三次元磁界解析技術

藤田　満(ふじた　みちる)　芦田　有(あしだ　ゆう)　武　達男(たけ　たつお)

1 まえがき

ワークステーションに象徴されるコンピュータ技術の発達は演算速度，主記憶容量ともにめざましいものがあり，それに伴ってコンピュータ利用の数値解析法も進歩を続け，研究開発のスピードアップ，高性能な製品の実現には有力な武器となっている。

富士電機では，二次元電磁界解析用に1975年に差分法[1]，1983年に有限要素法[2]のソフトウェアを開発し，多くの電気機器の開発・設計に活用して，成果を上げている。これらのソフトウェアは完全自動最適要素分割機能を有し，データ入力の省力化と要素分割の粗密をコンピュータで自動的に行い計算精度の向上を図った。また局所ズーミング機能の併用により，短時間で高精度な計算が行えるよう工夫されている。そして，近年のさらに高精度な計算要求により，三次元解析ソフトウェアの開発を1985年に着手し，**表1**に示すように問題に応じて適切な解析ソフトウェアを開発してきた。**表2**に富士電機が自主開発した電磁界解析ソフトウェアの一覧を示す。

本稿では，三次元解析法のなかで**表2**において＊印を付けた積分形解法のうち磁界解析について，その解法の概要と適用例を紹介する。

表1　電磁界解析ソフトウェア開発経過

次元	年度	解析手法	代表的適用例
二次元	1975	差分法	変圧器などの電磁界
	1983	有限要素法	回転機などの電磁界
	1986	磁気モーメント法	磁気シールド構成
	1986	磁気ベクトルポテンシャル法	変圧器リード引出箱渦電流
三次元	1986	表面電荷法	開閉器電界
	1987	ワイヤモーメント法	線条アンテナ散乱
	1989	有限要素法	回転機
	1990	パッチモーメント法	板状アンテナ散乱
	1992	電気ベクトルポテンシャル法	浮揚溶解など誘導加熱装置

表2　自主開発の電磁界解析ソフトウェア一覧

対象場	次　元	静　界	交番界
電　界	二次元	FDMT（差分法） FEMT（有限要素法）	
	三次元	＊USCM（表面電荷法）	
磁　界	二次元	＊UDAM2（磁気モーメント法） FDMT（差分法） FEMT（有限要素法）	
	三次元	＊UDAM3（磁気モーメント法） MAG3（有限要素法）	＊EDDY（電気ベクトルポテンシャル法）
電磁波	三次元		＊WIRE（線アンテナモーメント法） ＊PATCH（面アンテナモーメント法）

＊は積分形解法を示す。

2 積分形解法の特長と富士電機の手法

三次元解析手法は，解析全空間を四面体などの要素で分割して全領域のエネルギーが最小の条件で解く有限要素法[3]などの領域分割形解法と，変数を導体，磁性体などの構造

表3　三次元磁界解析法

対象場	ソフトウェア名	変　数	富士電機のソフトウェアの特長
静磁界	＊UDAM3	磁性体中の磁気モーメントベクトル（3成分）	・モデルの対称性考慮 ・係数マトリックスが対称 ・厳密式と近似式の使い分け
	MAG3	要素の磁界強度（3成分）	・四面体一次要素と辺要素を併用 ・磁束密度が直接求まる。
交番磁界	＊EDDY	導体表面の電気ベクトルポテンシャルの法線成分（1成分）	・モデルの対称性考慮 ・コイルの渦電流考慮
電磁波	＊WIRE ＊PATCH	アンテナ上の電流（2成分）	・モデルの対称性考慮 ・直列コンデンサの最適容量化

＊は積分形解法を示す。

藤田　満

昭和50年入社。電磁界解析ならびに電磁気応用機器の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所電力技術開発本部機器技術開発部主査。

芦田　有

平成4年入社。電磁界解析ならびに電磁応用機器の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所電力技術開発本部機器技術開発部。

武　達男

昭和46年入社。電磁気応用の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所電力技術開発本部機器技術開発部課長。

物内の物理量（磁束密度や誘導電流）に限って解く積分形解法に大別される。積分形解法は空間の変数を考慮しなくてよいから変数総量を減じることができるので複雑な形状でも精度よく計算できる。さらに要素分割などの入力作業が簡便なため注目を浴びている解法である。**表3**に富士電機の三次元磁界解析法の特長を示す。それぞれのソフトウェアは計算時間の短縮と解析精度の向上のため，種々工夫されており，汎用性を考慮した。

三次元積分形解法としては，①静磁界問題では磁性体の磁化モーメントベクトルを未知数にした解法，②渦電流問題では導体中の電流の流れを表す電気ベクトルポテンシャルを未知数にした解法，③アンテナ問題ではアンテナ上の電流を未知数にした解法，をそれぞれ採用したソフトウェアを開発した。

3 静磁界解析

3.1 解析法の概要

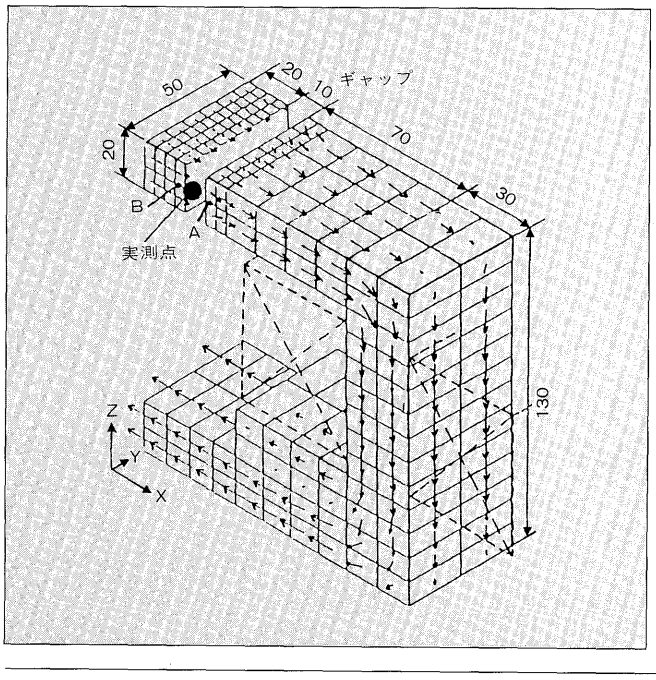
ある空間の磁束密度は，コイルのつくる磁束密度と磁性体が磁化されたために生じる磁束密度に大別できる。磁気モーメント法は磁性体を多くの小さなブロックに分割し，おのおののブロックの磁化量である磁気モーメントを未知数として，それぞれの磁気モーメント同士が及ぼす影響を係数マトリックスとし，コイルのつくる磁界はビオサバール則により計算して既知項として解析する方法[4]である。

磁性体の磁気飽和特性は逐次緩和法により透磁率を反復修正して考慮した。また，係数マトリックスを対称にする基本式を導出し，記憶容量，計算時間の短縮を図った。

3.2 適用例

ギャップ付電磁石の解析例[5]を**図1**に示す。モデルの対称性を考慮した1/4モデル（要素数は196）で計算した。

図1　電磁石の磁界分布



ヨーク材は電磁鋼板（SS41）でその非線形磁化特性を考慮した。図中の矢印は磁性体中の磁化の大きさ，すなわち磁束密度を示している。**図2**にギャップ部の磁束密度分布の計算結果とホール素子での実測結果を示す。測定位置での磁束密度はX方向だけをもち，アとイの中間の値であるから，妥当な計算であることが分かる。

磁気記憶媒体の消磁磁石の磁界解析例を**図3**に示す。磁気ディスクの消磁を行うため，漏れ磁界を徐々に大きくする必要がある。永久磁石で磁界を発生し，ギャップ長が広がった構造を採用した。このモデルは三次元解析でないと計算できない。ギャップ長，磁極の形状の検討に本解析は有効である。

図2　ギャップ部磁束密度分布

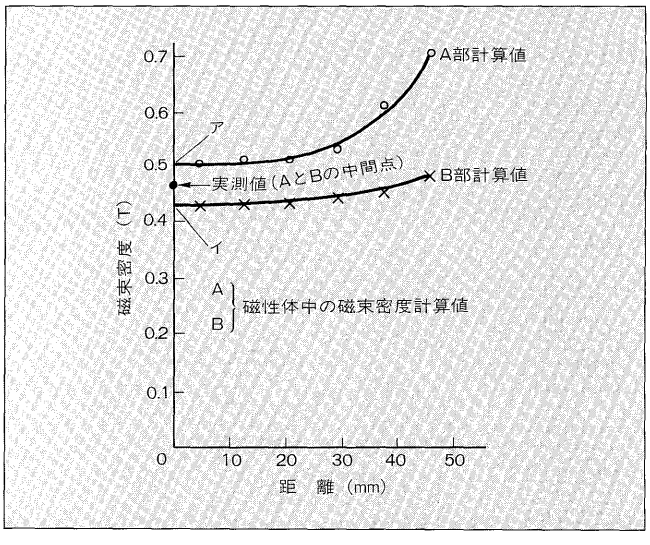
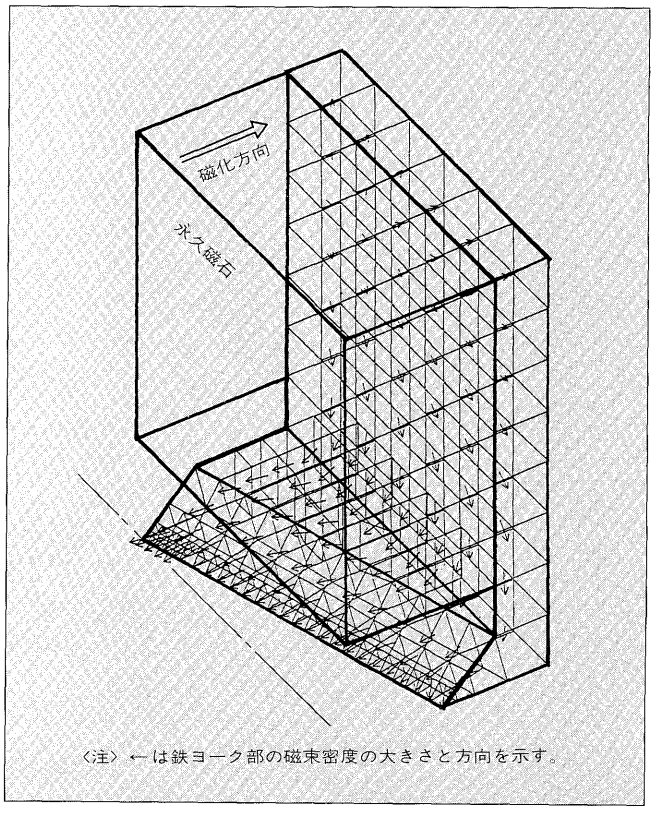


図3　磁気記憶媒体の消磁磁石の磁界分布



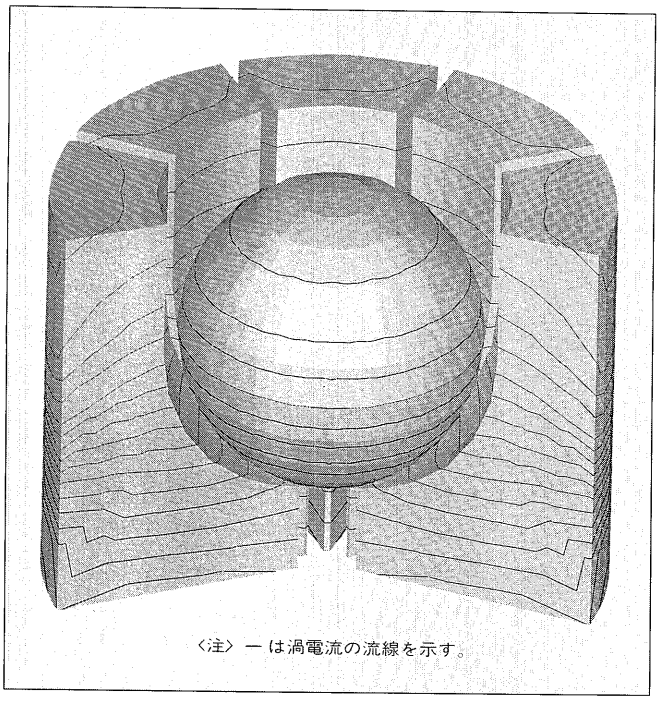
〈注〉←は鉄ヨーク部の磁束密度の大きさと方向を示す。

4 渦電流解析

4.1 解析法の概要

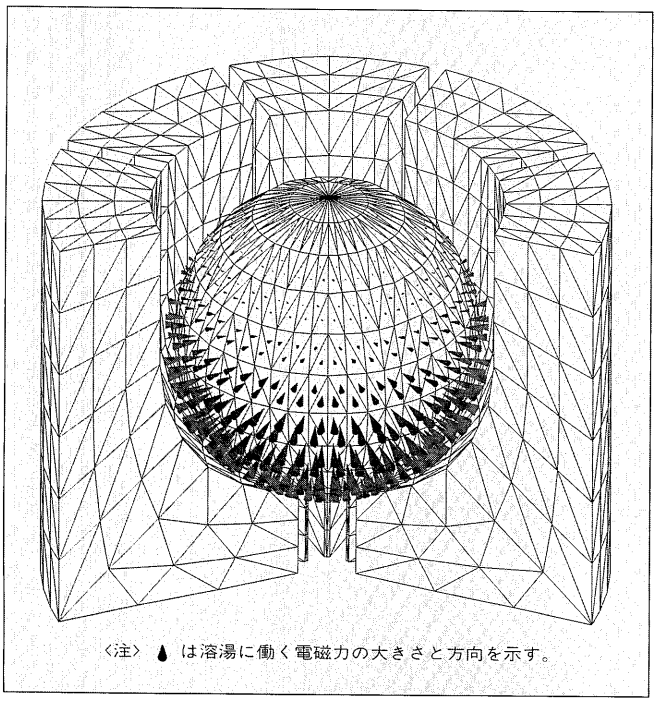
交流磁界内での導体中の渦電流は，表皮効果とよばれる現象により，導体の表面に集中する。電気ベクトルポテンシャル法は，導体表面に表皮厚さの薄板導体を定義する。薄板導体としては，渦電流がその厚み方向の成分をもたない，すなわち導体表面に平行な成分だけとして近似する。渦電流を決める微分方程式を導体表面上の二次元有限要素法で離散化し，渦電流の起電力となる磁束の影響を積分項で表す方法[6]である。本方法では，電気ベクトルポテンシャルは薄板要素の直交成分だけが未知数となるからスカラ量となり，記憶容量，計算時間の面からも有利である。

図4 浮揚溶解装置の渦電流分布



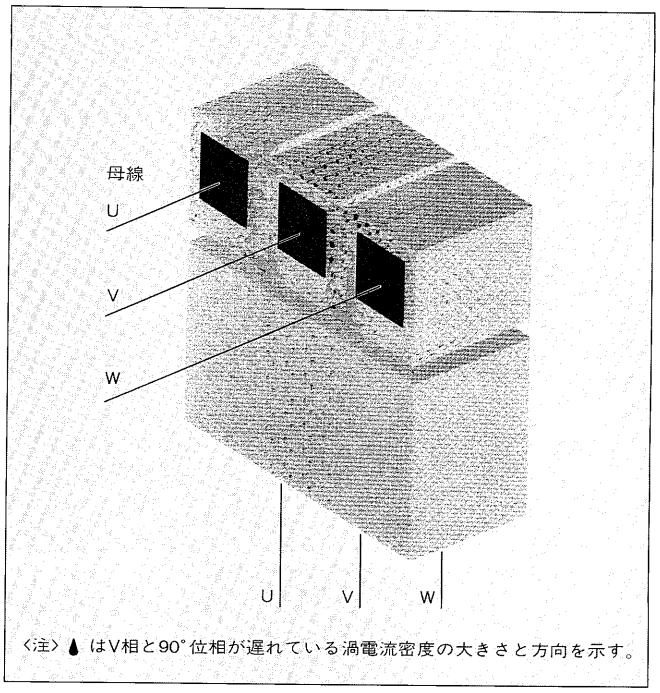
〈注〉 ー は渦電流の流線を示す。

図5 浮揚溶解装置の電磁力分布



〈注〉 ▲ は溶湯に働く電磁力の大きさと方向を示す。

図6 変圧器リード引出部渦電流分布



〈注〉 ▲ はV相と90°位相が遅れている渦電流密度の大きさと方向を示す。

4.2 適用例

浮揚溶解装置の渦電流解析[7]を**図4**に示す。浮揚溶解装置は高周波インバータ電源から大電流をコイルに通電し，コイル内部の銅るつぼと被溶解物に渦電流を誘起させ，これらの電磁反発力で被溶解物を重力に逆らって浮揚させつつ溶解する新しい溶解装置である。**図5**に電磁力分布を示す。この解析では構造の対称性を考慮して，係数マトリックスはるつぼの一つのセグメントの半分の領域で計算した。この工夫により全要素数は4,000であるが，ワークステーションで十分計算できる。

変圧器リード引出部の渦電流計算例を**図6**に示す。三相交流のリードが引出箱を貫通しており，渦電流解析により局部加熱の同定が可能となった。

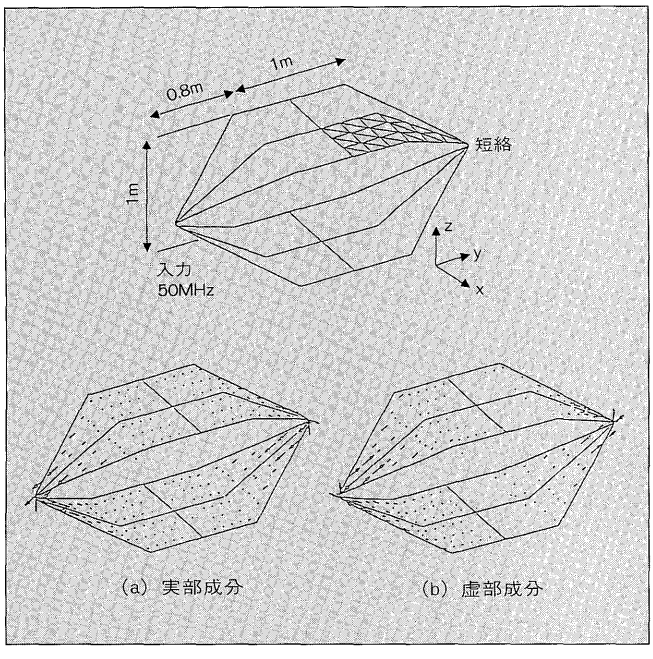
5 電磁散乱問題

5.1 解析法の概要

アンテナなどの電磁散乱問題は，モーメント法により解析できる。アンテナが細い場合はワイヤ法[8]で，板状の場合はパッチ法[8]で扱われる。モーメント法はRayleigh-Ritzの変分法に基づいて，アンテナ上の電流を基本関数で近似して基礎方程式に代入し，その残差に重み関数を掛けて全領域で積分して，その重み付けした残差が最小になるように電流分布を求める方法である。

本解析で採用したポイントマッチング法は精度を考慮し，重み関数としてインパルス関数，基本関数として矩形（くけい）パルス関数を採用した。結果として，インピーダン

図7　過渡電磁ノイズ試験用アンテナの電流分布



スマトリックスと電圧マトリックスが得られ，アンテナ上の電流分布が直接求まる。

インピーダンス Z_L が節点 n に追加装荷された場合は係数マトリックスの n 番目の対角項の自己インピーダンスに Z_L を加えることにより考慮できる。

5.2　適用例

EMC（Electromagnetic Compatibility）は電子機器の縮小化に伴うノイズによる誤動作の点から重要な問題である。**図7**に過渡電磁ノイズ試験用アンテナの解析結果[9]を示す。板状の上下2面の構成となっており，パッチ法で解析した。これにより，負荷抵抗による共振特性[10]とアンテナ上の電流分布が明らかとなった。

6　あとがき

本稿では富士電機の積分方程式による三次元磁界解析法およびその適用例について述べた。シミュレーションによれば現象を可視的にかつ定性的に把握でき，製品の構成，寸法の最適化検討も可能でその果たす役割はますます大きくなっている。その場合，解析法を理解したうえでの境界条件など解析モデルの設定も正しい計算には不可欠となる。

今後，電磁界とその他の解析法，例えば流れ解析との連成問題についての解析法を確立していく。また，種々の問題への適用により，モデル設定を含めた解析技術の高度化を図っていきたい。

最後に，ソフトウェア開発にあたり適切なご教示，ご指導をいただいている福山大学工学部坪井始教授に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

(1)　松浦清ほか：抵抗場の電界計算，電気4学会連合大会，No. 1-6（1979）
(2)　山名正樹ほか：交番界有限要素法での最適自動分割法，電気学会全国大会講演論文集，No.707（1985）
(3)　米沢栄一ほか：磁界解析の回転機への応用，富士時報，Vol.66，No.4，p.249-252（1993）
(4)　山名正樹ほか：磁気モーメント法による三次元磁界計算，電気学会全国大会講演論文集，No.738（1986）
(5)　武達男ほか：磁気モーメント法による非線形を用いた三次元磁界計算，電気学会全国大会講演論文集，No.734（1987）
(6)　坪井始ほか：ソース電流を考慮した薄板導体の渦電流解析，電気学会論文誌A，Vol.110，No.9（1990）
(7)　坪井始ほか：磁気浮上溶解の三次元渦電流解析，電気学会全国大会講演論文集，No.852（1992）
(8)　坪井始ほか：モーメント法によるMRI用RFアンテナの電磁界解析，電子情報通信学会，No.MBE87-27（1987）
(9)　Analoui，M. et al.：Numerical Analysis of Antenna by a Surface Patch Modelling，IEEE Trans. Magn. Vol.26，No.2，p.905-908（1990）
(10)　四蔵達之ほか：パッチモデルによるストリップラインアンテナの解析，電気学会全国大会講演論文集，No.1403（1993）

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。