一般社団法人日本溶接協会　溶接情報センター
WE-COM 溶接技術者交流会
WE-COMマガジン
第27号（2018年1月発行）

特集：ここまで見える！アーク溶接の可視化シミュレーション

溶接変形と残留応力シミュレーション

大阪大学接合科学研究所
村 川　英 一

1. はじめに

つい最近までは、溶接変形や残留応力の数値シミュレーションは重要構造物の開発・設計に関わる研究者や限られた技術者が使う道具であった。しかし、近年ではコンピューターの高性能化やシミュレーションに使われるプログラムの高度化により、船、自動車、建設機械、建築、橋梁の分野でも設計や生産の現場で日常の道具として広く活用が可能になってきた。ここでは、溶接変形・残留応力シミュレーションの現状を解説するとともに、期待される効果について、いくつかの事例を紹介する。

2. 溶接変形・残留応力シミュレーションの概要

2.1　シミュレーションの概要と計算で得られるもの

実際の溶接におけるプロセスはおおよそ、

(1) セットされたワークの上を溶接トーチが通電状態で移動し、
(2) アークから供給された熱でワークの溶接部が加熱、溶融されて部材がつながり、
(3) 熱が、溶接部周辺の母材や大気中に散逸することで冷却、凝固し、
(4) ワークが室温まで冷却して溶接が終了する

という過程をたどる。一方、溶接の力学的シミュレーションでは、有限要素法を用いてまず温度を計算し、次にワークの変形および応力を計算する。

すなわち、

(1) 与えられた溶接条件の下で、溶接開始から完全冷却までの時々刻々の温度分布を計算し、更に
(2) 計算された温度分布を用いてワークの変形および応力を計算

することになる。

このような2段階の計算で得られるものは主として温度、変位（変形）、ひずみ、応力である。しかし、シミュレーションの目的は、単に温度、変形、ひずみ、応力の値を計算することではなく、計算結果から意味を抽出し、与えられた問題に対する解決の糸口を得ることである。この作業を助けるのが計算結果の『可視化』である。さらに『可視化』は、次のように単純なレベルから高度なレベルに分類することができる。

(レベル-1) 見る：人の眼には見えない温度や応力を映像や図表にして分かりやすくする
(レベル-2) 分る：現象の本質を理解し説明する
(レベル-3) 描く：設計、生産技術者間の共通な理解を醸成し、これを接点にした連携を通した新しい戦略的展開を図る

シミュレーションは非常に強力な道具であるので常にレベル-3を目指すべきである。

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved。

ここでは単純な例を用いて溶接による温度や応力、さらには疲労き裂の成長過程の『可視化』について説明する。計算例は、全長 600 mm、幅 120 mm、厚さ 10 mm の板の板幅中央から 20 mm オフセットした位置に TIG トーチによるメルトランを 300 mm 実施した場合である。**図 1** は、加熱過程で TIG トーチが移動中の温度分布を等温線として可視化したものである。さらにこの瞬間の加熱線中心軸に沿った温度分布を曲線として示したものが**図 2** である。これらは単に温度分布を示したものであり、情報として得られるのは、最高温度が約 1700℃であり、実験から得られる温度分布（あるいは温度履歴）が有ればこれと比較することで計算結果の予測精度が判断できる。さらに、温度分布の特徴を抽出するために、全過程で各点が経験する最高温度の分布を、溶融温度（約 1450℃）、HAZ 領域の目安（約 800℃）で色分けしたものが**図 3** である。表面の分布と、中央断面の分布が示されており、これらの図から、計算で再現された溶込みの幅と深さが把握できる。

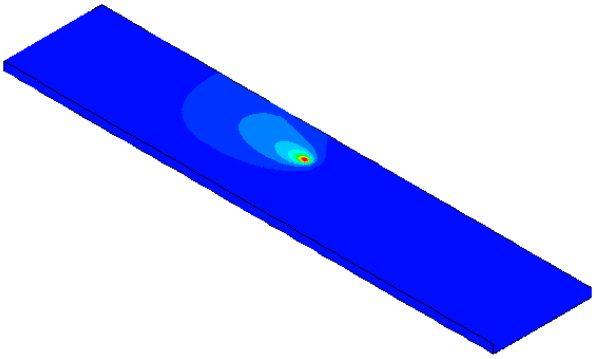


図 1　TIG トーチが移動中における温度分布

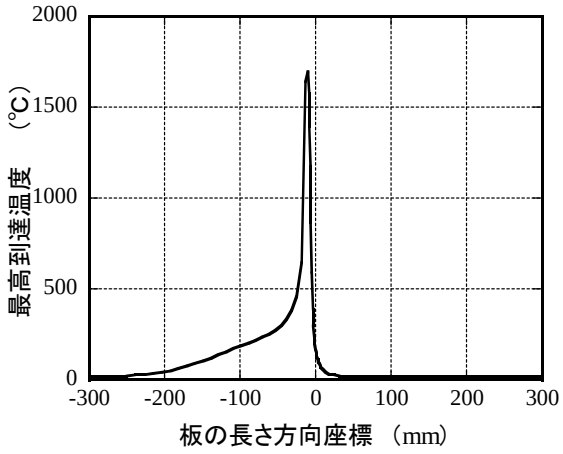
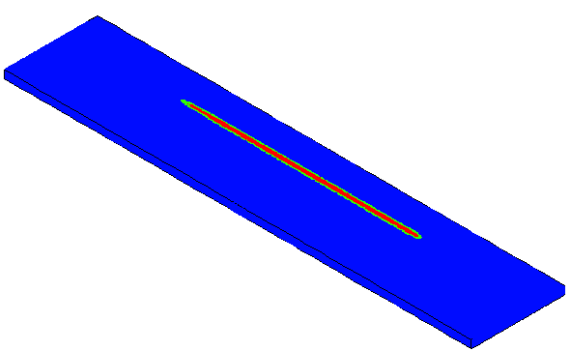
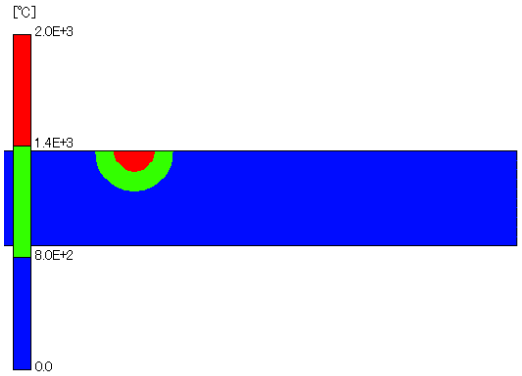


図 2　トーチ移動方向の温度分布



（a）板表面における温度の 3 次元分布



（b）中央横断面における温度分布

図 3　最高到達温度の分布（赤：溶け込み形状、緑：熱影響部）

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

次に、完全冷却後の板の長さ方向の残留応力の 3 次元分布と中央断面における分布を示したものがそれぞれ**図 4、5** である。また、板幅方向の分布を板中央の表面についてグラフとして示したものが**図 6** である。グラフとして表示すると**図 1** や**図 4** のような 3 次元分布図と比較して分布の特徴が鮮明になるため、より定量的で的確な理解が可能となる。例えば残留応力の分布幅は約 30 mm であり、板の長さ方向と幅方向の残留応力の大きさを比較すると、長さ方向に比べて幅方向の残留応力の大きさは小さいことが分る。この段階は可視化のレベルで言うとレベル-1 に相当し、レベル-2 では残留応力が疲労や応力腐食割れ(SCC)などに及ぼす影響を検討することになる。**図 7** は溶接残留応力が存在する板材の表面に仮に半径 3 mm の初期き裂が存在し 120 MPa の片振りの繰り返し荷重を受けるときに成長するき裂の形状を予測し負荷荷重回数との対応を示したものである。このような検討を実構造物の溶接継手に適用することにより継手の形状寸法、溶接条件などの合理的な設計や施工が可能となる。これをさらに発展させることで経験や実績ベースのものづくりから定量的な予測に基づいたものづくりがレベル-3 の成果として期待される。

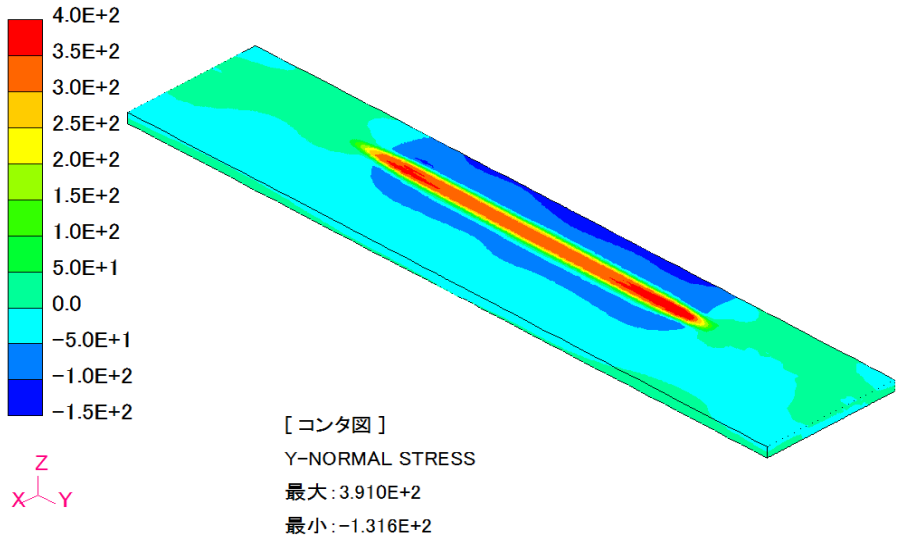


図 4　長さ方向残留応力の 3 次元分布

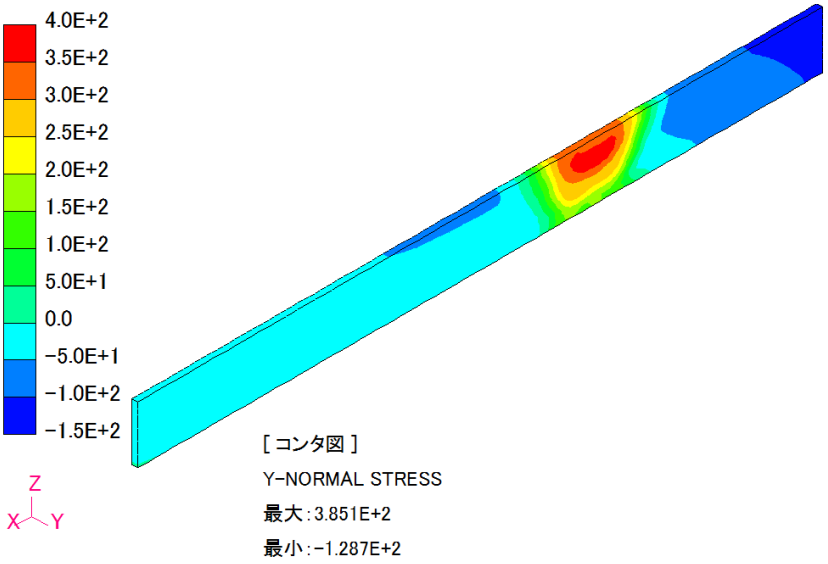


図 5　中央断面における長さ方向残留応力の分布

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

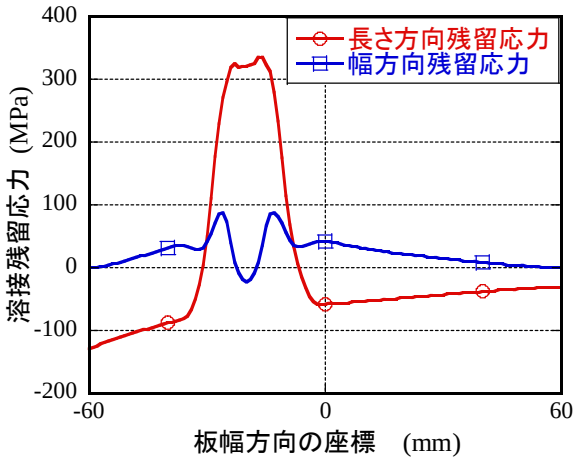


図 6　板中央の表面における残留応力の板幅方向分布

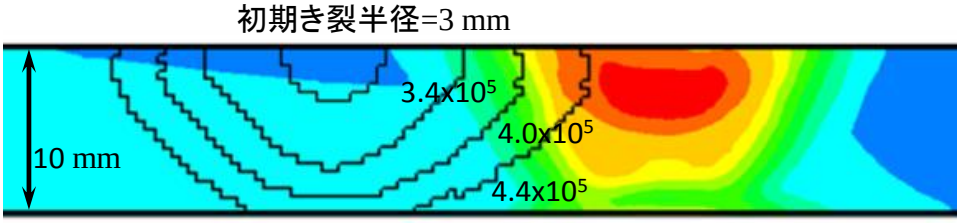


図 7　溶接残留応力が存在する板材における疲労き裂の成長（シミュレーション結果）

2.2　シミュレーションの流れ

狭い意味では、シミュレーションは物理的実験をコンピューターを用いた数値実験に置き換えたものである。したがって、シミュレーションの流れは、実験と同じで、次のような流れとなる。

(1) シミュレーションの目的の明確化
- トラブル対策なのか研究開発なのか
- 問題の種類は（変形の制御、脆性破壊、疲労、SCC）
- 問題のポイントは？（事前に予想を立てておく）

(2) モデルの決定
- モデルの形状寸法、拘束条件、材料選択（母材、溶接材料）、溶接条件

(3) 材料定数の収集

(4) 有限要素で用いるメッシュデータ、溶接入熱等に関する入力データの作成

(5) 計算の実施（予備計算⇒本計算）

(6) 計算結果の妥当性検討（入力データミス等が発見された場合は再計算）

(7) 計算結果の分析（計算目的の視点から計算結果の意味を抽出）

(8) 必要があれば発展的なシミュレーションを実施

(9) トラブルの解決、新技術・製品の開発

なお、シミュレーションでは実際の物やエネルギーを必要としないので、現在は入手できない未来の材料や、実現できない理想的な溶接条件を想定したより積極的な検討が可能となる。また、目では

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

直接見ることができない溶接構造物の内部の残留応力や溶接過渡温度が 3 次元的な分布として可視化できるので、より定量的で詳細な現象把握が可能となる点が物理実験と比較して優れた点である。

また、近年のコンピューター技術の飛躍的発達により、シミュレーションは実験に置き換わるということに留まらず、実構造物あるいは実部品の溶接変形や残留応力の予測にも活用可能となっている点が注目される。

3. 溶接変形・残留応力シミュレーションの基本原理

実構造物において溶接変形や残留応力が生じる過程は非常に複雑であるが、これを計算するための原理を簡単な例を用いて説明する。

前述のように溶接の力学シミュレーションには、一般に、有限要素法が使われる。有限要素法は、構造物の安全評価などに無くてはならない道具であり、構造物に荷重が作用した時の応力や変形が計算結果として得られる。ここではその原理を最も単純な 1 本の棒のモデルを用いて説明する。**図 8** に示すように、長さが L、断面積が A の線形弾性体の棒があり、F の荷重が作用している状態を考える。この時、棒に発生する応力（単位面積当たりの力）σ、棒の伸びあるいは変位 u を計算するというのが解くべき問題である。

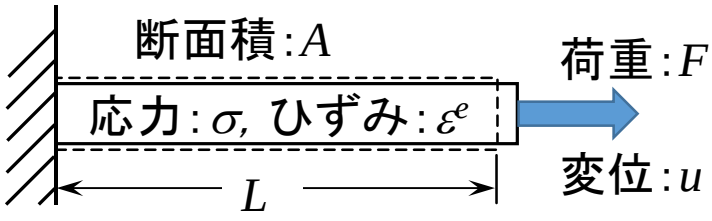


図 8　棒に作用する荷重と伸び

一方、変位 u、ひずみε^e、応力σ、荷重（力）F の間には次の三つの関係がある。

・ひずみは単位長さ当りの伸びなので

$$\varepsilon^e = u/L \qquad \text{(変位とひずみの関係)} \qquad (1)$$

・応力は単位面積当たりの力なので

$$\sigma = F/A \qquad \text{（力の釣合）} \qquad (2)$$

・ヤング率 E は応力とひずみを関係付ける係数なので

$$\sigma = E\,\varepsilon^e \qquad \text{（応力とひずみの関係）} \qquad (3)$$

1 本の棒の場合、応力σは、式(2)から直接求められ、一方、変位 u は式(1)、(2)、(3)からひずみと応力を消去し、荷重を変位で表すと、

$$F = (EA/L)\,u \qquad (4)$$

となる。さらに、棒の剛性あるいはバネ定数 $K=(EA/L)$を用いると、

$$F = K\,u \qquad \text{（荷重＝バネ定数×伸び）} \qquad (5)$$

となり、バネに働く力と伸びの関係と同じ式になる。複雑な構造物を有限要素法で解く場合も、コンピューターの中で式(5)と同じ形の式が作られ、これを u について解くと変位が求められる。すなわち、

$$u = F/K \qquad (6)$$

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

これに対して溶接の場合は、荷重が全く作用しない状態で、熱により変形と応力が発生する点が異なる。溶接では、構造物の非常に狭い領域が局部的に加熱されるので、加熱部はその周りの金属から拘束されていることになる。これを 1 本の棒のモデルで考えると棒の両端が伸び縮みしないように拘束された**図 9** のような状態と考えることができ、棒を加熱すると熱応力が発生する。

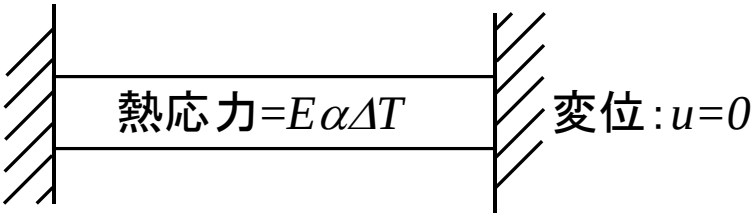


図 9　完全拘束棒の加熱

加熱温度をΔT、線膨張係数をαとすると

$$\text{熱応力} = -\text{ヤング率}\times\text{熱ひずみ} = -E\alpha\Delta T \qquad (7)$$

となり、鋼の場合おおよそ、E=200 GPa、$\alpha=10^{-5}$ 1/℃なので

$$\text{熱応力} = -2\Delta T \quad (\text{MPa}) \qquad (8)$$

となる。式(5)は、完全に伸び縮みが拘束された棒が 100℃加熱されると 200 MPa の圧縮の熱応力が発生し、200℃加熱すると 400 MPa の応力が発生することになる。溶接のように最高温度が溶融温度を超える場合には、加熱・冷却過程で金属の溶融、凝固、相変態、塑性変形が生じる。冷却過程では温度変化がマイナスになるので、結果としてプラスの応力、すなわち引張の残留応力が発生する。

これをひずみから見ると、全ひずみεは、熱ひずみε^T、弾性ひずみε^e、塑性ひずみε^p、クリープひずみε^c、相変態のひずみε^t の和であり、拘束された棒では伸び u がゼロなので、

$$\varepsilon = u/L = 0 = \varepsilon^T + \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^c + \varepsilon^t \qquad (9)$$

となる。一方、既に説明したように応力は弾性ひずみにヤング率を掛けたものであるから、式(3)より

$$\sigma = -E(\varepsilon^T + \varepsilon^p + \varepsilon^c + \varepsilon^t) \qquad (10)$$

が導かれる。この式は、溶接の場合、熱ひずみ、塑性ひずみ、クリープひずみ、相変態によるひずみなどが原因となり応力が発生する。今は簡単のために棒が完全に拘束された場合を想定しているので変形はゼロであるが、**図 10** のように拘束が緩い場合には、応力と同時に変形が生じる。

結論として溶接のシミュレーションに用いられる有限要素法の原理を一言で説明するとすれば、基本となる式(1)、(2)、(3)に溶接特有の式(9)を加えたものである。

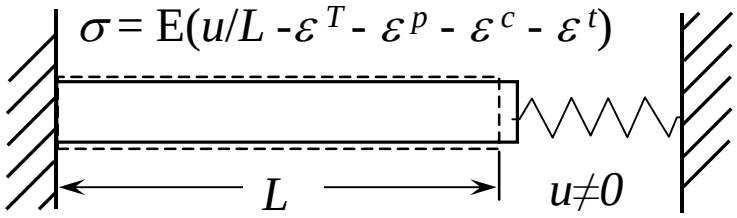


図 10　溶接の問題に対応した単純モデル（拘束が緩い場合）

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

4. 溶接変形・残留応力シミュレーションソフトの紹介

溶接変形・残留応力のシミュレーションの多くは、温度計算と変形・応力の計算のふたつの部分から構成されている。したがって、アークから与えられたエネルギーにより作られ時々刻々変化する温度分布が計算でき、材料の降伏、クリープ、相変態を考慮しながら変形と応力が計算できるソフトであれば溶接変形・残留応力のシミュレーションが可能である。たとえば、「Abaqus」、「MSC.Marc」は構造解析全般に使用可能な商用汎用ソフトであり、「SYSWELD」、「Quick Welder」、「JWELD++」、「simufact welding」、「ASU/WELD-Master」は溶接に特化した商用ソフトであり、「JWRIAN」、「理想化陽解法 FEM」はそれぞれ大阪大学と大阪府立大学が開発した研究用ソフトである。溶接学会 溶接構造研究委員会の中に設置された溶接力学シミュレーション研究会ではこれら 9 種類のシミュレーションソフトを使用したラウンドロビン解析を実施し、その結果をアドホック研究会「実構造物への展開を目指した溶接予測技術の検証」成果報告書(平成 29 年 2 月、一般社団法人 溶接学会)としてまとめている。このラウンドロビンでは、6 パス多層溶接継手を対象に実験計測と解析を実施し、剛性が低く外乱の影響を受けやすい最初のパスを除けば、変形の計測結果と 9 種類のソフトを用いた計算結果は非常に良い対応を示すことが報告されている。

5. 溶接シミュレーションの活用事例

5.1 溶接変形の予測

ここでは、多数のパイプを溶接で接合して製作される大型フレーム構造の溶接継手部の変形をシミュレーションにより予測した例[1)]を紹介する。**図 11** は、16 本の口径が異なるパイプが複雑に接合された溶接継手部の変形と残留応力を有限要素法を用いてシミュレーションして得られた結果を応力分布について示す。このように複数のパイプから構成される継手では溶接変形や残留応力を従来の経験や実験式から予測するのは困難であるが、シミュレーションを用いれば、溶接や組立て順序の影響も含めて変形や残留応力が精度良く予測できる。一方、**図 12** に示される船の居住区全体などのように非常に大きな構造物の場合に対しては、溶接組立変形を簡便に予測するシミュレーション法[2)]が開発されている。**図 13** は居住区の有限要素モデルであり、各層に分割して作成された 4 層のブロックを順次組上げた時の溶接組立変形を予測した結果が**図 14** である。歪取による変形を無視した場合にはブロックのコーナー部にギャップが生じることを示している。

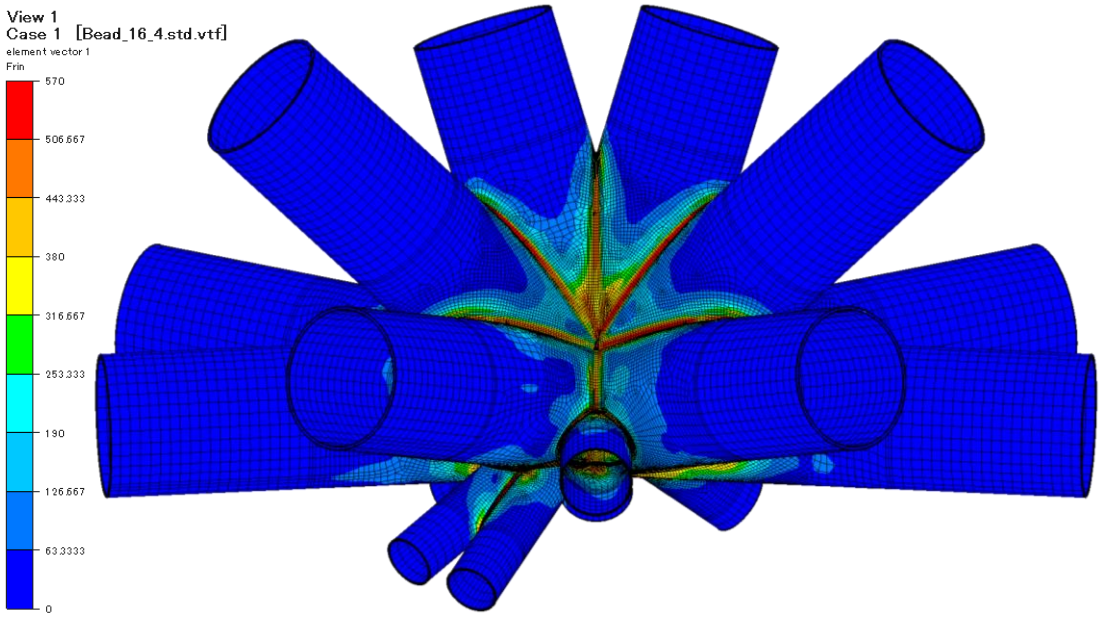


図 11　16 本のパイプが溶接された継手の Mises 応力分布

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

図 12　溶接組立て変形予測の対象（バラ積船の居住区構造）

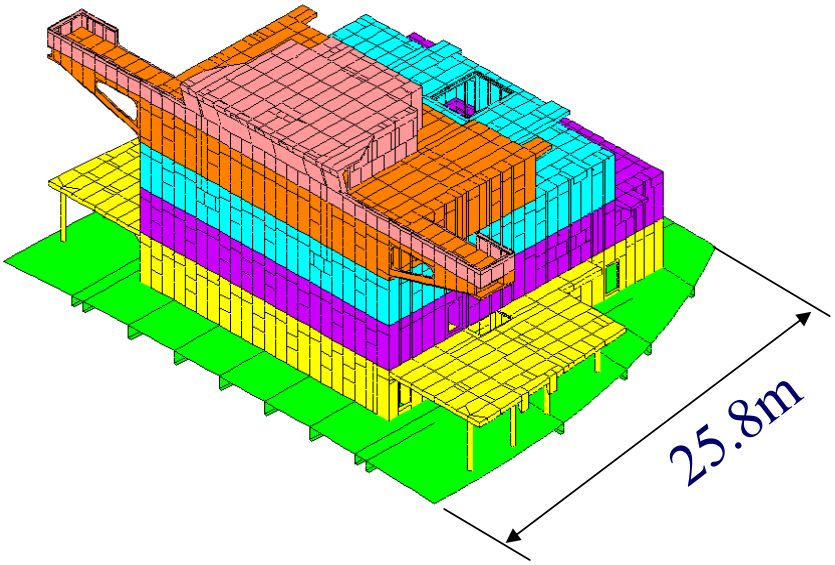


図 13 有限要素モデル（シェル要素）

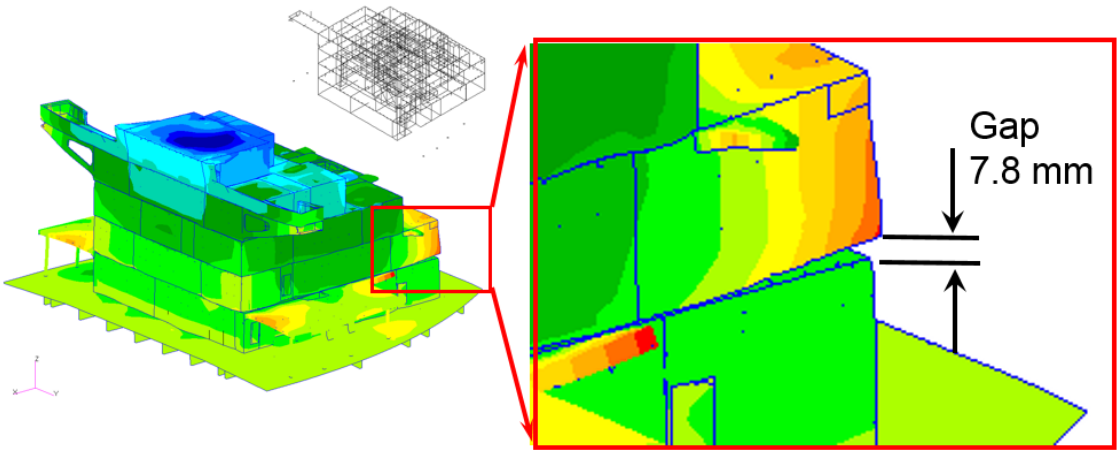


図 14　シミュレーションで予測されたブロック間のギャップ

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

5.2　溶接残留応力の予測と応力腐食割れの進展予測

残留応力のシミュレーションの例として、**図 15** に示される厚肉パイプの多層溶接による残留応力予測とショットピーニングによるパイプ表面の残留応力改善効果を検討した事例 [3]を紹介する。**図 16** は 10 パス多層溶接による残留応力を計算するための有限要素メッシュである。さらに**図 17**(a)は単独のピーニング粒子の衝突解析によるショット後の応力分布であり、この結果を用いて現実の高密度ピーニングのシミュレーションを行って得られた周方向残留応力の分布を示したものが**図 17**(b)である。ショットの密度を示すパラメータ R_C の値がゼロの場合は、溶接終了後に余盛を機械加工により削り取った状態に対応し、パイプの表面の応力は引張になっている。腐食環境にさらされるパイプ表面の残留応力が引張の場合、応力腐食割れの発生が懸念されるため、これを圧縮に改善する方法がショットピーニングである。**図 17**(b)に示されるように、R_C の値の増加に従って表面の圧縮残留応力の絶対値が大きくなっている。

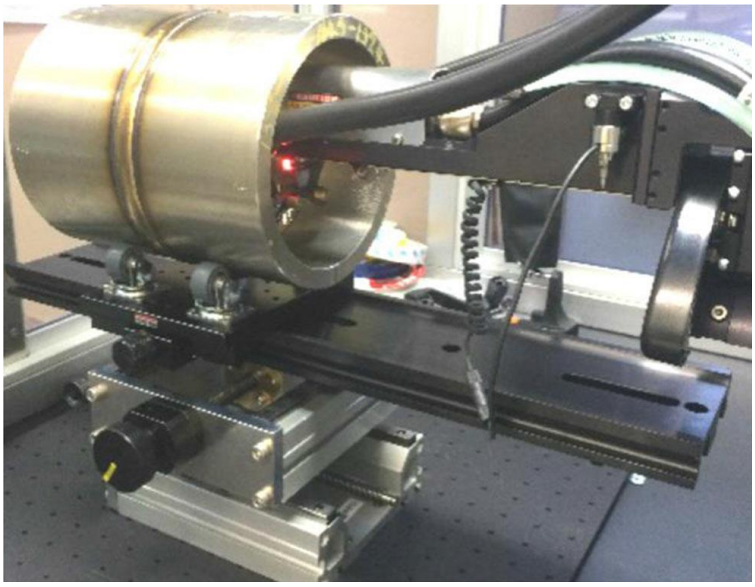


図 15　厚肉パイプの多層溶接

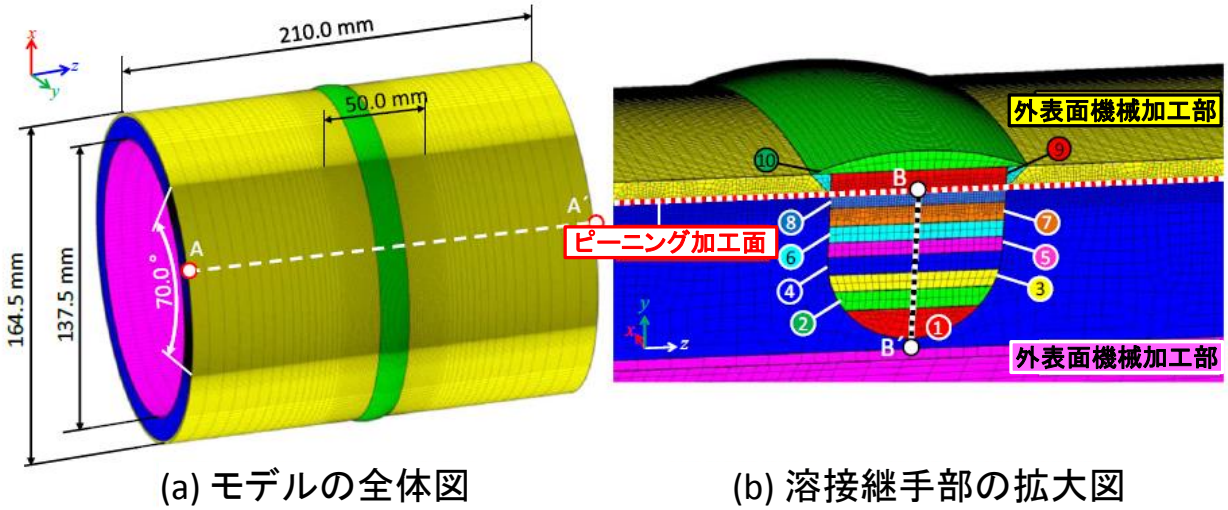
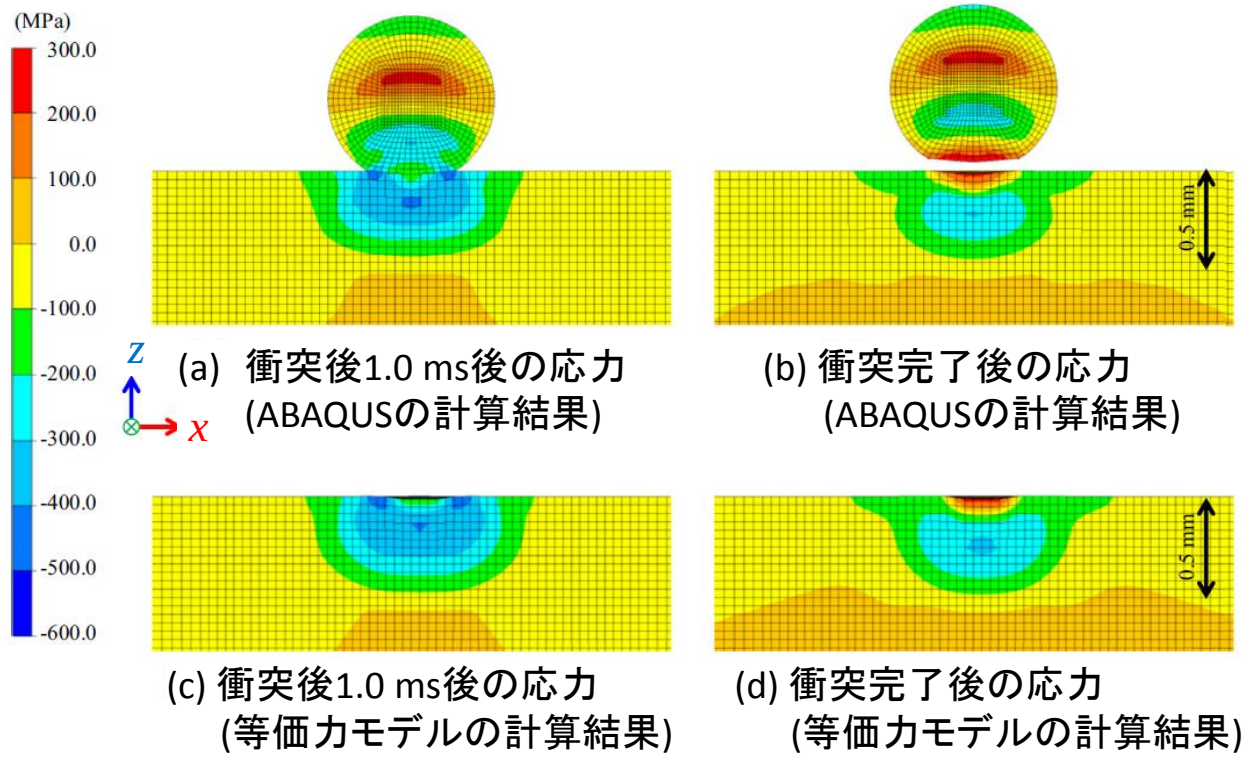


図 16　シミュレーションで用いた FEM モデル

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.



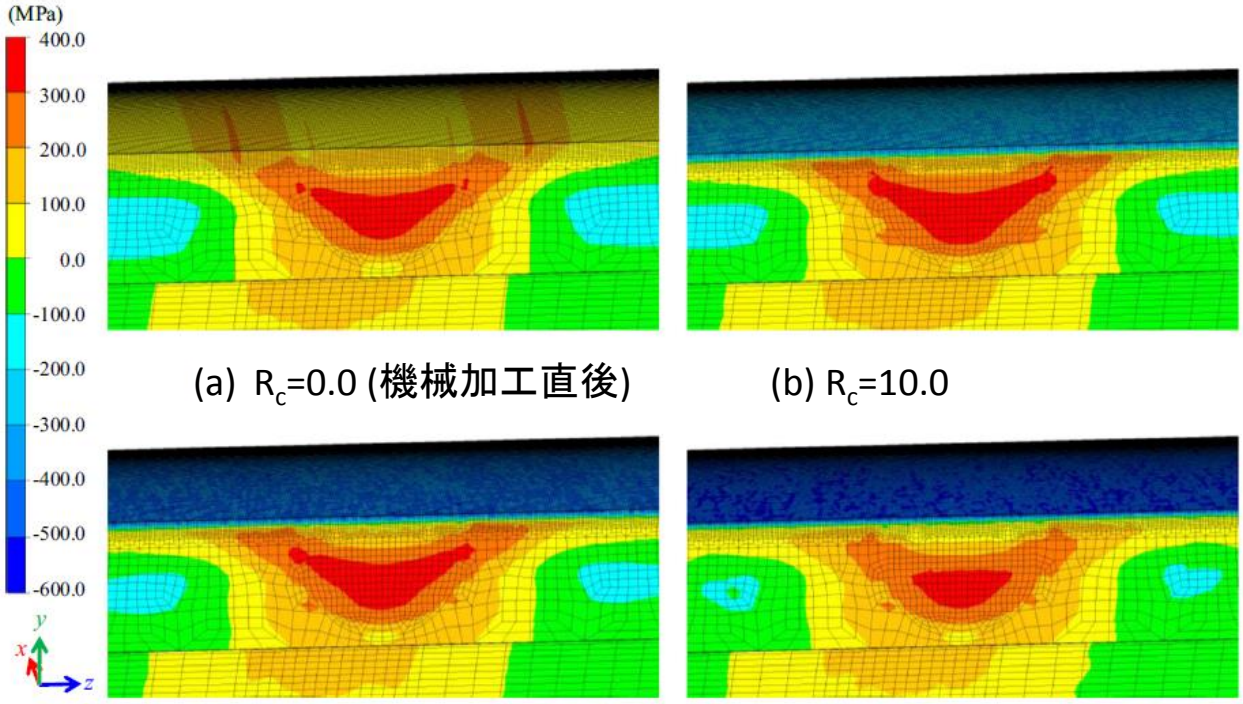
(a) 衝突後1.0 ms後の応力 (ABAQUSの計算結果)

(b) 衝突完了後の応力 (ABAQUSの計算結果)

(c) 衝突後1.0 ms後の応力 (等価力モデルの計算結果)

(d) 衝突完了後の応力 (等価力モデルの計算結果)

(a) 単一の粒子の衝突シミュレーション



(a) R_c=0.0 (機械加工直後)

(b) R_c=10.0

(c) R_c=25.0

(d) R_c=50.0

(b) ショットピーニングによる周方向残留応力の変化

図 17　ショットピーニングによるパイプ表面の残留応力改善

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

6. 溶接残留応力シミュレーションのき裂進展予測への活用

前述のように応力腐食割れの発生および成長は溶接残留応力の影響を受ける。特に**図 18** に示される低合金鋼とステンレス鋼の異材溶接継手部の残留応力分布は複雑である。そのため、まず溶接シミュレーションにより溶接残留応力を計算する必要がある。残留応力が予測できれば次のステップは非破壊検査で同定されたき裂が操業時に受ける荷重の下でどの程度成長するかの予測であり、**図 19** は 113 年後までの成長を予測した結果[4)]である。

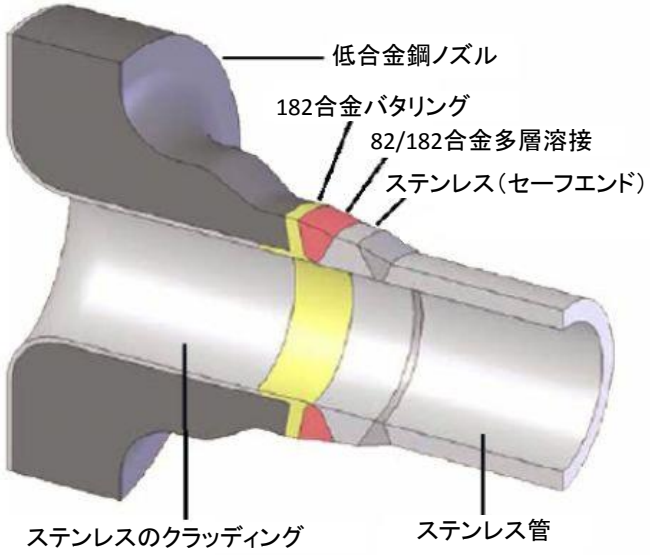


図 18　多層溶接異材継手の断面（低合金鋼・ステンレス鋼）

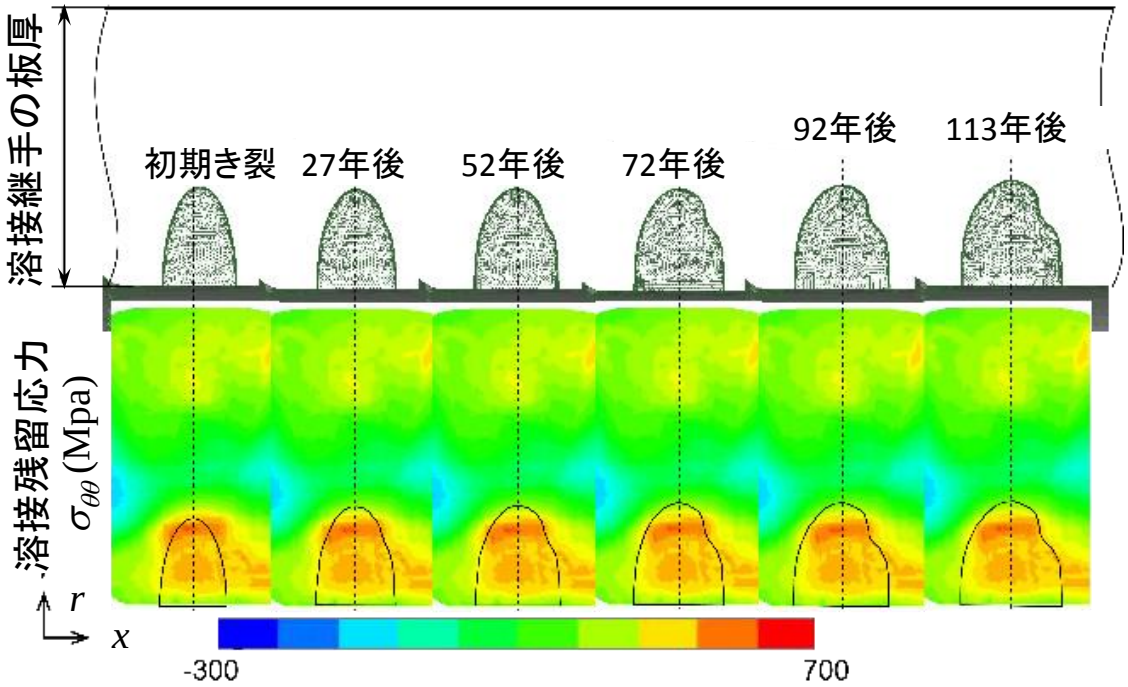


図 19　残留応力と応力腐食割れ（SCC）の進展予測

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.

7. おわりに

溶接のシミュレーションは通常の応力解析と比較して特殊であるため、多少の習熟は必要であるが、シミュレーションを上手く活用できた場合の効果は想像以上なので、積極的にチャレンジして頂きたい。

参考文献

1) 生島一樹, 北村徳識, 河原充, 南野寿造, 柴原正和, 湯藤尚人, 永井昭弘, 谷和彦, 辻丈彰, 山田順也, 中谷光良： 理想化陽解法 FEM を用いた多重パイプ継手の残留応力解析, 溶接学会全国大会講演概要, Vol.97 (2015), 404-405.
2) 村川英一： 溶接変形・残留応力シミュレーション入門, 溶接技術, No.11 (2007), 74-79.
3) 生島一樹, 木谷悠二, 北村徳識, 柴原正和, 西川聡, 秋田貢一： ショットピーニング時の残留応力緩和挙動に関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, Vol.99 (2016), 352-353.
4) 岡田裕, 野瀬雅広, 天野聖, 遊佐泰紀, 前川晃, 釜谷昌幸： 溶接残留応力を考慮した異材接合部の SCC（応力腐食割れ）進展解析に関する研究, 溶接構造シンポジウム 2017 年講演論文集, 369-372.

＜略歴＞

村 川 英 一（むらかわ　ひでかず）

1973 年　大阪大学　工学部　造船学科　卒業
1975 年　大阪大学　大学院　工学研究科　修士課程　修了
1978 年　米国ジョージア州立工科大学　博士課程　修了
1978 年　米国ジョージア州立工科大学　研究員　採用
1980 年　同上退職
1980 年　株式会社日立製作所　日立研究所　採用
1983 年　同上退職
1983 年　大阪大学　溶接工学研究所（接合科学研究所）　助手　採用
1987 年　同上助教授に昇任
2001 年　同上教授に昇任
2016 年　大阪大学を定年退職
2016 年　大阪大学名誉教授、接合科学研究所招へい教授
　　現在に至る

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2011-2018 All Rights Reserved.