

## 特集

コンピュータの飛躍的性能向上及びコストダウンはシミュレーション技術に革命をもたらしたか？

## 渦電流探傷シミュレーションとコンピュータの能力向上

Progress of computers and its effects to simulation of eddy current testing

黄 皓宇

(東北大学)

高木 敏行

(東北大学)

Haoyu HUANG

Member

Toshiyuki TAKAGI

Member

*Key Words:* Eddy current testing, numerical analysis, forward problem, inverse problem.

## 1 はじめに

発電用原子力プラントの蒸気発生器の伝熱管における供用期間中検査では、電磁誘導現象を利用した非破壊検査手法の一つである渦電流探傷試験 (ECT) が採用されている。原子力プラントの健全性を確保するために、より高精度な渦電流検査手法の開発が要求され、検査手法、信号処理法及び数値解析手法などの研究開発が行われてきた。渦電流探傷試験は電磁誘導現象を原理としているため、モデリングには渦電流解析、特に、工学的観点から有限要素法 (FEM) や境界要素法 (BEM)、及びこれらの併用法による解析が有効である。ECT 数値解析が実施されるようになった当初は、計算機性能の制約、未成熟な数値解析技術により、二次元薄板近似モデルや三次元軸対称モデルに有限要素法を適用する手段が多く用いられていた [1][2]。このような数値解析により欠陥の大きさとその検出信号との関係、プローブの検出性能などがある程度評価されたが、実際の検査を想定した詳細な検討は形状に関する制限から不可能であった。

しかし計算機の大幅な性能向上を背景とした近年の電磁場解析技術の進展に伴い、新しい順解析及び逆解析技術の開発が進められた。なお、ここで順問題解析とは数値解析によって与えられた欠陥に対して、その探傷信号を予測することであり、逆問題解析とは探傷信号より欠陥を推定することをいう。一般に逆問題解析は順問題解析に比べ多くの計算機資源を要する。現在に至っては、三次元渦電流解析に基づく欠陥検出信号の予測、又はプローブの設計支援などが計算記憶容量の観点からは可能となった [3]-[5]。高速な信号予測アルゴリズムによって、順解析の必要時間も大幅に短

縮され、従来不可能とされた逆解析も実用的な CPU 時間内で解析できるようになった [6]-[8]。

本解説では、計算機のパフォーマンス向上を背景とする渦電流探傷シミュレーション技術の進展について概観し、渦電流探傷の数値解析技術の現状を把握し、今後の動向を探る。以下次節において計算機の発展についてのべ、第 3 節において数値解析による ECT の順・逆問題解析の近年の目覚ましい進展について解説する。

## 2 コンピュータの発展

計算機技術は急速に発達しており、スーパーコンピュータの計算能力も年々向上している。最新 LINPACK ベンチマーク (2001 年 6 月号)[9]によると、現在世界で最も高速な計算機は ASCI White (SP Power3 375MHz, 米国 IBM) であり、8192 個 CPU を持ち、計算能力は 7226GFlops に至る。また、日本にある最高速計算機は東京大学の SR8000/MPP (日立) の 1709GFlops で、世界第 5 位である。一方、近年汎用マイクロプロセッサの急速な高性能化により、それらを演算要素としたスカラー型並列計算機がローエンドのスーパーコンピュータとして急速に普及しており、スーパーコンピュータの形態が多様化してきている。また、スーパーコンピュータの絶対性能の向上、価格性能比の向上は、スーパーコンピュータの利用方法にも影響を与えつつある。

木下ら [10]によると、過去 10 年間のベクトルコンピュータの性能向上は 10 倍程度に過ぎないのに対して、マイクロコンピュータの性能は 100 倍程度向上した。激しい技術競争の結果として、この 10 年間でマイクロコンピュータの性能がベクトルコンピュータの性能にかなり近づいたといつてよい。一番身近な Intel

Chip ベース・デスクトップパソコンの標準装備について Table 1 に示したが、大幅に性能が向上していることが分かる。初期のベクトル型スーパーコンピュータ Cray-1 は理論性能が 80MFlops であったが、現在のデスクトップパソコンの上位機種はそれに優る性能を持つに至っている。

Table 1 Desktop PC (Intel Chips) over time.

Year	CPU Released	Standard Memory	Hard Disk	OS
2000	PIII 1GHz	128MB	20GB	Windows 2000
1999	PIII 450MHz	64MB	10GB	Windows 98
1998	PII 333MHz	64MB	5GB	Windows 98
1997	PII 300MHz	32MB	2GB	Windows 95
1996	Pentium 200MHz	32MB	1GB	Windows 95
1995	Pentium 180MHz	32MB	512MB	Windows 95
1994	Pentium 100MHz	16MB	256MB	Windows 3.0
1993	Pentium 66MHz	16MB	128MB	MS DOS 6.0
1991	80486 DX/4 100MHz	4MB	64MB	Windows 3.0
1989	80486 DX 25MHz	1MB	20MB	MS DOS 4.0
1985	80386 DX	640KB	10MB	MS DOS 3.2

数値シミュレーションの問題をコンピュータの演算速度に基づいて分類整理して検討する。主要な数値シミュレーションの問題の核心部分では、何らかの演算を繰り返す行うことが多い。例えば、それを FORTRAN プログラムで表現すれば、DO ループで記述される。データの長さを  $N$  とすれば、総和や表計算の計算量は  $N$  となる。このような問題をコンピュータで処理するならば、KFlops 程度の演算速度をもてば、 $N=1000$  でも 1 秒で終わる。つまり総和や表計算問題は KFlops マシンで十分である。

連立方程式や固有値の問題では、未知数あるいは固有ベクトルの要素数を  $N$  とするとき、 $N^3$  の規模の計算量となる。通常は係数行列を  $N \times N$  の密行列ではなく、帯行列や疎行列とするように工夫するために完全な立方体計算となることは少ないのではあるが、例

えば  $N=1000$  として KFlops マシンでそれを処理しようとすれば 1M 秒、約 300 時間を必要とすることになる。MFlops マシンでも 1 K 秒程度の計算となる。三次元構造物を  $10 \times 10 \times 10$  の格子に分割するだけでも、各格子点に対応する未知数は 1000 になる。問題が非線形、非定常であってさらに多くの格子網と物理量を必要とする場合には、しかもこの規模の計算を繰り返すおこなう場合には、それを処理するには GFlops マシンでなければ不可能である。

ECT シミュレーションにおける計算処理の多くは高速な計算速度及び計算記憶容量を必要とする。従来は、計算手法の研究開発を効率的に行い、あるいは計算を実際的な時間内に十分な規模で行うために、スーパーコンピュータシステムが必要とされてきた。しかし、計算機の発展により、現在 ECT シミュレーションに使われているコンピュータの多くはマイクロコンピュータ(マイクロ・プロセッサ・ベースのワークステーション、デスクトップパソコン等)である。次節に示すように、ある程度の計算精度を有する ECT シミュレーションでは 100MFlops 程度の計算能力が要求されている。この能力を満たすマイクロコンピュータが存在しなかった時期は数値計算手法の進展も速くはなかった。また、現在使われている計算機の能力はすでに十分であり、ECT 数値シミュレーションの今後の発展は解析手法の進展に依存すると考える。

### 3 渦電流解析の進歩

#### 3.1 解析規模から見た ECT 数値解析の進歩

最近 10 年間の ECT 数値解析の進展を Table 2 に示し、解析可能な問題、評価、次元数、要素数/未知数及び計算資源を比較した。ここでの評価はあくまでも著者らの主観による評価である。ECT 数値解析が実施されるようになった当初は、計算機性能の制約、数値解析技術の未成熟などの理由により、二次元薄板近似モデルや三次元軸対称モデルが適用された [11][13][14]。また、計算規模を小さくするため、境界要素法及び積分方程式法 (BIM) が多く使われていた。数値解析により欠陥の大きさとその検出信号の関係、プローブの検出性能などが評価されたが、実際の検査を想定した詳細な検討は形状に関する制限から不可能であった。

1990 年頃に、最初の三次元有限要素解析の ECT 問題への適用例がある [12]。分割が粗いため、定性的な理解のためには問題はないものの、定量的には十分な計算精度を得ることができていなかった。この時代は

Table 2 Progress of numerical simulation of eddy current testing by scale of the problem.

Year	Problem	Evaluation	Dimension	Elem. /Unknowns	Time(s)	Memory (MB)	Computer/Speed	Ref.
Now	Forward	◎	3D	61,200 / N/A	4,500	256	Sun Ultra 10 300/100MFlops	26
	Inverse	◎	3D	N/A / N/A	1.29 (3,600)	20	Gateway-PentiumII 400M/295MFlops	27
1999- 1998	Forward	◎	3D	22,176 / 73,669	1,302	200	VT-Alpha 533 /166MFlops	24
	Inverse	○	3D	6,000 / 22,812	6,000 (460,000)	3(38)	SUN Ultra SPARC 300/ 100MFlops	25
1997- 1996	Forward	◎	3D	15,900 / 50,706	956	N/A	Hitachi S-3800 182/6431MFlops	22
	Inverse	○	3D	3,380 / 11,645	270,000	19	VT-Alpha 500 /141MFlops	23
1995- 1994	Forward	○	3D	7,680 / 21,552	290	40	VT-Alpha 500 /141MFlops	17
	Inverse	△	2D,3D	512 / N/A	NA	N/A	N/A	20,21
1993- 1992	Forward	△	3D	N/A / 104,117	2,460	N/A	HP Apollo730 /49MFlops	15
	Inverse	△	2D	N/A	NA	N/A	N/A	16
1991- 1990	Forward	△	3D	240 / 2,238	392	108	Hitachi S-820 /300MFlops	12
	Inverse	N/A						
Before 1990	Forward	△	Axis.	N/A	N/A	N/A	N/A	11
	Inverse	N/A						

◎ Very Good ○ Good △ Normal

\*Computing time and memory in ( ) is the ones for the preparation of database.

\*\*Data mainly obtained from COMPUMAG, E'NDE and QNDE Conferences.

まだスーパーコンピュータが ECT 数値解析で用いられることもあったが、計算能力 100MFlops があっても一人のユーザーが使用できる資源はその一部にしか過ぎない。その後、計算機の性能向上に伴い、有限要素法が様々な分野の大規模なシミュレーションに用いられるようになってきた。しかし、一般にスーパーコンピュータを占有することは不可能であり、計算時間も数時間以内で終わることが望ましいので、要素分割には制限があり、数値解析精度には問題が残っていた。

1994 年以降、マイクロコンピュータの性能がベクトルコンピュータの性能に近づいて 100MFlops 台に乗った。その影響を受け、ECT 数値解析にマイクロコンピュータを使う傾向が現れた。計算機能力の向上と共に新たな解析手法が ECT に適用され、高い精度の信号予測が可能となり、実験結果に基づく検証も行われてきた [17]。日本 AEM 学会では、「ECT 検査技術の高度化研究開発分科会」を設置し、ベンチマーク

問題を提案した [18][19]。分科会のみでなく国際協力の下で研究も進め、電磁非破壊検査に関する国際ワークショップが 1995 年以降毎年開催されている。この時点では、高精度な三次元渦電流解析に基づく欠陥検出信号の予測、又はプローブの設計支援などが可能となっていた [24][26]。

有限要素法などによる順問題モデリングと最適化手法による信号からき裂形状を同定する手法がある。一般に、同定には多くの計算時間が費やされる。そのため、当初は逆問題が余り取り扱われなかった。計算機の発展により、1994 年前後によく逆問題が取り上げられ始められた。開発された高精度な三次元順問題解析手法を用い、放電加工による人工き裂 (EDM き裂) の形状推定が盛んに行われた [20][21][23]。

逆解析に残存する課題は計算時間である。Badics ら [6] や Chen ら [7] により高速な信号予測アルゴリズムが開発されている。これまで、渦電流解析を用いた信

号予測では有限要素もしくは境界要素で構成される問題領域全体を計算する必要があった。き裂による信号の変化分を求めるにはき裂部の物理量のみから求められるため [8], 高速アルゴリズム [6][7] では問題領域はき裂とその周辺の局所的な領域に縮退される。詳細に要素分割した従来法と同じ精度でかつ高速度で信号予測が可能となった。高速な信号予測アルゴリズムによって、従来不可能とされた ECT 逆問題も実用的な時間内で解析できるようになった [25]。また、ニューラルネットワークを用いた欠陥形状の再構成法も開発されてきた。教師信号データベースの準備やニューラルネットワークの学習は時間を要するが、学習終了後のネットワークを使う際には普通のデスクトップパソコンでわずか 1~2 秒で欠陥形状を再構成することができる [27]。

このように、ECT 数値解析の対象は二次元から三次元、順問題から逆問題、要素分割は数百個から数万個へと発展した。ECT シミュレーションの解析能力すなわち解析精度及び速度がともに向上したことは計算機の発展に大きく関係している。

### 3.2 解析手法から見た ECT 数値解析の進歩

#### 3.2.1 順問題解析

ECT は電磁誘導現象を原理としているため、渦電流解析が適用できる。電磁界解析手法の妥当性や精度の確認には、厳密解との比較が用いられるが、厳密解を持つモデルは単純な形状に限定される。初期の数値解析ではこのようなモデルとして軸対称モデルや二次元薄板モデルが多く用いられている。しかし、実際の検査を想定した詳細な検討は不可能であった。例えば、リモートフィールド ECT の原理を解明するため、軸対称解析 [11][14] が行われた。90 年代初期、三次元数値解析は未熟であり、精度的にも軸対称に及ばない状況であった。一例として、電流ベクトルポテンシャル  $T$  法 [12] が挙げられる。空気領域を取り扱わないが、細かい分割はまだ記憶容量の制限があり、解析精度は十分ではなかった。過去 10 年間 ECT 数値解析手法の進展を Table 3 に示し、解析手法の面からまとめた。

加圧水型原子力プラントの蒸気発生器伝熱管を対象とした ECT 数値解析では実機に近いモデルが望まれ、これに応えるベンチマーク問題が E'NDE ワークショップにおいて提案された。このベンチマーク問題では、実際の伝熱管に放電加工によりき裂を設け、精密探傷用

のパンケーキコイルを用いて得られた測定結果が比較用のため提供されている。これらの問題に適用された最初の三次元解析は  $A-\phi$  法に基づく節点要素の有限要素法、有限要素-境界要素法、 $B-E$  法による節点要素の境界要素法等 [17] である。計算機の大幅な性能向上を背景として、ECT 数値解析技術の開発が進められてきた。Fig.1 に示したように、計算値は実験結果と良く一致していることにより、三次元 ECT 数値解析の精度が確認された。

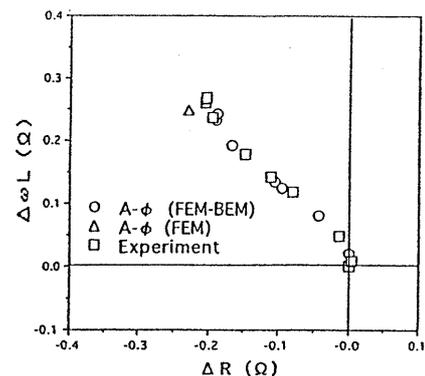


Fig. 1 Impedance change of benchmark step2. ID40%, 300 kHz, Lift-off 0.5 mm. (by Reference 17)

有限要素法では従来からベクトル変数の 3 成分を要素の節点に定義する節点要素が用いられてきた。しかし、記憶容量、計算時間及び精度の面から改良が求められてきた。その一つとして提案されたのが、要素の各辺において、辺に平行なベクトル変数の成分を未知変数として定義する辺要素 [35] である。いずれの要素を用いても最終的に得られる連立方程式は大規模となる。この解法にはガウス消去法のような直接法が用いられてきた。近年、記憶容量及び計算時間の面から直接法の代わりに ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) 法が用いられるようになった [5][29]。Fukutomi ら [24] は初めて三次元リモートフィールド ECT の解析を実施した。リモートフィールド ECT の数値解析は非常に高い精度が要求されるが、分割方法、コイルの移動等を工夫して、検証された軸対称モデルの結果と良く一致することを示した (Fig.2)。

有限要素法 [20][28] に基づいた ECT の数値モデリングでは空間の要素分割が不要である境界要素法 [13][16] と異なり、電流源となる励磁コイル及び検査対象物となる導体の他にこれらを取り囲む空気領域の要素分割が必要となる。実際の検査では、センサコイ

Table 3 Numerical analysis methods of ECT forward problems.

Year	Dimension	Variable	Discretion Method	Fast Simulator	Notes	Ref.
2001	3D	$A_r$	Edge, FEM	○	Natural Crack	39
2000	3D	$E$	Edge, FEM-BEM		TRIFOU	26
	3D	$A-\phi$	Nodal, FEM-BEM	○	Magnetic Noise Source	34
1999	3D	$A-\phi$	Nodal, FEM		3D Remote Filed	24
	3D	$A_r$	Edge, FEM	○	Magnetic Noise Source	25
1998	3D	$T$	BIM		CARIDDI	31
	3D	$A-\phi$	Nodal, FEM-BEM	○		7,33
	3D	$A_r$	Edge, FEM	○		32
1997	3D	$A-\phi$	Nodal, FEM, FEM-BEM			29,30
	3D	$E-H$	Nodal, FEM	○		6,28
1995	3D	$E-H$	Nodal, FEM			20
1994	3D	$A-\phi$	Nodal, FEM, FEM-BEM			17
	2D	$B-E$	Nodal, BEM			16
1992	Axis.	$A$	Nodal, FEM		Remote Filed	14
1990	3D	$T$	Nodal, FEM			12
	2D	$A-\phi$	Nodal, BEM			13
Before 1990	Axis.	$A$	Nodal, FEM		Remote Filed	11

\*Data mainly obtained from COMPUMAG, E'NDE and QNDE Conferences.

\*\* $A$ :Magnetic Vector Potential  $A_r$ :Reduced Magnetic Vector Potential

$T$ :Electric Vector Potential  $\phi$ :Electric Scalar Potential

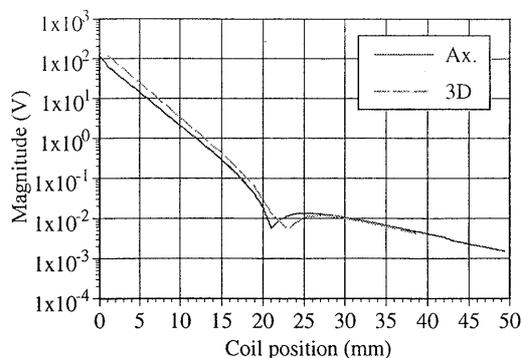


Fig. 2 RFEC signals as a function of the distance between the exciter and detector. (by reference 24)

ルは被試験体上を走査する。これを数値解析で模擬するため、測定点ごとに異なる要素分割を用意することは渦電流信号の数値解析作業において多大な労力を要求する。そこでコイルの要素分割が不要な変形磁気ベクトルポテンシャルを用いる方法が提案された。辺要素を用いた変形磁気ベクトルポテンシャル法 [29] により、複雑なき裂形状を考慮する必要がなく、前処理を容易にした。解析に要する計算時間の短縮には至っていない。

一方, Badics ら [6][28] や Chen ら [7][33] は解析

領域を欠陥とその周辺の局所的な領域のみとする高速解析手法を提案した。これらの方法は  $A-\phi$  法による節点要素の有限要素-境界要素法及び  $E-H$  法による節点要素の境界要素法に基づいたものである。これより探傷信号を求めるための時間は従来の数十分の一から数百分の一まで短縮され、現実的な時間のうちに欠陥形状の再構成を行うことが可能となった。また, Huang らは同様の手法を磁気ベクトルポテンシャル法と辺要素を用いた解析に適用し [32], 支持板部や拡管境界部などの外部雑音源下での高速解法を確立させた [36][37]。Fig.3 に示したように、これらの高速解法も従来法と同じ計算精度を持つ。

近年では、これまでのいわゆる人工欠陥から、自然欠陥へと研究対象が変わりつつある。1999 年には応力腐食割れ (Stress Corrosion Crack, SCC) や粒界内割れ (Inter Granular Attack, IGA) を対象としたラウンドロビンテスト [38] が実施され、各国の研究機関によって測定及び順・逆解析 [39] が行われたということは、大きく注目されるべきものである。計算精度や速度や適用性などの観点から見ると、ECT 数値解析手法はこの十年間で ECT 研究開発の有力な手段の一つとして確立したとってよい [40]。計算機の発展

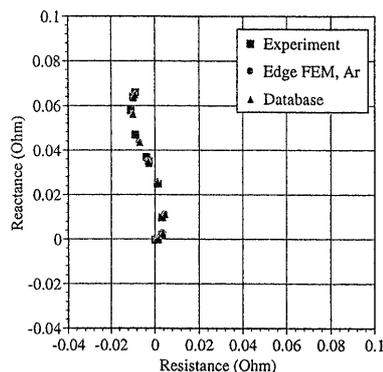


Fig. 3 Impedance change of benchmark step3. OD60%, 150 kHz, Lift-off 0.5 mm, where the database method is the fast simulator method. (by Reference 32)

によって、新たな手法を予め検証することができ、実際の問題に応用可能となった。

### 3.2.2 逆問題解析

ECT 逆問題は探傷信号より欠陥を推定する問題をいう。逆解析では、開発された順問題モデルが何らかの形で使用されることが多い。主な三種類の逆解析法を以下に示す [41]。

その一つであるパラメータ推定に基づく欠陥形状の再構成法は、順解析のモデルを逆解析の実行時にオンラインで使用して、欠陥形状のパラメータの最適化問題として逆問題が解かれる。ECT 逆問題は不適切性もしくは不安定性と呼ばれる特徴を備えている。これだけでも逆問題解析は順問題解析に比べ著しく困難なものであるが、さらに、実際の ECT 逆問題解析を考えた場合、計算時間という大きな問題があると言わざるを得ない。順問題解析の繰り返し計算が必要であり、ECT 逆問題は当初大型計算機などを用いる必要があると考えられていた。

計算時間の問題を解決するため、さきに示した高速順問題解析手法が開発され、より短い時間で欠陥を再構成することが可能となった [25][32][39]。しかし、依然として検査時におけるリアルタイムの欠陥再構成への適用は困難といえる。また、良好な収束を得るためには適当な初期値を与えることも重要である。真の欠陥形状と大きく異なる初期推定形状を用いる場合、収束が極めて遅いか、もしくは全くしないという事態を招く可能性すらある。

一方、ニューラルネットワークを用いた欠陥形状の再構成法がある [27][42][43]。この方法では、逆解析

での非線形写像をニューラルネットワークを学習させることにより構築していく。本手法の優れた特徴の一つは、再構成に要する計算時間の短さである。ニューラルネットワークを用いた逆解析には反復計算を行う必要がないため、ほぼ瞬時に再構成することが可能である。一方、学習用のデータベースの構築には数日程度の計算を要し、またネットワークの学習及び構造の最適化にも半日程度は必要である。しかし学習はオフライン時に行うことができるため、実用上問題とはならないと考えられる。また、雑音に対してロバストであるという点も、注目すべき特徴である。

現在 ECT 逆問題では、放電加工による人工欠陥であればかなり複雑な形状のものであっても逆解析が可能となり、又は自然欠陥の形状再構成もある程度可能となった [39]。現在のところ最も大きな問題と見られているのが複数の欠陥が近接して存在する場合の取扱いである。これまでの欠陥形状の逆解析においては、多くのものは単独の欠陥を対象とするか、もしくは少なくとも欠陥数をあらかじめ既知として解析を行っており、実際に数と形状の両者を未知として解析を行った例が少ない。

複数欠陥の問題を解決するには、進化論的計算手法 (Genetic Algorithm, GA; Genetic Programming, GP 等) を用いた手法に着目すべきである [44][45]。現場での通常の計算機資源による速やかな計算処理が必要であり、モデルに基づくパラメータ推定をそのまま利用することは現実的ではない。またモデルに基づく非破壊評価では、検査環境の厳密な数学的記述が必要であるが、現場での作業環境は予測不可能であり、観測における数学的記述にはあいまいさが介入せざるを得ない。このため、熟練者の持つ欠陥形状と ECT 検査信号との関係に関する知識の獲得を目指し、ファジィ推論への特徴量抽出に GP を適用し、その情報を用いることによりファジィ推論機構の学習という方法が提案された [45]。誤差に対するロバストな推論機構であり、現実の検査環境下におけるあいまいさを克服することを目的としている。この手法は今後の展開が待たされるが、問題の制約条件に柔軟に対応できる、いわばソフトな境界条件ののちで問題の可解性があり、今後の研究の進展が期待される。

計算機の発展によって、ECT 逆問題計算が初めて可能となった。また計算時間などの問題がいくつか残っており、特に GA, GP などの方法の計算量は極めて多いと考える。逆問題解析はまだ実験室レベルである

といわざると得ない。しかし、10年前には順問題解析が未熟であった頃、いろいろな解析手法が考案され始めた。その後、計算機の発展により検証・選択されて、現在の完成度の高い解析手法に至った。このことを考えると、単純に計算機の発展に頼るのではなく、新たな逆問題解析手法を開発すべき時期ではないかと考える。

#### 4 終わりに

本稿においては、渦電流シミュレーションとコンピュータの能力向上を対象として、最近10年間の進展について概説した。構造物の安全性・信頼性を確実に担保するために、欠陥の形状を定量的に決める必要がある。原子炉構造物においてはそれが特に強く要請されている。年に一度の定期検査が実施されているが、その中で解析による定量的な評価はまだ適用されるに至っていない。逆解析手法の開発及び計算機の進歩を待たねばならない。

非破壊検査は欠陥寸法情報を提供し、余寿命評価が可能な破壊力学と結びついて初めてその有用性を発揮するものである。構造物の信頼性の面からも逆解析の進展に強く期待したい。

#### 参考文献

- [1] R.E. Beissner, J.A.G. Temple, Calculation of Eddy Current Fields for Coils of Arbitrary Shape, *Review of Progress in QNDE*, Vol.9A, (1990), pp.257-264.
- [2] R. Becker, K. Betzold, K.D. Boness, R. Collins, C.C. Holt, J. Simkin, The Modeling of Electrical Current NDT Methods - Its Application to Weld Testing (Part 1), *British Journal of NDT*, (1986), pp.286-294.
- [3] 福富広幸・高木敏行・谷順二, 渦流探傷試験におけるコイルとき裂のメッシュレス有限要素解析法, 日本機械学会論文集(A編), 64, 622 (1998), pp.1541-1547.
- [4] 小島史男・岡本十蔵・大野泰彦, 有限要素境界要素併用法を用いた電磁場逆解析による蒸気発生器細管材料のき裂形状推定に関する計算法, 日本機械学会論文集(C編), 63, 612 (1997), pp.2650-2656.
- [5] 福富広幸・高木敏行・谷順二・小島史男, 辺要素有限要素法と Trust Region 法を用いた渦流探傷試験におけるき裂深さの推定法, 非破壊検査, 47, 10 (1998), pp.754-762.
- [6] Z. Badics, Y. Matsumoto, S. Kojima, Y. Usui, K. Aoki, F. Nakayasu and A. Kurokawa, Rapid Flaw Reconstruction Scheme for 3D Inverse Problem in Eddy Current NDE, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, (1997), pp.303-309.
- [7] Z. Chen, K. Miya and M. Kurokawa, A Knowledge Based Approach for Fast Computation of ECT Signals, Non-linear Electromagnetic Systems, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, 13, (1998), pp.209-212.
- [8] S.J. Norton and J. R. Bowler, Theory of Eddy Current Inversion, *Journal of Applied Physics*, 73, 2 (1993), pp.501-511.
- [9] Performance of Various Computers using Standard Linear Equations Software, An up-to-date version: <http://www.netlib.org/benchmark/performance.ps>
- [10] 木下利博, 科学技術計算における近年のコンピュータ性能向上, 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.3 (2001), pp.295-300.
- [11] W. Lord, Y.S. Sun, S.S. Udpa and S. Nath, A Finite Element Study of the Remote Field Eddy Current Phenomenon, *IEEE Tran. Magnetics*, Vol.24, No.1 (1988), pp.435-438.
- [12] T. Takagi, M. Hashimoto, S. Arita, S. Norimatsu, T. Sugiura and K. Miya, Experimental Verification of 3D Eddy Current Analysis Code Using T-Method, *IEEE Tran. Magnetics*, Vol.26, No.2 (1990), pp.474-477.
- [13] M. Enkizono and S. Nagata, Simulation Analysis of Magnetic Sensor for Nondestructive Testing by Boundary Element Method, *IEEE Tran. Magnetics*, Vol.26, No.2 (1990), pp.877-880.
- [14] M. Chen, Y. Sun, W. Lord, S. Nath and Y.K. Shin, Pulse RFEC Probe Response, *IEEE Tran. Magnetics*, Vol.28, No.2 (1992), pp.1430-1433.
- [15] Z. Badics, H. Komatsu, Y. Matsumoto, K. Aoki, F. Nakayasu and K. Miya, A Thin Sheet Finite Element Crack Model in Eddy Current NDE, *IEEE Tran. Magnetics*, Vol.30, No.5 (1994), pp.3080-3083.
- [16] H. Lee, H. Jung and S. Hahn, An Inverse Analysis for Crack Identification in Eddy Current NDT of Tube, *IEEE Tran. Magnetics*, Vol.30, No.5 (1994), pp.3403-3406.
- [17] M. Hashimoto, H. Fukutomi, T. Takagi, T. Serizawa, M. Kurokawa, K. Miya, H. Tsuboi, M. Tanaka, Y. Harada, E. Okano and R. Murakami, Experiment and Numerical Analysis of Benchmark Tests for ECT, *Review of Progress in QNDE*, Vol.13A, (1994), pp.287-294.
- [18] T. Takagi, H. Fukutomi, M. Hashimoto, Y. Yoshida, K. Miya, H. Tsuboi, Y. Harada and J. Shimone, ECT Research Activities in JSAEM - Benchmark Models of Eddy Current Testing for Steam Generator Tube - (Part 1), *Nondestructive Testing of Materials*, (1995), pp.253-264.
- [19] M. Hashimoto, T. Takagi, H. Fukutomi, Y. Yoshida, K. Miya, H. Tsuboi, Y. Harada and J. Shimone, ECT Research Activities in JSAEM - Benchmark Models of Eddy Current Testing for

- Steam Generator Tube - (Part 2), *Nondestructive Testing of Materials*, (1995), pp.313-320.
- [20] J. Bowler, Eddy Current Inversion Using Gradient Methods, *Nondestructive Testing of Materials*, (1995), pp.31-40.
- [21] R. Pierri, G. Rubinacci and A. Tamburrino, A Numerical Algorithm for the Reconstruction of 3D Conducting Profiles Using Eddy Current Testing, *Nondestructive Testing of Materials*, (1995), pp.235-244.
- [22] T. Sakai and N. Soneda, Development of 3-D Electromagnetic Field FE Code Specialized for the Numerical Simulation of Eddy Current Testing, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, (1997), pp.23-29.
- [23] H. Fukutomi, T. Takagi, J. Tani and F. Kojima, Crack Shape Characterization in Eddy Current Testing, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(II)*, (1998), pp.305-312.
- [24] H. Fukutomi, T. Takagi and T. Aizawa, Remote Field Eddy Current Technique Applied to Steam Generator Tubes, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(III)*, (1999), pp.292-299.
- [25] H. Huang, T. Takagi and H. Fukutomi, Numerical Analysis of Eddy Current Testing for Steam Generator Tubes with a Support Plate, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(III)*, (1999), pp.217-223.
- [26] V. Bertrand, D. Lesselier and S. Mastorchio, Numerical Modeling of Eddy Current Nondestructive Evaluation with FEM-BEM TRIFOU Software in Controlled Configurations, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(IV)*, (2000), pp.32-41.
- [27] N. Yusa, W. Cheng and K. Miya, Reconstruction of the Parameters of Natural Crack Model Candidates by Using Neural Networks, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(IV)*, (2000), pp.135-142.
- [28] Z. Badics, Y. Matsumoto, S. Kojima, K. Aoki and F. Nakayasu, Effective Probe Response Calculation Using Impedance Boundary Condition in Eddy Current NDE Problems with Massive Conducting Regions Present, *IEEE Tran. Magnetics*, Vol.32, No.3 (1996), pp.737-740.
- [29] H. Fukutomi, T. Takagi, J. Tani and G. Chen, Consideration of ECT Signals of SG Tube with Copper Deposit, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, (1997), pp.79-86.
- [30] F. Kojima, Computational Method for Crack Shape Reconstruction Using Hybrid FEM-BEM Scheme Based on A- $\phi$  Method, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, (1997), pp.279-286.
- [31] R. Albanese, G. Rubinacci, A. Tamburrino, F. Villone, Reconstruction of Cracks with Integral Methods, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(II)*, (1998), pp.107-113.
- [32] H. Huang, T. Takagi, H. Fukutomi and J. Tani, Forward and Inverse Analysis of ECT Signals Based on Reduced Vector Potential Methods Using a Database, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(II)*, (1998), pp.313-321.
- [33] Z. Chen and K. Miya, Reconstruction of Crack Shapes Using a Newly Developed ECT Probe, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(II)*, (1998), pp.225-232.
- [34] W. Cheng, K. Miya and K. Demachi, Application of FEM-BEM Coupling Method to Eddy Current Testing Problems, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(IV)*, (2000), pp.17-24.
- [35] 羽野光夫, 全周波数領域に適用可能な線形三次元電磁場の有限要素法解析—理論編—, *電気学会論文誌 A*, 100, (1990), pp.570-576.
- [36] H. Huang, T. Takagi, and H. Fukutomi, Fast Signal Prediction of Noised Signals in Eddy Current Testing, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.36, No.4 (2000), pp.1719-1723.
- [37] 黄皓宇, 福富広幸, 高木敏行, ノイズを含む渦流探傷信号の高速シミュレーション, *日本機械学会論文集 (A編)*, 65巻, 638号 (1999), pp.2024-2031.
- [38] T. Takagi and K. Miya, ECT Round-robin Test for Steam Generator Tubes, *日本 AEM 学会誌*, Vol.8, No.1 (2000), pp.121-129.
- [39] H. Huang and T. Toshiyuki, ECT Signals for Round-robin Test with Differential TR Probe and their Inverse Analysis, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(V)*, (2001), pp.218-225.
- [40] 高木敏行, 遊佐訓孝, 渦電流探傷試験の数値解析, *日本 AEM 学会誌*, Vol.9, No.1 (2001), pp.48-54.
- [41] 小島史男, 遊佐訓孝, 陳振茂, 電磁非破壊評価における逆解析技術, *日本 AEM 学会誌*, Vol.9, No.1 (2001), pp.48-54.
- [42] R. Popa and k. Miya, A Data Processing and Neural Network approach for the Inverse Problem in ECT, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(II)*, (1998), pp.297-304.
- [43] P. Ramuhalli, M. Afzal, K. Hwang, S. Udpa and L. Udoa, A Feedback Neural Network Approach for Electromagnetic NDE Signal Inversion, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(IV)*, (2000), pp.1-8.
- [44] D. Ioan, M. Rebian and A. Duca, Use of Evolutionary Agents to Solve ENDE Inverse Problems, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(V)*, (2001), pp.59-66.
- [45] F. Kojima and N. Okajima, Crack Profiles Identification of Steam Generator Tubes in PWR Plants Using Database, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(V)*, (2001), pp.97-104.