

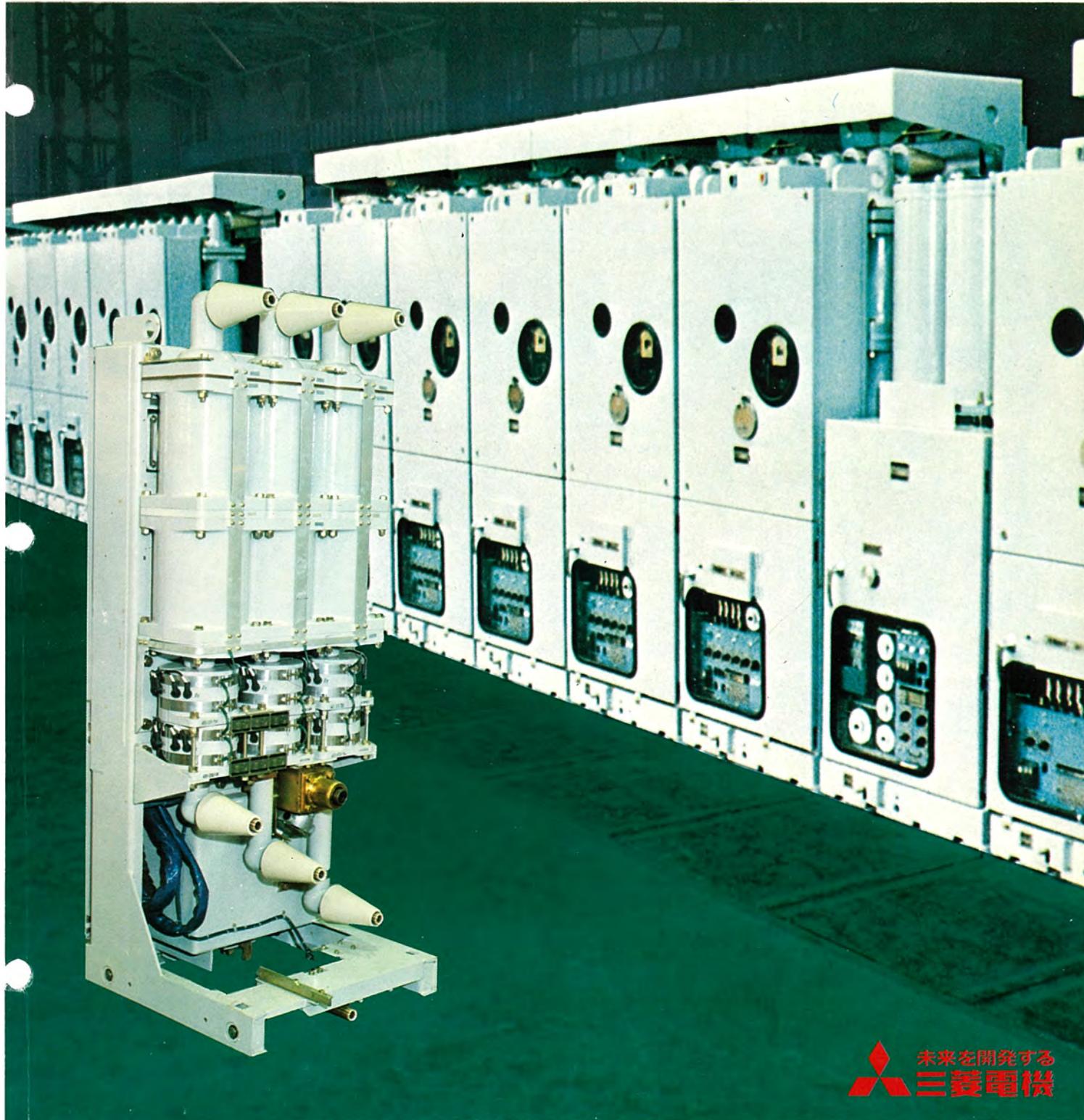
MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol. 47 October 1973

静止器の固体絶縁特集

10

東京電力株 駒沢変電所納め 23kV 1,500A 固体絶縁開閉装置





静止器の固体絶縁特集

目 次

《特集論文》

(巻頭言) 固体絶縁技術	中島達二…1013
注型絶縁物の製造技術	西崎俊一郎・小鯛正二郎・坂井龍吉…1014
固体絶縁物の評価試験	高橋康英・桑原宏・信崎泰秀・藤井勲・高橋宏次…1021
縮小形変電所における固体絶縁技術	村上靖武・森栄作・平河宏之・酒井雅朗・竹内吉章…1027
屋外用注型絶縁材料	寺谷宏・川上剛・坂井龍吉・宗村弘次…1033
耐熱性注型エポキシ樹脂ブッシング	土橋勝・荒畑吉邦・清水澄・岸田光弘…1038
低電圧用注型エポキシ樹脂支持がいし	小鯛正二郎・藤井範秋・村上靖武・原田浩作…1044
エポキシモールド形計器用変圧変流器	落合温之・塚本忠之・野口聰・本城守…1049
新しい可撓性硬化剤	森脇紀元・広田潔・不可三晃・西崎俊一郎…1054
エポキシ樹脂の分子運動と導電性	宮本晃男・柴山恭一…1058
エポキシ樹脂の力学的性質に及ぼす充てん剤効果	土橋勝・児玉峯一…1063
エポキシ樹脂注型品の内部応力	土方明躬・福島二郎・佐保和生・片岡勝敏・太田照雄…1069
エポキシ樹脂の部分放電劣化と耐トリーイング性	平林庄司・平沢栄一・長谷川武敏・川上剛…1076

《普通論文》

コアメモリカードの自動検査システム	布施明・田中立夫・田中千代治・鷹取東朋・阪尾正義…1085
プロセス制御用問題向き言語システムMDSS	首藤勝・居原田邦男・五十嵐真・中平泰男…1092
工業用プログラミング言語CONFORM IV	首藤勝・関本彰次・春原猛・太細孝・定松淳一・大田葉子…1100

《技術講座》

超音波探傷試験法(4)一超音波探傷器と探触子一	河野勝美…1109
-------------------------	-----------

《新製品紹介》	1115
不燃性22kVモールド形計器用変圧変流器(MOF)完成・新形クラッチモータ・オゾンによる漂白液再生装置	

《ニュースフラッシュ》	1117
VX形真空しゅ断器・九州電力(株)川内発電所向け556MVAタービン発電機完成・北海道電力(株)新冠発電所向け105MVA/102MW発電電動機完成	

《特許と新案》	1083
超電導合金・プラスチックQスイッチ・自動水洗装置・総電器装置	

《表紙》

表紙1 東京電力(株)駒沢変電所納め 23kV 1,500A 固体絶縁開閉装置
電力供給の高密度化は、時代の成行きであり、変電所の縮小化・無人化も、同時に要求されつつある。

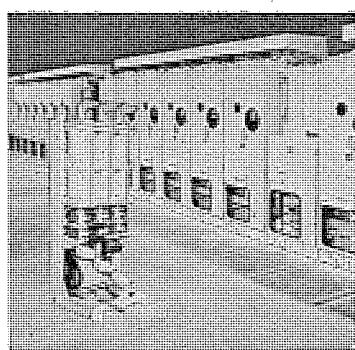
これに対処する方法として現在二つの方法がとられており、一つはガス絶縁方式で、他の一つはここで紹介する固体絶縁方式である。

表紙の写真は、無人化変電所である東京電力(株)駒沢変電所に納入された23kV 1,500A 固体絶縁開閉装置で、絶縁媒体として、エポキシ樹脂およびEPTゴムが使用されている。また外被に接地層が設けられた完全固体絶縁方式で、従来のキューピクル式のものの1/10の容積になっている。

表紙2 三菱ポータブル超音波探傷器

表紙3 三菱エレベータ

表紙4 三菱配電用変圧器




**SPECIAL EDITION : SOLID INSULATION FOR TRANSMISSION AND
DISTRIBUTION APPARATUS**
CONTENTS
SPECIALLY COLLECTED PAPERS

Manufacturing Technique of Cast Insulating Materials.....	S. Nishizaki • S. Kodai • R. Sakai...1014
Confirmation Tests for Solid Insulation.....	Y. Takahashi • H. Kuwahara • Y. Shinohashi • I. Fujii • K. Takahashi...1021
Solid Insulation Technique in Compact Substations.....	Y. Murakami • E. Mori • H. Hirakawa • M. Sakai • Y. Takeuchi...1027
Castable Insulating Materials for Outdoor Use.....	H. Teratani • T. Kawakami • R. Sakai • H. Munemura...1033
Cast Epoxy Bushings for High Temperature Use.....	M. Tsuchihashi • Y. Arahata • A. Shimizu • M. Kishida...1038
Cast Epoxy-resin Insulators for Low Voltage Use.....	S. Kodai • N. Fujii • Y. Murakami • K. Harada...1044
Epoxy Resin Molded Type Potential-Current Transformers.....	H. Ochiai • T. Tsukamoto • H. Noguchi • M. Honjou...1049
A New Flexible Curing Agent.....	T. Moriwaki • K. Hirota • A. Fukami • S. Nishizaki...1054
Segmental Motion and Electric Conduction of Epoxy Resin.....	T. Miyamoto • K. Shibayama...1058
Mechanical Properties of Filled Epoxy Resins.....	M. Tsuchihashi • M. Kodama...1063
Internal Stresses on Epoxy Resin Castings.....	A. Hijikata • J. Fukushima • K. Saho • K. Kataoka • T. Ôta...1069
Partial Discharge and Treeing Resistance of Epoxy Resins.....	S. Hirabayashi • E. Hirasawa • T. Hasegawa • T. Kawakami...1076

TECHNICAL PAPERS

Automatic Test System of Core Memory Printed Circuit Board.....	A. Fuse • T. Tanaka • C. Tanaka • H. Takatori • M. Sakao...1085
MDSS-A Problem Oriented Programming System for Process Control.....	M. Sudô • K. Ihara • M. Igarashi • T. Nakahira...1092
CONFORM IV A Programming Language for Industrial Use.....	M. Sudô • S. Sekimoto • T. Sunohara • T. Dasai • J. Sadamatsu • Y. Ôta...1100

TECHNICAL LECTURE

Ultrasonic Testing (4).....	K. Kôno...1109
-----------------------------	----------------

NEW PRODUCTS

1115

NEWS FLASH

1117

PATENT AND UTILITY MODEL

1083

COVER :

23 kV 1,500 A Solid Insulation Switchgear Delivered to Komazawa Substation,
Tokyo Electric Power Company

It is the course of events that the territories of electric power supply get of high density. This brings about the compact construction and unattended operation of the substations. As a measure to cope with the situation, two methods are in practice to rationalize the construction of the equipment : One is to employ gas insulated system and the other is to use solid insulation apparatus to minimize the spaces as is introduced herein.

The picture on the cover shows 23 kV 1,500 A solid insulation switchgear delivered to Komazawa Substation, an unattended installation, of the Tokyo Electric Power Company. For the insulation epoxy resin and EPT rubber are used, and in addition, the outside cover is provided with grounded layers to insure perfect solid insulation. The spaces occupied with this new switchgear is only one tenth of that in old design.

「三菱電機技報」アブストラクト

UDC 678.6/7.027.22:621.315.6.3.027.6/8.002.2

注型絶縁物の製造技術

西崎俊一郎・小鯛正二郎・坂井龍吉

三菱電機技報 Vol.47・No.10・P1014～1020

電気機器における注型絶縁物は、機器の高電圧化・コンパクト化の傾向とあいまってますますその適用範囲が広がるとともに、重要性を帯びてきている。これらの機器では、絶縁材料としてだけでなく、構造材料としても使用されるため、素材のもつ特性を適正に判断して選択しなければならないことは言うまでもないが、その特性を十分に發揮させるために最適設計を行なうこと、製造技術上の諸問題を解決することも重要になる。

本報では、注型技術の動向、高電圧絶縁への適用例、素材の選定あるいは注型法などの注型技術に関する一般的なことをまとめた。なお、これらの詳細については本誌の別報を参照されたい。

UDC 621.316.5:621.315.6:54-16]001.8.001.4

固体絶縁物の評価試験

桑原 宏・高橋康英・信崎泰秀・藤井 熱・高橋宏次

三菱電機技報 Vol.47・No.10・P1021～1026

固体絶縁技術の開発と進歩は、ガス絶縁開閉装置や固体絶縁開閉装置などの縮小形開閉装置の製品化を達成させた。縮小形開閉装置の部品としての固体絶縁物は、電気的、機械的および化学的に非常に過酷な条件で使われるものであり、これら絶縁物の製品化については、製造技術の確立のみならず、実用条件を十分に考慮した評価を実施しなければならない。

本報告では、これら縮小形開閉装置に使用する固体絶縁物の評価に対する開発、実用性能試験の経過と結果、および製品試験方法、管理基準等について述べる。

UDC 678.6/7:62-405:621.3.048:621.316.3

縮小形電所における固体絶縁技術

村上靖武・森 栄作・平河宏之・酒井雅朗・竹内吉章

三菱電機技報 Vol.47・No.10・P1027～1032

エポキシ注型絶縁物は、固体絶縁開閉装置およびガス絶縁開閉装置に広く使用されている。これら開閉装置の縮小化・高容量化・高信頼性等の要求に伴い、絶縁物であるエポキシ注型品にも多くの性能がきびしく要求される。本文では、これら要求性能を満足するエポキシ注型材料の開発経過の一端と、製造技術上の問題である、形状面からくる内部応力の解析について述べる。

UDC 621.315.62.027.7:678.7.001.5

屋外用 注型絶縁材料

寺谷 宏・川上 剛・坂井龍吉・宗村弘次

三菱電機技報 Vol.47・No.10・P1033～1037

注型絶縁材料を屋外用機器に使用する場合、注型材料としての一般的な性能のほかに耐トラッキング性や耐候性が必要であり、材料の選択できる範囲が狭くなる。一方、注型絶縁の利点を生かした屋外用機器の種類は増大しつつあり、すぐれた性質をそなえた屋外用注型絶縁材料の研究開発が強く要望されている。ここでは、エポキシ樹脂を中心に、屋外用注型絶縁材料にたいする当社の考え方と、材料の基礎研究から実器に対する長期評価試験に至る研究開発の一端を述べる。

UDC 678.6/7:621.315.62

耐熱性注型エポキシ樹脂ブッシング

土橋 勝・荒畑吉邦・清水 澄・岸田光弘

三菱電機技報 Vol.47・No.10・P1038～1043

電気機器の小形・軽量化や大容量化に伴い、エポキシ注型ブッシングの耐熱性の向上が強く望まれているが、エポキシ注型絶縁材料は、諸性質の温度依存性上、B種絶縁以上の耐熱区分で使用されるることは少なかった。

このため、B種絶縁として使用可能な耐熱性注型材料を開発し、ブッシングに適用した結果、十分な実用性能を有することが認められた。

ここでは、注型材料の諸特性、製品化のための形状に関する問題およびブッシングへの適用例などについて述べる。

UDC 621.315.62.027.5:678.7.001.5

低電圧用 注型エポキシ樹脂支持がいし

小鯛正二郎・藤井範秋・村上靖武・原田浩作

三菱電機技報 Vol.47・No.10・P1044～1048

最近、注型技術の一つとして速硬化エポキシ樹脂配合を用いて高温でゲル化させる加圧ゲル化法、あるいはホットモールド法などが紹介され、これらによって注型品の製造における量産性が大いに改善されるようになった。ここでは、これらに用いられる速硬化配合における促進剤の効果と、高温における反応過程について述べるとともに、加圧ゲル化法を適用したときのレジンに加える圧力の効果についても報告する。

加圧ゲル化法を適用して製作した低電圧用注型がいしは、良好な性能を備えており、注型配合の自由性とあわせて屋外用、あるいは大形品の量産化の可能性を示唆するものといえよう。

UDC 621.315.61/621.314.22.08

エポキシモールド形 計器用変圧変流器

落合温之・塚本忠之・野口 肇・本城 守

三菱電機技報 Vol.47・No.10・P1049～1053

給電の信頼性向上とともに、配電機器に要求される信頼度も非常に高い。エポキシモールドなどの固体絶縁では、耐クラック性が絶縁信頼度から最も重要である。最近当社で開発した耐クラック性を向上したエポキシモールド形計器用変圧変流器（P0-6T）を紹介する。

このものは一次巻線二次巻線間絶縁に信頼度の高い薄葉絶縁材を用い、耐クラック性の高いレジンシステムを採用することによって、温度差95℃（熱湯85～90℃、冷液-5～-10℃）の冷熱試験に耐えるものとなった。本文では、絶縁信頼度を高める構造、各種材料の物性、耐クラック性の評価法、実機の耐クラック性、信頼度、誤差特性などの概要を報告する。

UDC 678.674.074:678.674.076:547.42

新しい可撓性硬化剤

森脇紀元・広田 潔・不可三 晃・西崎俊一郎

三菱電機技報 Vol.47・No.10・P1054～1057

新しい可撓性エポキシ硬化剤TEP-11を開発した。これにより硬化されたエポキシ樹脂の機械的性質、電気的性質、熱安定性などについて述べる。市販可撓性樹脂よりもすぐれた耐熱衝撃性、衝撃性を与え、またエポキシ樹脂に種々の比率で配合することにより、硬いものからゴム状物まで広範囲の機械的性質の硬化物が得られる。

「三菱電機技報」アブストラクト

UDC 541.68:539.2:621.3.048:621.316.1

エポキシ樹脂の分子運動と導電性

宮本晃男・柴山恭一

三菱電機技報 Vol.47-No.10-P1058~1062

種々の橋かけ密度をもつ、酸無水物によって硬化した同族体エポキシ樹脂について誘電的性質を調べた。エポキシ樹脂の自由体積と電気伝導度は、橋かけ密度の増加とともに減少する。イオン性荷電担体の移動に必要な最小の体積を、自由体積理論から導びいた式によって求めた。その体積は同じ系のセグメント運動に必要な体積の約3分の1になった、その体積を作るエネルギーを熱力学的観点から明らかにし、自由体積を考慮した電気伝導度式との関係を議論した。



UDC 678.6:539.3/4].001.5

エポキシ樹脂の力学的性質に及ぼす充てん剤効果

土橋 勝・児玉峯一

三菱電機技報 Vol.47-No.10-P1063~1068

合成樹脂／充てん剤系固体絶縁材料に関して、基礎的知見を得る目的でエポキシ樹脂／無機質粒状充てん剤複合系の力学的性質を調べた。

エポキシ樹脂／充てん剤系では、充てん剤の形状や表面状態の違いにより、樹脂—充てん剤間相互作用に違いを生じ、さらに、その相互作用性は機械的繰返し応力、熱衝撃および媒体としての水などの外部刺激によって緩和されることが認められた。



UDC 678.6/.7].067:624.043:620.17

エポキシ樹脂注型品の内部応力

土方明躬・福島二郎・佐保和生・片岡勝敏・太田照雄

三菱電機技報 Vol.47-No.10-P1069~1075

埋金を有するエポキシ樹脂注型品の硬化過程に発生する内部応力の挙動を明らかにするために、球形のロードセルを埋金とした球形の注型モデルにより、硬化過程における内部応力の発生挙動を調べた。その結果は、物性値が温度によって変化する非定常熱応力解析結果とよく一致し、注型品の内部応力は注型樹脂のガラス転移温度(T_g)以下の冷却過程に生じ、 T_g 付近を通過するときの冷却速度に大きく依存することが明らかになった。一方、注型品の内部応力を光弾性法で調べるさい問題となる硬化、冷却過程で生じる凍結しま(縞)の発生挙動について検討し、内部応力 () をこの凍結しまから測定する手法についての基礎的知見を明らかにした。

UDC 621.315.618

エポキシ樹脂の部分放電劣化と耐トリーイング性

平林庄司・平沢栄一・長谷川武敏・川上 剛

三菱電機技報 Vol.47-No.10-P1076~1081

エポキシ樹脂の耐部分放電性と耐トリーイング性について検討した結果、次の事がわかった。エポキシ樹脂の耐部分放電性は、橋かけ密度、無機充てん剤の有無によって顕著な差なく、またエポキシ樹脂の種類を変えて樹脂間の差異は少ない。しかしマイカとエポキシ樹脂の複合絶縁物の耐部分放電性は良好である。また、耐部分放電性は、温度依存性を示し、温度とともに低下する。

エポキシ樹脂の耐トリーイング性は、ポリエチレンに比べ3~5倍高く、無機充てん剤により向上する。またエポキシ樹脂の耐トリーイング性は、V- β 特性の電圧依存性の大きい事から () 、針電極埋め込みでの短時間破壊電圧で評価できると考えられる。

UDC 681.142.004 Others

コアメモリカードの自動検査システム

布施 明・田中立夫・田中千代治・鷹取東朋・阪尾正義

三菱電機技報 Vol.47-No.10-P1085~1091

コアメモリの直接周辺回路は周知のことく、リニアIC回路で構成されている。そのためメモリカードはダイナミックな検査が必要となる。従来この種のカードの検査は熟練した検査員が手動の簡易形テストとオシロスコープを使って行っていた。しかしながら今回のようにメモリカードが大形化され、かつ部品の実装が高密度化されると、もはや手動で検査したのでは多大な時間を費すことになる。

そこで制御用としてMELCOM 9100-5と、波形のA-D変換用にディジタルリードアウトオシロスコープ () をを使った自動検査システムを開発した。なお故障箇所指摘の分解能 () をあけるため本システムではICクリッパを検査員が使って行っている。

UDC 681.3.06.007.3

プロセス制御用問題向き言語システム MDSS

首藤 勝・五十嵐 真・居原田邦男・中平泰男

三菱電機技報 Vol.47-No.10-P1092~1099

工業用計算機の応用プログラム作成合理化に関する諸問題を解決する手段として、最近では高レベルプログラミング言語が使われ始めている。これらの言語は、はん(汎)用的な使用を目的としたFORTRANのような手続き向き言語と、適用範囲を限定し、対象に密着した表現法で簡単にプログラムが作れる問題向き言語の2種類に大別される。

MDSSはMELCOM 350-30/30F用に開発されたプロセス制御用の問題向き言語システムで、プロセスデータ収集監視処理には空欄記入式、制御演算処理にはブロック線図指向形式 () の二つの特長的な記述言語を提供している。本報告では、MDSSの構成 () について、言語および実行システムの両面からその概要を述べる。

UDC 681.3.06.007.3

工業用プログラミング言語 CONFORM IV

首藤 勝・関本彰次・春原 猛・太細 孝・定松淳一・大田葉子

三菱電機技報 Vol.47-No.10-P1100~1108

CONFORM IVは、MELCOM 350-30F計算機システム用に開発した工業用計算機応用分野を指向した手続き向きプログラミング言語である。最近、工業用の分野でもソフトウェアの生産性向上が重視され、プログラミング言語の高レベル化は、その対策の主要なもの一つである。

CONFORM IVはそのような背景のもとに開発された言語で、工業用分野全般にわたるプログラミングに適しており、またそのコンパイラは工業用分野におけるプログラムの作成、デバッグの形態を考慮して設計されている。本文では工業用プログラミング言語 () の最近の動向に触れた後、CONFORM IVの言語機能およびコンパイラーの特長について述べる。

UDC 534.8-8:681.89

超音波探傷試験法(4)——超音波探傷器と探触子——

河野勝美

三菱電機技報 Vol.47-No.10-P1109~1114

金属材料中の内部欠陥を外部から超音波パルスを使って検査する方法は、昭和24年以来使用されているが、超音波探傷器と探触子の技術的発展にともない、その使用分野も拡大されつつある。

今回は、探傷結果に直接影響を与える超音波探傷器と探触子の構造、および超音波探傷器の取扱い方法について述べる。



固体絶縁技術

電子技術総合研究所次長（工博） 中島達二

最近の電力需要の増加は著しく、わが国においてはここ数年来、年間10%を超える伸び率を示しており、年々電力供給設備の増強を計らねばならない状況にある。しかし、大容量電力の導入を必要とする都市部にあっては、土地価格の高騰や地域との環境調和などの観点から、用地の確保はますます困難となりつつあり、電力設備の増設にきびしい制約を受けている。このため変電所などの小形化を計る必要があり、固体絶縁の新しい技術をとり入れた研究開発が活発に進められている。

一方電気機器における固体絶縁の技術は、新しい合成高分子の開発と加工技術の進歩と共に発展し、電気機器の小形化に貢献してきた。ことに、無溶剤ワニスあるいは注型樹脂といわれる高分子の開発に負うところが大きい。このものは、液状の樹脂に硬化剤を添加反応させることによって固化し、固化時に揮発性の物質を生じないので、ち密でボイドのない絶縁組織が構成できる点に特長がある。エポキシ樹脂、不飽和ポリエチレン樹脂、シリコン樹脂などがあるが、高電圧機器の絶縁には、固化時の体積収縮が小さく、かつ金属や各種基材との接着力に富むエポキシ樹脂が最も広く用いられている。

エポキシ樹脂が高電圧機器の絶縁に使用されはじめたのは1950年代の初期の頃である。以後20数年にわたって、特性改善のための樹脂配合の技術、充てん剤、成形・応用技術などに改良が加えられ、計器用変成器の絶縁、開閉装置の絶縁、ケーブル接合部の絶縁、発電機コイルの絶縁、がいし類等の、小形化や信頼性の向上などが計られてきた。

最近では、さきに述べた、変電所における電力設備の小形化の一環として、主要機器の小形化と母線などの絶縁距離の短縮に、エポキシ樹脂による固体絶縁が広くとり入れられている。

とくに、6.6kV、22kV級の開閉設備、計器用変成器、母線などの充電部をエポキシ樹脂でおおって一括収容した完全固体絶縁ミニクラッドや、66kV、154kV、275kV級の、導体部の支持絶縁にエポキシ樹脂を使用した六ふっ化いおう(SF₆)ガス絶縁ミニクラッドはすでに実用の段階に入っており、前者は従来のものの10~20%，後者は数%程度の容積ですみ、変電所全体の所要スペースが大幅に縮少さ

れている。現在ではさらに電圧階級の高いミニクラッドの研究開発が進められている。

また、従来の磁器がいし・ブッシングにくらべてエポキシ樹脂がいし・ブッシングのほうがより小形化されるという利点から、変電所の小形化に関連してエポキシ樹脂製品が磁器製品に置きわりつつある。公称電圧77kV以下の屋内用のものが実用化されているが、3.3kV~33kVの使用が特に多い。屋外用のものは試用段階で、実用化には至っていない。

エポキシ樹脂はもともと電気絶縁用としてヨーロッパで発展したものであり、その使用量は圧倒的に多く、製品の幅も広い。たとえばがいし類では、屋内変電所の母線や断路器の支持がいしとして最高132kV用のものまで実用化されており、屋外用も10~45kV用のものが発売されている由であり、また屋内用計器用変成器類では220kV用まで広くエポキシ樹脂が採用されており、さらに屋外用に向けての開発研究が進められている。

以上に述べたような、主としてエポキシ樹脂を使用する固体絶縁技術は、長い間の研究の積み上げによって今日の水準にまで発展してきたものであるが、より一層の信頼性の向上、より高い電圧階級の機器への適用、屋外用電気機器・がいし類への適用、製品の均質化・量産化の問題など多くの課題が今後に残されている。これを絶縁組織の特性の側からみれば、耐電界性、耐熱衝撃性、熱安定性、耐熱性などの改善、可とう(撓)性の賦与などの問題を解決していくことであり、そのためには、目的に応じて、充てん剤の選定、原料樹脂や硬化剤の改良、それらの配合上の技術的諸問題等の解決を計り、さらには成型時に内部ひずみ(歪)やボイドの発生を防止するような絶縁構成と成形方法とを選定することがたいせつである。

固体絶縁の形成はこのようにいくつかの複雑な技術の総合化により生み出されるものであるから、材料科学的手法を取り入れ、従来試行錯誤的手段に訴えていた部分をできるだけ減らすようにして、問題点の抽出とその解決を容易にすること、特性の適確な評価方法や寿命予測技術を確立すること、などが製品の質的向上や開発期間の短縮につながる重要な事項と考えられる。

注型絶縁物の製造技術

西崎俊一郎*
小鯛正二郎**・坂井龍吉**

Manufacturing Technique of Cast Insulating Materials

Central Research Laboratory Shunichiro Nishizaki
Itami Works Shôjiro Kodai・Ryukichi Sakai

Cast insulating materials used for electric apparatus are extending their application ranges and becoming important in conformity with the trend of the apparatus becoming of higher voltage and more compact. As the materials are used for structural members as well as insulations of apparatus, it is needless to mention that the selection of the materials depending on their characteristics is very important. To make the best use of their characteristics, it is essential to work out optimum design and solve numerous problems no the manufacturing technique with the materials.

This report summarizes the tendency of casting technique, examples of cast insulations applied to high voltage apparatus, selection of materials and general matters concerning casting technique such as practicable method of casting. Further particulars shall be referred to other papers given in this special number of the magazine.

1. まえがき

注型絶縁は、絶縁機能と構造機能とを一体化することによって、全く新で合理的な機器の設計を可能にするとともに、部品組立などの省力化から機器製造の効率化に大きく寄与する絶縁方式であり、機器への適用はますます拡大されようとしている。この理由として注型絶縁物の次のような長所があげられる。

- (a) 高電圧絶縁に適する
- (b) 電気機器の小形・軽量化に役立つ
- (c) 組立工数の簡略化が可能になる
- (d) 多相一体化を可能にする
- (e) 耐環境性の向上を図ることができる
- (f) 複雑形状品や大形品の製作が可能である

しかし、反面、次のような短所もあげられる。

- (a) 樹脂の硬化収縮によって内部応力を発生し、製品形状によつてはクラックに進展することもある
- (b) 衝撃強度に弱点がある
- (c) 比較的大がかりな設備が必要である
- (d) 高度な製造技術が要求される

注型技術としては、上記の長所をますます伸張し、欠点を克服すべく、材料・製造プロセスの両面において研究が進められ、当社の注型絶縁の実用面において、大きな成果を得ている。

本報では、これら最近の注型絶縁物製造技術の問題点と進歩について、材料・製造プロセスの面より概説するが、その前に注型技術の動向について少しく述べておきたい。

エポキシ注型絶縁の適用機種が、小形のものから、複雑なインサートを含むものや大形のものへ、また、個別生産から量産へ、屋内機器から屋外用へ、あるいは超高電圧化へと拡大されるにつれて技術的な問題点は多様化しているが、共通的には、クラックの防止、速硬化などがあげられている。これらは、材料・製造プロセスの両面から検討されているが、特に、最近では硬化法の面から新しい製造技術を開発することが進められている。

欧州系の材料メーカー (CIBA, Shell) は、新しい注型品製造技術の開発を積極的に進めているが、これらの新技術は、従来の注型法が、低い温度の金型に比較的低い温度の樹脂を注入し、硬化速度の遅い配合によって、発熱を押えて硬化させるという考え方であるのに対し、1) 触媒的促進剤を適用してゲル化時間を短縮する。2) 金型の温度を樹脂温度より 30~50°C 高くし、金型に面した外側より逐次硬化を進める。3) 中心部および注入口を液状に（内部応力はない）保って、加圧力・遠心力などを用いて未硬化樹脂を補給するという考え方をベースにしている。これらによれば、数十分のゲル化の可能性を示し、生産性において金型の効率化、大形注型化、量産品の自動化・省力化、単位時間当たりの生産量の大幅な増加等を示唆するものである。

当社では、これらの進歩に対応し、また、各機種に必要な技術的要請に応じて、エポキシ樹脂の真価を發揮させる注型絶縁技術の開発を進めているが、このためには形状設計、原料レジンなどの材料配合選定、硬化プロセス、製造装置（金型を含む）などの各要素をも有機的に総合化して検討を実施し、成果をあげている。ここで、当社伊丹製作所における注型絶縁物の高電圧絶縁への適用例について時間的流れに沿って述べる。

2. 注型絶縁物の高電圧絶縁への適用例

エポキシ樹脂注型品が、開閉装置の絶縁材料として利用されてからまだ二十数年にしかならず、ベーカイトのような材料と比べると、格段に日が浅い。伊丹製作所でも、いち早くその基礎研究や、応用について研究を始め、昭和 35 年ごろより製品への適用を行なっているが、最初の製品は 6 kV クラス以下のがいし・ブッシング類であった。しかし、昭和 38 年からは 25 kV クラスの車両用トランクに取り付けるブッシングの量産にはいり、すでに実運転が行なわれて 10 年になった現在も、高温と振動のある環境で無事故で運転され、社会に貢献している。昭和 40 年からは、図 2.1 にあるような 10 kV 以下の磁気しゃ断器用注型部品を大量生産しており、この間にさらに深く高電圧絶縁物製造上の技術的問題点、たとえば、内部応力の発生と

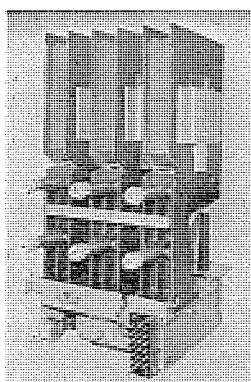


図 2.1 6 kV 磁気しゃ断器
6 kV magneblast circuit breaker.

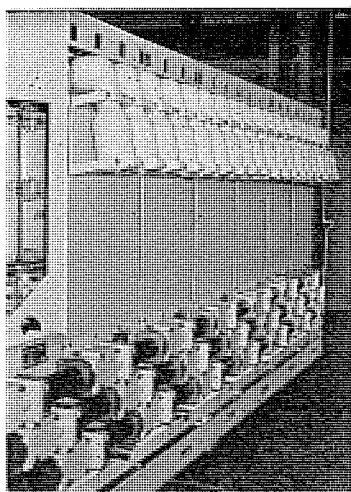


図 2.2 固体絶縁による 20 kV 緩小形変電所
20 kV compact substation with solid insulation.

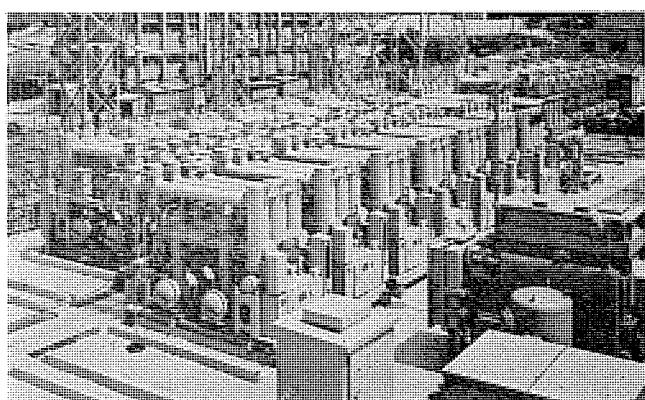


図 2.3 世界最大級の 77 kV ガス絶縁変電所
77 kV class gas insulated substation in the class of the largest scale in the world.

クラックへの進展、機構の解明、ボイド除去法の開発、電界緩和技術、設備開発、金型技術等に力を注ぎ、その確立を図ってきた。以上の積み重ねの後、昭和 43 年からは、本号の別報で紹介される固体絶縁およびガス絶縁による縮小形変電所に使用する注型品の生産を開始し、実系統で運転にはいってから長いものではすでに丸 4 年以上経過するという使用実績を持つに至っている。図 2.2 は、20 kV の固体絶縁による縮小形変電所の一例であるが、この製品では、しゃ断部断路部・母線接続部、その他ほとんどの絶縁部品が注型品で構成されており、さらに、絶縁物表面には、人間に対する電気的安全上の配慮からメタリコンによる接地処理が施されている。

図 2.3 は、70 kV クラスでは世界最大級規模のガス絶縁変電所を示すが、このような SF₆ ガスによる開閉機器にも、導体支持用スペーサー、操作機構におけるロッド類、架台等の製品として多数の注型品が使用されている。これらの場合には、主絶縁媒体がきわめて絶縁特性にすぐれた SF₆ ガスであることにあわせて一段と縮小化が進められており、絶縁物にはきわめて高い電界強度が要求される。ガス絶縁による縮小形変電所には、現在のところ 60~500 kV クラスまであり、60~140 kV クラスだけでもすでに 30 以上の変電所でその真価を発揮しており、500 kV クラスについてもすでに基礎研究・応用研究、長期にわたる寿命試験等も完了し、いよいよ量産段階にはいっている。

図 2.4 は、当所で製作し、大形変圧器の専門工場である赤穂工場に設置されている 4,000 kV の衝撃電圧発生装置であるが、ここに使用されているコンデンサ用がい管および変圧器の架台には、図

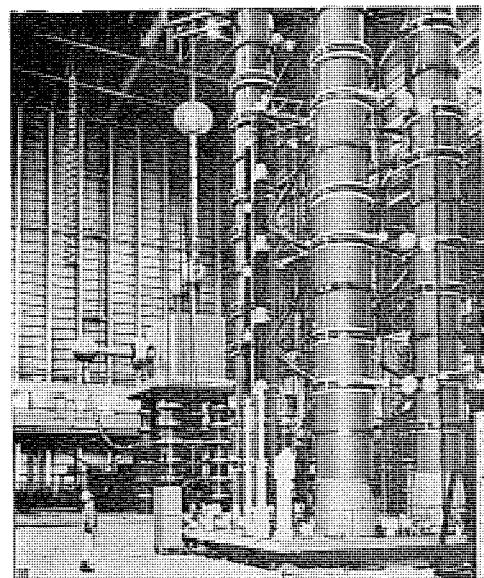
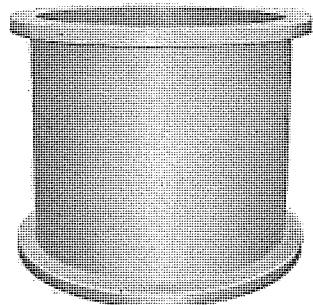


図 2.4 注型品で製作されたコンデンサからなる 4,000 kV 衝撃電圧発生装置および変圧器支持架台
4,000 kV impulse generator in which cast supporter and condenser tubes are used.

図 2.5 4,000 kV 衝撃電圧発生装置のコンデンサおよび試験用変圧器架台に使用されているがい管 (注型品重量 250 kg)

Insulating pipe for 4,000 kV impulse generator condenser and transformer supporter (weight 250 kg).



2.5 に示したような、重量で 250 kg、直径で 1,200 mm もある最大重量級の注型品が使用されている。

上記以外でも、多方面に注型品が使用されており、たとえば 6 kV クラスのメタルクラッドのブッシング類や絶縁支持物では、組立工数を簡素化するような構造のものが多数開発され、使用されている。また、30 kV クラスまでの注型ブッシングでは、油しゃ断器・ガスしゃ断器・断路器・キューピクル・変圧器等のそれぞれの用途に応じて各種電流区分のものが多数生産されているが、これ以上の電圧区分のブッシングについては、含浸技術によってコンデンサ形で生産されている。この他に多種類の油密端子類、タップ切換器用各種部品、各種電圧・電流区分に応じた計器用変圧・変流器、コンデンサ形計器用変圧器用ケース類、変圧器部品、電車用制御器部品、加速器用部品等の広範囲にわたって注型品が使用され、実績を積んでいる現状である。

3. 注型材料の選定 (原材料の選定)

レジンモールド 絶縁のうち、注型法は、注入時の圧力が小さいことから、内部の埋金やコイル部品への影響が小さくなることが特長である。高分子化学の進歩によって電気絶縁物としての注型可能な樹脂は多様化しているが、表 3.1 のように、それぞれ得失があり、その中でもエポキシ樹脂が主流を占めてきている。かかるエポキシ樹脂の真価を発揮させるためには、硬化剤・硬化促進剤・希釈剤・可とう(撓)性賦与剤・充てん剤の併用が必要であり、これらの配合技術は、単なる改質効果ではなく、各材料による複合効果を追求するものであり、電気部品全体を一つの複合材料としてとらえ、材料開発

表 3.1 注型レジンの特長
Features of casting resins.

	エボキシ	不飽和ポリエチル	ウレタン	シリコーン
硬化プロセス	酸、アミン硬化剤の多様性	ラジカル重合 取縮大	反応が早い 湿気注意	室温硬化可能
機械的性質	きわめてすぐれて いる	エボキシより劣 る	普通	劣る
電気的性質	酸無水物硬化の ものはすぐれている	良好	吸湿時の特性 が劣る	すぐれている
コスト	普通	有利	普通	高価

表 3.2 ビスフェノール A 形エボキシの分子量分布
Distribution of molecular weight on some bisphenol type A epoxy resins.

エボキシ	平均分子量	平均粘度	融点	分布(重量%)					
				n=0	1	2	3	4	5以上
A	367	0.097	13,000		88	10	2	Trace	
B	482	0.50	28,000		70	13	9.5	4	2.5 1.0
C	560	0.77		37	47	30	15	5	2 1
D	583	0.85		38	50	24	15	6.5	3.0 1.5
E	691	1.24		42	36	22	30	8	2 2
F	844	1.77		55	22	16	19	15	7 21
G	908	2.00		70	16	16	12.5	12.5	13 30
H	1,850	5.31		97	5	5	8	9	9 66

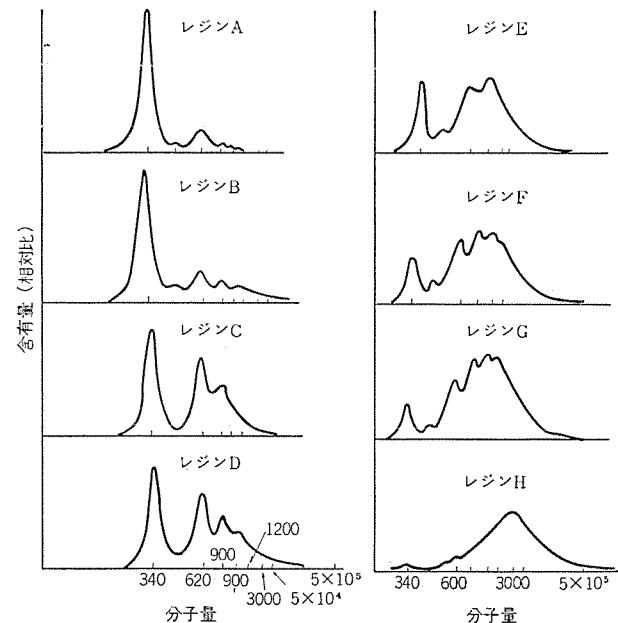


図 3.1 ビスフェノール A 形エボキシ樹脂の GPC クロマトグラフ
Gel permeation chromatography of some bisphenol type A epoxy resins.

や機器設計の段階から考慮を払って製造技術を確立している。

3.1 原料レジン

注型物の用途によって要求特性はかなり異なり、これに対応して原料レジンと硬化剤の選択は重要な要素である。機械的強度の点からビスフェノール A ジグリジルエーテルタイプのエボキシ樹脂が最も多く用いられるが、製造技術の点で、分子量の小さい液状樹脂を用いるか、固形樹脂を用いるかは、考慮を要する点である。特に、量産化を行なうために、設備・装置を自動化するうえには、液状のほうが取扱いが容易であるが、得られた製品の耐クラック性については、固形樹脂のほうが化学構造的にみて、ややすぐれている面もある。エボキシ樹脂は、縮合反応によって合成され、その分子量は一定の分布をもっている。平均分子量で近似していても、分子量分布ではやや異なると思われる場合もある。ガルパニエーションクロマトグラフで、代表的な

表 3.3 新脂環族エボキシ“エポサーモ CE レジン”の特性
Properties of new type cycloaliphatic epoxy resins “Epotherm CE resins”.

	項目	CE-200	CE-300	CE-600
生レジン	エボキシ当量 g/0.1 mol 粘度 CPS, 30°C	200~208 600~800	175~182 1,200~2,000	135~140 950~1,100
硬化特性	配合条件 レジン H H P A B D M A ゲル化時間 100°C 120°C	100 66 1 40~45 min 16~18 min	100 75 1 32~35 min 12~14 min	100 86 1 35~40 min 13~15 min
物理的特性	熱的特性 熱軟化温度 (針入度法) °C 耐熱衝撃法 (オリファント法) ヒートサイクル指数* 加熱減量 200°C/week, %	66 4 以上 2.2	105 1 1.8	145 0~1 1.6
	機械的性質 引張り強度 kg/mm² 曲げ強度 kg/mm² 曲げ弾性率 kg/mm² 電気的性質 誘電率 60 Hz 誘電正接 60 Hz % 体積固有抵抗 Ω cm 絶縁破壊電圧 kV/mm 耐アーチ性 s 耐トラッキング性 IEC法, CTI DIP法, kV	7.0 10.5 280~290 3.5 0.4 3×10^{16} 22 168 600 以上 3.0 以上	7.0 12.5 330 3.4 0.3 8×10^{16} 25 175 600 以上 3.0 以上	7.0 11.0 330 3.5 0.2 1×10^{17} 25 175 600 以上 3.0 以上

* クリヤレジンの値である。充てん剤を添加すれば向上する。従来形シクロエボキシのうち、内部オレフィンのエボキシ化物ではサンプル作成も困難。

市販エボキシ樹脂の分子量分布を測定した結果を表 3.2, 図 3.1 に示した。これらの分布の違いは、注型物製造条件や、得られた製品の耐クラック性などにも影響を与える。

ビスフェノールタイプのエボキシ樹脂は、耐トラッキング性の面で劣るので、汚損環境や屋外用の注型絶縁には、耐トラッキング性のすぐれたシクロエボキシ樹脂の適用が検討されている。シクロエボキシには、内部オレフィンのエボキシ化したものと、グリジルエチルの 2 系列のものが市販され、がいし・ブッシング等への適用が進んでいるが、前者は、機械強度の面でもろい性質が、注型・硬化後にクラックの生成となって問題を生じやすく、後者については、反応性の面で発熱が大きいことから、大形注型品の製造には困難を伴うことなどから、製造技術の面で留意する必要がある。この対策として前者については、シクロ系可とう性賦与樹脂を配合することで熱変形温度を下げてやるなど、最適樹脂配合が検討されている。最近、この欠点を克服する方向として、一二の耐トラッキングエボキシ樹脂としてヒドントインエボキシ (CIBA), CE エボキシ (三亜化成) などが開発されている。CE エボキシは、石油化学原料をベースとする新タイプの脂環式エボキシ樹脂で、耐トラッキング性とともに、熱衝撃性にもすぐれ、エボキシ当量に多様性のある各グレードのブレンドから各種の熱変形温度をもつものが得られる点、硬化速度の調節が従来のグリジルエチルタイプと比べて容易な点で特長がある。硬化物の特性の二三を表 3.3, 図 3.2 に示した。当社では現在、6 kV, 20 kV, 70 kV の各クラスのがいし・ブッシングを試

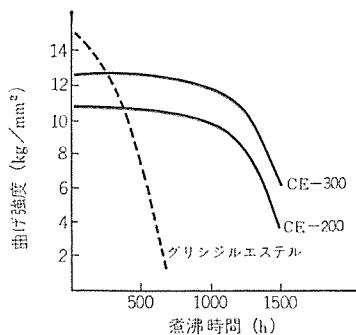


図 3.2 シクロエポキシ硬化物の耐煮沸性 (硬化剤 HHPA)
Boil-waterproof properties of cured cycloaliphatic epoxy resins (hardener HHPA).

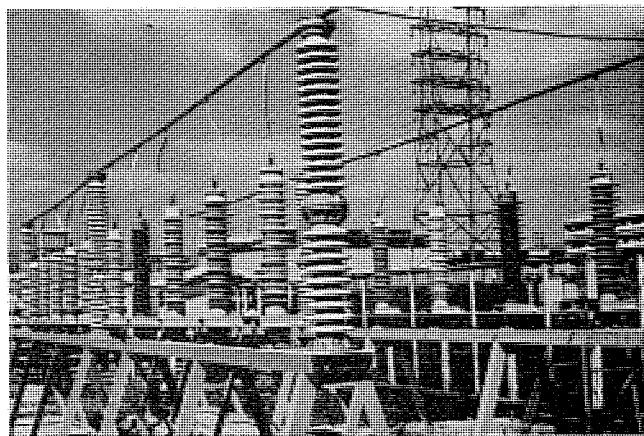


図 3.3 70 kV 支持がいしの屋外課電暴露評価試験
Test yard of outdoor exposure test under electric stress (70 kV insulator).

作し、屋外課電暴露試験を行なっている (図 3.3)。

3.2 充てん剤

エポキシ注型樹脂では、充てん剤は複合材料の要素成分として重要なものであり、その機械的強度・熱特性に及ぼす影響については別途に詳述するが、注型品の製造技術のうえでも大きな影響を与える。

充てん剤の添加は、樹脂硬化時における局部発熱の緩和効果をもたらし、内部応力の少ない硬化物を与え、大形注型品の耐クラック性を改善する。これは、熱伝導率の向上と、単位体積当たりの発熱量の低下、および相対的な系としての膨張係数を下げるところによる。一方、熱伝導率の高いある種の充てん剤は、比重が大きくて製造プロセス中に充てん剤の沈降が発生しやすく、留意する必要がある⁽¹⁾。

充てん剤が、配合物の加熱硬化中に沈降すると、不均質な硬化物になり、クラックの原因になる。充てん剤の沈降を、樹脂—充てん剤複合系の懸濁液中を充てん剤粒子が沈降すると考え、ストークスの法則をあてはめると、粒子の沈降距離は次式で表わされる。

$$H = \frac{g(d_P - d_S)D^2 P}{18 \cdot \eta_S} \cdot t \quad (3.1)$$

H : 沈降距離

d_P : 粒子の密度

g : 重力の加速度

t : 沈降時間

d_S : 懸濁液の密度

η_S : 懸濁液の粘度

懸濁液の粘度は、充てん剤の量とともに増加し、樹脂の硬化反応の進行とともに増加する。ビスフェノール A エポキシ樹脂—HHPA 混

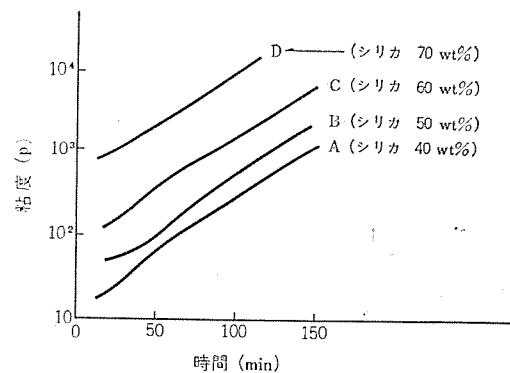


図 3.4 樹脂—充てん剤混合系の粘度変化 (120°C)
Viscosity vs. time depending on amount of filler content.

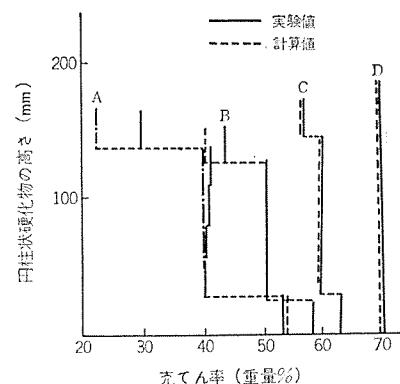


図 3.5 沈降による充てん率の変化
Distribution of filler content with sedimentation.

合物にシリカ粉末を 40 % (wt) から 70 % まで変えた 4 種の配合物を 120°C で反応させ、その粘度の変化をみると、図 3.4 のようになる。粘度の対数は、時間とともに直線的に変化するから、一つの配合物の硬化時の粘度変化は次式で表わすことができる。

$$\eta_S = \eta_{S_0} e^{kt} \quad (3.2)$$

η_{S_0} : $t=0$ のときの粘度

k : 定数

これを式 (3.1) に入れて積分すると、

$$H = \frac{g(d_P - d_S)D^2 P}{18 \eta_{S_0} k} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (3.3)$$

懸濁液の粘度が 1,000 ボイズになると、充てん剤の沈降はほとんどなくなるから、沈降時間は懸濁液の粘度がこの値に達するまでと考えてよい。

この配合物を 27 φ × 195 の試験管中に入れて 120°C で硬化した円柱状硬化物をブロックに分割し、灰分の測定から充てん剤の分布を測定した結果を図 3.5 に示す。最上部と最下部以外のブロックは、沈降によって失った粒子と同量の粒子が上のブロックより供給されるので、充てん率は初めの配合値と変わらない。また、充てん率の高い D では、各ブロックとも配合率はほとんど変わっていない。初めの粘度が高いからである。また、最上部のブロックには、上澄層が形成されており、この層の厚さと配合物の充てん剤の量とを図 3.6 に示す。懸濁液の粘度が高ければ高いほど、沈降が少ないわけであるが、粘度が高くなると、作業性が悪くなるから、充てん剤の量を増すにもおのずから限度がある。

充てん剤の種類によっても、配合物の粘度に影響を与えることは図 3.7 のとおりであり、実際に製造条件を設定するうえでは、これらの成分の影響のほか、さらに粒度分布についても注意を払う必

要がある。

3.3 硬化剤

注型絶縁には酸無水物系の硬化剤が使用される。これは、構造絶縁物として必要な電気的・機械的な性質を機器の使用温度より高い温度まで保持することを要求されるからである。図3.8に示すように、注型品の基本的な特性は、ガラス転移温度(T_g)以上で大きく

変わり、得られた製品の使用上からは好ましくない性質になるので、 T_g を高くするために一般には酸無水物硬化剤が用いられる。

硬化剤は、配合物の粘度・ポットライフ・硬化条件に大いに影響を与える。そして、配合時の取扱いやすさは、液状であるか、固形であるかによって異なり、計量・混合・注入といった操作中の揮発性も作業方法・装置に影響を与える、特に、真空注型を行なう際の樹脂混合物からの硬化剤の揮発は、注型操作をそがいすることが多いから、その真密度管理・設備設計に注意を要する。

3.4 硬化促進剤

前述のように、硬化速度を促進・調節することは、単に注型品の生産効率を向上させるのみでなく、硬化反応を注型品の最適部分より順序立てて行なわせて内部応力・ひけ・ボイドなどを生じないようにし、寸法精度の高い、耐クラック性にすぐれた注型品を得るうえでも重要である。

反応の促進とともに、配合樹脂系のポットライフが長いこと、さらに、理想的にいえば、潜在性硬化剤が開発されれば、配合は一液性にすることが可能になるので、多くの研究がなされている。しかし、これらの実用化への選択は重要である。促進系硬化反応の特長づけには、示差熱量分析法(DSC法)による等温熱硬化曲線は、有効な手段の一つである。二三の促進剤の添加効果をゲル化時間の温度特性(図3.9)で示した。これらのアレニウスプロットより、多くは、活性化エネルギー15~18 kcal/molにあるが、Fのように異なった挙動を示すものもある。

一般的には、3.3節に記したように、 T_g を境にして材料物性が大きく異なってくるので、注型品の製造工程チェックの手段として熱変形温度の測定を実施することがよくあるが、上記のDSC法による T_g の測定は、試料の量が少なくてよいので、当社で採用している。図3.10にDSC法による T_g と熱変形温度HDTとの関係を示した。

4. 製造技術

絶縁あるいは構造絶縁物として有機材料を用いる場合には、適切な材料を選択しなければならないが、注型品の場合、素材の選択とともに、注型品を生産する製造技術上の問題が製品機能に大いに影響する。次に、注型法と注型絶縁物を製造するうえでの二三の問題点について述べる。

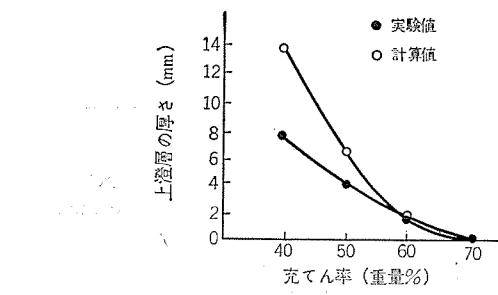


図3.6 上澄層の厚さと充てん率との関係
Thickness of upper clear layer vs. filler content.

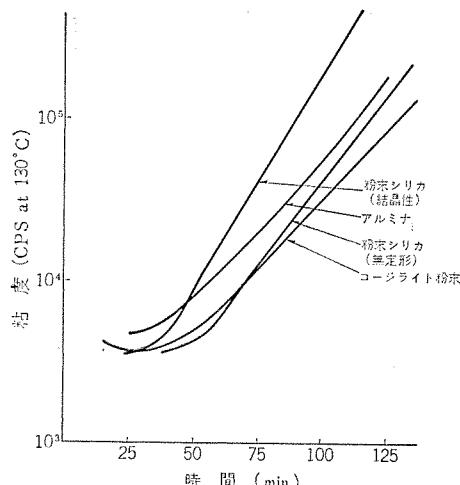


図3.7 樹脂混合物の粘度に及ぼす充てん剤の影響(130°C)
ビスフェノールA形エポキシ100部/酸無水物硬化剤30部
/充てん剤200部

Effect of filler component on viscosity of resin mixture
(at 130°C).

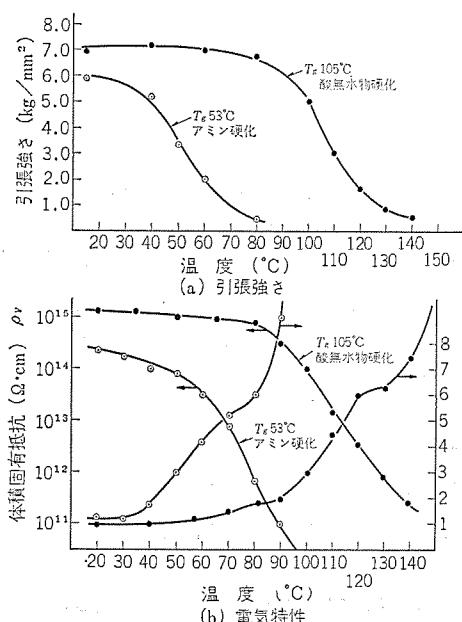


図3.8 エポキシ樹脂硬化物の特性
Properties of cured epoxy resin vs. temperature.

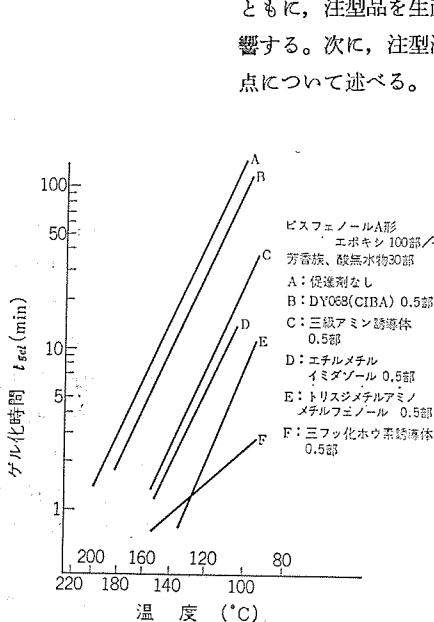


図3.9 促進剤によるゲル化時間の変化
Effect of accelerator on gel time.

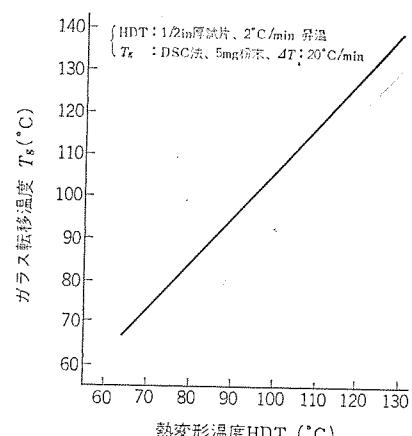


図3.10 エポキシ硬化物のHDTと T_g との関係
Glass transition temperature (T_g) measured by DSC method vs. heat distortion temperature (HDT).

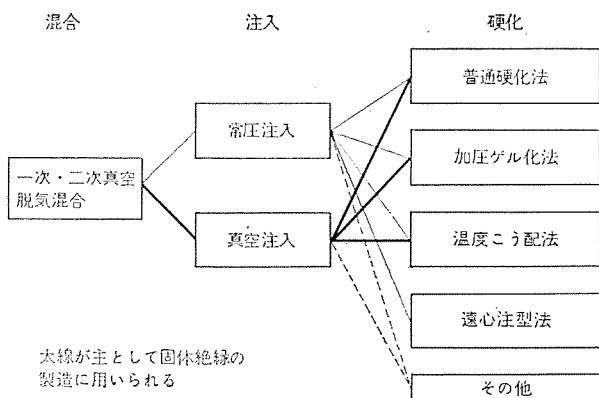


図 4.1 注型方法
Casting process.

4.1 注型法

送配電機器に用いられるエポキシ樹脂は、特性上、酸無水物硬化のものがほとんどである。注型の方法にもいろいろあるが、ここでは、キャスティングに限定する。注型操作は、図 4.1 に示すように、原材料の配合と混合、金型への注入および硬化の三つの段階に分けられる。

4.1.1 混合操作

注型は、レジンの配合から始まる。普通、酸無水物硬化の場合、各材料は加熱状態で混合される。混合順序は、ポットライフの関係から硬化剤が最後に加えられる。硬化剤が混合されれば、ただちに反応が開始され、粘度が上昇し、ゲル化に至る。したがって、注型に適した粘度以下で金型内に注入しなければならない。電気用の場合、混合操作は、真空中で行ない、レジン混合物中にボイドを残さないことが絶対的条件である。混合温度は、注入操作に要する時間を十分に保証できるポットライフになるような温度を設定する。

4.1.2 注入操作

(1) 常圧注入

真空脱気されたレジン混合物を大気圧のもとで金型に注入する常圧注入は、注型品を構造材料として用いる場合、あるいは低電圧用で単純な形状のものに適用され、高電圧用注型品には次の真空注入が適用される。電子部品などの埋込みにおけるポッティングは、常圧注入の場合が多い。また、遠心注型も常圧注入である。

(2) 真空注入

固体絶縁として送配電機器に用いられる注型品の場合には、すべてこの方式がとられる。これは、金型内に残存する空気、注入時に巻き込まれる空気を除去し、注型品をボイドレスにするための前提条件である。

真空注入には、金型を真空ふんい気(真空タンク)内に置き、真空下でレジンを注入する方法と、金型内を直接真空にしてレジンを注入する、二つの方法がある。

4.1.3 硬化法

(1) 普通硬化法

一般に行なわれる硬化法で、レジンの注入された金型を加熱炉に入れ、所定の温度・時間に保持して硬化させる。硬化収縮による応力、硬化後の熱応力を少なくする意味で時間をかけてゆっくりゲル化させ、その後に高温で後硬化させる、2段硬化が行なわれることもあり、金型の離型サイクルは比較的長い。

(2) 加圧ゲル化法⁽²⁾⁽³⁾

速硬化配合を用い、高温でゲル化させて金型の離型サイクルを非常

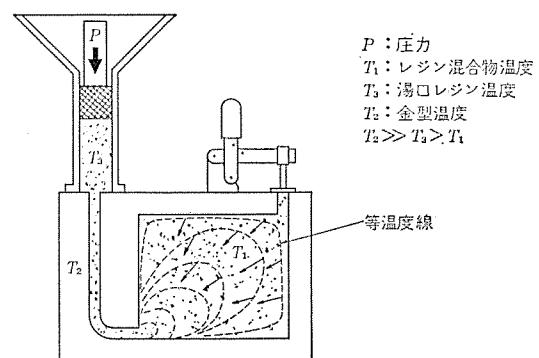
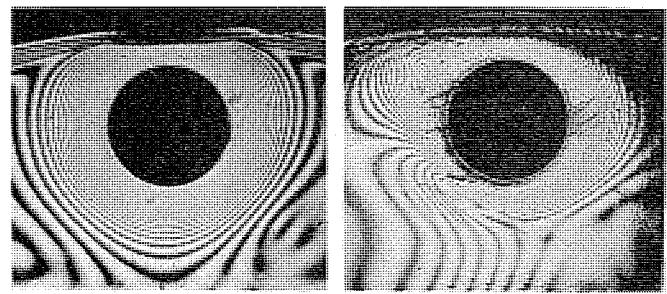


図 4.2 加圧ゲル化法の原理
Principle of the pressure gelation process.



(a) 普通硬化法

図 4.3 光弾性による埋金周辺の主応力分布
Isochromatic lines, stress distribution.

に短縮させる硬化法で、図 4.2 にその原理を引用した。加圧ゲル化法では、a) 反応性の高い樹脂配合体を用いる。b) 型の温度が樹脂混合物の温度より 60°C 以上高いこと。c) 注型された樹脂を湯口の部分から比較的低い圧力で押しながらゲル化させるという新しい作業方法が取られる。この硬化法の一つの特長は、金型外周と中心部とのゲル化時の温度がほぼ一定になることである。また、ゲル化が一端より始まり、収縮に見合うレジンが湯口から補給されるので、注型品の内部応力が少なくなる傾向を示す。一例として注型品に埋め込んだ埋金周辺の応力の状態を、実物モデルについて光弾性で調べた結果を図 4.3 に示す。普通硬化法の場合には埋金に対して同心円状に多数のしまが確認されるが、加圧ゲル化法の場合にはしまの数も少なく、その形状も流れていることがわかる。このしまの流れは、加圧した位置と関係があり、ゲル化した後もレジンはしばらくは流動状態にあることを意味するといえよう。

(3) 温度こう配法

この方法は、ゲル化時の金型に湯口より遠い位置から湯口に対して温度こう配をつけ、湯口より遠い位置からゲル化させる方法で、加圧ゲル化法と同様な効果があり、ひけ等のない注型品を得ることができる。特に、大形注型品に適する方法である。

(4) 遠心注型法

速硬化配合を用い、回転する金型にレジンを注入し、遠心力によって金型外周部にレジンを押しつけてゲル化させる。注入は、常圧で行なうが、配合樹脂が遠心力によって周方向へ押し出され、結果として必然的にボイドは中心部へ移動するので、ボイドの無い製品が得られる。この注型法は、一般的に、同心円的な製品、ブッシング、がいし等に利用されて成果を得ている。

4.2 高電圧用注型絶縁物製造上の問題点

高電圧用注型絶縁物を製造するうえで重要な項目でまとめて整理すれば、次のようになる。

- (1) 各種特性面でバランスのとれた材料の選択
- (2) 樹脂の硬化収縮、熱因子等によって発生する内部応力の緩和と、クラックの発生防止、その対策としての製品形状の研究
- (3) 樹脂組成物中に含まれる気ほう(泡)や、硬化時に生ずる硬化収縮ポイドの除去
- (4) 金型技術の確立、製造設備の研究開発
- (5) 硬化収縮によって発生する、注型品表面でのいわゆる“ひけ”現象の防止、表面精度の保持
- (6) 樹脂・硬化剤・充てん剤等の原材料管理、プロセス管理による異物混入防止
- (7) その他、注型品表面への導電処理、電界緩和技術等

以上のようなテーマがあげられるが、これらのうちのいくつかの項について簡単に説明を加える。

注型材料の特性とは、ガル化までのいわゆる樹脂組成物としての特性と、硬化が終わって製品になってからの特性とに分かれるが、まず、配合樹脂組成物については、それぞれの原材料について1章でも少し述べているように、要求性能を満たし、異物を含まない、管理されたものでなくてはならない。この材料は、4.1節で述べられているように、前処理→予備混合→調合→注入→硬化というプロセスを経て製品になるが、液状段階では、一定の可使時間を持つこと、比較的低粘度で、気ほう・水分等が除去可能なうえ、流れ特性も良好なこと、硬化に至る段階で充てん剤の沈降を生じないこと、著しい発熱を制御できるような充てん系・硬化システムであること、硬化収縮が少ないと等と要求条件は非常に多い。硬化を終えた製品においては、それぞれの用途に応じた特殊な特性を備えていることは当然であるが、一般的な電気・機械・物理・化学的特性、その温度特性、クリープ特性、疲労特性、寿命特性等もバランスされた物性値を持っていることが重要である。特に、高電圧用注型材料として開発された配合物の一般特性については、後述の村上らの文献に記載されている。

(2) 項の応力緩和、クラックの防止技術については、本誌の村上らの縮小形変電所における固体絶縁技術、および土方らの“エポキシ樹脂注型品の内部応力と硬化過程の関係”等でも詳述されているが、材質的にみれば、配合物の膨張係数を埋込材料のそれに近づけることであり、樹脂自身の反応性を制御することにあるが、このために樹脂・充てん剤・硬化剤・硬化促進剤等について総合的な研究がなされている。また、硬化法もきわめて重要であるので、その温度・時間・冷却法についても検討がなされている。しかし、なんといっても目的とする製品の形状が最重要であり、埋込物のある場合には、端末部のR形状、抜け、まわり止め処理、埋込物と周囲注型品の肉厚との関係、クッション処理、L・T形状等におけるコナのR、おう(凹)部の肉厚の変化、Rのとり方にも注意を払う必要がある。その評価法としては、光弾性法⁽⁴⁾・切削法・ひずみ(歪)計測法・ヒートショック法・ヒートサイクル法・破壊試験等の各種手法があげられるが、それぞれを使いわけて安定した製品を得るようにしている。

(3) 項のポイドについても、高電圧絶縁材料として長期にわたる寿命保証をするうえできわめて重要な問題になってくる。まず、材料については、前処理段階での乾燥、真空処理方法が問題であり、注型時には設備上の問題も見のがすことはできなく、注入方法も重要である。また、型についても検討項目が非常に多く含まれていて、多くの興味あるデータを得ている。

(4) 項については、当社では特に所内に金型や設備について総

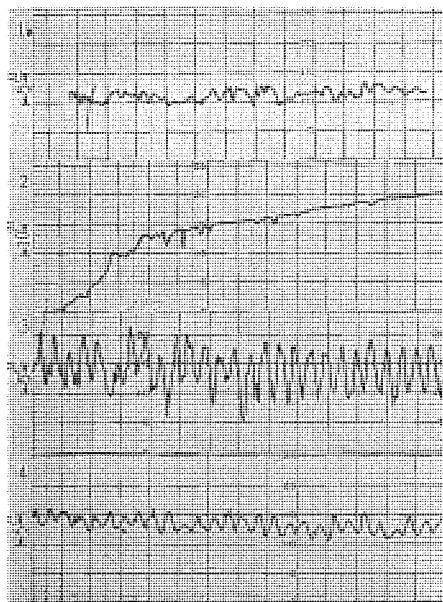


図 4.4 注型品の表面精度 (タリサーフによる)
Surface of casting products (measured by Tarysurf).

合的に研究する部門を持ち、新しい技術の実現を迅速に行ない、機動性を発揮している。

(5) 項のいわゆる“ひけ”現象については、樹脂の硬化時に熱供給のアンバランスが生じ、樹脂補給口より樹脂の補給が十分に行なわれなくなり、製品表面に段差ができる現象であり、ひどい場合にはポイド状になることも起こり、いずれの場合にも高電圧絶縁物として使ううえは不適当になる場合もある。この解決策としては、4.1節に示した加圧ガル化法・温度こう配法等が最適であり、ある特定の製品で成果をあげている。図4.4に、面粗度計(タリサーフ)によって測定した注型し放しの表面の状態、ひけを起こしている部分の状態、機械加工後の状態、加工後に特殊処理を施した状態等の図を載せたが、注型品に対してうねり・ひけ・寸法精度等からやむを得ず機械加工を施さねばならぬ場合でも、特殊な方法で耐温性・耐ガス漏れ性等にすぐれたなめらかな面を得ることも可能である。

未説明の、注型絶縁物製造上の問題点も含め、当社では、基礎的な研究成果を積み上げ、信頼性の高い製品を数多く生産している。

5. む す び

高電圧用注型絶縁物の製造技術の一部について述べた。当社においては、以上のように、材料・製品設計・製造技術・設備・金型開発・製品評価等の個々の問題点の有機的結合を図り、十分な管理のもとに製品の生産を行なっている。今後とも、注型絶縁技術の急速な進歩・発展が予想されるが、当社では、基礎研究、製造プロセスの検討、材料開発などを積極的に行ない、優秀な性能の製品を作り出していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 西崎、福島、安田: 第21回熱硬化性樹脂討論会(昭46)
- (2) 長沢: 高分子加工, 8, 12 (昭46)
- (3) Dieterle W., Schirr J.: Bull Schweiz Elektrotech., 63, [22] 1300~1304 (1972)
- (4) 高橋、小飼、坂井他: 三菱電機技報, 44, 9, 1183 (昭45)

固体絶縁物の評価試験

高橋 康英*・桑原 宏**・信崎 泰秀**
藤井 勲**・高橋 宏次**

Confirmation Tests for Solid Insulation

Itami Works Yasuhide Takahashi・Hiroshi Kuwahara・Yasuhide Shinozaki
Isao Fujii・Kohji Takahashi

The development and progress in solid insulation technique has accomplished the production of marketable articles of compact switchgear such as gas insulated switchgear and solid insulated switchgear. Solid insulation used for the component parts of switchgears is to undergo extremely severe operation electrically, mechanically and chemically. To produce marketable insulation goods of these kinds, it needs not only the establishment of manufacturing technique but also the confirmation of the performance in thorough consideration of practical operation.

Description is made in this report on the development for confirming solid insulation to be used for the compact switchgears, the process and the result of test on practical performance, the test method of products and the inspection standard.

1. まえがき

ガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear; 以下, GISと略称) や固体絶縁開閉装置 (以下, ミニクラッドと略称) は、従来の装置と比べて、その容積が大きく縮小されている。これら縮小形開閉装置に使用される絶縁物は、この縮小率に反比例して高い絶縁耐力が要求されるとともに、縮小形開閉装置としての種々の特殊な性能を満足しなければならない。当社ではこの絶縁材料としてエポキシ樹脂注型絶縁物を開発し、絶縁物単体での開発試験および実機として適用された状態での性能検証試験、さらに実系統における実用化試験等を実施して多くのデータを蓄積し、この絶縁物の十分な性能と信頼性を確認することができた。

注型絶縁物は、機器の大形化・大容量化に伴い、単品自身が大形化の傾向を有している。さらに、絶縁物は、導電電極や取付金具等の埋金類との一体注型を行なっており、電気絶縁材料としてばかりでなく、構造材料としての役割をも果しており、その電気的・機械的性能はともにすぐれたものであることが要求されている。

本報告においては、これら縮小形開閉装置に使用する固体絶縁物について、その開発・実用性能試験の経過と結果、および製品試験方法・管理基準等について述べる。

2. GIS用絶縁物の開発試験

GISに使用される絶縁物には、絶縁スペーサ・絶縁操作棒・支持筒・消弧室筒・抵抗接点筒等があるが、これらはすべて注型絶縁物である。これら絶縁物は、SF₆ガス内の高電界中で使われる所以、その電気的評価は特に十分に行なわなければならない。また、500 kV機器に使用されるものは、1個当たりの注型品は大形であり、さらに、導体埋金類を同時に注型している。これらの理由から、実機に使用された場合の機械的強度を十分に検証しておかなければならない。

2.1 長期試験

GISに使用するエポキシ樹脂注型品の試験片による長期試験を実施した結果、悪条件でも使用時の電界強度で50~

100年の寿命を保証できるものと考えられるが、さらに、500 kV GISに使用される注型品の実物を長時間課電して性能の確認を行なった。試験は、図2.1, 2.2に示すように、特殊変圧器の上部にSF₆ガスを充てんした試験用タンクを取り付け、この中にスペーサ、およびしゃ断器に使用する絶縁操作棒・支持筒等を実際に使用する場合と同一の電位分布になるように配置して420 kV (=550×1.3/√3)を連続印加した。

長期課電試験は、昭和44年6月から開始され、昭和46年4月に取り出し、図2.3, 2.4に示す試験容器で耐電圧試験および部分放電試験を実施した。試験の結果、AC耐電圧840 kV1分間、インパルス耐電圧±(1×40)μs 1,800 kVのいずれも良好で、部分放電試験も413 kV (=550×1.3/√3)において検出感度1 pCで内部コロナを認めなかった。このように、常規大地電圧の1.3倍の電圧を約2年間連続印加した後でも、耐電圧性能は良好であり、劣化の傾向は全く認められない。さらに、同じ試料について引き続き課電中であ

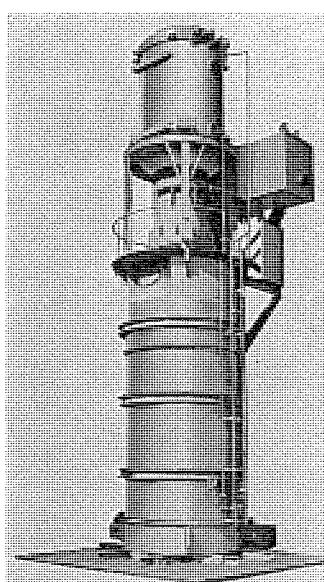


図2.1 絶縁物単体試験状況
Voltage endurance test equipment.

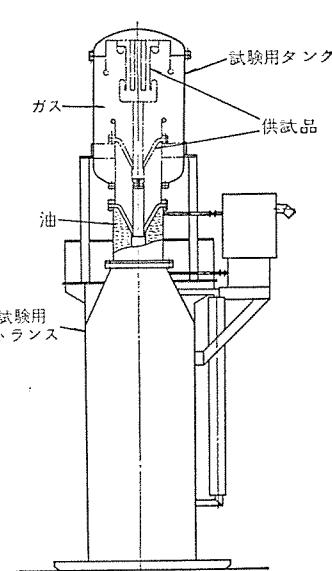


図2.2 絶縁物単体試験装置
Sectional view of voltage endurance test equipment.

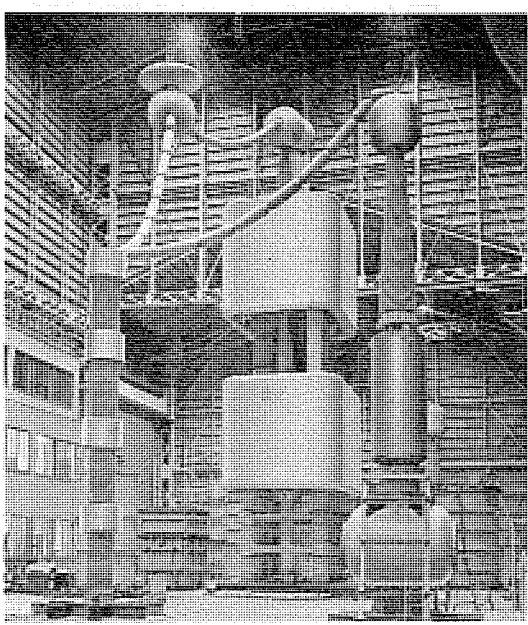


図 2.3 絶縁スペーサ試験状況
Spacer test equipment.

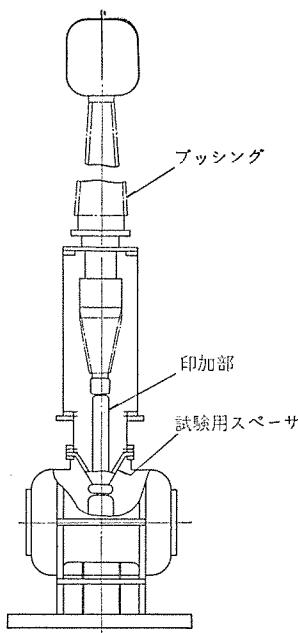


図 2.4 耐電圧試験装置
Sectional view of spacer test equipment.

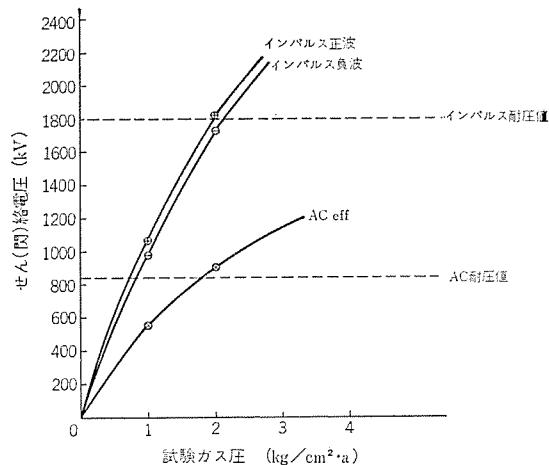


図 2.5 500 kV スペーサのせん絡特性
Flashover characteristics of 500 kV Spacer

り、現在に至る 4 年間異常を認めていない。

2.2 電気的特性試験

500 kV 絶縁スペーサについて、スペーサ近傍の電界を実機とほぼ同様な状態において耐電圧・部分放電・せん(閃)絡特性試験を行なった。試験は、図 2.3、2.4 に示す試験容器を使用して実施し、耐電圧は AC 840 kV、標準インパルス 1,800 kV、開閉インパルス 1,200 kV のいずれも良好で、部分放電試験は定格電圧に相当する 550 kV まで印加して検出感度 1 pC で内部コロナを認めなかった。引き続き、せん絡特性試験を実施したが、その結果を図 2.5 に示す。同時に実施した $V-t$ 特性試験結果と、せん絡部分にかかる電界とを照合・検討し、常時使用状態での $V-t$ 特性を推定・作成したものを図 2.6 に示す。絶縁スペーサの電気的特性を耐電圧および絶縁協調面から検討すると、次の事が考えられる。

(1) 耐電圧特性については十分に余裕があり、組立公差、機器の動作、振動等に対しても問題はない。

(2) 線路引込口ギャップを設置した場合、BIL に対する余裕はあるが、1 μ s 以下の $V-t$ に対しての絶縁協調には検討を要する。

(3) 棒ギャップでは、通常、負極性のほうが正極性より 10~15 % 高いのに対して、GIS 内部の SF₆ガス中では、この逆に 5~10 % 低い。棒ギャップとの協調のみを考えると、GIS が平たん(坦)な特性であり、これに極性効果が加わって急しゅん(峻)波頭領域での協調に注意する必要がある。

(4) 急しゅん波頭での保護は、経済性を考えて球ギャップも考えられるが、500 kV の信頼性向上のうえから避雷器の設置がより好ましい。

2.3 機械的特性試験

500 kV 絶縁スペーサのように、大形注型品の機械的強度については、単に材料試験値に基づいて設計するのでは不十分で、残留応力、繰返し応力による疲労、高温時の強度、大形化による強度低下等を考えて設計・評価することが必要である。エポキシ樹脂注型品は、高温の液状樹脂を型に流し込んで固化化させるが、高温から室温に冷却する際に内部の埋込金属と樹脂との熱膨脹係数の差の影響で残留

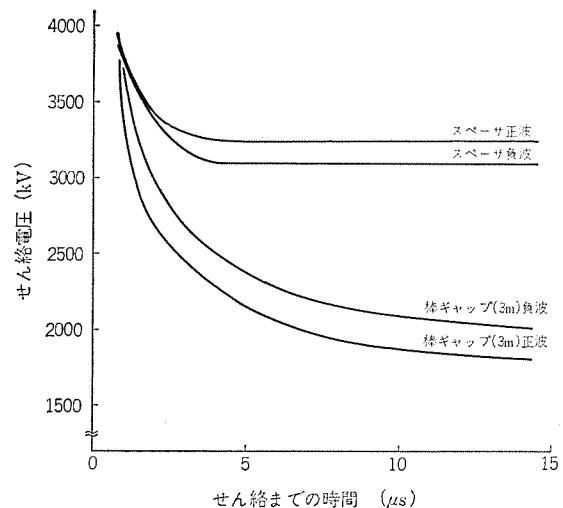


図 2.6 500 kV スペーサ $V-t$ 特性
 $V-t$ characteristics of 500 kV Spacer.

応力が生ずる。また、絶縁物は、機器に組み込まれて使用される段階では高温(90°C 以下)で使用されるので、その範囲内での検証を実施する必要がある。

500 kV GIS 用スペーサについて、上記の事を考慮して評価を行なった。ヒートショックは、スペーサ表面の各部にひずみ(歪)計を取り付け、0°C(水中)→90°C(温水)に各 1 時間放置するサイクルを 3 サイクル実施し、各部での応力変化を求めた。発生応力は 2~3 kg/mm² であり、エポキシ樹脂成形体の引張り強度の 8.2 kg/mm² と比較して十分に小さいことがわかった。試験状況を図 2.7 に示す。

水圧破壊試験は、0°C(水中)→75°C(温水)のヒートショックを 3 回実施したスペーサの表面各部にひずみ計を付け、図 2.8 のように、水圧を加えた。破壊圧力は 23.9 kg/cm² であり、破壊時の最大応力は、破壊箇所とほぼ同じ位置で発生し、6.3 kg/mm² であった。試験片の引張り強度は 8.2 kg/mm² であるが、この 500 kV スペーサは大形注型品であるので、強度が低下したものと考えられる。

曲げ破壊試験は、常温および高温(90°C)の両条件で図 2.9 のよ

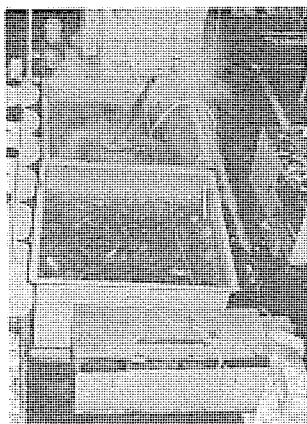


図 2.7 ヒートショック 試験状況
Heat shock test.

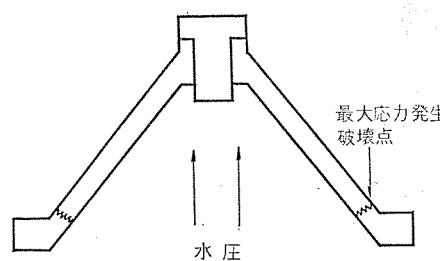


図 2.8 水圧破壊試験
Hydraulic test.

うに実施した。試験の結果、破壊点近くの曲げ応力は、常温および高温においてそれぞれ 8 kg/mm^2 , 7 kg/mm^2 であった。材料試験片の曲げ強さは 12 kg/mm^2 であるから、大型注型品であることによる強度の低下が考えられる。しかし、高温での曲げ破壊強度については、この程度の温度では明らかな強度の低下はない。

以上のように、 500 kV 絶縁スペーサについての機械的強度を検証したが、残留応力や高温使用、また、繰返し疲労による応力の低下等を考慮しても十分に余裕のある強度を有するといえる。

2.4 絶縁スペーサのリーキテスト

GIS 用絶縁スペーサは、しゃ断器・断路器・母線の仕切りとして SF_6 ガスのガス漏れに対する性能を有していかなければならない。この検証方法として、絶縁スペーサをタンクに取り付け、タンクにガスを封入し、スペーサの中心導体に実器での使用温度を想定して常温 \rightarrow 90°C のヒートサイクルを加え、スペーサ中心導体およびフランジ部の外部へのガス漏れ試験を実施した。中心導体およびフランジ部分にはガス漏れに対する特殊な処理が施されており、このヒートサイクルを 50 回繰り返し実施したが、いずれの箇所からもガス漏れは認められず、ガス漏れに対する十分な性能を有することが実証された。

2.5 スペーサ変形時の耐電圧試験

GIS 機器のある一部で内部アーカーが発生し、アーカーによるガス圧上昇が起こった場合、スペーサの片側に破裂板の破壊圧力までの圧力が加わってスペーサが変形するが、この状態において耐電圧性能に異常がないかを検証した。試験は、図 2.10 に示すように、スペーサ片側に破裂板の最高破裂圧力 $9 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ 、他側に機器の最低ガス圧 $2.3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ を封入し、AC 840 kV 1 分間、Imp (1×40) μs $1,800 \text{ kV}$ の正負各 1 回を印加し、いずれの場合にも異常のないことを実証した。

500 kV 絶縁スペーサの水圧試験時に中心部の変形量をダイヤルゲージで測定しているが、この結果では $6.7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の差圧で中心部が軸方向に 0.9 mm 変位するにすぎず、また、その状態における電位分布も測定したが、絶縁物表面の電界強度の変化は無視できる。

2.6 長時間運転後の絶縁スペーサの化学的分析

154 kV 絶縁スペーサで現地運転 8か月のものを持ち帰り、スペーサ表面の化学的特性の変化を測定した。試料をスペーサ表面から削り取り、赤外線吸収スペクトルの測定、顕微鏡写真撮影およびフッ素の定量的測定を行ない、表面近くの樹脂材料が、運転中における部分放電や分解ガスによって化学的特性の変化を生じてないかを検証した。試験の結果は、いずれの特性についても、新品スペーサのそれと比較して変化なく、絶縁物の表面は良好な状態を保っていることが判明した。

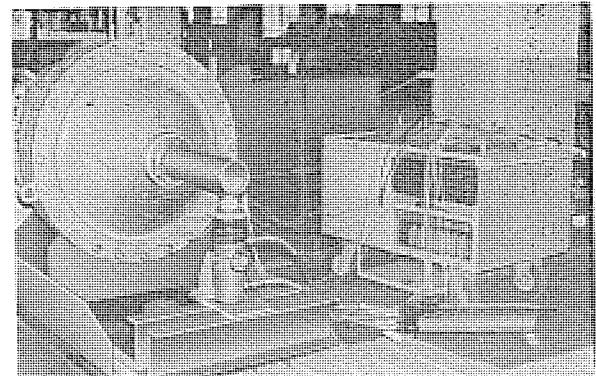


図 2.9 曲げ破壊試験状況
Bending stress test.

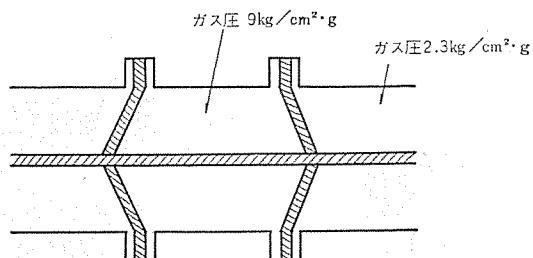


図 2.10 変形時のスペーサ試験
Spacer test with distortion.

3. ミニクラッド用絶縁物の開発試験

固体絶縁開閉装置（ミニクラッド）用絶縁物の特長は、その絶縁物の内部に大きな導電用電極および電界緩和用のシールドリング等の複雑な形状の埋金を有していることである。したがって、このミニクラッド用絶縁物の評価については、成形時の残留応力、および運転時のヒートサイクルに着目した。特に、大電流用の大きな導電・電極を同時に成型する絶縁物については、注型後の絶縁物中の温度こう配、および樹脂と埋め込まれた電極との熱膨脹係数の違いによる残留ストレスによるクラックについて注意深く検証試験を行なった。

3.1 長時間課電通電試験

送電線用 (400 A) 2 回路分、母線連絡用 (1,500 A) 2 回路分および PT-LA 用 1 回路分を接続し、それぞれについて 24 kV の電圧を印加した状態で昼間は定格電流を通電し、夜間は電流を停止するという課電通電試験を実施した。試験は約 1 年間にわたって継続され、その間、1か月目、3か月目および 6か月目と最終段階とにおいて絶縁抵抗・ $\tan \delta$ ・耐電圧試験および部分放電試験を実施した。いずれの試験結果についても異常を認めず、機器として十分に実用に耐ええることが証明された。試験状況を図 3.1 に示す。

3.2 ミニクラッド用注型品のヒートショック

ミニクラッド用絶縁物は、埋金との一体注型による硬化時の残留ひずみによって運転時の導体温度上昇等によるクラックが問題になる。この問題に対する検証を行なうため、絶縁物全体を $0^\circ\text{C} \rightarrow 90^\circ\text{C}$ 間の繰返しヒートショック、導体のみに通電してのヒートサイクル等の熱応力に対する絶縁物の耐クラック性に関する試験を実施した。絶縁物に対しては、その加熱前後に部分放電試験を行なって欠陥の有無の検証を行ない、いずれも異常なく十分に使用に耐えることを証明することができた。

3.3 ミニクラッド用絶縁物の振動試験

絶縁物が実器に使われる場合の機械強度・振動等の検証も兼ねて耐震試験（図 3.2）、輸送試験（図 3.3）および絶縁物の落下試験等

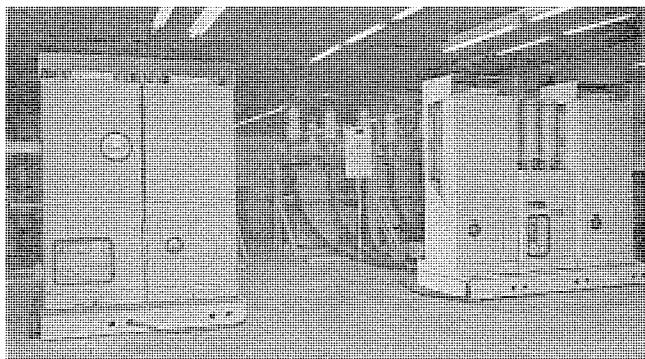


図 3.1 長期課電通電試験
Long duration test applied with voltage and current.

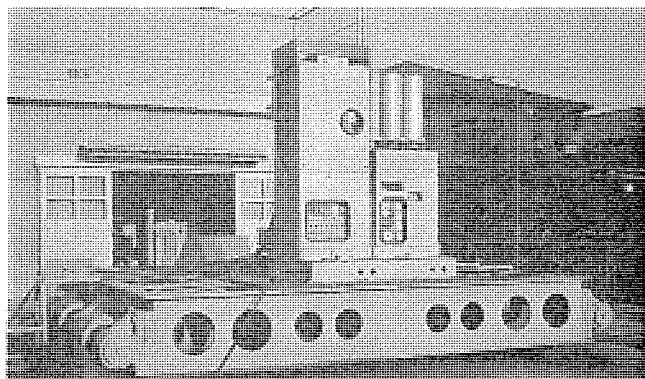


図 3.2 耐震試験中のミニクラッド
Miniclad under seismic test.

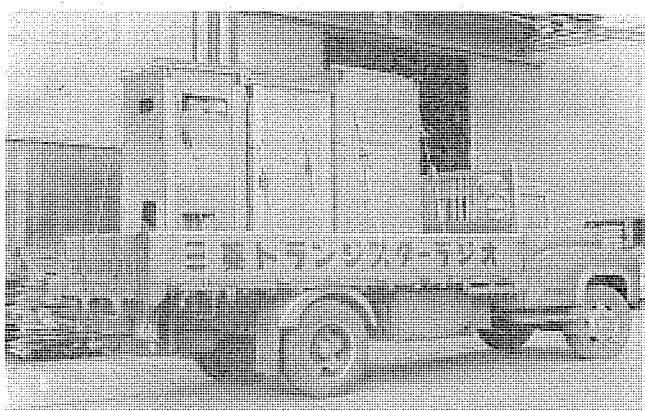


図 3.3 輸送試験中のミニクラッド
Miniclad under transportation test.

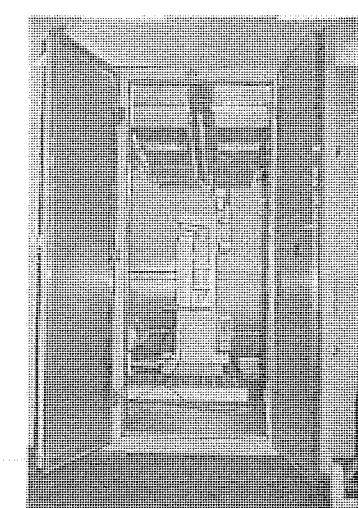


図 3.4 環境試験中の
ミニクラッド
Miniclad under extreme
condition.

を実施した。耐震試験については、エルセントロ地震波および共振点における正弦波加振を行なった。輸送試験は、伊丹—東京間を往復輸送し、その間に発生する加速度を測定し、また、落下試験では 10~45 mm の落差による加速度の測定を行なった。輸送試験では 0.5 G ~1.2 G、落下試験では 10 G までが記録された。試験前後の検証として、耐電圧および部分放電試験を実施したが、いずれも異常なく、十分に実用に耐えることが証明された。

3.4 環境試験

ミニクラッド全体を、図 3.4 のように、恒温槽(槽)に入れ、-20 °C から 40 °C、湿度 100 % の状態に保ち、耐電圧特性など絶縁物の実用性能の検証を行なった。試験の結果、特に異常は認められなかった。

4. 製品試験

4.1 非破壊試験方法の検討

ガス絶縁開閉装置や固体絶縁開閉装置に使用される絶縁物は、注型品が多く使われるが、これら注型絶縁物は、導電用電極や、電位傾度を緩和するためのシールドリングが同時注型される。これら注型絶縁物は、絶縁強度や機械強度の長所を生かし、大形かつ複雑な形状の注型品を製作し、それら機器の絶縁構造部品として高い電位傾度、高い応力で使われる場合が多い。

これらの理由から、製品として使用される注型絶縁物は、その製作完了時点できびしい性能検証を行なう必要がある。これら絶縁物は、高電位傾度、高応力で使われる所以、製品の製作段階でボイドクラック等の欠陥が存在すれば、それは部分放電による絶縁劣化や、クラックの進展によって絶縁物の破壊に至るものである。

非破壊試験方法としては、容量・誘電損失の測定、超音波法、X線透過法、部分放電音の聴取、発光・発熱の観察、オゾンの化学的検出、ラジオ雑音測定、部分放電パルスの数や大きさの測定、部分放電開始消滅電圧の測定等が考えられる。これらの測定により、絶縁物中のボイドクラック等の欠陥検出が試みられた。しかし、絶縁物中ではきわめて小さな欠陥を許容することは、絶縁破壊につながることであり、そのためには電圧を印加したときに発生する部分放電電荷量の測定が最適である。その他の機械的・電気的試験方法は、いずれも絶縁物のきわめて小さな欠陥を見出すには、現在の技術では測定精度が十分でなく、たとえばX線透過法の場合、絶縁劣化のトリガになる、電極と樹脂境界面の欠陥検出は困難なことがある。

4.2 部分放電電荷量の管理基準

縮小形開閉装置に使用される絶縁物は、その製品完成時点での製造段階の欠陥の有無について非破壊検査が行なわれる。この非破壊検査は全数について実施され、部分放電試験による性能検証が実施される。絶縁物単体は、そのきわめて小さな欠陥をも検出されなければならない。絶縁物が機器に組み立てられた状態では、工場環境、試料容量、試験用変圧器等の電源からの雑音および試験用変圧器から試料までの長い印加用部分放電防止導体等のため、使用されている絶縁物の長期絶縁寿命診断に必要な程度の部分放電電荷量の検出感度を求めるのは非常に困難である。これら絶縁物の寿命診断と検出感度とを総合的に検討した場合、絶縁物は、製品完成後の単体状態で非破壊試験としての部分放電試験を実施しなければならない。

許容される部分放電電荷量に関しては、各種のデータが提供されているが、Kreuger は絶縁物中のボイドの部分放電電荷量に関する

実験結果を発表していく中で 3 kV/mm の電位傾度では 10^{-12} クーロンを越える部分放電は有害であると述べており、Davis, Milidner および Hamphries の実験結果とも一致している。

機器で使用される絶縁物は、常規大地電圧における電位傾度は上記の値以下であり、この電位傾度では 10^{-12} クーロン以下であれば、エポキシ樹脂の絶縁劣化はないと考えられる。

エポキシ注型絶縁物の部分放電電荷量と絶縁寿命との関係については、その絶縁材料特性、形状、部分放電発生場所、絶縁媒体、発生形態などにより、一概には言えず、また、それぞれの発生状況について定量的に判断するには数多くの実験とデータ集積が必要である。しかし、当社の採用している、常規使用状態における電位傾度での部分放電電荷量の許容量 10^{-12} クーロンは、これらのいずれにも適合し、長期間の使用に十分に耐えるものであると考えられる。

製品としての最終検証試験は、実器での長期課電となるが、2章および3章に述べたように、電圧加速試験を実施する。今までに得られたデータによれば、絶縁寿命は、破壊までの時間に加速電圧比の $6 \sim 7$ 乗を乗じたものになっている。絶縁物の寿命と放電電荷量・電位傾度との関係を図4.1、4.2に示す。図からわかるように、電位傾度と寿命とは上記の値を示し、また、絶縁物の寿命は、放電電荷量の平方根に逆比例している。

以上、注型絶縁物製品は、それが完成した段階で部分放電試験室へ送られ、製造段階の検証と絶縁寿命診断のため、全数について部分放電試験が実施される。

4.3 66～187 kV GIS 用 絶縁物試験設備

図4.3は、今後、都市近傍での需要がますます増大すると思われるガス絶縁開閉装置用絶縁物の試験設備である。試験用変圧器から試験用タンクまでは、印加線から出るコロナの防止と安全の確保、および設備のコンパクト化を考慮してGIS方式の全密封試験設備である。

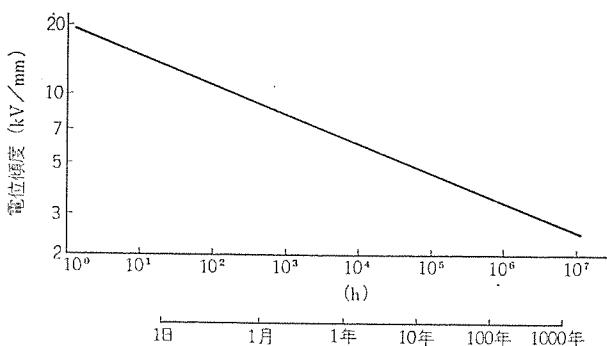


図4.1 絶縁物の電位傾度と寿命
Life characteristics of insulator.

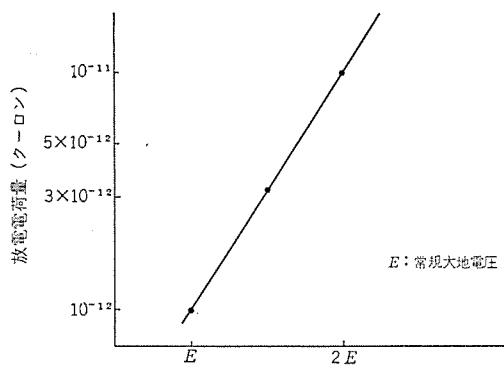


図4.2 注型絶縁物の部分放電特性
Partial discharge characteristics.

また、試験用タンクを2基設置して作業の効率化を図っている。GIS装置を図4.4に示す。

試験設備は、大量生産に対応するため、組立ておよび解体が簡単かつ短時間で行なえるように生産工場とのライン化を図り、製造工程の終わりで絶縁物を台車に積込み、その台車をそのまま試験装置の試験用タンクに入れれば、試験ができる構造にした。

4.4 220～550 kV GIS 用 絶縁物試験設備

図4.5、4.6に試験設備の配置と試験状況を示す。設備構造は、66～187 kV 設備とほぼ同様であるが、特にGIS方式によって試験用変圧器から試験用タンクへ電圧を印加するので、AC 840 kV という電圧まで部分放電フリーで試験が実施できる。

試験用タンクは、大容量のタンクであるので、真空脱気、ガスの供給・回収等を短時間で行なえるようにガス系統の能力増強を図っている。

4.5 6～23 kV ミニクラッド用 絶縁物試験設備

ミニクラッド用絶縁物も、それが機器に組み込まれて使用されるときとほぼ同様な電位分布で試験が実施される。部分放電試験は、実際に使用される状態の電圧よりも高い試験電圧で実施し、検出感度

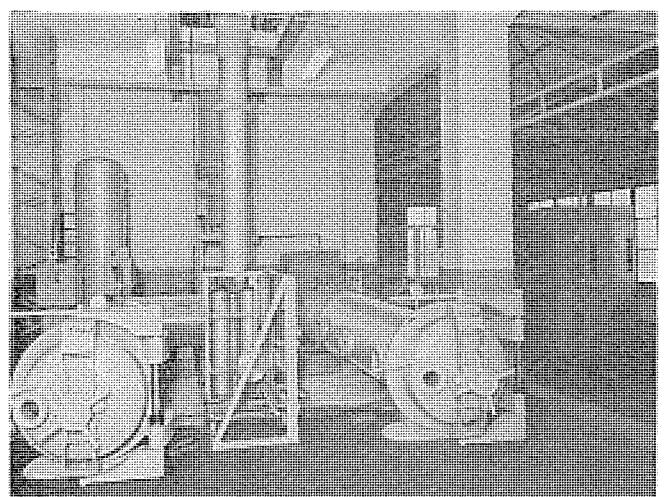


図4.3 66～187 kV GIS 用 絶縁物試験設備
Testing equipment of insulators used for 66～187 kV GIS.

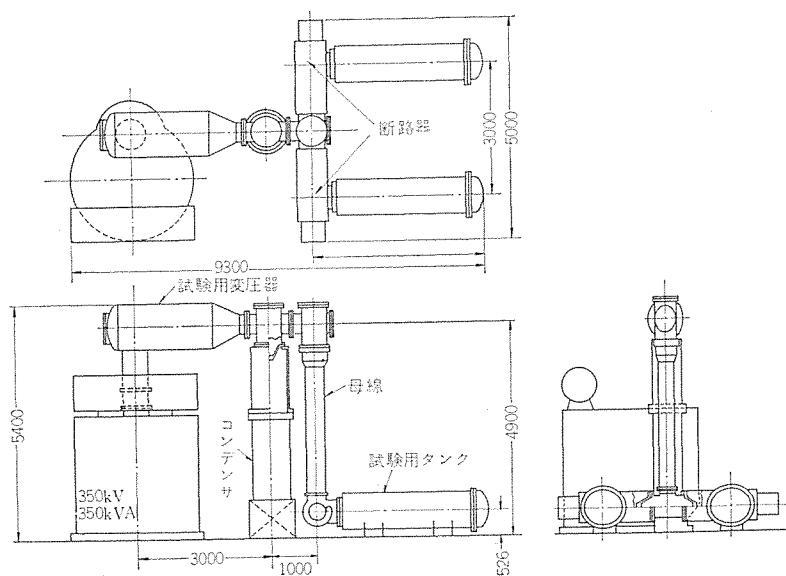


図4.4 66～187 kV GIS 用 絶縁物試験設備
Testing equipment of insulators used for 66～187 kV GIS.

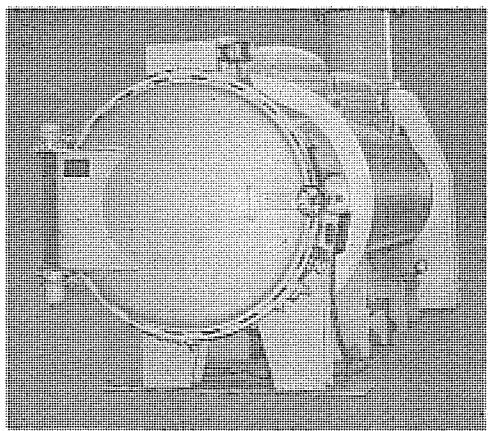


図 4.5 絶縁物試験設備
Insulator test equipment

を上げて製造最終段階での検査を行なう。

5. む す び

ガス絶縁開閉装置および固体絶縁開閉装置に使用される注型絶縁物について、その実体品についての電気的・機械的特性および機器として組み立てられた状態での課電・通電その他の実用性能試験結果について述べた。また、製品の品質管理として、材料特性・実使用状態等から考慮しての製品試験方法と、その管理基準について当社の実施方法を述べた。

縮小形開閉装置については、すでにこれら長期の開発および実用性能試験を完了し、十分な性能と信頼性を有することを実証した。

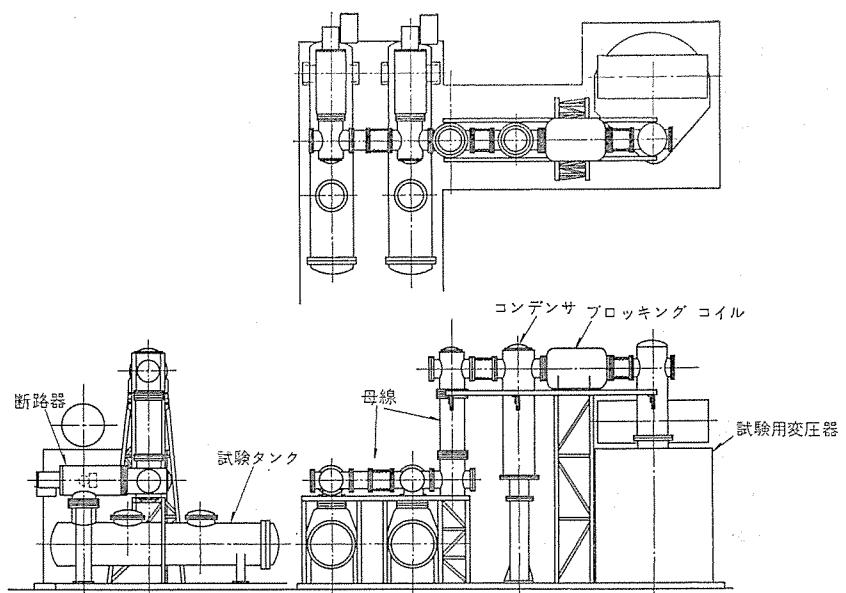


図 4.6 220~550 kV GIS 用 絶縁物試験設備
Testing equipment of insulators used for 220~550 kV GIS.

これら機器および絶縁物は、今後、十分に実用性能を有する機器としての発展が期待できる。

電力需要の増加は、より一層安定性・信頼性を開閉機器にも要求しており、機器の骨格になる絶縁物を今後、さらに詳細に研究し、よりよいものを製造する努力がなされなければならない。

終わりにあたり、長期にわたって研究開発にご指導いただいた関係各位に深く謝意を表するしだいである。

参 考 文 献

- (1) 剣持、永田ほか：三菱電機技報 46, No. 8, 940 (昭47)
- (2) F. H. Kreuger：部分放電検出、コロナ社

縮小形変電所における固体絶縁技術

村上 靖武*・森 栄作*・平河 宏之*
酒井 雅朗*・竹内 吉章*

Solid Insulation Technique in Compact Substations

Itami Works Yasutake Murakami・Eisaku Mori・Hiroyuki Hirakawa
Masaaki Sakai・Yoshiaki Takeuchi

Cast epoxy insulations are widely used for solid insulated switchgear and gas insulated one. As the requirement gets intense for the compactness, higher capacity and higher reliability of the switchgear of these kinds, a variety of performance comes in demand crucially of the epoxy resin products.

This paper states a part of the progress of development on the epoxy cating compound to meet the above requisite and the analysis of internal stress caused by the shape of the work that poses the problems in the manufacturing technique.

1. まえがき

産業社会の発展、都市の過密化に伴い、安定した電力の供給と、変電所用地の取得難を解消するために変電所の縮小化が要求されてきている。変電所縮小化機器として、当社では昭和44年3月に固体絶縁開閉装置を、43年3月にはガス絶縁開閉装置を開発し、現在まで多くの変電所に納入され、満足すべき成果をおさめて順調に運転を続けている。

これら縮小形開閉装置には、多くの固体絶縁物が使用されているが、固体絶縁方式はもちろん、ガス絶縁方式においても、その果す役割は大きく、固体絶縁技術は、これら絶縁物の開発とともに発展・進歩してきたといつても過言でない。

固体絶縁技術は、材料研究・製造技術・評価の総合技術であり、製品の開発にあたってとくに機能面からみた機器の要求性能を検討し、開発の目的を明確にし、これら技術に有機性を持たせ、かつバランスさせながら開発を進めなくてはならない。

このような技術に答える材料として、ブッシング、磁気シャンクのコンタクトベース等で実績のあったエポキシ注型材料が適用された。本報では、縮小形開閉装置におけるエポキシ注型材料開発の経過と、選定の基本的な考え方、および製造技術上の根本問題である内部応力の解析について説明する。

2. 固体絶縁物への要求性能と技術的問題点

縮小形開閉装置には信頼性・安全性の向上、保守点検の容易さ等を強く要求され、当然、絶縁物に対する要求も多く、きびしくなっている。固体絶縁物に対する要求事項を下記にまとめる。

- (1) ガス絶縁・固体絶縁の共通事項
 - (a) 高い電界強度で長時間の運転に耐えること。
 - (b) 開閉操作などで加わる高い機械ストレスに耐えること。
 - (c) 機械的耐熱性の良いこと。
 - (d) 繰り返される負荷変動から生ずる熱ストレスに耐えること。
 - (e) 縮小に適するように自由な形状のものが得られ、導体埋込みが可能のこと。
 - (f) 作業性が良好で、均一な品質の製品が得られること。
- (2) 固体絶縁方式に特に要求される事項

(a) 耐トラッキング性を有すること。

(b) 難燃性であること。

(3) ガス絶縁方式に特に要求される事項

(a) arced SF₆ガス中で劣化が生じないこと。

その他、技術的問題点として、固体絶縁方式では、寸法精度の良いこと、および固体絶縁物表面を完全接地にすること。ガス絶縁方式では、ガス漏れを防ぐために絶縁物フランジ部の面精度の良いこと、およびガスの劣化を防ぐためにガス中の水分管理にあわせて絶縁物原材料中の水分管理があげられる。

3. 材料開発

固体絶縁材料には、導体や埋金の同時成形や、大形成形が可能で、電気的特性・機械的特性にすぐれ、材料配合の選択自由度の大きいエポキシ注型材料が最適である。しかし、機器がコンパクト化されるほど、その絶縁材料に対する要求性能は多岐にわたり、かつ、きびしいものになってくる。要求性能の中には、互いに相反する性質の要求もあり、すべての性能を満足させることは不可能に近い。そこで、一般には要求特性ごとに材料を分類・検討し、総合的に評価しながら特性にバランスを持たせるような配慮が必要である。

3.1 耐熱性

エポキシ注型品には、絶縁材料であるとともに、構造材としての機能をも要求される。電気機器の縮小化・容量増大に伴って機器の温度上昇も大きくなるので、耐熱性には化学的な熱劣化による耐熱性と機械強度の耐熱性の両面を考える必要がある。機械強度上の耐熱性は、ガラス転移点(T_g)、あるいは熱変形温度(HDT)で評価される。耐熱性、すなわちHDTを高くするには、エポキシ樹脂の橋かけ密度を大きくすることが必要である⁽¹⁾。橋かけ密度を大きくするには、エポキシ当量の小さいエポキシ樹脂、あるいは橋かけ点を多く有するエポキシ樹脂が用いられる。固体絶縁開閉機器では、耐トラッキング性の要求もあり、耐熱的にもすぐれているといわれるシクロアリファティック形エポキシを中心に検討した。

シクロアリファティック形エポキシのHDTは、150°C～200°Cにまで達する。一方、HDTが高くて橋かけ密度が大きいと、硬化収縮量が大きくなり、機械的にもろくなるので、シクロアリファティック形エポキシだけでは実用ににくい。この欠点を改善する方法として、一般的に可

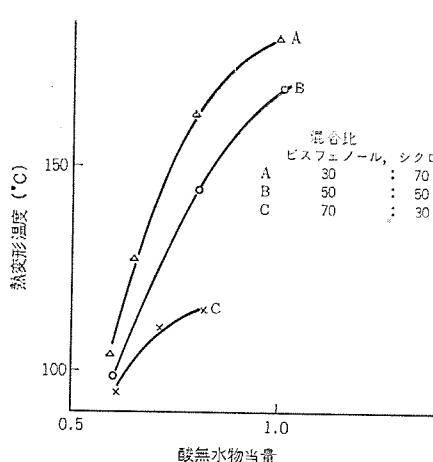


図 3.1 ビスフェノール形エポキシ、シクロアリファティック形エポキシの混合比と熱変形温度
Variation of H.D.T. with content of bisphenol epoxy and cycloaliphatic epoxy.

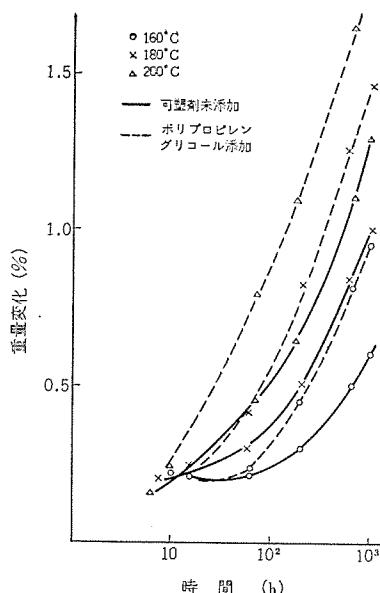


図 3.2 热劣化に与える可塑剤の影響
Effect of plasticizer on thermal deterioration.

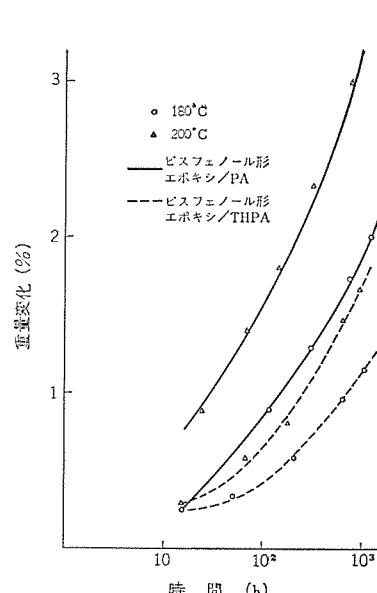


図 3.3 热劣化に与える硬化剤の影響
Effect of hardener on thermal deterioration.

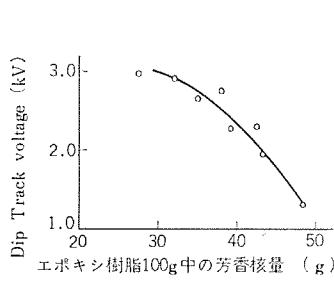


図 3.4 エポキシ樹脂中の芳香核量とトラッキング性
Tracking effect on quantity of aromatic ring in cured epoxy resin.

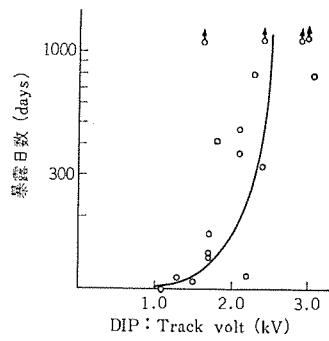


図 3.5 Dip 法対暴露日数
Exposed days vs. Dip track volt.

とう(撓)性賦与剤が用いられるが、熱劣化がはげしくなるので、耐熱性の要求のきびしい機器には適用できない(図3.2)。そこで、可とう性賦与剤の代りに強じん(軟)で熱安定性の良い材料との混合系を考え、機械的強度の安定しているビスフェノール形エポキシとシクロアリファティック形エポキシとの混合系を検討して、HDTと耐クラック性とから配合を選定した(図3.1)。

図3.3に、樹脂を同一にして硬化剤の異なる2種類の配合について測定した結果を示した。酸無水物の構造の違いによっても、その耐熱性は大きく異なることがわかる。

3.2 耐トラッキング性

機器の高電圧・悪環境下での使用には、絶縁材料に対する耐トラッキング性も重要視される。トラッキング試験法に関しては、IEC法、Dust & Fog法、噴霧法、Dip Track法等の試験法があり、これらについて実際面との相関性が検討されている。

耐トラッキング性の良い材料にシクロアリファティック形エポキシが知られているが、耐クラック性・強じん性の点に欠けるので、実用化が遅れていた。最近では、耐クラック性を改良したエスチル系のシクロアリファティック形エポキシも開発されている。しかし、注型品としての実績が少なく、実用化にはいま少し時間を要するものと思われる。当社においては、機械的強度の点を重視し、耐熱性と同様に、シクロアリファティック形エポキシとビスフェノール形エポキシとの混合系を採用した。

エポキシ樹脂配合材中の芳香核量と耐トラッキング性との間には、図

表 3.1 耐トラッキング性に及ぼす充てん剤効果
Tracking resistance of various fillers.

充てん剤種類	充てん量 (P. h. r.)	トラッキング電圧 C. T. I. (V)
シリカ: ドロマイド	150:50	250
シリカ: ドロマイド	100:100	600
シリカ: 水和アルミナ	150:50	300
シリカ: 水和アルミナ	100:100	600
炭酸マグネシーム	50	250
水和硫酸カルシーム	50	600
炭酸カルシーム	50	600

注) 樹脂のトラッキング電圧 (190 V)

3.4の関係が見出されている⁽²⁾。一方、耐トラッキング性と実験電暴露との関係(図3.5)⁽²⁾から実用トラッキング性の必要値が推定できる。

耐トラッキング性を改善する方法として充てん剤の効果も多く報告されている。種々の充てん剤について調べた結果を表3.1に示す。これらの充てん剤の中には、粘度・電気特性・耐クラック性・熱劣化性に悪影響を及ぼすものがあるので、使用にあたって注意を要する。

3.3 難燃化

固体絶縁開閉器では、機器の使用環境から難燃化の要求が強い。一般に、有機材料の難燃化には、ハロゲン化物・有機りん化合物があり、さらに、三酸化アンチモンを加えて相乗作用を持たせている。実験によると、ハロゲン化物、特に臭素化物あるいは三酸化アンチモンとの混合系が最も効果が認められた。しかし、これらによる難燃化は、炭化促進作用によるもので、耐トラッキング性とは裏腹の関係になっている。図3.6⁽³⁾にハロゲン添加量と耐トラッキング性との関係を示した。

実際の機器で燃焼が継続するか否かは、材料の熱容量、熱伝導による燃焼熱の供給・放散のバランスによって決まる。注型材料には大量の充てん剤が添加されているので、充てん剤によって熱伝導・熱容量が増加し、また、有機質分が充てん剤の添加分だけ減少するなどから難燃化の効果が期待された。充てん剤の燃焼性に与える効果を図3.7に示す。同じシリカ粉末でも、粒度の細かいシリカ粉末のほうが、難燃化効果が大きく、炭酸カルシームの場合には、ほとんど難燃化効果が認められなかった。このように適当な充てん剤、そ

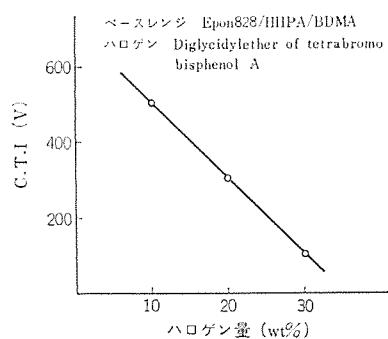


図 3.6 ハロゲン量の耐トラッキングに及ぼす影響
C.T.I. volt vs. halogen weight in epoxy resin.

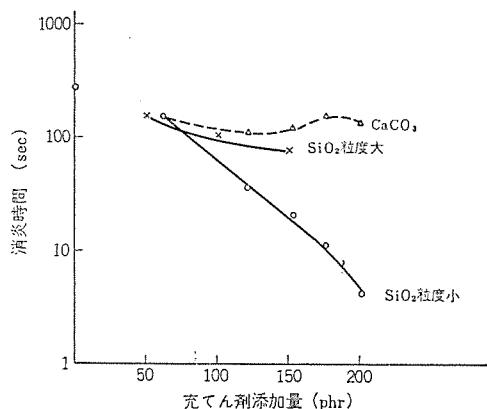


図 3.7 充てん剤添加量と燃焼性
Filler content effect on combustion resistance.

表 3.2 Arced SF₆ の注型材に及ぼす影響
Characteristics of casting materials in arced SF₆ atmospheres.

エポキシ種	曲げ kg/mm ²		抵抗値 Ω	
	試験前	試験後	試験前	試験後
エビ/ビス系 A	15.3	14.2	4×10^{15}	2×10^{13}
エビ/ビス系 B	13.0	12.2	7×10^{15}	5×10^{13}
シクロ C	12.0	11.0	2×10^{15}	3×10^{13}
シクロ D	9.6	3.1	3×10^{15}	5×10^{12}
シクロ E	8.1	10.0	5×10^{14}	5×10^{13}
硬化剤種	曲げ強度 kg/mm ²		抵抗値 Ω	
	試験前	試験後	試験前	試験後
酸無水物 A	12.4	11.5	1×10^{15}	2×10^{13}
酸無水物 B	12.8	12.2	2×10^{15}	4×10^{13}
アミン系 C	4	4	2×10^{11}	7×10^6
アミン系 D	14.9	14.9	2×10^{15}	3×10^9

の粒子径を選択し、充てん量をある程度上げれば、ハロゲン添加量がわずかでも、十分な難燃化を実現できることがわかった。

3.4 耐 arced SF₆ 性

特異な特性として、ガス絶縁開閉器の場合に耐 arced SF₆ 性が要求される。この arced SF₆ ガスは、SF₆ ガス中に酸素・水分が存在するときに材料に対して腐食性を示すといわれ、ガス絶縁方式では、ガス中の水分管理をきびしく行なっている。水分管理下では、耐 arced SF₆ ガスの材料に対する腐食性は少なく広い材料の適応が考えられるが、より良い材料の選定が望まれる。水分存在下における耐 arced SF₆ ガス試験結果を表 3.2 に示す。ビスフェノール形エポキシが平均してすぐれ、シクロアリファティック形エポキシの場合には、種類によって耐性の悪いものが認められる。また、硬化剤では、酸無水物硬化の場合には影響は少ないが、アミン系硬化剤ではほとんど耐性が

認められなかった。最終的には、実しゃ断下に試料を置いて判断し、材料を選定している。その概要についてはすでに報告してあるので、参照されたい⁽⁴⁾。

3.5 接地層

固体絶縁方式では、人員に対する安全のため、外面はすべて接地した導体でおおうことが必要とされる。接地層を設けるには、導電材料を、注型品外周に同時注型する方法と、成形後に注型品外周面に導電性材料をコーティングする方法が考えられた。固体絶縁方式は、形状が複雑で、前者の方法は困難であると判断して、成形後に表面に処理する後者の方法を重点的に検討した。

表面に導電材料をコーティングする方法には、導電塗料・めっき・真空蒸着・金属溶射の各方法があるが、これらについて比較実験した結果、価格、作業性、導電層の安定性、接着性などから金属溶射法を採用した。

接地層は、注型品に完全に密着し、はがれたり、ふくれたりしないことが必要である。この密着性試験にはく(剝離試験)、引張試験、液中・気中での冷熱試験、長期加熱試験を行ない、溶射材料と製造法とを検討し、また、密着の安定性を確認した。最初に問題になったのは、溶射膜は物理的なからみつきによる密着であるから、注型品の面処理をどのように行なえばよいか、ということであった。サンドブラスト・液体ホーニング・ショットブラスト・その他各種を検討した結果、注型品の表面樹脂層を完全に除去できて均一な粗面が得られる方法を開発した。溶射材料は、塗膜の強度からみると、アルミと銅とが良好であったが、密着性からは亜鉛とすずとが安定した塗面を示した。溶射膜の厚みも、密着強度に及ぼす効果が大きく、薄すぎると、金属粒子間のからみつきが少なくて塗膜としての強度が得られず、反対に厚すぎると、弾性率の高い金属膜になるので、冷熱試験あるいは溶射の際にコーナ部などに“ふくれ”を生じやすくなるので、適切な膜厚管理が必要である。

接地層の抵抗が高くなると、導体に雷インパルスが加わった際に接地点より遠い部分に電圧の浮上がりが生ずる。人体抵抗を1 kΩと考えて母線モデル実験を行ない、接地層の抵抗は約1 Ω/m以下にするのが安全であるとの結論を得た。

機器を屋外で使用する場合、接地層の酸化・腐食を考慮する必要がある。保護塗装にポリエチル系・エポキシ系・ウレタン系の各種塗料を選び、亜硫酸ガス試験・塩水噴霧試験を各100サイクル行ない、またWeather-O-Meterによる加速暴露、重汚損地帯での屋外暴露を行ない、接地層の抵抗にほとんど変化を生じないで、塗膜の変化の最も少ないポリウレタン系の塗料を採用した。

4. 注型絶縁物の内部応力

注型材料は、導体・埋金などの金属と一体で使われることが多く、縮小形開閉機器でも、ほとんど金属埋込み物と一体成形されている。このような注型樹脂と金属との組合せは、両者の物理的性質の差から、製品の成形時あるいは使用中の熱サイクルによって、種々の内部応力が誘起され、製品の強度低下、ひいてはクラックを発生させことがある。

この内部応力の発生原因には、材料の膨張係数、硬化収縮、弾性率などの材料に関するもの(材料因子)と、埋金あるいは製品形状による応力集中に関するもの(形状因子)がある。これらが、熱変化に対して複雑な挙動を呈し、一般的な解析・対策などを困難なものにしている。ここでは、縮小形開閉機器注型品の製造にあたって

検討を行なった材料因子および形状因子の一例を説明する。

4.1 内部応力と充てん剤の効果

エポキシ注型品は、比較的高温(100~150°C)で硬化され、硬化後に高温から室温までもどされるとき、樹脂の硬化収縮と熱収縮によって製品に内部応力が発生する。この収縮応力を小さくする方法に次のことが考えられる。

- (1) 樹脂の弾性率を小さくする。
- (2) 硬化収縮率を小さくする。
- (3) 热収縮率を小さくして、埋込み物との膨張係数の差を少なくする。
- (4) 硬化温度をできるだけ低くし、樹脂の硬化による発熱を抑える。

(1)には可とう性賦与剤の添加が一般に行なわれ、その効果も大きいが、構造材としての安定した機能を失なわせること、耐熱劣化性にも欠けるので、当機器の材料に適用することはできない。そこで、(2), (3), (4)項に効果のある無機質充てん剤を中心に研究を行なった。

無機質充てん剤は、一般に膨張係数が小さく、樹脂に充てんすれば、注型材の相対的樹脂分が減少するので、それだけ注型品の膨張係数も減少する。一方、埋込み導体の膨張係数もアルミニウム・黄銅・銅などで異なるので、膨張係数の差を考慮して充てん量を決める必要がある。特に、異形導体の注型品に対しては、充てん剤の量をだんだんにふやして埋込み導体との膨張係数の差を小さくしたときの耐クラック性に及ぼす効果を種々検討し、最適充てん量を決めている。

しかし、充てん剤の種類・粒径・粒度分布によって、耐クラック性に与える効果は大きく変化する(表4.1)。また、強じんな樹脂は、充てん剤の種類などの変化に対して割合に鈍感であるが、もろい樹脂は、充てん剤の影響を鋭敏に受け、充てん剤の選定をいっそう困難にしている。そこで、シクロアリファティック系エポキシを主体とするもろい樹脂にも安定した補強性を示す充てん剤が望まれた。各種の充てん剤、その粒子形状・粒度分布を総合的に組み合わせて検討し、新しく混合充てん剤を開発した(表4.1)。この充てん剤は、固体絶縁開閉装置用注型材に適用している。

これらの材料の耐クラック試験には、Cワッシャ・オリファンワッシャを用いて冷熱試験を行なっているが、このようなサンプル試験では、極端なエッジ効果で注型材に応力集中を起こさせ、この応力集中に対しての耐久性をみるもので、熱伝導率、樹脂と埋金の接着による応力分散効果などの微妙な差を明確には認め難い。これらの効果を確認するには、ある程度の容量・寸法を要し、適切な大きさのモデルを作って実験を行ない、最終的な材料の選定を行なっている。

注型品にクラックがはいるか否かは、材料の機械的強度と内部応力

表 4.1 充てん剤の種類と耐クラック性
Crack resistance of some fillers.

樹脂: ビスフェノール系エポキシ

充てん剤種	充てん量(P.h.r.)	クラック指數
石英粉末	150	8
炭酸カルシウム	150	5
緑柱石粉末	150	11
mixed filler	150	15
水和アルミナ	150	1
アルミナ	200	7

との大小関係によって決まるので、充てん剤と機械的強度との関係についても、知る必要がある。充てん剤の充てん量と引張強度および衝撃強度との関係を図4.1, 4.2に示した。衝撃強度での充てん剤は、欠陥あるいは応力集中体として作用する。引張強度では、充てん量とともに、いったん強度低下を見るが、再度強度を回復し、続いて充てん量を多くすると、徐々に収れんしながら強度が低下している。すなわち、充てん剤には欠陥としての作用と補強性との両面性を有し、強度面からみた充てん量は、100~200 phrが適当でないかと推定される。熱サイクルが注型品に加わると、一種の疲労応力として作用すると考えられる。疲労応力を加えたときの強度を充てん剤の種類を変えて実験した結果を図4.3に示した。この場合にも耐クラック性と同様に、強じんな樹脂では充てん剤間の差は少なく、もろい材料では明らかに充てん剤の差が現われている。

4.2 内部応力の解析

注型品の開発に際し、必ずプロトタイプのモデルで内部応力の測定を行なって設計および製造法に関する多くの知見を得ている。ここでは、固体絶縁方式におけるモデルを使って解析した概要を説明する。

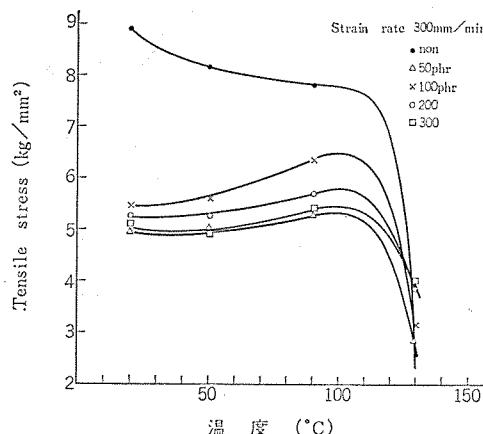


図 4.1 引張強度に及ぼす充てん量効果
Yield stress by vs. temperature and filler content effect.

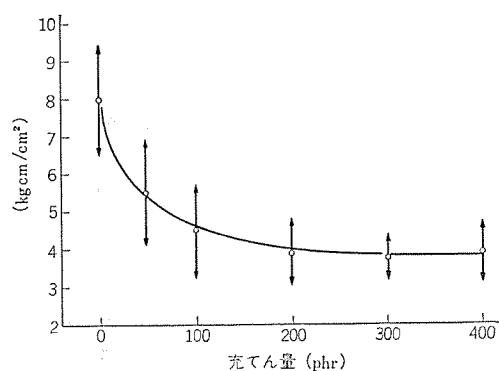


図 4.2 充てん率と衝撃強度
Effect of filler content on impact strength.

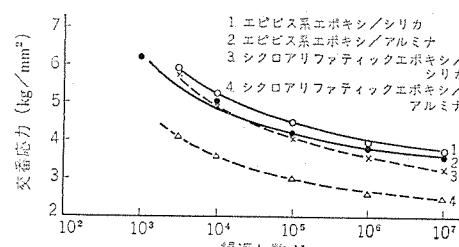


図 4.3 回転曲げ疲労強度
Fatigue strength of casting resins under flexural cycling stress.

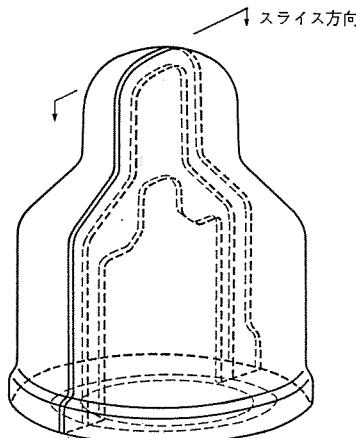


図 4.4 光弾性実験 モデル の スライス
Slice direction of photoelastic model.

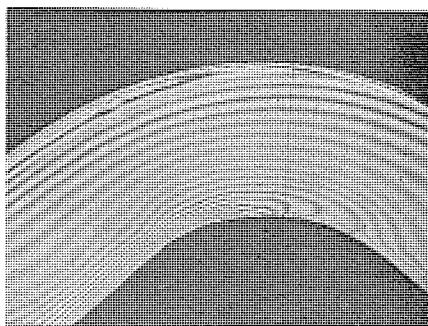


図 4.5 等色線写真
Isochromatic lines.

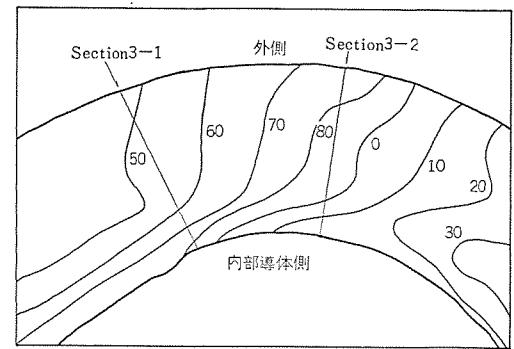


図 4.6 等傾線図
Isoclinic lines.

形状因子を中心とした内部応力は、種々の方法で解明される。たとえば、内部ひずみ測定素子埋込法⁽⁵⁾による硬化時のひずみの測定は、実物について測定しうる点で非常にすぐれた方法であるし、電子計算機による数値解析、あるいはモアレ法やホログラフィ法などの解析も、それぞれ有効な方法である。しかし、注型樹脂の内部応力解析で最も効果的な手法とされているのは、以下に示す光弾性実験法である。この方法には次の利点がある。

- (1) 製品と同一の型から容易に光弾性モデルが作れる。
- (2) 内部応力を視覚的に捕えることができる。
- (3) 応力値を高精度で定量できる。

4.2.1 実験モデルの作成

図 4.4 は、実験対象のモデルの形状を示す。これは、内部の導体を厚さ約 20 mm の樹脂層がおおう構造になっている。注型樹脂としては充てん剤を入れないエポキシ樹脂を用い、注型条件は製品と一緒にして作成する。

注型後、中心軸と平行な面で厚さ 10 mm のスライスを切り出す。その様子は、図 4.4 に示すとおりである。スライスの表面は、切出しによって生じた微細な傷を除くため、サンドペーパで #1,000 まで入念に研磨する。

4.2.2 測定

(1) 等色線の測定

スライス全面のうち、特に等色線しま(縞)が集中している部分の等色線写真を図 4.5 に示す。一般に、しまが多く集まっている点は、応力値も高いと考えてよいから、図より R の起点に最も大きな応力集中を起こしていることがわかる。この図では、0 次の等色線しまが見られないので、応力凍結操作によって数次のしまを凍結させたテストピースを作り、これを補償あるいは比較に用いて、しま次数を決定した。

(2) 等傾線の測定

等傾線の読み取精度は、最終的な応力計算値の精度に大きな影響を与えるから、測定は慎重に行なう必要がある。図 4.6 は等傾線の例である。

(3) 主応力の計算

実験データの解析には種々の方法があるが、ここでは、せん断応力差積分法を適用した。この方法は、まず、解析点の内側に微小距離を隔てた 2 点をとる。次に、これら 3 点で測定された等色線および等傾線から、せん断応力を計算によって求める。最後に、これを解析面に沿って積分して、各点の応力値を得るものである。

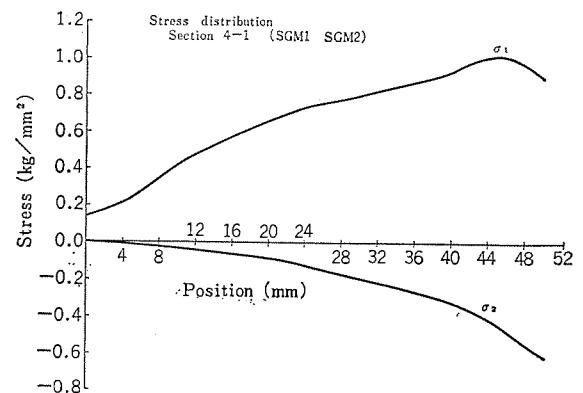


図 4.7 プロッタが描いた応力分布曲線
Curves of stress distribution drawn by a plotter

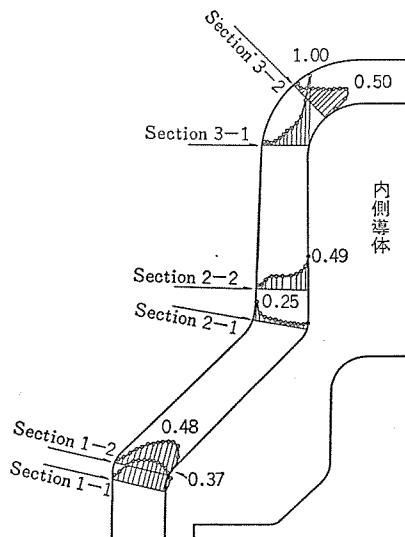


図 4.8 主応力分布図 (軸方向応力)
測定応力の最大値を 1 とする
Stress distributions on some sections.

4.2.3 計算結果の図示

実験データの解析には、せん断応力差積分法のプログラムを作り、電子計算機で処理する⁽⁵⁾。これに、プロッタを使って応力分布図を描かせるプログラムを加えて活用している。図 4.7 は、プロッタに描かせた応力分布曲線の一例である。図で σ_1 は、スライス内の 2 主応力のうちの代数的に大きな応力を意味している。また、この例では σ_1 が軸方向応力を、 σ_2 が半径方向応力を示していると考えて間違いない。

スライスの主な断面について図 4.7 と同様な解析を行なった結果をまとめて図 4.8 に示す。最初に、図 4.5 で注目した点の応力集中が、他と比べて相当大きいものであることが明確にわかる。

5. 注型材料および製品の紹介

注型材料は、ここに説明した特性のほかに、コロナ劣化・圧縮クリ

表 5.1 エポキシ注型樹脂の一般特性
General properties of epoxy casting resins.

項目	単位	#1	#2	#3
引張強さ	kg/mm ²	8.5	7.5	8.2
曲げ強度	kg/mm ²	13.5	12	12
曲げ弾性率	kg/mm ²	1,000	1,000	1,100
圧縮強さ	kg/mm ²	18	20.2	21
衝撃強度	kg/mm ²	3.5	4.0	4.5
熱変形温度	°C	105	130	115
絶縁破壊強さ	kV/mm	30	27	27.2
誘電率		4.1	5.5	6.5
誘電正接	%	1.6	1.4	0.5
体積抵抗率	Ω-cm	>3×10 ¹³	1×10 ¹⁵	>3×10 ¹³
耐トラッキング性	V	260	>600	250
耐アーチ性	s	187	189	196
燃焼性	s	110	20	130

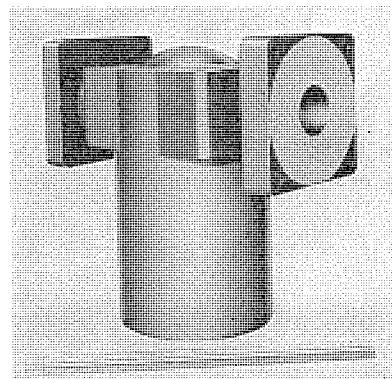


図 5.1 固体絶縁開閉機用母線側接手
Bus connect parts of 22 kV solid insulation switchgear.

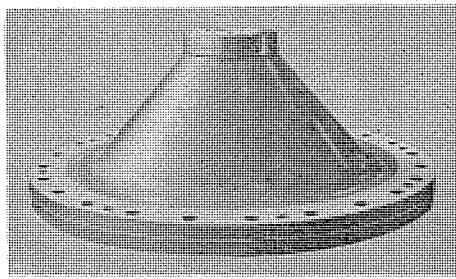


図 5.2 ガス絶縁開閉機用絶縁物
Insulator used in gas insulated switchgear.

一挙動・作業性などの検討を重ねて開発された。表 5.1 に縮小形開閉装置に使われている注型材料の一般特性を示した。

注型品の製品化は、上述したように、材料のきびしい選定と、緻密な設計、周到な製造技術、そして、これらをバックアップする応力解析があつて初めて可能になる。このような技術の評価、また製品の熱応力に対する信頼性を確認するために、製品での冷熱試験を行なっている。冷熱条件は、材料の選定と違い、機器の使用条件を考慮する必要がある。すなわち、機器の使用条件と周囲状況とからくる熱サイクル、この熱サイクルから発生する熱応力の解析、材料の疲労強度から冷熱試験条件を決定した。

このような管理のもとで製造された製品の例を図 5.1、5.2 に示した。図 5.1 は、固体絶縁開閉装置用の母線側接続注型品を、図 5.2 はガス絶縁開閉装置用の導体支持絶縁スペーサである。

6. むすび

以上、縮小形開閉装置に使用されている固体絶縁材料および製品開発にあたっての基本的な考え方とデータの一端を紹介した。

機器の縮小化は、使用環境からの制約が多く、絶縁材料に対しても種々の特性が要求される。個々の特性に対しては、それぞれ最適な配合を選び得るが、すべての特性を同時に満足させるには、ある程度、最大公約数的な点をとらえた配合の選定が必要になる。本文では、個々の特性を中心に説明してあるが、実際にはこの一連の情報の中からどのように最終配合を決定するかが重要である。

縮小形開閉装置は、特に、固体絶縁方式では埋込み導体が複雑で、クラックが危惧された。耐クラック性に対しては、主に充てん剤を中心に検討を行ない、耐クラック性のすぐれた充てん剤を開発した。一方、形状の問題に対しては、応力解析法を用いて設計または製造法に多くの知見を与えていることを紹介した。

このように多くの基礎的な実験の積重ねと、実器モデルによる種々の評価とをマッチさせて初めて信頼性の高い製品が製作されるものと信ずる。

終りに、本報告のために種々のデータ、アドバイスをいただいた関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) 柴山ほか：三菱電機技報、45, No. 6, 736 (昭 46)
- (2) 川上：絶縁材料研究会資料、No. 1 M-72-10 (昭 47)
- (3) 西崎、寺谷：電気関係学会関西支部連合大会、G 5-20
- (4) 広岡ほか：三菱電機技報、44, No. 9, 1,175 (昭 45)
- (5) 高橋ほか：三菱電機技報、44, No. 9, 1,183 (昭 45)
- (6) 坂井ほか：電気学会全国大会 (昭 47-312)

屋外用注型絶縁材料

寺谷 宏*・川上 剛*
坂井 龍吉**・宗村 弘次**

Castable Insulating Materials for Outdoor Use

Manufacturing Development Laboratory Hiroshi Teratani・Takeshi Kawakami
Itami Works Ryūkichi Sakai・Hirotugu Munemura

When the castable insulating materials used outdoor, tracking resistance and weatherability are required in addition to the general performance specific to the casting. This restricts the range of materials to be selected. On the other hand the kinds are increasing of outdoor apparatus making the best use of the merits of cast insulation. The study and development of the castable insulating materials for outdoor use have been strongly desired.

In this article description is made, in reference to the epoxy resin on the view entertained by Mitsubishi for the insulation materials referred to and also about a part of the Company's study and development covering the basic research of the material and many years' confirming tests with the apparatus put into practice.

1. まえがき

注型絶縁は、絶縁機能と構造機能とを兼ね備え、大形で形状の複雑な製品が得やすいところから、電気機器のコンパクト化・大容量化・高電圧化に適した絶縁方式として広く採用されている。注型絶縁材料としては、エポキシ樹脂・シリコン樹脂・ポリエチレン樹脂・ウレタン樹脂などの各種の有機材料が使用されているが、特にエポキシ樹脂は、性質のバランスの点より多く用いられている。エポキシ樹脂を屋外で使用しようとの試みは、以前よりなされており、すでに多くの種類の脂環式エポキシ樹脂が屋外絶縁用に適した材料として市販されている。しかしながら、屋外用注型絶縁材料としては、一般的な要求性能に加え、屋外での汚損環境下において性能を長く維持することが要求される。屋外使用で特に問題になる性質は、耐トラッキング性や耐候性であり、これらの性質は、劣化因子の変化によって影響をうけやすいので、促進試験による材料の選別とあわせ、長期間の屋外暴露試験によって性能を確認するとともに、両試験法の関連性を調べておく必要がある。ここでは、屋外用エポキシ注型樹脂について、当社の考え方と研究・開発状況を述べたい。

2. 化学構造と性質

屋外用絶縁材料として実績のあるセラミックスと比較して、エポキシ樹脂などの有機材料は、機械的特性・重量・加工性・寸法精度などはすぐれているが、耐候性・耐トラッキング性・燃焼性の面では劣っている。有機物は、無機物と比べて本質的に熱分解が起こりやすく、また、紫外線とか酸素・オゾン・水分等による分解も起こりやすい。しかし、これらの性質をよくは(把)握したうえで使用するならば、形状設計の任意性、接着とか埋込みによる構造一体化、量産化などの面より、電気機器の高性能化への有機材料の寄与は大きい。そこで、まず、エポキシ樹脂の化学構造と性質との関係について考えてみたい。

2.1 耐トラッキング性

耐トラッキング性は、絶縁物表面の漏れ電流とか放電によって材料が熱分解をうけ、析出した炭素によって導電路が形成されて絶縁破

壊に至る現象であり、炭素の析出の少ないとときには侵食形になる。カーボンの析出量は、化学構造と密接な関係があり、硬化樹脂が熱分解した際に揮発しないで残る化学結合のエネルギー ΔH_c と、硬化樹脂中の全結合エネルギー ΔH_T との比 $\Delta H_c/\Delta H_T$ を計算で求めると、 $\Delta H_c/\Delta H_T$ が小さいほど耐トラッキング性がよいことが報告されている。たとえば、草川ら⁽⁸⁾は、化学構造を変えた一連のエポキシ樹脂について $\Delta H_c/\Delta H_T$ と、DIP 法⁽⁷⁾による耐トラッキング性とが良い相関関係にあることを認め、また、シェル化学では、ダストオフオフ試験の結果、 $\Delta H_c/\Delta H_T$ が 0.350 を境にしてトラッキング破壊がエロージョンに変わっていくことを見出している。

2.2 燃焼性

耐トラッキング性材料の $\Delta H_c/\Delta H_T$ が小さいとすれば、当然、熱によって分解しやすく、また、熱分解生成ガスが容易に着火燃焼すると考えられる。臭素化エポキシ樹脂によって難燃化を行なった一連の硬化樹脂についての例⁽⁹⁾を図 2.1, 2.2 に示した。脂環式エポキシ樹脂は、芳香環を含むエポキシ樹脂と比べて熱分解によって低温で分解揮散し、残さ(渣)を残さない。燃焼性は、酸素指数法⁽⁹⁾で測定しているが、難燃グレードにするためには酸素指数 24 以上が必要であり⁽⁵⁾、空気中では不完全燃焼状態になるので、カーボンが析出しやすく、耐トラッキング性が低下する。無機質の充てん剤を混合すると、相対的に可燃性の樹脂成分が減少するので難燃性になるが、耐トラ

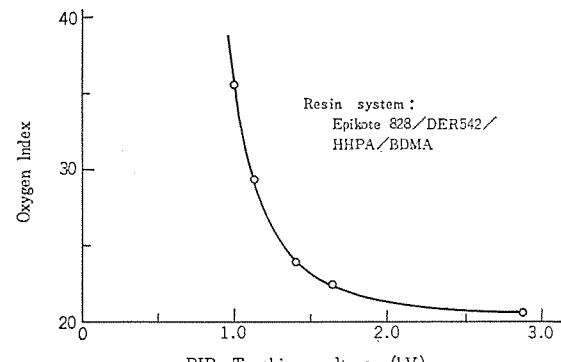


図 2.1 燃焼性-耐トラッキング性
Oxygen index vs. DIP-tracking voltage.

表 2.1 ヘキサハイドロ無水フタル酸で硬化したエポキシ樹脂の耐候性(充てん剤なし)
Weatherability of epoxy resins cured with hexahydropthalic anhydride (non-filler).

試料番号	エポキシ生樹脂の種類	化学結合の差		暴露時間 h	促進耐候性試験による性質変化			耐トラッキング性* kV
		芳香環	二重結合		曲げ強さ kg/mm ²	曲げ弹性率 kg/mm ²	光源側	
1	エビビス形	あり	なし	0	14.4	3.1×10^2	2.9	2.9
				1,000	12.1	3.0×10^2	1.5	2.0
				2,000	13.1	3.0×10^2	1.4	1.8
2	脂環族、グリシル形	なし	あり	0	12.8	3.5×10^2	>3.0	>3.0
				1,000	14.5	3.6×10^2	>3.0	>3.0
				2,000	4.6	3.4×10^2	>3.0	>3.0
3	脂環族、グリシル形	なし	なし	0	12.9	3.3×10^2	>3.0	>3.0
				1,000	13.8	3.5×10^2	>3.0	>3.0
				2,000	15.0	3.4×10^2	>3.0	>3.0
4	脂環族、環内エボキシド形	なし	なし	0	9.9	2.5×10^2	>3.0	>3.0
				1,000	10.7	2.5×10^2	>3.0	>3.0
				2,000	5.7	2.6×10^2	>3.0	>3.0

* DIP-Track 法

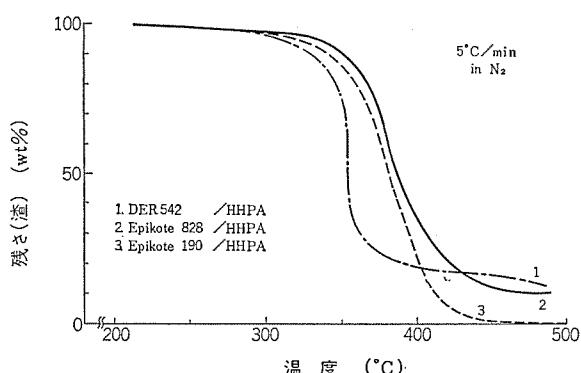


図 2.2 エポキシ樹脂硬化物の熱重量曲線
Thermogravimetical curve of cured epoxy resin.

ッキング性と両立させるためには、水和アルミナのような加熱時に結晶水を放出する充てん剤が効果的である。

2.3 耐候性

自然の気象条件は、地域・季節・年度によって変化し、必ずしも一定ではないが、材料の劣化に作用する主な因子は、紫外線・降雨量と考えられ、耐候性の促進試験として、材料の使用される地域の

平均気象を想定したウェザーラム試験が行なわれている。耐候性試験は、劣化因子が単独でなく、空気中の酸素・オゾンなどともからみ合って相乗的に作用するので、化学構造との関連は複雑であるが、材料の性質判定には有効な方法である。表 2.1 にエポキシ樹脂の耐候性試験結果の一例⁽¹⁾を示したが、脂環式エポキシ樹脂でも化学構造が異なれば、性質の低下が異なり、また、最初は耐トラッキング性がよくても、しだいに低下してくる樹脂があるなど、注意すべき点が見出された。なお、充てん剤のはいった試料では不透明になり、光の作用が表面に止まると考えられ、性質の変化は小さくなると考えられる⁽²⁾。

3. 長期屋外暴露試験

屋外用エポキシ注型樹脂の実用化にあたり、樹脂材料とともに充てん剤・着色剤、その他の副材料を組み合わせた組成物を開発し、その硬化物について単独で、あるいは実器とかモデルの形で長期間の屋外暴露試験を行なう必要がある。

3.1 モデルによる試験

3.1.1 耐候性試験

エビビスおよび脂環式エポキシ樹脂組成物でがいしの形状を模擬し

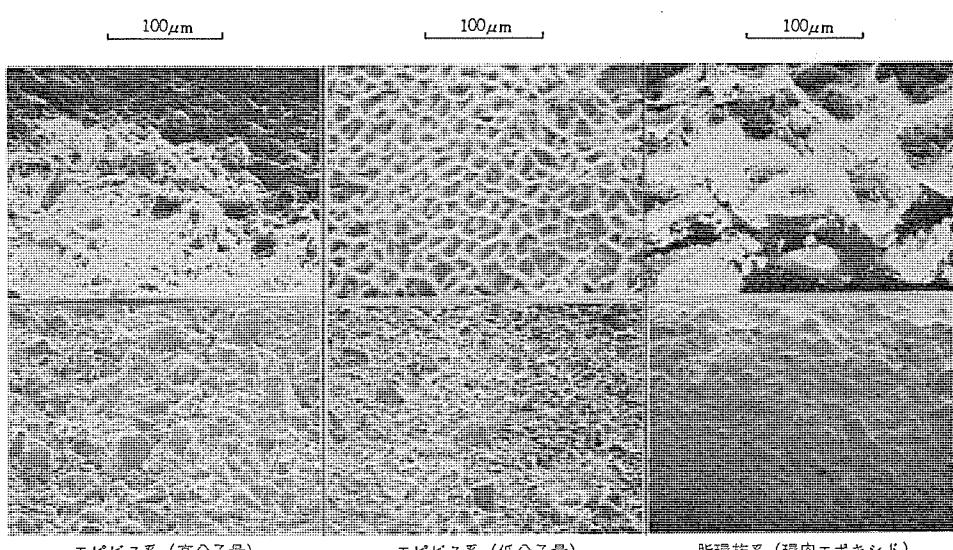


図 3.1 5年間屋外暴露後の酸無水物硬化エポキシ樹脂(シリカ充てん)の表面(上:日照面、下:地向面)
Surface of epoxy resins cured with acid anhydride (silica filled) after outdoor exposure test for 5 years.
(upper : sunshine side, lower : ground side)

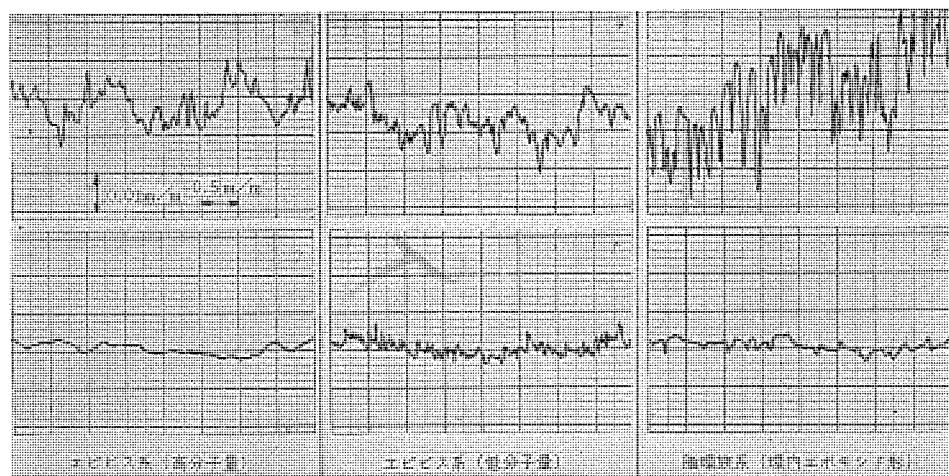


図 3.2 5年間屋外暴露後の酸無水物硬化エポキシ樹脂(シリカ充てん)の表面粗度(上:日照面, 下:地向面)
Surface of epoxy resin cured with acid anhydride (silica filled) after outdoor exposure test for 5 years.
(upper : sunshine side, lower : ground side)

たモデルを作製し, 当社伊丹製作所の構内に置き, 昭和42年より5年間耐候性試験を行ない, 性質の変化を調べた結果, 試料には, 日照面と地向面とで著しい差が生ずることが認められた。地向面は外観変化がわずかであったが, 日照面は光沢の減少, 退色白化, ざらつきの増加がみられた。モデル表面の走査形電子顕微鏡写真の一部を図3.1に, また同じ試料の面粗度をタリサーフによって測定したデータを図3.2に示した。なお, 暴露前の面粗度は, 高分子量のエピビスとほとんど同じであった。いずれの試料も地向面のおうとつ(凹凸)深さは数μmであるが, 日照面は, エピビス系が20μm程度であるのにたいして脂環族樹脂では30~40μmになっている。また, オうとつのピッチは, 生樹脂の分子量が小さく橋かけ密度の高いほど, 小さくなっているが, 酸無水物とエステル結合で架橋しているので, エポキシ樹脂中のエステル結合量と加水分解性との関係についての橋本らの結果^(4,6)とかなりよい相関性がみられているが, 原因は明らかでない。

3.2 耐トラッキング性

各種の材料で作製した棒状モデルについて, 表4.1に示した条件で試験を行なっている。今までに得られた結果では, 屋外でのトラッキング寿命とDIP法との間には比較的良好な相関関係が認められているが⁽⁷⁾, 詳細については別途に報告の予定なので, 省略する。

4. 実器の屋外課電試験

屋外用高電圧機器の絶縁物として注型樹脂を使用する場合には, 材料・モデルによる試験だけでなく, 実器による実働状態での長期試験による検証が重要である。実器にあっては, 機器として要求される諸性能が満足されなければならないので, さきに述べた屋外での性能をあわせ持った注型材料としてのすべての性質がチェックされることになり, この意味からも実器による試験は重要である。ここでは, 現在, 当社が実施している, 実器の長期屋外課電試験の状況について述べる。試験中の機種・試験条件を表4.1にまとめて示した。

4.1 6号支持がいし

屋内用として6号支持がいしは, すでに大量に実用に供されており, 当社においても注型法とか成形法によって生産を行なっているが, エピビス系・脂環式系などのエポキシ注型材料を用いて同一寸法形状のがいしを作製し, 従来の屋内用のがいしとあわせて試験に供し

表 4.1 屋外で長期課電試験中の試料および試験条件
Samples and outdoor test conditions.

	棒状モデル	6号支持がいし	20号ブッシング	70号支持がいし	110号支持がいし
樹脂組成物	<ul style="list-style-type: none"> 注型品 成形品 積層品 ゴム製品 	<ul style="list-style-type: none"> エポキシ成形品 (ビスフェノール系) シクロエポキシ注型品 ビスフェノール注型品 ブレンド系注型品 	<ul style="list-style-type: none"> シクロエポキシ系注型品 シクロービスフェノールブレンド系注型品 		<ul style="list-style-type: none"> シクロエポキシ注型品
試料数(本)	110	24	20	20	1
試験場所	当社神戸製作所屋上(海岸近く)	当社伊丹製作所6kV局部変電所	当社伊丹製作所屋外試験場	大ト一佐野工場海岸線近く	
48年6月末までの課電期間	5年	成形品2年 注型品1年	6か月	6か月	2年
印加電圧kV	6.6	6.3(継間)	18.5	63.0	73.5
ACせん絡電圧kV	—	50	107	310	483.5
1mp(50%せん絡電圧)kV	—	(-)135	(-)191	(-)580	976
高さmm	150	80	235	750	1,170
沿面距離mm	100	120	585	1,860	3,600
重さkg	0.1	0.3	10	18	45

注) 1. 70kV支持がいし: このうちの2本は60kVクラス用であるが, 同一印加電圧で試験中。

2. 棒状モデル: この試料の試験結果については別途発表予定。

3. 20kVブッシングの高さとは, 上, 下対称であるブッシングの中心導体の先端からフランジまでの寸法を現わす。

表 4.2 6号支持がいしの耐トラッキング特性
Tracking resistant properties of 6kV insulators.

試料No.	樹脂	充てん剤	製法, 表面塗装	塗装噴霧試験	I E C 試験
1	ビスフェノール系エポキシ	シリカ, その他	成形	C _{3b}	250(V)
2	ビスフェノール系エポキシ	シリカ, その他	成形+リミトラックA	C _{3c}	600以上
3	ビスフェノール系エポキシ	シリカ, その他	成形+リミトラックB	C _{3c}	600以上
4	ビスフェノール系 シクロエポキシ	シリカ, 水和アルミナ	注型	C _{3c}	600以上
5	シクロエポキシa	シリカ, 水和アルミナ	注型	C _{3c}	600以上
6	シクロエポキシb	シリカ, 水和アルミナ	注型	C _{3c}	600以上
7	シクロエポキシc	シリカ, 水和アルミナ	注型	C _{3c}	600以上
8	シクロエポキシd	シリカ	注型	C _{3c}	600以上
9	ヒタシオインエポキシ	シリカ, 水和アルミナ	注型	C _{3c}	600以上

注) リミトラック: トラッキング防止用塗料

ている。供試がいしの種類とトラッキング特性とを表4.2に示してある。試験場所は、当社伊丹製作所構内の建物北側の屋外に設けられた6kV局部変電所で、樹脂がいしはいずれも実ラインに入れてある。今まで成形品で2年、注型品で1年を経過したのみであるが、トラッキング破壊は生じていない。ただし、試料の表面の光沢は減少している。試験場所は、南側に隣接して建物があるので、降雨・汚損は屋外他場所とほとんど変わらないが、太陽光線が日中は当らないこと、対地間電圧が3.6kVrmsと低いことなどから材料の耐トラッキング性が低く、かつ、耐候性試験により低下の著しいエピビス系樹脂でも破壊が生じないものと考えられる。

4.2 20号ブッシングおよび70号支持がいし

これらのブッシングおよびがいしの製作にあたり、屋外用に適するよう、汚損時のせん絡特性を向上させる、沿面距離を長くする、紫外線のしゃへい部分を多くする等の検討を行ない、さらに軽くする、全体の長さをできるだけ短くする等の配慮も行なって“ひだ”や全体の形状を設計し、エポキシ樹脂注型品としての特長を最大限に發揮させた。注型用の組成物は、エポキシ樹脂の化学構造の差異による変化が見出せるように硬化剤・充てん剤の成分は統一した。しかも、エポキシ樹脂はほとんどをシクロエポキシ樹脂の単独成分にし、比較のためにブレンド系を加え、色についても自然色を中心にし、一部については着色剤を加えて着色の影響もみられるようにした。この試料を製作する際、ブッシングについてはどの組成物も問題なく製作できたが、70号支持がいしについては、両端に大きな埋金を入れることも原因し、ある種の樹脂組成物ではクラックを生ずるものがあり、埋金を一部小さく変更して製作したものもある。試験場所は、当社伊丹製作所構内の屋外課電暴露試験場である。図4.1に試験状況を示したが、この地域は南に面しており、紫外線による劣化についても興味あるデータが得られると期待している。

この長期課電試験は、48年1月より開始したが、6か月経過後では電気特性上の変化はみられないようである。表4.3および表4.4でブッシングおよびがいしのある配合の中の数例について、初期特性と6か月後の値を示した。ここに記したものには、すべて部分放電が認められていないが、耐クラック性に乏しい、ある種の組成物で作られたブッシングの中にはかなりの部分放電量を示すものも認められているが、すべて同一の電圧で試験が行なわれている。部分放電と誘電正接のそれぞれの電圧特性も調べているが、この関係につ

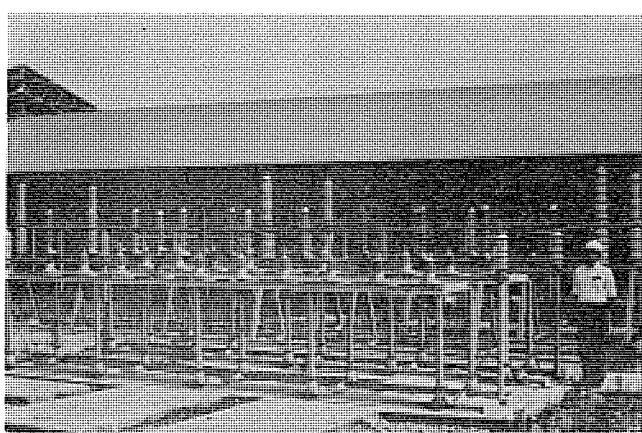


図4.1 課電暴露試験状況 (20号ブッシングおよび70号支持がいし)

Test yard of outdoor exposure test under electric stress (20 kV bushings and 70 kV insulators).

表4.3 20号エポキシ樹脂ブッシングの課電前後の電気的諸特性
Electrical properties of 20 kV bushings before and after outdoor exposure test.

試験項目 試料	A 耐電圧 50 kV 1 min	C インバルス耐電圧 150 kV (10以上) kV	部分放電			誘電正接		漏れ電流 mA
			コロナ放電電荷量 10 kV PC	電圧特性 20 kV PC	誘電正接 電圧特性 30 kV PC	10 kV %	20 kV %	
A	OK	OK	>30	0	0	0.32	0.32	0.54
	OK	OK	>30	0	0	0.82	0.87	0.53
B	OK	OK	>30	0	0	0.35	0.35	0.53
	OK	OK	>30	0	0	0.87	0.90	0.53
C	OK	OK	>30	0	0	0.67	0.65	0.56
	OK	OK	>30	0	0	0.93	0.95	0.56

注) 上段は初期特性を、下段は6か月課電後の値を示す。

表4.4 70号エポキシ樹脂支持がいしの課電前後の電気的諸特性
Electrical properties of 70 kV insulators before and after outdoor exposure test.

試験項目 試料	A C 耐電圧 160 kV 1 min	インバルス耐電圧 400 kV	70 kV における放電電荷量 PC		漏れ電流 mA
			0	0	
A	OK	OK	0	0	0.02
	OK	OK	0	0	0.02
B	OK	OK	0	0	0.02
	OK	OK	0	0	0.02
C	OK	OK	0	0	0.02
	OK	OK	0	0	0.02
D	OK	OK	0	0	0.02
	OK	OK	0	0	0.02

注) 上段は初期特性を、下段は6か月課電後の値を示す。

いては、将来の経日変化をみたうえで結論を出したい。ブッシングとがいしで漏れ電流に大きな差がみられるが、これは、沿面距離の差によるものと考えられる。いずれの供試品も、次の110号支持がいしにみられるような著しい表面荒れは認められていないが、ひだの上部に多量の降下物が付着して汚損されている。本試験は、開始後の日数が浅く、興味あるデータはまだ得られていないが、今後、一定期間ごとに特性を調べ、長期間にわたる試験を進める予定である。

4.3 110号支持がいし

この支持がいしは、某材料メーカーより提供されたもので、外部は脂環式系、内部はエピビス系のエポキシ樹脂を使用した二重構造のものである。試験場所は、大ト-（株）の協力を得、塩害調査を行なうに適した大ト-佐野工場内の屋外課電試験場を利用させていただいている。試験状況を図4.2に示すが、この位置は、海岸線より60m、高さは12mで、近接させて同一の樹脂で作製したパイロットがいしを無課電状態で設置して比較を行なっている。試験場の環境は、すぐ傍にがいしの原石置場があり、粉じんの付着が多く、冬期には北西の季節風が海側より強く吹きつけるため、着塩量はきわめて大きくなる。

このがいしの試験は、昭和46年8月より開始しているが、今までのところ異常な漏れ電流や、ひだ上でのトラッキングマークは見出されていない。塩分付着量は、パイロットがいしによって定期的に測定しているが、冬期のある時点では 0.25 mg/cm^2 に達したことがある。しかし、その後に降雨があると、 0.01 mg/cm^2 以下になり、変動が激しい。漏れ電流は、沿面距離の長いこともあり、今までに1mA以上を検出されたことはない。外観変化は、3.1節で述べたのと同じように、ひだの上面では退色白化・ざらつきが著しく、シングレーリングによるかすかな侵食（痕）も見られる。パイロットが

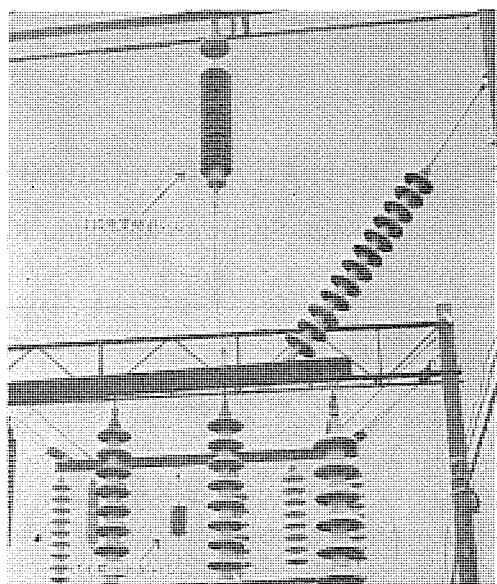


図 4.2 エポキシ樹脂がいしの試験状況（上：110号支持がいし、下：パイロットがいし）
Location of outdoor exposure test (upper ; 110 kV insulator, lower ; pilot insulator).

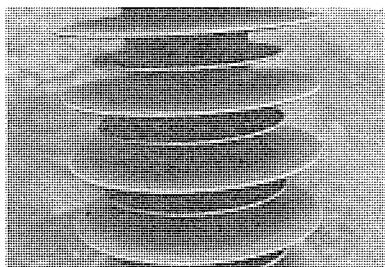


図 4.3 屋外課電試験 1 年後の 110 号支持がいし
110 kV insulator after outdoor exposure test for one year under electric stress.

いしにも白化・ざらつきはみられるが、課電がいしと比べて変化が少なく、紫外線・汚損・降雨などの劣化因子の作用と、放電による劣化とが相乘的に影響しあっていると考えられる。図 4.3 に 1 年課電後のがいしの外観写真を示すが、大きなひだの上面には内周部まで白化が起こっているのにたいし、小さなひだの上面および各ひだの下面には白化はほとんどないことがわかる。なお、白化していない部分でも、ざらつきはかなり起っている。ひだの大

小、上下面によって太陽光・降雨・汚損の差はあるにしても、屋外用としては、さらに放電の発生する状態も考慮して適切な設計を行なうことがいかに重要であるかの示唆が得られた。

このがいしは、初めに述べたように、内部にエビビス系樹脂を使用しているが、電極に近い電界のきびしい部分では トランクリング が発生し、一部では灰化状態になっていることが認められ、樹脂の差が顕著に現われた。この状態でも電圧印加は可能なので、試験を続行しているが、耐 トランクリング 性のよくない材料を組み合わせた二重構造の絶縁を採用する際には、外部を耐 トランクリング 性材料で完全におおうことが必要であると思われる。

5. む す び

屋外用注型絶縁材料としてのエポキシ樹脂について述べたが、樹脂の選択については、促進試験とあわせて、実環境での長期間の試験が必要である。当社としても、材料および実器について長期試験を行なっているが、判定を下せるデータについてはまだ得られていないものが多い。試験中の材料とか実器については、それぞれまとまつたデータが得られた時点で報告していきたい。

終りに、ご助言・ご協力を賜わった社内の関係者、課電暴露試験にご協力を賜わった大トー株式会社の関係者に厚く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 寺谷, 藤沢, 西崎: 昭和 48 年電気学会全大予稿集, 335
- (2) 黒沢: 昭和 48 年電気学会全大予稿集, 336
- (3) 寺谷, 高木: 第 21 回 (昭 47) 高分子学会年次大会講演要旨集, 26 E 28
- (4) 橋本, 草川: 電気学会第 5 回電気絶縁材料シンポジウム 予稿集, I-3 (昭 47)
- (5) 西崎, 寺谷, 小林: 昭和 46 年電学関西支部連大予稿集, G 159
- (6) 寺谷: 昭和 47 年電気学会全国大会予稿集, 221
- (7) 川上: 絶縁材料研究会資料, IM-72-10 (昭 47-10)
- (8) H. Kusakawa and O. Hashimoto: Mitsubishi Denki Laboratory Report, 10, No. 3/4 (1970)
- (9) ASTM, D 2863-70
- (10) シエル 化学技術資料「屋外碍子用 エピコート樹脂」R 72 E 2

耐熱性注型エポキシ樹脂ブッシング

土橋 勝*・荒畑 吉邦*・清水 澄*・岸田 光弘*

Cast Epoxy Bushings for High Temperature Use

Itami Works Masaru Tsuchihashi・Yoshikuni Arahata・Akira Shimizu・Mitsuhiko Kishida

With the tendency of electric machinery getting compact and lighter in weight, desire for the improvement of thermal stability is becoming urgent with regard to the cast epoxy bushings. But because of the properties of casting materials depending on the temperature, these materials have rarely been used on high temperature regions above those of class B insulation.

For this reason casting materials having thermal endurance enough to work as Class B insulation have been developed on purposes for the application to bushings, resulting in the approval of practical performance satisfying the need. In this article are described various characteristics of casting materials, problems concerning the shapes for marketability and examples adapted to the bushings.

1. まえがき

エポキシ樹脂のすぐれた機械的および電気的性質と、成形性のよいことを応用し、要求される多様な形状を比較的容易に満たし得るエポキシ注型ブッシングが実用化されて久しい。この間、エポキシ樹脂自体も、耐熱性・耐候性、およびその他の諸要求に沿った研究・開発が進み、数多くの特長ある材料が提供されるようになった。

近年の技術革新による、電気機器の小形化あるいは大容量化に伴い、エポキシ注型絶縁物が多量に使用されつつあるが、一方では、耐熱性の点から適用を制約されることも多く、その向上が望まれている。エポキシ注型ブッシングは、適用範囲が拡大するとともに、耐熱性の向上が望まれている機種の一つである。

注型絶縁材料としてのエポキシ樹脂の耐熱性は、化学的安定性によって制約されているといふよりは、注型絶縁材料に要求される電気絶縁機能と、構造材料としての機能の温度特性上から制約され、エポキシ注型絶縁物の多くは、100~120°C以下の温度範囲で使用されているのが一般的現状である。

これらのことから、当社では、B種絶縁として使用可能な耐熱性エポキシ注型絶縁材料を開発したが、ここでは、エポキシ注型絶縁材料の諸性質と、それをブッシングに適用するにあたって必要な電界的あるいは熱的現象、およびブッシングへの適用例などについて述べる。

2. エポキシ注型絶縁材料

2.1 諸性質の温度依存性

橋かけ高分子の諸性質の温度依存性に対する橋かけ密度の影響については、力学的性質⁽¹⁾や電気的性質⁽²⁾、その他において多くの研究がなされ、高分子の巨視的諸性質と分子構造との関係がしだいに明確になりつつある。

一方、高分子材料の多くの性質は、周知のように、ガラス転移温度(T_g)前後で急激な変化を示すので、電気機器におけるような広範囲の温度で材料を使用する場合、 T_g が使用限界温度を決める一つの基準になる。ことに、注型ブッシングのように、構造材料としての機能を強く要求される場合には、 T_g が高温側での使用限界温度になり、さらに、油密あるいは気密を確保するために寸法精度をきびしく要求される機器に適用する場合には、絶縁媒体による膨潤や、長期間のクリープ特性などを考慮し、一般に、 T_g より10~20°C低温を最

高使用温度にしている。

このように、注型ブッシングにとって重要な意味をもつ T_g と橋かけ密度との関係について以下に示す。

エポキシ当量370~435のビスフェノール形エポキシ樹脂と、1エポキシ当量に対して0.8モルの酸無水物(無水フタル酸および無水安息香酸)を用い、表2.1の組成で硬化させた試料系列の緩和弾性率 E (2.5秒値)、およびその時間微分 λ の温度依存性を図2.1⁽³⁾に示した。エポキシ樹脂の酸無水物による硬化の機構は複雑であるが、ここでは、第二級水酸基とエポキシ基の反応によるエーテル結合の生成度は硬化剤組成によって変わらないと仮定すれば、橋かけ密度の異なる同族体高分子が生成する。図2.1における λ 曲線のピーク位置を示す温

表2.1 試料
Sample preparation.

試料名	樹脂	硬化剤組成 (無水フタル酸+無水安息香酸)	硬化条件
P-1		0.667 モル分率	酸無水物添加量 0.8モル/エポキシ当量
P-2	ビスフェノール形 エポキシ	0.800	促進剤 BDMA 0.1 phr
P-3		0.909	
P-4	(エポキシ当量 370~435)	0.952	硬化 130°C×24 hr
P-5		1.000	

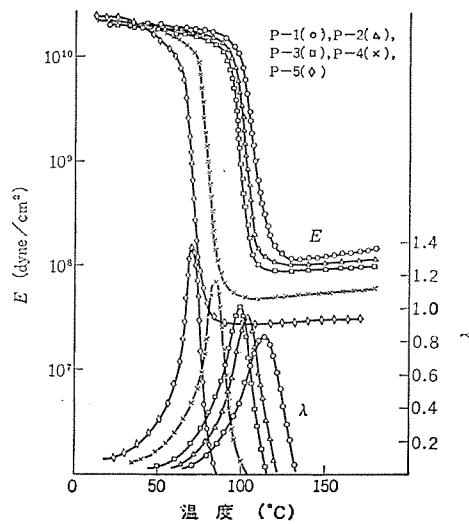


図2.1 E , λ の温度依存性
 E , λ vs. temperature.

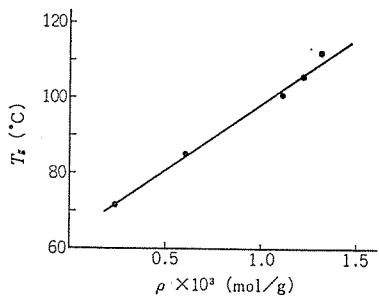


図 2.2 橋かけ密度とガラス転移温度の関係
Glasstransition temperature vs. crosslinking density.

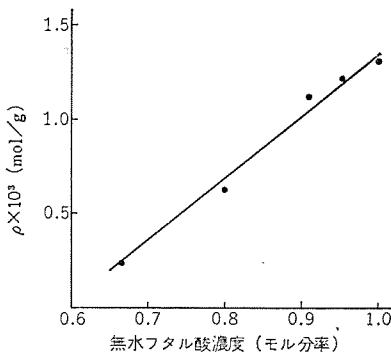


図 2.3 無水フタル酸のモル分率と橋かけ密度の関係
Crosslinking density vs. molar fraction of phthalic anhydride.

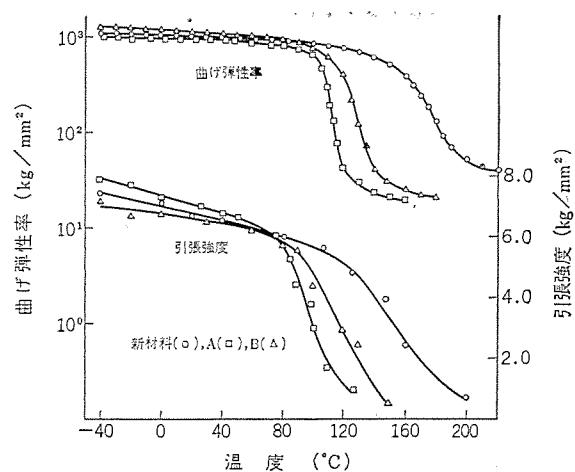


図 2.4 曲げ弾性率および引張強度の温度依存性
Flexural modulus, tensile strength vs. temperature.

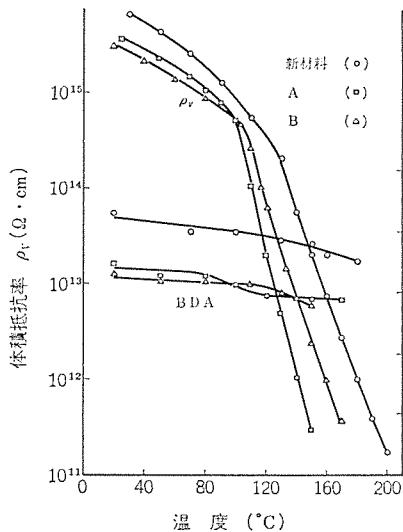


図 2.5 ρ_v および BDV の温度依存性
 ρ_v , BDV vs. temperature.

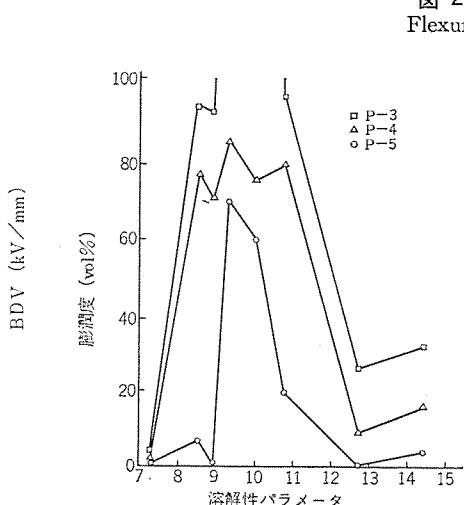


図 2.6 溶解性パラメータと膨潤度の関係
Degree of swelling vs. solubility parameter.

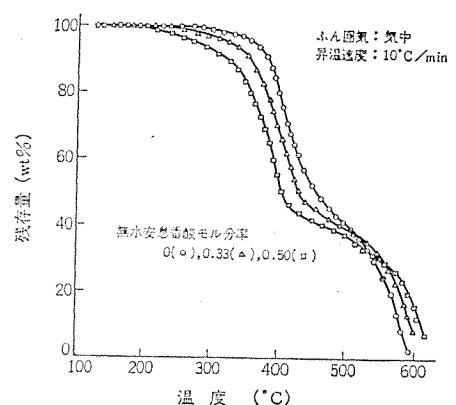


図 2.7 热分解特性に与える無水安息香酸の濃度の影響
Effect of molar fraction of benzoic anhydride on thermal degradation.

度を T_g とし、 T_g より 100°C 高温でのゴム弾性率 E_2 の値から式 (2.1) によって得られた橋かけ密度 ρ に対して T_g をプロットすれば、図 2.2 のような直線関係が得られる。

$$E_2 = 3d\rho RT \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、 d は試料の密度、 R は気体定数、 T は絶対温度である。

次に、式 (2.1) で求めた橋かけ密度の二塩基酸濃度依存性を図 2.3 に示す。図 2.3 から橋かけ密度は式 (2.2) によって表わすことができる⁽⁴⁾。

$$\rho = An - B \left(n > \frac{B}{A} \text{ の場合} \right) \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\rho = 0 \quad \left(n \leq \frac{B}{A} \text{ の場合} \right)$$

ここで、 n は混合酸無水物中の二塩基酸のモル分率、 A はエポキシ基とカルボキシル基の当量関係と、用いた樹脂の組成によって定まる定数、 B はエーテル結合による分子生長の程度と線状重合体を作るのに要する二塩基酸無水物の量によって定まる定数である。

このように、エポキシ樹脂硬化物は、その組成を調整することによって、ある程度自由に T_g を選択することができる。もちろん、注型絶縁材料としての総合的機能は、橋かけ密度を調整するだけでは満たされず、高分子を構造する分子鎖の化学種や、複合材料としての充てん剤についても詳細に検討する必要のあることは言うまでもない。

このような考え方から開発した耐熱性注型絶縁材料の機械的性質および電気的性質の温度依存性を、石英充てんビスフェノール形エポキシ (A) や石英充てん変性エポキシ (B) 系注型絶縁材料と比較して、図 2.4 および図 2.5 に示した。

2.2 耐溶剤性

エポキシ注型ブッシングは、今日では広く電気機器で使用されているが、油入変圧器などにおけるように、絶縁媒体と共存する場合には、媒体による膨潤劣化や媒体の汚損についても十分に検討をしておく必要がある。

高分子材料の耐溶剤性を判断する一つの手段として、高分子材料と溶剤との溶解性パラメータ δ を比較する方法が一般に行なわれている。Small⁽⁵⁾によれば、分子構造と密度とから δ を計算によって求めることができる。しかし、酸無水物硬化エポキシ樹脂の場合、その分子構造は必ずしも明確ではないので、ここでは、Lloyd ら⁽⁶⁾と同様に、 δ の既知の溶剤における平衡膨潤度から間接的に硬化物の δ を求める方法を用いた。図 2.6 に、表 2.1 に示した試料系列の 20°C, 1,500 時間後の膨潤度と δ との関係を示した。図 2.6 から明らかのように、曲線はエポキシ樹脂の橋かけ密度に無関係に、いずれも $\delta = 9.3$ にピーク値をもっていることを示している。このことから、当試料系列のエポキシ硬化物の δ は約 9.3 であると推測される。一方、その膨潤度は、橋かけ密度が増すとともに小さくなり、かつ、膨潤度～ δ 曲線の幅が狭くなることが認められる。

絶縁媒体として多用される鉛油の場合、その組成は複雑であり、 δ は一定値とはなり得ないが、Small⁽⁵⁾ の方法で概算すれば、約 8.2 以下の値と推定され、試料 P-5 を用いた 100°C での平衡膨潤度は 1.89 vol. % ときわめて小さな値を示した。また、高温用媒体として使用されるシリコーン油の場合には、 δ は 5.5⁽⁷⁾ であるから、エポキシ硬化物にとっては、さらに、有利な媒体と考えられる。

これらの裏付けのために、新材料の耐鉛油性・耐シリコーン油性を 120°C および 140°C で 100~1,000 時間の範囲で検討したが、材料の膨潤劣化や、媒体の汚損は、ほとんど認められない結果を得ている。

2.3 耐熱酸化劣化性

エポキシ樹脂の熱分解挙動については、多くの報告⁽⁸⁾がなされている。エポキシ樹脂は、酸化劣化によってハイドロパオキサイドが生成することが認められているが、その場合、アミン系硬化剤で硬化させた樹脂は、150°C で酸化が始まり、一方、無水マレイン酸硬化物では 200°C でも安定であり、ハイドロパオキサイドの生成量も少ないことが、Bishop ら⁽⁹⁾によって報告されているなど、エポキシ樹脂硬化物の熱分解特性に与える構成成分の影響は無視できない。また、エポキシ樹脂/酸無水物系では、酸無水物の添加量は必ずしも化学量論的ではなく、硬化物の機械的あるいは電気的性質などから、要求性能に最も適する量を実験的に決めることが多いが、このような樹脂と硬化

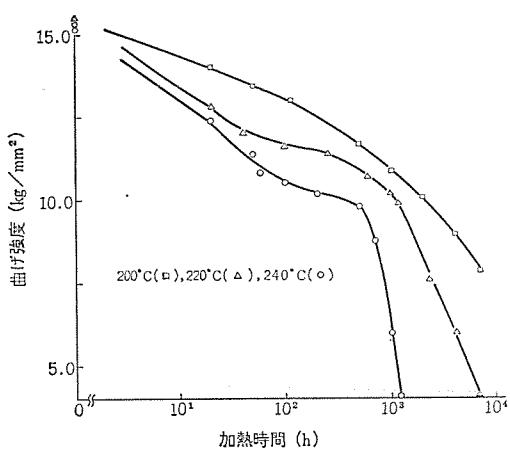


図 2.8 加熱による曲げ強度の変化
Change of flexural strength during heat aging.

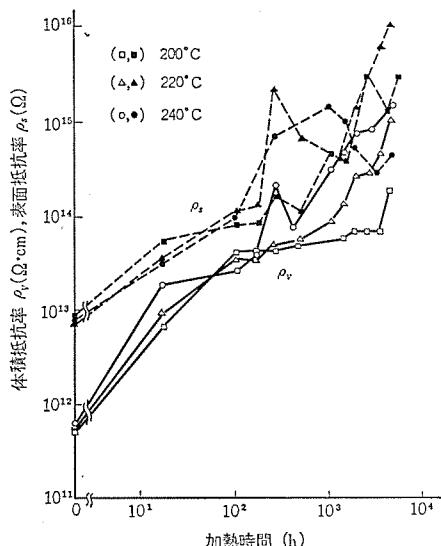


図 2.9 加熱による ρ_v , ρ_s の変化
Change of ρ_v , ρ_s during heat aging.

剤との割合によっても熱分解特性は影響されることが考えられる。ノボラック形エポキシ/無水メチルナデイク酸 (MNA) 系においては、MNA 85 phr 添加系の熱分解開始温度が最も高く、95 phr あるいは 55 phr 添加系より耐熱性にすぐれていることが、Fleming⁽¹⁰⁾ によって示されている。さらに、ノボラック形エポキシ/酸無水物 (MNA+無水安息香酸) 0.85 モル系で、MNA と無水安息香酸との割合を変えた場合の熱分解特性を無水安息香酸のモル分率をパラメータにして図 2.7 に示したが、図 2.7 から明らかのように、無水安息香酸の濃度が増すにつれて、分解開始温度が低温側に移行することが認められる。これらのこととは、エポキシ樹脂/酸無水物系では、エポキシ樹脂および酸無水物の相対量や側鎖の生成度などが硬化物の熱分解特性に対して重要な因子になりうることを示している。

一方、電気機器の固体絶縁材料は、上述のような短時間の特性とともに長期間の耐熱安定性についても検討し、製品の長期性能を保証しなければならない。図 2.8, 2.9, 2.10 は、ビスフェノール形エポキシ/酸無水物/シリカ系の長期間熱劣化における諸特性の変化を示したものである。このうち、表面抵抗率 ρ_s および体積抵抗率 ρ_v の測定は 140°C で行ない、その他は室温で測定した。このような加速劣化試験の結果から、試料の耐熱寿命を推定するために、曲げ強度および絶縁破壊電圧特性を用い、特性値の 50% 低下する時間をアレニウスプロットしたものを図 2.11 に示した。図 2.11 から試料の耐熱寿命は、機械的特性上から制約されるであろうと思われる。

今回開発した耐熱性注型絶縁材料についても、同様な方法で耐熱酸化劣化性を検討し、130°C での長期間使用に十分耐え得る材料で

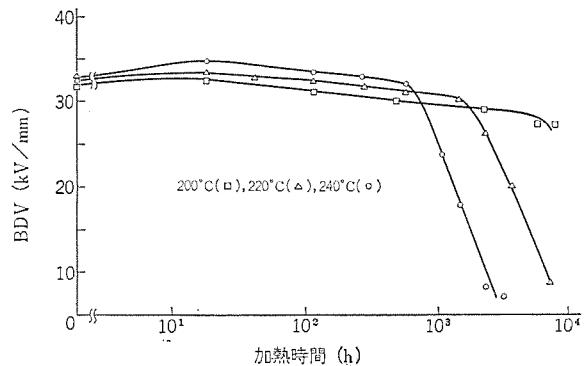


図 2.10 加熱による BDV の変化
Change of BDV during heat aging.

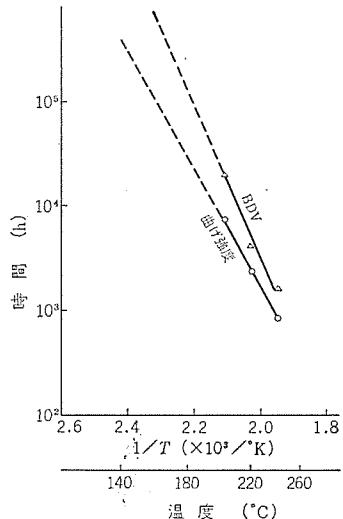


図 2.11 エポキシ注型材料の耐熱寿命
Thermal endurance for epoxy casting material.

あると判定される。

3. エポキシ注型ブッシングの形状

耐熱性注型絶縁材料をブッシングに適用するにあたり、電界分布、熱解析および内部応力などの形状に関する検討を行なったが、ここでは、電界および熱解析について述べる。なお、熱的現象と密接な関係にある内部応力については別報を参照されたい。

3.1 電界の検討

電界強度の推定法には

- (1) グラフ算出法
- (2) アナログ方式による算出法
- (3) 数値計算による算出法

などがある⁽¹¹⁾が、耐熱性エポキシ注型ブッシングに関して、主として使用したものについて概要を示す。

耐熱性エポキシ注型ブッシングを電界的な面からみた場合には、接地側シールドの網目の問題、接地側シールドの端末形状、および中心導体上の突起の問題などがある。

接地側シールドの網目の問題に対しては、網の断面形状が円筒状の場合には、ある条件のもとで重畠法を用いた理論によるグラフ化は可能である。しかし、網の断面形状が円筒状でない場合には、静電探針法による実測と、アナログ方式による算出または数値計算法を併用して電界強度を推定する方法を用いた。

接地側シールドの端末形状については、エポキシ注型ブッシングによく使用される形状について、電子計算機を用いてグラフを作成し、設計時点で形状を十分に検討した。グラフの一例を図3.1に示した。

中心導体上の突起に対しては、突起の形を球状または回転だ(梢)円体状と仮定し、平等電界中における突起部の電界強度を理論式よ

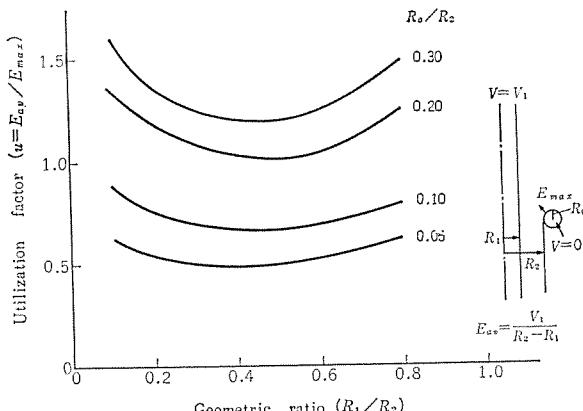


図3.1 端末部に対する Utilization Factor
Utilization factor for cast epoxy bushing.

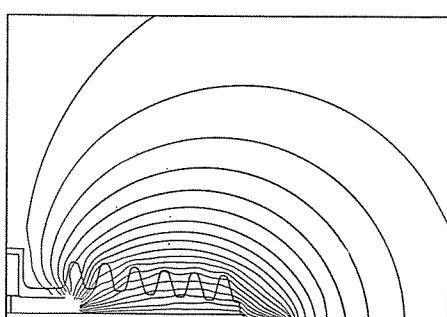


図3.2 作図器による電界分布例
Potential distribution drawn by the graphic plotter.

り算出し、グラフを作成して電界の推定を行なった。なお、突起が近接して存在する場合や、多数個連続して存在する場合については、静電探針法による実測と、アナログ方式による算出法を併用して電界を推定した。

最終的には、実場の使用状態における境界条件で、アナログ方式による算出法と数値計算法を併用して確認した。なお、絶縁物の表面が汚損している場合のように、伝導電流と変位電流が共存するような場の電界分布の推定は、実測とアナログ方式または数値計算法を併用した。

絶縁物の表面が清浄な場合の計算機によるフィールドマップの一例を図3.2に示す。

3.2 热解析

3.2.1 热解析の方法

热現象問題を解析する場合、一般には実体モデルを製作して実測することが多いが、モデルの製作に要する費用と時間を無視することができず、種々の案を比較検討することは不可能に近い。そこで、設計時の種々の問題の解決に必要な热分布の推定、温度計算の方法について述べる。

(1) 解析可能な簡略化したモデルによる計算

実際の機器の形状、境界条件をそのまま適用して直接計算によって解析できる例はまれである。これは、形状を解析可能な平板、円筒あるいは棒に近似させて手計算によって解析を進める方法である。

直交座標において温度分布を支配する微分方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q = C_P \omega \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (3.1)$$

ここで、 t : 溫度

k : 热伝導率

q : 体積発熱量

ω : 比重量

C_P : 比熱

τ : 時間

式(3.1)に解析可能な境界条件を与え、一次元あるいは二次元の微分方程式によって解析を進める。

(2) 抵抗紙模写による方法

熱の場と類似の電磁界の解析にはアナログ解法として抵抗網・電解液法・抵抗紙などが古くから使用されている。これらのうち、抵抗紙が簡単な装置と容易な測定のために広く使用されている。抵抗紙による解析は、二次元に限定されるが、大半の機器は、二次元に近似が可能である。

抵抗紙模擬装置で成立する二次元過渡電流場の式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial y} \right) - C \frac{\partial V}{\partial \tau} = -j^0 \quad (3.2)$$

また、二次元熱伝導場での式は、式(3.1)より、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial t}{\partial y} \right) - C_P \omega \frac{\partial t}{\partial \tau} = -q \quad (3.3)$$

ここで、 V : 電位

ρ : 比抵抗

C : 静電容量

j^0 : 電流密度

式(3.2)と式(3.3)において次の関係を導入する。

$$k = \alpha / \rho, \quad C_P \omega = \alpha C, \quad q = \beta j^0 \quad (3.4)$$

表 4.1 車両積載変圧器用エポキシ注型ブッシングの開発試験結果

Results of developmental test on cast epoxy bushings for the main transformer of rolling stock.

試験項目	試験結果
1. 構造、外観検査	異常なし
2. 绝縁抵抗測定	2,000 MΩ 以上
3. 温度試験	定格電流 200 A, 溫度上昇 20 deg
4. 誘電正接および静電容量測定	測定電圧 10~42 kV 誘電正接 0.75% 変化なし 静電容量 55 pF
5. 商用周波耐電圧試験	乾燥 70 kV, 1分間 異常なし
6. 衝撃波耐電圧試験	乾燥 175 kV, 波形 $1 \times 40 \mu\text{s}$ 印加回数 正、負 各 5 回 異常なし
7. 内部部分放電試験	測定電圧 10~38 kV 測定値 5 PC 以下
8. 誘電正接温度特性試験	測定電圧 10 kV, 測定温度 20~125°C 測定値 0.75%~2.0%
9. 過電流強度試験	5,000 A 2秒間通電, 溫度上昇 27 deg
10. 加熱試験	125°C 8時間, 異常なし
11. 冷熱油密試験	常温→125°C→常温 3サイクル 油圧 1.5 kg/cm², 異常なし
12. 曲げ耐荷重試験	先端荷重 100 kg 1分間, 異常なし
13. 冷凍振動試験	試験温度 -20°C 加振加速度 1.4 G 加振周波数 10 Hz 加振時間 上一下 4時間 左一右 2時間 前一後 2時間 いずれも異常なし

これらの必要性から、今回、新材料を適用した車両積載変圧器用ブッシングの試作を行なった。

当ブッシング例における仕様値は次のとおりである。

定格電圧	25 kV
定格電流	200 A
耐電圧値 商用周波	70 kV (1分間)

衝撃波 175 kV {波形 $(1 \times 40) \mu\text{s}$ }

製品化にあたり、車両積載用としての使用条件に耐える条件として、表 4.1 に示した開発試験を実施し、いずれも問題なく耐え、十分な実用性能を有することを確認している。

その他、耐熱性エポキシ注型絶縁材料を適用した例として、低圧 (1,500 V) 用ブッシングなどもあるが、本稿では割愛する。

5. むすび

電気機器の小形・軽量化あるいは大容量化に伴い、エポキシ注型ブッシングの耐熱性の向上が強く望まれているが、エポキシ注型絶縁材料は、主に諸性質の温度依存性上から、JEC-147 などで認められているような B 種または F 種絶縁として使用されることは少なかった。

このため、分子構造に関する検討を行ない、B 種絶縁として使用可能な耐熱性注型絶縁材料を開発した。さらに、当材料を電気機器に適用するうえでの問題点に関する検討を経て、ブッシングに適用した結果、十分な実用性能を有することが立証された。

このことから、エポキシ注型ブッシングの適用範囲が、B 種絶縁の領域まで拡大されると同時に、従来、懸念されていた、エポキシ注型ブッシングの高温時の寸法安定性に対しても、十分な特性を提供できると思われる。

今後、複雑な構造を有するブッシングにも、当材料を適用するように、さらに多方面からの検討を進めていく所存である。

最後に、当耐熱性エポキシ注型ブッシングの開発に、ご尽力くださった関係各位に心から謝意を表す。

参考文献

- (1) たとえば、柴山：高化、18, 183 (昭 36) など
- (2) たとえば、宮本、柴山：電気学会全国大会シンポジウム、4-1(iv) (昭 47)
- (3) 土橋ほか：電気学会全国大会昭 47-305
- (4) 柴山、児玉：高化、20, 587 (昭 38)
- (5) P. A. Small : J. Appl. Chem., 3, 71 (1953)
- (6) W. G. Lloyd, et al. : J. Polymer Sci., 62, 301 (1962)
- (7) H. Burrell : Off. Digest, 27, 726 (1955)
- (8) たとえば、M. B. Neiman, et al. : J. Polymer Sci., 56, 383 (1962)
- (9) D. P. Bishop, et al. : IEC., 59, 32 (1967)
- (10) G. J. Fleming : J. Appl. Polymer Sci., 10, 1813 (1966)
- (11) 新田、山田、荒畑：三菱電機技報、44, No. 9, 1133 (昭 45)

低電圧用注型エポキシ樹脂支持がいし

小鶴正二郎*・藤井範秋*・村上靖武*・原田浩作**

Cast Epoxy-resin Insulators for Low Voltage Use

Itami Works Shōjiro Kodai · Noriaki Fujii · Yasutake Murakami
Sanda Plant Kōsaku Harada

Recently a pressure-gelation method at high temperature or a hot mold method applied to the quick curing of epoxy compound is introduced as one of casting techniques. This new development has brought about much improvement on the quantity production of cast resin goods.

Herein are described the effect of accelerator in the quick curing of epoxy compound, and a reactivity at high temperature. Also a report is made on the effect of pressure given to resin in the application of the pressure-gelation. In the case of cast insulators for low voltage produced by the pressure-gelation, excellent performance is available to suggest, in connection with the freedom of formulation in casting, the practicability of quantity production of outdoor insulators or other large cast articles.

1. まえがき

従来、がいしはセラミックスで作られていたが、合成樹脂の発展に伴って種々のレジンがいしが開発されてきた。現在、これらのレジンがいしには、その良好な諸特性からエポキシ樹脂が多用されている。ことに、低電圧用支持がいしあるいはブッシングは、大部分のものがエポキシ樹脂製になりつつある。レジンがいしは、耐候性・耐トラッキング性の点でセラミックスのものにやや劣るが、この点についてもシクロ系のエポキシ樹脂の出現によって改善されつつある。

エポキシ樹脂がいしは、一般に成形法または注型法によって作られるが、前者は小形品を対象に、後者は中ないし大形品を対象に適用されるケースが多い。成形法と比較して注型法は量産性に劣るが、最近では注型技術の進歩によって離型サイクルの早い速硬化配合が適用され、量産性も改善されるようになった。すなわち、加圧ゲル化法⁽¹⁾あるいはホットモールド法、遠心注型法などがそれである。このような速硬化法は、いずれも一般的なエポキシ配合に硬化促進剤を添加するが、ここではこれらの促進剤の効果と、耐熱寿命に及ぼす影響、加圧ゲル化の効果、ならびに加圧ゲル化による注型がいしの諸特性について紹介する。なお、この報告では小形がいしに限定する。

2. エポキシ樹脂支持がいし

エポキシ樹脂支持がいし（以下、エポキシがいしと呼ぶ）は、その製法からみて、成形がいしと注型がいしとに分けられる。前者は材料の成形性から主として小形品に、後者は金型の離型サイクルから大形品に適用される。また、原料的に前者は成形用粉体を用いるのに対し、後者は配合した液状樹脂を用いる。最近では、多量の充てん剤を加えた半固状の混合物を圧縮成形やトランシファー成形に適用されるようになつた。

これらは、成形製品がいずれも電気絶縁用に用いられ、そして構造要素としての性能も要求されるので、成形あるいは注型のいずれをとるかは、製品の性能とともに、生産性の面からもあわせて検討する必要がある。セラミックがいしとエポキシがいしとを比較すると、一般的に次のようないいえる⁽²⁾。

表 2.1 成形法と注型法との比較⁽³⁾
Comparison between molding and casting.

	成形法	注型法
長所	(1) 配合操作がない (2) 可使時間が比較的長い (3) 定量が簡単である (4) 生産性が良い (5) 充てん剤充てん率を大きくすることができる (6) 離型性が良い (7) 成形面がきれいに仕上がる	(1) 成形時高圧を要しない (2) ポイドレスにできる (3) 機械的強度が良い (4) 大形品まで作ることができる (5) インサートとの接着性が良い (6) 自由なフォーミュレーションができる
	(1) 比較的高い成形圧を要す (2) 高温での成形を要す (3) 金型の消耗は比較的はげしい (4) 大形部品には適用できない (5) インサートに対する接着性が悪い (6) 自由なフォーミュレーションができない	(1) 配合操作を必要とする (2) 可使時間が短い (3) 一般的に離型サイクルが長い (4) より多くの設備を要する (5) ぱり取り等の後加工を要する

レジンがいしはセラミックがいしと比較して、

- 各種の形状が自由に容易に得られる。
- 小形・軽量化ができる。
- 取付金具を成形時に同時に埋込して一体化できる。
- 寸法精度が高い。
- 機械的・電気的特性が良い。
- 短納期である。

エポキシがいしは、現在、成形法あるいは注型法で生産されているが、両者にはそれぞれ一長一短があり、目的に応じていずれをとるかが決められる。両者の比較を表 2.1 に示す。

3. 速硬化注型材料

3.1 加圧注型

注型絶縁物は、高電圧機器をはじめとして多くの電気機器部品に適用され、大形部品・コイル埋込部品などのエポキシ樹脂の特長を生かした構造絶縁物が生産されている。従来、一般的にエポキシ注型物は、エポキシ配合物の硬化に長時間を要するので、金型の離型サイクルが長く、大量生産には不向きであった。近年、速硬化配合によって離型サイクルを短縮し、量産に対しても改善された加圧ゲル化法が各方面で適用され始めた。加圧ゲル化法のほかにも、速硬化配合を用

いるホットモールド法あるいは遠心注型法などがある。

注型によって低圧用の支持がいしを製造するには、量産性が問題になる。すなわち、金型の回転率を上げて生産性を向上させなければ、成形法とは競争できない。一般に、離型時間を短くするには、高温でゲル化させるか、反応促進剤を用いて反応性を高めることが行なわれる。加圧ゲル化法は、この両者を同時に行なうものである。また、加圧ゲル化法では配合物のポットライフが短いので、配合温度をできるだけ低くし、高温で短時間にゲル化させ、そしてレジンの急激な反応収縮に対して加圧によって湯口より金型内へのレジンの補給を容易にし、ひけなどのない寸法精度の良い製品を得ている。

われわれは、一般に用いられるエピビス系エポキシ樹脂／酸無水物／シリカ充てん系の配合物に種々の促進剤を添加したときの促進剤の効果を調べた。

3.2 促進剤の効果

市販のエピビスタイプのエポキシ樹脂に酸無水物を硬化剤として配合し、充てん剤としてシリカ粉末を加えたものをベースとし、促進剤の種類と添加量を種々に変えて反応性を調べた。実験の順序としては、エポキシ樹脂とシリカ粉末を一定温度で真空脱気混合した後、一定量の硬化剤に所定量の促進剤を加えたものを添加混合し、所定温度に保たれた油バス中の鉄製の反応容器に直ちに移し、サーモカプセルによって温度変化を測定する。反応温度は、配合温度より40~60°C高く設定した。

図3.2に、反応温度と反応量を変えたときのレジン配合物の中心位置の温度変化の状態とゲル化点とを示す。反応温度が高いほど、反応量の多いほど、発熱ピークは高くなるが、ゲル化時間は、加熱

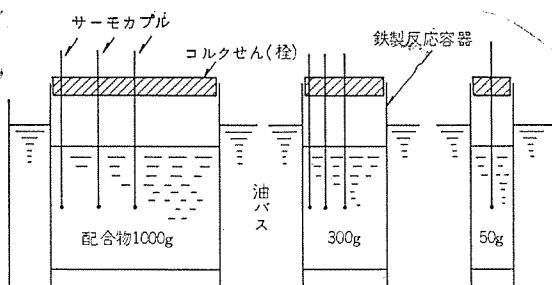


図3.1 反応性の試験法
Test method of exothermic reaction in different locations of casting mixture.

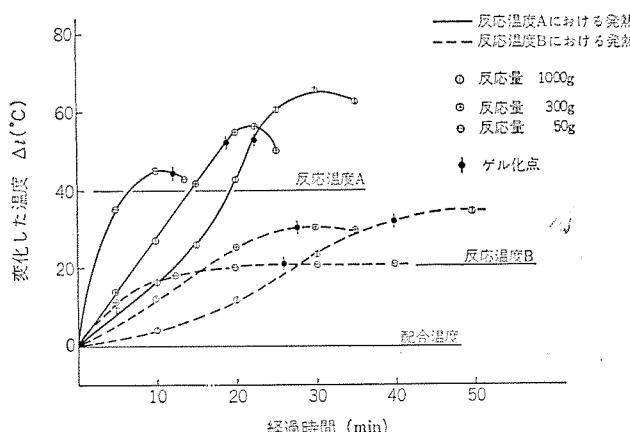


図3.2 エポキシ配合物の反応性
(1) 反応温度と反応量の関係
Exothermic reaction of epoxy-resin mixture.
(1) Effect of reacting temperature and casting volume on exothermic reaction.

されやすいものほど短くなる。そして、ゲル化点の温度は、50gのものを除いてほぼ同じであり、反応温度より10~12°C高い温度である。

図3.3は、促進剤の添加量を2倍にしたときの状態で、反応量1,000gのときの中心点の温度変化である。促進剤が多いほうが、発熱カーブは立ち上がるが、発熱ピーク温度、ゲル化点の温度はさし

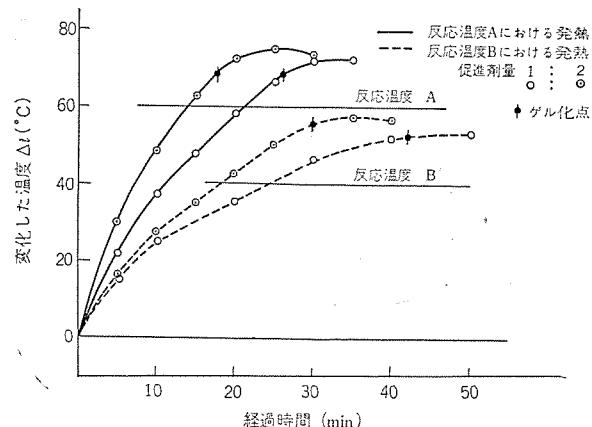


図3.3 エポキシ配合物の反応性
(2) 促進剤の添加量との関係
Exothermic reaction of epoxy-resin mixture.
(2) Effect of accelerator on exotherm.

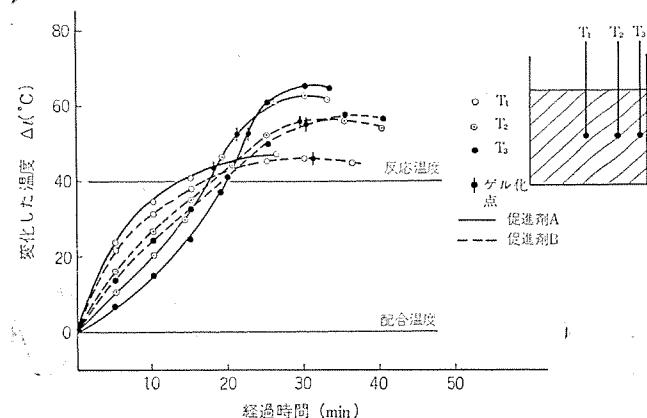


図3.4 エポキシ配合物の反応性
(3) 反応容器内の位置的関係
Exothermic reaction of epoxy-resin mixture
(3) Spot-wise exothermic difference.

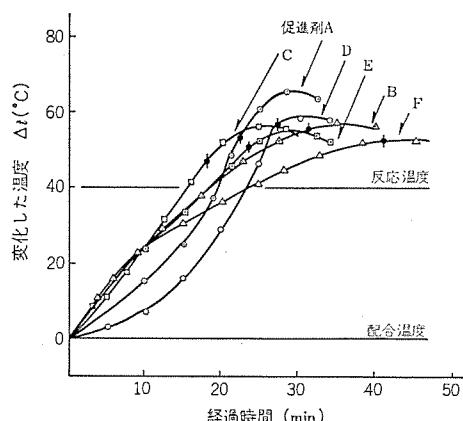


図3.5 エポキシ配合物の反応性
(4) 促進剤の種類と反応性
Exothermic reaction of epoxy-resin mixture.
(4) Effect of various accelerators on exothermic reaction.

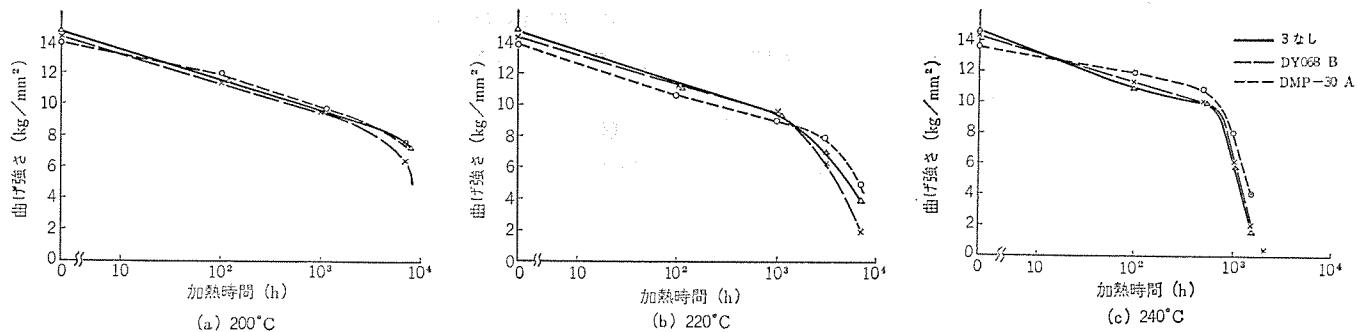


図 3.6 热劣化
Heat endurance.

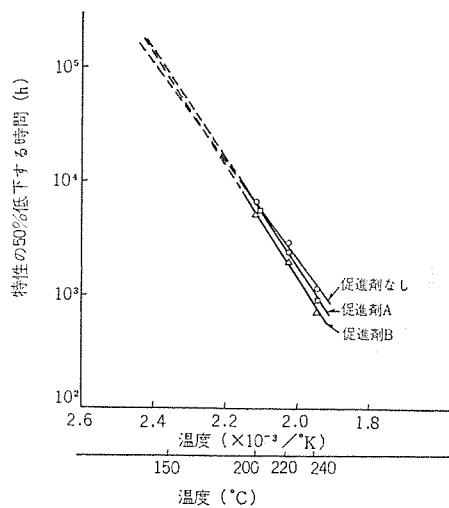


図 3.7 耐熱寿命
Thermal endurance.

て変わりない。

図 3.4 は、反応量 1 kg のときの外周部と中心部との各部分における発熱の状態を示したもので、中心部ほど温度の立上りは遅れるが、中心点・中間点のゲル化点の温度は同じであると言える。しかし、促進剤の種類によって各部分のゲル化時間は異なり、図 3.4 に示した A の場合は外周部からゲル化が進み、B の場合は逆に中心付近からゲル化が進む。これらのケースは、促進剤の種類・添加量、および配合温度と反応温度との温度差、反応量によって変化する。図 3.5 に数種の促進剤の種類を変えたときの反応性を示した。配合温度と反応温度との差を 40°C とし、反応量 1 kg のときの中心点の温度の変化である。反応初期に発熱するもの、初期は遅いが、その後に急激に発熱するもの、ゲル化後の発熱の大きいものや小さいものなどといろいろなケースがある。これらの特性は、反応物内のゲル化点の時間的な進み方とともに、加圧ゲル配合・硬化条件を決めるときの重要な選択因子である。

3.3 促進剤の耐熱寿命に与える影響

促進剤を添加した場合の硬化物の耐熱寿命に与える促進剤の影響を調べた。3.2 節の促進剤 A, B を用いた場合、および促進剤を含まない 3 種の硬化物について試片の電気特性・機械特性の加熱による変化を求める、それぞれの特性が初期値の 50% になる点を寿命とした。熱劣化は 200°C, 220°C および 240°C である。図 3.6 に一例として曲げ強さの劣化のようすを示した。このようにして得られた耐熱寿命を図 3.7 に示す。図のプロット点は、それぞれの場合の電気特性・機械特性上の寿命の平均値を示したもので、促進剤は高温において耐熱寿命に影響を若干与える傾向を示したが、全体的に

にはほとんど耐熱寿命に影響しないことがわかった。

4. 加圧ゲル化法における加圧力の効果

加圧ゲル化法では速硬化配合とともに、高温においてゲル化過程でレジンに圧力を加える。このときの加圧力が、硬化物の特性にどのように影響するかについて述べる。

試料片は、ゲル化時にレジン配合物に任意の圧力が加えられ、そして後加工なしで熱変形温度試片、およびダンベル形引張試片が同時に注型できる金型を用いて作製した。レジン配合は、3章で述べたベース配合、すなわち、エピビスタイプエポキシ/酸無水物/促進剤 B/シリカ粉末に固定し、加圧力・硬化温度を変えて試料片を作成した。

(1) 硬化温度と熱変形温度

促進剤を含む速硬化配合物の硬化温度を 90°C ないし 150°C の間で変化させて硬化したときの硬化物の熱変形温度を図 4.1 にプロットした。このときの加圧力は大気圧である。熱変形温度は、硬化温度が高くなるほど低下する傾向を示す。これは、潜在性硬化剤を用いたエポキシ配合、あるいは不飽和ポリエチル樹脂の硬化時の触媒量を多くした場合の熱変形温度、あるいは、架橋密度との関係と共にしており、反応過程（触媒濃度、反応速度）での促進剤の活性度、エポキシの架橋状態の差異によるものと考えられる。

次に、硬化温度を一定にしたときのゲル化過程におけるレジンに加わる圧力の硬化物に与える影響を図 4.2 に示す。加圧力は、0~4 kg/cm².g に変化させ、そして配合物のゲル化が完了するまで常にレジンの補給と、圧力が加わるように金型に温度こう配を設け、ゲル化はダンベル試片ならびに熱変形温度試片の長さ方向の一端より進行するようにした。

(2) 加圧力と引張強さ

硬化物の引張強さは加圧力に関係しない。図中には各 10 本の試片の測定値の平均値と最大・最小値をプロットした。

(3) 加圧力と残留ひずみ(歪)

硬化の完了したダンベル試片を T_g 以上の温度で 30 分間加熱し、その後、室温まで徐冷して自由収縮させたときの寸法変化を図 4.2 (b) に示す。図は長さ方向の寸法収縮を試片の残留ひずみとして加

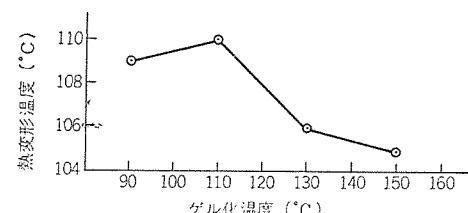


図 4.1 硬化温度と熱変形温度
Cure-temperatures vs. heat-distortion temperature.

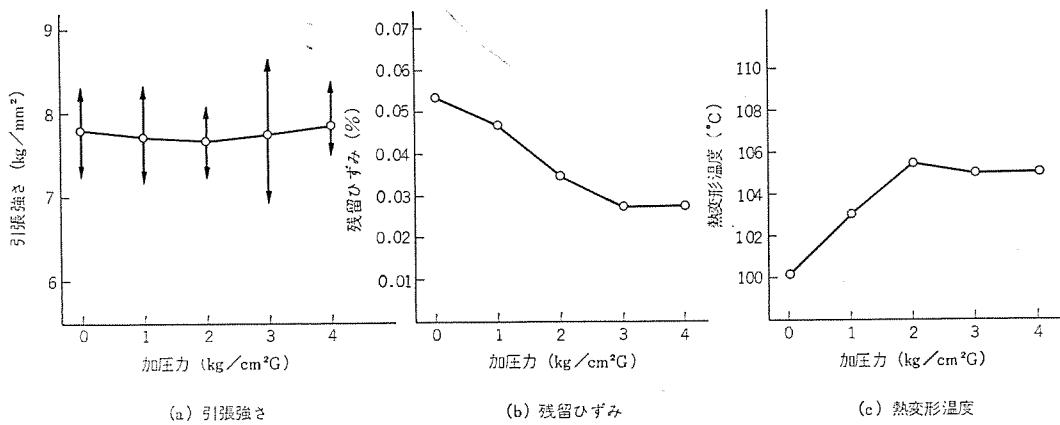


図 4.2 加圧力の効果
Effect of pressure on pressure-gelation.

圧力に対応させた。残留ひずみは、加圧力の増加とともに減少し、 $3 \text{ kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 以上ではほぼ一定の値になる。これは、加圧ゲル化法で各ポイントのゲル化温度がほぼ一定になることとあいまち、硬化物の残留内部応力が、普通注型法の場合よりも高いゲル化温度をとるにもかかわらず、同等あるいはそれ以下になることを示唆するものといえよう。

(4) 加圧力と熱変形温度

熱変形温度は、図 4.2 (c) に示したように、加圧力とともに高くなり、 $2 \text{ kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 以上ではほぼ一定になる傾向である。この加圧力の効果は図 4.1 に示した、高温硬化による熱変形温度の低下する温度にほぼ相当する。

以上に述べたように、速硬化配合においては、その硬化の早さゆえに注型の量産性を可能にするものであるが、配合物のポットライフ、硬化過程におけるさまざまなゲル化の状態（促進剤の種類・添加量、ゲル化温度、ゲル化の進行する位置的関係、注型容量、注型品の肉厚など）は、硬化後の製品の機能に及ぼす多くの因子になる。速硬化配合を用いた量産性のある成形法に対して成形法では採用しがたい大形部品にまで適用できる加圧ゲル化法を適用して、 6 kV 以下の低電圧用支持がいしを試作したので、それについて次に述べる。

5. 注型による低電圧用エポキシ支持がいし

加圧ゲル化法を適用して製作したエポキシがいしの性能について以下に述べるが、速硬化配合を用いた注型法によれば、従来の注型法と比較して量産性が改善され、圧縮成形あるいはトランク成形によるエポキシがいしの生産の場合とほぼ同じ生産性にまで近づけることができる。

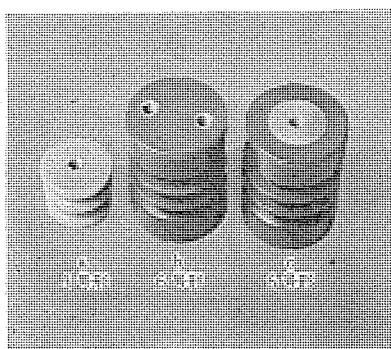


図 5.1 注型エポキシ樹脂がいし
Cast epoxy-resin insulator.

前章までに述べた、エビス系エポキシ配合を用いた加圧ゲルによる 6 kV 用エポキシ支持がいしを加圧ゲル化法により製作した結果を、つぎに述べる。エポキシがいしの形状ならびに評価は、JEM 1262-1973 によった。図 5.1 に低電圧用支持がいしの写真を、図 5.2 に EID 6 A 2 形がいしの図を示す。表 5.1 に形式試験の結果をまとめたが、いずれの試験項目についても良好な結果が得られた。試験項目 (4), (5), (6) については、定められた条件で試験を行なった結果、異状なく、引続き部分放電試験を行なって部分放電荷量を

表 5.1 JEM 1262 による形式試験結果
Type test result on JEM 1262

試験順序	試験項目	規 格	結 果
(1)	構 造 試 験	EID 6 A 2 を適用	良 好
(2)	外 観 試 験	ひけ、色むら、かけ等外観の欠点別許容限度	合 格
(3)	部 分 放 電 試 験	常規対地電圧の 1.1 倍の電圧において 100 PC 以下	合 格 (13 PC)
(4)	低 温 お よ び 高 温 試 験	$-20^{\circ}\text{C} \sim +90^{\circ}\text{C}$ 3 サイクル (その後 (3) の試験で 100 PC 以下)	異常なし (変化なし)
(5)	曲 げ 耐 荷 重 試 験	180 kg 1 分間 (その後 (3) の試験で 100 PC 以下)	異常なし (変化なし)
(6)	短 時 間 電 流 試 験	20 kA (その後 (3) の試験で 100 PC 以下)	異常なし (変化なし)
(7)	商 用 周 波 耐 電 圧 試 験	22 kV 1 分間	異常なし
(8)	衝 撃 波 耐 電 圧 試 験	60 kV $1 \times 40 \mu\text{s}$ 正負極性ともに 5 回	異常なし
(9)	耐 アーク 試 験	曲げ耐荷重対応電流を定格電圧 $\sqrt{3}$ の電圧で 15 サイクル	

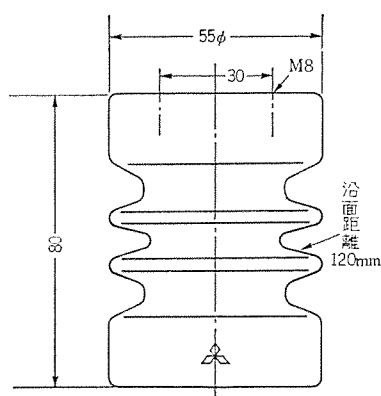


図 5.2 EID 6 A 2 形がいし
Epoxy-resin insulator, type EID 6 A 2.

表 5.2 6号形注型がいしの一般性質
Properties of cast epoxy-resin insulator for 6kV use.

試験項目	条件	測定値
(1) 曲げ強さ kg		270~318 平均 283
(2) 引張強さ kg		2,140~2,630 平均 2,480
(3)ねじり強さ kg-cm		2,300~2,760 平均 2,490
(4) 商用周波せん絡電圧 kV		45~52
(5) 衝撃周波せん絡電圧 kV 50%せん絡値	極性+ 極性-	79~87 -136~-193
(6) 耐トラッキング性	印加電圧 3.98 kV	101回良好
(7) 過電圧試験	(6)に引継ぎ行なう 塗付着量 0.054~0.062 mg/cm ²	6.9 kV×1.2 良好
(8) 耐電圧試験	(7)ののち水洗	22 kV 良好
(9) 霧室内せん絡電圧 kV	汚損度 0.03 mg/cm ² 0.06 mg/cm ²	11.4~11.9 10.5~11.8

注) 試料数はいずれの項目についても5個

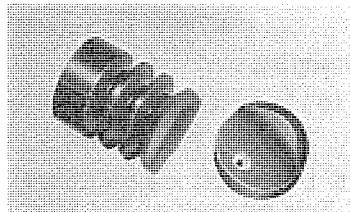


図 5.3 曲げ破壊状態
Fracture shape in flexural strength test.

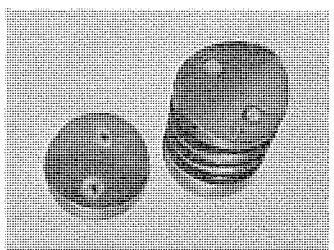


図 5.4 引張破壊状態
Fracture shape in tensile strength test.

測定したが、試験前後の部分放電電荷量にはいずれも変化がなくて良好であった。

表 5.2 に JEM に準拠した試験法により行なった 6 号 A2 形がいしの、他の諸特性を示す。試料数は、いずれの項目についても各 5 個である。曲げ破壊および引張破壊の状態を図 5.3, 5.4 に示す。機械的強度は、がいしの構造、埋金の形状および表面状態によって左右される。この場合には埋金の底部より破壊していることがわかる。

これらの結果は、注型によって支持がいしの量産を行なって、良好な性能を有する注型品の製作が可能であることを示唆するだけでなく、配合の自由性からシクロエポキシ樹脂を用いた屋外用絶縁物の量産性をも期待できるし、さらには、より大きな形状の注型品の量産化をも可能にすることを示している。

6. むすび

速硬化配合による注型によれば、金型の離形サイクルを短縮し、注型の量産性を著しく改善する。そして、速硬化配合に用いられる促進剤は、硬化物の特性・耐熱寿命になんら悪影響を及ぼさないことが明らかになった。また、加圧ゲル化法でレジンに加圧すれば、注型品の外観・面精度・寸法精度を向上させるだけでなく、注型品の内部残留応力⁽⁴⁾を減少させる傾向があり、高温でのゲル化による熱応力的な短所をカバーできる可能性を示す。

加圧ゲル化法による注型がいしの性能は良好で、注型の大量生産において、配合の自由性、より大形品への適用性などの点で成型法と比較して有利な点があり、エポキシ樹脂のもつ優秀な機械的特性を発揮させる点からも、将来の注型のあり方を示唆するものであるといえよう。

参考文献

- (1) 長沢: 高分子加工, 昭46年8月号, 419
- (2) 土田: 電気雑誌 OHM, 昭和38年3月号
- (3) 垣内 弘 編: エポキシ樹脂, 昭晃堂
- (4) 元起ほか: 富士時報, 41, No. 11, 827 (昭43)

エポキシモールド形 計器用変圧変流器

落合 溫之*・塚本 忠之*・野口 肇*・本城 守*

Epoxy Resin Molded Type Potential-Current Transformers

Fukuyama Works Haruyuki Ochiai・Tadayuki Tsukamoto・Hajime Noguchi・Mamoru Honjou

With the elevation of reliability on power feeding, the reliability asked for the distribution apparatus has become very high. As for solid insulations such as epoxy resin molded ones, resistance against cracking plays the most vital part in view of insulation dependability. Epoxy resin molded type potential-current transformers (PO-6 T) with improved cracking resistance have been recently developed by Mitsubishi, introduction being made herein. For these new instrument transformers sheet and film insulating materials of high reliability are used between the primary and the secondary windings so as to form a high cracking resistance system. They will withstand heat shock tests, the temperature change of 95°C (hot water at 85°C~90°C and cold liquid at -5°C~-10°C).

This article reports the outlines of information such as the construction to elevate the insulation reliability, physical properties of the materials, estimation of cracking resistance, this resistance of the transformers in use, the degree of reliability and error characteristics.

1. まえがき

エポキシ樹脂が電気絶縁材料に使用されはじめて久しく、注型技術の進歩とあいまって、従来の6kV用油入り計器用変圧変流器にとってかわり小形軽量化されたエポキシモールド形乾式変成器が信頼性の面で高く評価され、各電力会社でも広く採用され好評を得ている。

とくに配電回路用機器の信頼性向上が強く要望される今日、油入り式に比べ、保守点検が容易で小形軽量、比較的汚染されたふん団気環境下においても絶縁劣化がほとんどなく、火災などの二次災害のおそれがない、などの特長のため機器近代化要求の潮流にのってますます高く評価されている。

わが国では当社が始めて製品化に成功し過去十数年来、幾多の改良を加えPO-2H, PO-4およびPO-6Hなどの機種を各電力会社に納入し現地に取付けられ運転中であり、豊富な種類のモールド形計器用変圧変流器のシリーズを完成市販している。ここでは電力需給用として蓄積された技術を総合し耐クラック性をさらに一段と改良し軽量化した新開発のPO-6T形屋外用計器用変圧変流器について、その材料、構造、性能面から評価した結果の概要を紹介する。

2. PO-6T形 計器用変圧変流器の概要

これは電力量計と組合せて、三相3線式6kV回路の電力量を計量するために使用するもので、エポキシ樹脂でモールドした計器用変圧器（以下PTといふ）および変流器（以下CTといふ）を各2台、鉄箱内に収納したいわゆるモールド形計器用変圧変流器（以下PCTといふ）である。

このPCTは某電力会社の規格改訂にともなって開発したもので、その設計意図ならびに具体的な改良事項はつぎのとおりである。

（1）絶縁信頼性の向上

絶縁信頼性の向上のためには、内部PT, CTの耐クラック性を向上させることと、箱内部の相間短絡を防ぐために内部高圧露出部をなくすことが必要である。前者に対しては、後述のごとくPT, CTの絶縁構造と注型材料を改良した。さらに工作条件とか、製品の評価方法についても十分吟味した。また、後者に対しては従来はCT

が二重比定格で、一次端子の銅板がモールド部分から露出し、この部分に切換装置を設けていたが、本品は單一比定格とし切換装置が不用になったので、銅板の代りに絶縁電線を使用した。これにともなってCTの一次コイルとこの絶縁電線との接続部はCTのモールド内部に設けた。また、箱内部の高圧電線の接続部の絶縁は従来、絶縁テープを巻いていたが、本品は接続部をゴムで一体にモールドして、絶縁信頼性を向上させた。

（2）防爆構造

これはユーザでの外部結線作業時の誤結線によるPTの二次短絡とか、落雷によるPT, CTの絶縁破壊によって急激にガスが発生し、アーク等によってガス爆発を起して、箱のフタとか内蔵物が飛散するのを防ぐのが目的である。最終的な構造を決める前に、放圧弁等を使用した種々の防爆構造について、ある短絡容量を設定して内部高圧部の短絡試験を行なった結果、放圧弁等を設けなくても箱のフタおよび外箱側面の変形により、爆発時の圧力を吸収できることが判明した。ただ、フタの面積を大きくしてフタが変形しやすいようにし、かつフタを締付ける部分の構造を改良することによって、フタが絶対飛散しないようにした。また、鉄箱をプレス型によって、しづることにより溶接部をできるだけ少なくした。これにより溶接作業による、鉄箱の強度のバラツキを少なくすることができる。

（3）小形軽量化

前述のごとく、鉄箱をプレス型によりしづること、鉄箱内部の高圧露出部をなくすこと、さらにCTの絶縁構造を改良することによって、従来のものに比べて大幅に小形軽量化ができた。

（4）防雨構造

従来この種のPCTは、万一雨水が鉄箱内部に入った場合、この水を抜くために鉄箱の底部に水抜き穴を設けていた。しかしながら、これは据置で設置した場合とか、保管中にこの穴から箱内部に水が入る可能性があるという欠点があるため、本品はこの水抜き穴を廃止した。したがって、鉄箱にはどんな雨水も入らない構造にする必要がある。このため、フタと鉄箱とのパッキング効果を向上させた。この性能については、PCTのコンジットパイプにせん(栓)をして水中に浸して、水が入らないことを確認している。

表 2.1 PO-6T 形 PCT の定格
Rating of type PO-6T instrument transformer.

変	圧	比	6,600/110	
変	流	比	5~100/5	
階	級		0.5 W 級	
定格負担	C	T	2×15 VA	
	P	T	2×15 VA	
過	冠	流	強度	150
重	量		87 kg	
形	式		屋外用	

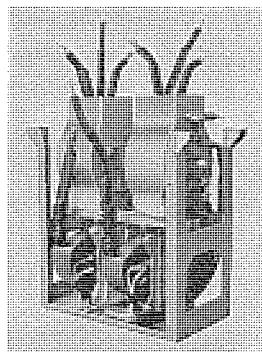


図 2.1 内部構造
Interior view.

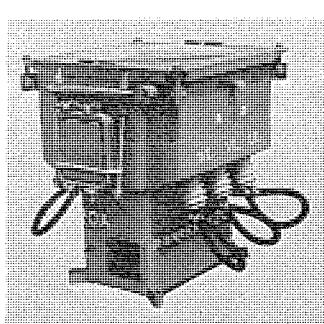


図 2.2 PO-6T 形 PCT の外観
Exterior view of type PO-6T instrument transformer.

つぎに、本品の定格は表 2.1 のとおりである。

構造は図 2.1 に示すとく、取付わく(枠)の上部に CT、下部に PT を各 2 台設置し、これを図 2.2 に示す鉄箱に収納したものである。据付けは柱上懸垂、平面据置いずれも可能な構造であり、6 kV 回路への接続はブッシングを介して鉄箱内から外部へ引き出された高圧絶縁電線を使用する。また、電力量計への接続は、二次端子箱内に設けた二次端子台に低圧絶縁電線を接続し、コンジットパイプを通してこれを外部へ導き出して行なう。検定封印は鉄箱のフタをはずさないで外部より容易に行なうことができる。

3. 耐クラック性

固体絶縁において、クラックが発生すれば絶縁破壊を引きこし致命的であることは明白である。以下 PT および CT の耐クラック性につ

いて、構造、注型材料、注型作業および評価の面から、その概要を述べる。

3.1 構 造

鉄箱内に収納している PT および CT は、いずれも単相用をおのの 2 個用いコイルのみをエポキシ樹脂でモールドし絶縁している。モールドコイルは製品の心臓部であり、絶縁上最も重要な要素である。特に耐クラック性が重要視される。モールドコイルにクラックを発生しないようにするには、モールドコイル内に残留する応力を、樹脂の設計許容応力内に納める必要がある。

上記モールドコイル内に残留する応力は、モールドコイル、コイル、埋込金具等の形状、モールドコイルの絶縁構造および樹脂量と銅量の割合等ならびに製造過程におけるエポキシ樹脂の硬化条件等に起因するものである。そこで設計段階で内部残留応力を小さくする構造にするために、モールドコイルおよびコイルの形状の小形簡略化、埋込金具の廃止、高低圧コイル間の絶縁方式、銅量の減少等の配慮が必要である。そしてモールドコイルの絶縁構造を検討するための一つの手段として、高圧コイルと低圧コイル間に適当な絶縁間隔をとってエポキシ樹脂で充てんしたモールドコイルにおいて、各要素(コイル、エポキシ樹脂)に材料定数を与えて、温度が 100°C 変化した場合、各部に発生する熱応力を有限要素法を用いたプログラムによって計算した。その結果は、高圧コイルと低圧コイル間および低圧コイルと大地間のエポキシ樹脂部に発生する応力が、最も大きくなっている。これは実機をヒートショックによって、故意に破壊した場合に発生するクラックのパターンからも同様なことがいえる。このことより、高低圧コイル間の内部残留応力を解消する手段として、高低圧コイル間に薄葉絶縁材を用いてコイルを一体化し、絶縁する方式がしだいに採用されつつある。

当社においても数年前よりこの絶縁方式を積極的に取り組み市販向 PT に採用している。現在までの顧客の情報(特に品質的内容)と当社における種々の試験より判断して良好な結果を収めている。特にモールドコイルの耐クラック性は、一段と向上した。今回電力向として市販向の経験を生かして高低圧コイル間に薄葉絶縁材を用いた。この材料は絶縁性能を長期にわたり保持できるよう配慮してあり、つぎの特長点がある。

(1) 耐部分放電特性が良好である。

(2) 耐熱性が良好である。

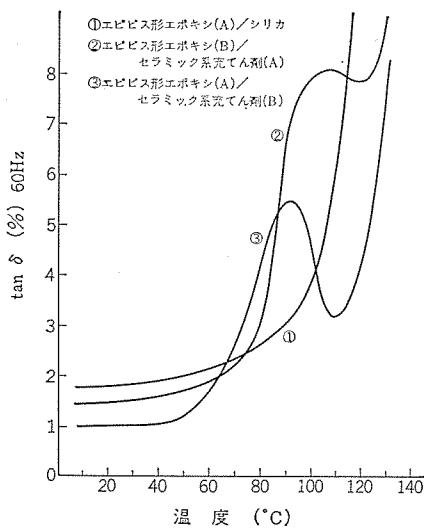


図 3.1 誘電正接一温度特性
Dielectric-tangent-temperature characteristics.

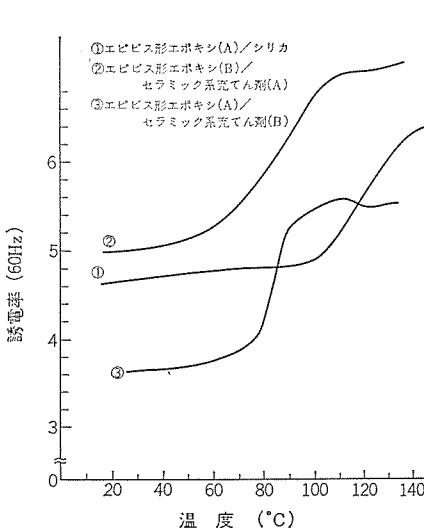


図 3.2 誘電率一温度特性
Dielectric-constant-temperature characteristics.

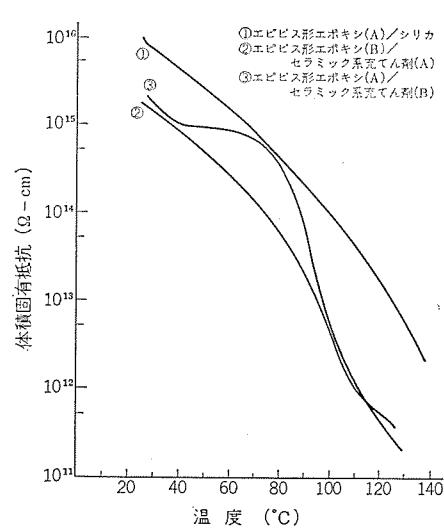


図 3.3 体積固有抵抗一温度特性
Volume conductivity-temperature characteristics.

(3) 樹脂との親和性が良好である。

なおこのものは当社中央研究所で研究され、その実用化がなされたもので、発電機、電動機等でその優秀性を実証されている。

3.2 注型材料

当社では、変成器の絶縁材料としてエポキシ樹脂のバランスのとれた特性にいち早く着目し研究開発を進め、実機に応用し、豊富な経験と長年の使用実績がある。

エポキシ配合系は、エポキシ樹脂そのものの種類が多いこと、硬化剤、硬化促進剤、希釈剤、可とう(撓)性賦与剤、充てん剤等を変えることによって、多種多様のものが得られ、それぞれの目的に応じた物性の硬化物を得ることができる。

計器用変成器における耐クラック性の点からは、つぎのようなことが必要である。

(1) 樹脂内に埋め込まれるコイルの熱膨張係数と差が少ない。

(2) 硬化時の発熱が少なく、硬化収縮応力が少ない。

(3) 使用状態での内部外部の温度差による熱応力に耐える強度をもつこと。

(4) 可とう性を付与して、内部応力を緩和すること。

こうした観点から、各種の充てん剤、可とう性賦与剤、硬化剤が検討されている。

エポキシ樹脂には、エピビス型のエポキシ樹脂、耐候性に富む環状脂肪族エポキシ、耐熱性に富むエポキシノボラックタイプ等、いろいろのものがある。耐クラック性の良い硬化物を得るために、エポキシ当量の比較的大きい、エピビス型のエポキシ樹脂が使用される。さらに耐クラック性を向上させるため、多種類の充てん剤、ポリプロピレンジコール等の一般的な可とう性賦与剤が使用されるが、可とう性賦与剤の多量使用は電気的特性、耐熱安定性、耐老化性の低下を招くことが多い。硬化剤としては常温硬化型のアミン系硬化剤、中高温硬化型の酸無水物系硬化剤が一般に使用される。エポキシ硬化物の熱膨張係数を低くすること、機械的特性の改善、耐クラック性の改善、コストダウン等から充てん剤が使用される。充てん剤としては一般に石英末(シリカ)が使用されているが、そのほかにも耐トラッキング性を改良する充てん剤、熱膨張係数が小さく、熱伝導率の高い充てん剤が使用される。また硬化条件も耐クラック性に重要な影響をもっており、そのほかの物性との総合的なバランスから最適硬化条件が決定される。各種のレジン組成、ある硬化条件によって得られた硬化物の特性として、図3.1に誘電正接の温度特性、図3.2に誘電率の温度特性、図3.3に体積固有抵抗の温度特性を示す。

3.3 注型作業

モールド変成器の耐クラック性をはじめとする各種性能には実際の注型作業が重要な役割をもっている。原材料の厳密な管理、また製造工程の大幅な自動化による安定品質の確保が肝要である。さらに材料特性のみでなく、混合、脱泡(泡)注型時の徹底した工程品質管理が要求される。注型作業の作業性には注型レジンの粘度一時間特性(ポットライフ)がたいせつである。各種のレジン組成の粘度一時間特性を図3.4に示す。

注型レジンと一次巻線と二次巻線間の薄葉絶縁材等の各種材料との親和性も耐クラック性、絶縁性能に重要な役割をもっている。この親和性には二つの面が考えられ、一つはエポキシ樹脂のゲル化速度に及ぼす影響、もう一つはエポキシ樹脂との接着性があり、検討の結果良好な性能が得られている。

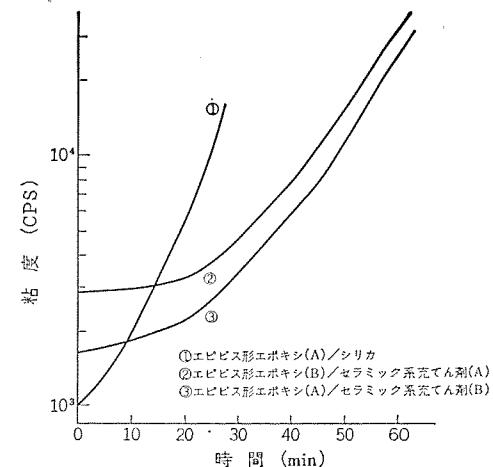


図 3.4 粘度一時間特性
Viscosity-time characteristics.

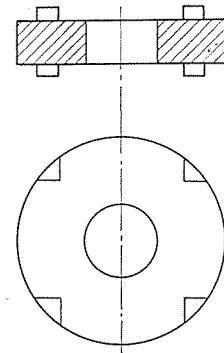


図 3.5 オリファンタ ワッシャ
Olyphant washer test insert.

クラック指数 サイクル数	0	1~3	4~6	7~9	10~12	13~15	16~18	19~21	22~24	25~27
ヒートショック 条件	硬化後 そのままの 状態	105°C S	105°C S	105°C S	105°C S	105°C S	120°C S	135°C S	150°C S	165°C S

図 3.6 オリファンタ ワッシャ 試験条件
Olyphant washer test condition.

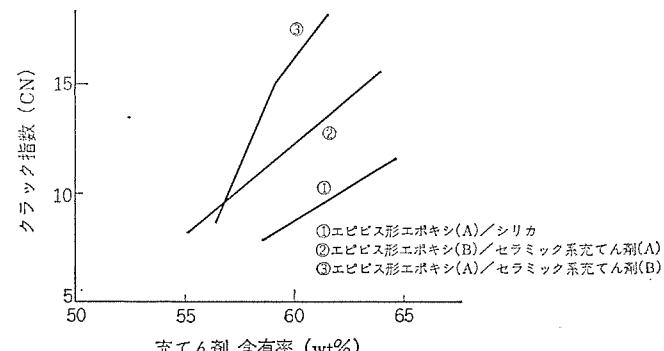


図 3.7 クラック指数一充てん剤含有率特性曲線
Crack index number-filler content (wt %) characteristics.

3.4 耐クラック性の評価

機器としては各種の絶縁試験に耐えることはもちろん必要であるが、特に耐クラック性を評価する方法としては大別してテストピースによる方法と実機テストによる方法がある。テストピースから実機性能を的確に推測することは困難であり最終的には実機テストによらねばならない。しかし各種材料硬化条件の相対的な性能比較によるスクリーニング法としてテストピース試験法が行なわれる⁽¹⁾。

3.4.1 テストピース

テストピース試験法としてはCワッシャ、オリファンツワッシャ等の金属を樹脂中に埋込んで注型し冷熱によるヒートショックを与える冷熱試験が行なわれている。テストピースと実機との相関関係を検討する方法として、巻線部分をリングによって置き換えるミニモデルによる方法も考慮されている。これらの冷熱試験はヒートサイクルの増加とともに、冷熱の温度差を拡大するのが普通である。図3.5にオリファンツワッシャ形状、図3.6に冷熱試験条件を示す⁽²⁾。

このオリファンツワッシャによるスクリーニング試験の結果を図3.7に示す。試験した樹脂組成の充てん剤含有率では、充てん剤含有率の高いほうが良好な耐クラック指数を示した。

3.4.2 実機

実機での耐クラック性試験法としては、大別して液中で温度変化の急激なヒートショックを与えるヒートショック試験と、気中での温度変化の比較的ゆるいヒートサイクル試験に分けられる。実際の使用状態で受ける応力は、夏冬の温度差、日中夜間の温度差、負荷の大小による温度差等によるヒートサイクルによるものが大部分であり、ヒートサイクル試験のほうが実用的であるとも考えられるがこれらは今後の検討課題であろう。

実際には強制劣化の意味もあってヒートショック試験が広く行なわれている。当所では、熱湯85°C、冷液-10°C、温度差95°Cの液中にそれぞれ2時間浸漬する厳しい条件を採用している。ヒートショック試験ではヒートショック試験前後において衝撃波耐電圧試験、商用周波耐電圧試験等に耐えることはもちろん、 $\tan\delta$ 、部分放電特性等が大きく変化しないことが必要である。

これらの評価方法およびレジン組成から、上記の熱湯85°C、冷液-10°Cの冷熱試験に合格することができた。

さらに実際の使用状態の極端な場合として事故等による短絡のためにCTの一次側に過大な電流が流れる場合がある。この短絡電流のために一次巻線が異状発熱しモールド内部に大きい応力を生じクラックを発生する可能性があり、過電流強度試験が行なわれる。PO-6Tは定格一次電流20Aで過電流強度150倍であるので機械的過電流強度7,500A(波高瞬時値)熱的過電流強度3,000A(1秒間)通電の結果、外観、構造、絶縁いずれも異常なく良好な性能を有している。

4. 実機性能

耐クラック性については前述のとおりであるが、ここでは実機についての誤差特性、絶縁性能について述べる。

4.1 誤差特性

PO-6T形PCTの誤差特性として、図4.1にCT比誤差特性、図4.2にCT位相角特性、図4.3に合成誤差特性を示す。JIS 0.5W級に十分合格し、かつ軽負荷域での誤差特性の向上を考慮したものである。

4.2 絶縁性能

ここでは特に耐クラック性に重点をおいた絶縁性能について述べる。

4.2.1 供試品

(1) モールド形変流器

6,900V(6号A級) 20A/5A 15VA

(2) モールド形変圧器

6,600V/110V(6号A級) 15VA

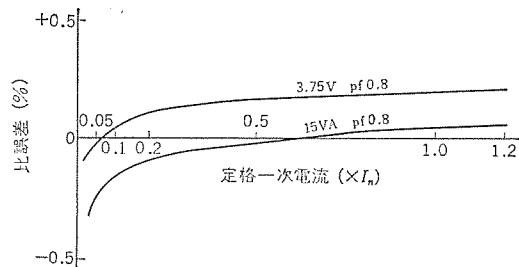


図4.1 PO-6T形PCTのCT比誤差特性曲線
CT-ratio error characteristic curves of type PO-6T PCT.

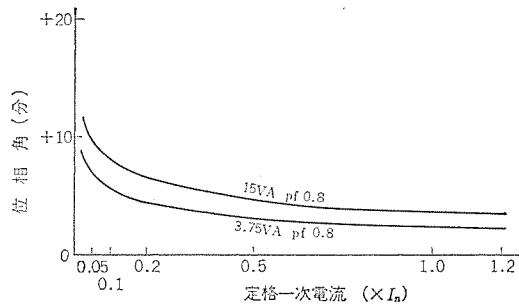


図4.2 PO-6T形PCTの位相角特性曲線
CT-phase angle characteristic curves of type PO-6T PCT.

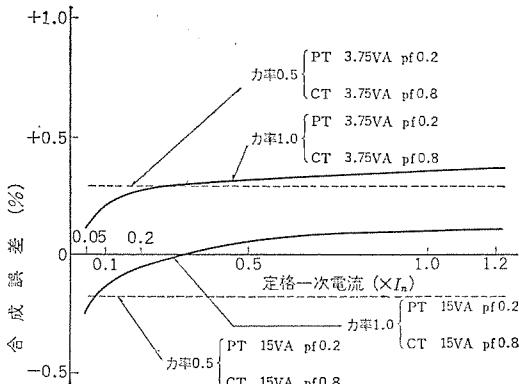


図4.3 PO-6T形PCT合成誤差曲線
Overall error curves of type PO-6T potential current transformer.

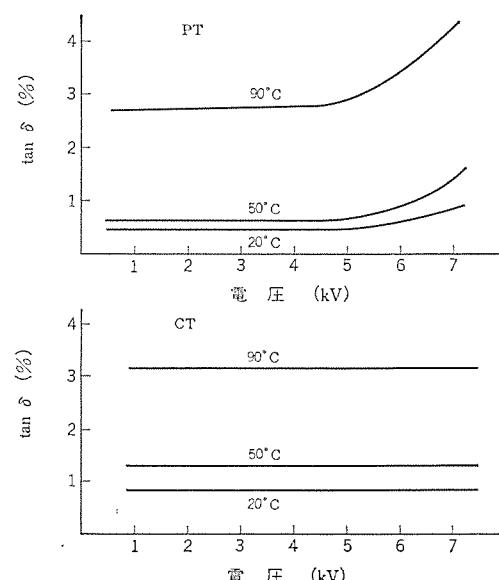


図4.4 tanδ-電圧特性曲線
Tan δ-voltage characteristic curves.

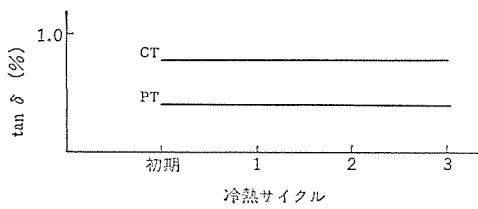


図 4.5 冷熱試験後の誘電正接の変化
Variation of $\tan \delta$ after heat shock test.

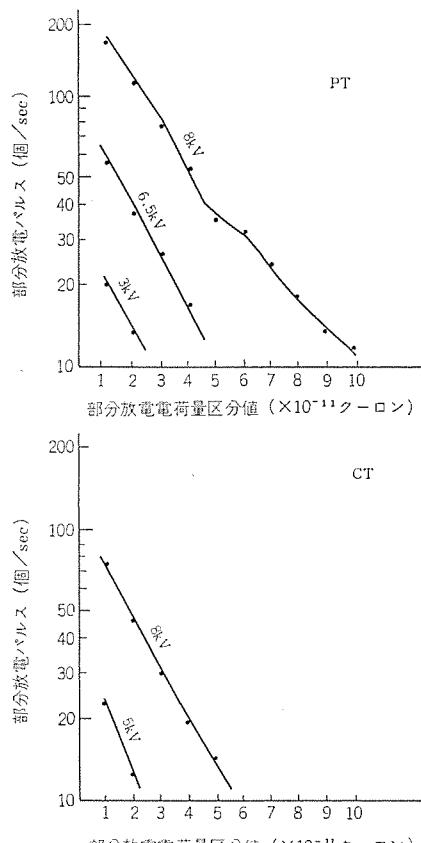


図 4.6 部分放電分布曲線
Partial discharge characteristic curves.

4.2.2 $\tan \delta$ 試験

PT, CT 各単体で逆シェーリングブリッジを用い, 20°C~90°C の $\tan \delta$

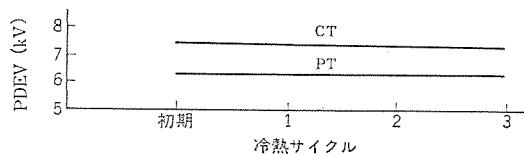


図 4.7 冷熱試験後の PDEV の変化
Variation of PDEV after heat shock test.

温度特性, 電圧特性を測定した結果を図 4.4 に示す。平たん(坦)な電圧特性, 温度による変化の少ないことが良好な絶縁性能を示す。図 4.5 に冷熱試験による誘電正接の変化を示すが, 変化はほとんどない。

4.2.3 部分放電試験

部分放電による絶縁物の劣化が進むことのないよう, 使用電圧で有害な部分放電がないことが必要である。ある一定の電荷量の部分放電を生ずる部分放電開始電圧 (PDIV), 部分放電消滅電圧 (PDEV) で示される。ここでは一定電圧印加時の発生部分放電分布を図 4.6 に, 冷熱試験による PDEV の変化を図 4.7 に示す。冷熱試験による変化はほとんどなく良好な耐クラック性を示す。

4.3 強制劣化特性

モールド形 PCT の長期にわたる信頼性を確認するために, 120°C のオーブン中に 500 時間放置する連続高温試験, -20°C で 4 時間, 80°C で 4 時間放置する気中での連続ヒートサイクル (50 サイクル) 試験の結果, 試験後の衝撃波耐電圧試験, AC 耐圧試験等にも異常なく, $\tan \delta$ 部分放電特性変化もなく良好な絶縁性能を有していることを示した。

5. むすび

以上当社の PO-6 T 形 PCT の概要を述べたが, 多くの新しいエポキシ樹脂も研究されており, 今後とも研究を積み重ねて配電機器の信頼性向上, 近代化にいささかなりとも寄与したい所存である。本文が使用者各位のご参考になれば幸いである。

参考文献

- (1) A. Noshay : Insulation/Circuits, 19, No. 5 (1973)
- (2) 寺谷ほか : モールド絶縁材料, 三菱電機技報 43, No. 12 (昭 44)

新しい可撓性硬化剤

森脇 紀元*・広田 潔*・不可三 晃*・西崎 俊一郎*

A New Flexible Curing Agent

Central Research Laboratory

Toshimoto Moriwaki・Kiyoshi Hirota
Akira Fukami・Shunichiro Nishizaki

A new flexible curing agent TEP-11 has been developed. Mechanical, electrical and thermal properties have been studied of epoxy resins cured with this agent. TEP imparts higher thermal shock and impact resistance to the cured resins than commercial flexible epoxy resins.

It is possible to obtain the cured resins in the wide range of mechanical properties depending upon the concentration of this curing agent.

1. まえがき

電気機器、電子部品の含浸や注型用にエポキシ樹脂⁽¹⁾⁽²⁾が広く使用されている。エポキシ樹脂の最大の特長はその卓越した接着性があるので、エポキシ樹脂は金属などと接触した形で使われることが多い。コイルなどをインサートして硬化したり、注型や含浸に応用したりする場合は、いずれも他の物質と密着している。

このようなものを加熱と冷却の熱サイクルの中に置くとエポキシ樹脂とそれに密着した他の物質の熱膨張係数が異なるために、内部ひずみによって大きな応力が発生し、クラックやはく離が生じ破壊するにいたる。このような熱サイクルに対する強さを耐熱衝撃性とよび、実用上きわめて重要な性質である。このような内部ひずみを吸収し、内部応力の発生を防止するためには、樹脂に可とう(撓)性を持たせることが必要である。

エポキシ樹脂に可とう性を持たせる方法としては、可とう性樹脂、可とう性硬化剤、可とう性付与剤などを配合する方法がある。

たとえば可とう性エポキシ樹脂としてはダイマー酸のジグリシジルエステル、ポリアルキレンエーテルのジグリシジルエーテルなどがある。

可とう性硬化剤としてはダイマー酸とジアミンからのポリアミド、無水デセニルコハク酸、ポリアゼライン酸ポリ酸無水物、ポリセバチン酸ポリ酸無水物、末端カルボキシル基を有するポリエーテル、ポリエスチルなどがある。

可とう性付与剤としては末端に水酸基を有するポリエスチル、ポリアルキレンエーテル、末端にチオール基を有するポリサルファイドなどがある。

しかしながらこの方法で可とう性を与えたエポキシ樹脂はねばり強さが欠ける。末端にカルボキシル基を有するポリブタジエン-アクリルニトリル共重合液状ゴム⁽³⁾、末端にエポキシ基を有する結晶性ポリアミド⁽⁴⁾、ポリエスチル⁽⁵⁾などによるエポキシ樹脂の強じん(韌)性の向上が盛んに研究されている。われわれも強じん性を与える硬化剤の開発および応用研究を行なってきた。その結果、耐衝撃性、耐熱衝撃性などのすぐれた可とう性硬化剤 TEP-11 が開発されたのでその性質について述べる。

2. TEP-11 の性状および無充てん剤配合硬化物の特性

TEP-11 の一般的性状を表 2.1 に示す。

エピビス系固形エポキシ樹脂/芳香族酸無水物系に TEP-11 を種々の比率で配合した場合の一般的影響をしらべた。硬化は 130°C × 24

表 2.1 TEP-11 の性質 Properties of TEP-11.

項	目	特 性
比 重	25°C	1.10
粘 度	100°C	50±10 ポイズ
酸 価		90±5
外 觀		淡黄色液状*

* 常温で液状であるが冬期には結晶性物質の折出がみられる。

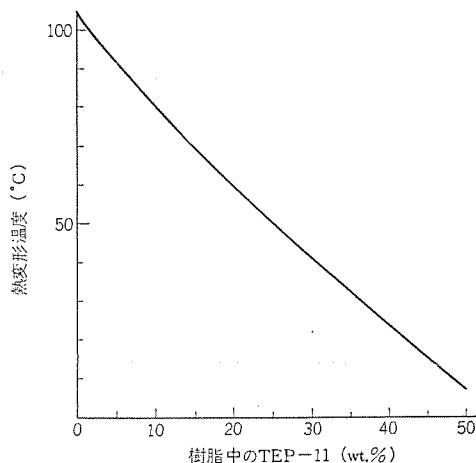


図 2.1 热変形温度と TEP-11 の配合量の関係
HDT vs. TEP-11 concentration.

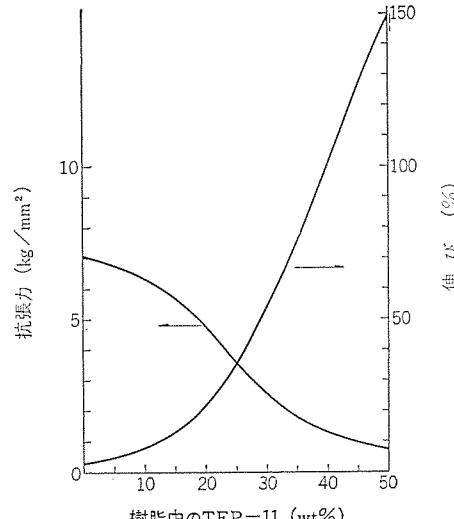


図 2.2 抗張力、伸びと TEP-11 の配合量の関係
Tensile strength and elongation vs. TEP-11 conc.

時間で行なった。図2.1は熱変形温度とTEP-11の配合比率の関係が示してある。配合比率が増加すれば、ほぼ直線的に熱変形温度が下がってゆくことがわかる。TEP-11の比率をさらに増加させれば熱変形温度も約-40°Cまで下がることが可能である。

TEP-11の配合比率を抗張力、伸びの関係を図2.2に示した。TEP-11の比率が増加するにつれて抗張力は減少し、逆に伸びは増大してゆくことがわかる。このようにTEP-11の配合比率を変えることにより硬いものからゴム状物まで多種多様の要求にそなう広範囲の機械的特性の硬化物が得られる。

3. TEP-11の充てん剤配合硬化物の特性

エポキシ樹脂を注形用として使用するとき、充てん剤配合で使用する場合が多い。ここではエビビス固形エポキシ樹脂／芳香族系無水物／TEP-11／充てん剤系で行なった結果について述べる。市販可とう性樹脂系について行なった結果も併記する。市販可とう性樹脂としてはダイヤ酸系可とう性エポキシA(A社製)、およびポリプロピレンジライコール系可とう性エポキシB(B社製)の2種類を用いた。また充てん剤は組成、粒度、粒形などの異なる品種が多くあり、充てん率などをえた場合多くの組合せが考えられるが、実際に樹脂配合を使用する場合、状況により要求される特性が異なるので特定のものに決めるとはできないが、ここではシリカ3Hを用い、充てん率は60Wt%とした。また熱変形温度は55°C前後になるように配合を決めた。硬化は130°C×24時間で行なった。表3.1に配合および硬化物の熱変形温度を示した。

3.1 TEPの機械的性質

一般的な機械的性質を表3.2に示した。オリファントワッシャー法⁽⁶⁾による耐熱衝撃値はA、Bの値が8.0、10.7であるのにくらべて、TEPは14.3と大きな値を示し耐クラック性がすぐれていることがわかる。強じん性のより正確な測定法として高速度試験⁽⁷⁾があるが、一般には強じん性の目安として破壊に対する抵抗を測定する衝撃試験が利用されている。衝撃強度の測定法としては、シャルピー法、アイゼット法などの曲げ衝撃、振り子形法などの引張衝撃、落球衝撃など数多くあるが⁽⁸⁾、ここではシャルピー法と振り子形法によって測定した。いずれの測定法でもTEPがA、Bと比較して大きな値を示しており、

表3.1 配合および熱変形温度
Formulation and heat distortion temperature.

試料名 配合	TEP	A	B
エポキシ樹脂	エビビス型固形エポキシ樹脂		
硬化剤	芳香族系無水物		
可とう性付与剤	TEP-11	可とう性エポキシA	可とう性エポキシB
熱変形温度 °C	54	55	57

表3.2 機械的性質
Mechanical properties.

試験項目	TEP	A	B
抗張力 kg/mm ²	5.5	6.5	6.0
伸び %	8.8	6.0	5.0
曲げ強度 kg/mm ²	9.0	11.2	10.6
たわみ mm	3.8	2.7	2.4
曲げ弾性率 kg/mm ²	640	700	700
耐熱衝撃値	14.3	8.0	10.7
シャルピー衝撃値 kg·cm/cm ²	6.5	4.7	5.0
引張衝撃値 kg·cm/cm ²	25.6	12.8	15.2

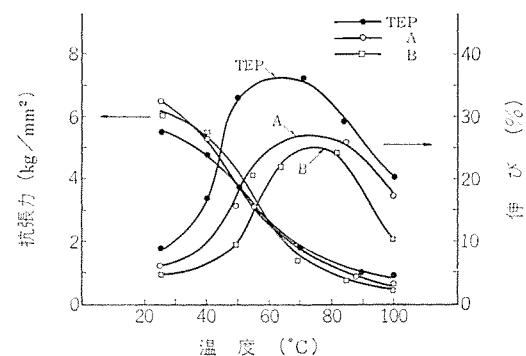


図3.1 抗張力、伸びの温度特性
Tensile strength and elongation vs. temperature.

特に振り子形法での引張衝撃値は約2倍であり強じん性がうかがわれる。

引張、曲げでは伸び、たわみが大きく可とう性がすぐれていることがわかる。図3.1に抗張力、伸びの温度特性を示した。インストロンTM形引張試験機を用いて、5mm/minの引張速度で抗張力、伸びを測定した。TEPはA、Bに比較して低温では伸びが大きく、転移点以上の高温では伸び、抗張力共に大きな値を示しており、機械的特性においてすぐれているのはTEPの特長といらるべきであろう。

3.2 TEPの電気的性質

一般的な電気的性質を表3.3に示した。耐トラッキング性(Dip法)、耐アーチ性はいずれもTEPはA、Bと差はほとんどなかった。図3.2に誘電率温度特性、図3.3に誘電体損失温度特性を示した。200V, 60Hzで測定した。TEPのtan δの立ち上がりがブロードであり、ピーク値も4.5%と低いことが注目される。図3.4に体積固有抵抗温度特性を示した。TEPはA、Bにくらべて多少、値が小さかった。図3.5に絶縁破壊電圧温度特性を示した。3者間にほとんど差は認められない。図3.6に耐コロナ性を示した。測定はIEC(b)電極を用いて600Hzで行なった。この場合、TEP、Bのみとの比較であるあまり差はみられなかった。

表3.3 電気的性質
Electrical properties.

試験項目	TEP	A	B
誘電体損失 %	2.6	2.1	2.4
誘電率	5.5	5.0	5.3
体積固有抵抗 Ω·cm	4.3×10^{14}	5.0×10^{14}	6.5×10^{14}
絶縁破壊電圧 kV/mm	35.5	34.4	32.5
耐トラッキング性 kV	1.9	1.8	1.9
耐アーチ性 s	195	186	180

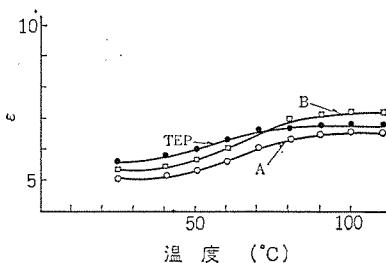


図3.2 誘電率温度特性
Dielectric constant vs. temperature.

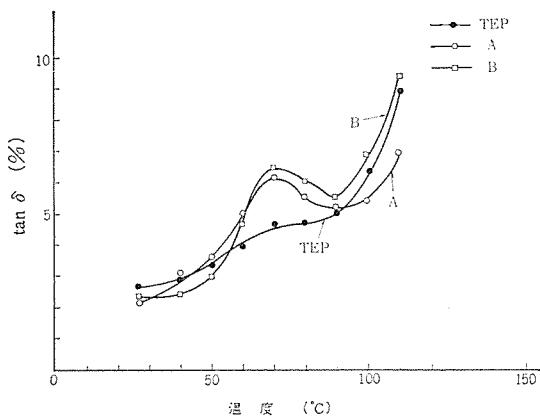


図 3.3 誘電体損失温度特性
Dissipation factor vs. temperature.

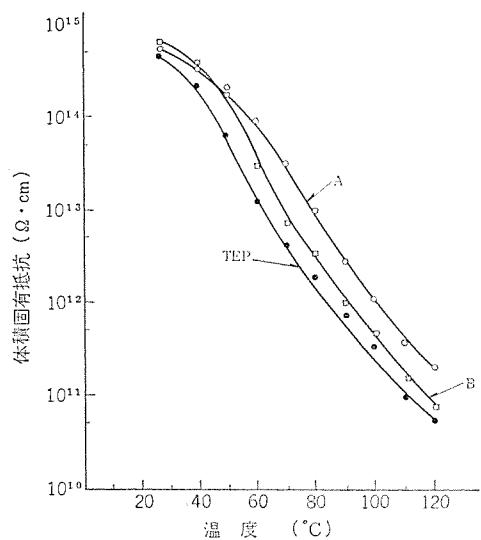


図 3.4 体積固有抵抗温度特性
Volume resistivity vs. temperature.

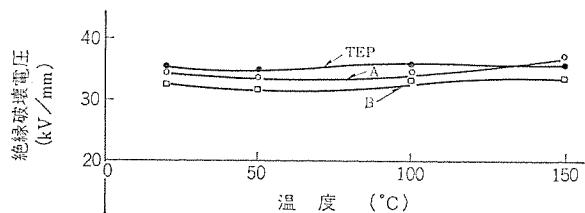


図 3.5 絶縁破壊電圧温度特性
Break down voltage vs. temperature.

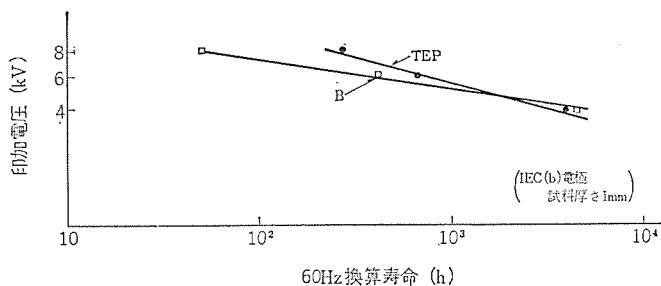


図 3.6 耐コロナ性
Partial discharge resistance.

3.3 TEP の熱安定性

耐熱性の評価として抗張力、弾性率などの機械的特性の低下⁽⁹⁾、破壊電圧などの電気的性質の低下⁽¹⁰⁾、熱天びん(秤)、加熱減量などの重量損失などから寿命推定などが行なわれているが、ここでは抗

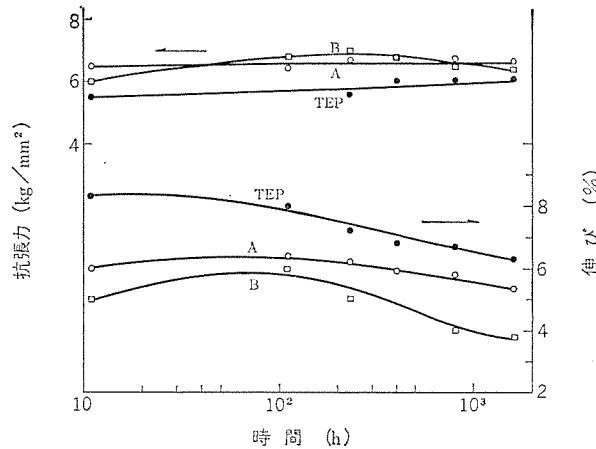


図 3.7 130°C 加熱劣化後の抗張力、伸び
Effect of thermal aging at 130°C on tensile strength and elongation.

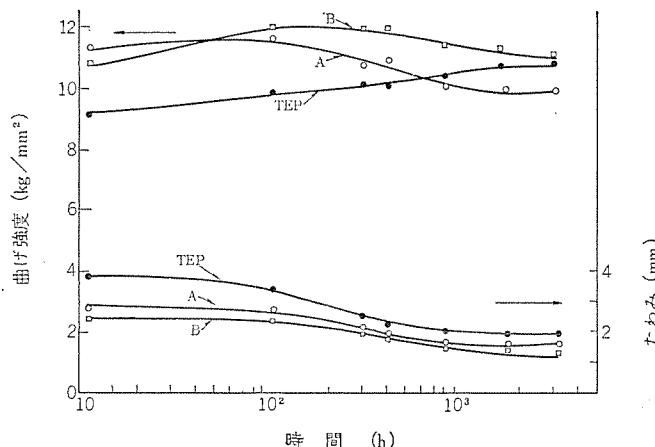


図 3.8 130°C 加熱劣化後の曲げ強度、たわみ
Effect of thermal aging at 130°C on flexural strength and deflection.

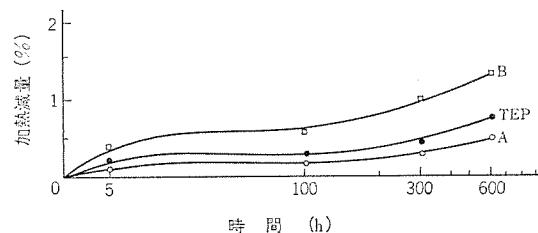


図 3.9 150°C での加熱減量 (Wt %)
Effect of thermal aging at 150°C on weight loss.

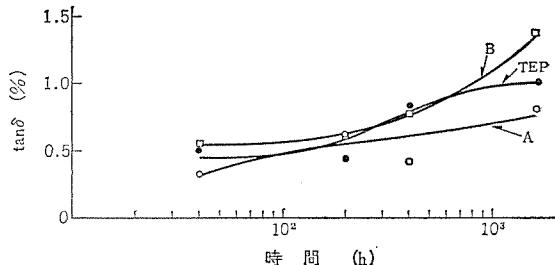


図 3.10 170°C 加熱劣化後の誘電体損失
Effect of thermal aging at 170°C on dissipation factor.

張力、曲げ、誘電体損失、加熱減量などについて行なった結果について述べる。130°C での加熱劣化後の伸び、抗張力を図 3.7 に示した。TEP は初期値と共に 1,600 時間後でも伸びが最も大きいことがわかる。また図 3.8 に示した曲げ、たわみでも同じような傾向を示し

た。図3.9に150°Cでの加熱減量を示した。B>TEP>Aの順に減量が多くなった。次に170°C加熱劣化後の誘電体損失を図3.10に示した。1,600時間後の値はTEPがA, Bの中間の値を示した。以上の結果からTEPの熱安定性はA, Bの中間に属するものと思われる。

4. む す び

新しい可攪性硬化剤TEP-11およびそれから得られるエポキシ樹脂硬化物の特性について述べた。これらをまとめると

- (1) 耐熱衝撃性が優れている。
- (2) 衝撃性が優れている。
- (3) 伸び、たわみが大きい。

などの特性を有している。このように機械的特性がすぐれていることから変成器をはじめ、可攪性、強じん性を必要とする実用器機へ多く適用され好結果が得られている。今後、機器のコンパクト化によるきびしい設計条件の機器の絶縁材料などに広く使用されることが期待される。

終りに、この研究に関してご協力を賜わった、中央研究所の放電・プラズマGの関係各位に厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) H. Lee, K. Neville : *Handbook of Epoxy Resins*, McGraw-Hill Book Co. (1967)
- (2) 堀内：エポキシ樹脂、昭晃堂（昭45）
- (3) E. H. Rowe, A. R. Siebert, and R. S. Drake : *Modern Plastics Aug.*, 110 (1970)
- (4) CIBA-GEIGY : 特公、昭47-26,199
- (5) CIBA-GEIGY : 特公、昭47-30,439
昭47-47,319
- (6) 穴山、寺谷：三菱電機 36, No. 7, 68 (昭37)
- (7) 田沢：三菱樹脂社報、63 (昭47)
- (8) 高分子学会編：高分子材料試験法、地人書館（昭38）
- (9) G. T. Merrill, A. C. Meeks : *J. Appl. Polymer Sci.*, 16, 3,389 (1972)
- (10) H. Peymers : *Modern Plastics*, Sept., 78 (1970)

エポキシ樹脂の分子運動と導電性

宮本 晃男*・柴山 恒一**

Segmental Motion and Electric Conductivity of Epoxy Resin

Central Research Laboratory Teruo Miyamoto・Kyoichi Shibayama

Electric properties have been studied on homologous epoxy resin having crosslink density of various degrees cured with acid anhydride. Free volume and electric conductivity in the epoxy resins decrease with the increase of the crosslink density. A critical volume required for the migration of ionic charge carriers has been estimated by a simplified equation derived from the free volume theory. The estimated value is about one third of the critical volume required for a segmental motion in the same system. The energy of hole formation has been evaluated from the thermodynamic viewpoint, thus discussion covering the relation with the previous treatment in consideration of the free volume.

1. まえがき

エポキシ樹脂は、絶縁材料として今日欠くことのできないもの一つになってきた。これはエポキシ樹脂のもつ優れた電気的性質のほか、優れた機械的性質および熱的性質を有するため、それに加えて種類の多いエポキシ樹脂、硬化剤、硬化促進剤、その他の添加剤など、それらを適宜に選択し組合せることによって、機器から要請される特性をもつ絶縁物を合成することの可能性が大きいためである。

しかしエポキシ樹脂を含む三次元高分子は、組成的に複雑であること、非溶解性で、そのうえ無定形ため回析法など一般的な研究手段が適用できないことから、電気的性質と構造との間の関係は十分明らかにされているとはいえない。すなわち、これまで幅広い実験結果の集積と実績とに依存した経験的手法が、絶縁材料の発展の主役をはたしてきたことも否定できない。このような方法では、今後、さらに急速な進歩と発展の期待される電気機器に対する複雑で、高度な要求にこたえてゆくには困難であろう。近年、原子や分子のレベルから、電気絶縁性を理解しようとする物性論的立場からの研究が盛んになってきている。

エポキシ樹脂をはじめとする高分子材料は、絶縁体といってもわざかに電気を通す。それは分子内を移動する荷電担体の数がきわめて少ないことが大きな原因になっている。このため荷電担体は電子なのか、イオンなのか不明な場合が多い。高分子の中、非共役系で有極性のものはイオン性伝導が有力視されている^{(1)~(3)}。しかし、たとえ非共役系高分子でも、荷電担体は電子であると考えたほうが都合の良い実験事実も最近多く報告されるようになった^{(4)~(6)}。これはある特定の状態では、電子の挙動が導電性に大きな寄与をもたらすようになるものとも考えられる。パラフィンにおいて、バンドモデルによる解析が試みられた例もある⁽⁷⁾が、以上のような事情から、荷電担体の輸送現象については依然不明確である。

三次元高分子の導電性は、使用するモノマー、プレポリマー、あるいは硬化剤などの違いにより著しく変化する⁽⁸⁾。これは高分子の分子鎖運動および分子鎖と荷電担体との相互作用を通じて現われた挙動と考えられる。したがって、高分子の電気的性質を理解するには、高分子の構成や構造から議論するのが正統な方法であろう。ここでは硬化剤の酸無水物の量を調節して得た橋かけ密度の異なる同族体エポキシ樹脂について、構造を調べ、さらに構造と電気的性質との関係

から、導電機構を探り、荷電担体の輸送現象を明らかにすることを目的とした。

2. エポキシ樹脂の構造

2.1 橋かけ密度

高分子への橋かけの導入は、その橋かけ点において分子鎖運動を束縛するので、分子鎖運動を規制でき、さらに構造の理解を容易にさせることのできる便利な方法である。エポキシ樹脂の酸無水物による硬化の機構は複雑であるが、ここでは、第二級水酸基とエポキシ基との反応によるエーテル結合の生成は硬化剤の組成によって変わらないとすれば、硬化剤の組成を変えることによって、橋かけ密度の異なる同族体高分子が生成する。

ビスフェノール A エポキシ樹脂（エポキシ当量 190）と酸無水物とを、当量比で 1 対 1 の割合に混合して硬化させた。硬化剤には、二塩基酸無水物の無水ヘキサヒドロフル酸 (HHPA) を用い、橋かけ密度を調節するため、一塩基酸無水物の無水安息酸 (BA) を適量添加して一連の同族体試料を得た。硬化物の組成および硬化条件は表 2.1 に示す。

各試料の橋かけ密度 ρ はゴム弾性理論⁽⁹⁾より式 (2.1) より求めた。

$$\rho = \frac{E'_2}{3\phi dRT} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで, E'_2 : 平衡弾性率

ϕ : フロントファクタ

d : 密度

R : 気体定数

T : 絶対温度

ϕ は樹脂中の網目鎖末端間距離の二乗平均とその鎖が 1 本、自由

表 2.1 硬化剤の組成と硬化条件
Composition of curing agent and curing conditions.

硬化剤の組成	HHPA/(BA+HHPA) (モル分率)
試料番号 1	1.00
2	0.91
3	0.81
4	0.71

硬化促進剤: 2-エチル-4-メチルイミダゾール

硬化条件: (120°C × 24 h) + (140°C × 2 h)

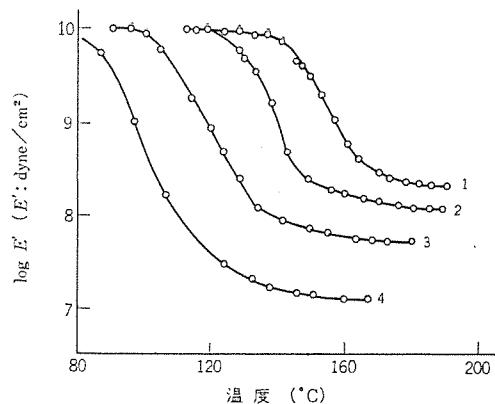


図 2.1 動的弾性率の温度変化
Dynamic mechanical modulus vs. temperature.

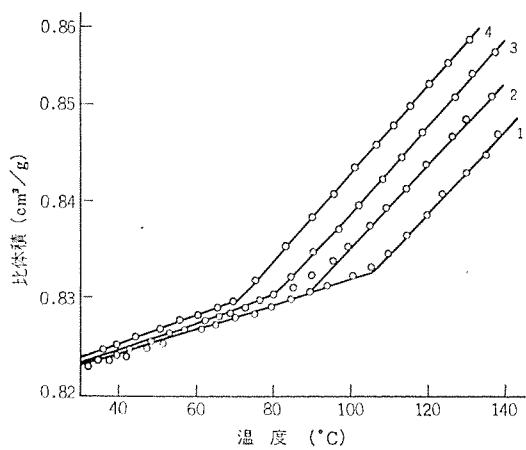


図 2.2 比体積の温度変化
Specific volume vs. temperature.

表 2.2 橋かけ密度を表わすパラメータ
Value of characteristic parameters relating to crosslink density.

特性 試料番号	T_g °C	$\alpha_b \times 10^4$ deg ⁻¹	$\alpha_a \times 10^4$ deg ⁻¹	d g/cm ³	$E_2' \times 10^{-8}$ dyne/cm ²	$\rho \times 10^3$ mole/g
1	105	1.4	4.2	1.145	2.30	1.47
2	90	1.4	4.3	1.145	1.19	0.87
3	81	1.4	4.4	1.145	0.52	0.43
4	70	1.3	4.6	1.144	0.12	0.01

α_b : T_g 以下の熱膨張係数
 α_a : T_g 以上の熱膨張係数
 d : $T_g + 100^\circ\text{C}$ における密度

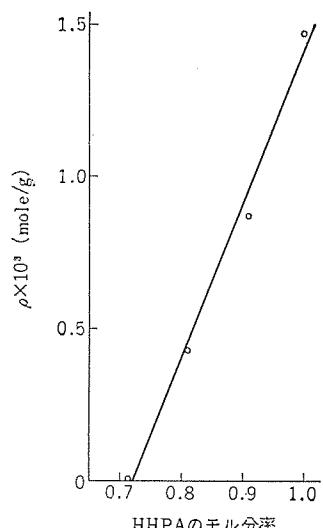


図 2.3 橋かけ密度の HHPA のモル分率変化
Crosslink density vs. mole fraction of HHPA.

空間に置かれたときの末端間距離の二乗平均の比として表わせる。高度に橋かけした系では 1 としてよい。ここでは低い E_2' をもつ試料についても ρ を 1 として橋かけ密度を求めた。なお橋かけ密度の逆数は橋かけ点間分子量を表わす。

図 2.1 および図 2.2 にそれぞれ動的弾性率の温度依存性と、比体積(逆数は密度を表わす)の温度依存性を示す。図 2.1 には明らかなガラス状態、ガラス転移およびゴム状態の三つの領域が観測される。二塩基酸無水物の量が増すにつれ、高い平衡弾性率を示し、ガラス転移領域も高温側に移行している。比体積の温度依存性を示す図 2.2において、二直線の交点の温度位置はガラス転移温度 T_g を表わすが、この T_g は二塩基酸無水物の増加とともに高温側に移行し、同一温度における比体積は減少する。これらの実験結果を用いて、橋かけ密度に関するパラメータを表 2.2 に示す。橋かけ剤の二塩基酸無水物の量が、モル分率にして 1.00 から 0.72 まで変化させると、式 (2.1) から求めた橋かけ密度は約 1/150 になる。その様子を橋かけ密度の二塩基酸無水物濃度(モル分率: N) 依存性として図 2.3 に示す。図から橋かけ密度 ρ は式 (2.2) で表わせる。

$$\rho = aN + b \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、 a, b : 定数

a はエポキシ基とカルボキシル基との当量関係によって定まる定数で、 b はエーテル結合による分子成長の程度と線状重合体をつくるのに要する二塩基酸無水物の量によって定まる定数である。

2.2 セグメント運動

高分子のセグメント運動は、ガラス転移温度以上では一種の熱拡散運動をおこし、運動の緩和時間の温度依存性は自由体積が主変数になる式 (2.3) によって表わされる WLF 式にしたがう⁽¹⁰⁾。

$$\log \frac{\tau(T)}{\tau(T_g)} = -\frac{C_1(T-T_g)}{C_2 + (T-T_g)} \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

ここで、 $\tau(T)$: 温度 T における緩和時間

$\tau(T_g)$: T_g における緩和時間

C_1, C_2 : WLF パラメータ

WLF パラメータ C_1, C_2 は WLF 式と Cohen-Turnbull の式⁽¹¹⁾との対応より、式 (2.4) および式 (2.5) で関係づけられる。

$$C_1 = \frac{\gamma v_s^*}{2.303 f_g v_g} \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

$$C_2 = \frac{f_g}{\alpha_f} \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

ここで、 γ : 自由体積の重りを表わす補正係数

v_s^* : セグメントが運動に必要な最小の体積

v_g : T_g における比体積

f_g : T_g における自由体積分率

α_f : 自由体積の熱膨張係数

Doolittle の理論⁽¹²⁾によれば、 $\gamma v_s^*/v_g$ は 1 程度の値をとるとされている。 $\gamma v_s^*/v_g$ および v_g を求めるには、図 2.2 のガラス転移温度前後の熱膨張係数の差 $\Delta\alpha$ を α_f の値として算出した。算出に用いた関係は式 (2.6), (2.7), (2.8) のとおりである。

$$f_g = C_2 \cdot \Delta\alpha \quad \dots \dots \dots (2.6)$$

$$v_0 = \{1 - f_g - \Delta\alpha(T - T_g)\} v \quad \dots \dots \dots (2.7)$$

$$\gamma v_s^* = 2.303 C_1 C_2 \Delta\alpha v_g \quad \dots \dots \dots (2.8)$$

ここで、 v_0 : 占有体積

v : T_g 以上の任意温度における比体積

力学的緩和時間が得られた No. 1, No. 2 および No. 3 の試料に

表 2.3 WLF 解析結果
Results of WLF analysis.

特性 試料番号	C_1	C_2	f_g	$\gamma v_s^*/v_g$	γv_s^*
1	16.9	89.4	0.024	0.94	0.78
2	19.1	90.1	0.026	1.15	0.96
3	20.5	92.5	0.028	1.31	1.09

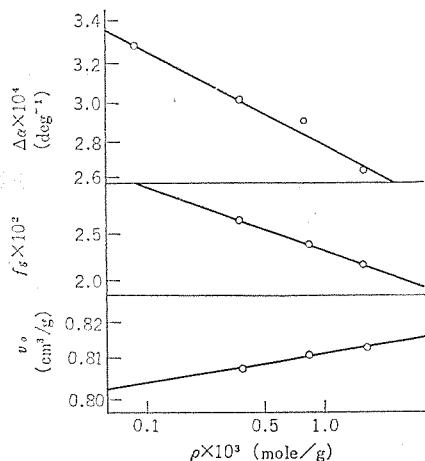


図 2.4 自由体積の熱膨張係数、自由体積分率、占有体積の橋かけ密度変化

Thermal expansion coefficient of free volume, free volume fraction, and occupied volume vs. crosslink density.

について、WLF プロットから求めた C_1 , C_2 , f_g , $\gamma v_s^*/v_g$ および γv_s^* の値を表 2.3 に示す。これらの解析結果から、自由体積分率 f_g , 占有体積 v_o および熱膨張係数 $\Delta\alpha$ の橋かけ密度依存性によって、このエポキシ樹脂系の構造を整理すると、図 2.4 のようになる。橋かけ密度の増加とともに自由体積分率は減少し、変化は小さいが、占有体積は増加する傾向にある。このことからガラス状態における橋かけの主な効果は、自由体積を減少させることであると結論される。一方、ゴム状態における自由体積の熱膨張係数も橋かけ密度の増加とともに減少しているので、自由体積をさらに減少させる。

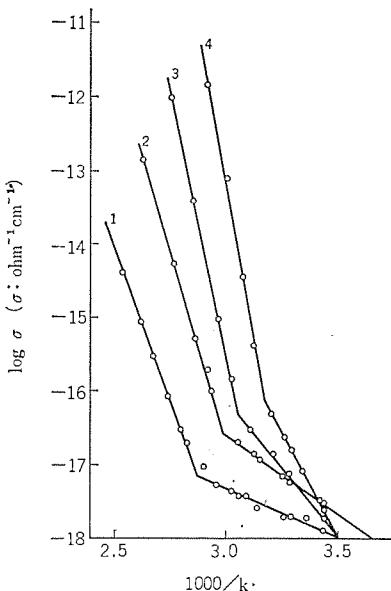


図 3.1 電気伝導度の温度変化
Electrical conductivity vs. reciprocal temperature.

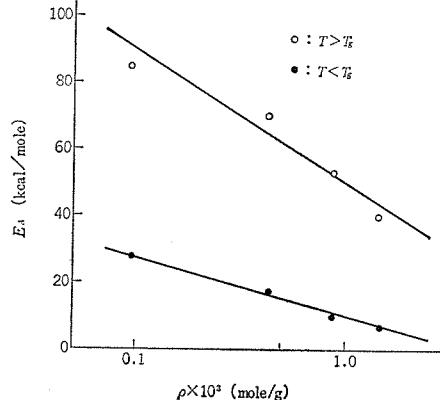


図 3.2 Arrehenius の活性化エネルギーの橋かけ密度変化
Arrhenius activation energy vs. crosslink density.

占有体積は一般に、橋かけ密度が変化しても変わらないとされているが、芳香族系酸無水物硬化エポキシ樹脂の同族体⁽¹³⁾に、この実験結果と同じような挙動が見られる。

3. 導電性

3.1 導電性の橋かけ密度依存性

図 3.1 に印加電圧 100 V の直流で測定した電導度の温度変化を示す。この測定範囲 (15~160°C) では、橋かけ密度が小さくなるにしたがい大きな電導度を示し、比体積の温度特性と類似の挙動を示す。二直線の交点は図 2.2 の比体積の温度依存性より得られたガラス転移温度に対応した挙動を示す。各試料ともこの温度付近を境にして電導度の急増が観測されるが、これは後述するように、高分子主鎖のミクロラウンド運動の影響によるものと考えられる。

電導度 σ の温度依存性は Arrhenius の式によって表わされる。

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (3.1)$$

ここで、 σ_0 : 頻度因子

E_A : 見かけの活性化エネルギー

$\log \sigma \sim 1/T$ プロットの傾きより得られる見かけの活性化エネルギーを表 3.1 に示す。見かけの活性化エネルギーと橋かけ密度とは、図 3.2 で示されるように式 (3.2) のような関係で表わされる。

$$E_A = A \log \rho + B \quad (3.2)$$

ここで、 A, B : 溫度によらない定数

のことから電気伝導過程と高分子構造とは密接な関係にあることがうかがわれる。頻度因子 σ_0 にも同様な橋かけ密度依存性が見られ、その様子を図 3.3 に示す。前述したように、高分子の電導機構は不明な場合が多いが、図 3.2, 3.3 のような挙動はイオン性伝導を支持するものと考えられる。図 3.1 から、自由体積の増加

表 3.1 アレニウス活性化エネルギー
Arrhenius activation energy.

活性化エネルギー 試料番号	E_b kcal/mole	E_a kcal/mole
1	6.36	39.7
2	10.0	53.0
3	17.3	69.7
4	27.1	84.5

E_b : T_g 以下のアレニウス活性化エネルギー

E_a : T_g 以上のアレニウス活性化エネルギー

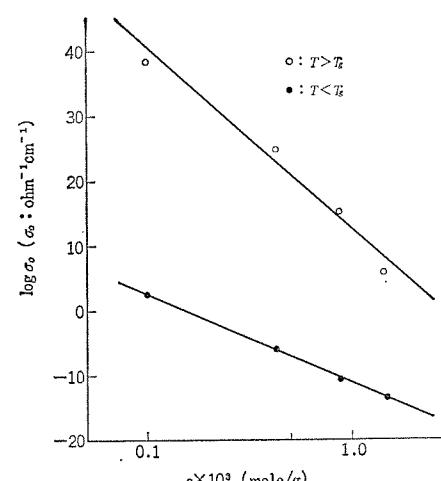


図 3.3 頻度因子の橋かけ密度変化
Pre-exponential factor vs. crosslink density.

とともに電導度が増加すること、およびガラス転移温度以上の温度域のArrheniusプロットで、セグメントのミクロブラウン運動の開始に伴つて急増する自由体積に対応して、電導度が急増することの二つの現象は、イオン性伝導を特徴づける一つの挙動である。この導電挙動は同時に、イオンの移動にはその体積以上の空孔を必要とすることを示唆している。その空孔形成の確率は自由体積の量や分布に依存するであろう。

3.2 電導度におよぼす自由体積の効果

ここで荷電担体をイオンであると仮定すれば、電気伝導、拡散、粘性は互いに輸送現象として同様な機構で議論される。それらの現象は Stokes-Einstein の式、式(3.3)と Nernst-Einstein の式、式(3.4)によって関係づけられている。

$$D = \frac{kT}{6\pi r\eta} \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

$$\mu = \frac{eD}{kT} \quad \dots \dots \dots (3.4)$$

ここで、
D : 拡散係数

k : Boltzmann 定数

r : イオン半径

η : 粘度

μ : 移動度

e : イオンの電荷

Cohen-Turnbull は低分子 Van der Waals 液体について自由体積 v_f が分子の移動度を支配することを明らかにした⁽¹¹⁾。η は式(3.5)によって表わされる。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{\gamma v_i^*}{v_f}\right) \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

ここで、
 η_0 : 定数

v^* : 低分子の移動に必要な最小の体積

高分子のガラス転移温度より高い温度の領域では、高分子の熱力学的挙動は、液体や溶液のそれに似ているので、高分子へ式(3.5)を適用する。電導度 σ は温度が一定の時、イオン濃度 n と移動度 μ によって表わされる。

$$\sigma = n\mu \quad \dots \dots \dots (3.6)$$

式(3.3)、(3.4)、(3.5)、および式(3.6)より式(3.7)を得る。

$$\sigma = C \exp\left(-\frac{\gamma v_i^*}{v_f}\right) \quad \dots \dots \dots (3.7)$$

ここで、

$$C = \frac{e^2}{6\pi r\eta_0} n$$

v_i^* : イオンが移動に必要な最小の体積

C にはイオン濃度 n を含むので、温度依存性をもつことになるが、一般には n の温度依存性は極めて小さい。ガラス転移温度より高温側の高分子の電導度は Arrhenius 型の温度依存性ではなく、形式上はむしろ自由体積が主変数になる WLF 型の温度依存性、すなわち温度の増加とともに見かけの活性化エネルギーが低下する挙動を示す。温度一定のとき、電導度と自由体積 v_f の関係は式(3.7)より式(3.8)のようになる。

$$\left[\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(1/v_f)} \right]_T = -\gamma v_i^* \quad \dots \dots \dots (3.8)$$

γ という係数をもつが、 $\log \sigma \sim 1/v_f$ プロットの傾きよりイオンの移動に必要な体積 γv_i^* が得られる。使用した試料の化学組成から判

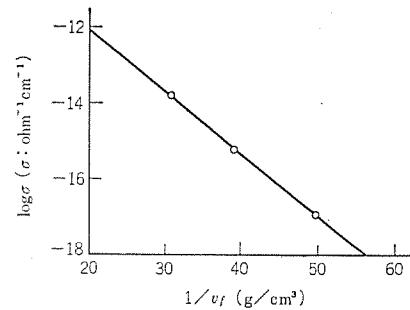


図 3.4 電気伝導度の自由体積変化 (105°C)
Electrical conductivity vs. reciprocal free volume.

断すると、各試料によって荷電担体の種類が異なる可能性は小さいと考えられる。105°Cにおいて式(3.8)を適用すると図3.4のようになる。すなわち、橋かけ密度の増加とともに、いいかえると、自由体積の減少とともに、電導度が減少する。傾きより γv_i^* を求めると、0.38cm³/g の値になる。他の温度においても同様な値を得た。先に求めたセグメントの γv_s^* とこのイオンの γv_i^* を比較すると、イオンの移動に必要な体積はセグメントが運動に必要な体積の1/2~1/3ということになり、線状高分子の値⁽¹⁴⁾と一致する。

高分子におけるイオン供給源は複雑であるが、主に原料モノマ中に存在する不純物、重合とか縮重合過程における混入触媒、加熱成形過程における各種添加剤、吸湿および高分子自身の分解や解離などが考えられる。ここで求めた γv_i^* はイオンの大きさを表わすので、イオン種に関する間接的情報となろう。さらに、イオンの解離エネルギー - やイオンと高分子マトリックスとの相互作用について知ることが可能になれば、イオン種の推定をかなりの精度で行なうものと考えられる。

3.3 空孔形成のエネルギー的機構

前述したように、ガラス転移温度より高温側の広い温度範囲における電導度の温度依存性は、WLF型の温度依存性を示すとして、Cohen-Turnbul の理論⁽¹¹⁾に従い、セグメントの再配列にはエネルギー変化を伴わないような v_i^* が主に電導度を支配するとして議論してきた。一方、Glasstone らによれば、Arrhenius プロットで表わせる狭い温度範囲における導電過程はエネルギー過程によって説明されている⁽¹⁵⁾。したがって高分子中のイオンの輸送現象を追求するには、両者の関係を明らかにする必要がある。

イオンの移動に必要な空孔は内部圧 P_i と外部圧 P に抗してできる。この過程中恒温が保たれるとすれば、この空孔が形成されるのに必要なエネルギー E_h は式(3.9)で表わされる。

$$E_h = (P_i + P)v_i^* \quad \dots \dots \dots (3.9)$$

熱力学的取扱いにより、 P_i は式(3.10)のようになる。

$$P_i = \left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V - P \quad \dots \dots \dots (3.10)$$

ここで、
E : 内部エネルギー

V : 体積

この体積 V は自由体積 v_f に相当するので、補正係数 z を与えた式、式(3.11)

$$Pv_f = zRT \quad \dots \dots \dots (3.11)$$

と式(3.10)より次のような関係が導びかれる。

$$\frac{E_h}{RT} = \frac{(P_i + P)}{RT} = \frac{zv_i^*}{v_f} \quad \dots \dots \dots (3.12)$$

自由体積の重りを表わす補正係数 z と z は物理的には同様な意味

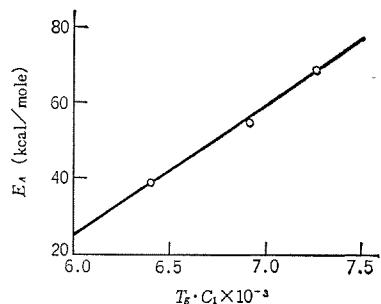


図 3.5 Arrhenius の活性化エネルギーの $T_g \cdot C_1$ 変化
Arrhenius activation energy vs. $T_g \cdot C_1$.

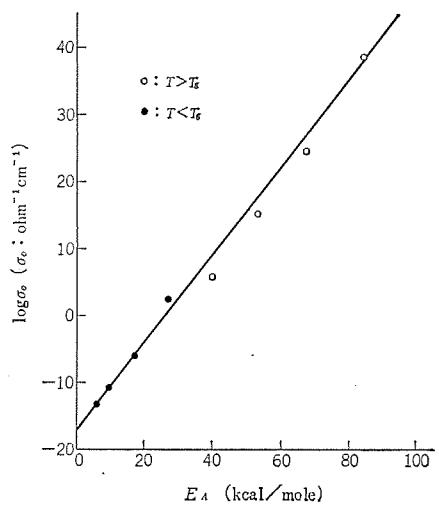


図 3.6 電気伝導現象の補償効果
Compensation law of electrical conduction phenomena.

になるので、Arrhenius プロットで表わせる比較的狭い温度範囲では、エネルギー過程によっても、セグメントの再配列にエネルギーを必要としない輸送過程によっても表現することができる。

式(3.12)の v_i^* の代りに v_s^* を用いれば、 E_h はセグメントの運動に必要な空孔を作るエネルギー E_s に相当することになる。一方、ガラス転移温度における自由体積分率 f_g は v_f/v_g と定義されるので、式(3.12)を用いて、式(2.4)を書きかえると、 E_s は次のような関係によって表わされる。

$$E_s = 2.303RT_gC_1 \quad (3.13)$$

イオン濃度 n の温度依存性が小さいとすれば、ガラス転移温度以上の領域では、見かけの活性化エネルギー E_A は空孔を作るエネルギー E_h が支配的になるので、 E_A と $T_g \cdot C_1$ とは相関関係の成立つことが期待される。図 3.5 に E_A の $T_g \cdot C_1$ 依存性を示す。

3.4 補償効果

活性化エンタルピーと活性化エントロピーとの相互補償関係を、等速関係あるいは補償効果といい、反応速度、粘性、拡散などの輸送現象において、多くの事例が認められている。導電現象における補償効果も、分子構造を変えた数種の高分子、たとえば、種々の結晶化度をもつポリ三フッ化エチレン⁽¹⁶⁾、ポリ3・3-ジメチルクロロオキシクロルブタン⁽¹⁶⁾、ポリエチレンテレフタレート⁽¹⁶⁾、硬化剤を変えたエポキシ樹脂⁽⁶⁾、および有機半導体⁽¹⁷⁾などで報告されている。電導度の Arrhenius の式における見かけの活性化エネルギーは活性化エタルピーに相当し、頻度因子には、絶対反応速度論⁽¹⁵⁾によれば活性化エントロピーの項を含む。図 3.6 に見かけの活性化エネルギー E_A と頻度因子 σ_0 の相互補償関係を示すと、式(3.14)のような直線によって表わされる。

$$\log \sigma_0 = \alpha E_A + \beta \quad (3.14)$$

ここで、 α, β : 定数

Arrhenius プロットで導電現象を表わすと、ガラス転移領域で折れ曲った二つの直線になり、あたかも低温側と高温側の導電機構が異なるかのような挙動を示す。しかし補償効果によってプロットすれば、ガラス転移に関係なく同一の直線によって表わせるので、イオンの移動機構は互いに無関係でないことが推察される。

4. むすび

橋かけ密度を調節して作製した酸無水物硬化エポキシ樹脂の電気伝導度の温度変化を測定した結果、電導度は高分子の自由体積に規制されることがわかった。このような挙動はイオン性伝導と考えられるので、電導度の自由体積依存性から、イオンが移動に必要な体積 γv_i^* を求める式を導出し、この系での値 $0.38 \text{ cm}^3/\text{g}$ を得た。イオンを推定する適当な方法がない現在、この γv_i^* はイオンの種類に関する情報の一つとして重要と考えられる。

イオンの移動に必要な最小の空孔の形成過程には、エネルギー過程とエネルギーを必要としない過程の二つの説があるが、両者の関係を熱力学的観点から明らかにすることができた。

補償効果によって導電挙動をプロットすると、ガラス転移に関係なく同一直線によって表わせたことは、ガラス転移温度前後のイオンの移動機構は無関係でないことが判明した。

参考文献

- (1) L. E. Amborski : J. Polymer Sci., 62, 331 (1962)
- (2) R. A. Foss : J. Appl. Polym. Sci., 7, 1,015 (1963)
- (3) S. Saito, H. Sasabe, T. Nakajima, K. Yada : J. Polymer Sci., A-2, 6, 1,297 (1968)
- (4) J. F. Fowler : Proc. Roy. Soc., A 236, 464 (1956)
- (5) K. Yahagi, et al. : J. Appl. Phys., 37, 310 (1966)
- (6) A. Van Roggen : Phys. Rev. Letters, 9, 363 (1962)
- (7) W. L. McCubbin : J. Chem. Phys., 43, 983 (1965)
- (8) R. W. Warfield, M. C. Peter : Makromol. Chem. 58, 139 (1962)
- (9) A. V. Tobolsky : "Properties and Structure of Polymers" Wiley, New York (1960)
- (10) M. L. Williams, R. F. Randel, J. D. Ferry : J. Am. Chem. Soc., 77, 3,701 (1955)
- (11) M. H. Cohen, H. Turnbull : J. Chem. Phys., 31, 1,164 (1959)
- (12) A. K. Doolittle, D. B. Doolittle : J. Appl. Phys., 28, 807 (1957)
- (13) 柴山, 児玉 : 高化, 20, 587 (昭38)
- (14) S. Saito, Reports : Prog. Polym. Phys. Japan, 12, 411 (1969)
- (15) S. Glasstone, H. Eyring : "The Theory of Rate Processes" McGraw-Hill, New York (1959)
- (16) B. I. Sazhin, N. G. Podosenova : Doklady Akad. Nauk SSSR., 148, 628 (1963)
- (17) J. E. Katon : "Organic Semiconducting Polymers" Marcel Dekker (1970)

エポキシ樹脂の力学的性質に及ぼす充てん剤効果

土橋 勝*・児玉峯一**

Mechanical Properties of Filled Epoxy Resins

Itami Works Masaru Tsuchihashi

Manufacturing Development Laboratory Minekazu Kodama

For the purpose of acquiring basic knowledge of solid insulation materials made out by compositing the synthetic resin and filler, studies have been made on the mechanical properties of epoxy resin-inorganic particulate composite. It has been found that, in the case of the composite the difference in the shape or surface condition of the filler makes difference in the interaction between the resin and the filler. Also it is made known that the interaction is alleviated by external stimulus such as repeated mechanical stresses, thermal shocks and absorbed water.

1. まえがき

固体絶縁物は、多くの場合、電気絶縁機能とともに、構造材料としての機能を要求されるため、合成樹脂のみではそれらの機能を満たすことはできず、無機質充てん剤との複合系として絶縁組織が形成されている。

したがって、固体絶縁材料においては、充てん剤は合成樹脂に劣らず重要な成分であり、その選定を誤れば、満足な絶縁組織が得られないことは当然である。すなわち、充てん剤を構成する材質の違いはもちろんのこと、その形状の違いや、充てん剤粒子の表面状態の微妙な違いにより、樹脂／充てん剤複合系の特性が影響を受ける程度は無視できない。また、このような不均質混合系では各種外部刺激によって相間の界面状態が変化しやすく、そのために巨視的特性が経時的に変化を受けることも考えられる。電気機器に適した固体絶縁組織を確立するためには、これらの点についての基礎的理解を深めることが必要である。

本文では、エポキシ／充てん剤複合系の力学的性質に及ぼす充てん剤の形状の違いの効果、機械的繰返し応力、熱衝撃、および媒体との相互作用の効果を調べた結果を述べる。ここで、力学的性質の評価を中心に行なったのは、この方法が複合系の微細構造と、物性の概略を知るには最も良い方法の一つであるためである。また、充てん剤として、中空球状充てん剤も用いたが、これは最近、軽量化複合材用充てん剤として注目されているものである。

2. 実験方法

2.1 試料

中空球状充てん剤として、ほうけい酸ソーダガラスからできているガラスマイクロバーレン、非中空球状充てん剤としてEタイプのガラスピース、不規則形状充てん剤として溶融石英粉末を用いた。溶融石英粉末の形状を図2.1に示した。他の2種類の充てん剤は真球である。エポキシ樹脂は、ビスフェノール形のもの2種(エポキシ当量175～210と、370～435)を用いた。硬化剤としては、トリエチレンテトラミン(TEA)、および無水フタル酸と無水テトラヒドロフタル酸との混合物を用い、硬化促進剤としてはベンジルジメチルアミン(BDMA)を用いた。充てん剤の表面状態を変えるため、溶融石英粉末をシラン系エポキシ樹脂用カプリング剤(*r*-グリシドキシプロピルトリメトキシラン)で表面処理したものも用いた。

この場合、表面処理は次のように行なった。カプリング剤をメタノールで2%溶液にし、その中に溶融石英粉末を24時間室温で浸漬した。

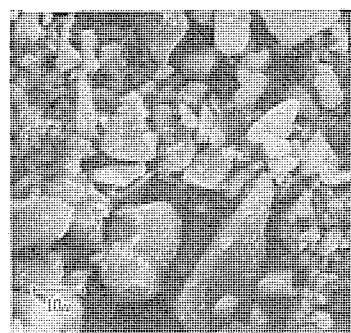


図2.1 溶融石英の電子顕微鏡写真
Electron micrograph for fused quartz.

表2.1 試料
Sample preparation.

試料	組成		硬化条件
	樹脂相	充てん材(体積分率)	
ON	エポキシA ¹⁾ /TTA =10/1	0	ゲル化30°C 後硬化 (100°C×7h)+(140°C×4h)
1 F		0.091	
2 F		0.197	
3 F		0.330	
1 G		0.099	
2 G		0.180	
3 G		0.302	
1 B		0.140	
2 B		0.248	
3 B		0.398	
R-1	エポキシB ²⁾ /混 合 酸無水物 ³⁾ /BDMA =10/3/0.01	0	130°C×24h
R-2		0.30	
R-3		0.45	
R-4		0.55	
R-3C		シラン系カップ リング剤処理溶 融石英粉末 0.45	

1) エポキシ当量175～210のビスフェノール形エポキシ樹脂

2) エポキシ当量370～435のビスフェノール形エポキシ樹脂

3) 無水フタル酸と無水テトラヒドロフタル酸の混合物

4) 密度 2.22 g/cm³、粒径 37 μ 以下が 66 重量%

5) 密度 2.48 g/cm³、粒径 88～210 μ

6) 密度 0.33 g/cm³、粒径 10～250 μ

充てん剤を溶液中から取り出し、真空乾燥器で50°C、24時間乾燥後、凝集状態の粒子をふるい分けて100メッシュ以下の粒子になるようにした。表2.1に試料の組成および硬化条件を示した。

2.2 測定

粘弾性の測定は、岩本製作所製粘弾性スペクトロメータVESと、応用電気研究所製自由減衰形動的ねじり粘弾性測定装置を用いて行なった。インストロン引張試験機で室温(30°C)での応力-ひずみ曲線を求めた。また、Wiedelman製SF-10 U形万能疲労試験機を用い、室温で定荷重引張圧縮試験を行なった。

3. 実験結果と考察

3.1 充てん剤の形状の違いの効果

図3.1、3.2に不規則形状充てん剤(F系列)と非中空球状充てん剤(G系列)を充てんした試料について、粘弾性スペクトロメータを用いて、貯蔵弾性率E'、損失弾性率E''の温度依存性を求めた結果を示した。両系列ともに充てん剤含有量が増すにつれて、ガラス域およびゴム域の弾性率E'は大きくなる。E'～温度曲線の主分散ピーク位置は、充てん剤の種類および含有量によってほとんど変わらない。充てん剤含有量の増加にともなうゴム弾性率の増加は、F系列のほうが大きい。これは、両種の充てん剤間に充てん剤-樹脂間相互作用の違いがあるためであろう。

両系列の試料間の特徴的な違いとして、ガラス域におけるE'の温度こう配は、F系列のほうがG系列より小さいことがあげられる。図3.3に両系列の試料について相対弾性率E'c/E'10(E'cは充てん系の弾性率、E'10は非充てん系の弾性率)の(T-Tg)依存性を示した。Tgは、E'～温度曲線のピーク温度で表わした。図3.3から明らかなように、F系列では相対弾性率は温度とともに増加するが、G系列ではほとんど温度に依存しない。Nielsenら⁽¹⁾は、相対弾性率が温度とともに増加するのは、充てん剤と樹脂の熱膨張係数の違いのために、硬化中に充てん剤表面付近の高分子鎖に誘起された応力が、温度の上昇によって緩和されるためであると考えている。この考えによると、F系列のほうがG系列と比べて硬化時に誘起される応力が大きいことになる。

相対弾性率の温度依存性は、式(3.1)のように表わされる⁽¹⁾。

$$\frac{d(E'c/E'10)}{dT} = k \left(\frac{E'c}{E'10} \right) \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) f(\phi_2)}{\varepsilon_y} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

式(3.1)で α_1 、 α_2 はそれぞれ樹脂と充てん剤の線膨張係数、 $f(\phi_2)$ は充てん剤の体積分率 ϕ_2 の関数であり、充てん剤粒子の周囲の応力場の性質によって定まる。 ε_y は降伏点での伸び、 $E'c/E'10$ は誘起応力が零の状態での相対弾性率、 k は充てん剤粒子の形状、および複合体の構成成分の性質に依存する係数である。 $f(\phi_2)$ には充てん剤含有量が小さいものに対するNielsenら⁽¹⁾の計算値を用い、 ε_y には本実験の場合のような降伏点が明りょう(瞭)に現われないときには、破断伸びが用いられる⁽¹⁾。 $E'c/E'10$ には、図3.3における外そう(挿)から得た $T=T_g$ での相対弾性率を用いた。表3.1に、得られた k の値を示した。表3.1から明らかのように、それぞれの系列の k の値にはかなりの開きがある。この両系列間の k の値の違いは、充てん剤の材質の違い(SiO₂ 99.8%以上の溶融石英と、Eタイプのガラス)だけで説明するにはあまりに大きく⁽¹⁾、充てん剤形状の違いに帰せられるところが大きいものと考えられる。

図3.4に中空球状充てん剤を充てんした試料(B系列)のE'、E''～温度関係を示した。ガラス域におけるE'の温度こう配は、G系列と同程度である。G系列と比べて対照的なのは、充てん剤含有量が増加するにつれて、ガラス域のE'が小さくなる点である。ゴム域でのE'は、G系列と同様に、充てん剤含有量とともに増加する。

表3.1 相対弾性率の温度依存性をあらわす数値
Numerical values representing the temp. dependence on relative modulus.

No.	$d(E'c/E'10)/dT$	$E'c/E'10$	$\alpha_1^a - \alpha_2^b$	$f(\phi_2)^c$	ε_y	k
1 F	2.2×10^{-3}	1.37		0.34	0.019	1.81
2 F	3.0×10^{-3}	1.57	49.5×10^{-6}	0.58	0.019	1.26
3 F	3.2×10^{-3}	1.68		0.80	0.018	0.88
1 G	4.0×10^{-5}	1.11		0.34	0.055	0.13
2 G	2.0×10^{-4}	1.20	45×10^{-6}	0.50	0.039	0.29
3 G	2.4×10^{-4}	1.29		0.73	0.037	0.21

a) 50×10^{-6}

b) 5×10^{-6} (ガラスビーズ)、 0.5×10^{-6} (溶融石英)

c) From reference 1

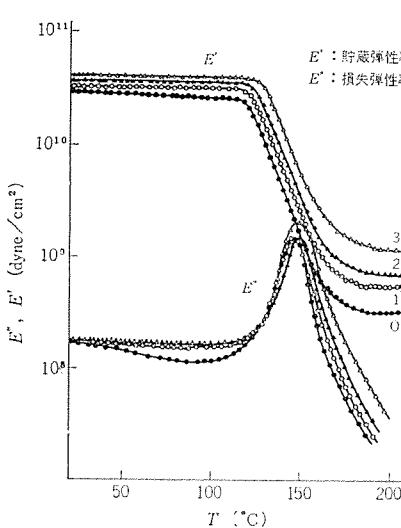


図3.1 溶融石英充てんエポキシ樹脂のE'、E''～温度曲線
E', E'' vs. temperature curves of fused quartz particles-filled epoxy resin.

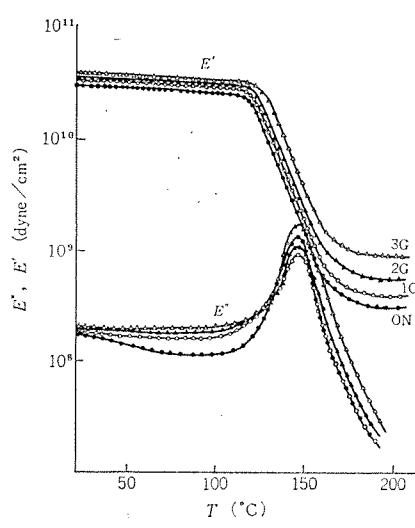


図3.2 ガラスビーズ充てんエポキシ樹脂のE'、E''～温度曲線
E', E'' vs. temperature curves of glass beads-filled epoxy resin.

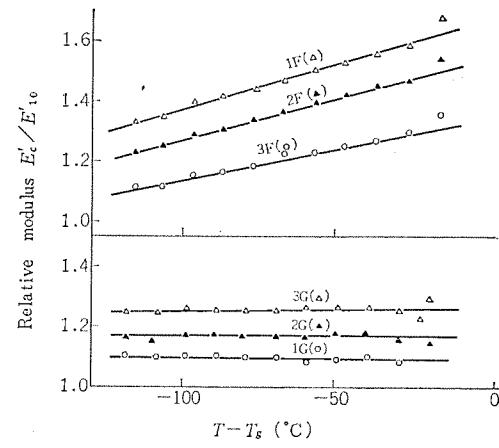


図3.3 相対弾性率～温度関係
Relative modulus vs. temperature relation.

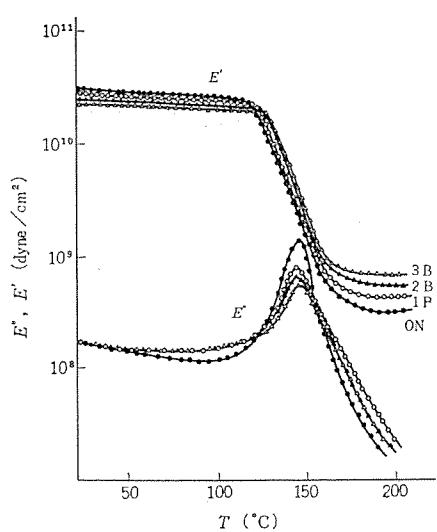


図 3.4 ガラスマイクロバルーン 充てん エポキシ樹脂の E' , E'' ~ 温度曲線

E' , E'' vs. temperature curves of glass microballoon-filled epoxy resin.

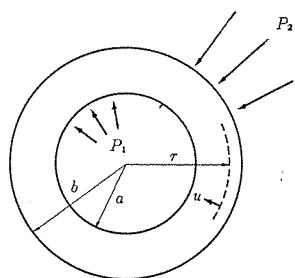


図 3.5 球殻の変形をあらわす図
Schematic representation for deformation of spherical shell.

中空球状充てん剤としてシラスバルーンをポリスチレンに充てんした場合、充てん剤の直径が比較的大きく（球かく（殻）の厚さと直径の比が小さい）、含有量が小さいところでは、室温での弾性率は充てん剤含有量が増すにつれて低下することが示されている⁽²⁾。

また、高分子複合系の強化理論⁽³⁾によると、その巨視的な弾性率は、母体高分子と充てん剤の弾性率、充てん剤含有量、高分子のポアソン比などによって規定され、上述のF・G系のよう、充てん剤含有量とともに全温度域で弾性率が増加する傾向や、気ほう（泡）含有体の弾性率が気ほう率の増加につれて低下する傾向を上記理論によって説明することが、しばしば行なわれている。本実験で得られた結果を二成分複合系の理論にしたがって説明しようとすれば、充てん剤の低温（ T_g 以下）での見かけの弾性率は母体高分子のそれより小さく、高温（ T_g 以上）では母体高分子の弾性率のほうが小さくなるということになる。以下に充てん剤の見かけの弾性率を求めてみる。

図3.5のような内径 a 、外径 b の球かくが内圧 P_1 、外圧 P_2 を受けるときの球かく表面での半径方向の変位 $(u)_{r=b}$ は、式(3.2)で示される⁽⁴⁾。

$$\frac{(u)_{r=b}}{b} = \frac{1}{(b^3 - a^3)E} \left[\frac{2}{3} (1-\nu) a^3 P_1 - \left\{ (1-2\nu) b^3 + \frac{(1+\nu)}{2} a^3 \right\} P_2 \right] \quad (3.2)$$

式(3.2)で E , ν は、それぞれ球かく構成材の綫弾性係数とポアソン比である。本実験の場合には $P_1=0$ と考えてよいので、式(3.2)は式(3.3)のようになる。

$$\frac{(u)_{r=b}}{b} = -\frac{1}{(b^3 - a^3)E} \left\{ (1-2\nu) b^3 + \frac{(1+\nu)}{2} a^3 \right\} P_2 \quad (3.3)$$

また、外圧 P_2 による球かくの体積変化率は、 $3(u)_{r=b}/b$ に等しくなる。したがって、外圧 P_2 と体積変化率との比でこの中空球の体積弾性率 K が表わされるとすれば、式(3.4)が成り立つ。

$$K = \frac{(b^3 - a^3)E}{3((1-2\nu)b^3 + (1+\nu)a^3/2)} \quad (3.4)$$

したがって、この体積弾性率が、この充てん剤の見かけの弾性率になる。非中空球の場合には $a=0$ となるので、式(3.4)は等方性材料における次式のようになる。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

今、IG-101の球かく構成成分の E , ν を通常のほうけい酸ソーダガラスの常温での値 6×10^{11} dyne/cm²、および 0.22 とし、IG-101の平均粒径 70μ 、球かくの厚さ 2μ の値を用いて式(3.4)から K を求めると、 2.96×10^{10} dyne/cm² になる。一方、エポキシ樹脂(ON)の常温での K を $E=3.0 \times 10^{10}$ dyne/cm²、ポアソン比 0.35⁽⁵⁾ を用いて計算すると、 3.33×10^{10} dyne/cm² になる。B系列の試料のゴム弾性域（200°C）でもIG-101の K は常温での値とほとんど変わらないが、エポキシ樹脂の K は 1×10^9 dyne/cm²（ポアソン比 0.45⁽⁵⁾）になる。動的弾性率 E' に関して、この体積弾性率の場合と同様な傾向が維持されるものとすれば、定性的には、図3.4の挙動は理解される。

3.2 機械的繰返し応力の効果

不規則形状充てん剤を充てんしたR系列の試料を万能疲労試験機を用いて定荷重引張圧縮を行なったときの $S-N$ 特性を図3.6に示した。この場合の試験条件は、繰返し速度 1,800 rpm、周囲温度 30°C である。高分子系複合材料では、一般に、鋼のような疲れ限度を示さないことが知られているが、本実験の試料でも疲れ限度は認められず、繰返し回数 (N) の増加とともに破壊応力 (S) は低下する。しかし、 $S-N$ 曲線のこう配は、繰返し回数の増加とともに次第に緩慢になる。また、充てん剤の含有量が増すとともに曲線は高応力側へ移行し、さらに、測定値のばらつきが小さくなる傾向が認められる。

繰返し応力場における材料のヒステリシス損失による発熱現象が疲労強度に与える影響は無視できない⁽⁶⁾ので、熱電対を用いて疲労試験中の試料の温度上昇を測定したが、負荷応力の 2.0~3.5 kg/mm² の範囲で温度上昇は少なく、R-1 で 1.2~7.5°C、R-3 の場合で 0.8~6.4°C であった。R-3 の値は、黒田ら⁽⁷⁾がアスベスト布および綿布入フェノール積層板で得た値と比べてかなり小さい。フェノール積層板では基材の種類によって温度上昇に差があり、アスベスト布の場合には

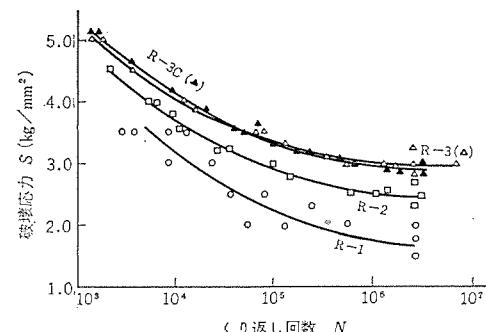


図 3.6 エポキシ樹脂、充てん剤系の $S-N$ 曲線
Stress-cycle curves of filled epoxy resin.

50°C, 編布の場合には70°C~110°Cとされている。このことは、両者の熱伝導率(アスペスト0.134 kcal/m·h·°C, 編0.080)⁽⁸⁾の違いに基づくものと思われ、本実験の結果は、溶融石英の熱伝導率(1.16 kcal/m·h·°C)⁽⁸⁾が前二者の値と比べてさらに高いため、温度上昇が小さくなつたと考えられる。また、R-1の場合には、黒田ら⁽⁹⁾の熱可塑性樹脂についてのガラス転移域での測定とは違い、ガラス転移域より十分に低い温度で測定したために発熱も小さいものと思われる。

繰返し応力によってこれらの複合体の微細構造が、どのような影響を受けるかを知るため、負荷応力2.0 kg/mm²で 1×10^4 および 3×10^6 回の繰返し応力を与えた試料を作り、その粘弾性を調べた。

図3.7に、繰返し回数 3×10^6 の場合の貯蔵弾性率 G' 、損失弾性率 G'' の温度依存性を示した。図3.7から明らかなように、繰返し応力によって G' は低下し、 G'' は増大する。また、主分散および副分散のピーク温度は、繰返し応力によって、変化することはない。

繰返し回数 1×10^4 の場合の G' 、 G'' ~温度関係も図3.7と同傾向であるが、 G' の低下度、および G'' の増加度は、図3.7の場合と比べて小さい。図3.8に0°Cにおける G' 、 G'' の値の繰返し回

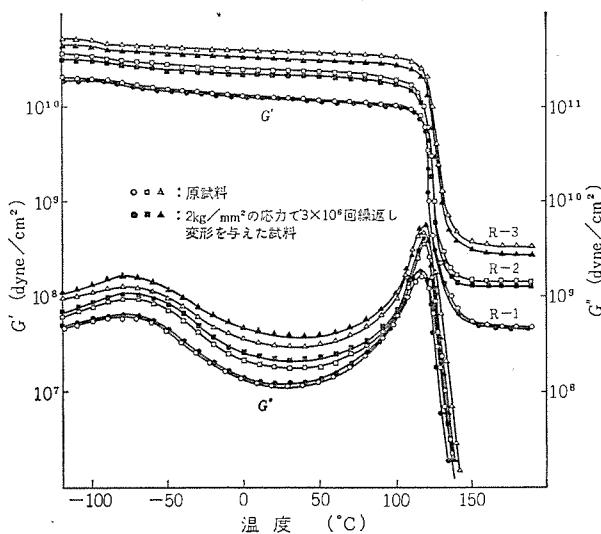


図3.7 G' 、 G'' に対する繰返し応力の効果
Effect of repeated stress on G' 、 G''

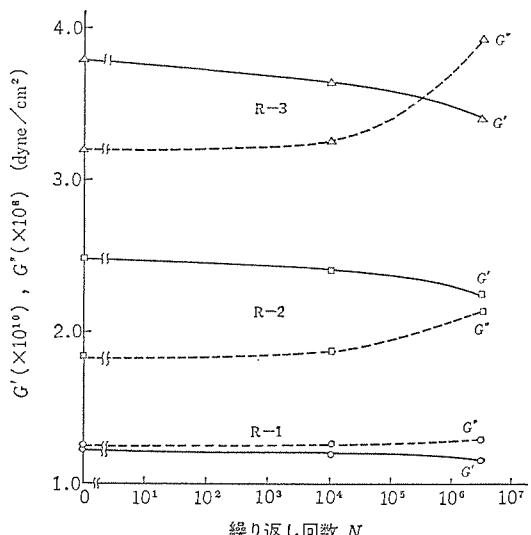


図3.8 繰返し回数と G' 、 G'' の関係
 G' 、 G'' vs. number of cycles on fatigue.

数依存性を示した。図3.8から明らかなように、繰返し回数が増すとともに G' の低下と、 G'' の増大の傾向が顕著になる。また、この傾向は0°C以外でも同じである。

図3.9にシラン系表面処理剤で処理した充てん剤を用いた試料R-3Cの粘弾性に及ぼす繰返し応力(3×10^6 回)の効果を示した。図3.7との比較からわかるように、R-3と比べて、R-3Cの場合には、 G' および G'' の繰返し応力による変化は小さい。

図3.10に 3×10^6 回の繰返し応力を与えた試料と原試料(繰返し応力を与えないもの)との相対弾性率 G'_c/G'_{10} を示した。R-2、R-3とともに、繰返し応力を与えた試料の G'_c/G'_{10} は、原試料のそれと比べて減少し、その温度依存性は小さくなる。さらに、充てん剤含有量が増すと、 G'_c/G'_{10} の温度係数は大きくなる傾向にある。3.1節に述べたように、相対弾性率の温度依存性が小さくなるのは、充てん剤表面付近の高分子鎖の誘起応力が緩和されるためである。したがって、上述の結果は、繰返し応力を与えることによって誘起応力の減少がもたらされることを示すものである。また、Nielsenら⁽¹⁰⁾は、充てん材と樹脂間の接着性が良いものの損失弾性

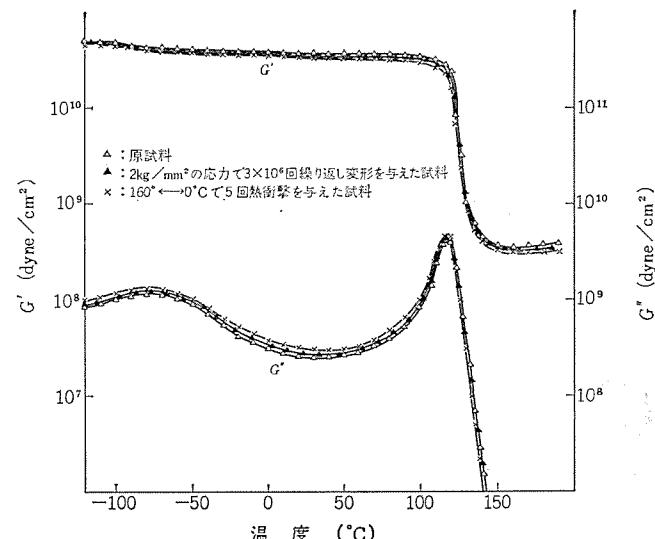


図3.9 G' 、 G'' に対する繰返し応力と熱衝撃の効果(R-3C)
Effect of repeated stress and heat shock on G' 、 G'' (R-3C)

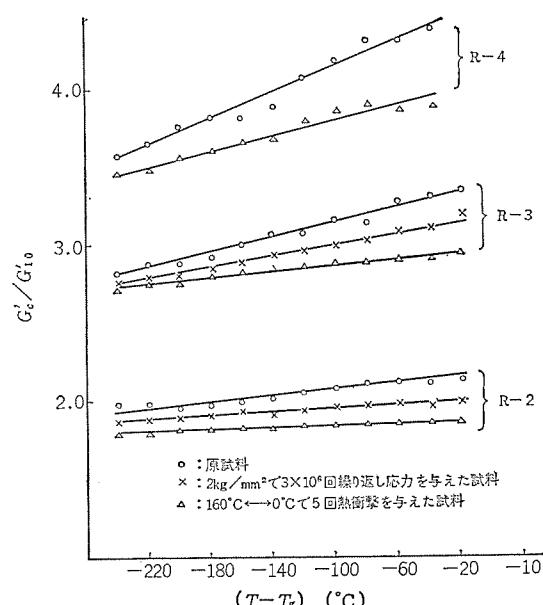


図3.10 相対弾性率~温度関係
Relative modulus vs. temperature relation.

率は、接着性の悪いものと比べて小さくなることを示している。これらのことから、エポキシ樹脂／充てん剤複合系は、繰返し応力を受けることにより、充てん剤粒子とエポキシ樹脂間の相互作用が低下し、誘起応力の減少、あるいは接着性の低下という現象が生ずるものと考えられる。

一方、Schrager⁽¹¹⁾は、非充てん系高分子の場合でも、繰返し応力によって損失正接や損失弾性率が増加することを報告しているが、本実験で用いた複合系においては、上述のように、樹脂と充てん剤粒子との界面の相互作用性の変化に基づく効果が重要であると考えられる。

3.3 热衝撃の効果

図3.11に、繰返し熱衝撃を与えた試料の粘弾性を示した。この場合の繰返し熱衝撃条件は、160°Cで5分間加熱後、0°Cまで冷却して5分間保つ操作を5回繰り返したものである。図3.11から明らかなように、繰返し熱衝撃によって G' は低下し、 G'' は増大する。さらに、充てん剤含有量が増すにつれて、この傾向は顕著になる。加熱温度100°C、冷却温度-198°Cとするほかは、上述と同様な条件で繰返し熱衝撃を与えた場合も、 G' 、 G'' の変化の傾向は図3.11と同じであるが、その程度は小さくなる。すなわち、これらの系の T_g (120°C)を含む温度域で熱衝撃を与えた場合には、 T_g を含まない温度域での場合と比べて G' 、 G'' の変化が大きくなる。

シラン系表面処理剤で処理した充てん剤を用いた試料R-3Cに繰返し熱衝撃($160^\circ\leftrightarrow 0^\circ\text{C}$)を与えた場合の粘弾性を図3.9に示した。図3.11との比較から、充てん剤の表面処理により、樹脂一充てん剤間相互作用を増すと、熱衝撃による影響が小さくなることが認められる。

図3.11の結果から T_g 以下の相対弾性率を求めて図3.10に示した。3.2節で述べた繰返し応力の効果と同様に、熱衝撃によって相対弾性率およびその温度こう配が小さくなることが認められ、かつ、これらの変化は、充てん剤含有量とともに大きくなる。

3.4 媒体の効果

複合系に対する媒体としての水の影響を知るため、R系列を用いて、水中での吸水量と、膨潤試料の応力-ひずみ特性を測定した。表3.2には約 $0.5 \times 5.0 \times 100$ (mm) の試料の全吸水量 Q (ml) と、

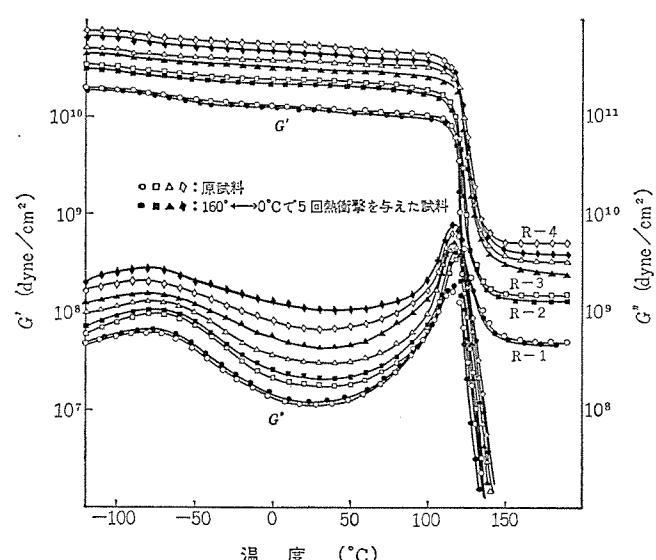


図3.11 G' , G'' に対する熱衝撃($160^\circ\leftrightarrow 0^\circ\text{C}$)の効果
Effect of heat shock($160^\circ\leftrightarrow 0^\circ\text{C}$) on G' , G'' .

溶融石英粒子内部の水分吸着量を無視し、さらに、樹脂相の吸水量は充てん材が共存しても変わらないと仮定して求めた、樹脂と充てん剤間の界面に存在する水分量 $\{Q - Q_{R-1} \cdot (1 - \phi_2)\}$ 、および両者の割合、また、溶融石英粉末の平均比表面積 $2.08\text{m}^2/\text{g}$ ⁽¹²⁾ から計算した充てん剤の単位表面積あたりの吸着水分量を示した。表3.2から明らかなように、全吸水量は、充てん剤含有量とともに増加する。また、その増加は、主に樹脂と充てん剤間の界面に基づくものであると考えられ、このことは、充てん剤の単位表面積あたりの吸着水分量が、充てん剤含有量と無関係に、ほぼ一定の値になることからも推測される。一方、充てん剤をシラン系表面処理剤で処理したR-3Cの場合には、その吸水量がR-3と比べてかなり小さく、充てん剤の単位表面積あたりの吸着水分量は、R-3の約 $\frac{1}{5}$ 程度である。

充てん剤含有量と、膨潤および未膨潤試料の応力-ひずみ特性の関係を図3.12に示したが、膨潤により、いずれも破壊応力と応力-ひずみ曲線のこう配が低下し、これらの変化は、充てん剤含有量とともに顕著になる。また、膨潤によって、複合系の応力-ひずみ曲線のこう配は、非充てん系(R-1)の値とほとんど同じになる。R-1では膨潤によって破壊ひずみが増加し、系中に浸入した水が可塑剤的に作用することを示しているが、複合系では充てん剤含有量とともに破壊ひずみが顕著になる。

次に、シラン系表面処理剤を用いた場合(R-3C)の特性をR-3とともに図3.13に示した。図3.13から明らかなように、膨潤によって両試料間のちがいが顕著になり、R-3Cは、R-3と比べて破壊応力および応力-ひずみ曲線のこう配の低下が少なく、さらに、R-3では破壊ひずみが著しく減少するのに対し、R-3Cではやや増加することが認められる。

これらのこととは、複合系を水によって膨潤させた場合、石英系充てん剤は、その表面にシラノール基などの親水基をもっているので、水分を吸着しやすく、そのため充てん剤とエポキシ樹脂との接着性

表3.2 吸水特性
Characteristics of water absorption.

試料	$1 - \phi_2$	Q ($\times 10^{-3}$ ml)	$Q - Q_{R-1} \cdot (1 - \phi_2)$ ($\times 10^{-3}$ ml)	$\frac{Q - Q_{R-1} \cdot (1 - \phi_2)}{Q} \times 100$ (vol %)	単位表面積あたりの水分量 ($\times 10^{-3}$ ml/m ²)
R-1	1.00	4.460	0	0	0
R-2	0.70	4.906	1.78	0.36	5.16
R-3	0.55	4.930	2.48	0.50	4.76
R-3C	0.55	3.134	0.68	0.22	1.31
R-4	0.45	5.092	3.09	0.61	4.86

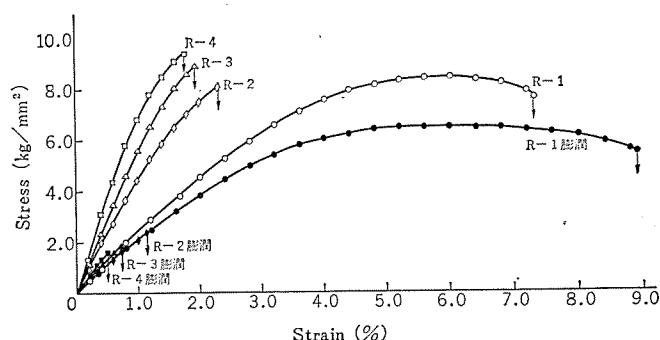


図3.12 膨潤および未膨潤試料の応力-ひずみ曲線
Stress-strain curves of swollen and unswollen sample.

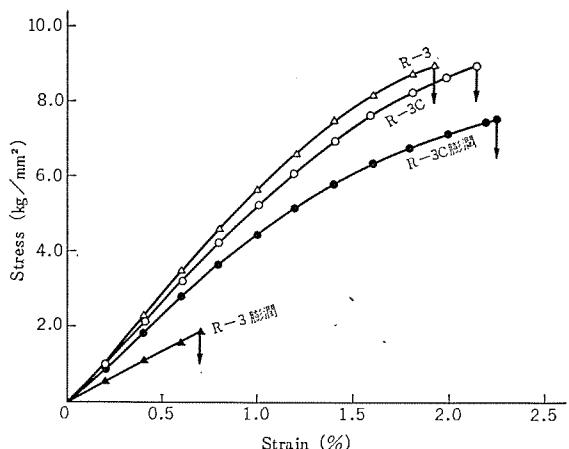


図 3.13 耐水性に与える充てん剤表面処理の効果
Effect of surface treatment of filler on water resistance.

が弱められることが考えられる。一方、充てん剤をシラン系表面処理剤で処理した場合、充てん剤の表面は、シラノール基がシランと反応して、水分吸着サイトが減少するので、表3.2のよう、水分の吸着性が低下し、充てん剤とエポキシ樹脂間の接着性が保持されると思われる。

4. む す び

エポキシ樹脂の力学的性質に及ぼす充てん剤効果を調べた結果、次のことがわかった。

(1) 球状充てん剤を用いた場合には、不規則形状充てん剤を用いた場合より、硬化時の誘起応力が小さくなる。

(2) 中空球状充てん剤を用いると、非中空球状充てん剤の場合とは対照的にガラス域の弾性率は、充てん剤含有量が増すにつれて小さくなる。

(3) 構造し応力や熱衝撃を与えると、樹脂一充てん剤間相互作用は弱められる。この効果は、充てん剤含有量が増すにつれて見か

け上大きくなる。

(4) 複合系の吸水量は、充てん剤含有量とともに増加するが、充てん剤の単位表面積あたりの吸着水分量は一定である。また、複合系は、水による膨潤によって破壊ひずみおよび強度が著しく低下する。

(5) シラン系カプリング剤によって、樹脂一充てん剤間相互作用を増すと、外部刺激による力学的特性の変動は小さくなる。

これらの知見は、エポキシ樹脂／充てん剤系の組成を、その使用目的によって選定する際の有力な決め手になる。

最後に、本研究を行なうにあたり、ご援助をいただいた関係各位に心から謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) L. E. Nielsen, T. B. Lewis : J. Polym. Sci., Part A 2, 7, 1705 (1969)
- (2) R. Onoko, et al. : Rep. Prog. Polym. Phys. Japan, 15, 325 (1972)
- (3) たとえば、E. H. Kerner : Proc. Phys. Soc., 69 B, 808 (1956)
- (4) 強度設計データブック編集委員会編：強度設計データブック，P 1,004，裳華房（昭37）
- (5) 土橋、児玉：未発表
- (6) 横口、今井：材料，19, 199号, 362 (昭45)
- (7) 黒田、谷口：材料試験，11, 504 (昭37)
- (8) 日本機械学会：機械工学ハンドブック，四版，P 11-10 (昭42)
- (9) 黒田、小牧：材料，14, 138号, 172 (昭43)
- (10) T. B. Lewis, L. E. Nielsen : J. Appl. Polymer Sci., 14, 1,449 (1970)
- (11) M. Schrager : J. Polym. Sci., Part A 2, 8, 1,999 (1970)
- (12) 児玉：高分子学会年次大会（昭47）発表

エポキシ樹脂注型品の内部応力

土方 明躬*

福島二郎**・佐保和生**・片岡勝敏**

太田照雄***

Internal Stresses on Epoxy Resin Castings

Central Research Laboratory Akemi Hijikata

Manufacturing Development Laboratory

Jirô Fukushima・Kazuo Saho・Katsutoshi Kataoka

Itami Works Teruo Ôta

Purpose of this report is to make clear the behavior of internal stresses produced in the curing and cooling process of epoxy resin casting having metal insert in it. The investigation has been made with a spherical casting model in which a sphere type load cell is set in. The result made available is well identical with the analysis of unsteady thermal stresses that physical properties change according to the temperature of the resin. It was found that the internal stresses occur in the cooling process at the temperature below the glass transition value (T_g) of cast resin. It largely depends on the cooling rate when passing the neighborhood of T_g . On the other hand, studies have been made on the behavior of frozen fringe produced in the curing and cooling process which poses problems when the internal stress of the casting is investigated by the photoelasticity; then a basis knowledge is obtained on techniques of measuring the internal stress from this frozen fringe.

1. まえがき

電気機器に使用されているエポキシ樹脂注型品は、コイルや導体あるいは鉄心など、注型樹脂と熱膨張係数や弾性係数などの物理的性質が異なる物体が注型樹脂内部に埋込まれ、一体化された構造となっている。このような注型品においては種々の要因が複雑にからみ合って、注型樹脂に内部応力が発生するが、さらに注型品を低温に冷却したり、過酷な冷熱サイクル試験に供すると熱応力が加算される結果、注型樹脂層に割れが発生したり、あるいは埋込物と注型樹脂との間にはく離が生じ、注型品の絶縁耐圧や耐コロナ性が低下するなど、強度的、電気的な問題を生じる場合がある。

したがって、良好な樹脂注型品を製造するためには、発生する内部応力を定量的には(把握することが肝要であり、この場合注型樹脂の硬化過程と関連づけて理解することは有益である。

エポキシ注型樹脂の硬化過程における物性値の変化を示す例として図1.1に、Fischらが温度に対する密度の変化で示した例⁽¹⁾を比容の変化にあらためて、模型的に示した。図示の場合の硬化過程は、液状で型への注入が行なわれたのち硬化温度に昇温させるA~B、所定の硬化温度に所定時間保持して液状の樹脂を硬化せしめるB~D、その後冷却して常温に至らしめるD~Fの三つの過程に大別できる。C点は液状の樹脂がゲル化し、固化はじめる時点である。冷却過程のE点では物性値の変化に屈曲点を生じ、樹脂がゴム弾性からガラス状に転移する。

以上の硬化過程(注型過程と呼ぶこともある)において、反応収縮過程のB~Cにおける収縮はかなり大きいが、この部分では樹脂が液状である、前述のような問題となる内部応力はC点以降の、とくに冷却過程で生じると考えてよい。この冷却過程での物性値は転移域が存在するので非線形な変化をし、このため内部応力の発生挙動が複雑になっている。注型品の内部応力の定量的測定あるいは解析は、従来より二、三試みられているが⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、上記の物性値の非

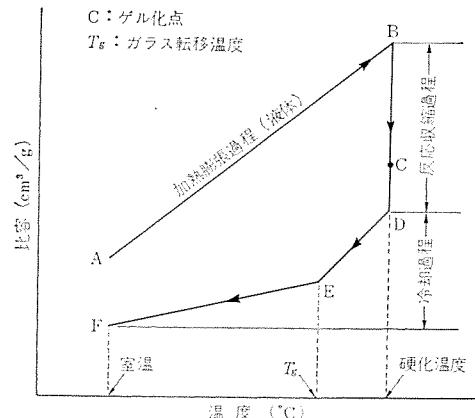


図 1.1 エポキシ注型樹脂の硬化過程における比容の変化
(模型図)

Specific volume change of epoxy casting resin during the curing process (schematic diagram).

線形性を考慮した内部応力の定量化はまだなされていないようである。

一方、複雑な形状をした注型品では、その内部応力を通常の残留応力測定法や単純な解析法では求め難い場合があり、このような場合の応力測定手法として光弾性法があげられる。しかし、光弾性法を注型品の内部応力の解析に用いる場合、光弾性しま(綱)に凍結しまが含まれていること、および三次元形状の応力測定に通常用いられている凍結法では、応力値に関する情報として凍結しまのみしか得られないなどの問題がある。

以上の諸点を考慮し、ここでは、1) 球形ロードセルを埋金として用いた球形の注型品について、硬化過程とくに冷却過程に発生する応力を実験的に求め、これと物性値の非線形性を考慮した解析解を比較し、その定量化を試みるとともに、2) 冷却過程に生じる凍結しまと内部応力との関連を把握するための基礎実験を行ない、三次元形状注型品に発生する内部応力の光弾性解析手法を検討した。

2. 実験と結果

2.1 供試エポキシ注型樹脂と物性値

供試した注型樹脂は充てん材を含有しないビスフェノールAタイプのエポキシ注型樹脂であり、その注型は、予熱したエポキシ樹脂および硬化剤をすばやく混合、脱気し常圧で予熱した後述の注型モデルの型に注ぎこむことによって行なった。供試注型樹脂の物性値を以下に示す。

(1) 線膨張係数

供試注型樹脂のガラス状およびゴム状領域の線膨張係数および T_g (ガラス転移温度)を英弘全自動熱膨張計(英弘精機産業製)を用いて、72°C/hの昇温速度で測定した。なお T_g はガラス状およびゴム状での伸びの変化を直線で結んだときの2本の直線の交点の温度として求めた。これらの測定結果を表2.1に示す。

(2) たて弾性係数およびポアソン比

供試エポキシ注型樹脂のたて弾性係数およびポアソン比の温度依存性を、抵抗線ひずみゲージを用いて引張試験によって測定した結果を図2.1に示す。なお、これらの物性値の測定に際しては、ひずみゲージの補強効果⁽⁵⁾を考慮した。図から明らかのように、たて弾性係数は温度上昇によって低下し、とくに90°C付近で急激に低下して転移域を示し、115°C付近以上ではほぼ一定になってゴム弾性を示す。また、ポアソン比は室温から約90°Cまではほぼ一定値であり、それ以上の温度では温度上昇とともに増大する傾向がみられる。

(3) 光弾性感度

供試エポキシ注型樹脂の光弾性感度の温度依存性を、引張試験によって得た結果を図2.2に示す。光弾性感度は温度上昇とともに約110°Cまで徐々に増大し、115°C付近から急激に増大するが、125°C以上ではほぼ一定値となる。

2.2 球形ロードセルによる内部応力の測定

2.2.1 実験および実験条件

注型過程に生じる内部応力の定性的な説明のために、Bush⁽⁴⁾は

表2.1 供試エポキシ注型樹脂の線膨張係数および T_g
Thermal expansion coefficients (linear) and T_g of the
epoxy casting resin tested.

線 膨 張 係 数 (1/°C)		T_g (°C)
ガラス状領域	ゴム状領域	
67.4×10^{-6}	158×10^{-6}	110

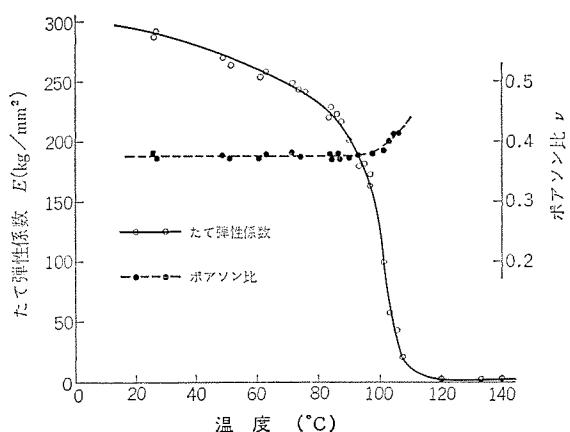


図2.1 供試注型樹脂のたて弾性係数およびポアソン比
Modulus of elasticity and poisson's ratio for casting resin tested.

円筒形ロードセルを埋め込んで実験を行なっているが、この方法では軸方向の拘束が不明確で、定量化が困難であることから、ここでは図2.3に示す中空球の埋金のある球形の注型モデルを用いて、注型過程に発生する樹脂内周の半径方向の応力(以下この応力を注型圧力と呼ぶ)を、埋金自身をロードセルにすることで測定した。このロードセルは、内面に抵抗線ひずみゲージをはり付け、あらかじめ温度および外圧に対しても校正した。また、冷却過程中的温度測定は、樹脂半径方向に熱電対を埋め込んで行なった。

冷却条件は、①硬化後130°Cから40°Cまで徐冷(4.5°C/h)、②急冷(図2.4に冷却曲線を示す)、③130°Cから T_g 以下の90°Cまで徐冷後40°Cまで急冷、の3条件とした。

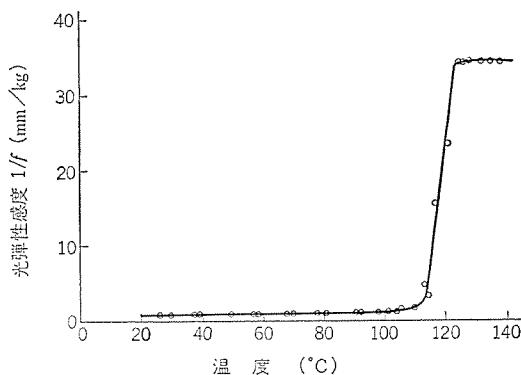


図2.2 供試注型樹脂の光弾性感度
Photoelastic sensitivity for casting resin tested.

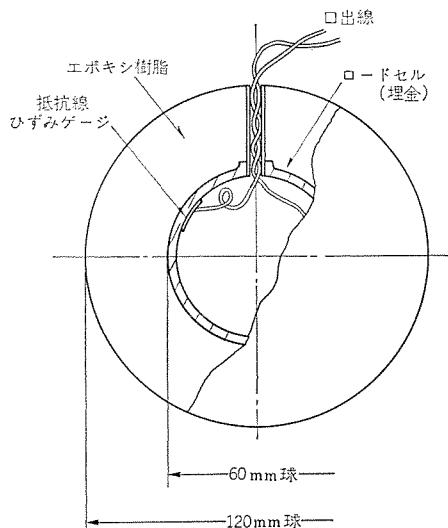


図2.3 内部応力実験用注型モデル
Casting model for internal stress experiment.

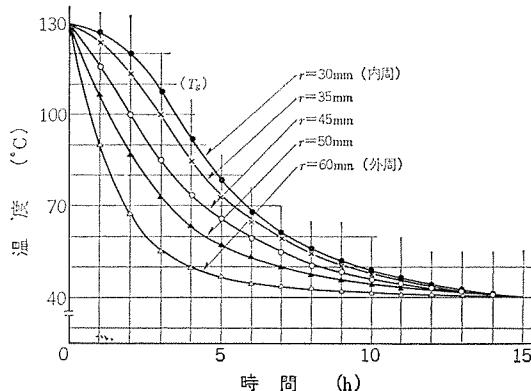


図2.4 急冷過程における冷却曲線
Relation between temperature and time in cooling process.

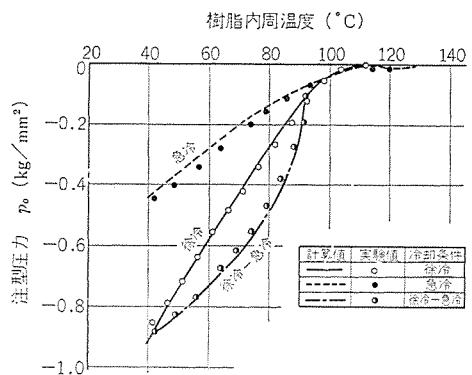


図 2.5 冷却過程における注型圧力
Casting pressure in cooling process.

2.2.2 実験結果

注型圧力の測定は、注型直後から硬化過程全域について行なった結果、注型圧力の発生は冷却過程にのみ認められたので、以下冷却過程における応力について述べる。

図 2.5 に冷却過程における注型圧力を示す。図は各冷却条件で冷却したとき、樹脂内周の温度が図示の温度に達したときの、注型圧力 p_0 を示している。図から明らかなように、注型圧力は徐冷の場合転移域以上ではごくわずかであり、転移域から約 90°C までは非直線的に増加し、90°C 以下ではほぼ直線的に増加する。一方急冷の場合は、約 95°C までは徐冷の場合とほぼ同様の値であるが、95°C 以下では増大の割合が徐冷の場合と比較してかなり小さく、半径方向の温度分布がなくなる 40°C では、徐冷の場合の約 40%である。90°C まで徐冷した後急冷した場合、冷却途中一時に徐冷の場合より大きくなるが、40°C では徐冷の場合とほぼ等しくなる。このように内部応力の発生挙動は冷却条件によってかなり異なる。

2.3 光弾性法による内部応力の測定

2.3.1 二次元実験

注型品の室温における内部応力を、光弾性法で求めるための基礎実験として、冷却過程における応力と光弾性しまの発生挙動を、二

表 2.2 二次元注型モデルの構成材料および寸法
Materials and dimensions of two dimensional casting models.

実験番号	構成材料		寸法 mm			
	埋金	樹脂	$a\phi$	$b\phi$	$c\phi$	h'
1	一般構造用鋼 (SS 41)	エポキシ 注型樹脂	13.0	15.0	67.5	8.90
2			28.0	30.0		9.39
3			43.0	45.0		9.04
4			28.0	30.0		9.17
5	アルミニウム (A1100 B-D)		28.0	30.0		8.76

表 2.3 光弾性しまの実験値と計算値の対応
Comparison of experimental and calculated fringe order.

実験番号	半径位置 r (mm)	dN_1/dt_1 (B-C 間)		dN_2/dt_2 (A-B 間)		$(dN_1/dt_1)/(dN_2/dt_2)$		温 度 °C				N_R	
		実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	t_A	t_B	t_D	t_C	実験値	推定値
1	24.5	7.0×10^{-3}	6.95×10^{-3}	4.80×10^{-3}	4.51×10^{-3}	1.63	1.53	137	100	90	23	0.47	0.482
	39.4	2.52×10^{-3}	2.56×10^{-3}	1.80×10^{-3}	1.67×10^{-3}	1.40						0.175	0.165
2	43.5	7.12	7.22	4.80	4.83	1.48	1.50	138	100	91	24	0.50	0.488
	67.0	3.46	3.46	2.32	2.31	1.49						0.235	0.234
3	59.8	9.92	9.61	6.92	6.65	1.43	1.45	140	102	93	24	0.67	0.610
	66.2	7.92	7.83	5.68	5.41	1.39						0.54	0.520
4	38.4	11.00	11.00	6.88	6.61	1.60	1.65	139	98	91	23	0.445	0.435
	49.2	4.32	4.47	2.80	2.72	1.54						0.30	0.298
5	36.9	8.50	8.90	6.32	6.47	1.34	1.38	139	101	92	23	0.59	0.605
	48.3	4.90	5.20	3.80	3.82	1.29						0.34	0.352

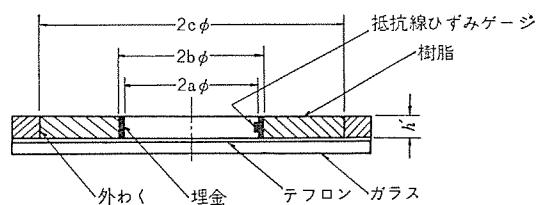


図 2.6 光弾性実験用二次元注型モデル
Two dimensional casting model for photoelastic experiment.

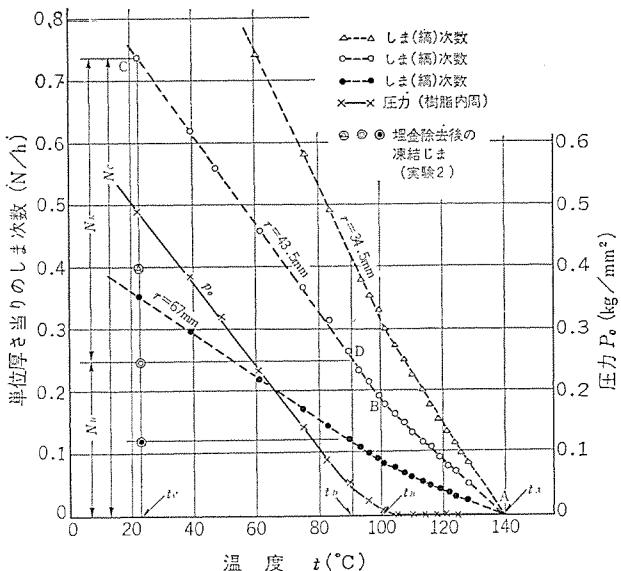


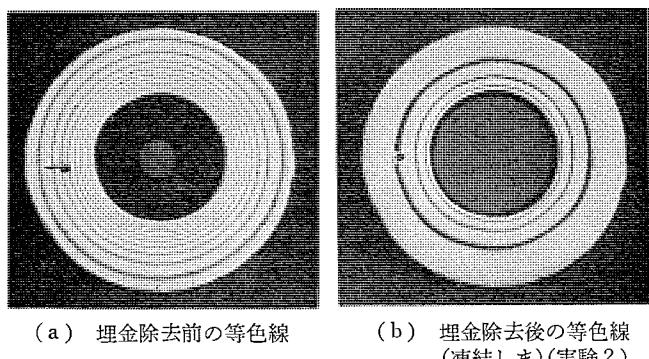
図 2.7 冷却過程のしま(綺)次数と圧力の変化
Change of fringe order and casting pressure in cooling process.
次元注型モデルについて調べた。

(1) 供試注型モデル

図 2.6 に供試注型モデルを示す。ガラス板の上に Teflon 板を敷き、その上に外わくと同心になるように埋金を設置し、両者の間に樹脂を注型した。外わくと埋金の樹脂が接する面には Teflon 被覆を施したが、その厚さは数 μ であり注型圧力におよぼす影響は無視できる。なお、注型圧力を検出するため埋金の内周に抵抗線ひずみゲージをはり付け、あらかじめ温度および圧力に対して校正を行なった。表 2.2 には供試した注型モデルの構成材料および寸法を実験番号とともに示す。

(2) 実験方法

注型樹脂がゲル化した後、外わく、Teflon 板およびガラス板をはずし、モデルを垂直にして炉外に配置した光弾性装置によって、冷却過程（冷却速度 4°C/h）のしま次数を測定し、同時に注型圧力を測定した。また室温にて埋金を除去し、その前後におけるしま次数と注



(a) 埋金除去前の等色線
(b) 埋金除去後の等色線
(凍結しま)(実験2)

図 2.8 等 色 線
Isochromatic fringe pattern.

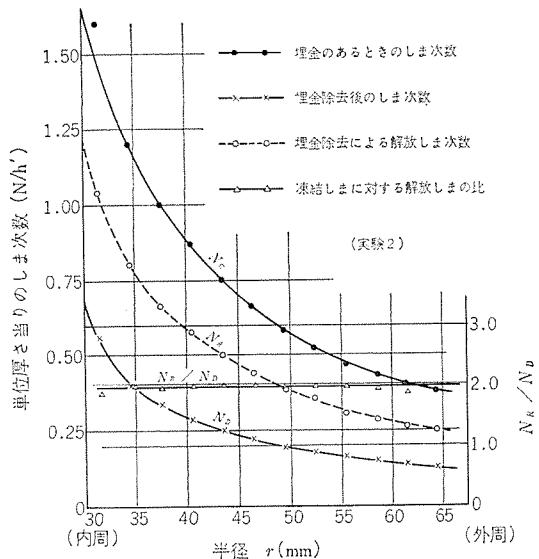


図 2.9 二次元注型モデルのしま次数分布
Fringe order distribution on two dimensional casting model.

型圧力の変化も測定した。その後、注型樹脂を半径方向に切断してしま次数変化を調べた。

(3) 実験結果

(a) 冷却過程のしま次数と注型圧力の変化

冷却過程におけるしま次数と注型圧力の変化の例を、実験2について図2.7に示す。これより図に示すA~B間、B~C間でSampsonの結果⁽⁶⁾と同じように温度の低下につれしま次数が直線的に増加するが、両範囲ではこう(勾)配が異なること、半径上での箇所においてもしまが発生はじめる温度 t_A 、およびしま次数のこう配が変化する温度 t_B がほぼ一定であること、ならびに注型圧力は110°C付近で発生はじめ、約90°C以下ではほぼ直線的に増加するなどのことがわかる。表2.3に各モデルについてのしま次数こう配 dN/dt 、および温度 t_A 、 t_B 、 t_C などの実験値を示す。

(b) 埋金除去による変化

実験2の場合の埋金除去前後の等色線の状況を図2.8に示す。また、図2.9には半径上の埋金除去前および除去後のしま次数 N_c および N_d の分布、埋金除去による解放しま($N_r = N_c - N_d$)の分布、ならびに凍結しまに対する解放しまの比 N_r/N_d を示す。これらの図から、埋金除去によってかなりのしま次数が解放され、 N_r/N_d は半径上ほぼ一定であることがわかる。なお、 N_d を図2.7にプロットし、図示のように冷却過程の温度をみれば各半径についてほぼ一定であり、この温度 t_d は表2.3に示すように t_B より約9°C

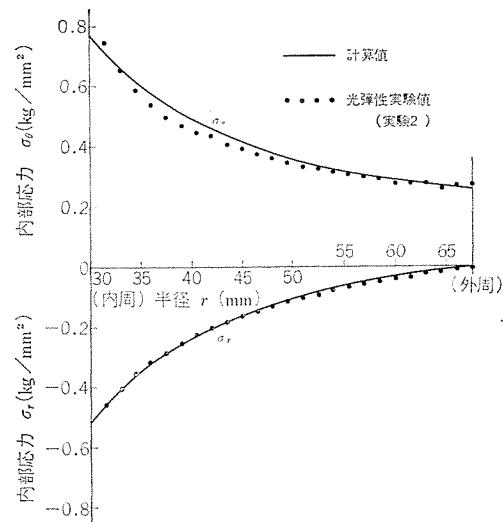


図 2.10 二次元注型モデルの応力分布
Stress distribution on two dimensional casting model.

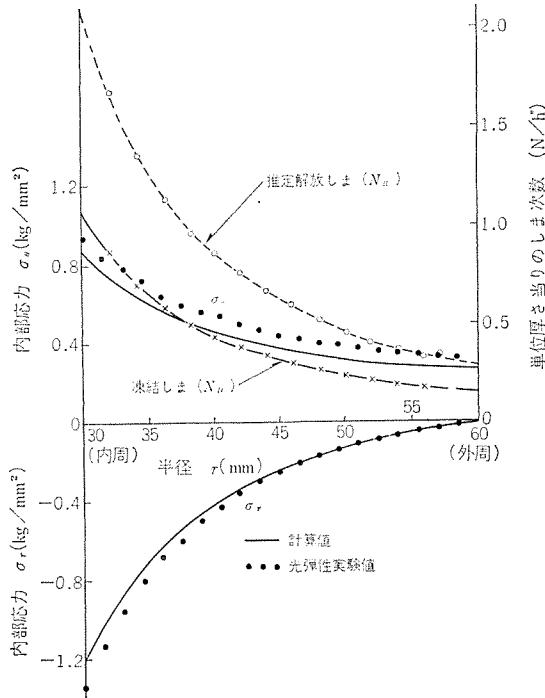


図 2.11 三次元注型モデルのしま次数と応力の分布
Distribution of fringe order and stress on three dimensional casting model.

低い。表2.3には t_d 、 N_r の実験値も示す。

(c) 半径方向切断による変化

埋金除去後の注型樹脂を半径方向に切断した結果、しま次数はほとんど変化しなかった。これは本実験の場合冷却速度が小さいため、注型モデルの内外周に温度差を生ぜず、それによる熱応力が生じてないことを示している。

(d) 応力分布

室温における解放しま N_r と光弾性感度 $1/f$ を用いてFilonの公式積分法によって、注型樹脂内の半径方向応力 σ_r および円周方向応力 σ_θ の分布を求めた。また、埋金のひずみ変化より検出した注型圧力 P_0 を注型樹脂内周に作用させたときの応力を、厚肉円筒の式を用いて計算した。これらの結果の例を実験2について図2.10に示すが、両者はよく一致した。

以上の実験結果は、他の注型モデルについても同様であった。

2.3.2 三次元実験

前述のように埋金除去によってかなりのしまが解放され、内部応力がこの解放しまより得られることがわかり、さらに後述する検討で凍結しまから解放しまがほぼ推定できることがわかったので、これらの結果の三次元形状注型品への適用を検証するために、実際に三次元注型モデルについての実験を行なった。

(1) 供試注型モデル

2.2節で述べた球形ロードセルを埋金とした、球形の注型モデルを供試した。

(2) 実験方法

注型モデルより中心を通り、厚さ約5mmにスライスした試料について、半径方向の凍結しま次数分布を求めた。

(3) 実験結果

(a) 凍結しまと推定解放しま：図2.11に凍結しまと後述の検討で推定した推定解放しま($N_R=1.9\sigma N_B$)の半径上の分布を示す。

(b) 応力分布：球かく(殻)についての応力の平衡方程式と、推定解放しま N_R を適用して得た次式によって、光弾性法による応力分布を求めた。

$$\sigma_r = -\int_{r=c}^{r=b} \frac{2fN_R}{rh''} dr, \quad \sigma_\theta = \frac{fN_R}{rh''} + \sigma_r \quad (2.1)$$

ここに h'' はスライスした試料の厚さである。また、球形ロードセルより求めた注型圧力を用いて、注型樹脂の応力分布を厚肉球かくの式より計算した。図2.11にこれらの結果を示す。

3. 検討

3.1 冷却過程における内部応力

実験結果で述べたように内部応力は、 T_g 付近の冷却速度に影響される。それぞれの冷却過程での内部応力を、温度で物性値の変化する非定常の熱応力の問題として計算し、実験結果と対比検討した。

3.1.1 計算法

冷却過程における内部応力は、冷却過程を多数の段階に分割し、各段階で定常熱応力問題として取扱って、冷却過程全域にわたって積算することで求めた。各段階での中空球の応力は、球を多層に分割し(図3.1)各層内外周の変位、半径方向のつり合い式から伝達マトリックス法によって計算した。以下その計算方法を述べる。

半径方向に温度分布をもつ中空球の変位、熱応力の一般式は次式

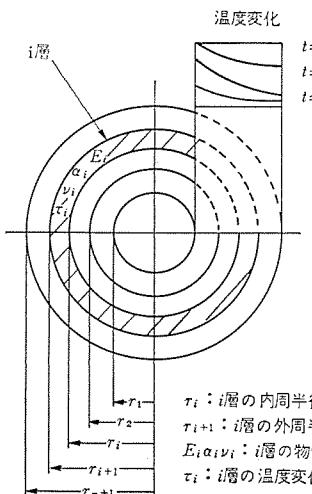


図3.1 内部応力計算モデル
Model for calculation of internal stress.

で表わされる⁽⁷⁾。

$$u_r = \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{\alpha}{r^2} \int_a^r \tau r^2 dr + c_1 r + \frac{c_2^2}{r^2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-2\nu} c_1 - \frac{2E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{r^3} c_2 - \frac{2\alpha E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^3} \int_a^r \tau r^2 dr \quad (3.2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-2\nu} c_1 + \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{r^3} c_2 + \frac{\alpha E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^3} \int_a^r \tau r^2 dr - \frac{\alpha E \tau}{1-\nu} \quad (3.3)$$

ここに u_r : 半径方向変位 c_1, c_2 : 積分定数

σ_r : 半径方向応力 E : たて弾性係数

σ_θ : 円周方向応力

r : 任意半径 ν : ポアソン比

a : 内周半径

τ : 温度変化

つぎに多重層の場合、任意 i 層の諸元を図3.1で表わせば、任意 i 層の中空球の内周に変位 $[u_r]_i$ 、応力 $[\sigma_r]_i$ を受けた時の外周の変位 $[u_r]_{i+1}$ 、応力 $[\sigma_r]_{i+1}$ は各層内での温度分布が一定とすれば次式で表わされる。

$$[u_r]_{i+1} = \frac{1}{3(1-\nu_i)} \left(\frac{2(1-2\nu_i)r_{i+1} - (1+\nu_i)r_i^2}{r_i} \right) [u_r]_i + \left\{ \frac{(1-2\nu_i)(1+\nu_i)}{3(1-\nu_i)E_i} \left(r_{i+1} - \frac{r_i^3}{r_{i+1}^3} \right) \right\} [\sigma_r]_i + \frac{(1+\nu_i)\alpha_i \tau_i}{3(1-\nu_i)r_{i+1}^2} (r_{i+1}^3 - r_i^3) \quad (3.4)$$

$$[\sigma_r]_{i+1} = \left\{ \frac{2E_i}{3(1-\nu_i)} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{r_i^2}{r_{i+1}^3} \right) \right\} [u_r]_i + \left\{ \frac{1+\nu_i}{3(1-\nu_i)} + \frac{2(1-2\nu_i)r_i^3}{3(1-\nu_i)r_{i+1}^3} \right\} [\sigma_r]_i - \frac{2\alpha_i E_i \tau_i}{3(1-\nu_i)r_{i+1}^3} (r_{i+1}^3 - r_i^3) \quad (3.5)$$

$$[\sigma_\theta]_{i+1} = \left\{ \frac{E_i}{3(1-\nu_i)} \left(\frac{2}{r_i} - \frac{r_i^2}{r_{i+1}^3} \right) \right\} [u_r]_i + \left\{ \frac{1+\nu_i}{3(1-\nu_i)} - \frac{(1-2\nu_i)r_i^3}{3(1-\nu_i)r_{i+1}^3} \right\} [\sigma_r]_i + \frac{\alpha_i E_i \tau_i}{1-\nu_i} \left(\frac{r_{i+1}^3 - r_i^3}{3r_{i+1}^2} - 1 \right) \quad (3.6)$$

したがって最外層 n 層の外周における変位 $[u_r]_{n+1}$ 、応力 $[\sigma_r]_{n+1}$ は、次式のような関係で1層目の内周の変位、応力を表わされる。

$$\begin{bmatrix} u_r \\ \sigma_r \\ 1 \end{bmatrix}_{n+1} = \begin{bmatrix} N \\ & N-1 \\ & & 2 \\ & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r \\ \sigma_r \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}_n \begin{bmatrix} u_r \\ \sigma_r \\ 1 \end{bmatrix}_1 \quad (3.7)$$

ここに $[N]$, $[N-1]$, ..., $[2]$, $[1]$ は各層での係数マトリックス

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}_n$$

は n 層までの係数マトリックスの積である。

境界条件 $[\sigma_r]_1=0$, $[\sigma_r]_{n+1}=0$ を用いることにより、最内周の変位 $[u_r]_1$ 、最外周の変位は次式で表わされる。

$$[u_r]_1 = -A_{23}/A_{21}, \quad [u_r]_{n+1} = A_{11} \cdot [u_r]_1 + A_{13} \quad (3.8)$$

任意層における $[u_r]_i$, $[\sigma_r]_i$ は次式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} u_r \\ \sigma_r \\ 1 \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}_{i-1} \begin{bmatrix} u_r \\ \sigma_r \\ 1 \end{bmatrix}_1 \quad (3.9)$$

σ_θ は $[u_r]_i$, $[\sigma_r]_i$ が求められれば式(3.6)より求められる。

3.1.2 計算結果

内部応力の計算は、各条件下での冷却過程を20~30段階に分割し、それぞれの段階でモデルを20層に等分割して行なった。冷却過程の温度分布は実験的に求めたものを、また物性値は各段階、各層内の平均温度に対する物性値(表2.1および図2.1に示す)を用いた。

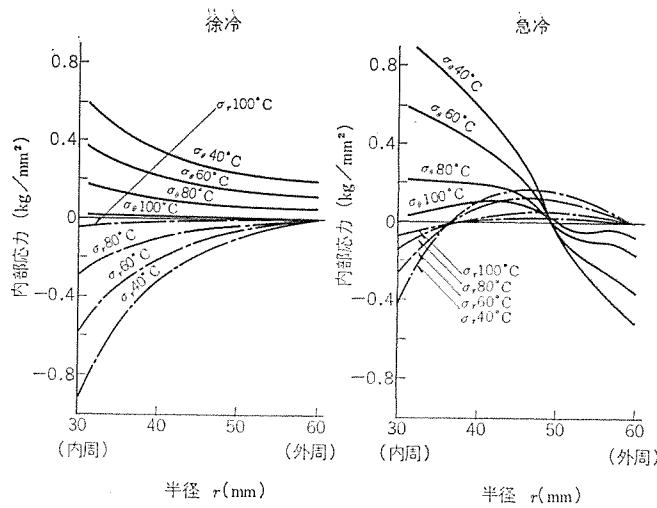


図 3.2 冷却過程における内部応力分布
Internal stress distribution in cooling process.

冷却過程における注型圧力の計算値を、その実験値を示した図 2.5 に併記する。また冷却過程における、各半径での円周方向応力 σ_θ 、および半径方向応力 σ_r を徐冷、急冷の場合について図 3.2 に示す。図 3.2 の曲線に沿って記入した数値は、樹脂内周温度を示す。

3.1.3 注型過程における内部応力の挙動

図 2.5 に示したように、徐冷時に生じる内部応力は、冷却過程全域にわたって計算値と実験値は良い一致がみられることから、発生する内部応力が埋金と注型樹脂の熱膨張差によるものであり、温度に対して非直線であるのは、樹脂の物性値 (E, α, ν) の温度に対する非直線性によるものと考えられる。こうした物性値の非直線性を考慮しない場合、例えば物性値を T_g まで一様と考え常温の物性値を使って、温度変化を $(T_g - \text{常温})$ として概算すれば、本実験の場合では非直線性を考慮した場合の約 1.4 倍となり、その相違が大きい。

つぎに急冷時に生じる注型圧力は、計算値が実験値に比較して若干低いが、ほぼ良い一致がみられることから、急冷時の内部応力は埋金と樹脂の熱膨張差によるものほかに、転移域通過時の樹脂内の温度差が大きく関与している。すなわち 130°C から急冷した場合、冷却過程で半径方向の温度差が大きく（図 2.4）外層部が転移域以下に冷却されて収縮しても、内周温度が転移域以下にさがって内層部の剛性が高められるまでは、外層部の剛性のみでつり合いを保つため、発生する注型応力は、内周が転移域にさがるまでの内周拘束のない（埋金のない）温度分布による熱応力と、内周が転移域以下になった以後の内周拘束のある熱応力（埋金の熱膨張による熱応力 + 温度分布による熱応力）を重畠したものであると考えられる。

一方、転移域以下まで徐冷後急冷したものは、130°C から転移域を通過して急冷した場合と違って、この効果はなく、転移域以下で半径方向に温度差のある間、温度分布による熱応力が一時的に加算されて大きくなるが、温度分布がなくなるとほとんど消滅し、徐冷の場合とほぼ等しくなる。

つぎに冷却を完了したときに残留する応力分布と冷却速度の関係は、図 3.3 に示すように 130°C から急冷することによって、樹脂内周での半径方向の応力 σ_r （いずれも圧縮応力）は、徐冷の場合の約 40% に低下するが、円周方向の応力 σ_θ （いずれも引張応力）は約 30% 大きくなる。また外周の σ_θ は徐冷の場合引張応力であるの

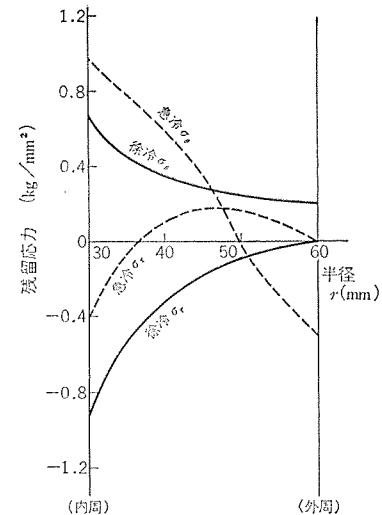


図 3.3 注型残留応力分布（40°C）
Residual stress distribution of casting model.

に対して、急冷では圧縮応力となる。

以上述べてきたように、冷却過程に発生する内部応力は、物性値が温度で変化する非定常の熱応力問題として解くことによって定量化できることが明らかになり、充てん系の注型品や冷却条件が違った場合についても同様に、注型残留応力が定量化できるものと考えられる。

3.2 光弾性法

3.2.1 冷却過程のしま次数変化

二次元実験における冷却過程の温度に対するしま次数こう配について検討する。冷却過程で注型樹脂内周に生じる圧力変化 dP_0 は焼ばめの式からつぎのように求められる。

$$dP_0 = \frac{(\alpha_p - \alpha_m) E_p E_m dt}{Q} \quad \dots \dots \dots (3.10)$$

ただし、

$$Q = E_p \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_m \right) + E_m \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_p \right)$$

であり、 α は線膨張係数、 E, ν はたて弾性係数、ポアソン比で、添字 p, m は注型樹脂および埋金を表わし、 dt は温度変化である。式 (3.10) と厚肉円筒の式を光弾性法に適用することによってしま次数こう配 dN/dt はつぎのように得られる。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{h'}{f} \frac{2b^2 c^2}{r^2 (c^2 - b^2)} \frac{(\alpha_p - \alpha_m) E_p E_m}{Q} \quad \dots \dots \dots (3.11)$$

式 (3.11) に室温および高温の物性値および表 2.2 に示した寸法を代入して、B~C 間のこう配 dN_1/dt_1 、A~B 間のこう配 dN_2/dt_2 を計算した結果を表 2.3 に示したが、計算値は実験値とほぼ一致し、上記のような計算でしま次数こう配がほぼ求められた。

3.2.2 解放しま次数の推定

内部応力に関与する解放しまは、二次元形状では比較的容易に得られるが、三次元形状でのそれは求め難い。そこで、三次元形状注型品では、応力値に関する唯一の情報である凍結しまから解放しまを推定する必要がある。この解放しま N_R は、図 2.7 からわかるように、しま次数こう配 dN/dt 、凍結しま N_D 、冷却過程の温度定點 t_A, t_B, t_C, t_D などを用い、 M/K を $(dN_1/dt_1)/(dN_2/dt_2)$ で表わすとつぎのようになる。

$$N_R = \frac{(t_D - t_C) M/K}{(t_A - t_B) + (t_B - t_D) M/K} N_D \quad \dots \dots \dots (3.12)$$

表 3.1 材料および寸法と K の値との関係
 K values relative to materials and sizes.

埋金材料	鉄					アルミニウム					銅					2.0				
	c/b	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	0.84	0.67	0.50	0.33
a/b	0.0 (中実)					0.0 (中実)					0.0 (中実)					0.84	0.67	0.50	0.33	0.25
二次元形状(円板)	1.015	1.030	1.044	1.054	1.061	1.020	1.028	1.035	1.042	1.048	1.013	1.030	1.040	1.050	1.053	0.99	1.020	1.033	1.039	1.042
三次元形状(球)	1.087	1.101	1.116	1.124	1.127	1.080	1.086	1.090	1.095	1.098	1.085	1.098	1.103	1.113	1.116	1.056	1.092	1.100	1.106	1.107

ここに M は、 $M = [f_2(\alpha_{p1} - \alpha_m)E_{p1}]/[f_1(\alpha_{p2} - \alpha_m)E_{p2}]$ であり、注型樹脂のガラス状領域およびゴム状領域における物性値（前者の領域を添字 1、後者の領域を添字 2 で示す）によって定まる。また K は式(3.10)に示す Q を用いて $K = Q_1/Q_2$ で示される。

表 2.3 に M/K および N_R の計算結果を併記するが、計算値は実験値とよく対応しており、上記のような方法で解放しまがほぼ推定でき、したがって三次元形状でも同様に推定できると考えられる。

3.2.3 複雑な形状の注型品の応力測定

式(3.12)に示す M は物性値のみで定まるが、 K は複雑な形状に関しては容易に求められない。そこで、 K におよぼす注型品の形状、寸法の影響および比較のために埋金材料の影響を検討する。供試の球形の注型モデルに対する K の値は、二次元注型モデルの場合と同様の方法で得られる Q よりつぎのようになる。

$$K = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\frac{E_{p1}}{E_{p2}} \left\{ \frac{b^3 + \frac{a^3}{2}}{b^3 - a^3} (1 + \nu_m) - \nu_m \right\} + E_m \left\{ \frac{b^3 + \frac{c^3}{2}}{c^3 - b^3} (1 + \nu_{p1}) + \nu_{p1} \right\}}{\frac{E_{p2}}{E_{p1}} \left\{ \frac{b^3 + \frac{a^3}{2}}{b^3 - a^3} (1 + \nu_m) - \nu_m \right\} + E_m \left\{ \frac{b^3 + \frac{c^3}{2}}{c^3 - b^3} (1 + \nu_{p2}) + \nu_{p2} \right\}}$$

.....(3.13)

注型品が二次元形状(円板)および三次元形状(球)で、その埋金が中実の鉄、アルミニウムおよび銅製であるときの c/b に対する K の値および埋金材料が銅で $c/b=2.0$ のときの a/b に対する K の値の計算値を表 3.1 に示す。この結果、注型品の形状、寸法および埋金の材質などが変わっても K の値の変化はそれほど大きくはなく、 K に表記のような値を用いれば、複雑な形状の注型応力が光弾性法で実用上さしつかえない程度の精度で求められることがわかった。

以上の検討で、本供試樹脂を用いた注型品の室温における内部応力が光弾性法によって求められることがわかり、一般に用いられてる充てん材入りの注型樹脂のような光弾性法が直接適用できない樹脂を用いた注型品の内部応力を、光弾性法で求めるための基礎的知見が得られた。

4. むすび

埋込物を有するエポキシ樹脂注型品の硬化過程に発生する内部応力の発生挙動を調べるために、無充てんのエポキシ樹脂を用いた球形のロードセルを埋込とした注型品によって埋込に加わる圧力を測定し、その結果を物性値が温度によって変化する非定常熱応力解析結果と比較検討した。その結果、

(1) 注型品の割れが問題となるような内部応力は、ガラス転移温

度以下の冷却過程で発生する。

(2) この応力は注型樹脂がその冷却過程でゴム状弾性からガラス状に転移する転移域を通過するさいの冷却速度に依存する。また、転移域以下での冷却速度の違いによる内部応力の差異は、冷却過程では認められるが冷却完了後には認められない。

(3) これらの状況は注型樹脂の弾性係数、線膨張係数などが温度によって変化する非定常熱応力解析結果とよく一致し、この種の問題が物性値が温度によって変化する非定常熱応力問題として扱えることが明らかになった。

さらに、複雑な形状の注型品の内部応力を光弾性法で測定するまでの基本的な問題である硬化過程における光弾性しまの発生挙動を円板状の数種の二次元注型モデルで調べた結果、

(4) 光弾性しまは冷却過程のある一定の温度(t_A)より生じはじめ、その後、温度の低下とともに直線的に増加するが、樹脂の転移域のある一定の温度(t_B)で折点が生じ、その前後でこう配が異なる。さらに、冷却完了後埋込物を除去して観察される凍結しまと同じしまが観察される冷却過程での温度はほぼ一定の値(t_D)となる。

(5) 冷却完了後観察される光弾性しまは、転移域以上で生じる凍結しまとそれ以降の過程で生じるしま(埋込物除去により解放されるしま)の和であるが、この両者の比は上記の t_A 、 t_B 、 t_D および室温 t_C 、樹脂と埋込物の物性値によって定まる定数(M)、および注型品の形状によって定まる定数(K)によって式(3.13)のように表わされ、注型品内部の応力分布には依存しない。

(6) この比の値を用いて三次元注型品の凍結しまから求めた内部応力は、ロードセルで測定した注型圧力より計算で求めた値とよく一致し、任意形状の注型品の応力をその凍結しまから測定するうえでの基本的手法が明らかになった。

参考文献

- W. Fisch, W. Hoffmann, and R. Schmid : J. of Applied Polymer Science, 13, No. 2, 295 (1969)
- A. J. Bush : Modern Plastics, 35, No. 6, 143 (Feb., 1958)
- G. H. Dewey, and J. O. Outwater : Modern Plastics, 37, No. 6, 142 (Feb. 1960)
- 高橋ほか：三菱電機技報, 44, No. 9, 1,183 (昭45)
- 村上ほか：日本機械学会論文集, 39, No. 320, 1,193 (昭48)
- Robert C. Sampson : Experimental Mechanics, 3, No. 10, 225 (Oct., 1963)
- 竹内：熱応力, 206, 1st ed. (昭46), 日新出版

エポキシ樹脂の部分放電劣化と耐トリーイング性

平林 庄司*・平沢 栄一*・長谷川 武敏*
川 上 剛**

Partial Discharge and Treeing Resistance of Epoxy Resins

Central Research Laboratory Shôji Hirabayashi・Eiichi Hirasawa・Taketoshi Hasegawa
Manufacturing Development Laboratory Takeshi Kawakami

Epoxy resins are now in wide use for high voltage electrical insulations. For better understanding of their performance, partial discharge resistance and treeing breakdown are investigated. The former is found not significantly affected by the type of resins (such as two different diglycidyl ether of bisphenol A and its modified epoxy resin), inorganic fillers (such as quartz, ceramic powder and aluminium hydrate) and the degree of the density of cross linking of epikote 828 in the range of $0.0251 \text{ mol/gr} \times 10^{-3}$ to $1.47 \text{ mol/gr} \times 10^{-3}$. It is also proved that this resistance referred to is roughly equal to that of polyethylene terephthalate. This resistance decreases with the increase of the ambient temperature.

The reconstituted mica-epoxy composites show much better performance than those not containing mica.

The treeing breakdown strength of epoxy resin is 3 to 5 times that of polyethylene; the epoxy resin filled with powdered quartz gives about 1.5 times higher breakdown strength than that without fillers. Strong dependence of treeing life on applied voltage suggests that the treeing resistance may be estimated by short time breakdown strength under pin-plane electrode arrangement.

1. まえがき

最近、エポキシ樹脂が各種電力用機器の絶縁物として盛んに使用されている。これらのエポキシ樹脂を長期に使用するうえでの、信頼性をはさむには、劣化についての知見を得ることが重要である。

劣化といつても、非常に多くの要因が考えられる。電気的な劣化について考えても、部分放電劣化(コロナ劣化)、トリーイング破壊、トラッキング、アーカー、くり返しインパルス疲労破壊等多くある。これらの個々の劣化が単独に生じることはまれで、相互に関係して生じる。また電気的劣化のみでなく、他の熱的、機械的等、種々の要因とも関係している。このため、実機は、固体絶縁物の真性破壊電界強度の数百分の1の電界強度で設計されている場合が多い。

ここでは、特にエポキシ樹脂の耐部分放電性と耐トリーイング性について述べる。耐部分放電性に関する研究は、ここ十数年来活発に行なわれてきた。その結果、耐部分放電性の諸現象の解明は、かなり明確に行なわれているが、寿命に対して定量的取り扱いをすることは、非常に難しい。そこで現在のところ、経験的手法である印加電圧と寿命の関係($V-t$ 特性)の特性から、絶縁物の部分放電に対する強度を判定することが最も妥当であると考えられる。

トリーイング破壊とは、固体絶縁物中の異物やボイド等の欠陥によって生じた局部高電界によって絶縁物が樹枝(tree)状に部分破壊し、ついには全路破壊に至る現象である。トリーイング破壊は、部分放電劣化の場合とは異なり、比較的低電圧でも、局部の高電界が形成された場合には、肉厚絶縁物を部分放電劣化より短時間で全路破壊に至らせる。最初に実用機器でトリーの発生が確認されたのは、ポリエチレンケーブルにおいてである⁽¹⁾。従ってトリーイングについては主として、ポリエチレンについて電気学会絶縁材料トリーイング専門委員会⁽²⁾を中心として検討してきた。ここでは、特にエポキシ樹脂について実験し、ポリエチレンの特性と比較した。

2. 実験方法

2.1 耐部分放電性試験(耐コロナ性試験)

一般に絶縁材料の耐部分放電性の評価は、印加電圧と寿命の関係($V-t$ 特性)で評価する場合が多い。ここでは、電気学会の絶縁材料コロナ劣化専門委員会等で多く検討してきた標準試験に依った⁽³⁾。

(1) 電極構成

従来、耐部分放電性試験電極には、集中法電極、半球棒電極、IEC(b)電極等多くあるが、取り扱いの簡易さと、導体の端部での部分放電が発生するような、実用状態を比較的良く模擬していると考えられるIEC(b)電極を用いた。図2.1にIEC(b)電極の形状を示す。

(2) ふん囲気

耐部分放電寿命は、湿度に対して影響を持つことが知られている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そこで乾燥剤 P_2O_5 入りの内容積約20lのデシケータ中で約一昼夜放置後試験した。

(3) 周波数

一般に、絶縁物の耐部分放電寿命試験は、周波数加速試験および

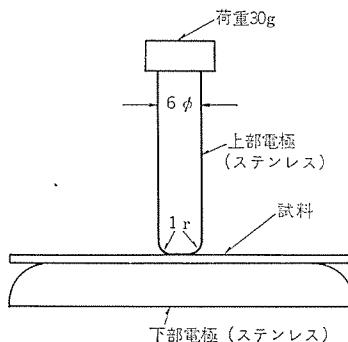


図2.1 電極形状 (IEC(b)電極)
Electrode arrangement for partial discharge resistance test.

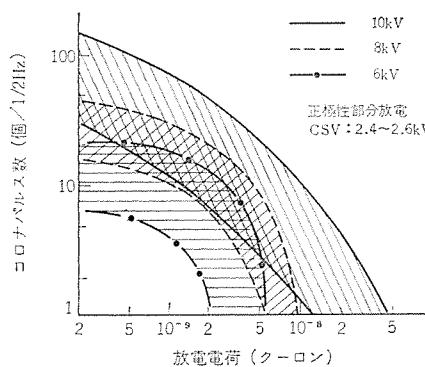


図 2.2 部分放電累積ひん(頻)度分布(正極性)
Accumulative repetition rate of partial discharge pulses (positive pulse).

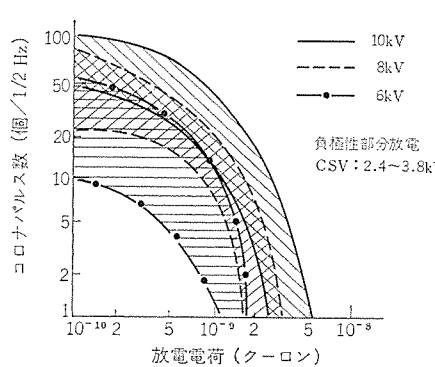


図 2.3 部分放電累積ひん(頻)度分布(負極性)
Accumulative repetition rate of partial discharge pulses (negative pulse).

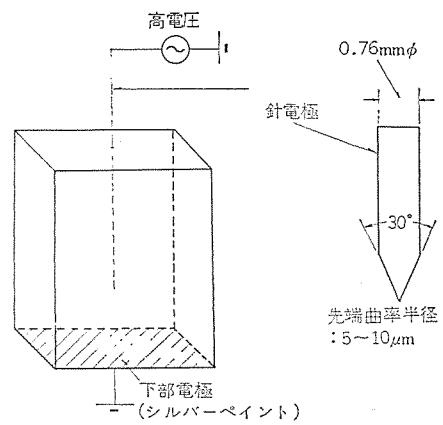


図 2.4 電極形状
Electrode arrangement for treeing test.

電圧加速試験が行なわれている。周波数加速試験においては、耐部分放電寿命は、正弦波 1kHz 程度まで周波数に反比例することが知られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そこで 600 Hz の正弦波で、商用周波数 60 Hz の 10 倍の加速試験を行なった。

(4) 印加電圧

10kV, 8kV, 6kV の 3 段階を標準とした。

(5) 試料の形状と厚さ

試料は、 $50 \times 50 \times 1.0 \text{ t} \pm 0.05 \text{ mm}$ のシート状のものを用いた。

(6) 試験繰り返し試料数

原則として電圧 1 点につき 6 個の試料を試験した。

(7) データ処理法

得られたデータは、ワイルプロットより平均寿命を求め、印加電圧と寿命の関係 ($V-t$ 特性) に表わした。また 5%, 95% 信頼寿命により耐部分放電性を比較した。

(8) 部分放電の大きさ

図 2.2, 2.3 にそれぞれ、正極性、負極性の放電パルスの累積ひん度分布を示す。見かけの最大放電電荷量は、6kV で $2 \sim 5 \times 10^{-9}$, 8kV で $6 \sim 9 \times 10^{-9}$, 10kV で $1 \sim 4 \times 10^{-8}$ クーロン、負極性は、それぞれ $1 \sim 1.8 \times 10^{-9}$, $1.7 \sim 3 \times 10^{-9}$, $2.6 \sim 5.2 \times 10^{-9}$ クーロンである。また部分放電開始電圧 (C.S.V.) は、 10^{-10} クーロンの検出感度で、正極性は、2.4~2.6kV、負極性は、2.4~3.8kV である。なお絶縁厚は 1 mm である。

2.2 耐トリーイング試験法

筆者等も、電気学会絶縁材料トリーイング専門委員会⁽²⁾に参画して、トリーイングについて検討してきた。そこで試験方法の多くは、この委員会の方法によった。なお、充てん剤入りのエポキシ樹脂の場合は、不透明材料であることから、トリーイング寿命の $V-t$ 特性および針状埋め込み電極構成での短時間破壊電圧の値で評価した。

(1) 電極構成

先端角 30°、曲率半径 5 μm の針状電極をエポキシ樹脂中にモールドした。これにより局部高電界を模擬した。形状を図 2.4 に示す。

(2) 電圧印加方法

試料の低圧側を、直接接地するディレクトグラウンド方式と、試料の低圧側と接地間に、間隔を保つ、リモートグラウンド方式があるが、ここでは、ディレクトグラウンド方式を用いた。

(3) ふん囲気、電圧

ふん囲気は絶縁油 2 号である。またトリーイングの場合は、周波数加速に一定の規則性が認められていないので、正弦波 60 Hz で試験した。

表 3.1 試料の種類と配合
Test samples.

(1) 橋かけ密度の効果 (耐部分放電性)

	配 合 (重量 %)				橋かけ密度 mol/g $\times 10^{-3}$	硬 化 条 件
	エビコート 828	HHPA	BA	2E4 Mz		
A	100	100	0	1.0	1.470	$120^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ hs} + 140^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ hs}$
B	100	90	10	1.0	0.870	$120^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ hs} + 140^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ hs}$
C	100	83.4	16.6	1.0	0.403	$120^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ hs} + 140^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ hs}$
D	100	72	28	1.0	0.0946	$120^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ hs} + 140^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ hs}$
E	100	63.1	36.9	1.0	0.0251	$120^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ hs} + 140^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ hs}$

(2) 代表的エポキシ樹脂の差異 (耐部分放電性)

	樹 脂	硬 化 剂	硬 化 条 件
F	エビビス系エポキシ (低分子量 WPE 185)	酸無水物	$120^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ hs} + 140^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ hs}$
G	エビビス系エポキシの変性 A	酸無水物	$110^{\circ}\text{C} \times 4 \text{ hs} + 135^{\circ}\text{C} \times 4 \text{ hs} + 155^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ hs}$
H	エビビス系エポキシの変性 B	酸無水物	
I	エビビス系エポキシ (高分子量 WPE 390)	酸無水物	
J	ポリエチレンテレフタレート 0.2 mm \times 5 枚重ね		

(3) 充てん剤の効果 (耐部分放電性)

	樹 脂	充 て ん 剤	硬 化 剂	促 進 剤	備 考
K	アラルダイト CT-200	シリカ※1	酸無水物系	なし	
L	アラルダイト CT-200	セラミック系	酸無水物系	なし	
M	アラルダイト CT-200	セラミック系 + アルミナ	酸無水物系	あり	
N	アラルダイト CT-200	アルミナ	酸無水物系	あり	
O	アラルダイト CT-200	シリカ※2	酸無水物系	なし	
P	アラルダイト CT-200	なし	酸無水物系	なし	
Q	エビコート 1040	セラミック系	酸無水物系	なし	
J	ポリエチレンテレフタレート 0.2 mm \times 5 枚重ね				※1 と ※2 はシリカの量が異なる

(4) 集成マイカとエポキシの複合絶縁物 (耐部分放電性)

	マ イ カ	エ ポ キ シ 樹 脂
R	集 成 マ イ カ	低分子量エビビス系エポキシの変性 A

(5) 温度依存性 (耐部分放電性)

G	低分子量エビビス系エポキシの変性 A 0.4 mm	T	ポリエチレンテレフタレート 0.25 mm
S	ポリエチレン 0.3 mm	U	塩化ビニール 0.3 mm

(6) 耐トリーイング試験

	樹 脂	充 て ん 剤	Vol. %
E	エビコート 828	なし	
P	アラルダイト CT-200	なし	
V	アラルダイト CT-200	シリカ	47 %
W	アラルダイト CT-200	シリカ	57 %

硬化剤: 酸無水物系

3. 実験に用いた試料の種類と内容

今回実験に用いた試料の種類と配合を表3.1に示す。

4. 実験結果(耐部分放電性)

4.1 耐部分放電性に及ぼす橋かけ密度の効果

エポキシ樹脂の橋かけ密度を変えた場合には、直流の電気伝導(イオン伝導)の過程に顕著な差があるという報告がある⁽⁸⁾。ここでは耐部分放電性に及ぼす橋かけの効果について検討した。なお試料は、ビスフェノール系エポキシ樹脂エピコート828と酸無水物を重量比で1対1の割合に混合して硬化した。また硬化剤には、無水ヘキサヒドロフタル酸を用いた。橋かけ密度の調節には、無水安息香酸を用いた。図4.1に橋かけ密度を変化した場合のV-t特性を示す。この特性および、図4.4, 4.5, 4.6のそれぞれ10kV, 8kV, 6kVのワイブル分布より求めた5%, 95%信頼寿命の比較から、橋かけ密度を1.47 mol/g × 10⁻³～0.0251 mol/g × 10⁻³まで60倍程度変化させても有意差がない。

4.2 エポキシ樹脂の種類による耐コロナ性

図4.2に低分子量エピビス系エポキシ樹脂(WPE 185)とこれを変性した樹脂および高分子量エピビス系エポキシ樹脂(WPE 390)のV-t特性を示す。ここで比較用として0.2mmのポリエチレンテレフタレートを5枚シリコーングリスで重ね合せ、絶縁厚1mmにした試料を試験した。以上のV-t特性および、ワイブルプロットより求めた信頼寿命の比較

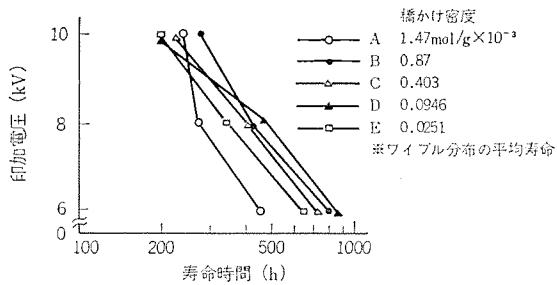


図4.1 耐部分放電性に及ぼす橋かけ密度の効果
V-t curves of epoxy resins with various degrees of cross-linking density.

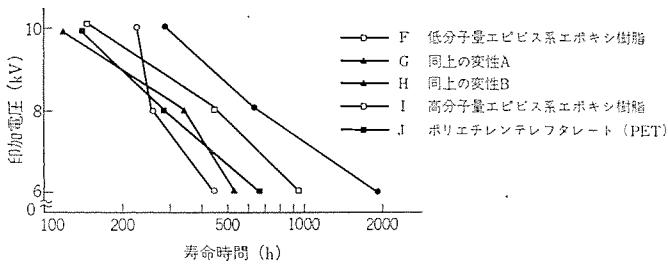


図4.2 代表的レジンの耐部分放電性
V-t curves of various types of resins.

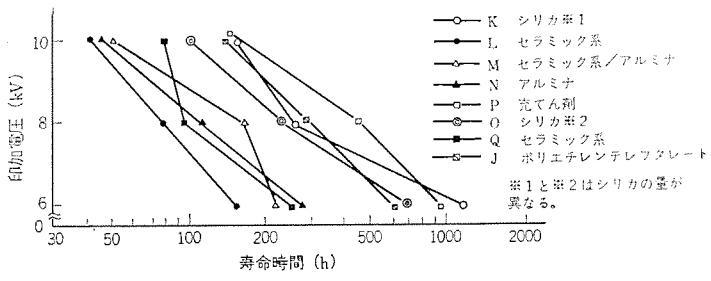


図4.3 耐部分放電性に及ぼす充てん剤の効果
Effects of inorganic fillers on V-t curves of epoxy resins.

から、エポキシ樹脂の種類を変えてても、樹脂間に耐部分放電性の顕著な差は認められない。なおポリエチレンテレフタレートと同程度の耐部分放電性を示す。

4.3 耐部分放電性に及ぼす充てん剤の効果

図4.3に、エポキシ樹脂に、充てん剤として、アルミナ、シリカ、セラミック系充てん剤を充てんした場合のV-t特性を示す。この結果および、ワイブル分布の信頼寿命の比較から、耐部分放電性は、充てん剤の効果は少なく、充てんしないものと比べ同程度の耐部分放電性を示す。またポリエチレンテレフタレートと比べて同程度の耐部分放電性を示す。

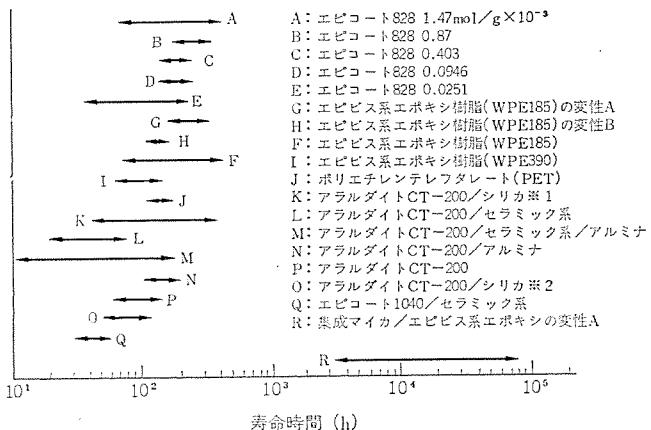


図4.4 信頼寿命の比較 (10 kV)
Reliability lives at 10 kV.

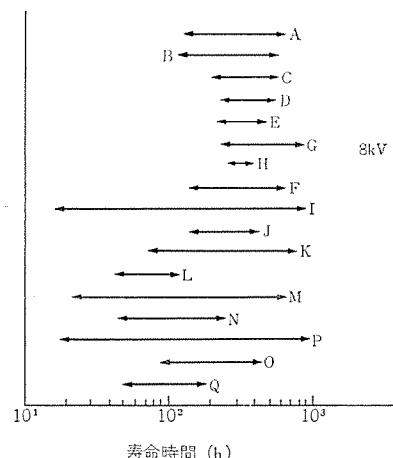


図4.5 信頼寿命の比較 (8 kV)
Reliability lives at 8 kV.

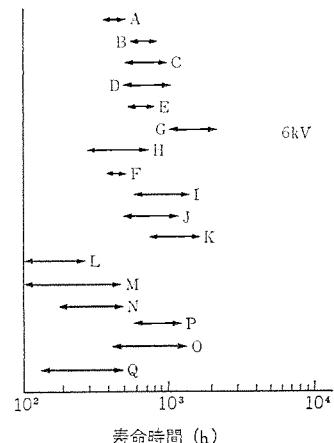


図4.6 信頼寿命の比較 (6 kV)
Reliability lives at 6 kV.

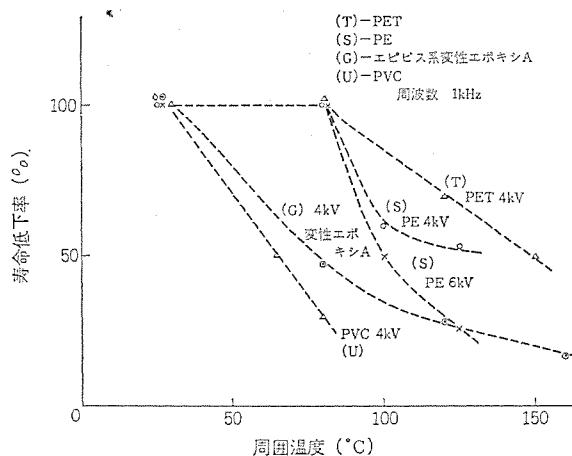


図 4.7 寿命の温度特性
Relation between lives and ambient temperature.

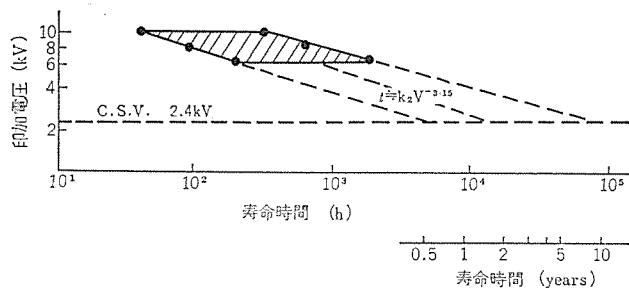


図 4.8 部分放電開始電圧付近の寿命推定
Estimation of lives near partial discharge inception voltage.

4.4 集成マイカとエポキシ樹脂の複合絶縁物の耐部分放電性

図4.4に集成マイカに変性エポキシAを含浸した場合の10kV印加における耐部分放電寿命を他の材料と比較して示す。これよりエポキシ含浸のマイカは他のエポキシ樹脂に比べ、1~2けた寿命が長い。これは、マイカの耐部分放電電性の良好なことによると思われる⁽⁹⁾。なおこの場合は、試料の厚さは、0.5mmである。耐部分放電寿命は、IEC(b)電極において印加電圧一定の場合は、絶縁厚の約3乗に比例することを確かめている。この関係を考慮すると、図示した0.5mmの絶縁厚より1mmの場合は更に寿命が長くなる。

4.5 耐部分放電性の温度特性

図4.7に変性エポキシA、ポリエチレン、ポリエチレンテレフタレート、塩化ビニールの常温での寿命を100%とした時の、周囲温度に対する寿命の低下率を示す。これより寿命の温度に対する低下率は、ポリエチレンテレフタレート、ポリエチレン、変性エポキシA、塩化ビニールの順に大きくなる。

4.6 耐部分放電性のまとめ

(1) 全試料のワイブルプロットより求めた信頼寿命の比較

図4.4, 4.5, 4.6にそれぞれ10kV, 8kV, 6kVの信頼寿命を示す。この結果および $V-t$ 特性から、エポキシ樹脂の耐部分放電性は、橋かけの効果、無機充てん剤の効果は少なく、またエポキシ樹脂の種類を変えてても樹脂間に顕著な差はない。しかしエポキシとマイカの複合絶縁物は良好な特性を示す。

(2) 部分放電開始電圧付近の寿命推定

一般に寿命 t は、印加電圧 V に対し $t = kV^{-n}$ あるいは、 $t = k(V - V_s)^{-n}$ (V_s は部分放電開始電圧) という経験式がよく用いられる。ここでは、前者の式を適用し、部分放電開始電圧付近での寿

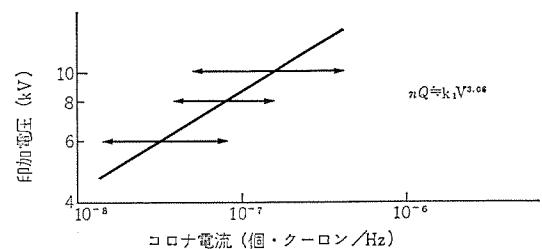


図 4.9 部分放電電流と印加電圧の関係
 Relation between voltage and partial discharge currents.

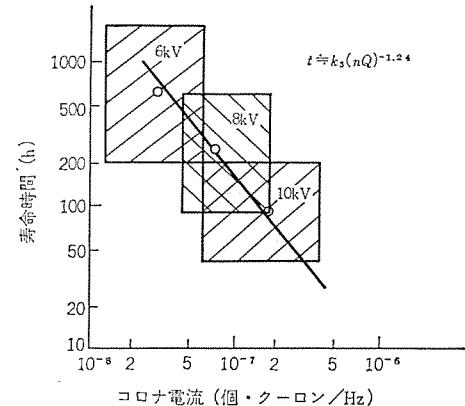


図 4.10 部分放電電流と寿命の関係
Relation between partial discharge currents and lives.

命を推定した。図4.8に寿命推定のための印加電圧 V と寿命 t の両対数表示を示す。部分放電開始電圧を 2.4 kV として $V-t$ カーブを外そう(挿)して寿命を推定すると 0.57 年～8 年となる。この推定寿命は、部分放電開始電圧以下では、実際の寿命は、無限大であるから、長期の部分放電に対する信頼性は握には、安全サイドの推定となる。また今回の試験結果は、絶縁厚が 1 mm の場合であり通常は、これより厚い材料で使用している場合が多い。従い、今後厚さ効果を考慮した $V-t$ カーブ(平均電界 $E-t$ カーブ)の確立が実用的には重要な課題となる。現在、同一平均電界でも、絶縁厚が厚く、印加電圧が高いうが、絶縁厚が薄く、印加電圧が低い場合より寿命が短くなることを確認している。

(3) 部分放電電流と寿命の関係

図 4.9 に印加電圧と部分放電電流の関係を示す。部分放電電流 nQ (n ; 1 Hz 当りの放電 パルス 発生数, Q ; 放電の クーロン 値) は、図 2.2, 2.3 の累積ひん度分布より求めたものである。電圧 V に 対して、数個の試料の実験から、次の式が近似的に成立する。

$$(nQ)_{\text{正}+\text{負}} \doteq k_1 V^{3.06} \dots \quad (4.1)$$

図 4.8 から寿命 t は、 V に対して、平均値の直線で次のような近似式が成立する。

$$t \doteq k_2 V^{-3.15} \dots \quad (4.2)$$

この式 (4.1), (4.2) から寿命は、部分放電電流に対し $6 \sim 8 \text{ kV}$ の電圧範囲で、ほぼ反比例している。この関係を示したのが図 4.10 である。ここで寿命 t と部分放電電流は、近似的に次のように表わせる。

5. 耐トリーイング性の実験結果

5. 1 長時間 $V-t$ 特性

図 5.1 にエピコート 828 (橋かけ密度 $0.025/\text{mol/g} \times 10^{-3}$) の場合の

耐トリーイング寿命の $V-t$ 特性を示す。この結果より寿命 t は、電圧 V に対し $t \propto kV^{-7}$ と表わせ、電圧依存性の大きさを示して

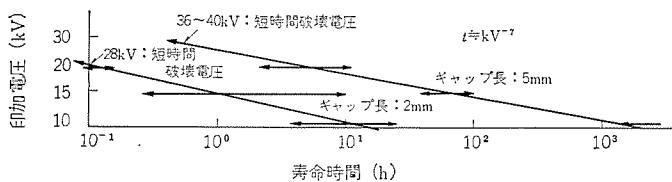


図 5.1 トリーイングの $V-t$ 特性
 $V-t$ characteristics of treeing.

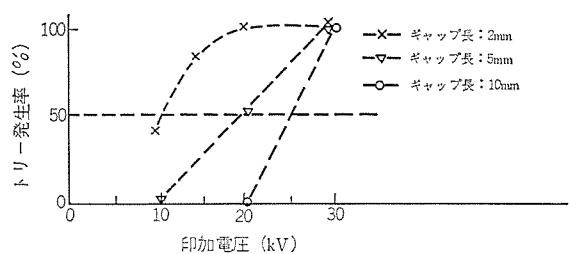


図 5.2 特性電圧
Tree inception voltage.

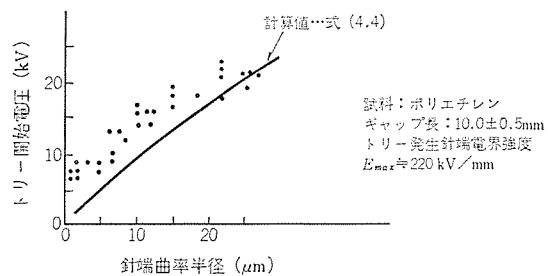


図 5.3 ポリエチレンのトリー開始電圧⁽²⁾
Tree inception voltage of polyethylene⁽²⁾.

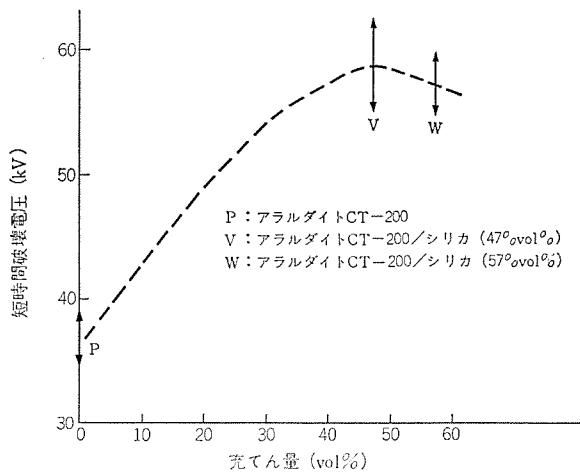


図 5.4 短時間破壊電圧 (針埋め込み電極)
Short time breakdown voltage under pin-plane electrode.

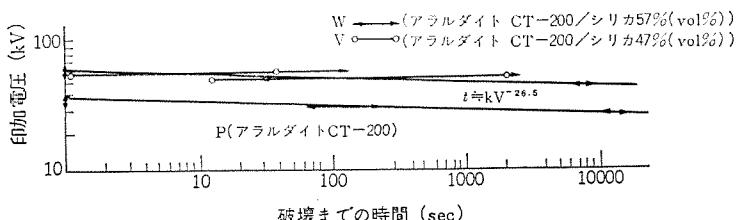


図 5.5 トリーイングの $V-t$ カーブ
 $V-t$ characteristics of treeing.

いる。また $V-t$ カーブを短時間側に外そうした値は、針状電極埋め込みでの短時間破壊電圧とよい一致を示す。

5.2 特性電圧⁽²⁾ (50 % トリー発生電圧)

図 5.2 にエピコート 828 (0.0251 mol/g × 10⁻³) の場合の特性電圧を示す。これより特性電圧は、電極間距離 2 mm で 12 kV, 5 mm で 20 kV, 10 mm で 25 kV と推定できる。針端の曲率半径を回転双曲面体と仮定した場合には、針端の電界 E_{max} は次のように表わせる⁽¹⁰⁾。

$$E_{max} = \frac{2V}{2.3r \log\left(1 + \frac{4d}{r}\right)} \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

ここで, V : 印加電圧

r : 針端曲率半径

d : 電極間距離

この式より特性電圧を電界に書き直すと、電極間距離 2 mm で、688 kV/mm, 5 mm で 966 kV/mm, 10 mm で 1112.5 kV/mm となる。この電界は、ポリエチレンにおいて電極間距離 10 mm で電圧を段階昇圧して求めたトリー発生電界 220 kV/mm⁽²⁾ (図 5.3) と比べ 3~5 倍高い。なおトリーの進展は、アクリル樹脂、ポリエチレンに比べ、遅いという報告⁽¹¹⁾もあり、エポキシ樹脂の耐トリーイング性は、ポリエチレンに比べ良好と思われる。

5.3 耐トリーイング性に及ぼす充てん剤の効果

アラルダイクト CT-200 にシリカをボリュームパーセントで 47 % および 57 % 充てんしたエポキシ樹脂について、短時間破壊電圧 (針電極埋め込み 1 kV/s 電圧上昇速度、絶縁油 2 号中) と $V-t$ 特性を求めた。この結果をそれぞれ図 5.4, 5.5 に図示する。シリカ無充てんのエポキシ樹脂の針埋め込みでの短時間破壊電圧が 34 kV~37 kV であるのに對し、充てんしたものが 55~62 kV となり 1.6 倍程度高い値を示している。また寿命 t は、電圧 V に対し、 $t \propto kV^{-26.5}$ と近似的に表わせ、電圧依存性が大きい。また充てん剤入りのものと、入っていないエポキシ樹脂の $V-t$ カーブの傾斜の値は、ほぼ同じである。なお充てん量 47 % と 57 % の差異は、ほとんど認められない。

5.4 耐トリーイング性結果のまとめ

以上、エポキシ樹脂の耐トリーイング性を $V-t$ 特性により検討した。その結果、トリーイング寿命は、耐部分放電寿命に比べ、電圧依存性が大きい。また針電極埋め込みでの短時間破壊電圧は、 $V-t$ 特性を短時間寿命側に外そうした値と比較的よい一致を示す。エポキシ樹脂のトリー発生の特性電圧は、ポリエチレンに比べ 3~5 倍程度高い。またシリカを充てんすると針電極埋め込みでの短時間破壊電圧は、無充てんのエポキシ樹脂に比べ 1.6 倍程度高くなり、 $V-t$ 特性も向上する。以上のことから、エポキシ樹脂の耐トリーイング性は、トリー発生電圧および針電極埋め込みでの短時間破壊電圧で評価できると考えられる。

以上は、針電極先端に、100 倍程度の顕微鏡観察でボイドがないう場合の検討結果である。実用的には、平均電界が低くとも、使用電圧が高い場合には、ボイドでの部分放電によるトリーの発生、進展、破壊が考えられるので、この点について更に検討する必要がある。

6. むすび

以上、エポキシ樹脂の耐部分放電性と耐トリーイング性について述べた。耐部分放電性試験結果より、一般的に有機絶縁物は同

一定程度の耐部分放電性を持ち、充てん剤を混入しても余り特性は向上しないことがわかった。しかしマイカとの複合により特性が向上する。また耐部分放電性は温度依存性を持ち、温度の上昇とともに寿命は低下する。今後寿命の厚さ効果を考慮した $V-t$ カーブ（平均電界 E —寿命 t カーブ）の確立が重要な課題である。

耐トリーイング性については、エポキシ樹脂がポリエチレンに比べ良好であることを述べた。またトリーイングの $V-t$ 特性は、電圧依存性が大きく、針状電極埋め込みでの短時間破壊電圧で耐トリーイング性を評価できると考えられる。充てん剤を入れることにより耐トリーイング性は向上する。今後、実用的には、部分放電からトリーイングが発生する場合について検討が必要であると考えられる。

最後に、この実験に際し、試料の作成および助言をして頂いた林氏（生研）、坂井、長谷川氏（伊電）他関係各位に感謝する。

参考文献

- (1) D. W. Kitchen, O. S. Pratt : A.I.E.E., 77, Pt. III, 180 (1958)
- (2) 電気学会技術報告第100号 (昭47)
- (3) 電気学会技術報告第90号 (昭44)
- (4) E. J. Macmahon : IEE Trans., Electrical Insulation, EI-3, No. 1, 3-10 (1968)
- (5) 坂田：大阪府総合科学委員会、高分子材料の放電劣化専門部会
- (6) 岡本、池田：電中研技術研究所所報, 11, No. 3 (昭39)
- (7) 平沢、平林、坂田、犬石：電学会関西支部連大 (昭46)
- (8) 宮本、柴山：電学会絶縁材料研究会資料, IM-71-19 (昭46)
- (9) 原、平林：三菱電機, 34, No. 11 (昭35)
- (10) J. H. Mason : Proc. Instn. Elect. Engrs., 98, Pt. I, 44 (1951)
- (11) 能登、吉村：電学誌, 90-4, 724 (昭45)

当社の特許

登録番号	名 称	発 明 者	登録番号	名 称	発 明 者
649959	双方向性半導体スイッチ	{蒲生 浩・川岸昭夫 市村隆彦	656701	カラー受像管螢光面焼付装置	藤村 健男
651560	アンティバックラッシュ駆動方式	遠藤義昭・石井康一	656702	半導体装置	{船川 繁・山根正熙 中田仗祐
653052	パルス欠損検出装置	斎藤 豊・林 敏弘	656703	半導体装置	{清水潤治・船川 繁 中田仗祐
653053	通信方式	太田堯久	656704	電気スイッチ	石田秀樹・寺田光彦
653054	ポリエステルアミドの製造法	西崎俊一郎・不可三 晃	656705	空中線刷ビーム抑圧方式	中司浩生
653056	熱硬化性電導樹脂組成物	草川英昭	656707	符号付与回路	遠藤義昭
653058	ケーブル事故検査装置	{宮田泰之・森 健 近藤博道	656706	追尾レーダ方式	田原清一
653061	オゾン発生器付水処理装置	田畠則一・森 貢	656708	低沸点ガスの液化装置	相良泰一
653062	電気掃除機	武井久夫	656709	温泉昇温装置	{萩原孝久・町原義太郎 三ヶ田丈彦
653064	ストリップラインサーチューレータ	中原昭次郎・折目晋啓	656710	冷温水機	渡辺 靖
653065	微量溶液分析装置	甲斐潤二郎・渡辺将代	656711	流量計	{岩本 浩・小林健三 浜崎芳治・淡野光章
653066	生鮮食料品の貯蔵方法および貯蔵装置	宇川 彰	656712	流量計	{岩本 浩・小林健三 浜崎芳治・淡野光章
653067	トンネルダイオード増幅器	{白幡 潔・武富大児 小木曾弘司	657221	インバータ装置	赤松昌彦
653068	自動副搬送波平衡調整回路	中村信弘・山口哲成	657222	給電用シミレータ	林 重雄・山田郁夫
653071	光磁気共鳴磁力計	久保高啓	657226	モールド形変圧器コイル	白神十九一・日比野正義
653072	テレビジョン受像機	高田 豊	657227	真空開閉装置	勝田久登
653079	自動アーケ溶接器	鵜飼 順・鉄 豊造	657229	気相成長膜の製造装置	{川中龍介・岩田泰昌 中島当記
653081	移相器	紅林秀都司	657220	密封型電池	泰 卓也・松岡宏昌
653082	移相器	{紅林秀都司・中原昭次郎 溝淵哲史	657223	周波数検出装置	三上一郎
653083	ストリップ線路形移相器	紅林秀都司・溝淵哲史	657224	走行材料の減速制御装置	小川裕三
653051	曲面偏光板の製造法	井手平三郎・依田 功	657225	パルス変調波搬送周波数測定方式	{田原清一・田中安敏 水野谷 徹
653055	放電加工装置	{斎藤長男・久慈陽一 小林和彦・丹羽 進	657228	導波管における可動短絡板装置	小笠原信雄・鍛治宣人
653057	ネットワークプロトコル	三上一郎・西浜 忠	657230	時刻表示装置	神本明輝
653059	エンジン制御方式	小川裕三	657231	時間分布測定装置	{壇井芳昭・梅田義明 笠尾勇夫
653060	高次姿態波減衰器	{伊藤卓司・渡辺高明 奈良武治・莉込正敏	657232	軸受冷却装置	宇都宮弓輝
653063	マイクロ波姿態変換器	伊藤卓司	657311	超音波分光器	{八島英之・細野孝雄 田淵大作
653069	クラッチモートル	横山昌弘	659088	無接触探針装置	{安東 滋・谷口一郎 宮沢生行
653070	電圧検出装置	林 伸一郎	659089	文字車の零復帰装置	神本明輝
653073	アナログ、デジタル変換方式	松村雅司	659090	真空しゃ断装置	杉尾憲一
653074	無限移相器	中原昭次郎・紅林秀都司	659091	点弧制御装置	赤松昌彦
653075	無限移相器	中原昭次郎・紅林秀都司	659080	自動利得制御回路	吉富正夫
653076	トンネルダイオード増幅器	{白幡 潔・武富大児 小木曾弘司	659081	自動溶接機	津田栄一・弘中一光
653077	長尺コイル状金属板等の巻取りまたは巻戻し装置	河原泰祐	659082	自動溶接装置	弘中一光・丸山寿一
653078	自動アーケ溶接器	鵜飼 順・鉄 豊造	659083	金属板の成形方法	{斎藤長男・荒井伸治 片寄文隆
653080	熱電気発電方式	河島 清・西 健一	659084	順次点滅回路	近藤明博
656697	アーケによる気体加熱装置	伊藤利朗・小村宏次	659085	電気スイッチ	渡辺睦夫
656698	半導体の高温加熱装置	石井 悠	659086	電気スイッチ	渡辺睦夫
656699	多重搬送制御装置	武谷勝次・小井川 茂			
656700	カラー受像管螢光面焼付装置	藤村 健男			



特許と新案

超電導合金 (特許第630234号)

発明者 小俣虎之助・田中光雄・菅原宏

この発明は重量%で26~64.5%のチタン、2.5~19.5%のタンタル、2.5~49.5%のニオブ、および0.1~5%のアルミニウムからなる超電導合金に係わり、Ti-Ta-Nb三元系合金の超電導特性を更に向上させるものであり、超電導線の生産性、経済性を著しく増大させるものである。

先に発明したTi-Ta-Nb三元系合金は、従来のNb-Zr合金およびNb-Ti合金に比べ、臨界電流密度、臨界磁界、および加工性の面で驚くべき優れた性質を有しているが、Ti-Ta-Nb三元系合金の最高の超電導特性を發揮させるためには、比較的長時間の熱処理が必要とした。

しかるに、この発明によるTi-Ta-Nb-Al四元系合金は熱処理時間が10時間程度の短い時間で、Ti-Ta-Nb三元系合金の臨界電流密度をしのぐ値が得られるため、生産性を高め、超電導線の経済的効果を一層高めることが可能となる。

この発明に使用された材料は、Ti、Ta、Nb、およびAlの各金属が種々の組成に配合され、非消耗アーカ溶解法により溶解され、冷間スウェーリングおよび冷間伸線により、直径0.25mmの細線に加工された後、各種の温度および時間で熱処理を施されたものである。この発明による合金はきわめて可鍛性に富み、中間熱処理を加えることなく断面減少比99%以上まで細線冷間加工ができる。

プラスチックQスイッチ (特許第633715号)

発明者 草川英昭・高橋健造・伊東克能

この発明はルビーレーザにおいてジャイアントパルスを発生させるときに用いるプラスチック製のQスイッチに関するものである。

従来のプラスチックQスイッチは色素を分散させている樹脂が1種類であり、その発振回数は樹脂の熱的性質により決まる。

例えば、常温で使用する場合、発振回数は30回程度に限定される。

この発明は使用温度に適した発振回数を有するプラスチックQスイッチを提供するものであり、その要旨とするところは、ガラス転移温度の大きく異なる、少なくとも2種類の樹脂の混合あるいは共重合させることにより、つくられた樹脂にQスイッチ作用をもつ色素が分散されて使用温度に対して発振回数を任意に選択し得るプラスチックQスイッチに係わる。

すなわち、プラスチックQスイッチのジャイアントパルスを発振させることのできる回数は、使用温度と樹脂ガラス転移温度との差によって決り、使用温度に対し最適の使用回数をもったプラスチックQスイッチは、少なくとも2種のガラス転移温度の異なる樹脂の混合あるいは共重合させることによってつくることができる。

このような組合せによる共重合体のガラス転移温度の変えられる範囲は、混合あるいは共重合させる2種の樹脂のガラス転移温度の差の大きいものほど著しい。例えば、ガラス転移温度105~115°Cのメタクリル酸メチル(MMA)と、ガラス転移温度-60°C~-70°Cのアクリル酸nブチル(BA)とによれば、使用温度が-80°Cより90°Cまでの広い範囲にわたって使用できるプラスチックQスイッチをつくることができる。

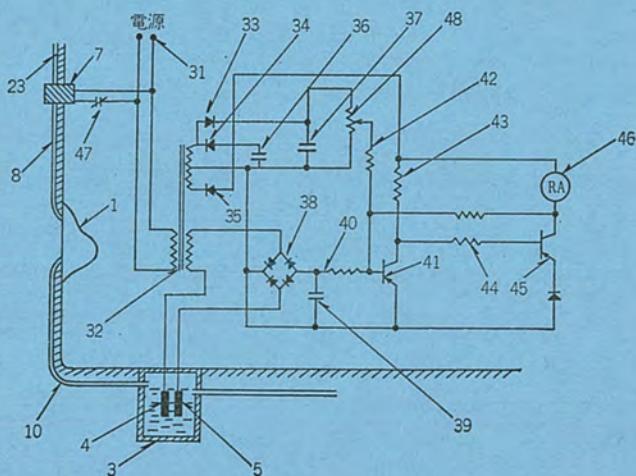
特許と新案

自動水洗装置 (実用新案第923251号)

考案者 鈴木 弘・宮崎 治・三田村 隆輝

この考案は水洗便器等の自動水洗装置に関するものである。従来汚水タンク中に一对の電極を設け、この電極を介して水洗用水道の電磁バルブを高電圧で付勢しておき、汚水タンク中の導電度の変化に応じて電磁バルブを開閉するように構成したものがあったが、汚水タンク中に高電圧が加わっていることが人体に危険であった。

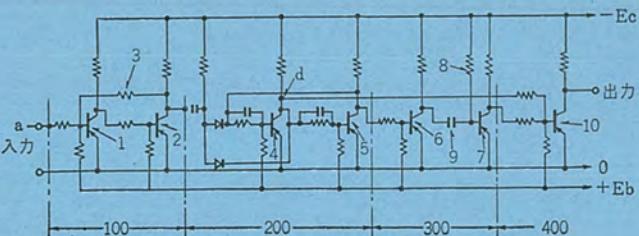
この考案はこの点を改良したもので、図について説明すると、便器(1)の汚水タンク(3)中に設けた一对の電極(4)(5)間の導電度をトランジスタ(41)(45)のシミット回路で検出し、この検出で、継電器(46)を動作させることにより、継電器(46)の接点(47)で水道(8)の電磁バルブ(7)の付勢回路を開閉するようにしたものである。したがってこの考案では、汚水の導電度検出用印加電圧を人体に危険のない低電圧にすることができ、また動作感度も十分に高くすることができる。



継電器装置 (実用新案第944365号)

考案者 吉田太郎・宮崎 治

この考案は周期的にくり返し発生する信号の周波数と基準周波数とを比較し、その大小を検知する継電器装置に関するもので、図について説明すれば、周期的に発生する入力信号を波形整形回路(100)でく(矩)形波に整形した後、2進計数回路(200)に導いてその周波数を半減する。この2進計数回路の出力の半周期は、入力信号の1周期に相当する時間信号となるので、この時間信号とこれと別に設けた時限回路(300)の基準時間信号とを比較し、いずれの信号が大きいかを検出することにより、上記基準の時間信号に対応する基準周波数と上記入力信号の周波数との大小を検知し、この検知信号を出力回路(400)で増幅して出力信号とする。この構成により、この考案では入力信号の正の半周期と負の半周期の時間が等しくない場合でも、その1周期の時間を適確に基準時間信号と比較して正確に動作する。また装置全体を無接点要素で構成できるので、その寿命も半永久的なものとすることができます。



コアメモリカードの自動検査システム

布施 明*・田中立夫*
田中千代治*・鷹取東朋*・阪尾正義**Automatic Test System of Core Memory
Printed Circuit Board

Kamakura Works

Akira Fuse・Tatsuo Tanaka・Chiyoji Tanaka
Harutomo Takatori・Masayoshi Sakao

That the direct peripheral circuit of core memory is composed of linear IC circuit is known to everybody. This necessitates to have the printed circuit board undergo dynamic tests, which have been carried out by a skilled test man by the use of a simple tester of manual operation and of an oscilloscope. However, the core memory printed circuit board has become so large and the parts equipped have turned to be of high density now, it takes to much time to execute the tests manually. Consequently there have been developed an automatic test system with MELCOM 9100-5 for the control and a digital read-out oscilloscope for A-D conversion of waveforms in use. In addition an IC clipper is to be used by the test man to improve the resolution in specifying faulty points.

1. まえがき

電子計算機に使われるコアメモリカード（注：カードとは部品を装着したプリント配線板の意）も集積回路技術の進歩により、周辺回路に使用する駆動回路およびセンサアンプなどが集積化されるとともに従来箇別部品のまま装着していた抵抗、コンデンサおよびパルストラスなどもモジュール化されてきたためコアメモリカードの実装がより高密度化されてきた。

コアメモリ直接周辺回路は周知のとおり、400~600 mA の大電流を高速でスイッチングさせる駆動回路と約 30 mV のコア出力電圧を増幅するセンサ増幅回路とが混在しており、しかもコアメモリの動作余裕度がコア出力振幅で約 10 mV、ストローブ時間で約 30 ns とシビアである。したがって周辺回路の時間軸および駆動振幅などのバラツキが問題となるためダイナミック検査をやることが必要となる。

従来のカード検査では手動の簡易形テストを使って、オシロスコープの管面上に入、出力波形を描かせ、検査員が各検査項目ごとに観測し、合否の判定を下していくため多大な検査時間を費すとともに不具合箇所が発生した場合、故障箇所の摘出にかなりの熟練度を要求される。その上さらに今回のように 4 k 語-17 ビット分のコアメモリ直接周辺回路が 1 枚の大形カード上にとう（搭）載され、かつ量産化されるに至っては検査時間の短縮による省力化および均一の製品を提供することなどのため大形コアメモリカード専用の自動検査システムを開発することが必要となった。

本カード検査システムでは 430 mm × 310 mm の大形コアメモリカードが自動的に検査できる。なお故障箇所が即座にわからない場合には添え付けの IC クリップを使い、タイプアウトされるロケーションを検査員がクリップではさむことにより故障箇所の指摘の分解能を上げている。この場合クリップで IC をはさむ作業は検査員が行なうが、その合否は計算機が行なっている。なお本検査システムは大形コアメモリカードの専用機になっているが制御用計算機、補助記憶用磁気ドラム、タイプライタ、A-D 変換用ディジタルリードアウトオシロスコープおよび電源の各部はその他のメモリカードを検査する場合にも共通に使われる。すなわちテストステーションだけを各カードごとに専用化すればよいわけで心臓部

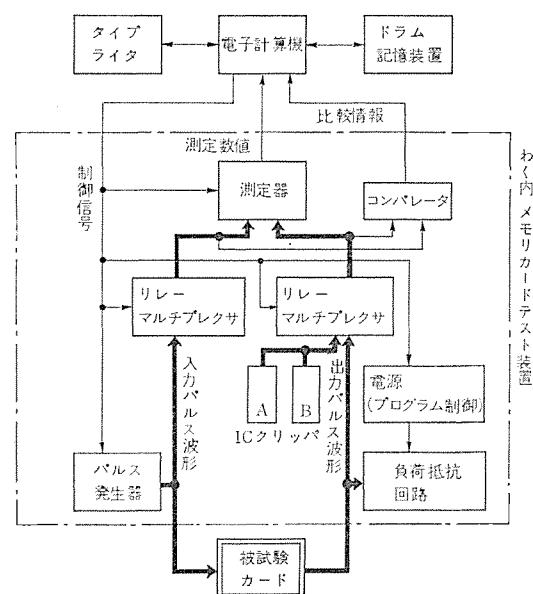
は共用できるようとしてある。

以下に今回開発した大形メモリカード自動検査システムにおけるハードウェアおよびソフトウェアについて述べる。

2. ラスタハードウェア

2.1 構成

本テストのハードウェア構成を図 2.1 のブロック図に示す。電子計算機（MELCOM 9100-5）はメモリカードテスト装置に対し必要な制御を行ない、同装置からの測定結果を読み込んで測定の合否判断を行ないメモリカードの検査をする。計算機は内部メモリ（8 kW）のほかにドラム記憶装置（256 kW）を補助としている。計算機はタイプライタ（ASR 35）に故障指摘、および検査員に操作を要求する指示事項を打出す。メモリカードテスト装置は被検査カードに必要なパルスを与える、入出力の信号波形を測定する装置である。次節で詳細に述べる。

図 2.1 ハードウェア構成
Block diagram of the test system.

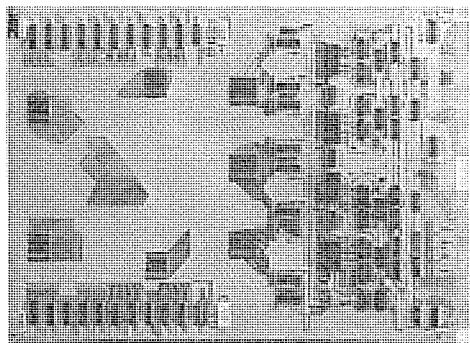


図 2.2 被検査カード
PCB under test.

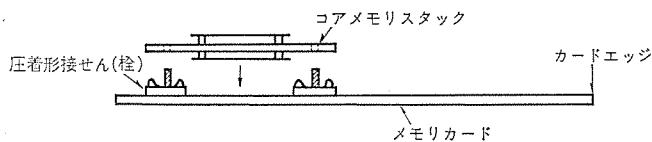


図 2.3 被検査カードとコアメモリスタックの接続
Conjunction between PCB and core memory stack.

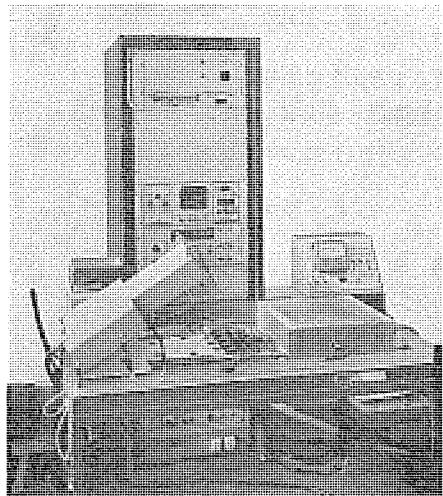


図 2.4 メモリカードテスト装置
Test device of the memory PCB tester.

2.2 メモリカードテスト装置

図 2.2 に被検査カードの写真を示す。被検査カードは縦横 430 mm × 310 mm の寸法を有し、コアメモリの直接周辺回路を実装している。コアスタックは図 2.3 に示すとく被検査カードの圧着形接栓にて接続される。ただし本テスターはコアスタックを接続する前のメモリカードに対し検査を行なう。すなわち図 2.3 のメモリカードのカードエッジおよび圧着形接栓から必要な電気接続を行ない、入出力のパルスを取出してカードの検査をする。図 2.4 にメモリカードテスト装置の写真を示す。同図の机に被検査カードを置き、ヘッダーを倒して圧着形接栓と接続する構造になっている。次に図 2.1 にもどり、メモリカードテスト装置の各部につき述べることにする。

2.2.1 パルス発生器

パルス発生器は被検査カードの 38 点の TTL 入力と 17 点のセンス入力に対し必要なパルスを供給する。パルス発生器は図 2.5 に示す(1)～(9)のパルスを発生している。38 点の TTL 入力に対して(1)～(8)の中から一種のパルスを選択し、必要な入力点に供給する。パルス選択とは独立に “H” “L” レベルを必要な入力点にセットすることも可能である。センス入力に対して同図(9)のパルス幅を持った微少振幅パルスを供給する。コアの “1” 読出信号は山形で、グランドに対

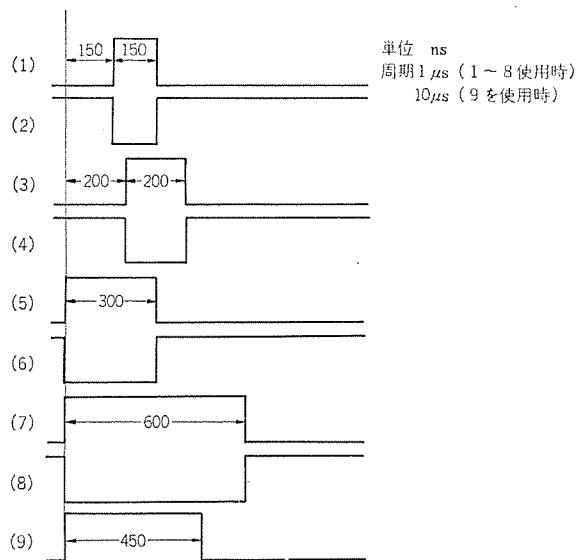


図 2.5 発生パルスの種類
Timing pulses for test.

し互いに反対極性なパルスであるが、本テスターにおいては平たんで、グランドに対し互いに反対極性なパルスをセンス入力に入れている。

2.2.2 負荷抵抗回路

負荷抵抗回路は被検査カードのインヒビットドライブ回路、XY ドライブ回路に負荷抵抗を接続することにより構成される。メモリカードの実使用時はコアスタックと接続されており、上記ドライブ回路の負荷は抵抗分のほかに多少のインダクタンス分、キャパシタンス分が存在するが、本テスターにおいては単純な抵抗分のみとしている。

2.2.3 リレーマルチプレクサ

リレーマルチプレクサは多数の入力測定点、出力測定点からそれぞれ 1 点を選択し、それらの信号波形を後の項で述べる測定器に伝送する。入力測定点は 74 点、出力測定点は 112 点ある。測定点の選択には高信頼度・高速動作・小形なマイクロリードリレーを使用している。すべての信号波形の伝送には同軸ケーブルを使用し、伝送特性（周波数特性、ノイズ混入防止など）を良くして信号波形を忠実に伝えるようにしている。同軸ケーブルは外径の小さなものを使用し、装置の小型化を計っている。

IC クリップは被検査カード内の必要な IC (DIP 形のみ) からの信号波形を取り出し、故障指摘を詳しく行なうために使っている。IC クリップ B はセンサアンプ IC をはさみ、IC クリップ A はその他の IC をはさむため使い分けしている。

信号波形の伝送には図 2.6 に示す 4 種の伝送要素で構成している。同図(a)は入力インピーダンス 750Ω であり、図内の式に示すとく出力振幅を入力振幅の 0.1 倍にして伝送する。これはロジック信号波形などの伝送に使用する。同図(b)は入力端にエミッタフォロワートランジスタを使用し、入力インピーダンスを数 $k\Omega$ に上げている。式に示すとく出力振幅を入力振幅の 0.9 倍にして伝送する。これは微少振幅であるセンス入力信号波形の伝送の際に用いる。同図(c)は 1 本の線に流れる電流波形を電圧波形に変換して伝送する。電圧・電流変換比は $2 \text{ mA}/\text{mV}$ であり、図内の式に示す電圧を発生する。この伝送要素はインヒビット電流の測定に用いる。同図(d)はすでに述べた同図(a)の伝送要素を用い、抵抗に流れる電流を測定している。この伝送要素は XY ドライブ回路のソース出力信号波形の伝送に用いる。以上の伝送要素において入力インピーダンスを上げることに努め、

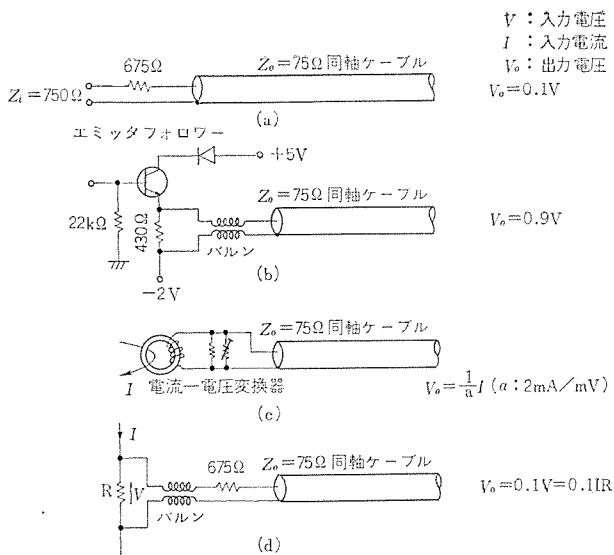


図 2.6 伝送要素

Transmision elements to measurement instrument.

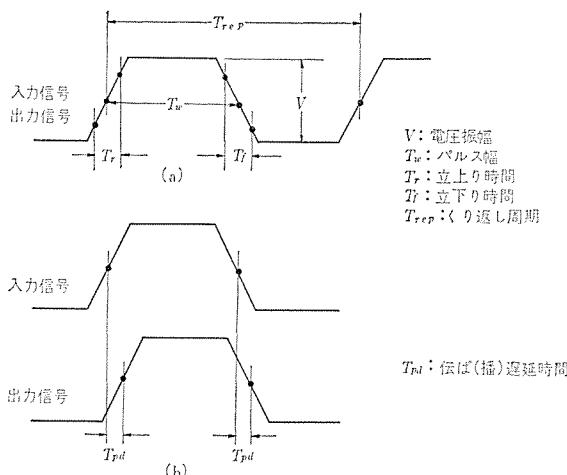


図 2.7 測定項目
Measuring parameters of the tester.

信号波形を取出す際の負荷効果を小さくしている。

2.2.4 測定器

測定器は 2 個のリーマルチプレクサから伝えられた信号に対し、図 2.7 に示す各測定を行なう。同図(a)に示すごとく 1 個の波形に対し電圧振幅、パルス幅、立上り時間、立下り時間、くり返し周期を測定することができ、同図(b)に示すごとく 2 個の波形の間の伝ば(播)遅延時間を測定することができる。これらの測定の制御はすべて計算機により行なわれる。測定器は測定量を数値化する機能(AD 変換機能)を持っており、その数値を計算機に送る。測定器はリードアウトオシロスコープとデジタルユニットからなり、測定する波形をグラウンド上で見ることができるので、プログラムデバッグの際などに各測定が正しく行なわれるか否かを目で確認することができる。ただし通常の検査では測定を高速に進めるので、グラウンド上の波形を見ることはない。測定器には次の製品を使用している。

- (1) リードアウトオシロスコープ
R 568 (3S6・3T6・S3A×2 を含む)
- (2) デジタルユニット
R 230

2.2.5 コンパレータ

前項で述べた測定器により信号波形の振幅を測定したとき、振幅

が全くない場合がある。このときの直流レベルがあるしきい(閾)値より高いか、あるいは低いかを判別して検査を進める必要がある。この目的のためにコンパレータを使用する。判別すべきところの直流レベルがあるしきい値より高い場合を“1”，反対に低い場合を“0”として計算機に送る。次のしきい値を持ったコンパレータを使用している。

- (1) しきい値 0.8 V (ロジック信号など)
- (2) しきい値 1.3 V (インヒビットドライブ回路)
- (3) しきい値 80 mV (センスアンプ入力回路)
- (4) しきい値 10 mV (センスアンプ V_{REF} 電圧)

2.3 検査方式

このテスターはもっぱらダイナミック検査を行なうものである。すなわちすでに示した図 2.7 の項目につき信号波形を測定して検査を行なう。メモリカードは正確な動作を保証する必要があるためドライブ電流の流れ始めるまでの時間、立上り時間、あるいはセンスアンプのセンス出力が出るまでの時間などいろいろな時間的規格が定められている。1 枚のメモリカードがこれらの規格に合致していることを検査するためにもダイナミック検査が必要である。

被検査カードに対してまず多数のブロックに分け、各ブロックごとに検査を行なっていく。各ブロックに対し入力信号を与え、入出力信号の検査を行なう。全ブロックが規格を満足しているならばそのカードには故障がないと判断し、1 枚のカードの検査を終了する。ある 1 個のブロックで入出力信号の検査が規格を満足しなかった場合、そのブロック内に何らかの故障が存在するものと判断する。たとえば出力信号振幅が皆無な場合、そのブロック内のいずれかの部品が非動作な故障を起こしているか、カードのプリントパターンがグランドその他とはなんぞブリッジしている可能性がある。また入力信号に対し出力信号の伝ば遅延時間が大きすぎる場合、そのブロック内の半導体(ゲート IC, リニア IC, トランジスタ)に伝ば遅延時間の大きな物が含まれているか、あるいはその他の電気部品の故障による影響が考えられる。いずれにしても 1 個のブロックの入出力信号の検査からそのブロック内に故障が存在するかどうかがわかる。

1 個のブロック内に故障が存在することを知った場合、さらにブロック内の途中の信号をいくつか取出し、故障の存在する範囲をせばめるようとする。その手段としては IC クリップを使用し、IC のピンの中から必要なピンの信号を取出してさらに検査をする。

故障しては電気部品の故障とはなんぞブリッジによる故障とがある。しかしながら本テスターにおける信号波形のみの検査ではなんぞブリッジの故障を指摘することはできず、なんぞブリッジの結果現われた信号波形の検査から、いずれかの電気部品の故障として故障指摘がなされる。検査員がカードを修理する際、まず故障指摘された個所に関係するプリントパターンに対してはなんぞブリッジがあるかどうかを目視検査をし、なんぞブリッジがないならば、次に電気部品の修理を行なう必要がある。

本テスターの被検査カードに使用されている部品としてはゲート IC, リニア IC, トランジスタ IC (トランジスタ数個をモールドしたものの)、ダイオード、抵抗、コンデンサがある。本テスターではゲート IC の故障に対して完全に 1 ゲートの故障指摘をすることができ、その他の部品の故障に対して 1 個あるいは 2 ~ 4 個の故障指摘が行なえる。

2.4 検査方法

図 2.8 にカードの検査フローを示す。

A: カード組立を行なった後、部品取付けが正しいこと、なんぞ

付後のはんだ ブリッジがないことを目視検査する。

B : メモリカードテスターにてカード検査を行なう。カード内に故障がなければCに進む。故障がある場合、テスターは故障指摘をタイプライタに打出す。このときDに進む。

C : カード内に故障がなく、カード検査を終了する。実際に故障していた部品およびはんだ ブリッジに対し記録をつける。当社内で開発してある統計処理プログラムを使用し、これらの記録のバッチ統計処理を行なう。

D : タイプライタに打出された故障指摘から、まず指摘された電気部品に関係したプリントパターンにはんだ ブリッジがないかを目視検査を行なう。はんだ ブリッジがあればそれを除去した後再びカード検査にかける。はんだ ブリッジがなければ指摘された電気部品の交換を行なう。指摘された電気部品が複数個の場合、可能性の大きいと思われる部品の交換を行なった後再びカード検査にかける。

Bのカード検査の段階でタイプライタに打出す事柄は2種ある。

一つは検査を進める際検査員に操作を要求する指示事項であり、他の一つは故障指摘である。指示事項とは被検査カード内に実装されているスイッチの切換えの指示、およびICクリップをはさむべき個

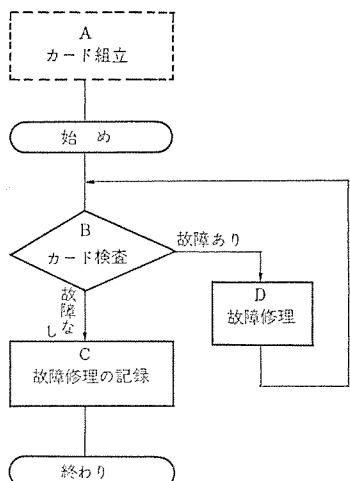


図 2.8 検査フロー
Inspecting flow on memory PCB.

表 2.1 メモリカードテスター性能
Specification of the memory card tester.

項目	性能
入力信号	ロジック入力: TTL "H" "L" レベル および8種のパルス幅から1種(図2.5参照) センス入力: 0~50 mV(半固定)
測定点	入力側: 74点 出力側: 112点
使用測定器	リードアウトスコープ R568 (3S6, 3T6, S3A×2含む) デジタルユニット R230 ソニーテクトロニクス社製
測定レンジ	5 mV/DIV~200 mV/DIV×8 DIV 抵抗分剖法により最大 20 Vまでの電圧を測定 10 ns/DIV~500 ms/DIV×10 DIV
測定器精度	測定値×(±3%) ±1カウント
測定速度	1測定当り 20 ms以下 (10 ns/DIV~100 ns/DIV)
コンバータ	0.8 V±0.2 V (ロジック信号など) 80 mV±20 mV (センサアンプ入力回路) 10 mV±2 mV (センサアンプ V _{REF} 電圧) 1.3 V±2 V (インヒビットドライブ回路)
被検査用電源	+5 V (0, ±5%可変) -5 V (0, ±5%可変) +20 V (10~22 V, 2 Vおきにプログラム可能)

所の指示の2項である。指示事項が打出された場合、検査員が指示事項に従って操作をした後、再スタートスイッチを押せば計算機は検査を続ける。ICクリップを使用する場合でも操作は簡単であり、打出された個所のICをはさめばよい。その後ICピンから信号を取出すリレー選択その他の制御は自動的に行なわれる。

本テスターの電気的性能を表2.1に示す。

3. テスター ソフトウェア

3.1 テスター オペレーティング システム

テスターのブロック体系は図3.1に示されるような構成をし、テスター プログラムを除いた部分をテスター オペレーティング システムと総称している。オペレーティング システムの機能概略は以下のとおりである。

3.1.1 システム スーパーバイザ

MELCOM 9100-5のオペレーティング システムをベースにして、テスターに最適になるように編成し、またテストプログラムの作成を容易にすべく、数多くのマクロ命令(30種類)を追加したものであり、本オペレーティング システムの特長は、このマクロ命令にある。

(1) マクロ命令の一例

一つのテストを行なうためのマクロ命令の一つに次のような形式のものが用意されている。プログラム言語は、M 9100-5のアセンブラー言語である。

BAL	(TEST 1)
AC	A
AC	B
AC	C
AC	D
AC	E
AC	F

A : テスト ナンバーがストアされているアドレス
B : テストを行なうために入力に与えるデータアドレス
C : 測定器に入力波形を描かせるために、入力ピンにプローブを接続するためのデータアドレス
D : 測定器に出力波形を描かせるために、出力ピンにプローブを接続するためのデータアドレス
E : 測定器に振幅測定・時間測定に関する情報を与えるデータアドレス

F : 測定データをチェックするための比較データアドレス
G : 測定データが異常な場合のエラー処理アドレス

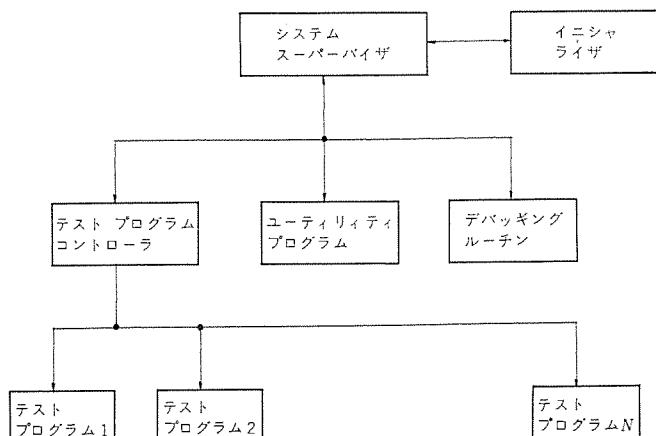


図 3.1 ソフトウェアのブロック図
Block diagram of software.

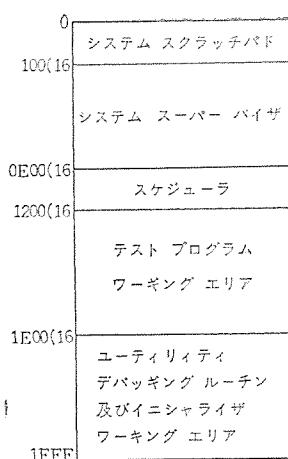


図 3.2 オペレーティングシステムメモリマップ
Memory map of operating system

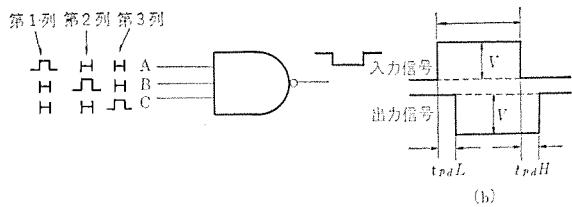


図 3.3 ゲートロジックの検査
Test of gate logic.

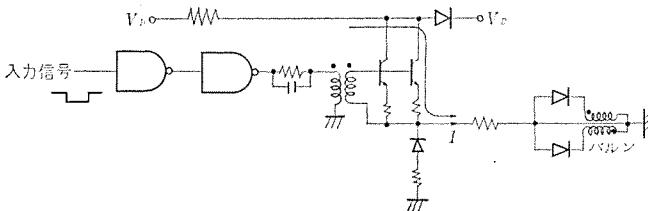


図 3.4 インヒビットドライブ回路の検査
Test of inhibit drive circuit.

3.1.2 ユーティリティプログラム

このプログラムは、M 9100-5 用に開発されたエクステンディド ユーティリティ プログラムをそのまま使用していて機能としては、以下のようなものがある。

- (1) メモリ (コアおよび ドラムメモリ) の内容の読み出し、および変更
- (2) 紙テープのメモリへのロード
- (3) プログラムのスーパー バイザへの登録および消去
- (4) チェック サムの計算

3.1.3 デバッギング ルーチン

このプログラムは、テストプログラムのデバッギングを容易にするためのもので、システム タイプライタを手段として次のような機能を有している。

- (1) プログラムのトレース

プログラムをシステム タイプライタで指定されたアドレス部分を実行し、実行後のアキュムレータ、プログラム レジスタ、ステータス レジスタ、および指定されたアドレスの内容をシステム タイプライタにプリントする。

- (2) コアメモリの内容の変更、およびプリント

- (3) アキュムレータの内容の変更

3.1.4 イニシャライザ

計算機の電源を投入後、テストシステムが立上がるよう ドラムメモリよりスーパー バイザおよび テストプログラム コントローラをコアメモリ上にロードするためのプログラムである。またシステムが動作中に何らかのエラ

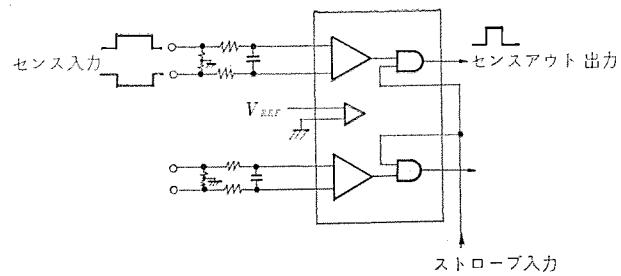


図 3.5 センスアンプ回路の検査
Test of sense amplifier circuit.

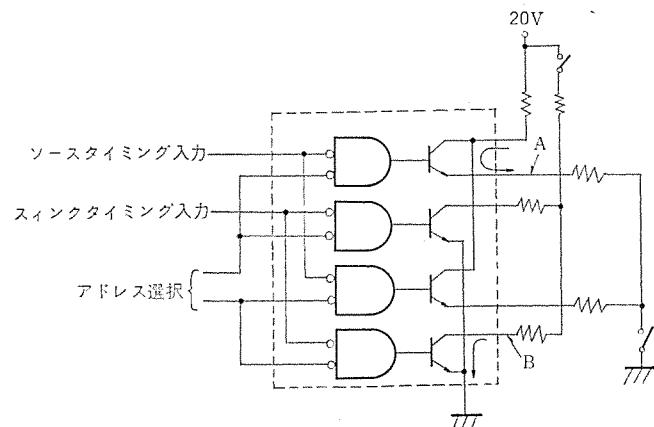


図 3.6 XY ドライブ回路の検査
Test of XY drive circuit.

が発生し、テストを続行することができない場合には、このプログラムにより再びスーパー バイザ以下、コア常駐のプログラムを、ドラムよりロードしてイニシャル状態にする。コア常駐のプログラムが、コア上に呼び出されると、システムの準備は完了し、あとは検査員の指示を待つだけとなる。

3.1.5 テストプログラム コントローラ

このプログラムは、コアメモリの容量の関係で、いくつかに分割された、テストプログラムの管理するものであり、スケジューラの役目を果している。テスト準備が完了し、検査員がテストスタートのスイッチを押すと、このプログラムが走り出し、実行すべき テストプログラムが何であるかを判断し、必要なデータをそろえてからスーパー バイザにそのプログラムの実行を要求する。

なお本 テスターのオペレーティングシステムのコアメモリマップは、図 3.2 のようになっている。

3.2 テストプログラム

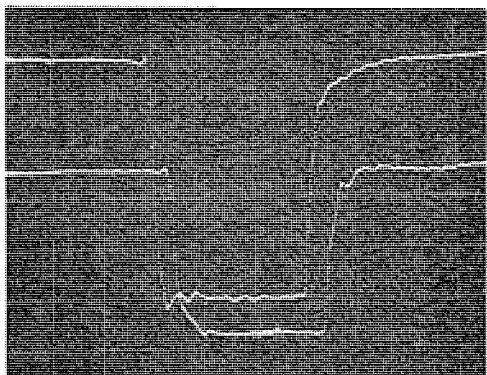
メモリカードの テストプログラムは次の分割になっている。

- (1) タイミング回路
- (2) インヒビットドライブ回路
- (3) センスアンプ回路
- (4) XY ドライブ回路
 - (a) ソース+タイミング
 - (b) スインク+タイミング
 - (c) ソース+デコード
 - (d) スインク+デコード

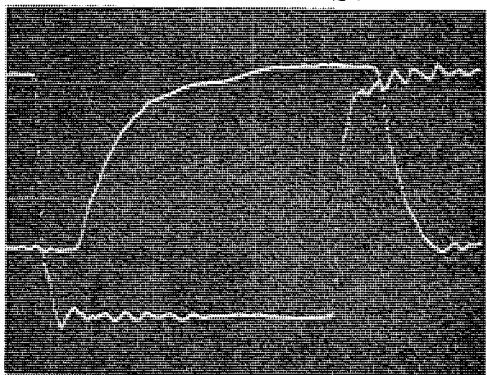
以下順に各 テストプログラムにつき述べることにする。

3.2.1 タイミング回路

この回路はゲートロジックのみからなり、カードの選択および外部からのタイミング信号をカードの選択に応じてカード内に供給する回路である。ゲートロジックの検査は次のように行なう。図 3.3 (a) の第 1



(a) ICクリッパーからの信号



(b) インヒビット電流

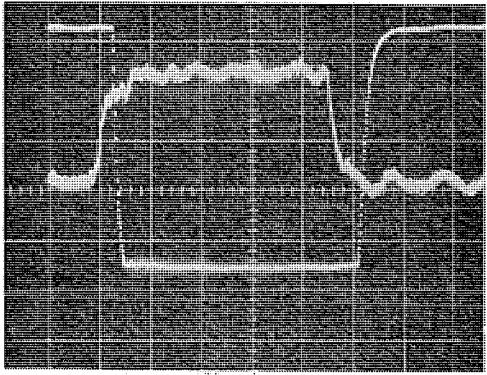


図 3.7 信号波形
Signal waves.

列の入力を与え、(b)に示すような検査を行なう。順次同図(a)の第2列、第3列の入力組合せに従って検査をする。

3.2.2 インヒビット ドライブ回路

この回路はコアメモリに“0”情報を書き込む際インヒビット電流を流す回路である。図3.4に示す回路で、入力信号に対するインヒビット電流を調べ、各測定から故障があればさらにブロック内の検査を行ない故障指摘を行なう。

3.2.3 センスアンプ回路

この回路はコアメモリからの読出信号の“1”“0”的判別をする回路である。検査に当っては平たんなパルスをセンス入力とする。図3.5に示す回路に対しストローブ入力を“H”とおき、センス入力信号に対するセンスアウト信号の検査を行なう。次にストローブ入力にパルスを与える、ストローブ入力に対するセンスアウト信号の検査を行なう。このときセンス入力にも前と同じパルスが入っている。

3.2.4 XY ドライブ回路

この回路はコアメモリの中から一つのアドレスを選択し、“1”“0”情報を記憶したり、あるいはそこから記憶情報を読出すためのドライバ回路である。図3.6に検査回路を示す。同図点Aのごとくトランジスタから電流が流れ出す出力をソース出力という。同図点Bのごとくトランジスタに流れ込む出力をシンク出力という。選択するアドレスを“L”レベルにおきソースタイミング入力にパルスを入れ、ソース出力の信号波形を検査する。各ソース出力に対し検査を行なう。次に選択するアドレスを“L”レベルにおきシンクタイミング入力にパルスを入れ、シンク信号波形を検査する。各シンク出力に対し検査を行なう。次にソースタイミング入力あるいはシンクタイミング入力を“L”とおき、アドレス選択を行なうデコーダの入力にパルスを与える、そのパルスの入力からソースあるいはシンク出力までの伝ば遅延時間を測定する。

図3.7に波形写真を示す。同図(a)はタイミング回路において入力信号とICクリッパーAでゲートロジックの信号を取出したものである。同図(b)はインヒビット回路の入力信号と出力電流の信号を取出したものである。同図(c)はセンス入力信号とセンスアウト出力信号である。

図3.8に故障指摘をした場合の例を示す。同図(a)は振幅がなかった場合であり、(b)は伝ば遅延時間が大きかった場合である。ともに最後の所で故障箇所を示している。

3.3 保守プログラム

テストが正常に動作するかどうかを確認するうえで保守プログラムは不可欠なものである。次のようなものがある。

(1) 測定器に対するもの

- (2) パルス発生器・入力信号側リレーマルチプレクサに対するもの
- (3) 出力側リレーマルチプレクサに対するもの

(1)は測定器に対する制御を分解し、個々に制御を与え、ブラン管上の変化が正しいことを確認する。(2)は個々の入力点に対しパルスを与え、信号の振幅などの測定が正しく行なわれることを確認す

```

SW TSU01-04 SET "0"
**SET CLP-A IC T04
T: 0002 0003. MV< 0240. MV
COMP-2 "H"
**SET CLP-A IC T05
T: 0035 0003. MV< 0240. MV
COMP-2 "L"
ERR IC S06 06

```

(a)

```

T: A402 0.146 US> 0.050 US
**SET CLP-A IC S02
T: A426 .1042 US> .0300 US
ERR IC T02 08

```

(b)

図 3.8 故障指摘例
Examples of fault location.

る。(3)は検査プログラムで代用し、備え付けのカードを正しく検査できればよい。

3.4 検査時間と省力効果

カードが正常である場合の計算機の正味の検査時間は2分程度の短時間であるが、カードの着脱、故障があった場合の故障指摘およびその後の処理を考慮すれば、1回の検査に平均10分かかる。1枚のカードに対し計算機を使用して3回の検査が必要であるとして、約30分で1枚のカードの検査が終了する。これに対し、従来の人手で検査する方法では1枚のカード検査に約5時間かかると予想され、本テスタでは約10倍の検査のスピードアップとなるので大幅な省力合理化が期待される。

4. む す び

以上大形メモリカード自動検査システムについて記述した。近年のカードの実装の高密度化により、メモリカードの1枚当たりの検査個所もふえている。省力化の意味も含めカード検査を自動化する必要があるが、これを時間測定などのダイレクト検査を行なう一つの方法として実現したものであり、自動化の効果が早期に現れることが期待される。現在本自動検査システムの共通部分を有効に活用するため、他のコアメモリカードおよびそれに使用するリニアIC部品の検査が行なえる新たなテストステーションを鋭意開発中である。

最後に本テスタの開発にご協力下さった関係各位に感謝する。

プロセス制御用問題向き言語システム MDSS

首藤 勝*・居原田 邦男*
五十嵐 真**・中平 泰男**

MDSS—A Problem Oriented Programming System for Process Control

Kamakura Works Masaru Sudô・Kunio Iharada
Head Office Makoto Igarashi・Taio Nakahira

As a means for reducing programming labor in the application of industrial computers, high level programming languages are coming into recent use. These languages are divided into two kinds: ones are procedural languages for general use such as FORTRAN and the others are problem oriented languages employed for programming simply by limiting the applicable range through the expression closely related to the object. MDSS is a problem oriented language system for the process control developed for use with MELCOM 350-30/30F. It furnishes with two characteristic languages; one is a fill-in-the blank form for the process data acquisition and mentioning and the other is a block diagram oriented form for the control operation processing. This report describes, in reference to the composition of MDSS, the outlines viewed from two angles of the language and execution system.

1. まえがき

プロセス制御を中心とする工業応用では、はん(汎)用に比して計算機プログラムの実行時間およびメモリ効率にきびしきが要求される関係上、プログラムの作成段階では、もっぱらアセンブラレベルの言語が使用されてきたことは周知のとおりである。

最近になって、計算機制御の応用分野の多様化と制御内容の高度化、プログラム量の増大と人件費の高騰に伴い、プログラム作成の労力と時間の軽減、プログラムの維持、管理およびドキュメンテーションの合理化などに関する問題が表面化してきた。これらの問題を解決する手段として、アセンブラ言語より高いレベルにあるプログラミング言語を採用する動きが多くなってきている。

高レベルのプログラミング言語といえば、以前はFORTRANを代表とするいわゆるコンパイラ言語を指していたが、最近では、それよりさらに適用対象に密着した表現法で簡単にプログラムが作れる言語が開発され、上述の要請に応えるものとして使われ始めている。これらを“問題向き言語”と呼びコンパイラ言語と区別し、コンパイラ言語のことをその性格から“手続き向き言語”と呼ぶ習慣が定着しつつある。

これら2種の高レベルプログラミング言語はそれぞれ異なった特長をもつため、その性格、実用上の要求に応じて適宜使い分けすることが好ましい。手続き向き言語は、科学技術計算(FORTRAN)とか事務経営計算(COBOL)あるいは工業応用(拡張形FORTRAN)など、ある応用分野でははん用的に使用でき、標準化、教育訓練などの見地からもかなりの効果を上げている。反面、FORTRANのような言語でも、それを用いて高度なプログラムを書くことは現場のプラント制御技術者にとっては一種の特別な訓練を要する特別な仕事であるという現実は無視できない。問題向き言語はこのような“プログラミング技術と応用技術の間のギャップ”を埋めるために出現したもので、現場の制御技術者が扱う技術機能を日常使用する専門用語に近い形で表わし、“プログラミングのための必要悪”といえる諸手続や概念の習熟をできるだけ排除することを基本として構成される。従

って問題向き言語はその適用対象がある程度制限されるが使い方が簡単になり、またドキュメント性も最高度に保たれる。

工業用中形計算機MELCOM 350-30/30F用としては、手続き向き言語CONFORM-IV(別稿参照)と問題向き言語MDSS(MELCOM DDC & SUPERVISORY CONTROL SYSTEM)とを備え、両者の使い分けあるいは併用によって実行効率の高いプログラムを高能率で作成し、かつそのドキュメント保持の面でも効果を上げることが期待される。

本報告では問題向き言語MDSSについて、その言語とシステム構成の概要を記述する。

2. プロセス計算機制御の基本概念

2.1 プロセス制御における計算機処理機能

プロセス制御における計算機の処理機能のとらえ方として次のようなものがある。すなわち、計算機機能を階層的にとらえた、直接制御機能(対象はプロセスの一部分)、最適制御機能(対象はプロセス全体)、総合管理機能(対象は工場全体)といった分類方法やオンライン運転時の機能を主体としたデータ収集処理機能、プロセス監視機能、DDC(直接デジタル制御、従来のアナログ調節計の代替)、スーパーバイザリ制御機能(DDCまたは調節計に対する設定値を与える)、シーケンス制御機能、人間・計算機コミュニケーション機能、他計算機との通信機能などといった分類方法である。

一方、これらの機能を実現するためのソフトウェア作成の立場からながめると、要求される制御機能の定義方法、プログラムの記述言語、プログラムデバッグの容易さ、修正変更の容易さ、保守性などが問題となってくる。

われわれは具体的な計算機制御システムの設計、製作の立場からこれらの機能を図2.1に示すように

- (1) プロセス入出力処理
- (2) 制御計算処理

の二つに分類し、それら相互の仲介をデータファイルによって行なう形を基本とした。

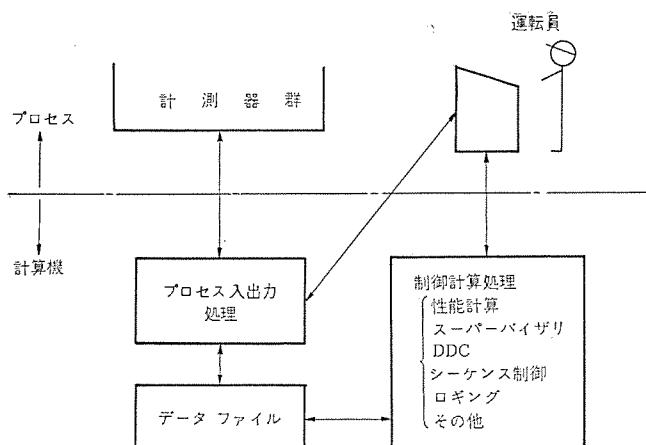


図 2.1 プロセス制御における計算機処理機能
Functions in process computer control.

2.2 プログラムの基本形態

プロセス入出力処理にはプロセスデータを入力し、制御計算処理で使用できる形式に変換し、各種の限界値と比較して妥当性を確認したうえで所定のデータファイルに格納する入力処理と、制御計算の結果として得られ、出力ファイルに格納されているデータを要求に応じてプロセス側へ出力する出力機能とがある。一つのプラントを制御するシステム全体としては、これら入出力点数が多く、また各種データのやり取りは周期的にデータをスキャンする操作を伴うかあるいは各種イベントの連鎖に基づいて組織的に行なわれる。これらの操作は個々には複雑な制御を伴うが、全体として外見上は共通的な処理が多いため、このプロセス入出力部分を制御計算部分と分離し、サブシステムとしてまとめると全体のプログラム構成が簡明になって好都合が多い。

制御計算処理機能部分では、基本的にはプロセス入力処理によって変換格納されたデータを使用して制御のアルゴリズムに応じた各種の計算を行ない、プロセスへの制御出力データを算出し、出力機能部分へ渡す。この処理は適用対象および制御の方式などにより多様性に富み、適当なプログラミング言語を用いて個々に書かれる。

プロセス計算機制御では、このように入出力と内部処理を機能部分として分離し、全体をタイミングメカニズムあるいはイベントの連鎖によって管理する形をとるのが一般的である。もちろんすべてのプロセス制御プログラムが計算手続きと入出力の明確な分離を前提としているわけではなく、ローカルな制御と外界との情報リンクに伴う入出力は計算手続きに含まれることもあるし、プラントへの出力が手続きプログラムで処理されることもある。

3. MDSS の概要

3.1 概要

MDSS では前述の二つの計算機処理機能を実現するため、入出力処理機能に対しては「プロセスデータモニタシステム」、制御計算処理機能に対しては「DDCシステム」が用意されており、はん用手続き向き言語「CONFORMシステム」も包含的に使用することを可能にしている。プロセスデータモニタシステムは取扱うデータの種類（アナログ値、オン・オフ値）に応じてさらに「アナログスキャンシステム」と「デジタルスキャンシステム」に分けられる。以上の各システムはいずれも対象とする処理内容に適合したプログラミング言語を提供するためにそれぞれ独立したサブシステムとして構成されているが、いずれも MELCOM 350-30/30F 標準オペレーティングシステム (TSOS) のもとで動作し、互いに有機的

に結合して目的とする計算機制御システムを実現する。

ここでは「プロセスデータモニタシステム」および「DDCシステム」の構成について述べることにし、「CONFORMシステム」については稿を改めて報告する。

3.2 MDSS の構成要素とオペレーティングシステムの関係

MDSS は前述のように複数のサブシステムからなり、全体として一つのシステムを構成する。これらのサブシステムに対応してそれぞれの言語、言語プロセッサ、実行時プログラム群およびユーティリティプログラム

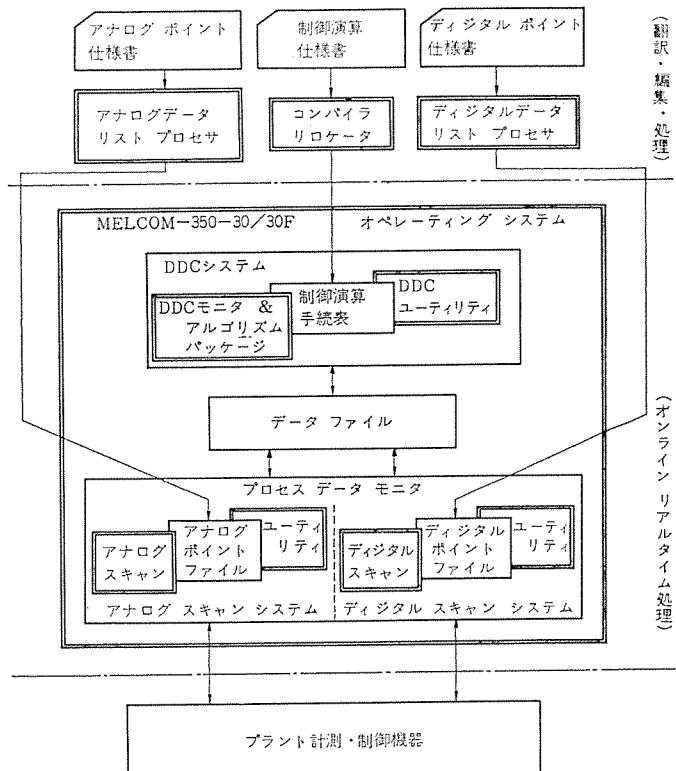


図 3.1 MDSS 構成要素の関連
Software configuration of MDSS.

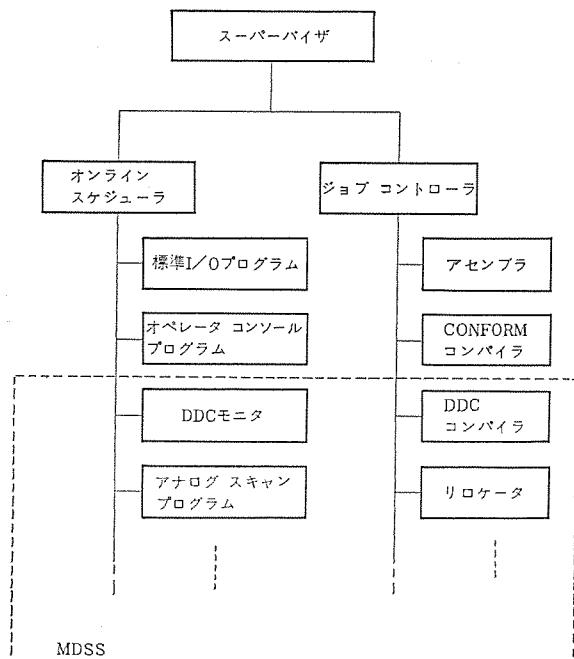


図 3.2 MELCOM 350-30/30F オペレーティングシステム
と MDSS の関係
Construction of MELCOM 350-30/30F operating system.

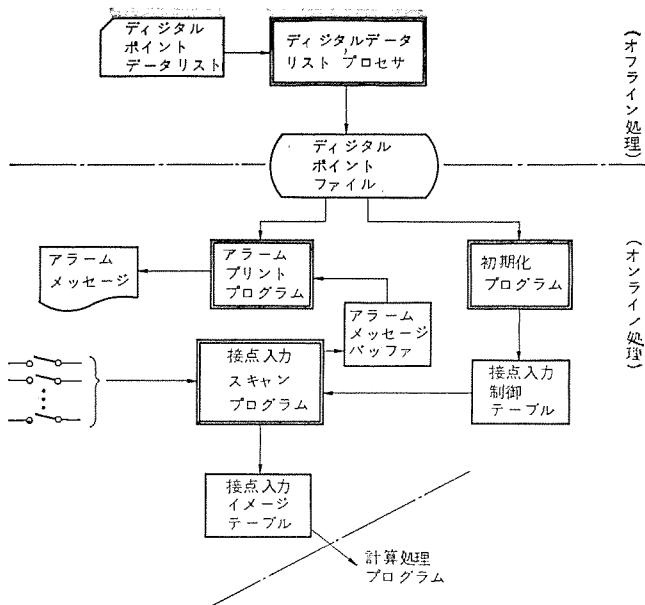


図 4.5 接点入力およびアラームスキャンの構成
Configuration of contact closure input and alarm scan.

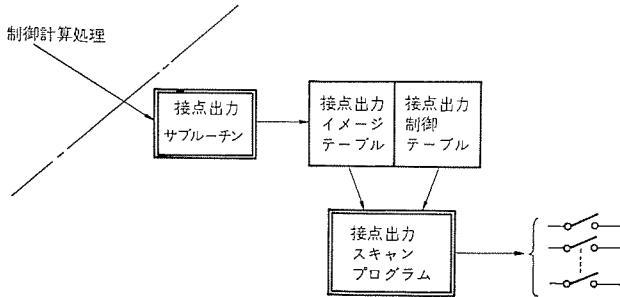


図 4.6 接点出力スキャンの構成
Configuration of contact closure output scan.

に応じて、これが使用される。

4.2.4 接点出力スキャン

接点出力スキャンに関する構成要素の関連を図 4.6 に示す。制御計算処理からの出力データが接点出力サブルーチンを介して出力イメージテーブル上に置かれると同時に、該当する接点グループ（16 点／グループ）の出力要求フラグがセットされる。接点出力スキャンプログラムは別のタイミングで起動されており、出力要求フラグに基づいて接点出力処理を行なう。接点出力サブルーチンは出力データの変換法（ON に対し“1”を出力するか、“0”を出力するかなど）に従って幾つかの種類が用意されている。

4.3 DDC システム

4.3.1 DDC 言語

MDSS の中の制御計算処理に関する部分を DDC システムと呼び、そこで用いる言語を DDC 言語と呼ぶ。一般的にはプログラミング言語の定形化を進める程、プログラムの作成効率が向上するが、この部分では多様性をもった処理が対象となるため、入出力部分程には表現形式の定形化は適さない。言語をどの程度まで定形化するかは、適用対象の広さ、言語の簡易化の要求の強さによって決められる。

DDC 言語では DDC を中心とした応用を想定しているとはいえ、ある程度の適用範囲を保つために、処理手続きのモジュール化、標準化から始め、それらを呼ぶための指定、その中で使用するパラメータの指定を骨格とした形の定形化を図っている。DDC や SPC を中心とする応用では、論理ブロック図に現われるブロックと対応する程

度の大きさで処理機能をまとめモジュール化することで、ブロック線図からのプログラム作成が容易になる。もちろん言語中には、パッケージ化された処理機能の呼出しステートメントを定義する機能が備えられているので、言語の適用面を拡張することも可能である。

以下に DDC 言語の概要について述べる。

(1) 全体の構造

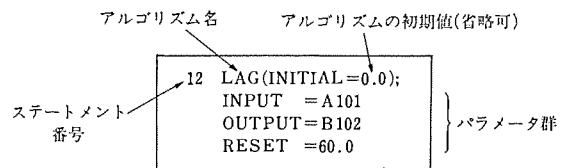
DDC プログラムの言語構造は大きく分けて、「MACRO DEFINITION」、「PROGRAM DECLARATION」、「CONTROL CALCULATION」の三つの部分からなる。前二者では各種の定義、宣言を記述し、実際の制御演算は CONTROL CALCULATION 部で記述する。

(2) PROGRAM DECLARATION

表 4.1 に示す宣言ステートメントを用いてプログラム名、変数名のタイプ、初期値などを指定する。初期値指定のある変数名は計算機システムの運転開始時にその値が初期値として設定される。

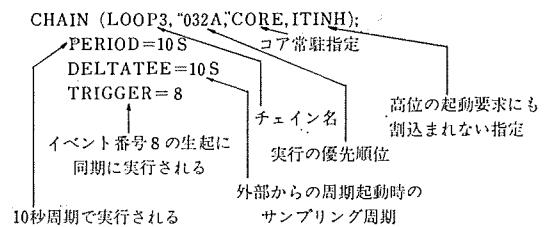
(3) CONTROL CALCULATION

制御演算の本文を、パッケージ化された処理機能を基本単位として記述する。それらをアルゴリズムステートメントと呼び、ステートメント番号、アルゴリズム名およびいくつかのパラメータで構成する。パラメータの表現は単にデータをリストとして並べる方法ではなく、その説明句を並記した形をとる。これによりドキュメンテーションの向上が図れ、またパラメータ変更時などの識別情報としてこれを利用することができる。例をば一次遅れアルゴリズムは次のように表現される。



MDSS では DDC で用いられる典型的な制御アルゴリズムについて表 4.2 に示すような一通りの標準アルゴリズムステートメントが用意されている。

DDC プログラムの作成は制御計算ブロック線図上の各ブロックの接続状況に対応して、パラメータを選びながらアルゴリズムステートメントを並べて行けばよい。このようにして構成された一つの処理単位をチェインと呼び、実行上の取扱い単位となる。CONTROL CALCULATION 部には複数個のチェインを記述することができる。各チェインの先頭には実行の諸条件を規定する CHAIN ステートメントを置く。これは例えば次のように書く。



DDC プログラムの例として、PI コントローラを用いた典型的な定値制御ループのブロック線図を図 4.7 に、そのチェインを図 4.8 に示す。

(4) MACRO DEFINITION

これはアルゴリズムステートメントの拡張のために設けられた部分で、新しく追加されるものの書式を定義する。ただし、この場合、対応するパッケージプログラムは別に用意する必要がある。

アルゴリズムステートメントの定義は大きく分けて、次の三つの部分から

構成している。SDB はスキャン処理に必要な情報のみを含み、基本およびオプションブロックから成る。各 SDB は処理の高速化を図るためにスキャン周期ごとに一つのファイルにまとめられている。

STDB は点シンボル、点の説明句など、スキャン処理に直接関係のな

い情報を持ち、全体で一つのファイルにまとめられている。ファイル中の各 STDB は点シンボルをキーとしたオープンハッシュ技法による順序で並べられている。STDB と SDB は 1 対 1 対応があり、互いに相手のポインタを持ち、相互参照が可能になっている。

スキャン処理時には直接 SDB を参照することにより迅速なアクセスが可能になり、またオペレーターズコンソールなどのユーティリティプログラムからは点シンボルをキーとして STDB からたどることにより SDB 中のデータにも効率良くアクセスできる。

4.2 デジタルスキャンシステム

4.2.1 機能の概要

MDSS で処理するデジタルデータは、プラントの各部のオン・オフ状態を表わす、いわゆる接点データである。これらに対するデジタルスキャンシステムの処理機能は接点入力のスキャニング、それに関連したアラームのスキャニングおよび接点出力のスキャニングから成っている。

ソフトウェアの構成要素としては、アナログスキャンシステムと同様の接点データを定義する穴埋め様式の記述フォーム、それらをポイントファイルの形に編集、変換するプロセッサ、スキャニング処理を行なう実行時プログラム群およびスキャン条件の変更などを行なうためのユーティリティプログラムがある。

4.2.2 デジタルポイントデータリスト

デジタルデータの定義は図 4.4 に示す様式の用紙に必要事項を記入する形で記述する。記入項目には、点シンボルとその説明句、値の格納場所(ワードとビット位置)、ステータスの説明句、各種チェック指定がある。

4.2.3 接点入力スキャンとアラームスキャン

接点入力およびアラームのスキャニングに関する構成要素の関連を図 4.5 に示す。接点入力のデータリストは専用のプロセッサで編集されデジタルポイントファイルとして登録される。これは外部メモリに置かれるが計算機の運転開始時に動作する初期化プログラムによってスキャンに必要な情報が抽出され、主メモリ上の所定の位置に移される。

計算機が定常運転になると接点入力スキャンプログラムが指定された周期で起動され、接点入力が行なわれる。入力された接点データはイメージテーブル上に置かれる。この過程でアラームチェックが必要と指定されたものについては、データリストで指定された正常値との比較を行ない、不一致があればその番号をアラームメッセージバッファに登録する。

一方、アラーム処理をつかさどるアラームプリントプログラムは接点入力スキャンプログラムとは別のタイミングで起動され、アラームメッセージバッファ内の情報に基づき、外部メモリ上のデジタルポイントファイルからアラーム印字に必要な情報を抽出し、成型して所定のタイプライタに印字する。

入力された接点データは、イメージテーブル上にあり、計算処理の必要

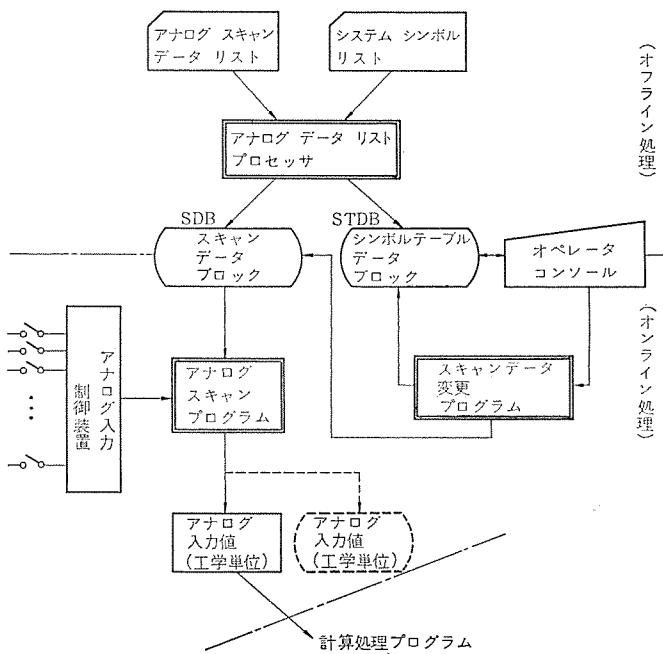


図 4.2 アナログスキャンシステムの構成
Configuration of analog scan system.

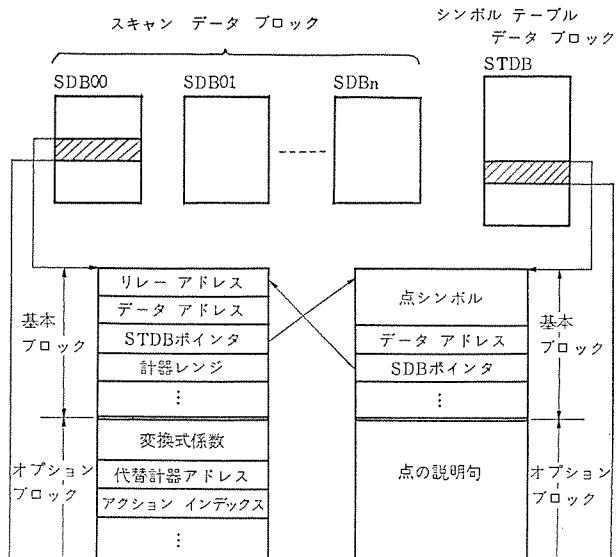


図 4.3 アナログポイントファイルの構成
Organization of analog point file.

MDSS デジタル・ポイント・データリスト

CCI…SP : 設定値(1/0)		LC : リミットチェック(Y/N)		作成 :		日付 :	
CCO…S : マニュアルセット(Y/N)		R : マニュアルリセット(Y/N)					
シンボル SYMBOL	内 容 説 明 POINT DESCRIPTION	ポイント番号 BIT REG	ステータスの説明 SET RESET	各種チェック SP/SLC/R	種別 ID	SEQUENCE	
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80							

図 4.4 デジタルポイントデータリスト

Specification form for digital points.

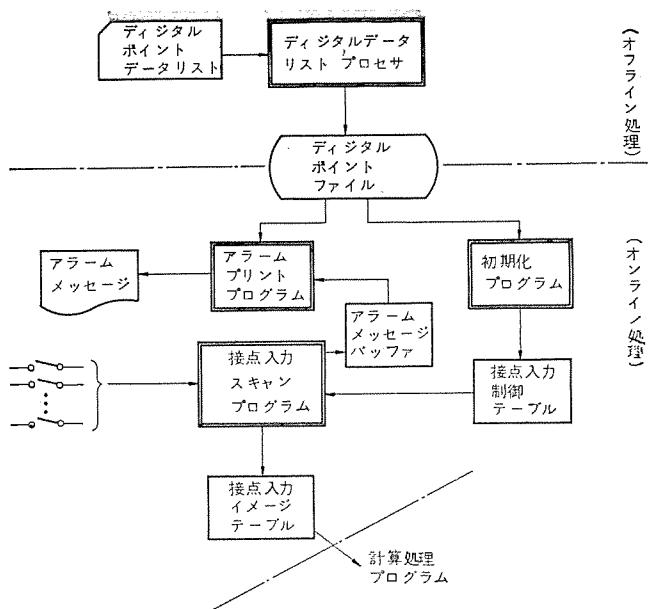


図 4.5 接点入力およびアラームスキャンの構成
Configuration of contact closure input and alarm scan.

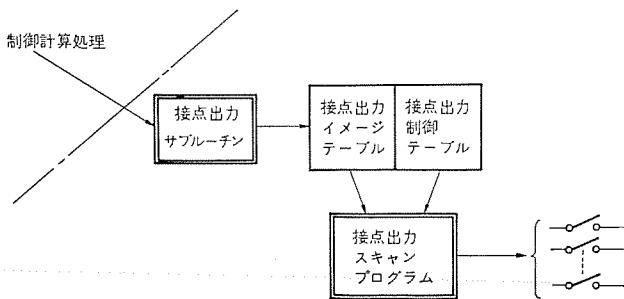


図 4.6 接点出力スキャンの構成
Configuration of contact closure output scan.

に応じて、これが使用される。

4.2.4 接点出力スキャン

接点出力スキャンに関する構成要素の関連を図 4.6 に示す。制御計算処理からの出力データが接点出力サブルーチンを介して出力イメージテーブル上に置かれると同時に、該当する接点グループ (16 点/グループ) の出力要求フラグがセットされる。接点出力スキャンプログラムは別のタイミングで起動されており、出力要求フラグに基づいて接点出力処理を行なう。接点出力サブルーチンは出力データの変換法 (ON に対し “1” を出力するか、“0” を出力するかなど) に従って幾とおりかの種類が用意されている。

4.3 DDC システム

4.3.1 DDC 言語

MDSS の中の制御計算処理に関する部分を DDC システムと呼び、そこで用いる言語を DDC 言語と呼ぶ。一般的にはプログラミング言語の定形化を進める程、プログラムの作成効率が向上するが、この部分では多様性をもった処理が対象となるため、入出力部分程には表現形式の定形化は適さない。言語をどの程度まで定形化するかは、適用対象の広さ、言語の簡易化の要求の強さによって決められる。

DDC 言語では DDC を中心とした応用を想定しているとはいえ、ある程度の適用範囲を保つために、処理手続きのモジュール化、標準化から始め、それらを呼ぶための指定、その中で使用するパラメータの指定を骨格とした形の定形化を図っている。DDC や SPC を中心とする応用では、論理ブロック図に現われるブロックと対応する程

度の大きさで処理機能をまとめモジュール化することで、ブロック線図からのプログラム作成が容易になる。もちろん言語中には、パッケージ化された処理機能の呼出しステートメントを定義する機能が備えられているので、言語の適用面を拡張することも可能である。

以下に DDC 言語の概要について述べる。

(1) 全体の構造

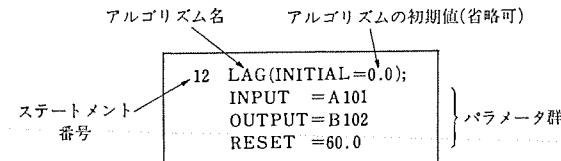
DDC プログラムの言語構造は大きく分けて、「MACRO DEFINITION」、「PROGRAM DECLARATION」、「CONTROL CALCULATION」の三つの部分からなる。前二者では各種の定義、宣言を記述し、実際の制御演算は CONTROL CALCULATION 部で記述する。

(2) PROGRAM DECLARATION

表 4.1 に示す宣言ステートメントを用いてプログラム名、変数名のタイプ、初期値などを指定する。初期値指定のある変数名は計算機システムの運転開始時にその値が初期値として設定される。

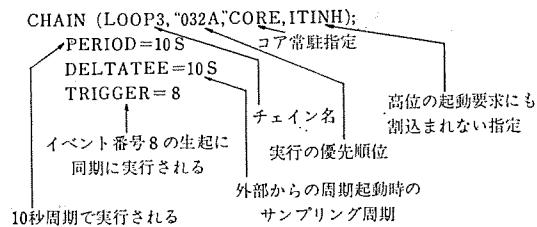
(3) CONTROL CALCULATION

制御演算の本文を、パッケージ化された処理機能を基本単位として記述する。それらをアルゴリズムステートメントと呼び、ステートメント番号、アルゴリズム名およびいくつかのパラメータで構成する。パラメータの表現は単にデータをリストとして並べる方法ではなく、その説明句を並記した形をとる。これによりドキュメンテーションの向上が図れ、またパラメータ変更時などの識別情報としてこれを利用することができる。例えば一次遅れアルゴリズムは次のように表現される。



MDSS では DDC で用いられる典型的な制御アルゴリズムについて表 4.2 に示すような一通りの標準アルゴリズムステートメントが用意されている。

DDC プログラムの作成は制御計算ブロック線図上の各ブロックの接続状況に対応して、パラメータを選びながらアルゴリズムステートメントを並べて行けばよい。このようにして構成された一つの処理単位をチェインと呼び、実行上の取扱い単位となる。CONTROL CALCULATION 部には複数個のチェインを記述することができる。各チェインの先頭には実行の諸条件を規定する CHAIN ステートメントを置く。これは例えば次のように書く。



DDC プログラムの例として、PI コントローラを用いた典型的な定值制御ループのブロック線図を図 4.7 に、そのチェインを図 4.8 に示す。

(4) MACRO DEFINITION

これはアルゴリズムステートメントの拡張のために設けられた部分で、新しく追加されるものの書式を定義する。ただし、この場合、対応するパッケージプログラムは別に用意する必要がある。

アルゴリズムステートメントの定義は大きく分けて、次の三つの部分から

表 4.1 宣言ステートメントの種類と機能
Statements of data declaration.

ステートメント	パラメータ	機能
PROGRAM ;	P	プログラム名の宣言
REAL ;	v_1, v_2, \dots	変数名 v_i を実数型に宣言
INTEGER ;	v_1, v_2, \dots	変数名 v_i を整数型に宣言
LOGICAL ;	v_1, v_2, \dots	変数名 v_i を論理型(ワード)に宣言
BIT ;	v_1, v_2, \dots	変数名 v_i を論理型(ビット)に宣言
EQUIVALENCE ;	$v_1=u_1, v_2=u_2, \dots$ $v_n=(u_n, u'_n, \dots) \dots$	変数名 v_i を u_i として再定義
INITIAL ;	$v_1=d_1, v_2=d_2, \dots$	変数名 v_i の初期値指定

表 4.2 DDC アルゴリズムステートメント
Algorithm statements for DDC.

アルゴリズム名 ステートメント名	機能
HILIM, LOLIM	$y = \begin{cases} x & (x \leq z) \\ z & (x > z) \end{cases}, \quad y = \begin{cases} x & (x \geq z) \\ z & (x < z) \end{cases}$
HISEL, LOSEL	$y = \max(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad y = \min(x_1, x_2, \dots, x_n)$
CLAMP	$y = \begin{cases} z_1 & (x > z_1) \\ x & (z_1 \leq x \leq z_2) \\ z_2 & (x < z_2) \end{cases}$
DEDBND	$y = \begin{cases} x & (x \geq z_1 \text{ または } x \leq z_2) \\ (x_1 + z_2)/2 & (z_1 > x > z_2) \end{cases}$
MULT	$y = a \cdot x_1 \cdot x_2$
ADDER	$y = a_0 \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i + b$
FUNGEN	関数発生器 $y = f(x)$, f は折線関数
RAMP, RAMPAM	ランプ信号発生器, A/M 変換付きランプ信号発生器
ANLGSW, ANTRNS	アナログスイッチ $y = \begin{cases} x_1 (SW=1) & \text{一次遅れ付きアナログスイッチ} \\ x_2 (SW=0) & \text{スイッチ} \end{cases}$
THRSHLD	スレッショールド $y = \begin{cases} 1 & (x \geq z) \\ 0 & (x < z) \end{cases}$
LAG, LAGAM	一次遅れ, A/M 変換付き一次遅れ
PID, PIDAM	PID コントローラ, A/M 変換付き PID コントローラ
BUMP	パンプレス トランスマッタ
RESET	積分 $y = \frac{1}{T \cdot S} \cdot x$
RATE	一次遅れ付き微分 $y = \frac{T \cdot S}{1+T \cdot S} \cdot x$
AND, OR, EOR, NOT	論理積, 論理和, 排他的論理和, 否定
FLPFLP	フリップ フロップ
PLSGEN	パルス発生器
BITSUM	多数決論理
SETRST	論理変数の値設定
DTIMLG, DTIMAN	むだ時間ロジカル, むだ時間アナログ
STFILT, DVFILT	$y_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_{n-i+1}$ $y_n = \frac{12}{(k^2-1)k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{k+1}{2}-i\right) x_{n-i+1}$
COMPUTE	一般計算式 (FORTRAN の算術式, 論理式)

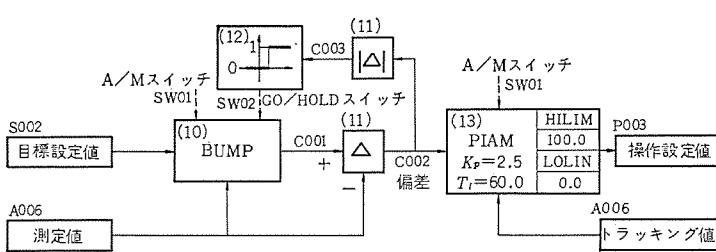


図 4.7 定置制御ループのブロック線図例
Block diagram of typical feedback control.

```

PROGRAM DECLARATION;
PROGRAM; LVLCNT : LEVEL CONTROL : ;
REAL; S002 : SET POINT : ;
A005 : MEASURED VALUE : ;
A006 : TRACKING VALUE : ;
P003 : CONTROL OUTPUT : ;
C001, C002, C003 : ;
BIT; SW01 : AUTO/MANU SWITCH : ;
SW02 : GO/HOLD SWITCH : ;

CONTROL CALCULATION;
CHAIN (LOOP2, "0205", DRUM, ITINH);
DELTATEE=10S
10 BUMP;
    MV = A005
    SP = S002
    ADJUST = C001
    AMSW = SW01
    GHSW = SW02
11 COMPUTE;
    C002=C001-A005
    C003=ABS(C002)
12 THRSHLD;
    INPUT = C003
    OUTPUT = SW02
    REF = 2.0
13 PIAM;
    INPUT = C002
    OUTPUT = P003
    GAIN = 2.5
    RESET = 60.0
    HILIM = 100.0
    LOLIM = 0.0
    TRACK = A006
    AMSW = SW01
14 EXIT;
END;

```

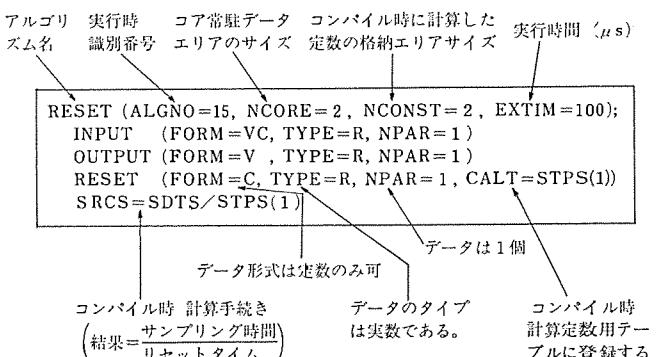
図 4.8 DDC プログラム例
Example of DDC program.

なる。

(a) アルゴリズム名, 実行時の識別番号, オブジェクトのレイアウト, 実行時間などアルゴリズムのオブジェクトに関する定義

(b) パラメータの説明句, 書かれるべきデータの形式, 個数など, パラメータの書式に関する定義

(c) コンパイル時に計算されるべき定数の計算式に関する定義積分アルゴリズムについての定義例を次に示す。



MACRO DEFINITION 部で一度定義されたアルゴリズムステートメントは, 以後, そのシステムでは標準のものと全く同様に, 每回定義することなく使用できる。

4.3.2 DDC プログラムのオブジェクト形式

DDC 言語で書かれたプログラムは実行に先立ち, 実行時に変換する必要があるが, 言語上の機能を実行段階で効率良く実現するため, そのオブジェクト形式は図 4.9 に示す構造をとっている。

初期化テーブルは起動タイミング, 変数およびアルゴリズムの初期値などの情報を含んでおり, 実行システムへ登録するときにのみ参照される。チェックの本体は各制御アルゴリズムパッケージ呼出し情報とその中で使うパラメータデータをテーブル形式にまとめたもので構成される。

オブジェクトプログラムには, それらが参照する各種データ領域の位置

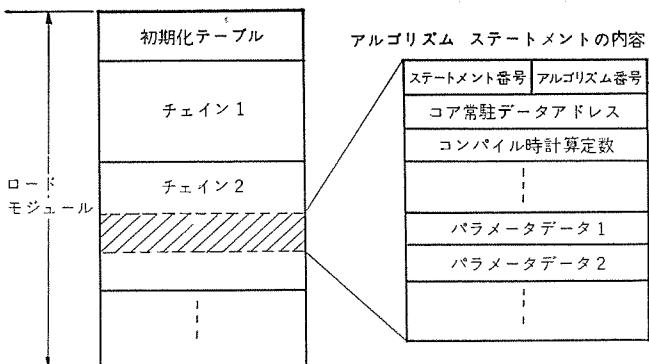


図 4.9 DDC プログラムのオブジェクト形式
Object structure of DDC program.

およびプログラムの実行位置を固定せず、再配置の融通性を残したリロケータブル形式と、それらの割付けが確定したアブソリュート形式の2種類がある。後者は前者をリロケータと呼ぶサポートプログラムで処理することにより得られる。両者とも構造上は MELCOM 350-30/30 F 標準のロードモジュールと同一構造としているので、一般的のプログラムと共に管理され、またプログラムファイルを扱う既存の各種ユーティリティプログラムをそのまま利用できる。

4.3.3 DDC プログラムの実行方式

DDC プログラムはチェインの集まりで構成されるが、チェインごとに動作の状態（作動周期、起動タイミングなど）が異なるのでその実行の制御管理はチェイン単位で行なう。チェインの実行管理方式として、それらをオペレーティングシステムのタスクに割付ける方法も考えられるが、タスク数の増加によるタスク管理のオーバヘッドの増加が重大になり、また、周期起動指定、コア/ドラム常駐指定、割込み禁止指定などの特長的な言語機能の実現に困難さがある。このため、DDC システムでは各チェイン間に演算処理の重要度に応じて優先順位をもった独自の管理体系を設けている。優先順位はメイン（最大 15）とサブレベル（各メインレベルにつき最大 256）からなるレベル番号で示し、プログラム記述時には、3 けたの 16 進数で表わす。このレベル番号は実行時におけるチェインの識別にも使われる。レベル番号に基づく優先順位の実行制御は、次のスケジュール規則に従って行なう。

（1）メインレベルスケジュール

あるレベルのチェイン実行中に、より高レベルのチェインの実行要求が起きた場合、実行中のチェインは中断され、高レベルのものが起動される。中断されたチェインは実行要求が出ている、より高レベルの全チェイン（中断中に発生したものを含め）を実行後、中断点から再開される。このようなチェインの割込みはアルゴリズムステートメント実行の切れ目で発生する。

（2）サブレベルスケジュール

同一メインレベル内でのサブレベル間では実行中の割込みはなく、実行要求の出ているチェインについて高位のサブレベルのものから順次実行される。ただし、メインレベルの割込みで中断中のものがあれば、それがそのメインレベル内で最優先となる。

チェインの実行は図 4.9 に示したアルゴリズムステートメントに対応するテーブルの内容を解説し、必要な情報と実行の制御を該当サブルーチンパッケージに移すという方式で進める。このための解説ルーチンをディレクタと呼び、次に述べる DDC モニタの中核的な構成要素となっている。

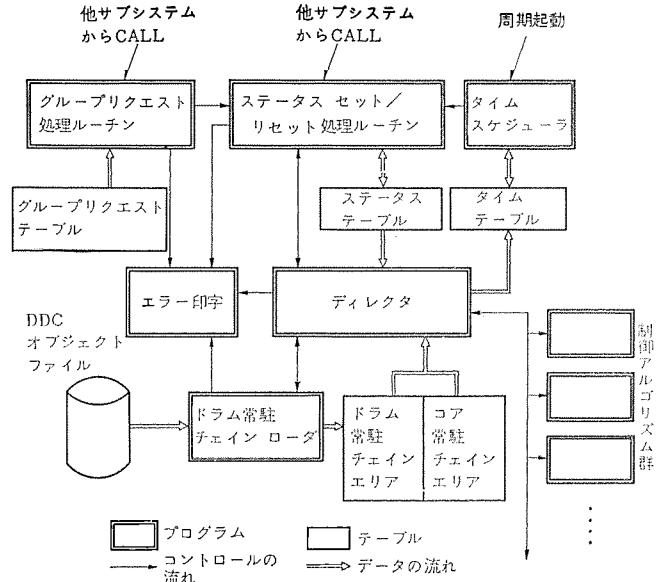


図 4.10 DDC モニタの構成
Configuration of DDC executive monitor

4.3.4 DDC モニタ

チェインの実行の制御管理と DDC システム外部との実行時インターフェースをつかさどるために、幾つかの機能別プログラムおよびテーブルを用意する必要がある。これらのものを集めて制御管理用のモニタプログラムを構成し、これを DDC モニタと呼ぶ。それは図 4.10 に示す構成をもち、スーパバイザの下に位置して働く。各要素の概略内容および機能は次のとおりである。

（1）ステータステーブル

各チェインについて起動要求の有無、実行の可否、ディレイ表示、割込みの可否、チェインのスタートアドレスなどの動作状態を示す情報をもつ主メモリ上のテーブル。

（2）タイムテーブル（オプション）

周期的に起動されるべきチェイン、またはディレイ中のチェインに対し、必要な時間データをもつ主メモリ上のテーブル。

（3）グループリクエストテーブル（オプション）

イベントの生起に同期して起動されるチェインがある場合に必要なイベントとチェイン群（レベル番号）の主メモリ上の対応表。

（4）ディレクタ

チェインの実行を直接、制御するプログラムで、まずステータステーブルを調べ、起動要求が出ているチェインについてアルゴリズムステートメントを解説し、実行を該当アルゴリズムルーチンへ移す。一つのアルゴリズムの実行終了後、コントロールはディレクタに戻り、再びステータステーブルを調べ、より高位チェインの起動要求があればそちらに移る。このようにしてアルゴリズムを次々に実行し、一つのチェインの実行が終り、他に起動要求が全くない場合にディレクタは終止する。

ディレクタ自身は一つのタスクとして実行され、通常次に述べるステータスセット/リセットルーチンにより起動される。

（5）ステータスセット/リセットルーチン

チェインの状態を起動要求、中断、実行禁止、実行終了のいずれかに置くためのリエントラントなサブルーチンで、さらに起動要求状態に設定する時、ディレクタが動作中でなければこれを起動する。

（6）グループリクエスト処理ルーチン（オプション）

指定イベントに対応するチェイン群の一せい起動要求を処理する。

(7) タイム スケジューラ (オプション)

外部から一定時間間隔 (例えば 1 秒ごと) で起動され、タイム テープル 中の時刻を更新する。起動予定時刻に達した チェイン があれば、その起動要求を出す。

4.3.5 ユーティリティ プログラム

プラント 制御 プログラム は一般に多くの部分からなっており、現地据付調整時には部分的な試験を積み重ねていく関係上、これらの プログラム を一時的に変形したり、他の プログラム との接続関係を変更したりする処置が必要となる。また、プログラム の パラメータ の中には据付調整の段階で初めて固定できるものや プラント 運転実績が得られるにつれ、より最適な値に修正されるものがある。

MDSS では、このような変更要求を プログラム の修正 という消極的な見方ではなく、再コンパイルを前提としない プロセス 制御特有の システム チューニング として積極的にとらえ、このための ソフトウェア ツール を提供している。

プロセス 制御応用における プログラム チューニング に要求される事項 として次の点をあげることができる。

(1) ソース 言語 レベル で処置できること。これは高位言語を用いる場合に重要で、プログラム の内部構造に関する知識を前提とせずに パラメータ の チェック や変更をするための条件である。

(2) チェイン の一時的な実行抑制あるいは周期的な実行など、プログラム の実行に関する制御の機能があること。

(3) オンライン 制御と並行して操作できることが望ましい。

(4) 現地計算機の構成のままで処理が可能であること。

(5) チューニング の記録が残ること。

(6) 誤操作の可能性が少ないこと。

MDSS では、アナログ スキャン システム、デジタル スキャン システム および DDC システム の各部分に上記の機能をもった ユーティリティ プログラム が付属している。いずれも最も基本的な入出力装置である システム タイプ ライタ のみを用い、会話 モード により処理を進める方式を採用しているので、人と機械の情報疎通が便利になり、履歴をわかり易い形で残すことができる。

アナログ および デジタル の プロセス 変数の モニタリング 処理 システム に関する主要な チューニング 機能を次にあげる。

(1) スキャニング および モニタリング の停止、再開

(2) 警報上下限値、変化率制限値の変更

(3) 計器 レンジ、初期値の変更

(4) ポイント 情報の表示および測定値の手動設定

DDC システム に対する主要な チューニング 機能は次のとおりである。

(1) チェイン の単発的あるいは周期的起動要求とその停止

(2) チェイン の実行禁止または割込み禁止とそれらの解除

(3) チェイン の内容変更と内容表示

(4) 変数の値の手動設定

```
: MP: //SYMD, MDSSF; LVLNT  
CHAIN=LOOP2, D  
ST. NO=13, PIAM  
ARG=GAIN  
DATA=1.0  
PLOC=28B5 (35A8; 4)  
OLD=4128 0000  
NEW=4110 0000  
ARG=: CEND
```

図 4.11 パラメータ の チューニング 例
Example of tuning for program parameter.

DDC システム における上記機能の一例として、図 4.8 中の PIAM アルゴリズム の パラメータ GAIN を 2.5 から 1.0 に変更したときの操作記録を図 4.11 に示す。下線部分は計算機からの出力である。

5. む す び

プロセス 制御用の問題向き言語 システム の構成について、言語と実行 システム の両面から述べた。

MDSS の実用上の最も顕著な効用は、プログラム コーディング 労力の軽減および現地における ソース 言語 レベル での プログラム チューニング 機能である。これにより コーディング に費やされる時間と労力を システム 総合設計など質の高い作業に振り向け得ること、また簡明な記法で プログラム を管理・維持することにより、不必要的誤りの発生を防ぐことが期待できる。

参 考 文 献

- (1) 日本電子工業振興協会：工業用 コンピュータ ソフトウェア の標準化動向 (第 1 報) (昭 47-2)
- (2) 首藤、五十嵐、居原田：プロセス 制御用 プログラミング システム—MDSS—、昭 47 信学全大、No. 1,196
- (3) 日本経営科学協会：プロセス 制御用 計算機 の ソフトウェア 手法開発の チェックポイント (昭 47)
- (4) 首藤、居原田ほか：DDC 用 ソフトウェア MDSS とその構成、第 15 回自動制御連合講演会、No. 3,066 (昭 47)
- (5) 亀井、立花ほか：DDC 言語 MDSS による ボイラ 昇温制御系の構成と適用、第 15 回自動制御連合講演会、No. 3,061 (昭 47)
- (6) 首藤、五十嵐、居原田：ソース 言語 レベル での オンライン プログラム の チューニング について、昭 47 情処学会大会、No. 31
- (7) 五十嵐、中平ほか：プロセスデータ モニタリング における ファイル の一構成、昭 47 情処学会大会
- (8) Herbert E. Pike Jr : Process Control Software, Proceeding of IEEE, (Jan., 1970)

工業用プログラミング言語 CONFORM IV

首藤 勝*・関本 彰次*・春原 猛*
太細 孝*・走松 淳一*・大田 葉子**

CONFORM IV A Programming Language for Industrial Use

Kamakura Works Masaru Sudô・Shôji Sekimoto・Takeshi Sunohara
Takashi Dasai・Junichi Sadamatsu
Head Office Yôko Ôta

CONFORM IV is a programming language orienting the field of industrial computer application developed for MELCOM 350-30F computer system. Recently the improvement of productivity of software is seriously taken up even in the field of industrial application. The movement for turning the programming language to higher level is one of principal measures to meet the situation. CONFORM IV is the language developed under such circumstances, suited for the programming of whole the industrial field. Also its compiler is designed in consideration of the programming and debugging facilities. The article first touches on the recent trend of programming language for industrial use, and after that it describes the language function of CONFORM IV and the features of compiler.

1. まえがき

プロセス制御をはじめとする工業用計算機応用分野では、その当初から本質的にオンライン機能の実用が要求されたために、多様な入出力機能、各種の管理機能をプログラムに含む必要があり、また多重タスクの処理が基本的に含まれるなどの事情があって、はん(汎)用の計算機応用に比べて高レベルプログラミング言語の普及が遅れていたといえる。また、それに加えて工業用計算機ははん用のように華やかな存在ではなく、設備の一部として終始とらえられていたため高レベル言語使用のためのリソースの追加が極度に抑えられるという背景もあった。最近個々の応用システムの大規模化に伴うプログラム量の増大、人件費高騰によるソフトウェアコストの問題などから、ソフトウェアの作成と実動の効率向上が重大となり種々の対策がとられているが、プログラミング言語の高レベル化もその主要のもの一つである。

高レベルプログラミング言語にはいわゆるコンパイラ言語、正しくは“手続き向き言語”と呼ばれるものと、もっと適用対象に密着した簡易な表現でのプログラム作成を可能とした“問題向き言語”的二つがあり、おののの適性を生かして使いわける。

工業用中形計算機 MELCOM 350-30F の場合、手続き向き言語としては CONFORM IV があり、問題向き言語システムとしては MDSS (別稿参照) があって、両者の併用あるいは使い分けが可能であるので、広い応用範囲を効率よくカバーしている。

CONFORM IV は上述のような観点から開発に取組んで 1970 年に実用化した初版の CONFORM を発展充実させて開発された新しい手続き向き言語である。初版 CONFORM で試みた制御用の諸機能を実用経験に基づいて練り上げたうえ、さらに言語機能を充実させ、また科学技術計算の多く含まれる応用を考慮して JIS-7000 レベル FORTRAN との互換性の確立を実現している。コンパイラについては特に実行時効率に重点を置いてオブジェクトプログラムの最適化に種々の実用的配慮を施すとともに、直接コンパイル法を採用しながらアセンブラー言語との混用プログラミングを可能とするなどの特色を備えている。

本報告ではまず工業用プログラミング言語の最近の動向に触れたのち

CONFORM IV の概要について述べる。

2. 工業用プログラミング言語の動向

工業用プログラミング言語といった場合に、それらは図 2.1 に示すように大きく三つのレベルに分類することができる。

各レベルにおける言語の特長を挙げてみると次のようになる。

(1) 問題向き言語 (Problem Oriented Language)

- (a) 記述が簡単 (例えば穴埋め方式)
- (b) ドキュメンテーションが同時に作れる
- (c) 適用対象範囲はある程度限定される
- (d) プログラミングパッケージの充実が必要

(2) 手続き向き言語 (Procedural Language)

- (a) FORTRAN と同程度の記述レベル
- (b) プログラム教育が比較的容易である
- (c) 工業用の分野内でははん用性がある
- (d) 資料管理の省力化は中程度

(3) アセンブラー言語

- (a) 最も機械に近いレベルの言語
- (b) きめ細かい技巧的なプログラムが書ける
- (c) 適用範囲が広い
- (d) プログラミング労力が大きく、習熟も困難

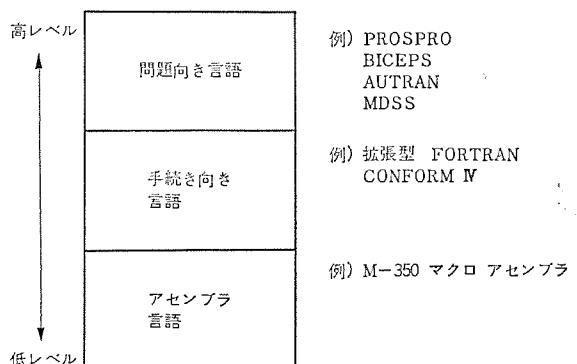


図 2.1 プロセス制御用言語のレベル
Classification of languages for industrial use.

(e) ドキュメントを別途に整える必要有り

計算機によるプロセス制御が始まった当初は、それが対象とする制御の分野およびそれの中での適用の範囲も狭く、したがって計算機をなるべく小形化し、計算機というよりはむしろ制御系ハードウェアシステムの一部付属装置としてつくり付けにされてきた。そこで作成するプログラムもできるだけコンパクトにということが要求され、ほとんどアセンブラー言語によるプログラミングが主流をなしていた。

しかし、制御技術の進歩により計算機制御の対象が広げられるとともに制御計算機システムは従来のように制御系ハードウェアの一部として組込まれるというよりは、むしろそれから独立して存在するという形態になり、更にはプロセス制御だけでなく、それに関連する生産管理のような事務的な情報処理までも含めた総合システムが構成されるまでになってきている。そのような大規模なシステムを構成するのに必要なソフトウェアの量は膨大なものとなり、しかもおののの目的における制御システムは絶えず改良、発展がなされる。

こうしたソフトウェアの量の増大と、保守の必要性により、前述したアセンブラー言語における長所（コンパクトなプログラムが作成可能）による利益と、短所（プログラミング労力が大きい）による損失を比較した場合に、損失のほうははるかに大きくなりつつある。したがってソフトウェア生産量の増大という問題はアセンブラー言語によるプログラミングでは到底解決できるものではなくなってきている。近年、コンパイル技術の発達およびハードウェアのソフトウェアに対する相対コストの低下と相伴って、高レベル言語によるプログラミングが急速に広まりつつあり、将来はアセンブラー言語によるプログラミングはごく限られた部分において行なわれるのみで、主流は問題向き言語と高レベル手続き向き言語となっていくであろう。

一方、アセンブラー言語と異なり、高レベル言語はハードウェアデザインにほとんど依存しない表現がとれるので、ソフトウェアの流通ということが考えられ、言語の標準化が重要な問題とされるようになってきた。工業用の分野は他のソフトウェアの分野と比較すると歴史的に目が浅いため、標準化はこれからといった段階にある。プログラミング言語に對してはアメリカのパデュー（Purdue）大学で工業用計算機ソフトウェアの標準化を目標とする研究会があり、ヨーロッパ各国、日本からも委員が参加し将来の国際標準を目指して拡張形FORTRAN、工業用新言語、問題向き言語等の検討が行なわれている。

3. MELCOM 350-30 F 工業用プログラミング言語体系

工業用計算機システム MELCOM 350-30 F における工業用プログラミング言語体系は、前章の冒頭に述べたように三つのレベルからなる。

- (1) MDSS (MELCOM DDC and Supervisory Control System)
- (2) CONFORM IV
- (3) MELCOM 350-30 F マクロアセンブラー

MDSSは問題向きレベルの言語であり、各種のプロセス制御に必要な機能が標準パッケージとして用意されており、簡単な言語（データリストの記入およびプロセス制御内容の指定）により、必要とする機能を満たすプロセス制御プログラムを作成できる。したがって、プログラマは高度のプログラミング技術を有する必要がなく、プラント制御の技術者が容易にプログラムを作成することができる。

CONFORM IVは次の手続き向き言語レベルに属するものであり、上記のMDSSでは記述しにくい個所、MDSSの標準パッケージまたはプロセス制御システム全体の中核となる部分などをはじめとする工

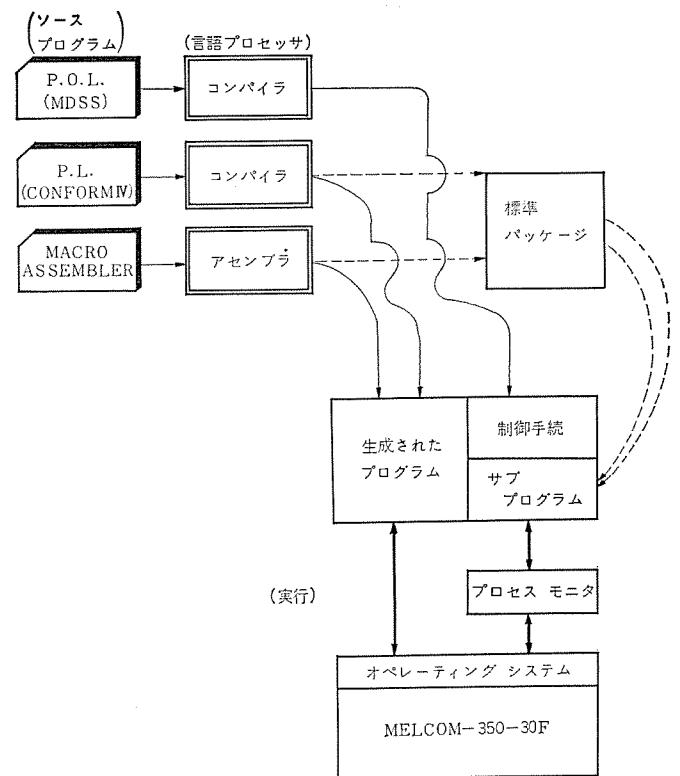


図 3.1 プログラムの生成と実行
Concept of program generation and execution.

業用分野のプログラミング全般にわたって使われる。

マクロアセンブラー言語は以上の言語では記述できない特殊な部分またはシステムの実行効率に重大な影響を与える部分のプログラミングに使用される。

図3.1は工業用システムにおけるプログラムの生産と実行の概念図である。

4. CONFORM IVの言語仕様

CONFORM IVは、現在最も普及している言語FORTRANを基礎にして、工業用計算機システムを指向した実時間システムのプログラミングに適合するよう拡張、発展させた言語である。

拡張、発展に際し、新しい言語機能をどのような判定基準により取捨選択するか、またどのような形で実現するかが問題となる。CONFORM初版の使用経験、その他工業用の分野におけるプログラミングの傾向を考慮して言語仕様を設定したが、特に留意した点は、言語機能の充実とオブジェクトプログラムの効率およびコンパイラの大きさの間のバランスを図ることである。言語機能を充実し、柔軟性を持たせれば持たせる程オブジェクトプログラムの効率が下がることは一般的な傾向であり、PL/I言語の例を見ても明らかである。使用ひん度の少ない言語機能にまで及んだ表現をことごとく導入した場合には、プログラミングがしやすくなる反面、コンパイラの仕事量が増えコンパイラの大形化につながる。更にまずい場合には、オブジェクトプログラムのサイズを大きくし、実行速度を低下させる。したがって、中、小形機を標準とするような工業用計算機システムにおいてはおのずと言語機能の取捨には厳選を期する必要がある。

また、個々の言語機能の実現に当っては、特定の計算機システムにとらわれない、より一般的な形で導入することが望ましい。しかしながら限られた能力を持つ計算機システムで、オブジェクトプログラムのサイズおよび実行時間を最適化し、しかもアセンブラー言語によるプログラミ

ングと比較して、そん(遙)色なくするためには、ある程度対象計算機システムの特性を考慮することも必要と考える。

CONFORM IV の言語機能上での特長は次のとおりである。

- (1) 副プログラムの結合構造指定
- (2) インラインアセンブリ機能
- (3) 外部記号のきめ細かい結合機能
- (4) ビットデータ(論理データ)の処理機能
- (5) 指標変数による間接アドレッシング
- (6) プロセス入出力文
- (7) 多重タスク制御機能
- (8) デバッグ機能

以下の節において CONFORM IV の言語仕様について、FORTRAN から拡張された部分を中心として、その機能と導入理由について概説する。表 4.1 は CONFORM IV と JIS-7000 FORTRAN との言語仕様の比較表である。

表 4.1 JIS-7000 FORTRAN と CONFORM IV の比較
Comparison between JIS-7000 FORTRAN and CONFORM IV.

比較項目	JIS-7000 FORTRAN	CONFORM IV	比較項目	JIS-7000 FORTRAN	CONFORM IV
プログラムの書式	注釈指定 ○第1行に C	注釈指定 ○第1行に C ○各行の余白に /* で始まる注釈指定	実行文	○ビット操作文 なし	○ビット操作文 SETBIT 文 RESETBIT 文 SHIFT, RIGHT 文 SHIFT, LEFT 文
データの型	整数型、実数型、倍精度実数型、複素数型、論理型、文字型	左のほかに倍精度整数型、指標型があり、更に整数型のデータをビットストリングとして処理可能		○タスク制御文 なし	○タスク制御文 ASSIGN-TASK 文 CALL-TASK 文 WAIT 文 DELAY 文 PURGE 文 READ-TIMER 文
定数	整数、倍精度実数、複素数、論理定数、文字定数	左のほかに倍精度整数、16進定数			
2進因子	なし	ビットストリングデータの1ビットを取り出す機能 v(s; i)			
間接アドレッシング機能	なし	指標型変数による間接アドレッシング機能	非実行文	○宣言文 DIMENSION 文 COMMON 文 EQUIVALENCE 文 EXTERNAL 文 型宣言文	○宣言文 左のほかに、 GLOBAL 文 REFERENCE DATA 文 DEFINE DATA 文 POINTER 文 MAIN 文
式	算術式、関係式、論理式	○各式における倍精度整数型、指標型、ビットストリングに対する拡張 ○論理演算子に .EOR. (排他的論理和) を付加		○ODATA 文	○ODATA 文
	○代入文 算術代入文 論理代入文 ASSIGN 文	○代入文 算術代入文 論理代入文 指標代入文 ASSIGN 文 倍精度整数型変数、2進因子に対する代入が可能 ○多重代入文 例) $M=N=3$		○FORMAT 文 欄記述子 F, E, G, D, I, L, A, H, X	○FORMAT 文 左の欄記述のほかに、 ID, FD, R, S, Z, T, W, U, M, K, V, N, BL, RD, C
実行文	○制御文 GO TO 文 IF 文 CALL 文 RETURN 文 CONTINUE 文 STOP 文 PAUSE 文 DO 文	○制御文 左のほかに、 SCAN 文 DO-SCAN 文	プログラムの構造	○文関数、組込み関数、基本外部関数 ○主プログラム、副プログラム、初期設定副プログラム	○FORTRANのプログラム構造を以下のとく拡張 ①多重エントリ指定 SENTRY 文 ②多重リターン機能 RETURN 文 ③再入可能指定 REENTRANT 文 ④インラインアセンブリ ++ASS 文 ++CONF 文 ⑤内部副プログラム構造 ⑥外部副プログラムの結合構造指定 STRUCTURE 文
	○入出力文 READ WRITE REWIND 文 BACKSPACE 文 ENDFILE 文	○入出力文 左のほかに、 ENCODE 文 DECODE 文 FETCH 文 STORE 文 PROCESS-I/O 文	デバッグ機能	なし	○TRACE ON 文 TRACE OFF 文 ○テストコンパイル行指定
			その他		○コンパイラのオプション トレース テストコンパイル 信頼性ビット

PROGRAM		MELCOM CONFORM CODING FORM			DECK ID	73	74	75	76	77	PAGE	1 OF													
PROGRAMMER		JOB NO			DATE																				
LINE	STATE	CONFORM STATEMENT										DECK	PAGE	SEQ											
LOCATIONS	OPERATION	OPERATION	OPERATION	REMARKS											1 D	100	100								
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100																									
C	SAMPLE CODING FOR INLINE ASSEMBLY																							0	
	INTEGER PSW																							0	
	GO TO 200											/* GO TO INLINE ASSEMBLY												1	
	;																							1	
	;																							2	
	;																							2	
	;																							3	
EE	ASSEMBLER																							3	
2005	EDO	X'0010'	/* INLINE ASSEMBLY PART																						4
	STL	PSW																							4
EE	B 2005																							5	
EE	CONFORM																							5	
	;																							6	
	;																							6	
300	IF(PSW<11) GO TO 500																							7	
	;																							7	
	;																							7	

図 4.1 インラインアセンブリのコーディング例
Sample coding of in-line assembly.

(4) インラインアヤンブリ

コンパイラ レベル の言語では直接書きにくい特殊な処理や、特に、実行速度やサイズに微妙な要求がなされる部分についてはどうしてもアセンブラー言語が必要な場合がある。そのような場合に CONFORM IV 中にアセンブラー言語のコーディングを混用することが可能であり、全体としてはすべて CONFORM IV でプログラムを作成でき、アセンブラー言語で書かれたプログラムとのインターフェース等を考慮する必要がない。

図 4.1 で示すように インラインアセンブリ部は ++ASSEMBLER 文と ++CONFORM 文で指定する。また両言語間での名前や文番号の相互参照は自由に行なえる。

4. 1. 2 プログラム単位間の結合

主 プログラム と 副 プログラム をすべて 1 枚板に結合するのではなく、実行時の制御の シーケンス を考慮して 副 プログラム が必要になった時点で主記憶域に ロード されるような構造を可能にし、主記憶域の効率的な使用を実現している。副 プログラム の結合構造の指定は STRUCTURE 文で行なう。

STRUCTURE $t_1(k_1)$, $t_2(k_2)$, ...

ただし、 k_i は副プログラム名の並びであり、 t_i は構造の型を指定するキー語で、次のものがある。

SUB	接合型
PHASE	オーバーレイ型
LOCAL	ローカル コモン ルーチン型
GLOBAL	グローバル コモン ルーチン型

図4.2から図4.5はうえに挙げたおのの構造を図示したものである。

4.2 シンボル間の結合および補助記憶域へのアクセス

プロセス制御も含めて一般に実時間処理システムを構成する際に、そこで使用されるデータ名すなわちシンボルは通常、おのれのに個有の有効範囲を厳格に意識して設定される。それにより各プログラム間のインターフェースを確立するとともに、必要なときに必要なデータ領域だけを確保し、主記憶域の効率的な使用を図る。

CONFORM IV における共用データには三つのレベルがあり、おののおのの宣言文によって指定される。

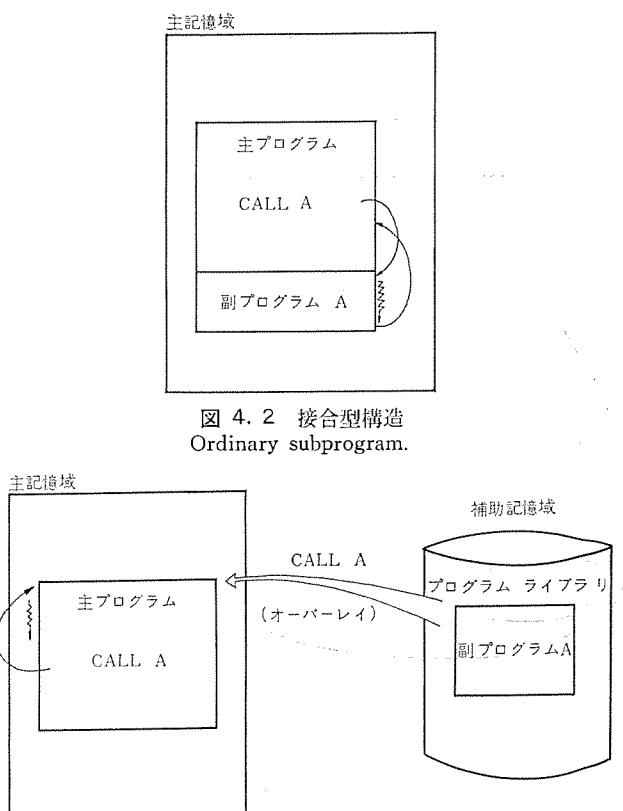


図 4.3 オーバーレイ型構造
Overlay type subprogram.

(1) GLOBAL 文

プログラム間で共用するシンボル（システムシンボル）であることを宣言する。

(2) COMMON 文

一つのプログラム内で共用するシンボルであることを宣言する。

(3) DEFINED DATA, REFERENCE DATA 文

任意の プログラム 単位 (コンパイル 単位) 間で 共用する シンボル であることを宣言する。

主記憶域のメモリ容量が小さいシステムで多量のデータを処理する場

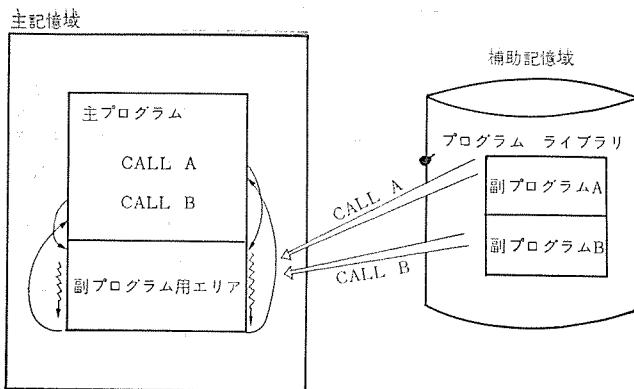


図 4.4 ローカル コモン ルーチン 型構造
Local common type subprogram.

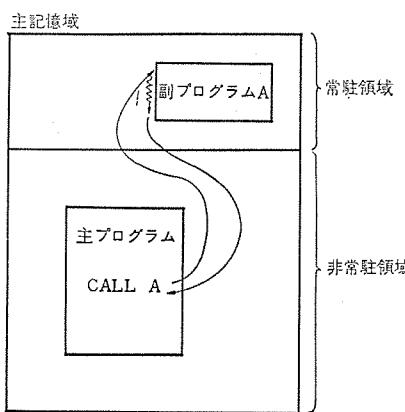


図 4.5 グローバル コモン ルーチン 型構造
Global common type subprogram.

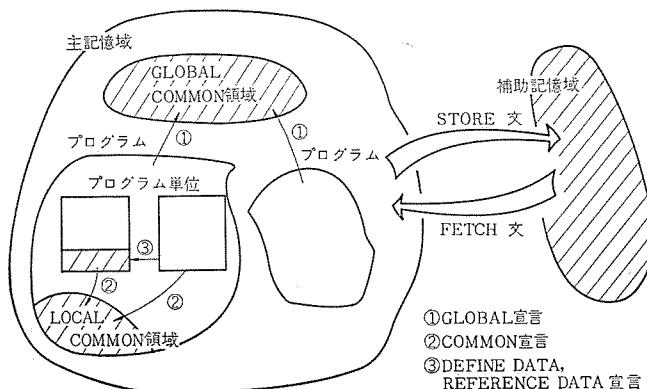


図 4.6 CONFORM IV におけるデータの結合
Data linkage in CONFORM IV.

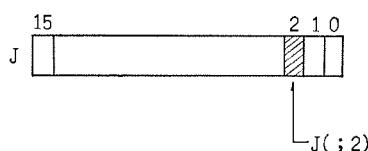


図 4.7 2進因子の具体例
Example of binary factor.

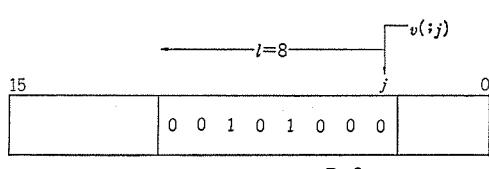


図 4.8 SCAN 文の機能概念
Implication of SCAN statement.

合に補助記憶域の一部を主記憶域の延長と考えたプログラミングが必要となる。ところが能率の良い仮想メモリのメカニズムを実現するにはハードウエアおよびオペレーティングシステムの援助が必要であり、一般にそのような機能を持たない中小形以下の工業用計算機システムのうえで上記メカニズムを導入した場合には、プログラミングがし易い反面、オブジェクトプログラムの実行効率が落ちるという欠点がある。

そこで上記の仕様上の長短のバランスを考慮した機能として補助記憶域と主記憶域間のデータ転送を行なうFETCH文およびSTORE文を設けた。図4.6はCONFORM IVにおけるデータの結合を図示している。

4.3 データの種類と処理

FORTRANの整数型、実数型、倍精度実数型、複素数型、論理型、文字型のデータのほかに新たに次のデータを導入した。

倍精度整数型データ

ビットデータ（論理データ）

4.3.1 倍精度整数型データ

各種プロセス制御における積算データの処理等においては、丸めの誤差等が出ないように整数型のデータとして扱う必要がある。その際に単精度では不十分な場合が多く、倍精度整数型データを設けるとともに、それに対する算術演算、入出力機能を導入した。

4.3.2 ビットデータ

プロセス制御等のオンライン実時間システムのプログラミングにおいては、算術演算とともに論理演算が非常に大きなウェイトを占め、ビットデータの能率的な処理機能が要求される。FORTRAN等の従来の科学技術計算用高レベル言語では算術演算が主流を占め、ビットデータの処理機能に関しては非常に貧弱である。そこで次のようなビット処理機能を導入している。

(1) ビットデータの表現

(a) ビットストリング

整数型のデータを16個のビットデータの集合とみなし、16ビット全体に対して論理演算(・AND・, ・OR・, ・EOR・, ・NOT・), 比較演算(・EQ・, ・NE・)およびシフト操作が可能である。

(b) 16進定数

ビットストリングの定数を4けたの16進数によって表現する。

(c) 2進因子

ビットストリングおよび16進定数の各ビットを参照するには次のような形式で表現される2進因子を使う。

$$v(s; i)$$

ただし, v : 整数型の変数名, 配列名または16進定数

s : 添字

i : ビット位置指定 (0~15)

これにより、1ビットデータに対する論理演算、比較演算およびセット、リセットビット操作が可能である。また代入文で右辺の演算結果の論理値を2進因子にセットすることもできる。

(2) ビットデータの処理機能

ビットデータを処理する機能として、FORTRANの論理型データに対する機能(論理演算、論理代入文、論理IF文、論理値の入出力)に加えて、次のものが導入されている。

(a) セット、リセットビット文

SETBIT v

RESETBIT v

2進因子 v で示されるビットを“1”または“0”にする。

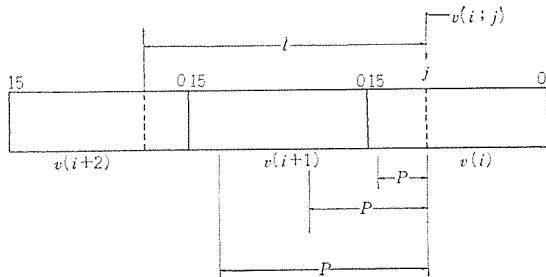


図 4.9 DO-SCAN 文の機能概念
Implication of DO-SCAN statement.

(b) シフト操作文

SHIFT RIGHT v, m

SHIFT LEFT v, m

ビットストリング v を右または左に m ビットシフトする。

(c) SCAN 文

SCAN v, l, p, k

2進因子 v から始まる l ビット領域 ($1 \leq l \leq 16$) の最初の “1” のビット位置を整数変数 p に入れ、文番号 k の文を次に実行する。“1” のビットがなければ、SCAN 文の次の文を実行する。

(d) DO-SCAN 文

DO-SCAN v, l, p, k

2進因子 v から始まる l ビット領域 ($1 \leq l \leq 2^{15}-1$) のビットを調べ、“1” のビットに出会うごとに、その位置を p に入れ、DO-SCAN 文から文番号 k の範囲の文を実行する。

4.4 指標変数による間接アドレッシング

環境条件に適合したデータテーブル等の動的な選択やリスト処理等を記述する際に間接アドレッシングの機能が必要となる。従来の高レベル言語では一般にそのようなプログラミング是不可能であり(PL/Iではロケータデータが導入されている),アセンブラー言語で書かざるをえなかつた。CONFORM IV では指標変数を導入し、間接アドレッシングの記述を可能にした。

(1) 指標変数の宣言文

POINTER t, v_1, v_2, \dots

ただし、 t はデータ型を示すキー語であり、次のいずれかである。

INTEGER

DOUBLE INTEGER

REAL

DOUBLE PRECISION

COMPLEX

LOGICAL

この宣言文により変数 v_i は指標変数で、 v_i が指すデータの型は整数型、倍精度整数型、実数型、倍精度実数型、複素数型または論理型であると宣言されることになる。

(2) 指標変数の参照

(a) 指標変数が指す領域の参照

指標変数が代入文の左辺にある場合は右辺の結果が指標変数で指される領域に代入される。また指標変数が式の中で使われたときは指標変数が指す領域のデータが演算の対象となる。

(b) 添字付き指標変数

添字付き指標変数は指標変数で指される領域を一次元の配列と考えた場合の配列要素を指し、表現法は次のとおりである。

指標変数(添字式)

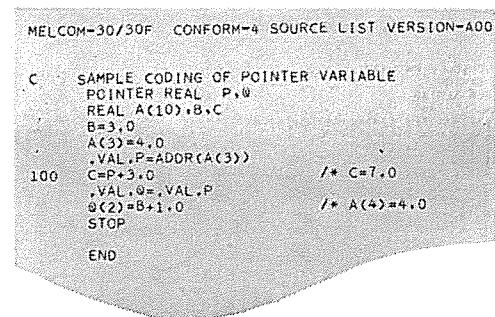


図 4.10 指標変数の使用例
Sample coding of pointer variable.

(c) 指標変数の参照

指標変数そのものに代入したり、指標変数の値を演算の対象とするときは次の表現をとる。

•VAL. 指標変数

(d) 指標代入文

実行時に指標代入文により指標変数にアドレス定数を代入する。右辺には、指標変数の参照または組込み関数 ADDR の引用を書く。ADDR は実引数に指定された変数名、配列要素名または配列名(添字がすべて 1 の配列要素とみなす)のアドレスを返す。

例 •VAL.P=ADDR (XYZ)

XYZ のアドレスが指標変数 P に入る。

•VAL.Q=•VAL.P

指標変数 P の値が指標変数 Q に入る。

(3) 指標変数の初期設定

指標変数へのアドレス定数の初期設定は DATA 文で行なう。初期値として整定数、変数名、配列名または配列要素名を指定する。

4.5 タスク制御文

オンライン実時間システムでは複数個のプログラムが適切な時点での緊急度に応じて動作することが基本的に必要である。従来の FORTRAN 等の高レベル言語では多重タスキング用の機能はなく、タスク管理の部分は通常アセンブラー言語で記述してきた。CONFORM IV ではタスク制御文として以下のようなものがある。

(1) ASSIGN-TASK 文

ASSIGN-TASK $t(a_1, a_2, \dots, a_n)$

タスク名の集合 a_1, a_2, \dots, a_n に代表タスク名を定義し、要素のタスク名は $t(i)$ という添字付き変数の形で参照する。

(2) CALL-TASK 文

CALL-TASK $t, p, z c, u$

タスク t に優先順位 p を与え、 z で指定するタイミングで起動する。 z はタスクの起動の仕方を示すキー語で“ECB”的とき、即時起動、“TIME”とすれば指定時刻に、“INTERVAL”とすれば、指定時間後におのの起動する。時間 c は分単位およびシステムカウントの単位で示される。 u はユーザ番号である。

(3) WAIT 文

WAIT $t, ECB c, k$

タスク t の終了同期を取る。 k はタスク t にエラーが発生したときの行き先文番号である。

(4) PURGE 文

PURGE t, u

ユーザ番号 u のタスク t を強制的に消滅させる。

CONFORM IV コンパイラは以下の方法により最適化を行なっている。

(a) 1語命令の使用

MELCOM 350-30 F 計算機には 1語命令と 2語命令があり、できるだけ 1語命令を使うような最適化を行なう。プロセス制御では整数型、論理型のデータ処理が多く、この最適化の効果は大きい。一方、2語命令の 1語命令化は実行時間の短縮にもつながる。

(b) 実行時パッケージのコア常駐化

実行時パッケージを主記憶域の常駐領域に置き、多重プログラミングシステムにおける多数のプログラム間で共用させることにより、メモリの節約が可能となる。このため実行時パッケージをすべてリentrant(再入可能なルーチン)にしている。

(c) コンパイル時における定数計算および添字計算

(d) 副プログラムの入力点における仮引数の一括埋込み

(e) 実行時パッケージ(組込み関数、基本外部関数も含めて)におけるレジスタ経由の実引数の受け渡し

(f) FORMAT 文の欄記述子のコード化

(2) 信頼性ビットオプション

MELCOM 350-30 F 計算機にはハードウェアのオプションとして信頼性ビットオプションがある。それは図 5.1 で示すように実数型、倍精度実数型、複素数型のデータの最終ビットをそのデータの信頼性を示すビット(正しい値である場合は“0”，そうでない場合は“1”)として扱い、それらのデータに対する演算の際にハードウェアが自動的に信頼性ビットの情報を伝達(播)する。

コンパイラではこれに対して、次のような考慮をしている。

(a) コンパイル時に信頼性ビットオプションを指定すると、信頼性ビットオプション付きのシステムで動作するオブジェクトプログラムを生成する。

(b) 実行時パッケージは信頼性ビット付きのものと、そうでないものが用意されている。

この機能およびビットデータ処理機能により、データの信頼性に関する処理が従来に比較して、一段と能率良く行なえるようになった。

(3) コンパイル速度のスピードアップ

CONFORM IV ではオンラインアセンブリ機能を含むが、アセンブリを経由せず、直接、オブジェクトプログラムを生成することにより、コンパイル速度のスピードアップを図っている。

また、プロセス制御用のプログラムは一般的の科学技術計算の場合と違い、例えば、何百という入力点におののの名前をつけるといったように、プログラム内で定義されるシンボルの数が多い。工業用計算機では一般に主記憶域の容量が限定されている場合が多いので、CONFORM IV コンパイラでは補助記憶域を主記憶域の延長と考え、ハッシュテーブル、リスト構造の採用等により能率の良いテーブル処理を行なっている。

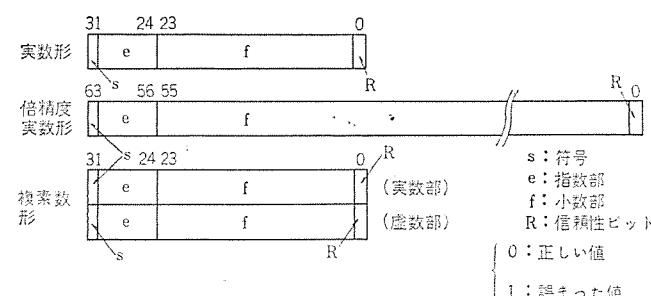


図 5.1 信頼性ビット付きデータの内部表現形
Internal form of data with reliability bit.

(4) デバッグに対する考慮

工業用の分野でのプログラムの作成形態を考慮して、デバッグをより能率的にするため次のような方策を講じている。

(a) トレース、テストコンパイルオプション

トレース、テストコンパイル機能については前章で既に述べたが、それらの機能をオブジェクトプログラムの中に含めるかどうかをコンパイル時に指定できる。

(b) コンパイル時の豊富なエラーメッセージ

コンパイル時に検出されるソースプログラム上のエラーについては、その内容がすべて英文で出力され、またエラーメッセージの種類も豊富なため、エラーの修正が容易にできる。

(c) ソースコードとオブジェクトコードの対応リスト

工業用の分野に適用される計算機システムは一般的の場合と異なり、現地の計算機システムに言語プロセッサ等が提供されていない場合がある。したがって現地で再コンパイルしないで直接オブジェクトコード上の修正によるデバッグが必要な場合があり、CONFORM IV ではオプションの指定により、ソースプログラムとオブジェクトコードの対応リストをシンボリックに見易い形でプリントする。

(d) コンパイラ自身のためのデバッグ機能

コンパイラは自分自身のためのデバッグ機能を内蔵しており、万一何かの原因で、コンパイラ自身が正常に動作しなくなった場合に、デバッグ情報が簡単に収集できる。

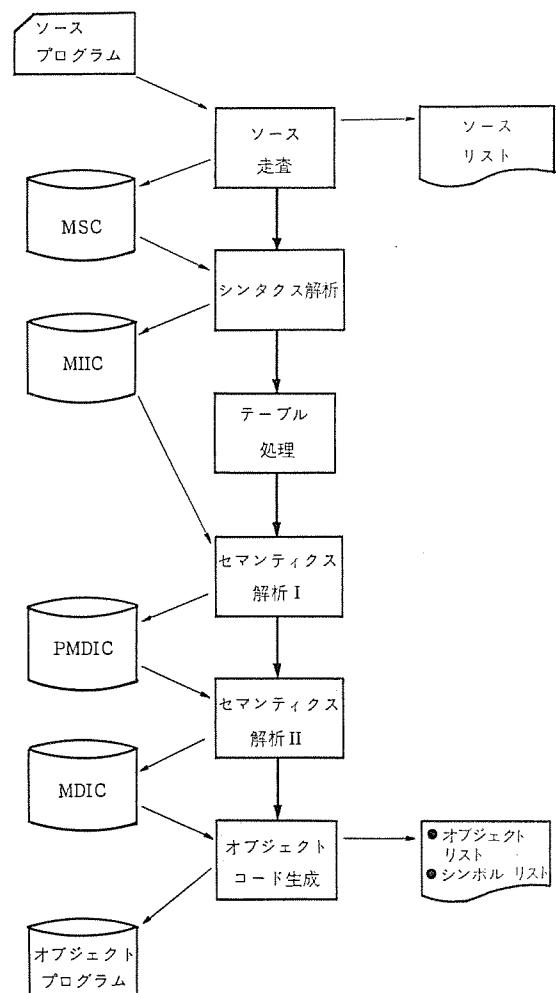


図 5.2 CONFORM IV のコンパイル過程
Compiling path of CONFORM IV.

(5) システム構成に依存しないコンパイラ

一般の計算機システムと異なり、工業用計算機システムの場合は入出力機器、補助記憶装置の構成および主記憶域の容量等は各システムごとにおののの独自に決められる。CONFORM IVコンパイラは条件付きアセンブリングとオーバーレイリンクージにより、おのののシステムで最も効率よく動くプロセッサに組立てられる。

5.2 コンパイラの構成

CONFORM IVコンパイラは図5.2に示すように論理的には六つのフェーズから構成されており、ソースプログラムのコードを以下に述べる中間コードに順次変換し、最後にオブジェクトコードを生成する。

(1) 修正ソースコード (MSC: Modified Source Code)

ソースプログラムから不要な空白や、注釈を取除いたもの。

(2) 機械独立中間コード (MIIC: Machine Independent Intermediate Code)

MSCに対して構文解析を行なって生成する機械独立な形をした中間コードで、式の部分はTRIPLEと呼ばれる1オペレータ:2オペランド形式の情報単位から構成される。

(3) 擬似機械従属中間コード (PMDIC: Pseudo Machine Dependent Intermediate Code)

MIICに対して更に解析を行なって生成するコードで、式の部分はPAIRと呼ばれる1オペレータ:1オペランド形式の情報単位から構成される。

(4) 機械従属中間コード (MDIC: Machine Dependent Intermediate Code)

PMDICから生成するMELCOM 350-30 Fアセンブラーコードに類似の中間コードである。

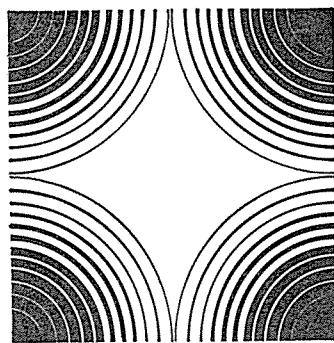
6. むすび

現在、原子力プラント、鉄鋼プラント等の分野でCONFORM IVが使われ始めているが、特にソフトウェアの生産性向上の面での寄与が大きい。今後、更に工業用計算機システムにおけるアルゴリズムの整理とそれに対応する言語機能の導入および改良等の努力を続ける必要があるとともに、ソフトウェアの流通を良くするという意味からプログラミング言語の標準化も考えていかなければならない。また一步進めてソフトウェアオリエンティドなハードウェアの設計ということも考慮していく必要がある。

CONFORM IVの開発と実用化に際しては社内関連部門から実用データの提供など多くの援助を頂いたことを記して謝意を表したい。

参考文献

- (1) 有田、首藤、関本、居原田:プロセス制御用コンパイラCONFORM RM、三菱電機技報45, No. 2, 213 (昭46)
- (2) 首藤、関本、春原:制御用手続き向き言語のための機能について、昭46、情報処理学会第12回大会、No. 70
- (3) 首藤、関本他:プロセス制御用言語CONFORM IV、昭47、電気関係学会関西支部連合大会、G7-34
- (4) 首藤、関本他:プロセス制御用言語CONFORM IVコンパイラ、昭47、情報処理学会第13回大会、No. 29
- (5) Herbert E. Pike, JR.: Process Control Software, Proceedings of IEEE, 58, No. 1 (1970)
- (6) James D. Schoeffler, et al.: A Real-Time Language for Industrial Process Control, Proceedings of the IEEE, 58, No. 1 (1970)
- (7) Minutes (1st-9th) Workshop on Standardization of Industrial Computer Languages, Purdue University



技術講座

超音波探傷試験法(4)

—超音波探傷器と探触子—

河野勝美*

1. 構造

超音波探傷装置は、普通、パルス反射式超音波探傷器、探触子ケーブルおよび探触子で構成されている。現在、パルス反射式超音波探傷器(以下、探傷器といふ)は、構造的および性能的な面で考えると、簡易形、ポータブル形、はん用形および専用形の4種類に大別できる。また、探触子は、用途から考えると表1.1のように区分される。

1.1 探傷器の構造

図1.1に、探傷器の外観構造の一例を示し、図1.2に電気的ブロック図の一例を示す。次に、このブロック図を中心に機能の概要を説明する。

(1) 電源部

各部への直流電圧(低圧から高圧まで)を供給する部分である。DC-DCコンバータ電源方式のものでは、普通、約1kHzから約10kHzまでの発振を行なっている。その出力の一部を同期部へ送り、電源同期をとっているものが多い。

全半導体化をはかった探傷器では、全電源は、一括、定電圧回路を使用して安定化をはかけており、一部、真空管を使用した探傷器では、ヒータ電圧以外はすべて定電圧回路を使用していることが多い。

(2) 同期部

時間軸部、送信部、ゲート部およびDAC部間の同期をとつてブラウン管波形を静止させる役目をもつていて。波形の繰返しは、普通、約50~約1,000Hzの範囲であり、この周波数を高くすると、波形は明るくなるが、ゴーストエコーは多くなる。

同期部の入力信号は、電源周波数から得ている場合が多い。

(3) 時間軸部

時間軸は、直線掃引方式がほとんどである。掃引の傾斜は、測定範囲つまみと音速ダイヤルにより可変できるようになっている。音速ダイヤルは、既知の音速に校正された直読式のものが多い。観測しやすいように、エコーの位置を調整するため、パルス位置つまみまたは掃引遅延つまみが装備されている。

繰返し周波数(以下PRFといふ)の切換えは、測定範囲つまみに連動して切換える方式と単独に切換える方式のものとの2種類がある。どちらの場合も、測定範囲を小さくすると、ブラウン管波形の輝度が暗くなるのでPRFを上げるようになっている。

表1.1 探触子の種類

区分	用途	形式
垂直用	直接接觸用	標準形
		保護膜付
	分割形	遅延材付
		遅延材付
		遅延材なし
	局部水浸用	膜付
	膜なし	
	水浸用	—
	その他	タイヤ探触子
斜角用	直接接觸用	固定角形
		可変角形
	局部水浸用	—
		タイヤ探触子
	その他	固定角形 可変角形

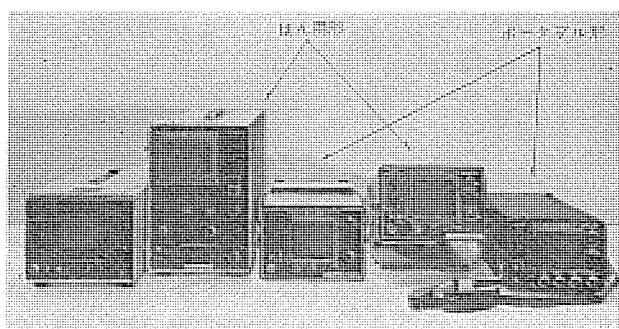


図1.1 パルス反射式超音波探傷器の外観構造例

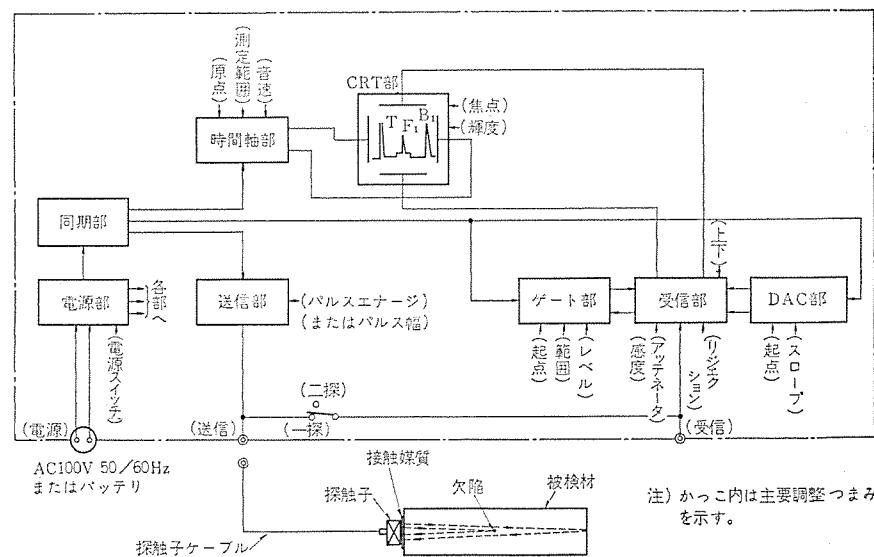


図1.2 パルス反射式超音波探傷器の電気的ブロック図の例

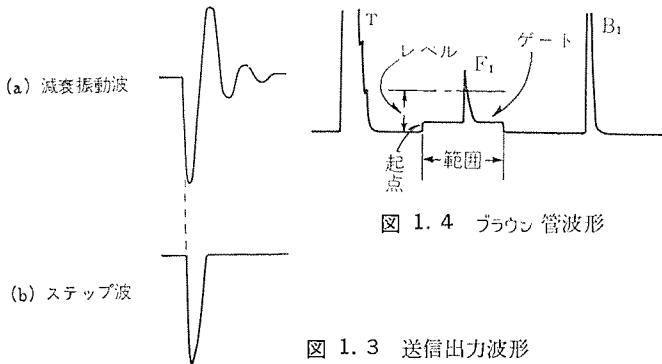


図 1.3 送信出力波形

この PRF の切換えにより、約 0.5~2 dB 程度の感度変化があるので、前者の場合、標準試験片で感度設定するときと実際に探傷するときで測定範囲を切換えることが多いので、若干の感度変化が生じることを知っておくことが必要である。

(4) 送信部

現在、送信部は、電子管式と半導体式のものがある。電子管式には、サイラトロンと真空管を使用したものとがあり、後者の場合は、前者にくらべて信頼性が高い。前者のサイラトロンは、寿命が一定でなく、少なくとも 500~1,000 時間ごとに取換える必要がある。

送信方式は、減衰振動波(図 1.3 (a))を出すものと、ステップ波(図 1.3 (b))を出すものとの 2 種類がある。また送信出力の調整つまみを備えており、送信波の振動数を主として変えるパルス幅調整つまみと送信波の振幅を主として変えるパルスエナージつまみとの 2 種類がある。

(5) 受信部

被検材からのエコーをブラウン管で観測できる程度まで増幅する部分である。アッテネータつまみは、普通、増幅回路の前段に 1 個、途中に 1 個以上の合計 2 個以上で構成されており、60~70 dB まで 0.5~2 dB ピッチで可変できる。増幅回路の途中に入っているアッテネータは、回路雑音(白色雑音)を減少させ得るが、増幅回路の前に入っているアッテネータは、回路雑音(白色雑音)を減少できない。1 個のアッテネータで 50 dB 以上変化させるものもあるが、精度が悪くなると共に、増幅直線性が悪くなる等の問題点があるため、2 個以上に分離して使用することが多い。

周波数切換え式と広帯域式の 2 種類があり、前者は、はん用形探傷器に、後者は、ポータブル形探傷器に使用されることが多い。

(6) ゲート部

ゲート部は、ゲートの起点と範囲つまみにより、ゲートマークを設定してブラウン管波形中の任意のエコーを選出し、ゲートのレベルつまみで設定したレベル以上のエコーが存在する場合、警報する機能をもっている(図 1.4 参照)。

(7) DAC 部

DAC 部は、距離に対応してエコー高さが低下していくことを補償する機能をもっている。ブラウン管上、エコー高さをほぼ同一値に補償

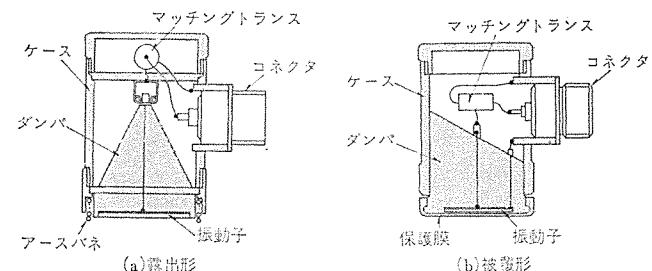


図 1.5 垂直探触子の構造例

する方式と、ブラウン管上、エコー高さは変化させず、ゲートレベル自体を曲線にする方式がある。

(8) CRT 部

CRT 部は、欠陥位置または被検材の厚みを観測する部分である。内面盛付角形ブラウン管が普及してきたので、従来の丸形ブラウン管にくらべて大形画面が得られ、誤差なく測定できるようになった。CRT 部には、焦点、上下、輝度調整等のつまみが装備されている。長期間使用中、もしブラウン管を交換した場合は、そのブラウン管の特性ばらつきに合わせて時間軸部の再校正をする必要がある。

1.2 探触子ケーブルの構造

探触子ケーブルは、一探触子用と分割形探触子用に大別できる。このケーブルは、同軸ケーブルが使用されているため、急激に折り曲げると破損しやすい。ケーブル長さは、探傷器の性能に影響を与えるので、指定長のものを使用する必要がある。

1.3 探触子の構造

1.3.1 超音波の発生と受信

結晶にひずみまたは応力を与えると、電気分極の起きる現象を圧電直接効果、逆に結晶に電圧を与えたとき、ひずみまたは応力の生ずる現象を圧電逆効果といい、これら二つの効果を総称して圧電現象という。この結晶の代表例として水晶、硫酸リチウムがある。

誘電体において電気変位の 2 乗に比例したひずみを発生する現象を電わい(歪)現象といい。普通の誘電体において、この現象は微弱にしか起こらないが、チタン酸バリウム、ジルコンチタン酸鉛およびニオブ酸鉛等のような強誘電体は、かなり大きく発生する。

電わい現象を利用して機械振動を起こさせるには、普通、誘電体を高電圧で分極することによって得られる残留分極に交流電気変位を印加することにより行なわれる。

各種振動子材料の特性を表 1.2 に示す。

1.3.2 垂直探触子の構造

垂直探触子の構造の一例を図 1.5 に示す。

垂直探触子は、振動子、ダンパー、マッチングトランジ、アースばねおよびコネクタ等の主要部品で構成されているものと、振動子、ダンパー、アースばねおよびコネクタ等の主要部品で構成されているものとの 2 種類がある。

振動子は、片面電極形と両面電極形の 2 種類があり、水晶振動子

表 1.2 各種振動子材料の特性

区分 特性	圧電振動子		電わい(压)セラミック振動子			備考
	水晶 SiO ₂	硫酸リチウム Li ₂ SO ₄ , H ₂ O	チタン酸バリウム系磁器 BaTiO ₃	ジルコンチタン 酸鉛系磁器	ニオブ酸鉛系磁器 PbNb ₂ O ₆	
種類	単結晶	単結晶	磁器材料	磁器材料	磁器材料	
切断方向	X 軸 0°	Y 軸 0°	—	—	—	
密度 [kg/m ³ (×10 ³)]	2.65	2.06	5.7	7.5	6.0	
誘電率	4.5	10.3	1,700	550	280	大きいとインピーダンス整合回路が必要
音響インピーダンス [kg/m ² s (10 ⁶)]	15.2	11.2	30	28	16	
振動様式	厚さ振動	厚さ振動	厚さ振動	厚さ振動	厚さ振動	
周波数定数 [MHz, mm]	2.870	2.730	2.6	1.8	1.4	
圧電率 (10 ⁻¹² m/V)	2.0	16	190	130	74-80	大きいほうがよい(送信)
圧電ひずみ(歪)係数 (10 ⁻⁵ V/m ²)	50	175	13	26	32	大きいほうがよい(受信)
電気機械結合係数 (%)	10	38	50	60	42	大きいほうがよい
機械的 Q (概数)	10 ⁶	—	400	500	11	一般に低いほうがよい
最高使用温度 (°C)	550	75	100	280	500	高いほうがよい

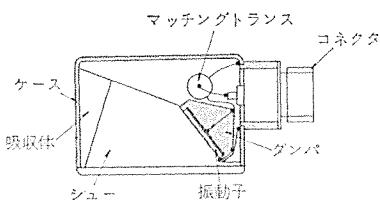


図 1.6 斜角探触子の構造例

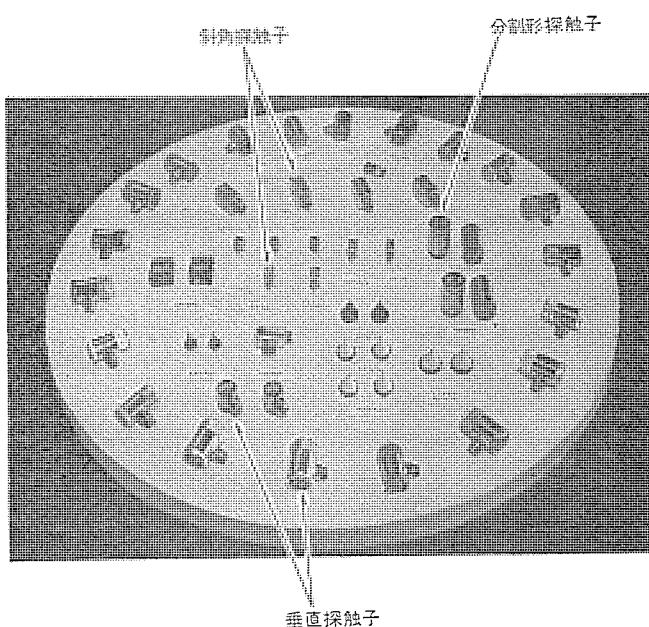


図 1.7 各種探触子の構造例

は、高インピーダンスのため片面電極形でも使用できるが、電わいセラミック振動子は、低インピーダンスのため必ず両面電極形を使用する必要がある。

片面電極形は、被検材を負電極として使用するため、図 1.5 (a)

表 1.3 探触子の表示記号

順序	内 容	種 别 記 号
①	試験周波数	数値そのまま、単位MHz
②	振動子材料	水晶: Q, 硫酸リチウム: L チタン酸バリウム系磁器: B ジルコンチタン鉛系磁器: Z 圧電磁器(不明なもの): C
③	振動子の大きさ	円板: 直径、単位:mm 2分割の場合は分割前の寸法で示す 角板: 高さ×幅、単位:mm
④	形 式	垂直: N, 斜角: A, 表面波: S 可変角: VA, 水浸: I タイヤ: W, 2分割: D を加える
⑤	屈折角	低炭素鋼への屈折角、単位: 度

のようにアースをとるようになっている。両面電極形は、電極保護のため、普通、保護膜付で使用するようになっている。

1.3.3 斜角探触子の構造

斜角探触子の構造の一例を図 1.6 に示す。

斜角探触子は、振動子、ダンパ、マッチングトランス、シュー、ケースおよびコネクタ等の主要部品で構成されているものと、振動子、マッチングトランス、シュー、ケースおよびコネクタ等の主要部品で構成されているものとの 2種類がある。どちらの場合も、シューが摩耗してくると、保護板をはりかえて使用することがある。斜角探触子用振動子は、高感度を目的として電わいセラミック振動子を使用することが多い。

1.3.4 探触子の表示

探触子は、JIS-Z-2344(以下、JIS という)で、表 1.3 のように表示することが規定されている。次に表示例を示す。

[例 1] 5 Q 20N	↓ ↓ ↓ ↓	[例 2] 2 Z 10 × 10 A 70
① ② ③ ④	① ② ③ ④ ⑤	① ② ③ ④ ⑤

図 1.7 に各種探触子の外観構造例を示す。

2. 性能・機能

(1) 総合感度

NDIS-2404 では、斜角探傷の場合、A1 感度が 40 dB 以上、A2 感度が 40 dB 以上 (45°) と 20 dB 以上 (70°) と規定されている。
(ただし、2~5Z 10×10~20×20 A、基準線 50 %)

総合感度は、試験周波数ごとに目盛板の基準線 (%) と標準穴のエコー高さの差をデシベルで表示することが多い。ただし、探触子の寸法・材質、保護膜の有無および各種つまみの条件を併記しなければならない。

(2) 遠距離分解能

JIS では、垂直探傷で 2 MHz の場合、少なくとも B 級以上とされている。試験周波数ごとに、図 2.1 (a) のように A、B の二つのエコー高さをそろえ、 $h_1=100\%$ に設定した後、A-B 間の谷の高さ h_2 を記憶しておく、アッテネータを調整して $h_1=100\%$ を h_2 まで下げ、そのときのアッテネータの値を遠距離分解能 X (dB) と表示する。同様に図 2.1 (b) のように B、C の二つのエコー高さをそろえ、 $h_3=100\%$ に設定した後、B-C 間の谷の高さ h_4 を記憶しておく、アッテネータを調整して $h_3=100\%$ を h_4 まで下げ、そのときのアッテネータの値を遠距離分解能 Y (dB) と表示する。この場合、リジェクションは、0 または OFF とする。ただし、探触子の寸法・材質、保護膜の有無および各種つまみの条件を併記しなければならない。

(3) 近距離分解能

垂直探傷において試験周波数ごとに、図 2.2 のように、第 1 回底面エコー (B_1) の高さを $h_1=100\%$ に設定後、送信パルス T-B₁ 間の谷の高さ h_2 (%) が、ほぼ 0 (%) になる鋼板厚み t (mm) を近距離分解能 t (mm) で表示する。ただし、探触子の寸法・材質、保護膜の有無および各種つまみの条件を併記しなければならない。

現在、5 MHz で近距離分解能 3~8 mm のものが多い。ただし、5Q 20 N、保護膜なし、パルスエナジー：最小、波形調整：ピーキング、リジェクション：OFF。

(4) 増幅直線性

JIS では、1 級：6 % 以下、2 級：8 % 以下と規定されている。試験周波数ごとに、STB-G を使用して、JIS の方法により測定を行なう。この場合、リジェクションは 0 または OFF とする。ただし、試験片の名称、エコーの名称、探触子の寸法・材質、保護膜の有無および各種つまみの条件を併記しなければいけない。

(5) 測定範囲

測定範囲とは、時間軸フルスケールのことで、通常、時間軸の粗調整つまみを測定範囲と表示している。測定範囲が相当広範囲の被検材の音速で校正されている方式と、鋼材の縦波または横波音速で校正されている方式の 2 種類がある。

普通、約 20 mm~約 5 m までの測定範囲が直読目盛になっているものが多い。

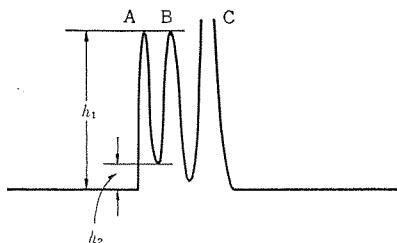


図 2.1 (a) Xの測定

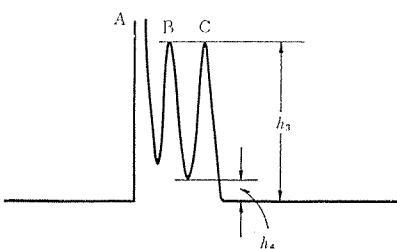


図 2.1 (b) Yの測定

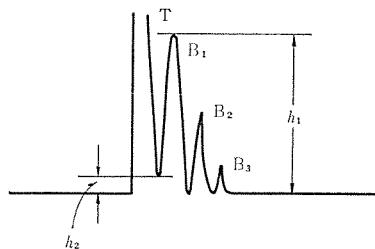


図 2.2 多重反射波形

(6) 音速設定範囲

上記(5)項の測定範囲が直読になるよう、時間軸の微調整つまみを測定範囲と超音波伝ば(播)時間との比、すなわち速度で校正したものが多い。水からアルミニウムまでの音速に設定できるものが多くなっている。

(7) 試験周波数

JIS では、金属探傷の試験周波数は、0.4~10 MHz を推奨している。試験周波数は、探触子へ印加する減衰振動波の振動数のことと言い、被検材へ接触させた状態で調整されている。

(8) 利得調整範囲

利得調整は、通常、アッテネータで行ない、JIS では 2 dB 以下、50 dB 以上の減衰量が規定されている。

(9) 時間軸の直線性

JIS では、前記(5)項、測定範囲の左端 20 % を除き、2 % 以上と規定されている。現在、(5)項の測定範囲について 1 % 以上のものが多くなっている。

(10) 使用電源

交流電源単独使用のものと、交直両用の 2 種類がある。ポータブル

形は、通常、後者の場合が多い。交流電源の場合、AC 100 V が多く使用され、直流電源の場合、特殊バッテリが多く使用されている。

(11) 連続使用可能時間

連続使用可能時間は、直流電源の場合のみ指定され、バッテリの容量・使用りれきおよび周囲温度により制限される。密閉形鉛バッテリのものが多く使用され、+20°Cで約5~10時間程度、連続使用できる。この鉛バッテリの場合、-5°Cで約3.5~7時間程度となる。また、鉛バッテリの場合、初期値の容量は低く、充放電20~30回後、容量増加後を基準に表示しているものもある。

(12) ゲート

ゲートは、タイミング方式とコンパレータ方式の2種類がある。前者は、測定範囲を切換えると、ゲートマーカの起点と範囲が関連して変化する方式であり、後者は、測定範囲を切換えても、ゲートマーカの起点と範囲が、ほとんど変化しない方式である。ゲートレベルは、10~100%間に、実際にエコーを入れて設定する方がほとんどである。ゲート数は、1チャネルのものが多いが、2チャネルのものもある。

3. 取扱い方法

探傷器を取扱う前に、下記事項を調査し、探傷方法が適当かどうか考慮しなければならない。

- (a) 被検材の製造りれきと用途
- (b) 予想される欠陥の方向性と分布
- (c) 検査規格または検査指示書
- (d) 標準試験片

3.1 探傷器、その他の準備

(1) 探傷器の使用環境や被検材の探傷範囲に応じて、探傷器と探触子の種類を選定すること。

(2) 普通、周囲温度は-5~+45°C、湿度は最大90%以下、機械的振動は一般車載程度以下の振動範囲で使用すること。

(3) 使用電源は、探傷器の種類に応じて、AC 100 V または十分充電された専用バッテリ(6 V, 10 V または 12 V, 使用極性は探傷器の種類により異なる)を確保する。

(4) 試験片、接触媒質(スピンドル油またはグリセリン等)、物差し、チョーク、グラインダ、筆記具および記録用紙。

3.2 各種つまみの調整

(1) 電源

ウォームアップタイムは、約5分程度である。電源スイッチを投入して、このウォームアップタイム経過後、各種つまみの調整を行なわなければならない。

(2) 試験周波数

被検材の寸法、材質、熱処理の状態および探傷範囲を考えて選定しなければならない。試験周波数の切換えは、探傷器のつまみを切換えると共に、その周波数の探触子を接続するものと、その周波数の探触子を接続するだけのものとの2種類がある。

(3) 時間軸

超音波探傷でもっとも重要なことは、ブラウン管上にあらわれたエコーが、超音波が被検材に入射したところから幾らの距離(斜角探傷の場合、ビーム路程という)のところからのものであるかを知ることである。そのため探傷器のブラウン管の時間軸は、距離をあらわすようになっている。

これらに関するつまみとして、次のものがある。

(a) 測定範囲と音速の調整

被検材の寸法に応じて、時間軸を縮尺または拡大するための調整つまみである。

(b) 零点の調整(パルス位置または掃引遅延の調整)

エコーの入射点を目盛板の0に調整し、またエコーを観測に便利な位置に調整するためのつまみである。

(c) 部分拡大の調整

このつまみは装備していない探傷器もある。エコーを観測する場合、特定部分を拡大するためのつまみである。

(d) 繰返し周波数(PRF)

斜角探傷の場合、ゴーストエコーの発生する不具合がないため、PRFを上げて波形を明るくして使用できる。

垂直探傷の場合、超音波減衰の少ない被検材では、ゴーストエコーの影響を受けるおそれがあるため、適当なPRFで使用する必要がある。

(4) 感度

超音波探傷で次に重要なことは、エコー高さ(欠陥寸法に関係する)である。感度は、測定すべきエコー高さがブラウン管上、読み取りやすい値になるように設定するつまみであり、送信側と受信側の両方で設定できる。送信側の感度設定は、パルス幅またはパルスエナジーフラッシュで設定できる。厚物(大物)探傷の場合、パルス幅またはパルスエナジーフラッシュは、できるだけ右回しいっぱいの状態にして標準試験片で感度設定したほうが、送信エネルギーが大きいため感度がよくなる。

受信側の感度設定は、アッテネータ、感度およびリジェクションつまみで設定できる。ただし、リジェクションつまみは小さい雑音的エコーを消して波形を見やすくするためのもので、特殊な場合以外は使用しないのが原則である。

3.3 探傷上の注意事項

(1) 探傷面の異物(ルーズスケール、さび(錆)、土砂等)は、探触子の接触をわるくし、かつ接触子面を傷つけるため除去しなければならない。普通、接触媒質は、探傷面が25S以下のあらさであれば、水またはスピンドル油でよいが、25S~150Sのあらさではグリセリンがもっともよい。

(2) 被検材の結晶粒が大きくなると、粒界反射をもたらすか、または超音波の透過性がわるくなり、実用上、探傷できないことがある。このとき、分割形探触子を使用すれば解決できる場合がある。

(3) 被検材中の内部応力により、音速の変化を生じて超音波ビ

ームが屈折することがあり、また偏析等に当って超音波ビームが曲ることがある。

(4) 超音波探傷で重要なことは欠陥の判定基準である。材料には厳密に無欠陥というものではなく、ある程度の欠陥のあるものでも、技術上、経済上から使用する場合もあり、どの程度の欠陥までが使用にあたって許容できるかが問題となる。エコーから得られる情報は、欠陥の位置と大きさに関するものだけであり、被検材の評価の根拠となる欠陥の実体を十分に知ることはできないことがある。そのため一定調度である基準を想定した場合でも、欠陥の状態いかんによって実用上、無害と思われる微小欠陥が基準以上に大きく指示されたり、また逆に当然廃却の対象となるような重大欠陥が基準以下に指示されるという例外的不確定さがある。このため原則的には、基準線による判定は避けるべきであり、もし、このような基準を採用する場合は、解釈にあたり検査の経済性と材料の安全係数等を考慮して柔軟性をもって考えるべきである。

いずれにしても、欠陥の判定は、被検材の使用条件や特性などをもとに発注者と受注者間で協議のうえ、取り決めることが望ましい。

3.4 使用終了

使用終了時は、電源スイッチを切るだけでよいが、ダイヤルの数字回転部、スイッチの根本および探傷器前面とケースとのすき(隙)間に付着した接触媒質、じんあい(塵埃)および水気等は、可動に支障を与え、かつ内部の部品を早期に劣化させるため、十分、清掃しなければならない。

3.5 保守点検

致命的な故障でなくても、探傷結果に影響を与えることがあるの

で、JISに規定する次の保守点検を実施しなければならない。

(1) 日常点検

探傷器の用途に応じて、(b)～(e)のうち、一つは必ず点検しなければならない。

(a) 一般的事項

- (b) 感度
- (c) 増幅直線性
- (d) 分解能
- (e) 時間軸直線性

(2) 定期点検

- (a) 感度
- (b) 遠距離分解能
- (c) 増幅直線性
- (d) 不感帶
- (e) 減衰器
- (f) その他、特に特定した特性

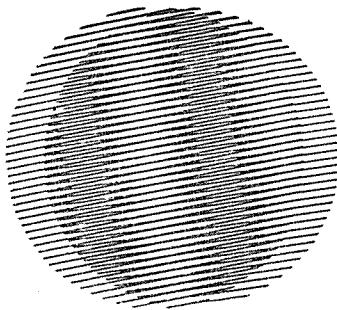
(3) 特別点検

次に示す場合に行なう。点検項目は、上記(2)に準ずる。

- (a) 装置に特別な衝撃を与えたと思われる場合
- (b) 修理を行なった場合
- (c) 探触子または探触子ケーブルを交換して、点検が必要と思われる場合
- (d) 特殊な環境条件で使用し、異常を感じた場合。

(昭和48-8-9受付)

新製品紹介



不燃性 22 kV モールド形 計器用変圧変流器 (MOF) 完成

従来、ビル受電設備用 22 kV 級 MOF は、不燃性油入形で製作されてきたが、PCB 公害問題で使用できなくなったため、豊富な実績のあるエポキシレジンモールド 技術を用いたモールド形 MOF を開発したので、紹介する。

外観を図 1 に、中身構造を図 2 に示す。

■ 定格

形名	EB-2
最高電圧	23,000 V, 絶縁階級 20 号 A
PT 部	変圧比 22,000/110 V 定格負担 2×100 VA
CT 部	変流比 100-50/5 A (一次切換え) 定格負担 2×40 VA 耐電流 25 kA 0.5 秒
階級	0.3 W 級、周波数 50-60 Hz
屋内用	エポキシレジン モールド 形

■ 特長

- (a) 火災・爆発のおそれがない
- (b) 保守・点検が不要
- (c) 小形・軽量
- (d) 吸湿による劣化、経年変化がない
- (e) 過電流に強い

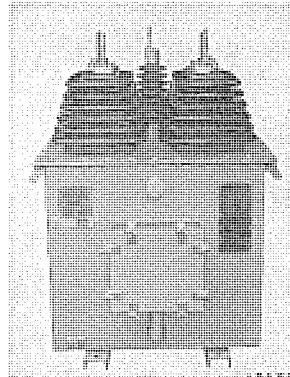


図 1 EB-2 形 MOF 外観

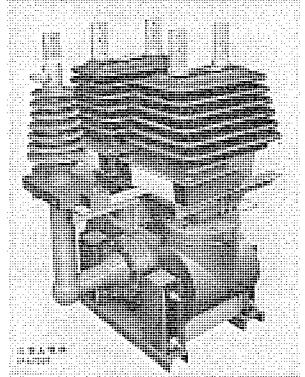


図 2 EB-2 形 MOF 中身

■ 当社の不燃油入形 MOF との比較

	EB-2 形	不燃油入形	備考
外形寸法	幅	750	935
	奥行	785	885
	高さ	1,060	1,265
総重量 (kg)	420	770	1:1.8
C T 耐電流	25 kA 0.5 秒	40 倍、1 秒	

なお、この MOF 開発品は、昭和 47 年 12 月より長期課電を続行中である。

【伊丹製作所】

新形クラッチモータ

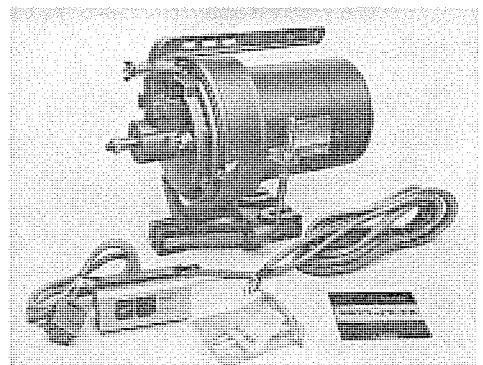
当社では、このほど工業用 ミシン用 クラッチモータの性能を一段と改良した新形 クラッチモータを開発した。

クラッチモータは作業者が意のままにミシンを操作できる操作性と、一般家庭内でも使用されるために要求される静諧性と、保守点検の必要性など、いくつかの厳しい要求を満す必要がある。

以下、新形 クラッチモータの改良の要点と仕様を紹介する。

■ 主な改良点

- (1) クラッチ板の形状、取付方法の改善により鳴き音の減少、寿命の向上、取換交換の省力化を計った。
- (2) レバー機構の単純化と動作の円滑な球面接手の採用により足踏みペダルの踏みタッチを一段と軽快にした。
- (3) 過酷な運転にも安心して使用できるように、モータのトルク特性とフライホイールの慣



新形 クラッチモータ CB-202 C 形 三相 200 V
50/60 Hz 200 W 2 P

新製品紹介

性モーメントとの相乗的性能の向上を計った。

■ 主な仕様

防じん(塵)フィルタ付※、開放保護形、A種絶縁

6V 照明ランプ用口出線付※、押しボタンスイッチ付

防振ゴム付、可逆転プラグ付※

単相 100V, 50/60Hz, 100~400W, 2P, 4P

三相 200V, 50/60Hz, 100~550W, 2P, 4P

(注) ※印は 200W 以上に標準装備されている。

なお、新形シリーズでは、自動運転のできる電磁操作式クラッチモータや、編機などに使用される高出力クラッチモータ、極数変換形の可変速クラッチモータなどの応用機種も準備されている。

[名古屋製作所]

オゾンによる漂白液再生装置

このたび NHK 代々木放送センタにオゾンによるカラーフィルム漂白液再生装置を納入した。漂白液中の赤血塩(シアノ化合物)は写真フィルムを漂白すると環元されて黄血塩となる。これをオゾンによって酸化し、赤血塩に再生し、公害防止上問題となるシアノ化合物を系外に排出せず、クローズドプロセスとして使用するものである。

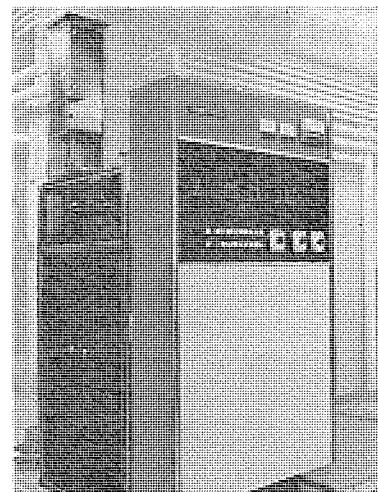
■ 構成

- (1) 漂白液再生そう(槽)
- (2) オゾナイザ
- (3) 空気乾燥装置

■ 特長

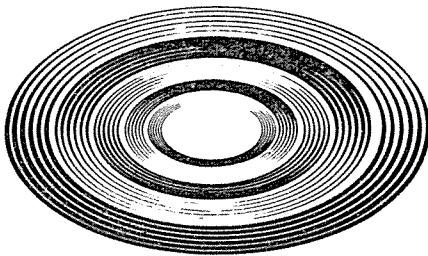
- (1) オゾナイザは高周波電源を採用し、小形化を図っている。高周波電源として静止形インバータを採用している。
- (2) NHK 放送センタ内に設置するにふさわしい、最新な意匠設計を行った。
- (3) システムの動作状況が一目でわかるディスプレイパネルが設けられ、操作並びに故障検出が容易にできる。

[名古屋製作所]



オゾンによる漂白液再生装置

NEWS FLASH



VX形真空しゃ断器

当社のVKG形真空しゃ断器は、これまで電力会社および一般工業関係の広い分野で実用されてきたが、さらにこれまでの製作経験実績を生かして、従来に比べてより高信頼性、高性能で小形軽量化を計った7.2kV級のVX形真空しゃ断器のシリーズを製品化し、既に納入を開始した。

このVX形真空しゃ断器は、真空スイッチ管容器のセラミック化およびしゅう(摺)動部の少ない簡単な操作機構を採用してしゃ断器全体をコンパクトにまとめ、より一層の信頼性の向上、小形化を計っており、一般産業、ビル施設、受変電設備の中核として信頼性の確保、省力化に貢献できるものと期待される。

■特長

- (1) しゃ断性能は抜群
しゃ断時間が短く、過酷な脱調・異相地絡・高速度再投入などの責務が可能
- (2) 高信頼度で長寿命
- (3) 保守点検項目が少なく、最少の保守で省力化の効果を上げうる
- (4) 閉鎖配電盤に2~3段積が可能で、従来よりスペースはさらに縮少化
- (5) 安全で周囲環境に調和
火災・爆発などのおそれのない高い安全性を有しあつしゃ断時の騒音もごくわずかな無公害しゃ断器

■仕様

VX形真空しゃ断器定格

形 名	6-VX-13		6-VX-20		6-VX-20	
準 準 規 格			JEC-181 (1971)			
定 格 電 壓 kV	7.2	3.6	7.2	3.6	7.2	3.6
定 格 電 流 A	600		1,200		2,000	
定 格 周 波 数 Hz	50/60					
定 格 しゃ断電流 kA	12.5	16	20	25	20	25
(参考) しゃ断容量 MVA	160	100	250	160	250	160
定 格 投入電流 kA	31.5	40	50	63	50	63
定 格 短時間電流 kA	12.5	16	20	25	20	25
開 極 時 間 s	0.025		0.025		0.03	
定 格 しゃ断時間 サイクル	3					
定格再起電圧上昇率 kV/μs (定格しゃ断電流の場合)	0.32	0.16	0.32	0.16	0.32	0.16
絶縁階級 (号)	6 A					
標準動作實務	A, B および R					
無負荷投入時間 s	0.1					
重 量 kg	130		145		190	
投 入 操 作 方 式	電気, 手動					
投 入 制 御 方 式	電気					
投 入 操 作 電 壓 (標準)	DC 100 V					
引きはずし操作方式	電気, 手動					

[神戸製作所]

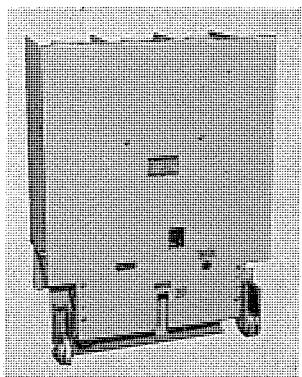


図 1 6-VX-20形 2,000 A
真空しゃ断器

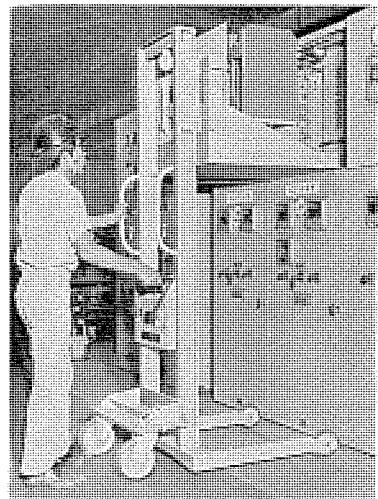


図 2 VX形真空しゃ断器収納状況
(FX形メタルクラッド)

九州電力(株)川内発電所向け 556 MVA タービン発電機完成

神戸製作所では、このほど九州電力(株)川内発電所1号ユニット用556 MVA, 3,600 rpm タービン発電機を完成した。本機は三菱重工高砂製作所製の500 MW 蒸気タービンと直結されるもので、固定子コイルは2列ベントチューブ方式による内部冷却とし、回転子コイルは標準内部冷却である。フレーム中心と鉄心中心を一致させた同心構造を採用して全体構造のコンパクト化を図っている。また、励磁方式としては、ブラシレス励磁機を採用したが、これは、火力用2極機に直結されるブラシレス励磁機としては国内で最大容量のものである。

タービン 定格： 500 MW

発電機定格

出 力： 556 MVA

電 壓： 18,000 V

力 率： 90 %

ガス 壓： 4 kg/cm²

短絡比： 0.64

回転数： 3,600 rpm

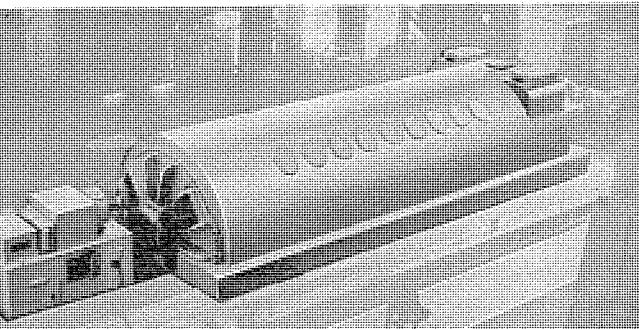
冷却方式： 内部冷却

励磁方式： ブラシレス

励磁機定格： 2,700 kW 540 V

本機は、発電機および励磁機単体でそれぞれ、各種の電気的・機械的試験を実施した後、発電機と励磁機を直結して試験したが、結果は極めて良好であった。

現在、発電所現地で鋭意据付中であり、来春運転開始の予定である。



[神戸製作所]

北海道電力(株)新冠発電所向け 105 MVA/102 MW 発電電動機完成

北海道電力(株)新冠発電所向けとして、かねてより鋭意製作中の105,000 kVA/102,000 kW 発電電動機が完成し、工場試験もこのほど好成績にて終了することができた。

この発電所には、現在製作中の#2号機とあわせて、発電電動機が2台設置されることになっており、完成のあかつきには水力プラント設備として、また揚水発電プラント設備と

して北海道地方で最大容量のものとなる。またこの発電電動機には、三菱重工(株)製の 103,000 kW/102,000 kW デリア形ポンプ水車が直結されるが、これはデリア形として今まで国内において製作された最大容量のものである。

そのほか、この発電電動機の特長として

(1) 電動機始動電圧： 電動機始動時の系統電圧のじょう(擾)乱を軽減するため、北海道電力(株)との共同研究により、系統インピーダンス、主変圧器および発電電動機の機器定数をすべて考慮して、系統電圧の変化および加速時間を電子計算機をもちいてシミュレートし、その結果に従って 40 % 低減電圧始動方式を選定した。

(2) 電動機始動時過負荷運転： この発電所の放水路は非常に長いので、揚水始動時のダウンサージにより一時的にポンプ揚程が増加する。そこでこのダウンサージが平常状態に落ちくまでのあいだ、電動機定格容量を超過する 120,000 kW 運転も可能な設計とし、ポンプ水車の良好な運転状態を妨げることのないものとした。

(3) 固定子コイル： 電動機始動時の短時間過負荷運転も可能なように、高温における諸特性にすぐれた新型エポキシ樹脂絶縁を採用した。

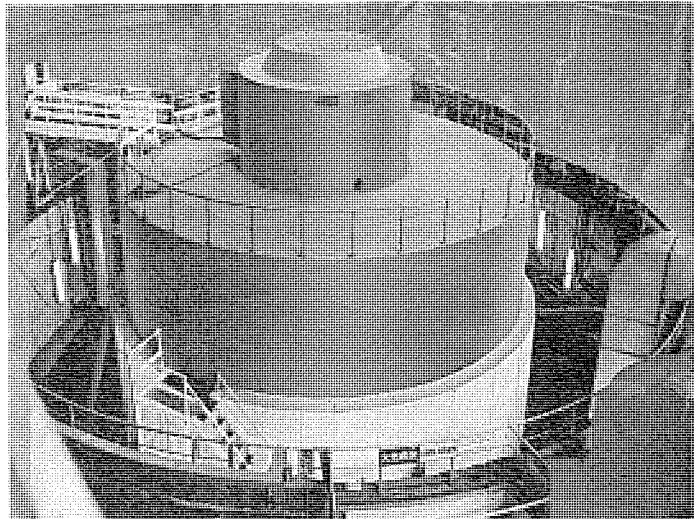
(4) 始動巻線： この発電電動機は低速大容量であるうえ、回転子のはずみ車効果 GD^2 が $4,000 \text{ t-m}^2$ ($2H=5.6$ 秒) と大きなものにもかかわらず、機器の経済性の見地より自己始動方式を採用した。このため特殊高抵抗銅合金製の強力な始動巻線が設けられている。

(5) 主軸： 発電電動機の主軸はもっとも剛性の要求されるものであるが、最大輸送重量が 40 トンと制限されているため、溶接構造主軸を採用し、両要求を満足することができた。

(6) スラスト軸受： 当社標準のキングスベリ形であるが、デリア形ポンプ水車の水圧推力の変化に対しても、とくに、たわみの少なくなる構造とした。また軸受油冷却器は油そう(槽)外部に設置され、潤滑油は別置のモータポンプセットによって循環される。また油そう周囲に点検窓を設け、ここから容易にパッドを交換できる構造とした。

なお発電電動機のおもな仕様はつぎのとおりである。

形 式	準かさ形回転界磁全閉内冷形	
	(発電機運転)	(電動機運転)
容 量	105,000 kVA	102,000 kW
電 圧	13,200 V	13,200 V
電 流	4,592 A	4,571 A
力 率	95 %	100 %
周波数	50 Hz	50 Hz
回転数	231 rpm	231 rpm
無拘束速度	497 rpm	
はずみ車効果	$4,000 \text{ t-m}^2$	
回転方向	時計方向	反時計方向
励磁方式	サイリスタ励磁	サイリスタ励磁



[神戸製作所]

====当社の登録実用新案====

登録番号	名 称	考 案 者	登録番号	名 称	考 案 者
969801	コードの端末部分保護装置	宍倉周作・鶴谷嘉正	972466	硬水加熱用ヒータ	松村恒男
970530	ポンプの自動運転装置	小平道徳	972467	絶縁発熱線	野畑昭夫・大竹操
970531	電気掃除機	加藤悟・南日国伸	972468	絶縁発熱線	野畑昭夫・大竹操
970533	やぐら付脚温器	山田英樹・加太義武	972469	絶縁発熱線	野畑昭夫・大竹操
970534	やぐらこたつ	米本春夫	972470	火花点火機関のジーゼリング防止装置	坂本敏之
970535	大小兼用こたつ上板	阿部五郎・鈴木清治	972471	シリコン制御整流素子の保護装置	杉本盛行・山本勇 飯田隆彦・小嶋鈴夫
970536	大小兼用こたつ上板	阿部五郎・鈴木清治	972472	シリコン制御整流素子の保護装置	杉本盛行・山本勇 飯田隆彦・小嶋鈴夫
970537	大小兼用こたつ上板	阿部五郎	972473	半導体装置	杉本和彦・上川孝
970538	ストーブ兼用足温器	山田英樹・加太義武	972474	電動工具	秋吉俊男・小井川茂
970539	電気あんか	阿部五郎・鈴木清治	972475	卓上丸鋸の保護装置	弘瀬潔
970540	食器洗浄機の洗剤投入装置	小川昇・村岡和典 関根文男	972476	空気調査装置	吉野昌孝
970541	折りたたみやぐらこたつ	田岡恒雄	972477	冷凍装置	松永勝利・高橋克己
970542	暖房器兼用衣類乾燥器	奥田文一・鶴谷嘉正	972478	蒸発式凝縮器	大場健司
970543	折りたたみやぐらこたつ	田岡恒雄・鈴木幸利	972479	冷凍装置	酒井誠記
970544	大小兼用こたつ上板	鈴木清治	972480	冷凍装置	河村求
970532	水中ランプ	大盛真次・宮井隆 柏村玲二郎・仙場幸治	972481	温水暖房器の放熱管取付装置	中村雄二・吉村晃
970545	交直両用電気カミソリにおけるスイッチ	木ノ内達夫・大原俊介	972482	冷凍装置	吉田輝義
971572	光学像検知装置	中塚正三郎・梅田義明	972483	吸収式冷暖房機の蒸発器用伝熱管	大場健司
971571	エレベータの到着予報装置	鷺津勝・日比野正義	972484	吸収式冷暖房機の蒸発器用伝熱管	大場健司・大槻昭義
972447	電気洗濯機	小原英一・小野健一	972485	こたつ上板	阿部五郎
972448	冷蔵庫	海野賢	972486	冷凍装置	福原敏・黒田猪三男 杉山敏和
972449	ヘアードライヤの空気切換弁装置	斎藤全平・大嶋英明	972487	静電濾過装置	荒井伸治・片寄文隆
972450	瞬時停電自動再投入装置	久松章三	972488	静電濾過装置	荒井伸治・片寄文隆
972451	扇風機	小木曾明男	972489	パッケージ型空調機における加湿器	森光幸次・則松真司
972452	差込み型接続器	糸魚川佐富・吉村勉	972490	空気調和機	高橋克己
972453	回転運動を軸方向運動へ変換する機構	藤田昇三	972491	空気調和機	高橋克己
972454	コードの抜け止め装置	野畑昭夫・原崎実 丹野正道	972492	製氷皿	田中毅
972455	コードの抜け止め装置	野畑昭夫・原崎実 丹野正道	972493	換気扇	田口幹雄
972456	コードの抜け止め装置	野畑昭夫・原崎実 丹野正道	972494	吸収式冷暖房機の蒸発器	小原英一・大場健司 笠置紘
972457	コードの抜け止め装置	野畑昭夫・原崎実 丹野正道	972495	電気こたつの発熱量切換装置	吉田茂夫
972458	磁気録音再生機	高橋広光・大塚洋俟	972496	ジグザグ式空気清浄器	平山建一
972538	気体圧縮機用液体排出装置	門原加納	972497	空気清浄器	平山建一
972459	内燃機関の蒸発燃料制御装置	小西寛示	972498	換気扇取付装置	牛越康徳
972460	内燃機関の蒸発燃料制御装置	小西寛示	972499	換気扇取付装置	田口幹雄
972461	ルーバーの取付装置	桜井信捷・須田洋	974228	鉄心溝を備えた電気機器	諸岡広・早川隆昭 中原庸行
972462	トランジスタ式テレビジョン受像機用電源装置	高橋廣光	974229	回転電機	岩土和孝
972463	発熱線保持装置	三ヶ田文彦・小林雅和	974230	電気黒板ふき装置	加藤悟・飯塚保
972464	電熱線取付装置	芹沢市夫	974231	電気黒板ふき装置	角野英雄・飯塚保
972465	電気発熱体のリード線接続装置	近藤正司・日比野浩一	974232	インバータ装置	大野栄一・赤松昌彦

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2番3号(三菱電機ビル) (西 100) (電) 東京 (03) 218局2111番

大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル) (西 530)	(電)	大阪 (06)	343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) (西 450)	(電)	名古屋 (052)	565局3111番
静岡営業所	静岡市伝馬町16の3番地(明治生命静岡支社) (西 420)	(電)	静岡 (0542)	54局4681番
福岡営業所	福岡市中央区天神2丁目12番1号(天神ビル) (西 810)	(電)	福岡 (092)	72局2111番
長崎営業所	長崎市丸尾町7番8号(長崎底良会館) (西 852)	(電)	長崎 (0958)	61局6101番
札幌営業所	札幌市中央区北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (西 060-91)	(電)	札幌 (011)	212局3711番
仙台営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル) (西 980)	(電)	仙台 (0222)	21局1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号 (西 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) (西 730)	(電)	広島 (0822)	48局5311番
岡山営業所	岡山市駅前町1丁目9番地(明治生命館) (西 700)	(電)	岡山 (0862)	25局5171番
高松営業所	高松市鶴屋町2番1号 (西 760)	(電)	高松 (0878)	51局0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目2番地23号(北陸ビル) (西 950)	(電)	新潟 (0252)	45局2151番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル) (西 100)	(電)	東京 (03)	218局2111番
関東商品営業所	大宮市大成町4丁目298番地(三菱電機大宮ビル) (西 330)	(電)	大宮 (0486)	65局3211番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1 (西 530)	(電)	大阪 (06)	344局1231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) (西 450)	(電)	名古屋 (052)	565局3111番
福岡商品営業所	福岡市中央区天神2丁目12番1号(天神ビル) (西 810)	(電)	福岡 (092)	72局2111番
札幌商品営業所	札幌市中央区北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (西 060-91)	(電)	札幌 (011)	212局3777番
仙台商品営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル) (西 980)	(電)	仙台 (0222)	21局1211番
北陸商品営業所	金沢市小坂町西97番地 (西 920)	(電)	金沢 (0762)	52局1151番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル) (西 730)	(電)	広島 (0822)	48局5311番
高松商品営業所	高松市鶴屋町2番1号 (西 760)	(電)	高松 (0878)	51局0001番
東京機器営業所	東京都港区北青山1丁目2番3号(青山ビル) (西 107)	(電)	東京 (03)	404局0336番
大阪機器営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1 (西 530)	(電)	大阪 (06)	344局1231番
名古屋機器営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル) (西 450)	(電)	名古屋 (052)	565局3111番
静岡機器営業所	静岡市小鹿2丁目1番22号 (西 420)	(電)	静岡 (0542)	82局2061番
浜松機器営業所	浜松市海老塚町479の1 (西 430)	(電)	浜松 (0534)	54局4121番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (西 661)	(電)	大阪 (06)	491局8021番
生産技術研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (西 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 (西 247)	(電)	鎌倉 (0467)	44局6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町1丁目1番2号 (西 652)	(電)	神戸 (078)	652局2121番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (西 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 (西 669-13)	(電)	三田 (07956)	3局4371番
赤穂工場	赤穂市天和651番地 (西 678-02)	(電)	赤穂 (07914)	3局2221番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号 (西 850-91)	(電)	長崎 (0958)	61局6211番
稻沢製作所	稻沢市菱町1番地 (西 492)	(電)	稻沢 (0587)	32局8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地 (西 640-91)	(電)	和歌山 (0734)	36局2111番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地 (西 247)	(電)	鎌倉 (0467)	44局1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (西 661)	(電)	大阪 (06)	491局8021番
北伊丹製作所	伊丹市瑞原4丁目1番地 (西 664)	(電)	伊丹 (0727)	82局5131番
熊本第一工場	熊本市竜田町弓削720番地 (西 862)	(電)	熊本 (0963)	38局7211番
熊本第二工場	熊本県菊池郡西合志町御代志997 (西 861-11)	(電)	熊本 (09624)	2局0151番
名古屋製作所	名古屋市東区矢田町18丁目1番地 (西 461)	(電)	名古屋 (052)	721局2111番
旭工場	尾張旭市下井町下井 (西 488)	(電)	尾張旭 (05615)	3局5101番
福岡製作所	福岡市西区今宿青木690番地 (西 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 (西 720)	(電)	福山 (0849)	21局3211番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号 (西 229)	(電)	相模原 (0427)	72局5131番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地 (西 670)	(電)	姫路 (0792)	23局1251番
静岡製作所	静岡市小鹿3丁目18番1号 (西 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 (西 508)	(電)	中津川 (05736)	6局2111番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号 (西 247)	(電)	鎌倉 (0467)	44局6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号 (西 963)	(電)	郡山 (0249)	32局1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地 (西 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 (西 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岡所1番地 (西 617)	(電)	京都 (075)	921局4111番
長野工場	長野市大字南長池字村前 (西 380)	(電)	長野 (0262)	43局1101番
札幌営業所	札幌市中央区北2条東12丁目98番地 (西 060)	(電)	札幌 (011)	231局5544番

次号予定

三菱電機技報 Vol. 47 No. 11

研究特集

《特集論文》

- 超高速列車用超電導電磁石およびクライオスタットの開発
- 高出力 CO₂ レーザ
- コルゲート円すいホーンアンテナ
- 電界効果型ネマティック液晶を用いたカラーディスプレイ技術
- 有限要素法による構造解析のための自動データ作成法
- 凍結一融解による汚泥処理
- GaAs 液相エピタキシャル結晶

- 低圧 TIG アークによる高速片面溶接法

- 各種試験法による絶縁材料の耐トラッキング性
- カルシアーアルミナ系ガラスの封着性能
- 家電用接触機構部品の信頼性

《普通論文》

- シーケンス制御装置 MELSEC-310
- シーケンス制御装置 MELSEC-710
- 三菱マイクロコントローラ MELMIC-100

《技術講座》

- 超音波探傷試験法(5)——超音波探傷の実際
その1——

三菱電機技報編集委員会

委員長 正木茂雄
副委員長 神崎遼
常任委員 伊藤一夫
" 上田重夫
" 宇佐見重夫
" 大田重吉
" 北川和人
" 古賀亨
" 外野範吾
" 塚本信雄
" 藤永敦

常任委員 堀謙二郎
" 渕武雄
" 武藤正
" 吉松誠一
委員 畠谷一雄
" 武田忠夫
" 林昇寿
" 待鳥正
" 吉武正彦
" 若宮佐三

(以上 50 音順)

三菱電機技報 47 卷 10 号

昭和 48 年 10 月 22 日印刷 昭和 48 年 10 月 25 日発行「禁無断転載」定価 1 部 金 200 円(送料別)

編集兼発行人

東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号

正木茂雄

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 2 番 3 号 (郵便番号 100)

三菱電機株式会社内

「三菱電機技報社」

(電話) (03) 218 局 2323 番

発売元

東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地 (郵便番号 101)

株式会社 オーム社書店

(電話) (03) 291 局 0912 番 振替口座 東京 20018 番