

# 電磁超音波探触子を用いた配管減肉計測の信頼性評価

## Reliability Assessment of Pipe Wall Thickness Measurements using Electro Magnetic Acoustic Transducer

職業能力開発総合大学校	小坂 大吾	Daigo KOSAKA	Member
神戸大学大学院	小島 史男	Fumio KOJIMA	Member
神戸大学大学院	中本 裕之	Hiroyuki NAKAMOTO	Non Member
神戸大学大学院	田端 大樹	Hiroki TABATA	Non Member
神戸大学大学院	加藤 翔	Sho KATO	Non Member

This paper is concerned with risk assessment of pipe wall thinning management. The reliability of the NDT systems is evaluated from probability of detection (POD). The statistical uncertainty of NDT reliability is then represented by a conservative confidence bound on the POD function. The idea is applied to the pipe wall thinning management using electro magnetic acoustic transducer.

**Keywords:** Probability of Detection, Nondestructive Test, Pipe Wall Thinning Measurement, Inspection, Risk Assessment

## 1 緒言

発電所は、日本機械学会が定める減肉管理規定に基づき、定期的に配管の肉厚測定を行っている[1]。減肉管理の高度化として、配管減肉の予測に基づく保全が検討されており、配管減肉予測シミュレーション技術について研究が行われている[2,3]。減肉進展予測では定期的に測定値による補正をかけていることから、配管厚さの初期値、補正值(定期点検時の測定値)が正確であることが求められる。

本研究においては、計測値の解析によって求められる Probability of detection(以下では、POD とする)による配管の残存肉厚計測の信頼性評価法を提案する[4]。この評価法は、米国国防省における航空機機体のき裂計測やスウェーデンの核燃料廃棄物格納容器の欠陥計測において適用事例がある[5]。本論文では、POD による計測データの信頼性評価法と適用の条件について述べる。次に事例として、配管の構成要素である直管、エルボ、レデューサを対象物とした、電磁超音波探触子 (Electro-Magnetic Acoustic Transducers : EMAT) の計測データから評価法を用いて残存肉厚の信頼下限値を求める。その信頼下限値に基づき、計測に対する信頼性を考察する。

連絡先:小島史男  
神戸大学大学院 工学研究科 情報知能学専攻  
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1  
E-mail: kojima@koala.kobe-u.ac.jp

## 2 POD を用いた信頼性評価法

非破壊検査の信頼性評価のためには、Fig.1 に示すように、3つの計測条件を定める必要がある。1つ目の条件は、試験体の形状や寸法、計測点を定める計測性能評価条件である。2つ目の条件が、計測機器の機種や設定、キャリブレーションの日程などを定めた計測機器の仕様・規格に関する条件である。3つ目の条件として、計測方法や検査員の技量を定める計測方法の標準化がある。これらの条件を整えることで非破壊での計測データの再現性が得られるとし、次に示す信頼性の評価値を求める。

検出確率  $POD(d)$  は残存肉厚  $d$  とその計測によって得られる信号値  $\Delta f$  の関係で表現できる。残存肉厚  $d$  に対する信号値  $\Delta f$  の関係は確率密度  $g_d(\Delta f)$  とすると、決定閾値  $\Delta f_{dec}$  に対する  $POD(d)$  は

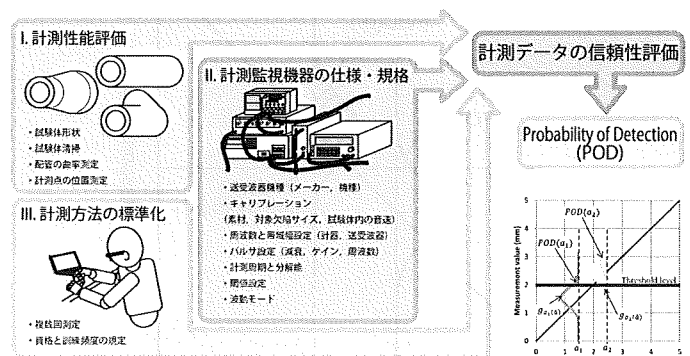


Fig. 1 Reliability evaluation using POD

$$POD(d) = \int_{\Delta f_{min}}^{\infty} g_d(\Delta f) d\Delta f \dots\dots\dots(1)$$

となる。Fig.2 の斜線部分が検出確率  $POD(d)$  を示す。この時、残存肉厚  $d$  に対する信号値  $\Delta f$  の関係が

$$\Delta \hat{f} = \mu(d) \dots\dots\dots(2)$$

で与えられるとし、その対数をとって

$$\ln(\mu(d)) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) \dots\dots\dots(3)$$

で十分に直線近似できると仮定する。この仮定の下で測定モデルを対数直線帰帰モデルで与える。

$$\ln(\Delta \hat{f}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \delta \dots\dots\dots(4)$$

この時、測定誤差  $\delta$  は平均 0、分散  $\sigma_\delta^2$  の正規型確率変数とする。 $\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta$  は最尤推定法によって求まる。この時、モデルの仮定下において、決定閾値  $\Delta \hat{f}_{dec}$  に対する  $POD(d)$  は以下の式で与えられる。

$$POD(d) = \Phi \left\{ \frac{\ln(d) - \mu}{\sigma} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

$$\mu = \frac{\ln(\Delta \hat{f}_{dec}) - \beta_0}{\beta_1}, \sigma = \frac{\sigma_\delta}{\beta_1} \dots\dots\dots(6)$$

この時  $\Phi$  はガウスの累積密度関数である。また、 $POD(d)$  の 95% 下限信頼区間は

$$POD_{95}(d) = \Phi(z - h) \dots\dots\dots(7)$$

で与えられ、

$$z = \frac{\ln(d) - \mu}{\sigma} \dots\dots\dots(8)$$

$$h = \left\{ \frac{\gamma}{nk_0} \left[ 1 + \frac{(k_0 z + k_1)^2}{(k_0 k_2 - k_1^2)} \right] \right\}^{0.5} \dots\dots\dots(9)$$

となる。 $n$  は検査回数、 $\gamma$  は推定したい信頼区間下限値を示す。 $k_0, k_1, k_2$  はフィッシャーの information matrix  $I(\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta)$  から推定される信頼区間決定のためのパラメータである[6]。

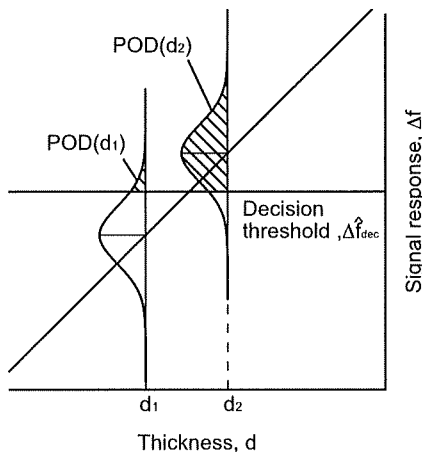


Fig. 2 Schematic of  $POD(d)$  calculation

### 3 EMAT による残存肉厚の計測

EMAT の計測原理を Fig.3 に示す[7]. EMAT の探触子は永久磁石とコイルにより構成されており、対象物が磁性体の場合、コイルに電流を流すことによって作用するローレンツ力と磁歪の力、磁化力によって超音波を発生させる[8,9]. この超音波と反射波間で共振が起こり、共振周波数を用いて式(8)により対象物の残存肉厚を求めることがで

きる。ただし式(8)において、残存肉厚  $d$ 、音速  $c$ 、 $\Delta f$  は EMAT の出力信号から得られる共振周波数間隔を表す。

$$d = \frac{c}{2\Delta f} \dots\dots\dots(10)$$

この計測に係る 2 節で述べた計測性能評価条件として、計測対象を減肉加工された直管、エルボ、レデューサとする。これらの試験体の材質、呼び径、呼び厚さは同一であり、詳細な寸法と形状を Fig.4 から Fig.6 に示す。計測機器の条件として、Fig.7 に機器構成を示す。

送信は、パルサー電源によって 200V、100us のバースト波を発生させ、EMAT に印加する。この際、共振周波数を得るために送信波の周波数を 3MHz から 5MHz の間で掃引する。受信は、ダイプレクサーを介して 40dB のアンプと 500kHz-5MHz のバンドパスフィルタを介して行う受信波に対して送信波を中心としたある程度の周波数間隔を求めることができる。

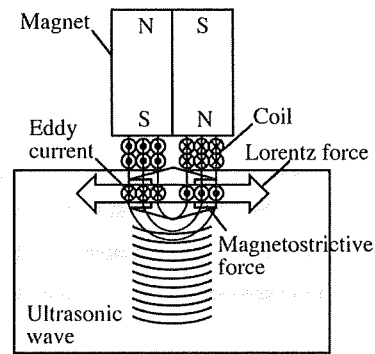


Fig. 3 Principle of EMAT

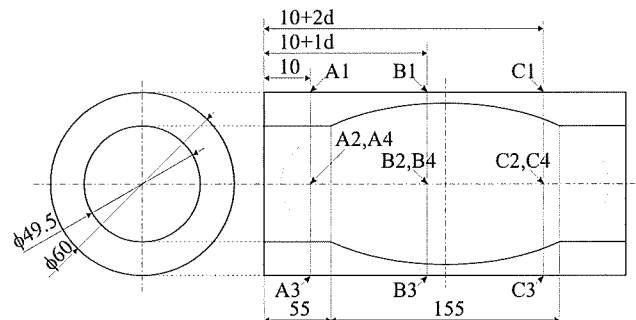


Fig. 4 Straight pipe with wall thinning

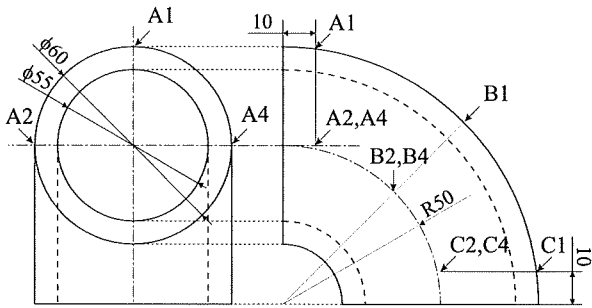


Fig. 5 Elbow specimen

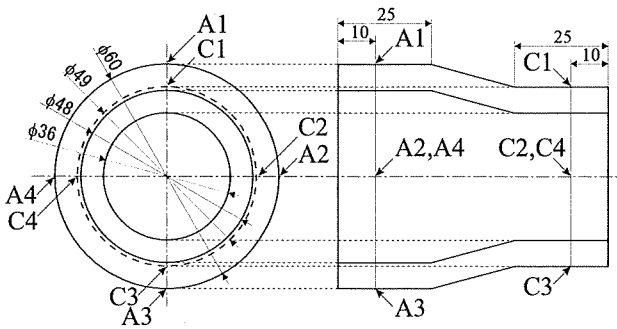


Fig. 6 Reducer specimen

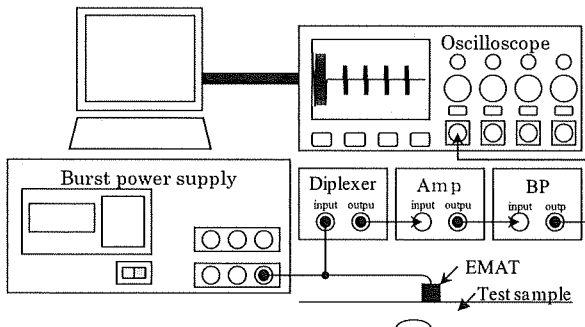


Fig. 7 Experimental setup

#### 4 適用結果

3章で定めた機器の仕様・規格で、対象の試験体を標準化した方法で、PODを作成するためのデータを試験体ごとに測定する。次に、機械学会が定める測定点を計測し得られた信号値 $\Delta f$ を決定閾値 $\Delta \hat{f}_{dec}$ としたPODを作成し、信頼性評価を行う。

直管やエルボ、レデューサの各測定点に対して10回測定を行った。これらの集積された計測データをもとに、 $\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta$ を最尤推定法によって求めた値をTable 1に示す。次に一例として直管における $\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta$ と式(4)-(8)を用いて $\Delta \hat{f}_{dec} = 810$  (残肉 2.0mm)における $POD(d)$ と95%下限信頼区間を決定するパラメータの推定を行った結果を

Table 1 Estimated parameters using maximum likelihood estimation method

試験体	$\beta_0$	$\beta_1$	$\sigma_\delta$
直管	7.36	0.98	0.036
エルボ	7.48	1.05	0.050
レデューサ	7.35	0.98	0.056

Table 2 Estimated parameters of straight pipe ( $\Delta \hat{f}_{dec} = 810$ )

$\mu$	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$d_{90/95}$
0.68	-83	5827	-404979	1.88

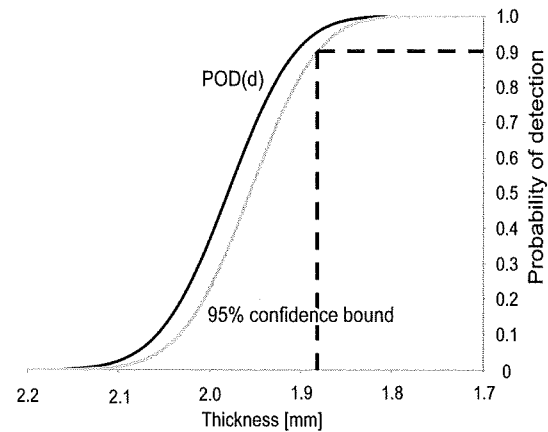


Fig. 8  $POD(d)$  function and lower 95% confidence bound of straight pipe with wall thinning ( $\Delta \hat{f}_{dec} = 810$ )

Table 2に示す。またこの時の $POD(d)$ と95%下限信頼区間をFig.8に示す。 $d_{90/95}$ は $POD(d)$ の90%の検出確率と95%下限信頼区間の交点で与えられる。 $d_{90/95}$ は $\Delta \hat{f}_{dec}$ が設定された時に、 $\Delta \hat{f}_{dec}$ に対応する残存肉厚が90%の確率で検出でき、 $d_{90/95}$ 値以上の残存肉厚があることを95%保証する。従ってEMATによって残存肉厚が2.0mmと計測された場合には、 $d_{90/95} = 1.88$ mm以上の残存肉厚が保証される。直管における各測定点の測定値に対する $d_{90/95}$ の推定結果をTable 3に示す。

次にFig.4に示したエルボの計測点に対する $d_{90/95}$ をTable 4, Fig.5に示したレデューサの計測点に対する $d_{90/95}$ をTable 5に示す。直管の結果であるTable 3と比較するとTable 4, Table 5では、直管の結果であるTable 3と比較すると、真値 $d$ との差が1mm以上と大きい。試験体形状以外の条件を一致させて計測したことから、この結果はEMATによる残存肉厚計測の信頼性が試験体形状の影響

Table 3  $d_{90/95}$  of straight pipe with wall thinning

		1	2	3	4
A	d	5.3	5.5	5.3	5.5
	$d_{90/95}$	5.03	5.22	5.03	5.22
B	d	2.1	2.1	1.9	2.0
	$d_{90/95}$	1.95	1.95	1.76	1.88
C	d	3.6	3.6	3.6	3.2
	$d_{90/95}$	3.36	3.36	3.36	2.99

Table 4  $d_{90/95}$  of elbow

		1	2	3	4
A	d	5.5	5.29	5.46	5.5
	$d_{90/95}$	4.03	3.85	4.00	4.03
C	d	6.38	6.15	6.34	6.4
	$d_{90/95}$	4.96	4.78	4.93	4.98

Table 5  $d_{90/95}$  of reducer

		1	2	3
A	d	5.26	6.31	6.42
	$d_{90/95}$	4.19	5.08	5.19
B	d	5.17	6.32	6.2
	$d_{90/95}$	4.08	5.09	4.81
C	d	6.06	6.34	6.38
	$d_{90/95}$	4.67	5.11	5.14

影を受けることを示している。

## 5 まとめ

本論文では、非破壊検査における計測方法・条件に対する信頼性の評価を目的として、計測データから求めた POD の  $d_{90/95}$  による評価方法について述べ、EMAT の計測データの適用事例を示した。今後は、十分な信頼性を確保するための条件について検討し、他の計測方法で得られた計測データへの適用も試みる。

## 謝辞

本研究は経済産業省原子力安全・保安院の「平成 23 年度高経年化技術評価高度化事業」において実施した研究である。関係各位に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格, JSME S NG-1(2006)
- [2] 内田 俊介, 内藤 正則, 岡田 英俊, 越塚 誠一, 大平 拓, “静的電気化学解析と動的酸化皮膜成長解析を結合したモデルによる PWR 給水系配管の減肉評価”, 日本機械学会, 動力・エネルギー技術の最前線講演論文集, pp. 347-350(2010)
- [3] 町田 秀夫, 荒川 学, 平沼 巨樹, 設楽 親, “BWR プラント配管減肉管理に対する LRFD の適用”, 日本機械学会, M&M 材料力学カンファレンス 2008, OS0308-1(2008)
- [4] "Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment", Department of Defense Handbook, pp.49-53, 81-144 (2009)
- [5] Christina Muller, Mstislav Elaguine, Carsten Bellon, Uwe Ewert, Uwe Zscherpel, Martina Scharmach and Bernhard Redmer : "POD (Probability of Detection) Evaluation of NDT Techniques for Cu-Canisters for Risk Assessment of Nuclear Waste Encapsulation", ECNDT 2006, Fr.2.5.1 (2006)
- [6] P. Berens : "NDE Reliability Data Analysis", ASM Handbook Volume 17, pp689-701(1989)
- [7] R.B. Thompson : Physical principles of measurements with EMAT transducers, in:Physical Acoustics, Vol.19, Academic Press, New York, pp157-200 (1990)
- [8] K. Kawashima, Very high frequency EMAT for resonant measurement, in: Proc IEEE Ultrasonic Symposium, No. 2, pp1111-1119 (1994)
- [9] M. Hirao, H. Ogi, T. Ohtani, and T. Morishita: Electromagnetic Acoustic Resonance to Assess Creep Damage in 2.25Cr-1Mo Steel, Nondestructive Characterization of Materials in Aging Systems (Materials Research Society, Vol. 503), edited by R.L.Crane et al., pp.31-36 (1998)