

三次元計測器を用いた船体構造の計測精度と  
精度管理への適用に関する研究  
(A study on the accuracy control and measurement of  
hull structure using 3D Measurement Technique)

博士論文

平成29年 3月

阿部 亮吾



## 目 次

<b>1</b>	<b>はじめに</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>三次元計測器の概要と精度管理への利用の現状</b> .....	<b>3</b>
2.1	三次元計測器の種類と特徴 .....	3
2.2	三次元計測器を用いた計測の現状 .....	7
2.3	造船における精度管理の現状と既往研究 .....	7
2.4	既往研究の課題と本研究の位置づけ .....	12
2.5	本研究で利用する計測機材 .....	13
<b>3</b>	<b>計測対象（ハッチカバー）と作業状況</b> .....	<b>14</b>
3.1	ハッチカバーの形状 .....	14
3.2	作業環境 .....	16
3.3	ハッチカバーの建造工程 .....	17
3.4	計測するタイミング .....	19
3.5	計測スケジュール .....	21
<b>4</b>	<b>TSを用いたハッチカバー計測</b> .....	<b>25</b>
4.1	本計測で使用した機器 .....	25
4.2	計測誤差の整理 .....	26
4.3	計測精度の検討 .....	30
4.4	TSを用いた計測方法 .....	38
4.5	計測結果の解析方法 .....	46
4.6	計測結果と考察 .....	50
4.7	TSのまとめ .....	62
<b>5</b>	<b>TLSを用いたハッチカバー計測</b> .....	<b>63</b>
5.1	本計測で使用した機器 .....	63
5.2	計測誤差の整理 .....	66
5.3	計測精度の検討 .....	68

5.4	TLS を用いた計測方法の検討 .....	88
5.5	計測結果の解析方法 .....	94
5.6	計測結果と考察 .....	95
5.7	TLS と TS の比較 .....	102
5.8	TLS のまとめ .....	105
<b>6</b>	<b>結論 .....</b>	<b>106</b>
	謝 辞 .....	108
	参考文献 .....	109

## 1 はじめに

一般的な建設分野における構造物（橋梁や建物など）の施工や、大規模な工業製品の製造を行う際には、作業工程ごとの変形量や設計データとの乖離など三次元形状の品質管理が求められる。これは、形状寸法の品質向上によって、後続作業や修正作業が軽減され効率化がはかれるとともに、設計で計算された強度に限りなく近くなるためである。これらの品質管理手法として、多くの分野で PDCA サイクルによる作業工程の改善が提案されている。本論文では、大規模工業製品の代表格である造船分野に焦点をあてて、その品質管理手法について検討する。

大規模工業製品の代表格である造船分野では、品質管理のために高精度な三次元形状が求められる。すなわち、各部材を溶接にて接合してブロックを作成していくが、その過程で溶接時の入熱により部材が大きく変形する。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<sup>1)</sup>。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<sup>2)3)</sup>。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。

造船分野では部材のサイズは非常に大型（数 10m～数 100m 規模）である。また、一般的な造船分野の溶接変形は、横収縮、縦収縮、縦曲がり変形、回転変形、角変形、座屈形式の変形がある。横収縮では経験式として 10mm 幅場合は約 1.8mm 程度である<sup>1)</sup>。そのような溶接変形の把握は、下げ振りや巻尺などを用いて二次元的な寸法を計測されており、採寸上の基準が統一されておらず、加えて熟練作業員の属人的な技能に依存している。そのため、取得したデータの精度や値の再現性が低く、形状変形の定性的な傾向の把握と、設計データとの乖離の評価が困難となっている。

以上の議論に基づき、本研究では、実際の造船工場内における三次元計測機器を用いた品質管理方法について検討を実施する。

本論文は次の 6 章から構成されている。

第 1 章では，研究の背景と目的について述べた。

第 2 章では，三次元計測器の概要と精度管理への利用の現状を整理した。

第 3 章では，計測対象であるハッチカバーについて建造工程と計測したタイミングについて整理した。

第 4 章では，トールステーション（以下 TS）を用いたハッチカバー計測として，まず工場内における TS の計測誤差を考察した。そのうえで，工場内に適した計測方法と解析方法を提案するとともに実際の工場内において計測を実施し，変形量について考察した。

第 5 章では，地上型レーザスキャナ（以下 TLS）を用いたハッチカバー計測として，まず工場内における TLS の計測誤差を考察した。そのうえで，工場内に適した計測方法と解析方法を提案するとともに実際の工場内において計測を実施し，変形量について考察した。

第 6 章では，5 章までの結果を総括し，今後の課題とそれを解決するための方針を述べた。

## 2 三次元計測器の概要と精度管理への利用の現状

### 2.1 三次元計測器の種類と特徴

大規模工業製品の代表的な計測機には、主に TS, TLS, ステレオ画像計測機, レーザ光切断法の 4 つがあり<sup>4)5)</sup>, それぞれ次のような計測特性を有している (Table 2-1).

#### (1) TS (Fig. 2-1)

TS は、距離を計測する光波測距計と角度を測るセオドライトの機能を有している。計測原理は、計測者が望遠鏡から特徴点を視準し、距離と角度を同時に観測して 3 次元的位置を求める<sup>6)</sup>。距離は近赤外線光の反射光と照射光の位相差より測定し、角度は 2 軸コンペセンサーにより水平角、天頂角を測定する。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可能である。

特徴として、計測点数が多い場合は計測時間が増大する。また、特定の測定点の計測精度は高いが面的な歪みの計測が困難である。

#### (2) TLS (Fig. 2-2)

TLS の計測原理は、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、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 3 次元的位置を求める手法である<sup>7)</sup>。面的な広がりを持った歪みを計測することがかのである。

特徴としては、面的な広がりを持った歪みを高速に計測できる。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困難で、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。また、測定間隔の問題から部品の外周部に相当するエッジ部の形状変化点を的確に測定することが困難である。

#### (3) ステレオ画像計測機 (Fig. 2-3)

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<sup>8)</sup>。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。

(4) レーザ光切断法 (Fig. 2-4)

レーザ光切断法の原理は、レーザ光をワイドに計測対象物に照射し、対象物までの距離より座標を計測する。計測結果は断面で表現されるが、計測対象が移動することで三次元座標を計測することが可能である。

特徴としては、形状を高精度に早く計測することが可能である。ただし、計測範囲が狭く短いため、計測可能なものは近距離かつ小規模な部品などが主である。

Table 2-1 三次元計測器の特徴

No.	計測方法	長所	短所	仕様	計測対象
1	TS	1点を高精度に計測 再現性が高い 造船の使用実績が多い	計測時間がかかる	計測範囲： 1.3～200m 精度： ±1mm	大規模工業 製品 斜面，道路 橋梁，ビル
2	TLS	高速に大量の計測が可能 特徴点不要 面的な歪を計測	後処理工程に時間がかかる 再現性が低い	計測範囲： 0.6～200m 精度： ±2mm	大規模工業 製品 斜面，道路 橋梁，ビル
3	ステレオ 画像計 測	高速に高精度な計測が可能 画像上の特徴点の変異を検出 面的に計測	光環境に影響 カメラ間の相対位置により精度が変化 特徴点以外の検出不可	計測範囲： ～15m 精度： ±0.1mm	工業製品 機械部品
4	レーザ光 切断法	高速に高精度な計測が可能 特徴点不要 面的な歪を計測	近距離かつ小規模のみ計測可能	計測範囲： ～0.5m 精度： ±0.2μm	工業製品 機械部品



Fig. 2-1 トータルステーション



Fig. 2-2 地上レーザスキャナ



Fig. 2-3 ステレオ画像計測

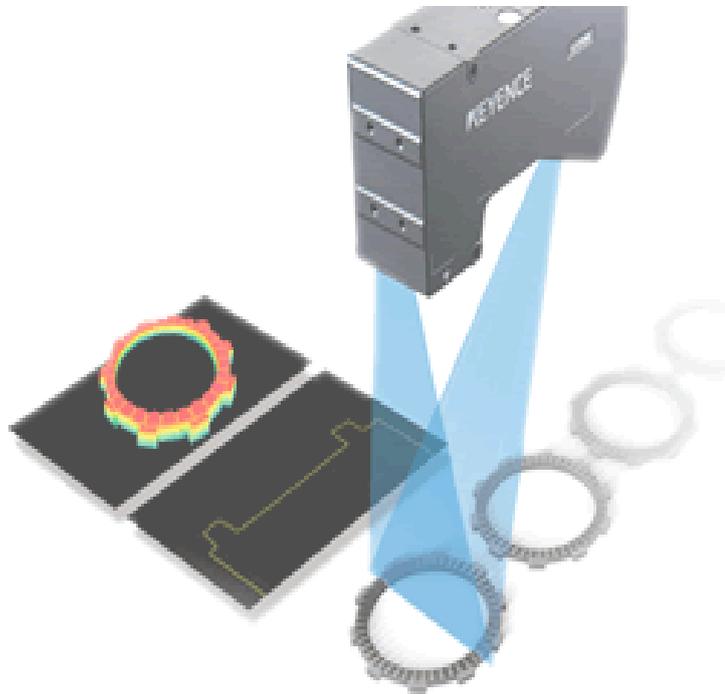


Fig. 2-4 レーザ光切断法 (KEYENCE HP より)

## 2.2 三次元計測器を用いた計測の現状

三次元計測機器を用いた変形・変位の計測は、造船分野だけでなく地形測量分野や建設分野でも進展している。

地形測量の分野でも同様に、地すべりなどの地形や橋梁などの建造物を対象に、複数時期（工程）ごとに連続する三次元の変形量計測が実施されている。さらに、TLSを用いた時系列変化の計測方法の現状を整理し、海岸・河川・山地など地形要素ごとの応用事例の紹介された<sup>9)</sup>。建設分野では、TSを用いた道路土工における出来形管理システムの構築と実証実験による巻尺などの従来手法との比較検証がある<sup>10)</sup>。その他にもTSを用いた衛星アンテナの駆動中心を1mm以下で計測した事例などがある。

造船分野においても三次元計測器を用いた研究は進められており、例えば工場内や船舶内部を目的としたTLS計測データから面や配管などの形状再構築のための点群データ平準化手法<sup>11) 12)</sup>やTLSを用いた船体全体の形状計測がある<sup>13)</sup>。

地形・工業測量と工業計測を比較すると、以下の違いがあげられる。すなわち、一般的な地形測量では、不動点となる基準点を設けて変形量を抽出する<sup>10)</sup>。その際に、計測器は地面が安定しており、対象までの距離や視通が十分な箇所に設置される。また、要求精度は数cm～数十cmである。

工業計測は計測対象が工程ごとに移動するため、不動点を部材の外に設けることができない<sup>14)</sup>。また、工場内は計測条件が厳しく、測量機器の設置面が不安定であったり、他の機材や壁により距離や角度が不十分な場合がある。また、工程間の時間が短いため全計測点を短時間で観測する必要がある。しかし、要求精度は1mm以下～数mm程度と高精度である。

## 2.3 造船における精度管理の現状と既往研究

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（Fig. 2-5, Fig. 2-6）。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。

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。そのため、造船分野では品質管理の要求精度を満たす計測方法について研究が進められている。



Fig. 2-5 工場内の作業風景



Fig. 2-6 既存の三次元計測状況

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。

ステレオ画像計測では、造船工場でのデジタルカメラとターゲットを用いた三次元計測の評価実験がある<sup>5)</sup>。さらに、ステレオ画像計測に基づく三次元変形計測システムの構築と実際の溶接における従来手法との精度比較が報告されている<sup>14)</sup>。他にもステレオ画像計測による変形量の高精度な計測が進められている<sup>15)</sup>。

TSを用いた計測では、TSの計測結果を3Dモデルと比較し、溶接変形や接合部の目違い等を評価する手法の提案がある<sup>16)</sup>。また、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<sup>5)</sup>。

TLSを用いた計測では、TLSを利用して溶接工程における曲り外板の工作精度の評価手法に関する報告がある<sup>17)18)</sup>。さらに、ブロックの精度管理を目的としたTLS計測結果と3Dモデルを比較するための位置決め手法が提案されている<sup>19)</sup>。

実際の工場内における適用事例の研究としては、日本造船研究会にて実際の工場内における三次元計測機器を比較検証がある。

第237研究部会では、平行ブロック試験体を対象として、耐環境性、作業性、事前準備、計測要員、計測時間、後処理、計測精度の評価項目に対してステレオ画像、TS、レーザ計測などを比較した<sup>20)</sup>。その結果、小型部材にはステレオ画像方式、大型部材にはTSと絶対距離計の組合が最適であるとの報告がある。

さらに、第246研究部会で、曲りロンジ部材を対象として自由曲面の形状やガス長さの計測を行ない、中組み立てブロックにはFMレーザ・スキャナまたはレーザトラッカーが最適であると報告された<sup>4)</sup>。

実際の造船所において三次元計測を行なった事例も報告されており<sup>21)</sup>、近年では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<sup>22)23)</sup>。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課題が残されている。これらの研究では、1つの溶接工程前後の変形を比較しており、複数ある工程ごとの変形を実際の溶接工程ごとに計測した例は少ない。

## 2.4 既往研究の課題と本研究の位置づけ

2.2 で述べた通り，造船分野の三次元計測は地形分野や建設分野と比べて，高精度な結果が求められるが，計測環境が制限される．しかし，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．SR237 部会,ST246 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<sup>4)20)</sup>，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．

既往研究で，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ある．

そこ本論では，三次元計測器（TS と TLS）の工場内における誤差要因と計測精度を整理する．その上で，実運用を想定した三次元計測器を用いた計測（解析）方法を提案する．さらに，比較的形状が単純なハッチカバーを対象に各工程における溶接時の変位を抽出する．ハッチカバーなどの部材は個別受注のため計測機材を利用した精度管理が実施される例が少なく，最終形状の完成品の計測は実施しているが各工程での計測の三次元的な把握がない．

## 2.5 本研究で利用する計測機材

本論で対象とする工場内の環境ではステレオ画像計測を用いることは困難であった。すなわち，工場内は暗く明るさが安定しておらず，さらに対象物の面は鉄でできているため特徴点が少なかった。また，レーザ光切断法を用いるためには，計測対象が大型であり対象全体を計測することができなかった。そのため，本論では TS と TLS を用いることとする。

既往研究において，TS は最終成果品の精度管理に適用されているが，精度管理の最終結果ではなく工程や原因の究明が必要となる。TLS は，曲板，パイプなど単純構造はすでに実施されているが，ブロックのような大型部材への適用が進展していない。そのため，今回はある程度の大きさを備えたハッチカバーを対象とする。

まず，TS と TLS を用いるにあたり，工場内の環境における誤差要因を整理して，各誤差要因に対する計測精度を検証した。そして，TS と TLS を実際の造船分野の工程に適用した場合の計測手法と解析手法を提案し，実際のハッチカバーの溶接工程を対象に適用可能なレベルを検討した。

### 3 計測対象（ハッチカバー）と作業状況

#### 3.1 ハッチカバーの形状

本論文では，船体部材の中で比較的形状が単純なハッチカバーを対象に精密三次元計測を行い，その品質管理手法を検討する．ハッチカバーとは，船舶の甲板に貨物の出し入れ等をするための昇降口の上部に設置する開閉式のカバーである．

計測対象のハッチカバーの概観を（Fig. 3-1）に示す．おおよその大きさは，縦 18m，横 8m，高さ 0.8m である．初期工程では，完成時と上下反転の状態部品が設置されており，途中で部品が反転されて完成時と同じ方向になる．反転前の下部（完成時の上面）には工程当初から天板が設置されている．その内部には部材の長手方向と平行して 2 本，短手方向と平行して 4 本のロンジ材が組込まれている．ロンジ材とは船殻の補強を主な目的に，船殻に対して平行または直角に配置された板である．



Fig. 3-1 ハッチカバーの外観

### 3.2 作業環境

工場内は狭く両側に壁。周辺に他の部材が配置されていた。計測機材の設置位置と観測時間は厳しく制限されていた (Fig. 3-2)。ハッチカバーは溶接工程ごとに部材が移動するため、工程ごとに計測機材を設置する必要があった。



TS 設置状況



工場内全景



ハッチカバーの移動状況



ハッチカバーの反転状況

Fig. 3-2 工場内の状況

### 3.3 ハッチカバーの建造工程

今回計測対象としたハッチカバーの建造工程を以下に記載する (Fig. 3-3). 建造的特徴は, 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・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. 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, ガーター及びロンジ材の溶接線の長い部分を溶接する.
- 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.
- 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: 下げ振りや巻き尺で採寸後, 所定の箇所を加熱およ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.



1) NC マーキン・切断



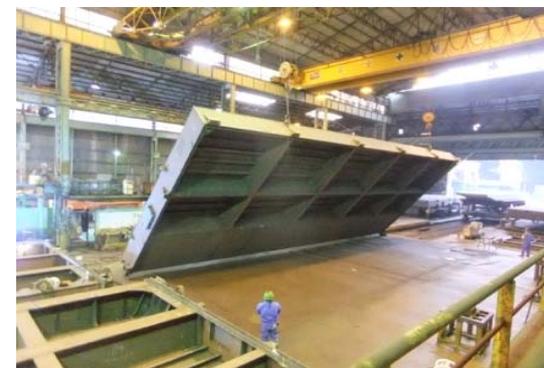
2) 仮組



3) 自動溶接



4) 手動溶接 1



5) 反転



6) 手動溶接 2



7) 歪取



8) 検査

Fig. 3-3 溶接工程とハッチカバーの移動

### 3.4 計測するタイミング

溶接工程の説明 (Fig. 3-4) と工場内のハッチカバーの位置 (Fig. 3-5) を示す。計測対象は仮溶接から歪取り溶接までの 5 工程 (2)仮溶接,3)自動溶接,4)手動溶接 1 (反転前),6)手動溶接 2 (反転後),7)歪取り溶接) とした。溶接工程ごとにハッチカバーは移動し、さらに手動溶接の間で反転した。TS と TLS の計測は各溶接の前後と移動の前後で実施した ([A],[B],[C],[D],[E],[F],[G])。

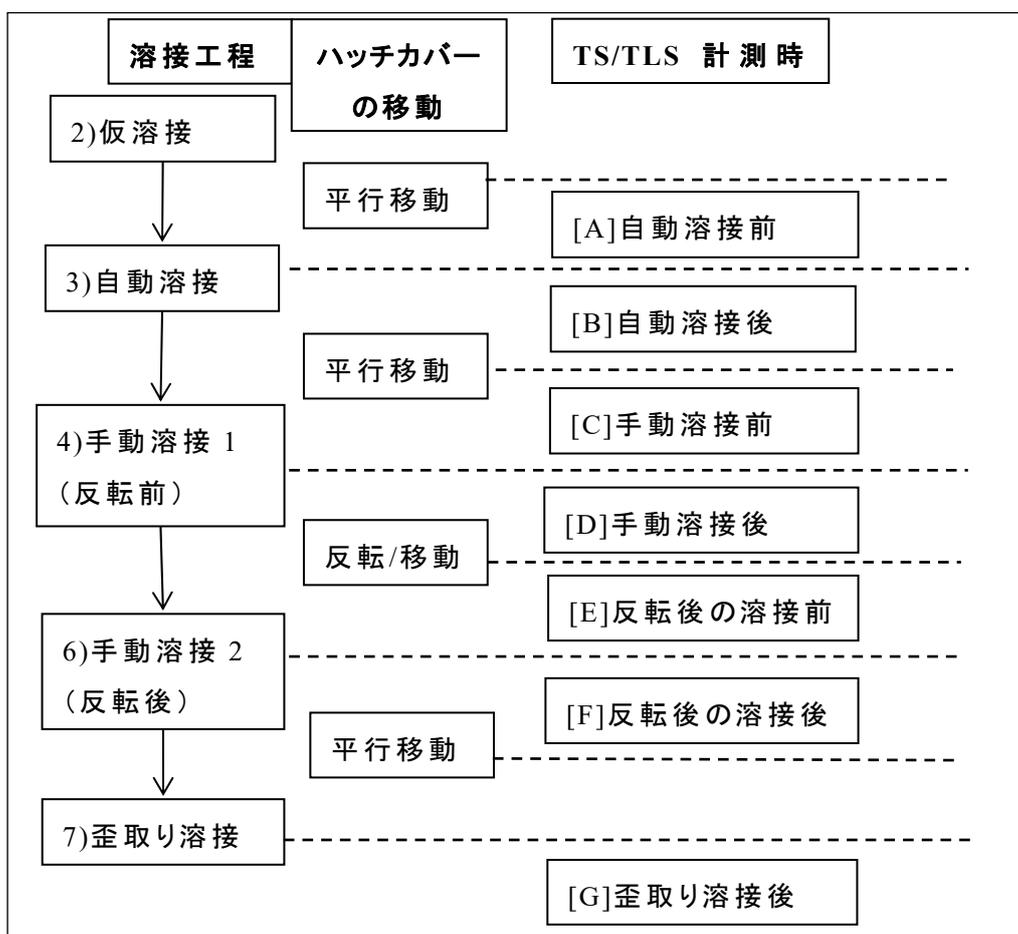


Fig. 3-4 作業工程の説明

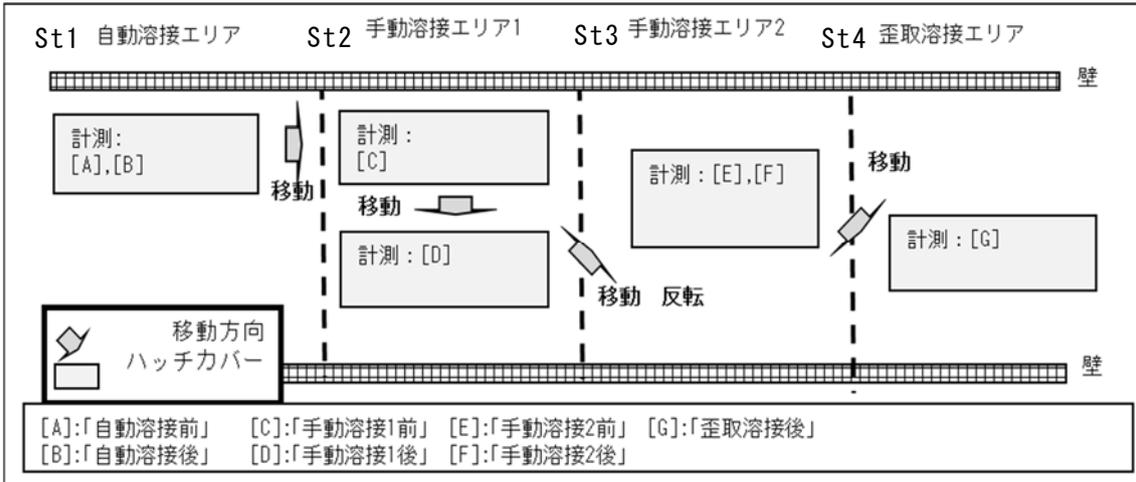


Fig. 3-5 溶接工程と工場内のハッチカバー位置

### 3.5 計測スケジュール

2014年と2015年に同じ部材を対象として実施した。計測期間はそれぞれ2014年1/6～1/10と、2015年1/6～1/9である。計測可能時間は溶接工程の間となり1計測で1.5時間～2.0時間程度であった。2014年に実施した実証実験の計測スケジュールをTable 3-1に示す。計測可能時間が限られていたため、空いている時間にTS用の基準点とTLS用の計測ターゲットを工場内に設置した。

Table 3-1 2014年度 計測スケジュール表

1月6日	現地到着/機材確認	8:00	8:30
	打合せ	8:30	9:00
	St2TLS 設置箇所確認	9:00	10:00
	St2TLS 用ターゲット設置	9:00	10:30
	St2TS 基準点設置	10:30	12:30
	ターゲットシート貼り付け	12:30	14:30
	St2 自動溶接前計測①	14:00	17:00
	データ確認	17:30	18:30
1月7日	現地到着/機材確認	8:30	9:00
	St3TLS 設置箇所確認	9:30	11:30
	St3TLS 用ターゲット設置	9:30	11:30
	昼休み	11:30	12:30
	St4TLS 設置箇所確認	12:30	14:00
	St4TLS 用ターゲット設置	12:30	14:00
	St3TLS 用ターゲット計測	14:00	15:00
	St2 自動溶接後計測②	17:00	19:00
	St3TS 基準点設置	19:00	19:30
	St3 手動溶接前計測③	19:30	20:00
	St3TS 基準点設置	20:00	20:30
1月8日	現地到着/機材確認	9:30	10:00
	St3TLS 用ターゲット計測	10:00	12:00
	昼休み	12:00	13:00
	データ整理	13:00	16:00
	夕食	16:30	17:30

	St3 基準点計測	17:30	19:00
	St3 手動溶接後計測④		
	St4TLS 用ターゲット計測	19:00	21:30
1月9日	現地到着/機材確認	11:00	11:30
	St4 基準点計測	11:30	12:00
	St3 上部鉄板溶接後計測⑤	12:00	13:30
	昼休み	14:00	15:00
	St5TS 基準点設置	14:00	15:00
	St5TLS 用ターゲット設置	16:30	17:30
	St5TLS 設置箇所確認	17:30	19:00
	St4 反転後溶接後計測⑥	19:00	21:00
1月10日	現地到着/機材確認	10:00	10:30
	St5 基準点計測	10:30	11:20
	St5 歪みとり前計測⑦	11:30	14:00
	データ整理	14:00	16:00
	機材整理発送	14:00	16:00

2015年に実施した実証実験の計測スケジュールを Table 3-2 に示す。計測は4日間にわたり実施した。2014年同様に計測可能時間が限られていた。また、2014年に設置したTS用の基準点と計測ターゲットは全て撤去していたため、新たに工場内に設置した。

Table 3-2 2015年度 計測スケジュール表

1月4日	ターゲット貼り付け		
	数量確認		
	梱包		
	機材発送		
	宿に連絡		
	TLSのパラメータ確認		
1月5日	宿で受け取り		
	TS, コレクター, デジカメを充電		
	荷物を車に載せる		
	ターゲット設置, 計測		
1月6日	現地到着/機材確認	8:00	8:30
	打合せ	8:30	9:00
	St2TLS 設置箇所確認	9:00	10:00
	St2TLS 用ターゲット設置	9:00	10:30
	St2TS 基準点設置	10:30	12:00
	St2 自動溶接前計測①	12:00	14:30
	宿泊先にチェックイン	15:00	16:30
	St3 配置場所確認	16:30	16:30
	St3TLS 設置箇所確認	15:00	18:00
	St3TLS 用ターゲット設置	15:00	18:00
	St3TS 基準点設置	15:00	18:00
	St2 自動溶接後計測②	18:00	20:30
1月7日	St3 手動溶接前計測③	8:00	10:30
	St4TLS 設置箇所確認	11:00	15:00
	St4TLS 用ターゲット設置	11:00	15:00
	St4TS 基準点設置	11:00	15:00

	St3 手動溶接後計測④	19:00	21:00
1月8日	St4 反転後溶接前計測⑤	7:00	9:00
	St5TLS 設置箇所確認	9:00	12:00
	St5TLS 用ターゲット設置	9:00	12:00
	St5TS 基準点設置	9:00	12:00
	St4 反転後溶接後計測⑥	19:00	21:00
1月9日	St5 反転後溶接前計測⑦	7:00	9:00
	St5 反転後溶接後計測⑧	19:00	21:00

## 4 TS を用いたハッチカバー計測

### 4.1 本計測で使用した機器

本計測にはソキアトプコン社製 NET1200（一級 TS）を使用した。機器スペックを Table 4-1 に示す。本製品は通称 MANMOS と呼ばれており，SR237 部会<sup>20)</sup>と 246 部会<sup>4)</sup>にて精度検証が実施された TS（NET2B）の後継機種にあたり，造船分野において導入が進んでいる。

Table 4-1 NET1200 スペック表

望遠鏡	全周回転，正像，倍率 30x，最短合焦距離 1.3m			
測角部	最小表示	水平角・鉛直角共	0.5" / 1" 選択可	
	精度	水平角・鉛直角共	1"	
測距部	測定可能範囲 (斜距離)	反射シート (正対時)	1.3～200m (50x50mm 反射シート使用時)	
		ノンプリズム	1.3～40m	
		CPS12	1.3～350m(気象条件良好時)	
		反射プリズム		
		1素子 AP 反射プリズム	1.3～2,000m(気象条件良好時)	
		最小表示	精密測定 : 0.0001m, トラッキング測定 : 0.001m	
	精度 (D は測定距離，単位は mm)	反射シート (RT1A, 正対時)	±(0.6 + 2ppm x D) mm	
			ノンプリズム	±(1 + 2ppm x D) mm
		CPS12 反射プリズム	±(1 + 2ppm x D) mm (距離 4m～), ±(5 + 2ppm x D) mm (~4m)	
			AP 反射プリズム	±(2 + 2ppm x D) mm (距離 4m～), ±(5 + 2ppm x D) mm (~4m)
測距モード	精密測定	反射シート・ノンプリズム : 0.9 秒毎 (初回 4.8 秒), プリズム : 1 秒毎 (初回 5.2 秒)		
	トラッキング測定	0.3 秒毎 (初回 1.6 秒)		

## 4.2 計測誤差の整理

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<sup>24)</sup>。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。

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  $\varphi$ 、垂直角の測角精度を  $\theta$ 、測距精度を  $\delta$  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  $\varepsilon$  は式(1)で表される。

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

### 4.2.1 機械的誤差

本計測の最大斜距離は 25m 以内であったため、機械的誤差は式(1)より約 0.6mm 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。

### 4.2.2 計測機の設置に起因する誤差 (Fig. 4-1)

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

る誤差を計測機の設置に起因する誤差と定義する。

#### 4.2.3 視準に起因する誤差 (Fig. 4-2)

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。

#### 4.2.4 計測ターゲットの設置に起因する誤差 (Fig. 4-3)

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。



Fig. 4-1 計測機の設置



Fig. 4-2 視準



Fig. 4-3 計測ターゲットの設置

今回の実験環境では機械的誤差よりも人為的誤差が大きいと想定される。そのため、誤差（4.2.2, 4.2.3, 4.2.4）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. 4-4）。ここでは、複数回計測した際の標準偏差  $\sigma$  と最大偏差を誤差と考える。

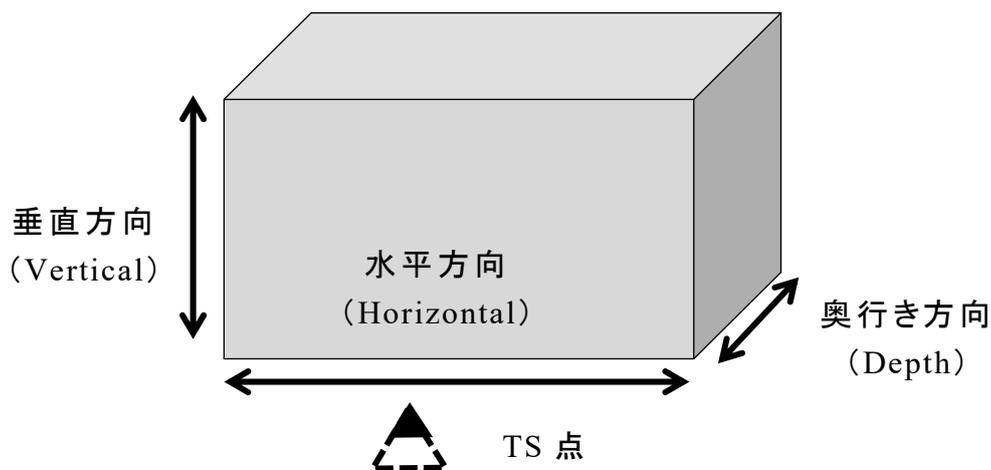


Fig. 4-4 計測誤差の軸方向

### 4.3 計測精度の検討

#### 4.3.1 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 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。計測は実際のハッチカバーを対象に Side/Aft 側の計測用に設置した TS 点を用いた。計測対象の点は、実際の計測点のうち端部とその中間部の計 33 点である。結果を Table 4-2 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  $\sigma$  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。

Table 4-2 TS 設置誤差(mm)

作業者	水平方向		奥行き方向		垂直方向	
	$\sigma$	MAX	$\sigma$	MAX	$\sigma$	MAX
測量未経験者	0.4	1.2	0.7	1.8	0.5	1.8
熟練作業者	0.5	1.4	0.5	1.4	0.8	1.6

#### 4.3.2 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 4.3.1 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  $\sigma$  は 0.4mm であり、十分に小さかった (Table 4-3)。

Table 4-3 視準誤差(mm)

作業者	水平方向		奥行き方向		垂直方向	
	$\sigma$	MAX	$\sigma$	MAX	$\sigma$	MAX
測量未経験者	0.4	0.6	0.2	0.3	0.2	0.5
熟練作業者	0.1	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1

### 4.3.3 使用した計測ターゲット

本研究では計測ターゲットとして反射シートを使用した。入射角度が浅い箇所は測距用のレーザ光が反射せずに計測できない箇所が多く発生した。そのような箇所は、L字ターゲットを利用して計測した (Fig. 4-5)。ここで、L字ターゲット用いる場合は、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字ターゲットを設置した。



反射シート



L字ターゲット

Fig. 4-5 計測ターゲットの取付状況

#### 4.3.4 計測ターゲットの設置に起因する誤差の定量化

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  $\sigma$  と最大偏差を誤差と考える。なお、L字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字ターゲットの設置に起因する誤差

#### 4.3.5 反射シートの設置に起因する誤差

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  $\sigma$  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 4-4)。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 4-4 反射シートの設置誤差 (mm)

作業者	水平方向		奥行き方向		垂直方向	
	$\sigma$	MAX	$\sigma$	MAX	$\sigma$	MAX
測量未経験者	16.5	35.2	-	-	3.2	9.0
熟練作業者	1.7	3.6	-	-	0.4	0.7

#### 4.3.6 L字ターゲット設置に起因する誤差

L字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。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、直接計測とL字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字ターゲットを再設置しつつ1つの計測点を10回計測した (Fig. 4-6, Fig. 4-7)。

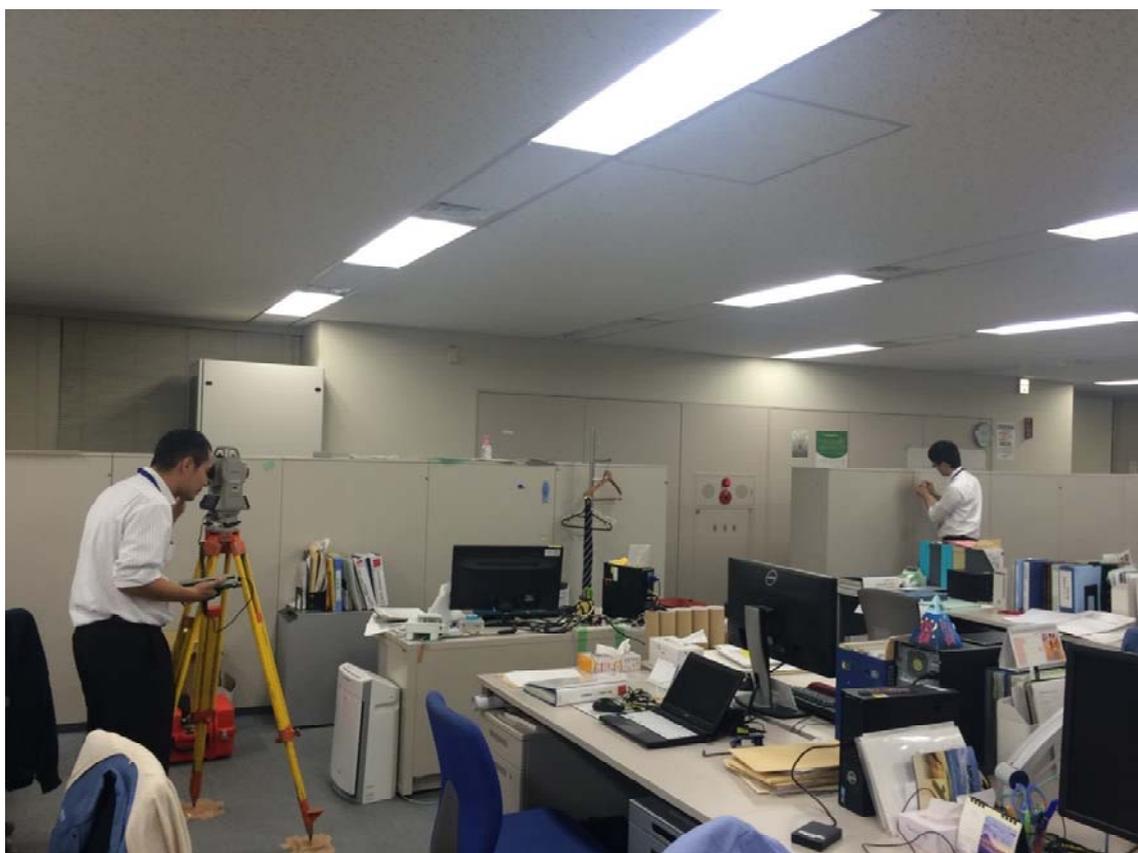
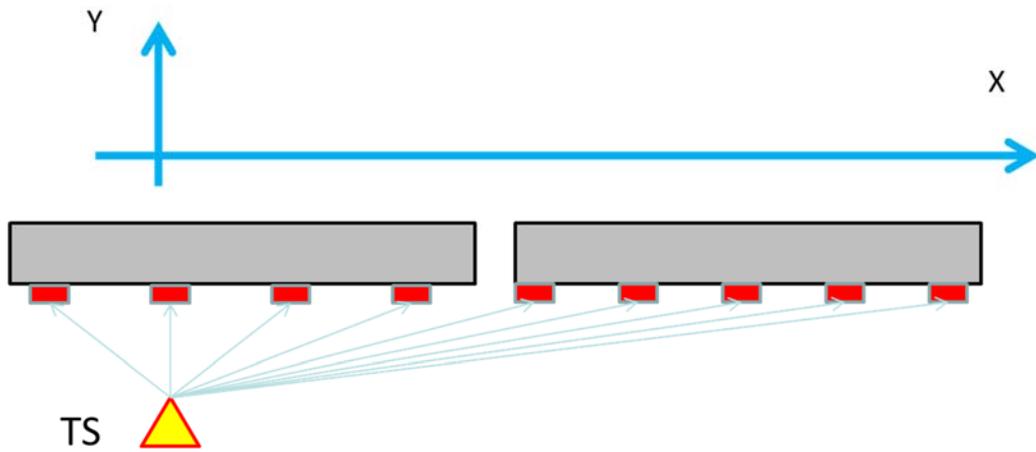


Fig. 4-6 予備実験の計測状況



ターゲット 番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
角度(°)	48.9	90.0	52.8	29.8	18.3	14.0	11.3	10.4	8.8
距離(m)	2.8	1.9	2.3	3.7	5.9	7.7	9.4	10.3	12.1
反射シート	○	○	○						
L字 ターゲット				○	○	○	○	○	○

Fig. 4-7 ターゲット試験イメージ

以上の結果を Table 4-5 に示す．反射シートは水平 0.3mm 以下，垂直が 0.1mm 以下であった．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，反射シートの直視よりも精度は劣るものの，精度の低下は小さい．

Table 4-5 ターゲット再設置 (mm)

ターゲット種別	水平方向		奥行き方向		垂直方向	
	$\sigma$	MAX	$\sigma$	MAX	$\sigma$	MAX
反射シート	0.1	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1
L 字ターゲット	0.5	1.0	0.3	0.6	0.2	0.3

#### 4.3.7 TS の造船工場における計測精度のまとめ

本章におけるこれまでの議論より，誤差とその累計を Table 4-6 にまとめた．これまで TS の計測精度と考えられてきたメーカスペックよりも 10 倍以上の誤差となっている．その中でも，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，計測ターゲット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．実際の運用では計測ターゲットは一度設置したら最後まで外さないことが望ましい．今後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計測機器の設置に起因する誤差となる．そのためには，実際の計測では計測機器の設置がなるべく最小となるような計測方法が望ましい．

今回は反射シート設置の誤差を除外するため，反射シートを自動溶接前に貼り付けて，どの工程においても同じ場所を計測するようにした．また，TS 設置誤差を除外するため，ハッチカバーの端点を基準点として変形量を抽出した．

Table 4-6 工場内の TS 誤差のまとめ(mm)

誤差				累計誤差 ①+②+③+④	メーカ スペック
①機械	②TS 設置	③視準	④ターゲット 設置		
0.6	0.4(1.2)	0.4(0.6)	16.5(35.2)	17.9(37.6)	1.0

σ(MAX)

## 4.4 TS を用いた計測方法

### 4.4.1 ハッチカバーの計測箇所

TS と用いた計測では，観測者 1 名と補助者 1 名の 2 名体制で実施した (Fig. 4-8)．観測には三脚を用いて実施し，工場内に基準点を設置して実施した．ハッチカバーの部材名称と計測点を Fig. 4-9 に示す．ハッチカバーの外枠の端点 (四隅点)，ロンジ材との接点，その中間を計測点として，直接計測ターゲットを貼り付けた．この計測点を全工程で計測することで相対的な形状変化を追跡した．各計測面の名称は以下の通りとした．**Center**：船体中央側，**Side**：船体外側，**Aft**：船体後方側，**Fore**：船体前方側，**Upper**：完成時の船体上部 (天板部)，**Deck**：完成時の船体下部 (開口部)．**Center** 側と **Side** 側は上部と下部にそれぞれ 11 箇所それぞれ計 22 箇所，**Fore** 側と **Aft** 側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 箇所に設置した (Fig. 4-9)．



Fig. 4-8 TS の観測状況

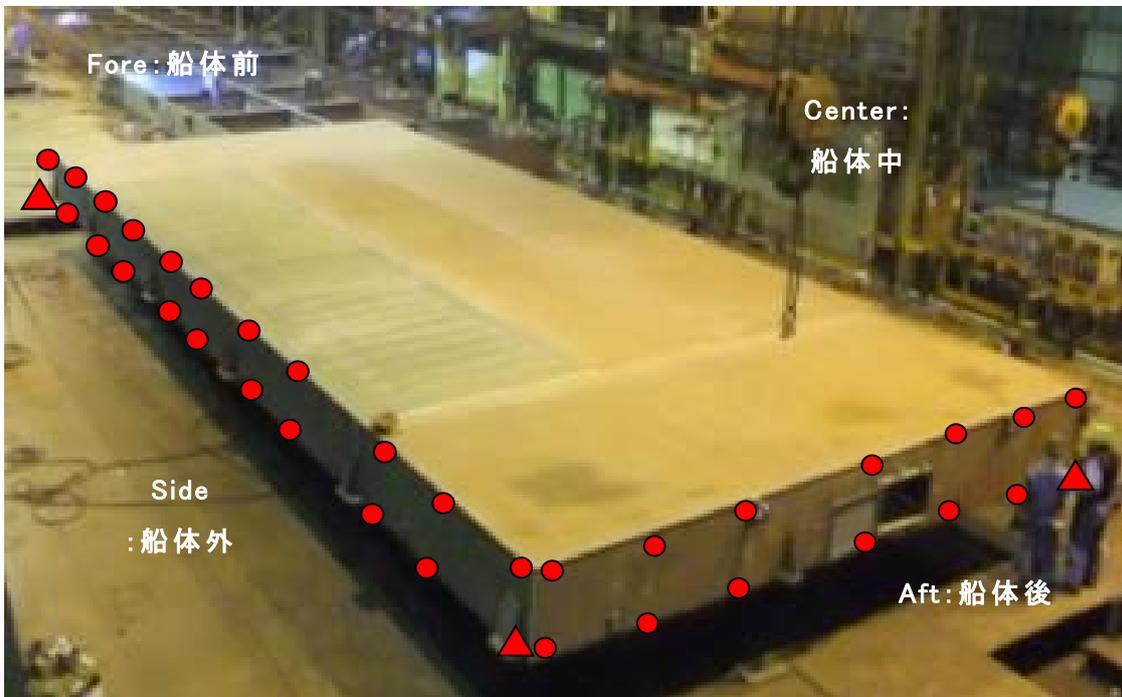
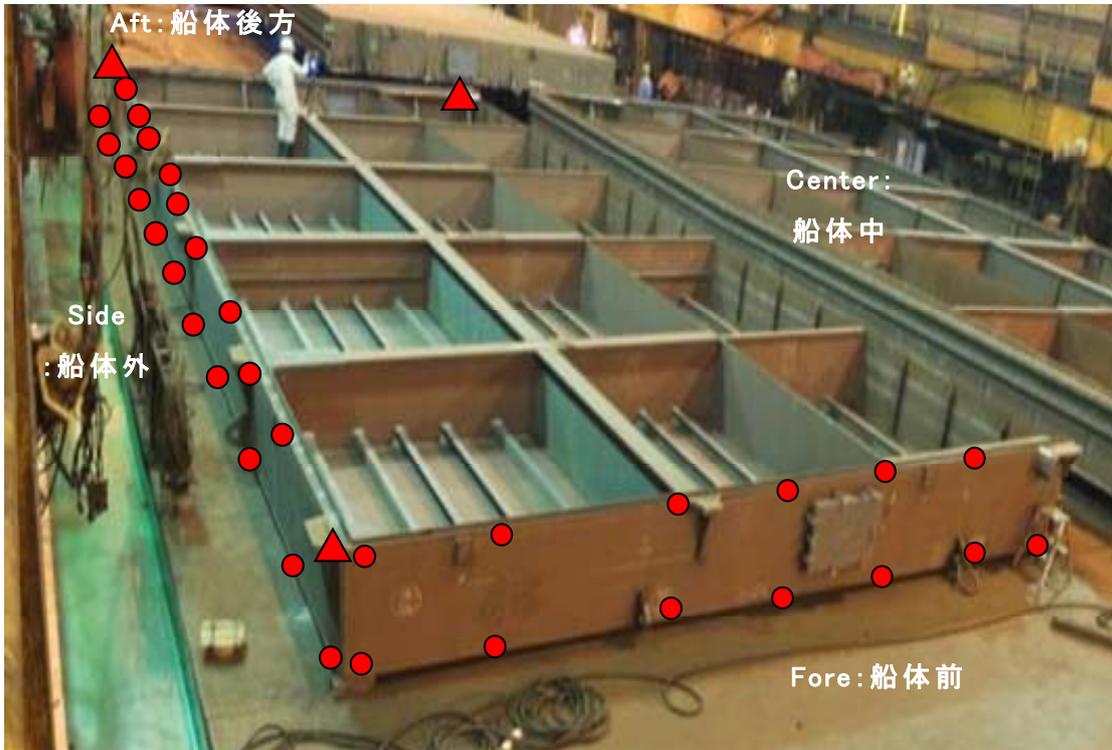


Fig. 4-9 ハッチカバーの部材と計測点 ●計測位置 ▲座標変換点

#### 4.4.2 計測時間の短縮

一般的な TS 計測の作業は TS 設置，ターゲット設置，視準して計測となる．その場合に，それぞれ必要な作業時間が TS 設置：10 分/設置，ターゲット設置：3 分/箇所，視準して計測：20 秒/箇所となる．一般的な作業では TS 設置は 6 箇所，ターゲット設置は 72 箇所となるため，全部で 5 時間ほどかかってしまう．今回の計測可能な時間は溶接工程の間や昼休みのため，1～1.5 時間/1 工程しかなく計測時間の短縮化が求められた．

今回の計測では以下の 3 つの作業手法により作業時間の短縮を実施した (Table 4-7)．

①計測ターゲットに事前に反射シートを設置して，最後まで同じ場所を計測した．計測ターゲットの設置時間が短縮された．

②1 つの基準点から 2 つの面を計測できる四隅の 2 点に TS を設置した (Fig. 4-10)．TS の設置数量が 6 箇所から 2 箇所に減少し，TS の設置時間が短縮した．

③工場内は狭く TS 設置可能箇所に制限があり，TS を対角の 2 箇所に設置すると入射角が浅く直接反射シートを計測できない計測点が多く発生した．そのような計測点には，計測点の反射シールに対して直角に L 字ターゲットを設置することで計測を可能とした (Fig. 4-11) ．

なお，端部は研磨や溶接によりシールがはがれてしまうため，端部から約 50mm 離れた箇所にターゲットを設置した．

Table 4-7 計測手法による計測時間の比較

作業項目	一般的な手法			提案手法		
	数量	時間 (分)	合計 (分)	数量	時間 (分)	合計 (分)
TS 設置	6	10	60	2	10	20
ターゲット設置 (マーキング)	72	3	216	-	-	-
ターゲット設置 (L 字ターゲット設置)	-	-	-	72	0.25	18
視準計測	72	0.25	18	72	0.25	18
		合計	296		合計	56

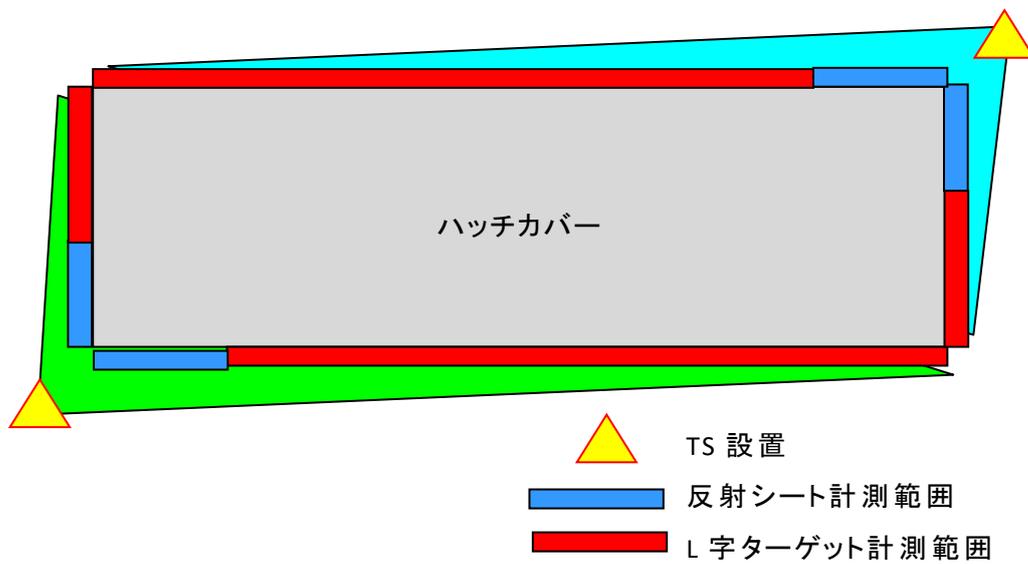


Fig. 4-10 TS と計測ターゲットの配置

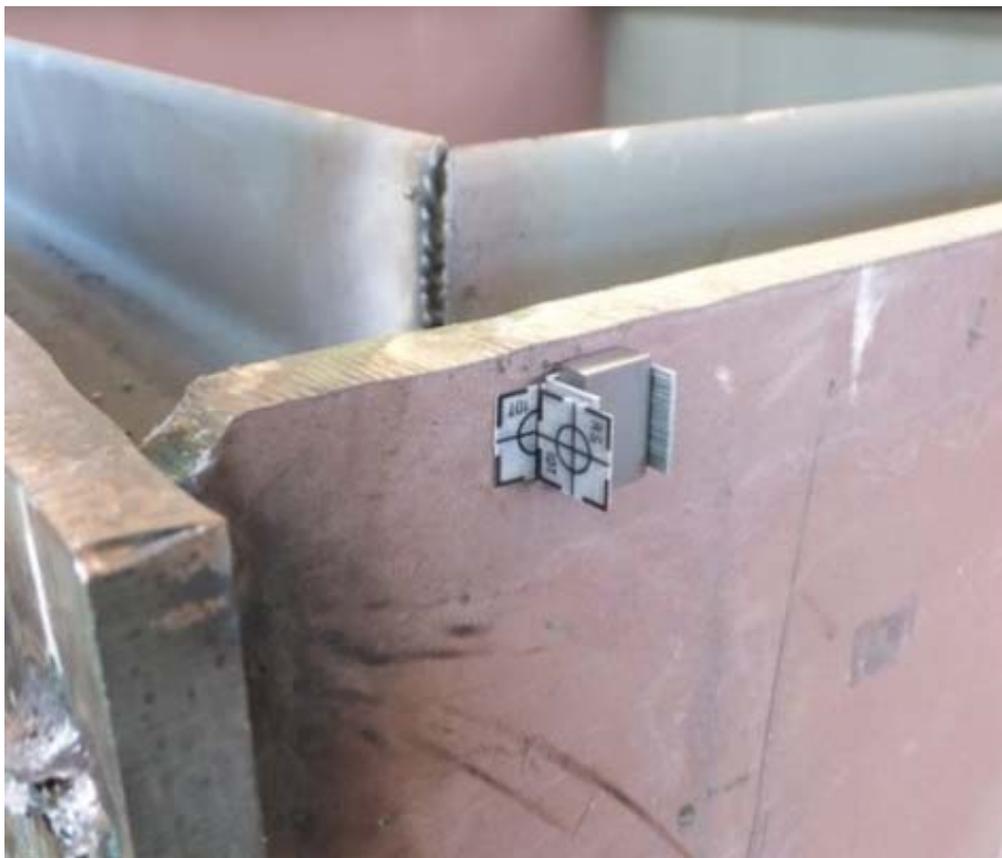
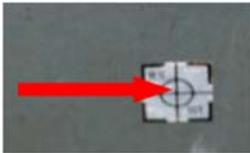


Fig. 4-11 ターゲットの設置状況

計測は全7工程全て実施できたが、計測可能時間が短い2工程([C]手溶接前, [E]反転溶接前)については全計測点を計測できなかった。その2工程以外では、L字ターゲットを使用することで、入射角が浅いターゲットも計測できたため、精度を維持したまま計測時間の短縮化が可能となった。また、欠測率が11%程度と良好な結果であった (Table 4-8)。

船舶の溶接工程では、工程途中で追加設置される部材が多くあるため、計測不可となった TS から死角となる計測点を精度高く計測する手法の検討が必要である。例えば、1点に対して任意の3箇所を計測してから球の中心を求める手法などが想定される。

Table 4-8 計測方法ごとの計測数量

	計測方法		
	直接	L字ターゲット	計測不可
全体			
360箇所	40	285	35
100%	11%	79%	10%

#### 4.4.3 計測精度の向上

TS の計測誤差が大きい要因として、ターゲット設置と TS 設置があげられる。本論では、ターゲット設置として反射シートを最初に設置して最後まで動かさないことで、ターゲット設置の誤差を除去した。次に、TS 設置の誤差については、TS の設置をなるべく減らすために対角の 2 箇所のみとした。さらに、TS から計測箇所の計測状況（角度と距離）をなるべく同じにすることで、計測状況の差異による精度低下をふせいだ。

解析時に計測対象内の四隅を基準として位置合わせを実施することで、TS の設置誤差を除去することが可能であった。今回実施した計測方法・解析方法と従来の計測方法を比較した表を以下に示す（Table 4-9）。

Table 4-9 従来型の計測方法と本論の計測方法の比較（mm）

計測・ 解析 方法	誤差					累計誤差	メーカー ペック
	① 機械	② TS 設置	③ 視準	④ターゲット設置			
				反射 シート	L 字 ターゲット		
従来	0.6	0.4(1.2)	0.4(0.6)	16.5(35.2)	-	17.9(37.6)	1.0
本論	0.6	-	0.4(0.6)	-	0.5(1.0)	1.5(2.2)	

σ (MAX)

#### 4.4.4 TS を用いた計測方法のまとめ

工場内では，計測時間が限られるため精度を維持したまま効率的な作業手法が求められる．特に，計測ターゲットの設置にかかるため，計測ターゲットを最初の工程で設置して最後まで同じ場所を計測することが効果的であった．さらに，L字ターゲットを設置することでTSの設置回数を減らすことで作業を効率化できた．

計測精度の向上としては，計測ターゲットの設置誤差を除去するため，計測ターゲットを一度設置したら最後まで外さないことが大切である．工場内のような狭く計測対象までの距離や角度が保てない場合は，L字ターゲットの使用が効果的であった．本論の計測方法と計測精度を用いることで，維持したままTSの設置回数を最低限にすることで作業効率を上げることができた．さらに，計測対象内に基準があるので計測機器の設置誤差が除去することが可能となった．

## 4.5 計測結果の解析方法

### 4.5.1 変形量の可視化

各工程前後の変形量と変形方向を表現する場合に、各計測点の部材内の空間的な位置を認識できる表現が必要である。そのため、水平方向の変形量は縦方向と横方向の変形量を合わせた『ベクトルの向き』で表現した (Fig. 4-12)。高さ方向の変形量は、完成時の上方向 (Upper) と下方向 (Deck) の変形を色で分けて、変形量を円の直径で示した『円の大きさ』で表現した。

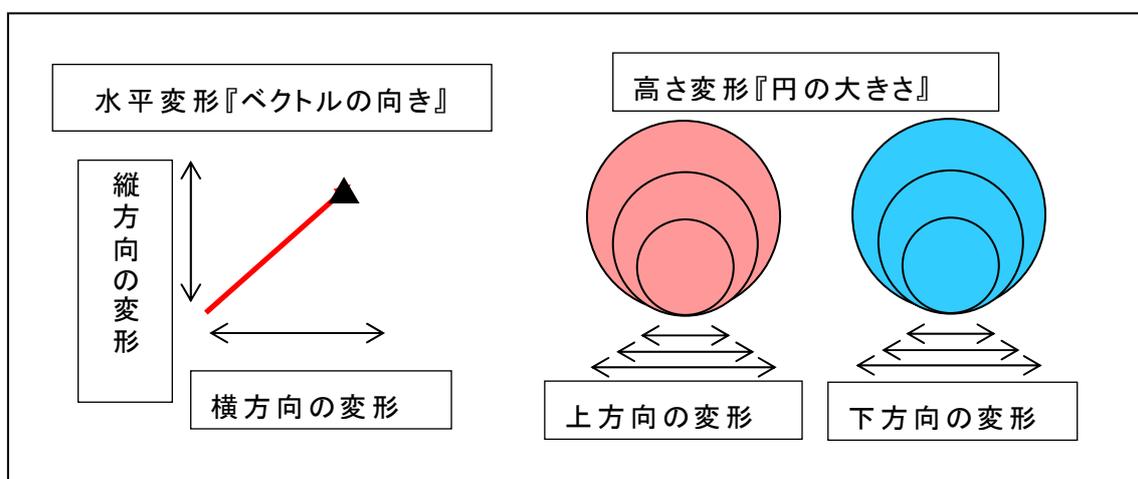


Fig. 4-12 変動量の表現方法

### 4.5.2 計測結果抽出のための位置合わせ

これまでの研究では、最終成果に対して TS の計測結果と CAD モデルの比較が行なわれている。本論では、各溶接工程を追跡的に調査するため、複数時期の計測結果を位置合わせする必要がある。計測結果の位置合わせ作業について、検討結果を以下に記載する。

### 4.5.3 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. 4-13 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、4 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。

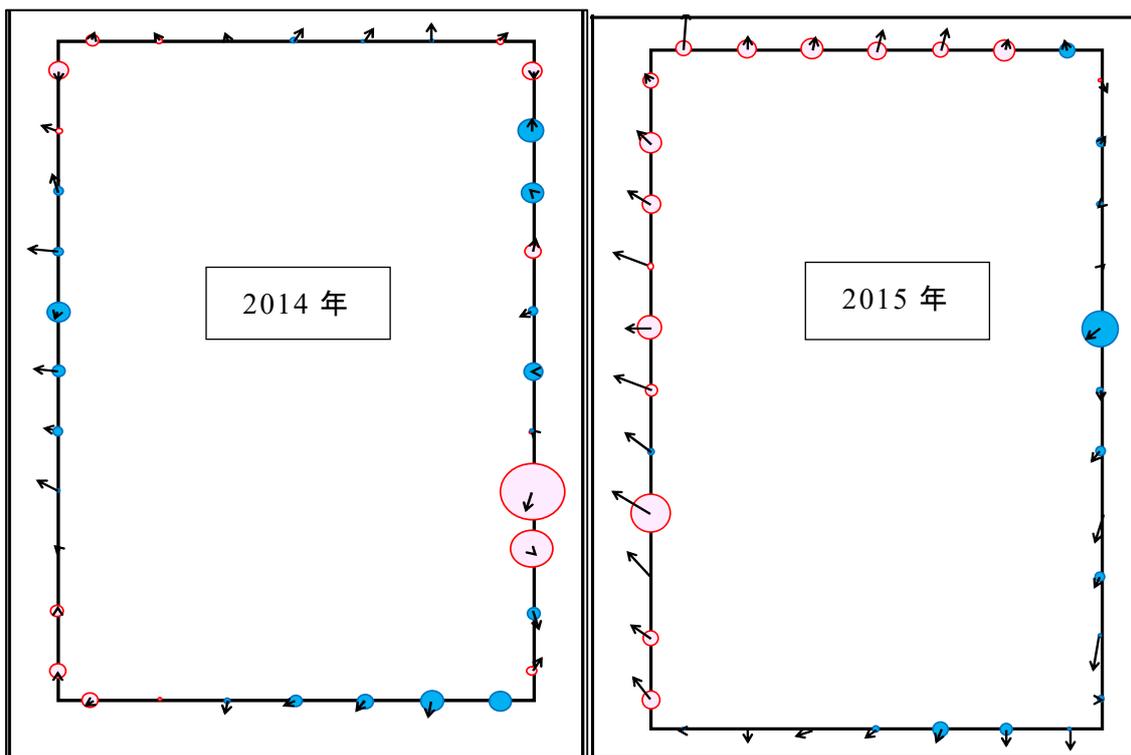


Fig. 4-13 計測結果（2014 年/2015 年）と CAD モデルの比較

#### 4.5.4 計測結果同士の位置合わせ

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内で変形が少ないと想定される四隅を基準とし、計測データに座標変換を実施して変形を比較した。座標変換に用いた変換用基準点は端部の3点として、回転座標変換<sup>25)</sup>(2)を実施した(Fig. 4-14)。座標変換の基準点をある片側ブロック(例:ブロック I (Center/Fore))で実施した場合に、逆側のブロック(例:ブロック II (Side/Aft))の変形が正しく表現されなかった(Fig. 4-15)。これは、変換用基準点の変形量が大きい場合に、逆側のブロックにおいて基準点の変形量が影響して相対的な変形がわからなくなるためである。そのため、座標変換をCenter/Fore面(ブロック I)とSide/Aft面(ブロック II)で別々に実施した。この場合の変化量とは、変換用基準点を中心とした相対的な変化となるため、変換用基準点とした6点については時系列的な変化を比較することができない。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2)$$

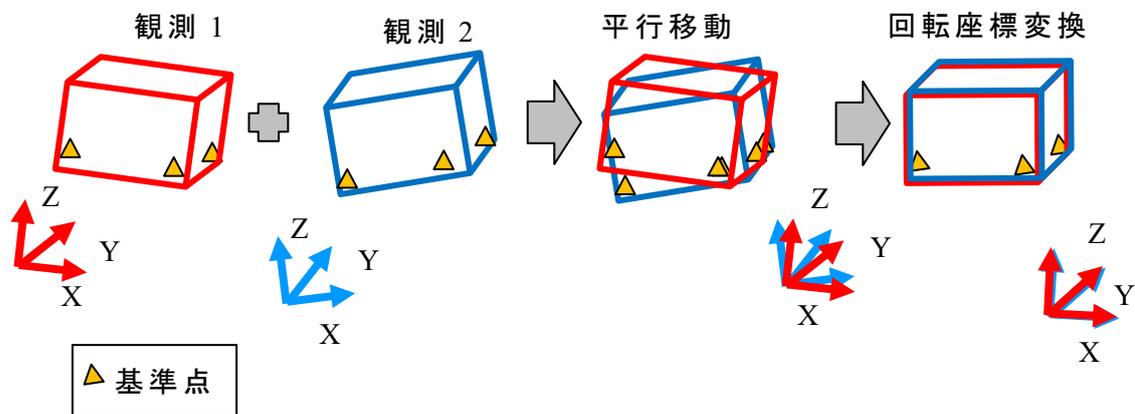


Fig. 4-14 座標変換概念図

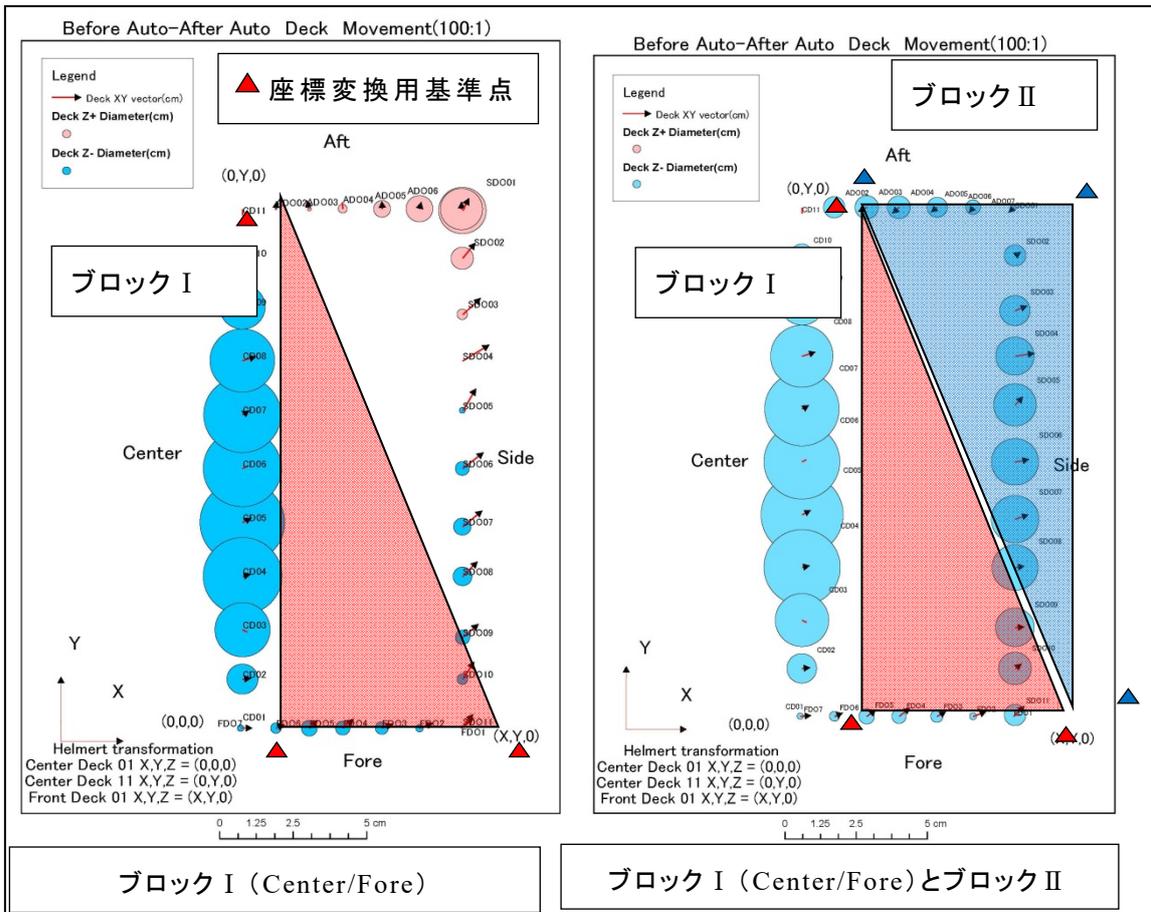


Fig. 4-15 座標変換の比較

## 4.6 計測結果と考察

### 4.6.1 計測結果の比較

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、[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

### 4.6.2 工程間の変形量

各溶接工程における変形量を Fig. 4-16～Fig. 4-19 に示す。

#### ① [A]自動溶接前/[B]自動溶接後の比較 (Fig. 4-16)

自動溶接はハッチカバー内部のロンジ材に沿って実施されており、全工程の中でも最も入熱量が大きく、収縮による変形が大きかった。Center 側と Side 側では、中央部付近ほど高さ方向の変形（面内変形）が大きかった。Fore 側と Aft 側も高さ方向の変形が大きく、さらに水平方向は天板部の方が開口部よりハッチカバーの中心に向かう変形量が大きく、天板部が狭くなるような面外変形が発生した。

Center 側が他の面よりも高さ方向の変形が大きかったのは、Center 側は 1 枚板で作成されていたため、2 枚板で作成されているほかの面より変形が大きかったと考えられる。天板部の面外変形が大きかったのは、ロンジ材が天板部と溶接が実施されるため、天板部の収縮が大きかったためである。

#### ② [B]自動溶接後/[D]手動溶接後の比較 (Fig. 4-17)

手動溶接では、自動溶接で生じた変形が元の形に戻るよう変形が生じた。Center 側と Side 側で高さ方向の変形が大きく①と逆方向に変形した。Aft 側と Fore 側の水平方向の変形は少しではあるが①と逆方向に変形した。Center 側と Side 側の高さ方向の変形は、ハッチカバーの外枠が手溶接で溶接されたために

①で生じた変形を元に戻すように変形したと考えられる。また、Fore側の支持位置が端部となったため、Aft側とFore側の水平方向がそれぞれ外側に向かって変形し、Fore側の高さがあがったと考えられる。

### ③ [A]自動溶接前/[F]反転溶接後（歪取溶接前）の比較（Fig. 4-18）

歪取作業の作業量を算出するため、自動溶接前と歪取溶接前である反転溶接後を比較した。

高さ方向は自動溶接時の変形量が残っている状態であった。特に、1枚板で作成されているCenter側の変形が一番大きかった。水平方向は側面に沿って短くなる変形がみられた。これは入熱によりハッチカバーが全体的に収縮するためと考えられる。

### ④ [F]反転溶接後/[G]歪取溶接後の比較（Fig. 4-19）

歪取り工程で歪みを取った変形量を把握するため、歪取り溶接前後を比較した。歪取作業では作業者が水準儀や水糸を使用して歪み量を計測し、部分的に入熱する方法で歪取を実施していた。Center側とSide側は、高さ方向が①と逆方向に変形した。Aft側はそれに伴い水平方向が内側に変形したと考えられる。

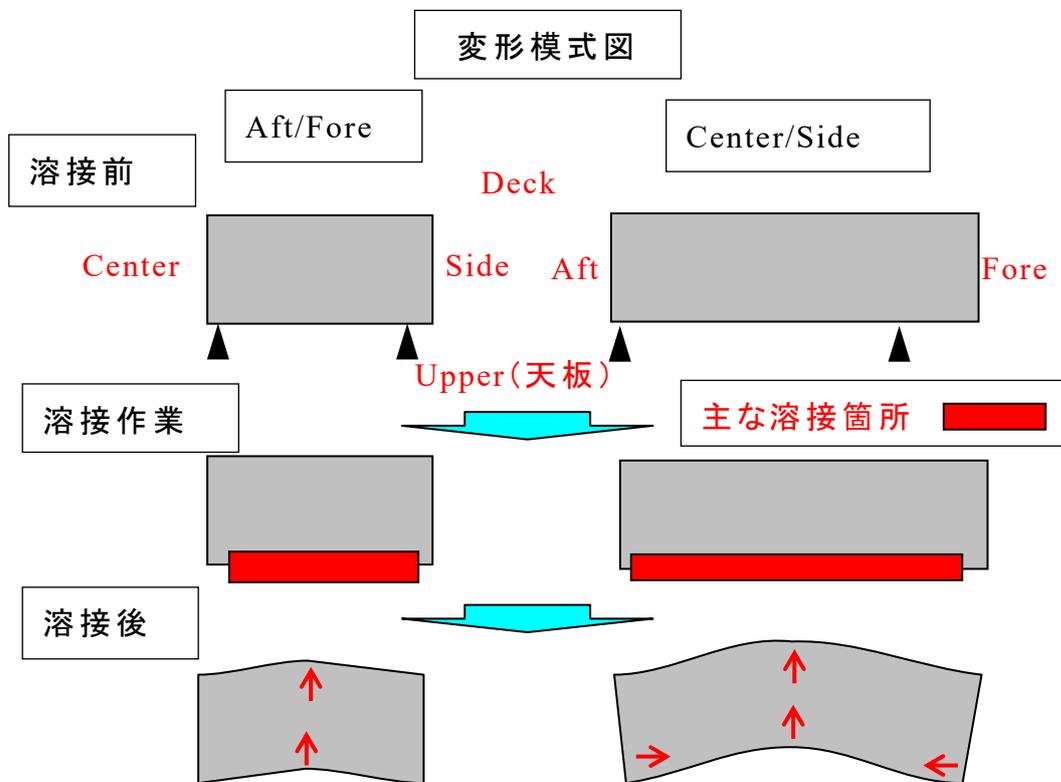
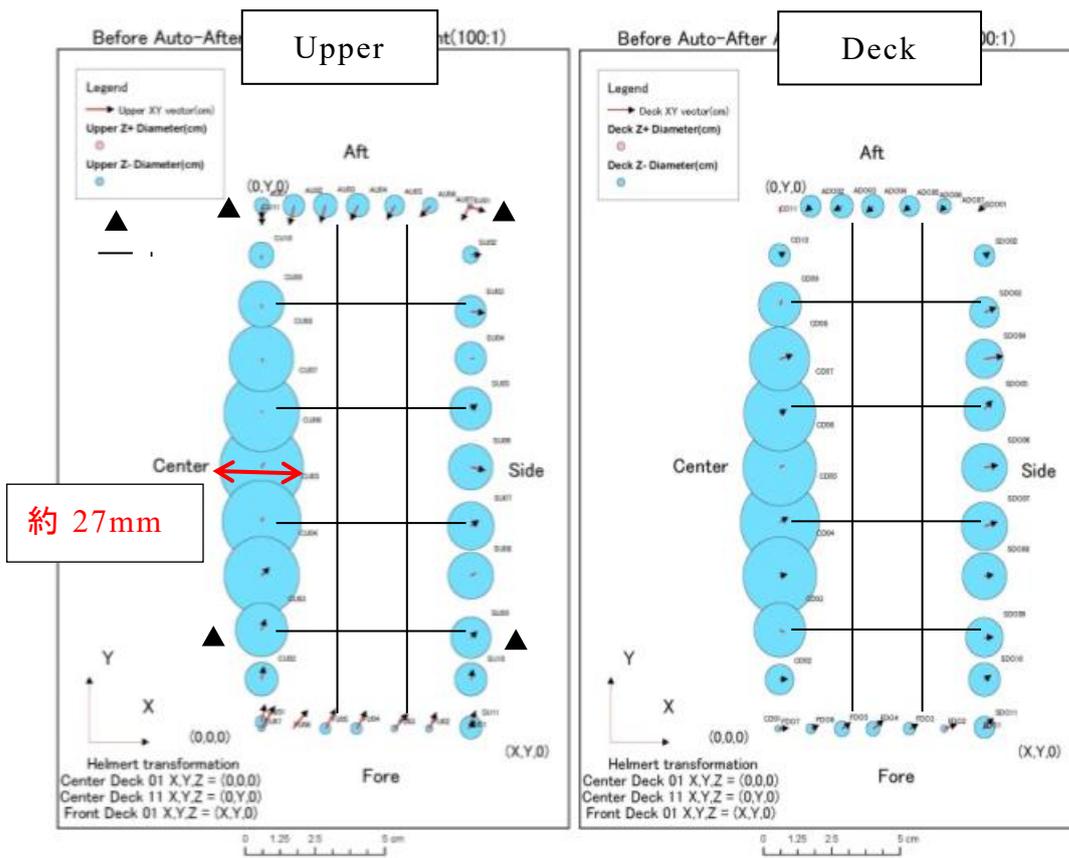


Fig. 4-16 [A]自動溶接前/[B]自動溶接後の比較

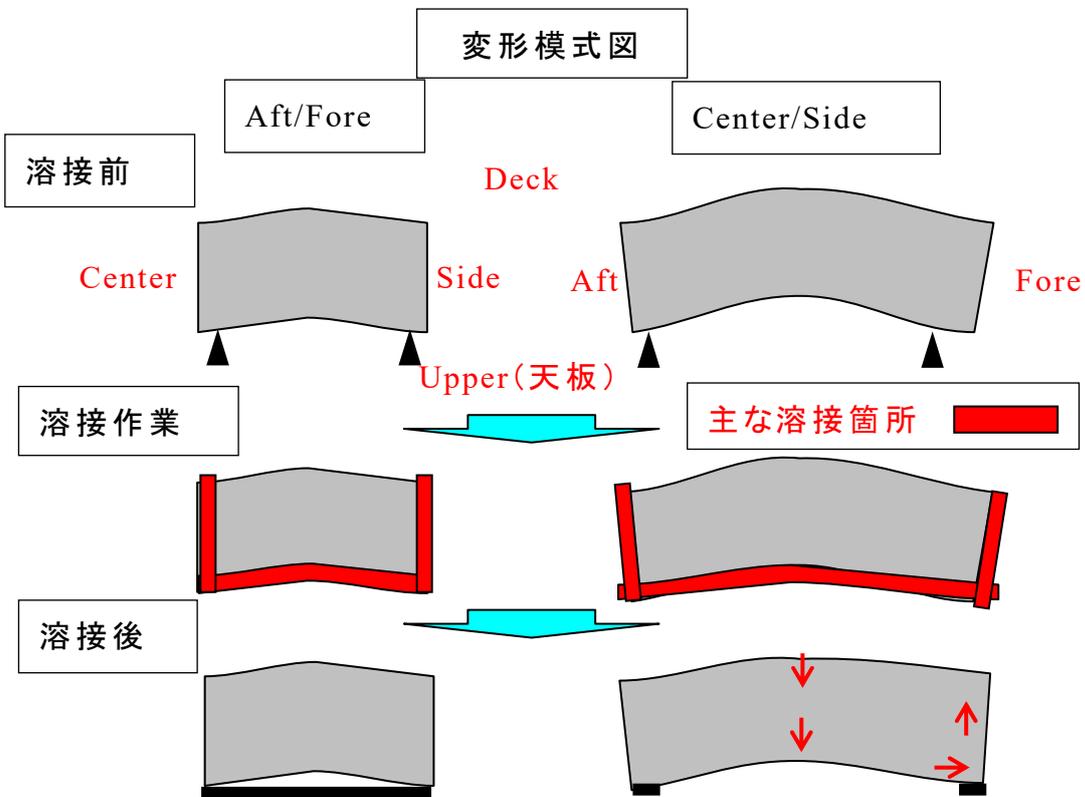
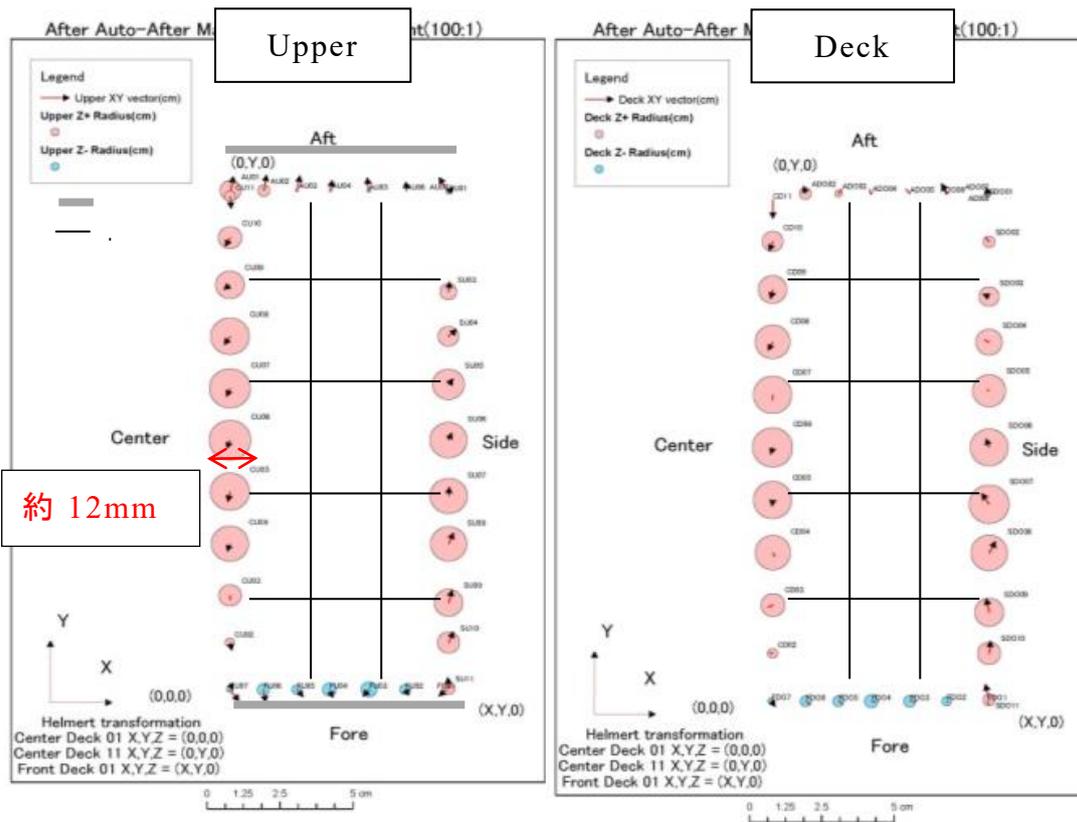


Fig. 4-17 [B]自動溶接後/[D]手動溶接後の比較

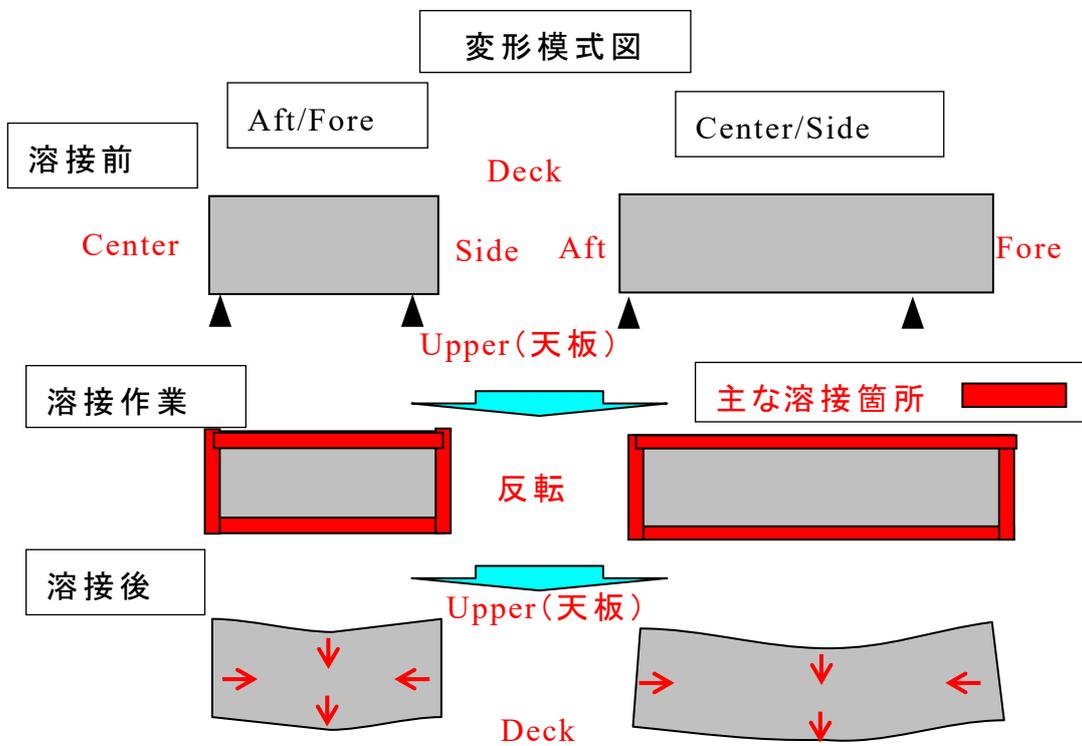
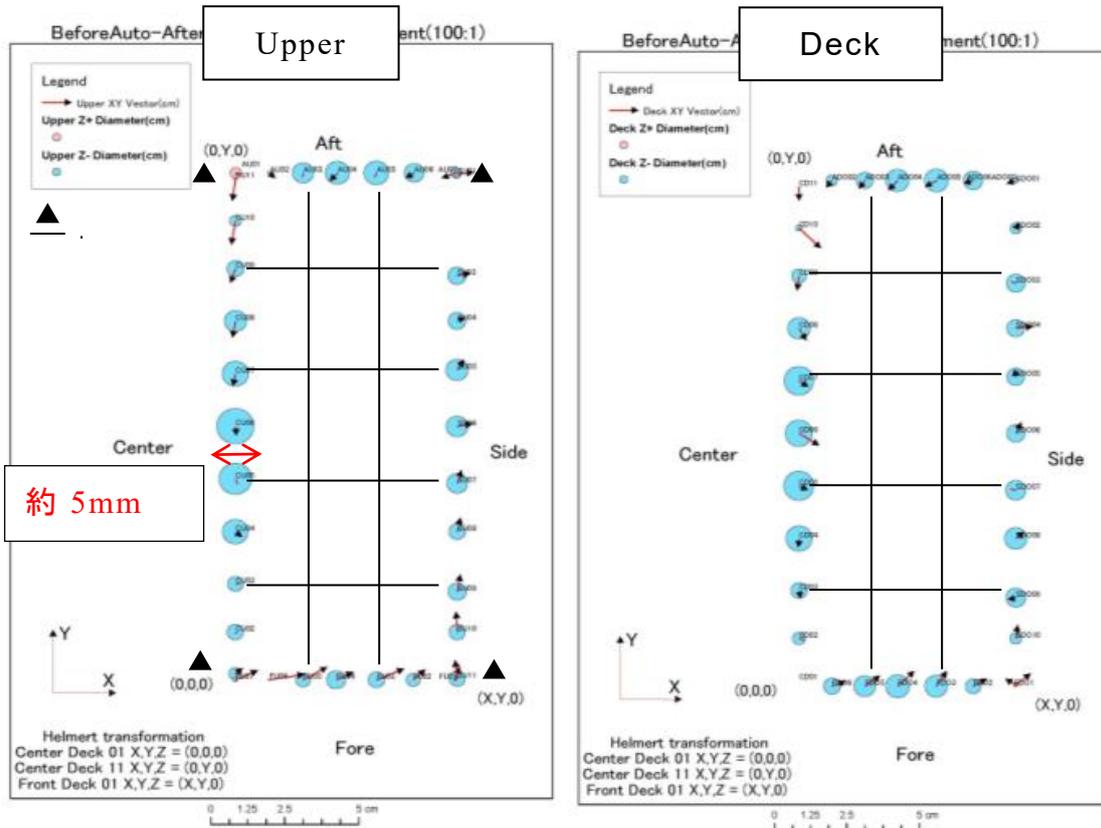


Fig. 4-18 [A]自動溶接前/[F]反転溶接後（歪取溶接前）の比較

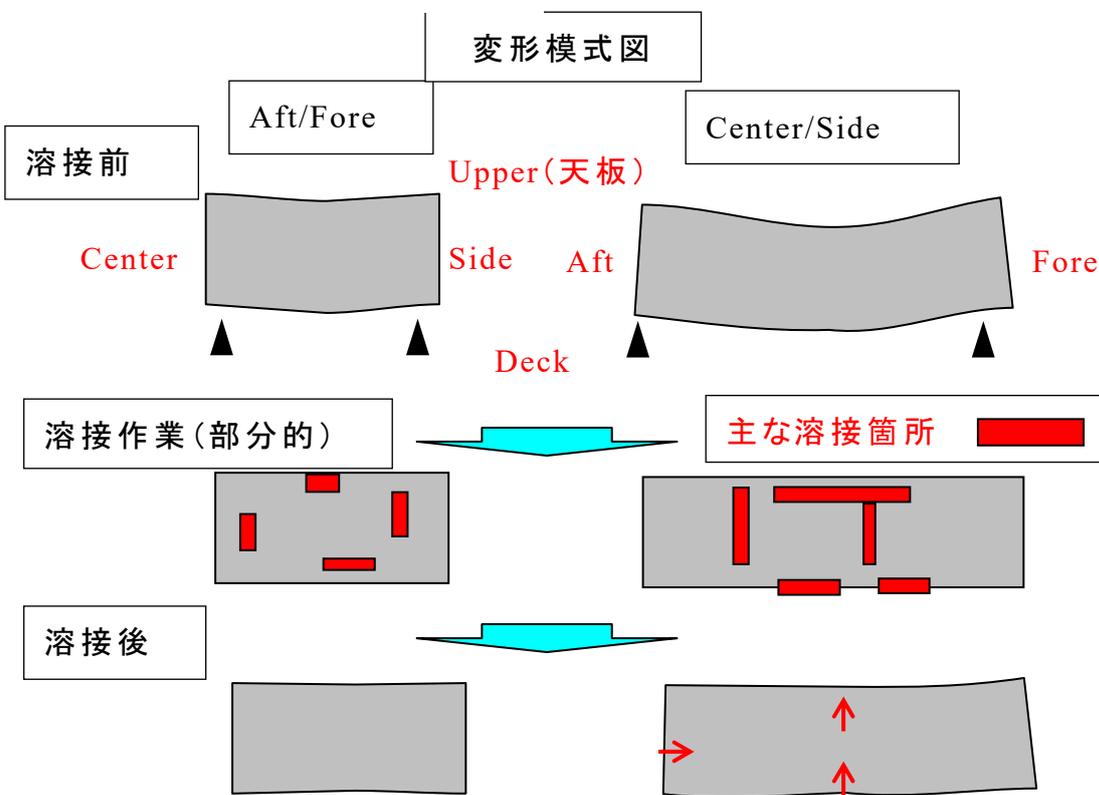
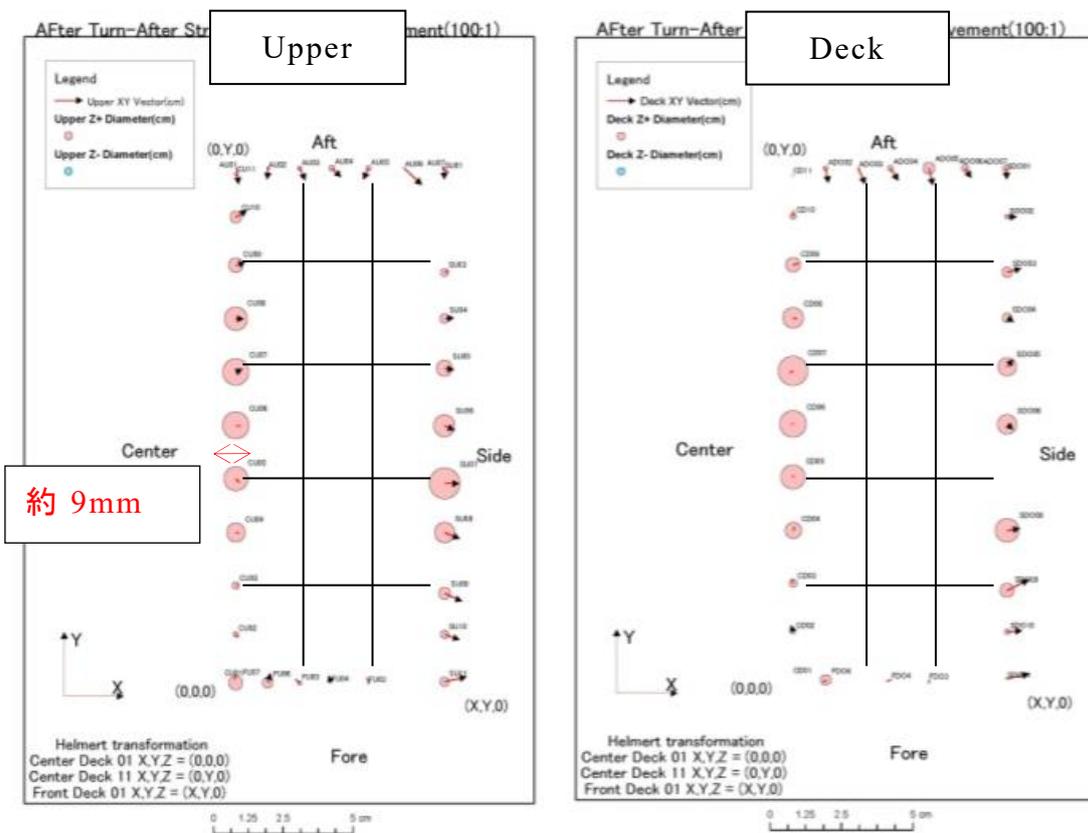
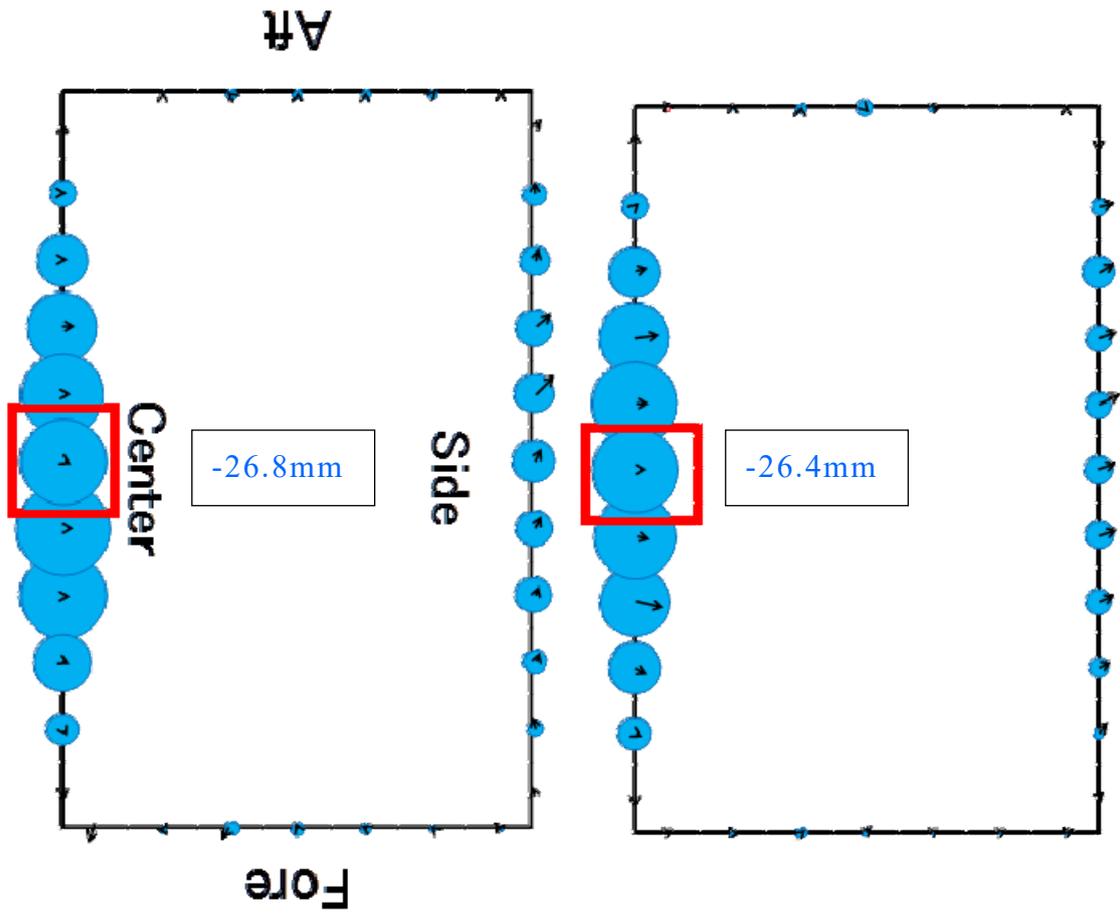


Fig. 4-19 [F]反転溶接後/[G]歪取溶接後の比較

#### 4.6.3 2014年と2015年の比較

2014年と2015の結果を Fig. 4-20～Fig. 4-23 に示す。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。比較結果から以下の知見が得られる。

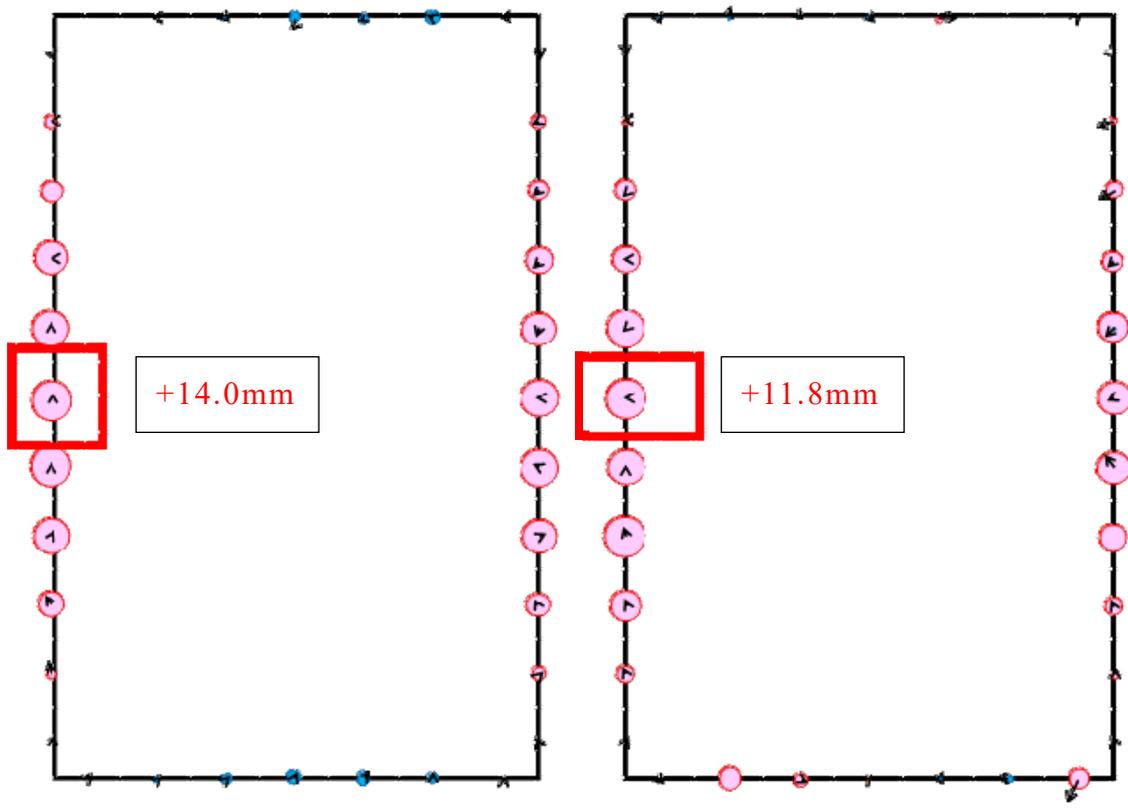
- a)(3)自動溶接では Deck 側に大きく変形し、特にセンター側の変形が大きい (Fig. 4-20)。Upper 側で多くのロンジが溶接されること、およびこの段階ではセンター側の剛性が低いことから、計測結果は妥当と考えられる。なお、図中の A 点における Deck 方向への変形量は -26.8mm であった。
- b)(4)手動溶接 1 及び(6)手動溶接 2 では、Upper 側への変形が発生している (Fig. 4-21, Fig. 4-22)。(4)手動溶接 1 及び(6)手動溶接 2 で実施される溶接箇所を考慮すると、この変形も妥当である。なお、A 点の変形量は(4)手動溶接 1 が 14.0mm、(6)手動溶接 2 が 3.3mm であった。
- c)(7)歪取では、Upper 方向への 9.5mm 変形させている (Fig. 4-23)。上記 a)、b) の変形量の差が 9.5mm 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 (Fig. 4-24)。また、2015年の A 点の変形量は、(3)自動溶接が 26.4mm、(4)手動溶接 1 が 11.8mm、(6)手動溶接 2 が 5.9mm 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より、(3)自動溶接の変形が最も大きいと考えられる。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 (Fig. 4-25)。また、2014年と2015年の溶接工程がほぼ一致していることから、完成品の個体差が溶接工程で発生することが少なく、もし個体差が発生する場合は、溶接工程以外の工程 (NC マーキング・切断や仮溶接) が要因と考えられる。



2014年計測

2015年計測

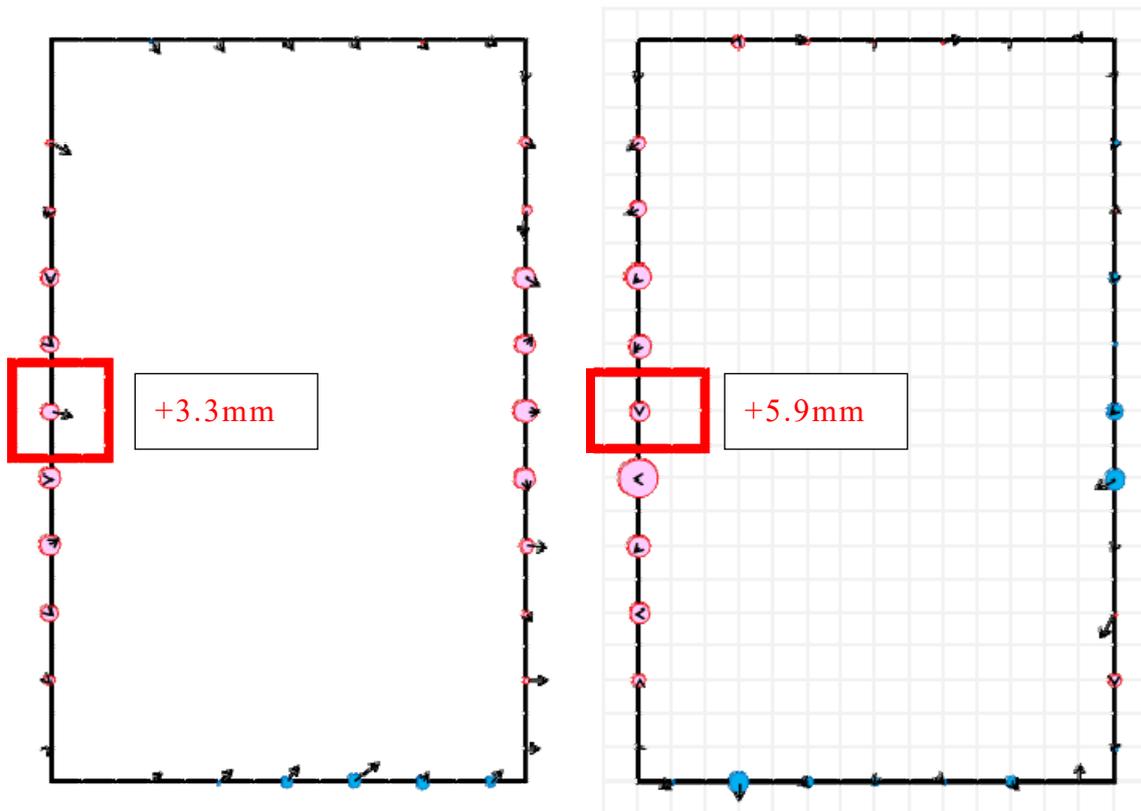
Fig. 4-20 自動溶接前後



2014 年計測

2015 年計測

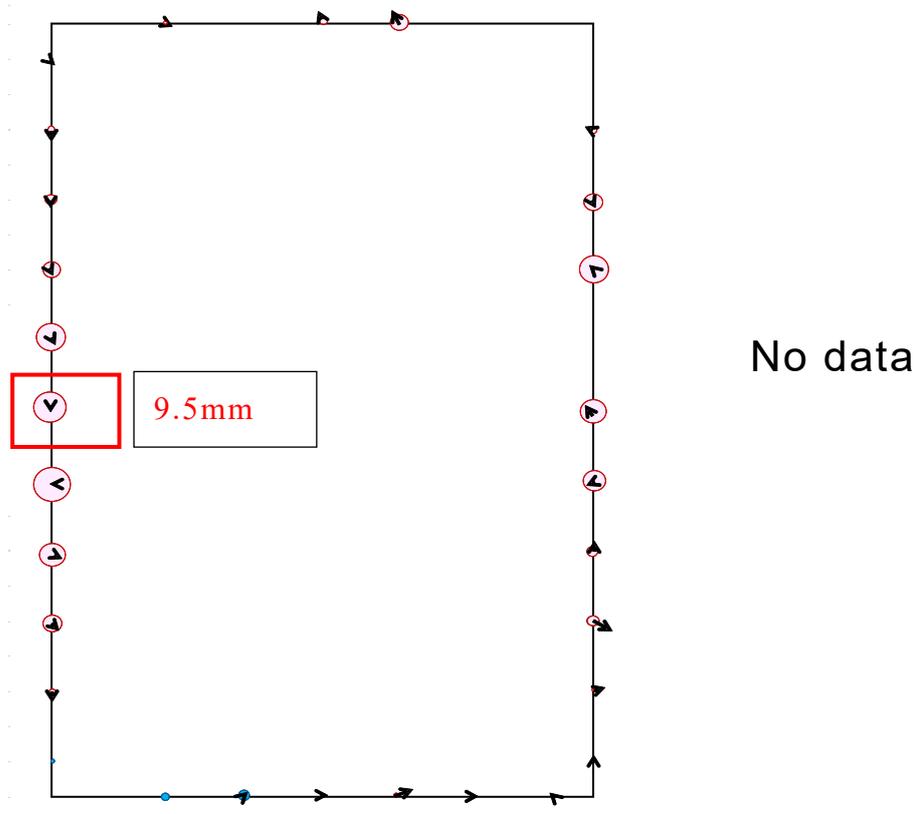
Fig. 4-21 手動溶接 1 前後



2014年計測

2015年計測

Fig. 4-22 手動溶接 2 前後



2014 年計測

2015 年計測

Fig. 4-23 歪取溶接前後

	[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]
	3) 自動溶接 → 4) 手動溶接 1 → 6) 手動溶接 2 → 7) 歪取溶接						
2014	-26.8mm	14.0mm(-12.8mm)		3.3mm(-9.5mm)		9.5mm	
2015	-26.4mm	11.8mm(-14.6mm)		5.9mm(-8.7mm)		NoData	

Fig. 4-24 計測点 A における 2014 年と 2015 年の変形量の推移



Fig. 4-25 仮組み溶接の状況

## 4.7 TS のまとめ

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明らかにした。さらに、実際の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にあたり、計測手法及び解析手法を提案した。そして、溶接工程ごとのハッチカバーの変形量を定量的に把握した。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の影響が大きいことを示した。そして、これまで認識されてきた計測誤差よりも、10倍以上誤差があることを明らかにした。

今回は作業時間に制限があったため、精度を維持したまま計測時間を短縮する計測方法を提案した。計測ターゲットは最初に反射ターゲットを設置してそれを全工程で計測することで、計測ターゲットの設置時間と設置誤差を除去した。さらに、L字ターゲットを用いることで計測精度を維持したまま広い範囲の計測が短時間で実施可能となった。また、ハッチカバー内の端部測定点を座標変換の基準点とすることは、計測器の設置誤差を削除することが可能となり、工程ごとの変形傾向の比較に有効であった。具体的には、座標変換をブロックごとに実施することで、変換用基準点が大きく変形したときでも、基準点から離れた計測点の変形量を正しく表現することができた。

変形量の可視化については、高さ方向と水平方向の変動を同じ図面の中で表現することで、空間的な変形を把握することができた。定性的には複数の観測点で測定された TS データを、それぞれ異なる独立した座標系で管理することで、工程ごとの変形傾向を把握できた。定量的には mm オーダーの変形が測定可能であることを確認した。

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により、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、自動溶接前に逆歪を 10mm 実施することで、歪取工程の作業が低減できる可能性を示した。また、2014 年と 2015 年の溶接工程がほぼ一致していることから、完成品の個体差が溶接工程で発生することが少ないと考えられる。もし、個体差がある場合は溶接工程以外の工程（NC マーキング・切断や仮溶接）が要因と考えられる。

## 5 TLS を用いたハッチカバー計測

### 5.1 本計測で使用した機器

TLS は大きく分けて広範囲に及ぶ遺跡や大型の建築物の計測に適している飛行時間型（タイム・オブ・フライト方式）と近距離を高精度かつ高速にスキャンする位相差方式（フェイズシフト方式）の 2 つの計測方法がある<sup>9)</sup>。今回は、対象物までの距離が最大 15m と近距離であり、かつ mm レベルの精度を必要となるため、フェイズシフト方式の Faro 社製 Focus3D を使用した（Table 5-1）。工場内では溶接作業が行なわれており、計測には 1 溶接工程につき 2 時間ほどしか計測時間が取れなかった。本計測の計測パラメータは精度と計測時間を考慮して、1 計測が 10 分程度となるように分解能を「1/4:10m 先で 6mm 間隔」とし、品質を「x4: 1m 先で最大較差 1.35mm」としたが、その精度と計測時間の関係について予備実験として検証する必要がある。Faro 社製 Focus3D の計測パラメータは分解能と品質で設定が可能で、分解能は単位面積当たりの取得する点数=点密度で、品質は定点の繰り返し数で繰り返し測定しそれらを 1 点に平均化（2 の(品質値-1)乗：例 x4=2<sup>3</sup>）した値である（Fig. 5-1）。

Table 5-1 TLS の器械スペック

計測年度	2014 年		2015 年	
機種名	FARO 社 Focus3DS120		FARO 社 Focus3DX330	
距離範囲(m)	0.6~120		0.6~330	
測定速度(p/s)	最大 976, 000		最大 976, 000	
範囲誤差	±2	mm	±2	mm
範囲ノイズ(90% 反射率)	10m 0.6mm	25m 0.95mm	10m 0.3mm	25m 0.3mm
偏向ユニット	垂直 305°	水平 360°	垂直 300°	水平 360°
垂直/水平 解像度	垂直 0.009 度	水平 0.009 度	垂直 0.009 度	水平 0.009 度
ビーム広がり	標準 0.16mrad(0.009°)		標準 0.19mrad(0.011°)	
ビーム径(出口)	3.8	mm	2.25	Mm
二軸補正センサ	精度 0.015	測定範囲±5	精度 0.015	測定範囲±5

スキャンパラメーター(品質)

例) 解像度1/4で約1m先の球ターゲットをスキャン

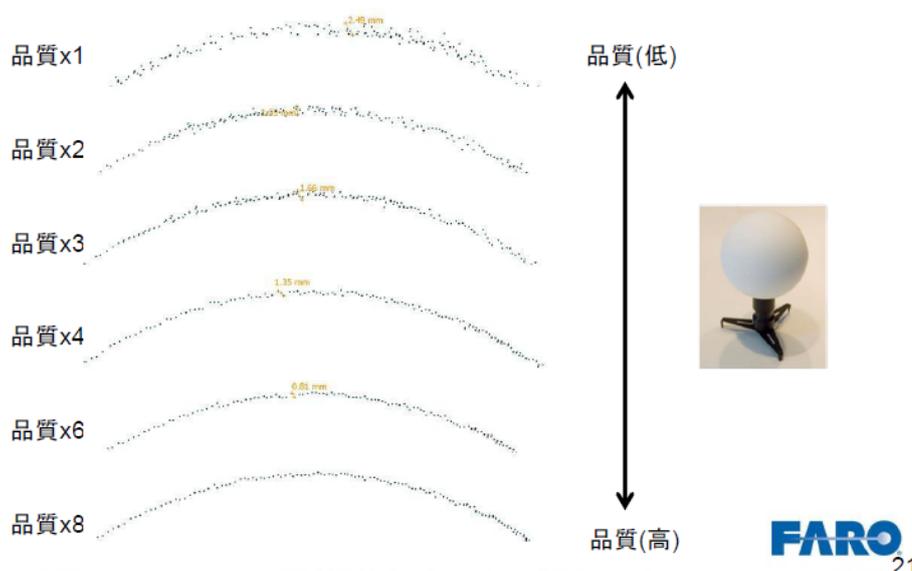


Fig. 5-1 スキャンパラメーターによる精度の変化

TLS の誤差要因<sup>26)</sup>と本計測環境から想定される内容をまとめた (Table 5-2)。計測対象は鉄板でできており表面の材質が全体的に均一となっているため、材質の違いによる精度への影響が少ない。また、工場内は気象条件が安定していた。本計測のような環境下では距離と入射角度が精度に大きく影響すると想定される。

Table 5-2 TLS 計測の誤差要因と計測環境

計測対象条件		計測気象条件		計測機種条件	
建築物・ 構造物	船体のブ ック:安定	天候, 温 度, 湿度, 気圧	冬季の屋内: ほぼ安定	機器の軸, 回転角	同一機材を使 用
材質	鉄板	照度	屋内のため ほぼ安定	キャリブレ ーションの点 検方法	計測前に実施
色調	塗装前	その他		作業手順	ほぼ安定
表面 状況	フラット			波長, スポ ット径	距離と入射角 度により変化
入射角	近接のため 場所により 大きく変化			取得点密度 と有効範囲	距離と入射角 度により変化
その他	対象までの 距離が大き く変化			反射率と取 得率	距離と入射角 度により変化

## 5.2 計測誤差の整理

### 5.2.1 TLS の計測精度に関する既往研究

TLS の計測精度に関する既往研究は、道路舗装面に対して直接水準と TLS の精度を比較して、1cm 以下の精度を有しているとした報告がある<sup>27)</sup>。また、公共測量作業規程へのマニュアル作成を目的として、各メーカーの TLS の特徴と精度に影響を与える項目を整理して実証実験を行なった報告がある<sup>26)</sup>。近距離計測の報告例としては、2～30m の距離について複数のフェイズシフト方式の TLS を使用して、計測距離とビーム径の関係から精度比較を実施した例がある<sup>28)</sup>。本研究対象の工場内では、近距離 (0.5m～15m) となる点と、入射角度 (TLS から対象物へのレーザーがあたる角度。TLS のレーザーに対して計測対象面が平行に近いと入射角が浅い。) が非常に浅くなる (10 度以下) 点から、このような環境下における計測時の精度について検証する必要がある。

### 5.2.1 TLS の計測誤差について

TLS の計測時の誤差は、TS と同様に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。TLS についても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機械的誤差

TS 同様に計測機器自体が固有に有している誤差である。

#### ②計測器の設置に起因する誤差

TS 同様に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の設置に起因する誤差と定義する。

#### ③計測パラメータ

TLS の計測時に 1 点の精度と点密度を計測パラメータとして変更できる。

#### ④合成精度

異なる計測結果を1つのデータとして扱うための合成作業を実施するが、合成処理するための方法によって精度が変化する。

#### ⑤計測対象までの距離と入射角度

計測対象までの距離と入射角度によって1点の精度が変化する。特にメーカー推奨の入射角度は60度となっているが、本計測では60度以下となる計測が多く発生する。

計測パラメータ、対象までの距離によって点間隔と点密度が変化する。

#### ⑥エラーデータ

TLSで計測した場合に端部のノイズデータや不要箇所のデータなどが取得される。

本計測のような環境下では、②,③,④,⑤,⑥が精度に大きく影響すると想定されるたにより検証を実施した。

## 5.3 計測精度の検討

### 5.3.1 TLSの予備実験について

TLSの計測精度の検証に関する予備実験は2回実施した。予備実験①では、計測器の設置として同じ場所に2回設置した計測結果の差分を確認した。さらに、様々な計測パラメータの組合せによる点間隔、点密度、奥行方向の誤差を検証した。高精度な計測パラメータを用いることが好ましいが、実際の計測作業では、計測可能な時間が限られてしまうため、計測時間と精度の関係において適切なパラメータを決定する必要がある。また、全体の溶接による歪みを把握するためには、複数の地点から計測して合成作業を実施する必要がある。しかし、合成を実施するにあたり合成するための対応点の設定とTLSの設置回数が計測時間に影響してしまう。

予備実験①ではハッチカバー計測において最適な計測パラメータを決定するとともに、合成方法を検討した。予備実験②では、その計測パラメータの距離と角度による点間隔、点密度、奥行方向の誤差を検証した。最後に、エラーデータについて実際の工場内で発生した状況を整理した。

### 5.3.2 実験方法①（計測器の設置、計測パラメータ、合成の検証）

計測誤差の②、③、④を確認するため、広島大学内の実験施設に設置された定盤に対して計測ターゲットを設置して計測を実施した（Fig. 5-2）。計測ターゲットとTLSの設置位置については、TSを用いてそれぞれの座標を計測した。実際の溶接工程を想定すると計測可能な時間が限られるため、TLSの計測パラメータと計測時間についても記録した（Table 5-3）。

各点の色と内容を以下に示す。

橙色：TLS設置地点

水色：計測ターゲット

灰色：TLS合成用ターゲット

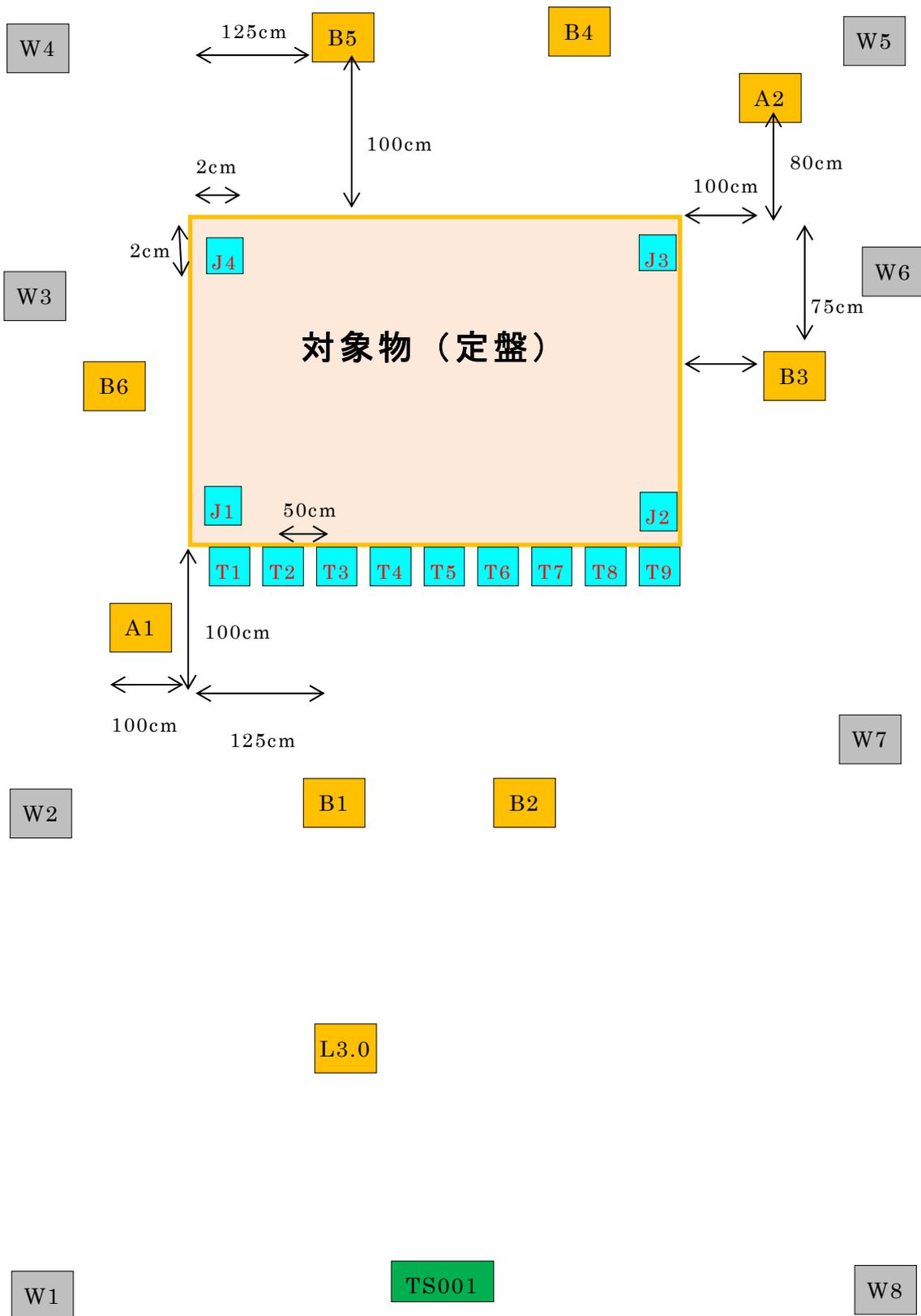


Fig. 5-2 予備実験の現地環境

Table 5-3 計測パラメータと計測時間

No	観測点名	分解能	品質	観測時間
1	L3.0	1/4	1x	0:02
2	L3.0	1/2	1x	0:04
3	L3.0	1/1	1x	0:16
4	L3.0	1/8	2x	0:02
5	L3.0	1/4	2x	0:03
6	L3.0	1/2	2x	0:08
7	L3.0	1/8	4x	0:10
8	L3.0	1/4	4x	0:03
9	L3.0	1/2	4x	0:30
10	L3.0	1/8	8x	0:31
11	L3.0	1/1	4x	1:58

検証方法は以下の2通りで実施した。

- (1) TLS の設置に起因する誤差を検証するため、TLS を L3.0 に 2 回設置して同じパラメータで計測した。
- (2) TLS の計測パラメータによる計測精度の違いを検証するため、TLS を L3.0 に設置したまま計測パラメータである分解能と精度の組み合わせを変えて計測した。
- (3) TLS の合成の精度検証を実施するため、2 パターンに分けて TLS を設置した (Fig. 5-3) 。
  - ① A1～A2：最小限の設置方法による計測を検討するため、対象物の対角に 1 つ設置した。
  - ② B1～B6：対象物を囲むように短編はそれぞれ 1 箇所、長辺にはそれぞれ 2 箇所、あわせて 6 箇所に設置した。

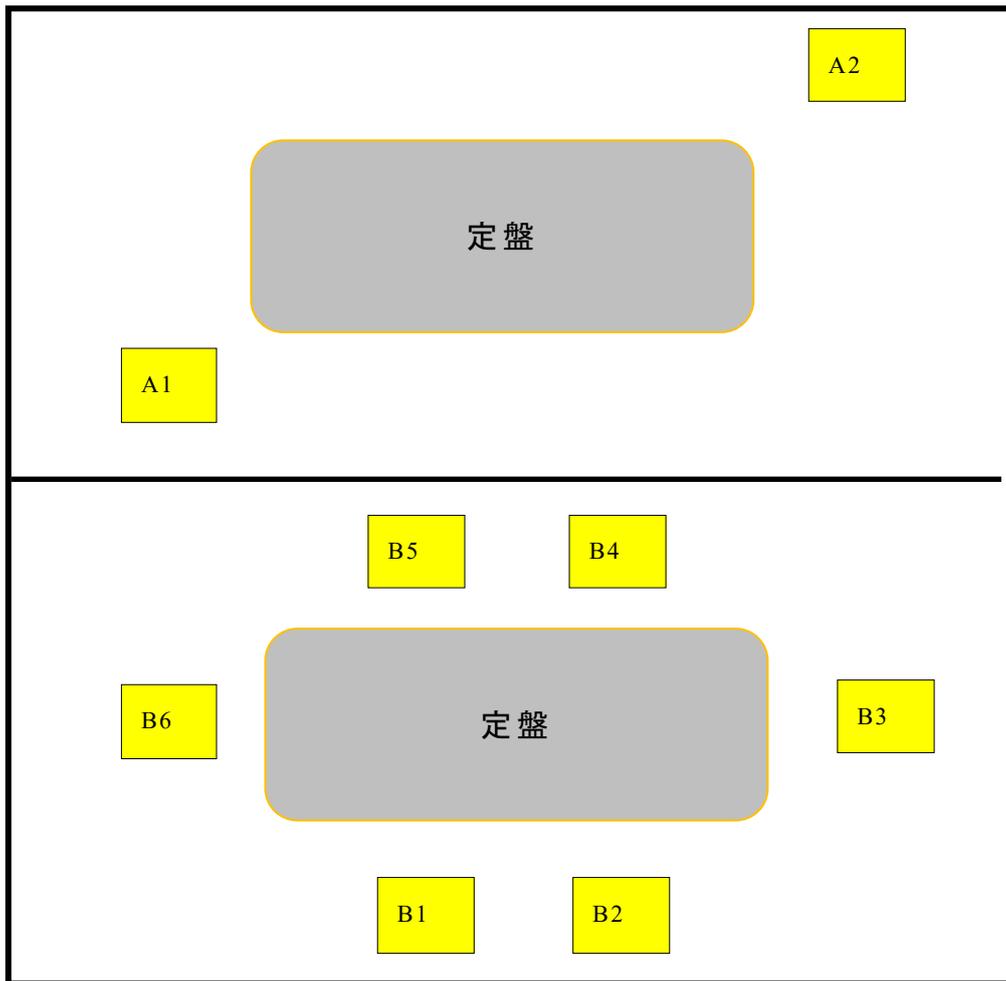


Fig. 5-3 合成実験の配置図

### 5.3.1 計測器の設置に起因する誤差

約 3m はなれた計測点に TLS を 2 回設置して計測し，計測値の較差を誤差として検証した．実験は各入射角度における水平と奥行の精度を確認した．角度に関係なく較差が水平-10mm,奥行 10mm 発生した (Table 5-4)．これは，TLS には TS にある高精度な求心や整準台がないため，基準点の上に機材を再設置する場合の再現性が低いと考えられる．

Table 5-4 2 回計測時の較差

2 回計測の較差 (m)						
角度 (°)	90		60		45	
方向	水平	奥行	水平	奥行	水平	奥行
1 回目	0.2463	3.0139	1.7443	3.0149	3.2321	3.0139
2 回目	0.2569	3.0035	1.7545	3.0047	3.2421	3.0035
較差	-0.0106	0.0104	-0.0102	0.0102	-0.0100	0.0104

### 5.3.2 計測パラメータによる誤差の実験

約 3m はなれた計測点 L3.0 において計測パラメータである分解能と品質を変化させて計測を実施した。計測データは入射角度が異なる T3 (90°), T6 (60°), T9 (45°) に 75cm×75cm のターゲット (Fig. 5-4) を設置して平均値より計測精度を確認した (Fig. 5-5)。TS で L3.0 からの T3,T6,T9 の距離と角度を計測した結果を Table 5-5 に示す。

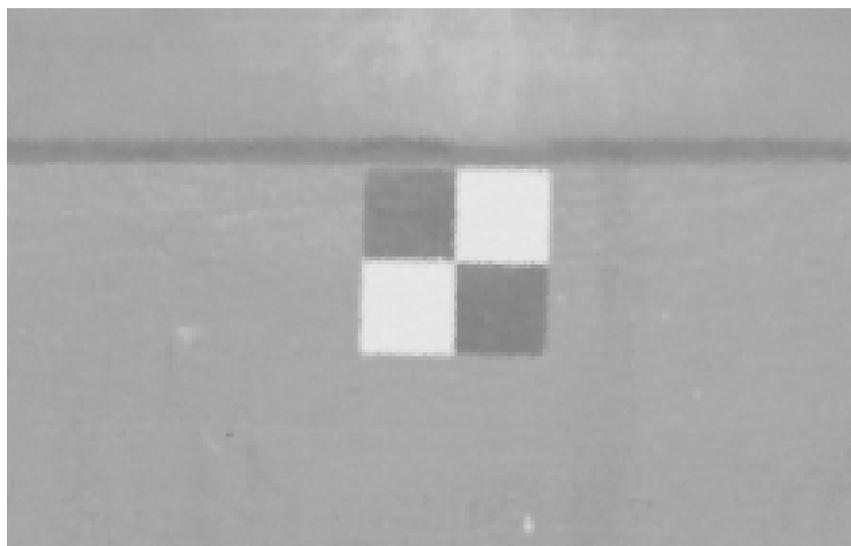


Fig. 5-4 計測ターゲット

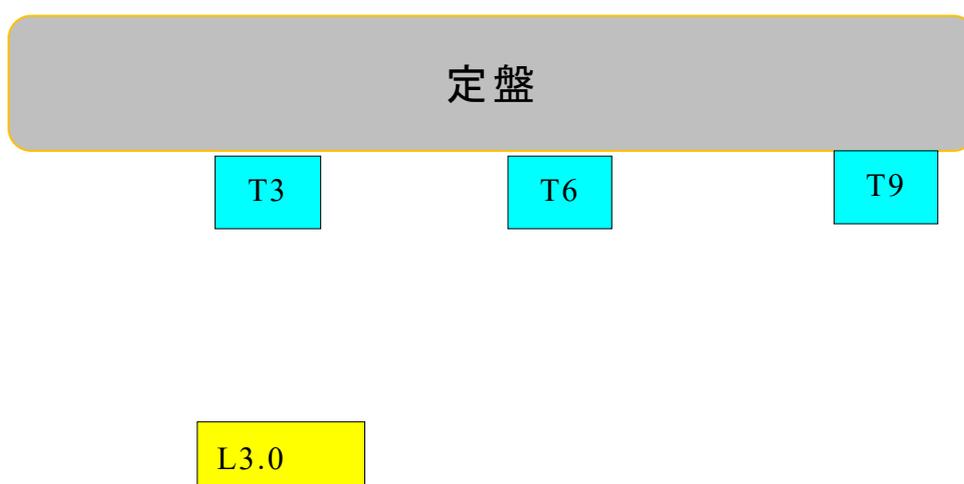


Fig. 5-5 計測パラメータによる実験の模式図

Table 5-5 L3.0 からの計測ターゲットの距離と角度

計測点	X	Y	$\Delta$	入射角度
T3	0.24	3.01	3.02	90
T6	1.73	3.01	3.48	60
T9	3.22	3.01	4.41	45

### 5.3.3 計測パラメータによる誤差の結果

入射角度による影響を確認するため、最も精度が高いと想定される入射角度が 90 度に近い観測点 T3, TLS メーカー推奨の入射角 60 度以内となる観測点 T6, 入射角度が 45 度以下で精度が低下すると想定される観測点 T9 にて精度を確認した。検証方法は、75mm×75mm の計測ターゲット内における平均値をそれぞれ算出し、さらに計測パラメータの精度が一番高いと想定される分解能 1/1, 精度 4x からの差分を誤差とした (Table 5-6)。

奥行方向の誤差は、計測パラメータと入射角度が変化しても平均化した値は  $\pm 0.3\text{mm}$  程度と高精度であった。一方で水平方向の誤差は、入射角度と分解能によって変化した。すなわち、どの計測パラメータにおいても、入射角度が低下 (T3⇒T9) すると精度が低下し、分解能が低下 (1/1⇒1/8) すると精度が低下した。品質 4x において分解能 1/1, 1/2, 1/4 は奥行・水平・垂直ともに計測精度が同等であった。計測時間はそれぞれ 1/1 (1:58), 1/2 (0:30), 1/4 (0:03) であった。計測時間と計測精度より、ハッチカバー計測の計測パラメータは、分解能 4x, 品質 1/4 と決定した。

入射角度による水平方向の誤差の変化は、レーザー光のビーム径が楕円になってしまい正しい反射光が受信できないためと考えられる。また、分解による水平方向の誤差の変化は、点密度の低下により平均化による中心推定が影響している。

Table 5-6 観測点の誤差 (mm)

精度 (mm) 点密度 (//75mm <sup>2</sup> )		8x			4x			2x			1x		
分解能	角度 (ターゲット)	水 平	奥 行	密 度									
1/1	90°(T3)				0.0	0.0	23423				0.1	0.1	22263
	60°(T6)				0.0	0.0	15424				0.9	-0.1	14853
	45°(T9)				0.0	0.0	8142				1.2	-0.1	7777
1/2	90°(T3)				0.0	0.0	5722	-0.1	-0.1	5879	0.4	-0.1	5386
	60°(T6)				0.3	0.1	3820	0.6	-0.1	3952	1.6	-0.2	3764
	45°(T9)				-0.2	0.0	1950	0.8	-0.1	2006	1.9	-0.1	1926
1/4	90°(T3)				0.1	-0.2	1378	0.2	0.0	1426	1.2	-0.2	1179
	60°(T6)				1.0	-0.1	901	0.8	0.2	979	1.4	-0.1	831
	45°(T9)				1.0	-0.2	498	2.5	0.0	467	3.6	-0.2	447
1/8	90°(T3)	-0.1	-0.3	331	0.0	-0.1	329	0.4	-0.1	316			
	60°(T6)	1.0	-0.3	220	0.8	0.0	203	1.6	-0.2	224			
	45°(T9)	-2.5	-0.3	117	2.1	-0.1	116	1.8	0.1	119			

#### 5.3.4 合成の精度

TLS データからエッジ面推定をするために、異なる設置地位置から計測した TLS データの合成処理を実施する。その場合に計測時の点密度や精度によりレーザデータが二重になったり、交差するなどの誤差が発生する。

TLS の配置と計測したレーザデータの合成方法による精度を確認するため、以下の 2 手法にて検証を実施した (Fig. 5-6)。

(1) TLS を対角に配置 : A1,A2

対象の外に配置した計測ターゲットで合成した場合となる。

合成に使用したターゲット : W1~W6

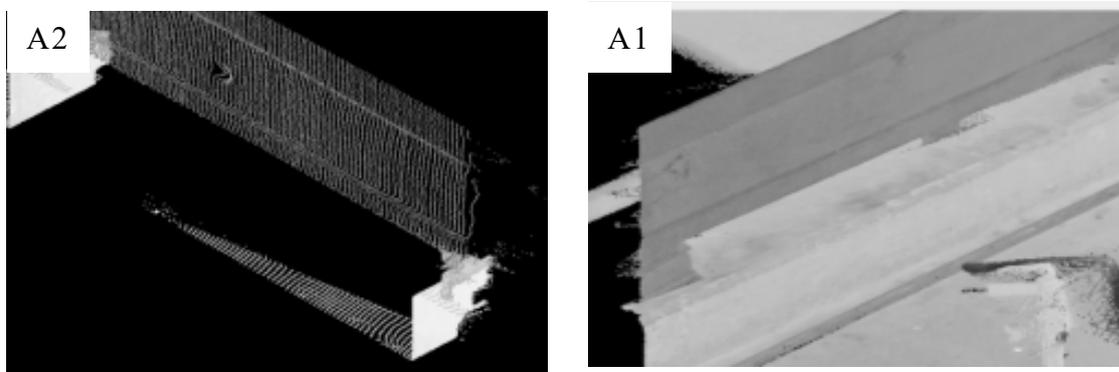
(2) TLS を対象の全体に配置 : B1~B6

対象に設置した計測ターゲットと対象の外に配置したチェックカードで合成した場合となる。

合成に使用したターゲット : W1~W8 と T1~T9

(1) TLS を対角に配置：A1,A2

A1とA2は工場内に設置した計測ターゲットW1～W8を用いて合成を実施した。A1とA2レーザデータが交差する端部において、それぞれの計測結果を比較すると点密度に著しく違いがあった（Fig. 5-6）。TLSの配置が2箇所なのでレーザ同士の重なりなどが少なく全体的にはきれいに合成されているようであった。しかし、端部は点密度が薄いため合成のズレ等を確認することができなかった。端部を検出するにはA1とA2のレーザデータから面またはラインより推定する必要があるが、長辺側の点密度が薄いため端部推定時の精度に影響を及ぼすと想定される。



A1とA2の合成

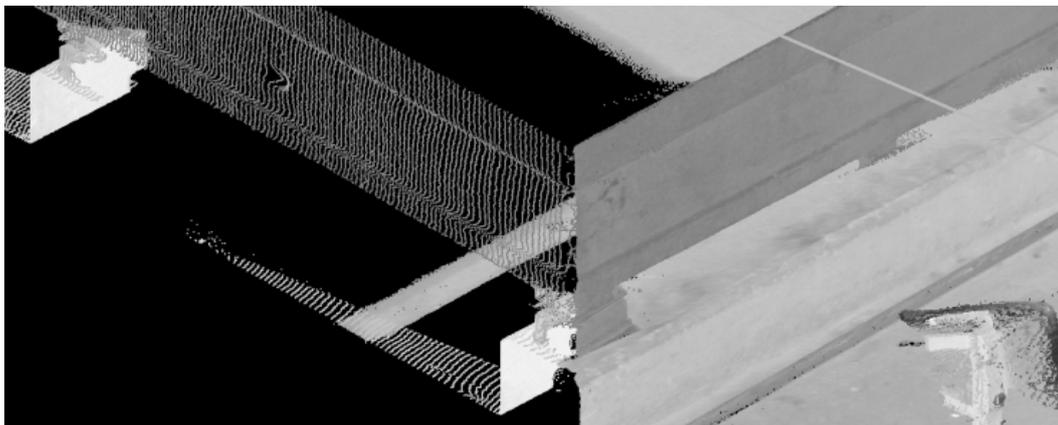


Fig. 5-6 A1,A2のレーザデータと合成結果

(2) TLS を対称の全体に配置：B1～B6

B1～B6の計測データをW1～W8とT1～T9を用いて合成処理を実施した。端部の取得形状を確認した場合に、レーザ欠損箇所が発生していた (Fig. 5-7)。これは、TLSを多く配置したため(1)の配置より点密度があつたが、それでも端部に当たっておらず隙間が発生したと考えられる。そのため、端部をTLSから抽出するためには面又はラインなどを用いてエッジ部推定が必要となる。

これらの合成精度を確認するため、四つ角の上部に設置した計測ターゲットJ1～J4について、TLSで計測精度を確認しようとしたが、入射角度が低くデータ欠損箇所が多かった (Fig. 5-7)。そのため合成の精度検証することができなかった。

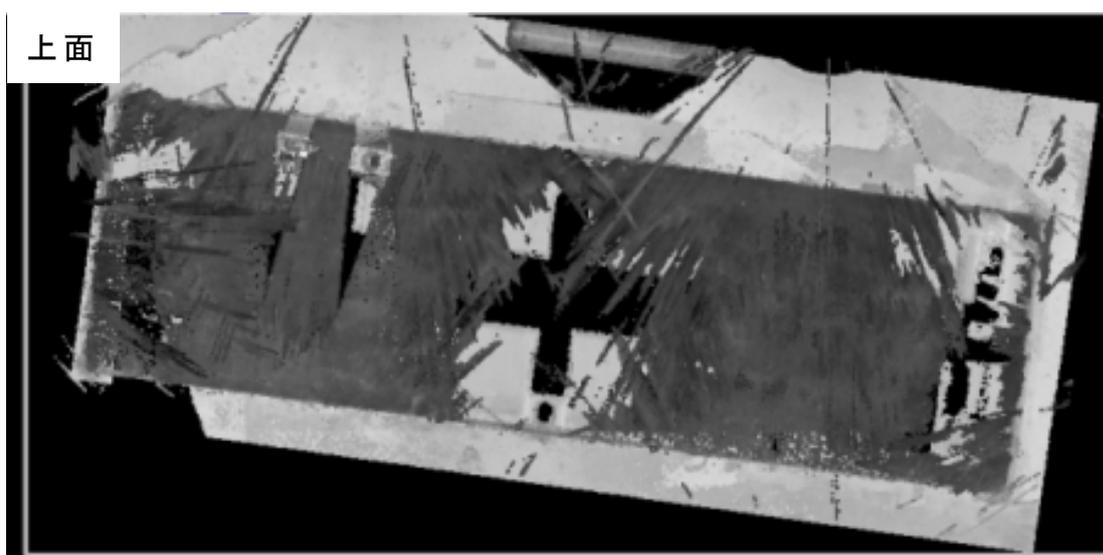
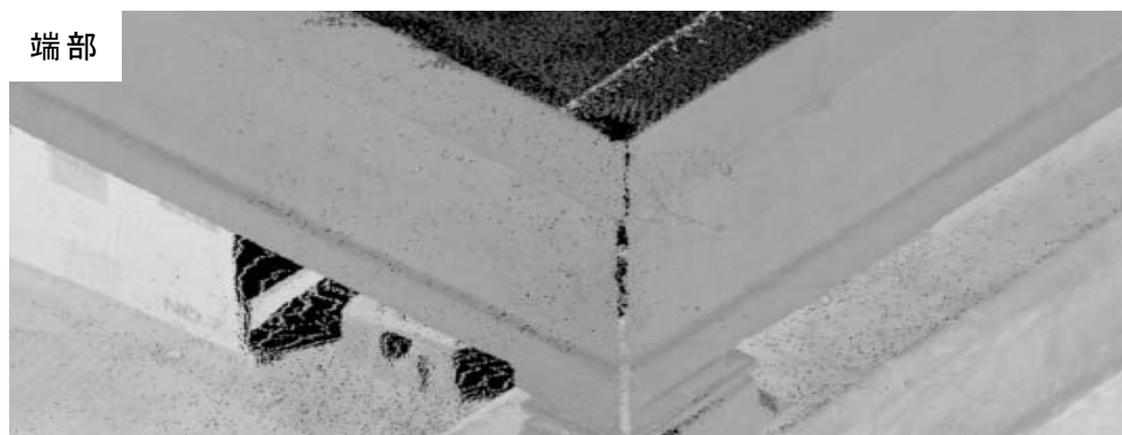


Fig. 5-7 B1～B6の合成結果

### 5.3.5 予備実験①のまとめ

計測パラメータによる精度の違いを検証した結果、奥行方向の精度はパラメータを変化させても大きく変化しなかったが、水平方向はパラメータと入射角により変化した。工場内の実証実験では、実験結果から計測精度と計測時間を総合的に考えて精度 4x と分解能 1/4 で実施することとする。

TLS の配置と合成の精度確認の結果、TLS は対角配置だと片側の点密度が少なくなってしまうため、実証実験では B1～B6 で実施することとする。また、合成作業は計測ターゲットを、その中と外に設置した場合でも精度を確認することができなかった。そのため、異なる面における合成作業を行わずに CAD モデルと面ごとに直接比較することとした。

### 5.3.6 予備実験②（入射角度と点密度の検証）

TLS は入射角度と点密度によって精度が変化する。そのため、工場内のハッチカバー計測に近い環境を屋内に設定して入射角度と点密度の変化を検証した。計測パラメータは、予備実験①で決定した値とした。実験では、1 列に 14m ほど並んだロッカーを計測対象とし、TLS を奥行方向に 0.6m, 2m, 3m, 5m, 7m, 9m, 11m の 7 箇所を設置して計測した (Fig. 5-8)。レーザデータは計測面に対して TLS から離れるように 1m ピッチで 10cm×10cm の枠を設定して抽出し、点間隔、点密度、奥行方向の標準偏差、奥行方向の最大残差を確認した。

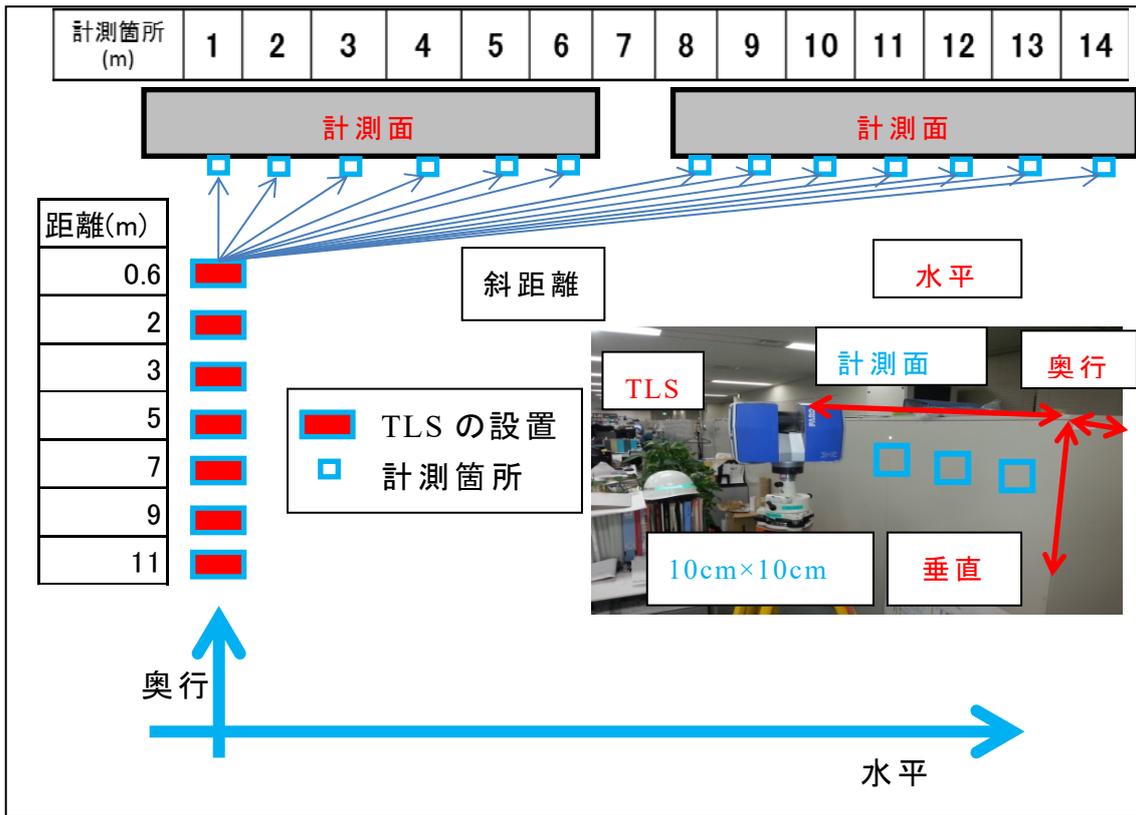


Fig. 5-8 実験の概要

### 5.3.7 実験結果

#### (1) 点密度

レーザ点群の点密度を Fig. 5-9-a に示す。点密度は最近傍で入射角度が 90 度となる箇所が一番多く、4 万点/10cm<sup>2</sup> 以上あった。点密度は入射角度が浅くなり、また距離が遠くなるほど減少した。点密度が少ない箇所では 50 点以下の場合もあった。

#### (2) レーザ点群の 2 点間の距離

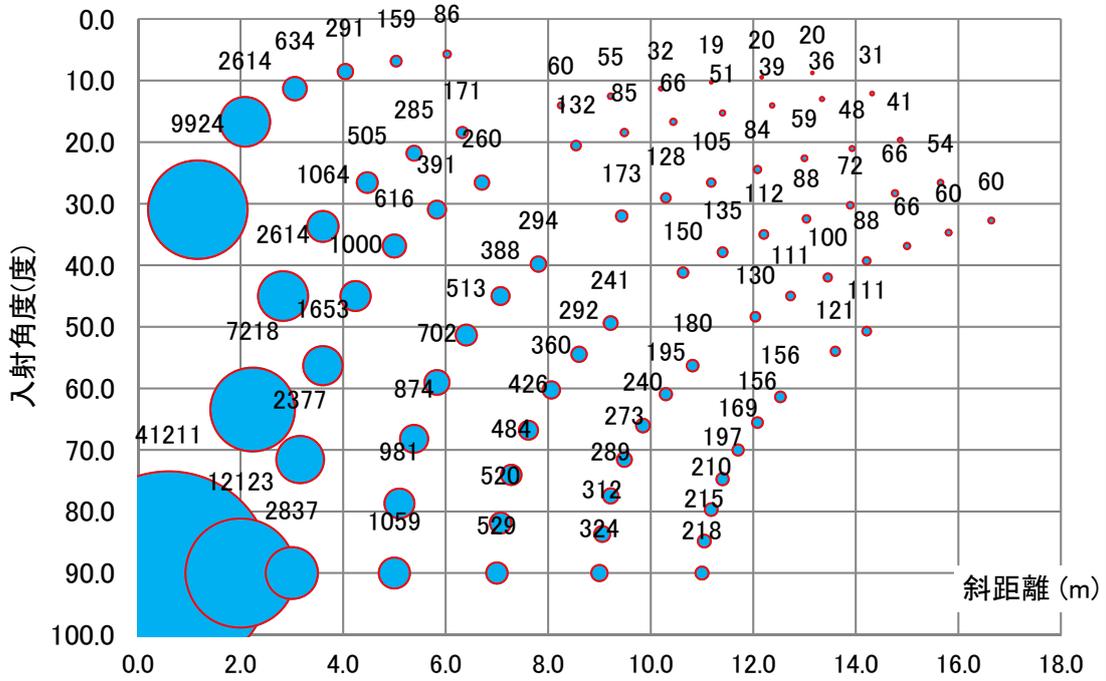
レーザ点群の 2 点間の距離は垂直方向と水平方向に分けて検討した。垂直方向の点間隔は距離に比例して点間隔が広くなり、最近傍地点 (0.6m) の 0.4mm から最遠方地点 (16m) の 10mm 程度まで変化した (Fig. 5-9-b)。水平方向の点間隔は入射角度と距離の両方の影響を受けており、入射角度が小さくなるか距離が遠くなると点間隔が広がった (Fig. 5-9-c)。例えば、距離が 4m 以内でも角度が 10 度以下になると点間隔が 16mm 以上であった。これは、10cm<sup>2</sup> の枠を計測面に対して設定しているため、入射角度が浅くなると TLS に対して垂直に投影した場合の実質的な水平幅が狭くなるためである。実際の工場内でも同様の計測状況が想定される。

#### (3) 計測値の奥行方向のバラツキ

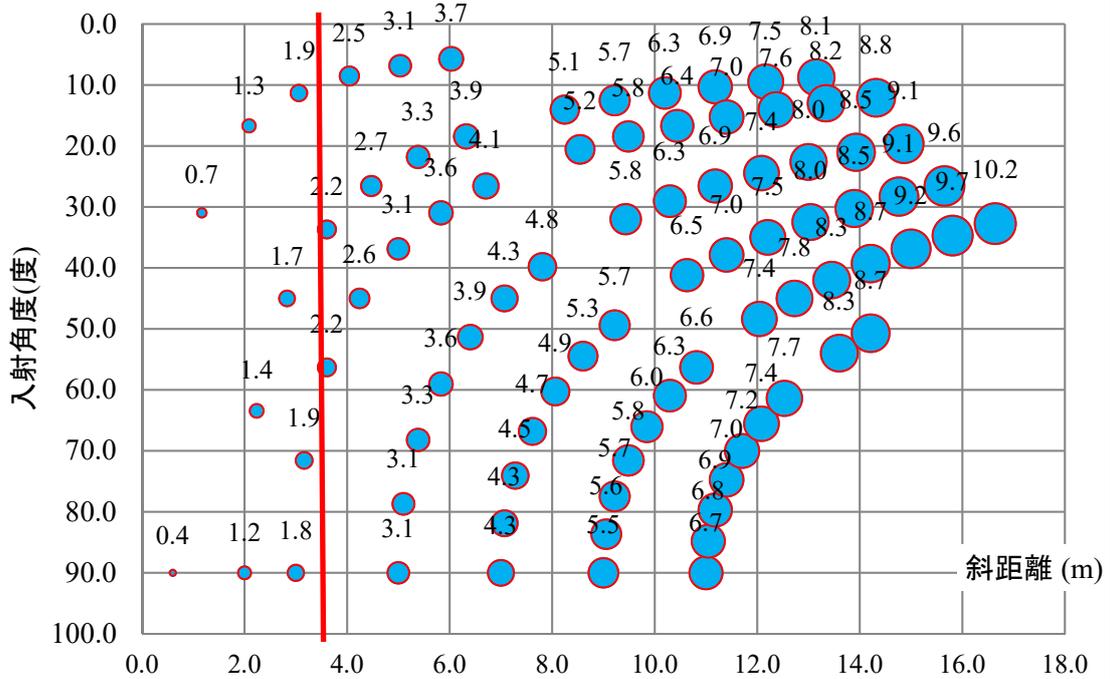
計測値の奥行方向のバラツキは、標準偏差と最大残差に分けて検討した。奥行方向の標準偏差は、入射角度が 10 度以下になると 0.7mm~1.2mm と悪化した (Fig. 5-9-d)。また、最近傍で入射角度が 90 度の箇所でも 0.5mm と高い値を示すが、それ以外はほぼ 0.5mm 以下であった。最大残差は標準偏差と同様の傾向を示した。すなわち、入射角度が 10 度以下となると 1.4mm~2.4mm と精度が悪化した (Fig. 5-9-e)。また、最近傍で入射角度が 90 度の箇所で 2.3mm と高い値を示すが、それ以外は 1.3mm 以下であった。

入射角度が 10 度以下になると精度が悪化したのは、Focus3D のビーム径 (出口) は 2.25mm、ビーム広がり は 0.19mrad (0.011°) であり、入射角度が 10 度以下の箇所はスポット径が大きくなるとともに、ビーム反射が不安定になり精度が悪化したと想定される。また、最近傍箇所で精度が悪化したのは、メーカーより示されている Focus3D の計測可能距離が 0.6m 以上であり、計測面が近すぎてノイズが多く計測されるためと考えられる。

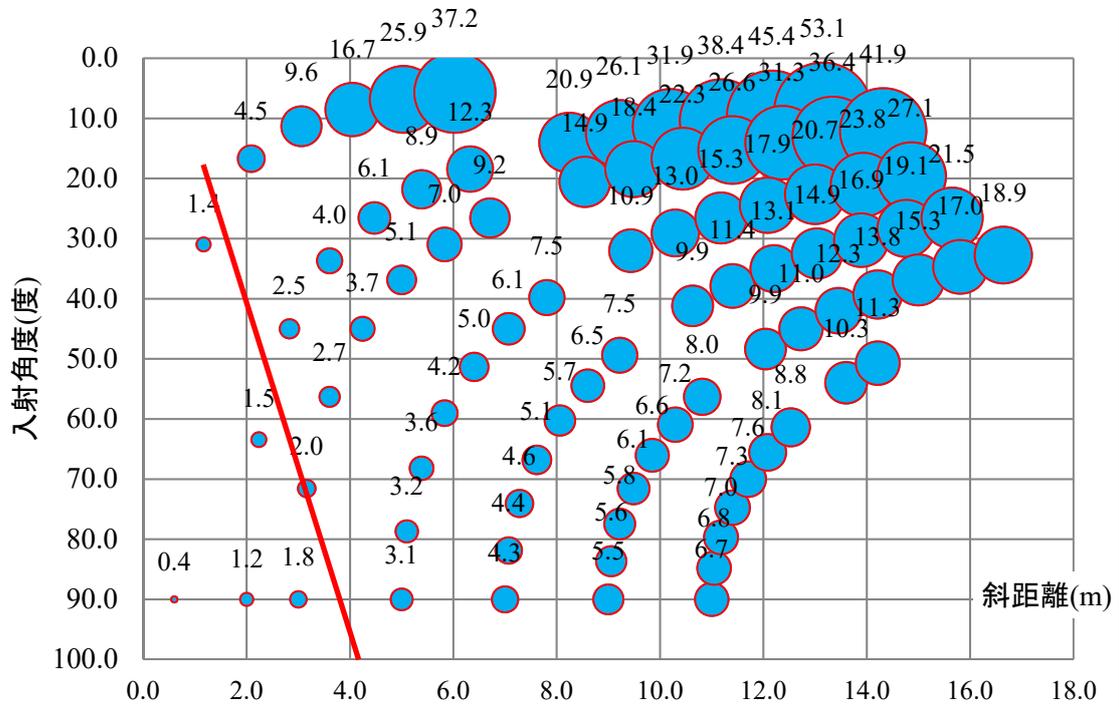
a. 点密度 (10cm × 10cm)



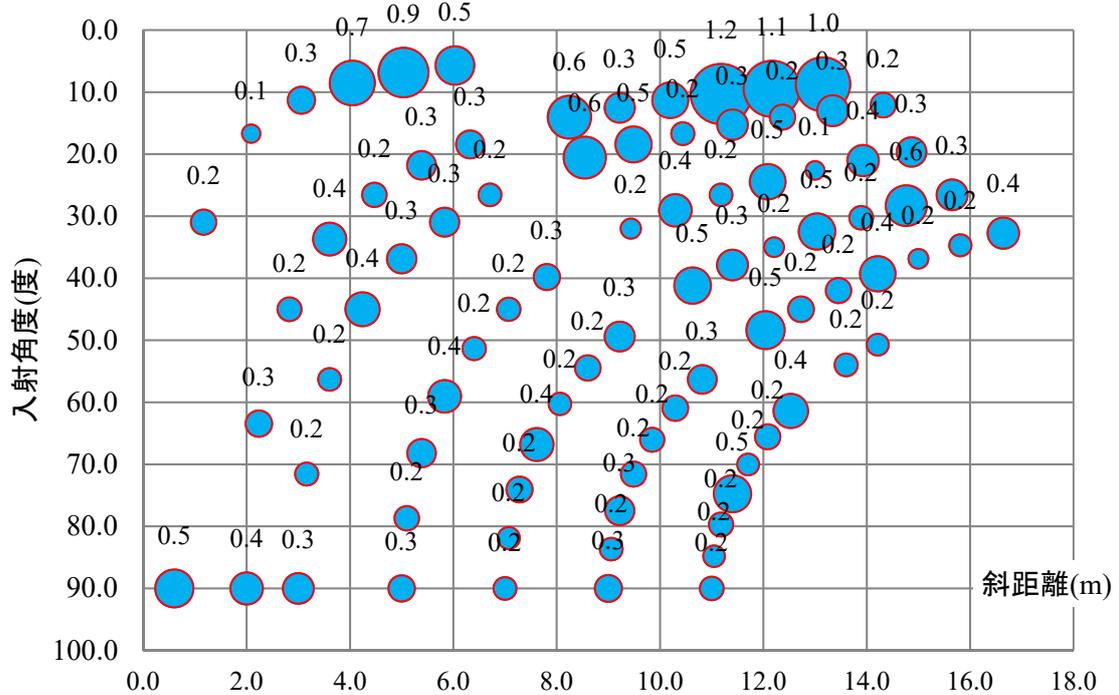
b. 垂直方向の点間隔(mm)



c. 水平方向の点間隔(mm)



d. 標準偏差(mm)(奥行方向)



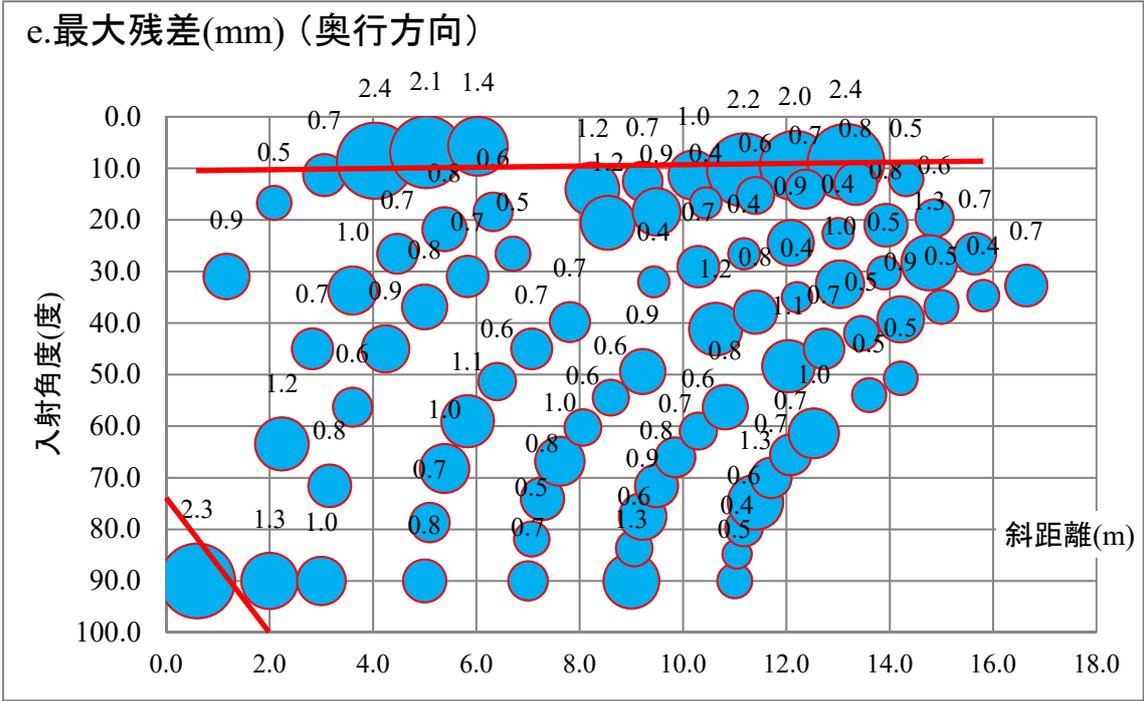


Fig. 5-9 精度検証結果 (a 点密度, b 垂直方向の点間隔, c 水平方向の点間隔, d 標準偏差 (奥行方向), e 最大残差 (奥行方向))

### 5.3.8 エラーデータ

レーザデータは計測時に計測結果に不要なデータや障害物によるデータの欠損が発生する。今回の計測においても、これらのエラーデータとして以下のようなエラーが発生した。

- ①障害物による欠損 (Fig. 5-10)
- ②対象外データ (Fig. 5-11)
- ③ノイズデータ (Fig. 5-12)

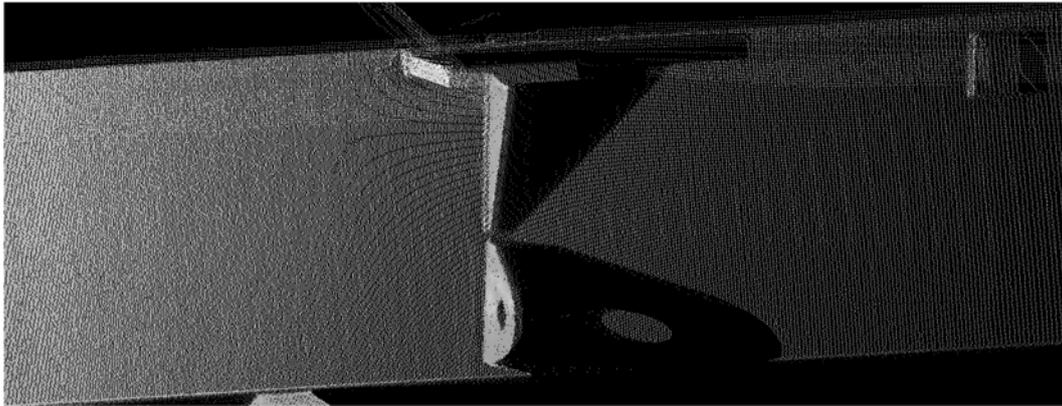


Fig. 5-10 障害物による欠損

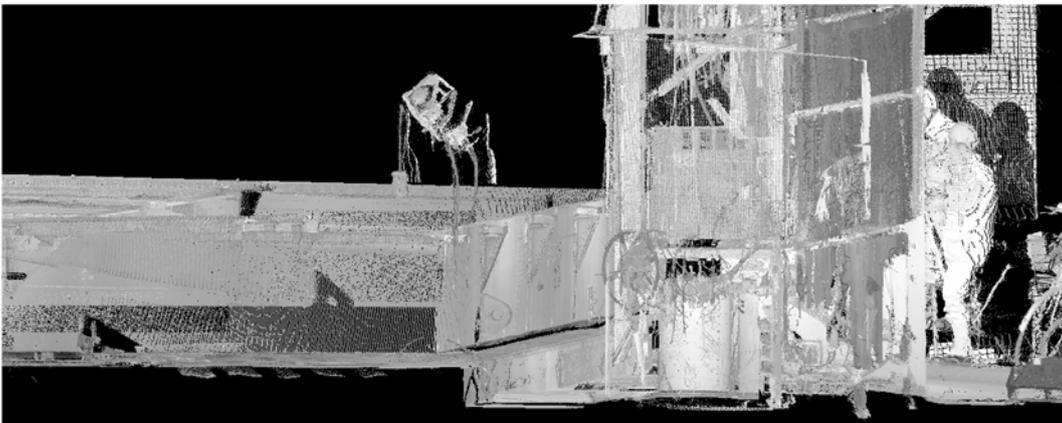


Fig. 5-11 対象外データ

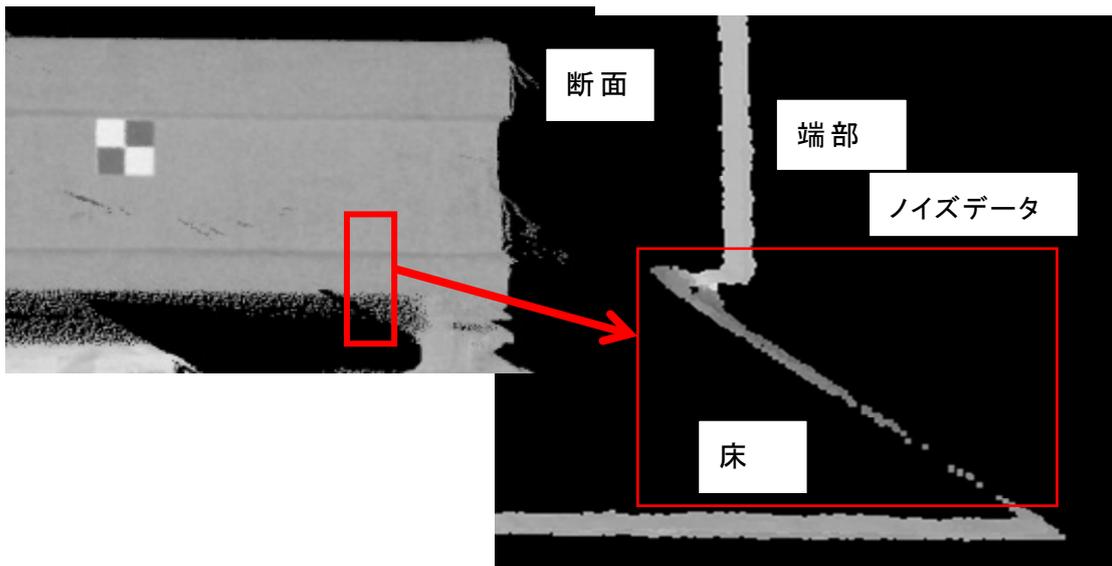


Fig. 5-12 端部のノイズデータ

### 5.3.9 計測精度のまとめ

TLS の支配的誤差は計測器の設置であり，次に計測パラメータと距離と入射角度であった．特に，計測パラメータは，設定によって 2 分～120 分まで大幅に変化する．そのため，計測精度と計測時間が最適な計測パラメータを決定する必要があった．

距離と入射角度は，水平と垂直方向では距離によって点間隔が大きく変化し，品質管理に使える範囲は非常に限られた範囲であった．奥行方向については 1 入射角度が  $10^{\circ}$  以内であれば要求精度を満たす計測が可能であった．

合成時の精度については計測ターゲットを対象物の中または，中と外の両方に設置した場合でもエラーが確認された．そのため，合成を行わずに CAD モデルと直接比較することで変化量を確認することとした．他にも，TLS 特有のエラーとして，障害物による欠損，対象外データ，端部のノイズデータがあった．

## 5.4 TLS を用いた計測方法の検討

### 5.4.1 船舶における計測時の特徴

船舶の部材を計測あたり，一般的な地形計測作業と異なる点として以下のものがあげられる。

工場内は壁や他の機材が迫っており，TLS を理想的な計測位置に設置できない。そのため，計測対象までの距離が短くなり，計測精度を保つためにメーカー推奨の入射角（ $60^\circ$ ）を維持するためには TLS の設置箇所が多くなる。TLS の設置箇所数が多くなると，後処理作業のデータ時間が多くなってしまう。他にも，面の奥行方向の変形だけでなく，端部を精度よく計測する必要がある。

一般的な TLS 計測の作業は TLS 設置してその後の計測と簡単である。作業員も 1 名で対応可能なので計測自体は簡便である。

#### 5.4.2 TLS の配置

工場内でハッチカバーは溶接工程ごとに移動するため、溶接工程ごとに TLS の設置を変えながら計測した。工場内は狭く両側に壁が迫っており、かつ周辺に他のハッチカバーがあるため、TLS の設置可能箇所は厳しく制限された。ハッチカバーの各計測面の名称は以下の通りとした (Fig. 5-13)。Center : 船体中央側, Side : 船体外側, Aft : 船体後方側, Fore : 船体前方側, Upper : 完成時の船体上部 (天板部), Deck : 完成時の船体下部 (開口部)。Center と Side は幅が広く、また TLS とハッチカバーの距離と入射角度を十分にとることができなかった。そのため、Center と Side はそれぞれ Fore 側と Aft 側の 2 箇所に TLS を設置した。上記の計測作業を全工程で実施して CAD モデルと比較することで、相対的な面外変形について工程ごとに解析した。

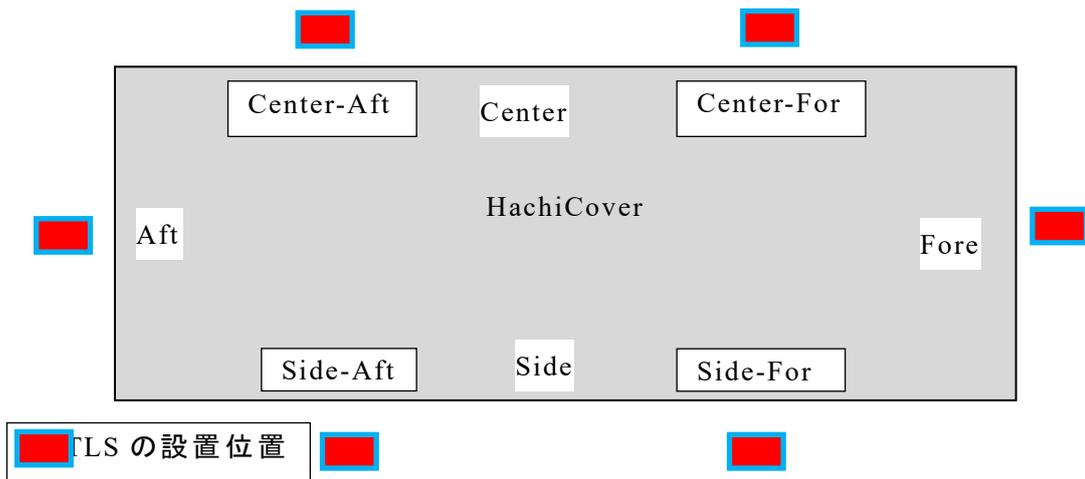


Fig. 5-13 ハッチカバーの計測面の名称

### 5.4.3 計測状況

計測時の距離と入射角度について、計測時の TLS の位置 (Fig. 5-14) を示す。また、実際の各 TLS の設置位置における最短距離と遠方端部の入射角度を整理した結果 (Table 5-7) を示す。第 3 章の屋内実験の結果より、入射角度が 10 度以下の計測と最短距離が 0.6m 以下については最大残差が 2mm 以上となっており、上記条件に該当する精度悪化箇所を赤字で示した。最短距離は、2014 年計測の Aft の歪取溶接後以外はすべて 0.6m 以上であった。入射角度は、Fore と Aft が 2014 年の歪取作業以外は全て 10 度以上であった。Center と Side は遠方端部の入射角度は 10 度以下となることが多かった。しかし、これらは Fore 側と Aft 側の 2 箇所より重複するように計測しているため、10 度以上の箇所をそれぞれ採用すれば対象箇所全体のデータが得られる。

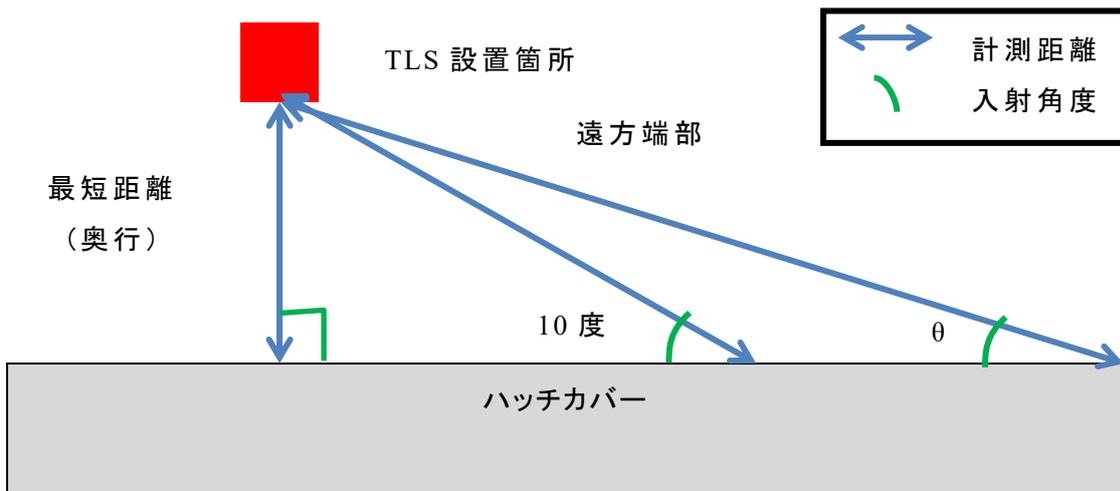


Fig. 5-14 入射角度と距離の概念図

Table 5-7 計測時の最短距離と遠方の入射角度

作業 工程	設置箇所	Side-Fore		Side-Aft		Aft		Center-Aft		Center -Fore		Fore	
		計測年度	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014
自動 溶接 前	最短距離 (m)	1.1	1.3	0.9	1.2	1.1	2.5	1.5	1.7	1.2	1.8	1.2	2.8
	遠方端部 の入射角 度(°)	4.5	6.5	4.1	5.5	16.3	28.1	6.4	8.4	5.5	8.0	13.7	32.2
自動 溶接 後	最短距離 (m)	1.8	1.3	1.2	1.7	0.9	3.2	1.2	1.6	2.1	1.7	1.5	3.4
	遠方端部 の入射角 度(°)	8.5	6.2	5.5	7.1	15.7	33.4	5.0	7.5	9.1	6.6	18.3	36.3
手動 溶接 1後	最短距離 (m)	1.0	2.2	1.1	2.2	0.7	1.7	0.9	2.3	1.2	2.6	2.0	2.2
	遠方端部 の入射角 度(°)	4.2	9.8	4.6	9.1	11.1	18.7	3.2	9.7	7.4	10.8	24.1	22.7
手動 溶接 2後	最短距離 (m)	2.6	2.5	2.5	-	1.4	3.3	3.6	2.8	3.9	3.1	2.0	1.1
	遠方端部 の入射角 度(°)	9.7	10.5	10.0	-	22.2	35.2	14	11.5	14.7	12.4	22.5	16.4
歪取 溶接 後	最短距離 (m)	1.8	1.6	1.6	1.0	0.5	3.6	1.0	-	1.3	-	1.0	1.7
	遠方端部 の入射角 度(°)	8.4	7.1	6.4	4.8	11.4	36.7	4.2	-	5.1	-	8.3	21.1

#### 5.4.4 計測時間

計測に必要な時間は、TLS 設置：5 分/設置，計測：10 分/箇所となる．今回のハッチカバーを対象とすると一般的な作業手法では TS 設置が 10 箇所となるため，全部で 150 分ほどかかってしまう．今回の計測可能な時間は溶接工程の間や昼休みのため，1～1.5 時間/1 工程しかなく計測時間の短縮化が求められた．

今回の計測では以下の 2 つの作業手法により作業時間の短縮を実施した (Table 4-7)．

①計測パラメータ：各パラメータにて計測時間と計測精度を比較して，今回の計測に合致したパラメータを決定した．

②TLS の設置数量：TLS の設置数量が計測時間にかかるため，計測結果の利用できる入射角度を調査して，入射角度が 10°以上であれば計測データを採用できることを明らかにすることで，TLS の設置数量を 6 箇所に減少した．

Table 5-8 作業手法による計測時間の比較

作業項目	一般的な手法			提案手法		
	台数	時間 (分)	合計 (分)	台数	時間 (分)	合計 (分)
TLS 設置	10	5	50	6	5	30
計測	10	10	100	6	10	60
		合計	150		合計	90

#### 5.4.5 計測精度

TLS の計測精度として奥行方向はメーカー仕様と同等の精度が出ており、奥行方向の品質管理に適用可能である。一方で、端部については、点間隔の問題、入射角度の問題、端部に発生するノイズデータの影響によって品質管理の要求を満たすことができない。

計測結果の方向として計測面に対して3方向（水平、垂直、奥行）があげられるが、奥行方向はメーカー仕様と同等レベルの高い精度が確保されることを確認できたが、水平と垂直方向については点密度の影響を受けて精度が低下する（Table 5-9）。そのため、今回のような近距離で入射角度が悪化するような環境では、TLS の計測結果は奥行方向のみ使うことが望ましく、端部については点密度とノイズの影響を受けるため計測精度が低いので利用できない。

さらに、奥行方向の精度についても入射角度が10度以下となる場合は、精度低下が確認された。メーカーからの推奨入射角度は60度以上となっているため、それと比べればかなり広い範囲で利用することができるが、10度以下となる場合は改めて TLS を設置するなどの対応が必要となる。

Table 5-9 TLS の計測誤差のまとめ

位置	誤差 (mm)			累計誤差 (mm)
	機械	点間隔	ばらつき	
水平	2.0	27.1		27.2
奥行	2.0		0.5(1.3)	2.1(2.4)
垂直	2.0	10.2		10.4
			合計	29.2

σ (MAX)

## 5.5 計測結果の解析方法

### 5.5.1 CAD モデルとの比較方法

TLS で計測したデータには、対象箇所以外のデータも含まれるため、後処理作業でハッチカバーの計測面のレーザデータを抽出した。次に、InnovMetric 社製 PolyworksInspector のデータ位置合わせ機能を使用して CAD モデルとの位置あわせを実施した (Fig. 5-15)。位置あわせは、自動フィッティングを用いた。著しくレーザデータと CAD モデルの形状が異なる場合は、この機能を用いることができなかつたので手動にて位置合せを実施した。

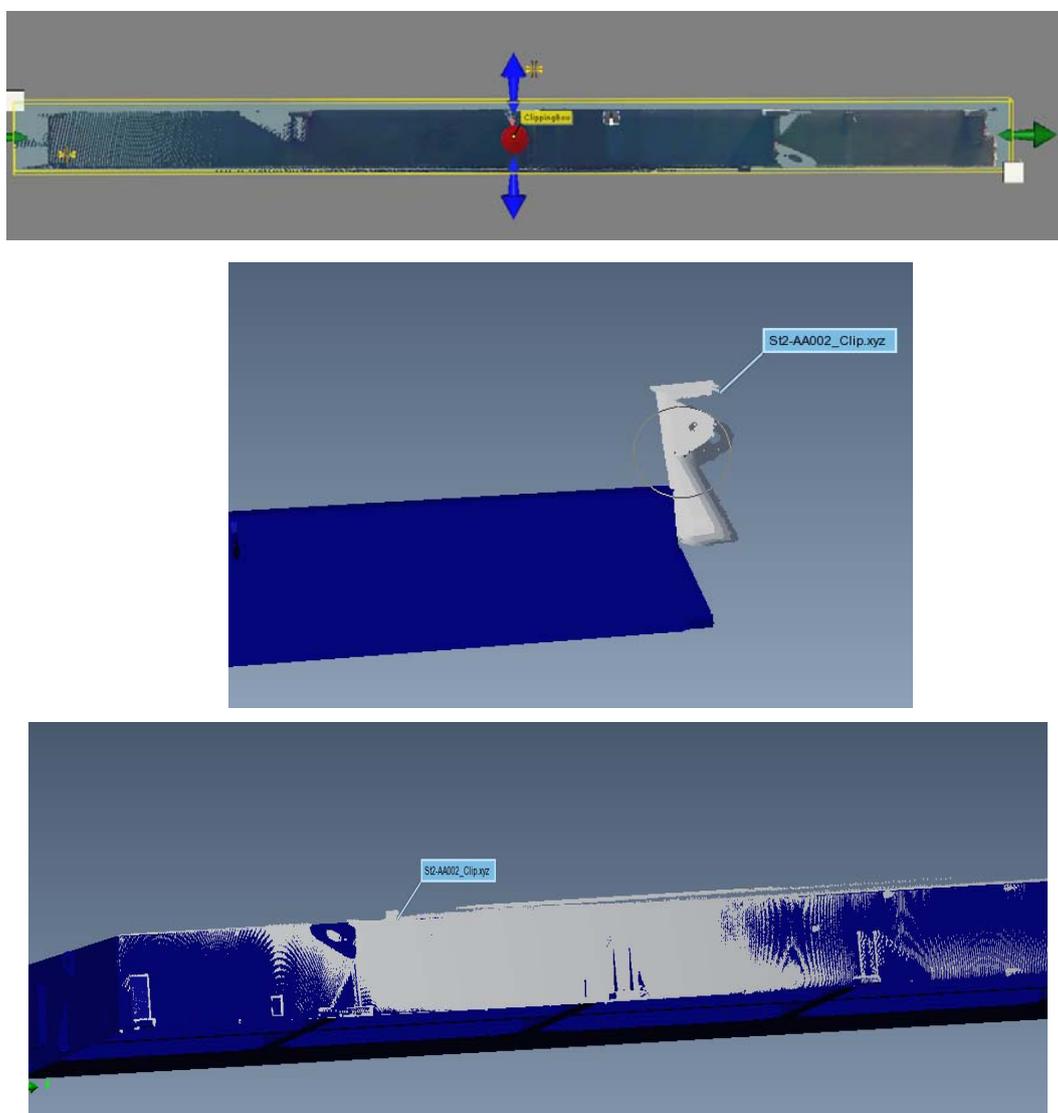


Fig. 5-15 CAD モデルとレーザデータの位置あわせ

## 5.6 計測結果と考察

### 5.6.1 変形量の可視化

CADモデルとの位置合せに使用した InnovMetric 社製 PolyworksInspector の寸法形状検査機能を用いて、抽出したレーザデータと面外変形の形状検査を実施した。面外変形の形状検査の変形量は段彩図にて表現した (Fig. 5-16)。変形量は段彩図で $\pm 10\text{mm}$ を上限としてハッチカバー内側への変形は青色、ハッチカバー外側への変形は赤色で表現した。例えば、Fig. 5-16 のサンプルでは、両端部の青色箇所は CAD モデルに比べてレーザデータがハッチカバーの内側に変形しており、中央部の赤色箇所は CAD モデルに比べてレーザデータがハッチカバーの外側に変形している。Center と Side は、入射角度が 10 度以下のデータを除外して表現した。

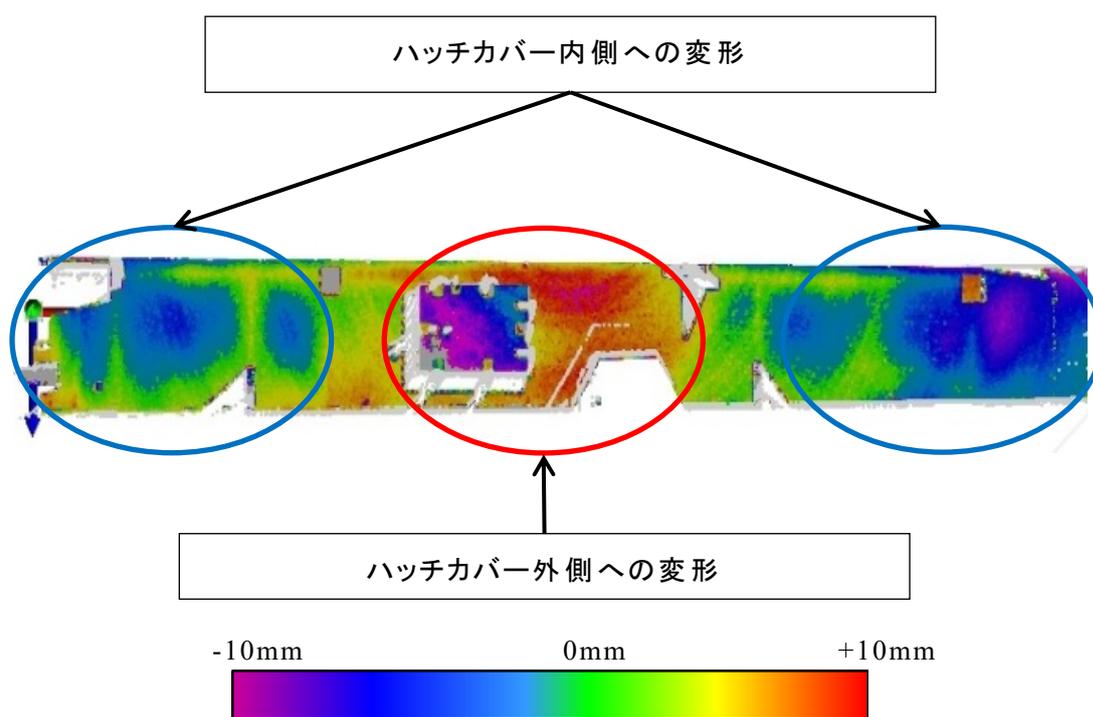


Fig. 5-16 変形量の概念図とサンプル

## 5.6.2 工程間の変形量

CAD モデルとレーザデータの比較した形状検査の変形量を以下に示す。

Fore (Fig. 5-17) と Aft (Fig. 5-18) は自動溶接前から両側端部が内側（青色）に、中央部が外側（赤色）に変形していた。手動溶接 1 後と手動溶接 2 後では両側端部の内部が内側（青色）へ変形した。歪取溶接後は、自動溶接前から存在した両端部と中央部の変形量が減った。

Side (Fig. 5-19) と Center (Fig. 5-20) も Fore と Aft と同様に自動溶接前から両側端部が内側（青色）に、中央部が外側（赤色）に変形していた。自動溶接後は、Side は両側端部で内側（青色）に大きく変形しており、Center は 2014 年の中央部が大きく外側（赤色）に変形した。手動溶接 1 後と手動溶接 2 後では両側端部の内部が内側（青色）へ変形した。歪取溶接後は、面外変形が修正されているが、自動溶接前から存在していた変形が残っていた。すなわち、Side については中央部より 1 つ外側の面が Aft 側と Fore 側とも外側（青色）に変形しており、端部と中央部は内側に変形していた。Center は中央部付近が外側（赤色）に変形しており、その周辺は内側（青色）に変形していた。

全箇所において自動溶接前に面外変形は発生しており、その変形量が各工程で変化しながらも歪取溶接後まで残っていた。実際に現地では、仮溶接時に溶接された箇所とその周辺で面外変形が確認された。各工程における変形量では、手動溶接 1 後と手動溶接 2 後で大きかった。これは、手動溶接 1 では全体の外枠を溶接しており、手動溶接 2 では外枠に対して部分的な溶接が実施されたため、外枠の熱収縮とその内部の熱収縮の違いにより発生したと考えられる。

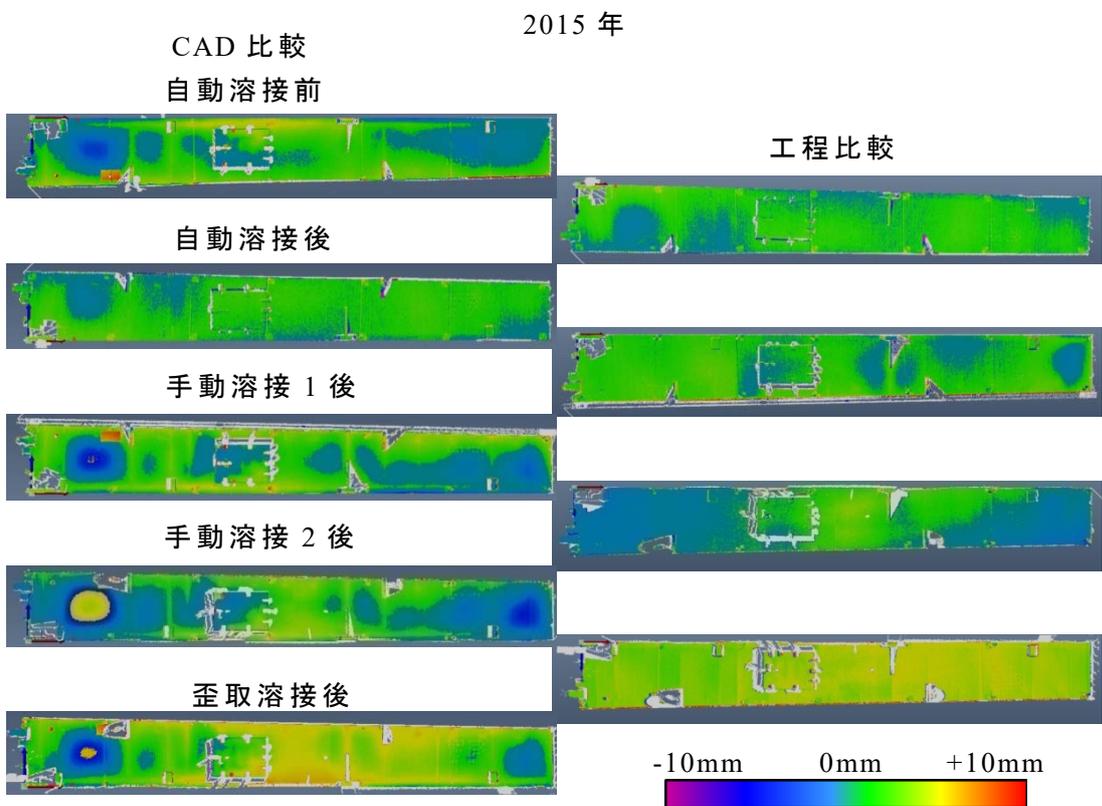
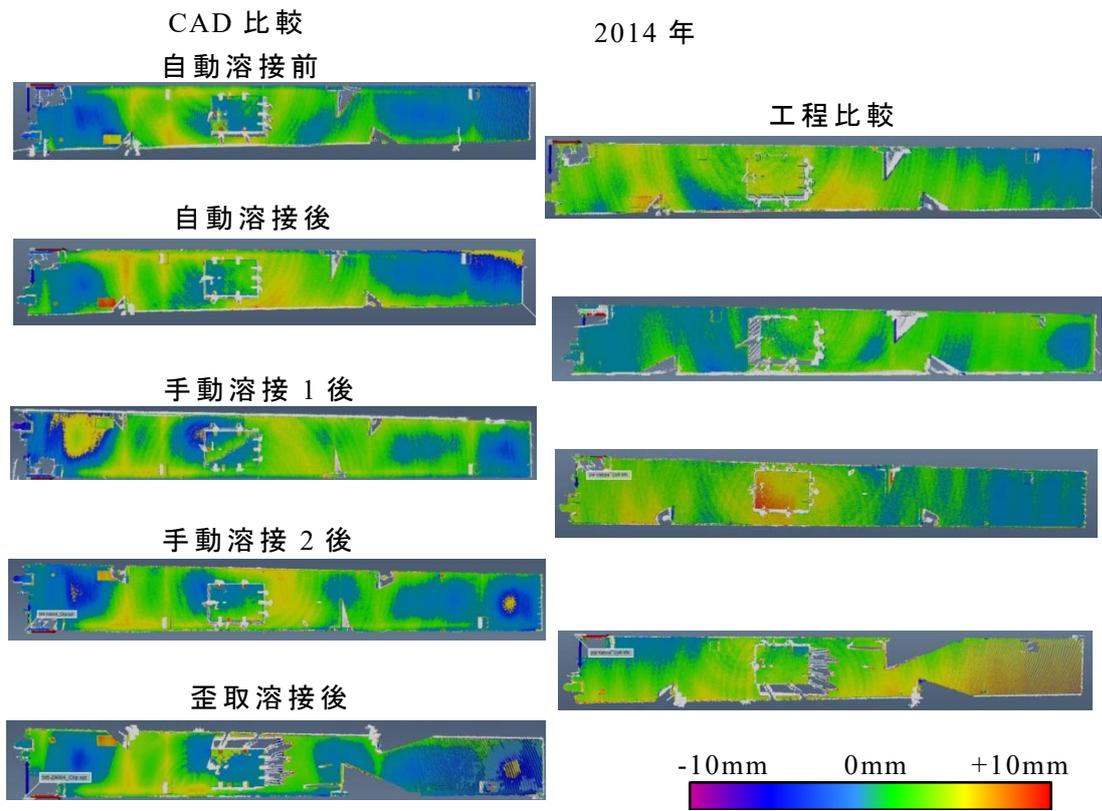
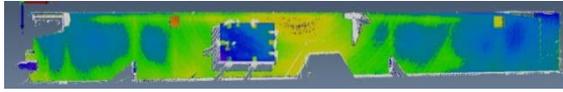


Fig. 5-17 Fore 面の CAD モデルと TLS データの比較

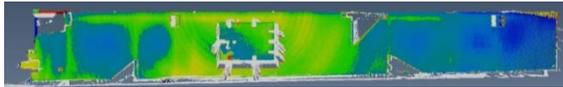
CAD 比較

2014 年

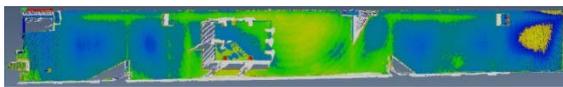
自動溶接前



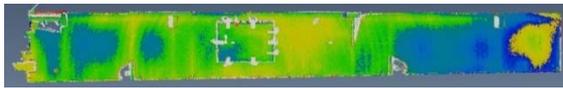
自動溶接後



手動溶接 1 後



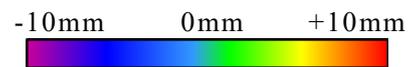
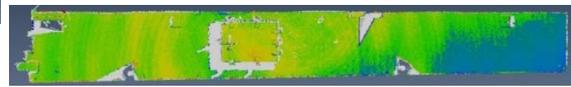
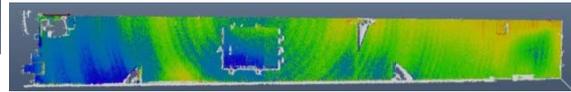
手動溶接 2 後



歪取溶接後



工程比較



CAD 比較

2015 年

自動溶接前



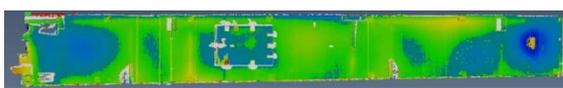
自動溶接後



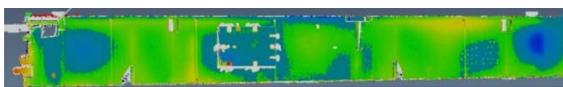
手動溶接 1 後



手動溶接 2 後



歪取溶接後



工程比較

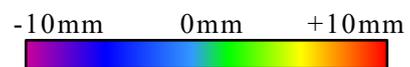
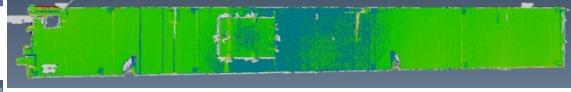
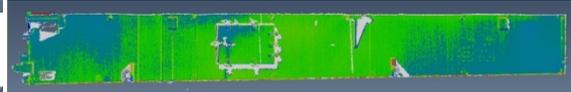
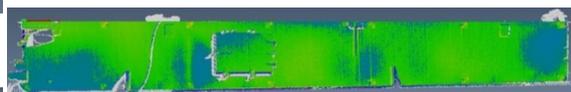


Fig. 5-18 Aft 面の CAD モデルと TLS データの比較

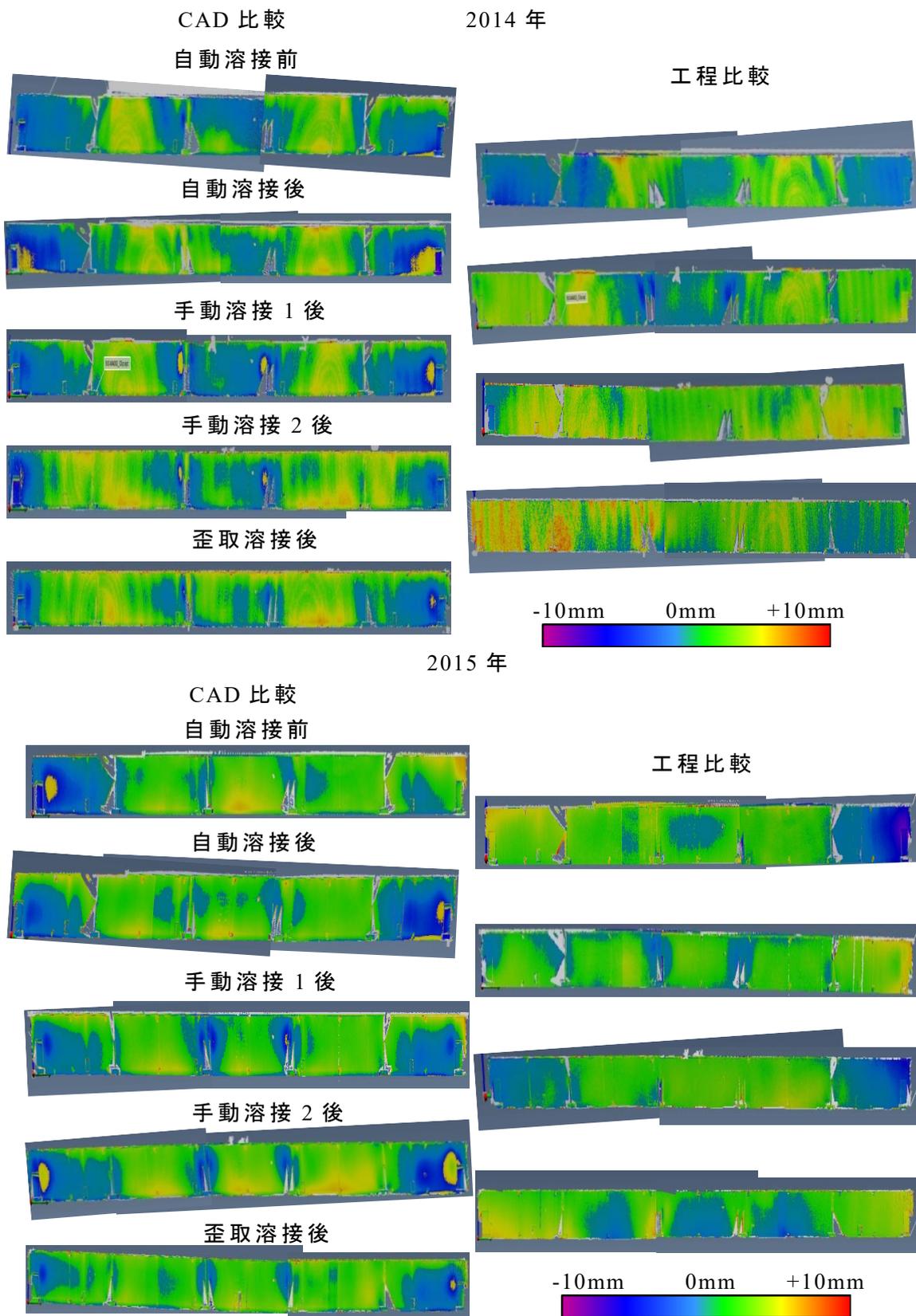


Fig. 5-19 Side 面の CAD モデルと TLS データの比較

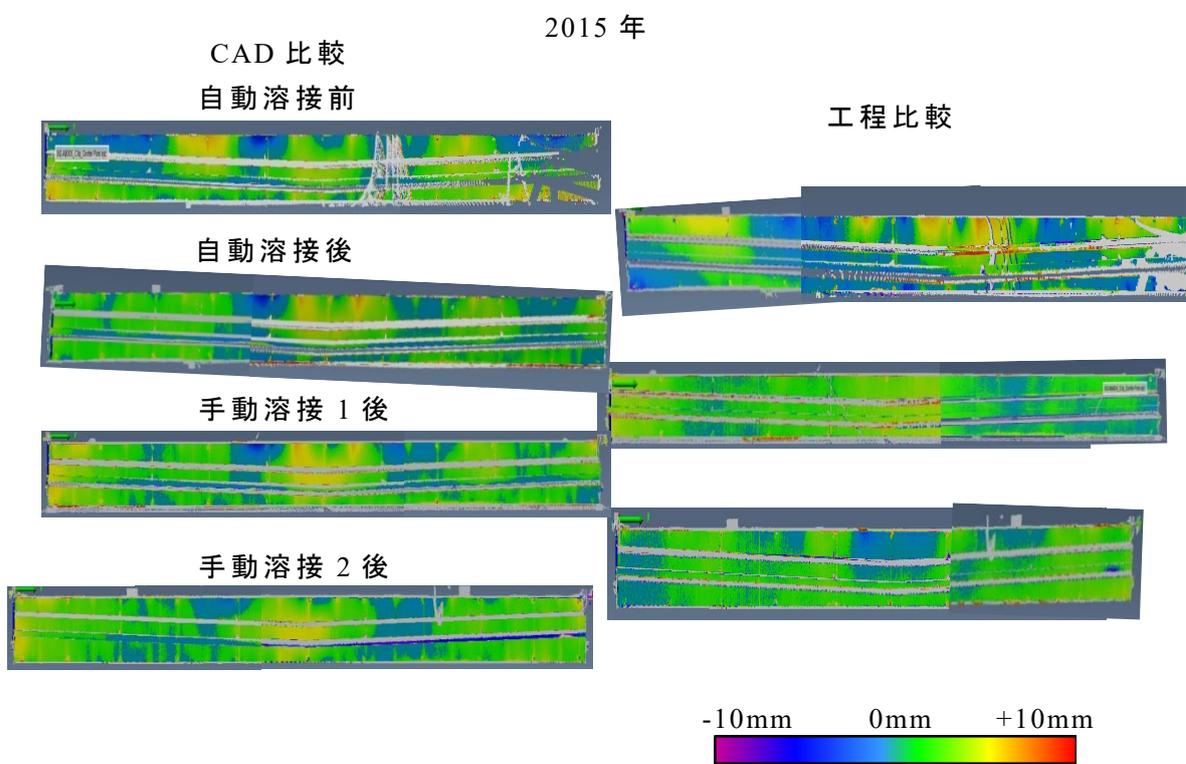
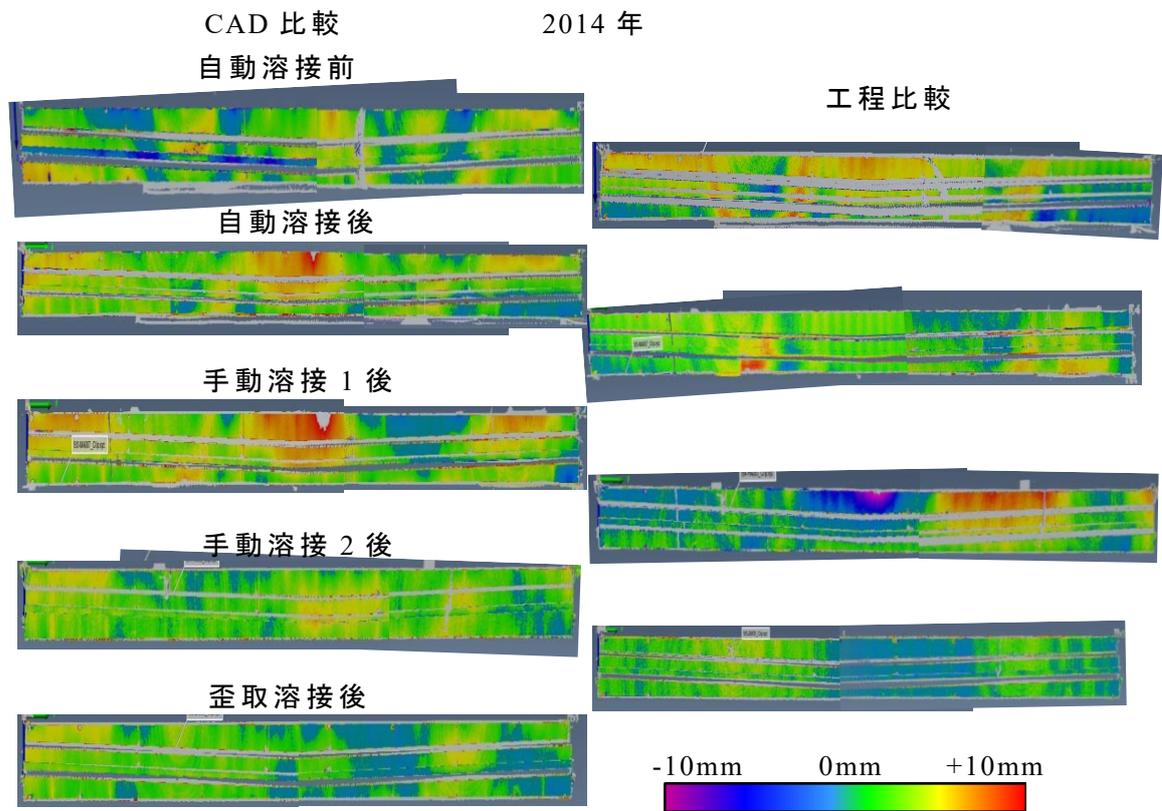


Fig. 5-20 Center 面の CAD モデルと TLS データの比較

## 5.7 TLS と TS の比較

### 5.7.1 計測結果の比較

奥行方向の変形量を CD06 について TLS の 2014 年と 2015 年の結果を比較した。観測時点での CAD からの変形量と累積した変形量を Fig. 5-21 に示す。また、TS の CD06 における奥行方向の変形を Fig. 5-22 に示す。TLS については、2014 年と 2015 年の変形傾向が類似しているが、TS の結果と比較すると傾向が一致していない。これは、TS はハッチカバーの端部付近の計測点を基準点としており、TLS は CAD の面を基準面として変形量を算出している。TS は端部の基準点としているため、端部の CAD 面からの変形量が含まれた状態で変形量が算出される。一方で、TLS は CAD 面ともっとも誤差が少ない位置に配置されて変形量が算出される。このように、位置あわせの基準とする位置や形状が異なる場合は、単純な変形量の比較をすることができないため、変形量が算出される場合の基準をどのように設定するかによって変形量の見え方が異なるので注意が必要である。

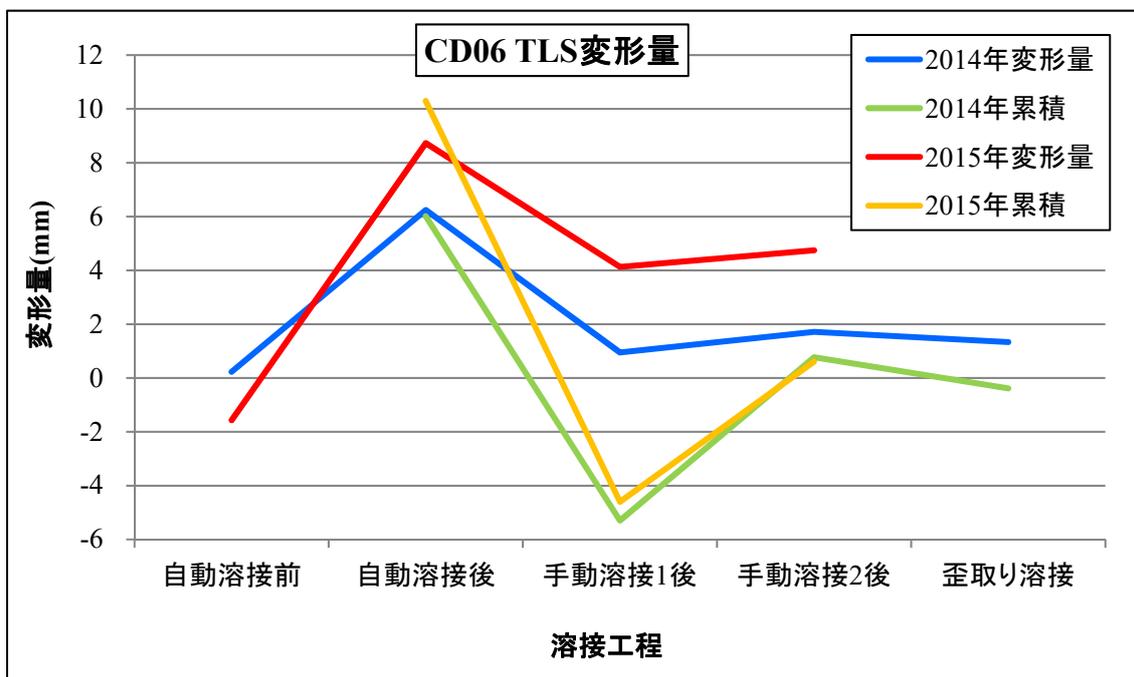


Fig. 5-21 CD06 における TLS 計測結果 (2014 年 2015 年)

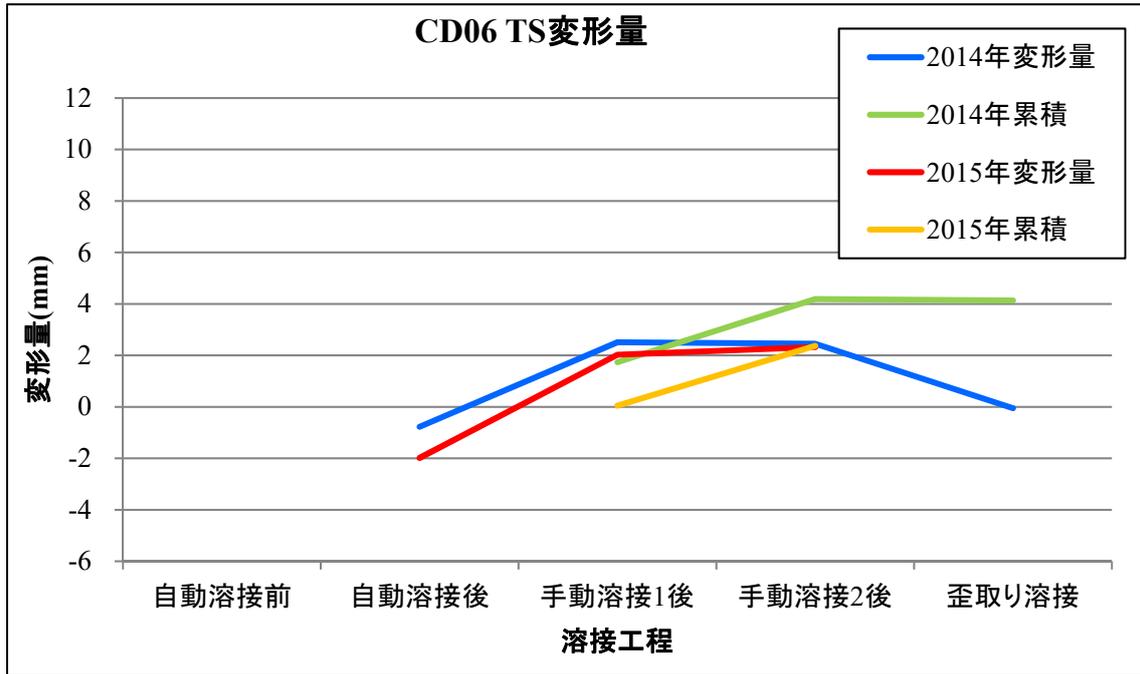


Fig. 5-22 CD06 における TS 計測結果 (2014 年 2015 年)

### 5.7.2 計測方法の比較

TS と TLS の計測可能な変形を比較すると、自動溶接前の仮溶接による変形が歪取溶接後まで残る点は同様の傾向を示した。さらに、面外変形が大きくなる工程は自動溶接後が大きく、TS と TLS の両方でその傾向が確認された。一方で、手動溶接 1 または手動溶接 2 でも TLS では局所的な面外変形が確認されるが、TS では十分確認することができない。

面内変形では、TS を用いることで全工程において上下方向の大きな変形を明らかにすることができたが、TLS では確認することができない。

TS と TLS の計測可能な変形と特徴を以下に示す (Table 5-10)。

Table 5-10 TS と TLS の比較表

計測機材	TS	TLS
面外変形	○	◎
面内変形	◎	△
設計データとの比較	△ターゲット設置位置の精度次第	○相対比較なら可能
計測可能範囲	点	面
注意点	計測点の視準が必要	エッジ部の検出に難射影部の発生
計測時間	○(40分×2箇所) 計測数量により変化	○(20分×6箇所) 設定により変化
計測技術	熟練作業者	非熟練作業者も可能
作業者	2人	1人
事前準備	△ターゲット設置, TS点設置	○不要
後処理	○	△データが重い, ノイズ除去, 合成処理
再現性	○	×
精度(奥行)	0.5mm(0.8mm)	2.1mm(2.4mm)
精度(垂直)	0.5mm(0.5mm)	10.4mm
精度(水平)	0.6mm(1.1mm)	27.1mm

## 5.8 TLS のまとめ

TLS の計測誤差を整理し、工場環境下における計測精度と計測時間を考慮した計測方法を提案した。さらに、この計測方法における精度が維持される範囲についても提示した。すなわち、計測精度と計測時間から最適な計測パラメータを決定し、TLS については計測対象を囲むように配置した。また、面が異なる箇所での合成を行わずに面ごとに CAD モデルと直接比較することで合成による誤差を除外した。さらに、計測結果の精度について、奥行方向については高い精度が確認されるが、水平方向・垂直方向については点密度やエラーデータの影響から精度がないことを確認した。さらに、奥行方向についても計測距離が 0.6m 以下、入射角度が 10 度以下だと精度が低下することを示した。

実際の工場内における実証実験結果では、計測面全てにおいて自動溶接前に面外変形は発生した。その変形量が各工程で変化しながら歪取溶接後まで残存した。各工程における特徴のある変形としては、手動溶接 1 後と手動溶接 2 後に Fore,Aft,Side で変形拡大した。手動溶接 1 では全体の外枠を溶接しており、手動溶接 2 では外枠に対して部分的な溶接が実施されたためと考えられる。すなわち、外枠の熱収縮とその内部の熱収縮の違いにより発生した。これは、TS で明示されていない傾向であった。

## 6 結論

本論では造船分野における溶接工程の品質管理を目的として、三次元計測機器を用いた品質管理手法を検討した。

まず、TS と TLS の工場内のける実際の計測可能な精度について予備実験にて明らかにした。その上で、ハッチカバーを計測対象として、溶接工程における TS と TLS を用いた溶接変形の三次元形状の品質管理について検討を実施した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

通常、メーカー仕様に記載されている計測精度は機械精度のみとなっており、計測時の条件によって計測精度は大きく変化する。今回のような工場内は狭く対象が移動する環境下であり、機械精度以外に様々な要因によって計測精度が変化する。そのため、計測精度を向上するためには計測環境における誤差要因を明らかにし、計測精度を向上するための手段が必要となる。

変形計測の中で造船分野が他分野と大きく異なる点は、作業工程の中で大型の計測対象が移動することである。そのため、異なる工程間の変形を計測するためには、複数回に渡り計測機器を設置する必要がある。しかし、TS と TLS とともに計測機器の設置が誤差要因となるため、TS は計測対象の内部に基準点を設置することで、TLS は面ごとに CAD モデルと比較することで上記の誤差を除去した。

計測機器の設置を減らすことで、計測精度の向上と計測時間の短縮が期待できるが、一方で1点あたりの計測誤差として入射角度や距離などが誤差要因となる。TS ではL字ターゲットを設置とすることで入射角度が低い場合でも良好な精度で広い範囲を計測することが可能であり、他の部材の品質管理にも有効と想定される。TLS は点密度の変化によって水平・垂直方向の精度が悪化した。既往研究<sup>20)</sup>でもこのような TLS の精度悪化は指摘されており、原因として計測方法が指摘されていたが、本論ではさらに点密度による影響を提示した。

TLS の奥行方向の精度は良好であり、メーカー推奨の60度以下の入射角度になっても、10度以上であれば2mm程度の精度が確保されることを明らかにした。一方で、水平・垂直の精度が悪いため、端部の推定は困難であった。各面同士を法線ベクトル等で端部推定を行なう方法もあるが、点密度の問題に加えて端部特有のノイズデータの存在により、本論では言及することができなかった。今後の作業手法の検討が必要である。

工業計測の特徴として、計測結果を短時間に提示する必要がある。TS は計測後すぐに結果を出すことができるが、TLS はデータ処理が重く、ノイズデータの除去など結果の提示に時間がかかり、実用性が低かった。

上記の検討より、TSは高精度に端部の変形を抽出することが可能であり、本論による誤差要因の整理から導き出した計測方法により、工場内においてもメーカー仕様と同等レベルの精度を確保することが可能となる。一方で、TLSの精度管理への適用範囲は、現状だとCenterのような面同士の接合など奥行方向のみとなり、後処理の問題、水平・垂直方向の精度の問題により、全体的な精度管理への適用には課題が残る。

今後の展望として、以下の内容があげられる。

- ・本手法を複雑な曲面形状の船首部分の溶接工程や大型機械の溶接工程における品質管理に適用する。TSは高精度であるが計測点の数量によって計測時間がかかってしまう。一方で、TLSは短時間に大量の計測点を計測可能だが、端部の精度や後処理に時間がかかる。

- ・TLSの実用性は、後処理作業の効率化・自動化を検討する必要がある。本作業では、TLSの後処理作業としてレーザデータの作成、対象箇所抽出、CADモデルとの位置あわせ、段彩図表現を行なった。これらの作業はデータ処理時間や位置あわせ作業など計測結果の算出に時間を要した。

- ・今回検討したTSとTLS以外にも新たな3次元計測機器が実用化され始めている。例えば、イメージステーション（IS）は、TS・TLS・写真の3つの計測機能を有しており、今後の適用可能性について期待される。

- ・本作業手法で抽出された溶接工程ごとの変形量を、PDCAサイクルに基づく工程改善へ適用する方法について検討が必要である。計測結果と設計図面（CAD）の相違について、設計または作業工程への反映方法について検討する必要がある。例えば、TSによる追跡的な計測において、逆歪による歪取工程の削減可能性について言及した。歪取作業は本検証工程において1つのハッチカバーに対して1.5時間ほど要していた。仮に、本作業が1時間に短縮されれば、ハッチカバーが10セット必要となる船体の場合は、5時間の短縮が期待される。

## 謝 辞

本研究を遂行するに当たり，多大なる御指導・御教示を頂いた広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻教授濱田先生に深く感謝申し上げます．同専攻助教平田先生から頂いたご助言とご協力も本研究には不可欠でした．

常石造船株式会社の半田様と西様には計測実験へのご協力と工場計測の立会い，実験結果の解釈におけるご助言を頂きました．

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．年末年始のお忙しい時期にもかかわらず，快く現地計測にご協力を頂きました．

実験の補助をしてくれた広島大学大学院の浦野様（当時），田村様（当時），黒川様，国際航業株式会社の武田様，鏝田様，高橋様，その他全てのスタッフの理解と協力のもとに本論文を完成させることができました．感謝申し上げます．

## 参考文献

- 1) 奥本泰久, 大沢直樹, 青山和博, 後藤浩二, 小田逸人, 田崎泰博, 津川博光, 中山祐蔵, 野口千年, 濱田雄二: 船舶海洋工学シリーズ⑨造船工法, pp72-73, 成山堂書店, 2012.
- 2) 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, pp249-260, 日本船舶海洋工学会, 1997.
- 3) Dianzhen, ZHANG.etal, 'Study on Three Dimensional Coordinate Measuring Methods for Production of Ship Hull Blocks', *Proc.ofICCAS2009, I*, pp.115-118, 2009.
- 4) (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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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, pp28-29, 日本測量協会, 2015.
- 8) 柴原正和: 三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, 日本船舶海洋工学会, 2012.
- 9) 早川裕式, 小口高: 地形学における地上レーザ測量の活用, 地学雑誌, 第 125(3)号, pp.299-324, 東京地学協会, 2016.
- 10) 有富孝一, 上坂克巳, 阿部寛之, 田中洋一, 柴崎亮介: トータルステーションを活用した道路土工における出来形管理システムの構築と現場実証, 土木情報利用技術論文集第 15 号, pp259-270, 土木学会, 2006.
- 11) 増田宏, 村上健治: 大規模点群データの平準化手法に関する研究 (第 1 報) — ロバスト推定に基づく平準化手法 —, 精密工学会誌, 第 76(5), pp.582-586, 精密工学会, 2010.
- 12) 増田宏, 村上健治: 大規模点群データの平準化手法に関する研究 (第 2 報) — 大規模点群平準化のためのストリーミング処理 —, 精密工学会誌, 第 76(6), pp.689-693, 精密工学会, 2010.
- 13) 桐谷伸夫, 今里元信, 山之内博: 3 次元船体形状の計測技術, KANRIN 日本船舶海洋工学会誌, 第 40 号, pp12-16, 日本船舶海洋工学会, 2012.

- 14) 柴原正和, 河村恵里, 生島一樹, 伊藤真介, 望月正人, 正岡孝治: ステレオ画像法に基づく三次元溶接変形計測法の開発, 溶接学会論文集, 第 28 巻 1 号, pp108-115, 日本溶接学会, 2010.
- 15) 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, pp387-396, 日本写真測量学会, 2012.
- 16) 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, pp399-408, 日本造船学会, 2000.
- 17) Hiekata, K.etal., Development of The Algorithm for Accuracy Evaluation System for Curved Shell Plates By LASER Scanner, *ICCAS2011, I*, pp.127-134, 2011.
- 18) 稗方和夫, 松尾晃: 三次元計測の造船海事産業への適用, *KANRIN 日本船舶海洋工学会誌*, 第 40 号, pp2-5, 日本船舶海洋工学会, 2012.
- 19) 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, 第 17 号, pp169-176, 日本船舶海洋工学会, 2013.
- 20) (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.
- 21) 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.47No.3, pp.99-102, 2010.
- 22) 「EcoMarineG1」SAMININFORMATIONSYSTEM,  
[http://www.saminis.com/jn/product/product\\_01.php](http://www.saminis.com/jn/product/product_01.php), 2016.4.29.
- 23) 「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.
- 24) 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.
- 25) 飛田幹男: 世界測地系と座標変換, pp.42-49, 日本測量協会, 2002.
- 26) 鹿田正昭, 徳永光晴, 下川雄一, 西本憲正: 地上型レーザスキャナーデータ計測の標準化に関する調査研究, 日本建設情報総合センター研究助成事業成果報告会資料集第2010-10号, pp1-21, 日本建設情報総合センター, 2012.
- 27) 前田憲治, 織野祥徳, 横手了, 岡本良徳: 地上型レーザスキャナーの精度検証, 土木学会第66回年次学術講演会, pp15-16, 土木学会, 2011.
- 28) 榎本昌一, 小栗昇悟, 増田宏, 田中一郎: 複数のレーザスキャナによる平面計測精度の比較, 精密工学会学術講演論文集, pp547-548, 精密工学会, 2012.