

II-74

モアレ法による水槽内2次元波高分布の連続計測

北海道大学工学部	正員	水田	洋
北海道大学工学部	正員	大谷	守正
北海道大学工学部	正員	高橋	將
北海道大学工学部	正員	吉田	静男

1. はじめに

波動の水槽実験において、水位が最も基本的な被測定量であることは言うまでもない。抵抗線式あるいは容量式波高計によって精密に測定された水位の時間変化を解析することは広く行われてきた。また1次元水槽では、側面を透明にして写真撮影することも可能である。ところで、2次元水槽内で波高計を使って水位の定点測定を行う場合は、あらゆる方向から波高計に入射する波を捉えることになる。このため、同時に数チャンネルの波高計が使えたとしても、これだけでは結果の解析に想像力を駆使することになる。

我々は、底面地形が変化する水域を伝播する波浪の数値解析を行い、その結果の検証のため、2次元水槽実験を実施した。その際に、数値解析による2次元波高分布図と比較するための実験画像を、等波高線を光干渉縞で可視化するモアレ法によって得た。用いた器材は手近なものであったが、ビデオカメラで連続的に記録された刻一刻の画像からは、曖昧さのない解析が可能であった。本稿ではその実験と解析の方法について報告する。

2. 大型水槽におけるモアレ法

格子間隔がほぼ同じ2枚の格子を透かして見ると、格子間隔よりはるかに大きい間隔の縞模様が見られることがある。これがモアレ縞で、網戸やレースのカーテンなどで日常的に観察される。モアレ法は、3次元物体の計測に適用できることがTakasakiによって示されたが[1]、1970年代に方式の改良が進み、流体表面形状の計測にも応用されるようになった[2]。モアレ法には大きく分けて、物体に投影された光源近くの格子の影をカメラの対物レンズの前の格子を通して観察する投影法と、物体近くの格子の影を離れた光源から物体に照射し、これを格子自身を通して離れたカメラで観察する照射法(実体格子法)がある[2,3]。投影法は格子を物体近くに置かなくてすみ、種々の調整を光学的に行える利点があるが、我々は、光学部品の準備を必要とせず器材の入手が容易な照射法を選んだ(図1)。

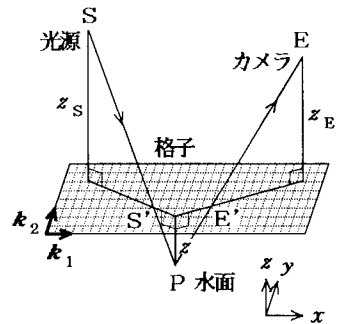


図1. モアレ法の器材配置

実験は、縦横深さ9.4m×7.4m×0.5mの大型水槽内に凸部と凹部のある平均勾配1/10の斜面地形を作り、水深0.26mの沖合いで、周期1.45s、波長2.12m、波高6mmで造波された表面波が、底面地形の変化のために汀線付近で変形・屈折・反射・碎波する様子を観察した。ここでの計測対象は、汀線付近に設けた岸沖方向2.0m、沿岸方向1.8mの水域である。大きい計測領域に照射法を使うため、従来の方法[4,5]はそのままでは適用できず、モアレ法の器材である格子・光源・カメラの選び方、使い方に新たな工夫を要した。

格子には、ネジを切った棒を2本平行に置き、ネジ谷同士の間につや消した糸を多数渡した平行格子を使うのが普通であるが[2,4]、計測領域が大きければこのような格子の作製にはかなりの労力と時間を費やすことになる。この

ため、ポリエステル糸をピッチ1mm および5mm で正方格子状に編んだ建設工事用のネットをたるみや歪のないように木枠に張って格子とし、ネットからの反射を減らすため、黒のつやなし塗料を吹き付けた。格子は、上方から見て静水状態でモアレ縞が現れないように水面近くに水面とほぼ平行に吊った。

光源については、広い計測領域をなるべく一様に明るく照射できるものが望ましい。このため、500Wの写真用ハロゲン光源のほか、長さ2.4m、110Wの蛍光灯も用いてみた。格子と光源の4通りの組合せのうち、粗い格子と蛍光灯を用いた場合の画像が明るく、モアレ縞も明瞭であった。

実験画像は広角レンズをつけたビデオカメラで連続的に記録した。ビデオカメラは、解像度の点では普通の写真に及ばないが、変化する現象の画像を正確な時間管理で漏れなく記録でき、メモリーボードやプリンタへ出力することもできる。撮影された格子と走査線の重なりによるモアレ縞は、格子線と走査線の密度差が大きいために現れなかった。

格子上方の光源・カメラまでの空間の側方は暗幕で遮光し、水面にはアルミ粉を撒いて反射が水面からに限られるようにした。水槽上部にある器材設置用鉄骨の構造上の制約のため、標準的なモアレ法のように光源およびカメラから格子までの距離を等しく取れなかったため、後述の方法で画像の解析を行った。

ビデオ画像は、造波後6sから10sの間を0.2s間隔でイメージメモリーボード（フォトロン製FDM98-4）からパソコン（NEC製PC-9801）に取り込み、各画像の明るさの非一様性、水平方向の歪みなどを除去した上で、波高分布を求めるための解析を行った。これらの画像処理と解析の方法については3、4節に示す。

3. 画像処理の方法

写真1は、表面波が、底面の中央が他より高い凸部地形の左方から右方の汀線へ伝播して、底面地形による屈折・変形を受けて最大遡上の直前（造波後8s）で突っ立つ時の未処理画像である。この画像には、水面からの直接反射光、光源の照射むらによる明るさの非一様性と、計測領域の撮影方向が斜めであることや球面収差による水平方向の歪みなどがある。これらを計数的に除去するため、縦横の画素数256×256、各画素の明度階調64で画像をメモリーボードからパソコンに取り込み、パソコン上のBASICプログラムとそれから呼ばれるアセンブラプログラムで次の処理を施した。

- (1) 処理前の画像（ORG）で隣合う画素間の明るさを平均して平滑化画像（AVR）を求める。
- (2) 画面間減算ORG-AVRで平均的な明るさからの差を取り出す（SUB）。
- (3) SUBにおける明部と暗部のコントラストを強調する（CNT）。
- (4) CNTの水平面内歪みを回帰補正する（COR）。

SUBでは、ORGとAVR両画面の画素の明るさの差をとる際に、全画素に共通な定数を加え、画素の明るさが最小でも0となるようにした。この操作は、画面を一樣な明るさで照射することに相当している。

画像の水平面内歪みの補正には、実座標 (X, Y) の画面上での移動先の座標 (x, y) を知り、その点の画素の明るさを実座標での明るさとするを画面全体で行えばよい。これには、画面上の数点における (X, Y) と (x, y) の対応をもとに決めた回帰曲面関数 $x=x(X, Y)$ 、 $y=y(X, Y)$ を用いる。ここでは、画面に撮し込まれた縦横2本のスケールを座標の対応づけに使い、次の回帰曲面関数の係数 $A_i, B_i (1 \leq i \leq 6)$ を求めた。

$$\begin{cases} x(X, Y) = A_1 + A_2 X + A_3 Y + A_4 XY + A_5 X^2 + A_6 Y^2, \\ y(X, Y) = B_1 + B_2 X + B_3 Y + B_4 XY + B_5 X^2 + B_6 Y^2. \end{cases} \quad (1)$$

写真1に以上の処理を施したのが図2で、直接反射光のあった沖合いでも縞の明部と暗部のコントラストが強調され、波高分布の解析がより容易な画像になっている。

4. 波高分布の解析

ここでの実験には、平行格子の代わりに正方格子を使う、点光源の代わりに線光源の蛍光灯を使う、格子までの距離が光源とカメラとで違う、など標準的な方法[3]とは異なる点があるため、波高分布を求める過程を検討し直した。

図1のように、正方格子は直交する2枚の平行格子の重ね合わせと見なされる。以下では、それぞれの平行格子の格

子線に垂直な格子面内の方向を x, y , 格子面と垂直な上方を z とする。格子の光透過率が正弦波的に変化するならば、 $r_s=(x_s, y_s, z_s)$ にある光源から出た光が r_s で格子を横切って水面上の $r_p=(x, y, -z)$ に達し、反射されて r_E で再び格子を横切って $r_E=(x_E, y_E, z_E)$ にあるカメラに至る時、各平行格子が独立であればEで計測される光強度は

$$I_{1,2} = \frac{1}{2} (1 + \cos k_{1,2} \cdot r_{s'}) \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos k_{1,2} \cdot r_{E'}) \quad (2)$$

となる。ここで $k_{1,2}$ は波数ベクトルで、 x, y 方向の単位ベクトルが x, y , 各々の平行格子の格子間隔が $\lambda_{1,2}$ なら $k_1 = (2\pi/\lambda_1)x, k_2 = (2\pi/\lambda_2)y$ である。正方格子におけるモアレ縞の光強度は、 I_1 と I_2 の積を三角関数の積和の公式で展開し、元の格子と同程度の短い波長で変化する項を平均によって落とせば、次のようになる。

$$\overline{I_1 I_2} = \frac{1}{64} (2 + \cos 2\pi N_1) \cdot (2 + \cos 2\pi N_2), \quad 2\pi N_{1,2} = \frac{2\pi}{\lambda_{1,2}} \varphi_{1,2} = k_{1,2} \cdot (r_E - r_s). \quad (3)$$

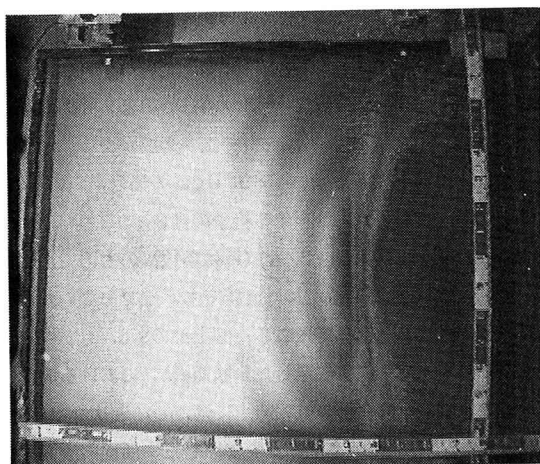


写真1. 画像処理前の表面波の水平画像

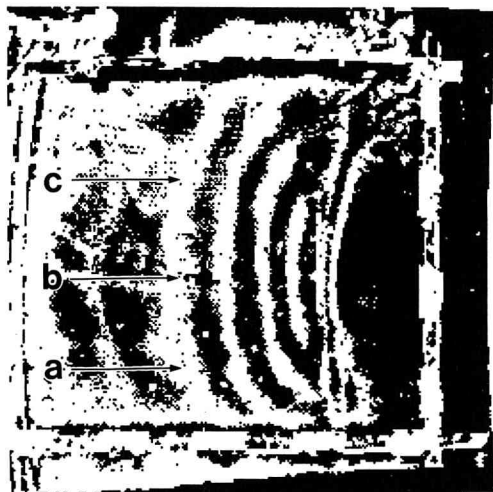


図2. 画像処理後の表面波の水平画像

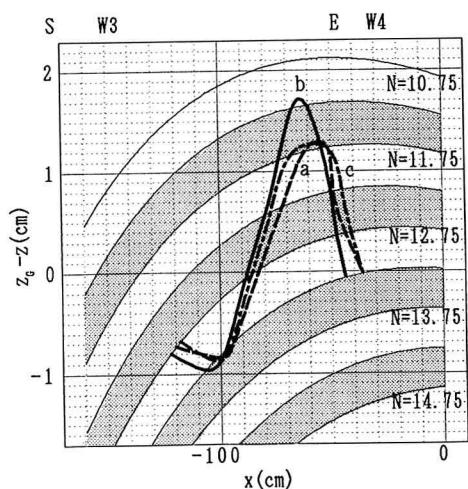


図3. 等位相線と表面波の断面波形

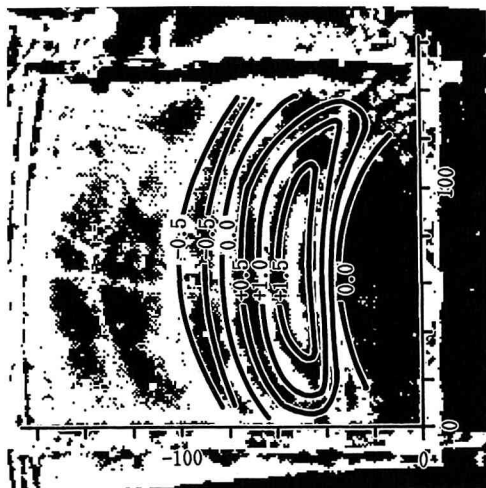


図4. 2次元波高分布 (単位cm)

幾何学的相似性 (図1参照) より式(4)が得られるので、これと k_1, φ_1 の定義から式(5)が導かれる。また φ_2 の表式は、式(5)の x を y で置き換えたものである。

$$r_E - r_S = \frac{z}{z_E + z} (r_E - r_P) + \frac{z}{z_S + z} (r_P - r_S), \quad \varphi_1 = \frac{z}{z_E + z} (x_E - x) + \frac{z}{z_S + z} (x - x_S). \quad (4, 5)$$

点光源とカメラが同じ zx 平面内にある場合、 $|y - (y_S + y_E)/2| \leq \lambda_2 \{ (z_E + z)(z_S + z) \} / (z |z_E - z_S|)$ であれば $r_E - r_S$ もこの zx 平面内にほぼ入り、 k_1 とは平行、 k_2 とは垂直になる。このとき $N_2 \ll 1$ となって式(3)の $2 + \cos 2\pi N_2$ はほぼ定数である。また線光源の場合には、式(3)を N_2 に含まれる y_S について光源の範囲 $(-Y, Y)$ にわたり平均することになるが、 $\lambda_2 (z_S + z) / z \ll 2Y$ であれば、式(3)の $2 + \cos 2\pi N_2$ はやはり定数に近い。いずれの場合も平行格子と同様、縞の明るさが同じなら次数 N_1 あるいは φ_1 が等しいと見なすことができる。なお、この実験で以上の条件が満たされていることは確認した。

式(5)を z について解くと、 z は φ_1 と x の関数として次式のように表される。

$$z = \left[\frac{\varphi_1}{B} + F(\varphi_1, x) \right] \bar{z}, \quad F(\varphi_1, x) = \frac{A}{2B} \left[\sqrt{1 + \frac{4B\varphi_1}{A^2} \left(\frac{z_S z_E}{z} - 1 - \frac{\delta}{B} \right)} - 1 \right], \quad (6)$$

$$x_{SE} = x_E - x_S, \quad \bar{x} = (x_S + x_E)/2, \quad \bar{z} = (z_S + z_E)/2, \quad \delta = (x - \bar{x})(z_E - z_S)/\bar{z}, \quad A = x_{SE} + \delta, \quad B = x_{SE} - \varphi_1.$$

通常のアレ法では $z_S = z_E$ とするので、 $F(\varphi_1, x) = 0$ より z は φ_1 のみの関数となり、アレ法はそのまま等波高線となる。しかし $z_S \neq z_E$ の場合 z は x にも依存するので、例えば次のようにして等波高線を引き直す必要がある。

図3の細線は、 $\lambda_1 = 0.5 \text{ cm}$, $x_S = 46.5 \text{ cm}$, $x_E = 162.5 \text{ cm}$, $z_S = 183.6 \text{ cm}$, $z_E = 289.0 \text{ cm}$ の場合について、式(6)に基づき、 N_1 の等しい等位相線を水面付近で描いたものである。ただし x に依存する格子の高さ z_G を用い、 z の代わりに静止水面からの高さを縦軸とした。これらの等位相線は $N_1 = n + 1/4, n + 3/4$ (n は整数)のもので、水面がこれらを横切った位置がアレ法縞の明部と暗部の境となる。 $z_S \neq z_E$ なので等位相線は直線でも水平でもないが、静止水面のできるだけ広い範囲が明部となるよう格子の傾きが調節されたことは見て取れる。図上部のS, E, W3, W4は、それぞれ光源、カメラ、沖側波高計、岸側波高計の水平位置を示す。太線は、図2に示した3断面a, b, cにおける波形である。これは、図2における断面と明部・暗部の境との交点の水平位置を図3の等位相線上に落とし、順次つないで行ったものである。このために必要な縞の次数の同定には、W3, W4で記録された波高データを参照した。断面内波高分布からは、波の波形勾配は後ろより前で、振幅は波底より波頂で大きいこと、脇の断面a, cに較べて中央の断面bでは、先端部の進みは遅いが振幅は大きいことなどがわかる。いくつかの断面でこのような作業を行えば、図2内の多くの点における波高が求められる。これらに基づいて等波高線を引き、図4の2次元波高分布図が得られる。

5. おわりに

照射型のアレ法を、2次元大型水槽内の波動の2次元的かつ連続的な計測に適用するための工夫と、得られた画像の処理および解析の方法について述べた。アレ法は、水槽内の波動を包括的に理解する必要がある場合には、適切な方法であると言える。こうして得られた水槽実験画像と数値解析結果との比較については、機会を改めて述べる。最後に、水槽をお借りした北海道大学工学部港湾工学講座と水槽実験・画像解析に協力いただいた丹下信之君に感謝します。

参考文献

- [1] H.Takasaki: Moire Topography, Appl.Opt., 9(6), p.1457 (1970).
- [2] 流れの可視化学会編: 新版流れの可視化ハンドブック (朝倉書店), p.344 (1986).
- [3] 日本機械学会編: 光応用機械計測技術 (計測法シリーズ6, 朝倉書店), p.24 (1985).
- [4] 長瀬吉夫, 水野明哲, 山内邦比古: K-アレ法による水面形状の可視化, 流れの可視化, 1(2), p.105 (1981).
- [5] I.Grant, N.Stewart and I.A.Padilla-Perez: Topographic Measurements of Water Waves Using the Projection Moire Method, Appl.Opt., 29(28), p.3981 (1990).