

着色水を用いた画像処理による波高計測方法の開発

岩 永 正 裕・山 岸 陽 一

Development of Measurement Method of Wave Height by means of
Coloring Water and Picture Processing

Masahiro IWANAGA and Yōichi YAMAGISHI

Abstract

There are many methods to measure wave height at one point. But to know the distribution of wave height in the two dimensional region, it is necessary to traverse measuring poles in all the region and it is difficult to know the instantaneous wave height distribution.

Then we develop the method measuring wave height by means of picture processing. We color water with ink and know the depth of water with the relation between the brightness of water and the depth of it. It enables us to know the instantaneous wave height distribution easily.

1. ま え が き

実験室における波高の計測方法には端子間の電気抵抗の変化を計測する方法¹⁾, 電気容量の変化を計測する方法や浮きを利用する方法などがある。しかしいずれの方法も2次元の領域全体の波高分布を知るためには端子をトラバースして各点各時刻の波高を計測する必要がある, 非常に長い計測時間を要する上に瞬時の波高分布(水位)全体を把握することは困難である。本研究はこれらの困難を解決するために, 水を着色して水深の変化により生じる明暗を画像処理することにより各時刻における波高分布全体を計測する方法を開発しその特性と制約を明かにすることが目的である。

記 号

- b : 光の吸収率
 H : 水深
 ΔH : 底面の水深変化量
 h : 波高(水位変動の両振幅)
 I : 入射光量
 I_0 : 水面における入射光量
 $I_{0\max}$: 水面における入射光量の最大値

J : 反射光量

J_0 : 水面における反射光量

$J_{0\max}$: 計測可能な水面における反射光量の最大値

k : 光の反射率

z : 水面を原点とする下向きの座標

2. 画像処理による波高計測の原理と方法

2.1 画像処理による波高計測の原理

着色した水はその水深により明暗が変化する。この性質を利用して水面の画像をビデオカメラで撮影し, 画像処理して水面各点の明暗を求め, この明暗から水深(波高)を求める。

2.2 水の着色方法と照明

着色には黄色と緑色のインク(サクラカラー製デザインインクのピグメントレモンイエローとサップグリーン)を容積比2.7:1の割合で混合して使用した。濃度は水1リットルに対して $5.0 \times 10^{-5} \sim 3.5 \times 10^{-4}$ リットルのインクを加えた。

照明は4個の写真用ランプ(リフレクターランプ100 V, 500 W)を斜め上から照射して, 供試波高計測領域で明暗のむらが少なくなるように調節した。供試波高計測領域の底面のアクリル板は黒色とし, アクリル板上のインクの粒子によって光が乱反射し, 明るさ

が水深によって変化するようにした。

2.3 撮影ならびに画像処理装置

Fig. 1 に本研究で使用了画像処理システムの概要を示す。撮影には手動絞りの工業用ビデオカメラ (Konika 製 KS-30) を供試波高計測領域真上に設置して暗室中で撮影した。録画、再生には再生時に 1 フィールド (1/60 秒の画像) 毎に静止画像を得ることができるビデオデッキ (National 製 GT4W) を使用した。

画像処理には、パーソナルコンピュータ PC-9801 と画像処理ボード (Photoron 製 FDM 4-256) を使用した。画像処理ボードは 1 フィールドの画像を縦横それぞれ 256 点に分解し各点の明暗を 64 階調でメモリーに取り込むことができる。さらに 64 階調の上限と下限の明るさを予め設定することができるリファレンス機能を備えている。コンピュータへの画像の取り込みは上記ビデオデッキで 1 フィールド毎の静止画像を再生した上で行った。

2.4 画像処理による波高計測方法

画像処理により波高計測を行うには次の手順で実験を行う。波高計測する領域の水深を H 、予想される最大波高 (両振幅) を h とする。

(1) 水深 $H-h/2$ から水深 $H+h/2$ の範囲で明暗の変化が大きく表れるようにインク濃度を調整する。

(2) 水深が $H-h/2$ と $H+h/2$ になるように水槽の水位を設定して、それぞれの静水面をビデオカメラで撮影し、これを基準画像とする。

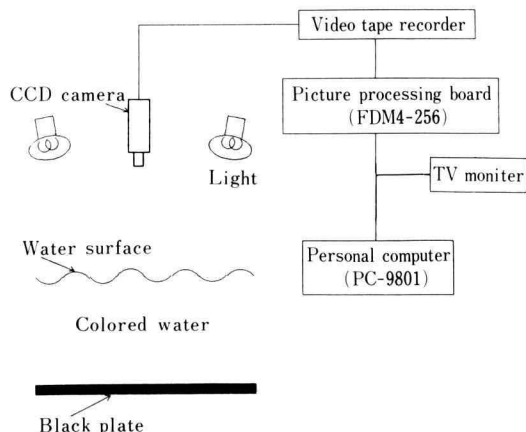


Fig. 1. Picture processing system.

(3) 水深 H において波を起し、その画像を撮影する。

画像処理は次の手順による。

(1) リファレンスの設定: 水深 $H-h/2$ の静水面の画像をコンピュータに取り込み明暗を調べて最も暗い場所の明るさをリファレンスの下限値とする。同様に水深 $H+h$ の静水面の最も明るい場所の明るさをリファレンスの上限値とする。

(2) 基準画像の記録: リファレンス設定後、水深 $H-h/2$ と $H+h/2$ の静水面画像の各点の階調をフロッピディスクに記録し、これを基準画像とする。

(3) 波動面の画像の記録: 水深 H における 1 フィールド毎の波動面の画像をコンピュータに取り込み各点の階調をフロッピディスクに記録する。

(4) 波高値の算出: 波動面の画像中の各点における明暗の階調を同一点の基準画像の明暗の階調を用いて直線補間して水深を求め、これから H を差し引くと波高値が得られる。

以上により 1/60 秒毎の供試波高計測領域の全ての点の波高分布を求めることができる。

3. 画像処理による波高計測結果

3.1 波浪水槽と供試波高計測領域

実験装置は Fig. 2 に示すようなもので、塩ビ製幅 1 m、高さ 0.75 m、長さ 4 m の水槽とプランジャー式造波装置を使用した。この水槽の水位は予備タンクとの水の出し入れで 50 mm を上限として変化することができる。

一辺 20 cm の正方形の黒色のアクリル板 (厚さ 2

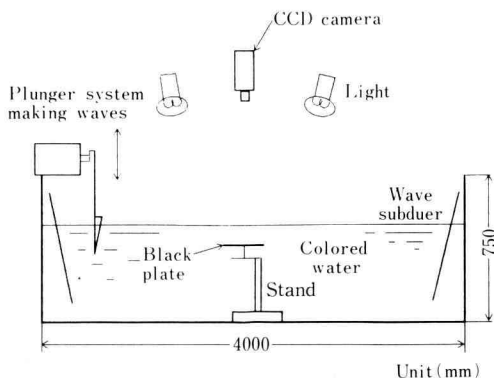
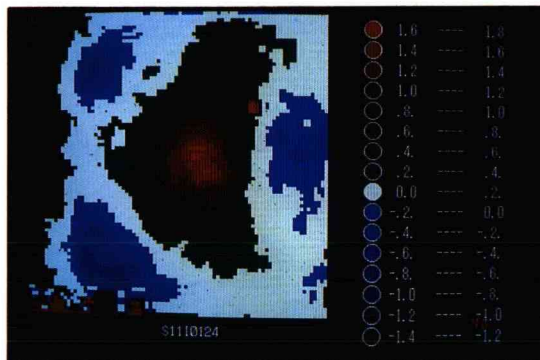


Fig. 2. Experimental apparatus.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Examples of instantaneous wave height obtained by picture processing.

mm)を水中に水平に設置し、この平板上を供試波高計測領域とした。

3.2 画像処理による波高計測例

Fig. 3(a)~(c)は供試波高計測領域の波高の分布を画像処理によって求めたものであり、例えば最も明るい赤色の部分は水位が静止水面より1.6~1.8 mm高いことを表わしている。(b)は(a)の0.066秒後、(c)は(b)の0.1秒後の波高分布である。このとき波長は300 mmで平板を設置した水深は9 mmであり、波は左から右に進んでいる。波のエネルギーが平板後方に集まる様子がわかる¹⁾。このように瞬時の波高分布全体を容易に計測できることが画像処理による波高計測の長所である。

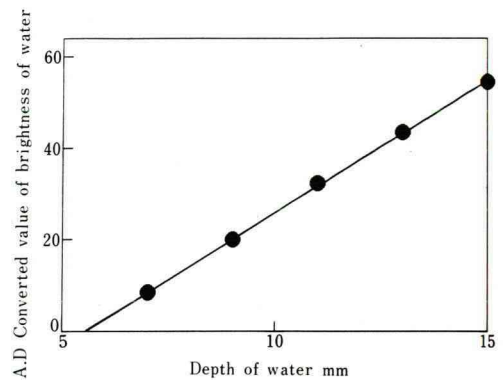


Fig. 4. Calibration of the relation between the brightness of water and the depth of it.

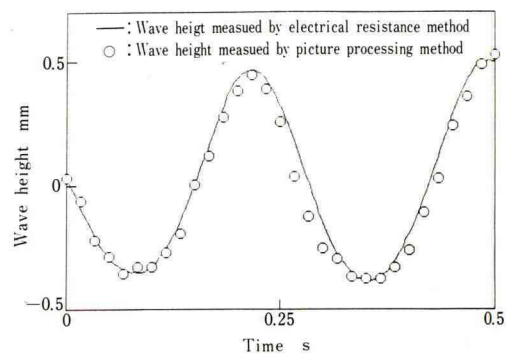


Fig. 5. Comparison of the the wave hight change measured by picture processing with that measured by electrical resistance method.

3.3 画像処理による波高計測の検証

上記の画像処理方法の中で波高を直線補間で求めたが、その妥当性を Fig. 4 のように調べた。縦軸は画像処理ボードを介してコンピュータに取りこんだ明るさを表す値 (64 階調フルスケール) であり、横軸は水深を表す。このように狭い水深変化域では明るさは水深が増すに従ってほぼ直線的に増加する。

さらに電気抵抗式の波高計測装置¹⁾を用いて、画像処理によって求めた波高値が適正であるかを調べる。Fig. 5 は水深 11 mm において波長約 80 mm の波を起こし、供試波高計測領域の中央の点における波高の時間的変化を画像処理による波高計測方法と電気抵抗式波高計測方法で求め比較したもので、よく一致している。このことから画像処理による波高計測は十分実用に耐えると思われる。

4. 本波高計測方法の特性と制約

Fig. 4 は波高計測のための必要最小限の範囲で水深と明暗の関係を調べれば直線関係が得られたが、本節ではより広い範囲で水深と明暗の関係を調べる。この結果を用いて本波高計測方法の特性を明らかにするとともに、実験に最適なインク濃度ならびに照明の明るさを調べ、さらに本波高計測方法の制約を論じる。

4.1 水深と明暗に関する実験方法

Fig. 6 に示す縦 45 cm 横 90 cm 高さ 45 cm のガラ

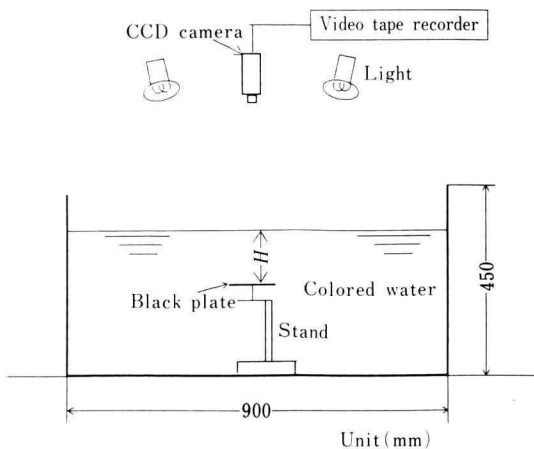


Fig. 6. water tank.

ス製の水槽に着色した水道水を入れる。その中に黒色のアクリル製の平板を沈めて、平板の水深と明暗の関係を調べる。平板の水深を 0~140 mm, 着色インク量を水 1 リットル当り $5.0 \times 10^{-5} \sim 3.5 \times 10^{-4}$ リットルの範囲で変化させて実験を行った。

4.2 水深と明暗の関係の整理方法

水槽の水面に I_0 の光量の光があたっており、水深を H とする。水面における反射光量を J_0 , 水中の透過光量, 反射光量をそれぞれ I, J とする。境界条件は $z=0$ において $I=I_0$, $z=H$ において $J=0$ である。

水深 z の位置にある幅 dz の着色水の薄い層を考える。この層の上面に到達する透過光の光量を I , 反射率を k , 吸収率を b とし, この薄い層の中のインク粒子により $kIdz$ の光量分反射され, $bIdz$ の光量分吸収されと考える。

$$dI = -kIdz - bIdz$$

反射光 J がこの層で増加する光量 dJ は次式で与えられる。

$$dJ = kI(-dz)$$

上記微分方程式の解は次式となる。

$$I = I_0 e^{-(k+b)z}$$

$$J = I_0 k (e^{-(k+b)z} - e^{-(k+b)H}) / (k+b)$$

したがって水槽水面の反射光量は

$$J_0 = I_0 k (1 - e^{-(k+b)H}) / (k+b) \quad (1)$$

で与えられる。

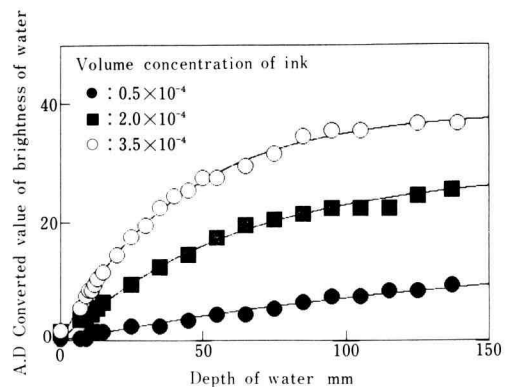


Fig. 7. Relation between the brightness of water and the depth of it over a wide range.

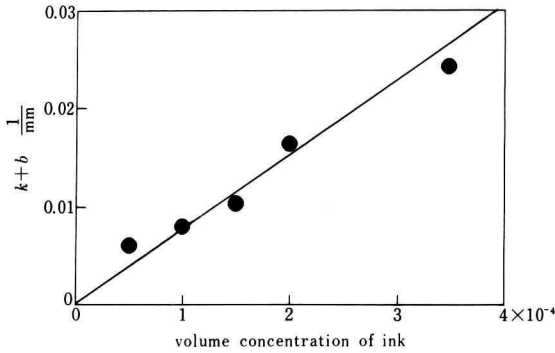


Fig. 8. Relation between volume concentration of ink and sum of the coefficient of absorption and that of reflection of light.

4.3 水深と明暗に関する実験結果

Fig. 7は水深を変化させて供試波高計測領域の明暗の階調を調べたもので、記号は実験値、実線は(1)式を表わし、両者はよく一致している。反射率 k と吸収率 b の値は(1)式と実験値の誤差が最小となるように選んだ。この図からわかるように明るさは水深が深くなると飽和して水深による変化が少なくなる。この明るさが飽和する水深はインク濃度が濃いほど浅くなる。

Fig. 8に $k+b$ の値とインク濃度の関係を示す。インク濃度が増加するに従い、 $k+b$ の値は増加することがわかる。

4.4 本波高計測方法の特性

ある水深 H で波高を計測する場合、その水深において明るさが水深変化により大きく変化することが望ましい。(1)式から水深による明るさの変化率は次式で与えられる。

$$dJ_0/dH = I_0 k e^{-(k+b)H} \quad (2)$$

入射光量 I_0 が大きいかほど(2)式の値は増加するが、入射光量 J_0 を計測する装置（ビデオカメラ、画像処理ボード）には計測可能な光量の上限值 $J_{0\max}$ が存在する。これを(1)式に代入して使用可能な最大入射光量 $I_{0\max}$ を求めると次式となる。

$$I_{0\max} = J_{0\max} \frac{(k+b)}{k} \frac{1}{(1 - e^{-(k+b)H})} \quad (3)$$

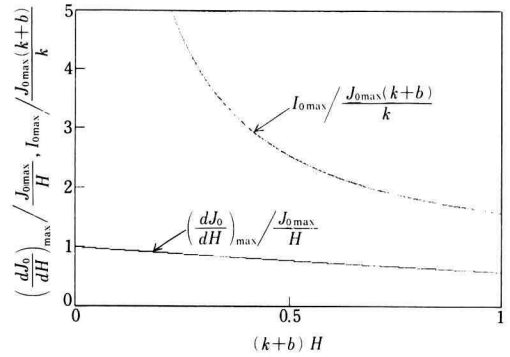


Fig. 9. Change of $(\frac{dJ_0}{dH})_{\max} / \frac{J_{0\max}}{H}$ and $I_{0\max} / \frac{J_{0\max}(k+b)}{k}$ with $(k+b)H$.

Fig. 8からわかるように $k+b$ はインク濃度にはほぼ比例し、 k もインク濃度に比例すると考えられるので $(k+b)/k$ は定数とみなしてよい。したがって $I_{0\max}$ は $(k+b)H$ により変化する。(3)式を(2)式の I_0 に代入すると次式が得られる。

$$\left(\frac{dJ_0}{dH}\right)_{\max} = \frac{J_{0\max}}{H} (k+b)H \frac{e^{-(k+b)H}}{(1 - e^{-(k+b)H})} \quad (4)$$

これより $\left(\frac{dJ_0}{dH}\right)_{\max}$ も $(k+b)H$ により変化することがわかる。

Fig. 9に $\left(\frac{dJ_0}{dH}\right)_{\max} / \frac{J_{0\max}}{H}$ と $I_{0\max} / \frac{J_{0\max}(k+b)}{k}$ の $(k+b)H$ に対する変化を示す。両者とも $(k+b)H$ に対する単調減少関数であるが、前者はゆるやかに後者は急激に減少する。水深に対する光量の変化率(前者)を最大にするためには $(k+b)H$ を0に近づければよいが、このとき必要な入射光量(後者)は無限大となり実現不可能である。そこで例えば $(k+b)H$ の値を0.4に設定する(Fig. 8を用いて水深が深い場合はインク濃度を小さく浅い場合はインク濃度を大きくする)と、必要な入射光量は約 $3J_{0\max}(k+b)/k$ となり水深によって変化しない。水深に対する光量の変化率は約 $0.8 J_{0\max}/H$ となり水深に反比例して減少する。従って両振幅 h の波高の波によって生じる光量の変化は約 $0.8 J_{0\max}h/H$ となる。

以上のことより実験の精度に影響を及ぼすのは波高と水深の比であることがわかる。本研究で使用した画像処理ボードは64階調で、前述のようにリファレンス

機能を備えており、波によって生じる光量の変化分を拡大してフルスケールでコンピュータに取り込むことができるので波高計測の分解能は波高の $1/64$ であるが、ノイズを減らすために波高と水深の比が $1/10$ 以上あることが望ましい。

供試波高計測領域の底面の水深に変化がある場合にも本画像処理による波高計測方法は適用可能であるが、供試波高計測領域の最も深い水深に対して上記の方法によってインクの濃度を調整する必要がある。

水深が変化する場合には最も深い水深と浅い水深の差を ΔH とすると波高計測の分解能は $(\Delta H + h)/64$ となる。

4.5 本波高計測方法の制約

本波高計測方法には比較的簡便に2次元領域全体の瞬時の波高分布を求めることができるという長所があるが次のような制約がある。

(1) 波高と水深の比がある程度大きいときには十分精度良く波による水面変動を計測できるが、波高が水深に較べて小さくなるには従いS-N比が悪化する。

(2) 供試波高計測領域の底面の水深が変化する場合に波高計測の分解能が悪くなる。

(3) 水深によって最適なインク濃度が異なりインク濃度を調整する必要がある。

5. む す び

水をインクで着色し、水深の変化によって明暗を生

ぜしめ、これをビデオカメラで撮影してコンピュータを用いて画像処理を行い明暗から水深を計算することにより、2次元領域の瞬時の波高分布を計測する方法を開発した。

本波高計測方法には次のような特性ならびに制約があることを明らかにした。

(1) 波面変動により生じる光量の計測値は

計測可能な最大光量 \times 波高/水深

の大きさをもち、波高が水深に較べて小さくなる程S-N比が悪化する。

(2) 最適なインク濃度は水深が深い程小さくなり、水深にあわせてインク濃度を調整する必要がある。しかし必要なライトの光量は水深により変化しない。

(3) 供試波高計測領域の底面の水深が変化する場合に波高計測の分解能が悪くなる。

6. 謝 辞

本研究は本学4年次卒業研究として行われたものであり、下記の諸君の協力を得た。ここに謝意を表します。

望月 敬, 森谷 昌一,
石毛 克典, 大野 恭博

文 献

- 1) 岩永, 山岸, 「波浪発電用集波装置の開発」, 神奈川工科大学研究報告, No. 13, 1989, 39