

# 水平円柱に作用する全波力について (その1)

井出 和文  
(本社技術本部海洋開発部)

細野 成一  
(本社技術本部海洋開発部)

藤沢 康雄  
(本社技術本部海洋開発部)

## Total Wave Forces on a Horizontal Cylinder (Part 1)

Kazufumi Ide Seiichi Hosono  
Yasuo Fujisawa

### Abstract

Many structures such as seaberths and seabottom pipelines which are composed of submerged horizontal cylindrical members have been constructed in recent years. It is of extreme importance in designing for wave forces acting on these marine structures to be accurately estimated.

The authors have investigated the characteristics of wave forces acting on a submerged horizontal cylinder. Particularly, the relations between the properties of waves and of cylinder were investigated by the small-amplitude wave theory. The model was subjected to the actions of regular waves at a constant water depth. As a result, it was clearly shown that inertia coefficients are affected by the depths of water at which models are installed and decrease in proportion to increase in Keulegan-Carpenter numbers.

### 概 要

近年、シーバースや海底パイプライン等、水平円柱部材を用いた海洋構造物が数多く建設されている。これらの海洋構造物に作用する波力の適確な評価を行なうことが設計上、非常に重要である。

著者らは規則波（非砕波）によって水中に水平に設置された円柱（水平円柱）に対して直角方向から波がきた場合に水平円柱に及ぼす波力（水平方向波力および鉛直方向波力）の特性を検討している。今回は一様水深中に設置された水平円柱に作用する波力の実験から微小振幅波理論を用いて質量係数を求めた。この結果、質量係数は水平円柱の設置水深によって異なった値を示し、Keulegan-Carpenter 数の増大に伴って著しく減少することが示された。

## 1. まえがき

近年、シーバースや渡海橋の多柱基礎用プラットフォーム、海底パイプライン等の水平円柱部材を用いた海洋構造物が数多く建設されている。これらの構造物に作用する波力の適確な評価を行なうことが設計上非常に重要である。

水平円柱に作用する波力に関する代表的な研究には Keulegan および Carpenter<sup>1)</sup> のものがある。しかし、この研究は水平円柱を重複波の節に設置した場合の実験結果に基づいているので鉛直方向の水粒子速度が存在せず、そのために通常の進行波による波力と若干その特性が相違すると考えられる。最近の研究では、長崎<sup>2)</sup> および土屋・山口<sup>3)</sup> による実験・研究が行なわれ

てきている。

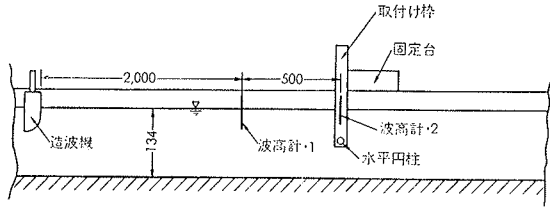
本研究は、規則波（非砕波）によって波の峰の進行方向が円柱の長手方向と直角になるように水平に設置した場合の、水平円柱に及ぼす波力（水平方向波力および鉛直方向波力）の特性について検討するものである。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1. 実験装置

実験は九州大学応用力学研究所海洋防災実験所内の図1に示すようなプランジャー型造波機付の水槽（幅1.5m、水深1.34m、長さ60m）において、単一周期の規則波を使用して行なわれた。水平円柱モデルは造波機から20mの位置に固定台、取付け枠とともにセ

ットされている。波高計 (電気抵抗型) は水平円柱モデルの中央真上に1個と水平円柱より5m前方に1個の合計2個をセットした。



図一 実験水槽 (単位cm)

### 2.2. 実験水槽

実験に際しては水平円柱の設置水深 (静水面から水平円柱の中心までの距離) を水面下15.6cm, 45.1cm, および74.9cmの3ケースつき, それぞれ波の周期と波高を変化させていった。実験条件を表一1に示す。

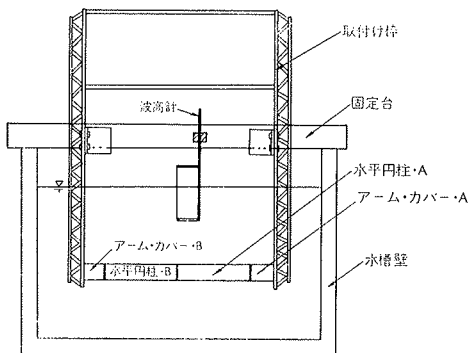
設置水深 (cm)	周期 $T_0$ (sec)	波高 $H_0$ (cm)	$D/H_0$	設置水深 (cm)	周期 $T_0$ (sec)	波高 $H_0$ (cm)	$D/H_0$		
15.6	1.0	5.1	0.47	45.1	2.0	5.0	0.44		
		7.9	0.69			8.2	0.72		
		4.9	0.43			8.6	0.75		
	1.4	7.8	0.68		74.9	1.4	4.8	0.42	
			10.3				0.90	7.8	0.68
			10.6				0.93	10.0	0.88
		2.0	12.9			1.13	10.1	0.89	
			13.0			1.14	12.6	1.11	
			5.3			0.47	12.8	1.12	
	45.1	1.0	5.4		0.47	2.0	5.2	0.46	
			8.2		0.72		7.4	0.65	
			8.4		0.74		8.3	0.73	
1.4		5.1	0.45	10.2	0.90				
		8.0	0.70	10.4	0.91				
		5.0	0.44						

ここに、Dは水平円柱の直径11.4 (cm)であり、 $T_0$ 、 $H_0$ は図-1に示されている波高計1の場所にある測定値である。

表一 実験条件

### 2.3. 波力の測定方法

波力の測定系は硬質塩化ビニール製の円形パイプを鉄製の波力測定用アームに取り付け、図-2に示すように左右2個の水平円柱モデルを取付け枠にボルトによって固定する。この取付け枠 (鉄製) は水槽上の固定台 (自重500 kg) に固定される。

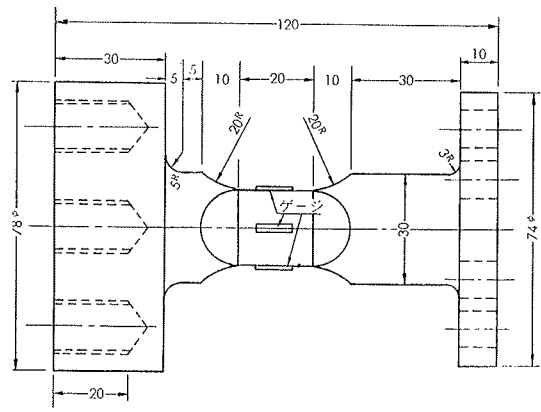


図二 波力測定装置

水平円柱モデルはAとBの左右2個の部分からなりそれぞれ片持ちばりとして波力測定アームと一体となって取付け枠に固定される。表一2および図-3に水平円柱モデルの寸法と波力測定用アームを示す。

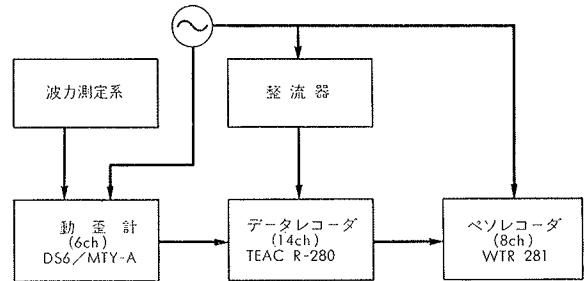
	直径	長さ
水平円柱 A	11.4cm	38.15cm
水平円柱 B	11.4cm	38.00cm
アームカバー A	11.4cm	11.6 cm
アームカバー B	11.4cm	11.7 cm

表一2 水平円柱モデルの寸法



図三 波力測定用アーム (単位mm)

この波力測定用アームの矩形部の4面には表裏2枚で1組の半導体ゲージ (新興通信 (株) 製, TYPE-E N108) が2組貼付されている。表裏のゲージの出力差により、その点での水平および鉛直方向の曲げモーメントに比例する歪量を2倍にして取り出すことができ、しかも温度差によるゲージの出力変化をある程度補償することができる。また、防水・耐熱を考慮して各ゲージをシーリング・ワックスでコーティングした。図-4に波力測定回路のブロックを示す。



図四 測定記録系ブロック図

### 3. 実験方法

実験は図-2に示されている取付け枠を上下に移動

することによって水平円柱モデルの設置水深を変えて波力の測定と、実験波の測定を同時に行なった。得られた測定値は次のものである。

- $\eta_0(t)$  : 水平円柱モデルの前面5m の場所における波 (波高計 1 により測定)
- $\eta_{up}(t)$  : 水平円柱モデルの中央真上の波 (波高計 2 により測定)
- $F_X(t)$  : 水平円柱モデルに作用する全水平波力 (X 方向波力)
- $F_Y(t)$  : 水平円柱モデルに作用する全鉛直波力 (Z 方向波力)

波力の実験に先だち、空中においてキャリブレーションを行なった。波の作用を受けた場合の水平円柱モデルは長さ方向に等分布荷重を受けるものと仮定した。キャリブレーションは円柱内に水を注入して水の重量を荷重とし、そのときの歪を読み取る方法を使った。なお、X方向とZ方向のキャリブレーションは別々に行なわれ、円柱は互に90度回転した位置にある。Z方向のキャリブレーションにおいては実験時に円柱が浮力を受けることを想定し、あらかじめ浮力に相当する重量の水を円柱内に注入しておき、この状態から荷重～歪関係を求めた。この結果、波力と動歪計の出力とは直線関係があり、一定の換算係数で表わせることが確かめられた。

#### 4. 水平円柱に作用する波力の算定 (理論式)

##### 4.1. 水平円柱

水平円柱に作用する単位長さあたりの水平波力は座標を図-5 のようにとると、抗力と慣性力の和として波力を表現する次のような Morison-O'Brien の式で表わされる。

$$F_X/l = 1/2 \rho D C_D |u| u + \rho \pi D^2 / 4 C_M (du/dt) \quad (1)$$

ここに、 $F_X$  : 水平円柱に作用する水平波力、 $l$  : 水平円柱の長さ、 $\rho$  : 流体の密度、 $D$  : 水平円柱の直径、 $u$  : 波の水平水粒子速度、 $du/dt$  : 水平方向の波の水粒子加速度、 $C_D$  : 抗力係数、 $C_M$  : 質量係数である。

(1)式により水平波力を計算するには、 $C_D$  および

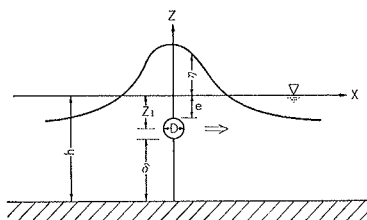


図-5 座標系

$C_M$  の正確な値と波による水粒子速度  $u$  および加速度  $du/dt$  を適確な波動理論を用いて精度よく推定することが必要である。本実験においては水深が一様で 134 cm と深く、実験波の周期が 1.0 秒から 2.0 秒の範囲内にあり、波形に対する水槽の底による影響は少なく、さらに実用的な面を考慮すると比較的簡単な式の方が解析上便利であることなどの理由により、微小振幅波理論を用いてこの実験結果の考察を進めた。

微小振幅波理論では次のような水面波形  $\eta(t)$  を考える。

$$\eta(t) = a \cos(kx - \sigma t) \quad (2)$$

$$k = 2\pi/L, \quad \sigma = 2\pi/T$$

ここに、 $a$  は波の振幅、 $L$  は波長、 $T$  は波の周期である。

本理論により、この波による水粒子速度  $u$  および加速度  $du/dt$  はそれぞれ次式で表わされる。

$$u = a\sigma \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (3)$$

$$\frac{du}{dt} = a\sigma^2 \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (4)$$

ここで、 $h$  は水深、 $z$  は静水面から鉛直上向きの距離を表わす。抗力係数および質量係数はこれらの両係数の位相による変化を無視し、波の峰、谷、水位変動の零点を谷から峰に向かって切る位相、および峰から谷へ向かって切る位相における実測の水平波力  $F_{XD1}$ 、 $F_{XD2}$ 、 $F_{XM1}$  および  $F_{XM2}$  を用いて式(5)よりそれぞれ算出する。図-6 に水平円柱上の波高と X 方向および Y 方向の歪 (波力) の実験記録を、図-7 に波力と波の位相の関係を示す。

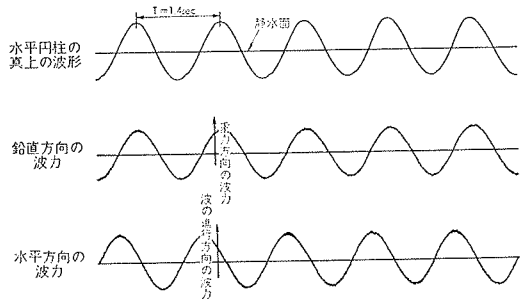


図-6 実験記録の一例

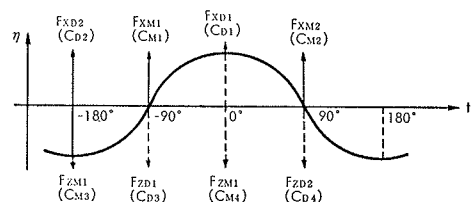


図-7 波力記号と波の位相の関係

$$\left. \begin{aligned} C_{D1} &= \frac{F_{XD1}/l}{(\rho/2)Du|u|}, & C_{D2} &= \frac{F_{XD2}/l}{(\rho/2)Du|u|} \\ C_{M1} &= \frac{F_{XM1}/l}{(\rho/4)\pi D^2(dw/dt)}, & C_{M2} &= \frac{F_{XM2}/l}{(\rho/4)\pi D^2(dw/dt)} \end{aligned} \right\} (5)$$

ただし、式(5)で使用する  $u$  および  $du/dt$  は式(3)および式(4)においてそれぞれの位相を  $0^\circ, 180^\circ$ , および  $90^\circ, -90^\circ$  とし、 $|\cos(kx-\sigma t)|=1$ ,  $|\sin(kx-\sigma t)|=1$  として解析する。(図-7 参照)

#### 4.2. 鉛直波力

水平円柱に作用する単位長さあたりの浮力が作用する方向の波力(鉛直波力)は水平波力と同様に Morison-O'Brien の式に従うと次のようになる。

$$F_z/l = \frac{1}{2}\rho DC_D w|w| + \rho \frac{\pi D^2}{4} C_M (dw/dt) \quad (6)$$

ここに、 $F_z$  は水平円柱に作用する鉛直波力、 $w$  は鉛直方向の波の水粒子速度、 $dw/dt$  は鉛直方向の波の水粒子加速度である。

微小振幅波理論により、 $w$  および  $dw/dt$  はそれぞれ次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} w &= a\sigma \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh} \sin(kx-\sigma t) \\ \frac{dw}{dt} &= -a\sigma^2 \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx-\sigma t) \end{aligned} \right\} (7)$$

抗力係数および質量係数は水平波力の場合と同様に水位変動が谷から峰に向かって零点を切る位相、峰から谷に向かって切る位相、谷および峰の位相における実測の鉛直波力  $F_{ZD1}, F_{ZD2}, F_{ZM1}, F_{ZM2}$  を用いて次式よりそれぞれ算出されるものとする。(図-7 参照)

$$\left. \begin{aligned} C_{D3} &= \frac{F_{ZD1}/l}{(\rho/2)Dw|w|}, & C_{D4} &= \frac{F_{ZD2}/l}{(\rho/2)Dw|w|} \\ C_{M3} &= \frac{F_{ZM1}/l}{(\rho/4)\pi D^2(dw/dt)}, & C_{M4} &= \frac{F_{ZM2}/l}{(\rho/4)\pi D^2(dw/dt)} \end{aligned} \right\} (8)$$

ただし、式(8)で使用される  $w$  および  $dw/dt$  は式(7)において  $|\sin(kx-\sigma t)|=1$ ,  $|\cos(kx-\sigma t)|=1$  として算出されるものとする。

#### 5. 実験結果および考察

水平円柱に作用する波力は  $H/D, h/H$  等の無次元量をパラメータとして表わされる。今回の報告においては最も適切なパラメータであると考えられた Keulegan-Carpenter 数 ( $U_m T/D$ ) を用いて実験結果を解析した。ただし、Keulegan-Carpenter の用いた  $U_m$  は水平円柱の中心位置に対応する重複波による水粒子速度であるが、ここでは式(3)および式(7)から求められる水平方向および鉛直方向の波の水粒子速度の最大値をそれぞれ水平波力ならびに鉛直波力に対応させて用いた。

また、 $H$  は波の波高、 $h$  は水深、 $D$  は円柱の直径で

ある。

質量係数  $C_M$  および抗力係数  $C_D$  は式(8)ならびに式(8)を用いて計算したものである。従って、揚力に関しては検討されてなく、今後の問題として残されている。しかしながら、本実験条件では抗力は慣性力の1割ぐらの値であり、測定上ばらつきが大きかったため、今回は質量係数  $C_M$  ( $C_{M1} \sim C_{M4}$ ) についてのみ検討した。図-8 ~ 10 に設置水深別の質量係数を示した。

土屋・山口<sup>3)</sup> は質量係数に対する底面の影響、すなわち、Proximity effect は  $\delta/D > 0.5$  (図-5 参照) では無視できるとしている。

本実験においては  $\delta/D > 6.6$  と大きいので底面に対する Proximity effect は無視できうる。

表面に対する Proximity effect を検討するため、底面に対するものと類似したパラメータ  $e/D$  を考える。ここに  $e$  は静水面から水平円柱表面までの最短距離である (図-5 参

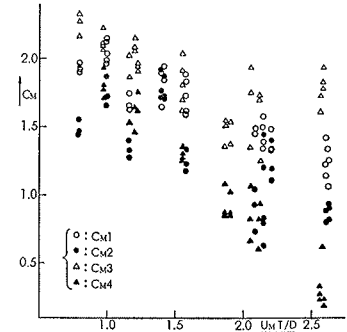


図-8 質量係数 (設置水深: 15.6 cm)

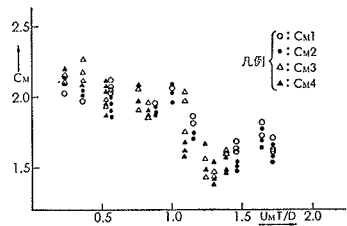


図-9 質量係数 (設置水深45.1 cm)

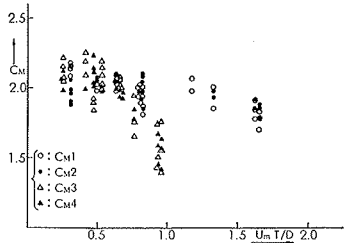


図-10 質量係数 (設置水深74.9 cm)

照)。  $e/D$  の値は設置水深が 15.6 cm, 45.1 cm, 74.9 cm に対して、それぞれ 0.87, 3.4, および 6.0 となる。図-8 から図-10 を比較すると、 $e/D$  の値が小さい設置水深 15.6 cm の場合にはデータのばらつきが大きく、表面に対する Proximity effect が現われていると考えられる。設置水深が 45.1 cm と 74.9 cm の場合にはデータのばらつきも少なく、Proximity effect の影響は現われていないと思われる。実験記録は 15.6, 45.1 および 74.9 cm の 3 ケースの設置水深に対して行なったにすぎないが、この結果から  $e/D \geq 3$  以上では Proximity effect の影響は現われなく、 $e/D \leq 1$  であれば現われると考え

られる。1<e/D<3 の範囲に関しては、今後実験ケースを増加させて検討して行きたい。

設置水深 15.6cm の場合には、Proximity effect の影響が現われ、質量係数  $C_{M1} \sim C_{M4}$  は異なった値をとり、その差は  $U_m T/D$  の値が増すにつれて大きくなる。特に鉛直方向の質量係数  $C_{M3}$  と  $C_{M4}$  において、その差が大きく現われる (図-8)。

この原因は、水平円柱が水面の近くに位置し、波による衝撃力 (船舶の場合に使われているスラムのようなもの) や後流の発生等に起因すると思われる。

さらに鉛直上向きの波力に対応する質量係数  $C_{M3}$  が鉛直下向きの波力に対応する質量係数  $C_{M4}$  (図-7 参照) より大きい値をとることは、本解析が揚力の影響を考慮していないことも大きく影響していると思われる。

設置水深が 45.1cm の場合には、質量係数  $C_{M1} \sim C_{M4}$  はほぼ同じ値をとり、最大 2.1 から最小 1.5 ぐらいの範囲にある (図-9)。

設置水深が 74.9cm の場合には水平方向の質量係数  $C_{M1}$  と  $C_{M2}$  はほぼ同じ値を示し、その値は 2.2 から 1.7 の範囲に分布しており、その減少の割合は小さい。しかし、鉛直方向の質量係数は水平方向の質量係数よりも減少の割合が大きく、 $U_m T/D$  の値が 1 ぐらいのところから 1.5 ぐらいの値に減少する (図-10)。

各々の位相における質量係数の値を図-11 と図-12 にそれぞれ図示した。これから、波が円柱前面または

円柱上方に作用する位相にある質量係数  $C_{M1} (C_{M4})$  はまとまった値をとり、逆に円柱背面および下方に作用する位相にある質量係数  $C_{M2} (C_{M3})$  はばらついた値をとるが、各々の質量係数はそれぞれ同一の直線、または曲線上にあって減少していることがわかる。

実験記録のばらつきについては、さらに検討する必要がある。この原因については、本多・光易<sup>4)</sup> は、流体の速度場および加速度場を実測しないで表面波形  $\eta(t)$  より波の理論を用いて推定した値を用いて解析した  $C_D$  および  $C_M$  には波の理論の精度がそのまま影響していることや、波の運動が厳密に安定でなく、僅かではあるが波形が前後非対称で運動が乱れている場合があることなどを述べている。この問題についても、今後詳細に研究して行く予定である。

## 6. 結語

本研究では、一様水深中に設置した水平円柱に作用する波力の実験から波の微小振幅波理論を用いて質量係数を推定し、波の特性と水平円柱の特性 (円柱の径、設置水深) の関連を検討した。その結果、質量係数は水平方向と鉛直方向とは違いがみられること、設置水深により影響を受けることなどが示された。この原因としては解析において微小振幅波を仮定したのに対し、実際の波は若干非線形であること、後流が発生することや、揚力等が考えられる。また、今回の実験はパラメータ  $U_m T/D$  の値が 2.6 以下の狭い範囲であったが、今後範囲を拡大して検討していく必要がある。

## 7. 謝辞

本研究をすすめるにあたり、終始暖かい御指導、激励をいただいている九州大学光易恒教授、波力の計測に関して全面的な協力をいただいた江藤賢次技官ならびに同研究室の方々には感謝致します。

## 参考文献

- 1) Carbis H. Keulegan and Lloyd H. Carpenter: Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, Jour. Res. N. B. S., Vol. 60, No. 5, 1958.
- 2) 長崎作治・尾形賢: 海底パイプラインに作用する波力について(その1), 第19回海岸工学講演会論文集, 1972.
- 3) 土屋義人・山口正隆: 水平円柱に作用する全波力について, 第12回海岸工学講演会論文集, 1974.
- 4) 本多忠夫・光易 恒: 大口径円柱に作用する波圧に関する研究, 九州大学応用力学研究所報, 第40号, 1973.

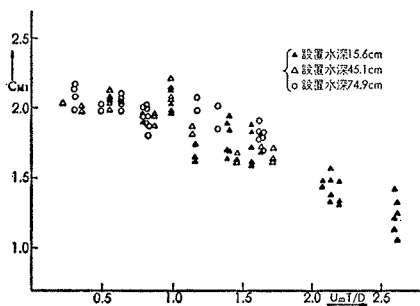


図-11 質量係数  $C_{M1}$

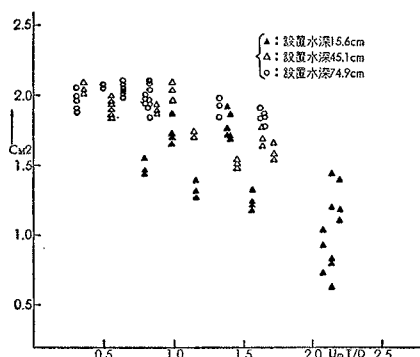


図-12 質量係数  $C_{M2}$