The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定
Author(s)	小川, 直輝
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/143
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

固有ひずみ法による
原子炉溶接継手の残留応力の測定

２０１１年１月

小川　直輝

【　目　　次　】

１．緒言　1
参考文献　5

２．固有ひずみ法による残留応力測定理論　7
2.1　固有ひずみ法とは　7
2.2　固有ひずみ法の基礎理論　8
参考文献　12

３．固有ひずみ法による原子炉配管突合せ溶接継手の残留応力測定　13
3.1　平板継手に対する測定理論（平板 T-L 法）　13
3.1.1 平板 T-L 法　13
3.1.2 平板 T-L 法を軸対称継手に適用する場合の課題　14
(1) T 片面内固有ひずみの溶接線方向弾性ひずみへの影響　14
(2) 板幅方向固有ひずみの板厚方向線形変化成分の有効化　14
3.2　配管突合せ溶接継手の残留応力測定　15
3.2.1 軸対称継手に対する測定理論の開発（軸対称 T-L 法）　15
(1) 全固有ひずみと周方向弾性ひずみの関係　17
(2) T 片における固有ひずみと弾性ひずみの関係　18
(3) 全固有ひずみと T 片切断時に解放される軸方向弾性ひずみの関係　19
(4) 全固有ひずみと弾性ひずみの関係　21
3.2.2 解析対象　23
3.2.3 計測手順　24
3.2.4 測定結果及び考察　26
(1) 残差の評価　26
(2) 内外表面での残留応力分布　27
(3) 内部での残留応力分布　32
参考文献　38

４．固有ひずみ法による原子炉容器管台貫通溶接部の残留応力測定　39
4.1　残留応力測定の基礎　39
4.1.1 関数表示固有ひずみ法の基礎理論　39
4.1.2 非軸対称円周厚板継手に対する解析理論の構築（関数表示 T-L 法）　43
(1) 試験体，座標系と固有ひずみ成分　43
(2) 切断及び計測手順　45
(3) 測定方程式の構築　49
(4) 固有ひずみ分布関数　51

4.1.3 実験と解析の概要 53
(1) 実験作業 53
(2) 解析作業 55
4.1.4 測定結果（基礎解析結果） 59

4.2 固有ひずみ分布関数の適性診断 69
4.2.1 第１段階／残差からの診断 70
4.2.2 第２段階／統計学的見地からの診断 73
4.2.3 第３段階／専門知識（溶接力学）からの診断 83
(1) 定量的診断 83
(2) 定性的診断 85
4.2.4 残留応力の分布特性およびその生成機構 86

4.3 測定精度と経済性を考慮したひずみ計測領域の最適化 87
4.3.1 第１段階／残差からの診断 89
4.3.2 第２段階／統計学的見地からの診断 92
4.3.3 第３段階／専門知識（溶接力学）からの診断 93
(1) 定量的診断 93
(2) 定性的診断 95
4.3.4 第４段階／作業効率と経済性を考慮した総合評価 98
参考文献 100

５．結言 101

付録 固有ひずみ領域影響評価 103

本研究に関連した発表論文および特許 109

謝辞 111

１．緒言

原子力発電プラントや火力発電プラントは，様々な配管や容器を溶接により接合している構造物であり，溶接部には残留応力が発生する．特にニッケル基合金溶接部においては，残存する残留応力により，応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）が発生する事象が国内外のプラントにおいて近年生じている．

例えば，Fig.1-1 に示すような沸騰水型原子炉(BWR:Boiling Water Reactor)の原子炉容器貫通部(浜岡 1 号機 CRD ハウジング等)の溶接部で応力腐食割れによる漏洩事象が認められている [1-1)]．また，加圧水型原子炉(PWR: Pressurized Water Reactor)においても大飯３号機や海外で原子炉蓋用管台溶接部での漏洩が報告されており [1-2), 1-3)]，寿命評価とその結果に基づく適切な予防保全対策が重要となっている．

応力腐食割れは，材料，環境，応力の 3 つの因子が重畳したときに発生する．各因子に対して，材料，環境面での改善は適宜進められており，応力を低減する手法も構築されている [1-4) ~1-6)] が，応力値そのものを精度よく評価することも重要である．溶接残留応力を精度よく測定することで，力学的な面から損傷発生防止に最適な溶接法を究明することや，損傷発生後のき裂進展解析の精度を向上させ，寿命評価の信頼性を高めることが可能となる．

特に，容器貫通部のように厚板と配管との複雑な溶接形状を持つ構造物は，部材内部で残留応力が複雑に変化しているものと考えられるため，残留応力の詳細な分布データ取得の必要性が高まっている．

残留応力分布の測定法は様々な手法が提案されているものの [1-7)]，厚肉構造物内部の残留応力分布を測定できる理論は少なく，例えば，逐次穿孔法として有名な Sachs 法 [1-8)] では管の残留応力分布が軸対称でしかも軸方向に一様であることが条件となっている．最近では DHD（Deep-Hole Drilling）法 [1-9)] があるが，穿孔ラインに沿った残留応力分布が得られるだけで 3 次元的な分布は測定できない．3 次元的に複雑に分布している残留応力を測定する手法は，現時点では，上田らが提案した“固有ひずみ法”[1-10)] 以外には見当たらない．固有ひずみ法を用いた残留応力評価では，平板の突合せ継手や T 継手のような構造物に対して適用例 [1-11) ~1-14)] が多いが，軸対称構造を対象とした配管突合せ溶接継手に対する適用はない．また，容器貫通溶接部においては，ひずみゲージを使用した通常の切断法により配管の内外表面の残留応力評価に対する適用例 [1-15), 1-16)] はある

が，板厚内部の応力評価を行っている例はない．

そこで，本研究では，配管突合せ溶接継手及び原子炉容器管台貫通溶接部を対象に，固有ひずみ法を測定原理とした具体的な測定理論と測定手順を開発する．

配管突合せ溶接継手に対しては，同継手部は軸対称な形状を有するので，軸対称な残留応力分布を想定し，固有ひずみ法の軸対称測定理論を新たに開発する．その理論に基づいて，有限要素法解析プログラムを構築する．実継手に近い試験体を製作して，切断による解放ひずみを計測し，同プログラムに入力することにより，配管突合せ溶接継手部の残留応力分布を推定する．

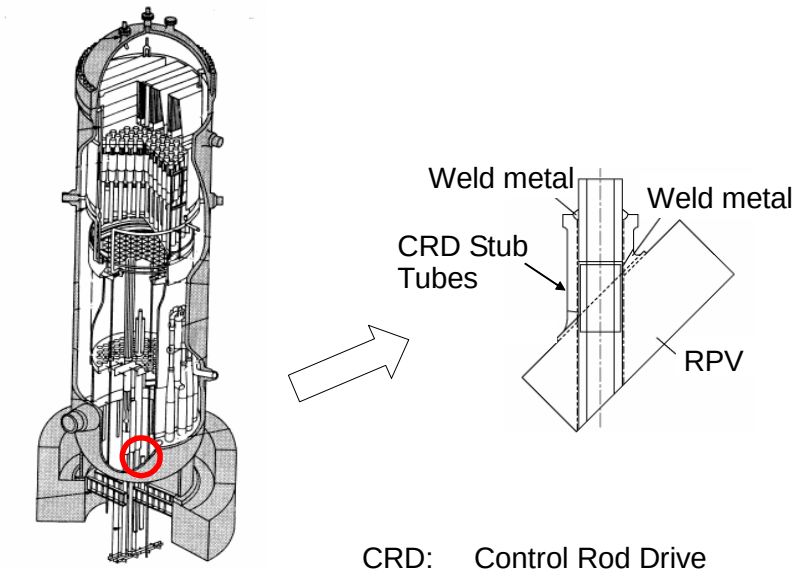
原子炉容器管台貫通溶接部に対しては，同継手部は寸法的に小さく（ひずみの計測数が制限される），しかも，応力分布が複雑に変化している（未知固有ひずみ数が非常に多くなる）と推察されるため，固有ひずみの分布を関数表示する手法 [1-17] を採用する．即ち，関数表示法に基づいて原子炉容器管台貫通溶接部に対する残留応力の測定理論及び方法を開発する．更に，推定結果に対する信頼性評価手法を提案し適用する．

まず，最初に，上記継手の残留応力測定に適した関数表示固有ひずみ法の理論を具体的に展開する．固有ひずみ分布関数としては１０種類の関数を準備する．その理論に基づいて有限要素法解析プログラムを構築する．同時に，実継手に近い試験体（モックアップ）を製作して，開発したプログラムを使用して，その３次元溶接残留応力分布を測定する．

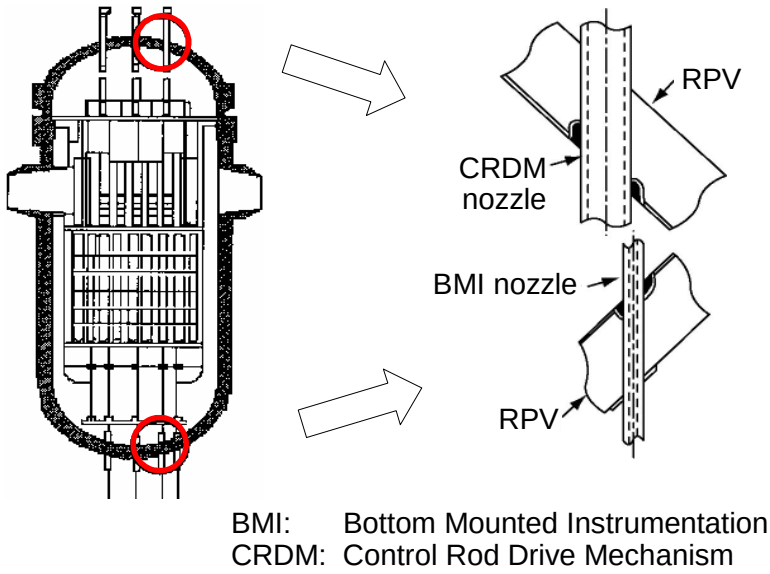
１０種類の分布関数を用いて解析を実行し，各分布関数の本解析への適応性を評価する．評価は固有ひずみ法が統計学的には最小二乗法に基づいていることに注目して実施する．最小二乗法は実験データの解析法，具体的には“あてはめ”法の一つである．その結果は，一般的には，３段階で診断するのが望ましいと考えられている [1-18]．第１段階は「残差からの診断」であり，第２段階は「統計学的見地からの診断」であり，最後の第３段階は「専門知識からの診断」である．１０種類の分布関数による推定結果を，このような診断法により評価する．各関数の適応性の優劣を判定し，最適な関数を決定する．更に，その最適関数を使用した場合の残留応力推定結果（測定結果）の信頼性を検討する．

最後に，今後，同様な溶接継手構造物に対する残留応力評価を実施する場合を想定し，測定結果の信頼性と実験の経済性が両立する計測条件を探究する．即ち，実験における

ひずみ計測は，測定結果の信頼性を考えると，固有ひずみが存在すると推察される領域を十二分に含む広領域において，出来る限り多数計測することが望ましい．しかし，計測作業は煩雑であり高費用を要することから，経済性を考えると，できる限り少ない計測点数で残留応力を評価したい．そこで，計測位置及び計測点数が測定精度に及ぼす影響を解明し，同時に経済性も考慮して，測定結果の信頼性と実験の経済性が両立する計測条件（最適ひずみ計測領域）を提案する．



(a) BWR



(b) PWR

Fig. 1-1 Shape of vessel penetration

参考文献

1-1）中部電力㈱，浜岡原子力発電所１号機　制御棒駆動機構 ハウジング部からの漏えいに関する原因と対策について（プレスリリース），2002年4月.

1-2）関西電力㈱，大飯発電所３号機の定期検査状況について（原子炉容器上部ふた制御棒駆動装置取付管台からの漏えいの原因と対策）（プレスリリース），2004年10月.

1-3）Materials Reliability Program: Review of Stress Corrosion Cracking of Alloys 182 and 82 in PWR Primary Water Service (MRP-220). EPRI, Palo Alto, CA: 2007. 1015427.

1-4）G. Yagawa, Y. Hayase, S. Araki, S. Nakayama, T. Umemoto, T. Watanabe, Y. Ando, Theorical and Experimental Study on Induction Heating Stress Improvement for Nuclear Primary Piping, Journal High Pressure Institute of Japan 21-4 (1983), 169-178. (in Japanese)

1-5）K. Okimura, T. Kobayashi, T. Tsuruta J. Nishitani, M. Toyoda, MHI's Maintenance Technologies Supporting High Plant Availability of PWR Nuclear Power Plants, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 47 No. 1 (Mar. 2010)

1-6）T. Ohta, K. Kamo, I. Muroya, S. Asada and Y. Nakamura: Residual Stress Improvement on Inner Surface of Pipes Using Pipe Outer Surface Irradiated Laser Heating, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 27, No. 4, (2009) 325-332.

1-7）The Japan Welding Society : Handbook of Welding and Joining (2nd Edition, Maruzen(2003), I-3-4. (in Japanese)

1-8）G. Sachs : Der Nachweis Innerer Spannungen in Stangen und Rohren, Zeitshrift fur Metallkunde, 19 (1927), 352-357.

1-9）E.J. Kingston, D. Stefanescu, A.H. Mahmoudi, C.E. Truman and D.J. Smith : Novel Applications of the Deep-Hole Drilling Technique for Measuring Through-Thickness Residual Stress Distributions, Journal of ASTM International, 3-4(April 2006), Paper ID/JAI 12568.

1-10）Y. Ueda, K. Fukuda, K. Nakacho and S. Endo : A New Measuring Method of Residual Stresses with the Aid of Finite Element Method and Reliability of Estimated Values, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 138 (1975), 499-507, (in Japanese) and Theoretical and Applied Mechanics (University of Tokyo Press), 25 (1977), 539-548, etc.

1-11）Y. Ueda, K. Fukuda and M. Tanigawa : New Measuring Method of 3-Dimensional Residual Stresses Based on Theory of Inherent Strain, Journal of the Society of Naval

Architects of Japan, 145 (1979), 203-211. (in Japanese)

1-12）Y. Ueda, Y. C. Kim and A. Umekuni : Measurement of Three-dimensional Welding Residual Stresses due to Electron Beam Welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.4, No.1, (1986), 138-142. (in Japanese)

1-13）望月正人，斉藤直人，榎本邦夫，坂田信二，斉藤英世 ： 固有ひずみ法による平板多層溶接突合せ継手の部材内部での残留応力の検討，日本機械学会論文集，A編，61巻，587号，（1995），1568-1573.

1-14）Y. Ueda, N. X. Ma, Y.S. Wang and R. Koki : Measurement of Residual Stresses in Single-pass and Multipass Fillet Welds Using Inherent Strains, Estimating and Measuring Methods of Residual Stresses Using Inherent Strain Distribution Described as Functions (Report 5), Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.13, No.3, (1995), 470-478. (in Japanese)

1-15）M. Mochizuki, M. Hayashi, M. Nakagawa, N. Tada and S. Shimizu, Residual Stress Estimation at Welded Juncture of Small Diameter Pipe Penetrating Pressure Vessel Using Inherent Strain, Proceedings of the 8th International Conference on Pressure Vessel Technology, Montreal, Canada, Vol. 2, No. H1070B, (1996), 237-243.

1-16） K. Ogawa, D. Deng, S. Kiyoshima, N. Yanagida and K. Saito，Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment，Computational Materials Science, Vol. 45, Issue 4, (2009), 1031-1042.

1-17）Y. Ueda and N.X. Ma : Expression of Inherent strain in Form of Function and its Estimation, Estimating and Measuring Methods of Residual Stresses Using Inherent Strain Distribution Described as Functions (Report 1), Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 11-1 (1993), 189-195, etc. (in Japanese)

1-18）T. Nakagawa and Y. Oyanagi : UP Applied Mathematics Series 7,University of Tokyo Press, ISBN 4-13-064067-4 (1982), Chapter 8.(in Japanese)

２．固有ひずみ法による残留応力測定理論

2.1　固有ひずみ法とは

本研究では固有ひずみ法を適用する．“固有ひずみ”とは，ある構造物あるいは部材において応力が生じている場合，そのひずみを取り除く（０にする）と，その構造物あるいは部材が無応力状態になる，そのような“応力の発生源”となっているひずみのことである．

固有ひずみと残留応力は弾性的に，即ち，一意的に対応している．したがって，計測ひずみより固有ひずみを求めることができると，それを用いた弾性計算で残留応力を知ることができる．しかし，計測ひずみと固有ひずみの関係，固有ひずみと残留応力の関係を，３次元任意形状・任意固有ひずみ分布（任意残留応力分布）状態に対して，連続体の弾性力学理論より求めることは不可能である．そこで，有限要素法を用いて，それらの関係が定式化された．その理論が“固有ひずみ法”[2-1)] である．固有ひずみ法は逆問題としての解析法の一つである．

有限要素法を用いた固有ひずみ法は，原理的には，どのように複雑な形状及び固有ひずみ分布（残留応力分布）に対しても適用できる．例えば，厚板溶接継手を対象とする場合を考える．その内部の残留応力を測定するために，初期に内部にひずみゲージを貼ることは物理的に不可能である．内部にひずみゲージを貼るためには，対象物を切断する必要があるが，それにより応力状態は変化してしまう．これに対し，固有ひずみ法では固有ひずみを介して残留応力を測定するので，初期に物体表面だけにひずみゲージを貼付し，その後の切断による解放ひずみより，内部を含めた物体全体の残留応力を求めることができる．又，もし，表面上での計測では感度が悪い場合は，固有ひずみが存在すると考えられる領域の近くでひずみゲージが貼れるように，切断してもよい．切断により固有ひずみが完全に解放されてしまわない限り，その後の細断時における解放ひずみより固有ひずみを推定することが可能である．

又，ひずみゲージによる計測値には，不可避の誤差が含まれる．通常の測定法では，それを無視し，計測値が正しいものとして，残留応力の確定値のみを求めている．固有ひずみ法では，計測ひずみに誤差が含まれていても，統計学的手法により，残留応力の最確値と標準偏差（信頼区間）を求めることができる．即ち，推定される残留応力の信頼性を評価し把握することができる．

2.2　固有ひずみ法の基礎理論

前節で述べたように，物体内に固有ひずみが存在すると，それに対応する弾性ひずみが発生している（弾性応答）．固有ひずみと弾性ひずみとの間には線形の関数関係が存在する．又，弾性ひずみと応力は一意的関係（弾性構成方程式）にあるので，固有ひずみと応力との間にも線形の関数関係が存在する．

物体を有限要素に分割した時，物体全体の要素に残留する弾性ひずみ$\{\varepsilon_k\}$（総数＝n＝要素数×弾性ひずみ成分数＝残留応力$\{\sigma_k\}$の成分の総数）と，物体全体の要素に含まれる固有ひずみ$\{\varepsilon_j*\}$（総数＝q（q≦n））の間には，線形の関数関係が存在する．これを式(2-1)で表す．式(2-1)はn個のスカラー式（連立方程式）を１つのマトリックス式にまとめたものである．固有ひずみと残留応力の関係も同様である．

$$\{\varepsilon_k\}=[H_{kj}]\{\varepsilon_j*\} \qquad (k=1\cdots n, j=1\cdots q) \tag{2-1}$$

$$\{\sigma_k\}=[M_{kj}]\{\varepsilon_j*\} \qquad (k=1\cdots n, j=1\cdots q) \tag{2-2}$$

n個の弾性ひずみ$\{\varepsilon_k\}$の内，計測される弾性ひずみをm個（m≦n）とし$\{{}_m\varepsilon_i\}$で表すと，$\{{}_m\varepsilon_i\}$と固有ひずみ$\{\varepsilon_j*\}$の関係は，式(2-1)を，関係するm個のスカラー式の集合に縮小することにより求められる（n個の連立方程式の集合がm個の連立方程式の集合に縮小される）．この関係は測定方程式（観測方程式）と呼ばれる．これを式(2-3)で表す．

$$\{{}_m\varepsilon_i\}=[H_{ij}]\{\varepsilon_j*\} \qquad (i=1\cdots m, j=1\cdots q) \tag{2-3}$$

式(2-3)で$\{{}_m\varepsilon_i\}$と$\{\varepsilon_j*\}$を関係付ける$[H_{ij}]$の成分は次のように簡単に求めることができる．即ち，$[H_{ij}]$の第r列の各成分は，$\{\varepsilon_j*\}$のr番目の成分を１，他の成分を０とした時の固有ひずみが生じさせる各計測点での弾性ひずみである．例えば，$[H_{ij}]$の２列目の各成分は，単位固有ひずみ$\{\varepsilon_j*\}=\{0100\bullet\bullet\bullet0\}^T$を与え，各計測点で発生する弾性ひずみをFEM解析することにより求めることができる（全列を同時に計算することも可能）．

未知数である固有ひずみの数と同じ数の弾性ひずみを計測することができると（q＝m），式(2-3)により，固有ひずみを確定値として求めることができる．もし，それより多い弾性ひずみを計測すると（q＜m），m 個のスカラー式が含まれる測定方程式（式(2-3)）において，独立な関係がq個で，残りのm-p個は従属関係となる．

しかし，実際の計測ひずみには，通常，誤差が含まれている．即ち，固有ひずみに対応する真の弾性ひずみが計測されているとは限らない．したがって，計測ひずみの数 m が固有ひずみの数 q と同じ場合は，式(2-3)は，計測ひずみが真の弾性ひずみであると仮定した場合の固有ひずみの確定値を与えているに過ぎない．そこで，より信頼度の高い固有ひずみを求めるために，計測ひずみ数 m を固有ひずみ数 q より多くする（q＜m）．そして，計測ひずみには誤差が含まれているものと考えると，式(2-3)に含まれる m 個の方程式には，もはや従属関係は存在しなくなる．計測ひずみの誤差を$\{x\}$とすると，式(2-3)は，

$$\{{}_m\varepsilon_i\} - [H_{ij}]\{\varepsilon_j *\} = \{x_i\} \qquad (i = 1 \cdots m, j = 1 \cdots q) \tag{2-4}$$

上式に含まれる m 個の方程式の中の任意の q 個を用いると，q 個の固有ひずみを確定値として求めることができる．但し，どの方程式（どの計測ひずみ）を選択するかで，推定される固有ひずみの値は異なったものとなる．そこで，統計学的手法を導入して，m 個のすべての方程式（m 個のすべての計測ひずみ）を用いて，確率論的に最も生じやすい値，即ち，最確値とその偏差を求めることにする．

固有ひずみの真の値$\{\varepsilon *\}$を最確値$\{\hat{\varepsilon} *\}$に置き換えると，誤差$\{x\}$は残差$\{v\}$と呼ばれるものとなり，式(2-4)は，

$$\{{}_m\varepsilon_i\} - [H_{ij}]\{\hat{\varepsilon}_j *\} = \{v_i\} \qquad (i = 1 \cdots m, j = 1 \cdots q) \tag{2-5}$$

残差の平方和を S とし（式(2-6)），S が固有ひずみの最確値に対して最小となるように最小２乗法を適用する（式(2-7)）．式(2-7)は固有ひずみの最確値を求める連立方程式となっており，正規方程式と呼ばれる．残差が式(2-5)で表されることより，式(2-7)より式(2-8)を導くことができる．式(2-8)は計測ひずみと固有ひずみの最確値の関係を示している．

$$S = \{v_i\}^T \{v_i\} \qquad (i = 1 \cdots m) \tag{2-6}$$

$$\partial S / \partial \{\hat{\varepsilon}_j *\} = \{0\} \qquad (j = 1 \cdots q) \tag{2-7}$$

$$[H_{ij}]^T \{{}_m\varepsilon_i\} = [H_{ij}]^T [H_{ij}]\{\hat{\varepsilon}_j *\} \qquad (i = 1 \cdots m, j = 1 \cdots q) \tag{2-8}$$

$\left[H_{ij}\right]^T\left[H_{ij}\right]$は q × q の正方マトリックスであり，その逆マトリックスを求めると，固有ひずみの最確値を計測ひずみに対する陽関数として表すことができる．

$$\left\{\hat{\varepsilon}_j *\right\} = \left(\left[H_{ij}\right]^T\left[H_{ij}\right]\right)^{-1}\left[H_{ij}\right]^T\left\{{}_m\varepsilon_i\right\} \equiv \left[G_{ji}\right]\left\{{}_m\varepsilon_i\right\} \qquad (i = 1\cdots m,\ j = 1\cdots q) \tag{2-9}$$

固有ひずみの最確値と式(2-1)及び式(2-2)より，弾性ひずみ及び残留応力の最確値を求めることができる．

$$\left\{\hat{\varepsilon}_k\right\} = \left[H_{kj}\right]\left\{\hat{\varepsilon}_j *\right\} \qquad (k = 1\cdots n,\ j = 1\cdots q) \tag{2-10}$$

$$\left\{\hat{\sigma}_k\right\} = \left[M_{kj}\right]\left\{\hat{\varepsilon}_j *\right\} = \left[M_{kj}\right]\left[G_{ji}\right]\left\{{}_m\varepsilon_i\right\} \equiv \left[N_{ki}\right]\left\{{}_m\varepsilon_i\right\} \qquad (k = 1\cdots n, i = 1\cdots m,\ j = 1\cdots q) \tag{2-11}$$

又，最確値の精度は次のように推定することができる．測定の重みを同じ（単位重み）とすると，測定値の誤差の分散の不偏推定量は，

$$\hat{s}^2 = \left\{v_i\right\}^T\left\{v_i\right\} / (m-q) = S/(m-q) \qquad (i = 1\cdots m) \tag{2-12}$$

固有ひずみと残留応力の最確値の不偏分散は，それぞれ，

$$\left(\hat{s}_{\varepsilon_j^*}\right)^2 = \left(\sum_{i=1}^{m}\left(g_{ji}\right)^2\right)\cdot\hat{s}^2 \qquad (j = 1\cdots q) \tag{2-13}$$

ここで，g_{ji} ：式(2-9)中の $\left[G_{ji}\right]$の成分

$$\left(\hat{s}_{\sigma_k}\right)^2 = \left(\sum_{i=1}^{m}\left(n_{ki}\right)^2\right)\cdot\hat{s}^2 \qquad (k = 1\cdots n) \tag{2-14}$$

ここで，n_{ki} ：式(2-11)中の $\left[N_{ki}\right]$の成分

標準偏差の推定値として，通常通り，不偏分散の正の平方根をとると，

$$\hat{s}_{\varepsilon_j^*} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{m}\left(g_{ji}\right)^2\right)\cdot\hat{s}^2} \qquad (j = 1\cdots q) \tag{2-15}$$

$$\hat{s}_{\sigma_k} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{m}\left(n_{ki}\right)^2\right)\cdot\hat{s}^2} \qquad (k = 1\cdots n) \tag{2-16}$$

参考文献

2-1）Y. Ueda, K. Fukuda, K. Nakacho and S. Endo : A New Measuring Method of Residual Stresses with the Aid of Finite Element Method and Reliability of Estimated Values, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 138 (1975)，499-507, (in Japanese) and Theoretical and Applied Mechanics, University of Tokyo Press, 25 (1977), 539-548, etc.

３．固有ひずみ法による原子炉配管突合せ溶接継手の残留応力測定

3.1　平板継手に対する測定理論（平板 T-L 法）[3-1)]

3.1.1 平板 T-L 法

これまでに，平板の厚板突合せ溶接継手試験体を対象として，その溶接長が十分長い場合に対して，実精度を考慮した実用的測定法として T-L 法が提案されている．本研究においても，基本的には T-L 法を適用する．そこで，従来の T-L 法について簡単に説明する．

（a）溶接線が十分長く，中央部付近が定常状態，即ち，固有ひずみ各成分が長さ方向に一定になっているとする．この場合，中央部付近では，溶接線方向の弾性ひずみは同方向の固有ひずみのみによって生成されている．この事実を利用して，固有ひずみ成分を２つに分けて測定する．

（b）中央部付近において，溶接線に垂直な薄い試験片（T 片）１枚と，溶接線方向に薄い試験片（L 片）を必要枚数，切り出す．L 片は，試験体の上下表面に平行な面，あるいは，上下表面に垂直な面を有している．更に，それらの T 片及び L 片を細断する．これらの切断による解放ひずみを用いて，L 片からは溶接線方向の固有ひずみを，T 片からは溶接線に垂直な面内の固有ひずみを求める．

3.1.2 平板 T-L 法を軸対称継手に適用する場合の課題

(1) T 片面内固有ひずみの溶接線方向弾性ひずみへの影響

上記のように，十分長い溶接線を有する平板継手では，その中央部付近では，溶接線方向の弾性ひずみは同方向の固有ひずみのみによって生成されている．このことは理論的に証明されている．従来の T-L 法は，この特性に基づいて，測定法及び測定理論が展開されている．しかし，軸対称継手では，その理論は成立せず，T 片面内固有ひずみも溶接線方向弾性ひずみを発生させる．したがって，その影響を取り入れた固有ひずみと弾性ひずみの新たな関係を求める必要がある．

(2) 板幅方向固有ひずみの板厚方向線形変化成分の有効化

平板継手試験体では，板幅方向固有ひずみの板厚方向の分布において，一様成分は勿論，線形変化成分も自由に変形できるため，残留応力を生成しておらず，無効固有ひずみとなっている．つまり，その固有ひずみ成分は，試験体の初期の状態において，すでに解放されており，測定することはできず，又，その必要もない．そこで，これまでの T-L 法では，板幅方向固有ひずみの有効成分を，それがそのまま残っている T 片を切り出した後，T 片を細断することにより求めている．

しかし，軸対称継手では，軸方向（平板の板幅方向に相当）固有ひずみの板厚方向の分布において，一様成分は平板の場合と同様に自由に変形できるが，線形変化成分は自由に変形することはできず，残留応力を生成する．つまり，有効固有ひずみとなる．この有効固有ひずみは，元の試験体から T 片を切り出した時に，解放されてしまう．T 片から求められるのは，非線形成分だけである．したがって，軸方向固有ひずみの板厚方向線形変化成分を求めるためには, 元の試験体から T 片を切り出す時の解放ひずみを計測し，それとの関係を定式化しておく必要がある．

尚，以後，軸方向固有ひずみの板厚方向の線形変化成分を単に“軸方向固有ひずみ線形成分”と呼び，軸方向固有ひずみの板厚方向の非線形変化成分を単に“軸方向固有ひずみ非線形成分”と呼ぶ.

3.2　配管突合せ溶接継手の残留応力測定

3.2.1 軸対称継手に対する測定理論の開発（軸対称 T-L 法）

固有ひずみ（残留応力）が軸対称に分布していると想定した場合の測定方程式（固有ひずみと計測ひずみの関係）を導出する．即ち，第２章で式(2-3)として示した測定方程式を軸対称状態に対して具体的に求める．

軸対称状態における固有ひずみ成分は軸方向，径方向，周方向，及び，軸方向と径方向が作る面内でのせん断（以下では，単に“せん断”と呼ぶ），の４成分である．試験体から T 片及び L 片を切り出す時，更に，それらを細断する時に解放されるひずみ（計測ひずみ）より，それらの固有ひずみを推定する．そのための測定方程式を，3.1.2 節で説明した軸対称特有の挙動を考慮して導出する．

ところで，L 片の切断方向としては，これまで２方向が提案されているが，軸対称としての切断の容易さから，軸対称の軸に垂直な薄い片として切り出すことにする．このことを含め，以下の式展開に合わせて，3.2.3 項で示している実験手順，Fig. 3.2-2，Fig. 3.2-3 を参照されたい．

尚，ここに示す測定理論及び実験手順に関して特許出願を行い，査定の結果，平成２２年６月１８日に特許登録された（特許第 4533621 号, 残留応力測定方法および装置）．

---------- ＜記号及び添字＞ ----------

$\{\varepsilon_j *\}$：固有ひずみ

$\{{}_m\varepsilon_i\}$：固有ひずみにより生じている計測位置での弾性ひずみ

＜注＞切断により解放されるひずみ（計測ひずみ）は，元，そこに存在していた弾性ひずみと逆符号であるので，計測ひずみを逆符号にして，$\{{}_m\varepsilon_i\}$の入力データとする．

【添字】

$L = 1, \cdots, N_L$

N_L ：全 L 片での，周方向の固有ひずみ数，あるいは，計測弾性ひずみ数

$T = 1, \cdots, N_T$

N_T ：T 片面内の，固有ひずみ数，あるいは，計測弾性ひずみ数

$T1 = 1, \cdots, N_{T1}$

N_{T1} ：軸方向の固有ひずみの板厚方向線形変化成分を除く，T 片面内の固有ひずみ数（通常，非線形変化成分が存在するので，$N_{T1} = N_T$）

$T2 = 1, \cdots, N_{T2}$

N_{T2} ：軸方向の固有ひずみの板厚方向線形変化成分数

$Tz = 1, \cdots, N_{Tz}$

N_{Tz} ：軸方向の計測弾性ひずみ数

---

(1) 全固有ひずみと周方向弾性ひずみの関係

（a）元の軸対称体における周方向固有ひずみと周方向弾性ひずみの関係

$$\left\{ {}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta*}{}^{W\to L\to S} \right\} = \left[H_1 \right] \left\{ \varepsilon_{\theta_{jL}} * \right\} \tag{3-1}$$

ここで，

$\left\{ \varepsilon_{\theta_{jL}} * \right\}$ ：周方向固有ひずみ

$\left\{ {}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta*}{}^{W\to L\to S} \right\}$：元の軸対称体において，周方向固有ひずみにより生じている周方向弾性ひずみ（軸対称体⇒L 片⇒細片の切断により解放される）

$\left[H_1 \right]$：元の軸対称体において，$\left\{ \varepsilon_{\theta_{jL}} * \right\}$と$\left\{ {}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta*}{}^{W\to L\to S} \right\}$の関係を表すHマトリックス

（b）元の軸対称体における軸方向，径方向及びせん断固有ひずみと周方向弾性ひずみの関係

軸方向固有ひずみは，以後の関係式との統合のため，板厚方向の分布を線形変化成分と非線形変化成分に分離しておく．

$$\left\{ {}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot zr*}{}^{W\to L} \right\} = \left[H_2 \right] \left\{ \varepsilon_{zr_{jT}} * \right\} = \left[H_{2\cdot 1} \right] \left\{ \varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}} * \right\} + \left[H_{2\cdot 2} \right] \left\{ \varepsilon_{z_{LjT2}} * \right\} \tag{3-2}$$

ここで，

$\left\{ \varepsilon_{zr_{jT}} * \right\}$ ：軸方向固有ひずみ，径方向固有ひずみ，せん断固有ひずみ

$\left\{ \varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}} * \right\}$ ：軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向固有ひずみ，せん断固有ひずみ

$\left\{ \varepsilon_{z_{LjT2}} * \right\}$ ：軸方向固有ひずみ線形成分

$\left\{ {}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot zr*}{}^{W\to L} \right\}$：元の軸対称体において，軸方向，径方向及びせん断固有ひずみにより生じている周方向弾性ひずみ（軸対称体⇒L 片の切断により解放される）

$\left[H_2 \right]$：元の軸対称体において，$\left\{ \varepsilon_{zr_{jT}} * \right\}$と$\left\{ {}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot zr*}{}^{W\to L} \right\}$の関係を表すHマトリックス

$[H_{2\cdot1}]$：元の軸対称体において，

$\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\}$と$\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot zr*}{}^{W\to L}\}$の関係を表すHマトリックス

$[H_{2\cdot2}]$：元の軸対称体において，

$\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\}$と$\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot zr*}{}^{W\to L}\}$の関係を表すHマトリックス

（c）元の軸対称体における全固有ひずみと周方向弾性ひずみの関係

式(3-1)と式(3-2)より，

$$\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta zr*}{}^{W\to L\to S}\}=\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta*}{}^{W\to L\to S}\}+\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot zr*}{}^{W\to L}\}=[H_1]\{\varepsilon_{\theta_{jL}}*\}+[H_{2\cdot1}]\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\}+[H_{2\cdot2}]\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\} \tag{3-3}$$

ここで，

$\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta zr*}{}^{W\to L\to S}\}$：元の軸対称体において，全固有ひずみにより生じている周方向弾性ひずみ（軸対称体⇒L 片⇒細片の切断により解放される）

(2) T 片における固有ひずみと弾性ひずみの関係

T 片における軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向及びせん断固有ひずみと軸方向，径方向及びせん断弾性ひずみの関係は，

$$\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r*}{}^{T\to S}\}=[H_3]\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\} \tag{3-4}$$

ここで，

$\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r*}{}^{T\to S}\}$：T 片において，軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向及びせん断固有ひずみにより生じている軸方向，径方向及びせん断弾性ひずみ

$[H_3]$：T 片において，$\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\}$と$\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r*}{}^{T\to S}\}$の関係を表すHマトリックス

(3) 全固有ひずみと T 片切断時に解放される軸方向弾性ひずみの関係

（a）元の軸対称体における軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向及びせん断固有ひずみと軸方向，径方向及びせん断弾性ひずみの関係

$$\left\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r^*}{}^{W\to T\to S}\right\}=\left[H_4\right]\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\} \tag{3-5}$$

ここで，

$\left\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r^*}{}^{W\to T\to S}\right\}$：元の軸対称体において，軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向及びせん断固有ひずみにより生じている軸方向，径方向及びせん断弾性ひずみ

$\left[H_4\right]$：元の軸対称体において，

$\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}$と$\left\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r^*}{}^{W\to T\to S}\right\}$の関係を表すHマトリックス

（b）元の軸対称体における軸方向弾性ひずみの内，T 片への切断時に解放される弾性ひずみの内訳

$$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta zr^*}{}^{W\to T}\right\}=\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta^*}{}^{W\to T}\right\}+\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_{NL}r^*}{}^{W\to T}\right\}+\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_L*}{}^{W\to T}\right\} \tag{3-6}$$

ここで，

$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta zr^*}{}^{W\to T}\right\}$：元の軸対称体において，全固有ひずみにより生じている軸方向弾性ひずみの内，T 片への切断時に解放される弾性ひずみ

$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta^*}{}^{W\to T}\right\}$：元の軸対称体において，周方向固有ひずみにより生じている軸方向弾性ひずみ（T 片においては完全に解放されている）

$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_{NL}r^*}{}^{W\to T}\right\}$：元の軸対称体において，軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向及びせん断固有ひずみにより生じている軸方向弾性ひずみの内，T 片への切断時に解放される弾性ひずみ

$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_L*}{}^{W\to T}\right\}$：元の軸対称体において，軸方向固有ひずみ線形成分により生じている軸方向弾性ひずみ（T 片においては完全に解放されている）

（c）元の軸対称体における周方向固有ひずみと軸方向弾性ひずみの関係

$$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta*}{}^{W\to T}\right\}=\left[H_5\right]\left\{\varepsilon_{\theta_{jL}}*\right\} \tag{3-7}$$

ここで，

$\left[H_5\right]$：元の軸対称体において，

$\left\{\varepsilon_{\theta_{jL}}*\right\}$と$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta*}{}^{W\to T}\right\}$の関係を表すHマトリックス

（d）元の軸対称体における軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向及びせん断固有ひずみと，軸方向弾性ひずみの内，T 片への切断時に解放される弾性ひずみの関係

式(3-4)と式(3-5)より，

$$\begin{aligned}\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_{NL}r*}{}^{W\to T}\right\}&=\left[H_z\right]\left\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r*}{}^{W\to T\to S}\right\}-\left[H_z\right]\left\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r*}{}^{T\to S}\right\}\\&=\left[H_z\right]\left[H_4\right]\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}-\left[H_z\right]\left[H_3\right]\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}\\&=\left[H_z\right]\left(\left[H_4\right]-\left[H_3\right]\right)\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}\end{aligned} \tag{3-8}$$

ここで，

$\left[H_z\right]$：軸方向，径方向及びせん断弾性ひずみから，軸方向弾性ひずみだけを抽出するマトリックス（元の軸対称体と T 片に共通）

（e）元の軸対称体における軸方向固有ひずみ線形成分と軸方向弾性ひずみの関係

$$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_L*}{}^{W\to T}\right\}=\left[H_6\right]\left\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\right\} \tag{3-9}$$

ここで，

$\left[H_6\right]$：元の軸対称体において，$\left\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\right\}$と$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_L*}{}^{W\to T}\right\}$の関係を表すHマトリックス

（f）元の軸対称体における全固有ひずみと，軸方向弾性ひずみの内，T 片への切断時に解放される弾性ひずみの関係

式(3-6)に，式(3-7)ー式(3-9)を代入すると，

$$\begin{aligned}\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta zr*}{}^{W\to T}\right\}&=\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta*}{}^{W\to T}\right\}+\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_{NL}r*}{}^{W\to T}\right\}+\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot z_L*}{}^{W\to T}\right\}\\&=[H_5]\left\{\varepsilon_{\theta_{jL}}*\right\}+[H_z]([H_4]-[H_3])\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}+[H_6]\left\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\right\}\end{aligned}\tag{3-10}$$

(4) 全固有ひずみと弾性ひずみの関係

以上により求められた，式(3-3)，式(3-4)，式(3-10)を再記すると，

$$\left\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta zr*}{}^{W\to L\to S}\right\}=[H_1]\left\{\varepsilon_{\theta_{jL}}*\right\}+[H_{2\cdot1}]\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}+[H_{2\cdot2}]\left\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\right\}\tag{3-3 bis}$$

$$\left\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r*}{}^{T\to S}\right\}=[H_3]\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}\tag{3-4 bis}$$

$$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta zr*}{}^{W\to T}\right\}=[H_5]\left\{\varepsilon_{\theta_{jL}}*\right\}+[H_z]([H_4]-[H_3])\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}+[H_6]\left\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\right\}\tag{3-10 bis}$$

３つの関係式を１つのマトリックス式にまとめると，

$$\begin{Bmatrix}\left\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta zr*}{}^{W\to L\to S}\right\}\\\left\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r*}{}^{T\to S}\right\}\\\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta zr*}{}^{W\to T}\right\}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}[H_1]&[H_{2\cdot1}]&[H_{2\cdot2}]\\[0]&[H_3]&[0]\\[H_5]&[H_z]([H_4]-[H_3])&[H_6]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\left\{\varepsilon_{\theta_{jL}}*\right\}\\\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}\\\left\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\right\}\end{Bmatrix}\tag{3-11}$$

ここで，

$\left\{\varepsilon_{\theta_{jL}}*\right\}$ ：周方向固有ひずみ

$\left\{\varepsilon_{z_{NL}r_{jT1}}*\right\}$ ：軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向固有ひずみ，せん断固有ひずみ

$\left\{\varepsilon_{z_{LjT2}}*\right\}$ ：軸方向固有ひずみ線形成分

$\left\{{}_m\varepsilon_{\theta_{iL}\cdot\theta zr*}{}^{W\to L\to S}\right\}$：元の軸対称体において，全固有ひずみにより生じている周方向弾性ひずみ（軸対称体⇒L 片⇒細片の切断により解放される）

【注】軸対称体⇒L 片の間の変化は，表裏面での計測値を内部線形補間する．L 片の長さが板厚の２倍程度以上あれば，この補間に伴う誤差はせいぜい数％である（Saint-Venant の原理より）

$\left\{{}_m\varepsilon_{zr_{iT}\cdot z_{NL}r*}{}^{T\to S}\right\}$：T 片において，軸方向固有ひずみ非線形成分，径方向及びせん断固有ひずみにより生じている軸方向，径方向及びせん断弾性ひずみ

$\left\{{}_m\varepsilon_{z_{iTz}\cdot\theta zr*}{}^{W\to T}\right\}$：元の軸対称体において，全固有ひずみにより生じている軸方向弾性ひずみの内，T 片への切断時に解放される弾性ひずみ

【注】表裏面での計測値のみでよく，内部線形補間する必要はない（軸方向固有ひずみ線形成分は，有意の未知数としては変化率だけで，板厚方向各列で１つずつだけであるので，敢えて，測定数を増やす必要はない）

式(3-11)が，第２章での式(2-3)に相当する．以後の理論展開は，式(2-4)以降と同じである．上記の弾性ひずみを計測することにより，固有ひずみ及び残留応力の最確値及び偏差を求めることができる．

3.2.2 解析対象

これまでに示した軸対称測定理論を用いて, 原子炉冷却材配管を想定したステンレス鋼管の溶接継手の残留応力を測定した.

実験計測に用いた試験体の形状を Fig. 3.2-1 に示す．外径 216.3mm，板厚 22mm の 8Bsch160 管である．溶接部は V 開先であり，その溶接条件を Table 3.2-1 に示す．溶接は TIG 溶接により，１４パス１１層で行われた．試験体の材料は SUS304 で，溶接棒は Y308L である.

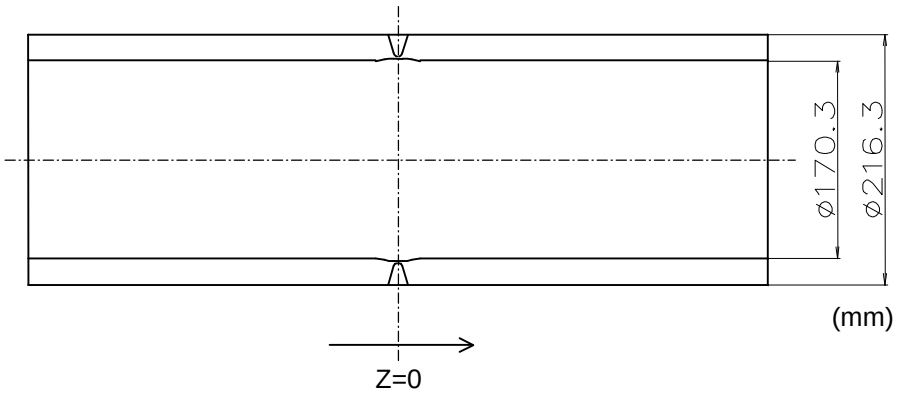


Fig. 3.2-1　Test pipe

Table 3.2-1　Conditions of welding

Welding process	Welding material	Layer No.	Pass No.	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (KJ/mm)
TIG	TGS308L (φ1.2)	1	1	140	9.5	80	1.0
		2	2	150	9.5	80	1.1
			3	150	9.5	80	1.1
		3	4	190	10	80	1.4
			5	190	10	80	1.4
		4	6	250	11	60	2.8
		5	7	275	11	60	3.0
		6	8	275	11	60	3.0
		7	9	275	11	60	3.0
		8	10	275	11	60	3.0
		9	11	275	11	60	3.0
		10	12	275	11	60	3.0
		11	13	275	11	60	3.0
			14	275	11	60	3.0

3.2.3 計測手順

計測手順は以下の通りである．Fig. 3.2-2 に計測及び切断の流れを示す．

１）試験体の内外表面にゲージを貼付する．その初期値を計測する．

２）試験体よりＴ片とＬ片を切り出す．内外表面ゲージの切断後の値を計測する．

３）Ｔ片とＬ片の断面にゲージを貼付する．その初期値を計測する．

４）Ｔ片とＬ片を細断する．全ゲージの切断後の値を計測する．

上記のＴ片におけるひずみゲージの実際の貼付位置を Fig. 3.2-3 に示す．図中の○印が計測位置であり，ゲージ長 1 mm の２軸ひずみゲージを貼付した．Ｌ片の断面にも，Fig. 3.2-2 に示すように板厚方向に１列，Ｔ片と同じ位置にひずみゲージを貼付した．

尚，Ｔ片とＬ片は溶接始終端より離れた位置から切り出した．又，試験体の内外表面での直接計測は管の周方向２ヶ所の位置で行った．

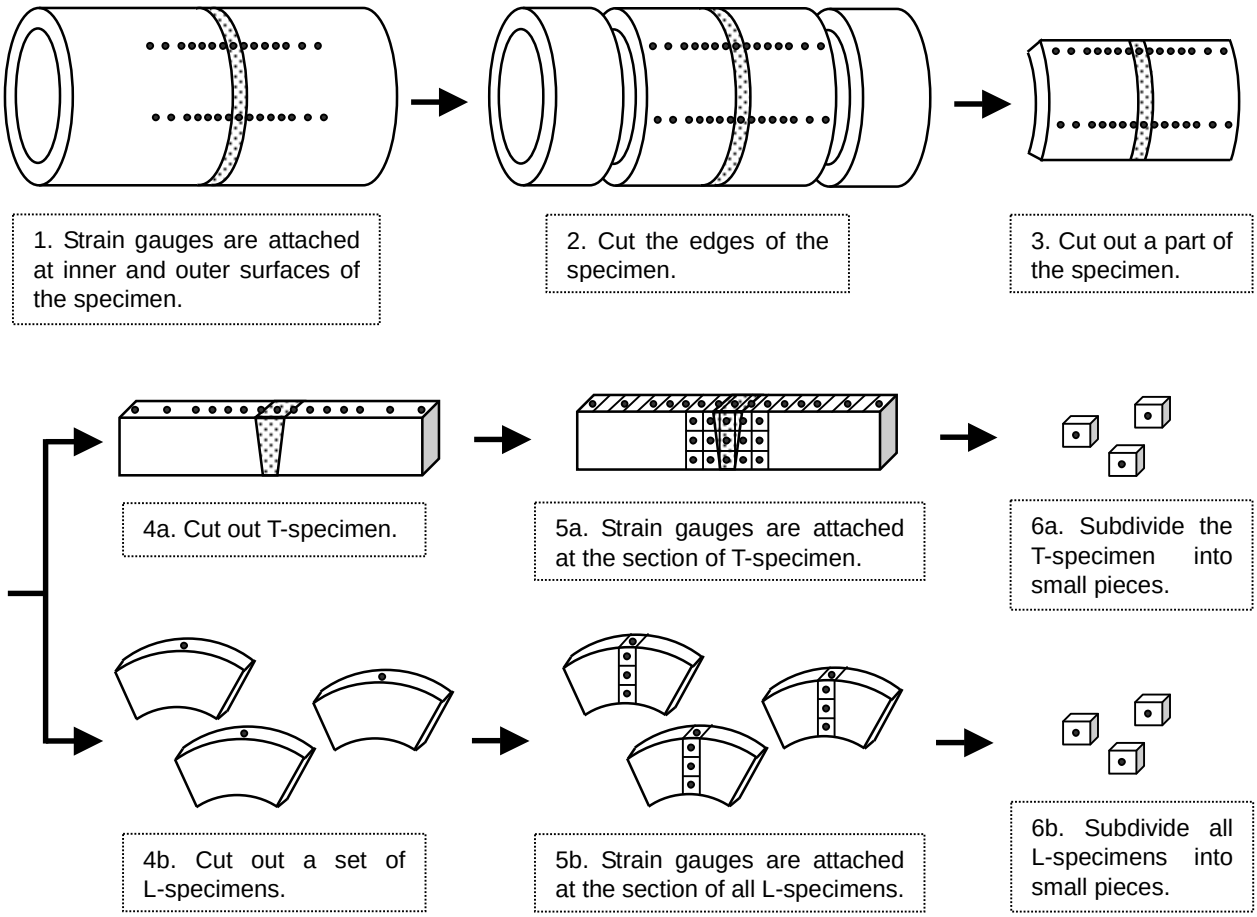


Fig. 3.2-2 Procedure of measuring and cutting

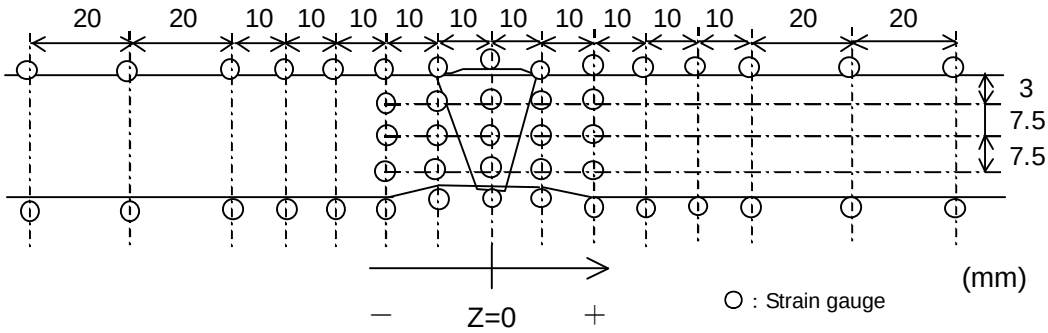


Fig. 3.2-3 Measuring positions of strains (T-specimen)

3.2.4 測定結果及び考察

(1) 残差の評価

まず，解析結果の残差を調べた．残差とは，固有ひずみが最確値通りに分布しているとした場合，各計測位置において生じる弾性ひずみと，実際の計測ひずみとの差のことである（但し，計測ひずみは解放ひずみであるので，逆符号にして差を求める必要がある）．

$$\{v_i\} = -\{{}_m\varepsilon_i\} - \{\hat{\varepsilon}_i\} \qquad (i = 1 \cdots m) \tag{3-12}$$

ここで，$\{v_i\}$：残差

$\{{}_m\varepsilon_i\}$：計測ひずみ

$\{\hat{\varepsilon}_i\}$：弾性ひずみの最確値

m ：計測ひずみの数

残差の大きさとデータ数の関係をまとめたのが Fig. 3.2-4 である．残差が大きくなると共に頻度数は減少していき，ほぼ単調な，なだらかな変化を示している．又，分布の裾野の先でパルス的に大きな残差を示すデータも見当たらない．したがって，はっきり異常と考えられるデータは存在せず，この全計測データを使用して推定することに特に問題はないと判断した．以下に，その解析結果を示す．

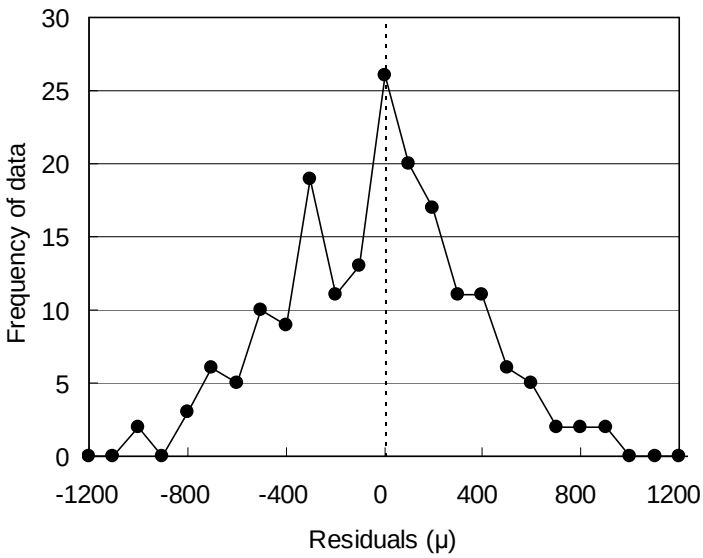


Fig. 3.2-4　Frequency distribution of residuals

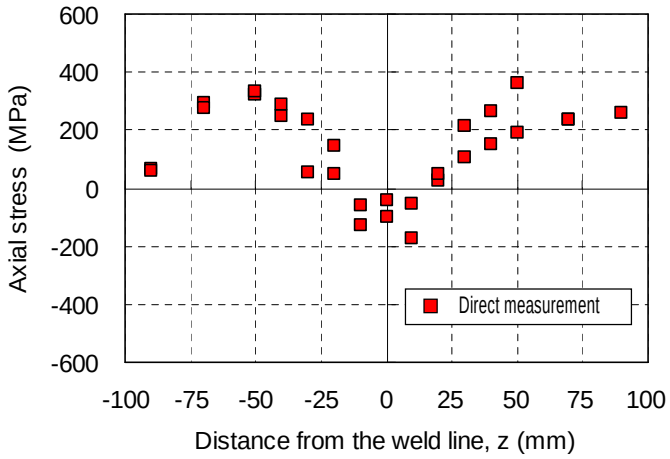
(2) 内外表面での残留応力分布

試験体の内外表面での残留応力は直接計測できる．管の周方向２ヶ所の位置での計測値を Fig. 3.2-5 及び Fig. 3.2-6 に示す．横軸は管の軸方向座標であり，原点は溶接部中央である（Fig. 3.2-1，Fig. 3.2-3 参照）．Fig. 3.2-5 が軸方向応力，Fig. 3.2-6 が周方向応力であり，それぞれ，軸方向の分布を表している．

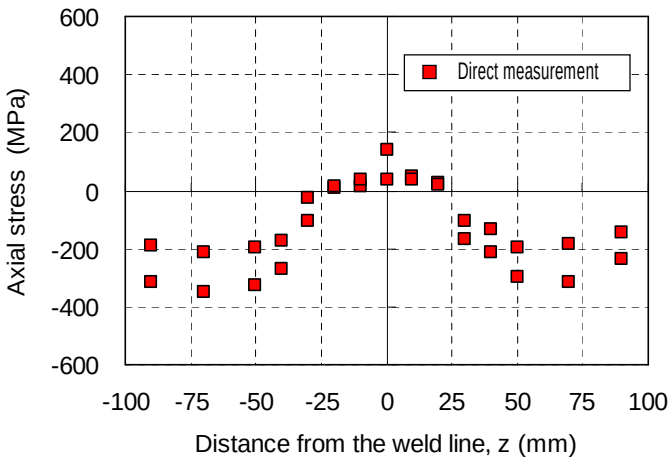
軸方向応力は外表面では引張応力が分布し，溶接部中心から 50mm 程度離れた位置で最大値を示すが，溶接部に近付くと大きく低下し，溶接部では圧縮応力に転じている．内表面では，外表面のほぼ逆の分布傾向を示しており，溶接部には小さな引張応力が生じている．

一方，周方向応力は，外表面では，軸方向応力の分布特性が弱められたような分布を示している．内表面では，軸方向応力と類似の分布特性を有し，溶接部には小さな引張応力が見られる．

参考のため，これらの分布特性を，２B 管，４B 管及び２４B 管を対象に，その溶接残留応力を軸対称として熱弾塑性解析した結果[3-2)]と比較してみる．板厚が異なり，開先形状や溶接条件も相違するが，Fig. 3.2-7 及び Fig. 3.2-8 に示すように，基本的な分布特性は同研究での４Ｂ管あるいは２４Ｂ管と類似している．即ち，軸方向応力及び周方向応力共に，外表面で溶接部付近では，その二つの管の間の分布になっている．内表面では，２４Ｂ管に近い分布となっている．

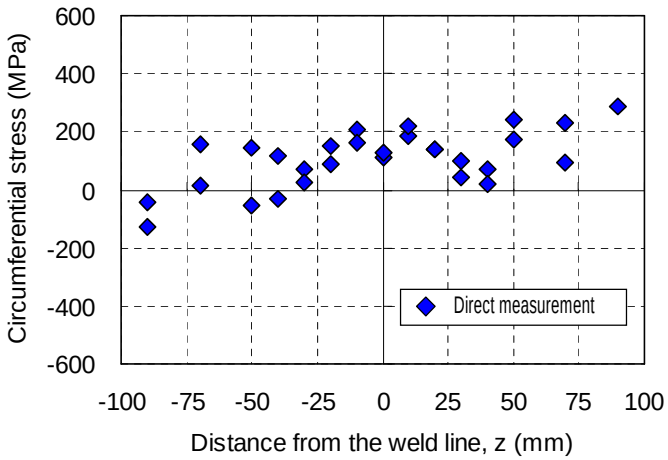


(a) On the outer surface

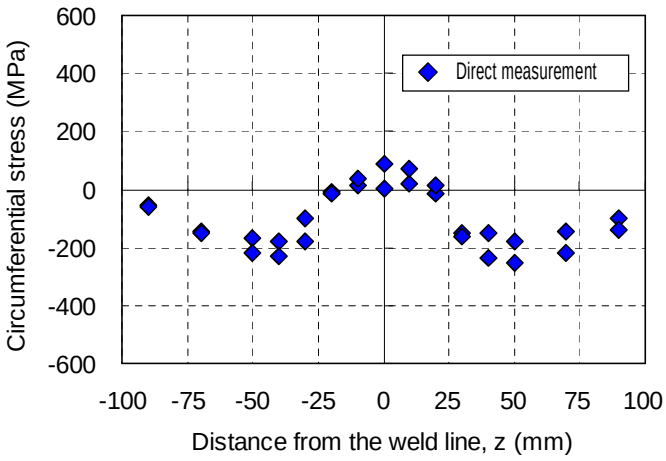


(b) On the inner surface

Fig. 3.2-5 Axial stresses on the surfaces

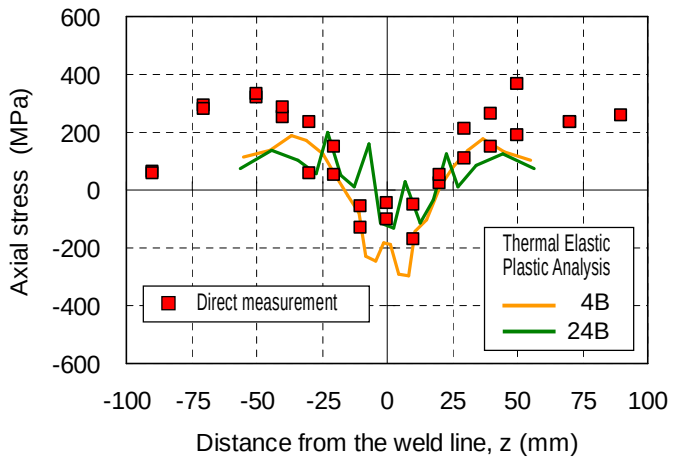


(a) On the outer surface

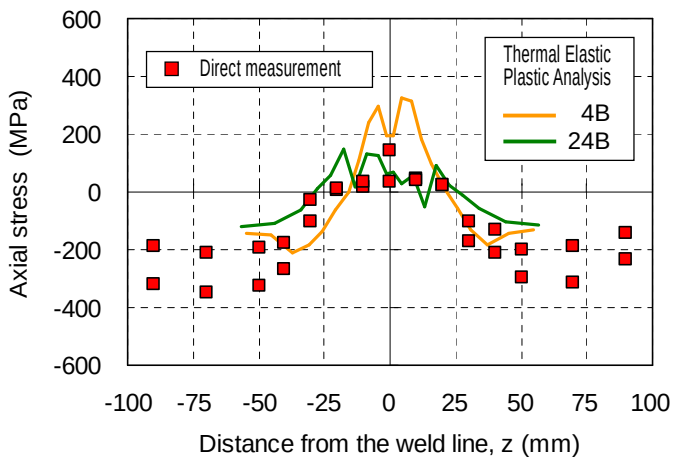


(b) On the inner surface

Fig. 3.2-6 Circumferential stresses on the surfaces

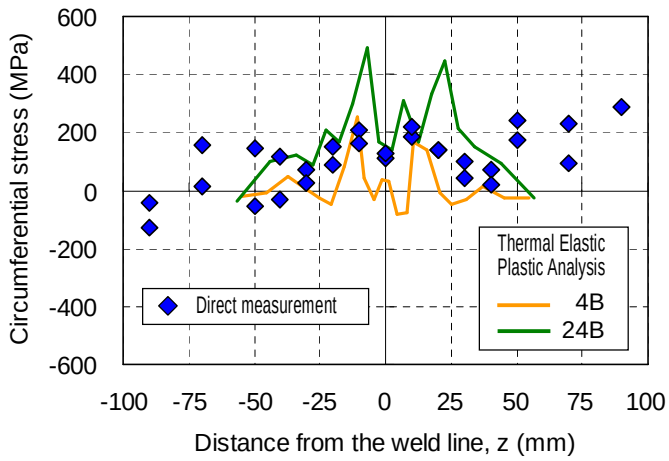


(a) On the outer surface

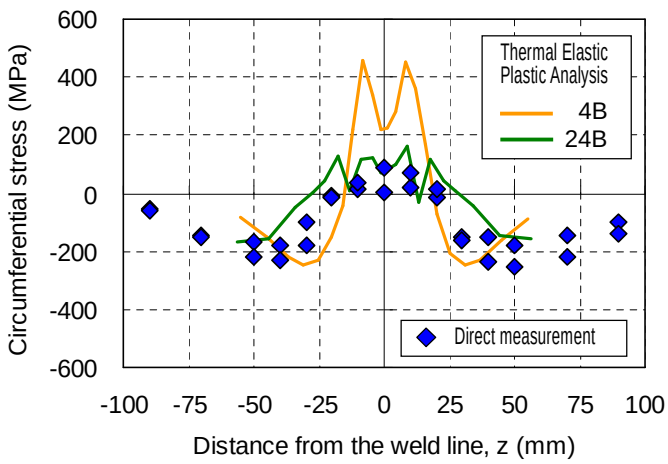


(b) On the inner surface

Fig. 3.2-7 Comparison of axial stresses on the surfaces



(a) On the outer surface



(b) On the inner surface

Fig. 3.2-8 Comparison of circumferential stresses on the surfaces

(3) 内部での残留応力分布

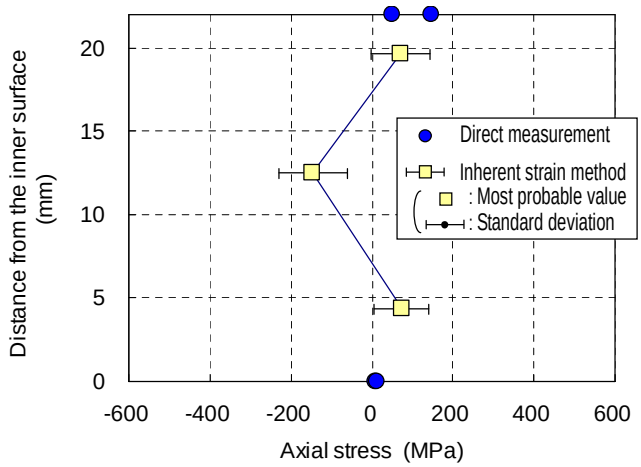
固有ひずみ法により測定された試験体内部の残留応力分布を示す. Fig. 3.2-9 及び Fig. 3.2-10 は，残留応力の最確値と標準偏差を，有限要素の要素中心（＝ひずみゲージ貼付位置）に対して示したものである．すべて，板厚方向の分布を表しており，表面での直接計測値も示されている．Fig. 3.2-9 が軸方向応力，Fig. 3.2-10 が周方向応力である．

軸方向応力は，中央断面（Fig. 3.2-9 (c)）では，外表面付近で圧縮応力となっており，板厚中央部から内表面にかけては引張応力が分布しているが，いずれも，値は小さい．一方，周方向応力は，中央断面（Fig. 3.2-10 (c)）では，断面全体に引張応力が分布している．内外表面付近では小さいが，板厚中央付近では大きな引張応力が残留している．

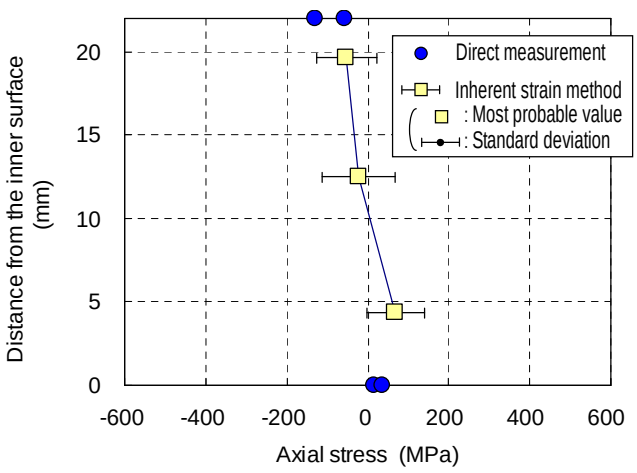
軸方向応力および周方向応力は，共に，試験体内部の残留応力分布が中央断面に対して左右対称の分布になっていない．これは，溶接時における同一層で左右に溶接パスを振り分けている影響である．

中央断面での分布を上記の熱弾塑性解析結果と比較してみると，Fig. 3.2-11 及び Fig. 3.2-12 に示すように，軸方向応力及び周方向応力共に，４Ｂ管と２４Ｂ管の間の分布になっている．

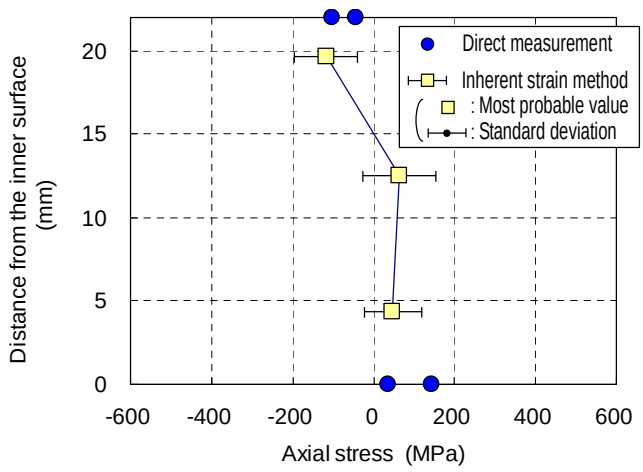
Fig. 3.2-9 及び Fig. 3.2-10 には，推定結果の精度の評価値として，残留応力の最確値と共に標準偏差を示している．標準偏差は５０〜１００MPa 程度となっており，本推定法は実用的精度を十分有していると考えられる．



(a) z = -20mm

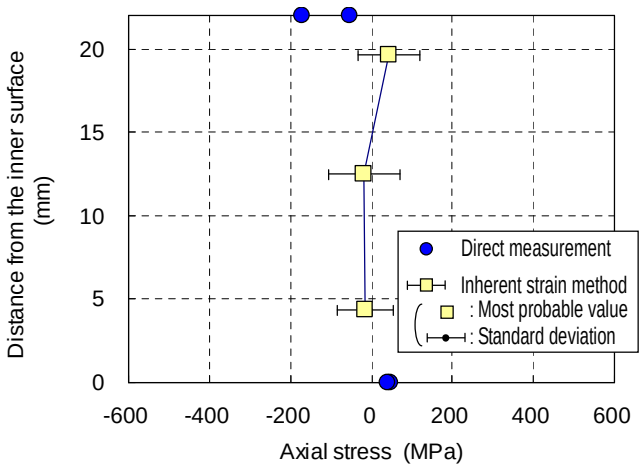


(b) z = -10mm

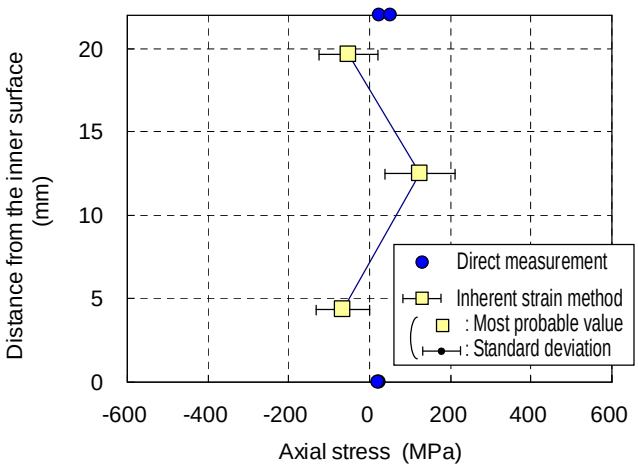


(c) z = 0mm

Fig. 3.2-9 Axial stresses at the cross sections

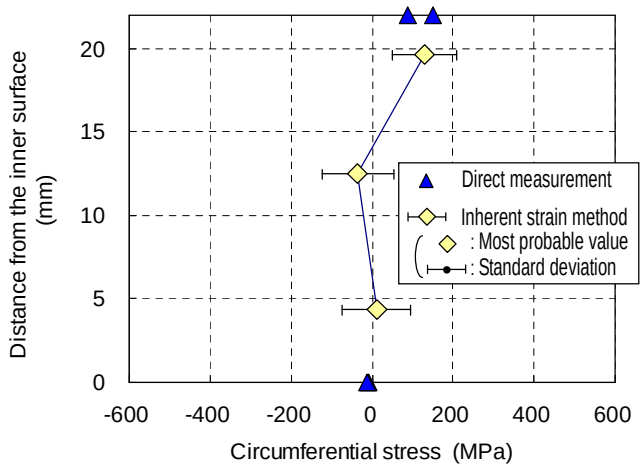


(d) z = 10mm

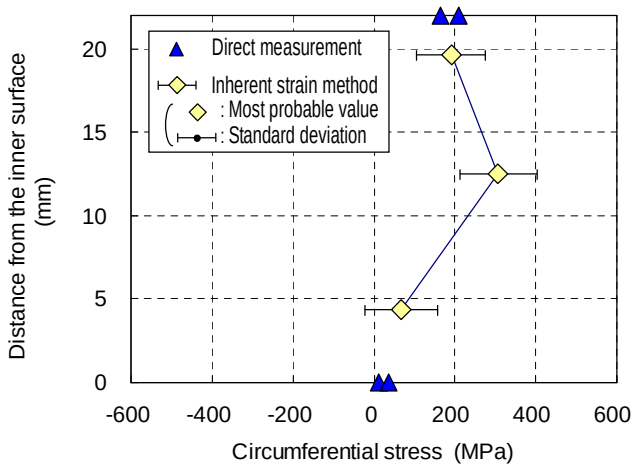


(e) z = 20mm

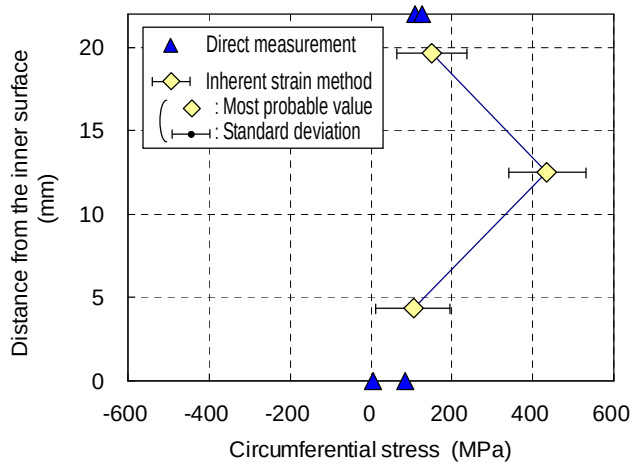
Fig. 3.2-9 Axial stresses at the cross sections



(a) z = -20mm

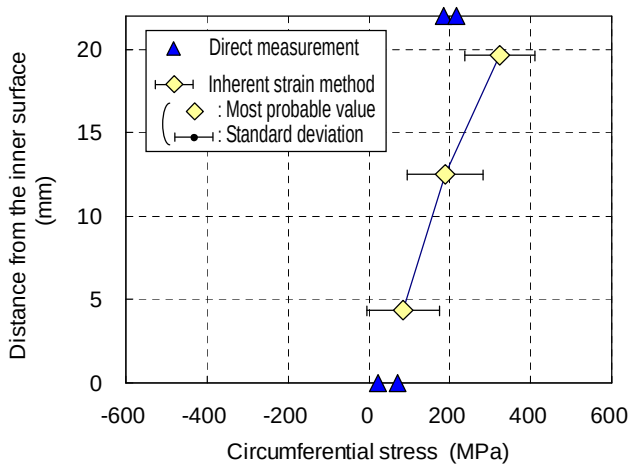


(b) z = -10mm

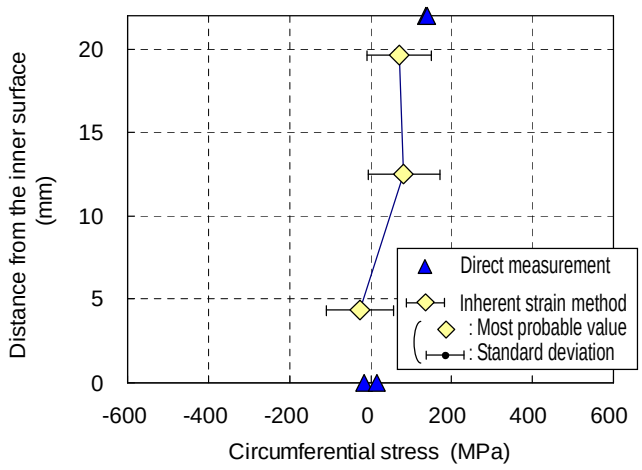


(c) z = 0mm

Fig. 3.2-10 Circumferential stresses at the cross sections



(d) z = 10mm



(e) z = 20mm

Fig. 3.2-10 Circumferential stresses at the cross sections

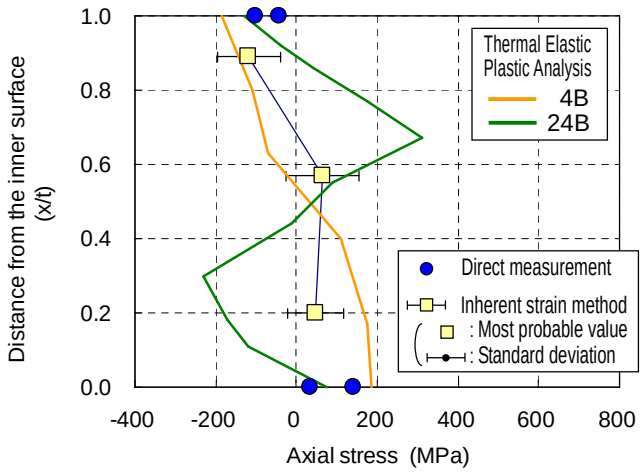


Fig. 3.2-11 Comparison of axial stresses at the middle cross sections

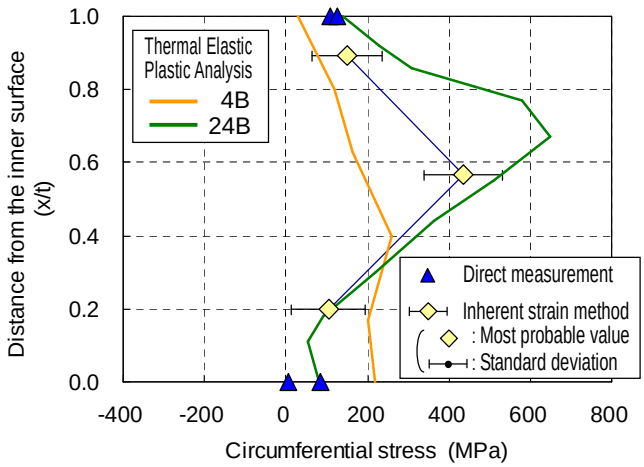


Fig. 3.2-12 Comparison of circumferential stresses at the middle cross sections

参考文献

3-1）Y. Ueda, K. Fukuda and M. Tanigawa : New Measuring Method of 3-Dimensional Residual Stresses Based on Theory of Inherent Strain, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 145 (1979), 203-211, and Journal of The Japan Welding Society, 49-12 (1980), 845-853, etc. (in Japanese)

3-2）Y. Ueda, K. Nakacho, T. Shimizu and K Ohkubo : Residual Stresses and Their Mechanisms of Production at Circumferential Weld by Heat-Sink Welding, Journal of The Japan Welding Society, 52-2 (1983), 90-97, and Journal of Pressure Vessel Technology (Transactions of the ASME), 108 (1986), 14-23, etc.

４．固有ひずみ法による原子炉容器管台貫通溶接部の残留応力測定

4.1　残留応力測定の基礎

4.1.1 関数表示固有ひずみ法の基礎理論

最初の固有ひずみ法では，解析対象物を有限要素に分解し，物体内で分布している固有ひずみが要素毎に異なると考えて測定理論が定式化された．これが固有ひずみ法の原点であり，各要素の固有ひずみがそのまま未知数となるので，後に，“要素表示固有ひずみ法”[4-1)] と名付けられた．第２章では，この測定原理を説明した．又，第３章では，この“要素表示固有ひずみ法”をそのまま適用して，配管突合せ継手の残留応力を測定した．

本章で研究対象とする原子炉容器管台貫通溶接部は複雑な形状をしており，応力分布も３次元的に複雑に変化していると推察される．一方，溶接部の寸法は小さく，ひずみの計測数が制限される．もし，“要素表示固有ひずみ法”を適用し，要素分割を十分細かくしていくと未知固有ひずみ数が非常に多くなり，ひずみ計測数が必要数を満足できなくなる．つまり，細かい要素分割での精度の高い測定が非常に困難になる．そこで，後に提案された，固有ひずみの分布を関数で表す“関数表示固有ひずみ法” を採用することにする [4-2)]．この方法では，固有ひずみ分布を関数で近似することになるが，未知数の数を大幅に減少させることができる．分布関数の係数が未知数となり，計測ひずみから係数の値を推定することになる．又，適切な分布関数を設定すると高い推定精度が期待できる．以下に，この“関数表示固有ひずみ法”の基礎理論を示す．

$$\{\varepsilon_s *\} = [P_{sp}]\{A_p\} \qquad (s = 1 \cdots s_{\max},\ p = 1 \cdots q) \tag{4-1}$$

ここで，

$\{\varepsilon_s *\}$：物体内で分布している固有ひずみ成分（３次元なら最多６成分）

$[P_{sp}]$：分布関数マトリックス

$\{A_p\}$：分布係数ベクトル（未知数）

$s_{\max}$：固有ひずみの成分数（３次元なら最多６成分）

p_s：各固有ひずみ成分の分布係数の数

q：全固有ひずみ成分に対する分布係数の総数．３次元なら，$q = \sum_{s=1}^{s_{\max}} p_s$

分布係数の値が確定された場合，固有ひずみ分布が確定され，そのような固有ひずみが分布しているとした場合の弾性ひずみ分布及び応力分布を弾性計算により求めるこ

とができる．

$$\{\varepsilon_k\} = [H_{kp}^F]\{A_p\} \qquad (k = 1 \cdots n, p = 1 \cdots q) \tag{4-2}$$

ここで，$\{\varepsilon_k\}$：分布関数及びその分布係数の値に対応する弾性ひずみ

$[H_{kp}^F]$：$\{A_p\}$と$\{\varepsilon_k\}$の関係を表す弾性応答マトリックス

n：全要素の弾性ひずみ成分の総数

$$\{\sigma_k\} = [M_{kp}^F]\{A_p\} \qquad (k = 1 \cdots n, p = 1 \cdots q) \tag{4-3}$$

ここで，$\{\sigma_k\}$：分布関数及びその分布係数の値に対応する応力

$[M_{kp}^F]$：$\{A_p\}$と$\{\sigma_k\}$の関係を表す弾性応答マトリックス

n：全要素の応力成分の総数（＝弾性ひずみ成分の総数）

n 個の弾性ひずみ$\{\varepsilon_k\}$の内，計測される弾性ひずみを m 個（m≦n）とし$\{{}_m\varepsilon_i\}$で表すと，$\{{}_m\varepsilon_i\}$と固有ひずみ分布係数$\{A_p\}$の関係は式(4-2)を縮小することにより求められる（n 個の連立方程式の集合が m 個の連立方程式の集合となる）．この関係は測定方程式と呼ばれる．これを式(4-4)で表す．

$$\{{}_m\varepsilon_i\} = [H_{ip}^F]\{A_p\} \qquad (i = 1 \cdots m, p = 1 \cdots q) \tag{4-4}$$

ここで，m：計測する弾性ひずみの数

式(4-4)で$\{{}_m\varepsilon_i\}$と$\{A_p\}$を関係付ける$[H_{ip}^F]$の成分は次のように求めることができる．即ち，$[H_{ip}^F]$の第 r 列は$\{A_p\}$の r 番目の成分を 1，他の成分を 0 とした時に，それに対応する固有ひずみ（式(4-1)）が生じさせる各計測点での弾性ひずみとして，弾性計算により簡単に求めることができる．

関数表示に近似したことによる誤差及び計測誤差により，通常，計測ひずみ$\{{}_m\varepsilon_i\}$は式(4-2)及び式(4-4)を満足せず，両辺の値に差が生じる．これを統計学的に処理するために，計測する弾性ひずみ数を未知数である固有ひずみ分布係数の数より多くしておく．式(4-4)で両辺の値の差，即ち，誤差を$\{x\}$で表すと，

$$\{{}_m\varepsilon_i\} - [H_{ip}^F]\{A_p\} = \{x_i\} \qquad (i = 1 \cdots m, p = 1 \cdots q)\ (m \geq q) \tag{4-5}$$

ここで，$\{x\}$：誤差

式(4-5)は m 個のスカラー方程式から構成されており，誤差がなければ，その中の任意の q 個を用いると，すべての固有ひずみ分布係数を一意的に求めることができる．しかし，誤差が含まれていると，どの方程式（どの計測ひずみ）を選択するかにより，算出される固有ひずみ分布係数の値は違ったものとなる．そこで，統計学的手法を導入して，m 個のすべての方程式（m 個のすべての計測ひずみ）を用いて，確率的に最も生じやすい値（最確値）とその偏差を求める．

固有ひずみ分布係数の最確値を$\{\hat{A}_p\}$で表すと，誤差$\{x\}$は残差$\{v\}$と呼ばれるものとなり，式(4-5)は,

$$\{{}_m\varepsilon_i\} - [H_{ip}^F]\{\hat{A}_p\} = \{v_i\} \qquad (i = 1\cdots m, p = 1\cdots q) \tag{4-6}$$

ここで，$\{\hat{A}_p\}$：固有ひずみ分布係数の最確値

$\{v\}$：残差

残差の平方和をSとし（式(4-7)），Sが固有ひずみ分布係数の最確値に対して最小となるように最小２乗法を適用する（式(4-8)）．式(4-8)は固有ひずみ分布係数の最確値を求める連立方程式となっており，正規方程式と呼ばれる．残差が式(4-6)で表されることより，式(4-8)より式(4-9)を導くことができる．式(4-9)は計測ひずみと固有ひずみ分布係数の最確値の関係を示している．

$$S = \{v_i\}^T\{v_i\} \qquad (i = 1\cdots m) \tag{4-7}$$

$$\partial S / \partial\{\hat{A}_p\} = \{0\} \qquad (p = 1\cdots q) \qquad \text{（正規方程式）} \tag{4-8}$$

$$[H_{ip}^F]^T\{{}_m\varepsilon_i\} = [H_{ip}^F]^T[H_{ip}^F]\{\hat{A}_p\} \qquad (i = 1\cdots m, p = 1\cdots q) \qquad \text{（正規方程式）} \tag{4-9}$$

$[H_{ip}^F]^T[H_{ip}^F]$は q × q の正方マトリックスであり，その逆マトリックスを求めると，固有ひずみ分布係数の最確値は計測ひずみより，次式のように求められる．

$$\{\hat{A}_p\} = ([H_{ip}^F]^T[H_{ip}^F])^{-1}[H_{ip}^F]^T\{{}_m\varepsilon_i\} \equiv [G_{pi}^F]\{{}_m\varepsilon_i\} \qquad (i = 1\cdots m, p = 1\cdots q) \tag{4-10}$$

固有ひずみ分布係数の最確値と式(4-2)及び式(4-3)より，弾性ひずみ及び残留応力の最確値を求めることができる．

$$\{\hat{\varepsilon}_k\} = [H_{kp}^F]\{\hat{A}_p\} \qquad (k = 1\cdots n, p = 1\cdots q) \tag{4-11}$$

$$\{\hat{\sigma}_k\} = \left[M_{kp}^F\right]\left\{\hat{A}_p\right\} = \left[M_{kp}^F\right]\left[G_{pi}^F\right]\left\{{}_m\varepsilon_i\right\} \equiv \left[N_{ki}^F\right]\left\{{}_m\varepsilon_i\right\} \quad (k=1\cdots n,\ i=1\cdots m,\ p=1\cdots q) \tag{4-12}$$

又，最確値の精度は次のように評価できる．測定の重みを同じ（単位重み）とすると，測定の分散の不偏推定量は，

$$\hat{s}^2 = \{v_i\}^T\{v_i\}/(m-q) = S/(m-q) \qquad (i=1\cdots m) \tag{4-13}$$

固有ひずみ分布係数と残留応力の最確値の不偏分散は，それぞれ，

$$\left(\hat{s}_{A_p}\right)^2 = \left(\sum_{i=1}^{m}\left(g_{pi}^F\right)^2\right)\cdot\hat{s}^2 \qquad (p=1\cdots q) \tag{4-14}$$

ここで， g_{pi}^F ：式(4-10)中の $\left[G_{pi}^F\right]$ の成分

$$\left(\hat{s}_{\sigma_k}\right)^2 = \left(\sum_{i=1}^{m}\left(n_{ki}^F\right)^2\right)\cdot\hat{s}^2 \qquad (k=1\cdots n) \tag{4-15}$$

ここで， n_{ki}^F ：式(4-12)中の $\left[N_{ki}^F\right]$ の成分

標準偏差の推定値として，通常通り，不偏分散の正の平方根をとると，

$$\hat{s}_{A_p} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{m}\left(g_{pi}^F\right)^2\right)\cdot\hat{s}^2} \qquad (p=1\cdots q) \tag{4-16}$$

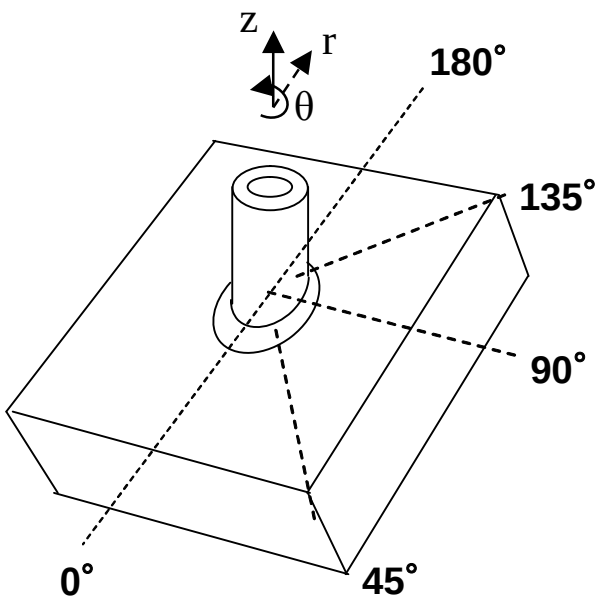
$$\hat{s}_{\sigma_k} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{m}\left(n_{ki}^F\right)^2\right)\cdot\hat{s}^2} \qquad (k=1\cdots n) \tag{4-17}$$

4.1.2 非軸対称円周厚板継手に対する解析理論の構築（関数表示 T-L 法）

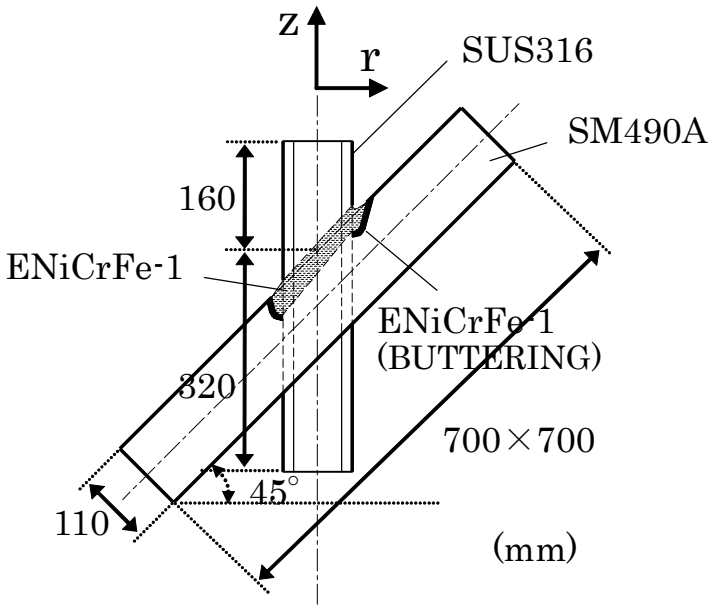
(1) 試験体，座標系と固有ひずみ成分

原子炉容器管台貫通溶接部は管台となる円管を本体容器に接合するものであるが，一般的に非軸対称な形状をしている．この溶接部の残留応力を関数表示固有ひずみ法を適用して測定する．直接の解析対象とする試験体（モックアップ）を Fig. 4.1-1 に示す．母板とする厚板平板（板厚 110mm，長さ×幅 700mm×700mm）に入射角 45°で管部材（外径 100mm，板厚 15mm，長さ 480mm）が貫通溶接されている．異材継手であり，母板は SM490A，管は SUS316，溶接棒は ENiCrFe-1（ニッケル基合金 600 材）である．試験体は 0°-180°断面に対する対称性を有している．実溶接も出来る限り対称に行われるので，固有ひずみがこの断面に対して対称に分布しているものと仮定する．

座標系としては円柱座標系を使用する．管部材の軸方向を z，径方向を r，周方向を θ で表す．応力や固有ひずみの成分はこの円柱座標系に対して表示する．固有ひずみの成分は右肩に“＊”を付けて表す．即ち，その垂直ひずみ３成分を ε^*_z，ε^*_r，ε^*_θ で，せん断ひずみ３成分を γ^*_{zr}，$\gamma^*_{r\theta}$，$\gamma^*_{\theta z}$ で表す．



(a) Schematic of model



(b) 0°-180° section

Fig. 4.1-1 Mock-up of welded joint of reactor vessel

(2) 切断及び計測手順

試験体の切断及び解放ひずみの計測手順を以下に示す. 平板継手に対して提案された T-L 法[4-3)] と呼ばれる手法に基づいている．Fig. 4.1-2 にその作業の流れを示す．図中，ひずみゲージの貼付位置に関しては，作業の概要が分かる程度に粗く示している．詳細は Fig. 4.1-3 に示されている．尚，使用したゲージはすべて２軸ひずみゲージ（ゲージ長：1mm）である．

（a）初期の試験体（モックアップ）を，以後，３Ｄ試験体と呼ぶ．３Ｄ試験体は２体準備する．３Ｄ試験体には，固有ひずみの６成分がすべて有効固有ひずみとして存在している．３Ｄ試験体の表面にゲージを貼付し，以後の切断時に解放されるひずみを計測する．この計測ひずみを$\{{}_m\varepsilon_{3D}\}$と表示する．

（b）３Ｄ試験体において固有ひずみ存在領域を十分大きい目に想定し，その外部を切断し取り除く. 切断後の試験体を３Ｄ-C 試験体と呼ぶ. ３Ｄ-C 試験体も２体準備する．

（c）３Ｄ-C 試験体の一つより，ｚｒ面を面とする薄板を切断し，Ｔ片と呼ぶ．Ｔ片は周方向にいくつかの角度 (0°-180°断面に対する対称性の仮定より, 本実験では, 0°，45°，90°，135°，180°の５つの角度）において切り出す．このように切り出されたＴ片では，その面に垂直方向の固有ひずみ成分（ε^*_θ）及び垂直方向を含むせん断固有ひずみ成分（$\gamma^*_{r\theta}$，$\gamma^*_{\theta z}$）はほぼ完全に解放されており，面内方向の固有ひずみ成分（ε^*_z，ε^*_r，γ^*_{zr}）のみによって残留応力が生成されているものと仮定することができる．各Ｔ片の表面（切断面）にひずみゲージを貼付する．Fig. 4.1-3(a)はひずみゲージ貼付位置を 0°-180°断面に対して示したものである．45°，90°及び 135°断面においても同様に貼付する．Ｔ片を更に細片に切断し，その時に解放されるひずみを計測する．この計測ひずみを$\{{}_m\varepsilon_T\}$と表示する．

（d）もう一つの３Ｄ-C 試験体より，母板の板厚方向に垂直な面を有する薄板（楕円リング状薄板）を切断し，Ｌ片と呼ぶ．Ｌ片は固有ひずみが存在していると想定される領域をすべて含むように複数枚（本実験では 14 枚）切り出す．Ｌ片においては，Ｌ片の面が z 軸方向に垂直ではないため, 固有ひずみの６成分がすべて有効固有ひずみとして残存している．各Ｌ片の表面（切断面）にひずみゲージを貼付する．Fig. 4.1-3(b)は 0°-180°ライン上におけるひずみゲージ貼付位置を，すべてのＬ片に対してまとめて示したものである．45°，90°及び 135°における径方向にも同様に貼付する．Ｌ片を更に細片に切断し，その時に解放されるひずみを計測する．この計測ひずみを$\{{}_m\varepsilon_L\}$で表示する．

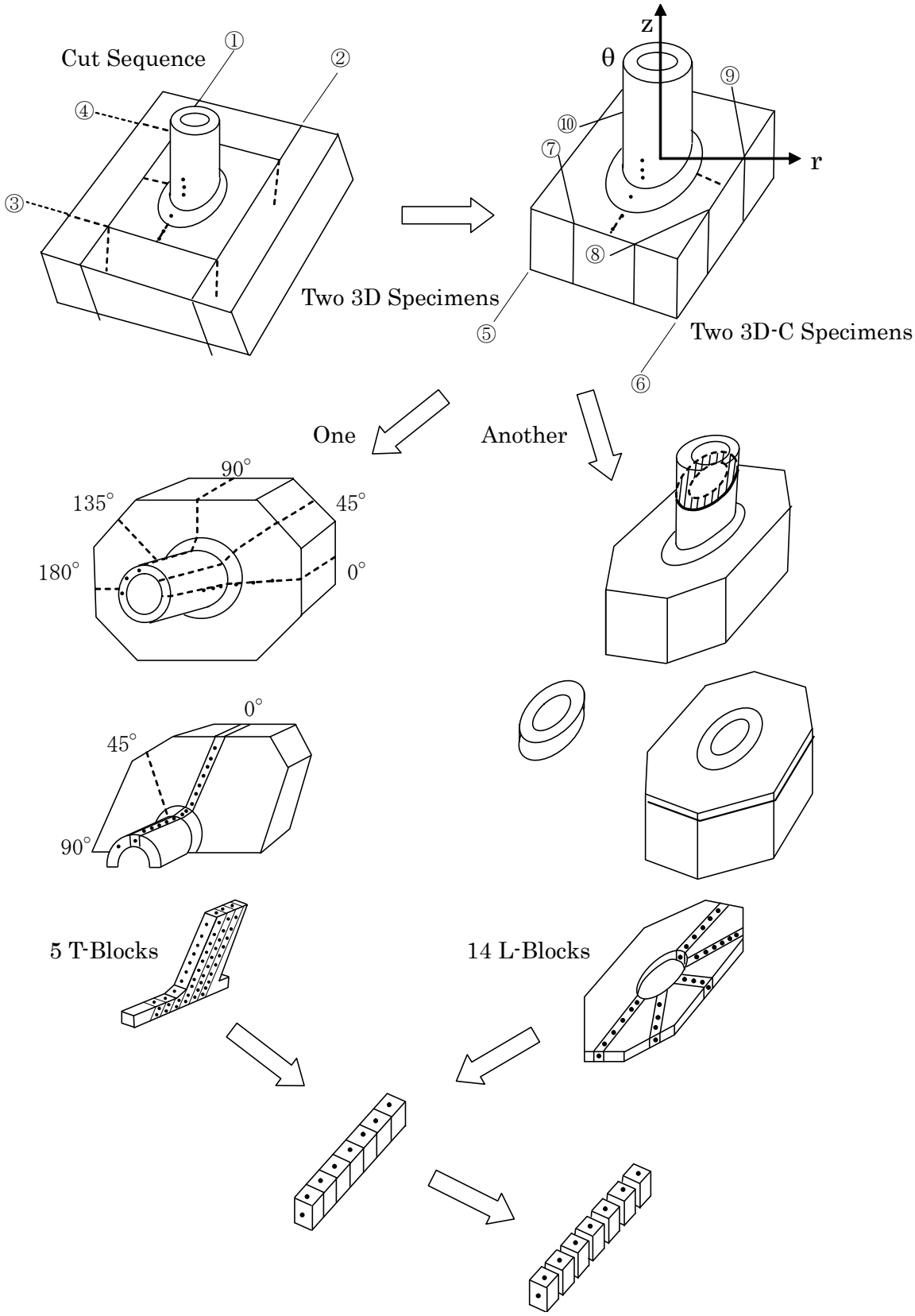
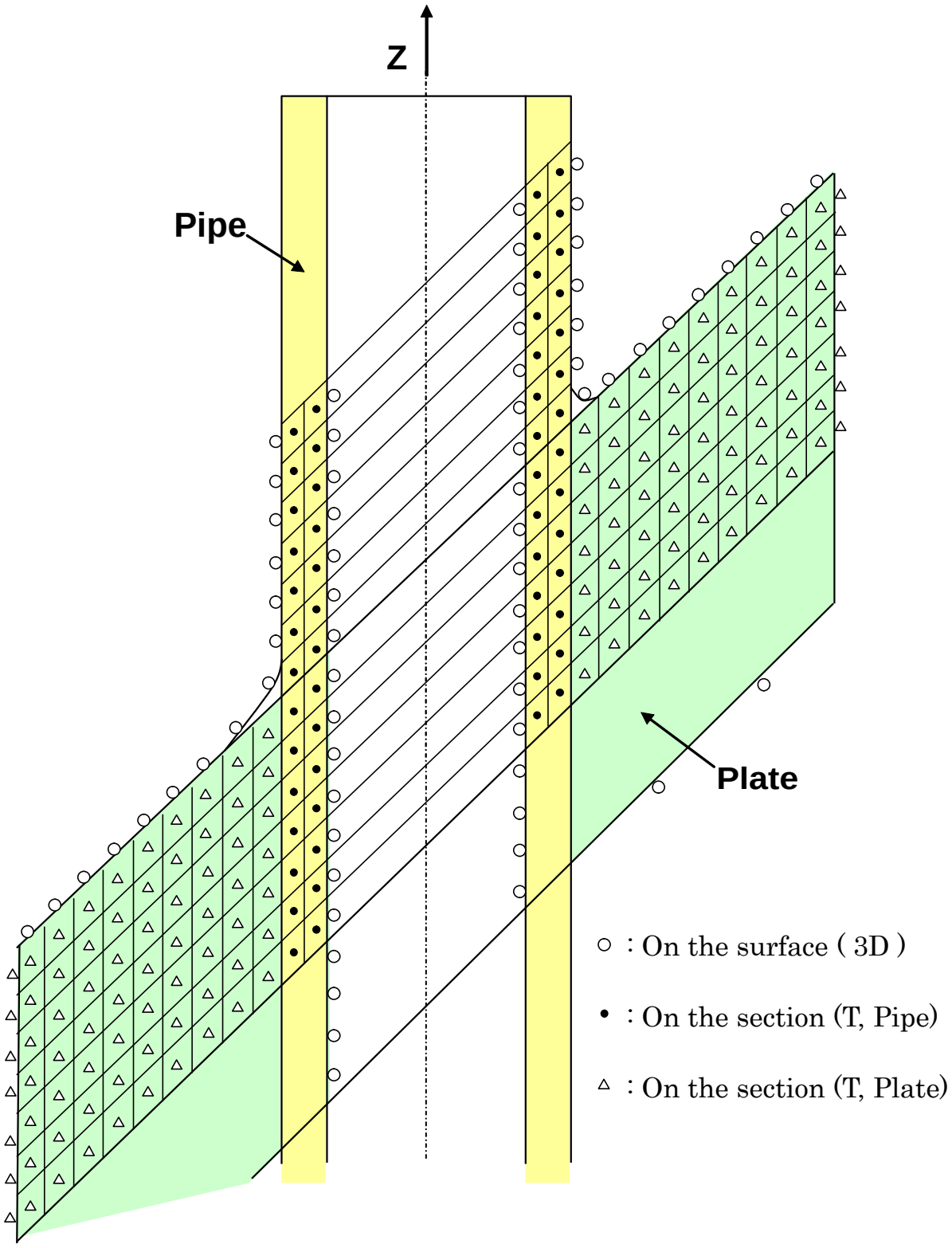
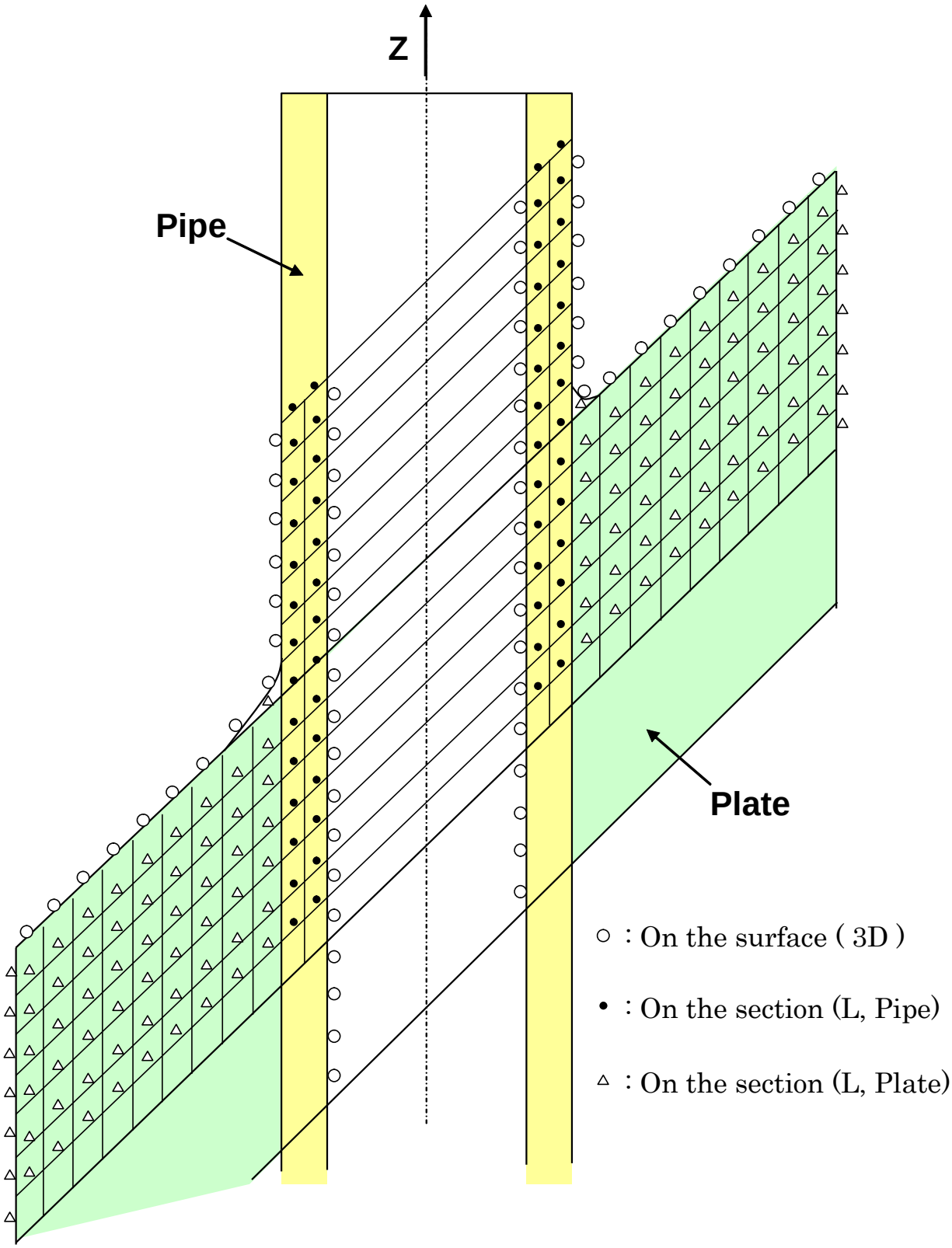


Fig. 4.1-2 Procedure of experiment



(a) T specimens (0°, 180°)

Fig.4.1-3 Measurement locations



(b) L specimens (0° – 180°)

Fig. 4.1-3 Measurement locations

(3) 測定方程式の構築

有限要素法により，まず，３つの試験体・試験片（３Ｄ試験体，Ｔ片，Ｌ片）における測定方程式（弾性応答）を別々に求める．

（a）３Ｄ試験体：６つの固有ひずみ成分のすべての分布係数$\{A_p\}$の成分に対し，順次，１つだけに単位量を与え（他の成分は０とする），試験体の計測位置に生じる弾性ひずみを求める．これにより求められた応答マトリックスを$[H_{3D}^F]$で表すと，

$$\{{}_m\varepsilon_{3D}\}=[H_{3D}^F]\{A_p\} \tag{4-18}$$

（b）Ｔ片：面内の３つの固有ひずみ成分（ε^*_z，ε^*_r，γ^*_{zr}）の分布係数に，順次，単位量を与え（他の成分は０とする），試験片の計測位置に生じる弾性ひずみを求める．求められた応答マトリックスを$[H_T^F]$で表す．但し，Ｔ片においては，応答マトリックス$[H_T^F]$の列を他の２つの応答マトリックスと同じように全分布係数に対応させるため，列を追加し，追加成分は０としておく（存在していないと仮定している固有ひずみ３成分に対しては弾性ひずみが発生しないようにしておく）．

$$\{{}_m\varepsilon_T\}=[H_T^F]\{A_p\} \tag{4-19}$$

（c）Ｌ片：３Ｄ試験体と同様の計算手順で，応答マトリックス$[H_L^F]$を求めることができる．

$$\{{}_m\varepsilon_T\}=[H_T^F]\{A_p\} \tag{4-20}$$

（d）全体に対する測定方程式：３Ｄ試験体，Ｔ片及びＬ片での計測ひずみを同時に使用する場合の測定方程式は，上記の３つの式を統合して，

$$\{{}_m\varepsilon_W\}=[H_W^F]\{A_p\} \tag{4-21}$$

ここで，$\{{}_m\varepsilon_W\}=\begin{Bmatrix}\{{}_m\varepsilon_{3D}\}\\ \{{}_m\varepsilon_T\}\\ \{{}_m\varepsilon_L\}\end{Bmatrix}$　，　$[H_W^F]=\begin{bmatrix}[H_{3D}^F]\\ [H_T^F]\\ [H_L^F]\end{bmatrix}$

式(4-21)が本研究での測定方程式で，前項の式(4-4)に相当する．以後の理論展開は前

項と同じである．

尚，３Ｄ試験体及びＬ片には，６つの固有ひずみ成分がすべて有効固有ひずみとして残留しているので，計測数が未知分布係数の数より多ければ，理論上は，単独でも（あるいは，３つの試験体・試験片の内，２つを用いて），残留応力を推定することが可能である．但し，それにより，感度が悪い計測位置（[解放弾性ひずみ／解放固有ひずみ]の比が小さい位置）の数（比率）が多くなると，推定される最確値の信頼性が低くなる（偏差が大きくなる）と考えられる（式(4-4)及び式(4-10)ー(4-17)を参照）．

(4) 固有ひずみ分布関数

溶接残留応力を生成している固有ひずみは，溶接溶融部での剛性回復後の熱ひずみと，溶接に伴う温度変化時に，同部を含め，その周囲に発生する塑性ひずみである．そこで，溶接部を含めその周囲に固有ひずみが存在すると考える領域を想定し，その領域内で，固有ひずみ各成分に対して，境界では０となる条件を満たす下記のような分布関数を設定した．

（4-1） ｚｒ面（Ｔ片）に対する分布関数

分布関数として，多次多項関数と三角多項関数を準備した．局所座標系を設定し，固有ひずみ及び座標を正規化したものを以下に示す．局所座標系は，ｚｒ断面で管外面と母板の上表面との交点を原点とする．又，固有ひずみは多項式の各項の最大値で，座標は固有ひずみ領域端部の座標で無次元化することにより正規化する．変化に富んだ分布が表現できるように，二つの関数共，ｚ方向及びｒ方向に５項（Ｎ＝５）まで式展開しプログラム化した．

(a) 多次多項関数

$$\varepsilon^{*f}_{k}(\zeta,\xi)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}A_{ijk}\left(1-\frac{\zeta}{Z_k}\right)^{i}\left(1-\frac{\xi}{R_k}\right)^{j} \tag{4-22}$$

ここで，k ：ｚｒ断面の番号（Ｔ片の番号），$k=0,1,2,3,4$

ζ ，ξ ：局所座標（軸方向，径方向）

Z_k ，R_k ：局所座標系における固有ひずみ領域端部の座標（軸方向，径方向）

A_{ijk} ：固有ひずみ分布係数

(b) 三角多項関数

$$\varepsilon^{*f}_{k}(\zeta,\xi)=A_{1k}\left(1-\frac{\zeta}{Z_k}\right)\left(1-\frac{\xi}{R_k}\right)+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}A_{ijk}\cos\left((2i-1)\frac{\pi\zeta}{2Z_k}\right)\cos\left((2j-1)\frac{\pi\xi}{2R_k}\right) \tag{4-23}$$

ここで，A_{1k},A_{ijk} ：固有ひずみ分布係数

（4-2） θ 方向（周方向）に対する分布関数

固有ひずみの周方向の分布は，実験と連動し，Ｔ片が切り出されるｚｒ断面における固有ひずみ分布を補間することにより表現する．本実験でのＴ片の切断位置は

$\theta = 0°, 45°, 90°, 135°, 180°$ の５つである（５つの角度が $\theta_{k=0,1,2,3,4}$ となる）．各Ｔ片（ｚｒ断面）における固有ひずみ分布は式(4-22)あるいは式(4-23)により表される．その間の任意の角度 θ での固有ひずみ分布はそれらの式を用いて補間表示する．補間には Lagrange の補間法（Lagrange の補間多項式）を採用する．Lagrange の補間多項式は，指定されたいくつかの点を多次曲線で滑らかに連続させるもので，周方向の固有ひずみ分布は，式(4-22)あるいは式(4-23)を用いて，次式で表されることになる．

$$\varepsilon^{*f}_{L}(\zeta,\xi,\theta) = \sum_{k=0}^{4} \varepsilon^{*f}_{k}(\zeta,\xi) \cdot L_k(\theta) \tag{4-24}$$

ここで，$\varepsilon^{*f}_{k}(\zeta,\xi)$：式(4-22)あるいは式(4-23)

$L_k(\theta)$：Lagrange の補間係数（ここでは，$n = 4$）

$$L_k(\theta) = \prod_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^{n} \frac{\theta - \theta_m}{\theta_k - \theta_m}$$

$$= \frac{(\theta - \theta_0)\cdots(\theta - \theta_{k-1})(\theta - \theta_{k+1})\cdots(\theta - \theta_n)}{(\theta_k - \theta_0)\cdots(\theta_k - \theta_{k-1})(\theta_k - \theta_{k+1})\cdots(\theta_k - \theta_n)}$$

周方向の分布を式(4-24)のように補間することにより，新たに未知係数が発生することはない．周方向には式(4-24)のように分布しているものとして，ｚｒ断面に対する式(4-22)あるいは式(4-23)に含まれるの未知分布係数の最適化が行われることになる．

ところで，本解析では，固有ひずみ分布の 0°-180°断面に対する対称性を仮定している．上式により滑らかな分布を表現することはできるが，0°及び 180°での滑らかな対称性を満足させることはできない．そこで，次のような計算法を考案した．即ち，0°ー180°における固有ひずみ分布が，0°の外側には 0°を対称面として，180°の外側には 180°を対称面として連続的に分布していると想定した．これにより，0°及び 180°での滑らかな対称性をほぼ完全に満足させることができる．又，これによっても新たな未知数は発生しない．

4.1.3 実験と解析の概要

(1) 実験作業

試験体は 0°-180°断面に対する対称性を有しており，溶接も下記のように実継手に近い溶接条件で出来る限り対称に実施した．これにより，固有ひずみ（溶接残留応力）は 0°-180°断面に対称に分布していると仮定した．

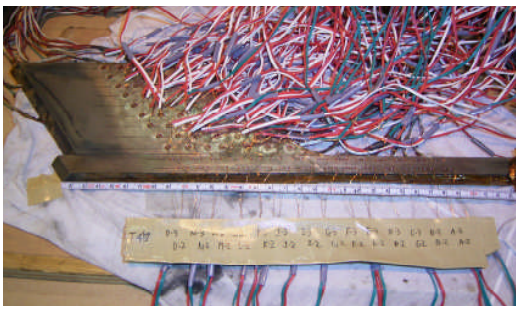
溶接は手溶接（被覆アーク溶接）により行い，電流は 120A〜130A，電圧は 24V，入熱量は 8kJ/cm〜13kJ/cm である．溶接方向は谷側の 0°付近を始端とし山側の 180°付近を終端とした．その 0°-180°間を連続的に溶接せず，数回に分け，両側を交互に溶接しながら終端 180°に到るようにした．又，パス数及び層数は 0°-180°間の位置により異なり，途中の 90°付近で少なく，0°付近及び 180°付近で多くなっている．平均としては７〜８層，20 パス程度である．

試験体（３Ｄ試験体）は２体準備し，１体からはＴ片を，もう１体からはＬ片を切り出した. 更に, Ｔ片とＬ片を細断した. このような各切断の前にひずみゲージを貼付し，切断前後の計測値より解放ひずみを算出した．

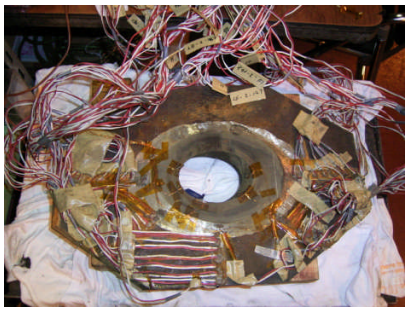
実際のひずみ計測状況を Fig.4.1-4 に示す．

ひずみ計測は，本研究が新しい測定法の最初の試みであるので，固有ひずみが存在すると推察される領域を十二分に含む広領域において，出来る限り多数計測した．その結果，計測ひずみ数は下記（Table 4.1-2）の固有ひずみ分布係数（未知数）の数より遥かに多くなり，３Ｄ試験体，Ｔ片及びＬ片での総計は２８７１となった．明らかに不可解な大きな数値（絶対値で 5000μ以上）を示す不良データは取り除いており，使用したデータの絶対値は全て 2000μ以下である．

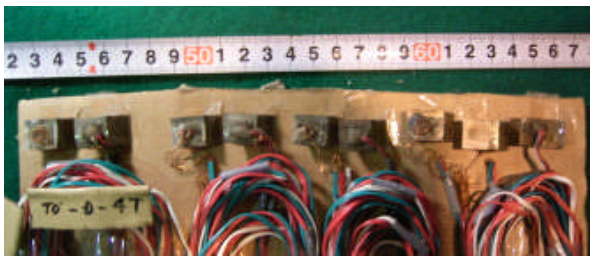
(a) Strain gauges and leads attached at inner and outer surfaces of the specimen



(b) Strain gauges and leads attached at the section of T-specimen



(c) Strain gauges and leads attached at the section of L-specimen



(d) Small pieces cut out from specimens

Fig. 4.1-4 Photos of measurements

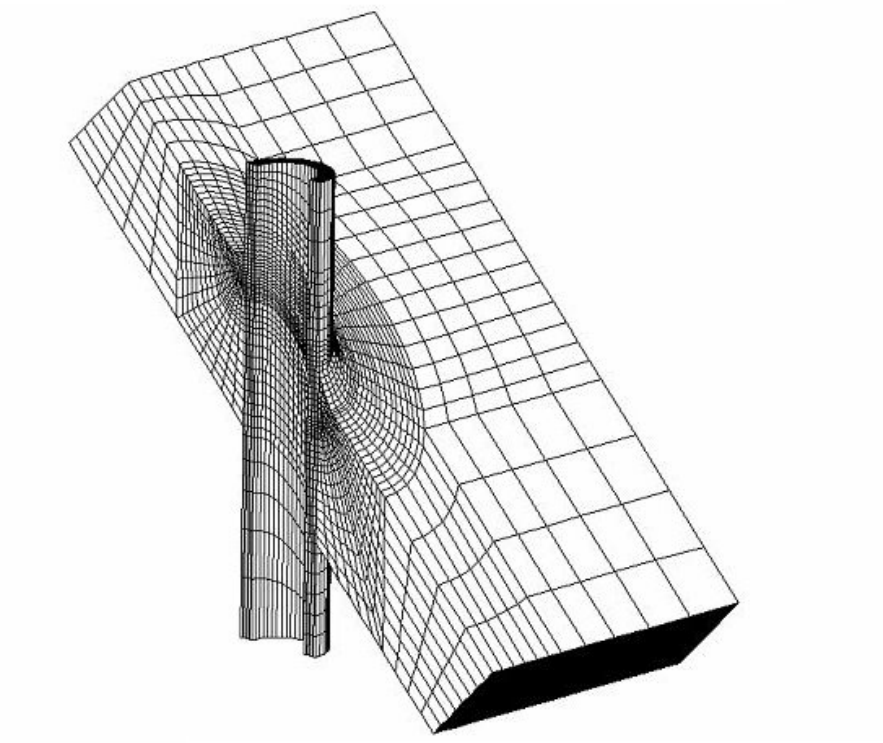
(2) 解析作業

本節で示す最初の解析には，上記のような不良データを除く２８７１の計測ひずみをすべて使用した．解析に用いた要素分割を Fig. 4.1-5 に示す．全要素数は１５２４８である．試験体は異材溶接継手であり，解析に必要な各材料の材料定数（室温における弾性係数，ポアソン比）[4-4)]を Table 4.1-1 に示す.

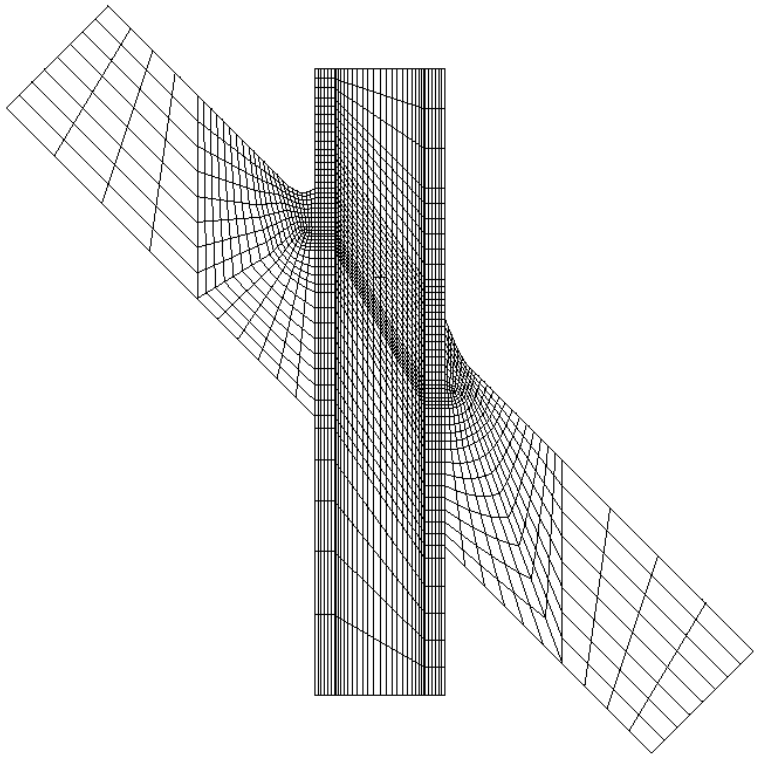
分布関数としては上記の２種類（式(4-22)＋式(4-24)，あるいは，式(4-23)＋式(4-24)）を適用し，それぞれ，ｚｒ面（Ｔ片）に対する分布関数として１項のみを使用した場合から５項までを使用した場合に対して解析を実行した．各ケースでの固有ひずみ分布係数の総数を Table 4.1-2 に示す.

解析で想定する固有ひずみ領域は，各Ｔ片において，Fig. 4.1-6 に示すように，a，b，c，d の４つの境界位置を示すパラメーターを用いて設定した．図に示すように，厚板断面及び管断面において楕円領域として定義した．上記の２種類の分布関数に対して，このような４つの領域パラメーターを設定し，その値を変化させ，解析結果への影響を調べた．領域パラメーターの大きさ（固有ひずみ想定領域の広さ）の解析結果への影響に関しては，本章での研究成果に基づいた条件での解析結果を付録にまとめている.

又，解析は，固有ひずみ成分として６成分をすべて考慮する場合と，垂直ひずみ３成分（ε^*_z，ε^*_r，ε^*_θ）のみを考慮する場合の２つの条件に対して実行した．これは，計測ひずみはすべて垂直ひずみであり，せん断固有ひずみ（γ^*_{zr}，$\gamma^*_{r\theta}$，$\gamma^*_{\theta z}$）に対する感度によっては，推定結果の信頼性（例えば，残留応力の偏差）が，せん断固有ひずみを含めた方が必ずしも高くなるとは限らないと予想したことによる（式(4-4)及び(4-10)ー(4-17)を参照）．両方の条件で解析した結果，固有ひずみ成分として６成分をすべて考慮した場合は，上記の予想通り，推定精度が悪いことが判明したため，今後の検討項目として保留し，ここでは，垂直ひずみ３成分のみを考慮した結果をまとめている.

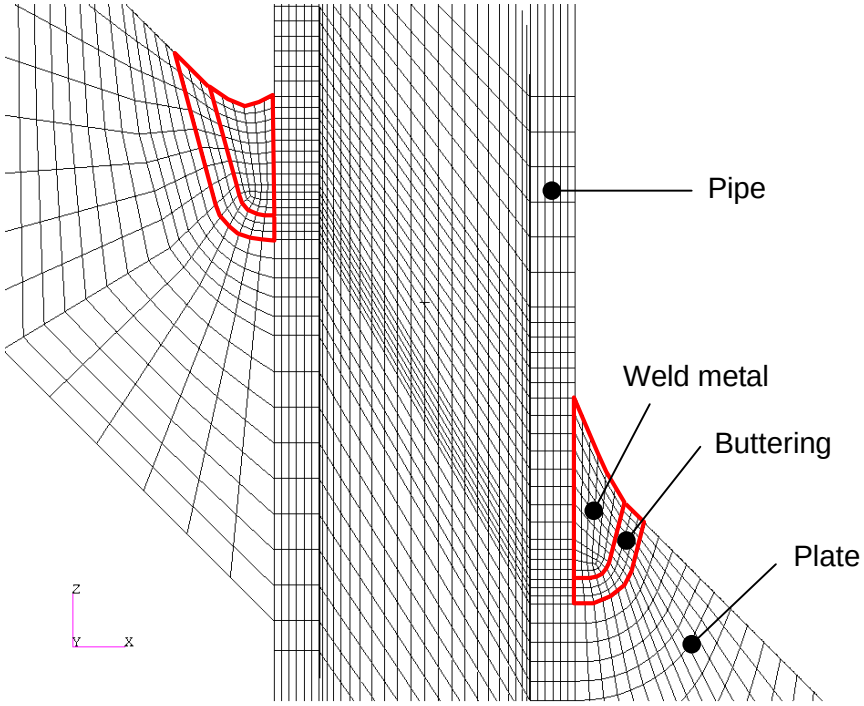


(a) 3-D view of model



(b) 0°-180° section

Fig. 4.1-5 Mesh division of mock-up



(c) Enlarged 0°-180° cross section

Fig. 4.1-5 Mesh division of mock-up

Table 4.1-1 Material properties

	Material	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Initial yield stress (MPa)	2% yield stress (MPa)
Weld metal	ENiCrFe-1	2.14×10^5	0.3	394	425
Pipe	SUS316	1.95×10^5	0.3	240	288
Plate	SM490A	2.03×10^5	0.3	330	382

Table 4.1-2　Number of coefficients (unknowns)

Num. of members	Multi-order function	Trigonometric function
1	15	30
2	60	75
3	135	150
4	240	255
5	375	390

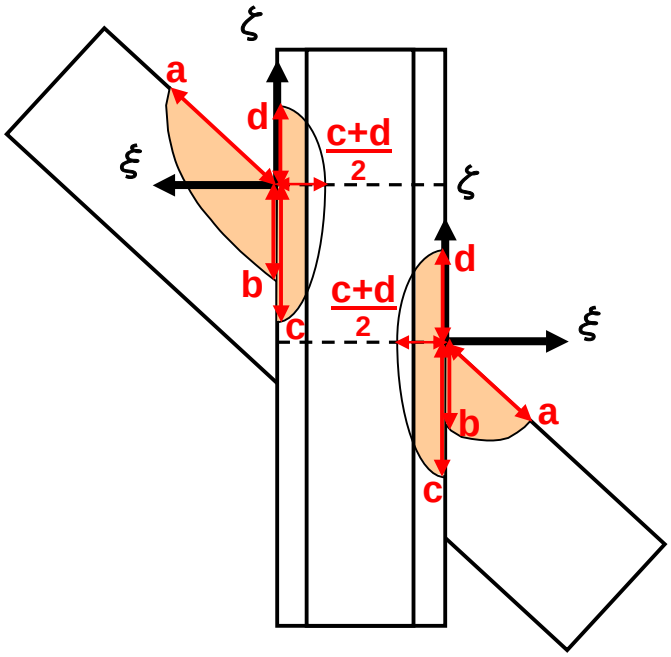


Fig. 4.1-6　Parameters of inherent strain region

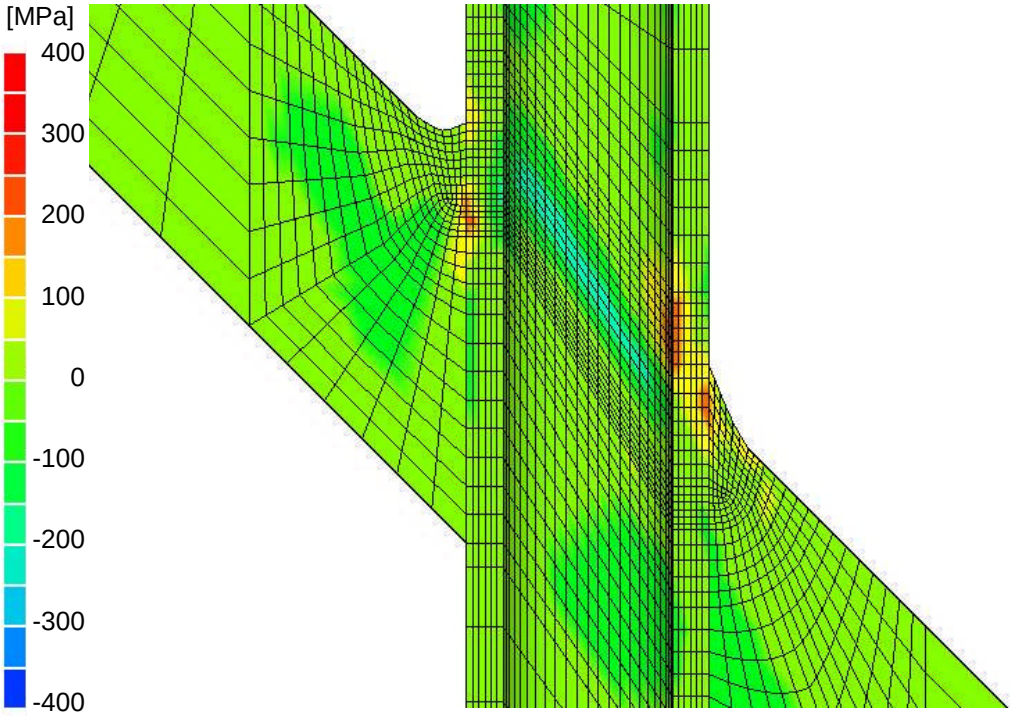
4.1.4 測定結果（基礎解析結果）

本測定法を適用し，実験と有限要素法解析により得られた残留応力分布を以下に示す．前項で述べたように種々の条件で解析を行ったが，本項では，その代表例として，分布関数としては多次多項関数を３次まで使用し，固有ひずみ領域パラメーターは５つのすべてのＴ片において a=b=c=d=70mm と設定し，固有ひずみ成分としては垂直ひずみ３成分のみを考慮した場合の結果を示す.

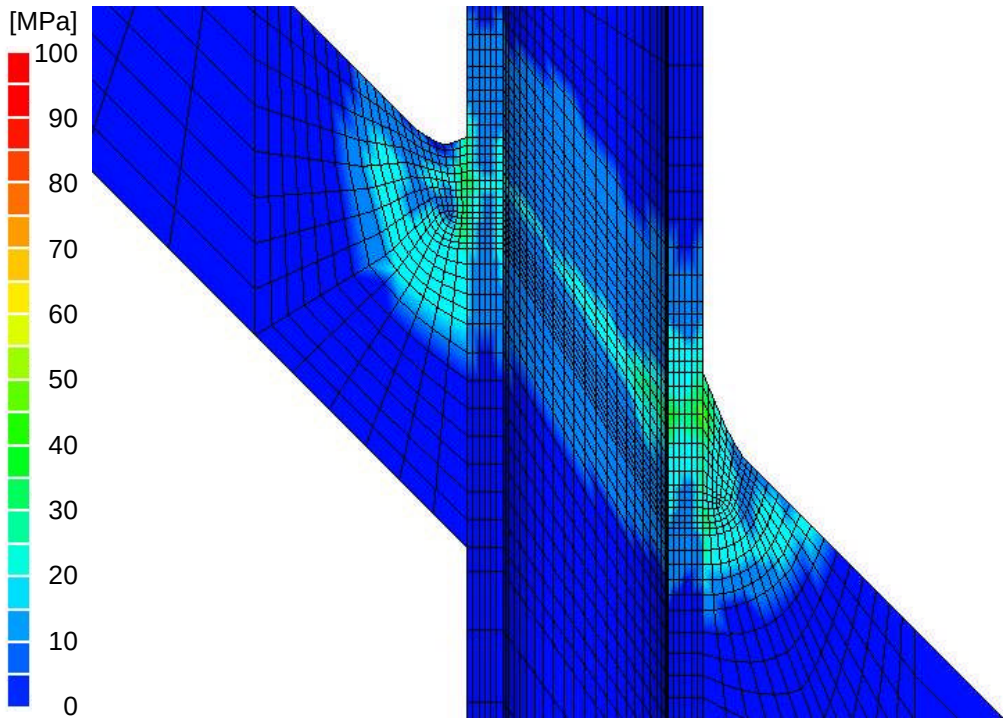
0°-180°断面における残留応力の最確値と偏差の分布を Fig. 4.1-7ーFig. 4.1-9 に示す. Fig. 4.1-7 は軸方向応力σ_zを，Fig. 4.1-8 は径方向応力σ_rを，Fig. 4.1-9 は周方向応力σ_θを示している．同様に，90°断面における残留応力の最確値と偏差の分布を Fig. 4.1-10ーFig. 4.1-12 に示す．また, 外表面における残留応力の最確値と偏差の分布を Fig. 4.1-13ーFig. 4.1-15 に示す.

残留応力分布の特徴としては，周方向応力が最も大きな引張応力成分となっており，特に 0°側（谷側）において溶接部から管台にかけて大きな引張応力が見られる．軸方向応力も 0°側（谷側）において溶接部から管台にかけてやや大きな引張応力が発生している．径方向応力は 90°断面においてやや大きな引張応力が見られる.

推定された残留応力の信頼性を評価するため，最確値の標準偏差を調べた．各応力成分での［偏差／最確値］比の平均値を以下に示す．［偏差／最確値］比を用いたのは，理論的に，最確値が大きい場合は偏差も大きくなる傾向がある（式(4-12)及び式(4-17)を参照）ので，最確値の精度の評価を偏差そのものではなく，最確値に対する偏差の割合（無次元化量）で評価すべきであると考えたからである．まず，すべての要素に対しての偏差の最大値を最確値の最大値と比べると，その比は軸方向成分では約 0.21，径方向成分では約 0.26，周方向成分では約 0.27 となっている．又，応力の最確値の絶対値が 100MPa 以上となっている高応力領域において，すべての要素の応力の［偏差／最確値］比を求めると，その平均値は軸方向成分では約 0.17，径方向成分では約 0.15，周方向成分では約 0.13 となっている．これらの数値より，推定結果の信頼性は実用上十分高いと考えられる.

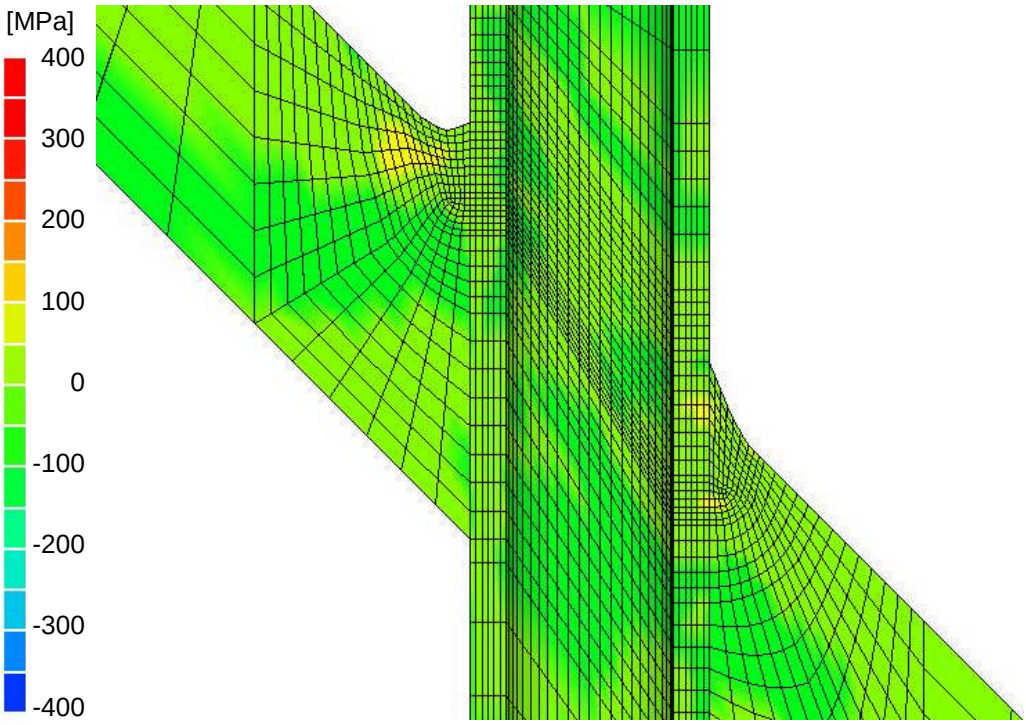


(a) Most probable value

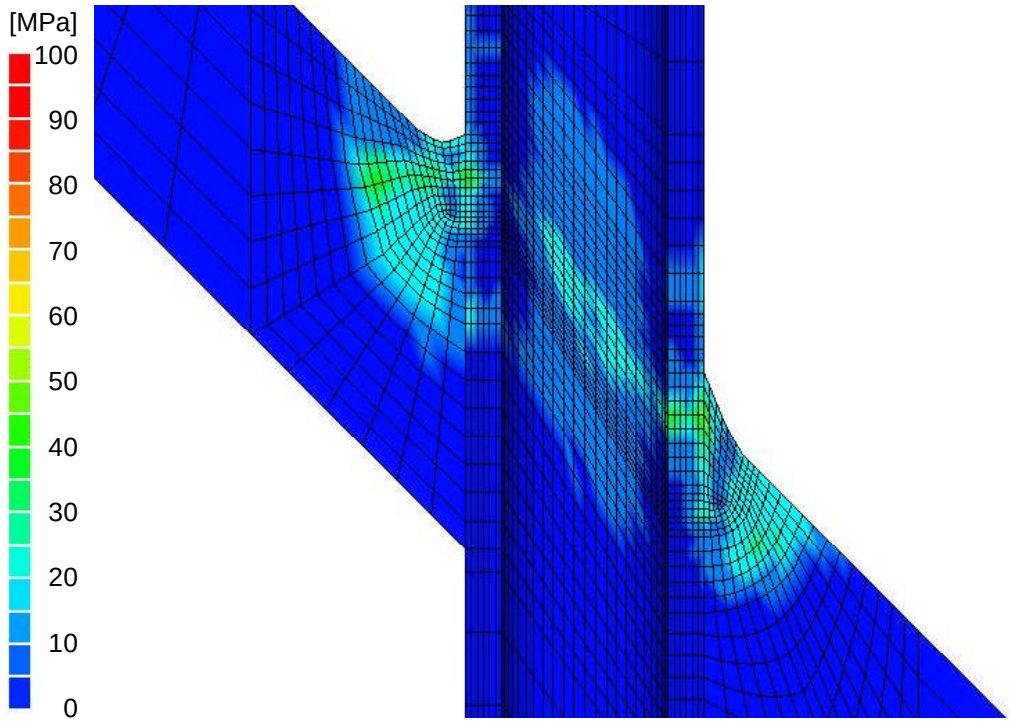


(b) Standard deviation

Fig. 4.1-7 Residual stress σ_z at $0° - 180°$ section

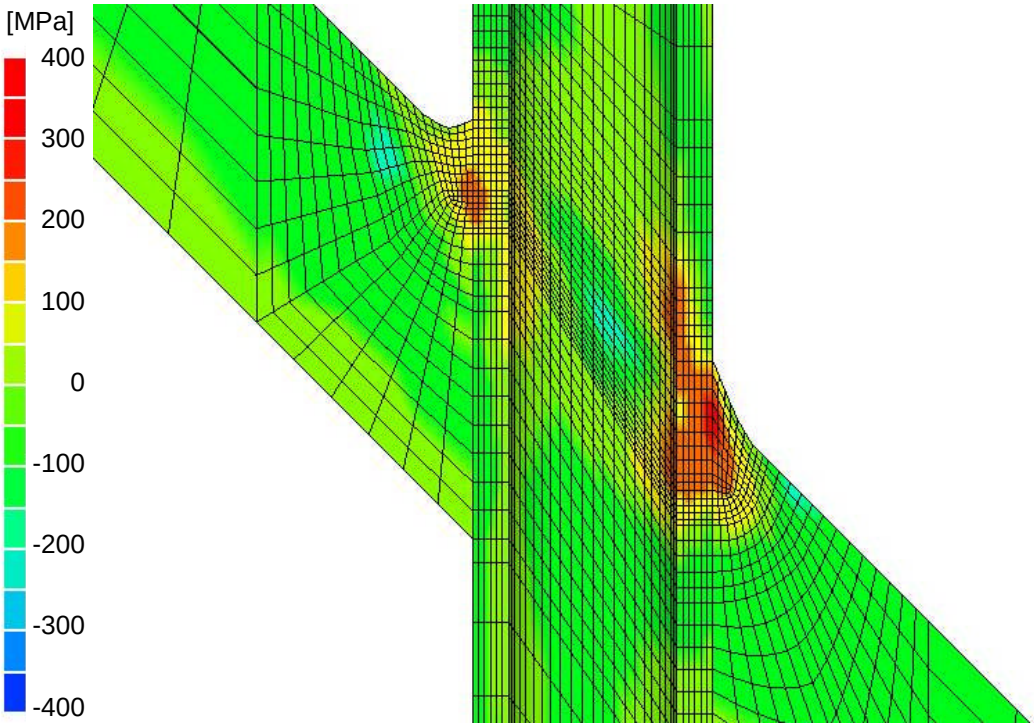


(a) Most probable value

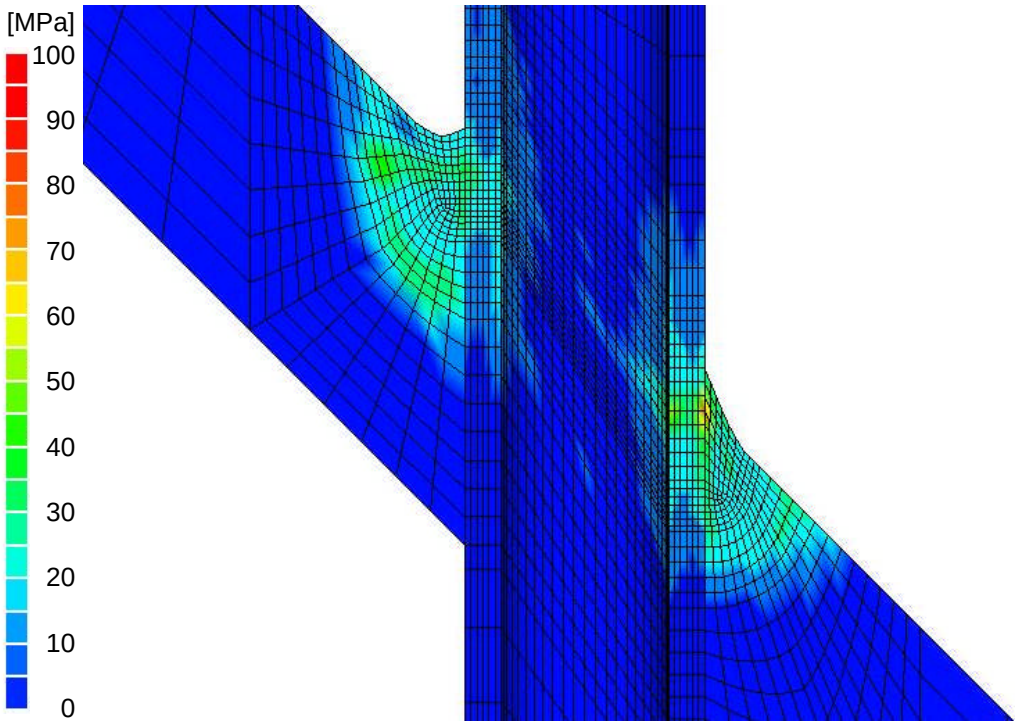


(b) Standard deviation

Fig. 4.1-8 Residual stress σ_r at $0° - 180°$ section

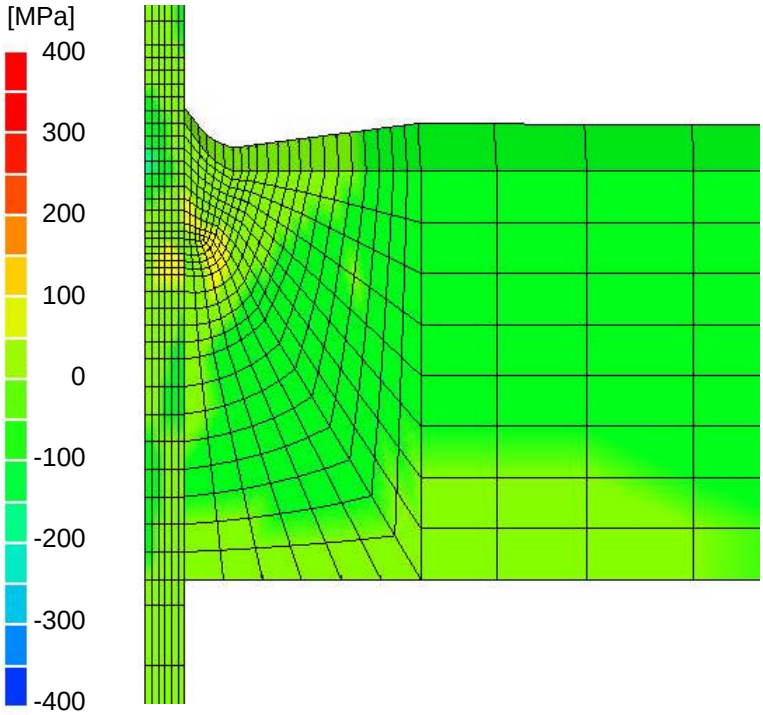


(a) Most probable value

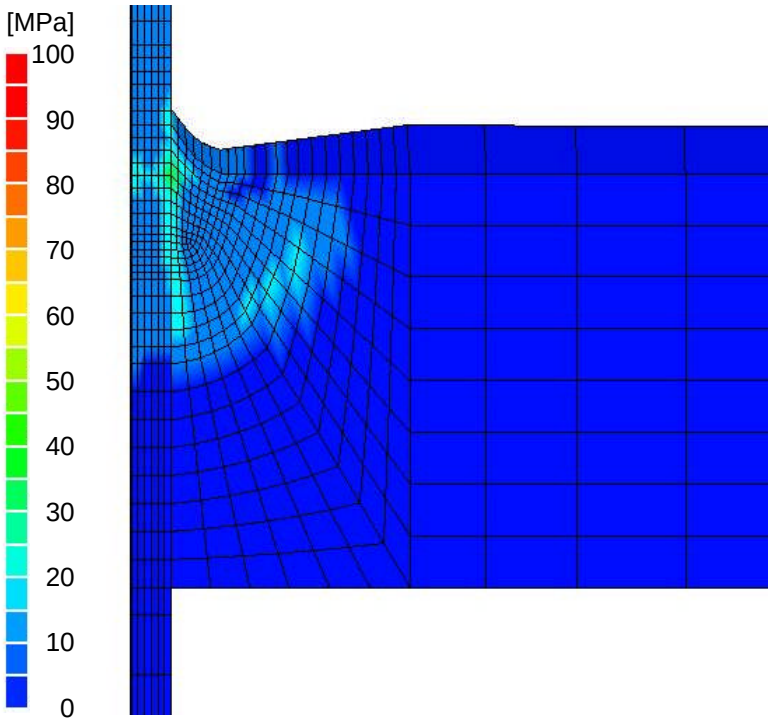


(b) Standard deviation

Fig. 4.1-9 Residual stresses σ_θ at $0° - 180°$ section

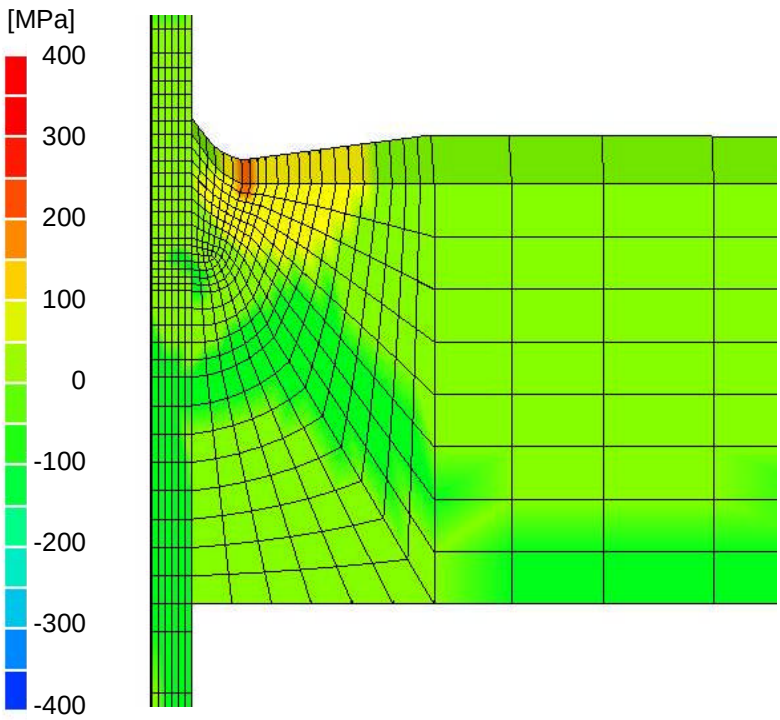


(a) Most probable value

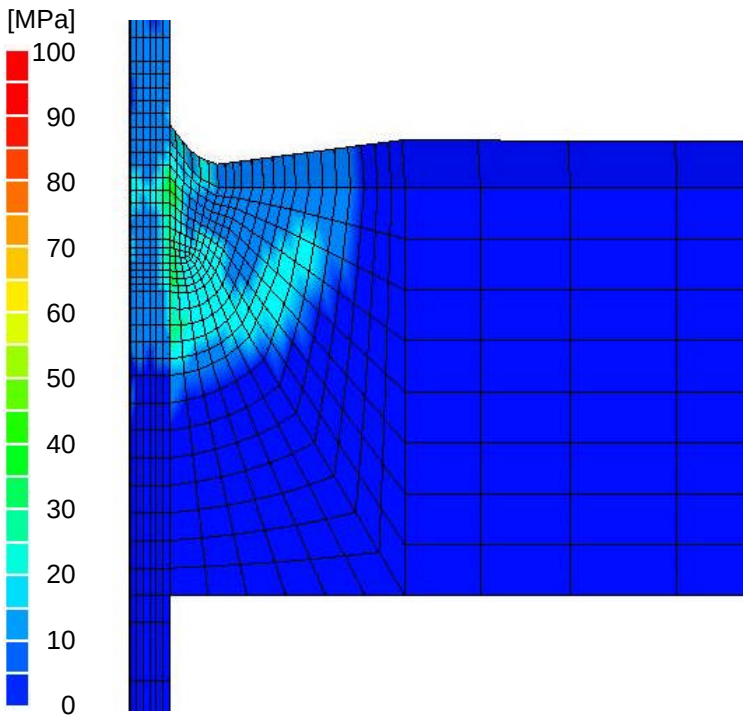


(b) Standard deviation

Fig. 4.1-10 Residual stress σ_z at 90° section

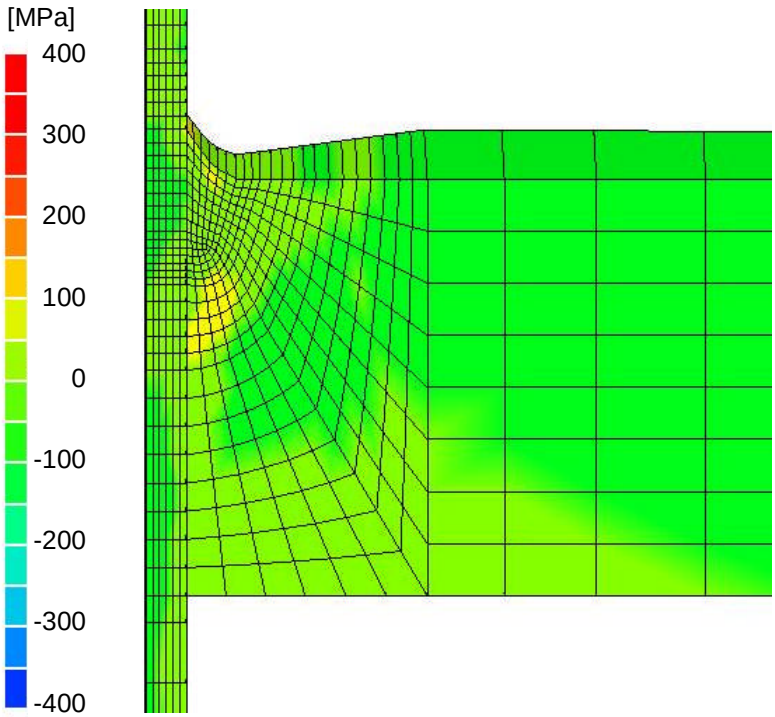


(a) Most probable value

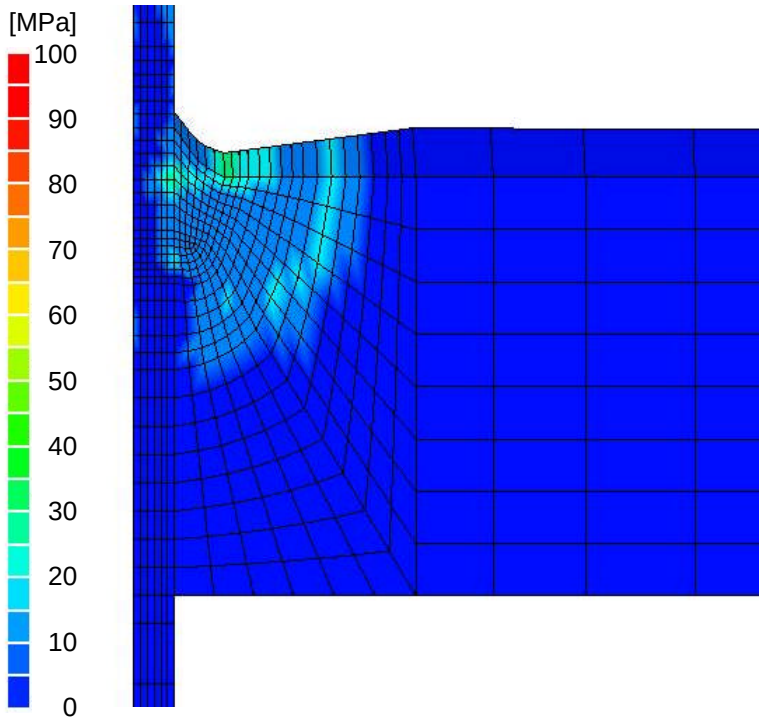


(b) Standard deviation

Fig. 4.1-11 Residual stress σ_r at 90° section

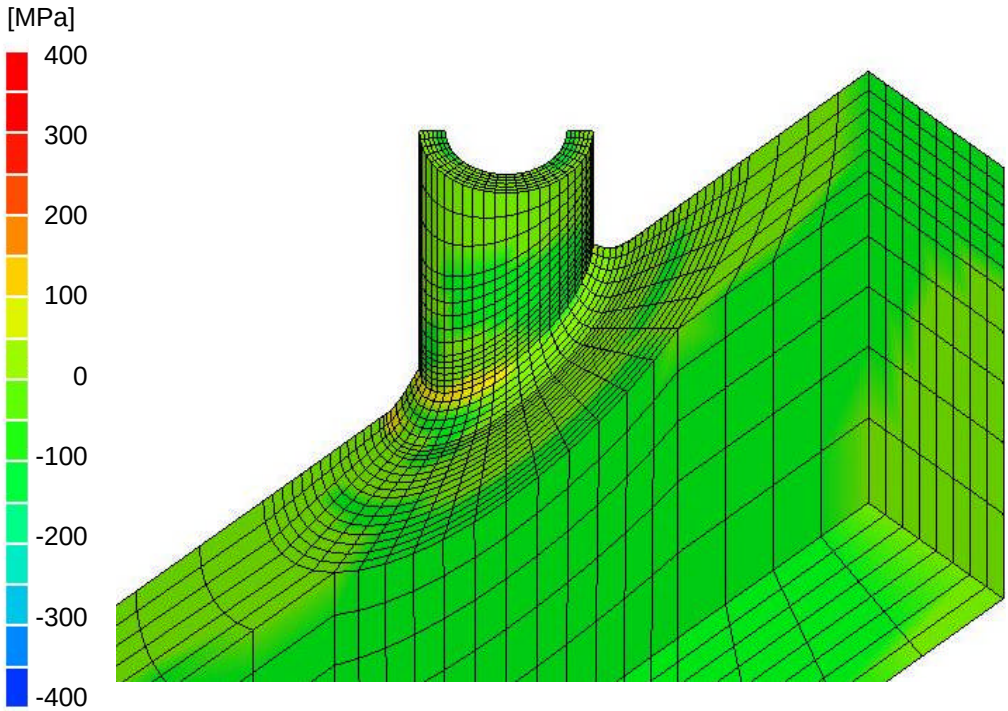


(a) Most probable value

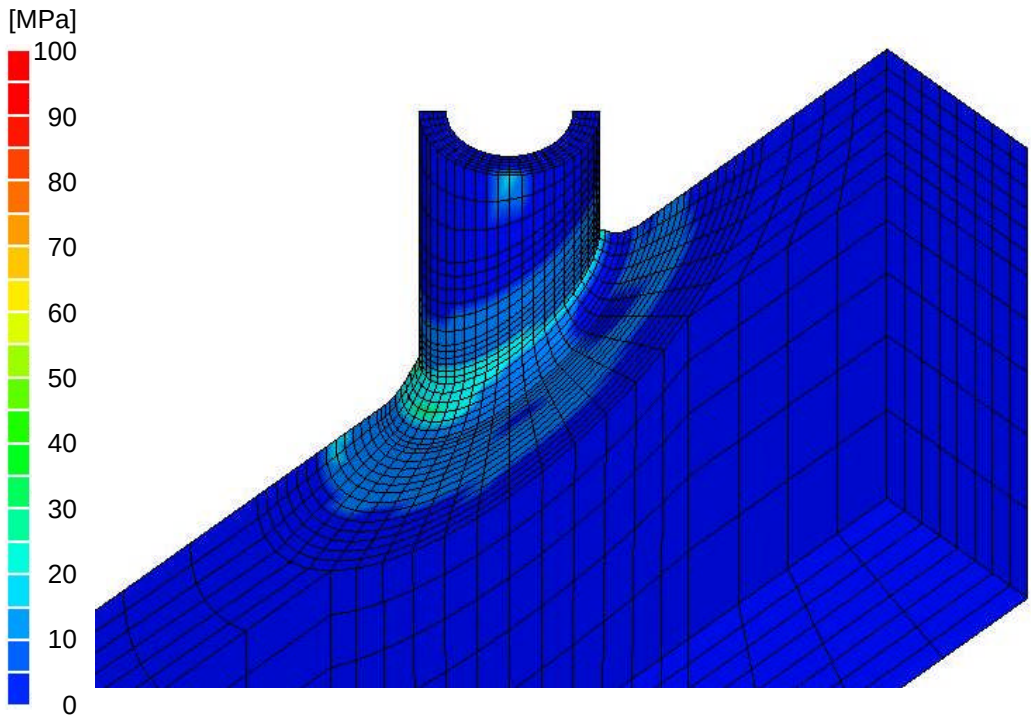


(b) Standard deviation

Fig. 4.1-12 Residual stresses σ_θ at 90° section

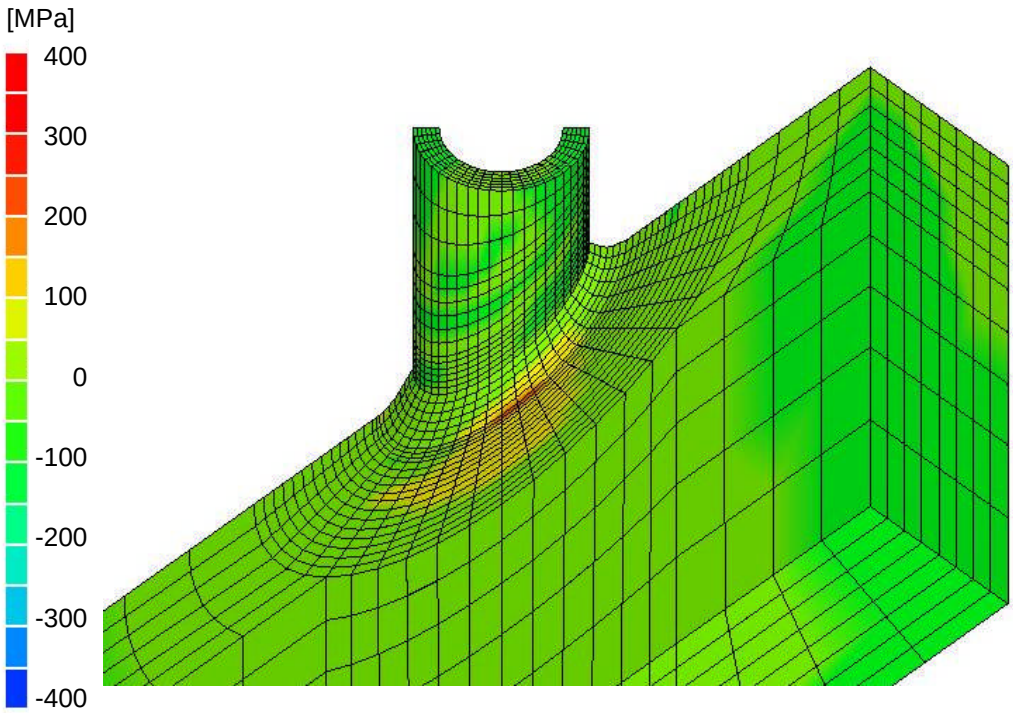


(a) Most probable value

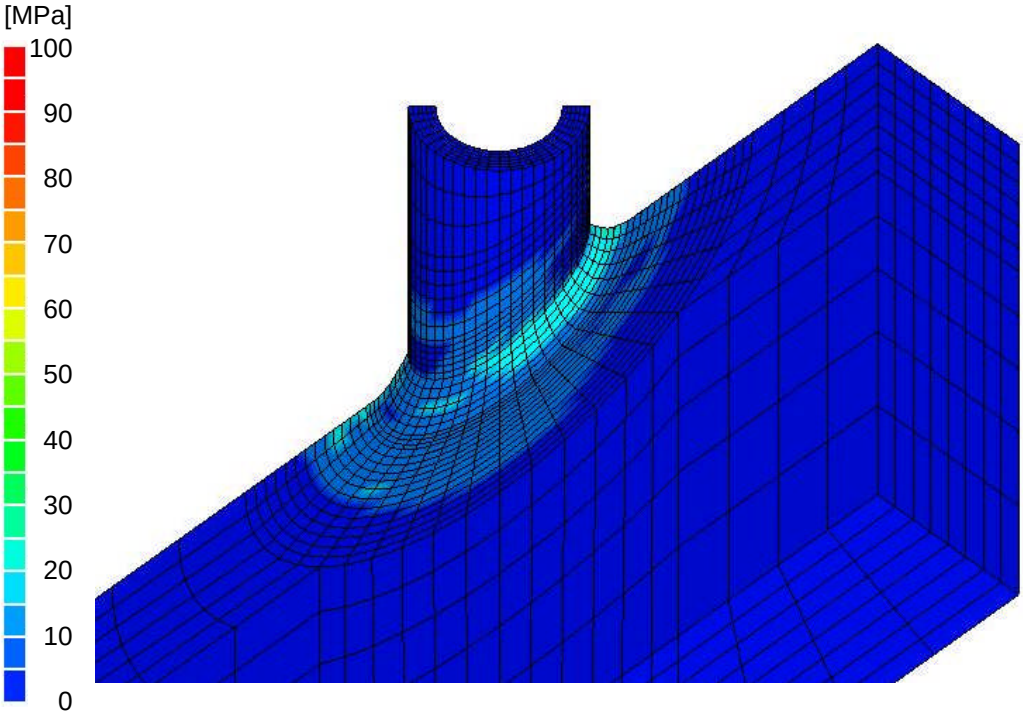


(b) Standard deviation

Fig. 4.1-13 Residual stresses σ_z at the surface

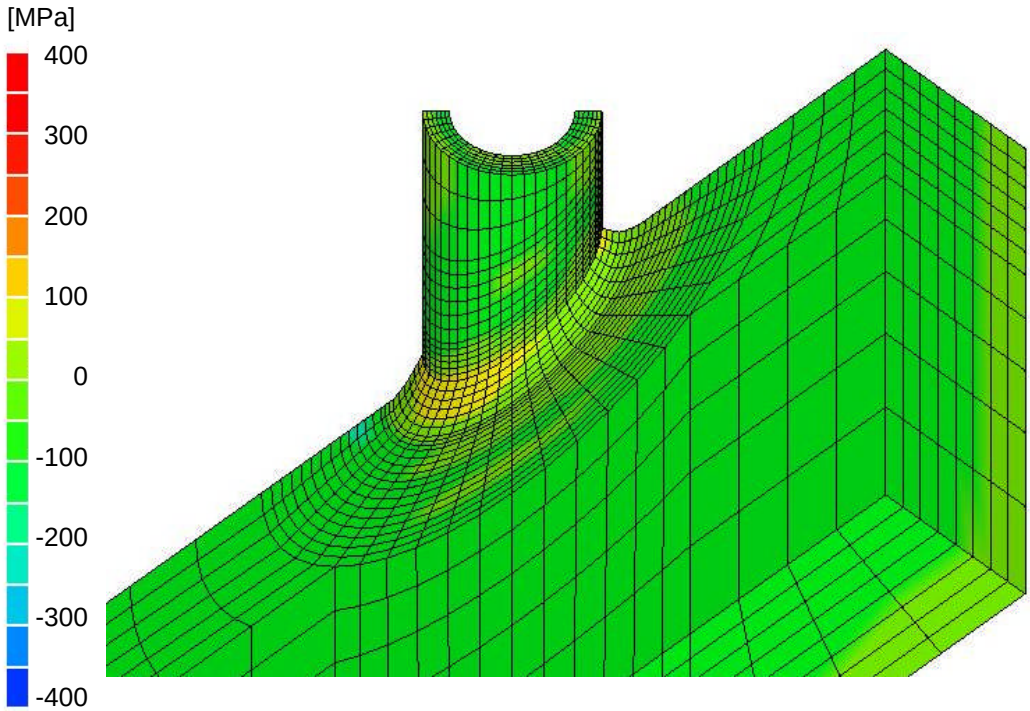


(a) Most probable value

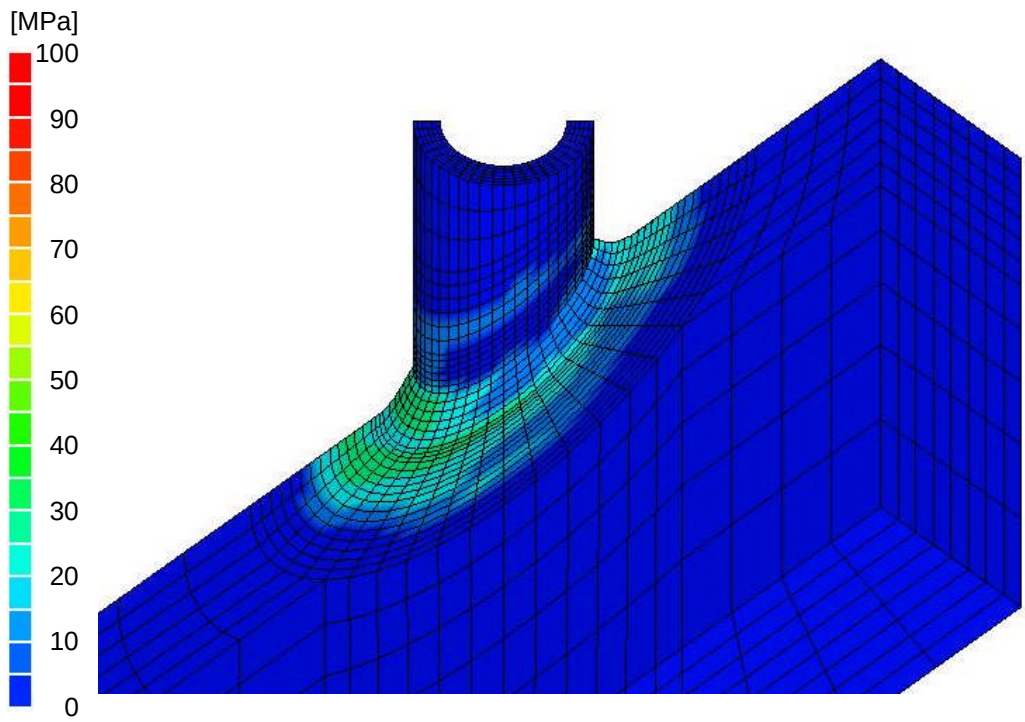


(b) Standard deviation

Fig. 4.1-14 Residual stresses σ_r at the surface



(a) Most probable value



(b) Standard deviation

Fig. 4.1-15 Residual stresses σ_θ at the surface

4.2　固有ひずみ分布関数の適性診断

前節では, 固有ひずみ分布関数として多次多項関数を３次まで使用した結果を代表例として説明した.

解析条件の内で特に重要なものとして上記の固有ひずみ分布関数がある．本研究で開発した解析プログラムでは，１０種類の分布関数を設定することができるようになっている．本節では，それらの分布関数の本解析への適応性を評価する．評価は固有ひずみ法が統計学的には最小二乗法に基づいていることに注目して実施する．最小二乗法は実験データの解析法，具体的には“あてはめ”法の一つである．その結果は，一般的には，３段階で診断するのが望ましいと考えられている[4-5)]．第１段階は「残差からの診断」であり，第２段階は「統計学的見地からの診断」であり，最後の第３段階は「専門知識からの診断」である．本研究では，１０種類の分布関数に対して，それぞれ，解析を実行し，その推定結果を上記の診断法により評価し，それらの間での適応性の優劣を判定する.

固有ひずみ分布関数以外の解析条件は前節と同じように設定した．即ち，固有ひずみ領域設定パラメーター，a, b, c, d（ｚｒ断面において楕円として定義／Fig. 4.1-6 参照）は５つのすべてのＴ片において a=b=c=d=70mm と設定し，固有ひずみ成分としては計測ひずみと同じように垂直ひずみ３成分のみを考慮した.

分布関数としては，２種類（式(4-22)＋式(4-24)，あるいは，式(4-23)＋式(4-24)）を使用し，それぞれ，ｚｒ面（Ｔ片）に対する分布関数として１項のみを使用した場合から５項までを使用した場合に対して解析を実行した．最小二乗法では，項数が異なる場合は別の関数モデルと見なされるので，１０種類の関数を使用したことになる.

4.2.1 第１段階／残差からの診断

残差からの診断とは，解析した結果において“異常に大きな残差を示すデータ”を判別することであり，そのデータを取り除いて，再解析する．第３章で，配管突合せ継手の残留応力解析においても実行している．この時は，全計測データを使用した解析結果の残差分布を診て，一部のデータを取り除いて再解析する必要性はないと判断した．

本章でも，最初の解析を，明らかな不良データを除く２８７１のデータをすべて使用して行った．その解析結果の残差を調べた．残差の定義式を再記する．

$$\{v_i\} = -\{{}_m\varepsilon_i\} - \{\hat{\varepsilon}_i\} \qquad (i = 1 \cdots m) \tag{4-25}$$

ここで，$\{v_i\}$　：残差

$\{{}_m\varepsilon_i\}$　：計測ひずみ

$\{\hat{\varepsilon}_i\}$　：弾性ひずみの最確値

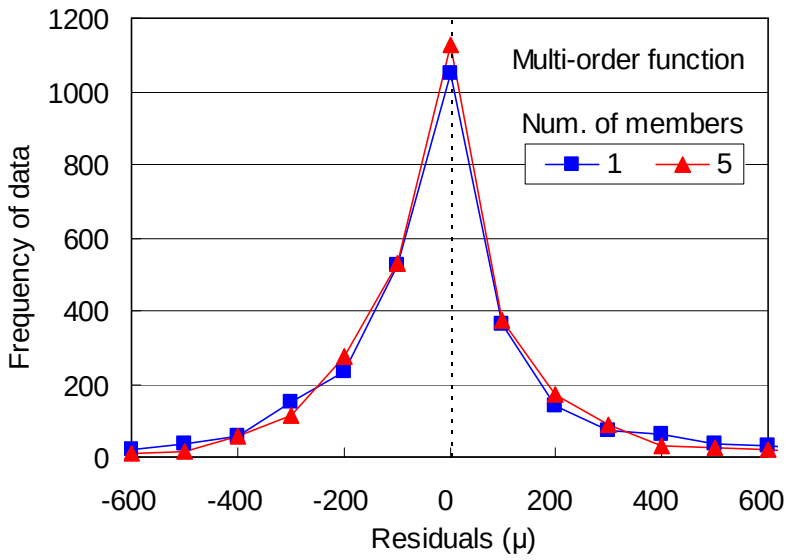
m　：計測ひずみの数

各分布関数で２８７１のデータをすべて使用して解析した結果より，残差の大きさとデータ数の関係をまとめたのが Table 4.2-1 と Fig. 4.2-1 である．Table 4.2-1 は，残差の大きさを100μの範囲で区切り，その範囲に入るデータ数をまとめたもので，残差の数値は各範囲の中心値である．Fig. 4.2-1 は，その結果の内，多次多項関数と三角多項関数で，それぞれ，最も差が大きい１項と５項の結果を図で比べたものである．

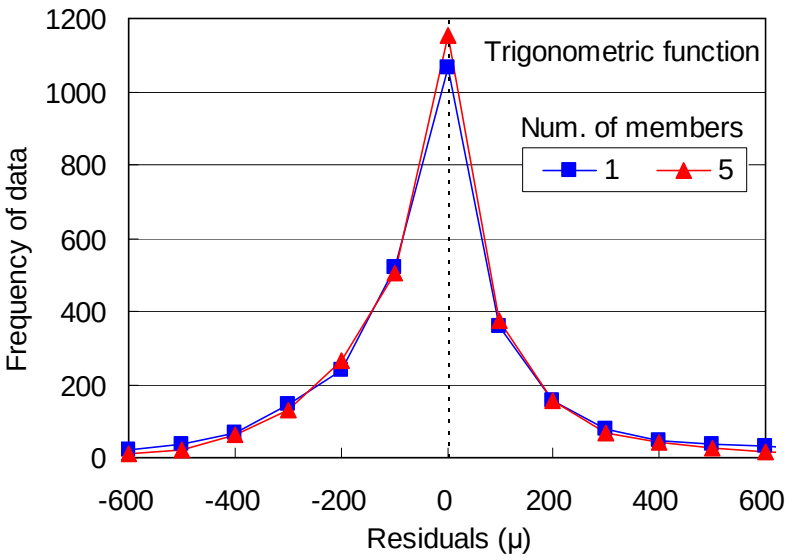
“異常に大きな残差”とは数式で定義されるものではなく，残差の分布を全体的に観て判断される．Table 4.2-1 と Fig. 4.2-1 を見ると，残差はその絶対値が大きくなると共に，頻度数は減少していき，ほぼ単調な，なだらかな変化を示している．分布の裾野の先でパルス的に大きな残差を示すデータは見当たらない．これは，予め，明らかに不可解な数値を示す不良データを取り除いている効果によるものと考えられる．したがって，はっきり異常と判断できるデータは存在しないが，Table 4.2-1 で区間頻度が０ー２程度である±1000μより大きな残差を示すデータは，準異常データとして取り除くことにする．そして，残りのデータを使用して，もう一度，解析を実行する．その２回目の解析結果に対して，第２，第３の診断を行う．

Table 4.2-1 Frequency distribution of residuals

	Function	Multi-order function					Trigonometric function				
	Members	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Residuals (μ)	-2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1700	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	-1600	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	-1500	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	-1400	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	-1300	2	2	1	1	0	0	2	1	0	0
	-1200	0	1	1	0	1	1	1	2	1	1
	-1100	4	2	1	1	0	2	1	0	2	1
	-1000	5	3	2	3	3	4	3	3	1	0
	-900	3	5	1	0	1	4	5	3	2	4
	-800	11	7	8	6	2	12	8	8	8	4
	-700	12	7	13	7	11	7	7	9	8	8
	-600	19	21	14	14	8	22	16	11	14	11
	-500	38	36	25	16	14	38	36	33	25	21
	-400	57	66	67	68	55	68	65	69	78	64
	-300	151	140	136	128	113	144	136	144	131	132
	-200	236	230	244	249	274	238	239	234	240	265
	-100	526	544	521	531	528	517	533	526	524	502
	0	1049	1065	1106	1101	1128	1066	1099	1108	1133	1153
	100	362	366	361	374	375	360	345	357	357	374
	200	142	146	147	171	171	154	146	144	157	158
	300	74	87	82	78	86	77	85	87	78	67
	400	61	47	51	46	32	46	49	51	38	42
	500	38	30	33	29	26	35	30	28	27	24
	600	33	27	23	18	20	30	29	20	18	15
	700	20	19	17	13	8	21	15	15	14	9
	800	8	6	5	7	6	6	8	6	4	5
	900	5	2	1	1	1	4	2	2	1	3
	1000	2	1	2	1	0	1	1	0	2	0
	1100	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0
	1200	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	1300	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	1400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



(a) Multi-order function



(b) Trigonometric function

Fig. 4.2-1 Frequency distribution of residuals

4.2.2 第２段階／統計学的見地からの診断

最小二乗法による実験データの解析結果を統計学的に評価する代表的な基準値として，“測定誤差の分散の不偏推定量”がある．この基準値により，測定結果全体に対する総合的な“あてはめ”精度を一つのスカラー量で知ることができる．

測定の重みを同じ（単位重み）とすると，測定誤差の分散の不偏推定量は次式で表される．

$$\hat{s}^2 = \{v_i\}^T \{v_i\} / (m-q) \qquad (i = 1 \cdots m) \tag{4-26}$$

ここで，$\hat{s}^2$　：測定誤差の分散の不偏推定量

$\{v_i\}$　：残差

q　：固有ひずみ分布係数の数

m　：計測ひずみの数

これまでの解析結果より，式(4-26)で求められる測定誤差の分散の不偏推定量（以後，単に，“誤差の分散”と呼ぶ）を求めると Fig. 4.2-2 のようになる．Fig. 4.2-2 には，全データを使用した場合と，±1000μ より大きな残差を示すデータを取り除いた場合の結果を示している．後者は前者より値が小さくなっており，“あてはめ”精度が向上したことを示している．又，どちらの場合も，各関数で，項数を増加させていくと，“誤差の分散”は小さくなっていく．これは，係数を増加させることにより，変化に富んだ分布を表現することができ，計測データに対する“あてはめ”がよくなっていくことを意味する．極端な場合として，もし，計測データ数と同じ数の係数を使用すれば，すべての計測データを完全に“あてはめ”ることができる．又，多次多項関数と三角多項関数でこの分散の大きさを比べると，項数が１，２では三角多項関数の方が小さいが，３でほぼ同じになり，４，５では逆に多次多項関数の方が小さくなっている．このような“誤差の分散”だけから判断すると，多次多項関数で５項まで使用した場合が最も推定精度が高いことになる．

又，残留応力の最確値の分布を，0°-180°断面に注目して見てみると Fig. 4.2-3 ～ Fig. 4.2-6 のようになる．軸方向応力σ_zと周方向応力σ_θを，各関数を使用した場合に対して示している．関数の項数を増加させていくと，分布の起伏が鮮明になっていくことが分かる．

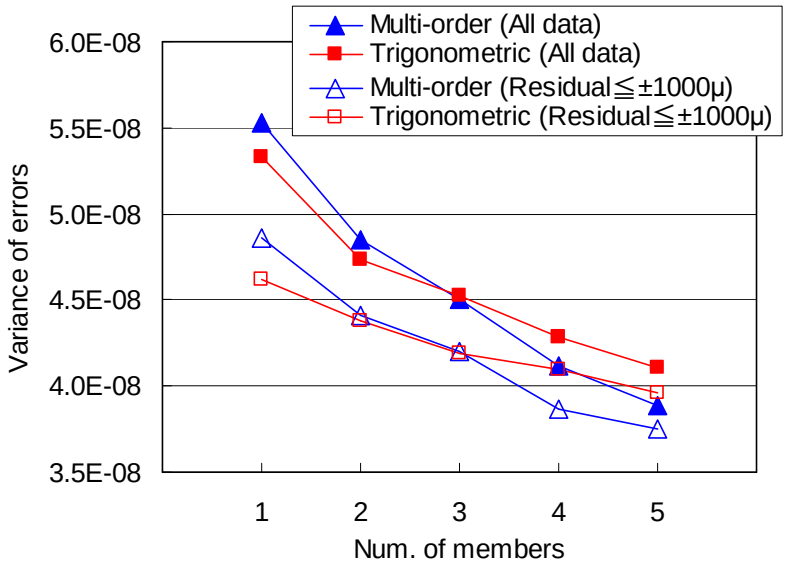
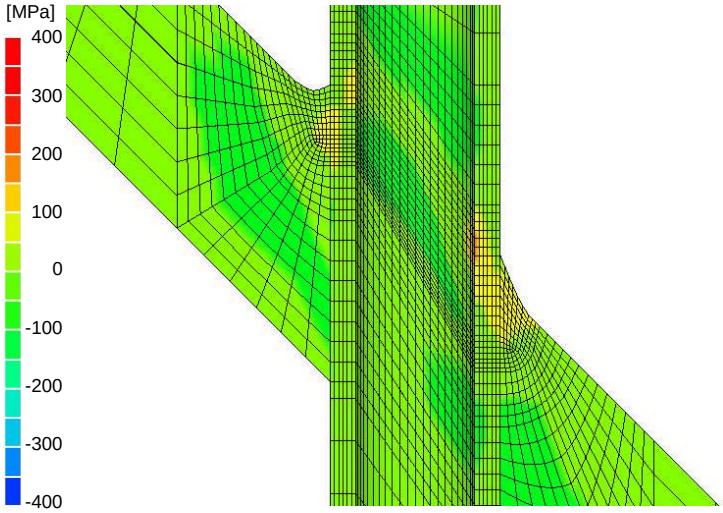
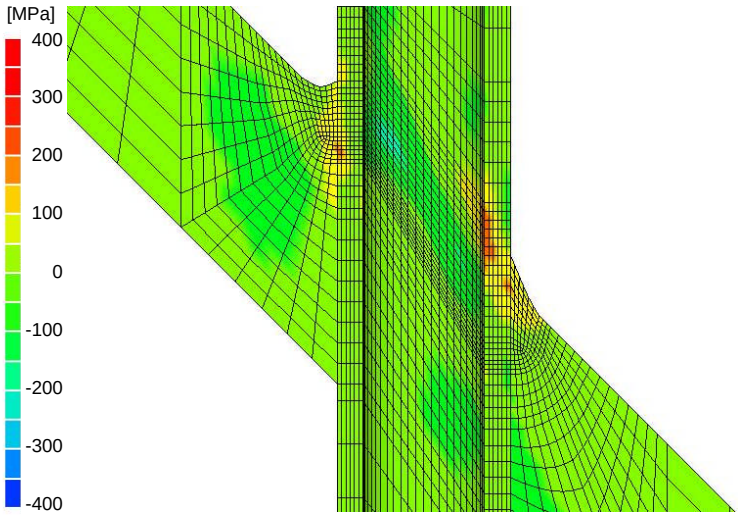


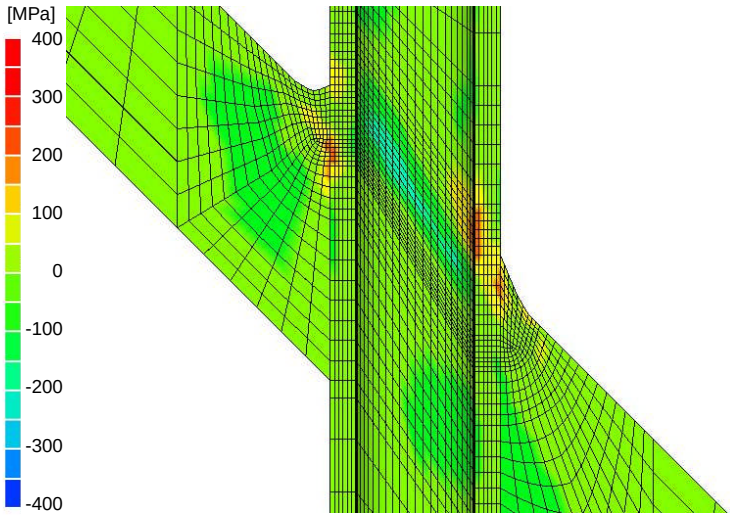
Fig. 4.2-2 Unbiased estimate of variance of errors



(a) Multi-order function with 1 member

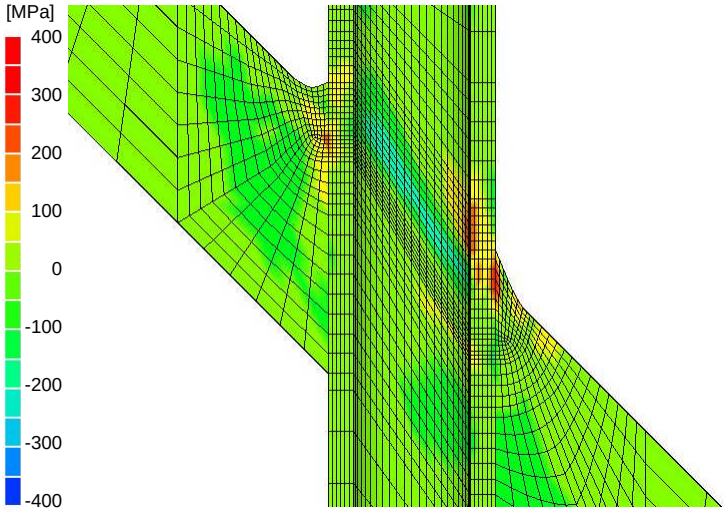


(b) Multi-order function with 2 members

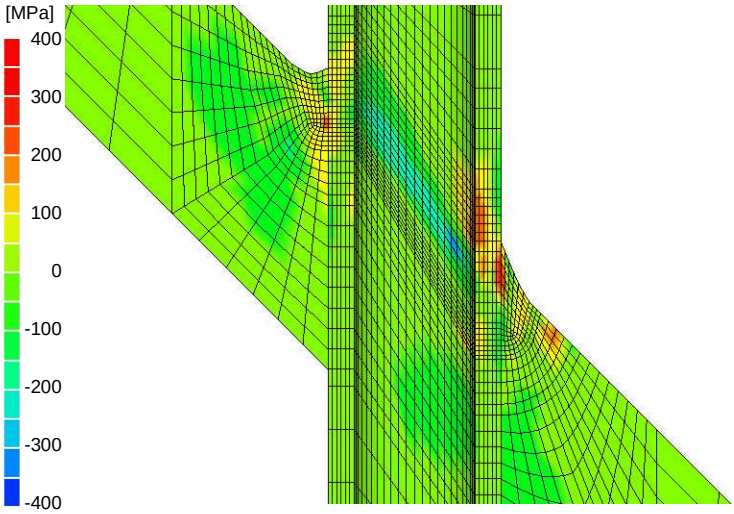


(c) Multi-order function with 3 members

Fig. 4.2-3 Most probable value of residual stress σ_z at $0° - 180°$ section

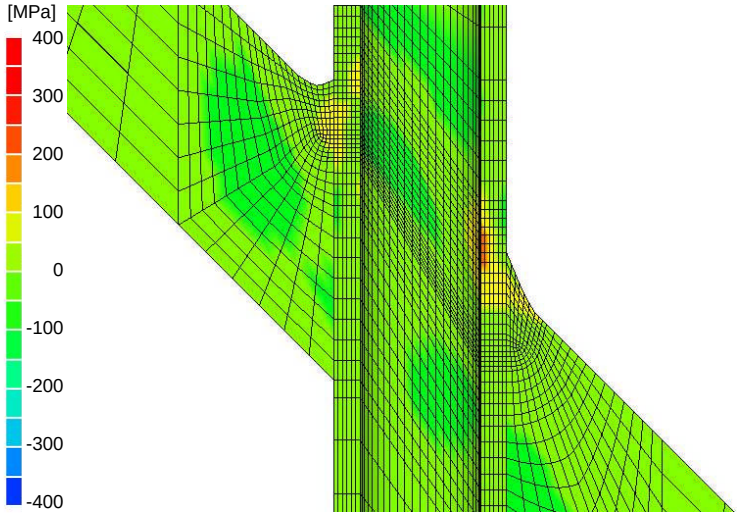


(d) Multi-order function with 4 members

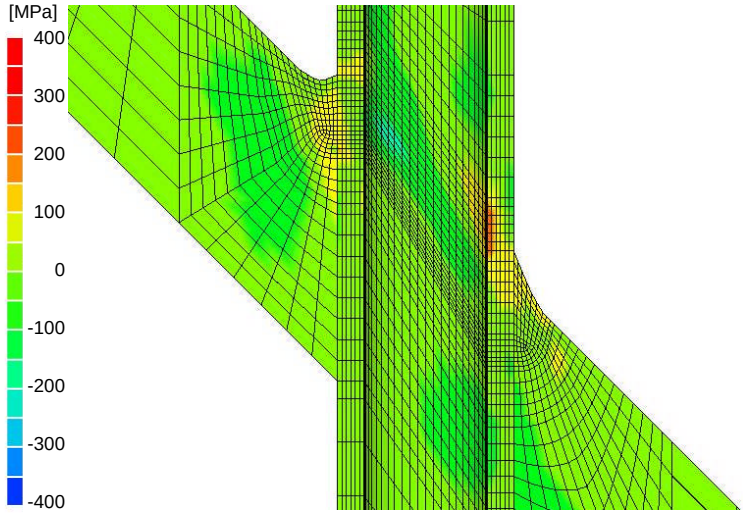


(e) Multi-order function with 5 members

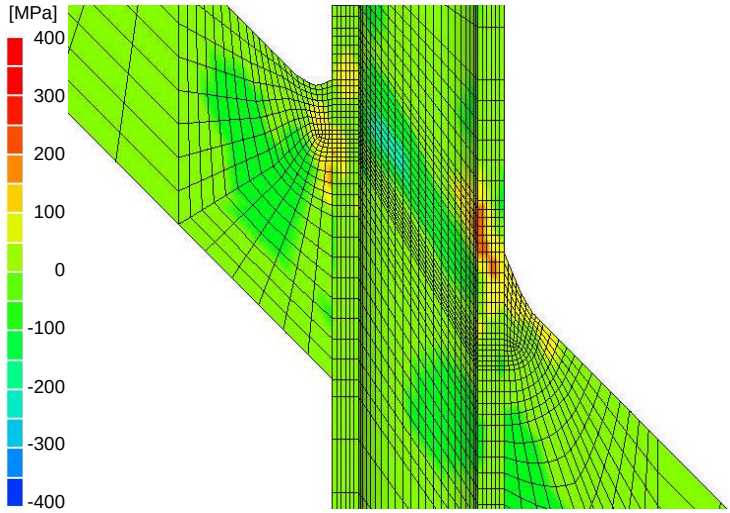
Fig. 4.2-3 Most probable value of residual stress σ_z at $0° - 180°$ section



(a) Trigonometric function with 1 member

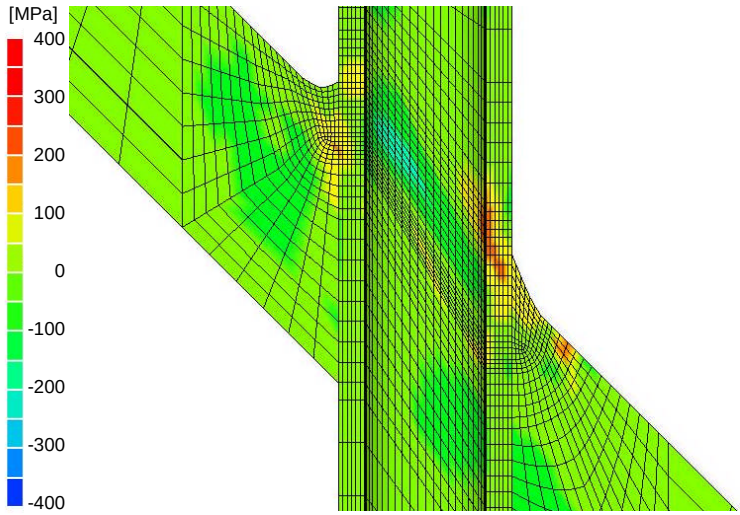


(b) Trigonometric function with 2 members

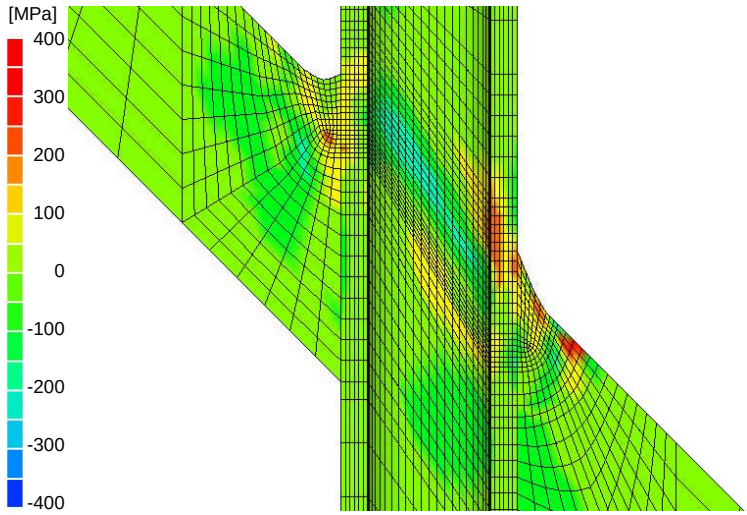


(c) Trigonometric function with 3 members

Fig. 4.2-4 Most probable value of residual stress σ_z at $0° - 180°$ section

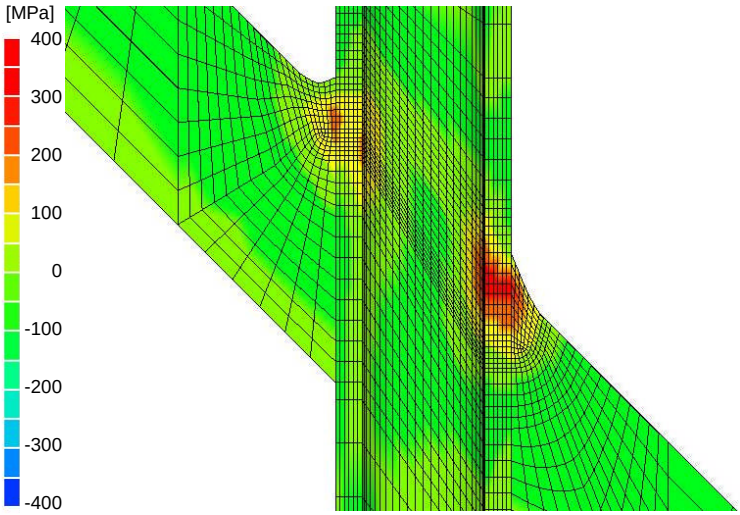


(d) Trigonometric function with 4 members

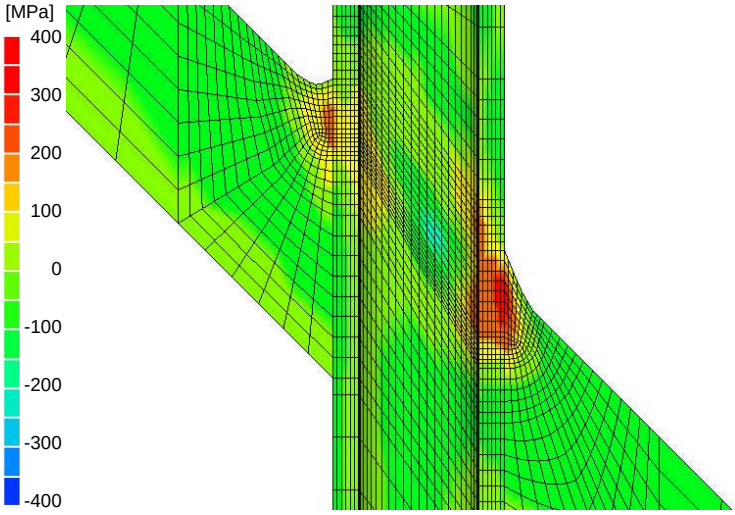


(e) Trigonometric function with 5 members

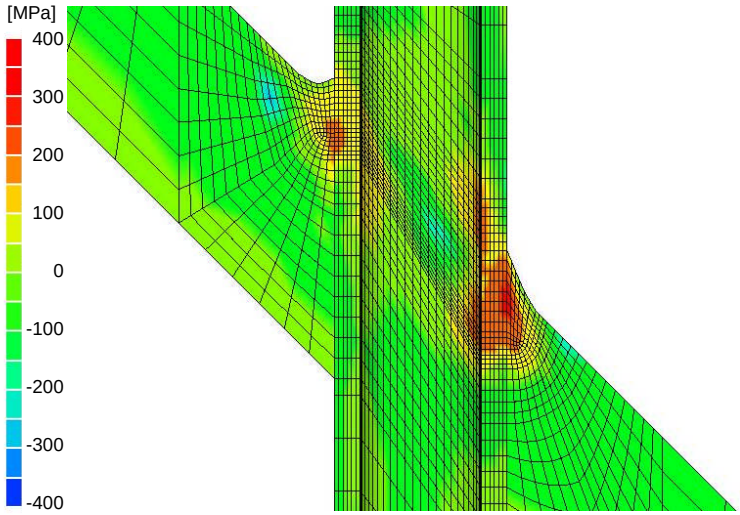
Fig. 4.2-4 Most probable value of residual stress σ_z at $0° - 180°$ section



(a) Multi-order function with 1 member

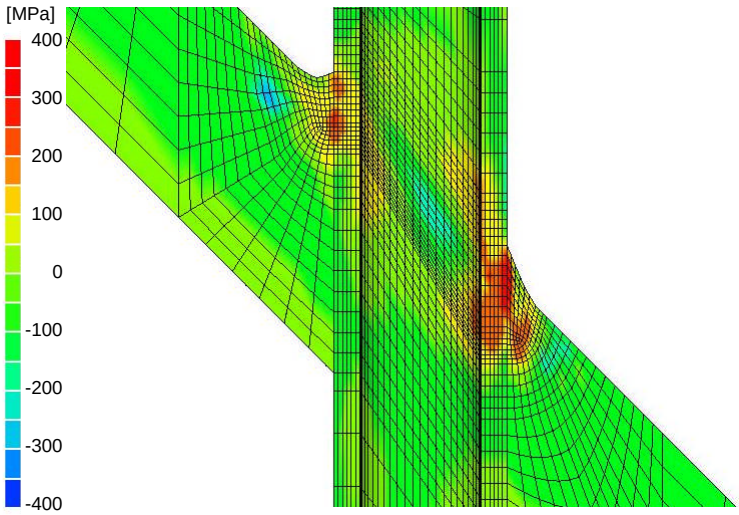


(b) Multi-order function with 2 members

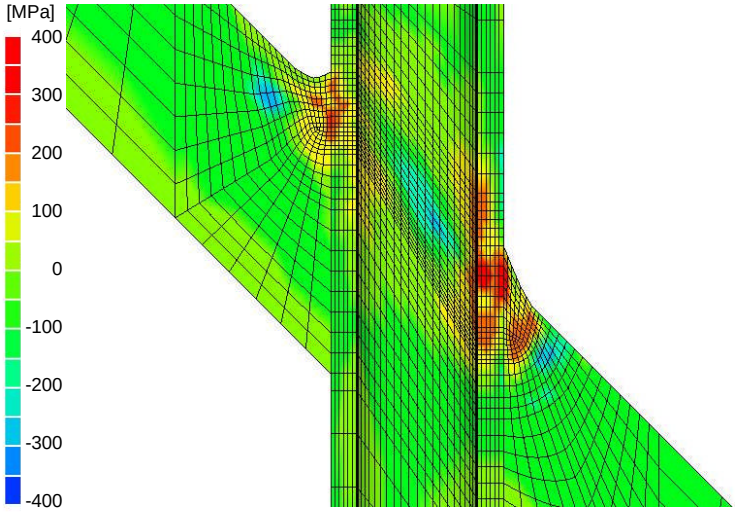


(c) Multi-order function with 3 members

Fig. 4.2-5 Most probable value of residual stress σ_θ at $0° - 180°$ section

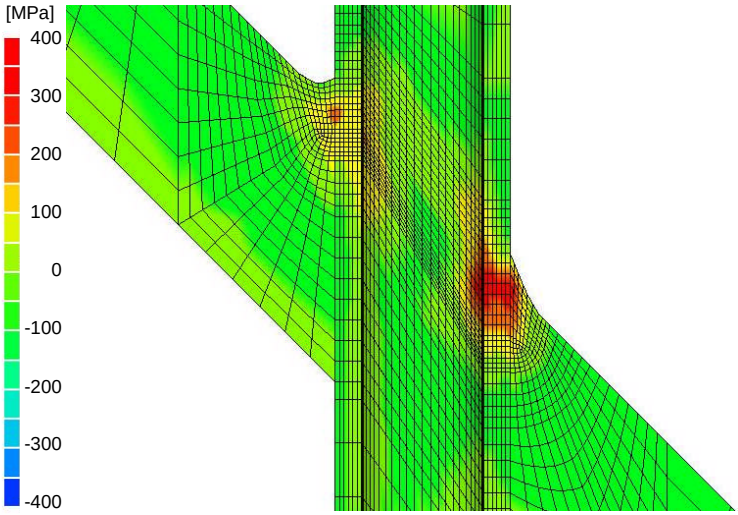


(d) Multi-order function with 4 members

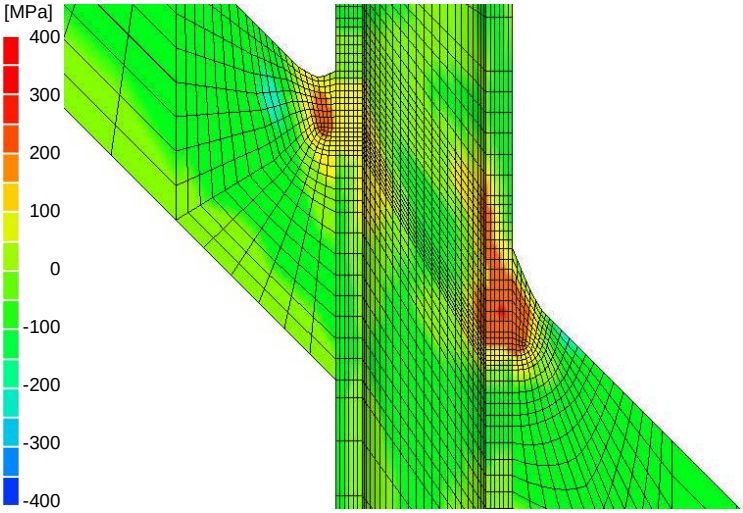


(e) Multi-order function with 5 members

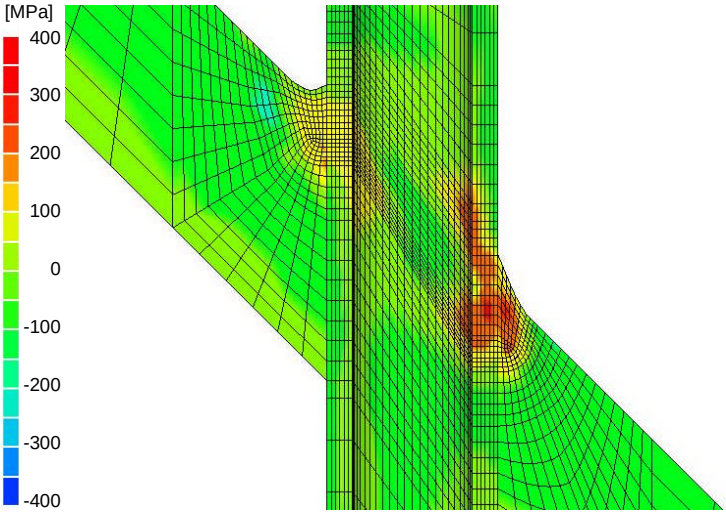
Fig. 4.2-5 Most probable value of residual stress σ_θ at $0° - 180°$ section



(a) Trigonometric function with 1 member

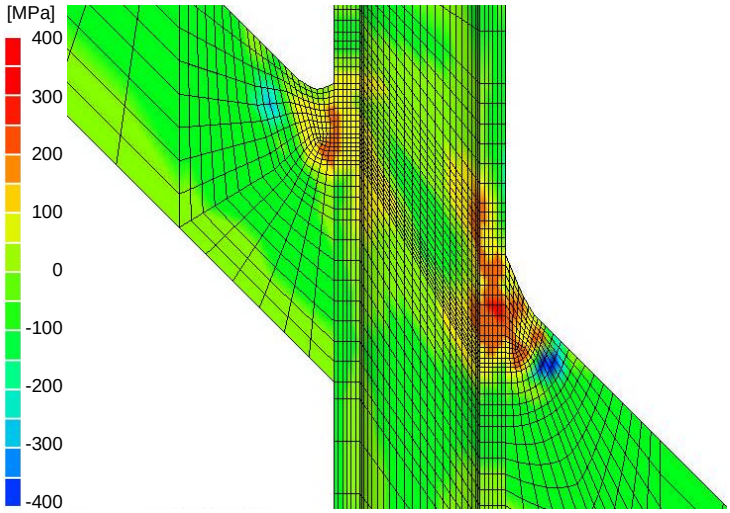


(b) Trigonometric function with 2 members

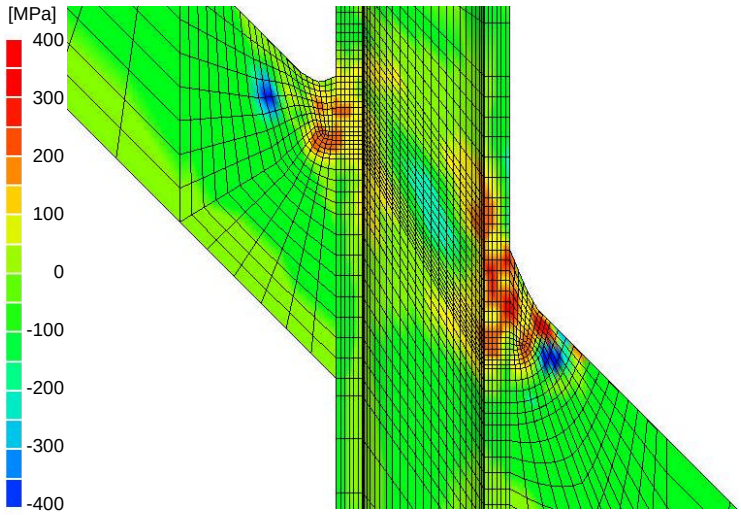


(c) Trigonometric function with 3 members

Fig. 4.2-6 Most probable value of residual stress σ_θ at $0° - 180°$ section



(d) Trigonometric function with 4 members



(e) Trigonometric function with 5 members

Fig. 4.2-6 Most probable value of residual stress σ_θ at $0° - 180°$ section

4.2.3 第３段階／専門知識（溶接力学）からの診断

解析結果の評価は統計学的診断だけに依存するのではなく，最終的には，解析者自身の専門知識や経験からの診断に基づいて下す必要がある．

推定された残留応力分布が妥当なものであるのか，力学的に二つの診断を行ってみる．一つは定量的診断，もう一つは定性的診断である．

(1) 定量的診断

推定結果を溶接力学の観点から，まず，定量的に診断する．診断は，推定された残留応力の最確値から求められる相当応力と材料の降伏応力を比較することにより行う．Fig. 4.1-5 に示した３Ｄ試験体を構成する１５２４８個の全要素に対して，残留応力６成分の最確値より相当応力を求め，その要素の材料の降伏応力と比較した．材料の降伏応力としては，初期降伏応力と加工硬化後の降伏応力を比較の対象とした．加工硬化後の降伏応力としては２％伸び後の降伏応力（以後，２％硬化降伏応力と呼ぶ）を用いた．継手を構成する３つの材料において，有意な剛性を有する温度（1000℃程度）から室温に至るまでの全熱ひずみ量は 1.5%ー2%程度 [4-6), 4-7)] である．これが完全に拘束された場合の２％硬化降伏応力を溶接残留応力が越える可能性はほとんどないと考え，判定条件とした．各材料の初期降伏応力及び２％硬化降伏応力 [4-6), 4-7)] を Table 4.1-1 に示す．固有ひずみ分布関数が異なる１０の解析結果に対して，各要素の残留応力の相当応力を求め，それがこれらの降伏応力を越える要素の数を調べた．又，すべての要素の中での相当応力の最大値も求めた．それらの結果を Table 4.2-2 に示す．

Table 4.2-2 を見ると，初期降伏応力を越える要素はすべての結果において存在する．一方，２％硬化降伏応力を越える要素は，多次多項あるいは三角多項のどちらの関数を用いても，１項で少し存在し，２項ではなくなるが，３項で極僅か現れ，４項で増加し，５項では急増している．３項に注目すると，２％硬化降伏応力を越える要素は，どちらの関数を用いても，２つだけである．しかも，Table 4.2-2 に示すように，その相当応力は２％硬化降伏応力を僅かに越えているだけである．要素数が１５２４８もあり，有限要素法としての不可避の誤差を考慮すると，２％硬化降伏応力を越える要素数が，極僅かであれば，許容されるものと考えられる．一方，項数を増加させると，分布の特徴がより鮮明に解明され，統計学的には，4.2.2 項で示した“測定誤差の分散の不偏推定量”は小さくなっていく．このことを合わせて判断すると，３項による推定結果の信頼性が最も高いと考えられる．そこで，多次多項関数及び三角多項関数で３項の結果を見比べると，かなり近い分布ではあるが，その傾向は完全には一致していない．そこで，そのどちらかを最良として選択する必要がある．

Table 4.2-2 Comparison between equivalent stress and yield stress

	Mem.	Residual stress	Pipe	Weld metal	Plate
Multi-order function	1	Max stress *	315.6	267.7	179.0
		Over initial **	83	0	0
		Over 2% ***	8	0	0
	2	Max stress	277.5	288.1	187.4
		Over initial	84	0	0
		Over 2%	0	0	0
	3	Max stress	293.8	273.1	253.1
		Over initial	128	0	0
		Over 2%	2	0	0
	4	Max stress	544.5	599.9	316.9
		Over initial	167	14	0
		Over 2%	37	12	0
	5	Max stress	768.7	848.5	517.9
		Over initial	268	33	19
		Over 2%	102	24	7
Trigonometric function	1	Max stress	345.3	288.2	167.7
		Over initial	91	0	0
		Over 2%	17	0	0
	2	Max stress	284.1	269.5	241.2
		Over initial	142	0	0
		Over 2%	0	0	0
	3	Max stress	301.2	266.7	217.5
		Over initial	113	0	0
		Over 2%	2	0	0
	4	Max stress	305.6	327.0	607.1
		Over initial	101	0	30
		Over 2%	2	0	17
	5	Max stress	319.4	880.1	993.6
		Over initial	156	25	95
		Over 2%	17	25	59

* Max stress : Max of equiv. stress (MPa)
** Over initial : Num. of elem. over initial yield stress
*** Over 2% : Num. of elem. over 2% yield stress

(2) 定性的診断

まず，Fig. 4.2-3 ～ Fig. 4.2-6 で，全体的な分布傾向を多次多項関数と三角多項関数で比べてみる．１項同士，２項同士はかなりよく似た分布を示している．３項から，少し差がはっきりしてくる．但し，高応力領域は大体同じである．

二つの関数で最も差が目立つ５項の結果を観ると，三角多項関数を使用した結果に二つの不自然な分布特性が観られる．一つ目は，母板の 0°側（谷側）上表面付近で，溶接部端から溶接部幅程度離れた領域に，大きな引張の軸方向応力 σ_z が生じていることである．σ_z 成分としての最大引張がそこに生じている．母板は z 軸に対して 45°の傾斜角を有しており，表面付近では，その分，z 方向の応力は生じにくい．しかも，溶接部からかなり離れた位置である．そこに大きな引張の σ_z が生じるとは考え難い．不自然な分布の二つ目は，上記の位置の近くと，それに対応する 180°側（山側）の位置で，非常に大きな圧縮の周方向応力 σ_θ が局部的に生じていることである．このような不自然な分布は項数が少ない場合には目立たないが，三角多項関数にはそのような不適切性が潜在しているものと考えられる．一方，多次多項関数により推定された結果には，このような明らかな不自然さは見当たらない．したがって，２つの関数を比べた場合，多次多項関数の方が三角多項関数より信頼度が高いと判断される．

以上のような統計学的評価と力学的評価を合わせて判断すると，固有ひずみ分布関数として，多次多項関数３項を使用した場合が最も信頼できる推定結果を与えていると結論付けられる．

4.2.4　残留応力の分布特性およびその生成機構

これまでに得られた残留応力評価結果より，原子炉容器管台貫通溶接部における残留応力の分布特性をまとめる．前項で，多次多項関数３項を使用した場合が最も信頼できる推定結果を与えていると結論付けたので，その結果に対して考察する．

残留応力（最確値）分布の特徴としては，周方向応力が最も大きな引張応力成分となっており，特に 0°側（谷側）において溶接部から管台にかけて大きな引張応力が見られる．軸方向応力も 0°側（谷側）において溶接部から管台にかけてやや大きな引張応力が発生している．径方向応力は 90°断面においてやや大きな引張応力が見られる．

これらの分布傾向を溶接金属の収縮に対する内的拘束の程度から考察してみる．同拘束は，軸方向には，180°側（山側）は溶接金属部表面は自由表面となっており， 0°側（谷側）の溶接部の方が厳しい．また，管台の高温部の曲げ変形（周方向の収縮に起因）に対する厚板からの拘束は，0°側の方が 180°側より小さく，曲げ応力が生じやすい．軸方向応力の分布傾向はそれらに対応している．径方向には，逆に，180°側（山側）に近いほど内的拘束は厳しくなっていると考えられる．しかし，径方向応力 σ_r は途中の 90°断面において 180°断面よりも大きな引張が発生している．その原因は明確ではないが，例えば，溶接が手溶接であり，0°から 180°までの半周を連続的に溶接するのではなく，数回に分けている不連続溶接であること，又，周方向の位置によりパス数が異なっていることが影響因子として考えられる．溶接金属の収縮に対する周方向の拘束は，溶接線の方向が周方向と一致する 0°付近及び 180°付近で最も厳しくなり，溶接線の方向と周方向が 45°の角度を持つ 90°付近で最も弱くなる．周方向応力 σ_θ の分布傾向はこれに対応している．

4.3　測定精度と経済性を考慮したひずみ計測領域の最適化

4.2 節では，固有ひずみ分布関数の適性診断を実施し，最適な分布関数を選定した．固有ひずみ分布関数と共に重要な測定条件としてひずみ計測の位置と数がある．管台貫通溶接部試験体に対しては，先に述べたように，本研究が新しい測定法の最初の試みであり，固有ひずみが存在すると推察される領域を十二分に含む広領域において出来る限り多数計測した結果，ひずみ計測数は２８７１となった．

このような試験体を用いた残留応力計測は，計測作業が煩雑であり高費用を要することから，今後，類似の測定を実施する場合，作業効率と経済性を考えると，できる限り少ない計測点数で精度よく評価できることが望ましい．しかし，計測点数が少なくなると，一般的に推定精度は低下し，的確な評価ができない場合が生じ得る．そこで，本研究の最後として，ひずみ計測領域の最適化を試みた．即ち，計測領域をこれまでの広範囲から少しずつ狭めていき，推定精度と経済性が両立する最適領域を究明した．

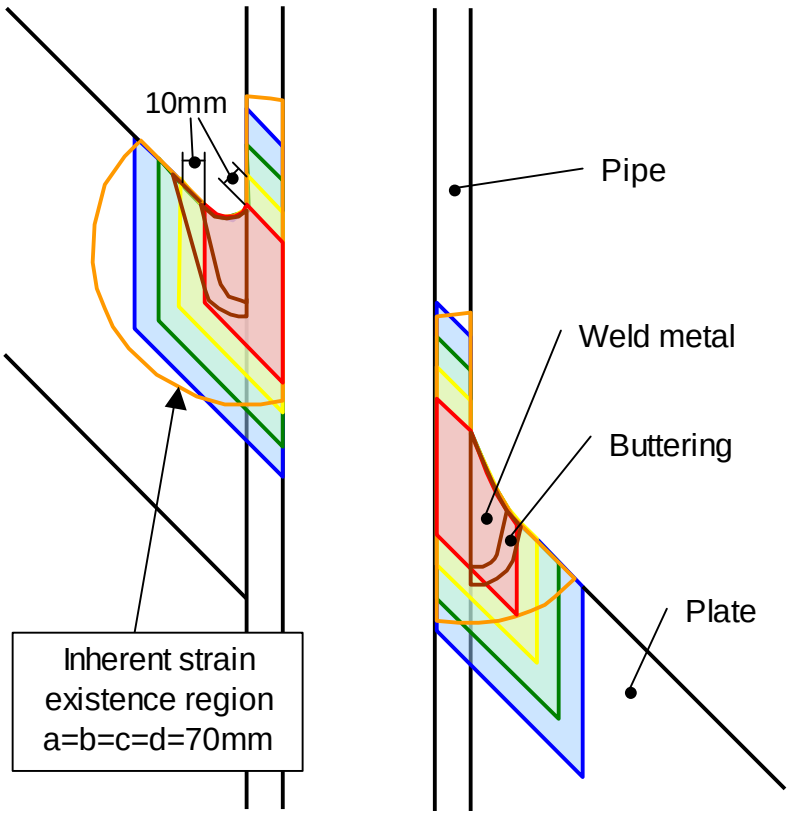
解析は次のような条件の下に実行した．まず，ここでは，ひずみ計測領域の適性を評価することを目的とするので，他の解析条件は一定に設定した．即ち，固有ひずみ領域設定パラメーター，a, b, c, d（ｚｒ断面において楕円として定義／Fig. 4.1-6 参照）は５つのすべてのＴ片において a=b=c=d=70mm と設定し，固有ひずみ成分としては計測ひずみと同じように垂直ひずみ３成分のみを考慮した．又，固有ひずみ分布関数としては，4.2 節で最も信頼性が高いと判断された３次多項関数を使用した．

最適化を目差すひずみ計測領域は，実際の計測工程を考慮して，以下のように設定した．Fig. 4.3-1 に各計測領域を示す．

ケースＡは本研究での実際の計測領域そのものである．これを基準に，ケースＢ，Ｃ，Ｄ，Ｅと，徐々に計測領域を狭めた．ケースＢは固有ひずみ分布関数の境界，a=b=c=d=70㎜ をほぼ含む領域である．分布関数の領域は広い目に設定されており，境界付近で固有ひずみが存在しない，あるいは，非常に小さければ，それに対応するように関数の係数が求められる．ケースＢからＥまでは，ひずみゲージの貼り付けが 10㎜ピッチであることを考慮し，10㎜ 幅で計測領域を狭めている．ケースＣは，溶接端部（バタリング部含む）から 20㎜ 程度離れた範囲までを計測領域としており，固有ひずみの成分である塑性ひずみの発生領域を十分に含み，且つ，それより広過ぎない領域であると考えられる．ケースＥは最小計測領域として，溶接金属部と，管の長さ方向でそれに接する領域を計測範囲とした．このように計測領域を設定し，実際の計測データを使用し，各ケースで，その計測領域に含まれる計測データのみを用いて解析を実行した．ちなみに，ケースＥで使用した計測データの数は 441 個である．

解析結果の評価は，4.2 節と同様に，固有ひずみ法が統計学的には最小二乗法に基づいて

いることに注目して３段階で行い，更に，第４段階の診断として，「経済性からの診断」を追加し，総合的に最適なひずみ計測領域を決定した．



Case	Color	Num. of measurements
A		2871
B		1529
C		1133
D		767
E		441

Fig. 4.3-1　Strain measurement region

4.3.1 第１段階／残差からの診断

各ケースの解析結果より，残差の大きさとデータ数の関係をまとめたのが Table 4.3-1 と Fig. 4.3-2 である．

Table 4.3-1 と Fig. 4.3-2 を見ると，どのケースも，残差の大きさと共に，頻度数は減少していき，ほぼ単調な，なだらかな変化を示している．分布の裾野の先でパルス的に大きな残差を示すデータは見当たらない．これは，予め，明らかに不可解な数値を示す不良データを取り除いている効果によるものと考えられる．したがって，はっきり異常と判断できるデータは存在しないが，Table 4.3-1 で区間頻度が０ー２程度である±1000μ より大きな残差を示すデータは，準異常データとして取り除くことにする．そして，残りのデータを使用して，もう一度，解析を実行する．その２回目の解析結果に対して，第２，第３，第４の診断を行う．

Table 4.3-1 Frequency distribution of residuals

	Case	A	B	C	D	E
Residuals (μ)	-2000	0	0	0	0	0
	-1900	0	0	0	0	0
	-1800	0	0	0	0	0
	-1700	0	0	0	0	0
	-1600	0	0	0	0	0
	-1500	0	0	0	0	0
	-1400	0	0	0	0	0
	-1300	1	1	1	0	0
	-1200	1	2	1	0	0
	-1100	1	0	1	1	0
	-1000	2	2	2	2	0
	-900	1	1	2	2	0
	-800	8	7	2	1	0
	-700	13	4	8	7	1
	-600	14	11	12	9	5
	-500	25	27	21	18	8
	-400	67	48	36	26	13
	-300	136	86	70	55	33
	-200	244	166	119	78	41
	-100	521	286	211	124	70
	0	1106	400	246	143	91
	100	361	224	167	124	70
	200	147	118	107	76	55
	300	82	56	57	37	28
	400	51	41	26	23	15
	500	33	16	15	20	3
	600	23	14	15	8	2
	700	17	7	4	4	0
	800	5	3	1	0	0
	900	1	1	0	0	0
	1000	2	1	1	1	0
	1100	0	1	2	0	0
	1200	1	0	0	2	0
	1300	0	0	0	0	0
	1400	0	0	0	0	0
	1500	0	0	0	0	0
	1600	0	0	0	0	0
	1700	0	0	0	0	0
	1800	0	0	0	0	0
	1900	0	0	0	0	0
	2000	0	0	0	0	0

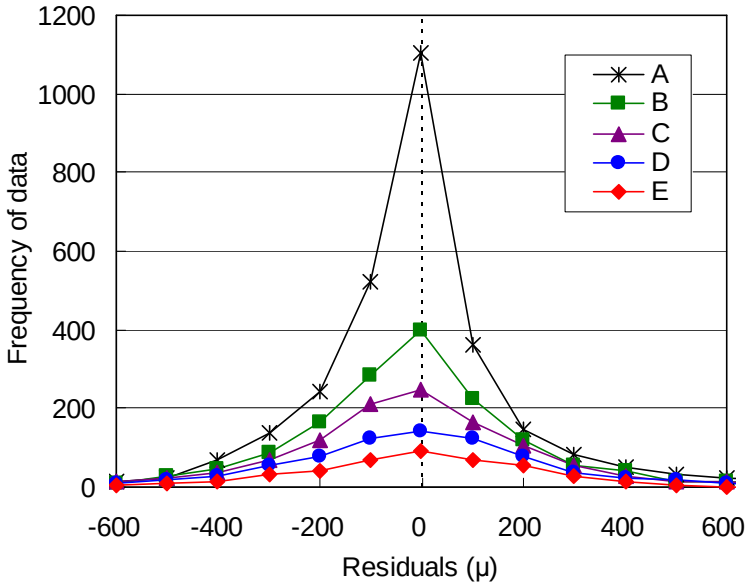


Fig. 4.3-2 Frequency distribution of residuals

4.3.2 第２段階／統計学的見地からの診断

測定誤差の分散の不偏推定量（以後，単に，“誤差の分散”と呼ぶ）を求めると Fig. 4.3-3 のようになる．Fig. 4.3-3 には，各ケースで，全データを使用した場合と，±1000μ より大きな残差を示すデータを取り除いた場合の結果を示している．後者は前者より値が小さくなっており精度が向上したことを示している．又，ひずみ計測領域を狭めていくと，“誤差の分散”は大きくなっていく．これは，ひずみ計測数を減少させることにより，固有ひずみ分布関数による“あてはめ”が平均的には悪くなっていくことを意味する．ただし，ケース D から E で減少しているのは，ケース E が溶接部領域であり，その部分においては，固有ひずみ分布関数による“あてはめ”精度が平均的には若干改善されたためと推察される．

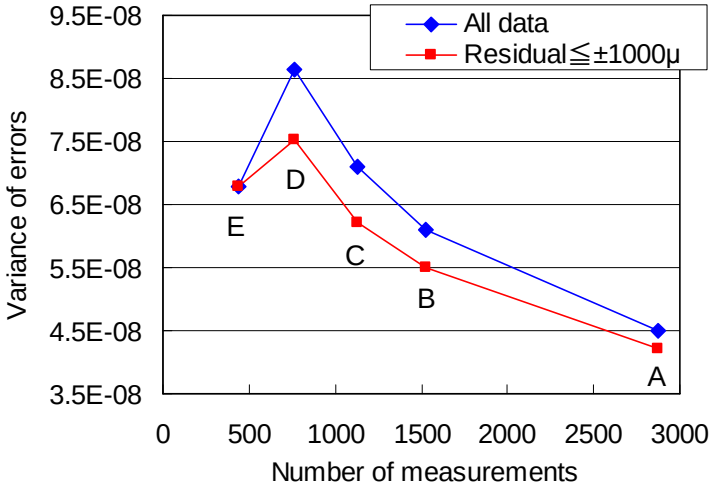


Fig. 4.3-3　Unbiased estimate of variance of errors

4.3.3 第３段階／専門知識（溶接力学）からの診断

(1) 定量的診断

ひずみ計測領域が異なる５つの解析結果に対して，各要素の残留応力の相当応力を求め，要素の材料の降伏応力と比較した．又，すべての要素の中での相当応力の最大値も求めた．それらの結果を Table 4.3-2 に示す．

Table 4.3-2 を見ると，初期降伏応力を越える要素はすべての結果において存在する．一方，２％硬化降伏応力を越える要素数は，ケース A で 2 個，ケース B, C において０，ケース D では 11 個，ケース E では 1000 個以上である．

次に，各ケースにおいて，残留応力の［偏差／最確値］比の絶対値の平均値を，各応力成分に対して求めた．その結果を Fig.4.3-4 に示す．［偏差／最確値］比を求めるにあたり，残留応力の高い領域での精度評価が重要であると考え，応力の最確値の絶対値が 100MPa 以上の高応力値を示す要素のみを対象とした．全ての計測データを用いたケース A では概ね 0.15 である．計測領域を狭めていくと，［偏差／最確値］比は大きくなる．ケース C では概ね 0.2，ケース D では概ね 0.3 である．ケース A とケース B，C との差は小さい．ケース B，C の推定精度はケース A よりほとんど低下していないと言える．

Table 4.3-2　Comparison between equivalent stress and yield stress

Case	Num. of measurements	Residual stress	Pipe	Weld metal	Plate
A	2871	Max stress *	293.8	273.1	253.1
		Over initial **	128	0	0
		Over 2% ***	2	0	0
B	1529	Max stress	282.5	276.8	276.5
		Over initial	160	0	0
		Over 2%	0	0	0
C	1133	Max stress	282.8	316.4	307.1
		Over initial	148	0	0
		Over 2%	0	0	0
D	767	Max stress	315.5	373.8	413.4
		Over initial	109	0	19
		Over 2%	8	0	3
E	441	Max stress	422.2	535.2	1055.9
		Over initial	469	23	1221
		Over 2%	78	14	999

*　Max stress：Max of equiv. stress (MPa)
**　Over initial：Num. of elem. over initial yield stress
***　Over 2%：　Num. of elem. over 2% yield stress

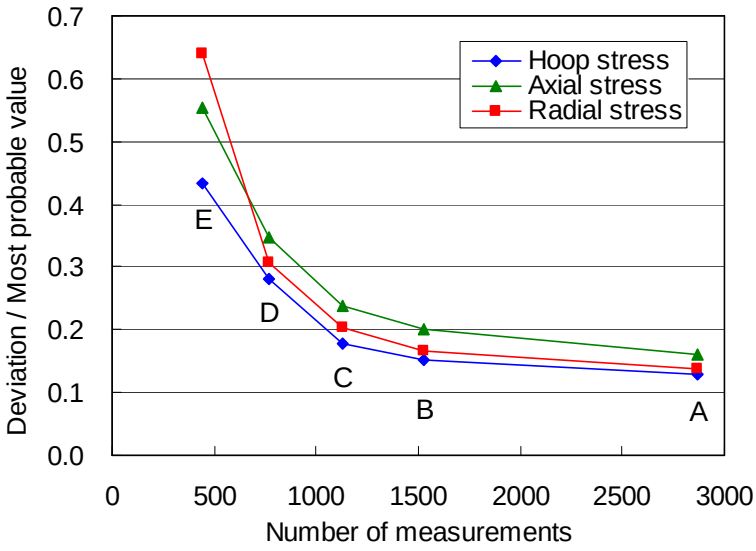
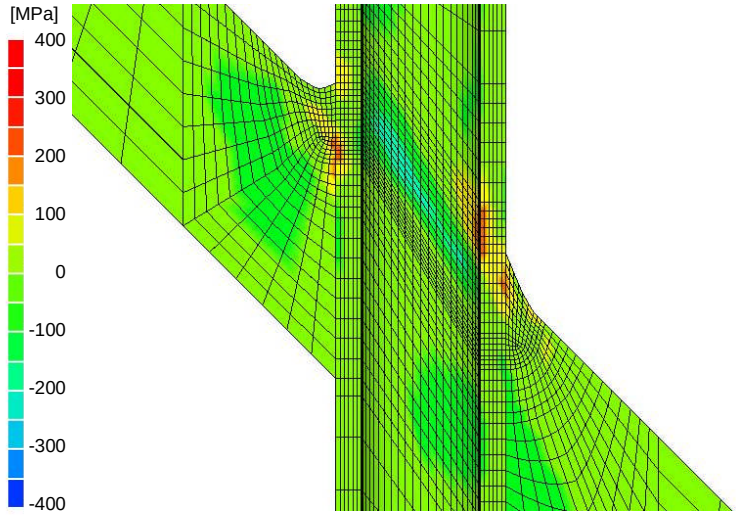


Fig. 4.3-4 Effect of measurement number on accuracy

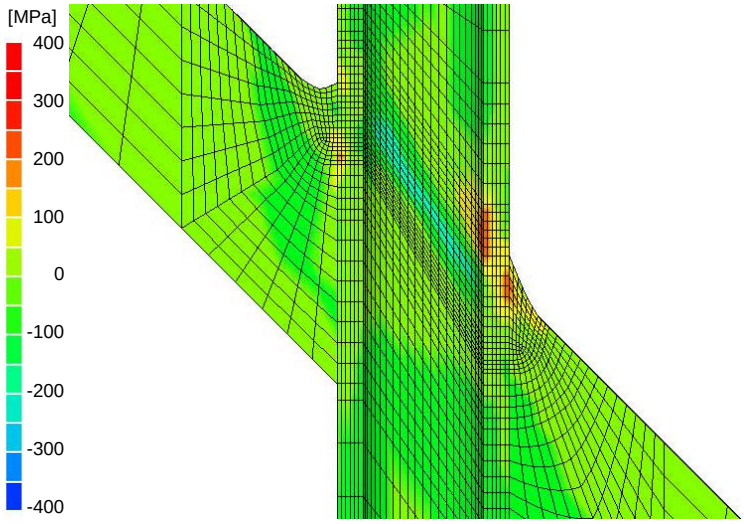
(2) 定性的診断

残留応力分布として，0°-180°断面における軸方向応力σ_zと周方向応力σ_θの最確値の分布を，ケース A，C，D に対して示すと Fig. 4.3-5 と Fig. 4.3-6 のようになる．３つのケースに絞ったのは，前項での定量的診断結果より，ケース B と C との差が小さいので，計測数の少ないケース C をその代表とし，また，ケース E は［偏差／最確値］比が他のケースと比べて非常に大きな値で，精度面で不適当と判断し除外したためである．これらの図において，全体的な応力分布傾向を比べてみる．

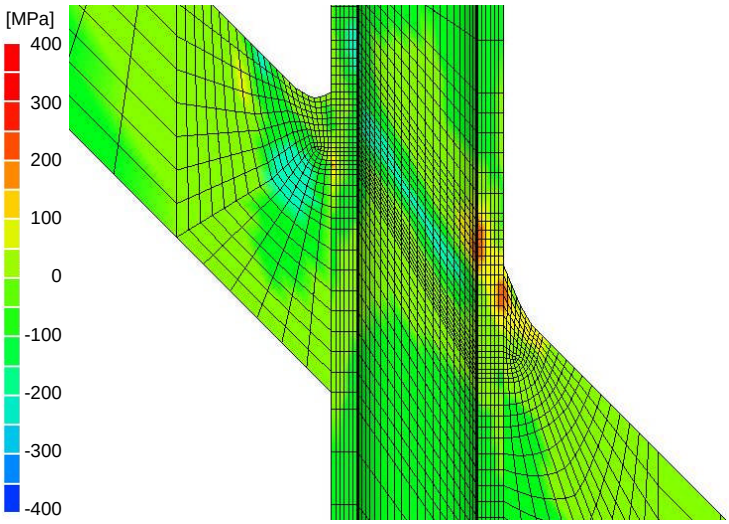
σ_zにおいては，ケース A，C，D の分布に有意な差は見られない．σ_θにおいては，ケース D では，ケース A，C と比べて，板の内部に大きな圧縮応力が現われており，不自然な分布特性となっている．すなわち，母板の 0°側（谷側）上表面付近で，溶接部端から溶接部幅程度離れた領域に，非常に大きな圧縮の周方向応力σ_θが局部的に生じている．ケース C ではそのような不自然さは見当たらない．したがって，計測領域をケース C まで小さくしても信頼できる結果が得られるが，それ以上狭くすると推定結果の信頼性が低下すると考えられる．



(a) Case A

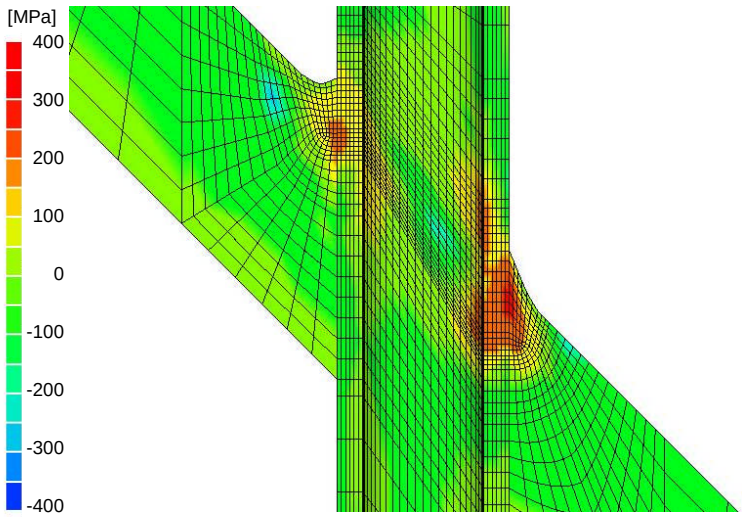


(b) Case C

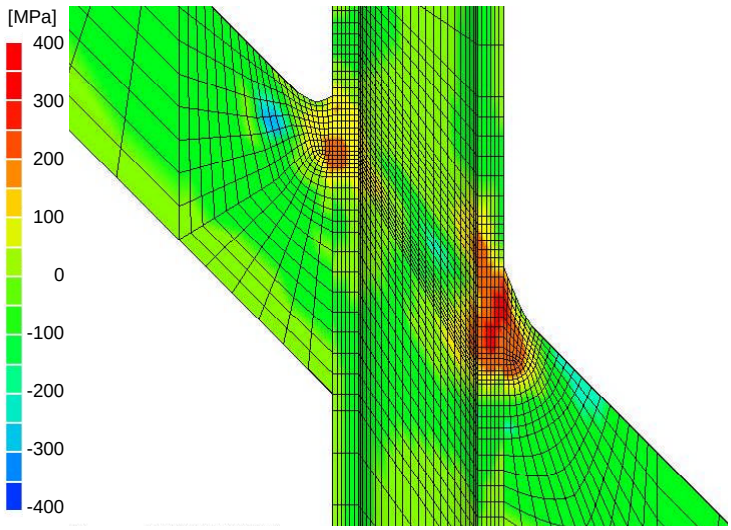


(c) Case D

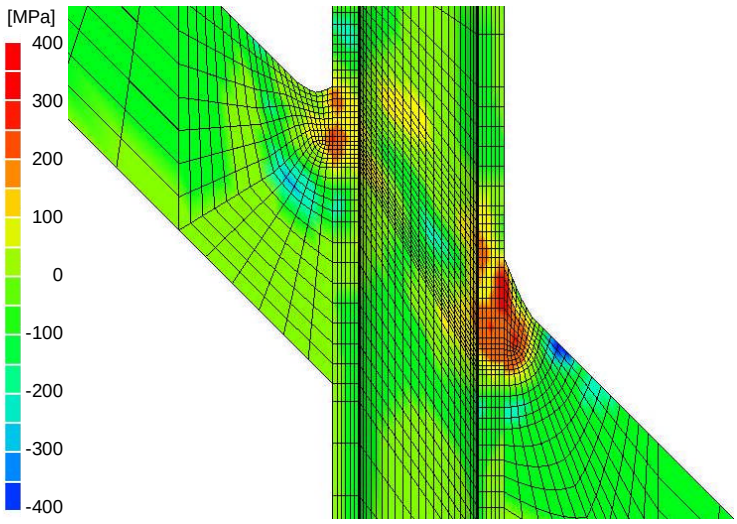
Fig. 4.3-5 Most probable value of residual stress σ_z at $0° - 180°$ section



(a) Case A



(b) Case C



(c) Case D

Fig. 4.3-6 Most probable value of residual stress σ_θ at $0° - 180°$ section

4.3.4 第 4 段階／作業効率と経済性を考慮した総合評価

ケース A～E に対して，作業効率と経済性（実験の手間と費用）を比較した．Fig. 4.3-7 に計測費用（手間）と計測数の関係を示す．費用（手間）は計測数にほぼ比例的に増加する．これに，残留応力の［偏差／最確値］比と計測数の関係を重ねた．

もし，計測数の減少に対する精度の低下が大きいと，計測数を削減させることはできない．しかし，今回の結果では，前項で示したように，ひずみ計測領域をケース C まで合理的に小さくしても，精度低下は小さく，残留応力の［偏差／最確値］比で見ると元の 0.15 から 0.2 に増加する程度である．

ケース C では，ひずみ計測数を従来の 2871 個から 1133 個へと，元の約 40%に大幅に削減することができる．このケース C は，先に述べたように，溶接端部（バタリング部含む）から 20mm 程度離れた範囲までを計測領域としており，固有ひずみの成分である塑性ひずみの発生領域を十分に含み，且つ，それより広過ぎない領域であると考えられる．したがって，同様の，あるいは，類似の継手形状であれば，このような範囲をひずみ計測領域に設定することにより，信頼できる評価が得られるものと推察できる．

以上の検討結果より，ひずみ計測領域として，ケース C が“精度と経済性”の要求を折り合わせた最適計測領域であるとして推奨される．また，最適な固有ひずみ分布関数とひずみ計測領域の選定ができたことにより，適切な応力分布を用いた高精度で経済的な寿命評価が実現可能となる．

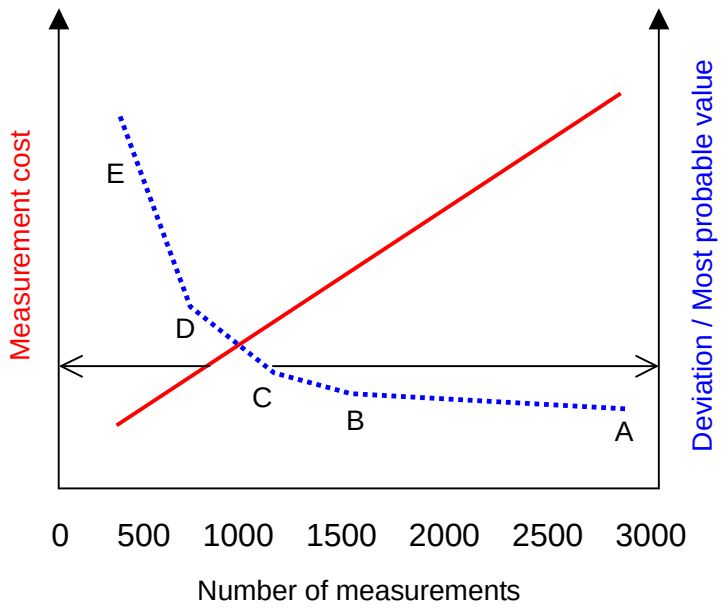


Fig. 4.3-7 Measurement cost and accuracy

参考文献

4-1） Y. Ueda, K. Fukuda, K. Nakacho and S. Endo : A New Measuring Method of Residual Stresses with the Aid of Finite Element Method and Reliability of Estimated Values, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 138 (1975), 499-507, (in Japanese) and Theoretical and Applied Mechanics (University of Tokyo Press), 25 (1977), 539-548, etc.

4-2） Y. Ueda and N.X. Ma : Expression of Inherent strain in Form of Function and its Estimation, Estimating and Measuring Methods of Residual Stresses Using Inherent Strain Distribution Described as Functions (Report 1), Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 11-1 (1993), 189-195, etc. (in Japanese)

4-3）Y. Ueda, K. Fukuda and M. Tanigawa : New Measuring Method of 3-Dimensional Residual Stresses Based on Theory of Inherent Strain, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 145 (1979), 203-211, and Journal of The Japan Welding Society, 49-12 (1980), 845-853, etc. (in Japanese)

4-4) 日本機械学会：発電用原子力設備規格，設計・建設規格，第 I 編 軽水炉規格, 2005 年版. (in Japanese)

4-5) T. Nakagawa and Y. Oyanagi : UP Applied Mathematics Series 7, University of Tokyo Press, ISBN 4-13-064067-4 (1982), Chapter 8. (in Japanese)

4-6）I. Muroya, et al. : Residual Stress Evaluation of Dissimilar Weld Joint Using Reactor Vessel Outlet Nozzle Mock-up Model (Report-1), Proceedings of the ASME 2008 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2008-61829.

4-7） K. Ogawa, et al. : Welding Residual Stress Analysis Using Axisymmetric Modeling for Shroud Support Structure, Proceedings of the ASME 2008 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2008-61148.

５．結言

本研究は，原子炉の安全性の向上を目的として，固有ひずみ法の新しい測定理論と測定手順を開発し，原子炉容器及び冷却材配管の溶接部の残留応力を実継手に近い試験体（モックアップ）を使用して測定したものである．

まず，原子炉の冷却材配管の溶接部の残留応力を固有ひずみ法により測定した．円管継手に対して，新たに軸対称測定理論を展開し，その理論に基づいて，有限要素法解析プログラムを構築した．同時に，冷却材配管溶接部の試験体を製作し，同プログラムを使用して，溶接残留応力を評価した．

実験及び理論解析の結果，溶接部中央断面では，軸方向応力は小さいが，周方向応力は板厚中央付近に大きな引張応力が残留していること，等，板内部の残留応力分布の特徴を知ることができた．本測定法は統計学的理論に基づいており，残留応力の最確値と共にその標準偏差を知ることができる．そこで，推定結果の精度の評価材料として測定の残差及び残留応力の標準偏差を調べ，推定結果の信頼性が十分高いことを示した．

次に，原子炉容器の管台貫通溶接部の残留応力を固有ひずみ法により測定した．この継手は寸法的に小さく，しかも，固有ひずみが複雑に変化していると推察される．そこで，固有ひずみの分布を関数表示する手法を採用した．これにより，未知数を大幅に減少させ，測定を現実的なものとすることができた．

上記継手の残留応力測定に適した関数表示固有ひずみ法の理論を具体的に展開し，それに基づいて有限要素法解析プログラムを構築した．又，実継手に近い試験体を製作して，同プログラムを使用し，その３次元溶接残留応力分布を測定した．

関数表示固有ひずみ法を適用する場合，解析で使用する固有ひずみ分布関数が特に重要な解析条件となる．本研究では，１０種類の分布関数を設定して，それらの関数の本解析への適応性を評価した．評価は固有ひずみ法が統計学的には最小二乗法に基づいていることに注目して，３段階の診断により進めた．第１段階は「残差からの診断」，第２段階は「統計学的見地からの診断」，最後の第３段階は「専門知識からの診断」である．「専門知識からの診断」では，溶接力学的観点から，まず，定量的に，そして，定性的に診断した．１０種類の分布関数により得られた解析結果を，このような手順で評価し，分布関数の適応性の優劣を判定した．その結果，固有ひずみ分布関数として，３次多項関数を使用した場合が最も信頼できる推定結果を与えていると結論付けた．また，その残留応力の分布特性を把握すると共に，生成機構を溶接金属の収縮に対する内的拘束の観点から考察した．

試験体を用いた残留応力計測は，計測作業が煩雑であり高費用を要することから，経済性を考えると，できる限り少ない計測点数で精度よく評価できることが望ましい．そこで，本研究の最後に，固有ひずみ分布関数と共に重要な解析条件である，ひずみ計測領域の適性診断を行った．適性診断における計測領域は，実際の計測工程を考慮して設定した．結果の評価は分布関数の診断時と同様に３段階で行い，更に，第４段階の診断として，「経済性からの診断」を追加し，総合的に最適なひずみ計測領域を決定した．その結果，推定精度をほとんど低下させずに，ひずみ計測数をこれまでの 2871 個から 1133 個（約 40%）へと合理的に大幅に削減できることを解明した．この計測領域は，溶接端部から約 20㎜ 離れた領域を含む範囲であり，塑性ひずみ発生領域よりやや広い領域と考えられる．類似の継手形状であれば，同様の範囲を計測領域として設定すれば，信頼できる測定結果が得られるものと結論付けた．このように推定精度と経済性が両立するひずみ計測領域を究明できたことは，将来，類似の実験を実施する場合の一つの指標となり，非常に意義深い成果と言える．

以上のように，本研究は，原子炉の配管突合せ溶接継手及び原子炉容器管台貫通溶接部の残留応力を対象として，固有ひずみ法に基づく高精度高効率な測定理論と測定手順を開発し，モックアップを使用した実験により，同継手の残留応力分布を解明すると共に測定法の信頼性を実証したものである．本研究で構築した３次元残留応力評価手法は厚板内部の複雑な残留応力分布を解明することが可能であり，適切な応力分布を用いた発電プラント等の溶接構造物に対する寿命評価の高精度化が実現できるため，その健全性及び経済性の向上に大いに貢献することができるものと確信する．又，残留応力改善を目的とした新しい溶接法の検証，等にも，必須の測定法として大いに活躍することが期待できる．

付録　固有ひずみ領域影響評価

１．はじめに

本文では，固有ひずみ分布関数として，３次多項関数を使用した場合が最も信頼できる推定結果を与えていると結論付けた．また，ひずみ計測領域の適性診断を行い，溶接端部から約 20㎜ 離れた領域を含む範囲をひずみ計測領域と設定したときに，推定精度と経済性が両立できることを究明した．

本文中の解析で想定した固有ひずみ領域は本文中の Fig. 4.1-6 に示すように，a，b，c，d の４つの境界位置を示すパラメーターを用いて，５つのすべてのＴ片において a=b=c=d=70㎜ と設定した．

そこで，ここでは，解析で設定される固有ひずみ領域が評価結果に与える影響を確認するため，固有ひずみ領域に対する感度解析を実施した．

２．解析条件

固有ひずみ分布関数としては３次多項関数を使用し，ひずみ計測領域は推定精度と経済性を両立できる，本文中の Fig.4.3-1 で示すケースＣに設定した．固有ひずみ領域範囲の設定は，５つのすべてのＴ片において共通とし，a=b=c=d=40，50，60，70，80，90㎜ の６パターンで評価を行った．

固有ひずみ領域（a=b=c=d=40，70㎜）とひずみ計測領域ケースＣの関係を Fig. A-1 に示す．固有ひずみ領域 a=b=c=d=40㎜ は溶接金属部を概ね含む範囲であり，a=b=c=d=70㎜ では，溶接金属部から約 30㎜ 離れた領域までを含んでいる．

３．解析結果

解析においては，本文中での 4.2 節及び 4.3 節での評価の流れと同様に，「残差からの診断」から行った．各固有ひずみ設定領域に対して解析を行い，その結果での残差が±1000μ以下となる計測値を取り出して，再度計算を行った．

なお，本評価におけるケース名が「C60」と記されている場合は，ひずみ計測領域がケースＣで固有ひずみ領域が a=b=c=d=60mm であることを示す．

3.1　測定誤差の分散の不偏推定量

固有ひずみ設定領域が異なる６つの解析結果に対して，測定誤差の分散の不偏推定量の変化を Fig. A-2 に示す．固有ひずみ存在範囲を広くしていくと，分散が小さくなり，固有ひずみ分布関数による“あてはめ”精度が平均的には改善されていく．しかし，ケース C70 より広くすると逆にやや大きくなり，僅かな差ではあるが，ケース C70 の分散が一番小さい．

3.2　残留応力と相当応力の比較

同じく６つの解析結果に対して，各要素の残留応力の最確値より相当応力を求め，要素の材料の降伏応力と比較した．又，すべての要素の中での相当応力の最大値も求めた．それらの結果を Table A-1 にまとめた．

Table A-1 を見ると，初期降伏応力を越える要素はすべての結果において存在する．一方，２％硬化降伏応力を越える要素数は，ケース C40 で 37 個，ケース C50 で 21 個，ケース C60 で 16 個，ケース C70 で 0 個，ケース C80 で 2 個，ケース C90 で 13 個である．

3.3　残留応力の偏差の評価

同じく６つの解析結果に対して，残留応力の［偏差／最確値］比の平均値を，各応力成分に対して求めた．その結果を Fig.A-3 に示す．［偏差／最確値］比を求めるにあたり，残留応力の高い領域での精度評価が重要であると考え，応力の最確値の絶対値が 100MPa 以上の高応力値を示す要素のみを対象とした．

３つの応力成分は，C60 あるいは C70 で［偏差／最確値］比が極小値を示し，３成分を平均的に見ると，ケース C70 の比が，一番小さくなっている．

４．まとめ

固有ひずみ分布関数として３次多項関数を使用し，ひずみ計測領域として溶接端部から約 20㎜ 離れた領域を含む範囲を設定したときに，固有ひずみ想定領域が評価結果に与える影響を検討した．即ち，領域の広さが，測定誤差の分散，残留応力の最確値，その偏差に与える影響（感度）を確認した．

測定誤差の分散は，固有ひずみ領域を広くすると，小さくなる傾向があるが，領域範囲 70㎜ において最小となった．

残留応力の相当応力については，固有ひずみ領域範囲 70㎜ のみ，２％硬化降伏応力を超える要素が生じていない．

残留応力の［偏差/最確値］比についても，固有ひずみ領域範囲 70㎜ において最小となることが分かった．

以上のことから，固有ひずみ設定領域としては，a=b=c=d=70㎜ とした場合の評価精度が最も良いことを確認することができた．この領域は塑性ひずみの生成領域よりやや広いと考えられるが，関数表示固有ひずみ法を適用する場合，固有ひずみ設定領域としては，このようなやや広い目の領域を設定することが精度のよい解を得るのに最適な状態になっていると考えられる．

Table A-1 Comparison between equivalent stress and yield stress

Case	Residual stress	Pipe	Weld metal	Plate
C40	Max stress *	564.6	687.3	253.8
	Over initial **	61	15	0
	Over 2% ***	24	13	0
C50	Max stress	363.9	420.4	338.0
	Over initial	53	5	1
	Over 2%	21	0	0
C60	Max stress	383.7	445.3	276.3
	Over initial	104	7	0
	Over 2%	13	3	0
C70	Max stress	282.8	316.4	307.1
	Over initial	148	0	0
	Over 2%	0	0	0
C80	Max stress	286.3	314.3	401.6
	Over initial	173	0	5
	Over 2%	0	0	2
C90	Max stress	304.2	311.1	526.7
	Over initial	209	0	16
	Over 2%	5	0	8

* Max stress : Max of equiv. stress (MPa)
** Over initial : Num. of elem. over initial yield stress
*** Over 2% : Num. of elem. over 2% yield stress

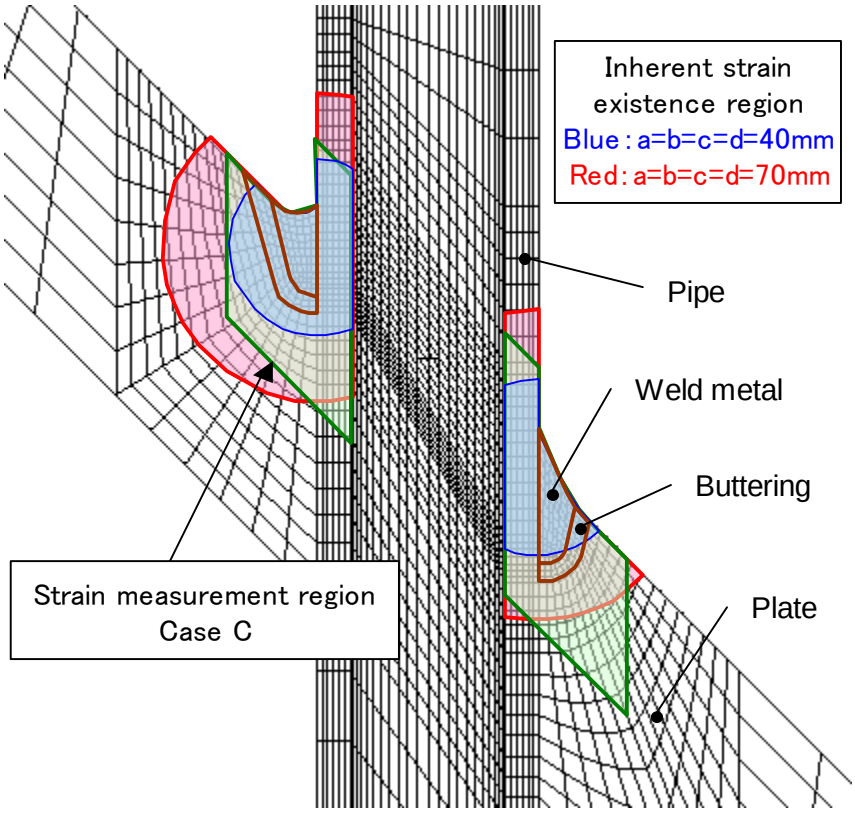


Fig. A-1 Inherent strain existence region and strain measurement region

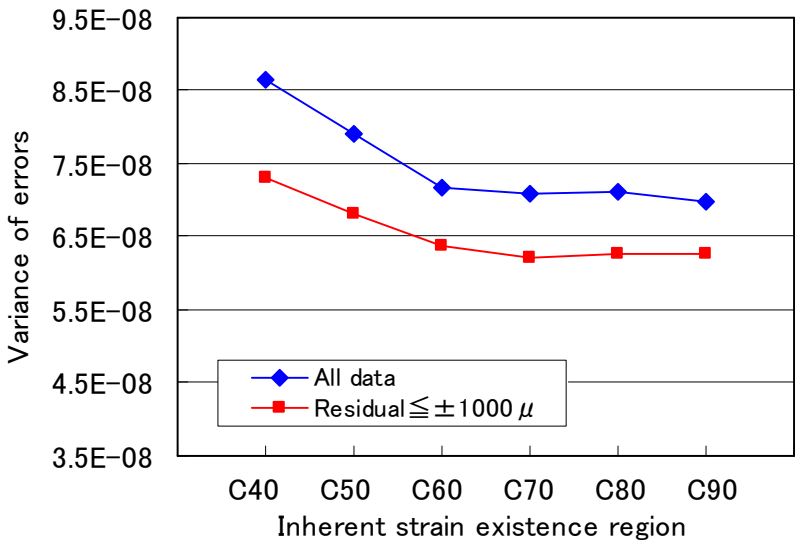


Fig. A-2 Unbiased estimate of variance of errors

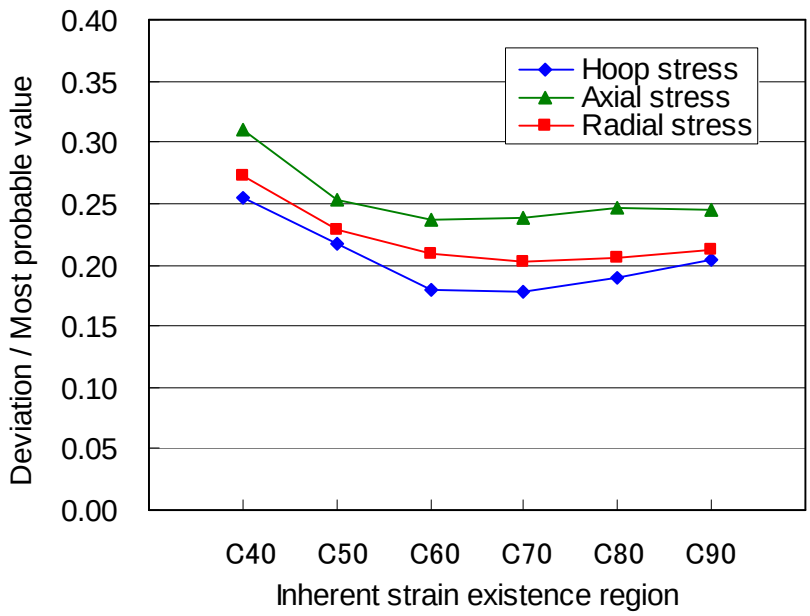


Fig. A-3 Effect of inherent strain existence region on accuracy

本研究に関連した発表論文および特許

雑誌掲載論文

中長 啓治，太田 高裕，小川 直輝，麻 寧緒，濱口 裕充，佐藤 嶺樹，名山 理介:“固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定 -原子炉容器管台貫通部の残留応力測定-”，溶接学会論文集，Vol. 25，No. 4，(2007) 581-589.＜平成１９年度溶接学会論文賞受賞＞

中長 啓治，太田 高裕，小川 直輝，與田 俊介，曽我部 道弘，小川 和夫:“固有ひずみ法による溶接残留応力の測定 -軸対称測定理論の開発と円管継手への適用-”，溶接学会論文集，Vol. 27，No. 1，(2009) 104-113.

中長 啓治，小川 直輝，太田 高裕:“固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定 -固有ひずみ分布関数の適性診断-”，溶接学会論文集，Vol. 27，No. 4，(2009) 297-306.

小川 直輝，中長 啓治:“固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定 -ひずみ計測領域の適性診断-” 溶接学会論文集，Vol. 28，No. 2，(2010) 208-215.

国内会議発表論文

中長　啓治，太田　高裕，小川　直輝，麻　寧緒，濱口　裕充，武田　祐輔：“原子炉溶接継手の残留応力の固有ひずみ法による測定”，溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集，2，(2006)，697-704.

中長　啓治，小川　直輝，太田　高裕：“固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定”，溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集，(2009)，377-384.

小川　直輝，室屋　格，岩本　洋一，太田　高裕，中長　啓治，小川　和夫：“JNES IAF プロジェクトでの PWR 異材継手部に対する残留応力計測技術と解析評価技術の成果”，溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集，(2009)，397-404.

国際会議発表，国内学会発表

中長　啓治，麻　寧緒，諏訪　高典，太田　高裕，小川　直輝：“固有ひずみ関数表示による３次元残留応力測定の FEM プログラム開発”，溶接学会全国大会，東京，(2006.04.13-2006.04.15)，220.

中長　啓治，太田　高裕，小川　直輝，麻　寧緒，山本　広史，濱口　裕充：“原子炉溶接継手の残留応力の固有ひずみ法による測定”，溶接学会全国大会，東京，(2006.04.13-2006.04.15)，222.

K. Nakacho, M. Satou, M. Nayama, T. Ohta, N. Ogawa, N. Ma：“Measurement of Welding Residual Stresses of Reactor Vessel by Inherent Strain Method”, The 8th International Welding Symposium (8WS), Kyoto, Japan, (2008.11.16-2008.11.18), 227.

K. Nakacho, R. Sato, N. Ogawa :“Application of Robust Estimation to Inherent Strain Method for More Accurate Estimation of Welding Residual Stresses”, The 8th International Welding Symposium (8WS), Kyoto, Japan, (2008.11.16-2008.11.18), 228.

N. Ogawa, I. Muroya, Y. Iwamoto, T. Ohta, K. Nakacho, K. Ogawa :“Residual Stress Measurement and Analysis of Dissimilar Metal Surge Line Nozzle”, Proceedings of 2009 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'09), Tokyo, Japan, (2009.05), 9486.

特許

特許第 4533621 号　残留応力測定方法および装置（2010.6.18）

謝　辞

本論文をまとめるにあたり，終始的確な御指導ならびに御鞭撻を賜りました大阪大学接合科学研究所准教授 中長啓治先生に厚く御礼申し上げます．また，本論文を御査読頂きました大阪大学接合科学研究所教授 村川英一先生，大阪大学大学院工学研究科教授 大沢直樹先生，望月正人先生，大阪大学接合科学研究所准教授 芹澤久先生に謹んで感謝の意を表します．

本研究における残留応力の測定評価は，以下に示す２つのプロジェクトの研究成果に基づいています．配管突合せ溶接継手の評価に対しては，独立行政法人原子力安全基盤機構「複雑形状部機器配管健全性実証事業」において，平成１６年度に実施した成果を基にまとめたものです．独立行政法人原子力安全基盤機構 小川和夫氏，及び共同研究者であった当時大阪大学大学院工学研究科の與田俊介氏，曽我部道弘氏に謝意を表します．また，原子炉容器管台貫通溶接部の評価に対しては，経済産業省「革新的実用原子力技術開発提案公募事業」において，平成１５年度に２年計画として採択された研究「３次元溶接構造物の革新的内部残留応力測定及びき裂進展解析の精緻化に関する技術開発（代表：三菱重工業㈱ 名山理介氏）」の成果を基に，測定の精緻化を更に進めたものです．経済産業省及び共同研究者であった三菱重工業㈱ 太田高裕氏，岩本洋一氏，㈱JSOL 麻寧緒氏，諏訪高典氏（当時），当時大阪大学大学院工学研究科の濱口裕充氏，佐藤嶺樹氏に謝意を表します．

会社の通常業務と並行して研究を進める上で，様々な配慮や助言を頂きました，私の上司である三菱重工業㈱ 中馬康晴氏，鶴岡誠司氏に謝意を表します．

最後に，多岐にわたり著者を支えて下さいました両親，妻，息子に心から感謝いたします．