

テンプレートマッチングを用いた画像処理による 渦電流探傷信号からの複数き裂の同定*

長屋 嘉明^{*1}, 高木 敏行^{*2}
黄 皓 宇^{*2}, 内 一 哲 哉^{*2}

Identification of Multiple Cracks from Eddy Current Testing Signal by Image Processing Using a Template Matching Method

Yoshiaki NAGAYA, Toshiyuki TAKAGI^{*3},
Haoyu HUANG and Tetsuya UCHIMOTO

^{*3} Institute of Fluid Science, Tohoku University,
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8577 Japan

This paper describes a novel method identifying the number and positions of cracks. Using the ECT signal obtained by two-dimensional scanning as a picture image, a template matching method with help of genetic algorithms is applied to predict the number and positions of cracks. The present method employs a superposition of crack signals and a nonlinear scaling technique of a signal profile on crack length which are verified by numerical simulation. The number and positions of cracks are predicted sufficiently.

Key Words: Nondestructive Inspection, Inverse Problem, Numerical Analysis, Multiple Cracks, Eddy Current Testing, Template Matching, Genetic Algorithm, Pattern Recognition, Steam Generator Tubes

1. 結 論

加圧水型原子力発電プラントの蒸気発生器(Steam Generator, SG)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法の1つである渦電流探傷試験(Eddy Current Testing, ECT)が採用されている^①。その理由として3千数百本ある細管を非接触でかつ高速に探傷可能であり、減肉やき裂に対する感度が良いことが挙げられる。最近では、検査に対する要求も単に欠陥の有無だけでなく、欠陥の形状を定量的に評価することや、より微小な欠陥の検出など、精度や信頼性の向上が必要とされてきている。

ECTの高精度化に対応するため日本AEM学会では1999年~2001年にかけてラウンドロビン試験を行った^②。この試験は各研究機関で開発されたECTプローブの性能比較を目的として実施された。性能評価にあたっては検出性だけでなく、測定者にとって未知形状の欠陥についても欠陥形状推定を同時に行うこととした。未知の試験片として、複数のEDM(Electro

Discharge Machining, 放電加工)欠陥を付与した上で管外面を樹脂で覆った試験片と人工IGA(InterGranular Attacking, 粒界腐食割れ)/SCC(Stress Corrosion Cracking, 応力腐食割れ)を含む2種類の伝熱管形状の試験片を用意して国内外の機関による回送試験を行った。

この試験の結果として、き裂の数や位置が既知の場合には、き裂形状を再構成することが可能であった。しかし逆解析を行う前にき裂の位置や数を正確に推定することは困難であった。

従来は探傷によって得たECT信号からき裂を探す際には、過去の経験からプローブ特有の信号パターンを信号全体から探している。本研究ではこうした処理を計算機上において実現することを提案する。

ECTに対して信号処理を応用した例としては、SN比向上を目的としてウェーブレット変換を用いた研究^③や画像処理を用いてスリット状き裂の復元を行った研究^④がある。またソフトコンピューティングを応用した研究では順問題解析や逆問題解析にニューラルネットワークを用いた研究^⑤や遺伝的プログラミングを用いた研究^⑥がある。

本論文では探傷信号の中からき裂による信号のみを選び出すという問題を画像認識問題ととらえ、テン

* 原稿受付 2002年5月22日。

^{*1} 学生員, 東北大学大学院工学研究科(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)。

^{*2} 正員, 東北大学流体科学研究所。
E-mail: takagi@ifs.tohoku.ac.jp

プレートマッチング(template matching)を応用する。2次元走査された ECT 測定信号を画像に見立てることでき裂の位置と数を推定する。その際、探索効率向上を目的として探索アルゴリズムに遺伝的アルゴリズムを利用する。き裂の長さの拡大率およびき裂の座標を遺伝的アルゴリズムの遺伝子とすることで非破壊検査への応用を可能にする。

本研究ではき裂が複数ある場合を対象とし、ECT 信号に対して画像処理を行うことで、き裂の位置と数を推定する方法を提案し、位置と数を推定することを目的とする。

2. 遺伝的アルゴリズムに基づいたテンプレートマッチング

2.1 正規化相関の逐次適用

テンプレートマッチングとは、未知の入力画像に対して、あらかじめ用意されているテンプレートの存在位置や角度・スケール等を推定することである。

テンプレートマッチングの一般的手法として正規化相関の逐次適用がある。テンプレートマッチングにおいては、入力画像とテンプレート画像との対応評価が極めて重要であるが、正規化相関は評価する画像間の相対的な輝度値の差を補正して正しく評価できる。

正規化相関をテンプレートマッチングに適用するには、テンプレートと同じ大きさの相関ウィンドウを仮定し、その領域内のピクセルの輝度値とテンプレートのピクセルの輝度値を評価することになる。このときの正規化相関値 C を求める式は次の形で与えられる。

$$C = \frac{\sum_i (x_i - X)(y_i - Y)}{\sqrt{\sum_i (x_i - X)^2} \sqrt{\sum_i (y_i - Y)^2}}$$

ここで x_i はテンプレートの各ピクセルにおける輝度であり、 X は x_i の平均である。また y_i は相関ウィンドウの各ピクセルにおける輝度であり、 Y は y_i の平均を表す。

正規化相関を仮定し得る全テンプレートパターンに対して入力画像中を密に探索すれば、必ず相関値の高い部分が現れる。その場所をもって対応位置とする。

しかしこの手法では全領域を完全に計算し、探索を終了するまで最適解を知ることができない。途中で打ち切りができないことや、全く関係ない部分の計算も行わなくてはならないことから冗長計算が大量に発生し、探索効率は非常に悪化する。

2.2 遺伝的アルゴリズムによる探索

こうした問題から探索効率向上のために探索に遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を用いた方法

が開発された⁶⁾。逐次評価を用いたテンプレートマッチングの最大の問題は、探索領域の広さである。そこで広域探索における最適化問題に対して用いられることの多い遺伝的アルゴリズムを利用する。

GA とは自然の選択淘汰や突然変異による生物進化のメカニズムにヒントを得た最適化アルゴリズムである。GA では扱う問題の解候補を遺伝子で表し、生物として仮定する。GA での処理を以下に示す。

- 1) ランダムに個体を創造し初期集団を発生させる。
- 2) 環境により各個体の適応度を計算する。
- 3) 各個体の適応度に応じて選択、交叉、突然変異を行う。
- 4) 2), 3)の世代交代を繰り返す。

これにより集団全体の適応度が上がり、そのなかでも特に高い適応度を示す個体がその問題に対する解である可能性が高くなる。

3. プローブおよび試験片

今回の実験には著者らが開発した差動受信型 TR(Transmit-Receive)プローブを用いた⁹⁾。プローブを図1に示す。このプローブは直径約2mmのパンケーキ型コイル1個を励磁コイルとし、4個を検出コイルとして差動配置したものである。周方向欠陥検出用(A, B)と軸方向欠陥検出用(C, D)に最適配置されており、欠陥方向の識別が可能であるという特徴を有する。実験における探傷器の設定は、試験周波数を400kHz、ゲインを60dBとした。スキャンピッチは軸方向(ω)を0.5mm間隔、周方向(θ)を3°間隔とした。このとき周方向は約0.58mm間隔となる。またプローブ下端と試験片表面の距離であるリフトオフは0.2mmとした。

このプローブより得られた信号電圧の y 成分を図2に示す。この信号は周方向に長さ5mm、幅0.2mm、

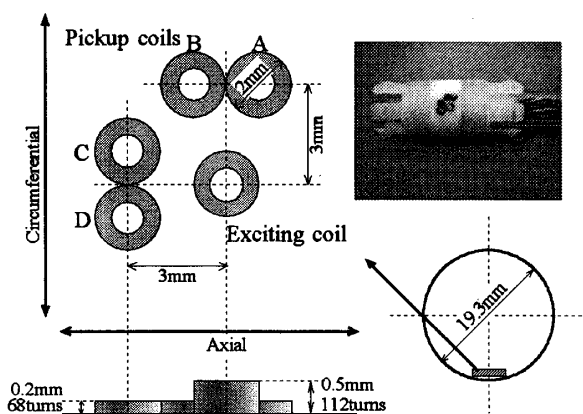


Fig. 1 Geometry of a differential TR probe

外面 (Outer Defect, OD) 側で深さが板厚に対して 40% である EDM き裂を周方向検出チャンネルを用いて 2 次元走査することにより得られたものである。この図よりわかるように、このプローブから得られた信号はき裂の両側面に正負反対の 2 つのピークを有すると

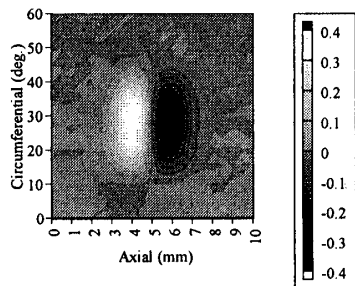


Fig. 2 ECT signal using a differential TR probe (mV)

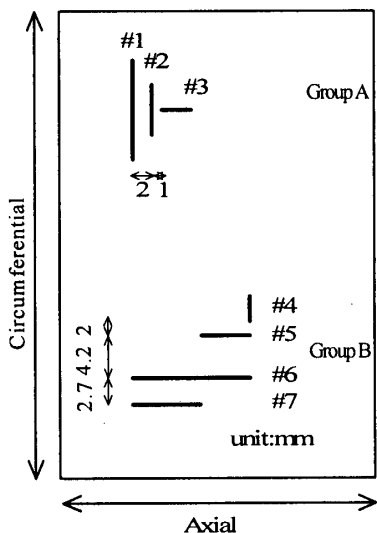


Fig. 3 Positions of EDM slits on the sample

いう特徴がある。今回はこの信号をテンプレートとして用いた。

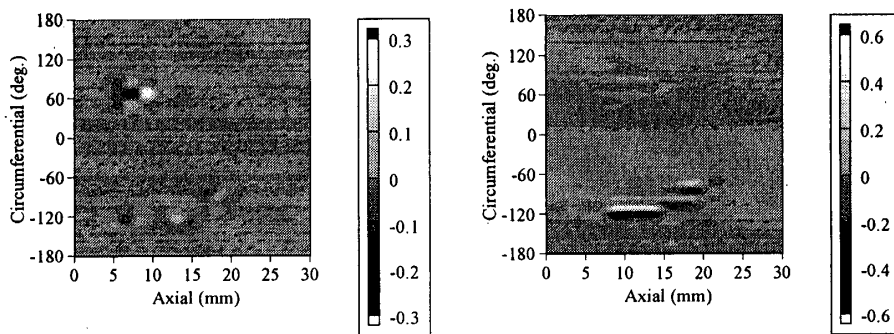
試験片として上記のラウンドロビン試験で用いられた複数き裂を含む試験片を使用した。長さ 300 mm, 外径 22.23 mm, 内径 19.69 mm, ニッケル基合金 600 の直管である。き裂の位置および形状を図 3 および表 1 に示す。き裂は 2 群に分かれており、A 群には周方向に 2 本、軸方向に 1 本が入っている。B 群には周方向に 1 本、軸方向に 3 本が入っている。この試験片より得られた ECT 信号のうち y 成分を図 4 に示す。図 4 (a) が周方向欠陥検出用チャンネルより、図 4 (b) が軸方向欠陥検出用チャンネルより得られた信号である。この軸方向と周方向の 2 つのチャンネルの信号に基づいて欠陥の位置の推定を試みる。

4. テンプレートマッチングの ECT 信号への応用

ECT 信号に対して遺伝的アルゴリズムに基づいたテンプレートマッチングを適用する。フローチャートを図 5 に示す。遺伝的アルゴリズムにおいてき裂の座標およびき裂の長さ方向の拡大率を遺伝子とし、遺伝子に基づいてテンプレートを拡大縮小、および平行移動させる。変換後のテンプレートの各点における信号と、同じ位置の入力画像の各点における信号を比較し、正規化相関を用いて適応度を計算する。適応度に基づいて遺伝子を選択、交叉、突然変異させ、集団全体の適応度を上昇させる。そのときに最も高い適応度を示す遺伝子がすなわちき裂のある場所となる。ここでは

Table 1 EDM slits on the sample

Group	Slit No.	Max depth (%)	Length (mm)	Width (mm)	Direction	Crack shape
A	#1	21	10.3	0.21	Circ.	Rectangle
	#2	44	4.6	0.21	Circ.	Ellipse
	#3	31	3.0	0.31	Axial	Ellipse
B	#4	24	2.5	0.21	Circ.	Slope
	#5	46	5.0	0.22	Axial	Slope
	#6	29	12.1	0.22	Axial	Rectangle
	#7	50	7.0	0.24	Axial	Rectangle



(a) Circumferential channel (b) Axial channel

Fig. 4 ECT signal from the multiple cracks sample (mV)

GAパラメータとして以下の値を用いた。

- 一世代あたりの個体数：60
- 世代交代数：200
- 交叉率：0.9
- 突然変異率：0.02
- トーナメント選択
- 2点交叉
- エリート保存則

以上の処理により1つのき裂を検出した後、続けて2つ目のき裂の検出を行う。その際にはき裂が複数あるときの信号は、き裂が単独であるときの信号の重ね合わせとして評価できると仮定し、元の信号から変換後のテンプレートの信号を引き算することによって2回目以降の探索を可能にしている。

4・1 ECT信号に関する仮定

今回の研究においてECT信号に対して以下の2つの仮定をおいた。

- (1) 複数のき裂の信号は単独のき裂信号の重ね合わせで表現できる。
- (2) き裂の長さに合わせて、き裂信号の長さ方向への拡大縮小が可能である。

前者は2回目以降の探索を可能にする。後者は一種類のテンプレートからさまざまな長さのき裂信号を探索するために必要である。これらの仮定を数値解析により検証する。順問題解析には辺要素にもとづく磁気ベクトルポテンシャル法を用いた¹⁰⁾。

4・2 き裂の重ね合わせに関する検討

まずき裂の重ね合わせについて検証する。重ね合わせはき裂が単独で存在するときを得られた信号同士を、想定する間隔だけずらして足し合わせることで実現される。

今回実験で用いるプローブ以外にも2種類のプローブに対して解析した。これを表2に示す。No.1のプローブは実験で用いたものと同じもの、No.2はNo.1のプローブを基とし、検出コイルの径を半分の1mmにし、検出コイルの間隔を短くした。これにより分解能

の向上が期待できる。No.3は外径2mm、内径1mmのパンケーキ型プローブでありNo.1やNo.2のプローブの励磁コイルと同じものである。このプローブを用いて仮定が一般的に成り立つことを検証する。

き裂は長さ10mm、幅0.2mm、深さはそれぞれOD20%とOD40%のき裂が平行に並んでいる状態を想定し、間隔が1mm、2mm、3mmの3パターンについて検証した。き裂の幅方向に0.25mm間隔で-10mm～+10mmまで81点を計算した。すべての条件において実際に2本のき裂で解析し、得られた信号と、単独のき裂として解析を行い、重ね合わせた信号との相関係数を表3に示す。また解析結果の一部を図6から図8に示す。図6はき裂の間隔を1mm、2mm、3mmと変化させたときのNo.1のプローブの信号である。図7はNo.2のプローブより、図8はNo.3のプローブより得られた信号である。

いずれの場合でも大変高い精度で再現できており、き裂信号の重ね合わせの仮定は成り立つといえる。

また図6から今回使用したコイル径2mmのNo.1のプローブでの分離可能なき裂の間隔の限界は2mmと3mmの間にあるといえる。図6(c)を見ると信号に4つのピークが出ていることから2つのき裂が存在するといえる。図6(b)の信号からでも2つのき裂に分離することは可能だが、実際にはノイズの影響があるので難しい。同じくコイル径が1mmのNo.2のときには図7より分離可能な間隔の限界は1mmと2mmの間であることがわかる。この結果より分離可能なき裂の間隔は検出コイルの径に依存するといえる。

図8よりNo.3のプローブでも仮定が成り立つことが示されたが、き裂間隔が3mmのときでも分離は難

Table 2 Probes used for a numerical simulation

Probe No.	Probe type	Diameter of coils (mm)	
1	Differential TR probe	Exciting	Pickup
		2	2
2	Differential TR probe	Exciting	Pickup
		2	1
3	Pancake type probe	2	

Table 3 Correlation coefficients in superposition verification

Probe No.	Between cracks (mm)	Correlation coefficient	Figure
1	1	0.999775	6(a)
	2	0.999974	6(b)
	3	0.999994	6(c)
2	1	0.999211	7(a)
	2	0.999316	7(b)
	3	0.998931	7(c)
3	1	0.999818	8(a)
	2	0.999990	8(b)
	3	0.999998	8(c)

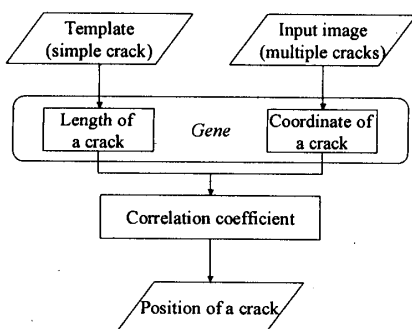


Fig. 5 Flow chart of the new method

しく、分解能の面ではNo.1やNo.2のプロープより劣ることがわかる。

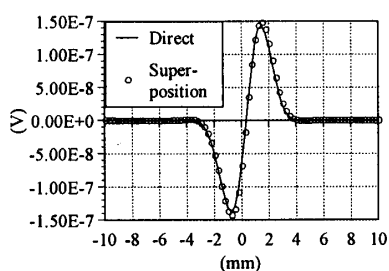
4・3 き裂の長さの拡大に関する検討

次に長さの拡大に関して検証する。き裂の長さが変わるとき裂によって生じる信号の長さも変わる。しかし長さを変化した比率に合わせて信号を単純に拡大縮小しても整合性はとれない。そこでき裂の信号に対して非線形変換を行う。

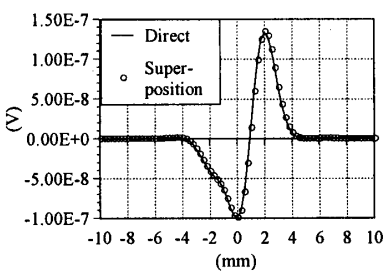
プロープに対してき裂が十分な長さを有する場合、き裂の中央部の信号はき裂の長さが無限の長さを持つときと同じはずである。またき裂の端部の信号は端部の形状が同じならばき裂の長さに関わらず常に同じはずである。そこでこの仮説を基にき裂を端部と中央部に分け、中央部の長さのみを変化させることでき裂信号の長さを変えることを考えた。テンプレートの拡大、縮小の概念図を図9に示す。テンプレートを拡大するときにはき裂中央部の信号を、き裂を長くさせる分だけ増やす。逆に縮小するときには中央部から順に信号を減らしていく。

数値解析を用いてこの仮定を検証した。長さが5mmのき裂の信号を基にして、長さを3mm, 7mm, 10mmと変化させる。深さに関しては外面20%, 40%, 60%の3種類について検証した。プロープは表2におけるProbe No.1およびNo.3を用いた。き裂に対して平行に0.5mm間隔で-10mm~+10mmまで41点を計算した。No.3に関してはき裂の真上を計算したがNo.1のプロープは検出コイルが差動をとっているためき裂の真上では信号の変化がないので、き裂の横2mmのラインを計算している。すべての結果において実際の長さの信号と拡大、縮小して作り出した信号との相関係数を表4に示す。また解析結果の一部を図10および図11に示す。図10はNo.1のプロープを用いてOD40%長さ3mm, 7mm, 10mmのき裂を測定した計算した信号である。図11は同じくNo.3のプロープを用いてOD40%長さ3mm, 7mm, 10mmのき裂より得られた信号である。

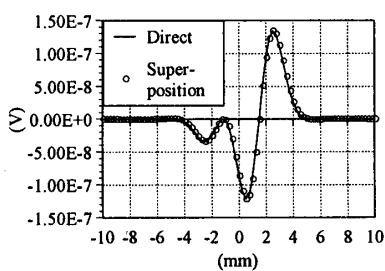
No.1のプロープに関しては図10よりわかるようにほぼ再現できており、また相関係数にも全く問題はな



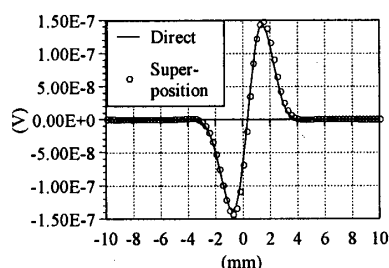
(a) 1 mm interval



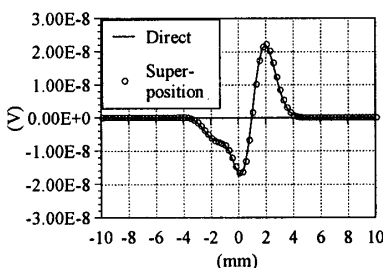
(b) 2 mm interval



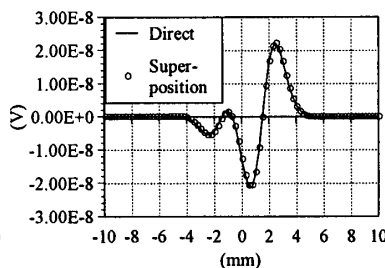
(c) 3 mm interval

Fig.6 Signal V_x with probe #1

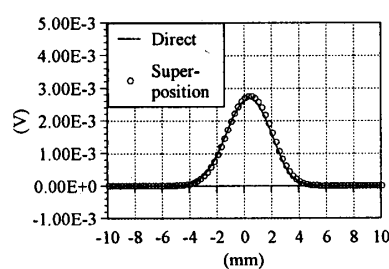
(a) 1 mm interval



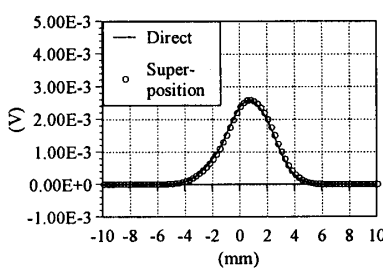
(b) 2 mm interval



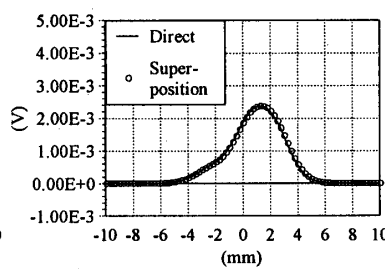
(c) 3 mm interval

Fig.7 Signal V_x with probe #2

(a) 1 mm interval



(b) 2 mm interval



(c) 3 mm interval

Fig.8 Signal V_x with probe #3

いことから、長さの拡大と縮小に関する仮定は正しいといえる。No. 3のプローブに関して図 11 より長さ 5 mm のき裂から得られた信号では 7 mm, 10 mm のときの信号のピーク値を十分に再現することができなかった。このことから信号を拡大するよりも、プローブの大きさに対して十分な長さを有するき裂の信号を縮小する方が再現精度は高くなるといえる。

5. き裂の位置と数の推定結果

テンプレートマッチングを用いてき裂の位置と数の推定を行った。推定結果を図 12 および表 5 に示す。き裂の番号はテンプレートマッチングにおいて検出された順番である。推定は A 群と B 群に分けて行った。図 12 (a) および (b) が A 群の推定結果である。また図 12 (c) および (d) が B 群の推定結果である。軸方向に 0.5 mm 間隔で 30 mm, 周方向に 3° 間隔で 180°, 計 61×61=3721 点が探索領域となる。

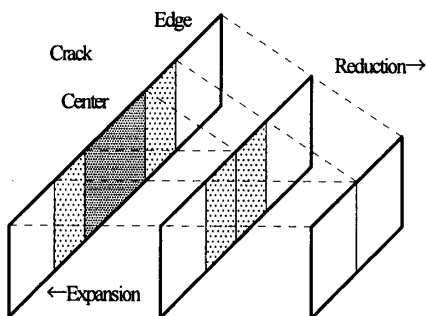


Fig. 9 Nonlinear Scaling of ECT signal with different crack lengths

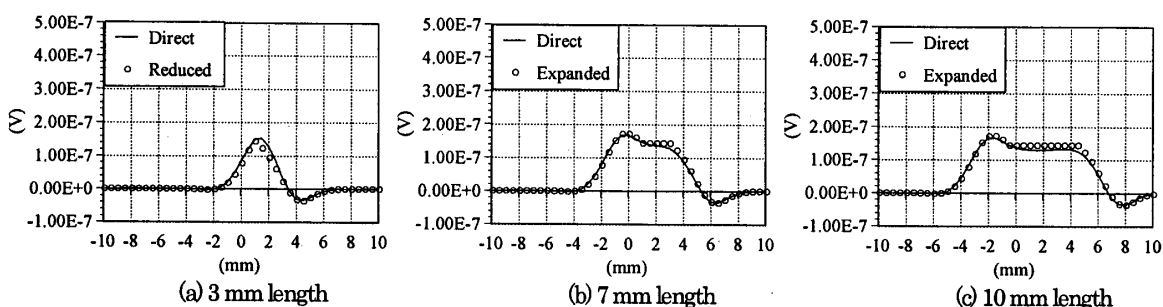


Fig.10 Signal V_x of an OD40% crack with probe #1

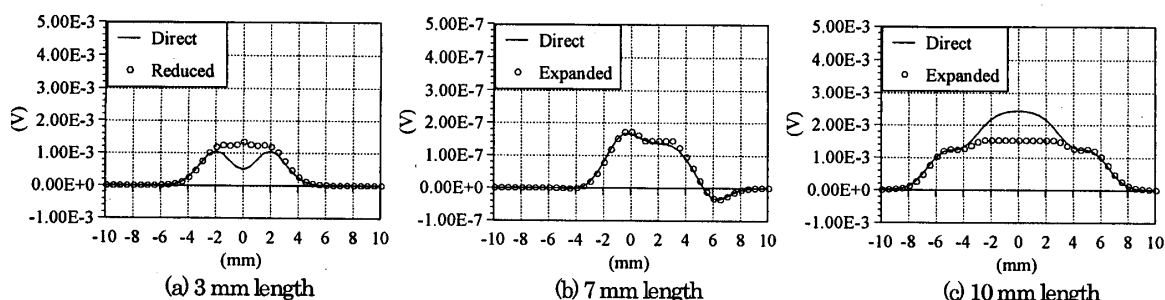


Fig.11 Signal V_x of an OD40% crack with probe #3

A 群に関して、周方向き裂検出用の検出コイルから得られた信号に対してテンプレートマッチングを行った結果、周方向のき裂として R1, R2, R3 の 3 本を検出した。また軸方向検出用コイルから得られた信号から軸方向のき裂として R4 と R5 の 2 本を検出した。B 群に関して周方向き裂として R6 および R7 が、軸方向き裂として R8, R9, R10, R11, R12 および R13 を検出した。

これらのうち R2 と R3, および R4 と R5 に関してはき裂の幅方向の中心位置が同じであることから、単独のき裂 R2_3 および R4_5 であると判断できる。また

Table 4 Correlation coefficients in nonlinear scaling verification

Probe No.	Crack length (mm)	Crack depth (%)	Correlation coefficient	Figure
1	3	20	0.993333	10 (a)
		40	0.989545	
		60	0.985233	
	7	20	0.999426	
		40	0.999014	
		60	0.998457	
	10	20	0.998638	
		40	0.997277	
		60	0.995720	
3	3	20	0.954865	11 (a)
		40	0.944560	
		60	0.933430	
	7	20	0.987701	
		40	0.983429	
		60	0.977280	
	10	20	0.971627	
		40	0.958091	
		60	0.934017	

R8 と R13, R9 と R10, R11 と R12 もき裂の座標のずれが長さ方向のみであり, また長さの判別でもき裂が重なっていることから, 単独のき裂 R8_13, R9_10, R11_12 であると判断できる.

それぞれのき裂は実際のき裂との位置関係から R1 は#2に R2_3は#1に R4_5は#3に対応していると考え

られる. また R8_13は#5に R9_10は#7に R11_12は#6に対応していると考えられる. このとき R1 と R2_3の間隔は 2mm であり, 実際の#1と#2の間隔と完全に一致している. また R8_13と R11_12の間隔は 464mm, R9_10と R11_12の間隔は 232 mm となり, 実際の間隔 42mm および 27mm とほぼ一致している.

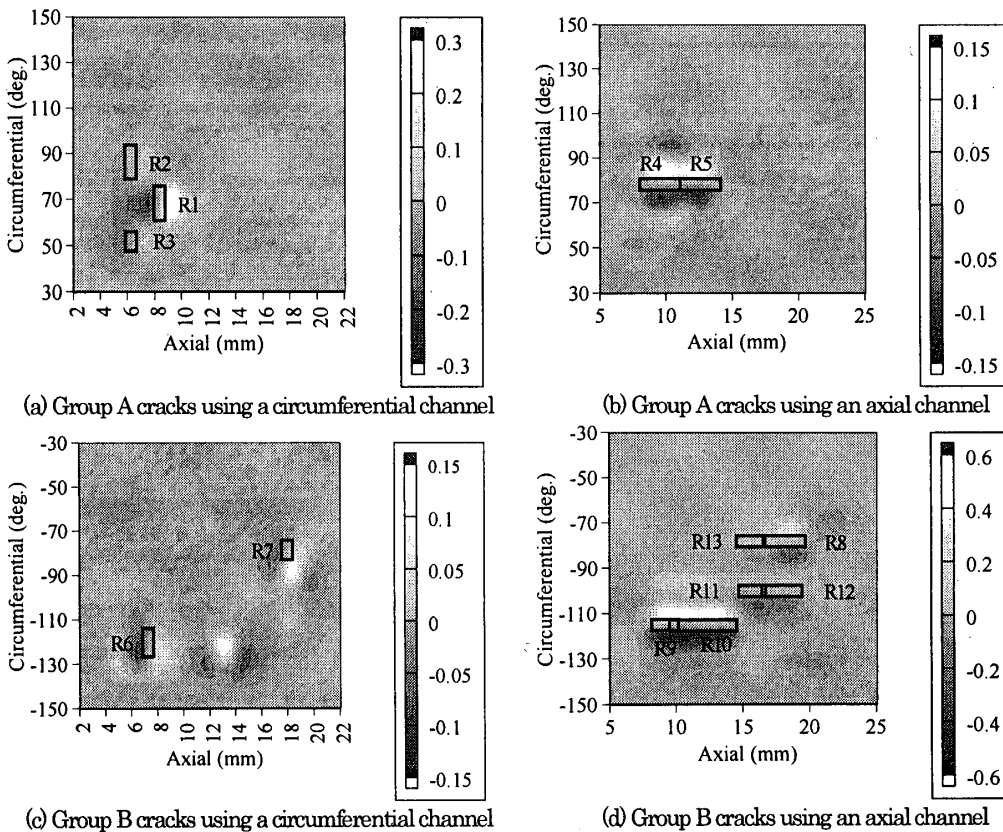


Fig. 12 ECT signal from the multiple cracks sample and detected positions of cracks (mV)

Table 5 Detected cracks

Group	Direction	No.	Axial (mm)	Circ. (deg.)	Length (mm)	Correlation coefficient
A	Circ.	R1	8.5	72	3.5	0.989914
		R2	6.5	90	3.5	0.984462
		R3	6.5	54	2.0	0.959339
	Axial	R4	9.5	78	3.0	0.976397
		R5	12.5	78	3.0	0.956765
B	Circ.	R6	7.5	-120	3.0	0.970138
		R7	18.0	-75	2.0	0.948053
	Axial	R8	18.0	-78	3.0	0.990974
		R9	8.5	-114	2.0	0.960324
		R10	11.5	-114	5.0	0.949905
		R11	15.5	-102	2.0	0.944395
		R12	17.5	-102	3.0	0.940544
		R13	15.5	-78	2.0	0.939506

Table 6 Length of detected cracks

Group	Direction	No.	Length (mm)	True length (mm)	Error of length (mm)	Slit No. in Fig.3
A	Circ.	R1	3.5	4.6	-0.5	#2
		R2_3	9.7	10.3	-0.6	#1
	Axial	R4_5	6.0	3.0	+3.0	#3
B	Axial	R8_13	5.0	5.0	0	#5
		R9_10	6.5	7.0	-0.5	#7
		R11_12	4.5	12.1	-7.6	#6

周方向き裂 R6 および R7 に関しては軸方向き裂 R9_10 および R8_13 と座標が重なっていることから、軸方向き裂#7 および#5 のき裂のエッジを検出したものと考えられる。

#4 のき裂と思われるものを検出することはできなかった。それは#4 が短くかつ小さいき裂であり、その隣にある#5 の大きな信号の方を検出してしまうためである。浅いき裂に比べてき裂が深い方が信号が大きくなるため、深さの異なるき裂が近接して存在する場合、浅いき裂を検出することは困難となる。そのような場合、重要となるのはより深いき裂の検出であり、今回の場合、より危険な深いき裂を検出することができた。小さなき裂の検出には分解能や解像度の向上が必要であり今後の課題である。

今回提案したテンプレートマッチングではき裂の長さに応じてテンプレートの拡大および縮小を行っているため、副次的にき裂の長さに関する情報も得られる。推定されたき裂の長さを実際のき裂の長さとの比較を表 6 に示す。本手法では長さの判別は主な目的とはしていないが、精度は比較的高く、き裂形状の再構成をせずに比較的容易にき裂の長さを推定することができた。

6. 結 論

本論文では 2 次元走査によって得られた ECT 測定信号を画像に見立てることで、遺伝的アルゴリズムに基づくテンプレートマッチングを応用した、き裂の位置と数を推定する方法を提案した。またその手法を実現するためにき裂の重ね合わせとき裂の長さ方向への信号の拡大という 2 つの仮定を設け、その検証を行った。そしてその仮定に基づいて実験より得られた ECT 信号にテンプレートマッチングを適用し、き裂の位置と数を精度よく推定した。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学研究補助金 特定推進研究(課題番号 11CE2003)によって行われた。本研究で使用した試験片は(株)原子力エンジニアリング 原田豊氏、下根純理氏より提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) 高松 洋, 宮 健三, 陳 振茂, “加圧水型原子力発電所における電磁非破壊検査技術開発の経緯”, 日本 AEM 学会誌, Vol.8, No.1 (2000), 95-101.
- (2) 高木 敏行, 福富 広幸, “電磁解析技術による渦電流探傷試験”, 日本非破壊検査協会, 47-2 (1998), 85-91.
- (3) 宮 健三, 高木 敏行, 小島 史男, 橋本 光男, 西口 磯春, 山田 外史, 原田 豊, 下根 純理, 蒸気発生器伝熱管の渦電流探傷試験の研究活動, 日本 AEM 学会誌 Vol.9, No.2 (2001), 108-121.
- (4) G. Chen and A. Yamaguchi, Enhancement of Signal Noise Ratio of Eddy-Current Signals by Wavelet Transform, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, IOS Press (1997), 255-262.
- (5) H. Hoshikawa and K. Koyama, ECT Flaw Image Restoration by Deconvolution, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, IOS Press (1997), 295-302.
- (6) P. Ramuhalli, M. Afzal, K. Hwang, S. Udpa and L. Udpa, A Feedback Neural Network Approach for Electromagnetic NDE Signal Inversion, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV)*, IOS Press (2000), 1-8.
- (7) F. Kojima and N. Okajima, Crack Profiles Identification of Steam Generator Tubes in PWR Plants Using Database, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V)*, IOS Press (2001), 97-104.
- (8) 長尾 智晴, 安居院 猛, 長橋 宏, 遺伝的手法を用いた 2 値図形のパターンマッチング, 信学論, J76-DII, No.3 (1993), 557-565.
- (9) H. Huang, and T. Takagi, Inverse Analyses for Natural and Multicracks Using Signals From a Differential Transmit-Receive ECT Probe, *IEEE Trans. Magnetism*, 38(2) (2002), 1009-1012.
- (10) H. Fukutomi, T. Takagi and M. Hashimoto, Numerical Evaluation of ECT Impedance Signal due to Minute Cracks, *IEEE Trans. Magnetism*, 33(2) (1997), 2123-2126.
- (11) H. Huang and T. Takagi, ECT Signals for Round-robin Test with Differential TR Probe and their Inverse Analysis, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V)*, IOS Press (2001), 218-225.