

水底下方に投影された波面映像に鈴木・住野の方法を適用した 場合の波形解析精度に与える観測面位置変化の影響

檀 和秀* 岸 篤史** 中村 文則*

Experimental Results on the Accuracy of Wave Height Calculated by Applying Suzuki-Sumino's Method to the Projected Images Observed at and below the Bottom of the Channel Changing the Distance between the Bottom and the Observation Plane

Kazuhide DAN, Atsushi KISHI, Fuminori NAKAMURA

ABSTRACT

When natural light waves travel into the interface between water and air, a part of the light waves refracts and diffracts at the interface. When these waves travel to the horizontal observation plane located at the bottom of the water, these waves make a light intensity profile on this observation plane. It is possible to calculate the wave profile by applying Suzuki-Sumino's method to this light intensity profile observed at a bottom of a channel and below a transparent bottom. The accuracy with relative errors is the value of the difference between the calculated wave height and the measured wave height using the wave meter divided by the measured wave height. The relative error increases as the water depth increases and the refractive index increases and the brightness in the still water surface increases. Because of the loss of the light energy at the transparent bottom, the relative error of the wave profile in the case of the transparent bottom is greater than that in the case of the bottom of the ground glass. The relative error decreases as the distance between the bottom and the observation plane decreases.

Keywords: Wave meter, Wave profile, Projected natural light intensity

1. はじめに

波高計測にはレーダーを用いた平面的な計測手法も開発されているが、多くは超音波式、水圧式波高計などによる点計測が用いられている。実験室内の波高計測においても点計測が主である。自然光が水面で屈折し、水底で明暗模様をつくることはよく知られており、この現象を利用した現地、実験室内での平面的な波高計測手法の開発を目

*都市システム工学科, **建築・都市システム工学専攻

的に以下の実験を実施した。

平行光線である自然光が水面上の波面に入射すると、屈折し、その結果水底では波面に対応した明暗模様を生じる。平行光線間の光のエネルギーは保存されるという考えのもとに、光の強度の関係式を導き、波形分布に変換するという鈴木・住野の関係式より、水底の光強度分布である明暗模様を解析して水面の波形分布を求め、実測した波

高記録と比較し波高測定精度について考察を行った。

2次元水路や平面水槽を使用した実験においてはアクリル板製の装置がよく用いられる。この場合、水表面にできる波が水底につくる光強度情報である明暗模様は水路底がアクリル板製であればほとんどの光を透過してしまうが、すりガラス製であればアクリル板製よりは透過量が少なくなる。水底での光情報をすべて記録するためには、水底を全反射する材質にして水中から撮影せねばならない。

今回は自然光が水面で屈折し、水中を進行した後、アクリル板製の水路底を屈折、透過して、その下方にできる明暗模様を白い観測板に反射させるかたちで記録した。水、アクリルなどの物質中の光の吸収やすべての境界面で発生している反射は空気中からの入射角の変化によって多少変化すると思われるが、今回の実験においては一様と考えている。

2. 自然光を利用した面的波高測定

海岸・河川・湖沼などにみられる水面波の面的波形計測を目的に、自然光が水面で屈折し、水中を通過して水底に生じさせる明暗模様を鈴木・住野の方法で解析した。本手法は手軽で費用や労力をあまり必要としない面的波高推定法と言える。

図1のように自然光が鉛直に入射する場合を考える。 $x=x$ と $x=x+\Delta x$ の鉛直入射光線が水面で屈折し、それぞれ水中を通過して水底での $x'=x'$ と $x'=x'+\Delta x'$ に到達する様子を表している。この図の場合は光が集まるケースとなっており、水底では明るくなる。平行光線間の光は光線から外には出ないので以下のような関係式が成り立つ。

$$c(x) \cdot dx = B(x') \cdot dx' \quad (2.1)$$

ここに、

$c(x)$: 静水面時の輝度

$B(x')$: 波がある場合の輝度

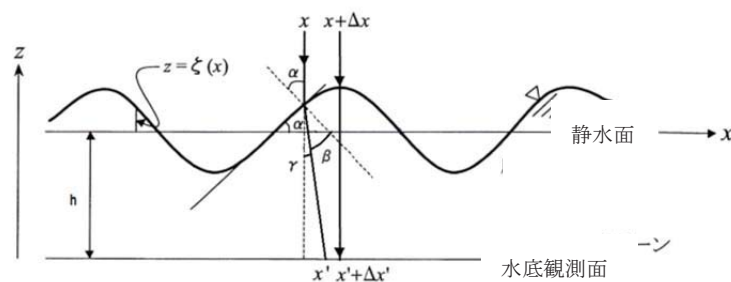


図1 鉛直入射の場合の水面での屈折

以上の場合に鈴木・住野の方法によれば波形 $\zeta(x)$ は以下のようにあらわされる。

$$\zeta(x) = \frac{1}{ch \left(1 - \frac{1}{n}\right)} \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F}[B'(x)]}{\omega^2} \right] \quad (2.2)$$

ここに、 $c(x)$ を c と置き換えており、 n は屈折率である。 $B'(x) = c - B(x,y)$ であり、 ω は空間周波数である。 \mathcal{F} はフーリエ変換を \mathcal{F}^{-1} はフーリエ逆変換を表す。

図2に示される水平面内 (x,y) での波形 $\zeta(x,y)$ は同様にして式 (2.3) によって表される。

$$\zeta(x,y) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{1}{ch \left(1 - \frac{1}{n}\right)} \cdot \frac{\mathcal{F}[B'(x,y)]}{\omega_x^2 + \omega_y^2} \right] \quad (2.3)$$

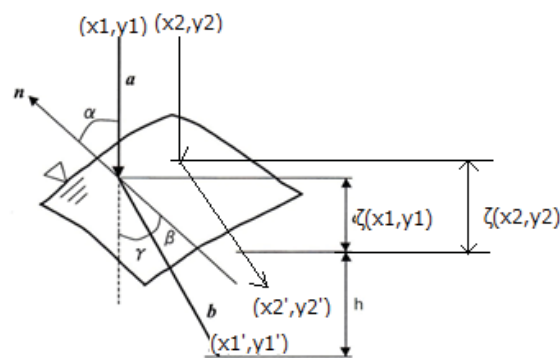


図2 鉛直入射の場合の境界面での屈折

ここに、 $c(x,y)$: 静水面時の輝度

$B(x,y)$: 波がある場合の輝度

$B'(x,y)$: 明るさの変動成分であり、

$c(x,y) - B(x,y)$ で表される。

ω_x, ω_y : 空間周波数

h: 一様水深 (cm)
 n: 屈折率 (=1.33)
 y 軸は水路方向、x 軸は水路と直角方向
 である。

3. 空間周波数

x軸方向の空間角周波数を ω_x 、y軸方向の空間角周波数を ω_y と表している。これらはx軸方向の空間周波数を f_x 、y軸方向の空間周波数を f_y とすれば式(3.1)のように表される。

$$\begin{aligned} \omega_x &= i2\pi f_x \\ \omega_y &= i2\pi f_y \end{aligned} \quad (3.1)$$

ここに、i: 虚数単位

実際に記録された明暗映像のx軸方向の長さがX、y軸方向の長さがYとする。この画像をx軸方向にm、y軸方向にn分割すると計算領域には $m \times n$ 個のデータが存在する (今回は m:512、n:256)。この領域のそれぞれの位置に対する空間周波数はx軸方向に $m/2$ 、y軸方向に $n/2$ までは、それぞれ k_x, k_y を整数として式(3.2)で表される。

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{k_x}{X} & (k_x = 0 \sim \frac{m}{2}) \\ f_y &= \frac{k_y}{Y} & (k_y = 0 \sim \frac{n}{2}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 k_x : x軸方向のデータ番号
 k_y : y軸方向のデータ番号

次に $m/2$ 、 $n/2$ を超える領域の空間周波数は式(3.3)で表される。

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{k_x - m}{X} & (k_x = \frac{m}{2} + 1 \sim m - 1) \\ f_y &= \frac{k_y - n}{Y} & (k_y = \frac{n}{2} + 1 \sim n - 1) \end{aligned} \quad (3.3)$$

周波数処理においては0で除することを避け

るため、 $f_x = f_y = 0$ の場合にはy軸方向に1つ進んだ領域の空間周波数を用いて計算を行っている。

4. 実験方法

実験は図3に示すような模型水槽 (540×20×15cm) を用いた。側壁での光の反射の影響を避けるため、太陽に向かって波が進行するように実験装置を水平面内で移動して調節する。発生波は周期0.27秒の規則波である。



図3 実験装置

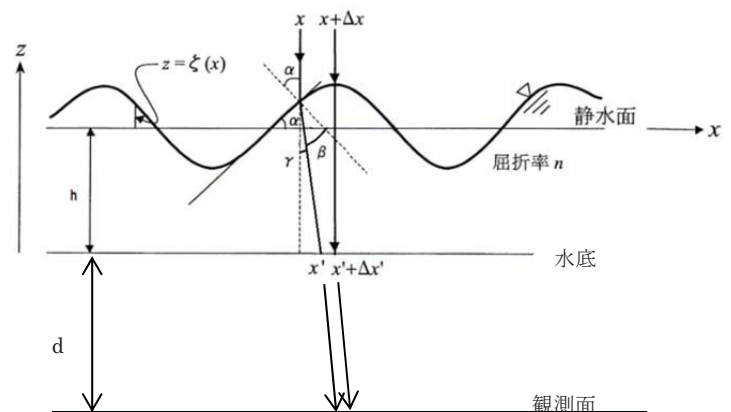


図4 水底と観測面との距離

図4はアクリル板製の水底とその下方に置く白い観測面との距離dの位置関係を表している。水底には位置を確認する2本の検測ピンを取り付け、観測面に投影された映像の中からピンを探し、水底での位置と観測面での位置が対応できるようにしている。

(1) 水底での明暗映像からの波高推定

波の無い状態と波を発生させた状態において、水槽の底面 (アクリル板製とすりガラス製) に映る映像を下方からビデオカメラで撮影 (映像幅は約10×30cm) し、同時に真横からもビデオカメ

ラで撮影して波長を測定する。また容量式波高計を2か所に設置(間隔:180cm)して波高を測定する。映像に移っている実際の長さは水路幅が15cmであることから換算して求める。

撮影した映像は画像処理ソフト ImageJ により 256×512pixel に分割し、各ピクセルの輝度を取得後、OriginPro9.0 で FFT・IFFT を実行し式(2.3)により解析する。

(2) 水底下方に観測面を設置する場合の波高推定

波の発生要領は(1)と同じである。図4のdを変化させながら、白い観測版に写る明暗模様をビデオカメラで記録する。この場合の観測面内の実際の長さは、2本の検測用ピンの映像位置から算定する。

5. 結果と考察

撮影は映像内に1波長以上でかつ波ができる限り多く入るようにした。得られた映像の中の解析範囲の決定の際には、フーリエ変換・逆フーリエ変換を有限区間で行うことを考え、解析区間の最初の値と最後の値はほぼ一致するように選んでいる。

(1) 水底が亚克力板とすりガラス板の違い

水深が12.1cm、天候が晴れ、水底が亚克力板の場合について解析結果を表1に、また図5～10にそれぞれ静水面と波がある場合の記録映像、輝度分布図 $B(x,y)-c(x,y)$ 、解析波形、水路中央での輝度分布図 $B(x,y)-c(x,y)$ 、解析波形、波高計記録を示している。

表1 結果(亚克力板製水底)

水深	12.1cm	解析波高	0.04cm
水底	亚克力	波高計	0.63cm
天候	晴れ	相対誤差	93.8%
太陽高度	31.2°	映像幅	10×30cm
波長	8.7cm	解析波長	8.4cm
相対誤差(波長)			3.0%



(a) 波有り (b) 静水面

図5 記録映像

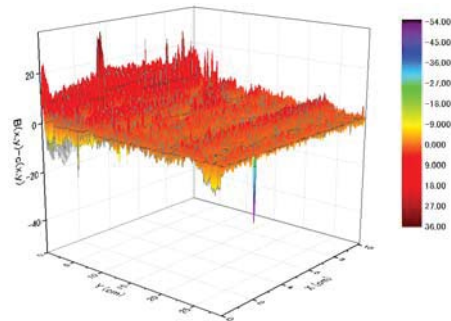


図6 $B(x,y)-c(x,y)$

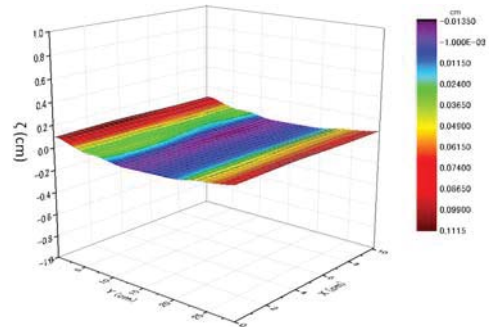


図7 解析波形

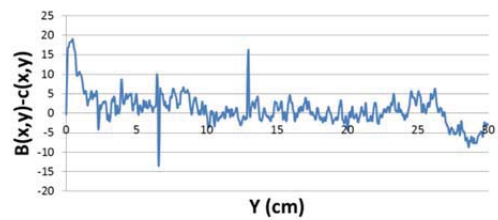


図8 水路中央の $B(x,y)-c(x,y)$

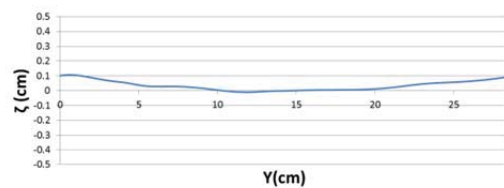


図9 水路中央の解析波形

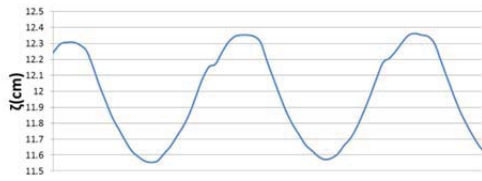


図 10 波高計記録

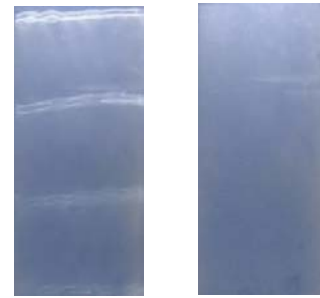
水底がアクリル板製の場合の結果について考察する。表 1 から解析波形で得た波長は 8.4cm に対し実際の波長は 8.7cm、相対誤差は 3%であり、その精度は高い。しかし、解析によって得た波高は 0.04cm に対して波高計では 0.63cm であり相対誤差は 93.8%と大きく、解析で得た波高は実際の波高に比べ非常に小さい値となっている。これは図 8、図 9 の水路中央の解析波形と波高計記録からも確認できる。

この原因は水底の材質がアクリル製で透明であることが挙げられる。波による明暗模様を下方から観測するためにアクリル板製の水路底を用いたが、アクリル板の場合は入射する光をほぼ透過させてしまったため、記録映像の輝度の最大値と最小値の差が明確に表れず解析波形が小さくなったと考えられる。輝度の最大値と最小値の差は図 7 から小さいことがわかる。

アクリル板が光情報の多くを透過させたのに対して、すりガラス製水路底の場合はアクリル板よりも光の透過量は少ないと考えすりガラスを選んだ。結果を表 2 に、図 11～16 にそれぞれ静水面と波がある場合の記録映像、輝度分布図 $B(x,y)-c(x,y)$ 、解析波形、水路中央での輝度分布図 $B(x,y)-c(x,y)$ 、解析波形、波高計記録を示している。

表 2 結果 (すりガラス板製水底)

水深	12.1cm	解析波高	0.13cm
水底	すりガラス	波高計	0.57cm
天候	晴れ	相対誤差	77.4%
太陽高度	31.2°	映像幅	10×30cm
波長	8.0cm	解析波長	8.04cm
相対誤差 (波長)		0.5%	



(a) 波有り (b) 静水面

図 11 記録映像

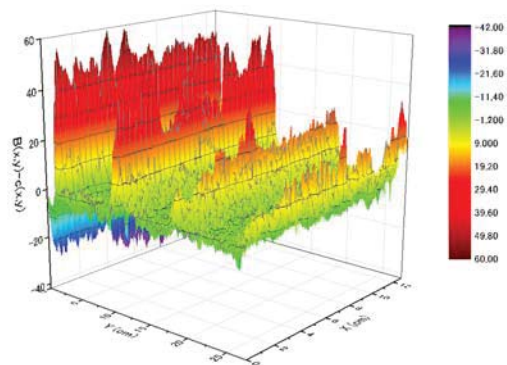


図 12 $B(x,y)-c(x,y)$

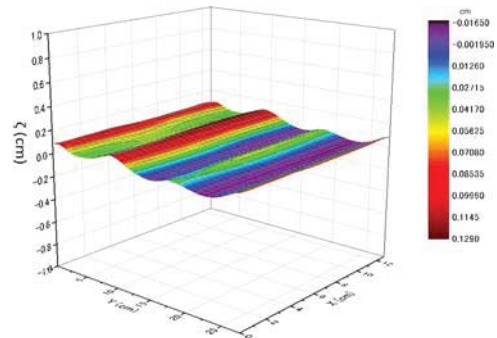


図 13 解析波形

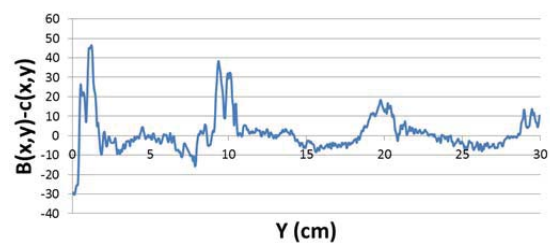


図 14 水路中央の $B(x,y)-c(x,y)$

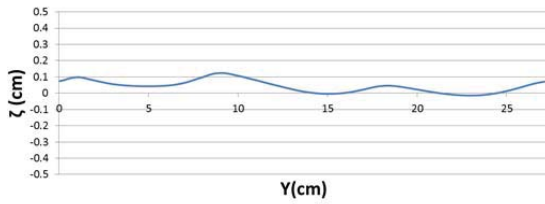


図 1 5 水路中央の解析波形

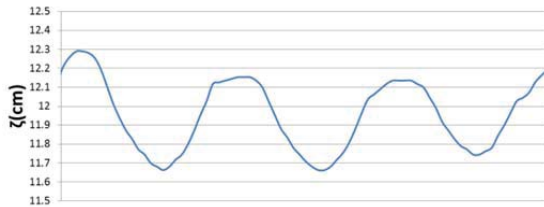


図 1 6 波高計記録

すりガラス製水底の場合では、表 2 から解析波形で得た波長が 8.04cm に対して実際の波長は 8.00cm、相対誤差は 0.5%であり、アクリル板製と同様にその精度は非常に良い。さらに、図 1 1 の明暗模様と図 1 5 の波の数や発生個所もほぼ一致している。また解析によって得られた波高も 0.13cm に対して波高計記録では 0.57cm で、相対誤差は 77.4%となり、アクリル板の場合の結果と比較すると精度は良くなっている。

アクリル板、すりガラス板のそれぞれの場合に水深を変えて実験を行い、得られた波高についての相対誤差の分布を図 1 7 に示している。図からアクリルの場合の相対誤差はすりガラスの場合よりも比較的大きな値となっている。すりガラスには表面の細かい凹凸があり、これによって通常ならば直進してしまう光がすりガラスに当たって散乱し、明暗模様がより明確に表れ、光情報がアクリルの場合よりも多く取得できたからであると考えられる。これは図 6 と図 1 2 の $B(x,y)-c(x,y)$ の分布図からもわかる。すりガラスはアクリル板製に比べ有効的に明暗模様を観測でき、精度を良くすることができるといえる。

しかし、すりガラスを用いても、透過する光は存在するためすりガラスでは明暗模様の取得に限界があり、波面で屈折したすべての太陽光を観測

しているとは言えない。このことが未だに高い誤差が生じてしまう原因と考えられる。

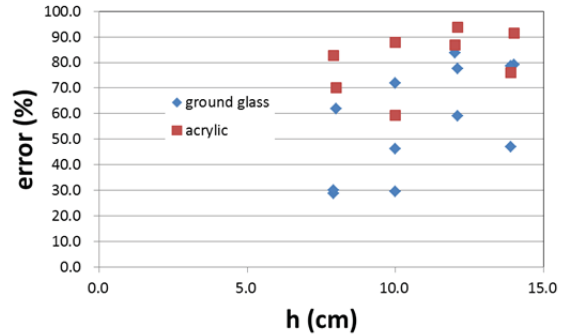


図 1 7 波高の実測値と理論値の相対誤差

水底がアクリル板、すりガラス板を設置した場合について共通しているのは解析波形によって得られた波長は非常に良い精度の結果が得られており、解析波形の波の数も実際の映像とほぼ一致しているのに対し、波高は両ケースともに精度が非常に悪く、すりガラスを用いても実際に利用するにはその誤差は許容できるものではない。

式(2.3)から輝度分布の他に波高を決定するパラメータとしては屈折率 n と静水面時の明るさ c がある。つまり、波高が波高計記録よりも極端に小さくなった原因は屈折率 n 、静水面時の明るさ c の仮定あるいは決定方法の問題が挙げられる。

(2) 屈折率 n

今回の解析において屈折率は 1.33 を一定値として仮定し計算を行った。これは一般に常温 (20°C) の水の屈折率が 1.33 であることに基づいたものである。入射する光の波長が明確に特定することができれば少数点以下第 3 桁まで決定できるが、今回の研究に利用した自然光は多種の波長を含む光線であるため、 $n=1.33$ として用いている。つまり屈折率は入射光線の波長によって決定されるため自然光のように多種な光線が含まれると波長による若干の誤差は考えられる。そこで、波長による誤差を考慮し $n=1.32$ や 1.34 としてすりガラスの場合に対する解析結果を表 3、図 1 8、1 9 に示す。

表3 n=1.32、n=1.34 としたときの結果

n	解析波高	相対誤差
1.32	0.13cm	76.9%
1.34	0.12cm	78.0%

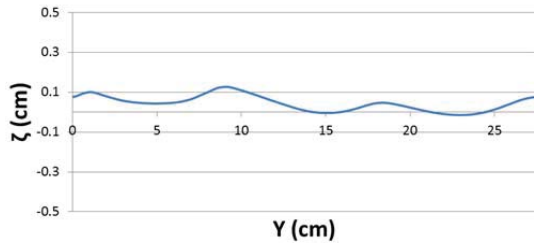


図18 n=1.32 の場合の解析波形

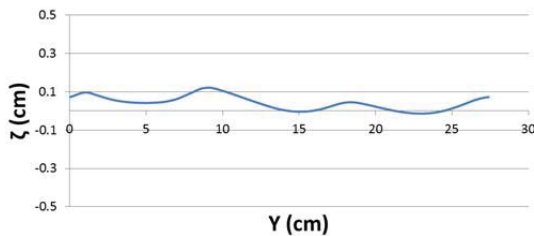


図19 n=1.34 の場合の解析波形

表3、図18、図19から屈折率を0.1変化させただけでは波高、相対誤差はほぼ変化しない。また、屈折率は温度によっても変化し、今回実験に用いた水の温度は約7℃であった。従って、温度による誤差もあり得る。すりガラス板の場合の実験において、水深8cm、10cm、12cm、14cmと変化させたときの各データに対して屈折率のみを変化させ相対誤差が最も小さくなるときの屈折率を調べた。その結果を表4に示す。

表4 各水深に対して相対誤差が最小になる屈折率

水深 h(cm)	屈折率	解析波高(cm)	相対誤差(%)
7.9	1.23	0.63	1.7
10	1.15	0.59	2.3
12.1	1.06	0.56	1.2
13.9	1.06	1.24	6.1

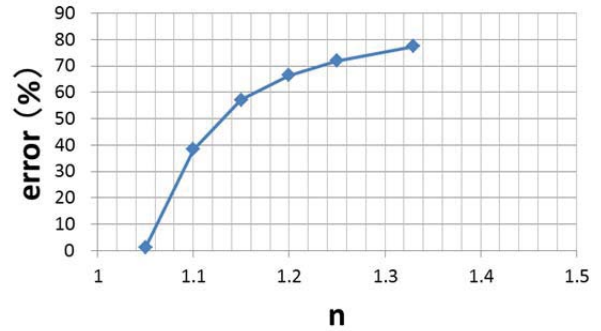


図20 パターン2における相対誤差と屈折率 n の関係

表4から相対誤差を最小にするためには仮定した屈折率の値よりも0.1~0.27小さくする必要がある。式(2.3)から波高は屈折率に反比例しているため、屈折率を小さくすることで解析によって得られる波高は大きくなり、相対誤差も小さくなる(図20)。しかし、温度による水の屈折率の変化量は1℃ごとに 8×10^{-5} であるため、水温が常温(20℃)よりも約10℃低いくらいでは屈折率が仮定値よりも0.1~0.27も小さくなることはない。つまり、本実験で波高が波高計記録よりも極端に小さくなった原因として、多種の波長を含む自然光による誤差や屈折率の温度変化は考えられないといえる。同時にその変化量の小ささから屈折率を1.33と仮定しても問題ないといえる。

(3) 静水面時の輝度 c

図21において光が鉛直に入射すると仮定すれば、入射光の明るさを c とすると式(2.1)のように $cdx=Bdx'$ となる (B は観測面上の輝度)。しかし、実際は季節により太陽光は水平面に対し δ だけ傾いて入射するため cdx は cdx'' となる。 dx と dx'' の関係は以下のようなになる。

$$dx > dx'' \tag{5.1}$$

$$c \cdot dx'' = c \cdot f(\delta) \cdot dx = c \cdot \cos(90 - \delta) \cdot dx$$

すなわち、斜め入射を考慮すると c を小さくしなければならぬ。そこで、c を小さくすることで、波高の相対誤差が最小となる c を調べた。その結果を図22、表5に示す。

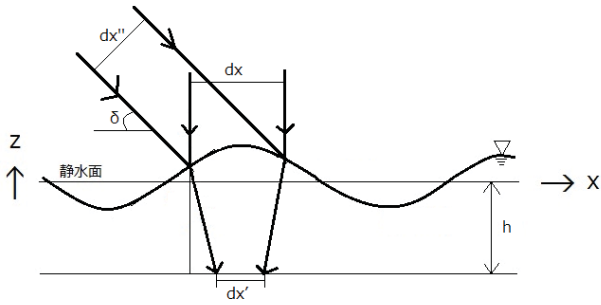


図 2.1 鉛直入射と斜め入射

図 2.2 から c を小さくすることで相対誤差が 1%程度まで小さくすることが確認できる。また表 5 から今回の解析に用いた c を約 40~110 程度小さくした値のときに相対誤差が約 1~2%になることが確認できた。しかし、水深 12.1cm や 13.9cm の場合には元の c の約 25%にしなければ誤差を 1%程度に小さくすることはできず、斜め入射を考慮してもこの値は非常に小さく、無理があるといえる。

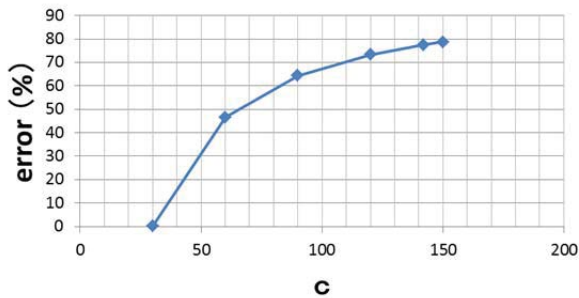


図 2.2 すりガラス板の場合の相対誤差と c の関係

表 5 各水深に対して相対誤差が最小になるときの輝度 c

水深 h (cm)	映像から取得した静水面時の輝度 c	誤差が最小となるときの c	解析波高(cm)	相対誤差 (%)
7.9	145.2	105	0.64	1.2
10	145.4	80	0.57	2.2
12.1	142.0	32	0.57	0.1
13.9	145.8	31	1.34	0.8

(4) 水底と観測面の距離 d について

アクリル板、すりガラス板共に波高に関する誤差が大きく、すりガラスを用いた場合について屈折率 n や静水面の輝度 c を変化させて誤差を最小にすることを試みたが、そのための n や c の減少量はあまりにも大きく無理がある結果となった。すなわち、この誤差の最も大きな原因としては光情報の取得量であると考えられる。そこで、透過率が 0 の発泡スチロール製の白い観測板を水底の下部に設置し、その白板上に作られる明暗分布を観測し、解析を行った (図 4、2.3)。 d は水底と白い観測板との距離である。

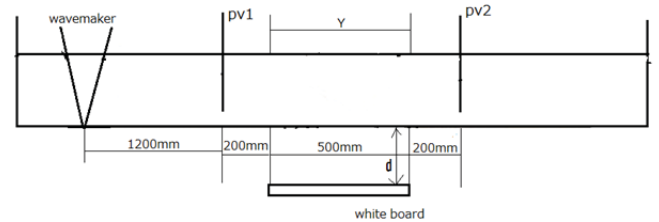
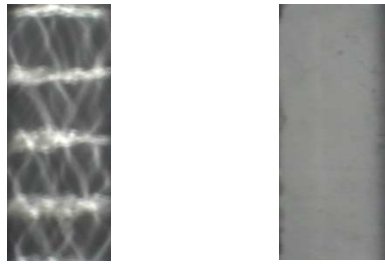


図 2.3 実験の概略図

明暗分布の観測方法としては上方と真横からビデオカメラ 2 台を用いて撮影し、映像幅はあらかじめ水槽に取り付けた検出ピンの目印によって決定した。波は規則波で周期は 0.27s である。解析方法はアクリル板、すりガラス板と同様で、水深としては h を使用し、水底下方に投影された映像を検出ピンの位置により実際の解析すべき映像の長さを決定する。実験結果を表 6、図 2.4 ~ 2.8 にそれぞれ静水面と波がある場合の明暗模様、輝度分布図 $B(x,y)-c(x,y)$ 、解析波形、水路中央での解析波形、波高計記録を示している。

表 6 結果 (白板の使用)

水深	12.1cm	解析波高	0.60cm
距離 d	35cm	波高計	0.67cm
天候	晴れ	相対誤差	10.5%
太陽高度	31.2°	映像幅	10×30cm
波長	10.1cm	解析波長	10cm
相対誤差 (波長)			1.0%



(a) 波有り (b) 波無し

図 2.4 映像記録

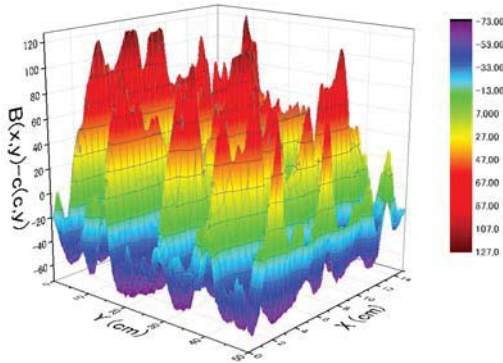


図 2.5 $B(x, y) - c(x, y)$

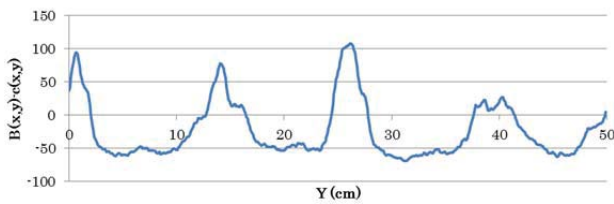


図 2.6 断面中央の $B(x, y) - c(x, y)$

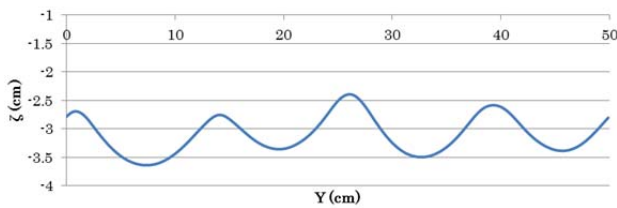


図 2.7 断面中央の解析波形

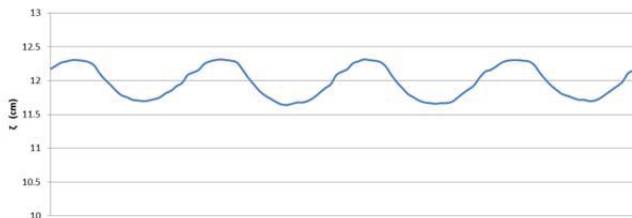


図 2.8 波高計記録

表 6 から波高に関する相対誤差が 10.5%であり、アクリルやすりガラスの場合よりも精度が向上し

ている。また、波長の相対誤差も小さく、波の数や発生場所は図 2.4 の映像とほぼ一致している。この結果から光情報をより多く取得することが精度の向上には必須であるといえる。

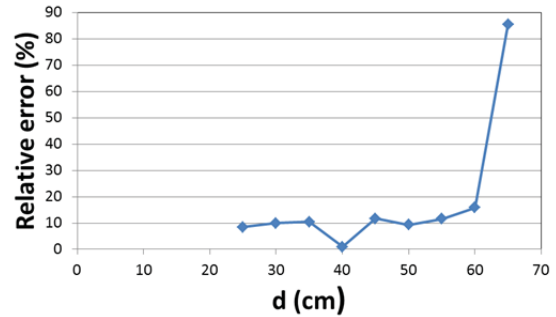
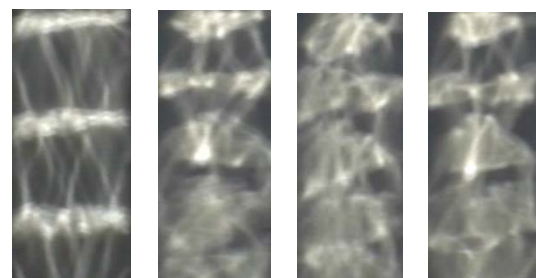


図 2.9 相対誤差と水底と観測面間の距離 d

図 2.9 に波高に関する相対誤差と水底と観測面間の距離 d の関係を示す。 d が 55cm 以上になると相対誤差が徐々に大きくなる傾向があり、65cm の時には相対誤差が極端に大きくなっている。これは d が 50cm 以上になると観測面上の明暗模様が鮮明でなくなるためであると考えられる。図 3.0 に d が 55cm を超えた場合の明暗模様の不鮮明さの例を示している。これは波の波形勾配にも関係すると考えられる。精度よく波形を推定する上で最適な d を検討することが必要となる。



50cm 55cm 60cm 65cm

図 3.0 d が 50cm 以上の時の記録映像

6. 結論

以下に本研究で得られた知見を記す。

- ① 今回の手法で面的波高推定を行う場合、波の発生場所、発生個数が実際の波と一致

した波形を得ることができ、解析によって得た波長はアクリル、すりガラス、白い観測板の全てにおいてよい精度である。

- ② すりガラスを水底に設置して撮影した場合、設置しなかった場合よりも明暗模様はより明確に表れ、水槽の下から観測する場合はすりガラスの使用が有効的である。しかし、すりガラスを用いても実用に至るような精度の波高を得ることはできない。
- ③ 屈折率を変化させることで相対誤差が最小となる屈折率の値を調べた結果、得られた屈折率は考えられる波高の変化量の許容を超えていたため、屈折率は 1.33 としよと考えられる。
- ④ c の値を変化させることで、波高の相対誤差は約 1~2%にまで下げることができる。しかし、 c を大幅に小さくする必要があり、実際的でない。

- ⑤ 水底にアクリル板やすりガラスより透過率の低い白い観測板を設置して、観測板上方から撮影し、光情報を多く取得することでアクリルやすりガラスよりも精度のよい結果を得ることが出来た。
- ⑥ 水底と観測板との距離を大きくすると観測板上の明暗模様が不鮮明になり、精度が極端に悪くなる。よって、最適な d の決定方法を検討する必要がある。

参考文献

1. 鈴木敏夫・住野和哉：水面透過光の明暗分布を利用した面的波高計測，関西造船協会誌，第 220 号，pp.105-110，1993.
2. 檀和秀：水上・水中から観測される水底に投影された波面映像例，可視化情報学会全国講演会（宇都宮），Vol.23, Suppl. No.2, pp.211-214, 2003.