

複雑形状欠陥の渦電流探傷による新しい深さサイジング法

A New Depth Sizing Method for Complex Shape Stress Corrosion Cracks from ECT Signals

会津大学 コンピュータ理工学部 兼本 茂* Shigeru KANEMOTO Member

(財) 発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英 Weiyang CHENG Member

(財) 発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター 古村 一朗 Ichiro KOMURA Member

Depth sizing of multiple closely located parallel cracks are studied as a simplification of stress corrosion crack (SCC). Because of the interference from other cracks, eddy current testing (ECT) signals of the multiple cracks are different from that of a single one, and the method used for the depth sizing of a single crack is not practical for that of multiple cracks. In order to find a depth sizing index which is sensitive to just the maximum depth of multiple cracks, an optimum model finding method based on Akaike information criterion (AIC) is introduced. The method and the depth sizing index are validated both experimentally and numerically.

Keywords: Eddy Current Test, SCC, Depth Sizing, AIC

1. 緒言

近年、化学プラントや原子力発電プラントの高経年化に伴い、各種構造物の検査や診断が重要になってきている。なかでも、原子力発電プラントでは応力腐食割れ (SCC) が相次いで発見されたことを契機にして「維持規格」の整備が精力的に進められるようになり、これに付随して、SCC の検出・サイジング技術の研究開発が広く進められている。超音波探傷法は、この欠陥サイジング技術として、最も実用性・信頼性の高い方法として期待されており、様々な検証試験を通しての標準化・規格化が進められているが、これと平行して、この超音波探傷法を補完し、より信頼できる検査を行うために、渦電流探傷法 (ECT) の開発も精力的に進められている^(1~6)。

ECT は、本来は表面付近の微細な欠陥の検出に用いられるものであるが、近年、電磁場の浸透深さをより深くした渦電流プローブの開発、電磁界解析と組み合わせた欠陥サイジング法の開発などによって、5-10mm にいたる欠陥深さの計測が可能になりつつある^(1,3)。しかしながら、ECT により SCC のような欠陥の深さサイジングを行う場合、①欠陥内の部分接触による通電の影響があること、②分岐・曲がり・複数並行欠陥など複雑な形状であること、という二つの主要因によって出

力電圧が変化してしまい、正しい深さサイジングができない場合がある。このため、欠陥内部の導電率を仮定した逆解析による深さサイジング法⁽⁷⁾や、複雑・複数の欠陥形状を事前知識として導入した逆解析による深さサイジング法⁽⁸⁾などが試みられている。しかしながら、これらの手法はいずれも導電率の分布や欠陥の数などの事前知識が必要である。このため、筆者らは、複数の計測周波数で得られる ECT 信号の線形結合で構成する「深さサイジング指標」という仮想信号を導入し、その係数を最適化することで、導電率に影響されずに深さのみに依存する指標を作ることができることを示した^(9,10)。しかしながら、この指標も、欠陥形状の複雑さには影響されてしまう。

本報告では、SCC 深さサイジングへの影響因子として重要な欠陥形状の中で、特に、近接並行欠陥の深さサイジングの問題を解決する手段を検討する。前報にならった深さサイジング指標を導入し、その係数を最適化することで、近接並行欠陥の本数や欠陥開口幅に影響されず、深さのみに依存する指標が構成できることを示す。前報では、導電率変化への感度を最小に、深さ変化への感度を最大にする条件を評価尺度として、深さサイジング指標を求めたが、今回は、深さ予測誤差を最小にするというもう少し直接的な評価尺度で、欠陥形状に依存しない指標を求めることを試みる。電磁界解析により作成したデータと、インコネル試験片に加工した近接並行 EDM スリットのデータを用いて、深さサイジング指標の作成と検証を行った。

もちろん、最終的なゴールは、前述の SCC 深さサイ

連絡先: 兼本 茂 (会津大学コンピュータ理工学部)、
〒965-8580 会津若松市一箕町鶴賀、電話:
0242-37-2501、e-mail: kanemoto@u-aizu.ac.jp

ジングの二つの主要因である部分通電と複雑形状の影響の両方を緩和する深さサイジング指標の確立であるが、これは将来の課題として、その第一歩として、各要因の深さサイジング手法の検討は重要と考える。

2. 近接並行欠陥の影響

本論文では、近接並行欠陥の深さサイジングに着目した検討を進める。計測に用いるプローブの大きさよりも小さい範囲の中で、近接して並行に入った欠陥がある場合、ECT 信号の C スキャン表示では一本の欠陥に見えてしまうが、信号の振幅は、同じ深さの一本だけの欠陥より大きくなってしまふ。Fig.1 には、2mm と 4mm の単独欠陥（インコネル試験片に EDM 加工で作成したスリットで、長さ 20mm、開口幅 0.2mm）のリサージュ波形を、1mm 間隔で平行に入れた深さ 2mm の近接並行欠陥（長さと同じ）と比べたものを示す。計測は、400kHz の探傷周波数でクロスコイル型プローブを用いた。この結果から、振幅だけに着目した深さサイジングをしてしまうと、2mm の平行欠陥を 4mm の単独欠陥と間違えてしまう可能性があることが分かる。しかしながら、リサージュ波形のパターンの違いを定量化できれば、正しい深さサイジングができる可能性がある。小島ら⁽⁶⁾は、欠陥本数を事前知識として与えて深さサイジングする方法を提案しているが、もし、この様な知識なしに深さサイジングすることが可能であれば、実用上のメリットは大きい。本論文の目的は、このような事前知識を用いずに深さサイジングをする方法の提案である。

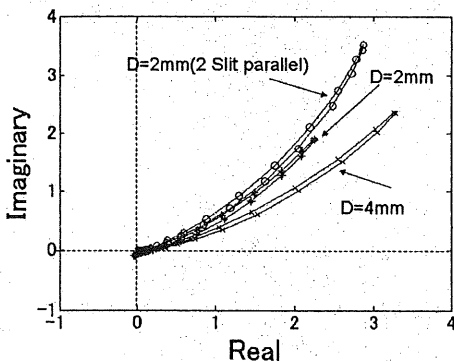


Fig. 1 Comparison of ECT signals of different depth cracks.

3. 深さサイジング指標の導出

前報^(9,10)では、導電率の影響を最小限にする深さサイジング指標を最適化法で求め、これを用いた深さサイジングにより、異なる導電率の欠陥の深さを精度よくサイジングできることを示した。本論文では、この基本的な考え方は踏襲する。すなわち、欠陥の深さのみに感度を持つ深さサイジング指標が存在するという仮定である。

まず、欠陥の表面を走査した際の ECT 計測信号を下記のように表す。

$$y = [y_{am}^{f_k}(x_l), y_{ph}^{f_k}(x_l)]^T, \quad (1)$$

ここで、サフィックスの am と ph は、ECT 信号の振幅と位相を、 f_k は、k 番目の探傷周波数を、 x_l は、l 番目の走査位置とする。このとき、 c を y と同じ次元の未知係数として、下記の線形結合によるパラメータ S を深さサイジング指標として定義する。

$$S = c^T * y \quad (2)$$

この深さサイジング指標 S が、欠陥形状や本数によらず深さのみに感度を持つ仮想信号として求めれば、欠陥深さ d と S の校正曲線を事前に作っておくことで、計測データから深さサイジングができることになる。本論文では、深さに応じて信号が飽和する一般的傾向を考慮して、下記の 2 次式による校正曲線を用いるものとする。

$$d_{pred} = a_1 * S * S + a_2 * S + a_3 \quad (3)$$

ここで、 $a_1 - a_3$ は校正データから求めるフィッティング係数で、 d_{pred} は、深さの推定値である。(2)式の係数 c の決め方は、前報では、導電率への感度を最小にするという条件を用いたが、本報告では、下記の予測誤差を最小にする条件とする。

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d^{(i)_{mes}} - d^{(i)_{pred}})^2 \quad (4)$$

ここで、 N は学習データのケース数である。一方、(2)式で用いる観測信号は、計測周波数、走査位置、

振幅、位相などから多様な組み合わせが選択可能である。この中で適切なモデルを選択するために、下記の赤池情報量基準を用いる。

$$AIC = N \log \sigma^2 + 2p \quad (5)$$

ここで、 p は係数 c の次元である。すなわち、パラメータ数が多いほどペナルティを課し、できるだけ小さいモデルを選択するという考え方である。

4. 検証結果

近接並行欠陥の深さサイジングの検証を目的に、インコネル 600 試験片 (300mmx122mmx10mm 厚) を用いて、Table.1 に示すような 10 種類の EDM スリットを作成した。深さ 2-6mm の欠陥と間隔 1-3mm の近接並行欠陥の他に、欠陥の開口幅 (0.2、0.4mm) や欠陥形状 (矩形、三角、楕円) も作成し、多様な形状の欠陥を模擬している。これらの異なる種類の欠陥に対して正しい深さサイジングをする普遍的な指標を発見することが本論文の目的となる。

Table 1 Slit Types in Test Piece for Depth Sizing

番号	深さ	幅	欠陥長さ	形状	欠陥数	欠陥間隔
1	2mm	0.2mm	20mm	矩形	1	-
2	2mm	0.4mm	20mm	矩形	1	-
3	4mm	0.2mm	20mm	矩形	1	-
4	2mm	0.2mm	20mm	矩形	2	1mm
5	2mm	0.2mm	20mm	矩形	2	2mm
6	6mm	0.2mm	20mm	矩形	1	-
7	2mm	0.2mm	20mm	三角	1	-
8	2mm	0.2mm	20mm	楕円	1	-
9	2mm	0.2mm	20mm	矩形	2	3mm
10	4mm	0.2mm	20mm	矩形	2	1mm

これらの各欠陥の計測は、5mm 外径のクロスコイル型プローブと多重周波数 ECT 信号計測装置 (RD-Tech、MultiScan MS5800) を用いて行い、400、200、100、50kHz の 4 通りの周波数のデータを取得した。プローブの走査は、欠陥を囲む 40mmx40mm の領域で行ったが、その中で、欠陥中央部を直交して走査した一次元方向のデータのみを今回の解析では用いている。さらに、深さサイジング手法の普遍性を確認するために、上記の試験データと同じ計測を電磁界解析で模擬した結果も用いている。模擬した欠陥形状の種類が限られているため、解析によるデータから深さサイジング指標を求め、その指標を試験データで検証することで、手法の普遍性が高められると考えた。また、解析と試験の結

果を同じ校正曲線で扱えることが確認できれば、将来的には、解析で多様な欠陥形状を模擬し、そこから深さサイジング指標を作ることで、試験だけではできない普遍性の高い結果を得ることが出来る。

(2)式の深さサイジング指標の導出に当たっては、(1)式の ECT 計測信号を具体化する必要がある。このために、複数の周波数で計測された ECT 信号から、リサージュ波形を代表する特徴量として、Table.2 に示すような 7 ケースの組み合わせパターンを選んだ。ここで、計測周波数は 400kHz と 100kHz を選択し、また、計測信号の実部・虚部を振幅と位相に変換した量を用いる。更に、リサージュ波形を代表する量として、最大振幅を与える走査位置での値と、その半値となる走査位置での値を含めて、合計 8 種類の計測信号を定義した。さらに、この中から表に示すような 2-8 信号の組み合わせパターンを 7 ケース定義し、この中から最適な深さサイジング指標を探索することとした。

Table.2 Combination of ECT signals for Depth Sizing Index Construction

Frequency	400kHz				100kHz			
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
Position	Max	Max	Max/2	Max/2	Max	Max	Max/2	Max/2
Case								
1	○	○						
2					○	○		
3	○				○			
4		○				○		
5	○	○	○	○				
6	○	○			○	○		
7	○	○	○	○	○	○	○	○

探索手順としては、まず、Table.2 の 7 ケースの観測パターンについてそれぞれ Table.1 の 10 通りの試験データ (電磁界解析による結果) を用いて(4)式を最小にする深さサイジング係数 c と構成係数 a を求める (学習データ、Analysis と記載)。さらに、この係数を、インコネル試験片で得た同じ 10 通りのデータを用いて深さサイジングを行い、(4)(5)式の予測誤差と AIC を評価する。これらの結果をまとめたものが、Table.3 である (テストデータ、Test Piece と記載)。表内に、AIC 最小のケースを下線で示しておいた。なお、予測誤差に関しては平方根をとった値を RMS として示している。これより、学習データで最小値となるケース 7 (8 種の計測信号を全て利用) は、テストデータでは必ずしも最小値とならないことがわかる。学習データへの過渡の適合となったためといえる。一方、ケース 6 が、テストデータでの最小値を与えている。これは、400kHz

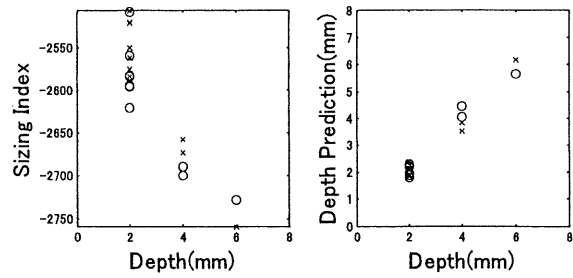
と 100kHz の二つの周波数の振幅と位相差を用いるケースであり、深さサイジング指標は下記のようになった。

$$S = -27.8y_{am}^{400kHz} - 9.5y_{ph}^{400kHz} - 7.4y_{am}^{100kHz} + 21.3y_{ph}^{100kHz}$$

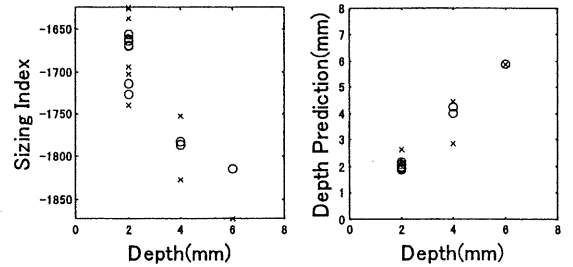
この深さサイジング指標と深さ推定値の結果を Fig.2(a)に示す。丸印は学習データの結果であり、×印はテストデータの結果であるが、いずれのデータに関しても、1mm 程度の誤差範囲内で深さ推定が良好に行われていることがわかる。一方、ケース7の結果を Fig.2(b)に示すが、学習データでの深さ予測の結果は良好であるが、テストデータでの結果が劣化していることがわかる。また、二つのパラメータの中で最良であるケース4 (400kHz と 100kHz の位相差) の結果を Fig.2(c)に示すが、これも、妥当な深さ推定値が得られている。このときの深さサイジング指標は下記のように得られている。

$$S = -4.76 y_{ph}^{400kHz} + 7.08 y_{ph}^{100kHz}$$

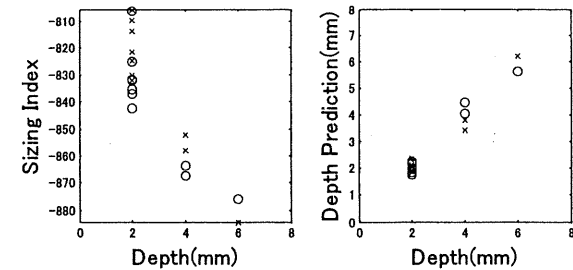
この係数の有効性を見るため、単純な位相差による深さサイジング結果を Fig.2(d)に示した。最適化手法を使うことで大きな精度向上となっていることがわかる。



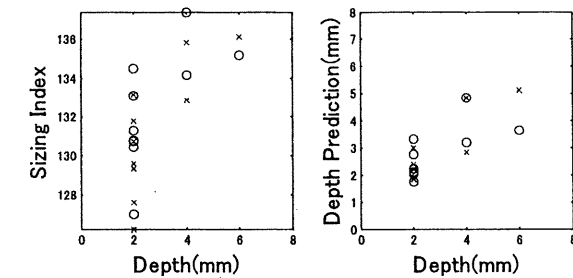
(a) Case.6



(b) Case.7



(c) Case 4



(d) Phase Difference ($S = y_{ph}^{400kHz} - y_{ph}^{100kHz}$)

Fig.2 Depth Sizing Index(Left) and Depth Prediction Results(Right) (Circle: Analysis, Cross: Test Piece)

Table 3 Results of Depth Prediction Error and AIC

Case	Number of Parameter	RMS		AIC	
		Analysis	Test Piece	Analysis	Test Piece
1	2	0.920	0.916	2.335	2.254
2	2	0.663	0.558	-4.223	-7.677
3	2	0.860	0.584	0.975	-6.771
4	2	0.235	0.537	-24.956	-8.427
5	4	0.234	1.137	-21.083	10.563
6	4	0.187	0.132	-21.426	<u>-20.580</u>
7	8	0.113	0.427	<u>-28.175</u>	0.328

5. 結言

近接平行欠陥を含む複雑形状欠陥の深さサイジングを行う方法を提案した。欠陥の本数や形状に影響されず深さのみに感度を持つ深さサイジング指標を最適化法で求めるが、その際、赤池情報量基準 (AIC) を用いて最適なモデルを選択することで、より普遍性のあ

るサイジング方法にすることができた。手法の妥当性は、EDM スリットを付与した試験片を用いた計測と、対応する電磁界解析による模擬データを用いて行った。

今回は、限られた種類の欠陥のみでの検証結果であるが、電磁界解析を利用することで、多様な欠陥を模擬して、そこから普遍的な深さサイジング指標を構築することで、より実用性の高いサイジング手法を確立できると考えられる。特に、SCC 深さサイジング法として確立するためには、複雑形状という要因に加えて、欠陥内の部分接触による導電率の変化も含めて、普遍的な深さサイジング指標を探索してゆく必要があるが、これは今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 高木敏行、遠藤久、“厚肉構造物のための渦電流探傷技術”、非破壊検査、Vol.53、No.10、2004、pp.602-607.
- [2] 小島史男、“渦電流探傷シミュレータと逆問題解析”、非破壊検査、Vol.53、No.10、2004、pp.596-601.
- [3] ラディスラブ ヤノーセック、陳振茂、遊佐訓考、宮健三、“厚肉材に渦電流探傷法を適用するための新しい励磁手法の提唱”、非破壊検査、Vol.54、No.4、2005、pp.206-211.
- [4] W. Cheng, I. Komura and M. Shiwa, “Eddy Current Examination of Fatigue Cracks in Inconel Welds”, under the review of Journal of Pressure vessel technology since May, 2005.
- [5] W. Cheng and K. Miya, “Reconstruction of Parallel Cracks by ECT”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.14, 2001/2002 , pp495-502.
- [6] 兼本茂、程衛英、志波光晴、古村一朗、“渦電流探傷における欠陥形状復元のための新しい信号処理法”、保全学、Vol.5、No.1、2006、pp.63-70.
- [7] N. Yusa, Z. Chen, K. Miya, T. Uchimoto and T. Takagi , “Large-scale parallel computation for the reconstruction of natural stress corrosion cracks from eddy current testing signals”, NDT&E International, Vol.36, 2003, pp.449-459.
- [8] 小島史男、池田拓也、“渦電流探傷法における階層型自然き裂モデルによるき裂診断解析法”、日本保全学会、第2回学術講演会要旨集、2005、pp.81-82.
- [9] W.Cheng, S.Kanemoto, I.Komura and M.Shiwa、 “Depth Sizing of Partial-Contact Stress Corrosion Cracks from ECT Signals”、 NDT&E International、 Vol. 39、 Issue 5、 2006、 pp.374-383.
- [10] 兼本茂、程衛英、志波光晴、古村一朗、“部分接触 SCC の渦電流探傷による新しい深さサイジング法”、保全学、投稿中 (2006) .