リスク解析援用型構造健全性保証のための 溶接配管の残留応力推定手法の提案* (第 2 報 : L カーブ法と人工ノイズ法の適用)

小川 雅^{*1}, 中村 春夫^{*2}

Proposal of an Estimation Method of Welding Residual Stresses in Welded Pipes for Risk-Analysis-Based Assurance of Structural Integrity (2nd Report: Application of the L-Curve and the Artificial Noise Methods)

Masaru OGAWA^{*1} and Haruo NAKAMURA

^{*1} Tokyo Institute of Technology Dept. of Mechanical and Control Engineering,
O-okayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan

To assure structural integrity for operating welded plants, it is required to evaluate welding residual stresses without crippling the functions of the parts. As a nondestructive method, the bead flush method has been proposed. By applying this method, all the 6 stress components that satisfy the self-equilibrium condition in whole structure can be computed, since solutions are calculated by the FEM analysis from eigen-strains that are estimated from released strains during removal of reinforcement of the weld. In the previous report, a new approach to apply this method to welded pipes with relatively low height of reinforcement was proposed. In there, released raw strain data were pre-treated in consideration of a prior knowledge before conducting the inverse analysis. In this study, to improve statistical estimation accuracy, the L-curve method and the artificial noise method are introduced as well as “the truncated singular value decomposition method”. By using these methods, it is shown stable solutions of multiple residual stress distributions can be obtained from a single measurement of released elastic strains.

Key Words : Inverse Problem, Residual Stress, Nondestructive Inspection, Eigen-Strain, Welded Pipe, Finite Element Method, Probabilistic Method, Experimental Stress Analysis

1. 緒 言

大型プラントなどの溶接構造物の構造健全性保証のためには、溶接残留応力の評価が重要な課題となっている。現在、稼働中構造物に対する非破壊検査手法として、X 線回折が広く使われており、また超音波⁽¹⁾や磁気⁽²⁾などの手法も提案されている。一方、FEM (有限要素法) によって部材全体の残留応力を定量的、かつ非破壊的に評価を行うビードフラッシュ法⁽³⁾は、設計時の健全性評価に用いた FEM モデルをそのまま利用して解析を行い、さらに得られた残留応力解を FEM 解析で直接利用することができるため、設計から施工、保守・管理に至る健全性評価の過程が、同一の解析ツールによって一貫的に行えるという特徴を有する。この手法は固有ひずみ理論⁽⁴⁾に基づいているが、切断法⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾などの破壊手法とは異なり、溶接余盛りを除去する際の弾性解放ひずみから、逆解析により固有ひずみを求めるため本質的に非破壊的である。固有ひずみとは、外力を伴わない物体中に応力・ひずみが存在する場合に、その生成源として定義され⁽⁴⁾、均一に生じた場合には内部に応力を生じさせない非弾性ひずみのことであり、本研究では逆解析に際して溶接残留状態を再現する媒介として扱う。したがって、必ずしも実際の非弾性溶接ひずみ (塑性ひずみ、熱ひずみ、変態ひずみ) に相当するものではない。

* 原稿受付 2010 年 8 月 20 日

^{*1} 正員, 東京工業大学 理工学研究科 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*2} 正員, フェロー, 東京工業大学 理工学研究科

E-mail: hnakamura@mep.titech.ac.jp

これまで、比較的溶接余盛り高さの高い溶接平板や配管に対して、この手法の有効性が示されてきたが^{(7)~(10)}、比較的余盛り高さの低い溶接配管については、それだけ観測される解放ひずみの情報量が少なくなるため、著者らは推定精度の向上を目指すだけでなく⁽¹¹⁾、リスク解析⁽¹²⁾にも応用することができるよう、前報⁽¹³⁾において残留応力分布の統計的評価方法について検討を行い、解放ひずみ計測データの前処理を行うことにより解の安定性と高い推定精度との両立を図ることが可能となることを示した。しかしながら、十分な解の信頼性を得るためには、階数低下法⁽¹⁴⁾から推定した残留応力分布の存在範囲を適切に限定するとともに、階数低下法に代わるより信頼性の高い適切化手法の導入が望まれる。

そこで、本研究では解放ひずみから固有ひずみを推定する逆問題解析において、より信頼性の高い解を得るために、特異値分解における階数低下法に着目し、推定精度の相対的に高い解を判別するだけでなく、他の適切化手法と組み合わせることによって、より精度の高い残留応力の分布確率を、安定的に求める手法について検討を行う。

2. ビードフラッシュ法の定式化⁽⁷⁾⁽¹⁵⁾

一般に、弾性ひずみベクトル $\{\epsilon\}$ と固有ひずみベクトル $\{\epsilon^*\}$ との間には、式(1)の関係が成り立つ。

$$\{\epsilon\} = [R] \{\epsilon^*\} \quad (1)$$

ここで、 $[R]$ は弾性応答マトリクスであり、 $[R]$ の i 番目の列は、固有ひずみベクトル $\{\epsilon^*\}$ の i 番目の成分を1とし、他を全て0とした単位固有ひずみ

$$\{\text{unit } \epsilon^*\}_i = \{0, \dots, \epsilon_i^* = 1, \dots, 0\}^T \quad (2)$$

を負荷したときに得られる弾性ひずみベクトルの値として、FEMの弾性解析から求められる。式(1)から、溶接余盛りの除去前後における弾性ひずみは

$$\{\epsilon_{\text{eb}}\} = [R_{\text{b}}] \{\epsilon_{\text{b}}^*\} \quad (3)$$

$$\{\epsilon_{\text{ea}}\} = [R_{\text{a}}] \{\epsilon_{\text{a}}^*\} \quad (4)$$

と表すことができる。ただし、添え字のbとaはそれぞれ余盛りの除去前(before)と除去後(after)に対応するものとする。余盛り除去に際して新たな加工ひずみを生じさせない限り、除去前後での固有ひずみは不変($\{\epsilon_{\text{b}}^*\} = \{\epsilon_{\text{a}}^*\} = \{\epsilon^*\}$)であるから、解放ひずみベクトル $\{\Delta\epsilon\}$ は

$$\begin{aligned} \{\Delta\epsilon\} &= \{\epsilon_{\text{ea}}\} - \{\epsilon_{\text{eb}}\} \\ &= ([R_{\text{a}}] - [R_{\text{b}}]) \{\epsilon^*\} \\ &= [R] \{\epsilon^*\} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ただし、 $[R] = [R_{\text{a}}] - [R_{\text{b}}]$ である。実際には、ひずみゲージによる観測値には計測誤差 $\{\Delta\epsilon_{\text{err}}\}$ が含まれるため、計測解放ひずみベクトル $\{\Delta\epsilon_{\text{em}}\}$ は

$$\{\Delta\epsilon_{\text{em}}\} = [R] \{\epsilon^*\} + \{\Delta\epsilon_{\text{err}}\} \quad (6)$$

によって表される。従って、推定固有ひずみの最確値 $\{\epsilon_{\text{est}}^*\}$ は最小二乗法の解として次式によって示される。

$$\{\epsilon_{\text{est}}^*\} = [R]^+ \{\Delta\epsilon_{\text{em}}\} \quad (7)$$

ただし、 $[R]^+$ は $[R]$ のムーア・ペンローズ一般化逆行列⁽⁹⁾であり、

$$[R]^+ = [R]^T [R] ([R]^T [R] [R]^T [R])^{-1} [R]^T \quad (8)$$

のように記述される。

3. 数値シミュレーション方法⁽¹³⁾

3・1 対象モデル

対象として扱う FEM モデルは、前報⁽¹³⁾と同じ、内計 98mm、肉厚 8mm、外側の余盛りの片幅が 8mm、高さがわずか 0.3mm の、周囲に拘束のない全周突合せ溶接配管である(図 1 参照、節点数 16032、要素数 12480)。材料はヤング率 $E=2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.265$ のステンレス鋼とした。なお、解析は溶接線に対して対称であると仮定し、1/2 モデルにて行った。解析には汎用有限要素解析ソフト ANSYS (CYBERNET SYSTEMS CO., LTD., Japan) を用いた。

Fig. 1 Analytical FEM model of a butt-welded pipe

3・2 数値シミュレーション手順

まず、正解の固有ひずみ分布として、上田らによる溶接平板の切断法に基づく逆解析の結果など⁽¹⁶⁾を参考に、熊谷らが溶接平板において仮定したもの⁽⁷⁾を用い、この固有ひずみから弾性計算によって求めた応力分布を、正解の残留応力分布とする(図 2 参照)。次に、解放ひずみの計測値を模擬するために、余盛除去前後の配管モデルのそれぞれに正解固有ひずみを与え、その際得られる弾性ひずみの差に計測誤差を加える。ただし、本研究における計測誤差は、平均 0、標準偏差 $20 \mu \text{ strain}$ の正規分布に従うものとし、乱数によってその値を決定する。そして、計測解放ひずみ分布から固有ひずみを計算し、それから残留応力の推定分布を導く。最後に、推定結果を正解分布と比較して、本手法の有効性評価を行う。

なお、配管座標の r, θ, z は、それぞれ半径方向、周方向、軸方向に相当するものとし(図 3 の左図参照)、同一箇所での経年変化の実測を想定して、余盛りの除去範囲を $\Delta\theta=60$ 度/回の部分除去とした。これにより、同一箇所を期間を置いて都合 6 回 ($60 \text{ 度} \times 6 \text{ 回} = 360 \text{ 度}$) 測定することができる。

このとき、ひずみゲージは図 3 の右図のように貼り付けて解放ひずみを測定する。

Fig. 2 Exact residual stress distributions
(on the inner surface)

Fig. 3 Measurement of released strains by strain gauges

4. 逆問題解析における解の適切化

4・1 固有ひずみ分布の関数近似

有限要素モデルの各要素の値を未知推定量とすると、その数が膨大となるので適切な解を得ることが困難となる。そこで、以下に示すようなロジスティック関数の線型結合によって固有ひずみ分布を表現し、未知数の削減を行う。

$$\{\epsilon_s^*\}(z) = \sum_{i=1}^4 \frac{\{a_{si}\}}{1 + \exp(p + q_i z)} \quad (9)$$

ここで、添え字の s は半径方向(r)、周方向(θ)、軸方向(z)を示し、 $\{a_{si}\}$ は未知係数ベクトルである。また、 p と q_i は固有ひずみの存在領域が高々40mm 程度であること⁽¹⁶⁾を考慮して、 $z \leq 40\text{mm}$ の範囲で右辺の4個の基本項がほぼ等間隔に分布するように定めた定数である。さらに、薄肉配管を想定し、固有ひずみは厚さ方向と周方向に一樣であるとし、式(9)の $\{\epsilon_s^*\}$ を z だけの関数とすることによって、求めるべき未知推定量の数を r, θ, z の3方向の合計で12とした。なお、このとき残留応力は厚さ方向にも変化している。

4・2 特異値分解における階数低下法⁽¹⁴⁾

式(7)の弾性応答マトリクス $[R]$ が $N \times M$ の行列によって表され、その階数が n である場合、特異値分解により行列 $[R]^+$ は次式のように書くことができる。

$$[R]^+ = [V] [B]^- [U]^T \quad (10)$$

$$[B]^- = \begin{bmatrix} B_n^- & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[B_n]^- = \begin{bmatrix} 1/\mu_1 & & 0 \\ & 1/\mu_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & 1/\mu_n \end{bmatrix}, \quad \mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_n \geq 0 \quad (12)$$

ここで、 $[V]$, $[B]^-$, $[U]^T$ はそれぞれ $M \times M$, $M \times N$, $N \times N$ の行列であり、 $(1 \leq j \leq n)$ は行列 $[R]$ の特異値と呼ばれる。この特異値が小さいと、それだけ $[R]^+$ の成分の値が大きくなり、誤差の影響も拡大されてしまうため、解が不安定となる。

そこで、 $[B_n]^-$ の代わりに縮退させた行列

$$[B_t]^- = \begin{bmatrix} 1/\mu_1 & & 0 \\ & 1/\mu_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & 1/\mu_t \end{bmatrix}, \quad (t < n) \quad (13)$$

$$\mu_{t+1} = \mu_{t+2} = \cdots = \mu_n = 0 \quad (14)$$

を用いることによって、解を安定化させることができる。本研究では、前述の通り固有ひずみの関数近似を行っており、未知数は12であり、また $[R]$ の最大階数 n も12となる。

4・3 人工ノイズを用いた解の安定化手法⁽¹⁴⁾

いま、式(12)の $[B_n]^-$ の代わりに、人工ノイズと呼ばれる実数パラメータ γ を含んだ $[B_{n,\gamma}]^-$ により表すと、

$$[R_\gamma]^+ = [V] [B_{n,\gamma}]^- [U]^T \quad (15)$$

$$[B_{n,\gamma}]^- = ([B]^2 + \gamma[I])^- [B] \quad (16)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\mu_1}{\mu_1^2 + \gamma} & & 0 \\ & \frac{\mu_2}{\mu_2^2 + \gamma} & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \frac{\mu_n}{\mu_n^2 + \gamma} \end{bmatrix} \quad (17)$$

となる。ここで、 $[I]$ は単位行列である。このとき、人工ノイズの値 γ が0であれば式(15)は式(10)に一致し、一方 γ の値の増加に伴って $[B_{n,\gamma}]^-$ の各成分の値は減少する。つまり、人工ノイズを用いた安定化手法では、 γ を1つの実数パラメータとみなすことによって、安定化の度合いを連続的に設定することができる特徴を有する。なお、人工ノイズの値が大きくなり過ぎてしまうと、解は過度に平滑化されてしまうため注意を要する。また、式(17)の代わりに縮退させた次式の行列を適用し、特異値分解における階数低下法と合わせて安定化を行うことも可能である。

$$[B_{t,\gamma}]^- = \begin{bmatrix} \frac{\mu_1}{\mu_1^2 + \gamma} & & & 0 \\ & \frac{\mu_2}{\mu_2^2 + \gamma} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{\mu_t}{\mu_t^2 + \gamma} \\ 0 & & & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mu_{t+1} = \mu_{t+2} = \cdots = \mu_n = 0 \quad (19)$$

5. 計測解放ひずみの前処理と応力の推定結果

0～60度までの余盛り除去範囲において、 $\theta=3.75$ 度から $\Delta\theta=7.5$ 度刻みに貼り付けた8行3列のひずみゲージ(図3の右図参照)による正解解放ひずみ分布は図4のように所定の z ごとにほぼ一定となるが、計測誤差を与えた場合に計測される解放ひずみ分布は、一例として図5に示すとおり、所定の z ごとにかなり変動が大きくなる。計測誤差を考慮しない場合には、余盛りから z 方向に等しい距離にあるひずみゲージの同じ成分の値同士は、比較的近い値を示すことから、各列の観測値を平均化することによって、ちょうどホワイトノイズの平均が0に近づくように、誤差を低減させることができると考えられる(図6)。さらに、平均化に用いる f 行のひずみゲージの

うち、任意の g 行により平均化を行った場合、合計 fC_g 通りの平均化解放ひずみ分布を得ることができる。ただし、整数 f, g は ($f \geq g \geq 0$) の関係を満たす。本実験では、8 行のひずみゲージのうち、任意の 7 行により平均化を行うことによって、1 回の解放ひずみの観測により、合計 $8C_7$ 通りのひずみデータの取得を行う。この $8C_7$ 通りの解放ひずみから算出した $8C_7$ 通りの残留応力の推定分布を図 7 に示す。なお、図中の表記 σ_{zf} は、第 f 行目以外の 7 行のひずみゲージによる平均化解放ひずみから求めた、 z 方向の残留応力分布であることを示す。この結果から、適切化階数 2 では安定化の度合いがやや強すぎるため平滑化が過度に行われている傾向が認められ、一方適切化階数が 3 の場合には、逆に過度に振動した解が得られている。ただし、後者の場合には階数 2 の場合よりもかえって正解に近い結果も含まれることがわかった⁽¹³⁾。本研究で対象としている溶接配管の場合には、たとえ余盛り高さが同じ場合であっても溶接平板よりも不適切性が強い逆問題となる⁽¹⁰⁾ことから、特異値分解による階数低下法は必要と考えられる。ただし、階数低下法では階数として整数値しか取れないため図 7 に示すように、隣接する階数の間に最適解が位置してしまうという問題がある。そこで、以下ではこのような場合について、正解が不明であるという制約条件の下で、より高精度な残留応力分布を得る方法の検討を行う。

Fig. 4 Exact released strains⁽¹³⁾

Fig. 5 Measured released strains⁽¹³⁾

Fig. 6 Averaged released strains⁽¹³⁾
(mean of the data in Fig. 5)

Fig. 7 The total $8C_7$ distributions of estimated stresses in the axial direction⁽¹³⁾
(on the inner surface, stabilized by the truncated singular value decomposition)

6. 推定残留応力の分布確率の評価

6・1 比較的精度の高い解の判別

まず、同じ平均化解放ひずみから得られる残留応力の解に関して、図 7(b)に示される階数 3 の分布が、図 7(a)の階数 2 の分布よりも精度が高くなっている推定分布を抽出する方法について考察する。

いま、 $8C_7$ 通りの解放ひずみから残留応力を求める逆解析において L カーブ法⁽¹⁷⁾を適用し、それぞれの適切な階数値について調べると図 8 のようになる。L カーブ法は、式(7)の推定固有ひずみ解のノルム $\|\{\epsilon^*_{est}\}\|$ (図 8 の縦軸)と残差ノルム $\|\{\epsilon^*_{est}\} - [R]^+ \{\Delta \epsilon_m\}\|$ (図 8 の横軸)とがともに小さくなる場合に、解の高い安定性 ($\|\{\epsilon^*_{est}\}$

$\|\{\varepsilon_{\text{est}}^*\}-[R]^+\{\Delta\varepsilon_{\text{em}}\}\|$ が小さい) と高い推定精度 ($\|\{\varepsilon_{\text{est}}^*\}-[R]^+\{\Delta\varepsilon_{\text{em}}\}\|$ が小さい) が両立されていると考える手法である。したがって、図 8(a)によって表される L カurve において、曲率が最大となる場合の階数が最適値となる。図 8 の(a)からここではほとんどの場合に関して、階数 2 が最適な階数であることがわかるが、階数 2 と階数 3 の近傍を拡大した図 8 の(b)から、特に $f=6$ (黒丸の推定 6) の結果についてだけは、階数 2 よりも階数 3 の方が解ノルムと残差ノルムの両方が低くなっている。実際に、 $f=6$ の場合については階数 3 のほうが正解応力との誤差の二乗平均が小さくなっていた。したがって、正解が未知な場合においても L カurve 法を実施することにより、図 7 の推定応力の中で比較的精度の高いものを判別することができることが可能と考えられる。

Fig. 8 L-curves

なお、図 8(b)の $f=6$ の L カurve で見られる階数 3 の局所的な極小値は階数 2 の値とほとんど同一位置にあり、場合によってはこれを判別することができない可能性があるだけでなく、たとい比較的正確に近い階数 3 の解が見つかったとしても、その他の推定分布については過度に平滑化されてしまっているか (本研究では階数=2)、あるいは不安定となっているか (本研究では階数=3) のどちらかに偏っていると考えられる。これは、最適解が階数 2 と階数 3 の間に位置することに起因していると考えられる。そこで、最適階数が 2 つの階数値の間に位置する場合においても、両者の間に安定化の度合いを設定することにより、適切に精度の高い応力分布を求める方法を次節以降で述べる。

6・2 推定残留応力の存在範囲の特定

ここでは、解の安定化の度合いを連続的に選択することのできる人工ノイズを用いた安定化手法 (4・3 節参照) を導入し、特異値分解における階数低下法と照らし合わせることで、安定化の度合いの範囲を定めて残留応力の存在範囲の特定を行う。

6・2・1 人工ノイズを用いた安定化手法による推定分布

人工ノイズによる解の安定化手法を用いて gC_7 通りの残留応力を求めるとき、任意の人工ノイズ γ における各解と正解との差異度 S の gC_7 通りの平均値 S_{ave} は、図 9 のように表される。ただし、分布の類似性を評価する尺度の差異度 S (誤差の二乗平均の平方根) は次式で与えられる。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^w (x_l - x_l^*)^2}{w}}, \quad (1 \leq l \leq w) \quad (15)$$

ここで、 w は残留応力の推定値のデータ数であり、本数値解析実験では w の値は 32 である。 l は z 方向の観測地点を示し、 x_l と x_l^* はそれぞれ地点 l における推定応力と正解応力値を示す。また、人工ノイズの値と推定残留応力の関係について、その一例を図 10 示す。ただし、図 10 の(b)が差異度がほぼ極小に、したがって γ が最適とな

る場合である．なお，人工ノイズの値 γ は微小であることから，計算機に入力する際に桁落ちを避ける目的で正規化を施した（なお本研究の場合に限れば，正規化をしない場合でもほとんど出力結果に差異は認められなかった）．

Fig. 9 Mean deviation of estimated stresses from exact ones as a function of an artificial noise

Fig. 10 Estimated stress distributions by the artificial noise method (on the inner surface, in the axial direction)

図 9 における極小値として適切な人工ノイズの値を選ぶことによって，図 10(b)のように，解の安定性と高い推定精度をともに満足する解が得られることがわかる．一方，人工ノイズの値が小さすぎると， σ_{θ} 通りの推定分布のうち，中には正解分布に比較的近いものも含まれるが，不安定な解が多いため，全体として正解との差異が広がる結果となり（図 10(a) 参照），また人工ノイズの値が大き過ぎてしまうと，それだけ解が過剰に平滑化されるため，正解との差異が拡大する傾向となった（図 10(c)参照）．なお，既知である正解と照らし合わせることで，最適な人工ノイズの値 γ_{opt} は $\gamma_{\text{opt}}=10 \times 10^{-12}$ であることがわかった．

6・2・2 人工ノイズの値の適正範囲の特定

実際の配管では，正解の応力分布が未知のため，最適な γ_{opt} を決めることができない．そこで，解の安定化の度合いの比較的強い階数 t と安定化の度合いの弱い $t+1$ に対して，それぞれそれらと同等の安定化の度合いとなる人工ノイズの値 γ_t と γ_{t+1} を求めることができれば，人工ノイズの適正値をその間の範囲として絞り込むことができる． γ_t の値は人工ノイズの値を変化させたときの解と，階数 t の解との相違度が極小となる値として得ることができるので，正解がわからない場合でも評価できる．なお， $t=2$ である本研究においては図 11 より $\gamma_2=36 \times 10^{-12}$ ， $\gamma_3=0.3 \times 10^{-12}$ となる．また， γ_2 と γ_3 における推定応力はそれぞれ図 12 の(a)と(b)によって表され，図 7 の(a)と(b)に比較的近い値となっており，また人工ノイズの最適値がこの適正範囲にある（ $\gamma_3 \leq \gamma_{\text{opt}}=10 \times 10^{-12} \leq \gamma_2$ ）ことも確認できる．

Fig. 11 Deviation between estimated stresses by the truncated singular value decomposition method and by the artificial noise method

Fig. 12 $8C_7$ estimated stresses in the axial direction
(on the inner surface, stabilized by the truncated singular value decomposition method)

6・3 推定残留応力の最確値の導出

ここでは、人工ノイズの最適値を導くために、6・1節において用いたLカーブ法を適用する．このときのLカーブを図13に示す．

Fig. 13 L-curves

前述した特異値分解における階数低下法では安定化の度合いが離散的(整数値)にしか決定できなかったため、解ノルムと残差ノルムがともに小さくなるLカーブの極小値を、あまり多く見つけ出すことができなかったが(図8(b)参照)、連続的に安定化の度合いを設定できる人工ノイズを用いた方法を適用することによって、その極小値をより多く見つけ出すことができることがわかる(図13(b)参照)。そして、このLカーブの局所的な極小値から一意的に求めた人工ノイズの最確値を図13(b)中に示す。また、その値を用いて導いた推定残留応力の最確値は図14のようになる。ただ一度の解放ひずみの計測で、複数の残留応力分布が得られていることが分かる。構造健全性保証に際してはき裂進展解析を行うが、その場合に残留応力による応力拡大係数を計算する必要がある。中性子線回折などで図14に相当するような多数の測定点を得られたと仮定しも、それらの上限や下限を単純に包絡したり、統計的に95%や5%信頼限界を求めたとしても、それらは自己平衡条件を満足していないことになるので、単純な統計的アプローチができないことになる。一方、本研究の手法では個々の残留応力分布のすべてが応力の自己平衡条件を満足しているという特徴を有する。しかも、残留応力分布は配管のあらゆる位置において6成分(3つの垂直応力と3つのせん断応力)すべてが求まるので、FEMによる強度解析にも直接利用することができるという利点もある。

Fig. 14 The most probable values of the estimated stresses (on the inner surface)

なお、図14(a)より z 方向成分の推定応力においては、最確値として良好な値が得られていることがわかる。一方、 θ 方向成分の推定結果については、全体の傾向としては良好な推定となっているものの、応力腐食割れや疲労によるき裂の発生が特に問題となりやすい $z=0$ の位置(配管内表面)での値が正解よりも圧縮側に推定されているという問題がある。よって、配管内面表面の応力成分の推定精度の向上が、今後の課題として挙げられる。

7. 結 言

溶接残留応力を評価するビードフラッシュ法を、比較的余盛り高さの低い溶接配管に対して適用し、一度の計測から複数の残留応力分布を推定する手法に改善を施し、推定残留応力分布の評価精度の向上を試みた。本研究により得られた内容を以下に記す。

- (1) 逆問題解析の特異値分解における階数低下法では、階数として整数値しか取れないため、正解の階数が整数値の間に位置する場合が多いという問題がある。この結果に、人工ノイズによる解の安定化手法とLカーブ法を適用することにより、高精度な解が得られる人工ノイズの範囲が限定できる。
- (2) 上記の手法により、より精度の高い残留応力の分布確率を、安定的に求めることができる。

文 献

- (1) 荒居善雄, 小林英男, 大沢靖雄, 轟章, “溶接残留応力測定への音弾性法の適用と疲労き裂進展の評価”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 53, No. 86 (1987), pp. 1574-1580.
- (2) 山崎友裕, 山本真史, 平尾雅彦, “磁歪特性を利用した軟鋼の非破壊残留応力測定”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 63, No. 96 (1997), pp. 1489-1494.
- (3) Nakamura, H., Naka, Y., Park W. and Kobayashi, H., “Computer Aided Nondestructive Evaluation Method of Welding Residual Stresses by Removing Reinforcement of Weld”, *Current Topics in Computational Mechanics, ASME PVP*, Vol. 305, (1995), pp. 49-56.
- (4) Mura, T., “Micromechanics of Defects in Solids”, *Martinus Nijhoff Publishers*, (1987).
- (5) 上田幸雄, 福田敬二, 中長啓治, 円道節夫, “残留応力の有限要素法に基づく測定原理と推定値の信頼性”, 日本造船学会論文集, No. 138 (1975), pp. 499-507.
- (6) 上田幸雄, 福田敬二, 谷川雅之, “固有ひずみ論に基づく 3 次元残留応力測定法”, 日本造船学会論文集, No. 145 (1979), pp. 203-211.
- (7) 熊谷克彦, 中村春夫, 小林英男 “余盛り除去による溶接残留応力の解析援用非破壊評価 (適切化法の導入とひずみ変化測定位置の最適化)”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 65, No. 634 (1999), pp. 1397-1404.
- (8) 李亨魯, 後藤知将, 中村春夫, “ビードフラッシュ法による溶接残留応力の逆問題解析 (厚さ方向の固有ひずみ分布を考慮した解法の提案)”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 68, No. 674 (2002), pp. 1466-1472.
- (9) 中村春夫, 木村善樹, “ビードフラッシュ法の溶接配管への適用 (連続的余盛り除去による精度向上)”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 72, No. 724 (2006), pp. 2015-2022.
- (10) 中村春夫, 山本美緒, “ビードフラッシュ法の溶接配管への適用 (軸対象問題による取り扱い)”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 73, No. 725 (2007), pp. 164-171.
- (11) 小川雅, 細谷友磨, 中村春夫, “連続余盛り除去による溶接配管へのビードフラッシュ法の適用精度向上”, *M&M2007 材料力学カンファレンス講演論文集*, 日本機械学会, No. 07-3 (2007), pp. 82-83.
- (12) 例えば, Stewart, M. G (著), Melchers, R. E. (著), 酒井信介 (監訳)・ほか 13 名 (訳), “技術分野におけるリスクアセスメント”, 森北出版, (2003).
- (13) 小川雅, 中村春夫, “リスク解析援用型構造健全性保証のための溶接配管の残留応力推定手法の提案 (測定データの前処理による精度向上)”, 日本機械学会論文集 A 編, (2010), (掲載可) .
- (14) 例えば, 久保司郎, “逆問題”, 培風館, (1992).
- (15) 熊谷克彦, 中村春夫, 小林英男 “余盛り除去による溶接残留応力の解析援用非破壊評価 (概念提案と付き合い溶接平板による解析的実証)”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 65, No. 629 (1999), pp. 133-140.
- (16) 上田幸雄, 麻寧緒, 古木良一, “ビードオンプレート溶接における 3 次元残留応力の TL_yL_z 法および T 法による測定”, 溶接学会論文集, Vol. 11, No. 4 (1993), pp. 555-562.
- (17) Hansen, P.C., Analysis of Discrete Ill-posed Problems by means of the L-curve, *Transactions of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 34, No. 4, (1992), pp. 561-580.