



## 検出確率を用いた超音波厚さ計測による 配管減肉検査の信頼性評価について

Reliability assessment for thickness measurements of pipe wall  
using probability of detection

神戸大学  
神戸大学  
神戸大学

中本 裕之  
小島 史男  
加藤 翔

Hiroyuki NAKAMOTO  
Fumio KOJIMA Member  
Sho KATO

This paper proposes a reliability assessment method for thickness measurements of pipe wall using probability of detection (POD). Thicknesses of pipes are measured by qualified inspectors with ultrasonic thickness gauges. The inspection results are affected by human factors of the inspectors and include some errors, because the inspectors have different experiences and frequency of inspections. In order to ensure reliability for inspection results, first, POD evaluates experimental results of pipe-wall thickness inspection. We verify that the results have differences depending on inspectors including qualified inspectors. Second, two human factors that affect POD are indicated. Finally, it is confirmed that POD can identify the human factors and ensure reliability for pipe-wall thickness inspections.

**Keywords:** pipe-wall thickness measurements, reliability assessment, probability of detection, human factors

### 1. はじめに

火力や原子力発電プラントの配管減肉管理では、欠陥や減肉によって引き起こされる配管の破裂や内容物の漏えいなどの事故を防ぐために配管厚検査が行われている。この配管厚検査は、日本機械学会が定める配管減肉管理規格によって超音波厚さ計を用いた定期的な実施が定められており、非破壊検査協会規格や日本工業規格によって認定を受けた有資格者によって実施されている[1]。しかしながら、同じ資格を持つもの同士であっても、検査の経験や頻度などから検査者個人の技量の差が生じる。この人的要因（以降では、ヒューマンファクタとする）が検査の結果に影響を与えるため、検査の結果である配管厚は誤差をもつ。検査者が検査を実施する以上、このヒューマンファクタが原因となる誤差を0にすることは不可能である。発電プラントの老朽化が進み配管厚検査の対象が増える中、検査者個人の非破壊検査技術の評価し、適材適所に検査者を配置し高効率かつ信頼性の高い検査を実施することが求められている。

そこでヒューマンファクタを有する超音波厚さ計による配管厚検査を対象として、検査技術の信頼性の評価に用いられている検出確率(POD:Probability of detection)を適用し、PODを用いてヒューマンファクタの影響の評価方法を提案する。このPODは検査結果データから信号応答モデルを同定することで求められ、米国国防省における航空機機体のき裂検査、スウェーデンの核燃料廃棄物格納容器の欠陥検査において適用事例がある[2][3]。これらはPODを用いて検査の信頼性についての基礎的な検討のみがなされており、日本の配管厚検査における高効率かつ信頼性の高い検査の実施というニーズに応じられる検査者の技量の評価、特にヒューマンファクタの影響の定量化までは議論されていない。本論文では、PODによってヒューマンファクタの影響を抽出し、検査の信頼性を定量的に評価できることを検証する。以降では、PODの適用の条件について述べ、さらに検査結果データから信号応答モデルを同定する方法について述べる。次に、有資格者を含む複数の検査者によって配管厚模擬検査を実施し、PODが検査者毎に異なることを確認する。このときPODに影響を与えるヒューマンファクタを挙げ、逆にPODからそのヒューマンファクタを特定できる、すなわち検査者の技術的な問題点を特定できることを検証し、配管厚検査においてPODを指標とした信頼性評価の可能

連絡先:中本裕之  
神戸大学大学院システム情報学研究所  
〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1、  
E-mail: nakamoto@panda.kobe-u.ac.jp

性と有効性を示す。

## 2. 検出確率 POD による信頼性の評価

### 2.1 検査データ収集の条件

非破壊検査における POD を求めるためには、Fig.1 に示すような検査実施のための 3 つの条件を定める必要がある[4]。1 つ目の条件は、検査の対象となる試験体の形状や試験体上の検査の位置などを定める試験体に係る条件である。2 つ目の条件は、検査に用いる機器の機種や設定、校正日程などを定める検査機器に係る仕様及び規格に関する条件である。最後の条件として、検査の方法や検査員の技量及び経験に関する条件がある。これらの条件を揃えることにより、非破壊検査における検査データの再現性が得られ、その検査データを用いて POD(a)関数を決定できる。

POD(a)関数の決定方法として、検査データの形式の違いに対応した 2 つの方法、Hit/Miss 法と  $\hat{a}$  analysis 法が提案されている[4]。Hit/Miss 法は検査の結果が 1(Hit)または 0(Miss)で表される場合に用いられ、多くの検査結果を用いることで POD(a)関数のパラメータの推定ができ検出確率が求められる。この方法は米国空軍において航空機の機体に発生したき裂の検出結果に対して適用事例がある[2]。一方、 $\hat{a}$  analysis 法は計測対象の大きさに基づく応答信号とその大きさの真値の関係から POD(a)関数のパラメータを推定する方法である。この方法で、非破壊検査技術である電磁超音波法を用いた検査の信頼性の評価に関する研究が進められている[5][6]。同様に、本研究で対象としている配管厚検査に用いる超音波厚さ計も配管の厚さに対応した連続的な信号を出力することから、本研究においても後者の  $\hat{a}$  analysis 法を用いる。

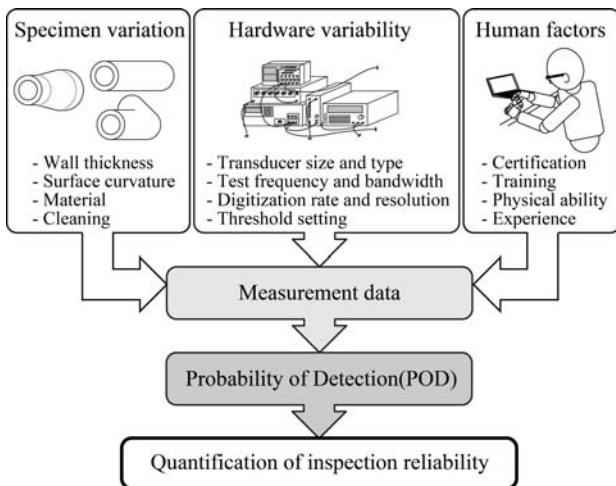


Fig.1 Reliability assessment using probability of detection.

### 2.2 $\hat{a}$ analysis 法による POD(a) 関数の決定

配管厚検査における配管厚  $a$  とその応答信号値  $\hat{a}$  の関係から POD(a)関数を決定する。まず試験体を用いて配管厚検査を実施し、配管厚  $a$  とその応答信号値  $\hat{a}$  を組とする測定データセットを収集する。次に、対数直線回帰により応答信号モデルを作成する。配管厚  $a$  に対する応答測定信号値  $\hat{a}$  の関係を確率密度  $g_a(\hat{a})$  に従うとすると、決定閾値  $\hat{a}_{dec}$  に対する POD(a)は

$$POD(a) = \int_{-\infty}^{\hat{a}_{dec}} g_a(\hat{a}) d\hat{a} \quad (1)$$

となる。ただし、閾値  $\hat{a}_{dec}$  は検出したい配管厚として任意に決定可能な値である。Fig.2 は POD(a)算出の概要を表しており、斜線部分は応答信号値  $\hat{a}$  が閾値  $\hat{a}_{dec}$  を下回った場合の検出確率 POD(a)を示す。一般的に、配管厚  $a$  と信号値  $\hat{a}$  の関係は(2)式で表すことができる。

$$\hat{a} = w(a) + \delta_{ga} \quad (2)$$

ここで  $w$  は応答信号値から配管厚を求める関数、 $\delta_{ga}$  は測定ノイズを表し、 $\delta_{ga}$  の確率密度分布は  $g_a(\hat{a})$  によって決定される。この配管厚  $a$  と信号値  $\hat{a}$  の関係をモデル化し、直線回帰が可能なよう両対数を取ることで(3)式を得る。

$$\ln(\hat{a}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(a) + \delta \quad (3)$$

この時、 $\delta$  は平均 0 で標準偏差  $\sigma_\delta$  の正規分布とする。この  $\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta$  推定値  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\sigma}_\delta$  は最尤推定法によって求める。このとき POD(a)関数は以下の式で与えられる。

$$POD(a) = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(a) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right] \quad (4)$$

$$\hat{\mu} = \frac{\ln(\hat{a}_{dec}) - \hat{\beta}_0}{\hat{\beta}_1}, \quad \hat{\sigma} = \frac{\hat{\sigma}_\delta}{\hat{\beta}_1} \quad (5)$$

ここで  $\Phi$  は標準正規分布の累積分布関数であり、 $\hat{\mu}$  と  $\hat{\sigma}$  はそれぞれ配管厚の平均と標準偏差を示す。また、POD(a)関数の  $\alpha$  % 信頼下限は(6)式で表される。

$$POD_\alpha(a) = 1 - \Phi(\hat{z} - h) \quad (6)$$

ただし、

$$\hat{z} = \frac{\ln(a) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (7)$$

$$h = \left[ \frac{\gamma}{nk_0} \left[ 1 + \frac{(k_0 \hat{z} + k_1)^2}{(k_0 k_2 - k_1^2)} \right] \right]^{0.5} \quad (8)$$

となる。 $n$  は検査回数を表す。 $\gamma$  は信頼係数であり、 $n$  と設定した信頼下限  $\alpha$  % から決定される[7][8]。 $k_0, k_1, k_2$  は POD(a)関数のパラメータ  $\theta = (\mu, \sigma)$  の最尤推定値によって決定される。

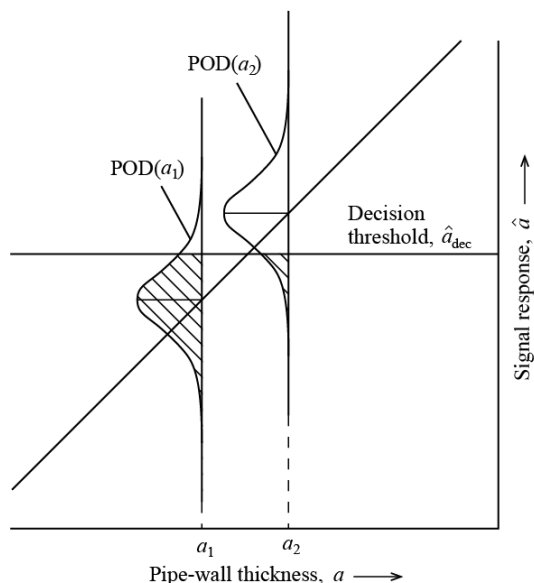


Fig.2 Schematic of  $POD(a)$  calculation.

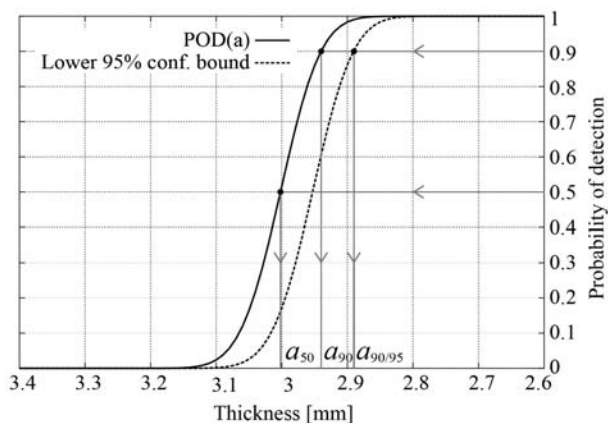


Fig.3  $POD(a)$  function, lower 95% confidence bound and evaluation indicators.

### 2.3 $POD(a)$ 関数から得られる評価指標

$POD(a)$ 関数とその95%信頼下限の例をFig.3に示す。Fig.3において、 $POD(a)$ 関数を実線で、95%信頼下限を破線で表す。 $POD(a)$ 関数を決定づける変数として $\hat{\mu}$ と $\hat{\sigma}$ がある。これらはそれぞれ $POD(a)$ 関数の配管厚方向の位置と傾きを決定し、決定閾値 $\hat{a}_{dec}$ に対応する $POD$ が50%に近く、傾きが急なほど高い信頼性をもって検査が可能であることを示す。さらに、 $POD(a)$ 関数の逆数によって定義される $a_{50}$ 、 $a_{90}$ 、 $a_{90/95}$ に着目する。 $a_{50}$ は $POD(a)$ 関数の検出確率が50%となる配管厚の値であり、決定閾値 $\hat{a}_{dec}$ に対する $POD(a)$ 関数の平均値である。 $a_{90}$ は $POD(a)$ 関数の検出確率が90%となる配管厚の値であり、決定閾値 $\hat{a}_{dec}$ に対応する信号値によって90%の検出が可能な配管厚を表す。 $a_{90/95}$ は $POD(a)$ 関数の95%信頼下限に対し

て検出確率が90%となる配管厚を表しており、 $a_{90}$ よりも保守的な値となっている。すなわち、 $a_{90/95}$ は決定閾値 $\hat{a}_{dec}$ に基づいて作成した $POD(a)$ 関数の95%信頼下限において、90%の信頼性で検出可能な配管厚を表す。

$a_{50}$ 、 $a_{90}$ 、 $a_{90/95}$ を評価指標とすることで、超音波厚さ計の仕様や検査者の技能などが含まれた信号応答モデルを用いて、検出したい配管厚やそれよりも減肉が進行した配管厚の存在の可能性を評価できる。次節以降ではそれらの評価指標を用いて、その検査条件に対する検査の信頼性を定量化できることを示す。

### 3. 超音波厚さ計を用いた配管厚の模擬検査実験

配管厚検査の結果に対し $POD(a)$ 関数を求めるため、超音波厚さ計を用いて模擬検査実験を実施した。本実験では特に人的要因の影響を確認するため、それ以外の試験体に係る条件及び検査機器に係る条件は一定にし、検査者を変更した場合の検査結果を収集した。各条件については次の通りとした。

#### ・試験体

試験体として、直径60.5mm、配管厚5.5mmの2B配管を母材とし流れ加速型腐食を模擬した切削加工を施した後、流れ方向に半分に切った17本の配管を用いる。Fig.4に試験体を示す。試験体の表面には、検査位置を示す円が7個だけマーキングされており、それぞれに1から7の番号を付けた。Fig.5に試験体の構造を示す。各試験体の4番は最も配管厚が薄い箇所であり、17本に対して1.5から5.5mmの範囲で配管厚を残すよう加工の程度を変化させた。すべての検査位置の配管厚はレーザー距離計で事前に計測し、それを2章2節における配管厚 $a$ として用いる。

#### ・検査機器

検査機器としてFig.6に示すような超音波厚さ計を使用する。主な仕様は次の通りである。超音波厚さ計の出力値は厚さであるため、2章2節における応答信号値 $\hat{a}$ は計測した配管厚とする。）

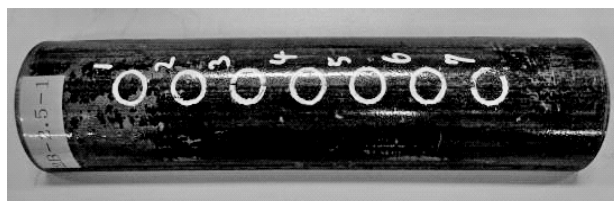


Fig.4 Example of specimen.

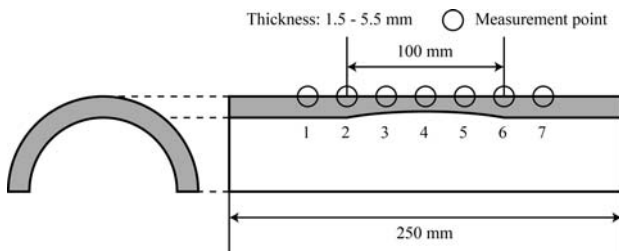


Fig.5 Specimen structure.

- 測定器 : DM-4 (GE Inspection Tech.社製)
- 探触子 : DA-401 (GE Inspection Tech.社製)
- 接触媒質 : ソニコート
- 測定方式 : パルス・エコー方式
- 測定回数 : 1 回

・検査者

日本非破壊検査協会規定の非破壊検査技術者の資格証明書をもつ配管厚検査の経験の豊富な2名(技術レベル3と技術レベル2をもつ者をそれぞれAとBとする)と無資格者3名(C, D, Eとする)の計5名とする[9]. 各技術レベルに対応する技術は次の通りである. ただし, NDTは非破壊検査を意味する.

- 技術レベル3

NDTに精通し, 全てのNDT作業を実施したり指示する能力を有するもの.

- 技術レベル2

確立されている, 又は認可されているNDT手順書に従ってNDT作業を実施したり指示する能力を有するもの.

さらに模擬検査時に各検査者に指示した検査条件及び手順を次に示す. プラントの非破壊検査では, 検査者は校正試験体を携帯し1日に数回の校正を行うことから, この手順にも校正を実施するプロセスを含めた. 無資格の検査者に対しては検査機器の使用方法や検査手順について十分な練習と説明をした上で模擬検査を実施した.

・検査条件

- 室温 (10~30°C) 実施すること
- 各校正試験体の白い円形マーキングの中心の校正値を取得すること
- 各試験体の白い円形マーキングの中心を測定すること
- 測定値は小数点以下第2位まで記録すること



Fig.6 Ultrasonic thickness gauge.

・検査手順

- (1) 校正試験体の2点(1.0mmと6.0mm)で2点校正を実施し, (2)へ進む
- (2) 校正試験体の2点で値が0.2mm以上ずれていないことを確認する  
→ずれていれば(1)へ戻る  
→ずれていなければ(3)へ進む
- (3) すべての試験体の円形マーキングされた7点を順番に測定し, それを10回行い(4)へ進む. ただし, 4時間以上連続して測定する場合, または4時間以上の休憩が生じる場合, (4)へ進む
- (4) 校正試験体の各1点で値が0.2mm以上ずれていないことを確認する  
→ずれていれば(3)の結果を破棄, (1)へ戻る  
→ずれていなければ(5)へ進む
- (5) (3)の結果を保存する  
→未測定の実験体がある場合, (3)へ戻る  
→全ての試験体の検査が完了すれば終了

以上の模擬検査により, 得られる検査結果の数は一人当たり1190となる.

#### 4. 実験結果

3章で定めた模擬検査実験にて得られた結果の配管厚を用いて,  $POD(a)$ 関数を決定した. まず, 5名の検査者ごとに配管厚  $a$  と計測した配管厚  $\hat{a}$  からなるデータセットを作成する. このデータセットをもとに, 対数直線回帰により応答信号モデルを作成する. 検査者Aの例をFig.7に示す. Fig.7より, 配管厚  $a$  と計測した配管厚  $\hat{a}$  の各対数が線形関係にあることがわかる. また最尤推定法によって得られた各検査者の応答信号モデルのパラメータ ( $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\sigma}_\varepsilon$ )をTable 1に示す. このモデルの仮定下に

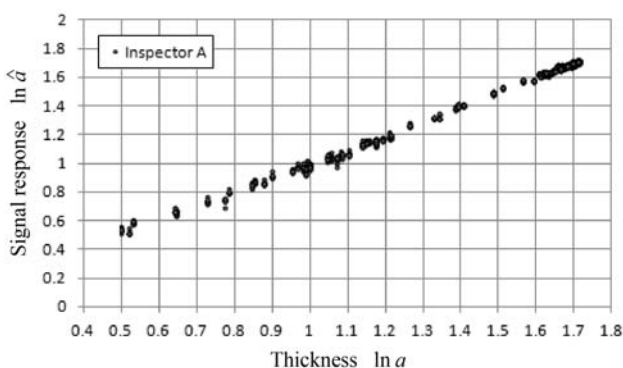


Fig.7  $\ln \hat{a}$  versus  $\ln a$  relation of inspector A.

において、(4)式と(6)式を用いて決定した決定閾値  $\hat{a}_{dec} = 3.0$  における  $POD(a)$ 関数と 95%信頼下限を Fig.8 に示す。またこの時の  $POD(a)$ 関数のパラメータの推定値と評価指標を Table 2 に示す。Fig.8 より、各検査者において  $POD(a)$ 関数の傾きが異なっていることがわかる。 $\hat{\sigma}$  が小さいほど  $POD(a)$ 関数の傾きが急になっており、検出確率の変化も大きくなる。各検査者の  $\hat{\sigma}$  について大小関係は  $A < B < C < D < E$  であり、有資格者が無資格者よりも小さく有資格者間でもレベルが上位の者が小さい結果となっている。この結果は検査者の技量に対応しており、 $\hat{\sigma}$  を用いて検査の精密さの評価が可能であるといえる。次に  $a_{50}$  に着目する。決定閾値  $\hat{a}_{dec} = 3.0$  としたことから、 $a_{50}$  が 3.0 に一致すれば検出確率 50%で配管厚を検出できることを示す。逆に 3.0 から離れるほど検査結果の絶対誤差が大きいとみなせる。5 人の検査者中では検査者 A の  $a_{50}$  が最も誤差が小さく、検査者 E が 3.0 と最も離れていることより、後者は検出したい値に関して絶対誤差をもつ検査結果であるといえる。さらに Fig.8 より、検査者 A の  $POD(a)$ 関数と 95%信頼下限間の幅が検査者 E の幅よりも小さいことが読み取れる。これは Table 2 の  $a_{90/95}$  でも確認でき、 $a_{90/95}$  と  $a_{50}$  の差が小さいほど信頼度の高い検査結果とみなせる。

Table 1 Estimated values of  $POD(a)$  function of each inspector.

	A	B	C	D	E
$\hat{\beta}_0$	-0.004	0.004	0.030	-0.01	0.048
$\hat{\beta}_1$	1.003	0.999	0.981	1.006	0.980
$\hat{\sigma}_\delta$	0.016	0.016	0.022	0.029	0.038

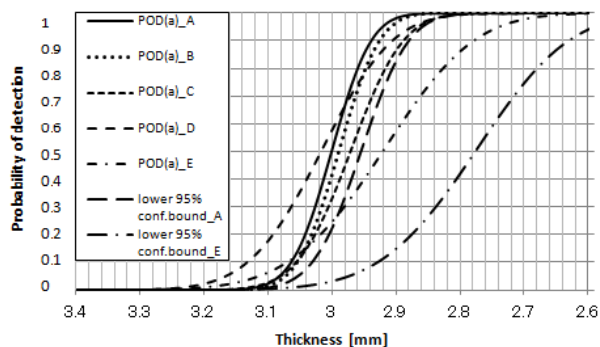


Fig.8  $POD(a)$  function and lower 95% confidence bound of each inspector.

Table 2 Estimated values of  $POD(a)$  function parameters of each inspector.

	A	B	C	D	E
$\hat{\mu}$	1.099	1.095	1.088	1.105	1.072
$\hat{\sigma}$	0.0162	0.017	0.0219	0.029	0.039
$a_{50}$	3.00	2.99	2.97	3.02	2.92
$a_{90}$	2.94	2.93	2.89	2.91	2.78
$a_{90/95}$	2.89	2.88	2.82	2.81	2.63

以上の結果から、模擬検査実験の結果から求めた  $\hat{\sigma}$  と  $POD(a)$ 関数、 $a_{50}$ 、 $a_{90/95}$  を用いて検査の信頼性を定量化できた。今回の実験の場合、信頼性に差を与えた要因はヒューマンファクタである。次節ではヒューマンファクタの具体的な要因について、実験データを通じて考察する。

## 5. $POD$ に影響を与える要因に関する考察

超音波厚さ計を用いた配管厚検査は検査者の手によって実施されるため、マーキングの中心位置と探触子を接触させた位置間に誤差（以降では、検査位置誤差とする）が生じると考えられる。さらに、1日に数回の定期的な校正作業の技量が検査結果に誤差（以降では、検査校正誤差とする）を与える可能性もある。そこでこれらを配管厚検査に影響を与えるヒューマンファクタとして、逆に  $POD$  を用いてこれらヒューマンファクタの影響の定量評価の可能性について検証する。

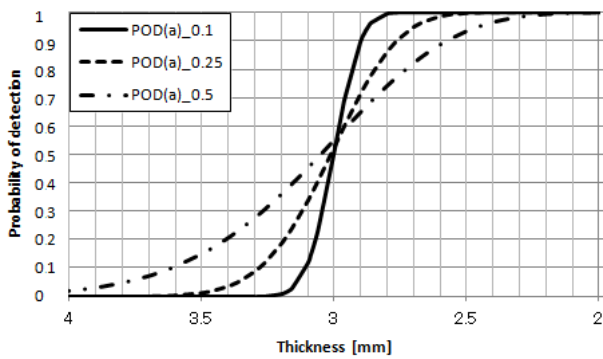


Fig.9 POD(a) function including simulated inspection error.

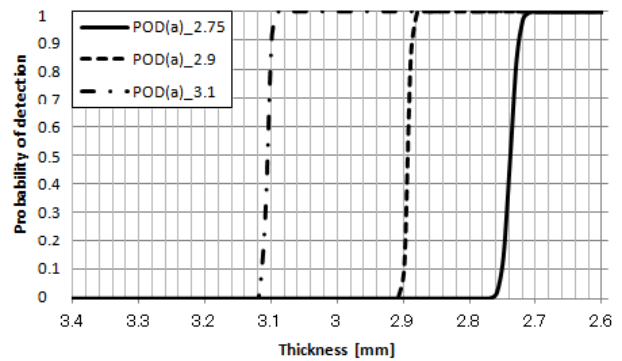


Fig.10 POD(a) function including simulated calibration error.

Table 3 Simulated position error versus  $\hat{\sigma}$ .

Position error [mm]	0.1	0.25	0.5
$\hat{\sigma}$	0.027	0.068	0.133

POD(a)関数に対する検査位置誤差の影響を確認するためすべての試験体の各検査位置に対し、10個のデータのうち5個はレーザー距離計で計測した配管厚を、残り5個はその配管厚へ0.1mm, 0.25mm, 0.5mmだけ値を加算もしくは減算したデータを作成した。ただし、加算と減算はランダムに選択した。配管厚  $a$  とのデータセットを基に決定閾値  $\hat{a}_{dec}=3.0$  として POD を求めた。Fig.9 に求めた POD(a)関数を示す。またこの時の  $\hat{\sigma}$  を Table 3 に示す。Fig.9 によると、加減算した値が大きくなるほど POD(a)関数の傾きが緩やかになっている。加減算により検査の精密さが低下した影響が、POD(a)関数に対しては傾きとして表れている。このことは、POD(a)関数の傾きによって決定閾値  $\hat{a}_{dec}=3.0$  に対する検査者の検査の精密さを評価できることを示している。

次にPOD(a)関数に対する検査校正誤差の影響を確認するため、校正値が -0.25, -0.1, +0.1mm の校正誤差をもつと仮定してデータセットを作成し、決定閾値を  $\hat{a}_{dec}=3.0$  として POD(a)関数を求めた。Fig.10 に求めた POD(a)関数を示す。またこの時の  $a_{50}$  の値を Table 4 に示す。Fig.10 において、決定閾値  $\hat{a}_{dec}=3.0$  とした配管厚 3.0mm と比較して校正値が小さい場合、 $a_{50}$  も小さくなっている。反対に校正値が大きい場合、 $a_{50}$  も大きくなっており、その配管厚方向の変動の幅は校正誤差が影響を与えていることが分かる。このことは、 $a_{50}$  によって校正誤差を定量的に評価できることを示す。

4章で示した結果に対して、ヒューマンファクタが要因となる誤差を考察する。検査位置誤差については  $\hat{\sigma}$  が A<B<C<D<E の関係にあり、技術レベル3の有資格者の

Table 4  $a_{50}$  versus simulated calibration error relation.

Calibration error [mm]	-0.25	-0.1	0.0	0.1
$a_{50}$	2.75	2.90	3.00	3.10

Table 5 Calibration error of each inspector.

Inspector	A	B	C	D	E
Calibration Error [mm]	0.0	0.01	0.03	-0.02	0.08

検査位置誤差が最も小さいとの結果になっている。さらに、 $a_{50}$  に対応する配管厚と決定閾値  $\hat{a}_{dec}=3.0$  との差が検査校正誤差として校正誤差を求めると Table 5 のようになり、校正誤差についても技術レベル3の有資格者が優位であることが分かる。これらのことから、3章で述べた模擬実験の条件下において、配管厚検査の結果を用いて決定した POD(a)関数の  $\hat{\sigma}$  と  $a_{50}$  によってヒューマンファクタの影響を定量的に評価できることを確認できた。

## 6. 結論

本論文では、超音波厚さ計による配管厚検査に対して POD を適用した。POD(a)関数を求めるため、試験体、測定機器、検査者に関して条件を整え模擬検査実験を実施し検査データを収集した。検査の信頼性を評価した結果、その検査データの範囲内においては、有資格者の検査技術の信頼性の高いことが示された。さらに、ヒューマンファクタの要因について考察し、POD(a)関数によってその要因が特定できることを検証した。ただし、今回の実験では検査者数は5名のみと少数であったため、今後は、さらに多く検査者に対し評価を実施する必要がある。加えて、他の非破壊検査法で得られた検査データに対して

POD による評価を適用し、検査の困難さの評価及び検査法の選択に対する検査結果の応用について検討する。また、評価した信頼性を検査計画に応用する方法論についても検討したい。

## 謝辞

本研究は原子力規制庁の「平成 24 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] 発電用火力設備規格 火力設備配管減肉管理技術規格: 日本機械学会, JSME S TB1-2009 (2009) など
- [2] J. Knopp, R. Grandhi, L. Zeng and J. Aldrin: “Considerations for Statistical Analysis of Nondestructive Evaluation Data: Hit/Miss Analysis”, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.4, No.3, pp.105-115 (2010)
- [3] C. Mueller, M. Elaguine, C. Bellon, U. Ewert, U. Zscherpel, M. Scharmach and B. Redmer: “POD(Probability of Detection) Evaluation of NDT Techniques for Cu-Canisters for Risk Assessment of Nuclear Waste Encapsulation”, Proceedings of the 9th European Conference on NDT, Berlin, German, Sept. 25-29, Fr.2.5.1 (2006) [CD-ROM]
- [4] Alan P. Berens: “NDE Reliability Data Analysis”, ASM Handbook, Vol.17, Nondestructive Evaluation and Quality Control, pp.689-701 (1989)
- [5] F. Kojima, D. Kosaka, H. Tabata, H. Nakamoto: “Reliability Assessment of EMAT-NDE System for Pipe Wall Thinning Management”, Proceedings of The 17th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Rio de Janeiro, Brazil, Jul.29-Aug.1, p.2, (2012)
- [6] 小坂大吾, 小島史男, 中本裕之, 田端大樹, 加藤翔: “電磁超音波探触子を用いた配管減肉計測の信頼性評価”, 日本保全学会論文集, Vol.10, pp.37-44 (2012)
- [7] R.C.H. Cheng and T.C. Iles: “Confidence Bands for Cumulative Distribution Functions of Continuous Random Variables”, Technometrics, Vol.25, No.1, pp.77-86 (1983)
- [8] R.C.H. Cheng and T.C. Iles: “One-Sided Confidence Bands for Cumulative Distribution Functions”, Technometrics, Vol.30, No.2, pp.155-159 (1988)
- [9] “非破壊試験技術者の認証制度のご案内”, 一般社団法人日本非破壊検査協会, p. 2 (2013) <http://www.jsndi.jp/qualification/pdf/ninsyouseido201307.pdf>

(平成 25 年 4 月 9 日)