



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

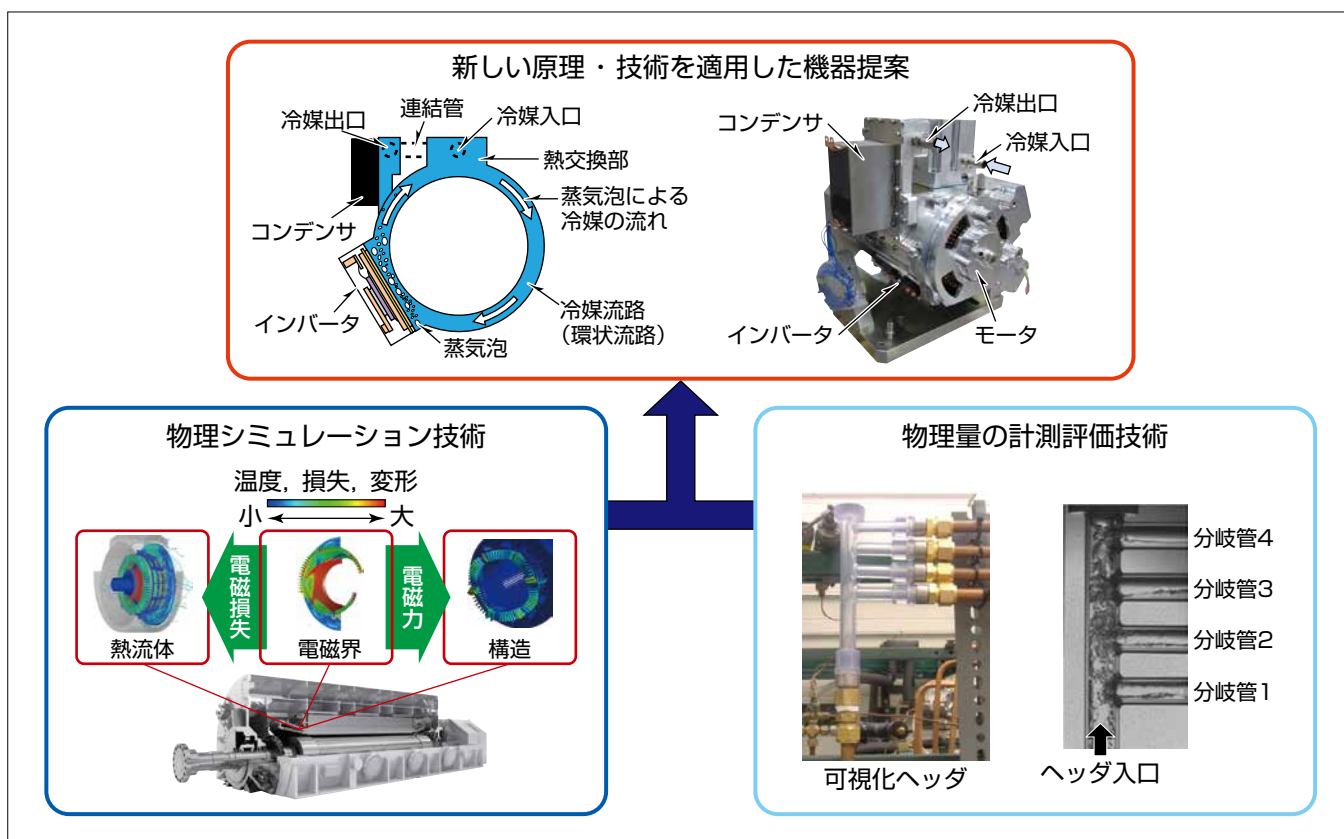
Akihiro Daikoku

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閉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

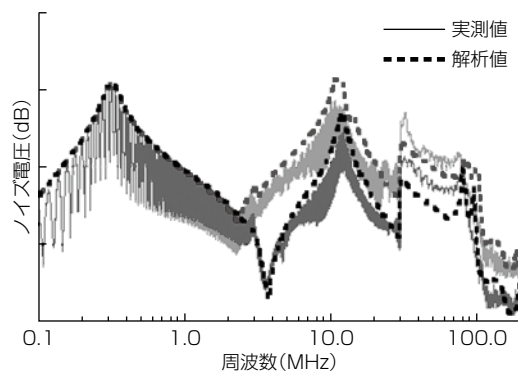


図1. 電磁結合有無でのノイズ電圧の解析値と実測値の比較

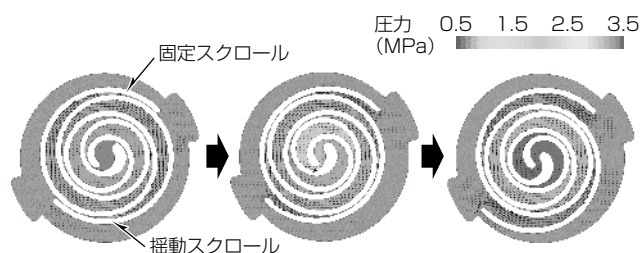


図2. 圧縮機構部の静圧分布の変化

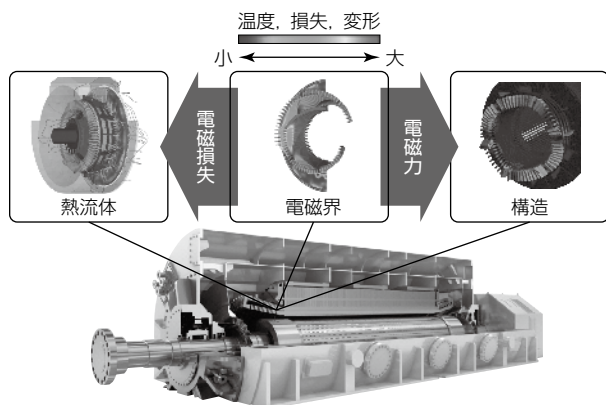


図3. 大規模連携解析技術適用イメージ

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

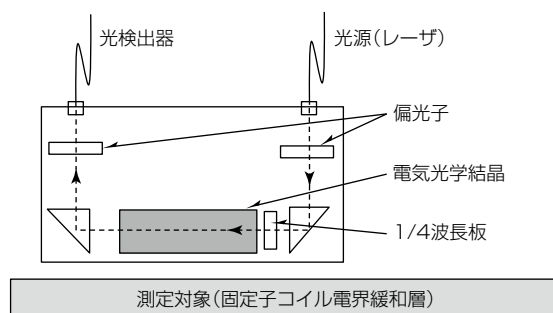


図4. 開発した表面電位計測システムの基本構成

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

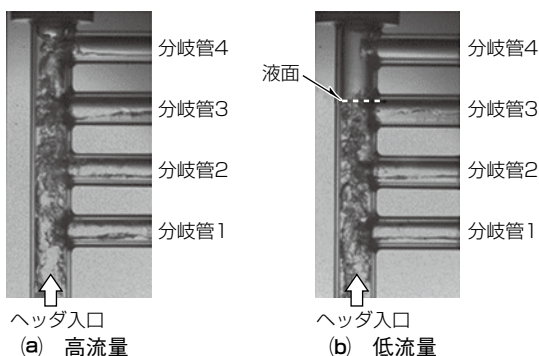


図5. 冷媒気液二相流の可視化結果

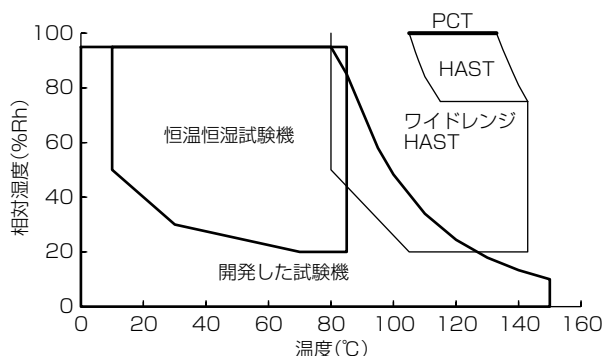


図6. 各種恒温恒湿試験装置の制御可能範囲

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

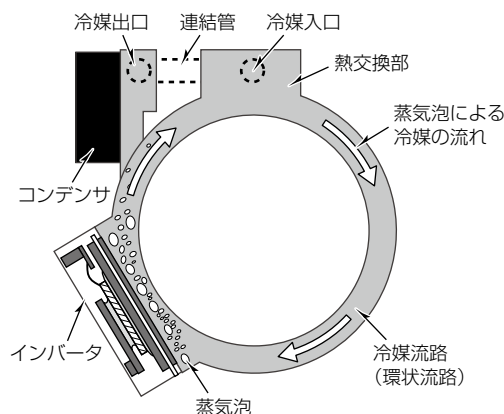


図7. 冷媒流路内の模式図

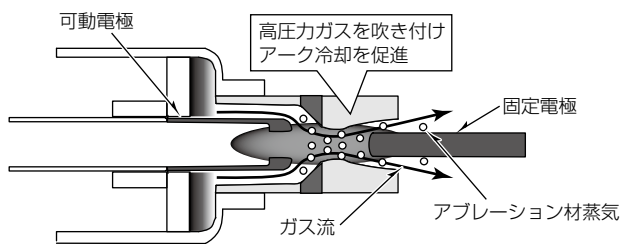


図8. アブレーション材料を適用した電流遮断

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、圧縮機の非定常油挙動評価技術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: 圧縮機の非定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)