

渦電流探傷試験逆問題に対する確率論的評価

Probabilistic Evaluation of Eddy Current Inverse Analyses

普遍学国際研究所	遊佐 訓孝	Noritaka Yusa	Member
普遍学国際研究所	陳 振茂	Zhenmao Zhen	Member
普遍学国際研究所	宮 健三	Kenzo Miya	Member

Abstract This study evaluates the probability of the errors in evaluation of length and depth of a defect from eddy current testing signals measured in inspections of a steam generator tubes in nuclear power plants. Numerous numerical simulations are performed to establish database containing a large number of defect profiles and corresponding eddy current signals; then the probability of error is calculated as a function of the difference in signals using the databases. The results of this study clarify that the eddy current inversion in the configuration is not so ill-posed. Furthermore, this study enables one to evaluate the probabilistic assessment eddy current inversion results.

Keywords: probabilistic non-destructive evaluation, inverse problem, numerical simulation
E-mail: yusa@iiu.co.jp

1. 緒言

数値電磁場解析の高度化に伴い、近年渦電流探傷法によって得られた探傷信号より欠陥形状を推定するための逆解析技術に関する研究が数多く行われている[1]。渦電流探傷信号は本来は超音波探傷信号のように欠陥の形状に関する情報を直接的に伝えるものではないが、これらの研究の結果、計算機上の逆解析により、渦電流探傷信号から欠陥の断面形状を良好な精度で推定することが可能であると認識されるようになってきている。

しかしながら、計算機上で複雑な逆問題解析を行う必要があるということは、渦電流探傷信号から欠陥形状を推定するという作業には、不適切性という問題が潜在しているということの意味している。不適切性とは逆問題が一般的に有する問題であり、この場合では、推定された欠陥形状から計算される探傷信号が探傷試験によって得られたものと全く同じであったとしても真の形状とは異なったものである可能性があることや、わずかな雑音の混入が欠陥推定結果に大きな影響を及ぼしてしまうことなどを意味している。

現実的には、ある欠陥の形状がどの程度正しく推定されたかどうかの基準には探傷信号の一致の度合いを用いる以外は無いのだが、現状

ではある信号の差異がどの程度の推定誤差につながるものかという知見が得られておらず、これは渦電流探傷信号から欠陥形状を推定する技術の実用化においてもっとも大きな問題の一つとなっている。

本研究は以上のような背景により実施されたものであり、渦電流探傷信号の差異が欠陥形状の推定誤差に及ぼす影響を定量的に評価することを目的としたものである。数値解析により構築された、十分な数の渦電流探傷信号-欠陥形状データを含むデータベースに基づき、渦電流探傷信号から欠陥形状を推定するという逆問題の不適切性について検討する。

2. 数値解析による不適切性評価

2.1 解析体系

本研究では、渦電流探傷法が実際に適用されている、軽水炉蒸気発生器伝熱管に発生した軸方向欠陥をパンケーキ型プローブを用いて探傷し、得られた探傷信号より欠陥の形状を推定したことを想定して解析を行った。プローブの励磁周波数は 300 kHz、リフトオフは 0.5 mm と設定した。数値解析における伝熱管の物性値は導電率が 1.0 MS/m、比透磁率は 1.0 である。解析においてはプローブは欠陥直上を軸方向に走査するものとし、0.5mm 間隔 41 点からの探傷

信号を用いて以下の評価を行った。

2.2 欠陥モデル

用いた欠陥モデルを Fig. 1 に示す。欠陥の境界形状は図に示す a, b, d, x_0, L_0 の計 5 つのパラメータを用いて表現されるものとした。この欠陥モデルは半楕円形から矩形までの多彩な欠陥を表すことが出来ることから、実機に発生する複雑な形状を模擬するだけの十分な表現力を有するものであると考えられる。欠陥の各パラメータは Fig. 1 中に示される値をとるものとし、これら全ての組み合わせ 2,863,245 通りについて数値解析を行い、欠陥データベースを作成した。以下この形状推定を行うべき欠陥を含んだデータベースをデータベース A と記す。なお、欠陥の幅については、断面形状と比べて探傷信号に対する影響が小さいことから、本研究においては 0.2 mm の一定値とした。

しかしながら、実際には欠陥の厳密な形状までを明らかにすることは必ずしも必要ではなく、欠陥の最大深さと長さについての情報が得られれば十分であることが多い。また、欠陥形状の推定において複雑な欠陥モデルを用いることは、推定すべきパラメータの数の増大につながり、結果として逆解析が困難となることが予想される。そのため、本研究においては、実際には Fig. 1 のような形状を有する欠陥を、Fig. 2、Fig. 3 のような半楕円形もしくは矩形形状のものとして形状推定を行うこととした。それぞれの場合についてパラメータの組み合わせは 87,906 通りであり、以後半楕円形欠陥のデータベースをデータベース B、矩形欠陥のものをデータベース C と呼ぶ。いずれの場合についても、欠陥の幅はデータベース A と同様、0.2mm と固定して解析を行っている。

2.3 不適切性評価結果

データベース A と B、もしくは A と C に含まれる欠陥の組み合わせ全てについて、

$$\varepsilon = \sum |Z(c_{true}) - Z(c_{rec})|^2 / \sum |Z(c_{true})|^2$$

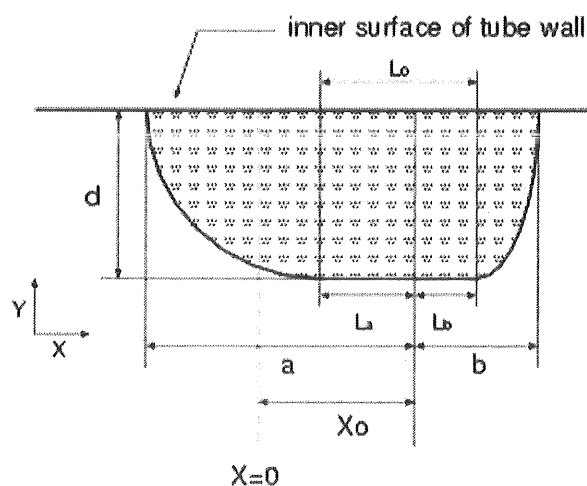
と定義する探傷信号の差 ε と、最大深さおよび長さの誤差である Δd および Δl の値を計算し、渦電流探傷信号からの欠陥形状推定における推定誤

差の評価を行った。ここで Δd と Δl の正負は

$$\Delta d = d - d', \Delta l = (a + b) - 2a'$$

によって定義した。

得られた結果をまとめたものが Table 1, 2 である。半楕円モデルを用いた場合は欠陥形状を大きく見積もるのに対し、矩形モデルの場合は小さく見積もる傾向があることが確認できる。また、全体的に矩形モデルの方が良好な推定結果を与えるものであることも明らかとなった。



Parameter	Value
a	From 0.5 to 5.0mm in 0.25 mm pitch
b	From 0.5 to 5.0mm in 0.25 mm pitch
d	From 10% to 100% in 2.5% pitch
x ₀	From -5.0 to 5.0 mm in 0.5 mm pitch
L ₀	From 0.0 to (a+b) mm in 1.0 mm pitch
L _a	=L ₀ × a/(a+b)
L _b	=L ₀ × b/(a+b)

Fig. 1 Defect modeling and parameters

より定量的な議論を行うために、得られた結果より深さおよび長さの推定誤差の累積分布関数を求めたものが Fig. 4 および Fig. 5 である。このような累積分布関数を用いることで、探傷信号の差異である ε より推定形状の誤差の確率を定量的に評価することが可能となる。例えば、矩形モデルを用いた場合であれば

$$P(|\Delta d| < 5\% | \varepsilon < 0.050) = 0.99,$$

$$P(|\Delta d| < 5\% | \varepsilon < 0.100) = 0.81,$$

$$P(|\Delta d| < 10\% | \varepsilon < 0.100) = 0.98,$$

と計算される。

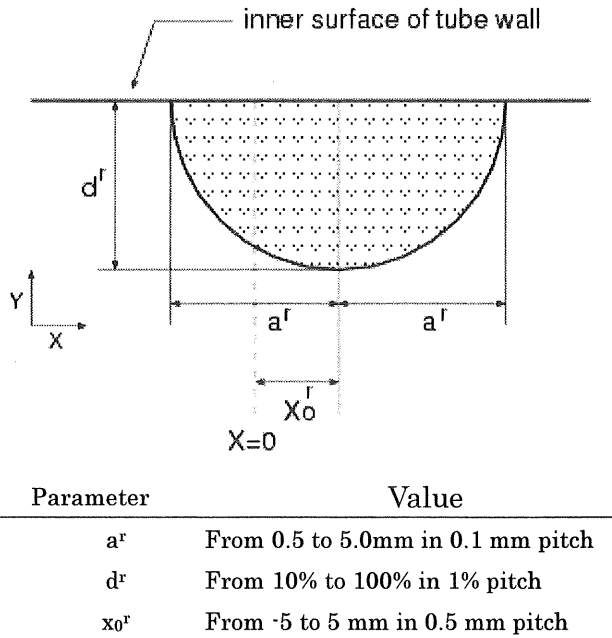


Fig. 2 Semi-elliptic defect model

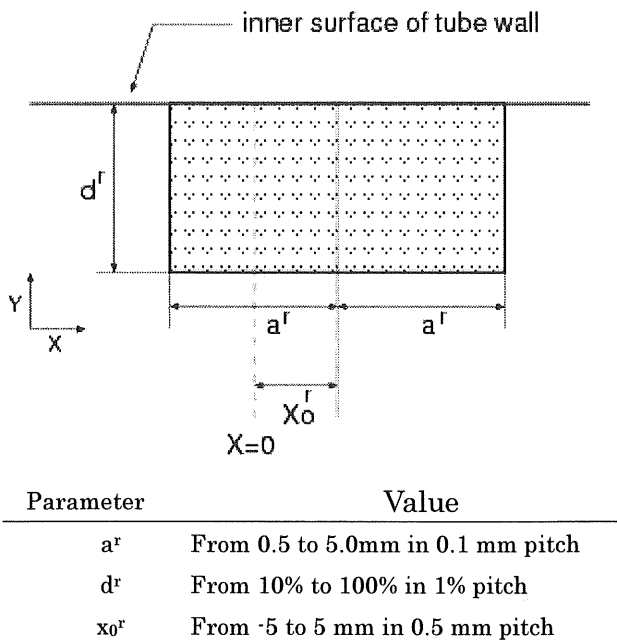


Fig. 3 Rectangular defect model

Table 1 Relationship between ε and Δd , Δl using the semi-elliptic model (Database B)

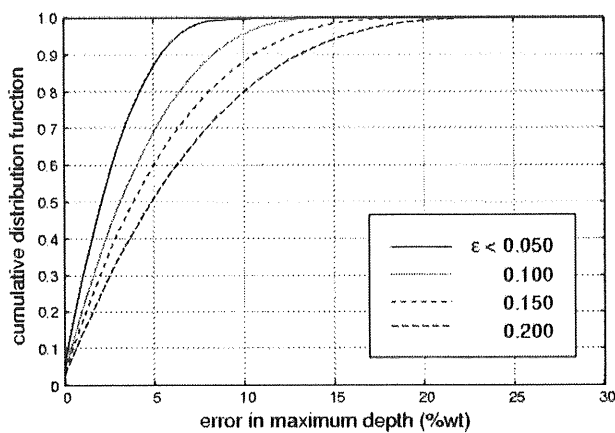
	Δd (%wt)		Δl (mm)	
	mean	variance	mean	variance
$\varepsilon < 0.050$	-2.33	6.18	-0.18	0.77
< 0.075	-2.92	10.77	-0.30	1.82
< 0.100	-3.03	16.41	-0.36	2.99
< 0.125	-2.97	23.76	-0.39	4.44
< 0.150	-2.80	32.79	-0.41	6.24
< 0.175	-2.58	43.67	-0.43	8.40
< 0.200	-2.31	56.45	-0.45	10.93

	$ \Delta d $ (%wt)		$ \Delta l $ (mm)	
	mean	variance	mean	variance
$\varepsilon < 0.050$	2.72	4.23	0.30	0.36
< 0.075	3.54	6.75	0.42	0.92
< 0.100	4.03	9.45	0.49	1.45
< 0.125	4.50	12.35	0.55	2.05
< 0.150	5.01	15.53	0.62	2.75
< 0.175	5.59	19.16	0.69	3.56
< 0.200	6.21	23.36	0.77	4.48

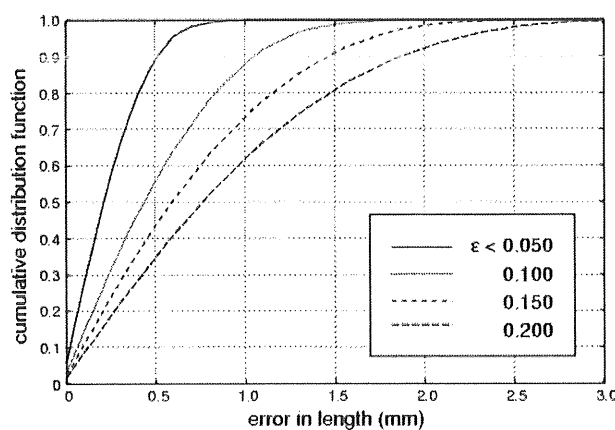
Table 2 Relationship between ε and Δd , Δl using the rectangular model (Database C)

	Δd (%wt)		Δl (mm)	
	mean	variance	mean	variance
$\varepsilon < 0.050$	0.77	3.23	0.26	0.73
< 0.075	1.49	7.78	0.36	1.44
< 0.100	1.90	13.05	0.40	2.18
< 0.125	2.17	19.40	0.41	3.13
< 0.150	2.41	27.13	0.41	4.32
< 0.175	2.65	36.34	0.40	5.79
< 0.200	2.90	47.18	0.39	7.59

	$ \Delta d $ (%wt)		$ \Delta l $ (mm)	
	mean	variance	mean	variance
$\varepsilon < 0.050$	1.46	1.70	0.30	0.51
< 0.075	2.42	4.12	0.42	0.96
< 0.100	3.16	6.72	0.49	1.34
< 0.125	3.82	9.58	0.55	1.75
< 0.150	4.48	12.90	0.62	2.19
< 0.175	5.16	16.75	0.69	2.69
< 0.200	5.86	21.20	0.77	2.68



(a) Depth



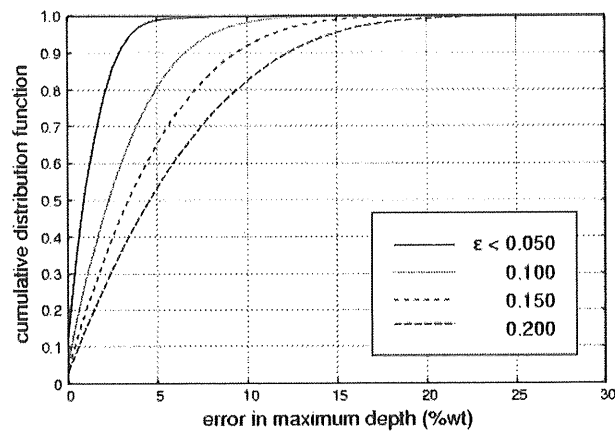
(b) length

Fig. 4 Cumulative distribution function of error in the reconstructions using the semi-elliptic model.

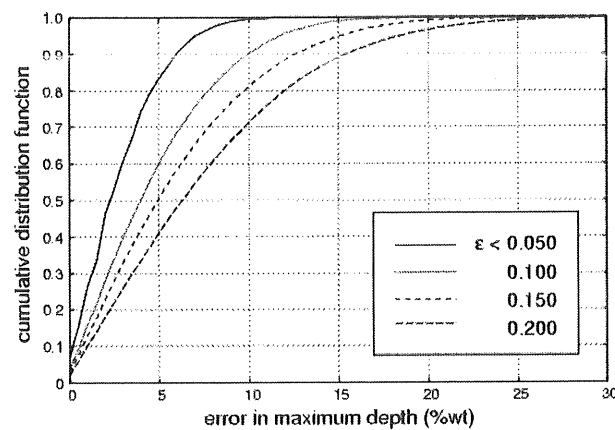
3. まとめ

渦電流探傷信号から欠陥形状を推定するための逆問題における不適切性の評価を数値解析に基づいて行った。誤差の累積分布関数を計算することで、欠陥形状推定結果がどの程度の誤差の確率を含んでいるのかに関する定量的な評価が可能となることを示した。

通常、本研究で取り扱ったように特別な雑音源が存在しない体系においては、精密探傷によって得られた探傷信号と、数値解析との差の割合は 5%程度である。本結果より、そのような体系においては、得られた渦電流探傷信号より欠陥形状を精度良く推定することは十分に可能であり、またその際に複雑な欠陥モデルを用いずとも欠陥の最大深さ、長さについては精度良く推定することが可能であるということ



(a) Depth



(b) Length

Fig. 5 Cumulative distribution function of error in the reconstructions using the rectangular model

も明らかとなった。

今回取り扱った体系においては、形状を半楕円もしくは矩形として欠陥形状の推定を行った場合、前者は欠陥を大きく見積る傾向があるのに対し、後者は小さく見積る傾向があるということが明らかとなった。また、全体的に、形状を矩形として行った推定結果の方が、半楕円形として行った場合よりも、探傷信号のずれの程度が同じであるのならば良好な推定結果となっている可能性が高いということも判明した。

参考文献

- [1] B.A. Auld and J.C. Moulder, "Review of advances in quantitative eddy current nondestructive evaluation", Journal of Nondestr. Eval., Vol. 18, 1999, pp. 3-36.