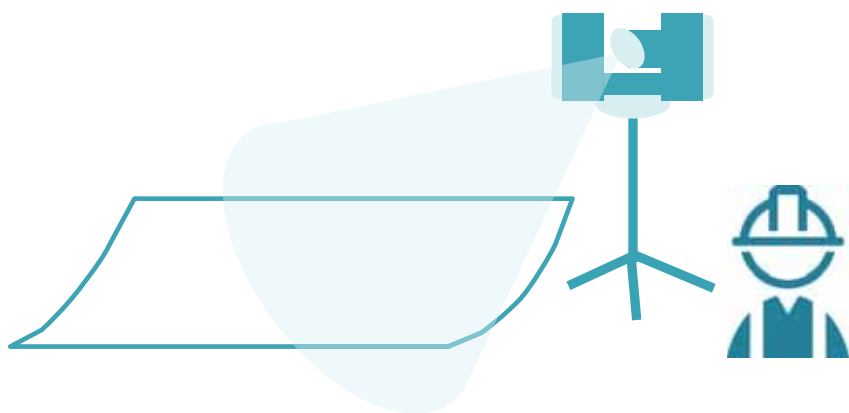


# レーザースキャナを用いたぎょう鉄作業支援と ノウハウ抽出のケーススタディに関する研究



満行泰河<sup>1</sup> 稗方和夫<sup>2</sup> ○笠原達也<sup>2</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学大学院 工学系研究府

<sup>2</sup>東京大学大学院 新領域創成科学研究科

# 目次

---

1. 研究背景

2. 目的

3. 手法

4. ケーススタディ

5. 考察

6. 結論

1.

# 研究背景

# 船体曲がり外板の製造



Fig. 船体曲がり外板 (今治造船株式会社M.S. RAGA 日本船舶海洋工学会)

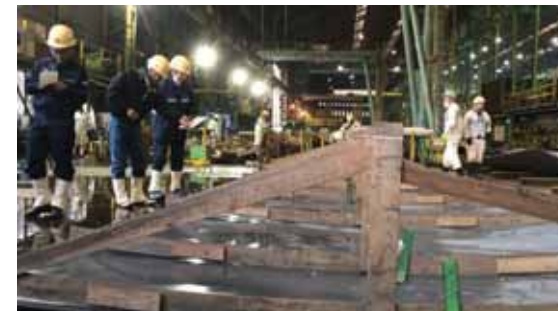


Fig. 曲げ型を用いた形状評価の様子  
短辺方向 (左)、長辺方向 (右)

## ぎょう鉄 (Line heating)

船体を構成する3次元的な曲がりを持つ鋼板 (曲がり外板) の製造はガスバーナーと水を用いた職人による手作業

設計形状を基に作成された木製の曲げ型を用いて形状を評価

# ぎょう鉄作業における現状の課題

曲げ型を用いた形状評価、加工方案決定の手法は職人により異なる。

- 熟練工の減少による後継者不足
- 技能を見よう見まねで継承する方式
- 造船所間の**作業時間の格差**<sup>[1]</sup>や**技能伝承**、**十分な加工品質の確保**<sup>[2]</sup>の問題

技能の体系化、形式化、属人性低減の必要性

[1] 田中義照, 松岡一祥: ぎょう鉄とその周辺 —ぎょう鉄技能教育と新しいシステムの開発—, 日本造船学会誌 Vol. 880 pp.113-117, (2004)

[2] 丹後義彦, 石山隆庸, 永原章二, 長島智樹, 小林順: 線状加熱自動板曲げシステムの実船適用—システムの概要と適用実験—, 日本造船学会論文集 第193号, pp. 85-95, (2003)

# 属人性低減のための取り組み

レーザーสキャナを用いたぎょう鉄作業支援システムの開発

曲がり外板工作精度評価手法<sup>[3][4]</sup>

➢ 精度評価システムとして現場導入

曲げ型のバーチャル化<sup>[5][6]</sup>

曲率誤差評価手法<sup>[6][7][8]</sup>

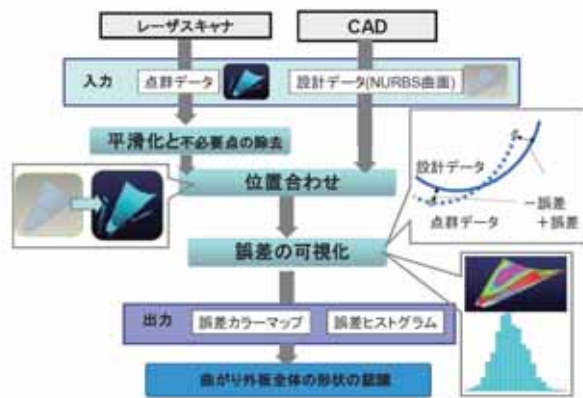


Fig. 精度評価システム<sup>[2]</sup>

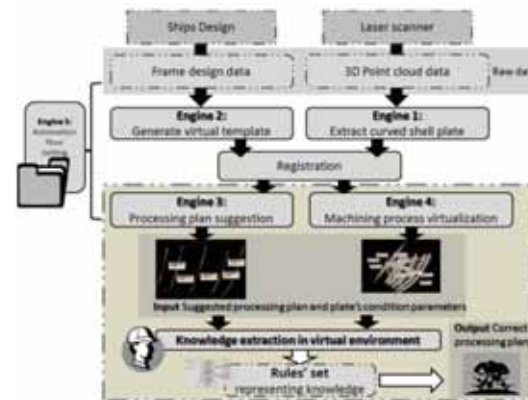


Fig. バーチャル木型システム<sup>[5]</sup>

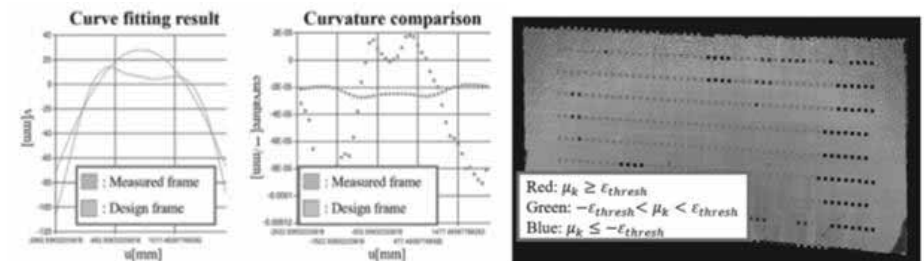


Fig. 曲率誤差評価手法<sup>[6]</sup>

[3] 稗方和夫, 大和裕幸, 笈田佳彰, 榎本昌一, 古川慈之, 牧野有紀, 杉廣武俊: レーザースキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13, pp. 231-238, (2011)

[4] 中垣憲人, 菅原晃佳, 稗方和夫, 大和裕幸, ソンシヨウギョク: レーザースキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの研究開発 (第2報), 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 17, pp. 169-176, (2013)

[5] ソンシヨウギョク, 稗方和夫, 大和裕幸, 中垣憲人, 菅原晃佳: 3D計測データとバーチャル木型を用いた曲がり外板加工方案生成システムの開発と評価, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第19号, pp. 603-606, (2014)

[6] Jingyu Sun, Kazuo Hiekata, Hiroyuki Yamato, Norito Nakagaki, Akiyoshi Sugawara: Visualization and automation of curved shell plate's manufacturing plan design process for knowledge elicitation, International Journal of Agile Systems and Management, Vol. 1, Issue 3, pp. 202-212, (2014)

[7] Kazuo Hiekata, Taiga Mitsuyuki, Kota Okada and Yoshiyuki Furukawa: Development of Curvature Gap Estimation System for Deciding Thermal Forming Instructions of Ship Curved Shell Plates Using Laser Scanner, International Journal of Automation Technology, Vol. 12, No. 3, pp. 339-347, (2018)

# 現状の取り組み

同じくレーザースキャナを用いた取り組みとして  
 曲がり外板の角変形を評価する手法を開発  
 ➤ 曲げ型を用いた評価を数学的モデルで模した手法

2019年10月の検証実験で外板の短辺方向について、曲げ型なしでの加工を実施  
 ➤ 現場で要求される精度での加工を達成  
 (詳細は船舶海洋工学会にて発表)

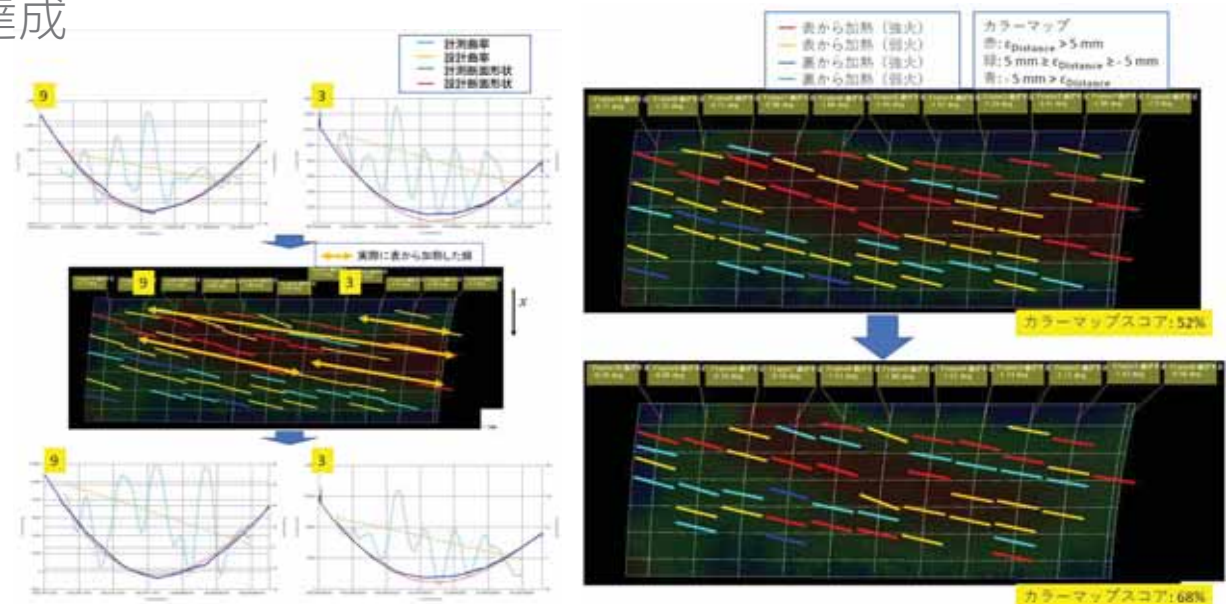


Fig. 2018年10月に行われた検証実験での結果

# 本研究における課題

開発したシステムにより出力された加熱線の直上を加熱すれば良い短辺方向と比較して、3次元曲げを含めた長辺方向の曲げは、**特殊な加熱法を要する**

➤ **絞り加工**

曲げのみではなく、端部の収縮を考慮した加熱

固有ひずみ解析を用いた研究により、現場で行われる加工が理論的に妥当であると示した研究<sup>[8]</sup>

外板端部の収縮は**面内ひずみ分布が複雑**

➤ 現場で行われているノウハウを抽出、検討する必要性

[8] 上田幸雄, 村川英一, Rashwan Ahmed Mohamed, 奥本泰久, 神近亮一, 計算機支援板曲げ方案自動作成システムの開発 (第2報) 固有ひずみの観点から見た現場での作業手順, 日本造船学会論文集, 第171号, pp. 405-415, (1992)



## 2.

## 目的

# 本研究の目的

---

造船所でのケーススタディを通して、職人の曲げ型を用いた形状評価と、開発した手法を用いた形状評価との整合性を確認

整合しない場合においても、それぞれの形状評価結果を比較・検討した上で、現場における加熱線決定ノウハウの抽出が行えることを確認

3.

# 手法

# 曲げ型を用いた形状評価手法



Fig. 短辺方向の形状評価



Fig. 長辺方向の形状評価

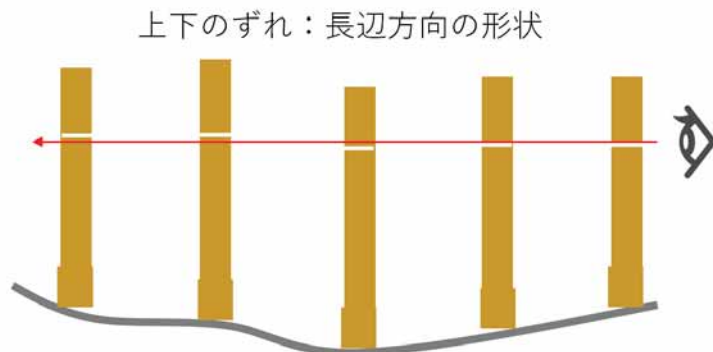


Fig. 見通し線を用いた形状評価

## 短辺方向 (FrameLine)

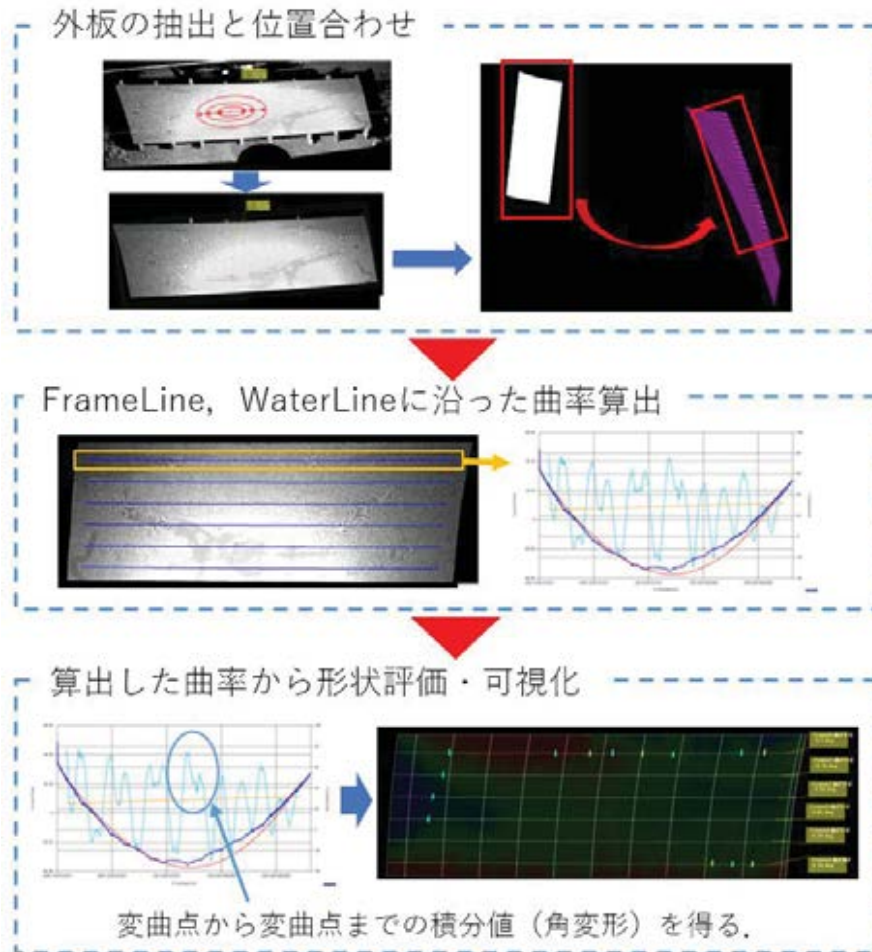
➤ 曲げ型と板の形状を直接評価

## 長辺方向 (WaterLine)

➤ 各曲げ型に水平に引かれた見通し線のずれを評価

※ 曲げ型はFrameLineに沿った形状に作成

# 開発した形状評価手法 — 概要

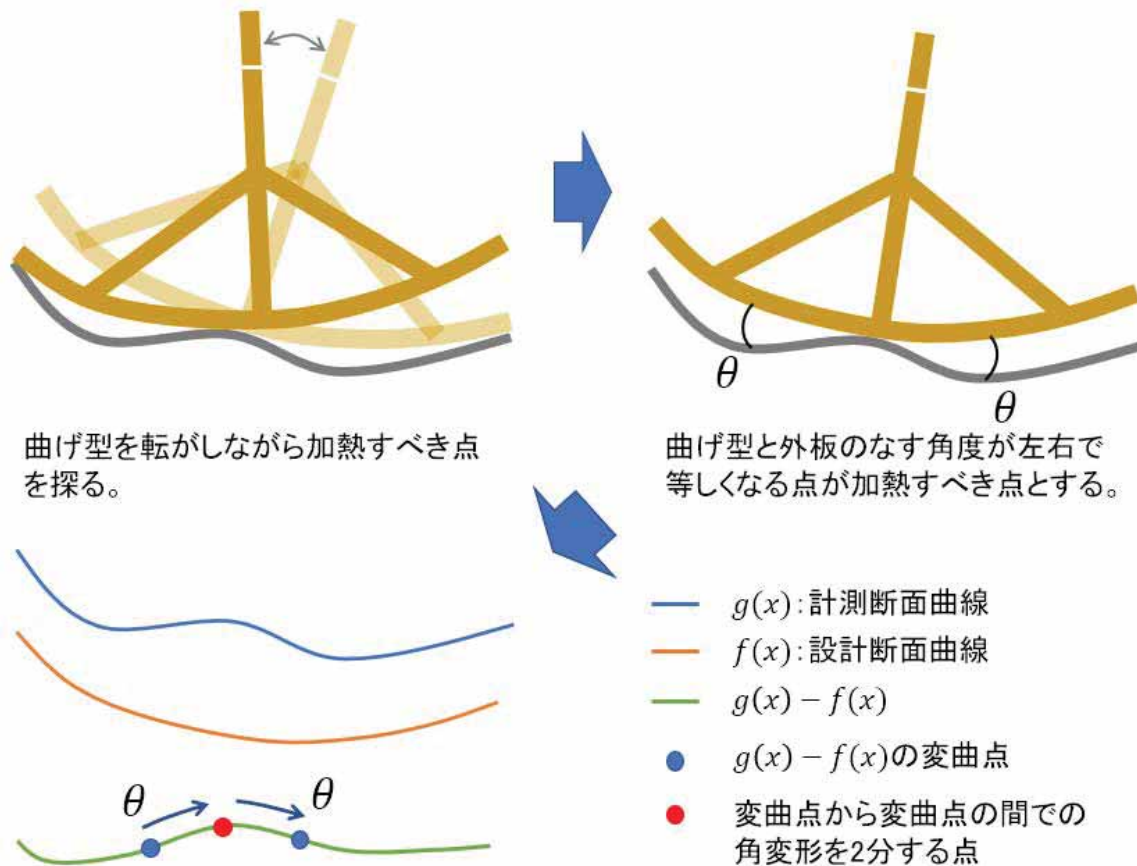


## 入力データ

レーザースキャナで計測して得た計測点群データ  
 CADから出力した設計曲面データ  
 設計FrameLine、WaterLine点群データ

Fig. 開発した形状評価手法のフロー

# 開発した形状評価手法 - アプローチ



曲げ型の短辺方向の評価を模した手法  
 長辺方向に対しても同様の手法  
 (短辺方向に沿って作成される曲げ型が長辺方向にも存在するイメージ)

Fig. 開発した形状評価手法のアプローチ

# 開発した形状評価手法 - 外板の抽出

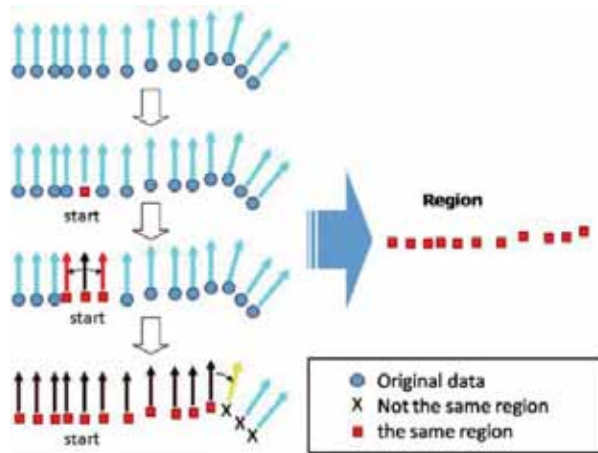


Fig. 領域成長法<sup>[2]</sup>

領域成長法を用いた手法により計測点群データから外板を抽出  
 選択した点（シード点）の法線ベクトルと近傍点の法線ベクトルを比較  
 > 内積が設定した閾値以下となる点を同じ領域として確保

※ 領域成長法は点群処理における同一平面の抽出に広く用いられる手法

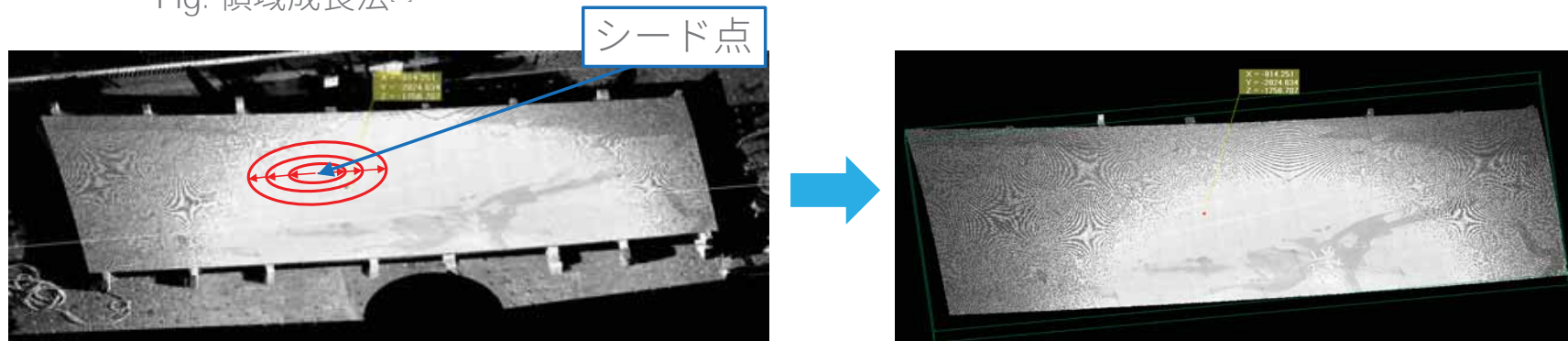


Fig. 領域成長法を用いた外板の抽出

[2] 稗方和夫, 大和裕幸, 笈田佳彰, 榎本昌一, 古川 慈之, 牧野有紀, 杉廣武俊: レーザースキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13, pp. 231-238, (2011)

# 開発した形状評価手法 — 位置合わせ

階層的ICPアルゴリズムを基盤とした処理<sup>[7]</sup>

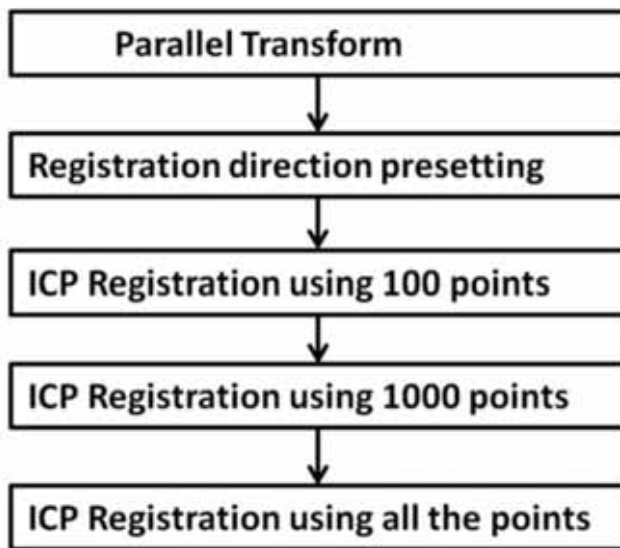


Fig. 位置合わせ処理のフロー<sup>[7]</sup>



Fig. 階層的ICPアルゴリズムを用いた位置合わせの様子

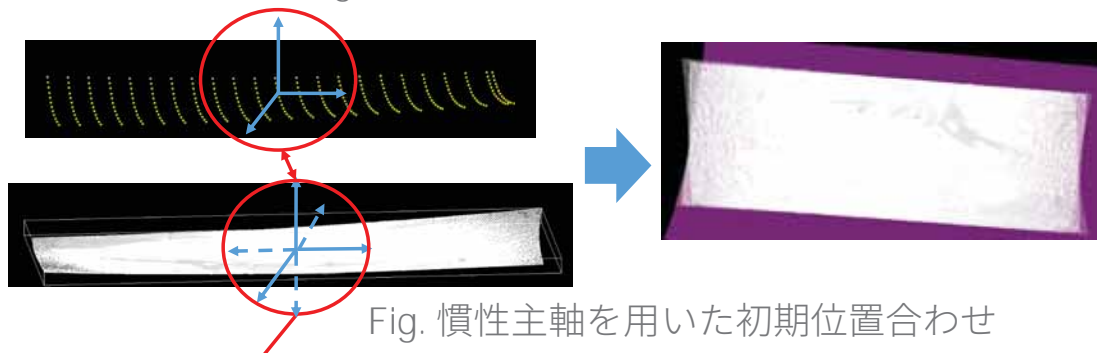


Fig. 慣性主軸を用いた初期位置合わせ

設計FrameLine点群と外板点群の慣性主軸（主成分分析で求める）に対し、2軸変換をしながら4パターンの初期位置合わせを行う。

➤ ICPアルゴリズムによって適切でない位置合わせ結果となることを防ぐ。

[7]. Sun, K. Hiekata, H. Yamato, N. Nakagaki, A. Sugawara and Y. Kaneko : Efficient point cloud data processing in shipbuilding: Reformative component extraction method and registration method, Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 1, Issue 3, pp. 202-212, (2014)



# 開発した形状評価手法 - 曲率算出

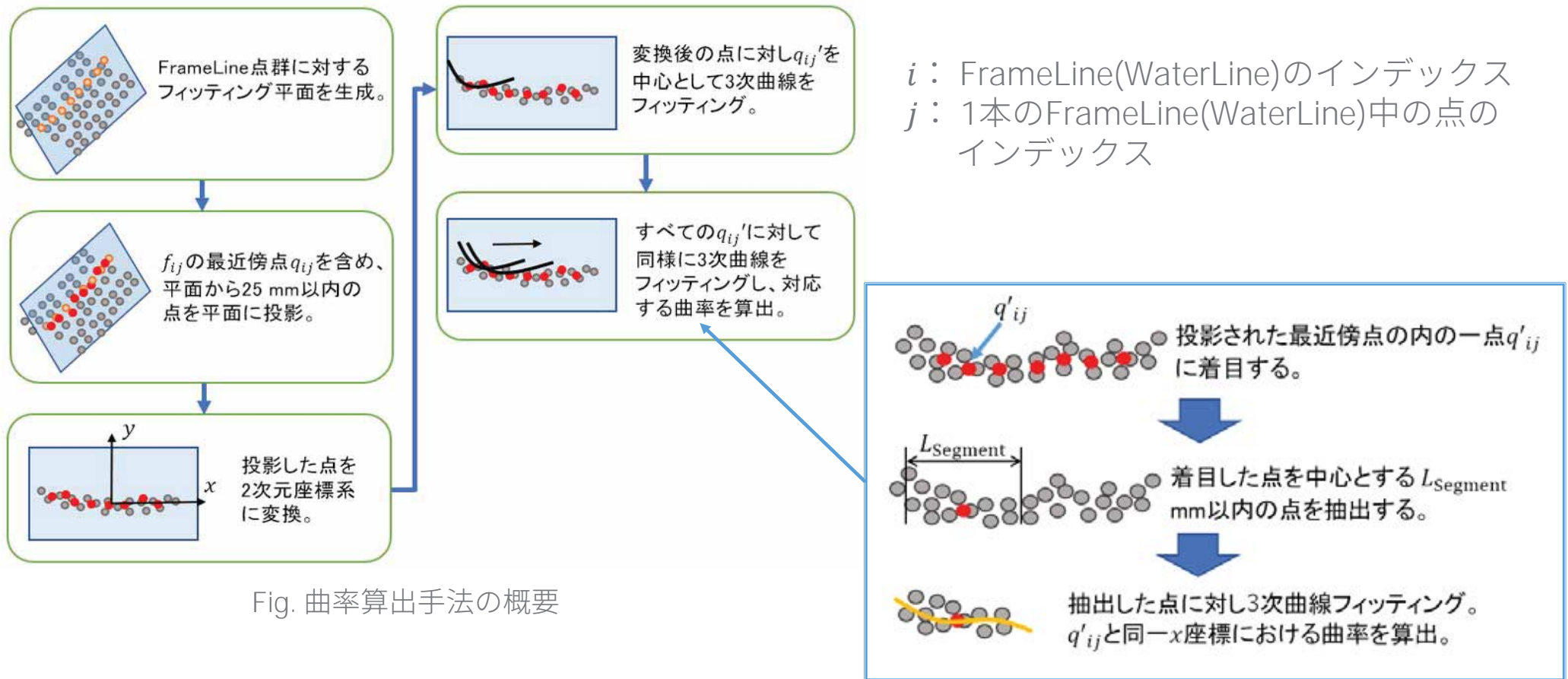


Fig. 曲率算出手法の概要

# 開発した形状評価手法 — 角変形評価

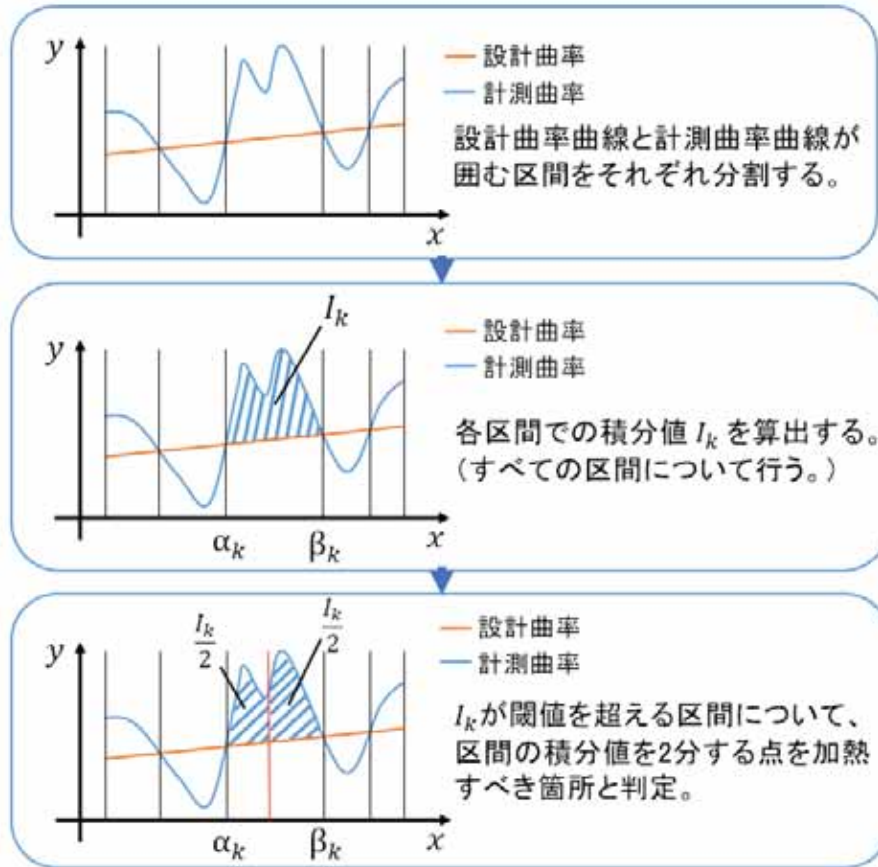


Fig. 角変形評価手法の概要

曲率誤差（符号付）は式(4)で表される。

$$\varepsilon = C_{\text{MEASUREMENT}} - C_{\text{DESIGN}} \quad (4)$$

$C_{\text{Measurement}}$ : 計測曲率

$C_{\text{Design}}$ : 設計曲率

各区間の積分値を式(5)で算出する。  
(台形近似で算出)

$$I_k = \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \varepsilon dx = \sum_l^{N-1} \frac{(\varepsilon_{kl+1} - \varepsilon_{kl})(x_{kl+1} - x_{kl})}{2} \quad (5)$$

$N$ : 各区間の点の数

$k$ : 区間のインデックス

$l$ : 各区間の点のインデックス

$I_k$  が閾値  $I_{\text{Threshold}}$  を超えた区間において  
式(6)を満たす点を加熱すべき点とする。

$$\int_{\alpha_k}^t \varepsilon dx = \int_t^{\beta_k} \varepsilon dx = \frac{I_k}{2} \quad (6)$$

# 開発した形状評価手法 - 曲率算出

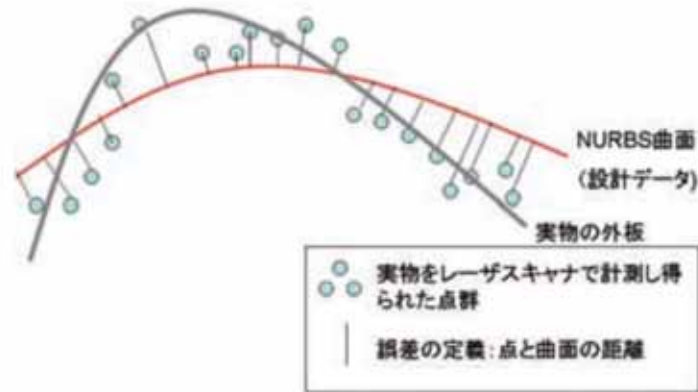


Fig. 距離誤差算出<sup>[2]</sup>

位置合わせされた外板点群と設計曲面(NURBS曲面として表現)との垂直距離をニュートン法により算出  
 > 符号付距離を距離誤差として扱う。

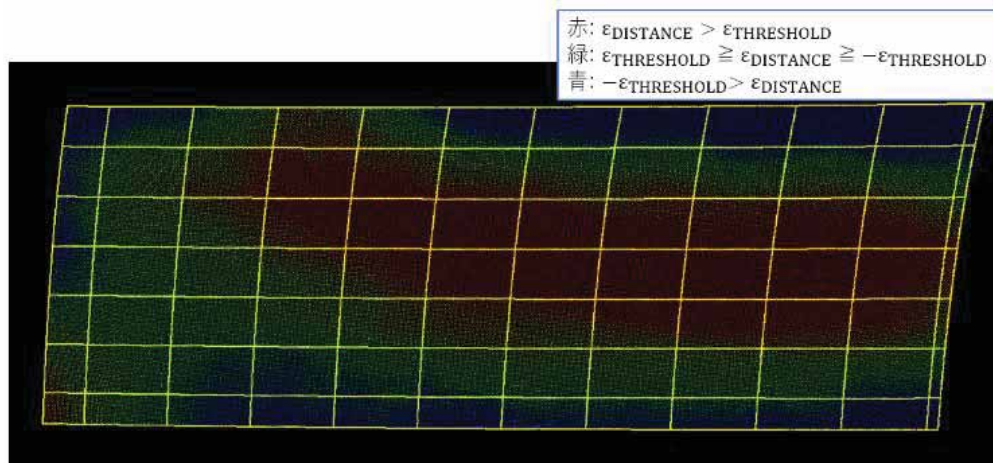


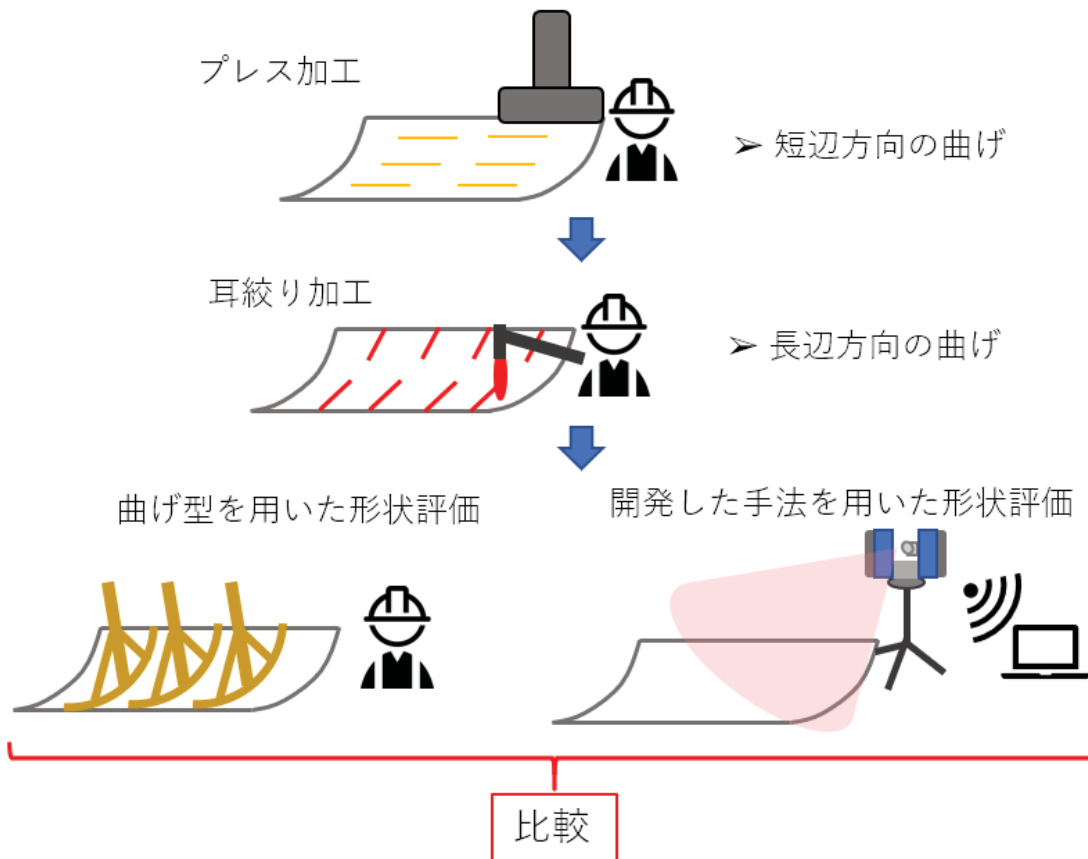
Fig. 距離誤差カラーマップ

赤 : 5 mm以上高い  
 青 : 5 mm以上低い  
 緑 : ±5 mm以内

緑色となる割合をカラーマップスコアとして算出

[2] 稗方和夫, 大和裕幸, 笈田佳彰, 榎本昌一, 古川 慈之, 牧野有紀, 杉廣武俊: レーザースキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13, pp. 231-238, (2011)  
 Study on Working Support for Line Heating Using Laser Scanner and Case Study of Know-How Extraction | Yokohama National University & The University of Tokyo

# ノウハウ抽出手法と対象ケース①



## プレス加工

短辺方向の曲げを生じさせる冷間加工

## 耳絞り加工

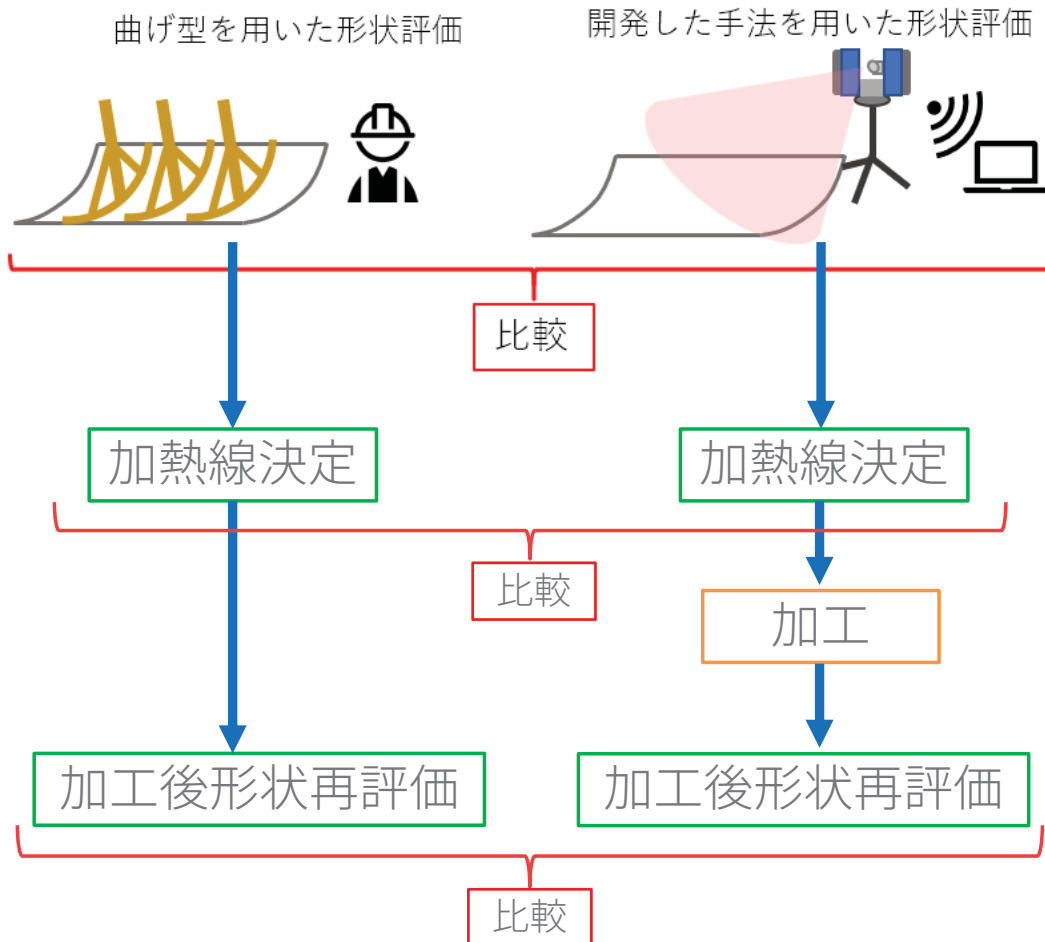
(短辺方向の曲げを維持しながら)  
長辺方向の曲げを生じさせる端部収縮加熱

耳絞り加工が一通り完了した段階における形状評価を比較

※ この段階で形状にずれが存在した場合、修正加熱を行う

Fig. 対象部材の加工フローと対象とするケース

# ノウハウ抽出手法と対象ケース②



- 曲げ型を用いた形状評価
- 開発した手法を用いた形状評価

それぞれの

- 評価結果
  - 決定加熱線
  - 加熱後形状再評価結果
- を比較

職人に対するインタビューにより検討

※ 実際に行われる加熱は開発した手法を用いた形状評価により決定した加熱線によって行う

Fig. 対象部材の加工フローと対象とするケース

4.

# ケーススタディ

# ケーススタディ概要

## 造船所における検証実験

レーザースキャナの位置は外板端部から約1.5 m、高さ1.8 m  
外板の寸法は 短辺方向：約3.5 m、長辺方向：約9 m

以後、例えば0番のインデックスを持つFrameLineを  
「FrameLine 0」のように表記



Fig. 実験環境の様子

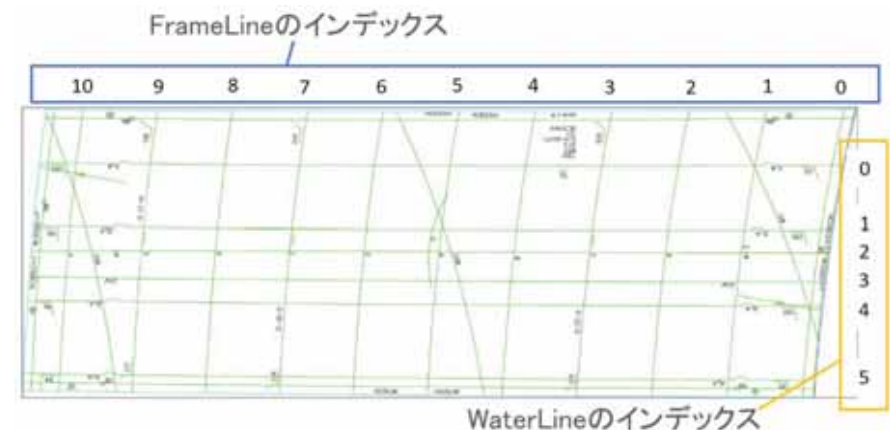
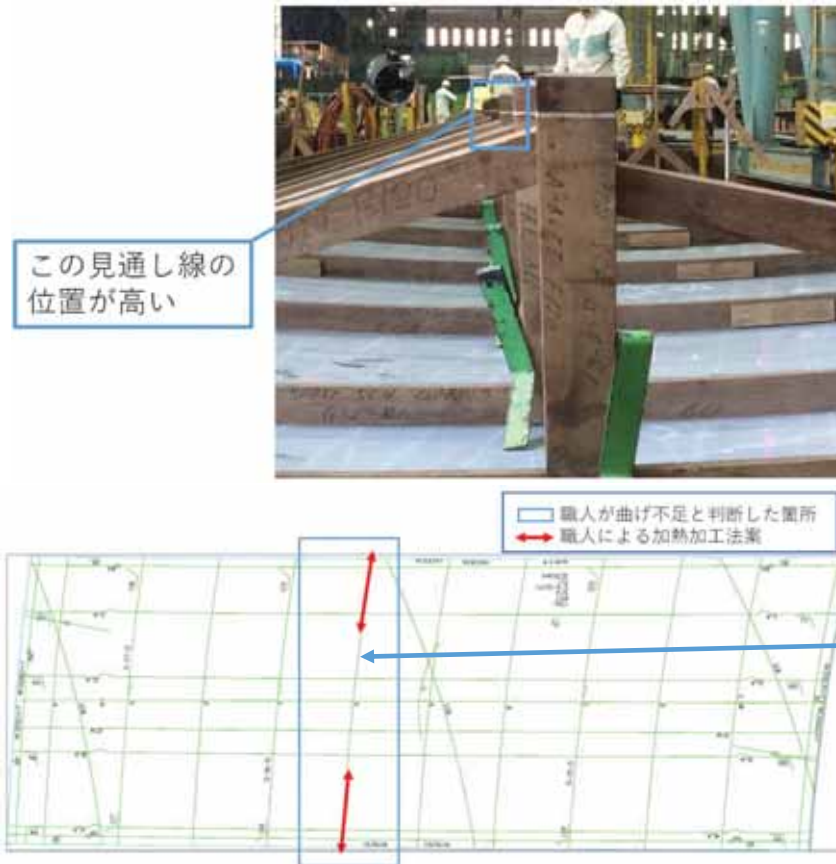


Fig. 実験対象部材とFrameLine、WaterLineのインデックス

# 評価結果と比較 - 曲げ型を用いた評価

曲げ型の見通し線を用いた長辺方向の評価と修正加熱案

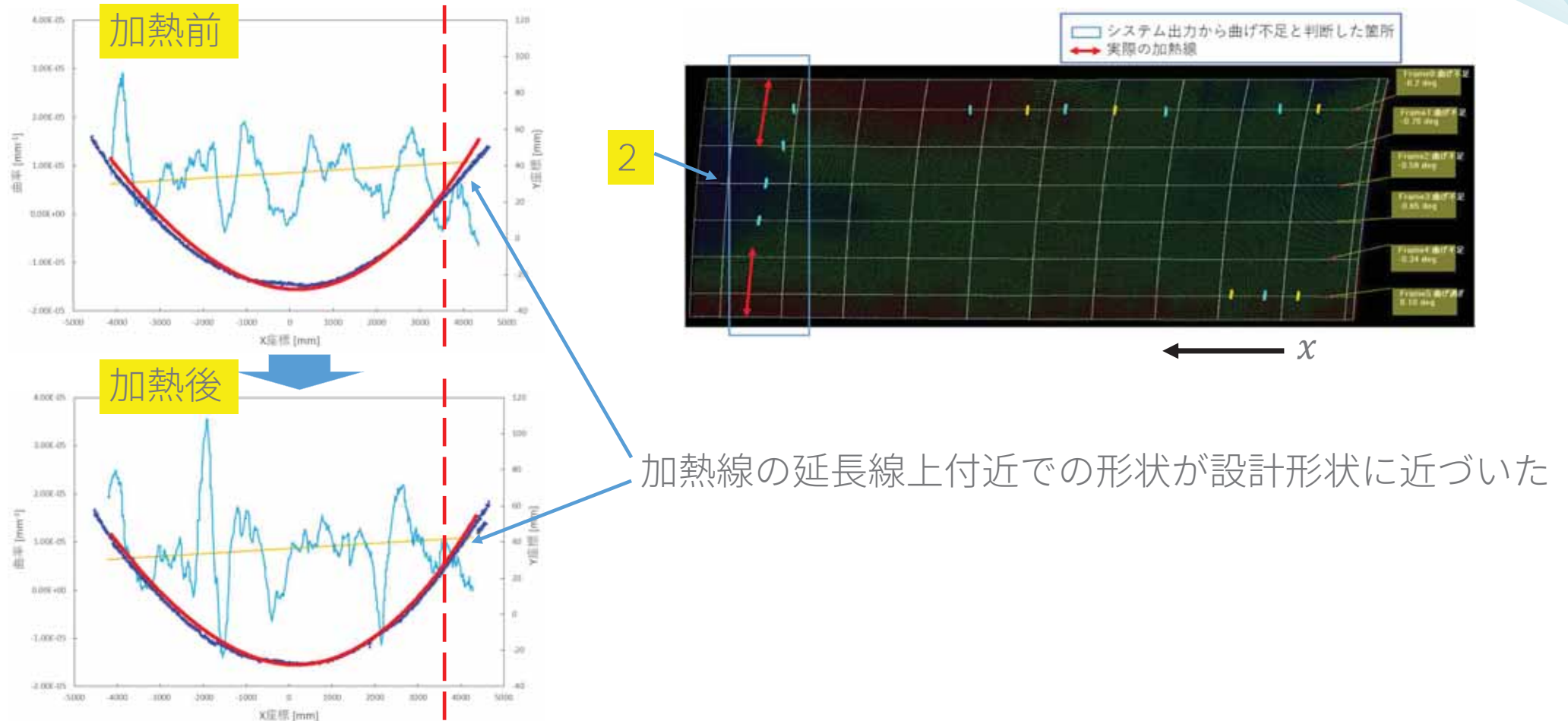


FrameLine 6に沿って設置された曲げ型の見通し線の位置が高く、周辺が曲げ不足

Fig. 曲げ型を用いた形状評価結果



# 評価結果と比較 - 開発した手法による評価



加熱線の延長線上付近での形状が設計形状に近づいた

Fig. 加熱前後でのFrameLine 2断面形状の変化

# 加熱後の再評価結果 - 曲げ型を用いた評価

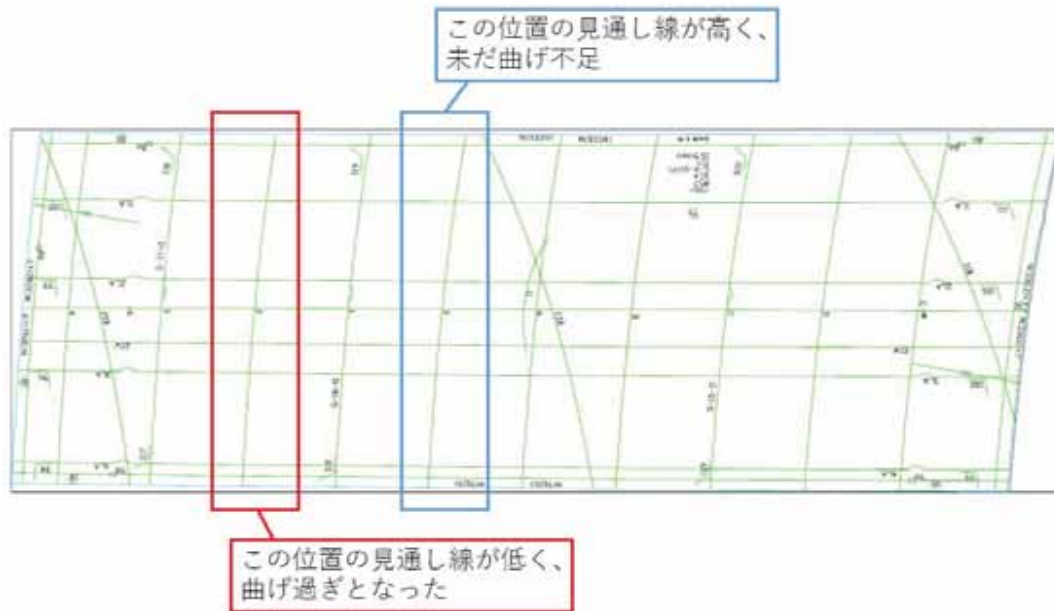


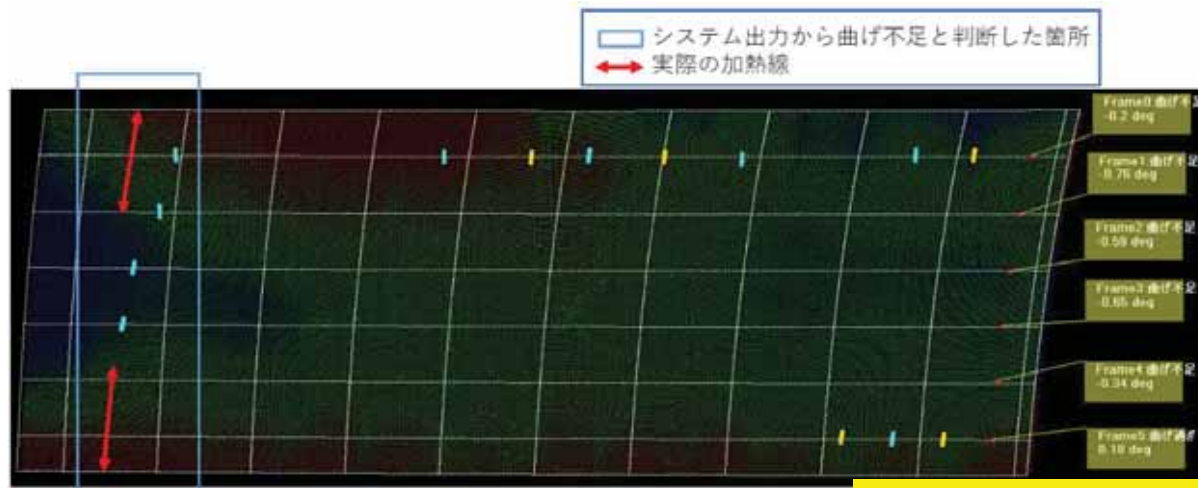
Fig. 曲げ型を用いた再評価結果

加熱後、曲げ型を用いて形状を再評価

加熱前に曲げ不足と判断された箇所は**未だ曲げ不足**

代わりに**曲げ過ぎ**と判断された箇所が発生

# 加熱後の再評価結果 - 開発した手法を用いた評価



形状は明らかに改善

カラーマップスコア：78%

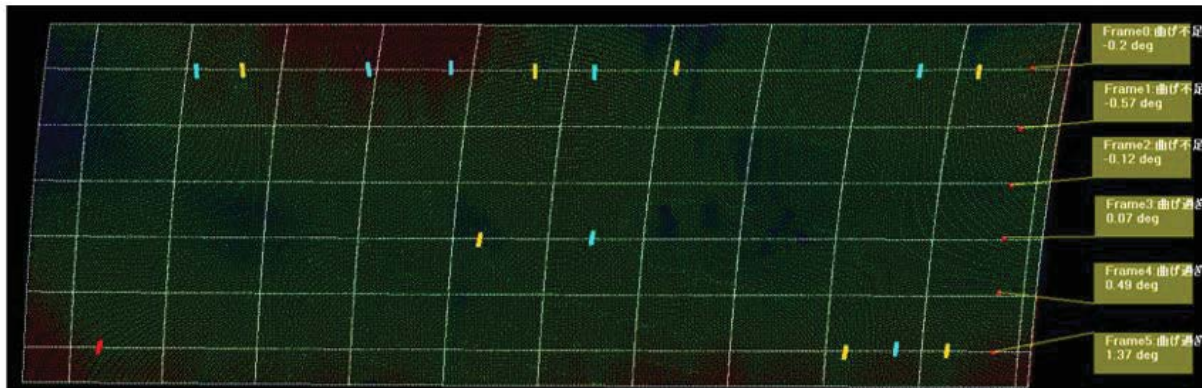


Fig. 開発した手法による再評価結果 カラーマップスコア：91%

5.

# 考察

# 職人による評価の意図

評価と比較の結果を踏まえたインタビューを実施

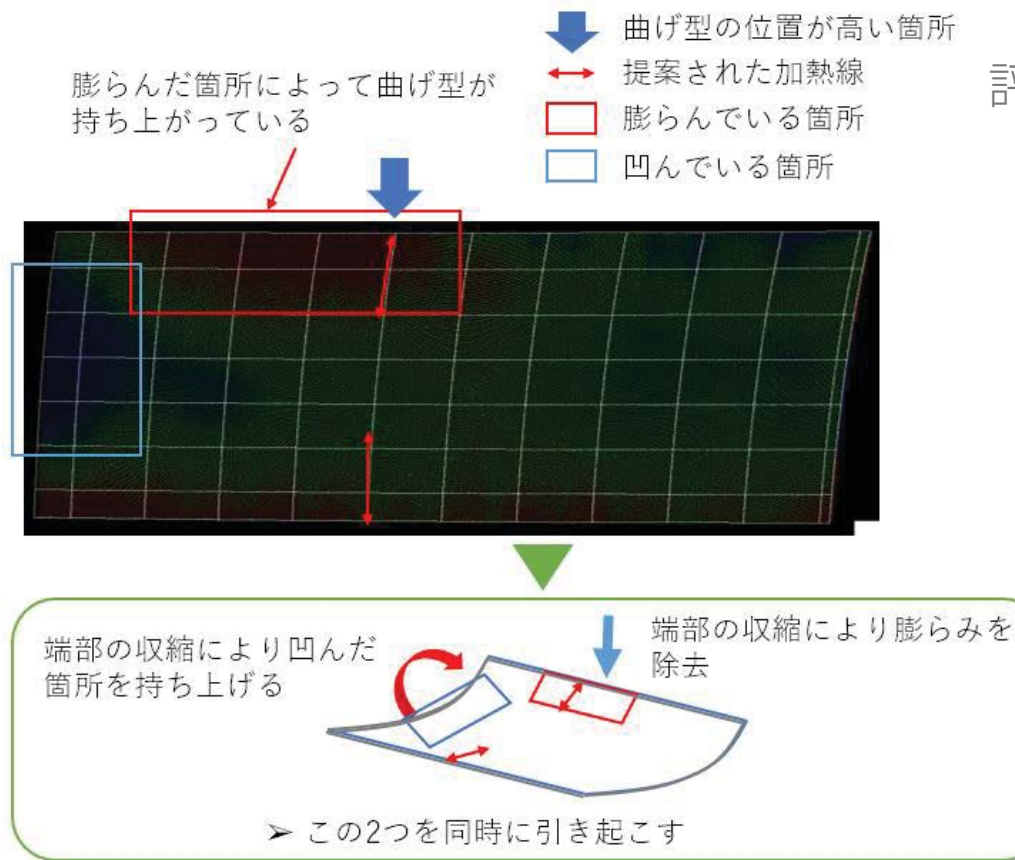


Fig. 職人による形状評価の意図

# 短辺方向を考慮した再評価結果

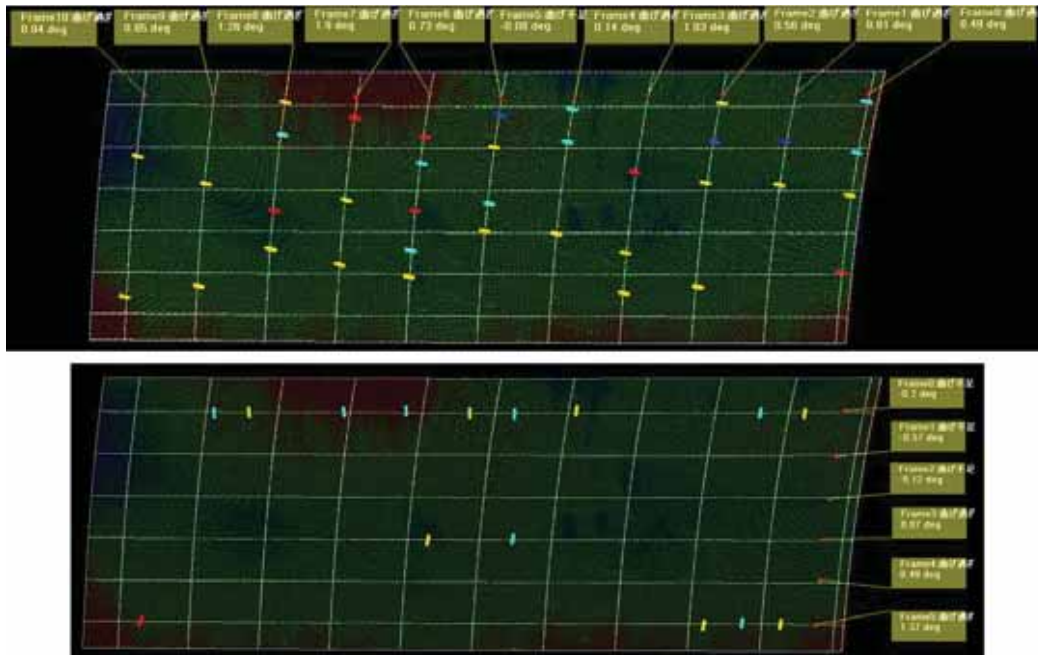


Fig. 短辺方向および長辺方向の再評価結果

短辺方向（特にFrameLine 7）における角変形の誤差が比較的大きい  
 ➤膨らみは短辺方向に起因する可能性

Table 再評価における各FrameLine、WaterLineの全体角変形誤差

FrameLineのID	全体角変形誤差 [deg]	WaterLineのID	全体角変形誤差 [deg]
0	0.49	0	-0.20
1	0.01	1	-0.57
2	0.56	2	-0.12
3	1.03	3	0.07
4	0.14	4	0.49
5	-0.08	5	1.37
6	0.73		
7	1.90		
8	1.26		
9	0.85		
10	0.94		

# 再評価結果を踏まえたインタビュー①

短辺方向を考慮した再評価結果を踏まえて再度インタビューを実施

- 膨らみはプレス加工の時点で存在していたこと
- 短辺方向の曲げ過ぎが原因である可能性があること

➤ プレス加工が短辺方向のみの曲げを生じさせる作業であることを考慮すると、膨らみは短辺方向に起因すると判断出来る。

以上から、開発した形状評価の妥当性を確認

# 再評価結果を踏まえたインタビュー②

再評価の後再度短辺方向の加熱を実施

➤ 形状は大きく改善せず

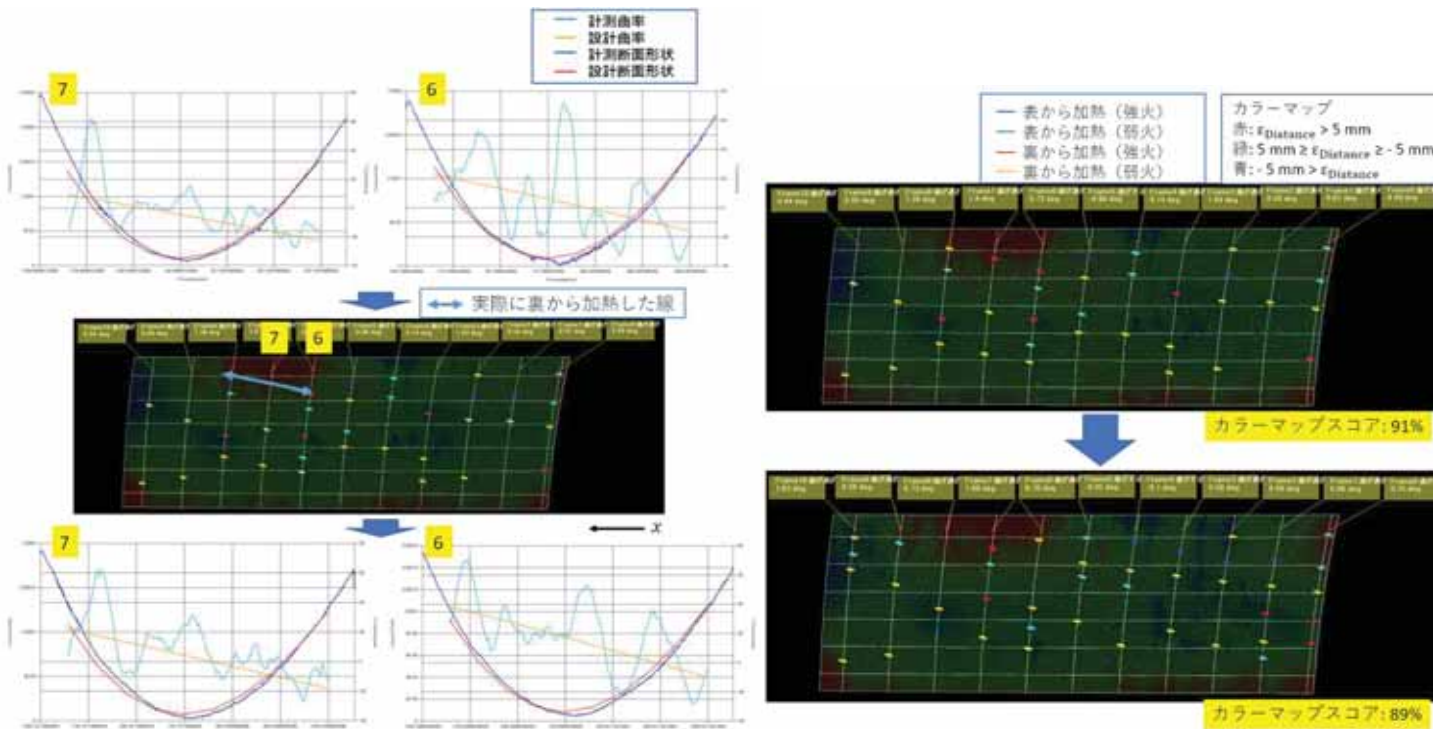
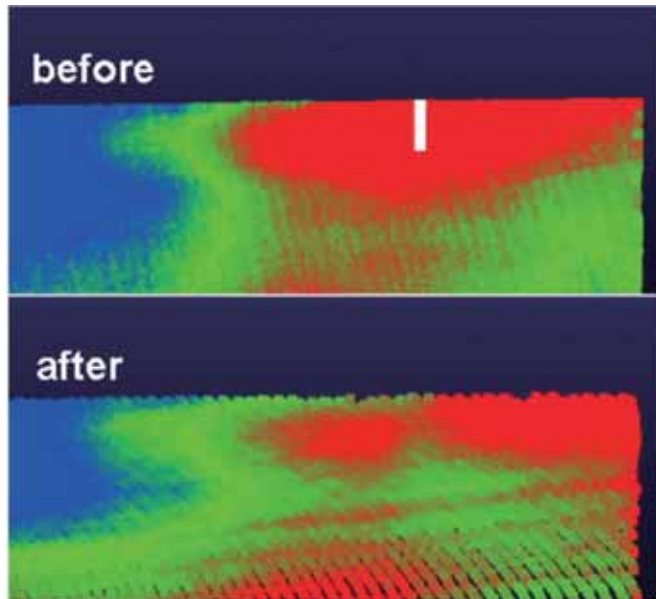


Fig. 再評価後の短辺方向の追加加熱



# 再評価結果を踏まえたインタビュー③



先行研究<sup>[3]</sup>において、端部に膨らみが存在する場合、直上を収縮することによって形状を改善  
 ➤ 現場のノウハウの妥当性、絞りによる加工の必要性

Fig. 先行研究における距離誤差カラーマップと加熱線<sup>[3]</sup>

[3] 稗方和夫, 大和裕幸, 笈田佳彰, 榎本昌一, 古川 慈之, 牧野有紀, 杉廣武俊: レーザースキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13, pp. 231-238, (2011)

# まとめ

---

曲げ型による形状評価と開発した手法を用いた形状評価結果および加熱線を比較

➤ 開発した手法を用いた形状評価が妥当

インタビューを基に加熱線決定ノウハウを抽出

➤ 収縮を必要とする修正に対する加熱ノウハウを抽出

[3] 稗方和夫, 大和裕幸, 笈田佳彰, 榎本昌一, 古川 慈之, 牧野有紀, 杉廣武俊: レーザースキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13, pp. 231-238, (2011)

6.

## 結論

# 結論

造船所でのケーススタディを通して、職人の曲げ型を用いた形状評価と、開発した手法を用いた形状評価との整合性を確認

➤ 整合しなかったものの、**開発したシステムによる形状評価の妥当性を確認**

整合しない場合においても、それぞれの形状評価結果を比較・検討した上で、現場における加熱線決定ノウハウの抽出が行えることを確認

➤ **収縮を考慮したノウハウの抽出が行えた**

ご清聴ありがとうございました

Contact

Tatsuya Kasahara: [tkasahara@s.h.k.u-tokyo.ac.jp](mailto:tkasahara@s.h.k.u-tokyo.ac.jp)

Laboratory: [is-contact@edu.k.u-tokyo.ac.jp](mailto:is-contact@edu.k.u-tokyo.ac.jp)