデンサを形成する電極板を機械的に取り除くか残すかによって、おのおの “0” “1” を書き込む方式とする。

これはシールド板を用いる方式に比べて、構造が簡単であるうえに、電極板間隔を小さくすることができるので結合容量が大きく、また、

電極板間隔のばらつきも小さくできるので結合容量のばらつきも小さいからである。

(2) 素子の平行板コンデンサを形成する誘電体としては、ガラスエポキシを用いる。

これは、ガラスエポキシが化学的・熱的・機械的に信頼性が高いので、加工・保守が容易であるうえに、誘電率が4.5~5.0と比較的大きいからである。また、基板材料としての実績も多く、高く評価されている。

(3) 4層の多層基板構造とする。

平行板コンデンサは、原理的には2層の基板構造でよいのだが、小さい電極板面積で大きな結合容量を得るためには電極板間隔を小さくせねばならない。すると、機械的強度が保てず、また、周辺回路との電気的な接続も困難になる。したがって、2層の基板を2重に積層して、4層の多層基板とした。これをメモリカードと言うことにする。基板構造にすることによって、電極板の重ね合わせ精度は、機械的な重ね合わせ⁽²⁾による場合よりも向上し、結合容量のばらつきを小さくすることができる。

(4) メモリカードは、第1層および第4層に駆動線を、第2層および第3層に感知線を配置する。

駆動線はおのの独立に駆動されるので、駆動線を第2層または第3層に配置すると、層間の相互干渉を防ぐために、第2層、第3層間にシールド層を加えねばならず、構造が複雑になる。感知線が第2層、第3層にある場合は、同一ビットの感知線は互いに接続されるので、シールド層は不要である。したがって、情報の書き込みは、第1層または第4層の駆動線と素子コンデンサの電極板を結ぶプリントパターンを切断することによって、比較的容易に行ないうる。また、切断されたパターンを復元することも困難ではない。

(5) 相隣る感知線の間隔(ピッチ)は、IBMカードの穴ピッチと一致させる。

これは、IBMカードを用いて、情報パターンの作成および検査を容易に行なうためである。

(6) 駆動回路はメモリカードに積載する。

これは、駆動回路を素子の近くに置くことによって、駆動波形のひずみを少なくすることと、Partial Decode方式を用いることによって入力線数を減らすことが目的である。

(7) 周辺回路との電気的接続は、市販のプリント基板用接せん(栓)を用いる。

これは、メモリカードの差し換えだけで記憶内容が容易に変更できるうえに、保守・調整も容易に行なえるからである。

記憶素子の静電結合容量(C_0)は約2pFと仮定して設計した。 C_0 が大きいと、出力は大きい、まわり込み雑音も大きく、また電極板面積を小さくせねばならないので実装密度が低下する。もちろん、 C_0 を大きくするには、電極板間隔を小さくしてもよいが技術的に限度がある。また逆に C_0 が小さいと、出力が小さくなり、雑音に弱い。したがって、通常 C_0 は数pFに選ばれている。

当初の設計目標は次のとおりである。

“1”出力電圧 (Min)	2.5 mV
“1”出力 Peak Time	60 ns
S/N	4
駆動電圧	4 V
1語のビット数	40ビット
1ブロックの語数	256語

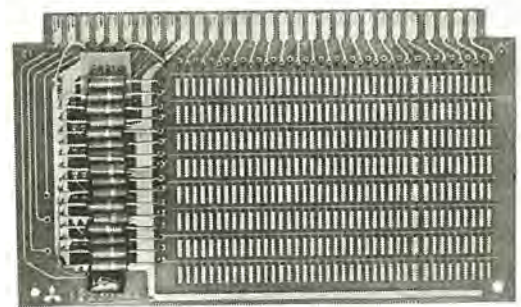


図 3.1 メモリカード
Memory card.

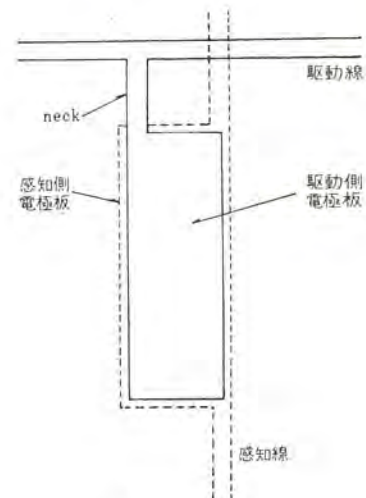


図 3.2 記憶素子
Memory element.

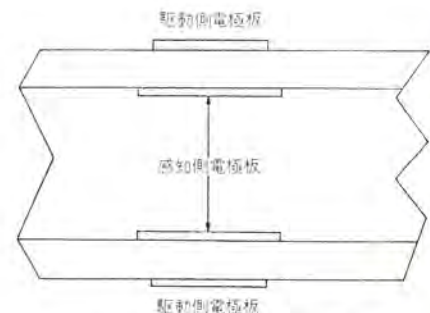


図 3.3 メモリカードの断面
Cross-section of memory card.

以上の条件を満たすものとして、図3.1に示すようなメモリカードを試作した。素子の詳細を図3.2に示す。また、素子の断面を図3.3に示す。各部の寸法は次のとおりである。(単位: mm)

カードサイズ	140×85
駆動側電極板面積	1.2×5.4 (寸法公差 ±0.1)
感知側電極板面積	1.4×5.4 (寸法公差 ±0.1)
駆動線および感知線幅	0.3 (寸法公差 ±0.1)
電極板間隔	0.125±0.025
銅はく(箔)厚み	0.035
基板厚み	1.6

駆動側電極板が感知側電極板よりひと回り小さいのは、重ね合わせ誤差があっても C_0 がばらつかないように配慮されているからである。また、ネック(駆動線と駆動側電極を結ぶパターン)と感知線が重なっていないのは、“0”の場合の残留結合を極力小さくしてS/Nを向上させるためと、ネックを機械的に切断して“0”を書き

込む際に感知線を切断しないためである。

このようにして作られた素子の結合容量 C_0 は、ガラスエポキシの誘電率を 4.6~5.6 とすると、 $2.17^{+0.49}_{-0.40}$ pF である。ただしこのばらつきは、最悪設計値ではなく、標準値と最悪設計値の中央値を採用した。

図 3.1 より明らかとなおり、メモリカード当たりの語数は 16 (各面 8 語づつ) であり、第 2 層と第 3 層の対応する感知線は、メモリカード内でスルーホールによって接続されている。

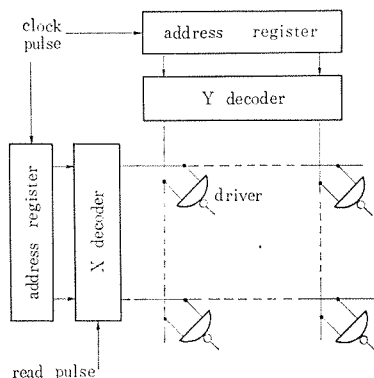


図 3.4 駆動系
Drive system.

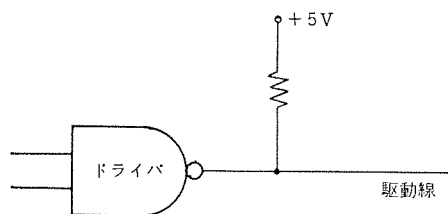


図 3.5 駆動回路
Drive circuit.

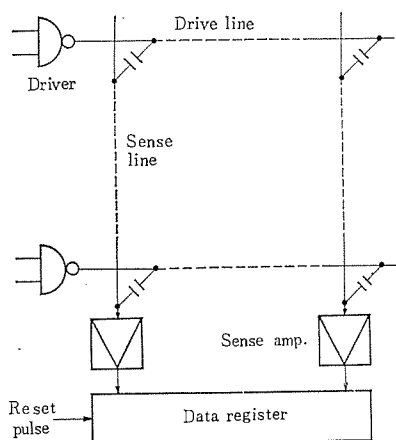


図 3.6 感知系
Sense system.

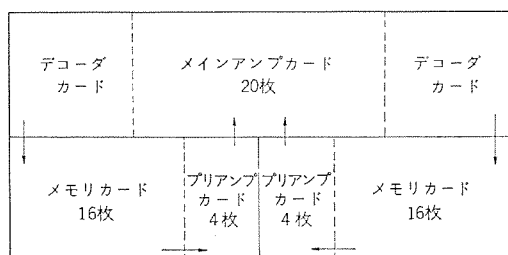


図 3.7 512 語 モジュール
512 Word module.

3.2 駆動系

駆動系の構成を図 3.4 に示す。駆動系は、Xデコーダ、Yデコーダおよびドライバの三つから成立している。アドレス信号の下位 3ビットは Xデコーダで、残りのビットは Yデコーダでデコードされる。このデコード出力を再びドライバでデコードする。このようなデコード法は、Partial Decode と呼ばれている。Xデコーダには、このほかに Read Pulse がはいていて Read Timing を与えている。駆動系はすべて TTL NAND ゲートで構成されている。したがって、駆動パルスは負パルスである。TTL-IC のパルス出力は、 T_f (立下り時間) のほうが T_r (立上り時間) よりも小さいので、高速化のため、負パルスをそのまま駆動パルスとして用いている。

駆動線は図 3.5 に示すように、抵抗によって 5V 電源につり上げられている。IC 出力の電圧振幅は通常 3.5V 程度であるが、抵抗でつり上げることによって、4~4.5V まで増すことができる。図 3.1 に示すように、ドライバおよび抵抗はメモリカードに積載されている。

3.3 感知系

感知系の構成を図 3.6 に示す。感知系は、感知線、センスアンプおよびデータレジスタの三つから成立している。

感知線は、主として、バックパネル上のプリントパターンである。バックパネルは、3層の多層基板で、第1層と第3層に信号線があり、第2層はアース層である。感知線の終端には、抵抗とコンデンサが並列に接続されている。

センスアンプは、プリアンプとメインアンプに分けられる。プリアンプはトランジスタ 1 段アンプ (A 級) で、電圧増幅率は約 9、カットオフ周波数は約 9 MHz である。メインアンプはトランジスタ 3 段増幅器で、最終段はスイッチング段である。最終段のトランジスタのベースは、ストロブ回路につながれている。使用電源は、+5V と -5V である。

データレジスタは、TTL-IC によるフリップフロップ 40 回路で構成されている。

3.4 ROM ブロック と ROM モジュール

ROM ブロックは、256 語 (10,240 ビット) で構成される。具体的には、メモリカード 16 枚、プリアンプカード 4 枚 (10 回路/カード)、バックパネル 1 枚で構成される。

ROM モジュールは、ビルディングブロック方式で ROM ブロックを結合したものである。したがって原理的にはいくらかでも拡張できるが、Yデコーダに 8 入力ゲートを用いているので、同一アクセスタイムでは、2kW までしか拡張できない。それ以上の拡張にはセンスセレクトを用いる。図 3.7 に 512 語モジュールのカード配置を示す。矢印は信号の流れを示す。

駆動パルスの立下り時間 (T_f) を 20 ns とした場合の諸特性の計算値は、次のとおりである。

"1" 出力電圧 (Min)	3.2 mW
"1" 出力 Peak Time	62 ns
S/N	5.3

4. 実験結果

今回は、256 語の ROM ブロックを試作し、128 語を実装した状態で以下の実験を行なった。出力電圧および出力 Peak Time の計算値は 3.4 節で述べたとおりであるが、まわり込み雑音が小さくなるので、S/N の計算値は 7.7 となる。

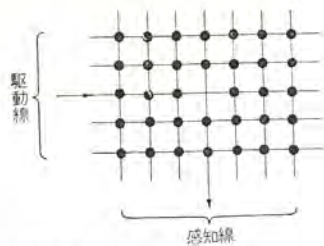


図 4.1 Max “0” パターン
Max “0” pattern.

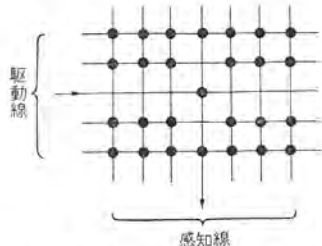


図 4.2 Min “1” パターン A
Min “1” pattern A.

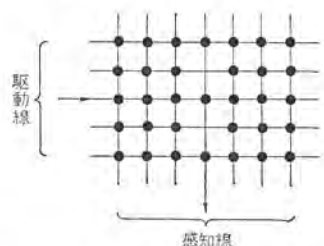


図 4.3 Min “1” パターン B
Min “1” pattern B.

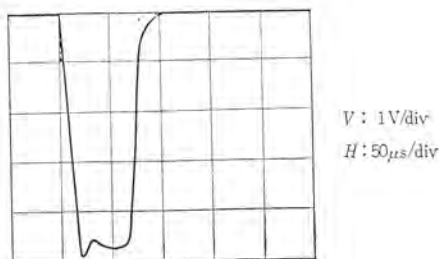


図 4.4(a) 駆動パルス
Drive pulse.

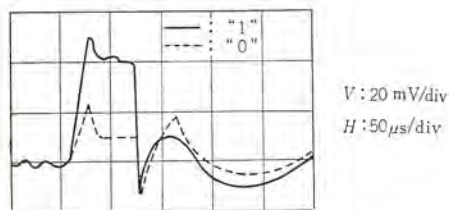


図 4.4(b) プリアンプ出力
Output of preamplifier.

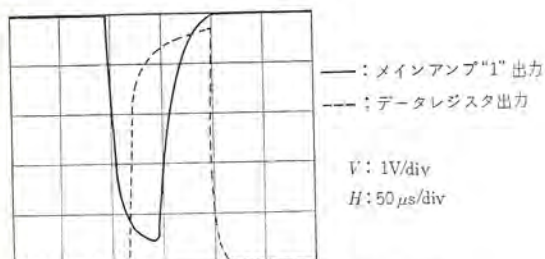


図 4.4(c) メインアンプおよびデータレジスタ出力
Output of main-amp and data register.



図 4.5 Min “1” パターン A におけるプリアンプ出力
Output of preamplifier at Min “1” pattern A.

4.1 Max “0” と Min “1”

Max “0” パターンを 図 4.1 に示す。すなわち、注目ビット以外はすべて “1” である場合に回り込み雑音は最大になる。Min “1” パターンを 図 4.2 に示す。すなわち、まわり込み雑音の主ルートを通り切り、しかも駆動線間結合による分流ルートの容量性負荷が最大となるパターンである。しかしながら、これらのパターンが Max “0” や Min “1” となるのは、駆動パルスの立下り時間が負荷によって変わらない場合である。実際には、立下り時間は容量性負荷が大きいほど大きく、そして、“1” 出力電圧は立下り時間が大きいほど小さくなる。したがって 図 4.3 に示すように、駆動線の負荷が最大で、しかも、まわり込み雑音のルートの一部を切断したパターンが Min “1” パターンとなる場合もある。今回の実験では、以下に述べるように、図 4.2 のパターンと 図 4.3 のパターンで、出力電圧にそれほどの差は認められなかった。

図 4.4(a) は駆動パルス、(b) は Max “0” および 図 4.3 のパターンによる Min “1” のプリアンプ出力、(c) はメインアンプ出力およびデータレジスタ出力を示す。図 4.5 は 図 4.2 のパターンによる Min “1” のプリアンプ出力である。

“1” 出力は、プリアンプ出力で約 50 mV であるので、プリアンプ入力では約 5.5 mV である。設計値は 3.2 mV であるので少し大きい。また、S/N は約 2 であるが、設計値は 7.7 であるので、だいぶ小さい。これはシステムノイズ（グラウンドレベル変動）によるものと思われる。これが約 2 mV あるとすると、システムノイズを除いた S/N は約 6 となり、設計値とほぼ一致する。

4.2 アクセスタイムとサイクルタイム

アクセスタイムとは、デコーダにアドレス信号がはいってからデータレジスタがセットされるまでの時間を言う。最悪状態におけるアクセスタイムの計算値は 110 ns である。その内訳は、デコーダおよびドライバの遅れが 40 ns、素子およびセンスアンプの遅れが 50 ns、データレジスタの遅れが 20 ns である。図 4.4 によれば、プリアンプの遅れに比べてメインアンプの遅れが大きい。これはメインアンプを高速化することによってアクセスタイムが短縮できることを意味する。素子およびセンスアンプの遅れは、出力波形の差やセンスアンプの性能の差によってばらつき、平均値は約 40 ns で、小さいものは 30 ns に近いものもある。

サイクルタイムとは、駆動パルスの繰返し時間を言い、最小サイクルタイムは、出力の減衰速度で決まる。実験では、サイクルタイムを 200 ns まで短縮したが十分動作することを確認した。サイクルタイム 150 ns でも “1” “0” の弁別はできたが、前回の読み出し出力の影響が次の読み出し出力に現われ、波形がひずみ、アクセスタイムが少し遅れるという結果が得られた。したがって実用できるサイクルタイムは 200 ns 程度と考えられる。

4.3 タイミングチャート

論理素子として使用する TTL ゲートの最大伝ば遅延時間を 10 ns とし、最悪状態でのタイミングチャートを描くと 図 4.6 のとおりであ

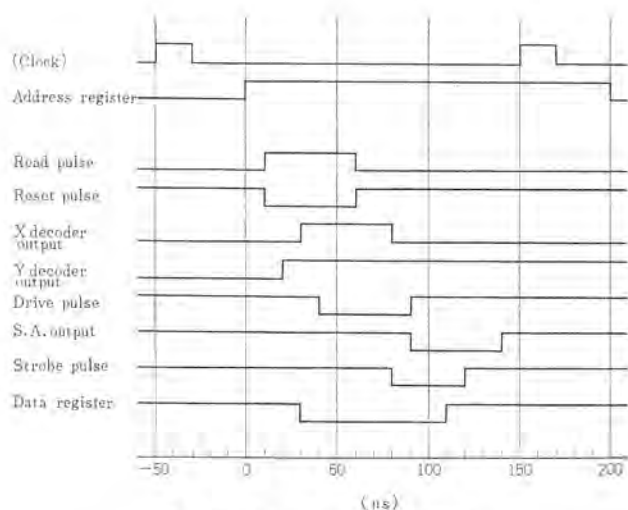


図 4.6 タイミングチャート (5 MHz)
Timing chart.



図 4.7 ノイズテストのブロック図
Block diagram of noise test.

る。

4.4 電圧マージン

電圧マージンテストは、+5 V および -5 V 電源のうち、一方のみを変化させて誤動作電圧を測定した。その結果は次のとおりである。

+5 V 電源	3.8 V ~ 5.3 V
-5 V 電源	-7.8 V ~ -1.4 V

+5 V 電源の臨界値のうち、5.3 V は IC の規格電圧の上限である。他の臨界値は、いずれも“1”が検出できなかった電圧である。以上のように、電圧マージンは十分広いことがわかる。

4.5 ノイズテスト

MELCOM 3100/40 の電源ラインに、試作 ROM を接続してノイズテストを行なった。テスト法のブロック図を図 4.7 に示す。ノイズ発生器は三基電子製で 100 Ω の抵抗で終端されている。ノイズ波形はく(矩)形パルスで、周期は 50 Hz の AC 電源に同期して位相 0° で発生

される。パルス幅は 800 ns と 100 ns について実験した。その結果、800 ns では 610 V、100 ns では 520 V の振幅のノイズまで大丈夫であり、実用上問題ないことがわかった。

5. む す び

サイクルタイムは 200 ns で、所期の設計値が得られたが、アクセスタイムは 110 ns で、少し大きい。高速化の要求に対しては、センスアンプの高速化と出力信号の早期減衰によって対処せねばならず、この点に対する改良が今後の課題である。

また、システムノイズに対してはバックパネルや電源系の設計に十分な留意をする必要がある。

しかしながら、スピード、 S/N 、耐ノイズ性などは、十分実用に耐えるものであり、多層基板を用いた記憶素子の信頼性や保守性の良さを併せ考えれば、今回開発した C-ROM の実用的個値は非常に大きいものと考えてよい。

本文の C-ROM はマイクロプログラム制御方式の電子計算機の固定メモリとして、現在開発中の次期計算機への適用を計画している。今後の将来への動向としてはこの種の固定メモリは IC メモリへと変遷してゆくものと推察されるが、過渡期としてはコストなどの点から併用されるであろう。

最後に、本装置の開発に終始ご指導ご協力くださった関係各位に深く感謝いたします。

(昭和 44-2-24 受付)

参 考 文 献

- (1) M. H. Lewin : A Survey of Read-Only Memories, Proc. FJCC, p. 777, (1965)
- (2) J. W. Haskell : Design of a Printed Card Read-Only Store, IBM J., p 142, (March, 1966)
- (3) 織田, 南部 : 静電結合型固定記憶装置の一最適設計法, 昭 42 連大 No. 2,694
- (4) 織田, 南部 : 静電結合型固定記憶装置の一最適設計法, (2), 昭 42 信学全大, No. 929
- (5) 蒲生, 南部 : 静電結合型固定記憶装置, 昭 42 信学全大, S1-7

Automatic Program Control of Coke Pushers

Nagoya Works Nobuhiko IMAHORI

Recent working machines of coke furnaces are automatized for rationalization of the operation. Now fully automatic travelling devices of coke pushers have been completed. The coke pusher is operated from the ground according to a predetermined working plan to repeat a definite process of travelling to and stopping at a coke furnace. To effect the operation, signals are sent out over a reeled cable to designate the number arranged on a binary systems with the furnaces to discharge the product ; at the pusher, then, comparison and operation is made between the instruction signals of travelling positions and a present position of the pusher memorized by a binary reversible counter ; a travelling motor undergoes reactor control to make automatically acceleration, deceleration and stop at a definite position within prescribed accuracy.

1. ま え が き

最近製鉄所、ガス会社などにおいては合理化の一環としてコースを製造するコース炉の作業機械の自動化が計画されている。このほど当社ではこれらコース炉用作業機械の総括集中制御を行なうために、まずコース押出機の走行全自動運転装置を製作した。

このコース押出機は地上に設置された指令装置の信号により、赤熱コースを押出す押出位置や、コース 炉に石炭を装入した際石炭の山をならすためのならし位置へ自動的に走行しこれらの作業を行なうもので、従来運転手により操作されていた走行作業がすべて自動化され、将来炉ふた掃除などの作業が自動化されれば無人運転も可能となるよう考慮されている。

以下 コークス 押出機の走行全自動運転装置の概要について述べる。

2. コークス炉の概要

コークス 炉は一般に 100 門前後ならんだ多数の乾留室からなり、炉室両側の押出機、コークガイド車、消火車と炉上の装入車によって作業を行なう。図 2.1 にコークス 炉平面図、図 2.2 にコークス 炉断面図を示す。

コークス 炉の作業は 1,100°C 前後の高温で石炭を乾留し、乾留の終了した赤熱 コークスはかま(窯)出しを行なうために炉室両側の炉ぶたを押出機およびコークガイド車でおのおの取りはずし、押出機の押出ラムで赤熱 コークスを押出し、押出された赤熱 コークスはコークガイド車のガイドを通して消火車へ積込まれる。消火車は押出速度に追尾して走行し、消火車全長に赤熱 コークスを均等高さに積載したのち消冷塔に向かい走行し、消冷塔間に停車して赤熱 コークスは散水、消火される。

赤熱 コークス のかま出しを終了した押出機および コークガイド 車は炉

室両側の炉ぶたを装着し、押出機はならし棒が炉室に合致する位置に走行停止する。一方装入車は コールビン で石炭を受炭し、炉上を走行してかま出しの完了した炉室上で停止し、炉上の装入口より石炭を炉室内に装入する。押出機は装入車より装入される石炭が炉室内に均等に充てん(填)されるよう炉ぶたの上部に付属する小ぶたを開け、ならし棒で炉室内上部を数往復させる。

装入車は装入完了後 コールビン に向かって走行し石炭を受炭したの

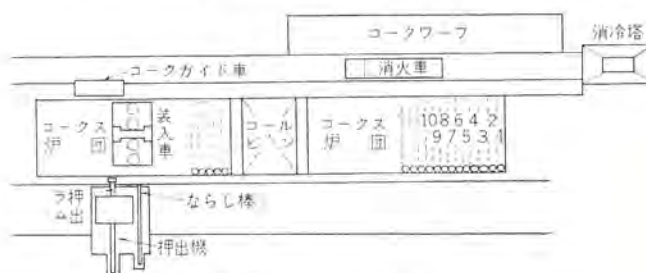


図 2.1 コークス 炉平面図
Plan of coke furnace.

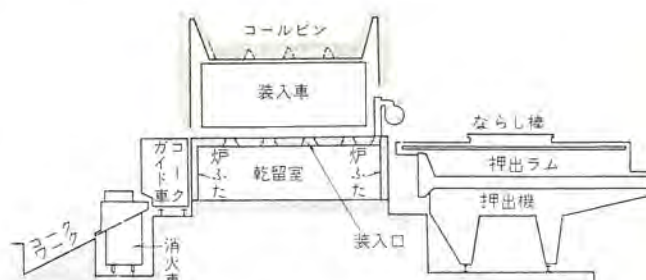


図 2.2 コークス 炉断面図
Section of coke furnace.

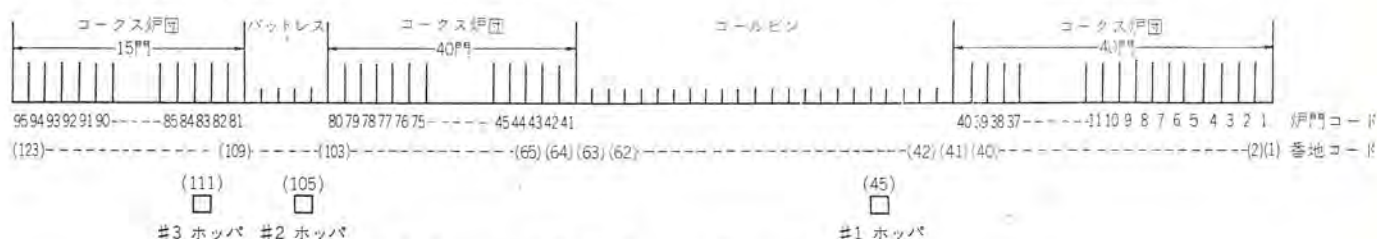


図 2.3 コークス 炉用配列図

Disposition of coke furnaces.

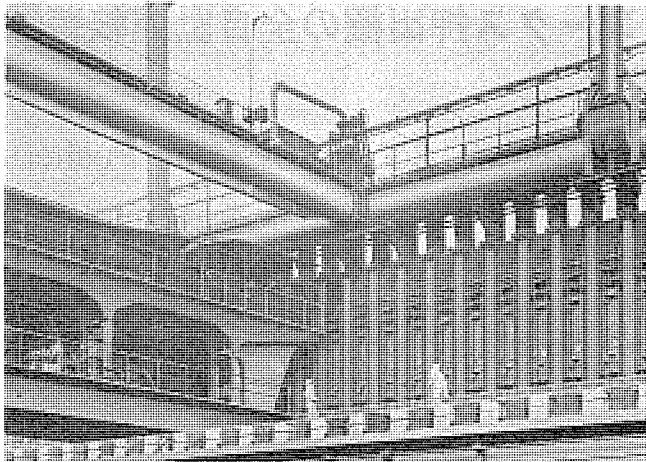


図 2.4 コークス炉とコークス押出機
Coke furnaces and coke pusher.

ち、次のかま出し炉室に向かって走行する。押出機はならし作業終了後、コークガイド車は炉ふた装着後、次のかま出し予定炉室へ走行し同様の作業を繰り返す。

今回自動化したコークス炉の炉団配置は、図 2.3 に示すように押出機側よりみて右より #1~#40 まで 1 門 1,100 mm の等間隔でなっている。さらにコールドピンをはさんで #41~#80, 途中バットレスをはさんで #81~#95 の順にならんでおり、そのかま出し作業順序ははじめ #1 の炉室を、次は #6, #11, #16……と 5 門飛びに行ない、#91 で 1 番の系列が終わり次は #3, #8, #13……と 3 番の系列を最後の #93 まで行なう。次は 5 番の系列、2 番の系列、4 番の系列を順にかま出しし、4 番の系列の最後 #94 の次は元に戻って #1, #6 と 1 番の系列を行なう。このようにかま出し作業はいずれも 5 門飛びに規則正しく行なわれる。

3. コークス押出機概要

押出機はコークス炉の炉ふたを取りはずしおよび装着を行なう炉ふた取機、コークス炉内の赤熱コークスを押出す押出装置、装入車よりコークス炉乾留室に石炭を装入するとき石炭の山を均一にならすならし装置、ならし用小ふたの取りはずしおよび装着を行なう小ふた取機などからなり、図 3.1 に示すような配置に設備されている。

押出機の作業順序は図 3.2 に示すようにまずふた取り位置へ走行し、炉ふた取機をコークス排出がまの位置へ合わせて炉ふた取機により排出がまの炉ふたをとり、炉ふたわく掃じ機によりコークス炉わくの掃じ(除)を行なう。次に押出しラムにより赤熱コークスを押出し、押出完了後炉ふた取機により炉ふたを装着する。次は左へ 2,523 mm (約 2, 3 門分) 走行し、ならし棒を排出がまの位置へ合わせて小ふた取機によりならし口の小ふたを開けた後ならし棒を炉内へ入れてならし作業を行ない、ならし終了後小ふたを閉じる。以上で 1 サイクルの作業を完了し、左へ 2,977 mm 走行し 5 門先の炉室のかま出しを行なう。

押出機は通常以上の作業を繰り返して行なうが、ならし作業中にならし棒によって乾留室内から外へ出された石炭をホッパにため、ホッパが満杯になった場合は上記作業工程に関係なく小ふた装着後地上に設置された戻し炭処理場へ走行し、戻し炭排出後正常作業に復する。地上の戻し炭処理場は 3 箇所あり(図 2.3 参照)、押出機が #1~#40 にあるときは #1 ホッパ (45 番地) へ、#41~#80 にあるときは #2 ホッパ (105 番地) へ、#81~#95 にあるときは #3 ホッパ (111 番地) へ。

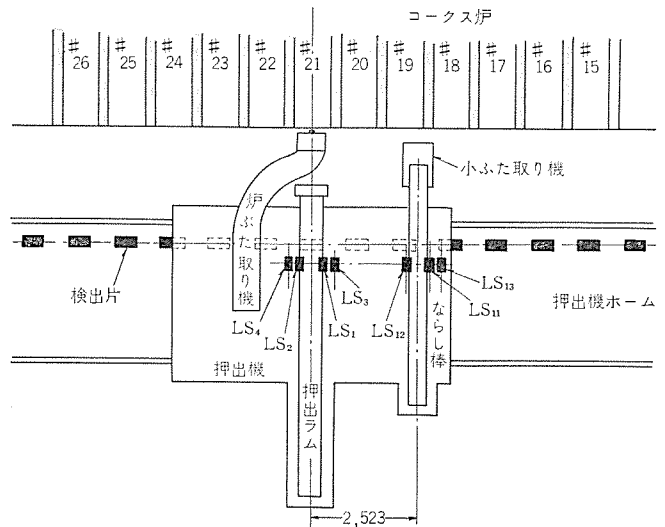


図 3.1 押出機の機器配置
Arrangement of coke pusher.

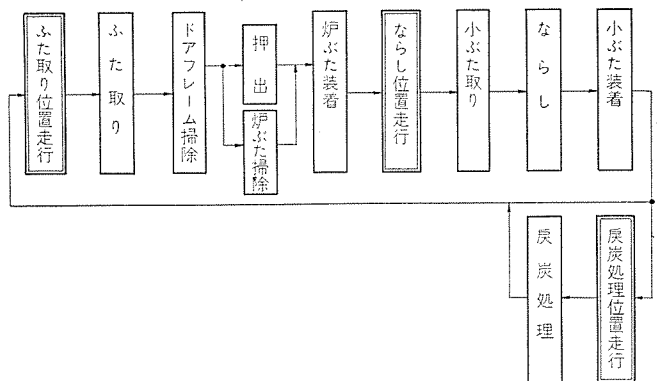


図 3.2 押出機運転プログラム
Running programs of coke pusher.

へ走行し戻し炭を排出する。

4. 自動運転装置

押出機の走行装置はこのような作業を行なうためにかま出し炉室位置を指令する地上指令装置とならし位置、戻し炭処理位置を指令する機上指令装置、押出機的位置を検出する位置検出部、走行電動機を駆動させるための速度制御部などにより構成されている。

4.1 地上指令装置

コークス炉の作業は先に述べたように常に 5 門飛びに規則正しく行なわれ、押出機、装入車、コークガイド車はいずれもかま出し炉を基準に走行するため地上に全車共通の指令装置を設け、押出機、装入車、コークガイド車を一括制御できるようにしている。今回車上装置は押出機しか製作していないが装入車、コークガイド車についても車上装置を追装すれば、地上指令装置は現在のものがそのまま使用できるものである。

地上の指令装置はかま出し炉番号を設定するダイヤル、炉番号読取装置、1 サイクル完了信号によって自動的に指令を次のかま出し炉番号に進めるレジスタおよび入力指令制御部、変則 10 進法による炉番号を 2 進法に変換する 10 進 2 進変換装置などから成立っている。地上指令装置のかま出し炉番号出力は順次自動的に押出機に送られ、押出機ではそのかま出し炉番号を基準にして押出機の各作業を行なうことができる。

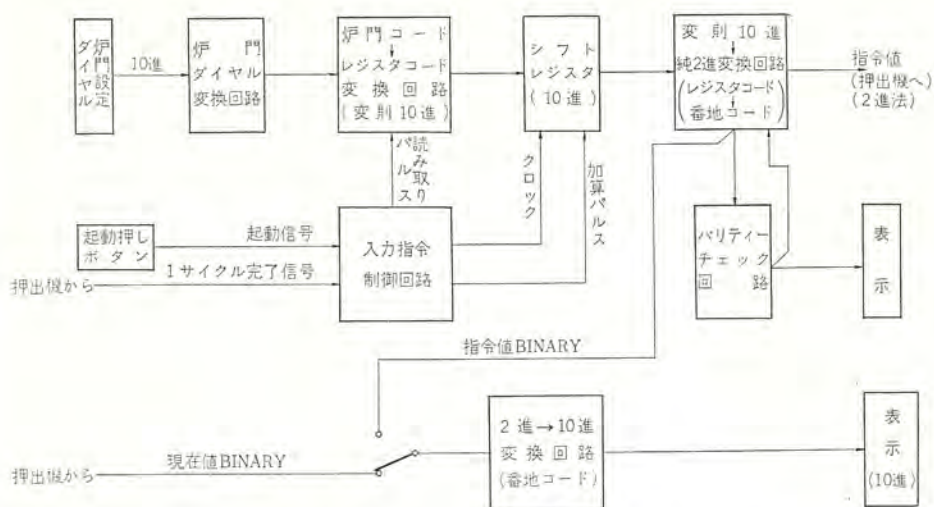


図 4.1 地上指令装置ブロック図
Block diagram of control system on ground equipment.

表 4.1 コード番号比較表
Comparison of code numbers.

炉 門 コ ー ド	レジ ス タ コ ー ド	10進番 地 コ ー ド	(パ リ テ ィ)	2進番地コード	炉 門 コ ー ド	レジ ス タ コ ー ド	10進番 地 コ ー ド	(パ リ テ ィ)	2進番地コード
00	00	00	1	000000	48	29	71	1	1000111
01	01	01	0	000001	49	86	72	1	1001000
02	58	02	0	000010	50	48	73	0	1001001
03	20	03	1	000011	51	11	74	0	1001010
04	77	04	0	0000100	52	68	75	1	1001011
05	39	05	1	0000101	53	30	76	0	1001100
06	02	06	1	0000110	54	87	77	1	1001101
07	59	07	0	0000111	55	49	78	1	1001110
08	21	08	0	0001000	56	12	79	0	1001111
09	78	09	1	0001001	57	69	80	1	1010000
10	40	10	1	0001010	58	31	81	0	1010001
11	03	11	0	0001011	59	88	82	0	1010010
12	60	12	1	0001100	60	50	83	1	1010011
13	22	13	0	0001101	61	13	84	0	1010100
14	79	14	0	0001110	62	70	85	1	1010101
15	41	15	1	0001111	63	32	86	1	1010110
16	04	16	0	0010000	64	89	87	0	1010111
17	61	17	1	0010001	65	51	88	0	1011000
18	23	18	1	0010010	66	14	89	1	1011001
19	80	19	0	0010011	67	71	90	1	1011010
20	42	20	1	0010100	68	33	91	0	1011011
21	05	21	0	0010101	69	90	92	1	1011100
22	62	22	0	0010110	70	52	93	0	1011101
23	24	23	1	0010111	71	15	94	0	1011110
24	81	24	1	0011000	72	72	95	1	1011111
25	43	25	0	0011001	73	34	96	1	1100000
26	06	26	0	0011010	74	91	97	0	1100001
27	63	27	1	0011011	75	53	98	0	1100010
28	25	28	0	0011100	76	16	99	1	1100011
29	82	29	1	0011101	77	73	100	0	1100100
30	44	30	1	0011110	78	35	101	1	1100101
31	07	31	0	0011111	79	92	102	1	1100110
32	64	32	0	0100000	80	54	103	0	1100111
33	26	33	1	0100001	81	17	109	0	1101101
34	83	34	1	0100010	82	74	110	0	1101110
35	45	35	0	0100011	83	36	111	1	1101111
36	08	36	1	0100100	84	93	112	0	1110000
37	65	37	0	0100101	85	55	113	1	1110001
38	27	38	0	0100110	86	18	114	1	1110010
39	84	39	1	0100111	87	75	115	0	1110011
40	46	40	1	0101000	88	37	116	1	1110100
41	09	41	0	1000000	89	94	117	0	1110101
42	66	42	1	1000001	90	56	118	0	1110110
43	28	43	1	1000010	91	19	119	1	1110111
44	85	44	0	1000011	92	76	120	1	1111000
45	47	45	1	1000100	93	38	121	0	1111001
46	10	46	0	1000101	94	95	122	0	1111010
47	67	47	0	1000110	95	57	123	1	1111011

図 4.1 は地上指令装置のブロック図で以下その動作概要を説明する。

指令かま出し炉の位置表示は#1～#95の炉番号と一致した炉門コード、#1、#6、#11……とかま出し炉番の順番に1、2、3、……と番号を付したレジスタコード、図2.3に示すようにコールピン間を23区分、パットレス間を5区分に分割し1番から通し番号をつけた番地コードの3種類によって示される。かま出し炉番の手動設定は炉番号をそのまま用いた炉門コードを使用しており容易に設定ができる。また地上から押出機へのかま出し炉番号指令および押出機現在位置のデジタルランプ表示は、押出機の位置がコールピン間やパットレス間にあってもわかるように番地コードを使用している。なおレジスタコードは、地上指令制御回路内でのみ使用されるもので直接外部へは出てこない。表 4.1 に炉門コード、レジスタコード、番地コードの比較表を示す。

地上指令装置では初回のかま出し炉番号(炉門コード)を1けた目および2けた目の10進設定ダイヤルにより設定し、指令起動押しボタンを押すと炉門コードは、かま出し作業順序を示すレジスタコードに変換されシフトレジスタに読取られる。シフトレジスタの出力は10進法のレジスタコードから2進法による番地コードに変換され、リレーを駆動してリレー接点により押出機へ送信する。押出機は1サイクルの作業を完了後完了信号(小ぶた装着完了)を地上指令装置へ送信し、シフトレジスタを1ビットシフトさせ次のかま出し炉番号を指令する。また炉門コード94(レジスタコード95)のときは次の1サイクル完了信号によりレジスタをリセットし、炉門コード01(レジスタコード01)をシフトレジスタへセットし直す。

その他パリティチェック回路で番地コードのチェックを行ない異常がある場合押出機への送信を停止するほかランプ表示を行なう。

なお地上指令値の2進法による番地コードおよび押出機の現在位置番地コード(2進法)は、2進10進変換回路を通して計数表示管に10進法で表示され、地上でも押出機の現在位置が容易に判読できる。

4.2 押出機機上指令装置

押出機は地上からのかま出し炉番号指令を受けて押出機の現在位置と指令値が一致するまで走行し、かま出し炉の定位

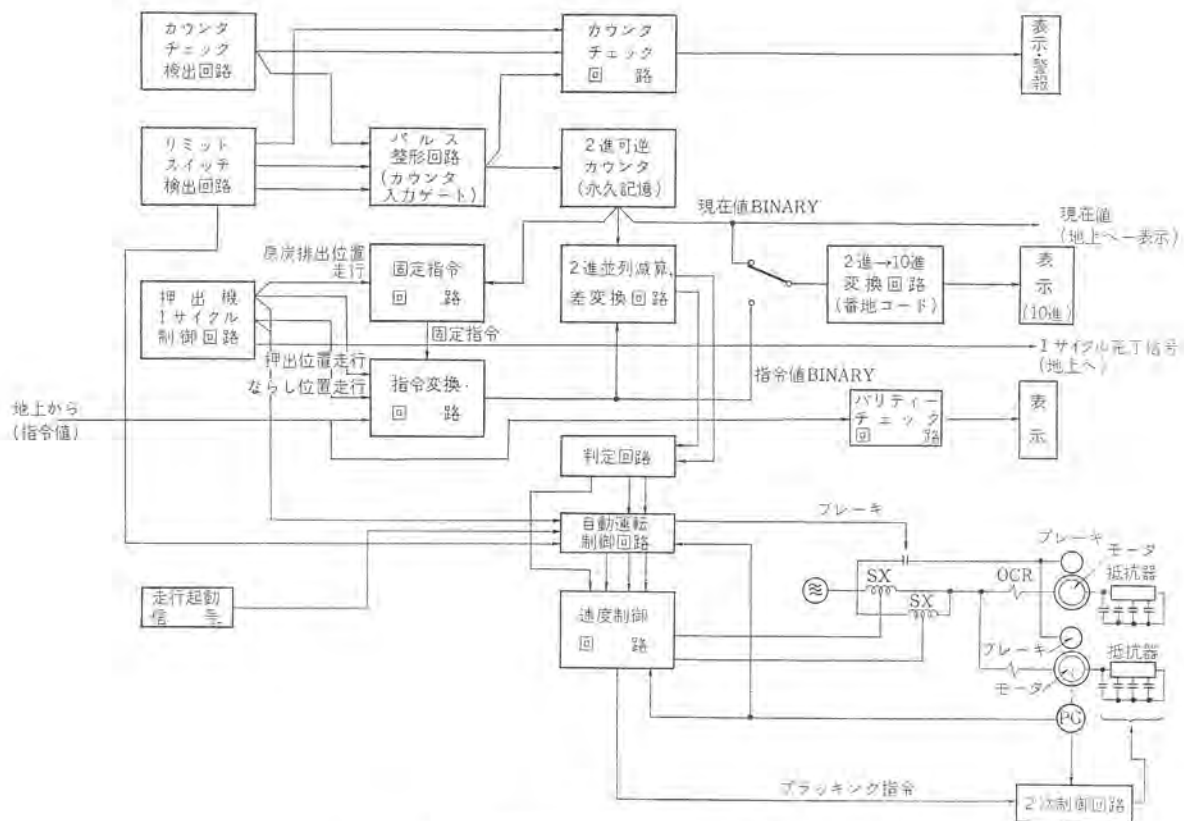


図 4.2 押出機機上指令装置ブロック図
Block diagram of control system on coke pusher.

置で停止するとふた取り作業、押出作業、ふた付き作業を行なう。ふた付き完了信号によって押出機はかま出し炉番地 + 2 番地の指令値を出し、それに従って 2 かま分走行、小ぶた取り、ならし、小ぶた装着作業を行なって 1 サイクルの作業を完了する。1 サイクル完了信号は小ぶた装着用リミットスイッチによって地上指令装置に送信し、それによって地上からは次のかま出し炉番号が送られ、押出機は次のかま出し炉に向かって走行し同様の作業を繰返し行なう。その他押出機では戻し炭がホッパに満杯になると満杯検出リミットスイッチが動作し、地上 3 個所の戻し炭処理場へ地上からの指令に関係なく走行し戻し炭を排出する。

押出機の機上指令装置は地上からの指令に対してならし位置を設定し直す指令変換回路、戻し炭処理位置を設定する固定指令回路、指令値と現在値を比較演算する 2 進並列減算回路、差変換回路および指令値と現在値の差による速度基準信号を出す判別回路から構成されている。図 4.2 は押出機機上指令装置のブロック図を示す。

押出機の地上側には 1 門ごとに炉心に 1 個の検出片が埋設されており、さらにコールピン間では 23 個、バットレス間では 5 個の検出片が炉幅にほぼ等しい間隔で埋設されている。押出機に設置された 2 個のリミットスイッチ LS₂、LS₁₃ (図 3.1 参照) は、これら地上の検出片上を通過するごとに 2 進可逆カウンタを 1 カウント加算または減算させることにより、押出機の現在位置が 2 進の番地コードにより常にカウンタに記憶されている。

一方地上の指令装置から送信されたかま出し炉番指令は、指令変換回路において押出位置走行の場合は地上指令値がそのまま機上指令値となり、ならし位置走行の場合は、地上指令値 + 2 の演算を 2 進法で行ない押出機の機上指令値とする。この押出機の機上指令値とカウンタ上の押出機現在値を 2 進並列減算回路、差変換回路で比較演算し、指令値と現在値の絶対値をとり出し判別回路でそれら

を組合せて、左または右走行出力および ± 1 以下、± 3 以下の走行速度制御用出力を出している。

また戻し炭ホッパが満杯になると押出機が番地コードで #1 ~ #40 (炉門コード #1 ~ #40) にある場合は番地コード #45 の #1 ホッパ位置へ、番地コード #64 ~ #103 (炉門コード #41 ~ #80) にある場合は番地コード #105 の #2 ホッパ位置へ、番地コード #109 ~ #123 (炉門コード #81 ~ 95) にある場合は番地コード #111 の #3 ホッパ位置の指令値を出すことができる。

その他機上指令装置は、地上同様現在値および指令値のデジタル表示およびパリティチェック回路も備えている。

4.3 走行制御装置

押出機機上指令装置からの左行または右行走行信号および走行指令制御信号は、走行電動機駆動用速度制御回路へはいり押出機を自動的に加速、減速させ所定の位置へ精度内で停止させることができる。

押出機の走行装置は、巻線形三相誘導電動機 30 kW 10 P 2 台により最高速度 80 m/min (自動運転においては 72 m/min) で走行し、炉のセンタに対して ± 5 mm の精度内に停止する。そのためリアクトル制御を採用し、停止直前においては最高速度の約 5 % 程度の一定低速度まで減速し、停止指令によって押出機ブレーキ (機械的) およびリアクトル制動 (電氣的) をかけ停止させている。停止位置が ± 5 mm を越えた場合は自動修正を行なうことができる。

図 4.3 はリアクトル制御回路の概要で電動機 1 次側に 4 台の可飽和リアクトルをブリッジに接続し、そのリアクトル SX₁、SX₃ を励磁すると電動機には正相の電圧が印加され正方向のトルクすなわち正回転 (左走行) の場合には駆動トルク、逆回転の場合 (右走行) には制動トルクが発生し、逆にリアクトル SX₂、SX₄ を励磁すると電動機には逆相の電圧が印加され、逆方向のトルクすなわち正回転 (左走行) の

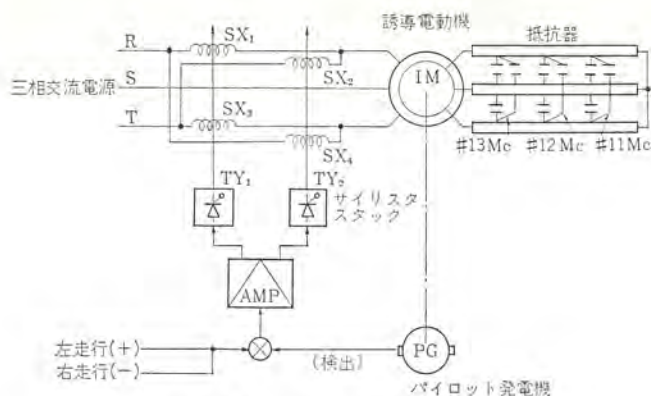


図 4.3 リアクトル制御ブロック図
Block diagram of reactor control.

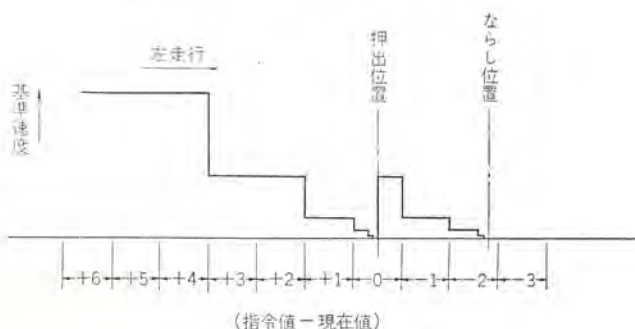


図 4.4 基準速度特性
Velocity diagram of standard.

場合は制動トルク、逆回転（右走行）の場合は駆動トルクを発生する。またリアクトルの直流励磁電流をかえることにより、電動機に印加される電圧を変化させ電動機トルクを制御する。

押出機の走行リアクトル制御は、自動速度制御回路へ機上指令装置の指令により左走行の場合すなわち指令値>現在値の場合は(+)基準電流を加えると、リアクトル SX_1 , SX_3 を励磁し電動機速度は基準速度に等しくなるまで加速する。電動機に直結したパイロット発電機による検出電流は常に基準電流と比較され、その差を増幅器により増幅し、サイリスタ点弧位相を制御してリアクトルの励磁電流を変化させ、検出速度が指令速度に近づき常に差がなくなる方向に自動制御する。

電動機速度は押出機の現在値と指令値の差が4かま以上の場合は最高速度の90%で走行し、3かま以下になると機上指令装置よりの速度指令により基準電流(+)を1段減少させるとパイロット発電機の検出電流(-)のほうが大きくなり、リアクトルは SX_2 , SX_4 が励磁され電動機は減速する。さらに1かま以下で2段減速し、現在値と指令値が合った所で3段減速し、炉の中心で停止指令すなわち基準電流を0にして、リアクトルによる逆相制動を行なうと同時に押上ブレーキを動作させ停止する。

一方指令値<現在値の場合は機上指令装置の指令により(-)基準電流を自動制御回路へ入れ、リアクトル SX_2 , SX_4 を励磁し右方向に加速走行する。現在値と指令値の差により左走行同様自動的に減速停止する。図4.4に走行速度基準特性を示す。

押出機の停止位置は2個のリミットスイッチ——押し位置では LS_{11} ,

表 4.2 信号線一覧
List of signals.

地上→押出機信号		押出機→地上信号	
符 号	用 途	符 号	用 途
X_0	指令値 2^0	X_{10}	現在値 2^0
X_1	指令値 2^1	X_{11}	現在値 2^1
X_2	指令値 2^2	X_{12}	現在値 2^2
X_3	指令値 2^3	X_{13}	現在値 2^3
X_4	指令値 2^4	X_{14}	現在値 2^4
X_5	指令値 2^5	X_{15}	現在値 2^5
X_6	指令値 2^6	X_{16}	現在値 2^6
X_7	指令値 2^7	X_{20}	1サイクル完了信号
X_8	指令準備完了 A 接点	X_{21}	トルクモータ起動信号
X_9	指令準備完了 B 接点	X_{23}	押出機作業工程表示信号
X_{22}	トルクモータ非常停止信号		
P_8	共通線		
P_{10}	-100 V 電源共通線		

LS_{12} 、ならし位置では LS_{11} , LS_{12} によって炉しん(芯)に対し ± 5 mm の位置を検出し、行き過ぎの場合は自動的に修正し停止精度 ± 5 mm 以内に停止できる回路となっている。

4.4 信号伝達装置

地上の指令装置と機上指令装置の信号伝達は、雑音その他による誤動作を確実に防止できる有線方式としリールケーブルを採用した。

ケーブル巻取装置は地上側に設置し、常にケーブルを一定張力に保つよう地上のトルクモータによりケーブルを巻取りながら押出機は走行する。

信号伝達本数は表4.2に示すように23本使用している。

5. む す び

コークス押出機はじめコークス炉回りの作業機械は、ここ数年急速に自動化が推進され作業の合理化がなされているが、とくに走行関係の自動化は一つの課題になっていた。当社では昭和41年よりリアクトル制御による5かま自動走行、自動定位置停止装置を製作納入してきたが、今回走行の全自動プログラム運転装置(特許申請中)の完成により、押出機の自動化は無人数化へ一歩踏み出したものとして注目される。さらにこの装置は地上から指令できるため作業機械相互のインターロックも容易にとることができる。

以上コークス押出機の走行全自動運転装置の概要を説明したが、特色をまとめると大要次のようになる。

(1) 押出機、装入車、コークガイド車の全自動集中制御を考慮して地上に指令装置をおいたこと。

(2) 位置検出は近接スイッチにより各炉室ごとに1個の金属片を検出し、カウンタ方式としたため装置が簡単である。

(3) 位置検出、かま出し炉番指令とも2進法とし比較演算が容易である。

(4) 走行電動機はリアクトル制御により速度制御を行ない、80 m/min の速度から炉の中心に対して ± 5 mm の精度で停止できること。

(5) 自動運転回路はすべて無接点化され、装置が小形になった。最後にこの自動運転装置の完成にあたって、企画の段階から終始ご指導とご協力をたまわった関係各位に深く感謝する。

航空機用電動バルブ

杉山 昌司*・奥田 安男*・瀬津 豊良*

Motor Operated Valves for Aircraft

Nagoya Works

Masashi SUGIYAMA・Yasuo OKUDA・Kiyoshi NEZU

Motor operated valves for aircraft have almost depended on imported products. Mitsubishi set about domestic production of these motor operated valves last year, completing the development of two types recently and still continuing to build several new types of them. These valves are used for the flow control of the fuel, lubricating oil and hydraulic oil system of aircraft. High reliability is demanded of them from the viewpoint of special use with aircraft. Their performance is confirmed by rigid qualification tests based on Military specifications. Because of their small size and high performance they are expected to find a big demand for automatic control of transporting fluid for general use. This article introduces briefly, in connection with the motor operated valves now in quantity production after passing qualification tests and also those under development, their application specification, construction and performance.

1. ま え が き

航空機用電動バルブは、従来ほとんどを外国からの輸入品に依存していたが、最近わが国でも各種航空機の国産製作が活発に行なわれており、各機体会社からも強く国産装備品の調達が望まれている。当社では航空機の燃料系統を構成する主要部品として、従来製作の燃料ブースタポンプに引き継ぎ、新しく電動バルブの国産化に着手し、43年末に試作を完了して現在すでに2種類の電動バルブの量産を開始している。続いて仕様諸元の異なる数種類の電動バルブを開発中である。

この電動バルブは、アメリカのWhittaker社と技術提携を行なって開発したもので、性能の安定性と高度な信頼性の向上にとくに留意されている。

電動バルブは主として航空機の燃料系統に装備されるが、この他潤滑油系統および作動油系統にも装備され、流体の流量を制御（全開および全閉）するもので、航空機用としての用途の重要性から飛行中に遭遇すると考えられる低温 -55°C 、高温 $+135^{\circ}\text{C}$ 、海面上から60,000 ft (18,300 m)の高度および振動加速度15 Gなどのいかなる飛行条件でも満足に機能を発揮できることが要求される。また、最新のMIL規格に従って、従来誤信号により発生した不測の事故を防止するため誤信号防止装置を取付け、バルブの信頼性向上に考慮を払っている。

これらの要求性能を確認するため、電動バルブはMIL規格および機体会社の仕様書に規定された要求事項を適用して認定試験を実施している。

本文は現在までに認定試験を完了し量産中のものおよび開発中のものについて用途、仕様、構造および性能などについてその概要を報告する。

2. 用途および適用規格

2.1 用途

電動バルブは主として燃料タンク、燃料ブースタポンプなどと、ともに燃料系統を構成し配管途中に配置され、燃料タンクからエンジンへ供給される燃料の流量制御（全開および全閉）および燃料タンク間を移送される燃料の流量制御に使用されるほか、潤滑油系統および作動

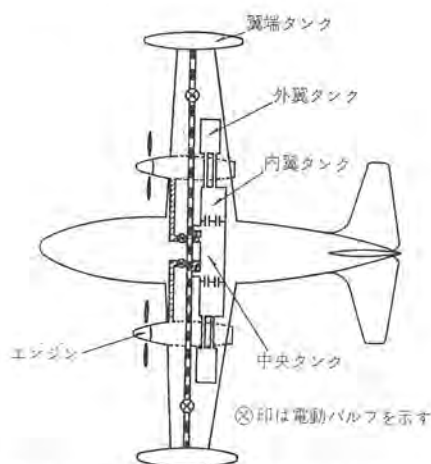


図 2.1 航空機における電動バルブの配置例
Example of configuration of motor operated valves in airplane.

表 2.1 適用 MIL 規格
Standard of MIL applied.

使用流体	適	用	規	格
燃 料	MIL-V-8608 A AMENDMENT 2	VALVES, FUEL SHUTOFF, ELECTRIC MOTOR OPERATED		
潤滑油	MIL-V-25025 AMENDMENT 1	VALVE, SHUTOFF, TURBINE ENGINE SYNTHETIC OIL, ELECTRIC MOTOR OPERATED		
	MIL-V-7374 A AMENDMENT 1	VALVE, SHUTOFF, OIL ELECTRIC MOTOR OPERATED RECIPROCATING ENGINE		
作動油	MIL-V-8608 A AMENDMENT 2	VALVES, FUEL SHUTOFF, ELECTRIC MOTOR OPERATED		
	MIL-V-25025 AMENDMENT 1	VALVE, SHUTOFF, TURBINE ENGINE SYNTHETIC OIL ELECTRIC MOTOR OPERATED		

油系統の流量制御にも使用される。図 2.1 に航空機における電動バルブの配置例を示す。

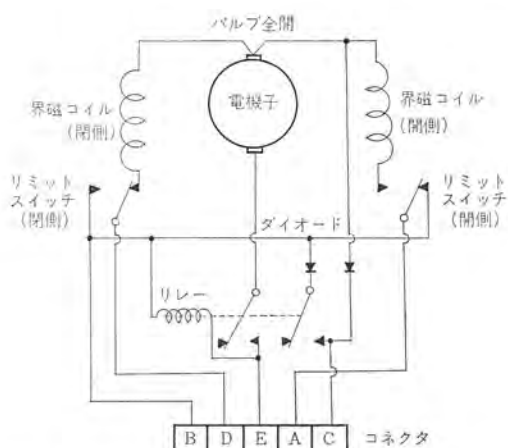
2.2 適用規格

電動バルブには使用する流体の種類により、それぞれ表 2.1 に示

表 3.1 電動バルブ仕様一覧表

List of specification of motor operated valve.

仕 様 形 式	バ ル ブ 特 性							モ ー タ 特 性			重 量 (kg)
	管 径 (in)	使用流体	定格圧力 (psi)	保証圧力 (psi)	破壊圧力 (psi)	サーマル リリフ	動作時間 (s)	電 圧 (VDC)	ストール電流 (A)	誤信号防止 装 置	
MDK-138975-04	1 (フランジ 1)	燃 料 潤滑油	40	120	180	両 方 向	1/2~1	18~30	10 以下	付	0.93
MDK-133415-11	1 (フランジ 1 1/4)	燃 料	60	120	180	両 方 向	1/2~1	18~30	10 以下	な し	0.87
MDK-138985-64	1 1/4	作 動 油	120	180	300	両 方 向	1 以下	18~30	10 以下	付	約 0.95
MDK-138995-14	1 1/2	燃 料	60	120	180	両 方 向	1/2~1	18~30	10 以下	付	約 1.04
MDK-148965-16	2	燃 料	60	120	180	両 方 向	1.5~3	18~30	10 以下	付	約 1.17



ピン A : バルブを開くための+側電源端子
 ピン B : リレー機能のみを試験するための端子
 ピン C : バルブの開閉時以外はすべての位置でピン A と内部で接続され、また全閉時以外はすべての位置でピン D と内部で接続される。運転中の表示灯信号を与え、また、バルブの両端位置で誤信号がないかを確認する。
 ピン D : バルブを閉じるための+側電源端子
 ピン E : ピン A およびピン B の共通一側端子

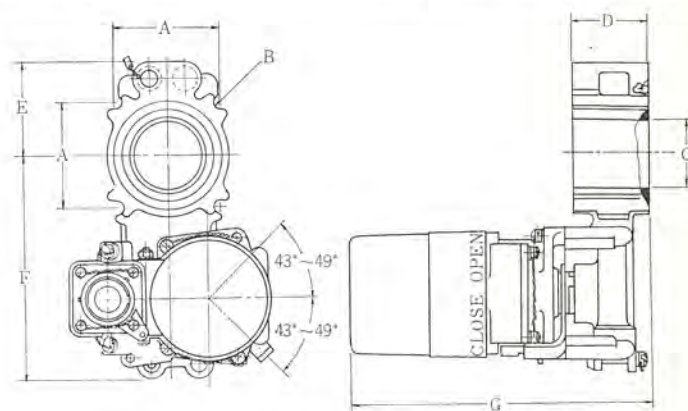
図 3.1 接続図 Connection diagram.

図 3.2 電動バルブ, 形式 MDK-133415-11
Motor operated valve, type MDK-133415-11.図 3.3 電動バルブ, 形式 MDK-138975-04
Motor operated valve, type MDK-138975-04.

す MIL 規格が適用される。

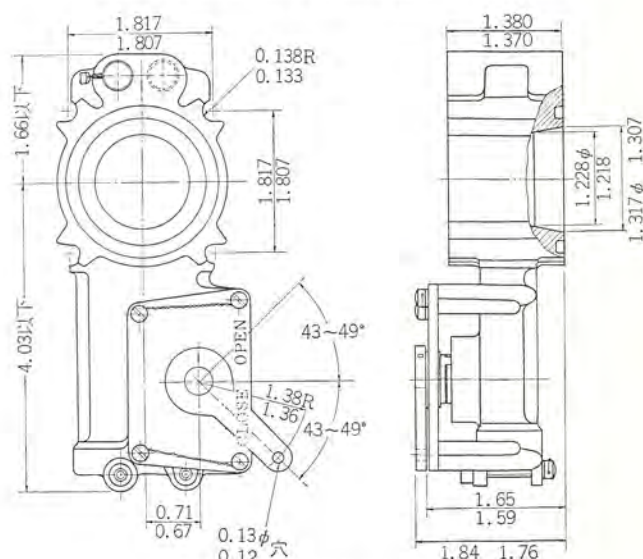
3. 仕 様

当社で開発を完了した機種および現在開発中の機種についておもな仕様を表 3.1 に、接続図を図 3.1 に外観写真を図 3.2 および図 3.3 に、外形寸法を図 3.4 に示す。これらのバルブはその用途により“O”リングのみを変更することにより、いずれの流体についても使用可能となり、また、アクチュエータ部分を取りはずすことにより手動バルブとして使用することもできる。手動バルブの一例を、図 3.5 に示す。



形式	寸法	A	B	C	D	E	F	G
MDK-138975-04	1.322	No. 10-32 UNF-3 B	0.849	1.380	1.14 以下	4.75	5.37	5.17
	1.302							
MDK-133415-11	1.661	0.138 R	0.849	1.380	1.66 以下	3.56 以下	5.22	5.11
	1.651							
MDK-138985-64	1.661	0.138 R	1.083	1.380	1.66 以下	3.58 以下	5.24	5.11
	1.651							
MDK-138995-14	1.817	0.138 R	1.228	1.380	1.66 以下	4.03 以下	5.24	5.11
	1.807							
MDK-148965-16	2.380	0.169 R	1.630	1.380	1.92 以下	4.30 以下	5.24	5.11
	2.370							

(単位: インチ)

図 3.4 電動バルブの外形寸法
Outline dimensions of motor operated valves.図 3.5 手動バルブの外形寸法
Outline dimensions of manually operated valve.

4. 構造および機能

電動バルブの構造は図4.1および図4.2に示すとおりであり、下記に示す各機構より構成され航空機に積載される機器として、とくに小形、軽量化の配慮がなされている。

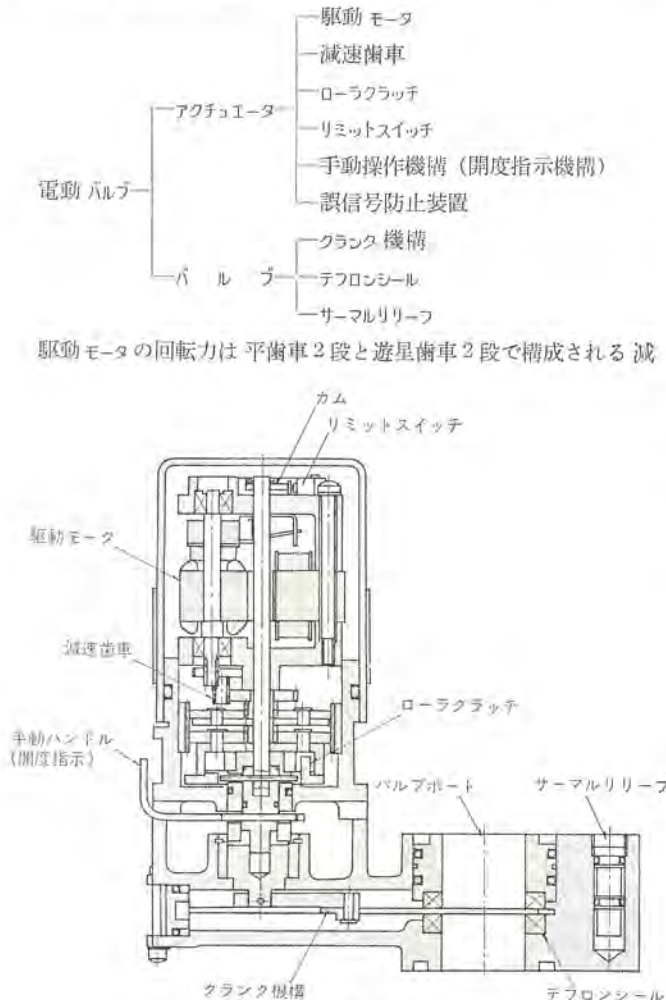


図 4.1 構造概略図
Sectional view of motor operated valve.



図 4.2 構造断面図
Sectional view of motor operated valve.



図 4.3 アクチュエータ Actuator.

速歯車により減速され、ローラクラッチを介してアクチュエータ出力軸へ伝達される。アクチュエータの回転運動はクランク機構により直線運動に変換され、バルブ部分のスライドを往復させバルブを開閉する。バルブが全開または全閉位置になったときには、リミットスイッチが作動して駆動モータを停止させる。図4.3にアクチュエータの内部構造を示す。

つぎに各機構について概要を説明する。

(1) 駆動モータ

非常に小形軽量の分割界磁形直流直巻モータで、電圧 18~30 VDC、定格/最大電流 1.5 A/5 A、回転数 10,000~20,000 rpm、出力 10 W、短時間定格で要求されるバルブの性能にマッチするよう設計され、+135°C の周囲温度下でも使用できるよう絶縁材料は F 種のものを使用し玉軸受のグリースには、Aero Shell Grease No. 15 を使用している。また界磁鉄心は、はまり込みをなくしつる巻状のスパイラルピンにより位置決めする特殊な構造を採用している。

(2) 減速歯車

平衡歯車 2 段、遊星歯車 2 段の特殊な構造で、駆動モータの回転力は平衡歯車 2 段で減速され、さらに内歯車固定の単式遊星歯車 2 段で減速されローラクラッチへ伝達される。遊星歯車は小形化および同心構造とするために使用されている。

(3) ローラクラッチ

電源故障時においても手動で操作ができ、また、電動操作時の過負荷保護のため図4.4に示す構造のローラクラッチを設けている。電動操作時には(A)のように出力側カムは入力側ケーシングと一体で回転し、手動時にはロック開錠部分が(B)のように一方のローラのくさび(楔)作用をはずすため、駆動側ケーシングがロックされていても出力側は手動により自由に回転させることができる。

(4) リミットスイッチ

アクチュエータ出力軸上のカムによりバルブ全開時には開側リミットスイッチを、全閉時には閉側のリミットスイッチをそれぞれ動作させて、モータ電源をシャ断する。リミットスイッチには高信頼度の超小形マイクロスイッチを使用している。

(5) 手動操作機構および開度指示機構

電源故障時には手動ハンドルを回すことによりローラ、クラッチをスリッパさせて手動操作を可能にするとともに、ハンドル上端と名板上の文字「OPEN」および「CLOSE」によりバルブの開閉位置が表示され、外部から容易にバルブの開閉を確認することができる。

(6) 誤信号防止装置 (False Signal Eliminator)

従来、誤信号により発生した不測の事故を防止するため、最新の規格 MIL-V-8608 A AMENDMENT 2 により、本装置の取付けが規定されている。この装置は高信頼度のミニチュアリレー 1 個とダイオード 2 個より構成され、バルブの全開および全閉位置では、リレーが励磁されてモータの一侧回路をシャ断する。なお、比較のため防止装置のない旧接続図と防止装置をつけた新接続図を図4.5、4.6に示す。

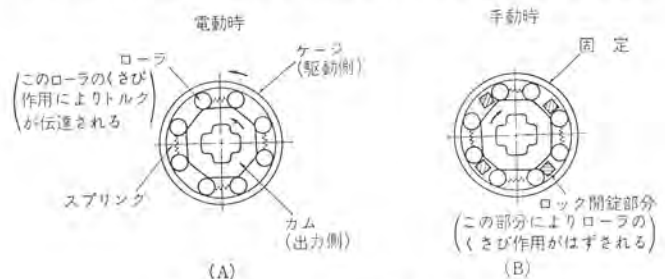


図 4.4 ローラクラッチ Roller clutch.

す。

図 4. 6 の旧接続図では誤って B 端子に誤信号による電圧が印加されるとバルブは閉位置へ動作し、操縦席の操作スイッチは“全開”のままであってもバルブは全閉位置となり燃料をしゃ断し、航空機の不測の事故を生ずるおそれがある。しかし図 4. 5 の新接続図で

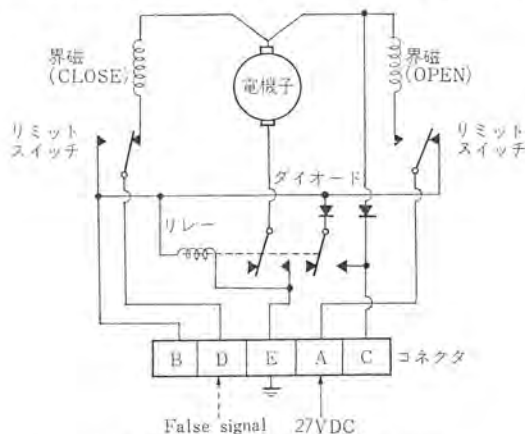


図 4. 5 接続図 (誤信号防止装置付)
Connection diagram with false signal eliminator.

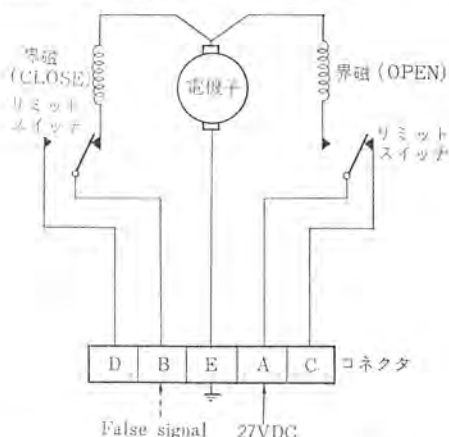


図 4. 6 接続図 (誤信号防止装置なし)
Connection diagram without false signal eliminator.

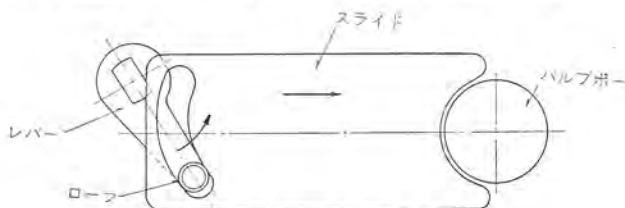


図 4. 7 クランク機構 Crank mechanism.

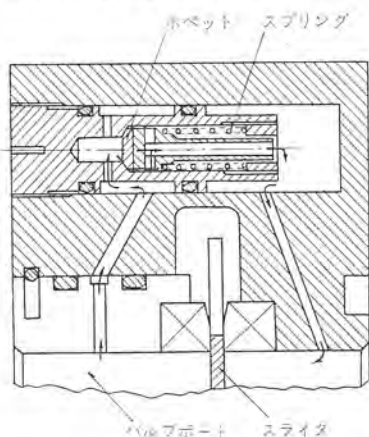


図 4. 8 サーマルリリーフ Thermal relief.

は誤って D 端子に誤信号による電圧が印加されても、リレーにより一側回路がしゃ断させているため、バルブは動作せず定位置に留まっている。

(7) クランク機構

アクチュエータ出力軸の回転運動は、図 4. 7 に示したクランク機構により直線運動に変換され、スライドの直線運動によりバルブのポートを全開または全閉にする。

(8) テフロンシール

バルブ部分の密閉を保つため特殊構造のテフロンシールを使用している。テフロンはゴムなどに比べ耐熱性、耐摩耗性がすぐれており摩擦係数也非常に小さく、しかも化学的に不活性であるため、あらゆる環境条件においても使用でき、バルブなどのシール材料としては最適なものである。

(9) サーマルリリーフ

バルブを閉じたとき配管内に閉込められた燃料が温度上昇により熱膨張し、圧力が異常に上昇するのを防止するもので図 4. 8 に示す構造で各方向に 1 個ずつ取付けられ、一方のポートの圧力が規定値より大きくなると、ピストンがスプリングに抗して押され、他方のポートへ燃料を流し圧力上昇を防止する。

5. 性能

5.1 要求条件

電動バルブの性能を確認するため MIL 規格および機体会社の仕様書を適用し認定試験を実施する。認定試験は規定された台数の供試品を使用し、グループ別に一連の各試験を規定された順序で行ない要求値を満足するかどうかを確認するものである。表 5. 1 に燃料シャットオフ用およびオイルシャットオフ用バルブの試験項目を示す。

つぎに、燃料シャットオフバルブについて試験内容の概略を示す。

(1) 外観仕上検査

使用材料、寸法、重量、表面処理および異種金属の接触などについて検査し適否を確認する。

(2) バルブボディおよびシャフトシール漏えい試験

バルブの一方のポートをクローズし、他方のポートへ 0~120 psi の空気圧を加え、いかなる外部漏えいもまたはシャフトシール漏えいのないことを確認する。

(3) 閉じたバルブの空気圧漏えい試験

閉じたバルブの各ポートに 0~60 psi の空気圧を加え、いかなるときも内部漏えいが自由空気中で 10 cc/min を越えないことを確認する。

(4) 閉じたバルブの燃料圧漏えい試験

閉じたバルブの各ポートに 0~60 psi の燃料圧を加え、いかなるときも内部漏えいが 0.5 cc/min を越えないことを確認する。

(5) 開じたバルブの空気吸引漏えい試験

閉じたバルブの各ポートに対して 0~6 psi で空気を吸引し、いかなるときも漏えいが 10 cc/min を越えないことを確認する。

(6) 動的漏えい試験

シャットオフ圧力 60 psi で、バルブを開位置にしたときの流量が定格流量となるよう調整し、バルブを開位置から閉位置へ動作させ 2 分間後、漏えいが 0.5 cc/min を越えないことを確認する。

(7) サーマルリリーフ動作試験

バルブを閉じて、各ポートに 100 psi から徐々に圧力を上げたとき、両方のサーマルリリーフのクラッキング圧力が規定値内にあることを確認する。

表 5.1 認定試験項目
Items of approval test.

用 途：燃料シャットオフ		用 途：オイルシャットオフ	
適用規格：MIL-V-8608 A (2)		適用規格：MIL-V-25025 (1)	
供 試 品：3 台		供 試 品：3 台	
試 験 項 目	グ ル ープ	試 験 項 目	グ ル ープ
(1) 外観上検査	1~3	(1) 外観上検査	1~3
(2) バルブボディおよびシャフトシール漏えい試験	1~3	(2) バルブボディおよびシャフトシール漏えい試験	1~3
(3) 閉じたバルブの空気圧漏えい試験	1, 2	(3) 閉じたバルブのオイル圧漏えい試験	1~3
(4) 閉じたバルブの燃料圧漏えい試験	1~3	(4) 閉じたバルブの空気吸引漏えい試験	1~3
(5) 閉じたバルブの空気吸引漏えい試験	1, 2	(5) 圧力降下試験	1
(6) 汚染燃料耐久試験	1	(6) 動的漏えい試験	1
(7) 加速腐食試験	1	(7) 機能試験	1~3
(8) 砂じん試験	1	(8) 耐オイル試験	1
(9) 耐腐試験	1	(9) 低温試験	1
(10) 微振圧力試験	1	(10) 湿度試験	1
(11) 防爆試験	1	(11) 耐久試験	2
(12) サーマルリリーフ動作試験	2	(12) 高度耐久試験	2
(13) 圧力降下試験	2	(13) 振動試験	2
(14) 動的漏えい試験	2	(14) 耐電圧試験	2
(15) 機能試験	2	(15) 塩水噴霧試験	2
(16) 耐久試験	2	(16) 砂塵試験	3
(17) 振動試験	2	(17) 耐腐試験	3
(18) 耐電圧および絶縁抵抗	2	(18) 防爆試験	3
(19) 塩水噴霧試験	2	(19) 分解検査	1~3
(20) 耐燃料および低温試験	3		
(21) 湿度試験	3		
(22) 無線障害試験	3		
(23) 分解検査	1~3		

(8) 圧力降下試験

バルブに定格流量までの流量を流したときのバルブ部分のみによる圧力降下を測定し、0.25 psi 以下であることを確認する。

(9) 機能試験

シャットオフ圧力 60 psi に対してバルブを 18 VDC, 27 VDC および 30 VDC で運転する。このとき動作時間は 18 VDC で 2 秒を越えないこと、27 VDC で 1/2~1 秒であること、および電流はいかなるときも 10 A を越えないことを確認する。

(10) 耐電圧および絶縁抵抗

耐電圧試験は各巻線間および巻線とフレーム間に 1,000 V, 60 Hz の電圧を 1 分間印加し絶縁破壊のないことを確認する。絶縁抵抗は耐電圧試験の前後、巻線とフレーム間について 500 V メガーで測定し、100 MΩ 以上であることを確認する。

(11) 耐久試験

次のサイクルを連続して実施し、要求性能を満足することを確認する。

(a) バルブを海面上気圧、71°C で 4 時間乾燥した後、高度 60,000 ft の気圧で 500 サイクル運転する。この試験を 4 回繰返した後閉じたバルブの燃料圧漏えい試験を実施する。

(b) シャットオフ圧力 60 psi, 定格流量の試験液を循環させ、室温でバルブを 5,500 サイクル運転する。その後、バルブボディおよびシャフトシール漏えい試験および閉じたバルブの燃料圧漏えい試験を実施する。

(c) 高温 +54.4°C で上記(b)と同様にバルブを 2,000 サイクル運

表 5.2 振動条件
Condition of vibration.

周 波 数	全振幅または加速度
5~10 Hz	全振幅 0.050 in
10~75 Hz	全振幅 0.036 in
75~300 Hz	加速度 10 G
300~500 Hz	加速度 15 G

転する。ただし、流れの方向は(b)と逆とする。

(d) 低温 -55°C で上記(b)と同様にバルブを 500 サイクル運転する。ただし、流れの方向は(b)と逆とする。

(12) 振動試験

周波数 5~500 Hz の範囲について実施し、共振周波数で表 5.2 に示した全振幅、または加振加速度を 3 軸方向に各 4 時間加える。この試験終了後閉じたバルブの燃料圧漏えい試験を実施する。

(13) 無線障害試験

規格 MIL-I-6181 D に従って実施し、伝導性障害波は 0.15~25 MHz, ふく射性障害波は 0.15~400 MHz の範囲について測定する。なお、この試験には規格 MIL-I-6181 D の 3.2.2 項の Short duration interference 規定を適用する。

(14) 汚染燃料耐久試験

適用規格に規定された汚染物(けい(珪)砂およびダストなど)を規定の割合で混入した試験液をバルブに流し、200 サイクル運転した後、バルブボディおよびシャフトシール漏えい試験、閉じたバルブの燃料圧漏えい試験、閉じたバルブの空気吸引漏えい試験および機能試験を実施する。

(15) 加速腐食試験

バルブを塩化ナトリウム溶液(重量比 2.5 %)中に浸漬後、51.7°C ~57.2°C の炉の中で 1 時間乾燥する。これを 50 回繰返した後、バルブの機能に影響を与えるような腐食のないことを確認する。

(16) 耐燃料および低温試験

つぎの各試験を連続して実施し、要求性能を満足することを確認する。

(a) 高温 +71°C の試験液にバルブを 96 時間浸漬する。

(b) 高温 +71°C でバルブを 24 時間乾燥後 5 サイクル運転する。

(c) 高温 +71°C の試験液にバルブを 18 時間浸漬する。

(d) 高温 +71°C でバルブを 30 時間乾燥後 5 サイクル運転する。

これら(a)~(d)の各試験終了後、閉じたバルブの燃料圧漏えい試験を実施する。

(e) 低温 -55°C でバルブを 72 時間放置した後、低温状態のままで次の試験を実施する。

(1) 18 VDC で機能試験を行ない、動作時間は 10 秒以下、電流は 10 A であることを。

(2) 27 VDC で機能試験を行ない、動作時間は 1/2~1 秒、電流は 10 A 以下であることを。

(3) バルブボディおよびシャフトシール漏えい試験。

(4) 閉じたバルブの燃料圧漏えい試験

(17) 防爆試験

規格 MIL-E-5272 C 防爆試験手順 IV に従って実施する。アクチュエータカバー内部に爆発性混合気を充満させ点火栓で爆発させ、これにより周囲の爆発性混合気に点火しないことを確認する。この試験に

は2種類の混合比のものを使用する。1種類は圧力が最も強くなるようなもの（混合比15：1）であり、他の1種類は炎の持続時間が最も長いようなもの（混合比11：1）とする。

(18) 砂じん(塵)試験

適用 MIL 規格に規定された種類と割合の砂じんを温度 25°C、湿度 30 % 以下、密度 0.1~0.5 g/ft³、速度 100~500 ft/min でバルブに吹きつける。

つぎに試験そう(槽)の温度を 71°C に上げて6時間保持する。この後、機能試験およびバルブボディおよびシャフトシール漏えい試験を実施する。

(19) 耐菌試験

4種類の菌 (Chaetomium globosum, Aspergillus niger, Aspergillus flavus および Penicillium citrinum) の混濁液をバルブに霧ふきし、室温 30±2°C、相対湿度 95±5 % で28日間放置し、かびの発生のないことを確認する。

(20) 塩水噴霧試験

重量比 20±2 % の塩水を温度 33.3~36.1°C、相対湿度 85 % 以上で50時間バルブに霧ふきする。この結果バルブに腐食の形跡がないことを確認する。

(21) 湿度試験

2時間の間に試験そうの温度を 71.1°C に、相対湿度を 95±5 % に上げ6時間保持、その後16時間で温度を 37.8°C 以下まで下げる。これを15回繰返す。この後バルブを -55°C で2時間保ち、この -55°C に保った間に機能試験を実施する。

(22) 破壊圧力試験

バルブを開位置にして一方のポートに栓をし 180 psi の液圧を1分間加え、どの部分にもゆがみまたは損傷のないこと。この後圧力を 60 psi に下げたときバルブのどの部分からも外部漏えいの形跡がないことを確認する。

(23) 分解検査

各グループの試験完了後バルブを分解し、機能に影響を与えるような悪化、腐食または過度の摩耗がないことを確認する。

5.2 試験結果

現在までに認定試験を実施した2種類のバルブ P/N MDK-133415-11 およびバルブ P/N MDK-138975-04 は上述の試験項目のすべてに合格したが、ここではその内のおもな項目についてバルブ P/N MDK-133415-11 の試験結果を述べる。

(1) バルブボディ および シャフトシール漏えい試験

図 5.1 に示した空気圧漏えい試験装置を使用して、初回試験および他の試験項目の後での確認試験を実施した。この結果を表 5.3 に示す。

(2) 閉じたバルブの空気圧漏えい試験

図 5.1 に示した空気圧漏えい試験装置を使用し、規定の圧力を加えて試験した試験結果を表 5.4 に示す。

(3) 閉じたバルブの燃料圧漏えい試験

図 5.2 に示す燃料圧漏えい試験装置を使用して、初回および他の試験項目の後での確認試験を実施した。試験結果を表 5.5 に示す。

(4) 閉じたバルブの空気吸引漏えい試験

図 5.3 に示す空気吸引漏えい試験装置を使用して実施した。試験結果を表 5.6 に示す。

(5) 動的漏えい試験

供試品 No. 2 について実施し、漏えい量はアクチュエータ側が 0.25 cc/min、反アクチュエータ側は 0 であった。

(6) サーマルリリーフ動作試験

両方のサーマルリリーフについて、図 5.2 の燃料圧漏えい試験を使



図 5.1 空気圧漏えい試験装置
Air pressure leakage test setup.

表 5.3 バルブボディ および シャフトシール漏えい試験結果
Result of leakage test of valve body and shaft seal.

供試品	試験条件	温度	漏えい量 (cc/min)				
			5 psi	30 psi	60 psi	90 psi	120 psi
No. 1	初回	室温	0	0	0	0	0
	汚染燃料耐久試験後	室温	0	0	0	0	0
	砂じん試験後	室温	0	0	0	0	0
No. 2	初回	室温	0	0	0	0	0
	耐久試験中	室温	0	0	0	0	0
No. 3	初回	室温	0	0	0	0	0
	低温試験後	-55°C	0	0	0	0	0

表 5.4 閉じたバルブの空気圧漏えい試験結果
Test result of air leakage of sealed-off valves.

供 試 品	圧 力 ポート位置	漏 え い 量 (cc/min)											
		燃 料 圧 4 in	1 psi	2 psi	3 psi	4 psi	5 psi	15 psi	25 psi	35 psi	45 psi	55 psi	60 psi
No. 1	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
No. 2	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5.5 閉じたバルブの燃料圧漏えい試験結果
Test result of fuel leakage of sealed-off valve.

供試品	試験条件	温度	ポート位置 圧力	漏えい量 (cc/min)											
				燃料圧 4 in	1 psi	2 psi	3 psi	4 psi	5 psi	15 psi	25 psi	35 psi	45 psi	55 psi	60 psi
No. 1	初回	室温	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	汚染燃料耐久試験後	室温	アクチュエータ側	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0.05
			反アクチュエータ側	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
No. 2	初回	室温	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	高度耐久試験後	室温	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	室温耐久試験後	室温	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0	0
	振動試験後	室温	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0.05	0	0
			反アクチュエータ側	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
No. 3	初回	室温	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	耐燃料試験後	室温	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	低温試験後	-55°C	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			反アクチュエータ側	0.1	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



図 5.2 燃料圧漏えい試験装置
Fuel pressure leakage test setup.



図 5.3 空気吸引漏えい試験装置
Air suction leakage test setup.

表 5.6 閉じたバルブの空気吸引漏えい試験結果
Test result of breathing air of sealed off valve.

供試品	試験条件	ポート位置 圧力	漏えい量 (cc/min)					
			1 psi	2 psi	3 psi	4 psi	5 psi	6 psi
No. 1	初回	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0
		反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0
	汚染燃料耐久試験後	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0
		反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0
No. 2	初回	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0
		反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0
	室温耐久試験後	アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0
		反アクチュエータ側	0	0	0	0	0	0

表 5.7 サーマルリリーフ 動作試験結果
Test result of thermal relief action

供試品	ポート位置	クラッキング圧力 (psi)
No. 2	アクチュエータ側	115, 109, 108, 108, 108, 109
	反アクチュエータ側	116, 116, 110, 111, 111, 113

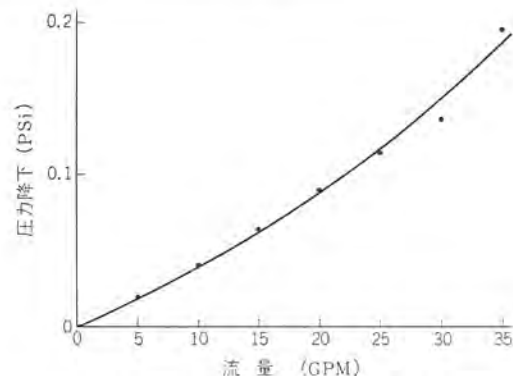


図 5.4 圧力降下試験結果
Test data of pressure loss test.

用して実施した。試験結果を表 5.7 に示す。

(7) 圧力降下試験

マノメタを使用して実施した。試験結果を図 5.4 に示す。

(8) 機能試験

バルブに定格圧力 60 psi を加え、規定電圧 18 VDC、26 VDC および 30 VDC を印加し機能試験を実施した。動作時間と電流はビシグラフで測定した。試験結果を表 5.8 に電流カーブを図 5.5 に示す。

6. む す び

以上大要を述べた電動バルブは多くの特長をもつが要約すると

(1) 航空機で使用されるすべての種類の燃料、潤滑油および作動油の流量制御に使用できる。

表 5.8 機能試験結果

Function test result.

供試品	試験条件	温度	18 VDC				24 VDC				30 VDC			
			動作時間 (s)		最大電流 (A)		動作時間 (s)		最大電流 (A)		動作時間 (s)		最大電流 (A)	
			開→閉	閉→開	開→閉	閉→開	開→閉	閉→開	開→閉	閉→開	開→閉	閉→開	開→閉	閉→開
No. 1	汚染燃料耐久試験後	室温	0.84	0.83	2.7	2.8	0.69	0.68	4.0	4.1	0.60	0.59	4.3	4.3
	加速腐食試験後	室温	0.85	0.84	2.7	2.7	0.68	0.68	3.9	4.0	0.59	0.58	4.3	4.3
	砂塵試験後	室温	0.95	0.92	2.5	2.6	0.64	0.67	3.7	3.7	0.58	0.59	4.3	4.2
	耐菌試験後	室温	0.79	0.81	2.8	2.8	0.58	0.59	3.7	3.9	0.52	0.54	4.4	4.5
No. 2	耐久試験後	室温	0.85	0.90	2.4	2.6	0.59	0.65	3.6	3.6	0.53	0.55	4.1	4.2
	塩水噴霧試験	室温	0.85	0.85	2.8	2.9	0.69	0.68	4.1	4.1	0.60	0.59	4.5	4.5
No. 3	低温試験後	-55°C	1.38	1.38	3.8	3.9	0.80	0.83	4.7	4.8	—	—	—	—
	湿度試験後	-55°C	1.30	1.38	3.8	3.8	0.88	0.88	4.8	4.7	0.75	0.75	4.8	4.8

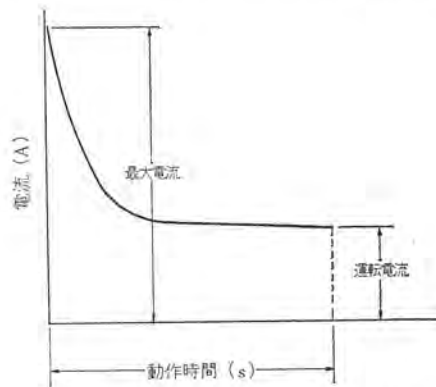


図 5.5 電流カーブ Current curve.

(2) 適用 MIL 規格を十分満足し、飛行中に遭遇するあらゆる環境条件に対して性能を十分保証することができる。

(3) 誤信号防止装置を設けているため、従来バルブの誤動作で発生した不測の事故を防止することができる。

(4) 電源故障などの緊急時には手動ハンドルを回すことにより、手動でバルブを開閉することができる。

(5) サーマルリリフを設けているので、バルブを閉じたとき配管内に閉込められた流体が温度上昇により熱膨張し、圧力が異常に上昇するのを防止できる。

(6) バルブ部分にはテフロンシールを使用しているため、耐摩耗性がすぐれ、摩擦係数が小さいので 10,000 Hz 以上の寿命を十分に保証できる。

(7) ローラクラッチの使用によりバルブの開閉位置が確実に設定され、しかも過負荷によるモータの焼損を防止できる。

(8) 小形、軽量であるため、取付け、保守などの取扱いが非常に容易である。

などをあげることができる。

航空機に積載される機器として、高信頼度であることがとくに重

要で、品質の維持、性能の安定には非常に高度な技術が要求される。性能は適用規格を満足するものであり、とくに高空における状態、低温および高温状態など非常に過酷な条件となっているが、あらゆる環境条件でも性能は十分発揮されている。

これらの電動バルブの用途は、航空機用だけでなく、広く民需用としてセントラルヒーティングシステムなどの完全自動化、液体移送の自動化などに多くの需要が期待される。

今後、航空機用に開発したこれら電動バルブの技術を民需用として広範囲に応用し波及させていく予定である。

終わりにこれら電動バルブの開発および認定試験に際して、種々ご指導、ご協力いただいた通産省、運輸省、三菱重工業(株)および川崎航空機工業(株)の関係各位および当社関係部門の方々に厚く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Valves, Fuel Shut-off, Electric Motor Operated, MIL-V-8608 A AMENDMENT 2
- (2) Valve, Shut-off Turbine Engine, Synthetic Oil, Electric Motor Operated MIL-V-25025 (USAF) AMENDMENT 1
- (3) Valve, Shut-off, Oil, Electric Motor Operated, Reciprocating Engine, MIL-V-7374 A (ASG) AMENDMENT 1
- (4) Actuators and Actuating Systems, Aircraft, Electro-Mechanical, General Requirements for, MIL-A-8064 A (USAF)
- (5) Environmental Testing, Aeronautical and Associated Equipment, General Specification for, MIL-E-5272 C AMENDMENT 1
- (6) Affect of Spurious Signals on Two Position Electric Actuators ; Whittaker Corporation Report 2000-67

深海潜水艇用油入均圧直流電動機

河村 博 敏*

Oil-filled Direct Current Motors for Deep-sea Vehicles

Kobe Works Hirotoshi KAWAMURA

Exploitation of the ocean is cried for and deep sea vehicles are coming into imminent need. These underwater boats must be built small sized for the purpose of increasing their strength against high pressure and of improving their mobility in the water with propelling motors equipped outside the shell. For submerged machines are suited induction motors, which, however, need frequency converters in excess because of the power sources being storage batteries. This will bring about disadvantage of increasing the dimensions and costs. On the other hand, DC motors have bare conductors such as commutators and brushes, meeting with difficulty for underwater use and unfitting them for outboard installation. Under the circumstances, Mitsubishi has developed oil filled DC motors the pressure of which is equilized inside and outside through bellows. They are about to be put into practical use as propelling machines of deep-sea vehicles, their description being made herein.

1. ま え が き

海洋開発がクローズアップされ、当社においても海底油田掘削装置などの関連機器の開発に取り組んでいるが、その一環として、深海潜水艇推進用の油入均圧直流電動機の試作に成功した。

1,000 m につき約 100 kg/cm² の水圧を受ける深海潜水艇では、耐圧強度を増加し、水中運動性を向上させるため、推進電動機を殻外に設け艇を小形化する必要がある。深海潜水艇の推進電動機の方式としては次の二つが考えられる。

(1) 電池→直流電動機

(2) 電池→周波数変換器→誘導電動機

船外装備するには誘導電動機が適しているが、周波数変換器が十分に必要になるため、寸法が大きく高価という欠点がある。一方直流電動機には整流子・ブラシなどの裸導電部があるため、水中電動機にすることが困難で、船外装備には不適当と考えられていた。このたび内部に油を封入し、内外圧力を均圧させるためにベローズを使用した油入均圧直流電動機を開発し、最大深度 1,500 m の深海潜水艇の推進電動機として、実用化の見通しが得られたので、その概要を報告する。

2. 基礎実験および調査

2.1 電動機内部封入液体の決定

電動機内部に封入される液体には次のことが要求される。

- (1) 絶縁物であること
- (2) 水または海水に溶けないこと
- (3) 化学的に安定で劣化時間が長いこと
- (4) 現在一般に使用されている絶縁物に対し無害であること
- (5) 揮発性が小さいこと
- (6) 粘度が低いこと
- (7) 膨張係数が小さいこと
- (8) 熱伝導率がよいこと
- (9) 廉価であること

この中で(1)～(4)は絶対的必要条件であり、これを満足する液体としては油以外に考えられないので、シリコン油、鉱油および不燃

表 2.1 油の特性
Characteristics of oil.

油の種類	鉱油		シリコンオイル			不燃油	
	A	B	C	D	E	F	G
比重	0.83	0.905	0.87	0.94	0.96	1.53	1.34
粘度 CS (0°/25°)	15/7.5	47/15.5	/2.0	/10	37/20	26/9.2	8.4.2
粘度・温度係数	0.65	0.77	0.48	0.55	0.57	0.9~0.8	0.7~0.8
流動点 °C	-5	-40	-84以下	-60以下	-60以下	-30	
引火点 °C	140以上	140以上	75以上	160以上	240以上	130以上	
沸点 °C	220以上	250以上	230以上	250以上	250以上	250以上	250以上
揮発性 % 150°C 24h	小	小	大	15	1.0	小	小
溶解力	小	小	小	小	小	大	大
誘電率		2.2	2.2~2.8			4.01	4.61
体固有抵抗 ρΩ-cm	3.1×10 ¹³	2.6×10 ¹⁴	10 ¹⁴			10 ¹⁴	2.8×10 ¹³
破壊電圧	24~67kV /2.5mm	40~42kV /2.5mm	10~12 kV/1 mm			40kV/ 2.5mm	50~52kV/ 2.5mm
膨張係数	0.0007 ~0.0008	0.0007	0.00095				
油中放電による ガス発生量	小	大	大				
価 格	安い	安い	非常に高い			やや高い	

油の3種類について調査した。これらの油の特性を表 2.1 に示す。

(a) シリコン油には

(i) 粘度の温度変化が少ない

(ii) 粘度の低いものが得られる

(iii) 化学的に安定である

などの利点があるが、その反面

(iv) 揮発性がやや高い(特に粘度の低いもの)

(v) 高価である

などの欠点がある。すなわち粘度が低いものは揮発性があるため使えず、揮発性が問題にならないものは粘度が他の油と大差ない。粘度の温度変化が少ないことは、油入電動機にとって必要なことではないので、高価なシリコン油を使う意味がなくなってくる。

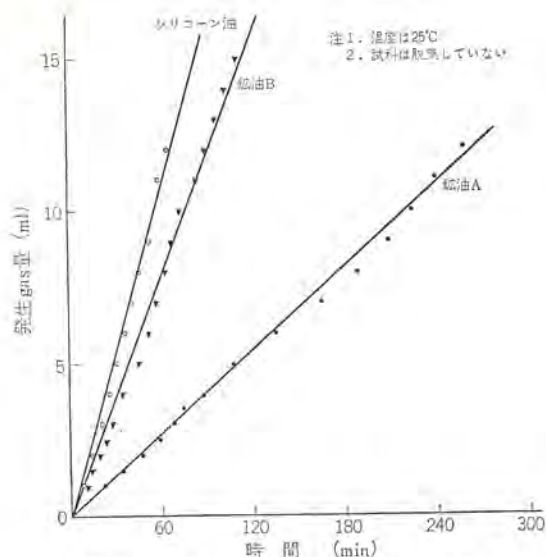


図 2.1 油の火花放電によるガス発生量
Volume of gas generated by spark discharges in oil.

表 2.2 カーボンブラシ粉末混入油の絶縁抵抗
Insulation resistance of oil containing carbon brush particles.
(単位 MΩ)

混入カーボン 量油1,000cm ³ に対する割合	体積 (cm ³)	重量 (mg)	鉱油 A				鉱油 B			
			電極間距離 (mm)				電極間距離 (mm)			
			1	2	3	5	1	2	3	5
0.05	82	50~100	∞	∞	∞	∞	50~100	∞	∞	∞
0.1	164	0.05	∞	∞	∞	∞	0.05	∞	∞	∞
0.2	328	0.05 以下	∞	∞	∞	∞	0.05	∞	∞	∞
0.3	492	0.05 以下	∞	∞	∞	∞	0.05 以下	∞	∞	∞
0.4	656	0.05 以下	∞	∞	∞	∞	0.05 以下	∞	∞	∞
0.5	820	0.05 以下	0.1	∞	∞	∞	0.05 以下	∞	∞	∞
0.7	1,148		0.05	∞	∞	∞	0.05 以下	50~100	∞	∞
1.0	1,640		0.05 以下	∞	∞	∞	0.05 以下	50	∞	∞
1.5	2,460			0.5~1.0	∞	∞	0.05 以下	5~10	∞	∞
2.0	3,280			0.5 以下	∞	∞	0.05 以下	2~3	∞	∞
5.0	8,200			0.5 以下	∞	∞				

(b) 不燃油は

一般的に良好であるが、ハロゲン化物であるため、分解した場合絶縁物に対する悪影響が心配されるので除外した。

(c) 鉱油は

低温において粘度が高い以外は特に欠点はない、粘度が高い場合問題になるのは次の点である。

(i) 機械損が大きい

(ii) 整流子表面に付着して流れる油によりブラシが浮き上がり、整流子-ブラシ間の接触抵抗が増してスムーズに回転せず火花を発生する。(i)は電動機が運転されるとすぐに温度が上がリ粘性も下がるので、実用上問題にならない。(ii)は回転速度が高い電動機に見られる現象で、ブラシ圧力を高める、ブラシにスリットを入れる⁽²⁾などの対策が必要になるが、試作機は低回転速度であるため問題にならなかった。

以上述べたような理由により封入油としては鉱油が適当であるという結論に達した。鉱油の中でも比較的粘度が低く、火花によるガス発生量が少ない(次節参照)品種“A”を使用することにした。

2.2 油中放電による油の劣化

直流電動機ではブラシ-整流子間に目に見えない火花が発生している可能性があり、この火花による油の劣化、ガスの発生が予想される。そこで接点の開閉により油中で放電させ、油の劣化状態および発生ガスの分析を行なった。放電後の油はいずれも大きな変化はなく、劣化は認められなかったが、発生ガスの量は図2.1に示すように鉱油“A”が最も少ない。なお油は試験前に脱気していないので、発生ガスには最初から入っていた空気を含んでいると推定される。

この試験の放電電圧は平均900Vで直流電動機の火花電圧よりも大きい、試験時間が短かく、火花の性質も異なるので、この結果のみで判断することは危険で実機についてさらに調査する必要がある。

2.3 ブラシによる油の汚損

直流電動機では摩耗したブラシにより油がよごれ絶縁抵抗が低下する可能性がある。場合によってはフィルタを設ける必要もでてくるので、あらかじめブラシ粉末混入量と絶縁抵抗の関係を測定した。

試験はブラシの粉末を油に混入し、かくはん(攪拌)機で十分かくはんした後、電極間の絶縁抵抗を500V絶縁計で測定したもので、その結果を表2.2に示す。試作した電動機では12.5×32×40mmのブラシを4個使用しており、これが30mm摩耗したとすれば48cm³となる。封入油は約70lであるから1lあたり0.7cm³となり、表2.2の試験結果から絶縁距離が2mm以上あれば絶縁抵抗は無限大に等しいといえる。このことからブラシによる油の汚損は問題にならず、空気中と同様に考えてよいことが判明した。

2.4 絶縁物の選定

油づけ電動機に使用される絶縁物として次の点が要求される。

(1) 油に対して安定であること

(2) 深海における外圧に耐えること

油に対しては水中誘導電動機や変圧器の実績から、現在使用しているガラス、マイカ系の絶縁物ならば一応問題ないといえる。深海における圧力は1,500mで約150kg/cm²であるが、この圧力に対して機械的に問題となるのは絶縁物中に存在する気泡である。気泡があればこの圧力により亀裂破壊を生ずるおそれがある。気泡のない絶縁するには無溶剤性ワックスの真空含浸が適当であるから、エポキシ系のF種絶縁を使用することにした。

2.5 ペローズ

電動機に油を封入した場合油に海水が混入してはならない。油は非圧縮性であるから油の温度が変わらなければ電動機内外圧力差は零で、油が漏れない程度のシールをしておけば圧力150kg/cm²の海中でも問題ない。しかし油の温度が変化し、油が膨張収縮すればいかに完全なシールをしても呼吸作用によって海水が混入する。したがって油の膨張収縮を逃がすペローズが必要になってくる。ペローズが完全に動作すれば内圧と外圧はバランスするので、シールによる圧力差はほとんど零と考えればよい。

ペローズの容積変化量は次式により決まる

$$\text{容積変化量} = \text{封入油の容積} \times \text{温度変化} \times \text{膨張係数}$$

ペローズにも各種あるが、試作機では容積変化量が大きいため適当なものが少なく、結局ニトリルゴムと特殊布でできているペロフォーム

使用することにした。

3. 11 kW 推進電動機の試作

3.1 試作機の概要

試作機は、図 3.1 に示すような出力-回転速度特性を持つ潜水艇に装備できることを目標に計画した。公称定格は 0.45/11 kW 110/220 V 100/300 rpm であり、極数は 4 極、励磁は他励分巻、起動はじか入れが可能である。界磁制御のみで 100/300 rpm の速度制御は可能であるが、電動機のサイズを小さくするため電圧は 2 段切換えとした。

この電動機の詳細な特性を図 3.1 に、構造を図 3.2 に、また外観を図 3.3 に示す。

3.2 電気設計の考え方

推進用油入電動機を設計する場合、普通の電動機と比較して

- (1) 外形寸法の制限
- (2) 冷却効果の相違
- (3) 整流条件の相違

を特に考慮する必要がある。

推進電動機は配置上から外径寸法の小さいほうが望ましい。電動機のトルクは D^2L (D : 電機子外径, L : 電機子鉄心長) に比例するので、 D が小さく L の大きい設計にする必要がある。 D が小さく L の大きい電動機のほうが一般に重量が軽くなり、また GD^2 も小さいので応答が速いという利点がある。その反面銅損が増し効率が悪くなる。効率は機械損が減ることである程度カバーできるし、外径を小さくするほうが重要であるから、可能なかぎり電機子径を

小さくして $D : L = 1 : 1.8$ とした。

油入電動機は、油の熱伝導が空気よりもよく、外被を海水で冷却するので一般の電動機よりも冷却効果が大い。したがって電流密度をかなり高くとることが可能であるが、回転速度の低い機械、電機子径が小さく鉄心長の長い機械では効率が悪くなるため、電流密度をあまり高くとることはできなかった。

整流条件は油の被膜のため悪くなることが予想されたが、この電動機は回転速度が低いので整流が問題になる機械でないため、ブラシ圧力を増す以外には特に考慮しなかった。

3.3 機械損低減法

電動機を油中で運転すれば空中よりも機械損が増大する。これを低減するには油の乱流が極力少なくなるように回転子および固定子

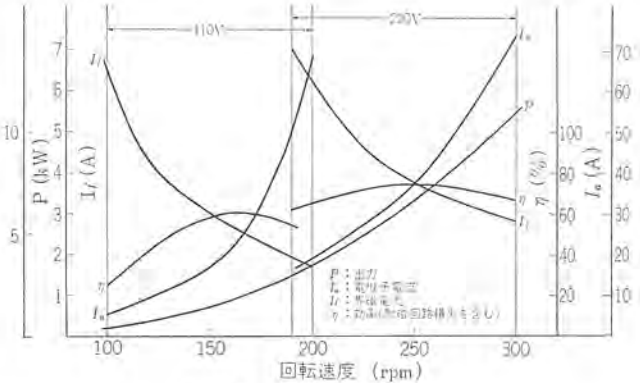
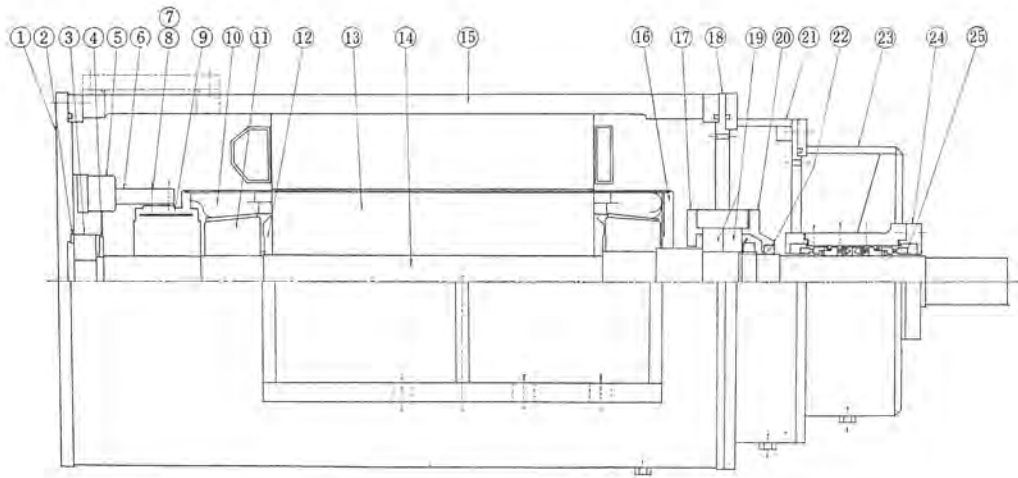


図 3.1 油入電動機特性曲線
Oil-dipped motor characteristics.



番 号	品 名	番 号	品 名	番 号	品 名
1	前 軸 受 さ き え	10	電 機 子 コ イ ル	19	軸 受
2	ブ レ ロード ス ブ リ ン グ	11	電 機 子 コ イ ル さ き え	20	端 カ バ ー
3	た ま 軸 受	12	電 機 子 タ ラ シ ン バ	21	内 カ バ ー
4	シ ー ル リ ン グ	13	電 機 子 鉄 心	22	オ イ ル シ ー ル
5	ブ ラ シ 進 退 器	14	軸	23	外 カ バ ー
6	ブ ラ シ	15	雄 鉄	24	端 カ バ ー
7	ブ ラ シ 保 持 器	16	仕 切 板	25	メ カ ニ カ ル シ ー ル
8	炭 素 ブ ラ シ	17	端 カ バ ー		
9	整 流 子	18	後 軸 受 さ き え		

図 3.2 油入電動機構造図
Construction of oil-dipped motor.

の表面をなめらかにする必要がある。直流機の回転子はスロットによるおうとつがあるので、これをなくすために図 3. 4 に示すように表面にガラスバンドを巻いている。また反整流子側コイルエンド部もポンピング効果がでないよう端板をあてワニスを充てんしている。固定子については極間に真ちゅう板を渡し円筒形に近づけている。

3. 4 電動機内部の脱気

電動機内部に空気が残っていると圧力により収縮するので、海水を混入させないようにベローズでその変化を吸収させる必要がある。空気が残量が多いとベローズの容積も多くなるので電動機内部の空気は少ないほうが望ましい。油の中には一般に 10% 程度の空気が含まれているので封入油を脱気することはもちろん、電動機本体についても油を入れるとき空気が残らないような構造にする必要がある。絶縁物の間には気泡が残しやすいのでエポキシワニスを真空含浸した。また回転子内部の小さな空間もエポキシワニスを含浸したが、空間が大きいと温度変化により割れる可能性があること、真空含浸を数回繰返す必要があることなどの理由により、空間をできるだけ小さくす

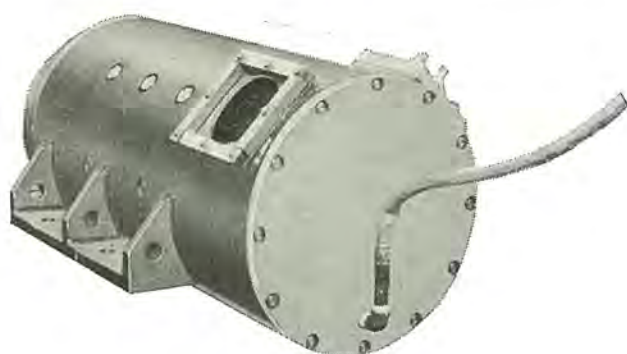
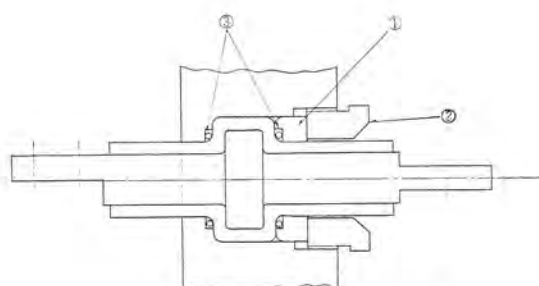


図 3. 3 油入電動機外観
Exterior view of oil-dipped motor.



図 3. 4 油入電動機回転子
Rotor of oil-dipped motor.



① プッシュ ② リングナット ③ オイルリング

図 3. 5 端子構造
Construction of terminals.

るためガラス繊維を充てんした。

3. 5 油のシール法

ベローズの動作が完全であれば内外圧力差は 0 になるが、ベローズの不感帯を考慮して 3 kg/cm^2 の圧力差に耐えるように各部のシールを行なった。

軸貫通部はメカニカルシールを 2 段使用しているほか、万一海水が侵入しても、電動機本体に直ちに達しないように内部を分離している。フレームの合わせ目はすべて O リングでシールしている。

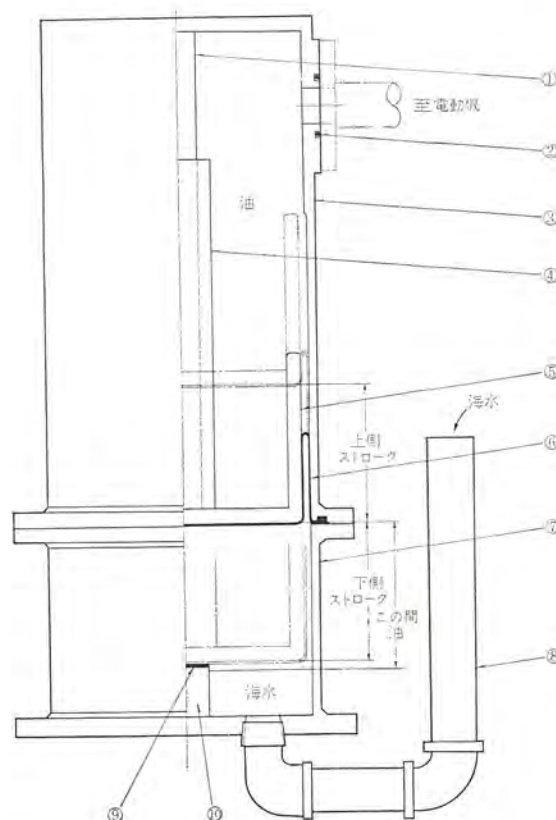
継鉄に主極および従極を取付けるボルトの締付面のシールにはスタッド O シール (O リング付きワッシャ) を使用している。

端子口出部は図 3. 5 に示すように端子棒を、O リングを介して、端子座にリングナットで締め付ける構造にしている。なお端子棒の絶縁は、ポリエステルガラス系テープを巻き付け乾燥硬化したものを使用しているため、端子棒と絶縁物の間のシールも完全である。

3. 6 ベローズの構造

ベローズは下記の項目を満足することを条件にして構造ならびに機構を決定した。

- (1) 圧力および温度変化に対して正確にかつ時間遅れなく追従作動すること
- (2) 耐油性・耐海水性のある材質であること



番 号	品 名	番 号	品 名
1	ガ イ ド 軸	6	ベ ロ フ ラ ム
2	O リ ン グ	7	下 部 シ リ ン ダ
3	上 部 シ リ ン ダ	8	導 入 管
4	ガ イ ド 管	9	座 板
5	ピ ス ト ン	10	ス ト ッ パ

図 3. 6 ベローズ構造
Construction of bellows.



図 3.7 ベローズ 外觀
Exterior of bellows.

(3) 温度変化による油の容積変化を吸収できる容積変化量を有したものであること

油の容積変化量は次のようになる

全油量 70 l
膨張係数 0.0008
温度変化 0~60°

(海水の温度変化 0~30°, 油の温度上昇 30°)

油の変化量 = $70 \times 0.0008 \times 60 = 3.4 \text{ l}$

これに対してベローズの最大変化量は、油に空気が含まれていることを考慮して、6.1 l とした。

ベローズは図 3.6 に示すように上部シリンダ・下部シリンダ・ピストン軸・ピストンガイドおよびベロフラムよりなる。ベロフラムより上部の室には油が充満し電動機を通じており、下部には海水が浸入している。油の容積変化に追従してベロフラムはピストンにそって上下に移動する。電動機から独立した構造になっているので、ぎ装束つごうのよい位置に取り付けることができる。

4. 試験結果

4.1 一般試験

直流電動機としての一般試験では整流・特性ともに空気中で運転する場合と差異はなかった。機械損は図 4.1 に示すように空気中の約 2.5 倍であるが、300 rpm で定格出力の 1.25%, 全損失の 2.9% であるから問題ない。温度上昇試験は、水そうを使って 4 l/min の水を循環して行なったが、予想よりも低かったので限界出力試験を行ない約 13.5 kW まで使用できることを確認した。このときの水温の上昇は 8 度であるが、実際の運転では循環水量が多く、水温の上昇は考えられないので条件が良くなると予想される。なおこれを一般の直流電動機と比較すると、約 1.3 倍の出力が得られることになる。

4.2 ベローズ動作試験

ベローズの動作状態の試験は油の温度を 20°C→40°C→20°C と変化させ次の点を確認した。

- (1) 内部の圧力が高くないこと。
- (2) 温度を高くした場合と低くした場合とでベローズの変化量が

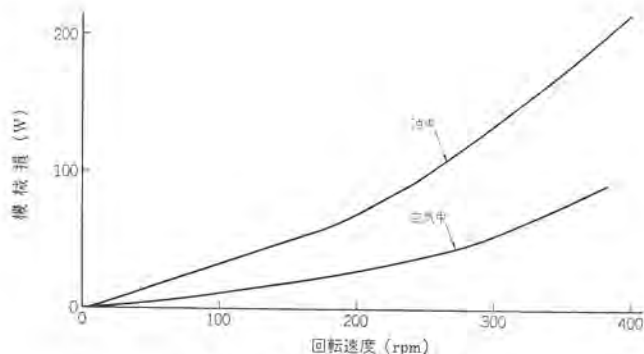


図 4.1 油入電動機の機械損
Mechanical loss of oil-dipped motor.

表 4.1 運転後の油の分析
Analysis of oil after operation.

測定項目 (単位)	分 析 結 果			
	封入前	50時間後	250時間後	260時間後
色 (ユニオンカラー)	1(-)	2 $\frac{1}{2}$ (-)	2 $\frac{1}{2}$ (-)	2 $\frac{1}{2}$ (-)
引火点 (°C)	142	137	135	132
粘度 at 37.8°C (cst)	4.49	5.2	5.2	5.5
全酸価 (mg・KOH/g)	0.23	0.742	0.626	0.479
水分 (%)	なし	なし	なし	なし
銅板腐食	なし	なし	なし	なし
混じり物 (%)	なし	0.0022	0.0038	0.0063
混じり物定性分析	—	Fe, Si, Cu, C	Fe, Si, Cu, C	Fe, Si, Cu, C

同じであること。

内部圧力は圧力計により測定したが圧力変化は認められなかった。ベローズの変化量は下部シリンダ室(図 3.5 参照)の水の排出・吸入量で測定したが、油の温度変化 20°C→40°C で 1.5 l 排水し、40°C→20°C で排水した量をそのまま吸水した。したがってベローズの動作には温度の上昇下降によるヒステリシスはないと言える。

この結果から、油の膨張係数を逆算すると約 0.001 となり計画値 0.0008 より大きくなるが、油の温度が必ずしも均一でないことによる測定誤差と思われる。

4.3 差圧試験

電動機内外の圧力差はベローズによりほぼ零に保たれるが、各部のシールは差圧 3 kg/cm² で計画しているので、圧縮空気により差圧試験を行なった。3 kg/cm² で 10 分間、さらに 5 kg/cm² で 1 分間油に内圧を印加したが油の漏れは認められなかった。

4.4 ブラシの摩耗および整流子の条こん(痕)

約 250 時間の運転でブラシの摩耗量は約 4.0 mm であった。1,000 時間当たり 16 mm となり一般の電動機の 3~8 mm/1,000 時間に比較してかなり多い。ブラシ圧力を高くしたことも原因の一つであるが、やはり油入電動機ではブラシの摩耗が多いと言える。

直流電動機では運転中に整流子の表面にチョコレート色の酸化銅被膜が生成され、この被膜によって良好な整流作用、潤滑性および整流子の耐摩耗性などが助長される。しかし油中では酸化被膜が生成されず、特に耐摩耗性が不足するため条こんの発生が予想されていた。250 時間運転後調査した結果ではやはりわずかに条こんの発生が

認められた。整流子には銅を使用するのが普通であるが、油中で酸化銅の被膜が生成されなければ必ずしも銅を使用する必要はなく、鉄・ステンレスなどの耐摩耗性のある金属のほうが油入電動機の整流子に適しているのではなかろうか⁽³⁾。

4.5 油の劣化調査

電動機に封入した油を運転開始後、50時間・250時間・260時間でそれぞれサンプリングし、分析した結果を表4.1に示す。これによると封入前と比較してユニオンカラーが変わっているが、絶縁材料などの色素によるものであろう。また劣化の目安となる全酸価については50時間後に増大しているが、その後は逆に減少しており劣化は認めがたい。

5. む す び

これまでの試作試験結果から、油入均圧直流電動機を深海潜水艇の推進電動機として実用化できる見通しが得られたが、特に安全性が重視されるものだけに、さらに実用化に際しては、今後、長期耐久試験などを行ない万全を期すことにしている。また潜水深度が1,500 m以上の潜水艇も必要になってくるので、150 kg/cm²以上の圧力に耐える電動機も開発する予定である。

わが国は四面を海に囲まれているにもかかわらず、海洋開発は諸

外国に大きく遅れをとっている。この油入均圧直流電動機が今後の海洋開発、特に海底資源の開発に少しでも役立つことができれば幸いである。

最後に今回の開発にあたって、ご指導とご援助をいただいた三菱重工業 神戸造船所ならびに 当社中央研究所の関係各位に厚く感謝の意を表わすものである。

(主要構造は特許実用新案出願中)

参 考 文 献

- (1) F. D. Gay Lord, et al : Motors that don't mind sea water
SEA Journal, (May, 1966)
- (2) Н. В. Водошци, В. Л. Фрумцл : УСТРАНЕНИЕ МАСЛЯНОГО КЛИНА В СКОЛЪЗЯЩЕМ КОНТАКТЕ МАСЛОПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИИ, No. 4 (1968)
- (3) К. К. Намцтокоа, В. Г. Брезцнскц, Б. Б. Кац : НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СКОДЪЗЯЩЕГО КОНТАКТА В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАОЛЕ, ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИИ, No. 4 (1968)

中性子チョッパ

渡 辺 光 人*

Neutron Chopper

Central Research Laboratory Mitsuhito WATANABE

A neutron chopper is a fundamental component in neutron experiments using a time-of-flight method. Herein is described mechanical performance of a neutron chopper newly developed. A rotor in this device is made of K monel weighing about 16 kg and provided with ten slits each having an effective length of 250 mm (0.5 mm wide by 25 mm high). In constructing the rotor, a special shape is given to it by cutting off a low stressed part of the conventional circular rotor and limit design is made to allow plastic deformation locally so that it can withstand a high rotational speed of 30,000 rpm. On the other hand single unit tests are conducted on grease lubricated ball bearings and vacuum seals which are components of a high speed drive unit to confirm high speed performance. As a result of operation of the neutron chopper, it is proved that the vibrational amplitude of the rotor is below 30μ , the degree of vacuum is $(8 \sim 10) \times 10^{-2}$ torr and the temperature rise is below 35°C at each part, thus unattended operation being practicable.

1. ま え が き

中性子チョッパは原子炉から放出される強い中性子線を用いて、原子炉のスペクトル測定を行ったり、種々の物質の中性子断面積のエネルギー変化を測定する等の中性子実験を行なうための実験装置であり、タイムオブフライト法の原理に基づいている。

タイムオブフライト法というのは、時間的に連続して出てくる中性子流を、高速回転するチョッパロータで切断して多色中性子の脈流を作り、中性子がチョッパから一定距離にある検出器まで飛行するに要する時間が、中性子のエネルギーによって異なることから、この時間を電氣的に分析・記録する方法である。検出器でカウントされたパルスは、マルチチャンネルタイムアナライザに記録され、中性子線のスペクトルとして表示される。タイムオブフライト法の特長は、脈流中のすべての中性子に対して同時にエネルギー分析を行なうので、データの集まり方が非常に速いと言うことであり、非弾性散乱の実験において、散乱された中性子のエネルギーを解析するために幅広く用いられている。

中性子チョッパは多くのタイムオブフライトシステムの基本的な構成要素であり、1947年のフェルミチョッパ以来、実験目的に応じて中性子の通過する時間をできるだけ短くすること、中性子をできるだけ多

く取りだすこと、バックグラウンドをできるだけ低く押えること等を目的として、多くの種類のチョッパが作られてきた。

われわれもこれまで数種類の中性子チョッパを設計・製作してきたが⁽¹⁾、このほゞスリットの有効長さ 250 mm の組立式ロータを 30,000 rpm で回転させることに成功した。このロータでは周速が 390 m/s に達し、材料強度の点から極限に近い。この論文では中性子チョッパを高速回転装置としてみた場合の機械的な面について述べる。回転装置の外観は図 1.1 に示すとおりである。

2. 装置の概要

2.1 構 成

中性子チョッパのおもな構成要素は、原子炉から放出される中性子線をロータまで導くコースコリメータおよびファイナコリメータ、実験時以外は中性子線や γ 線をシャ断するための水シャッターおよび鉛シャッター、中性子線をチョップするロータ、ロータを高速回転させる回転装置、ロータの回転速度精度を 0.05 % 以下に制御するためのデジタル方式の回転速度制御装置、中性子を飛行させるための He ガス入りフライトチューブ、中性子を検出するプラスチックシンチレータ、検出器の信号を電氣的に分析・記録するマルチチャンネルタイムアナライザ、タイムアナライザの動作起点となるスタート信号発生器、およびしゃへい体である。

以下、とくに高速回転するロータおよびその回転装置にかぎって述べることにする。ロータは、くし歯状に加工された上下2部分、およびその締め付けボルトからなり、たがいにくし歯状の部分をはめ込んでスリットを構成している。回転装置は駆動用の電動機、増速してロータを回転させる駆動部、ロータをささえる軸、風損をなくするための真空容器、軸が真空容器を貫通するための軸封装置、ロータの振れ回わりを押える振動減衰機構、真空容器と軸封装置のための真空系および油循環系および各種検出器から構成されている。

2.2 仕 様

(1) 性 能

回転速度範囲 : 3,000~30,000 rpm

回転速度精度 : 0.05 %

エネルギー範囲 : $10^{-3} \sim 10^3$ eV

図 1.1 中性子チョッパ組立
Assembly of neutron chopper.

- (2) ロータ
- 形 式 : 上下2分割組立式 ロータ
- 材 質 : K モネル
- 長 径 : 250 mm
- 重 量 : 16.6 kg
- スリット形式 : 不等ピッチ 直線状 スリット
- スリット寸法 : 幅 0.5 mm × 高さ 25 mm × 10 本
- (3) 駆動電動機
- 形 式 : 直流分巻電動機
- 定格出力 : 3.7 kW
- 最高回転速度 : 15,000 rpm
- (4) 駆動部
- 形 式 : ベルト 増速駆動方式
- ベルト : 絹 エンドレスベルト
- ベアリング : 単列深みぞ形 ポールベアリング
- (5) 軸
- 形 式 : 可とう(撓)性つり下げ軸
- 材 質 : ビアノ 線
- (6) 真空容器
- 材 質 : 一般構造用圧延鋼材
- 重 量 : 約 200 kg
- (7) 軸封装置
- 形 式 : 軸振れ防止形 オイルシール 油潤滑方式
- オイルシール : V 形 オイルシール
- 潤滑油 : スピンドル 油
- (8) 振動減衰機構
- 形 式 : 油浸 シリンダ 方式
- ダンピング 油 : モビール 油
- (9) 真空系および油循環系
- 真空 ポンプ : 油回転真空 ポンプ 150 l/min
- 油循環 ポンプ : 遠心 ポンプ
- フィルタ : メタルフィルタ 150 メッシュ
- (10) 各種検出器
- 回転速度 : 電磁 ピックアップ
- 振 動 : 加速度形振動計
- 真空度 : サーマスタ 真空計
- 温 度 : 銅-コンスタンタン 熱電対

3. ロータ

ロータの設計法についてはこれまでも述べてきたので⁽¹⁾, ここでは重複を避けて, 考え方の概要を述べるにとどめる。

われわれはこれまで, 組立式 ロータでは直径 300 mmφ, 最高回転速度 13,000 rpm の ロータを, また一体形 ロータでは直径 250 mmφ, 最高回転速度 16,000 rpm のものを設計・製作し実験にはいつている。しかし, すでにこれらの ロータの設計において, スリット底の応力集中部に対しては局部的な塑性変形を許容した極限設計を採用しており, これまでの設計法のままで直径 250 mmφ, 最高回転速度 30,000 rpm の ロータを設計することは不可能である。

ここで, チョップ ロータに要求される点をもう一度考えてみると,

(1) γ 線・中性子線に対してしゃへい効果の大きい材料・構造であること。材料としては比重が大きく, 単位体積当たりの中性子吸収断面積が大きいこと。

(2) 分解能を上げるため周速が高いこと。

(3) 実験の効率を上げるためスリット断面積が大きいこと。ただし, 分解能を上げるためにはスリット 幅は小さいほうがよい。

と言う3条件を満足する必要がある。しかし, これらの性能を引き上げることは ロータの機械的強度に関しては矛盾しており, どのようにして調和を保つか, これまでの設計で第一に考慮されてきた点である。しかしこうした バランスのとれた ロータ では, もう大幅な性能の向上をはかることは無理であって, どれかの条件をゆるめるか,あるいは他の手段によって条件を緩和するしか性能向上の方法はない。

ここで述べる ロータでは, スリット有効長さ 250 mm, 最高回転速度 30,000 rpm を実現させるために, ロータの“閉”位置(ロータスリットが中性子流と直角方向)でのしゃへい能力を犠牲にして, 回転速度の向上をはかった。

3.1 ロータ材料

ロータ材料としては, 実験目的・実験方法に応じて種々の材料が考えられるが, 前記の条件を満たす必要があり, しゃへい能力と比強度が選択の基準となる。今回のチョップのように, 単一ロータの場合にはしゃへい効果の点から金属性ロータを採用するのが普通である。金属材料としてはK モネルが最も優秀であり, 信頼性も高い⁽²⁾。

3.2 ロータ構造

これまでのロータは一般に円板状をしていたが, これはロータが“閉”位置にあるときに, スリットがしゃへい材の最大量で囲まれるから, しゃへいの目的からは有利であった。一方, スリットのあるロータを高速回転させるに当たって理想的な形というのは, ロータの側面部の材料を削り落して, スリット先端部なるべく細くし, テーパをつけて中央部を太くした構造である。実験に必要な回転速度, ロータ材質などによって, 上述の二つの形状の中間的なところを選ばよいが, 今回は高速回転させることに主眼を置いた。

実際の構造としては, スリットを一体の鍛造材から削り出すことができれば, 高応力部を一体に製作でき, 強度および信頼性の面から理想的である。前回, 幅 2 mm, 高さ 40 mm の スリットを, 放電加工で直径 250 mm の K モネル 製 ロータに貫通させることに成功したが⁽²⁾, 今回はスリット寸法が幅 0.5 mm, 高さ 25 mm であり, 250 mm もの距離にわたって加工することは, 加工中の電極の曲がりなど精度の問題が大きく, 不可能でないとしてもきわめて困難である。

このことから, ロータを上下に2分割し, 図 3.1 に示すように互いにくし歯状の部分をはめ込んで, スリットを構成する組立式構造を採用した。各半分の主要部寸法は同一にし, 接合面にせん(剪)断力が働かないように考慮した。そして上半分には駆動軸に取付けるためのコレット用のボスを, 下半分には振動減衰機構につながるピンを取付けるためのボスをそれぞれ削り出してある。上下部の接合は応力集中を避ける構造としたいが, ろう付けでは十分な強度の保障がないために, ボルト 締めとした。

3.3 ロータ強度

K モネル 製のロータの場合, 遠心力による破壊は平均応力説にしたがうことはまちがいないと思われる。一方, ロータ内の正確な応力分布を求めることは簡単にはできないので, 設計に際しては種々の断面を考え, その平均応力を求めるのが実用的であり, 信頼もおける。ロータ形状としては, できるだけどの断面でも平均応力が一樣になるように選ぶのが有利であるが, 同時に, 上下部の接合面を引き離そうとする曲げモーメント, およびそれを締め付ける ボルト寸法を考えて,



図 3.1 組立式ロータ Built-in type rotor,

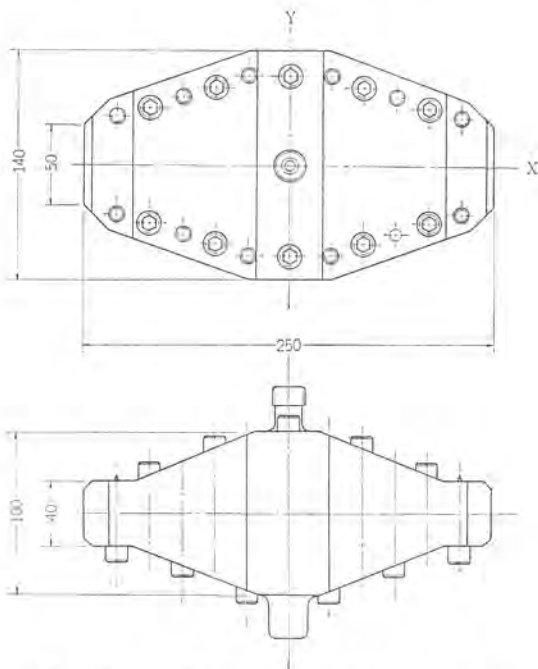
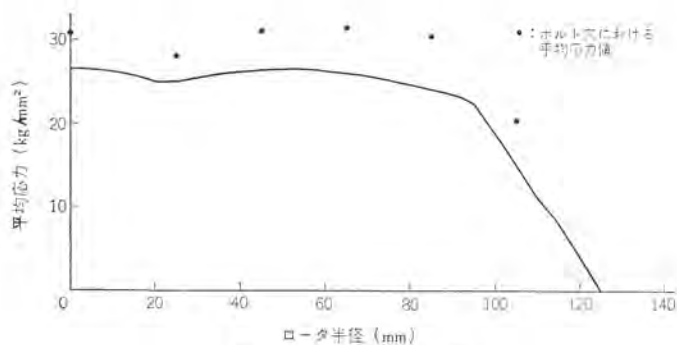
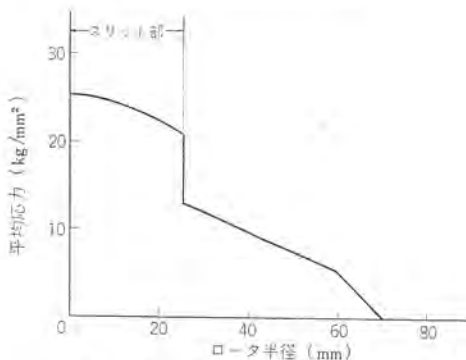


図 3.2 ロータ形式 Shape of chopper rotor.



(a) スリット方向平均応力分布



(b) スリット直角方向平均応力分布

図 3.3 ロータ内の平均応力分布曲線 (30,000 rpm 時)
Average stress distribution of the rotor at 30,000 rpm.

最適の形状を選ぶ必要がある。この計算には数回の繰返しを要するが、最終的なロータ形状を図 3.2 に、30,000 rpm 時のスリット方向および直角方向の平均応力分布を図 3.3 に示す。

図 3.3 から明らかなように各断面の平均応力が降伏点を越えることはないが、スリット底、およびボルト穴では応力集中が生じ、最大応力を弾性として計算すると 160 kg/mm^2 に達し、回転停止による寿命が問題となる。K モデルに対する全ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon$ と破壊までの繰返し数 N の関係式⁽²⁾

$$\Delta \varepsilon = 0.18/N^{1/2} + 0.0058$$

より、推定寿命は $(2 \sim 3) \times 10^3$ 回となる。

4. 回転装置

中性子チョッパの回転装置は、ロータを安全に高速回転させるものであるから、できるだけ構造が簡単で、回転の安定性のよい形式が望ましい。基本的な構造としては、

(1) ロータは可とう(撓)性の軸でつり下げてセルフバランスして回転させる。

(2) 大気中では風損が過大になるので、真空中で回転させるのが最もよい方法である。具体的な構造は図 4.1 に示すとうりである。駆動電動機としては直流分巻電動機を使用し、平ベルトにより 2 倍に増速してロータを 30,000 rpm まで回転させることができる。このため、駆動電動機はベアリングを介して支柱上に支持され、スプリングによりベルト張力を与えている。ロータは前述のとおり重量約 16 kg の K モデル製で、駆動部のベアリングから 3 mmφ の軸によって垂直につり下げられセルフバランスして回転する。ロータの振れまわりを押えるために、下部に振動減衰機構を設けてある。

また、風損を減少させる目的で、ロータは鋼製の真空容器中で回転させるが、この真空容器と鉛製の保護リングが、万一ロータが破壊し

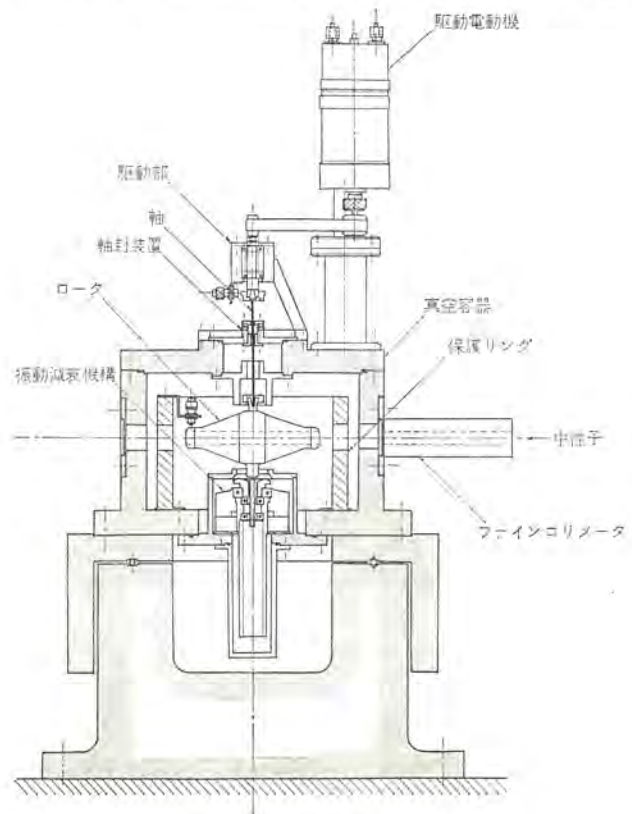


図 4.1 回転装置の構造
Construction of driving system.

た場合の保護を行なっている。この真空容器の中性子通路には角孔を設けてあるが、真空を保持し、かつ中性子の吸収・散乱を少なくするために2mm厚のアルミニウム窓を取付けてある。軸が真空容器を貫通する部分には、オイルシールからなる軸封装置を設けてある。

各種検出器としては、回転速度を検出する電磁ピックアップ、真空度を検出するサーミスタ真空計、真空容器の振動を検出する加速度形振動計、および各部温度を検出する銅-コンスタンタン熱電対が取付けられており、安全保護動作をおこなわせている。

この回転装置において、とくに高速回転することにより問題となるのは、ロータをつり下げて回転する駆動部ベアリング、および真空封止用の軸封装置である。これらについてはその信頼性を確認するためにあらかじめ単体試験を行なった。

4.1 グリース潤滑によるボールベアリング試験

ベアリングの高速性能に最も影響をおよぼすのは、その潤滑方法である。潤滑方法には大別してグリース潤滑とオイル潤滑があり、潤滑性能は後者のほうがはるかに良い。とくに高速回転においてオイルジェット方式あるいはオイルミスト方式が多用されるのは、潤滑性能以外にもベアリングでの発生熱量を容易に除去できるという、大きな利点があるためである。一方、グリース潤滑の場合には、ハウジングまわりの構造が簡単になり、また油を供給する必要がないため保守・点検が容易となる。

上述のようにどちらの潤滑方法にも、それぞれ利点・欠点があるが、とくに中性子チョッパのように大きなしゃへい体に囲まれて運転する場合には、できるだけ構造簡単で保守・点検の容易なほうがよいわけで、できればグリース潤滑にしたいわけである。

通常、高速回転用として使用するベアリングは単列深みぞ形か、アンギュラコンタクト形であり、グリース潤滑した場合の限界速度を示す値 $d_m \cdot n$ 値 (d_m : ベアリング内・外径の平均値 mm, n : 回転速度 rpm) はカタログ推奨値では30万とされてきたが、近年、グリースの高速性能もかなり向上しており、 $d_m \cdot n$ 値50万は十分可能とされている⁽³⁾。ここでは単列深みぞ形6203ベアリングをグリース潤滑により、30,000 rpmで使用可能かどうか試験してみることにした。この場合の $d_m \cdot n$ 値は85万でかなり高い値である。

4.1.1 試験装置

試験装置の構造を図4.2に示す。この装置では駆動は直流電動機により行ない、試験用のベアリングを装着した軸をベルト増速により回転させている。ベアリングの負荷は電動機重量をベルト張力としてかけ、約16kgのラジアル荷重を与え、スラスト荷重はかけていない。この場合、負荷容量より求めた寿命は 5×10^4 時間となり十分ながい。なお、ベアリング寿命の判定はアウトレースの温度上昇を目安とすることにした。以下試験ベアリング仕様を示す。

ベアリング形式：単列深みぞ形ボールベアリング6203、フェノール樹脂製
リテナ、スキマC3、精度SP級

グリース：リチウム系グリース

4.1.2 試験結果

新しいベアリングをいきなり30,000 rpmで回転させた場合、アウトレース温度は図4.3に示すように、かなり急激に上昇し、やがて異常音を発生し、ベアリングは破損してしまうことがわかった。

そこでもっと低い回転速度での温度特性を知るために、種々の回転速度について試験を行なったところ、20,000 rpm ($d_m \cdot n$ 値57万) 以下ならば比較的短時間で温度が平衡に達することがわかった。ならし運転の意味で新しいベアリングを20,000 rpmで、1日に8時間ず

つの断続運転で合計100時間の運転を行なった結果を図4.4に示す。運転初期には、アウトレース温度にいったんピークがでて後平衡温度に達するが、運転を続けると段々ピークがなくなり、平衡温度自体も低下する。しかし運転時間が約30時間をこえてからは、温度上昇はほぼ一樣になることがわかった。

このならし運転を行なったのち徐々に回転速度を上昇させ、30,000 rpmに至ったが、温度上昇は約8°Cであり、ピークも見られず良好であった。30,000 rpmで、やはり1日8時間の断続運転を行ない、延運転時間1,000時間でも何等異常は認められず、十分寿命があることがわかった。

以上の試験結果より、適当なならし運転さえしてやれば、グリース潤滑によって30,000 rpmの運転は可能ながことが明らかとなった。

4.2 軸封装置

この中性子チョッパが必要とする軸封装置に要求される仕様は、

最高回転速度：30,000 rpm

保持真空度： 1×10^{-1} torr 以下

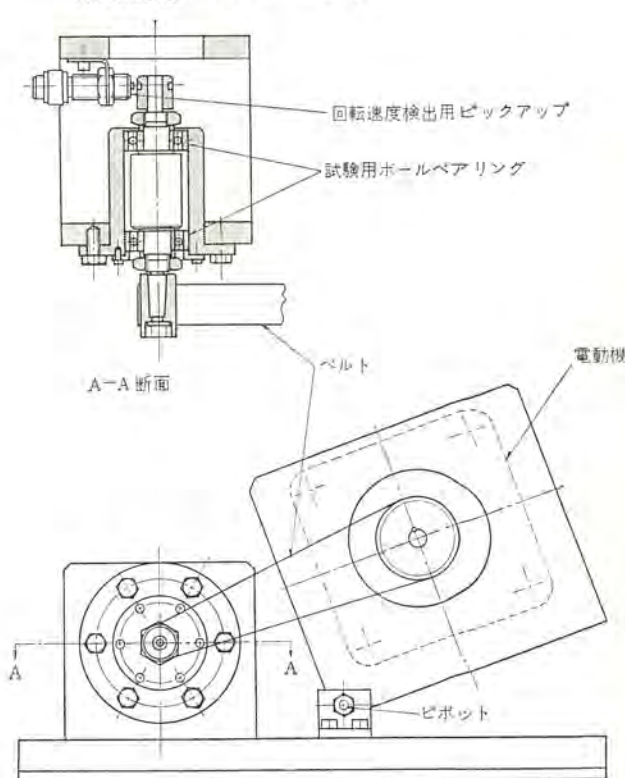


図4.2 ベアリング試験装置の構造
Construction of bearing test equipment.

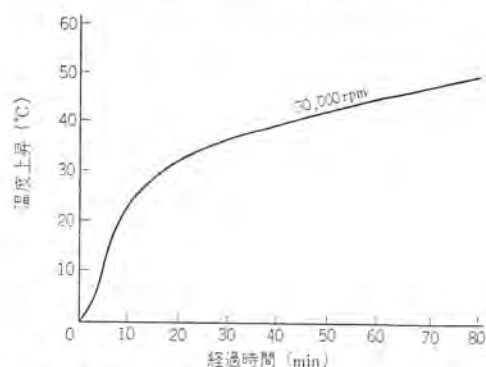


図4.3 ならし運転なしでの6203形ベアリングの温度上昇
(30,000 rpm時)
Temperature rise of 6203 type ball bearing without running-in
(at 30,000 rpm).

であるが、そのほかロスが少ないこと、十分寿命のあること、保守が容易なこと、および価格が安いことが必要である。シール形式としては、緊迫式シール、メカニカルシール、非接触式シールなど種々のものが考えられるが、ここでは最も簡単で実用性があると考えられるオイルシールを選定した。

これまでに製作した中性子チョッパでは、オイルシールを用いて軸径10 mmφ、16,000 rpmで、シール部寿命は500時間以上あることが確認されている。しかし、10 mmφのまま30,000 rpmまで回転させると、軸周速は15.7 m/sと過大になりオイルシールの寿命が短くなる。そこで軸径を細くすることにし、軸径3 mmφのオイルシールについて試験を行なうことにした。軸を細くすることはロスの少ない軸封装置を可能にし、さらにロータからの力が軸受に伝わることを防ぐ意味でも有利である。

4.2.1 試験装置

試験装置の外観を図4.5に、系統図を図4.6に示す。3 mmφの軸は整流子電動機に直結され、端部はブッシュを介してベアリングで支持されている。その中間に2組のV形オイルシールよりなる軸封装置が設けられ、潤滑油が循環する構造となっている。ベアリング側が真空室となっており、150 l/minの真空ポンプで排気した。

密封性能に影響をおよぼす要素としては、軸振れ、回転速度、緊迫力、軸の表面あらさ、潤滑油の種類などが考えられる。ここでは軸振れを2/100 mm以下、軸の表面あらさを0.8 S以下とし、潤滑油はスピンドル油#60を採用した。

回転速度、真空度、各部温度の測定を行ない、油漏れの有無は肉

眼で観察することにした。オイルシールの寿命は真空度の劣化と油漏れから判定することにした。なお、運転はすべて1日8時間の断続運転である。

4.2.2 試験結果

延運転時間が32時間、120時間、250時間での真空度曲線を図4.7に示す。時間軸原点は軸の回転開始時である。いずれの場合にも回転開始後約4時間、真空度が劣化していき、また延運転時間がながくなるとともに到達真空度が徐々に劣化する現象がみられた。しかしこの現象は、軸封装置側を閉じ切って真空ポンプのみ運転しても同様に現われたことから、真空ポンプの特性によるものとわかった。

油漏れ量は真空室側へもれてきた油の量を測定して求めたが、延運転時間に関係なく約0.1 cc/hで一定であった。この程度の漏れ量ならば容易に処理できるから問題ないが、普通の意味からすればオイルシールの密封限界をこえて使用しているわけであり、軸振れが増せば漏れ量は急激に増加する可能性がある。この軸封装置の損失動力を摩擦トルクの測定と運転中の潤滑油の温度上昇より求めると、30,000 rpm時に10 W程度ときわめて少なかった。寿命も300時

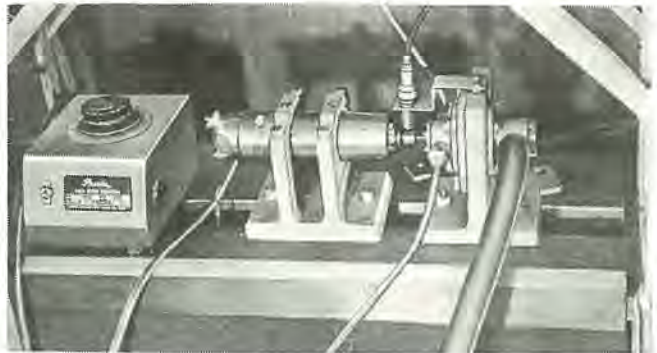


図 4.5 軸封試験装置の外観
Exterior view of shaft seal test equipment

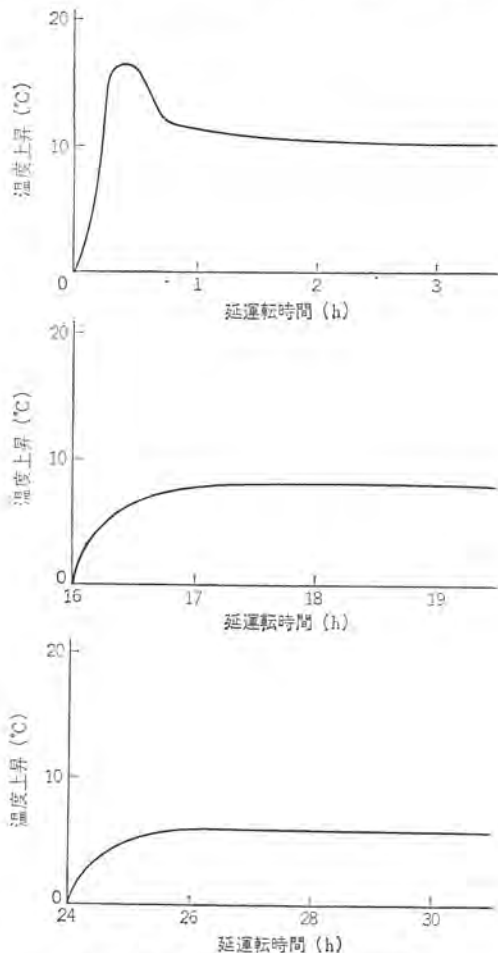


図 4.4 20,000 rpmでの運転経過
Temperature rise of bearing at 20,000 rpm.

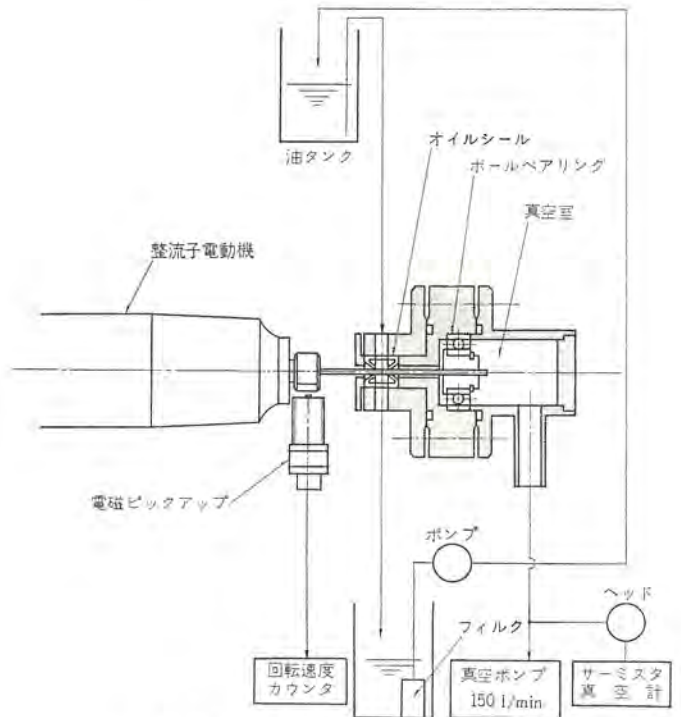


図 4.6 軸封試験装置の系統図
Schematic diagram of shaft seal test equipment.

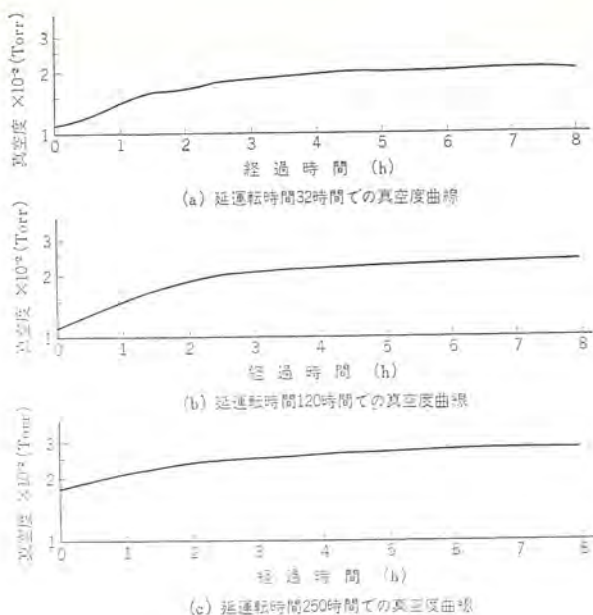


図 4.7 真空度曲線
Pressure of vacuum chamber.

間以上あり、十分実用可能な軸封装置の開発ができた。

5. 回転装置の運転結果

ロータは K モネル 材の熱処理を行ない、その機械的性質が MIL 規格値を満足していることを確認してからバランス修正を行なった。しかしこのロータはセルフバランスして回転するため、バランス修正はそれほど困難ではない。

回転試験に際してはロータの変位を容量変位計で測定し、正常な運転かどうか判定することにした。回転部分にはすべて熱電対を取付けて温度測定を行ない、また真空度の測定を行ないつつ回転上昇させた。運転経過の一例を図 5.1 に示す。ロータの一次共振数は 10 cps で、ロータの最大振幅はこの回転数で生じ最大約 300 μ であっ

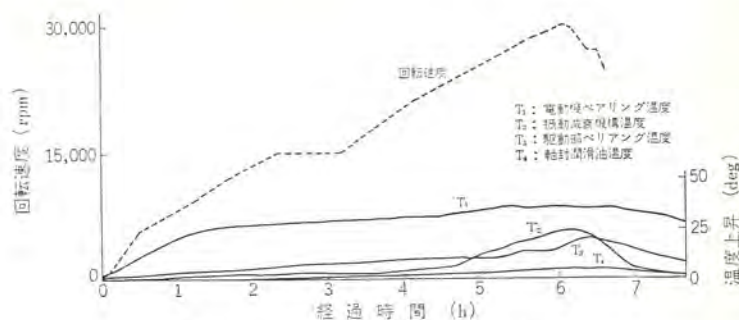


図 5.1 運転経過 Operation chart.

た。この共振点をはずれると最高回転数までほかに共振点はなくロータ振幅は 30 μ 以下であった。真空度は $(8 \sim 10) \times 10^{-2}$ torr でほぼ一定しており、各部の温度上昇は 35°C 以下であった。

中性子チョッパは高速で長時間連続して運転する必要がある、また原子炉内で使用するものであるから、安全性について十分考慮する必要がある。この装置でも想定される事故については各種安全保護動作を行なわせているが、確実に動作しており無人運転が可能となった。

6. む す び

以上、中性子チョッパの重要な構成要素であるロータおよび回転装置について述べたが、スリット有効長さ 250 mm、重量約 16 kg の K モネル製ロータを 30,000 rpm で安全に回転させることに成功し、機械的性能は十分満足された。しかし、この装置は単一ロータの中性子チョッパとしては限界に近く、今後性能を上げるためには、複数のロータを組合せて使用する方向に進むであろう。

参 考 文 献

- (1) 前田、菰原、川面、大野：三菱電機技報、36, 1,133 (昭 37)
- (2) 菰原、渡辺、梶田：三菱電機技報、39, 1,116 (昭 40)
- (3) 赤岡：潤滑、8, 219 (昭 38)



技術講座

システム理論——(I) 基礎

伊藤 貴 康*

1. ま え が き

システム工学という言葉は、現在かなり一般的に知られるようになっているが、システム理論はその基礎理論ともいべきものである。従来システム理論は、制御理論とその手法、および実際問題へのそれらの応用、とくに計算機制御的な立場からの応用というように取られている傾向が強い。しかし本来システム理論は一つの科学分野というより科学理念と考えらるべきで、諸概念の明確化、いろいろな分野に共通した概念を理解し、役立てていく上の助けとなることを目ざしている。システム理論を用いて、実際に何らかの推論を行なうには問題を特殊化し、システム構成の詳細を与える必要がある。従来この特殊化の一例として、主として制御理論がとられてきたと考えてよい。

この論文は、最近の数学的システム理論に関する基礎的諸概念についての解説を意図している。上述のように従来システム理論は制御理論との関連において論じられているが、現在われわれは計算機時代にはいりつつあり、今後システム理論も計算機と密接に関連したものとしてとらえていかねばならないことが予想される。本文では、このような立場から、計算機の数学的モデルであるオートマトン理論と現代制御理論との融合の下にシステム理論の基礎的概念の解説を行なう。

本文は数学的システム理論の基礎的な側面を紹介するだけであるが、システム工学全般の意味、基本的諸問題、システム工学を進めていく上での考考方に関しては馬場⁽²⁾によるすぐれた論文がありそれを参照されたい。

本文を読むにあたって、大学教養課程くらいの数学的知識を仮定している。少しむずかしいと思われるところは(*)印を付けておいたが、その部分は飛ばして読んでいただいてもかまわない。

2. システムの数学的定義と基礎概念

システムとは、直観的には入力、出力、内部状態という三つの要素から表現され、内部状態は外界からの入力によって、ある特定の法則にしたがった影響を受けて動作し、出力として内部状態から定められるある量を外界に反映させるような任意の系である。たとえば、電力回路網、計算機の論理回路、その他工学、物理関係だけでなく、生体、経済、社会現象などもこのような意味でのシステムとして記述されるものが多い。

時間スケール T は $(-\infty, \infty)$ であるとしておく。数学的には、 T は全順序半群であると定義しておいてよい。すなわち T に属する、あらゆる x, y, z に対して

- (1) $x \leq y$ かあるいは $y \leq x$

- (2) $x \leq x$

- (3) $x \leq y, y \leq x$ ならば $x = y$

- (4) $x \leq y, y \leq z$ ならば $x \leq z$

次にシステムの Implicit な定義と Explicit な定義を形式的な形で与えておこう。この定義には連続性の条件がはいっているが、それをはずせば離散の場合にもあてはまる。

定義 1 (*) (Implicit な定義)

システムは可分な距離空間 R 上の、次の性質を満たす変換群 $\{R_t\}$ として定義される：

- (1) R_t は $(-\infty, \infty)$ 上のあらゆる t に対して定義されている。

- (2) R 上の点 p の R_t による写像を $q = f(p, t)$ としたとき、 f が次の性質を持っている：

$$f(p, t_1 + t_2) = f(f(p, t_1), t_2)$$

- (3) R_t は次の性質を満たす意味において連続である。すなわち t_0, p_0 を任意にとり、 $\{t_n\}, \{p_n\}$ は t_0, p_0 に収束するような任意の系列とすると

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(p_n, t_n) = f(p_0, t_0)$$

この定義の場合、 R の点 p がシステムの状態を表わし、 R は状態空間といわれる。 $f(p, t)$ はシステムが時刻 $t=0$ で状態 p にあるとしたときに、時刻 t になったときのシステムの状態を表わす。

定義 2 (*) (Explicit な定義)

システムは次の五つの公理から定義される数学的な系である。

- (1) システムの動作が定義されている状態空間 Q と時間の集合 T が存在し、 T は上述のように実数の全順序半群である。

- (2) システムの入力情報空間 I が与えられている。

- (3) 今、 T, Q の初期値をそれぞれ t_0, x_0 とし、 $t \geq t_0$ で定義された I の点である入力を u としたとき、システムの時刻 t における状態は

$$\phi : I \times T \times T \times Q \rightarrow Q$$

なる写像で決まり、この関係を $\phi_u(t, t_0, x_0) = x_t$ と表わす。ここに ϕ_u は $t \geq t_0$ のみ定義されている。

Q の任意の要素 $x_0, t_0 \leq t_1 \leq t_2, T \cap [t_0, t_1]$ で定義された I の定数 u に対して、次の関係が成立つ。

$$\phi_u(t_0, t_0, x_0) = x_0$$

$$\phi_u(t_2, t_1, x_0) = \phi_u(t_2, t_1, \phi_u(t_1, t_0, x_0))$$

- (4) システムの出力は $\psi : T \times Q \rightarrow (-\infty, \infty)$ で与えられる。

- (5) ϕ, ψ は Q, T, I 上で定義された位相に関し、連続である。以後具体的に話を進めるために、次のような表現を用いる。

システム $\hat{S}$ は入力 u 、出力 y 、状態 x を有し、各時点 $t (t \in T)$ において、 $u(t) \in I$ (入力空間)、 $y(t) \in O$ (出力空間)、 $x(t) \in Q$ (状態空間)

間)である。 I, O, Q は時間に独立である。システム $\hat{S}$ は入力-出力-状態の関係で与えられ、次のように表現される。

$$\begin{cases} \underline{x}(t) = \phi(\underline{x}(t_0), \underline{u}(t_0, t)) \\ \underline{y}(t) = \psi(\underline{x}(t), \underline{u}(t_0, t)) \end{cases}$$

これをシステム $\hat{S}$ の状態方程式という。

定義 3

あらゆる入力 $\underline{u}$ に対して、状態 $\underline{x}_i$ で始まる $\hat{S}$ の応答が状態 $\underline{x}_j$ で始まる $\hat{S}$ の応答に一致するときに、状態 $\underline{x}_i$ は状態 $\underline{x}_j$ と同値であるといわれる。すなわち

$$\underline{x}_i \cong \underline{x}_j \Leftrightarrow \forall \underline{u} [\underline{\psi}(\underline{x}_i, \underline{u}) = \underline{\psi}(\underline{x}_j, \underline{u})]$$

定義 4

状態空間に他に同値な状態がないとき、 $\hat{S}$ は既約形であるという。状態方程式

$$\underline{\dot{x}}(t) = \underline{f}(\underline{x}(t), \underline{u}(t), t)$$

は、次のような状態分離性を有する。

$$\phi(\underline{x}(t_0), \underline{u}(t_0, t)) \cong \phi(\underline{x}(\tau), \underline{u}(\tau, t))$$

ここに $t_0 < \tau < t_0$ 。

定義 5

$\hat{S}_1, \hat{S}_2$ の入力空間の、あらゆる入力 $\underline{u}$ に対し、状態 $\underline{x}_1$ ではじまる $\hat{S}_1$ の応答が、 $\underline{x}_2$ ではじまる $\hat{S}_2$ の応答と同じであるときに、システム $\hat{S}_1, \hat{S}_2$ に属する状態 $\underline{x}_1, \underline{x}_2$ は同値である。すなわち

$$\underline{x}_1 \cong \underline{x}_2 \Leftrightarrow \forall \underline{u} \cdot [\underline{\psi}^{(1)}(\underline{x}_1, \underline{u}) = \underline{\psi}^{(2)}(\underline{x}_2, \underline{u})]$$

定義 6

もし $\underline{x}_1$ と $\underline{x}_2$ が同値でないとき、システム $\hat{S}_1$ の状態とシステム $\hat{S}_2$ の状態は distinguishable であるといわれる。

定義 7

状態 $\underline{x}_1$ が、入力 $\underline{u}$ によって状態 $\underline{x}_2$ になるような $\underline{u}$ が $\hat{S}$ の入力空間 I に存在するとき、状態 $\underline{x}_2$ は状態 $\underline{x}_1$ から reachable であるという。

定義 8

システム $\hat{S}$ の任意の状態が、他のあらゆる状態から reachable であるとき、 $\hat{S}$ は strongly connected であるという。

定義 9

$\hat{S}_1$ の状態空間のあらゆる状態 $\underline{x}_1$ に対し、 $\hat{S}_2$ の状態空間に少なくとも一つの同値な状態 $\underline{x}_2$ が存在し、かつまた、その逆もいえるときに、 $\hat{S}_1$ と $\hat{S}_2$ は同値であるという。

3. 線形システム

前節において、システムの一般的な定義といくつかの基本的概念について述べたが、本節ではとくに線形システムについて、2, 3の基本事項を述べる。入力空間 I , 出力空間 O , 状態空間 Q が線形空間で、 ϕ, ψ が、それぞれ $I \times Q, Q$ に関して線形であるときに、システム $\hat{S}$ は線形であるといわれる。一般に線形システムの状態方程式は

$$\begin{cases} \frac{d\underline{x}}{dt} = \underline{F}(t)\underline{x} + \underline{G}(t)\underline{u}(t) \\ \underline{y} = \underline{H}(t)\underline{x} \end{cases} \quad (3.1)$$

のように表現されることが知られている。

この方程式は線形常微分方程式ゆえ、その解は、

$$\underline{x}(t) = \Phi(t, t_0)\underline{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)\underline{G}(\tau)\underline{u}(\tau)d\tau \quad (3.2)$$

にて与えられる。ここで $\Phi(t, t_0)$ は $\underline{F}(t)$ によって次のように定義される遷移行列といわれるものである。

$$\begin{cases} \Phi(t, t) = E \quad (E: \text{単位行列}) \\ \Phi(t_2, t_0) = \Phi(t_2, t_1)\Phi(t_1, t_0) \\ \frac{d}{dt}\Phi(t, t_0) = \underline{F}(t)\Phi(t, t_0) \end{cases} \quad (3.3)$$

出力 $\underline{y}(t)$ は、 $t=t_0$ のとき $\underline{x}(t_0)=0$ とすれば

$$\underline{y}(t) = \int_{t_0}^t \underline{H}(t)\Phi(t, \tau)\underline{G}(\tau)\underline{u}(\tau)d\tau \quad (3.4)$$

で与えられる。このとき

$$\underline{W}(t, \tau) = \underline{H}(t)\Phi(t, \tau)\underline{G}(\tau) \quad (3.5)$$

はインパルス応答行列といわれる。

一般に線形システムのインパルス応答行列は計算により簡単に求めることができるが、インパルス応答が与えられたときに、式(3.1)のような線形システムを求めるという問題は容易に求まらないことが多い。この問題はシステムの同定 (Identification) と呼ばれている。なお式(3.1)がインパルス応答 $\underline{W}(t, \tau)$ を実現する系を表わすという意味から、式(3.1)で表わされるシステムを $\underline{W}(t, \tau)$ の realization ということがある。

4. 有限オートマトン

直観的に考えても、計算機が上述のような意味でのシステムを構成することがわかるが、一方実際の面から考えても、計算機のシステム設計は現在のシステム工学上代表的な問題の一つになっている。この節では、計算機の抽象的なモデルの一つである有限オートマトンが、数学的システムとしてはどのように表現されるかを概説する。前節で述べたような、通常のダイナミカルシステムが、空間および時間に関し連続であるのに対し、オートマトンの場合には、少なくとも時間に関して、離散的である点が異なっている。ここでは時間は $t=0, 1, 2, \dots$ のように量子化されているとしておこう。オートマトン M のある時点での入力 $\underline{u}(t)$ とその時点での M の状態 $\underline{x}(t)$ が与えられたときに、次の状態、出力が一意的に定まる場合 M は決定性オートマトンと言い、そうでないとき M は非決定性オートマトンと言われる。ここでは決定性オートマトンについて話を進める。

定義 10

オートマトン M は入力集合 I , 出力集合 O , 状態集合 Q , 入力関数 ϕ , 出力関数 ψ によって決まり、これを次のように表わす。

$$M = \langle I, O, Q, \phi, \psi \rangle$$

ここに I : 入力集合

O : 出力集合

Q : 状態集合

$\phi: Q \times I \rightarrow Q$ (入力関数)

$\psi: Q \times I \rightarrow O$ (出力関数)

すなわち時刻 t で M が状態 x にあり、入力 u を受けると、 M の状態は時刻 t で $\phi(x, u)$ となり、 M の出力は $\psi(x, u)$ となる。ここで Q の要素が有限のときに M は有限オートマトンといわれる。

I^* を I の要素のあらゆる有限系列からなる集合としよう。このとき ϕ, ψ を

$$\begin{cases} \phi: Q \times I^* \rightarrow Q \\ \psi: Q \times I^* \rightarrow O \end{cases}$$

のように容易に拡張できる。以下ではこのように拡張した場合について考えよう。

いま

$$x = a_1 a_2 \cdots a_n \in I^*$$

$$q \in Q, g_1 = \phi(q, a_1), g_k = \phi(g_{k-1}, a_k)$$

また

$$\phi(q, x) = g_n$$

$$\psi(q, x) = \psi(a_n, g_{n-1})$$

としよう。そのとき

$$\phi(\phi(q, x), y) = \phi(q, xy)$$

状態 q に始まる M の入出力関係は

$$M_q: I^* \rightarrow O$$

すなわち $M_q(x) = \psi(q, x)$ で与えられる。

定義 11

二つのオートマトン $M^{(1)}$ と $M^{(2)}$ は

$$\{M_q^{(1)} | q \in Q_{M^{(1)}}\} = \{M_r^{(2)} | r \in Q_{M^{(2)}}\}$$

のときに同値であるといわれる。ここに $Q_{M^{(1)}}$, $Q_{M^{(2)}}$ はオートマトン $M^{(1)}$, $M^{(2)}$ の状態である。

すなわち、 $M^{(1)}$, $M^{(2)}$ が同じ入出力関係の集合からなるとき、 $M^{(1)}$ と $M^{(2)}$ は等価なオートマトンであるという。

定義 12

オートマトンはもしそれより状態数の少ない同値なオートマトンがなければ、既約形であるといわれる。

与えられた二つのオートマトンが同値であるかどうかは、いわゆる Moore の思考実験によって決定でき、また既約オートマトンが一意的に存在することもいえるが、ここではその内容については立ちいって述べない。

定義 13(*)

オートマトン $M = \langle I, O, Q, \phi, \psi \rangle$ と Q の部分集合 F 、初期状態 x_0 が条件:

$$\phi(x_0, a_1 a_2 \cdots a_n) \in F \Leftrightarrow a_1 a_2 \cdots a_n \in G$$

を満たすときに、事象 G は M により実現可能 (あるいは認識可能) といわれる。

定義 14 (*)

有限オートマトンで実現可能な事象を正規事象 (regular event) と称する。

いま、 $a_1, a_2, \dots, a_n$ をオートマトン M への入力系列を形成するアルファベットとする。このとき M によって実現される正規事象は次のように表現できることが知られている。まず正規表現というものを定義する。

(1) 各アルファベット a_i は正規表現で、 ϵ, ϕ も正規表現である。

(2) x と y が正規表現のとき、 $x \vee y, x \cdot y, x^*$ はいずれも正規表現である。

(3) 上記の規則から作られる表現だけが、正規表現である。

この正規表現は、正規事象としての次のような意味を持っている:

(a) 各文字 a_i に対し、 $[a_i]$; ϕ に対し空集合:

ϵ に対し単位集合 (すなわち長さ 0 の系列)

(b) x, y が系列の集合のとき、 $x \vee y$ はその和集合

(c) $x \cdot y$ は x の任意の系列と y の任意の系列をつないで得られるすべての系列

(d) $x^* = \epsilon \vee x \vee x \cdot x \vee x \cdot x \cdot x \vee \dots$

すなわち入力アルファベットが、 $a_1, a_2, \dots, a_n$ のオートマトン M のシステムとしての振舞は、正規事象で表わされることになる。なおオートマトン M 上で定義される関数すなわち入力系列を出力系列に変換する関数はプログラムといわれるが、ある関数

$$f: I^* \rightarrow O$$

は、もし $f = M_q$ となる $q (q \in Q_M)$ が存在するときに、 M によって実現されるといわれる⁽⁸²⁾。

このようにオートマトン理論では、オートマトン、オートマトンで受理される集合 (これを言語という) とプログラムという三つの重要な要素があり、それぞれオートマトン理論、数学的言語理論、プログラム理論として研究されている。

定義 13 で与えたオートマトンによる認識という概念はオートマトンによるパタン認識の問題にあたり、原理的に認識可能な系列と認識不可能な系列などを数学的に取扱ううえに重要である。

5. 可制御性、可観測性

システムの可制御性、可観測性という概念は、次式で与えられるような線形システム $\hat{S}_L$ に対し、Kalman により導入された。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

ここに A, B, C, D は $(n \times n)$, $(n \times r)$, $(p \times n)$, $(p \times r)$ の行列である。 $\underline{x}, \underline{u}, \underline{y}$ は、それぞれ状態ベクトル、入力ベクトル、出力ベクトルである。

定義 15

ある有限時間 T に対して

$$\phi(\underline{x}, \underline{u}(0, T)) = \underline{s}$$

となるような入力 $\underline{u}(0, T)$ が存在するときに、システム $\hat{S}$ の状態 $\underline{x}$ は、可制御であるという。ここに $\underline{s}$ は $\hat{S}$ のある状態であるとする。

定義 16

システム $\hat{S}$ のあらゆる状態が可制御であるときに、システム $\hat{S}$ は可制御であるという。

定理

線形システム $\hat{S}_L$ は

$$[B, AB, \dots, A^{n-1}B]$$

が n 個の線形独立な列ベクトルを含むときにのみ、そのときに限って可制御である。

システム $\hat{S}$ が状態 $\underline{x}$ のときに、零入力 0 に対して、応答が

$$\phi(\underline{x}, 0) = 0$$

のときに、システム $\hat{S}$ の状態 $\underline{x}$ は零状態 0 にあるということにする。このとき、 $\hat{S}$ のあらゆる状態が零状態 0 から reachable であるときに“可制御性”は定義 8 で導入した“strongly connected”という概念と一致することがわかる。

定義 17

いかなる初期状態 $\underline{x}(t_0)$ も、入力 $\underline{u}(t_0, t)$ と出力 $\underline{y}(t_0, t)$ から一意的に決定できるような入力 $\underline{u}(t_0, t)$ が存在するときに、 $\hat{S}$ は初期状態決定性をもつという。

定義 18

線形システム $\hat{S}$ が、初期状態決定性を有するときに、 $\hat{S}$ は可観測であるといわれる。

定理

線形システム $\hat{S}_L$ は

$$[C^*, A^* C^*, \dots, A^{*n-1} C^*]$$

が、 n 個の線形独立な列ベクトルを含むときにのみそのときに限って可観測である。

定義 19

システム $\hat{S}$ は

(1) その状態変化が、入力に関係しないときに、可制御でないとい。

(2) システム $\hat{S}$ の出力が、定数のとき可観測でないという。

可制御性、可観測性に関し、Kalman によって与えられた二つの基本定理を述べておく。次の定理は、可観測性との関係を与えるもので、予測、推定などにおいても重要な役割を演じている。

定理 (双対性定理)

$\hat{S}_L^*$ を $\hat{S}_L$ に双対な線形システムとしよう。すなわち $\hat{S}_L^*$ は

$$\begin{cases} \dot{\underline{\alpha}} = -A^* \underline{\alpha} + C^* \underline{\beta} \\ \underline{\gamma} = B^* \underline{\alpha} - D^* \underline{\beta} \end{cases}$$

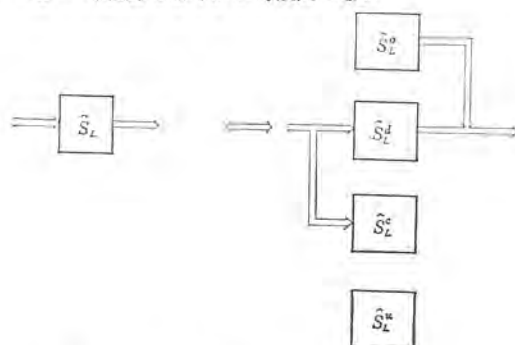
ここに $\underline{\alpha}$, $\underline{\beta}$, $\underline{\gamma}$ はそれぞれ、 n 次、 p 次、 r 次のベクトルである。このときシステム $\hat{S}_L$ は $\hat{S}_L^*$ が可観測のときに限ってそのときにのみ

可制御である。

定理 (標準形定理)

線形システム $\hat{S}_L$ は、次の四つの部分システムに分割できる：

- (1) $\hat{S}_L^d$: 可制御でかつ可観測
- (2) $\hat{S}_L^c$: 可制御でかつ可観測でない
- (3) $\hat{S}_L^0$: 可制御でなくかつ可観測
- (4) $\hat{S}_L^u$: 可制御でなくかつ可観測でない



6. 推定, 予測, 同定, 最適制御

6.1 推定, 予測

入力 $\underline{u}(t)$, 状態を $\underline{x}(t)$, 出力を $\underline{y}(t)$ とし、 $\underline{y}(t)$ に観測雑音 $\underline{d}(t)$ がはいつた観測出力を $\underline{z}(t)$, 状態 $\underline{x}(t)$ に対するシステム雑音を $\underline{\beta}(t)$ とする。このとき、 $\underline{z}(t)$ を $[0, \tau]$ にわたって観測した結果に基づいて $\underline{x}(t)$ の最良推定値 $\hat{\underline{x}}(t|\tau)$ を見い出すことを状態推定の問題という。 $t=\tau$ のときフィルタ問題、 $t>\tau$ のときに予測問題、 $t<\tau$ のときに平滑問題という。

$E(\|\hat{\underline{x}}(t) - \underline{x}(t)\|^2)$ を最小にするものを最良推定として考えるのが Wiener フィルタで、その解は

$$\hat{\underline{x}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \underline{z}(\tau) d\tau$$

で与えられる。ここに $g(\tau)$ は、いわゆる Wiener-Hopf の方程式

$$\varphi_{zy}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \varphi_{zz}(t-\tau) d\tau \quad (t>0)$$

の解として与えられる。 φ_{zy} , φ_{zz} はそれぞれ、相互相関関数、自己相関関数で次式で与えられる。

$$\begin{cases} \varphi_{zy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \underline{z}(t-\sigma) \underline{y}(\sigma) d\sigma \\ \varphi_{zz}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \underline{z}(t-\sigma) \underline{z}(\sigma) d\sigma \end{cases}$$

システムの状態方程式が、次のような線形微分方程式で表わされる場合を考えよう。システムが

$$\begin{cases} \frac{d\underline{x}(t)}{dt} = F(t) \underline{x}(t) + G(t) \underline{\beta}(t) \\ \underline{y}(t) = H(t) \underline{x}(t) \\ \underline{z}(t) = \underline{y}(t) + \underline{d}(t) \end{cases}$$

で与えられるとき、 $E(\underline{x}(t|\tau) - \underline{x}(t)) = 0$ で $E(\|\underline{x}(t|\tau) - \underline{x}(t)\|^2)$ を最小にするものを最良推定とするのが、Kalman-Bucy フィルタといわれるものである。ここに

$$\begin{cases} E(\underline{\beta}(t)) = 0 \\ \text{cov}[\underline{\beta}(t), \underline{\beta}(\tau)] = E(\underline{\beta}(t)\underline{\beta}'(\tau)) = Q(t)\delta(t-\tau) \\ E(\underline{\Delta}(t)) = 0 \\ \text{cov}[\underline{\Delta}(t), \underline{\Delta}(\tau)] = E(\underline{\Delta}(t)\underline{\Delta}'(\tau)) = R(t)\delta(t-\tau) \\ \text{cov}[\underline{\beta}(t), \underline{\Delta}(\tau)] = 0 \end{cases}$$

(δ は Dirac デルタ 関数とする。)

$Q(t)$, $R(t)$ は symmetric non-negative definite matrix である。最適推定量 $\hat{\underline{x}}(t|\tau)$ は次の線形システム方程式で与えられる。

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\underline{x}}}{dt} = F(t)\hat{\underline{x}}(t|\tau) + K(t)\bar{\underline{z}}(t|\tau) \\ \bar{\underline{z}}(t|\tau) = \underline{z}(t) - H(t)\hat{\underline{x}}(t|\tau) \end{cases}$$

ここに $\hat{\underline{x}}(t|\tau)$ 初期状態は 0 である。

いま

$$\bar{\underline{x}}(t|\tau) = \underline{x}(t) - \hat{\underline{x}}(t|\tau)$$

としよう。 $\bar{\underline{x}}(t|\tau)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\underline{x}}(t|\tau)}{dt} &= F(t)\bar{\underline{x}}(t|\tau) + G(t)\underline{\beta}(t) \\ &\quad - K(t)\{\underline{\Delta}(t) + H(t)\bar{\underline{x}}(t|\tau)\} \end{aligned}$$

ここで $P(t) = \text{cov}[\bar{\underline{x}}(t|\tau), \bar{\underline{x}}(t|\tau)]$ としたとき

$$K(t) = P(t)H'(t)R^{-1}(t)$$

であることが示される。ここに $P(t)$ は行列微分方程式

$$\begin{aligned} \frac{dP(t)}{dt} &= F(t)P + PF'(t) - PH'(t)R^{-1}(t)H(t)P \\ &\quad + G(t)Q(t)G'(t) \end{aligned}$$

の解として得られる⁽¹⁸⁾。

6.2 同定

$\underline{u}(t)$: 入力

$\underline{x}(t)$: 状態

$\underline{y}(t)$: 出力

$\underline{z}(t) = \underline{y}(t) + \underline{\Delta}(t)$: 観測出力

$$\frac{d\underline{x}(t)}{dt} = F(t)\underline{x}(t) + G(t)\underline{u}(t)$$

状態 $\underline{x}(t)$ に対するシステム雑音を $\underline{\beta}(t)$ とする。

入力 $\underline{u}(t)$, $t \in [-\infty, \tau]$ および 観測出力 $\underline{z}(t)$, $t \in [0, \tau]$ を観測した結果に基づいて、ある入力 $\underline{u}(t)$ に対する $\underline{x}(t)$ の最良推定値を見いだすことを、システムの同定という。

$$\begin{cases} \frac{d\underline{x}(t)}{dt} = F(t)\underline{x}(t) + G(t)\underline{u}(t) \\ \underline{x}(0) = \underline{x}_0 \end{cases}$$

という簡単な場合は、

$$\begin{cases} \frac{d\Phi(t, 0)}{dt} = F(t)\Phi(t, 0) \\ \Phi(0, 0) = E \end{cases}$$

の解 $\Phi(t, 0)$ が求められると、 $\underline{u}(t)$, $t \in [0, \tau]$ から $\underline{x}(t)$ を与える解は、

$$\underline{x}(t) = \Phi(t, 0)\underline{x}(0) + \int_0^t \Phi(t, \tau)G(\tau)\underline{u}(\tau)d\tau$$

として与えられる。したがって $\Phi(t, 0)$ を一意的に決定できれば、同定可能である。

いま $\underline{x}(t)$ を $t=0, T, 2T, \dots, (n-1)T$ において n 回観測し、その結果をならべて得られる行列

$$[\underline{x}(0), \underline{x}(1), \dots, \underline{x}(n-1)]$$

が、non-singular であれば、 $\Phi(t, 0)$ を一意的に決定できる。これを n -同定可能であるという。 $\underline{y}(t)$ を観測して同定であるための必要十分条件は、可観測でかつ n -同定可能であることである。

6.3 最適制御

制御の問題では最適制御方式を探すことは、実用上最も重要なことのひとつである。入力 $\underline{u}$ により出力 $\underline{y}$ への作用素が与えられているときに、 $\underline{y}$ と $\underline{u}$ に関するはん(汎)関数で与えられる評価関数を最大(あるいは最小)にする入力 $\underline{u}$ を探す問題を最適制御問題という。

この問題は、システムが代数方程式で記述される場合には、

$$\min\{h(\underline{y}, \underline{u}) \mid f(\underline{y}, \underline{u}) = 0, g(\underline{y}, \underline{u}) \leq 0\}$$

のように問題を表わすことができ、線形の場合、簡単な非線形の場合は、線形計画法、非線形計画法、あるいは一般行列を用いたりして解かれている。

システムが常微分方程式で与えられるときは

$$\begin{aligned} \min_{\underline{u}} \left\{ J = \gamma(\underline{x}(T)) + \int_0^T h(\underline{u}, \underline{x})dt \right. \\ \left. \left| \frac{d\underline{x}}{dt} = f(\underline{x}, \underline{u}), \underline{x}(0) = \underline{x}_0, g(\underline{x}, \underline{u}) \leq 0, t \in [0, T] \right\} \end{aligned}$$

であらわされる変分問題となり、変分法、ダイミックスプログラミング、最大原理を用いて、簡単な場合に関しては解かれている。

7. 線形オートマトン

オートマトンは、その状態方程式が

$$\begin{cases} \underline{x}(t+1) = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t) \\ \underline{y}(t) = C\underline{x}(t) + D\underline{u}(t) \end{cases}$$

で与えられるときに、線形オートマトンであるといわれる。上式で与えられるオートマトンを M_L と記すことにする。線形オートマトンの性質はかなりよく知られているが、ここでは、前節で述べた可制御性、可観測性という、線形システムでの基本概念が線形オートマトンの場合についてもいえることと、その意味を説明する。

オートマトン M は、 M の任意の状態が、 M のあらゆる状態から到達できるときに“strongly connected”であるといわれる。また (i, j)

のあらゆる対に関して、 M の状態 x_i から状態 x_j へ m ステップで到達できるときに、 M は m -可制御であるといわれる。オートマトン M が m -可制御であるような m が存在するときに M は可制御であるといわれる。

定理

$$K_m^c = [B, AB, \dots, A^{m-1}B]$$

としたとき、 K_m^c に n 個の線形独立な列ベクトルがあるときそのときに限り、オートマトン M_L は m -可制御である。

線形オートマトンは、 n -可制御であれば可制御である。線形オートマトンの可制御性は、所望の状態が、 m ステップで確かに到達できることを保証する点にその重要さがある。 m が一意的でない場合、最小の m は、メモリアドレスの最小アクセス時間であることを意味している。

オートマトン理論の場合には、可観測性ということはオートマトンの診断可能性ということに当り、それは次のように定義される。

定義 20

オートマトン M_L の初期状態が、常に入出力関係の検査から決定されるときに、オートマトン M_L は診断可能（可観測）であるといわれる。すなわち

$$\underline{x}(0) = f(\underline{u}(0), \dots, \underline{u}(m), \underline{y}(0), \dots, \underline{y}(0))$$

となるような m が存在するとき M_L は診断可能であるといわれる。

定理

線形オートマトン M_L は

$$K_n^D = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

が、 n 個の線形独立な行ベクトルを含むときそのときに限って、診断可能である。

定理

線形オートマトン M_L は、 M_L が診断可能であるときそのときに限り、既約形である。

8. 確率オートマトンと Fuzzy オートマトン

8.1 確率オートマトン

確率オートマトンは次のように定義される。

定義 21

確率オートマトン M_p は $M_p = \langle I, O, Q, P \rangle$ で与えられる。

ここに I : 入力集合

O : 出力集合

Q : 状態集合

P : 条件付確率 $P(x', y | x, u)$

$$u \in I; y \in O; x, x' \in Q$$

このようなオートマトンは、情報理論における通信路のモデルとして、

Shannon によって導入されたものと同じである。

定義 22

いま

$$p_x(y_1, y_2, \dots, y_n | u_1, u_2, \dots, u_n) = \sum_{x_k \in Q} \prod_{k=1}^n P(x_{k+1}, y_k | x_k, u_k)$$

$$x_1 = x$$

は状態 x で始まり、入力 $u_1, \dots, u_n$ を受けたときに出力として $y_1, \dots, y_n$ を得る確率であるとしよう。このとき M_p の状態 x, x' は同じ入出力関係を与えると、すなわち $p_x(\cdot | \cdot) \equiv p_{x'}(\cdot | \cdot)$ のときに同値であるといわれる。

確率オートマトン M_p は r 個の状態を持っているとする。 $M(y|u)$ は (i, j) 要素として $m_{ij}(y|u) = P(j, y | i, u)$ を持つ $r \times r$ の行列とする。このとき

$$M(x) = \sum_{y \in O} M(y|u)$$

はマルコフ行列で、状態遷移行列とも呼ばれる。 $m_{ij}(u)$ は M_p が状態 i のときに入力 u を受けたとき、状態 j へ移る確率である。

定理

$$p_x(y_1 y_2 \dots y_{r-1} | u_1 u_2 \dots u_{r-1}) = p_{x'}(y_1 y_2 \dots y_{r-1} | u_1 u_2 \dots u_{r-1})$$

は x と x' が同値であるための十分条件である。

確率オートマトンは、次のように定義してもよい。

定義 23

入力集合 I に関する確率オートマトン M_p は $M_p = \langle Q, \tilde{M}, s_1, F \rangle$ で与えられる。ここに

Q : r 個の状態集合

$\tilde{M}$: 各入力 u に対し、 $\tilde{M}(u)$ はマルコフ行列

s_1 : 初期状態

$F \subseteq Q$: 指定された最終状態

定義 24(*)

M_p に対し $I^*(I$ の要素の有限系列の集合) の部分集合

$T(M_p, \lambda)$ を

$$T(M_p, \lambda) = \{u | u \in I^*, p(u) > \lambda\}$$

とする。ここに

$$p(u) = \sum_{j \in F} m_{ij}(u) \quad (0 \leq \lambda < 1)$$

このとき、もし $u \in T(M_p, \lambda)$ なら u は cut-point λ で、 M によって受理されるということにする。

定義 25(*)

あらゆる $u \in I^*$ に対し、 $|p(u) - \lambda| \geq \delta$ であるような、 $\delta(>0)$ が存在するとき cut-point λ は M_p に関し、孤立していると呼ばれる。

定理(*)

(1) $T(M_p, \lambda)$ が有限オートマトンで実現できないような、確率オートマトンと cut-point λ が存在する。

(2) もし M_p が孤立した cut-point λ を持つとき、 $T(M_p, \lambda)$ は有限オートマトンで実現できる。

8.2 Fuzzy オートマトン(*)

集合の Fuzziness という概念は, Zadeh によって境界のはっきりしない集合を記述するのに導入されたものである。空間 X における Fuzzy 集合 A とは

$$0 \leq f_A(x) \leq 1; x \in X$$

なる membership 関数 $f_A(x)$ によって特性づけられた集合で, $f_A(x)$ は x が A に属する度合を表わすものである。

Fuzzy 集合の演算は次のように定義される。

$$\text{和集合 } C = A \cup B \Leftrightarrow f_C(x) = \max[f_A(x), f_B(x)]$$

$$\text{共通集合 } C = A \cap B \Leftrightarrow f_C(x) = \min[f_A(x), f_B(x)]$$

$$\text{包含関係 } A \subseteq B \Leftrightarrow f_A(x) \leq f_B(x)$$

$$\text{補集合 } \bar{A} \Leftrightarrow f_{\bar{A}}(x) = 1 - f_A(x)$$

このような Fuzzy 集合は, 論理的な面からは本質的に連続値を取る論理と変わらないが, システム理論のうえからは人間を preference のようなものを Fuzzy 関係である程度表現できるおもしろさがある。

定義 26

Fuzzy オートマトン M_F は $M_F = \langle I, O, Q, f, g, h \rangle$ で与えられる。ここに

I : 入力集合

O : 出力集合

Q : 状態集合

$f: Q \times I \times T \rightarrow [0, 1]$

$$f(x, e, x', n) = \begin{cases} 1 & \text{if } x = x' \\ 0 & \text{if } x \neq x' \end{cases}$$

$$f(x, u^*u, x', n) = \max_{x'' \in Q} \{ \min [f(x, u^*, x'', n), f(x'', u, x', n + \text{length}(u^*))] \}$$

$g: Q \times I \times O \times T \rightarrow [0, 1]$

$$g(x, u^*, v^*, n) = 0 \text{ if } \text{length}(u^*) \neq \text{length}(v^*)$$

$$g(x, e, e, n) = 1$$

$$g(x, u^*u, v^*v, n) = \min \{ g(x, u^*, v^*, n), \max_{x'' \in Q} [\min \{ g(x, u^*, x'', n), g(x'', u, v, n + \text{length}(u^*)) \}] \}$$

$h: Q \times T \rightarrow [0, 1]$

ここに T は時間スケール, u^* は入力系列の集合 I^* の要素, v^* は出力系列の集合 O^* の要素である。 f, g, h が時間に独立のときに, オートマトン M_F は定常 Fuzzy オートマトンであるといわれる。

上記のように, 状態遷移関数 f が $\max \min$ の演算で与えられるものを, pessimistic fuzzy オートマトンということがある。状態遷移関数が $\min \max$ の演算になるものもうえと同様の仕方, 定義できるが, そのような Fuzzy オートマトンを optimistic fuzzy オートマトンという。

9. システム理論のその他の側面

本文において, システム理論の基礎的諸概念について概説したが, 数多くの重要な概念について紙数の関係もあり, 説明をばいた。

以下に, 本文で述べなかった現代システム理論のトピックスの題目だけをリストし, 本講を終わることにする。

- (1) システムの代数的構造理論
- (2) 統計的制御系
- (3) 適応制御, 学習制御, パターン認識, 自己組織系
- (4) 安定問題
- (5) システムの分解, 多重レベル制御
- (6) 最適制御と数学計画法
- (7) 予測理論・フィルタ理論・計画理論
- (8) Branch 空間における制御理論
- (9) 分布定数形制御系
- (10) ゲームの理論・戦略理論
- (11) 古典制御理論と現代的システム理論の関係
- (12) 回路網のダイナミカルシステム理論による表現・解析
- (13) グラフ理論によるシステム解析
- (14) オートマトンの代数的理論
- (15) 位相オートマトン
- (16) 数学基礎論的側面
- (17) システム理論, オートマトン理論, 言語理論, フォーム理論の関係
- (18) システム理論, 情報理論, 経営システムの関係
- (19) 人工知能とその応用

このうちいくつかはシステム理論に関する本講座(II)以下で論じられるはずである。

最後に日ごろご指導いただいている馬場準一博士に深謝の意を表す。
(昭44—4—30受付)

参考文献

- (1) M. Aoki: Optimization of Stochastic Systems, Academic Press (1967)
- (2) M. Arbib: A common framework for automata theory and control theory, J. SIAM, Control, 3, (1965)
- (3) M. Athans: The status [of optimal control theory and applications for deterministic systems, Trans IEEE on AC, (July 1966)
- (4) 馬場準一: システム工学の考え方, 制御工学 10, (昭41—10)
- (5) A. V. Balakrishnan: Optimal control problems in Banach spaces, SIAM Control, 3, (1965)
- (6) R. Bellman: Dynamic Programming, Princeton, Princeton University Press (1957)
- (7) R. Bellman: Mathematical Optimization Techniques
- (8) R. Bucy, P. Joseph: Filtering for Stochastic Processes with Applications (1968)
- (9) R. Brockett: The status of stability for deterministic systems, Trans IEEE on AC (July 1966)

- (10) G. Dantzig : Linear Programming and Extensions, Princeton University, Princeton (1963)
- (11) E. Farmer : A method of prediction for non-stationary Processes and its Application to the Problem of Load Estimation, Proc. IFAC (1963)
- (12) J. Fox : System Theory, Polytechnic Press (1965)
- (13) Y. Ho & R. Lee : Identification of linear dynamical systems, Information and Control, 8, (1965)
- (14) Y. Ho : On stochastic approximation method and optimal filtering theory, J. Math. Analysis & Appl. (1962)
- (15) R. Kalman : On the general theory of control systems, Proc. IFAC, Moscow (1960)
- (16) R. Kalman : Mathematical description of linear dynamical systems, JSIAM Control, 1, (1963)
- (17) R. Kalman : Algebraic structure of linear dynamical systems, Proc. N. A. S. 54, (1965)
- (18) R. Kalman & R. Bucy : New results in linear filtering and prediction theory, Journal of Basic Eng., Trans ASME, Series D, 83, (1961)
- (19) 児玉慎三 : 分解原理の最適制御への応用, 計測と制御, 7, 2 (昭 43)
- (20) N. Nilsson : Learning Machines, McGraw-Hill, New York (1965)
- (21) 坂和愛幸 : 最近の制御理論からの話題, 計測と制御, 7, (昭 43)
- (22) 佐藤・市川 : 多重レベル制御系, 計測と制御, 7, (昭 43)
- (23) C. Shannon : Mathematical theory of communication, Univ. of Illinois Press (1948)
- (24) 高橋安人 : システムと制御, 岩波書店 (昭 43)
- (25) L. Zadeh : Fuzzy Sets, Information and Control, 8, (1965)
- (26) L. Zadeh & C. Desoer : Linear System Theory, McGraw-Hill (1963)
- (27) M. Arbib : Algebraic Theory of Machines, Languages and Semi-groups, Academic Press (1968)
- (28) N. Chomsky : Formal properties of grammars, Handbook of Math. Psych., 2, Wiley, New York (1963)
- (29) M. Cohn : Properties of Linear Machines, JACM, 11, (1964)
- (30) S. Ginsburg : Mathematical Theory of Context-Free Languages, McGraw-Hill (1965)
- (31) M. Harrison : Introduction to Switching and Automata Theory, McGraw-Hill (1965)
- (32) 伊藤貴康 : プログラム理論について, 電子通信学会オートマトンと自動制御研究会資料 (昭 44-4)
- (33) T. Ito : Some Formal Properties of a Class of Program Schemata, Proc. IEEE Switching and Automata Theory Symposium (1968)
- (34) 伊藤貴康 : 機械における学習, 三菱電機技報, 39, (昭 40)
- (35) E. Moore : Gedanken Experiments on Sequential Machines, Automata Studies, (C. Shannon) Princeton Univ. Press (1956)
- (36) M. Rabin : Probabilistic Automata, Information and Control, 6, (1963)
- (37) M. Rabin and D. Scott : Finite Automata and their decision problems, IBM Journal Res. & Dev, 3, No. 2 (1959)
- (38) E. Santos & W. Wee : General formulation of sequential machines, Information and Control, 12, (1968)
- (39) T. Bashkow : The A matrix, new network description, IRE Trans. CT-4 (1957)
- (40) R. Bott and R. Duffin : On the algebra of networks, Trans AMS 74, (1953)
- (41) A. Ben-Israel and A. Charnes : Generalized Inverse and the Bott-Duffin Network Analysis, Journal of Math. Analysis & Appl. (1963)
- (42) R. Brayton and J. Moser : A theory of non-linear networks I, II, Quarterly of applied mathematics, 22, (1964)
- (43) 渡部和 : 回路のトポロジー, 電気通信学会誌, 45, (昭 37)
- (44) 渡部和 : 集積回路解析のための回路基礎理論, 電気学会誌 89, (昭 44)
- (45) M. Minsky : Steps toward artificial intelligence, Proc. IEEE, 49, (1961)
- (46) G. Nagy : State of the Art in Pattern Recognition, Proc. IEEE, 56, 5 (1968)



新製品紹介

新形「三菱オイルポンプ」シリーズ完成

三菱電動油ポンプは、切削剤・研削剤用ポンプとして工作機械はじめ各種機械に採用され好評を博しているが、最近工作機械の高速化、切削工具の進歩発展に伴い、より高性能なポンプが要望されるようになってきた。この要望に応ずるため、装いも新たに次のような数々の特長をもった新形「三菱オイルポンプ」シリーズを完成した。

特 長

- (1) ポンプ吐出量の大幅な向上
- (2) 自吸吸入高さの大幅な向上 (NP 形)
- (3) 油面限界 (上限, 下限) の表示 (NQ 形)
- (4) あらゆる機械にマッチするスマートなデザイン
- (5) 大きく見やすい点検窓 (150 E 以下)
- (6) 耐久力の向上
- (7) E 種絶縁の採用
- (8) ISO ねじの全面的採用

機 種

表 1 のように、NP 形 NQ 形各機種で旧形と同様の呼び名とし形名のあとに「E」をつけている。

オイルポンプ機種一覧表

形 名	モートル仕様三相かご形モートル					構 造
	出力 (W)	極 数	電 圧 (V)	周波数 (Hz)		
床 置 形	NP-50 E	50	2	200/200/220	50/60/60	全 閉 形
	NP-75 E	75	2	200/200/220	50/60/60	全 閉 形
	NP-150 E	150	2	200/200/220	50/60/60	全 閉 形
	NP-250 E	250	2	200/200/220	50/60/60	全閉外扇形
	NP-400 E	400	2	200/200/220	50/60/60	全閉外扇形
浸 油 形	NQ-50 E	50	2	200/200/220	50/60/60	全 閉 形
	NQ-75 E	75	2	200/200/220	50/60/60	全 閉 形
	NQ-150 E	150	2	200/200/220	50/60/60	全 閉 形
	NQ-250 E	250	2	200/200/220	50/60/60	全閉外扇形
	NQ-400 E	400	2	200/200/220	50/60/60	全閉外扇形

構 造

- (1) 外観は、図に示すように円すい (錐) をベースとしており安定した感じのものとなっている。
- (2) モートル部とポンプ部の固定締付けは外部で行なえるように統一した。
- (3) メカニカルシールは、最近よく使用されるアルカリ性切削剤に強いものを新しく採用した。
- (4) ポンプ羽根車 (インペラ) は、オイルポンプ専用に新しく開発された (特許申請中) ものを使用している。

[名古屋製作所]



新形オイルポンプシリーズ

テクスねじ用電気ドライバ

自動車工場、アルミサッシ組立、その他部品関係の締付け用ねじとして最近 テクスねじが多く使用されてきた。

このねじは従来、ねじ下穴をあけ、タッパにてねじを切り、締めつけねじを使用してねじ締めつけを行っていたものを、ねじ自身で下穴加工、ねじ切りを行ない、締めつけも同時に行なえるもので、大変能率よくねじの締めつけができるものである。

このねじの締めつけ用として新たに開発したのが、この電気ドライバで従来の電気ドライバのようにただ単にねじの締めつけのみでなく、穴あけ加工、ねじ切り加工を行なうため、電動機の大さき、および、回転数が異なるとともに、締めつけ時のトルクをコントロールするクラッチがつけられていて、常に確実な締めつけができるようになっている。

1. 用途

テクスねじ締めつけ用が主用途であるが、一般用ねじの締めつけにも使用できる。テクスねじは主として鋼板にねじを切り、締めつける等の使用が多く、自動車工場、板金工場、サッシ工場、大工作業等に使用されている。

2. 特長

(1) 二重絶縁で感電の心配がない。

外被がプラスチックで製作されており、電気的に安全な二重絶縁構造であり、アースをとる必要がない。

(2) 締めつけ力のコントロールが容易にできる。

締めつけ力のコントロールを行なうため調整可能な、ストッパーをつけて作業性を容易にするとともに確実な締めつけが可能である。

(3) 正逆回転スイッチ付きで、締めつけ、ゆるめが容易にできる。

(4) 製品箱付きで作業現場に持ち運びできる。

3. 仕様

形名	容量 mm	出力 W	電 源			全負荷 電 流 A	無負荷 回転数 rpm	重 量 kg	付 属 品
			種 類	電 圧 V	周波数 Hz				
NS-6 A-1	テクスねじ 6	160	単 相 交 流	100	50/60	3.2	2,800	2.0	プラスビット (No. 2両頭) 2 個 予備カーボン ブラシ 1 組 製品箱 1 個

[福岡製作所]



テクスねじ用電気ドライバ

MEL-PACK 500 ノーガスアーク溶接機

しゃへいガスを使用しないノーガス溶接法は、風の影響が大きい屋外現場溶接における有力な自動化の手段として、従来から鋼管坑の継手溶接などに使用されていた。最近になって、ワイメーカの努力により、ワイの機械的性能の向上(特に衝撃値)、2.4φワイの開発による作業性の向上が計られ、超高層ビルの建設ムードと相まって建築業界や、溶接工不

新製品紹介

足から徹底的な省力化の迫られている造船業界へ大幅に採用される機運にある。
当社では従来から SN-500 A ノーガス形溶接機を製作販売し大きな実績をおさめていたが、このような状況に対処して、アーク特性、操作性、耐久性について試作改良を積み重ね、新たに Package type の MEL-PACK 500 を完成した。

- 特 長
- (1) 屋外現場溶接に威力を発揮する Package 方式。
ノーガスワイヤの防湿、ワイヤ送給部の防じん(塵)コントロール、主要機構の保護など、過酷な条件で使用される現場溶接には最適な構造である。
 - (2) 可搬性にすぐれ、手溶接と同様な機動性。
重量わずか 1 kg と軽量さに加えて、人間工学的に設計された取っ手の形状、位置により、建築、造船など足場の悪いところでも手軽に持ち運びできる。
 - (3) SLC 方式とダブルローラ機構により完ぺきなアーク長制御。
整流器回路における減速時の応答性を改善した SLC 方式と、ダブルローラ、ワイヤガイド、潤滑剤注入構造などのワイヤ送給機構の組合わせで、常にアーク長が正確にコントロールされる。
 - (4) 操作性が容易。
溶接トーチのハンドル形状、コンジットケーブルの柔軟性の改善、ワイヤ送給装置の内部点検窓(ワイヤ残量、ワイヤ送給部)調整部の形状など使いやすさ重点の数々の構造。
 - (5) 保守点検が容易。
全無接点化の制御回路により信頼性を著しく向上した。またつまみねじ一つで内部点検が可能な構造としている。



MEL-PACK 500 ノーガスアーク 溶接機

MEL-PACK 500 仕様一覧表

総 合 形 名		SN-500 B
適 用 電 源		AC 垂下特性 (例, MA-500 交流アーク溶接機)
定 格 電 流 (A)		500
使 用 率 (%)		60
ワイヤ送給装置	形 名	SN-500 B
	使用ワイヤ径 (mm)	3.2(2.4) 2.4φ 用は駆動ローラ変更
	ワイヤ送給速度 (m/min)	0.5~6
	ワイヤ送給部	ダブルローラ方式
	制 御 方 式	サイリスタ制御, SLC 方式
	制 御 部	内蔵, プリント板コネクター式
	重 量 (kg)	18
	外 形 寸 法 (mm)	230×475×555
溶接トーチ	形 名	MV-501 B
	使用ワイヤ径 (mm)	3.2(2.4) 2.4φ 用はチップチップロテクタ変更
	コンジット長 (m)	3
	冷 却 方 式	自 然 冷 却

[名古屋製作所]

携帯用電気みぞ切機

現在好評販売中の EG-21 A-1 形 電気みぞ切機を一段と強力にし、使いやすいものにし

て、市場の要求に合わせて改良し、形名を EG-21 B-1 形にあらためたので発表する。

1. おもな改良点

- (1) 電動機出力を大にし、強力にした。出力 500 W→550 W に変更。
- (2) カッター (18 mm 幅～36 mm 幅) の取付寸法を変更し、他社品のカッターも取付けられるようにした。
- (3) ふち欠け防止板を片側調整式とした。
- (4) 定盤を軽くて、強い アルミダイカスト 製にするとともに切削粉の排出が容易にできる形状にした。
- (5) 目盛板を見やすくし、丈夫にした。
- (6) スタンド を板金製とし、一体化して取付、取りはずしを容易にした。
- (7) 国際ねじを使用した (ISO ねじ化)。

2. 仕 様

形 名	最 大 容 量 mm	電 源			出力 W	全負荷 電 流 A	無 負 荷 回 転 速 度 rpm	重量 kg	付 属 品
		種類	電圧 V	周波数 Hz					
EG-21 B-1	カッター 切 削 幅 36 切込深さ 28.5	単相 交流	100	50/60	550	11	5,000	7.8	カッター 1 個
	丸のこ 外 径 203 切込深さ 67.5								スタンド 1 個
									丸のこ 1 個
									といし 1 個
									定 規 1 個
									道具箱 1 個
									のこ用定規 1 個
									のこ用フレンジ 1 個
									スパナ 1 個
									のこ用定盤 1 個
									製品箱 1 個
									予備炭素ブラシ 1 組

3. 特 長

- (1) 特性の良い、強力な電動機を使用しているのので、強力な切削、切断が可能。
- (2) カッターが自由に取付けられる。
他社品のカッターを手持ちの場合でも使用できるので便利。
- (3) ふち欠け防止板を調整式とした。
ふち欠け防止板を調整式としたので、防止板を損傷することなく、刃幅が変わってもふち欠け防止の効果が大きい。
- (4) アルミダイカスト 製の使いやすい定盤。
目盛板を見やすく、丈夫にし、定盤の形状を切削粉の排出が便利になるように変更したので、作業が便利になった。
- (5) スタンド の取付けを簡単にした。
アングル 製 2 本脚式を板金製として一体化し、取付け、取りはずしが容易になったので、スタンド式の丸のこ作業等が安全に作業ができるようになった。
- (6) のこ用定盤を付属しのこ作業が容易になった

[福岡製作所]



携帯用電気みぞ切機 (EG-21 B-1 形)

放電加工機用最適制御装置「オブティマイザー」

放電加工機は電源に半導体スイッチング素子を採用したことによって性能が画期的に向上し、今日のような隆盛を見るに至った。すなわち、従属形コンデンサ放電回路にくらべれば独立形の半導体電源ははるかに安定、高能率な加工を行ない4～6倍の高い生産性が得られる。しかしながら複雑な形状で加工液の流通が不十分な場合には、加工の進行状況に応じて、最も安定、能率のよいパルス条件に操作者が調整する必要があった。したがって、加工能率が操作者の経験、勘によって左右されることは否めない事実であった。人手不足の今日、熟練作業者の確保は非常に困難であり、省力化が強く望まれていた。

このたび、当社は、加工現象の時々刻々の変化に対して、最も安定した、最も能率の高い加工条件を自動的に選定する最適制御装置を開発した。これはアダプティブコントロール装置とプログラムコントロール装置とからなっており、アダプティブコントロール装置は予測できない加工現象の変化に対して最も安定、高能率な加工条件を自動的に選定し、一方、プログラムコントロール装置は荒、中、仕上と加工段階に応じて放電パルスのエネルギーを自動的に切りかえてゆく。この両方の機能を適用することによって、加工を始めるに当たって、要求精度に相応する条件を一度セットするだけで、その後は完全な無人運転ができるようになる。この最適制御装置オブティマイザーの開発によって、省力投資の対象として、ダイアックス放電加工機の受注増大が大いに期待される。

特長

(1) 世界最初の本格的放電加工機最適制御装置である。

従来のものはプログラムコントロールが主体であり、記憶装置と判断装置をもった、アダプティブコントロール機能を含むものはこれが最初である。

(2) 画期的な定常アーク前駆現象検出回路がついている。

アダプティブコントロールの最も基本的問題は現象の検出にあるが、オブティマイザーは画期的な放電現象検出方式を備えている。

(3) 誰が操作しても熟練者が注意深く加工するとき同様の加工ができる。

放電現象の検出にもとづく信号によって、安定な範囲で最も能率のよい条件を試行錯誤によって自動的に見出し、加工を行なうので個人差がなく高能率の加工ができる。

(4) 連続無人運転の信頼度が抜群に高い。

放電状態の検出は従来のように平均値的な検出でなく、デジタル的に放電パルスの一発々々について行ない、定常アーク前駆現象をすみやかにとらえるので、危険な状態に移行することが全くない。

(5) 数値制御化された深さ位置決め装置がついている。

(6) ダイアックストランジスタ電源シリーズと組合せて使用できる。

[名古屋製作所]



オブティマイザー
OP-1 形

トランジスタ電源
DE-90 T

放電加工機
DM-300



NEWS FLASH

可変プログラム方式総括制御装置 MELMAC

本装置はベルトコンベヤ加工機ラインなどから成る諸設備の総括制御用として、開発された可変プログラム方式制御装置である。

総括制御装置においては、設備の合理化等により、しばしば改造・増設があり、制御装置の変更にも多大の労力を費やしていた。また設備自体も近年ますます多数、複雑な系統となり、従来の制御方式では短納期製作が困難になった。これに対処するため今回、開発した MELMAC は、次の点を特に考慮している。

(1) 設備仕様の概要が判明した時点でハードウェアの製作開始が可能であり、仕様打合わせと並行して製作できること。

(2) 実動後の設備の増設や変更に対応でき、改造に要する時間がきわめて短時間であること。

(3) 装置の保守、点検が容易であること。

(4) 装置の部品は標準化され、回路は標準パターンで構成されていること。

MELMAC は上記各項目の要求を満たせしめるものであり、特長として

(1) 制御回路は固定部分と可変部分に分けられ、必要最小限のフレキシビリティを考慮し、回路方式は簡明な方式となっている。

固定部品は、各種機器ユニット（プリントカード）および主幹ユニット（トランジスタパック）より構成され、可変部分はピンマトリックス、AND 回路、OR 回路より構成された可変プログラム回路方式となっている。

可変部品は大きくわけて3ブロックに分けられる。

(イ) システム設定ボード

本ボードはシステムスイッチ・停止スイッチおよびタイマーブロックからの信号を処理して、各機器ユニットの系統を設定する。

(ロ) 機器インターロックボード

機器ユニットで機器個々変わる補機モータ、リミットスイッチ等からなる起動インターロック、運転インターロック信号を本ボードにて設定する。

(ハ) 機器間インターロック

本ボードは各機器相互間のインターロックを運転フローに従って、設定するもので、AND、OR 回路を有するマトリックスボードにて設定する。

(2) シリコントランジスタ、ダイオードを使用した無接点方式論理回路で構成され、信頼性が高く、制御電力が少ない。

(3) 保守点検が容易である。

(イ) 機能ごとにユニット化され、チェック端子が十分準備されているため点検が容易である。

(ロ) モータ制御回路はプリントカードユニットになっており、スベアと機械的に差換えることで故障を発見し、故障回復を行なえる。

(ハ) カードユニットは、オフラインに準備されたカードチェッカでチェックし、容易に故障原因を除去できる。

MELMAC 一般仕様

- | | |
|----------------|----------------------|
| (1) 回路素子 | シリコントランジスタ使用の NOR 要素 |
| (2) 制御方式 | タイマー 順序起動方式 |
| (3) 系統選択 | マトリックスピンボード |
| (4) 機器間インターロック | マトリックスピンボード |
| (5) 機器インターロック | マトリックスピンボード |

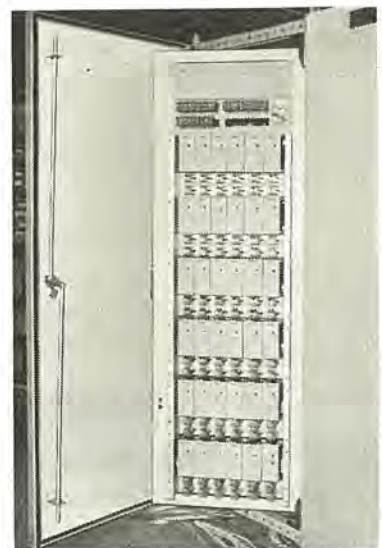


図 1 MELMAC 機器ユニット実装外観

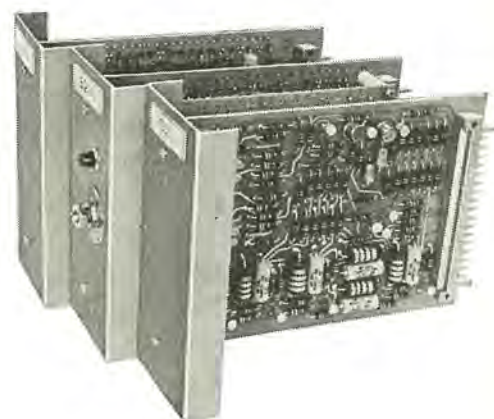


図 2 機器ユニットカード

- (6) 警報信号選択 マトリックスピンボード
- (7) 入力信号 DC 100 V 3 mA 接点信号
- (8) 出力信号 250 V 3 A AC プラグインリレー または トランジスタスイッチ (完全無接点式)

[長崎製作所]

輪転機リールスタンド周速計用高精度 IC 化 DA 形速度変換器完成

印刷速度 600 m/min 程度で運転される輪転機の自動高速紙継ぎのためには新巻取紙の周速を印刷速度と精密に同調させる必要がある。新巻取紙の周速の測定を電磁的なパルスで行ないこれを電子回路を応用した速度変換器でアナログ信号に変換し、印刷速度のアナログ信号と比較する。このような目的に使用するために次のような性能を有する高精度 IC 化 DA 形速度変換器を開発した。

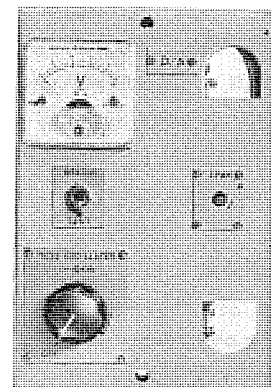
速度測定範囲	0.5~10 kHz
定格出力電圧	DC 8 V (負荷抵抗 100 k Ω)
直線性	$\pm 0.05 \%$
精 度	$\pm 0.1 \%$
応答速度	約 40 ms
使用温度範囲	-10~+50°C
制御電源	DC 24 V

パルス→アナログ電圧変換の原理は入力パルスが1個はいるたびに波高値および持続時間一定、すなわち電圧時間積一定の出力パルスを発生し、これを積分して入力パルスの周波数に比例する直流電圧を得るものである。DA 形速度変換器では 100 kHz の水晶発振器を内蔵しこれをクロックパルスとしてデジタル方式で出力パルスの持続時間を決めている。すなわち速度検出器からの入力パルスの立上がりでゲート回路を開き、クロックパルスを3段の2進カウンタに入れる。3段の2進カウンタは8個のクロックパルスを計数すると最初の状態になるがこのときゲート回路を閉じ次の入力パルスの立上がりで再びゲート回路が開かれるまで休止する。2段目と3段目の2進カウンタの出力を合成して入力パルス1サイクルごとに持続時間 60 μ s のパルスを取り出している。水晶発振器の精度は 0.005 % 以内およびゲート回路、2進カウンタ等のロジック回路は動作速度の速い TTL 形の IC を使用しているので出力パルスの持続時間は精度よく保たれる。次に出力パルスの波高値は精密に温度補償されたゼナーダイオード (温度係数 $\pm 0.002 \%$ /°C 以内) で 18 V に決めている。このようにして波高値および持続時間を高精度に保ち、これを抵抗-コンデンサで構成する積分回路で積分し入力パルスの周波数に比例する直流電圧を取り出している。

発振周波数 1~10 kHz の試験用発振器および出力電圧監視用電圧計を内蔵しており必要に応じて動作状態をチェックできる。

図 1 は DA 形速度変換器の外観を示すもので外形寸法は幅 100, 高さ 150, 奥行約 200 (mm) のプラグインユニットにまとめられている。

[神戸製作所]



DA 形速度変換器

自動検針装置

—料金調定業務としての検針業務の自動化—

最近、電気事業全般の合理化、近代化が進み、電力系統の運用の自動化が進められている中で、料金調定業務としての電力量計の検針だけは、検針員が各需要家を戸別訪問して計器の指示を読みとる方法がとられている。しかし将来、単純作業労働者の激減が予想され、検針員の確保が困難となり、自動検針の必要性が出てくる。

このたび、当社の、中央研究所、福山製作所、通信機製作所が共同で、自動検針装置の開発に成功したので、ここに紹介する。

1. 利 点

利点としてつぎのようなことが挙げられる。

- (1) 検針業務の省力化、信頼度の向上
- (2) 需要家への立入りによるトラブルを解消
- (3) 検針期間の延長短縮が容易
- (4) 配電線の負荷制御への通用によるその経済的運用
- (5) 計器の集団誤差チェック
- (6) 適時計量値チェックによる異常状態の発見

2. 構 成

構成は図1に示すごとく、支店に設けられた中央装置（図3左端）柱上変圧器ごとに設けられた端末装置（図3中央）各需要家ごとに設けられた発信装置付電力量計（図3右端）中央装置と端末装置を結ぶ伝送線、端末装置と電力量計を結ぶ計測線よりなる。

(1) 発信装置付電力量計

電力量計の歯車の回転で永久磁石を回転させ、その磁石が落下する時間リードスイッチが閉じてパルスを発信する。

(2) 端末装置

リードアウトカウンタ・制御回路・走査回路・FSMOD・FSDEM・V. F. R. よりなる。リードアウトカウンタは電力量計からのパルスで動作し電力量計と同じ値を指示し、かつ ϕC_2 コードに変換した出力を各けたごとに出す。走査回路は、この ϕC_2 コードを順次並列→直列変換する。FSMOD 走査回路の出力信号を音声周波信号に変換するものである。FSDEM は中央装置からのACK・NACK信号を復調するものであり、V. F. R. は中央装置からの呼出し信号受信回路である。制御回路は端末装置の制御をつかさどる。

(3) 中央装置

受信レジスタ・制御回路・FSMOD・FSDEM・V. F. OSC・表示回路・プリンタ・パンチャ・出力機器制御回路よりなる。端末装置から送られた信号はFSDEMで復調され受信レジスタに蓄えられている。そして出力機器制御回路により表示・プリントアウト・パンチャアウトされる。FSMODは端末装置にACK・NACKを返送するために信号を音声周波数に変換するものである。V. F. OSCは端末装置への呼出し信号発生回路である。制御回路は中央装置の制御をつかさどる。

3. 伝送方式

情報は電力量計1個に2けたのアドレスと4けたの計量値を送る。その送出順序および構成は図2のとおりである。誤り検出は ϕC_2 および、スタートビット、および、ストップビットの付加で行なう。伝送路には図3のごとくR. Zで乗せ信号“1”には f_1 (2,400 Hz) 信号“0”には f_0 (2,600 Hz) そして信号の間には f^* (2,500 Hz) をそう入する。伝送速度は50ボーであるので1メタ分は約1秒で伝送できる。

4. 動作

中央装置から呼出し信号を送出すると端末装置はそれを受信し Power を入れ、Start 信号・端末番号・(計量値 4 けた+アドレス 2 けた)×10 メータ・Stop 信号の順に伝送する。中央装置は Start 信号・端末番号・情報 1 メータ分・Stop 信号をおのおの受信後、誤り検出を行なって ACK または NACK を返送する。

5. 特長

(1) 情報を伝送するとき、アドレス後置にしたので伝送中にメータのけた上げがあっても、アドレスを C_2 コードから故意に変えることによって誤った情報が正しいと検定されることが防げる。

(2) 3 周波 FS MODEM を使ったので受信側の同期が容易にとれ、伝送速度の異なるものに対しても適応性がある。

むすび

以上に述べた方式は、電力量計のみではなく ガスメータ・水道メータにも、そのまま適用できるものであり、今後、電気・ガス・水道を一体化した、自動検針システムが考えられていくと思われる。今後の問題として各装置の低廉価・信頼度の向上・端末装置の小形化・伝送路に配電線を使う方式の開発などがある。

[中央研究所]

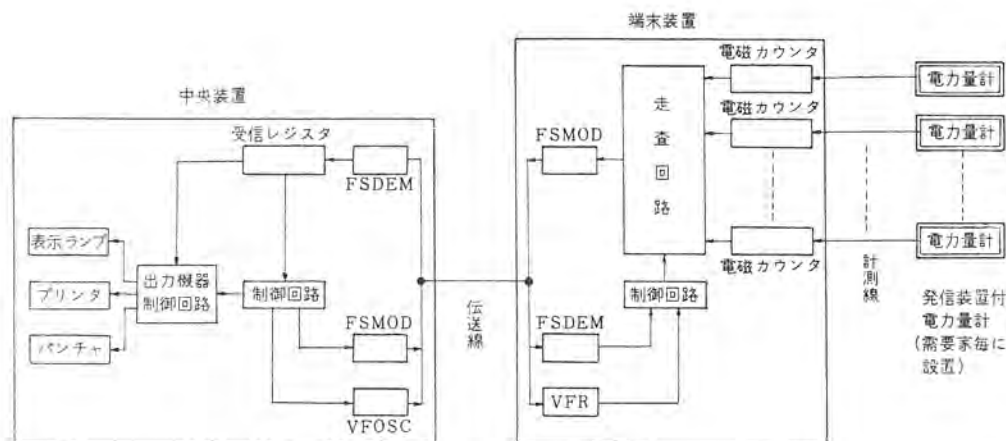


図 1 自動検針装置構造図

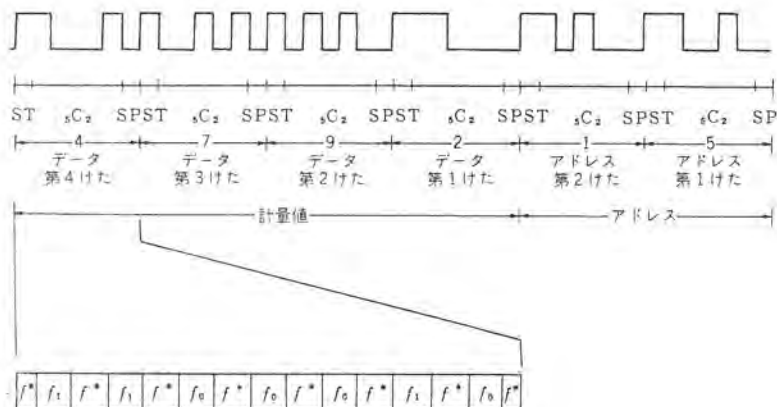


図 2 送出フォーマットの一例



図 3 自動検針装置

本社・営業所・研究所・製作所・工場所在地

本 社	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル)	(電) 100)	(電) 東京 (03) 212局 6111番
大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル)	(電) 530)	(電) 大阪 (06) 312局 1231番
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)	(電) 450)	(電) 名古屋 (052) 561局 5311番
福岡営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)	(電) 810)	(電) 福岡 (092) 75局 6231番
長崎出張所	長崎市丸尾町6番14号	(電) 852)	(電) 長崎 (0958) 23局 6101番
札幌営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル)	(電) 060-91)	(電) 札幌 (0122) 26局 9111番
札幌工場	札幌市北2条東12丁目98番地	(電) 060)	(電) 札幌 (0122) 23局 5544番
仙台営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル)	(電) 980)	(電) 仙台 (0222) 21局 1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号	(電) 930)	(電) 富山 (0764) 31局 8211番
広島営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)	(電) 730)	(電) 広島 (0822) 47局 5111番
岡山出張所	岡山市西長瀬字村北122番地の1(三菱電機岡山ビル)	(電) 700)	(電) 岡山 (0862) 24局 0331番
高松営業所	高松市鶴屋町5番地の1	(電) 760)	(電) 高松 (0878) 51局 0001番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル)	(電) 100)	(電) 東京 (03) 212局 6111番
城南家電営業所	東京都世田谷区池尻3丁目10番3号(三菱電機世田谷ビル)	(電) 154)	(電) 東京 (03) 411局 8181番
城西家電営業所	国分寺市南町2丁目16番14号(秀美ビル)	(電) 185)	(電) 国分寺 (0423) 22局 1881番
城北家電営業所	東京都文京区大塚3丁目3番1号(新茗溪ビル)	(電) 112)	(電) 東京 (03) 944局 6311番
千葉家電営業所	千葉市新宿町2丁目49番地(三菱電機千葉ビル)	(電) 280)	(電) 千葉 (0472) 42局 5486番
横浜家電営業所	横浜市中区富士見町3番地4	(電) 232)	(電) 横浜 (045) 251局 2226番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1	(電) 530)	(電) 大阪 (06) 344局 1231番
洲本出張所	洲本市上物部2丁目6番33号	(電) 656)	(電) 洲本 (07992) 2局 0631番
名古屋商品営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)	(電) 450)	(電) 名古屋 (052) 561局 5311番
静岡出張所	静岡市七間町9番地の10(池田ビル)	(電) 420)	(電) 静岡 (0542) 53局 9186番
福岡商品営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)	(電) 810)	(電) 福岡 (092) 75局 6231番
札幌商品営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル)	(電) 060-91)	(電) 札幌 (0122) 26局 9111番
仙台商品営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル)	(電) 980)	(電) 仙台 (0222) 21局 1211番
富山商品営業所	富山市桜木町1番29号	(電) 930)	(電) 富山 (0764) 31局 8211番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)	(電) 730)	(電) 広島 (0822) 47局 5111番
岡山出張所	岡山市西長瀬字村北122番地の1(三菱電機岡山ビル)	(電) 700)	(電) 岡山 (0862) 24局 0331番
高松商品営業所	高松市鶴屋町5番地の1	(電) 760)	(電) 高松 (0878) 51局 0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目12番地(北陸ビル)	(電) 950)	(電) 新潟 (0252) 45局 2151番
関東商品営業所	埼玉県与野市上落合後原842	(電) 338)	(電) 与野 (0488) 33局 3181番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661)	(電) 大阪 (06) 491局 8021番
商品研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号	(電) 247)	(電) 鎌倉 (0467) 46局 6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目10番地の1	(電) 652)	(電) 神戸 (078) 67局 5041番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661)	(電) 大阪 (06) 491局 8021番
三田工場	三田市三輪町父々部85番地	(電) 669-13)	(電) 三田 (07956) 局 4371-5番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号	(電) 850-91)	(電) 長崎 (0958) 23局 6211番
稲沢製作所	稲沢市井之口町1100番地	(電) 492)	(電) 稲沢 (0587) 32局 8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地	(電) 640-91)	(電) 和歌山 (0734) 23局 7231番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地	(電) 247)	(電) 鎌倉 (0467) 46局 1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661)	(電) 大阪 (06) 491局 8021番
北伊丹製作所	伊丹市大鹿字主ヶ池1番地	(電) 664)	(電) 伊丹 (0727) 82局 5131番
熊本工場	熊本市竜田町弓削720番地	(電) 862)	(電) 熊本 (0963) 62局 7211番
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地	(電) 461)	(電) 名古屋 (052) 721局 2111番
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地	(電) 819-01)	(電) 福岡今宿 (09295) 6局 0431番
福山製作所	福山市緑町1番8号	(電) 720)	(電) 福山 (0849) 21局 3211番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地	(電) 670)	(電) 姫路 (0792) 23局 1251番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号	(電) 229)	(電) 相模原 (0427) 72局 5131番
世田谷工場	東京都世田谷区池尻3丁目1番15号	(電) 154)	(電) 東京 (03) 414局 8111番
静岡製作所	静岡市小島110番地	(電) 420)	(電) 静岡 (0542) 85局 1111番
中津川製作所	中津川市駒場町1番3号	(電) 508)	(電) 中津川 (05736) 5局 7151番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号	(電) 247)	(電) 鎌倉 (0467) 46局 6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号	(電) 963)	(電) 郡山 (02492) 2局 1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地	(電) 370-04)	(電) 尾島 (02765) 2局 1111番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所1173番地	(電) 375)	(電) 藤岡 (02742) 2局 1185番
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字図所1番地	(電) 617)	(電) 京都西山 (075) 921局 4111番
ラジオ工場	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661)	(電) 大阪 (06) 491局 8021番

次 号 予 定

三菱電機技報 Vol. 43. No. 8

多重通信とデータ伝送特集

《特集論文》

- 多重無線の動向
- 新幹線試験電車 951 形用列車無線装置
- 800 MHz 帯狭帯域工業用テレビジョン無線装置
- ME-7 D 302 形 7 GHz 帯多重通信装置
- 新形 12 GHz 帯多重無線装置
- 制御用データ伝送
- 新しい符号化方式
- 符号伝送用変復調装置
- データ伝送装置の新実装方式
- 自動給電用 IC 化デジタル伝送装置
- 電力系統安定用信号伝送装置
- IC 化遠隔監視制御装置
- 庄川系水力発電所集中監視制御システム
- 水道用データ伝送システム
- ダム河川管理用 IC 化テレメータ放流警報装置
- 海象観測用テレメータシステム
- 大気汚染監視テレメータシステム
- 東京都交通局納め電鉄変電所集中監視制御装置

《技術講座》

- システム理論—(II) システム解析とグラフ理論—

三 菱 電 機 技 報 編 集 委 員 会

委員長	小 倉 弘 毅	常任委員	鈴 木 正 材
副委員長	片 岡 高 示	"	祖 父 江 晴 秋
常任委員	明 石 精	"	湊 武 雄
"	石 川 理 一	"	山 田 栄 一
"	上 田 重 夫	委 員	尾 畑 喜 行
"	宇 佐 美 重 夫	"	北 垣 成 一
"	大 野 寛 孝	"	南 日 達 郎
"	神 崎 遼	"	林 昇 寿
"	北 川 和 人	"	松 元 雄 蔵
"	小 堀 富 次 雄	"	和 田 義 勝

(以上 50 音順)

昭和 44 年 7 月 22 日印刷 昭和 44 年 7 月 25 日発行「禁無断転載」定価 1 部金 100 円(送料別)

編集兼発行人

東京都千代田区丸の内 2 丁目 12 番地

小 倉 弘 毅

印刷所

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地
(郵便番号 162)

大日本印刷株式会社

印刷者

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地

高 橋 武 夫

発行所

東京都千代田区丸の内 2 丁目 12 番地 (郵便番号 100)

三菱電機株式会社内 「三菱電機技報社」

(電) (03) 212 局 6111 番 (内線 2498)

発売元

東京都千代田区神田錦町 3 の 1 (郵便番号 151) 株式会社 オーム社書店

(電) (03) 291 局 0912 番 振替東京 10018