

株式会社 シフトロック

2012年10月

3次元リアルタイム磁場解析 ソルバーQmの紹介

2012年10月

株式会社 シフトロック

Agenda

- 概要
- 特長
- さらなるQmの利点
- デモンストレーション

3次元リアルタイム磁場解析 ソルバーQmとは

- 非線形3次元動磁場解析のRADツール
- 運動及び渦電流(非線形磁性体を含む)を含めた解析ソルバ
- 空間メッシュ・境界条件不要の積分方程式法を採用

広範囲な産業と応用分野

- ◆ 汎用磁場解析ソフトであるので広範囲の産業
 - 基本的に電気または磁石を利用するところではすべて関係
 - 電気・電子・精密・機械・土木・建設・自動車・原子力・エネルギー・環境・資源探査・医学,etc...

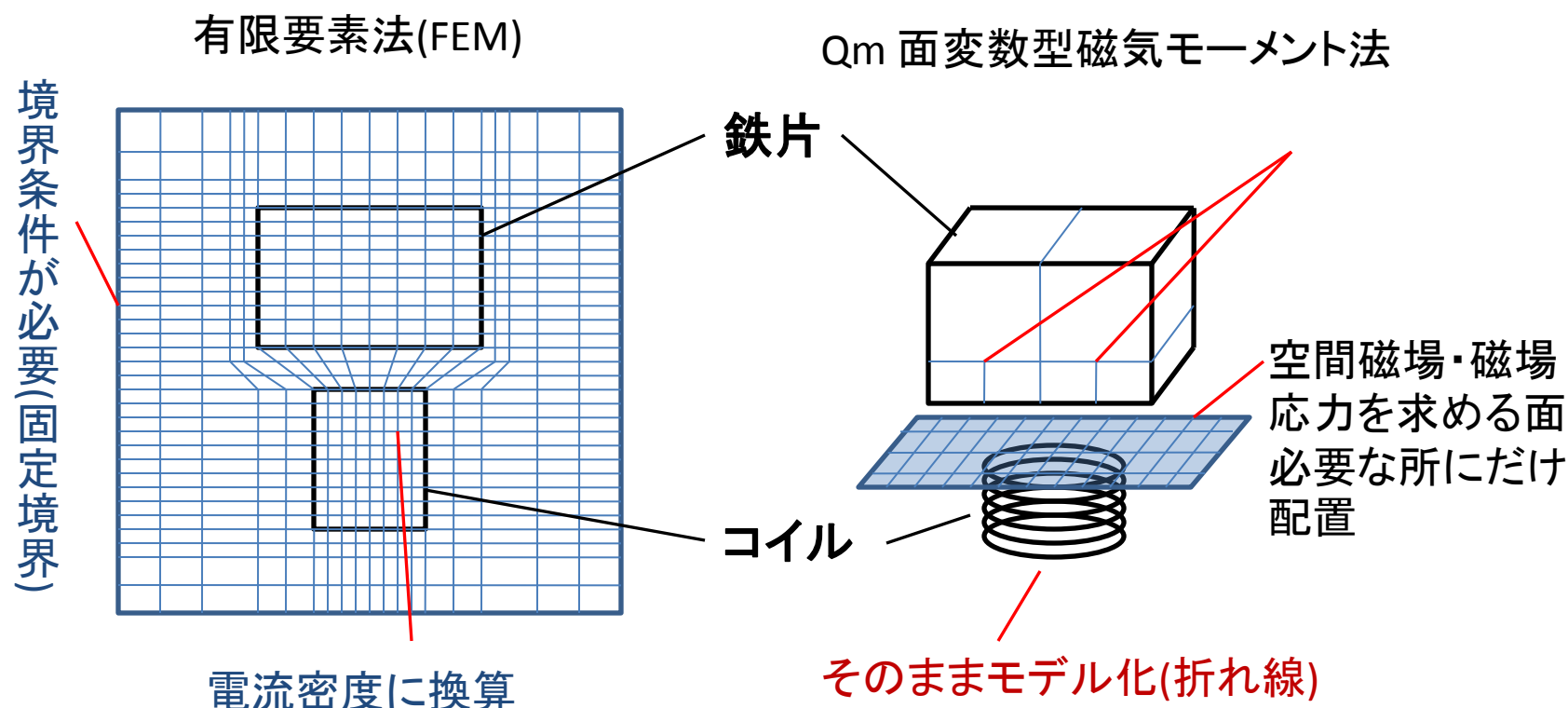
- ◆ キーワード: 渦電流・電磁石・永久磁石・電磁誘導
 - 永久磁石製品、永久磁石製作、着磁器、磁気特性計測
 - リレー、プランジャ、スイッチング機器
 - モータ類、ステッピングモータ、ボイスコイルモータ、リニアモータ、
 - 各種電磁石設計、Qレンズ、偏向ヨーク
 - MRI、シールドルーム、電磁気器の磁気シールド
 - 磁気浮上、磁気軸受け、宙に浮く独楽、電磁カップリング
 - 磁気センサ、金属探知機、磁気探勝、資源探査

Agenda

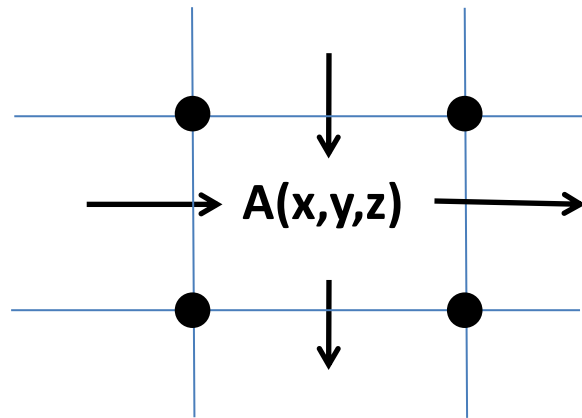
- 概要
- 特長
- さらなるQmの利点
- デモンストレーション

空間メッシュ不要でモデル作成を省力化

- 面倒なメッシュ分割が不要でモデル作成が省力化
- 動きを伴うもの・相互位置関係が変わるパラメータサーベイには有利
→相互位置関係からみた解析値の連続性の保証



FEM磁場解析理論



空間も含めベクトルポテンシャルAは
周りの節点の値で補完できると仮定



要素への出入りのバランス式を立てる
※エネルギー最小などの条件あり



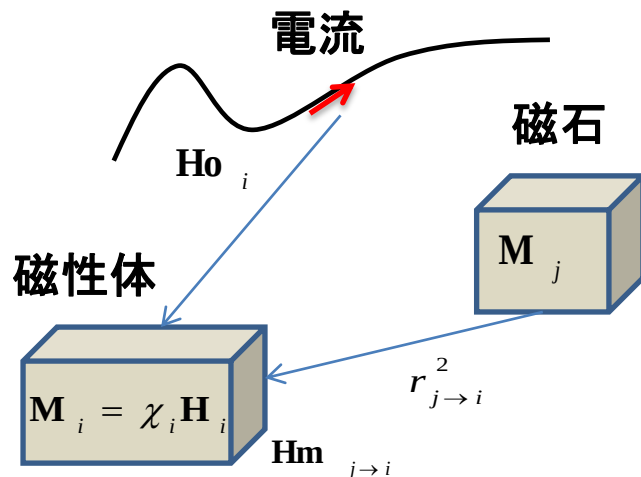
漸化式となり境界条件を与える(バン
ドマトリックスとなる)

したがって要素内の磁場の値は周りの4点の値の補完値となりメッシュ
を細かくしない限り精度は上がらない
辺に変数を置くFEMもあるが補完値であることは変わらない。



したがって急激な変化に対してはメッシュを細分化するしかない。
磁性体やコイルの形・寸法に関係のない空間部分のメッシュ分割によ
り解が変化するという安定性のない現象が生じる。

Qm磁場解析理論



空間及び磁性体内部も含めて任意場所の磁場
 $H(x, y, z)$ は重ね合わせの原理から

$$H = H_o + H_m \quad (1) \text{式}$$

i番目の磁性体では $H_i = H_o_i + H_m_i$ (2)式

H_o_i : 電流等からの寄与 ビオサバルの法則

H_m_i : 磁性体からり寄与は磁性体に発生した磁気
 モーメントの分布 $M(r)$ と距離が分かれば クーロン
 の磁場の法則で求まる

相互作用からソース分布
 (磁性体の面磁荷密度)を求める

$$H_m = - \frac{1}{4\pi} \int \nabla \frac{\mathbf{M}(r) \cdot \mathbf{r}}{r^3} dv \quad (3) \text{式}$$

M が磁性体面毎に一定とすると $H_m_i = - \frac{1}{4\pi} \sum_j \frac{\mathbf{M}_j}{r_{j \rightarrow i}^2}$ (4)式

となる。また、各磁性体で $M_i = \chi_i H_i$ (5)式 が成立するのでこの式に(2)式,
 (4)式を代入すると

$$\frac{\mathbf{M}_i}{\chi_i} = H_o_i - \frac{1}{4\pi} \sum_j \frac{\mathbf{M}_j}{r_{j \rightarrow i}^2} \quad (6) \text{式}$$

が得られ M_i を未知数する連立一次方程式として解くことができます。 また、磁性
 体をセルに分割して磁化率 χ_i を反復修正することにより非線形計算を扱うこと
 ができる。

Qm磁場解析計算の流れ

出力成果物

磁気モーメント
渦電流反磁場
実効透磁率
ジュール熱
ヒステリシス損

空間磁場
マックスウェルの応力
トルク



開始

ソース分布の計算

解析の中心
マトリックス組立
解く

ソース分布から計算

ポスト処理
不要な場合は省略

終了

空間メッシュがないから・・・

- **変数の数が少ないので計算が高速**
特に広い解析空間を有する問題 …… 磁気シールド・薄型モータ
- **空間磁場は積分の解析解を利用するので高精度**
- **尖った形状磁性体で作る磁場の計算精度が高い**
針状の磁性体・粗巻きコイル・ロータ、ステータの突起など空間で急激に変化する問題に強い・・・FEMは磁場が急激に変化する空間もメッシュが必要なので微細なメッシュが必要(しかも線形補間)
- **運動のある問題も簡単**
動きによる空間メッシュの整合性は考えなくて良い
- **モデルが簡素**
コイルと磁性体・導体だけのモデル化
実験とよく似ているので直感的に扱えます。

磁場解析のRADツール

ソルバーに組み込まれたポスト

- ◆ カット&トライを繰り返すRADツールとして欠かすことの出来ない機能
- ソルバー ポスト 一体型
 - ソルバーとポスト部のメモリ共有とマルチスレッド機能によりリアルタイムに図が更新
- ステアリング機能
 - 計算を途中で停止・条件変更・再開可能
- プローブ機能
 - 画面上の図形をマウスでクリックして情報表示
- 時系列グラフ・空間分布グラフ表示
 - ヒステリシスループ・ジュール熱・マックスウェル応力・トルクなどのグラフ化

ソルバーはブラックボックスではなく 透明性の高いものが信頼の証拠となる

- テキストベースの入出力ファイル1つでリスタート
 - データの互換性・可搬性・可読性・再利用性・加工性
 - 解析ソフトウェアとしては信頼性を示す重要な要素の一つである入出力データの透明性
- XML,CSVファイル形式の結果のエクスポート機能
- 再入可能な入出力ファイル形式
 - 出力ファイルをそのまま入力にできる階層的ファイルフォーマット
 - リスタート計算・分岐リスタートが簡単
 - オリジナルファイルフォーマットはFORTRANなどで読み込み易いフリーフォーマット

直感的な入力条件で 磁場設計スキルの向上に

- 数値解析特有の難しい入力が非常に少ない
→境界条件・ゲージ条件・電流密度への換算等々は不要
- 入力データは製品を作るときに必要な直接的なパラメータが中心
例 各部寸法・B-H曲線・電流のアンペアターン値
→数値解析特有の知識はあまり要らない。
→試作物を作るような感覚でモデルを作ることができる。
→磁場製品を作る知識の方がより重要で、製造設計スキルの直接的な感覚が研ぎ澄まされる。
- セル(要素)を重ねることにより物性の重複を表現
- 複雑なコイルの巻き方 (サンプルあり)をしていても正確にモデル化

Agenda

- 概要
- 特長
- **さらなるQmの利点**
- デモンストレーション

Qmの解析手法は?

- 磁場解析法の種類
- 磁場解析にFEMが使用される背景
- その前に確認事項
- 3次元磁場解析とFEM
- 2次元と3次元計算量の比較
- 計算ループにおける精度
- 計算ループとQmの解析コントロールパネル
- 磁場超越関数(電流の場合)
- 磁場超越関数(磁性体の場合)
- 面変数型磁気モーメント法

Qmは面変数型磁気モーメント法

■ 理論解析法

- 複素数を利用した等角写像 磁気回路法 パーミアンス法

■ 微分方程式法

- 差分法
- 有限要素法(FEM)
→ スカラーポテンシャル、A- Φ 法

■ 積分方程式法

- 境界要素法(BEM)
→ 非線形が扱えない
- 磁気モーメント法(IEM)
→ Qm 面変数型磁気モーメント法

FEMの3次元磁場解析には落とし穴が...

- 一般に利用されている磁場解析ソフトは有限要素法(FEM)によるものがほとんど

→ 構造解析で大成功を収めた

→ FEMライブラリ・ノウハウが蓄積

→ 非構造(流体・磁場・音場)解析への適用 連成計算目的

- ◆ 2次元磁場解析のFEM(ベクトルポテンシャル法)で成功。

★しかし

2次元磁場解析には限界が...

FEMの3次元磁場解析には落とし穴が...

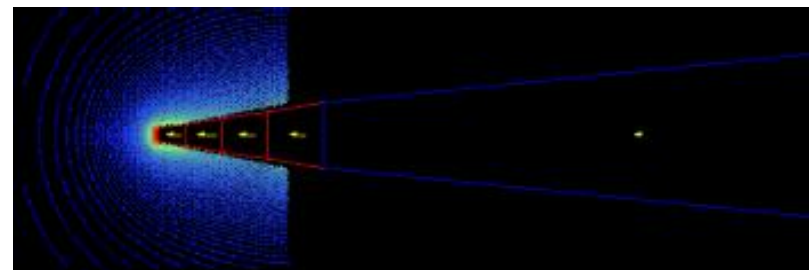
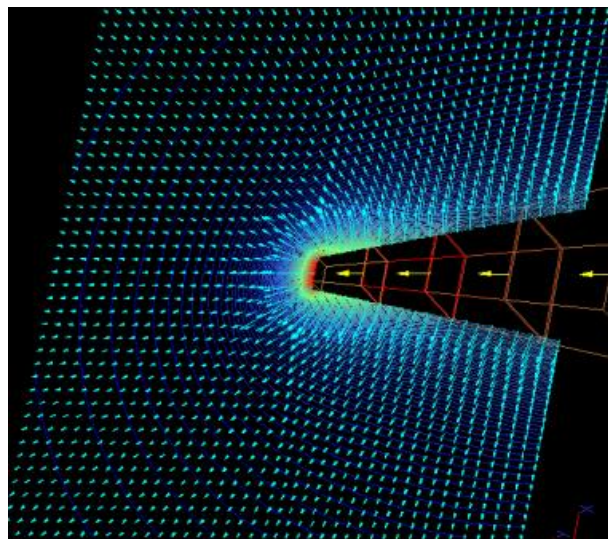
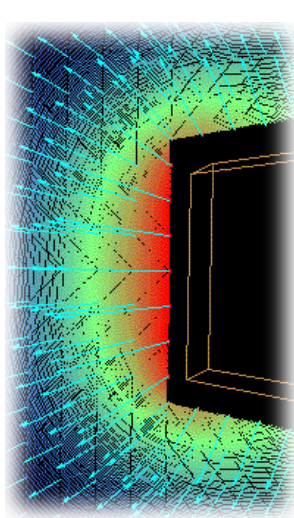
3次元磁場解析は必要不可欠

- ✓ 2次元磁場解析には限界が
電流と磁場との関係は元々3次元でしか表せない
次元を減らしたために不可解な補正項が出現
→かえって問題を複雑化・精度を損なう
- ✓ 重厚長大から小型・薄型軽量へ
 - 表面積/体積 比が大きくなる →磁場が横から漏れやすい
 - エネルギーロス発生
 - 定格出力を得るため電流値を大きく
 - 低電圧化によりさらに電流値が大きく
 - 狭い空間に大きな電流とロス →発熱 →悪影響
 - ロスを少なくするため、3次元的に磁路を確保し設計する。 磁場がどう流れるか3次元磁場解析が必要。

3次元磁場解析は難しい・・・

2次元計算より細かいメッシュが必要

- 3次元解析では、針のような形状の計算があり、非常に鋭い空間磁場のピークが出る。理論的には、関数系は超越関数になる。



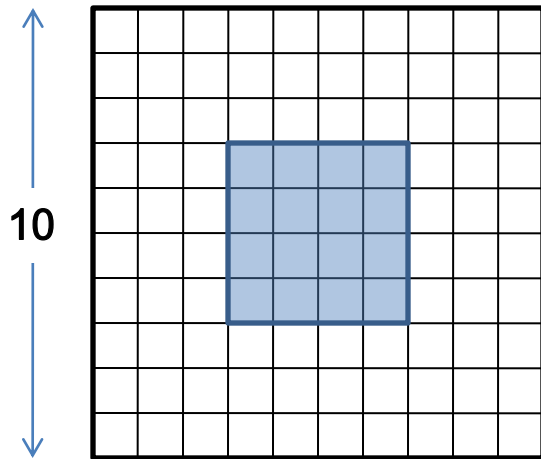
Qmによる解析 先端に磁場が集中

磁気ヘッド、磁気記録製品はこの性質を利用して記録密度を上げています
プランジャ・モータ等でも極の形状の3次元磁束集中が問題となる。

3次元磁場解析とFEMとは本当に相性がいいの？

- 急激な磁場変化を3次元で正確に計算する必要がある
- FEMは磁場(ベクトルポテンシャル)をメッシュ間の収支バランスで解く
 - メッシュ内部は、求める場が形状関数(補間関数)で表され、その関数系は初等関数(冪上の多項式であるが実際には一次式・二次式まで)に限られている。
 - しかし、磁場の関数は、急激な変化が特長の超越関数である。
- ◆ 急激な変化を正確にとらえるためには、2次元解析以上に細かい空間メッシュ分割が必要
 - 周りのメッシュ引きずられて細かくする必要がある。
- ◆ 3次元解析が理想だが、敬遠される理由
 - 高次元解析は取り扱う変数の数が幾何級数的に増える。
 - 計算量はさらにその3乗倍
 - 高パワーの計算機・プリポスト・ソルバー →高額
- ◆ Qmは、FEMなどと比べて3次元解析が得意。
 - 解析手法の比較

3次元計算は2次元計算を拡張しただけ？



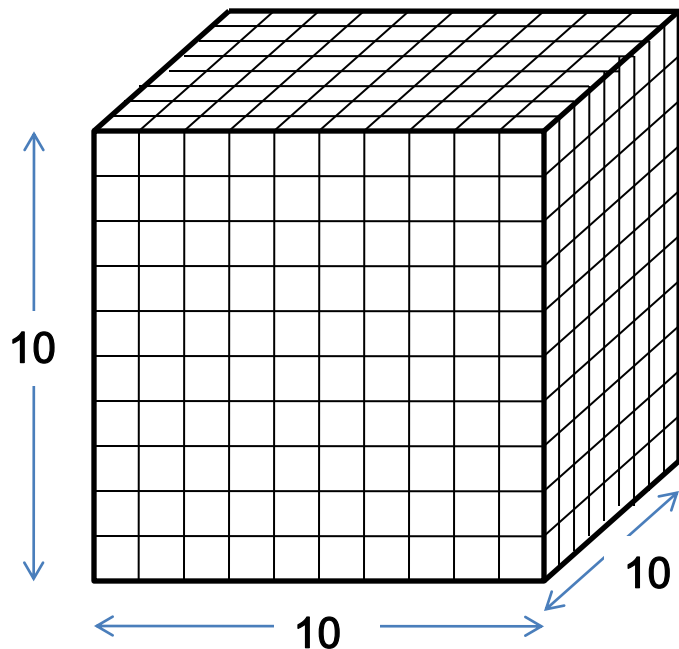
・10X10のメッシュ 100変数

・マトリックスサイズ

N=100 バンド幅 W=10 のマトリックス

・計算量 $CPT\ 2D = N \times W^2$

$$CPT2D = 100 \times 10^2 = 10^4$$



・10X10X10 のメッシュ 1000変数

・マトリックスサイズ

N=1000 バンド幅 W=100 のマトリックス

・計算量 $CPT\ 3D = N \times W^2$

$$CPT3D = 1000 \times 100^2 = 10^7$$

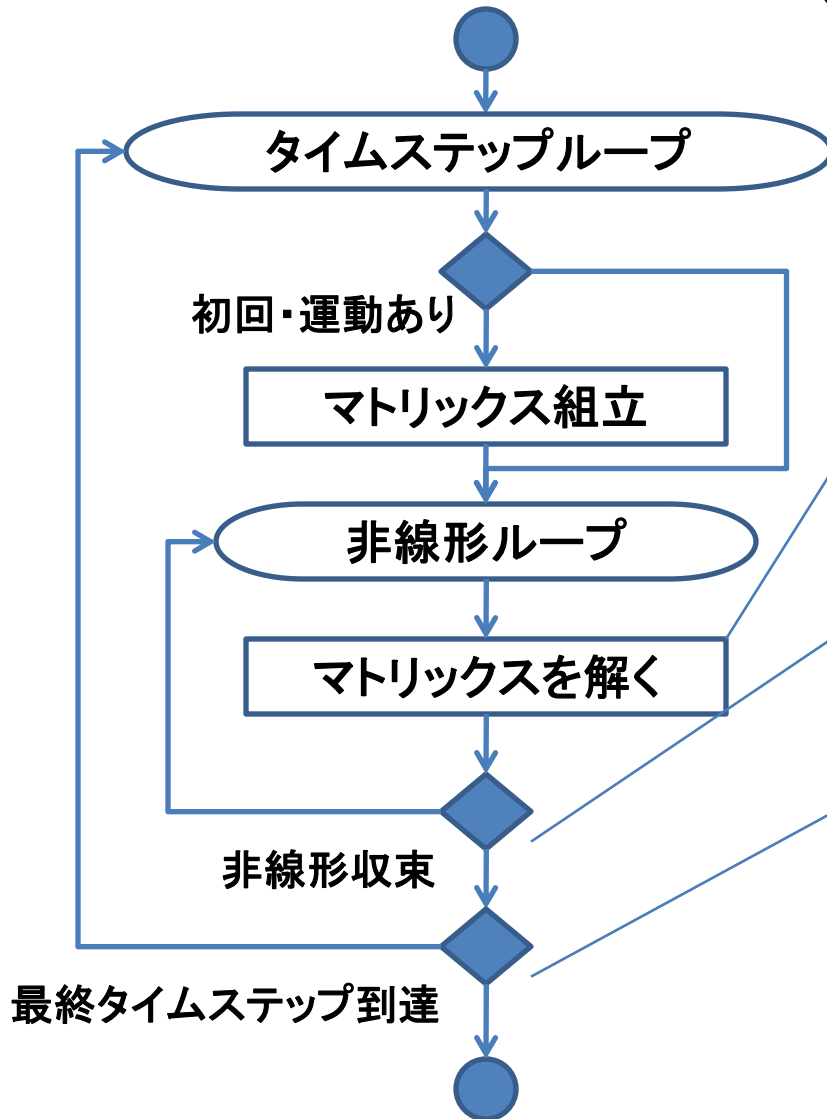
・計算量の比

$$\frac{CPT3D}{CPT2D} = \frac{10^7}{10^4} = 10^3$$

3次元にすると待てど暮らせど・・・

- 計算量の比 10^3 の意味するもの
 - 2次元計算で 1秒で終わる計算が
3次元計算では 1,000秒 $\approx$ 16.7分 かかる
 - 一辺が100であれば 計算量の比は $100^3 = 10^6$
2次元計算で1秒で終わっても
3次元計算では 10^6 秒 $\approx$ 277.8時間 $\approx$ 11.6日
- 2次元はスカラーポテンシャルで1メッシュ1変数
- 3次元は 3成分(ベクトルポテンシャル) なので変数の量は 3倍
 $CPT3D = 3000 \times 300^2 = 27 \times 10^7 \cdots 27 \times 10^6 \text{ 秒} \approx 313 \text{ 日}$
- FEMのように、空間含めたメッシュ分割を必要のある手法は
3次元解析ではコストが非常に高い
- しかしこれはガウスの消去法を使用した場合の話で
ICCG法などそれに準じた強力な手法があるというが・・・

マトリックスソルバーの精度を落とすと・・・ ツケが後で回る



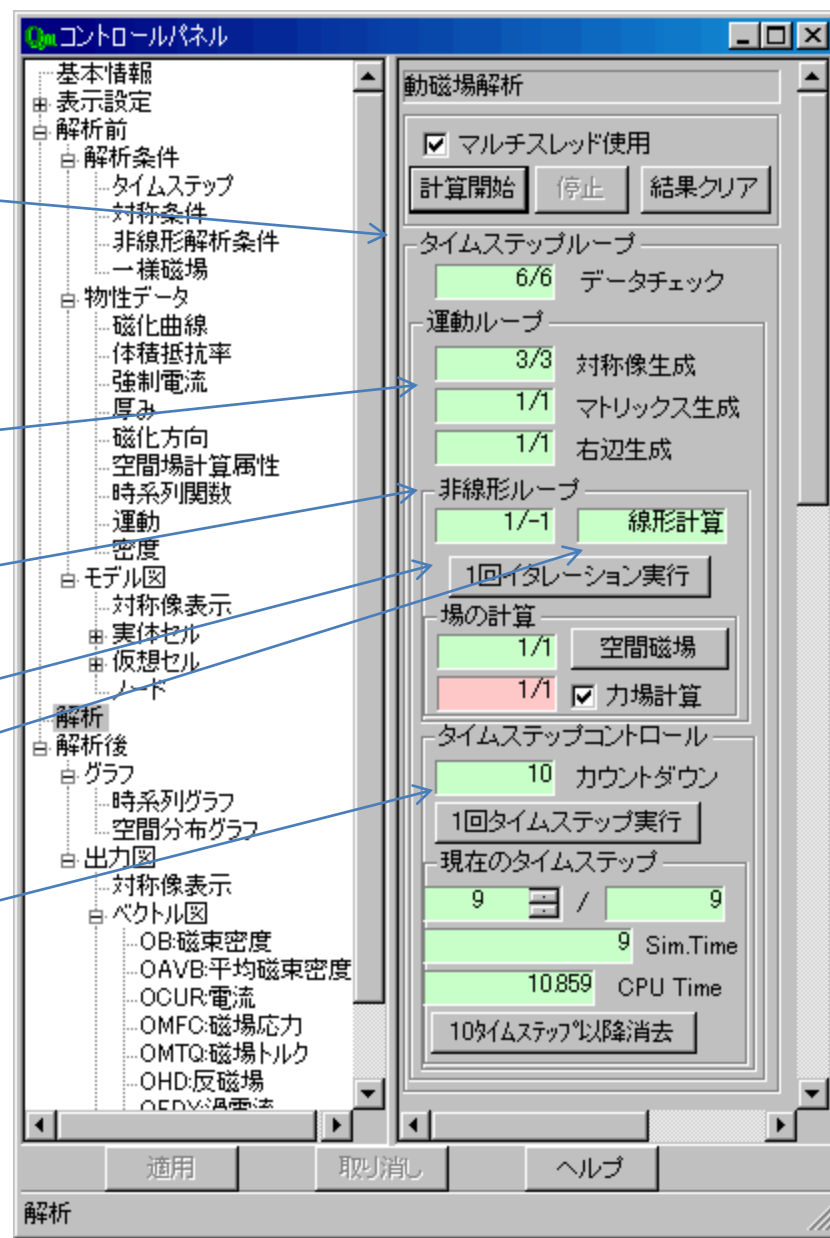
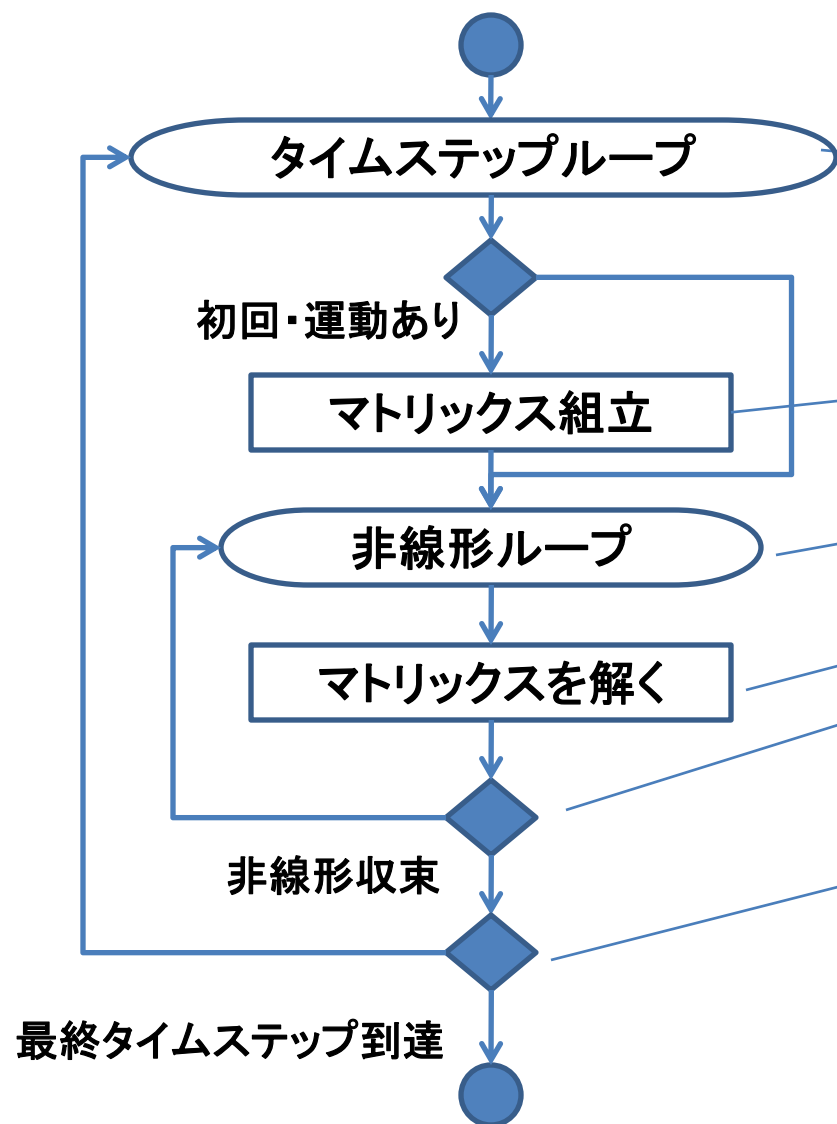
・ICCG法 マトリックス解く部分に収束判定あり

・収束判定が甘いと誤差大きくなる
→非線形ループが収束しない
精度が落ちて時間がかかる

・さらにタイムステップループで誤差が累積する

・ガウスの消去法までの精度を出すには同程度の時間がかかる

Qm解析コントロールパネルで計算ループを監視



磁場解析は他のCAEの分野より厳しい・・・

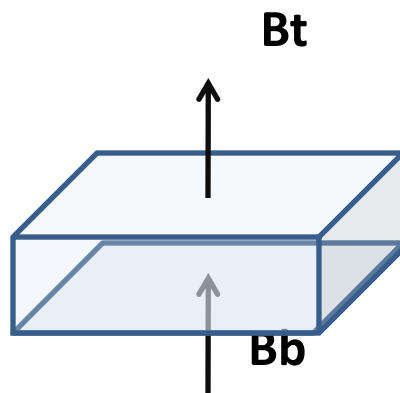
Qmのように最後までキッチリと計算が必要

- 実測しやすい。高精度の計測器がある。
- 物理現象の取り違えがければ、合って当たり前の世界。
→理論解を求めやすいモデル・実験が可能
- 磁場の値そのものよりも応力やトルクなど二次結果を求めることが多い。
→力に換算すると誤差が大きくなる。
- 特に非線形計算を途中で打ち切ると磁気飽和が正確に計算されない
→磁気飽和を起こすような磁束密度が強い部分は、ボトルネックに なって
いてその系の磁路を支配することが多い

他のCAEの分野とも若干、毛色の違う。

力に換算すると誤差が大きくなる例

- 磁場応力は、磁場の二乗に比例し、トルクはその差。(大気圧の例)
→有効数字が極端に少なくなることがある。



マックスウェルの応力
nを法線方向とするある面に作用する応力

$$F = \mu_r H (H \cdot n) - \frac{1}{2} \mu_r H^2 \cdot n$$

上部磁場 $B_t = 100 \pm 5$

下部磁場 $B_b = 105 \pm 5$

上部応力 $F_t = c * (10000 \pm 707.106)$

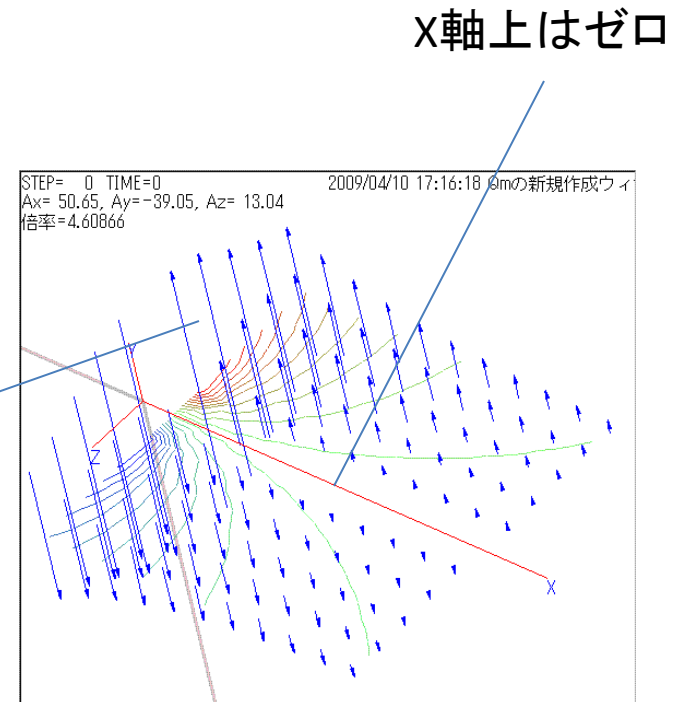
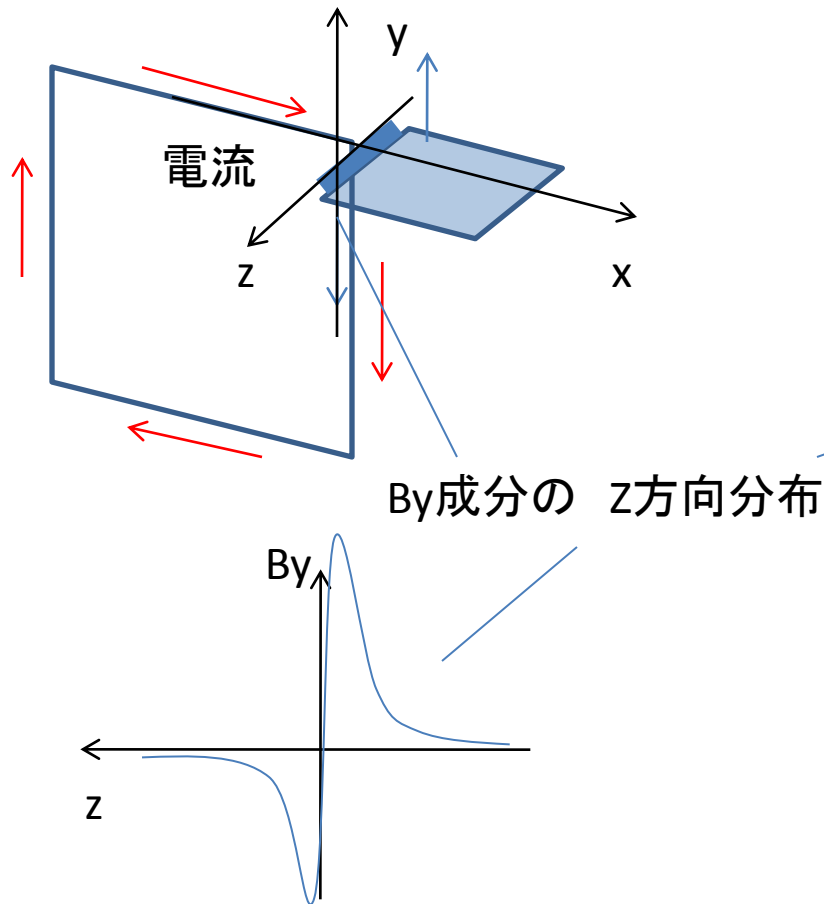
下部応力 $F_b = c * (11025 \pm 742.462)$

$$\begin{aligned} \text{合力 } F_b - F_t &= c * (11025 - 10000) \pm \sqrt{742.462^2 + 707.106^2} \\ &= c * (1025 \pm 1025.304) \end{aligned}$$

磁束密度の誤差が5%でも、力に換算すると誤差は100%・・

超越関数は尖っていて、 FEMでは細かい空間メッシュが必要

- 磁性体近傍の空間部分磁場の変化は激しい
- 例 単純な矩形コイル近傍の磁場

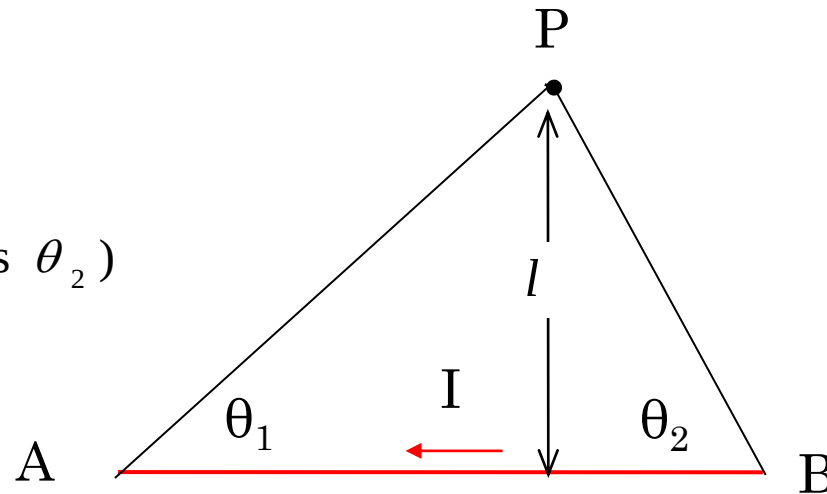


Qmではビオサバールの法則(Biot-Svart low)
をそのまま計算→離散化誤差はなし

- 電流素片(Current element)

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} d\mathbf{r}' \times \frac{\mathbf{r}}{r^3}$$

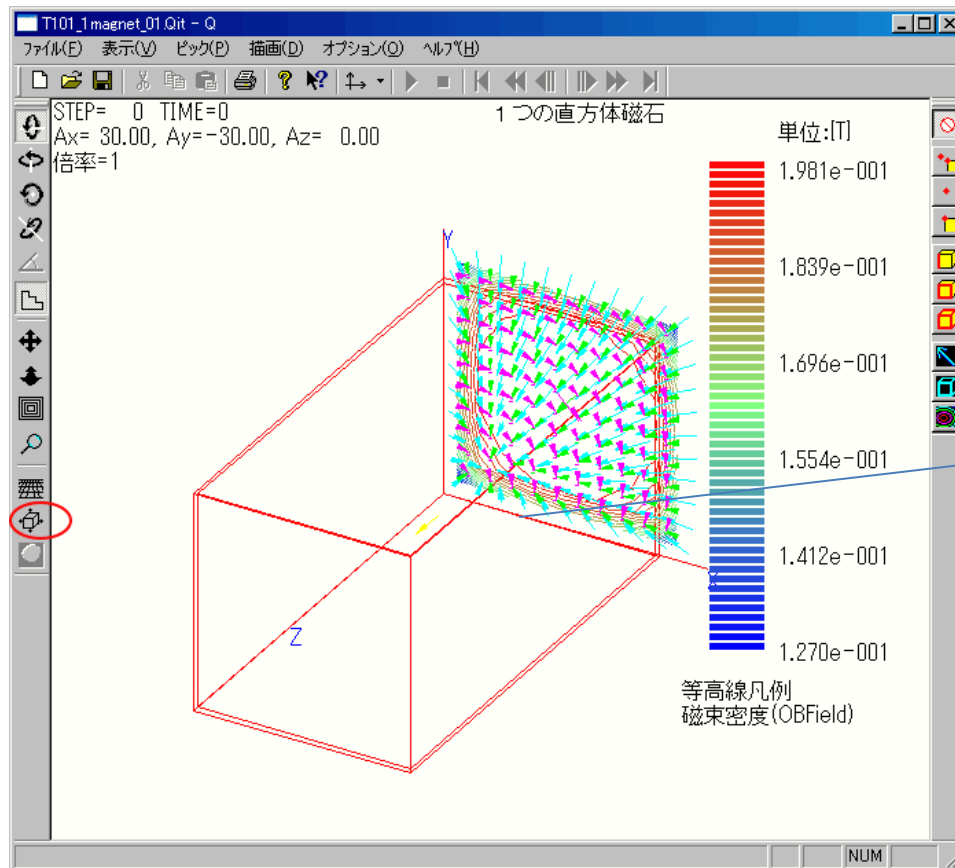
$$H = \frac{I}{4\pi l} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$$



- 複雑なコイルの巻き方でもすべて電流素片で計算することにより表現可能

面変数型磁気モーメント法では 面積分の解析解を使って計算

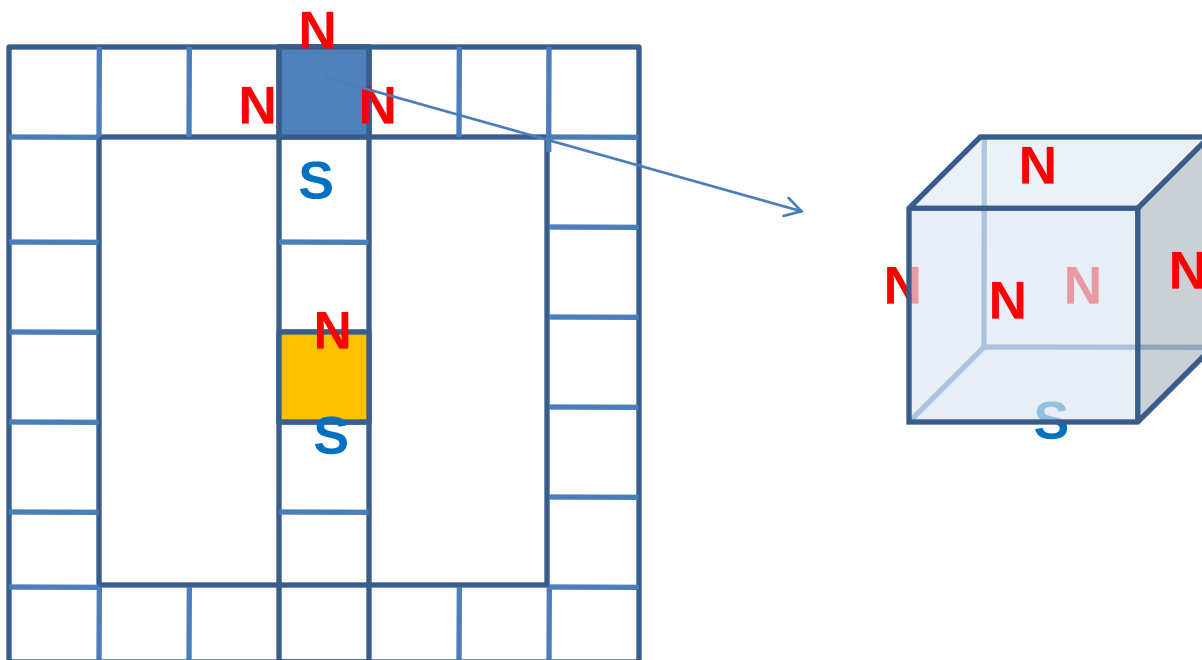
- 磁性体内部の磁束密度は比較的变化がなだらかな面に変数(面磁荷)を置くことで十分な精度で表現可能



磁石セル一つで(面変数一つで)極の近傍の空間磁束密度が精度よく計算できる

1つの面だけS極で残りは全部N極という 柔軟な変化も表現できる

- 面変数ごとに極が決まる

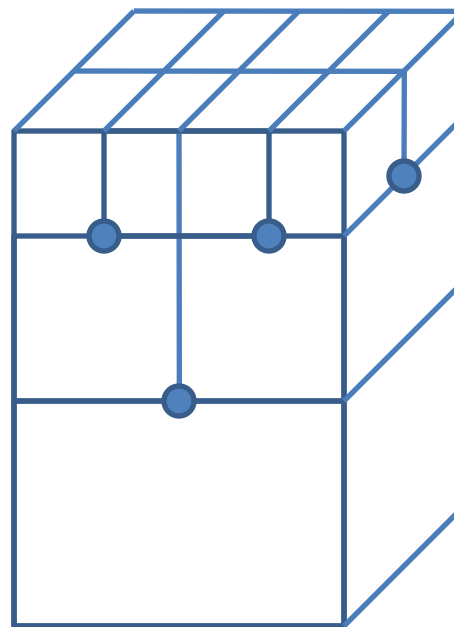
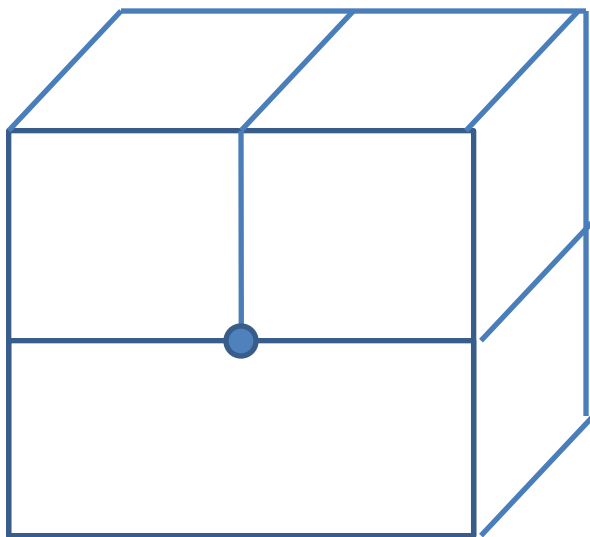


磁性体・導体ともに不連続節点パターンが 許容されるので分割しやすい

●磁性体・導体ともに以下のような不連続節点パターンの分割を許容

細メッシュから粗メッシュへのパターンが作りやすい

導体セルの場合、不連続点があっても、どちらか一方の端の点または、辺が共有されておれば、電氣的に接続されます。



Qm入力データの構成概要

■ Qicファイル 形状データ (プリPで作成)

- (A)磁石・コイル・(強)磁性体等の3次元形状を表すデータ
- (B)空間磁場・磁場応力を計算する面を定義するデータ
- (C)常磁性体 動磁場解析のとき

■ Qitファイル 物性データと計算条件(Qmのコントロールパネルで編集)

- (A-1)永久磁石や鉄などの場合 磁化方向やB-H曲線
- (A-2)コイルの場合、流す電流強度(アンペアターン値)、
一様磁場があるときはその値(ベクトル量)
- (B-1)必要とする空間磁場や空間マックスウェルの応力の座標。
- (C-1)収束条件 非線形解析の場合は
- (D-1)対称条件 対称性がある場合

●動磁場解析のとき以下を追加

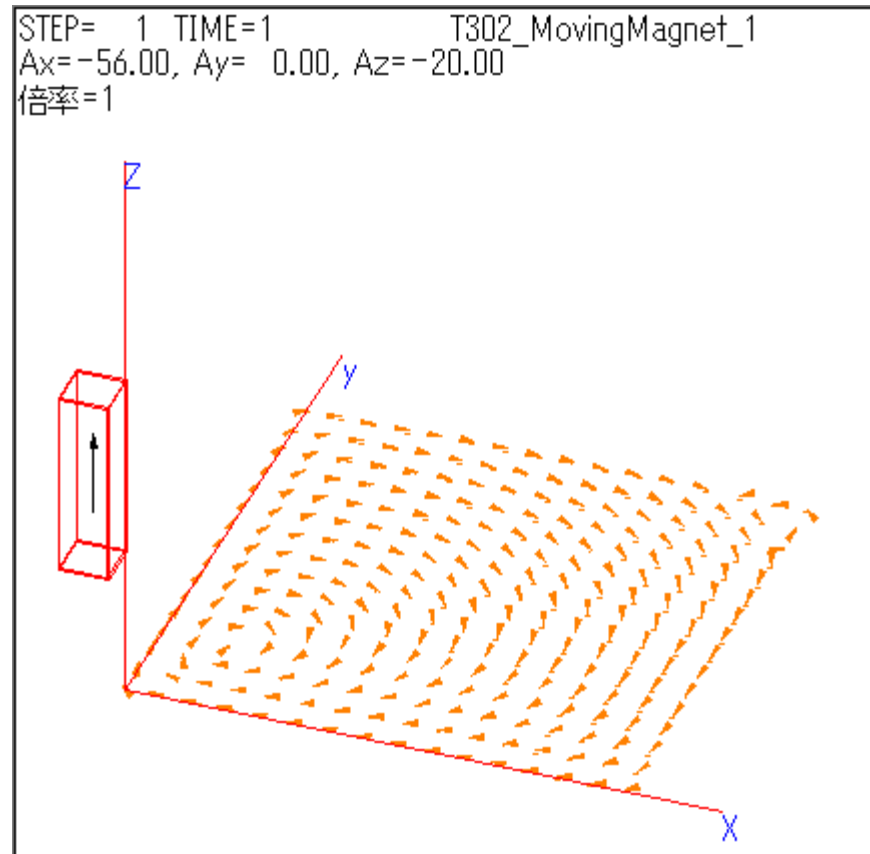
- (E-1)タイムステップ幅。
- (E-2)導体の体積抵抗率。
- (E-3)変化を記述する関数 (A-2)の起磁力が変化する場合
- (F-1)運動を記述する関数。 運動がある場合

Agenda

- 概要
- 特長
- さらなるQmの利点
- デモンストレーション

T302_MovingMagnet

複雑な運動を伴った渦電流の計算



T302_motor 電気学会「回転機の高精度数値シミュレーション 技術調査専門委員会」資料のモデル計算

