



安井公治\*



岩崎隆至\*\*

# 製品を支える物理シミュレーション技術

## Physical Simulation Technology for Products

Koji Yasui, Takashi Iwasaki

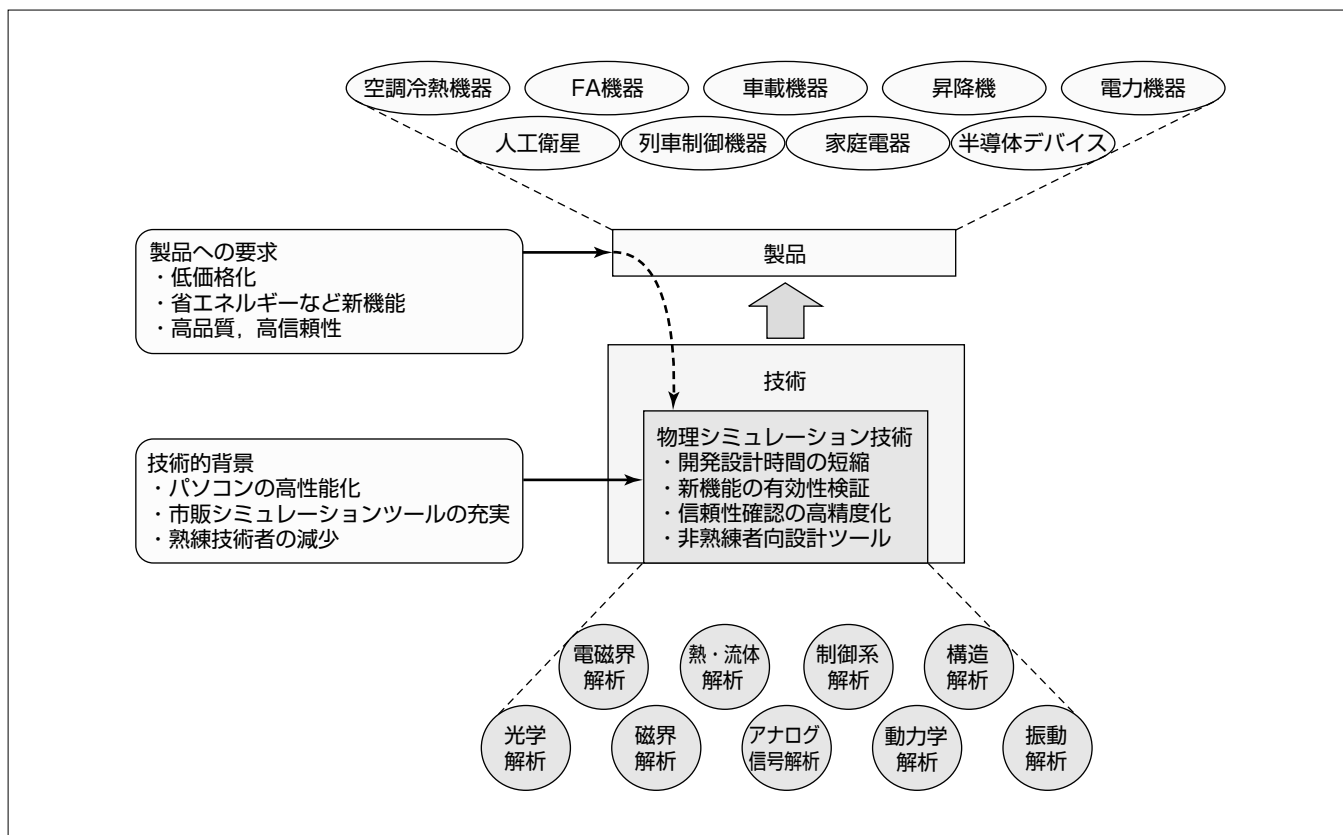
### 要旨

三菱電機の主要な製品には、物理現象に基づき所望の機能を実現するものが多い。具体的には、空調冷熱機器、FA(Factory Automation)機器、車載機器、昇降機、電力機器、人工衛星、列車制御機器から家庭電器、半導体・電子デバイスまで多くの製品が、電気、機械、熱などの物理現象に基づき動作する。これらの物理現象を把握し、製品設計に反映することが、機能・性能・品質の良好な製品を実現するためには不可欠である。物理シミュレーション技術は、この物理現象の把握の意味からその重要性を増してきた。

市場又は社会からの製品に対する要求には、低価格化、省エネルギー、高信頼性等がある。物理シミュレーション

技術を有効に活用することによって、開発設計時間の短縮、新機能の有効性検証、信頼性確認の高精度化が実現できるため、先に述べたの製品への要求に効率よく対応できる。一方、物理シミュレーション技術に対する技術的背景には、パソコンの高性能化、市販ツールの充実等がある。これによって、シミュレーションの高速化、高精度化が実現できるとともに、新たな展開として、シミュレーションにおける実データの利用及び連成解析といった最新技術が利用できるようになった。

本稿では、この特集号に掲載された論文を例に、これらの物理シミュレーション技術の活用例や最新技術の利用について述べる。



### 物理シミュレーション技術の位置づけ

物理シミュレーション技術は、製品を支える技術の根幹を成すものの1つであり、近年その重要性がますます増している。製品に対しては、市場又は社会からその時代に応じた製品への要求があり、これに対応するための新たな技術が物理シミュレーション技術による場合が多くなっている。逆に言うと、新たな製品への要求が、物理シミュレーション技術の進歩を促している(図中の点線)。一方、物理シミュレーション技術の進歩は、その時代の技術的背景にも支えられている。例えば、最も直接的な影響は、パソコンなど計算機能力の進歩である。これらの背景の下、物理シミュレーション技術の利用によって、開発設計時間の短縮、新機能の有効性検証、信頼性確認の高精度化、非熟練者向設計ツール等が実現されている。

## 1. ま え が き

当社の主要な製品には、物理現象に基づき所望の機能を実現するものが多い。空調冷熱機器、FA機器、車載機器、昇降機、電力機器、人工衛星、列車制御機器から家庭電器、半導体・電子デバイスまで多くの製品が、電気、機械、熱などの物理現象に基づき動作する。これらの物理現象を把握し、製品設計に反映することが、機能・性能・品質の良好な製品を実現するためには不可欠である。

この特集では、これらの製品開発時に、重要な役割を担う計算機上での物理シミュレーション技術について述べる。シミュレーションは、近年の計算機の発達に応じて、より高精度になり、複雑な対象への対応も可能になってきた。この特集の各論文では、最新のシミュレーション技術の様々な製品開発への貢献成果を示す。

本稿では、現在の製品開発におけるシミュレーションの重要性、最新技術の展開等について、この特集号の論文を例として述べる。

## 2. この特集号の論文

表1に、この特集号の論文で対象としている製品と適用したシミュレーション技術の一覧を示す。これらは、当社の製品開発で適用されているシミュレーション技術のごく一部ではあるが、主に先端技術総合研究所が各製作所とともに実際の製品開発に向けて適用したものであり、それぞれが物理現象のシミュレーションとして実用できる先端技術の例であると言える。

表1に示すように、今回対象とする製品は、人工衛星、タービン発電機、エレベーターなどの大型の製品から、パワー半導体などの小型のものまで多様なものが対象となる。また、適用されている物理シミュレーション技術も多様であり、その解析対象としては、構造解析、振動解析、磁界解析、電磁界解析、熱・流体解析、光学解析、制御系解析、動力学解析、アナログ動作解析などである。これらの解析対象は、それぞれの製品での機能の実現、問題の解決に不

表1. この特集号の対象製品とシミュレーション

対象製品	適用するシミュレーション
人工衛星	衛生姿勢変動シミュレーション
人工衛星	構造解析、振動解析
タービン発電機	FEMによる電磁振動解析
スマートメータ(電磁操作開閉器)	電磁界解析、電磁力と運動の連成解析
レーザ加工機(レーザ発振器)	ビームモード形成シミュレーション
数値制御装置(NC)	制御系、機械系動力学モデル
電動パワーステアリング	制御系、車両動力学モデル
磁石モータ	構造解析、磁界解析、モータ性能把握連成解析
プロペラファン(繊維強化樹脂製)	構造解析、構造最適化、樹脂流動予測連成解析
IHクッキングヒーター	電気回路解析、熱流体解析、熱・電磁界連成解析
エレベーター	ロープ動力学モデル、建物振動モデル
パワー半導体	半導体素子モデル、アナログ動作解析

FEM: Finite Element Method

可欠のものである。

人工衛星、タービン発電機やエレベーターといった大型の製品は、試験のための試作、確認にコストと時間が必要となるため、新機能や信頼性の評価のために運転データなど過去の知見に基づくシミュレーション技術の利用が期待されている。また、IH(Induction Heating)クッキングヒーターなどの家庭電器製品、レーザ加工機や数値制御装置等のFA機器、電動パワーステアリングなどの車載機器では、低コスト化のために効率のよい製品開発が要求されるとともに、競争環境の厳しさによって、性能だけでなく従来にはない新機能(例えば、省エネルギーなど)の追加も必要になっている。これらの製品分野では、シミュレーション技術による製品設計での効率化と多様な要求への対応が従来にも増して期待されている。

## 3. 物理シミュレーション技術の位置づけと効果

### 3.1 物理シミュレーション技術の位置づけ

図1は物理シミュレーション技術の位置づけを模式的に表したものである。製造業においては、より良い製品を提供することが命題であり、それを支えるための技術を保有しておく必要がある。物理シミュレーション技術は、製品を支える技術の根幹を成すものの1つであり、近年その重要性がますます増している。

製品に対しては、市場又は社会からその時代に応じた要求(例えば、2章で述べた省エネルギーなど)が発生する。これらの要求に対応するためには新たな技術が必要になり、近年ではその技術が物理シミュレーション技術である場合が多くなっている。逆の見方をすれば、新たな製品への要求が、物理シミュレーション技術の進歩を促しているとも言える(図1中の点線)。

一方、物理シミュレーション技術の進歩は、その時代の技術的背景にも支えられている。例えば、最も直接的な影響は、パソコンなど計算機能力の進歩である。

次の節からは、現状における製品への要求、技術的背景について整理し、これらに対応するための物理シミュレーション技術の利用について、この特集号の論文を例に述べる。

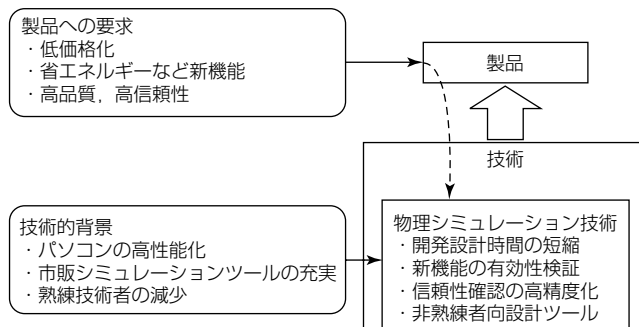


図1. 物理シミュレーション技術の位置づけ

### 3.2 製品への要求

2章で具体的な製品状況などを簡単に述べたが、一般的に製品への次のような要求が高まってきている。

#### ①低価格化

製品の低価格化は恒常的な要求である。このためには、製造コストの低減に向けた、限界設計による材料の削減や、製品開発期間短縮が必要である。

#### ②省エネルギー

近年、省エネルギーは、製品に対する社会からの主要な要求となった。このように、従来からの競争軸に加え、新しく多様な機能への要求が今後も生じると考えられる。

#### ③高品質、高信頼性

自動車や家電製品のリコール問題など製品の品質問題への注目が集まっており、従来にも増してあらゆる分野の製品について品質への要求が高まっている。

### 3.3 技術的背景

物理シミュレーション技術に影響を及ぼす技術的背景としては、以下のような項目が挙げられる。

#### ①パソコンの高性能化

パソコンの計算能力の発展は著しく、計算機上で行うシミュレーション技術は、その恩恵を直接的に受ける。計算時間短縮のほか、高精度の計算や、より複雑な構成のシミュレーションも実用できるようになってきた。

#### ②市販シミュレーションツールの充実

物理シミュレーションを行う場合、市販のシミュレーションツールを用いることがある。これは、一般的な解析を行う場合には、自らプログラムを作成するより、市販ツールの方が使いやすく高効率に解析が可能である。特に近年は、ユーザーが自らツールに機能を追加できるカスタマイズ機能の充実で、独自の解析にも対応可能になってきている。

#### ③熟練技術者の減少

技術の専門性が高まってきたため、開発されたシミュレーション技術を細部まで理解し使いこなせる技術者の不足が、問題となってきている。開発したシミュレーション技術のツール化が必要な場合が増加している。

### 3.4 物理シミュレーション技術による効果

3.2節、3.3節で述べた製品への要求、技術的背景から、物理シミュレーション技術を用いる効果について、この特集号の論文を例に述べる。

#### 3.4.1 開発設計時間短縮

低コストな製品実現のための開発期間短縮に有効な方法として、開発ステップを同時並行的に行うコンカレント的手法や実機試作回数低減が挙げられる。より高精度なシミュレーション、あるいはこれまでできなかったシミュレーションによって、解析結果の精度を上げることができれば、試作回数削減につながる。

電磁操作開閉器では、その基本性能として安定的なON/OFF動作とその状態の維持がある。これまで、ON/OFF動作の定量的把握は困難であったが、電磁力解析と開閉器のON/OFF動作の運動解析をあわせたシミュレーション技術を開発することによってこの課題を解決し、設計段階での最適化による開発効率化を実現した(図2)<sup>(4)</sup>。

これ以外にも、NCの運動制御系における新しい機械振動の抑制方式の提案と制御系シミュレーションによる事前のパラメータ設定<sup>(6)</sup>、パワー半導体における半導体素子の物理モデルを用いたシミュレーションによるスイッチング波形解析や損失評価の高精度事前予測<sup>(12)</sup>等が、実機検証時間短縮の例として挙げることができる。

#### 3.4.2 新機能の有効性検証

これまでにも新機能開発は重要な課題であったが、省エネルギー、使いやすさ、安全性等の従来主要な競争軸になりにくかった項目が、社会の価値観の変化によって注目を集めるようになってきている。それらに対応していく場合にも、シミュレーション技術は重要性を増している。

自動車では以前にも増して安全性への注目が増している。電動パワーステアリングは運転者のハンドル操作力を軽減する装置であるが、ハンドル操作可能なモータを備えているため、それを用いて自動車に横風のような横外乱が加わった場合でも、ハンドルが振られないように補償する機能を開発した。この機能開発において、提案方式の有効性確認を、自動車の動特性モデルを用いたシミュレーションによって確認している(図3)<sup>(7)</sup>。

その他、IHクッキングヒーターでの対流煮込み過熱を電磁界解析及び熱流体解析によるシミュレーションで有用

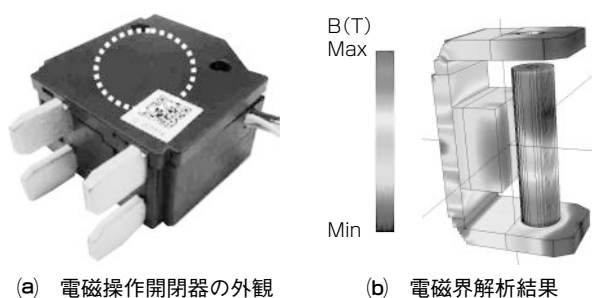


図2. 電磁操作開閉器と解析結果

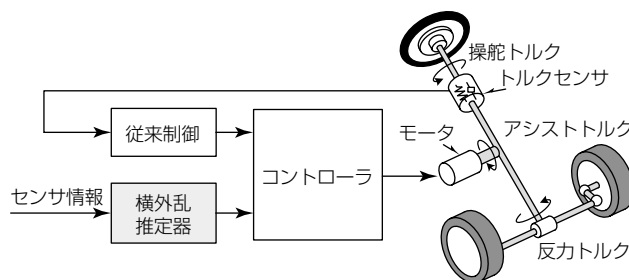


図3. 電動パワーステアリングの横外乱補償

性を検討したもの<sup>(10)</sup>、地震による長周期振動に対するエレベーターロープの振動発生をシミュレーションで再現しその対策を検討したもの<sup>(11)</sup>、衛星基本設計段階における人工衛星の広帯域姿勢決定系の有効性を検証したもの<sup>(1)</sup>などが新機能検証として挙げられる。

### 3.4.3 信頼性確認の高精度化

製品設計を行う場合、信頼性評価は最も重要な検討項目である。したがって、物理シミュレーション技術を製品設計に使用する場合は、信頼性評価にも利用する機会が多い。物理シミュレーションの高精度化によって、設計段階での信頼性評価が強化でき、実験的な信頼性評価の負担を軽減できる。

例えば、繊維強化樹脂を用いたプロペラファンにおいて、繊維の流れを解析的に予測する方法を新たに開発し、その結果を用いてファンの剛性を精度よく推定するシミュレーションを実現した(図4)<sup>(9)</sup>。これによって、設計段階で、信頼性を確保しながらファンの軽量化、高剛性化を図る限界設計が可能となった。

直接的に信頼性評価を目的とした例として、ロケット打ち上げ時の音響振動に対し人工衛星の信頼性評価を行うシステム<sup>(2)</sup>や、タービン発電機の信頼性確保に不可欠な固定子の共振回避設計ツール<sup>(3)</sup>がある。

### 3.4.4 非熟練者向設計ツール

製品設計において高機能化や限界設計が進むと、それを支える技術は高度で多岐にわたる。そのため、設計技術者に要求される知識や熟練性の範囲も広がるが、この要求への対応は現実には難しい。そこで、熟練度が低くても使用可能なツールを開発し、設計技術者の負担を軽減することが考えられる。特に、3.4.3項で述べた信頼性確認の分野では、製品ごとに同様の計算をパラメータを変えて行う必要があることから、このようなツールの有用性が高いといえる。

人工衛星がロケット打ち上げ時に受ける音響振動に対する汎用的な振動解析システムJANET(JAXA Acoustic analysis NETwork)が運用されている<sup>(2)</sup>。このツールは(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)への申請によって宇宙機の設計者ならだれでも使用できるもので、これを用いる

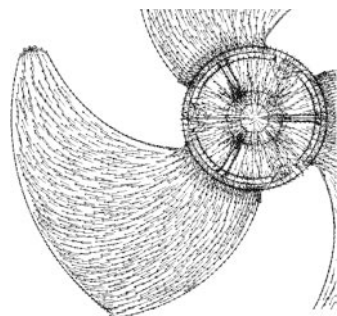


図4. プロペラファンの繊維流れ解析結果

ことによって、従来の音響試験による試行錯誤的設計を避けることができ、開発期間の短縮が図れるシステムとなっている。

また、タービン発電機の設計において、発電時に電磁振動が固定子のコイルエンドに加わるため、コイルエンドの固有振動数を電磁振動周波数と一致させない共振回避設計が不可欠である。固定子コイルエンドの構造が複雑なため、有限要素法による解析には熟練が必要であったが、これを自動的に行うツールを開発した<sup>(3)</sup>。このツールは有限要素法に対する熟練は必要なく、構造変更などのパラメータスタディを迅速に行える。

## 4. 物理シミュレーションにおける最新技術

この章では、物理シミュレーション技術における最近の方向性として、シミュレーションにおける実データの利用及び連成解析について述べる。これらが可能になった背景には、計算機能力の向上とともに、市販のシミュレーションツールがカスタマイズ機能を充実させ、シミュレーション使用者が様々な工夫を行えるようになったことも影響していると考えられる。

### (1) シミュレーションにおける実データの利用

シミュレーションは元来計算機上で実世界と同等の現象を得ることを目的としている。しかし、より高精度なシミュレーションが必要になるに従い、計算機上では再現困難な事象も正確に扱う必要が生じてきた。このために、部分的に実世界のデータを利用したシミュレーションが行われている。

具体的にこの特集号では、人工衛星の音響振動評価システムにおける音響試験データの利用<sup>(2)</sup>、モータ磁気設計における応力と磁気特性を関係付けるデータの利用<sup>(8)</sup>、エレベーターロープシミュレーションにおける地震波形の利用<sup>(11)</sup>等が挙げられる。

### (2) 連成解析

通常の物理シミュレーションは、振動、熱、電磁界など特定の物理量に着目したものである。しかし、システムとしての製品全体のふるまいを把握する場合、複数の物理量を扱う必要がある場合が多い。連成解析とは、複数の物理シミュレーション間でデータを受渡することによって、目的とするシステム全体の挙動を把握する技術である。

この特集号では、電磁操作開閉器における電磁力とアクチュエータ運動の連成解析<sup>(4)</sup>、モータ磁気設計における構造と磁界の連成解析<sup>(8)</sup>、繊維強化樹脂ファンにおける構造と樹脂流動予測の連成解析<sup>(9)</sup>、IHクッキングヒーターにおける熱、電磁界、流体の連成解析<sup>(10)</sup>がある。

これらの2項目を含んだ解析の具体例として、永久磁石モータの性能予測について述べる<sup>(8)</sup>。モータ開発においては、設計時に量産時のモータ特性を正確に把握できれば大

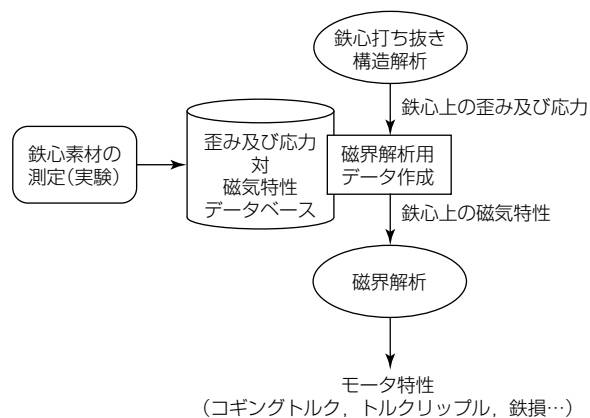


図5. モータ磁気設計技術のフロー

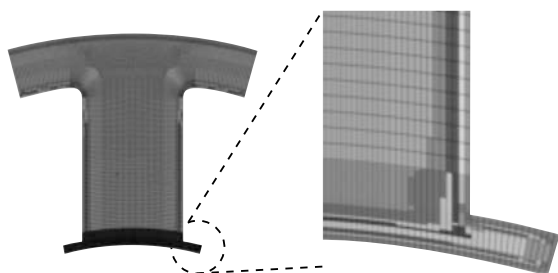


図6. 磁界解析

幅な開発効率化につながる。これまで、電磁鋼板を用いたモータでは、鋼板打ち抜き時に発生する歪(ひず)みや応力による特性劣化を解析的に求めることが困難であった。そこで、まず、実験によって打ち抜き時に発生する歪み及び応力と磁気特性との関係を表すデータベースを作成した。シミュレーションとしては、まず打ち抜き後に鋼板上に残る歪と応力を求める構造解析を行い、その出力をデータベースをもとに鋼板上の磁気特性に変換し、次にその磁気特性を用いて磁界解析によってモータ特性を求めた(図5, 図6)。これによって、従来把握できなかった特性劣化も事前に把握できるようになり、開発効率化に貢献できている。ここで開発した技術は、実データの利用と連成解析を巧みに応用した具体例と言える。

### 5. む す び

この特集号では、当社の様々な製品に適用されている物理シミュレーション技術についての論文を掲載した。製品の動作は実世界での物理現象に基づいているため、最終的には実物での検証が不可欠である。しかし、物理シミュレーション技術の発達によって、設計から評価段階までバーチャルな計算機上で行える範囲が増えており、開発期間短

縮に大きな効果があることから、今後もその傾向は続いていくと考えられる。ここで留意すべき点は、バーチャルな世界が実物での現象と乖離(かいり)しないような確認を怠らないことであり、この特集号の論文ではこの確認を着実に実施している。最後に、この特集号が少しでも読者の参考になれば幸いである。

### 参 考 文 献

- (1) 島 岳也, ほか: 人工衛星の広帯域姿勢決定, 三菱電機技報, **85**, No.7, 385~388 (2011)
- (2) 吉田佳子, ほか: ロケット打上げ時の人工衛星音響振動評価システム, 三菱電機技報, **85**, No.7, 389~392 (2011)
- (3) 田宮洋一: タービン発電機固定子コイルエンドの固有振動数計算ツール, 三菱電機技報, **85**, No.7, 393~396 (2011)
- (4) 蓑田強平, ほか: スマートメータ用電磁操作開閉器への電磁界・運動連成シミュレーションの適用, 三菱電機技報, **85**, No.7, 397~400 (2011)
- (5) 西前順一, ほか: 先端レーザ加工機を支えるシミュレーション技術, 三菱電機技報, **85**, No.7, 401~404 (2011)
- (6) 長岡弘太郎: NC制御機能開発におけるシミュレーション技術の活用, 三菱電機技報, **85**, No.7, 405~408 (2011)
- (7) 北野弘明, ほか: 電動パワーステアリングを用いた横外乱推定及び直進制御, 三菱電機技報, **85**, No.7, 409~412 (2011)
- (8) 山口信一, ほか: 鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮したモータ磁気設計技術, 三菱電機技報, **85**, No.7, 413~416 (2011)
- (9) 坂本博夫, ほか: 繊維強化樹脂の流動方向予測と構造解析, 三菱電機技報, **85**, No.7, 417~420 (2011)
- (10) 下畑賢司, ほか: IHクッキングヒーター開発への熱・電磁界連成解析技術の適用, 三菱電機技報, **85**, No.7, 421~424 (2011)
- (11) 渡辺誠治, ほか: 高速エレベーターのロープシミュレーション技術, 三菱電機技報, **85**, No.7, 425~428 (2011)
- (12) 富永真志, ほか: パワー半導体素子のモデル化と動作特性解析, 三菱電機技報, **85**, No.7, 429~432 (2011)