

3Dレーザースキャナを用いた実船の初期たわみ計測と分析*1

川島史也*, 辰巳晃*, 飯島一博*, 塩満大祐**, 柳本史教**, 石橋公也**

1. 緒言

板と防撓材を隅肉溶接で接合する際の熱収縮により、防撓パネルにはやせ馬形状の初期たわみが生じる。初期たわみは防撓パネル構造の座屈・最終強度に有意な影響を与える不確定要因である。この溶接初期たわみの特徴を調べるため、実船における計測が古くから行われてきた¹⁻⁴⁾。これらの計測では接触式の変位計が使用されたが、形状の計測には時間を要するため、十分な数のデータが蓄積されているとは言えない。また、板の座屈に影響を及ぼす初期たわみは防撓材を挟んで反対称な成分である。この反対称な初期たわみを分析するためには、隣接する2枚の矩形板の初期たわみが必要となるが、利用可能なデータは非常に限られている⁴⁾。

最近では3Dレーザースキャナを用いて構造物の形状計測が行われており⁵⁾、著者らの一人は3Dレーザースキャナを用いてボックスガダ試験体の初期たわみの計測を行い、その有効性を示した⁶⁾。本研究では、実船の初期たわみ計測に対して3Dレーザースキャナを適用し、その適用可能性を調べる。得られた初期たわみの計測データを分析し、隣接する2枚の矩形板の初期たわみ成分の相関を調べる。また、単一矩形板の初期たわみ形状を予測するために開発された統計モデル⁷⁻⁹⁾を、隣接パネル間の相関を考慮できるように拡張する。

2. 初期たわみの計測

2.1 計測対象

初期たわみの計測は今治造船株式会社丸亀事業本部にて2023年4月と11月に行った。対象船は64,000DWTバルクキャリアと5,800TEUコンテナ船である。64,000DWTバルクキャリアに関しては船側および船底を、5,800TEUコンテナ船に関しては船側および縦隔壁を計測した。

2.2 計測装置

計測にはFARO社製の3Dレーザースキャナ（Focus3D X130）を使用した。これは据え置き型の3Dレーザースキャナであり、周辺の対象を3次元の点群データとして計測する。仕様書上の測定誤差は±2mmである。

2.3 点群の可視化

3Dレーザースキャナで計測された点群データはFARO SCENEを用いて可視化した。可視化した64,000DWTバルクキャリアの船側の点群をFig. 1に示す。この点群から対象の矩形板を取り出して点群のばらつきを確認し、初期たわみの解析の可否を判断した。



Fig. 1 Example of point cloud data of the ship side.

*1 本論文は、著者らが執筆した日本船舶海洋工学会講演会論文集 第38号 659-663頁の転載（一部改変）であり、公益社団法人日本船舶海洋工学会から許可を頂いたものであり、著作権は公益社団法人日本船舶海洋工学会にあります。

* 国立大学法人大阪大学大学院工学研究科

** 開発本部 技術研究所

バルクキャリアの船底については、台座上の船体ブロックに対し、レーザースキャナを地面に設置した状態で計測した。しかし、レーザースキャナと計測対象の距離が近いため、スキャナから離れた位置ではレーザーの入射角が大きくなり、板の初期たわみ形状を正確に測定できなかった。また、コンテナ船の船側については、ドックサイドから計測したが、計測対象までの距離が遠く、点群のばらつきが大きかった。

本研究では、点群を精度よく計測できた、バルクキャリアのビルジ上部のサイドロンジで区切られる船側とコンテナ船の縦隔壁を初期たわみの分析に用いる。バルクキャリアの船側では、隣接する2枚の矩形板を21組、計42枚の矩形板を解析した。コンテナ船の縦隔壁については隣接する3枚の矩形板を4組と、隣接する2枚の矩形板を4組、計20枚の矩形板を解析した。合わせて62枚の矩形板の初期たわみの解析結果を報告する。

3. 初期たわみの解析

3.1 解析手法

3Dレーザースキャナで計測された点群データについて、文献⑥を参考に分析を行った。例としてブロック状態の64,000DWTバルクキャリアの点群データを使用して、分析の流れを説明する。まず計測された点群データについてFARO SCENEを用いて解析対象となる矩形板を取り出す。この時、座標軸は3Dレーザースキャナを置いていた方向に依存するため、直交座標系の各軸が試験体の長手方向、幅方向、面外方向と一致するように座標変換を行う。この座標変換は主成分分析を用いて行った。点群が評価面の上にはばらついていることから、分散が最大となる第1主成分軸、2番目に大きくなる第2主成分軸、面外方向の第3主成分軸を決定し、座標変換を行う。座標変換を行った結果をFig. 2に示す。

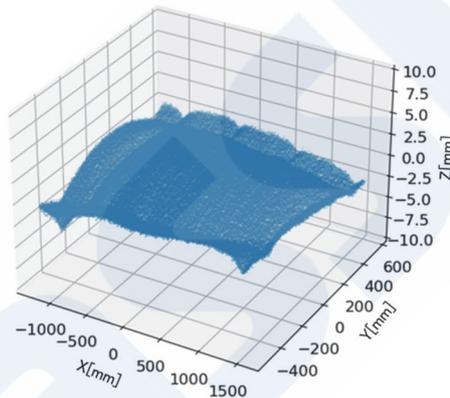


Fig. 2 Point cloud data after coordinate transformation.

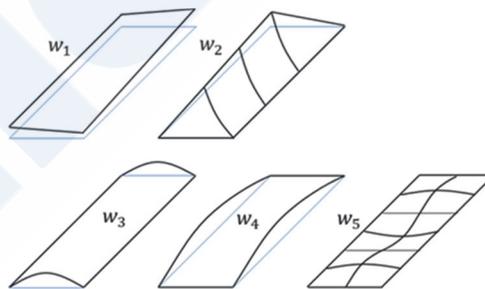


Fig. 3 Superposition of deflection modes.

点群データに対してFig. 3に示す $w_1 \sim w_5$ のたわみモードの重ね合わせ形状を当てはめることでその形状の分析を行う。 w_1 は平面の傾き、 w_2 はねじりを表すモードであり、 w_3 、 w_4 はそれぞれ長手方向と幅方向の全体たわみモードを表している。 w_5 がやせ馬たわみ形状を示す局所たわみモードであり、本研究の主な分析対象である。各モードは次式で表される。

$$w_1 = c_0 + c_1x + c_2y \quad (1)$$

$$w_2 = c_3xy \quad (2)$$

$$w_3 = \sum_{j=1}^{m_s} \left(\frac{x}{a} B_j + \frac{a-x}{a} C_j \right) \sin \frac{j\pi y}{b} \quad (3)$$

$$w_4 = \sum_{i=1}^{n_s} \left(\frac{y}{b} D_i + \frac{b-y}{b} E_i \right) \sin \frac{i\pi x}{a} \quad (4)$$

$$w_5 = \sum_{i=1}^{m_p} \sum_{j=1}^{n_p} A_{ij} \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{j\pi y}{b} \quad (5)$$

ここで a は矩形板の長さ、 b は幅である。 m_s 、 n_s 、 m_p 、 n_p は各たわみモードで考慮する項数である。本研究では $m_s = 1$ 、 $n_s = 1$ 、 $m_p = 11$ 、 $n_p = 3$ とした。 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 B_j 、 C_j 、 D_i 、 E_i 、 A_{ij} は各成分の係数である。 A_{ij} は長辺方向 i 半波、短辺方向 j 半波の振幅を意味する。

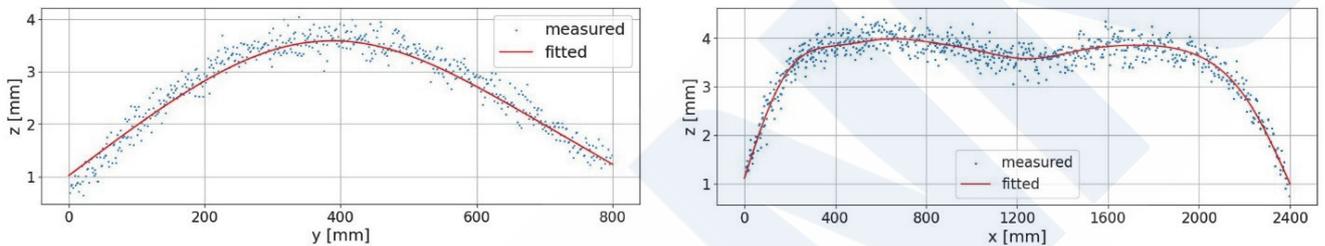


Fig. 4 Measured point cloud and fitted curves.

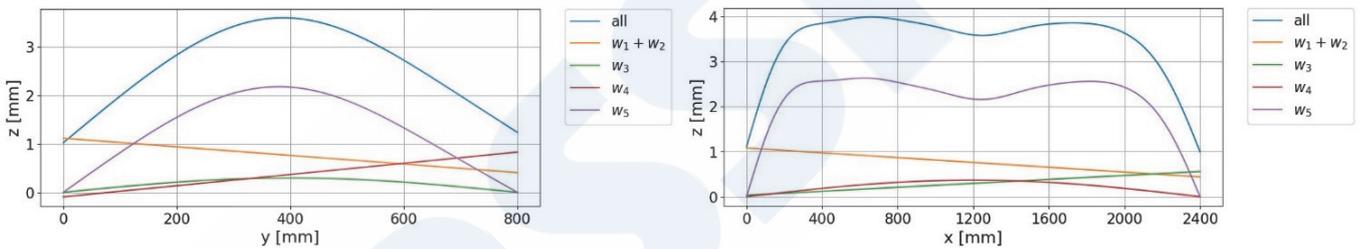


Fig. 5 Mode decomposition of initial deflection.

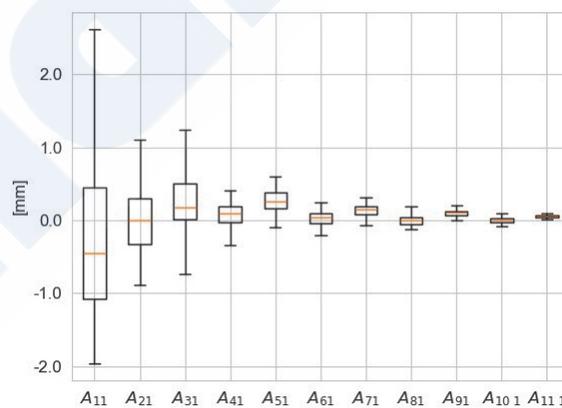


Fig. 6 Initial deflection components.

Fig. 4に計測された点群と点群に当てはめた初期たわみの曲線を示す。点群への当てはめは最小二乗法により行った。 x 方向は矩形板の長辺方向であり、 y 方向は短辺方向を表している。防撓材の立つ方向を z 方向とする。いずれも矩形板の中心線上のたわみであり、当てはめた曲線はおおむね点群の中央を通っていることが分かる。平面と捩れ変形を表す $w_1 + w_2$ 、全体たわみモードを表す w_3 、 w_4 、局所たわみを表す w_5 に分離した結果をFig. 5に示す。対象の矩形板の場合、局所たわみモードである w_5 が支配的であることが分かる。以上の解析を62枚の矩形板に対して行った。

3.2 単一矩形板の解析結果

局所たわみ成分 w_5 の係数のうち、 A_{i1} 成分について $i = 1 \sim 11$ まで各成分の傾向を分析した。Fig. 6に A_{i1} の箱ひげ図を示す。局所たわみ成分のうち A_{11} 、 A_{31} 、 A_{51} といった奇数半波成分の平均値とばらつきが大きく、偶数半波成分よりも支配的であることが分かる。ただし、過去の計測結果²⁾と比較して、 A_{11} が負となる矩形板が多かった。ひずみ取りがなされた矩形板が多かった可能性があるが、さらなる調査が必要である。

次に矩形板の最大たわみ量と $\beta^2 t$ の関係をFig. 7に示す。 β は板の細長比パラメータであり、 $b/t\sqrt{\sigma_y/E}$ で表される。 b は板の幅、 t は板厚、 σ_y は降伏応力、 E はヤング率である。本研究の計測結果だけでなく、過去の計測結果^{2) 4)}も合わせて示す。丸印で示す64,000DWTバルクキャリアと5,800TEUコンテナ船が本研究の結果である。図中の直線はSmith et al.¹⁰⁾が実船の初期たわみ計測結果をもとに導いた最大初期たわみ量の基準であり、 $0.025\beta^2 t$ がSlight、 $0.1\beta^2 t$ がAverage、 $0.3\beta^2 t$ がSevereである。本計測の初期たわみの最大値はSlightの周辺におおむねばらついており、過去の計測結果と同じ傾向である。

3.3 隣接する矩形板の解析結果

隣接する2枚の矩形板における初期たわみの相関について分析を行った。本計測のデータに加え、過去の計測データのうち計測された矩形板の位置関係が記録されている46,000DWTバルクキャリアのデータ⁴⁾を分析した。隣接する2枚の矩形板を矩形板P、矩形板Qとする。Fig. 8に矩形板Pと矩形板Qの A_{11} の関係を示す。横軸が矩形板Pのたわみ A_{11}^P 、縦軸が矩形板Qのたわみ A_{11}^Q である。データはおおむね対角線上に集まっており、 A_{11} には正の相関があることが分かる。相関係数は0.62であった。

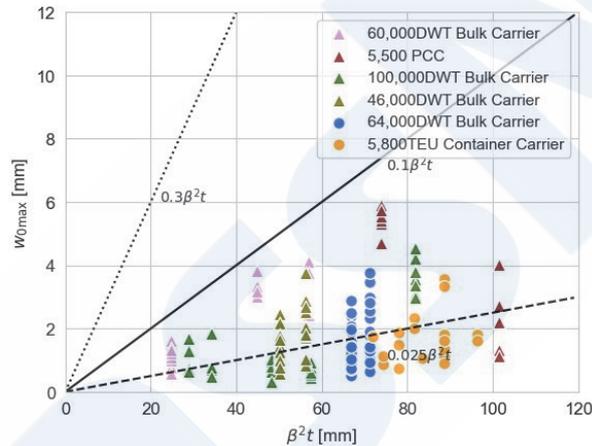


Fig. 7 Maximum values of initial deflection.

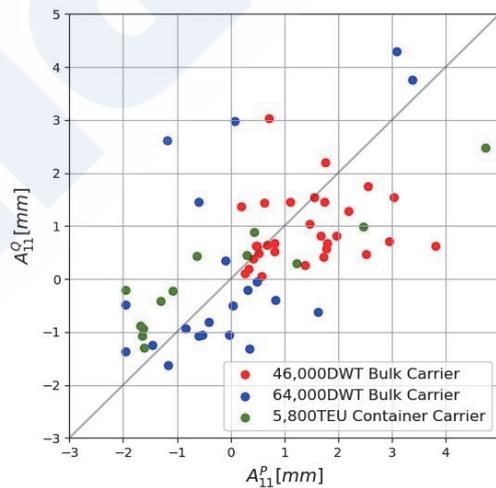


Fig. 8 Comparison of A_{11} between adjacent plates.

隣接する2枚の矩形板の A_{11} の差分 ΔA_{11} のヒストグラムをFig. 9に示す。図中の実線は正規分布に従っていると仮定してfittingを行った結果である。この時、分布の平均は0とした。推定された標準偏差の値は1.24である。なお、KS検定を行った結果、 p 値は有意水準0.05以上となり、 A_{11} の分布として正規分布は棄却されなかった。

次に、隣接する2枚の矩形板の最大たわみの大きさをそれぞれ w_{\max}^P , w_{\max}^Q として、初期たわみの最大値の比 $\alpha = w_{\max}^Q/w_{\max}^P$ ($w_{\max}^P > w_{\max}^Q$)を計算した。初期たわみ比 α のヒストグラムをFig. 10に示す。 α の分布はおおむね一様分布のような形状となった。本計測および過去の46,000DWTバルクキャリアの計測⁴⁾から得られた α の平均値はいずれも約0.64となった。

連続防撓パネルの最終強度には防撓材を挟んで反対称な成分が影響する。その最終強度解析では初期たわみ形状を仮定することが一般的である。例えば、片方の矩形板の初期たわみの最大値についてはFig. 7の結果から推定し、隣接するもう一方の矩形板では初期たわみの最大値を0.64倍することで、隣接する2枚の矩形板の初期たわみの相関を考慮した最終強度解析が実施できる。

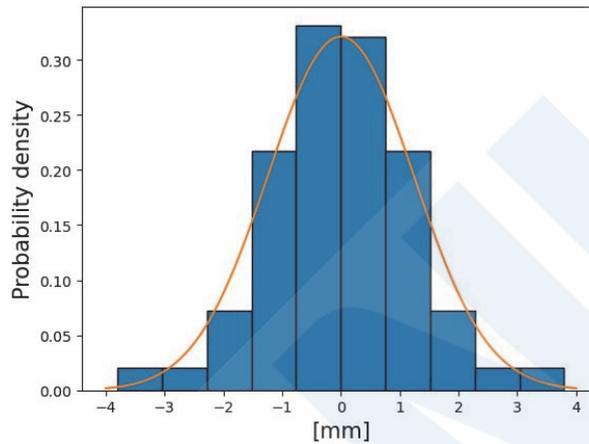


Fig. 9 Histogram of ΔA_{11} and a fitted normal distribution.

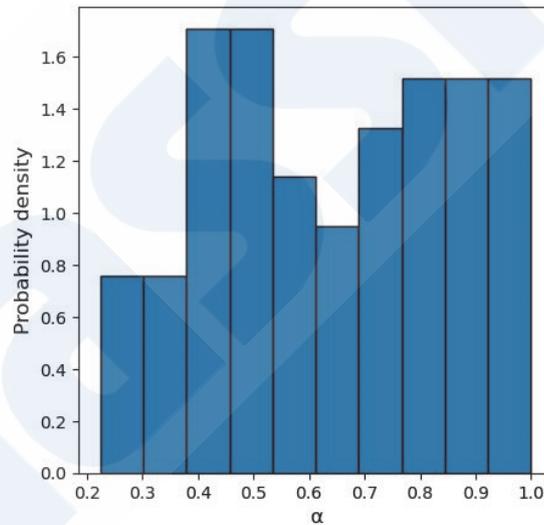


Fig. 10 Histogram of the initial deflection ratio α .

4. 隣接パネルの相関を考慮した初期たわみ形状の統計モデル

4.1 単一矩形板の統計モデル

著者らの一人は単一矩形板の初期たわみ形状を予測する統計モデル⁷⁻⁹⁾を提案している。本モデルでは、初期たわみの振幅 \mathbf{A} の確率密度関数を

$$p(\mathbf{A}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{11}|\Sigma|}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{A} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{A} - \boldsymbol{\mu})\right\} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{c}_0 + \mathbf{c}_1 \left(\frac{b}{t^2}\right) + \mathbf{c}_2 \left(\frac{b}{t^2}\right)^2 \quad (7)$$

と表している。 \mathbf{A} は初期たわみの振幅 $A_{i1}(i=1\sim 11)$ をまとめたベクトルである。すなわち、初期たわみの振幅が多変量正規分布に従うと仮定し、その平均 $\boldsymbol{\mu}$ が説明変数 b/t^2 の2次式で表されるとした統計モデルである。 $\boldsymbol{\Sigma}$ は 11×11 の分散共分散行列、 b は板幅、 t は板厚、 $\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2$ は回帰係数を並べた成分数が11のベクトルである。説明変数 b/t^2 に関してはビード溶接された板の角変形に関する研究¹⁰⁾を参考に導出したパラメータである。この統計モデルはベイズ統計を採用しており、パラメータ $\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \boldsymbol{\Sigma}$ の事後分布を推定している。本研究では、 $\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \boldsymbol{\Sigma}$ の事後分布の期待値 (EAP推定値) を代表値として(6), (7)式を用いることで、単一矩形板の初期たわみの各成分を確率密度関数とする。

4.2 隣接パネルの相関の考慮

隣接する2枚の矩形板PとQの初期たわみの成分を $\mathbf{A}^P = (A_{11}^P, A_{21}^P, \dots, A_{11}^P)$, $\mathbf{A}^Q = (A_{11}^Q, A_{21}^Q, \dots, A_{11}^Q)$ と表す。 $\mathbf{A}^P, \mathbf{A}^Q$ の同時確率密度分布として

$$p(\mathbf{A}^P, \mathbf{A}^Q) = p(\mathbf{A}_o^Q | \mathbf{A}_{11}^Q) p(\mathbf{A}_{11}^Q | \mathbf{A}_{11}^P) p(\mathbf{A}^P) \quad (8)$$

を提案する。 $p(\mathbf{A}^P)$ は矩形板Pの初期たわみ成分の確率密度関数であり、(6)式を用いる。 $p(\mathbf{A}_{11}^Q | \mathbf{A}_{11}^P)$ は矩形板Pの長手方向1半波成分 A_{11}^P が与えられた状態での矩形板Qの1半波成分の確率密度関数を表す。Fig. 9の結果より、1半波成分の差分 $A_{11}^P - A_{11}^Q$ が平均ゼロ、標準偏差 σ_d の正規分布に従うと仮定すると、

$$p(A_{11}^Q | A_{11}^P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left\{-\frac{(A_{11}^Q - A_{11}^P)^2}{2\sigma_d^2}\right\} \quad (9)$$

と表すことができる。最後に、 $p(\mathbf{A}_o^Q | \mathbf{A}_{11}^Q)$ は A_{11}^Q が与えられた状態での、その他の成分 $\mathbf{A}_o^Q = (A_{21}^Q \sim A_{11}^Q)$ の確率分布である。 \mathbf{A}^Q は(6)式が多変量正規分布に従うと仮定するので、その条件付き分布も多変量正規分布となる。すなわち、

$$p(\mathbf{A}_o^Q | \mathbf{A}_{11}^Q) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{10} |\boldsymbol{\Sigma}_{o|1}|}} \exp\left\{-\frac{(\mathbf{A}_o^Q - \boldsymbol{\mu}_{o|1})^T \boldsymbol{\Sigma}_{o|1}^{-1} (\mathbf{A}_o^Q - \boldsymbol{\mu}_{o|1})}{2}\right\} \quad (10)$$

と導かれる。ここに、 $\boldsymbol{\mu}_{o|1}, \boldsymbol{\Sigma}_{o|1}$ は

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu}_{o|1} &= \boldsymbol{\mu}_o + \frac{A_{11}^Q - \mu_1}{\sigma_1^2} \boldsymbol{\sigma}_{o1} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{o|1} &= \boldsymbol{\Sigma}_{oo} - \frac{\boldsymbol{\sigma}_{o1} \boldsymbol{\sigma}_{o1}^T}{\sigma_1^2} \end{aligned} \quad (11)$$

と計算できる。 $\boldsymbol{\mu}_o$ は $\boldsymbol{\mu}$ の2～11成分を並べたベクトル、 σ_1^2 は $\boldsymbol{\Sigma}$ の1行1列成分、 $\boldsymbol{\Sigma}_{oo}$ は $\boldsymbol{\Sigma}$ の2～11行2～11列を取り出した 10×10 の行列、 $\boldsymbol{\sigma}_{o1}$ は $\boldsymbol{\Sigma}$ の1列目の2～11行を取り出したベクトルである。すなわち、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} &= \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \boldsymbol{\mu}_o \end{pmatrix} \\ \boldsymbol{\Sigma} &= \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \boldsymbol{\sigma}_{1o} \\ \boldsymbol{\sigma}_{o1} & \boldsymbol{\Sigma}_{oo} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

である。

提案する統計モデルからサンプリングした隣接する2枚の板の初期たわみ形状をFig. 11に示す。3回サンプリングを行っており、実線が矩形板P、点線が矩形板Qを表す。提案モデルと有限要素法を組み合わせることで、やせ馬初期たわみを持つ連続パネルの最終強度モンテカルロ解析が可能である。

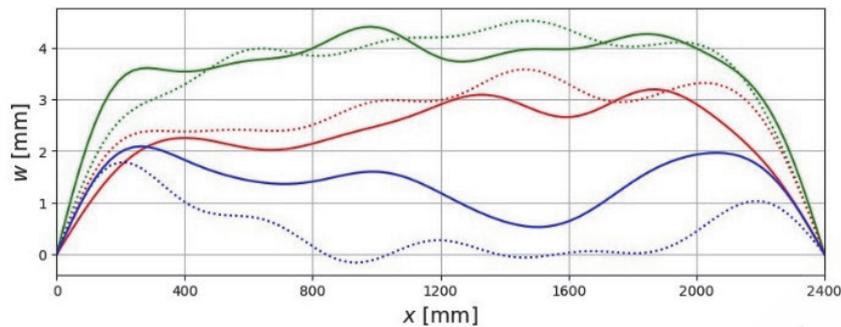


Fig. 11 Sampled initial deflections of adjacent plates.

5. 結言

本研究では3Dレーザー扫描仪を用いて実船の初期たわみの形状計測を行い、その適用可能性を調べた。得られた計測データを用いて矩形板の初期たわみ成分の分析を行い、連続防撓パネルの座屈・最終強度に影響する隣接パネル間の初期たわみ成分の相関を調べた。得られた知見をもとに、既存の初期たわみの統計モデルの拡張を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 3Dレーザー扫描仪と計測対象の位置関係が適切であれば、複数の矩形板の初期たわみを一度に計測することが可能である。
- (2) 隣接する2枚の矩形板の長辺方向1半波成分の間に正の相関がある。また、初期たわみの最大値の比 α の平均値は約0.64である。
- (3) 提案した統計モデルを用いることで、隣接パネル間の相関を考慮して初期たわみ形状をサンプリングすることができる。

3Dレーザー扫描仪を用いて得られた初期たわみの特徴は既存の計測データの傾向とおおむね一致するが、長辺方向1半波成分が負となる場合が多かった。この点について、ひずみ取りが行われた可能性を含め、さらなる調査が必要である。

謝辞

初期たわみの計測にあたっては、今治造船株式会社と日本シップヤード株式会社にご協力いただいた。ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Ueda Y, Yao T.: The influence of complex initial deflection modes on the behaviour and ultimate strength of rectangular plates in compression. *J. of Constructional Steel Research*, Vol. 5, Issue 4, pp. 265-302, 1985.
- 2) Yao T, Fujikubo M.: *Buckling and ultimate strength of ship and ship-like floating structures*. Elsevier; 2016.
- 3) Kmiecik M, Jastrzebski T, Kuzniar J.: Statistics of ship plating distortions. *Marine Structures* Vol. 8, Issue 2, pp. 119-132, 1995.
- 4) 平川真一, 林田一樹: 防撓パネル構造の初期不整の調査と圧壊挙動のシミュレーション, 広島大学工学部卒業論文, 1998.
- 5) 佐野敦司, 藤久保昌彦: 部分積み時の非真球タンクの座屈強度に関する研究—第1報: 模型試験および強度推定式の開発—, *日本船舶海洋工学会論文集*, 第32号, pp. 117-128, 2020.
- 6) 辰巳晃, 小森山祐輔, 田中義照, 藤久保昌彦: レーザー扫描仪によるボックスガーダ試験体の初期たわみ計測とその成分分析, *日本船舶海洋工学会講演会論文集*, Vol. 32, pp. 337-342, 2021.
- 7) 景山裕司, 辰巳晃: 平板構造の溶接初期たわみのベイズ統計モデル化とその最終強度評価, *日本船舶海洋工学会講演会論文集*, Vol. 32, pp.303-308, 2021.

- 8) 景山裕司, 辰巳晃: 平板構造の溶接初期たわみのベイズ統計モデル化とその最終強度評価—第2報: 初期たわみ成分間の相関の考慮—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 35, pp.503-505, 2022.
- 9) Tatsumi A., Kageyama Y.: Ultimate strength assessment of rectangular plates subjected to in-plane compression using a statistical model of welding initial deflection, Marine Structures, Vol. 93, No. 103523, 2024.
- 10) Smith CS, Davidson PC, Chapman JC, Dowling PJ.: Strength and stiffness of ships plating under in-plane compression and tension. Royal Institution of Naval Architects Transactions, Vol. 130, pp. 277-296 1988.
- 11) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 構造用材料の溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌, Vol. 45, pp 302-308, 1976.