

東京大学工学部 正会員 堀川清司
 東京大学工学部 正会員 渡辺晃
 東京大学大学院 学生会員 朝倉堅五

1. はじめに

波動のようべ刻一刻変化する水面に対して、ある瞬間の平面的・立面上の水位分布を定量的に把握するには困難である。最近では立体写真による波高観測を行なつたものが精度は高いが、撮影や固定化の経費が高く簡単には利用できない。立体写真の他にも *Starry sky* 法、透過光法、*Negroic endoscope*、全格子法などが平面的な水位変動の観測に用いられており、各瞬間の等水位線が直接目視でき、装置、撮影、固定化が容易で失点では、以下に述べるモアレ写真法が最もすぐれたもの。ここでは、モアレ写真法によて水位分布を測定した結果を二、三紹介し、残された問題点や今後の可能性について若干述べることにする。

2. モアレ写真法の原理及び実験方法

モアレ写真是高峰(1970)によって開発された比較的小面積の対象物に適する等高線写真法で、物体表面の凹凸測定や自動車の車体設計などで実用化されており、海岸工学の今野下也井口ら(1971)により海底砂礫の観測に応用されており、モアレ網の発現機構については松本の論文²⁾によどめられており、ここではその原理だけを簡単に記す。

モアレ網(等高線)を生じさせるためには、黒糸を密に等間隔に張り、たすだ状のモアレ網と点光源が必要である。図-1はモアレ網の系の方向に垂直な断面図で、モアレ網系によって光源からの光が遮られる領域と、モアレ網系によって目(カメラ)から見えない領域(影の陰)が黒く塗られている。 H_1, H_2, \dots, H_n 面は黒色部の面積が最も小さいから、この高さにあたる物体の表面は最も明るく見える。一方、モアレ網面から H_n 面までの距離 h_n は図中の記号を用いて、 $h_n = nsl/(d - ns)$ で与えられる。ただし、光源とカメラがモアレ網面から等距離にある限り、モアレ網下の物体表面上に明暗の縞模様として等高線をみることはできない。なお等高線高度間隔は一定ではなく、次數れが大きい程大きくなる。

本実験のためにL型鋼($40 \times 40 \times 2\text{ mm}$)をボルト締めた長方形の枠($100 \times 70\text{ cm}$)に、黒い5号釣糸を1mm間隔に張りめたモアレ網を作製した。後述の写真a~dに見られるよう

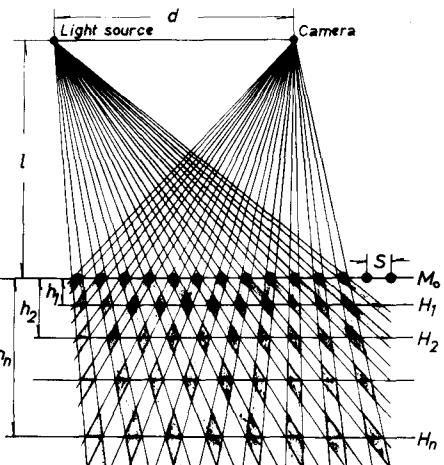


図-1 モアレ写真的原理

M_0 : モアレ網面, S : モアレ網系の周期

$H_1 \sim H_n$: 明るいモアレ網のあらわれる面

d : 光源・カメラを経た直線とモアレ網系に垂直な面に投影した長さ

1) 高峰敏夫: 非定常水面の統合的記録, pp. 105-106, 应用水理学, 下I(木間仁編), 丸善, p. 175, 1971.

2) 松本栄次: モアレ写真による海底砂礫の観察, 東京教育大学地理学研究報告, XV, pp. 175-191, 1971.

に、今回使用したモアレ網系には、系方向および平行と直角方向に 3 本の太い線が 15 cm 間隔に張られており。これは写真の歪を修正する目的と、モアレ縞の等高線の高さスケールの役目を兼ねている。この太糸とモアレ縞の次数れを求めることができる（詳細は松井の論文参照）。モアレ写真により等水位線を観察するためには、水面上にモアレ網の影を映さなければならぬ。そのため市販の白色オスター色を用い、体積濃度 1% の割合で水に溶かし水槽全容の水を不透明にした。

図-2 は実験装置の概要である。実験に用いたリップカルタンクは 600 × 120 × 15 cm の小型平面水槽で、フランジヤー式造波機により周期 0.3 ~ 3.0 秒の波を発生することができる。本実験とは関係ないが、リップカルタンクの底は一部がガラス張りになっており、下から光をあてるこことによつて水槽上部のスクリーンに水面の影を映すことが可能である。モアレ写真用の光源はたき火だけ点光源で、しかも光量が大きいことが必要なため映写機用ランプ (100V, 1kW, 2灯) を用いた。撮影には 35 ミリカメラ (Nikon F, F1.2, 55mm), フィルムは感度と粒子密度を勘案して Kodak PLUS-X (ASA 125) を用い、絞り F5.6, 露出時間 1/125 秒の条件で撮影した。カメラ - 光源距離, 光源 - カメラ - モアレ網間距離等は図-2 に示してある。

3. 円柱の周りの回折波

モアレ写真による水面解析の一例として、直立円柱周囲の回折散乱波をとりあげた。水深は 9.9 cm, 円柱の径は 8.9 cm 及び 16.5 cm の 2 種類である。撮影されたモアレ縞の一例が写真 2-a に示されている。明暗の縞模様が明瞭に識別できる。写真中央にみえるのは円柱で、上面に凹凸があるためにこの部分にもモアレ縞が現れている。入射波は写真の左から右に進行しており、ほほ上下対称な水面形が得られている。写真上のモアレ縞の自由端をトレースしたのが図-3(a)~(d) の破線で、各縞の次数れが数字で示してある。これと並んで 0.5 mm 間隔の等水位線をひくと図中の実線が得られ、数字は静水面からの水位である。一方, MacCamy³⁾ が得た速度加速度シグナルから、円柱周囲の回折波の各点の水位 $\zeta(r, \theta; t)$ を求めると、入射波を $\zeta_0 e^{i(kx-\omega t)}$ として次のようになる。a は円柱の半径。

$$\zeta / \zeta_0 = e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} E_m \cos m\theta [J_m(ka) - J_m'(ka) / H_m^{(1)}(ka) \cdot H_m^{(0)}(ka)] , \quad E_m = 1 (m=0), 2i^m (m \neq 0)$$

各ケースに対応した等水位線の理論値は図-4(a)~(d) に示されている。等水位線の形状、水位の値は理論値と実測値がかなり良い一致を示している。完全には一致しない理由は (1) 理論は非粘性、

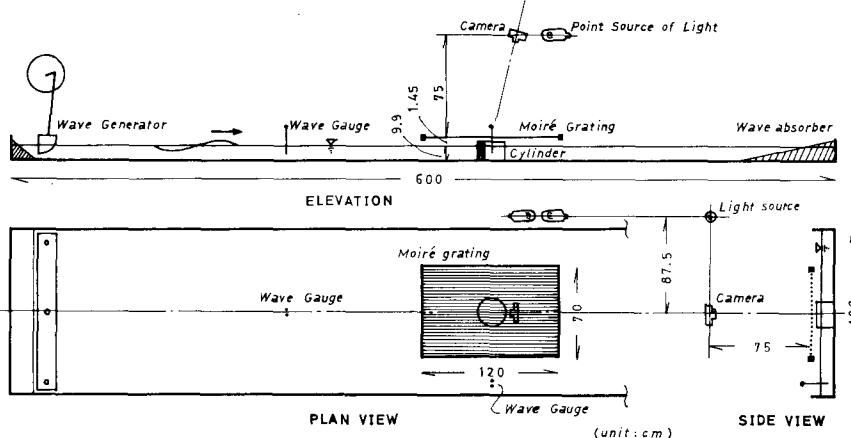


図-2
実験装置
の概要

3) MacCamy, R. C. & R. A. Fuchs: Wave forces on piles; a diffraction theory, B.E.B. Tech. Memo. No. 69, p. 17, 1954.

微小振幅と仮定 1) ロス: ×, 2) 理論値と位相 10° ことにより位相の不一致, 3) モアレ網生成上および水平固定上の誤差, 4) 反射波および側壁の影響, 5) 斜め導入を偏至修正する際の誤差, 6) モアレ縞中心線の読み誤差, 等が考えられる。今回の対象はモアレ写真の精度を調べる上では応和も適切な例ではなかつたので、若干直接的手法で誤差の検討をする必要がある。

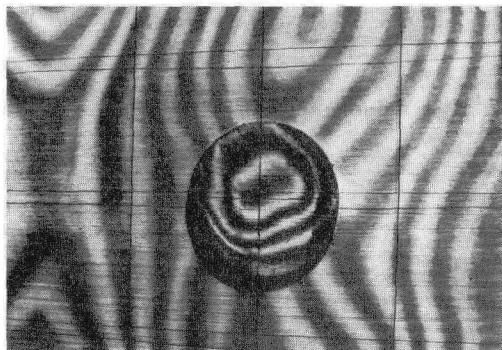


写真-a 水面のモアレ写真 (Case 1)

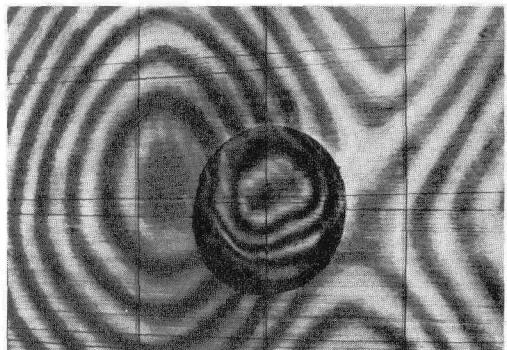


写真-b 水面のモアレ写真 (Case 2)

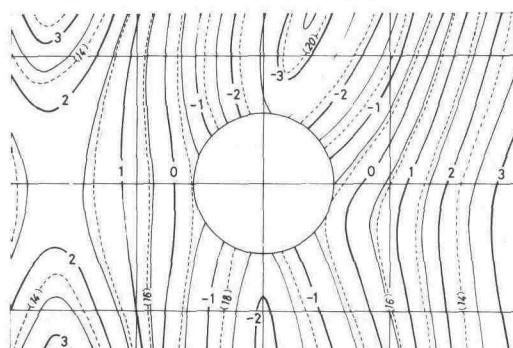


図-3 (a) 写真-aから求めた等水位線

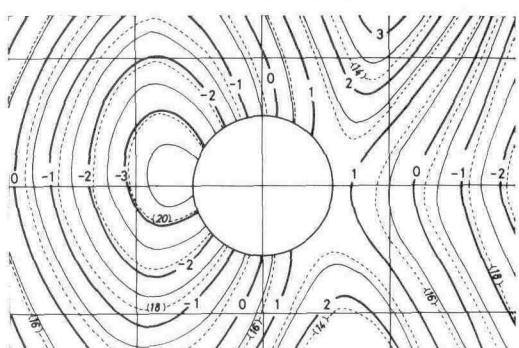


図-3 (b) 写真-bから求めた等水位線

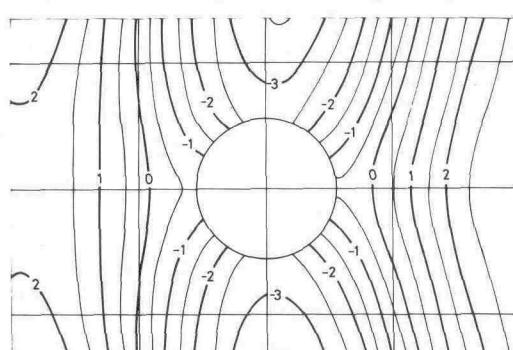


図-4 (a) Case 1 に対する理論等水位線

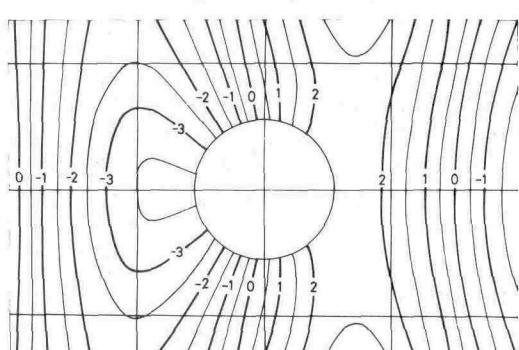


図-4 (b) Case 2 に対する理論等水位線

$$\text{Case 1: } D = 16.5 \text{ cm}, L = 59 \text{ cm}, S_0 = 3.1 \text{ mm}, \\ \sigma\alpha = 113^\circ \text{ (実験), } 110^\circ \text{ (理論)}$$

$$\text{Case 2: } D = 16.5 \text{ cm}, L = 59 \text{ cm}, S_0 = 3.1 \text{ mm} \\ \sigma\alpha = 344^\circ \text{ (実験), } 340^\circ \text{ (理論)}$$

(注) 入射波は左から右向きに進行している。図-3 (a)~(d) 中の破線は写真-a~d の測定範囲を固定した時の () 内の数字は各縞の次数 n の値を意味する。実線は破線から内挿して求めた 0.5 mm 間隔の等水位線で、数字は各等水位線の静水面上の高さ (mm)。図-4 中の数字も同義。D:円柱径, L:入射波波長, S₀:同振幅。

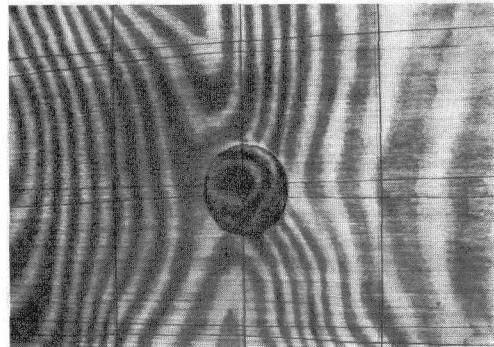


写真-C 水面のモアレ写真 (Case 3)

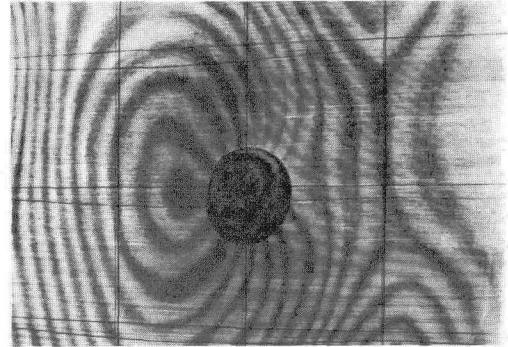


写真-d 水面のモアレ写真 (Case 4)

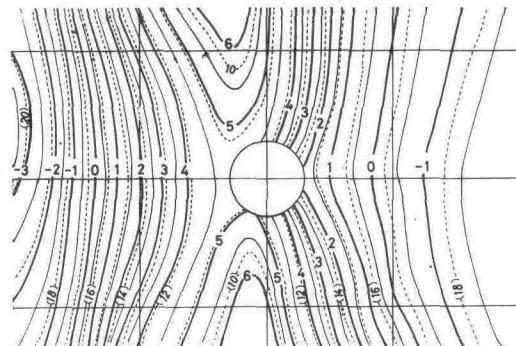


図-3(c) 写真-Cから求めた等水位線

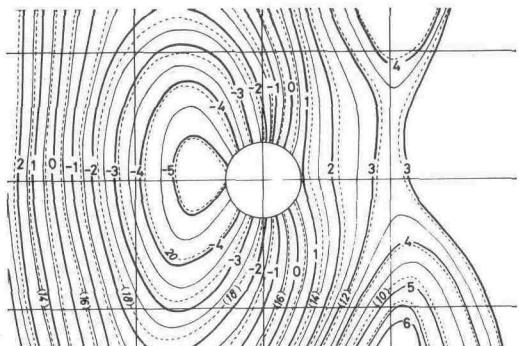


図-3(d) 写真-dから求めた等水位線

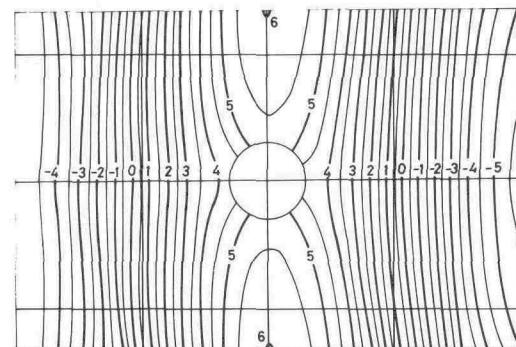


図-4(c) Case 3に対する理論等水位線

Case 3 : $D = 8.9 \text{ cm}$, $L = 63 \text{ cm}$, $S_0 = 5.7 \text{ mm}$
 $\sigma_t = 275^\circ$ (実験), 280° (理論)

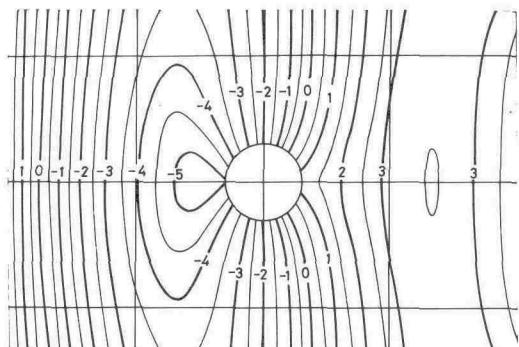


図-4(d) Case 4に対する理論等水位線

Case 4 : $D = 8.9 \text{ cm}$, $L = 63 \text{ cm}$, $S_0 = 3.5 \text{ mm}$
 $\sigma_t = 34^\circ$ (実験), 30° (理論)

4. お す び

モアレ写真による水面観測は、精度の点でまだ充分とはいえない。しかししながら精度を向上させる手段は種々考えられ、小型実験水槽等における平面的な水位分布を定量的に容易に観測する手法として大きな可能性をもつている。たとえば16ミリシネカメラを用いれば、水位分布を時間的にも空間的にも連続的変動として記録でき、各種の屈折・回折現象、斜面上の波の変形、湾内静態度、湾口付近の長波の挙動など、応用範囲は枚挙に難いばかりでない。今後、各方面で利用が試され、漸次手法を改良してデータの積重ねが行われることを期待する。