

MITSUBISHI
Changes for the Better

家庭から宇宙まで、エコチェンジ



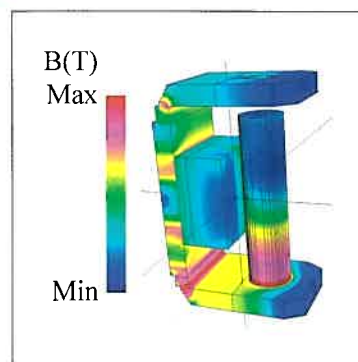
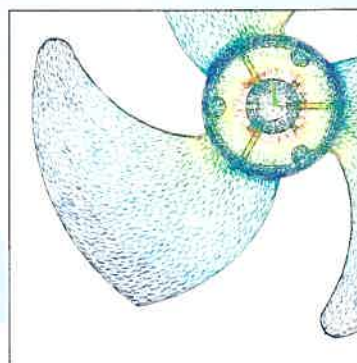
三菱電機技報

7

2011

Vol.85 No.7

特集 「製品を支える物理シミュレーション技術」



目 次

特集「製品を支える物理シミュレーション技術」

物理シミュレーションの超越	1
中村仁彦	
製品を支える物理シミュレーション技術	2
安井公治・岩崎隆至	
人工衛星の広帯域姿勢決定	7
島 岳也・藤井悠太	
ロケット打上げ時の人工衛星音響振動評価システム	11
吉田佳子・世古博巳・佐々野 浩・施 勲忠・安藤成将	
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	15
田宮洋一	
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	19
森田強平・小倉健太郎・小林哲也	
先端レーザ加工機を支えるシミュレーション技術	23
西前順一・山本達也・藤川周一	
NC制御機能開発におけるシミュレーション技術の活用	27
長岡弘太郎	
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	31
北野弘明・栗重正彦・松永隆徳	
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	35
山口信一・大穀晃裕・谷 良浩・田中敏則・藤野千代	
繊維強化樹脂の流動方向予測と構造解析	39
坂本博夫・馬場智子・青木普道	
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	43
下畑賢司・稲口 隆	
高速エレベーターのロープシミュレーション技術	47
渡辺誠治・東中恒裕	
パワー半導体素子のモデル化と動作特性解析	51
富永真志・堀口剛司・漆畑廣明・木ノ内伸一・大井健史	

Physical Simulation Technology for Products

Transcendental Physical Simulation

Yoshihiko Nakamura

Physical Simulation Technology for Products

Koji Yasui, Takashi Iwasaki

Spacecraft Attitude Determination Using High-bandwidth Angular Rate Sensors

Takeya Shima, Yuta Fujii

Acoustically Induced Random Vibration Analysis System for Artificial Satellites

Keiko Yoshida, Hiromi Seko, Hiroshi Sasano, Qinzhong Shi, Shigemasa Ando

Natural Frequency Calculation Tool of Turbo-generator Stator Coil End

Yoichi Tamiya

Application of Coupled Simulation of Electromagnetic Field and Motion to Electromagnetically Actuated Relay for Smart Meter

Kyohei Minoda, Kentarou Kokura, Tetsuya Kobayashi

Simulation Technology for Advanced Laser Processing System

Junichi Nishimae, Tatsuya Yamamoto, Shuichi Fujikawa

Applying of Simulation Technology to Development of Control Function for NC System

Kotaro Nagaoka

An Assist Control Method for Lateral Disturbance Using an Electric Power Steering

Hiroaki Kitano, Masahiko Kurishige, Takanori Matsunaga

Motor Design Technologies Considering Deteriorated Magnetic Properties in Magnetic Core Due to Stamping

Shinichi Yamaguchi, Akihiro Daikoku, Yoshihiro Tani, Toshinori Tanaka, Chiyo Fujino

Prediction of Flow Direction by Thermal Analysis and Coupling with Structural Analysis in FRP

Hiroo Sakamoto, Satoko Baba, Hiromichi Aoki

Application of Coupled Analysis of Thermal and Electromagnetic Field to Development of IH Cooking Heaters

Kenji Shimohata, Takashi Inaguchi

Rope Simulation Technology for High Speed Elevator

Seiji Watanabe, Tsunehiro Higashinaka

Modeling and Characteristics Analysis of Power Semiconductor Devices

Shinji Tominaga, Takeshi Horiguchi, Hiroaki Urushibata, Shinichi Kinouchi, Takeshi Oi

特許と新案

「運転支援装置」「ユーザインタフェース設計装置」	55
「ウェブアプリケーション検査装置」	56

表紙：物理シミュレーション

三菱電機の主要な製品には、物理現象に基づいて所望の機能を実現するものが多い。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、これらの製品を支える技術の根幹を成すものの一つであり、近年その重要性がますます増している。

写真は、本特集号で紹介している物理シミュレーション結果の例であり、それぞれ、①ビームモード形成シミュレーションによるCO₂レーザ発振器のビーム形状、②繊維強化樹脂の流動方向を予測するための過渡熱解析結果、③小型電磁アクチュエータの電磁界解析結果である。



巻/頭/言

物理シミュレーションの超越

Transcendental Physical Simulation

中村仁彦

Yoshihiko Nakamura



物理シミュレーションの意味するところは微視から巨視への展開にある。微分方程式で表される微視的なモデルを長い時間や大きな空間で解いていくと、意外な全体像が見えてくる。直感が想像したとおりの全体像が見えてくるときには、直感の正しさを教える。

物理シミュレーションはわれわれの認知能力を補うツールでもある。流体の偏微分方程式を、海底の地形、地球の運動、海水の温度分布等の条件のもとで解いていくと、地球規模の水圏の様相が見えてくる。大気の様相と海流とは相互にかかわり地球規模の気圏の様相を与え気候変動の予測を可能にする。地球表面の地殻変動を岩盤のせめぎ合いであらわすプレート・テクトニクスは、岩石圏の様相を与える。陸地部では地震のシミュレーションを可能にし、海底の岩盤の変動と海水の挙動を連成させると津波のシミュレーションが可能になる。物理シミュレーションは微視的モデルと境界条件からの帰結であり、何も付け加えない。しかし、われわれの理解はそのままでは巨視的な世界に至らないのである。シミュレーションは、日常の我々の経験的認識を超越した“神の視野”ともいえる巨視的世界を、経験的認識の人の視野の中にもたらすのである。

微視的な物理現象は基礎的な微分方程式で表されることが多い。巨視の様相を求めてこれを解いていくところにシミュレーションの困難がある。わずかな数値の誤差が計算結果に大きな違いを与えることがある。いわゆる“バタフライ効果”とよばれるものである。エドワード・ローレンツの1972年の講演でブラジルでの蝶(ちょう)の羽ばたきがテキサスで竜巻を引き起こす可能性を、予測不可能性の例として言ったものである。これは計算モデルが発散的な性質を持っているときに起こる。一方で、東太平洋のペルー沖の海水温度が12月ごろに上昇するいわゆる“エルニーニ

ョ現象”は気圏の様相に大きな変化を与える地球規模の気候変動の兆候として捉えられており、そのシミュレーションは精度を上げつつある。いずれも“風が吹けば桶屋が儲(もう)かる”ような意外性があるが別物である。物理シミュレーションの結果に意外性が発見された場合に、計算不可能性によるものなのか計算の当然の帰結なのかの判断は大規模な物理シミュレーションにつきまとう問題である。

個の人の運動や行動を物理シミュレーションする研究分野も広がっている。人の筋骨格的モデルを物理シミュレーションとして微分方程式で解いて解析するバイオメカニクスの研究については、ロボットの力学・運動学の計算論にもとづいて近年大きく発展してきている。平成23年度から始まった文部科学省の“次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム”の“(分野1)予測する生命科学・医療および創薬基盤”では「予測医療に向けて、神経系から身体力学系までを含めた人の行動シミュレーションの研究」を東京大学と沖縄科学技術大学が共同で始めており、筆者らもこれに参加している。人の神経系と身体系を含む大規模計算を、次世代スーパーコンピュータを用いて行う研究である。

物理シミュレーションが人の神経系の活動を模擬して行動の予測に結びつけられれば、神経疾患と運動や行動の変化などの関係を明らかにすることができる。また、身体と結びついた神経系の挙動の解析は人の認知過程の解明にもつながるだろう。長い道のりの研究のはじまりにしかすぎない。しかし、物理シミュレーションの力を借りて、われわれの認知能力を補い、われわれの認知過程を捉えようとする研究の第一歩と考えれば心が踊ってくる。

物理シミュレーションは超越した先で、どんな全体像を見せてくれるのだろうか。

製品を支える物理シミュレーション技術



安井公治*



岩崎隆至**

Physical Simulation Technology for Products

Koji Yasui, Takashi Iwasaki

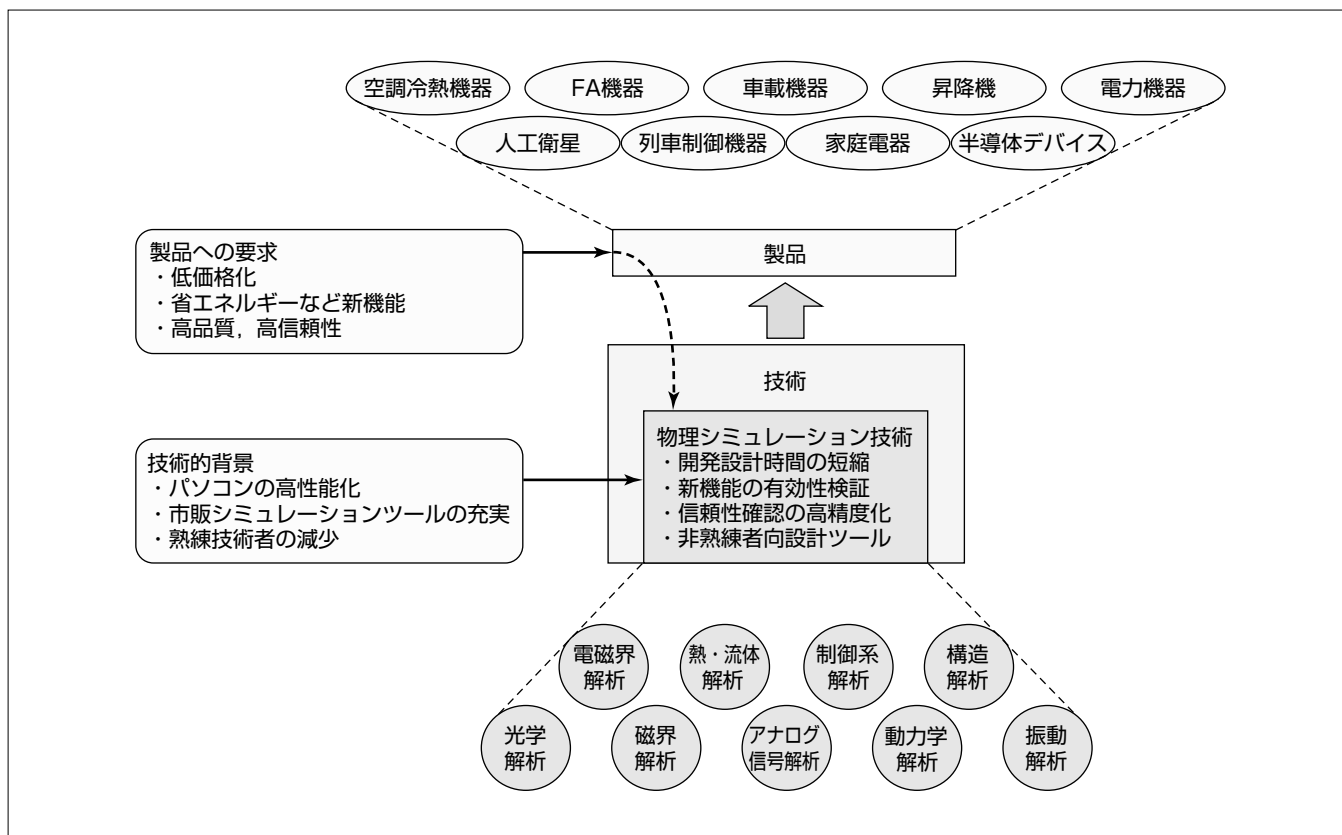
要 旨

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。

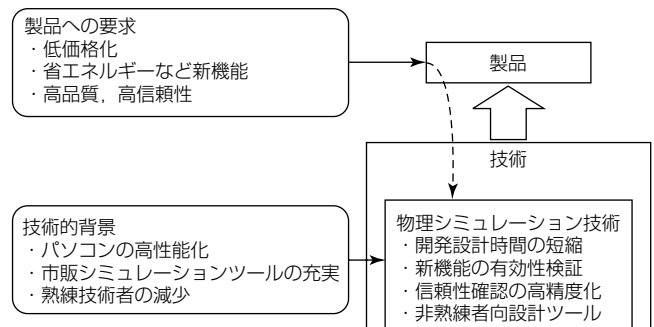


図1. 物理シミュレーション技術の位置づけ

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なのである。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)⁽⁴⁾。

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⁽⁶⁾、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⁽¹²⁾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)⁽⁷⁾。

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

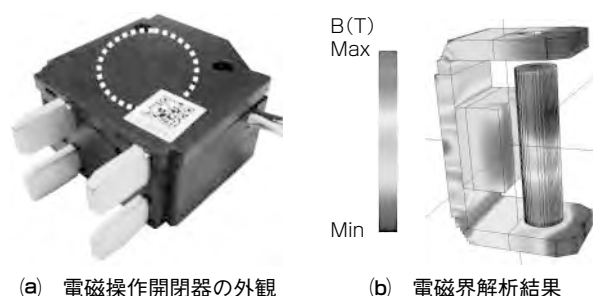


図2. 電磁操作開閉器と解析結果

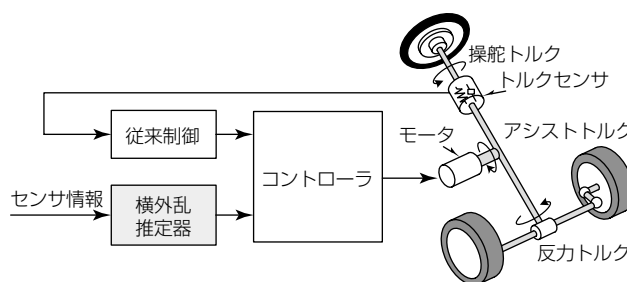


図3. 電動パワーステアリングの横外乱補償

性を検討したもの⁽¹⁰⁾、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⁽¹¹⁾、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⁽¹⁾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)⁽⁹⁾。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⁽²⁾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⁽³⁾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⁽²⁾。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

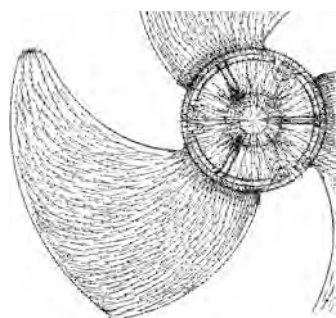


図4. プロペラファンの繊維流れ解析結果

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⁽³⁾。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⁽²⁾、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⁽⁸⁾、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⁽¹¹⁾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しすることによって、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⁽⁴⁾、モータ磁気設計における構造と磁界の連成解析⁽⁸⁾、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⁽⁹⁾、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⁽¹⁰⁾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⁽⁸⁾。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

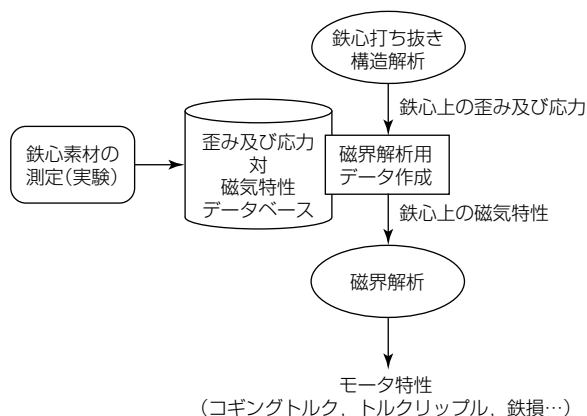


図 5. モータ磁気設計技術のフロー

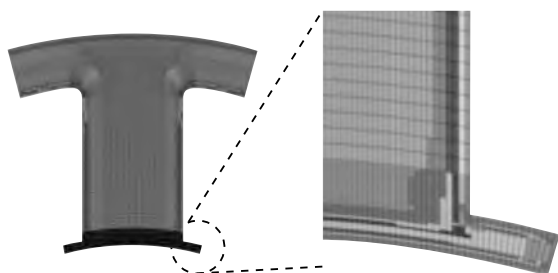


図 6. 磁界解析

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) 袁田強平, 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)

人工衛星の広帯域姿勢決定

島 岳也*
藤井悠太**

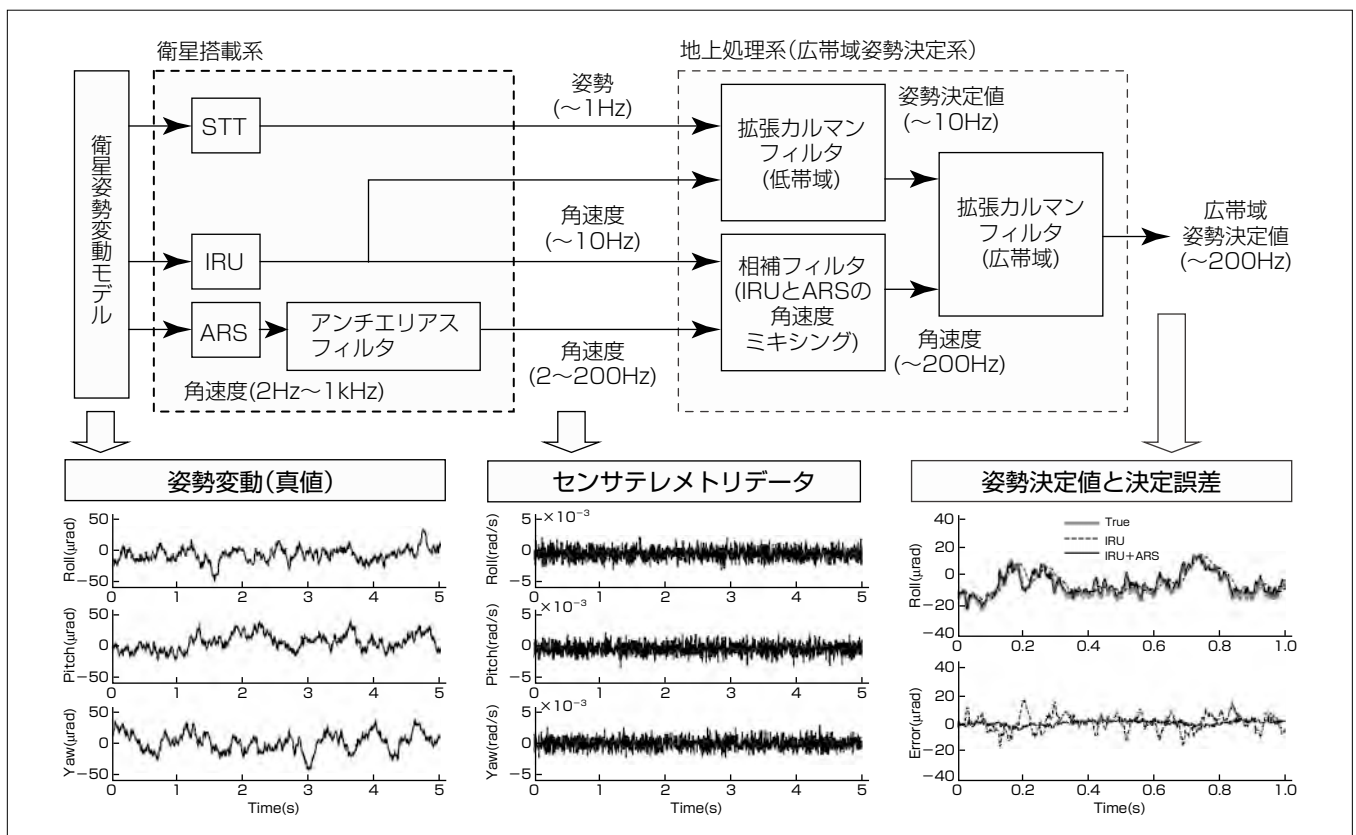
Spacecraft Attitude Determination Using High-bandwidth Angular Rate Sensors

Takeya Shima, Yuta Fujii

要 旨

人工衛星に搭載した観測センサを用いて、高品質な観測画像を生成する際には、観測センサの指向方向を高精度に決定し、地表面上での観測点の位置決めを行い、これをもとに画像幾何補正などの種々の補正処理が実施される。観測センサの指向方向決定のためには、それを搭載した人工衛星の姿勢決定が必要となるが、これは通常、衛星搭載センサデータを地上に取得し、拡張カルマンフィルタなどを用いたオフライン処理によって高精度に決定される。しかし、近年、地球観測衛星や天文観測衛星等における画像分解能要求の飛躍的な高まりを背景として、これまで姿勢決定の対象ではなかった衛星姿勢変動の中・高周波成分の取得画像への影響が問題となってきた。

そこで観測帯域の異なる複数のセンサを衛星に搭載し、これらのセンサデータを用いた信号処理によって、従来の姿勢決定系の観測帯域を超える広帯域姿勢決定について検討を行った。また開発した広帯域姿勢決定系の有効性を検証するために、軌道上の衛星姿勢変動モデルを用いた数値シミュレーションを実施した。まず衛星姿勢変動モデルと各センサの観測モデルを用いて、衛星姿勢決定で用いる各センサのテレメトリデータ(衛星姿勢と角速度の時系列データ)を模擬生成する。これを用いて姿勢決定シミュレーションを実施し、姿勢決定帯域及び姿勢決定精度の評価を行った。これによって、衛星基本設計段階で、開発した広帯域姿勢決定系の有効性を検証することができた。



広帯域姿勢決定系と姿勢決定シミュレーションの一例

広帯域姿勢決定のために、人工衛星には従来搭載センサの姿勢センサ(STT: STar Tracker, 帯域~1Hz程度)と角速度センサ(IRU: Inertial Reference Unit, 帯域~10Hz程度)に加え、高周波角速度センサ(ARS: Angular Rate Sensor, 帯域2Hz~1kHz程度)を搭載する。異なる観測帯域をもつこれらのセンサデータを組み合わせた信号処理によって、広帯域の姿勢決定値を得る。開発した広帯域姿勢決定系の有効性を検証するために、軌道上の衛星姿勢変動を模擬した数値シミュレーションを実施した。広帯域姿勢決定系(実線)では、従来の低帯域姿勢決定系(破線)に比べて、より姿勢決定誤差の低減が図られているのが確認できる。

1. ま え が き

人工衛星に搭載した観測センサを用いて、高品質な観測画像を生成する際には、観測センサの指向方向を高精度に決定し、地表面上での観測点の位置決めを行い、これをもとに画像幾何補正などの種々の補正処理が実施される。観測センサの指向方向決定のためには、それを搭載した人工衛星の姿勢決定が必要となるが、これは通常、衛星搭載センサデータを地上に取得し、拡張カルマンフィルタなどを用いたオフライン処理によって高精度に決定される⁽¹⁾。

一般に人工衛星の姿勢は、衛星搭載機器が発生する擾乱(じょうらん)によって、低周波から高周波にわたって広帯域に姿勢変動している。近年の地球観測衛星などにおける画像分解能要求の飛躍的な高まりを背景として、これまで姿勢決定の対象ではなかった衛星姿勢変動の中・高周波成分の取得画像への影響が問題となってきた。

これを受け、従来の姿勢決定帯域を超える広帯域姿勢決定系について検討を行った。広帯域姿勢決定で問題となるのは、宇宙空間で利用可能な広観測帯域をもつジッタセンサ(角度センサや角速度センサ)が存在しないことである。そこで異なる観測帯域をもつ複数のセンサを組み合わせ、広帯域姿勢決定系を構成し、軌道上の衛星姿勢変動を模擬した数値シミュレーションによって、姿勢決定精度の評価を行い、広帯域姿勢決定系の有効性を検証した。

2. 広帯域姿勢決定系

2.1 衛星搭載センサの特性

衛星姿勢決定のためのセンサとして、通常、衛星本体にはIRU等の三軸角速度センサが搭載される。IRUの入力角速度から出力角速度までの伝達特性は、二次のローパス特性でモデル化され、その観測帯域は10Hz程度である。図1(a)はIRUの角速度観測特性モデル(ゲイン特性と位相特性)の一例を示したものである。これよりIRU単体では10Hz程度までの姿勢変動しか観測できず、数十から数百Hz程度の中・高周波の姿勢変動は観測できない。

IRUより高い観測帯域をもつジッタセンサとして、高周波姿勢変動を観測可能なADS(Angular Displacement Sensor)や、高周波角速度を観測可能なARSがある⁽²⁾。ADSやARSの入出力伝達特性はバンドパス特性でモデル化され、その観測帯域は2Hzから1kHz程度である。図1(b)はARSの角速度観測特性モデルの一例を示したものである。図から分かるようにDC(Direct Current)成分を含む低周波の角速度は観測できないが、IRUでは観測できない10Hz以上の中・高周波の角速度は観測が可能である。

2.2 姿勢決定フィルタの構成

図1に示したセンサ伝達特性から、IRUとARSによる角速度観測値を補完的に用いることで、IRU単体では得られ

ない広帯域の角速度の観測が可能となる。すなわちDCから低周波域をIRU、中・高周波域をARSで受け持つことによって、DCから高周波までの広帯域にわたって角速度を観測できる。この広帯域角速度を用いることによって、従来の姿勢決定フィルタでは得られない、広帯域の姿勢決定値を得ることができる。

図2に広帯域姿勢決定系の全体像を示す。衛星本体には、従来の搭載センサであるSTTなどの姿勢センサとIRUなどの低帯域角速度センサに加え、高周波角速度センサARSを搭載する。またARSの高周波サンプリングによるエイリアシングの影響を抑えるために、アンチエイリアスフィルタも実装される。

IRUとARSによって観測された角速度をミキシングして広帯域角速度を生成するブロックが、図2における相補フィルタである。相補フィルタでは、まずARSのアンチエイリアスフィルタによる位相遅れ補償を実施する。これは、衛星に実装したアンチエイリアスフィルタと同じ特性をもつデジタルフィルタを時間逆向きに適用することで可能となる。次にIRUとARSによる角速度観測値のミキシングであるが、図1のセンサ観測特性に示すように、両センサは重複した観測帯域をもっている。したがって高精度姿勢決定のためには、ミキシングによって角速度観測特性(ゲイン特性と位相特性)を歪(ひず)ませないことが重要である。相補フィルタの設計パラメータは、位相遅れ補償後の

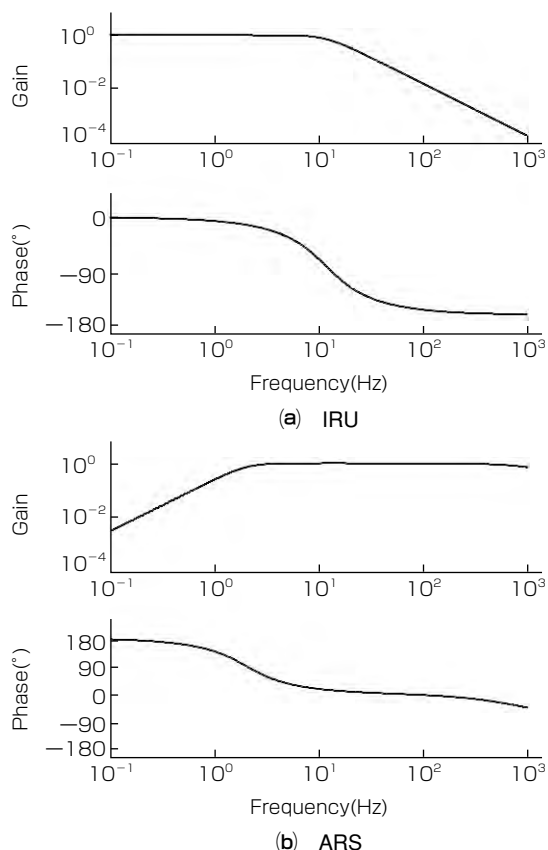


図1. IRUとARSの角速度観測特性モデル

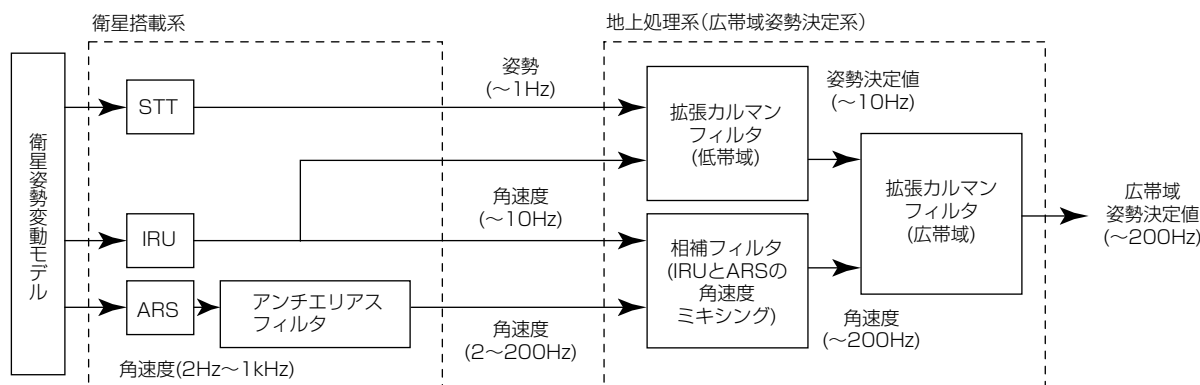


図 2. 広帯域姿勢決定系の全体像

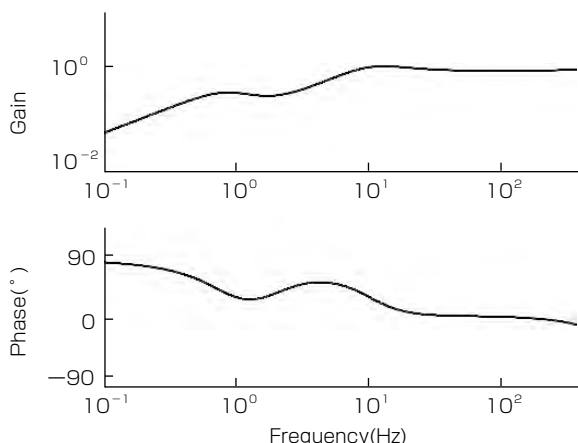


図 3. ARSの角速度観測値に乗じる周波数重みの特性

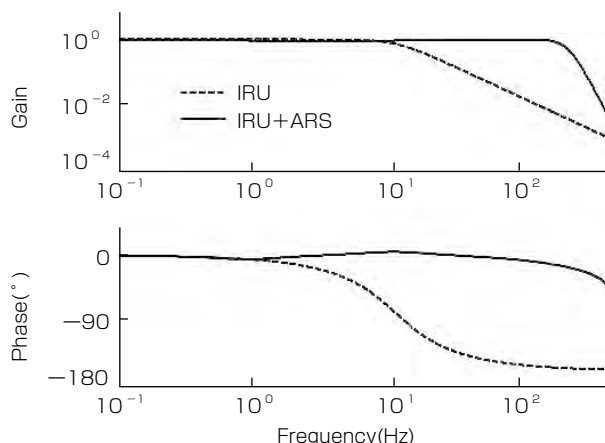


図 4. 相補フィルタによって実現される角速度観測特性

ARSの角速度観測値に乗じる周波数重みである。図 1 のセンサ特性を用いて設計した周波数重みの特性を図 3 に示す。相補フィルタでは、IRUによる角速度観測値と、周波数重みを乗じたARSの角速度観測値の和を広帯域角速度として出力する。この相補フィルタによって実現される入力角速度から出力角速度までの伝達特性を図 4 に示す。ここで破線がIRU単体の特性、実線がIRUとARSを用いた相補フィルタの特性を示す。DCから200Hz程度(アンチエイリアスフィルタのカットオフ周波数)までの広い周波数帯域にわたって、ほぼ平坦(へいたん)な周波数特性(ゲインと位相)が得られている。

3. 数値シミュレーションによる評価

衛星姿勢決定フィルタの姿勢決定精度は、衛星本体の姿勢変動に依存する。ここでは衛星姿勢変動モデルとして、欧州宇宙機関(European Space Agency: ESA)における光通信実証プログラムSILEX(Semiconductor laser Inter-satellite Link EXperiment)の設計基準値を用いる。このモデルは、軌道上の衛星姿勢変動を片側パワースペクトル密度(Power Spectrum Density: PSD)で規定したのとなっており、ESAのOLYMPUS衛星で、衛星定常時の加速度計の軌道上実測値に基づき設定されたものである⁽³⁾。

考慮している周波数区間でパワースペクトル密度が規定

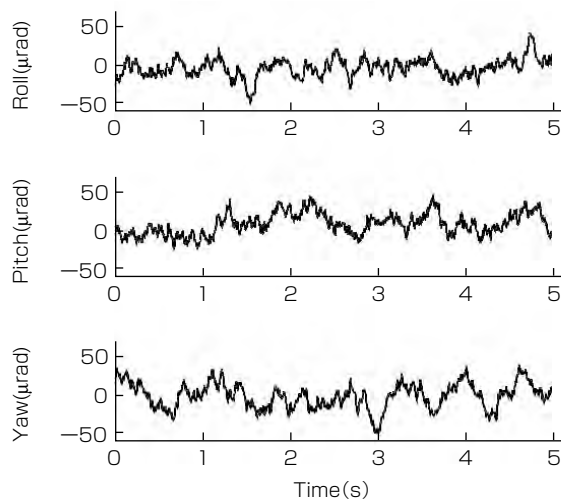


図 5. 模擬生成した衛星各軸の姿勢変動

されると、それを満たす姿勢変動の時系列データは、その周波数区間内のランダムな波の重ね合わせとして模擬生成できる⁽⁴⁾。こうして生成した衛星各軸の姿勢変動模擬データの一例を図 5 に示す。先に述べた姿勢変動モデルを用いると、各軸16μrad(1σ)程度の姿勢変動を仮定することになる。この姿勢変動模擬データと、各センサの観測モデルを用いて姿勢決定に使用するセンサテレメトリデータ(IRU, ARS, STT)を生成したものを図 6 に示す。

この模擬テレメトリデータを用いて姿勢決定シミュレー

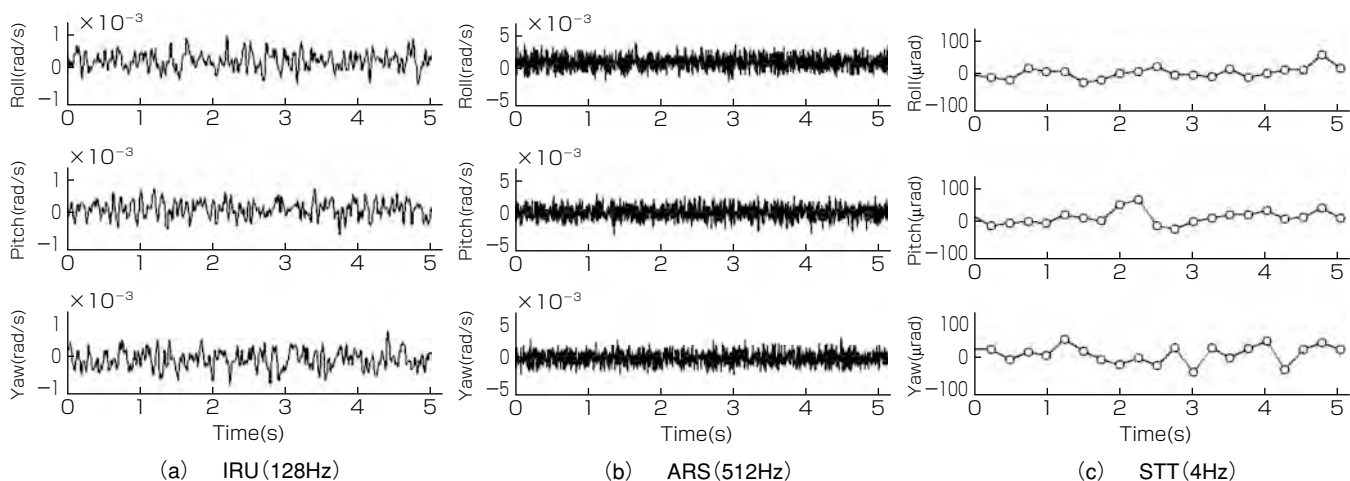


図6. 各センサのテレメトリデータ

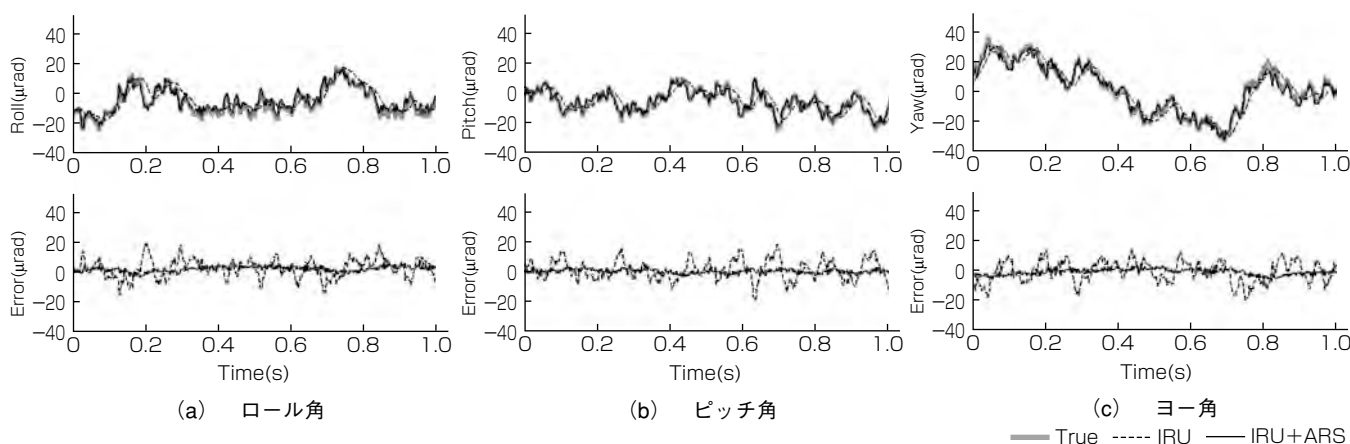


図7. 姿勢決定値と決定誤差

ションを行い、姿勢決定精度を評価した。図7は衛星姿勢各軸の姿勢決定値と決定誤差の評価結果の一例を示したものである。ここでグレー実線(True)が衛星姿勢変動真値、破線(IRU)が従来の低帯域姿勢決定フィルタ、実線(IRU+ARS)が今回開発した広帯域姿勢決定フィルタの結果を示している。この図から広帯域姿勢決定フィルタでは、より衛星姿勢変動真値に近い姿勢決定値を出力できているのが分かる。これは、広帯域姿勢決定フィルタでは、IRUの観測帯域を越えた中・高周波域でも姿勢決定が可能であり、それによって姿勢決定誤差が低減されるためである。

4. む す び

人工衛星の広帯域姿勢決定系について述べた。観測帯域の異なる複数のセンサを組み合わせた信号処理によって、従来の姿勢決定帯域を超える広帯域にわたって姿勢決定が可能となる。軌道上の姿勢変動を模擬した数値シミュレーションによって、衛星基本設計段階で、開発した広帯域姿勢決定系が姿勢決定誤差低減に有効であることを検証した。

参 考 文 献

- (1) 二宮敬虔, ほか: 天文観測用科学衛星の姿勢決定系におけるカルマンフィルタ, 宇宙科学研究所報告, No.102, 4~60 (1999)
- (2) Laughlin, D., et al.: A Dual Function Magnetohydrodynamic(MHD)Device for Angular Motion Measurement and Control, 25th Annual AAS Guidance and Control Conference, **111**, AAS02-061, 335~348 (2002)
- (3) Witting, M., et al.: In-Orbit Measurement of Microaccelerations of ESA's Communication Satellite OLYMPUS, SPIE, **1218**, 205~214 (1990)
- (4) 西口憲一, ほか: 救難用トランスポンダの視認性に対する波浪の影響について, 電子情報通信学会論文誌B, **J82-B**, No.5, 1073~1081 (1999)

ロケット打上げ時の人工衛星音響振動評価システム

吉田佳子* 施 勤忠***
世古博巳** 安藤成将***
佐々野 浩**

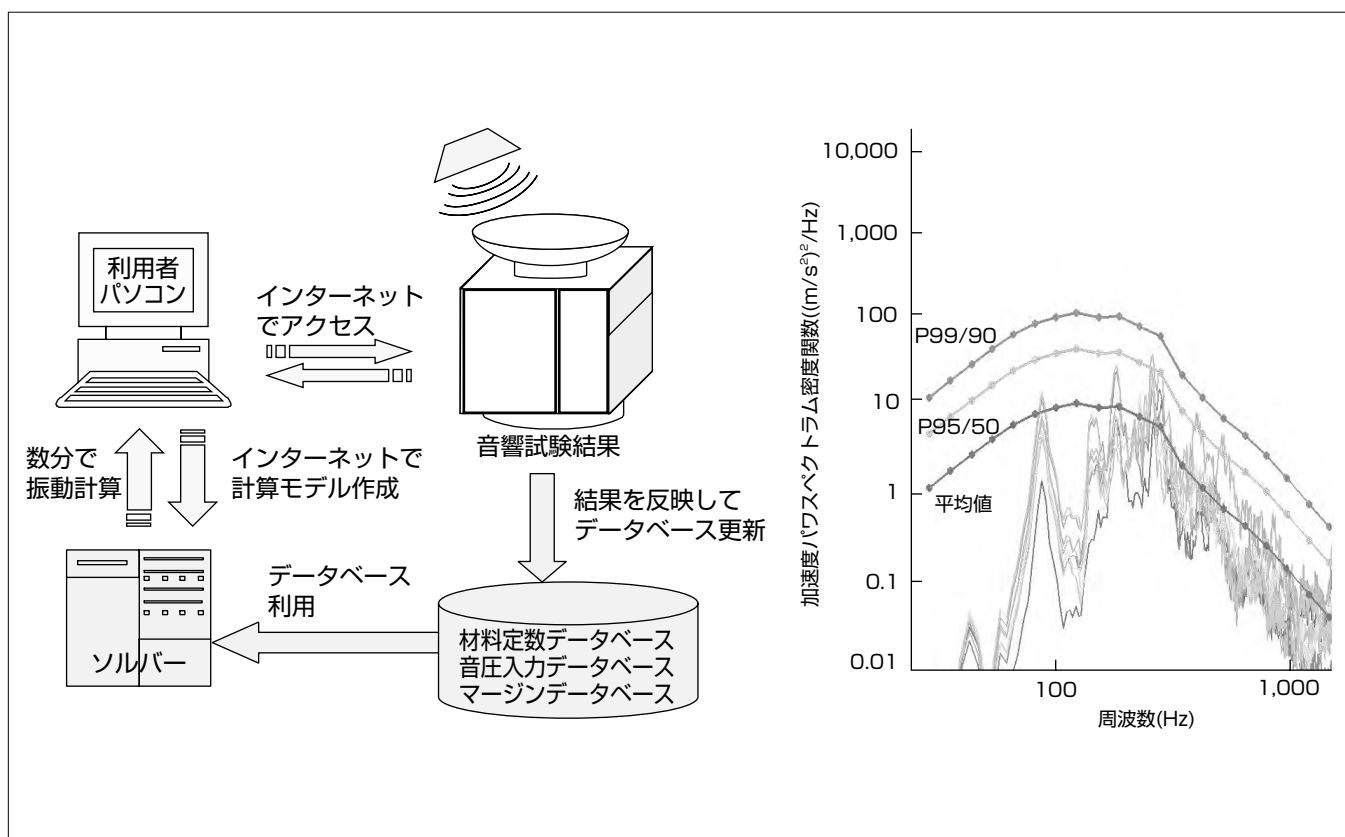
Acoustically Induced Random Vibration Analysis System for Artificial Satellites

Keiko Yoshida, Hiromi Seko, Hiroshi Sasano, Qinzhong Shi, Shigemasa Ando

要 旨

人工衛星は、そのロケットを打ち上げる際生じるエンジンの噴射音によって音響加振され、振動する。この振動に対する信頼性は、ロケットの音を再現できる試験室に人工衛星を入れて破損や不具合がないことを確認する音響試験で評価している。従来、この音響加振による振動応答は数値解析で求めることが困難であり、人工衛星の製作過程では、音響試験と経験則によるカットアンドトライを強いられていた。この状況を打破し、設計開発工程(設計－製作－試験)における手戻りの解消と、試験の短縮や省略による開発期間の短縮を目的として、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)は初期設計段階での振動解析システムを開発することを決定し、その開発支援メーカーとして、平成13

年に三菱電機を選択した。JAXAと三菱電機では、平成14年にシステムの開発を開始し、音響加振による人工衛星構体の振動の特徴や、人工衛星構体に使用されるハニカムパネルのパラメータスタディを実施して、基本的な振動応答解析手法を確立した。その後、構体パネルに搭載されている各機器の応答のばらつきに対する統計的处理方法を解析に組み合わせ、最新の6基の人工衛星について解析精度を検証して、平成19年に解析システムJANET(JAXA Acoustic analysis NETwork)として完成し、運用を開始した。現在、JANETは、準天頂衛星をはじめとする国内の大型人工衛星に利用され、人工衛星打上げの高信頼性化に貢献している。本稿では、JANETの概要について述べる。



ロケット打上げ時の人工衛星の音響振動評価システムJANET

JANETは、一般のインターネットブラウザからインターネット経由でサーバに接続して利用できるロケット打上げ時の人工衛星音響振動評価システムである。解析に必要なデータベースは、新しい人工衛星構体にも適用できるように、音響試験結果のデータを基に更新することができる。また、解析結果と音響試験結果の比較検証も実施できる。計算結果は、試験データの平均値と包絡値を表示し、人工衛星の初期設計段階で利用されている。

1. ま え が き

人工衛星を打ち上げる際、エンジンの噴射によって、ロケットには大きな振動と音が生じる。図1に示すように、ロケット先端のフェアリング内部に搭載された人工衛星は、ロケットの取付け部から伝わって来る振動と、空気を伝播(でんぱ)してくる音に晒(さら)される。近年の大型人工衛星の第一次固有振動数は30Hz以下であり、100Hzを超える高い周波数の振動は、振動伝達経路上で減衰してしまう。一方、数百Hz～数kHzに主成分を持つ音は取付け部から伝達するのではなく、あらゆる角度から10kHz以下の広い周波数帯域で人工衛星に作用する。また、その音圧レベルは人工衛星周りで130dB以上にも及び、人工衛星構体に大きな振動を発生させる。

このため、人工衛星を打ち上げる前には、ロケットの音を発生できる試験室に人工衛星を入れて打ち上げ時の音響環境を模擬し、人工衛星に破損や不具合がないことを確認する音響試験を実施している。当社は、国内メーカーでは唯一、この音響試験を実施できる工場を持っており、人工衛星の打ち上げ品質を保持している。従来、この音響加振による振動応答は数値解析で求めることが困難であり、製作過程では、音響試験と経験則によるカットアンドトライを強いられていた。この状況を打破し、設計開発工程(設計-製作-試験)における手戻りの解消と、試験の短縮や省略による開発期間の短縮を目的として、JAXAは初期設計段階での振動解析システムを開発することを決定し、その開発支援メーカーとして、平成13年に当社を選択した。平成14年にシステムの開発を開始し、音響加振による人工衛

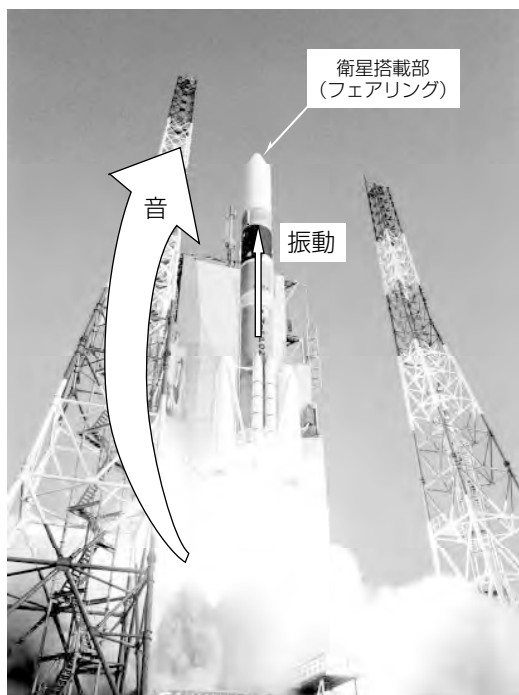


図1. 打上げ時に人工衛星が晒される振動環境(写真提供: JAXA)

星構体の振動の特徴や、人工衛星構体に使用されるハニカムパネルのパラメータスタディを実施して、基本的な振動応答解析手法を確立した。その後、構体パネルに搭載されている各機器の応答のばらつきに対する統計的処理方法を解析に組み合わせ、最新の6基の人工衛星について解析精度を検証して、平成19年に解析システムJANETとして完成し、運用を開始した。現在、このシステムは、準天頂衛星をはじめとする国内の大型人工衛星に利用され、人工衛星打ち上げの高信頼性化に貢献している。

本稿では、このシステムの構成と概要、及びシステム開発を通じて構築された振動解析技術について述べる。

2. JANETの概要

2.1 JANETの解析部の特徴

製品の構造設計では有限要素法^(注1)を使った振動応答解析が用いられることが多い。有限要素法による応答解析では、固有振動数が求められる周波数範囲が計算の範囲内であり、高い周波数まで計算するためには、非常に精密な解析モデルを製作する必要がある。また、音響加振による振動応答を求めるためには、一般には境界要素法^(注2)による音場解析と有限要素法による構造解析を連成させて計算する必要があり、高度なプログラミング、又は、高価なソフトウェアの投資が必要である。したがって、だれでもが容易に使える解析方法ではない。

今回の解析システムの開発では、だれでも、素早く評価ができることをコンセプトとし、広い周波数帯域で、音響加振による振動応答解析が実施できる統計的エネルギー法(SEA法)⁽¹⁾を用いた。この方法は、図2に示すように、人工衛星の構体を構成するパネル1枚を解析要素とするため、有限要素法で使用する精密なモデルが不要であり、寸法やパネルの種類を入力するだけでだれでもすぐに解析を実施できる。ただし、解析要素であるパネル1枚に対し、

- (注1) 計算対象領域を細かい要素に分割し、その要素上の節点の状態量を未知数として、微分方程式を定式化し、変分法によって応答計算する方法
- (注2) 計算対象領域の境界を細かい要素に分割し、その要素上の節点の状態量を未知数として、積分方程式を定式化し、積分演算で音圧計算する方法

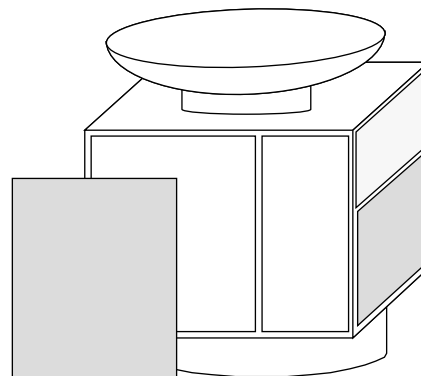


図2. SEA法におけるモデル化単位(パネル1枚が1要素)

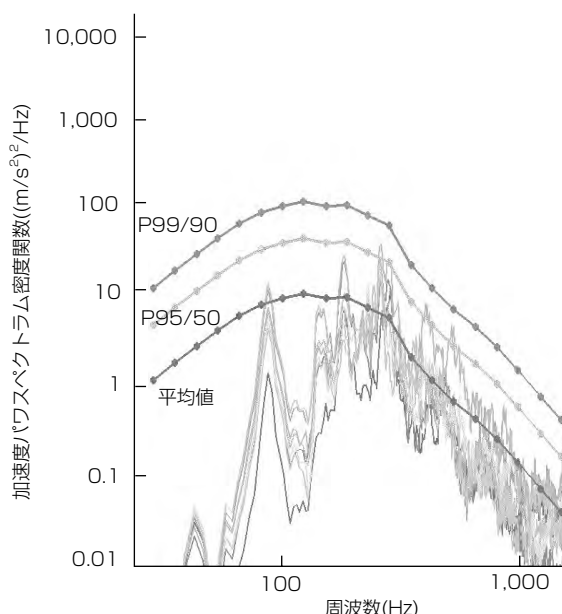


図3. システムによる計算結果の表示例

振動応答の平均値のみが求められるため、パネル内の振動応答の偏りについては直接計算できない。そこで、計算されるパネルの平均値に対するばらつきを、統計的配慮によって求められるようにした⁽²⁾。このシステムによる計算結果の表示例を図3に示す。図3の中の平均値は計算によって直接求められるパネルの応答加速度の平均値レベルで、P95/50, P99/90で示される $P\beta/\gamma$ は、“パネル内の各点の加速度応答が、確率 $\gamma\%$ で、パネル内全点の $\beta\%$ の応答を包絡する”値(マージン)である。このマージンは、パネル内の加速度応答測定点の数が十分大きい場合、加速度応答の分布が対数正規分布に近づく性質に基づいて、平均値と分散から計算される品質評価の統計レベルであり、航空の分野で規格化されている⁽³⁾。図3には、計算結果のプロット(・点)と、実際の音響試験結果(分解能9 Hzの線)を併せて示しているが、計算結果の平均値は、試験結果の平均値に漸近し、P99/90は、最大値を包絡している。この計算結果によって、搭載機器設計者はマージンに基づいた安全率を含む環境振動レベルを音響試験前に知ることができる。この振動レベルに耐える機器を設計すれば、音響試験での機器損傷を未然に防ぐことができる。

マージン量の決定のため、解析技術開発期間中に6基の人工衛星の音響試験結果で得た数千個のデータについて、各パネル内の応答の平均値や分散等の統計量を調査した。また、人工衛星に使われる複数種類の基本のパネルについて材料定数や解析係数(損失係数、音響放射効率、モード密度等)を調査した。これらの調査結果と、音響試験に使用されるロケットの音圧レベルについてはデータベース化して、ユーザーが解析に利用できるようにした。

2.2 JANETシステムの特徴

JANETのほかに、JAXAでは、音響試験の試験データ

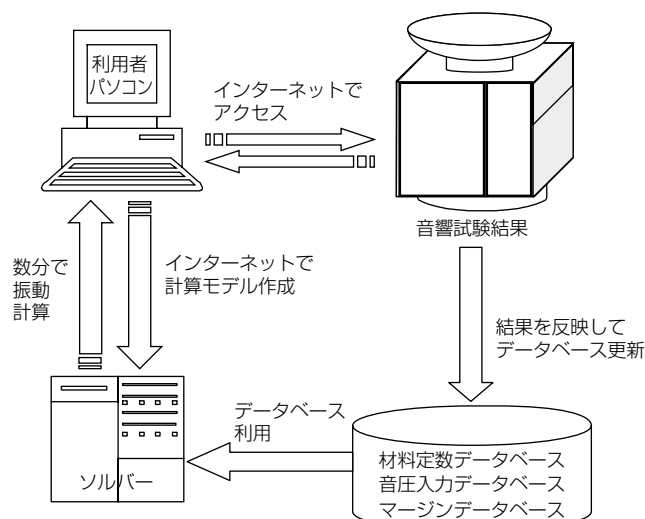


図4. 試験結果、データベース、ソルバーが連携するシステム

を蓄積・閲覧できるシステムを持っている。このシステムとJANETを結合させることで、この解析システム開発後に実施した新たな人工衛星の音響試験データを応答数値解析システムのデータベースへ反映できるようにした。このインタラクティブ構造によって、JANETは、常に最新の人工衛星に対応できる進化型のシステムとなっている。この音響試験の試験データは、図3のように、音響試験後に数値解析結果と併せて表示できるので、数値解析の妥当性を確認することもできる。

また、だれでも利用できる環境を実現するため、一般のインターネットブラウザからインターネット経由でサーバに接続して利用できるように整備した。現在、当社に限らず、宇宙機を設計・製作するメーカー各社がインターネットを通じてJANETを利用している。システムの全体像を図4に、インターネットブラウザ上のJANETの表示を図5に示す。

3. 解析手法の開発

解析手法の開発では、人工衛星全体の構体と、その一部である構体パネル(ハニカムパネル)の音響試験と振動試験を実施して、実設計に耐える解析精度を確立した。ここでは、音響加振を受ける人工衛星の振動応答における大きな特徴を反映できた研究開発成果の一例を示す⁽⁴⁾。

パネルのボルト締結によって構成される人工衛星では、パネル間に振動伝達があるため、パネル単体と人工衛星に取り付けられた場合では、一般に同じ加振力を受けても振動応答が異なる。しかし、音響加振の場合は、構体のパネルすべてに一様に音圧が負荷され、その振動伝達量がパネル間で相殺されること、パネル締結部を境界としたパネルごとの共振モードが応答に支配的となること等から、人工衛星に取り付けられたパネルの応答は、パネル単体の応答と等しくなることがSEA法の計算結果より得られた。こ

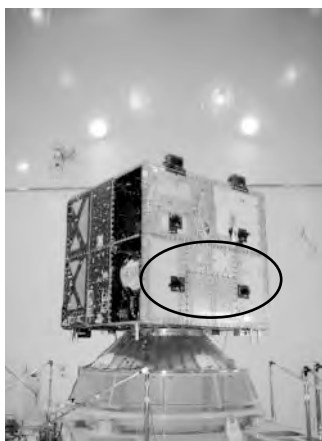


(a) ブラウザでの初期画面(予測解析, データ管理等を選択)

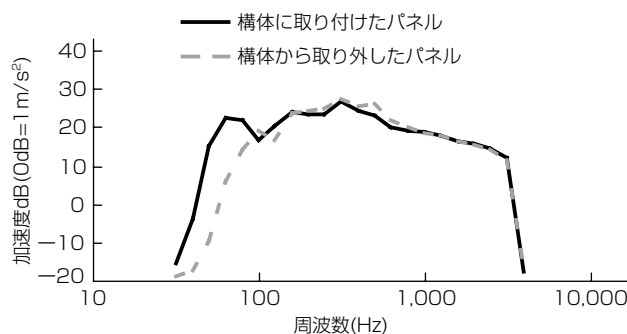


(b) 予測解析における諸元入力画面

図5. インターネットブラウザ上のJANETの表示



(a) 構体に取り付けたパネル (b) 構体から取り外したパネル



(c) 加速度周波数特性

図6. 構体取付け前後のパネルの振動応答の周波数特性

の計算結果を確認するため、図6に示すように構体に取り付けられたパネルと、構体から取り外したパネルについて同じ音響試験を行って、その振動加速度応答を調べた。図6の加速度周波数特性に示すとおり、100Hz以上では両者の応答は等しくなった。100Hz以下では構体全体がたわむ共振の影響によって、構体に取り付けたパネルの方が振動応答が大きくなったが、この共振ではパネルに搭載されている機器の振動には問題が生じないので、搭載機器の振動を設計する場合、パネル単体の評価で十分であることがわかった。このことから、JANETを利用する際、設計する機器が搭載されているパネルの仕様のみ入力データを作ればよいので、計算時間を大幅に短縮することが可能となった。

4. む す び

ロケット打上げ時の音響に晒されることで生じる人工衛星構体パネルの振動の評価を目的とした音響振動解析システムJANETについて述べた。正規運用前に人工衛星実機で十分精度検証されたシステムではあるが、日々刷新される新しい人工衛星構体にも対応できるよう進化し得るシステムである。JAXAに申請することで、宇宙機の設計者ならだれでも利用できるが、各メーカーのデータを守るセキ

ュリティも確保しており、ユーザー管理を徹底している。

また、利用者には、使い方を記したユーザーズマニュアルのほか、解析原理や、信頼性を証明する開発試験の内容等を記したセオレティカルマニュアルのダウンロードが整備されている。音響振動解析システムJANETが、人工衛星などの宇宙機の初期設計段階に利用され、国産宇宙機の打上げ信頼性の向上に貢献することを期待する。

参 考 文 献

- (1) Lyon, R.H.: Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Applications, MIT Press (1975)
- (2) 安藤成将, ほか: 拡散音場で加振される人工衛星パネルの振動応答に関する上限公差リミットの検討, 日本機械学会論文集(C編), **72**, No.716, 1130~1135 (2006)
- (3) Test Requirements for Space Vehicles, MIL-STD-1540B
- (4) Yoshida, K., et al.: Data acquisition and Validation Tests for Acoustic Loading Vibration Analysis, Aerospace Testing Seminar (2003)

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

田宮洋一*

Natural Frequency Calculation Tool of Turbo-Generator Stator Coil End

Yoichi Tamiya

要 旨

本稿では、タービン発電機固定子コイルエンドの共振回避設計に有用な設計支援ツールの開発内容を述べる。

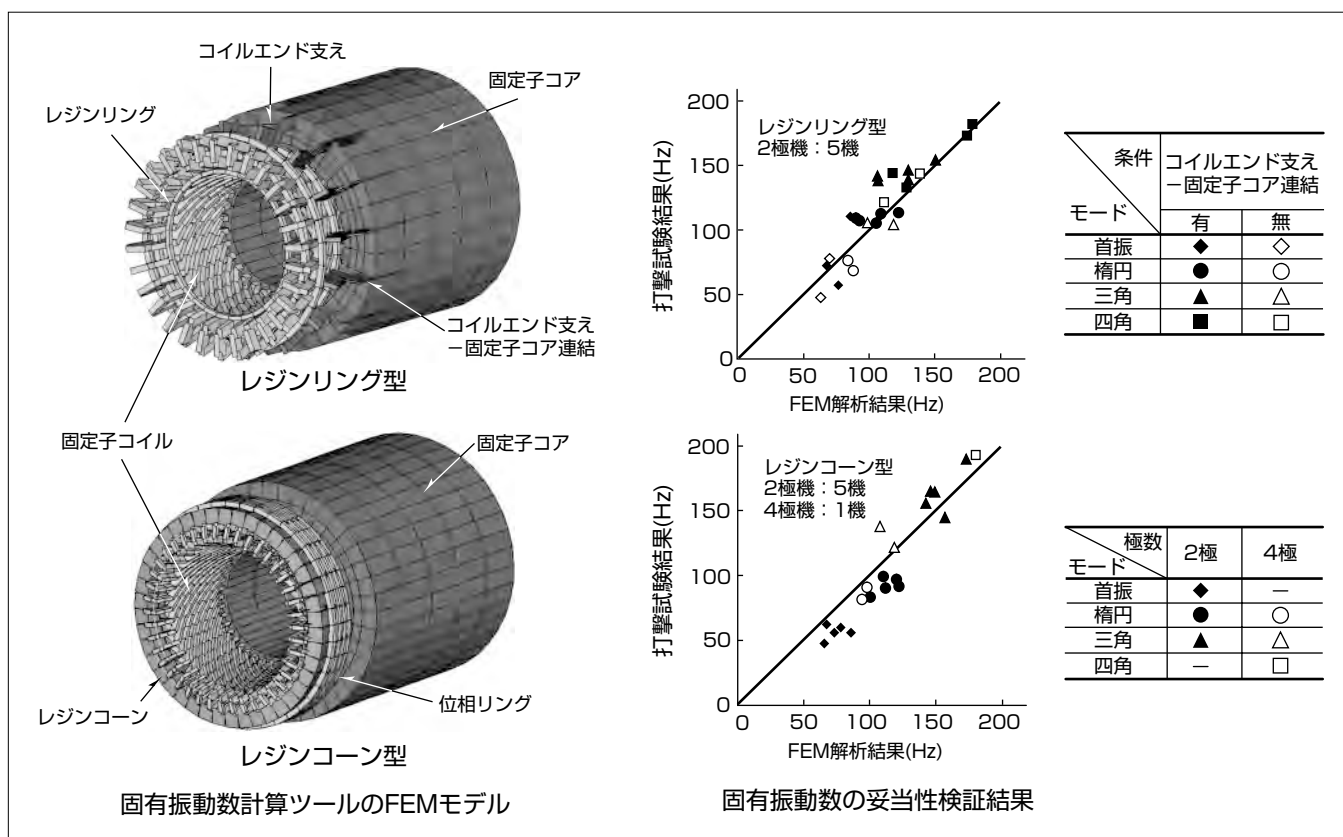
タービン発電機は、従来から大容量化・高効率化の市場要求が高く、常に高度な設計・製造技術が必要とされてきた三菱電機の基幹製品の一つである。特に、地球温暖化の原因と言われている二酸化炭素の削減が望まれている昨今、高効率化の市場要求はますます高まってきている。加えて、市場での競争力強化を目的とした低コスト化も同時に進めていかなければならない。

タービン発電機の固定子コイルエンドには、発電時の電磁振動が作用する。よって、共振による固定子コイル及び相リードの絶縁破壊を防止するための共振回避設計が不可欠である。

しかしながら、固定子コイルエンドの構造は非常に複雑であるため、有限要素法(FEM)を用いた振動計算には多大な時間と高度なCAE(Computer Aided Engineering)技術が必要であった。

本稿で述べる設計支援ツールは、複雑な構造をしている固定子コイルエンドのFEMモデルの作成から固有振動数計算結果の出力までを自動で行うツールである。このツールを用いることによって、高度なCAE技術を持っていない設計者でも、構造変更などのパラメータスタディを容易かつ迅速に実施することができる。

なおこのツールは、実機固定子コイルエンドの共振回避設計に既に活用されている。



固有振動数計算ツールのFEMモデルと妥当性検証結果

このツールは、固定子コイルエンドの固有振動数を迅速に計算することができる設計支援ツールである。複雑な構造をしている固定子コイルエンドのFEMモデルを自動で作成し、レジンリング型及びレジンコーン型の支持構造の違いや2極機及び4極機の違いにも対応できる。このツールは、固定子コイルエンドの共振回避設計に十分有用なツールであり、既に実設計に活用されている。

1. ま え が き

本稿では、タービン発電機固定子コイルエンドの共振回避設計に有用な設計支援ツールの開発内容を述べる。

タービン発電機の固定子コイルエンドは、図1に示すような複雑な構造をしている。その構造は、上口と下口のコイルで編み合わされたバスケットのような形状である。上口と下口のコイルは、固定子コアの両端から軸方向へ伸び出しながら、交差するように螺旋(らせん)状に巡回して、それぞれの終端で結合されている。固定子コイルエンドは、発電時の電磁力によって回転数の2倍の周波数で加振される。この周波数で固定子コイルエンドが共振すると、固定子コイル及び相リードの絶縁が破壊する可能性が高くなる。よって、固定子コイルエンドの共振回避設計は重要である。

固定子コイルエンドの共振回避設計は、計算機能力が発達する以前では、実機の加振実験結果⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾と従来実績に基づいて実施されていたが、計算機能力が飛躍的に向上した近年では、有限要素法(FEM)による振動計算結果⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に基づいて実施されている。このように今では、FEMは固定子コイルエンドの共振回避設計に不可欠なツールとなっている。しかしながら、固定子コイルエンドの構造は非常に複雑であるため、FEMモデルの作成及び解析に多大な時間を必要とし、かつ、高度なCAE技術を持つ技術者が必要であった。

本稿で述べる設計支援ツールは、高度なCAE技術を持っていない設計者でも、構造変更などのパラメータスタディを容易かつ迅速に実施することができるツールである。このツールでは、汎用構造解析ソフトウェアANSYS^(注1)

のAPDL(ANSYS Parametric Design Language)機能⁽¹¹⁾を採用している。APDL機能とは、ANSYSのコマンド(指令言語)のみでFEMモデルの作成から計算及び結果の表示・出力までを自動で実施するプログラム機能である。

(注1) ANSYSは、SAS IP, Inc. の登録商標である。

2. 固定子コイルエンドの支持構造

固定子コイルエンドの支持構造は、図2に示すレジンコーン型とレジンリング型の2種類がある。レジンコーン型は大容量の水冷却機に主に採用されており、レジンリング型は水冷却機よりも比較的小容量の空気冷却機や水素冷却機に主に採用されている。

レジンコーン型は、レジンコーンと押え板で固定子コイルを挟み込み、絶縁ボルトで締結することによって、強固な円筒剛性を保持した支持構造である。対して、レジンリング型は、レジンリングに上口と下口のコイルをFRP(Fiber Reinforced Plastics)製の紐(ひも)で緊縛し、さらに、上口-下口コイル同士、隣接コイル同士及びコイルエンド支えとレジンリングもFRP製の紐で緊縛することによって、円筒剛性を保持した支持構造である。

このような支持構造によって、固定子コイルエンドの円筒剛性は確保されているので、固定子コイル一本一本がバラバラに振動することはない。固定子コイルエンドは、発電時の電磁力によって、2極機では楕円(だえん)形状のモードで、4極機では四角形状のモードで共振する。

3. 固定子コイルエンド固有振動数計算ツール

開発した固定子コイルエンド固有振動数計算ツールでは、まずMicrosoft Excel^(注2)で作成された寸法表にタービン発電機の固定子コア及び固定子コイルエンドの主要寸法を入力し、Excelのマクロ機能を用いてAPDLファイルを作成する。APDLファイルはテキストファイル形式で出力される。ここで、固定子コア及び固定子コイルエンドの主要寸

(注2) Excelは、Microsoft Corp. の登録商標である。

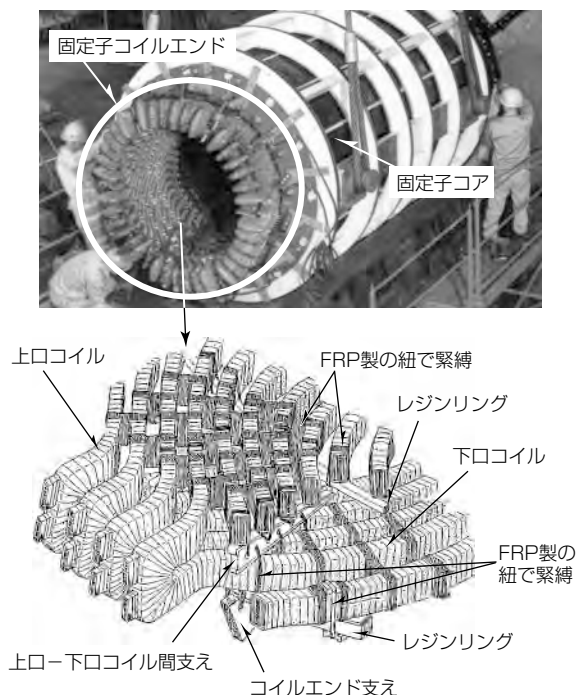


図1. 固定子コイルエンドの構造

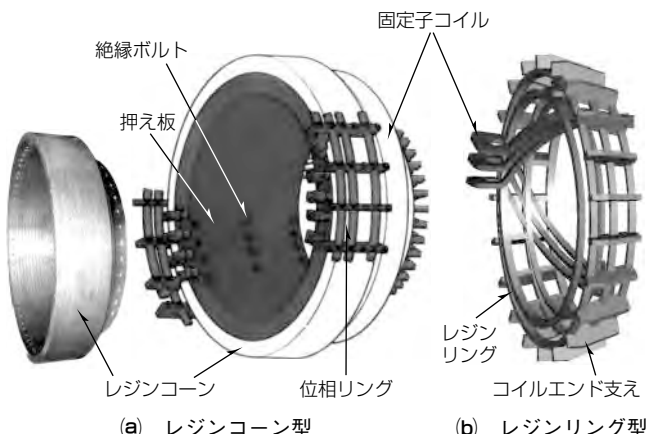


図2. 固定子コイルエンドの支持構造

法は、固定子コアの内・外直径、スロット数、固定子コイルの断面寸法、コイルエンド長、レジンリング寸法、レジンコーン寸法等で構成される。一般に、これらは機能設計段階で決定される寸法情報である。設計者はこれらの寸法情報のみからFEMモデルを容易に作成することができる。

ANSYSを起動し、APDLファイルを読み込むと、自動でFEMモデルを作成し、固有振動計算が実行される。計算結果はAVI(Audio Video Interleave)ファイル形式で出力され、固有振動数ごとの変形モード図が簡単に閲覧できるようになっている。

図3はこのツールで作成された固定子コイルエンドのFEMモデルである。レジンリング型とレジンコーン型の2種類が示されている。このツールは、スロット数が30～78まで3スロット刻みでFEMモデルを作成でき、2極機及び4極機のモデル化にも対応できる。また、図3のFEMモデルは軸方向1/2モデルであるが、タービン側及びエキサイタ側の構造の違いにも対応できる。

図3のFEMモデルにおいて、固定子コアはソリッド要素(節点数8)で、レジンコーン及びコイルエンド支えはシェル要素(節点数4)で、固定子コイル、レジンリング及び位相リングはバー要素(節点数2)で、FRP紐緊縛部はパネ要素(節点数2)で構成されている。節点数の多いソリッド要素で全構造部位を構成することは、計算に多大な時間を要するので、このモデルでは、シェル、バー、パネの各要素を用いて、総節点数が最大8,000点以下となるように工夫した。これによって、パラメータスタディに迅速に対応できるモデル構成となっている。

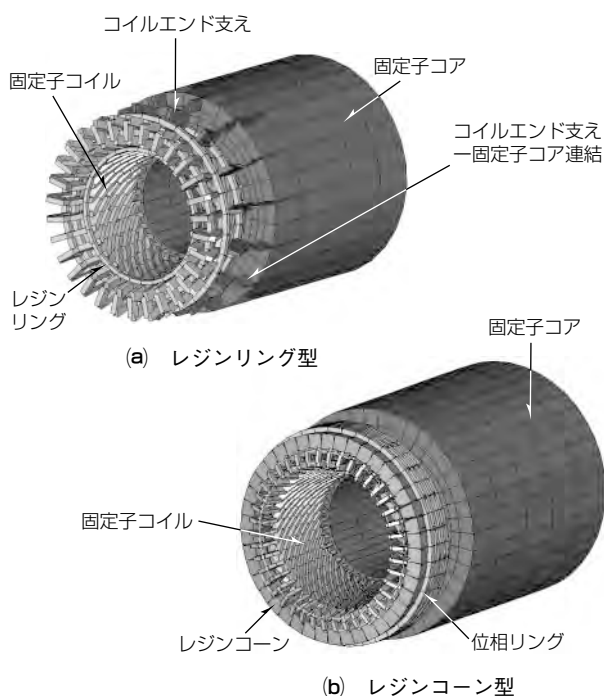
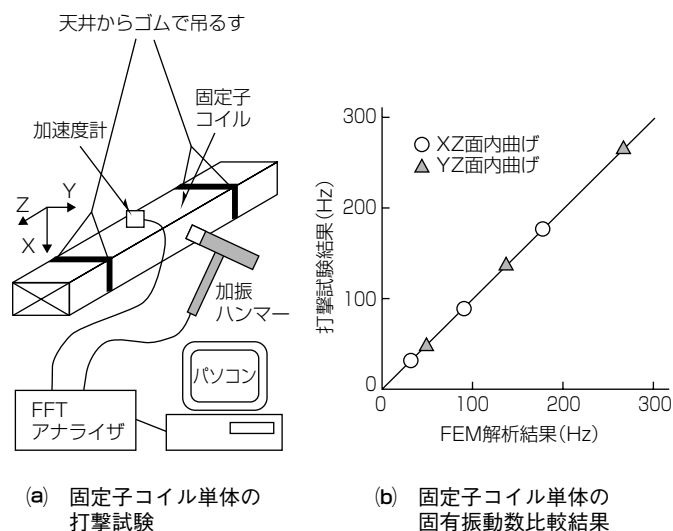


図3. 固定子コイルエンドのFEMモデル

4. 主要部品のFEMモデル妥当性確認

固定子コイル、レジンリング、レジンコーン等は、固定子コイルエンドを構成している主要部品である。この章では、これら主要部品の単体に対して、バーやシェルでモデル化したFEMモデルの妥当性を確認する。

図4及び図5に固定子コイル単体及びレジンコーン単体の打撃試験とFEMモデルの妥当性確認結果を示す。FEMモデルの妥当性確認は打撃試験結果とFEM解析結果の固有振動数を比較することによって実施した。図4及び図5では、固定子コイル単体及びレジンコーン単体の打撃試験結果とFEM解析結果の固有振動数は低次から高次のモードまでよく一致している。これらの結果より、主要部品についてバーやシェルでモデル化したFEMモデルは妥当であると判断できる。



FFT : Fast Fourier Transform

図4. 固定子コイル単体の打撃試験とFEMモデルの妥当性確認結果

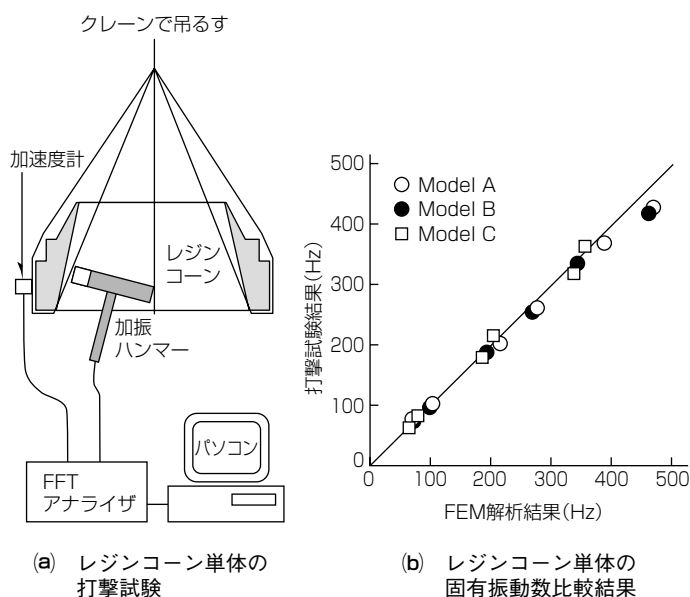


図5. レジンコーン単体の打撃試験とFEMモデルの妥当性確認結果

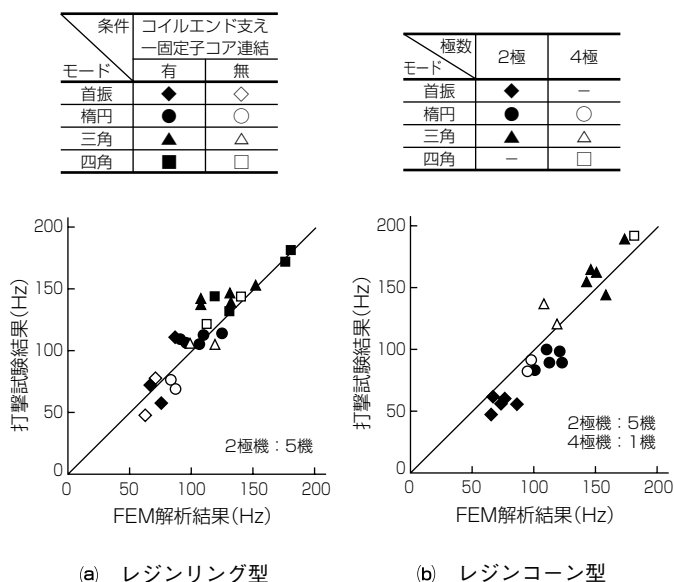


図6. 実機固定子コイルエンドの打撃試験結果とFEM解析結果の固有振動数比較

5. 実機固定子コイルエンドの固有振動数計算結果

図6は、タービン発電機の実機における固定子コイルエンドの打撃試験結果と、このツールを用いて得られたFEM解析結果の固有振動数を比較した図である。図6(a)はレジンリング型5機種についての比較結果であり、図6(b)はレジンコーン型6機種についての比較結果である。レジンリング型の5機種はすべて2極機である。これら5機種のうち、2機種はコイルエンド支えと固定子コア間の連結(図3)がある構造であり、3機種はその連結がない構造である。また、レジンコーン型の6機種のうち、5機種が2極機であり、1機種が4極機である。

図6では、首振、楕円形状、三角形状及び四角形状の4つのモードで、打撃試験結果とFEM解析結果はおおむね一致した。この結果から、実機固定子コイルエンドのFEMモデルの妥当性が確認でき、このツールが固定子コイルエンドの共振回避設計に十分有用であると判断できる。なお、図7に首振、楕円形状、三角形状及び四角形状の4つの変形モードを示す。これらは、タービン発電機を軸方向から見たときの固定子コイルエンド円筒端面の変形モードを示している。

6. む す び

このツールは、複雑な構造をしている固定子コイルエンドのFEMモデルの作成から固有振動数計算結果の出力までを自動で行うツールである。高度なCAE技術を持っていない設計者でも、容易にFEMモデルを作成し、固有振動数の計算が可能である。設計者は、機能設計段階で決まる主要数の寸法をExcelに入力することで、構造変更等のパラメータスタディに迅速に対応できる。また、実機コ

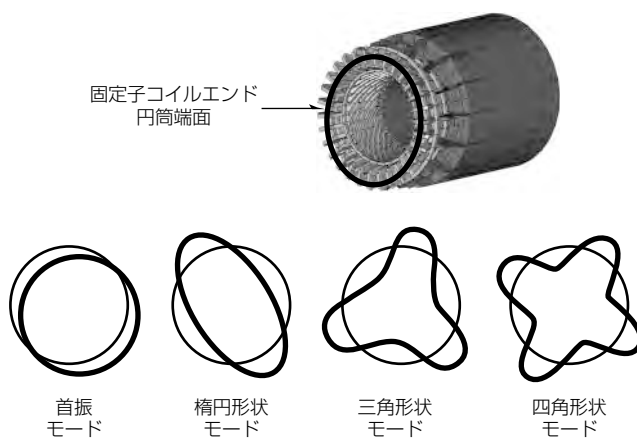


図7. 固定子コイルエンドの固有振動変形モード

ルエンドの打撃試験結果との比較によって、このツールが共振回避設計に十分有用であることも確認できた。

なお、このツールは、実機固定子コイルエンドの共振回避設計に、既に活用されている。

参 考 文 献

- (1) 田里 誠, ほか: 大容量水冷却タービン発電機固定子コイルエンド支持法の強度, 東芝レビュー, **30**, No.10, 758~762 (1975)
- (2) Patel, M. R., et al.: End-Winding Vibrations in Large Synchronous Generators, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, **PAS-102**, No.5, 1371~1377 (1983)
- (3) 免田 亨, ほか: 関西電力(株)南港発電所向け1号600MW水冷却タービン発電機, 三菱電機技報, **64**, No.6, 495~500 (1990)
- (4) 河瀬千春, ほか: 大容量タービン発電機における最新技術, 三菱電機技報, **73**, No.6, 436~438 (1999)
- (5) 前田 進, ほか: 原子力用大容量タービン発電機, 三菱電機技報, **74**, No.8, 509~512 (2000)
- (6) Stephan, C. E., et al.: New air-cooled turbogenerator in the 300-MVA class, ABB Review, No.1, 20~28 (1996)
- (7) Senske, K., et al.: Vibrational Behaviour of the Turbo-generator Stator End Winding in Case of Electrical Failures, CIGRE SC11 IEE Japan (1997)
- (8) 阿久津信雄, ほか: 新系列2極空気冷却タービン発電機の構造設計, 富士時報, **72**, No.5, 275~278 (1999)
- (9) 佐藤 理, ほか: 世界最大容量水素間接冷却タービン発電機, 東芝レビュー, **59**, No.2, 62~65 (2004)
- (10) 篠原主勲, ほか: タービン発電機ステータコイルエンドの固有振動特性, 日本機械学会論文集 (C編), **70**, No.692, 941~948 (2004)
- (11) サイバーネット: ANSYS APDLガイド (2007)

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

蓑田強平*
小倉健太郎*
小林哲也**

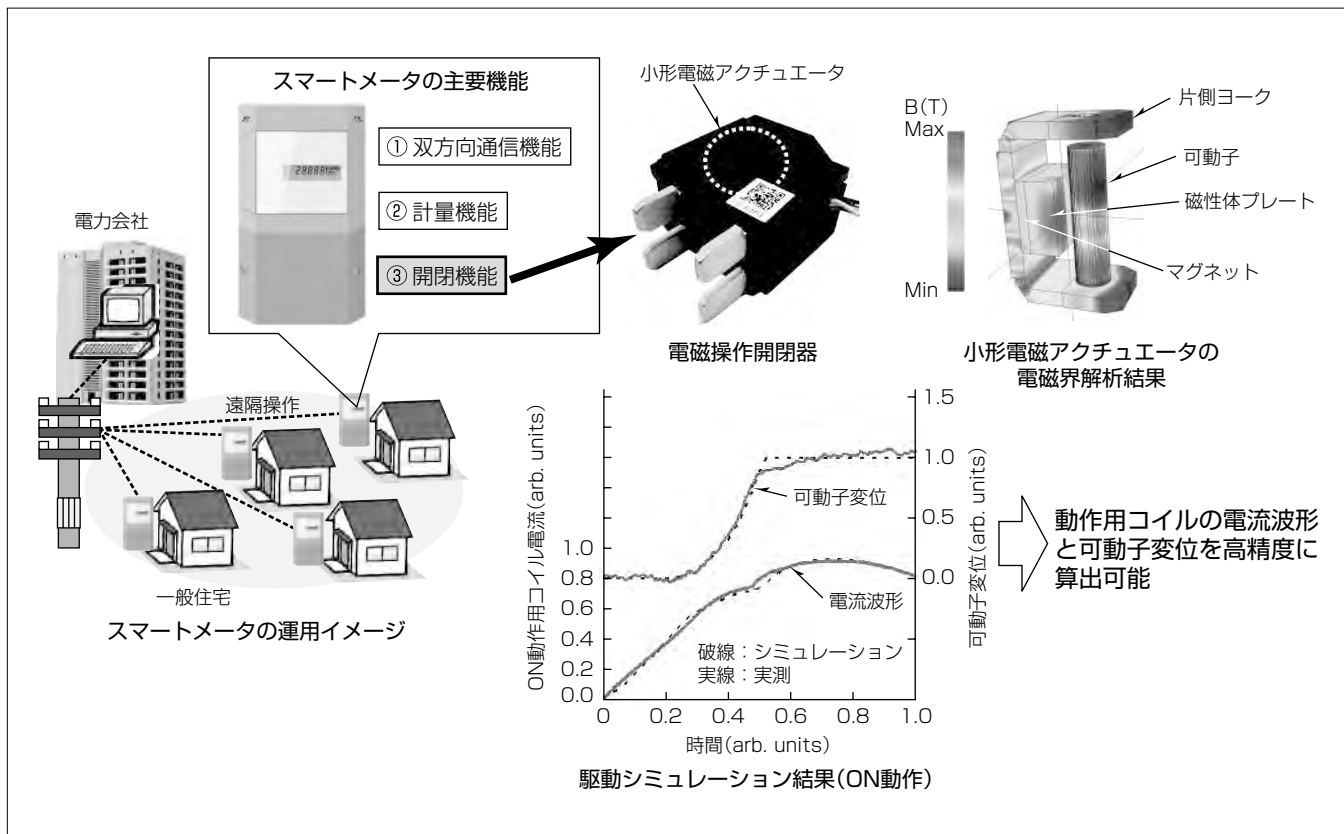
Application of Coupled Simulation of Electromagnetic Field and Motion to Electromagnetically Actuated Relay for Smart Meter
Kyohei Minoda, Kentarou Kokura, Tetsuya Kobayashi

要 旨

近年、ICT (Information and Communication Technology) の活用によって送配電網の電力の流れを供給側・需要側の両方から制御し、需給バランスを最適化するスマートグリッドが日本を含めた世界各国で注目されている。スマートグリッドの構成要素として導入が進みつつあるスマートメータは双方向通信機能を持ち、リアルタイムで電力量を計量し、電力供給回路の遠隔開閉 (ON/OFF) 制御が可能という特長を持つ。ON/OFF 動作を可能とする開閉器の基本性能として、①安定な ON/OFF 動作、②ON/OFF 状態の安定保持が必要である。今回、三菱電機ではこれらの要求を満たすため、電磁操作開閉技術を適用し電磁操作開閉器 (AC100V 60A) を開発した。この開発では、一方向組立てが可能な組立て性に優れた片側ヨーク構造にマグネ

ットを採用することで、小形かつ無電力で ON/OFF 状態の保持が可能な電磁アクチュエータ構造を考案し、電磁界シミュレーションによる電磁力解析から保持力や駆動力を最適化した。また、電磁力と電磁アクチュエータの動作を連成させた駆動シミュレーションの実施によって、設計上流段階で安定した ON/OFF 動作の可否を定量的に把握することを可能にした。この結果、試作器製作前に部品組立て時のばらつきなどを含めた動作特性の最適化を図ることができ、開発の効率化が可能となった。

本稿ではこれらの手法を用いた小形電磁操作開閉器の構造最適化及び駆動評価のための電磁界・運動連成シミュレーション技術について述べる。



スマートメータ用電磁開閉器の開発

スマートメータの開閉機能を実現するための電磁操作開閉器の開発で、電磁力と電磁アクチュエータの動作を連成させた電磁界・運動連成シミュレーションを実施し、スマートメータに搭載可能な小形化・無電力での ON/OFF 保持を実現した。

1. ま え が き

スマートグリッドの構成要素として導入が進みつつあるスマートメータは双方向通信機能を持ち、リアルタイムで電力量を計量し、電力供給回路の遠隔開閉(ON/OFF)制御が可能という特長を持つ。ON/OFF動作を可能とする開閉器の基本性能として、①安定なON/OFF動作、②ON/OFF状態の安定保持が必要である。今回、当社ではこれらの要求を満たすため、電磁操作開閉技術を適用し電磁操作開閉器(AC100V 60A)を開発した。今回の開発では、開閉器の電磁アクチュエータの運動方程式および駆動コイル部の電気回路方程式を連成して計算し、開閉器全体構造の最適化を図った。

本稿では、電磁操作開閉器の駆動評価に用いた電磁界・運動連成シミュレーション技術について述べる。

2. スマートメータの構成

2.1 スマートメータの主要機能

図1にスマートメータの主要機能を示す。スマートメータは双方向通信機能(図1①)、リアルタイムでの電力量の計量機能(図1②)及び遠隔操作によるON/OFF可能な開閉機能(図1③)で構成している。開閉器は電力の安定供給(ON/OFF状態保持)と安全なON/OFF動作の2つの性能が要求される。当社は電磁操作開閉技術と品質工学を適用することで、独自の方式によるスマートメータ用の電磁操作開閉器を開発した。

2.2 電磁操作開閉器の構成

図2は電磁操作開閉器の構造を示した模式図であり、電力供給回路である通電部と通電部をON/OFF動作させる電磁操作装置で構成している。電磁操作装置の電磁アクチュエータには一方向組立て可能な片側ヨーク構造を採用し、これに可動子、ON/OFF動作用コイル、マグネット、磁性体プレートなどを組み込んでいる。マグネットと磁性体

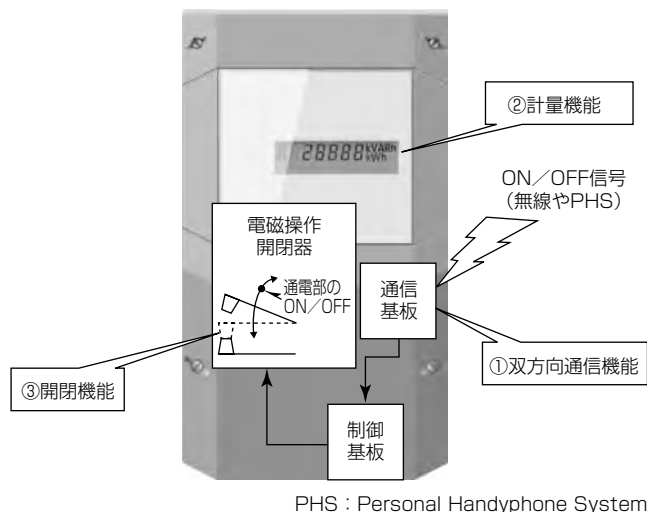


図1. スマートメータの主要機能

プレートで構成される高効率な磁気回路と安定した駆動特性によって2接点を同時に開閉する機構を確立し、無電力でON/OFF状態保持が可能な構造を実現した。電磁アクチュエータと通電部の間の中継部材は駆動棒、押し込みバー、接圧ばねで構成している。通電部は機械耐久性及び通電耐久性に優れた低損失Ag(銀)系電気接点と可とう導体を採用した。

2.3 電磁操作開閉器の基本動作

図3に電磁操作開閉器のON動作過程を示す。以下同図を基にON動作について述べる。

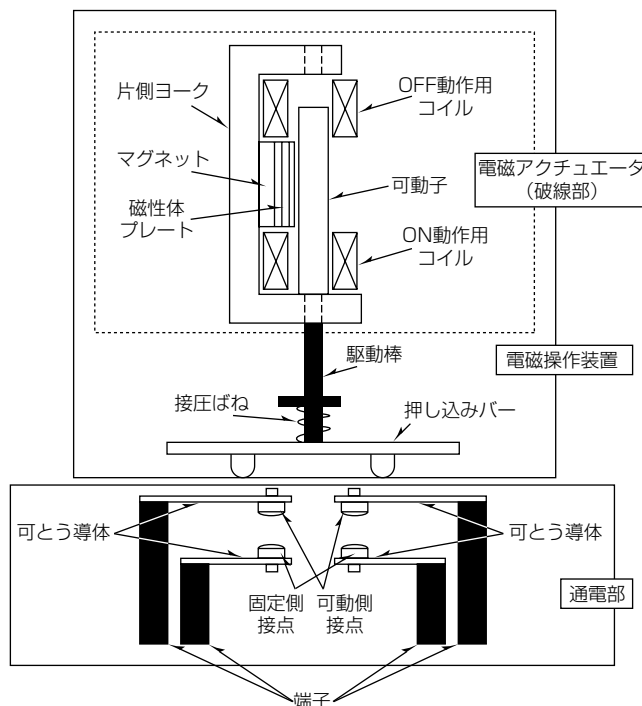


図2. 電磁操作開閉器の構造

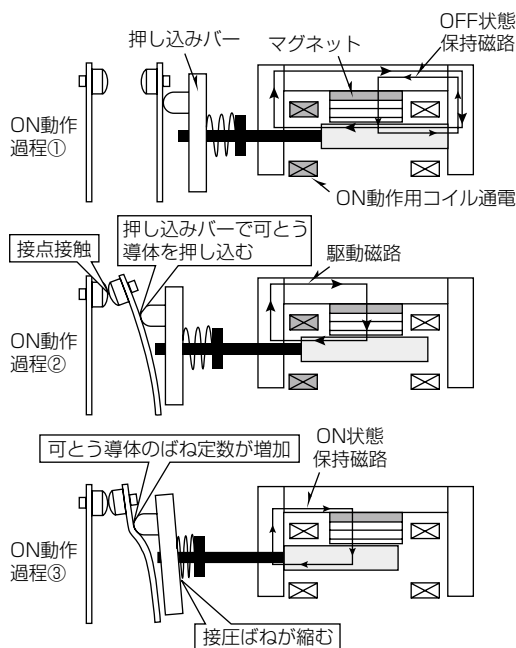


図3. 電磁操作開閉器のON動作過程

【過程①】 OFF状態ではマグネットの磁束による吸着力によって可動子が保持されている。ON動作用コイルへ電圧を印加すると通電が始まり、磁束が発生し、OFF状態保持磁路中の磁束をキャンセルし始める。

【過程②】 さらにON動作用コイルに電流が流れ、可動子に作用するON方向への駆動力が増加し、マグネットによるOFF状態保持力を超えた時点で可動子が動作を開始する。動作中は駆動磁路が形成され、可動子は押し込みバーによって可とう導体を押し込み、接点が接触する。

【過程③】 さらに可動子がON方向への動作を継続し、接点は接触状態のまま押し込みバーが可とう導体を押し込む。その結果、可とう導体のばね定数が増加し、接圧ばねが所望の終荷重まで圧縮され、可動子がヨークと当接すると動作を完了する。

OFF動作は、ON動作と同様である。

3. 電磁界・運動連成シミュレーション技術

3.1 電磁界・運動連成シミュレーション技術の原理

電磁アクチュエータの駆動力は可動子変位と動作用コイル電流に依存するため、静的な荷重評価ではその挙動を想定するのが困難である。電磁アクチュエータを設計する上で、その動作をシミュレーションで把握することは非常に有用である。ここでは、電磁界・運動連成シミュレーションの原理と手法について説明する。

シミュレーションに必要な値となるコイル鎖交磁束量 ϕ 、発生電磁力 F_{mag} 、コイルのインダクタンス L は可動子の変位 x 及びコイル電流 I に依存する。特に L については非線形の磁気特性となるため、 $L=\phi/I$ とならず $d\phi/dI$ して取り扱う必要がある。これらの連立方程式を解くには計算コードが複雑になり、計算時間も長くなる。簡易な計算コードであれば、コードの改訂を行う作業も容易となるため、3つの値(ϕ , F_{mag} , L)を x , I を変数とした関数として取り扱うように設定した。図4はその ϕ の一例で、この図を駆動特性マップと呼ぶ。駆動特性マップは電磁界シミュレーションの静解析によって作成することが可能であり、適切な補間を施すことで電磁アクチュエータの任意の条件下での磁気特性を算出することができる。このマップを関数として準備した上で、電磁アクチュエータの運動及び駆動コイル部の電気回路を連成して計算する。

電磁アクチュエータ可動子の運動方程式を式(1)に示す。ここで、 m ：可動子の重量、 $F_{friction}$ ：摩擦力である。摩擦力については実測値を使用し、校正している。

次に電磁アクチュエータのON/OFF動作用コイルに接続する電源電圧に関する回路方程式は式(2)のように表現できる。ここで、 $V(t)$ ：電源電圧、 R ：外部配線抵抗及びコイル抵抗の和、 ϕ である。ここで、式(2)の右辺第2、3項は $d\phi/dt$ を偏微分展開した形で表現している。

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_{mag}(x(t), I(t)) - F_{friction}(x) \dots\dots\dots (1)$$

$$V(t) = I(t) \cdot R + L(x(t), I(t)) \cdot \frac{dI(t)}{dt} + \frac{d\phi(x, I)}{dx} \frac{dx(t)}{dt} \dots\dots (2)$$

図5に、実機におけるON動作特性の実測結果及び計算結果を示す。図中には可動子の変位波形とON動作用コイルに流れる電流波形を示しており、実測と計算とが良く一致していることが分かる。なお、可動子変位波形の動作完了直前(時間0.5~0.6)の領域では、実測とシミュレーションで若干ずれが生じている。これは可動子がマグネット方向へ偏心していることが原因であり、シミュレーションの高精度化のためには可動子の偏心を模擬することが今後の課題である。

3.2 電磁操作開閉器全体の駆動シミュレーション

最終的に電磁操作開閉器全体の挙動をシミュレーションするためには、弾性体(接圧ばね、可とう導体)の動作を式(1)に反映する必要がある。接圧ばねは図2の可動側接点

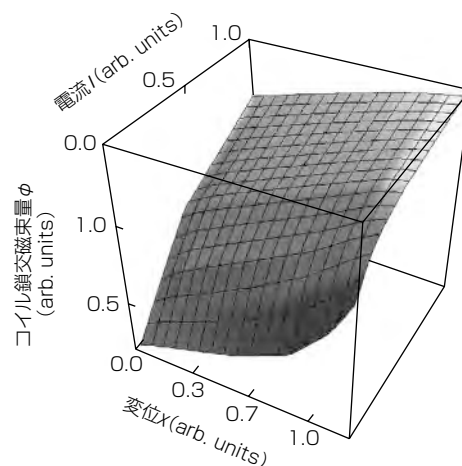


図4. 駆動特性マップの一例
(コイル鎖交磁束量の変位及び電流に対する変化)

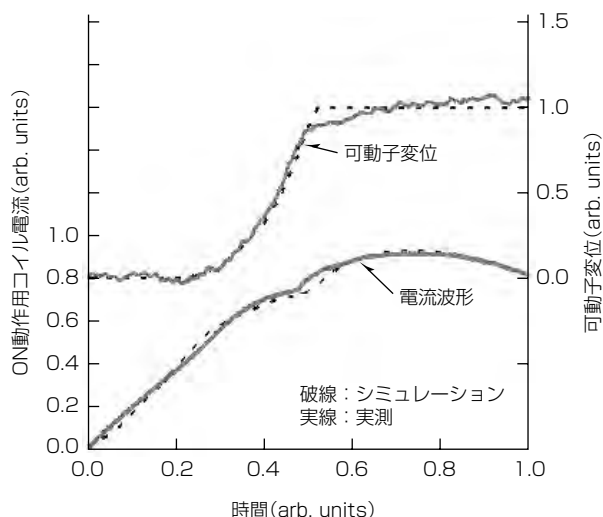


図5. 電磁アクチュエータ単体のシミュレーションと実測の動作波形比較(ON動作)

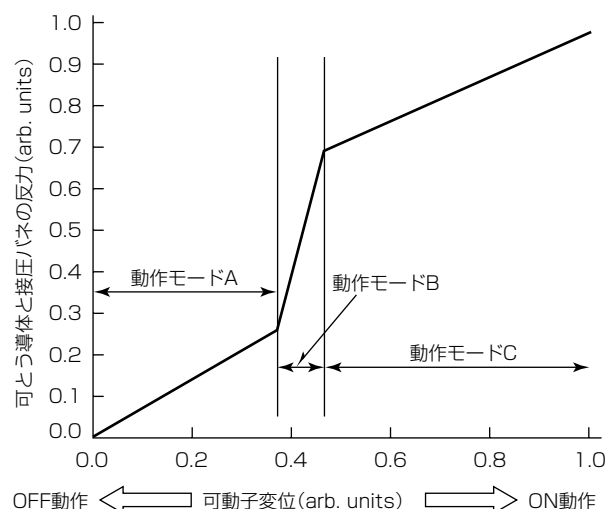


図 6. 可とう導体と接圧ばねの反力特性

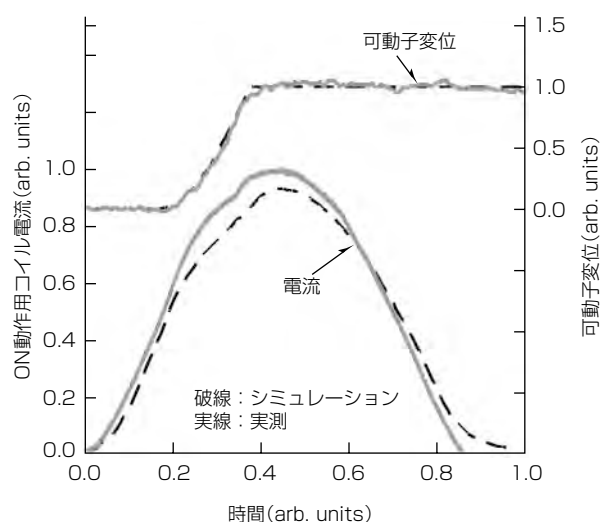


図 7. 電磁開閉器全体の動作におけるシミュレーションと実測波形の比較 (ON動作)

と固定側接点が接触すると縮み始め、可とう導体は接触の前後で荷重モデルが片持ち梁(はり)モデルから一端固定他端支持梁モデルに変化するため、可とう導体の反力特性に変曲点が発生する。この特性は図 6 のように 3 つのモードに分けられる。動作モード A は図 2 中の押し込みバーによって可とう導体が押し込まれて発生する反力が現れる領域である。動作モード B は可動側接点が固定側接点に接触した結果、一端固定他端支持梁状態となり、接点部が自由な状態に比べ反力が増大する領域となる。動作モード C は可とう導体の反力が接圧ばねの初荷重を超えるため、通電部は剛体とみなすことができ接圧ばねのみ圧縮される領域である。この反力特性を式(1)に適用すると式(3)として表現できる。 F_{spring} は可とう導体と接圧ばねの反力を示している。先に述べた電気回路方程式(2)と運動方程式(3)を連成して計算することで、電磁操作開閉器全体の駆動特性を明確化し、接圧ばねや可とう導体の最適化を図った。図 7 に実機の ON 動作特性における実測結果及び計算結果を示す。可動子変位波形は、計算と実測はおおむね一致していることが分かる。これらから、電磁界・運動連成シミュレーション

の採用によって実機を高精度に模擬することが可能であり、かつこのシミュレーション手法によって設計上流段階から電磁アクチュエータと各種弾性体(可とう導体と接圧ばね)とを組み合わせた総合性能評価が可能であることを確認した。

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_{mag}(x, I) + F_{spring}(x) - F_{friction}(x) \dots \dots \dots (3)$$

4. む す び

スマートメータの遠隔負荷開閉を可能とする電磁操作開閉器の開発に電磁界シミュレーションを適用し、スマートメータに搭載可能な小形かつ無電力による ON/OFF 状態保持が可能な開閉器の構成を検討した。さらに、電磁界・運動連成シミュレーションによる電磁操作開閉器全体の駆動評価を実施した。これらシミュレーション技術の実用化によって、設計上流段階で開閉器全体の駆動特性を定量的に把握でき、開発期間の短縮を図ることが可能となった。今後も、更なるシミュレーションの精度向上に向けて検討を継続し、開閉器の高性能化を追求していく。

先端レーザ加工機を支えるシミュレーション技術

西前順一*
山本達也*
藤川周一*

Simulation Technology for Advanced Laser Processing System

Junichi Nishimae, Tatsuya Yamamoto, Shuichi Fujikawa

要 旨

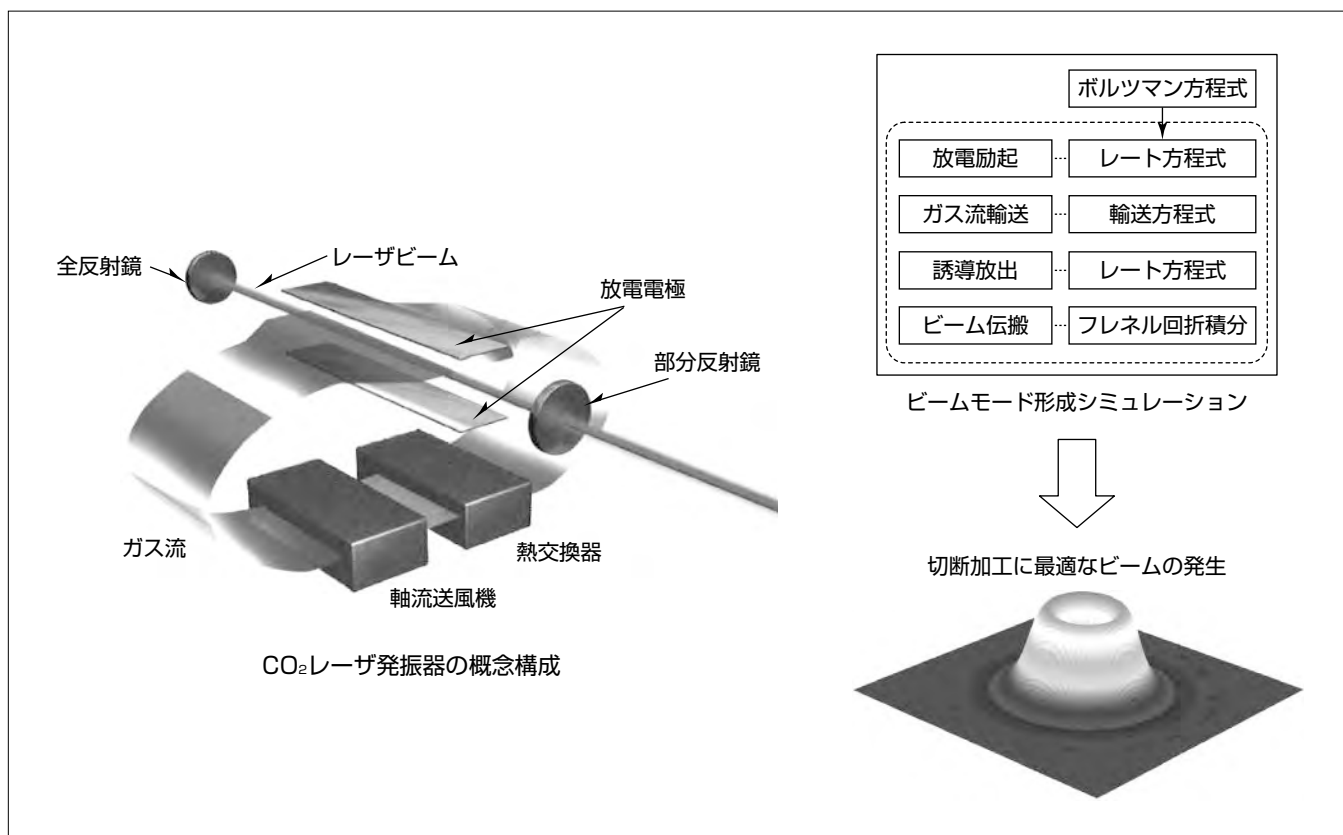
三菱電機では板金切断用途とプリント基板の微細穴あけ用途を中心に幅広い産業分野に向けたレーザ加工機を製品化しており、生産性(加工速度)をはじめとする性能ならびに品質向上を目指して、弛(たゆ)まぬ研究開発を進めている。レーザ加工機の開発では、目的とする加工に適したレーザビームを発生させることが、重要な開発ポイントとなる。本稿では、板金切断用レーザ加工機の開発に焦点を当て、切断加工に最適なレーザビームを発生させるために活用されているシミュレーション技術について述べる。

板金切断用のレーザ光源として使用されるCO₂レーザ発振器では、放電励起やレーザビームの空間伝搬など複数の物理過程が混在する中でビームモードが形成されるため、出力として発生するビームの性質を精度良く予測すること

は容易なことではない。レーザ発振器中に存在する各種物理過程を連立させて解析するシミュレーションを活用して、薄板から厚板まで高速かつ高品位に切断可能なレーザビームを発生させる発振器を効率的に開発することによって、業界トップレベルの切断速度と切断面品質を実現している。

また、近年、レーザビームの偏光状態をビーム半径方向の偏光(ラジアル偏光)とすることで切断速度の向上を図る試みが注目されている。電磁界解析シミュレーションの一種であるRCWA(Rigorous Coupled Wave Analysis)法を用いて設計した偏光制御ミラーによってラジアル偏光ビームとしては世界最高出力^(注1)となる出力4kWの発生に成功している。

(注1) 2011年4月1日現在、当社調べ



ビームモードシミュレーションの活用による加工に最適なビームの発生

板金切断加工に使用されるCO₂レーザ発振器では、放電励起、ガス流輸送、誘導放出、ビーム伝搬等複数の物理過程が混在するため、加工に最適なビームを発生させるための装置パラメータの決定は容易ではない。レーザ発振器中に存在する各種の物理過程を連立させて解析するビームモード形成シミュレーションを活用することによって、加工に最適なビームモードを発生する発振器の開発効率化を図ることができる。

1. ま え が き

レーザ加工プロセスは様々な分野に適用され、多くの産業で欠かすことのできない存在となっている。当社では板金切断用途とプリント基板の微細穴あけ用途を中心に幅広い産業分野に向けたレーザ加工機を製品化しており、生産性(加工速度)をはじめとする性能向上ならびに品質向上を目指して弛まぬ研究開発を進めている。

レーザ加工機の製品開発では、目的とする加工に適したレーザビームを発生させることが重要な開発ポイントとなる。

本稿では、板金切断用レーザ加工機の開発に焦点を当て、切断加工に最適なレーザビームを発生させるために活用されているシミュレーション技術について述べる。

2. 板金切断用レーザ加工機の概要

板金切断用レーザ加工機は、金属板に高出力のレーザビームを集光照射し、照射軌跡に沿って生じる金属溶融物をアシストガスの圧力などによって除去することで金属板を高速で任意形状に切断する装置である。機械加工にない高速性とプレス加工にないフレキシビリティを兼ね備えた工作機械として、自動車や電気機器をはじめとする多様な板金加工分野の開発試作や製造の現場で広く使用されている。

板金切断用レーザ加工機の例として図1に二次元レーザ加工機“ML3015LVP-45CF-R”の外観を示す⁽¹⁾。板金切断用レーザ加工機は、レーザビームを所定の軌跡に沿って走査して、加工対象である金属板に集光照射することで切断加工を実現する加工機本体と、加工機本体にレーザビーム

を供給するレーザ発振器から構成される。板金切断用のレーザ発振器としては、主に出力2～6kWの高出力炭酸ガス(CO₂)レーザが用いられている(図1の例におけるレーザ出力は4.5kW)。

図2に板金切断用レーザ加工機を用いた加工例として、板厚4.5mmから19mmまでの軟鋼の切断結果を示す⁽²⁾。プレス加工では困難な幅広い板厚で良好な切断面品質の自由形状切断が、機械加工を遥(はる)かに上回る速度で実現されている。

図2に示すようなレーザ切断の特長を活用した加工を実現するためには、高速高精度のビーム走査を可能にする加工機の開発や、アシストガスを吹きつけるノズルの最適化などによって加工能力の向上を図る加工技術の開発と並んで、目的とする加工に適したレーザビームを発生させることが重要なポイントとなる。

図3にレーザビームを発生させるCO₂レーザ発振器の概念構成を示す⁽³⁾。一対の放電電極間にレーザ光を発生させる分子であるCO₂分子を含んだレーザガスを流し、電極間の放電によってCO₂分子を励起することによって光の増幅作用を持つゲインを生成する。全反射鏡と部分反射鏡で構成されるレーザ共振器中を往復させる光をゲインによって増幅して部分反射鏡から出力レーザビームとして取り出す構成である。CO₂レーザではレーザガスの温度上昇によって動作特性が低下するため、レーザガスは軸流送風機と熱交換器を用いて循環冷却される。レーザビームの光軸方向、ガス流方向、放電電流の方向が互いに直交していることから、三軸直交型と呼ばれる構成である。

レーザ発振器で発生するビーム品質の最適化は、加工性能の向上に対して極めて重要な要素である。最適なモード次数(ビーム集光性)の適用のみならず、ビームプロファイルのわずかな差異が加工に及ぼす影響も無視できない。板金切断加工に供されるレーザ出力の増大に伴う切断板厚の増大や切断の高速化によって、発振器の出力ビームにはますます厳しい品質が要求されるようになっている。一方、図3に示す



図1. 二次元レーザ加工機“ML3015LVP-45CF-R”



図2. 軟鋼切断例

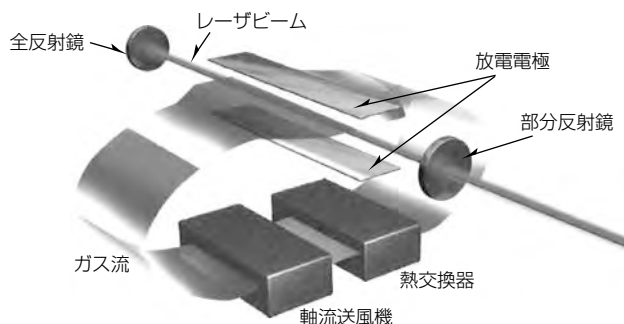


図3. 三軸直交型CO₂レーザ発振器の概念構成

ようにCO₂レーザ発振器では、放電励起やレーザビームの空間伝搬など複数の物理過程が混在する中でビームモードが形成されるため、出力として発生するビームの性質を精度良く予測することは難しく、試行錯誤的な手法で加工に最適なビームを発生させるレーザ発振器の装置パラメータを決定するには多大の時間と労力を費やしていた。そこで、加工に最適なビームモードを発生させる発振器の開発効率化を目的として、発振器中のビームモード形成をシミュレートする技術を開発した。

3. ビームモード形成シミュレーション

2章で述べたように、CO₂レーザ発振器では、次に挙げる複数の物理現象が混在して相互に影響を及ぼし合いながらビームモードが形成される。

- ・放電プラズマによるCO₂分子の励起
- ・ガスの流れによる励起分子の輸送
- ・励起分子とレーザビームの相互作用(誘導放出)
- ・共振器ミラー間のビーム空間伝搬

CO₂レーザ発振器から発生するビームモードを精度良く計算予測するためには、このような物理現象を数値モデル化し、三軸直交型CO₂レーザの構造を考慮して各現象が相互に影響しあう効果を付け加えることですべてを連立させて解析する計算コードが必要であり、図4のブロック図に示されるビームモード形成シミュレータが作成されている。

レーザ発振器の励起源となる放電の解析にはボルツマン方程式を基にした放電シミュレーションが用いられる。ボルツマン方程式による放電シミュレーションは、電子が電界から受け取るエネルギーが放電中で生じる電離現象や励起現象などに分配されていく過程を解析するのに有用であり、当社ではオゾナイザをはじめとする高性能の放電応用製品の開発に広く活用している。

レーザ発振器の開発では、ボルツマン方程式を基にした放電シミュレーションによってレーザ励起放電における励起効率や最適なガス組成などが求められており、試験デー

タと付き合わせて検証された値がレーザ励起放電のデータベースとしてビームモード形成シミュレーションで使用される。

レーザ発振は光の増幅作用を持つゲインによって、レーザビームが増幅されて発生する。CO₂レーザのゲインは、放電によって励起されたCO₂分子の密度に比例する物理量で、励起状態にあるCO₂分子の密度は、レーザ発振に関係する複数のエネルギー準位の励起や脱励起などを表すレート方程式と呼ばれる一群の方程式に基づいて解析される。一般的なレート方程式では時間変化のみが扱われるが、当社では三軸直交型CO₂レーザの構造を考慮して、ガス流によるCO₂分子の輸送効果を加えることによってゲインの時間・空間分布を求めるコードを開発している。

レーザ発振器のビームモードは、全反射鏡と部分反射鏡で構成されるレーザ共振器中を往復して空間伝搬するレーザビームが、ゲインによって増幅されて形成される。共振器中のミラー間のビーム空間伝搬は、波動光学における数値計算で多用されている高速フーリエ変換(FFT)によるフレネル回折積分を用いている。

レーザ発振器のビームモードはゲインの時間・空間分布の影響を受けて形成される。また、逆にゲインの時間・空間分布はビームモード形状の影響を受けて変化する。各物理現象に対応する数値解析をすべて連立させて矛盾のないビームとゲインの状態を求めることによって、CO₂レーザ発振器で発生するビームモードを数値的に予測することが可能となる。開発したビームモード形成シミュレーションを使って求めた出力ビームモードの例を図5に示す。

切断加工に最適なビームのモード次数は加工対象に依存する。例えば切断板厚がある程度厚くなると、溶融物を除去する切断溝幅を確保する必要性から、最適なビームモードは高次のモードへシフトしていく。またモード次数などの単純な指標では表すことができないわずかなモード形状の崩れや、ビーム周辺光の存在によって切断加工能力が大きく変化する。ビームモード形成シミュレーション技術を活用することによって、ゲイン分布やレーザガス温度分布、モードを規定する開口の配置等詳細な構成までを考慮した発振器装置パラメータの最適化が可能となる。これによって加工対象やユーザーニーズに合わせて最適化された発振器開発の効率化が図られ、業界トップレベルの切断速度と切断面品質の製品を実現している。

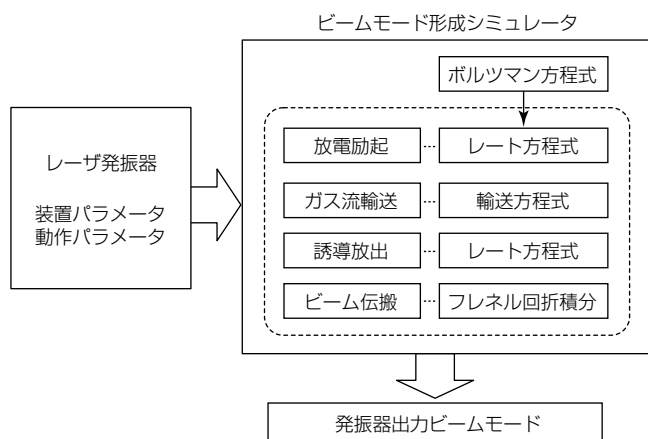


図4. ビームモード形成シミュレーションのブロック図

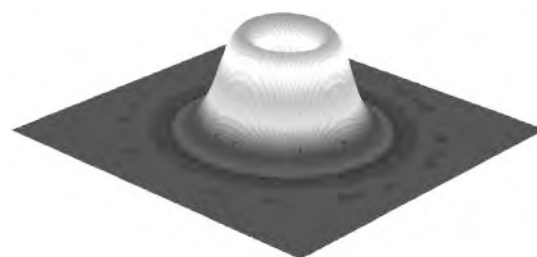


図5. 三軸直交型CO₂レーザ出力ビームモードの計算例

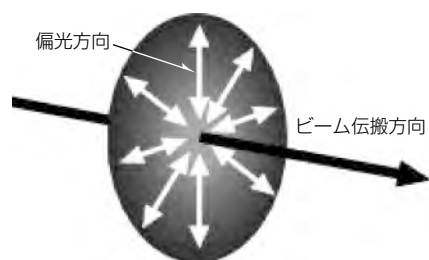


図 6. ラジアル偏光ビームの概念図

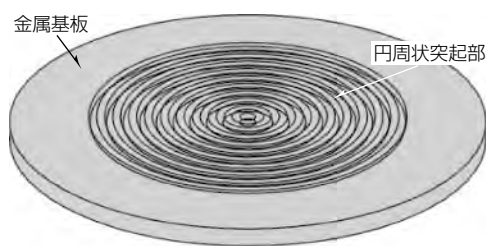


図 7. 完全反射型ラジアル偏光選択ミラーの概念構造

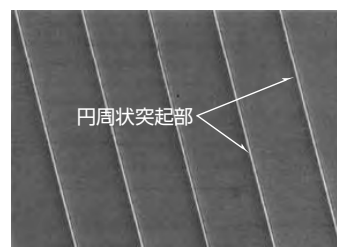


図 8. ラジアル偏光選択ミラー写真 (一部分の拡大)

4. 偏光制御におけるシミュレーション技術

最近のレーザ板金切断加工に関するトピックスとして、レーザビームの偏光状態をビーム半径方向の偏光(ラジアル偏光)とすることで切断速度の向上を図る試みが注目されている。

図 6 にラジアル偏光ビームの概念を示す。レーザビームが金属表面に斜めに入射する場合、入射面内で振動する電界を持つ光(P偏光)が最も高い吸収率を持つことが知られている。ビーム径方向のみに偏光したラジアル偏光ビームを金属切断へ適用した場合、任意の切断進行方向で照射されるレーザビームが常に吸収率が高いP偏光の状態で入射するため、一般的な切断加工に使用されている円偏光に比べてビーム吸収率が増加し、切断速度の向上が可能になると考えられている。

これまでもラジアル偏光ビームを選択的に発生させる提案はあったが、偏光を選択する素子が透過型の素子であるためにレーザビームの吸収が大きくなり、高出力レーザへの適用は困難と考えられていた⁽⁴⁾。これに対して当社では、ビーム吸収に伴う熱負荷の影響を回避するため、完全反射型の金属製ラジアル偏光選択ミラーを考案した。

完全反射型ラジアル偏光選択ミラーの概念構造を図 7 に示す。ミラー表面にはレーザビームの波長以下の幅を持つ円周状の突起部分が形成されている。金属の突起部分は、レーザビームを電磁波と考えた場合に一種のアンテナとして作用するものである。ラジアル偏光に直交する偏光成分(アジマス偏光)に関して、突起部分の高さを調整することによって、突起上面で誘起されるアンテナ反射波と、基板面で反射する基本反射波が打ち消し合うよう干渉させることで、ラジアル偏光のみを選択的に強く反射させる動作原理である。

3章でレーザビームの伝搬計算に用いたフレネル回折積分はスカラー近似の理論であるため、電界ベクトルに相当する偏光の振る舞いを扱うことはできない。ラジアル偏光選択ミラーの理論的動作検証ならびに試作のための設計検討には電磁界解析シミュレーション手法の一種であるRCWA法を選択した。

RCWA法を用いて円周状突起部のピッチならびに突起の高さ・幅をパラメータとしたシミュレーションで検討を実施し、ラジアル偏光成分に対する反射率は損失が生じないように十分に高い反射率であるとともに、ラジアル偏光に直交する偏光成分に対する反射率は、打ち消し合う干渉の効果によってレーザ発振器の出力ビームには現れなくなる低い反射率となるように円周状突起部の形状を設計した。このような設計にしたがって試作したラジアル偏光選択ミラーの写真を図 8 に示す。試作したラジアル偏光選択ミラーを共振器ミラーとして用いることによって、ラジアル偏光ビームとしては世界最高出力となる出力4kWの発生に成功している⁽⁵⁾。

5. む す び

板金切断用CO₂レーザ発振器のビームモード形成シミュレーション技術は、加工に最適な発振器開発の効率化によって業界トップレベルの切断速度と切断面品質の実現に寄与している。また、電磁界解析シミュレーション手法の一種であるRCWA法を用いて設計したラジアル偏光選択ミラーによって、ラジアル偏光ビームとしては世界最高出力となる出力4kWの発生に成功した。今後にわたり、レーザ加工機の開発で物理シミュレーション技術は有効な手段となると考えられ、その開発と活用を推進していく。

参 考 文 献

- (1) 城所仁志, ほか: 新型炭酸ガス二次元レーザ加工機“ML3015LVP-45CF-R”三菱電機技報, **84**, No.2, 151~154 (2010)
- (2) 井上 孝, ほか: 炭酸ガスレーザ加工機の普及とその技術変遷, レーザ加工学会誌, **13**, No.1, 1~5 (2006)
- (3) 藤川周一, ほか: CO₂レーザ加工機の現状と新展開, レーザー研究, **38**, No.3, 160~166 (2010)
- (4) Moser, T., et al.: Intracavity generation of radially polarized CO₂ laser beams based on a simple binary dielectric diffraction grating, **45**, 8517~8522 (2006)
- (5) 山本達也, ほか: 4kWラジアル偏光ビームの発生, レーザー学会第393回研究会報告, 1~6 (2009)

NC制御機能開発における シミュレーション技術の活用

長岡弘太郎*

Applying of Simulation Technology to Development of Control Function for NC System

Kotaro Nagaoka

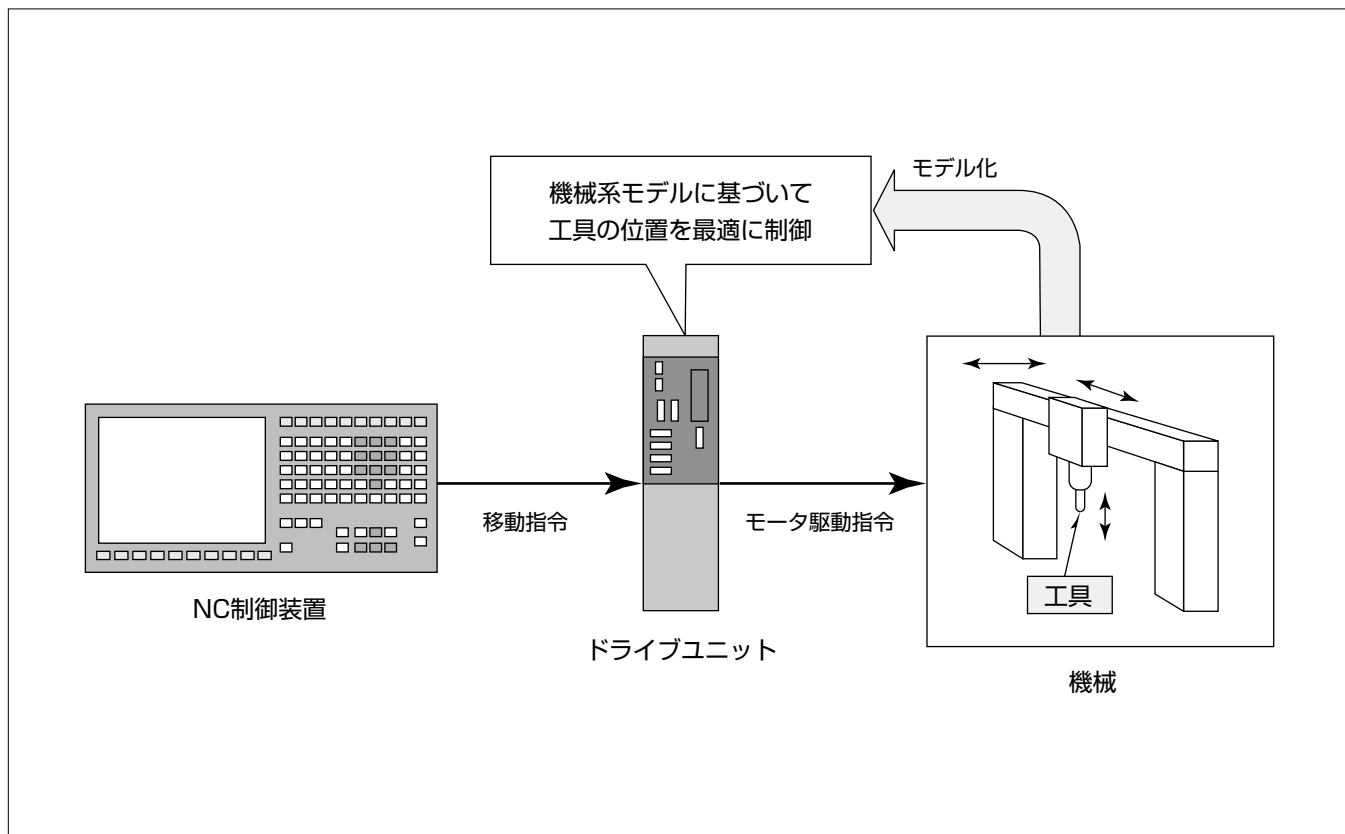
要 旨

NC (Numerical Control) 工作機械は、各種金型や金属部品などを高い精度で加工するための重要な生産財である。高精度な加工は、加工対象物に対する工具の経路(工具軌跡)を指令された経路に正確に追従させる制御(サーボ制御)によって実現される。サーボ制御は、NC制御装置で生成された移動指令に工具が正確に追従するように、ドライブユニット内で行われる。

近年、加工に要する時間を短縮して高い生産性を実現するために、機械の高速な駆動が求められている。一方で、機械を高速に駆動させようとする、工具を指令された経路に正確に追従させることが難しくなるという問題がある。高速に駆動させる場合、移動指令の変化が激しくなり、その激しい移動指令の変化に素早く反応させるように制御し

ようとすると、機械を不必要に揺らしてしまう。その揺れ(機械振動)の影響によって工具軌跡が指令された経路からずれてしまい、結果として加工の精度が低下してしまう。

そこで、機械振動を抑制し、高い精度で工具を移動指令に追従させるために、OMR-FF (Optimum Machine Response-Feed Forward) 制御方式を開発した。この方式は、機械振動をモデル化し、モデルに基づいた制御を行って高精度な加工を実現するものである。開発にあたり、シミュレーションによって求めた工具軌跡を定性的・定量的に分析することで、開発の効率化を図った。シミュレーションによって、従来よりも振動抑制性能が向上することが確認でき、さらに、最適な制御パラメータを探索することが可能となる。



NC工作機械の装置構成とOMR-FF制御

工具軌跡に影響を及ぼす機械振動をモデル化し、モデルに基づく最適な制御を行うことによって、機械振動を抑制して高精度な加工を実現する。

1. ま え が き

生産性向上の要求に対応するため、NC工作機械のサーボ制御では、高速・高加速度の条件下でも機械の工具軌跡が指令された経路に誤差なく追従することが求められる。追従誤差を小さくするためにサーボ制御のハイゲイン化（応答を速くすること）が図られているが、単に応答を速くして高速条件で駆動すると、機械振動が生じ、工具軌跡に誤差が生じてしまうという問題があった。さらに、サーボ制御に用いる位置検出器は、通常は工具とは離れた位置に設置されており、位置検出器が設置された位置から工具までの間の機械要素が振動しやすい場合、位置検出器で検出される位置（フィードバック位置）を指令された位置に正確に追従させても、工具軌跡は機械振動の影響を受けて指令経路からずれてしまうという問題があった。

そこで、機械振動を抑制するためのサーボ制御方式を開発した。開発に当たっては、工具軌跡をシミュレーションによって求めることによって、誤差抑制効果の確認や、最適パラメータの探索を行い、開発の効率化を図った。

本稿では、開発した制御方式の特長と、シミュレーションによる効果確認及び実機測定結果との比較について述べる。

2. 機械系のモデルに基づいた制御

2.1 振動抑制制御の課題

機械振動を制御によって抑制する場合、振動の周波数が既知であれば、フィードフォワード制御（想定される誤差に基づいてあらかじめ指令信号を操作する制御）が有効である。指令信号から機械振動の周波数成分を取り除くことで、機械振動を抑制することができる。また、フィードフォワード制御には、どのようなパラメータを設定しても制御系が不安定になることがないという利点がある。

工作機械のサーボ制御では、振動の抑制を簡単な構成で行う方式として、指令ノッチフィルタ（指令信号に含まれる特定周波数の振動成分を除去するフィルタ）を用いる方式が従来から用いられている。しかしこの方式では、工具軌跡に生じる誤差を十分に抑制できない場合がある。そこで、新しい制御方式として、OMR-FF制御を開発した。この制御方式は、当社汎用サーボで定評のある“規範モデル”を利用した2自由度制御⁽¹⁾に、機械の振動特性に応じたフィードフォワード制御を付加した方式である⁽²⁾。

2.2 機械系のモデル化

OMR-FF制御は、機械の特性に応じて工具軌跡が指令経路どおりに最適に動くように制御するものである。そのためには、機械系の特性を適切にモデル化することが必要となる。図1は、機械系モデル化の概念を示すイメージ図である。機械系は一般にモータ駆動指令を受けて駆動トルクを発生させるサーボモータ、実際に位置を制御する対象

である工具と、サーボモータの駆動トルクを工具まで伝達する動力伝達機構（ボールねじなど）から構成される。さらに、制御系にフィードバックするための位置を検出する位置検出器を持っている。図1に示す例では、サーボモータの回転角度からフィードバック位置を求めている。

一方、実際に制御したいのは工具の位置であるが、工作機械で加工中にこの位置を直接測ることは現実的には不可能である。長さを測定できる位置検出器（リニアスケール）を用いて、より工具に近いところの位置を測る方法もあるが、その場合も工具とは離れたところに位置検出器を配置することになる。

したがって、機械系を2つに分けてモデル化する。すなわち、モータ駆動指令とフィードバック位置の間のモデルを機械モデル1とし、フィードバック位置と工具位置の間のモデルを機械モデル2としてそれぞれモデル化する。フィードバック位置と工具位置との間の特性としては、数百rad/s程度の比較的低い周波数で振動する特性が見られる場合が多い。

2.3 OMR-FF制御方式

OMR-FF制御方式の構成を図2に示す。この制御系はフィードバック制御部とフィードフォワード制御部からなり、フィードフォワード制御部は規範モデルと位置・速度・トルクの各FF（フィードフォワード）演算を含む。規範モデルは、指令位置に対する工具位置の応答の速さを決定するためのもので、その応答の速さを規範モデルのゲインで規定する。

従来制御の場合は応答の速さはフィードバック制御部のパラメータや機械系の特性の影響を受けてしまうが、OMR-FF制御ではそれらに無関係に工具位置の応答の速さを決定できるので、工具位置の応答が所望の応答となるように容易に制御することができる。ただし、規範モデルのゲインを大きい値に設定すれば速い応答が得られるが、

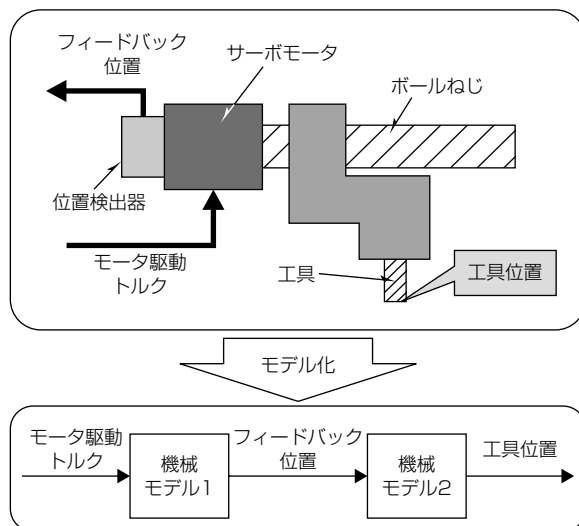


図1. 機械系のモデル化

工具端を急峻(きゅうしゅん)に動かすことになるため、振動が生じやすくなる。また、対称な形の信号が入力された場合には、対称な形の信号が出力されるように規範モデルを設計することによって、対称性のよい工具軌跡を得ることができる。

一方、位置・速度・トルクの各FF演算は、機械系のモデルに基づいて行われる。位置のフィードフォワード演算は、フィードバック位置から工具位置までのモデル(機械モデル2)の逆特性の演算を行う。速度のフィードフォワード演算は、機械モデル2の逆特性の演算を行った上で、位置を速度に換算する演算を行う。トルクのフィードフォワード演算は、モータ駆動トルクから工具位置までのモデル(機械モデル1と機械モデル2を結合したモデル)の逆特性の演算を行う。このように設計することで、機械の振動特性がキャンセルされ、工具位置は規範モデルの出力と一致して動作することになる。

3. 軌跡シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

従来制御方式とOMR-FF制御方式のそれぞれについて、パラメータと制御性能の関係を明らかにし、さらに両制御方式の制御性能の比較を行うために、軌跡シミュレーションを行う。

シミュレーションに用いる機械系は、周波数が200rad/s及び400rad/sの2つの振動モードをもつ3慣性系とする。シミュレーションに用いた機械系モデルの周波数応答を図3に示す。図3で、破線はモータ駆動指令から検出器位置までの周波数応答、実線はモータ駆動指令から工具位置までの周波数応答をそれぞれ示している。

シミュレーションに用いた指令経路は、送り速度5

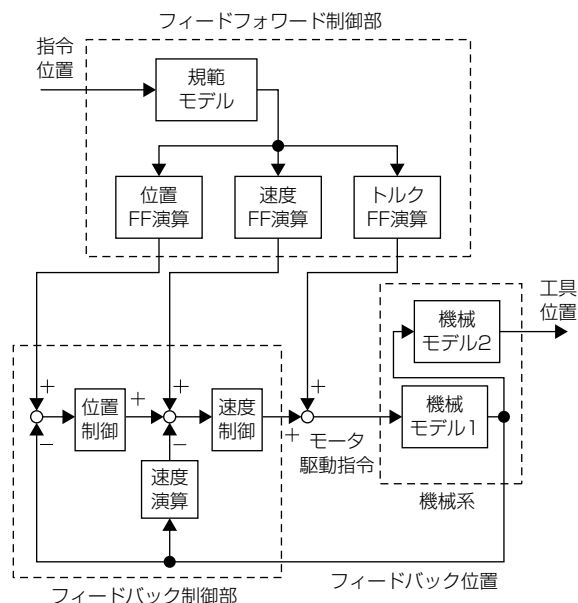


図2. OMR-FF制御の構成

mm/s、角度90°のコーナー形状とした。従来制御方式の場合、ノッチフィルタのパラメータを機械系の200rad/sの振動モードに合わせて設定した。また従来制御では、フィードフォワードの効き具合を、フィードフォワード率(FF率)を用いて調整する。このシミュレーションでは、FF率を0.70から1.0まで変化させた。また、OMR-FF制御方式の場合、位置・速度・トルクのフィードフォワード演算のパラメータは機械系の200rad/sの振動モードに合わせて設定し、規範モデルのゲインを30rad/sから55rad/sまで変化させた場合についてシミュレーションを行った。

性能の評価には、コーナー追従誤差(指令コーナーの角の二等分線と軌跡との交点と、指令コーナー頂点との距離)とコーナー振動振幅(コーナー通過後の工具軌跡の指令経路に垂直な方向の振動振幅)を用いることとした。

3.2 シミュレーション結果

従来制御及びOMR-FF制御それぞれのシミュレーション結果について、コーナー振動振幅を横軸にとり、コーナー追従誤差を縦軸にとってプロットしたものを図4に示す。FF率またはゲインを大きく設定すると、コーナー追従誤

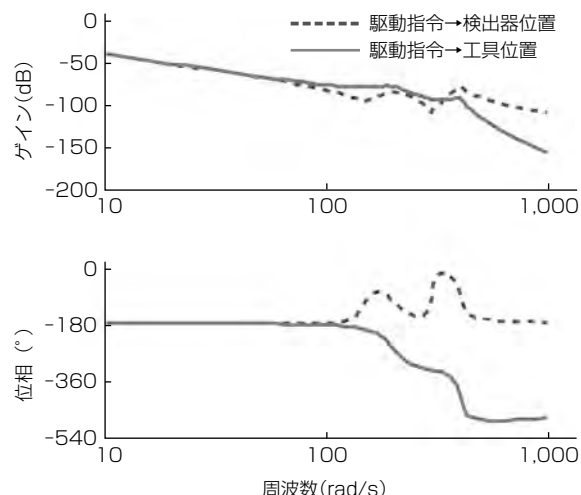


図3. シミュレーション用機械モデルの周波数応答

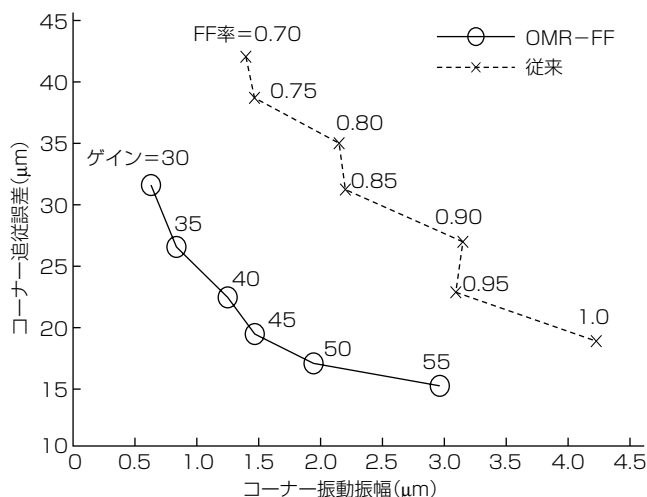


図4. シミュレーション結果

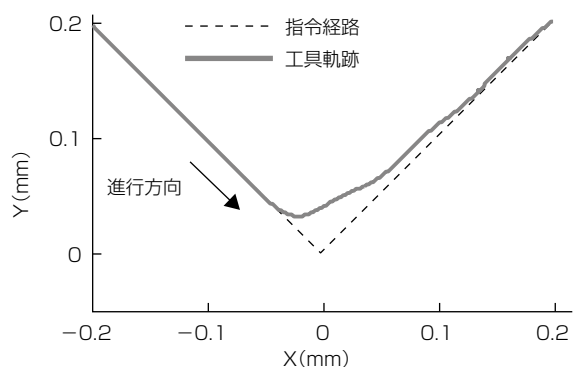


図5. 軌跡シミュレーション結果(従来制御)

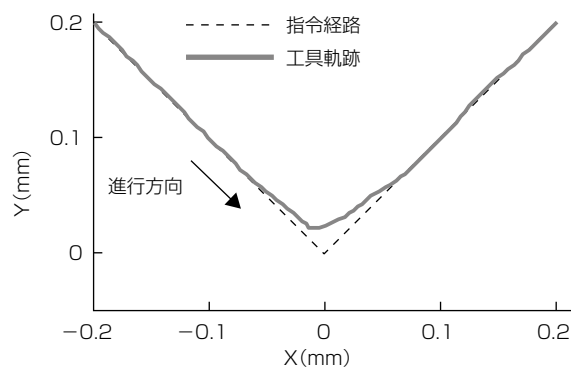


図7. 軌跡測定結果(従来制御)

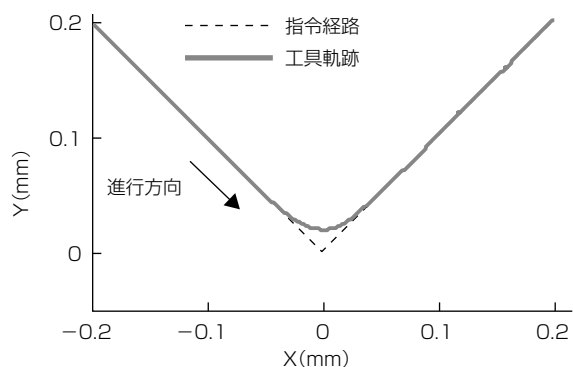


図6. 軌跡シミュレーション結果(OMR-FF制御)

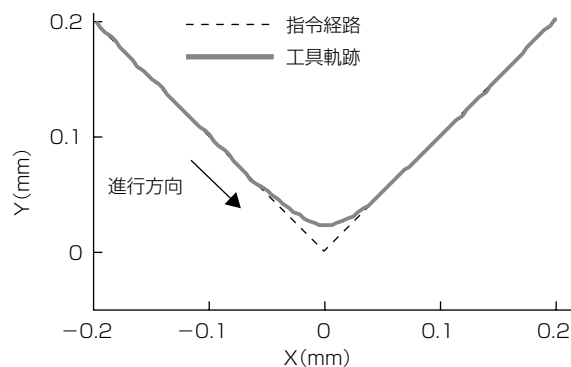


図8. 軌跡測定結果(OMR-FF制御)

差は小さくなるが、コーナー振動振幅が大きくなる。

同一のコーナー振動振幅で比較した場合、OMR-FF制御は従来制御に比べてコーナー追従誤差を約1/2にできる。例えば、コーナー振動振幅を1.5 μ m以内に抑えるための従来制御のFF率は0.75であるが、そのときのコーナー追従誤差は38 μ mである。一方、OMR-FF制御では、規範モデルゲインを45rad/sとすればコーナー振動振幅を1.5 μ m以下とできるが、そのときのコーナー追従誤差は従来制御時の1/2の19 μ mとなっている。

従来制御でFF率を0.75に設定した場合とOMR-FF制御で規範モデルゲインを45rad/sに設定した場合のコーナー通過時の軌跡を、図5及び図6にそれぞれ示す。OMR-FF制御の場合の方が工具軌跡の形状が対称でひずみの少ないものとなり、良好な制御特性が得られることが分かる。

4. 実機測定結果

シミュレーションモデルの妥当性及び実際の制御性能の確認のため、実機を用いた軌跡測定実験を行った。実験は、工具のX軸及びY軸の2軸の位置をNC制御装置を用いて制御し、そのときの工具軌跡を二次元エンコーダ⁽³⁾を用いて測定することによって行った。NC制御装置は三菱電機製“M750”及び“MDS-Dサーボドライブ”を用いた。

従来制御を用いた場合の測定結果を図7に、OMR-FF制御を用いた場合の測定結果を図8にそれぞれ示す。

各方式における制御パラメータは、シミュレーションと

同じものを設定している。工具軌跡の形状に現れる傾向としては、シミュレーション結果と実験結果はおおむね一致している。また、OMR-FF制御の方が軌跡の対称性が良い結果となっていることが分かる。

5. む す び

NC工作機械の送り制御系で、機械系のモデルに基づいて工具軌跡を最適に制御するための制御方式としてOMR-FF制御を開発した。従来の指令ノッチフィルタを用いる方式に対して、規範モデルを用いた2自由度制御方式に機械振動モデルに基づくフィードフォワードを付加した方式であるOMR-FF制御方式を適用することによって、軌跡の追従性・振動抑制性能・対称性が向上することを示した。

参 考 文 献

- (1) 小山正人，ほか：規範モデルを用いた電動機の2自由度制御，電気学会論文誌D，**114**，No2，137～143（1994）
- (2) Nagaoka, K.: Control Method of Motion Error Compensation for NC Machine Tools, Intl. J. of Automation Technology, **3**, No.3, 292～297（2009）
- (3) Measuring systems for inspecting linear axes-KGM181 and KGM182 grid encoders, Measuring systems for machine tool inspection and acceptance testing(The brochure of the Heidenhain), 10～11（2007）

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

北野弘明*
栗重正彦**
松永隆徳***

An Assist Control Method for Lateral Disturbance Using an Electric Power Steering

Hiroaki Kitano, Masahiko Kurishige, Takanori Matsunaga

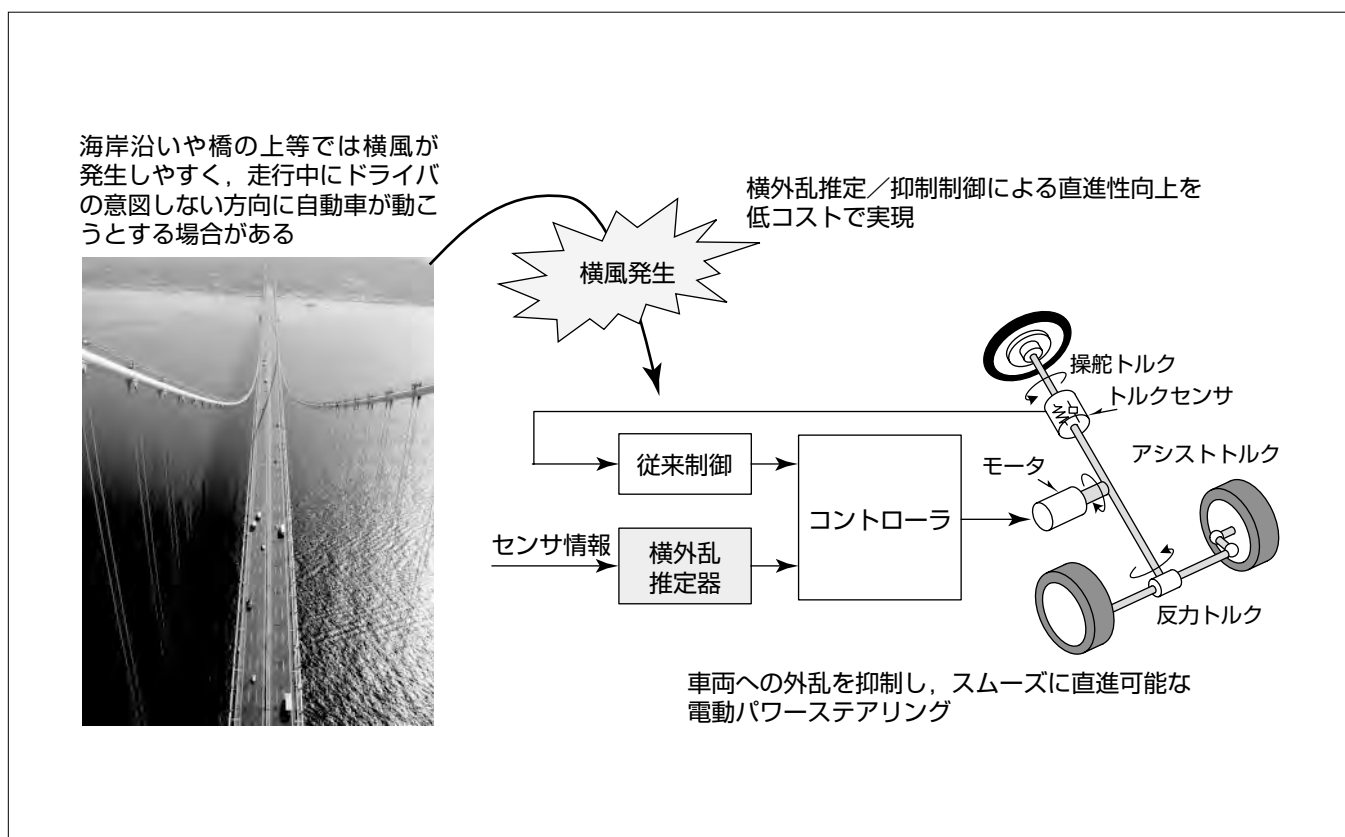
要 旨

自動車の直進走行中に急な横風が発生した場合に、ドライバの意図に反して車両が横方向に動こうとする場合がある。特に海岸沿いの道路や橋の上等では、横風が生じやすい。このような横外乱を推定し補償する制御手法が考えられているが⁽¹⁾⁽²⁾、いまだに広く普及しているとは言い難い。この理由の一つとして、従来の手法での横外乱を推定する際の過大な計算負荷が挙げられる。

三菱電機では、少ない計算負荷で横外乱を推定、制御する手法を開発した。計算負荷低減のポイントは横風によって車両を横方向に移動させようとする横力と、車両を回転

運動させようとするモーメントの関係を考慮することによって、横外乱推定器を簡略化したことである。

今回開発した横外乱推定器を用いた推定結果に基づき、電動パワーステアリングの発生するステアリング操作のアシストトルクに、横外乱を打ち消す方向に補償トルクを重畳させることによって、ドライバがステアリングを強く保持していない場合においても、ドライバの意図に反して車両が横方向に動こうとすることを抑制し、低コストで車両の直進性向上を図ることができる。



横風発生時に直進を維持可能な電動パワーステアリング

直進走行中に横風が吹いた場合、ドライバの意図に反して車両が横方向に動こうとする場合がある。車両の運動モデルと実測値との差から横風を推定する横外乱推定器を構築し、横風が発生した場合にも直進を維持できる電動パワーステアリングの制御を開発した。この横外乱推定技術は自動車の予防安全制御の高機能化への応用が期待できる。

1. ま え が き

自動車の直進走行において、急な横風による横外乱が発生した場合、ドライバの意図に反して車両が横方向に動くような場合がある。このような横外乱を推定し補償する制御手法が考えられているが⁽¹⁾⁽²⁾、低価格の自動車へ広く普及しているとは言い難い。この理由の一つとして、横外乱を推定する際の過大な計算負荷が挙げられる。当社では、自動車に備えられた標準的なセンサを用いて、計算負荷を低減し、車両直進中に発生する横外乱を推定、制御する手法を開発した。

2. 横外乱の推定手法

車両が直進走行中に横風が発生した場合、車両にドライバの意図に反して横方向や回転方向の運動が発生し、ドライバによる修正操舵が必要となる。当社では、図1に示すように、横風が車両挙動へと及ぼす影響をモデル化することで、横外乱推定器によって横外乱を推定することが可能となる新しい技術を開発した。本稿では、この推定原理について述べる。

2.1 車両の運動モデル

本来ならば、車両運動は操舵系やサスペンション等の挙動まで含まれる極めて複雑なものであるが、本稿では今回対象とする車両の横方向・回転方向運動を演算可能な最小限の自由度を持つ二輪モデル⁽³⁾を用いて検討を行う。

図1に示すように車両の直進走行中に横風が発生した場合、車両に対して横力とモーメントが発生する。そこで車両の二輪モデルから横外乱推定器を構築し、車両のセンサ情報を用いて横外乱を推定する⁽¹⁾。

2.2 横外乱推定器

先に述べた二輪モデルに対し横外乱を推定する横外乱推定器を構築し、横外乱推定器によって推定された横外乱量に基づき制御を行い、直進性を向上させる。

図2に電動パワーステアリング制御システムのブロック図を示す。ドライバからのステアリング操作が車両へと入

力され、車両挙動に反映される。さらに車両挙動は車両に備えられたセンサのセンサ信号が横外乱推定器へ入力される。そして横外乱推定器は入力信号から横外乱量を推定し、横外乱によって発生する車両挙動への影響を打ち消すように、電動パワーステアリング(Electric Power Steering: EPS)のアシストトルクに補償トルクを重畳させ直進性を向上させる。

2.2.1 横外乱推定器 1

従来の横外乱推定器として、図3に示す車両重心と横外乱作用点が一致すると仮定し、図1の横風によるモーメント ϕ_{mo} を考慮しないモデルを用いた手法が知られている⁽²⁾。しかし横外乱によるモーメントを考慮していないため、推定誤差が発生するおそれがあった。

2.2.2 横外乱推定器 2

2.2.1項で述べた横外乱推定器に横外乱によるモーメントを考慮した手法が知られている⁽¹⁾。横外乱によるモーメントを考慮しているため、横外乱量を正確に推定できるが、モデルが複雑になって計算負荷が高くなってしまうという課題が挙げられる。

2.2.3 新横外乱推定器

今回開発した横外乱推定器では、横外乱の車両上の作用点(空力中心)と車両重心との距離を l_w として、横外乱によるモーメント ϕ_{mo} を横外乱による横力 ϕ_{cw} から求め、計算負荷を低減した(図3)。

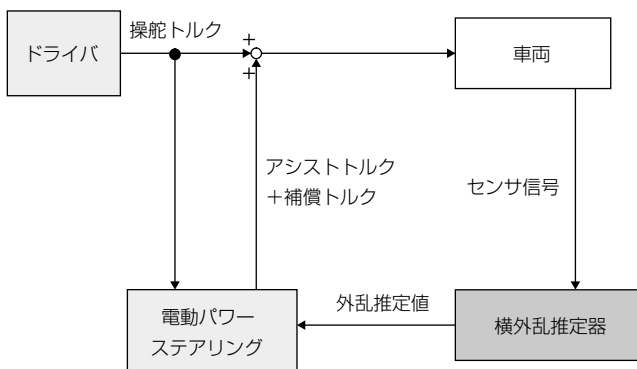


図2. 制御システムのブロック図

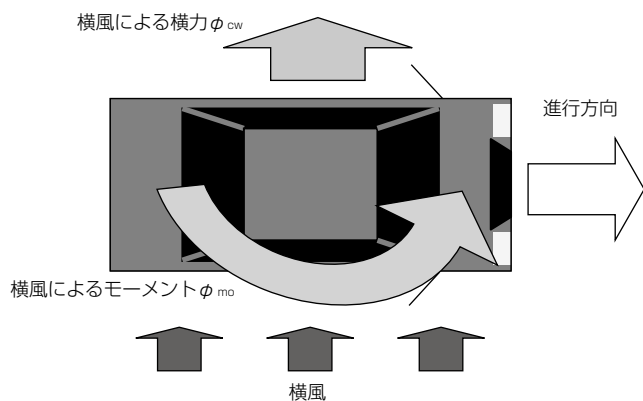


図1. 横風発生時の車両挙動への外乱

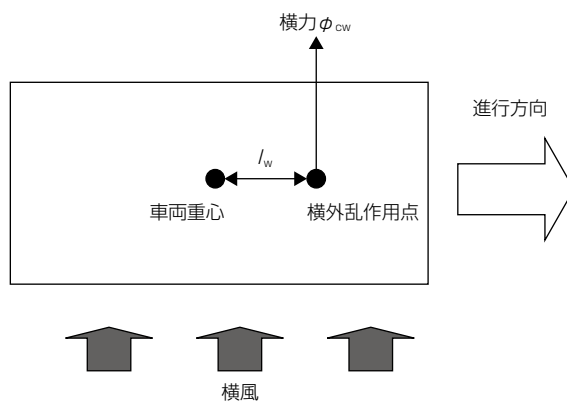


図3. 新横外乱推定器における外乱モデル

3. 直進制御シミュレーション

時速80kmでドライバが手放しで直進中、20m/sの横風がステップ状に発生した場合を想定し、先に述べた横外乱推定器からの推定値に対して、電動パワーステアリングを制御してトルクを発生させ、直進走行を維持しやすいようにアシストを行う。

3.1 横外乱推定器による推定精度

5秒間の走行における2.2節で述べた各横外乱推定器による推定結果を図4～図6に示す。

図4にOhtaらによる横外乱推定器1での推定結果を示す。

Ohtaらの手法では横外乱による横力 ϕ_{cw} しか考慮しておらず、横外乱によるモーメント ϕ_{mo} を考慮していないため、横外乱による横力 ϕ_{cw} の推定値が実際の値に対し5倍程度の値となってしまっている。

次に図5に横外乱推定器2での推定結果を示す。横風外乱の入力がステップ状のため、外乱発生初期は遅れが生じている。しかしながら、横風発生1秒後には横外乱による横力及びモーメントのどちらも推定値と実値が一致し、精度良く推定できている。

図6に今回開発した新横外乱推定器による推定結果を示す。横外乱によるモーメントを考慮しているため、横外乱推定器2と同様に定常状態では推定値と実値が一致するとともに、横外乱発生初期の応答遅れも同等以上で、精度良く推定できている。

3.2 横外乱推定器による直進制御シミュレーション

横外乱に対して直進制御を行わない場合に、先に述べた条件、すなわち手放しで走行した場合の走行軌跡を図7に示す。横外乱によって車両の横方向・回転方向運動が発生し、100m走行(4.5s経過)時に4m程度風下へと流されている。

図8にOhtaらによる横外乱推定器1での推定による直進制御の走行軌跡を示す。先に述べた横外乱による横力 ϕ_{cw} の推定誤差による過大な直進補償トルクのため、100m走行時に逆に5m以上風上側へ移動する結果となった。

図9に横外乱推定器2での推定による直進制御の走行軌跡を示す。横外乱初期の推定に遅れがあるため若干風下側に流されているが、100m走行時に横風による風下への移動量は1m以内に収まっており、横外乱に対する直進性向上を確認できる。

図10に新横外乱推定器での推定による直進制御の走行軌跡を示す。横外乱推定器2と同様に100m走行時に横風による風下への移動量は1m以内に収まっており、新横外乱推定器において、計算負荷を低減させつつ、横外乱推定器2と同等以上の横外乱に対する直進性の向上を確認できた。

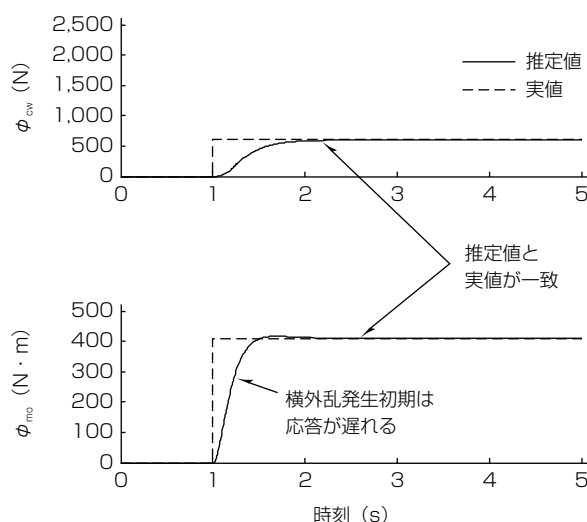


図5. 横外乱推定値(横外乱推定器2)

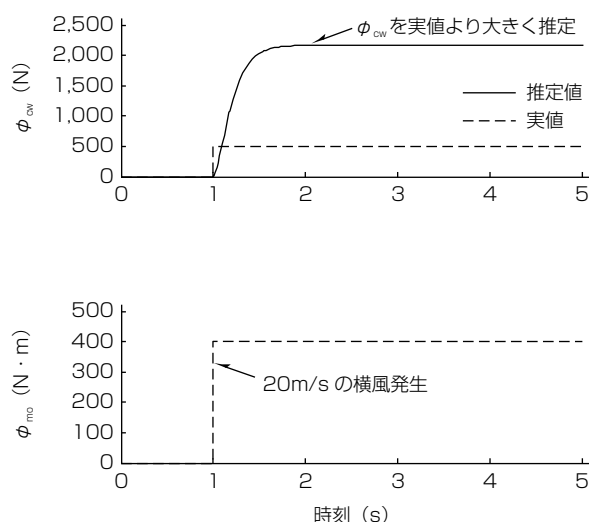


図4. 横外乱推定値(横外乱推定器1)

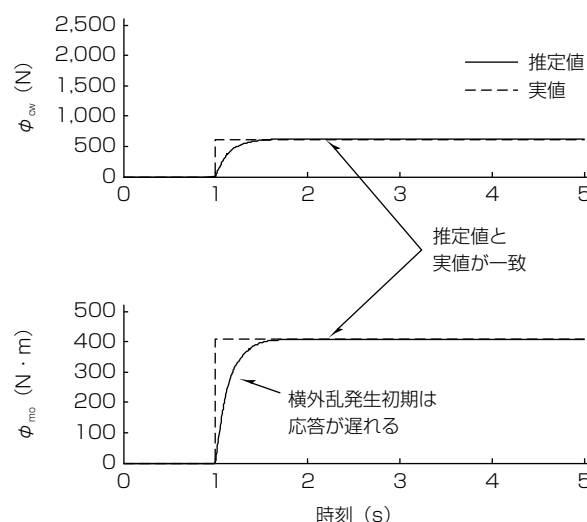


図6. 横外乱推定値(新横外乱推定器)

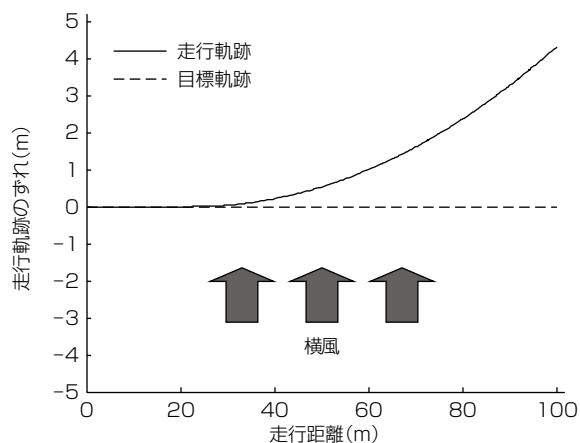


図7. 横外乱発生時の走行軌跡(制御なし)

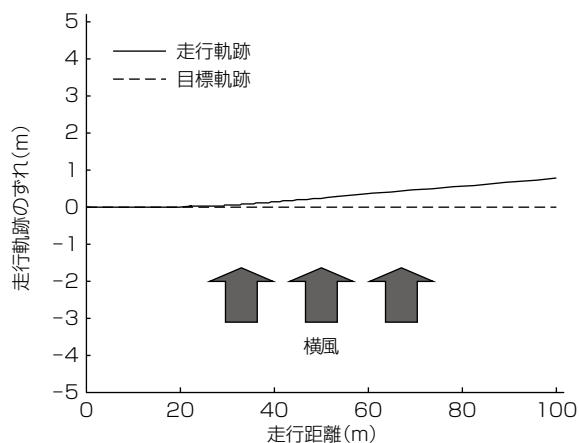


図9. 横外乱発生時の走行軌跡(横外乱推定器2)

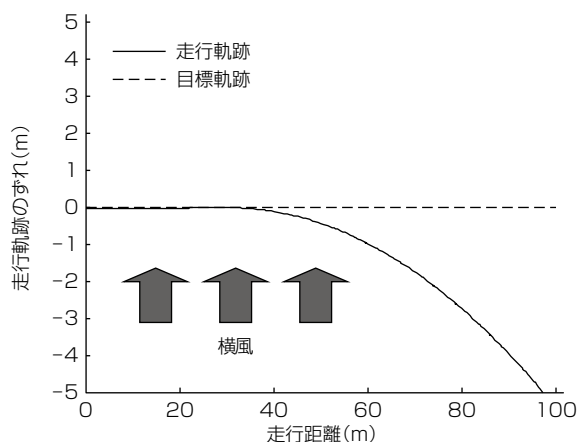


図8. 横外乱発生時の走行軌跡(横外乱推定器1)

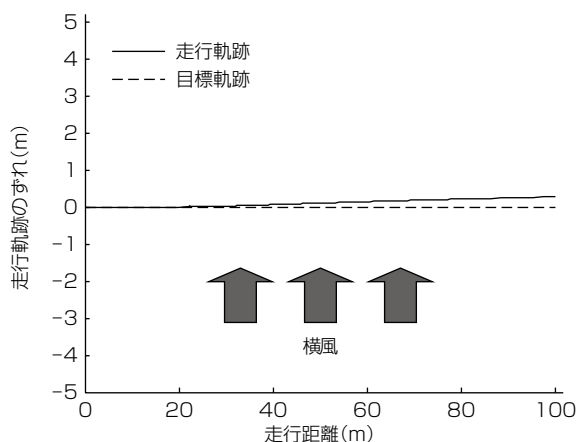


図10. 横外乱発生時の走行軌跡(新横外乱推定器)

4. む す び

当社では横外乱推定手法として、車両を横方向に移動させようとする横力と、車両を回転運動させようとするモーメントの関係を考慮することによって、計算負荷を低減した横外乱推定器を開発した。

開発した横外乱推定器では、横外乱による横力及びモーメントの推定を簡略化したモデルで行うため、従来の横外乱推定器と比較して必要な計算負荷が小さく、また推定精度も同等以上の結果を得た。

従来の横外乱推定器及び新横外乱推定器を用いて直進制御シミュレーションを行い、新横外乱推定器による制御で

は100m走行時に横外乱発生による風下への移動量が1m以内となり、横外乱推定器1を用いた場合と比較して推定精度が向上し、横外乱推定器2を用いた場合と比較して計算負荷を低減し、同等の性能を得ることができた。

参 考 文 献

- (1) 田島一親，ほか：特開2005-239012（2005）
- (2) Ohta, T., et al.: Robust Lateral Control System with Steering Torque Assist, Advanced Vehicle Control（2002）
- (3) 安部正人：自動車の運動と制御—車両運動力学の理論形成と応用，東京電機大学出版局（2008）

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

山口信一* 田中敏則*
大穀晃裕** 藤野千代***
谷 良浩*

Motor Design Technologies Considering Deteriorated Magnetic Properties in Magnetic Core Due to Stamping

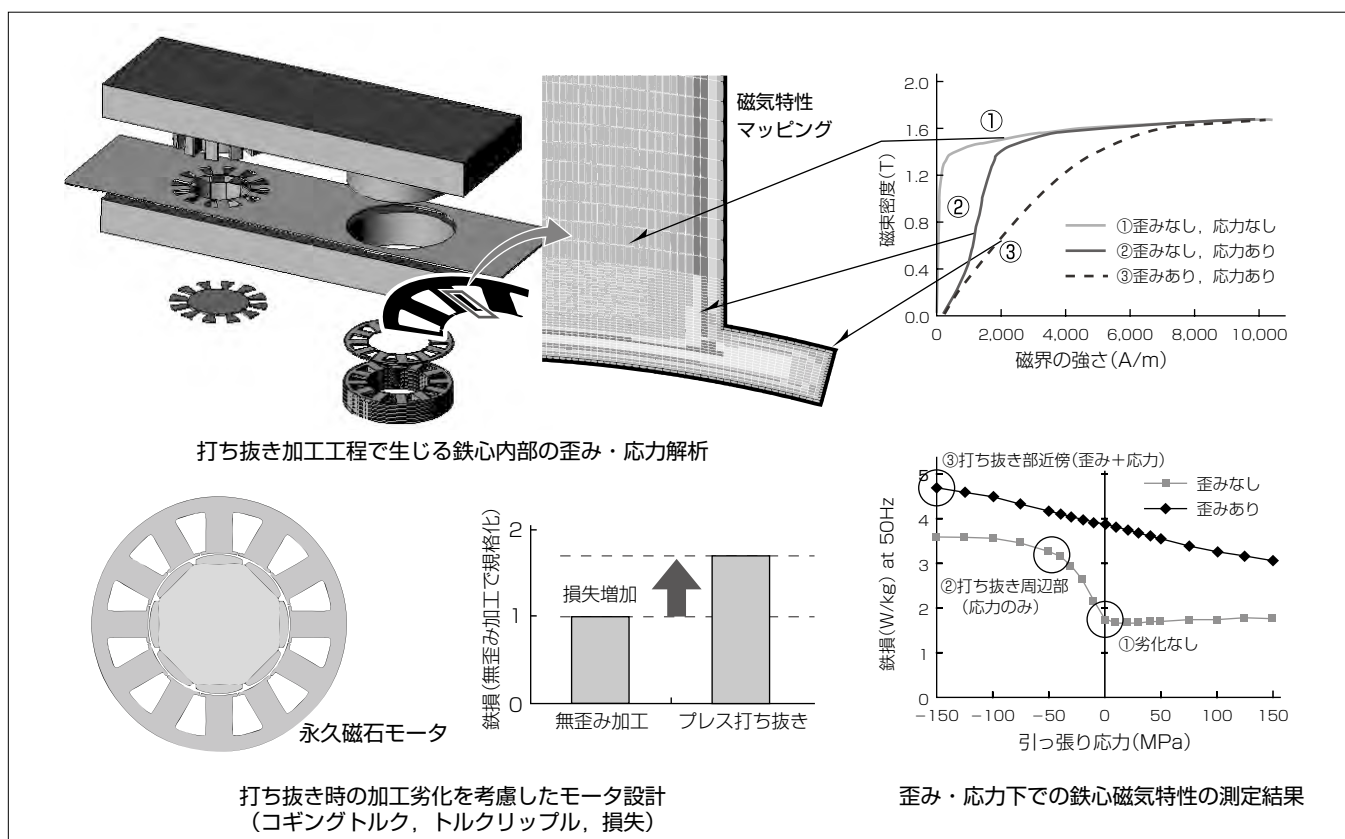
Shinichi Yamaguchi, Akihiro Daikoku, Yoshihiro Tani, Toshinori Tanaka, Chiyo Fujino

要 旨

近年、地球環境保護の観点から機器の省エネルギー・省資源化が進み、モータ開発でも低損失・小型化を追求した設計が求められている。低損失・小型化を追求したモータ設計を行うためには、量産時のモータ鉄心の磁気特性を正確に把握することが重要となる。

モータ量産時には、鉄心を電磁鋼板からプレス打ち抜きによって製作するのが一般的である。打ち抜きによって切断面近傍の鉄心素材には歪(ひず)みが加わるとともに、広範囲にわたって応力が残留し、これらの影響によってモータ鉄心の磁気特性は歪みや応力がない状態に比べ劣化することが知られているが、従来はこの磁気特性劣化がモータ性能に与える影響を定量的に把握できなかった。

本稿では、打ち抜き加工がモータ特性に及ぼす影響を設計段階で高精度に把握することを目的として開発した解析技術について述べる。この解析技術は、歪み及び応力を変化させた際の鉄心磁気特性のデータベースをあらかじめ作成し、打ち抜き解析結果に基づいて鉄心内部の磁気特性劣化をマッピングし、磁界解析でモータ特性を予測するものである。永久磁石モータを例として、鉄心打ち抜きによる加工劣化の影響を定量化した。この技術を用いることで、量産時の鉄心の磁気特性劣化を考慮した高精度な性能予測が可能となる。今後、設計技術の妥当性検証を行うとともに三菱電機モータの高性能化開発に役立てていく。



鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮した設計技術

歪み及び応力を変化させた場合の鉄心磁気特性のデータベースを取得し、打ち抜き解析結果に基づいて鉄心内部の磁気特性劣化をマッピングし、磁界解析を行うことで、打ち抜き加工がモータ特性に及ぼす影響を設計段階で高精度に予測する。

1. ま え が き

近年、地球環境保護の観点から機器の省エネルギー・省資源化が進み、モータ開発でも低損失・小型を満足する高性能化設計が求められている。モータの高性能化設計を行うためには、量産時のモータ鉄心の磁気特性を正確に把握することが重要となる。当社はこれまでに、鉄心の磁気異方性や焼きばめ時の応力を考慮した設計技術の開発を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。一方、産業機器、エレベーター、家電などの小型モータを量産する際には、鉄心を電磁鋼板からプレス打ち抜きによって製作するのが一般的である。打ち抜きによって切断面近傍の鉄心素材には歪みが生じるとともに、広範囲にわたって応力が残留し、これらの影響によってモータ鉄心の磁気特性は歪みや応力がない状態に比べ劣化することが知られているが⁽³⁾、従来はこの磁気特性劣化がモータ性能に与える影響を定量的に把握できなかった。

本稿では、打ち抜き加工がモータ特性に及ぼす影響を設計段階で高精度に把握することを目的として開発した解析技術について述べ、永久磁石モータを例にその解析結果について述べる。

2. 打ち抜き時の加工劣化を考慮したモータ設計

2.1 解析手法

今回開発した、打ち抜きによる加工劣化を考慮した解析システムのフローを図1に示す。解析システムは次の4項

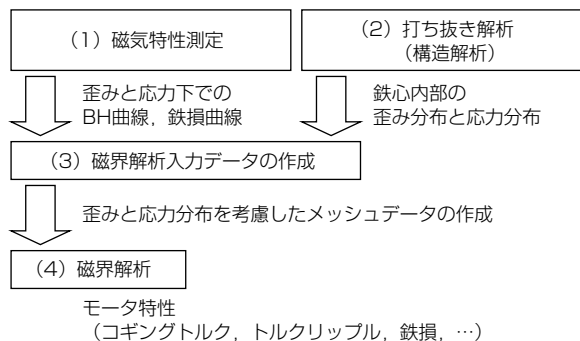


図1. 歪みと応力を考慮した解析システムのフロー

目で構成されている。

- (1) 歪み及び応力を付与した鉄心素材の磁気特性を歪み量及び応力値に対して測定し、データベースを作成する。
- (2) モータ鉄心の打ち抜き解析を行い、打ち抜き後の鉄心内部の歪み量及び応力値を算出する。
- (3) 鉄心の磁気特性データベースと打ち抜き解析結果を基に、磁界解析用の入力データを作成する。具体的には、磁界解析に用いるメッシュデータの各要素位置での歪み量及び応力値を(2)の解析結果から読み取り、この値が(1)で測定したデータのいずれに分類されるかを判定し物性番号として分類する。
- (4) これらで作成したメッシュデータに対し、物性番号とBH特性曲線とを対応させ磁界解析を実施する。応力値には金属材料の評価に適したミーゼス相当応力を用いる。

2.2 歪み・応力印加時の電磁鋼板の磁気特性⁽⁴⁾

歪み及び応力印加時の電磁鋼板の磁気特性を測定するため、図2に示す大型の引っ張り試験片に引っ張り加工を施し0～15%の歪みを付加した。磁気特性測定を行う磁気試験片は、図2の引っ張り試験片の中央部をワイヤカット切断し製作した。磁気測定は、応力印加機構付きシングルヨーク・2Hコイル方式の単板磁気試験器を用いて行った。図3に歪み及び応力印加時の磁気特性測定結果の一例を示す。図3(a)は塑性歪み0%及び5%時の圧縮応力下でのBH曲線であり、図3(b)は印加応力に対する比透磁率(磁束密度：1T)を示したものであり、図3(c)は印加応力に対する鉄損(磁束密度：1T)を示したものである。測定結果から、歪みや応力のない状態では比透磁率は高い値を示す

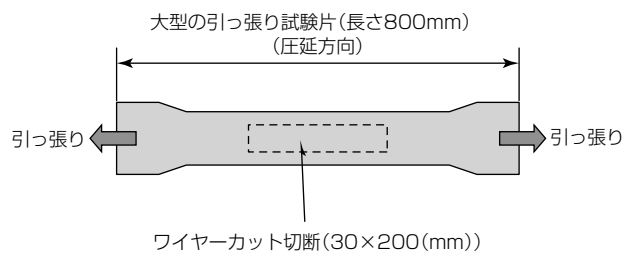
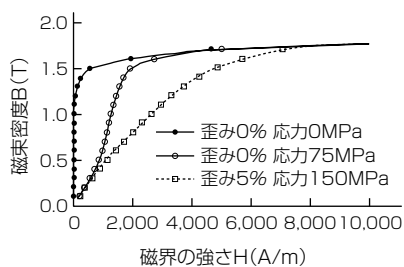
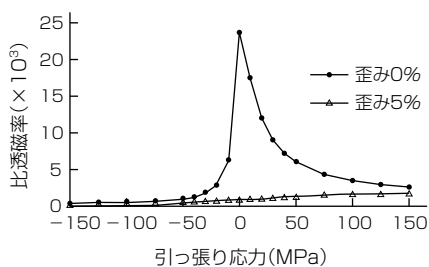


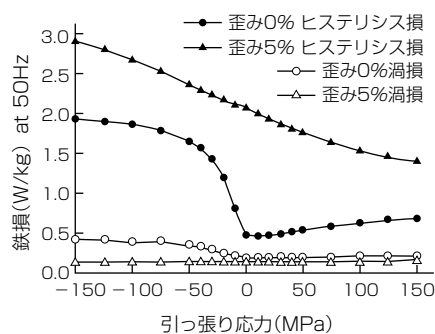
図2. 歪み付与磁気試験片の作製法



(a) BH曲線



(b) 歪み・応力-比透磁率曲線
(磁束密度：1T)



(c) 歪み・応力-鉄損曲線
(磁束密度：1T)

図3. 歪みと応力下での電磁鋼板の磁気特性

が、歪みや応力が印加されると比透磁率が低下することが分かる。また、引っ張り応力と圧縮応力では比透磁率の変化が異なる。特に歪みがない場合、圧縮時には引っ張り時よりも急峻(きゅうしゅん)に比透磁率が低下する。図3(c)より、歪みや応力はヒステリシス損への影響が大きく、歪み量や圧縮応力の増加に伴い、損失も増加していることが分かる。

3. 検証用モータと解析結果

3.1 検証用モータの諸元⁽⁵⁾

開発した解析技術を用いて打ち抜き加工がモータ特性に及ぼす影響について検討を行う。図4に検証用モータの断面図を示す。検証用モータは極数8、スロット数12の永久磁石モータとし、その他の諸元を表1に示す。本稿では、打ち抜き加工が永久磁石モータの基本性能であるコギングトルクと無負荷鉄損に与える影響について検討する。

3.2 打ち抜き解析

打ち抜き解析は構造解析を用いて行う。本稿では、図5に示すように、電磁鋼板から2ステップで固定子鉄心を打ち抜くことを想定した。図6に構造解析による打ち抜き解析の結果を示す。図6は、解析結果の対称性を考慮し半テ

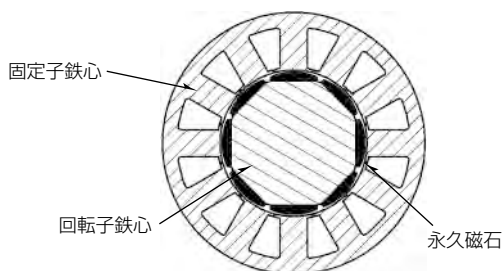


図4. 検証モータの断面図

表1. 検証用モータの諸元

極数	8
スロット数	12
回転子鉄心材料	S45C (JIS G4051)
固定子鉄心材料	35A230 (JIS C2552)
回転子外径(mm)	40
固定子外径(mm)	80
鉄心幅(mm)	45
エアギャップ長(mm)	0.4
永久磁石の残留磁束密度(T)	0.5, 1.0, 1.4

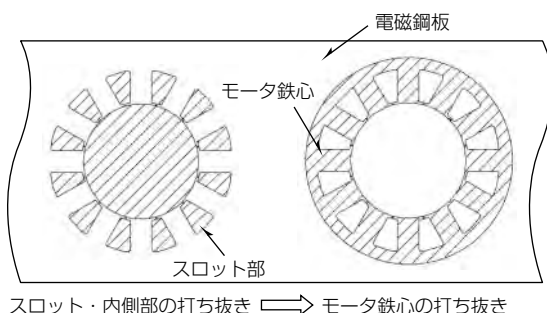


図5. 電磁鋼板からの打ち抜き方法

ィース分のみを示している。図6(a)及び図6(b)はティース全体及びティース先端部の応力分布のコンター図であり、図6(c)はティース中央部Aにおける切断部からの距離に対する歪み量と応力値を示した図である。解析結果より、切断部近傍での歪みや応力が大きくなっており、電磁鋼板の厚さのおよそ1/2の範囲に分布していることが分かる。

3.3 磁界解析用データの作成

打ち抜き解析結果を用い、歪み及び応力を反映させた磁界解析用のメッシュを図7に示す。モデル中の各要素の濃淡は物性番号の違いを表し、歪み量や応力値に応じてそれぞれ異なる磁気特性が割り当てられている。

3.4 打ち抜きによる加工劣化を考慮した磁界解析

図8に図7のメッシュデータと図3の歪み量及び応力値に対する磁気特性測定データを用い、磁界解析でコギングトルクを算出した結果を示す。図8(a)は磁石の残留磁束密度を1.4Tとした場合のコギングトルク波形であり、図8(b)は磁石の残留磁束密度を変化させた場合のコギングトルク

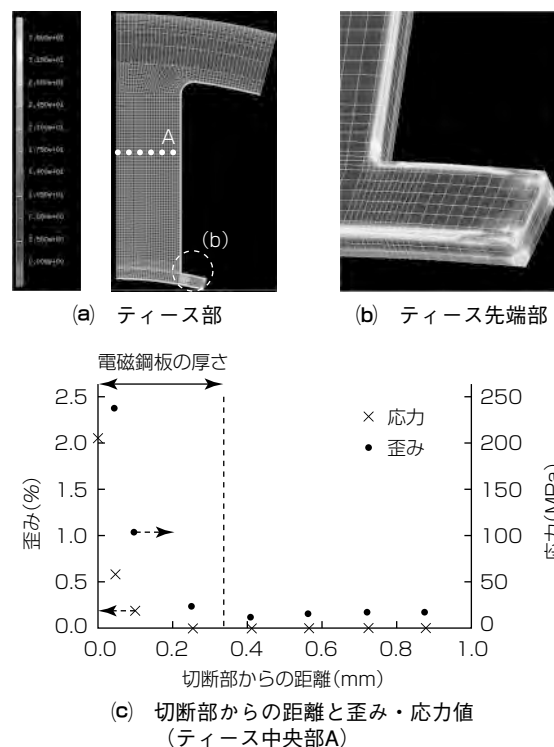


図6. 構造解析による応力分布解析結果

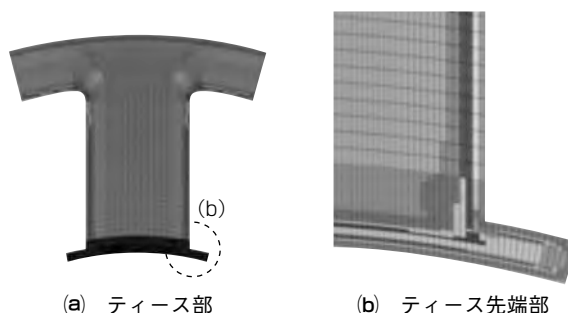
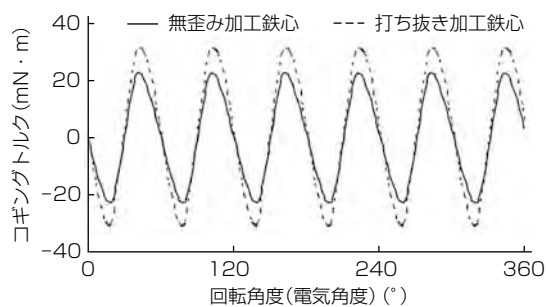
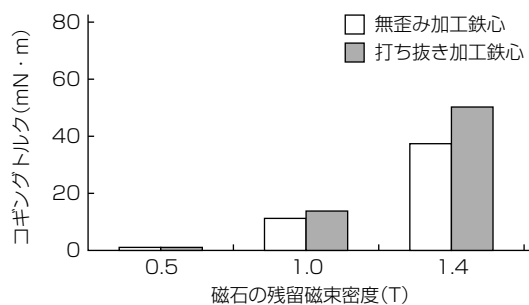


図7. 歪みと応力分布を反映した磁界解析用のメッシュ

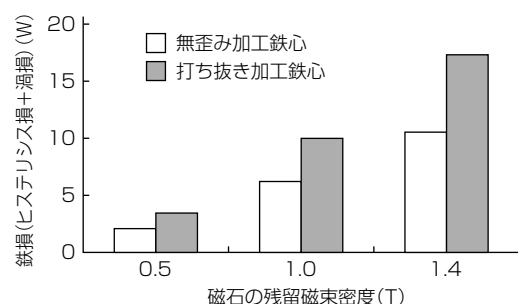


(a) コギングトルク波形(磁石の残留磁束密度1.4T)

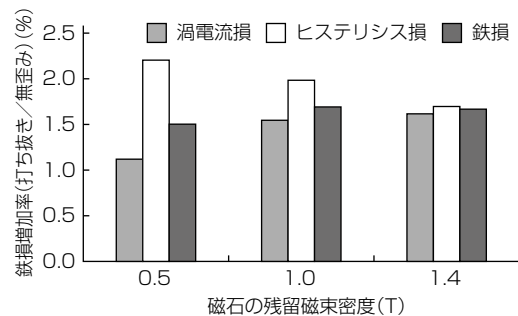


(b) コギングトルクの振幅

図8. 打ち抜きを考慮したコギングトルク解析結果



(a) 鉄損解析結果



(b) 渦電流損及びヒステリシス損の増加率

図9. 打ち抜き時の加工劣化を考慮した鉄損解析結果

の振幅値を示した図である。また、図8には歪み及び応力がない状態でのコギングトルク波形と振幅値も示した。図8より、打ち抜きによって発生する歪みや応力の影響を考慮することでコギングトルクが変化していることが分かる。このコギングトルクの変化量は磁石の残留磁束密度が大きくなるに伴い増加している。これは、磁石の残留磁束密度の大きさの変化によって、鉄心内部の磁気飽和の状態が変化しギャップ部の磁束密度が変化するためと考えられる。

次に鉄損解析について述べる。鉄損 W は、渦電流損 W_e とヒステリシス損 W_h の全メッシュ要素での和で表されるため⁽²⁾、次式となる。

$$W = W_e + W_h \\ = \sum_{\text{メッシュ}} \{ K_e(\varepsilon, \sigma) B^{\alpha(\varepsilon, \sigma)} f^{\gamma(\varepsilon, \sigma)} + K_h(\varepsilon, \sigma) B^{\beta(\varepsilon, \sigma)} f \} \rho \cdots (1)$$

ここで、 K_e 、 K_h 、 α 、 β 、 γ は歪み量 ε 、応力値 σ の関数であり、図3の鉄損測定データより同定を行った。 f は周波数、 ρ は電磁鋼板の密度、 m はメッシュの要素番号を示している。図9に鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮した鉄損解析結果を示す。図9(a)には無負荷・3,000r/min時の鉄損を、図9(b)には打ち抜き加工による鉄損の増加率を示した。図9より、打ち抜きの影響によって鉄損はおおよそ1.6倍に増加している。また、磁石の残留磁束密度の増加に伴い、渦電流損増加率は大きくなり、ヒステリシス損増加率は小さくなっていることが分かる。これは打ち抜きによって鉄心内部の磁束密度分布が変化したためと考えられる。

4. む す び

鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮したモータ設計技術について述べ、永久磁石モータを例として打ち抜き加工がコ

ギングトルクと鉄損に与える影響の定量化を検討した。この技術を用いることで、量産時の鉄心の磁気特性劣化を考慮した高精度な性能予測が可能となる。今後、設計技術の妥当性検証を行うとともに当社製モータの高性能化開発に役立てていく。

この研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託された“次世代自動車用高性能モータ蓄電パワーエレシステムの研究開発”で行われたものである。

参 考 文 献

- (1) 大穀晃裕, ほか: 鉄心の詳細な磁気特性を考慮したモータ設計技術, 三菱電機技報, **79**, No.11, 703~706 (2005)
- (2) 中野正嗣, ほか: 鉄心内部の応力分布を考慮した高精度鉄損解析手法, 電気学会論文誌D, **129**, No.11, 1060~1067 (2009)
- (3) 柏原義之, ほか: 電磁鋼板の打ち抜きによる磁気特性劣化量の推定技術の開発, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-07-57, 19~24 (2007)
- (4) 谷 良浩, ほか: 弾塑性歪みが無方向性電磁鋼板の磁気特性に及ぼす影響, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-09-42 (2009)
- (5) Yamaguchi, S., et al.: Accurate Magnetic Field Analysis for Estimating Motor Characteristics Taking Account of Elasto-Plastic Deformation in the Magnetic Core, COMPUMAG (2009)

繊維強化樹脂の流動方向予測と構造解析

坂本博夫*
 馬場智子**
 青木普道***

Prediction of Flow Direction by Thermal Analysis and Coupling with Structural Analysis in FRP

Hiroo Sakamoto, Satoko Baba, Hiromichi Aoki

要 旨

設計期間の短縮や信頼性向上のために、構造解析、構造最適化が多く分野で使われるようになった。しかし、電機製品分野では、個々の製品が多品種、多機能で、評価する項目が多いこと、開発コストが限られていることや開発期間が短いこと等の課題があり、それに対応した構造解析手法が必要である⁽¹⁾。

一方、低コスト化・高剛性化・高強度化のために、繊維を含有した繊維強化樹脂 (Fiber Reinforced Plastics : FRP) を材料とする製品が増加している。しかし、繊維強化樹脂は、その流動方向によって弾性率や強度などの機械的特性が変化するため、これまでは、変形量や固有値で、解析と実測の誤差が生じていた。この繊維強化樹脂製品の構造設計、信頼性設計のためには、短時間での流動方向を考慮した構造解析が不可欠である。

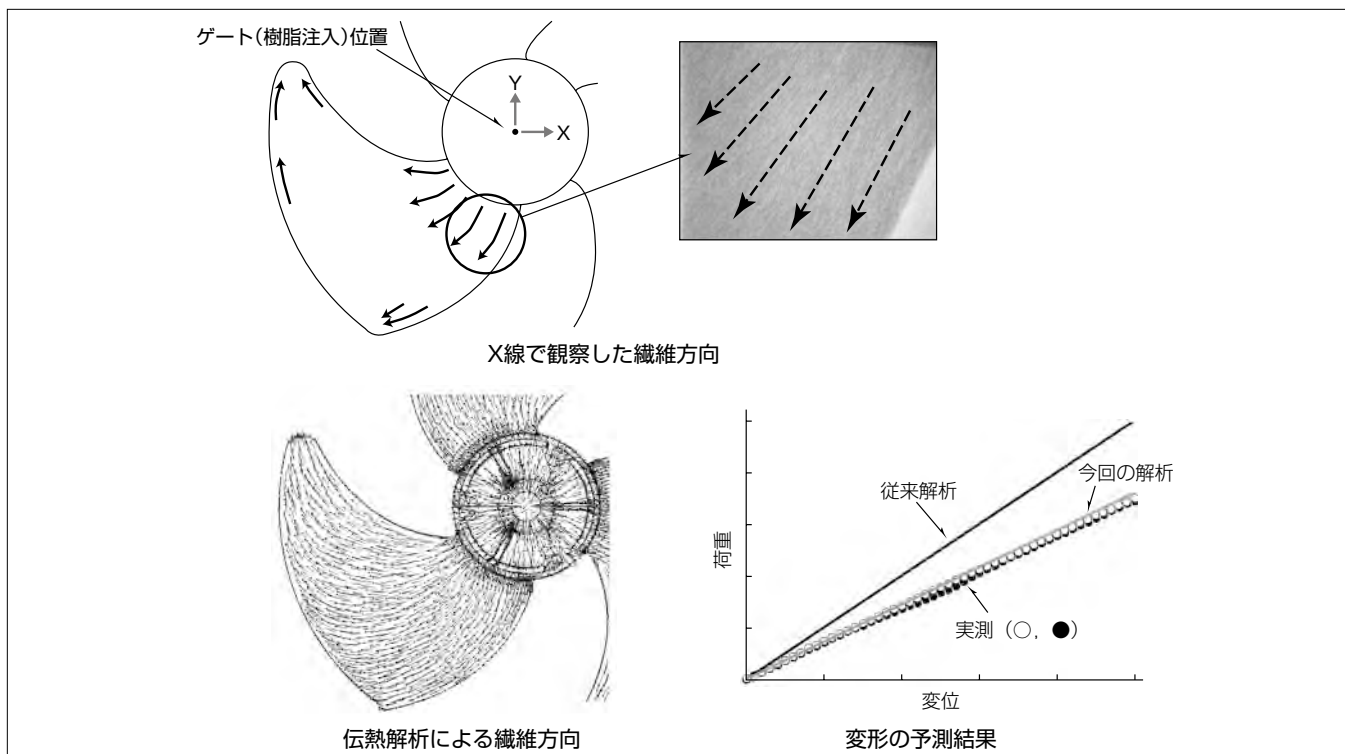
そこで、繊維強化樹脂に対して、汎用構造解析ソフトウェアで解析可能な伝熱解析で樹脂の流動方向を簡易的に予

測し、流動方向に基づいて異方性物性として設定する構造解析手法を提案し、その妥当性について検討した。

対象製品は、ガラス繊維強化樹脂のプロペラファンとし、X線CT (Computed Tomography) で繊維配向を観察した。次に、ゲート位置に単位温度を与えた過渡熱解析を実施し、熱の流れ方向を計算し、X線CTの繊維方向と比較し、一致することを確認した。

熱解析で得られた熱の流れ方向をもとに異方性物性として構造解析に入力する自動化プログラムを開発し、プロペラファンの静解析及び固有値解析に適用した。その結果、従来の異方性を考慮しない解析では実測と誤差があったが、異方性を考慮したこの解析では、変形及び固有値とも良く一致した。

この手法によって繊維強化樹脂の構造解析精度が向上し、ゲート位置の最適化や構造最適化によって、軽量・高剛性・高強度化、設計期間短縮、信頼性向上が可能になった。



プロペラファンの繊維方向及び変形のシミュレーション

X線CTで観察した繊維方向は、左下を向いており、伝熱解析の結果での熱の流れによる繊維方向とよく一致している。右下のグラフは繊維強化樹脂のプロペラファンの静解析結果で、繊維配向を考慮しない従来の解析では、実測と誤差があるが、繊維配向を考慮した今回の解析では実測とよく一致している。

1. ま え が き

近年、低コスト化・高剛性化・高強度化のために、繊維を含有した繊維強化樹脂を材料とする製品が増加している。一般に、樹脂は流動方向で異方性を持つため、その流動方向(Mold Direction: MD)とその垂直方向(Transverse Direction: TD)で弾性率、強度等の機械的特性が異なる。とくに、繊維強化樹脂では、流動方向が機械的特性に及ぼす影響が大きく⁽²⁾、繊維強化樹脂製品の構造設計のためには、流動方向を考慮した構造解析が不可欠である。その流動状態を把握するためには、流動解析を実施するのが一般的である⁽³⁾。

しかし、流動解析と構造解析のソフトウェアや使用するメッシュが異なることから、流動解析結果の流動方向を構造解析にマッピングする作業が必要になる。このため、新たなマッピングのソフトウェアが必要になり、マッピング作業に時間が必要になることから、これまで流動方向を考慮した構造解析はごく限られた例でしか実現されていなかった⁽⁴⁾。また、流動方向が一樣な状態にある等方性材料とみなした構造解析では、実機と解析結果に大きな誤差が生じていた。

そこで、本稿では、構造解析との連成が容易な伝熱解析で流動解析を代用し、伝熱解析によって得られる熱の流れ方向から樹脂の流動方向を簡易的に予測し、流動方向に基づいた異方性物性として設定する構造解析手法を提案する。なお、伝熱解析と構造解析の連成は、汎用構造解析ソフトウェアで容易に実現できるが、このような実設計に有用な手法はこれまで提案されていない。今回提案する伝熱解析による流動方向予測の検証のために、X線CTで繊維方向を観察した。さらに、この手法をプロペラファンの静解析及び固有値解析に適用し、この手法の妥当性の検証を行った。

2. 流動方向予測と構造解析との連成

基本となるエネルギー方程式は、直交表座標系で式(1)のように表される。

$$\begin{aligned} & \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &= \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ & - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \\ & + \left(\tau_{xx} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial V_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \\ & + \left\{ \tau_{xy} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \tau_{xz} \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \tau_{yz} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \right\} \\ & + Q \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 x, y, z は、 $x-y$ 平面を平板面に、 z 軸を板厚方向にとった局所座標系である。

ρ	: 密度 (kg/m ³)
c	: 比熱 (J/(kg · K))
T	: 温度 (K)
t	: 時間 (s)
V_x, V_y, V_z	: 伝導媒体中の熱の速度 (m/s)
K_x, K_y, K_z	: 熱伝導率 (W/(m · K))
P	: 圧力 (Pa)
τ	: セン断応力 (Pa)
Q	: 単位体積あたりの内部発熱量 (W/m ³)

式(1)の右辺第1項～第5項はそれぞれ、熱伝導、圧縮による内部エネルギー、法線応力による仕事、せん断応力による仕事、内部発熱を表す。式(1)から伝熱解析に関連する項を取り出し、モデル形状が薄肉として簡略化した熱伝導の支配微分方程式は、式(2)のように表される。

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad \dots\dots\dots(2)$$

同様に、射出成形CAE(Computer Aided Engineering)における流動解析では、式(3)のように簡略化される⁽⁵⁾。

$$\begin{aligned} & \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &= K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \tau_{xz} \frac{\partial V_x}{\partial z} + \tau_{yz} \frac{\partial V_y}{\partial z} + Q \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(2)と式(3)を比較すると、伝熱解析では、流動解析における板厚方向の速度勾配(こうばい)成分のせん断応力の影響が含まれていないことがわかる。

したがって、せん断応力を無視できる場合、すなわち、せん断応力を決定する粘度及びせん断速度を無視できる場合に、流動解析を伝熱解析で簡易的に近似できる。ここで、粘度は、せん断速度、温度及び圧力の関数で表されるため、これらが大きく変化しない単純な形状、例えば樹脂流動入り口(ゲート)数が少ない、板厚の増減が少ない形状、流動先端から離れた領域や金型壁面から遠い成形品内部等に対しては、流動の方向つまり V_x と V_y の比を得るための手段として伝熱解析を用いることは実設計で有効といえる。

汎用構造解析ソフトウェアの伝熱解析で流動方向を予測するには、全体をある温度に設定し、ゲート位置にそれより高い温度を負荷する過渡熱解析を行うことによって、熱の流れ方向が得られる。得られた熱の流れ方向を流動方向におきかえ、流動方向にMD、その垂直方向にTDの機械物性値を設定し、構造解析を実施することによって、流動方向を考慮した構造解析が可能となる。

3. プロペラファンにおける流動方向予測と検証

3.1 プロペラファンにおける流動方向予測

プロペラファンの流動方向を予測するため、汎用FEM

(Finite Element Method)解析ソフトウェアANSYS11.0^(注1)を用いて過渡熱解析を実施した。解析モデルを図1に示す。要素はソリッド要素(87番：四面体，10節点)を用い，メッシュサイズは3mmとした。境界条件として，全節点に温度0を，ゲート位置に相当する節点に温度1を与えた。解析時間は，Pentium4^(注2) 3.2GHzのパソコンで約1分である。

過渡熱解析によって得られた熱流束ベクトル分布を図2に示す。熱の流れ方向は，ゲート位置から放射状に広がる挙動を示している。なお，汎用樹脂流動解析ソフトウェアMold Plastics Insight 5.1を用いて得られた樹脂の流動方向と本結果はほぼ一致していることを確認している。

(注1) ANSYSは，SAS IP, Inc. の登録商標である。
(注2) Pentiumは，Intel Corp. の登録商標である。

3.2 流動方向予測の妥当性検証

予測した流動方向と実機の流動方向を比較し，妥当性を検証する。繊維配向と樹脂流動の方向はおおむね一致することから⁽⁶⁾，実機の流動方向の観察は，X線CT装置(XVA-160CT：ユニハイトシステム社製)を用いて，プロペラファンの繊維配向状態を透過撮影で観察し，図3に示す繊維配向方向の模式図を得た。得られた繊維配向方向の模式図と図2に示す熱の流れ方向を比較すると，実機での繊維配向方向と熱の流れ方向はほぼ一致しており，伝熱解析による流動方向予測の妥当性を確認できた。

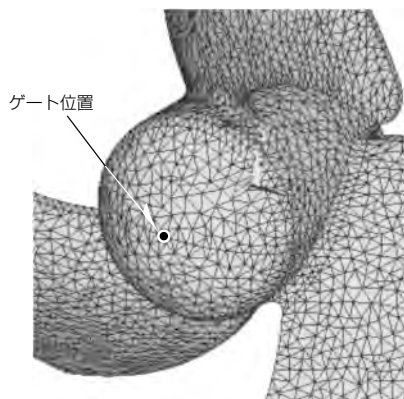


図1. FEM解析モデル(54,427 nodes, 27,246 elements)

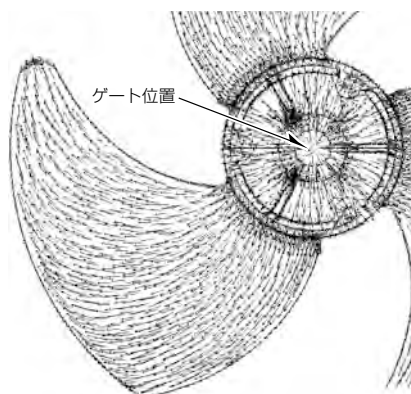


図2. 熱流速ベクトル分布

4. プロペラファンの構造解析と検証

4.1 静解析と妥当性検証

流動方向を考慮した構造解析を行うため，3.1節で予測した流動方向を構造解析における材料定数に反映させる。ここで，解析モデル形状は3.1節と同じであり，あらかじめ定義した要素座標系(右手則の直交座標系：xyz)に基づき，各要素の主軸(x)方向を，伝熱解析によって得られた熱の流れ方向に一致させた。これによって，構造解析で，流動方向の弾性率をMDの弾性率として設定することが可能となる。

静解析に使用した温度20℃における材料定数を表1に示す。なお，弾性率の実験の評価にはJIS試験片を用いるが，その試験片の長手方向を流動方向にすることが多く，その場合，弾性率はMDの値になる。解析ケース1では，等方性材料物性としてJIS試験片の弾性率，解析ケース2では，異方性材料物性として，MDの弾性率をJIS試験片の値とし，TDの弾性率を複合強化則(Reuss則)で算出した理論値とした。

要素はソリッド要素(187番：四面体，10節点)を用いた。負荷は，図4に示すように，ファン中央部円筒端面に強制変位1mmを与え，拘束条件は，ブレード先端(3節点)の軸方向(z)拘束，モデル中央であるゲート部の面方向(x, y)拘束とした。解析時間は，Pentium4 3.2GHzのパソコンで，異方性材料物性設定及び構造解析についてそれぞれ約1分である。

図5に，解析結果及び同条件を模擬した圧縮試験から得られた荷重-変位線図を示す。実測結果は，流動方向を考慮した解析ケース2の結果とほぼ同等であることが確認できる。一方，流動方向を考慮せず，等方性物性を用いた解析ケース1では，実測結果と大きく異なっており，従来の

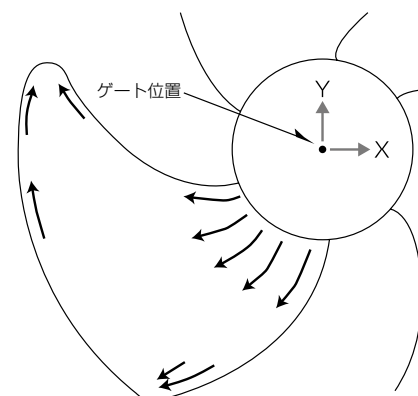


図3. 繊維配向方向の模式図

表1. 材料定数

解析ケース	弾性率(GPa)		ポアソン比	密度(kg/m ³)
	MD	TD		
1：等方性	3.58		0.35	1,040
2：異方性	3.58	1.75		

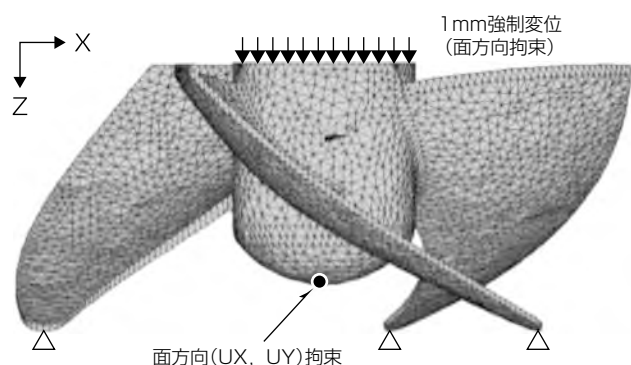


図4. 境界条件

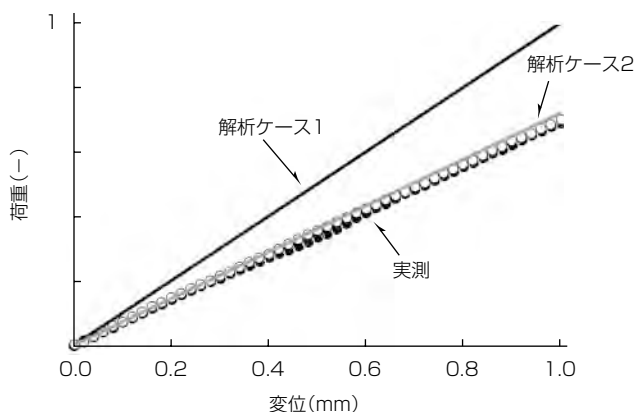


図5. 荷重変位線の比較(荷重はケース1の最大荷重で無次元化)

等方性物性による推定では、実機より剛性を高く予測することになる。

4.2 固有値解析と妥当性検証

次に、流動方向を考慮した固有値解析について検討する。解析モデルは静解析と同様であり、ANSYS11.0のブロックランチェス法を用いて固有値を求めた。解析時間は、Pentium4 3.2GHzのパソコンで、約5分である。

図6に、解析によって得られた固有値と振動試験によって得られた実機の固有値の関係を示す。破線は、実機と解析の固有値が一致する線である。いずれのモードでも、流動方向を考慮した解析ケース2の結果と実測結果はほぼ一致している。一方、流動方向を考慮せず、等方性物性を用いた解析ケース1では、実測結果と大きく異なっており、さらに、実測結果及び流動方向を考慮した解析結果で発現する4次のモードが存在しない。

このように、静解析、固有値解析ともに、流動方向を考慮することによって、構造解析の精度向上が確認できた。この方法は、汎用構造解析ソフトウェアで容易に解析可能なため、幅広い製品に適用できる。今後は、複雑なゲート配置や複雑な形状の製品に適用し、この方法の適用範囲を明確にする。

5. む す び

繊維強化樹脂製品に対して、汎用構造解析ソフトウェア

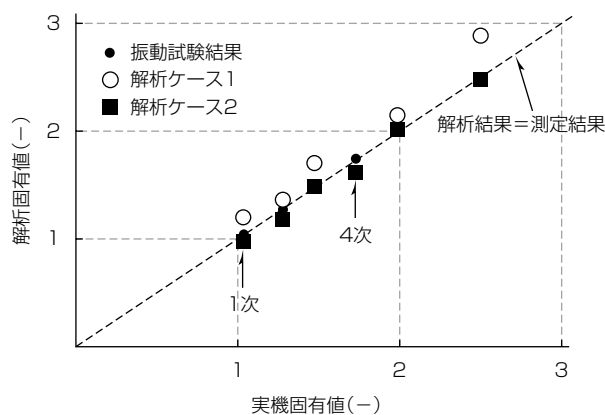


図6. 固有値の比較(1次固有値で無次元化)

で解析可能な伝熱解析で流動方向を簡易的に予測し、流動方向を異方性物性として設定する構造解析手法を提案し、その妥当性について検討した。その結果、X線CTによる繊維方向観察によって、伝熱解析で得られる熱の流れ方向と流動方向がほぼ一致することを確認した。さらに、この方法をプロペラファンの静解析及び固有値解析に適用し、流動方向を考慮した解析結果と実機試験の結果がよく一致した。この方法によって繊維強化樹脂の構造解析精度が向上し、ゲート位置の最適化や構造最適化によって、軽量・高剛性・高強度化、設計期間短縮、信頼性向上が可能になった。

参 考 文 献

- (1) Sakamoto, H., et al.: Systematic Identification Methodology of Specification and Approach for structural Design Optimization, Trans. of JSME, Series A, **76**, No.762, 241~250 (2010)
- (2) Tohgo, K., et al.: Influence of Fiber Orientation and Content on Fatigue Crack Growth Behavior in Short-Glass-Fiber-Reinforced Polycarbonate, Trans. of JSME, Series A, **59**, No.557, 62~67 (1993)
- (3) Chung, S.T., et al.: Numerical simulation of fiber orientation in injection molding of short-fiber-reinforced thermoplastics, SPE, **35**, No.7, 604~618 (1995)
- (4) Foss, P. H.: Coupling of flow simulation and structural analysis for glass-filled thermoplastics, Polymer Composites, **25**, No.4, 343~354 (2004)
- (5) H.S. Hele-Shaw, The flow of water, Nature 58, No.1489, 33~36 (1898)
- (6) Nakano, R., et al.: Fiber Orientation Observation by X-ray CT and Simulation, J. of JSPP, **20**, No.4, 237~241 (2008)

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

下畑賢司*
稲口 隆*

Application of Coupled Analysis of Thermal and Electromagnetic Field to Development of IH Cooking Heaters

Kenji Shimohata, Takashi Inaguchi

要 旨

IH(Induction Heating)クッキングヒーターは、ガラス天板の下に配置した加熱コイルに高周波電流を流し、加熱コイルで発生した磁場を鍋に鎖交させ、鍋に誘導される渦電流発熱で鍋を加熱する調理器である。火を使わず鍋自体を加熱するため、安全・高効率な調理器であるとともに、トッププレートがフラットなため手入れが容易という特長を持っている。

加熱コイルの最適化には、コイル仕様、駆動電流や鍋発熱特性の知見が欠かせない。さらに、調理機能への展開には、鍋の温度や調理物の対流の知見が有用と考えられる。

本稿では、IHクッキングヒーターを対象として、熱・電磁界連成解析の計算手法を開発し、計算結果の妥当性を検証した結果を述べる。

(1) 電磁界・電気回路連成解析

コイルの巻数や配置、フェライト、アルミ製の防磁リング、駆動回路を模擬した電磁界と電気回路の連成解析で、コイル電流、鍋発熱分布を高精度に計算することができる。

(2) 熱流体解析

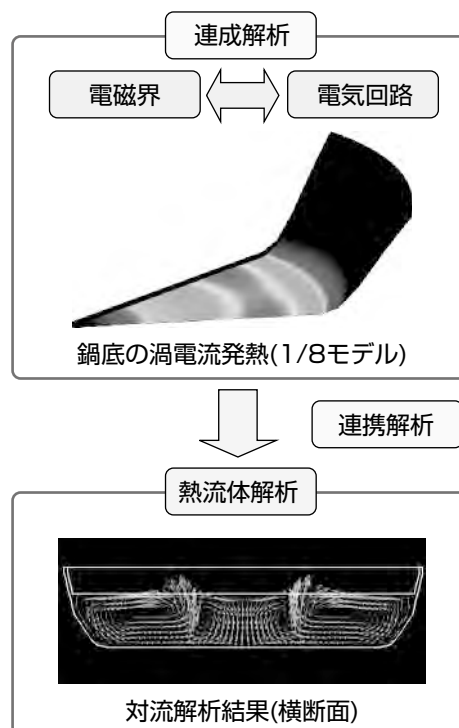
電磁界解析で算出した発熱分布を入力条件とした熱流体解析によって、鍋温度分布や水などの内容物の対流挙動を計算することが可能である。

(3) 調理機能への適用

熱・電磁界連成解析手法を、代表的加熱コイルであるトリプルリング型加熱コイルの対流煮込み加熱に適用し、その有用性を確認した。



IHクッキングヒーターの外観
(CS-T30HNWSR)



IHクッキングヒーターへの熱・電磁界連成解析

誘導加熱を利用した調理器であるIHクッキングヒーターを対象に、熱・電磁界の連成解析を適用した。まず、電磁界と電気回路の連成解析で、コイル電流や鍋発熱分布を計算する。この発熱分布を入力条件とした熱流体解析によって、鍋温度分布や水などの内容物の対流挙動を計算することが可能となった。この手法をトリプルリング型加熱コイルでの対流煮込み加熱に適用し有用性を確認した。

1. ま え が き

IHクッキングヒーターは、加熱コイルで高周波磁場を発生させ、鍋に誘導される渦電流発熱で鍋を加熱する調理器である。一連の調理特性を検討する際、鍋の渦電流発熱、鍋温度変化など実際の動作を模擬したシミュレーションが有効である。鍋の渦電流発熱の検討には、鍋に高周波磁界を印加する加熱コイルの巻線、フェライト、アルミ製の防磁リング、鍋を含めた過渡電磁界解析が適用できる。このとき、LC共振回路で駆動されるコイル電流を計算するためには、電気回路を電磁界解析と連成させて計算する必要がある。さらに、調理時の温度分布や液体の対流特性の検討には、電磁界解析で計算した発熱と、熱流体解析を連携した解析手法を開発する必要がある。

今回、加熱コイル形状と駆動回路をモデル化した電磁界・電気回路連成解析技術を開発し、コイル電流や鍋の発熱分布の計算を可能とした。さらに、電磁界解析で得た鍋発熱の分布を熱流体解析の入力として解析を行うことで、鍋の温度分布や内容物の対流挙動も解析可能となった。

2. 加熱コイルと駆動回路の仕様

図1に、三菱電機製IHクッキングヒーターの代表的な加熱コイルの外観と駆動回路の構成図を示す。加熱コイルは、ガラス製トッププレートの下に配置されている。加熱コイルとしては、主に2種類があり、図1(a)は大径及び小径のリング状コイル(ダブルリングコイル)、図1(b)は大径、中径及び小径のリング状コイル(トリプルリングコイル)で構成している。ダブルリングは、駆動回路によって、コイルのインダクタンス(L)と共振コンデンサ(C)によるLC共振回路で駆動される。トリプルリングでは、2個の駆動回

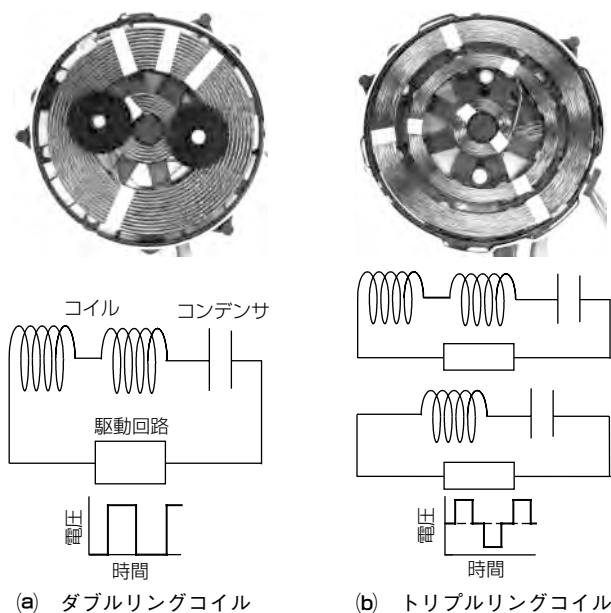


図1. 加熱コイルの外観及び駆動回路の模式図

路を持っており、内側の2個のコイルと外側のコイルを独立に駆動できる特徴を持っている。

3. 電磁界と熱流体の連成解析

3.1 計算手順

電磁界解析と熱流体解析の有限要素法の計算メッシュに互換性を持たせ、電磁界解析で計算した発熱分布の出力データを直接熱流体ソフトで使用できる手法を開発した。電磁界解析のソフトとしてサイエンスソリューションズ(株)のEMsolution^{(1)(注1)}を、熱流体解析のソフトとして(株)シーディー・アダプコ・ジャパンのStar-CD⁽²⁾を使用した。電磁界解析で鍋の発熱量を算出し、その発熱量をもとに鍋の温度分布を熱流体解析で計算する。次にその手順を示す。

- ①代表的電流値に対する発熱密度分布を電磁界解析で算出する。発熱密度の絶対値は電流値で変化するが、総発熱量で発熱密度を除して規格化した発熱密度分布は電流に依存しないと仮定する。
- ②回路やコイルの損失による加熱効率(約90%)を考慮して、電力を算出する。
- ③想定した電力時の発熱密度分布は、鍋のトータル発熱量をもとに定数倍して作成する。
- ④③で作成した発熱密度分布を使用して熱流体解析によって温度を算出する。

図2に、鍋、ガラス天板、加熱コイル、フェライト、アルミ製の防磁リングからなる計算モデルを示す。フェライトが配置されており、鍋及びコイルは円筒状であることから、周方向の対称性を考慮したモデルとした。電磁界解析では、鍋底のコイル面側の厚み0.2mm程度の領域に渦電流が集中するため、厚み方向の分割数を大きくする必要がある。一方、熱流体解析ではメッシュのアスペクト比が極端に大きいと発散しやすいこと、及び対象とする計算時間が数十秒から数分レベルと長いことを考慮し、熱解析のメッシュは電磁界解析のメッシュよりも粗くした。このため、熱解析のメッシュには、複数の電磁界解析メッシュを含むため、空間的に発熱密度を平均化した。

(注1) EMsolutionは、サイエンスソリューションズ(株)の登録商標である。

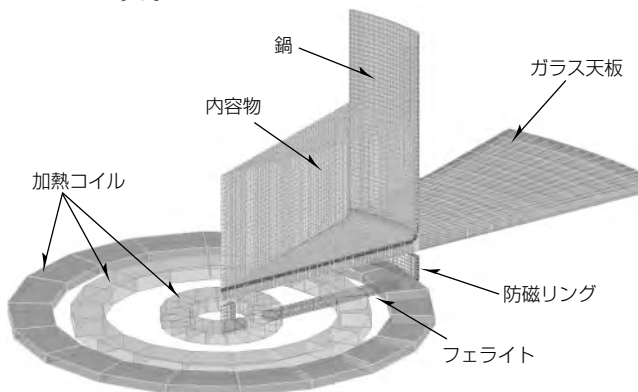


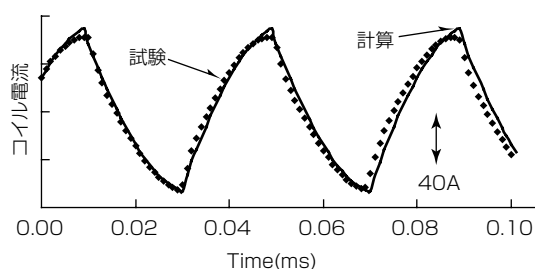
図2. 電磁界解析と熱解析のメッシュモデル

3.2 電磁界・電気回路の連成解析

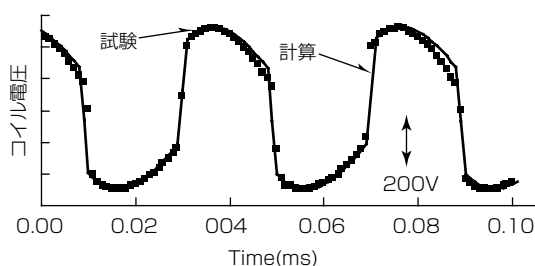
駆動回路は、スイッチング素子のON-OFFによって、約20kHz程度の周波数で、加熱コイルとコンデンサのLC共振回路に電圧印加を繰り返す。これを電磁界解析で模擬するため、電圧源、コイルのインダクタンス、コンデンサからなる等価回路を構成した(図1)。ダブルリングコイルでは、電圧印加と電圧ゼロの繰り返しとし、トリプルリングコイルでは、電圧印加、電圧ゼロ、逆電圧印加、電圧ゼロの繰り返しとした。

図3に、ダブルリングコイルでのコイル電流と電圧の試験結果と計算結果の比較を示す。駆動周波数は25kHzで、電流上昇時がコイルに電圧が印加されている時間、電流減少時は回路電圧がゼロの状態である。一般的な共振回路の正弦波形よりも三角波に近い形であることが特徴である。電流、電圧ともに、試験結果と計算結果はよく一致しており、計算の妥当性が確認できる。

図4に、ダブルリングコイルで鍋底から見た発熱密度分布を示す。発熱量は電源の駆動周波数である数十kHzで増減を繰り返すが、最終的に熱流体解析を実行する際は、数



(a) コイル電流の比較



(b) コイル電圧の比較

図3. ダブルリングコイルでのコイル電流と電圧の試験結果と計算結果の比較

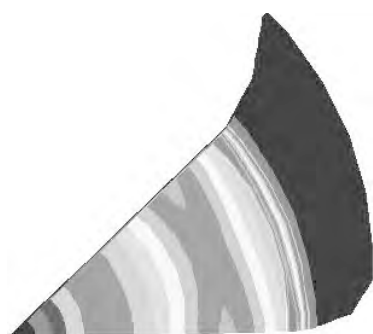


図4. ダブルリングコイルでの鍋底から見た発熱密度分布計算結果(1/8モデル)

十秒から数分レベルの時間を対象とするので、発熱量を時間平均している。発熱分布はドーナツ状であり、鍋の中心は発熱が小さい。また、周方向に発熱密度分布の大小があるのは、コイルの下に棒状のフェライトを配置しているので、フェライト直上に相当する鍋位置での発熱密度が高いためである。

3.3 熱流体解析

熱流体解析の妥当性を検証するため、フライパンを空焚(だ)きした場合の温度分布を試験と計算で比較した。

図5に、フジノス製フライパン(DX22)を火力弱で150秒加熱した場合の温度分布を、サーモビューアで測定した結果を示す。鍋中心では、発熱量が小さいが、鍋の熱伝導によって鍋中心まで温度が上昇している。また、棒フェライトの配置に起因する周方向の温度むらは見られない。

図6は、試験と同じ条件でフライパンを加熱した場合の温度分布の計算結果である。計算では鍋とトッププレートとの接触抵抗、空気対流による放熱、鍋からの輻射(ふくしゃ)による放熱を考慮している。温度分布の計算結果からは、発熱の小さい鍋中心まで温度が上昇していること、及び周方向の温度分布はほぼ均一とみなせることがわかる。

図7は鍋底の温度について、サーモビューアで測定した結果と計算結果を比較したものである。発熱密度が高いと考えられる場所(A)、鍋中央部(B)との2点を比較した。いずれも計算値と測定値はよく一致している。これから、熱・電磁界連成解析の妥当性が検証できた。

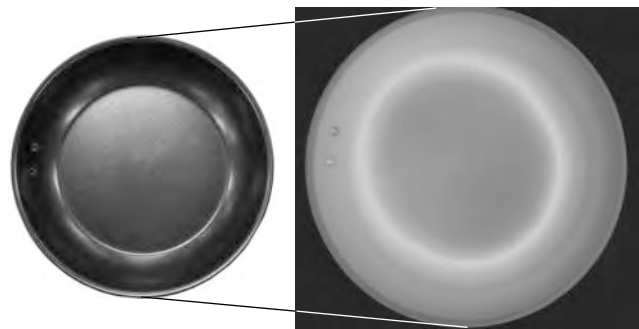


図5. フライパンの外観と加熱時の温度分布試験結果

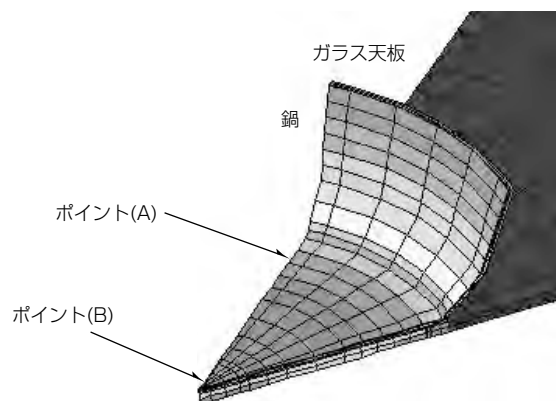


図6. フライパン空焚き時の温度分布計算結果

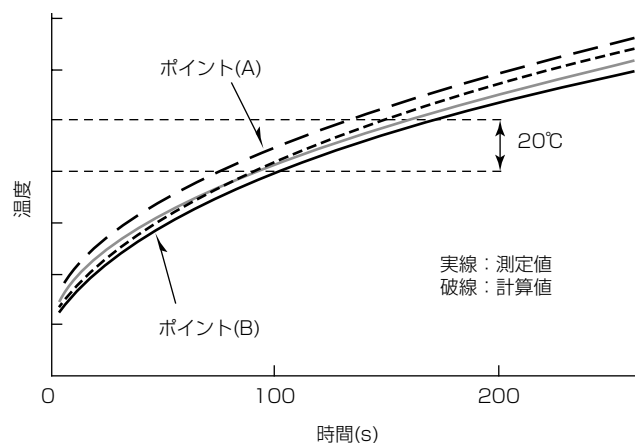


図7. 鍋温度の測定結果と計算結果の比較

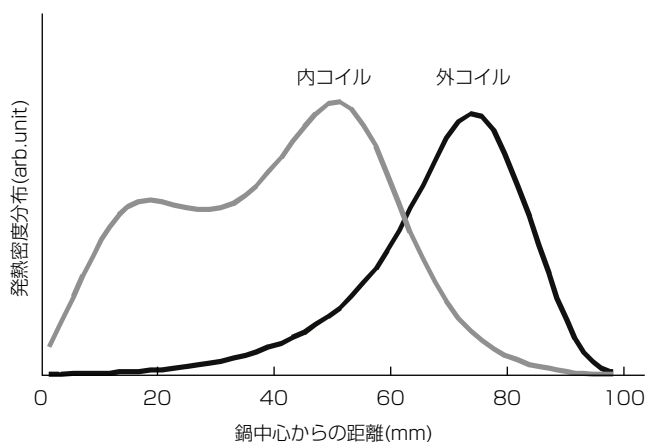


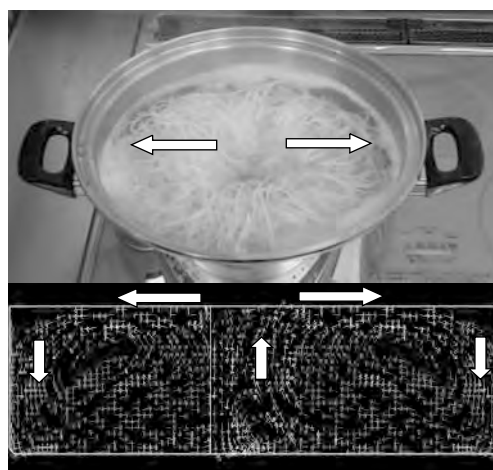
図8. トリプルリングコイルでの内コイル、外コイル単独加熱時の鍋発熱密度分布

4. 熱・電磁界解析の適用例

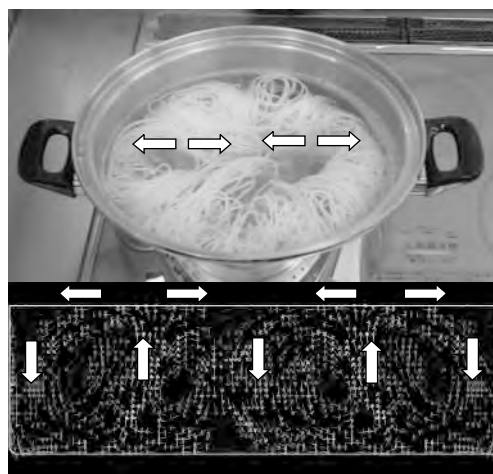
熱・電磁界解析の代表的な適用例として、トリプルリングコイルで、対流煮込み加熱(内側のコイルと外側のコイルを交互に加熱)での結果について述べる。

図8は、トリプルリングコイルで、内コイル単体と外コイル単体で加熱した場合の発熱密度分布を示す。内コイル単体では、鍋中心から半径方向60mm程度の領域を加熱する。外コイル単体では、半径方向70mm程度に発熱のピークがある。内コイル単体と外コイル単体の加熱を、時間的に交互に繰り返した場合の水の流速分布を解析した。

図9は、対流煮込み加熱でそうめんを茹(ゆ)でた場合の写真である。内コイル加熱時(a)は、鍋中心部で上昇し、水面では外周方向に移動し、鍋外周部で沈み込む動きを見せる。一方、外コイル加熱(b)では、鍋中心側と外周側にそうめんが沈み込む様子が見える。これに対応する解析結果として、図中に、鍋の横方向から見た断面での流速分布を示す。内コイル加熱時は、鍋中心から上昇流が発生し、水面では外周方向に強い流れが生じている。外コイル加熱時は、半径方向中間位置で上昇流が発生し、水面では鍋中心方向



(a) 内コイル加熱時



(b) 外コイル加熱時

図9. トリプルリング加熱コイルでの対流煮込み加熱時の対流挙動

と鍋外周方向への弱い流れとなった。これらから、対流解析結果は実際の動きを反映しているといえる。トリプルリングコイルでの対流煮込み加熱では、内コイル加熱時と外コイル加熱時の強い対流の場所、向きが異なるため、よりかき混ぜ効果が高く、均一に調理できることが確認できた。

5. む す び

電磁界・電気回路連成解析による鍋発熱分布を基に、熱流体解析で調理容器の温度分布や内容物の対流を計算する手法を開発し、この解析手法の妥当性を検証した。また、トリプルリングコイルでの対流煮込み加熱時の対流挙動を検討し、その有用性を確認した。

参 考 文 献

- (1) サイエンスソリューションズ(株)
<http://www.ssil.com/em/EMSolution/ja/index.html>
- (2) (株)シーディー・アダプコ・ジャパン
<http://www.cdaj.co.jp/product/>

高速エレベーターの ロープシミュレーション技術

渡辺誠治*
東中恒裕**

Rope Simulation Technology for High Speed Elevator

Seiji Watanabe, Tsunehiro Higashinaka

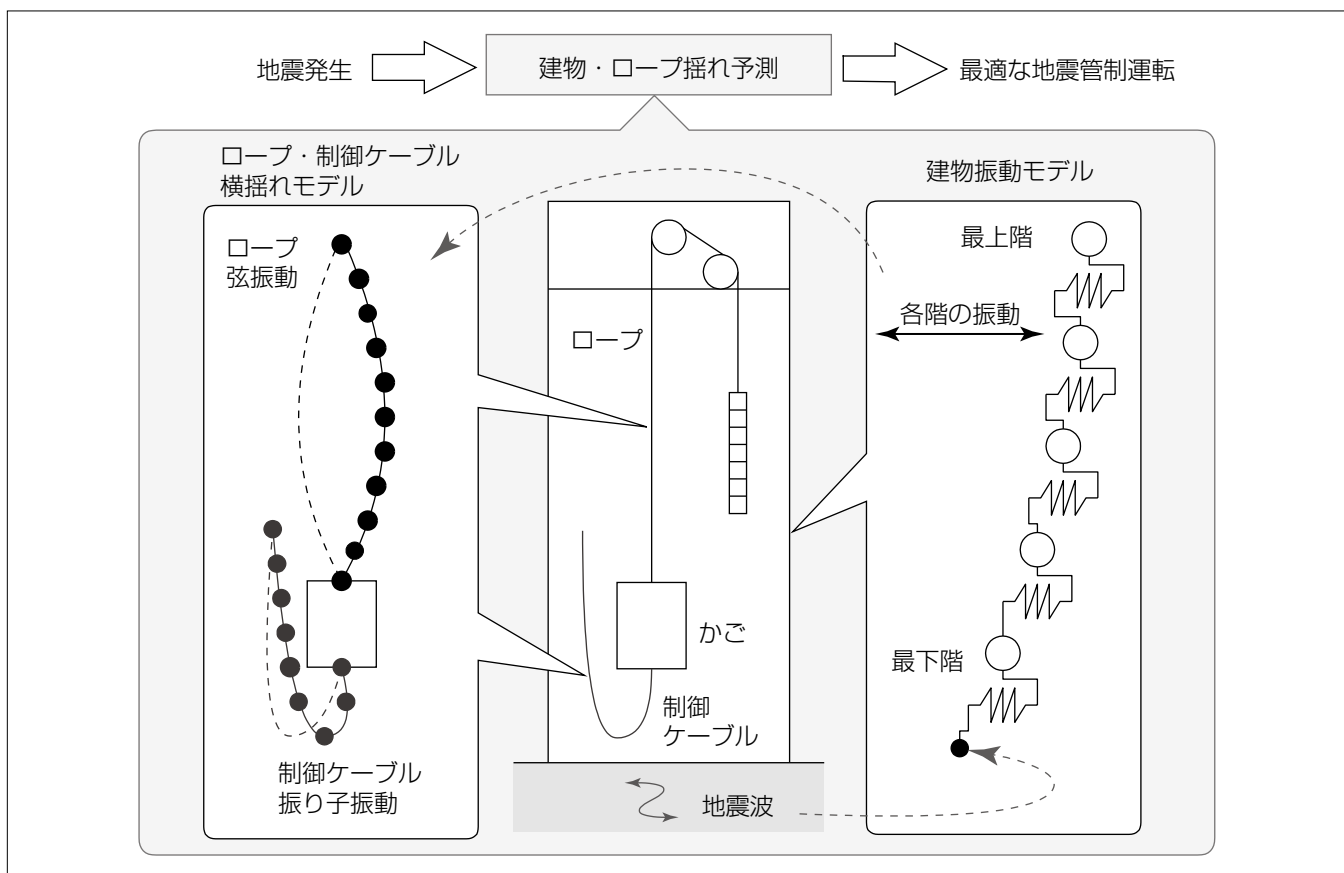
要 旨

2003年の十勝沖地震、及び2004年の紀伊半島沖地震、中越地震で観測された長周期地震動では、高層建築物の横揺れとともに生じるエレベーターロープの振動が注目されるようになった。長周期地震動は、数秒から十数秒の揺れが数分間にわたって継続するものであり、高層建築物の固有周期がこの揺れと一致すると、大きな建物振動を引き起こすことが知られている。この建物振動によって、エレベーターロープやケーブル類が大きく揺れて損傷する場合があります。今回の東日本大震災でも、長周期地震動による建物とロープの揺れによる被害が確認されている。

従来、長周期地震動に起因するエレベーターロープの横

振動評価に関しては、長周期地震動による建物振動のデータが乏しいことから、ロープ横振動の成長過程などの詳細な検討が十分に行われていなかった。そこで、長周期地震動における建物の揺れを評価できる建物振動モデルを構築するとともに、高層建築物に納入される高速エレベーターをターゲットに、エレベーターロープ及び制御ケーブルの横振動を評価可能なロープ振動モデルを作成した。

得られた振動モデルに基づき、長周期地震動によって発生するロープ揺れを抑制する対策について検討した結果を述べる。



建物振動及びエレベーターロープ・制御ケーブルの振動を予測する技術

長周期地震動を受ける建物に対し、各階における建物振動を計算するとともに、建物内に設置されたエレベーターのロープ・制御ケーブルの揺れを評価し、地震被害を防止する最適な地震管制運転を実現できる。

1. ま え が き

震源から遠く離れた位置で発生する長周期地震動では、通常の地震感知器では感知できない建物の揺れにもかわらず、エレベーターロープなどの長尺物が損傷する場合がある。2003年の十勝沖地震、2004年の紀伊半島沖地震や中越地震、そして今回の東日本大震災で、震源から約150km以上離れた平野部で、比較的長い周期(4～7秒)の地震動によって、従来の地震感知器が動作せずに、ロープやケーブル類が揺れて損傷する事象が確認されている。

従来、このような長周期地震動に対する建物の揺れとエレベーターロープの揺れについては、詳細な検討がなされていなかった。そこで、建物及びロープの振動モデルを構築することによって、ロープ揺れの評価を行うとともに、ロープ損傷を防止するための対策を実施した。

本稿では、導出した振動モデルに基づき、ロープの引っかかりを防ぐ機器の対策効果を確認するとともに、長周期地震動によるロープの揺れを推定し、ロープ揺れを抑制する管制運転方式について述べる。これによって、乗客の安全確保と昇降路機器の被害低減を図ることができる。

2. 建物振動モデル

図1に建物振動モデルを示す。建物は、多質点系の等価せん断剛性モデルとして表される。この時、建物の1次固有周期 T (秒)は、式(1)で近似できる。

$$T=0.025H \quad \text{.....(1)}$$

ここで、 H は建物高さ(m)を表す。

建物振動モードを図示すると、図2となる。長周期地震動では建物の1次固有振動モードが支配的となるため、ロープ揺れに対しては、建物の1次固有周期と一致するロープ長での評価が重要となる。

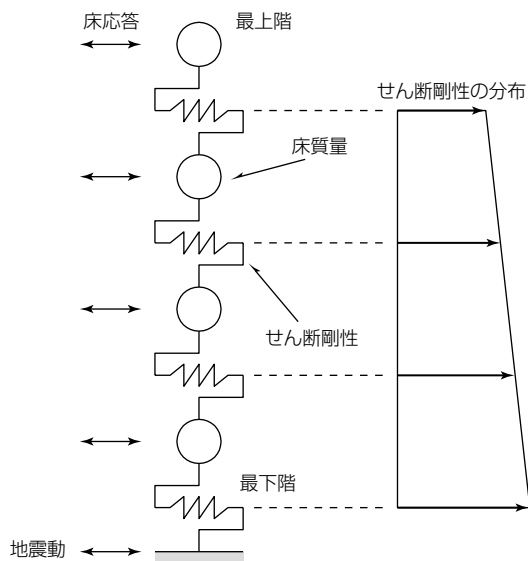


図1. 建物振動モデル

3. ロープ振動モデル

エレベーターには、図3に示すように、種々のロープが設置されている。

このうち、制御ケーブル以外は、ロープの両端が拘束された弦振動として横振動を評価できる。そこで、図3の右に示すように、ロープを多質点のバネ・マスモデルとして運動方程式を導出する。なお、制御ケーブルについては次章で述べる。

ロープの横振動を表す運動方程式は弦振動の式となり、運動方程式にはロープの張力がパラメータとして用いられる。ロープ張力 T は、式(2)で示すように3つの項で構成された、垂直・水平変位と時間の関数となる。

$$T(x, y, t) = T_s + T_v + T_h \quad \text{.....(2)}$$

ここで、 T_s はかごの自重(静荷重)、 T_v はロープ縦振動によるかごの慣性変化、 T_h はロープ横振動によるロープの伸びを表す。

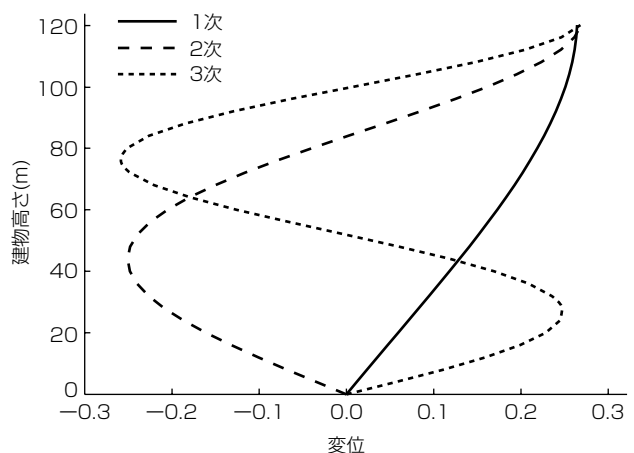


図2. 建物振動モード

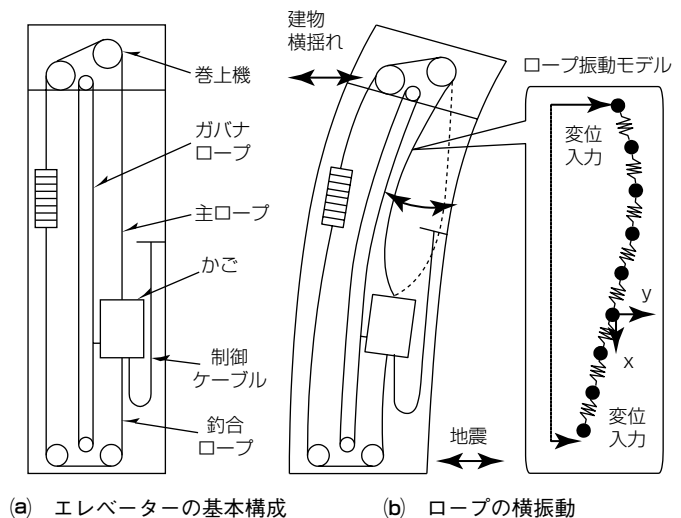


図3. 高速エレベーターの基本構成とロープ振動モデル

このことから、ロープの横変位 y は、 T_h によって、かごの上下振動と連成していることがわかる。さらに、ロープの伸びの影響 (T_h) で弦振動の固有振動数が変化するため、ロープの横振幅に依存した非線形特性を示す。また、ロープ横振動の減衰率は非常に小さく、振動が長時間にわたって持続することが実験で確認されている。

4. 制御ケーブル振動モデル

制御ケーブルは、昇降路の中間階で一端が固定され、他端がかご下に吊り下げられる構成であるため、3章で示した弦振動ではなく、振り子状の振動が発生する。

そこで、長方形断面の制御ケーブルに対し、二次元平面内でのケーブルの振動を考える。ケーブルを多質点のバネ・マスとして、ケーブルの長手方向の変形も考慮した二次元振動モデルの概略を図4に示す。

各質点の運動は x , y の2自由度の運動方程式で記述される。各質点には、隣接する質点同士で発生する長手方向の張力、鉛直方向の重力、隣接する質点の幾何形状で決まる曲げ反力が作用する。

かご側吊(つ)り下げ点近傍における制御ケーブルの走行時水平振動について計算した例を図5に示す。図5から、

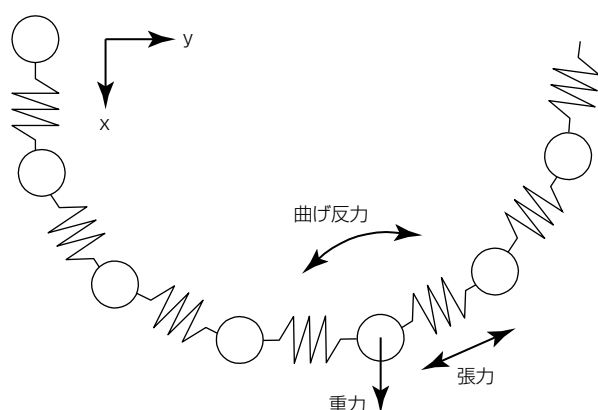


図4. 制御ケーブル振動モデル

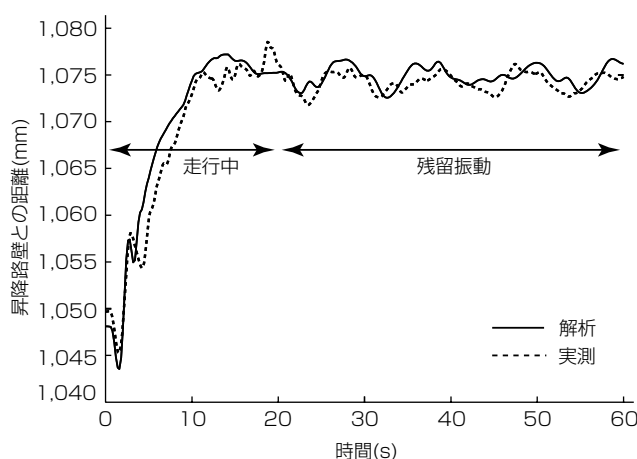


図5. ケーブルの水平変位

解析はほぼ実測と対応していることがわかる。このように、制御ケーブルの揺れについても、ロープと同様に計算で評価することができる。

5. ロープ横振動の低減

5.1 ロープの引っかかり対策

ロープが大きく揺れて、昇降路機器にロープが引っかかるのを防ぐ部品を、図6に示すように昇降路内に追加した。プロテクタは、ロープの揺れが増大して昇降路機器の背面にロープが回りこみ、昇降路機器と引っかかるのを防止し、釣合いおもり側レールを連結するタイバーは、かご側又は釣合いおもり側のロープと昇降路機器の干渉を防止する。

これらの追加部品によるロープの揺れ低減効果について解析検討した結果を図7に示す。ロープがプロテクタに接触することによって、ロープ横揺れの振幅増大が抑えられており、ロープの引っかかり防止に有効なことがわかる。

5.2 長周期地震時管制運転

長周期地震動によって、建物が1次の固有周期で揺れ続けている場合、図6で示すように、かご位置(ロープ共振階)によっては、ロープが建物振動と共振して大きな揺れになる。

そこで、従来の地震感知器では検出できないゆっくりとした建物揺れを検知し、ロープの揺れを推定可能な長周期感知器を開発した。この感知器によって、所定のロープ振幅を超えたと判断すると、建物の長周期振動に応じた管制運転に移行する。

エレベーターは、最寄り階での停止によって乗客の安全を確保した後、ロープの共振が発生しない階(ロープの非

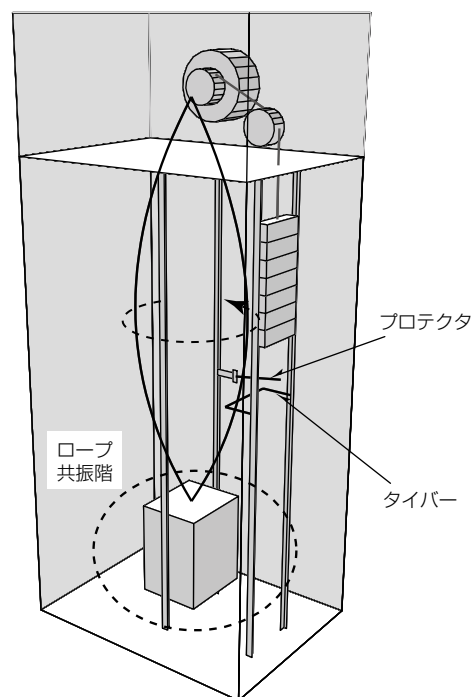


図6. ロープの引っかかり対策

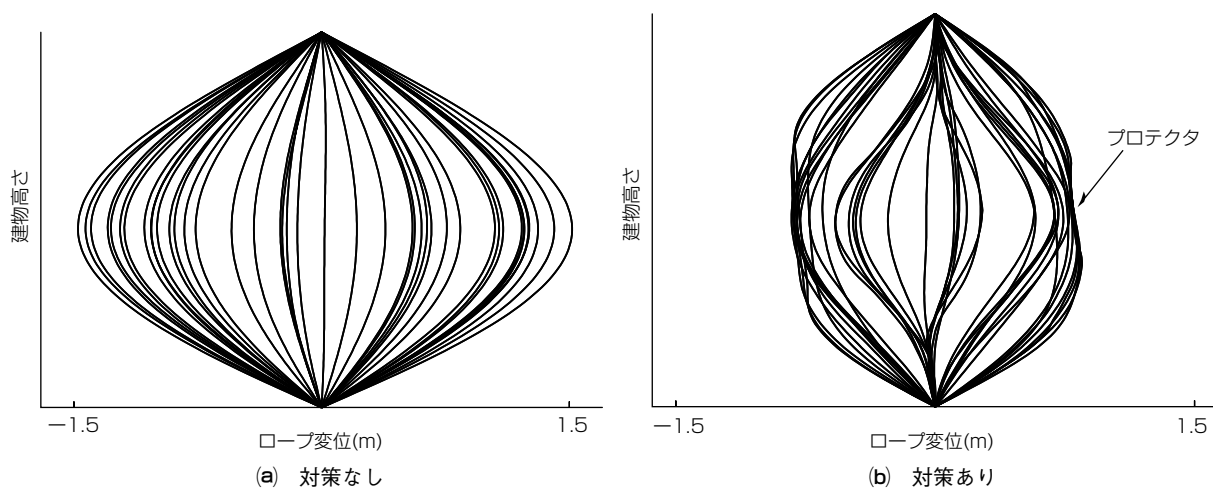


図7. 引っかかり対策の効果

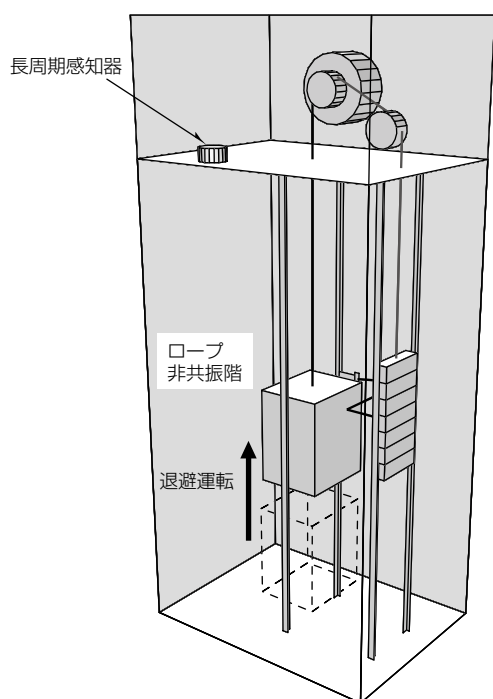


図8. 非共振階への退避

共振階)への退避を行う(図8)。これによって、ロープ揺れは収束し(図9)、建物の揺れが収束した場合は、自動的に通常の運転に復帰することができる。

この長周期地震時管制運転によって、ロープの非共振階へ迅速に退避することが可能となり、昇降路機器の破損を低減するとともに、復旧運転によって利用者へのサービスを、安全に再開することができる。

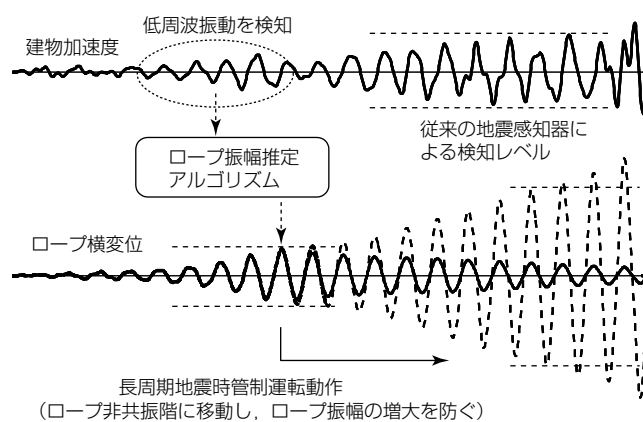


図9. 長周期地震時管制運転

6. む す び

高層建築物に設置される高速エレベーターに対し、長周期地震動でのロープ横振動を評価するために、建物振動及びロープ・制御ケーブルの振動モデルを構築した。これらのモデルを用いることによって、長周期地震動発生時におけるロープ振動の予測が可能となることを示すとともに、ロープの引っかかりを防止するための機器の対策と管制運転方式について述べた。これによって地震による昇降路機器の損傷低減と、乗客へのサービス向上を図ることができ、従来よりも耐震性を高めたエレベーターを実現することができる。

パワー半導体素子のモデル化と動作特性解析

富永真志* 木ノ内伸一**
堀口剛司** 大井健史**
漆畑廣明*

Modeling and Characteristics Analysis of Power Semiconductor Devices

Shinji Tominaga, Takeshi Horiguchi, Hiroaki Urushibata, Shinichi Kinouchi, Takeshi Oi

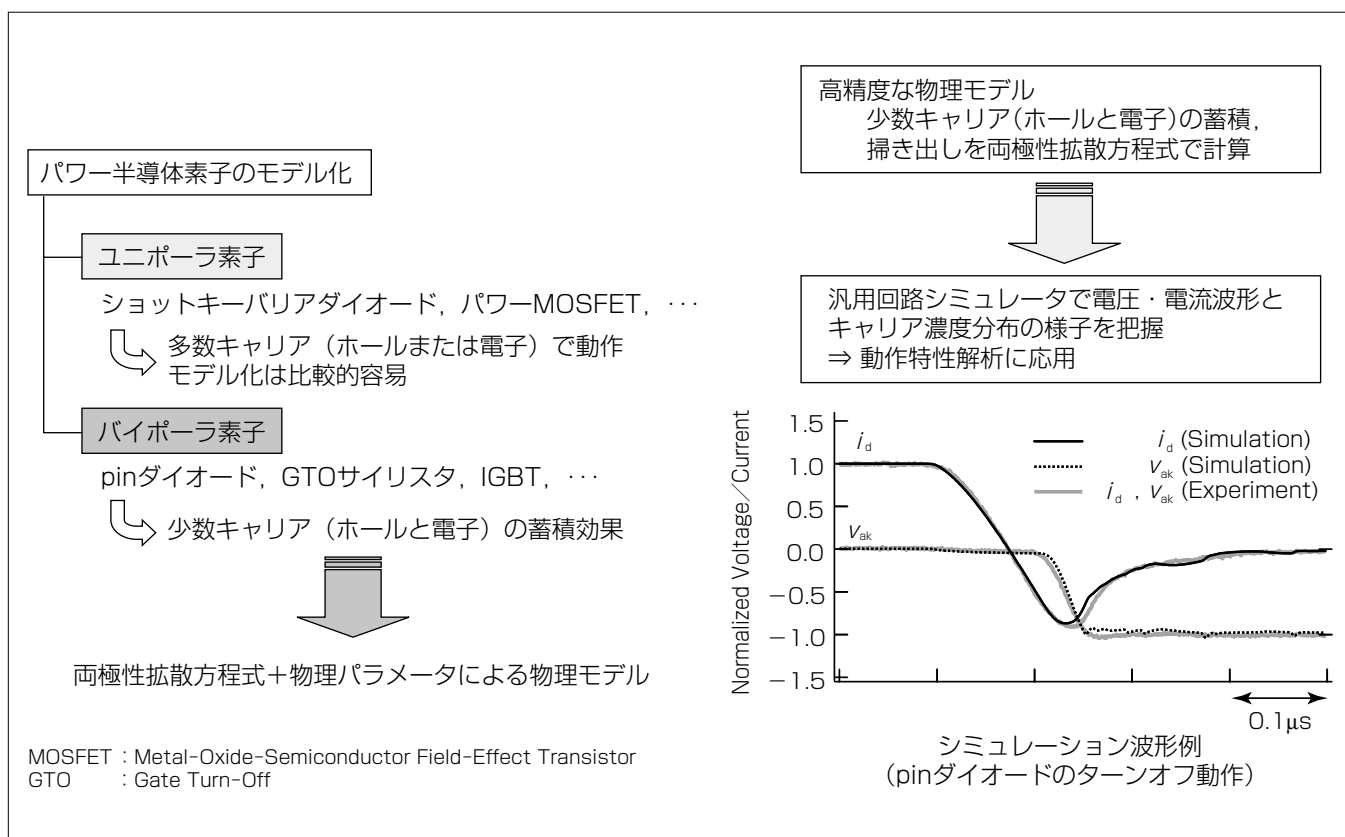
要 旨

近年の環境問題への関心の高まりなどを背景として、パワーエレクトロニクス機器に対する普及の期待とともに小型化、高効率化、低コスト化、品質向上が求められるなか、機器の設計段階におけるシミュレーション技術が重要な役割を果たしている。パワーエレクトロニクス機器の基幹部品であるパワー半導体素子は、シミュレーションでもその素子モデルが重要である。すなわち、パワー半導体素子モデルの精度がシミュレーション結果を左右する。

パワー半導体素子のうち、pinダイオードやIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)などに代表されるバイポーラ素子は、電流が主としてホールと電子という少数キャリアの拡散電流であるため、少数キャリアの挙動を表す両極性拡散方程式を適用した物理モデルとすることで、

その素子モデルの高精度化が実現できる。さらにこの素子モデルは、通常は計測することができないパワー半導体素子内部におけるキャリア濃度分布の様子を把握できるという特長を持つ。

例として、バイポーラ素子の中で最も基本的な構造を持つpinダイオードの素子モデルを用いて、その特徴的なターンオフ動作が高精度で模擬できることを示した。また、並列接続したpinダイオードのターンオフ動作を汎用回路シミュレータで解析し、複雑に変化するリカバリー電流の波形をキャリア濃度分布の変化で説明できることを明らかにした。このように、高精度な物理モデルが設計段階でのスイッチング波形解析や損失評価に有効であることを示した。



パワー半導体素子のモデル化とpinダイオードモデルによるシミュレーション解析

パワー半導体素子のうちユニポーラ素子はホールまたは電子のどちらか一方の多数キャリアで動作するため、比較的容易に高精度な素子モデルが得られる。一方、pinダイオードを初めとするバイポーラ素子には少数キャリアの蓄積効果という動作上の特徴があり、モデル化には少数キャリアの物理的挙動を把握することが重要である。両極性拡散方程式を適用したpinダイオードの物理モデルと適切なモデルパラメータの設定によって、実測波形とよく一致したシミュレーション結果が得られている。

1. ま え が き

近年、環境問題への関心の高まりやパワー半導体の性能向上によって、パワーエレクトロニクス機器の普及が進んでいる。これに伴って機器の小型化、高効率化、低コスト化、品質向上がより強く求められており、機器の設計段階におけるシミュレーション技術が重要な役割を果たしている。パワーエレクトロニクス機器の基幹部品であるパワー半導体素子は、シミュレーションでもその素子モデルが重要である。すなわち、パワー半導体素子モデルの精度がシミュレーション結果を大きく左右する。

本稿ではパワー半導体素子の高精度なモデル化と、これを用いたパワー半導体素子の動作特性解析例について述べる。

2. パワー半導体素子のシミュレーションモデル

2.1 パワー半導体素子のモデル化

パワー半導体素子のスイッチング動作における電圧、電流の過渡応答は素子の発熱(損失)やノイズの発生と深い関係があり、パワーエレクトロニクス機器の重要な設計ポイントとなっている。特に素子自身の発熱による温度上昇で動作特性が刻々と変化していくため、素子の温度特性の正確な模擬が素子モデルの精度向上に不可欠である。

従来、半導体素子の設計を目的とした動作解析には、素子の断面構造または三次元構造と物性値等を必要とするデバイスシミュレータが用いられている。これは温度特性を含めて半導体素子の挙動を高精度に模擬できるものの、計算負荷が大きく、素子を含む電気回路モデルと機器の冷却機構を考慮した熱解析モデルを連携させる連成解析への適用が難しい。そのため、汎用の回路シミュレータ上で扱えるパワー半導体素子モデルが求められている。

汎用回路シミュレータの1つで電子回路のアナログ動作解析を行うSPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)は、集積回路などの低圧小電力用途向けに開発されたSPICEモデルと呼ばれる独自の素子モデルを標準で実装している。しかし、パワーエレクトロニクス機器で用いられるパワーMOSFETやpinダイオードといった高耐圧、大電流用途のパワー半導体素子は物理的な構造や動作原理が異なるため、モデルパラメータの調整だけではパワー半導体素子の特性のすべてを模擬できず、素子モデルを再構築又は新たにモデルを構築する必要がある。

パワーMOSFETについては、MOSFETのSPICEモデルをベースとして精度を改善した素子モデルが比較的容易に得られている。これは、MOSFETがホールまたは電子のどちらか一方の多数キャリアで動作するユニポーラ素子であり、ホールと電子の両方で動作するバイポーラ素子に見られる少数キャリアの蓄積効果がないためである。一方、pinダイオードやGTOサイリスタ、IGBT等はバイポーラ

素子であり、少数キャリアの注入による伝導度変調効果を利用して、オフ時の高耐圧、オン時の低抵抗を実現している。この少数キャリアの注入、蓄積、掃き出し、消滅といった動作が過渡特性に大きな影響を与えているが、SPICEモデルではこれを正確に模擬する機能を備えていない。このように、少数キャリアの物理的挙動を把握することが、pinダイオードを初めとするバイポーラ素子のモデル化の要点である。バイポーラ素子の中で最も基本的な構造を持つpinダイオードのモデル化について2.2節に述べる。

2.2 pinダイオードのモデル化

pinダイオードは、p形半導体の層(p⁺層)とn形半導体の層(n⁺層)の間に、n形半導体の不純物濃度を低くして真性半導体に近付けたn⁻層を設けている。このようなpin構造によって、オフ時に空乏化した際の空間電荷密度が小さく、n⁻層にかかる電界強度を構造的に低減できるため、より高い耐圧が得られる。また、オン時には伝導度変調または高注入状態というホールと電子が高密度で共存するプラズマ状態となるため、n⁻層の抵抗成分を低減できる。pinダイオードの動作特性で最も特徴的かつ重要なのは、この低オン抵抗の状態からオフ状態への過渡的な動作(ターンオフ動作)に現れるリカバリー特性(逆回復特性)である。

図1にpinダイオードのターンオフ動作を示す。順方向に定電流 I_F が流れる状態では、n⁻層に図1(b)の時刻 t_1 で示すようなキャリア濃度 $p(x, t)$ が分布している。時刻 t_1 からターンオフ動作が始まって順方向電流が0まで減少しても、キャリアがすぐには消滅せず電流は更に逆方向へ流れる。この逆方向電流(リカバリー電流)によってn⁻層のホールはp⁺層へ、電子はn⁺層へと掃き出され、キャリアの減少に伴ってn⁻層の抵抗は増大する。図1(b)でキャリ

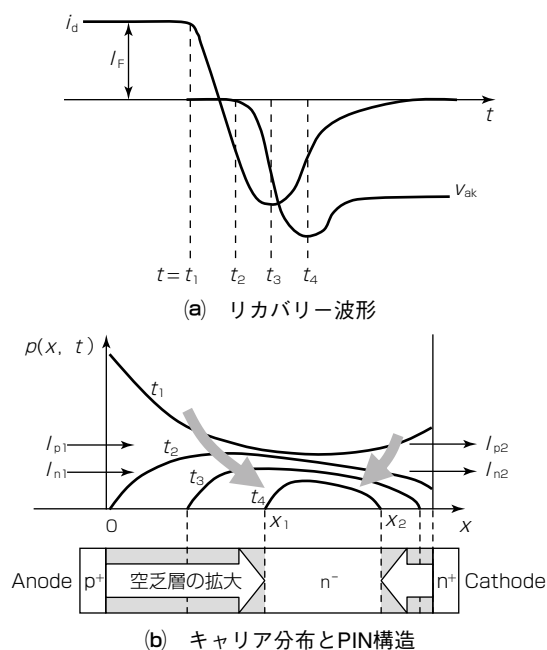


図1. pinダイオードのターンオフ動作

アの蓄積領域を位置座標 x_1 , x_2 で表すように、時刻 t_2 以降は x_1 , x_2 が移動して空乏層が拡大するとともにダイオードの端子電圧 V_{ak} が上昇し、キャリアの蓄積量も少なくなつて逆方向電流は減少する。

pinダイオードの n^- 層でキャリアの移動は一次元方向のみと仮定し、ホールと電子の濃度が等しい高注入状態の条件下ではキャリアの挙動を1つの式で近似的に表すことができ、そのキャリア濃度分布 $p(x, t)$ は式(1)に示す次元両極性拡散方程式で表される。

$$D \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} = \frac{p(x, t)}{\tau} + \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

ここで D は両極性拡散定数、 τ はキャリアのライフタイムである。両極性拡散方程式の境界条件として、キャリア蓄積領域の両端におけるキャリア濃度勾配を用いる。 $p(x, t)$ は式(1)から解析的に解けないため、シミュレーション中に数値解析で求める。このようにして得られたキャリア濃度分布から蓄積領域と空乏層のそれぞれにかかる電圧を計算し、さらに接合部の電圧を加算してpinダイオード端子間の電圧 V_{ak} を求める。これらの計算には電荷素量や半導体(シリコン)の誘電率などの物理定数のほか、チップ面積やpin構造各層の幅、ライフタイムや不純物濃度などのようにモデル化の対象としたpinダイオードの内部構造や物性に基づく物理パラメータを用いている。

高精度な素子モデルの実現には、モデルを構成する方程式に適切なモデルパラメータを適用することも必要である。先に述べた物理パラメータの具体的な数値は、市販の素子ではほとんど公表されておらず、実際にモデルを扱う回路設計者がそれらの値を直接計測することも極めて困難である。そのため、データシートや実測した静特性、スイッチング波形を参考に各種モデルパラメータの抽出、最適化を行う⁽¹⁾。

図2にpinダイオードモデルによるシミュレーション波形と実測波形を比較した例を示す。実測波形を目標にモデルパラメータを調整、最適化したことによって、精度よく模擬できている。ここでは複数の動作条件を参考にした平均的なパラメータを抽出、設定しており、モデル化における仮定や近似に起因する誤差は残るものの、電圧、電流、温度などの条件による波形の変化にも精度よく対応できる。これはキャリアの移動度やライフタイムに温度依存性がある

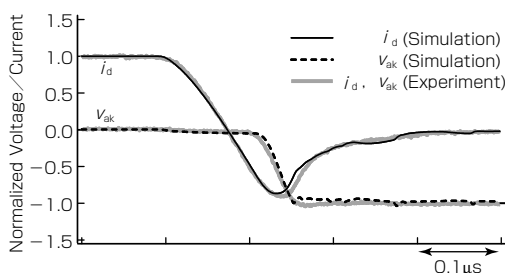


図2. シミュレーション波形 (pinダイオードターンオフ)

り、式(1)からキャリアの挙動を温度に応じて物理的に模擬できるためである。

3. 並列接続pinダイオードの動作特性解析

素子モデルを用いた動作特性解析の例として、パワー半導体素子を並列接続する場合を想定し、配線インダクタンスが異なるpinダイオードのターンオフ動作の解析について述べる⁽²⁾。

3.1 並列接続pinダイオードのシミュレーション

図3にリカバリ特性の評価試験回路を示す。試験条件は直流電圧 $V_{DC}=300V$ 、ゲート抵抗 $R_g=51\Omega$ 、温度を25℃(室温)とし、負荷インダクタンス L_L に100Aの電流が流れるようにパワーMOSFETをスイッチングさせた。2個のpinダイオード D_1 , D_2 を並列に接続し、 D_1 の配線長を D_2 よりも短くして配線インダクタンス L_1 , L_2 に差を与えた。

配線インダクタンス L_1 , L_2 は実測波形から求め、それぞれ10.7nH, 18.5nHをpinダイオードモデルに設定した。これと同じオーダーの回路定数も無視できないため、回路モデルには寄生インダクタンス L_s , 寄生抵抗 R_s も考慮した。また、パワーMOSFETにはSPICEモデルをベースに端子間容量の電圧依存性を考慮して、pinダイオードモデルと同水準まで精度を向上した素子モデルを用いた。

図4にターンオフ動作のシミュレーション結果を示す。また、表1にリカバリ損失(ターンオフ時のリカバリ電流×電圧の積分で表されるスイッチング損失)の比較を示す。 D_1 と D_2 は並列接続であるため、電圧波形は同一である。リカバリ電流波形はそれぞれ複雑に変化しているが、ともに実測波形とよく一致しており、リカバリ損失の誤差も10%前後で精度よく模擬できている。

3.2 ターンオフ動作の解析

シミュレーションで得られたキャリア濃度分布を利用して、リカバリ電流波形の複雑な変化を物理的に解析する。図5にリカバリ電流波形の比較を、図6に n^- 層内のキャリア濃度分布を示す。リカバリ電流波形に記載してい

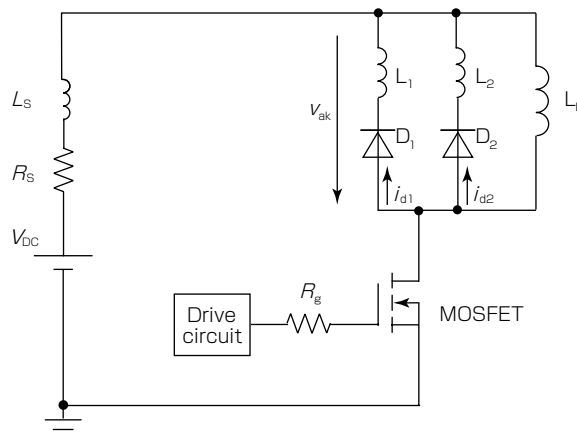
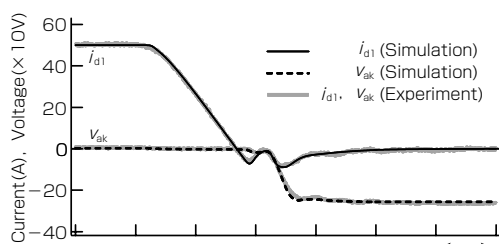
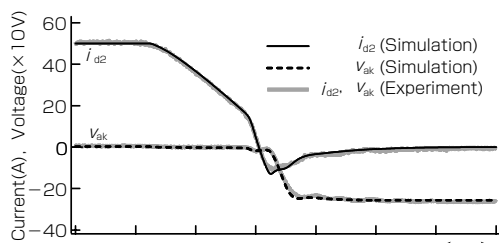


図3. リカバリ特性の評価試験回路



(a) D₁ : 配線インダクタンス10.7nH



(b) D₂ : 配線インダクタンス18.5nH

図4. ターンオフ動作のシミュレーション結果

表1. リカバリー損失の比較

	D ₁ : 10.7nH	D ₂ : 18.5nH
シミュレーション	146.8μJ	173.8μJ
実測値	129.9μJ	161.6μJ
誤差	13.0%	7.5%

る時刻 t_a , t_b , t_c , t_d は、キャリア分布の各時刻と対応する。

時刻 t_a までの順方向電流はそれぞれ一定値50Aで等しく、定常状態の電流値が等しいためにキャリア濃度分布も等しい。ターンオフ動作が始まると、配線インダクタンスが小さいD₁は電流の減少率 di/dt が大きく、電流の減少速度に応じてキャリア濃度も速く下降する。D₁は時刻 t_b でp⁺層側のキャリア濃度が先に0となり、時刻 t_b 以降はp⁺層側から空乏層が形成され始める。そのため、D₁には電流が流れにくくなり、時刻 t_b から逆電流が減少する一方で、D₂に流れる電流が増加して波形の傾きが大きくなっている。D₂は時刻 t_c でp⁺層側のキャリア濃度が0となり、p⁺層側から空乏層が形成され始めて電流が流れにくくなる。その結果、D₂の逆電流が減少し、D₁の逆電流が再び増加している。最後に電流が0に近付くと蓄積領域や接合部の電圧も0に近付き、ダイオード電圧のほとんどが空乏層にかかる。電圧は空乏層幅の2乗に比例し、電圧が等しいD₁, D₂の空乏層幅 x_1 も等しくなっている。このように、空乏層を形成する時期の差によってリカバリー電流が変化することを確認できた。

この例では配線インダクタンスが大きいD₂のリカバリー損失が大きいので、スイッチングを繰り返すとD₁よりD₂の温度が高くなっていく。この時、pinダイオードの温度特性からD₂へより多くの順方向電流が流れるためにリカバリー電流も増大し、リカバリー損失が増えてさらに温度差が拡大することがわかる。このような解析でどこにど

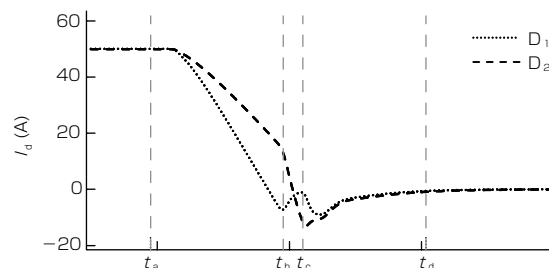
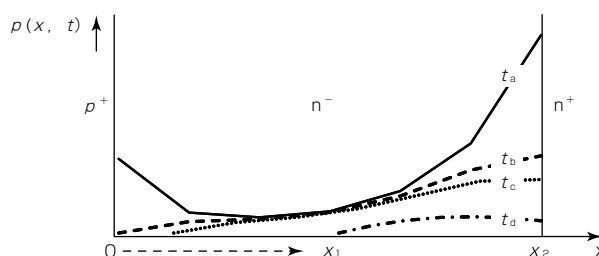
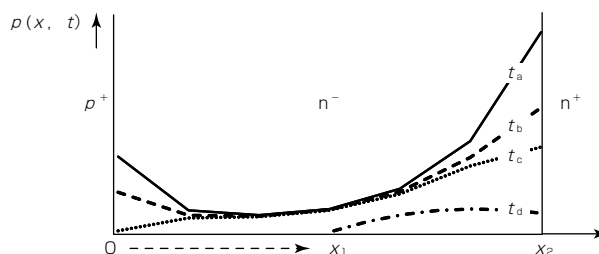


図5. リカバリー電流波形の比較



(a) D₁ : 配線インダクタンス10.7nH



(b) D₂ : 配線インダクタンス18.5nH

図6. キャリア濃度分布

れだけの冷却が必要かわかるため、最適な冷却機構の設計が可能となる。

4. む す び

本稿ではパワー半導体素子、特にpinダイオードなどのバイポーラ素子の物理モデルについて述べた。半導体内部におけるキャリアの挙動といった物理現象をモデル化することによって、高精度な素子モデルが得られることを示した。また、物理モデルを用いた動作特性の解析例を紹介し、高精度な物理モデルが設計段階でのスイッチング波形解析、損失評価に有効であることを示した。

参 考 文 献

- (1) 遠山 喬, ほか: 静特性と動特性の統合評価に基づくパラメータ抽出手法—pinダイオードモデルへの応用—, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-10-015 (2010)
- (2) 杉本貴之, ほか: デバイスモデルを用いた並列接続pinダイオードの動作特性—キャリアの挙動によるリカバリー特性の解析—, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-11-017 (2011)