

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

Study on Working Support for Line Heating Using Laser Scanner and Case Study of Know-How Extraction

満行泰河¹ 稗方和夫² 笠原達也²

Taiga Mitsuyuki¹, Kazuo Hiekata², and Tatsuya Kasahara²

¹ 横浜国立大学大学院 工学系研究府

¹ Graduate School of Engineering Science, Yokohama National University

² 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

² Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Abstract: Line heating a technique to process ship curved shell plates is performed manually by craft workers using wooden templates. Our study group is working on development of processing support system for line heating. In this paper, a case study to introduce a developed system using laser scanner was conducted. This case study was to compare the shape evaluation by craftworkers and by the system. As a result, although these did not match, it was confirmed that know-how of craftworkers is able to be extracted.

1. 緒言

造船業における船体を構成する 3 次元曲面鋼板（曲がり外板）の成形は、ぎょう鉄と呼ばれる作業によって行われている。ぎょう鉄はガスバーナーと水を用いて加熱冷却を繰り返しながら面内収縮を伴う板曲げを行う、職人による手作業である。このとき、設計形状を基に作成された木製の曲げ型を用いて外板の形状を評価しながら加工を行っているが、この形状評価の方法は職人によって異なっており、長年、熟練の技能を見様見真似で継承する方式が取られていた。著者らはぎょう鉄作業における形状評価の属人性低減に取り組んでおり、これまでにレーザースキャナと点群データを用いた作業支援の手法を開発してきた^{[1][2][3][4][5]}。現在、同じくレーザースキャナを用いた取り組みとして、新たに外板の角変形を考慮した形状評価手法を開発した。この手法は、曲げ型を用いた評価を数学的モデルで模した手法であり、曲げ型を用いた形状評価を計算機による解析によって代替することを指向している。本稿では、造船所でのケーススタディを通して、職人による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を比較、その整合性を評価する。整合しな

かった場合には、比較の結果を踏まえたインタビューから、現場におけるノウハウの抽出が行えることを確認する。

2. 比較対象の形状評価手法

本稿では、現場で用いられている曲げ型を用いた形状評価手法と、新規に開発した形状評価手法の比較を行い、検討する。本章では、この 2 つの評価手法について説明する。

2. 1 曲げ型を用いた形状評価手法

曲げ型は一般的に、外板の短辺方向に沿った形状に作成される。短辺方向の形状は、曲げ型と外板の形状を直接評価する。これは例えば、曲げ型と外板の間に生じた隙間や、曲げ型と外板のなす角度等から判断出来る。また、曲げ型は一定間隔で複数作成される。長辺方向の形状は、複数の曲げ型に対し、水平に引かれた見通し線と呼ばれる線を用いて評価する。長辺方向の形状に誤差が生じた場合、各曲げ型での見通し線の位置が上下にずれを生じる。職人は、この見通し線のずれから、長辺方向の形状をイメージすることで判断する。見通し線を用いた長辺

方向の評価は、短辺方向の評価と比較して、更に直感的な理解が難しく、非熟練者にとっては習得が困難となる。見通し線を用いた形状評価の模式図を Fig. 1 に示す。

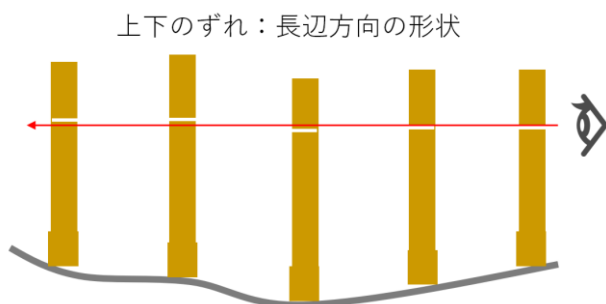


Fig. 1 見通し線を用いた形状評価の模式図

2. 2 開発した形状評価手法

開発した形状評価手法の全体概要を Fig. 2 に示す。本稿で用いる手法では、レーザースキャナにより計測・取得した加工中の外板の計測点群データと CAD から出力する設計データを入力とする。計測点群データは、必要な前処理（外板の抽出と位置合わせ）を行った後、設計の FrameLine（船体のフレームが接する線）、および WatreLine（船体の喫水線となる線）における断面の曲率を用いて形状を評価する。

外板の抽出は、レーザースキャナで計測した点群データから、外板を構成する点群のみを抽出する処理であり、領域成長法を用いる。また、位置合わせは、レーザースキャナを中心とした座標系で表される計測点群データと、船体座標系で表される設計データとが重ね合わさる様に座標変換を行う処理であり、Sun ら^[6]によって提案されたアルゴリズムを用いる。このアルゴリズムは、点群のマッチングに広く用いられる、階層的 ICP アルゴリズムを改良したものである。FrameLine・WaterLine 断面の曲率は、対象線近傍の点群を抽出した後、一定の幅で逐次的に 3 次曲線をフィッティングすることで得る。形状評価は、計測 FrameLine・WaterLine 断面曲線（算出した曲率分布を持つ曲線）を $g(x)$ 、設計 FrameLine・WaterLine 曲線を $f(x)$ と置けば、 $f(x)-g(x)$ の変曲点から次の変曲点までの角変形を評価する。この評価には、算出した曲率分布を用い、計測曲率曲線と設計曲率曲線が交わる点から次に交わる点までの曲率誤差（設計曲率と計測曲率の差）を積分することで得る。また、算出したそれぞれの積分値に対し、設定した閾値を超える箇所を加熱が必要な箇所であるとみなす。この箇所はそれぞれ幅を持っているが、積

分値を 2 分する点、つまり、変曲点から加熱点、加熱点から次の変曲点までの角度が等しくなるような点を加熱点としている。また、曲率算出対象断面の端点から端点までの積分値（全体角変形誤差）を、単一方向全体での形状の評価に用いる指標として算出する。積分値は、算出された曲率分布に対し、台形近似を行うことで算出する。

また、前処理によって設計データとマッチングされた点群に対し、稗方ら^[1]の精度評価手法を適用し、各点と設計 NURBS 曲面との距離算出、および距離に応じた色付けを行い、形状の改善の有無の確認を行う。本稿におけるケーススタディでは、次の色設定となる。

赤：5 mm 以上高い

緑：±5 mm 以内

青：5 mm 以上低い

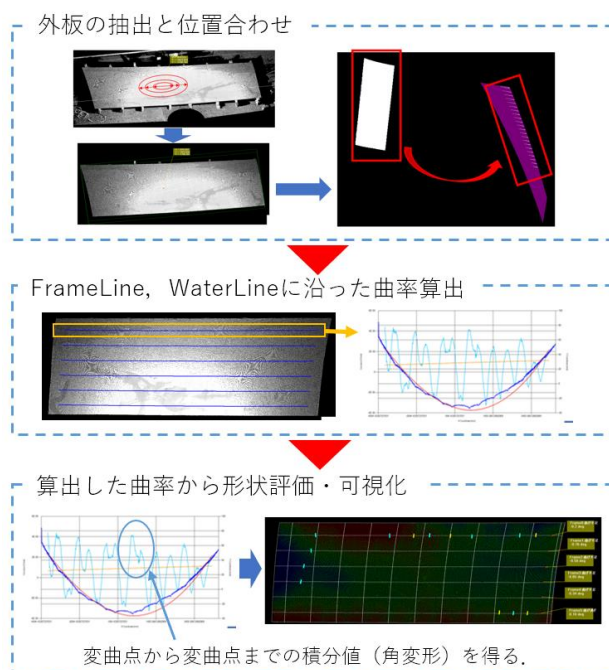


Fig. 2 計測点群データを用いた形状評価のフロー

3. ケーススタディ

ケーススタディでは、造船所にて行った検証実験を取り上げる。検証実験は香川県丸亀市の I 造船所にて行った。加工対象となるのは長辺方向約 9 m、短辺方向約 3.5 m、板厚 16 mm のねじれを含む腕型の外板である。外板におけるねじれとは、4 つの角に対し、ある対角点の組が、もう一方の対角点の組に対して高く、あるいは低く位置する様な形状である。Fig. 3 に対象とする外板の図面を示す。それぞれの FrameLine, WaterLine に対し、図の様にインデッ

クスを定義する。以後、例えば0番のインデックスを持つFrameLineを指すとき、「FrameLine 0」の様に表記する。レーザースキャナは、外板端部から約1.5 m、高さ約1.8 mの位置に設置した。

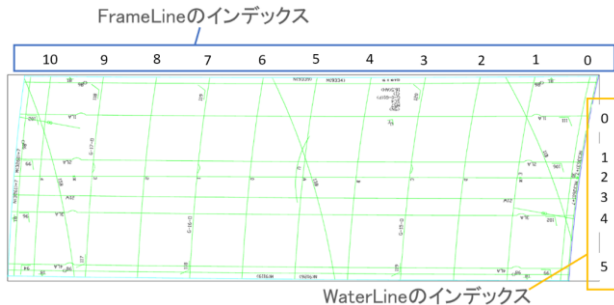


Fig. 3 対象とする曲がり外板

3. 1 対象とするケース

本ケーススタディで対象としたケースを Fig. 4 に示す。ケーススタディで対象とする外板では、プレス加工（短辺方向の曲げを生じさせる冷間加工）と耳絞り加工（長辺方向の曲げを生じさせる端部収縮加熱）が一通り行われた後、長辺方向の形状の評価を行う。このとき、プレス加工と耳絞り加工が正確に行われていた場合には追加加工の必要はないが、形状にずれが生じていた場合には修正のための加熱を行う必要がある。

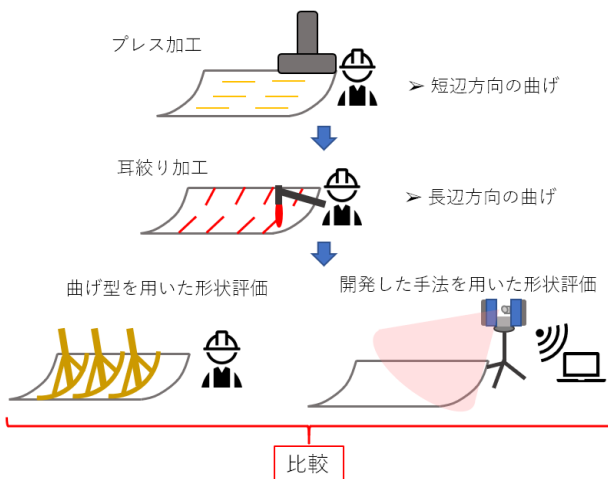


Fig. 4 ケーススタディで対象とするケース

3. 2 評価結果と比較

Fig. 5 に曲げ型の見通し線の様子と、職人による曲げ型を用いた形状評価結果とその提案加熱線を示す。

また、Fig. 6 に開発した手法をもちいた形状評価結果とその提案加熱線を示す。開発した手法を用いた形状評価の可視化では、形状の誤差の大きさによって、曲げ過ぎ、曲げ不足それぞれで2段階の閾値で色を設定しており、次の色設定となる。

- 赤：曲げ過ぎ（大）
- オレンジ：曲げ過ぎ（小）
- 青：曲げ不足（大）
- 水色：曲げ不足（小）

職人との議論の結果、本ケーススタディでは、開発した形状評価手法に基づく評価結果を採用した。加熱の結果、WaterLine 2 での断面形状が、設計形状に近づいたことがわかる。評価結果からは、職人による曲げ型を用いた評価と、開発した手法による評価は整合しなかったが、開発した手法による評価を基に行った加熱で形状が改善する、という結果となった。また、Fig. 5 に加熱後の形状に対し、曲げ型を用いて再評価を行った結果を示す。再評価結果からは、加熱によって形状は最善せず、加熱を行った箇所で曲げ過ぎが発生しているという評価がなされた。

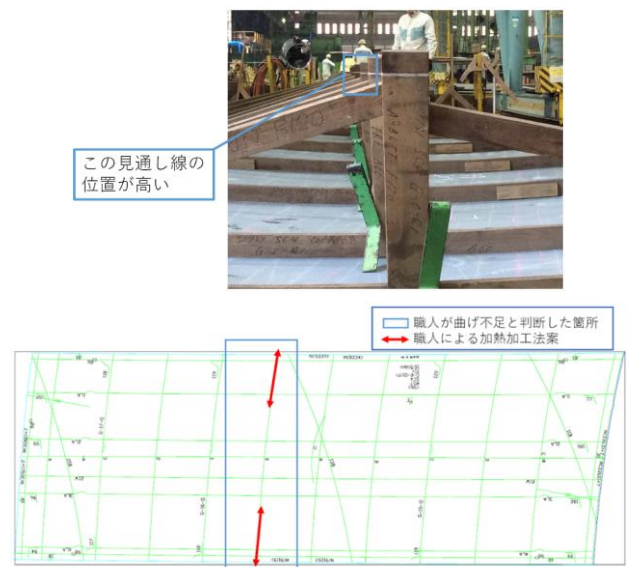


Fig. 5 曲げ型の見通し線を用いた評価

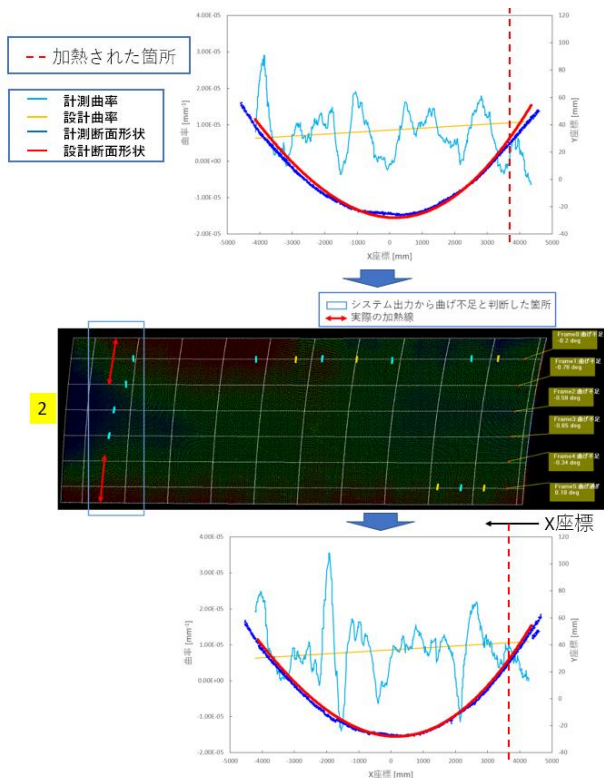


Fig. 6 採用された加熱線と WaterLine 2 における断面形状変化

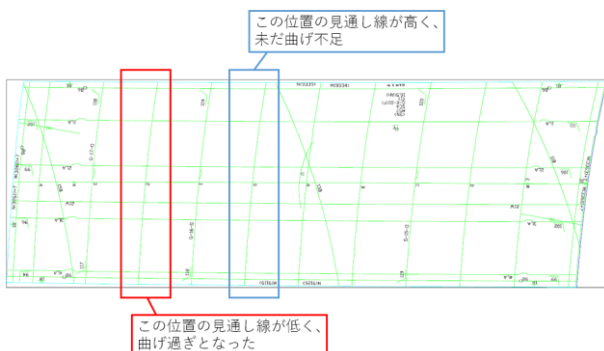


Fig. 7 加熱後における曲げ型の見通し線を用いた評価

3. 3 ケーススタディに関する考察

本ケーススタディにおける評価結果では、曲げ型を用いた評価と開発した手法を用いた評価の結果が異なっていた。しかし、開発した手法を用いた評価に基づいた加熱によって形状が改善したことから、開発した手法には妥当性があるといえる。Fig. 8 に、職人に対するインタビューから得た形状評価の意図を示す。職人が提案した加熱線によって、加熱線直下に収縮を引き起こすことにより、図中赤四角の膨

らんだ箇所と図中青四角の凹んだ箇所を同時に修正することが出来ると判断していた。Fig. 9 に、FrameLine, WaterLine 方向両方の再評価結果を示す。開発した手法を用いた評価では、Table 1 に示す全体角変形誤差の値から、膨らんだ箇所を横切る FrameLine, WaterLine において、FrameLine 7 周辺での角変形誤差が比較的大きいことがわかる。つまり、形状の誤差は短辺方向に起因すると判断できる。このことから、Fig. 8 の赤四角部分の膨らみは、長辺方向の曲げ不足に起因するものではなく、短辺方向の曲げ不足に起因するものであると判断出来る。この結果を踏まえて再度職人にインタビューを行った結果、赤四角部の膨らみは、プレス加工の時点から存在していたこと、短辺方向の曲げ不足に起因している可能性がある、との評価が得られた。以上から、開発した手法を用いた形状評価の妥当性に加え、職人による曲げ型を用いた評価の根拠と意図が抽出されたといえる。

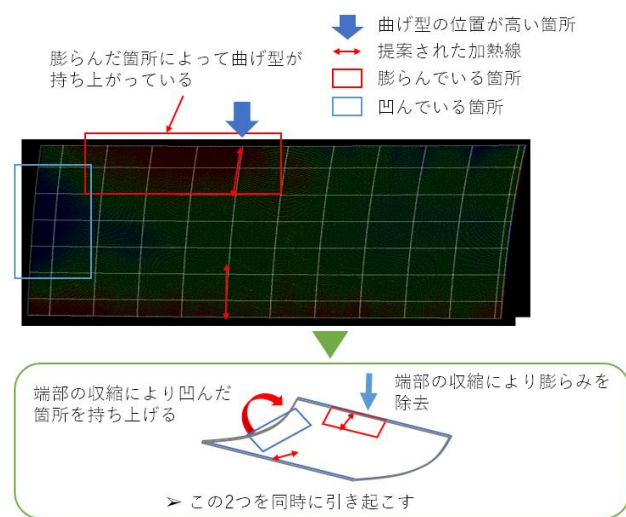


Fig. 8 職人による評価と提案加熱線の意図

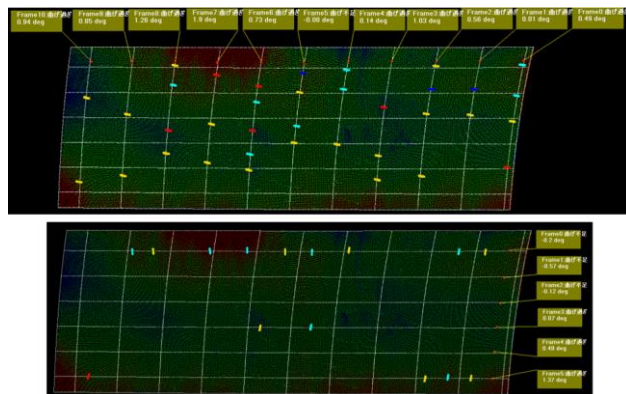


Fig. 9 開発した手法による再評価結果 FrameLine(上), WaterLine(下)

Table 1 加熱後形状における全体角変形誤差

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		

4. 結言

本稿では、造船所でのケーススタディを通して、職人による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を比較、その整合性を評価した。ケーススタディの結果、双方は整合しなかったために、比較の結果を踏まえたインタビューから現場におけるノウハウの抽出が行えることを確認した。

謝辞

本研究では、今治造船株式会社様に多大なるご支援を戴いた。また、点群解析ソフトウェアは、株式会社ユニクス様に提供していただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 中垣憲人, 菅原晃佳, 稗方和夫, 大和裕幸, ソンショウギョク : 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)
- [3] ソンショウギョク, 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)
- [4] 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)

- [5] 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)
- [6] J. 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)