

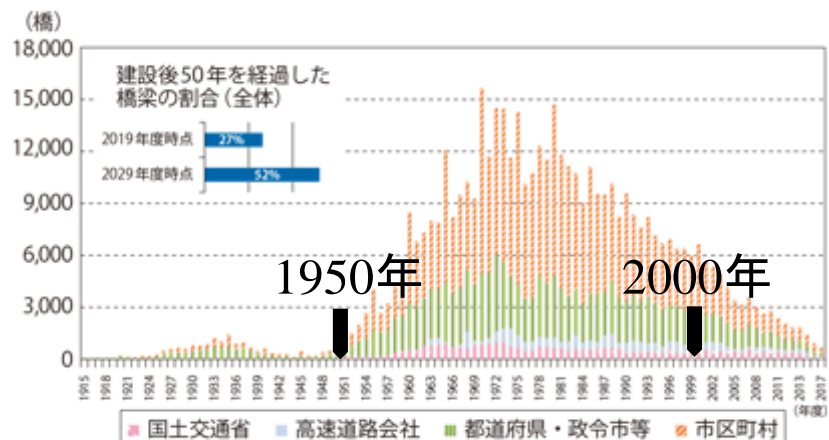
多層溶接継手の残留応力分布の推定と  
諸因子の影響に関する検討

## 既存インフラの老朽化

船舶・橋梁など  
国内インフラの老朽化



老朽化に起因する問題 増



高度経済成長期に集中

## 溶接残留応力と欠陥

溶接部近傍に引張残留応力が発生

- 疲労亀裂 ←老朽化の影響
- 応力腐食割れ

対策: 溶接施工条件の改善

課題: 溶接残留応力の把握・評価



船体の疲労亀裂

引用: Application of a ship-routing fatigue model to case studies of 2800 TEU and 4400 TEU container vessels

## 目的

多層溶接継手における残留応力分布の簡易的な推定

→ 多層溶接の傾向把握・推定手法開発

## 目的

多層溶接継手における残留応力分布の簡易的な推定

### 残留応力計測の特徴

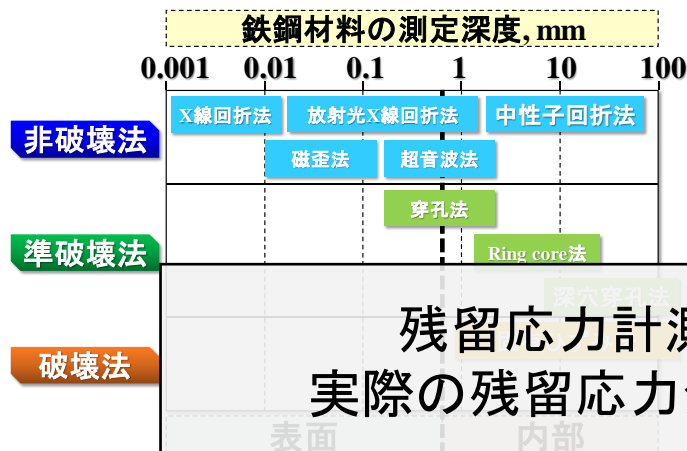
- ある点における実部材に基づく値を取得

非破壊法:

- 表面のみ
- 高価

準破壊法・破壊法:

- 部材を破壊
- 破壊部周辺



残留応力計測のみ/数値解析のみで  
実際の残留応力分布の把握は容易ではない

### 数値シミュレーションの特徴

- 力学的に妥当な残留応力分布を取得可能
- 溶接条件等の諸因子の検討が容易
- 外乱要因により実部材と乖離
- 溶接パラメータの調整が必要

## 開発手法

残留応力計測とシミュレーションを組み合わせることで、  
簡易的に部材の残留応力分布を推定

## 研究目的

多層溶接継手における残留応力の低減・分布の把握

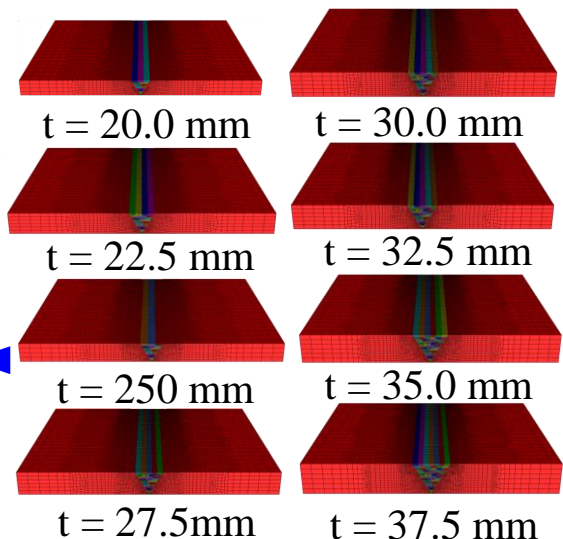
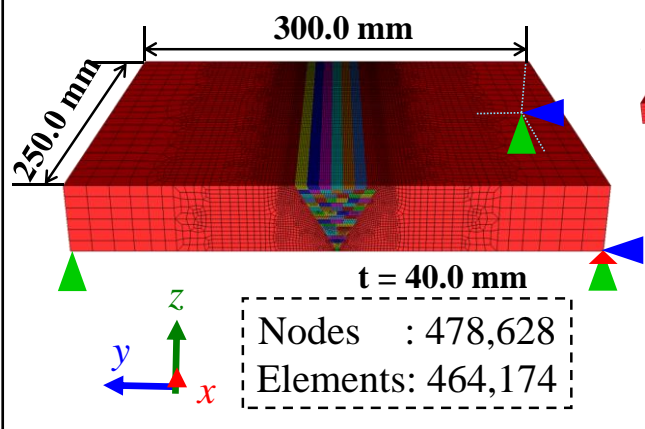
## 発表内容

- 多層溶接継手に残留応力分布の傾向の把握
  - 板厚の影響
  - 溶接順序の影響
  
- 残留応力の簡易予測システムの開発と評価
  - 1パス溶接における残留応力分布の推定
  - バイオリンプロットによる確率密度の可視化と評価
  - 同化条件が解析誤差に及ぼす影響

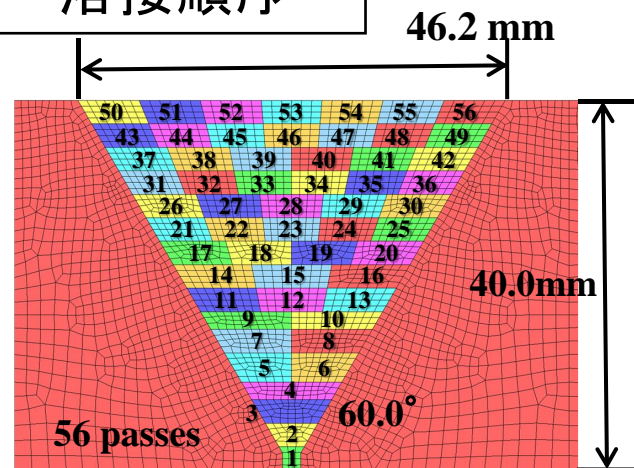
## 目的

多層溶接継手の残留応力分布・変形の傾向をまとめる

## 背景モデル

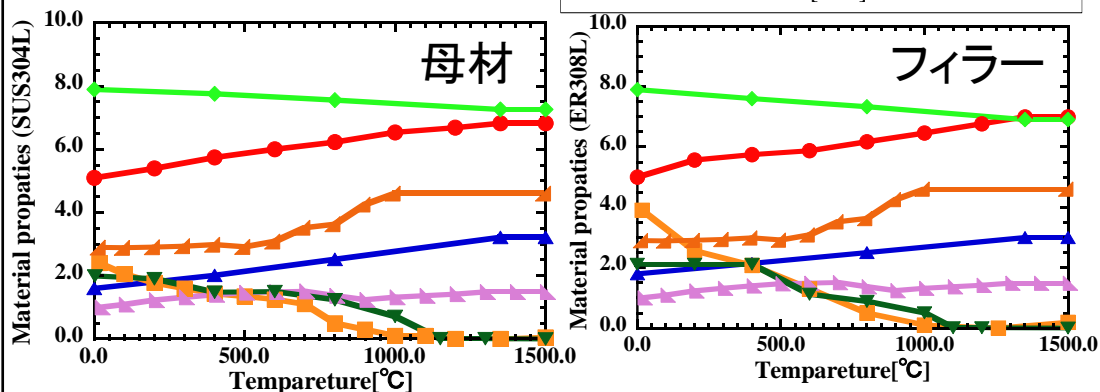


## 溶接順序



## 材料定数

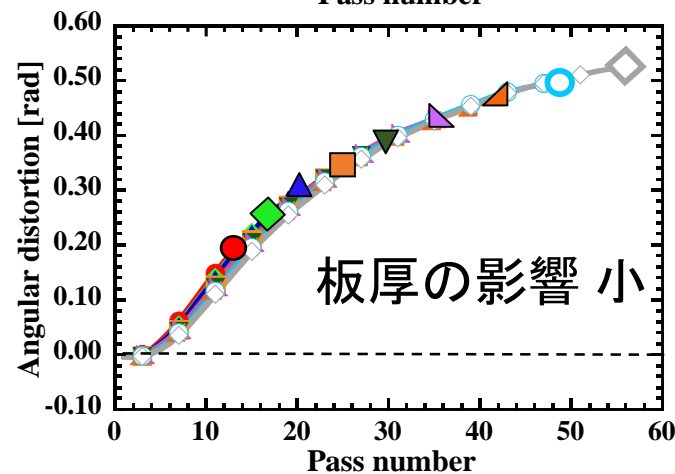
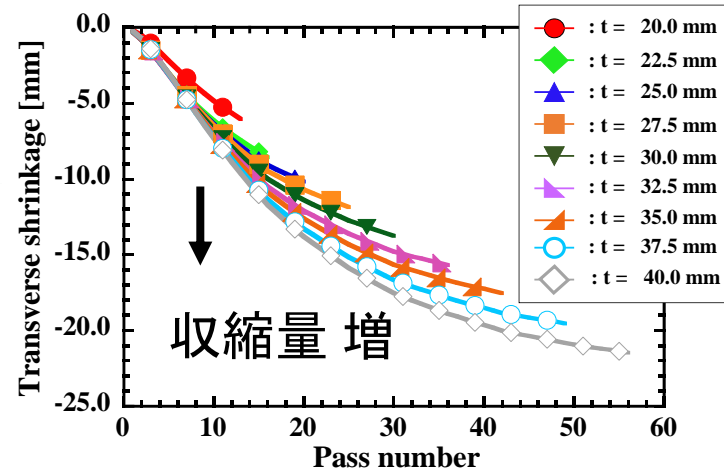
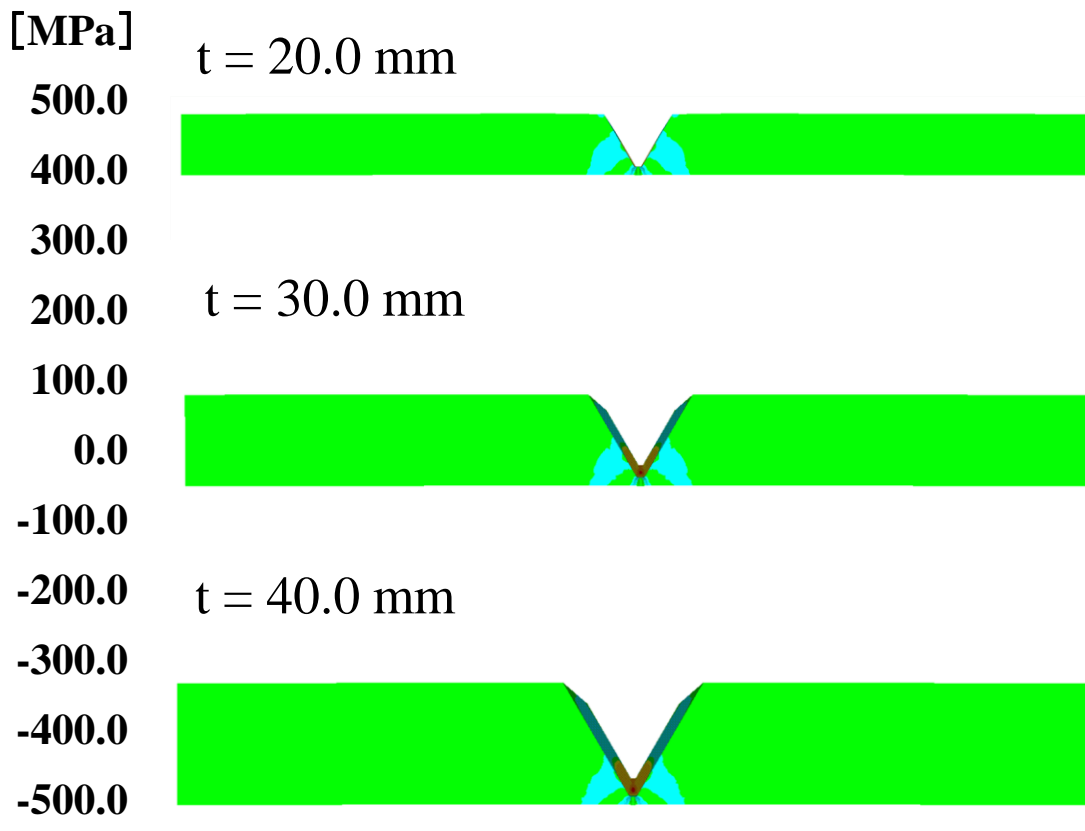
- : Specific heat [ $10^2$  J/kg K]
- ◆ : Density [ $10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>]
- ▲ : Thermal conductivity [ $10^{-2}$  W/mm K]
- : Yield stress [ $10^{-2}$  MPa]
- ▼ : Young's modulus [ $10^2$  GPa]
- ▲ : Thermal expansion coefficient [ $10^{-5}$  /K]
- ▲ : Poisson's ratio [ $10^{-1}$ ]



## 溶接条件

単位面積当たり入熱量	72.3 [J/mm]
フィラー面積 (t = 40.0 mm)	916.5 [mm <sup>2</sup> ]
溶接速度	1.0 [m/s]
熱効率	0.8

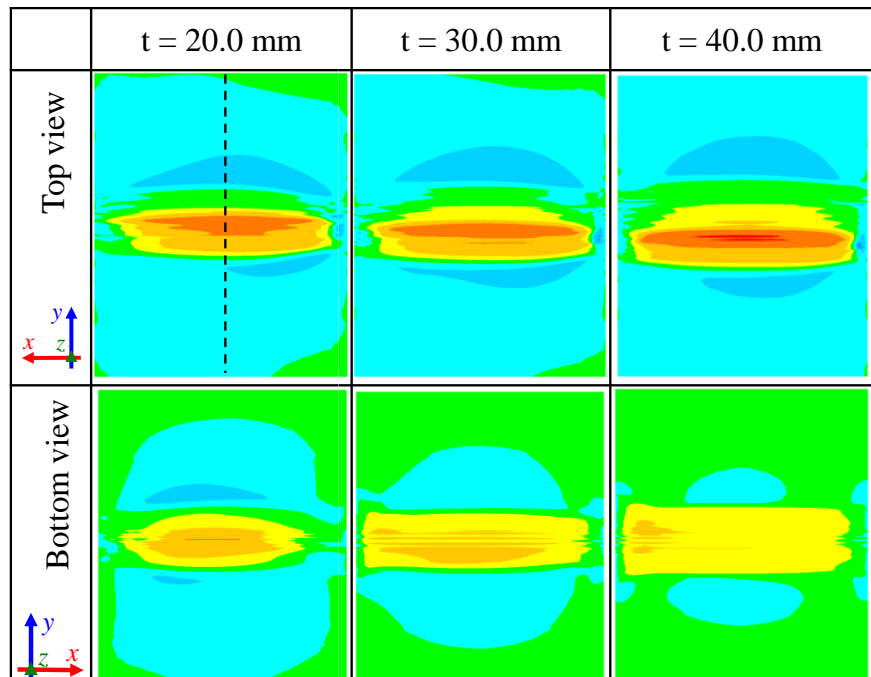
## 板厚ごとの変形の様子



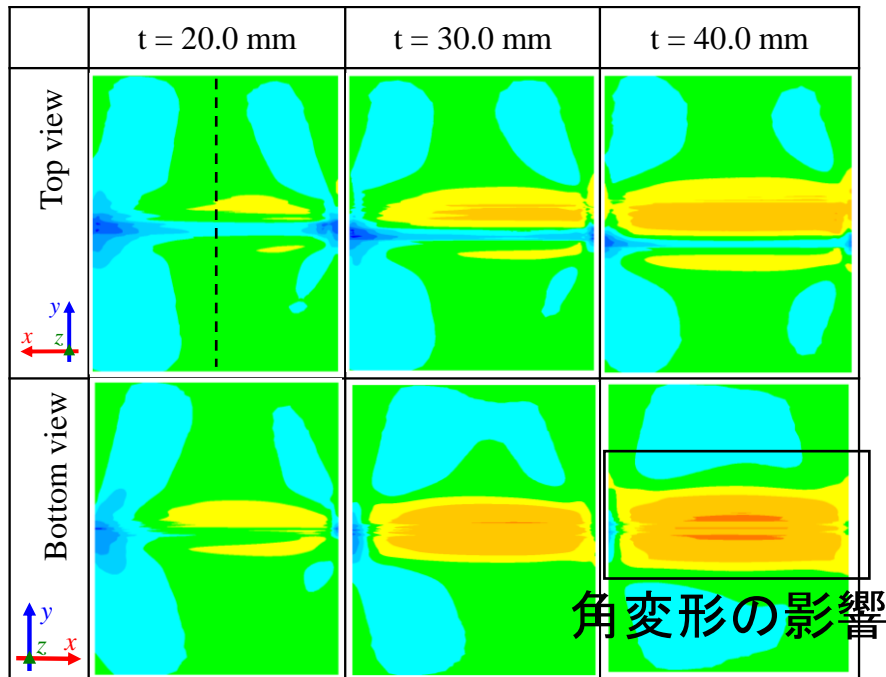
※ 横収縮 = 中央断面の表面と裏面端点の移動量平均として計算

板厚が大きいほど、横収縮が増加  
角変形においては、板厚の影響はとても小さい

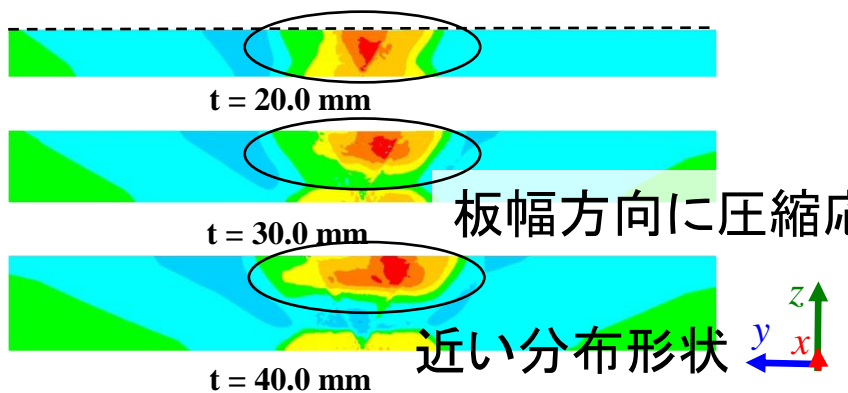
## 溶接線方向残留応力分布 $\sigma_{xx}$



## 溶接線垂直方向残留応力 $\sigma_{yy}$



角変形の影響

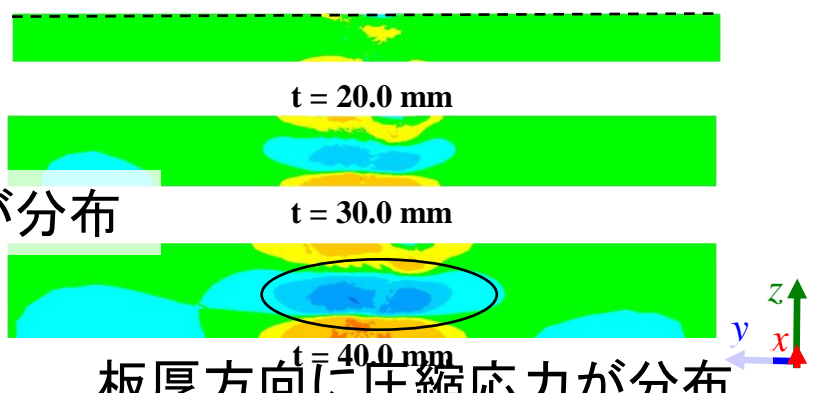


板幅方向に圧縮応力が分布

近い分布形状

500.0 400.0 300.0 200.0 100.0 0.0 -100.0 -200.0 -300.0 -400.0 -500.0

[MPa]

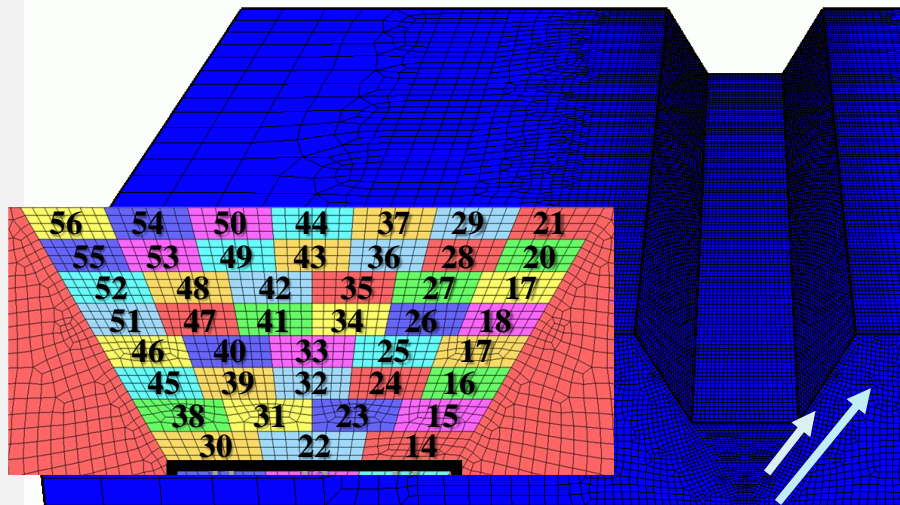


板厚方向に圧縮応力が分布

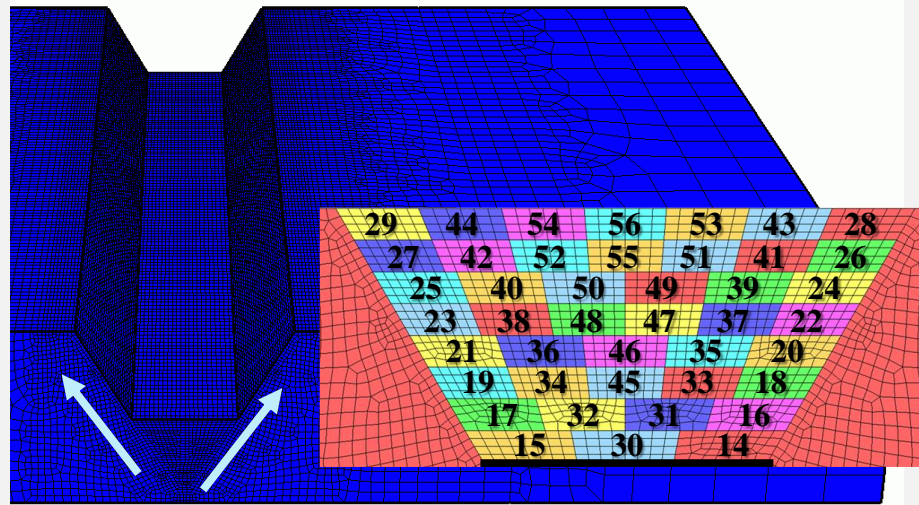
500.0 400.0 300.0 200.0 100.0 0.0 -100.0 -200.0 -300.0 -400.0 -500.0

[MPa]

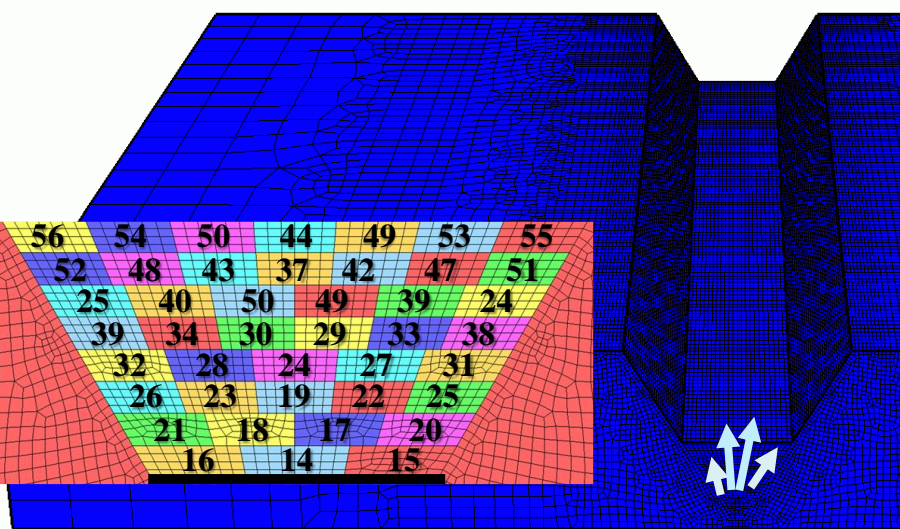
Order 1 : 右から縦に溶接



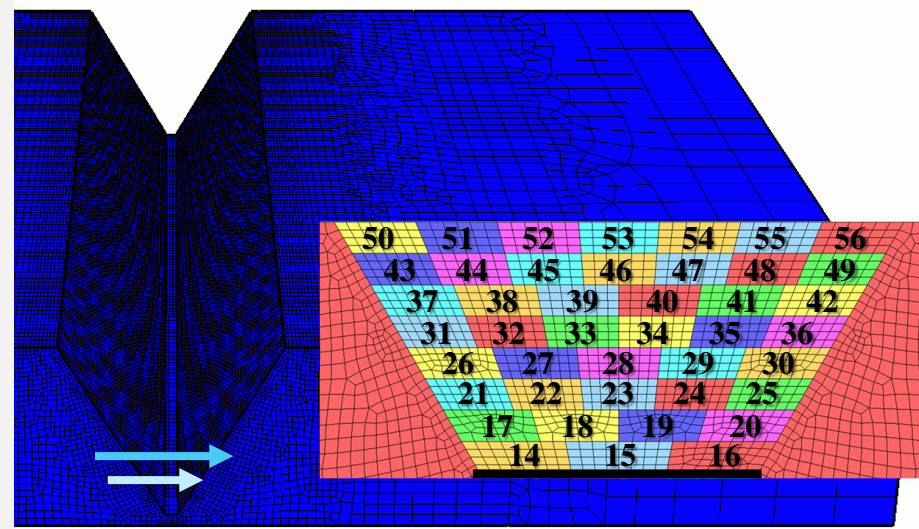
Order 2 : 外側から縦に溶接



Order 3 : 内側から溶接

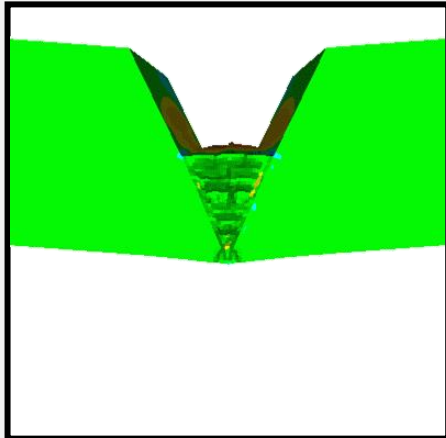


Order 4 : 底面側から溶接

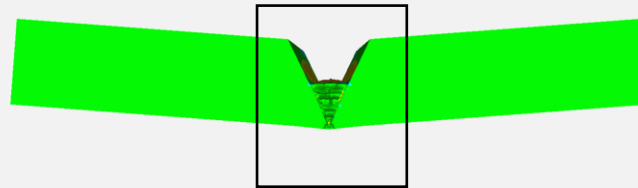




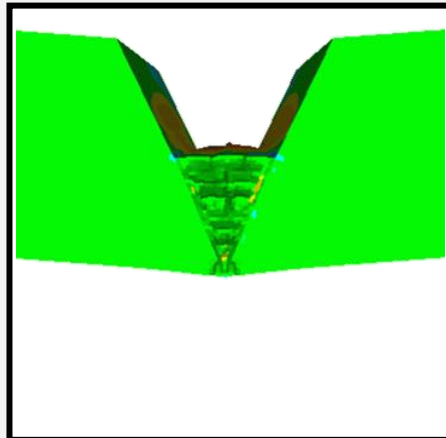
## 溶接順序と横収縮・角変形



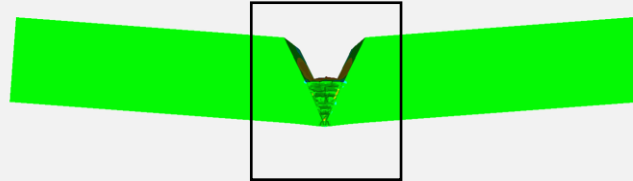
Order 4 : 底面から



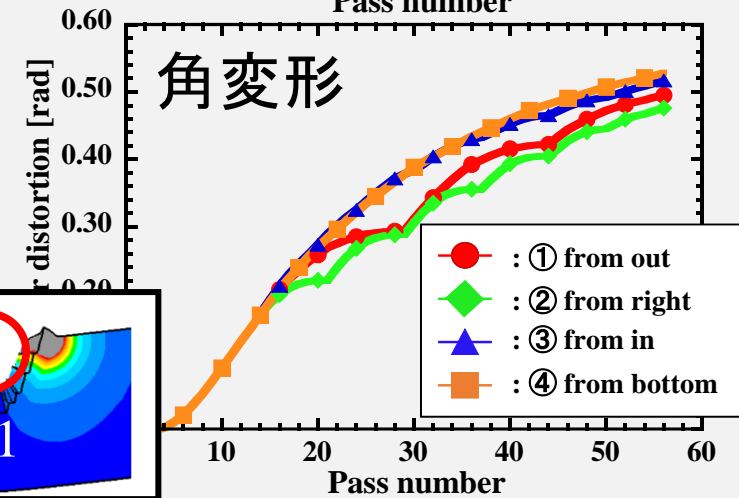
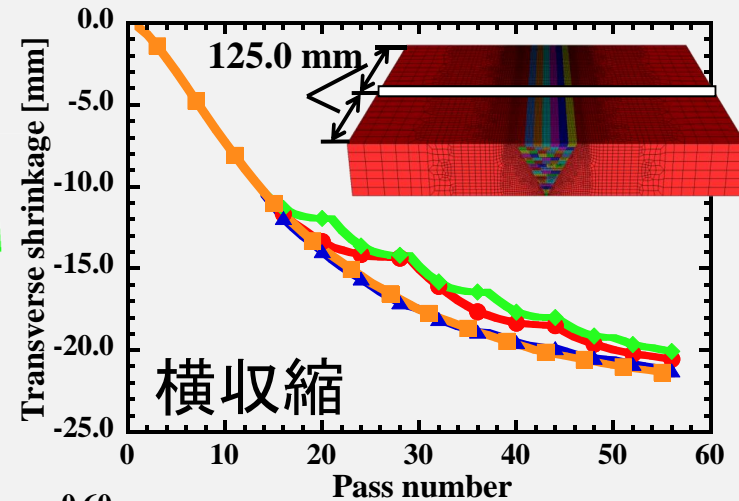
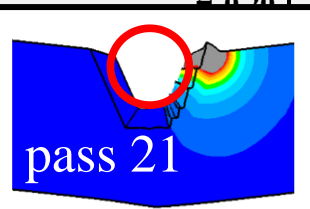
一般的



Order 1 : 右から縦



側面に空間がある  
ほど変形 緩



表面側のパスを優先的に入熱することにより  
横収縮・角変形が減少する傾向にある

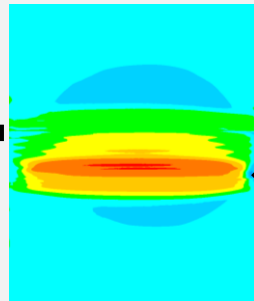
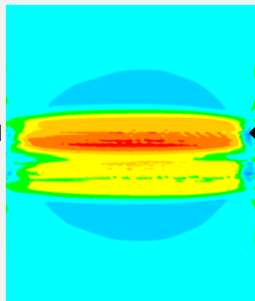
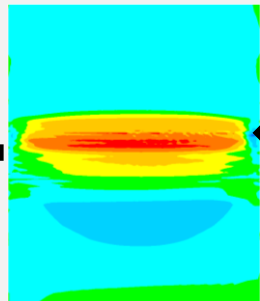
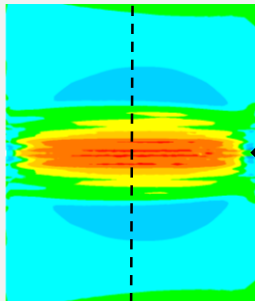
## 溶接線方向残留応力 $\sigma_{xx}$ (表面)

Order 1 : 外

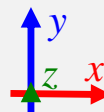
Order 2 : 右

Order 3 : 内

Order 4 : 下



最終パス付近に強い引張残留応力



[MPa]

500.0

400.0

300.0

200.0

100.0

0.0

-100.0

-200.0

-300.0

-400.0

-500.0

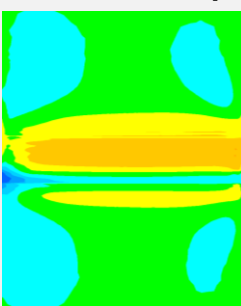
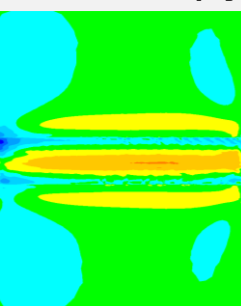
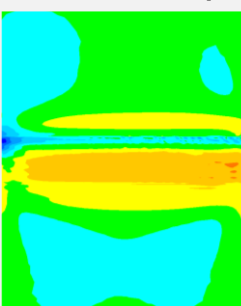
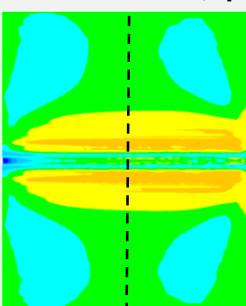
## 溶接線垂直方向残留応力 $\sigma_{yy}$ (表面)

Order 1 : 外

Order 2 : 右

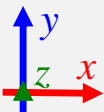
Order 3 : 内

Order 4 : 下



← 最終パス

最終パス上は小さい周辺に引張が分布

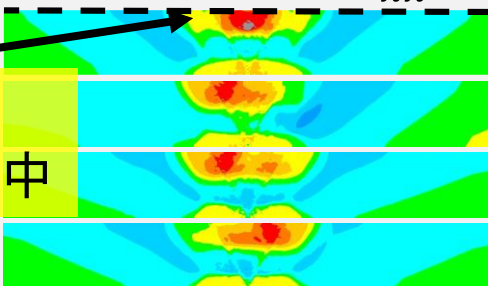


(中央断面)

溶接線方向  $\sigma_{xx}$

溶接線垂直方向  $\sigma_{yy}$

中央部に引張応力が集中

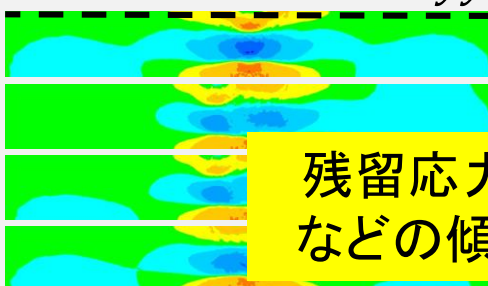


Order 1: 外

Order 1: 右

Order 3: 内

Order 4: 下



残留応力の大きさなどの傾向は一致

## 研究目的

多層溶接継手における残留応力の低減・分布の把握

## 発表内容

- 多層溶接継手に残留応力分布の傾向の把握
  - 板厚の影響
  - 溶接順序の影響
  
- 残留応力の簡易予測システムの開発と評価
  - 1パス溶接における残留応力分布の推定
  - バイオリンプロットによる確率密度の可視化と評価
  - 同化条件が解析誤差に及ぼす影響

## 時系列を扱わないデータ同化手法

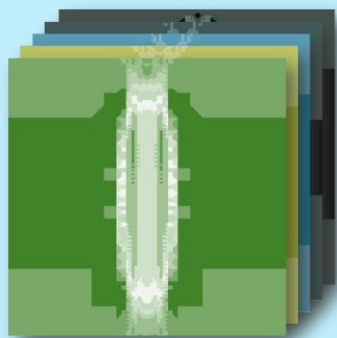
◆ **最適内挿法** : 同化後の分散が最小になるような重みを計算

◆ **3次元変分法** : 「評価関数」が小さくなるように解析、  
評価関数計算、解析値の修正を反復

アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF) と共通の手続き → **実装・計算コスト小**  
アンサンブルを利用 → 非線形性を表現

### アンサンブルを用いた最適内挿法の模式図

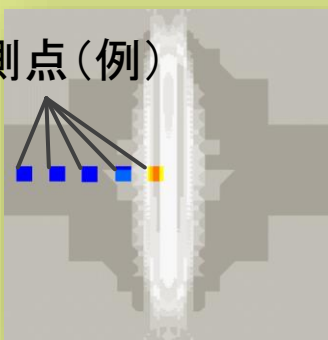
背景値(FEM)



摂動(ばらつき)を与えた初期値を基にFEMで解析

計測値

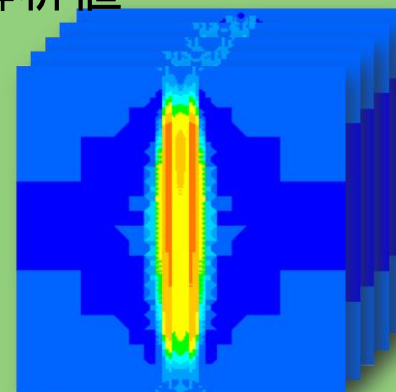
計測点(例)



計測結果に用意した摂動を与える

同化

解析値



それぞれの解析結果を観測値により修正

## 解析値の表現

$$x^{a(m)} = x^{b(m)} + W(y^o + w^{(m)} - Hx^{b(m)})$$

重み行列

解析イノベーション

背景値を計測値で修正

## 重み行列の最適化

$$W = BH^T (HBH^T + R)^{-1}$$

背景誤差共分散行列

解析値の分散を最小化

$$B = \frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^K (x^{b(k)} - \bar{x}^b) (x^{b(k)} - \bar{x}^b)^T$$

計測誤差共分散行列

$$R = \sigma_o^2 I_l$$

## 用語

m = 1, ..., M:

メンバー数

k = 1, ..., K:

状態数

l = 1, ..., L:

計測点数

a: assimilation

(同化=解析値)

b: background

(背景値)

o: observation

(観測値)

 $\sigma_o$ : 計測誤差標準偏差 $\sigma_b$ : 背景誤差標準偏差

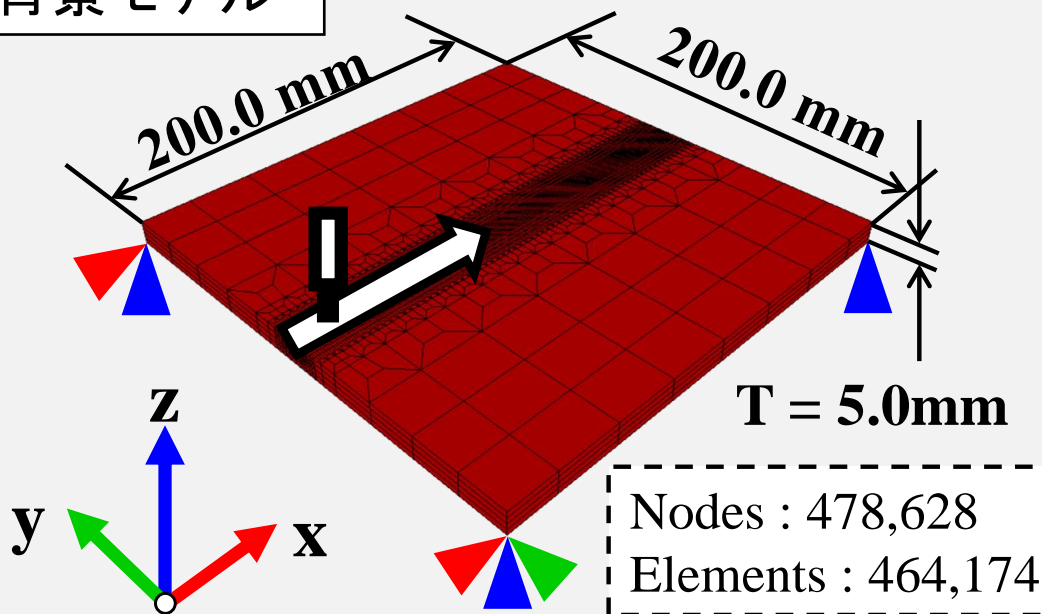
## EnKFとの比較

- 解析値の表現、重み行列の導出方法は共通  
重み行列 W がカルマンゲインに相当
- 最初に与える誤差分散がとても重要  
(カルマンフィルタでは適当な形に更新されていく)

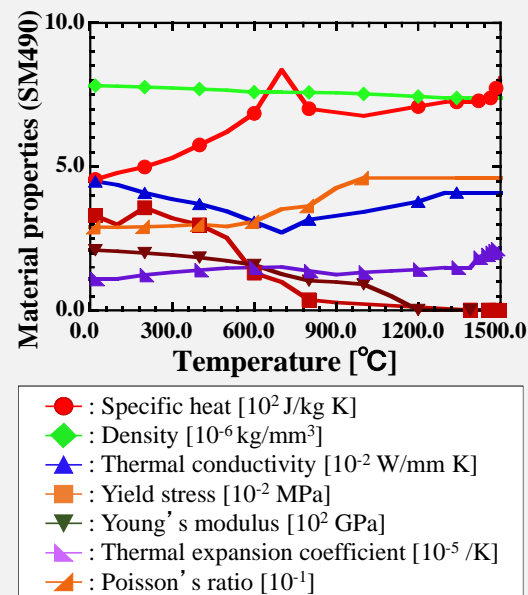
## 目的

簡易なモデルを用いて残留応力推定システムを試験・評価する

## 背景モデル



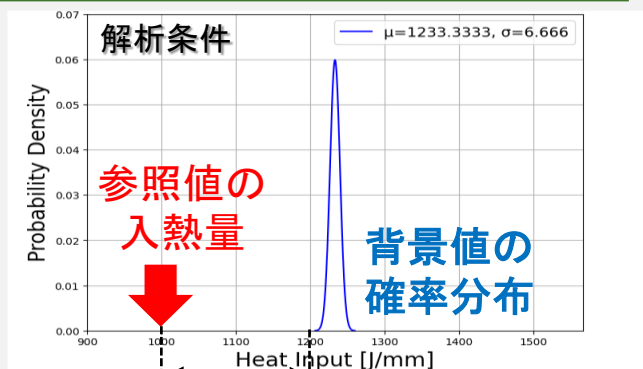
## 材料定数



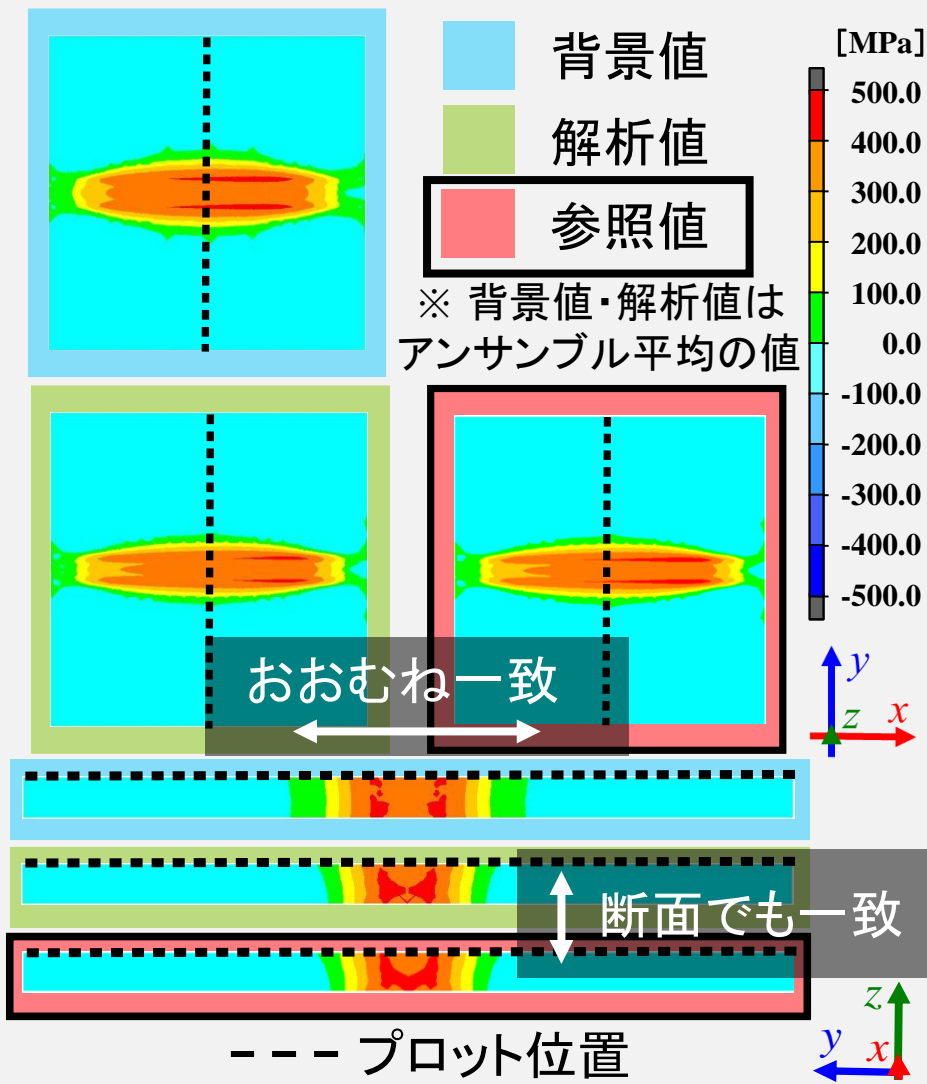
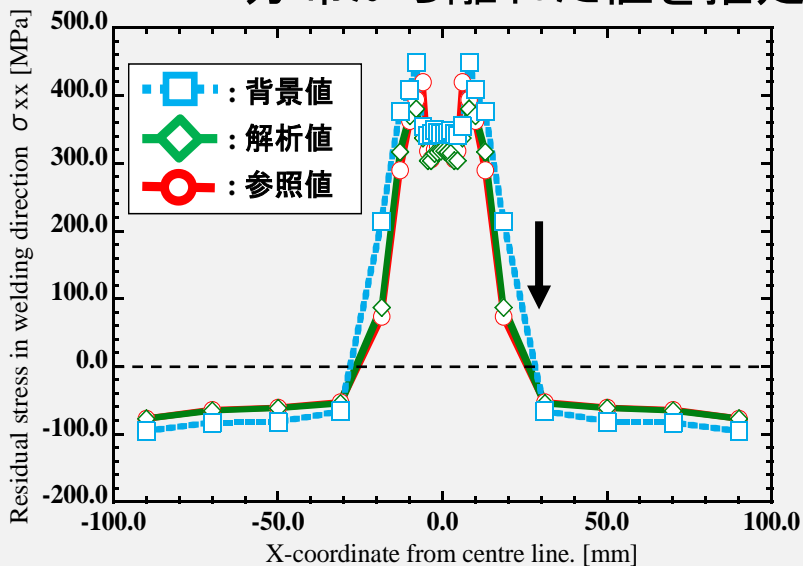
## 解析条件

背景値の基準入熱量[J/mm]	1266.7 [J/mm]	参照値の入熱量[J/mm]	1000.0, 1033.3, ..., 1666.7 (等間隔 21ケース)
背景誤差標準偏差[J/mm]	6.7, 20.0, 33.3, 46.7, 66.7, 200.0, 333.3	観測誤差標準偏差[MPa]	5.0, 10.0, 30.0, 50.0, 70.0, 100.0, 300.0, 500.0

## 1パスの溶接継手における同化



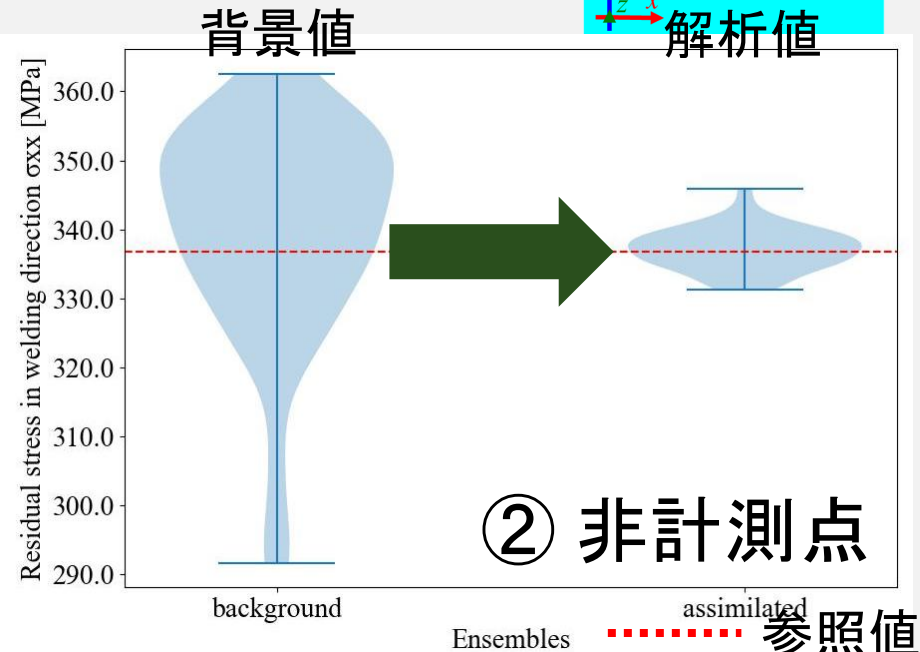
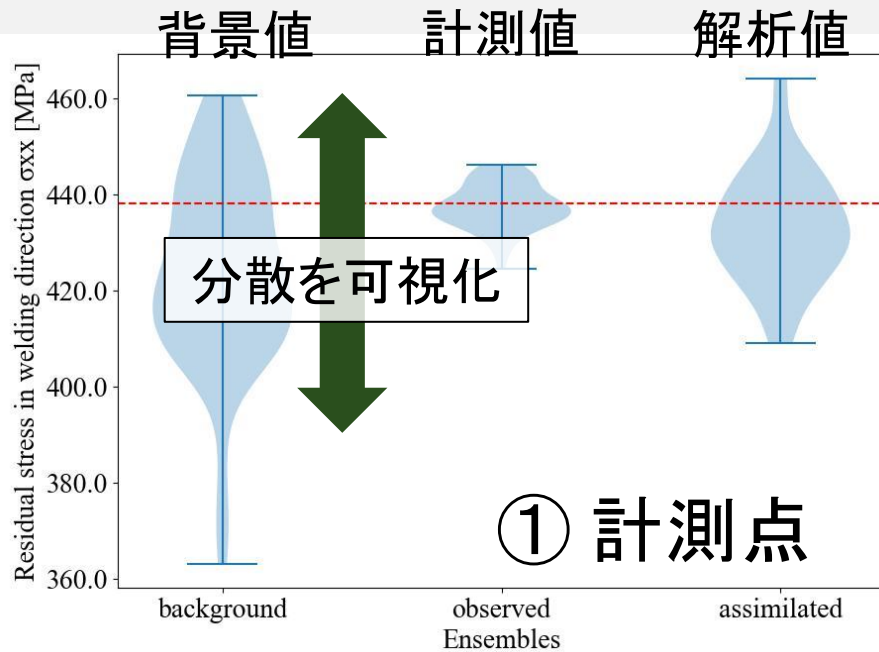
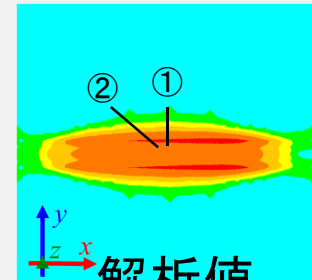
分布から離れた値を推定



背景値として与えた分布から参照値が外れた場合でも  
残留応力分布を良好に推定できた

## 計測 / 非計測 点での溶接線方向残留応力 $\sigma_{xx}$

- 分散や確率密度分布を分かりやすく表示
- 非線形性, 推定できたかを確認



アンサンブルにより確率密度を可視化  
→ 同化による推定の確度向上を確認

応用



- 計測位置の選定
- 解析結果の評価



最初に与える誤差が重要 →

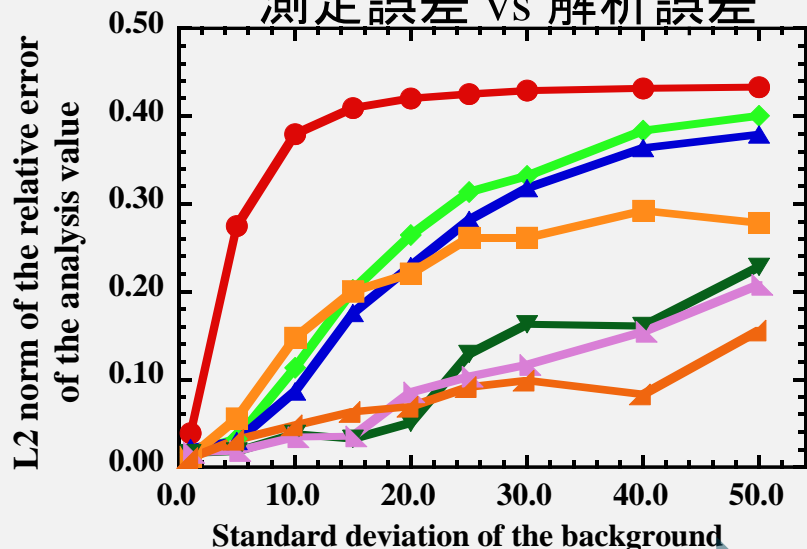
解析値の相対誤差により解析条件が及ぼす影響を比較

(解析値の相対誤差)

$$= \sqrt{\sum_{l=1}^L \left( \frac{(\text{解析値}) - (\text{参照値})}{(\text{参照値})} \right)^2}$$

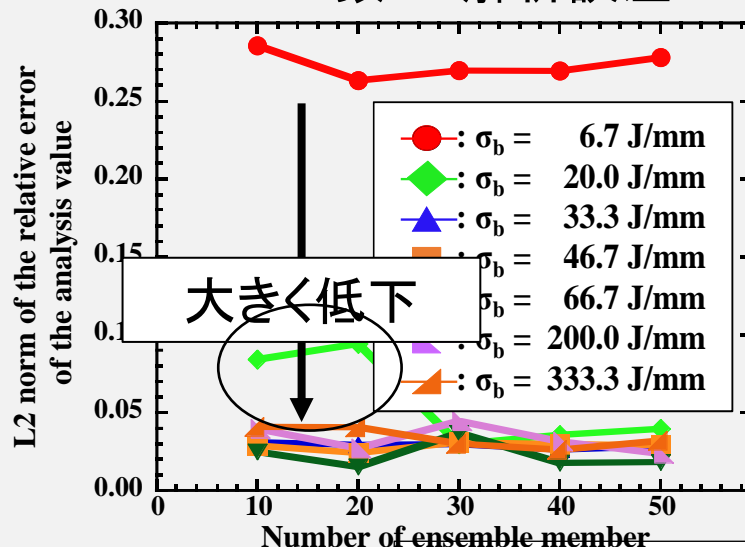
## 解析条件の影響

測定誤差 VS 解析誤差



計測精度が良好ならば  
背景誤差は広くとってもよい

メンバー数 VS 解析誤差



背景値の分散が小さい箇所  
でメンバー数による差

解析条件が解析値に及ぼす影響をまとめ  
背景誤差やメンバー数の与え方についての知見を得た

## 簡易推定モデルの構築

- 1パス溶接における残留応力分布の推定
- バイオリンプロットによる確率密度の可視化と評価
- 同化条件が解析誤差に及ぼす影響

多層溶接継手における残留応力分布の検討

複雑なモデルにおける  
残留応力分布の簡易推定手法の開発

FEMによる多層溶接継手の解析と、最適内挿法による残留応力分布の推定を通して、以下の知見が得られた。

- 板厚による影響について、角変形は板厚によらず、すべての板厚でパス数における角変形がおおむね一定となった。
- 残留応力分布については溶接線垂直方向について大きな差が見られ、表面に引張の残留応力、内部に圧縮の残留応力が大きく入った
- 溶接順序により、変形に差が見られ、表面側のパスを優先的に入熱↓ケースで変形が小さくなった
- 残留応力分布では、順序によって分布の仕方は大きく変わったが、大きさについては一定の値に収束した。外側から内側にパスを集めた場合に他ケースよりも大きな引張残留応力が見られた。
- データ同化手法(最適内挿法)を用いて1パスの溶接の残留応力を模擬的に推定した結果、板厚方向内部においても設定した参照値に近い残留応力分布を推定することができた。
- バイオリンプロットを用いることによってある要素における推定過程の確率分布を可視化し、解析値が参照値に近づいていることが確認できた。