気相界面の可視化と船体表面の水中照射 による波高の光学的計測

正員 二 宮 伸 治* 正員 茂 里 一 紘*
学生員 細 川 学**

Measurements of Wave Height by Visualizing Air-Side Free-Surface and Illuminating the Wetted Surface of Hull through Water

by Shinji Ninomiya, *Member* Kazuhiro Mori, *Member*
Manabu Hosokawa

Summary

Two optical methods to measure wave profiles are proposed with some accuracy analysis and examples. Although these are independent two methods, both are new techniques to get clear lines of free-surface boundaries. The methods provide enough contrast there for the boundary to be identified accurately by the image processing manner.

The one is the method to measure wave profiles along straight cutlines where the air-side of free-surface is visualized by mist of dry-ice (CO_2 gas). The mist, which is put on the water surface at upstream of the circulating water channel, covers all the surface in contact by the shearing stress of the moving water surface. The laser light sheet clearly visualizes the edge boundary of the air-side.

The second is for the measurement of the hull-side wave profiles by illuminating the wetted surface of the hull through the water. The surface looks brightly white as if some kinds of white paints were painted. It has enough contrast along the free-surface to be identified definitely.

Because the original pictures by the both methods have clear change in contrast across the free-surface boundary, the methods can provide relatively accurate results even after image processing. Because both methods are enough simple and automatic, they can be applied for daily measurements of the wave height in the circulating water channel.

1. 緒 言

船型学分野で波の持つ物理的情報の重要性を指摘し、それを船型改良に応用して大きな成功を収めたのは乾である。乾は、波面の写真撮影による波紋観察やアルミ箔粉の散布された水面の立体写真を利用した波高の定量的計測、安息香酸の化学反応を利用した船側波形計測などを行い、波のもつ物理的重要性を具体的に示した¹⁾。いずれの計測法も可視化的手法で、実験方法としても先駆的なものであった。波は船型改良のためだけでなく、自由表面界面の現

象に直接関係した重要な物理的情報である。

その後、波形解析による造波抵抗の直接算定法が提案されると共に多くの水槽で波高が計測されるようになった。それに伴い、汎用の試験水槽では実施が困難なアルミ箔粉の散布等による可視化的計測に代わって、抵抗型や容量型波高計が用いられるようになった。最近では、精度と応答性に優れるサーボ式波高計が主流になっている。しかし、水面の写真撮影による方法が面的計測法であるのに対し、これらの波高計による計測は、原理的には点計測である。

一方、船側波形の計測は安息香酸が特殊な化学成分を持つことから、模型船乾舷の写真撮影でなされるようになった。その方法が極めて簡便であることから船側波形は船型の是非を定性的に論ずるために頻繁に用いられるようになった。ところが、一方でこのことは、船側波形が船体に近い場所の波で逆解析などのためには最も適した情報であるにもかかわらず、その利用は定性的なものに限られるという

* 広島大学工学部

** 広島大学大学院工学科学研究科

印象を与えてしまった。船側波形が定量的に解析に用いられた例は、等価特異点を求めるために用いられたのみに留まる²⁾。この背景には、船側波形を十分な精度で定量的に計測する手法が未だに開発されていないという事情がある。

波形情報の定量的利用ないしは、船型との関連におけるデータベースの構築は、極めて重要なことである。そのためには、波高を精度よく短時間にかつ簡便に計測する必要がある。その方法の一つとして、可視化画像の画像処理による手法が考えられる。この方法による計測としては、竹沢らによる波傾斜を利用した方法が提案され、非定常な波の計画にも成功している³⁾。最近では、定常波の計測に応用した例も報告されている⁴⁾。モアレ縞を用いた方法も提案されたが⁵⁾、装置が煩雑なこともあり、実際にはあまり用いられていない。

ところで、乾の提案した方法は、いずれも今日でいう可視化的手法によるものであった。今日の画像解析機器の進歩は、以前の目視による読み取り作業の高速化、自動化を可能にしたが、精度の良い解析を行なうには、可視化の方法そのものが、その後の処理を視野に入れたものでなければならない。すなわち、画像処理によって必要な精度の定量的計測値を得るには、その処理に適した原画像をいかに得るかが重要となる。

ここでは回流水槽での計測を前提に、波面の可視化と画像処理によって波高を計測する二つの方法について述べる。一つは、ドライアイスミストを利用した方法で、いま一つは模型船の浸水表面を可視化する方法である。前者は任意切断面に沿った波高の計測であるのに対し、後者は船側波形の計測で、両者は、独立した二つの方法である。しかし、いずれも、波面である水と空気の界面を、できるだけ明確なコントラストをもった画像にして取り出すために、可視化に新しい工夫を取り入れものである。両者共に、簡便であることと水質を汚さないことを前提としている。

本論文では、これらの新しい手法を回流水槽における模型船の波高計測に適用し、他の点計測法による結果と比較することにより精度および有用性について評価する。

2. 気相界面の可視化による波高分布計測

水のように散乱性の低い物質の表面を直接可視化するには、アルミ箔粉など散乱物質の散布が必要である。しかし、このような手法は水質を汚染するため、汎用水槽での恒常的使用には適さない。そこで本研究は気相側に散乱物質を散布することによって気相界面を可視化しその画像を解析することで広域の波高分布を非接触計測する方法を提案する。(以下、気相界面可視化法と称する。)

可視化及び解析手順を Fig. 1 に示す。本方法では、水面上にミストによる薄い層を形成し、それをレーザー面光源(以下 LLS 光源と略称する)で可視化する。これを適当な角度から撮影して任意の 2 次元断面における波形画像を得

る。フィルタリング処理の後、しきい値処理により波形を検出し、あらかじめ較正した座標変換係数により波高分布を算出する。本方法で得られる画像は極めて 2 値性が高いため誤差の入る余地も少なく、その処理は比較的簡便である。

2.1 可視化および解析方法

Fig. 2 に可視化装置の概略を示す。ドライアイスを温水中に浸すことによって高濃度のミストを発生する。このミストを回流水槽上流から適当な送風装置で水面上に送り出すと、ミストは空気より重いので、水の流れによる煎断力によって、ほぼ均一な濃度、厚さを保った状態で下流へ輸送される。任意の位置で水槽上方から LLS 光源を照射することにより、ミスト層の波面側境界線が、光面と波面の交わる線(波高分布)として可視化される。

得られた画像は、CCD カメラにより画像解析装置に取り込まれる。CCD カメラと LLS 光源の位置関係を保持した状態で、両者をレーザー光面に直角な方向にトラバースすることにより、広域の波形分布の計測ができる。

Fig. 3 は、可視化画像及び解析過程の一例で、船体中心線に平行な位置での波高を計測したものである。(a)が原画像、(b)が 2 値化画像、(c)が境界面の検出結果である。

流れは右から左に流れている。船首を原点として流れの下流方向を x 軸、鉛直上方を z 軸とする。白い画像がミストでその下が水面となる。画面の端部で境界面が乱れてい

Fig. 1 Block Diagram of Air-Side Free-Surface Visualization Method

るが、これは光面の輝度分布の不uniform性に起因する。

境界線の検出には、しきい値法を用いる。画像の下から z 軸の正方向へ順次走査し、輝度がしきい値を最初に越えた点を波面の検出位置とする。2値化しきい値は、画像の状態に応じてあらかじめ与えられる。

こうして得られた境界線の画素座標 (x, z) は、次に示す変換式により実座標 (X, Z) に変換される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \\ xz \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

変換係数 $A_{11} \sim A_{24}$ は、計測前にレーザー光面上の既知である4点を用いて決定する。カメラと光面の位置関係を

Fig. 2 Schematic View of Air-Side Free-Surface Visualization System

Fig. 3 Visualized and Processed Image of Air-Side Free-Surface

保持してトラバースするので、計測面毎に較正を行う必要はない。

2.2 計測精度の評価

画像処理によって輪郭(ここでは波面)の検出を行う時、その結果が2値化しきい値に依存することがある。Fig. 4は、しきい値による波面の解析結果の変化を調べたものである。画像解析装置の検出できる最高輝度を1.0、最低輝度を0.0とした時、しきい値が0.52~0.64の間でほとんど解析結果は変動していない。これは本方法による可視化画像は、しきい値による依存性が弱く、2値性が非常に高いことを示す。一般に階調性の強い画像は、定量化に複雑な処理が必要となり、精度も低くなる。

したがって、本方法で得られる画像は、2値化画像処理に適したものであり、安定した計測を可能にする。また、処理に要する時間も極めて少なくなる。

本方法による波高計測結果の精度を評価するため、S-201 模型の波高分布を計測した。模型船長は1.0 m、幅は180 mm、計測速度は1.0 m/sである。3秒間の平均値を計測値とし、サーボ式水位計による計測値と比較した。水位計の公称精度(分解能)は0.2 mm程度である。水位計による計測は画像計測の前後を挟んで2回実施し、時間経過による波高の変動がないことを確認した。

Fig. 5に両者の結果を示す。光面の輝度が弱くなる左右の端部で最大約2.0 mmの誤差が生じているが、輝度の安定した中央部では誤差1.0 mm以内に収まっている。これは今回使用した画像解析システムのフレームサイズおよび

Fig. 4 Variation of Measured Wave Height Depending on the Change of Slice Level (S.L.: Slice Level of Brightness, Maximum Level=1.0)

計測範囲によって決定される量子化誤差とほぼ同じ値である。端部で大きな誤差が発生する要因としては、広角レンズの歪曲収差も考えられる。実験の利便性からは広範囲が計測出来る広角レンズの使用が望ましいが、本方法で利用した座標変換式では歪曲収差の補正は出来ない。使用する光学系の特性を考慮した座標変換を行う必要がある。

2.3 計測例

本方法の有効性を確認するため、S 201 模型船の波高分布を計測した。模型船長 1.0 m で、回流水槽中央に固定した。LLS 光源を y 方向にトラバースし、波高分布を計測した。流速は 1.0 m/s である。

本研究で用いている LIS 光源は、35 mW レーザーとシリンドリカルレンズを組み合わせたもので、幅方向に約 50 cm の範囲を照射することができる。計測は、供試模型中心線より 10 cm 離れたところから始め、 y 方向にトラバースさせ計 12 本の線上の波高分布を計測した。

Fig. 6 に、波高分布の計測結果を示す。今回用いたシステムでは、カメラと LLS 光源を独立してトラバースさせたため、機械的精度の制約に起因する相対的な位置のずれにより若干の計測誤差が生じる。不規則な凹凸はそのためである。また、端部で波形が乱れているが、これは光面の輝度が不足するためである。しかし、端部を除く領域では極めて安定した計測結果を得ることが出来たと思われる。装置設置後の計測は極めて迅速に実施することができ、しかも実時間での計測も可能である。

回流水槽、光源、トラバース装置などのハード的な制約のため、精度の面では必ずしも充分ではない点もあるが、本方法によって、広範囲の波高分布が容易に計測出来ることが確認された。将来的には、こうした装置を常設的に備えた回流水槽の設計が望まれる。

(a) Direct Method

(b) Air-Side Free-Surface Visualization Method

Fig. 5 Comparison between Results by Air-Side Free-Surface Visualization Method and Direct Measurement

3. 船体表面の水中照射による船側波形計測

回流水槽側面の観察窓から水中を通して適当な角度で船体を照らすと、光線の大部分が水面で全反射し、船体の浸水面のみが明瞭に可視化される。この可視化された面と水面との境界は、ほぼ船側波形とみなすことができる。従来の船側波高の計測が主として水面上を可視化していたのに対し、本方法では水面下を可視化する。以下、この方法を水中表面反射法と称する。

本方法で得られる境界線の座標を、空間座標系における 3 次元座標変換により同定することで、船側波形を簡便に計測することができる。

3.1 可視化および解析方法

Fig. 7 に、水中反射法による船側波形の可視化方法の概略を示す。光源は通常の白色光源で十分であり今回は 500 W レフランプを 2 個使用した。画像のノイズ成分を小さくするため、周囲は暗くするほうが望ましい。画像から波面を検出する処理は気相界面可視化法と同じである。

ところで船体側面は一般に複雑な曲面である。空間上の 3 次元座標を同定するためには、複数台のカメラによる画

Fig. 6 Three-Dimensional Plot of Measured Wave Height by Air-Side Free-Surface Visualization Method

Fig. 7 Schematic View of Wetted-Surface Illumination System

像の座標変換処理が必要となるが、装置と処理共に大変複雑となる。そこで、本法では、1台のカメラの画像から計測点と視点とを結ぶ直線を決定し、その直線と船体表面座標の交点から計測点の3次元座標を同定する簡便な方法を用いる。船体表面座標はポリゴンデータとしてあらかじめ与えられる。

座標の同定方法の概略を Fig. 8 に示す。まず実空間上で平行な関係にある任意 p 面, q 面を設定し、各々の面で4点ずつ、計8点の標点より次のアフィン変換係数 $A_{11} \sim B_{24}$ を決定する。

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_q \\ Y_q \\ Z_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$(X_p, Y_p, Z_p) \dots p$ 面上の実座標値

$(X_q, Y_q, Z_q) \dots q$ 面上の実座標値

$(x, y, z) \dots$ 画面上の画素座標値

実空間上の Z_p, Z_q は既知であるので、計測点の画素座標値 (x, y) より、 p, q 面上の2点 $P(X_p, Y_p, Z_p), Q(X_q, Y_q, Z_q)$ が求められる。直線 PQ が通過する船体表面上ポリゴンの各頂点が $S_1(X_1, Y_1, Z_1), S_2(X_2, Y_2, Z_2), S_3(X_3, Y_3, Z_3)$ で与えられる時、計測点の実座標値 $O(X_0, Y_0, Z_0)$ は、直線 PQ とポリゴンの交点として次のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} Z_{qp} \cdot X_p - X_{qp} \cdot Z_p \\ X_1 \cdot YZ_{23} + Z_1 \cdot XY_{23} + Y_1 \cdot ZX_{23} \\ Y_{qp} \cdot Z_p - Z_{qp} \cdot Y_p \end{bmatrix}$$

Fig. 8 Coordinate System for Calibration to Determine the Hull-Side Wave Profile

$$= \begin{bmatrix} Z_{qp} & -X_{qp} & 0 \\ YZ_{23} & XY_{23} & ZX_{23} \\ 0 & Y_{qp} & -Z_{qp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} X_{qp} = X_q - X_p, & YZ_3 = Z_2 Y_3 - Y_2 Z_3 \\ Z_{qp} = Z_q - Z_p & XY_{23} = Y_2 X_3 - X_2 Y_3 \\ Y_{qp} = Y_q - Y_p, & ZX_{23} = X_2 Z_3 - Z_2 X_3 \end{pmatrix}$$

この座標同定方法は、較正が複雑にも思われるが、カメラと船体の位置関係が保持される場合、較正作業は1度行うだけでよい。また、船体を変更した場合でもオフセットの書き換えのみで対応出来るため、非常に汎用性の高い方法であると考えられる。この方法も専用の照明用光源やカメラを回流水槽に常設することにより、日常的に計測することが可能である。

3.2 計測例および精度評価

本方法の精度、適用範囲を確認するため、回流水槽での船側波高計測に適用した。実験は前節と同じ船型に対して同じ条件で行った。

本方法で得られた可視化画像及び解析過程の一例を Fig. 9 に示す。(a)が原画像、(b)が2値化画像、(c)が船側波形の検出結果である。船体の浸水部分のみが明瞭に可視化されている。Fig. 10 に、しきい値の変化による波高計測値の変化を示す。しきい値が0.18~0.61の間でほとんど計測値は変動しない。これは、気相界面可視化法による画像と同じく2値性が非常に高いことを示している。

本方法の精度を評価するため、得られた船側波形分布を、マイクロメーターを用いた目視による点計測値と比較し

(a) Original Picture

(b) Binalized Picture

(c) Detected Wave Profile

Fig. 9 Visualized and Processed Images of Wetted Surface Illumination Method

た。計測値は3秒の平均値をとっている。

Fig. 11 にその結果を示す。船首近傍の1点を除く計測点で、本法で得られた計測値と点計測による値のずれは0.5 mm 以内に収まっている。船側波高そのものの変動が大きくなる船首近傍の1点で約1.7 mm のずれが生じている。この領域では、目視によるものではなく時系列の平均値を計測できる点計測法とその比較が必要であろう。

ところで、このような画像計測法の精度は一般に画素の分解能に依存するが、本方法では、その原理から物体表面近傍における水面形状が大きな影響を及ぼすものと考えられる。物体表面と水面の交わる部分を微視的に見ると、表面張力等の影響により水面形状は複雑な形となっている。本方法では水面形状の反射を利用しているが、波面のどの部分の波高を計測しているのかを把握する必要がある。

マイクロメーターによる点計測では、肉眼で波面の盛り上がった位置を船側波高としているので、本方法では表面張力の影響も含めた浸水部分の波高を計測しているということになる。

以上の結果から、本方法はこれまで多大な労力を要していた船側波形計測を、簡便かつ十分な精度で計測できる方法であることが確認できた。

4. 結 言

ドライアイスミストと LLS 光源を用いた気相界面の可視化により波高分布を計測する方法と、水中表面の照射により船側波高を計測する方法を示した。

Fig. 10 Variation of Measured Wave Height Depending on the Change of Slice Level (S.L.: Slice Level of Brightness, Maximum Level=1.0)

これらの方法はいずれも簡便で、しかも同時多量的な計測を可能とする。得られた可視化画像は極めて2値性が高く、簡単なしきい値処理で波高の定量化が可能である。また、照明むら、装置の設置精度等の実験上の諸条件にも左右されにくい。またこれらのことは画像による定量的計測で最も重要なことである。

本研究で提唱した2つの計測方法を組み合わせることによって、船側近傍から広範囲の波形分布を簡便、かつ高精度に計測することが可能である。特に回流水槽に於いては、恒常的な設備として備えることにより、従来、時間コスト、装置の複雑さなどから計測される機会が少なかった広域波面の波高分布を簡便に定量化できるという意味で、船型改良のために極めて有用な方法といえよう。

本研究で示した方法は、例えば、従来のモアレ法やアルミ箔粉法などによる可視化方法に比べて、装置が簡便であることや水質を汚染しない点でも恒常的な設備として優れている。

ここでは、解析にあたって、最も簡便なしきい値法を用いたが、階調性を考慮した画像の定量化アルリズムを適用することにより、さらに精度を上げることも可能である。一ライン上に限れば、連続的な画像の取り込みにより、波崩れなどの過渡的現象も計測できる。ただ、本方法は細かい乱れのある状態での可視化は可能であるが、表面が激しく変動する碎波状態では、波面の直接反射光が輝度レベルの高いノイズとなるため、計測が困難となり、適用することは出来ない。

本研究の画像処理及び諸計算は全てシャープ製パーソナルコンピュータ X 68000 によって行われた。本研究の遂行には、広島大学工学部卒業生である古井広高、大下泰輝氏の多大な協力を得た。また、土井康明助教授には解析の上で多くの有意義な意見を載いた。ここに併せて謝意を表する。

(a) Direct Method

(b) Wetted Surface Illumination Method

Fig. 11 Comparison between Results by Wetted Surface Illumination Method and Direct Method

参 考 文 献

- 1) 乾崇夫：眼で見る船型試験の話，船舶（27-1）（1954），pp.27-32，続・同，船舶（30-1）（1957），pp. 66-74.
 - 2) 茂里一紘他：船側波形による造波抵抗特性解析とその船型計画への応用，日本造船学会論文集，第 132 号，pp. 11-28.
 - 3) 竹沢誠二他：レーザー光線群による方向スペクトル波計測，日本造船学会論集，第 166 号，pp. 173-185.
 - 4) 鈴木敏夫他：水面透過光の明暗分布を利用した波高計測，平成 5 年 5 月関西造船協会講演会にて発表.
 - 5) 古里哲夫他：モアレ利用波紋撮影，日本造船学会誌，495，（1975），189.
-