

波動場におかれた水平円柱に作用する 波力の数値シミュレーション

都 築 進*・渡 辺 晃**・堀 川 清 司**

1. 緒 言

最近の海洋構造物は大水深の地点に設置されるものが数多くあり、部材として鉛直部材だけではなく水平部材や斜材が多く使われている。水平円柱に作用する波力の算定式としては、従来からベクトル表示に拡張した形のモリソン公式が用いられることが多く、従ってモリソン公式の流体力係数についての議論が中心であった¹⁾。しかし、モリソン公式では剥離渦の非対称運動が顕著となる条件においては波力の時間変化を正確に表現することができず、十分なものとはいえない^{2),3)}。

本研究では、渦の運動に伴う力を精度良く評価するために、離散化した渦点の集合として剥離渦を考える離散渦点法を用いて水平円柱まわりの流れの場を解析することにより水平円柱に作用する波力を評価する手法を適用し、実験結果との比較によりその妥当性を検証する。

2. 水平円柱に作用する波力の特性

波動場におかれた水平円柱の場合、水深、円柱の設置位置および波の条件によって水平円柱まわりの流速場が大きく異なり、その結果作用する波力の特性も変化すると考えられる。そこで、水平円柱に作用する波力ベクトルの1周期変化である波力経路(ベクトル先端の軌跡)を実験結果^{2),3)}より描くと、大別して図-1に示す(a)円型と(b)8の字型に分類できることがわかった。

このタイプ別をK.C.数と軌道流速振幅比 $\hat{W}/\hat{U}$ で整理したものが図-2である。図より、波力経路は $\hat{W}/\hat{U}$ が1に近

い深海波条件では円型となるが、浅海波条件では8の字型となることがわかる。ところで、ベクトル化されたモリソン公式では、抗力の作用方向と流速方向が一致することを前提としているために、8の字型の波力経路を再現することはできない。波力経路が8の字型になる理由としては、渦の非対称運動による揚力の影響が大きくなることが考えられ、このような波力経路を再現するためには、渦の運動に伴う流体力の変化を考慮した波力の評価法を用いる必要がある。

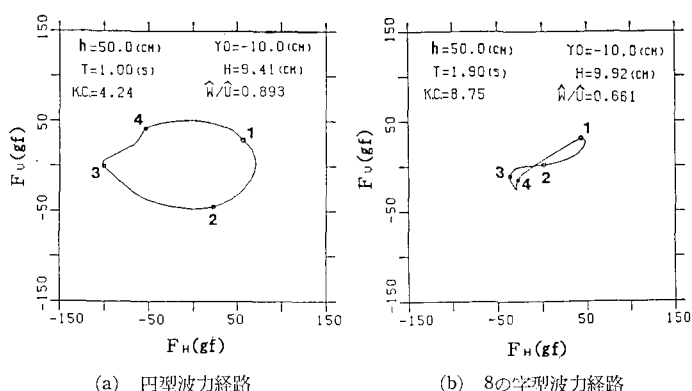


図-1 水平円柱に特徴的な波力経路

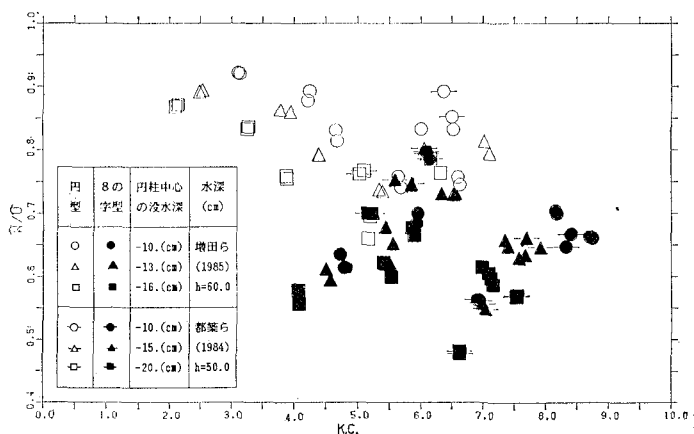


図-2 K.C.数と軌道流速振幅比による波力経路タイプの分類

* 正会員 工修 東京電力(株)

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

3. 水平円柱に作用する波力の数値シミュレーション

(1) 離散渦点法

離散渦点法とは、剝離を伴う非定常流れを数値的に解析する手法の1つで、剝離渦を離散化した渦点の集合と考え、物体まわりの流速場(複素ポテンシャル W) を、式(1)のようにポテンシャル流れ(W_p)と渦点の集合による流れ(W_v)の重ね合わせとして解くものである。

$$W = W_p + W_v \quad \dots\dots\dots (1)$$

(2) W_p の決定

流れを解くためには、最初に渦点のない完全流体ポテンシャル W_p を求める必要がある。図-3に示されるように波動場中に水平円柱が置かれた場合には、流速場が非一様で、また自由表面と底面が存在するために取扱いが非常に複雑となる。ここでは、円柱が自由表面と底面からある程度離れている場合にはそれらの影響を無視できることより^{4),5)}、Milne-Thomson の円定理⁶⁾より W_p を求めることにする。すなわち、円柱半径を R として、

$$W_p = W_{p0}(z) + W_{p0}(R^2/\bar{z}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに W_{p0} は円柱が存在しない場合の複素ポテンシャル、 $z = x + iy$ 、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\bar{z}$ は複素共役である。

微小振幅波理論では、 W_{p0} は次式で与えられる。

$$W_{p0} = \frac{\omega H}{2k \sinh kh} \sin(kz + iks_0 - \omega t) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 ω は角周波数、 k は波数である。

また、微小振幅波理論の適用範囲外の波については流れ関数法⁷⁾を用いるとすると、 W_{p0} は次式で与えられる。

$$W_{p0} = -A_0 z + \sum_n A_n \sin(k_n z + i k_n s_0 - \omega_n t - \beta_n) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 A_n 、 β_n は流れ関数法における係数、 $k_n = nk$ 、 $\omega_n = n\omega$ である。

(3) W_v の決定

渦点の集合による流れのポテンシャル W_v についても、 W_p と同様に円定理を用いるとすると、 W_v は次式で与えられる。ただし、円柱中心の同符号の循環の渦点は流れ

が非回転と考えられることにより省略される。

$$W_v = -\frac{i}{2\pi} \sum_k \Gamma_k \log(z - z_k) + \frac{i}{2\pi} \sum_k \Gamma_k \log(z - R^2/\bar{z}_k) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(4) 渦点の放出と運動

渦点の放出については、渦点の放出位置とその循環の大きさが必要である。本研究では、剝離点とは、境界層外縁のポテンシャル流速から簡単に決定でき、また実測値との対応も良いといった理由より、円柱表面に沿う圧力勾配が0となる点とした。そして、渦点の放出位置は剝離点位置で Kutta の条件が満足される位置とし、その循環の大きさ Γ は Sarpkaya⁸⁾ にない次式で計算した。

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \frac{1}{2} U_B |U_B| \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで U_B は剝離点での境界層外縁流速である。

渦点の運動については、その渦点の位置に誘起される流速(u_k, v_k)で移動されるものとする。

$$u_k - iv_k = \frac{d}{dz} \left\{ W + \frac{i\Gamma_k}{2\pi} \log(z - z_k) \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$z_k(t + \Delta t) = z_k(t) + (u_k, v_k) \Delta t \quad \dots\dots\dots (8)$$

(5) 波力の算定式

円柱に作用する流体力は、非定常流の場に拡張された Blasius の公式を用いて計算できる。

$$F_H - iF_V = \frac{i\rho}{2} \oint_C \left(\frac{dW}{dz} \right)^2 dz + i\rho \frac{\partial}{\partial t} \oint_C \bar{W} dz \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 C は物体を取り囲む任意の閉曲線、式(1)、(2)、(5)を(9)に代入すると次式を得る。

$$F_H - iF_V = 2\pi\rho R^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial W_{p0}}{\partial z} \right) + 2\pi\rho R^2 \frac{\partial \bar{W}_{p0}}{\partial z} \frac{\partial W_{p0}}{\partial z} - i\rho \sum_k \Gamma_k (u_k - iv_k) - \rho \sum_k i \frac{\partial}{\partial t} (\Gamma_k R^2/\bar{z}_k) + i\rho \sum_k \Gamma_k \frac{\partial^2 W_{p0}}{\partial z^2} (z_k - R^2/\bar{z}_k) \quad \dots\dots (10)$$

(6) 循環の減衰

離散渦点法では通常は放出された渦点の循環は変化させない。しかし、測定波力をよく再現するには、円柱周辺で繰り返されている渦の生成消滅をモデルに取り入れる必要がある。そこで本研究では、コアを持った剛体渦を考えることにより渦の粘性拡散を考慮し、さらに渦度の積分領域に上限値を設定することにより渦点の循環の減衰を扱った。なお、コアの大きさ r_v としては式(11)で与えられる粘性渦のコア半径を、積分領域の上限値 r_{cr} としては式(12)で示す放出後経過時間 T_0 に対する粘性渦のコア半径を用いた。

$$r_v = 2.24 \sqrt{\nu t^*} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$r_{cr} = 2.24 \sqrt{\nu T_0} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで t^* は渦の放出後の時間、 ν は動粘性係数である。

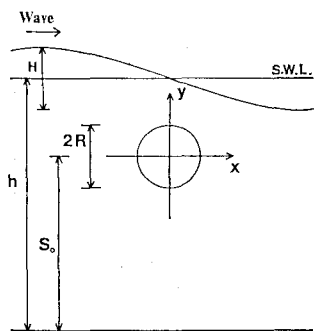


図-3 波動場中の水平円柱

(7) 計算の手順

図-4 に示されるように、1 ステップ毎に渦点を放出し、新しく放出された渦点を加えた流速場および波力を計算すると共に渦点の移流を行うという手順を用い、周期的な波力波形が得られるまで計算を繰り返した。なお、コアが触れ合った渦点は角運動量を保存するように合体させ、円柱内に入った渦点はコアが円柱表面に接触する位置まで戻して再移流を行なった。

4. 計算結果の検証

以上に述べた計算法の妥当性を確認するために、表-1 に示す深海波条件と浅海波条件の 2 つの条件について、減衰の強さを与える T_0 として波の周期 T と $T/2$ とを用いた計算を行い、実測波力経路と計算波力経路(3~4 周期目)を比較した結果を図-5 に示す。なお、

浅海波条件(W-3)については、 W_{p0} を求める際に流れ関数法を用いた。

図-5 より、深海波条件では $T_0 = T$, $T_0 = T/2$ のいずれの場合も円型の波力経路が再現されているが、浅海波条件では、 $T_0 = T/2$ とした場合には 8 の字型の波力経路を再現しているものの、 T_0

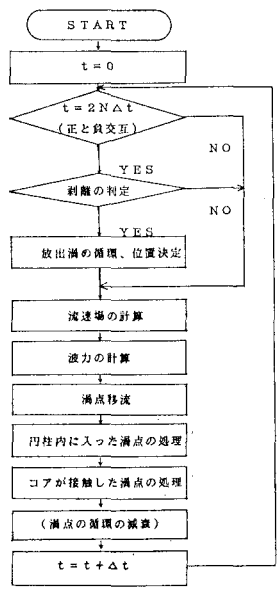
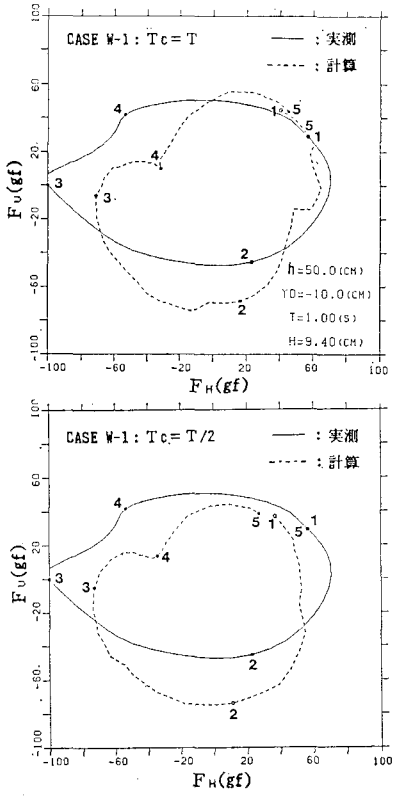


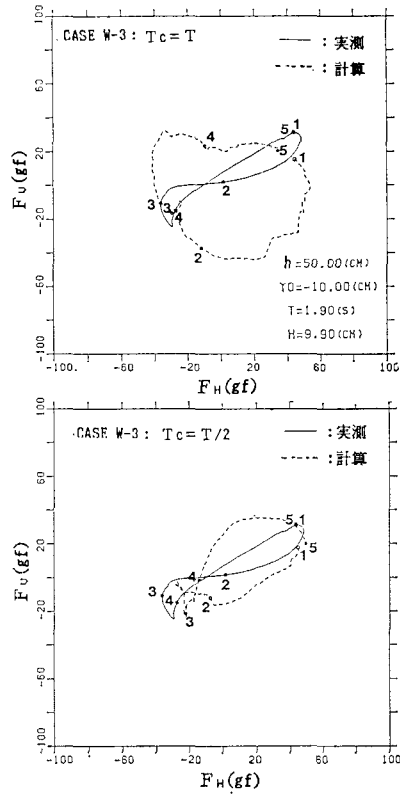
図-4 計算の手順

表-1 計算条件(1)

Case	円柱半径 R (cm)	円柱位置 Y_0 (cm)	水深 h (cm)	周期 T (s)	波高 H (cm)	ステップ数 $T/\Delta t$
W-1	2.5	-10.0	50.0	1.0	9.4	60
W-3	2.5	-10.0	50.0	1.9	9.9	120



(a) Case W-1 の波力経路



(b) Case W-3 の波力経路

図-5 実測波力と計算波力の比較

$=T$ とした場合には再現されていないことがわかる。

その原因を流況の点から考察するために、円柱周辺の渦成分のみの流況図を浅海波条件について描いたものが図-6である。図-6より、 $T_e=T/2$ とした場合には正の渦による負の渦の巻き込みといった非対称な渦運動が $t/T=3.6\sim 3.8$ において見られるのに対し、 $T_e=T$ とした場合には非対称な渦の挙動が顕著でないことが確認できる。

そのように渦点の循環の減衰の強さで流況に違いが現われる理由としては、以前に放出された渦点の影響が考えられ、実測波力を再現するためには、適当な強さの減衰をかけて以前に放出された渦の影響を小さくしてやる必要がある。

本計算法の応用として、表-2 に示すように K.C. 数を少し大きめとして一定に保ち、深海波条件と浅海波条件で計算を行い、3~4 周期目の波力経路を図-7 に示し

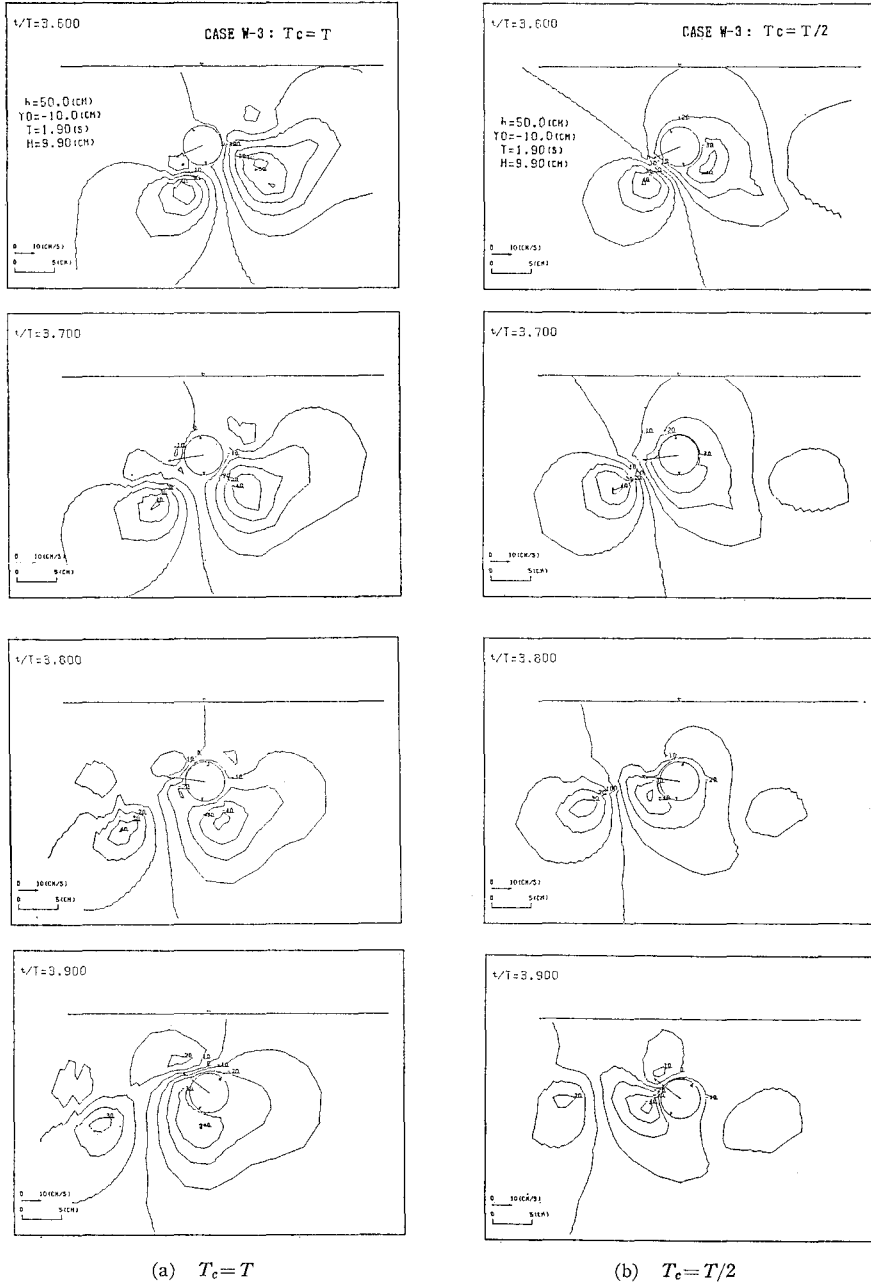


図-6 計算された円柱周辺の渦成分による流況 (Case W-3)

表-2 計算条件(2)

Case	円柱半径 R (cm)	円柱位置 Y_0 (cm)	水深 h (cm)	周期 T (s)	波高 H (cm)	ステップ数 $T/4t$
W-4	1.0	-13.0	50.0	1.2	14.0	150
W-6	1.0	-13.0	50.0	1.7	9.5	150

た. 図-7 より, K.C. 数が少し大きめな場合についても, 波力経路は深海波条件では円型, 浅海波条件では8の字型になることが確認された.

なお, 以上の計算例ではいずれも実験室規模の水理条

の拡張が必要となろう.

5. 結 語

本研究では, 離散渦点法を用いることにより, 波動場におかれた水平円柱に作用する波力を数値計算で求める手法を示し, その妥当性を考察した. その結果, 本計算法は渦点の循環に適当な減衰を施すことにより, 剥離渦の非対称運動が顕著となる場合についても適用可能であることが確認された. 今後は, 本計算法による波力モデルを, 解析的に表現して実用化を図ることが必要であると思われる.

参 考 文 献

- 1) 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, pp. 134~144, 1978.
- 2) 都築 進・渡辺 晃・堀川清司: 水平円柱に作用する波力, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, II, pp. 303~304, 1984.
- 3) 増田進弘・渡辺 晃・堀川清司: 波動場におかれた水平円柱に作用する波力と周辺流速場, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集, II, pp. 541~542, 1985.
- 4) Chaplin, J. R.: On the irrotational flow around a horizontal cylinder in waves, Jour. Appl. Mech., Trans. of ASME, Vol. 46, pp. 689~694, 1981.
- 5) 上北征男・山崎秀勝: 水平円柱に作用する質量力に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 358~362, 1980.
- 6) Milne-Thomson, L.H.: Theoretical Hydrodynamics, 4th ed., MacMillan, New York, 1968.
- 7) Dean, R.G.: Stream function representation of non-linear ocean waves, Jour. of Geophys. Res., Vol. 70, pp. 4561~4572, 1965.
- 8) Sarpkaya, T.: An analytical study of separated flow about circular cylinders, Jour. Basic Eng., Trans. of ASME, Vol. 90, pp. 510~518, 1968.

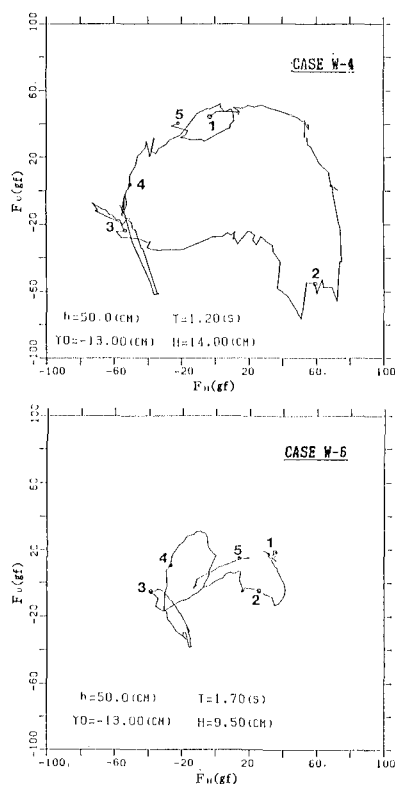


図-7 計算による波力経路