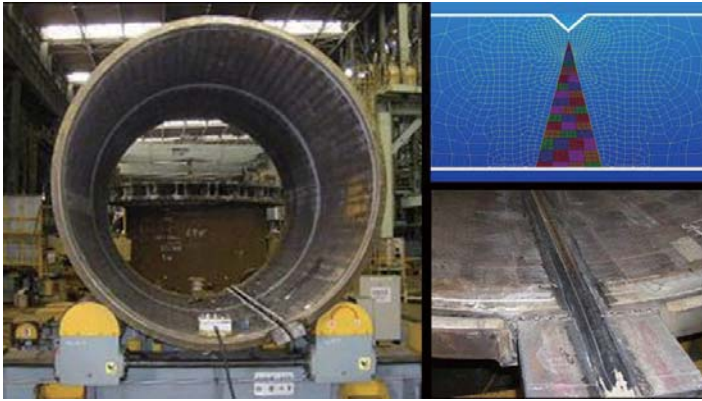


# 大規模解析による圧力容器長手多層溶接の変形予測

Prediction of Distortion in Longitudinal Multi-pass Welding of Pressure Vessel by Large Scale Analysis



山田 順也 Junya Yamada ①  
 中谷 光良 Mitsuyoshi Nakatani ②  
 森田 智大 Tomohiro Morita ③  
 昌谷 哲 Tetsu Sakaya ④

## あ ら ま し

有限要素法による大規模熱弾塑性解析を実施し、内径約10mの社内最大級の圧力容器長手多層溶接の変形量を計算した。メモリ使用量が小さく計算時間短縮が可能な理想化陽解法FEMを用いることにより、従来の計算手法では困難であった3次元実機モデルでの溶接変形を計算した。

解析により予測した変形量を逆ひずみとして与えることにより、溶接後の容器形状は真円に近づき、矯正作業を省略できる。よって、高品質な現地製作、あるいは製作工程の簡略化によるコストダウンが期待できる。

## Abstract

We conducted a large-scale thermal elastic plastic analysis using the finite element method to calculate the deformation amount of longitudinal multilayer welding in a pressure vessel measuring 10 meters in inside diameter—the largest in our company. We were able to calculate an actual 3D model, which is difficult to calculate by conventional methods, thanks to the reduced memory consumption and computing time of Idealized Explicit FEM.

By constructing a preset distortion obtained from the calculation, the shape of the vessel comes close to a true circle, and reformation can be skipped. This shows promise for high-quality on-site manufacturing and, through a simplified manufacturing process, cost reductions.

## 1. 緒 言

当社の主力製品のひとつである石油精製用リアクターおよび化学プラント用などの各種圧力容器は主に有明工場やインドの合弁会社であるISGEC Hitachi Zosen Limitedで製造しており、その製作過程ではサブマージアーク溶接を用いた多層溶接が行われている。当社で製作している圧力容器の板厚は100mmから200mmという極厚板であり、溶接変形が発生した場合、溶接後の修正曲げに多大な時間とコストがかかってしまう。また、近年では圧力容器が大型化してきており、直径が10mを超えるような大口径リング部材の製作が必要となってきた

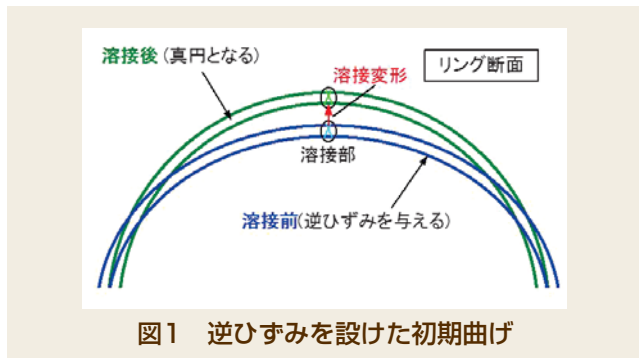
いる。このような大口径リング部材は輸送が困難であることから、例えば、周方向に分割した状態で現地を持ち込まれ、現地溶接されて組み立てられる場合がある。しかしながら、現地には大型の変形矯正のためのプレス機等を持ち込めないことから長手溶接を現地で行う場合に生じた溶接変形を矯正する修正曲げができない。溶接変形を予測できれば、図1に示すような逆ひずみ（溶接後に目的とする形状になるように、溶接で生じる変形と逆方向に予め曲げを加えておく施工法）による対策で、溶接後に真円に近づけられるものと考えられる。つまり、適正な逆ひずみ量を算出できれば、現地製作でも矯正作業の不要な製造が可能となる。さらに、工場内での製作においても、精度よく溶接変形を予測できれば矯正作業が不要となり、製作工程の簡略化によるコストダウンが期待できる。そこで、本研究では逆ひずみ量を求めるため、有限要素法による大規模熱弾塑性解析を実施し、圧力容器多層長手溶接の変形を計算した。

① 日立造船㈱ 技術開発本部 機械・インフラ研究室

② 日立造船㈱ 技術開発本部 機械・インフラ研究室 博士(工学)、大阪大学接合科学研究所 特任准教授

③ 日立造船㈱ 機械・インフラ本部 プロセス機器ビジネスユニット プロジェクト部

④ 日立造船㈱ 機械・インフラ本部 機械事業部 製造部

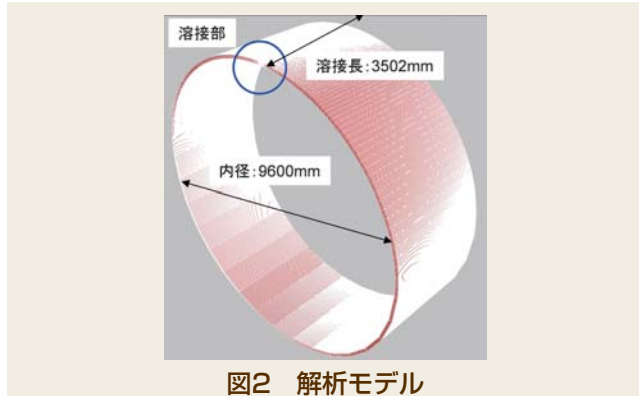


## 2. 解析方法

**2.1 理想化陽解法FEMによる大規模熱弾塑性解析**  
一般的に溶接変形は経験式や実験式に基づいて予測され<sup>1)</sup>、施工条件や継手形状が複雑な場合には数値解析が用いられる<sup>2)</sup>。従来の溶接変形を予測する数値解析である熱弾塑性解析では計算時間やモデルサイズの制約のために、解析対象はパス数の少ない溶接や実験で使用する試験体サイズのモデルに限定され、実機サイズで厚板多層溶接を解析することは困難であった。

従来から熱弾塑性解析に適用されてきた静的陰解法では、計算ステップごとに解析領域の全体剛性方程式を構築し、それを解く必要がある。しかし、近年、柴原らによって開発された理想化陽解法FEM<sup>3) 4)</sup>は動的陽解法を基にした計算手法であり、解析領域の全体剛性方程式を解く必要が無く、自由度ごと、要素ごとに独立した計算のみで解析を進めることが可能である。また、平衡方程式中の慣性項と減衰項を付加したことによる動的効果を抑えながら、静的平衡状態に達するまで時間ステップを進めて計算を行う。そのため、メモリ使用量が小さく計算時間を短縮できる。また、解析精度についても大規模な多層溶接解析モデルにより検証されており、静的陰解法と同等の解析精度で大型構造物の変形解析が可能である<sup>4)</sup>。そこで、実機サイズの溶接変形解析を実施するにあたり、従来法と同等の解析精度を保ちつつ、解析時間を短縮できる理想化陽解法FEMを適用した。

**2.2 解析モデル** 図2に解析モデルを示す。実機サイズの圧力容器を模擬したモデルであり、内径は9600mm、長さは3502mm、板厚は96mmである。実機では半円状の2枚の鋼板を溶接するため、継手は2箇所



あるが、基礎解析である今回の計算では、計算時間短縮のため継手は一箇所とした。開先は実施工で適用されているX開先とした。溶接線始末端のタブ板については、溶接変形には大きな影響を及ぼさないために今回の解析ではモデル化せず溶接の始末端は解析モデルの両端とした。溶接部の最小要素サイズは1mm程度と細かく分割しており、溶接線方向には240分割(要素長15mm)した。本モデルにおける全節点数は463,680で、全要素数は509,895である。従来の熱弾塑性解析手法では、3万要素程度が限界であり、その約17倍のモデルである。

**2.3 溶接条件** 開先形状とパス割を図3に示す。色付けされた部分は、別途、工場内溶接で施工された試験片から得られた溶接のパス割を示している。BP (Backing Pass) 溶接側およびFP (Finishing Pass) 溶接側の2方向から溶接する。まず、BP溶接で開先の大部分を溶接し、その後、裏はつりを行い、残りのFP溶接を行う。表1に示す溶接条件は工場内の実施工で行われているサブマージアーク溶接によるもので、BP溶接は全38パスでFP溶接は全9パスである。計算における熱効率<sup>5)</sup>は90%とした。裏はつりに関しては、要素を取り除くことで再現し、その際に応力を再分配した。なお、今回の解析では、溶接変形にあまり影響を与えないことから予

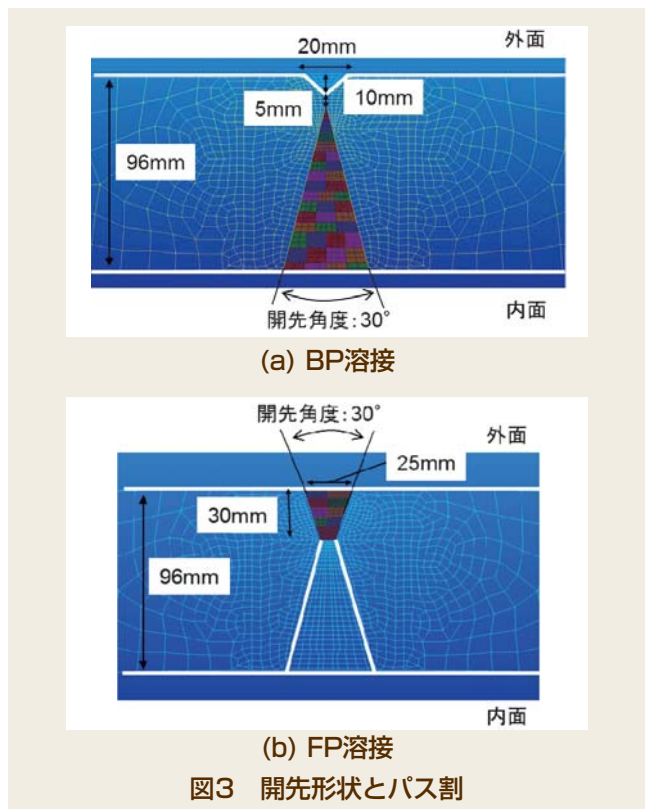


表1 溶接条件

パス	電流 $I$ (A)	電圧 $U$ (V)	溶接速度 $v$ (mm/s)	トーチ数
BP1~2	450~530	31~33	28~30	シングル
BP3~4	580~600	35~37	30	
BP5~7	450~500	32~33	30~35	
BP8~36	580, 580	32, 34	60	タンデム
FP1~2	510~530	32~33	30	シングル
FP3	580	34	30	
FP4~6	450~550	30	30	
FP7~9	580	32	30	

熱および後熱を考慮せず、初期温度およびパス間温度を20℃とした。

**2.4 材料物性** 材料物性には炭素鋼SA516Gr70 (ASME Section II, Part D) の値を用いた。図4および図5に示すように熱伝導率、比熱、ヤング率、降伏応力および線膨張係数には温度依存性を考慮した値を用いた。表2に示す材料物性は温度依存性を考慮せず、一定とした。また、本解析は弾完全塑性解析とし、加工硬化は考慮していない。

本解析では板表面から外気へ放出する熱量を(1)式に示すように、熱伝達による熱流束と熱放射による熱流束の和とした。(1)式を(2)式のように変形して、(3)式に示す熱放射を考慮した熱伝達係数 $a_c'$ を用いた。各温度における熱伝達係数を図6に示す。なお、本解析における放射率 $\varepsilon$ は0.8とした。

$$q = a_c(T - T_c) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_c^4) \quad (1)$$

$$q = (T - T_c) \left\{ a_c + \varepsilon\sigma(T + T_c)(T^2 + T_c^2) \right\} \quad (2)$$

$$a_c' = a_c + \varepsilon\sigma(T + T_c)(T^2 + T_c^2) \quad (3)$$

ただし、 $q$  (W/mm<sup>2</sup>) : 外気へ放出するエネルギー、 $a_c$  (W/mm<sup>2</sup>×℃) : 熱伝達係数 (=0.00001)、 $\varepsilon$  : 放射率 (=0.8)、 $\sigma$  (W/mm<sup>2</sup>/℃<sup>4</sup>) : ステファン・ボルツマン係数 (=5.67×10<sup>-14</sup>)、 $T$  (℃) : 境界面の温度、 $T_c$  (℃) : 外気の温度 (=20℃)、 $a_c'$  (W/mm<sup>2</sup>×℃) : 熱放射を考慮した熱伝達係数

**2.5 解析方法** 本解析では、まず溶接による熱伝導解析を行い、その結果を基に弾塑性解析を行い、溶接変形を計算した。熱伝導解析では、陰解法FEMにより溶接中および冷却中の各要素における温度を計算

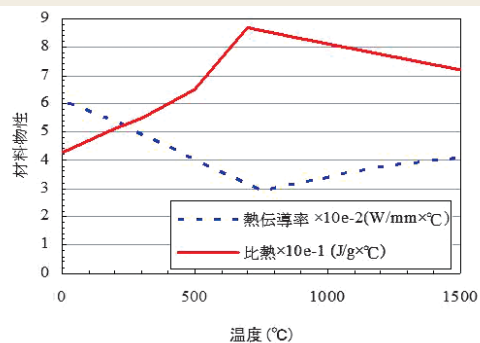


図4 熱伝導解析に用いた材料物性

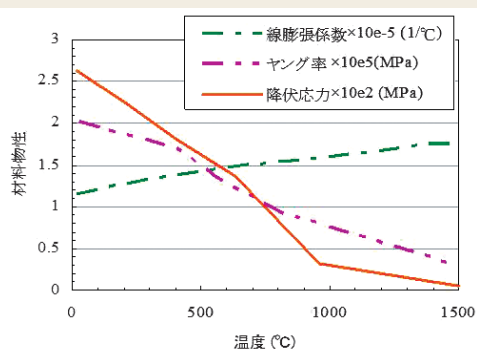


図5 熱弾塑性解析に用いた材料物性

表2 温度依存性を考慮しない材料物性

熱伝達率(W/mm <sup>2</sup> ×℃)	0.00001
密度(g/mm <sup>3</sup> )	0.00785
ポアソン比	0.3

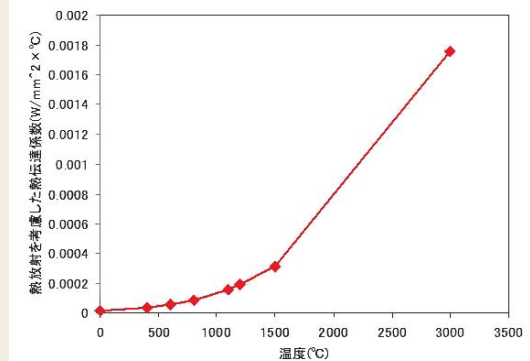


図6 熱伝達係数

した。本解析では移動熱源により溶融プールを再現するため、熱源の横断面方向の加熱範囲は溶着金属にあたる要素集合とし、熱源の長さはプール長を目安にシングルトーチの溶接では70mmでタンデムトーチの溶接では170mmとした。熱伝導解析における時間増分は溶接速度と溶着金属の要素サイズにより決定した。溶接による加熱・冷却過程の温度履歴を計算するためには、熱源がその時間増分で溶接線方向の1要素の長さを越えないように設定する必要があるため、1要素の長さ約15mmとタンデムトーチの溶接速度60cm/minから時間増分を1秒とした。弾塑性解析では理想化陽解法FEMを適用した。熱伝導解析で得られた1ステップ分の温度増分により発生する荷重を外力として静的平衡状態になるまで(4)式の繰り返し計算を行い、収束解を得た。なお、質量マトリックスおよび減衰マトリックスは収束速度を上げるため、対角成分のみ0ではない対角マトリックスとして計算した。

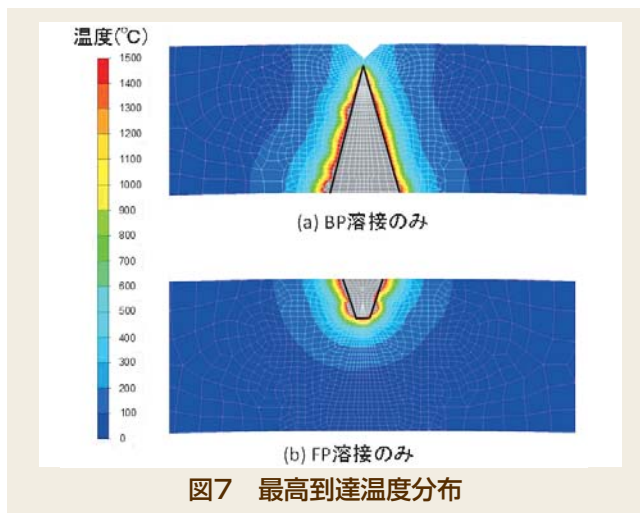
$$\left( \frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{U\}_{t+\Delta t} = \{F\}_t - \left( [K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right) \{U\}_t - \left( \frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{U\}_{t-\Delta t} \quad (4)$$

ただし、 $[M]$ : 質量マトリックス、 $[C]$ : 減衰マトリックス、 $[K]$ : 全体剛性マトリックス、 $U$ : 変位、 $F$ : 外力、 $t$ : 時間

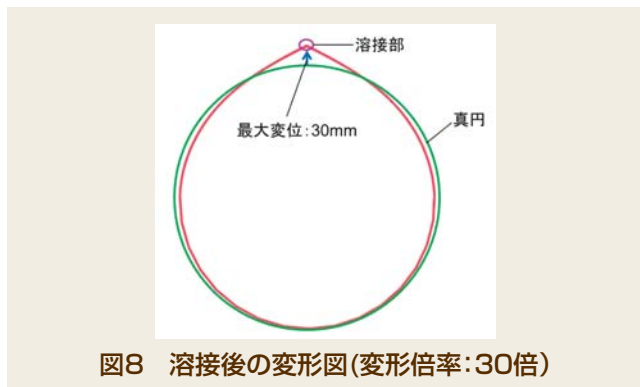
### 3. 解析結果

**3.1 最高到達温度分布** 図7にBP溶接のみおよびFP溶接のみの最高到達温度分布を示す。図中の灰色の範囲が1500℃以上に加熱された領域であり、実線で示した開先形状に対し解析における溶込み形状を表している。溶接変形を高精度に計算するためには、実際の溶接入熱を熱伝導解析で再現し、まず、溶込み形状を実際のものとは一致させることが必要である<sup>6)</sup>。図7ではBP溶接、FP溶接ともに開先部がほぼ溶融しており、与えた入熱条件は妥当な値であると言える。





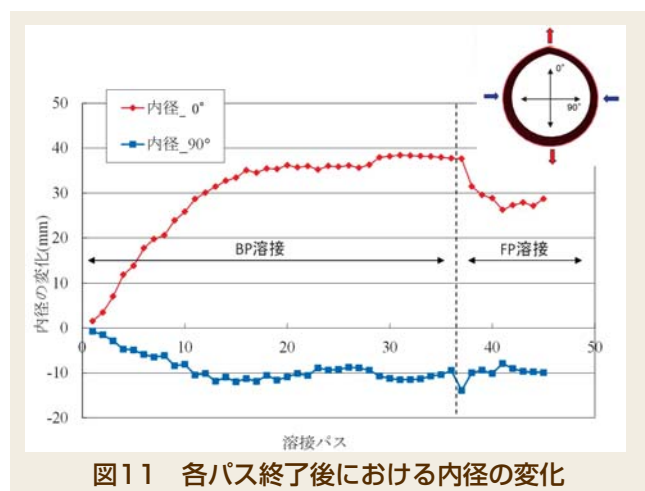
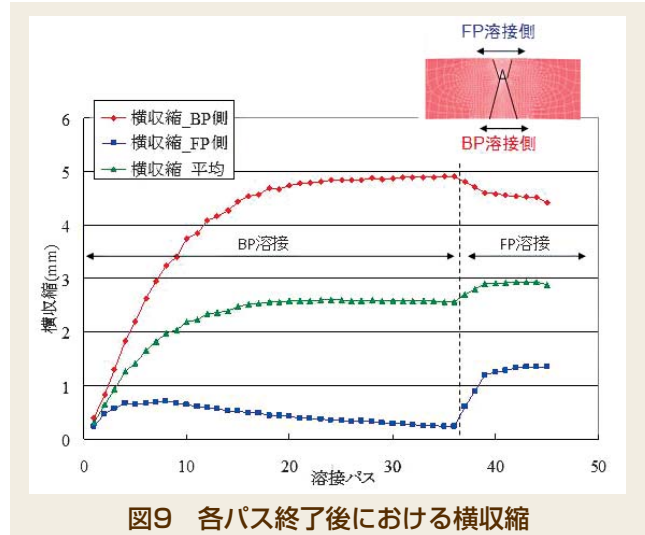
**3.2 溶接後の変形分布** 図8に溶接完了後における溶接線中央断面の変形図を示す。ここで、変形倍率は30倍としている。この図から溶接後にリング断面は楕円形になることがわかる。円筒内側のBP溶接側の開先断面積が大きい為、その角変形が生じることで溶接部がリングの外側に凸となり、溶接部における内径が長くなる(最大変位:30mm)。また、その変形にともない、溶接部に対して90°の位置における内径が短くなる。



**3.3 各パス終了後における横収縮と内径の変化** 溶接線方向中央のBP溶接側およびFP溶接側の板表面において、溶接前に約150mmとなる節点間の距離の変化から、横収縮を求めた。図9に各パス終了後における横収縮の時間変化を示す。横軸は溶接パス数を示している。BP溶接時ではBP溶接側の横収縮が大きく増加している。15パス目付近まではBP溶接側の横収縮が大きく増加していくが、それ以降はほぼ変化しない。FP溶接ではFP溶接側が収縮している。溶接完了後にはBP溶接側とFP溶接側の平均である板厚中央で約3mmの横収縮が生じている。

図10に示すように、中央断面における内面側表面上の節点A、B、C、Dから、節点間距離ACの変化を内径0°の変化とし、節点間距離BDの変化を内径90°の変化とし、解析結果から内径の変化を算出した。図11に各パス終了後における内径の変化を示す。溶着量の多いBP溶接ではFP溶接より大きな角変形が生じ、溶接部における内径が長くなり、溶接部に対して90°の位置における内径は短くなる。横収縮と同様に、15パス目付近までは

0°の位置の内径が大きく増加していくが、それ以降はほぼ変化しないことが分かる。また、FP溶接では0°の内径が短くなり、90°の位置における内径はほとんど変化しない。溶接完了後、溶接部における内径は溶接前に比べ30mm長くなり、溶接部に対して90°の位置における内径は10mm短くなる。この予測した変形を予め逆ひずみとして設定しておくことで、溶接後に真円になることが期待できる。



**3.4 溶接変形の溶接線方向分布** 図12に横収縮の溶接始端部からの溶接線方向への分布を示す。BP溶接側およびFP溶接側それぞれの板表面の横収縮と、平均として、板厚中央での横収縮を示している。BP溶接側およびFP溶接側ともに溶接始末端では小さく、溶接線中央部では一定となっている。また、BP溶接側とFP溶接側の横収縮の差が溶接線方向にほぼ一定であ

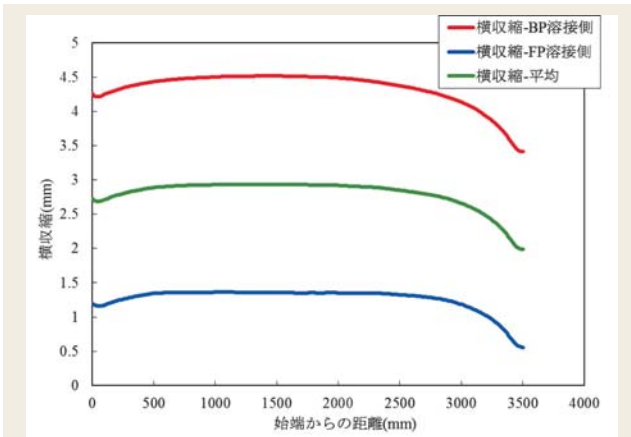


図12 横収縮の溶接線方向分布

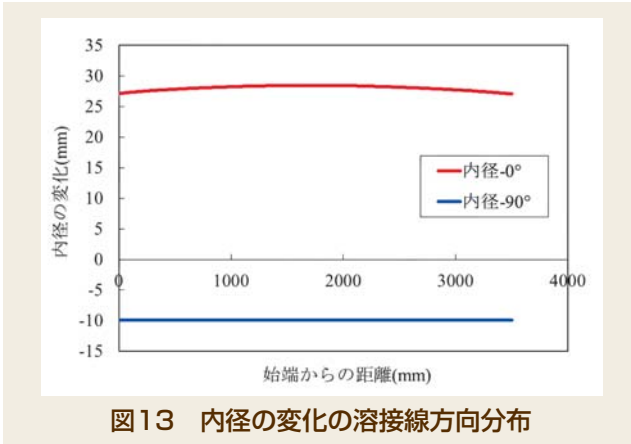


図13 内径の変化の溶接線方向分布

ることがわかる。図13に内径の変化の溶接始端部からの溶接線方向への分布を示す。内外面の横収縮の差がほぼ一定であったため、溶接部の角変形も一定となる。そのため、内径の変化は溶接線方向にはほとんど差がない。

**3.5 変形予測結果に基づく初期曲げ** 3.2項～3.3項で得られた変形予測結果から、図1に示した逆ひずみによる初期曲げ方法について考える。溶接部近傍では内径が大きくなる変形が生じるため、予めプレス機等により溶接部近傍の曲率を大きくする加工を行う必要がある。また、本ケースの場合、溶接変形に及ぼす溶接始末端部の影響が小さいため、溶接線全線で同量の曲げ加工を行えばよいこととなる。このような方法により初期曲げ加工を行えば、溶接後にリングを真円に近づけられると考えられ、矯正作業を低減できる。本手法により、修正曲げが困難な現地溶接部への適用、あるいは工場内溶接において、矯正曲げを大幅に低減することが期待できる。大規模解析による溶接変形予測により大型鋼構造物の製作費コストダウンと製品の品質向上を図っていく予定である。

## 4. 結言

本研究では、溶接後に真円となる逆ひずみの量を求めるため、板厚96mm、内径9600mm、X開先の圧力容器多層長手溶接で生じる溶接変形を大規模解析により計算した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・多層長手溶接によって生じる横収縮と内径は15パス目付近までは増加するが、それ以降はほぼ変化しない。
- ・溶接後、板厚中央では約3mmの横収縮が生じる。
- ・溶接後、0°の位置の内径は溶接前に比べ30mm長くなり、90°の位置における内径は10mm短くなる。
- ・内径の変化は溶接線方向にはほとんど差がない。

今回は内径約10mの長手溶接継手を解析対象とした。今後は種々の板厚および寸法に対しても数値解析による変形予測を実施し、逆ひずみによる初期曲げ方法の標準化を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 中谷光良、横谷一人 ほか：多層溶接継手の溶接変形推定手法の開発, Hitz技報, **2008**, Vol.68 (No.2)、54-57.
- 2) 上田幸雄, 山川武人：有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌, **1973**, Vol.42 (No.6), 61-71.
- 3) 柴原正和, 生島一樹 ほか：動的陽解法FEMを基にした大規模構造のための溶接過渡変形・応力解析手法の提案, 溶接学会論文集, **2011**, 第29巻 (第1号), 1-9.
- 4) 生島一樹, 柴原正和 ほか：GPUを用いた並列化理想化陽解法FEMの開発, 溶接構造シンポジウム2011 講演論文集, 313-320.
- 5) 溶接・接合便覧, 丸善, **1993**, 186.
- 6) 寺崎俊夫, 山川大祐 ほか：ビードオンプレート溶接で生じる残留応力・溶接変形の高精度数値解析手法に関する研究, 日本造船学会論文集, **2002**, 191号, 239-245.

### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船株式会社 技術開発本部  
機械・インフラ研究室

山田順也

Tel : 06-6551-9239 Fax : 06-6551-9086

e-mail : yamada\_j@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation

Technology Development Headquarters

Machinery & Infrastructure Laboratory

Junya Yamada

Tel : +81-6-6551-9239 Fax : +81-6-6551-9086

e-mail : yamada\_j@hitachizosen.co.jp



山田 順也



中谷 光良



森田 智大



昌谷 哲