

# 技術情報

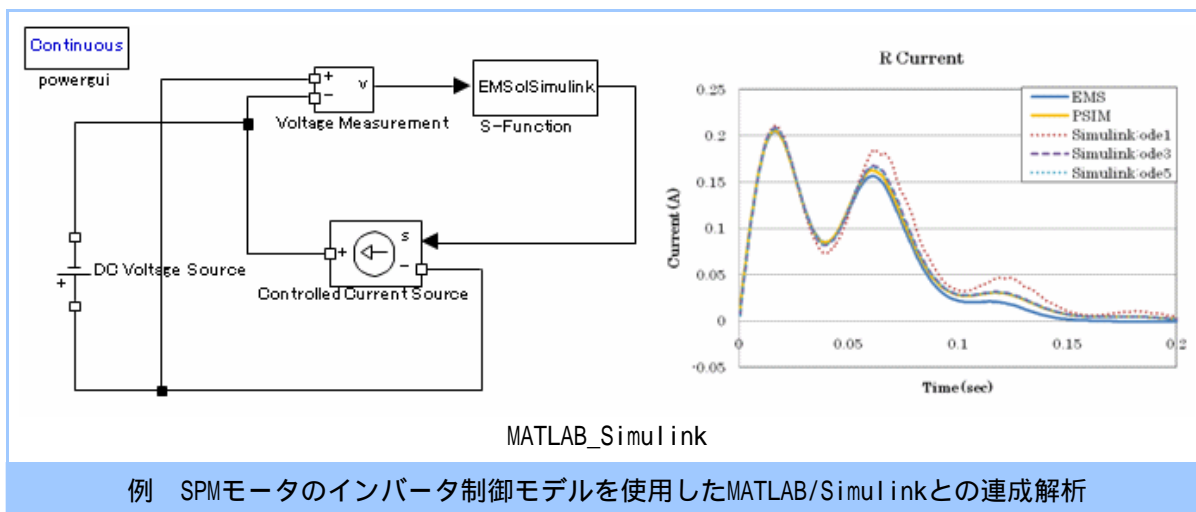
## 1. MATLAB/Simulinkとの連成解析

EMSolutionは単体で電磁場解析と外部回路系、運動方程式との連成解析機能を有しています。しかし、モータに代表されるような複雑な制御回路を模擬するには力不足なため、パワーエレクトロニクスも模擬できるPSIMとの連成解析モジュールを開発し、既にリリースしております。IPMモータに代表される電磁機器は、パワーエレクトロニクスも含む制御回路システムを、マルチドメインシミュレーション及びダイナミックシステムであるMATLAB/Simulink ([Mathworks Inc.](http://www.mathworks.com)) で作成されることが多く、より実機に近い回路が模擬できるなど汎用性が高いと思われます。

そこで、EMSolutionとMATLAB/Simulink (MATLAB 7.10.0 R2010a) との直接連成解析ができる機能を開発いたしました。

Windows版のみの提供となります。

### [リンク](#)



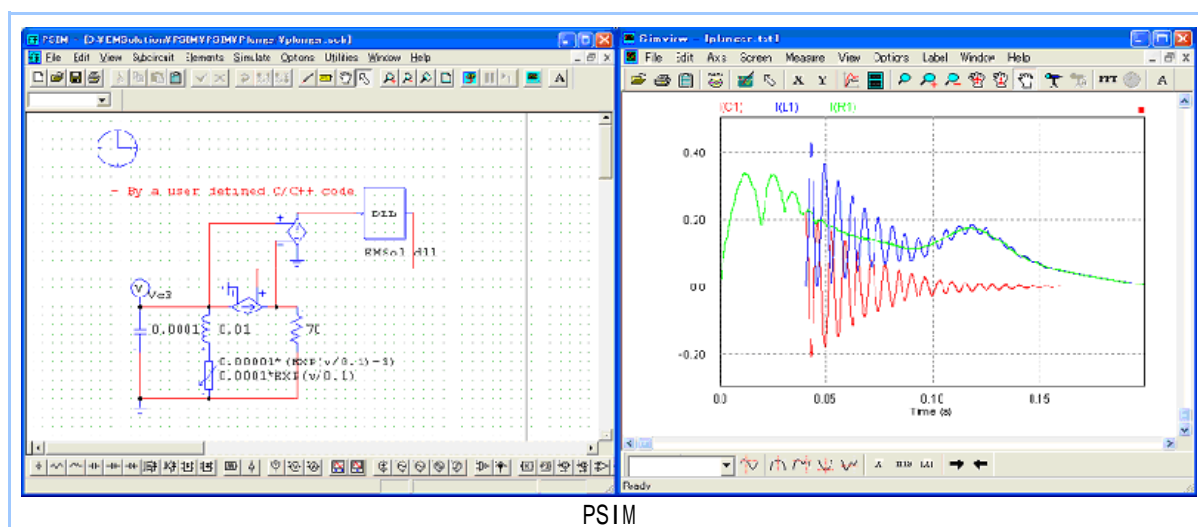
## 2. シミュレーションツール PSIMとの連成解析機能

EMSolutionは電磁場解析と外部回路系との連成や運動方程式との連成解析を行う機能を有していますが、複雑な電気電子回路系を模擬することや、運動をフィードバック制御したりする制御回路を模擬することは困難です。

そこで、汎用の回路・制御シミュレータであるシミュレーションツールPSIMとEMSolutionを連成させる機能を開発いたしました。

Windows版のみの提供となります。

[リンク](#)



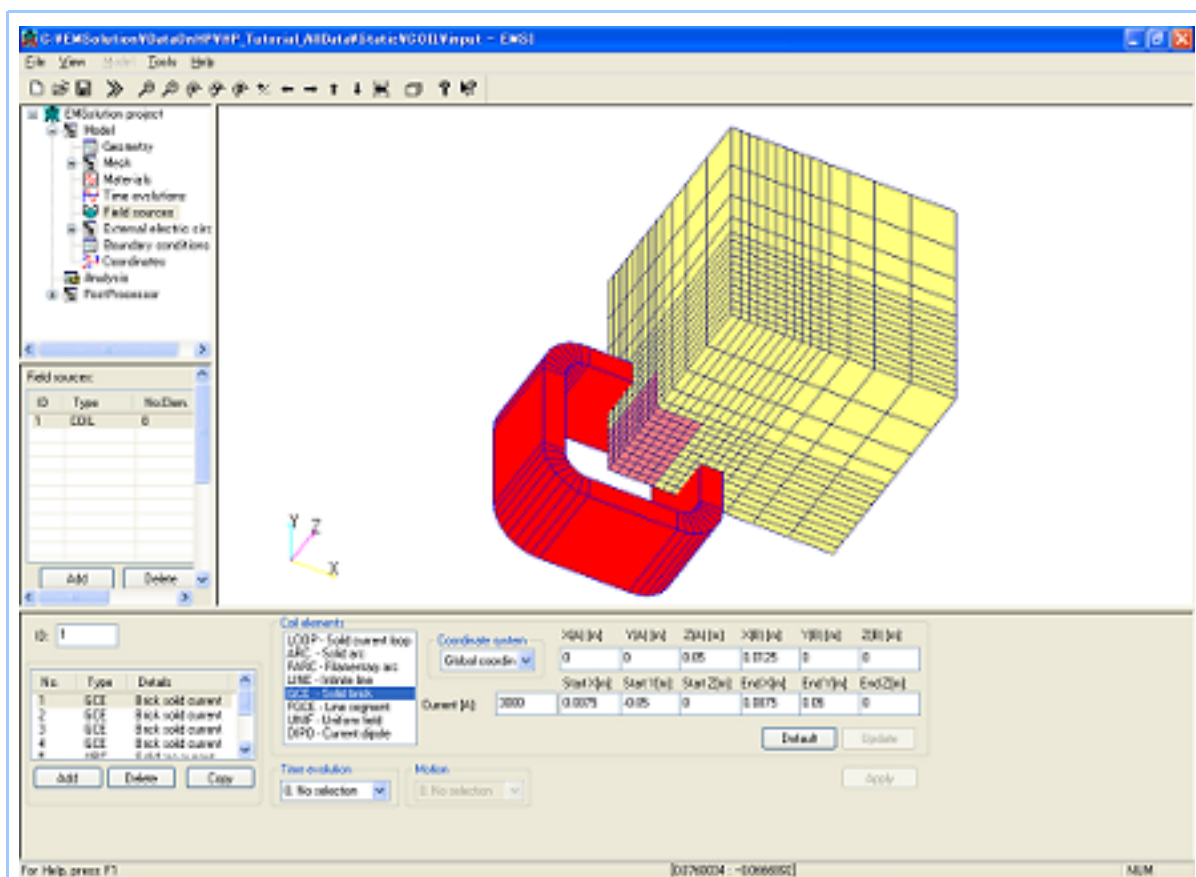
例 プランジャーモデルを使用したPSIMとの連成解析

### 3. EMSI (EMSolution Interface)

EMSolutionのインプットデータを作成するためのGUIソフトウェアであるEMSI (EMSolution Interface)を大幅に改良致しました。

メッシュデータに関連付けたインプットデータの作成、EMSolutionの実行、ポスト処理までをEMSI上で一貫して行うことができます。

[リンク](#)



COIL設定、表示

例 EMSIによって表示された磁場ソース (COIL)

#### 4. HyperWorksシリーズに対応

EMSolutionのプレポストソフトウェアとして使用可能である、統合CAEツールセットであるHyperWorksシリーズに対応しました。

高速にメッシュ作成できるHyperMeshをプレ処理として、グラフィック機能に優れたHyperViewをポスト処理として使用可能です。

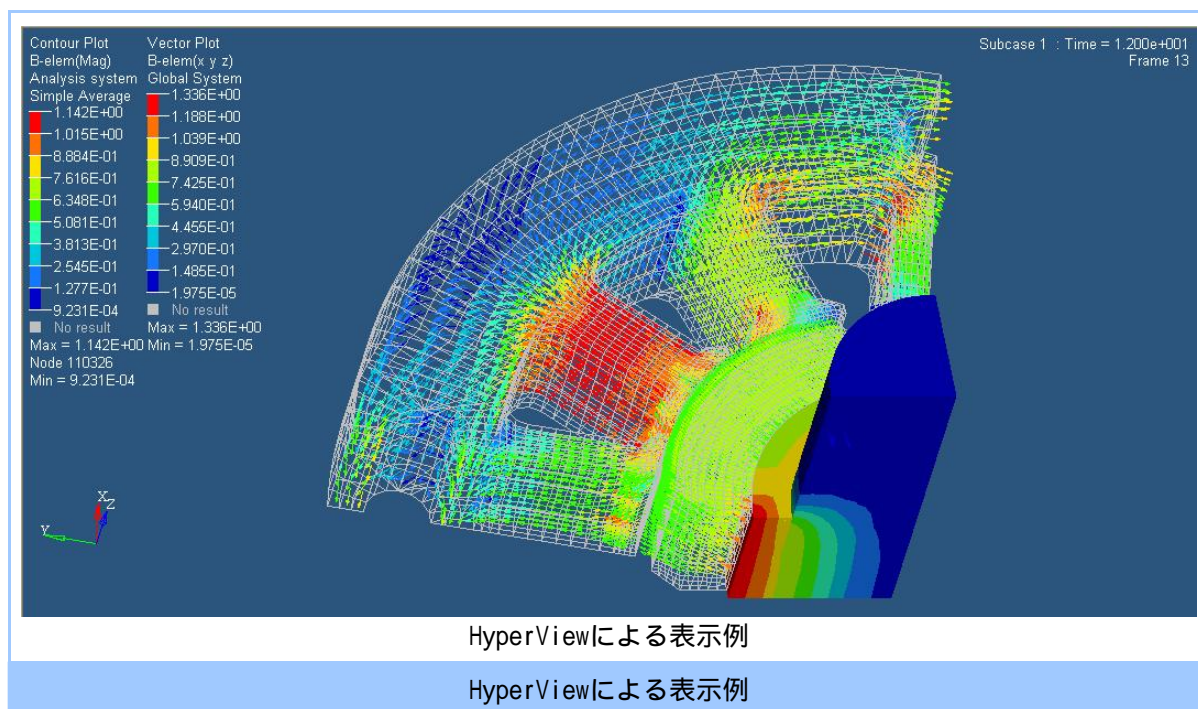
HyperMeshを使用すれば、六面体要素も簡単に自動メッシュ作成することができます。

HyperViewでは、EMSolutionの解析結果を様々な方法で表示可能です。

また従来，コンター図等から多くの情報を得るためには，静止画やある角度からの動画ファイルを作成する必要がありましたが，HyperView Playerを使用することによりファイル容量も小さい単一ファイルに変換することができます。

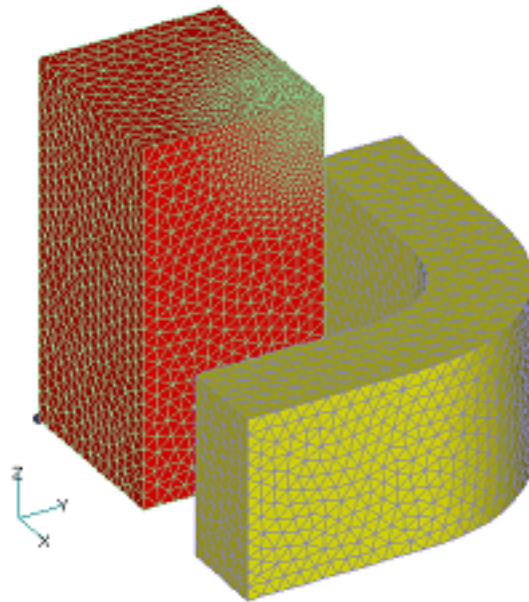
報告書やプレゼンテーション，デモンストレーションには最適かと思われます。

## リンク



## 5. Adventure ProjectのメッシュジェネレータとEMSolutionの磁場解析

[Adventure Project](#)では、メッシュ生成コードや構造解析ソルバー等のソースコードが公開されています。ここでは、そのメッシュジェネレータを使用し、有限要素メッシュを作成し、EMSolutionによる磁場解析への適用性を検討しましたので、報告します。[リンク](#)をご覧ください。



Adventureメッシュジェネレータによって生成されたメッシュ（磁性体とコイル）

Adventureメッシュジェネレータによって生成されたメッシュ（磁性体とコイル）

## 6. 「新しい計算電磁気学 -基礎と数理-」刊行

(Dec. 10, 2003)

培風館より次の「新しい計算電磁気学-基礎と数理-」が刊行されました。

- \* 書名：新しい計算電磁気学-基礎と数理-
- \* 著者：五十嵐一、亀有昭久、加川幸雄、西口磯春、A.ボサビ
- \* 刊行日：2003年12月10日
- \* 発行所：(株)培風館
- \* 定価：3,800円
- \* ISBN4-563-06731-8 C3054



「新しい計算電磁気学 -基礎と数理-」

本書では、近年では標準的になった辺有限要素法やFDTD法(有限積分(FI)法)で代表される「一般化された差分法」等についての基礎が述べられています。近年、電磁場の微分形式による表現が研究され、有限要素法や差分法を統一に解釈することが進められています。本書は、辺要素から始められたこの機運を理解する上で格好の入門教科書になると思います。

第1章「計算電磁気学入門」では、有限要素法の基礎を平易に記述し、また、「一般化された差分法」で取り上げられる空間の向きや双対メッシュについて入門的な記述が行われています。第2章「電磁場の辺有限要素法」は弊社亀有が執筆を担当しています。ここでは、辺要素により電磁場がどのように表現されるかを詳しく述べ、それを有限要素法に適用した場合の不定性の問題やゲージ固定について論じ、外部回路系との結合法について詳述しています。第3章「電磁場と等価回路」では、電磁場の等価回路表現を展開し、電磁場と圧電素子の結合が論じられています。

第4章「電気・機械結合系」では、電磁力を主題とし、機械系との結合が論じられ、その微分形式表現へと展開されています。第5章「一般化された差分法・電磁気問題の離散化」は計算電磁気学を基礎から築きあげられてきたボサビ博士が書き下ろされたもので、差分法と有限要素法を統一的に論じられており、計算電磁気学の基礎となるものです。電磁場ユークリッド空間を、アフィン、向き、計量の性質を持つ空間として多層的に把握し、微分形式を基に空間を離散化し、離散化Maxwell方程式というべきものを議論されています。その中で、差分法と有限要素法の統一的な解釈を展開されています。

第2章では、EMSolutionコードの基礎となる理論と手法を紹介しています。EMSolutionにおける解析法について理解されたい方々には、是非参考にさせていただきたいと考えます。他書を参照せずに読み進めるように工夫したつもりです。不備なところも多々あるかと思いますが、ご批判をいただければ幸いです。

## 7. 64bit AMD Opteronによるテスト

(Aug. 22, 2003)

計算機が大規模高速化し、EMSolutionでも今までにない大規模な解析のご要望が多くなってきました。従来の32BitのWindows機ですとメモリ使用が2Gbyteで押さえられており、百数十万要素の解析が精一杯でした。この度、[アミュレット\(株\)](#)殿より販売されるAMD Opteron機を借用する機会を得ましたので、大規模解析のベンチマークを行いました。

[リンク](#)

### 7.1. 64bit AMD Opteronによるテスト(その2)

(Nov. 11, 2004)

以前、[アミュレット\(株\)](#)殿より販売されているAMD Opteron機を借用して大規模解析を行いました。搭載メモリの関係から、目標とする1,000万要素の計算を行うことはできませんでした。今回**メモリ搭載量を最大の12GB**として再び借用する機会を頂きましたので、ベンチマークテストを行いました。その結果、**最大1,007万6面体要素の解析が可能**であることを確認しました。

[リンク](#)

## 8. 32Bit機による線形・非線形大規模解析

(Nov. 11, 2004)

以前からお問い合わせのあった、32Bit機でどの程度の大きさの解析ができるのかについて、この度ベンチマークテストを行いました。メモリを2GB搭載したWindowsマシンを用い、線形・非線形解析共に行いました。その結果、**線形・非線形解析共に最大133.1万6面体要素の解析が可能**であることを確認しました。

[リンク](#)

## 9. Dual Core, Quad Core搭載マシンによるパラレル実行ベンチマークテスト

(May. 9, 2008)

多くのお問い合わせを頂いていた、マルチコア搭載マシンで、二つの計算を同時実行した場合と、一つずつ計算を行う場合では、どの程度計算速度に差が出るのかについて、ベンチマークテストを行いました。その結果、パラレル実行ではTotalで使用メモリが搭載メモリを上回った場合は計算時間が非常に低下する、またJob数が多い場合も、メモリ取得やファイルIOのタイミングにより、非常に計算時間が低下してしまうことがわかりました。

[リンク](#)

## 10. Benchmark

EMSolutionはUNIX、Linux OSのEWSやWindows OSのPCで利用されています。Benchmarkでは、種々なOSや計算機でのEMSolutionの計算速度を比較しています。Benchmark問題としては、TEAM Workshop Problem20のプランジャーにおける電磁力問題を解いています。計算機導入の際のご参考にしていただければ幸いです。また、お客様のお持ちの計算機で、EMSolutionのパフォーマンスをお知りになりたい場合には、お申し出下さい。ご協力を頂けるようでしたら、ベンチマークを行います。

### [45.5 秒を達成！ \(March27, 2006\)](#)

本ベンチマークテストにおきまして、Intel EM64T Xeon 3.6GHz, Red hat Enterprise Linuxにより45.5秒を記録しました。

また、従来UNIX、Linux版に比べ計算速度が遅かったWindows版ですが、r9.7.7において大幅な高速化に成功しました！ UNIX、Linux版と比較しても遜色ないパフォーマンスですので、Windows OSのPCにおいても”高速ソルバー”のメリットを実感いただけます。

[リンク](#)

## 11. 参考文献

[リンク](#)

EMSolutionに関連する参考文献を示します。

## 12. 外部発表

### 12.1. 辺要素を巡って? 「張力って?」?

- \* 2011年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 同志社大学 京田辺キャンパス
- \* 2011年1月20日
- \* 発表者：亀有昭久\* (SSIL)
- \* 論文番号：[SA-11-13, RM-11-13](#)
- \* 要旨：

本年度の研究会から、民間研究者の記念講演が企画され筆者亀有が第一号で講演を承りました。僭越ながら、今後もこのような企画が行われることを願い、発表させて頂きました。講演内容は、筆者が電磁気数値解析に関わってきた経験を辺要素を中心に述べたものです。辺要素は、H. Whitney が導出し、J.C. Nedelec の有名な論文があり、その後、A. Bossavit , R. Albanese & G. Rubbionacci らによって発展させられたと考えています。筆者は、この発展時期に歩みをともしており、微力ながらその発展に寄与したかと考えています。

\*この発表論文の中で「辺要素」「節点要素」という用語を筆者が最初に言ったように書いています。文献としては、1989年に開かれた第一回電磁界セミナーの「渦電流解析技術? 辺要素 (Edge-element) について?」が最も早期のもので、ただ確信は無く、筆者以外でより早く言われていたかも知れないと疑っております。もし御心当たりがありましたら、お知らせ頂ければ幸甚に存じます。同様に、"Edge elements" というのも、1987年GrazのCOMPUMAGでA. Bossavit氏が言い出されたと思っておりますが、そうでない場合はお知らせ頂きたくお願い致します。用語などどうでもいいことかもしれませんが、今回の発表で源流はどこだったのだろうと探った結果ではあるのですが、不確かな結果であり、是非確かなものにしておきたいと思っております。

### 12.2. 電流線要素を用いた導体細線を含む有限要素法電磁場解析

- \* 2010年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* かがしま県民交流センター
- \* 2010年9月28日
- \* 発表者：亀有昭久\*、阿波根明（SSIL）
- \* 論文番号：[SA-10-064, RM-10-093](#)
- \* 要旨：

集積回路中の接続導体細線等のモデル化と解析法について示します。導体細線を線要素で表し、細線上に電圧印加点を与えることにより電気回路と接続することができます。従来のソリッド要素によるモデル化に比べ、より現実的なモデル化ができ、メッシュ分割が容易になります。また、細線のインダクタンスや抵抗が精度良く求められます。インダクタンスにはメッシュに依存する誤差が含まれますが、周波数に対して一定で補正が可能と考えられます。導体線要素に加え、表面インピーダンス法、薄板導体要素、無限要素等の特殊要素の適用例を示し、導体細線などの微細構造に対しての有限要素法解析が容易になることを示します。

### 12.3. Convergence Acceleration of Time-Periodic Electromagnetic Field Analysis by the Singularity Decomposition-Explicit Error Correction Method

- \* 2009 COMPUMAG Brazil
- \* Florianopolis, Brazil, (Nov 22-26)
- \* 2010年11月22-26日
- \* 発表者：高橋康人（同志社大学）、徳増正（（株）東芝）、亀有昭久、貝森弘行（SSIL）、藤田真史（（株）東芝）、岩下武史（京都大学）、若尾真治（早稲田大学）
- \* 論文番号：IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 8
- \* 要旨：

過去共著者らがSD-EEC時間周期有限要素法に関する論文をまとめたものです。主に理論について説明し、例題を用いてその効果を実証しています。

### 12.4. SD-EEC法を適用したタービン発電機鉄心端部構造物の渦電流解析

- \* 2009年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 北見工業大学
- \* 2009年9月16日
- \* 発表者：藤田真史、徳増正、上田隆司、垣内幹雄、大高徹（（株）東芝）、貝森弘行、亀有昭久（SSIL）、高橋康人（京都大学）、若尾真治（早稲田大学）

\* 論文番号：SA-09-75, RM-09-81

\* 要旨：

タービン発電機をはじめとする電気機械の電磁界解析を行う場合に、鉄心などの磁気特性に非線形を考慮する場合は、交流場においても過渡解析を行う必要がありますが、計算開始時の数値的な過渡現象のため、定常状態に至るまで長時間の計算を要する場合があります。本報告では、タービン発電機の鉄心端部の渦電流解析にSD-EEC法を適用して収束を改善した結果について、簡易モデルを用いて過渡現象について考察した例と共に述べています（[新機能60](#)）

## 12.5. 同期機の過渡磁場解析におけるSD-EEC時間周期有限要素法の適用

\* 2009年度 電気学会静止器・回転機合同研究会

\* 北見工業大学

\* 2009年9月16日

\* 発表者：貝森弘行\*，亀有昭久（SSIL）

\* 論文番号：SA-09-74, RM-09-80

\* 要旨：

周期性を持つ解析に有用な手法であるSD-EEC時間周期有限要素法を、運動を伴う解析である同期電動機の解析に適用に関する報告です。一般に同期電動機の解析で電圧入力とすると、定常解への収束が遅いことが知られています。そのため通常の電圧源過渡解析を行う場合、固定子側、回転子側共に周期性を持っていることに着目し、SD-EEC法を適用し、定常解への収束が格段に向上する結果を示しています（[新機能60](#)）

## 12.6. 等方性ベクトルプレイモデルを用いた有限要素法によるヒステリシス解析の検討

\* 2009年度 電気学会静止器・回転機合同研究会

\* 北見工業大学

\* 2009年9月16日

\* 発表者：阿波根明\*，亀有昭久（SSIL）

\* 論文番号：SA-09-67, RM-09-73

\* 要旨：

ヒステリシスモデルとして既に等方性ベクトルプレイモデルが提案されていますが、そのプレイモデルを有限要素法に適用したので報告します。発表PPTにありますように、有限要素法へ適用する際、非線形反復の一回の計算内において、ヒステロンのベクトル方向が変化するため、分割してヒステロンの修正を行う必

要性があることがわかりました。いくつかの計算例を示し、結果の妥当性を示しています。本解析機能は、今後EMSolutionの機能として公開予定ですが、2010/11月現在の公開版には含まれておりません。ご試用をお望みの場合はご相談ください。

## 12.7. 磁歪を含めた電磁応力解析の検討

- \* 2009年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 北見工業大学
- \* 2009年9月16日
- \* 発表者：亀有昭久\*，（SSIL）
- \* 論文番号：SA-09-65, RM-09-71
- \* 要旨：

電磁機器における磁性体の応力やその変形は、機器の振動や騒音を生じ、また磁気特性を変化させるため、磁性体に働く電磁力や磁歪を含めた構造応力解析が今後重要になると考えられます。磁場印加下における磁性体には、機械応力、磁気応力のみならず、磁歪による変形が加わることから、それらを総合した、応力解析について先進的な議論を展開しています。電磁力に関しては、節点力法が多く用いられていますが、それを見直すとともに、機械応力や磁歪による応力との関連を考察しています。さらに、磁場?応力?歪関係を求めて行くためには、計測の役割が重要であり、その関連についても示しています。本発表は先進的な理論をベースとしているため、EMSolutionの機能としては公開しておりませんが、ご興味がある方はご相談ください。

## 12.8. 回路連成過渡電磁場解析におけるSD-EEC時間周期有限要素法の検討

- \* 2009年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 早稲田大学
- \* 2009年1月29日
- \* 発表者：亀有昭久\*（SSIL）
- \* 論文番号：SA-09-5, RM-09-5
- \* 要旨：

電気回路を連成した過渡電磁場解析において、SD-EEC時間周期有限要素法の適用について検討しています。多くの電気機器においては、電気回路系の時定数が磁場のしみ込みの時定数より長く、定常状態を求めるには多大なステップ計算がかかってしまいます。そこで、電気回路を連成した過渡電磁場解析において、

SD-EEC時間周期有限要素法の適用について検討し、その有用性を示しています。また、従来の時間差分では対称な行列で解くことが困難でしたが、時間差分法を変更することにより対称行列での解法も提案しています。

## 12.9. Inverse Jiles-Atherton Vector Hysteresis Modelを用いた磁場解析

- \* 2008年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 大分県産業創造機構
- \* 2008年9月19日
- \* 発表者：亀有昭久\*、阿波根明 (SSIL)
- \* 論文番号：[SA-08-67, RM-08-74](#)
- \* 要旨：

Inverse Jiles-Atherton Vector Hysteresis Modelによる二次元ヒステリシスを含む磁場解析について検討しています。本モデルは、実際の材料への同定には限界があるとは考えられますが、異方性を含む二次元ヒステリシスの特徴を良く表現しています。このモデルを三次元有限要素法に適用し、ブラシレスサーボモータなどの解析を行い、ヒステリシスのコギングトルクの影響等を検討しています。また、磁気特性を微分形で表現すれば、有限要素法に取り込みやすいことを示しています。本解析機能は、EMSolution公開版には含まれておりませんが、使用をお望みの場合はご相談ください。

## 12.10. 低周波印加磁界による誘導電流解析

- \* 2007年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 岡山大学
- \* 2007年9月20日
- \* 発表者：阿波根明 (SSIL)
- \* 論文番号：[SA-07-62, RM-07-78](#)
- \* 要旨：

周波数が非常に低い場合や誘導電流の流れる材料の導電率が低い場合には、誘導磁界は印加磁界に比べて無視できるほど小さくなります。このような系における大規模解析に対応した解析法を提案致します。まず、印加磁界による磁気ベクトルポテンシャルを計算します。次に、そのベクトルポテンシャルを既知として、電気スカラーポテンシャルのラプラス方程式を有限要素法で解くことで誘導電流解析を行うことができるようにしました ([新機能53](#))。

### 12.11. 積層鉄芯ベンチマークモデルの提案とその高精度磁界解析

- \* 電気学会論文誌 vol. 127-B, no. 8 (2007), pp. 894-901
- \* 発表者：高橋康人、若尾真治（早稲田大学）、藤原耕二（同志社大学）、貝森弘行、亀有昭久（SSIL）
- \* 要旨：  
積層鉄芯のベンチマークモデルの提案をし、その解析を高速多重極法を適用した有限要素・境界要素併用法により鋼板一枚一枚モデル化して計算した結果と、均質化法による結果がよく一致した結果が求まることを示しました。

### 12.12. Magnetic Field Analysis Using Hybrid Mesh of Linear Hexahedral and Tetrahedral Edge Elements

- \* Compumag 2007 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields
- \* Aachen, Germany
- \* 2007年6月24日-6月28日
- \* 発表者：亀有昭久（SSIL）
- \* 発表：[Poster](#)
- \* 要旨：  
本件につきましては、すでに「[不整合接続による6面体と4面体を同時使用する辺要素有限要素解析](#)」で発表しましたが、改めて、新しいテスト計算結果を追加して発表しました。6面体だけではメッシュ分割が困難な誘導加熱装置を模擬した現実的なモデルで、本手法の有効性を示しました。

### 12.13. Improvement of ICCG Convergence for Thin Elements in Magnetic Field Analyses Using Finite Element Method

- \* Compumag 2007 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields
- \* Aachen, Germany
- \* 2007年6月24日-6月28日
- \* 発表者：亀有昭久（SSIL）
- \* 発表：[Poster](#)
- \* 要旨：  
磁気回路中の狭いギャップや薄い導体や磁性体の解析においては、非常に偏平な

要素が必要なことがあります。ギャップ要素や非磁性薄板要素等の2次元要素を使用することも可能ですが、3次元のソリッド要素が必要なことが多々あります。メッシュを積み上げでつくりますと、さらに偏平な要素が空気中にできてしまいます。このような時、ICCG法の収束が極端に遅くなります。本発表では、偏平な要素でも収束が変わらない方法を示しました。電気学会の検証問題（Box Shield 問題）の解析でも、従来の計算に比べ、約1/10の計算時間で解析できます。また、プランジャーのようなDeform motionを使う場合、従来ギャップが非常に小さくなると計算が困難でしたが、本解析法を持ちいますと、収束の低下も見られず解析できるようになりました。 ([計算例: anime.gif](#))

EMSolutionにおける 本解析機能につきましては、近日中にリリースしますので、ご利用ください。

#### 12.14. 不整合接続による6面体と4面体を同時使用する辺要素有限要素解析

- \* 2006年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 京都大学
- \* 2006年8月24日
- \* 発表者：亀有昭久 (SSIL)
- \* 論文番号：[SA-06-61, RM-06-63](#)
- \* 要旨：

導体や磁性体の形状が複雑で、かつ表皮効果が支配的な場合、表面近くを薄い層に6面体でメッシュ分割する必要が生じます。このような場合、自動メッシュは通常困難であり、むしろ構造メッシュで分割するほうが容易な場合が多々あります。一方、外部の空間メッシュは4面体自動メッシュの適用が望まれます。従来、このよう場合、EMSolutionではピラミッド要素を挟み込むことにより、6面体と4面体を接合してきました。しかし、一般に多くのプレポストプロセッサはピラミッド要素を取り扱わず、手間のかかるものでした。この度、6面体と4面体を直接接合することを可能としました ([新機能42](#))。このことにより、発表OHPに示しますように、複雑な形状をした誘導加熱装置の解析が比較的容易に解析可能となりました。この手法は、多くの装置の解析に威力を発揮すると思います。

#### 12.15. FEM Computation of Magnetic Field and Iron Loss in Laminated Iron Core Using Homogenization Method

- \* International Conference, CEFC 2006

- \* Hyatt Regency Miami, Miami FL, USA
- \* 2006年4月29日-5月5日
- \* 発表者：貝森弘行\*、亀有昭久（SSIL）、藤原耕二（岡山大学）
- \* 要旨：

新たに考案した均質化法による積層鉄心の解析手法と積層鉄心ベンチマークモデルの実験、解析結果の比較検討を行いました。これは、先に発表した、「[均質化法による積層鉄心の非線形静磁場解析（2005年度 電気学会静止器・回転機合同研究会）](#)」と、「[均質化法による積層鉄心損失解析（2006年度 電気学会静止器・回転機合同研究会）](#)」をまとめたものです。

## 12.16. FEM Computation of Magnetic Fields in Anisotropic Magnetic Materials

- \* 電気学会論文誌 B Vol. 126, No.2 2006, pp.141-146
- \* 発表者：亀有昭久（SSIL）、藤原耕二（岡山大学）
- \* 要旨：

電磁鋼板の異方性の解析法と解析例を示します。等方性、方向性、二方向性電磁鋼板の磁気特性とその特性を使ったリングモデルに対する解析結果を示します。いわゆる等方性電磁鋼板(25A300)でも、延方向とそれに直交方向で特性が異なり、異方性の効果が現れます。異方性特性の違いにより、リングモデル計算例では種々な磁場パターンが現れることが示され、その重要性が理解されると考えます。EMSolutionに本解析機能を導入しています。解析のためには、磁束密度Bに対して、角度ごとの磁場強度Hの大きさと方向のデータが必要とされます。

## 12.17. 均質化法による積層鉄心損失解析-- 積層鉄心解析手法検証用ベンチマークモデル --

- \* 2006年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 理化学研究所
- \* 2006年1月27日
- \* 発表者：貝森弘行\*、亀有昭久（SSIL）
- \* 論文番号：SA-06-23, RM-06-23 [Presentation](#)
- \* 要旨：

静磁場における積層鉄心均質化法を用いて、電気学会回転機の高速度高精度電磁界解析技術調査専門委員会で提案されている、「積層鉄心解析手法検証用ベンチマークモデル」の解析を行い、計測と良く一致する解析結果を得た。本モデルでは周波数が50Hzと低く、静磁場における均質化透磁率および導電率を適用する

ことで充分と考えられる。本解析機能は、従来よりEMSolutionに実装されています。本報告により、計測と解析の良い一致を見、その適用性が示されたと考えます。

## 12.18. 均質化法による積層鉄心の渦電流を含む非線形有限要素法過渡磁場解析

- \* 2006年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 理化学研究所
- \* 2006年1月27日
- \* 発表者：亀有昭久\* (SSIL)、藤原耕二 (岡山大学)
- \* 論文番号：SA-06-24, RM-06-24 [Presentation](#)
- \* 要旨：

表皮効果が支配的になる周波数が高い場合において積層鉄心に対して均質化の定式化を行った。線形定常の場合について考察し、均質化された等価透磁率と導電率を通じて電場と磁場が結合することを示した。非線形過渡磁場解析に拡張し、その解析可能性を示した。例えば電磁鋼板50A310においては、その鉄損は直流ヒステリシス損と古典的ジュール損でロス計測結果が説明でき、異常ジュールロスは小さいことを示した。今後、EMSolution に本解析機能を追加することを考えています。

## 12.19. 均質化法による積層鉄心の非線形静磁場解析

- \* 2005年度 電気学会静止器回転機合同研究会
- \* 九州大学 西新プラザ
- \* 2005年9月9日
- \* 発表者：亀有昭久\* (SSIL)、藤原耕二 (岡山大学)
- \* 論文番号：SA-05-83, RM-05-90 [Presentation](#)
- \* 要旨：

積層鉄心の均質化法について述べます。積層鉄心を一枚ごとにメッシュに切って有限要素法で解析することは現実的ではありません。均質化法によりバルクの等価的な磁気特性を導出し、積層の効果を解析することが重要です。本発表では、EMSolutionで古くから用いられてきた積層鉄心の取り扱いについて述べます。また、それを一般化し、積層のみならず微細磁性構造を持つ系の静磁場解析についての定式と解析法について述べます。

## 12.20. TLM法の改良に関する研究

- \* 2005年度 電気学会静止器回転機合同研究会
- \* 九州大学 西新プラザ
- \* 2005年9月9日
- \* 発表者：阿波根 明 (SSIL)
- \* 論文番号： SA-05-89, RM-05-96
- \* 要旨：

高周波解析であるTLM法の改良を行いました。TLM法は解析領域中で電磁波の伝搬時間が一定となるための同期性を維持しなければなりません。補間の考え方を導入することにより、解決を図ろうとしています。最も簡単な風上差分法では誤差が大きいため、エルミート補間の一種で三次精度であるCIP法を適用することで、精度の向上を実現することができました。

## 12.21. ニュートン・ラフソン法とICCG法の収束特性を利用した非線形反復解法の高速度化

- \* 2005年度 電気学会静止器回転機合同研究会
- \* 九州大学 西新プラザ
- \* 2005年9月8日
- \* 発表者：岡本吉史\*、姫野龍太郎 (理化学研究所)、亀有昭久、阿波根 明 (SSIL)、藤原耕二(岡山大学)
- \* 論文番号： SA-05-65, RM-05-72
- \* 要旨：

EMSolutionでは古くより、ニュートン・ラフソン法とICCG法の収束条件を工夫し、計算速度の向上を図ってきました。本発表では、その手法と適用について報告されます。また、直線探索(ラインサーチ)法を組み合わせ、収束のロバスト性を高めることができることが述べられます。

## 12.22. Box Shield Model(電気学会ベンチマークモデル)の磁界解析における大規模高精度化

- \* 2005年度 電気学会静止器回転機合同研究会
- \* 九州大学 西新プラザ
- \* 2005年9月8日
- \* 発表者：高橋康人\*、松本千春、若尾真治 (早稲田大学)、亀有昭久 (SSIL)
- \* 論文番号： SA-05-70, RM-05-77
- \* 要旨：

電気学会ベンチマークモデルとして提案されているBox Shield Modelが、有限要

素法、有限要素・境界要素併用法、磁気モーメント法で解いた結果が報告されます。有限要素法に関してSSILが担当しました。2ポテンシャル法についての説明とその解析結果について報告しています。後者の2つの方法に対しては、高速多重極展開(マルチポール)法が適用され、高速大規模解析の可能性が示されます。

### 12.23. 変位電流を含めた有限要素法周波数領域の電磁場解析

- \* 2005年度 電気学会静止器・回転機合同研究会
- \* 早稲田大学
- \* 2005年1月27日
- \* 発表者：亀有昭久(SSIL)
- \* 論文番号：[SA-05-2, RM-05-2](#)
- \* 要旨：

変位電流を含めた高周波領域の解析について検討を行っています。辺要素有限要素法を使用し、周波数応答を求めます。適用は閉領域に限られますが、導波管や共振空洞などの解析が行えます。入力として導波管モードやデルタギャップ電圧を与えることができます。高周波に限らず、低周波でも空間電場が計算され、変位電流の効果が解析できます。導体表面は、表面インピーダンス法を適用でき、表面損失を含めた解析が可能です。本解析機能は、EMSolution公開版には含まれておりませんが、使用をお望みの場合はご相談ください。

### 12.24. Regularization on Ill-posed Source Terms in FEM Computation Using Two Magnetic Vector Potentials

- \* 2003 COMPUMAG Saratoga
- \* Saratoga Springs, New York, USA
- \* 2003年7月13-17日
- \* 発表者：亀有昭久
- \* 発表：[Abstract](#), [Poster](#)
- \* 要旨：

2ポテンシャル法(EMSolutionで採用している、トータルポテンシャル領域と変形ポテンシャル領域に分けて解析する方法)は、メッシュと独立にソース磁場電流源を置くことができ、便利な方法です。しかし、従来、[ICCG法が発散](#)することが問題となってきました。本論文では、この問題を解決し、ICCG法の収束をよくすることができることを示しました。モデルにおいて、電流の連続性が厳密に成り立っていない場合でも収束し、それなりの結果を出すことができます。このこ

とにより、モデル作成の簡易化が可能となります。また、非線形解析の収束を高めることができるようになり、非常に小さな変動に対しても、そのレスポンスを解析できることを示しました。本件につきましては、特許申請を行いました。

## 12.25. 一樣運動における定常渦電流場の解析

- \* 2003年度電気学会静止器回転機合同研究会
- \* 東海大学代々木校舎
- \* 2003年1月27、28日
- \* 発表者： 亀有昭久\*、阿波根明
- \* 論文番号： SA-03-02, RM-03-02 [SA-03-02, RM-03-02](#)
- \* 要旨：

[直流場渦電流解析](#)に関する報告です。ポテンシャルの取り方や非対称行列ソルバの違いによる収束性の違い、電流密度のポスト処理、ペクレ数に対する不安定性について論じています。また、リーターダや磁気軸受の解析について紹介しています。結果としては、直流場渦電流解析では、A-phi法でLDU前処理付きのBi-CGSTAB法で解くことが最も効率的であるとしています。また、電流密度分布を計算する場合、後退差分を行うと運動方向に半メッシュずれることを示しています。ペクレ数に対しては、後退差分で行えば不安定性は生じないとしています。

接触して違う速度で動く導体の解析に関連して、今まで静止座標系と運動座標系での定式で結果が異なってきたのですが、有限要素レベルで運動座標変換を関数空間を保存して行えばどちらの座標系で定式を行っても等価であることを示しています。今後より明確にしてゆく必要があると考えています。

## 12.26. 幾何マルチグリッド法の電磁場数値解析への適用

- \* 2001年度電気学会静止器回転機合同研究会
- \* 新日本製鐵（株）八幡製鉄所
- \* 2001年8月2、3日
- \* 発表者： 亀有昭久
- \* 論文番号： SA-03-02, RM-03-02 [SA-01-11, RM-01-79](#)
- \* 要旨：

マルチグリッド法は有限要素法等の方程式を解く一つの方法ですが、計算時間が方程式の自由度に比例し、多自由度の解析では従来のICCG法よりも高速であることが知られています。その将来性に鑑み、初歩的な調査研究を行いました。マル

チグリッド法にもいくつかありますが、ここでは、階層的なメッシュを用いる幾何マルチグリッド法を調べました。二次元4辺形や三次元6面体を用いました。節点要素によるスカラ計算と辺要素によるベクトル計算による静磁場計算を行いました。辺要素の場合のマルチグリッドの収束性が心配されましたが、節点要素と変わらず、簡単なGauss-Seidel法を用いたVサイクルで良好な収束性が見られました。要素が扁平、偏長な場合、マルチグリッド法の収束の悪化が見られ、今後の問題かと思われます。

## 12.27. 最速(?)の電磁場解析ソルバーEMSolution:その機能と特徴(辺要素を考える)

- \* 電気学会 第10回「電磁界数値解析に関するセミナー」
- \* 2000年10月24日(火)
- \* 早稲田大学大久保キャンパス(理工学部)57号館201教室
- \* テーマ:「最新の電磁界解析技術とその適用」 ?役に立つ電磁界数値解析ソフトウェアの最前線?
- \* 発表者: 亀有昭久
- \* [発表論文](#), [発表HTML](#)
- \* 要旨:

EMSolutionの機能や特徴について概略を述べます。また、EMSolutionで用いている辺要素法やICCG法、節点力法の性質を考察します。

## 12.28. 辺要素有限要素法における渦電流解析の改善(節点二次辺一次4面体要素による)

- \* 2000年度電気学会静止器回転機合同研究会
- \* 2000年8月4、5日
- \* 東北大学流体科学研究所
- \* 発表者: 亀有昭久
- \* 論文番号: [SA-00-11, RM-00-76](#)
- \* 要旨:

表皮効果の大きい渦電流解析を行うときには、扁平な要素を使わざるを得ませんが、一次4面体要素で解析しますと電流密度分布が不合理な振動を示します。本論文では、節点二次要素により、改善されることを示します。この解析機能はEMSolution r8.1に備わっています。

## 12.29. 有限要素法による電磁場運動連成解析

- \* 第12回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
- \* 発表者： 亀有昭久
- \* [発表論文](#)
- \* 要旨：

EMSolutionの機能 (Deform module, Dynamic Module)を用い、TEAM Workshop問題 2 8 (An Electromagnetic Levitation Device)の解析を紹介しています。メッシュ変形を伴う電磁場と運動の連成を取り扱っています。