

# 船体形状復元法に関する基礎研究

## — 多点レーザー照射システムの適用と精度評価 —

田中俊介\*1・八木 光\*2

### Basic Study of A Hull Form Restoration Method — The Development of a Multi-Laser Projection System —

Shunsuke TANAKA and Hikaru YAGI

#### Abstract

Ships of all times and places have been playing an important role in transportation of cargoes and also the culture. When we study the maritime cross-cultural exchange in East Asia, the role of ship is outstanding. Recent years, ancient wrecked ships have been excavated in fairly good conditions from the sea in China and Korea, and intensive studies have been conducted from the stand point of archaeology and nautical archaeology. It is understood that engineering approach into such ships may contribute to make various historical events or incidents clear technically by confirming the historicity of documentary accounts and oral traditions. However, researches from engineering aspects are very limited especially in ship performances. One possible reason is that excavated ships are very limited in portion of the whole hull, and reconstruction of the exact whole hull shape is prevented. Another reason may be the difficulties in hull form conservation during excavation and reconstruction of wooden hull. In order to measure the hull form with the accuracy allowing us to draw hull lines, direct on-site measurement is preferable but difficult. On the other hand, recent technologies made it possible to measure various shapes without direct contact to the object. One typical application is 'laser optical systems' used in civil engineering, architecture and archaeology and so on. This is basically triangular survey to each point of target, and requires fairly long time.

Another method is 'stereo photo system' which requires no direct contact. But the optical color-signal detection depends on the distinctiveness of color of the target point on the body, and such condition is often beyond our control. In the cases of wrecked wooden ships, it is usual that the hull is monotonic color of water-logged smooth surface. This makes it difficult to detect the exact three dimensional shape.

In this study, stereo photo method is investigated combined with a newly developed multi-laser projection apparatus which makes it possible to mark multiple clear and distinctive targets on the body.

For the first step, a model ship is used to simulate a wrecked ship with smooth and monotonic color body. The analysis of photographs and consecutive treatment of fairing technique are applied using a computer aided engineering tool in ship design. The results indicated that the ship dimensions and fullness factors of the hull form can be derived with reasonable accuracy within several percent.

## 1. 前書き

古代から現代にいたるまで、世界の文化交流や通商にお

いて船舶の果たした役割は非常に大きいことはいうまでもない。長年にわたり日本と中国、韓国などの東シナ海に面する国々の交流においては、地勢学的な特徴から船が中心的な位置を占めている。近年、古代船の研究においては考

2007年5月10日受理

\*1 三井造船株式会社, 研究当時東海大学海洋学部船舶海洋工学科 (Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd., Former Undergraduate, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, School of Science & Technology, Tokai University)

\*2 東海大学海洋学部船舶海洋工学科 (Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, School of Marine Science & Technology, Tokai University)

古学，水中考古学や交流史面の研究と合わせ，工学的な観点からも当時の船についての解明が進んでおり，その材料，構造や船の地域特性も明らかになりつつある．中国や韓国においてはかなり大規模な古代沈没船の発掘も盛んに行われ，考古学的な研究が行われている．(例えば，Jeremy Green and Zae Geum Kim, 1989; Jeremy Green et. al. 1998; He Guowei, 2006) しかし，船舶の性能の解明などの工学面での研究については必ずしも十分とはいえず，研究が進むことにより文理融合的な史実の解釈等にも貢献することが期待されている．

古代船の復元方法は，海底遺跡から船体部材を発掘し，保存処理を行い，船体形状を復元する方法が一般に行われている．これらの過程を経て船体形状を詳細に数値化することが行われる．この過程では発掘，保存などに関する時間的および人的な面で多大な負担が発生する．船体形状では非発掘部分の再現をいかにこなすかも重要となる．古代船舶の性能などの特性を現代の工学的な観点から精査するためには船体形状を厳密に明らかにすることが必須条件である．水中での3次元計測も行われているが水中装置の導入，作業ともかなりの困難を伴う．(Gould, 2000) したがって，高精度の3次元形状計測法の開発が望まれるところである．

陸上における各種物体の形状計測では，3次元物体形状を非接触で計測する方法が数多く開発され，土木建築分野，自動車部品等で幅広く利用されるようになってきている．船舶分野では安達，小嶋氏らはレーザートータルステーションを利用し，神社などへの古い時代の奉納模型を詳細に調査し歴史的な船型を再現保存することも行っている．ここでは船型のオフセットの計測に加え，艀装品などの形状データまでもが詳細に再現され，数多くの成功例がある．(Kojima, 2006; 小嶋, 2006) 一方，この方法は精度確保の面から計測点を1点ずつ座標計測するという手法であり，長時間の作業を必要とする．対象を発掘船に限れば，発掘現場での精密な計測は事実上困難である．また非接触のステレオ写真システムに関しても木造沈没船では木材の朽ちた色が単調であることや形状が不明瞭な場合も多い．したがって写真システムでは，はっきりとしたマーカーを船体表面上に設定することが鍵となる．

本研究では，多点レーザー投射システムを利用し，船体表面上に多点マーカー設定を行い，ステレオ写真法により非接触かつ瞬時にデータ採取を行い，船型設計用として開発された3次元CADシステムを利用することにより，船舶の複雑な曲面を再現し，船型再現の精度を検証することとした．なお，船型への適用に当たっては精度維持の観点から多数の区画に分割撮影し，それらの写真を接続することが不可欠であるが，その接続方法について，どの程度の差異を生じるかもあわせて検討した．

具体的には，新たに設計した多点レーザー照射装置，市販用カメラを用い，ステレオ写真解析システム (Kur-

aves) にて形状復元を行い，船型の特徴である表面の滑らかな連続性を確保するために船型設計用ソフトウェア (Maxsurf) を用いて形状を再現しようとするものである．本報告では，その基礎研究として既知の船型に対して本システムを適用して線図を復元することにより，システムの適用の可能性，および船体諸寸法の算出を行うことにより精度を評価した．対象船型は Todd の Series 60,  $C_b=0.65$ , 長さ 1.25m の模型である．(Todd, 1953) 模型船の要目を Table 1 に示す．

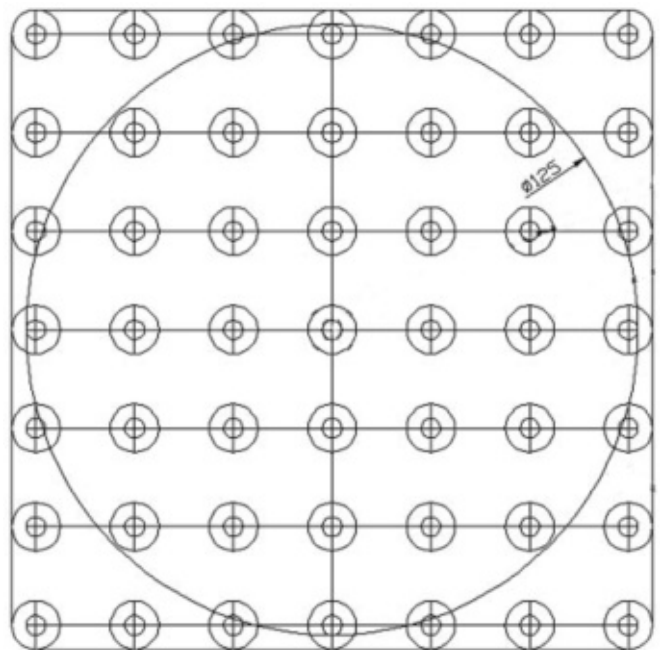
**Table 1** Principal Particulars of Model Ship

Length PP	1.250m
Breadth (mld.)	0.172m
Design draft	0.069m
$C_b$	0.65

## 2. レーザー投射システム

レーザー発光体は赤色レーザー (LM-102-A2) を使用し，Fig. 1 に示すとおりアクリル基板の上に 20mm 間隔で上下，左右 7 個ずつ昇目状に配置し，合計 49 個のマーカー発光を可能とした．また，マーカーの配置については，各マーカーが等間隔に配置する必要はないが，船体の形状がスムーズな面で構成されるように滑らかにフェアリングする後処理の際の利便性を考慮し，左右，上下方向ともほぼ一直線に投光できるように各レーザー発光器の LED 設置角度の調整を行った．Photo 1 に調整状況を示す．

ステレオ写真の解析システムと船型 CAD 間のデータ受



**Fig. 1** Arrangement of LEDs of Laser Projection System

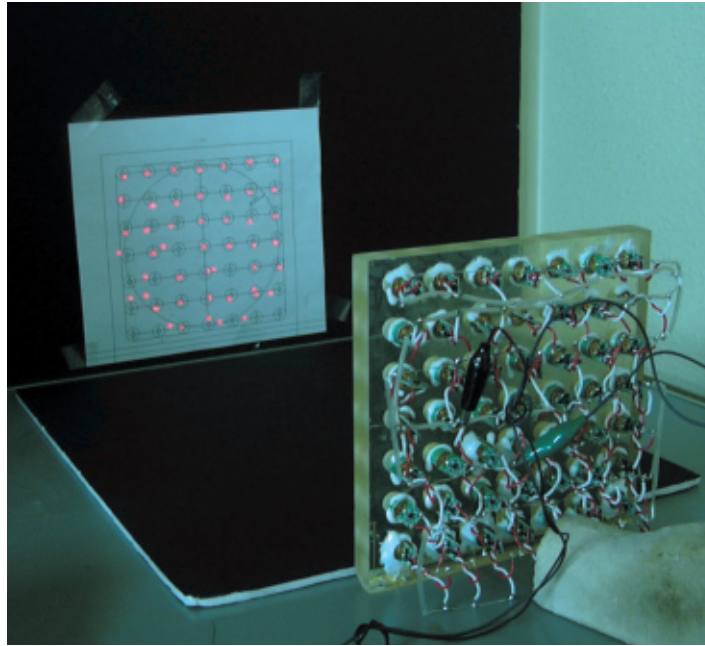


Photo 1 A Scene during the Adjustment of Laser Projection System

け渡しは、DXF形式にて行った。

### 3. ステレオ写真計測

船体写真は船の長さ方向に10分割して撮影し、模型上の喫水線とオーディネイトマークを接続点として利用して1隻の船体として合成した。各分割部分において2枚の写真を撮影し解析した。船首部の写真撮影の状況を Photo 2 に示す。写真解析の手順は Fig. 2 に示す。まず、カメラのレンズ歪み修正、分割船体部接続を行ない、結合後の船体

全体の3次元相対座標を得た。船首部の結合後写真を Photo 3 に、また全体の3次元ワイヤーフレームとして作成された復元船体を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 に示すように、X軸が船底の基線上船体中心線を示し、幅方向にY軸、深さ方向にZ軸をとり座標を定めた。なお、ワイヤーフレーム交点の分布は船体前後部では詳細に、中央近傍では平行部が平面であることから点数を少なく配置している。算出された船体座標の滑らかさに関しては Photo 3 の結合写真で示される通り、事前に描かれた水線およびオーディネイト線が両方とも滑らかであり前

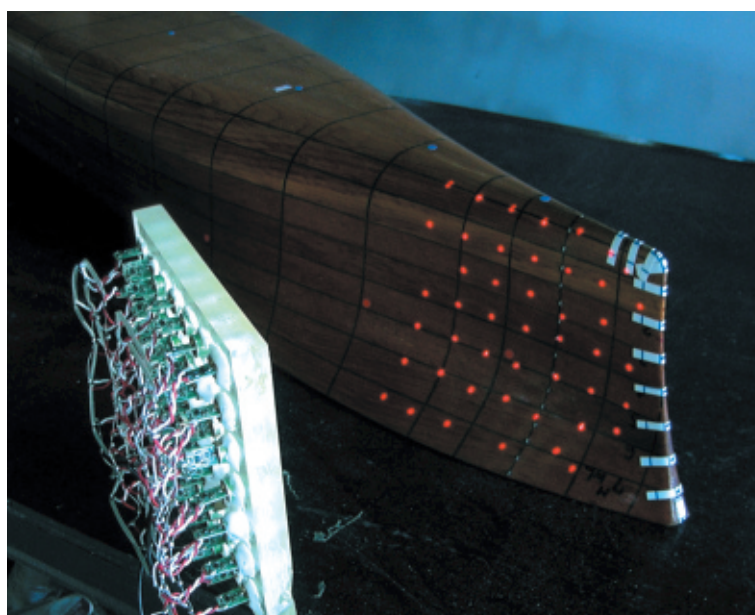
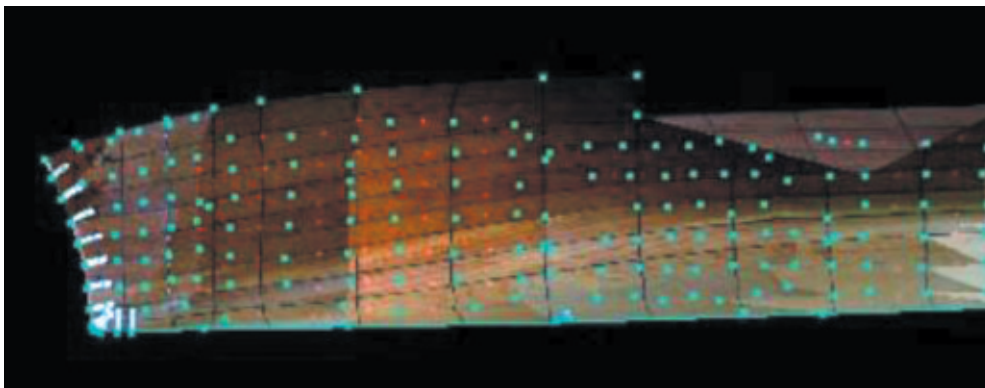


Photo 2 Laser Projection on the Model Ship Bow

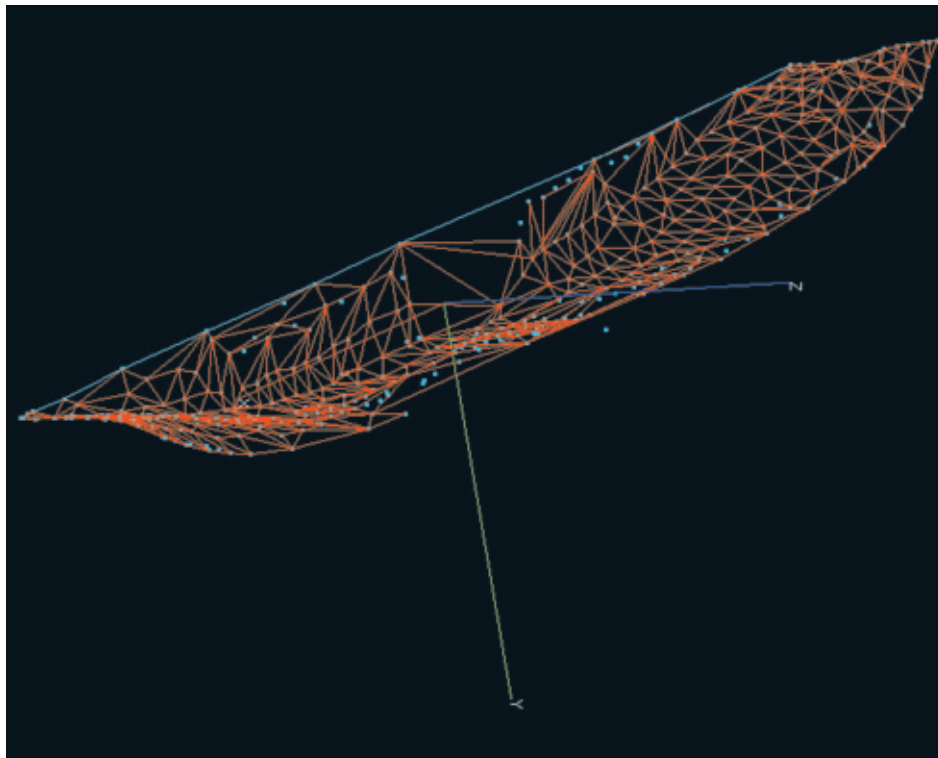


Step 1	Correction of aberration of camera lens.
Step 2	Set of datum point, coordinates and scale. Calculation of camera locations.
Step 3	Calculation of the bearing of one marker in a photo from the camera.
Step 4	Set of the marker's location in another photo of the pair.
Step 5	Calculation of the coordinate of the marker.
Step 6	Repeat the above step3-step4 for remaining markers.
Step 7	Build-up of 3-D coordinates, wire mesh or photo.
Step 8	Connection of components and integration of the total model.
Step 9	Generate CXV file.

**Fig. 2** Procedure of Photo Data Acquisition and Analysis



**Photo 3** Built-up Photo of Model Ship (Fore Half)



**Fig. 3** 3-D Wire Frame Hull Model Generated by Stereo Photo

後10区分の船体立体形状はほぼスムーズに連結されていることが分かる。

#### 4. 船型設計 CAD による再現性評価

船型復元の精度を調査するために、算出された船体座標データを用い船型設計用 CAD システムで定量的な再現性評価を行った。評価内容は1) 主要寸法、2) 水線面と横断面形状、および3) 正面船体の排水量分布などの船体形状全体の積分値を対象とした。さらに、写真の結合時に用いる共通マーカ数、必要最小数3点とした場合と40点とした場合の2つのケースについて上記諸数値に対する影響を調査した。

##### 4.1 船型フェアリングについて

船型再現には船型設計用 CAD システム Maxsurf を用いた。写真解析により算出した座標には写真のレンズ歪み、マーカ位置選定および連結時等の各段階において除去できない誤差が入るため、供試模型は船体表面が滑らかであるという条件で、一般船舶で行われるフェアリングを実施して形状を確定した。

フェアリングを行った後の復元船型をワイヤーフレームとして表わすと Fig. 4 となる。また、Series 60 の母船型として与えられる船体のオフセットとフェアリング後の水線面図及び正面線図との比較を Figs. 5, 6 に示す。両図から母船型として与えられた黒丸点で示すオフセットと復元線図は概略良い一致を示していることが示されている。ただし、詳細にみると、水線面図では船首、船尾部の先端部でやや誤差が大きくなる傾向があることが分かる。また、

深さ方向では船底部に近いほど誤差が大きいことが分かる。これらは、曲率の大きい位置に対応しており、誤差が増大する傾向にあることは妥当と言える。しかし、フェアリングは人的な要素も入ることから個人の技術上の問題もあり、必ずしも写真による船型復元の精度とは言い切れない点に注意が必要である。

船体の排水量の船長方向分布を示す CP 曲線で比較をすると Fig. 7 となる。オフセットの差異でも示されたとおり、前後部の曲率の大きいところでは座標値の積分である CP 値の差異が大きくなっているが、全体的には排水量の前後分布をかなり良く再現できることが分かる。

##### 4.2 再現誤差の検討

船型主要目の各要素について、写真復元による値と Series 60 の値を比較して Table 2 に示す。同表には、連結点数が必要最小値の3点の場合と40点の場合も比較している。

同表からわかるとおり、本システムによる船型の復元精度は接続点数が多いと最大で数%良くなることが分かる。40点の多点接続の例で推定精度を見ると、長さ寸法で約-1%から+7%、肥せき係数面積等の積分値では-2%程度となることになる。この際は前節でも述べた通り曲率変化の大きいところにおける形状再現の精度が悪いためであり、本例では曲率の大きい部分を小さく推定していることになる。

この推定値については、現代の船舶の設計や建造からみると問題となる値ではあるが、古代沈没船の復元という利用方法に限れば非常に有意義な精度が得られていると言える。

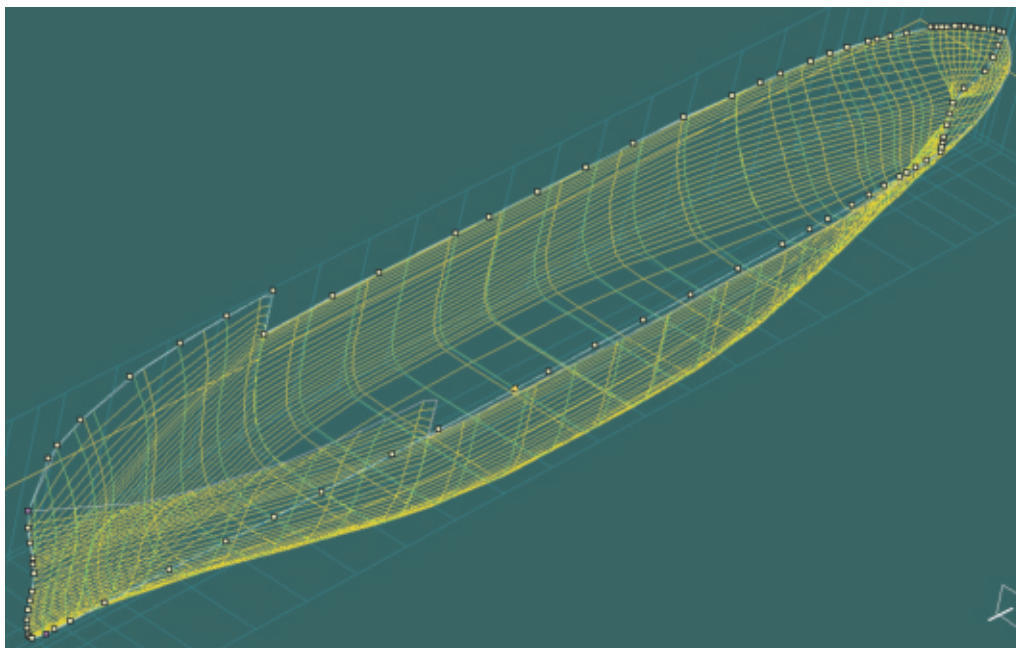


Fig. 4 Hull Form Faired by CAD System

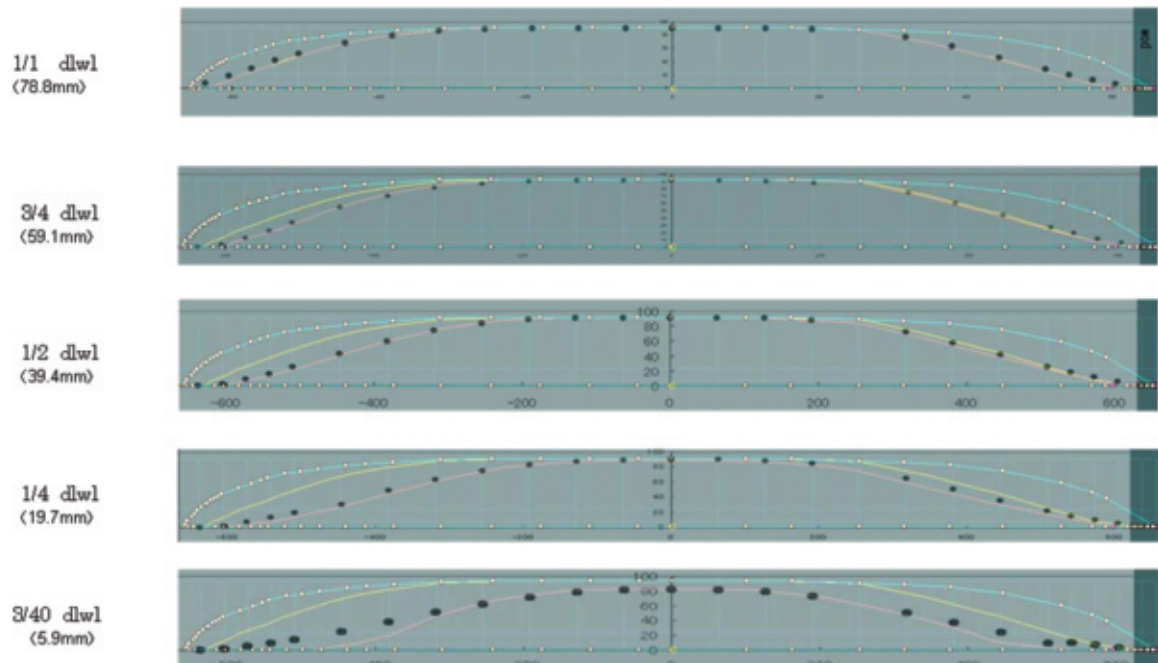


Fig. 5 Comparison of Generated Hull Form with Prototype (Water Line)

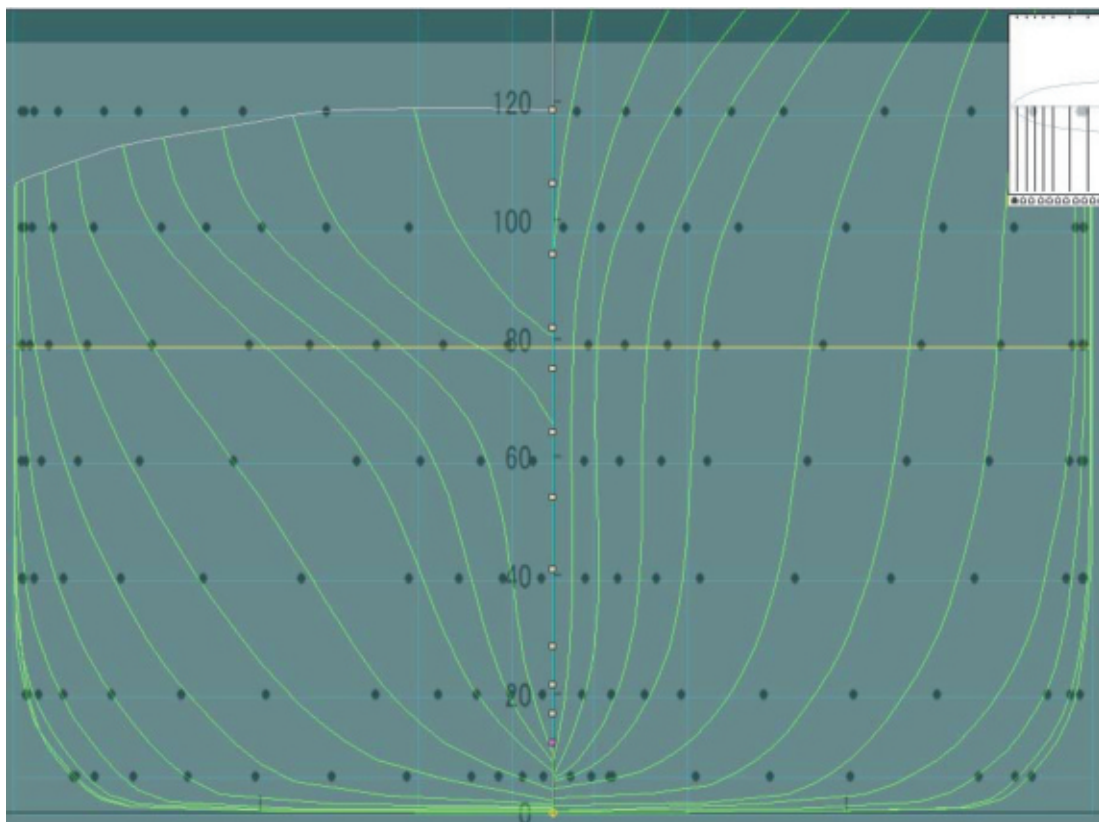


Fig. 6 Comparison of Generated Hull Form with Prototype (Body Plan)

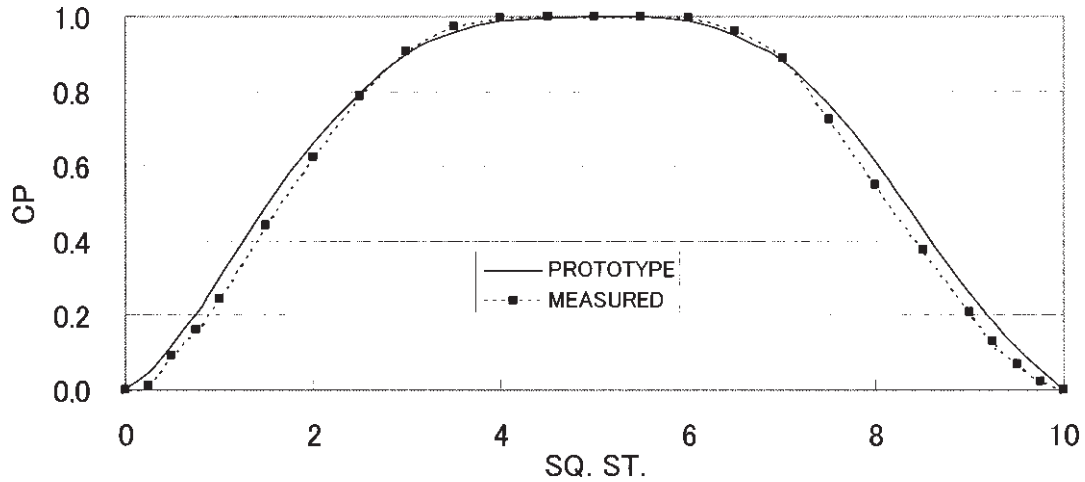


Fig. 7 Comparison of Prismatic Curves

Table 2 Effect of Number of Connection Points on Accuracy

No. of Connection Points	Reproduceability (%)		Difference (%)
	40 Points	3 Points	
Cb	97.63	96.31	1.32
Cx	98.78	98.78	0.00
Cp	97.58	97.73	-0.15
Lpp	100.01	99.69	0.32
Lwl	98.70	99.15	-0.45
B	99.77	105.45	-5.68
dwl	106.85	112.03	-5.18

## 5. まとめ

古代船の船型復元方法として多点レーザー照射による非接触ステレオ写真による手法の適応性について、小型模型船を対象として実用性を検討した。その結果以下のような結論を得た。

- 1) ステレオ写真システムによる船型復元法は、船体表面上マーカー作成用として多点レーザー照射により非接触で船体形状を復元することが可能である。また、写真接続の共通点数を多くすることにより復元精度はさらに向上する。
- 2) 小型模型船での適用例では、船舶設計用 CAD により復元精度を評価した結果、船舶の主要寸法や船型肥せき係数で見るとほぼ数%の精度で復元できる可能性を示した。さらに、この誤差は復元船舶の性能の全般的な評価に対しては十分利用できる精度と考えられる。
- 3) 画像解像度の高いカメラの利用により精度の向上が期待できることから、より大きな対象物についても同程度の復元精度が維持できると考えられる。したがっ

て、今後は大型対象物での検証および実用的なシステムの構築が期待される。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金（特定領域研究）（課題番号17083035）により実施した。

## 参考文献

- Gould, R. A. 'Archaeology and the Social History of Ships', Cambridge University Press, 2000.
- He Guowei (何国衛), Preliminary Study on Three Ancient Ships Excavated at Penglai Port', Proceedings International Symposium on Penglai ancient Ship, Penglai, China, August, 2006, pp.87-101 (中国語).
- Kojima, R. 'On a Method to Measure the Shape and Structure of Ships Using Laser Instrument', Proceedings International Symposium on Penglai ancient Ship, Penglai, China, August, 2006, pp.354-362.
- 小嶋良一, “進貢船模型の船体形状計測方法について”, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第3号, 2006年11月, pp. 117-120.
- Green, J. and Kim, Zae Geum, 'The Shinan and Wando

sites, Korea: Further Information', The International Journal of Nautical Archaeology, Vol. 18, 1989, pp.33-41.  
Green, J., Burningham, N., and Museum of Overseas Communication History, 'The Ship from Quanzhou, Fujian Province, Peoples Republic of China', The Inter-

national Journal of Nautical Archaeology, Vol. 27. 1998, pp.277-301.

Todd, F.H, 'Some Further Experiments on Single -Screw Merchant Ship Form- Series 60, Vol. 61, Trans. SNAME, 1953, pp.517-589.

## 要 旨

古代船の船型復元の基礎研究として、レーザー投光システムとステレオ写真法を組み合わせることにより船体線図の復元を図るとともに、船型設計用のCADを用いることにより船型のフェアリングを行い、船体形状および主要寸法再現精度についての評価も行った。

供試船としてToddのSeries 60,  $C_b=0.65$ の1.25m 模型船と一般用カメラを用いて評価した結果、レーザー投光システムを用い、船体の寸法および肥せき係数などの船型諸要素を数%程度という妥当な精度で算出でき、古代船の船型の復元に適用できる可能性があることを示した。