

# コンター法を用いた残留応力測定における FEM モデルの簡略化検討

## Examination of Simplification of FEM Models in Residual Stress Measurement Using the Contour Method



北村 徳識  
Yoshisato Kitamura

### 要 旨

機械加工、熱処理あるいは溶接などによって材料に発生した残留応力は、寸法の安定性や疲れ強度などに影響をおよぼすので、残留応力の測定は重要である。今回、残留応力の測定手法の一つとしてコンター法に注目した。しかし、機械部品の断面形状は複雑であり、コンター法を適用するにあたってはモデル簡略化が必要と考えられる。そこで、本報告では、適用事例が少ない薄板溶接試験片にコンター法を適用し、モデル簡略化の影響を検討した。

### — Synopsis —

Residual stress generated in materials by machining, heat treatment, or welding affects dimensional stability and fatigue strength, so it is important to measure residual stress. In this study, we focused on the contour method as one of the methods to measure residual stress. However, the cross-sectional shape of mechanical parts is often complicated, and model simplification is considered necessary for applying the contour method. Therefore, in this report, we applied the contour method to a thin welded specimen, which has not been frequently applied, and examined the influence of model simplification.

### 1. 緒言

機械加工、熱処理あるいは溶接などによって材料に発生した残留応力は、寸法の安定性や疲れ強度などに影響をおよぼすので、残留応力の測定は重要である。表1に示すように、残留応力測定にはいくつかの手法があり、非破壊法であるX線応力測定法や、破壊法のひずみゲージ法等がよく知られている。しかし、X線応力測定法は物体の極表面のみの残留応力を測定できる手法であり、ひずみゲージ法はゲージを貼った箇所近傍のみの残留応力を測定できる手法であるため、厚肉部品内部の広範囲な残留応力を平易に測定できる手法ではない。一方、コンター法は汎用の切断装置、計測設備および数値解析を利用して、注目している断面に垂直な方向の2次元応力分布を得ることが可能な手法である<sup>(1)・(2)</sup>。ただし、通常の機械部品は長手方向の断面の形状変化が複雑であり、コンター法を適用するためにはモ

デルの簡略化が必要である。しかし、モデルの簡略化が残留応力の評価に影響をおよぼすことが考えられる。そこで、本報告では、適用事例が少ない薄板溶接試験片(以後、試験片)にコンター法を適用し、モデル簡略化の影響を評価した。

### 2. コンター法の概略

コンター法は、2001年に米国のLos Alamos国立研究所で考案された、工業製品内等の残留応力分布の測定技術として、近年注目されている。本手法では、一般的な機械工場で汎用されている機器を使用し、部材内の注目している断面の垂直方向に作用する残留応力の2次元分布を得ることができる。以下に原理について説明する。図1の状態1のような応力分布をもつ板モデルがあると仮定すると、この板内の注目している断面において二つに切断する際、切断面の垂直方向に作用している残留応力場の分布が緩和され、状態2のように二つの切断表面は鏡面対称に弾性変形する。状態3は、この弾性変形した表面のX軸方向の変位分布を測定し、FEM解析で変位分布を強制的に元の形状に戻した状態であり、この解析で元の形状に戻すため必要な仮想の応力が計算される。具体的には、線形弾性応力解析により、状態2で得られた二つの切断表面の変位分布の平均値を、切断部品のFEMモデルの切断面に逆変位として与えることで得られる。なお、変位分布は微小であるため、FEMモデルは厳密な形状ではなく切断面が平坦な状態でも高精度な計算が可能であるといわれている。また、コンター法における切断時の弾性変形は、切断前の注目断面に垂直方向に作用する残留応力の緩和により生じたもののみと仮定するので、図1では注目断面における、X軸方向のみの残留応力評価となる。

表1 各種残留応力把握手法の概略

手法	特徴
X線 応力測定法	表面の残留応力を測定
中性子線 応力測定法	数十mm以上の厚肉の製品を測定可能(設備が極少数)
ひずみ ゲージ法	ゲージを貼った箇所近傍の応力を測定
センター ドリル法	深さが数mmまで、かつゲージを貼った箇所近傍の応力を測定
DHD法	穿孔した箇所の応力を測定
コンター法	注目断面に垂直な方向の2次元応力分布を測定

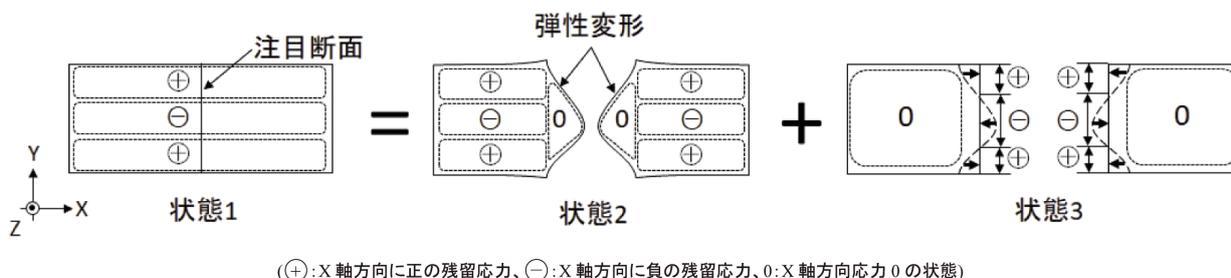


図1 コンター法の原理模式図

### 3. 試験片の準備

本報告で対象とする試験片を図2に示す。SUS304ステンレス鋼板(縦150mm×横100mm×板厚3mm)にTIG溶接にて、YS308溶加棒のビードオン溶接を3パスしたものを準備した。この試験片は座屈しており、非常に大きな残留応力が存在している。また、溶接部はY方向の幅の中央線から若干ずれて施工されている。一般的に溶接後の残留応力分布は、図3に示すように、溶接線方向(X軸方向)に対して、溶接部の中央付近では引張残留応力、溶接部から板幅方向にある程度離れた箇所では圧縮残留応力が発生することが知られている<sup>(3)</sup>。解析では、溶接部表面側において、コンター法でのX軸方向の中央断面におけるX軸方向残留応力分布が、図3に示す応力分布と様相が定性的に一致すること、特に溶接部表面側に引張残留応力が発生することについて検証を行った。



(a) 溶接部表面 (b) 溶接部裏面



(c) 側面

図2 試験片

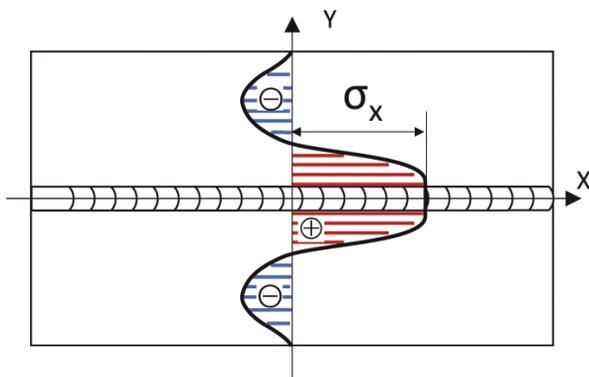
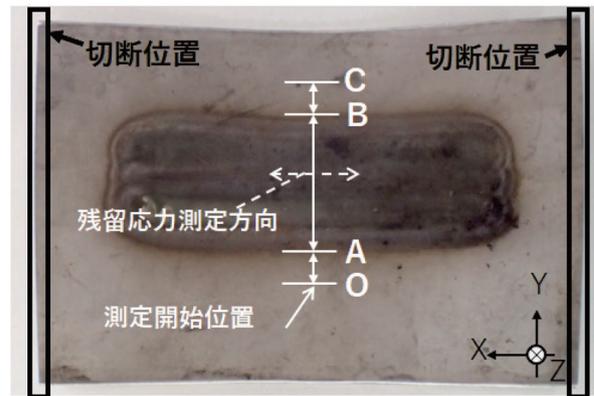


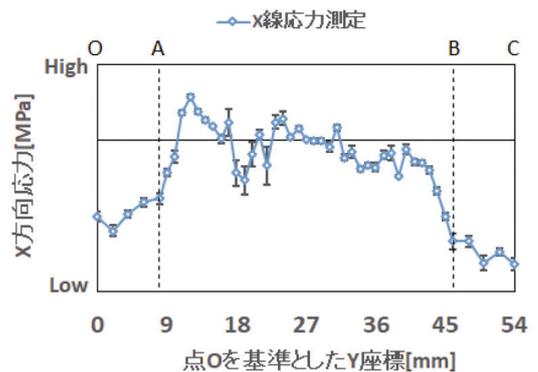
図3 溶接部表面側における溶接後のX軸方向残留応力分布の模式図

### 4. X線による試験片の残留応力測定

コンター法に先立ち、溶接部のX軸方向中央部におけるX軸方向の残留応力をX線応力測定法にて測定した。測定装置はリガク・ホールディングス株式会社製のAutoMATEであり、管球はCrである。応力測定位置は図4(a)に示す溶接部裏面のO-C間である。溶接部の裏面を測定対象とした理由は、溶接部表面は熱影響等で組織が不安定であり、残留応力の評価が難しいためである。なお、後工程に必要な基準面を設定するため、測定前に試験片のX軸方向両端部の一部を切断した。各切断位置は中央の切断予定位置から十分離れているので、サンプルの原理より、コンター法における残留応力解析には影響しない。図4(b)に、X線による応力測定結果を示す。溶接部表面とは異なり、裏面中央部では、ほぼ残留応力が発生していないが、両Y軸方向に進むにつれて、圧縮残留応力が発生していた。



(a) 応力測定位置



(b) 測定結果

図4 溶接部裏面におけるX線応力測定結果

### 5. 試験片の切断と変位測定

コンター法の解析に必要な変位を発生させるため、試験片の X 軸方向の中央断面を板幅方向にワイヤーカットした。諸事情により切断位置は X 線応力測定位置から X 軸に対して数 mm ずれた位置となった(図 5)。しかし、X 線応力測定位置の極近傍であるため、X 軸方向の応力分布、および切断面に発生する変位への影響は同程度と考えられる。

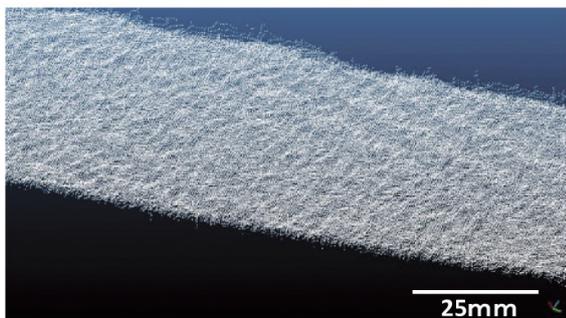
切断面の変位分布の測定には、カールツァイス株式会社製の三次元測定機 COMET L3D 5M を用い、図 6 に示す座標点群を得た。さらに図 7 に示すように、座標点群にノイズ除去やスムージング処理などを実施し、解析用の変位分布および CAD モデルを作成した。なお、切断後に得られた最大変位は X 軸方向範囲に約  $330 \mu\text{m}$  であった。



図 5 裏面から見た切断位置



(a) 断面での座標点群



(b) 枠部拡大

図 6 切断位置における座標点群

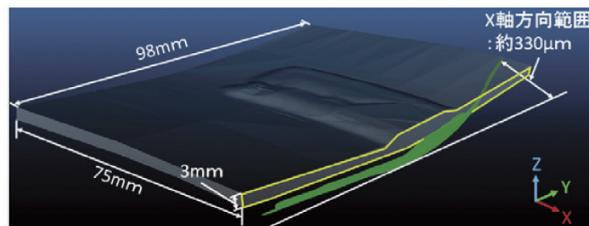


図 7 変位曲面(緑色)と CAD モデル(変位曲面は強調表現)

### 6. 応力解析

解析には汎用有限要素解析コード ANSYS 2020 R2 を用い、CAD モデルから作成した FEM モデルに変位分布を反映して応力解析を実施した。解析条件は、図 8 に示すモデルを用いた弾性解析とし、解析結果評価位置は X 線応力測定を実施した位置とした。物性値は SUS304 の常温時のデータ<sup>(4)</sup>、ヤング率 198.5 GPa、ポアソン比 0.294 を使用した。

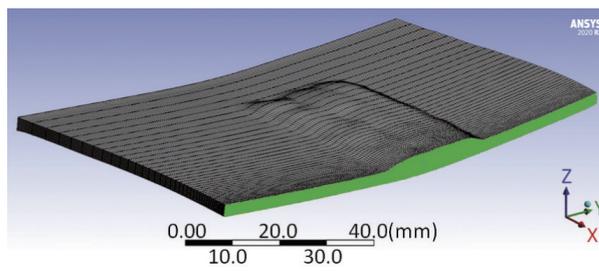
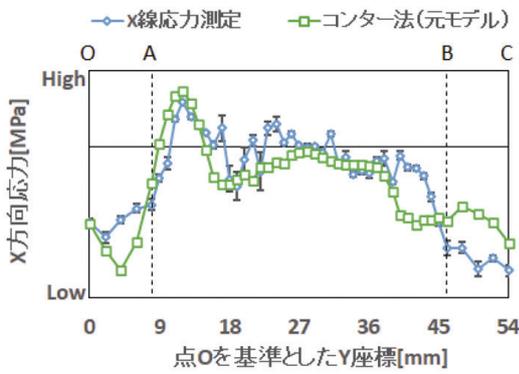


図 8 FEM モデル(断面: 変位分布付与位置)

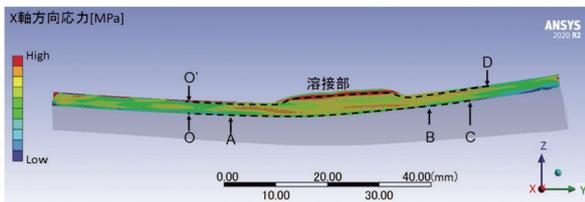
図 9 にコンター法による解析結果を示す。まず、O-C 間における応力は X 線応力測定法の結果に対して、A-B 間における最大値と圧縮応力分布の傾向、また O-A と B-C 間では圧縮応力分布の傾向が相似した(図 9 (a))。断面内の溶接部においては、比較的大きな引張応力が発生していることが確認された(図 9 (b))。また、解析結果における溶接部表面側の残留応力分布を確認するため、図 9 (b)に示す溶接部表面近傍の O'-D 間において、X 軸方向残留応力分布を取得した。その結果、中央近傍では引張応力分布、溶接部近傍から離れた場所では圧縮応力分布となり、図 3 で示したような応力分布と定性的に一致した(図 9 (c))。

## 7. FEMモデル簡略化の検討

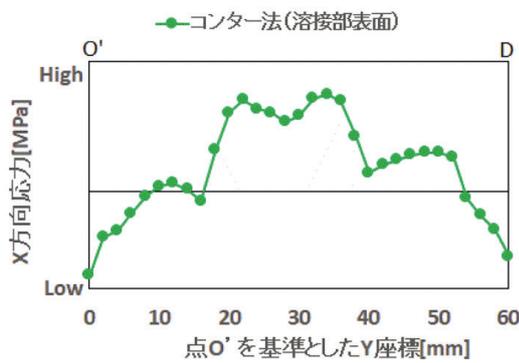
今回の試験片は座屈により鞍形の複雑な曲面で構成されており、FEM モデル作成に多大な時間を要する。しかし、FEM モデルを簡略化した場合においても精度の高い解析解が得られるのであれば、より効率的な解析が可能となる。そこで本報告では、次の三案のモデル簡略化案を提案し、それらが解析結果におよぼす影響を評価した。第一案は、元モデルを X 軸方向に半分以下の長さまで短縮化したモデルである。この案では、切断面から 10 mm 範囲と 35 mm 範囲のモデル(以後、短縮化 10 mm モデル(図 10 (a))、短縮化 35 mm モデル(図 10 (b)))を作成した。



(a) O-C 間における応力の比較

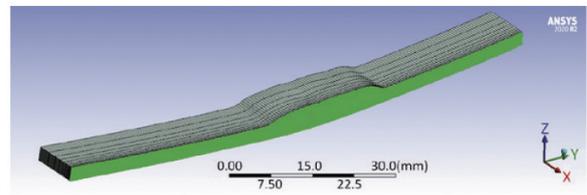


(b) 断面における X 軸方向応力分布

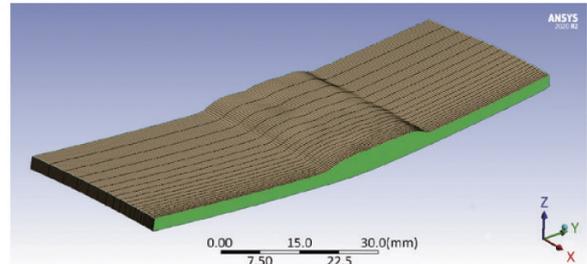


(c) O'-D 間における応力

図 9 コンター法による断面の X 軸方向応力分布



(a) 短縮化 10 mm モデル



(b) 短縮化 35 mm モデル

図 10 第一案：X 軸方向短縮化 FEM モデル (断面：変位分布付与位置)

第二案は、切断面を元の長さまで X 軸方向に単純押し出したモデル(図 11)であり、X 軸方向の曲率を無視した場合の影響を評価するものである。第三案は前述 2 案を組み合わせることで簡略化するので、短縮化による影響と曲率を無視した際の影響を評価することを目的とする。各モデルは、10 mm 長さで 35 mm 長さの切断面単純押し出モデル(以後、単純押し出 10 mm (図 12 (a))モデル、単純押し出 35 mm モデル(図 12 (b)))である。なお、断面に付与する変位分布は 5 章で得られた測定結果を使用した。

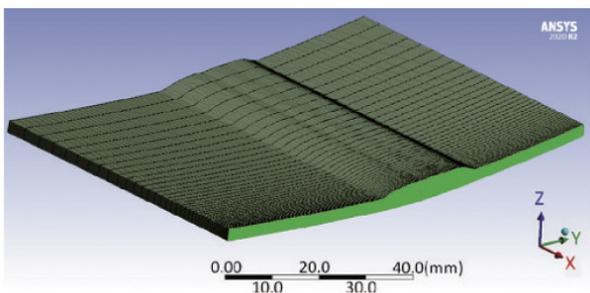
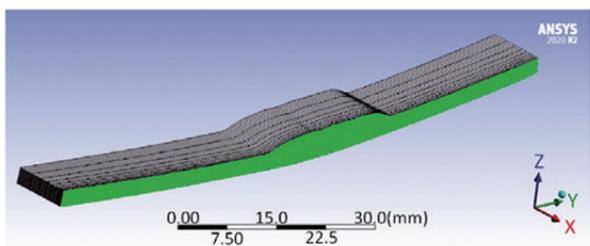
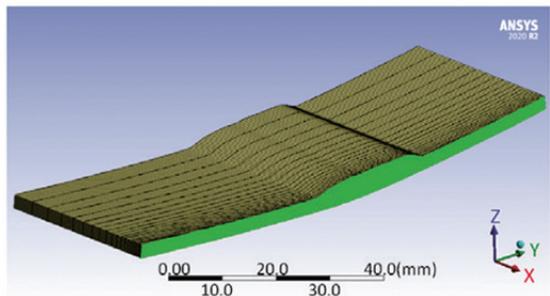


図 11 第二案：断面単純押し出モデル  
(断面：変位分布付与位置)



(a)単純押し出 10 mm モデル

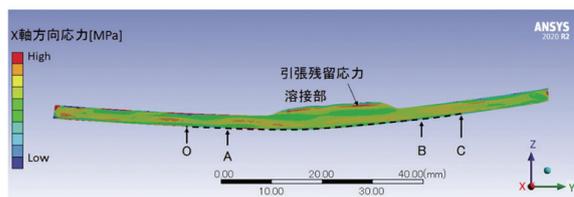


(b)単純押し出 35 mm モデル

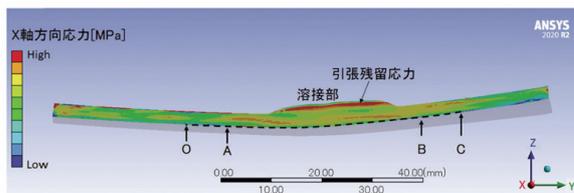
図 12 第三案：断面単純押し出モデルの短縮化  
(断面：変位分布付与位置)

## 8. 解析結果

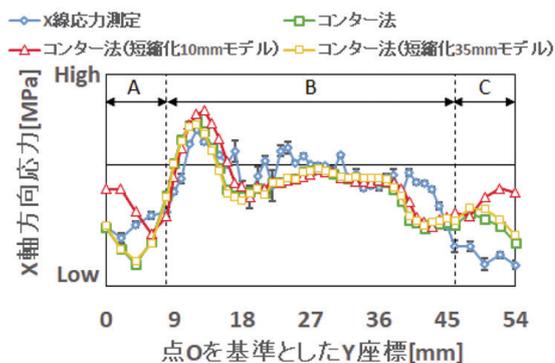
第一案における解析結果を図 13 に示す。短縮化 35 mm モデルでは、表面の引張応力分布は元モデル(図 9 (b))と同様の分布であるが(図 13 (b))、短縮化 10 mm モデルでは、特に溶接部表面の引張応力が元モデルより緩和されていた(図 13 (a))。また、O-C 間における応力分布を比較すると(図 13 (c))、元モデルと短縮化 35 mm モデルでは同程度の応力分布であったが、短縮化 10 mm モデルでは、O-A 間、B-C 間において元モデルの解析結果とは異なり圧縮応力が緩和されていた。



(a) X 軸方向応力分布(短縮化 10mm モデル)



(b) O-C 間における応力(短縮化 35mm モデル)

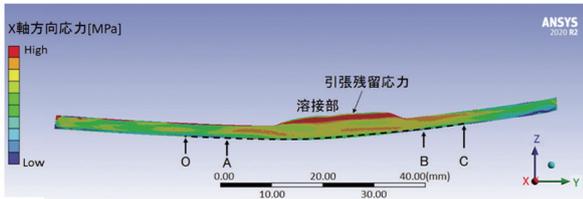


(c) O-C 間における応力の比較

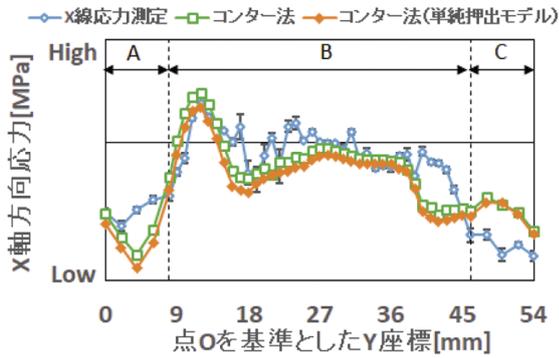
図 13 第一案の解析結果

第二案における解析結果を図 14 に示す。表面の引張応力分布は元モデルの解析結果と同程度であったが(図 14 (a))、O-C 間における解析結果は圧縮応力が若干増加した(図 14 (b))。

第三案における解析結果を図 15 に示す。元モデルでの解析結果と比較して、表面の引張応力分布は、単純押出 35 mm モデルは元モデルと同程度であるが(図 15 (b))、単純押出 10 mm モデルでは、元モデルより引張応力が減少していた(図 15 (a))。O-C 間での応力分布を比較すると(図 15 (c))、元モデルと短縮化 35 mm モデルでは同程度の結果であり、短縮化 10 mm モデルでは、特に O-A 間、B-C 間で元モデルの解析結果と異なっていた。

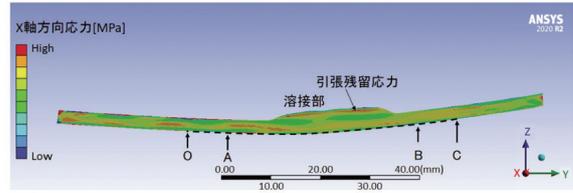


(a) 断面における X 軸方向応力分布

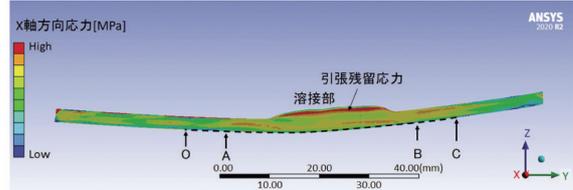


(b) O-C 間における応力の比較

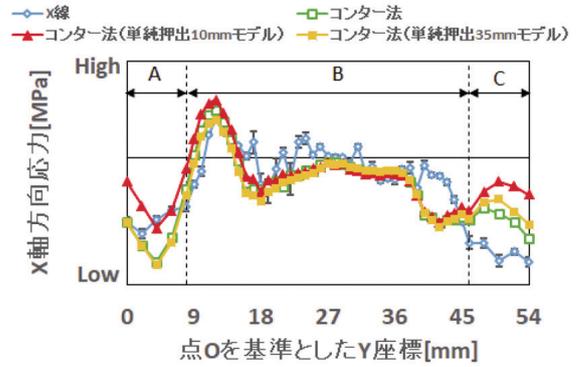
図 14 第二案の解析結果



(a) X 軸方向応力分布(単純押出 10mm モデル)



(b) X 軸方向応力分布(単純押出 35mm モデル)



(c) O-C 間における応力の比較

図 15 第三案の解析結果

ここで、モデル簡略化の影響を評価するため、評価区間の応力分布の指標  $E$  (式(1)~式(4)、図 16)を定義し、O-Cの各区分および全区間で  $E$  値を算出した(表 2)。なお、表中の数値は元モデルの評価値で規格化した。

$$E = \frac{\sum_k^{n-1} (\sqrt{(1-S_k)^2 \cdot \Delta L_k})}{L} \quad (1)$$

$$S_k = \frac{\sigma_{S_k} - \sigma_{O_k}}{\sigma_{O_k}} \quad (2)$$

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{i+1} + \sigma_i}{2} \quad (3)$$

$$\Delta L_k = Y_{i+1} - Y_i \quad (4)$$

( $n$ : 測定点数,  $i$ : 1~ $n$ ,  $k$ : 1~ $n-1$ )

ここで、各変数は以下の通り。

$E$ : 各区分での評価値

$L$ : 各区分の距離

$S_k$ : 各評価点での評価値

$\sigma_{O_k}$ : 元モデルでの  $\sigma_k$

$\sigma_{S_k}$ : 簡略化モデルでの  $\sigma_k$

$\sigma_i$ : 解析の応力値

$\sigma_k$ : 隣接2点間における解析の応力平均値

$\Delta L_k$ : 隣接2点間の距離

$Y_i$ : 点 O を基準とした測定点の Y 座標

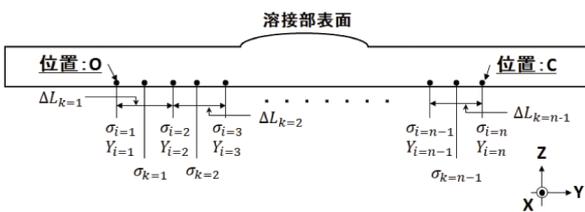


図 16 評価指標  $E$  に用いる各変数の模式図 (O-C 間の場合)

表 2 元モデルに対する簡略化モデルの評価値

評価区分	O-C 間	O-A 間	A-B 間	B-C 間
元モデル	1.00	1.00	1.00	1.00
短縮化 10 mm モデル	1.17	1.38	1.09	1.36
短縮化 35 mm モデル	1.05	1.00	1.04	1.13
単純押出 モデル	0.83	0.85	0.79	0.96
単純押出 10 mm モデル	1.10	1.41	0.96	1.45
単純押出 35 mm モデル	0.99	0.95	0.97	1.15

## 9. 考 察

表 2 より、O-C 間において、元モデルと短縮化 35 mm モデルおよび単純押出 35 mm モデルの評価値の比較より、これらの簡略化モデルは元モデルとほぼ同等の結果となった。他方、短縮化 10 mm モデルおよび単純押出 10 mm モデルは全区間において、評価値が悪化した。コンター法では、切断面の変形に重大な影響を与える領域内で、試験片の剛性が対称であることが要求される。この仮定は切断表面からサンプルの代表長さの 1.5 倍を超えない範囲まで拡張することができる<sup>(1)</sup>。代表長さは多くの場合、試験片の厚さで、最大断面寸法を採用することが望ましいといわれ<sup>(1)</sup>、各押出 10 mm モデル長さはこの仮定を満たすが、今回の試験片は薄板 (3mm) であるため、厚さの 3 倍以上のモデル長さであっても、モデル長さが不足していたと推測される。これらのことから、最大変位の約 330  $\mu$ m の約 100 倍以上である 35 mm モデルであれば、元モデルと同等の解析結果となることが示唆されたが、短縮化の下限については今後の検討が必要であると考えられる。

また、元モデルと単純押出モデルの X 軸方向応力と評価値を比較すると、単純押出モデルにおける応力値が元モデルより低く、また評価値も 1.00 を下回っている。これは、変位分布を付与する方向に対して、元モデルには曲率が存在していることに起因すると考えられる。従来のコンター法の拘束条件では、解析時の曲がり変形や回転の影響が大きいのが、単純押出モデルは曲率を考慮していないのでそれらの影響が小さく、評価値に差が生じたと考えられる。そのため、今回のような曲率をもつ薄板モデルでは、より最適な解析条件の検討が必要であると考えられる。

そして、各短縮化モデルと各単純押出モデルを比較すると、全区間である O-C 間と溶接部直下の A-B 間では、各単純押出モデルのほうが同じ長さの各短縮化モデルよりも評価値が良好であるが、溶接部近傍の O-A 間と B-C 間では各短縮化モデルのほうが評価値は良好であった。これらのことから、モデルの曲率の影響を示唆しているが、曲率の大きさやモデル長さによって変化するため、これらの定量的評価も今後の課題である。

## 10. 結 言

本報告では、溶接後の薄板試験片に対してコンター法を適用し、中央断面近傍での X 軸方向の残留応力分布を評価した。また、薄板試験片が座屈して曲率をもっていたことから、複雑なモデルであるにとらえ、本モデルの簡略化した際の影響について検討した。主な結果を以下に示す。

- 1) 本試験片に対しコンター法を適用した結果、溶接部表面側に引張応力の再現や、裏面における X 線応力測定結果と定性的な一致が認められた。
- 2) 単純に長さ方向を短縮化する簡略化の場合、最大変位分布の約 100 倍以上の長さを確保したモデルであれば、短縮化前と同等の結果が得られることが示唆されたが、短縮化の下限については今後も検討が必要である。
- 3) 今回のような曲率をもつ薄板モデルで通常のコンター法と同様の拘束条件で解析した場合、曲がり変形や回転の影響が大きくなることが懸念されたため、より最適な解析条件の検討が必要である。
- 4) 各短縮化モデルと各単純押出モデルの比較より、今回のモデルでは曲率が評価値に影響していることが示唆されたが、モデルによって曲率の大きさや長さが増えるため、異なるモデルでの短縮化や単純押出の検証を通して、簡略化時の影響の定量的評価が今後の課題である。

## 参 考 文 献

- (1) Michael B. Prime and Adrian T. DeWald: Practical Residual Stress Measurement Methods, "The Contour Method", pp. 109-138, (2013)
- (2) 高倉 大典, 深澤 大志: コンター法による部材内部の残留応力測定技術, IIC REVIEW No.62, pp. 38-44
- (3) 寺崎 俊夫: 3-4 溶接変形と残留応力, 溶接学会誌, 78 巻 (2009) 2 号, pp. 139-146
- (4) 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 (IAF) 事業 原子炉圧力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集", p21, (2013)