



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



三菱電機技報

6

2019

Vol.93 No.6

持続的成長を支える電機システム技術



目次

特集「持続的成長を支える電機システム技術」

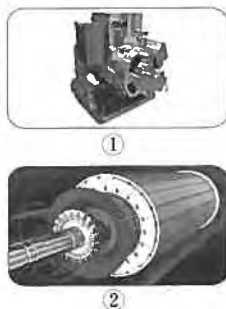
京都大学を捕まえる……………	巻頭言	1
北村隆行		
電気機器の持続的向上を支える基盤技術……………	巻頭論文	2
大森見裕		
電気信号情報を活用したモータ設備の異常検知技術……………		7
金丸 誠・井上 啓・宮内俊彦・林 和史		
高速・高出力モータを実現する回転機設計技術……………		11
水田貴裕・伊藤一将・栢山盛幸・久米将実・高島由晴		
新アブレーション材料を適用したアーク冷却技術 によるSF ₆ ガス遮断ユニットの性能向上……………		15
佐藤基宗・川名隆志・中村泰規		
電力機器の絶縁評価技術……………		19
吉村 学・海永壮一朗・梅本貴弘・大竹泰智・菅 健一		
空調用熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術……………		23
尾中洋次・松本 崇		
スクロール圧縮機の圧縮過程での熱流体挙動解析……………		27
河村雷人・岩竹 渉・清水瑞穂・達脇浩平		
圧縮機の非定常油挙動の実験的評価技術……………		31
森山貴司・村上泰城		
非相溶油を適用したHFO及びHC冷媒の トライボロジー特性……………		35
佐々木辰也・中尾英人・水野康太・高橋真一		
沸騰現象を利用した電子機器冷却技術……………		39
篠崎 健・浅井勇吾・牛房裕之		
電機製品の構造信頼性を支える材料強度加速評価技術……………		43
越前谷大介・澤田祐子・安藤順昭		
製品開発を支える振動・音響解析技術……………		47
柳館直成・和田拓真・八重樫直樹・江崎雄也		
電力変換システムの電磁ノイズ低減技術……………		51
春名延是・高橋慶多・長澤 忍・夏野一成・Luc Rambaud		

Electromechanical Technologies to Support Sustainable Growth Catch Kyoto University Takayuki Kitamura
Fundamental Technologies for Continuous Improvement of Electric Machines Akihiro Daikoku
Fault Detection Technique for Motor Equipment Using Electrical Signal Information Makoto Kanemaru, Hiroshi Inoue, Toshihiko Miyachi, Kazufumi Hayashi
Rotating Machine Design Technology for High Speed and High Output Electric Motor Takahiro Mizuta, Kazumasa Ito, Moriyuki Hazeyama, Masami Kume, Yoshiharu Takashima
Improvement of SF ₆ Interrupter Performance by Arc Cooling Technology with New Ablation Material Motohiro Sato, Takashi Kawana, Yasunori Nakamura
Insulation Evaluation Technologies of Power Equipments Manabu Yoshimura, Soichiro Kainaga, Takahiro Umemoto, Yasutomo Otake, Kenichi Suga
Thermal Fluids Technologies to Improve Heat Exchanger for Air-conditioning Yoji Onaka, Takashi Matsumoto
Analysis of Thermal Fluid Behavior during Compression Process of Scroll Compressor Raito Kawamura, Wataru Iwatake, Mizuho Shimizu, Kohei Tatsuwaki
Experimental Evaluation Technology for Oil Behavior during Unsteady-state in Compressor Takashi Moriyama, Hiroki Murakami
Tribology Characteristics of HFO and HC Refrigerants with Immiscible Oils Tatsuya Sasaki, Hideto Nakao, Kota Mizuno, Shinichi Takahashi
Cooling Techniques of Electronic Devices with Boiling Phenomenon Masaru Shinozaki, Yugo Asai, Hiroyuki Ushifusa
Accelerated Evaluation Technologies of Material Strength for Electric Industrial Products to Support Structural Reliability Daisuke Echizenya, Yuko Sawada, Nobuaki Ando
Vibration and Acoustic Analysis Technologies to Support Product Development Naomichi Yanagidate, Takuma Wada, Naoki Yaegashi, Yuya Ezaki
Electromagnetic Interference Reduction Technologies for Power Conversion Systems Nobuyuki Haruna, Keita Takahashi, Shinobu Nagasawa, Kazushige Natsuno, Luc Rambaud

関連拠点紹介…………… 55

特許と新案

「車両用回転電機」「回転電機」……………	57
「デュアルモードチョークコイル及びそれを用いた 高周波フィルタ並びに車載用モーター一体型電動パワー ステアリング及び車載用充電装置」……………	58



①



②

表紙：持続的成長を支える電機システム技術

この特集号では、三菱電機製品である電気機器の持続的向上を支える基盤技術と、それらを活用した開発提案事例を紹介する。

- ① 沸騰現象を利用した冷却方式は、ポンプやファンなどの冷媒を循環する装置が不要なため、機器の小型化に寄与する。車載用インバーター一体型モータのプロトタイプを製作し、その効果を実証した。
- ② タービン発電機のコイル内銅素線に至る細部までモデル化した大規模解析モデルによって、運転中の電磁損失や温度分布、変形などの挙動を詳細に把握している。

巻/頭/言

京都大学を捕まえる

Catch Kyoto University

北村隆行

Takayuki Kitamura



今世紀に入って20年が経過しようとしている。日本の製造業にとって難しい時期であったと指摘する声が多い。したがって、企業での研究にも出口からの思考が厳しく求められたのも合理的なことであったと理解できる。一方、大学に所属する一研究者の眼からは、外部からイノベーションの掛け声が強まるのに対して、企業研究者の新たな知識・知恵への冒険心が逆に萎縮したように見受けられる。端的な表現をお許しいただければ、結果が確実に見通せる堅実型研究や類似アイデアの安直型イノベーションが幅をきかせているように見える最近である。製造業での技術者・研究者の本来の強みは、現場からの多様な知識に基づく発想力と体系的な知識を活用する集中力にあると思われる。ここで、米中独等の国々に比べて、我が国の大学の学術研究が持つ潜在力を企業研究が活かしてきれていないように感じている。これに対して国家プロジェクト等では、好調な海外の産学連携制度を切り貼りのように移入することが次々提案されているが、制度はその国や組織に固有の文化の中にあるため、切り貼りはうまく機能しないことが多い。個々のグループ(個別の企業や大学)の文化に合った方法を開発するしかない。

三菱電機と京都大学工学研究科の共同研究では、“基礎研究”というキーワードを胸に秘めて、各々の産学文化を基盤にした新しいグループ(組織)対グループ(組織)連携へのチャレンジを行ってきている。特定の狭い技術知識とそれに対応する研究資金の単純な物々交換的連携から脱して、塊の知識を媒体にした集団的交流を大切にしている。この共同研究では、システム系とデバイス系の二つのグループができています。三菱電機での技術・工学基盤として強みがある電気機械に関連が深い分野であり、両者の知識が掛け算で伸びると期待している。

基礎研究という言葉は、それを使う人や場によって意味が大きく異なる。例えば、ビッグバンのような人の存在圏から遠く離れたものに対する知識を指す場合も多い。京都

大学は、自由や独立の考え方とともに、基礎研究に伝統がある大学である。しかし、研究科によって学問の中身が異なるため、基礎研究の定義や内容には微妙な相違がある。工学は技術に関する体系的な知恵であり、それに関わる自然科学とシステム科学から構成されている。工学研究科は、それらの学術基盤を深く探求することを基礎研究と呼んでいる。一方、三菱電機は歴史的に独自の創造的技術に特長があり、基礎から製品までをつなぐ芯が通っている組織である。技術開発・研究に必要なインスピレーションは、往々にして意外な分野からやってくる。また、それらのシステムを隙なく製品に作り上げるためには体系的な学術(工学)が必要である。私は、インスピレーションをもたらし研究and/or体系的基盤を成す研究を、京都大学工学研究科らしい産学連携基礎研究と考えている。

さて、従来の産学連携は知識だけが産学バウンダリを超える共同研究であった。それは、便利使いのスポット的知識移転である。人間の生死を超えるものとして、世界中に生まれ変わり(転生)の伝説や概念がある。この概念で大切なのは、前世の知識等を運ぶ担体(魂?)が必要なことである。産学連携でも、本質的な連携価値を獲得・持続するためには、知識・技術を担った人(知識の担体)がバウンダリを越えて移動するのが、根源的な知恵移転である。三菱電機と京都大学工学研究科は地力に優れた人材を擁しており、共同した“基礎研究”の実現は知識の担体を活性化することによって成される。すなわち、易動度の高い技術者・研究者が鍵となる。大組織では往々にして易動度を高めるための制度設計に振り回されることが多いが、活発な担体は制度そのものを乗り越えてしまう“人”であることから、簡単な制度と柔軟な運用が肝要であろう。特に、若手技術者・研究者が最も易動度が高いと考えられ、しかもバウンダリを行き来した経験が将来に残る。三菱電機の若手や京都大学の若手教員・大学院生の越境能力が核心であり、共同研究の新展開を牽引(けんいん)すると期待している。



大穀晃裕*

電気機器の持続的向上を支える基盤技術

Fundamental Technologies for Continuous Improvement of Electric Machines

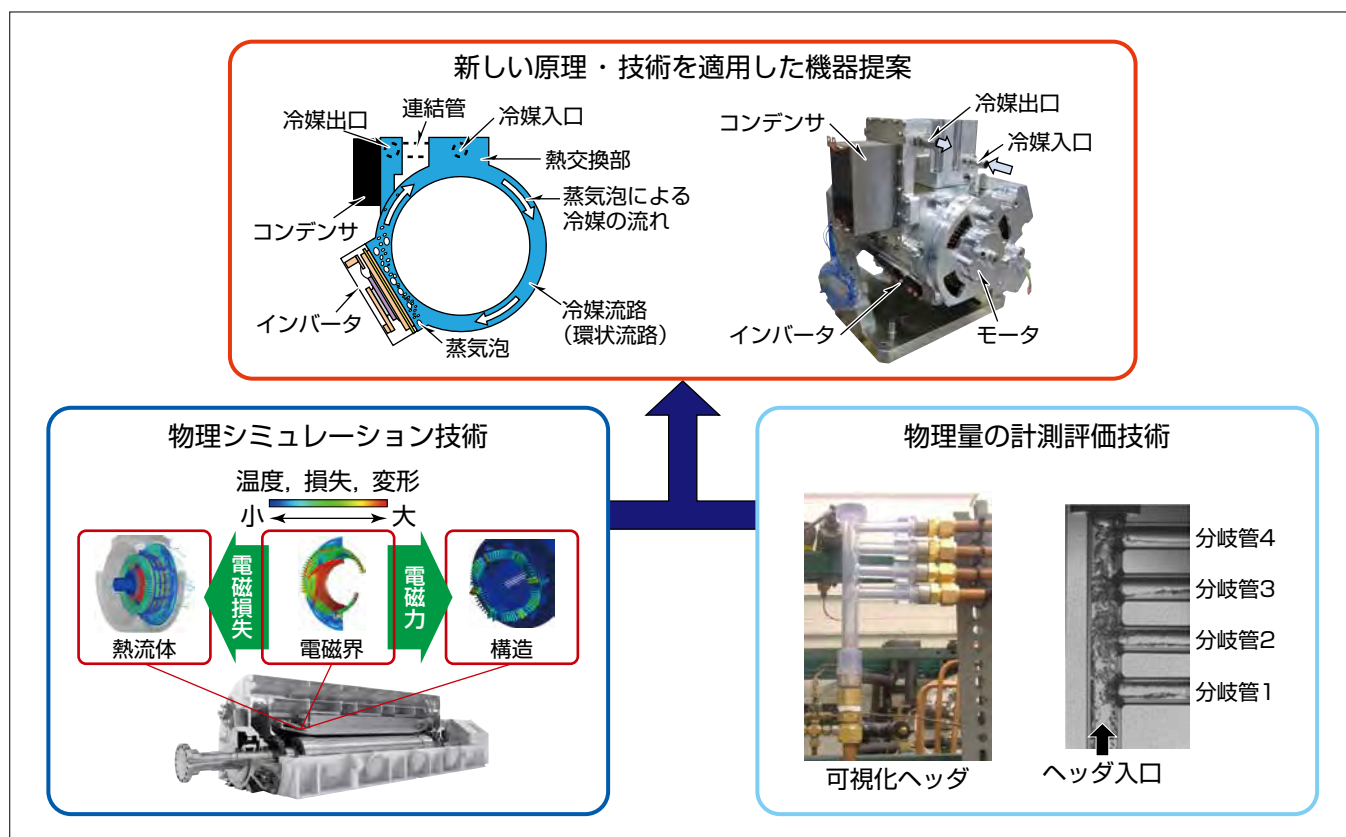
Akihiro Daikoku

要 旨

三菱電機が提供する、空調冷熱機器、FA機器、車載機器など多くの製品が所望の性能を実現する上で、電気、機械、熱などの物理現象に基づく製品設計が重要となる。当社製品がその機能・性能・品質の持続的向上を実現していくためには、これらの物理現象を把握して設計に反映することが不可欠である。

今回の特集号では、当社製品である電気機器の持続的向上を支える基盤技術と、それらを活用した機器提案事例を掲載した。本稿ではそのうち一部についての概要を述べる。物理シミュレーション技術では、パワー半導体を用いた電

力変換器を対象にした電磁ノイズ解析技術、スクロール圧縮機を対象にした熱流体挙動解析技術、タービン発電機を対象にした電磁-熱-構造の連携解析技術について述べる。物理量の計測評価技術では、電力機器の絶縁評価技術、熱交換器内の気液二相冷媒分流器の分流可視化計測技術、材料強度低下の加速評価技術について述べる。また、これらの基盤技術を活用した新しい原理に基づく機器提案事例として、沸騰冷却技術を用いたインバータ冷却装置について述べる。この特集号が、当社製品を支える技術を理解する上で、少しでも読者の参考になれば幸いである。



電気機器の性能向上を支える基盤技術

物理シミュレーション技術や物理量の計測評価技術は、電気、機械、熱などの物理現象に基づく当社製品の設計を支える基盤技術である。この技術を活用することで、新しい原理・技術を適用した機器提案を行い、機能・性能・品質の持続的向上を実現している。

1. ま え が き

当社が提供する、空調冷熱機器、FA機器、車載機器など多くの製品が所望の性能を実現する上で、電気、機械、熱などの物理現象に基づく製品設計が必要となる。これらの物理現象を把握して設計に反映することが、機能・性能・品質の良好な製品の実現に不可欠である⁽¹⁾。

本稿では、この特集号に掲載した論文の内容に基づいて、当社製品を支える物理シミュレーション技術、種々の物理量の計測評価技術と、それらを活用した、新しい原理に基づく機器の提案事例について述べる。

2. 高精度設計のための物理シミュレーション技術

製品の開発や設計の期間短縮、新機能の有効性検証、信頼性確認の高精度化等を実現する上で、物理シミュレーション技術が有効に利用される。ここでは代表的な例として、パワー半導体を用いた電力変換器の電磁ノイズ解析技術、スクロール圧縮機の熱流体挙動解析技術、タービン発電機の電磁-熱-振動の大規模連携解析技術について述べる。

2.1 パワー半導体を用いた電力変換器の電磁ノイズ解析技術

パワー半導体の適用拡大に伴い、電力変換器の高電力密度化による小型化が急速に進んでいる。パワーモジュールに加えコイル、コンデンサ、バスバー、プリント基板など電力変換器内部の多くの電気部品が従来よりも密接して実装される。このため、これら電気部品同士の電磁結合に起因した空間を伝搬する電磁ノイズによって、電子機器の誤動作が誘発される可能性が無視できなくなりつつある。

開発試作後に電磁ノイズ対策が必要となった場合、ノイズの原因となる電磁結合の低減をトライアンドエラーで行うと、対策期間が長期化する。試作前にあらかじめノイズ伝搬量を予測し、設計の上流段階で対策を施すことが重要である。

従来は、各電気部品の高周波インピーダンスを反映した電気回路モデルを各々作成し、これらを組み合わせた全体回路モデルの回路解析を行ってノイズ伝搬量を予測していた。電気部品同士の電磁結合を網羅的に回路モデルに追加する必要があり、モデル作成に膨大な時間を要していた。

今回、電力変換器の内部構造及び電気部品を全て三次元モデル化して電磁界解析を行い、電気部品間の電磁結合を網羅的に考慮する技術を開発した⁽²⁾。結果の一例を図1に示す。電磁結合が生じることで、3 MHz以上で最大20dB程度ノイズが増加する様子が解析で予測でき、実測値と解析値はおおむね10dB以内の精度で一致している。

2.2 スクロール圧縮機の熱流体挙動解析技術

ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンに搭載されるスクロール圧縮機を対象に、冷媒ガス圧縮過程の複雑な

熱流体挙動を解明する流体解析技術を開発している。圧縮過程での三次元流動解析技術の動向として、簡易な幾何形状で構成されるレシプロ型やロータリ型に関する報告は数多くあるが、複雑な幾何形状を持つスクロール型に関する報告は少なかった。今回、スクロール圧縮機での熱流体現象の高精度予測技術を構築するため、①スクロール揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した高精度な流体解析技術を開発した⁽³⁾。図2では①に関し、揺動スクロールの回転位相ごとの圧縮機構部の静圧分布図を示す。揺動運動による流体領域の幾何形状変化に伴う、吸入過程→圧縮過程→吐出過程での状態量変化が解析で得られていることが分かる。解析結果の妥当性は、実機を用いた測定結果と比較して検証している。この技術を用いて、スクロール巻終わり付近(=圧縮室の入口)での冷媒吸入や、最内室での混合流動など、複雑な流動現象を確認できるようになった。

2.3 タービン発電機の電磁-熱-振動大規模連携解析技術

電磁機器では振動がしばしば課題となるが、製品運転時は複数の物理現象が関連して振動が生じることが多い。回転機の例では、回転に伴い電磁場が回転移動することで作用する電磁力が変動し、振動が生じる。また通電によって温度が上昇して材料物性値が変化すると固有値が変化し、振動の様相も変化する。すなわち、電磁、熱、振動の三つを考慮しないと振動を正確に予測できないが、物理場が異なるため解析方法が異なり、連成解析が困難であった。

今回、発電機やモータの挙動の高精度予測を目的として、電磁-熱-構造大規模連携解析技術を開発した⁽⁴⁾。製品全

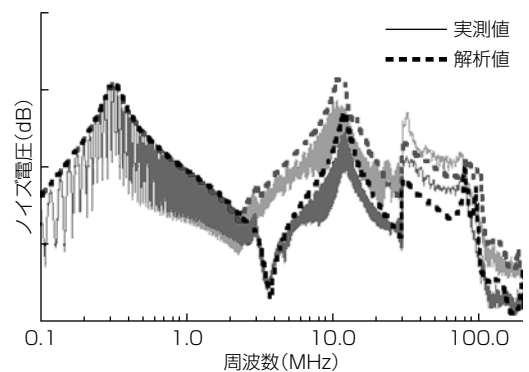


図1. 電磁結合有無でのノイズ電圧の解析値と実測値の比較

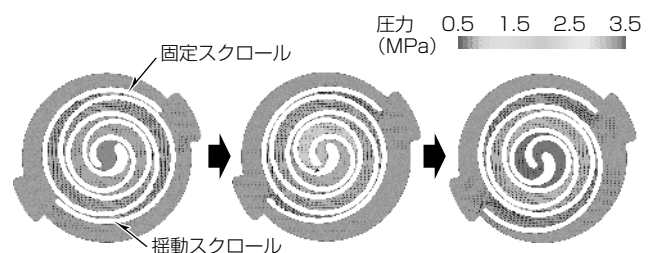


図2. 圧縮機構部の静圧分布の変化

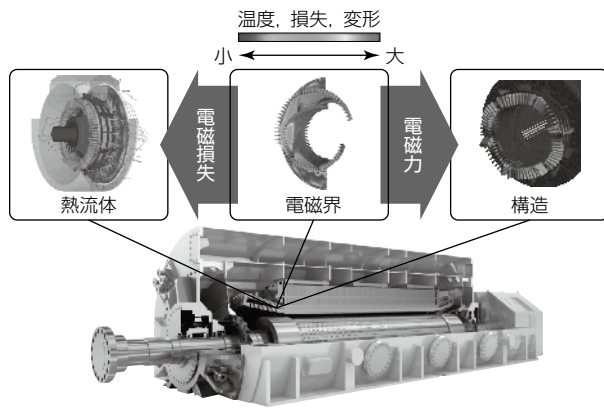


図3. 大規模連携解析技術適用イメージ

体を大規模モデル化し、電磁界解析で求めた電磁力分布や電磁損失分布を構造モデルにマッピングし、振動応答や温度分布を計算する。独自のメッシュ分割と18倍の計算速度を実現する領域分割法を採用し、高速化と計算精度確保を可能にした。図3に示すタービン発電機の固定子コイルエンド部では、部品サイズは最大数メートルと大きく、形状が複雑で部品点数が多いため、従来は解析モデルを簡略化して作成する必要があり、効率や信頼性に影響する電磁損失や温度分布、変形の詳細な予測は困難であった。今回、従来は簡略化していた部位も詳細にモデル化し、各々のメッシュ数が電磁界モデル3,000万、熱流体モデル10億、構造モデル1,000万にも及ぶ大規模連携解析を実施した。振動応答解析の結果、実測との誤差は4%以下であり、振動応答が高精度に計算できることが確認できた。

3. 物理量の計測評価技術

機器内部で生じている実際の物理現象を把握する上で、これらの物理量の定量的把握や可視化などによって、計測評価する技術が求められる。ここでは具体例として、電力機器の絶縁評価技術、熱交換器内の気液二相冷媒分流器の分流可視化計測技術、材料強度低下の加速評価技術について述べる。

3.1 電力機器の絶縁評価技術

電力用機器は6.6kVから765kVと電気機器の中で最も高電圧の環境下で使用されるため、製品開発をする上で絶縁信頼性の確保が最重要課題である。また、機器への軽量・小型化要求は機器内の電界を高めるため、一層の絶縁信頼性確保が求められており、絶縁現象計測評価、電位・電界計測評価、電界シミュレーション評価、絶縁破壊メカニズム評価などの絶縁技術を高度化して製品設計に反映させる必要がある。

今回、電力用機器の絶縁設計の合理化のため、高電圧部位での詳細な電位・電界分布の把握を目的とした、最新の絶縁評価技術を開発した⁽⁵⁾。近年の計算機の高性能化と汎用解析ソフトウェアの発達によって、容易に電位・電界分

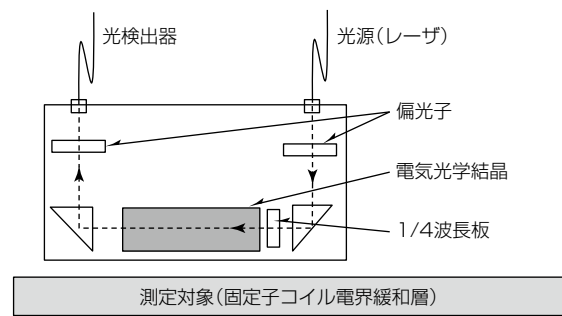


図4. 開発した表面電位計測システムの基本構成

布を推定できるようになった。一方で計測に関しては、電位・電界センサが金属部を持つため、高電圧部位に配置して測定する際の測定電圧に限界があった。そこで、電圧・電界に応じて透過光特性が変化する電気光学ポッケルス効果を用いた表面電位計測技術を新たに開発した。センサ部を絶縁物だけで構成できるため、高電圧部に近接させて計測ができる。図4に、開発した表面電位計測システムの基本構成を示す。光路上に2枚の偏光子と1/4波長板、電気光学結晶を配置し、レーザー光が電気光学結晶内部を透過する際に生じる偏光状態の変化を光量変化として測定する。光源及び光検出器は光ファイバで接続する構造とし、センサを可搬型にした。計測システムをコイルに沿って動作させることで得られる電界分布を、コイル表面電位分布に変換する信号処理手法を確立した。

3.2 熱交換器内の気液二相冷媒分流器の分流可視化計測技術

冷凍空調機器は蒸気圧縮を使用したヒートポンプ技術が鍵であり、これに用いる熱交換器は機器の性能に大きな影響を与える極めて重要なデバイスである。熱交換器の冷媒分流器は蒸発器の上流に配置され、複数の伝熱管に気液二相冷媒を最適に分流する役割を担う。その内部では密度が大きく異なるガス冷媒と液冷媒が複雑に影響する気液二相状態で流動する。この冷媒分流器内部の気液二相冷媒挙動を可視化計測して把握することは、熱交換器の高性能化の技術開発に有益な情報をもたらす。

今回、冷媒流動特性がヘッダ分流に与える影響を調査するため、分流器内部の冷媒流動特性の可視化計測技術を開発した⁽⁶⁾。構造が簡素で製造が比較的容易な垂直ヘッダ型冷媒分流器を対象に、ヘッダ内部の可視化実験と各分岐管に流れる液冷媒流量の計測を行った。

ヘッダは半透明のPVC(ポリ塩化ビニール)樹脂材で製作し、各分岐管に流れる液冷媒流量を測定するとともに、ヘッダ内の気液二相冷媒の流れを高速度カメラで観察する。図5に4分岐垂直ヘッダ内部の分流特性を示す。高流量では液冷媒がヘッダ上部に行きわたっているが、低流量では気液が分離し、液冷媒がヘッダの上部まで到達しない様子が観測された。

3.3 材料強度低下の加速評価技術

製品に求められる使用期間で性能を発揮し続けるには、材料強度に対して適切な構造設計を行うことが重要である。多くの材料では長期使用によって強度が低下するため、劣化現象を明らかにし、開発設計時に評価を行う必要がある。特に、実機に強度劣化を発生させ、影響を確認する加速試験は、製品寿命の定量化と想定外不良の市場流出防止に有効である。今回、電機製品に特徴的な構造材料である、はんだと樹脂材料の加速評価技術を開発した⁽⁷⁾。ここでは、樹脂材料の高温高湿による材料強度の劣化を対象とした加速評価技術について述べる。

高温高湿での劣化は、実使用環境で避けることが難しく、試験期間も長期化の傾向がある。従来、温度と湿度による加速試験を行う装置には、図6に示すような恒温恒湿装置、PCT(Pressure Cocker Test)、HAST(Highly Accelerated temperature and humidity Stress Test)がある。一般的な恒温恒湿試験機では、100℃前後の温度調節と低湿度状態のコントロールが難しい。試験時間の短縮のため、図の太線枠で示す150℃までの温度範囲で、大気圧下で空気と水蒸気を混合して広い湿度条件を網羅する装置を新たに開発した。この装置は、発生させた水蒸気と乾燥空気を混合して水蒸気量を調整する水蒸気発生装置と、この水蒸気量が調整された空気を流し込むチャンバとで構成される。チャンバ内に乾燥空気だけを流せば、相対湿度(Rh)がほぼ0%の条件も実現できる。この装置と、近年開発されたワイドレンジHASTとによって温度と湿度の調整範

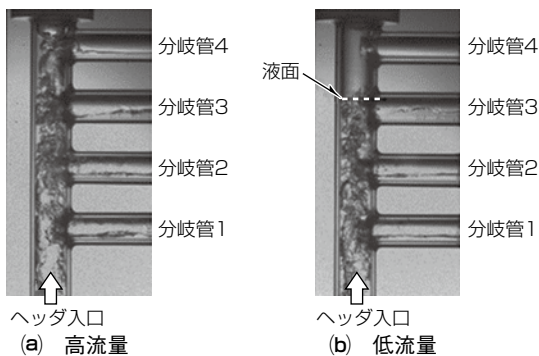


図5. 冷媒気液二相流の可視化結果

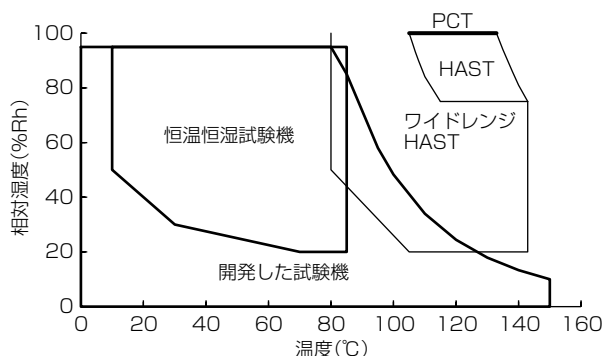


図6. 各種恒温恒湿試験装置の制御可能範囲

囲を拡大し、劣化現象を短期間で評価可能にした。ポリブチレンテレフタレート(PBT)を対象に加速試験を行った結果、一般的な恒温恒湿試験機を用いた85℃ 85%Rhに比べて、開発装置による120℃環境では8倍、150℃環境では18倍の速さで同様の劣化が再現された。

4. 新しい原理を用いた機器の提案

先に述べた物理シミュレーション技術や計測評価技術を活用し、新しい原理を用いた高性能機器の提案に努めている。ここでは代表例として、沸騰冷却技術を用いたインバータ、新アブレーション材料による電流遮断技術を用いたSF₆ガス遮断ユニットについて述べる。

4.1 沸騰冷却技術を用いたインバータ

電鉄、車載、家庭電器など電気機器の省エネルギー化を目的として、パワー半導体を組み込んだインバータ駆動化が進んでいる。機器の小型化が進む中、インバータの小型・高密度実装化によって発熱密度が増大し、高効率な冷却方式が求められている。インバータの冷却には一般に、ファンの送風で冷却する空冷方式と、水などの冷媒をポンプで循環させ冷却する水冷方式がある。これらは顕熱を利用しており、流体である空気や冷媒の温度上昇分が熱の移動量に相当する。そのため冷却能力向上には風量や冷媒量の増加が必要となり、消費電力増加や機器大型化といった課題が生じる。

一方、沸騰や凝縮などの相変化による冷媒の潜熱を利用した相変化冷却方式があり、沸騰で発生する蒸気泡の気泡ポンプ効果を冷媒循環の駆動力として利用できれば、ポンプによる課題を解消できる。

今回、相変化冷却方式の一つである沸騰冷却をインバータ冷却に適用することを目的に、基礎性能評価とプロトタイプ評価を実施した⁽⁸⁾。冷媒流路(環状流路)内の模式図を図7に示す。外部から供給される冷媒は、冷媒入口から流入し、連結管を経由してコンデンサ用冷却器を通り、冷媒出口から排出されるU字流れを基本とする。このU字流れの下部に、冷媒で満たされた環状流路を設け、熱交換部と

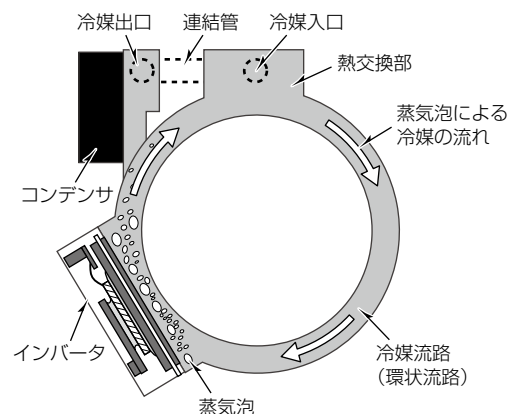


図7. 冷媒流路内の模式図

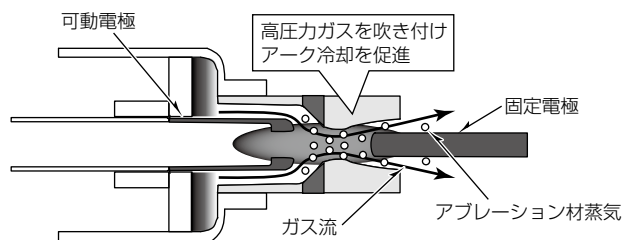


図8. アブレーション材料を適用した電流遮断

連結させる。流路壁面の一部をインバータ伝熱面とし、インバータが発熱すると伝熱面で冷媒が沸騰し、発生した蒸気泡の気泡ポンプ効果で生じた流れが駆動力となって冷媒の流れが生じる。上昇した蒸気泡は熱交換部で冷媒と熱交換することで凝縮して液に戻り、外部流路への流出はない。これが繰り返されて、安定した沸騰冷却を実現する。評価試験の結果、伝熱面から蒸気泡が発生し、自然対流冷却から沸騰冷却への移行を確認した。沸騰冷却開始後はモジュール温度上昇が緩やかになり、発熱量が380Wから750Wに増加しても、モジュール温度上昇を約23Kに抑制できた。

4.2 新アブレーション材料による電流遮断技術を用いたSF₆ガス遮断ユニット

高電圧ガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear: GIS)は、電力送配電システムが正常時には電流を安定して流し、異常発生時には事故電流を遮断して変圧器などの重要機器を保護する。これに用いられるSF₆ガスは、遮断性能や絶縁性能に優れる一方、地球温暖化係数が高く、使用量削減対象の温室効果ガスに指定されている。

GISの遮断ユニットは可動電極と固定電極で構成される(図8)、通常時はそれらが接触して電流が流れ、異常発生時はそれら電極を切り離して電流を遮断する。このとき、電極間に生じる高温のアークを通じて電流が流れ続けようとするが、従来はSF₆ガスの吹き付けによるアークの温度低下及び消滅によって、電流を遮断していた。このようなメカニズムで電流遮断を行うGISの遮断ユニットで、先に述べたアーク冷却メカニズムに加えて、独自のアブレーション材料からもガスを噴出させてガスの吹き付け圧力を高め、アーク冷却を促進して遮断性能を向上させる技術を開発した⁹⁾。当社独自のこの技術による遮断ユニットの性能向上は、GISの遮断ユニットの小型化や直列接続数の削減によるSF₆ガス使用量の削減に寄与できる。

5. む す び

この特集号では、当社の様々な製品の持続的な機能・性能・品質向上に資するため、物理シミュレーション技術や

物理量の計測評価技術を述べるとともに、これらの技術を用いた新しい原理に基づく機器提案の事例について述べた。紙面の都合で割愛したが、この特集号ではこれ以外にも、圧縮機の新非常油挙動評価技術¹⁰⁾、非相溶油を適用した冷媒のトライボロジー評価技術¹¹⁾、モータ設備の異常検知技術¹²⁾、高速・高出力モータ技術¹³⁾などの開発事例を掲載している。

この特集号が当社製品を支える技術を理解する上で、少しでも読者の参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 安井公治, ほか: 製品を支える物理シミュレーション技術, 三菱電機技報, **85**, No.7, 380~384 (2011)
- (2) 春名延是, ほか: 電力変換システムの電磁ノイズ低減技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 383~386 (2019)
- (3) 河村雷人, ほか: スクロール圧縮機の圧縮過程での熱流体挙動解析, 三菱電機技報, **93**, No.6, 359~362 (2019)
- (4) 柳館直成, ほか: 製品開発を支える振動・音響解析技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 379~382 (2019)
- (5) 吉村 学, ほか: 電力機器の絶縁評価技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 351~354 (2019)
- (6) 尾中洋次, ほか: 空調用熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 355~358 (2019)
- (7) 越前谷大介, ほか: 電機製品の構造信頼性を支える材料強度加速評価技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 375~378 (2019)
- (8) 篠崎 健, ほか: 沸騰現象を利用した電子機器冷却技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 371~374 (2019)
- (9) 佐藤基宗, ほか: 新アブレーション材料を適用したアーク冷却技術によるSF₆ガス遮断ユニットの性能向上, 三菱電機技報, **93**, No.6, 347~350 (2019)
- (10) 森山貴司, ほか: 圧縮機の新非常油挙動の実験的評価技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 363~366 (2019)
- (11) 佐々木辰也, ほか: 非相溶油を適用したHFO及びHC冷媒のトライボロジー特性, 三菱電機技報, **93**, No.6, 367~370 (2019)
- (12) 金丸 誠, ほか: 電気信号情報を活用したモータ設備の異常検知技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 339~342 (2019)
- (13) 水田貴裕, ほか: 高速・高出力モータを実現する回転機設計技術, 三菱電機技報, **93**, No.6, 343~346 (2019)

電気信号情報を活用した モータ設備の異常検知技術

金丸 誠* 林 和史***
 井上 啓**
 宮内俊彦***

Fault Detection Technique for Motor Equipment Using Electrical Signal Information

Makoto Kanemaru, Hiroshi Inoue, Toshihiko Miyauchi, Kazufumi Hayashi

要 旨

モータは、工場の生産設備や機械設備の動力を担うキーコンポーネントである。工場では、生産性の観点からモータの安定な連続運転が要求される。しかしながら、近年、メンテナンス費用削減や省力化が進められており、モータの安定な連続運転が見込めない状況に陥りつつある。そこで、メンテナンス要員の技能レベルに依存しないモータ設備の異常検知技術が強く望まれ始めている。

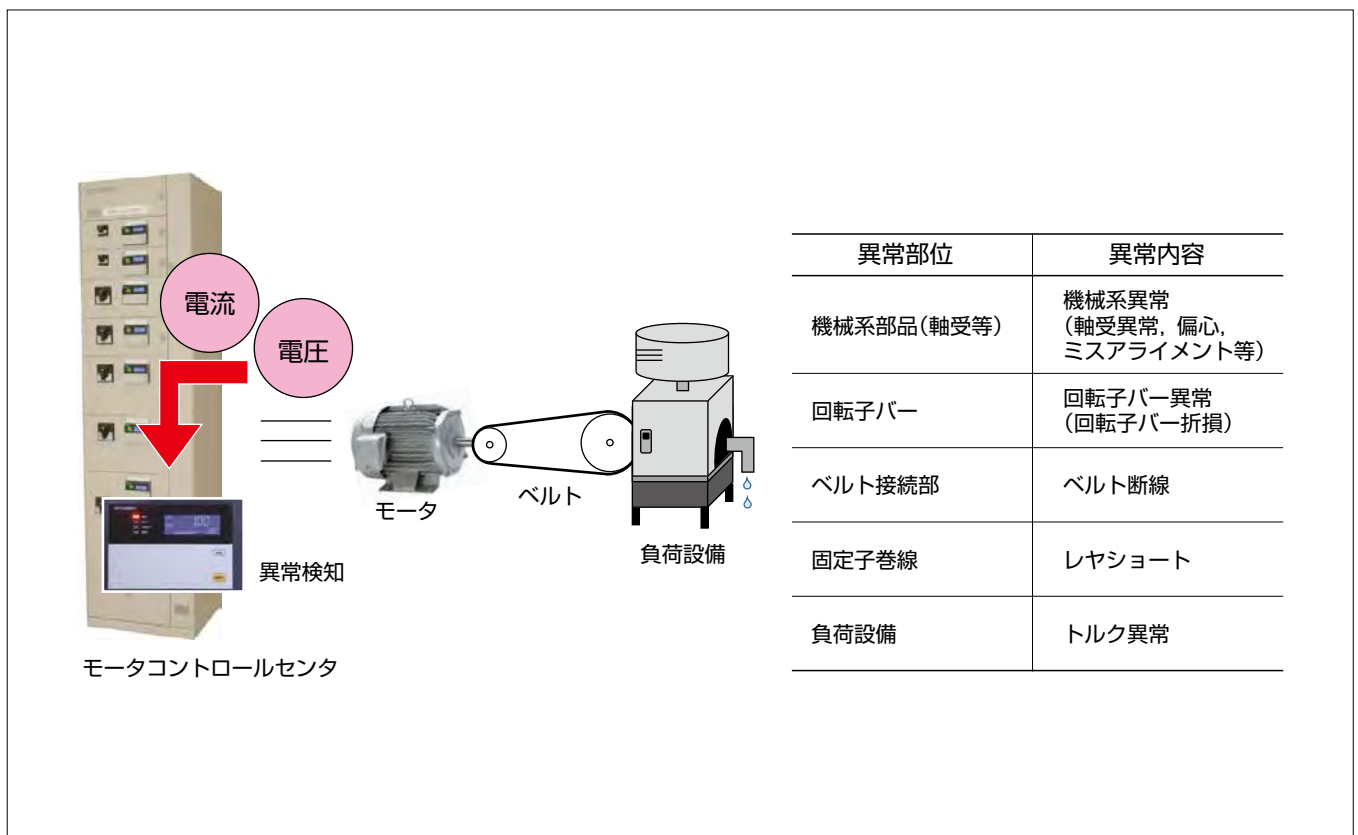
今回、運転中のモータの電気信号情報(電流と電圧)から異常検知に必要な特徴量を抽出し、5種類のモータ設備異常(①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線、④レヤショート、⑤トルク異常)を検知する技術を開発した。電流センサで取得したモータ電流の特徴量を抽出・解

析することで、①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線を検知する。そして、電流センサと電圧センサで取得したモータ電流・電圧の特徴量を抽出・解析することで、④レヤショート、⑤トルク異常を検知する。

この開発によって、モータ設備異常検知機能を業界で初めて(注1)モータコントロールセンタに搭載した。これによって、メンテナンス要員の技能レベルに依存せず、モータの突発的な故障停止を回避でき、モータの安定な連続運転を期待できる。

今後も、モータを始めとした電気設備の安心・安全を支える技術の開発を進めていく。

(注1) 2018年10月1日現在、当社調べ



モータ設備異常検知機能付きモータコントロールセンタのシステム構成

左の図は、モータ設備異常検知機能付きモータコントロールセンタのシステム構成を示す。モータコントロールセンタ内のセンサでモータの電流・電圧を計測し、異常検知に必要な特徴量を抽出・解析することで、モータ設備の異常を検知する。右の表は、モータ設備異常を検知する項目を示す。5種類のモータ設備異常(①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線、④レヤショート、⑤トルク異常)を検知する。

1. ま え が き

三菱電機は、持続可能な社会の実現のために、電気設備の安心・安全を支える技術の開発に取り組んでいる。電気設備の中でモータは、工場の生産設備や機械設備の動力を担うキーコンポーネントである。

工場では、生産性の観点からモータの安定な連続運転が要求される。しかしながら、全てのモータが良好な環境下で運転しているわけではない。高温、高負荷、腐食、摩耗等の高ストレス環境下で運転しているケースも多く、モータへの負担は大きい。モータへの負担が大きいと、突発的な故障停止を招くおそれがある。モータの突発的な故障停止は、生産ラインの停止や製品歩留まりの悪化に直結し、経営損失を引き起こす。このような突発的な故障停止を回避するために、工場ではメンテナンス要員を常駐させている。しかしながら、近年、経営効率化のため、メンテナンス費用削減や省力化が進められている。さらに、世代交代によるメンテナンス要員の点検技能低下や素人化の傾向も指摘されており、モータの安定な連続運転が、ますます見込めない状況に陥りつつある。そこで、メンテナンス要員の技能レベルに依存しないモータ設備の異常検知技術が強く望まれ始めている。

本稿では、運転中のモータの電気信号情報(電流と電圧)から異常検知に必要な特徴量を抽出し、5種類のモータ設備異常(①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線、④レシャヨート、⑤トルク異常)を検知する技術について述べる。この技術は、モータコントロールセンタに搭載され⁽¹⁾、2018年10月から受注を開始している。

2. モータ設備の異常検知技術

2.1 機械系異常検知技術

2.1.1 機 能

電流センサで取得したモータ電流を周波数解析し、機械系異常起因の特徴周波数を監視することによってモータ稼働中に機械系異常(軸受異常、偏心、ミスアライメント等)を検出する。本稿では、軸受異常検知について述べる⁽²⁾。

2.1.2 検 知 手 法

機械系異常が発生すると、固定子と回転子間のエアギャップの乱れ、又は回転速度の変動によってモータ電流へ影響を与える。そのため、機械系異常のモータ電流を周波数解析すると電源周波数の両側に式(1)の側帯波(f_m : モータ回転成分)が発生する。

$$f_m = f_s \pm f_r \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f_s は電源周波数、 f_r はモータ回転周波数である。機械系異常検知手法を図1に示す。電流センサで取得したモータ電流を周波数解析する。そして、電源周波数 f_s (例えば60Hz)を中心に、左右均等に発生する側帯波(モータ

回転成分Aとモータ回転成分B)を抽出する。側帯波はモータ回転周波数に依存し、モータの定格情報から発生周波数帯を理論的に特定できる。その後、抽出した側帯波の信号強度の傾向監視を行う。

2.1.3 試 験 結 果

軸受の加速劣化試験を実施した。軸受内に異物(アルミナ約20mg)を注入し、モータを運転させた。そして、側帯波(モータ回転成分Aとモータ回転成分B)を監視した。その結果を図2に示す。正常状態の信号強度を基に縦軸の劣化度合いを決定した。図2から、時間とともに劣化度合いが増加することから、この手法を用いて軸受異常を検知可能である。なお、この技術は2018年電気学会産業応用部門論文賞を受賞した。

2.2 回転子バー異常検知技術

2.2.1 機 能

電流センサで取得したモータ電流を周波数解析し、回転子バー異常起因の特徴周波数を監視することによってモータ稼働中に回転子バー異常(回転子バー折損)を検出する。

2.2.2 検 知 手 法

回転子バー異常が発生すると、異常な回転子バーが固定子の磁極を通過するときに、空間磁束線に影響を及ぼすことによってモータ電流が影響を受ける。回転子バー異常のモータ電流を周波数解析すると電源周波数の両側に式(2)の側帯波(f_{bar} : 回転子バー成分、 s : すべり)が発生する。

$$f_{bar} = (1 \pm 2s)f_s \dots\dots\dots (2)$$

回転子バー異常検知手法を図3に示す。電流センサで取得したモータ電流を周波数解析する。そして、電源周波数 f_s を中心に、左右均等に発生する側帯波(回転子バー成分Aと回転子バー成分B)を抽出する。側帯波はモータのす

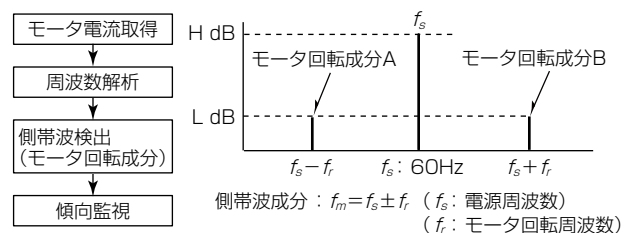


図1. 機械系異常検知手法

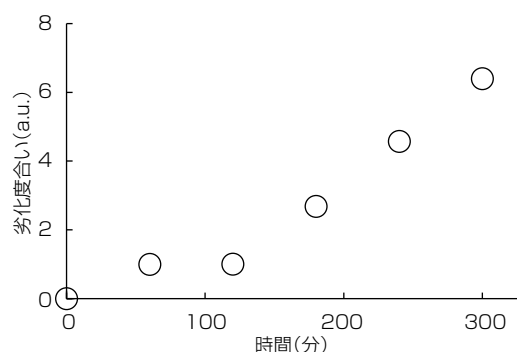


図2. 軸受の加速劣化試験結果

べりに依存する。その後、抽出した側帯波の信号強度の傾向監視を行う。

2.2.3 試験結果

正常時と回転子バー1本折損時の電流信号強度の結果を図4に示す。図から、回転子バー1本折損時の電流信号強度が、正常時に対して10.4~14.9dB増加した。正常時の電流信号強度との差分が大きいことから、この手法を用いて回転子バー異常を検知可能である。

2.3 ベルト断線検知技術

2.3.1 機能

電流センサで取得したモータ電流を周波数解析し、ベルト回転起因の特徴周波数を監視することによってモータ稼働中にベルト断線異常を検出する。

2.3.2 検知手法

ベルト断線が発生すると、ベルト張力に起因する軸振動の影響が消滅する。モータ軸振動の周波数は、単位時間当たりベルトが回転する周波数 f_{belt} に現れる。 f_{belt} は式(3)で表される。

$$f_{belt} = \frac{\pi D \cdot f_r}{L} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 D :モータプーリ径、 f_r :モータ回転周波数、 L :ベルト長さである。そのため、モータ電流を周波数解析すると電源周波数の両側に式(4)の側帯波(f_c :ベルト成分)が発生する。

$$f_c = f_s \pm k f_{belt} (k=1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (4)$$

ベルト断線検知手法を図5に示す。電流センサで取得したモータ電流を周波数解析する。そして、電源周波数 f_s を中心に、左右均等に発生する側帯波(ベルト成分Aとベルト成分B)を抽出する。その後、抽出した側帯波の信号強度の傾向監視を行う。

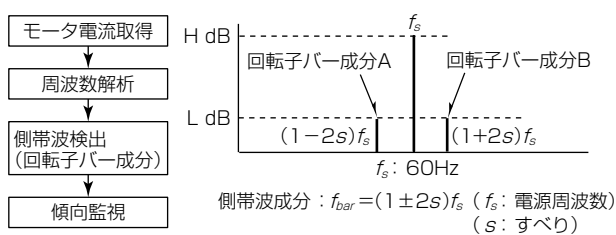


図3. 回転子バー異常検知手法

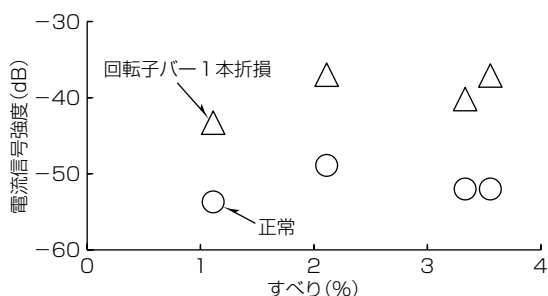


図4. 正常時と回転子バー1本折損時の電流信号強度

2.3.3 試験結果

正常時とベルト断線時の電流信号強度の結果を図6に示す。ベルト断線の場合、ベルト起因の側帯波が消滅する。これは、ベルト断線によってベルト張力の影響が消え、ベルト起因の電流変調が消滅したためである。図から、ベルト断線時の電流信号強度が、正常時に対して14.9~35.5dB減少した。正常時の電流信号強度との差分が大きいことから、この手法を用いてベルト断線を検知可能である。

2.4 レヤショート検知技術

2.4.1 機能

電流センサと電圧センサで取得したモータ電流と電圧の不平衡成分を監視することによってモータ稼働中にレヤショート(巻線短絡)を検出する⁽³⁾。

2.4.2 検知手法

レヤショートが発生すると、モータ巻線のインピーダンスが不平衡となる。そのため、モータ電流と電圧の不平衡性を解析することで、レヤショートを検出できる。

レヤショート検知手法を図7に示す。モータ電流と電圧を取得後、式(5)と式(6)で対象座標変換し、逆相電流 I_{sn} と逆相電圧 V_{sn} を算出する。

$$I_{sn} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots\dots\dots (5)$$

$$V_{sn} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \dots\dots\dots (6)$$

電源不平衡時も逆相成分が変化することから、逆相電流 I_{sn} と逆相電圧 V_{sn} の両方を考慮して式(7)のレヤショート評価値 ΔI_{sn} を定義した。

$$\Delta I_{sn} = |I_{sn} - Y_n V_{sn}| \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 Y_n は初期逆相アドミタンスで、測定開始時に算出できる。そして、レヤショート評価値 ΔI_{sn} の傾向監視を行い、信号強度が増加したときにレヤショートと判定する。

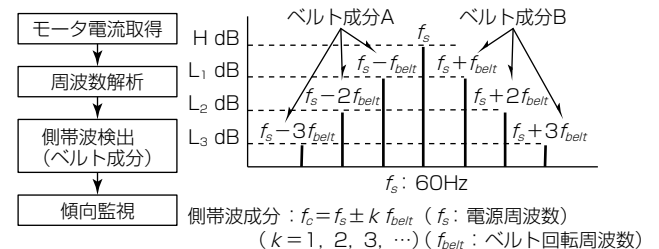


図5. ベルト断線検知手法

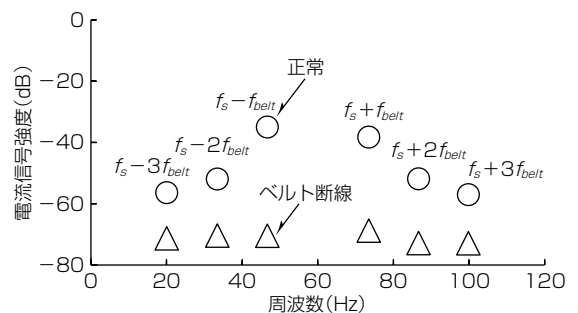


図6. 正常時とベルト断線時の電流信号強度

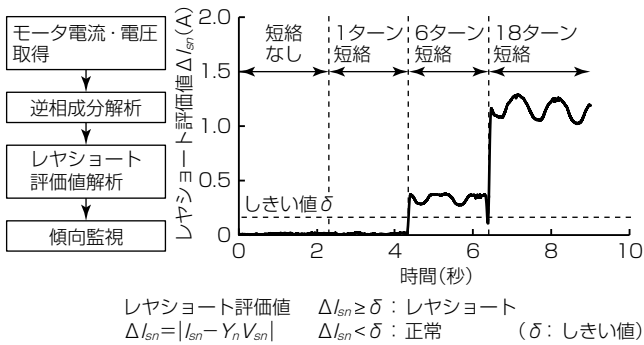


図7. レヤショート検知手法と試験結果

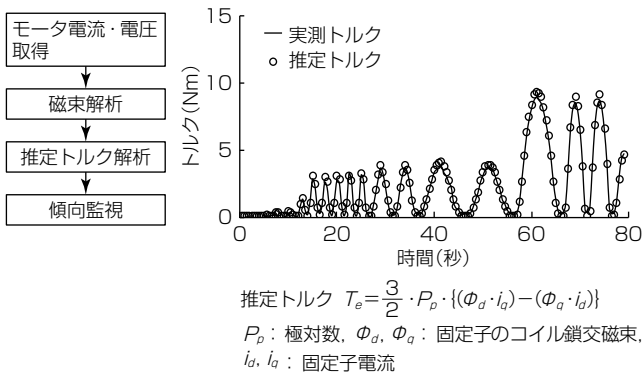


図8. トルク異常検知手法と試験結果

2.4.3 試験結果

レヤショート発生時のレヤショート評価値の結果を図7に示す。巻線短絡数が増加すると、レヤショート評価値も増加した。1ターン短絡の微小変化を検知することは困難であるが、6ターン短絡を十分検知可能であることから、この手法を用いてレヤショートを検知可能である。

2.5 トルク異常検知技術

2.5.1 機能

電流センサと電圧センサで取得したモータ電流と電圧を解析することによって、トルク推定を行い、トルク異常を検出する。

2.5.2 検知手法

トルク T_e の理論式は、モータ電流と鎖交磁束を用いて式(8)のように表される。 P_p は極対数、 Φ_d, Φ_q は固定子のコイル鎖交磁束、 i_d, i_q は固定子電流である。

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P_p \cdot \{(\Phi_d \cdot i_q) - (\Phi_q \cdot i_d)\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

トルク異常検知手法を図8に示す。モータ電流・電圧取得後に磁束解析し、トルク推定を行う。そして、推定したトルクを監視する。

2.5.3 試験結果

実測トルクと推定トルクの比較結果を図8に示す。実測トルクと推定トルクは、時間的な変動に対してよく一致していることから、この手法を用いてトルク異常を検知可能である。

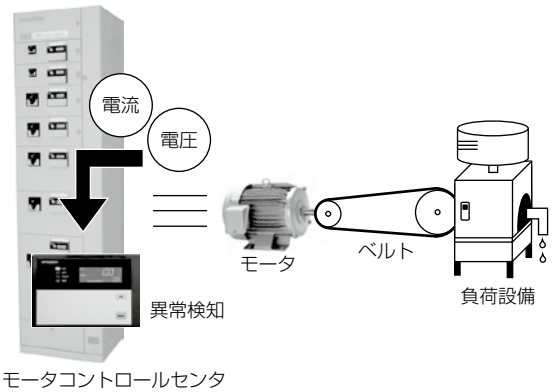


図9. モータ設備異常検知機能付きモータコントロールセンタのシステム構成

表1. モータ設備異常を検知する項目

異常部位	異常内容
機械系部品(軸受等)	機械系異常 (軸受異常, 偏心, ミスアライメント等)
回転子バー	回転子バー異常(回転子バー折損)
ベルト接続部	ベルト断線
固定子巻線	レヤショート
負荷設備	トルク異常

3. モータコントロールセンタへの適用

モータの運転・停止、保護、監視を集中管理するモータコントロールセンタに、業界で初めて5種類のモータ設備異常を検知する機能を搭載した(図9)。運転中のモータ電流・電圧から劣化診断に必要な特徴量を抽出・解析することで、5種類の異常部位・内容を検知できる(表1)。

4. む す び

運転中のモータの電気信号情報(電流と電圧)から異常検知に必要な特徴量を抽出し、5種類のモータ設備異常(①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線、④レヤショート、⑤トルク異常)を検知する技術について述べた。この技術は、モータコントロールセンタに搭載され、2018年10月から受注を開始している。今後も、持続可能な社会の実現のために、電気設備の安心・安全を支える技術の開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 関 孝一郎, ほか: 海外市場向け低圧モータコントロールセンタ“D”, 三菱電機技報, 91, No.11, 614~618 (2017)
- (2) 金丸 誠, ほか: 固定子電流パワースペクトルの特徴周波数監視による電動機軸受の異常検出技術, 電気学会論文誌D, 137, No.10, 799~805 (2017)
- (3) 金丸 誠, ほか: 逆相電流電圧解析による電動機固定子巻線短絡検出の高精度化, 電気学会論文誌D, 137, No.1, 17~23 (2017)

高速・高出力モータを実現する 回転機設計技術

水田貴裕* 久米将実*
伊藤一将* 高島由晴***
栢山盛幸**

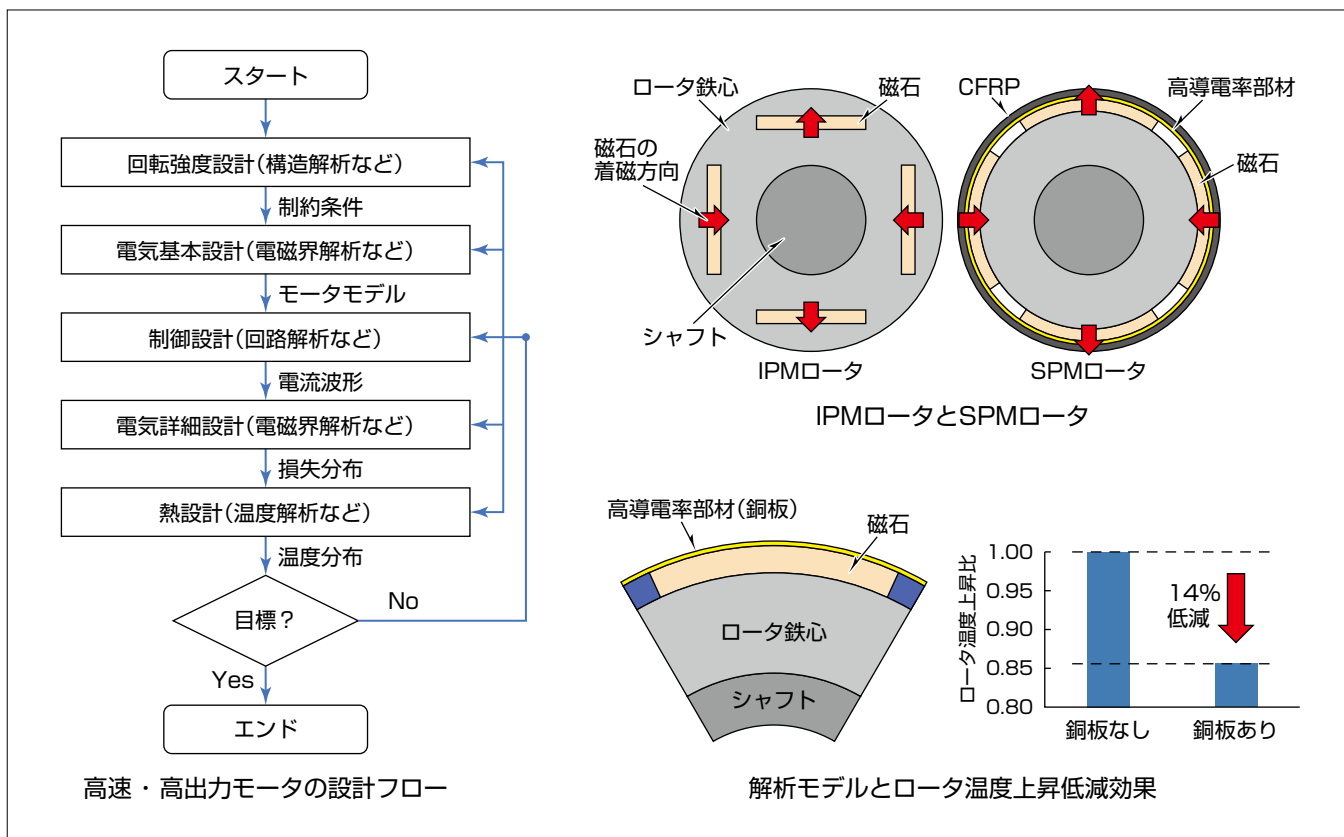
Rotating Machine Design Technology for High Speed and High Output Electric Motor

Takahiro Mizuta, Kazumasa Ito, Moriyuki Hazeyama, Masami Kume, Yoshiharu Takashima

要 旨

近年、駆動システムの小型化要求が高まっており、モータには高速化及び高出力密度化が求められている。高速化及び高出力密度化を実現するモータ方式として、誘導機やロータ鉄心内に磁石を埋め込んだモータ (IPM (Interior Permanent Magnet) モータ) などが考えられるが、誘導機は高出力化に、IPMモータは高速化に難があるため、高速化と高出力密度化の両立が課題であった。そこで、ロータの表面に永久磁石を貼り付けた後に、磁石外周にロータ損失を低減するための高導電率部材を巻きつけ、さらに磁石飛散防止のためCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) を巻きつけることで高速回転に対応した表面磁石型モータ (SPM (Surface Permanent Magnet) モータ) を開発した。

高速・高出力モータでは電気設計上の制約条件を設定するために強度設計を最初に実施した後、電気・制御設計を実施する。その後、インバータキャリア起因の損失を算出するため再度電気設計を行う。このフローで設計を進めた結果、キャリアを原因とする高調波の磁束によってロータが非常に高温になることが問題になった。そこで、高導電率部材を磁石外周に巻きつけることでキャリアリップルによるロータの損失を低減する構造を提案した。電磁界解析によって効果を確認し、キャリア周波数の表皮深さに対してロータ損失を低減する最適な高導電率部材の厚みが存在することを明らかにした。実機で効果を検証した結果、磁石外周に高導電率部材 (銅板) を巻きつけることでロータの温度上昇 (損失) を14%低減できることを確認した。



高速・高出力モータを実現する回転機設計技術

高速・高出力モータでは電気設計上の制約条件を設定するために強度設計を最初に実施した後、電気・制御設計を実施する。その後、インバータキャリアの損失を算出するため再度電気設計を行う。ロータ損失低減のために磁石外周を高導電率部材 (銅板) で覆う構造を提案し、実機で温度上昇 (損失) を14%低減できることを確認した。

1. ま え が き

モータは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する装置であり、EV(Electric Vehicle)、HEV(Hybrid Electric Vehicle)や鉄道の主機を始め、エアコンの圧縮機、工作機械の主軸など幅広い用途で用いられている。モータにはこれらのアプリケーションによって高出力密度化、低トルクリプル化、高効率化、高速化などが求められる。近年、駆動システムの小型化要求が高まっており、結果としてモータには高速化及び高出力密度化が特に求められている。

図1は横軸を最高回転数、縦軸をモータ出力密度として

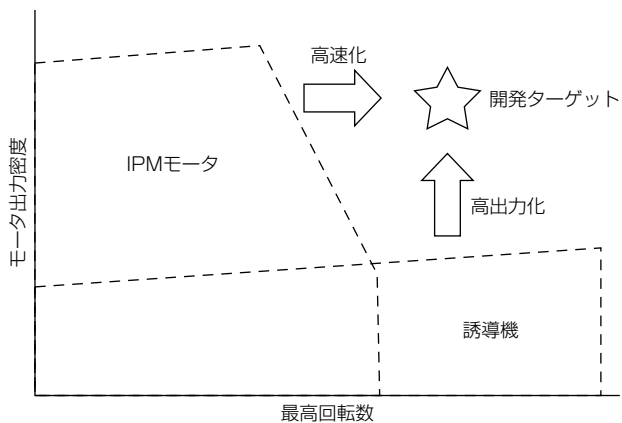


図1. 当社モータ製品マップのイメージ

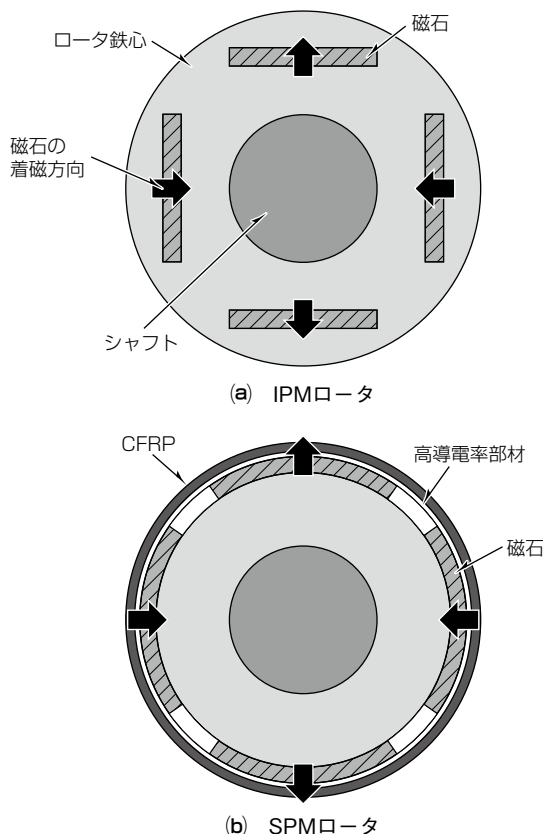


図2. 埋め込み磁石(IPM)ロータと表面磁石(SPM)ロータの断面図

各方式のモータをマッピングしたイメージ図である。誘導機はロータが堅牢(けんろう)であるため比較的高速域まで出力可能であるが、ロータ側に流れる2次電流の損失が大きいので、IPMモータに対し出力密度に劣る。一方でロータ鉄心内に磁石を埋め込んだモータ(IPMモータ)で高速化を実現するためには、機械強度確保のため磁石を鉄心内深くまで埋め込む必要がある。その結果、磁石の磁束が鉄心内部で短絡してしまうため、高速域での出力が低下してしまう。そこで、高速回転に対応可能な表面磁石型モータ(SPMモータ)を開発した。ロータの表面に永久磁石を貼り付けた後に、磁石外周にロータ損失を低減するための高導電率部材を巻きつけ、さらに磁石飛散防止のためにCFRPを巻きつけ高速回転に耐える強度を確保する構造となっており、高速化と高出力密度化の両立が可能である(図2)。

本稿では、高速・高出力SPMモータを開発する上での設計フローや開発上の課題とその解決手段について述べる。

2. 高速・高出力モータの設計フロー

図3に高速・高出力モータの設計フローを示す。高速モータの場合、遠心力に耐える構造であることが全体の律則となるため、まず構造解析等による概略強度設計を最初の実施する。構造解析等によって電気設計上の制約条件(CFRP厚みや磁石外周形状)を設定した後に、電磁界解析による基本設計に移る。電磁界による基本設計では速度-

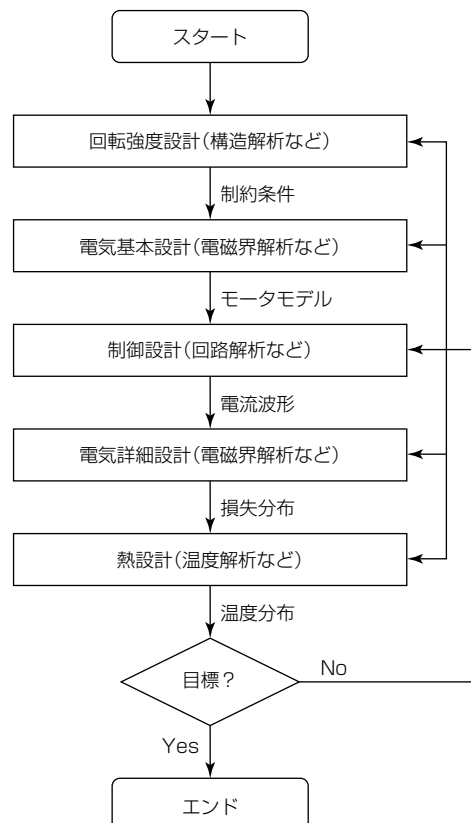


図3. 高速・高出力モータの設計フロー

トルク特性、正弦波駆動による損失量、効率や減磁特性を確認した後に、モータモデルを作成して制御設計を実施する。制御設計では、回路解析によって磁界解析のモータモデルを用いて制御性に問題がないことを確認する。

次いで回路解析の結果から得られる電流波形を用いて再度電磁界解析を実施する。なぜならば、基本設計による電磁界解析では正弦波による駆動を前提にしてキャリアリップルを考慮しておらず、損失が過小評価されるためである。キャリアリップルを考慮した電流波形によって各部材の損失量が求まると、その損失量によって温度解析を実施し、各部位の温度上昇を見積もる。定格ポイントでの温度が目標値に対して未達の場合、目標値を満たすように部材形状や配置を変更する。

3. 高速・高出力モータの課題と対策

高速・高出力モータは高速域での出力を確保するために巻数を小さくする必要がある。インダクタンスは巻数の2乗に比例するためインダクタンスも小さな値となる。電流波形に含まれるキャリアリップルはインダクタンスが小さいほど大きくなるので、高速・高出力モータは大きなキャリアリップルが重畳された電流で駆動されることになる。2章で示した設計フローにのっとり回路解析で得られた電流波形で電磁界解析・温度解析を実施した結果、ロータが非常に高温となることが問題になった。これは、キャリアリップルによる高調波がロータ部材に鎖交することで渦電流損失が発生することが原因である。磁石は耐熱温度を超えると磁力を失う(減磁する)ため、磁石温度が耐熱温度以下となるようにロータの渦電流損失を低減する必要があった。

3.1 ロータ渦電流損失低減の原理

キャリアリップルによるロータの損失を低減するために、高導電率部材を磁石外周に巻きつける構造を提案した。次にロータ損失低減の原理について述べる。

図4にこのモータのキャリア高周波に対するd軸の等価回路を示す⁽¹⁾⁽²⁾。V_{dh}はインバータのキャリア高調波電圧をdq変換した電圧、R_aはステータ巻線の相抵抗、L_{ld}はd軸のステータ巻線漏れインダクタンス、R_{kd}はロータの渦電流経路のd軸等価抵抗、L_{kq}はロータの渦電流経路のインダクタンスである。省略するがq軸の等価回路も同様に表すことができる。

キャリアの角周波数を ω_h 、基本波の角周波数を ω とするとキャリア高調波電圧が正相の場合、dq軸での周波数は $\omega_h - \omega$ となる。よってdq軸インピーダンスZ_{dh}、Z_{qh}は、

$$\begin{aligned} Z_{dh} &= R_a + R_{kd} + j(\omega_h - \omega)(L_{ld} + L_{kd}) \\ Z_{qh} &= R_a + R_{kq} + j(\omega_h - \omega)(L_{lq} + L_{kq}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。キャリア高調波電流は、電圧とインピーダンスか

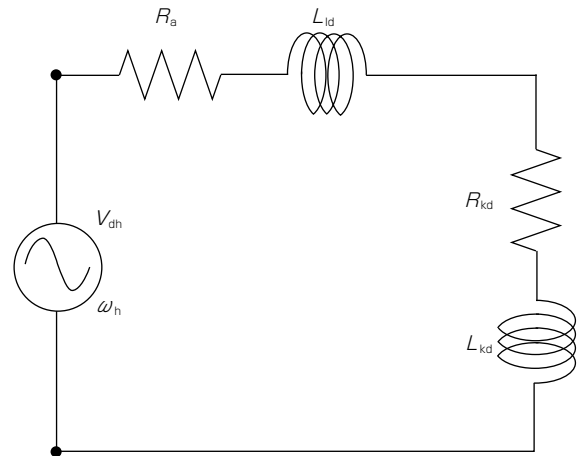


図4. キャリア高調波に対するd軸の等価回路

ら次式で与えられる。

$$I_{dh} = \frac{V_{dh}}{Z_{dh}} \quad I_{qh} = \frac{V_{qh}}{Z_{qh}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

よって、ロータで発生するキャリア高調波による渦電流損失W_eは、

$$W_e = R_{kd}|I_{kd}|^2 + R_{kq}|I_{kq}|^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。このモータで、キャリア周波数は基本波周波よりも十分に高い($\omega_h \gg \omega$)ため、式(1)でリアクタンス成分が支配的となる。式(1)で抵抗成分を無視すると式(1)~(3)よりW_eは

$$W_e = R_{kd} \left| \frac{V_{dh}}{(\omega_h - \omega)(L_{ld} + L_{kd})} \right|^2 + R_{kq} \left| \frac{V_{qh}}{(\omega_h - \omega)(L_{lq} + L_{kq})} \right|^2 \dots\dots (4)$$

となり、R_{kd}及びR_{kq}、つまりロータ側に流れる渦電流経路の抵抗を小さくすることによってW_eが低減する。よって、磁石よりも導電率の大きな部材を永久磁石外周に設けることで渦電流経路の抵抗が小さくなり、渦電流損失が低減することが期待できる。

3.2 高導電率部材の厚みによるロータ損失への影響

3.1節では、磁石外周に高導電率部材を巻きつけることによってキャリアリップルに起因する渦電流損失が低減する原理を述べた。この節では二次元電磁界解析を用いて渦電流損失低減効果を検証した結果について述べる。電磁界解析の諸元を表1に、ロータの解析モデルを図5に示す。CFRPは非磁性かつ軸方向に非導電性のため、電磁界解析のモデルからは除外している。高導電率部材としては銅板を想定して 6.0×10^7 S/mの導電率を設定した。また、解析に用いる電流波形は実機の電流波形を模擬するように基本波にキャリアリップル成分を重畳することで作成した。高導電率部材の厚みに対するロータ損失への影響を調べるために、高導電率部材の厚みtを変化させて解析を実施した。なお、高導電率部材の厚みを変化させる際は磁石外周面を

表 1. 電磁界解析の諸元

回転数	12,000r/min
出力	無負荷
銅板の導電率	$6.0 \times 10^7 \text{S/m}$
磁石の導電率	$7.1 \times 10^5 \text{S/m}$
ロータ鉄心の導電率	$3.2 \times 10^6 \text{S/m}$

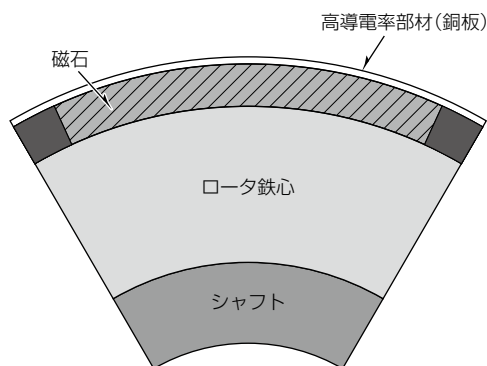


図 5. 解析モデル

固定しているため、ステータ内周から高導電率部材表面までの距離は高導電率部材の厚みを大きくするにつれて小さくなっていく点に注意する必要がある。

図6は、高導電率部材の損失、高導電率部材以外の損失及びロータで発生する全損失を縦軸に、キャリア周波数の表皮深さ d に対する高導電率部材厚みの割合(t/d)を横軸としてプロットした結果である。損失は高導電率部材がない(高導電率部材の厚みが0)場合の損失によって規格化している。図で示すように、高導電率部材の厚みが増すにつれて、高導電率部材以外の部材の損失は低減している。これは高導電率部材に流れる渦電流がキャリアリップルに起因する高調波磁束を打ち消し、高導電率部材よりも内周側にある部材に鎖交する磁束が減少するためである。また、高導電率部材の損失は厚みを増すにつれ増加していくものの、ロータの全損失は高導電率部材がない場合よりも低減しており、3.1節で述べた理論と合致していることが分かる。ロータの全損失は $t/d=0.7 \sim 0.8$ で最小となり、その後は t/d が増加するにつれ増加していく。ロータ損失が増加している要因としては、高導電率部材の厚みが厚くなるにつれてステータ内周までの距離が小さくなるため、ステータスロット高調波による影響が顕著になると考えられる。

3.3 実測結果

3.2節で高導電率部材によるロータ損失低減効果が確認できたので、実機を試作して効果を検証した。磁石の外周に銅板を巻きつけたロータ(銅板あり)と巻きつけないロータ(銅板なし)を試作し、温度飽和後のロータ温度を測定した。銅板の厚みについては3.2節の結果と工作性の観点から $t/d=0.4 \sim 0.5$ となるように選定した。モータの回転数

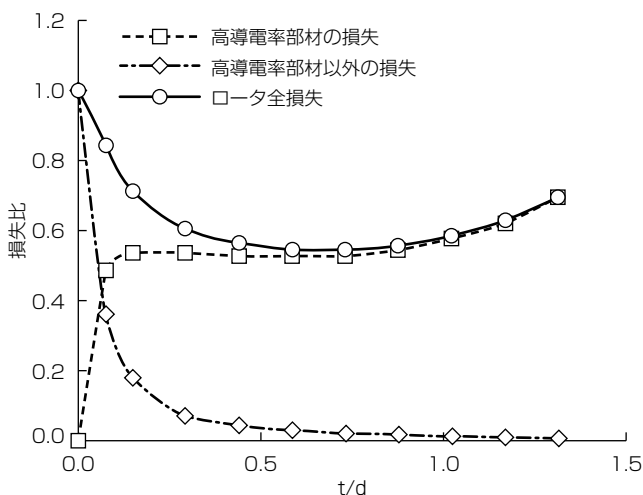


図 6. 高導電率部材厚みがロータ損失に与える影響

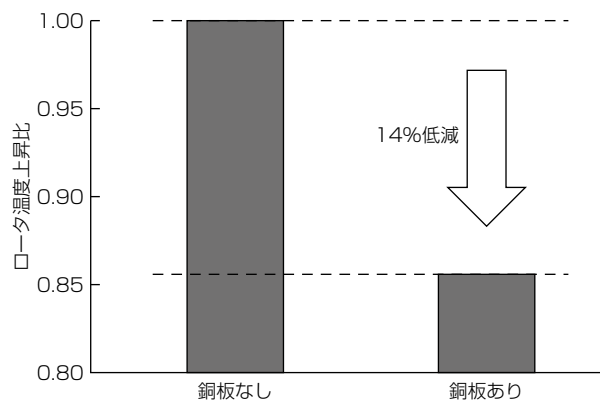


図 7. ロータ温度上昇比の比較

は12,000r/minに設定して試験を実施し、温度はロータ軸方向端面を測定した。結果を図7に示す。銅板なしの温度上昇を1として規格化して表示している。銅板を入れることでロータの温度上昇が14%程度低減しており、実機でも銅板による渦電流損失低減の効果が確認できた。

4. む す び

誘導機やIPMモータに対して高速・高出力なSPMモータを開発する上での設計フローや開発上の課題とその解決手段について述べた。今後も更なる高速化と高出力密度化の要求が進むことが予測されるため、市場ニーズに応えるべく研究開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 猪狩武尚：電気機械理論，コロナ社（1977）
- (2) 中野正嗣，ほか：永久磁石モータのインピーダンスを用いたキャリア高調波による回転子渦電流損の計算手法，電気学会論文誌D，137，No.8，663～672（2017）

新アブレーション材料を適用したアーク冷却技術によるSF₆ガス遮断ユニットの性能向上

佐藤基宗*
川名隆志*
中村泰規**

Improvement of SF₆ Interrupter Performance by Arc Cooling Technology with New Ablation Material

Motohiro Sato, Takashi Kawana, Yasunori Nakamura

要 旨

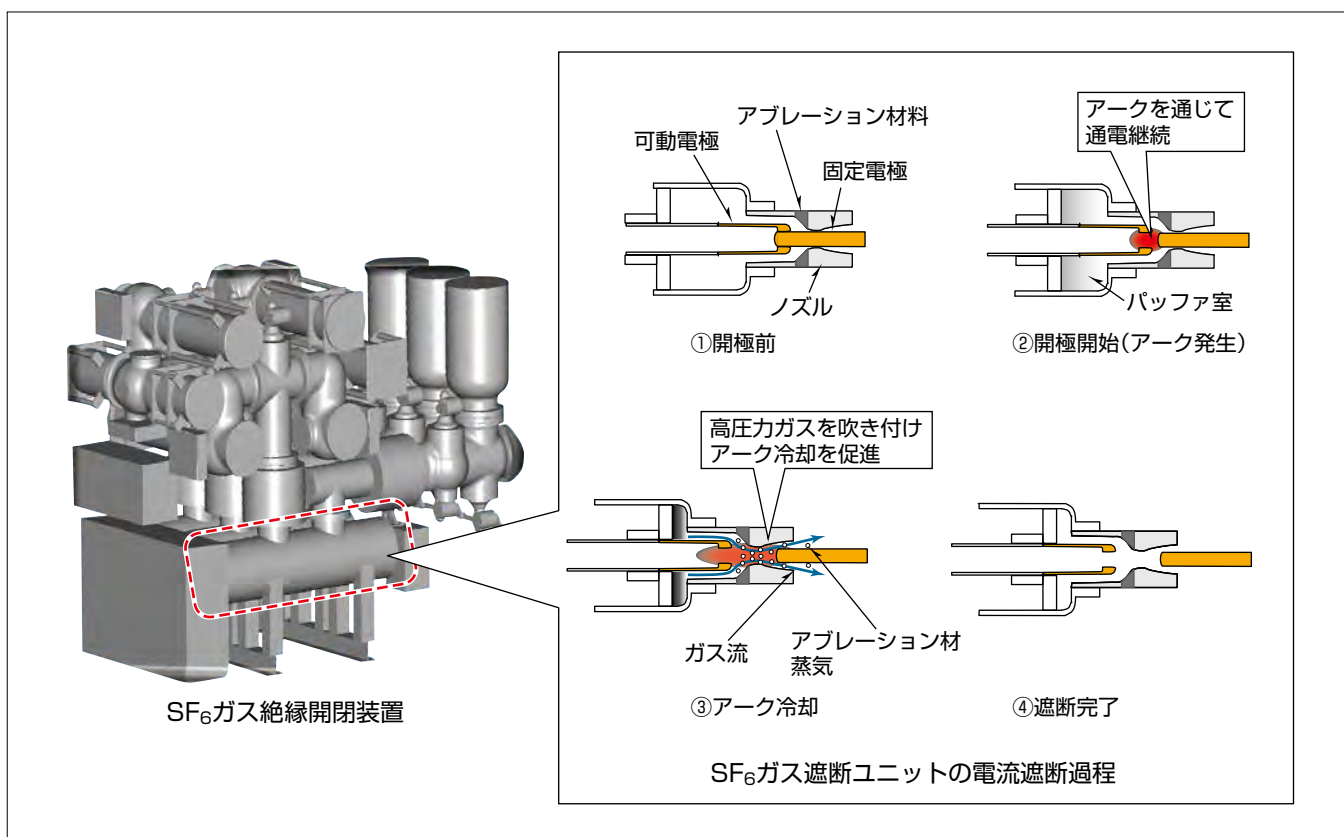
開閉装置は、電力送配電システムが正常な状態では電流を安定して流し、異常が発生した場合には事故電流を遮断して変圧器などの重要機器を保護する。電力用の高電圧ガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear : GIS)に使用されるSF₆ガスは、その優れた遮断性能や絶縁性能で電力の安定供給に寄与する一方、国連会議COP(Conference Of the Parties) 24でまとめられた地球温暖化対策実施指針では使用量削減対象の温室効果ガスに指定されている。

GISの遮断ユニットは、可動電極と固定電極で構成され、通常時はそれらが接触した状態で電気を流している。一方異常発生時には電流遮断のためにそれら電極を切り離すが、このとき電極間に生じる高温のアークを通じて電流が流れ

続ける。そのため、従来の遮断ユニットでは、SF₆ガスの吹き付けによるアークの温度低下及び消滅によって、電流を遮断していた。

このようなメカニズムで電流遮断を行うGISの遮断ユニットで、先に述べたアーク冷却メカニズムに加えて、今回独自のアブレーション材料からもガスを噴出させてガスの吹き付け圧力を高め、アーク冷却を促進して遮断性能を向上させる技術を開発した。

三菱電機独自のこの技術による遮断ユニットの性能向上は、GISの遮断ユニット小型化や直列接続数の削減によるSF₆ガス使用量の削減に寄与できる。



アブレーション材料を適用したSF₆ガス遮断ユニットの電流遮断過程

通常時は遮断ユニットの可動電極と固定電極の接触面を通じて電流が流れている(図の①)。異常発生時には可動電極と固定電極が切り離されるが、両電極間に発生する導電性アーク(約2万℃の熱プラズマ)を通じて電流が流れ続ける(図の②)。そのため、機械的圧縮によって圧力が上昇するパッファ室からのSF₆ガスの吹き付けに加えて、アブレーション材料から発生する高圧力ガスによって導電性アークを冷却することで絶縁性ガスになり(図の③)、電極間に電流が流れなくなるため遮断が完了する(図の④)。

1. ま え が き

高電圧の大電流は、たとえその通電経路を物理的に断ち切ったとしても導電性アーク(約2万℃の熱プラズマ)が発生して通電経路を維持するため、容易に遮断できない。すなわち、電流を遮断することは、アークを冷却し、さらに消滅させることと同義である。

電力送配電システムで、短絡事故などで発生する大電流は、システムに配備された開閉装置によって速やかに遮断される。この速やかな事故電流遮断が変圧器などの重要負荷を保護してシステムの健全性を維持している。

開閉装置で電流遮断を担う遮断ユニットは可動電極と固定電極とで構成されている。遮断ユニットによる電流遮断はそれら電極の開極によって生じるアークを消滅させることで行われ、遮断ユニットにはアーク自身のエネルギーによってポリマ樹脂を分解及びガス化させてアーク冷却を促すなどの工夫が取り入れられている。このような遮断ユニットに適用されるポリマ樹脂は、一般的に熱分解温度の低い材料ほどアーク暴露による分解質量が多く、それに伴う発生ガス量も多くなることが知られている⁽¹⁾。

当社は、電力用の高電圧SF₆ GISの遮断ユニットに適したポリマ樹脂(以下“アブレーション材料”という。)を見だし、遮断ユニットへのアブレーション材料の適用による遮断性能向上技術を開発した。

本稿では、見いだしたアブレーション材料について、SF₆アークに曝(さら)される際の分解質量特性や、アブレーション材料の分解による周囲空間の圧力上昇効果を述べる。

2. SF₆ガス中で使用するアブレーション材料の必要条件

2.1 ポリマ樹脂分解による電流遮断性能向上メカニズム

SF₆ GISの遮断ユニット内で生じるアークは、機械的に圧縮するパuffa室からSF₆ガスが吹き付けられることで冷却され、さらには消滅する。このとき、SF₆ガスの流れは、一般的にポリマ樹脂であるPTFE(ポリテトラフルオロエチレン)から成るノズルで制御される。ノズルはアークのエネルギーで分解し、アーク冷却やパuffa室の圧力増大による吹き付け圧力増加に寄与してアーク消滅を促し、遮断ユニットの遮断性能を向上させる⁽²⁾⁽³⁾。したがって、このノズルにPTFEより熱分解温度の低い絶縁樹脂を適用すれば、ノズルの分解質量が増大し、遮断性能の向上が見込める。

2.2 SF₆ガス中で使用するアブレーション材料特有の制約事項

PTFEより熱分解温度の低い樹脂として、POM(ポリアセタール)やPA6(ポリアミド6)がある。これらは低圧の

配線用気中遮断器の筐体(きょうたい)を始めとする消弧室近傍に設置する材料として検討されている⁽¹⁾⁽⁴⁾。しかしながら、これら水素をポリマ組成中に含む樹脂が、SF₆ガス中でアークを生じさせるGISの遮断ユニットに適用された例はない。

水素を材料組成中に含むそれらポリマ樹脂がアークによって分解すると、炭素(C)、酸素(O)、水素(H)、窒素(N)等に分解される。また、SF₆ガスは、アークによる分解過程で硫黄(S)やフッ素(F)に分解する。したがって、ポリマ樹脂とSF₆ガスの分解ガスが混合すると、混合ガスに含まれるH及びFの一部はガスの温度低下過程で結合して強酸性物質であるフッ酸(HF)となる。このHFはGIS内部の絶縁物の沿面絶縁性能を著しく劣化させる⁽⁵⁾。そのため、GISの遮断ユニットのノズルに適した材料は、水素を含まない絶縁材料と言える。

以上から、SF₆ガス中で使用するアブレーション材料には、従来のノズル材料であるPTFEより分解質量が多いこと、水素を持たないこと、の2条件を併せ持つことが望ましい。

3. アブレーション材料の分解質量特性

ポリマ組成中に水素を持たない絶縁樹脂を探索し、幾つかのポリマ樹脂を見いだした。それらポリマ樹脂をアブレーション材料の候補とし、SF₆アーク暴露による分解質量を測定した。この章では、最終的にアブレーション材料として選定されたポリマ樹脂の、SF₆アーク暴露による分解特性について述べる。

3.1 測定実験装置

図1(a)は、アブレーション材料から成るテストピースを取り付けるアーク装置(測定実験装置)の断面図である。テストピースはアーク装置の圧力室内部に配置され、厚み10mmの円筒形である。テストピースの外直径は70mm、内面の半径 R_w は11.5mm又は17mmとした。

また、図1(b)に示すとおり、テストピースはその内面以外をフェノール樹脂で覆われる。すなわち、可動電極と固定電極の間に生じるアークには、テストピースの内面だけが暴露される。アーク装置はSF₆ガスを0.6MPa-abs封入した密閉容器内に配置される。

アーク電流 I は60Hzの減衰性の正弦波交流であり、その第3半波目が9kA_{rms}から20kA_{rms}になるように調整される。

3.2 アブレーション材料の分解質量 M_1

テストピースはアーク装置に組み込まれる前に、実験前の初期質量 M_i を測定される。そして、アーク装置の中で複数回アークに曝された後取り出され、実験後の質量 M_a が測定される。テストピースの分解質量 M_1 は、アーク暴露回数 N と、 M_i 及び M_a の測定結果から、式(1)によって導出される。

$$M_1 = \frac{1}{N} (M_i - M_a) \quad \dots\dots\dots (1)$$

なお、この実験で、 N は5とする。

3.3 分解質量 M_1 の測定結果

図2は、アーク電流、アーク電圧及び可動電極移動距離の測定波形例、及びアーク装置での各時刻の電極配置を示している。なお同図は、電流の第3半波が20kA_{rms}に設定されたものである。アークは時刻13.5msに発生し、その後可動電極が20mm下降した時刻23msからテストピースはアークに暴露され始める。

図3では、この開発で見いだした新アブレーション材料とPTFEの分解質量 M_1 の測定結果を示している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図3(a)で、

テストピース内面の半径 R_w が11.5mmのときには、アーク電流 I が9.5kA_{rms}から20kA_{rms}へ増大すると、新アブレーション材料の M_1 は0.24gから0.5gへ、約2倍に増加している一方、PTFEの M_1 は0.09gから0.26gへ、約2.9倍に増加している。また、図3(b)で、 I が20kA_{rms}のときには、 R_w が11.5mmから17mmへ増大すると、新アブレーション材料の M_1 は0.5gから0.4gへ、約0.8倍に減少している。一方、PTFEの M_1 は0.26gから0.23gへ、約0.9倍に減少している。

このことから、どの測定条件でも、PTFEより新アブレーション材料の方が、SF₆アークに曝されたときの分解質量が多いことが明らかになった。

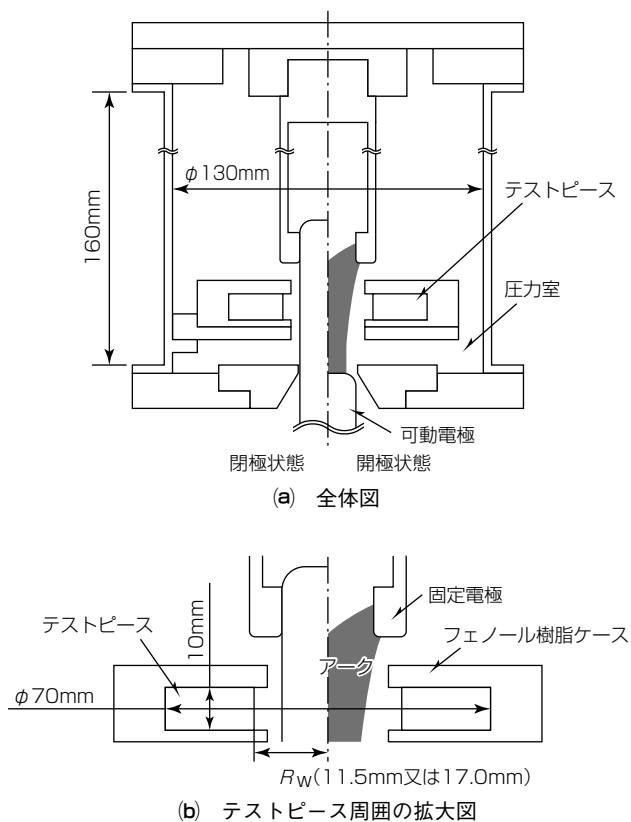
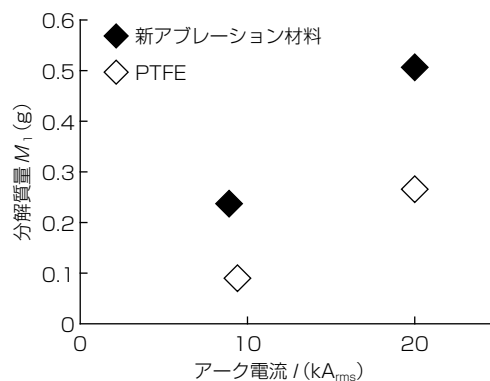
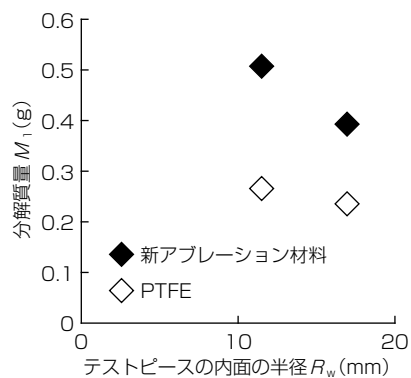


図1. アーク装置の断面図



(a) テストピースの内面半径 $R_w=11.5\text{mm}$ のときの M_1



(b) アーク電流 $I=20\text{kA}_{rms}$ のときの M_1

図3. 新アブレーション材料とPTFEの分解質量測定結果

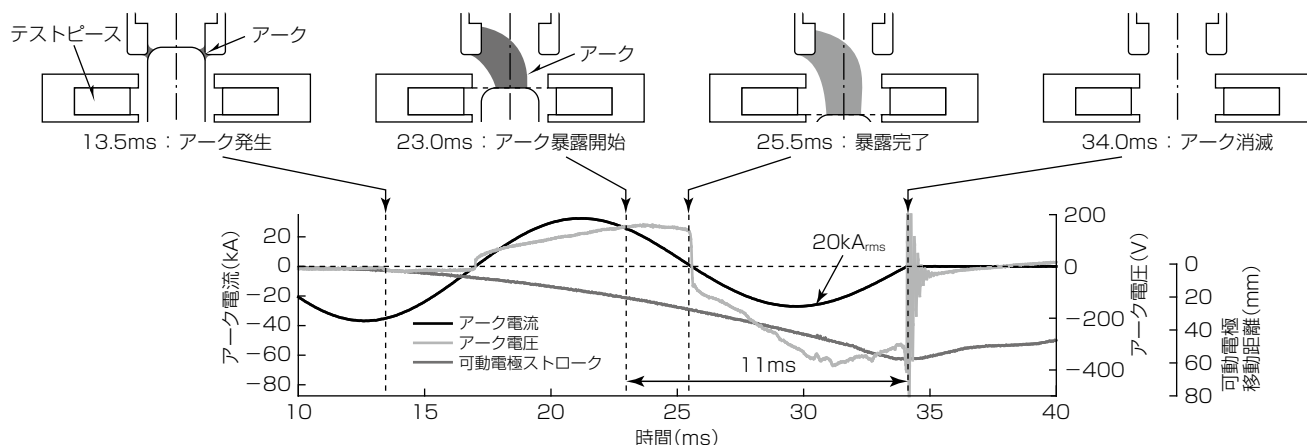


図2. アブレーション材料の分解質量 M_1 測定実験でのアーク電流・アーク電圧・可動電極移動距離の測定波形例

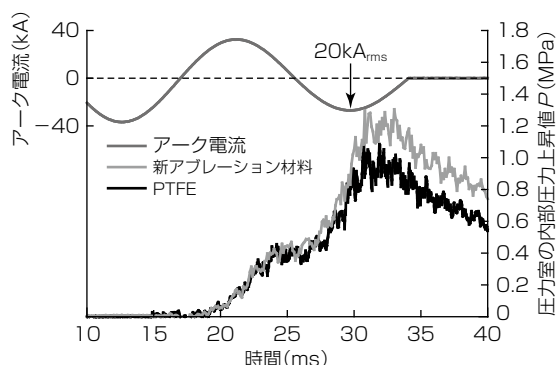


図4. PTFEと新アブレーション材料が設置された圧力室の内部圧力上昇値 P の測定結果

4. アブレーション材料の分解による周囲空間の圧力上昇効果

3章で述べたアブレーション材料の測定実験では、アークが生じている間、アーク装置のテストピースが設置される圧力室の内部圧力 P も圧電素子による圧力センサで測定していた。その測定結果から、アブレーション材料の分解による周囲空間の圧力上昇効果を評価する。

図4は、 R_w を11.5mm、アーク電流 I を20kA_{rms}とした場合での、圧力室の内部圧力 P の測定結果を示している。図で示すように、テストピース材料が新アブレーション材料の場合、 P は時刻約20msから上昇し始め、テストピースのアーク暴露が開始される時刻23msでは約0.3MPa上昇している。 P はその後も上昇を続け、電流がその波高値に達する時刻30msの周辺では約1.2MPaになる。一方、PTFEの場合、アーク電流の変化に対する P の上昇傾向は新アブレーション材料と同様であるが、テストピース内面全体がアークに暴露される時刻25.5ms回りから、新アブレーション材料との間に差異が生じ始める。そして、同時刻以降は、PTFEの場合の P は、新アブレーション材料の場合の P より常に低くなり、両者の最大値には約0.3MPaの差が生じる。

この実験結果から、SF₆ガス遮断ユニットのノズルの一部に新アブレーション材料を使用することで、パuffア圧力が増大し、ひいては遮断性能の向上が期待できる。

5. む す び

GISに内蔵する遮断ユニットの仕様は、国内規格JEC-2300や国際規格IEC62271-100等によって厳格に定められている。そのため、遮断ユニットの電流遮断性能が必要仕様にわずかでも届かない場合、GIS遮断ユニットの直列接続数増大、遮断ユニットの構造変更、さらには操作装置

の高出力化(油圧式操作装置の適用、など)を余儀なくされる。

今回開発した新アブレーション材料のノズル適用による遮断性能向上技術は、大幅な遮断ユニット構造の変更や操作装置の出力増加を伴わないため、先に述べたような規格が求める性能に届かない遮断ユニットに対して有効な性能改善策になると考えられる。

現在、この技術を活用した遮断ユニットの性能向上開発を進めている。この開発は、遮断ユニット小型化や直列接続数の削減によるGISのSF₆ガス使用量削減につながる。加えて、この開発は、ばね操作装置のGISへの適用範囲拡大にも寄与できると考えられる。高出力な一方で高頻度メンテナンスが必要な油圧式操作装置をばね操作装置に置き換えることによって、GISの省メンテナンス化を推進していく。

参 考 文 献

- (1) 磯崎 優, ほか: 密閉容器内における大電流気中アークの特性, 平成13年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 416, 356~357 (2001)
- (2) Zhang, J. L., et al.: Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-Expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor, IEEE Transactions on Plasma Science, **30**, No.2, 706~719 (2002)
- (3) Gonzalez, J.-J., et al.: PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breaker, IEEE Transactions on Plasma Science, **43**, No.8, 2703~2714 (2015)
- (4) Andre, P.: Composition and thermodynamic properties of ablated vapours of PMMA, PA6-6, PETP, POM and PE, J. Phys. D: Appl. Phys., **29**, 1963~1972 (1996)
- (5) 新開裕行, ほか: 高経年GCBの耐電圧性能検証および内部絶縁ガスの調査, 電気学会研究会資料 放電・開閉保護・高電圧合同研究会, ED-11-158/SP-11-57/HV-11-62 (2011)
- (6) 佐藤基宗, ほか: ノズルアブレーション促進によるガス遮断器性能向上技術開発に向けた検討, 電気学会研究会資料 放電・静止器・開閉保護合同研究会, ED-18-050/SA-18-033/SP-18-002 (2018)
- (7) 佐藤基宗, ほか: SF₆アークに暴露されるPTFEノズルのアブレーション質量予測式の提案, 電気学会論文誌B (2019年7月号掲載予定)

電力機器の絶縁評価技術

吉村 学* 大竹泰智*
 海永壮一朗* 菅 健一**
 梅本貴弘*

Insulation Evaluation Technologies of Power Equipments

Manabu Yoshimura, Soichiro Kainaga, Takahiro Umemoto, Yasutomo Otake, Kenichi Suga

要 旨

電力機器の開発では、過去からの社会ニーズに対応し、安全・信頼性の追求、小型・軽量化、運用・保守性の改善に取り組んできた。近年では、地球温暖化防止を始めとする環境負荷低減、ライフサイクルコスト削減などの新たなニーズもあり、開発に反映させてきた。

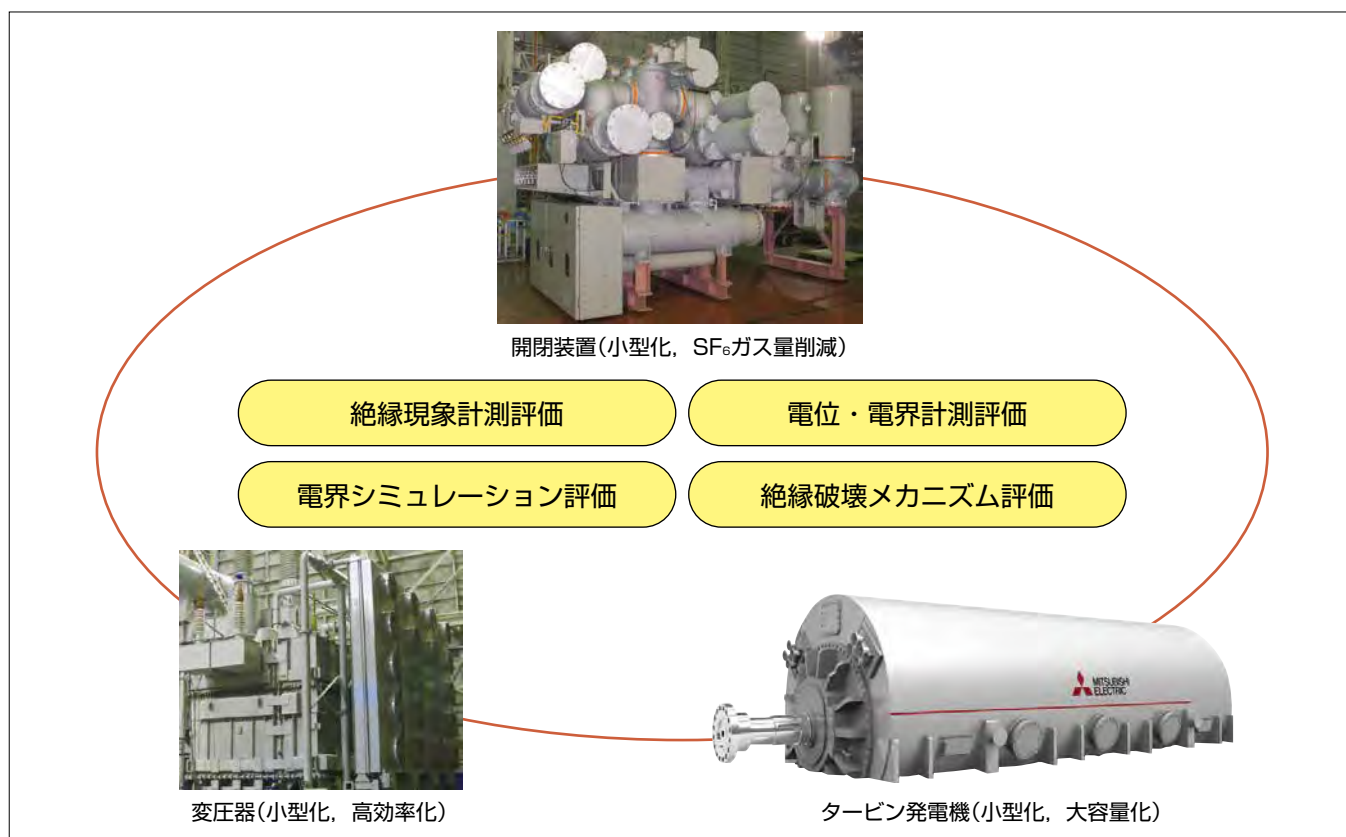
三菱電機は、発電及び送配電の主な電力機器を提供することで社会に貢献している。電力機器は6.6kVから765kVと電気機器の中で最も高電圧の環境下で使用されるため、製品開発をする上で絶縁信頼性の確保が最も重要な課題である。また、先に述べた社会ニーズの一つである機器の軽量・小型化への要求は機器内の使用電界を高めるため、なお一層の絶縁信頼性の確保が必要になっている。

様々なニーズに対応しながら絶縁信頼性を確保するには

高度な絶縁評価技術を製品設計に反映させることが重要である。絶縁評価技術の開発には様々な項目があるが、代表的なものとして“絶縁現象計測評価”“電位・電界計測評価”“電界シミュレーション評価”“絶縁破壊メカニズム評価”が挙げられる。今回、次の四つの絶縁評価技術を開発した。

- (1) AEセンサを用いた部分放電検出システム
- (2) 電気光学ポッケルス効果を用いた表面電位計測技術
- (3) 有限要素法を用いた過渡電界／熱伝導連成解析による温度上昇と沿面電界の定量評価技術
- (4) 球状ボイドの欠陥サイズと寿命の定量評価技術

今後、社会ニーズは更に変化する可能性はあるが、電力機器の絶縁信頼性を確保する重要度には変わりなく、絶縁評価技術の開発を継続的に実施する。



電力機器の絶縁に関連する主な開発ニーズと絶縁評価技術の開発項目

開閉装置、変圧器、タービン発電機の製品ごとに絶縁評価技術が関連する代表的な開発ニーズと、それらを開発するために必要な絶縁評価技術の開発項目を示す。

1. ま え が き

電力機器の開発では、過去からの社会ニーズに対応し、安全・信頼性の追求、小型・軽量化、運用・保守性の改善に取り組んできた。電力機器は、低コスト化、低環境負荷のため小型化を目指す機器内部の電界が一層高くなることから、絶縁信頼性を確保する重要性が増す。

本稿では絶縁の信頼性を高める上で必須である絶縁現象計測評価、電位・電界計測評価、電界シミュレーション評価、絶縁破壊メカニズム評価に関する最新の開発技術述べる。

2. 最新の絶縁評価技術

2.1 部分放電計測技術

電力用変圧器は、落雷時のサージ波形を模擬した雷インパルス電圧への耐電圧が重要な評価項目の一つである。絶縁耐力の評価には、絶縁破壊の前駆現象である部分放電の検出が有効である。ただ、古くから部分放電の検出技術が確立されている交流電圧に対して、雷インパルス電圧の場合は技術課題が大きく検出技術が確立されていなかった。雷インパルス電圧に対する部分放電検出が困難な理由としては、雷インパルス電圧発生器自身が発する多大な電磁ノイズと、変圧器内部のコイルの振動に起因する弾性ノイズによって、微弱な部分放電信号が埋没することにある。これら二つのノイズを除去する方法として、AE(Acoustic Emission)センサを用いた部分放電検出システムを構築した⁽¹⁾。この手法ではAE信号と電磁ノイズの伝搬速度の違いから、センサへの到達時間に差が生じ、部分放電信号と電磁ノイズを分離できる。さらに、部分放電信号だけを抽出するフィルタを適用することで部分放電信号と弾性ノイズの分離を試みた。

図1に実規模変圧器モデルに対して構築した雷インパルス部分放電検出システムを示す。中心周波数120kHzのAEセンサ(Physical Acoustics社、R15- α)を実規模変圧器モデルのタンク壁面に設けたアクリル窓に固定し、AEセンサの後段に遮断周波数200kHzの低域通過フィルタと、120kHz付近だけを増幅する狭帯域アンプを設置した。図2に、低域通過フィルタと狭帯域アンプがない場合で、部分放電の発生しない低電圧を印加した際のAEセンサ波形及び同波形の時間-周波数特性を示す。電圧印加直後に電磁ノイズとみられるパルス波形と電圧印加から1.5ms以降に、弾性ノイズとみられる数kHz~50kHzの周波数成分を持つ振動波形が検出された。なお、1.5msは変圧器コイル-AEセンサ間距離を油中音波の伝搬速度で割った値と同等であった。図3に低域通過フィルタと狭帯域アンプを使用した場合のAEセンサ波形及び同波形の時間-周波数特性を示す。絶縁破壊電圧を1.0とすると0.96倍となる破壊直

前の電圧を印加した場合である。フィルタとアンプの効果によって弾性ノイズとみられる数kHz~50kHzの振動波形は見られなくなり、代わりに電圧印加から1.3ms後に90~180kHz付近にピークを持つ部分放電とみられる波形を検出できた。

今後、実規模変圧器モデルでのデータ蓄積と、それに基づく検出精度の向上に継続的に取り組んでいく。

2.2 電気光学効果を応用した電位・電界計測技術

電力機器の絶縁設計を合理化する上で、高電圧部位での詳細な電位・電界分布の把握が重要である。近年の計算機の高性能化と汎用解析ソフトウェアの発達によって、容易に電位・電界分布を推定できるようになった一方で、計測は電位・電界センサが金属部を持ち、高電圧部位に配置して測定するため測定電圧に限界があった。そこで今回、電圧・電界に応じて透過光特性が変化する、電気光学ポッケルス効果を用いた表面電位計測技術を新たに開発した。センサ部を絶縁物だけで構成できるため、高電圧部に近接させる計測ができる点が最大の特長である。ここでは、開発

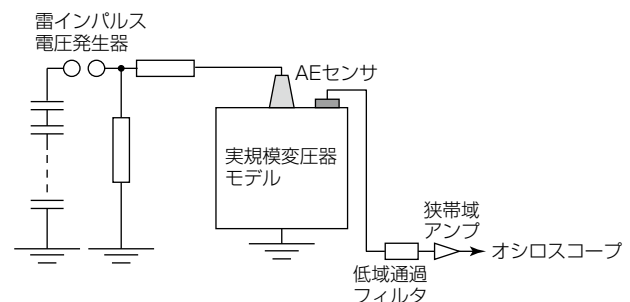


図1. 雷インパルス部分放電検出システム

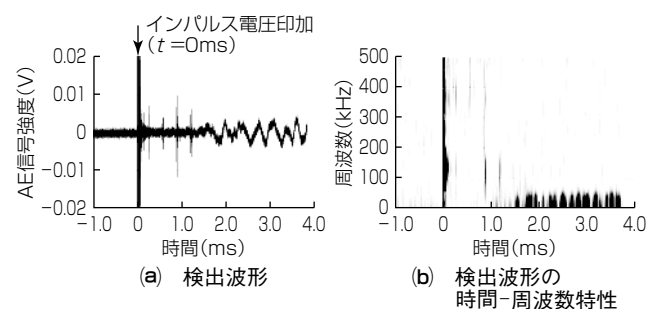


図2. ノイズ対策前の低電圧印加時のAEセンサ波形

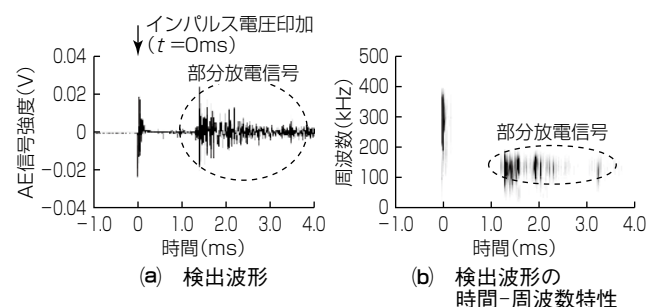


図3. ノイズ対策後の絶縁破壊直前のAEセンサ波形

技術をタービン発電機の固定子コイル電界緩和層での表面電位分布計測に適用した例について述べる。

図4に、タービン発電機と固定子コイル電界緩和層の構造を示す。同部位には、2.3節で述べる非線形抵抗材料を塗布して沿面電界の低減を図っている。発電機の高効率化と出力密度の向上には、コイル主絶縁の薄肉化による放熱性の向上が有効であるが、そのためには電界緩和層の表面電位分布や沿面電界の定量評価が必要である。図5に、開発した表面電位計測システムの基本構成を示す。レーザー光が電気光学結晶内部を透過する際に生じる偏光状態の変化を光量変化として測定するため、光路上に2枚の偏光子と1/4波長板を配置した。また光源、及び光検出器との間を光ファイバで接続する構造とし、センサを可搬型にした。さらに、計測システムをコイルに沿って動作させることで得られる電界分布を、コイル表面電位分布に変換する信号処理手法を確立した⁽²⁾。発電機の試験電圧に相当する50kVを固定子コイル導体に印加した際の表面電位の実測結果、及び有限要素法を用いた過渡電界解析結果を図6に示す。両者はよく一致しており、開発した測定技術の妥当性を実証できた。

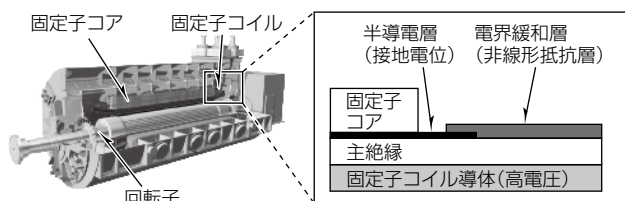


図4. タービン発電機と固定子コイル電界緩和層の構造

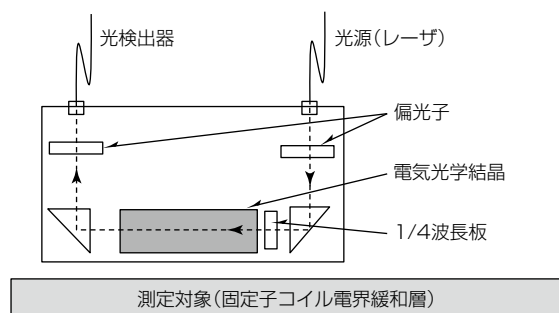


図5. 開発した表面電位計測システムの基本構成

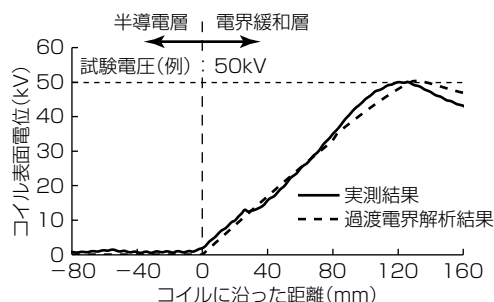


図6. 電界緩和層での表面電位分布の実測・解析結果

今後、発電機の開発に適用し、性能向上に貢献するとともに、他の電力機器の絶縁評価にも適用範囲を広げ、設計合理化を図る。

2.3 非線形抵抗材料を用いた電界緩和構造設計技術

電界に応じて抵抗率が変化する非線形抵抗材料は、沿面電界を緩和し、機器の絶縁信頼性を向上させるために有効な機能性材料であるが、図4に示した発電機固定子コイルへの適用には、電界緩和に伴って同材料に発生する電流のジュール発熱を抑制することが重要な課題である。2.2節で述べた発電機の高効率化と出力密度の向上に付随して電界緩和層に加わるストレスは増大する傾向にあり、電界緩和層での発熱と電界を同時に評価する解析手法の確立と、それに基づく電界緩和層の最適設計技術の確立が望まれる。

電圧階級の高い発電機では、異なる抵抗を持つ2種類の非線形抵抗材料を組み合わせた電界緩和構造（ダブルバンド方式）が用いられる。ダブルバンド方式の構造、及び表面電位・発熱分布を図7に示す⁽³⁾。ダブルバンド方式で、表面電位の傾きは各層の抵抗率に依存し、低抵抗層側で小さく、高抵抗層側で大きくなる。一方、発熱箇所は半導電層と低抵抗層、及び低抵抗層と高抵抗層の境界の2か所でピークを持つ分布になるが、単一の非線形抵抗材料を用いたシングルバンド方式と比較して最大発熱値が低減できる。ここで発熱分布は2種類の非線形抵抗材料の抵抗率組合せと、低抵抗層の長さ L_1 に依存する。当社は、有限要素法を用いた過渡電界／熱伝導連成解析を開発し⁽⁴⁾、温度上昇と沿面電界の定量評価技術を構築した。電界緩和層の表面電位・温度分布の解析例を図8に示す。また、これら評価手法に基づいて電界緩和構造を最適化したモデルコイルを製

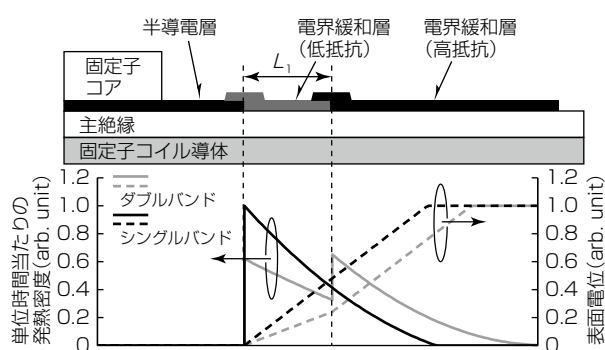


図7. ダブルバンド方式電界緩和層での電位・発熱分布

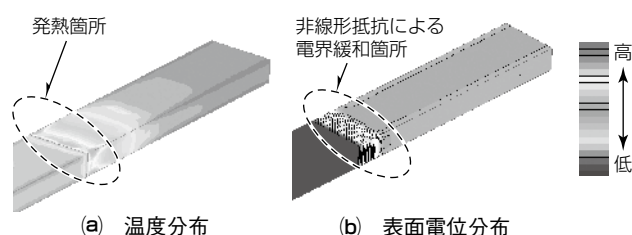


図8. 有限要素法による電位・温度分布の解析結果

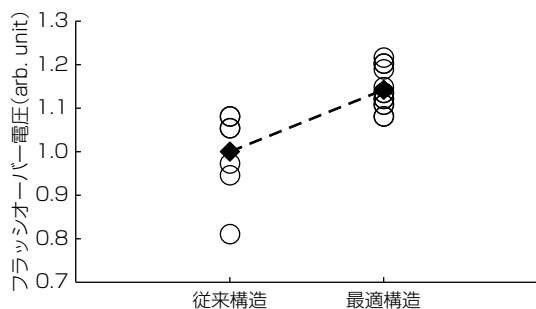


図9. 最適構造設計によるフラッシュオーバー電圧の向上

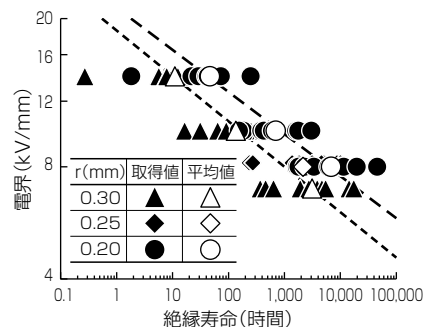


図11. 欠陥サイズごとのV-t試験結果

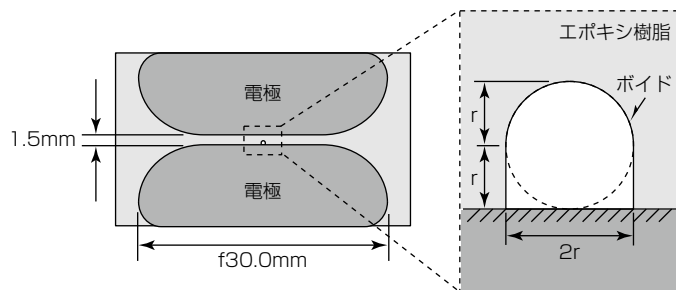


図10. 絶縁寿命評価サンプル

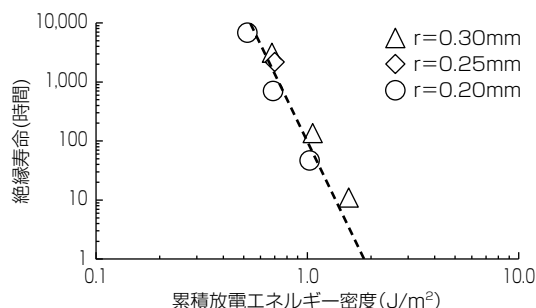


図12. 累積部分放電エネルギー密度と寿命の関係

作してフラッシュオーバー電圧を評価した結果を図9に示す。従来構造と比較すると、フラッシュオーバー電圧の平均値で15%程度向上し、また電圧のばらつきを低減できたことから、この電界緩和層の評価技術・最適設計技術の有効性を実証した。

2.4 固体絶縁物寿命評価技術

電力機器への固体絶縁の適用で、欠陥存在下の絶縁劣化特性の把握は極めて重要である。部分放電による絶縁物の劣化過程や実器に見られるボイド・剥離・クラックといった欠陥形状の違いによる絶縁寿命への影響については過去にも研究が行われている。しかし、欠陥サイズと寿命の相関関係は解明されていないため、今回は出荷時の部分放電試験で検出困難であり高リスクと想定される球状ボイドを対象を絞り、欠陥サイズと寿命に関する定量評価を実施した⁽⁵⁾。

図10に示す半径 r の球状ボイド欠陥を内包するエポキシ樹脂サンプルの絶縁寿命を評価した。各欠陥サイズの破壊時間特性(V-t特性)を図11に示す。欠陥サイズが大きいほど短寿命であり、かつ、傾きが増大する傾向が分かる。樹脂厚さや欠陥サイズが異なる実器に対して絶縁寿命を推定するため、支配要因と考えられる部分放電特性に着目して寿命との関係を検討した。交流電圧印加時の1サイクル当たりの放電回数と部分放電1回当たりに欠陥内壁で消費される放電エネルギー密度を理論計算し、これらの積である1サイクル当たりの累積部分放電エネルギー密度を欠陥サイズごと及び印加電圧ごとに算出した。絶縁寿命との関係を図12に示す。欠陥サイズが異なる場合も共通の絶縁寿命指標として累積放電エネルギーを使用できることが分かった。

今後、製品開発時の絶縁寿命評価への適用に向けて検討を進めていく。

3. む す び

電力機器の絶縁信頼性を高める上で必須である絶縁評価技術について述べた。今後、社会ニーズは変化する可能性はあるが、絶縁信頼性を確保する重要度には変わりはなく、継続的に技術開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 梅本貴弘：電力用変圧器の雷インパルス部分放電検出技術，電気評論，No.624，26～29（2016）
- (2) Onishi, D., et al. : Surface potential measurement of stress grading system of high voltage rotating machine coils using pockels field sensor, 2017 International Symposium on Electrical Insulation Materials (ISEIM), D4, 95～98（2017）
- (3) Umamoto, T., et al. : Optimization of multiple-layer end-turn stress grading system for high voltage turbogenerators, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 120～123（2018）
- (4) 梅本貴弘，ほか：インバータ駆動回転機のコイルエンド電界緩和システムにおける局所発熱低減手法の検討，電気学会論文誌A，138，No.4，133～140（2018）
- (5) 大竹泰智，ほか：エポキシ樹脂における絶縁寿命のPDエネルギー依存性，平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会，376（2016）

空調用熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術

尾中洋次*
松本 崇**

Thermal Fluids Technologies to Improve Heat Exchanger for Air-conditioning

Yoji Onaka, Takashi Matsumoto

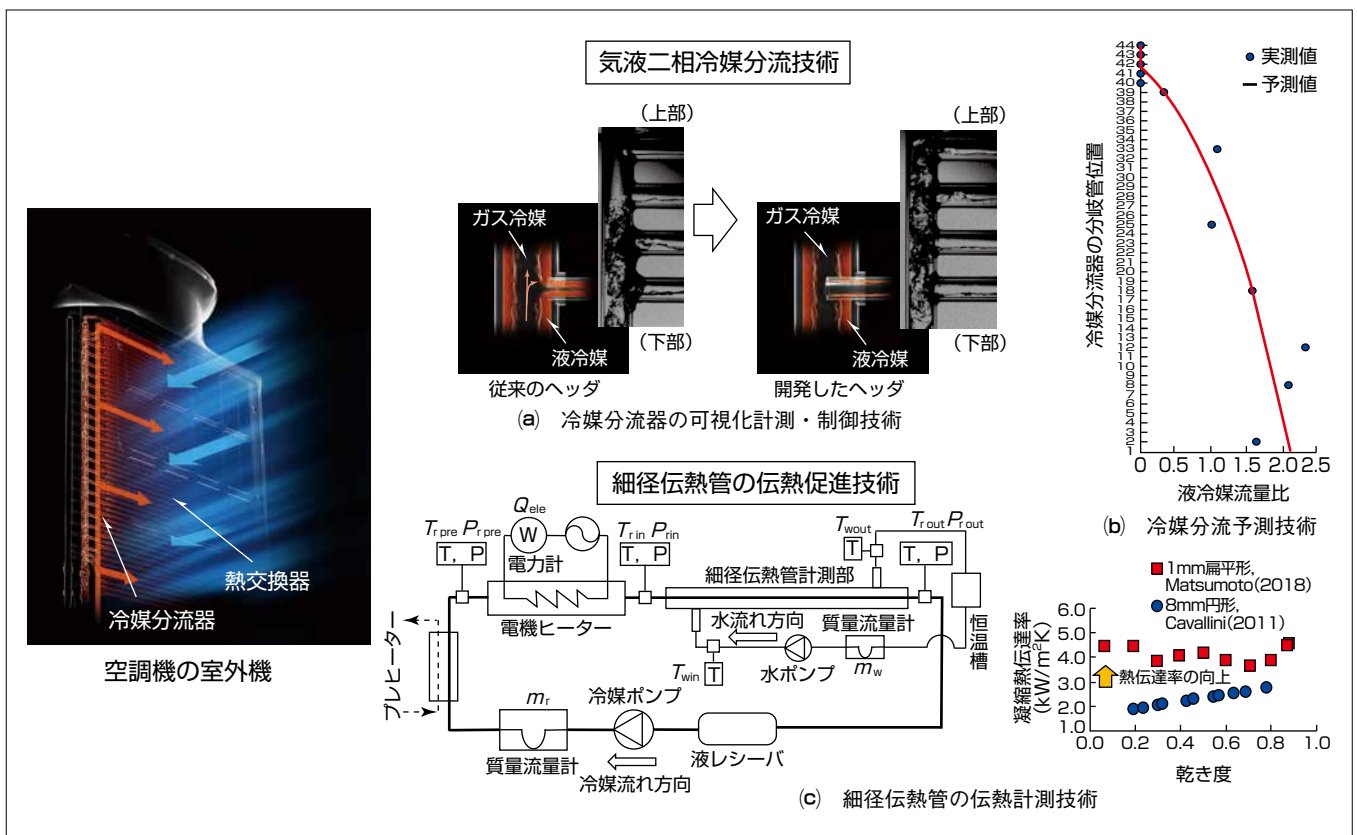
要 旨

三菱電機グループでは、家庭用電気機器から社会インフラシステムまで幅広い製品を世界各国に提供している。

主力事業の一つである冷凍空調機器はヒートポンプの技術が鍵となっており、機器に用いられている熱交換器は空調機器の性能に大きな影響を与える重要なデバイスの一つである。

熱交換器開発の技術動向としては、近年、欧州を中心とした温室効果ガスの規制強化や省エネルギー規制の強化に伴い、熱交換器内の冷媒量削減と性能向上を目的として、伝熱管(パス)の細径管化と多パス化が進展している。従来に比べて、パス数が増加したことで、複数のパスに冷媒を適切に分流する気液二相冷媒分流技術と、細径伝熱管の伝熱促進技術が重要となっている。

空調熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術に関する当社の代表的研究成果として、気液二相冷媒分流技術では冷媒分流器の可視化計測技術、分流予測技術、分流制御技術、また細径伝熱管の伝熱促進技術では伝熱計測技術がある。冷媒分流器の可視化計測技術は、高圧の冷媒の流動現象の把握を可能にし、低流量の条件で、液冷媒が冷媒分流器の上部まで流動しないフラッシングが発生していることを明らかにした。これらの結果を基に、一次元分流予測モデルを構築し、様々な使用条件での冷媒分流器の設計を実現した。さらに、可視化による気液二相流の流動状態から、冷媒分流器の枝管を主管に挿入する新構造を採用することで、冷媒分流を改善し、熱交換器性能を約10%向上させた。



熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術

空調機の室外機熱交換器を高性能化するために気液二相冷媒分流技術の開発と細径伝熱管の伝熱促進技術の開発を行っている。図(a)は冷媒分流器の可視化計測・制御技術、図(b)は冷媒分流予測技術の概要である。熱交換器の伝熱促進技術としては、細径伝熱管の熱伝達率を計測する基盤技術の開発を行っている。図(c)は開発した細径伝熱管の伝熱計測技術の概要である。

1. ま え が き

当社グループでは、家庭用電気機器から社会インフラシステムまで幅広い製品を世界各国に提供している。当社先端技術総合研究所は、当社グループの製品・システムの開発を支える基盤技術開発を担っている。主力事業の一つである冷凍空調機器は蒸気圧縮を使用したヒートポンプの技術が鍵となっており、特に冷凍空調機器に用いられている熱交換器は機器の性能に大きな影響を与える極めて重要なデバイスである。

本稿では、当社が継続的に開発を進めている空調用熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術として、気液二相冷媒分流技術と細径伝熱管の伝熱促進技術について述べる⁽¹⁾。

2. 熱交換器の技術動向

冷凍空調機器の冷媒回路の一例を図1に示す。機器は、主として圧縮機、熱交換器(蒸発器・凝縮器)、膨張弁の冷媒回路で構成されている。回路には代替フロンであるR410Aなどの高圧の流体を流動させ、熱交換器での凝縮と蒸発によって周囲空気との熱交換を行うことで、熱の移動を実現する。このため、熱交換器の高性能化は冷凍空調機器の性能を向上させる上で極めて重要となる。

熱交換器の技術動向として、近年、欧州を中心とした温室効果ガスの規制強化や省エネルギー規制の強化に伴い、熱交換器内の冷媒量削減と性能向上を目的として、伝熱管(パス)の細径管化が進展している。このため、従来に比べてパス数が増加したことで、複数のパスに気液二相状態の冷媒を適切に分流する気液二相冷媒分流技術の開発と、細径伝熱管の伝熱促進技術の開発が重要となっている。

3. 気液二相冷媒分流技術

気液二相冷媒分流技術に関して代表的な当社の研究成果として、冷媒分流器の可視化計測技術、分流予測技術、分流制御技術の三つについて述べる。

3.1 冷媒分流器の可視化計測技術

空調機に用いられている冷媒分流器(Distribution Header)は図1の蒸発器の上流に配置され、複数の伝熱管に気液二相冷媒を最適に分流する役割を担っている。冷媒分流器内部では密度が大きく異なるガス冷媒と液冷媒が複

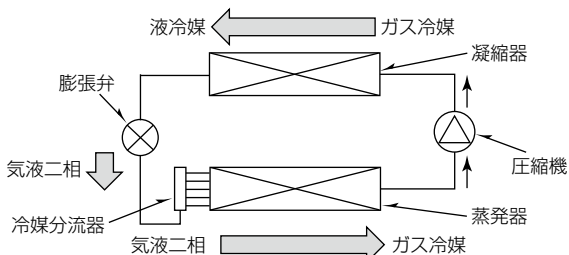


図1. 冷凍空調機器の冷媒回路

雑に影響する気液二相状態で流動する。空調機の冷媒は、主にR410AやR32が用いられており、運転条件によって蒸発器側で0.7～1.0MPa程度、凝縮器側で2.5～3.2MPa程度の高圧となる。

従来、水-空気などでの冷媒分流器の可視化研究は比較的なされていたが、高圧の冷媒での可視化計測に関する研究事例は少なかった。このため、空調機の実運転状況下での冷媒分流器内部の気液二相冷媒挙動の把握ができず、高性能化のアイデア創出や検証に時間を要していた。

当社は分流器内部の冷媒流動特性の可視化計測技術を開発した⁽²⁾。ここでは、分流器の中でも構造が簡素で、製造が比較的容易な垂直ヘッダ型の冷媒分流器を対象に、ヘッダ内部の可視化実験と各分岐管(以下“パス”という。)に流れる液冷媒流量の計測を行った。冷媒流動特性がヘッダ分流に与える影響を調査した結果について述べる。

構築した実験装置を図2に示す。実験装置は冷媒ポンプループに4分岐の垂直ヘッダをテストセクションとして接続し、ヘッダの各分岐管の下流に液冷媒流量計用の気液分離タンクを備えたものを用いた。各パスに流れる液冷媒流量は一定時間当たりに溜(た)まる液冷媒量を測定することで求める。テストセクションに流入する冷媒の圧力、乾き度は、テストセクション上流の電気ヒーター及び冷媒充填量によって調整する。

図3は4分岐垂直ヘッダと可視化に用いた光学機器である。ヘッダの各パスに流れる液冷媒流量の測定とともに、ヘッダ内の気液二相冷媒流れを高速度カメラで観察する。冷媒での可視化を実現するためのヘッダは半透明のPVC(ポリ塩化ビニール)樹脂材で製作した。投影はヘッダの後方から透過光を当て、ヘッダ正面の位置から行った。

図4は構築した実験系を用いた4分岐垂直ヘッダ内部の分流特性を表している。高流量では液冷媒がヘッダ上部に

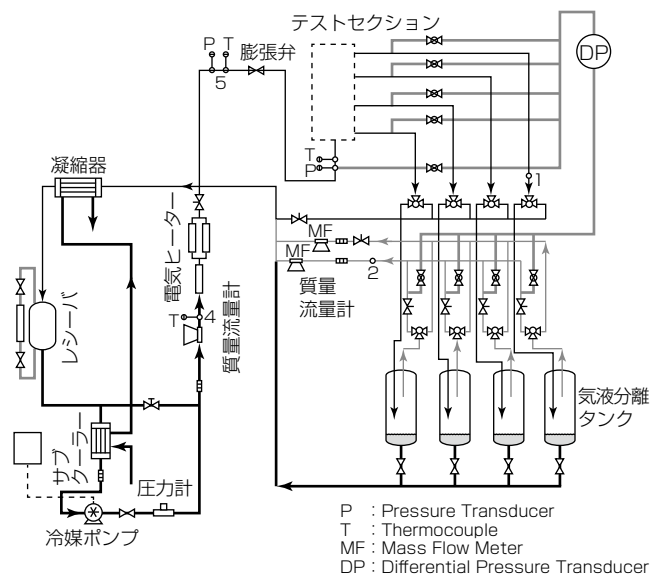


図2. 冷媒分流の可視化計測実験装置

行きわたっているが、低流量では、気液が分離し、液冷媒がヘッダの上部まで到達しないことが分かる。

3.2 分流予測技術

空調機は家庭用、店舗用、ビル用など幅広い負荷・運転条件と仕向け先に対応した設計が必要となる。このため、分流器設計では形状と冷媒状態の変化に対する汎用的な分流予測技術が必要になっている。ここでは、構造が単純で低コスト化に適するものの特性変動が大きいヘッダ型分流器の分流予測技術に関して、マクロな分流予測とミクロな分流予測について述べる。

まず、マクロな分流予測について述べる。垂直ヘッダの分流偏差の大小といったマクロな傾向を予測することで初期検討の段階でヘッダ径の選定などを行う際に活用する。可視化によってヘッダ内部の液面位置が冷媒流量と相関関係があることを示したが、当社はこの点に着目し、ヘッダ内部の液面位置の予測にフラッディング定数Cを適用することで20パスを超える垂直ヘッダの液面到達率を予測する式(1)を提案した⁽³⁾。ここで、Cはガス冷媒と液冷媒の見かけ速度、密度、管径によって求めるWallisのフラッディング定数である。式(1)によって、垂直ヘッダの分流偏差の大小といったマクロ的な傾向を予測することを可能にした。

図5にフラッディング定数Cと液面到達率の関係を示す。式(1)によって垂直ヘッダの液面位置を±20%で予測可能にした。

$$H=0.3989\log_e C+0.4967 \cdots \cdots (1)$$

次に、ミクロな分流予測技術について述べる。先に述べた

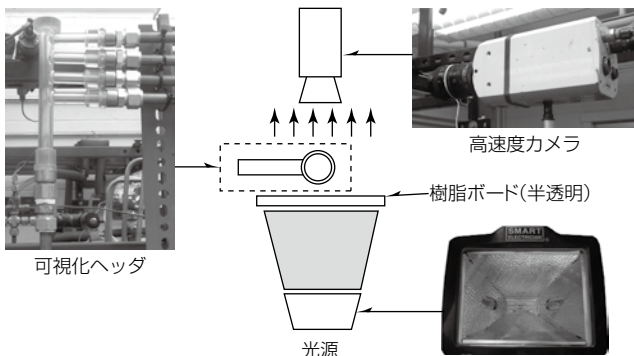


図3. 可視化実験時の光学機器とテストセクション

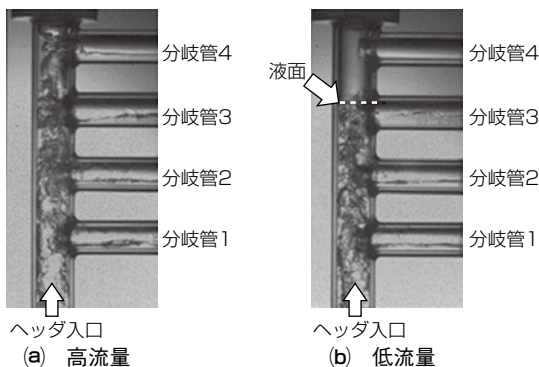


図4. 冷媒気液二相流の可視化結果

マクロな予測技術では、各パスに流動する液冷媒の流量などを予測できない。熱交換器の最適化設計には、各分岐に流れる冷媒流量などの情報が必要となるため、各部の分流特性を予測する必要がある。予測には、分流器の各要素の実験結果を基にした一次元モデル化や三次元数値解析によるものがある。ここでは、一次元モデル化について述べる。

垂直ヘッダの一次元モデル化に関しては、垂直ヘッダの上端部まで液冷媒が流入する条件で、ヘッダを垂直上昇管部、T分岐部、分岐管部の三つの要素に分けてモデル化を行っている⁽⁴⁾。空調機の幅広い運転条件では、ヘッダ上端部に液冷媒が到達しない条件が発生するため、同条件での実験・予測が重要である。当社は実験によって44分岐垂直ヘッダの冷媒分流特性を測定し、低冷媒流量時に液冷媒がヘッダ上部に到達しない条件での分流予測方法を新たに提案した⁽⁵⁾。

この計算方法を用いることで、図6に示すように、R410Aの44分岐垂直ヘッダの液冷媒流量比を±30%で予測でき、ヘッダ上部に液冷媒が到達しない条件を定性的に予測できた。

3.3 分流制御技術

3.1節と3.2節では、可視化計測技術と分流予測技術の開発について述べた。この節では、これらの開発技術を適

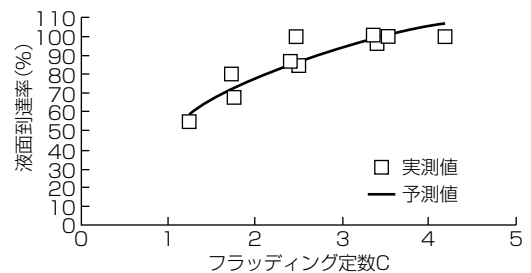


図5. フラッディング定数Cと液面到達率の関係

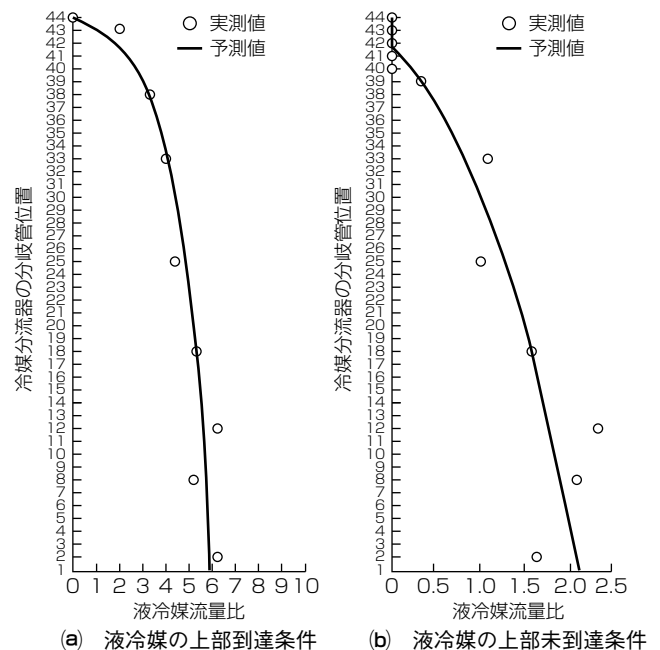


図6. 液冷媒流量比の実測値と予測値の比較

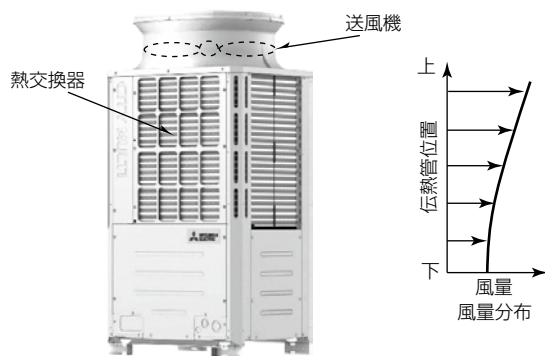


図7. ビル用マルチ空調機の室外機

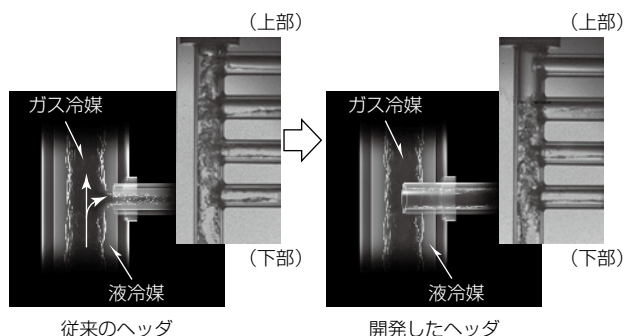


図8. 新構造の冷媒分流器

用して、ビル用マルチ空調機の室外機向けに新たに開発した新構造の冷媒分流器について述べる。一般に、ビル用マルチ空調機の室外機は図7に示すように送風機を筐体(きょうたい)上部に設ける“トップフロー型”を採用している。熱交換器を通過する空気の流れは送風機近傍で大きくなるため、熱交換器の上部に液冷媒を多く分流する必要があるが、単純な構造のヘッダ型分配器では、重力の影響で、液冷媒を熱交換器の上部まで流動させる設計が困難であった。

こうした課題に対応するため、当社はヘッダ型分流器の枝管を主管に挿入する新構造の冷媒分流器(図8)を開発した。新構造の冷媒分流器では、枝管を主管に液冷媒の相を貫くように挿入することで、主管を流れる液冷媒を飛散させ、主管の中心付近に流れる高速なガス冷媒に載せることで、ヘッダ上部に多く液冷媒を分流することを可能にした。これによって蒸発器の熱交換器の性能を約10%向上させた。

4. 細径伝熱管の伝熱促進技術

当社グループでは、冷媒量の削減と熱交換器の性能向上のために、熱交換器に使用する伝熱管の細径化と扁平(へんぺい)アルミ管化(図9)を進めている。当社では、2015年に外径4mmの扁平伝熱管を、2017年には外径2mmの扁平伝熱管を用いた空調機器を製品化している。これら従来に比べて細径な伝熱管での冷媒の熱伝達現象について、更なる高性能化を目指し、伝熱計測技術の構築を進めている。

図10は従来伝熱管と、細径伝熱管の凝縮熱伝達率の実

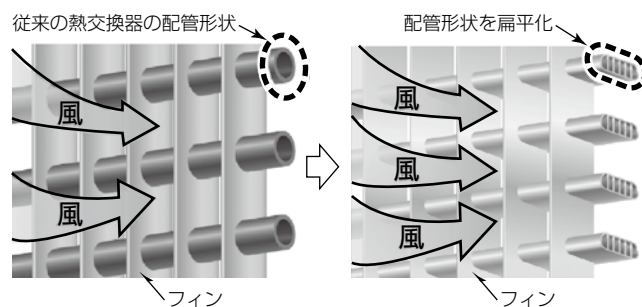


図9. 扁平アルミ管熱交換器

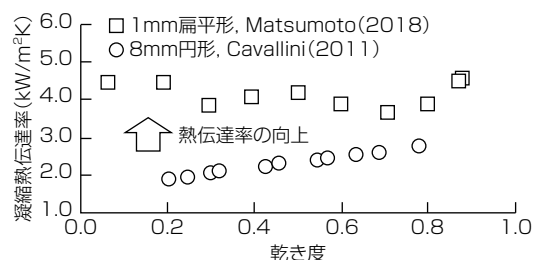


図10. 伝熱管細径化による冷媒凝縮熱伝達率の向上

験結果を比較したものである。伝熱管を細径化することで、凝縮熱伝達率を向上させることができ、熱交換器の高性能化が期待できる。

5. む す び

空調用熱交換器の高性能化に関連する熱流体技術として、気液二相冷媒分流技術と細径伝達管の伝熱促進技術について述べた。今後も、熱流体技術に関する、可視化計測技術、予測技術、制御技術の高度化を進め、機器のアイデア創出や設計適用を図り、多様な顧客のニーズや使用環境に対応する冷凍空調機器の開発に取り組む。

参 考 文 献

- (1) 松本 崇, ほか: 冷凍空調機器の高効率化を実現する混相流技術, 混相流, **32**, No.1, 159~164 (2018)
- (2) Onaka, Y., et al.: The experimental study of two-phase flow distribution in vertical header, 5th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Process of Refrigerants, 105~112 (2017)
- (3) 松本 崇, ほか: 多分岐な垂直ヘッダ型分配器における気液二相冷媒分配一実験による分配特性計測および偏流様相と液冷媒上部不到達条件の整理一, 日本冷凍空調学会論文集, **34**, No.4, 405~412 (2017)
- (4) Watanabe, M., et al.: Two-Phase Refrigerant Flow Distribution in a multi-pass Evaporator with vertical Upward Main tube, Transaction of the JSRAE, 2003, **20**, No.1, 21~28 (2003)
- (5) 松本 崇, ほか: 垂直ヘッダ型分配器における気液二相冷媒分配の予測, 日本冷凍空調学会年次大会, B143-1 (2014)

スクロール圧縮機の圧縮過程での熱流体挙動解析

河村雷人* 達脇浩平***
岩竹 渉*
清水瑞穂**

Analysis of Thermal Fluid Behavior during Compression Process of Scroll Compressor

Raito Kawamura, Wataru Iwatake, Mizuho Shimizu, Kohei Tatsuaki

要 旨

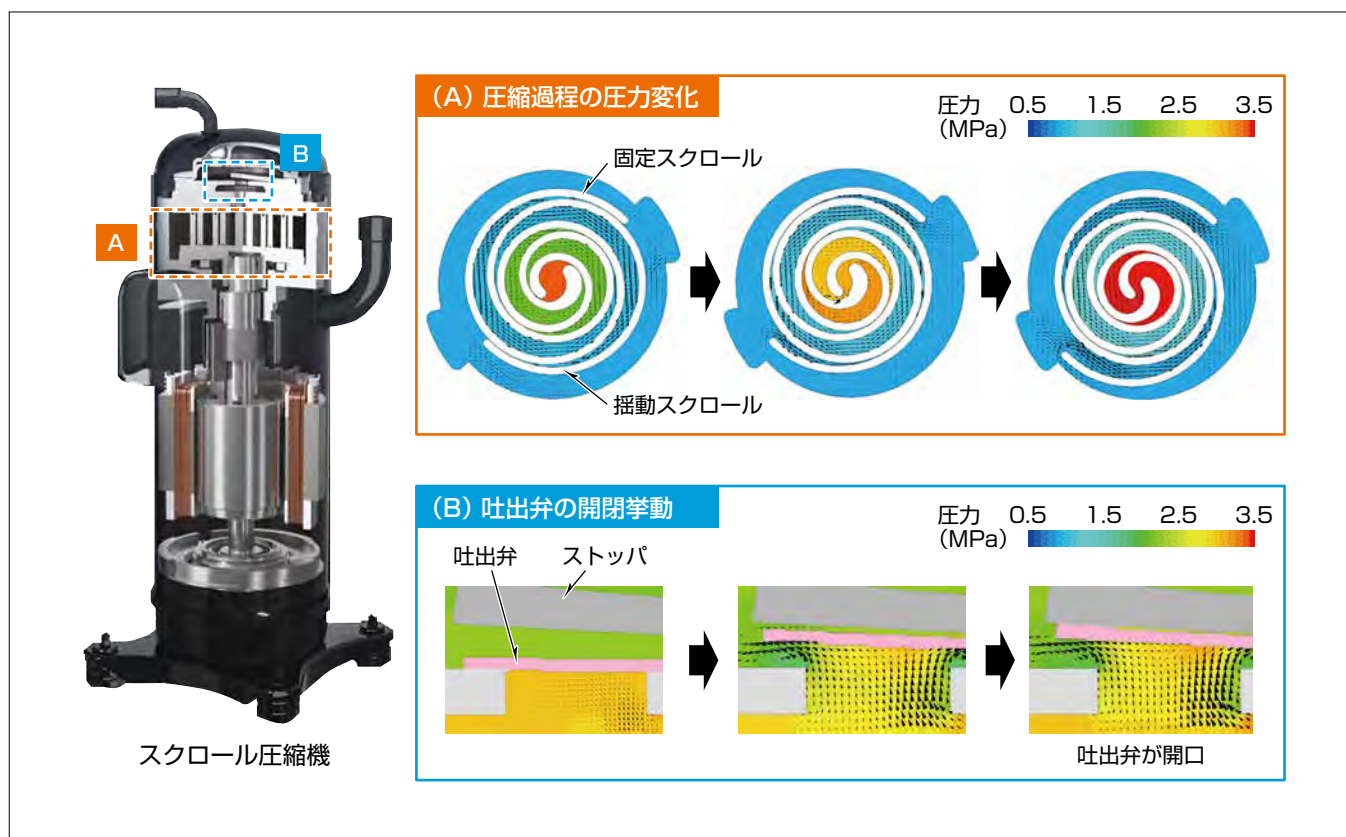
ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンに搭載されるスクロール圧縮機を対象に、圧縮過程の複雑な熱流体挙動を解明するための流体解析技術を開発している。従来の圧縮過程での三次元流動解析技術の動向として、簡易な幾何形状で構成されるレシプロ型やロータリ型に関する報告は数多くあるが、複雑な幾何形状を持つスクロール型に関する報告は少なかった⁽¹⁾⁽²⁾。

この研究では、スクロール圧縮機での熱流体現象の高精度予測技術を構築するために、CD-adapco社の三次元汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+(Ver.10.02.010)を用い、①スクロールの揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した高精度な流体解析

技術を開発し、実機での測定結果と比較することで解析結果の妥当性を検証した。解析と実験によって得られた知見は次のとおりである。

- (1) 圧力波形は実測結果と定性的によく一致し、定量的にも圧縮過程での圧力変化が誤差10%以内で、吐出過程での圧力最大値が誤差5%以内で一致することを確認した。
- (2) 吐出弁の開閉挙動は実測結果と定性的によく一致し、定量的にも最大リフト量が誤差6%以内で一致することを確認した。

この研究によって、スクロール圧縮機の圧縮過程での熱流体現象の高精度予測技術を確立し、空調冷熱機器の高性能化に貢献した。



圧縮過程での熱流体挙動解析

ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンに搭載されるスクロール圧縮機を対象に、圧縮過程の複雑な熱流体挙動を解明するために①スクロールの揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した流体解析技術を開発した。

1. ま え が き

ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンに搭載されるスクロール圧縮機を対象に、圧縮過程の複雑な熱流体挙動を解明するための流体解析技術を開発している。従来の圧縮過程での三次元流動解析技術の動向として、簡易な幾何形状で構成されるレシプロ型やロータリ型に関する報告⁽¹⁾⁽²⁾は数多くあるが、複雑な幾何形状を持つスクロール型に関する報告は少なかった。

この研究では、スクロール圧縮機での熱流体現象の高精度予測技術を構築するために、三次元汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+(Ver.10.02.010)を用い、①スクロールの揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した高精度な流体解析技術を開発した。

本稿では、その流体解析技術の解析方法及び実機での測定結果と比較した結果について述べる。

2. 解 析 方 法

2.1 スクロール圧縮機の構造

図1に、スクロール圧縮機の全体構成を示す。この圧縮機は、シェル内のガス空間が低压冷媒によって構成される低压シェル方式を採用しており、圧縮機構をシェル内の上側に、モータをシェル内の下側にそれぞれ配置している。吸入管から流入した冷媒の流れについて述べる。シェル側面の吸入管から圧縮機内部へ吸い込まれた低压の冷媒は、シェル空間上部のフレームに形成した2か所の連通口(以下“フレーム連通口”という。)を通過し、フレーム空間へ流入する。フレーム空間に流入した冷媒は、フレーム空間に設置した一対のスクロールで構成される圧縮機構に流入し、スクロールの回転動作に伴って低压から高压まで圧縮され、スクロール中央部に設置した吐出ポートから吐出マフラ内へ吐出する。その後、吐出マフラの連通口を通過し、シェル上面に設置した吐出管から圧縮機外部へ流出する。この研究では、このうちフレーム連通口から吐出管までの空間

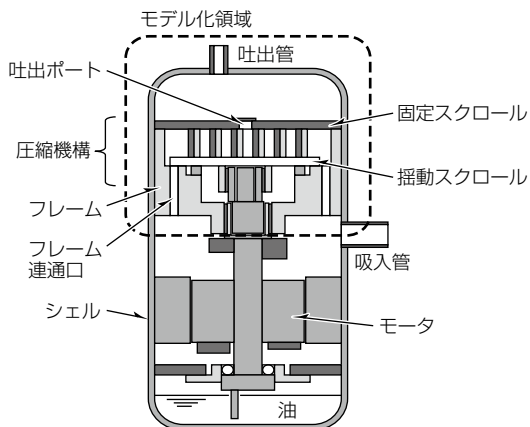


図1. スクロール圧縮機の全体構成

をモデル化した。すなわち、フレーム連通口から圧縮機構へ流入した低压冷媒をスクロールの回転動作によって高压まで圧縮し、吐出弁の開閉挙動によって吐出マフラ空間へ吐出され、吐出管から圧縮機外部へと流出する冷媒の流れを模擬した解析を実施した。

2.2 解析フロー

この研究では、三次元汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+(Ver.10.02.010)を活用し、スクロール圧縮機の圧縮機構部での流れ解析を実施した。圧縮機構部の内部では、冷媒を圧縮機構の旋回運動によって圧縮し、圧力が一定値以上になると吐出弁から開放される。この現象を模擬するために、圧縮室の形状変化を模擬したモーフィング、リメッシュの設定と、吐出弁の開閉運動を模擬したオーバーセットメッシュ及び剛体運動の設定が必要になるが、計算負荷が増大するため、解が安定するまでに時間がかかる課題がある。このため、まずは①吐出弁の開閉挙動をバッフル境界で簡易的に模擬したモデル(以下“バッフル境界モデル”という。)を用い、次に②吐出弁の剛体運動を考慮したモデル(以下“剛体運動モデル”という。)を用いることで、手順を2段階に分割し、計算時間を短縮した。

この手法では、1段階目のバッフル境界モデルの解析値を、2段階目の剛体運動モデルの初期値としてマッピングする。また、吐出弁の運動は吐出弁に剛体運動の設定をし、吐出弁周辺にはオーバーセットメッシュを作成する。さらに、揺動スクロールの旋回動作を模擬するため、時々刻々でメッシュが変形するモーフィングと、モーフィングによって歪(ゆが)んだメッシュのリメッシュを繰り返し実施する。なお、メッシュ作成及び計算にはJava^(注1)マクロを使用した。また、固定スクロールと揺動スクロール間のメッシュエラーを回避するため、揺動半径を0.15mm縮小し、スクロール側面に0.15mmの隙間を形成してモデル化した。これに伴い、圧縮過程での冷媒漏れが実運転条件よりも増えないように、先に述べた隙間では流体の粘性係数を大きく設定した。

(注1) Javaは、Oracle America, Inc.の登録商標である。

2.3 解析モデル

図2に、解析モデルの部品形状を示す。この研究ではモ

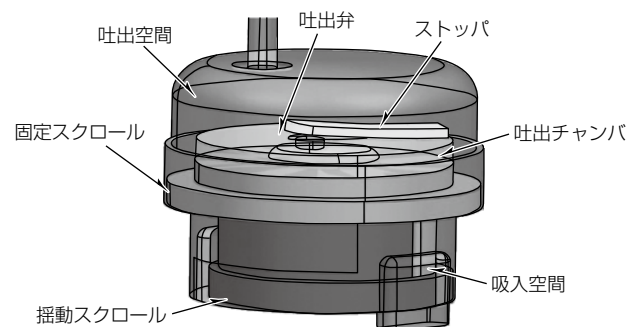


図2. 解析モデルの部品形状

デル化領域を①吐出空間、②吐出弁、③ストッパ、④吐出チャンバ、⑤固定スクロール、⑥揺動スクロール、⑦吸入空間(フレーム連通口+スクロール設置空間)によって構成した。このうち、⑥揺動スクロールの揺動運動と②吐出弁の開閉挙動を考慮したことがこの解析の主な特徴である。フレーム連通口の入口を流入境界として設定し、吐出管の出口を流出境界として設定した。また、バッフル境界モデルでは吐出ポート出口をバッフル境界として設定し、剛体運動モデルでは吐出弁の移動領域をオーバーセット領域とした。剛体運動モデルでは、吐出弁を剛体とし、一次元の線形ばねモデルによって吐出弁のリフト量を推定した。

2.4 解析条件

物性値のテーブルデータとして、密度、比熱、熱伝導率、粘性係数は冷媒物性表RefProp⁽³⁾から算出した値を用いた。なお、圧縮室間の冷媒漏れ挙動が実現象と乖離(かいり)しないように、壁面距離0.15mm以下の領域では粘性係数を大きく設定した。また、圧力条件は凝縮温度/蒸発温度=52/5℃、吸入過熱度=10℃とし、回転速度は60rpsとした。なお、タイムステップは0.5°刻みとし、リメッシュ間隔は5°刻みとした。全メッシュ数は約2,000,000セルとし、圧縮機構部(スクロール内部)の側面隙間部ではメッシュサイズを最小0.06mmまで、吐出ポート周辺のオーバーセット領域ではメッシュサイズを最小0.16mmまで細分化した。

3. 解析結果

3.1 圧縮過程の熱流体挙動

図3に、回転位相ごとの圧縮機構部の静圧分布と流速ベクトル図を示す。図4、図5に図3中の領域A、Bの拡大図を示す。図に示すとおり、この解析では揺動スクロールの揺動運動による流体領域の幾何形状変化に伴い、吸入過

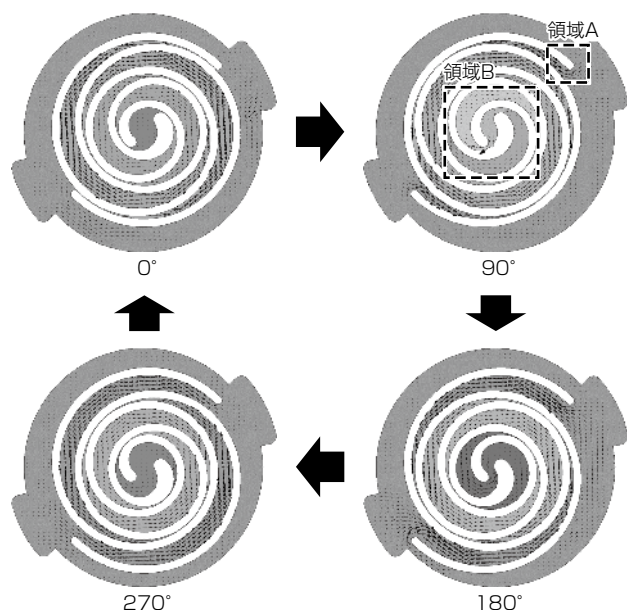


図3. 圧縮機構部の静圧分布と流速ベクトル図

程→圧縮過程→吐出過程での状態量変化や流動状態を表しており、三次元流動解析のメリットとして、スクロールの巻終わり付近(=圧縮室の入口)での冷媒吸入現象や、最内室での混合流動現象など、複雑な流動現象を確認できる。

図6に、圧縮室の圧力波形の実測結果と解析結果を示す。実測結果については、圧縮室に設置した複数の変動圧センサ(5011A, KISTLER社製)を用いて、解析条件と同等の運転条件での変動圧力データを取得した。なお、スクロール圧縮機では圧縮室を複数構成するため、圧力測定ポイントを複数設定し(実測：4か所、解析：30か所)、複数の

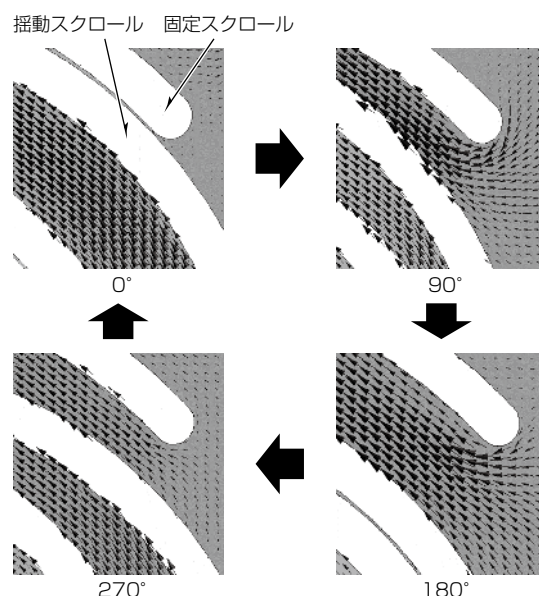


図4. 巻き終わり付近での冷媒吸入現象(図3中の領域A)

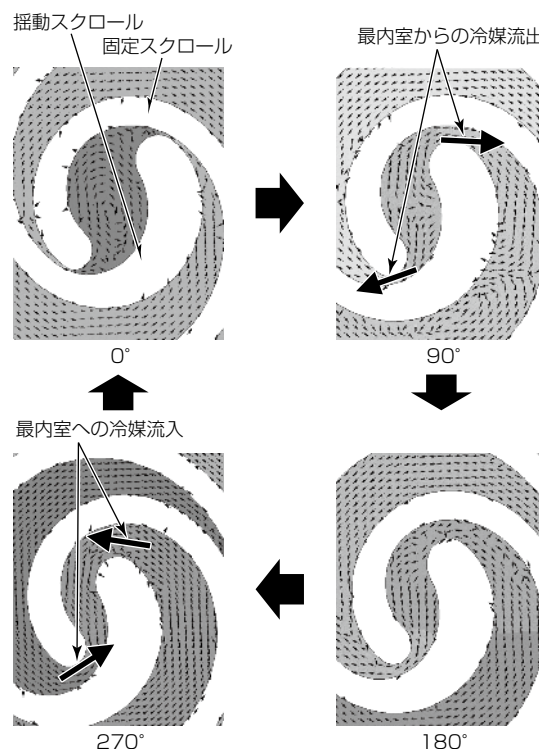


図5. 最内室での混合流動現象(図3中の領域B)

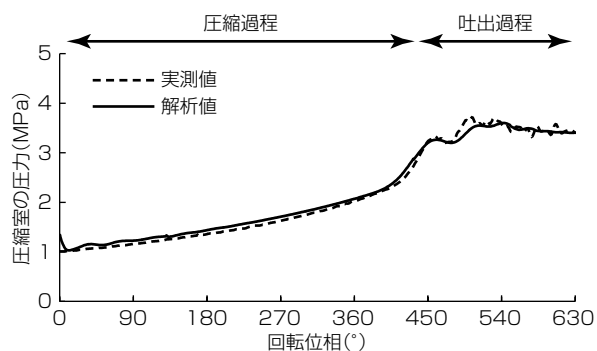


図6. 圧縮室の圧力波形

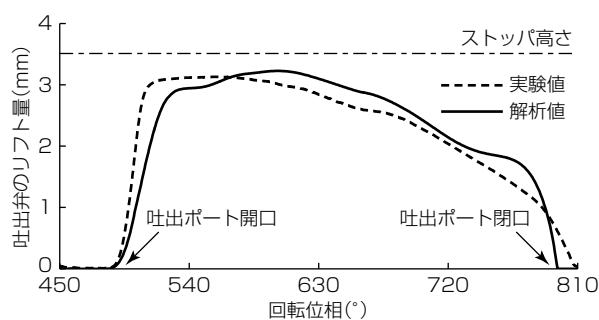


図8. 弁リフト量の解析値と実測値の比較

図8に、回転位相ごとの弁リフト量の解析値と実測値を比較して示す。なお、実機での弁リフト量は、弁の側面に設置したギャップセンサ(PU-05, (株)電子応用製)によって測定した。吐出ポート開口直後にリフト量は急激に増加し、開口中のリフト量は緩やかに低下し、閉口時のリフト量は急激に低下するという一連の弁挙動が実測結果と定性的によく一致し、定量的にも最大リフト量が誤差6%以内で一致することを確認した。

4. む す び

三次元汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+を用い、①スクロールの揺動運動に伴う冷媒ガスの吸入・圧縮・吐出挙動と、②内部流体の状態量変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬した流体解析技術を開発し、実測結果と比較した。得られた知見は次のとおりである。

- (1) 圧力波形は実測結果と定性的によく一致し、定量的にも圧縮過程での圧力変化が誤差10%以内で、吐出過程での圧力最大値が誤差5%以内で一致することを確認した。
- (2) 吐出弁の開閉挙動は実測結果と定性的によく一致し、定量的にも最大リフト量が誤差6%以内で一致することを確認した。

この研究によって、スクロール圧縮機の圧縮過程での熱流体現象の高精度予測技術を確立し、空調冷熱機器の高性能化に貢献した。

参 考 文 献

- (1) 堀 和貴：流体・構造連成解析を用いた空調用圧縮機の流体挙動分析，冷凍，84，No.981，597～603（2009）
- (2) 中嶋 進：コンプレッサー開発ツールとしてのCFDの機能，冷凍空調学会講演論文集，D235（2009）
- (3) Lemmon, E. W., et al.: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, NIST Ref. Database 23（2002）

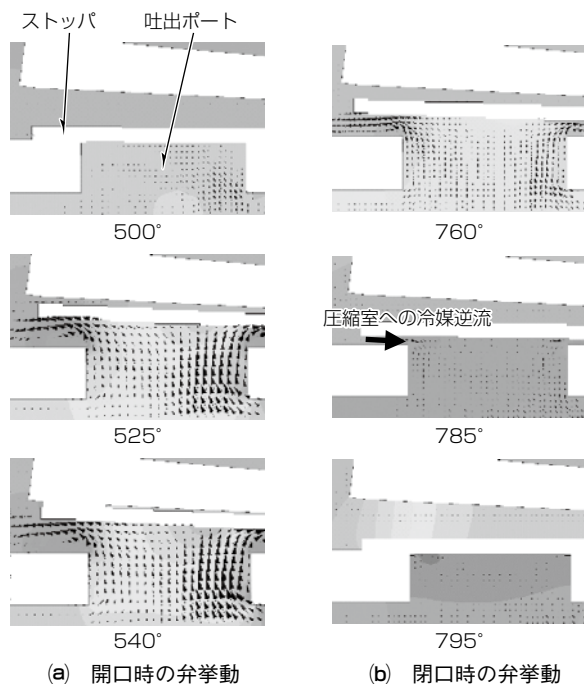


図7. 吐出ポート近傍の静圧分布と流速ベクトル図

波形を連結することで圧縮過程全域での圧力波形特性を比較した。どの運転条件でも、解析値と実測値が定性的によく一致しており、定量的にも圧縮過程での圧力変化が誤差10%以内で、吐出過程での圧力最大値が誤差5%以内で一致することを確認した。

3.2 吐出弁挙動

この手法では、吐出弁の剛体運動モデルを採用しており、圧縮室内部の圧力変化に伴う吐出弁の開閉挙動を模擬している。図7に、回転位相ごとの吐出ポート近傍の静圧分布と流速ベクトル図を示す。図7(a)は開口時の弁挙動を、図7(b)は閉口時の弁挙動をそれぞれ示している。図に示すように、開口時のリフト量拡大に伴い吐出流路の抵抗が減少し、圧縮室内部での過圧縮を緩和していく様子や、閉口時の圧縮室圧力の急激な低下に伴う冷媒の逆流現象が確認できる。

圧縮機の非定常油挙動の実験的評価技術

森山貴司*
村上泰城**

Experimental Evaluation Technology for Oil Behavior during Unsteady-state in Compressor

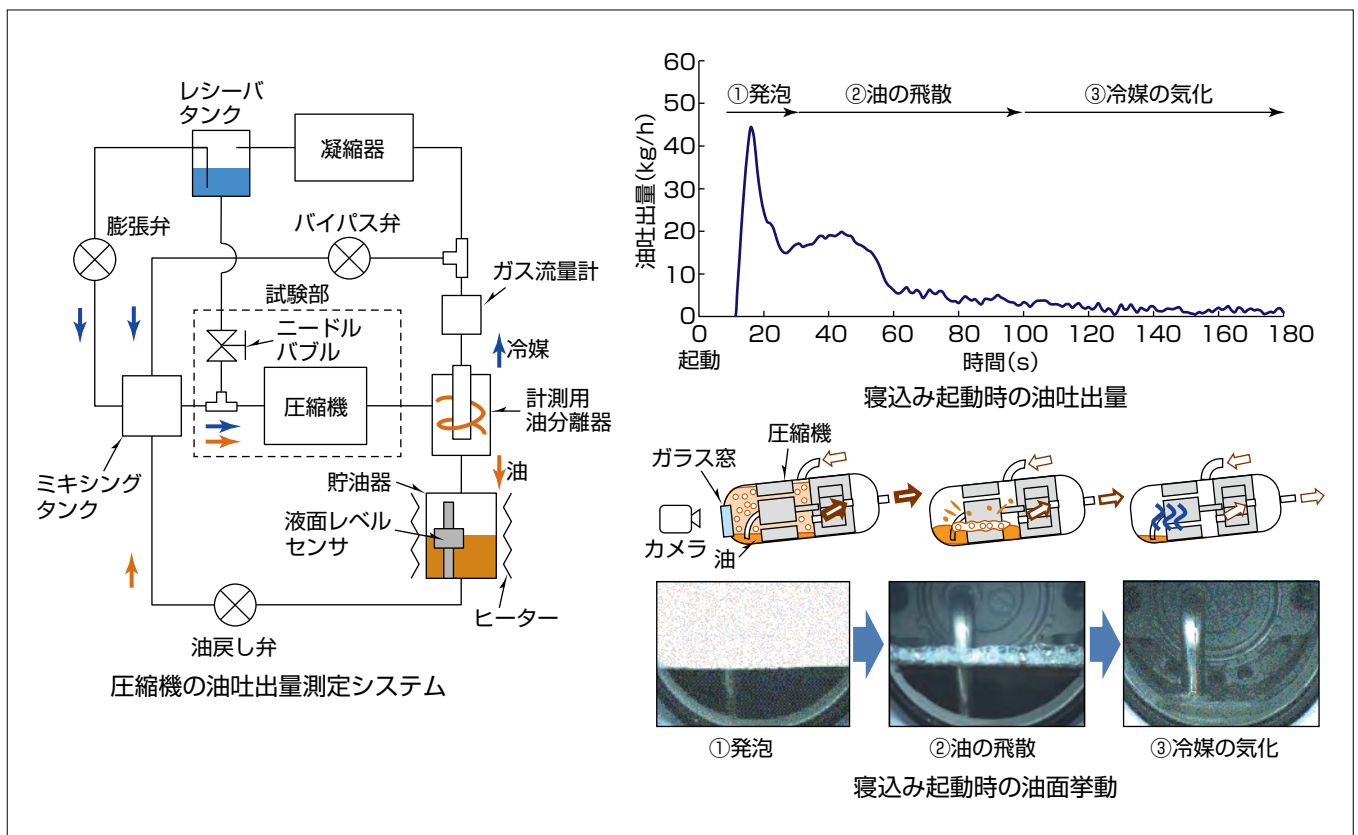
Takashi Moriyama, Hiroki Murakami

要 旨

空調機や冷凍機に使用するスクロール圧縮機やロータリ圧縮機は、通常、回転軸が垂直となるように縦置きに設置される。室外機が低背な空調機など、圧縮機の設置スペースに高さ制限がある場合では、回転軸を水平近くまで傾けて横置きに設置するケースもある。圧縮機は摺動(しゅうどう)部や軸受を潤滑するための油を内部に保持しており、縦置きでは円筒シェルの底部に、横置きでは円筒シェル側面に油が溜(た)まる。このため、横置きでは油貯留部がモータなどの構造物に遮られ、良好な潤滑を維持するために必要な油量(油面高さ)を確保するのが難しい。特に、内部に多量の冷媒液と油が溜まった状態で起動する寝込み起動時で、油に溶解していた冷媒液が減圧によって急激に気

化して発泡し、油が多量に吐出することで、油不足による潤滑不良を招く。

そこで、圧縮機から吐出する油を非定常かつ定量的に測定するシステムを構築するとともに、圧縮機内部の油面を可視化することによって、横置き圧縮機の寝込み起動時での激しい発泡の様子や、過渡的に変化する油吐出量の特性を定量的に明らかにした。さらに、圧縮機の油枯渇を抑制する手段である油分離器やアキュムレータを圧縮機に接続した寝込み起動時での油枯渇が抑制されるメカニズムを定量的かつ視覚的に明らかにした。この技術によって、より高性能、高信頼性を持つ圧縮機及び空調システムの開発が可能になる。



横置き圧縮機での寝込み起動時の油吐出量測定

圧縮機から吐出した冷媒と油を分離して各流量を測定するシステムを構築し、横置き圧縮機の寝込み起動時での油吐出量を測定した。この横置き圧縮機(試作機)では、起動直後の減圧による発泡(図の①)、回転子や冷媒ガスによる油の飛散(図の②)、油に溶けて残存していた冷媒の気化(図の③)が順に生じることで油面高さと油吐出量に変化することを定量的に明らかにした。

1. ま え が き

室外機が低背な空調機などでは、回転軸を水平近くまで傾けた横置き圧縮機を設置することがある。横置き圧縮機は円筒シェル側面に潤滑油を溜めるため、モータなどの構造物に遮られ、良好な潤滑を維持するために必要な油量（油面高さ）を確保するのが難しい。特に、内部に多量の冷媒液と油が溜まった状態で起動する寝込み起動時で、油に溶解していた冷媒液が減圧によって急激に気化して発泡し、油が多量に吐出する。

本稿では、起動時などの急激に変化する油吐出量を定量的に測定する技術を構築するとともに、圧縮機内部の油面を可視化することで、横置き圧縮機の寝込み起動時での油挙動を評価した内容を述べる⁽¹⁾。さらに、圧縮機の油枯渇を抑制する手段である油分離器やアキュムレータを圧縮機に接続した場合での圧縮機内部の油挙動への影響を評価した内容も述べる⁽²⁾。

2. 非定常油挙動の評価方法

2.1 油吐出量測定システム

図1に油吐出量測定システムの模式図を示す。従来の油吐出量測定では凝縮器後の冷媒液を一定量抽出して、その中に含まれる油の成分比を測定する方法が用いられるが、定常運転でしか測定できなかった。この装置では圧縮機から吐出した冷媒ガスと油を計測用油分離器で分離し、各々の単相の流量を測定することで、過渡時の測定も可能である。圧縮機の吸入側と吐出側の温度と圧力の条件は、膨張弁とバイパス弁の開度と凝縮器の熱交換量で調整できる。

図2に横置き圧縮機内部の液量測定の様子を示す。圧縮機の底部にガラス窓を設けることによって、油面（液面）を可視化した。なお本稿では、便宜のため、冷媒液と油の混合液量を油量、液面を油面として述べる。

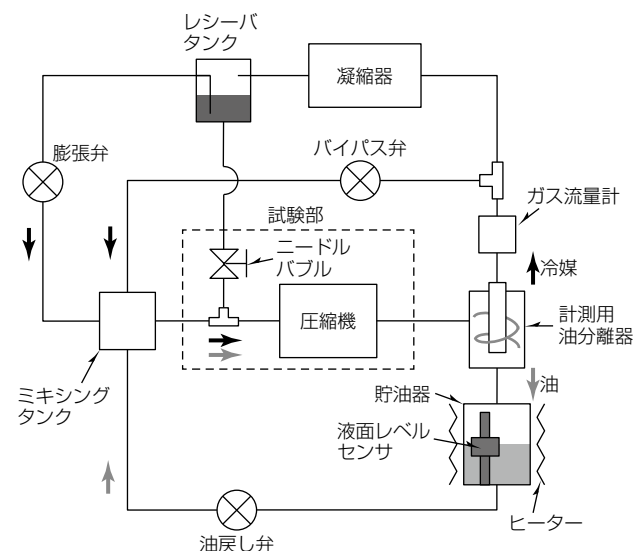


図1. 油吐出量測定システム

圧縮機はインバータ駆動のスクロール式横置き試作機を用いた。冷媒はR 407C、油は冷媒と相溶性の油を用いた。

2.2 寝込み起動試験方法

次の手順で起動条件を設定する。まず事前に圧縮機を定常運転させる。このとき、油戻し弁の開度を操作して圧縮機内部の油量が所望量になるように、貯油器内部の油量を調整する。次に圧縮機を停止して、レシーバタンクの冷媒液を吸入側から圧縮機内部に入れて、圧縮機内部の液量を所望量に調整する。

起動時は油戻し弁を常時全閉にして貯油器内部に溜まる油量の増加量を測定することで、油流量を測定する。

2.3 油分離器及びアキュムレータの評価方法

油分離器とアキュムレータの使用有無での効果を比較するため、三つの条件で実験した。油分離器とアキュムレータを使用しない場合をケースAとし、油分離器を使用する場合をケースB(図3)とし、アキュムレータを使用する場合をケースC(図4)とする。ケースBとケースCでは図1

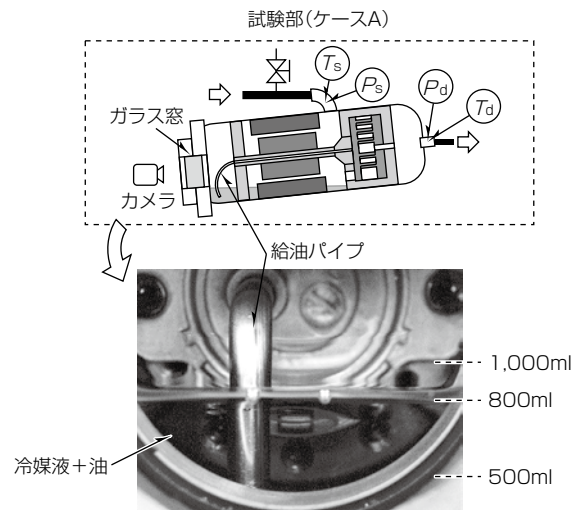


図2. 横置き圧縮機の液量測定

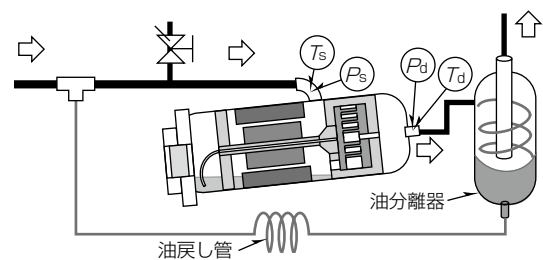


図3. 油分離器を接続した試験部（ケースB）

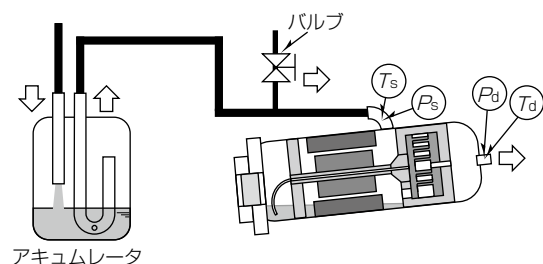


図4. アキュムレータを接続した試験部（ケースC）

の破線に示す試験部を図3と図4に示す構成に変更する。なお図1に示す計測用油分離器は、図3に示すケースBの試験対象となる油分離器とは別物であり、区別するため、以降、ケースBの油分離器を示す場合は、単に油分離器と表記する。

ケースBでは油分離器で分離された油が、コイル状の細管である油戻し管を介して圧縮機吸入側配管へ戻される構成とし、油分離器で分離しきれなかった油を計測用油分離器で分離して油循環量を測定した。本稿では、圧縮機から吐出直後の油流量を油吐出量、油分離器で分離しきれずに冷凍サイクルに流出する油流量を油循環量として区別する。

ケースCでは圧縮機とアキュムレータを接続する配管の途中にレシーバタンクにつながるバルブを接続した。

油分離器は容積0.65Lの遠心分離式を使用し、アキュムレータは容積4.8Lの衝突式を使用した。

3. 寝込み起動時の油挙動評価

3.1 実験条件

表1に各ケースの寝込み起動直前の圧縮機内とその周りの状態値を示す。起動前の定常運転で圧縮機内油量 V_0 を500mlに調整し、停止後に冷媒液を1,000ml注入して、圧縮機内油量 V_1 を1,500mlとした。定常運転時の残存熱量に

表1. 起動直前の圧縮機内の状態値

ケース	A	B	C
起動直前の油量 V_1 (ml)	1,500	1,500	1,500
定常運転での油量 V_0 (ml)	500	500	500
吸入側温度 T_s (°C)	36.7	37.3	36.6
吐出側温度 T_d (°C)	48.4	48.1	48.2
吸入側圧力 P_s (Mpa)	1.45	1.45	1.38
吐出側圧力 P_d (Mpa)	1.44	1.46	1.38

よって、起動前の温度が実験環境温度(約20°C)よりも高くなり、圧力も全体的に高くなった。膨張弁とバイパス弁は全ケースで起動前にあらかじめ同じ開度に調整した。起動から約10秒間は圧縮機を緩やかに加速させ、全ケースで同じ回転数に固定した。

3.2 実験結果

図5に起動180秒間の寝込み起動時の油循環量 G_o (ケースAとケースCは油吐出量と同量)を測定した結果を示す。ケースAでは起動10秒後から油循環量が増加し、起動15秒で最大となり、起動60秒までは多い状態が続き、それ以降は少なくなった。ケースBとケースCはどちらもケースAよりも油循環量が少なくなり、瞬時に急増する傾向は見られなかった。ケースBでは起動20秒後、ケースCでは起動15秒後から油循環量が増加し、両ケースともに起動25秒後から徐々に減少した。

図6に寝込み起動等の圧縮機内での油挙動とケースA, B, Cの油面推移を示す。起動直後の急激な減圧によって

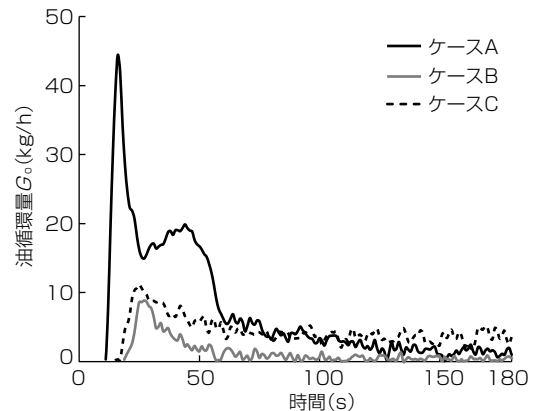


図5. 寝込み起動時の油循環量

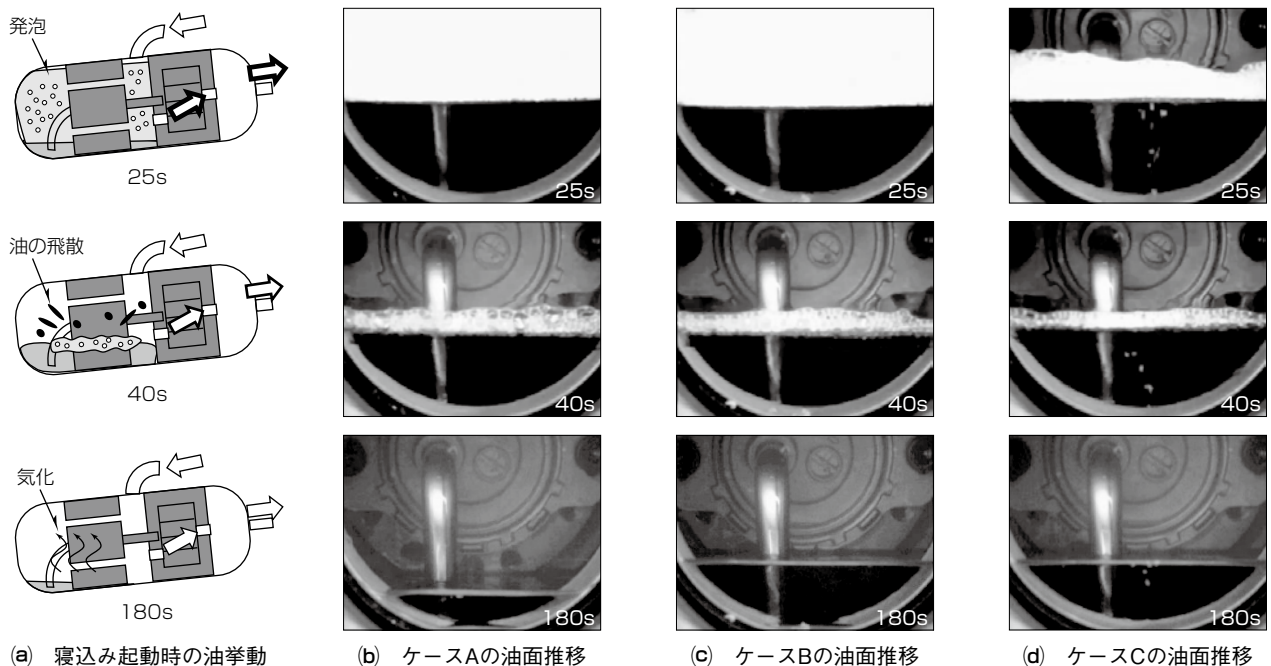


図6. 圧縮機内部の油面推移

起動25秒ではケースAとケースBは激しい発泡が生じているが、ケースCは発泡が弱い。起動40秒後にどのケースも発泡が収まるが、油面が高い間は泡立った状態が続いた。その後、油面が低くなると泡立ちが収まり、起動180秒までにケースAの油面が大幅に減少した。

3.3 油分離器とアキュムレータを使用しない場合 (ケースA)

起動直後の急激な減圧によって、図6(b)に示すように起動10～30秒では発泡が強くなって油が多量に吐出する。起動30～60秒では強い発泡が収まっても圧縮機内部の油面が回転子や冷媒ガスに巻き上げられるため、油が吐出しやすくなる。図5に示すように起動60秒以降では圧縮機内部の油面の巻き上げが収まり、油循環量が少なくなる。ただし、油に溶解している冷媒が気化することで油量が減少する。

3.4 油分離器による油枯渇抑制効果(ケースB)

図6(b)と図6(c)の起動40秒時に示すように、ケースBは起動60秒までの圧縮機内部の油面の挙動がケースAとほぼ同じになる。一方、図5に示すようにケースAに比べて油循環量が減少する。これについて図7を用いて述べる。

図7は定常運転時と起動時での油分離器内部の油挙動の模式図である。定常運転時では、油分離器で分離された油が冷媒ガスとともに油戻し管を通して、圧縮機へ戻される。一方、起動直後では油分離器に流入する油流量が油戻し管で流すことができる限界を超えるため、油分離器内部に油が溜まる。起動60秒までのケースBの油挙動は、発泡や回転子と冷媒ガスによる巻き上げの影響が強く、ケースAと同様になるが、起動直後に油分離器に溜まった油が徐々に圧縮機に戻されることで、油面高さは同等でも油が多く、溶解冷媒が少ない状態になる。このため、起動60秒以降では溶解冷媒の気化量が少なくなり、圧縮機内部の油量が多いまま維持されたと考えられる。

3.5 アキュムレータによる油枯渇抑制効果(ケースC)

図6(d)に示すようにケースCは起動直後の発泡が弱く、図5に示すようにケースAに比べて油循環量が減少する。これについて図8を用いて述べる。

図8は定常運転時と起動時でのアキュムレータ内部の油挙動の模式図である。アキュムレータを設置した場合の定常運転時では油戻し穴の高さまで油が溜まる。一方、起動直後では冷凍サイクル内に溜まっていた冷媒液がアキュムレータに流入し、油と混ざりながら溜まる。そのため、冷凍サイクルに溜まっていた冷媒液が圧縮機内部に流入する量が抑えられて、発泡が弱くなるとともに回転子や冷媒ガスによる巻き上げが抑制され、図5に示すように起動10～30秒の油循環量が減少する。

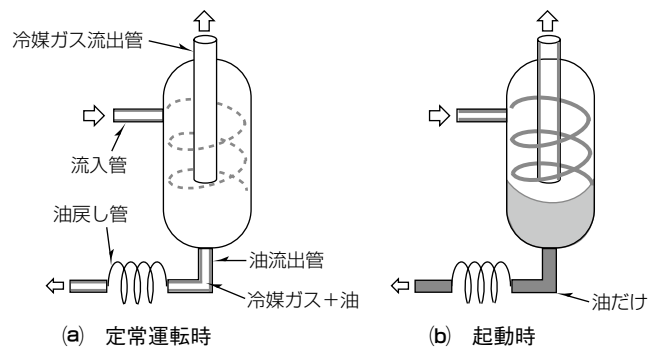


図7. 油分離器内部の油挙動

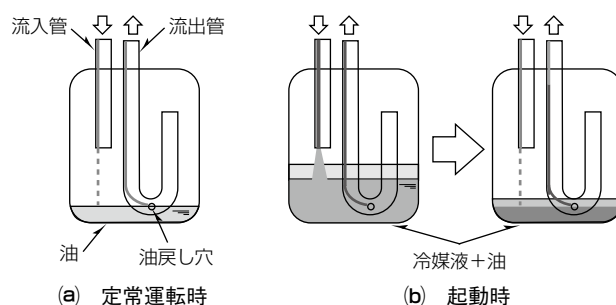


図8. アキュムレータ内部の油挙動

その後、油面が油戻し穴の高さになるまで、徐々に冷媒液と油の混合液が油戻し穴から流出管へ流れ出て、圧縮機に流入する。その結果、図6(d)に示すように起動60秒以降でも、ケースCはケースAに比べて油量の減少が少なかったと考えられる。

4. む す び

圧縮機の過渡的な油吐出量を定量的に測定するシステムを構築し、内部の油面挙動を可視化することで、横置き圧縮機の寝込み起動時での油挙動を評価した。さらに、油分離器又はアキュムレータを接続した場合の圧縮機の油枯渇を抑制するメカニズムを定量的かつ視覚的に明らかにした。今後、この評価技術の更なる改良を進め、より高性能、高信頼性を持つ圧縮機及び空調システムの開発に貢献する。

参 考 文 献

- (1) Moriyama, T., et al.: Experimental Investigation on Oil Outflow Characteristics in Horizontal Compressor, Trans. of the JSRAE, **35**, No.2, 85～91 (2018)
- (2) Moriyama, T., et al.: Experimental Investigation on Oil Outflow Characteristics in Horizontal Compressor, Proc. 2016 JSRAE Annual Conference, B221 (2017)

非相溶油を適用したHFO及びHC冷媒のトライボロジー特性

佐々木辰也* 高橋真一***
中尾英人*
水野康太**

Tribology Characteristics of HFO and HC Refrigerants with Immiscible Oils

Tatsuya Sasaki, Hideto Nakao, Kota Mizuno, Shinichi Takahashi

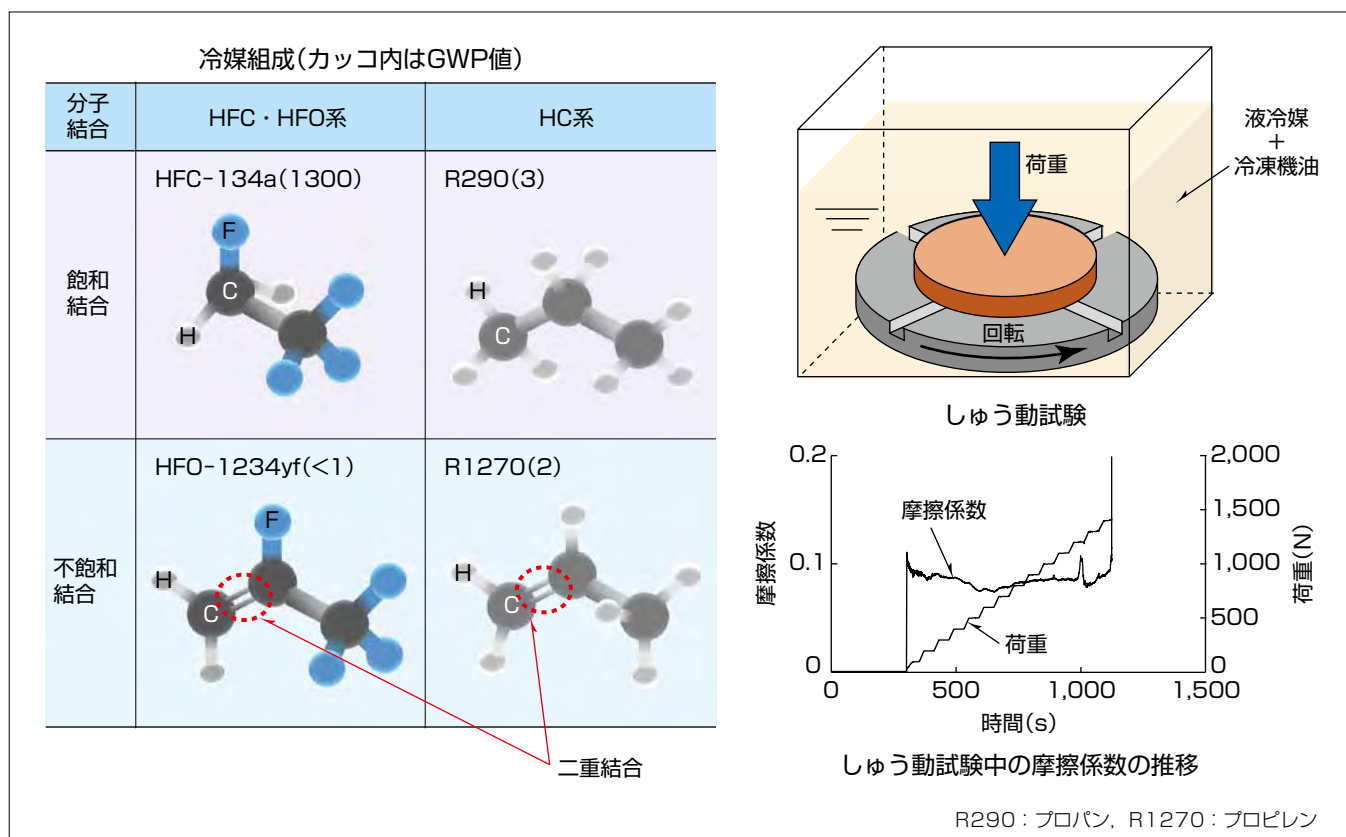
要 旨

近年、環境負荷軽減の観点から地球温暖化係数が低い冷媒の空調冷熱機器への適用を開始している。代表的な冷媒としてHC(炭化水素)系の自然冷媒やHFO(ハイドロフルオロオレフィン)系冷媒が挙げられる。これらの冷媒は冷凍機油とともに、圧縮機内のしゅう動部を潤滑する。空調冷熱機器の信頼性を担保するためには、冷媒と冷凍機油の潤滑性を把握し、しゅう動部の焼き付きを防止することが重要である。一方、これらの冷媒は分子構造上、飽和冷媒と不飽和冷媒に分類することができる。不飽和冷媒は分子構造に二重結合を持ち、付加反応を起こすため、冷凍機油やしゅう動部との化学的な反応によってトライボロジー特性に影響を及ぼすと考えられる。そこで、不飽和冷媒(HFO-1234yf, R1270)及び飽和冷媒(HFC-134a, R290)それぞれの冷媒環境でのしゅう動試験、及び試験後のしゅう動面観察による考察から、次の知見を得た。

R290)それぞれの冷媒環境でのしゅう動試験、及び試験後のしゅう動面観察による考察から、次の知見を得た。

- (1) この試験条件で、不飽和冷媒であるHFO-1234yfは飽和冷媒であるHFC-134aよりも耐焼き付き性に優れている。R1270とR290の比較も同様であった。
- (2) HFO-1234yf環境下で使用した試験片のしゅう動面からはHFC-134aよりも多量のフッ素イオンが検出された。しゅう動面上でフッ化物層が形成されたと考えられる。

この研究によって、冷媒の潤滑性の優劣とそのメカニズムを明らかにし、地球温暖化係数(GWP)が低い冷媒を適用した空調冷熱機器の製品化に貢献した。なお、この研究で2017年度の日本機械学会関西支部賞(研究賞)を受賞した。



冷媒の分子構造としゅう動試験の方法

HFC(ハイドロフルオロカーボン)・HFO系の冷媒では飽和冷媒としてHFC-134a、不飽和冷媒としてHFO-1234yfを、同様にHC系冷媒ではR290とR1270を選択した。液冷媒と冷凍機油の混合液中でしゅう動試験を行い、荷重を漸増させて摩擦係数が急激に上昇したときの荷重を焼き付き荷重と定義し、これを比較した。

1. ま え が き

近年、環境負荷軽減の観点から地球温暖化係数(Global Warming Potential : GWP)の低い冷媒が空調冷暖機器に適用されている。代表的な冷媒としてHC系の自然冷媒やHFO系冷媒が挙げられる。これらの冷媒は冷凍機油との組合せによって、圧縮機内のしゅう動部の潤滑性を決定づける一因となる。新しい冷媒を適用した冷凍空調機器の信頼性を確保するためには、冷媒と冷凍機油の潤滑性を把握し、しゅう動部の焼き付きを防止することが重要である。

これらの冷媒を分子構造の特徴で分類すると、飽和冷媒と不飽和冷媒に分けることができる。不飽和冷媒は分子構造に二重結合を持ち、付加反応を起こし得るため、油やしゅう動部との反応によってトライボロジー特性に何らかの影響を与えると考えられる。しかし、冷媒の不飽和結合がしゅう動部の耐焼き付き性に与える影響についての報告は少ない。そこで、これら地球温暖化係数の低い冷媒に関して、不飽和及び飽和冷媒の耐焼き付き性を明らかにするため、それぞれの冷媒環境下でしゅう動試験を行い、試験後のしゅう動面観察と合わせて考察を行った。

2. 冷媒と冷凍機油

使用した冷媒と冷凍機油の組合せを表1に示す。不飽和冷媒であるHFO-1234yfと比較するための飽和冷媒としてHFC-134aを比較対象にした。HFC-134aは耐熱性や材料適合性など地球温暖化係数以外の物理的性質がHFO-1234yfと類似している⁽¹⁾⁽²⁾。HC系の飽和冷媒はR290を対象とし、R290と同じ炭素数3のR1270を不飽和冷媒として選択した。冷凍機油は圧縮機の寝込み起動時などに粘度を確保できる非相溶油とし、HFC・HFO系冷媒の試験にはアルキルベンゼン(AB)油を、HC系冷媒にはポリアルキレングリコール(PAG)油を用いた。

3. 焼き付き試験

3.1 試験装置

焼き付き試験に使用した試験装置の構造を図1に示す。試験形態はディスクオンディスク形式を採用した。回転試験片と固定試験片をそれぞれの中心位置が合致するように取り付けた。圧力容器上側の皿ばねで試験部に荷重を负荷し、ばね上部のロードセルで計測した。また、负荷軸に取り付けられたトルクアームとロードセルによってしゅう動部で発生する摩擦力を測定した。圧力容器には温調配管を設けており、試験は雰囲気温度を制御して行った。雰囲気温度は圧力容器下部に設けた熱電対で測定した。冷媒と冷凍機油は液面がしゅう動面よりも高くなるように量を決定し封入した。液冷媒と冷凍機油が十分に攪拌(かくはん)できるように回転ホルダには攪拌棒が取り付けられている。

3.2 供試材

図2に供試材の形状を示す。回転試験片のしゅう動面には内周から外周に通じる放射状の給油溝が設けられている。

表1. 冷媒と冷凍機油の組合せ

冷媒	分子構造	GWP	飽和蒸気圧 (298K)	冷凍機油
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	1,300	0.7MPa	AB
HFO-1234yf	CF ₃ CF=CH ₂	< 1	0.7MPa	8 mm ² /s@313K
R290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	3	1.0MPa	PAG
R1270	CH ₃ CH=CH ₂	2	1.2MPa	46mm ² /s@313K

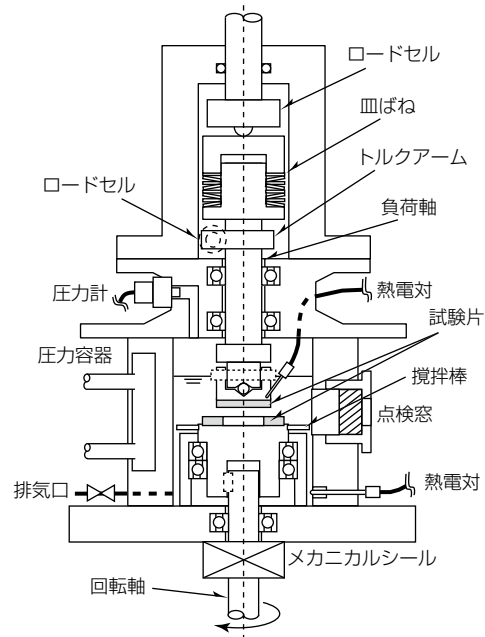
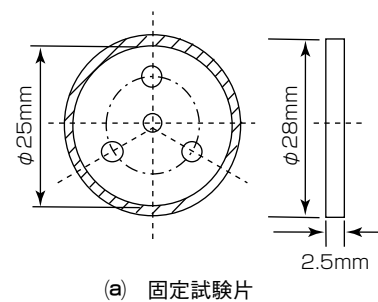
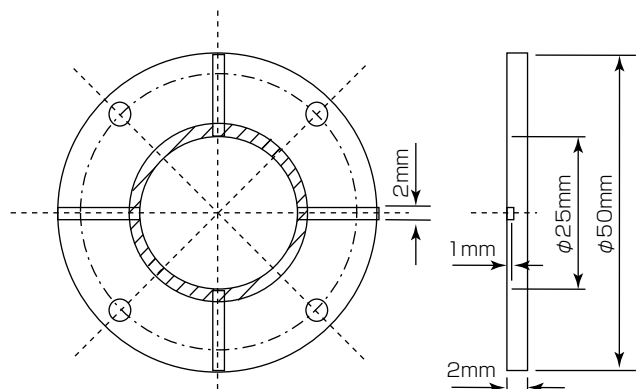


図1. 試験装置の構造



(a) 固定試験片



(b) 回転試験片

図2. 供試材の形状

表2. 試験条件

雰囲気温度	298K
冷凍機油の質量比率	10wt%
すべり速度	2.8m/s
負荷	100N/minのステップ荷重
データサンプリングレート	5/s
しゅう動面積	110mm ²

回転試験片が回転すると、給油溝を介してしゅう動面に冷媒と冷凍機油の混合液が供給される。しゅう動部は斜線で示したφ25～28mmの平面部分であり、面積は110mm²である。しゅう動面の表面粗度は研削加工によって十点平均粗さで1.0μm以下に設定した。固定試験片にはネズミ鋳鉄を、回転試験片にはダクタイル鋳鉄を使用した。

3.3 試験条件

試験条件を表2に示す。圧力容器に液状態の冷媒と冷凍機油を冷凍機油の質量比率が10wt%になるように封入し、雰囲気温度を298Kに温調した。このとき圧力容器内の圧力は表1に示す飽和蒸気圧となる。無負荷の状態でもモータを回転し、しゅう動部のすべり速度が2.8m/sに到達した後、試験片への負荷を開始した。しゅう動部への負荷は1分間に100Nずつ増加するステップ荷重とし、摩擦係数が急激に上昇する点で焼き付きが発生したと判断した。

4. 試験結果

図3に一例としてHFO-1234yf環境での荷重と摩擦係数及び固定試験片温度の関係を示す。荷重が1,300N以下では摩擦係数が0.08程度で安定しているが、1,400Nに到達すると摩擦係数が急激に上昇したため試験を停止した。固定試験片の温度は荷重の増加に比例して高くなり、焼き付き発生時には急激に上昇している。また、圧力容器下部の冷凍機油温度は荷重の増加とともに若干上昇傾向にあるが固定試験片の温度と比較すると小さい。どの冷媒でも同様に焼き付き直前には温度が急激に上昇していることを確認した。この試験では摩擦係数が急激に上昇したときに焼き付きが発生したと判断し、このときの荷重を焼き付き荷重と定義した。

図4に各種冷媒環境での焼き付き荷重を示す。不飽和結合であるHFO-1234yf環境での焼き付き荷重はHFC-134aよりも高いことが分かる。これら冷媒の分子構造の違いを比較してみると、フッ素数と水素数は同等で、炭素数と二重結合の有無に差がある。一方、炭素数がそれぞれ等しいR1270とR290の場合、R1270の方がR290よりも焼き付き荷重が大きい。これらの結果から、二重結合の有無が冷媒環境での耐焼き付き性に影響を及ぼすと考えられる。

ここで、二重結合を含む炭化水素は金属表面への吸着によって還元反応を抑制すること⁽³⁾、同一炭素数の化合物で二重結合を持つ化合物の方が二重結合を持たない化合物よりも酸中での鉄腐食の抑制効果が高いこと⁽⁴⁾などが言われ

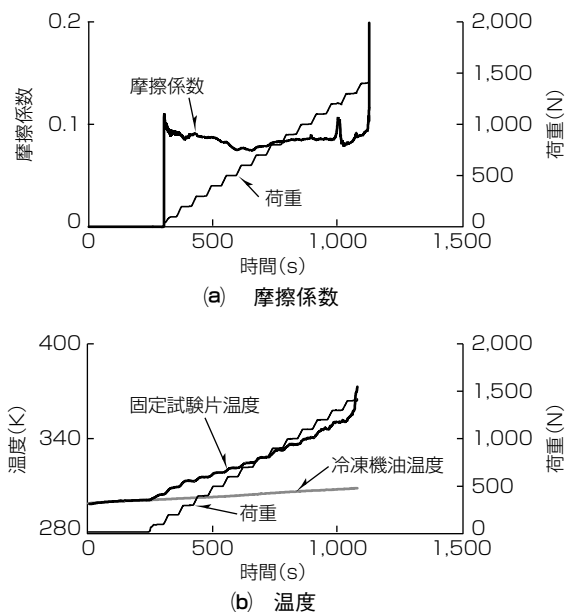


図3. 摩擦係数と固定試験片温度

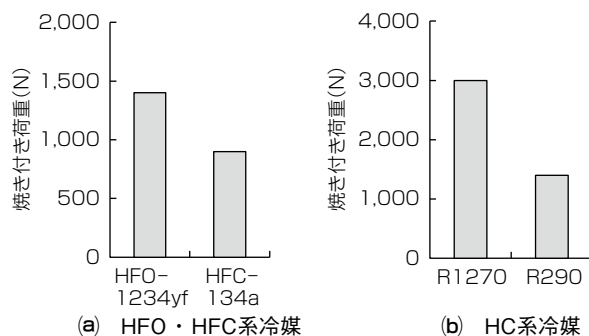


図4. 焼き付き荷重

ている。これらは二重結合の効果によって炭化水素が安定な金属表面へ化学吸着するためと考えられている。なお、吸着には物理吸着と化学吸着の2種類がある。物理吸着はファン・デル・ワールス力によるものであり、化学吸着は吸着分子と固体表面との間に電荷の移動がある化学結合によるもので、一般に高い温度で発生することが知られている⁽⁵⁾。これらのことから、二重結合を持つ冷媒環境での焼き付き試験中のしゅう動部では次に示す現象が起きると思われる。まず、しゅう動によって真実接触面で活性な新生面が現れる。次に、ファン・デル・ワールス力によって冷媒が新生面へ物理的に吸着し、摩擦熱を受けて電荷の移動が発生して化学吸着膜を生成する。ここで、しゅう動面への冷媒と冷凍機油の吸着のしやすさについて考える。HFO及びHFC冷媒とともに使用したアルキルベンゼン油は極性が低く、極性の高い冷媒が選択的にしゅう動面へ吸着する⁽⁶⁾。一方、HC系冷媒が無極性であることに対してPAG油は極性が高い。したがって、冷凍機油がしゅう動面に吸着するが、R1270については二重結合の反応性の高さによって、冷媒の吸着も起こっていると考えられる。

5. しゅう動面分析

各種冷媒環境下での耐焼き付き性に影響を与える因子を明らかにするため、それぞれの冷媒環境で行った焼き付き試験後の回転試験片の表面の元素をTOF-SIMS(Time of Flight Secondary IonMass Spectrometry, 飛行時間二次イオン質量分析法)によって分析した。表3に分析条件を、図5に焼き付き試験後のディスク写真を示す。図5に示すように、しゅう動面と非しゅう動面の2か所を分析した。試験片は焼き付き試験後にアセトン液中で超音波洗浄した。図6に試験片ごとの非しゅう動面としゅう動面のフッ素イオン含有量を示す。

図6に示すようにHFO-1234yf環境下で試験を行った回転試験片ではHFC-134a環境下の場合よりも非しゅう動面に対するしゅう動面でのフッ素イオン量比が大きい。フッ素は反応性が極めて高く、また、常温常圧では気体であるため、試験片上で化合物になっているフッ素が検出されたと考えられる。二重結合を持つHFO-1234yfは金

表3. 分析条件

分析モード	質量スペクトル
1次イオン	Ga+
2次イオン極性	陰性
質量範囲	1~2,000
分析面積	100×100(μm)
分析時間	5分

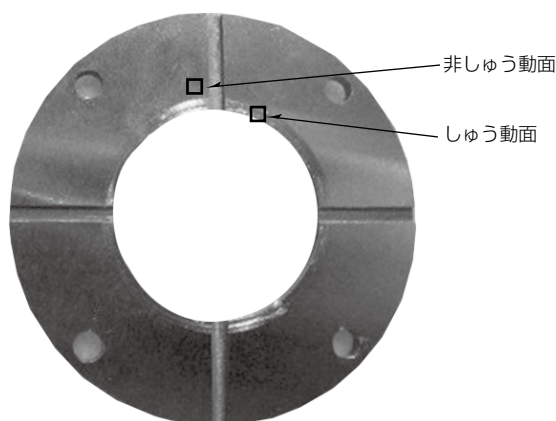


図5. 焼き付き試験後の試験片表面

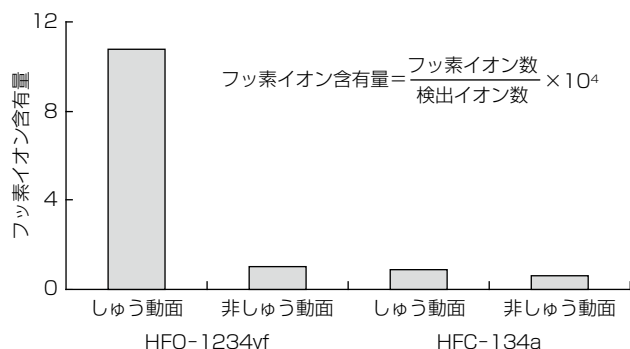


図6. フッ素イオン含有量の分析結果

属面への吸着性が強いいため、4章で述べたとおり、しゅう動中に試験片に物理吸着膜を形成し、その膜が摩擦熱によってしゅう動面との間に電荷の授受を発生させることで化学吸着膜としてフッ素化合物層を形成したと考えられる。この分析でフッ素化合物の同定には至らなかったが、AkramらによればHFO-1234yf環境での鋳鉄同士のしゅう動によってしゅう動面にフッ化鉄(Ⅲ)と、鉄-フッ素結合の有機物が確認されている⁽⁷⁾。この研究でもこれらの化合物が形成されていると推測する。

6. む す び

冷媒の分子構造に含まれる不飽和結合が冷媒のしゅう動特性に与える影響について検討した。HFO・HFC系冷媒としてHFO-1234yfとHFC-134a, HC系冷媒としてR1270とR290とに着目し、非相溶油と混合した場合のこれら冷媒の焼き付き試験を実施した。また、試験後のしゅう動面の分析から得られた結果の考察を試みた。その結果、次の知見を得た。

- (1) 今回の試験条件で、不飽和冷媒であるHFO-1234yfは飽和冷媒であるHFC-134aよりも耐焼き付き性に優れている。R1270とR290の比較も同様であった。
- (2) HFO-1234yf環境下で使用した試験片のしゅう動面からはHFC-134aよりも多量のフッ素イオンが検出された。しゅう動面上でフッ化物層が形成されたと考えられる。

参 考 文 献

- (1) Akasaka, R., et al.: JSRAE Thermodynamic Table Vol.3 HFO-1234yf, Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1 (2010)
- (2) Minor, B., et al.: HFO-1234yf Low GWP Refrigerant Update, Proc. of the 19th International Compressor Engineering Conference, 2349 (2008)
- (3) Zucchi, F., et al.: The Inhibiting Action of Organic Compounds with Multiple Bonds, Proc. of 3rd European Symposium on Corrosion Inhibitors, 121 (1971)
- (4) 荒巻国次, ほか: 二重結合をもつ化合物による酸中の鉄腐食の抑制, 防食技術, 29, No.9, 437~442 (1980)
- (5) 小西誠一, ほか: 潤滑油の基礎と応用, コロナ社, 53 (1992)
- (6) 夏目喜孝, ほか: 代替冷媒仕様カーエアコンとトライボロジー, トライボロジスト, 40, No.9, 718~723 (1995)
- (7) Akram, M.W., et al.: Lubricity of Environmentally Friendly HFO-1234yf Refrigerant, Tribology Int., 57, 92 (2013)

篠崎 健*
浅井勇吾*
牛房裕之**

沸騰現象を利用した電子機器冷却技術

Cooling Techniques of Electronic Devices with Boiling Phenomenon

Masaru Shinozaki, Yugo Asai, Hiroyuki Ushifusa

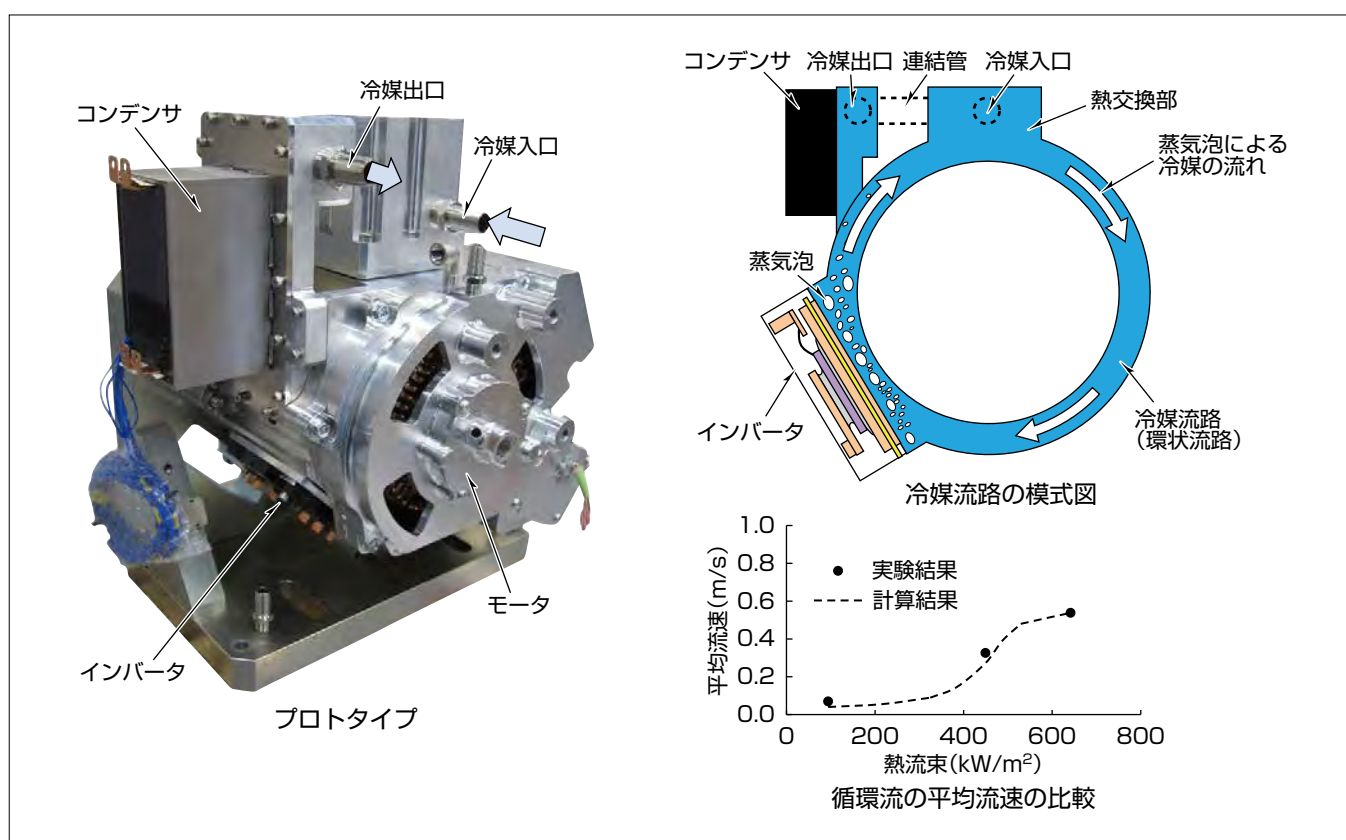
要 旨

近年、環境保護の観点から電機機器の省エネルギー化を目的としたインバータ駆動化が進んでいる。特にパワー半導体が組み込まれたインバータは、電鉄、車載、家庭電器などのキーデバイスに位置付けられている。さらに、機器の小型化が図られる中で、インバータの小型高密度実装化によって、設置面積当たりの発熱量である発熱密度が増大し、高効率な冷却方式の開発が必要不可欠になってきている。

インバータの冷却方式には、一般的にファンの送風で冷却する空冷方式と、水などの冷媒をポンプによって循環させて冷却する水冷方式がある。さらに、沸騰や凝縮などの相変化による冷媒の潜熱を利用した冷却方式が注目されて

いる。今回は、沸騰現象を利用した冷却方式に着目し、基礎性能評価装置によって沸騰冷却の特徴を把握するとともに、車載用インバータ冷却装置のプロトタイプを製作して性能評価を実施した。沸騰によって発生した蒸気泡の気泡ポンプ効果による循環流を利用して、冷媒が伝熱面に常時供給され、安定して沸騰が起こるような冷媒流路を構成したことで、インバータを効率良く冷却することを実現した。また、気泡ポンプ効果による循環流の流速を予測する数値シミュレーションを構築し、実験結果とよく一致することを確認した。

今後、基礎性能評価装置や数値シミュレーションを活用することで、沸騰冷却技術を各種電子機器へ展開していく。



沸騰冷却を適用したインバーター体型モータのプロトタイプ

モータの外周に設置した冷媒流路にインバータを取り付けることで一体化したプロトタイプを示している。発熱密度の大きいインバータが動作すると、インバータの伝熱面が沸騰して蒸気泡が発生する。発生した蒸気泡による気泡ポンプ効果で冷媒流路内に循環流が発生し、安定して沸騰冷却を利用することができる。構築した数値シミュレーションによって、循環流の流速を精度良く予測できることを確認した。

1. ま え が き

近年、環境保護の観点から電機機器の省エネルギー化を目的としたインバータ駆動化が進んでいる。特にパワー半導体が組み込まれたインバータは、電鉄、車載、家庭電器などのキーデバイスに位置付けられている。さらに、機器の小型化が図られる中で、インバータの小型高密度実装化によって、設置面積当たりの発熱量である発熱密度が増大し、高効率な冷却方式の開発が必要不可欠になってきている。

インバータの冷却方式には、一般的にファンの送風で冷却する空冷方式と、水などの冷媒をポンプによって循環させて冷却する水冷方式がある。さらに、沸騰や凝縮などの相変化による冷媒の潜熱を利用した冷却方式が注目されている。空冷方式や水冷方式は顕熱を利用した冷却方式であり、流体である空気や冷媒の温度上昇分が熱の移動量に相当する。このため、冷却能力を高性能化するためには、ファンやポンプで送り出す風量や冷媒量を増加させる必要があり、消費電力増加又は機器の大型化といった課題が発生する。一方、相変化冷却方式は、沸騰で発生する蒸気泡の気泡ポンプ効果を冷媒循環の駆動力として利用できれば、ポンプによる課題を解消することができる。

本稿では、相変化冷却方式の一つである沸騰冷却技術をインバータ冷却に適用することを目指して実施した、基礎性能評価及びプロトタイプによる評価結果について述べる。

2. 沸騰冷却技術

三菱電機では、沸騰冷却技術の基礎性能を評価するための試験装置を製作し、現象の可視化及び高性能化に向けた開発を行っている⁽¹⁾⁽²⁾。ここでは、基礎性能評価試験の結果を使って沸騰冷却技術の特徴について述べる。

図1は、沸騰冷却の性能を示す沸騰曲線である。縦軸は沸騰面の過熱度(沸騰面温度と冷媒の沸点の温度差)、横軸

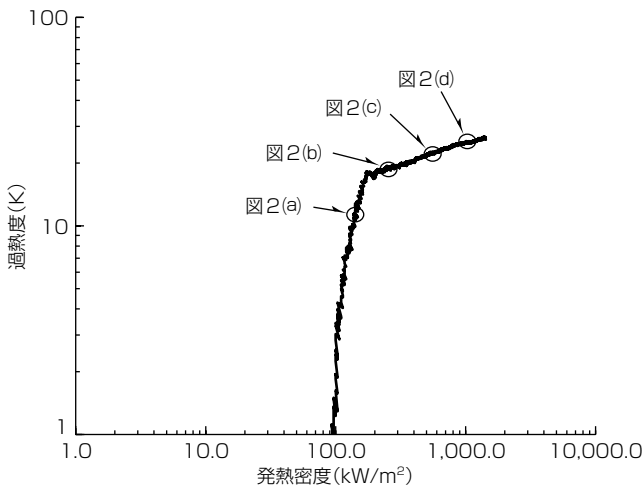


図1. 沸騰曲線

は熱流束(発熱密度)を示している。冷媒に熱流束を与えると、伝熱面は自然対流によって冷却される(図2(a))。自然対流による放熱量は小さいため、熱流束に対して過熱度が大きく上昇する。冷媒の温度が上昇して部分的に沸点に到達すると、伝熱面上から蒸気泡が発生し始め(図2(b))、沸



(a) 自然対流による伝熱面の冷却



(b) 伝熱面上からの蒸気泡発生



(c) 蒸気泡の数の増加



(d) 蒸気泡の合体と上昇

図2. 沸騰様相

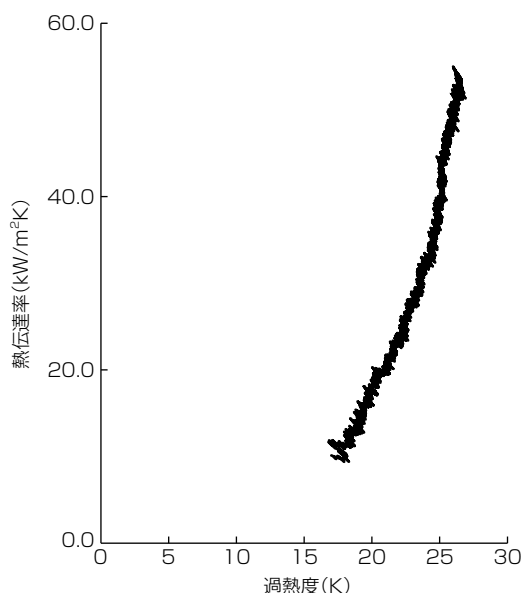


図3. 沸騰時の熱伝達率の推移

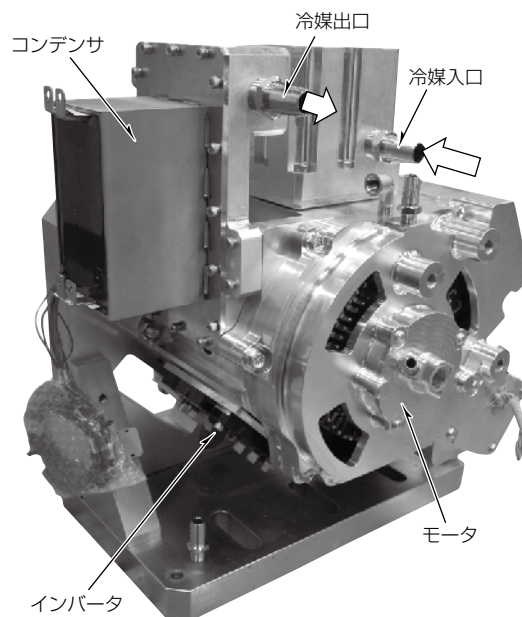


図4. プロトタイプ

騰曲線の傾きが変化する。さらに熱流束を与えると発生する蒸気泡の数が増加していき(図2(c)), 沸騰が激しくなると発生した蒸気泡が合体しながら上昇していく(図2(d))。さらに熱流束を与え続けると、限界熱流束(Critical Heat Flux: CHF)と呼ばれる限界点に到達し、その後は蒸気泡が伝熱面全体を覆ってしまい伝熱面に冷媒が接触できなくなる。その結果、急激に過熱度が上昇し、効果的な冷却ができずに熱暴走してしまう。蒸気泡が安定して発生している間は、熱流束を大きくしても過熱度の変化は小さい。つまり、従来の冷却方式では、風量や冷媒量が一定ならば熱伝達率が一定であるのに対して、沸騰冷却は蒸気泡の発生によって熱伝達率が上昇し、冷却性能が増加していく(図3)。つまり、過熱度の上昇に伴って熱伝達率が直線的に上昇する。

この現象を利用すれば、インバータを効率良く冷却できるだけでなく、動作条件によって発熱量が変化しても、伝熱面の温度があまり変化しないという効果も得ることができる。

3. 沸騰冷却技術を適用したプロトタイプ評価

3.1 プロトタイプの構成

沸騰冷却技術の冷却性能を確認するため、車載用インバータ冷却装置のプロトタイプを製作して性能評価試験を実施した。プロトタイプを図4に示す。プロトタイプは、モータ、インバータ、コンデンサ及び冷媒流路で構成されており、冷媒流路はモータ外周とインバータに接触している。冷媒流路内の模式図を図5に示す。外部から供給される冷媒は、冷媒入口から流入し、連結管を経由してコンデンサ用冷却器を通り、冷媒出口から排出されるU字流れを基本としている。このU字流れの下部に、モータ外周に図

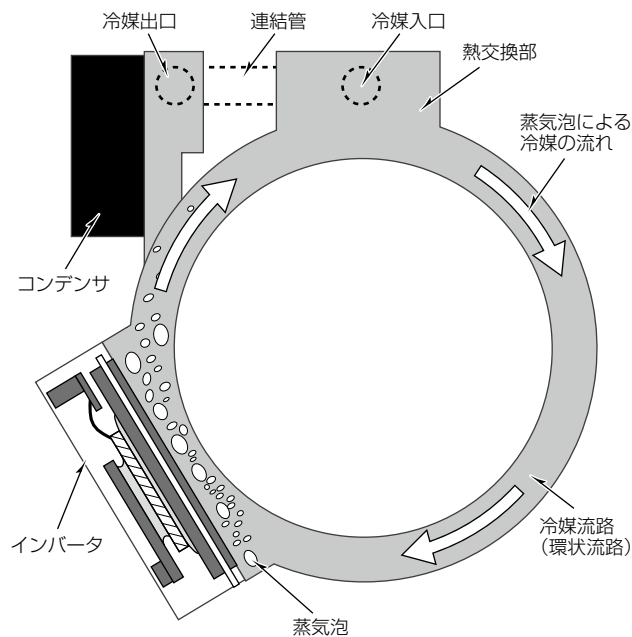


図5. 冷媒流路内の模式図

のような冷媒流路(環状流路)を設け、熱交換部と連結させる。環状流路は冷媒で満たされているだけで、ポンプによる流れの影響を受けない流路となっている。この流路壁面の一部をインバータの伝熱面で構成し、インバータの伝熱面を冷媒と接触させる。これによって、インバータが動作して発熱すると、伝熱面が沸騰して蒸気泡が発生する。発生した蒸気泡の気泡ポンプ効果によって生じた流れが駆動力となって、図中矢印で示す冷媒の流れが生じる。上昇した蒸気泡は熱交換部で冷媒と熱交換することで凝縮して液に戻るため、外部流路へ流出することはない。この現象が繰り返されることで、安定した沸騰冷却を実現できる。

表 1. 実験条件

液温	80℃
雰囲気温度	20℃
冷媒流量	10L/min
電流	10~120Arms
電圧	300V
トルク	0~85N・m
回転数	1,000~3,000rpm

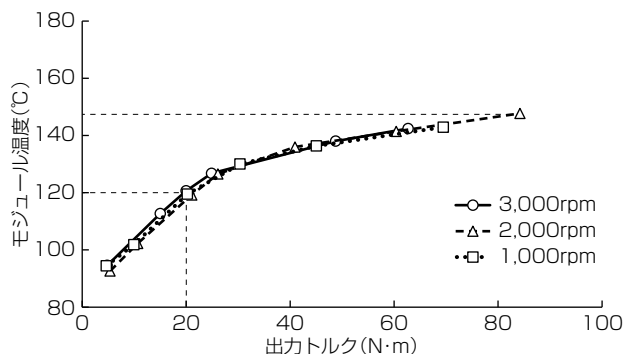


図 6. モジュール温度測定結果

3.2 評価試験結果

表 1 に実験条件を示す。冷媒流量は一定とし、冷媒には蒸留水を使用した。

図 6 に、出力トルクを変化させたときのモジュール温度測定結果を示す。縦軸のモジュール温度は、インバータに搭載されている SiC (シリコンカーバイド) チップ近くに設置された温度センサの温度を表す。トルクを増加させるためにインバータの電流を増加していくと、発熱量が増加するためモジュール温度が上昇する。出力トルク 20N・m、モジュール温度 120℃ 近傍で温度上昇の傾きが変化している。このとき、インバータの伝熱面からは蒸気泡が発生しており、自然対流による冷却から沸騰による冷却に移行したことを目視によって確認した。沸騰冷却が開始するとモジュール温度上昇は緩やかになり、出力トルクを約 4 倍 (発熱量を 380W から 750W) に増加させても、モジュール温度上昇を約 23K に抑制できた。発熱量の増加に対してモジュール温度の上昇を抑制できることから、沸騰冷却が効果的な冷却方式の一つであることが分かる。

3.3 数値シミュレーション結果

蒸気泡の気泡ポンプ効果による循環流速を予測するため、低サブクール沸騰領域に用いられる Ahmad の Profile-Fit 法⁽³⁾を参考にして数値シミュレーションを実施した。シミュレーションに際し、簡単化のため以下の条件を仮定した。①蒸気泡の浮力と摩擦損失だけを考慮、②加熱部の曲率は考慮せず鉛直流路、③発生した蒸気泡は熱交換部に到達するまで凝縮しない。

図 7 に、気泡ポンプ効果によって生じた冷媒流路内の循

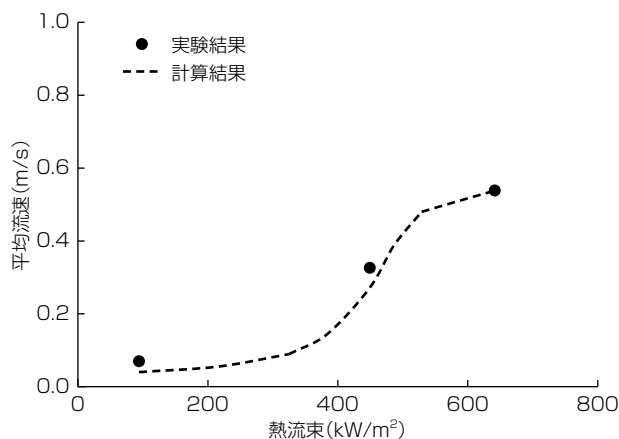


図 7. 循環流の平均流速の比較

環流の平均流速について実験結果と数値シミュレーション結果の比較を示す。計算結果の方がやや平均流速を低めに見積もっているが、全体的によく一致することが確認された。熱流束を大きくしていくことで自然対流から沸騰に変化し、蒸気泡による気泡ポンプ効果が生じ、循環流速が急激に増加する現象を表現できていると考えている。

この結果から、作成した数値シミュレーションを冷媒流路の設計に適用できるめどが得られたと考える。

4. む す び

相変化冷却方式の一つである沸騰冷却技術を車載用インバータ冷却へ適用することを目指し、基礎性能評価及びプロトタイプによる評価を行った。基礎性能評価で沸騰冷却の有効性を確認した。さらに、プロトタイプの製作・評価によって、沸騰によって発生した蒸気泡の気泡ポンプ効果による循環流を利用して効率的な冷却効果を実証するとともに、循環流速を予測する数値シミュレーションを開発した。

今後、基礎性能評価装置や数値シミュレーションを活用することで、沸騰冷却技術を各種電子機器へ展開していく。

参 考 文 献

- (1) 篠崎 健, ほか: 二液混合流体における沸騰熱伝達, 第53回日本伝熱シンポジウム講演論文集, J111 (2016)
- (2) 篠崎 健, ほか: 二液混合流体の沸騰における伝熱面堆積物の影響評価, 第54回日本伝熱シンポジウム講演論文集, C114 (2017)
- (3) Ahmad, S. Y.: Axial distribution of bulk temperature and void fraction in a heated channel with inlet subcooling, Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer, 92, No.4, 595~609 (1970)

電機製品の構造信頼性を支える 材料強度加速評価技術

越前谷大介*
澤田祐子*
安藤順昭*

Accelerated Evaluation Technologies of Material Strength for Electric Industrial Products to Support Structural Reliability
Daisuke Echizenya, Yuko Sawada, Nobuaki Ando

要 旨

自動車へのモータ採用に代表されるように、電機製品の適用範囲は拡大が続いており、運用条件や環境条件が多様化する中で、一層の品質確保が求められている。

製品に求められる使用期間で性能を発揮し続けるためには、材料強度に対して適切な構造設計を行うことが重要である。しかし、多くの材料では長期使用で強度が低下するため、劣化現象を明らかにし、開発設計時に事前評価を行う必要がある。

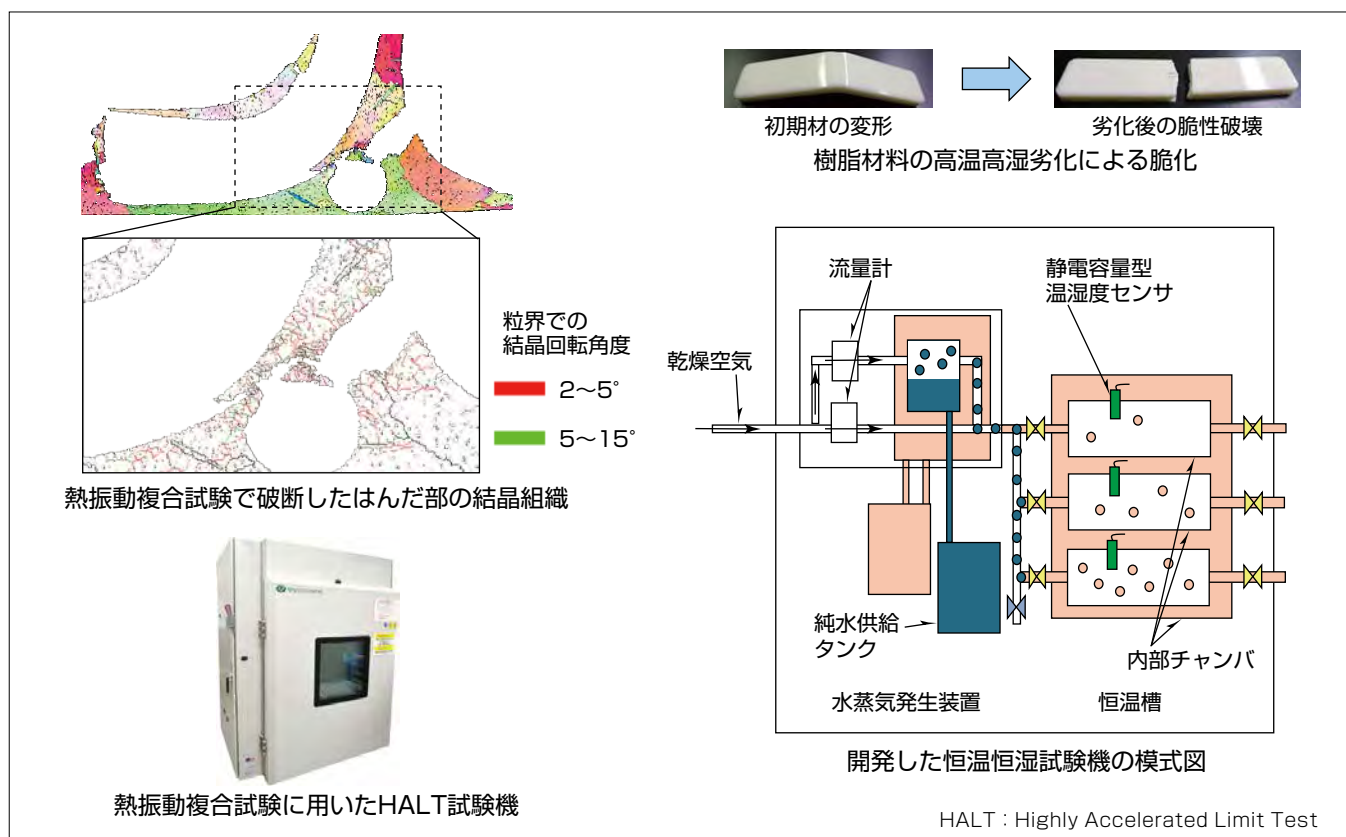
特に、実機で強度劣化を発生させて影響を確認する加速試験は、製品寿命の定量化と想定外不良の市場流出防止に有効である。

一方、電機性能と製品コストの両面からの要求によって、使用される材料は多種多様になっており、加速試験条件の

見極めが重要となっている。また、求められる使用期間が長期化する傾向がある中で加速試験も長期化しており、開発期間への影響を無視できない。

今回、電気製品で必須な構造材料であるはんだと樹脂材料の材料強度加速評価技術を開発した。

はんだに対しては、高速なヒートサイクル(H/C)とランダム振動を加えることができるHALT試験機による熱振動複合試験で加速評価する技術を開発した。樹脂材料に対しては、150℃までの温度範囲で、大気圧下で空気と水蒸気を混合して広い湿度条件を網羅する恒温恒湿試験機を開発し、高温高湿による強度低下を対象にした加速評価技術を開発した。



加速評価設備と破壊現象

はんだの強度加速評価では、HALT試験機を用いて熱振動複合試験を行った。破壊として顕在化する前にH/Cによる結晶の細分化が起きる。樹脂材料は高温高湿環境で劣化すると脆化(ぜいか)し割れてしまう。樹脂材料の強度加速評価用に開発した恒温恒湿試験機は水蒸気発生装置と恒温槽を分離し、100℃以上でも湿度コントロールを可能にしている。

1. ま え が き

電機製品の適用範囲拡大に伴い、以前よりも厳しい使用環境や稼働寿命の長期化といった、品質への要求も拡大している。性能を発揮し続けるためには構造的な破壊を避けなければならない、材料強度に対して適切な構造設計を行うことが重要である。しかし、多くの材料では強度が長期使用で低下するため、劣化現象を明らかにし、開発設計時に事前評価を行う必要がある。特に、実機で強度劣化を発生させ影響を確認する加速試験は、製品寿命の定量化と想定外不良の市場流出防止で有効な試験である。一方、電機性能と製品コストの両面からの要求によって、使用される材料は多種多様になっており、加速試験条件の見極めが重要になっている。また、求められる使用期間が長期化する傾向がある中で、加速試験も長期化しており、開発期間への影響が無視できない。そのため、材料強度の劣化現象を解明し、加速評価する技術の開発を実施している。

従来主体的な構造材料である金属材料の強度評価を進めてきたが、本稿では、電機製品で必須な構造材料となっている、はんだと樹脂材料の材料強度加速評価技術について述べる。

2. はんだの熱サイクル寿命の加速評価

2.1 はんだ接続部の熱サイクル寿命

はんだ接続は、電子部品の接続として最も一般的な方法であるが、電機製品の利用による自己発熱等を起因とするヒートサイクル(H/C)によって、有限な寿命で破壊することが知られている。これは、接続されている部品の熱変形量差がはんだ部分に繰り返し加わることで、疲労破壊が発生するためである。

はんだ接続部は、製品内に多数存在することもあり、最終的な評価として実機によるH/C試験が実施されているが、製品寿命が長くなるにつれて、その試験期間は数か月に及ぶようになってきている。今回、H/C試験の短時間化を目的として、HALT試験機による熱振動複合試験を行った。HALT試験機は、本来は製品の限界環境を確認するために開発された装置⁽¹⁾で、高速なH/Cとランダム振動を加えることができる。

2.2 サンプルと試験方法

評価したはんだ接続部は、SOP(Small Outline Package)部品と基板を接合したSn(スズ)-3.0Ag(銀)-0.5Cu(銅)はんだである。HALT試験機を用いてこの基板にH/Cと振動負荷を重畳させた熱振動複合試験を行った。また比較のため汎用H/C試験機を用いたH/C試験と、HALT試験機を用いたH/C試験を行った。表1に各試験条件を示す。H/Cは温度範囲-40~125℃とし、周期30min/cycとした。熱振動複合試験の熱負荷は温度範囲-100~120℃、周期

表 1. 試験条件

	熱負荷		振動負荷
	温度範囲(℃)	周期(min/cyc)	加速度(Grms)
H/C試験(汎用H/C試験機)	-40~125	30	-
H/C試験(HALT試験機)	-100~120	9	-
熱振動複合試験			40

9 min/cycとし、重畳させる振動負荷は装置の設定値として40Grmsとした。HALT試験機を用いたH/C試験では熱振動複合試験の熱負荷条件だけにした。50cycごとにサンプルを試験機から取り出し、SOPパッケージのはんだ接続部の破壊を確認した。

2.3 試験結果

汎用H/C試験機を用いたH/C試験では1,600cyc、HALT試験機を用いたH/C試験では800cyc、熱振動複合試験では200cycではんだ接続部が破断した。各試験後、はんだ接続部の断面観察及びEBSD(Electron Back Scattered Diffraction Pattern)解析を行った。図1にはんだ接続部断面の逆極点図マップを示す。図1(b)、同図(c)、同図(d)に示すように熱負荷をかけた三つの試験では、はんだ接続部にクラックがある。汎用H/C試験機及びHALT試験機を用いたH/C試験では、H/Cによるはんだ組織の結晶細分化が確認でき、同様の現象が再現されていると判断できる。熱振動複合試験ではH/C試験に比べて結晶細分化が明確ではないが、図2に示すように、結晶粒界を確認すると、結晶細分化が進んでいるのが確認され、場所と形状はH/C試験と同等であった。これらの結果から、HALT試験機を用いたH/C試験及び熱振動複合試験では、汎用H/C試験機を用いたH/C試験での破壊を評価可能と考えられる。

汎用H/C試験機を用いたH/C試験の試験時間は800hであるのに対して、HALT試験機を用いたH/C試験では120h、熱振動複合試験では30hとなり、それぞれ6.7倍、27倍試験時間を短縮できた。また、この試験結果から振動が複合される環境ではH/C疲労寿命が低下することが示されており、振動レベルの影響を検証することで、実製品の使用環境に対して新たな設計指標を得ることができた⁽²⁾。

3. 樹脂材料の高温高湿強度低下の加速評価

3.1 樹脂材料の高温高湿強度低下

樹脂材料は成形加工の容易さから低コストであり、また基本的に電気絶縁性を持つことから、多くの電機製品では必須の構造材料となっている。多種多様な材料が開発されている中で、環境規制対応等、競争力のある材料の活用が求められている。一方、化学構造上、温度や湿度、紫外線、溶剤等によって分解や溶融を起こすことから、長期使用では材料劣化の影響を考慮する必要があり、新材料採用のリスクとなっている。

その中でも高温高湿での劣化については、実使用環境で

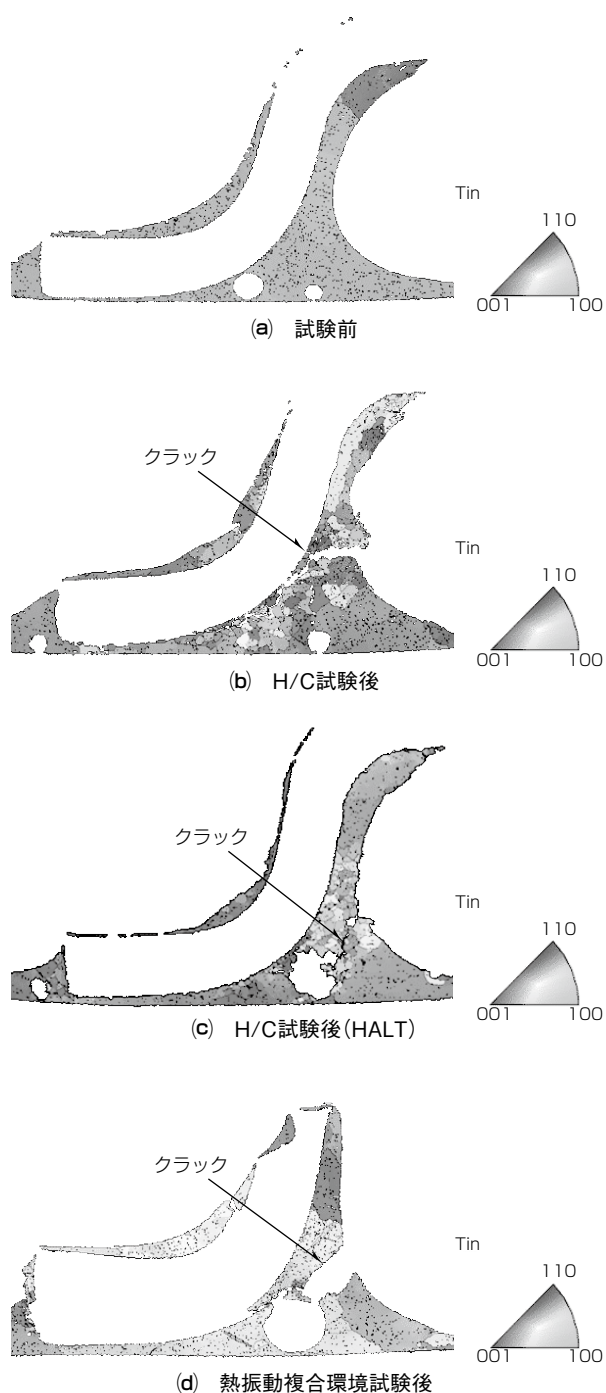


図1. SOPはんだ接合部の逆極点図方位マップ

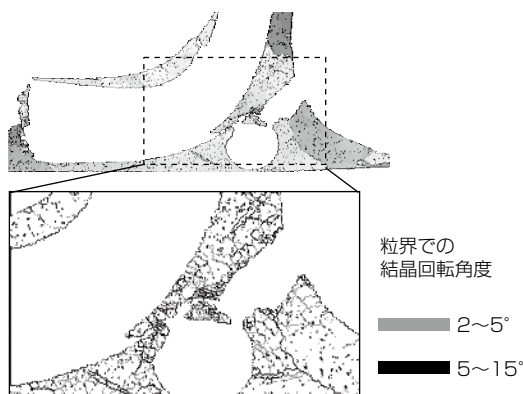


図2. 熱振動複合環境試験後はんだ接合部の結晶粒界マップ

避けることが難しく、試験期間も長期化の傾向がある。今回、材料強度の劣化という視点から、高温高湿劣化の加速評価技術の検討を行った。

3.2 温度と湿度による加速試験装置

温度と湿度による加速試験を行う装置には従来から、恒温恒湿試験機、PCT(Pressure Cocker Test)、HAST(Highly Accelerated temperature and humidity Stress Test)がある。図3に各装置が制御可能な温度と相対湿度の範囲を示す。一般的な恒温恒湿試験機では100℃前後の温度調節と湿度が低い状態をコントロールするのが難しい。そこで図の太線枠で示すような、150℃までの温度範囲で、大気圧下で空気と水蒸気を混合して広い湿度条件を網羅する恒温恒湿試験機を新しく開発した⁽³⁾。この装置は、水蒸気を発生させ、乾燥空気を混合して水蒸気量を調整する水蒸気発生装置と、恒温槽に内蔵されて水蒸気量が調整された空気を流し込むチャンバとで構成される。チャンバ内には乾燥空気だけを流すこともできるので、相対湿度(Rh)がほぼ0%の条件も実現できる。この装置と近年開発されたワイドレンジHASTによって温度と湿度の調整範囲を拡大して劣化現象を評価可能にした。

3.3 強度低下加速試験結果

対象とする樹脂材料にはポリブチレンテレフタレート(PBT)を用いた。試験片を高温高湿環境で保持し、数時間から数十時間ごとに取り出し、3点曲げで強度試験を行った。図4に85℃ 33%Rhの条件に暴露した時間ごとの

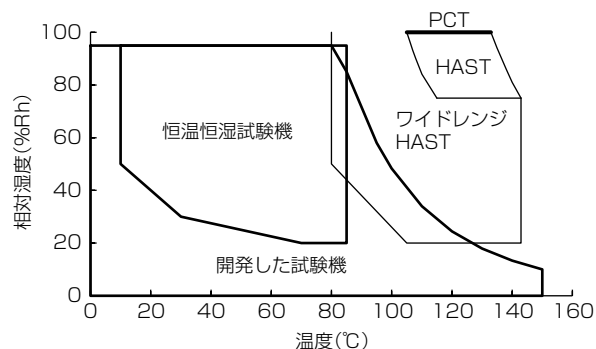


図3. 各種恒温恒湿試験装置の制御可能範囲

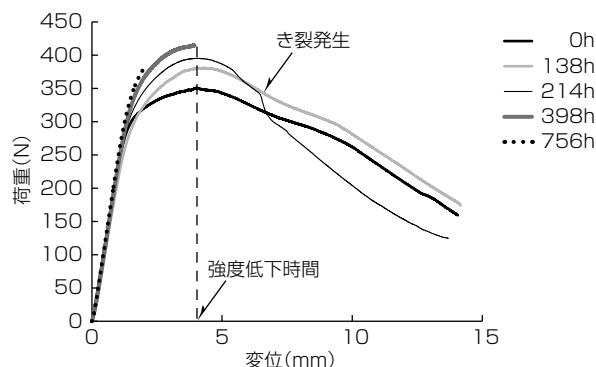


図4. 曲げ強度試験の荷重-変位関係

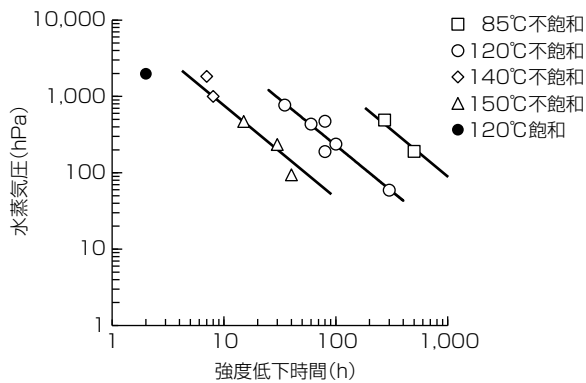


図5. 強度低下時間と水蒸気圧の関係

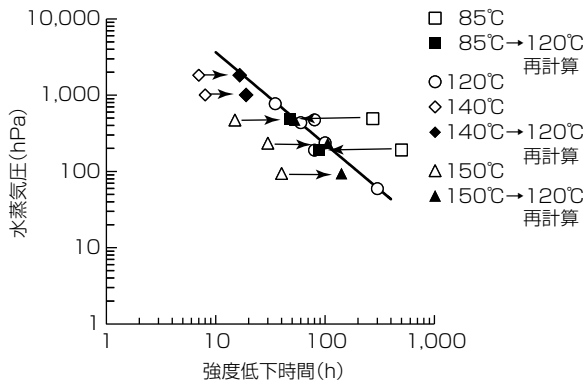


図6. 強度低下時間の120℃環境への再計算結果

荷重-変位関係を示す。初期の試験片は延性破壊を示しており、暴露当初は加熱によって結晶化が進むため最大荷重は増加する。その後、次第に加水分解による脆化が進行して最大変位が低下し、最終的には最大荷重が低下し始める。最大変位が最大荷重を示す変位まで低下した保持時間を強度低下時間と定義した。

図5に、強度低下時間と水蒸気圧との関係を示す。一般的な恒温恒湿試験機を用いた85℃ 85%Rhに対して、開発した恒温恒湿試験機による120℃環境では8倍、150℃環境では18倍の速さで同様の劣化が再現されており、試験時間を短縮できた。

温度ごとの試験データはそれぞれほぼ直線になった。そこでアレニウス型の式を用いて、強度低下時間を温度で加速した時間に整理し直した(式(1))。

$$L_{T_2} = L_{T_1} \times \exp \left\{ A \times \left(\frac{1}{(T_2 + 273.15)} - \frac{1}{(T_1 + 273.15)} \right) \right\} \dots\dots (1)$$

ここで T_1 は試験温度、 T_2 は整理し直す温度(℃)、 L_{T_1} は試験から求めた強度低下時間、 L_{T_2} は整理し直した時間である。定数 A はフィッティングによって求めた。図6に、各データを温度120℃で整理し直した結果を示す。各温度のデータが一つの線上に配置され、温度と水蒸気圧から強度低下時間を推定できることが示された。図7には、現実的な利用環境として、式(1)から30℃の強度低下時間予測線を示した。対象のPBTは30℃では10年(87,650h)以上の利用が可能と判断できる。また、一般的な恒温恒湿試験機

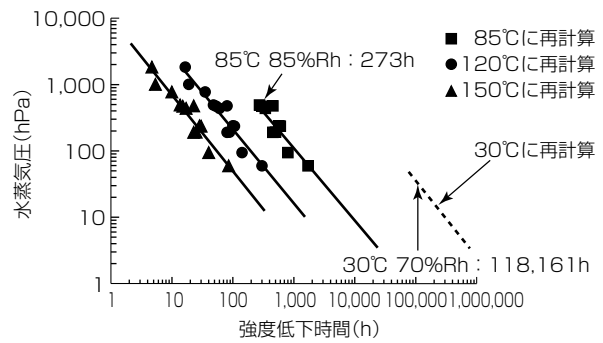


図7. 試験データと温度条件ごとの強度低下時間の予測線

による85℃ 85%Rhでは30℃ 70%Rhに対して430倍の加速となり、10年相当に約200時間の試験が必要と判断できる。

なお、結露が発生する飽和環境となるPCT試験結果については線に乗らず、劣化現象が異なることが示唆されており、樹脂材料の強度低下でも、結露は避けるべき環境であることが示された。

4. む す び

材料強度の劣化現象を解明して加速評価する技術として、はんだの熱サイクル寿命の加速評価と、樹脂材料の高温高湿強度低下の加速評価について述べた。

従来の試験に対して負荷を拡大させることで、加速評価が可能になった。また、加速評価の妥当性を検討する中で、熱サイクルについては振動の重畳効果、高温高湿劣化については温度と水蒸気圧の関係と、これまで明確ではなかった劣化現象が明らかになっている。加速評価技術の開発を通しての製品開発への知見が得られることは多く、今後も電機製品の競争力に直結する材料に対して継続的に技術開発を進めていく。

加速評価の目標として、製品が破壊するまで試験を行う、限界評価試験の実現が挙げられる。製品の破壊現象まで確認することで、想定外の不良モード流出を防ぐことを目的にしており、今後、複雑化を増す電機システムの評価でも重要な方法論になると考えられる。限界評価試験を進めることで革新的な電機システムについても安心・安全な市場投入を実現し、社会の持続的成長に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) IEC62506 Methods for product accelerated testing, Annex A, Highly accelerated limit test(HALT) (2013)
- (2) 大口健一, ほか: HALTを模擬した負荷下で2軸ラチェット変形を示す銅-はんだ接合体の疲労寿命評価, 機械学会年次大会予稿集, ID: J0450205 (2018)
- (3) 澤田祐子, ほか: 樹脂材料の強度低下予測(温度と湿度による加速評価), 日本機械学会論文集, 85, No.871, 18-00341 (2019)

製品開発を支える振動・音響解析技術

柳館直成* 江崎雄也*
和田拓真*
八重樫直樹*

Vibration and Acoustic Analysis Technologies to Support Product Development

Naomichi Yanagidate, Takuma Wada, Naoki Yaegashi, Yuya Ezaki

要 旨

技術開発によって製品性能は年々向上し、モータなどの動力機器の高出力化によって、振動源の力(加振力)が増加する傾向にある。また、小型化及び軽量化が求められている。加振力が増加すること、軽量化することで、製品の振動や騒音の発生リスクが増加する。そこで、振動解析や音響解析などの数値解析を実施して、製品の振動や騒音を予測し、振動や騒音低減の対策を講じている。また、試作品に対して振動測定、音響測定を実施することで、課題を抽出し、対策箇所を特定している。これらの取組みによって、効率的で効果的な設計を実施している。

三菱電機での製品開発への振動・音響解析技術の最新の

代表的適用事例として、次の三つが挙げられる。

(1) 振動解析技術

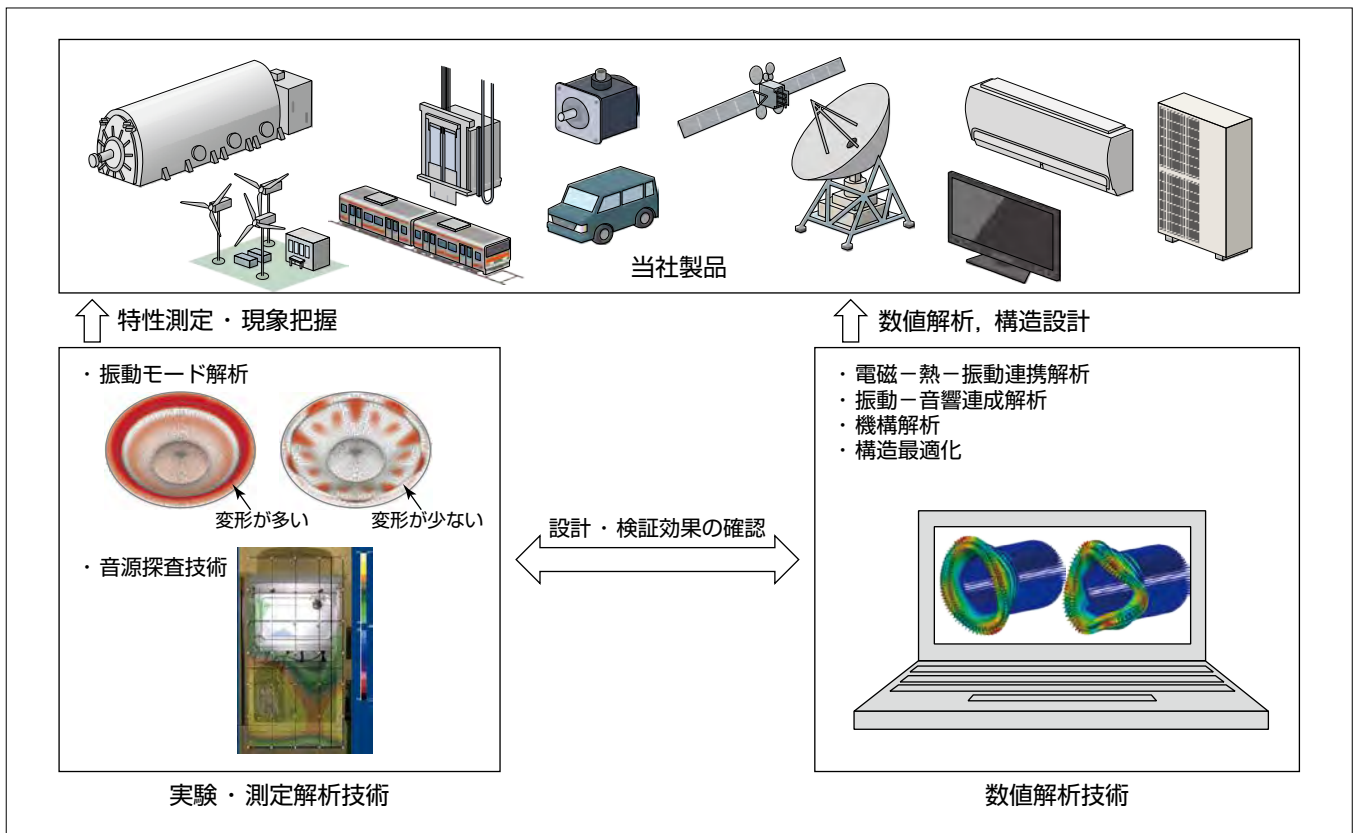
従来は扱えなかった大規模モデルで複数の物理現象をモデル化した数値解析技術を発電機に適用した。

(2) 音響実験技術

物理現象が複雑で解析が困難な製品に対して、実験的なアプローチで空調機室外機の騒音を改善した。

(3) 音響解析技術

振動と音を連成させた数値解析を用いて製品構造と振動と音の関係を予測する技術をスピーカーに適用し、高音質なスピーカーを設計した。



製品開発を支える振動・音響解析技術

振動・音響解析技術は、製品品質の根幹を成す基盤技術であり、当社の製品開発を支える技術である。実験・測定解析技術で製品やプロトタイプの振動・音響特性を測定し、振動や騒音を低減するために構造変更すべき箇所を特定する。構造変更案を数値解析技術で検証し、振動や騒音の低減効果と対策コスト(費用対効果)などから最も有効な構造を求める。そして、構造変更案の効果を試作品で実験検証し、製品に適用する。

1. ま え が き

技術開発が進み、製品性能が年々向上していることで、製品の動力源の加振力が増加している。また、製品の軽量化や小型化が進んだことで、製品の振動や騒音の発生リスクが増加しているため、振動や騒音の対策が不可欠である。そこで、振動解析や音響解析などの数値解析を実施して、製品の振動や騒音を予測し、振動や騒音の低減対策を講じている。また、試作品に対して振動測定、音響測定を実施し、課題を抽出し、対策箇所を特定している。これらの取組みによって、効率的で効果的な設計を実施している。

本稿では、振動解析技術、音響実験技術、音響解析技術の三つに焦点を絞り、技術概要と製品への適用事例について述べる。

2. 振動解析技術

2.1 電磁-熱-振動大規模連携解析技術

製品運転時の振動は複数の物理現象が連動して生じる。例えば、モータでは回転子が回転することで電磁場が発生する。電磁場は回転移動しながら固定子に電磁力を作用させ、固定子が振動する。また、固定子に電気が発生すると固定子の温度が上昇し、固定子材料の物性値が変化して固定子の固有値が増減するため、振動形状が変化する。つまり、電磁、熱、振動の3種類の解析を考慮しなければ正確な振動を予測できない。ただし、電磁、熱、振動は物理場が異なるため解析方法が異なり連成解析が困難、発電機全体解析は解析モデルの規模が大きすぎて解析できないといった問題があった。

そこで、発電機やモータの挙動を高精度に計算するため、製品全体を大規模解析モデル化した。電磁界解析で求めた電磁力分布や電磁損失分布を、そのまま入力として構造モデルにマッピングし、振動応答や温度分布を計算できる電磁-熱-振動大規模連携解析技術を開発した。この技術では、独自のメッシュ分割と18倍の計算速度を実現する領域分割法を採用することで、大規模解析モデルの高速化と計算精度確保を可能にしている。

2.2 タービン発電機への解析適用事例

発電機の運転状況を詳細に把握するため、タービン発電機固定子コイルエンド部の解析を、電磁-熱-振動大規模連携解析技術を用いて実施した。大規模連携解析技術の適用イメージを図1に示す。

発電機の部品サイズは最大数メートルと大きく、また、効率や信頼性に影響が大きい固定子は形状が複雑で部品点数が多いため、従来の解析では解析モデルを簡略化して作成する必要があり、電磁損失や、温度分布や変形の予測を詳細に把握するのは困難であった。今回、図2に示すように、コイル内銅素線のような従来の解析では簡略化する部位も

詳細にモデル化を行い、大規模連携解析を実施した。メッシュ数は電磁界モデル3,000万、熱流体モデル10億、構造モデル1,000万となった。

電磁界解析で得られた全電磁力を構造モデルにマッピングすることで、振動応答解析を実施した結果の一部を表1に示す⁽¹⁾。表のモード形状は全体解析からコイルだけ抽出した結果であり、実機試験結果も併せて示している。表から、この解析と実機試験結果の誤差は4%以下であり、振

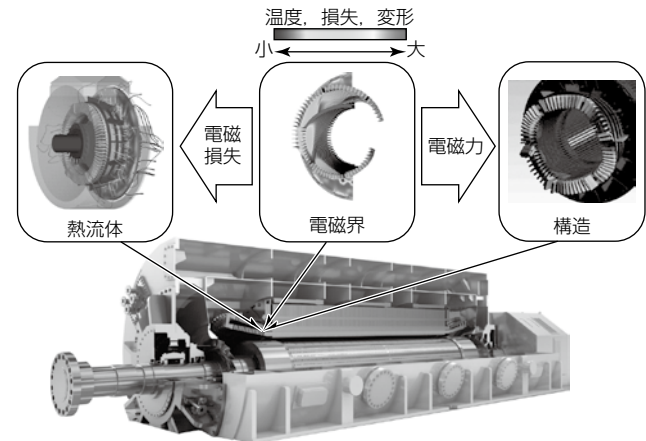


図1. 大規模連携解析技術の適用イメージ

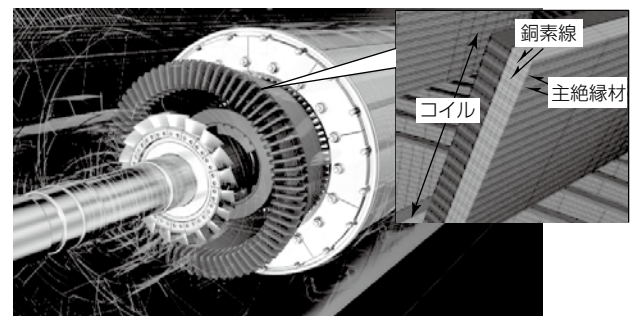
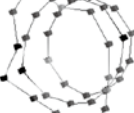


図2. 解析モデルの要素分割イメージ

表1. 振動応答解析結果

モード形状	固有振動数 (Hz(誤差%))	
	実機試験	解析
楕円	 56	 56.4(0.7)
三角形	 92	 88.9(-3.4)
四角形	 121	 122.2(1.2)

動応答が高精度に計算できることが確認できた。

今後、固定子の別部位又は回転子の解析も同様に行う。また他製品の解析検討時にもこの技術を用いることで当社製品への技術展開を図る。

3. 音響実験技術

3.1 遮音設計

騒音を簡単に低減する方法として、機器を囲い遮閉する防音カバーがある。機器全体を遮閉すると大きな騒音低減効果が望めるが、機器の冷却、低コスト、省スペースを考慮した遮音設計が求められる。

遮音設計で騒音低減を効率的に行うには、騒音の原因を把握して、騒音源や騒音の卓越する箇所に対策を講じることが効果的である。騒音は、動力源からの直接音、部品の共振による振動、流体の乱流などが原因となる。ここでは、空調機の室外機を対象として、騒音の発生原因を特定し、騒音源に対して適切な遮音設計を行った事例について述べる。

3.2 室外機騒音の原因分析

空調機の室外機を対象とした騒音の原因分析事例を述べる。図3に示すように室外機は空気と冷媒を熱交換する送風室と、圧縮機や膨張弁などの冷媒回路部品を収納した機械室で構成される。騒音源は送風室のファンと機械室の圧縮機に分類できる。各装置を単体運転したときの騒音から寄与率を算出できるが、熱交換の都合上、圧縮機単体を運転することは難しい。そこで、室外機全体の騒音からファン単体運転の騒音の差をとることで、送風室と機械室の騒音の寄与率を求めた。

室外機の音響パワーレベル(PWL)と寄与率の例を図4(a)に示す。寄与率は送風室が55%、機械室が45%であり、寄与率に大きな差はないため、送風室と機械室の両方の騒音を低減する必要がある。

送風室の騒音はファンの送風音、機械室の騒音は、①圧縮機自体から放射される騒音と、②圧縮機を支持する防振ゴムや配管から筐体(きょうたい)に振動が伝搬して発生する騒音とに分類できる。高周波数は①の成分が大きく、低周波数は②の成分が大きい傾向にある。機械室音を1/3オクターブバンドの周波数帯域の800Hz帯域以下と1kHz帯域以上に分けた図4(b)に示すように、低い周波数と高い周波数の寄与の差が小さいため、機械室の騒音を低減するためには全域の対策が必要である。

送風音はファン羽根枚数と回転数に比例した周波数で発生する騒音と、風の流れの乱れや羽根の回転速度に応じて発生する渦による乱流の騒音が支配的である。そこで、送風音に対しては、乱流が発生しにくい部品配置、ファン径拡大による回転数低減を行った⁽²⁾。

圧縮機自体から放射される騒音には、圧縮機を遮閉して騒音を外部に漏らさないようにする遮音設計が有効である。

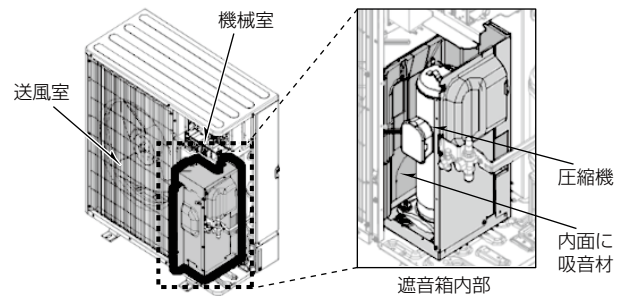


図3. 室外機と遮音箱

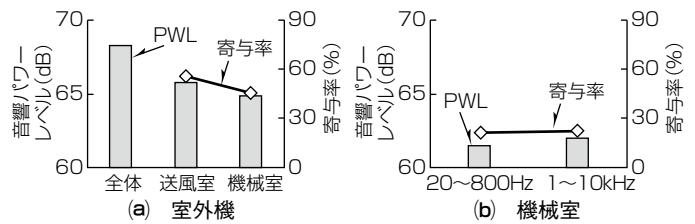


図4. 音響パワーレベルと寄与率

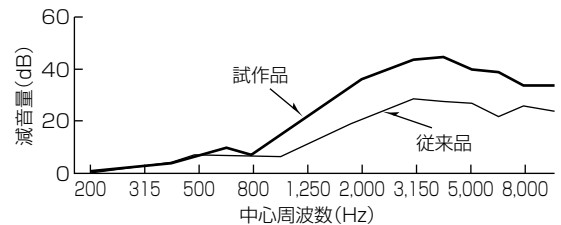


図5. 遮音構造の減音量の比較

また、圧縮機の支持部から伝搬する騒音は防振ゴムや配管構造の変更などで、振動を他の部品に伝搬させないための防振設計が有効である。このように騒音の原因を分析し、製品に対して有効な対策を講じている。

3.3 遮音設計の取組み

圧縮機から放射される騒音を低減するため、圧縮機の遮音方法を検討した。従来、圧縮機に吸音材とゴムを巻きつけていたが、圧縮機を箱体で囲う構造にした(図3)。遮音箱の材質と寸法、隙間量、内部の吸音率から、遮音箱内の残響を考慮した構造設計を行った。また、遮音箱内部は残響によって音圧が増加するため、吸音材を併用した。

試作遮音箱と従来品の比較のため、減音量を計測した。圧縮機容器に加振器を設置し、容器をスピーカー音源とし、遮音構造の有無の音圧を無響室で計測した。減音量の計測結果を図5に示す。減音量と圧縮機の騒音特性から、1kHz帯域以上の騒音を従来よりも10dB低減可能にする結果を得た。

送風音や防振ゴムの形状設計などの対策内容を含めて、全体音で10dBの低減効果を得ている⁽²⁾。

4. 音響解析技術

4.1 振動-音響連成解析技術

音響解析は空間内での音の発生や伝搬の様子を求める解

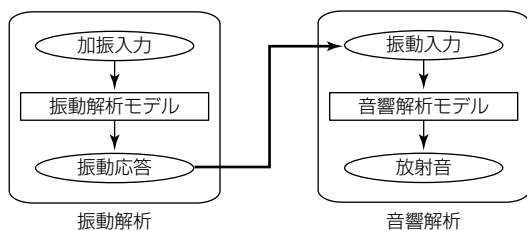


図6. 振動-音響連成解析

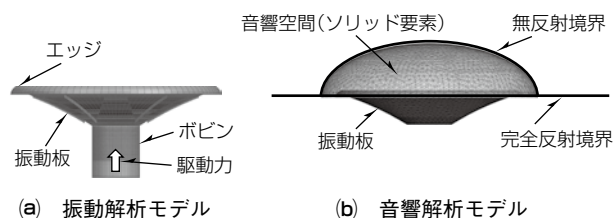


図7. 音響解析モデル

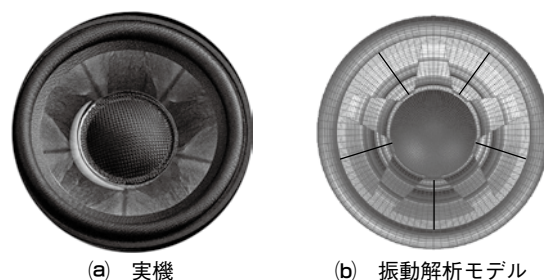


図8. リブ付き振動板

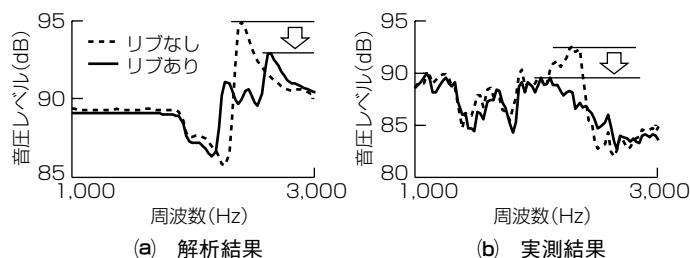


図9. 音圧の周波数特性

析技術で、無響室や残響室といった特殊な音響測定環境を用いることなく製品の音響特性の把握が可能になる。

機器が発する音には振動音と流体音とが存在し、このうち、加振入力を受けた機器の振動で発する振動音を予測する場合、図6に示す振動と音響との連成解析が有用である。

次に、オーディオスピーカーの振動板設計を事例に振動-音響連成解析技術について述べる⁽³⁾。

4.2 ウーファの高音質化

一般的なスピーカーは振動板が振動することで音が発生する。再生音の周波数特性が広帯域に平坦(へいたん)であるほど、収録音の再現性が良いとされている。しかし、高周波数帯域では振動板の共振によってピークやディップが生じるため、振動-音響連成解析を活用し、周波数特性を平坦化する振動板形状を求めた。

有限要素法によって構築した振動解析モデル及び音響解析モデルを図7に示す。振動解析モデルはシェル要素でモデル化し、エッジ端部を固定境界とした。振動板に用いられているNCV(Nano Carbonized high Velocity)材料はカーボンナノチューブを含む樹脂材料であるため、振動板成型時の樹脂の流れによってヤング率が変化する。そこでこの解析では、図8に示すように、樹脂の流動方向に応じてヤング率を定義した。磁気回路によって与えられる駆動力を入力とし周波数応答解析によって振動板表面の振動応答を求めた。

音響解析モデルはソリッド要素でモデル化し、開放空間を模擬するための無反射境界、及びバッフル板を模擬するための完全反射境界を設定した。ソリッドモデルには空気物性値を定義し、求めた振動板の振動応答を入力条件として放射音を解析した。

周波数特性にピークを発生させる原因となる振動板の分割共振を抑制する構造として、振動板にリブを設け、その本数、長さ、断面形状を変数として解析を行い、最適なり

ブ形状を導き出した。スピーカーの中心軸上1m離れた位置での音圧の周波数特性を図9に示す。リブを設けることで、振動板の共振による振幅増大が抑制され、周波数特性上のピークレベルが低減することが分かる。また、実機でもリブ有無で解析同様のピーク低減効果を得た。

前述したウーファを始めとして、トゥイーター及びサブウーンスピーカーなど、この解析による振動板設計を多様なスピーカー設計に展開している。

5. む す び

振動解析技術、音響実験技術、音響解析技術の三つの技術の製品開発への適用事例について述べた。振動解析技術では、従来は扱えなかった大規模モデルで複数の物理現象を考慮した解析技術を発電機に適用した事例について述べた。音響実験技術では、物理現象が複雑で解析が困難な製品に対して、実験的なアプローチで空調機室外機の騒音を改善した事例について述べた。音響解析技術では、振動と音響の連成解析を用いて製品構造と振動と音の関係を予測する技術をスピーカーに適用した事例について述べた。これらの技術を用いて、高品質な製品を開発している。

参 考 文 献

- (1) 長嶋孝明, ほか: タービン発電機の大規模構造解析, 日本機械学会 第30回計算力学講演会 (2017)
- (2) 内野進一: 低騒音ATWヒートポンプ, 三菱電機技報, 91, No.10, 550~553 (2017)
- (3) 神田穂高, ほか: 音響解析技術を用いたスピーカーの分割共振を抑制する構造の開発, 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2014 講演論文集655 (2014)

電力変換システムの電磁ノイズ低減技術

春名延是* 夏野一成**
高橋慶多* Luc Rambaud***
長澤 忍*

Electromagnetic Interference Reduction Technologies for Power Conversion Systems

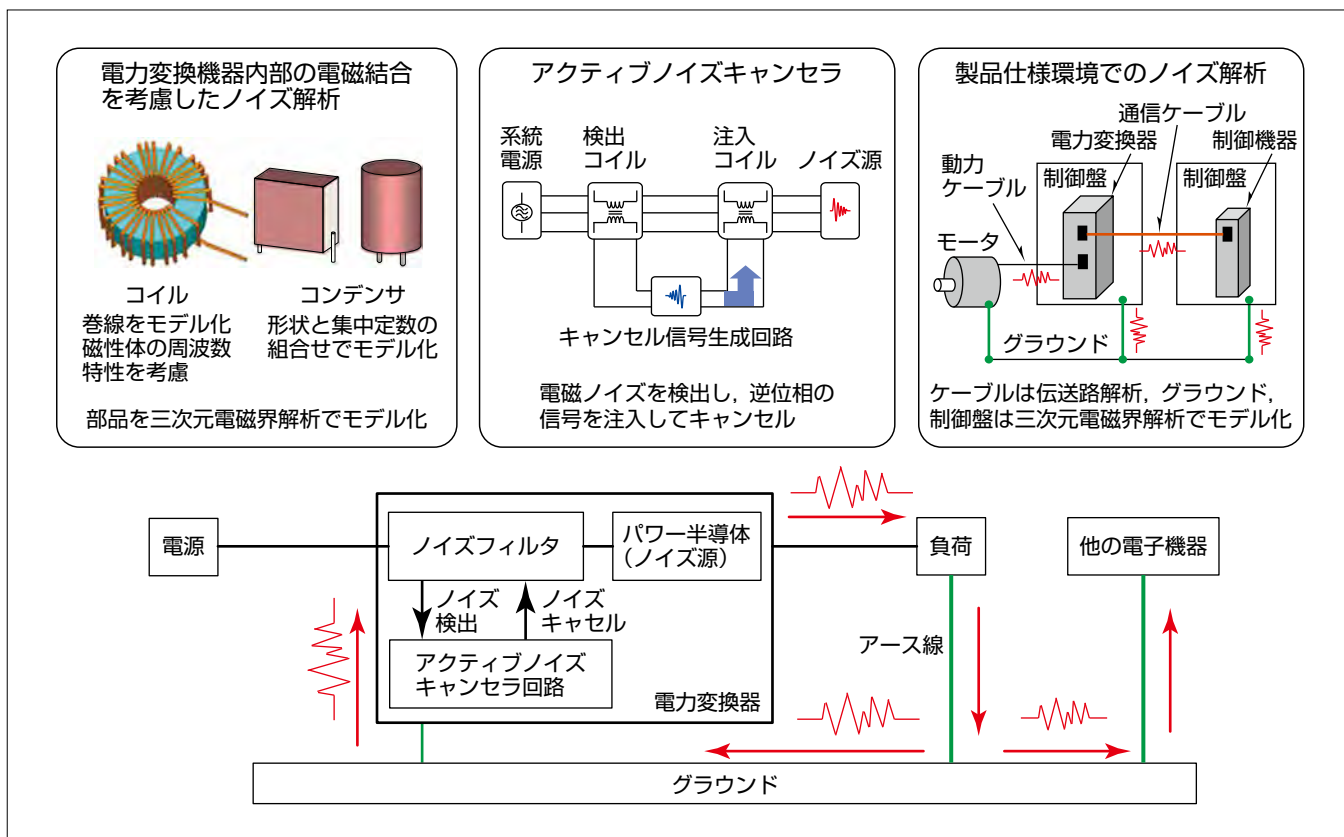
Nobuyuki Haruna, Keita Takahashi, Shinobu Nagasawa, Kazushige Natsuno, Luc Rambaud

要 旨

電力変換器は環境問題やエネルギー問題の解決を目的として自動車、FA機器、空調機、鉄道、電力等の多くの分野で利用が拡大している。電力変換器を構成する主要部品の一つであるパワー半導体はスイッチング動作時に電磁ノイズを発生させることが知られており、発生した電磁ノイズが他の電子機器を誤動作させないように機器外部に伝搬する電磁ノイズ量を低減する対策が行われている。近年では、電力変換器の小型・高効率化に伴ってノイズフィルタの小型化や機器内部のスペースを効率的に利用した高密度な実装も望まれている。さらに、電磁ノイズの影響を受けやすいIoT(Internet of Things)機器が急速に普及しつつあり⁽¹⁾、製品使用環境で周囲の機器を含むシステム全体の

電磁ノイズ対策も望まれている。

これらの要求に対し、三菱電機では①電力変換器内外を伝搬する電磁ノイズ量を高精度に予測するノイズ解析技術と②ノイズフィルタの小型化技術の開発を進めている。①では電力変換器内部にノイズフィルタを実装する際に課題となる電気部品間の電磁結合を考慮可能なノイズ解析技術と製品使用環境での機器外部へのノイズ伝搬量を予測するノイズ解析技術を、②ではノイズフィルタの性能を維持しつつ、小型化を実現するためのアクティブノイズキャンセラの設計技術を開発した。今後、これらの開発技術の高度化と製品適用を進め、低ノイズな電力変換システムの構築に貢献していく。



電力変換器から発生する電磁ノイズの伝搬経路と開発技術の位置付け

パワー半導体のスイッチング動作によって発生した電磁ノイズは電力変換器内部の電気部品、ケーブル、負荷、アース線や機器の金属筐体(きょうたい)へと伝搬していく。これらの要素を全て考慮した解析モデルを構築することでノイズフィルタの高密度なレイアウト設計と他の機器への影響評価が可能になる。一方で電磁ノイズを検出し、逆位相のキャンセル信号を注入するアクティブノイズキャンセラ回路を追加することでノイズフィルタ性能を高めて小型化することも可能である。

1. ま え が き

電力変換器の小型化を実現するためには、電力変換器から発生した電磁ノイズの伝搬量を高精度に予測するためのノイズ解析技術とノイズフィルタを小型化するためのアクティブノイズキャンセラの実現が必須である。

本稿では2章で、電力変換器内での電気部品間の電磁結合を全て考慮できる電磁界解析を用いたノイズ解析技術について、また、3章では電力変換システム内の他の機器への電磁ノイズの伝搬量を予測するノイズ解析技術について述べる。最後に4章でノイズフィルタの磁性体コアにノイズキャンセル回路を付加することで、性能を維持しつつ、ノイズフィルタの小型化を実現するアクティブノイズキャンセラの設計技術について述べる。

2. 電力変換器内部の電磁結合を考慮したノイズ解析技術

近年、パワー半導体の適用拡大に伴い電力変換器の高電力密度化に伴う小型化が急速に進んでいるが、パワーモジュール、コイル、コンデンサ、バスバー、プリント基板などの多くの電気部品が従来よりも密接して実装されるため、これら電気部品同士の電磁結合に起因した空間を伝搬する電磁ノイズが無視できなくなりつつある。そのため、電力変換器内でノイズフィルタを実装する際、配線を伝搬するノイズをノイズフィルタで抑制するだけでなく、電磁シールドによる電磁結合の抑制設計や、電磁結合が起きにくいような電気部品のレイアウト設計が新たに必要となる。

このような電磁結合の抑制を試作後のトライアンドエラーで行おうとすると対策期間が長期化してしまうため、試作前にあらかじめノイズ伝搬量を予測し、設計上流段階で対策を施すことが重要である。従来は電力変換器内部の各電気部品の高周波インピーダンスを反映した回路モデルを作成し、各回路モデルを組み合わせた全体回路モデルを使用して回路解析を行うことでノイズ伝搬量を予測していたが、電気部品同士の電磁結合を網羅的に回路モデルに追加する工程が必要であり、モデル作成に膨大な時間を要することが課題であった。この課題を受け、三次元電磁界解析を適用することで従来の回路モデル化を不要とする新たなノイズ解析技術を開発した⁽²⁾⁽³⁾。

電力変換器の内部構造及び電気部品を全て三次元モデル化して三次元電磁界解析を行うことで、電気部品間の電磁結合を網羅的に考慮することが可能になった。三次元モデルは三次元CADデータを元に作成可能である。コイル部品、コンデンサ部品の三次元モデルの一例を図1に示す。コイルは巻線1ターンずつ正確にモデル化し、磁性体モデルは透磁率の周波数特性を反映した。コンデンサの内部電極構造は微細であるため解析時間削減のためコンデンサ容量は

集中定数モデルを適用することで考慮した。コンデンサの寄生インダクタンスや抵抗成分は集中定数モデルを用いず、リードやコンデンサ形状を導体としてモデル化することで考慮している。このモデルによる部品単体のインピーダンスの解析値と実測値の比較を図2に示す。実測値と解析値がよく一致しており、部品ごとに高精度なモデルを構築することに成功した。

図1の部品モデルと、バスバー、プリント基板、筐体などを組み合わせた電力変換器内部の全体モデルを作成し、電磁結合が生じない場合(結合なし)と、電磁結合が生じる場合(結合あり)とで、電力変換器内部から発生する電磁ノイズの伝搬量の解析を行って実測値と比較した。結果を図3に示す。電磁結合が生じることで3MHz以上で最大20dB程度ノイズが増加するが、解析でもノイズ増加のふるまいを予測できていることが分かる。実測値と解析値はおおむね10dB以内の精度で一致しており、製品設計に十分適用可能であると判断した。今後、開発したノイズ解析技術を製品設計に適用し、電力変換器の小型化と低ノイズ化の両立に貢献する。

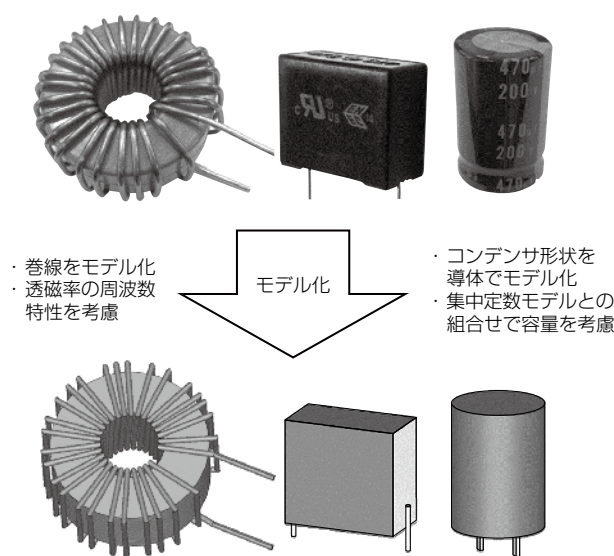


図1. コイル部品とコンデンサ部品の三次元モデル

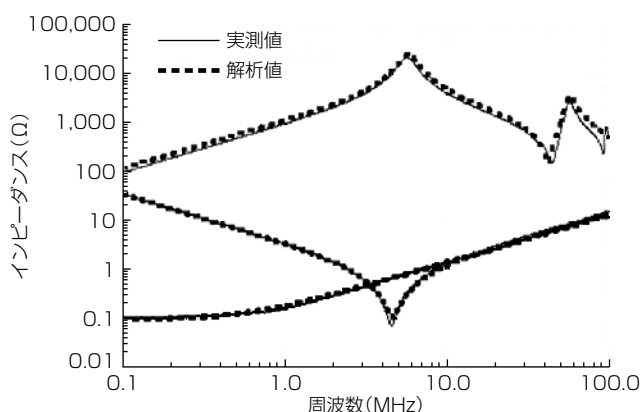


図2. コイル部品とコンデンサ部品のインピーダンス

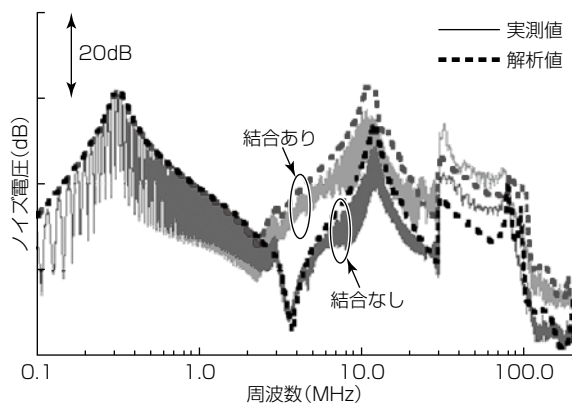


図3. 電磁結合有無でのノイズ電圧の解析値と実測値の比較

3. 製品使用環境を想定したノイズ解析技術

三菱電機では、FA製品のシステム構築時で電力変換器から発生する電磁ノイズを他の制御機器に干渉させないための制御盤内での電力変換器と制御機器の設置方法、配線方法、ノイズ対策部材の実装方法をガイドラインとして公開している⁽⁴⁾。今後は電磁ノイズの影響を受けやすいIoT機器の普及が想定されるため、更なる精度の高い電磁ノイズ対策設計実現のために、製品使用環境でのシステムレベルでの電磁ノイズの伝搬量を予測する解析技術を開発した。

図4に今回、解析モデルを構築したモータ駆動システムを示す。モータ駆動システムを想定した場合、電力変換器であるインバータから発生した電磁ノイズはインバータに接続される動力ケーブル、モータ、アース線、アース線が接続されるグラウンドや制御盤を伝搬し、例えば、制御機器とインバータ間の通信ケーブルにも伝搬する。このような製品使用環境での電磁ノイズの伝搬量を予測する方法として、ケーブル、アース線、制御盤、グラウンドのインピーダンスを等価回路化して回路解析を行う方法があるが、特に制御盤やグラウンドは電磁ノイズの分布が複雑であるため、等価回路モデルの作成に必要な工数が膨大になる。今回、制御盤とグラウンドは三次元電磁界解析で、ケーブルは伝送線路解析を用いたハイブリッド解析を行うことで、製品使用環境でインバータから通信線に伝搬するノイズ電流を予測できる解析モデルを構築した。この例では動力ケーブルから通信ケーブルに伝搬する電磁ノイズ量の予測を目的とし、ノイズ源にはインバータの代わりに信号発生器を使用した。また、動力ケーブルは非シールド、通信ケーブルはシールドケーブルである。

図5に動力ケーブルと通信ケーブルを伝搬するノイズ電流の解析値と実測値の比較を示している。通信ケーブルに伝搬するノイズ電流は動力ケーブルに比べては10～15dB程度小さくなる。これは信号発生器から発生した電磁ノイズが主に動力ケーブル、モータ、アース線、グラウンド、アース線、制御盤Aを伝搬しているが、一部、グラウ

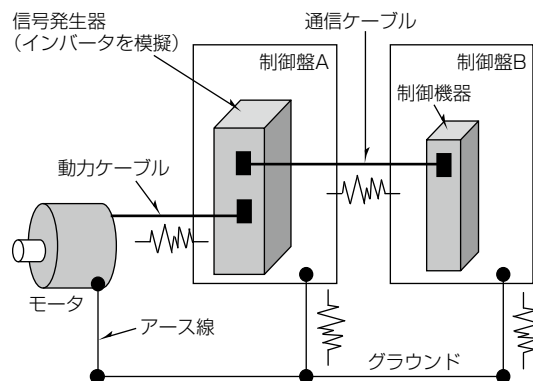


図4. 解析対象のモータ駆動システム

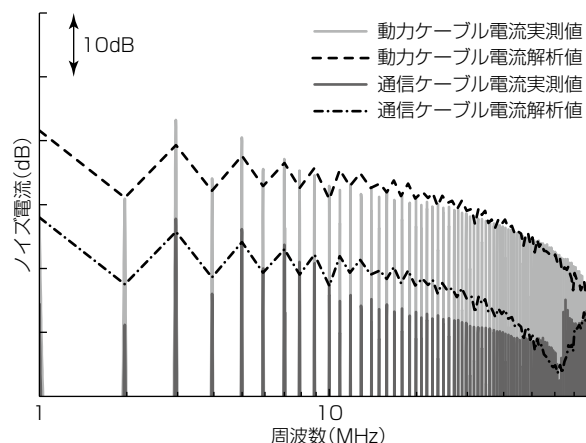


図5. ケーブルを伝搬するノイズ電流の解析値と実測値の比較

ンドで分流して制御盤B、通信ケーブルへと伝搬するためである。解析は、動力ケーブル、通信ケーブルの両電流を10dB以下の精度で再現できることを確認した。この解析モデルは2章で述べた電力変換器内部の電磁結合を考慮したモデルと組み合わせることで電力変換器から発生した後に周囲の通信ケーブルまで伝搬するノイズ電流の絶対値を予測することも可能になる。

4. アクティブノイズキャンセラ的设计技術

電力変換器の小型化を実現するためには、2章で述べたように部品間の電磁結合の影響を抑制する配置やシールド対策をするとともに、ノイズフィルタの性能を維持しつつ、小型化することも必要となる。一般的にノイズフィルタの性能と小型化はトレードオフの関係にある。今回、ノイズフィルタの性能と小型化を両立させる方法としてノイズフィルタの磁性体コアにノイズキャンセル回路を付加することでノイズフィルタを構成するコイルの性能を維持しつつ、小型化を実現するアクティブノイズキャンセラ的设计技術を開発した⁽⁵⁾。

図6にアクティブノイズキャンセラ回路を示す。アクティブノイズキャンセラは、①パワー半導体から発生した電磁ノイズを検出するための検出コイル、②検出した電磁

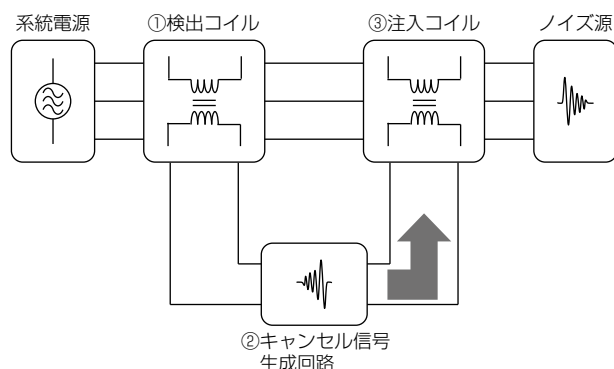


図6. アクティブノイズキャンセラ回路

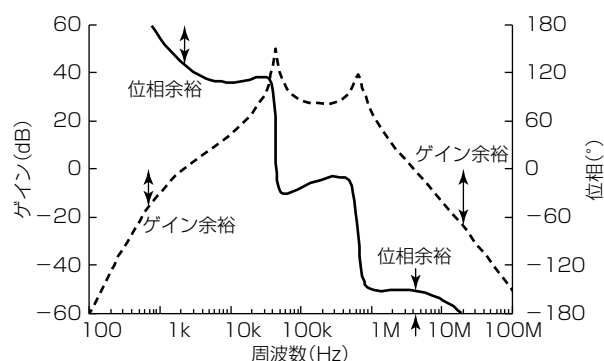


図7. 試作したアクティブノイズキャンセラの一巡伝達関数の実測結果

ノイズに対して逆位相となるキャンセル信号を生成するためのキャンセル信号生成回路、③生成したキャンセル信号を注入して電磁ノイズを低減させるための注入コイルから構成される。アクティブノイズキャンセラの設計手法として、①検出コイル→②キャンセル信号生成回路→③注入コイルの一巡伝達関数を評価し、ゲイン余裕と位相余裕を確保しながら、所望の帯域のゲインを増加させることで、負帰還安定度とノイズキャンセル効果の両立が可能になる。

図7に設計・試作したアクティブノイズキャンセラ一巡伝達関数の実測結果を示す。この例では150kHz～1MHzをノイズ低減のターゲット周波数として設計した。ターゲット周波数外の低周波帯域、高周波帯域共に十分なゲイン余裕と位相余裕を確保できており、安定な制御系を設計できたことが確認できる。アクティブノイズキャンセラをモータ駆動機器に適用した際のノイズ電流の実測結果を図8に示す。アクティブノイズキャンセラ回路を動作させることで、150kHzでコモンモードノイズ電流を40dB以上低減できることを確認できた。また、開発したアクティブノイズキャンセラは従来のノイズフィルタと比較して性能同等の場合に体積を1/5に低減できることを確認した。

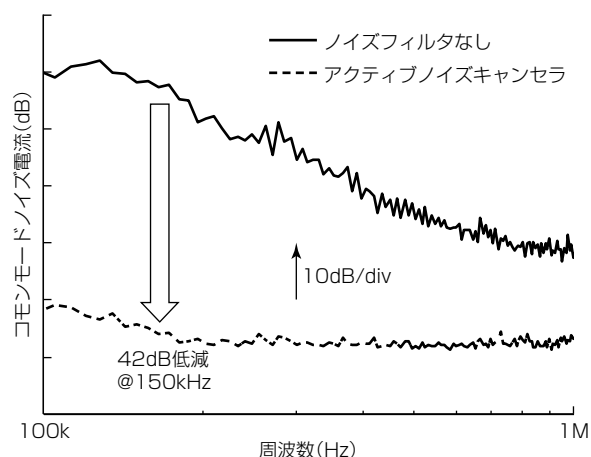


図8. アクティブノイズキャンセラ適用時のノイズ電流の実測結果

5. む す び

電力変換器から発生する電磁ノイズの伝搬量を予測するための技術として、電力変換器内部の電気部品の三次元モデル化によって、部品間の電磁結合の影響を考慮できるノイズ解析技術と機器に接続されるケーブル、負荷、制御盤等の製品使用環境の影響を考慮できるノイズ解析技術を開発した。また、電磁ノイズを検出してキャンセル信号を生成・注入することでノイズフィルタの性能と小型化を両立するアクティブノイズキャンセラの設計技術も開発した。今後、これらの技術の高度化と製品適用を進めて低ノイズな電力変換システムの構築に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 総務省：平成30年度版情報通信白書
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/
- (2) Takahashi, K., et al.: Mechanism of near-field coupling between noise source and EMI filter in power electronic converter and its required shielding, IEEE Trans. Electromagn. Compat. (2018)
- (3) Takahashi, K., et al.: Frequency domain simulation of conducted EMI in power electronic converters considering internal near field couplings by FEM, Proc. 2017 Int. Symp. Electromagn. Compat. (2017)
- (4) 三菱電機技術資料集「FA製品のシステム構築時におけるEMC設計ガイドライン」BQN-P0E100083
- (5) Molloy, S., et al.: A Fully-Isolated Robust Common-Mode Hybrid Filter, Proc. of the 10th Conference on Integrated Power Systems(CIPS) (2018)