製造現場におけるトータルステーションの 計測精度と構造物の精度管理に関する研究

正会員 阿 部 亮 吾^{*} 正会員 濱 田 邦 裕^{**}
正会員 平 田 法 隆^{**} 田 村 遼太郎^{***}
西 信 昭^{****}

A Study on the Measurement Accuracy of Total Station and The Accuracy Control of the Structure in the Construction Site

by Ryogo Abe, *Member* Kunihiro Hamada, *Member*
Noritaka Hirata, *Member* Ryotaro Tamura
Nobuaki Nishi

Summary

Generally, understanding shape deformation and the precise amount of three dimensional deformation at manufacturing processes is important in accuracy control. Since ships are very large products, three dimensional deformation measurements are very difficult to conduct during ship manufacturing process, and for that reason only few cases have been reported. In this study, a hatch cover is selected as a target structure and the three dimensional welding deformations observed in each manufacturing process.

This study examined the measurement accuracy of the total station in the actual shipyard and impact factor to the measurement accuracy are examined. Moreover, we conducted tracking investigations on the deformation of the hatch cover due to the progress of the process, and the accuracy improvement methods are examined.

1. はじめに

溶接構造物である船舶において、溶接工程の品質管理は極めて重要である。溶接工程では入熱による収縮によって部材が三次元的に変形する。この変形が大きい場合には、歪取作業や修正作業が必要となる¹⁾。

また、大型部材同士の接合時には、部材同士の接合部の高精度な三次元形状が求められる²⁾³⁾。このために、溶接工程における三次元的な溶接変形を把握し精度管理に活用することは、製品の品質保証とともに、後続作業の効率化やコスト低減に有効である。従来、溶接変形の把握は、熟練作業者の技能に依存しており、溶接変形の定性的な傾向の把握と、各溶接工程における変形量の定量的な評価は極めて困難であった。

近年は、高精度な三次元計測機の普及とともに、三次元計

測機を利用した新たな精度管理手法が提案されている。武市らは、トータルステーションによる計測結果を3Dモデル上に読みこみ、溶接変形や接合部の目違い等を評価する手法を提案している⁴⁾。稗方らはレーザースキャナーを利用した曲り外板の精度管理手法を提案している⁵⁾。また、造船所において三次元計測を実際に行った事例や⁶⁾、三次元計測を取り込みCADモデルとの相違を検討するためのソフトなども市販されている⁷⁾⁸⁾。しかし、造船における三次元計測に基づく精度管理の実質化という観点からは、以下に示す課題が残されている。

・三次元計測の精度の問題

これまでの研究では、三次元計測結果は十分な精度を有していることを前提に議論が展開されているものが殆どである。SR246部会において計測精度に関する簡易的な検討は行われているものの⁹⁾、実際の造船工場における計測精度や、計測精度に影響を与える因子について言及しているものは少ない。

・各工程の変形量の計測の問題

既存研究⁶⁾⁹⁾¹⁰⁾で、建造ブロックや中組ブロックの形状を計測し、CADモデルと比較することは行われている。しかし、あるブロックの建造プロセス全てに着目し、工程の進展に伴う変形量を追跡的に調査した事例は少ない。これは、精度管理上の要点となる建造工程を特定する意味でも重要で

* 国際航業株式会社

** 広島大学大学院工学研究院

*** 近畿車輛株式会社

(研究当時、広島大学大学院工学研究科)

**** 常石造船株式会社

原稿受付日 平成28年6月16日

ある。

以上の議論に基づき、本研究では造船工場におけるトータルステーションの実際の計測精度を調査するとともに、計測精度への影響因子と精度への定量的な影響を考察する。さらに、ハッチカバーの建造プロセスに着目し、工程の進展に伴うハッチカバーの変形を追跡的に調査する。

2. ハッチカバーの建造プロセス

2.1 ハッチカバーについて

本研究では、サイドローリング型ハッチカバーを計測対象とする。ハッチカバーの概略の大きさは、縦 18m、横 8m、高さ 0.8m である(Fig. 1)。構造材は前後方向に 2 本のガーダー、左右方向に 4 本のフロアーが存在し、前後方向に多くのロンジ材が補強部材として配置されている。

今回対象のハッチカバーは船体に搭載された状態で左舷側に配置されるものである。船体に搭載された状態を基準とし、以下のように識別する。

Fore : 船首側の面

Aft : 船尾側の面

Center : 対となるハッチカバーと向かい合う面

Side : 船体側面に近い面 (左舷側)

Upper : 船体上面 (天板部)

Deck : 船体下面 (開口部)

2.2 ハッチカバーの建造工程

ハッチカバーの建造工程を以下に示す(Fig. 2)。今回計測対象としたハッチカバーの建造の特徴は、溶接段階ごとに作業場所が変わり、それとともにハッチカバーの状況も変化することである。

(1) NC マーキング・切断

NCにより母材に部材切り出しのための罫書きを行った後、罫書きに沿って部材の切り出しを行う。

(2) 仮組

切り出した部材を組み合わせて仮組みを行う。角などの端部が部分的に溶接される。この時点では、以後の手順を考慮し上下を逆にした状態で仮組される。

(3) 自動溶接

自動溶接機を使用し、ガーダー及びロンジ材の溶接線の長い部分を溶接する。溶接はロンジ材から Aft 側または Side 側の端から順番に実施される。

(4) 手動溶接 1

自動溶接機で施工できない溶接線の短い部分や狭い部分の溶接を手動で溶接する。なお、安全上の理由から下向きの溶接が行える箇所に限定される。

Fig. 1 The shipyard and Hatch Cover

Fig. 2 Construction Process of Hatch Cover

(5) 反転

上下逆の状態から通常の姿勢へとクレーンを用いてハッチカバーを反転させる。

(6) 手動溶接 2

「手動溶接 1」で実施できなかった部分の溶接を行う。なお、実施箇所は反転したことで下向きの溶接が行える場所のみとなる。

(7) 歪取

下げ振りや巻尺で採寸後、所定の箇所を加熱及び水冷することにより残留応力の除去等を行うことで歪取を行う。

(8) 検査

車輪等の小物類の取り付け及び塗装の後、規定の寸法で完成しているかを検査する。

2.3 現状の品質管理の課題

現状の溶接工程における品質管理は、下げ振りや巻尺などを用いて二次元的な寸法と面外変形の計測により実施されている。現状の寸法の取り方は作業者の技能に依存した方法で行われているため、精度管理上の課題として以下の点が挙げられる。

- ・ 採寸上の基準が統一されておらず、取得したデータの精度や値の再現性が低い。
- ・ 寸法を計測した部分のみしか情報が得られないため、部分的な情報は得られても対象全体のねじれといった三次元的な形状を把握するに至っていない。
- ・ 寸法を測るタイミングが歪取工程の前後のみとなっており、各プロセスにおける変形量やその時点での形状について把握されていない。

3. 三次元計測方法と誤差要因

3.1 代表的な三次元計測機

大規模工業製品の代表的な計測機には、主にステレオ画像計測機、トータルステーション（以下 TS）、レーザースキャナー（以下 LS）の 3 つがあり⁹⁾¹¹⁾、それぞれ次のような計測特性を有している。

(1) ステレオ画像計測機

相対的な位置がわかっている 2 台以上のカメラで対象を撮影し、三角測量の原理で同じ場所を違った画像から特定することで三次元的な位置を求める手法である¹²⁾。画像的な特徴点に対して三次元的な変形を高精度に抽出できる。しかし、平面や曲面のように特徴点のない物体を計測することが難しい。また、撮影時の光条件によって精度が大きく左右され、例えば太陽光や水蒸気、溶接の光などが影響する。

(2) TS

望遠鏡から特徴点に対して、距離と角度を同時に観測して三次元的な位置を求める手法である¹³⁾。計測箇所には計測用のターゲットを用いることで、各計測作業で同一点を高精

度に計測することができる。一方で、計測点数が多い場合は計測時間がかかる。

(3) LS

垂直方向と水平方向に回転するセンサーより一定間隔で光を照射して、物体から光が戻ってくるまでの時間または位相差によって三次元的な位置を求める手法である¹⁴⁾。面的な広がりを持った歪みを計測できる。一方で、部材の端部や各計測作業で共通の同一点を計測することが難しい。また、計測対象以外のデータが多く取得されるため、ノイズ除去など後処理作業が発生する。

3.2 造船における三次元計測の既存研究と本研究の目標

造船業においては、先ず TS によるブロックの三次元計測が検討され³⁾、実際の造船工場における TS による三次元計測も報告されている¹⁵⁾。近年は、ステレオ画像計測機に基づく変形量の計測¹⁶⁾や、LS を用いた曲り外板の精度評価⁵⁾などの研究報告がなされている。しかし、ステレオ画像計測機や LS については曲げ工程など一部の工程を中心に検討されており、造船の全工程の精度評価に用いるには、未だ研究途上にあるといえる。

そこで本研究では、三次元計測機の中で最も造船への適用が進展している TS に着目し、造船工場における実際の計測精度を定量的に評価する。さらに実際の建造工程において、作業を止めずに、工程の進展に伴うハッチカバーの変形を追跡的に調査することが可能か否かを検討する。

3.3 計測誤差の分類

一般的に、計測時の誤差は、機器や器具に起因する機械的誤差、光・風などの外部環境に起因する自然的誤差、計測者に起因する人為的誤差に大別される¹⁷⁾。本研究では計測機器に起因する機械的誤差のみではなく、自然的誤差、人為的誤差も含め、造船工場における計測精度を議論するために、以下の誤差を定義し定量化を試みる。

(1) 計測機の設置に起因する誤差

造船工場で計測を実施する場合、溶接機材などによる場所の制限から計測機の設置地面が不安定で水平が維持できない場合がある。また、造船工場における計測の場合には、必ずしも測量士の資格を有する計測者がブロックを計測する訳ではないため、計測機が水平に設置されない場合もある。これらに起因する誤差を計測機に起因する誤差と定義する。

(2) 視準に起因する誤差

TS が適切に設置され、同一の計測ターゲットを計測する場合においても、計測誤差が発生する。この計測誤差には計測機に起因する機械的誤差に加え、造船工場の光の様子などに起因する自然的誤差、計測者の技量に起因する人為的誤差が含まれる。これらを総合して視準に起因する誤差と定義する。

(3) 計測ターゲットの設置に起因する誤差

TS を用いて精度よく計測を行うためには、計測ターゲットを設置する必要がある。この計測ターゲットの設置は人手

により行われるため、CAD モデル上の予定箇所とは異なる箇所に設置される場合もある。この誤差を計測ターゲットの設置に起因する誤差と定義する。

4. 計測方法と分析方法

4.1 本研究の計測機

計測にはソキアトプコン社製 NET1200 (一級 TS) を使用した。計測点には計測ターゲットとして反射シートを貼付した。今回使用した TS 及び反射シートの機械的誤差は、測角精度が 1", 測距精度が距離を $D(\text{mm})$ とすると $\pm(0.6+2\text{ppm} \times D)\text{mm}$ であるので、水平角の測角精度を φ , 垂直角の測角精度を θ , 測距精度を δ とすると,

$$\varphi = \theta = 2\pi / (60 \times 60 \times 360) (\text{rad})$$

$$\delta = 0.6 + 10^{-6} D (\text{mm})$$

となり、全体の誤差 ε は式(1)で表される。

$$\varepsilon (\text{mm}) = \sqrt{(D \sin \varphi)^2 + (D \sin \theta)^2 + \delta^2} \quad (1)$$

4.2 計測作業

工程の進展に伴う変形を議論するために、計測作業は各溶接工程の前後と移動の前後で実施した(Fig. 3)。すなわち、[A]自動溶接前、[B]自動溶接後、[C]手動溶接 1 前、[D]手動溶接 1 後、[E]手動溶接 2 前、[F]手動溶接 2 後、[G]歪取溶接後である。ハッチカバーの配置場所や計測可能時間は、溶接作業の進捗によって変化した。また、工場内は他のハッチカバーや作業工具があるため、TS の設置位置は制限された。そのため、作業への工程確認や基準点の配置などを各計測作業の前に実施した。計測作業が実施できるのは、主に昼休みなどの休憩時間とその日の溶接作業終了後のため、1 工程における計測作業が可能な時間は 1.5 時間以下となり、効率的な計測作業が求められた。[C]手動溶接 1 前及び[E]手動

溶接 2 前については計測時間の制約上、一部の計測しかできなかった。

なお、ハッチカバーの個体差や各種のバラツキの検討のために、本研究では同一形式のハッチカバーを 2 回 (2014 年 1 月, 2015 年 1 月) 計測した。2014 年と 2015 年において建造工程と計測作業に変更はない。

4.3 計測点と計測ターゲット

ハッチカバーの各面の名称と、計測点を Fig. 4 に示す。ハッチカバーの外枠の端点 (四隅点)、補強材との接点、その中間を計測点として、反射シートを貼り付けた。なお、各面の端部に反射シートを設置すると、溶接時の熱によりはがれてしまい継続して計測できないため、各面の端部から約 50mm 内側に反射シートを設置した。計測結果の合成や重ね合わせのための基準点を Deck 側の四隅に設定した。本研究では同型の異なるハッチカバーを 2 度計測しているが、計測点及び計測方法はいずれも同じである。計測点は、Center 面と Side 面は上部(Upper Side)と下部(Deck Side)にそれぞれ 11 箇所それぞれ計 22 箇所、Fore 面と Aft 面は上部と下部にそれぞれ 7 箇所それぞれ計 14 箇所、合計 72 箇所とした。

本研究では計測ターゲットとして、10mm の反射シート、L 字ターゲット及び水準器を取付けた長さ約 160mm のオフセットターゲットの 3 種類を利用した。各計測点には Fig. 5 (1)に示す反射シートを設置した。入射角が浅く計測精度の低下が懸念される場所には、反射シートに対して直角になるように L 字ターゲットを設置して計測した(Fig. 5 (2))。また、部品による障害などで直接計測できない計測点は、計測ターゲットを水平 (計測面に対して垂直) にオフセットして計測した(Fig. 5 (3))。反射シートの設置は(2)仮組後に行い、一度設置した反射シートは完成まで取り外さない。L 字ターゲットとオフセットターゲットの設置は計測作業毎に実施した。

Fig. 3 Measurement Timing and Locations of the Hatch Cover

Fig. 4 The Measurement Points on Hatch Cover

Fig. 5 Target sheet, L-type target and Offset target

4.4 TS 設置点

計測可能な時間は、溶接工程の間や昼休みとなり 1 計測作業あたり 1~1.5 時間であった。効率的に計測を実施するため、1 つの TS 設置点から 2 つの面を同時に計測できるように、TS はハッチカバー四隅の対角の 2 箇所を設置した(Fig. 6 T1,T2). TS は機械ごとの誤差を防ぐため 1 台のみを使用し、T1 と T2 に順番に設置した。また、計測点の計測状況 (角度

と距離) を各計測作業でなるべく同じにすることで、計測精度に差異が生じないようにした。各計測作業における TS 設置点は Fig. 3 に示した通りである。

Fig. 6 TS Points and Reference Points

4.5 計測結果の比較

計測対象が各工程で移動するため、変形量を工程ごとに比較するためには、ハッチカバー内に基準座標を求める必要がある。今回はハッチカバーの四隅のうち各 TS 設置点側の 3 点を基準点とし、計測データをヘルマート変換¹⁸⁾して変形を比較した。

なお、本研究ではハッチカバーは 2 箇所から計測されているため、計測結果を 2 つにわけて座標変換を行う必要がある。具体的には、ブロック I は、基準点 A, B, C を利用して座標変換を行い、ブロック II は基準点 D, E, F, を用いて座標変換を実施した(Fig.6)。

5. 計測誤差の定量化

本計測の最大斜距離は 50m 以内であったため、機械的誤差は式(1)より約 0.8mm となる。自然的誤差として温度、気圧、光などがあるが、これらは工場内で実施したため安定していた。例えば、10m の計測距離の場合に、気温が 10℃変化すると 0.1mm、気圧が 10hpa 変化すると 0.03mm 変化する。また、鉄の熱膨張指数 11.7 のため、室温が 5℃変化すると長辺が約 1mm 変化するので、気温の変化に伴って、2mm 程度伸縮する可能性がある。したがって、計測誤差の支配的要因は人為的誤差であると考えられる。ここでは 3.3 に示した項目にしたがって、誤差への影響を考察する。なお、計測誤差は TS からの計測面によって異なるため、TS 点を基準に誤差の方向を面に対し奥行き方向(Depth)、水平方向(Horizontal)、垂直方向(Vertical)と定義する(Fig. 7)。ここでは、

複数回計測した際の標準偏差 σ と最大偏差を誤差と考える。

Fig. 7 Axis Direction of Measurement Accuracy

5.1 計測機の設置に起因する誤差の定量化

熟練作業者と測量未経験者が同じ TS 設置点に TS を設置して同一状態のハッチカバーを計測した場合の誤差を求めた。計測に用いた点は Center 及び Aft の計 33 点である。結果を Table 1 に示す。計測機の設置に起因する誤差は比較的小さく、最大誤差は 1.8mm、標準偏差 σ は 0.8mm であった。また、熟練作業者と測量未経験者の差は小さかった。

5.2 視準に起因する誤差の定量化

次に、同一のハッチカバーを TS の設置状態を変えずに、同一点を熟練作業者と測量未経験者が複数回計測した際の誤差を求めた。計測に用いた点は 5.1 と同様である。熟練作業者と比較して測量未経験者の誤差は大きくなるが、その場合でも最大誤差は 0.6mm、標準偏差 σ は 0.4mm であり、十分に小さかった (Table 2)。

Table 1 Measurement Accuracy of TS Re-establishment (mm)

Measurement Person	Horizontal		Depth		Vertical	
	σ	MAX	σ	MAX	σ	MAX
Inexperienced Person	0.4	1.2	0.7	1.8	0.5	1.8
Skilled Worker	0.5	1.4	0.5	1.4	0.8	1.6

Table 2 Measurement Accuracy of Collimation (mm)

Measurement Person	Horizontal		Depth		Vertical	
	σ	MAX	σ	MAX	σ	MAX
Inexperienced Person	0.4	0.6	0.2	0.3	0.2	0.5
Skilled Worker	0.1	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1

5.3 計測ターゲットの設置に起因する誤差の定量化

本研究では計測ターゲットとして、反射シート、L 字ターゲット及びオフセットターゲットの 3 種類の計測ターゲットを利用した。ここで、L 字ターゲット及びオフセットターゲットを用いる場合は、反射シートを先ず計測点に設置し、

その反射シート上に L 字ターゲットあるいはオフセットターゲットを設置した。ここでは、計測ターゲットの設置に起因する誤差として、以下の 2 種類の誤差を定量化し、複数回計測した際の標準偏差 σ と最大偏差を誤差と考える。なお、L 字ターゲット及びオフセットターゲットの設置に起因する場合は以下の 2 種類の誤差の両方の影響を受ける。

- (1) 反射シートの設置に起因する誤差
- (2) L 字ターゲット及びオフセットターゲットの設置に起因する誤差

5.3.1 反射シートの設置に起因する誤差

反射シートの設置には時間を要するため、工場内で計測することできず、後日、屋内実験にて検証した。検証作業は、熟練作業者と測量未経験者を対象に、端点から水平 150cm、高さ 50cm の位置に反射シートを 10 回設置した場合の標準偏差 σ と最大偏差を確認した。なお端点からの計測に用いた器具は巻尺であり、これは実際の工場における計測時と同様である。

測量未経験者の計測誤差は水平 35.2mm、垂直 9.0mm であり、極めて大きかった (Table 3)。熟練作業者の計測誤差は測量未経験者と比較して小さくなるが、それでも計測機の設置に起因する誤差や視準に起因する誤差と比較して大きい。

Table 3 Measurement Accuracy of Target Establishment (mm)

Measurement Person	Horizontal		Depth		Vertical	
	σ	MAX	σ	MAX	σ	MAX
Inexperienced Person	16.5	35.2	-	-	3.2	9.0
Skilled Worker	1.7	3.6	-	-	0.4	0.7

5.3.2 L 字ターゲット及びオフセットターゲットの設置に起因する誤差

L 字ターゲットとオフセットターゲットは決まった位置に設置するため、作業者の熟練度ではなく計測ターゲットの違いによる精度の違いが問題となる。この誤差も工場内で検証することができなかったため、屋内実験にて検証した。検証作業は、1 列に並んだロッカーの垂直面を計測面とし、直接計測、L 字ターゲット、オフセットターゲットにて計測した。計測点は TS から離れるように 1m ピッチで設置し、L 字ターゲットとオフセットターゲットを再設置しつつ 1 つの計測点を 10 回計測した (Fig. 8)。

以上の結果を Table 4 に示す。L 字ターゲットは水平が 1mm 以下、垂直が 0.3mm 以下であった。そのため、直視よりも精度は劣るものの、精度の低下は小さい。一方、オフセットターゲットは、水平 3.4mm と垂直 2.0mm と悪かったが、奥行きは 0.6mm と L 字ターゲットと同等であった。

5.4 造船工場における計測精度

本章におけるこれまでの議論より、造船工場における計測において支配的な誤差は、計測ターゲットの設置に起因する

誤差と考えることができる。特に反射シートの設置に起因する誤差が大きい。本研究では構造の端点から巻尺を利用して計測点を特定したが、この方法では良い精度は得られない。また、計測点の設置に関して熟練作業者が行った場合と非熟練者が行った場合の精度の差も著しい。したがって、反射シートの設置に起因する誤差を減少させることが計測精度を向上させる上で鍵となる。実際の運用では設計段階で計測点を予め決めておき、NC マーキングの際に計測点のマーキングを行うことなどが有効と考えられる。

一方、上記のようにして反射シートの設置に起因する誤差が対策された場合には、次に問題となるのが反射シート上にオフセットターゲットを設置する誤差である。これは、TS の設置位置や計測点の位置を工夫してオフセットターゲットを使用しないか、オフセットターゲット自体を改良する必要がある。

Target No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Angle(deg)	48.9	90.0	52.8	29.8	18.3	14.0	11.3	10.4	8.8
Distance (m)	2.8	1.9	2.3	3.7	5.9	7.7	9.4	10.3	12.1
Direct	○	○	○						
L-type Target				○	○	○	○	○	○
Offset Target					○	○	○	○	○

Fig. 8 Target Test Image

Table 4 Measurement Accuracy of Target Re-establishment (mm)

Target Type	Horizontal		Depth		Vertical	
	σ	MAX	σ	MAX	σ	MAX
L-type Target	0.5	1.0	0.3	0.6	0.2	0.3
Offset Target	1.7	3.4	0.3	0.6	0.8	2.0

6. 溶接変形の表現と考察

6.1 欠測率

計測は全 7 計測作業のうち計測時間が十分に取れなかった 2 計測作業 ([C] 手動溶接 1 前と [E] 手動溶接 2 前) を除く 5 計測作業 ([A] 自動溶接前, [B] 自動溶接後, [D] 手動溶接 1 後, [F] 手動溶接 2 後, [G] 歪取溶接後) では、欠測率が 3% 程度と良好な結果であった (Table 5)。これは、L 字ターゲットとオフセットターゲットを使用することで、入射

角が浅い計測点や遮蔽物がある計測点も計測できたためである。この傾向は 2014 年と 2015 年ともに同じである。

Table 5 Measurement method and measurement rate

Welding Process	Measurement Method (Points)			
	Direct	L-type	Offset	Failure
[A] Before Automatic	8	60	3	0
[B] After Automatic	8	60	3	0
[D] After Manual 1	6	58	6	1
[F] After Manual 2	7	56	7	1
[G] After Straitening	11	49	4	7
Sum	40	283	23	9
100%	11%	80%	6%	3%

6.2 溶接変形の表現方法

ハッチカバーの三次元的な変形を表現するために、以下の表現方法を採用した (Fig. 9)。鉛直方向の変形量を円の大きさにより表現する。Deck 方向への変形の場合は濃灰、Upper 方向への変形の場合は淡灰により表現する。例えば、図中の A 点は Deck 側に 19.2mm 変形している。水平方向の変形は、ベクトルで表現する。ベクトルの向きが変形方向であり、長さが変形量である。例えば、図中の A 点は内側に 4mm 変形している。

Fig. 9 Comparison of Measurement Result and CAD model

6.3 CAD モデルと計測結果の比較

自動溶接後のハッチカバーについて、TS の計測結果 (2014 年/2015 年) と、CAD モデル上での絶対位置を比較した結果を Fig. 10 に示す。

水平方向と垂直方向ともに、各計測点の変形方向と変形量が隣り合う計測点と類似していない場合が多い。これらの傾

向は、5 章における議論を考慮すると、計測ターゲット、特に反射シートの設置に起因する誤差の影響を考慮する必要がある。特に、今回の計測では一部の反射シートを非熟練者が設置しているため、その影響が出ている可能性がある。つまり、単に計測結果と CAD モデルを比較したのみでは 2014 年と 2015 年のハッチカバーの形状の相違や、実際の変形状態を十分な精度で議論することができない。

Fig. 10 Comparison of Measurement Result(2014/2015) and CAD model

6.4 計測精度の影響を考慮した溶接変形の考察

本研究では、各工程における変形量とそのバラツキを精度良く求めることを目的とする。そこで、計測結果と CAD モデルとを比較するのではなく、各工程の前後の計測結果の差分を検討することを基本とする。これにより、計測ターゲットの設置に起因する誤差を除外して追跡的に変形を分析することができる。なお、4.2 で述べたように、[C] 手動溶接 1 前と [E] 手動溶接 2 前は全計測点を計測することができなかった。そこで、各工程における変形は以下の方法で推定した。

- (3)自動溶接： [A]自動溶接前と[B]自動溶接後
- (4)手動溶接 1： [B]自動溶接後と[D]手動溶接 1 後
- (6)手動溶接 2： [D]手動溶接 1 後と[F]手動溶接 2 後
- (7)歪取： [F]手動溶接 2 後と[G]歪取溶接後

以上の比較結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 では Fig. 10 に見

られたバラつきがなくなり、各工程における変形の様子を明確に理解できる。さらに、2014 年と 2015 年の計測結果の傾向が類似している点も理解できる。Fig. 11 から、以下の知見が得られる。

- a) (3)自動溶接では Deck 側に大きく変形し、特にセンター側の変形が大きい。Upper 側で多くのロンジが溶接されること、およびこの段階ではセンター側の剛性が低いことから、計測結果は妥当と考えられる。なお、図中の A 点における Deck 方向への変形量は 27mm であった。
- b) (4)手動溶接 1 及び(6)手動溶接 2 では、Upper 側への変形が発生している。(4)手動溶接 1 及び(6)手動溶接 2 で実施される溶接箇所を考慮すると、この変形も妥当である。なお、A 点の変形量は(4)手動溶接 1 が 12mm、(6)手動溶接 2 が 5mm であった。
- c) (7)歪取では、Upper 方向への 9mm 変形させている。上記 a)、b)の変形量の差が 10mm であるため、この値とほぼ一致している。
- d) 2014 年と 2015 年を比較すると、変形の傾向はほぼ一致している。また、2015 年の A 点の変形量は、(3)自動溶接が 26mm、(4)手動溶接 1 が 12mm、(6)手動溶接 2 が 6mm であり、2014 年の計測結果とほぼ一致している。
- e) 以上の結果より、各工程における変形の傾向と変形量は、2014 年と 2015 年でおおよそ一致しており、(3)自動溶接の変形が最も大きい。また、計測結果より、(2)仮組時に約 10mm の逆ひずみを取ることで、(7)歪取時の工数の削減が期待できる。

以上に示したように計測ターゲットの設置に起因する誤差を除外することにより、各工程における変形量を精度よく求めることができ、ミリ単位の変形を具体的に議論することが可能となる。

7.結言

7.1 本研究の結論

本研究では造船工場における TS の実際の計測精度を調査するとともに、計測精度への影響因子を検討した。さらに、工程の進展に伴うハッチカバーの変形を追跡的に調査し、その精度向上方法を検討した。本研究の知見を以下に整理する。

計測精度に影響を与える因子を、計測機の設置、視準、計測ターゲットの設置に整理した。さらに、計測結果に基づき、造船工場では、計測ターゲットの設置、特に反射シートの設置の影響が大きいことを示した。

同一のハッチカバーを追跡的に計測し、工程間の計測結果の差分を取ることで、計測ターゲットの設置に起因する誤差を除外することが可能となり、溶接変形量の抽出精度を向上させる手法を提案した。さらに、この手法を用いることにより、工程毎の変形の様子を定量的に把握することができた。

Fig. 11 Welding Deformations of Processes

7.2 今後の課題

(1) 対象工程の拡大

本研究では組立工程を主たる対象として計測を行った。その結果、溶接工程における変形のバラつきは少なく、個体の相違は仮組工程に起因していることが推定された。したがって工程の進展に伴う変形量の追跡の実現のためには、NCマーキング・切断の部材精度や、仮組工程の精度を十分に検討する必要がある。特に仮組工程においては止め方が完成精度に与える影響を定量的に検討することが重要と考えられ

る。

さらに、ハッチカバー単体の精度が反対舷ハッチカバーや船体ハッチコーミングに与える影響も考えられ、今後、検討する必要がある。

(2) 計測ターゲットとその設置手法の検討

計測精度の悪化は主に計測ターゲットの設置に起因している。したがって、計測精度を高くするためには、計測ターゲットの設置とオフセットターゲットの精度向上が必要である。計測ターゲットの設置は、仮組前にCADモデル上の

位置座標が決まっており、かつ継続して計測が可能な位置に実施する。例えば NC マーキングの時点で設置できることが望ましい。また、今回計測ターゲットに使用した反射シートは溶接時に溶けて剥がれてしまうため、継続して計測可能な材質にする必要がある。次に、工場内は狭いためオフセットターゲットを使用する場面が必ず発生する。1mm 以内を目標としたオフセットターゲットの改良が望まれる。これらの検討は今後の課題とする。

謝 辞

計測実験フィールドはイワキテック様に提供していただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 奥本泰久, 大沢直樹 et, al: 船舶海洋工学シリーズ⑨造船工作法, pp.72-81, pp.169-174, 成山堂, 2012.
- 2) Dianzhen, ZHANG. et al., 'Study on Three Dimensional Coordinate Measuring Methods for Production of Ship Hull Blocks', *Proc. of ICCAS 2009, I*, pp.115-118, 2009.
- 3) 野本敏治, 武市祥司, 青山和浩: 溶接変形の予測に基づく精度管理システムに関する研究, 日本造船学会論文集, 第181号, pp.249-260, 日本船舶海洋工学会, 1997.
- 4) 武市祥司, 青山和浩, 野本敏治: 精度管理システムを用いた位置決め作業支援に関する研究, 日本造船学会論文集, 第188号, pp.399-408, 日本造船学会, 2000.
- 5) Hiekata, K. et al., Development of The Algorithm for Accuracy Evaluation System for Curved Shell Plates By LASER Scanner, *Proc of ICCAS 2011, I*, pp.127-134, 2011.
- 6) 山本勉, 調枝和則: 造船現場におけるものづくり技術の高精度化, 三菱重工技報, Vol. 47 No.3, pp.99-102, 2010.
- 7) 「EcoMarine G1」 SAMIN INFORMATION SYSTEM, http://www.saminiis.com/jn/product/product_01.php, 2016.4.29.
- 8) 「Beagle を利用した造船業における 3D 活用状況」, NTT データエンジニアリングシステムズ, <http://www.nttd-es.co.jp/magazine/backnumber/no77/no77-bsb.html>, 2016.4.29.
- 9) (社) 日本造船研究協会 第 246 研究部会: 船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究, 平成 13 年度報告書, 日本造船研究協会, 2002.
- 10) (社) 日本造船研究協会 第 237 研究部会: 高度工作精度管理技術に関する研究, 平成 11 年度報告書, 日本造船研究協会, 2000.
- 11) 清水英樹: 大型構造物向け三次元形状計測技術とその評価, 溶接学会誌, 第 72(4)巻, pp. 238-241, 2003.
- 12) 小野徹: 講座: バンドル法 第六回 精密工業計測におけるバンドル法とカメラキャリブレーション, 写真測量とリモートセンシング, 第 51 巻, pp.387-396, 日本写真測量学会, 2012.
- 13) 浅野繁喜, 伊庭仁嗣, 大杉和由, 川西一樹, 下田勝弘, 仁科基, 福島博行: 最新測量入門新訂版, pp.16-39, 実教出版, 2008.
- 14) 日本測量機器工業会: 測量機器を知ろう 地上用レーザスキャナ (TLS) を学ぼう, 雑誌測量, pp.28-29, 日本測量協会, 2015.
- 15) 稗方和夫, 松尾晃: 3 次元計測の造船海事産業への適用-事例の紹介-, KANRIN 日本船舶海洋工学会誌, 第 40 号, pp. 2-5, 2012.
- 16) 柴原正和: 3次元画像計測法による溶接残留変形計測, KANRIN 日本船舶海洋工学会誌, 第40号, pp.6-11, 2012.
- 17) 浅野繁喜, 伊庭仁嗣, 大杉和由, 川西一樹, 下田勝弘, 仁科基, 福島博行: 最新測量入門新訂版, pp.111, 実教出版, 2008.
- 18) 飛田幹男: 世界測地系と座標変換, pp.42-49, 日本測量協会, 2002.