

# パルス励磁渦電流探傷の三次元電磁界解析

坪井 始\* 瀬島紀夫\*\*

## Three-Dimensional Electromagnetic Field Analysis of Pulsed Eddy Current Testing

Hajime TSUBOI\* Norio SESHIMA\*\*

### ABSTRACT

Three-dimensional electromagnetic field analysis of pulsed eddy current testing by a finite element method is presented. Transient electromagnetic field analysis is performed by the Fourier transform method based on three-dimensional edge-element finite element analysis. The eddy current density and magnetic flux density distributions at each time step are obtained by the inverse Fourier transform using the computation results of frequency domain. The method was applied to the TEAM Workshop problem 27. The computation results provided good agreement with the experimental results.

キーワード：渦電流探傷、パルス励磁、渦電流解析、過渡応答解析、有限要素法

Keywords: eddy current testing, pulse excitation, eddy current analysis, transient analysis, finite element method

### 1. まえがき

電気電子機器の設計において、電磁界解析は設計ツールのひとつとして使用され、実用化されている。また、研究分野としては、計算工学 (Computational Engineering) の中で計算電磁工学といわれる分野を形成している。

非破壊検査のひとつである渦電流探傷 (ECT: Eddy Current Testing) は、導電材料の非破壊検査に実用化されている。ECT のなかでも、パルス電流を励磁コイルに通電するパルス励磁 ECT は、等価的に 1 度に多くの周波数応答の情報が得られること、励磁コイルに大きな瞬時電力が与えられることなどの利点がある。

本稿では、辺要素有限要素法を用いたパルス励磁渦電流探傷問題の電磁界解析手法とその解析結果について述べる。辺要素としては四面体要素を用い、過渡解析にはフーリエ変換法を用いている。パルス励磁渦電流探傷問題として TEAM Workshop の Problem 27 [1] を選んで解析を行い、実験結果と比較する。

### 2. 解析手法

パルス励磁の渦電流解析は、過渡応答解析を行う必要がある。ここでは、フーリエ変換法による過渡応答解析を行った [2-4]。渦電流解析手法としては辺要素を用いた三次元有限要素法を用いた。

辺要素としては、辺上に 2 つの未知数を定義する四面体要素を用いている [5]。この場合、空気中では、辺上の 2 つの未知数は従属となるので辺上の未知数は 1 つとしてい

る [6]。過渡応答解析にフーリエ変換法を用いるので、有限要素解析は周波数領域での複素解析を行った。

フーリエ変換法による過渡応答解析は、複素解析プログラムがそのまま使用でき、一度周波数領域の解析を行ってしまえば異なる入力波形 (励磁波形) に対する応答計算が容易に行えるという利点がある。また、時間刻み数の二分の一の計算回数で常に解が得られることも特徴である。一方、空間分割が粗すぎて高周波成分を再現できない場合には非物理振動が解に重畳するので適切な空間分割を行う必要がある [3]。

フーリエ変換法では、有限要素法による周波数応答解析でインパルス応答  $H(\omega)$  が求められる。ここで、 $\omega$  は角周波数 ( $f$  を周波数として、 $\omega=2\pi f$ ) である。

入力  $x(t)$  のフーリエ変換  $X(\omega)$  を求めると、

$$X(\omega) = \text{FFT}(x(t)) \quad (1)$$

周波数領域における入力が求まり、周波数領域における出力  $Y(\omega)$  が次式で計算できる。

$$Y(\omega) = X(\omega) H(\omega) \quad (2)$$

時間領域の出力  $y(t)$  は、フーリエ逆変換 IFFT によってつぎのように求められる。

$$y(t) = \text{IFFT}(Y(\omega)) \quad (3)$$

インパルス応答  $H(\omega)$  は、時間応答を求めたい物理量毎に計算し、それぞれ (2)、(3) 式によって出力が計算できる。

フーリエ変換法を用いる場合、時間領域の現象を周期現

\* 情報処理工学科、\*\* 情報処理センター

象と見なして基本周期を考える。基本周期を  $T$  とすると、これを  $N$  等分して時間刻み  $\Delta t$  が決まる。

$$\Delta t = T/N \quad (4)$$

また、基本周波数  $f_0$  は  $T$  の逆数となり、

$$f_0 = 1/T \quad (5)$$

周波数領域の解析では、 $f_0, 2f_0, \dots, (N/2)f_0$  と直流による解析を行う必要がある。フーリエ変換に高速フーリエ変換 (FFT) を使用する場合には、 $N$  として 2 のべき乗の値

を使用しなければならないため、選択範囲はそれ程狭くない。実際には、計算モデルの時定数と計算時間を考慮して  $N$  を決める。ここでは、 $N=512$  として、周波数領域の計算回数を 256 としている。

### 3. 計算モデルと計算結果

パルス励磁渦電流探傷問題として TEAM Workshop Problem 27 を選んだ。Fig. 1 に計算モデルを示す。本モデルは、アルミニウム合金にあげられたねじ穴の欠陥検査を

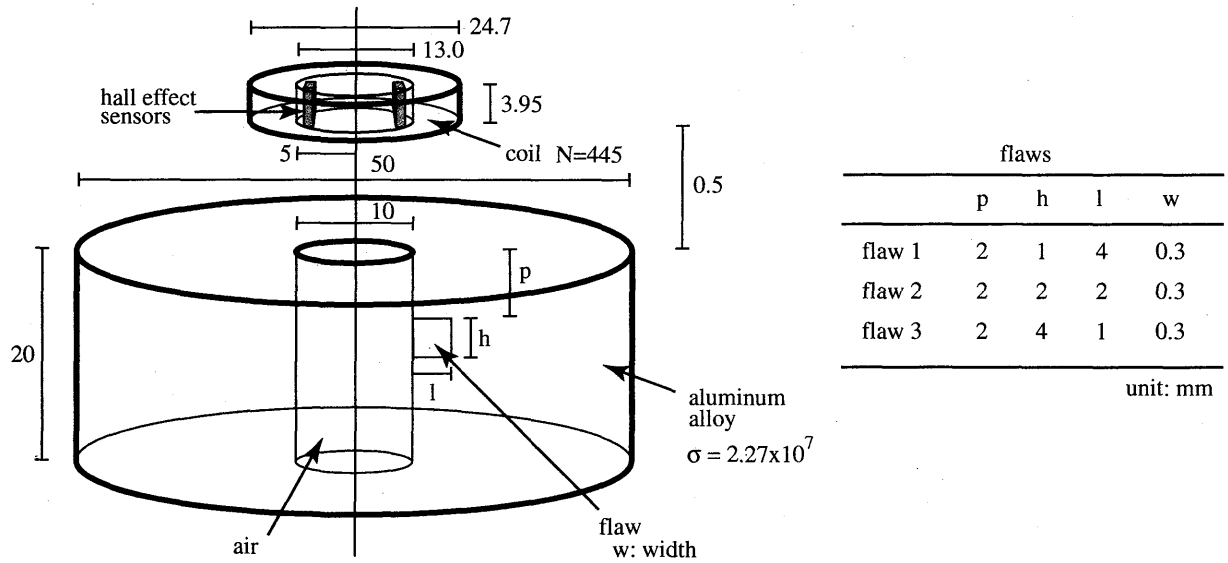


Fig. 1 Computational model: TEAM Workshop Problem 27.

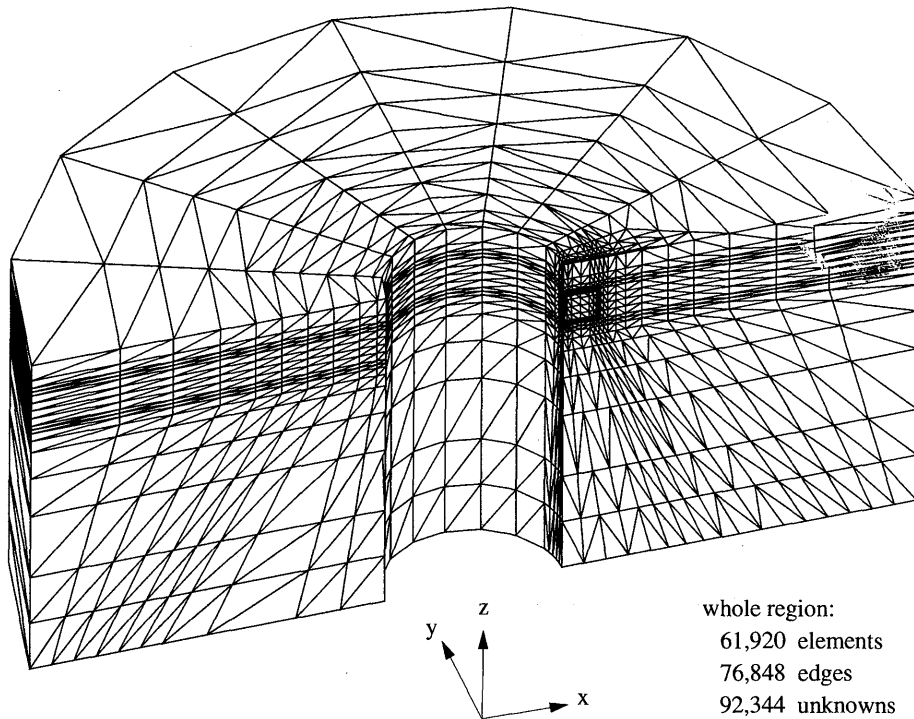


Fig. 2 Tetrahedral mesh of the aluminum alloy with the flaw 2.

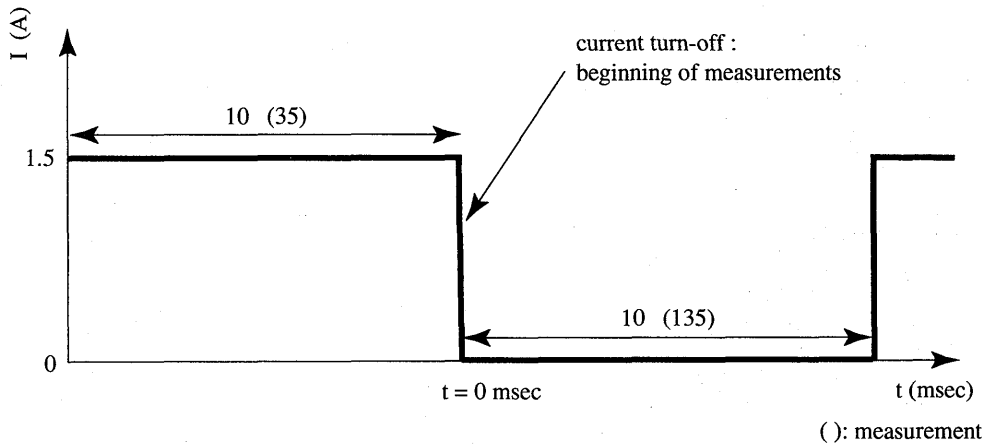


Fig. 3 Exciting current waveform.

モデル化したもので、三次元問題として扱う必要がある。計算モデルは、ねじ穴の上に 445 ターンの励磁コイルが置かれ、1.5A のピーク電流が通電されるものである。また、欠陥信号の検出は、励磁コイル内部に置かれたホール素子で行い、欠陥の直上とその反対側のホール素子の信号の差をとって欠陥信号としている。

Fig. 1 に示すように欠陥として 3 種類の形状が与えられている。計算モデルは、対称性があるので二分の一モデルとし、解析領域を四面体要素で分割した。磁束密度の計算には高い精度が要求されるため、欠陥付近とホール素子の磁束密度検出部（センサ部）付近は細かい要素分割を行う必要があるが、計算規模が大きくなるため欠陥付近とその直上のホール素子付近のみを細かい要素分割行って計算した。前述したセンサ出力（欠陥信号）の計算値を得るには、欠陥がない側のホール素子の磁束密度も高い計算精度で計算する必要があるため、その計算値は同じ要素分割で欠陥部の導電率をアルミニウムのそれにし、欠陥なしとして計算した磁束密度の値を用いた。したがって、欠陥ありと欠陥なしの 2 回の計算を行い、次式によりセンサ出力（欠陥信号） $\Delta B$  を計算した。

$$\Delta B = B_{flow} - B_0 \quad (6)$$

ここで、 $B_{flow}$  は欠陥があるときのセンサ部磁束密度の x 成分の計算値、 $B_0$  は欠陥がないときのセンサ部磁束密度の x 成分の計算値である。

Fig. 2 は、flaw 2 の場合のアルミニウム合金部分の四面体要素分割である。この場合、全領域の節点数 11,907、四面体要素数 61,920、辺の数 76,848、未知数 92,344 であった。

実験の励磁電流波形は、Fig. 3 に ( ) 付で示すようにパルス状で 35 msec 間 1.5A の電流の通電と 135 msec 間の休止を繰り返すものである。35 msec 間の通電時間内に磁気エネルギーがアルミニウム板内に蓄積され、通電がオフになった瞬間 (Fig. 3 の測定開始時間  $t=0$ ) から渦電流が流れ、欠陥信号が得られるものである。

計算では、計算ステップ数を少なくするため、磁気エネルギー拡散の時定数を考慮して、励磁電流波形は、Fig. 3 に示すように通電時間を 10 msec、休止時間を 10 msec と

するデューティ比 50% の矩形波の繰り返しとした。したがって、基本周期 20 msec、基本周波数 50 Hz となり、時間刻み数 512、時間刻み 39.0625  $\mu$ sec として計算した。

Fig. 4 には、励磁電流を正弦波 50 Hz として計算したときの、欠陥を含む x-z 平面上から y 方向に約 0.3 mm（欠陥 0.15 mm、アルミニウム部 0.15 mm）の範囲の欠陥付近の渦電流分布を示す。渦電流が欠陥を迂回して流れる様子が計算されていることがわかる。

Fig. 5 に欠陥信号  $\Delta B$  の計算結果と実験値 [1] の比較を示す。flaw 2 の計算結果は、実験値によく一致しているが、flaw 1 と flaw 3 の計算結果は、ピーク値で約 20% の誤差を生じている。これらの計算モデルについては、さらに要素分割の検討が必要であると思われる。

Fig. 6 は、欠陥がない場合のセンサ部の磁束密度の x 成分  $B_0$  の計算値である。励磁コイルの通電がオフになった

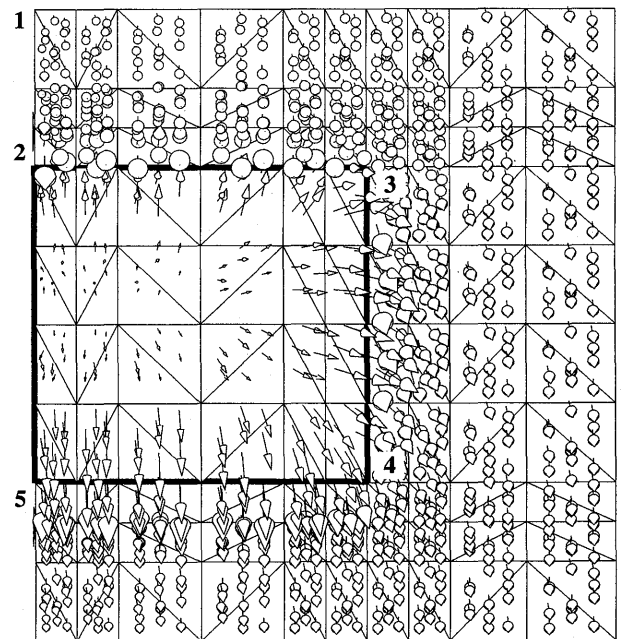


Fig. 4 Eddy current distribution around the flaw 2 for sinusoidal exciting current  $f=50$  Hz.

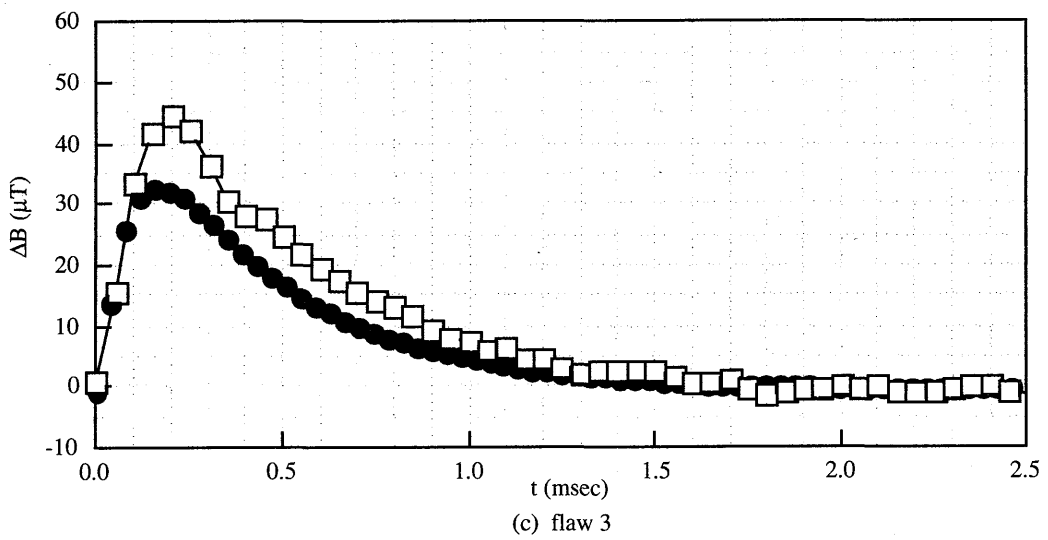
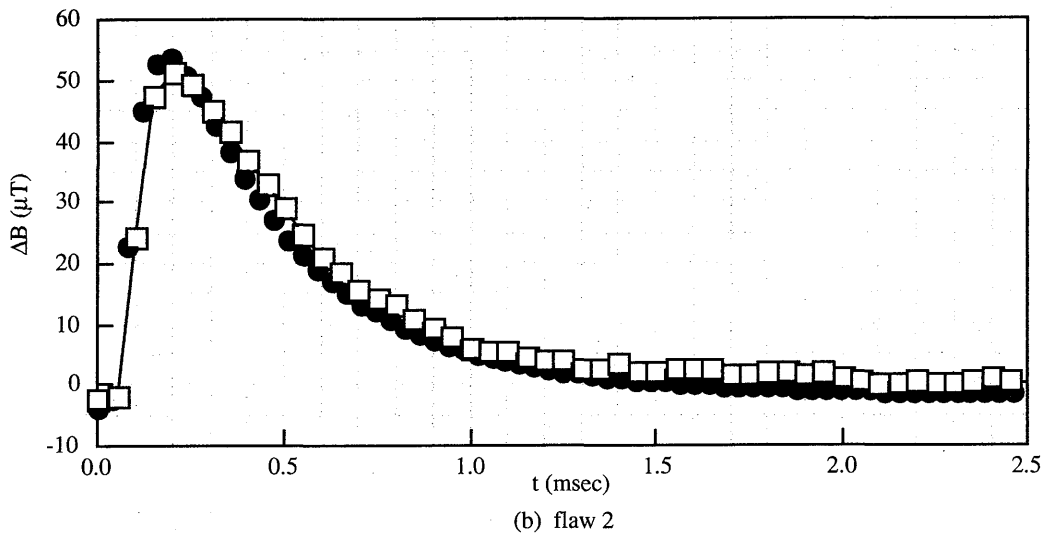
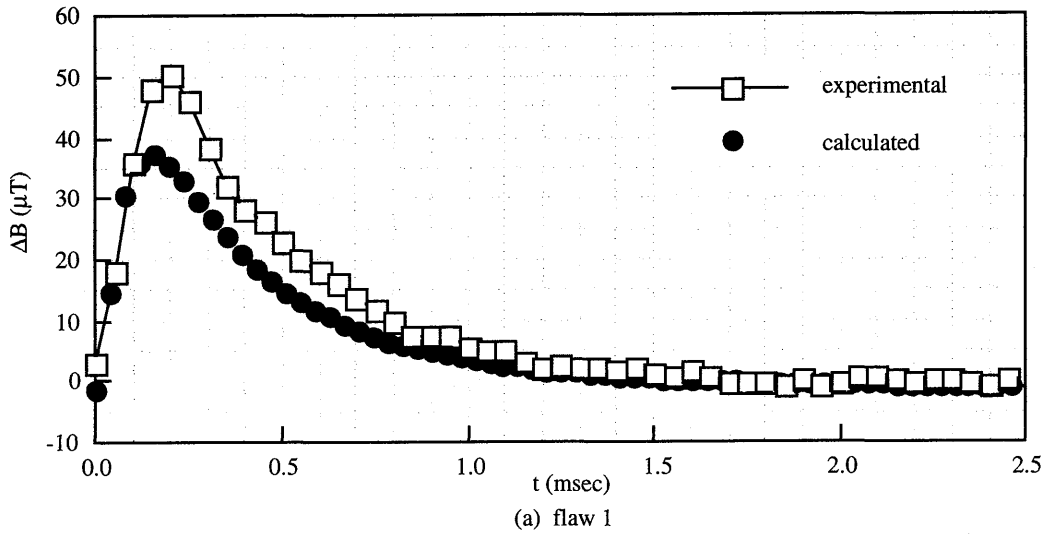


Fig. 5 Comparisons between calculated and experimental results.

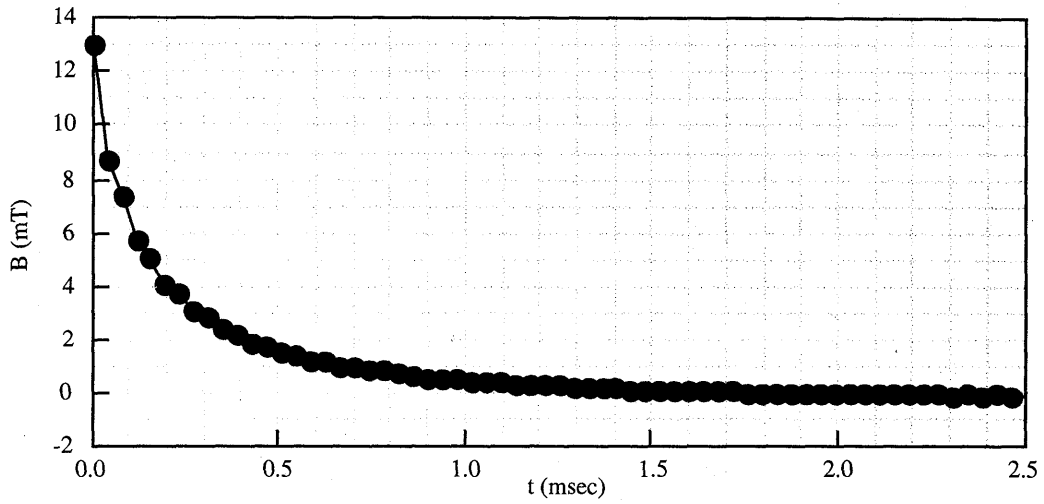


Fig. 6 Calculated results of magnetic flux density  $B_0$  at the sensor location without flaw.

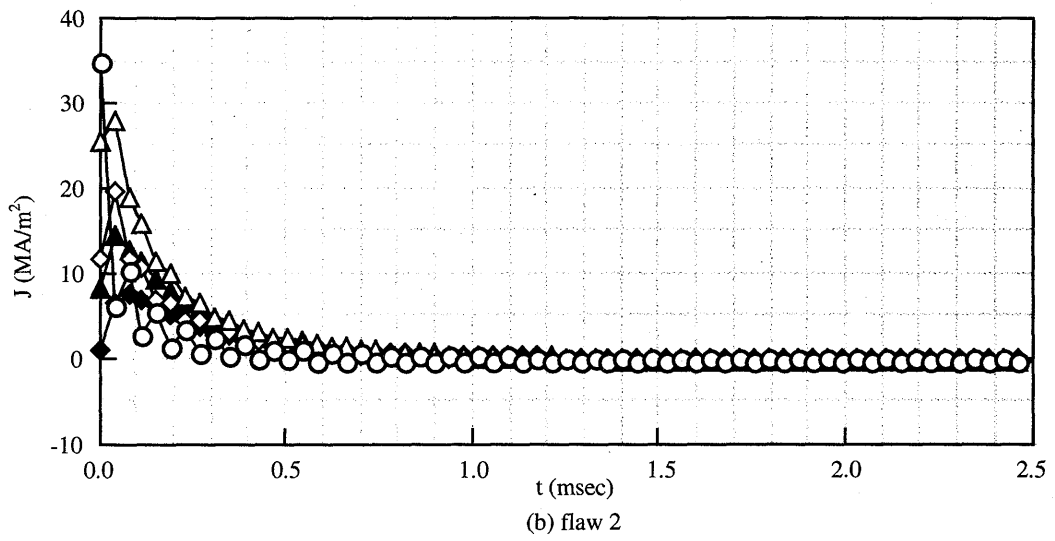
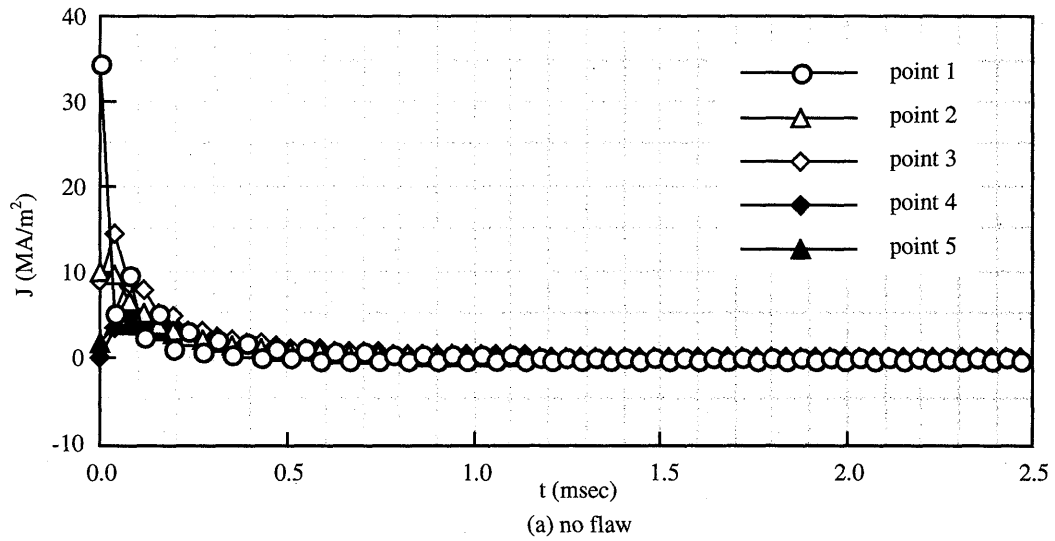
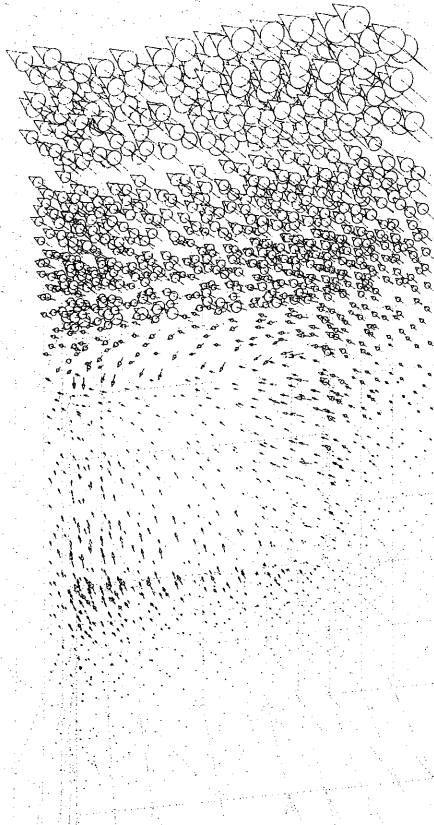
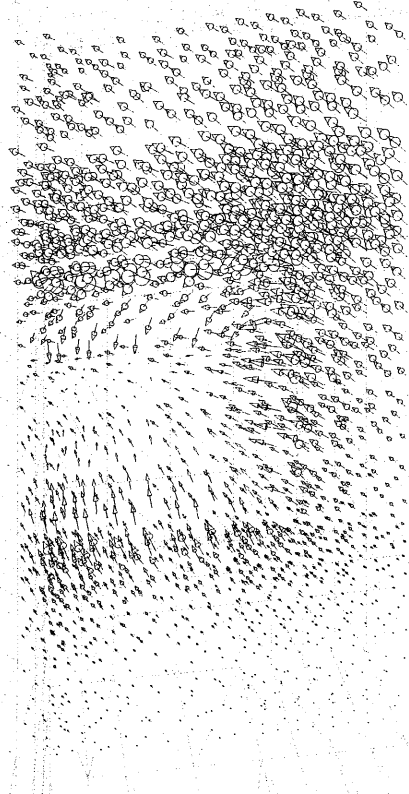


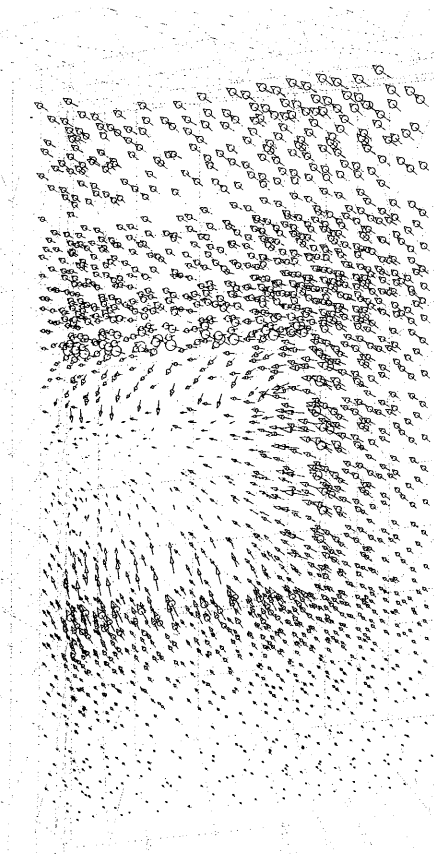
Fig. 7 Calculated results of eddy current density around the flaw 2.



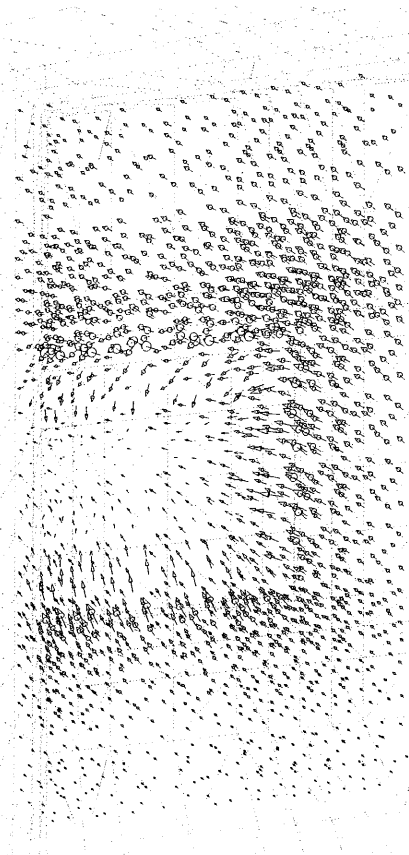
(a)  $t=39.1 \mu\text{sec}$



(b)  $t=78.1 \mu\text{sec}$



(c)  $t=117 \mu\text{sec}$



(d)  $t=156 \mu\text{sec}$

Fig. 8 Changes of eddy current distribution around the flaw 2.

後、渦電流が徐々に拡散するため、磁束密度が単調に減少していくことがわかる。Fig. 5 および Fig. 6 の磁束密度の値から明らかなように、差信号である欠陥信号は、ホール素子の検出信号（センサ部の磁束密度）の0.5%以下で非常に小さいことがわかる。

Fig. 7 は、Fig. 4 に示す flaw 2 周辺のアルミニウム合金表面上の point 1～5 の渦電流密度の y 方向成分の時間変化を示す。point 2 で渦電流密度が大きく、0.2 から 0.3 msec 程度の時定数で拡散、消滅していることがわかる。point 2 において、同図の欠陥がある場合とない場合を比較すると、欠陥によって迂回する渦電流の影響でピーク値が約3倍になっていることがわかる。しかし、この渦電流密度を直接測定することはできず、測定点の磁束密度の変化は、Fig. 5 に示したように非常に小さい。

Fig. 8 に、flaw 2 周辺の磁束密度分布の時間的变化を示す。アルミニウム合金の上部に励磁コイルがあるため、その電流がオフになった直後、その影響で表面に大きな渦電流が生じ、欠陥に流路を妨げられながら、また減衰しながら下部に向かって拡散していく様子が明らかになっている。

#### 4. むすび

以上、パルス励磁の ECT ベンチマーク問題の過渡渦電流解析を三次元有限要素法により行い、公開されている実験結果と比較し、所期の結果を得た。

パルス励磁 ECT の数値解析において、磁束密度の測定値をシミュレーションするには、非常に高精度（0.1%以下の精度）な解析が要求されるが、過渡応答解析にフーリ

エ変換法を用いた辺要素有限要素法により解析可能であることが確認された。また、磁束密度分布の時間変化をグラフィックス表示することにより、その物理現象を把握することができた。

開発した解析手法は、パルス励磁 ECT のプローブ設計に適用可能であり、プローブの最適設計への応用が期待できる。

#### 参考文献

- [1] F. Thollon: "Eddy Current NDT and Deep Flaws", TEAM Workshop Problem 27, TEAM Workshop web site.
- [2] 坪井 他: 「パルス励磁渦電流探傷の数値解析と実験結果の比較」、平成13年電気学会全国大会、No. 5-166 (2001-3).
- [3] 坪井: 「パルス励磁渦電流探傷の有限要素解析」、電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-00-7・RM-00-72 (2000-8).
- [4] H. Tsuboi: "Finite Element Analysis of Pulsed Eddy Current Testing", Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V), J. Pavo et al. (Editors), pp.38-45, IOS Press, Amsterdam (2001).
- [5] 羽野: 「三次元共振器問題の有限要素解析—四面体要素の場合—」、電子通信学会論文誌 C、Vol. J71C、p. 333 (1988).
- [6] 早川、Cingoski、山下: 「高精度・高速渦電流解析のための Whitney 辺要素・線形辺要素併用法」、電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-98-5・RM-98-69 (1998-8).