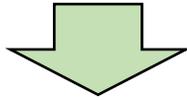


シェル-ソリッド混合解析手法による 薄板複雑構造物建造時 の力学的挙動の効率的解析

Efficient Analysis of Mechanical Behavior During Construction of Thin Complex Structures
by Shell-Solid Mixed Analysis Method

大阪府立大学 工学域
海洋システム工学課程
生島研究室 B4 柏井栄輝
(指導教員 : 生島一樹) 1

溶接時の変形や**残留応力**などは
疲労損傷や破壊などの原因に



構造物の亀裂や崩壊が生じ、
大きな事故に繋がる

建造時の溶接解析が重要

船舶や橋梁などの長大な構造物

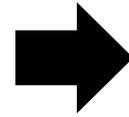
解析時間が膨大に

解析時間の効率化を目指す



薄板構造物

- ・航空機や船舶、LNGタンクなどに多く用いられる



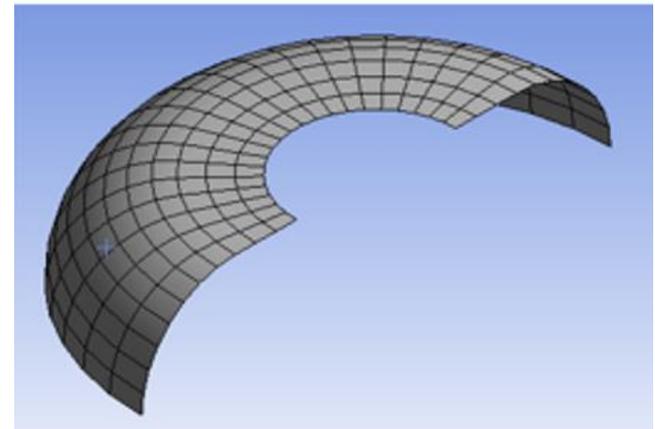
シェル要素での解析が一般的



シェル要素

- ・計算上は板厚分の剛性を持った見た目は厚み0の要素
- ・節点数が少ない為、**解析時間が短くなる**

シェルの節点自由度
→6自由度



溶接部近傍



- ・ 疲労による破断や損傷が起こりやすく、**事故の原因**となりやすい
- ・ **塑性ひずみ**が生じる

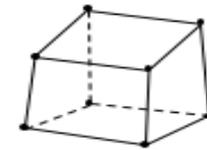


ソリッド要素を用いた応力や変位の詳細な検討が必要

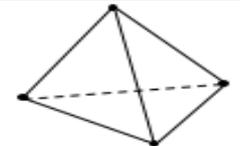
ソリッド要素

- ・ 三次元立体要素
- ・ 詳細な解析が出来るが、モデル化が困難で、要素数が多くなる為、**解析時間が膨大に**

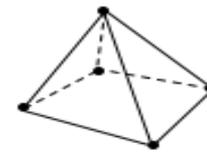
ソリッドの節点自由度
→3自由度



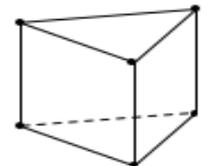
六面体(ヘキサ)



四面体(テトラ)



ピラミッド



三角柱(プリズム)

研究目的

ソリッドとシェル要素を用途に応じて活用する事で
解析精度を保ちつつ、解析時間を短縮する

大規模溶接解析の効率化

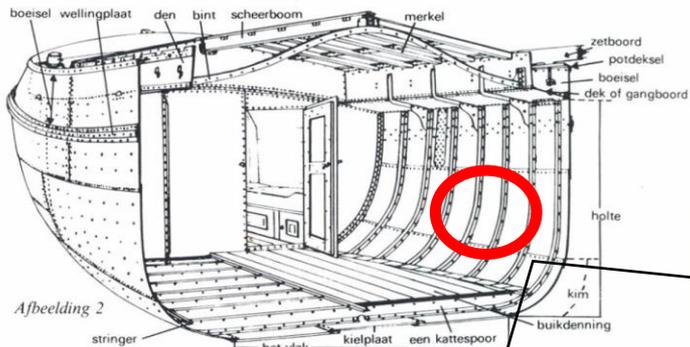
課題

- ①シェルとソリッド要素の**接続方法**
- ②ソリッド要素で**構築すべき箇所**の推定
- ③解析の**精度**

本研究

- ①シェルとソリッド要素を混合させた**溶接力学解析手法の提案**
- ②ソリッドで**構成すべき範囲の指針の提案**
- ③提案手法によるビードオンプレート、薄板複雑構造物での**解析精度検証**

シェルソリッド混合解析手法の概略



接続面の連続性を保つ
拘束条件を与える

Shell - Solid
Connection Face

T-joint weld

- ・ソリッド要素以外の場所に配置
- ・シェル要素を用いる

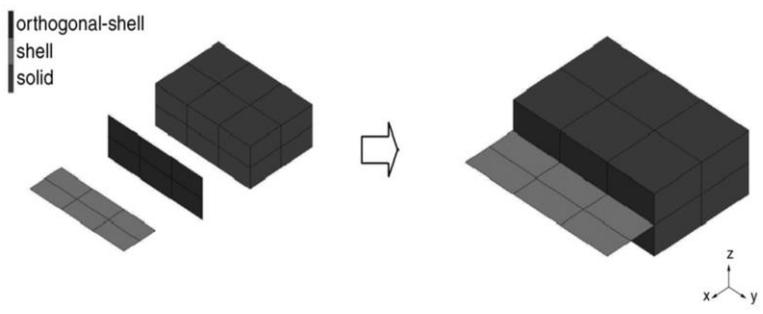
Shell part

Solid part

- ・ 詳細な検討が必要な溶接部近傍に配置
- ・ ソリッド要素を用いる

効率的な解析を可能にする

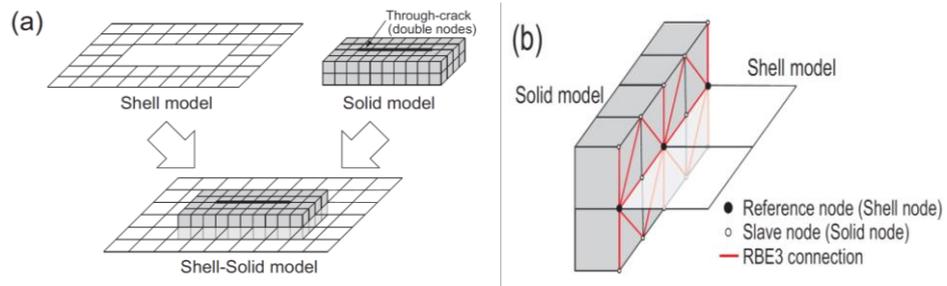
■ 疑似的なシェル要素



- ・ シェルソリッド接続面に疑似シェル要素を貼る

応力摂動を回避するために疑似シェル要素の板厚を設定する必要がある

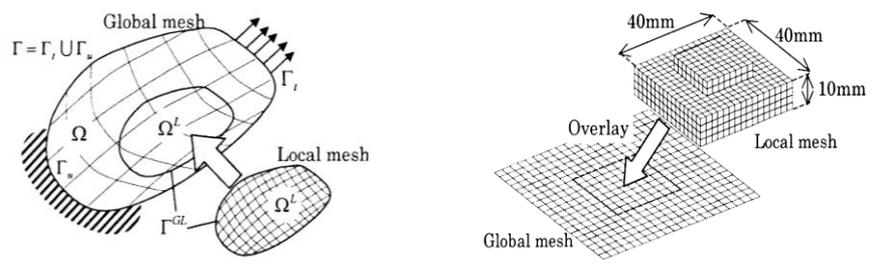
■ 剛体リンク要素



- ・ 剛体リンク要素で節点同士を結合

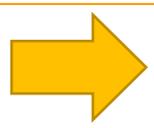
リンクの設定方法に工夫が必要

■ 重合メッシュ法



- ・ 重合メッシュ法による局所要素の埋め込み

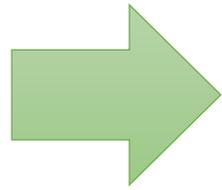
定式化が複雑



どれも実装が困難

①シェルとソリッドの接続方法

より平易な実装方法が必要



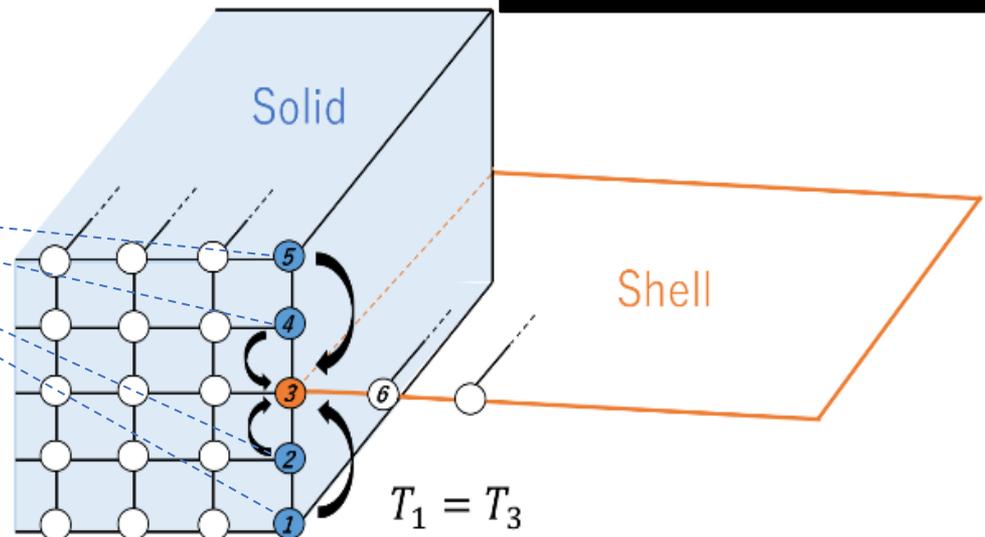
多点拘束を用いて、**直接自由度を拘束** することで、シェル要素とソリッド要素を接続する

MPC拘束条件

$$\theta_s = \theta_m$$

θ_s : ソリッド要素の節点温度

θ_m : シェル要素の節点温度



接続面において接点を共有しないソリッド節点温度を**シェル節点の温度で拘束**

①シェルとソリッドの接続方法

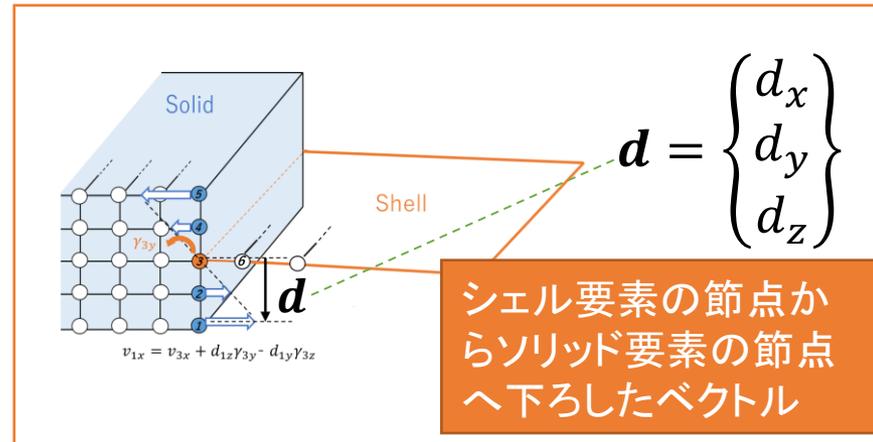
熱弾塑性解析

変位の関係

$$\begin{cases} u_{sx} &= u_{mx} + d_z u_{m\beta} - d_y u_{m\gamma} \\ u_{sy} &= u_{my} + d_x u_{m\gamma} - d_z u_{m\alpha} \\ u_{sz} &= u_{mz} + d_y u_{m\alpha} - d_x u_{m\beta} \end{cases}$$

ソリッド→並進3自由度

シェル→並進3自由度+回転3自由度



MPC拘束条件

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{B}_n^n \mathbf{u}_m$$

接合面での自由度消去

$$\begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \\ u_{sz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & d_z & -d_y \\ 0 & 1 & 0 & -d_z & 0 & d_x \\ 0 & 0 & 1 & d_y & -d_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_{mx} \\ u_{my} \\ u_{mz} \\ u_{m\alpha} \\ u_{m\beta} \\ u_{m\gamma} \end{bmatrix}$$

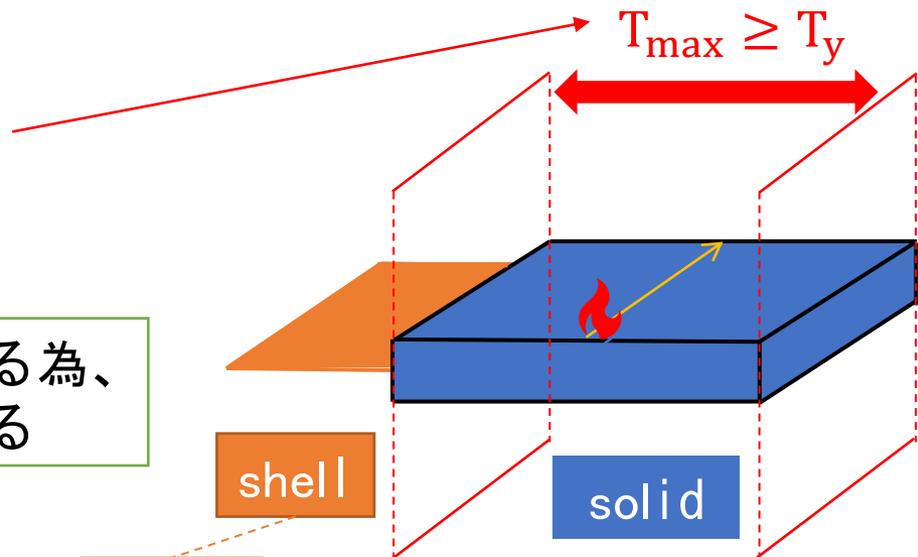
ソリッド側自由度

シェル側自由度

最高到達温度 \geq 降伏温度



塑性変形を生じる可能性がある為、ソリッドで構成する必要がある



弾性体を仮定



解析時間短縮のため

降伏温度 T_y (拘束された一次元の棒)

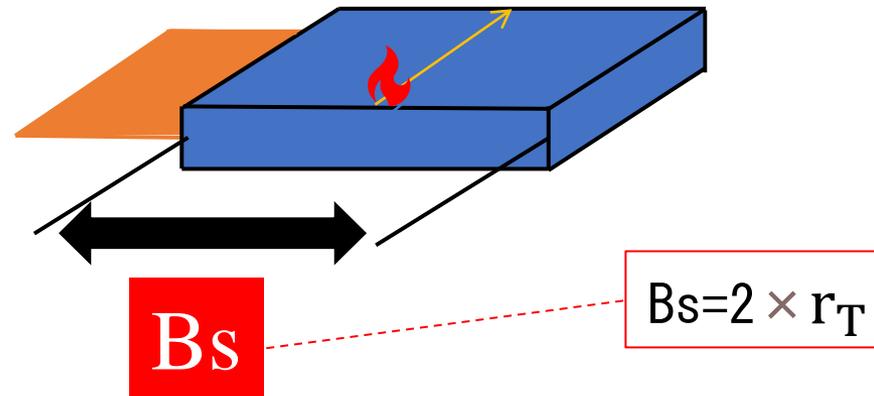
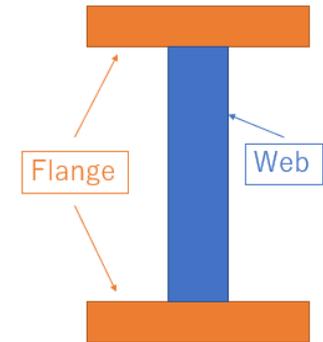
$$T_y = \frac{\sigma_y}{\alpha E} + T_{room}$$

- σ_y : 材料の降伏応力
- α : 線膨張率
- E : ヤング率
- T_{room} : 室温

今回用いる降伏距離 r_T (フランジをF、ウェブをWで表す)

$$r_T = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{Q_{net}}{c\rho(2h_F + h_W)} \frac{1}{T_y - T_{room}}$$

Q_{net} : 正味入熱量 c : 比熱 T_{room} : 室温
 h : 板厚 r : 溶接線からの距離 ρ : 密度



今回は、溶接部近傍のソリッドで
構成する幅をBsと定義する

③ビードオンプレートでの解析

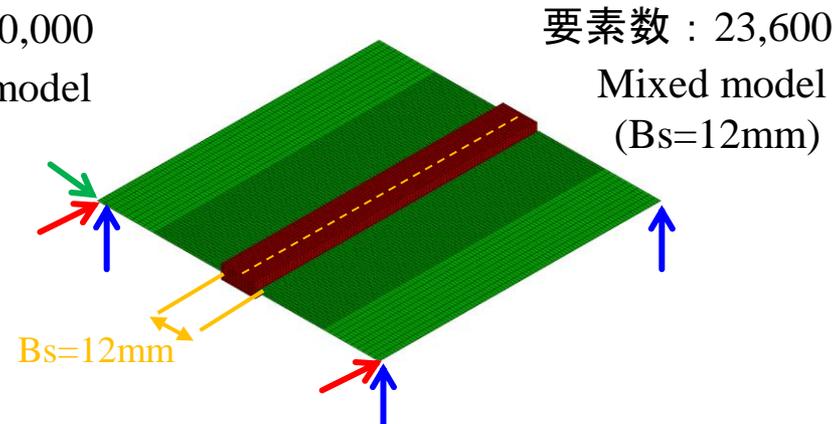
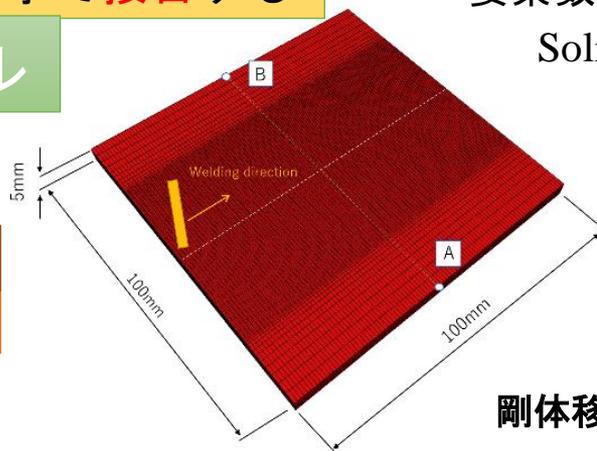
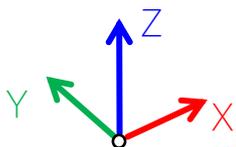


船舶等の建造時に、薄板に熱を加えて溶かす事で接合する

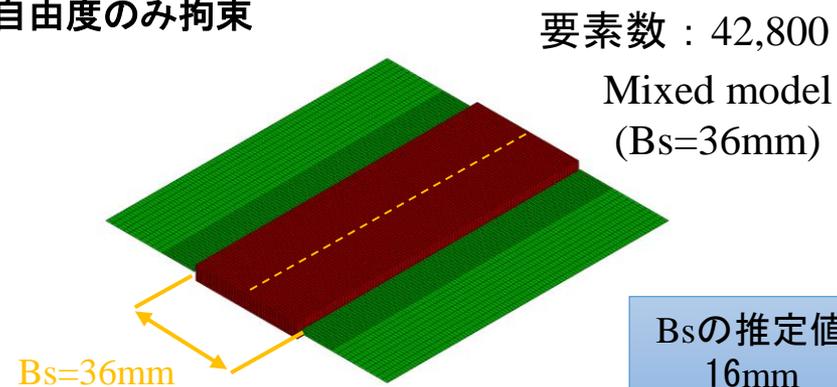
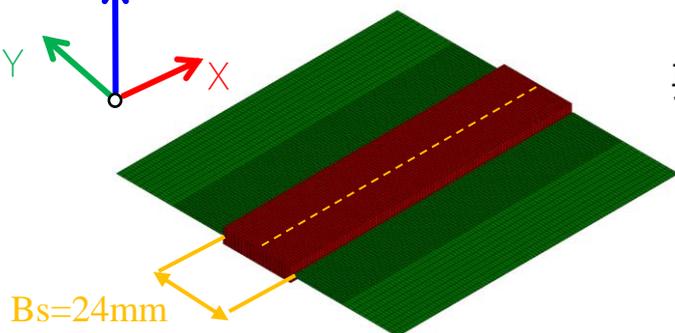
解析モデル

座標

原点：底中央



要素数：33,200
Mixed model
(Bs=24mm)



Bsの推定値
16mm

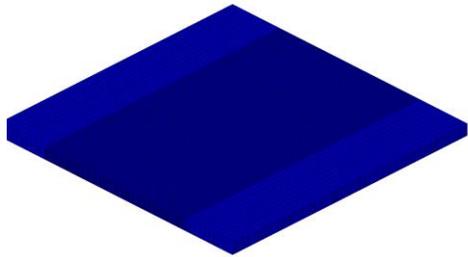
ビードオンプレート解析の目的

- ① 薄板に熱を加えた際の残留応力や変形の解析精度の確認
- ② ソリッド要素で構成すべき範囲についての検討

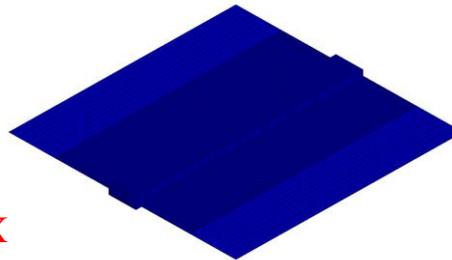
③ビードオンプレートでの解析

変形の様子

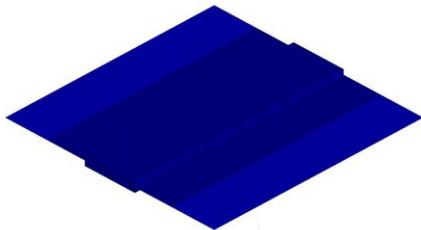
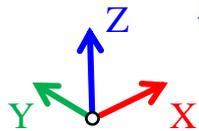
Solid model



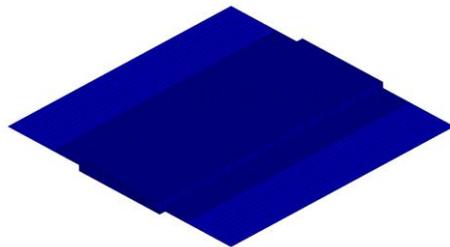
Mixed model
(Bs=12mm)



Mixed model
(Bs=24mm)

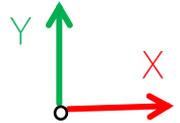
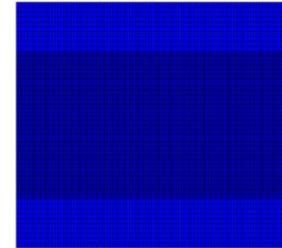


Mixed model
(Bs=36mm)



変形50倍

入熱の様子



入熱条件

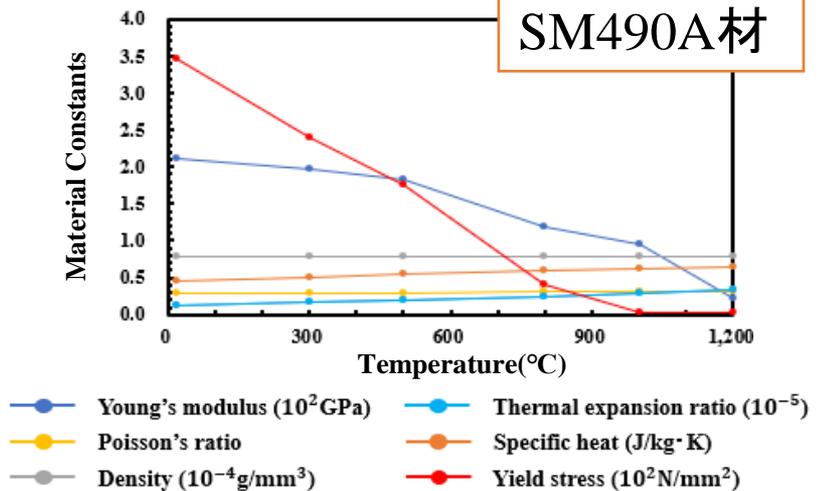
電流 : 100[A]

電圧 : 10[V]

溶接速度 : 10[mm/s]

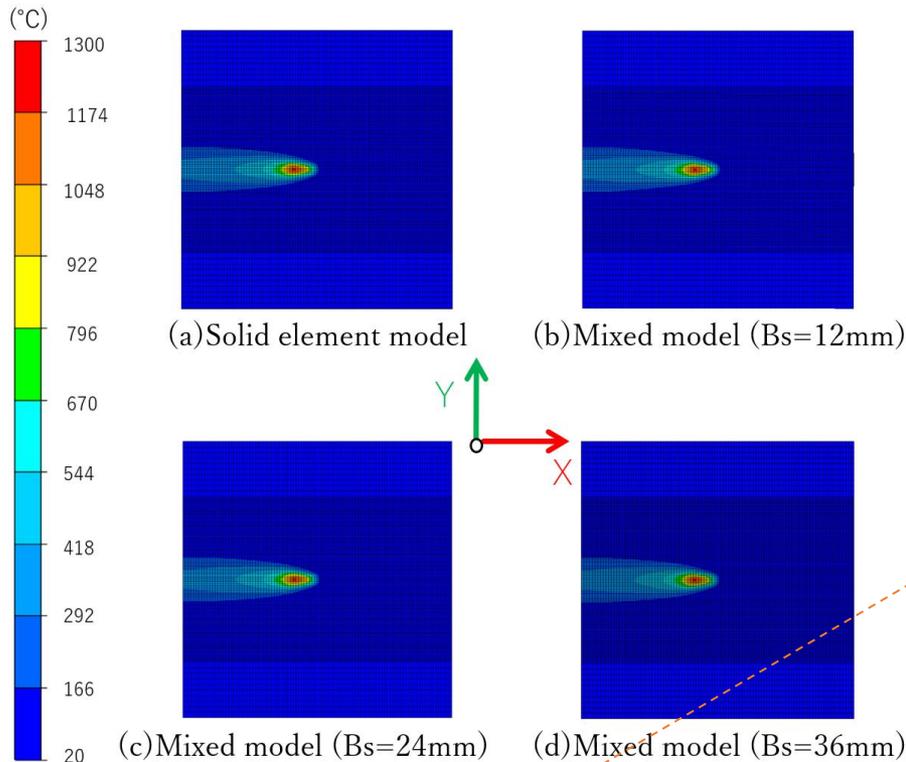
熱効率 : 0.8

材料定数

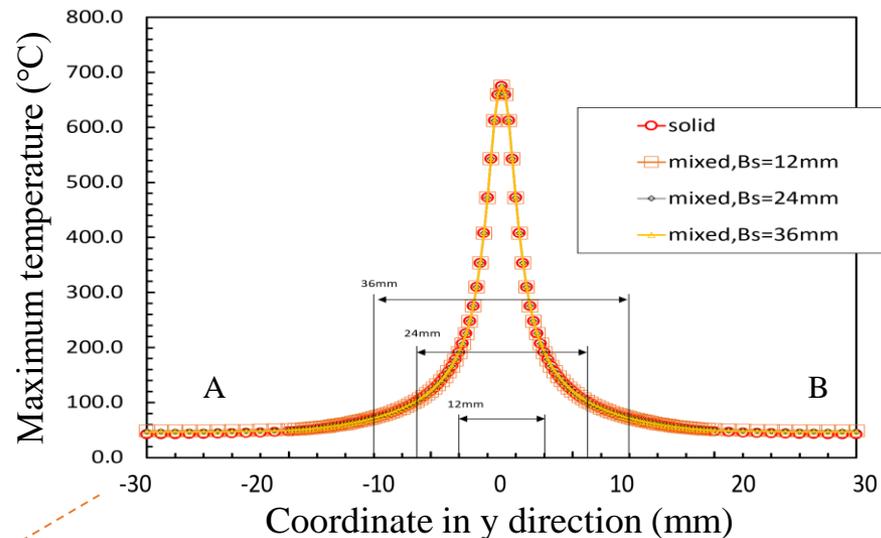


③ビードオンプレートでの解析

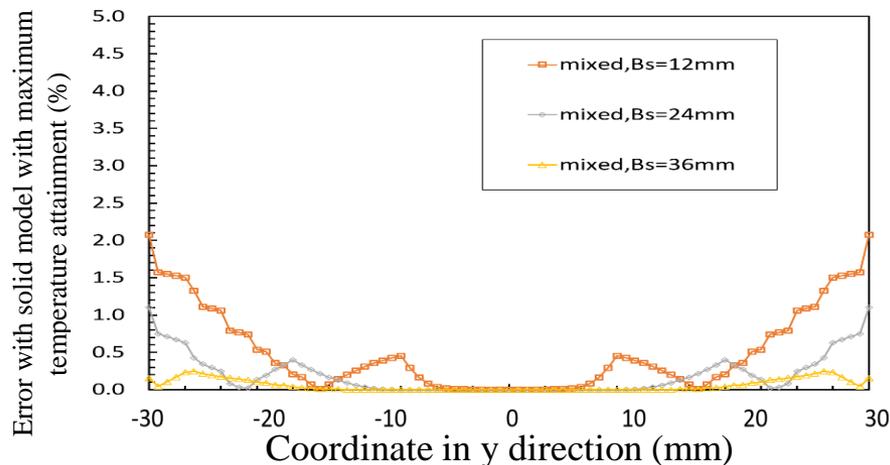
過渡の温度分布



最高到達温度



溶接部周辺のソリッドモデルとの誤差の割合
(最高到達温度)

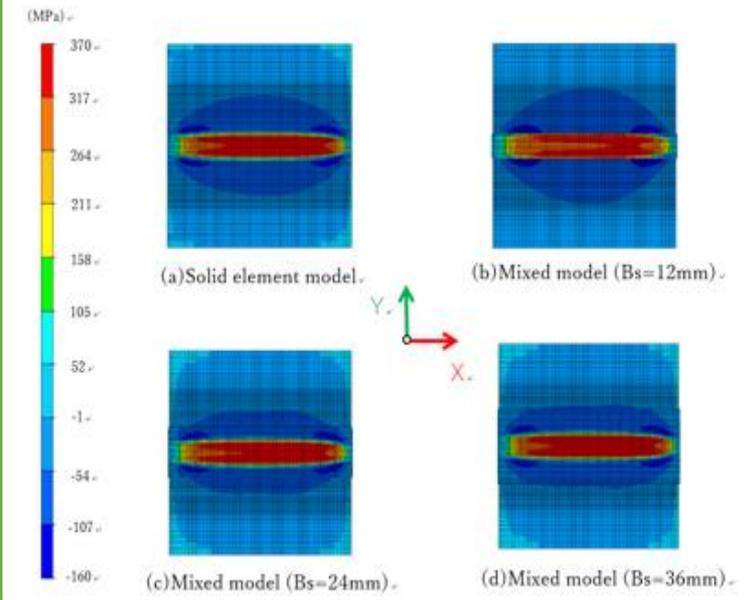


過渡の温度分布と最高到達温度の全体的な分布は**全てのモデルで良好に一致**

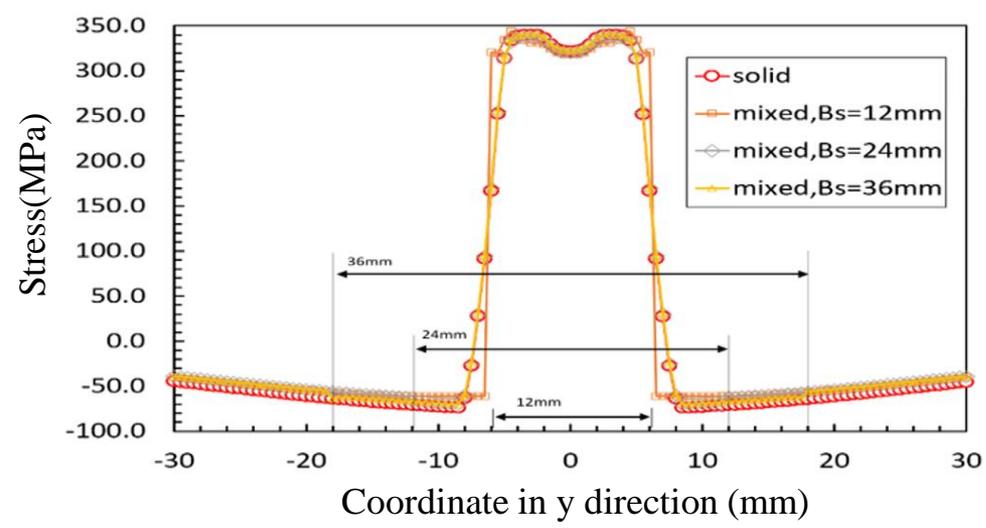
溶接部周辺の誤差の割合はBs=12mmのモデルで**2%程**で、温度差は**1.3°C程度**

③ビードオンプレートでの解析

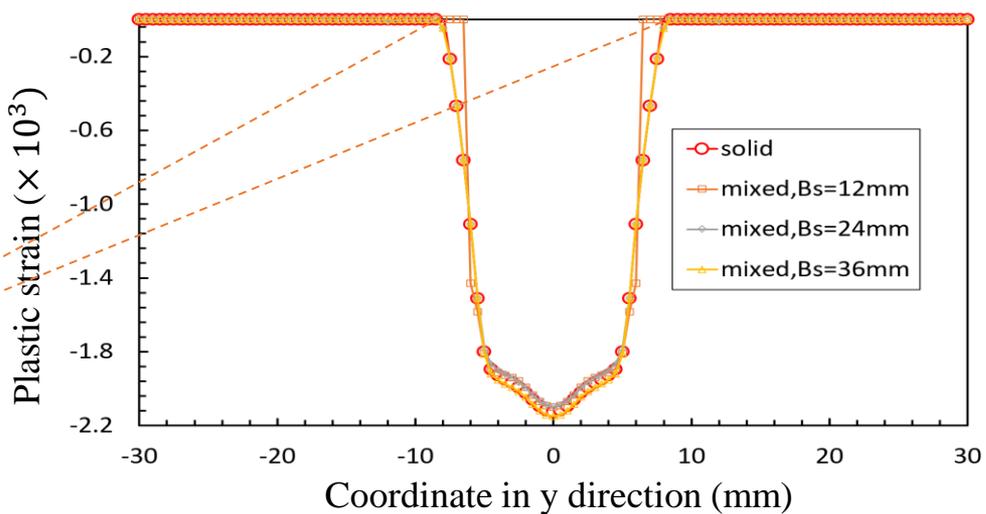
X方向の残留応力



溶接部近傍のX方向残留応力



溶接部近傍のX方向塑性ひずみ



残留応力、塑性ひずみ共にBs=12mmのモデルを除いて一致

Bsの推定値

16mm

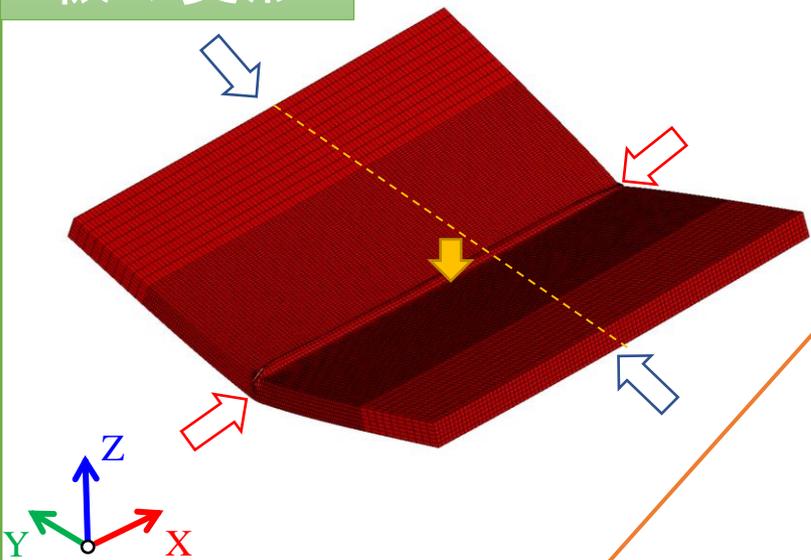
推定値◎

塑性ひずみの発生位置

-8mmと8mm

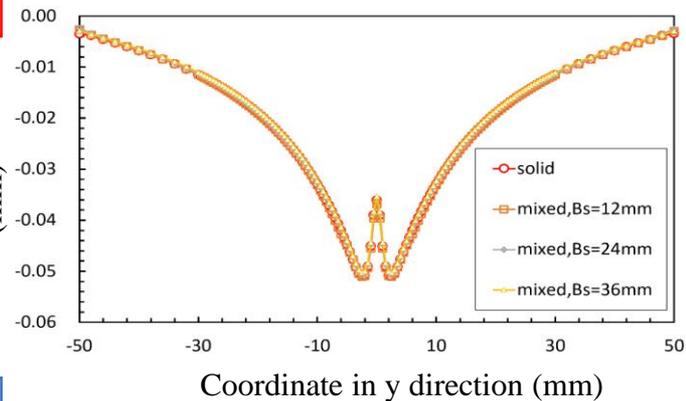
③ビードオンプレートでの解析

板の変形



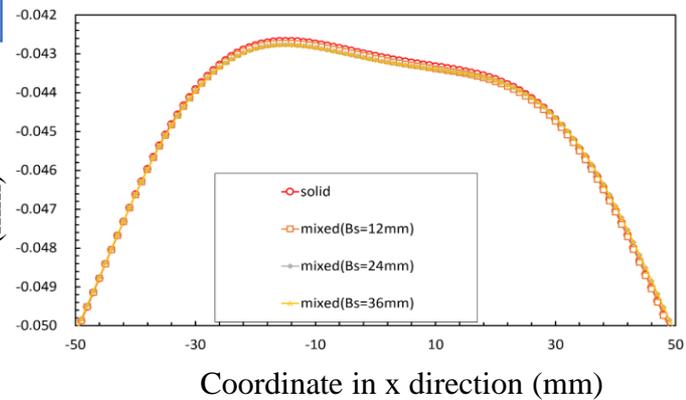
縦収縮

X-direction displacement (mm)



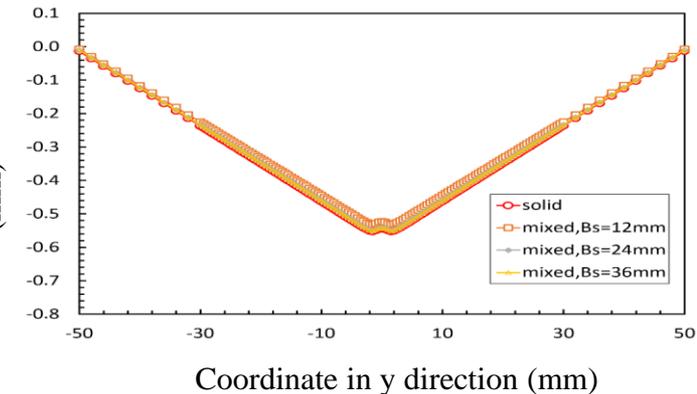
横収縮

Y-direction displacement (mm)



角変形

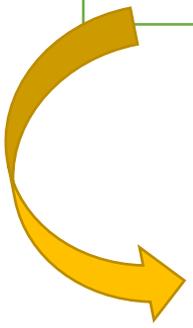
Z-direction displacement (mm)



縦収縮、横収縮、角変形の
全てで、全モデルが**良好に**
一致している事が分かる

ビードオンプレート 解析のまとめ

- ・ 熱伝導解析と板の変位に関しては、全てのモデルでソリッドモデルと同等の解析結果となった
- ・ 塑性ひずみが生じる箇所をソリッド要素で構成する事で、残留応力と塑性ひずみに関してもソリッドモデルと同等の結果を得られた

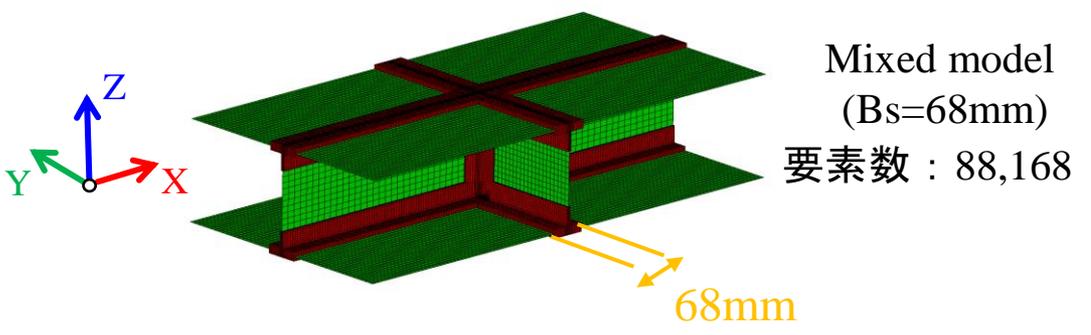
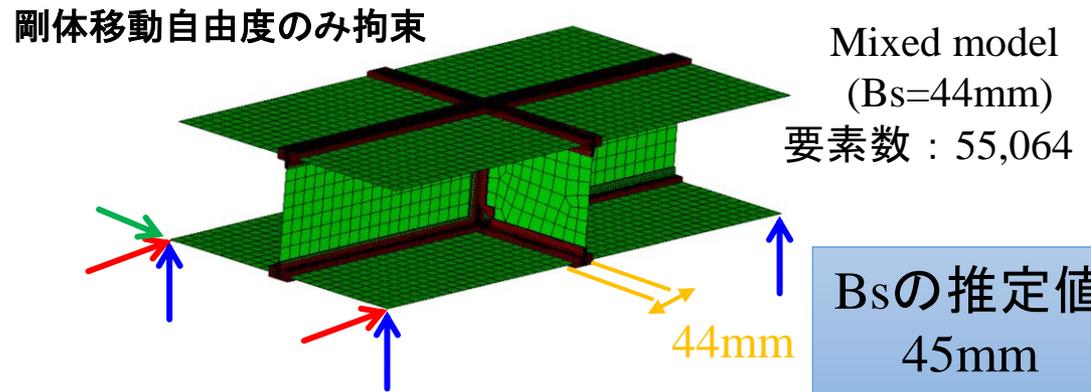
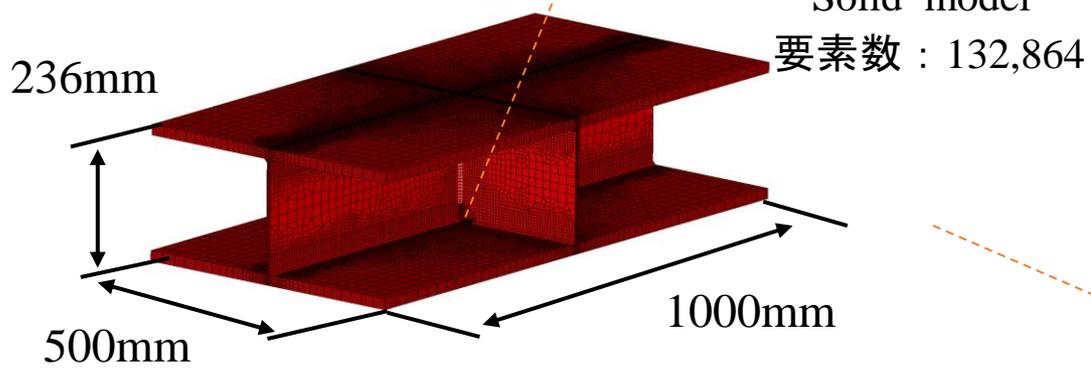


モデルが大規模になった時の解析
精度と解析の効率性の検証

③薄板複雑構造物での解析

解析モデル

座標
原点：下板の底中央



実際の構造物に近いモデルでの解析



薄板複雑構造物解析の目的

- ①モデルがより複雑になった時の解析精度
- ②モデルの規模が大きくなった際の解析の効率性(解析時間)の検討

③薄板複雑構造物での解析

変形50倍



入熱条件

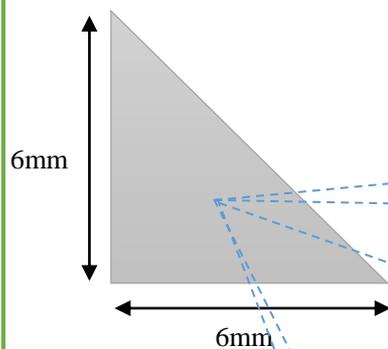
電流 : 200[A]

電圧 : 50[V]

溶接速度 : 10[mm/s]

熱効率 : 0.8

入熱部材の断面図



入熱部分

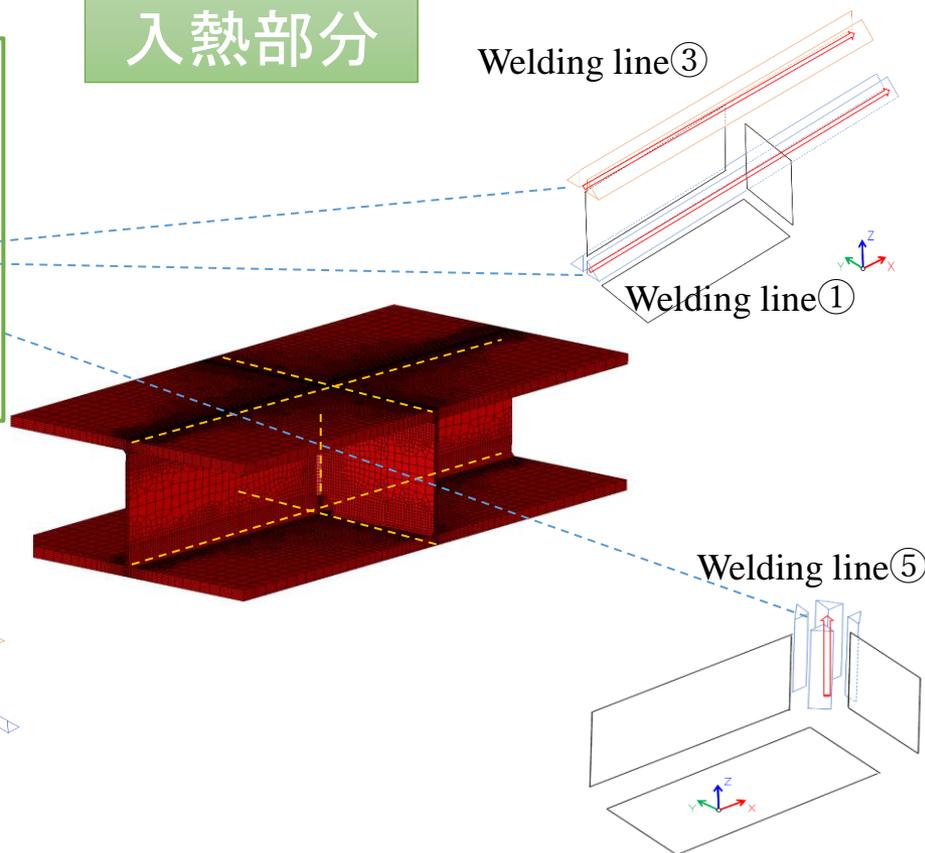
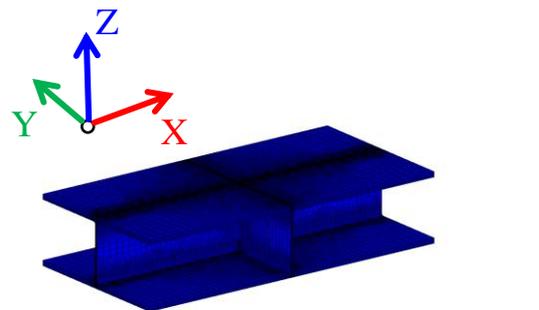
Welding line③

Welding line①

Welding line④

Welding line②

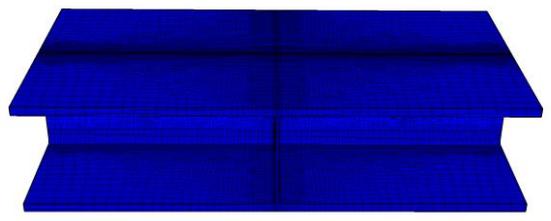
Welding line⑤



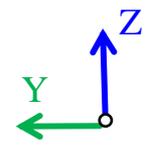
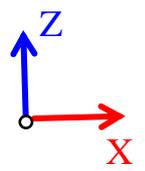
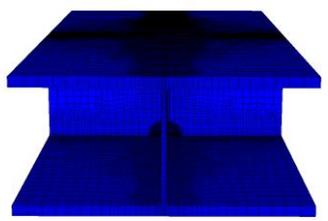
③薄板複雑構造物での解析

入熱の様子 (下板)

X方向入熱

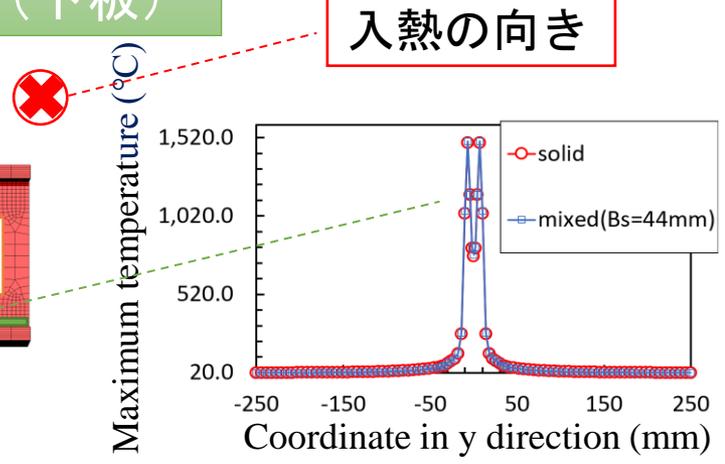
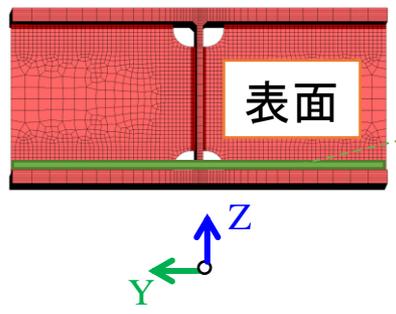


Y方向入熱

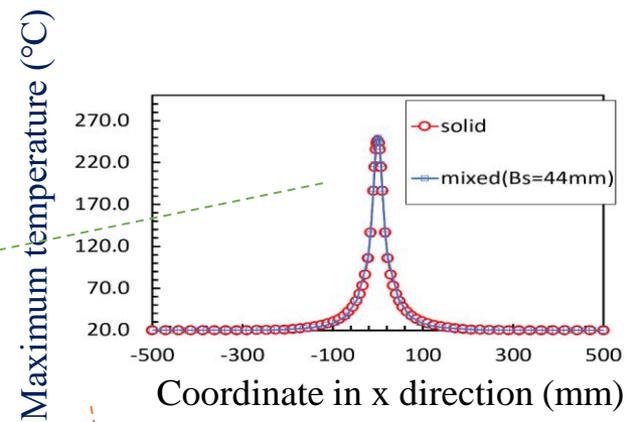
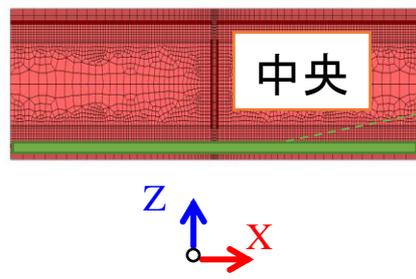


最高到達温度 (下板)

X方向入熱



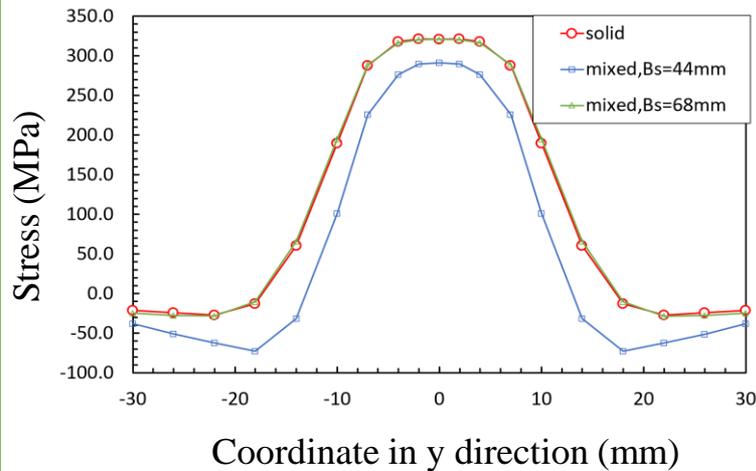
Y方向入熱



最高到達温度の全体的な分布はソリッドモデルと混合モデルで良好に一致

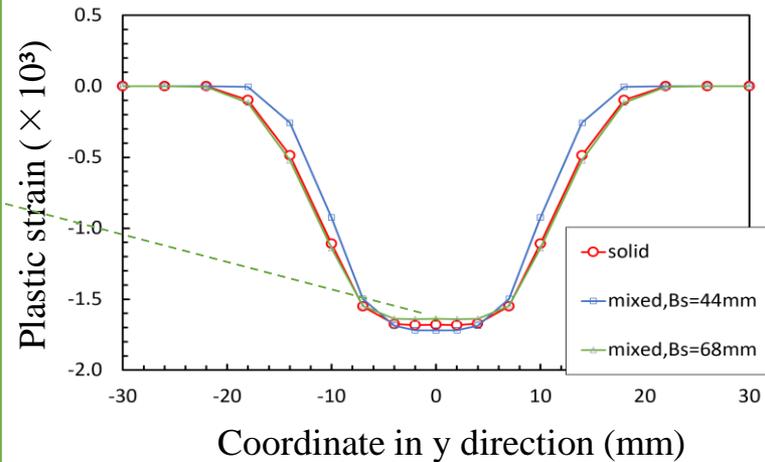
③薄板複雑構造物での解析

溶接部近傍のX方向残留応力

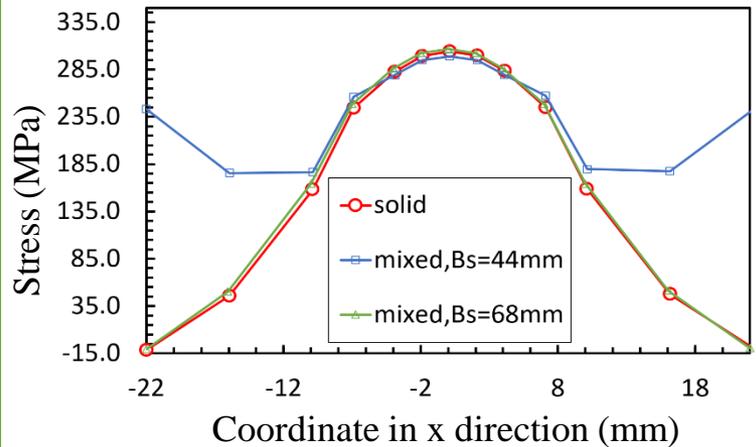


最大誤差
 4.0×10^{-5} 程度

溶接部近傍のX方向塑性ひずみ

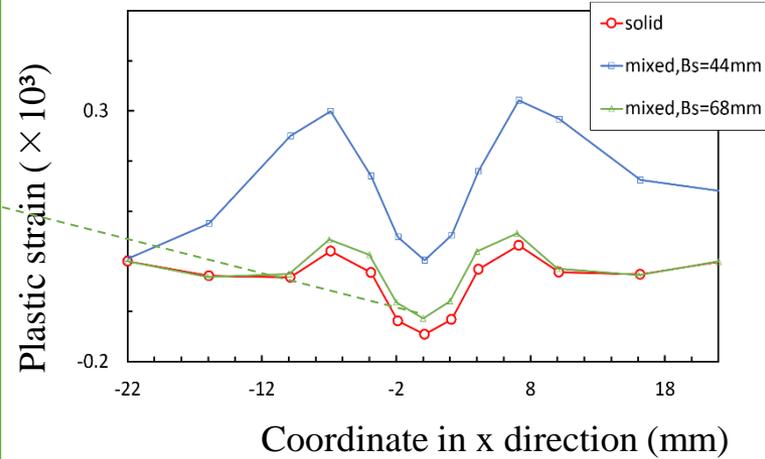


溶接部近傍のY方向残留応力



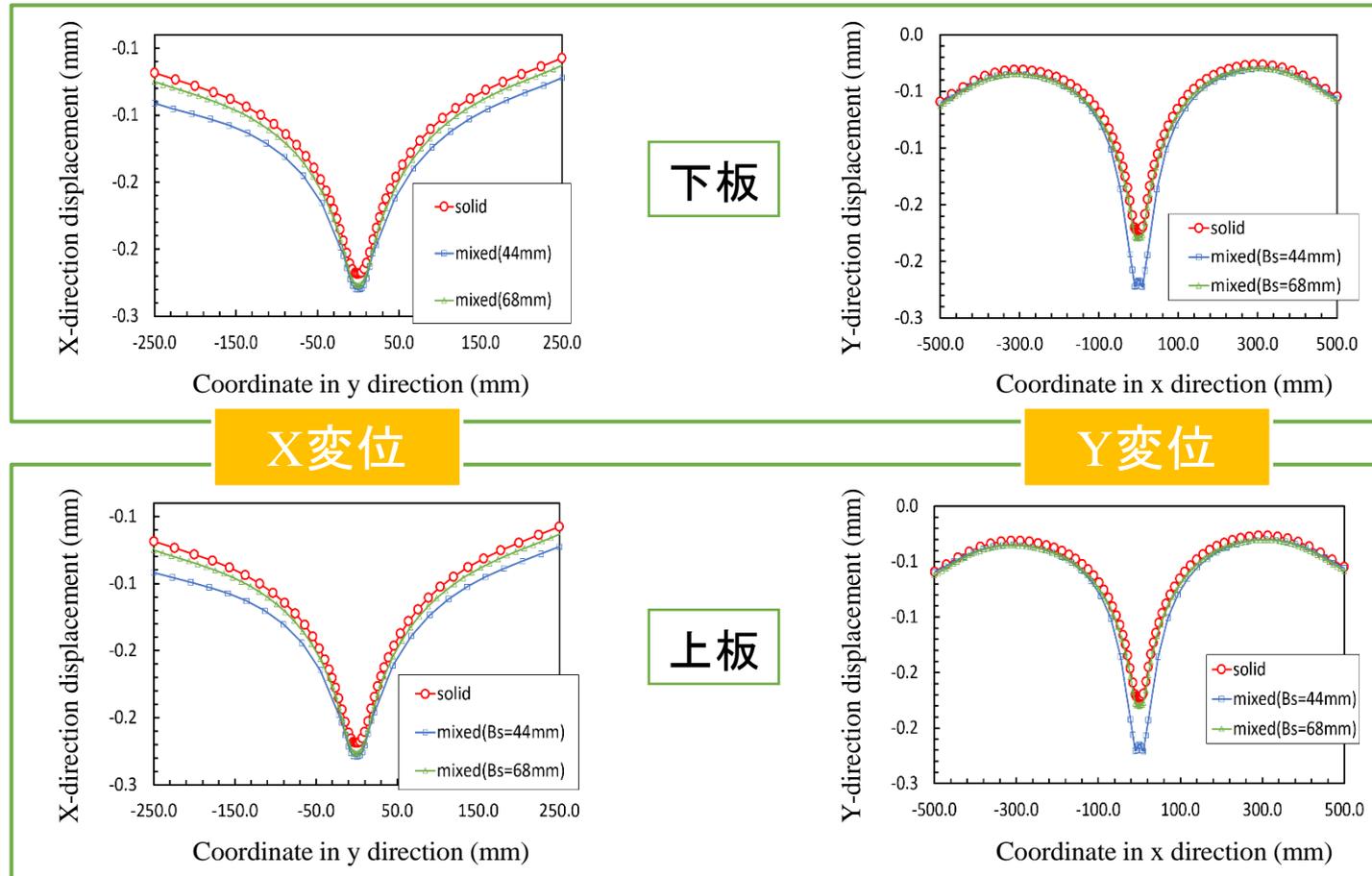
最大誤差
 3.0×10^{-5} 程度

溶接部近傍のY方向塑性ひずみ



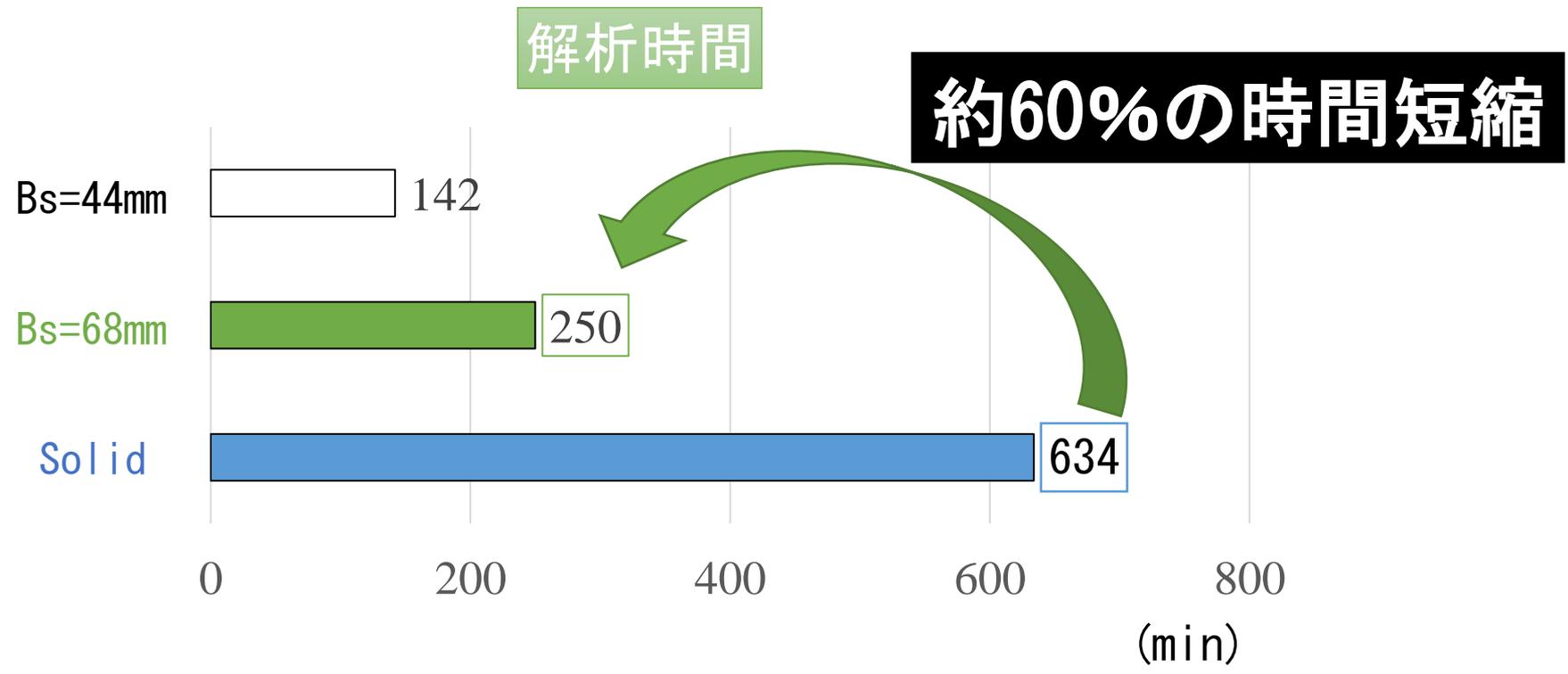
③薄板複雑構造物での解析

溶接後の変形

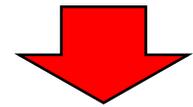


ソリッドで構成する範囲が45mm以上であるBs=68mmのモデルに関しては、変形においても、ソリッドモデルと同等の結果が得られた。

③薄板複雑構造物での解析



シェル要素とソリッド要素を上手く組み合わせる



解析の効率化が可能

本研究では、薄板構造物の効率的な解析を目的とし、薄板の解析に有用であると考えられるシェル要素をMPCにより、ソリッド要素と連結させる熱弾塑性解析の手法を提案し、ビードオンプレートで精度検証とソリッド要素で構成すべき範囲の確認を行った後、複雑な薄板構造物での精度検証と効率性を検討した。結果として、以下の知見が得られた。

- 1) ビードオンプレートの解析により、熱伝導解析においては、ソリッド要素で構成する範囲に関わらず、シェル-ソリッド混合モデルにおいて、ソリッドモデルと同等の解析結果が得られた一方で、熱弾塑性解析においては、溶接部近傍で塑性ひずみが生じる可能性があることから、その範囲はソリッド要素でモデルを構成する必要がある。
- 2) 提案したソリッドで構成すべき範囲は、ビードオンプレートと複雑薄板構造物の解析結果より、塑性ひずみが生じた位置が、あらかじめ算出していた範囲と一致していたので、モデルを作成するうえで、有効だと考えられる。
- 3) 塑性ひずみを考慮したシェル-ソリッド混合モデルにおいては、複雑な薄板構造物での熱弾塑性解析において、変位に関しては、数マイクロメートル程の誤差で、また残留応力に関しては、1%程の誤差で解析結果が得られる事が分かった。また、今回のモデルでは、ソリッドモデルのメッシュがやや粗く、各モデルのメッシュ分割が統一ではなかった為、計算結果に僅かな差異が生じた可能性もある為、より条件を均一にした解析を行う必要があると考える。
- 4) 解析精度がソリッドモデルとほとんど同じとなるシェル-ソリッドモデルにおいて、解析時間が、ソリッドモデルの半分以下となった