

波と流れの共存場に置かれた円柱に作用する流体力

岩 垣 雄 一*・ 浅 野 敏 之**・ 永 井 文 博***

1. 緒 言

円柱に働く波力の特性を解明することは、海岸工学あるいは海洋工学における重要な研究課題の一つであり、各種の問題について数多くの研究が行われている。最近、Sarpkaya と Isaacson¹⁾ は現在までのこの方面の研究結果を集成・体系化した書物を著わしている。しかし、その中でも述べられているが、波浪と流れが共存する場合の円柱に働く流体力特性を調べた研究は、その工学的重要性に比して非常に少ない。Verley と Moe²⁾ は定常流中に円柱を正弦振動させて、その減衰係数から共存場における抗力係数・慣性係数を求めている。また堀川・水口ら^{3),4)} は波動場で円柱を一定速度で曳行することにより、あるいは波と流れを同時に水槽内に発生させることにより、共存場での流体力特性を調べている。しかしながら今までのところ、共存場に置かれた円柱に作用する流体力特性を、円柱周辺の流況特性を調べることにより、その発生機構から解明しようとした研究はないように思われる。

本研究では、波と流れの共存場での流体力発生機構が、波動単独の場合と本質的に異なるのは、円柱に対する水粒子運動の非対称性によるものであると考えた。すなわち、波動場では有限振幅性を無視すれば、水粒子の運動が円柱に対して対称となるのに対して、共存場では流れが加わるので非対称となり、その結果、後流渦の発生・発達・離脱および流下の様子も異なって、共存場に特有な流体力が発生するものと考えられる。以上の見地から本研究では、まず共存場における円柱周辺の流況特性を理解するために可視化実験を行った。次いで直方方向の特性を、流れをとり入れたモリソン式中の抗力係数 C_D 、慣性係数 C_M を通じて評価し、後流渦の流況と照合して流体力発生機構の検討を行った。

2. 共存場に置かれた円柱周辺の流況

(1) 流況の可視化実験の概要

実験はすべて循環流発生装置の付いた造波水槽で行い、水深は 30 cm で一定とした。用いた円柱は直径 30 mm と 60 mm の 2 種類の直円柱であり、波は主として周波数 0.5 Hz で、波高が 1.1~3.5 cm の範囲のものを、流れはすべて逆流で流速を 0~13.9 cm/sec とし、全 27 ケースの実験を行った。円柱周辺の流況は、アルミニウム粉を水面に散布し、その流跡をモータードライプ付カメラで 1 秒間に 3 コマの割合で撮影することにより可視化した。容量式波高計を円柱と同位置に設置し、フィルムのコマ送りと水位変動との同期を行った。

(2) 波動場における後流渦パターンの分類

共存場における後流渦パターンを述べる前に、波動場における従来の知見を整理しておく。表-1 は岩垣・石田⁵⁾、樫木・中村⁶⁾、沢本・菊地⁷⁾ の結果を整理したものである。沢本らの実験は、重複波の節におかれた水平円柱を用いたものであり、前二者の進行波中に直円柱を設置した場合と多少状況異なる。岩垣・石田は $K.C.$ 数他に Re 数についても考察しており、また渦特性の把握方には三者の間に多少の違いがあるが、本質的な相違

表-1 波動場における円柱周辺の後流渦パターン

渦パターン	摘 要	樫木・中村 ⁶⁾	岩垣・石田 ⁵⁾	沢本・菊地 ⁷⁾
V-1	集中渦の発生なし	$K.C. < 3$	$K.C. < 2$ 剥離なし 集中渦なし	$K.C. = 2.9$
			$2 < K.C. < 5$, $Re > 2000$ 剥離あり 集中渦なし	剥離あり 集中渦なし
V-2	1 対 対 称 の 渦	$3 < K.C. < 8$	$2 < K.C. < 7.5$	$4 < K.C. < 5$ $5 < K.C. < 8$ 対称性くずれやすい
V-3	1 対 対 称 の 渦	$8 < K.C. < 13$	$7.5 < K.C. < 15$ $15 < K.C. < 19$ 非対称性強	$8 < K.C. < 16$
V-4	第 3 の 渦 の 発 生	$13 < K.C. < 20$ 非対称性弱 $20 < K.C. < 26$ 非対称性強	$19 < K.C.$	$16 < K.C. < 22$
V-5	カルマン渦に近い	$26 < K.C.$	カルマン渦に近い	$22 < K.C. < 30$ 第 3 の 渦 も 離 脱
				$30 < K.C.$ カルマン渦に近い

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 大阪府役所土木局土木部河川課

には至らないと考えられる。

(3) 実験結果および考察

流れが後流渦の特性に及ぼす効果を明らかにするために、同じ円柱径で波の周期波高がほとんど同じで、流れの流速のみが異なる実験ケースについて円柱周辺の流況を比較した。図-1は波のみによる表面 $K.C.$ 数 $K.C.s$

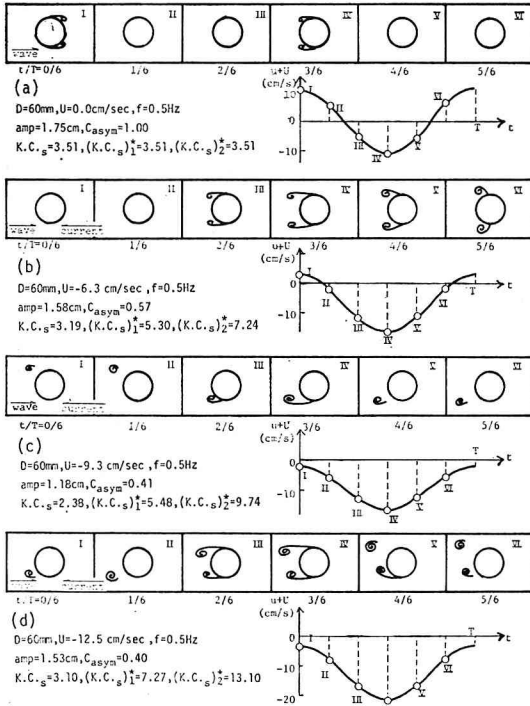


図-1 流れによる後流渦パターンの変化

が3付近で、流れの流速が異なる4つのケースの結果である。ここで $K.C.s$ は波による水粒子速度の静水面での最大値 $u_{m.s}$ と、波の周期 T 、円柱径 D とから次式で定義される。

$$K.C.s = u_{m.s} T / D \quad \dots\dots\dots (1)$$

$u_{m.s}$ は流れを深さ方向に一樣とした時の、流れを考慮した微小振幅波理論から算出する。また図中に示した $(K.C.s)_1$ および $(K.C.s)_2$ は、波と流れの方向が一致する谷位相時の合速度を用い、共存場における新たな $K.C.$ 数として提案したもので、これについては後述する。(添字 s は水面での水粒子速度を用いることを示す。) 図-1において、波の伝播方向は左から右で、流れの方向は右から左である。図-1 (a) は波のみの場合で、渦は円柱に接触したままで離脱しない。これは表-1の分類では V-1 のパターンに相当する。図-1 (b) は波に流速 $U = 6.3 \text{ cm/sec}$ の流れが重なった場合であり、水粒子速度が大きくなり始める位相 III で対称渦が発生し、時間の経過とともに発達・減衰・消滅する。谷位相を中心とする位相領域では、表-1の V-2 の対称渦パターンに相当

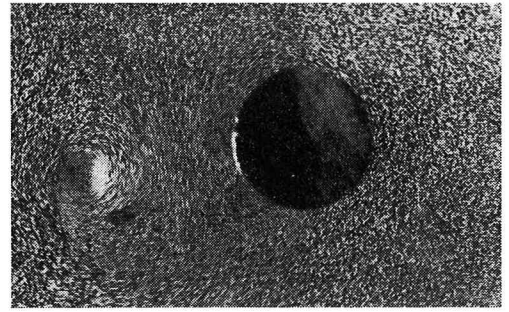


写真-1 流況写真(図-1 (c), $t/T=4/6$ における流況)

し、 $(K.C.s)_1$ 、 $(K.C.s)_2$ の値はどちらも V-2 のパターンを示す $K.C.$ 数の範囲内であることがわかる。図-1 (c) は (b) より大きな逆流が重なった場合で、水粒子の動きは全位相を通じて一方である。渦は1周期中に1個発生し、次の1周期では前と反対側から1個渦が発生する。これは波動のみの場合の後流渦パターンに対応するものではなく、共存場に特有の渦発生パターンと考えられる。図-1 (d) はさらに流速が大きくなった場合で、非対称な渦対が発生している。これは表-1の V-3 に相当し、 $(K.C.s)_1$ 、 $(K.C.s)_2$ の値も V-3 の範囲内であることがわかる。

図-1 およびここで示さなかった可視化実験の結果から以下のことが明らかになった。

流れと波の方向が一致し合速度が最も大きくなる谷位相付近で発生した渦が、全位相を通じての後流渦パターンを代表する。これと $(K.C.s)_1$ や $(K.C.s)_2$ との関係は、(c) の場合を除き、従来の波動のみの場合の後流渦パターンと $K.C.$ 数との関係に一致する。 $(K.C.s)_1$ と $(K.C.s)_2$ のどちらが共存場の渦特性を良く表現できるかについては、実験ケースが限られているので十分明確ではないが、次節に示すように流体力係数の記述では $(K.C.s)_2$ の方が良いパラメーターであることがわかった。一方、峰位相においては合速度が最も小さくなるので、谷位相で発生した渦が流下する影響が大きく、峰位相時の合速度から渦特性を説明することはできない。

このような後流渦の特性は、円柱に作用する直方向力のみでなく揚力の特性をも支配する。図-1 (c) は波動場にはない渦発生パターンを示すものであるが、これは特に揚力の変動周波数と波動周波数の関係に共存場特有の性質を与えるものである⁹⁾。

3. 円柱に作用する直方向力の特性

(1) 実験方法

実験装置は可視化実験とほぼ同じで、用いた円柱は直径 30 mm と 60 mm の直円柱であり、 $K.C.$ 数の大きいデーターを得るために直径 20 mm の直円柱を用いた実験を一部付け加えた。流れはすべて逆流で、流速は 0~

27.1 cm/sec, 波は周波数が 0.5 Hz~1.6 Hz, 波高が最大 21.0 cm の範囲で, 波動場で 80 ケース, 共存場で 104 ケース行った。水深は 40 cm で一定である。直円柱は片持ちばり型式で支持されており, これに作用する流体力のモーメントを 2 ゲージ法で測定した。

(2) 解析方法

円柱に作用する流体力は, 流れを考慮したモリソン式により次のように表わされる。

$$dF(z) = \frac{\rho}{2} C_D (u(z) + U(z)) |u(z) + U(z)| D dz + \frac{\rho \pi}{4} C_M D^2 \frac{\partial u(z)}{\partial t} dz \quad (2)$$

ここに dF は鉛直距離 dz に働く水平流体力, ρ は流体の密度, C_D , C_M はそれぞれ抗力係数, 慣性係数である。波による水粒子速度 $u(z)$ は流れを考慮した微小振幅波理論により与えられるものと仮定し, また流れの流速 $U(z)$ は水深方向に一様であるとする。流体力のモーメントはひずみゲージまでの縦距を考慮して水底から水面 $\eta(t)$ まで積分すれば計算できる。

C_D , C_M の算出方法として最初に用いたのは, 抗力または慣性力が 0 となる特定の位相から, 慣性係数あるいは抗力係数の値を求める方法である。しかしこの方法を共存場に用いると, 波と流れの構成比によっては, 算出すべき位相における水粒子速度や加速度が 0 に近づくため, 値の信頼度が低下する場合がある。また流れが大きくなると, すべての位相で合速度が 0 とならず, C_M が算出できなくなる⁹⁾。以下の点から共存場ではこの方法は, 波と流れの方向が一致し合速度が最も大きくなる谷位相で C_D を算出する時のみ適用することにする。こうして求めた C_D を, 谷位相の意味で $(C_D)_{tr}$ と表示する。

C_D , C_M を算出する第 2 の方法は, Reid¹⁰⁾ が提示した方法で, 水位変動 η から水粒子速度 u と加速度 $\dot{u}$ を計算し, 計算流体力が実測流体力と最も一致するように最小 2 乗法を用いて算出するものである。ここで η から u を計算する際には, 流れを考慮した周波数応答関数を用いる。この方法で算出した流体力係数は, best fit の意味で $(C_D)_{b.f.}$, $(C_M)_{b.f.}$ と表示する。

(3) 流体力係数を記述するパラメーター

流体力係数を支配するパラメーターとしては, 従来の研究では特に $K.C.$ 数と Re 数がとりあげられているが, 本研究における Re 数の範囲は $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ であり, この範囲では C_D , C_M の Re 数による変化が小さいことが報告されている¹¹⁾。したがって本研究では, $K.C.$ 数による流体力係数の変化についてのみ考察する。

波と流れが共存する時の $K.C.$ 数として, 次の 2 つを提案する。2. で示したように円柱周辺の後流渦の流況は, 合速度が最大となる谷位相付近の水粒子運動によ

て支配される。谷位相での水粒子の合速度から考えられる共存場の $K.C.$ 数として, まず

$$(K.C.)_1^* = (u_m + |U|)T/D \quad (3)$$

を定義した。

一般に $K.C.$ 数は円柱の片側方向への水粒子の移動距離 s と円柱径 D との比により,

$$K.C. = \pi s/D \quad (4)$$

と表わされるが, これを共存場に拡張し第 2 の $K.C.$ 数として次式を定義した。

$|U| \leq u_m$ の場合:

$$(K.C.)_2^* = 2\pi \int_{t^*}^{T/2} |U + u_m \cos \sigma t| dt/D \quad (5)$$

ただし t^* は水粒子速度が 0 になる時間で

$$t^* = \cos^{-1}(-U/u_m)/\sigma \quad (6)$$

$|U| > u_m$ の場合:

$$(K.C.)_3^* = \pi UT/D \quad (7)$$

一方, 波と流れの構成比を表現するものとして次のパラメーターを導入した。

$$C_{asym} = u_m/(u_m + |U|) \quad (8)$$

このパラメーターは波のみの場合には 1 となり, 流れの流速が大きくなるにつれて 0 に近づく。これはまた円柱を中心とした流況の非対称性を示すとも考えられるので, 添字 asym を付した。上述の (3), (5), (6), (8) 式における水粒子速度の最大値 u_m は, 水柱水没区間にわたり深さ方向に二乗平均して平方根をとった値を用いることにする。

次に流体力を形成する抗力と慣性力の割合を考察する。全位相を通じた抗力・慣性力の最大値 $dF_{D \max}$ と $dF_{M \max}$ は式 (2) により, それぞれ次式で表わされる。

$$dF_{D \max} = (1/2)\rho C_D D (u_m + |U|)^2 dz \quad (9)$$

$$dF_{M \max} = (1/2)\rho \pi^2 C_M D^2 (u_m/T) dz \quad (10)$$

したがって両者の比は

$$\begin{aligned} \frac{dF_{D \max}}{dF_{M \max}} &= \frac{C_D}{C_M} \left(\frac{u_m T}{D} \right) \left/ \pi^2 \left(\frac{u_m}{u_m + |U|} \right)^2 \right. \\ &= \frac{C_D}{C_M} (K.C.) / (\pi^2 C_{asym}^2) \quad (11) \end{aligned}$$

となる。 C_D , C_M は一

般に $K.C.$ 数や C_{asym} によって変化するが,

これらに無関係に C_M

$= 2$, $C_D = 1$ と置き,

$dF_{D \max}/dF_{M \max} = 1$

とすれば, 図-2 に示

すように抗力と慣性力の卓越領域が $K.C.$ 数と C_{asym} で区分される。

(4) 実験結果および考察

まず波と流れの共存場の特別の場合として, 波動のみの場合の C_D , C_M を特定の位相から算出したところ,

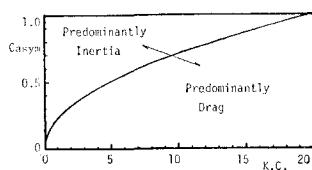


図-2 抗力と慣性力の卓越領域の区分

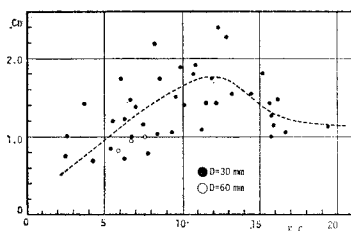


図-3 抗力係数 C_D の実験結果 (波動のみ)

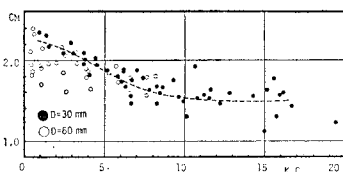


図-4 慣性係数 C_M の実験結果 (波動のみ)

図-3, 図-4 に示すような従来の知見と一致する結果を得た。

次に共存場において、波の谷位相から算出した抗力係数 $(C_D)_{tr}$ の結果を示す。図-5 は $(C_D)_{tr}$ と波の水粒子速度のみから算出した $K.C.$ 数との関係を示したもので、 $K.C.$ 数のみでは $(C_D)_{tr}$ の特性を表わすことができず、 C_{asym} で分類するとその傾向が明らかになることがわかる。図より C_{asym} が大きくなるにしたがって、実験値の平均曲線のピークは $K.C.$ 数が大きくなる方向に移動する。この実験結果を共存場の $K.C.$ 数として提案した $(K.C.)_2^*$, $(K.C.)_1^*$ で整理したものが図-6, 図-7 である。図-5 では 2 つのパラメーターを用いなければ、 $(C_D)_{tr}$ の特性が明らかにできないのに対し、図-6, 図-7 では 1 つのパラメーターで記述できることがわかる。また $(K.C.)_1^*$ を用いた図-6 より $(K.C.)_2^*$ を用いた図-7 の方がばらつきが少なく、 $K.C.$ 数の物理的意味から言っても $(K.C.)_2^*$ の方が適切なパラメーターと考えられ

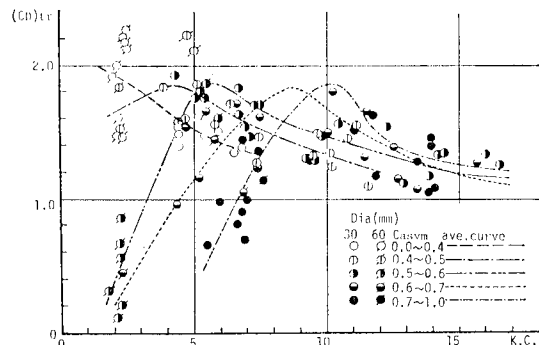


図-5 谷位相から求めた抗力係数 $(C_D)_{tr}$ と $K.C.$ 数との関係 (共存場)

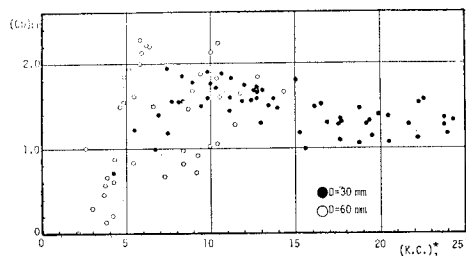


図-6 谷位相から求めた抗力係数 $(C_D)_{tr}$ と $(K.C.)_1^*$ の関係 (共存場)

る。

次に、実測値に全位相を通じて最も良く一致するような流体力係数を最小 2 乗法により算出した結果について述べる。上記のように $(K.C.)_2^*$ が最も適切なパラメーターであることが明らかになったので、 $(C_D)_{b,r}$ および $(C_M)_{b,r}$ を $(K.C.)_2^*$ で整理してみた。その結果を、それぞれ図-8, 図-9 に示す。図-7 と図-8 を比較すると算出法による差異はほとんどないことがわかる。

図-7~図-9 に示された共存場の流体力係数の平均的特性は、図-3, 図-4 の波動場の結果と良く一致することが注目される。谷位相での流況を表わす $(K.C.)_2^*$ で C_D , C_M の特性が整理できるのは、2. で述べたようにこの時の後流渦の流況が全位相を通じての流況を支配するためである。そして C_D , C_M の特性は、従来の波動場で定見となっている物理的説明がそのまま適用できる。すなわち、 $(K.C.)_2^*$ が 12~15 付近で C_D が最大となるの

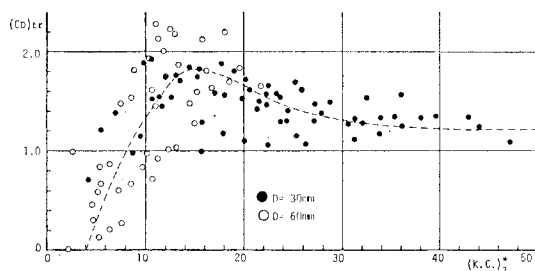


図-7 谷位相から求めた抗力係数 $(C_D)_{tr}$ と $(K.C.)_2^*$ の関係 (共存場)

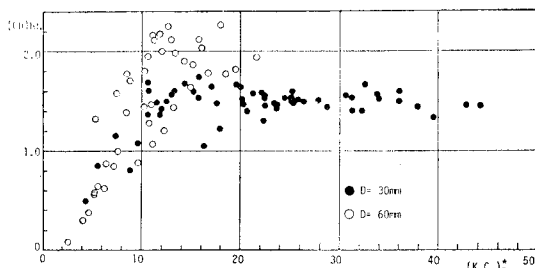


図-8 全位相に最適化する抗力係数 $(C_D)_{b,r}$ と $(K.C.)_2^*$ の関係 (共存場)

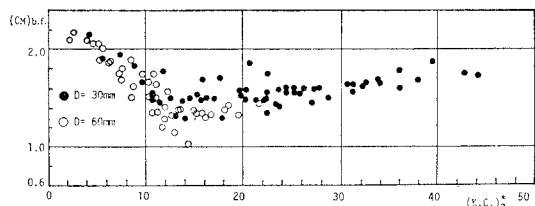


図-9 全位相に最適化する慣性係数 $(C_M)_{b,r}$ と $(K.C.)_2^*$ の関係 (共存場)

は、この時の後流渦が非対称になって、大きく強い渦が形成されるためであり、 $(K.C.)^*$ が非常に大きくなると、 C_D が 1.2 程度に漸近するのは、流況が定常流に近づくためである。一方、 C_M については、 $(K.C.)^*$ が小さい領域で 2 付近の値をとるのは、粘性の効果が小さく、ポテンシャル流に近い状態であることを示し、また C_D が最大となる $(K.C.)^*$ の領域で C_M が逆に最小となるのは、後流渦が円柱周辺に残存することにより、モリソン式での取扱いでは見かけ上慣性力が小さくなるためであろうと思われる。

さらに二、三の検討結果について述べる。これまでは C_D , C_M は位相を通じて一定と考えたが、共存場では円柱に対して流況が非対称となることから、波と流れが同方向となる谷位相を中心とする位相区間と、逆方向となる峰位相を中心とする位相区間に分けて、それぞれの区間で最も実測値と一致する流体力係数を求めた。谷位相を中心とした場合には、当然のことながら、図-8、図-9 の結果とほとんど変わらない。峰位相を中心とする区間で $(C_D)_{b.f.}$, $(C_M)_{b.f.}$ を計算した結果が図-10、図-11

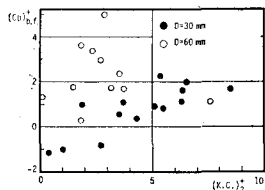


図-10 合速度が正の位相区間で最適化する抗力係数 $(C_D)_{b.f.}$ と $(K.C.)^*_{b.f.}$ の関係 (共存場)

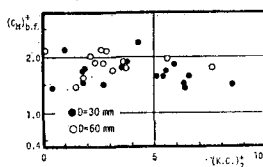


図-11 合速度が正の位相区間で最適化する慣性係数 $(C_M)_{b.f.}$ と $(K.C.)^*_{b.f.}$ の関係 (共存場)

である。ここで $(K.C.)^*_{b.f.}$ は、峰位相を中心とした水粒子運動から、式 (5), (6) で示した考え方で算出されるものである。図より C_D の結果に特にばらつきが見られ、峰位相を中心とした区間での流体力係数は、その時の流況を考慮した $K.C.$ 数を用いても整理できない。これは峰位相では谷位相時に発生した渦の影響が大きく、峰位相の水粒子運動に対応した渦が形成されないためである。

また共存場における加速度として、 $\partial u / \partial t$ に移流慣性項の $U \cdot \partial u / \partial x$ を加えた場合の流体力係数に及ぼす効果を検討したところ、 C_D にはほとんど値の変化はなく、 C_M は逆流の流速 U が增大するにつれて大きくなり、最大 1.3 倍程度の値となった。しかしこの場合には抗力項が慣性力項より十分大きく、 C_M の変化はあまり問題にならないと考えられる。

4. 結 言

以上、波と流れの共存場における円柱周辺の後流渦

の特性から、作用流体力の特性を説明することを試みた。

主要な結論は次のとおりである。

- (1) 円柱周辺の後流渦の特性は、波と流れの合速度が最大となる谷位相における流況で支配され、その渦パターンは共存場での新たな $K.C.$ 数である $(K.C.)^*$ または $(K.C.)^*_{b.f.}$ で表現できる。
- (2) 共存場における抗力係数 C_D 、慣性係数 C_M の実験結果は $(K.C.)^*_{b.f.}$ によって良く整理でき、それらの平均的特性は、波動のみの場合の C_D , C_M と $K.C.$ 数の関係に一致する。
- (3) (1)(2) より、後流渦の対称性や離脱・流下の特性と直方向流体力特性との関係は、波動場において得られた知見によって共存場でも一般的に説明できることがわかった。

最後に本研究は文部省科学研究費 (特定研究 (1) 代表者元良誠三東大教授) による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Sarpkaya, T. and M. Isaacson: Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Co., p. 651, 1981.
- 2) Verley, R. L. P. and G. Moe: The forces on a cylinder oscillating in a current, The Norwegian Institute of Technology, Report No. STF 60, A79061, p. 58, 1979.
- 3) 堀川清司・水口 優・北沢 修・柳本泰伴: 波と流れが共存する場における流体力について (1), 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 39~44, 1976.
- 4) 堀川清司・北沢 修・中井雅彦・水口 優: 波と流れが共存する場における流体力について (2), 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 347~351, 1977.
- 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 回海岸工学講演会論文集, pp. 531~537, 1975.
- 6) 樫木 亨・中村孝幸: 波動場の円柱後流渦と波力に関する研究, 愛媛大学紀要, 第 8 巻, 第 4 号, 1977.
- 7) 沢本正樹・菊池健司: 振動流中におかれた円柱に作用する揚力, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 429~433, 1979.
- 8) 浅野敏之・岩垣雄一・永井文博: 円柱に作用する揚力変動と波動との同調現象について, 第 37 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1982.
- 9) 浅野敏之・岩垣雄一・高階 宏: 波と流れの共存場における直立単円柱に作用する流体力について, 第 36 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 783~784, 1981.
- 10) Reid, R. O.: Correlation of water level variations with wave forces on a vertical pile for non-periodic waves, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 749~786, 1957.
- 11) Sarpkaya, T.: In-line and transverse forces on cylinders in oscillatory flow at high Reynolds number, Proc. of Offshore Technology Conference, Vol. 2, pp. 95~108, 1976.