

波動場における抗力係数, 質量係数の時間変化について

林 建 二 郎*・竹 内 俊 雄**

1. は じ め に

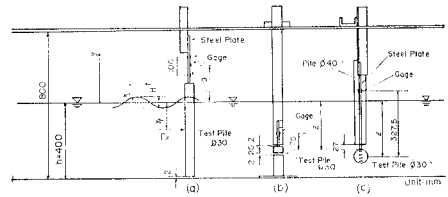
モリソン式を用いて小口径円柱に作用する波力の時間変化を正確に算定するには, 1) 波の水粒子速度, 加速度の時間変化を正確に算定すると同時に, 2) 各種波動パラメーターに対する抗力係数 C_D , 質量係数 C_M の時間変化特性をも明らかにする必要がある. そこで筆者らは, Al-Kaziy¹⁾ が水平円柱に, 岩垣・酒井²⁾ らが直円柱局部に作用する波力の解析に用いたと同じ手法を, 直円柱, および斜め円柱の C_D , C_M 算定に適用 (C_D , C_M は水深方向に一定と仮定) した結果を昨年³⁾ に発表した.

この解析方法は微小時間間隔 Δt 内では, C_D , C_M の変化は無視できると仮定して C_D , C_M の時間変化を求めるものである. したがって波力の時間変化を正確に測定すると同時に, Δt の取り方等について検討する必要がある. そこで, 今回直円柱において, 1) Δt の C_D , C_M 時間変化特性に対する影響を調べるとともに, 2) 新しく三分力計を用いて波力の測定を行い, 波力測定精度, および解析値の再現性について検討した.

次に筆者らは, 従来より研究が行われている, 波力および揚力の発生状況に多くの関連性がある円柱後流渦等の円柱周辺の流況特性 (例えば^{4), 5)} と, C_D , C_M の時間変化特性との関連性を調べてみようと考えている. そこで, まず揚力と C_D , C_M の時間変化特性との関連性, および C_D , C_M の水深方向特性を調べるために, 1) 三分力計を用いて直円柱に作用する水深方向合成進行波力 F_x , 揚力 F_y , および F_x の合力作用点の同時測定, 2) 静水面下 z における局部円柱に作用する局部波力 ΔF_x の測定, 3) 水平円柱に作用する水平波力 F_H の測定を行い, 上記直円柱の場合と同様の解析を試み, これらそれぞれの C_D , C_M 時間変化特性を調べた.

2. 実験装置および方法

実験は長さ 39.6m, 幅 0.6m, 高さ 0.8m, 水槽の一端に勾配 18/100 の消波斜面をもつ二次元造波水槽を用



- a) 直円柱 (水中固有振動数 12 Hz)
- b) 局部円柱 (水中固有振動数 15 Hz)
- c) 水平円柱 (水中固有振動数 10 Hz)
- * 三分力計水中固有振動数 18.5 Hz
($D=1.4$ cm), 12 Hz ($D=3$ cm)

図—1 波力検出装置の概略

いて行なった. 図—1 に示す波力検出装置を造波機の前 24.6m の位置に固定して, 1) 直円柱に作用する進行波力 F_x , および進行波力モーメント M_x , 2) 直円柱局部波力 ΔF_x , 3) 水平円柱水平波力 F_H の測定を行なった. また直円柱に作用する波力に関しては, 三分力計 (日章電機製) に径 3 cm のアクリルパイプ, および径 1.4 cm のアルミニウム管を取り付け, F_x , F_y , M_x の同時測定を行なった. F_x , M_x の同時測定より F_x の合力作用点 y_f が求まる. これら波力検出装置の静的検定を行なった結果, 検定荷重とゲージ出力の間には十分な直線性が認められた. 三分力計の相互干渉は 3% 以内であった. 局部波力 ΔF_x , 水平波力 F_H の測定位置は静水面下 $z = -10$ cm, -20 cm の 2 点とした.

波浪諸元の測定は, 2 本の容量式波高計を円柱真横とその前方 1 m の位置に設置して行い, 検出波力と同時にラビコーダーに記録した. 実験には水深 h を 0.4 m に保ち, 周期 T が 0.7 秒~1.6 秒, 波高 H が 0.02 m~0.14 m, 波形勾配 H/L (L : 波長) が 0.01~0.10 の波浪諸元を有する波を使用した.

3. 解析方法

(1) C_D , C_M の算出方法

波力算定式としてモリソン式を用い, C_D , C_M の微小時間間隔 Δt 内での変化は無視できると仮定すると, 次式より C_D , C_M の時間変化が求められる.

* 正会員 工修 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

$$C_D\left(t+\frac{1}{2}\Delta t\right) = \left| \frac{F_m(t)}{F_m(t+\Delta t)} \frac{F_I(t)}{F_I(t+\Delta t)} \right| \left| \frac{F_D(t)}{F_D(t+\Delta t)} \frac{F_I(t)}{F_I(t+\Delta t)} \right| \dots\dots\dots (1)$$

$$C_M\left(t+\frac{1}{2}\Delta t\right) = \left| \frac{F_D(t)}{F_D(t+\Delta t)} \frac{F_m(t)}{F_m(t+\Delta t)} \right| \left| \frac{F_D(t)}{F_D(t+\Delta t)} \frac{F_I(t)}{F_I(t+\Delta t)} \right| \dots\dots\dots (2)$$

式中 F_D , F_I はモリソン式中の抗力, 慣性力に係する値である。 F_m は実測波力である。

(2) 水粒子速度算定式

C_D , C_M の時間変化特性を求めるには, 水平水粒子速度 u , 加速度 $\dot{u}$ の時間変化を詳しく算定する必要がある。 図-2 は本実験に使用した代表的な波について, レーザードップラー流速計による $z=-10$ cm, -20 cm での実測値 u_m と計算値 u_c との一周期内における一致度 R_u を調べたものである。 一致度 R_u は次式で示される。

$$R_u = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (u_c(t_i) - u_m(t_i))^2 / N}}{|u_{m \max} - u_{m \min}|} \dots\dots\dots (3)$$

$N=100$

u_c にはストークス波の第3近似解, および Dean の Stream-function 法⁶⁾ (ストークス波の第5近似解に相当する流れ関数の項を使用) による計算値を用いた。 横軸にはパイプ径 D が 3 cm の場合の $K \cdot C$ 数 ($u_{m \max} \cdot D / T$) を取っている。 どちらの計算式を用いた場合も R_u の値は約 10% 以下である。 今回は u , $\dot{u}$ の算定式としてストークス波の第3近似解を用いた。

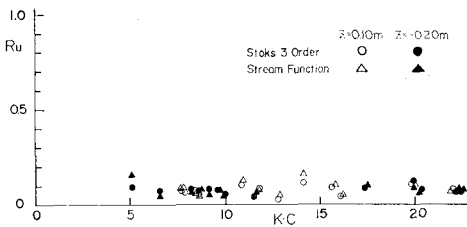


図-2 R_u と $K \cdot C$ 数の関係

4. 実験結果および考察

(1) 直円柱の場合

(a) C_D , C_M の時間変化特性

図-3, 4 は Δt を 0.01 T , 0.04 T , 0.1 T と変化させ, Δt の C_D , C_M 時間変化特性に対する影響を調べたものである。 図-3, 4 は rms. $K \cdot C$ 数 ($K \cdot C$ 数の u の値に u の水深方向 rms. 値を用いる) が 7.15, 15.6 の場合である。 図中には各 Δt における C_D , C_M の周期内平均値 $\bar{C}_D$, $\bar{C}_M$ も同時に記入している。 C_M については,

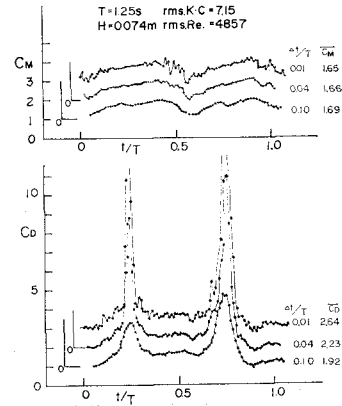


図-3 C_D , C_M の時間変化 (直円柱 $\Delta t=0.02 T$)

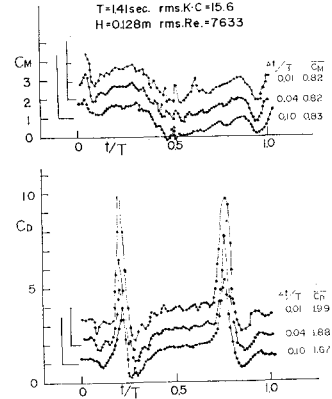
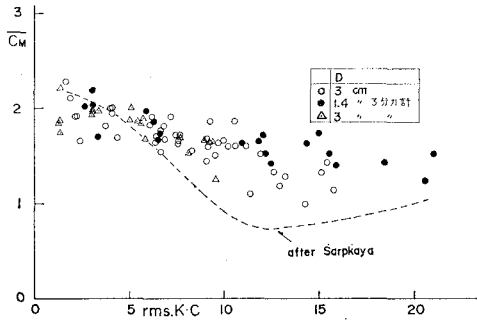
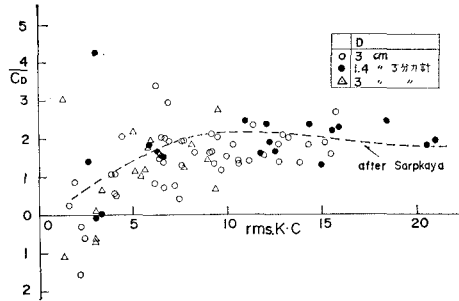
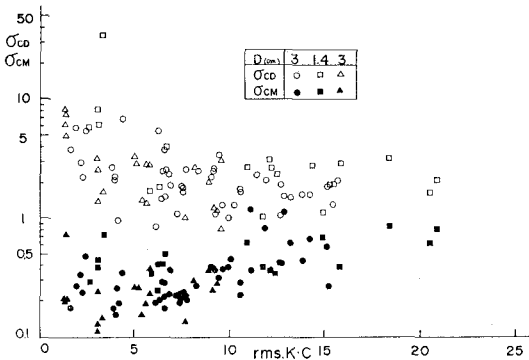


図-4 C_D , C_M の時間変化 (直円柱 $\Delta t=0.02 T$)

Δt の C_M 時間変化特性に対する影響が小さいことが認められる。 また, rms. $K \cdot C$ 数が増加すると周期内で大きく2回振動するが, その対称性がなくなる傾向が認められる。 C_D については, Δt が増加するにつれてピーク値が減少するために $\bar{C}_D$ は小さくなっている。 しかしピーク値を示す位相 (t/T が 0.25, 0.75) 付近以外では Δt の違いによる変化は少ない。 以上および以下の図において, 波の峰が円柱に作用する時の位相 t/T を 0 および 1 としている。

次に, rms. $K \cdot C$ 数に対する C_D , C_M の時間変化特性 ($\Delta t=0.02 T$) を調べるために, 1) rms. $K \cdot C$ 数と $\bar{C}_D$, $\bar{C}_M$ の関係を図-5, 6 に, 2) rms. $K \cdot C$ 数と C_D , C_M の $\bar{C}_D$, $\bar{C}_M$ からの標準偏差 σ_{C_D} , σ_{C_M} との関係を図-7 に示す。 これらの図中においては, 波力検出装置およびパイプ径の違いによる影響を調べるために, それぞれ記号を変えて示している。 また, 図-5, 6 には Sarpkaya⁷⁾ らの一様振動流中での結果を比較のために記入している。

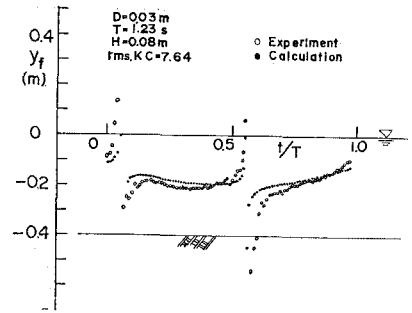
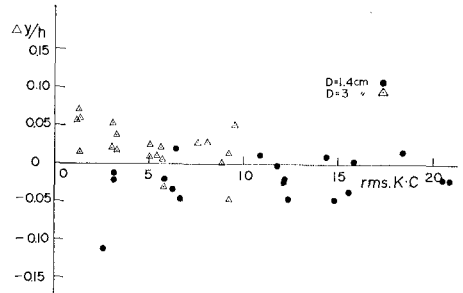
図-5 より $\bar{C}_M$ は rms. $K \cdot C$ 数が増加すると散らばりは大きくなるが減少する傾向が認められる。 図-6 より

図-5 $\bar{C}_M$ と rms. $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)図-6 $\bar{C}_D$ と rms. $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)図-7 $\sigma_{C_D}, \sigma_{C_M}$ と rms. $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)

$\bar{C}_D$ は rms. $K \cdot C$ 数が増加すると散らばりは少なくなり, Sarpkaya らの結果に近づく傾向が認められる. 図-7 より σ_{C_D} は C_D のピーク値の出現のために σ_{C_M} より大きな値を取ることが認められる. σ_{C_M} は rms. $K \cdot C$ 数の増加につれて, C_M の変動幅が大きくなるために増加する傾向が認められる. 今回のこれら解析結果において, パイプ径 D , および波力検出装置の違いによる影響は認められない. また, rms. $K \cdot C$ 数 5~9 の領域で図-3 に示すような C_D, C_M 変化特性の再現性が比較的認められた.

(b) F_x 作用点について

図-8 は三分力計を用いて測定した F_x の合力作用点 y_f の時間変化を示したものである. 図中には C_D, C_M の水深方向変化を調べるために, C_D, C_M が水深方向,

図-8 F_x 作用点の実測値と計算値の比較図-9 $\Delta y/h$ と rms. $K \cdot C$ 数の関係

および周期内では一定であると仮定したモリソン式による計算値を同時に示している. モリソン式中の C_D, C_M は最小自乗法による方法⁸⁾を用いて算出した値である.

図-9 は最大進行波力 $F_{x \max}$ が生じる位相での, $F_{x \max}$ の作用点の実測値と計算値の差 Δy の無次元値 $\Delta y/h$ と rms. $K \cdot C$ 数との関係を示したものである. 負の $\Delta y/h$ は実測値が計算値よりも水面側にあることを示している. 実測値と計算値の差は小さく, 大体水深 h の 5% 以内である. したがって C_D, C_M の水深方向変化は大きくないものと思われる.

(2) 局部円柱の場合

局部波力 ΔF_x の C_D, C_M 時間変化特性に対しても上記直円柱の場合と同様な解析を試みた. 図-10 は $K \cdot C$ 数が 8.59 の場合の C_D, C_M 時間変化特性を示したものである. 図-11, 12 は $\bar{C}_D, \bar{C}_M$ と $K \cdot C$ 数の関係を, 図-13 は, $\sigma_{C_D}, \sigma_{C_M}$ と $K \cdot C$ 数の関係を示す. これら C_D, C_M の $K \cdot C$ 数に対する時間変化特性は直円柱の場合と同様であるが, C_M の変動幅が直円柱の場合に比べて大きいことが認められる (図-10, 13 参照). この点については局部円柱セグメントと, 上部, 下部円柱間の間隙の影響を考慮する必要がある. 設置水深 z の違いによる影響はあまり認められないようである.

(3) 水平円柱の場合

水平円柱に作用する波力 F_H についても直円柱の場合と同様な解析を試み, その結果を局部円柱の場合と同様

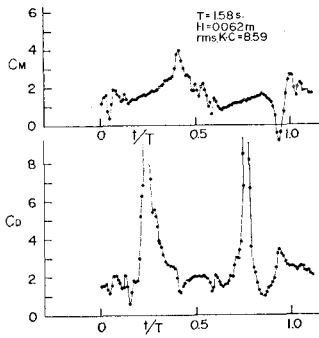


図-10 C_D, C_M の時間変化 (局部円柱 $\Delta t=0.02 T$)

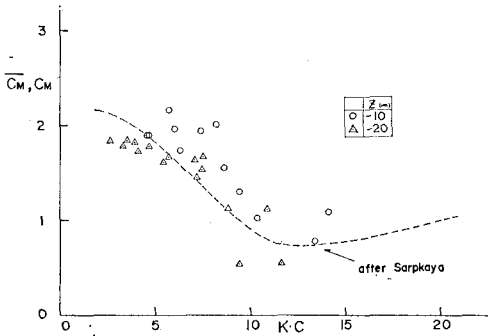


図-11 $\bar{C}_M$ と $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)

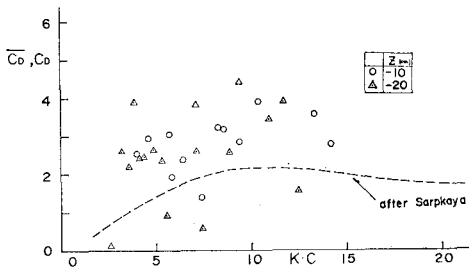


図-12 $\bar{C}_D$ と $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)

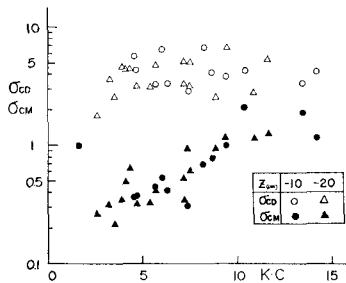


図-13 σ_{CD}, σ_{CM} と $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)

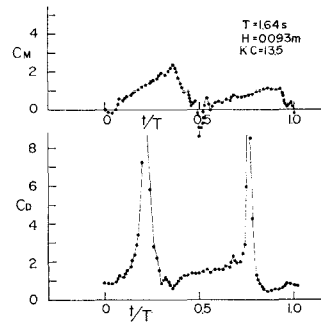


図-14 C_D, C_M の時間変化 (水平円柱 $\Delta t=0.02 T$)

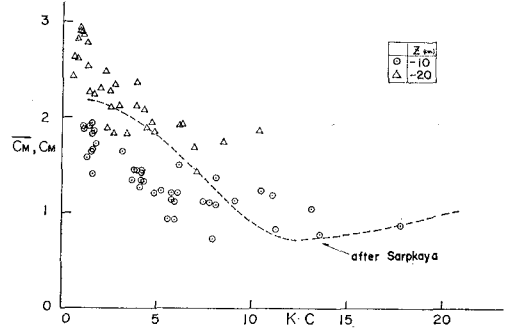


図-15 $\bar{C}_M$ と $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)

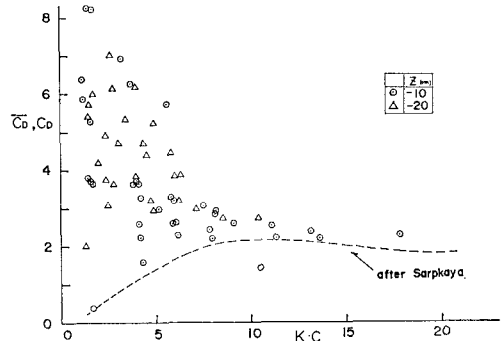


図-16 $\bar{C}_D$ と $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)

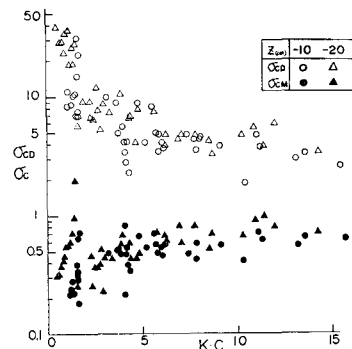


図-17 σ_{CD}, σ_{DM} と $K \cdot C$ 数の関係 ($\Delta t=0.02 T$)

に図-14, 15, 16 および 17 に示す。 C_D, C_M の $K \cdot C$ 数に対する時間変化特性は、直円柱 F_X 、局部円柱 ΔF_X の場合と同様であるが、図-15 に示されている $\bar{C}_M$ と $K \cdot C$ 数の関係において設置水深 z の影響が認められる。

しかし、図-17 に示している σ_{CM} と $K \cdot C$ 数の関係においては、設置水深 z の影響が認められない。

5. おわりに

以上は、直円柱、直円柱局部、水平円柱に作用する波力算定にモリソン式を用いた場合の C_D , C_M 時間変化特性を式 (1), (2) より算出し、rms. $K \cdot C$ 数および $K \cdot C$ 数との関係を調べてみようとして試みているものであり、ある程度の関連性が得られている。今後は、これら C_D , C_M 時間変化特性と、揚力および円柱後流渦の挙動特性との関連性を調べてみようと思っている。また、モリソン式以外の考え方も同時に検討し、さらにこの種の研究を押し進めたいと考えている。

謝辞： 本研究の遂行にあたり、関東学院大学真嶋恭雄教授、山口大学斉藤 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、重村利幸助教授から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、当講座池田事務官および本科卒論生の熱心な御協力を頂いた。ここに記して厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Al-Kazily, M. F.: Force on submerged pipelines induced by waves, University of California, Hydraulic Engineering Laboratory, Technical Report HEL 9-21, p. 197, 1972.
- 2) 岩垣雄一・酒井哲郎・千田哲男・津田俊雄：波力に関するモリソン公式の抗力係数および質量係数の位相変化について、昭和 48 年度関西支部年次学術講演会講演概要集、II-57-1~2, 1973.
- 3) 林建二郎・重村利幸・竹内俊雄：波力算定式中の抗力係数および質量係数の時間変化について、第 24 回海講論文集, pp. 337~341, 1977.
- 4) 榎木 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.
- 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) Dean, R. G.: Stream function representation of nonlinear ocean waves, JGR, Vol. 78, No. 18, pp. 4561~4572, 1965.
- 7) Sarpkaya, T.: Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, Jour. of Applied Mechanics, Vol. 42, Series E, No. 1, pp. 32-37, 1975.
- 8) Chakrabarti, S. K., A. L. Wolbert and W. A. Tam: Wave forces on vertical cylinder, Proc. of ASCE, WW 2, pp. 203-221, 1976.