

《展望・解説》

電磁機械におけるシミュレーションの進歩と動向

岩本 雅民・中村 史朗*

ABSTRACT The advance and present status of electromagnetic field simulation for electromagnetci machines are described.

The simulation, especially digital simulation by a large computer, allows engineers to find optimum design parameters and to determine the machine performance.

In this paper, the brief history and present status of several schemes of such simulation are described together with numerical examples.

The simulation technology of the field is now advancing rapidly and it will be a powerful tool for designing a more complicated system and higer performane electromagnetic machines.

1. 序

電磁機械のシミュレーション, 中でも電磁特性の数値シミュレーションは近年の電子計算機の発達に伴ない, その技法はより高度なものへ, 又その適用対象もより複雑なものへと発展してきた。電磁機械では, 電気, 磁気, 運動のエネルギーの相互の変換を基本原理とするものが多い。従ってその最適設計や高性能・高機能化のためには電磁現象の解明, すなわち電界, 磁界, 電流, インダクタンスなどの電磁諸量の空間的・時間的分布をあらかじめ高精度に解析し, 種々の設計パラメータに応じた電磁特性をシミュレーションにより把握することが何よりも重要となる。これにより, 電磁損失にもとづく温度上昇や電磁力による応力分布などのシミュレーションも可能になる。

現在のようにシミュレーション技術が発展する以前には, 設計に先立ち種々の試作実験を繰返して主要パラメータを探索したり, 過去の設計例にもとづき経験的手法により設計するといった方法がしばしば行なわ

れていた。前者は広義のシミュレーションということもできるが, 多大な時間やコストを必要とする。又後者については最適設計の観点から難があるなど, より解析的で精度の良い手段によるシミュレーション技術の利用が待望されていた。

シミュレーションには, 初期のアナログシミュレーション(電解液槽法, 導電紙法, 抵抗回路網法など)と近年の数値シミュレーション法とが有る。特に後者の発展は電磁機械の設計にたずさわる者に, 極めて強力なツールを与えるものといえることができる。

最近のこの方面に関するトピックスをまとめてみると次のようになる。

- (1) 完全三次元問題に対し実用的解析が可能になった。
- (2) 差分法, 有限要素法あるいは積分方程式法を中心に発展してきた電磁界解析法は, 更に有限・境界要素法など混合解析法や混合未知数を用いた特殊な解析法が研究され始めた。
- (3) 磁気異方性や永久磁石を考慮した解析や渦電流解析技術が着実に進歩してきている。
- (4) 電子計算機および周辺機器の進歩により, コンピュータグラフィックスを駆使した対話形シミュレーションに関する進歩が著しい。こ

Status and Progress on Simulation in Electro-Magnetic Machines. By Masatami Iwamoto and Shiro Nakamura (Central Research Lab. Mitsubishi Electric Corp.)

*三菱電機(株)中央研究所

これは今後の電磁機械シミュレーションの CAE システムへの統合に不可欠となる。

(5) 最近、電磁界数値解析に関する国際会議 (COMPUMAG 会議¹⁾) が定期的に行われるなど電磁界数値シミュレーションにたいする興味や理解が一層たかまってきた。

本稿では、電磁界シミュレーションの発展について解析手法を含め概観する。更に電磁機械のシミュレーションの幾つかの実例および動向について述べる。

なお、アナログシミュレーション法については今回は割愛している。

2. 電磁界シミュレーションの発展

図 1 に電磁界の解析法の代表的なものを分類した。ここでは特に数値解析法を用いたシミュレーションの発展について述べる。

2.1 電磁界の微分方程式

Maxwell の方程式と材質特性との関係式

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H}) \mathbf{H}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2)$$

但し、 $\mathbf{B}$: 磁束密度, $\mathbf{H}$: 磁界強度, $\mathbf{J}$: 電流密度, $\mathbf{D}$: 電束密度, ρ : 電荷, μ : 透磁率, σ : 導電率及び次式で定義される磁気ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ から二階偏微分方程式を得る。

$$\operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (4)$$

上式は時間に依存しない静磁界の場合であるが、時間依存の項を考える場合には、

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \operatorname{grad} \phi \right) \quad (5)$$

但し、 $\mathbf{J}_0$: 電流密度の強制項, ϕ : スカラ関数となる。(1)式中の $\partial \mathbf{D} / \partial t$ の項 (変位電流) は伝導電流 $\mathbf{J}$ に比べ十分に小さく無視できる。通常の電磁機械ではこの仮定が成立し、(5)式右辺の第二項の渦電流項を考えれば十分である。

(2)式で示すように透磁率 μ は $\mathbf{H}$ や $\mathbf{B}$ に強く依存する非線形材質定数である。

2.2 数値シミュレーション

(1) 差分法・有限要素法

複雑な磁気回路構成と磁性体の非線形磁気特性を考慮した本格的な電磁界解析としては、1960年代半ばに Erdélyi 氏が回転機の二次元断面磁束分布シミュレーションに差分法を用いたもの²⁾が初めてである。ほぼ

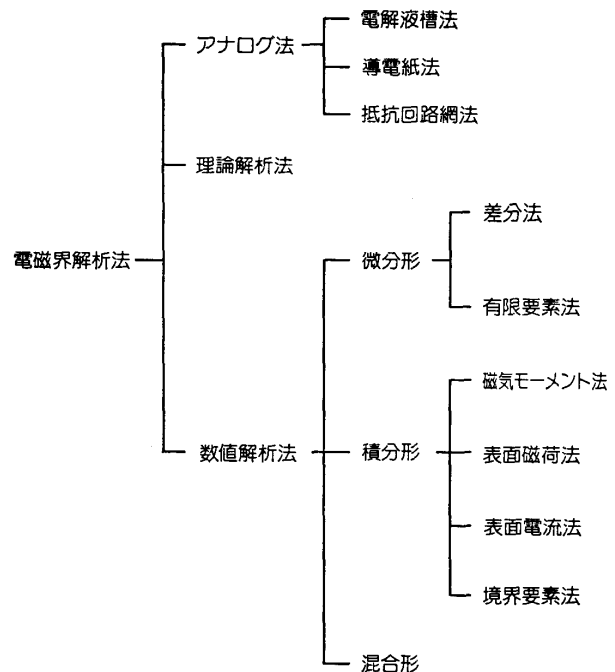


図 1 磁界解析法の分類

同じ時期に Winslow 氏により二次元磁界解析プログラム TRIM³⁾が開発されている。TRIM は以後主として高エネルギー物理研究用加速器のマグネットの設計に使用されてきている。いずれも大多元連立式の解法には逐次過大緩和法 (SOR 法) が用いられている。差分法はその後も回転機端部の準三次元電磁界解析問題に対して適用され静磁界⁴⁾や端部構造物の渦電流解析⁵⁾に効果をあげてきた。

有限要素法は1970年代になって Silvester 氏や Chari 氏らにより電磁界問題への適用が始まった⁶⁾。有限要素法は既に構造解析の分野で効果を挙げているが、彼らの電磁界問題への適用により、以後の本格的な電磁界数値シミュレーションの時期を迎えることになる。二次元直交座標系において、Euler の変分原理から(4)式は次式で示す汎関数の極値を求めることに等価である。

$$F = \iint_R \left(\frac{B^2}{2\mu} - A j \right) dx dy \quad (6)$$

第1項は磁界のエネルギー密度、第2項は電流のポテンシャルエネルギーを表わし、 F は系のエネルギーを表わす。このエネルギー汎関数の変分原理にもとづく有限要素法の定式化は Litz 形と呼ばれる。数値計算における離散化は領域を多数の要素に分割し節点に未知ポテンシャルを考え要素内のポテンシャル分布を補間関数を用いて表現する。補間関数は初期のものでは一次形式が一般に用いられていたが近年では更に高次の要素を適用する例が多い。上式中の μ の非線形性の取扱い

には反復修正法や Newton-Raphson 法が使われる。

ベクトルポテンシャルを用いた有限要素法を二次元問題に適用した場合には、等ポテンシャル線が磁力線を表わすことから機器の電磁現象を直観的に把握する上で好都合である。

渦電流を含む場のシミュレーションは、(5)式を適用し有限要素法で離散化をおこなうことができる。場が定常状態であるならば電磁諸量を複素ベクトルで与える複素演算法を用いることができる。また、過渡渦電流場であるならば、時間方向に常微分方程式の初期値問題として解くことになる。いずれの場合も(5)式中のスカラポテンシャルに関する定式化が必要になる。このために独立した導体内で渦電流の総和が零になる様に ϕ に制約を与える条件式を付加するなどの方法が用いられる。

未知数の選択に関して、(5)式をもとに離散化するものを A- ϕ 法、電流連続の式 $\text{div } \mathbf{J}=0$ から $\text{rot } \mathbf{T}=\mathbf{J}$ なる電流ベクトルポテンシャル $\mathbf{T}$ を導入し $\mathbf{H}=\mathbf{T}-\text{grad } \Omega$ により定まる磁気スカラポテンシャル Ω とを用いた T- Ω 法などが用いられている。それぞれ適用する対象に応じて選択され渦電流場のシミュレーションに効果を発揮している。

有限要素法の三次元化については後述するが、二次元問題では圧倒的に有限要素法が使用されている。これは境界適合性に優れるという利点とともに、重み付き残差法 (Galerkin 有限要素法) により極めて広範な対象が取扱えることや、その離散化過程に様々な応用が可能であり、たとえば改良形要素といった適用対象に応じた応用性に優れるなどの特長を有するためである。

(2) 積分解析法

この種の解析法として積分方程式法、境界積分方程式法及び境界要素法がある。積分形解析法は当初高エネルギー物理研究用マグネットの三次元解析を目的として開発された。電磁機械への適用では、リレーの磁気回路解析、近年では変圧器や回転機、磁気ヘッドの静磁界を対象とした解析あるいは渦電流問題の解析に発展している。積分形解析法は未知数を有限要素法のように全領域に分布させる必要がなく、磁性体の内部や表面に分布させればよいという際立った特長を有する。このため、開領域問題や三次元問題に有効である。

磁気モーメント法⁷⁾は磁性体の磁化を未知数とするもので非線形磁気特性を反復計算により考慮することができる。しかし、磁性体の内部の分割を要する。

表面磁荷法や表面電流法は線形磁気特性を対象とするが、磁性体表面に未知数を分布させればよい。磁性体の表面において次の積分方程式を離散化する。

表面磁荷法では

$$\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{x} \right) \sigma = \mathbf{H}_c \cdot \mathbf{n} - \left[\frac{1}{4\pi\mu_0} \int_S \text{grad } \frac{\sigma}{r} dS \right] \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

表面電流法では

$$\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{x} \right) \mathbf{k} = \mathbf{H}_c \times \mathbf{n} + \left[\frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\mathbf{k} \times \mathbf{r}}{r^3} dS \right] \times \mathbf{n} \quad (8)$$

ここに σ , $\mathbf{k}$ はそれぞれ表面磁荷密度、表面電流密度である。又、 $\mathbf{n}$ は表面外向きの単位法線ベクトル、 x は磁化率、 $\mathbf{H}_c$ は真電流が単独に作る磁界強度、 S は磁性体の全表面積である。

これらの解析法はそれぞれ変圧器⁸⁾、超電導発電機⁹⁾の完全三次元解析のために開発され実用されている。

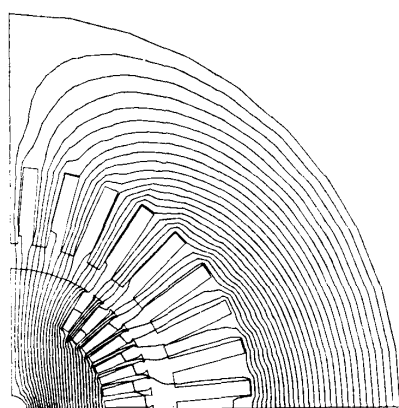
グリーンの定理にもとづいてポテンシャルに関する境界上の積分方程式を導く境界要素法も開発されている。上述の境界積分方程式法も境界要素法として分類できる。最近では境界要素法の適用性について多くの研究がみられ、その応用範囲も静磁界から定常電磁界へと、さらには有限要素法と結合した混合形解析法¹⁰⁾などに発展してきている。

(3) 電磁界解析の高度化

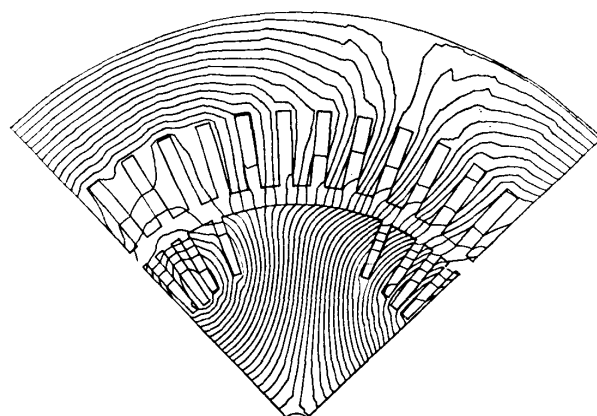
電磁界シミュレーションの高度化に関する進歩は、対象の次元、取扱う場を記述する方程式の忠実度及びシミュレーションの効率、容易さといった観点から述べることができる。次元については二次元から三次元へ、方程式の忠実度としては、 μ の非線形性や方向性の考慮あるいは渦電流の考慮といったものが可能となってきた。シミュレーションの効率は計算機と設計者のインターフェースすなわちデータの入出力の対話形式化といった点に進歩が見られる。

三次元化¹¹⁾については準三次元解析法の成功や積分形の解析法の実用化により、ある程度まで可能となっている。現在、有限要素法による三次元解析に関しては、ソー・スカラポテンシャル法¹²⁾が成功している。これは、電流が存在する領域と存在しない領域とで異なったスカラポテンシャルを用いるもので、ベクトルポテンシャルを直接用いる際に問題となる未知数の増大に対し1つの解答を与えたものとして注目される。ベクトルポテンシャルを直接用いた有限要素法も単純な構造の対象には適用が始まっている¹³⁾。

渦電流問題に対しては A- ϕ 法や T- Ω 法が成功し



(1) 無負荷時磁束分布



(2) 負荷時磁束分布

図2 発電機の無負荷・負荷特性シミュレーション¹⁴⁾

ている。特に $T-\Omega$ 下法は三次元化にあたり未知数が少なくて済むという利点があり、特に一般三次元化に対する適用性の研究が盛んである。

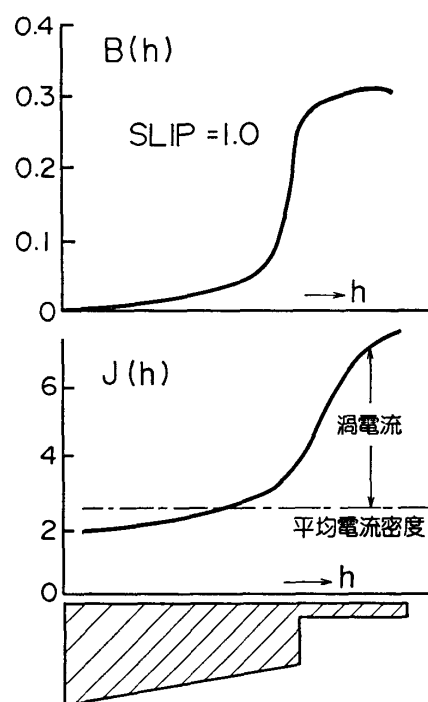
3. 電磁機械におけるシミュレーションの実例

3.1 回転機

小容量機から大容量機にいたる様々な種類の発電機や電動機に対し、その内部の磁束分布に代表される電磁界の挙動を求め発生電圧や電磁力あるいは電磁定数等を精度良く把握することにより、機械の最適設計をおこなうことができる。

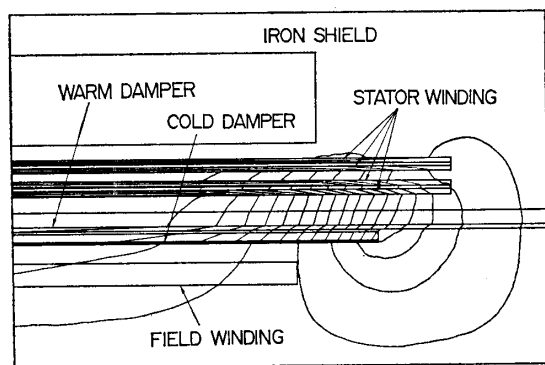
図2は大形発電機の無負荷および負荷飽和特性のシミュレーションの例¹⁴⁾である。無負荷飽和特性の場合には励磁電流を与え有限要素法により磁束分布を求め、発生電圧を得ることができる。負荷飽和特性の場合には発電機の負荷条件（端子電圧、力率など）を入力とし、必要な励磁電流や位相角を求めていくといった手順が一般に行なわれている。このシミュレーションにより、様々な負荷条件下での磁束分布、電流分布およびリアクタンスを設計段階で把握できる。また各種電気定数の飽和値や電磁損失に関する知見を得たり、機器の磁気回路構成の最適化のための指針を得ることができる。図3は比較的小形の誘導電動機の起動特性シミュレーション¹⁵⁾において得られた二次導体の起動時電流密度と磁束密度の分布である。この例では、周波数と導体形状をパラメータとし起動抵抗を検討している。前章に述べた $A-\phi$ 法による渦電流解析が用いられている。

図4に超電導回転機の電磁特性シミュレーションの例¹⁶⁾を示した。超電導回転機には非磁性構造材が用い

図3 小形誘導電動機の起動電流¹⁵⁾

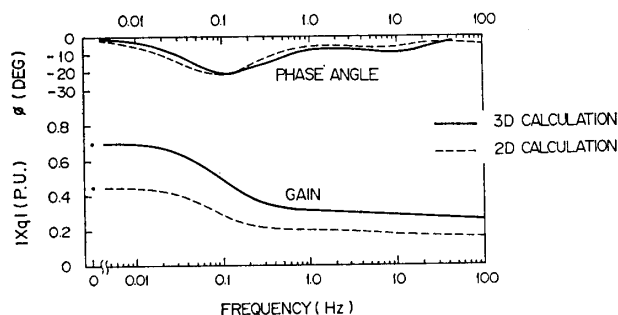
られる。従って、従来機のように磁路が明確でなくなり二次元解析の適用には限界がある。すなわち厳密に電磁特性を把握するためには三次元解析が必要となる。この例は構造的には軸対称であるが電磁界が三次元的に分布する対象にたいし、 $T-\Omega$ 法による渦電流解析を適用したものである。図4-(1)は磁気スカラーポテンシャルの等高線を示したものであり、図4-(2)は解析の結果として得られた過渡リアクタンスの周波数応答曲線である。

この解析法とはほぼ同様な手法が回転機端部の漂遊損解析⁵⁾やコイルエンドの電磁力解析にも用いられている。

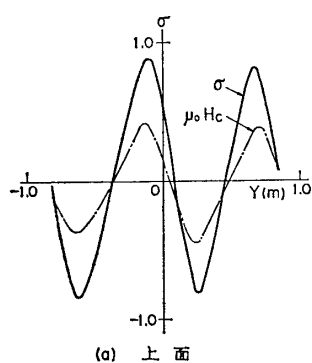


SLIP FREQ. = 0.3 Hz

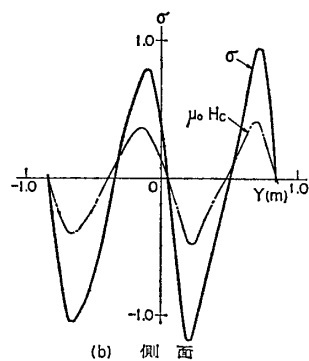
(1) 等ポテンシャル図



(2) リアクタンスの周波数応答

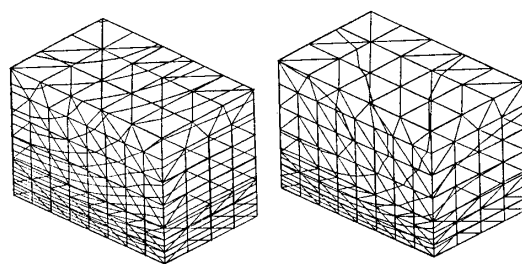
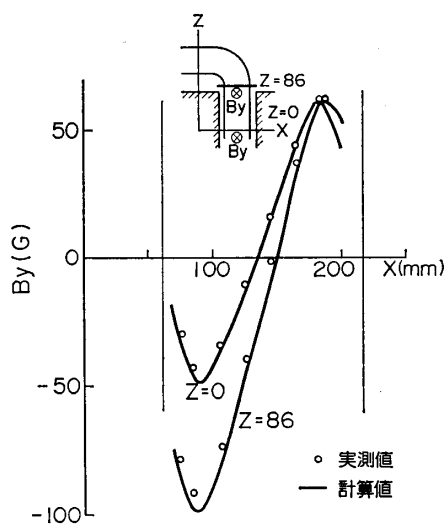
図4 超電導回転機の過渡リアクタンスのシミュレーション¹⁶⁾

(a) 上面



(b) 側面

(1) 表面磁荷密度分布

図6 変圧器磁性タンクの損失解析結果¹⁸⁾

(2) 空間中の漏れ磁界

図5 変圧器漏れ磁界の三次元解析結果⁸⁾

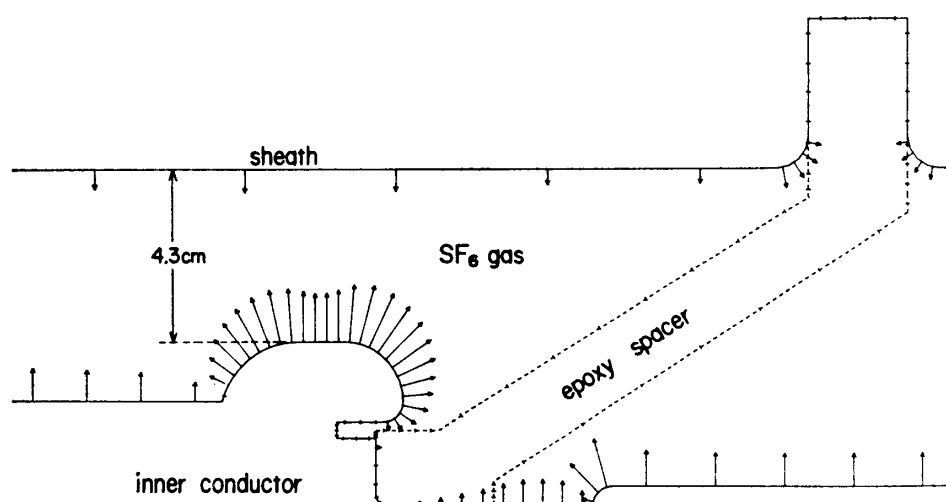
回転機の静磁界を完全三次元問題として詳細に解析した例も報告されている¹⁷⁾。通常、回転機では多数のスロットとティースが存在しコイルの数も多い。必然的に離散化の結果の要素数が膨大となり一回のシミュレーションに要する計算機 CPU 時間も又極めて大き

くなる。この例では反復計算だけで数万 CPU sec ということであり現状ではこのような力まかせの方法は実用性に乏しいと考えられるが、今後の計算機ハードウェアの進歩によっては実用化される可能性もある。

3.2 静止機器

これも回転機と同様、様々な機器において電磁界シミュレーションが実用され効果を上げている。

変圧器は成熟した機器といわれるがたとえば低損失化、高密度化といった機器の高性能化に関する積極的な技術開発が絶えずおこなわれている。この状況の中で電磁界シミュレーションの果たす役割は極めて大きいといえる。電界解析は変圧器の絶縁構成の最適設計の分野に活用され、二次元や三次元の表面電荷法が使用されてきている。ここでは低損失化の検討のために実施されたシミュレーション例を紹介しよう。大容量変圧器では空間漏れ磁束密度が増加し、巻線やタンク等の構造物に発生する漂遊損失が全損失に占める割合が高くなる。したがって、低損失、高密度化にあたってはこの空間漏れ磁束の定量評価が出发点となる。次に、得られた漏れ磁束分布をもとにコイル素線内渦電流損や並列素線間の循環電流損を求め最終的にはコイル温度分布シミュレーションまで可能となる。又、構造物についても漏れ磁束解析は非磁性、磁性構造物の漂遊損失解析へとつながる。図5は前述した表面磁荷

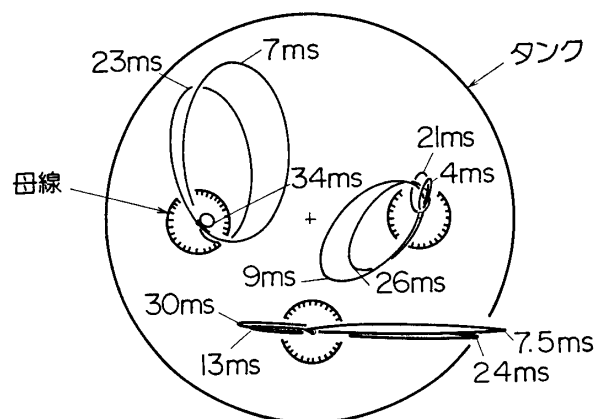
図 7 GIS の電極部の電界解析²¹⁾

法にもとづき空間漏れ磁界を三次元解析した例⁸⁾である。表面磁荷密度の分布はその定義から鉄心表面から空間中への漏れ磁束密度の分布に対応している。空間漏れ磁束密度の分布は実測値との比較から高い精度で求められていることが判る。図6は磁性薄板箱体の渦電流解析の結果¹⁸⁾である。これは立体的形状の薄板構造体に対し平面三次元表面インピーダンス法を適用したもので、有限長あるいは曲がりのあるブスバーによる変圧器タンクの漂遊損解析に用いられる¹⁹⁾。

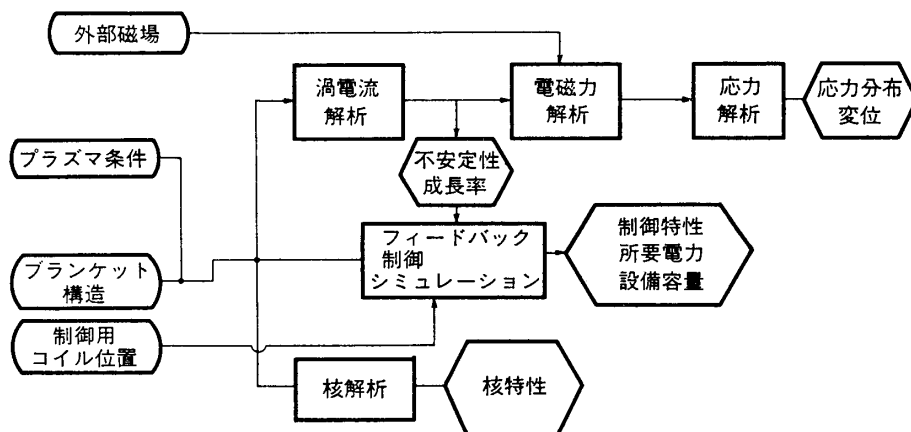
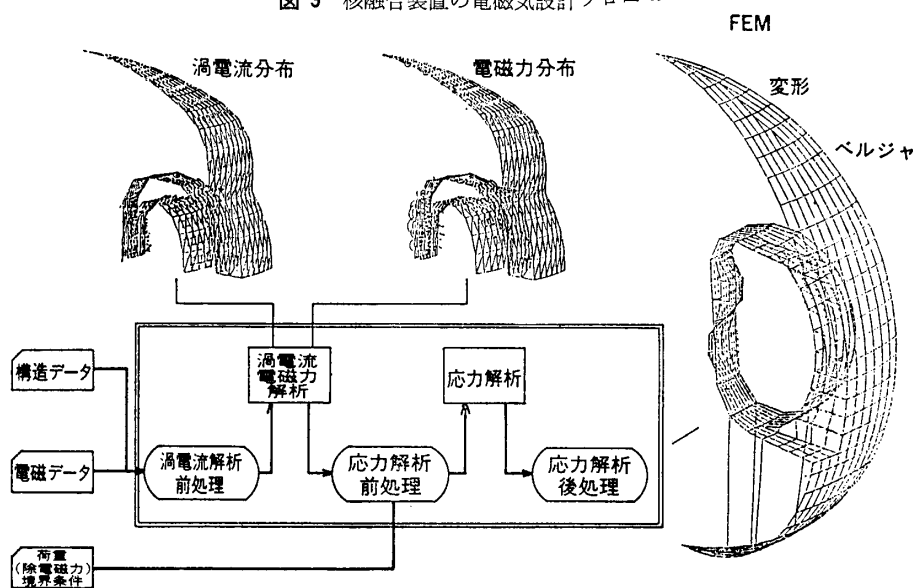
ガス絶縁開閉装置 (GIS) は縮小・密閉化されることで環境調和性に優れ、高い信頼性を有するために目覚ましい発展を遂げてきた。GISの縮小化や信頼度向上にはシミュレーション技術の貢献も大きい。サージ解析や電磁界解析あるいは熱解析や応力解析が効果的に結合され活用されている²⁰⁾。絶縁設計における電界解析の一例²¹⁾を図7に示した。これは表面電荷法による軸対称解析により得られた電界強度の分布である。GISの電極を耐電圧に関して最適化するために最大電界部の電極形状の変更と電界計算を繰り返し、所定の電界強度以下になるまで自動的に計算を実行する電極最適化プログラムに 응용されている。図8は、ガス絶縁三相一括母線の短絡電磁力の時間的変化のシミュレーション結果²²⁾である。この例では円筒非磁性タンク内の三相母線に短絡過渡電流が流れた場合の各母線に作用する過渡電磁力を、動的影像電流法により求めている。これにより各種の短絡電流波形に対し導体の支持構成を最適化することが可能となる。

3.3 核融合装置

トカマク形に代表される核融合装置は、超高温プラズマ、超電導、極低温、超高真空といったいわゆる超技術が共存する非定常電磁機械である。したがって、

図 8 三相一括母線の電磁力シミュレーション²²⁾

その設計や研究開発の過程では上述した機器に比べて電子計算機による数値シミュレーションの果たす役割は更に大きくなっていく。ここでは電磁気設計におけるシミュレーションシステムの一例²³⁾を紹介する。まず想定したプラズマ条件とブランケット構造に対し渦電流解析をおこなう。この結果、プラズマ変動に対するブランケットのシェル効果を示すパラメータ (不安定性成長率) を求める。このパラメータとフィードバック制御される磁場条件及びプラズマ変動条件を入力としてプラズマ位置制御シミュレーションを行う。渦電流解析結果と外部磁場との相互作用から電磁力が得られる。更にその負荷外力にもとづく応力解析を行い構造検討を行う。一般にブランケットのシェル効果を高めることと電磁力の低減とは相反することから、上記のシミュレーションを繰り返し最適なポイントを把握することが必要である。そのために、それぞれの解析間のデータ処理の自動化や対話形化をはかり設計効率を向上させている。図9は電磁設計のフロー、図10は渦電流、電磁力及び応力解析プログラムシステムの

図 9 核融合装置の電磁気設計フロー²³⁾図 10 核融合装置の渦電流、電磁力、応力解析システム²³⁾

一例²³⁾である。

3.4 その他

電磁特性シミュレーションの実例として、この他にも多数のものがあるが、ここで、磁気浮上システムの解析例と高解像度ディスプレイ用 CRT の電子ビームのシミュレーションの例を示しておく。

吸引形磁気浮上システムにおいて、車体に固定された電磁石は鉄製の軌道に対し吸引力を受ける。車体が高速で走行する際には渦電流が軌道に流れ、その反作用磁界により浮上力が減少すると共に抗力（ブレーキ力）が発生する。したがって、高速走行時の電磁界解析による浮上特性シミュレーションが有効となる。

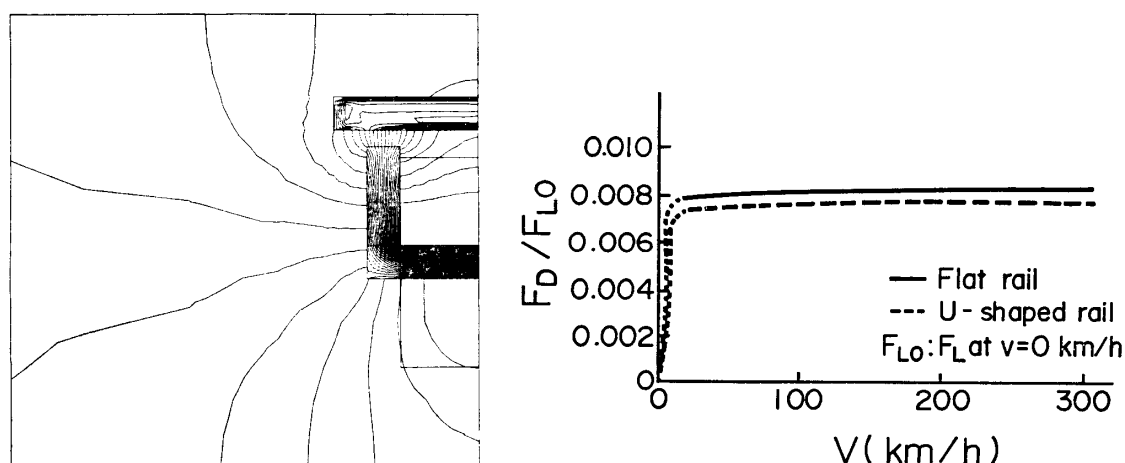
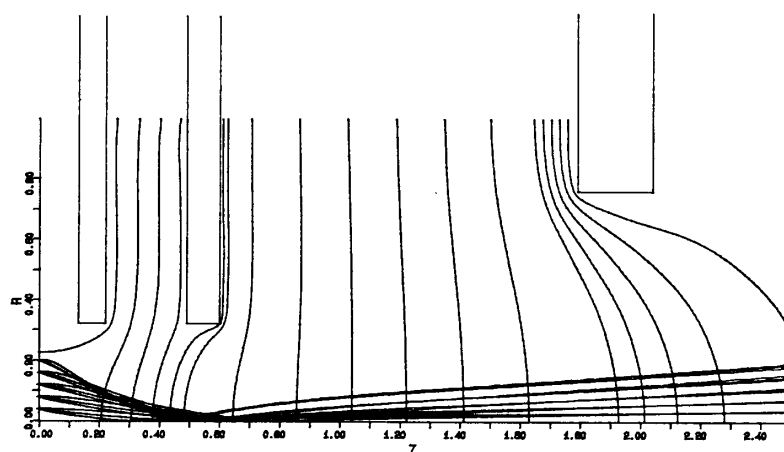
図11は、軌道方向に垂直な二次元断面にたいして A-φ 法による有限要素法解析を適用した結果得られた磁束分布と抗力の速度依存性である²⁴⁾。この場合、電磁界を記述する方程式には速度項が含まれている。又、電流が軌道方向に有限の長さであるためにフーリエ展開

を行ない、各次数毎に磁束と渦電流及び浮上力と抗力を求めている。

図12はディスプレイ用 CRT の電子軌道シミュレーション例²⁵⁾である。電界を表面電荷法で計算し、その結果をもとに電子の運動方程式を解き軌道を求めている。図は電子銃部分の軌道であるが、ビーム走査部すなわち電磁偏向部についても軌道シミュレーションが行なわれ²⁵⁾、色ずれやラスタ歪の低減化の検討に欠かすことのできない手段となっている。

4. 電磁界シミュレーションの動向

1960年代に始まる電子計算機による数値シミュレーションは約20年にわたり発展をつづけてきた。特に、1970年代に入ってから有限要素法の登場により、電磁機械の設計者の身近なものとなり手軽に設計の道具として使用されるようになりつつある。又、その適用対象も極めて広汎になった。

図 11 磁気浮上システムの電磁界シミュレーション結果²⁴⁾図 12 ディスプレイ CRT の電子ビーム軌道シミュレーション²⁵⁾

電磁界シミュレーション技術の動向としては、電磁界解析技術自体の高度化、シミュレーションを可能とする計算機環境の進歩、およびシミュレーションに対するニーズの昂まりといった3つの側面がある。これらは互いに密接に関係する。たとえば計算機の進歩がそれ迄は不可能であった膨大な処理を可能とし、それにより解析技術も高度化し設計者からのニーズも呼び起こすといった具合である。この状況は電磁機械に限らず他の分野も同様であろう。ただし電磁界シミュレーションの分野では比較的短期間に解析技術が進歩し適用対象も広がっている。

解析技術の高度化については、三次元対象の実用解析法の開発、各種の渦電流問題の解析が可能となったこと、磁性材料のヒステリシスや方向性が取扱えるようになったことなどが挙げられる。更に、解析の効率化に関し、未知数の選択についての検討や混合形の解析法についての研究、あるいは離散化における特殊要素の開発などが行なわれ確実に成果が出て来ている。

また、解析精度の向上に関しては高次要素の採用や二重解法²⁶⁾の提案、あるいは数値計算誤差の評価についての研究等が行なわれている。

計算機環境の進歩は、ハード及びソフトの両面でシミュレーション技術にインパクトを与えている。パーソナルコンピュータの普及と高性能化は一昔前には大形コンピュータで行なっていた解析をユーザの手許で手軽に行なうことを可能とした²⁷⁾。又、一方スーパーコンピュータにより膨大な解析処理を短時間で行なうことも可能になってきた。更に、周辺装置としての高性能カラーグラフィック端末と標準化されたグラフィックスソフトの進歩は高度な前処理や後処理を可能とするもので、今後のCAEシステムには不可欠となることが確実である。

シミュレーションに対するニーズは急速に昂まっているのが現状である。在来の電磁機械では、一段と高性能、高密度化が要求されている中で電磁特性シミュレーションの果たす役割は大きい。一方、前述した核融

合装置の例の様に極めて高度な技術を幅広く必要とするものではシミュレーションに依存する割合が一層大きくなる。この様な大規模システムでは個々の解析技術を効果的に組み合わせた多機能シミュレーションシステムが要求される。

このような動向の中で今後の課題と考えられるものをまとめると、(1)解析手法の高度化と実用化の一層の発展、(2)多機能シミュレーションシステムの実現、(3)入出力の効率化と高度な対話形システムの実用化となろう。(1)については上に述べた通り着実に進歩を見ているが、未だ解析が困難な対象、たとえば非線形渦電流の三次元問題などが課題として残されている。(2)、(3)についても、未だ研究段階にあり完全な実用システムは現われておらず、今後実用化に向けて一層の努力が必要であろう。幸い、現在のこの方面の研究の進展はかなりの勢いで進んでおり、解析手法の発展とともに一層使い易く多機能のシミュレーションが登場し、電磁機械の高性能化や省力化に貢献する日が近いと思われる。

参 考 文 献

- 1) 仁田：電界磁数値解析国際会議報告，電学誌104，47(1984)
- 2) S. V. Ahmed, E. A. Erdelyi : Non-linear vector potential equations for highly saturated heteropolar machines, IEEE Trans. Aerospace 2, 896 (1964)
- 3) A. M. Winslow : Magnetic field calculations in an irregular triangle mesh, UCRL-7784-T (1965)
- 4) T. Nomura : Calculation of the magnetic field in the end zone of turbine generators, IEEE Summer Power Meeting, 71 CP 513-PWR (1971)
- 5) T. Nomura, M. Iwamoto : Eddy-current losses in solid iron structures in the end zone of turbine generators, IEEE Winter Power Meeting, 75 C 75 072-4 (1975)
- 6) P. Silvester, M. V. K. Chari : Finite element solution of saturable magnetic field problems, IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-89, 7, 1642 (1970)
- 7) M. J. Newman, C. W. Trowbridge and L. R. Turner : GFUN ; An interactive program as an aid for magnet design, Proc. Int. Conf. Magnet Technology (1972)
- 8) 中村, 野村, 岩本 : 変圧器漏れ磁界の三次元解析, 電学論誌B, 96, 443 (1976)
- 9) T. Nomura, S. Nakamura, H. Kohmo : Magnetic field calculation of super-conducting alternators by a boundary element method, Proc. 5th Int. Conf. Boundary Elements (1983)
- 10) 小貫, 石山, 安部 : ベクトル・スカラー両ポテンシャルを併用した有限一境界要素法による開領域磁界解析, 電学論誌A, 103, 469 (1983)
- 11) 中村, 岩本 : 磁界解析法の発展と将来—三次元問題を中心として—, 電学誌104, No. 6, 471 (1984)
- 12) J. Simkin, C. W. Trowbridge : Three dimensional non-linear electromagnetic field computations, using scalar potentials, IEE Proc. B, 127, pt. B, 6, 368 (1980)
- 13) N. A. Demerdash, T. W. Nehl, F. A. Fouad and O. M. Mohammed : Three dimensional finite element vector potential formulation of magnetic fields in electrical apparatus, IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-100, 8, 4104 (1981)
- 14) 中村, 野村 : タービン発電機負荷時の磁束分布の解析, 電学全大807 (1977)
- 15) 中村, 野村 : 誘導電動機二次導体の表皮効果の解析, 同上869
- 16) T. Nomura, S. Nakamura, M. Iwamoto and M. Okada : Finite element analysis of operational impedance of superconducting alternators, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No. 6, 2608 (1983)
- 17) W. Novender, W. Müller : 3-dimensional non-linear calculations of magnetic fields in turbogenerators, ibid MAG-19, No. 6, 2604, 1983
- 18) 武智, 黒田 : 磁性鋼板タンクの渦電流損失解析, 電学全大, 647 (1982)
- 19) 管, 渡辺, 石井, 武智, 玉置 : 高電圧大容量変圧器の技術開発 [I], 三菱電機技報, Vol. 56, No. 7 (1982)
- 20) 松田, 佐藤, 宮本, 荒畑, 本吉 : ガス絶縁開閉装置 (GIS) における解析技術, 同上, Vol. 57, No. 9 (1983)
- 21) Y. Shibuya, K. Nakanishi, M. Masuda, T. Nitta : An improved method of field analysis and its application to the insulation design of gas insulated systems, 3rd Int. Symposium on High Voltage Engineering 32. 16, Milan, 28-31, Aug. (1979)
- 22) 小倉, 沼 : 三相一括母線におけるイメージ法による短絡電磁力解析, 電学全大, 1009 (1982)
- 23) 西川, 亀有, 塚本, 松岡, 八十島 : 核融合装置の設計解析プログラムの開発, 三菱電機技報, Vol. 58, No. 4 (1984)
- 24) 地藏, 山田, 岩本 : 吸引式磁気浮上車的高速走行浮上特性の解析, 電学論誌B, 97, No. 4 (1977)
- 25) 奥田, 野村 : 高解像度ディスプレイ装置の電磁界解析, 電気四学会連大, 5-6 (1984)
- 26) J. Penman, J. R. Fraser : Dual and complementary energy methods in electromagnetism, IEEE Trans. Magnetics, Vol. MAG 19, No. 6, 2311 (1983)
- 27) 根本 : 電磁界解析とパーソナルコンピュータ, 電気学会回転機・静止器合同研究会資料, RM-84-53, SA-84-24 (1984)