



---

## 大規模データ高速化セミナー資料

# 電磁場解析における SMS-AMGの適用

有限会社ムーテック

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



---

## はじめに

今日、電磁場解析の分野においても、問題の多様化および技術者要求の高度化に伴い、大規模問題を高速に解きたいという需要が高まっている。

ムーテックでは、現在このような要求に応えられるような次世代の電磁場解析ソフトウェアを開発中であるが、そのエンジン部として、株式会社ヴァイナスのスーパーマトリックスソルバー（SMS-AMG）に注目している。

今回は、電磁場解析にSMS-AMGを適用し、その性能および特徴を調査した結果を紹介する。

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



# 目次

	Page
・電磁場解析のテーマ	2
・ムーテック会社案内	3
・ムーテック開発計画	4
・電磁場解析の現状	6
・SMS-AMG組込みテスト	9
・計算時間の比較	15
・アスペクト比と収束性	16
・扁平率と計算時間	18
・今後の課題	19

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## 電磁場解析のテーマ

- ・ **低周波分野のテーマ(例えばモーターの効率化計算)**
  - － 各種連成解析(解析の大規模化)
    - ・ 運動: 回転モーターやリアモーターなどの動きを伴った解析(逐次解法)
    - ・ 温度: 鉄損による発熱から材料の温度依存性を考慮
    - ・ 回路: 制御回路のシミュレーション
  - － 材料特性の厳密化
    - ・ 着磁、渦流損・ヒステリシス損など材料特性のモデリング
- ・ **高周波分野のテーマ(電磁波解析)**
  - － 伝送線路特性、不要電磁波、アンテナ放射パターン、回路解析との連成、光動波路問題



益々の問題の大規模化で高速マトリックスソルバーへの期待

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## ミーテック会社案内

---

商号 : 有限会社ミーテック  
μ-TEC Co.,LTD  
設立 : 2002年7月  
資本金 : 300万円  
所在地 : 【本店】 東京都八王子市石川町2011番地の5  
【営業所】 〒150-0001 渋谷区神宮前2-17-6  
神宮前ビル4Fドルフィンズ内  
Tel:03-5411-6911 Fax:03-5770-5022

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## ミーテック業務紹介

---

1. 電磁場解析ソフトウェアの開発・販売・保守
  - 1) μ-MF1の開発
  - 2) μ-MF1の販売・保守 (2003年開始予定)
2. 電磁場関連ソフトウェアの受託開発
  - 1) μシリーズを核としたカスタマイズ開発
  - 2) 新規開発
3. 電磁場関連の受託解析
  - 1) 保有アプリケーションソフトによる解析
4. 電磁場分野を中心としたCAEコンサルティング
  - 1) ソフトウェア利用に関するコンサルティング
  - 2) 電磁場・熱・構造解析に関するコンサルティング

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## ミューテック開発計画

---

### 統合CAEシステム $\mu$ シリーズ

電磁場解析モジュール群  $\mu$ -MF 1 (ミュー・エムエフワン)

キーワード

材料モデリング  
高速処理  
連成解析  
ネットワーク対応

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

$\mu$ -TEC Co.,LTD



## $\mu$ -MF 1 の特徴

---

- ・ 将来に向けて最適なプログラミング言語を使用
- ・ 最も注目されている高速ソルバー (SMS-AMG) を採用
- ・ 解析の種類や規模、次元に応じて最適な解析手法を使用
- ・ コンパクトなモジュール群のプラグイン方式を採用
- ・ 鉄損、消磁解析の為にヒステリシス機能を強化
- ・ メジャー・ループを含む材料DBを装備
- ・ ユーザー専用システムへのカスタマイズを想定した設計
- ・ 将来の熱伝導・構造解析との連成を考慮した設計
- ・ 作業効率を格段に向上させるネットワーク対応
- ・ 必要な機能のみを選択、追加するベストチョイス形式での販売

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

$\mu$ -TEC Co.,LTD



## 機能 2003年4月リリース予定

---

- スカラポテンシャル法による静磁場、静電場解析
- A - 法による定常渦電流解析、非定常渦電流解析
- スーパーマトリックスソルバー (SMS-AMG) 装備
- 高速ソルバー (スカイライン法、ICCG法、他) 装備
- 積分方程式との併用機能
- 線形、非線形材料特性の入力機能およびDB
- 電磁力、電磁トルク解析機能
- 任意空間点磁界算出機能
- 一様磁界入力機能
- 移動物体の解析補助機能
- JavaによるGUIプログラム

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## 機能 2003年12月リリース予定

---

- スカラポテンシャル法による熱伝導解析
- 非線形収束計算の高速化
- ヒステリシス解析機能の強化
- ヒステリシス特性の材料DBへの組み込み
- 鉄損解析機能
- 運動方程式との連成機能
- ネットワーク対応

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## 社員経歴

---

野島洋一 1981年センチュリリサーチセンタ株式会社（現CRCソリューションズ）入社。電磁場業務歴20年。以下主な論文。

「磁気モーメント法による三次元磁界解析の高速化」(1988)

「浮上式鉄道用超電導コイルが振動した場合に発生する渦電流の評価」(1993)

「渦流探傷精度の解析の評価」(1994)

大場彰人 1986年センチュリリサーチセンタ株式会社（現CRCソリューションズ）入社。電磁場業務歴15年。以下主な論文。

「Fictitious Thin Air Element in Computing Force of Mutually Stuck Ferromagnetic Materials」(1990)

「B-H曲線における下に凸の領域を考慮した非線形磁界解析」(1991)

「CRT偏向ヨークのヒステリシス解析と収束性」(2001)

田中義章 1982年センチュリリサーチセンタ株式会社（現CRCソリューションズ）入社。電磁場業務歴19年。以下主な論文。

「積分方程式を伴った有限要素法による磁界解析の定式化について」(1985)

「渦電流解析理論」(1986)

「交番磁界中異方性磁性材料の磁気特性のための物理モデルについて」(2002)

2003/01

大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## 電磁場解析の現状

---

### オーバービュー

2003/01

大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



# Maxwell方程式と解析種類

## • Maxwell方程式

- 電界Eのローテーションは、磁束密度Bの時間微分  
$$\text{rot}E = -dB/dt$$
- 磁界Hのローテーションは、実電流Jと電束密度Dの時間微分(変位電流)の和  
$$\text{rot}H = J+dD/dt$$

## • 解析種類

- 静的問題(Static) 直流電流や永久磁石の作る磁場分布
- 定常問題(AC) 交流電流による渦電流
- 非定常問題(Transient) スイッチング電流波形などを、時間を追って解析
- 固有値問題 共振器の共振周波数、光動波路の固有モード

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



# 各種解法(低周波分野)

## • 差分法(Finite Difference Method)

- 差分格子で計算時間早い、任意形状表現不得意
- 低周波電磁場解析ではほとんど使われていない

## • 積分法(磁気モーメント法、境界要素法(BEM))

- 空間を除いた物体のみのでモデル化が簡単(開領域問題向き)
- フォーマリクス解法の為、要素数の多い問題は不得意

## • 有限要素法(FEM)

- 任意形状表現が得意、全ての解析種類、材料特性もカバー
- 節点や要素辺上のポテンシャルを未知数として、微分してE,Hを求める
- ICCG法、辺要素法など高速化がはかられ、最も普及した手法
- 3次元メッシュの為、テトラ要素が必要

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## 節点要素と辺要素

- **A- 法(電気スカラーポテンシャル、磁気ベクトルポテンシャルA)**
  - $B = \text{rot}A$   $E = -\text{grad} \phi - \dot{B}/dt$
  - ゲージ条件:  $\text{div}A = 0$  (クーロンゲージ)
    - T- 法:  $J = \text{rot}T$ ,  $H = -\text{grad} \phi + \dot{T}$ 
      - (電流ベクトルポテンシャルT, 磁気スカラーポテンシャル  $\phi$ )
- **節点要素**
  - 節点上にベクトルポテンシャル未知数を配置した要素
  - スプリアス解やゲージ条件の不明瞭性が問題に
- **辺要素**
  - 要素の辺方向にのみベクトルポテンシャルの未知数を配置した要素
  - スプリアス解やゲージ問題の解決

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## マトリックスソルバー

- **直接法**
  - IEMフルマトリックス解法が必要
  - 反復解法で収束しない問題(高周波のアスペクト比の大きい問題)
- **ICCG法(不完全コレスキー分解反復解法)**
  - マトリックスの前処理が必要
  - 電磁界問題のほとんどを高速処理
  - 未知数に応じて計算時間が増大(反復回数が増大)
- **AMG法(代数学的マルチグリッド反復解法)**
  - 問題サイズが増大しても反復回数が増加しない
  - ICCGを上回る高速処理
  - 電磁界問題の何処までカバーできるか

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*





## 学会での議論 (AMG法)

---

- 現在最も注目・議論されている反復解法
  - 節点要素法での研究報告がほとんど
  - 辺要素法では特殊な前処理・補助行列が必要
  - 電磁界問題の何処までカバーできるか
    - 要素のアスペクト比
    - テトラ要素
    - 高周波問題
- 
- **SMS-AMGに期待**

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



---

## SMS-AMG組み込みテスト

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## SMS-AMGテスト概要

---

株式会社ヴァイナスの代数マルチグリッド法によるスーパーマトリックスソルバー (SMS-AMG) を、有限会社ミュートックで開発したスカラポテンシャル法によるFEMプログラム (μ-stat) に組み込む。

組み込み後、電気学会モデルを用いて計算時間について調べる。

また、電磁場解析では重要な問題となる有限要素のアスペクト比と収束性の関係についても調査を行う。



## SMS-AMG について

---

### Super Matrix Solver (SMS) とは

航空宇宙技術研究所 (NAL) が基礎理論を開発。共同開発により、株式会社ヴァイナスが更に高速化・高機能化したマトリクス反復解法の加速手法です。

### 代数マルチグリッド法 (AMG) とは

1980 - 90年代に新たに開発された最新の数学理論に基づく反復解法 Algebraic Multi Grid (=代数マルチグリッド法) の略です。高速性が特徴ですが、以下の問題があり現時点では一般に広く普及するには至っていません。

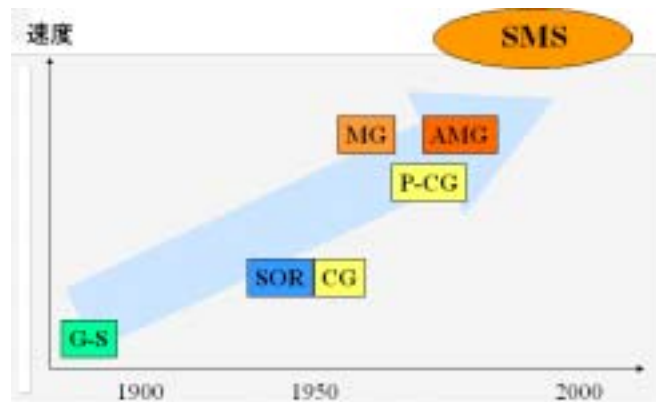
- ・プログラムのコーディングが難しく高度な数学知識を要する
- ・計算実行時、パラメータが多く、設定が困難

### SMS-AMG とは

SMS技術をAMG法に適用し、AMGの問題点を解決すると同時に、更なる高速・高安定化を図ったマトリクスソルバーです。



## 反復解法の歴史



2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## μ-stat について

ミュートックで開発したスカラポテンシャル法によるFEMプログラム μ-statは、  
将来、「統合電磁場解析システム μ-MF1」にプラグインする予定の静電磁場解析プログラムである。  
既にミュートックで開発済みのソルバーとして、スカイライン法、ガウスザイデル法、CG法、ICCG法、高速CG法があるが、今回はSMS-AMG法に対する比較対象として高速CG法を用いた。

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## テスト計算仕様

解析の種類： 3次元静磁界解析

解析対象： 電気学会3次元静磁界検証モデル  
(鉄心およびコイルによる1/8モデル)

参照論文「積分方程式を伴った有限要素法による各種磁界解析の定式化」  
田中、野島、中村、電気学会研究会資料、RM87-55、SA87-18、1987

テストマシン： HP workstation x1100  
Pentium4 2GHz  
メモリ786MB ディスク32GB

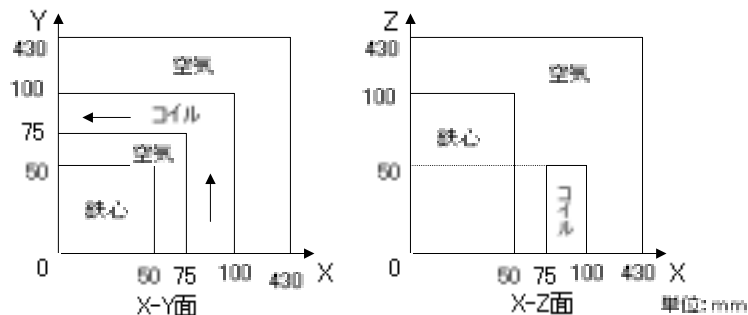
2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## 検証モデル仕様

検証モデルは、直方体鉄心の中央に励磁コイルを配置したものである。鉄心の比透磁率は1000、コイル電流は3000ATとし、線形解析を行った。以下に1/8モデルの概略図を示す。



2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## 比較プログラム

---

同一モデルを用いて以下の2つのプログラムの比較を行った。

- μ-MF1 高速CG法 (ミューテック)
- μ-MF1 SMS-AMG法 (ヴァイナス)



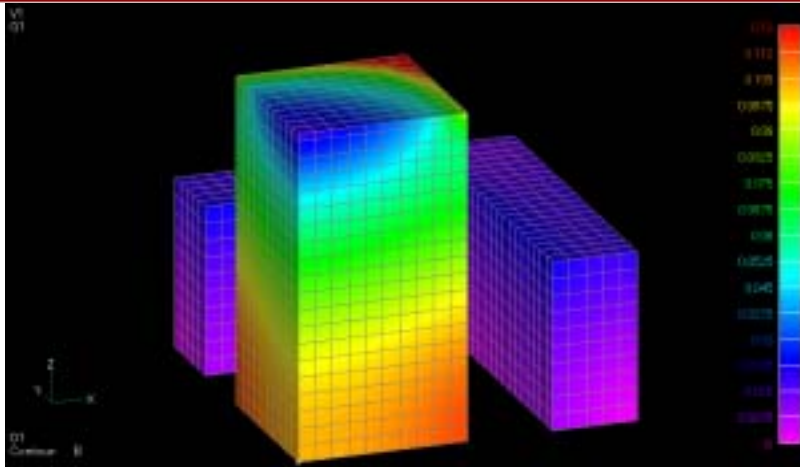
## 比較検討内容

---

- ・ 計算時間：プログラム実行開始から終了までの時間を測定。
- ・ 反復回数：同一の収束判定値を満たすまでの各ソルバーの反復回数。
- ・ 未知数： 2万～100万未知数のメッシュデータを用いて比較計算を行った。



## 解析結果1 $\mu$ -MF1+高速CG B(T)コンター

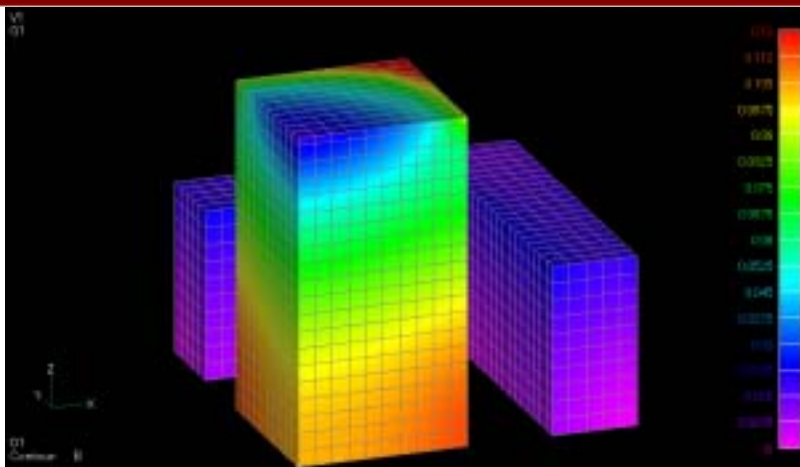


2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## 解析結果2 $\mu$ -MF1+SMS-AMG B(T)コンター



2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## 計算精度の比較

計算結果の妥当性を確認するために、実測値との比較を行った。(20000節点モデルの結果を使用)

測定ポイント： 磁性体上10mm。解析モデルの座標は、  
x:31.25mm y:31.25mm z: 110.0mm

測定値： 磁束密度のz成分 (Bz)

計算結果：	実測値(G)	$\mu$ + CG法	$\mu$ + AMG法
	241.9	240.1	240.1

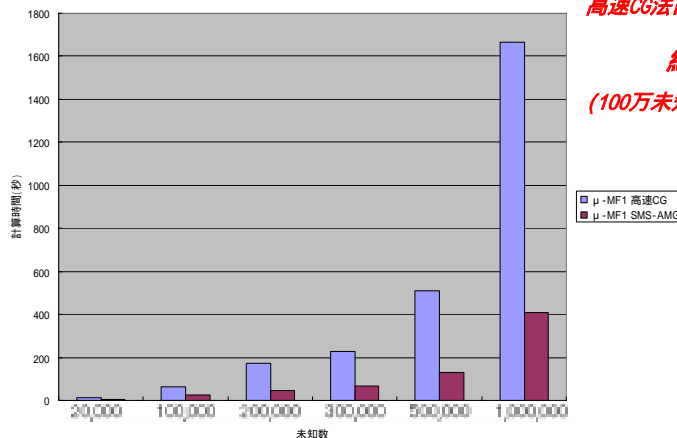
2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## 計算時間の比較

計算時間の比較



2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



## アスペクト比と収束性

---

次に、有限要素のアスペクト比とソルバーの収束性についての調査を行う。

一般的に扁平な要素を用いるとソルバーの収束性は劣化し、計算時間に影響を及ぼす。

しかし、扁平な要素を用いずにモデル化すると今度は要素数が膨大になり、やはり計算時間に影響が出る。

電磁場解析では扁平な要素を必要とする解析対象が比較的多い為、高アスペクト比で優れた収束性が得られれば、ソルバーとして理想的である。



## 収束性のテスト仕様

---

解析の種類、解析対象、テストマシン、および検証モデル仕様は、本資料の計算時間比較テストと同様に  
する。

μ-statプログラムに、高速CG法をプラグインした場合と、SMS-AMGをプラグインした場合について、

- ・ 計算時間
- ・ 反復回数
- ・ 計算精度

の比較を行う。

尚、未知数は全ケース20万に統一する。





## 収束性の比較検討内容

モデルの鉄心部分の一部（磁場変動が激しい部分）について、有限要素のアスペクト比を変化させる。以下に各比較ケースの内容を記す。

	未知数	アスペクト比	メッシュの粗さ
CASE1	200000	1:1	粗い
CASE2	200000	1:10	やや粗い
CASE3	200000	1:50	適当
CASE4	200000	1:100	細かすぎ

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## 収束性の比較計算結果

以下に各比較ケースの計算結果を記す。

	計算時間 (秒)		反復回数 (回)		計算精度 (G)	
	CG	AMG	CG	AMG	CG	AMG
CASE1	73	54	388	21	211.7	211.7
CASE2	108	68	692	24	196.0	196.0
CASE3	186	67	1323	26	200.0	200.0
CASE4	235	67	1747	25	200.6	200.6

表中の計算精度には、同一空間点での磁束密度の絶対値を用いた。CASE3を理想解とすると、CASE1では、5.5%の誤差があることになる。

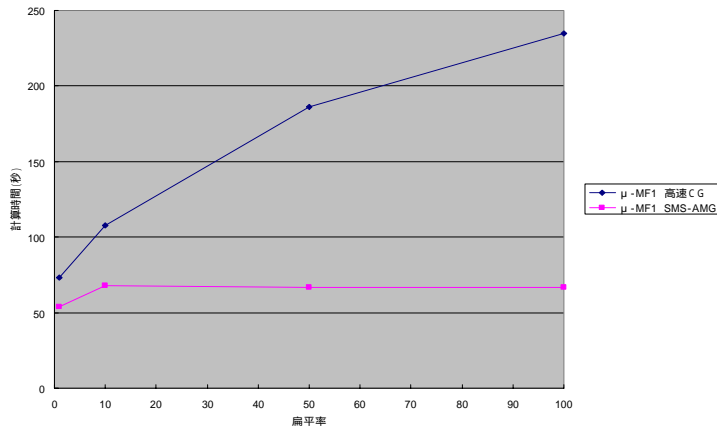
2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## 扁平率と計算時間

有限要素の扁平率と計算時間の関係



2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## まとめ

株式会社ヴァイナスのPC版SMS-AMGの性能テストを行った結果、磁場解析においても高性能を発揮することを確認することができた。

特に計算速度の速さは従来の常識を覆すものと言える。マシン環境によっては、200万自由度を超える計算も可能であると予測される。

また、収束性の調査ではSMS-AMGの反復回数が要素の扁平率に依存しないことが確認できた。これは、計算速度以上に特筆すべき性能である。

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

μ-TEC Co.,LTD



## 今後の課題

---

電磁場解析を解析の種類で大別すると、

- ・ 静磁場解析
- ・ 定常渦電流解析
- ・ 非定常渦電流解析

の3つに分類することができる。

今回は、静磁場解析において最適な（スカラーポテンシャル）を未知数とした節点要素法のプログラムに対して SMS-AMG が非常に有効であることが確認できた。

今後の課題としては、定常・非定常渦電流解析で最適なA-を未知数とした辺要素法のプログラムへの SMS-AMG の組み込みが考えられる。

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*



---

## 有限会社ミュートック

〒150-0001  
渋谷区神宮前2-17-6  
神宮前ビル4Fドルフィンズ内  
Tel:03-5411-6911  
Fax:03-5770-5022  
E-mail:info@mutec.org  
URL <http://www.mutec.org>

2003/01  
大規模データ高速化セミナー資料

*μ-TEC Co.,LTD*