

造船工程における形状計測作業の実態調査と 大型構造物の非接触3次元形状計測技術

桐谷 伸夫*、山之内 博*、今里 元信*、篠野 雅彦*、蔭山 智子*

The Investigation of working for the Measurement of Shape on the Shipbuilding Process and the Three-dimensional Noncontact Surface Profiling Technology for the Large Structural Component

by

Nobuo KIRIYA, Hiroshi YAMANOUCI, Motonobu IMASATO,
Masahiko SASANO and Tomoko KAGEYAMA

Abstract

In the manufacturing industry, both the metalworking and the measuring are important. Especially, high-accuracy measurement is necessary to make quality products. The effective metalworking and the measurement technology should be also necessary for the shipbuilding industry as a matter of course.

The purpose of this paper is to investigate the possibility of introduction of the three-dimensional noncontact measurement technology to the metalworking processing, based on the detailed investigation of working situation on the shipbuilding process. As a result of the ratio-delay analysis on the roll-forming work, it is clear that the work for the measurement of shape is responsible for a large share of the turnaround time of the working. However, it should be noted that the time of measurement work is not the nonperforming time.

Because the three-dimensional laser scanner is a remote surface profile system, it is expected of much help to the 3-D measurement work of the metal components. However, the utilization of the 3-D laser scanner is never directly useful for the effective roll-forming work in the shipbuilding process. It is necessary to evaluate the effectiveness of the introduction of the new technology based on the industry engineering. And, we hope that more useful technology will be put into practice very soon.

* 運航・物流系 計測技術研究グループ
原稿受付 平成23年4月28日
審査日 平成23年6月6日

目 次

1. まえがき	30
2. 造船工程における作業実態と形状計測	30
2.1 造船工程における加工作業	31
2.2 造船工程作業の稼働分析	31
2.2.1 稼働分析の実施目的と手法	31
2.2.2 ぎょう鉄作業の稼働分析	32
3. 大型構造物を対象とする	
3 次元形状計測技術	36
3.1 レーザースキャナー装置と	
3 次元形状計測	36
3.2 レーザースキャナー装置の	
精度検証と補正技術	36
4. 造船工程における 3 次元形状計測技術と	
作業の生産性及び信頼性向上	38
5. まとめ	40
参考文献	40

1. まえがき

製造業において、素材を図面に従って加工し、組み上げることは基本事項であり、それぞれの作業段階において作業精度を上げることは、歩留まりの向上や生産性の向上につながり、ひいては製品の品質・信頼性向上に寄与する。例えば、造船工程での作業の第一段階である鋼材調達後の切断加工工程では NC 切断などの高精度自動化作業が一般的になっており、その精度は火口位置で 0.1mm 以下、切断位置でも数 mm 以下となっている。すなわち、加工対象物を適正な精度をもって測り、加工する技術が製品の出来不出来を決定しており、これは製造業において普遍的なことである。一方、様々な作業において高度化や自動化が進められた現在でも、人間から機械への転換を容易に行うことが困難な作業があることも事実であるが、NC 切断機の導入によって切断作業の効率化や高精度化が実現されたように新たな手段や技術の検討も常に必要となっている。

造船工程におけるぎょう鉄作業は、他の製造業には見られない厚板の 3 次元曲げ加工という造船業の独自性を示すものであり、その作業は熟練作業者の持つ高い技術力によって支えられている最たるものである。その熟練の技を全面的に機械に置き換え、自動化することは決して容易なことではないが、作業の構造を定量的に解析して評価することで、部分的であっても作業者の負担の軽減や省力化から省人化を考えることは生産性

向上や品質管理の観点からも重要な課題である。

生産性向上や品質管理の観点からの作業分析のツールとしては、IE (Industry Engineering : 生産工学) によるアプローチがひとつの手段となる。IE では、作業動作の分析や作業工程の分析を通じて、生産性の向上や作業工程の改善を目的とするが、大規模複雑化した製造現場においてミクロ的な視点でのみ注視するのではなく、すなわち個々の作業だけでなく、それぞれの工程のつながりも含めた広い視野を持つことによって、IE がより有効なツールとなることを忘れてはならない。従って、マクロ的な視点に立って実施する作業工程の解析には大きな意義がある。

作業工程の解析の第一段階は、「現状の把握」にある。工程の実態を正確に把握し、理解することから全てが始まると考えられる。この「現状の把握」を実現する手段として、工程分析や稼働分析などの手法の適用が一般的である。

工程分析は、材料から製品に至るまでの流れを明確にし、問題点を明らかにすることによって改善のための対策案の策定にフィードバックすることを目的とするものであり、生産に伴う物の変化の経過を工程という切り口によって調べるのが本質である。また稼働解析は、製造現場で作業者がどのような作業にどれだけの時間を使っているかなど、時間の使われ方を明らかにすることで作業工程の実態を正確に把握し、理解するための手段である。

測り、そして加工する製造業の基本的な視点から考えるならば、日々進歩する計測機材や新たな技術の利用を検討し、問題点を明らかにすることは必須の要件である。そこで、本論文では、造船工程作業における厚板 3 次元曲げ加工作業に注目し、その作業実態を定量的に分析評価することを通じて、近年性能向上や普及が進んでいる非接触 3 次元形状計測技術の造船工程への導入や利用技術について検討した。

2. 造船工程における作業実態と形状計測

造船工程を大まかな段階として整理するならば、①設計、②加工、③組立、④搭載、⑤進水、⑥艀装であり¹⁾、これらの段階を経て、海上試運転の後に引き渡しとなる。本論文で注目した作業工程は加工段階であり、現場での作業実態の定量的な分析・評価を実施した。加工作業工程では、当然のことながら様々な段階や場面においての形状計測作業が実施されており、その実施実態を明らかにすることを含めた評価を行った。

2.1 造船工程における加工作業

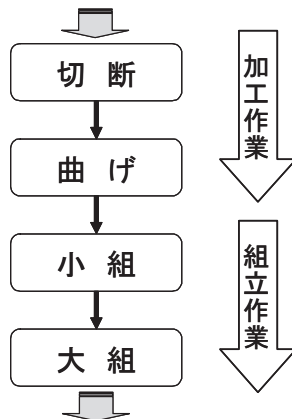


図-1 造船工程における加工作業からの流れ

前述した造船工程の大まかな流れから、加工作業工程と組立作業工程を整理して図-1に示す。加工作業工程を大別するならば、切断作業と曲げ作業に分けられる。現在では、ほとんどの切断作業がコンピュータ制御によるNC切断で行われており、板厚によりレーザー切断やプラズマ切断などが選択されている。従って、一部には手作業による切断作業も行われているが、切断精度はほぼ最高水準のものになっている。切断された鋼材は、機械曲げによる成型や更にぎょう鉄^{2)~7)}による曲げ加工の3次元成型が施されている。図-2及び図-3に機械曲げ作業とぎょう鉄作業の状況を示す。それぞれ、前処理作業としてマーキングの計測作業が施されている。

機械曲げ作業は図-2に示したように、プレス機やベンダーにより行われる冷間2次元曲げ作業であるが、図-3に示すぎょう鉄は複雑な3次元曲げ加工を要求される作業であり、作業者はバーナーの炎と水で鋼板をたわめることによって複雑な船首部材などの成型を行う。

2.2 造船工程作業の稼働分析

2.2.1 稼働分析の実施目的と手法

稼働分析^{8)~10)}は、前述したように「製造現場で作業者が、どのような作業にどれだけの時間を使っているかなど、時間の使われ方を明らかにすること」を目的として実施する。その実施方法を整理すると、「連続観測法」と「ワークサンプリング法」に大別することができる。目的はどちらも同じであるが、例えば連続観測法では、対象とする作業者について、観測者が一対一対応で始業時から終業時まで連続して観測し、発生した事象を漏らさずに記録する。従って、極めて多くの労力を必要とすることが欠点でもあるが、きめ細かい

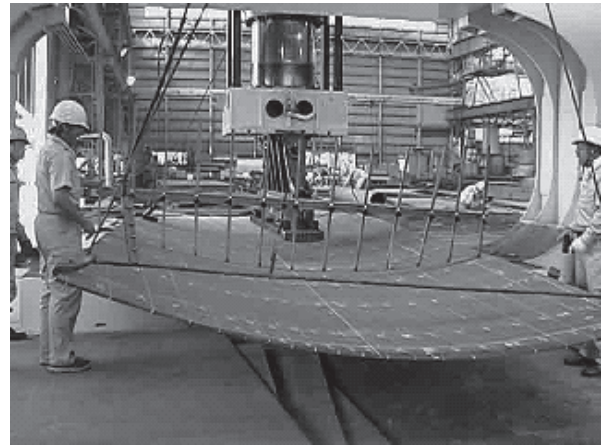


図-2 機械曲げ作業



図-3 ぎょう鉄作業

問題点の抽出が可能である長所を持っている。

ワークサンプリング法は、作業者や機械の傍らに観測者が位置して、全ての作業時間や運転時間を記録するのではなく、ランダムに選んだ時点でのみ、その時の状態（運転中、休止中かなど）を記録して全測定回数中の運転中の回数の比率から稼働率を推定する。連続観測法と比較すると、観測の実施やその後のデータ整理が容易で、一人の観測者が複数の作業者の状況を観測できること、また、作業者が観測者の存在をあまり意識せずに行きわたることから、実態に近い結果を得ることができる。しかし、瞬間的な観測結果の積み上げであるため、詳細な解析が困難であることに問題がある。また、サンプル数が少ないと誤差が大きくなる点があるため、十分な解析を行うためには結局観測数が多くなり、結果的に多くの観測時間を要するという欠点を持っている。このように、これらの観測方法にはそれぞれに問題もあることから、最近では、「ビデオ観測法」による観測が広く行われるようになっている。

ビデオ観測法では、観測対象とする作業者に対して、始業時から終業時までの非繰返し作業の観測が容易に実行でき、「連続観測法」や「ワークサンプリング法」での観測では得られない大量の記録を簡単に得ることができる。更に、解析の実施においては、現場での観測実施者以外の人間も事後解析に参加することが可能であることや観測時の状況を何度でも再現することができるという長所を持っている。

2.2.2 ギョウ鉄作業の稼働分析

造船工程におけるギョウ鉄作業を対象とした稼働分析を行うことを目的として、ビデオ観測法による計測を実施した。ビデオ撮影によって、ギョウ鉄作業のひとつの作業を鋼材の搬入設置から作業経過、作業終了、搬出移送までの一連の流れを連続して観測記録した事例である。なお、ビデオカメラはビデオ観測法に基づき、作業者に意識されることのない位置に固定設置して実施した。

作業の分類は表-1に示すように、6作業15内容分類である。また、図-4から図-7に作業状況の様子を作業分類における典型例として示す。解析対象とした長板鋼板ギョウ鉄作業は、3名の作業者によって実施されており、個別作業や協調作業を含んで実施されている事例である。図中に示す番号及び記号は、作業者の識別番号①～③と

作業内容分類を示している。このようにして観測記録されたビデオ映像情報をデータとして作業者

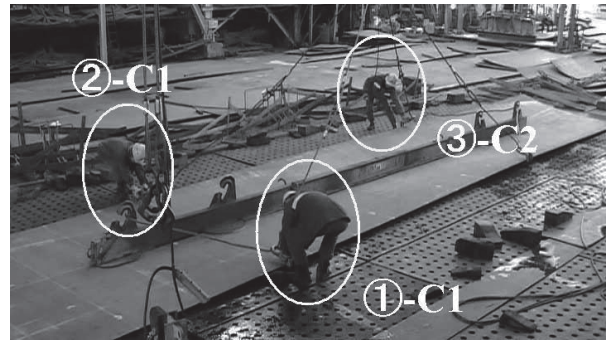


図-4 移送作業例

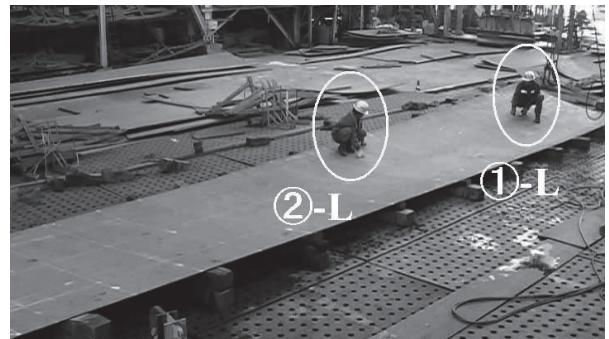


図-5 マーキング作業例

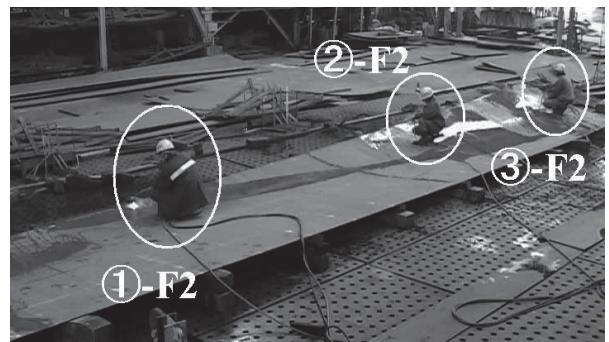


図-6 ギョウ鉄作業例

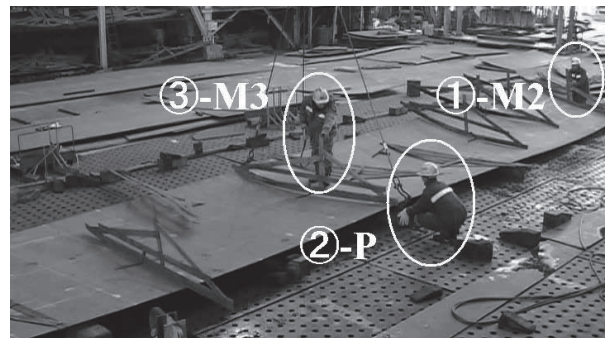


図-7 計測作業例

表-1 作業分類（ギョウ鉄作業工程）

作業分類	作業記号	作業内容分類
移送	C	1. フック付け外し 2. クレーン操作
設置	P	固定、調整
マーキング	L	準備、作業
加工	F	1. 準備 2. ギョウ鉄作業 3. 整備
計測	M	1. 準備 2. 型板保持 3. 計測作業
その他	W S V I X	移動 静止 観察 指示（被指示） 不在

表-2 1分間隔観測の作業状況 (Case1)

経過時間 [分]	作業員①	作業員②	作業員③
01	S	X	C2
02	S	S	C2
03	V	M1	W
04	C1	M1	C2
05	W	W	C
06	M1	W	C2
07	M2	X	C2
08	M2	X	X
09	V	X	C2
10	M2	X	C1
11	M2	X	P
12	M2	X	P
13	M2	X	C1
14	M2	X	M3
15	M2	X	M3
16	M	X	C1
17	S	W	C2
18	X	P	C2
19	X	P	P
20	M3	C1	X
21	M3	I	I
22	M3	M1	C2
23	M3	V	X
24	M3	V	X
25	L	M1	X
26	L	L	X
27	L	L	W
28	L	L	C1
29	L	L	X
30	W	F1	X
31	F1	F2	X
32	F2	F2	F2
47	F2	X	F2
48	F2	M1	F2
49	F2	M3	F2
50	F3	M3	F2
51	F2	F2	F2
52	F1	F2	F2
53	F1	F	F2
54	M3	X	F2
55	X	X	F2
56	X	M1	S
57	X	M1	S
58	X	X	F2
59	X	F2	F2
62	X	W	F2
63	X	M1	X
69	X	M3	X
70	X	M1	F1
71	X	M1	X
73	S	X	F2
74	F3	F1	F1
75	M1	X	X
76	X	X	M1
77	F1	X	M1
78	L	L	X
79	M1	M3	F2
80	S	W	S
81	W	W	P
82	X	X	X
83	X	X	W
84	X	X	X
87	S	S	C2
88	S	X	C2
89	X	W	X
90	X	P	X

や作業内容に注目して稼働分析を実施した。

表-2 は、ビデオ観測された作業状況を作業員別に表-1 に示す作業分類によって1分間隔でサンプリングして整理した結果である。すなわち、作業開始1分経過時点においては、作業員①は静止して作業現場に立っており、作業員③がクレーンの操作をし、作業員②は画面内に不在であることを意味している。この時、作業員①の作業行動を「S：静止」とするか、「V：観察」とするかは判別が困難となる。作業員の視線や態度により主観的に決定したが、作業中に無為な行動はないものと考えて分析を実施した。また、作業員3名が同時に同作業を継続する場合は表中より省いてある。例えば、作業開始32分経過時点から46分までは、作業員3名が同時にぎょう鉄作業を継続実施していることを示している。作業によっては複数作業員による協調作業の状況が重要な場合もある。そのような解析は、単純な稼働分析では把握しにくい分野だが、表-2 において作業員別の作業状況を精査することによって、明らかにすることも可能である。

表-2 に示すぎょう鉄作業 (Case1) では、作業員②及び③それぞれが作業進行の局面に応じて主導的な役割を果たしていることが明らかである。鋼材の搬入設置から搬出、また型板による形状計測においても率先して作業を進めることによる効率化、及び作業指示の発令が観察された。

稼働分析の第2段階として、作業時間を3作業員別15作業内容分類別に合計した結果を表-3 に示す。また、作業員3名による作業時間の合算として、15作業内容分類別に合計した結果を表-4 に示し、6作業分類による合計結果を図-8 に示す。この一工程において使われた時間は5402秒であることから、作業員3名での累積作業時間は16206秒となる。

図-8 に示すように、当然のことながら作業主体であるぎょう鉄に関わる作業時間が全体の約33%を占め、次いで計測に関わる作業が約21%、ビデオ映像内から外れた「不在」が約19%の割合となっている。ここで、「不在」は無作業を意味するものでなく、並行した他の作業等に関わった結果であることが、観測者によって確認されている。

ぎょう鉄作業において、前述のようにぎょう鉄の主作業の割合が約33%であることに対して、マーキング作業を含む型板による形状計測・確認作業の割合は約23%であることが明らかとなった。ぎょう鉄作業における形状計測や確認作業の実態は、図-7 に示すように型板を用いた複数の作業員による協調作業であり、作業工数からも作業全体に占める割合が多いことが明らかであるが、熟

表－3 作業別稼働状況 (Case1)

人 作業	作業①	作業②	作業③
C 1	57/1.06	105/1.94	174/3.22
C 2	—/—	—/—	982/18.18
P	28/0.52	344/6.37	301/5.57
L	211/3.91	211/3.9	—/—
F 1	111/2.05	134/2.48	141/2.61
F 2	1277/23.64	1517/28.08	1979/36.63
F 3	116/2.15	18/0.33	—/—
M 1	240/4.44	1363/25.23	149/2.76
M 2	494/9.14	392/7.26	—/—
M 3	342/6.33	179/3.31	217/4.02
W	501/9.27	264/4.89	385/7.13
S	105/1.94	1/0.02	54/1.0
V	177/3.28	94/1.74	199/3.68
I	26/0.48	103/1.91	181/3.35
X	1717/31.78	677/12.53	640/11.85

※ 作業時間 [Sec.] / 割合 [%]

表－4 作業別合計稼働状況 (Case1)

人 作業	作業①+②+③
C 1	336 / 2.07
C 2	982 / 6.06
P	673 / 4.15
L	422 / 2.60
F 1	386 / 2.38
F 2	4773 / 29.45
F 3	134 / 0.83
M 1	1752 / 10.81
M 2	886 / 5.47
M 3	738 / 4.55
W	1150 / 7.10
S	160 / 0.99
V	470 / 2.90
I	310 / 1.91
X	3034 / 18.72

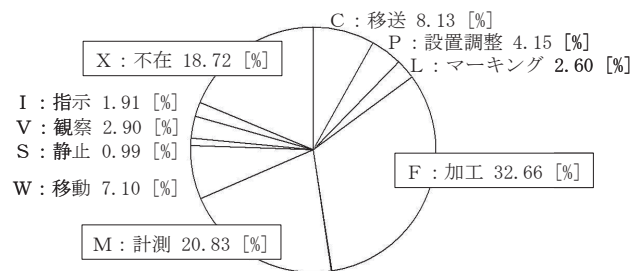
※ 作業時間 [Sec.] / 割合 [%]

練度の高い作業者の場合、形状計測や確認作業の実施と同時に次の作業手順の検討も行っていることがビデオ観測より判断される。従って、いわゆる作業実施上省くことのできない「段取りのルーティーン」と指摘できる。

稼働分析の実施目的は、対象作業における問題点の抽出から改善策の策定にある。作業性や生産性向上の見地から考えると、ぎょう鉄作業における形状計測・確認作業の工数削減を使用機材の側面や使い勝手などから検討することも重要と考えられる。また、単独による作業でなく、複数作業者による協調作業である点から考慮すると、作業チームの構成なども重要な作業計画立案のための要件となる。

Case1 作業と同様に他のぎょう鉄作業の分析結果を Case2 として整理し、表－5 から表－7、そして図－9 に示す。この Case2 作業も Case1 と同じ長板鋼板ぎょう鉄作業である。

この Case2 作業で使われた時間は 3820 秒であり、作業者 3 名での累積作業時間は 11460 秒となる。Case2 では、ぎょう鉄に関わる作業時間が全体の約 38% を占めており、次いで計測に関わる作業が約 13%、ビデオ映像内から外れた「不在」が約 12% の割合となっている。作業実態の傾向は、Case1 作業とほぼ同じと判断できるが、主作業であるぎょう鉄の時間割合が増加し、計測時間の割合が相対的に減少していることが認められる。Case1 における作業者 3 名での累積作業時間が 16206 秒であったことに対して、Case2 での累積作業時間は 11460 秒と約 7 割程度の工数であった。特に Case2 では、作業者③の行動に変化が見られ、



図－8 作業分類別構成割合 (Case1)

Case1 に比較して主作業であるぎょう鉄に関わる時間割合が減少し、画面から外れる時間割合が増大していることが顕著となっている。これも前述したように、作業者③が他所の作業に関連して、行動していることの結果であると判別されるが、その他方、作業者①や②の不在時間割合は減少し、ぎょう鉄作業の工程が円滑に進められている状況が推測される。

分析対象が 2 件の作業事例に限定された結果ではあるが、ビデオ記録に基づく詳細な観測から評価すると、造船鋼材加工工程におけるぎょう鉄作業では、主作業であるぎょう鉄の作業時間割合が作業全体時間の約 35% を占めることに対して、形状計測や確認作業が占める割合は、約 17% となることが明らかとなった。また作業中の歩行移動時間割合は約 8%、クレーン操作などの移送時間割合は約 7% となっている。

表-5 1分間隔観測の作業状況 (Case2)

経過時間 [分]	作業員①	作業員②	作業員③
01	V	P	S
02	M1	M1	C2
03	M3	M1	C2
04	C1	V	C2
05	V	W	C2
06	V	V	C2
07	V	W	M1
08	V	V	C2
09	S	P	W
10	S	W	M3
11	P	M1	M1
12	I	I	I
13	V	W	P
14	S	S	W
15	S	L	L
16	M3	L	L
17	M3	W	W
18	M3	M1	P
19	P	F1	W
20	F1	F2	X
21	F2	F2	X
22	F2	F2	X
23	F2	F2	X
24	F2	F2	X
25	F2	F2	X
26	F2	F2	X
27	F2	F2	X
28	F2	F2	X
29	F2	F2	X
30	F2	F2	X
31	F2	F2	X
32	F2	F2	X
33	F2	F2	X
34	F2	F2	X
35	F2	F2	X
36	F2	W	X
37	F2	F1	W
38	F2	F2	F2
39	F2	F2	F2
40	W	F2	F2
41	M1	F2	F2
42	M3	F2	F2
43	M3	F2	F2
44	M1	F2	P
45	F2	F2	F2
46	F2	F2	F2
47	F2	F2	F2
48	F2	F2	F2
49	F2	F2	F2
50	F2	F2	F2
51	M1	M1	F2
52	M1	M1	V
53	V	V	F2
54	S	V	F2
55	M1	M1	W
56	W	W	F1
57	P	W	L
58	W	L	L
59	V	L	L
60	X	P	S
61	X	X	X
62	C2	V	C2
63	W	V	C2
64	X	P	X

表-6 作業員別稼働状況 (Case2)

人 作業	作業員①	作業員②	作業員③
C 1	69/1.81	19/0.50	32/0.84
C 2	77/2.02	—/—	482/12.62
P	211/5.52	167/4.37	97/2.54
L	11/0.29	251/6.57	282/7.38
F 1	109/2.85	89/2.33	89/2.33
F 2	1416/37.07	1713/44.84	886/23.19
F 3	—/—	—/—	—/—
M 1	337/8.82	432/11.31	108/2.83
M 2	29/0.76	83/2.17	—/—
M 3	290/7.59	36/0.94	183/4.79
W	379/9.92	456/11.94	297/7.77
S	136/3.56	65/1.70	36/0.90
V	547/14.32	419/10.97	134/3.51
I	31/0.81	40/1.05	50/1.31
X	178/4.66	50/1.31	1144/29.95

※ 作業時間 [Sec.] / 割合 [%]

表-7 作業員合計稼働状況 (Case2)

人 作業	作業員①+②+③
C 1	120 / 1.05
C 2	559 / 4.88
P	475 / 4.14
L	544 / 4.75
F 1	287 / 2.50
F 2	4015 / 35.03
F 3	— / —
M 1	877 / 7.65
M 2	112 / 0.98
M 3	509 / 4.44
W	1132 / 9.88
S	237 / 2.07
V	1100 / 9.60
I	121 / 1.06
X	1372 / 11.97

※ 作業時間 [Sec.] / 割合 [%]

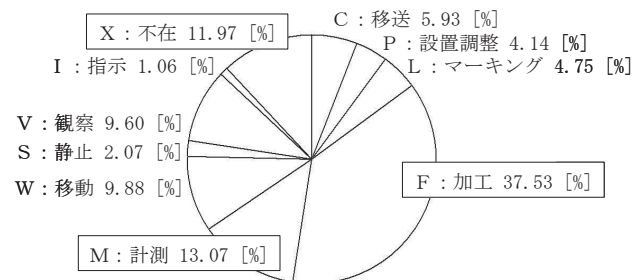


図-9 作業分類別構成割合 (Case2)

3. 大型構造物を対象とする3次元形状計測技術

3次元レーザースキャナー装置は、非接触で3次元形状計測を行う機器として非常に有用であるが、かつては高価であったことや高い精度が容易に得られないなどの短所があった。しかし近年では、大型対象物に対してミリレベルの計測精度を持つ機器の汎用化や低価格化が実現されており、大型の構造物を対象とした3次元形状計測の場面において有効な手段となっている。

3.1 レーザースキャナー装置と3次元形状計測

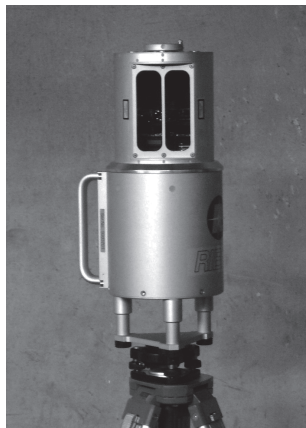


図-10 レーザースキャナー装置の外観例

図-10に3次元レーザースキャナー装置¹¹⁾を示し、表-8にその機能仕様を示す。本機は、レーザー距離測定器と2軸のビームスキャニング機構によって構成される3次元レーザースキャナー装置である。

計測原理としては表-8に示すように、機器内部に組み込まれたレーザーダイオードから発射された近赤外線波長($0.9\mu\text{m}$)のレーザー光が対象物に当たり、後方散乱光がフォトダイオードに受光されるまでの時間、すなわち、飛行時間を精密測定して、本機と観測対象物との距離を得るものである。このようにして得られた測距データは、基本的には1次元的な情報であるが、本機の場合、回転するポリゴンミラーによってレーザービームの上下縦方向のスキャニングを実行し、同時にポリゴンミラーが格納された機器ヘッド部自体を回転させることによって、左右横方向のスキャニングを実行している。この結果、観測された対象点の位置情報は計測器を原点とした3次元空間における位置座標として出力される。なお本機におけるスキャニング最大範囲は、上下角 ± 40 度、回転角 0 度 ~ 333 度である。

表-8に示すように今回使用した3次元レーザ

表-8 3次元レーザースキャナー装置の仕様

測定原理	単発レーザー光 飛行時間測定
測定距離 ① プリズム使用 ② 自然物のターゲット $p > 80\%$ (p = 反射率) ③ 自然物のターゲット $p > 10\%$	25 mm分解能で 350m 25 mm分解能で 350m 150m
最短距離	標準 2m
測定精度 (1σ 標準偏差)	$\pm 25\text{ mm}$
レーザー波長	$0.9\mu\text{m}$
レーザー光の 広がり角度	Approx. 3mrad (1mrad : 100mの距離 で 10cm のビーム幅)

ースキャナー装置はいわば旧型でもあることから、その測定精度は $\pm 25\text{mm}$ となっている。造船工程において、これは決して充分に利用可能な精度とは言いが、その対策として同一点の多数回測定による平均化処理に基づく補正技術や測定面上での1次元あるいは2次元位置補正による処理技術が開発¹²⁾されており、見かけ上の精度で $\pm 5\text{mm}$ 程度、換言するならば4~5倍程度の精度向上が可能である。

3.2 レーザースキャナー装置の精度検証と補正技術

今回使用した3次元レーザースキャナー装置は旧型機であるため、最新機と比較すると、その精度は決して高くない。そこで、その精度検証を目的として、精度評価実験を実施した。

計測は、図-11に示すように室内において距離5m離れ、平表面を持つアルミ製テスト部材をターゲットとして実施した。この時、3次元レーザースキャナー装置より発射されたレーザービームは、図-12に示すように約1.5cmの直径で計測面であるターゲット表面に当たっている。また、この距離条件では2軸でのビームスキャニング機構によって約1.6cm間隔(図-12のd)で縦及び横方向に走査されている。このようにして計測されたターゲット表面の各測定点は、3次元レーザースキャナー装置内部に設定された原点を基にXYZ軸値によって3次元空間座標を持つことになり、その位置が明らかにされる。

精度検証実験の結果を整理して、図-13に示す。これは、縦方向にミラースキャンされたターゲット中央表面の計測結果を1次元的に示したもので

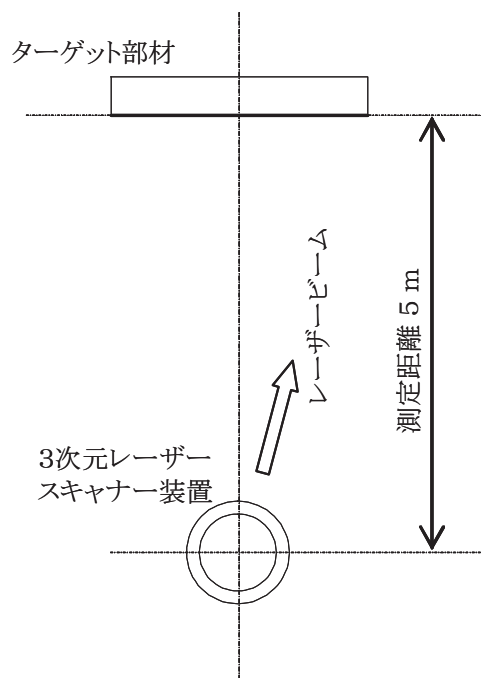


図-11 精度検証計測実験の概要

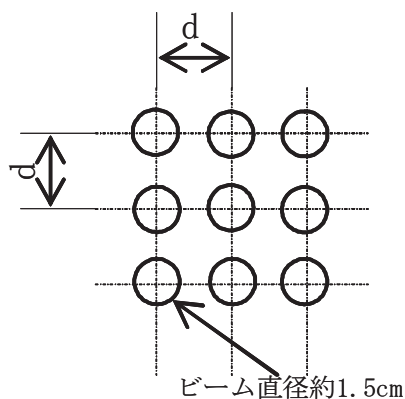
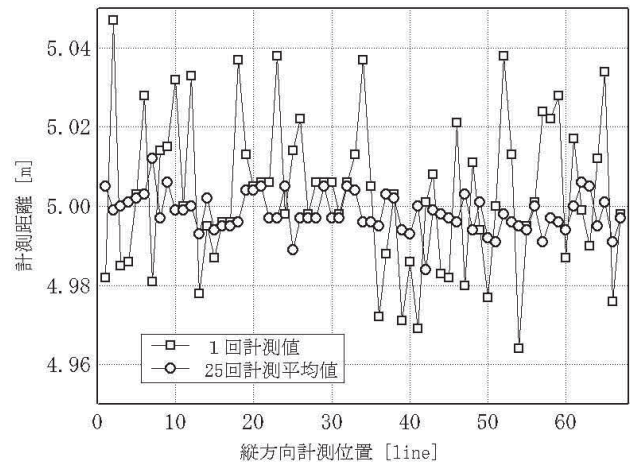
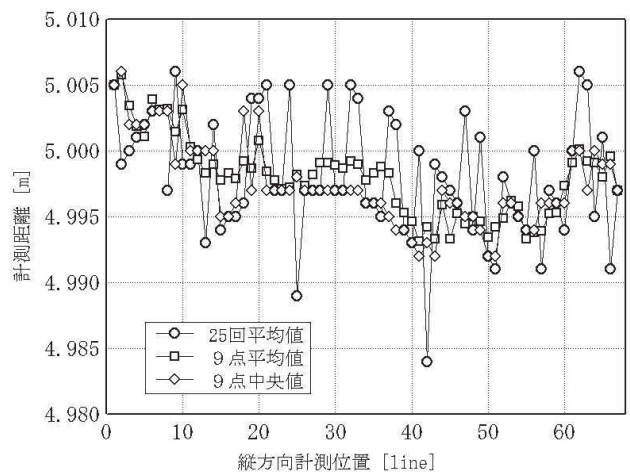


図-12 レーザービームの状況

あり、縦軸にレーザースキャナー装置原点との距離データを示している。横軸に示した縦方向計測位置とは、図-11に示す平面ターゲット部材においてスキャンされたビーム位置を上部よりビーム間隔ごとに与えたものである。図中、大きく変動している値は、1回のスキャンデータによる計測結果を示すものである。表-8に示すように、基本機能仕様として本機は $\pm 25\text{mm}$ の測定精度を持っているが、計測された実測データの標準偏差 σ は、 19.3mm であり、ほぼ仕様値の精度となっている。そこで、25回の連続スキャンによる計測結果の平均値を採用すると、その標準偏差 σ は、 4.9mm となった。すなわち、標準偏差によるデータの変動状態から評価すると、ここではほぼ

図-13 距離計測精度と補正結果
(1回計測値及び25回計測平均値)図-14 距離計測精度と補正結果
(25回計測平均値、9点平均値、9点中央値)

4倍の精度向上となっていることが推測される。これは、図-13に示した25回計測平均値の状況に見られるように1回観測のデータの持つバラツキが緩和され、精度向上の目的が達成されているためであり、25回のサンプリングによって中心極限定理に従い真値に近づいている。

図-13に示した多数回計測による精度向上の手法だけでなく、2次元での補正による処理結果を整理して図-14に示す。ここで施した処理は、注目する観測点を中心として3x3の観測点データに対する平均値と中央値を算出してデータ採用する手法である。多数回計測による手法と比較すると、平滑化には効果が期待されるが、局所的に大きな変化に対してデータがなまる、すなわち鈍化する結果となるものと推測される。図-14に見られるように、平面ターゲット部材表面に対しては、平均値、中央値処理とも当然のことながら大

きな差異は認められないが、平滑化できなかったデータの補正が実現されている。前述したように、平均値や中央値処理による 2 次元での補正では、データの局所的変化がなまることが推測されるが、

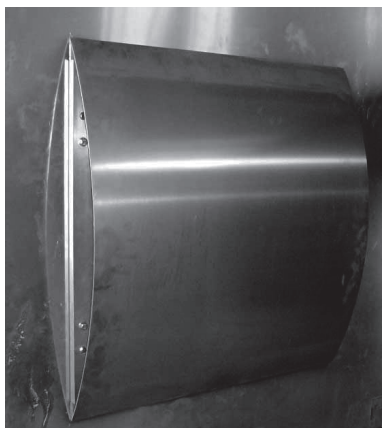


図-15 ターゲット部材（曲面）

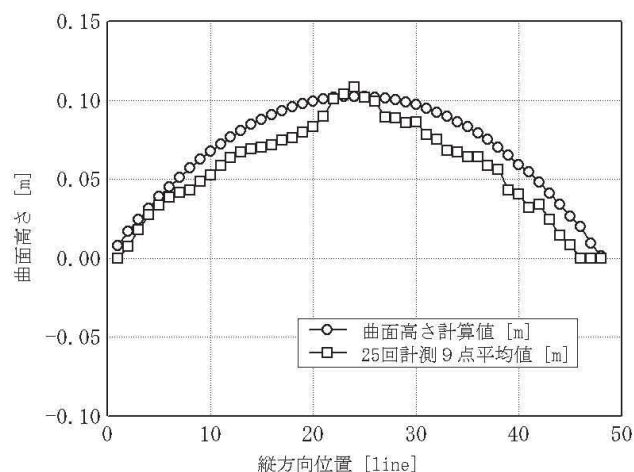


図-16 曲面表面の距離計測結果

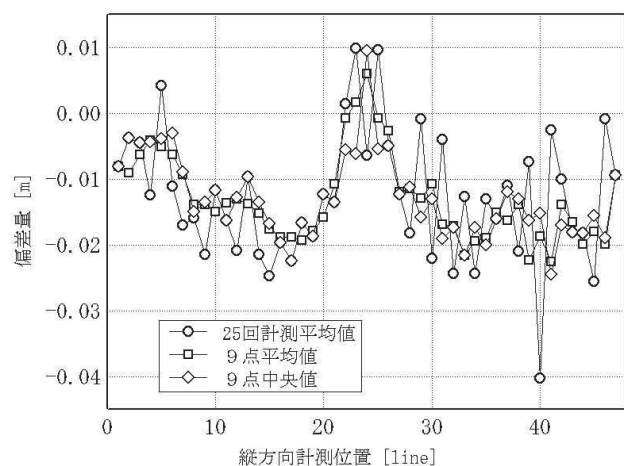


図-17 曲面表面の距離計測精度と補正結果
(25 回計測平均値、9 点平均値、9 点中央値)

計測対象物の形状性状によっては、例えば比較的大きな曲率での変化などには多数回計測平均化手法に加えて、実用上有効な補正手段になると考えられる。

平面ターゲットに加えて曲面を持つターゲットについても、レーザースキャナー装置の計測精度検証実験と補正処理の効果について検討を実施した。使用したターゲット部材は図-15 に示すように曲面を有するものである。使用したターゲットは、材質はアルミ材、縦横 75cm で中央部高さが 10cm となっており、これを図-15 に示すように横方向に設置して計測実験に供した。

レーザースキャナー装置による曲面表面の計測結果を図-16 に示し、図-14 と同様に 25 回計測平均値とそれに加えての 9 点データの平均値及び中央値処理に基づく結果を図-17 に示す。

平面計測の結果と異なり、ビーム径が広がった場合に、曲面では表面に当たったレーザーの後方散乱が受光センサに届くまでの経路が一樣でないために精度の低下が見られるが、それでも複数回計測結果における標準偏差 σ は 10.0mm であり、9 点平均値と中央値による補正処理ではそれぞれの標準偏差 σ は 7.0mm となっていることが明らかとなった。

使用したレーザースキャナー装置の計測性能や精度は、表-8 に示すように対象物の表面性状によって強く影響を受けるが、造船工程の現場における計測対象は鋼材であることや比較的近距离での計測となることから、充分に利用可能な機材であると言える。

4. 造船工程における 3 次元形状計測技術と作業の生産性及び信頼性向上

レーザースキャナー装置は、いわば旧型機であっても、計測方法や数値補正技術によって造船工程における形状計測に役立つ十分な性能を持つことが明らかになったが、最新機種であれば更に性能の向上が実現されている。表-9 に最新機の性能仕様¹¹⁾の概要を示すが、このような最新機材を使用し、新たな計測方法や数値補正技術を導入することによって、1mm 程度の測定精度を実現することも可能と考えられる。このような精度であれば、造船工程の曲げ加工作業においても十分な仕様である。しかし、例えばぎょう鉄作業における型板を用いた現状の作業に直ちに取って代わるとは考えられない。それは、稼働分析結果で示されたように形状計測に関わる作業が、加工作業全体において大きな割合を占めていても、形状計測から加工への作業の流れや手順を変更することの

表-9 3次元レーザースキャナー装置の仕様
(民生品としての最新機種事例)

測定原理	単発レーザー光 飛行時間測定
測定距離 自然物のターゲット $p \geq 80\%$ (p = 反射率) 自然物のターゲット $p \geq 10\%$	400m 140m
最短距離	標準 1m
測定精度 (1σ 標準偏差)	$\pm 6 \text{ mm}$
レーザー波長	$0.9 \mu \text{ m}$
レーザー光の 広がり角度	Approx. 0.3 mrad

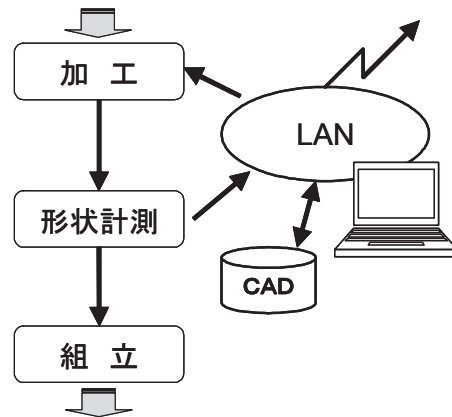
図-18 造船工場における加工作業場から
加工済み部材置き場の様子図-19 造船工場における加工済み部材の
集積管理状況

図-20 造船工程における加工品管理の方策

優位性が総合的に大きいとは考えられないためである。ただし、生産管理の観点から考えるならば、製品の加工作業精度を確認し、品質を保ち管理することの重要性は言うまでもない。

図-1で示した造船工程における加工作業からの流れを実際の造船工場のレイアウト事例で示すと、図-18と図-19の通りであり、図に見られるように加工済みの部材は搬出口付近に集積されて、次の組立工程への移送を待つ状況となっている。ここで、図-20に示すように生産管理の段階として、加工済み部材の形状計測工程を導入すれば、製品の加工作業精度の確認や品質管理の側面において有効な手段となる。

現実の問題として、生産現場において加工済み部材の形状計測工程を取り入れるためには、その作業の自動化や無人化が可能であることが重要な要件であり、かつ、そのためのシステム構築が必要となるが、このような造船工場の現場においても決して実現不可能な技術ではない。例えば、工場内高所に加工済み部材置き場を俯瞰するような位置を確保して、集積管理状況を常時監視するような動作によって加工済み部材の有無や形状を差分情報として取り込み、その形状情報を自動計測し、整理、記録することも可能である。この場合、現実には計測面は部材の一面に限定されるが、板厚を自動的に加味し、3次元情報として成立させることも容易なことであり、3次元CAD情報として一元管理するようなシステムの構築も可能である。

造船業におけるCIM（Computer Integrated Manufacturing：コンピュータ統合生産）の取り組みは「高度造船CIM」として広まり、成果を上げている¹³⁾が、さらに製造現場において、新しい技術や機材を取り入れた試みも図られるべきである。熟練作業者の技術を有効に生かすためにも、

主作業を支える形状計測などの工程の高度化や加工工程後の品質管理、生産管理によって生産性の向上や製品の信頼性向上を図ることが重要である。

5. まとめ

造船工程において、ぎょう鉄作業に注目して実施した稼働分析の結果、主作業であるぎょう鉄の作業時間の割合が約 33%であることに對して、副作業であるマーキング作業の割合は 2.6%であり、型板による形状計測・確認作業の割合は 20.8%であることが明らかとなった。作業占有度合いから考えると、形状計測や関連作業が決して小さいものでない実態が認識される。しかし、作業状況や作業形態から判断すると、一連の作業の流れの中から長年の経験によって確立された手順とも指摘できる。従って、このように成熟し、確立された手順や段取りを変更することは非常に困難であるが、少なくとも使用する作業機材の見直しによる使いやすさや取り回しやすさの向上、効率性の向上などへの取り組みは積極的に続けることが求められる。

工程管理や品質管理の観点から考慮すると、適正な手順によって加工された製品であっても加工後の製品状態を確認・記録することは必要な作業と考えられる。熟練した作業者の技術のみによって支えられる精度保証には限界もあり、現状の作業工程の流れを毀損することなく実施できる手段を取ることができれば、不良品の減少による歩留まりの向上など、生産性の向上や品質の保持に有効な効果がもたらされる。

大型構造物や部材の 3 次元非接触形状計測技術は、これまで建築や土木の分野で多く利用されてきたが、高精度化の実現により十分に造船の分野でも利用できるようになった。本論文で示したように観測データの 2 次処理によってミリレベルでの計測精度が簡便に得られることの利点は大きく、大型の部材を 3 次元加工する造船工程への導入による効果も期待される。また、本来屋外使用を前提として開発されてきた 3 次元レーザースキャナー装置の造船工場での利用には何も障害となる条件が無く、導入は比較的容易な機材であり、技術でもある。価格面で考えるならば、費用対効果を十分に評価する必要があることは言うまでもないが、造船は大型構造物を対象とする技術であることからその効果は十分に期待できるものである。

高品質で高信頼度の製品を作り出すためには、高精度で対象物を測る技術が必須であることから、3 次元レーザ計測技術は様々な分野で注目

されている。造船分野でも 3 次元レーザ計測の利用技術の研究はさらに重要となっているが、その背景において生産性の向上や高信頼度化、効率化などの目的を明確にして、より実用的なシステム構築を図ることが重要である。

謝 辞

本研究の実施において、造船工程作業実態観測などで多大なるご協力とご指導を頂いた常石造船株式会社の関係者各位に心よりの謝意を表します。

参考文献

- 1) 野澤和男：船 この巨大で力強い輸送システム、大阪大学出版会（2006）、pp.171-175
- 2) 松岡一祥、吉田康彦他：船体曲面外板の表現及び製造方法に関する基盤研究、鉄道・運輸機構研究報告書、2003-03
- 3) 砂川祐一、松岡一祥他：ぎょう鉄作業機械化システムの開発、日本造船学会講演会論文集、第 3 号（2004）、pp.99-100
- 4) 富澤茂、松岡一祥他：ぎょう鉄技能の伝承、日本造船学会講演会論文集、第 3 号（2004）、pp.101-102
- 5) 松岡一祥、砂川祐一他：ぎょう鉄作業と曲面の展開、日本造船学会講演会論文集、第 3 号（2004）、pp.103-104
- 6) 田中義照、松岡一祥他：ぎょう鉄データベース、日本造船学会講演会論文集、第 3 号（2004）、pp.105-106
- 7) 林慎也、松岡一祥他：ぎょう鉄技術・施工の現状、日本造船学会講演会論文集、第 3 号（2004）、pp.107-108
- 8) 池永謹一：現場の IE 手法、日科技連（2007）
- 9) 石原勝吉：現場の IE テキスト、日科技連（2008）
- 10) 生産管理講座：
<http://www1.harenet.ne.jp/~noriaki/link7.html>
- 11) リーグルジャパン株式会社：
<http://www.riegl-japan.co.jp/>
- 12) 桐谷伸夫、山之内博、今里元信：狹隘環境条件における 3 次元船型形状の計測技術、日本マリンエンジニアリング学会学会誌、第 46 巻 1 号（2011）、pp.76-81
- 13) 海洋政策研究財団：
<http://www.sof.or.jp/jp/outline/index6.php#08>