

円柱周辺の流速測定にはレーザードップラー流速計を使用した。このレーザードップラー流速計による測定は、原理的に 1) 流れに無接触であり流れ場を乱さない、2) 空間分解能および方向性に優れている等の利点を持っているが、乱れ場の測定においては、原理的に不確な要素も多くその使用において十分検討する必要がある。しかし、測定に必要な散乱用粒子が得やすい水を用いての測定においては、かなり精度よく流況の時間変化を測定することが可能だと思われる。今回使用した測定モードは、図-2 に示すように、出力 15 mW He-Ne ガスレーザーからの光線を等しい光の強さに二分割し、この二分割された光の交点において流速を測定するプリングモードである。図-2 は、水平水粒子速度 u を測定する場合であるが、ビームスプリッターを 90 度回転することにより鉛直水粒子速度 v の測定も可能である。又、周波数シフトシステムを使用することにより、順方向、逆流方向の速測定が連続的に可能である。本システムにおける、流速測定体積寸法を、通常用いられている算定式⁹⁾より算定した結果を図-2 に示す。この流速計の使用において必要とされる散乱粒子については、別に考慮する事なく、通常の水道水をそのまま使用した。

次に、水、ガラス、空気の屈折率が異なるために、流速計の移動距離と 2 本のレーザー光線の交点の移動距離が異なるので、流速測定点は水路幅の中心に固定し、円柱を水路方向および水路直角方向に移動させることにより、円柱周辺の水粒子速度の場所的変化を調べた。

実験使用波の選定にあたり、水深 $h=30$ cm, 40 cm, 50 cm, 周期 T が 0.7~2.5 秒、波高 H が 2 cm~15 cm の波浪諸元を有する波を、それぞれ約 5~10 分間作用させた場合の、進行波力 F_x 、揚力 F_y の時間変化特性を調べた。その結果、反射波の影響が少なく比較的長時間規則的な揚力の出現パターンが認められる、 $H=11$ cm, Run NO.

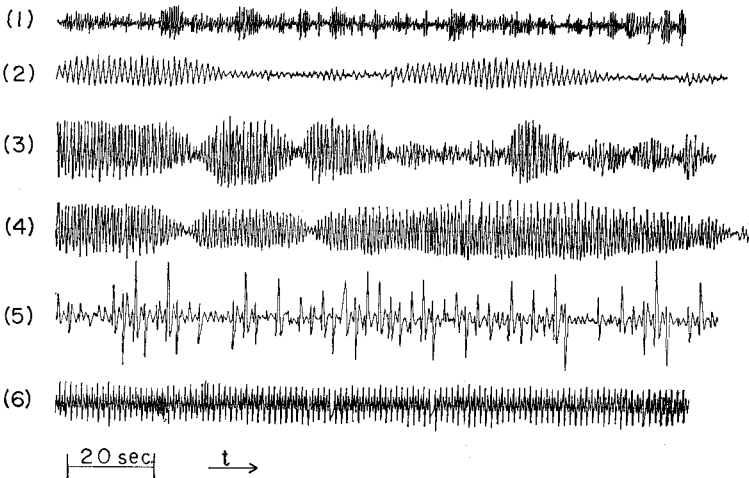


図-3 揚力の長時間測定例

$T=1.3$ 秒, $h=40$ cm の波浪諸元を有する波を実験波として使用した。流速および圧力分布の測定は、静水面下 $z=-17.5$ cm の位置で行なった。

使用した測定システムの概略を図-2 に示す。測定においては、シンクロスコープで信号のモニターを行ない揚力の出現パターンが大体同じ場合のみラビコーダーに記録した。

3. 実験結果および考察

3.1 揚力の長時間変化について

規則波中に設置された直円柱に作用する揚力 F_y の長時間変化特性を調べるために、約 5 分間の連続測定を行なった結果の代表例を図-3 に示す。表-1 に、これらの波の波浪諸元を示す。rms $K \cdot C$ 数が 5 前後では図中 (1) に示すようなパターンが多く見られたが、一部 (2) に示すように、規則的な周期をもって振幅変調を行う例が認められた。rms $K \cdot C$ 数が 8~12 の間では、(3), (4) に示すように比較的長い周期で振幅変調する場合が多く認められた。しかし rms $K \cdot C$ 数が 15 以上になると、(5) に示すように不規則な変化のパターン形状を示すようである。(6) は今回使用した波の場合を示したものである。この場合はかなり長時間規則的な揚力が出現していることが認められる。

表-1 波浪諸元

Run No.	1	2	3	4	5	6
水深 h (cm)	50	30	30	50	30	40
波高 H (cm)	8.0	2.3	6.2	7.2	6.5	11
周期 T (秒)	1.0	2.6	1.3	1.6	2.5	1.3
rms $K \cdot C$ 数	5.2	6.2	10.1	12	18.2	11.8

揚力は規則波中においても不規則に出現し、従来、その大きさ、および周波数特性については統計的に取り扱い、rms $K \cdot C$ 数をパラメータに整理されている^{2), 3)}。

しかし、このような現象を報告した例は見受けられないようである。反射波の影響、および波力検出装置の応答特性等を考慮して今後もう少し検討する必要があるが、円柱後流渦の挙動特性を示す一つの現象だと思われる。

3.2 円柱周辺の流速および圧力測定

図-4 は、今回使用した波において測定された、進行波力 F_x 、揚力 F_y 、円柱表面の法線方向に作用する波圧 P 、水平水粒子速度 u 、水位変化 η の同時記録例、および座標系を示したものである。

この記録例は図中に示されている流速測定点を原点とする X, Y 座標系において $X=-3\text{ cm}$, $Y=-2\text{ cm}$ の位置に円柱を設置した場合である。この時圧力計は $\theta=90^\circ$ の位置に設置されている。図中に記入されている点線は、 $\theta=270^\circ$ の位置に圧力計を設置した場合である。又、図中には、水槽床部に標準砂をまいて円柱周辺の渦の挙動を観察した結果を模式的に示している。この図に示すように渦の出現パターンは、 $\text{rms } K \cdot C$ 数をパラメーターにして分類されている円柱後流渦パターンにおいて非対称な渦が出現する場合^{2),3),5)}である。

次に、水平水粒子速度は、渦のはき出しにより急激に変化している事が認められる。又非対称な渦の出現のため、圧力の時間変化が $\theta=90^\circ$ と $\theta=270^\circ$ では異なっている事が認められる。

図-5 は、円柱を $X=5\text{ cm}$, $Y=-1\text{ cm}$ の位置、および円柱後流渦の影響を受けない $X=20\text{ cm}$, $Y=10\text{ cm}$ に設置した場合の水平および鉛直水粒子速度 u, v の記録例である。図中には、ストークス波の第3近似解による計算値を点線で示している。水平粒子速度 u はストークス波の第3近似解でよく近似されている事が認められるが、鉛直成分については、実測値と計算値の差が多少認められる。 $X=5\text{ cm}$, $Y=-1\text{ cm}$ の位置での測定においては、円柱後流渦の存在する位相と存在しない位相の周期性が認められる。又、円柱後流渦が存在する位相内では、水平および鉛直方向にほぼ同じ強さで流速が乱れている事が認められる。

図-6 は、円柱の設置位置を $X=-2\text{ cm}$ に固定し、 Y を 0 から $\pm 5\text{ cm}$ まで 0.5 cm 間隔に変化させた場合の水平水粒子速度 u の時間変化例を示したものである。図中には円柱設置位置の違いによる変化の様子を比較するために、円柱がない場合の流速の計算値(ストークス波の第3近似解)を点線で記入している。この測定中における円柱後流渦の出現パターンは図-4に示す場合と同様である。この図より、先に円柱後流渦のはき出しが見られる領域($Y=0 \sim 5\text{ cm}$)においては、位相 $t/T=0$ 付近で急激な速度変化が認められ、円柱が存在しない場合に比べて3倍近い流速が測定されている。次に、 $Y=-0.5, -1.5, -4\text{ cm}$ における測定記録例において、流速の出力信号が一部水平にホールドしている事が認められる。これは、レーザードップラー流速計の持つ問題点であり、統計処理を行なうにあたり考慮しなくてはならない重要な問題である。これが生じる原因としては、1) 流速計の応答特性範囲を越す非常に速い速度変化が存在すること、2) 流速測定に必要な散乱粒子が十分に存在しないことなどが考えられる⁶⁾。それらについていろいろ検討した結果、今回の測定においては後者の影響によるものと思われる。したがって、今後は、このように速度変化が激しい領域での測定においては、測定に必要な

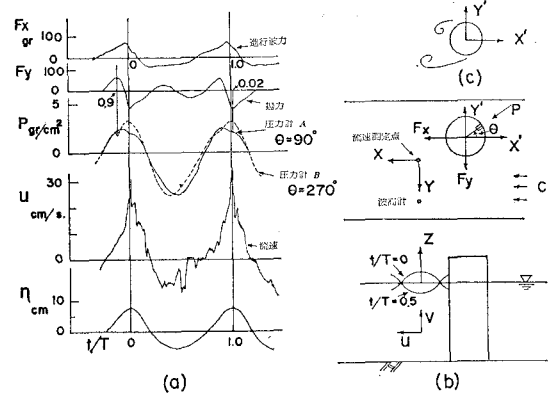


図-4 測定記録例および座標系

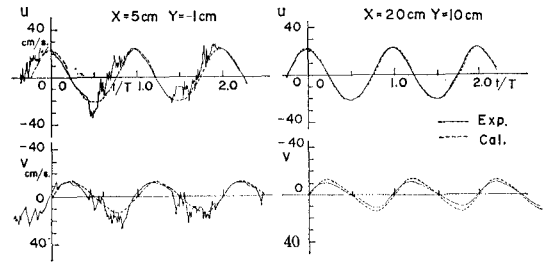


図-5 流速測定例(1)

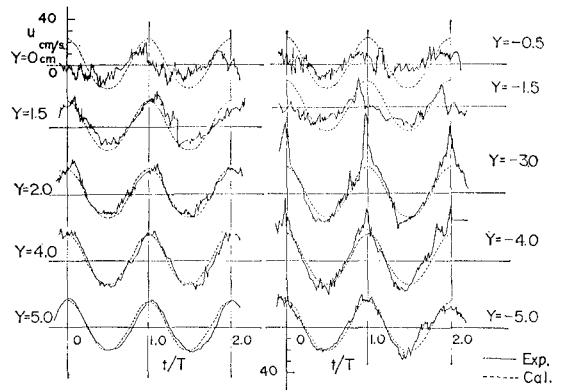


図-6 流速測定例(2)

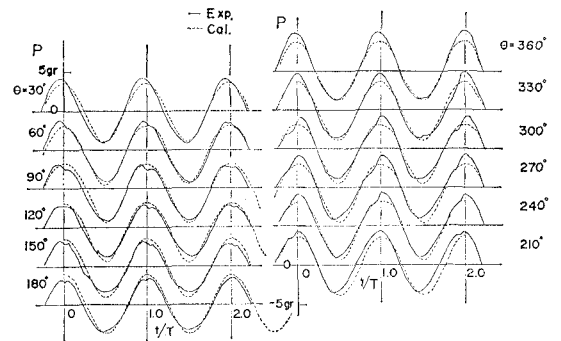


図-7 波圧測定例

散乱用粒子が得やすい水の場合でも散乱用粒子の濃度、大きさなどを十分考慮する必要がある、現在この点について検討中である。

$X = -2 \text{ cm}$, $Y = -3 \text{ cm}$ の位置に固定された円柱を、 $\theta = 0^\circ$ から 360° まで 15° おきに回転し、円柱表面法線方向に作用する波圧 P の時間変化を測定した。その結果の一例を図-7 に示す。測定中における円柱後流渦の出現状況は、図-4 に示されている場合と同様である。図中には、微小振幅波理論に基づく線形回折波理論による計算値を点線で示している。これらの波圧は、静水面状態における圧力値を基準とした波圧である。この図においても、非対称な渦の出現による、場所的に非対称な波圧時間変化特性が認められる。

3.3 流速、波圧、および揚力の関連性

図-8 に、作用方向が互いに反対である揚力のピーク値が出現する位相 $t/T = 0.90$, および $t/T = 0.02$ (図-4

参照) における水平水粒子速度の Y' 方向分布例を示す。図-8 は、 $X' = -2 \text{ cm}$, 2 cm の場合を示したものである。この図中においては、円柱の中心を原点とする X' , Y' 座標系を用いている (図-4 参照)。図中には、円柱が存在しない場合の流速値 (ストークス波第3近似解) を点線で示している。流速測定点と波力測定点の違いによる位相差は、 0.01 以下でありその補正は行っていない。この図において非対称な後流渦の出現およびその影響を受ける範囲が観察できる。又、図-8 と、図-4 の記録例より、円柱後流渦の出現と揚力のピーク値の出現に位相差が認められるようである。これについては、回折波の影響等を考慮して検討を行ないたい。

図-9 は、位相 $t/T = 0.90$, $t/T = 0.02$ における円柱表面上の波圧 P の分布を示したものである。図中には、線形回折波理論による計算値を点線で示している。 $t/T = 0.90$ においては、 $\theta = 90^\circ$ 付近の波圧が $\theta = 270^\circ$ 付近の波圧に比べて高い事、又、位相 $t/T = 0.02$ においては、その逆の傾向を示している事が認められる。したがって、これらの波圧分布特性より算出される揚力方向と、直接に三分力計により測定される揚力方向が一致している事が認められる。この事は、図-4 に示されている圧力記録例においても認められる。

最後に、以上の考察および図-4 に示される波力および揚力の記録例より、位相 $t/T = 0.02$ 付近において、座標系 Y' の + 側に速い速度場が存在するものと思われるが、今回の測定においては観察されなかった。したがって、円柱の極近傍に速い流れ場が存在しているものと思われる。

4. おわりに

以上は、円柱周辺の流況特性を定量的に評価する事を目的とし、まず比較的規則的な揚力の出現が認められる場合における、円柱に作用する波力と、円柱表面上の波圧分布および円柱まわりの流速との関連性を調べる測定を試みたものである。その結果、定性的な関連性は確認できたようである。定量的評価については、詳細な検討を測定法およびデータ処理法の検討とともに今後行なう必要がある。この種の測定により円柱周辺の流況特性を定量的に評価することは、円柱周辺の流れをモデル化する場合において必要とされる基礎的なデータを得るためには大事な事だと思われる。

本研究の遂行にあたり、関東学院大学真嶋恭雄教授、山口大学斎藤隆助教、東京工業大学沢本正樹助教、防衛大学池内正幸助教、重村利幸助教より貴重な御助言を頂いた。又実験ならびにデータ処理には、当教室渡辺準蔵技官、池田茂事務官の熱心な協力を頂いた。ここに記して厚く感謝の意を表します。

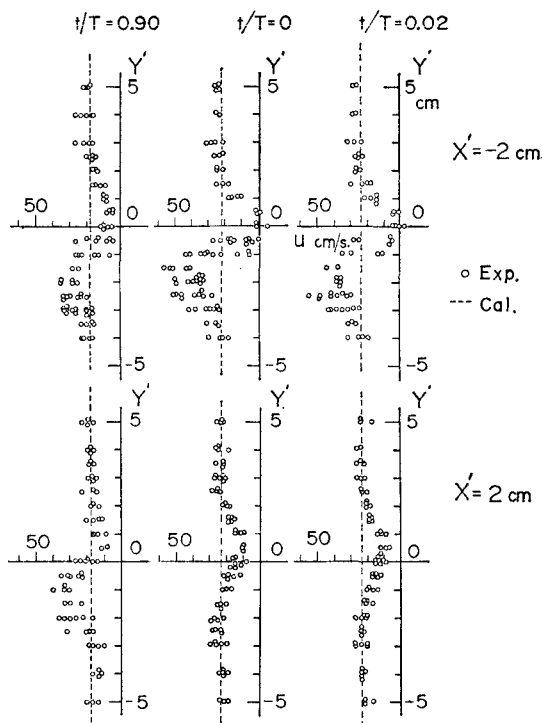


図-8 円柱近くの流速分布

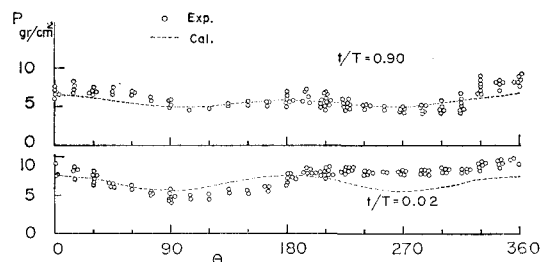


図-9 円柱表面の波圧分布

参 考 文 献

- 1) 林建二郎・竹内俊雄：波動場における抗力係数，質量係数の時間変化について，第25回海講論文集，pp. 362~366, 1978.
 - 2) Bidde, D. D.: Laboratory study of lift force on circular piles, Proc. ASCE, WW4, pp. 595~614, 1971.
 - 3) 横木 亨・中村孝幸・喜田 浩：円柱に作用する規則波による揚力について，第22回海講論文集，pp. 525~530, 1975.
 - 4) Isaacson, M. Q. and Maul, D. J.: Transverse forces on vertical cylinders in waves, J. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 102, No. WW1, pp. 49~60, 1976.
 - 5) 岩垣雄一・石田 啓：小口径円柱まわりの波圧分布と後流渦について，第22回海講論文集，pp. 531~537, 1975.
 - 6) F. Durst, A. Melling, and J. H. Whitelaw: Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry, Academic Press, 1976.
-