

振動流場における非対称没水構造物周りの流動解析

NUMERICAL SIMULATIONS OF OSCILLATORY FLOWS AROUND SUBMERGED ASYMMETRICAL STRUCTURES

押川英夫¹・小松利光²

Hideo OSHIKAWA and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助手 工学研究院環境都市部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門(同上)

Characteristics of an oscillatory flow around submerged asymmetrical structures (we call this structure the BaNK block) were investigated on the basis of numerical simulations. Komatsu *et al.*¹⁾ have proposed 'BaNK System' in order to cope with beach erosion and shoaling of fairway. In this study, a half cylinder is used as the BaNK block which is set on the bottom of an oscillatory flow channel. It was found that a residual hydrodynamic force increases as Reynolds number becomes larger. Furthermore, residual currents due to asymmetrical structures were comprehended by analyzing simultaneous flow patterns with different phases.

Key Words : DNS, BaNK system, residual current, oscillatory flow, submerged asymmetrical structure

1. 緒言

著者らは波浪エネルギーを用いた有効な海岸侵食防止技術であり、かつ積極的な砂浜の創出技術であるBaNK(Beach and Navigation Keeper)システムを提案している^{1)~8)}。本技術は、波浪によって生じる往復流場に非対称形状を有する構造物(BaNKブロック)を複数個設置するだけで、海底付近に波の一周期平均的な一方向流れ(以下では、波浪残差流と呼ぶ)を任意の方向に生成させ得ることから、底質移動の自在な制御を可能とするものである。本技術は往復流場であればどこにでも適用できるため、海岸侵食の防止、航路埋没の防止、魚の養殖筏周辺の水質・底質の改善、河口閉塞の防止等、様々な応用が可能となる。本システムに関して、これまで小松ら¹⁾、Oshikawa *et al.*⁵⁾、押川ら⁶⁾などにおいて、海岸侵食の防止を主要なターゲットに水槽実験および現地試験を通じて研究開発が進められてきた。次なる展開として、著者らは航路埋没の防止にターゲットを定め、まずは基礎研究として室内実験に基づく検討を行っている⁷⁾。

BaNKシステムにおいては、[往復流 - 非対称構造物(に働く流体力) - 流れの生成(波浪残差流) - 底質移動制御]といったプロセスによって漂砂制御が行われることになるが、本論文では波浪残差流

生成までのプロセスに着目する。従来の研究成果により、BaNKブロックとしては半円筒(柱)型構造物が有利であることが明らかとなっているが^{2), 4), 7)}、半円柱型構造物に関しては、振動流場における抵抗力の測定に基づいた検討が主であり、これまでに本システムの基本となる波浪残差流に関する検討が十分になされているとは言い難い。本論文ではBaNKシステムの基礎的研究として、半円柱型構造物の周囲の流れと構造物に作用する流体力を数値解析により同時に評価することで、非対称構造物によって生成される流れとその時間平均値である残差流の特性について検討する。

著者らは本論文と同様な解析を用いて半円柱型構造物周りの流れについて既に報告している⁸⁾。そこでは構造物の横断方向の設置間隔(L_y)について検討しており、本論文ではその成果をもとに L_y を半円柱の原型である円柱の直径の2倍に固定している。また今回は半円柱型構造物周りの流況、特に渦構造等について検討を行い、更にその結果としての残差流について考察する。なお、本論文では、以前の報告⁸⁾で得られた計算結果も一部利用している。

2. 解析手法について

(1) 基礎式および境界条件

本解析では自由表面のない振動流場を対象とする．実海域は水表面が変形する波浪場であるが，BaNK システムは非対称構造物を用いて底面付近に一周期平均的な一方向流れを生成させる手法であるため，構造物の非対称性による効果のみを評価すべく，波の非線形性による水表面の変形のない振動流場を対象とした．基礎式は，以下に示す 3 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式および連続方程式である．

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_i^{*2}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (2)$$

本論文では上付き * が付記された記号は全て無次元化されたものとし，これらの式は円柱あるいは半円柱型構造物の直径 D (但し，構造物が楕円柱の場合は長径) および振動流の断面平均流速の最大値 (振幅) U_0 で無次元化されている．従って，各方向 ($i=1 \sim 3$) の空間座標は $x_i^* = x_i / D$ ，流速は $u_i^* = u_i / U_0$ ，時間は $t^* = U_0 t / D$ ，圧力は $p^* = p / \rho U_0^2$ ， Re は Reynolds 数 ($\equiv U_0 D / \nu$) である (ρ ， ν はそれぞれ流体の密度および動粘性係数)．これらの方程式を MAC 法⁹⁾に基づき，staggered mesh 上で有限差分法による解析を行った．従って，本解析はいわゆる DNS (Direct Numerical Simulation) を実施したものである．流体解析において特に重要となる移流項には 5 次精度の風上差分，粘性項および圧力項には 4 次精度の中央差分を用いた．また，時間積分には 4 次精度の Runge-Kutta 法¹⁰⁾を用いた．

境界条件に関しては，物体表面および上下の固定境界で圧力の法線微分がゼロ，流速は no-slip 条件とした．その際，固定境界における差分は各項の差分の精度に合わせて同じ精度 (5 次あるいは 4 次精度) の片側差分を用いている．横断方向 ($i=2$ ， Y 方向) には周期境界条件を採用しており， Y 方向には等間隔で物体群が存在していることになる．振動方向 ($i=1$ ， X 方向)，つまり入出口の境界条件は水深が無限大の場合の鉛直 2 次元の振動流場における解析解^{11)，12)}を鉛直方向 ($i=3$ ， Z 方向) の中央断面 (本解析では無次元水深が 2.5 なので， $x_3^* = 1.25$) から上下対称に奥行き方向一様に与えた．このとき， u_2^* と u_3^* は全て 0 としている．例として下半分の無次元座標 $x_3^* = 0 \sim 1.25$ の場合について，主流方向流速 u_1^* および圧力 p^* の境界条件をそれぞれ式 (3)，式 (4) に示す．

表 -1 計算条件

Case No.	KC	Re	構造物の形状	計算周期数	格子
Case1	1	500	半円柱	8	粗
Case2	1	500	円柱	8	粗
Case3	1	500	楕円柱	8	粗
Case4	1	100	半円柱	5	粗
Case5	1	100	円柱	5	粗
Case6	1	100	楕円柱	5	粗
Case7	1	500	半円柱	5	密
Case8	1	500	円柱	5	密
Case9	1	500	楕円柱	5	密
Case10	1	300	半円柱	5	粗
Case11	1	800	半円柱	5	粗
Case12	5	100	半円柱	5	粗
Case13	10	100	半円柱	5	粗
Case14	3	500	半円柱	5	密
Case15	5	500	半円柱	5	密
Case16	5	500	楕円柱	5	密

$$u_1^* = \frac{U_c}{U_0} \left[\cos \left(\frac{2\pi}{KC} t^* \right) - \exp \left\{ - \left(\frac{Re \pi}{KC} \right)^{1/2} x_3^* \right\} \cos \left\{ \left(\frac{2\pi}{KC} t^* \right) - \left(\frac{Re \pi}{KC} \right)^{1/2} x_3^* \right\} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial x_1^*} = \frac{U_c}{U_0} \frac{2\pi}{KC} \sin \left(\frac{2\pi}{KC} t^* \right) \quad (4)$$

上式中の U_c は鉛直方向の中央断面における流速振幅であり， KC は KC 数¹³⁾ ($\equiv U_0 T / D$ ， T は振動の周期) である．因みに式 (3) の右辺第二項は振動流境界層の鉛直分布を表現する部分である．

構造物は振動方向には単体で設置した．座標系については，水平方向には構造物の中心 (半円柱の場合，円柱の切断面)，鉛直方向には水路床を原点とするデカルト座標系を採用している．2 種類の等方格子を用いており，空間格子間隔を $x_i^* = 1/20$ とした粗格子，および $x_i^* = 1/30$ とした密格子を用いている．密格子の格子数は主流方向に 450，横断方向には 60，鉛直方向に 75 であり，粗格子ではそれぞれ 300，40，50 である．従って，計算領域は粗格子，密格子ともに，主流，横断，鉛直方向にそれぞれ $15D$ ， $2D$ ， $2.5D$ となる．

(2) 計算条件について

球体とは異なり，円柱形状を基本とする半円柱型構造物では，円柱の直径 D だけでなく構造物高さ k にも自由度がある．今回は過去の実験結果等を踏まえて $k=D/2$ とし⁴⁾，ブロックの縦と横の長さの割合 (アスペクト比) を $1/4$ 球型^{1)，2)，3)，5)}と一致させている．

今回の解析では比較の対象となるパラメータ以

外，即ち KC 数， Re 数以外の計算条件は，格子の粗密と計算周期数を除いて全て一致させた（表 -1 参照）．数値計算に関するパラメータとしては，MAC 法⁹⁾において圧力のポアソン方程式を解く際の反復回数の上限を 30 回，振動流の一周期を $KC=1$ ，3，5，10 についてそれぞれ $N=2000$ ，6000，10000，20000 ステップで解像することとし，5 ないし 8 周期間の計算を行った．このように KC 数に応じて N を変化させることは，実質的な時間格子間隔を一致させることに相当する．

3．計算結果および考察

(1) 空間格子間隔について

始めに計算の精度について若干の検討を行った．同様な条件下での実験結果があれば理想的であるが，今回の解析は Re 数が小さいため，振動流場における比較可能な非対称没水構造物周りの実験結果は著者らの知る限り存在しない．そこで，格子の粗密のみ異なる計算結果を比較することで，格子サイズが十分小さく取れているか否かについて検討することにした． $KC=1$ ， $Re=500$ の円柱と半円柱について，粗格子と密格子それぞれの場合に構造物に作用する振動方向の流体力 C_{dx}^* の最終周期の一周期間の時系列を図 -1 に示す． C_{dx}^* は $0.5 \rho A U_0^2$ で無次元化されており，圧力抵抗により評価されている（ A は X 方向の構造物の投影面積）．これより， $x_1^*=1/20$ と $x_1^*=1/30$ の結果は一致しており，格子サイズとしては十分小さな条件となっていることが理解される．

(2) Reynolds 数への依存性について

次に今回計算対象とした Re 数に関して検討を行った． Re 数のみ異なる粗格子で半円柱， $KC=1$ の場合の振動方向の力の最終周期の時系列を図 -2 に示す．粘性抵抗を無視して圧力抵抗のみで C_{dx}^* を評価していることもあり， Re 数による C_{dx}^* の差異は非常に小さいが，正負のピークの大きさを比較すると， $Re=100$ のみ絶対値がやや大きくなっている．また $Re=800$ においては波形に乱れが生じており，乱流への遷移の兆候が見られるが，本解析の時空間格子は乱流を十分に解像出来るほど小さくないため，次節以降は非周期性が卓越しない $Re=500$ 以下を検討対象とする．

図 -2 の条件で構造物に作用する X 方向の残差流体力 C_{dxm}^* (C_{dx}^* の最終周期の一周期平均値) を求めると， Re 数の小さい方からそれぞれ -9.3×10^{-2} ， -5.2×10^{-2} ， -6.0×10^{-2} ， -0.109 であった．これより， Re 数や KC 数が小さく波形の歪みも小さいこれらの条件下においても意図した方向の流体力が

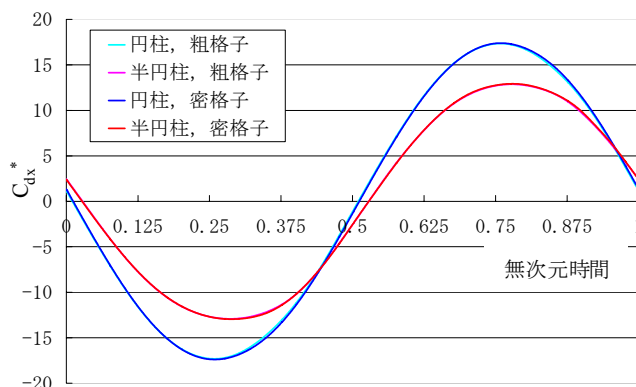


図 -1 振動方向の力の時系列 ($KC=1$ ， $Re=500$ ，最終周期)

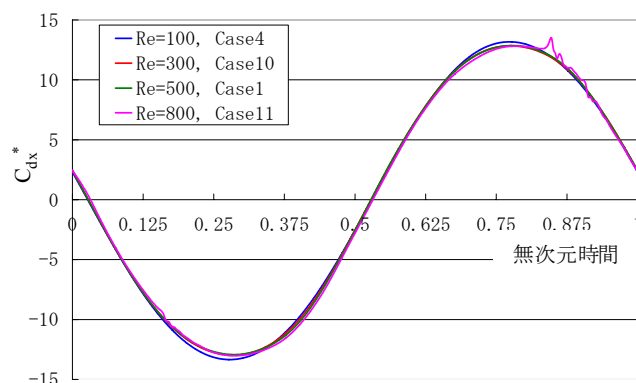


図 -2 振動方向の力の時系列 ($KC=1$ ，半円柱，最終周期)

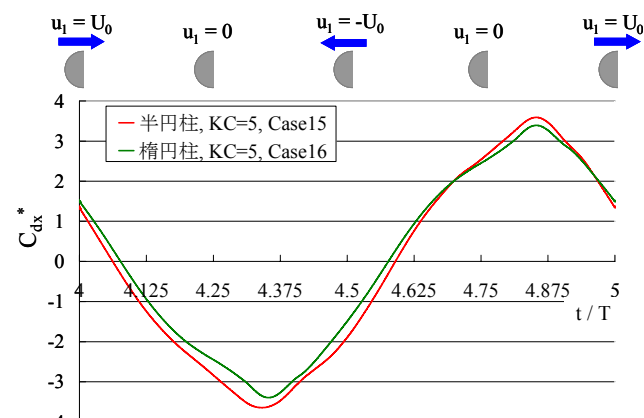


図 -3 振動方向の力の時系列 ($KC=5$ ， $Re=500$ ，5 周期目)

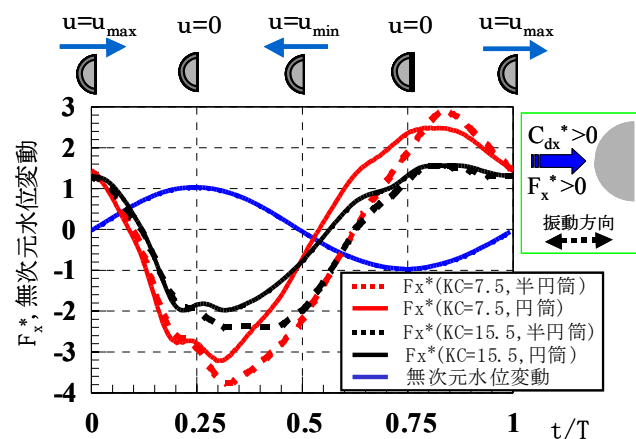


図 -4 実験による振動方向の力の位相平均波形 (押川ら⁴⁾より引用， $Re = 2.5 \times 10^4$)

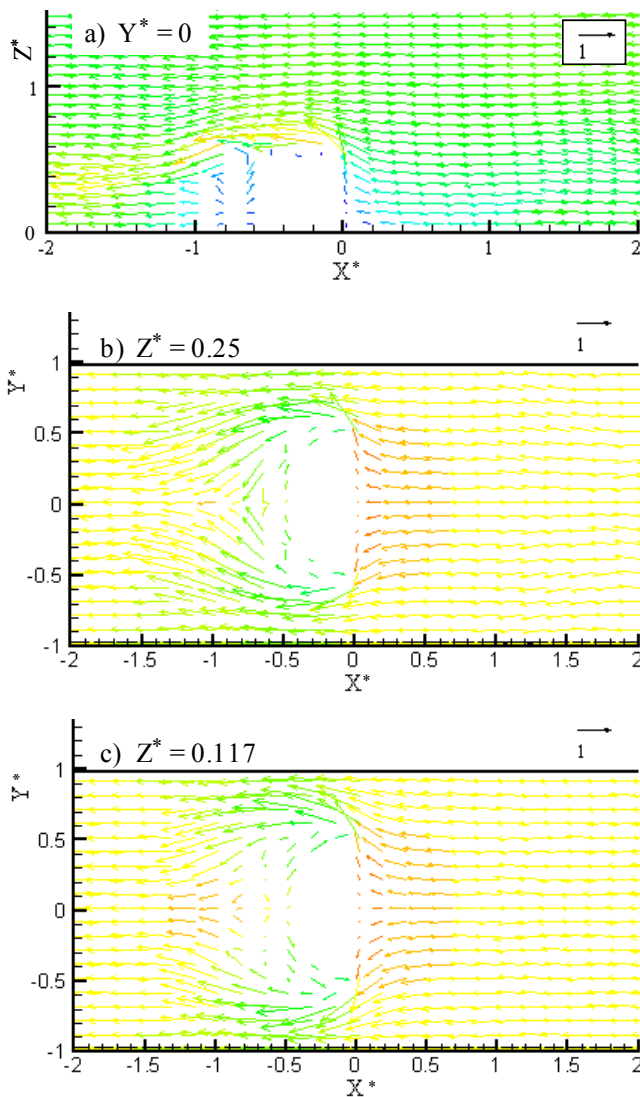


図-5 流れの瞬間像 (Case15, 半円柱, $KC=5$, $t/T=4.5$)

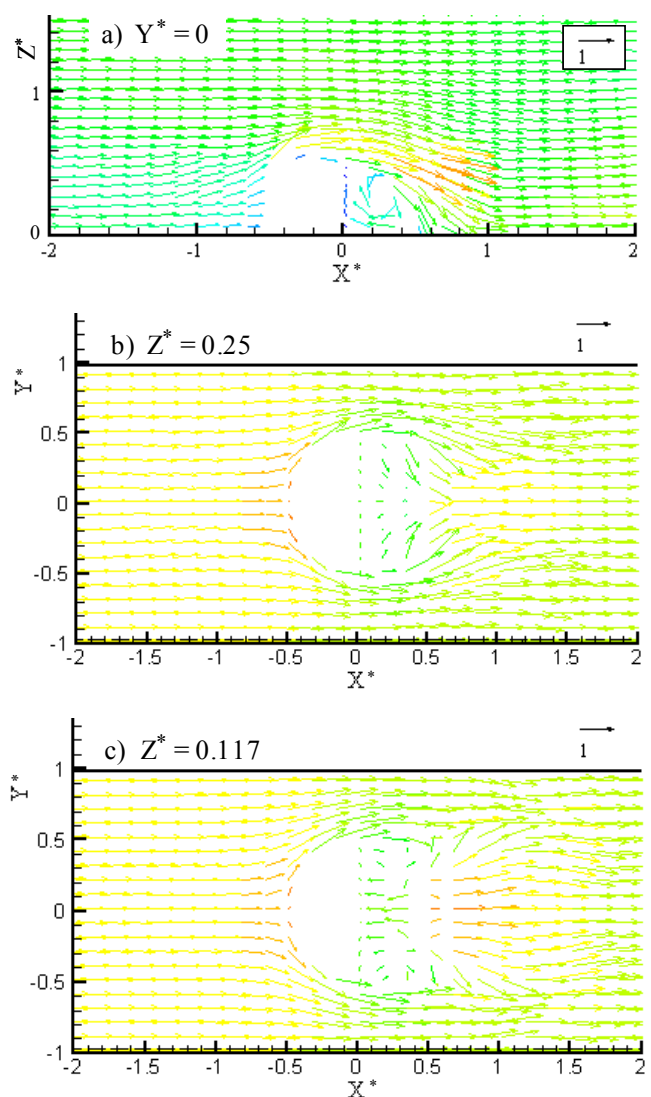


図-6 流れの瞬間像 (Case15, 半円柱, $KC=5$, $t/T=5.0$)

生じていることが理解される．粘性の影響がある程度小さくなると考えられる R_e 数が 300 以上では， R_e 数の増加に伴って残差流体力の絶対値が増加しているが，これも従来の実験結果^{2), 3)}と符合している．

(3) 構造物形状の非対称性について

非対称構造物（半円柱）周りの流況および構造物に作用する流体力の特性について，対称構造物との比較に基づいて検討を行った．対称構造物としては，半円柱の原型をなす円柱（直径 D と高さ k および投影面積が等しい）と，投影面積だけでなく構造物の X 方向長さと体積まで半円柱と同一となる楕円柱（長径 D ，短径 $D/2$ ，高さ k ）を用いた．

$KC=5$ ， $R_e=500$ ，密格子における半円柱と楕円柱の C_{dx}^* の最終周期の時系列を図-3に示す．図の上部には各時刻における半円柱型構造物と断面平均流速の関係を図示している．これより無次元時間 $t/T = 4.3$ の負のピーク付近において，半円柱と楕円

柱の C_{dx}^* の差異が大きいことが分かる．この位相は加速度の絶対値が最大となる時刻付近であり，著者ら^{2), 4)}による実験結果と符合する．参考として，半円筒とその原型の円筒に関する実験結果⁴⁾を図-4に示す．図の右側には X 方向の流体力の正の向きを図示している．図-3と図-4における KC 数が 5 に近い $KC=7.5$ の場合は，条件が大きく異なるにもかかわらず全体的には類似した波形となっている．両図はともに， $T/2$ に相当する位相付近においても対称構造物と非対称構造物で力の差異が大きくなっている．この位相は構造物の切断面に絶対値が最大となる流れが作用する時刻であることから，Morison 式¹⁴⁾中の抗力が卓越するため（定常流における）抗力係数が大きく異なることで C_{dx}^* に差異が生じている．図-4と比べると，図-3における対称な楕円柱と非対称な半円柱の差異は全体的に小さくなっているが，これは本解析の R_e 数が実験と比較して小さいためである．このことは，本解析において円柱と半円柱の流体力を併記した図-1で

は、図-4と異なりピークを含めて全体的に円柱の C_{dx}^* の方が半円柱より大きくなっていることと関連しており、換言すると本解析のような低 R_e 数の流れでは同径の円柱と半円柱では代表長さ（大きさ）が異なってくるということを意味している⁸⁾。

図-3の条件で C_{dxm}^* を比較すると、対称な楕円柱は 3.7×10^{-4} と微小であるのに対し、半円柱の C_{dxm}^* は -0.167 と絶対値が著しく大きくなっており、形状の非対称性の効果として残差流体力が生じていることが理解される。なお、この時のX方向の局所平均残差流速⁹⁾(X方向には原点の前後 $1.5D$ 、Y方向には全域、Z方向には水路床から $0.75D$ までの範囲で平均されたX方向の残差流速で、底層部の平均的な流れを意味する)は $U_m^*=2.9 \times 10^{-2}$ となっており、主流の振幅の3%程度の大きさの正の残差流が生じている。当然ながら、これより上側では負の残差流(U_m^* の補償流)が生じている。

(4) 半円柱周りの流れの構造について

Case15($KC=5$)の無次元時間 $t/T=4.5$ の場合の構造物付近の流れのベクトル図を、中央の鉛直断面($Y^*=0$)について図-5a)、構造物の半分の高さ $Z^*=0.25$ について図-5b)、底面付近の $Z^*=0.117$ について図-5c)に示す。また同条件における無次元時間 $t/T=5.0$ の場合の流れを図-6a)から図-6c)に図-5と同様に示す。図-6a)より $t/T=5.0$ の順流最大の位相では、横断方向(Y方向)に軸をもつ物体の高さ程度の顕著な渦が見られる。図-6c)は底面付近であるため、物体の前面の遮蔽領域($0 < X^* < 0.5$)は渦の下側で逆流となっている。同じ水平位置でやや上に相当する図-6b)では順流となっているが、これは図-6a)からも分かるようにその高さが渦の下側の負の流速域よりも上に位置しているためである。一方、逆流最大の位相である図-5a)をみると、前述のような明瞭な渦は見られず、構造物の後面($X^* \sim -0.8$)付近は放射状の流れとなっている。これは図-5b)および図-5c)から理解されるように、逆流時には構造物の円弧部に沿うような形で両サイドから周り込む流れが卓越して、中央断面付近($Y^*=0$)に流体が集中したために図-5a)では放射状の流れとなったものである。

比較のために、構造物形状のみ異なるCase16の楕円柱の $t/T=5.0$ におけるベクトル図を、図-6と同様に図-7a)～図-7c)に示す。図-7a)にはかなり扁平な形状ではあるが、図-6a)と同様に渦が認められ、また図-7b)、c)の水平面内の遮蔽域の流れも図-6b)、c)と類似している。従って、(構造物の滑らかな面に流れが作用する)順流時の非対称構造物周りの流れの構造は、対称構造物周りの流れの構造とほぼ一致しているものと考えられる。

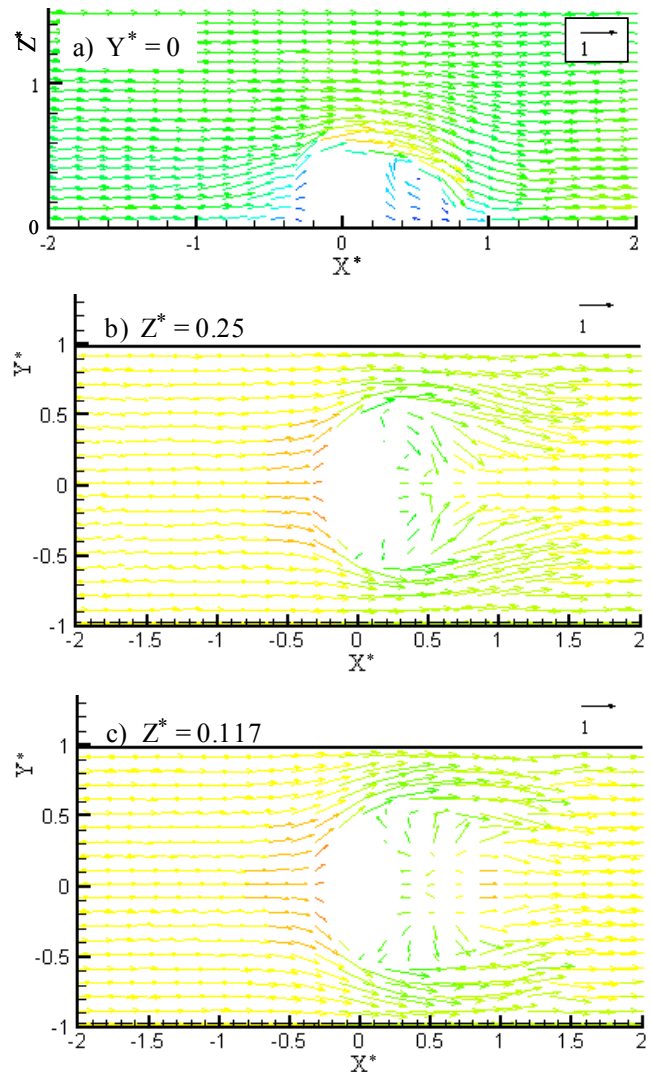


図-7 流れの瞬間像 (Case16, 楕円柱, $KC=5$, $t/T=5.0$)

最後に図-5～図-7の残差流の結果の例として、底面付近の $Z^*=0.117$ におけるベクトル図をCase15, Case16についてそれぞれ、図-8, 図-9に示す。半円柱では図-6a)において見られた渦により構造物の前面($0 < X^* < 0.5$)は逆流となっているものの、それ以外では構造物の前面の広範囲($-1 < X^* < 2$, $-1 < Y^* < 1$)に渡って意図した正の残差流が生じている。これは、左向きの流れが最大になる位相(逆流時)の図-5b)、c)において、構造物による縮流効果で速くなった流れ($-1.2 < X^* < 0$)は、直ぐに回復して周囲の元の流れとほぼ等しくなっている($X^* < -1.2$)のに対し、右向きの流れが最大となる位相(順流時)の図-6b)、c)では、構造物の前面の遮蔽域($0 < X^* < 0.5$)を除くと、縮流効果で高速となった流れが直ぐには回復しないためである。このように、構造物の前面の広範囲に渡って正の残差流が生じることは、波浪場に非対称没水構造物群を設置した従来の実験結果^{1), 5)}とも符合している。一方、図-9の楕円柱では、残差流の絶対値はそれ程小さくはないものの、対称な残差流分布と

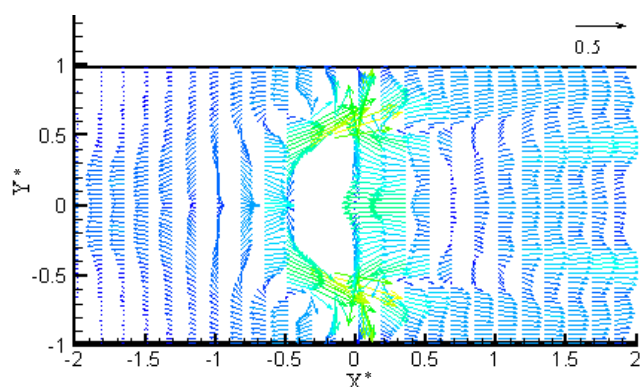


図-8 残差流の計算結果 (Case15, 半円柱, $Z=0.117$)

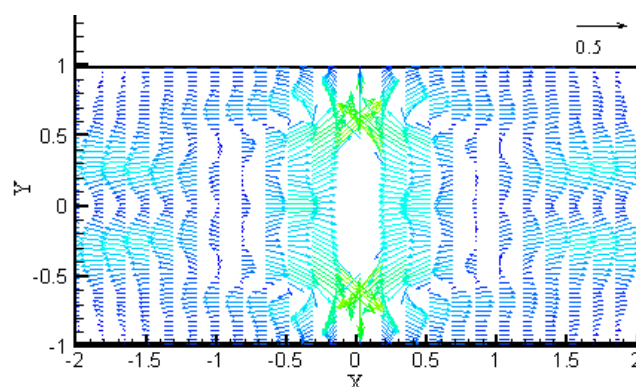


図-9 残差流の計算結果 (Case16, 楕円柱, $Z=0.117$)

なっており，対称構造物が物質輸送の促進に寄与しないことが理解される．

紙面の都合上図等は割愛するが，Case15, 16の図-5～図-7以外の位相の一部では鉛直方向（Z方向）に軸をもつ渦が見られている．因みに本節で述べた半円柱周りの流れの構造は，KC数が小さい場合（ $KC=1$ ）は残差流の形状等がやや異なっていたものの⁸⁾，Case14の $KC=3$ においては同様であった．

4．おわりに

非対称没水構造物を用いた底質輸送制御技術において有効な形状である半円柱の抵抗特性，およびその周辺の流況を数値解析に基づいて検討した．得られた知見をまとめると以下の通りである．

- (1) KC数が小さい半円柱型構造物周りの流れでは， R_e 数が大きくなるほど残差抵抗力（残差流体力の反作用）は大きくなる．
- (2) 順流最大の位相付近には横断方向に軸をもつ渦が生じるものの，逆流時には発生しない．また，非対称構造物周りの順流最大時の流れの構造は，対称構造物における流速最大時の流れと類似している．

謝辞：本研究は平成16，17年度科学研究費補助金（若手研究（B）），代表：押川英夫）の援助のもとに行われた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 小松利光，齋田倫範，小橋乃子，安達貴浩，柴田卓也：方向抵抗特性をもつ海底小規模構造物を用いた海底近傍の物質輸送の制御，水工学論文集，第45巻，pp.1087-1092，2001．
- 2) 押川英夫，小松利光，柴多哲郎，深田剛教：振動流場における非対称没水構造物の方向抵抗特性に関する実験的研究，水工学論文集，第47巻，pp.805-810，2003．
- 3) 押川英夫，柴多哲郎，小松利光：非対称没水構造物による波浪残差流生成特性，水工学論文集，第48巻，

No.2，pp.1255-1260，2004．

- 4) 押川英夫，國澤義則，鞠承淇，小松利光：振動流場における非対称没水構造物の抵抗特性，海岸工学論文集，第51巻，No.1，pp.671-675，2004．
- 5) Oshikawa H., Komatsu T. and Hashida M.: Control of substance transport due to plural submerged asymmetrical roughness in wave fields, Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management, Volume 1, pp.1017-1022, 2004.
- 6) 押川英夫，張信一郎，鞠承淇，小松利光：地行浜におけるBaNKシステムの現地試験，水工学論文集，第49巻，No.2，pp.1309-1314，2005．
- 7) 押川英夫，國澤義則，吉田秀樹，谷川晴一，黒田祐一，藤田和夫，小松利光：非対称没水構造物を用いた航路埋没防止技術に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第52巻，No.1，pp.486-490，2005．
- 8) 押川英夫，小松利光：往復流場における非対称没水構造物周りの数値解析，日本流体力学会 年会2005講演論文集，CD-ROM，2005．
- 9) Harlow, F.H. and Welch, J.E.: Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, Physics of Fluids, Vol.8, No.12, pp.2182-2189, 1965.
- 10) Baker, A. J.: Finite Element Computational Fluid Mechanics, Hemisphere, 1983.
- 11) Lamb S.H., Hydrodynamics, 6th Edition, CAMBRIDGE, pp.622-623, 1932.
- 12) 宇野木早苗，沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，pp.59-62，1993．
- 13) Keulegan, G. M. 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, 1950.
- 14) Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. and Schaaf, S.A., The forces exerted by surface waves on piles, J. Petrol. Technol., Petroleum Trans., AIME, Vol.189, pp.149-157, 1950

(2005.9.30受付)