

# 鋼橋の防食塗膜剥離におけるIH工法の 最適条件探索

大阪大学大学院 工学研究科  
地球総合工学専攻 准教授  
廣畑 幹人

# 塗膜剥離の技術



動力工具, 手工具



ブラスト(オープンブラスト)

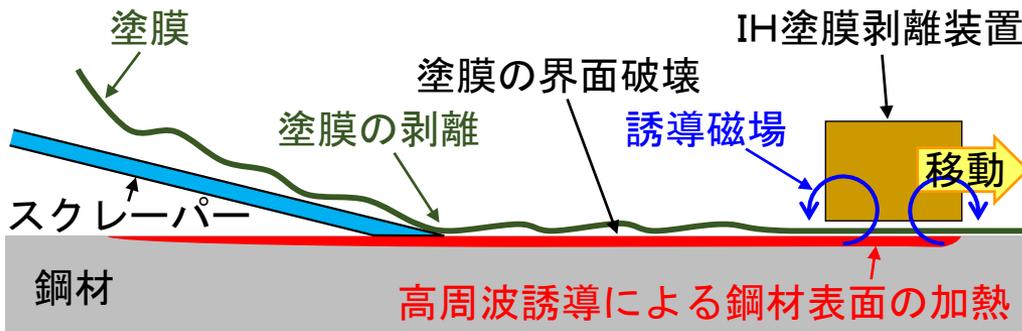


塗膜剥離剤

## 課題

騒音, 有害物質の飛散, 廃棄物の処理, 作業員の安全確保, 火災…

## IH塗膜剥離



## IH塗膜剥離

IH（電磁誘導加熱）式  
塗膜剥離工法



# IH塗膜剥離の特徴

- 騒音が発生しない(発電機の運転音程度).
- 塗膜を固形の状態剥離する.
- 研削剤, 剥離剤を使用しない.
  - ⇒ 粉塵等の飛散が少なく, 混入物のない状態で塗膜を回収できる.
  - ⇒ 周辺環境, 作業員への影響が少ない.
- 火気を使用しない.
  - ⇒ 火災リスクの低減.
- 厚膜に対する適用性が高い.
  - ⇒ 1000  $\mu$ m以上も剥離可能.



# IH塗膜剥離の適用事例

- 関門自動車道 関門橋中央径間  
門司側南補剛桁補修工事  
(関門3期工事)  
発注者: NEXCO西日本 九州支社  
工期: 平成25年11月～平成27年12月  
施工量: 21,000m<sup>2</sup>



- 平成26年度  
福井県内発電所, 復水器水室内面ライニング(軟質ゴム, 膜厚3mm)  
廃棄物系タンク内面ライニング(硬質ゴム, 膜厚5mm)
- 平成27年度  
北海道内石油会社タンク(ガラスフレーク, 膜厚500  $\mu$  m)  
福井県内発電所 純水供給装置アニオン塔内面  
(硬質ゴム, 膜厚3mm)
- 平成28年度  
北海道内発電所, 復水器水室内面ライニング(軟質ゴム, 膜厚3mm)  
北海道内橋梁(エポキシ, 膜厚300  $\mu$  m)  
(IH式RPR工法協会HP)

# IH塗膜剥離の適用事例

- 2020年10月～2021年2月 城ヶ島大橋 約500m<sup>2</sup>
- 2020年2月～2021年1月 NEXCO西日本関門自動車道 約12,000m<sup>2</sup>
- 2020年2月～2021年7月 城ヶ島大橋 約700m<sup>2</sup>
- 2017年2月～2017年6月 NEXCO中日本北陸自動車道 約6,700m<sup>2</sup>
- 2016年1月～2016年6月 NEXCO西日本沖縄自動車道 約5,100m<sup>2</sup>

(IH塗膜除去工法研究会HP)

- 2019年 国土交通省  
九州地方整備局管内 148m<sup>2</sup> + 81m<sup>2</sup>
  - 2019年 北九州市 井手原橋  
PCB含有量調査
- (IH式塗膜剥離技術協会HP)



# IH塗膜剥離の課題

- 温度管理が極めて重要.
  - ⇒ 過剰加熱は鋼材の**機械的性質の変状**, **変形**や**応力**を発生させるリスクがある.
- 部材の形状, 板厚に応じた適切な施工条件の確立が望まれる.

## 研究の目的

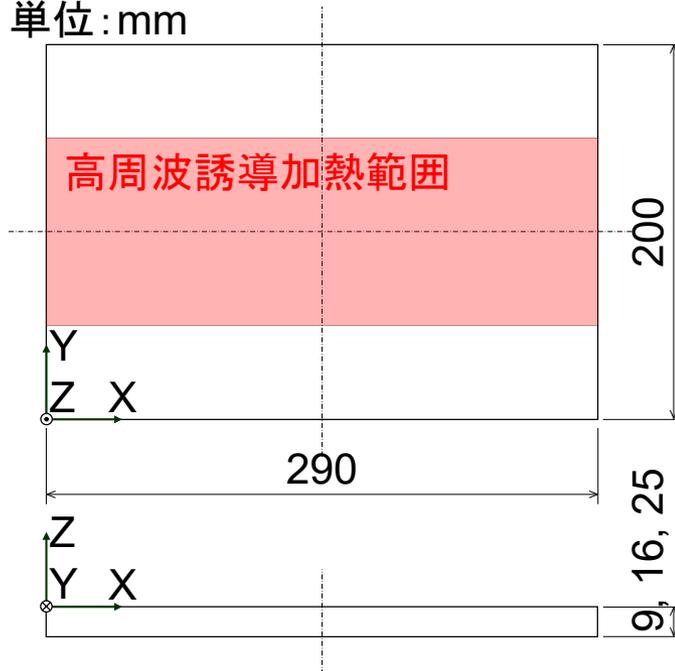
鋼橋の防食塗膜剥離におけるIH工法の最適条件探索に資するシミュレーション手法の構築.

# IHによる鋼板加熱実験

## 実験供試体

- 長さ 290 mm × 幅 200 mm 板厚 9 mm, 16 mm, 25 mm
- 材質 SM400A, 塗装なし
- 電気炉(630°C)で6時間加熱, 炉冷により焼鈍

単位: mm



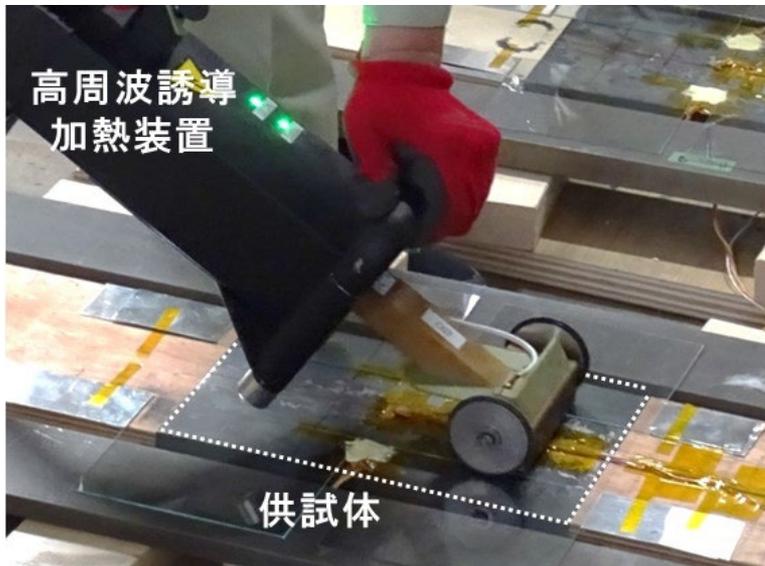
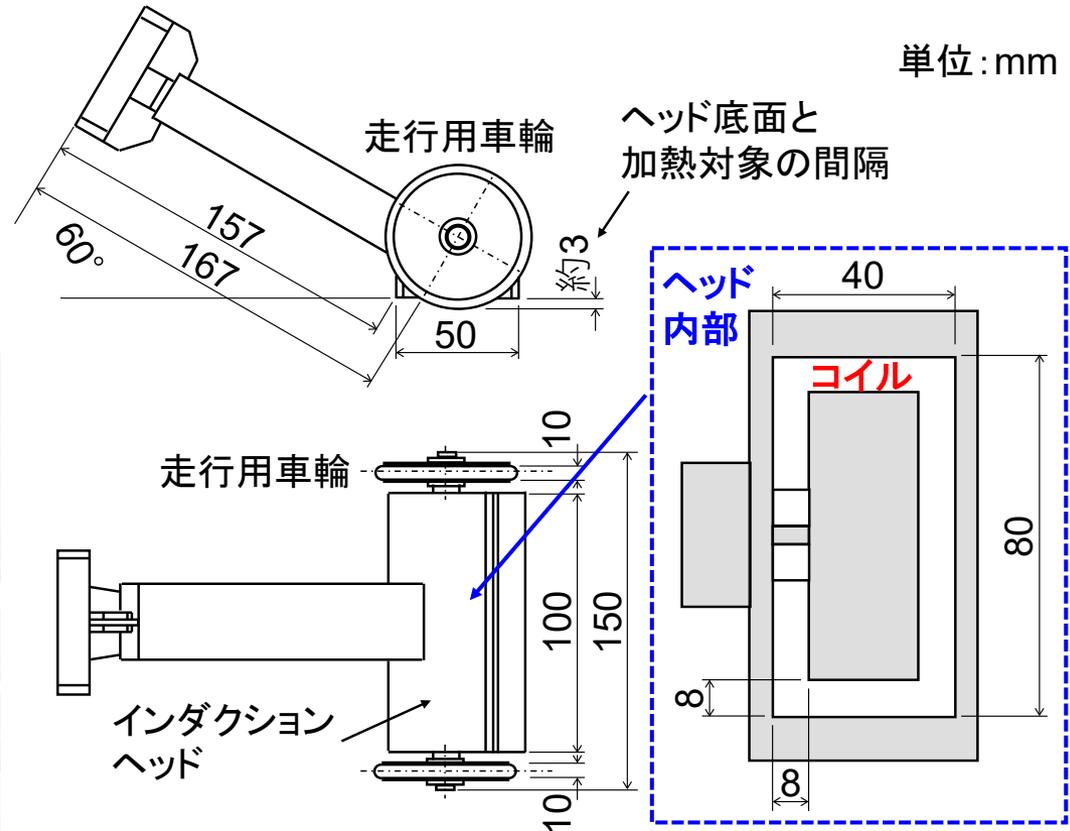
## 鋼材の機械的性質および化学組成

板厚	機械的性質			化学組成				
	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S
9	326	444	34	0.08	0.24	0.85	0.012	0.004
16	334	474	30	0.14	0.17	0.60	0.020	0.005
25	259	416	34	0.08	0.22	0.86	0.018	0.008

# IHによる鋼板加熱実験

## 加熱装置

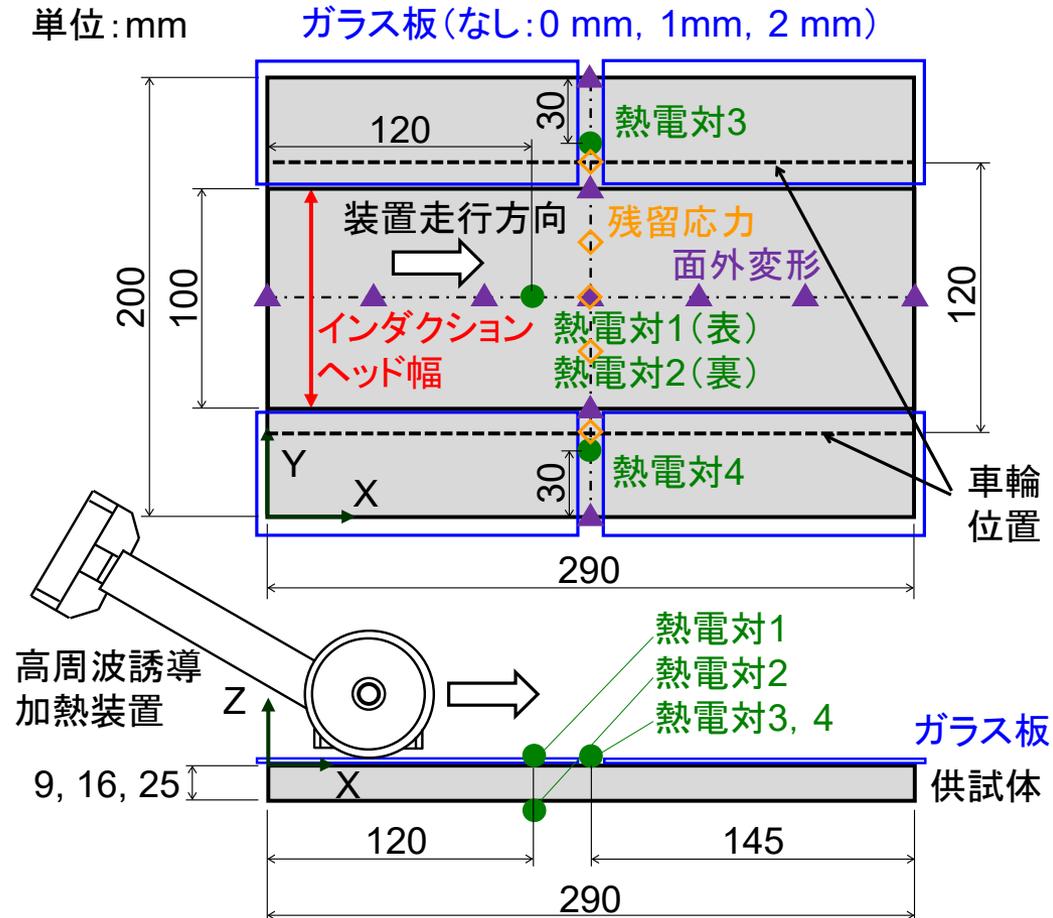
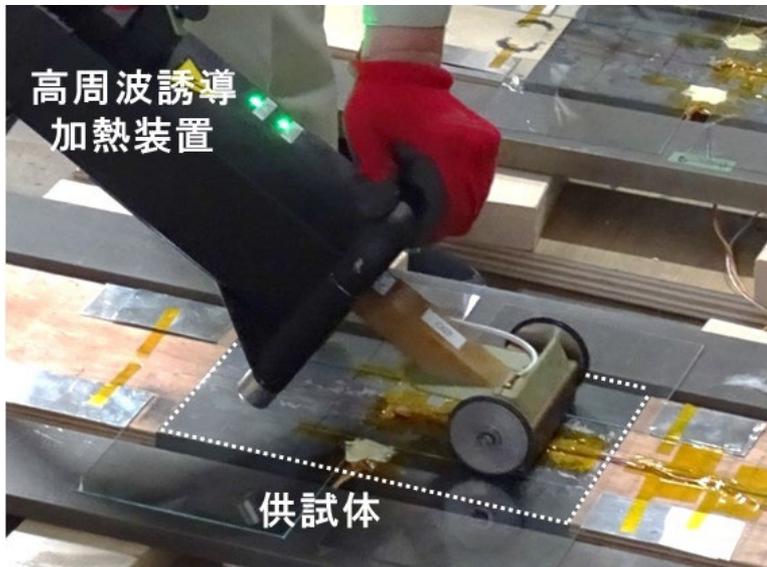
- インダクションヘッド : 100 mm × 50 mm  
(コイル寸法 : 80 mm × 40 mm)
- 高周波電源 : 50 kW
- 周波数 : 15~40 kHz



# IHによる鋼板加熱実験

## 実験

- 目標加熱温度：150～250°C
- 計測：温度，面外変形，  
残留応力
- ガラス板（塗膜の代用）  
なし：0 mm 2体/板厚  
1 mm, 2 mm 各1体/板厚



# IHによる鋼板加熱実験

## 実験

- 供試体ごとの加熱装置の平均走行速度

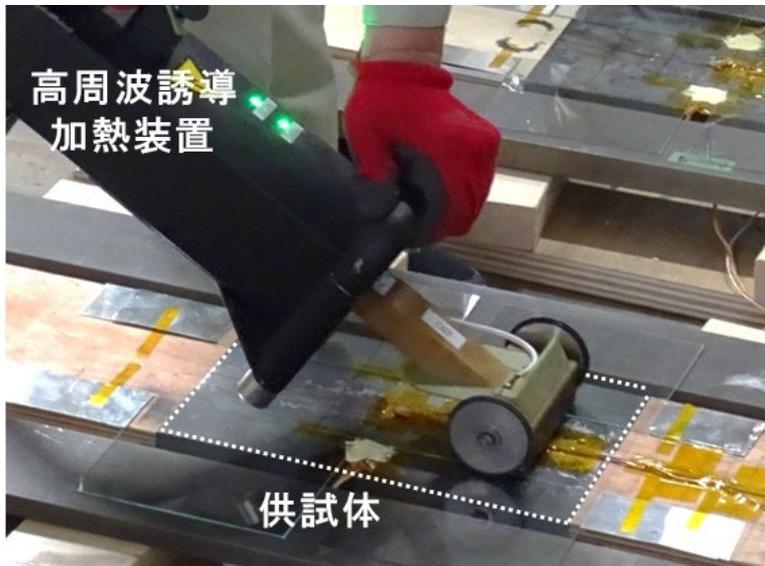
### 速度差の発生原因

インダクションヘッド底面と熱電対の接触  
ガラス板の隙間部分で車輪が停留

### 加熱装置の平均走行速度

単位 mm/s

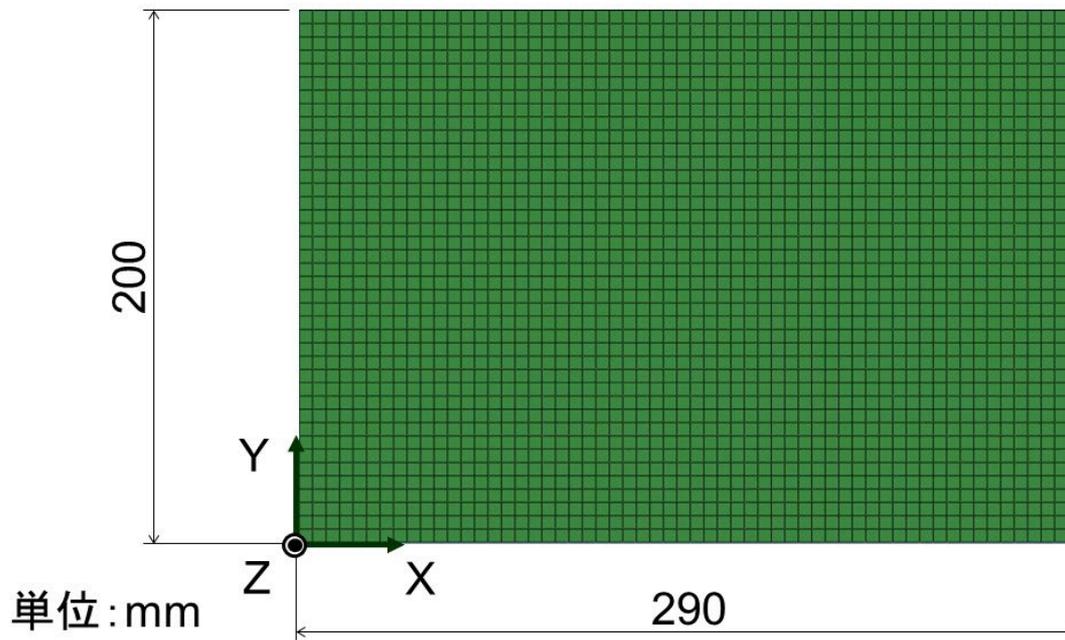
供試体 板厚	ガラスなし		ガラス厚	
	1体目	2体目	1 mm	2 mm
9 mm	27.6	25.5	23.6	20.8
16 mm	23.8	22.1	22.8	26.6
25 mm	25.6	27.4	20.5	23.3



# 熱弾塑性解析

## 解析モデル

- 有限要素解析ソフト Abaqus Ver. 6. 14 熱弾塑性解析
- 4節点シェル要素(メッシュサイズ 5 mm × 5 mm)
- 力学的境界条件 : 剛体変位のみ拘束
- 熱的境界条件 : 空気中への熱伝達



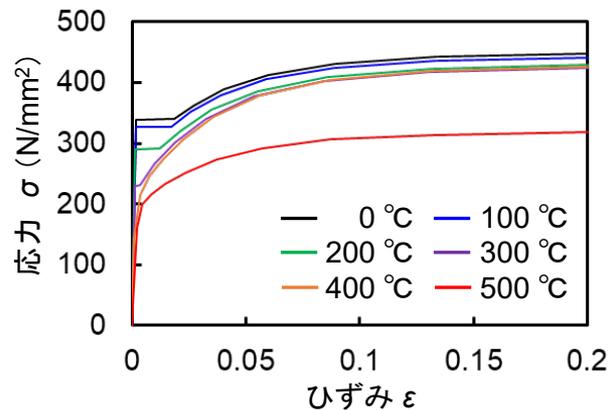
# 熱弾塑性解析

## 解析モデル

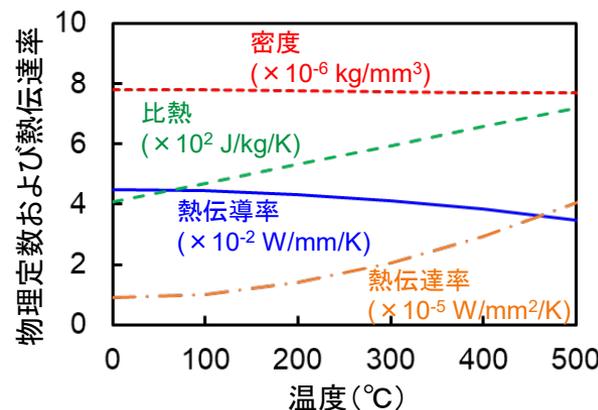
### 材料定数：温度依存型

中村弘文，鈴木弘之：鋼梁の崩壊温度，鋼構造論文集，第6巻，第22号，pp.57-65，1999.

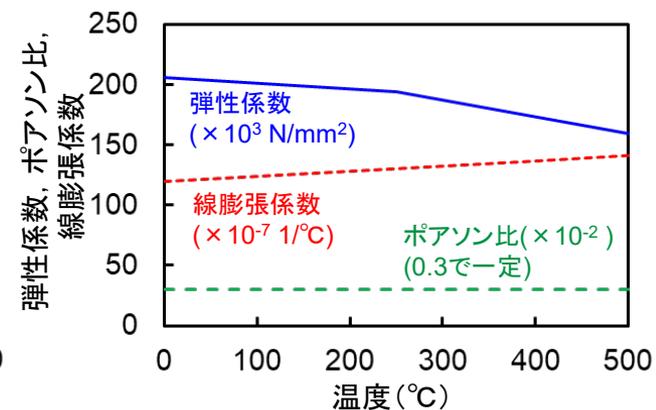
金裕哲，李在翼，猪瀬幸太郎：すみ肉溶接で生じる面外変形の高精度予測，溶接学会論文集，第23巻，第3号，pp.431-435，2005.



応力-ひずみ関係



物理定数および熱伝達率

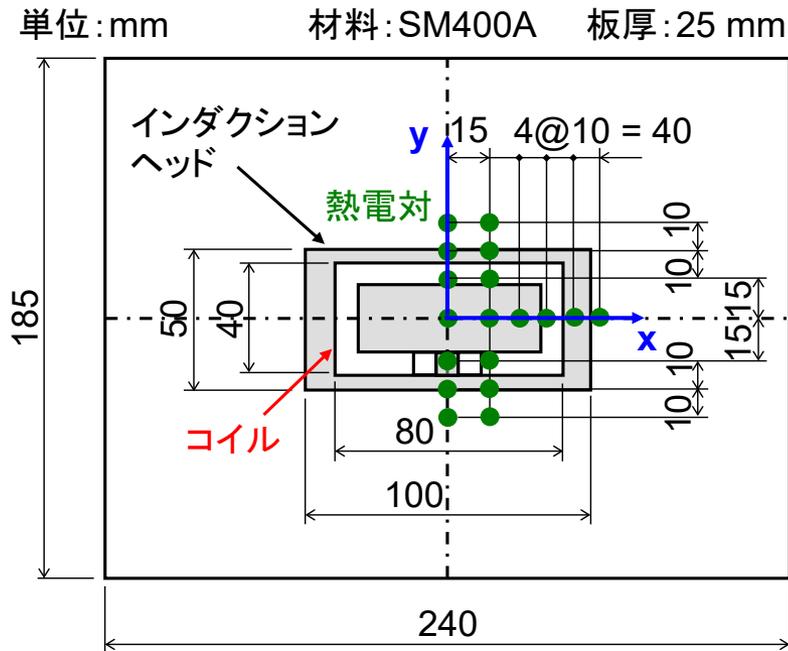


弾性係数，ポアソン比，  
線膨張係数

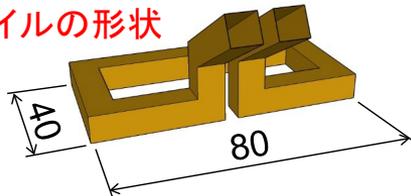
# 熱弾塑性解析

## 解析モデル

### 入熱領域の形状

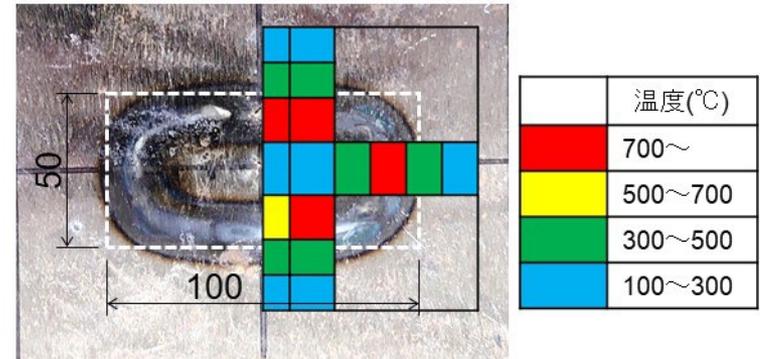


コイルの形状



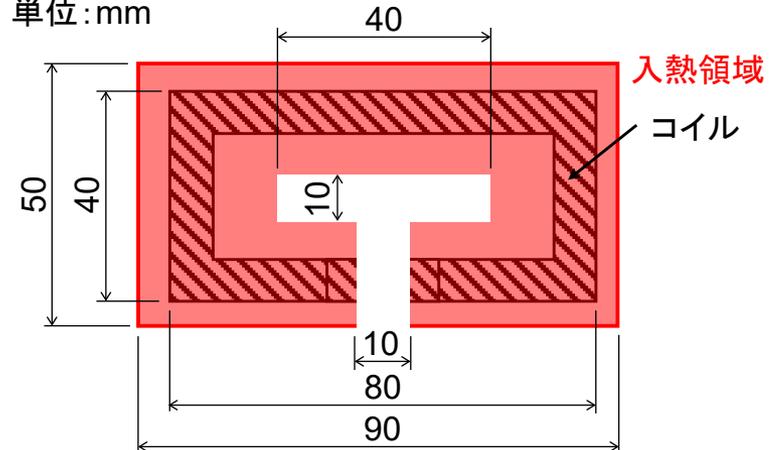
入熱領域決定用の実験供試体

単位: mm



加熱後の供試体表面と最高温度コンター

単位: mm



解析における入熱領域の形状

# 熱弾塑性解析

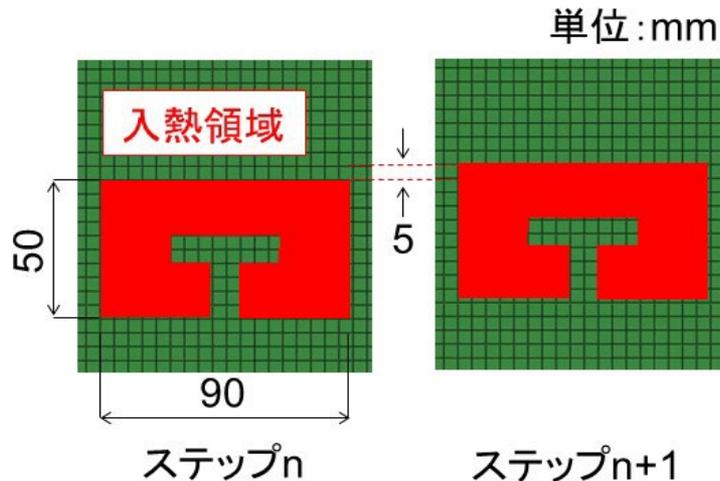
## 解析モデル

### - 入熱領域の移動

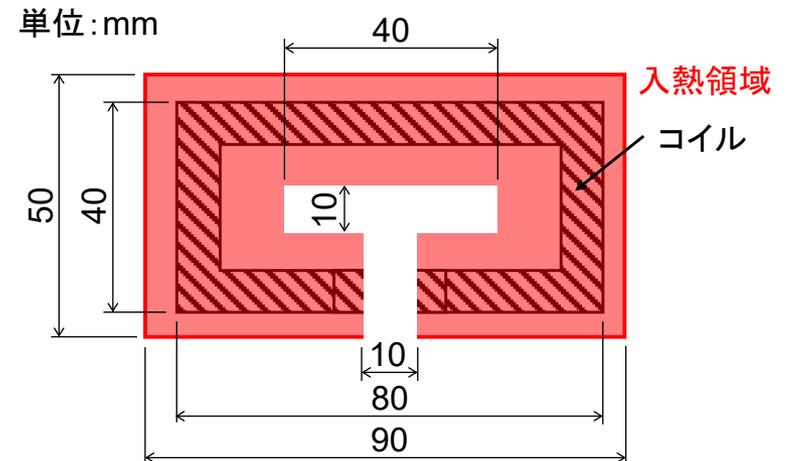
メッシュサイズに合わせ 5 mm ずつずらしながら逐次入力  
ステップの時間は実験で得られた平均速度から算出

### - 入熱深さおよび入熱量

ガラス厚ごとに異なる表面熱流束を付与



入熱領域の移動方法



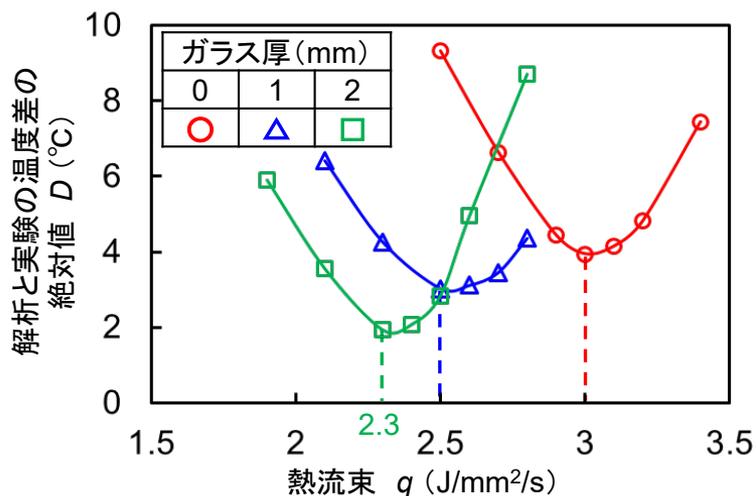
解析における入熱領域の形状

# 熱弾塑性解析

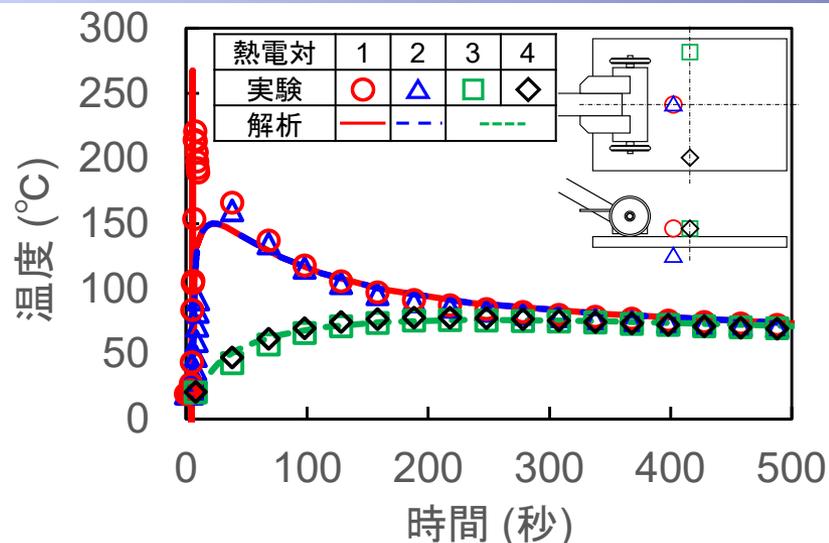
## 温度履歴

- 解析と実験の温度差の絶対値  $D$  (°C) が最小となる熱流束の大きさを探索

$$D = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{500} \sum_{k=1}^S |An_{ijk} - Ex_{ijk}|}{3 \times 500 \times S}$$



解析と実験の温度差と熱流束の関係



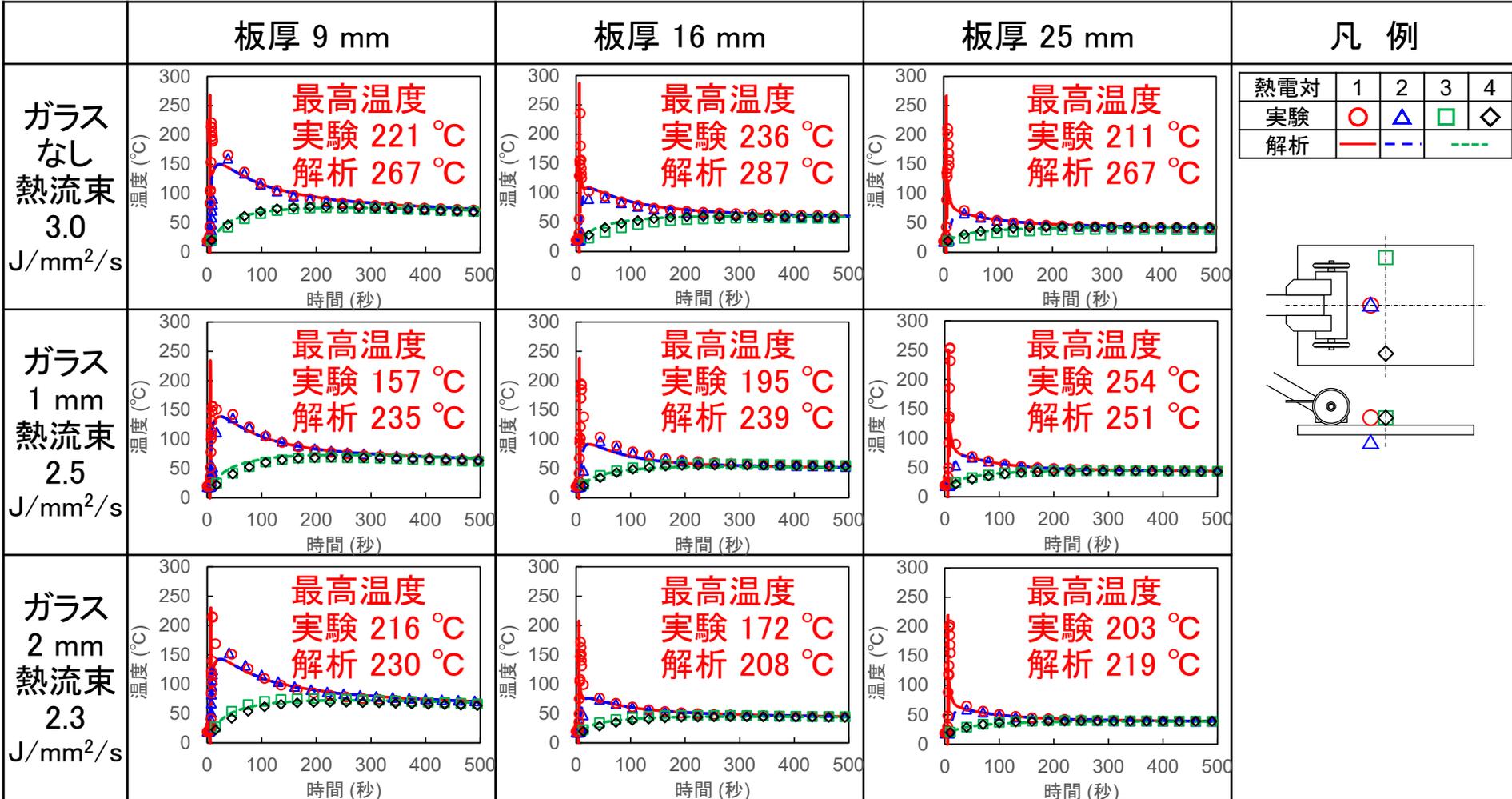
$An_{ijk}$  (°C) : 解析の温度  
 $Ex_{ijk}$  (°C) : 実験の温度  
 $i$  : 熱電対の番号を示す指標  
 $j$  : 温度計測の時刻を示す指標  
 $S$  : ガラス厚ごとの供試体数

ガラス厚ごとに採用した熱流束の値

ガラス厚	採用した熱流束の値
0 mm (ガラスなし)	3.0 J/mm <sup>2</sup> /s
1 mm	2.5 J/mm <sup>2</sup> /s
2 mm	2.3 J/mm <sup>2</sup> /s

# 実験および解析結果

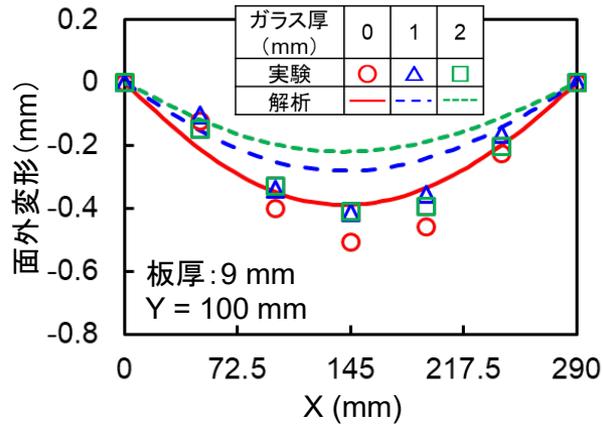
## 温度履歴



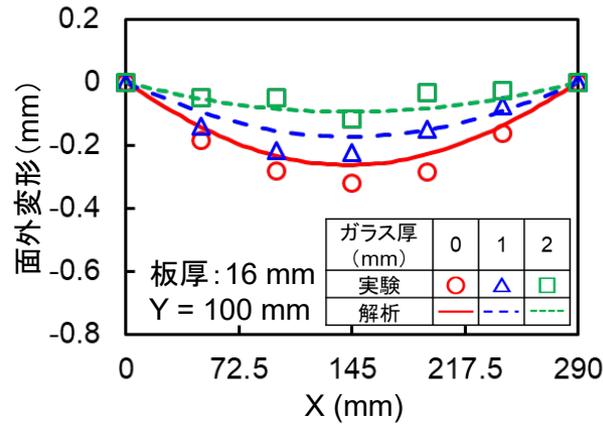
# 実験および解析結果

## 面外変形

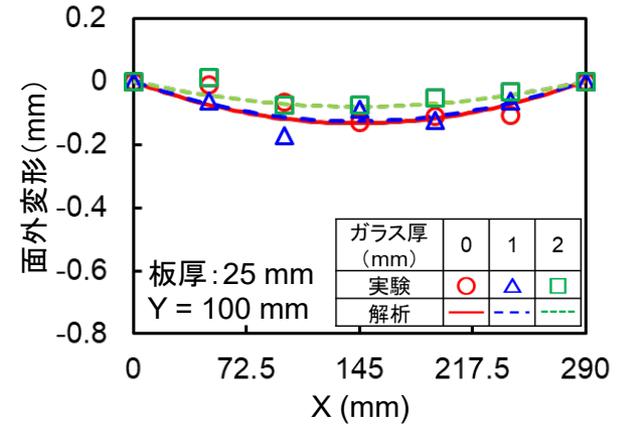
- 加熱面の裏側方向に凸の変形が生じる。
- 鋼板が薄く、（塗膜に見立てた）ガラス厚が薄いほど変形が大きい。



板厚 9 mm



板厚 16 mm

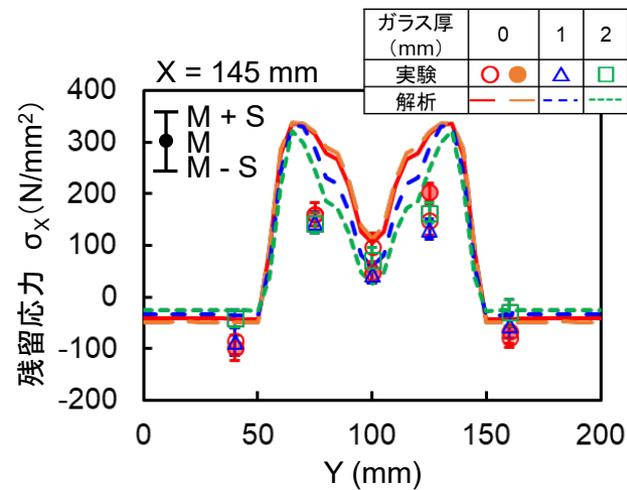


板厚 25 mm

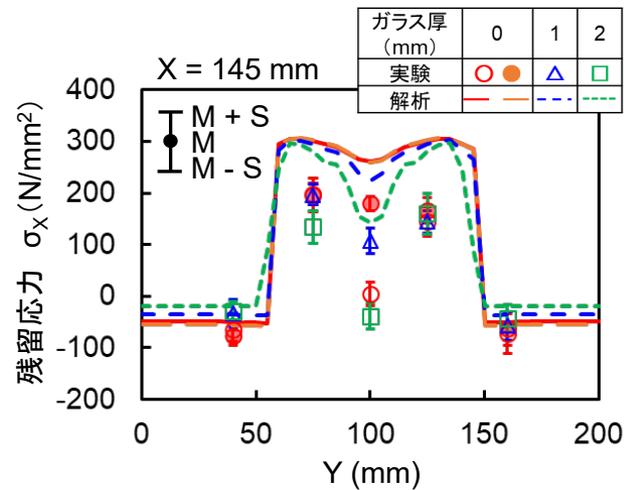
# 実験および解析結果

## 残留応力

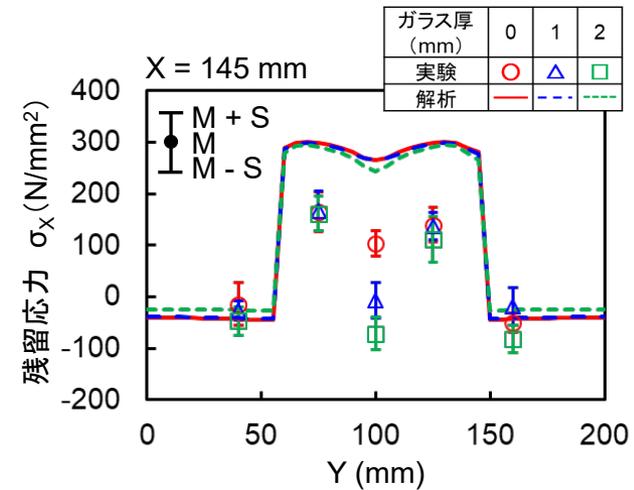
- 入熱領域の内側 (Y= 75 mm, 100 mm, 125 mm) は引張
- 入熱領域の外側 (Y= 40 mm, 160 mm) は圧縮
- 幅方向中央 (Y= 100 mm) の残留応力は小さい。



板厚 9 mm



板厚 16 mm



板厚 25 mm

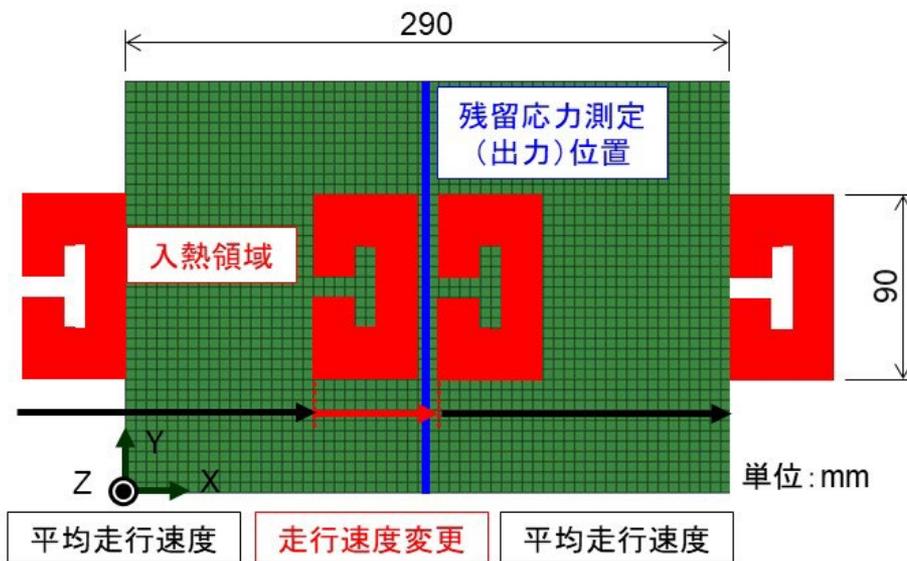
# 実験および解析結果

## 残留応力

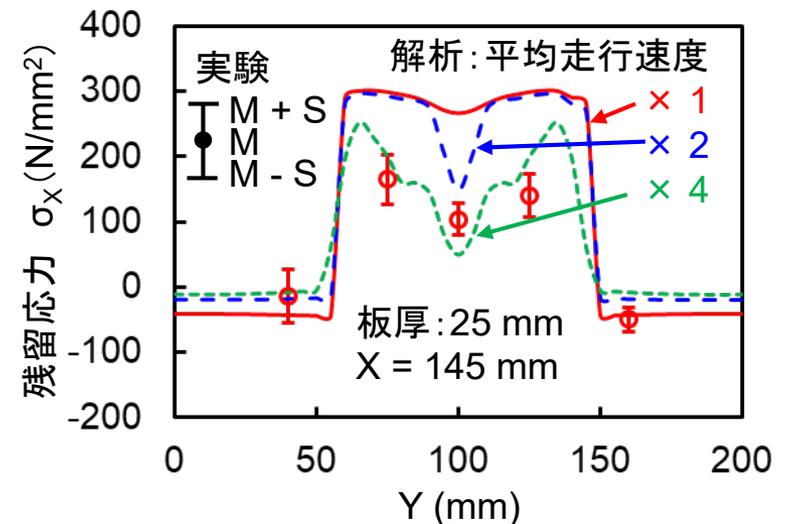
- 装置の走行速度のばらつきを考慮

(装置移動方向中央で、走行速度を変化させる)

⇒ 実験で得られた残留応力の分布には装置の走行速度のばらつきも影響している可能性



装置走行速度の変化位置



装置走行速度を変化させた場合の  
残留応力解析結果

# まとめ

- (1) 高周波誘導加熱による塗膜剥離の条件探索に資する熱弾塑性解析手法を提示し，鋼構造部材への入熱に伴う変形，残留応力の観点からその妥当性を検証した。
- (2) 鋼板の表側を加熱した場合，残留面外変形は裏側に凸となる傾向があり，板厚が薄く，装置と供試体との距離（塗膜厚）が遠い程，残留面外変形が大きくなる傾向を確認した。
- (3) 残留応力の装置走行方向成分を測定した結果，加熱領域（装置の走行範囲）では引張，非加熱領域（走行範囲外）では圧縮となった。また，装置走行速度のばらつきが引張応力の分布形状と大きさに影響を及ぼす可能性を示した。

## 本研究の成果

IH塗膜剥離の加熱を再現できるシミュレーション手法

⇒ 実構造物への適用



プレートガーダー  
(加熱順序の検討)



トラス部材  
(軸力作用下での施工可否)

## 課題

実構造物への適用のためのシミュレーションの  
効率化, 簡易化