

不規則波中の鉛直円柱に加わる波力 に関する実海域実験

正員 小寺山 亘* 正員 中 村 昌 彦*
丸 林 賢 次*

Ocean Wave Forces Acting on a Vertical Cylinder Fixed at Offshore Platform

by Wataru Koterayama, *Member* Masahiko Nakamura, *Member*
Kenji Marubayashi

Summary

Wave forces acting on a test cylinder fixed to an offshore platform were measured to determine the nature of the hydrodynamic force exerted on a structure in random waves. Forces were measured by two dynamometers, wave height and direction were determined using a wave height meter array, and information on the orbital velocity was collected by a three-component current meter set near the test cylinder to confirm the accuracy of the phase and amplitude of this velocity calculated from the height meter array data. The inertia coefficient (C_M) and the drag coefficient (C_D) of the test cylinder in irregular waves were obtained, and laboratory studies developed a method of data analysis. The following was found:

- (a) Constant values of C_D and C_M obtained from least square fit of the complete force time series are well ordered as a function of significant value of K_c numbers while the values determined from least squares fit on a wave-by-wave basis are widely scattered with no apparent meaningful tendency.
- (b) Ocean wave forces exerted on the cylinder are represented well by Morison's formula; the difference between the measured and predicted force by the formula is 10% and was very stable throughout the field experiments.
- (c) Transverse forces acting on the cylinder when it is fixed in irregular waves are weaker than those impacting when the cylinder is fixed in regular waves.

1. 緒 言

振動流中あるいは規則波中の円柱に加わる流体力に関する研究は、実験室内の装置を使って詳細に行われてきた^{1)~3)}。これらの結果を実海域に設置された構造物に適用する場合には、尺度影響⁴⁾・粗度影響等^{5),6)}の問題が残されている上に、実海域では波浪は短波頂不規則波であり、長波頂規則波あるいは規則的振動流に基づいて行われている実験室内の研究結果をそのまま適用することには問題があるように思える。これまで実海域の構造物に加わる波力についての解析手法は大別して2通りの方法がある。1つは

波と波力の時系列をモリソン式を仲立として比較し、抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M を求める方法であり、これには、Wiegel⁷⁾、永井等⁸⁾の研究が挙げられる。他の方法としては波と波力の得られたデータをスペクトル解析し、スペクトルベースで比較することで、 C_D 、 C_M を求めようとするものである^{9),10)}。前者の方法には不規則波中での C_D 、 C_M の値についての研究がそれほど多くなく、まだ未解決の問題が実験室レベルでも残っていることが難点である。後者の方法では、この問題に加えて解析法から生ずる誤差の算定が困難であるという問題がある。本報告では不規則波中の鉛直円柱に加わる波力の解析法について、実験室内での研究を行うことによって詳細に検討し、得られた解析法を使って時系列ベースで C_D 、 C_M を求める。また、波の入射方向に対して直角方向の力についても考察する。これらの結果を使用して、不規則波中の構造物に加わる波力の推定法を提案する。

* 九州大学応用力学研究所

2. 計測の概要

波力計測用鉛直円柱は、応用力学研究所津崎海洋災害実験所沖合い 2 km の海域に設置された海洋観測ステーションに取り付けられた。その概観図を Fig. 1 に示す。実験に使用した試験円柱は直径 0.5 m、長さ 9 m の鋼管であり、水中部の長さは平均水位の変動によって若干の変化はあるが、約 5.5 m である。試験円柱に加わる波力は、Fig. 1 に示すように円柱の上下に取り付けられた 2 分力計で計測する。また、入射波は海洋観測ステーションの 3 本の脚に取り付けた容量式波高計で計測する。さらに、円柱の近くには 3 次元電磁流速計を取り付けて、波の水粒子運動を計測した。これらのデータは、サンプリング周波数 10 Hz でサンプリングした後にテレメータで実験所へ送られる。観測は波高が設定された値以上の場合に、自動的に計測を起動するようにセットされている。Fig. 2 に観測システムのブロック図を示す。実海域実験の他に、本報告では解析法を検討するために室内実験を行った。室内実験に使用した模型の直径は 24 mm で水中部の長さは 252.5 mm であり、実海域試験用の円柱の 1/20.8 の縮尺模型である。

3. 解析方法の検討

実海域に置かれた鉛直円柱に加わる波力については実験解析上 2 つの問題点が残されている。1 つは鉛直方向に流体力が変化することであり、もう 1 つは波の不規則性である。これらの問題を室内実験を行うことによって検討する。

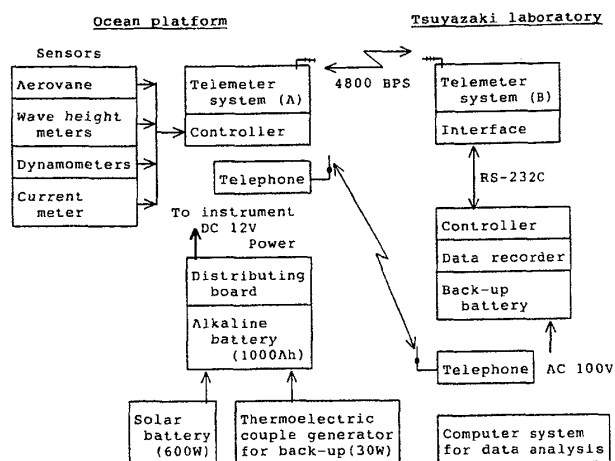


Fig. 2 Block diagram of measuring system

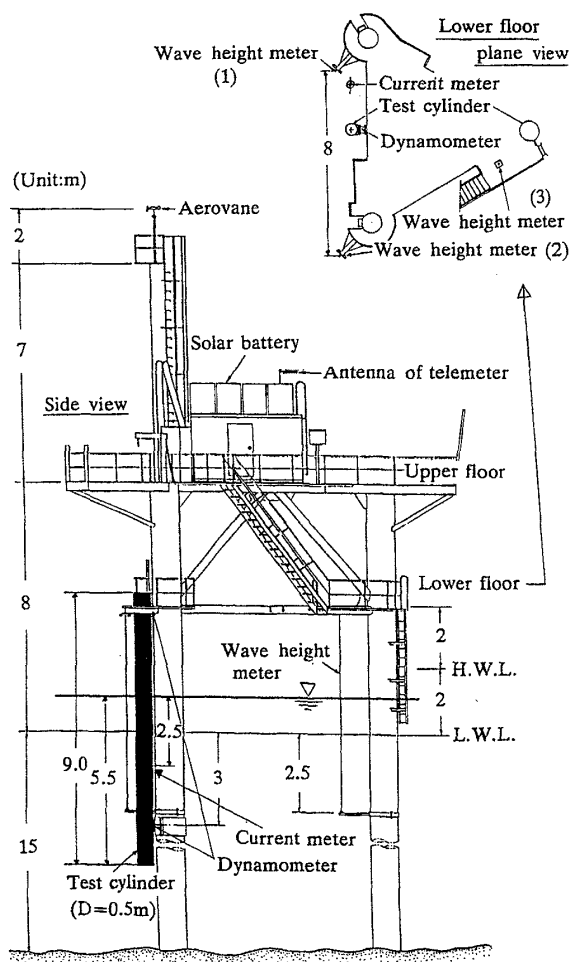
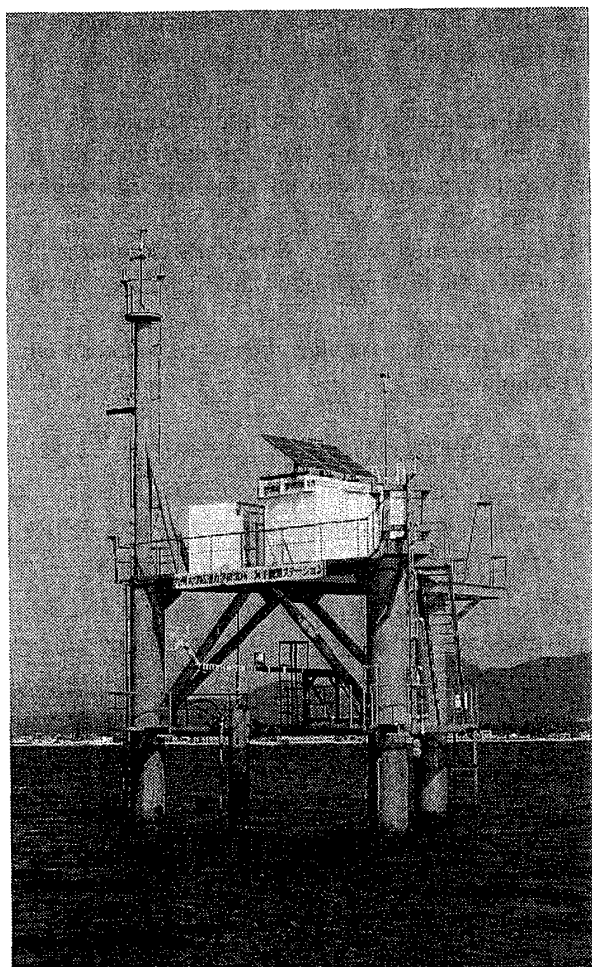


Fig. 1 A picture and schematic view of ocean platform and test cylinder for field experiment

解析の方法は以下の通りである。波の時系列を次のように表す。

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^M a_i \sin(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (1)$$

ζ は水面変位, a_i は成分波の振幅, ω_i は成分波の円振動数, ε_i は位相である。水粒子速度 $u(z, t)$, 水粒子加速度 $\dot{u}(z, t)$ は次式で求められる。

$$u(z, t) = \sum_{i=1}^M \left\{ -\frac{gk_i}{\omega_i} a_i \frac{\cosh k_i(h-z)}{\cosh k_i h} \sin(\omega_i t + \varepsilon_i) \right\} \quad (2)$$

$$\dot{u}(z, t) = \sum_{i=1}^M \left\{ -gk_i a_i \frac{\cosh k_i(h-z)}{\cosh k_i h} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \right\} \quad (3)$$

ただし,

$$gk_i \tanh(k_i h) = \omega_i^2 \quad (4)$$

ここで, g : 重力加速度, k_i : 波数, h : 水深, z : 静止水面からの距離(深さ)。波力の時系列 $F(t)$ はモリソン式を使い次式で表されるとする。

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho D \int_0^L C_D(z) u(z, t) |u(z, t)| dz + \frac{\rho \pi D^2}{4} \int_0^L C_M(z) \dot{u}(z, t) dz + F_w(t) \quad (5)$$

ただし, C_D : 抗力係数, C_M : 慣性力係数, ρ : 水の密度, D : 円柱直径, L : 円柱の水中部長さ, F_w : 造波に帰因する

力。 F_w は線形ポテンシャル理論によって求める。波高が小さい場合には他の項に比べて無視できない大きさであるが, 波高が大きくなれば無視できる。 C_D, C_M は波力の計測値の時系列 $F_{\text{exp}}(t)$ と(5)式より最小二乗法によって求められる。波浪中に置かれた鉛直円柱の場合には深さ方向に水粒子速度, 加速度が変化する。またそれに従って, C_D, C_M の値が依存する無次元数である K_c 数も変化する。従って, C_D, C_M の値も深さ方向に変化すると考える方が自然であろう。その場合近似的には2次元円柱の場合と同様に各断面位置での K_c 数(各断面位置での K_c 数の定義については後で説明する。)に依存すると考えられるが, まず C_D, C_M は深さ z によらず一定であると仮定し, 次式の Q を最小にする C_D, C_M を(7)式を用いて求める。

$$Q = \sum_{j=1}^N \left\{ F_{\text{exp}j} - F_{wj} - \frac{1}{2} \rho D C_D \int_0^L u_j(z) |u_j(z)| dz - \frac{\rho \pi D^2}{4} C_M \int_0^L \dot{u}_j(z) dz \right\}^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_D} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial C_M} = 0 \quad (7)$$

ここで, j はデータの番号, N はデータの総数である。このようにして求めた C_D, C_M が Fig. 3 である。 K_c 数は次のように定義した。まず水粒子の水平方向運動変位 ΔH を用いて時系列ベースの K_c 数を

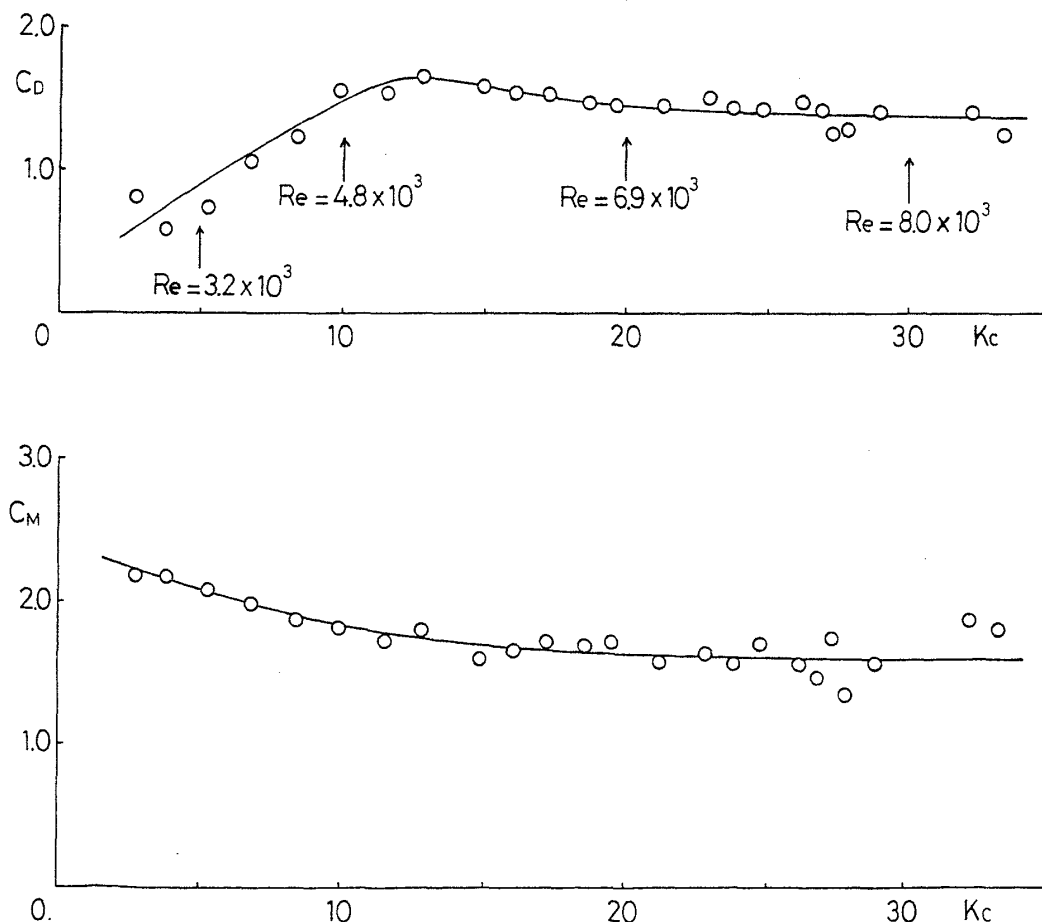


Fig. 3 Drag and inertia coefficient of laboratory model

$$K_c = \pi \Delta H / D \quad (8)$$

で計算する¹¹⁾。そして規則波中の場合は時系列全体の K_c 数の平均値を不規則波中の場合は時系列全体の K_c 数の 1/3 有義値を K_c 数と定義する。Fig. 3 は規則波中の室内実験の結果をこのように定義した静止水面上 ($z=0$) での K_c 数を横軸にとって整理したものである。

次に C_D, C_M が深さ z 方向に変化すると考える。任意深さでの K_c 数が計算できるので、深さ z での K_c 数に対する $C_D\{K_c(z)\}, C_M\{K_c(z)\}$ が、たとえばこれまでの 2 次元円柱に関する K_c 数ベースの実験結果の図から得られる。静止水面における値との比 $a(z), b(z)$ をその図から読取り、

$$\begin{aligned} C_D\{K_c(z)\} &= C_{D0} \times a(z) \\ C_M\{K_c(z)\} &= C_{M0} \times b(z) \\ (a(0) &= 1, \quad b(0) = 1) \end{aligned} \quad (9)$$

とおいて (5) 式に代入し、最小二乗法を使用することで、 C_{D0}, C_{M0} が求まる。ここで、 C_{D0}, C_{M0} は静止水面における流体力係数である。

$$\begin{aligned} Q' = \sum_{j=1}^N \left\{ F_{\text{exp},j} - F_{\text{wj}} - \frac{1}{2} \rho D C_{D0} \int_0^L a(z) u_j(z) |u_j(z)| dz \right. \\ \left. - \frac{\rho \pi D^2}{4} C_{M0} \int_0^L b(z) \dot{u}_j(z) dz \right\}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q'}{\partial C_D} = 0, \quad \frac{\partial Q'}{\partial C_M} = 0 \quad (11)$$

ここでは Fig. 3 の結果を第 1 近似と考え、各断面の $K_c(z)$ に対応する C_D, C_M を上に述べた方法で Fig. 3 から求める。この様にして求めた C_{D0}, C_{M0} を使って、さらに次の近似の C_{D0}, C_{M0} を求める。いわゆる繰り返し計算を行って求めたものが Fig. 4 の結果である。Fig. 3 の結果と比較するとそれほど差がなく、約 2 回の繰り返し計算で完全に収束した。これは実験に使用した波の波長が円柱の長さ に比べて大きいと思われる。ここで、 C_{D0}, C_{M0} は静止水面における流体力係数であるが、これらの流体力係数が K_c 数のみに依存すると仮定できるなら、 C_{D0}, C_{M0} は静止水面の K_c 数に対する値であるのみならず、任意深さでの K_c 数に対する値であると考えてよい。よって Fig. 4 の結果は各断面の $K_c(z)$ に依存する C_D, C_M であり、鉛直円柱に加わる波力はこれらを (5) 式に代入することで求められる。Fig. 4 の結果はレイノルズ数を実験を通して一定としていないので、他の実験結果と正確には比較できないが、Sarpkaya¹¹⁾ の実験等と比較して、ほぼ妥当な値を与えている。以上の解析方法は不規則波中での実験解析を前提としたものであり、従来行われている規則波中の解析手法とは

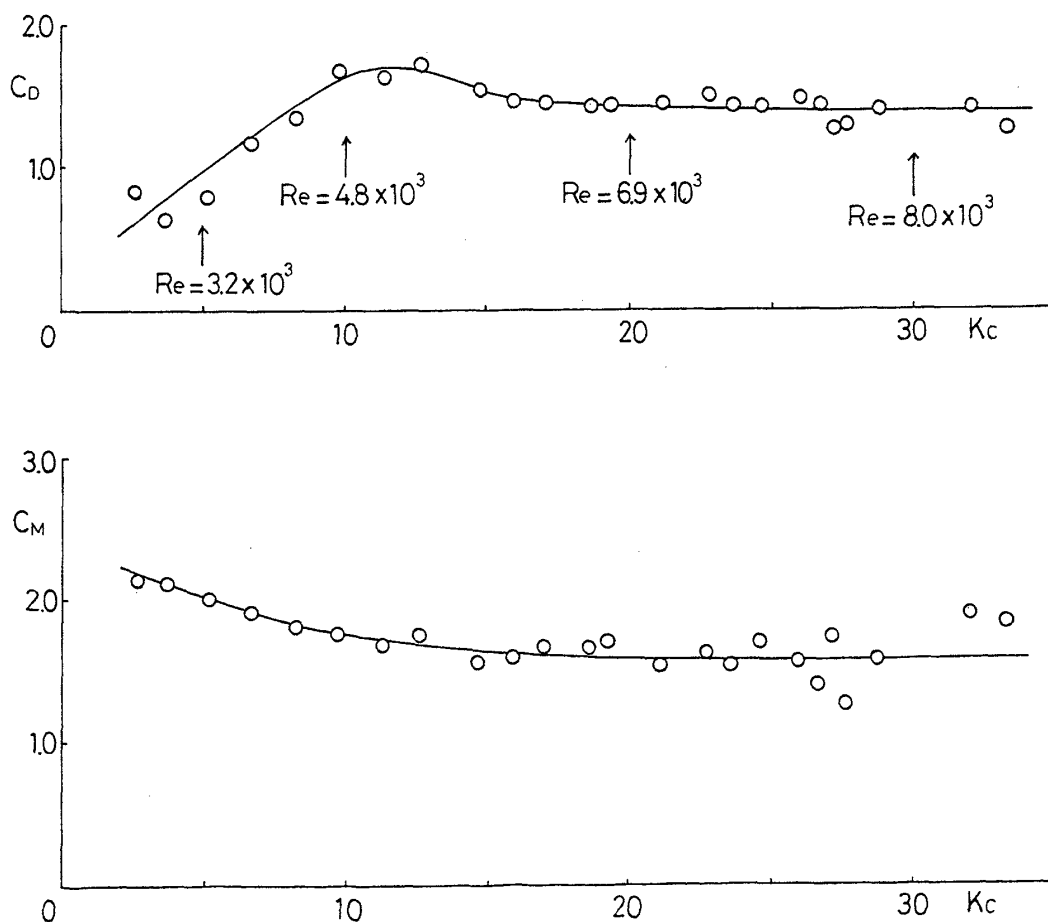


Fig. 4 Drag and inertia coefficient of laboratory model modified considering the vertical variation of K_c number

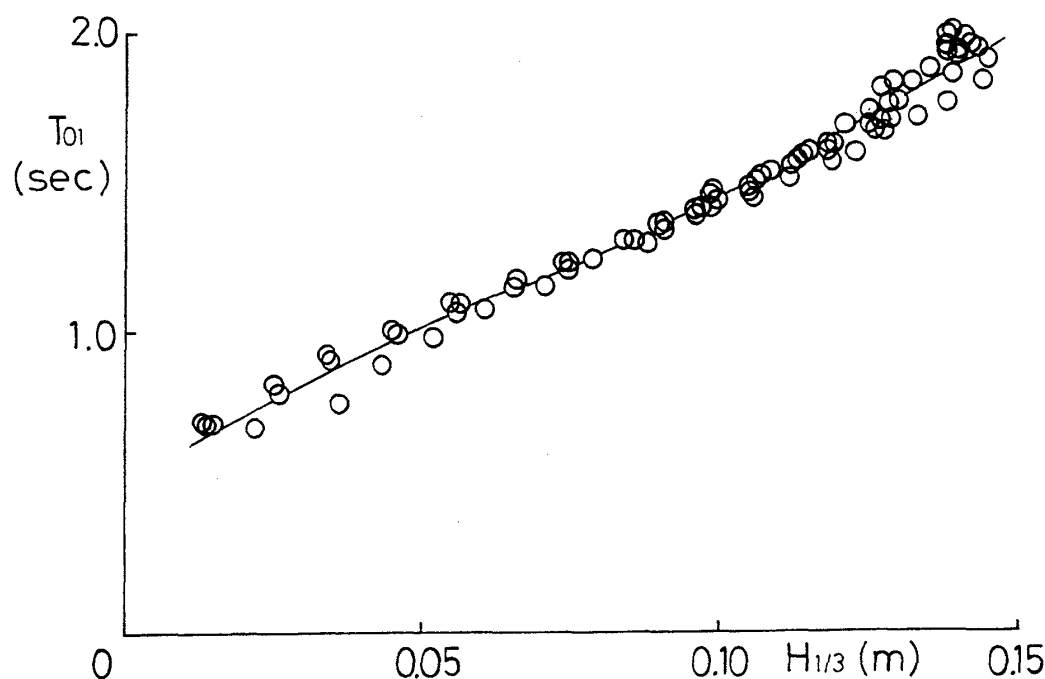


Fig. 5 Relation of average period to significant wave height of irregular waves used in laboratory experiment.

異なっている。一般的には計測された波力をフーリエ級数に展開し、モリソン式を使って表される波力の $\cos$ 成分, $\sin$ 成分と比較することにより C_D , C_M が求められる。しかしながら, 最小二乗法を用いて求めた規則波中の C_D , C_M は従来の方法で求めた値と良く一致することを予備実験で確認した。

次に不規則波のもつ不規則性が流体力係数 C_D , C_M に与える影響について室内実験を行うことで検討する。実験に使用した不規則波は ITTC 型のスペクトル分布を持つ。また, 平均波周期 T_{01} と有義波高 $H_{1/3}$ の間には Fig. 5 に示すような直線的関係を保つようにして波を発生させる。これは実海域実験で得られた現地の波の特性¹²⁾ を模擬したものである。 C_D , C_M を求める手順は規則波中の模型実験と同様で, まず C_D , C_M を深さ方向に一定として求め, K_c ベースに整理し, 次に深さ方向の K_c 数の変化に応じた C_D , C_M を求める。ただし, 横軸の K_c 数は規則波中の場合と異なり, 水粒子運動変位の $1/3$ 有義値で定義した K_c 数である。この計算を不規則波の一波一波について行った結果が (ただし, C_D , C_M は深さ方向に一定として計算), Fig. 6 である。バラツキが極めて大きい。これは単に実験精度の問題でなく, 流体力学的な問題である。規則波又は規則的に変動する振動流中では C_D , C_M は現在の波形で定まる Period Parameter に依存することがよく知られている。しかし, 本来, 非定常流中の流体現象は現在の流場だけでなく過去の履歴にも依存することが分かっており¹³⁾, 規則的振動流の場合には過去の履歴を特徴づけるパラメータ

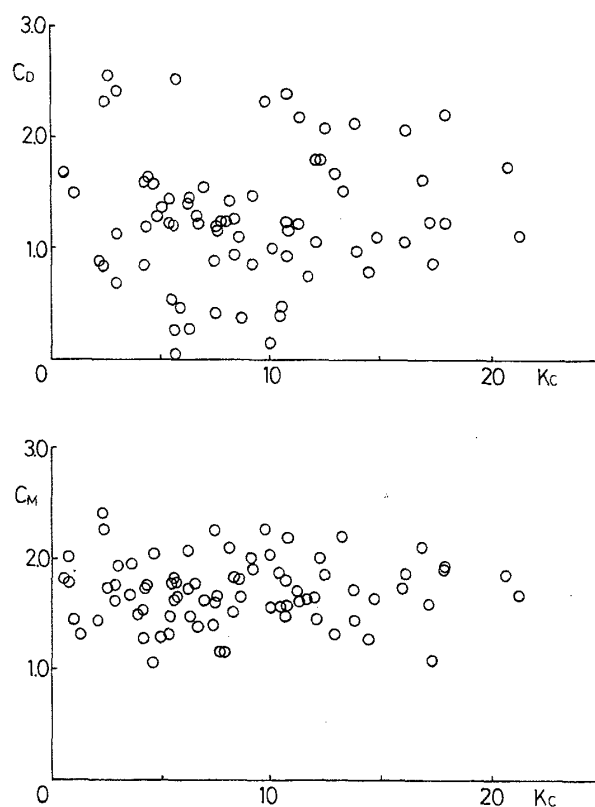


Fig. 6 Drag and inertia coefficient of laboratory model obtained from wave-by-wave least-squares fit

が現在のものと同一であるに過ぎない。このことは不規則波中の波力に関して大塚等¹¹⁾が既に指摘しているように、 C_D , C_M は単に現在の波だけでなく、一波又は2波、3波前の波からも影響を受ける事実からも証明されている。この過去の影響は厳密には無限時間前にさかのぼるものであるが、実用的にはある一定時間前を考えれば良いと思われる。本研究では2波～数波以上の C_D , C_M を平均化して、平均 K_c 数で整理する等して検討したが、結局最もよくまとまるのは、それぞれの不規則波全体で平均化して考えた結果であった。これは海洋構造物の設計に使用する際などの実用上も便利である。Fig. 7 は (10), (11) 式の最小二乗法を一

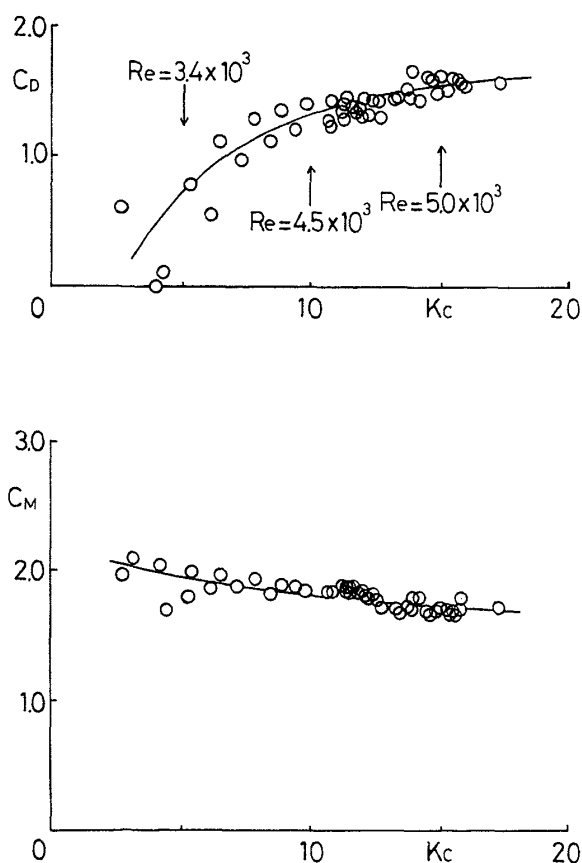


Fig. 7 Drag and inertia coefficient of laboratory model obtained from least-squares fit of complete force time series

つの不規則波全体の時系列に適用し、一組の C_D , C_M を求めた結果を K_c 数ベースでプロットしたものである。極めてよいまとまりが見られる。これは不規則波中ではたとえば1/3有義等で定量化される波高のレベルに応じて一定の C_D , C_M を使用すれば、良い推定値が得られることを示すものであり、しかも、そのようにして求めた C_D , C_M は、Fig. 4 の規則波中の実験結果と概ね一致している。従って、従来の規則波又は規則的振動流中の実験で求めた結果を不規則波中の波力推定にある程度使えることを裏づけている。なお本研究では水粒子の水平方向運動変位の1/3有義値で定義した K_c 数を使って C_D , C_M を整理したが、不規則波の有義波高 $H_{1/3}$ を用いて $K_c = \pi H_{1/3}/D$ としても同様に良いまとまりが得られると思われる。こうして求めた K_c 数は K_c 数の大きい領域では前述の定義によって計算した K_c 数とよく一致する。

4. 実海域データの解析

実海域のデータの解析は Fig. 1 に示した計測システムで得られた3本の波高計のデータと試験円柱の上下2カ所に取り付けられた検力計で計測した波力データを使用して行われる。まず、3本の波高計データの時系列から波の主方向を定める¹²⁾。次にプラットホームに対して波上側に位置する一本の波高計のデータの時系列を、その位置と波の主方向から試験円柱位置での時系列に換算する。現地では大きな波高が得られる波の主方向は西又は北西であり、波高データは結果的には常に北西の一本を使用した。波の方向性の計測については文献(12)を参照されたい。本研究は試験円柱近傍で3次元電磁流速計を使用して水粒子速度も測定し、波の振幅から微小振幅波の仮定を使って水粒子速度、加速度を求めることの妥当性やその時系列と試験円柱に加わる波力の時系列との位相差の計測精度をチェックした。Fig. 8 にその比較例を示す。波高計データから換算した水粒子速度と流速計データの時系列は良く一致している。全てのデータを統計処理して有義値及び主方向について比較したところ、振幅の有義値は数パーセント程度流速計が大きく、主方向については完全に一致した。振幅の誤差は

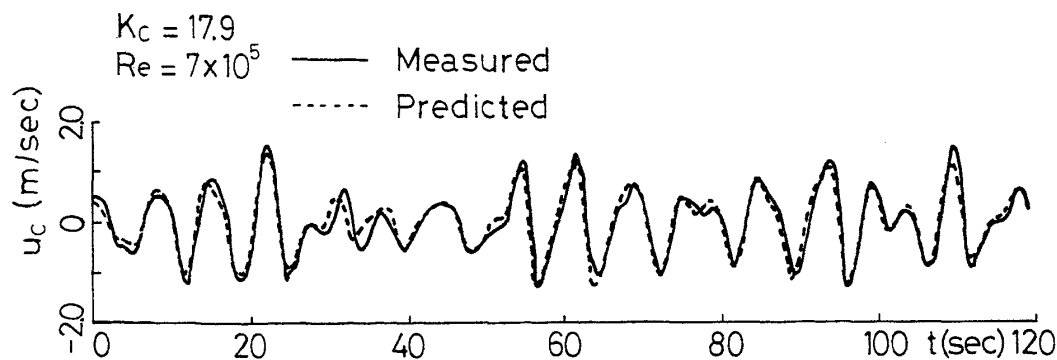


Fig. 8 Comparison of time series of horizontal component of orbital velocity between measured value with current meter and calculated one using the data of a wave height meter

波高計のデータを流速に換算する際に、微小振幅波の理論を使用したことや計測の誤差等に基づくものと思われるが、この程度の差は止むを得ない。また、最終的な C_D , C_M の値には数パーセント以上の影響は及ぼさない。主方向の算定には良い一致を得たので、波の時系列と波力の時系列の間の位相の測定は精度良く行われたと考えて良い。このことは C_D , C_M の算定には重要である。またよく知られているように、波には方向分散性があり、実験水槽で得られた波のように長波頂2次元波ではない。この事の影響は後に議論するとして、ここでは、一本の波高計から得られた波高を基にして、言い替えれば、波の主方向を3本の波高計から得た後は入射波を長波頂2次元波として、解析を進める。このように考えれば以後の解析は前節で示した方法で C_D , C_M を求められる。Fig. 9 に一つの計測例についてこの様にして求めた C_D , C_M を(5)式に代入して再合成した波力の時系列と直接計測した波力の時系列を比較する。両者は全体的に良く一致しているが、詳細に検討すると波下側への方向に大きな力が働く際には再合成値は忠実にこれを再現していないように見える。現地の風波の観察によると、波高が少し大きくなってくると小さなスケールの砕波がしばしば起こる。このことから、波力の計測値にも砕波の影響があるはずであり、Fig. 9 にそれが見受けられると考えてよい。従って、砕波力のように高次の非線形力はモリソン式では表現できないことがうかがえる。このことは流速計の計測データを使用して求めた場合も同様であった。図中の上部は、波の主方向と直角方向の力の時系列である。これについては後に考察する。

Fig. 10 は、この様にして得られた C_D , C_M を K_C 数を横軸にとって示したものである。波高及び波力の計測は12分

間のデータを単位としているが、その12分間の時系列を中間に1.83分間重複区間を設けて前半6.83分間、後半6.83分間の時系列に分割し、各々から前述のように最小二乗法によって、 C_D , C_M を求めて、その平均をとったものである。また K_C 数は Fig. 7 と同様に、静止水面にける水粒子運動変位の1/3有義値で定義されたものである。 C_D , C_M 共に従来の実海域実験で得られたものに比較して、バラツキ

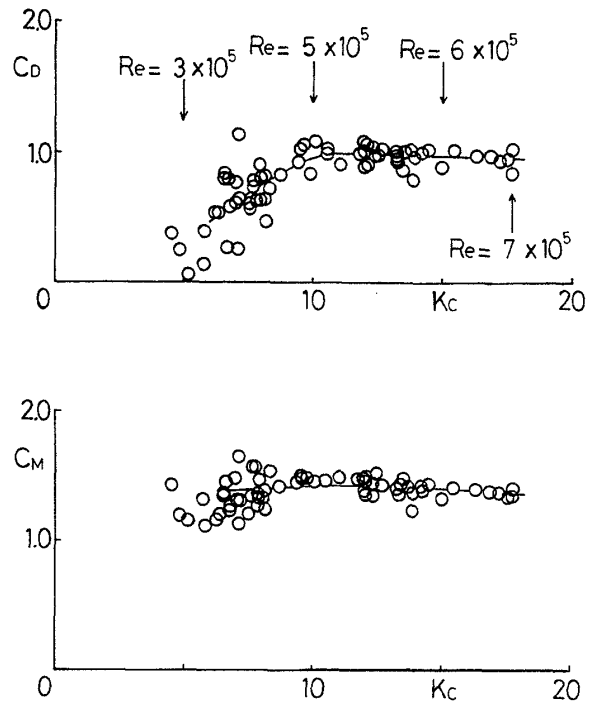


Fig. 10 Drag and inertia coefficient of test cylinder obtained from least square fit of complete force time series (Field experiments)

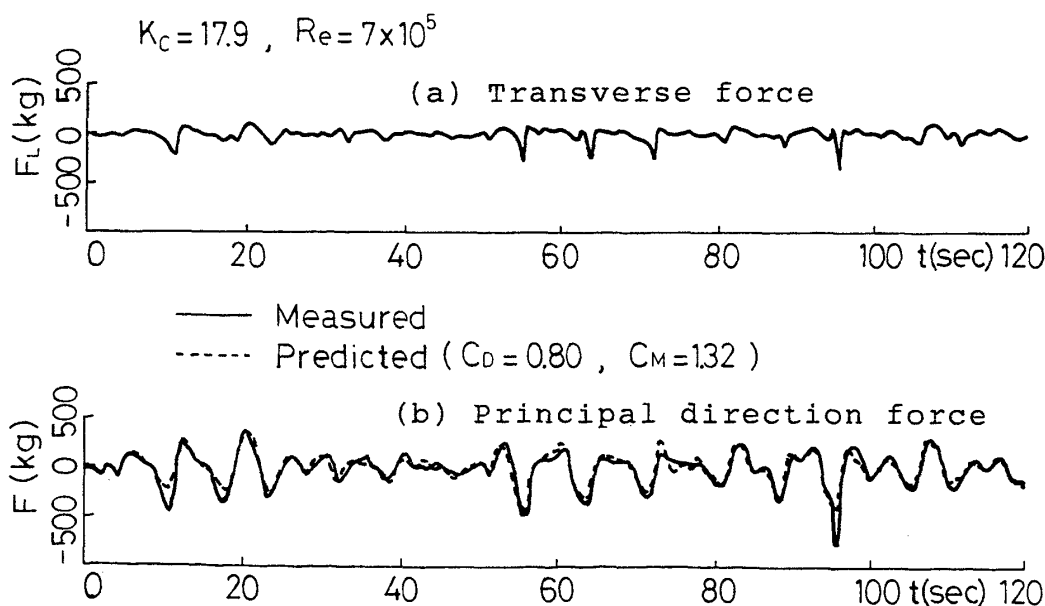


Fig. 9 Time series of wave forces of principal and transverse direction obtained from field experiment

が少なく良いまとまりを示している。これは波高と波力の計測において、特に位相の計測精度の向上に留意した事や解析法の妥当性を証明するものであると考えられる。図中に概略のレイノルズ数を書き込んでいる。この結果を従来の室内実験⁶⁾と比較すると C_D はかなり大きい。これは解析法による影響ではないことは Fig. 4 と Fig. 7 の値がよく一致していることから言える。しかし、笠原等の実験によると K_c 数 20 程度で $R_n = 5 \times 10^5$ の場合の C_D は、滑面円柱の場合に 0.6, C_M は 1.6 程度であった。Fig. 10 からは、 K_c 数が大きいときには $C_D = 0.9$, $C_M = 1.3$ 程度である。笠原等の実験では円柱に僅かな粗度があっても、 C_D は大きくなり 0.9 程度に上昇することが示されている。本研究では計測期間(平成 2 年 12 月 22 日～28 日)の直前 12 月 21 日にダイバーによる丁寧なかきおとしを行っているので、海洋構造物としては滑らかであると言って良いと思われるが、流体力学的モデルとしては、完全な滑面円柱とは言えないかもしれない。実用的には良く保守された構造物であっても、多少の粗度があると考えねばならない。 K_c 数が 10 以上では $C_D = 0.9$, $C_M = 1.3$ で K_c 数が 10 以下では C_D はその値から直線的に減少し、 C_M 値は殆ど変わらないか、2.0 へ漸近して行くと考えることが妥当であるように思える。

Fig. 11 に計測した波力のパワースペクトラムと Fig. 10 で求めた C_D , C_M と波の時系列を使ってモリソン式によって再合成した時系列から求めたパワースペクトラムの比較例を示す。横軸は円振動数 ω である。ピーク周波数よりも低周波数域では両者は良く一致しているが、高周波数域では再合成値は計測値に比べて、少し小さい。これは前述のように実測した波力には碎波による力が混入していることによると思える。Fig. 11 は比較の一例であるが、Fig. 12 に全計測例に渡って有義値で比較する。図の下部が実海域実験の結果であるが、殆ど全ての場合に再合成値は直接計測

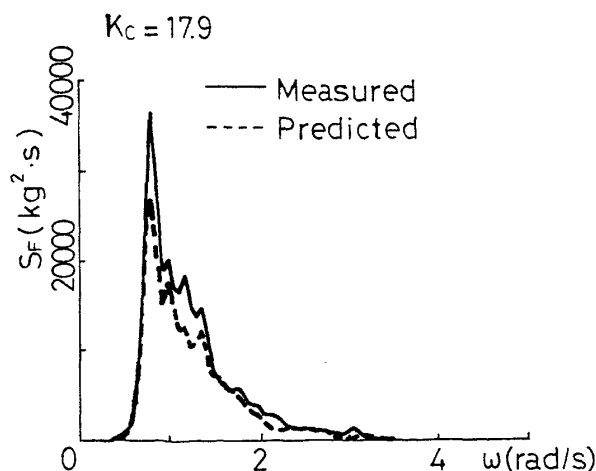


Fig. 11 An example of power spectrum of measured and predicted wave force using C_D , C_M shown in Fig. 10

の 88% 程度の値となっている。この値は永井等の研究結果⁶⁾とも一致している。これに反して、図の上部に示す室内実験の場合には両者の差は僅か 4% 程度しかない。この原因は時系列全体で C_D , C_M を一定としている影響かも知れないと考え(波高の小さい波に対しては、 C_D が小さく、この値に引きずられて、全体に小さ目の C_D になっている可能性がある)、波高の時系列から大きい方から 1/3 の範囲にある場合だけを抽出し、最小二乗法を適用して C_D , C_M を求めてみたが、結果は殆ど変わらなかった。この傾向は室内実験では、見られないから、実海域の波力に対しては(5)式は不十分なモデルである可能性がある。考えられる原因の一つは、実海域での波浪の持つ方向分散性であり、他の一つは風波特有の非線形特性、例えば前述の碎波力等である。方向分散性の影響は水粒子速度及び加速度に影響を与える。ここでは簡単のために、スペクトルベースで考察する。ある方向 θ の成分波 $\zeta(t)$ に対する水平方向の波粒子速度 $u(t)$ は伝達関数 $H(f)$ を用いて

$$u(t) = H(f)\zeta(t) \quad (12)$$

と表せるので、粒子速度の主方向成分 $u_\phi(t)$ は

$$u_\phi(t) = H(f)\zeta(t) \cos(\theta - \phi) \quad (13)$$

となる。ただし、 ϕ は波の主方向。従って、粒子速度の主方向成分のスペクトル $S_\phi(f)$ は波の方向スペクトル $S_\zeta(\theta, f)$ を使用して次式で表される。

$$S_\phi(f) = \int_{-\pi}^{\pi} |H(f)|^2 \cos^2(\theta - \phi) S_\zeta(\theta, f) d\theta \quad (14)$$

波の方向スペクトル S_ζ は方向分布関数 $G(\theta, f)$ と周波数スペクトル $S_\zeta(f)$ を用いて

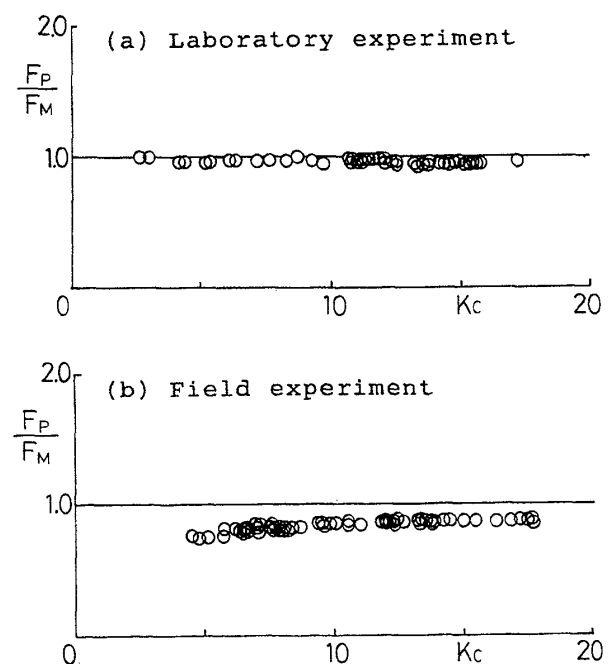


Fig. 12 Comparisons of significant values between measured and predicted wave forces (a) laboratory experiments (b) field experiments

$$S_t(\theta, f) = G(\theta, f) S_t'(f) \quad (15)$$

とかけると(14)式に代入し、波スペクトルのピーク周波数 f_p の値 $S_\phi(f_p)$ に注目すると、

$$S_\phi(f_p) = |H(f_p)|^2 S_t'(f_p) \int_{-\pi}^{\pi} G(\theta, f_p) \cos^2(\theta - \phi) d\theta \quad (16)$$

一方波の方向分散性を考えないと水粒子速度スペクトルは次式で表される。

$$S_\phi(f_p) = |H(f_p)|^2 S_t'(f_p) \quad (17)$$

(16)式と(17)式の値の平方根の比をとれば波の方向分散性を考えて波高データを解析した場合の水粒子速度と波の方向分散性を考えないで波高データを解析した場合の粒子速度の比 r が求まる¹³⁾。

$$r = \frac{\left\{ |H(f_p)|^2 S_t'(f_p) \int_{-\pi}^{\pi} G(\theta, f_p) \cos^2(\theta - \phi) d\theta \right\}^{\frac{1}{2}}}{\left\{ |H(f_p)|^2 S_t'(f_p) \right\}^{\frac{1}{2}}} \\ = \left\{ \int_{-\pi}^{\pi} G(\theta, f_p) \cos^2(\theta - \phi) d\theta \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

実際に計測例についてピーク周波数での方向分布関数を用いて積分を行うと(18)式の値は本研究の計測例の場合 0.96~0.98 となる。この値は参考文献(12)より計測期間中の方向集中パラメーター S の値が 30 前後であるとして計算したもので、 S の値が大きくなれば 1 に近付き、方向分散性がない状態に近づく。この値より本計測においては波の方向分散性の影響は小さいと考えられる。(5)式における u の値を波の方向分散性を考えて波高データを解析すれば、2~4%程度現在の値よりも小さくなることが分かる。

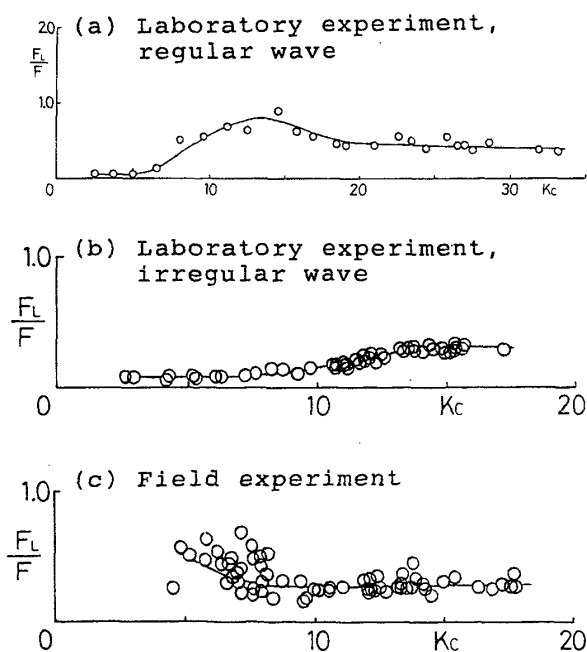


Fig. 13 Ratio of transverse forces to main direction force (a) in regular waves of laboratory experiment (b) in irregular waves of laboratory experiment (c) field experiments

その結果 C_D , C_M は逆に数%大きくなるが、最終的に再合成値は現在の値と一致するはずである。Fig. 9を注意深く見れば、波下側への力のピーク値を再合成値は十分に表現出来ていない傾向がみられるので、発達過程の波に含まれる碎波の影響と見るのが妥当であろう。同時に計測している水粒子速度の時系列を使って解析した結果でも、Fig. 12の傾向は全く同様であった。Fig. 12の結果は沿岸域に置かれた構造物の設計波力をどのように考えるかの重要なデータであると言える。

Fig. 13は波の主方向に直角方向の力と主方向の力の比である。参考までに実験室内の2次元長波頂波中の結果も示す。従来から言われているように、規則波中の直角方向の力は Kc 数が 10~20 の領域で大きい、実験室内の不規則波中ではこの傾向は見られず、直角方向の力は小さい。実海域の場合には、波の方向分散性の影響もあって、2次

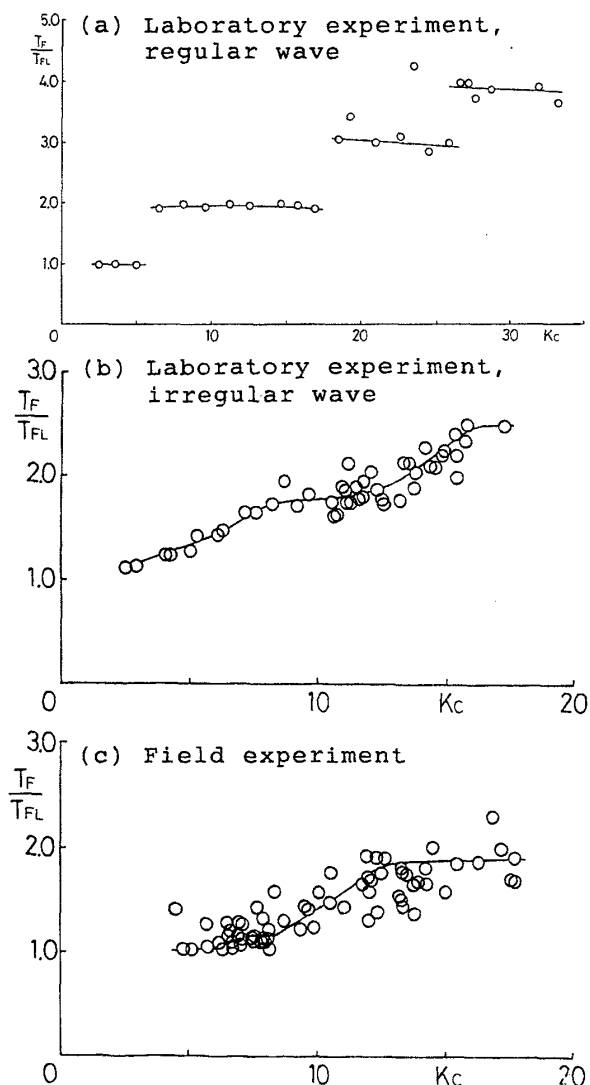


Fig. 14 Ratios of period of transverse forces to main direction forces (a) in regular waves of laboratory experiment (b) in irregular waves of laboratory experiment (c) field experiments

元波のように渦放出に伴う揚力だけではない。波高が小さい場合は波の方向分散性が強くなる¹²⁾ので Fig. 13 に見られるように直角方向の力が大きくなると考えられる。

Fig. 14 に波の主方向の流体力の周波数と直角方向の力の周波数の比を示す。規則波中では従来から言われているように、 K_c 数に応じて整数倍になる傾向にあるが、不規則波中ではこの傾向はそれほど明瞭ではなく、直線的に増加して行く。2 倍の領域で少しその傾向が見られる程度である。実海域の場合には傾向的には、実験室内の不規則波の実験とよく似ている。

5. 結 論

実海域実験で得られた波力のデータを解析して、抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M を得た。また、実験室内で相似模型による実験も行い、解析上の問題点について検討した。その結果、以下のような結論を得た。

1. 不規則波中の C_D , C_M は全時系列について一定とし、最小二乗法で求めて、静止水面における水粒子運動変位の $1/3$ 有義値で定義した K_c 数で整理すれば、良くまとまり、規則波中の結果ともほぼ一致する。波の一波一波について、求めた値はバラツキが大きく有意な傾向が見いだせない。
2. 実海域の波力データは、モリソン式で 90% 程度の精度で表現できる。残りの 10% 程度は碎波力等の高次非線形力と考えられるが、その大きさは 10% 程度で量的に極めて安定した割合を示す。
3. 不規則波中の波方向に直角方向の流体力は規則波中のように大きくない。

謝 辞

本研究の遂行に関して、多くの人の協力を得た。応用力学研究所の海洋関係部門の方々に深く感謝します。また、実験データの整理、原稿の準備に協力された吉田亜紀さんに謝意を表します。最後に、本研究の一部は文部省科学研究補助金によって行われたことを付記します。

参 考 文 献

- 1) Sarpkaya, T.: Vortex Shedding and Resistance in Harmonic Flow about Smooth and Rough Circular Cylinders, Proceedings of an International Conference Boss '76, (1976), p. 1-16.

- 2) 小寺山亘, 田代昭正: 水平没水円柱に加わる波力について, 日本造船学会論文集, 第 143 号, (1978), p. 136-144.
- 3) Kinoshita, T. and Sunahara, S.: Hydrodynamic Forces on a Circular Cylinder Oscillating at Low K_c number, Proc. of Osaka Colloquium '91, (1991).
- 4) Dummer, J., Hudspeth, R., Nath, J.: High Reynolds Number Wave Force Investigation in Wave Flume, Proceedings of the 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Vol. 1, (1986), p. 113-122.
- 5) 加藤直三: 付着生物の基礎調査と直立円柱に加わる波力への影響について, 第 6 回海洋工学シンポジウムテキスト, (1982), p. 17-25.
- 6) 笠原良和, 島崎克教, 小寺山亘, 中村昌彦: 高レイノルズ数域における円柱に働く波力への生物付着影響について, 日本造船学会論文集, 第 160 号, (1986), p. 55-66.
- 7) Wiegel, R. L., Beebe, K. E., Moon, J.: Ocean Wave Forces on Circular Cylindrical Piles, Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 83, (1957), p. 89-116.
- 8) 永井 豊, 水野雄三, 関野高志, 角野 隆: 大波浪海域における着底式海洋構造物の実海域実験研究, 科学技術振興調整費報告書「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」(第 2 期) 成果報告書, (1987), p. 216-237.
- 9) Bostrom, T. and Overvik, T.: Hydrodynamic Force Coefficients in Random Wave Conditions, Proceedings of the 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, (1986), p. 136-143.
- 10) Isaacson, M., Baldwin, J., Niwinski, C.: Estimation of Drag and Inertia Coefficients From Random Wave Data, Transactions of the ASME, Vol. 113, (1991), p. 128-136.
- 11) 大塚耕司, 池田良穂, 田中紀男: 水平没水柱体に働く波力に関する研究 (続報), 日本造船学会論文集, 第 165 号, (1989), p. 163-170.
- 12) 小寺山亘, 佐々木哲, 丸林賢次, 石橋道芳: 海洋観測ステーションによる沿岸波浪の方向スペクトルの計測, 日本造船学会論文集, 第 171 号, (投稿中).
- 13) Sarpkaya, T. and Isaacson, M.: Mechanics of Wave Forces on Offshore Structure, Van Nostrand Reinhold Company, (1981).