

波動場に設置された円柱周辺の流況特性について

林 建二郎*・竹内俊雄**

1. はじめに

波動場に設置された構造物周辺の流況特性を定量的に評価することは、海洋構造物に作用する波力の機構をより詳しく把握するために重要である。

しかし、この流況特性に関する定性的評価は従来かなり行われて来たが、定量的評価はまだ不十分であり、種々の研究が試みられている¹⁾。

本研究は、上記のことを目的とし、前報²⁾と同様に、円柱に作用する水平波力 (F_x)、揚力 (F_y)、円柱表面部分に作用する波圧 (P)、ならびに円柱周辺の流速の同時測定を行ない、これら互いの関連性を定量的に把握することにより、円柱に作用する波力の機構を明らかにするために必要な基礎的資料を得ようとするものである。併せて、最近開発が進み一般的な流速計としての使用が認められつつあるレーザドップラー流速計を用いた円柱周辺の流速測定を試み、その適用性、実際の使用における問題点、および測定精度の検討等をも目的としたものである。

円柱周辺の流況特性は、円柱後流渦、および揚力の挙動に見られるように、各種波動パラメーターに従い複雑に変化する。そして、規則波中においてもこれらの挙動は時間的に複雑に変動するようである^{3),4),5)}。

前報²⁾において、この規則波中における揚力の長時間変化の様子を調べた(測定時間=作用波の周期 $T \times 500$)。その結果、ある一部の実験波条件下において、一定の大きさの規則的な揚力の出現が長時間認められた。今回、まずこの現象に注目し、このような現象が生じる実験波領域を明らかにすることを試みた。次にこの現象が生じる1つの実験波を対象にして、前報²⁾と同様な測定を行った。又、今回は、円柱表面に生じる境界層剝離点近傍での流速測定を新たに試みた。

2. 長時間規則的な揚力

(1) 実験装置および方法

実験は長さ 39.6 m、高さ 0.8 m、幅 0.6 m の水槽の

表-1 模型円柱および実験波の諸元

円柱径	円柱長さ	固有振動数	水深	周期	波高	実験波数
D (cm)	l (cm)	(Hz)	h (cm)	T (秒)	H (cm)	波
4.0	61	8 (水中)	40	0.7	2	40 波種数
3.0	61	12 (水中)	40	2.2	14	40 "

一端に 15/100 の消波斜面を持つ二次元造波水槽を用いて行なった。円柱に作用する水平波力 F_x 、揚力 F_y の測定は、市販の三分力計にアクリル製円柱を取り付けて行なった。実験波の測定には、容量式波高計、抵抗線式波高計を使用した。表-1 に、今回使用した模型円柱、および実験使用波の諸元を示す。波力測定時間は、作用波周期 T の 1 000~1 500 倍周期間である。水平波力 F_x 、揚力 F_y 、水位変化 η を示すそれぞれの信号は電磁オシログラフに記録することにより、揚力の時間変化と、水平波力および水位の時間変化の関係をも考慮した。

(2) 実験結果および考察

図-1 (A) は、長時間規則的な揚力の出現が認められる実験ケース内の一例を示したものである。揚力は図-1 (B) に示すように、その大きさは時間的に不規則に変化する場合が多く認められるが、ある実験波条件内では (A) に示すような規則的な出現が長時間認められる。図-1 (A), (B) 中の上部信号は揚力 F_y を、下部信号は水平波力 F_x を示す。

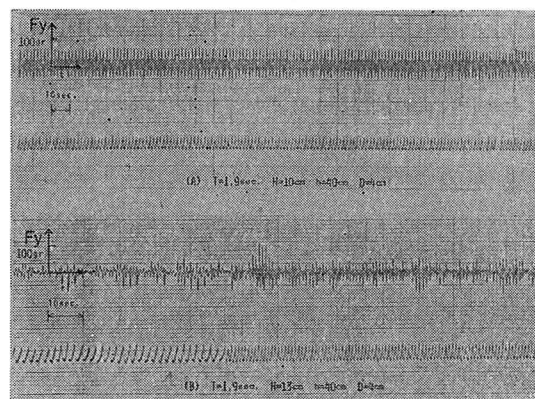
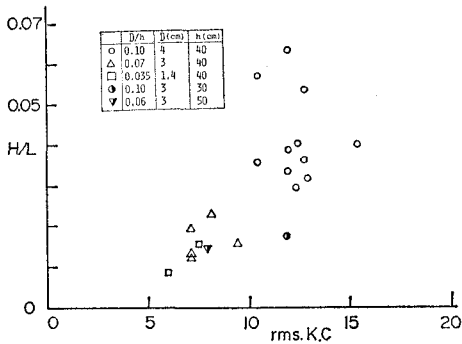
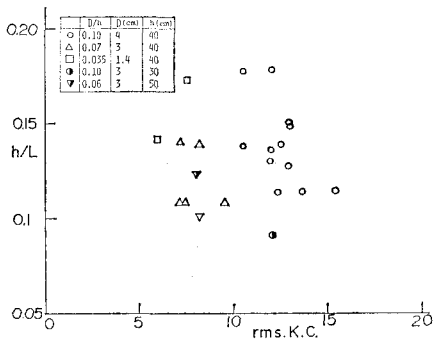
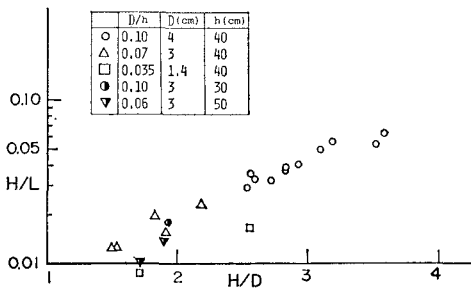


図-1 揚力の長時間測定例

(A) $T=1.9$ 秒, $H=10$ cm, $h=40$ cm, $D=4$ cm
(B) $T=1.9$ 秒, $H=13$ cm, $h=40$ cm, $D=4$ cm

* 正会員 工務 防衛大学校助手 土木工学教室

** 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室

図-2 H/L と rms.K.C. 数の関係図-3 h/L と rms.K.C. 数の関係図-4 H/L と H/D の関係

作用波周期 T の 500 倍時間以上規則的な揚力が出現した場合の実験波諸元の領域を以下示す。これらの図中には、 $D=3$ cm, $h=30$ cm, 50 cm, $D=1.4$ cm, $h=40$ cm の実験条件におけるものも一部記入している。

図-2 は、rms.K.C. 数と H/L の関係を、図-3 は、rms.K.C. 数と h/L の関係を、図-4 は、 H/D と H/L の関係を、それぞれ D/h をパラメーターとして示したものである。これらの図より今回行った実験条件内では、長時間規則的な揚力が認められる rms.K.C. 数の範囲は 6~16 であり、その領域は図-4 に示すように H/D と H/L によって規定されるようである。

3. 円柱周辺の流速測定

(1) 実験装置および方法

直径上に 2 個の小型圧力計を取り付けた径 4 cm のア

クリル製円柱を三分力計に取り付けた装置を用いて、直円柱に作用する水平波力 F_x , 揚力 F_y , および円柱表面に作用する波圧 P の同時測定を行なった。互いに 180° の角度をなす位置に圧力計を取り付けることにより、波圧 P の時間変化の場所的關係を調べることが可能である。

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。用いたレーザ流速計の測定モードは前報¹⁾と同様に二分割されたレーザ光線の交点において流速を測定するコリンジモードである。今回は、① 円柱に作用する揚力と円柱表面に作用する波圧 P , および流速との関連性、② 円柱表面に生じる境界層剝離点から供給される渦糸の強さ Γ の評価に必要な境界層外縁の水粒子速度 u_0 の評価を行うために、境界層剝離点近傍だと思われる $\theta=90^\circ, 270^\circ$ の円柱表面法線方向断面における水平水粒子速度の分布を調べた。

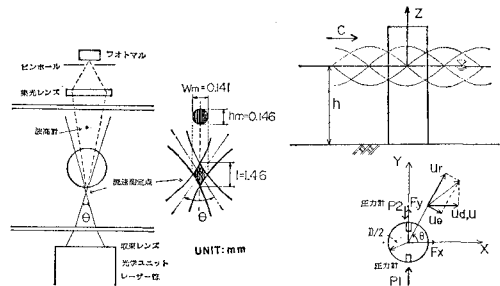


図-5 レーザ流速計の概略および座標系

図-5 に、この場合のレーザードップラー流速計光学系の概略、および座標系を示す。図中に示している流速測定体積寸法は、レーザ光線のガウス性強度分布を考慮した次式で示される算定式⁶⁾による値である。

$$w_m = \frac{D_m}{\sqrt{2} \cos \theta/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$h_m = \frac{D_m}{\sqrt{2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$l_m = \frac{D_m}{\sqrt{2} \sin \theta/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

D_m : 焦点におけるビーム径 ($D_m = 4f\lambda/\pi D_D$)

λ : レーザ光線の波長 (He-Ne ガスレーザー: 0.6328 μm)

D_D : レーザビーム径 ($D_D = 1$ mm)

θ : レーザビームの交差角度 ($\theta = 11.11^\circ$)

f : 改束レンズ焦点距離 ($f = 248$ mm 空気中)

上式は、空気中における測定体積寸法算定式である。水中においては、水と空気の屈折率が異なるために、交差角度 θ および焦点距離 f は異なるが、屈折の法則により、水中における測定体積寸法も空気中におけるものと同じである。

流速測定点は水路幅の中心付近に固定し、円柱を水路

方向、および水路直角方向に移動することにより円柱周辺の水平水粒子速度 u の場所的变化を調べた。

次に、これら一連の測定において得られた出力信号は電磁オシログラフに同時記録した。また、一部実験ケースの信号はデータレコーダーおよび FFT 信号処理器に接続し、これら出力信号の統計処理を試みた。

(2) 実験条件

研究目的に対する上記測定法の都合上、周期性の強い流況を示す場合のものをまず対象とすることにした。そこで、前述の長時間規則的な揚力の周期変化が認められる実験ケース内の1つである、水深 $h=40$ cm、波高 $H=10$ cm、周期 $T=1.6$ 秒、円柱径 $D=4$ cm のものを測定対象とした。波圧 P の測定点は静水面下 $Z=-15$ cm における $\theta=90^\circ$ 、 270° の二点である。流速測定点は、 $Z=-16$ cm、 $X=-2$ cm、 0 cm、 2 cm、 $Y=-4.8$ cm $\sim$ 10 cm ($X=0$ の場合 $Y=-4.8$ cm $\sim$ -2 cm、 2 cm $\sim$ 10 cm) の各点である。流速測定は水平水粒子速度 u のみを行なった。

(3) 実験結果および考察

a) 水粒子速度算定式

波動場に設置された円柱周辺の水粒子速度算定式として線型回折波理論式を用いると、図-5 (b) の座標系における (r, θ) 点での流速 u_θ , u_r は次式で示される。

$$u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$u_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ϕ は線型回折波理論式による次式で示される速度ポテンシャル。

$$\begin{aligned} \phi = & \frac{\pi H}{Tk} e^{i\omega t} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \left[J_0(kr) \right. \\ & - \frac{J_0(ka)}{H_0^{(2)}(ka)} H_0^{(2)}(kr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \left\{ J_n(kr) \right. \\ & \left. \left. - \frac{J_n(ka)}{H_n^{(2)}(ka)} H_n^{(2)}(kr) \right\} \cos n\theta \right] \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

式中、 J_n , J'_n は n 次のベッセル関数およびその微分
 H_n , H'_n は n 次の第2種ハンケル関数とその微分
 $a=D/2$ (円柱の半径), $k=2\pi/L$

したがって、線型回折波理論式による水平水粒子速度 u_a は次式で示される。

$$u_a = u_r \cos \theta + u_\theta \sin \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

なお、静水面状態を基準とした円柱表面に作用する波圧 P は次式で示される。

$$\begin{aligned} P(\theta) = & \left\{ -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \phi}{r \partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] \right\}_{r=D/2} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

b) 剥離点近傍の流速および波圧の時間変化

図-6 は、境界層剥離点近傍の点⁸⁾ ($X=0$ cm, $Y=\pm 2.1$

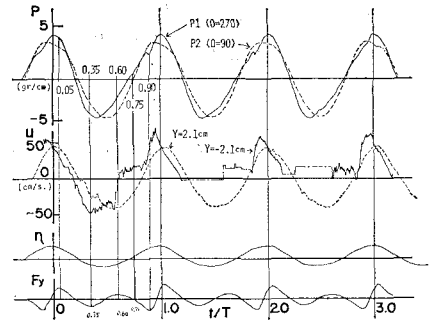
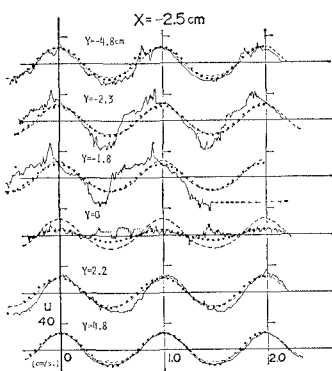
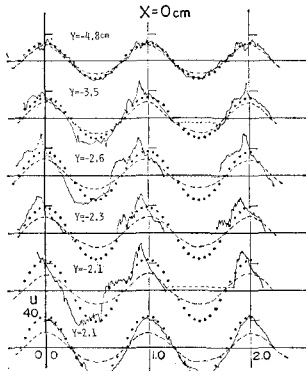


図-6 流速、波圧、波力の同時記録例

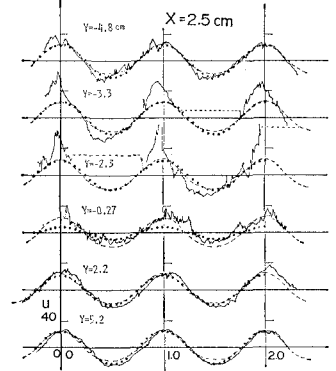
cm) における水平水粒子速度 u , および $\theta=90^\circ$ 、 270° での円柱表面に作用する波圧 P と、水平波力 F_x , 揚力 F_y の時間変化記録例である。この図より、 $\theta=90^\circ$ の側と、 $\theta=270^\circ$ の側では流速 u , および波圧 P の時間変化の様子が異なっていることが確認できる。揚力の極大値が生じる位相 ($t/T=0.90, 0.05, 0.3, 0.60$) 付近におけるその差は、流速 u , 波圧 P とも大きい事が認められる。



(a) $X=-2.5$ cm, $Z=-16$ cm



(b) $X=0$ cm, $Z=-16$ cm



(c) $X=2.5$ cm, $Z=-16$ cm

図-7 流速の時間変化

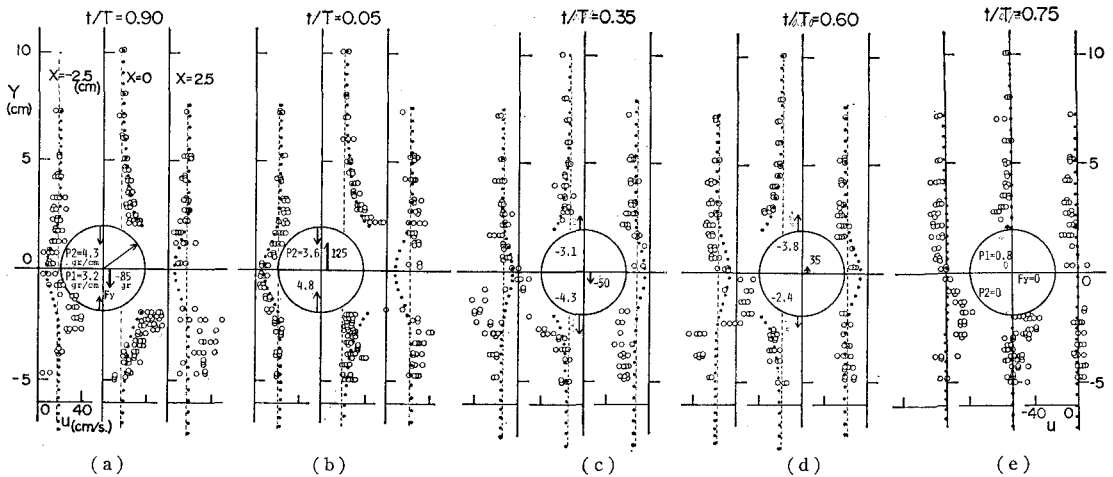


図-8 流速の空間分布

c) 流速の時間変化

図-7 は、 u の時間変化の場所的変化の様子を示したものである。この場合の揚力の時間変化方向は図-6の場合と同じである。位相 $t/T=0$ は $X=0$ 点に波の峯が来た時である。これらの図には、円柱の存在による流速変化の様子を検討するために、ストークス波の第3近似解による計算値を点線で、(7)式で示される線型回折波理論式による計算値を黒丸でそれぞれ記入している。図中一部点線で示している流速出力信号は、この時刻においては正常な流速測定が行われていない事を示している。

a) は $X=-2.5$ cm, b) は $X=0$ cm, c) は $X=2.5$ cm 断面のものをそれぞれ示している。この図より、円柱後流渦の出現により Y の負側では、 u は大きく変化している事が認められる。しかし、 Y の正側ではその時間的変化は少なく線型回折波理論式で大体近似できるようである。

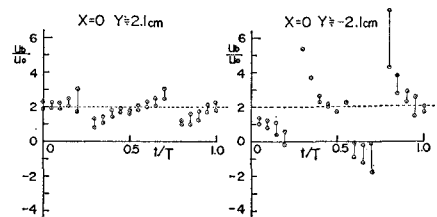
d) 流速の空間分布

図-8 は、図-6 に示す揚力の極大値が生じる位相 ($t/T=0.95, 0.05, 0.35, 0.60$) および位相 $t/T=0.75$ での水平水粒子速度 u の空間分布を示したものである。また、この図には、 $\theta=90^\circ, 270^\circ$ における波圧 $P2, P1$ および、揚力 Fy の値とその作用方向を同時に記入している。図中に記入している黒丸は、(7)式で示される線型回折波理論式による計算値である。点線はストークス波の第3近似解による計算値であり、円柱が存在しない場合の水平水粒子速度を示している。この図より、① 揚力が作用する方向側の波圧 P は、その反対側の波圧 P に比べて小さいこと、② $X=0$ cm の断面、および円柱後流域の断面では、揚力が作用する側の流速がその反対側のものと比べて大きい事が認められる。また、 $t/T=0.60$ の場合には、 $X=-2.5$ cm の Y 座標の負側の円柱周辺では、主流と反対方向の流速成分が円柱後流渦

の出現により認められる。

e) 境界層外縁の水粒子速度

前述したように、境界層剝離により主流中に供給される渦糸の強さ Γ の大きさを算定するには、境界層外縁の水粒子速度を評価する必要がある。境界層厚 δ は小さく⁸⁾、今回用いた測定法における、流速測定体積寸法では、境界層内の流速分布を調べる事は不可能である。したがって境界層厚 δ を詳しく見積ることはできない。そこで、近似的に、 $X=0$ cm, $Y=\pm 2.1$ cm の点における流速 u を境界層外縁の水粒子速度 u_b と仮定し、 u_b と主流速度 u_0 の比 u_b/u_0 の時間変化を示したものが図-9である。 u_0 は円柱より遠く離れた点における水平

図-9 u_b/u_0 の時間変化

水粒子速度である。図-7, 図-8 に示すように、この値はストークス波の第3近似解で大体近似できるので、この計算値を u_0 とした。図中に示している点線は、ポテンシャル流れの場合の値である。図より、 $Y=-2.1$ cm における値は変化が大きく $t/T=0.2$ および $t/T=0.6\sim 0.75$ の領域では負の値を示している。しかし u_0 の極大値が生じる位相 $t/T=0, 0.5, 1.0$ 付近ではポテンシャル理論の場合と同様に約 2 である。また、 u_b の最大値が生じる位相 $t/T=0.90\sim 0.95$ では、2.6 前後の値であることが認められる。 $Y=+2.1$ cm の場合は $Y=-2.1$ cm 側に比べて u_b/u_0 の位相 t/T による変化は少なく、

ポテンシャル流理論の場合の値2近くの値を示す位相が多いようである。

f) 流速の周波数分析

複雑な円柱後流域の流速の時間変化特性を調べるために、FFT 信号処理器による周波数分析を試みたが、図-7の流速記録例に見られるように、この領域においては、流速の乱れが強く正しく計測された信号が連続的に得られない状態である、したがって出力信号の良質化と併せてこのような出力信号に対する統計処理方法を今後検討しなくてはいけない。流速計の分解能を下げて連続信号が得られる状態で線型スペクトルを求めると、円柱後流域においては、作用波の2倍3倍周波数成分がかなり含まれていることが認められた。

4. おわりに

円柱周辺の流況特性を詳しく評価するための一つの試みとして行なった以上の研究結果を要約すると次のようである。

- ① 長時間規則的な揚力の出現が認められる波浪諸元の領域は、今回の実験条件内では、 H/D と H/L によって規定されるようである。
- ② この領域では、場所的に非対称な速度場が周期的に安定した状態で長時間存在し、その結果非対称な円柱周りの波圧分布が形成され揚力が生じる現象を実測的に確認できた(図-8 参照)。
- ③ 円柱表面 $\theta=90^\circ, 270^\circ$ の位置に生ずる境界層外縁流速 u_b と主流速度 u_0 との比 u_b/u_0 の t/T による変化を調べた結果、その値は円柱後流渦の影響を受け、かなりポテンシャル流れにおける値2より変

動している。

- ④ 図-5に示すレーザー流速計の光学系を用いて、円柱周辺の水粒子速度を測定することは可能である。しかし円柱周辺の乱れの激しい速度場領域で、流速を示す良質な連続信号は得られなかった。

本研究にあたり、関東学院大学真嶋恭雄教授、山口大学齋藤隆助教授、東京工業大学沢本正樹助教授、防衛大学校池内正幸助教授、重村利幸助教授より貴重な御助言を頂いた。また実験ならびにデーター処理には、当教室渡辺準蔵技官、木原啓二事務官の熱心な協力を戴いた。ここに厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、石田 啓・桑山勝則：「円柱および角柱背後の後流渦に関する研究」, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 421~424, 1979.
- 2) 林建二郎・竹内俊雄：「小口径円柱周辺の流況特性に関する基礎的研究」, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 406~410, 1979.
- 3) 中村孝幸：「海洋構造物に作用する波力特性とその振動応答に関する研究」, 大阪大学博士学位論文, 1977.
- 4) 沢本正樹・菊地健治：「振動中におかれた円柱に作用する波力」, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 429~433, 1979.
- 5) Maull, D. J. and M. G. Milliner: "Sinusoidal flow past a circular cylinder", Coastal Engineering, 2, pp. 149~168, 1978.
- 6) 「レーザーによる流体速度の計測」, 技術資料 No. 2, 日本科学工業(株), pp. 1~18, 1974.
- 7) 岩垣雄一・石田 啓・喜岡 渉：「回折波による円柱周辺の水粒子速度分布について」, 第29回土木学会年講, pp. 4~5, 1974.
- 8) 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回海岸工学講演会論文集, pp. 531~537, 1975.