

没水球体に作用する二成分波の波力の特性

WAVE FORCES ACTING ON A SUBMERGED SPHERE DUE TO TWO-COMPONENT COMPOSITE WAVES

岩田好一朗*・水谷法美**・都築克嘉***

By Koichiro IWATA, Norimi MIZUTANI and Katsuyoshi TSUZUKI

This paper is to discuss experimentally the wave forces acting on a submerged sphere in the two-component composite wave field. The measured wave forces are decomposed into the drag and inertia forces using the Morison's formula. The maximum wave force, the drag and inertia coefficients of individual waves defined by the zero-downcrossing method are mainly investigated in the relation to those of regular waves. Time variations of the water surface profile have significant effects upon the characteristics of the wave forces. The maximum wave force and inertia coefficient of the successive waves whose heights are increasing are shown to be larger than those of the successive waves whose heights are decreasing. Their variations become larger as the difference of the successive wave heights become larger.

Keywords: wave force, sphere, drag and inertia coefficients, two-component composite wave

1. 緒 言

近年、海岸・海洋空間に対する関心が高まりつつあり、海岸・海洋空間の高度利用、あるいは、静穏域の拡大が望まれるようになった。それに伴い、それらの空間を制御したり、あるいは、利用するための構造物の多様化が進むことが予想される。従来の構造物とは異なり、今後の構造物に特に期待されるのは、その機能だけでなく、水質の保全、景観の問題に代表されるような、環境の面からの要求を満たすものである。こういった要求を満たすための1つの構造物様式として、構造物を静水面下に潜らせた没水式の構造物があり、今後、没水型の構造物の需要が大きくなることが予想される。本研究は、構造物の形状として球体を取り上げる。没水型の構造物に作用する波力は、静水面上に出ている構造物に比べて一般に小さくなるが、逆に、静水圧は大きくなる。球体は、等方性を有する水圧に対して最も有利な形状であり、たとえば、海中備蓄タンク、浮体構造物の係留の中間ブイ

などのように球状構造物の必要性が考えられる。著者らは、波動場に置かれた没水球体に作用する波力について検討を加えてきた¹⁾。そして、規則進行波中の波力に対しては、Morison式の適用範囲、波力係数の特性などを明らかにしてきた。しかし、実際の海洋での波浪は不規則であるため、不規則波による波力の特性について明らかにしておくことが重要である。球体に作用する不規則波力の研究は非常に少ない。Iwata *et al.*²⁾は、不規則波の波力は、慣性力が支配的である場合は水位変動から予測することが可能であること、また、不規則波の波力係数は、規則波に対する値に比べて小さくなる傾向があることを指摘した。しかし、波力係数が小さくなる原因については明らかにされておらず、検討の余地が残されている。

不規則波は、2つ以上の自由波から構成される波として定義することができるため、2つの自由波から構成される二成分波は、不規則波の最も簡単な形の波であると考えられる。したがって、複数の自由波からなる不規則波の波力の機構、および1つの自由波からなる規則波との波力の差異を明らかにするうえで、2つの自由波からなる二成分波の波力の特性を明らかにすることは基本的に重要である。本研究では、没水球体に作用する二成分波の波力の特性について、水理実験を詳細に行い、前後

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工博 名古屋大学助手 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 エコー(株)第1技術部数理解析課
(〒116 荒川区南千住1-59-7)

の波の波高の相関に代表されるような波の時系列特性が波力に及ぼす影響について議論するとともに、その機構についても検討を加える。そして、二成分波の波力を規則波の波力と比較しながら波の不規則性が波力に及ぼす影響について議論しようとするものである。

2. Morison 式と次元解析

(1) Morison 式³⁾

一般に、物体の代表径が入射波長に比べて小さく、波の変形が無視できる場合には、物体に作用する波力は、Morison 式で算定されることが多い。後述するように、本研究で取り扱う球径が入射波長に比してきわめて小さいので、球体に作用する波力を Morison 式で表わすものとする。そして、同式中の波力係数の特性について検討を加える。球体に作用する x 方向、 z 方向の波力 F_x, F_z に Morison 式を適用すると、それぞれ次のように表わされる。

$$F_x = \frac{1}{8} C_{Dx} \rho \pi D^2 u \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{1}{6} C_{Mx} \rho \pi D^3 \dot{u} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_z = \frac{1}{8} C_{Dz} \rho \pi D^2 w \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{1}{6} C_{Mz} \rho \pi D^3 \dot{w} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C_{Dx} と C_{Dz} は抗力係数、 C_{Mx} と C_{Mz} は慣性力係数、 ρ は水の密度、 D は球の直径、 u, w はそれぞれ水平・鉛直方向の水粒子速度であり、上付きドット ($\dot{\cdot}$) は時間に関する微分を示す。なお、 x は波進行方向を正の向きとする水平軸、 z は静水面上に原点をもち、鉛直上向きを正とする鉛直軸である。

(2) 次元解析

本論では、二成分波の波力の特性を、まず、ゼロ・ダウクロス法で定義された一波ごとの波（本論では、波別解析波と称する）を取り上げ、波別解析波の波力の特性を中心に議論する。これは、波別解析波と同じ波高、周期をもつ規則波の波力と比較するうえで重要であるからである。波別解析波の波力 F は、次に示される 11 個の物理量によって支配されると考えられる。

$$F = \phi(U, D, d, h, T, \mu, g, \rho, \gamma, \delta; t) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 U は流速の振幅、 d は静水面から球の中心までの距離、 h は静水深、 T は波別解析波の周期、 μ は水の分子粘性係数、 g は重力加速度、 γ は前後の波の波高の相関係数、 δ は波高の変動係数、 t は時間である。二成分波を取り扱うため、式 (3) には、本来ならば 2 つの自由波の振幅 (a_1, a_2 、添字 1, 2 は 2 つの自由波を示す) と周期 (T_1, T_2) が考慮されるべきであるが、これらの値は、二成分波の包絡の周期とその形状を与えるものであり、 γ と δ に密接に関係する量である。本論では、二成分波を不規則波の 1 つとして定義するため、不規則波への適用も考慮して、本研究では、 a_1, a_2, T_1, T_2 の

代わりに γ と δ を取り上げる。なお、 γ, δ はそれぞれ次式で与えられ、規則波の場合は、 $\gamma=1, \delta=0$ となる。

$$\gamma = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (H_{i+1} - \bar{H})(H_i - \bar{H}) / \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$\delta = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2 \right\}^{1/2} / \bar{H} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 H は波高、 \bar{H} は平均波高、 N は波の数で、添字 i は i 番目の波を示す。また、二成分波の波別解析波の周期 T は、同一の波の中ではほぼ等しいため、 T の代わりに平均周期 \bar{T} を採用することにする。

式 (3) を無次元表示すると式 (4) を得る。

$$\frac{F}{\rho U^2 D^2} = \Phi \left(\frac{U \bar{T}}{D}, \frac{UD}{\nu}, \frac{h}{g T^2}, \frac{D}{h}, \frac{d}{h}, \gamma, \delta; \frac{t}{T} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\nu (= \mu/\rho)$ は水の動粘性係数である。式 (6) の右辺第 1 項の $U \bar{T}/D$ は、Keulegan and Carpenter 数⁴⁾（以下、K.C. 数と略記する）、第 2 項の UD/ν は Reynolds 数（以下、 Re 数と略記する）、第 3 項は水深波長比に相当する項、第 4 項は球径水深比、第 5 項は相対設置水深、である。波力については、その最大値 F_m （添字 m は波別解析波ごとの最大値を示す）に着目する場合は、 t/\bar{T} とは独立とみなすことができる。

Morison 式中の波力係数も波力と同様に式 (6) の右辺に示される無次元量によって支配されると考えられる。ただし、波力係数を時間と独立した量として取り扱うため、 t/\bar{T} とは独立である。本研究では、次章で詳述するように、波力係数を波別解析波ごとの値のほかに、1 つの波の時系列記録内では一定の値であると仮定して得られる値も計算した。この場合の波力係数は、 U を時系列を代表する流速の振幅とすることにより、波別解析波に対する値と同じ無次元量によって支配されると考えられる。

以上の結果に基づいて、波力の特性、特に波力係数を式 (6) の無次元量と関連づけながら論議するものとする。

3. 水理実験

(1) 実験方法

実験は、名古屋大学工学部土木工学科の二次元鋼製水槽（長さ 25 m、高さ 0.95 m、幅 0.7 m）で行われた。水槽の一端には、フラップ型不規則波造波装置が設置されている。他端には、反射波を極力小さくするために、消波ブロック、捨石、およびウレタンメッシュから構成される消波装置を設置した。球体に作用する波力の算定に際して、Proximity Effect などで Morison 式が適用できない範囲があることが著者らによって明らかにされ

ているので¹⁾、本研究では、二成分波による波力の基本的な特性を議論するため、主に Morison 式の適用可能な範囲を対象として実験を行った。実験条件を、以下のように決めた。球の直径を 2.5 cm とし、静水深を 3 種類 ($h=70, 56, 40$ cm) 変化させ、球の設置水深 (d) を $h=70$ cm に対しては $d=0.179 h, 0.357 h$ の 2 種類、 $h=56$ cm に対しては $d=0.357 h, h=40$ cm に対しては $d=0.357 h, 0.425 h$ の 2 種類とした。二成分波は、2 台の信号発生装置から出力される周期の異なる 2 つの正弦信号を重ね合わせ、それを入力とすることにより生起させた。2 つの正弦信号の周波数は、0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 Hz から得られる 15 種類の組合せである。実験では、2 つの正弦信号の振幅を同じ値に保ちながら合成波の最大波高が 10~20 cm になるように振幅を 2~4 種類変化させた。実験種目は全部で 146 ケースであり、すべてのケースで水位変動 η 、流速 u, w 、および波力 F_x, F_z を同時に計測した。なお、水位変動を電気容量式水位計で、流速を電磁流速計で、波力を Cantilever 型波力計²⁾で計測した。波力計の固有振動周波数は約 15 Hz であり、入射波の周波数に比べて十分高いので計測波力に及ぼす固有振動周波数の影響はほとんどない。また、波力計の検定結果より、入力と出力の間には十分な線形性が確認されている。計測時間は、各ケースとも約 2 分間とし、計測された水位、流速、波力の時間波形はすべて磁気テープとペン書レコーダーに記録され、解析に使用された。

また、波力の特性をより詳細に議論するため、適当なケースについて、コンデンスミルク法により、球体周りの流況の可視化実験を行った。実験で得られた流況はビデオカメラ (30 コマ/秒) に記録され、解析に使用された。

(2) 解析方法

実験で得られた水位、流速、波力の時間波形をすべてサンプリングタイム 0.05 秒で離散化し、解析に使用した。解析に使用したデータの個数は 1024 個 (51.2 秒に相当) である。これらのデータを使って式 (6) 中の無次元量を波別解析波ごとに計算した。ただし、二成分波では、流速の振幅は時間的に変化するため、流速の振幅の代わりに波別解析波ごとの流速の rms 値を採用し、さらに、規則波との関連を考慮して本研究では x, z 方向の流速の振幅としてそれぞれ $\sqrt{2} u_{rms}, \sqrt{2} w_{rms}$ を採用した。したがって、たとえば K. C. 数については、 x 方向は $\sqrt{2} u_{rms} T/D$ 、 z 方向は $\sqrt{2} w_{rms} T/D$ となる。なお、本研究では、波別解析法はゼロダウンクロス法を採用した。また、式 (1), (2) に示される Morison 式中の波力係数も計算した。波力係数の計算方法は、最小二乗法²⁾を採用した。この際、波力係数は、以下に示

される 2 通りの手法により、2 種類の値を計算した。

- (i) 波力係数は、波別解析波ごとに異なると仮定し、波別解析波ごとに波力係数を計算する。
- (ii) 波力係数は、1 つの時系列記録内では一定であると仮定し、1 つの二成分波に対して一組の波力係数を計算する。

なお、(ii) の手法で計算された波力係数は、(i) の手法で計算された波力係数と区別するため、上付きパー (一) をつけて示す。

本研究では、まず、(i) の手法で得られた結果を使い、波別解析波と同じ周期、波高をもつ規則波と比較した場合に、波力係数が、規則波と二成分波とでどのような差異があるのかを検討する。ついで、(ii) の手法で得られた結果を (i) の手法で得られた値と関連づけながら、二成分波の波力の時間波形の水位変動からの予測について検討を加える。なお、波力を計算するうえで必要な加速度の時間波形は、流速の時間波形に数値微分に相当する数値フィルターをかけることにより計算した^{1), 2)}。流速と加速度の時間波形は、3 次のオーダーまでの範囲に対する規則波の理論値と実験値の比較を行い、十分な精度をもつことを確認している。

球体周りの流況の詳細については、ビデオカメラで撮影された流況をコマ送り再生させて求めた。

4. 実験結果とその考察

(1) 慣性力係数の特性

γ の値は、2 つの成分波の周期、振幅の組合せによって変化する。このため、 γ による影響を検討するために、 γ の値を次の 4 つの領域、すなわち、(A) $0.5 \leq \gamma < 1.0$ 、(B) $0.0 \leq \gamma < 0.5$ 、(C) $-0.5 \leq \gamma < 0.0$ 、(D) $-1.0 \leq \gamma < -0.5$ 、に分けて考察するものとする。この (A)~(D) の領域のうち、(A) と (C) の領域に対する水位変動、流速、加速度、波力の時間変動の代表例を図-1 に示す。ただし、1 つの時系列内での最大値 (添字 max で示す) により、それぞれ無次元化してある。同図より、 γ の値が小さくなるとピートの周期が短くなり、引き続く波の波高の差が大きくなるのがわかる。本研究では、まず、慣性力係数の特性を議論する。

a) C_{Mx} (波進行方向の慣性力係数)

図-1 は、慣性力が圧倒的に卓越する場合の波力の時間波形を示したものであるが、無次元加速度と無次元波力を比較すると、波高が増大する過程 (以後、波高増大過程と称する) の波では無次元波力の方が無次元加速度よりも大きく、逆に、波高が減少する過程 (以後、波高減少過程と称する) の波では、無次元加速度の方が無次元波力よりも大きくなる傾向が認められる。これは、慣性力が卓越する場合の一般的な傾向であり、加速度に対

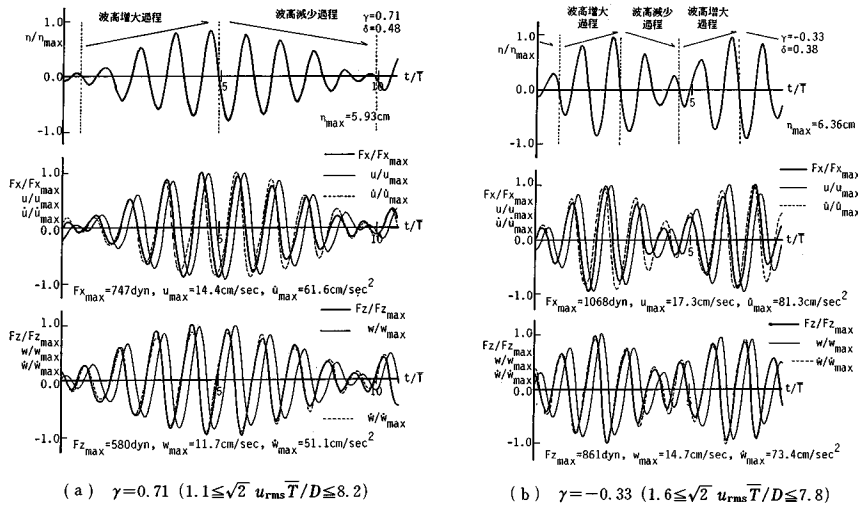


図-1 水位、流速、加速度と波力の時間波形

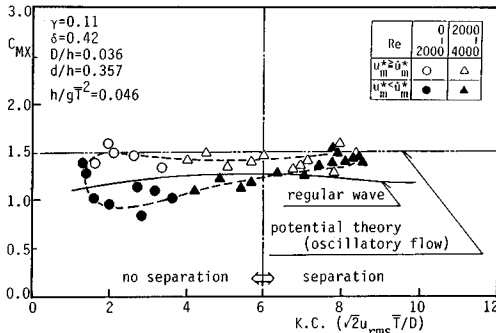


図-2 C_{MX} と K.C. 数の関係 (慣性力が卓越する場合)

する波力の大きさが波高減少過程より波高増大過程の方が大きくなること、すなわち、波高減少過程よりも波高増大過程の方が、慣性力係数は大きくなることを示す。この原因、および機構について以下に議論する。

a-1) K.C. 数と Re 数の効果

図-2 は、 C_{MX} と K.C. 数の関係を示した一例であり、剥離の始まる K.C. 数の値も同時に示してある。また、図中の破線は実験値の分布の概略を結んだ線であり、比較のために著者らによって得られた規則波に対する $C_{MX}^{(1)}$ も示されている。実験によると、波別解析波の C_{MX} は、全体的には振動流中に置かれた球体に対するポテンシャル理論値 $1.5^5)$ より若干小さくなる。そして、同じ K.C. 数の値に対して 2 つの値をとり、波高増大過程の波の値が大きな値に、波高減少過程の波の値が小さな値になり、剥離のない領域で特に明瞭なループ状の分布をすることが一般的な傾向として認められた。すなわち、二成分波の波別解析波の C_{MX} は、波高増大過程のときにループの上側の値、つまり大きな値を、波高減

少過程のときにループの下側の値、つまり小さな値をとりながら、ピートの一周でループを一周する。

図-1 から認められるように、波高増大過程では、無次元加速度の最大値 (\dot{u}_m^*) よりも無次元流速の最大値 (u_m^*) の方が全体的に大きく、また、波高減少過程では、 u_m^* よりも \dot{u}_m^* の方が全体的に大きくなる傾向がある。すなわち、波高増大過程と波高減少過程では、加速度と流速の相対的な大きさが異なる。そこで、 C_{MX} に及ぼす流速、加速度の相対的な大小関係の影響を調べるために、図-2 では、 u_m^* が \dot{u}_m^* よりも大きい値を白抜き記号で、逆に、 u_m^* よりも \dot{u}_m^* の方が大きい値を黒塗りの記号で示してある。同図にも示されているように、明らかに u_m^* の方が \dot{u}_m^* よりも大きい波の C_{MX} の方が、 u_m^* よりも \dot{u}_m^* の方が大きい波の値よりも大きく、波高の大小関係ではあまり明瞭でなかったピートの谷と峰の波の値についても u_m^* の方が \dot{u}_m^* よりも大きい波の方が C_{MX} は大きくなることははっきりわかる。さらに、 u_m^* と \dot{u}_m^* が等しい規則波の値と比較すると、 u_m^* の方が \dot{u}_m^* よりも大きくなる波の値は規則波の値よりも大きく、 u_m^* が \dot{u}_m^* よりも小さくなる波の値は規則波の値よりも小さくなる傾向が認められる。なお、ピートの峰と谷の波の一部を除けば、波高増大過程の波と u_m^* が \dot{u}_m^* よりも大きくなる波、波高減少過程の波と \dot{u}_m^* が u_m^* よりも大きくなる波の対応は非常によいため、本論では、以後、波高増大過程の波、波高減少過程の波の定義は、それぞれ $u_m^* \geq \dot{u}_m^*$ 、 $u_m^* < \dot{u}_m^*$ とする。

C_{MX} の波高増大過程と波高減少過程の差の原因を次のように考えることができる。 Re 数が 2000 以下の値 (○印) と 2000 以上の値 (△印) を比較すると、明らかに Re 数の小さい方が慣性力係数の値の差が大きいために

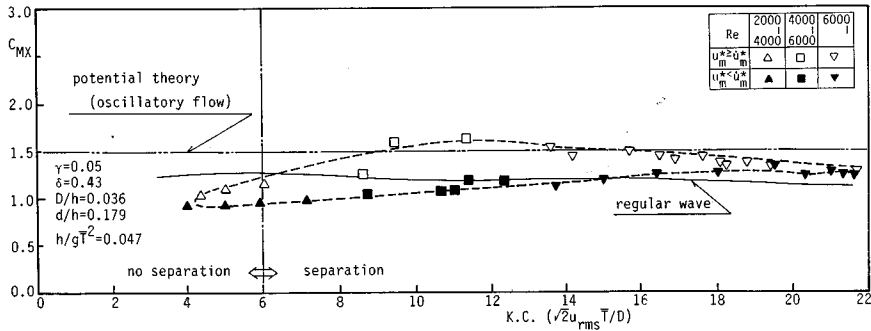


図-3 C_{MX} と K.C. 数の関係 (抗力が卓越する場合)

わかる。これは、粘性が慣性力係数の値に影響を及ぼしていることを示す結果である。剥離のない範囲では、水の粘性による球体表面での摩擦力和直立円柱に対して指摘されているような境界層の発達のための運動量の欠損による力⁶⁾が抗力の重要な成分であると考えられる。水平床での底面摩擦力については、層流状態では摩擦力の位相は流速の位相よりも $\pi/4$ だけ先に進むことが報告されている⁷⁾。また、波動場中の直立円柱表面に形成される境界層内の流速も、主流に比べて位相が先に進むことが報告されている⁸⁾。同様に、波動場におかれた球体表面でも摩擦力の位相が流速の位相より先に進むと仮定すれば、球体に作用する波力を Morison 式で算定する以上は、摩擦力は慣性力にも含まれることになる。また、運動量欠損に伴う抗力にも加速度と同位相になる成分が含まれている⁹⁾。球表面での摩擦力が慣性力にも含まれるならば、同じ加速度の波であっても相対的に流速が大きい波高増大過程では波高減少過程より慣性力に含まれる摩擦力は大きくなる。また、運動量欠損による抗力も、円柱に対する表示式⁶⁾によると波高増大過程の方が大きくなることになり、そのため、波高増大過程の慣性力が波高減少過程の慣性力よりも大きくなったものと考えられる。K.C. 数が同じ波ならば、波高増大過程の波と波高減少過程の波では流速は等しいため、慣性力に含まれるこれらの抗力の影響は同じ程度であると考えられる。しかし、慣性力係数を計算する際に除数となる加速度は、波高増大過程の波の方が小さいために、加速度に対する抗力の割合は、波高増大過程の波の方が大きくなる。したがって、波高増大過程の C_{MX} が波高減少過程の波の値よりも大きくなったものと考えられる。また、波別解析法による見掛けの差も含まれている可能性もあるが、少なくとも、ゼロダウンクロス法とゼロアップクロス法による差異はないことを確認している。

図-3は、K.C. 数が比較的大きく抗力が卓越する場合の C_{MX} と K.C. 数の関係を図-2と同様な方法で図示したものである。図-2ではあまり明瞭ではなかったが、

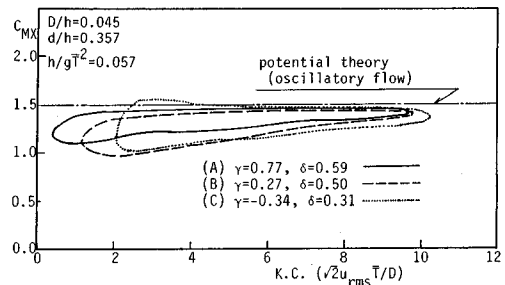


図-4 C_{MX} と K.C. 数の関係に及ぼす γ の効果

剥離のある範囲でも慣性力係数は波高増大過程の波の値の方が波高減少過程の波の値よりも大きくなり、ループ状の分布となることが認められる。規則波の慣性力係数については、剥離が起こり、渦が放出されるようになると慣性力係数が小さくなる傾向のあることが報告されている¹⁾。二成分波の場合は波高増大過程よりも波高減少過程の方が先行波の渦は大きく、その影響も大きい。そのため、波高減少過程の波の慣性力係数が波高増大過程の値よりも小さくなるものと考えられる。

a-2) γ と δ の効果

無次元加速度と無次元流速の最大値の差、あるいは渦の影響の大きさの差は、波高の相関が小さく、また、波高の変動の大きい方が、すなわち波高の変化の大きい方が大きくなる。波高の変動係数 δ が、 C_{MX} に及ぼす影響については、本実験では、二成分波を生起させるとき入力した2つの正弦信号の振幅を等しくしたため、 δ の値は0.4~0.5の間の場合が多く、 γ ほど詳細な論議はできないものの、 δ の値の大きい方が、 C_{MX} の値の差は大きくなることが認められた。図-4は、 C_{MX} に及ぼす γ の影響を調べた一例を示したものである。同図には、 D/h , d/h と h/gT^2 が同じ値で、 Re 数の範囲もほぼ等しく、 γ が異なる3つの波に対する C_{MX} の分布の概略のみが示されている。同図からも認められるように、 γ が小さくなるほど C_{MX} の分布はより上下方向に膨らんだループ状となる。この3つの波では δ の値にも

差があるが、慣性力係数の値は γ が小さい方が、より上下方向に膨らんだループ状の分布形状になると推察される。これは、本論では図示しないが、K.C. 数が大きく、抗力が卓越する場合でも同様である。

a-3) D/h , h/gT^2 と d/h の効果

規則波の C_{MX} については、 D/h と h/gT^2 はほとんど影響を及ぼさないことが報告されている¹⁾。二成分波の場合も、 D/h は C_{MX} にほとんど影響を及ぼさないことが確認された。しかし、 C_{MX} の値は h/gT^2 の値の変化により変動し、一例として図-5 に示されるように、 h/gT^2 が小さいほど C_{MX} の分布の幅が大きくなり、波高増大過程と波高減少過程の値の差は大きくなることが認められた。この原因の1つとして、成分波間の非線形干渉が考えられる。

次に、 C_{MX} に及ぼす d/h の効果であるが、限られた実験の範囲内では、 d/h の大きい方が C_{MX} は若干大きくなる傾向が認められた。これは、K.C. 数の範囲に多少差異はあるものの、規則波に対する結果と同様である。

b) C_{MZ} (鉛直方向の慣性力係数)

図-6 に C_{MZ} と K.C. 数 ($\sqrt{2} w_{rms} T/D$) の関係の一例を示す。図-2 の場合と同様に、 C_{MZ} の概略を破線で結んである。同図でも、波高増大過程、波高減少過程の波の定義は、既述の水平方向の流速と加速度を使って行ったが、鉛直方向の流速と加速度を用いても、波高増大過程では流速の方が加速度よりも相対的に大きくな

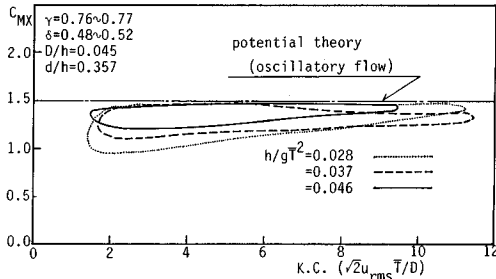


図-5 C_{MX} と K.C. 数の関係に及ぼす h/gT^2 の効果

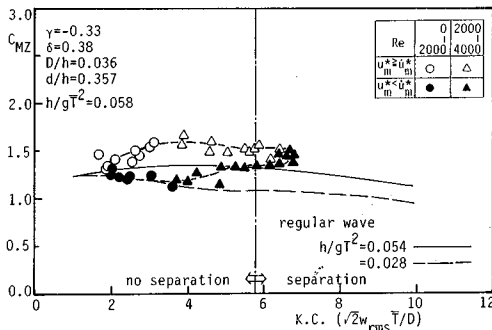


図-6 C_{MZ} と K.C. 数の関係

り、波高減少過程では、流速よりも加速度の方が相対的に大きくなる。同図にも示されるように、 C_{MZ} もループ状の分布となり、同一の K.C. 数に対して C_{MZ} は2つの値をとることが認められた。そして、 C_{MZ} の大きい方の値は波高増大過程の波の値であること、 γ が小さいほど、また、 δ が大きいほど波高増大過程と波高減少過程の C_{MZ} の差が大きくなることなど、 C_{MX} と同様な特性が認められた。 h/gT^2 , D/h と d/h の効果についても C_{MX} の場合と非常に良く似ていることが確認された。ただし、 C_{MZ} の場合は、全体的にループの上側と下側の値の差は C_{MX} の場合よりも大きくなる傾向がある。これは、球の上下で水平方向流速が異なるため、鉛直方向に力が作用し、その影響が現われたことが原因の1つとして考えることができる。

以上の結果より、慣性力係数 C_{MX} , C_{MZ} は γ が小さくなり、また、 δ が大きくなって引き続く波高の差が大きくなると、慣性力係数は波の時系列の影響を受け、波高の増大過程と減少過程で値が異なるようになることが指摘できる。

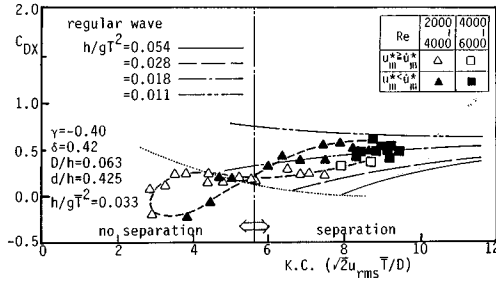
(2) 抗力係数の特性

a) C_{DX} (波進行方向の抗力係数)

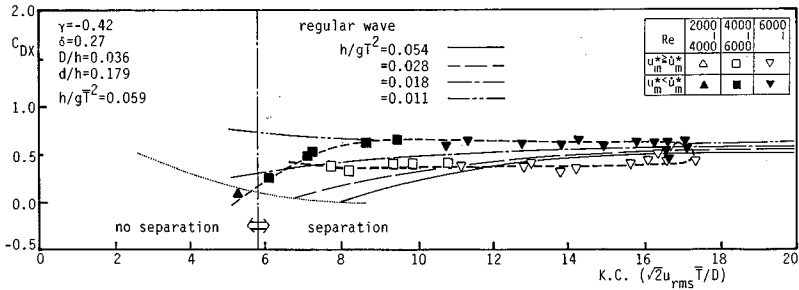
a-1) K.C. 数と Re 数の効果

図-7(a), (b) にそれぞれ慣性力が卓越する場合と抗力が卓越する場合の C_{DX} と K.C. 数の関係の典型的な例を示す。同図にも剝離が始まる K.C. 数の値が示してある。また、図中の点線は、抗力の慣性力に対する割合が5%であることを示す。 C_{DX} の一般的な傾向としては、図-7からも認められるように、剝離のある範囲ではほぼ一定値を取り、その値は0.5に近い。しかし、剝離のない範囲では K.C. 数の減少に伴い C_{DX} は減少し、その減少の仕方は、図-7からはあまり明瞭ではないが、 h/gT^2 の大きい方が顕著であり、規則波の場合と同様な傾向が認められた。

ところで、図-7にも示されているように、K.C. 数が5程度以下の範囲で、 C_{DX} が負の値になる場合の多いことが認められた。この原因は、次のように考えることができる。K.C. 数が小さく、渦の放出もない範囲では、前節で既述したように、Morison 式中の抗力項に示されるような流速の2乗に比例する力とは発生機構の異なる力、すなわち水の粘性による摩擦力、境界層の形成に伴う力⁶⁾が抗力の主要な成分であると考えられる。流速との間に位相差をもつこれらの力に、Morison 式をそのまま適用したために、抗力係数が負の値になったものと考えられる。しかし、K.C. 数が小さい範囲では、抗力は慣性力に比してかなり小さいため、本論では、工学的な簡便さという点に立ち、波力算定式として Morison 式を適用している。K.C. 数が小さい範囲、特に慣



(a) 慣性力が卓越する場合



(b) 抗力が卓越する場合

図-7 C_{Dx} と K.C. 数の関係

性が卓越する領域の抗力の発生機構、および表示式については、別途、稿を改めて報告する予定である。

波高増大過程と波高減少過程での抗力係数の差は、慣性力係数の場合とは異なり、剥離の有無によって変化する。すなわち、剥離のある場合では波高増大過程の波の値の方が波高減少過程の波の値より小さくなる傾向があるのに対して、剥離のない場合には両者の大小関係は逆転し、図-7(a)の実験値を結んだ破線に示されるような斜め ∞ の字のような分布形状となる。また、剥離のない範囲では、 Re 数の小さい方が、 C_{Dx} の差は大きくなる。図-7(b)では、剥離のない波の値が少ないために、抗力係数はループ状の分布となっている。両図より、剥離のない範囲では、波高増大過程の波の値の方が波高減少過程の値より大きくなることから、この範囲の抗力の支配的な成分であると考えられる摩擦力、境界層の形成に伴う抗力は波高増大過程の方が大きくなると推察される。また、剥離が起こり、渦が放出されるようになると、渦の発生に伴う圧力の非対称性による力が支配的になるが、波高減少過程では、先行波で形成される渦は大きく、その影響も大きいために波高減少過程の C_{Dx} が大きくなったものと考えられる。

a-2) γ と δ の効果

C_{Dx} は、慣性力係数に比べてばらつきが大きく、波高増大過程と波高減少過程における差は、慣性力係数の場合ほど明瞭ではないが、波高の相関係数 γ の小さい方

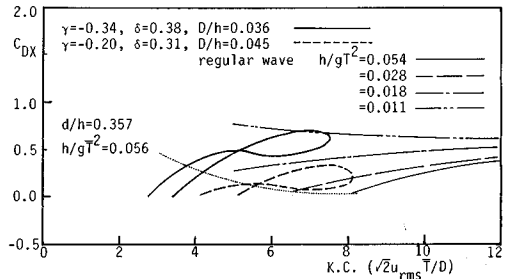


図-8 C_{Dx} と K.C. 数の関係に及ぼす D/h の効果

が大きくなる傾向が認められた。また、変動係数 δ の大きい方が、 C_{Dx} のばらつきは大きくなるものの、波高増大過程と波高減少過程の差は大きくなることが確かめられた。

a-3) D/h , h/gT^2 と d/h の効果

図-8は、 γ が同じ範囲 ((C) 領域) で、 h/gT^2 の値も等しく、 Re 数の範囲もほぼ等しい二成分波で D/h が異なる場合の C_{Dx} の比較を行ったものである。 $D/h = 0.045$ に対する値と $D/h = 0.036$ に対する値を比較するとわかるように、 D/h が大きい方が抗力係数は小さくなる傾向がある。この原因の1つとして、水深が浅くなったことによる波の非線形性が大きくなったことが考えられる。

h/gT^2 が及ぼす効果については、a-1) で既述したよ

うに、K.C. 数の減少に伴う C_{DX} の減少の割合が、規則波の場合と同様、 h/gT^2 の大きい方が顕著であり、同じ K.C. 数の値に対しては、 h/gT^2 の大きい方が C_{DX} は小さくなる。また、 C_{DX} に及ぼす d/h の影響については、 C_{MX} の場合ほど明瞭ではないが、 d/h の小さい方が C_{DX} は小さくなる傾向がある。すなわち、規則波の抗力係数に対して著者らが指摘したように¹⁾、球体周りの水粒子の運動の軌跡が円に近くなる方が C_{DX} は小さくなる。

図一7, 8 には、規則波に対する抗力係数の値も示されている。二成分波の C_{DX} と規則波の値を比較すると、図一7, 8 からわかるように、二成分波の値は規則波の値に比べて多少大きくなっていることが認められた。球体周りの流況の可視化の結果によると二成分波の流況は規則波のものとは基本的にはよく似ているが、波一周期内の時間変化に差のあることが確かめられた。本実験では、球体周りの流況は回転パターン¹⁾のみが観測されているが、規則波の場合は、この回転パターンの流況は、流れの方向は変化するものの波一周期内の流況の本質的な時間変化はほとんどなく、安定した状態が保たれる¹⁾。これに対して、二成分波の場合は渦糸の大きさ、あるいは、剥離域の大きさなどがその回転とともに変化することが確かめられた。すなわち、二成分波の波別解析波と同じ波高、周期をもつ規則波であっても、抗力の発生機構である剥離による圧力の非対称性、球表面での摩擦力に差があることになる。この差が波力係数の差に現われたものと考えられる。

b) C_{DZ} (鉛直方向の抗力係数)

紙面の都合上、本論では図示できないが、K.C. 数の値に伴う C_{DZ} の変化の全体的な傾向、および他の支配無次元量の影響は、 C_{DX} とよく似ていることが確かめられた。しかし、 C_{DZ} の方が C_{DX} よりも若干値が小さくなるようである。これには、 F_x と F_z に含まれる揚力の差が原因の1つとして挙げられる。

ところで、不規則波の抗力係数 C_{DX} , C_{DZ} は、非常にばらつきが大きいことが報告されている²⁾が、二成分波に対する結果から推論すると、波の時系列特性の及ぼす影響が不規則波の場合は波別解析波ごとに異なるため、抗力係数が大きくばらつくものと考えられる。不規則波の慣性力係数 C_{MX} , C_{MZ} も抗力係数ほどではないが、やはりばらつきは大きい²⁾。これに対しても抗力係数と同様のことが指摘できよう。

(3) 無次元最大波力の特性

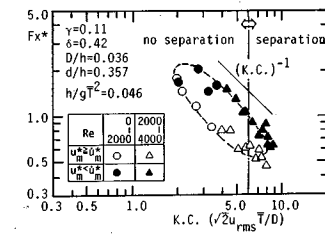
a) F_x^* (波進行方向の無次元最大波力)

規則波の最大波力は、流れの剥離がない場合は波高に比例し、剥離が起ると波高の2乗に比例するようになることが著者らによって明らかにされている¹⁾。二成分

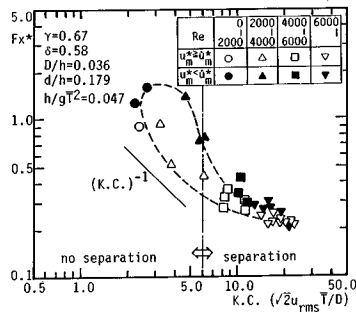
波に対する無次元最大波力と K.C. 数の関係の例を図一9(a), (b) に示す。なお、本研究では、無次元最大波力の表示法は、Morison 式の抗力項との関連も考慮して x 方向については、 $F_{xm}/\rho(u\sqrt{u^2+w^2})_m D^2$ (以下、 F_x^* と略記する)、 z 方向については、 $F_{zm}/\rho(w\sqrt{u^2+w^2})_m D^2$ (以下、 F_z^* と略記する) とした¹⁾。二成分波の無次元最大波力も規則波の値と同様に、剥離のない範囲では K.C. 数の増加に伴い減少し、その減少の傾きは-1に非常に近いこと、また、剥離がある範囲では一定値に近づく傾向が認められた(図一9参照)。

図一9にも示されるように、K.C. 数が小さく剥離がない範囲では、 F_x^* は、慣性力係数の場合と同様に、その分布形状はループ状になり、波高増大過程と波高減少過程では値が大きく異なることがわかる。また、 γ の小さい方が、波高増大過程と波高減少過程の値の差が大きくなる傾向が認められた。しかし、 F_x^* は波高増大過程の値の方が波高減少過程の値よりも小さくなる傾向があり、慣性力係数と逆の結果となり、一見奇異にみえる。これは次の理由による。

規則波の場合は、流速、加速度ともに、その振幅は時間的に変化しないが、二成分波の場合はそれぞれの振幅は時間的に変化する。K.C. 数が小さく慣性力が支配的な場合は、図一1にも示されるように、波力の位相は加速度の位相に近い。しかし、波力の最大値を無次元化するのには、加速度よりも位相が遅れた流速である。波高増大過程では、流速の振幅は時間の進行とともに増大するため、波力を無次元化する流速の値は、波力が最大にな



(a) 慣性力が卓越する場合



(b) 抗力が卓越する場合

図一9 F_x^* と K.C. 数の関係

る瞬間の振幅よりも大きくなる。逆に、波高減少過程では、流速の振幅は減少するため、波力が最大になる瞬間の振幅よりも小さくなる。したがって、波高増大過程の無次元最大波力は小さくなり、また、波高減少過程の無次元最大波力は大きくなる。抗力が卓越し、波力の位相と波力を無次元化する流速の位相が近くなると、無次元最大波力が、波高増大過程で小さくなり、波高減少過程で大きくなることはなく、一定値に近づく。以上の結果より、無次元最大波力の特徴を議論するうえで、波の時系列の影響を考慮する必要のあることが指摘できる。

b) F_x^* (鉛直方向の無次元最大波力)

図-10は、K.C. 数が小さく慣性力が卓越する場合の z 方向の無次元最大波力と K.C. 数の関係の一例を示したものである。 z 方向の無次元最大波力 F_x^* についても、慣性力が卓越する場合には、波高増大過程の値は波高減少過程の値よりも小さく、ループ状の分布をすること、また、本論では図示していないが、K.C. 数が大きくなり、抗力が卓越するようになると、無次元最大波力は一定値に近づくなど、 x 方向の無次元最大波力 F_x^* と同様の傾向が認められた。

なお、最大波力の絶対値は、波の周期が短く、深海波に近い場合は、 $F_{x_{max}}$ と $F_{z_{max}}$ の値はほとんど同じであるが、波の周期が長くなるに従って、 $F_{z_{max}}$ は $F_{x_{max}}$ に比べて小さくなることを付記しておく。

(4) 波力の予測

波別解析波ごとに波力の時間波形を計算し、それを連続的につなぐことにより、1つの波の時系列記録に対する波力の時間波形の計算は可能である。しかし、この手法によると計算時間は長くなるため、すべての波別解析波で波力係数を一定として計算できる方が便利である。

次に、3.(2)で記述した(ii)の手法によって得られた波力係数を使って計算された波力と実測波力の時間波形を比較した一例を図-11に示す。同図からも認められるように、計算値は実測値と概略等しいが、波力の極大値、極小値に着目すると、計算波力と実測波力の間で若干差が認められ、大きい場合で20%程度にもなり、無視できない大きさとなる。これは、波別解析波ごとに異なる波力係数を1つの値で代表させたためであり、波

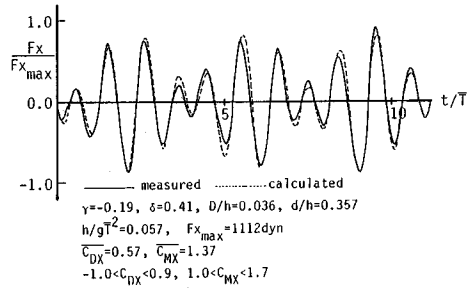


図-11 計算波力と実測波力の時間波形の比較 (F_x の場合)

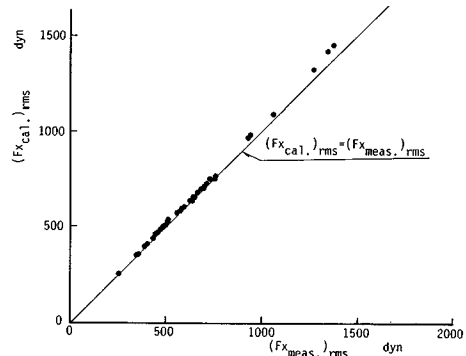


図-12 計算波力と実測波力の rms 値の比較
($(F_{x_{cal}})_{rms}$ は x 方向の計算波力の rms 値、
($F_{x_{meas}})_{rms}$ は x 方向の実測波力の rms 値)

高増大過程と波高減少過程で値が異なる波別解析波の波力係数を1つの値で代表させることの困難さを示している。したがって、二成分波の波力の時間波形を正確に算定するためには、計算量は多くなるが波別解析法を使う必要があることが指摘できる。しかし、波力係数をすべての波別解析波で一定として計算された波力については、rms 値に代表されるような、平均的な値は、図-12に示されるように、精度良く予測することが可能である。

(ii)の手法で計算した波力係数を、波別解析波の波力係数と比較すると、慣性力係数の値は、波高増大過程と波高減少過程の値のほぼ平均値であることが認められた。また、抗力係数については、図-7(b)に示されるように、抗力が卓越し、抗力係数がほぼ一定値となる K.C. 数が大きい波に対しては、慣性力係数と同様に、波高増大過程と波高減少過程のほぼ平均的な値になるが、図-7(a)に示されるように、慣性力が支配的な波で、抗力係数が、K.C. 数とともに変化するような場合は、1つの波の時系列の中でも、抗力の割合が大きくなる K.C. 数が大きい範囲の抗力係数の平均値に近いことが認められた。

また、規則波の波力係数の値との関係については、次

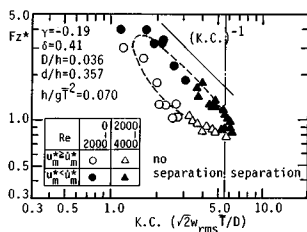


図-10 F_x^* と K.C. 数の関係

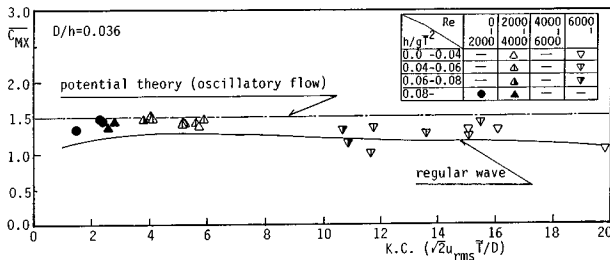


図-13 $\overline{C_{Mx}}$ と K.C. 数の関係

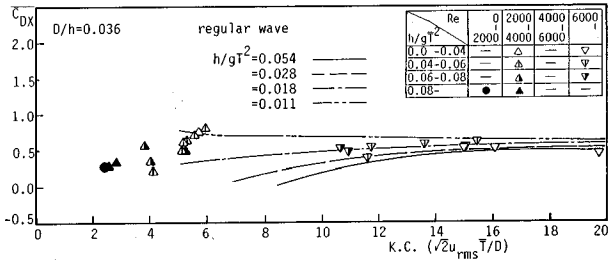


図-14 $\overline{C_{Dx}}$ と K.C. 数の関係

のような結果が得られた。慣性力係数 $\overline{C_{Mx}}$ は、図-13に示すように、K.C. 数が6以下の範囲で若干二成分波の値の方が規則波の値よりも大きいものの、全体的には規則波の値とほぼ同じ値になる。また、抗力係数 $\overline{C_{Dx}}$ は、図-14に示すように、K.C. 数が5~6以下の範囲で二成分波と規則波の値の差が若干大きい、K.C. 数が10以上の範囲では、両者はほぼ等しいとみなすことができる。K.C. 数が5以下の範囲では、慣性力が支配的であるため、作用波力を慣性力のみとしてもかなり精度良く表現し得る。したがって、実際の波力の計算においては、規則波の波力係数の値を使うことにより、二成分波の波力の rms 値といった平均的な値を予測することは可能である。本論では、紙面の都合上、x 方向波力に対する値のみを示したが、z 方向波力についても同様に、規則波に対する波力係数を使うことにより、波力の rms 値は精度良く計算できることが確認できた。

5. 結 論

本論で得られた結果を以下に要約する。

(1) 波高が増大する過程(波高増大過程)の波の慣性力係数は、波高が減少する過程(波高減少過程)の波の値に比べて大きくなり、同じ K.C. 数の値に対して、2つの値をとる。

(2) 波高増大過程と波高減少過程の慣性力係数の差

は、相関係数 γ の小さい方が大きくなり、また、変動係数 δ の大きい方が大きくなる傾向がある。

(3) 抗力係数は、剥離のある範囲ではほぼ一定値となるが、剥離のない範囲では K.C. 数の値によって変化し、規則波の場合と同様に、 h/gT^2 の大きい方が値は小さくなる。

(4) 抗力係数は、剥離のある範囲では、波高減少過程の波の値の方が大きく、また、剥離のない範囲では、波高増大過程の波の値の方が小さくなる傾向がある。

(5) 波力の最大値は、慣性力が卓越する場合は、波高増大過程の方が波高減少過程の波の値よりも大きくなる。しかし、流速の2乗で無次元表示すると、波高増大過程の無次元最大波力は、波高減少過程の値よりも小さくなる。

(6) 二成分波の波力の rms 値などの平均量は、波力係数をすべての波で一定であると仮定し、規則波に対する波力係数を使えば、精度良く算定できる。しかし、波力の時間波形を正

確に計算するためには波別解析法を使う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 岩田好一郎・水谷法美：没水球体に作用する波力の特性に関する研究，土木学会論文集，第405号/II-11，pp.215~224，1989.
- 2) Iwata, K., Mizutani, N. and Kasai, S. : Irregular wave forces acting on a submerged sphere, Coastal Eng. Japan, Vol. 30, No.1, pp.117~130, 1987.
- 3) Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. and Schaaf, S.A. : The force exerted by surface wave on piles, Tech. Pub. No.284, Petroleum Trans., AIME, Vol. 189, pp.149~154, 1950.
- 4) Keulegan, G.H. and Carpenter, L.H. : Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid, J. Res. Nat. Bur. Stand., Vol. 60, No.5, pp.423~440, 1958.
- 5) 河野二夫：球形物体の波による鉛直方向の流体力一重複波一，琉球大学理工学部紀要，pp.37~46, 1974.
- 6) 石田 啓・田村賢一：非剥離流および対称渦対状態における波動場の円柱の抗力係数，土木学会論文集，第393号/II-9，pp.121~130, 1988.
- 7) 岩垣雄一・樺木 亨：海岸工学，共立出版，463p., 1979.
- 8) 岩垣雄一・石田 啓：波動により円柱上に発達する3次元境界層について，第21回海岸工学講演会論文集，pp.1~6, 1974.

(1988.10.20・受付)