

シェル-ソリッド連成解析を用いた溶接力学解析手法

大阪府立大学大学院

○生島 一樹
柴原 正和

Analysis Method for Welding Mechanics Using Shell-solid Mixed Method

by Kazuki IKUSHIMA, Masakazu SHIBAHARA

1. 緒 言

多くの鋼構造物は、多数の薄板部材や補剛材等を溶接により接合することで建造されることから、溶接により生じる変形や残留応力について検討することは非常に重要である。溶接変形や残留応力の予測には有限要素法(FEM: Finite Element Method)に基づく熱弾塑性解析¹⁾が使用されることが多い。熱弾塑性解析においては、解析対象をソリッド要素を用いて要素分割を行い、加熱に伴う材料の非線形の力学的挙動を逐次解析することで、変形や残留応力を予測する。そのため、解析対象の構造全体をソリッド要素で分割する必要がある、多数の部材で構成される複雑構造物においては、解析モデルの構築に困難を伴い、解析規模も極めて大きくなる。

一方で、構造解析においては、シェル要素が広く用いられている。シェル要素を用いることで、CAD データから容易に構造全体の解析モデルを構築することが可能であり、シェル要素とソリッド要素を効率的に用いることで、ソリッド要素で構造全体をモデル化する場合に比べて、解析モデル作成時の困難を低減し、解析規模も削減できるものと考えられる。

シェル要素とソリッド要素を混合させた解析のこれまでの事例としては、シェル要素とソリッド要素の接続に仮想的なシェル要素を使用しホットスポット応力について検討した事例²⁾などが報告されているが、溶接熱弾塑性解析に対して、シェル要素とソリッド要素を混合させた解析を適用した事例は少ない。

そこで、本研究では、薄板複雑構造物における効率的な溶接熱弾塑性解析モデルの構築を行うために、有限要素解析(FEA: Finite Element Analysis)における多点拘束(MPC: Multi Point Constraint)機能³⁾を応用することで、シェル要素とソリッド要素を混合させた溶接力学解析手法を構築する。提案手法を基礎的な溶接継手の解析に対して適用し、提案手法の基本的な特性について検討する。また、自動車運搬船のパネル構造の溶接を模擬した解析に対して提案手法を適用し、薄板複雑構造物の溶接解析における提案手法の有効性を示す。

2. シェル-ソリッド混合解析手法

本研究では、薄板複雑構造物の溶接力学解析において、効率的なモデル化ならびに解析を実現するために、Fig. 1 に示すように、非線形の弾塑性解析が必要な領域をソリッド要素で、それ以外の構造全体をシェル要素でモデル化し、これらを接続させることを考える。これにより、計算負荷の大きいソリッド要素が必要な領域を限定し、効率化を図る。

溶接力学問題の解析を行う場合、熱伝導解析を用いて入熱に伴う温度変化を予測し、得られた温度分布を

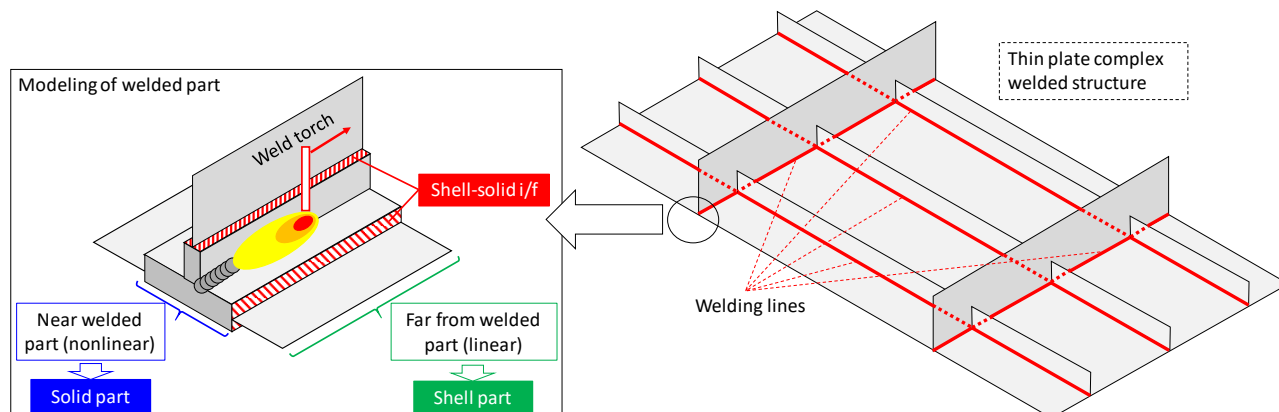


Fig. 1 Concept of welding mechanics analysis based on shell-solid coupling.

用いて熱弾塑性解析を行い、変形や応力などの力学状態を予測する。この弱連成解析を溶接開始から冷却終了にいたるまで逐次実施することで、溶接後の変形や残留応力分布が予測される。本章では、熱伝導解析と熱弾塑性解析のそれぞれについて、本研究で構築したシェル-ソリッド混合解析手法の詳細を述べる。

2. 1 熱伝導解析

熱伝導解析にておいて、シェル要素に関しては、一般的な2次元熱伝導要素により定式化し、ソリッド要素に関しても、一般的な3次元熱伝導要素を使用した。

シェル要素とソリッド要素の間の接続は、自由度消去を用いた事例⁴⁾を基に、Fig. 2に示すように、シェル

要素とソリッド要素の接続面(シェルソリッド接続面と定義する)にある節点の内、ソリッド要素のみに属する節点の温度がシェル要素の節点の温度と等しくなるような MPC 条件を設定する。この拘束条件を考慮するため、シェルソリッド接続面のソリッド要素のみに属する節点の持つ自由度を消去する。以降、シェル要素の節点を独立(マスター)節点、ソリッド要素の節点を従属(スレーブ)節点と定義する。シェルソリッド接続面の節点温度の関係を FEM の剛性方程式に直接組み込むために行列形式で表す。

$$[B^h]\{u^h\} = \{0\} \quad (1)$$

ここで、 $[B^h]$ 、 $\{u^h\}$ は、それぞれ、制約条件行列、全体自由度(温度)ベクトルである。式(1)の拘束条件式において、ベクトル $\{u^h\}$ を独立成分ベクトル $\{u_m^h\}$ と従属成分ベクトル $\{u_s^h\}$ に分割し、制約条件行列も同様に分割すると、次のようにあらわされる。

$$\begin{bmatrix} B_s^h & B_m^h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^h \\ u_m^h \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (2)$$

ここで、 B_s^h 、 B_m^h は、それぞれ、従属節点に関する制約条件行列、独立節点に関する制約条件行列である。式(2)を用いて全体自由度ベクトルを表すと、

$$\{u^h\} = [T^h]\{u_m^h\} \quad (3)$$

$$[T^h] = \begin{bmatrix} -B_s^{h-1}B_m^h \\ I \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。なお、上式において、 I は単位行列である。FEM を用いて非定常熱伝導問題を離散化することで得られる連立方程式を式(5)と定義する。これに式(3)を代入し、左から $[T^h]^T$ を乗じると、

$$[K^h]\{u^h\} = \{q\} \quad (5)$$

$$[T^h]^T[K^h][T^h]\{u_m^h\} = [T^h]^T\{q\} \quad (6)$$

となり、解くべき方程式が式(6)のように得られる。式(6)は独立自由度に関する連立方程式であり、従属自由度が消去されている。

なお、行列 $[T^h]$ を用いて自由度を消去する際に、式(6)では全体の係数行列に対して演算を適用するために、全体の係数行列と自由度消去後の係数行列が必要となるため、その分のメモリ消費量が増加する。本研究では、式(6)の係数行列と演算後の行列の非零成分の位置をあらかじめ求めておき、要素の係数行列を全体の係数行列に組み込む段階で、要素の係数行列に対して行列 $[T^h]$ を乗じたのちに、全体の係数行列に足し合わせることでメモリ消費量の増加を抑えた。

2. 2 熱弾塑性解析

シェル要素に関しては、汎用有限要素解析ソフトウェアなどで一般的に用いられる MITC4 要素を用いた⁵⁾。MITC4 要素は、ソリッド要素を平面に縮退させることで定式化した縮退シェル要素の一種で、ひずみのせん断成分の評価を工夫することで、曲げ変形に対する精度を向上させたものである。なお、解析を効率化するため、シェル要素には塑性変形は生じないものとして取り扱い、線形弾性体を仮定した。

また、シェル要素は変位と回転の自由度を持つが、ソリッド要素は、一般的に、自由度として変位のみを有する。本研究では節点あたりの自由度数を全節点で同一にするために、回転自由度を有するソリッド要素⁶⁾を採用した。本要素は、20 節点 6 面体 2 次要素の中間節点に関する変位を縮退させることで、8 節点 6 面体要素の各節点に回転自由度を持たせたものであり、2 次要素と同等の解析精度を有する要素である⁶⁾。

前節で示した熱伝導解析の場合と同様に、熱弾塑性解析においても MPC を用いてシェルソリッド接続面の自由度を消去する。ただし、熱弾塑性解析においては、熱伝導解析と異なり、1 節点に 6 自由度(3 並進+3 回転)の自由度を有することからこれを考慮する必要がある。また、Fig. 3 に示すように、シェルソリッド接続面において、シェル要素の断面形状が維持されなければならないことから、従属節点の自由度は次の関係

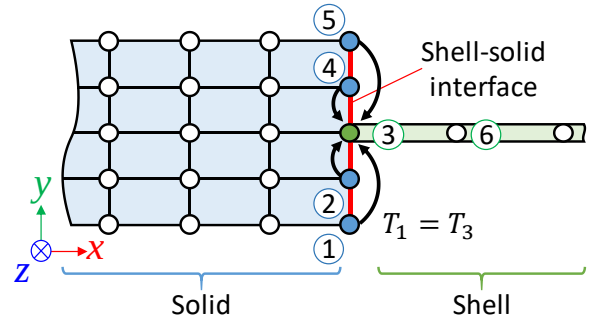


Fig. 2 Schematic illustration of shell-solid coupling on heat conduction analysis.

を満たす必要がある．本研究では，シェルソリッド接続面において，次式の間係を MPC 拘束条件として採用する．

$$\{u_s^m\} = [B_m^m]\{u_m^m\} \quad (7)$$

$$\{u_s\} = \begin{Bmatrix} v_{sx} \\ v_{sy} \\ v_{sz} \\ \theta_{sx} \\ \theta_{sy} \\ \theta_{sz} \end{Bmatrix}, \{u_m\} = \begin{Bmatrix} v_{mx} \\ v_{my} \\ v_{mz} \\ \theta_{mx} \\ \theta_{my} \\ \theta_{mz} \end{Bmatrix}, [B_m^m] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & p'_{sz} & -p'_{sy} \\ 0 & 1 & 0 & -p'_{sz} & 0 & p'_{sx} \\ 0 & 0 & 1 & p'_{sy} & -p'_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで， $\{u_s\}$ ， $\{u_m\}$ は，それぞれ従属節点と独立節点の自由度ベクトルであり， v_s ， θ_s ， v_m ， θ_m は，それぞれ，従属節点の並進自由度と回転自由度，独立節点の並進自由度と回転自由度であり，添え字の x ， y ， z は自由度の方向である．また， p'_s は従属節点の独立節点から見た相対座標である．式(8)は，従属節点の自由度に対して，独立節点の回転自由度による剛体回転を考慮した関係式となっているため，式(8)を MPC 拘束条件として用いることで，シェル要素の断面形状を維持した条件を設定することが可能となる．前節の熱伝導解析と同様に，FEM により熱弾塑性解析問題を離散化することで，得られる式(9)の連立方程式に対して，式(8)の拘束条件を考慮することで，解くべき方程式が式(10)のように得られる．

$$[K^m]\{\Delta u^m\} = \{\Delta F\} \quad (9)$$

$$[T^m]^T [K^m] [T^m] \{\Delta u_m^m\} = [T^m]^T \{\Delta F\} \quad (10)$$

ここで， $[K^m]$ ， $\{\Delta u^m\}$ ， $\{\Delta F\}$ ， $\{\Delta u_m^m\}$ は，それぞれ，全体剛性行列，変位増分ベクトル，荷重増分ベクトル，独立自由度に関する変位増分ベクトルである．また，行列 $[T^m]$ は次式で定義される．

$$[T^m] = \begin{bmatrix} B_{mi}^m \\ I \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで，部分行列 $[B_{mi}^m]$ は，式(8)で定義される拘束条件式をシェルソリッド接続面の各節点で求めたものである．以上により，シェルソリッド接続面におけるソリッド節点に関する自由度を消去し，熱弾塑性解析において，シェル要素とソリッド要素を接続する．また，前節の熱伝導解析と同様に，式(10)の行列演算においては，事前に乗算後の非零成分のパターンを求めておくことで，メモリ使用量を削減した．

以上の解析手法を理想化陽解法 FEM⁷⁾に基づく溶接力学解析プログラムを基に実装した．本プログラムは画像処理装置(Graphics Processing Unit: GPU)による並列処理が実装されており，本研究でもこれに基づいてプログラムを実装した．また，解析手法を実装するにあたり，独立節点はシェルソリッド接続面にあるシェル要素の節点とし，従属節点は，シェルソリッド接続面に位置し，かつ，独立節点からシェル要素の法線方向の延長上あり，シェル要素の板厚内にあるソリッド要素のみに属する節点を従属節点として解析プログラム上で自動的に選択した．

3. 基礎問題における提案手法の検証

3. 1 解析モデル・条件

2章で示したシェル-ソリッド混合解析手法の性能について検討するために，本手法と通常のソリッド要素を用いた熱弾塑性解析手法¹⁷⁾を Fig. 4 に示す基礎的な溶接継手の解析に対して適用した．同図に示すように，本解析モデルは，長さ 600mm，幅 400mm，板厚 6mm の下板に対して，高さ 394mm，板厚 11mm，フランジ幅 200mm の補剛材を溶接するモデルである．また，下板と補剛材の材料はいずれも SM490A 材を仮定し，Fig. 5 に示す材料定数の温度依存性データを解析に用いた．溶接条件は，電流，電圧，溶接速度，熱効率を，それぞれ，330A，32V，10mm/s，0.8 とし，補剛材の両側を同時溶接するものとした．なお，室温は 20°C とした．

3. 2 提案手法の解析精度

溶接部は複雑な非線形の力学挙動を示すことから，ソリッド要素で詳細に解析することが望ましい．一方で，それ以外の領域は線形的な挙動となることから，シェル要素でモデル化可能であると考えられる．本節では，ソリッド要素でモデル化する領域を変化させ，その影響について検討する．

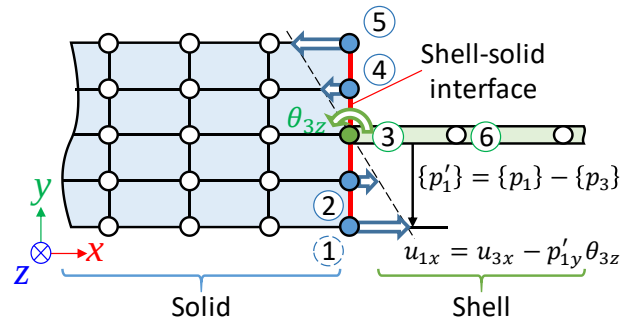


Fig. 3 Schematic illustration of shell-solid coupling on mechanical analysis.

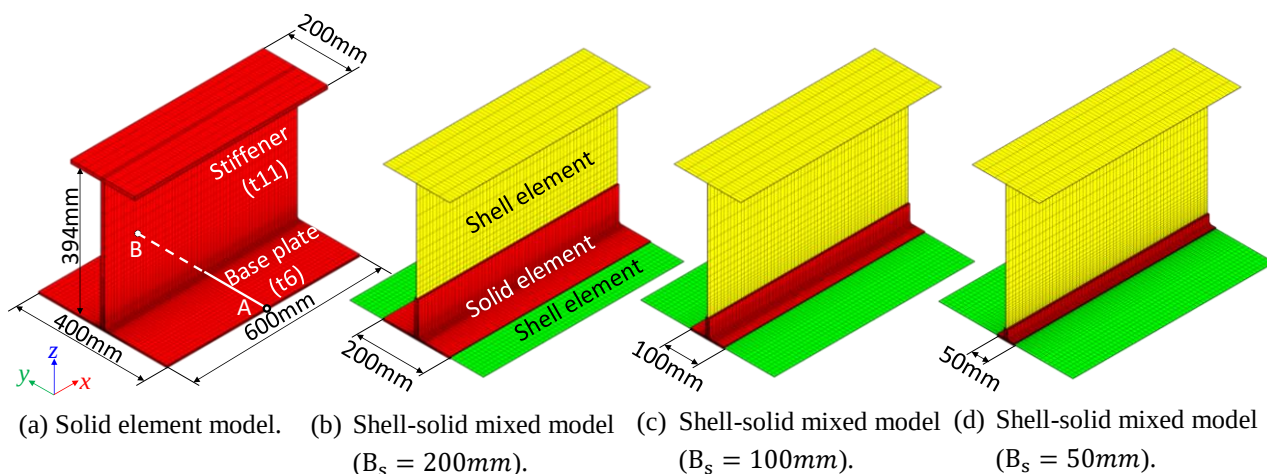


Fig. 4 Analysis model of stiffened plate.

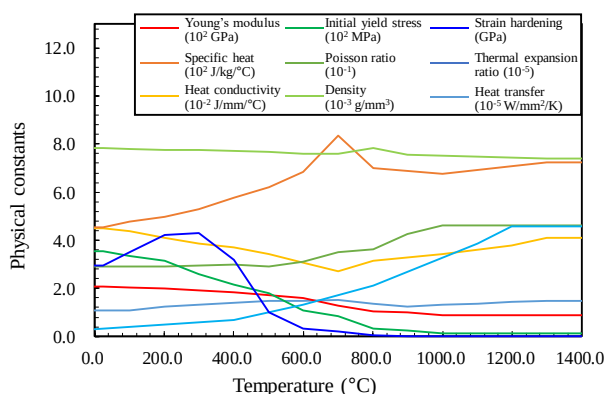


Fig. 5 Temperature dependent material properties of SM490A.

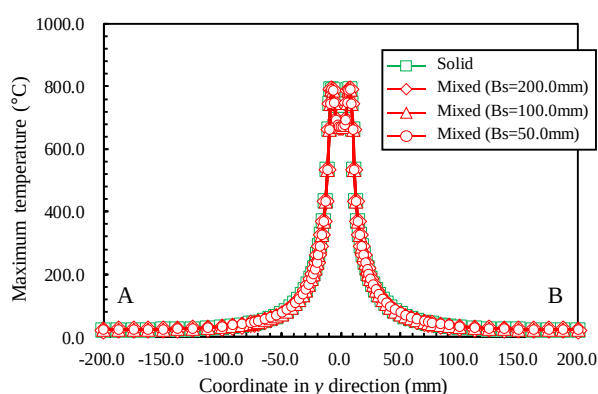


Fig. 6 Maximum temperature distribution along ling A-B.

本検討に用いたモデルは Fig. 4 の(b)から(d)に示すものであり、それぞれ、ソリッド要素でモデル化する領域の幅(B_s)を補剛材から 200mm, 100mm, 50mm とし、それ以外の領域はシェル要素でモデル化した。また、同図(a)は参考解として使用するソリッド要素のみでメッシュ分割を行ったモデルである。メッシュ分割の結果、Fig. 2 (a)-(d)のモデルの要素数は、それぞれ、49,200、41,160(ソリッド要素: 39,120, シェル要素: 2,040), 34,080(ソリッド要素: 30,600, シェル要素: 3,480), 25,920(ソリッド要素: 21,000, シェル要素: 4,920)となった。

熱伝導解析の結果得られた最高到達温度の Fig. 4 (a)に示す溶接線中央横断面の板厚中央に位置する A-B 線上の分布を Fig. 6 に示す。Fig. 6 において、赤色実線の◇印、△印、○印は、それぞれ、ソリッド領域の幅 B_s が 200mm, 100mm, 50mm の解析結果であり、緑色実線の□印は参考解としたソリッド要素の解析結果である。Fig. 7 に示す通り、いずれのモデルにおいても溶接部近傍で材料の力学的熔融温度程度の高温に達していることが分かる。また、シェルソリッド混合モデルにおいては、ソリッド領域の大きさによらず連続的な分布となっており、最高到達温度分布にほぼ差が見られないことが確認できる。

Fig. 7 に溶接開始から 35 秒後の時点での相当応力分布を示す。同図(a)はソリッドモデルの解析結果であり、(b)から(d)は、それぞれ、シェルソリッドモデルのソリッド領域の幅 B_s が 200mm, 100mm, 50mm の解析結果である。Fig. 7 から分かる通り、トーチ周辺は材料が高温になるため、降伏応力が下がることから相当応力が小さくなっており、トーチ通過後は、材料が冷却することで降伏応力が室温のものに近づいていくことから、相当応力が大きくなっていることが分かる。

Fig. 8 に残留応力の x 方向成分(σ_{xx})分布を示す。また、Fig. 9 に、A-B 線上の残留応力の x 方向成分(σ_{xx})の幅方向の分布を示す。同図より、溶接部近傍で引張りの残留応力を生じ、他の領域では、溶接部の引張り残留応力と釣り合うように圧縮残留応力が生じる典型的な溶接時の残留応力分布となっていることが分かる。また、残留応力分布に関してもシェルソリッド接続面で連続的な分布が得られており、継手全体の残留応力分布は、すべての解析モデルにおいて良好に一致していることも確認できる。一方、溶接部近傍に関しては、ソリッド要素でモデル化した領域が最も小さいもの(Fig. 4 (d))の残留応力分布のみが、それ以外のものとわずかに異なる結果となった。これは、ソリッド要素のみに非線形の弾塑性変形を考慮し、シェル要素に関しては線形弾性体を仮定したためであると考えられる。

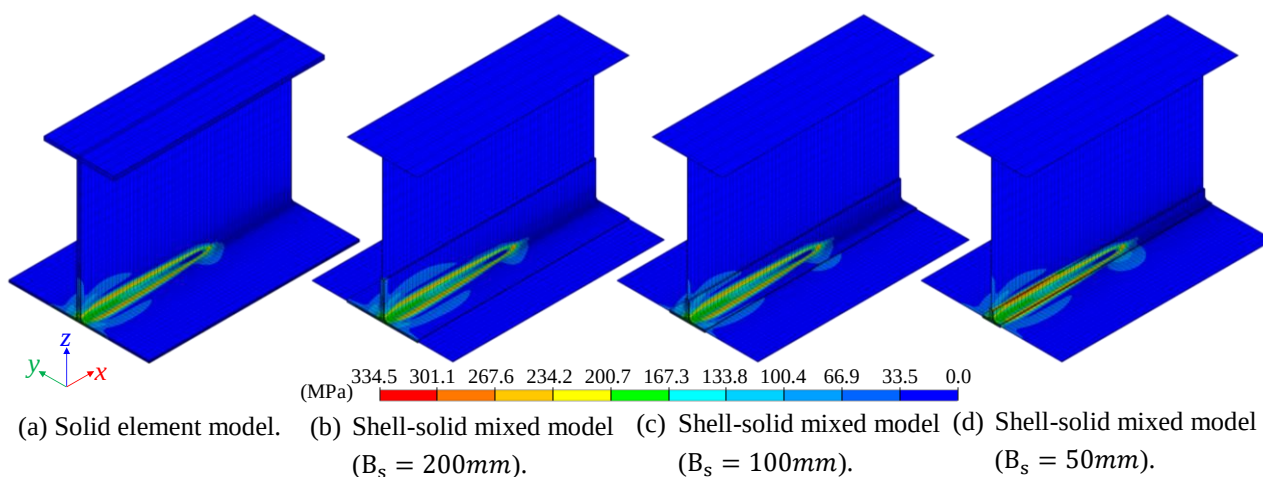


Fig. 7 Distribution of equivalent stress ($\bar{\sigma}$) at 35s from the start of welding.

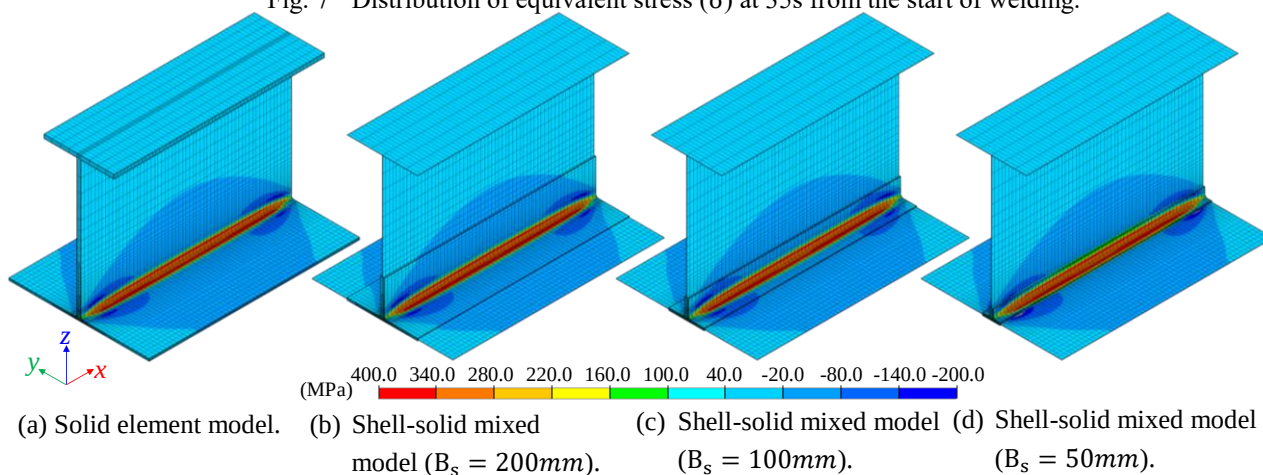


Fig. 8 Distribution of residual stress in x direction (σ_{xx}).

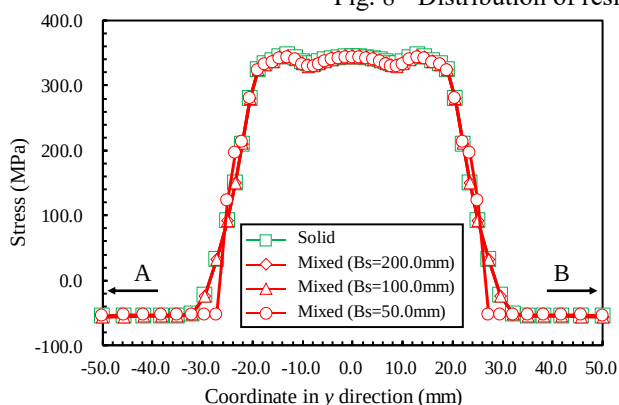


Fig. 9 Distribution of residual stress in x direction (σ_{xx}) along line A-B near welded part.

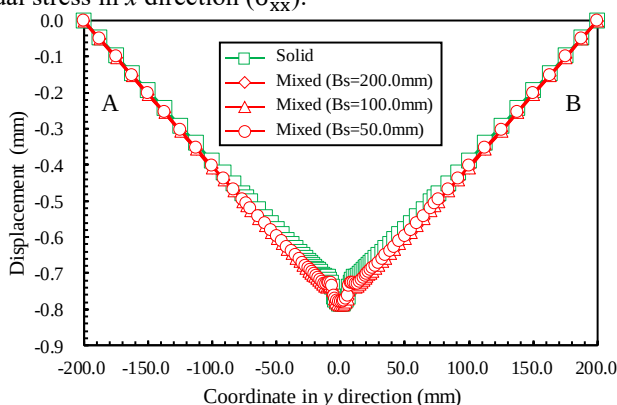


Fig. 10 Distribution of angular distortion.

溶接後の変形について検討する．Fig. 10 および 11 に、それぞれ、角変形と横収縮の分布を示す．角変形は、溶接後の形状における A-B 線からの z 方向の距離、横収縮は、下板の溶接線に対して左右の辺の板厚中央での y 方向変位の差と定義した．Fig. 10 より、角変形、すなわち、下板の面外方向の変形に関しては、全体として溶接部が z 方向に落ち込む V 字型の変形が生じていることが分かる．Fig. 11 に示す通り、横収縮についても、すべての解析モデルで全長にわたって 0.3mm 程度の収縮が生じており、大きな差は見られなかった．

以上のように、シェルソリッド接続面に塑性変形が生じない限り、提案手法は従来手法とほぼ同等の解析精度で溶接変形および残留応力を解析できると考えられる．

3. 3 ソリッド領域のモデル化範囲に関する検討

提案手法を用いて解析を行う際のソリッド領域の大きさの設定について検討するために、溶接時の入熱により塑性変形が生じる可能性のある領域について検討する．この領域は、入熱に伴い生じる応力が降伏応力

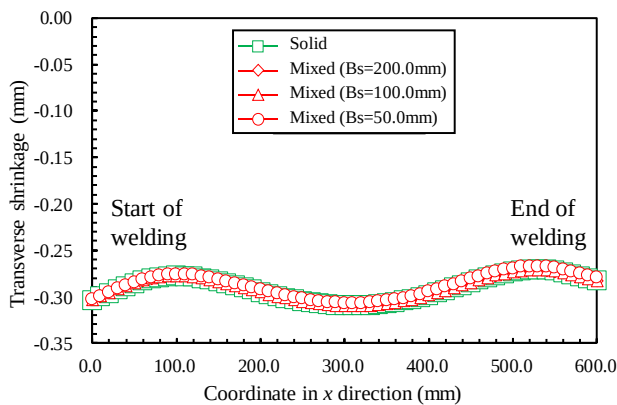


Fig. 11 Distribution of transverse shrinkage.

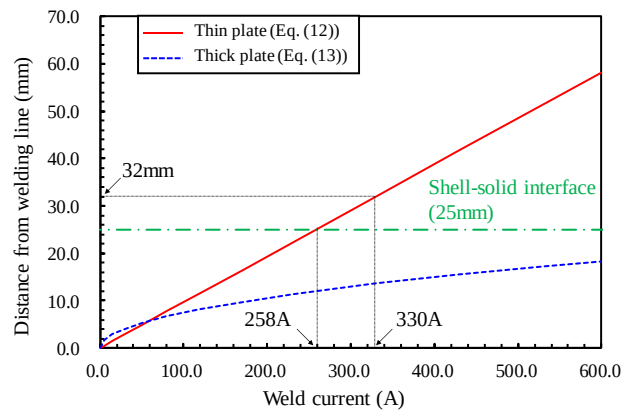


Fig. 12 Estimation of yield distance on the flange part.

を超えるような領域であることから、熱応力が降伏応力を超えるかどうかについて議論する。

最高到達温度が降伏温度を超える場合、塑性ひずみが発生する可能性があるため、その領域はソリッド要素を用いてモデル化すべきであるといえる。ここで、熱伝導論に基づく考察¹⁹⁾より、薄板と厚板、すなわち、横断面の最高到達温度分布が板厚方向に勾配を持たない場合と持つ場合において、最高到達温度が T_{max} に達する点の距離 r が、それぞれ、式(12)、(13)で表される。

$$r = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{Q}{c\rho h} \frac{1}{T_{max} - T_{room}} \quad (12)$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{2}{\pi e} \frac{Q}{c\rho} \frac{1}{T_{max} - T_{room}} \right)} \quad (13)$$

ここで、 Q 、 c 、 ρ 、 h 、 r は、それぞれ、入熱量、比熱、密度、板厚、溶接線からの距離である。本解析モデルはフランジとウェブを持つT継手であるため、それぞれに分配される入熱量を計算すると、最高到達温度が降伏温度となるおおよその溶接線からの距離が求まる。以降、この距離を降伏距離とする。

本解析モデルにおけるウェブ部の降伏距離を求めた結果をFig. 12に示す。図中、実線と破線は、それぞれ、式(12)、(13)により薄板と厚板を仮定した場合のフランジの降伏距離である。同図より、入熱量が100A程度までは、厚板を仮定した場合の方が降伏距離が大きくなるが、それ以上の入熱量の場合には、薄板を仮定した場合の方が降伏距離が大きくなっていることが分かる。Fig. 12において、降伏距離より溶接線に近い領域は、ソリッド要素でモデル化すべきであると考えられる。なお、Fig. 12より、本解析の条件におけるフランジ部の降伏距離は32mmであり、ソリッド領域が最も小さいモデルのシェルソリッド接継面の位置は、降伏距離より小さい25mmであるため、わずかではあるがシェルソリッド接継面に塑性ひずみが生じたものと考えられる。

以上の考察を検証するために、前節と同じモデルにおいて入熱量を変更した解析を行い、解析結果を比較する。入熱量は電流を82.5Aから495.0Aまでを82.5Aずつ変化させた6ケースとした。また、解析に用いたモデルは、全領域をソリッド要素で作成したもの(Fig. 4(a))と、ソリッド領域の幅が50mmのモデル(Fig. 4(d))を用いた。

Fig. 13に、電流の変化に伴うシェルソリッド接継面(溶接線からy方向に25mmに位置)における最高到達温度(T_{max})と溶接線方向の塑性ひずみ(ϵ_{xx})の変化を示す。同図より、電流が大きくなるのに伴い、シェルソリッド接継面も最高到達温度が上昇し、最高到達温度が降伏温度に近い電流が247.5Aのケースにおいてシェルソリッド接継面に塑性ひずみがわずかに発生しており、降伏温度を超えた電流が330Aのケースにおいてシェルソリッド接継面に塑性ひずみが大きくなり、以降、電流の増加に伴いシェルソリッド接継面に塑性ひずみも大きくなっていることが確認できる。Fig. 12より分かる通り、本解析モデルのフランジにおいて25mmが降伏距離となるのは、電流が258Aの場合であり、Fig. 13で塑性ひずみが発生

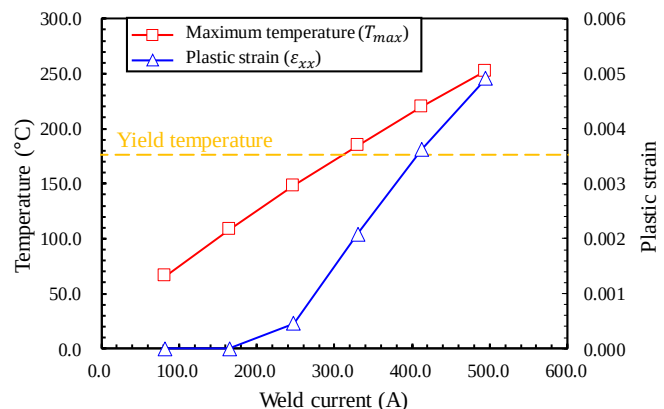


Fig. 13 Change in maximum temperature and plastic strain at shell-solid interface with increase of weld current.

した 247.5A より大きくなっている。電流が 330A の場合においてもソリッド要素との残留応力分布の差は小さいことから、影響は小さいものと考えられるが、解の精度の観点からは、式(12)および(13)で求められる降伏距離より大きい領域をソリッド要素でモデル化すべきであると考えられる。

本節で示したように、熱伝導論に基づくモデル化の指針により、溶接により塑性ひずみが発生する可能性がある領域をモデル化前に算出できるものと考えられる。この領域をソリッド要素でモデル化することで、提案手法を用いた場合においても従来手法と同等の解析精度が得られるものといえる。

4. BC ロースツール模擬試験体の解析

4. 1 解析モデル

実大構造物への提案手法の適用性を示すために、バルクキャリアのロースツール基部のウェブ補強十字継手溶接部を模擬した強度試験体の製作時をモデル化した溶接力学解析を行う。ロースツール基部等のウェブ補強十字継手の溶接ビード止端部は疲労損傷頻発部位として知られており、溶接組み立て時の残留応力が少なからず影響する部位であると考えられる。

解析モデル全体を Fig. 14(a)に示す。本モデルは長さ、幅、高さが、それぞれ、3920mm、1030mm、1025mm であり、メッシュ分割した結果、節点数、自由度数、シェル要素数、ソリッド要素数は、それぞれ、223,273, 1,339,632, 88,439, 119,400 となった。本解析モデルの材料には前章と同様の SM490A 材を仮定した。溶接箇所は 4 か所で、Fig. 14 (b)に示す A から D のパスの溶接を行う。溶接条件は、電流を 180A、電圧を 18V、溶接速度を 8mm/s、熱効率を 0.8 とし、y 軸の負方向から正方向に向かって溶接するものとした。同図に示す通り、本解析モデルでは、溶接部とその周辺のみをソリッド要素とした。拘束条件は、剛体運動のみを拘束するものとした。

比較対象として、六面体ソリッド要素のみを用いたモデルを作成した。六面体モデルの溶接部周辺のメッシュ分割を Fig. 15 に示す。六面体要素のみを用いて解析モデルを構築する場合、板厚まで考慮したメッシュ分割が必要となることから、極めて煩雑な手順が要求され、かつ、解析規模が増大する。本モデルの節点数、自由度数、要素数は、それぞれ、643,382, 1,930,146, 533,104 となった。

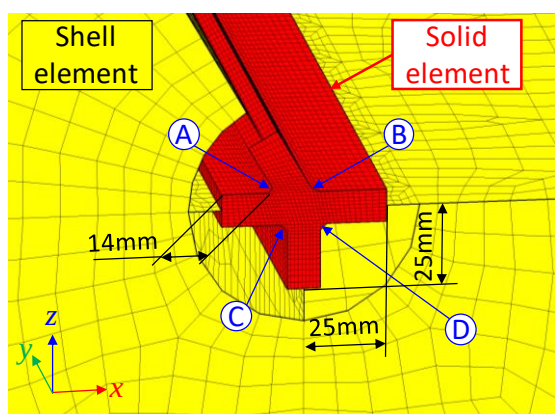
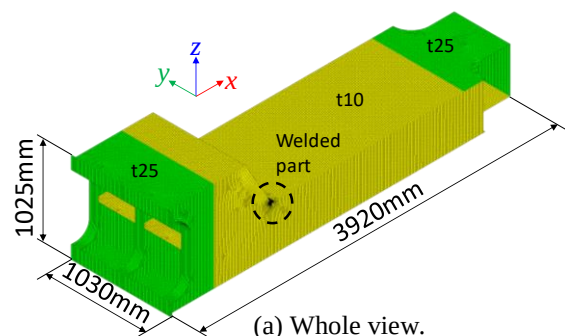
本解析には、CPU に Intel Core i9 3.3GHz、GPU に NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti を搭載した計算機を用いた。熱伝導解析の結果、温度ステップ数が 12,941 となり、これに対応する熱弾塑性解析を実施した。

4. 2 解析結果

Fig. 16 に全 4 パスの溶接後の変形および z 方向の変位分布を示す。Fig. 16 に示す通り、モデルの中央の十字継手を溶接することで、横収縮が発生し、中立軸より上側が内底板が収縮することで、全体としては、z 方向に落ち込むような変形となっていることが分かる。

また、溶接部周辺においては、最終パスの角変形により、内底板が内側にたわむような痩せ馬状の変形が生じており、また、両モデルの変形傾向および変形量はよく一致していることも確認できる。

Fig. 17 に全パス溶接完了後の各パスの内底板側溶接止端部の残留応力の溶接線垂直方向成分(σ_{xx})の始端から終端までの分布を示す。同図より、最終パスであるパス D のビード止端部の始終端および中央部の引張り残留応力が大きく、それ以外は、圧縮もしくは比較的小さ



(b) Zoomed view of welded part.
Fig. 14 Analysis model of lower stool.

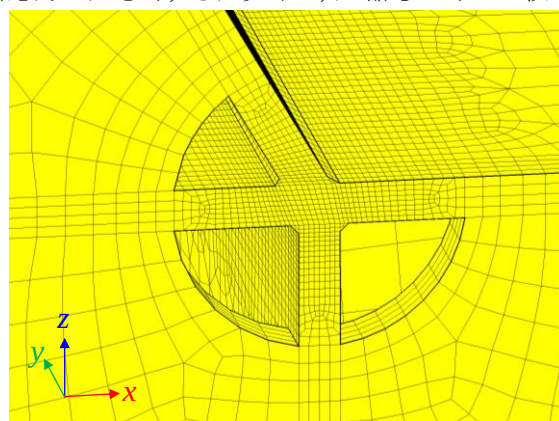


Fig. 15 Mesh division of reference solid model near welded part.

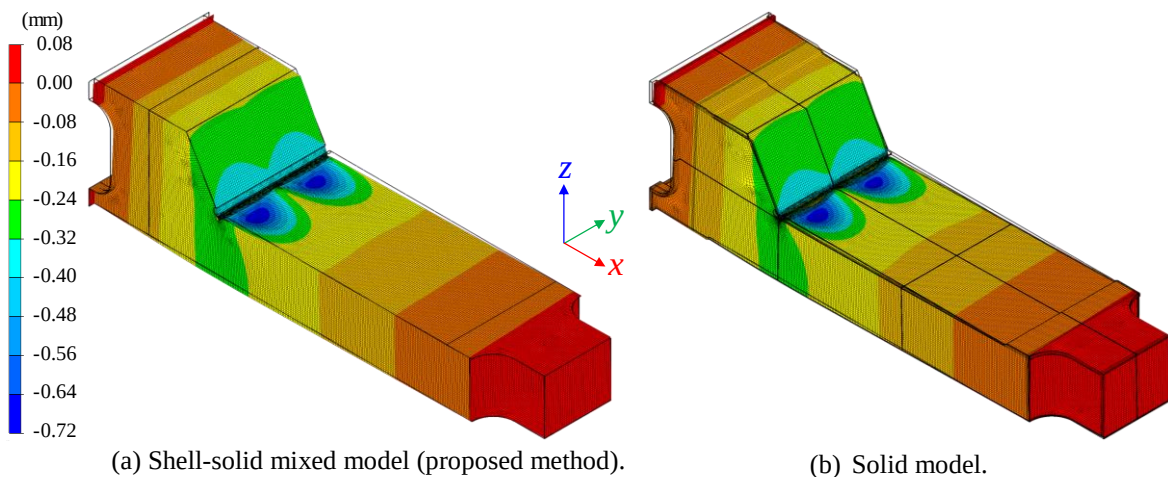


Fig. 16 Distribution of displacement in z direction with deformed shape after welding.

い残留応力となっていることが確認できることから、最終パスと溶接線中央のガーダーによる構造的な拘束の影響が顕著であることが分かる。また、ソリッドモデルとシェルソリッド混合モデルの残留応力分布は、いずれもよく一致している。

本節で示した通り、提案手法を用いることで、一般的な構造解析に使用される CAD モデルから作成されるシェル要素モデルに対して、局所的にソリッド要素を埋め込むことで、より詳細な応力評価を行えることから、提案手法は、効率的かつ高精度な構造物のモデル化に対して有効であるといえる。

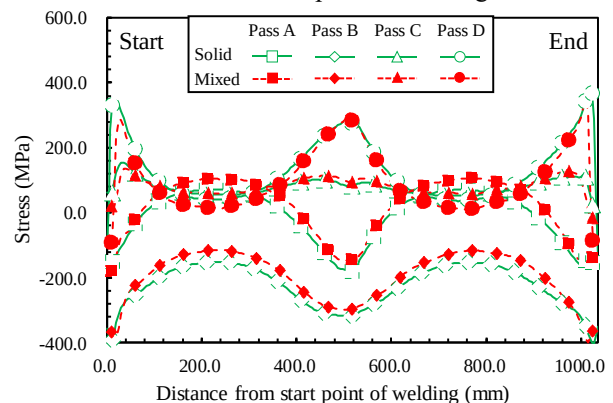


Fig. 17 Distribution of residual stress in x-direction (σ_{xx}) at weld toe of each pass.

5. 結 言

本研究では、薄板複雑構造物の効率的な溶接力学解析を行うために、シェル要素とソリッド要素を MPC に基づく自由度消去により結合させたシェルソリッド混合解析手法を提案した。溶接力学解析は、熱伝導解析と熱弾塑性解析を行う必要があることから、提案手法では、その両方において MPC を用いた定式化を示した。提案手法をウェブとフランジからなる基礎的な構造の溶接力学解析に対して適用した結果、提案手法はソリッド要素を用いた解析手法とほぼ同等の解析精度で、溶接変形および残留応力を解析できることを確認した。また、バルクキャリアのロワースツール基部の十字継手を模擬した構造の溶接力学解析に対して適用した結果、提案手法による変形および残留応力の解析結果は、複雑構造物においても参考解のソリッドモデルの解析結果よく一致することを確認した。以上のように、提案手法は、薄板複雑構造物における効率的かつ高精度なモデル化に対して有効であるといえる。

参考文献

- 1) Y. Ueda, T. Yamakawa: Analysis of thermal elastic-plastic behavior of metals during welding by finite element method, J. JWS, Vol.42, No.6 (1973), pp.61-71.
- 2) N. Osawa, K. Hashimoto, J. Sawamura, T. Nakai, S. Suzuki: Study on shell-solid coupling FE analysis for fatigue assessment of ship structure, Mar. Struct., Vol.20 (2007), pp.143-163.
- 3) T. Belytschko, W.K.Liu, B.Moran, Nonlinear finite elements for continua and structures, Wiley (2000).
- 4) 後藤 和哉, 橋本 学, 奥田 洋司: Convergence of parallel iterative linear solver in treatment of multipoint constraints with implicit and explicit master-slave elimination, J. Adv. Sim. Sci. Engng., Vol.7, No.1 (2015), pp.1-9.
- 5) E. N. Dvorkin, K. J. Bathe: A continuum mechanics based for-node shell element for general nonlinear analysis, Engng. Comput., Vol.1 No.1 (1984), pp.77-88.
- 6) S. M. Yunus, T. P. Pawlak, R. D. Cook: Solid elements with rotational degrees of freedom: Part 1 -Hexahedron elements, Intl. J. Numer. Meth. Engng., Vol.31 (1991), pp.573-592.
- 7) K. Ikushima, M. Shibahara: Nonlinear computational welding mechanics for large structures, J. Offshore Mech. Arct. Engng., Vol.141, No.2 (2019), paper no.021603.