

非対称振動流・定常流共存場中の円柱周辺の 流況および流体力の数値解析

A NUMERICAL STUDY OF FORCES AND VORTEX PATTERNS AROUND A CIRCULAR CYLINDER IN ASYMMETRIC OSCILLATORY PLUS MEAN FLOWS

馬替敏治¹・楳田真也²・由比政年³・石田 啓⁴

Toshiharu MAGAI, Shinya UMEMA, Masatoshi YUHI and Hajime ISHIDA

1正会員 金沢大学教授 大学院自然科学研究科(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)
2正会員 博(工) 金沢大学助手 大学院自然科学研究科(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)
3正会員 博(工) 金沢大学助教授 大学院自然科学研究科(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)
4正会員 工博 金沢大学教授 大学院自然科学研究科(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

This paper presents the results of numerical simulations on the unsteady flow fields around a circular cylinder placed in asymmetric oscillatory plus mean flows. The corresponding fluid forces acting on the cylinder are also examined. Systematic computations are carried out using the two-dimensional Navier-Stokes equations in a generalized curvilinear coordinate. The asymmetric velocity profile of the cnoidal waves is adopted for the oscillatory velocity fluctuation. The effects of the co-existing currents on the vortex motion and the fluid forces are investigated for various flow conditions. The structures of the wake vortices are described in detail, and the dependence of the maximum fluid force on the superimposed current are clarified.

Key Words : *oscillatory plus mean flow, asymmetry, fluid force, wake vortex, coexisting current*

1. 序 論

波動場に設置された円柱周辺の流況および流体力の特性を把握することは、海岸・海洋構造物への作用波力や周辺の流体場を予測するための基礎研究として重要である。これまでに、主に、波動場を正弦振動流で模擬する形で、小口径円柱を対象とした実験的および数値的研究が広く進められてきた。その結果、周期的に反転する流体場における渦の相互干渉により、振動流固有の流況パターンが形成されること、さらに、こうした流況の変化が、振動流方向および直交方向の流体力特性に大きな影響を与えることが明らかにされてきた（たとえば、Williamson¹⁾、林²⁾など）。

一方、浅水域において波高が増大し、波動の有限振幅性の影響が発現するような条件下では、流速波形は上下非対称となり、峯の部分より先鋭に、谷の部分がより平坦な流速変動が見られるようになる。

また、水面波形の前傾化に伴い、流速波形は、上下方向に非対称となるばかりでなく、波の峯・谷の前後方向においても非対称な変動を示す。さらに、波動成分とともに、海流、潮流および海浜流などの平均流成分が存在する場合には、重畳する流れの影響も重要となり得る。こうした、波と流れの共存場と波動単独の場合の流体力および流況特性の相違を正確に把握していくことも重要である。

波の非線形性を加味した非対称振動流場における柱体周辺の流況・流体力特性を論じた研究は比較的少ない。特に、流れとの共存場を対象としたものは、きわめてわずかである。こうした観点に基づき、本研究では、非線形のクノイド波を模擬した流速変動を有する非対称振動流場と定常流の共存場における円柱周辺の流体場を対象として体系的な数値解析を行い、渦流れと流体力変動の関連、KC 数および共存場における相対速度比と流体力の関係を数値的に検討する。

2. 解析手法および条件

(1) 解析手法

一般曲線座標系に変換された2次元Navier-Stokes方程式に対する数値解析モデルを用いて、非対称振動流と一様流の平行共存場（図-1）に設置された円柱周辺流体場の数値解析を行った。ここで、振動流成分の峯位相での最大流速を U_c 、谷位相での最大流速を U_T とする（ $U_c \neq U_T$ ）。また、定常一様流成分の流速を U_0 と表記する。解析手法の詳細に関しては、既報（由比ら³⁾；Yuhi et al.⁴⁾）を参照されたい。なお、本数値モデルによる流体力解析の妥当性については、正弦振動流場、正弦振動流と一様流の平行共存場に関する既往の実験結果（Obasaju et al.⁵⁾、岩垣ら⁶⁾）および、数値計算結果（Justesen⁷⁾）との比較を通じて、その定性的・定量的な有効性を検証済み^{3),4),8)}である。

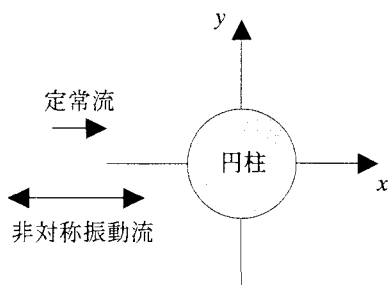


図-1 共存場の設定

(2) 非対称振動流成分のモデル化

浅海域において、波の振幅が波長や水深に対して有限の大きさを持つ場合、非線形性の影響が波動運動に現れる。この結果、定常進行波の条件下においても、波形および流速変動は上下非対称となる。例として、水深 $h^*=10\text{m}$ 、周期 $T^*=12\text{s}$ 、波高 $H^*=4\text{m}$ 程度の波浪を考えると、微小振幅波理論からの概算で、波長 $L^*=113\text{m}$ となり、相対水深 $H^*/h^*=0.4$ 、波長水深比 $L^*/h^*=11.3$ 、対応するアーセル数は50程度となる。なお、上付き添字 $*$ は、有次元量を表す。このように、相対水深が1/10以下となるような条件下における、波高の大きな波を対象とする場合には、一般に、クノイド波の理論が良く用いられる。

有限振幅波理論によるクノイド波の流速波形は楕円関数で表わされる。ここでは、簡単のため、非対称振動流速のモデル式として、クノイド波の流速波形を代数式で近似した田中ら⁹⁾の式に定常流速成分を加えて共存場とした。

$$U = \frac{2(A_s - 1)(2A_s - 1 - \sin \theta)}{(-1 + (2A_s - 1)\sin \theta)^2} + V_r \quad (1)$$

ここで、 θ は、以下のように定義される。

$$\theta = \frac{2\pi}{T^*} t^* \quad (2)$$

V_r は、定常流成分 U_0^* と振動流速成分の最大値 U_c^* の比、つまり、共存場における相対速度である。

$$V_r = \frac{U_0^*}{U_c^*} \quad (3)$$

式(1)第1項中の A_s は次式で与えられる。これは、流速波形の非対称性を表す指標である。

$$A_s = \frac{U_c^*}{U_c^* + U_T^*} \quad (4)$$

図-2は式(1)で表される流速変動の内、第1項の振動流速成分のみを取り出してその変動を示したものである（ $V_r=0$ に相当）。 $A_s=0.5$ のときは上下対称な正弦波形を示すが、 A_s の増加に伴って、非対称性が強くなり、峯の部分より急峻に、谷の部分より平坦になる。今回解析を行った条件、すなわち、 $A_s=0.75$ の場合にその特徴が明確に現れている。これに一様流成分が加わると、その正負の値によって流速波形は上下に平行移動する。

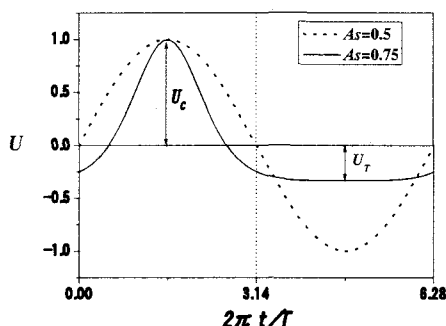


図-2 振動流成分の流速波形

(3) 解析条件

初期条件として、静止流体場を考え、20周期分の時間発展計算を行った。境界条件は、円柱表面での速度にはノースリップ条件を与え、圧力は境界層近似により圧力勾配ゼロの条件を用いた。また、外部境界では、式(1)で流速変動を指定した。

振動流成分に対するKC数を次式で定義する。

$$KC = \frac{U_c^* T^*}{D^*} \quad (5)$$

先に例示したような波浪条件下で、円柱直径 D^* を0.5～1.0m程度と想定すると、底面近傍におけるKC数は20～40程度となる。一方、今回のような2次元計算モデルを用いて、正弦振動流と一様流の共存場を解析した過去の計算結果においては、 $KC \leq 20$ 程度の領域で計算値と実験値は定性的・定量的に良く

一致するが、 $KC=30$ 前後では定量的な一致度が低下する傾向が見られた。また、先の条件下で代表流速を算出すると $O(1)\text{m/s}$ となり、対応するレイノルズ数が 10^6 程度の乱流場となる。さらに、このような高レイノルズ数域においては、流体場の3次元性が顕著になることも予想される。これに対し、前節でその概要を述べた2次元解析モデルは、基本的に層流運動を対象としたものである。以上の点を考慮し、本研究では、研究の第1段階として、 $KC \leq 20$ 、および、実スケールより小さい実験室スケールでのレイノルズ数域($O(10^3)$)を対象に計算を行った。実海象条件と整合し、3次元効果を含んだ、より大きな KC および Re 数域での解析や、非対称振動流と一樣流の共存場に関する実験的検討は今後の課題としたい。以下では、Stokesパラメータ $\beta (=Re/KC)$ を20に固定し、 $V_r = -0.5 \sim 0.5$ 、 $A_s = 0.5 \sim 0.75$ 、 $KC \leq 20$ の条件下で解析を行った結果を示す。

3. 解析結果および考察

(1) 流況パターン

本節では渦放出パターンの解析例として、 $KC=16$ の場合に着目することとし、 $A_s=0.75$ で、 $V_r=0$ 、 -0.5 、 0.5 の場合における円柱周辺の流況を比較する。図-3、図-6および図-9は、1周期分に対応した圧力

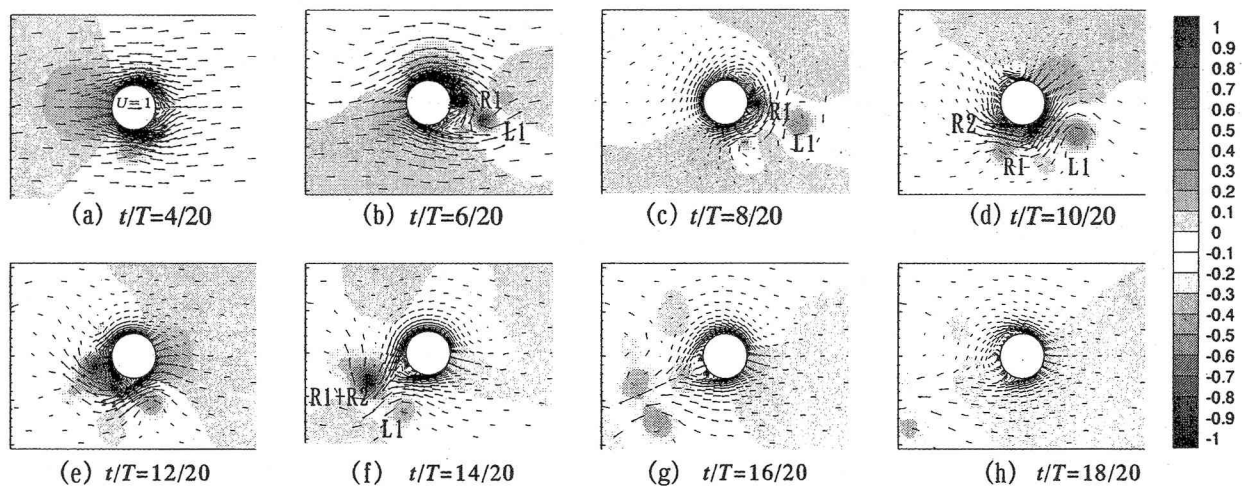


図-3 流況パターン ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=0.0$)

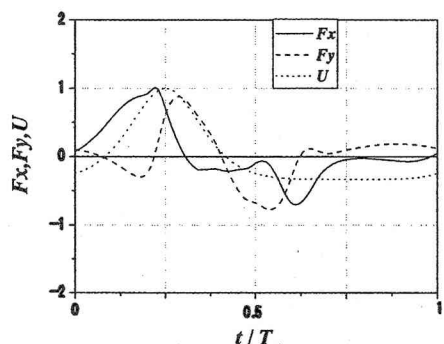


図-4 流体力の時間変化 ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=0.0$)

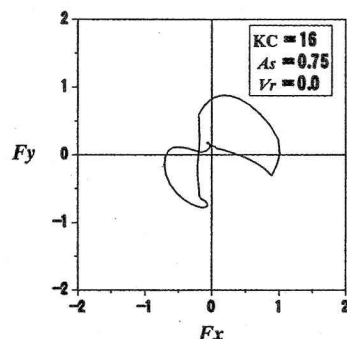


図-5 流体力 F_x , F_y の関係 ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=0.0$)

分布および速度ベクトルの時間変化を示す。ここでは、渦流れパターンが比較的安定した状態の特徴的瞬间を示している。図-4、図-7および図-10には、対応する周期の円柱に作用する流体力(圧力とせん断力の和)の時間変化を、図-5、図-8および図-11には、振動流方向に平行な流体力 F_x と直交する流体力(揚力) F_y との関係を示した。なお、流速は U_c^* で、流体力 F_x , F_y は、 $0.5 \rho^* D^* U_c^{*2}$ で無次元化している。

a) 非対称振動流場 ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=0$)

図-3(a)および図-4より、円柱上下表面に渦が発生し、流速が最大となる少し前($t/T=4/20$)で F_x が正の最大値を示す。これらの渦は徐々に発達しながら円柱表面に沿って右へ移動していき、より発達した下側の渦(L1)が $t/T=5/20$ で放出される。 $t/T=6/20$ 以降では F_x は負に転ずる(図-4)。上側の渦(R1)は円柱に沿って下側からさらに前方へと廻り込むうちに徐々に小さくなる(図-3(c), (d))。 $t/T=10/20$ で円柱前方で新たな渦(R2)が発生し(図-3(d))、その後下側へ廻り込んできた渦(R1)と合体する。

一方、先に放出された下側の渦(L1)は、徐々に弱くなりながら $t/T=8/20$ からは円柱の下側へ廻りこみ、前方で合体した渦(R2+R1)と $t/T=13/20$ で対をなして放出され、円柱の左下方へと移動していく(図-3(f))。揚力は $t/T=6/20$ で正の値をとり、 $t/T=8/20$

からは負の値をとる（図-4）。渦対放出後は揚力および振動方向流体力ともに小さい値をとる（図-4）

b) 順流共存場（ $KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=+0.5$ ）

振動の峯位相前半に円柱表面上下に発生した渦は、円柱表面に沿って後方（右側）へ移動する。図-6に示すように、 $t/T=4/20$ で上側の渦が放出され、振動方向流体力は正の最大値を示す（図-7）。放出された渦は、その後、上方へ移動している。 $t/T=6/20$ までは円柱下側で渦が発達し続け、揚力が負の極値を示す（図-7）。この円柱下側の渦は円柱に沿って円柱後方へと移動し、 $t/T=9/20$ で放出されて、先に上側から放出された渦と対になって円柱の上方へ移動していく（図-6(e), (f)）。後半周期には振動方向流体力、揚力ともに値は小さく、明確なピークも認められない（図-7）。

c) 逆流共存場（ $KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=-0.5$ ）

図-9に示すように、 $t/T=0/20$ では、円柱の左側の前周期末に残っていた二つの渦は、速度振幅が負から正へ反転する時点で円柱に再接近し、円柱に近い方の渦は消滅し、もう一方の渦は速度振動に従った運動をする。 $t/T=4/20$ で、円柱下側表面に渦(L1)が発生し、揚力は負の極大値を示す（図-9(a), 図-10）。この渦(L1)は $t/T=6/20$ では正方向の流速によって円柱下側表面に沿って右方へ移動するが、流速が再び負になると円柱下側に戻る。流速が負に転じてからも円柱上下で渦の発達・放出が生じ、その挙動によって揚力が正、負と変動する（図-10）。振動方向流体力は正から $t/T=5/20$ 付近で0、負となりその後は大きな変動は示さない（図-10）。

図-3, 図-6に示すように、 $V_r=0$, $+0.5$ の場合は、渦対が一つ放出されるが、図-9の $V_r=-0.5$ の場合には、渦対が一つとその他に渦が二つ放出されている。 F_y に着目すると、 $V_r=0$ では、正から負に転じ、後半周期ではほぼ0であり（図-4）、 $V_r=+0.5$ の場合は、常に正となるのに対して（図-6）、 $V_r=-0.5$ の場合には、 $t/T=6/20$ 以後は、多少の変動があるものの -0.5 前後の値をとっている（図-10）。一方、 F_x は、 $V_r=0$ では前半周期で渦の発生に応じて正負の値を取り、後半周期ではほぼ0である（図-4）。 $V_r=+0.5$ のときは1周期に渡って負になるのに対して（図-7）、 $V_r=-0.5$ の場合には、渦の発生に応じて正・負の値をとっている（図-10）。

(2) 流体力

図-12は無次元化された最大流体力（絶対値） F_{max} の V_r に対する変化を示したものである。最大流体力は4周期目以降の各周期ごとの最大値を平均し

て求めた。図中には、比較のため、 $KC=16$ の場合に加えて、 $KC=8$ に対する結果を合わせて表示した。ここで、 KC が異なると、無次元化の基準となる流体力も異なることを付記しておく。なお、 KC 数がさらに小さい場合の流体力変動は、主に流速変動の加速度に起因する慣性力に支配されるため、定常流成分を重ね合わせることによる影響はきわめて小さくなる。

振動流成分が対称波形を有する場合には、定常流成分の大きさのみが重要であり、その方向（符号）を逆転させても、最大流体力の大きさは変化しない。この場合、最大流体力の解析結果は、 $V_r=0$ に対して左右対称となる。一方、本研究で対象としたような非対称振動流に一樣流成分を重ね合わせた場合には、一樣流速の大きさに加え、その方向が重要な意味を持つ。つまり、非対称振動流の場合には、最大流体力の変化は、図-12, 図-13に示すように、一般に、 $V_r=0$ に対して非対称となる。図-12から、 $KC=8, 16$ 双方の場合において、 V_r の増加に伴って、最大流体力の値が大きくなっていることが確認できる。その変化は、 KC 数が大きい場合の方が顕著である。この例では、 $V_r=-0.5$ から 0.5 と変化する間に、 $KC=8$ では15%程度の変動が見られるのに対し、 $KC=16$ では、約2倍程度の増加が見られる。 F_{xmax} の増加は、共存する流れにより、峯位相での（共存場としての）最大流速が増加することに対応している。これは、高 KC 域で、抗力成分が卓越すること、および、最大流体力が発生する位相が、最大流速の位相と近いことも整合する。このように、非対称振動流の場合には、重畳する流れの流速が同じであっても、その作用方向が逆流側か順流側かで作用流体力が大きく変化することは重要である。

図-13は流れの主方向（ x 軸方向）における最大流体力 F_{xmax} （無次元）の V_r に対する変化を示したものである。ここで示した解析条件下においては、 y 軸方向の流体力（揚力）変動は比較的小さく、 x 軸方向の値が支配的となる。このため、図-13の傾向は、図-12とほぼ同様となっている。

図-14は揚力の最大値 F_{ymax} （無次元）の V_r に対する変化を示したものである。予想されるように、 KC 数が小さい方が揚力の値も小さい。 $KC=8$ の場合、逆流共存場で揚力値が増加している。これは、 U_c の0.75倍程度に達する比較的強い逆流の継続時間が長くなることで（図-2参照）、後流渦の発達が促進され、 x 軸に対する流れ場の非対称性が誘起されやすくなったためと考えられる。順流の場合には、最大流速は逆流の場合よりも大きくなるが、1周期中の大半の位相において流速は比較的小さい値を取

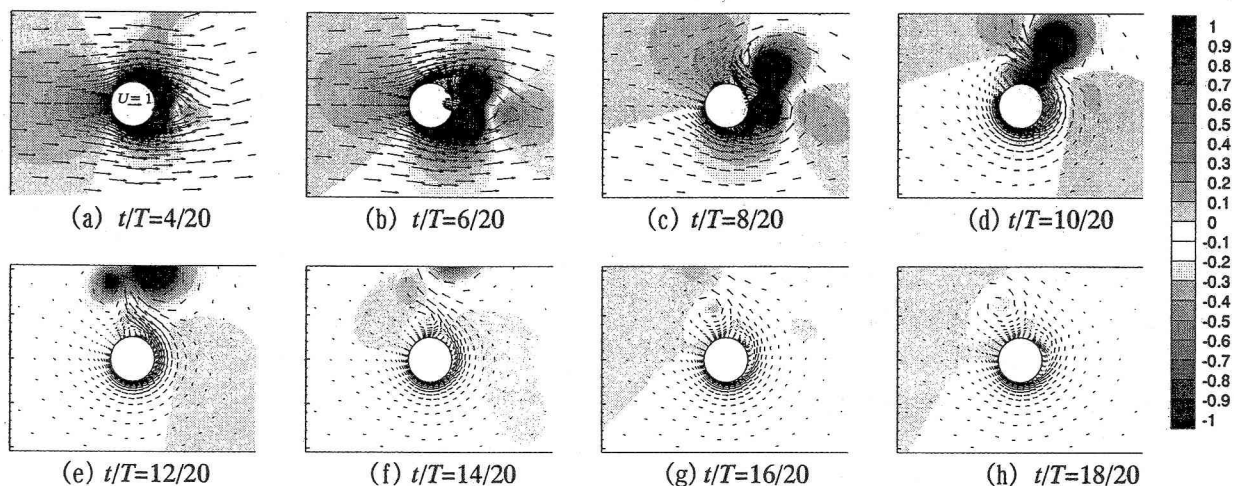


図-6 流況パターン ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=+0.5$)

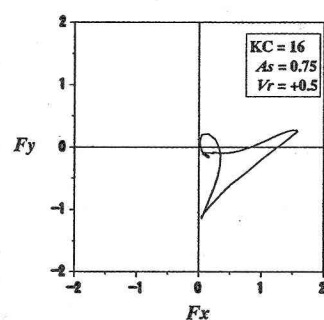
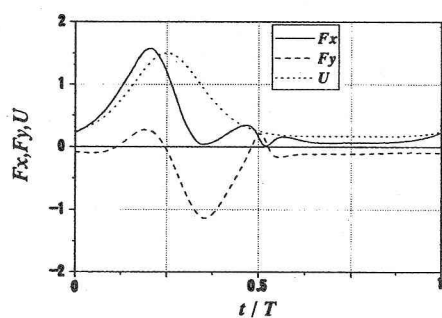


図-7 流体力の時間変化 ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=+0.5$) 図-8 流体力 F_x, F_y の関係 ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=+0.5$)

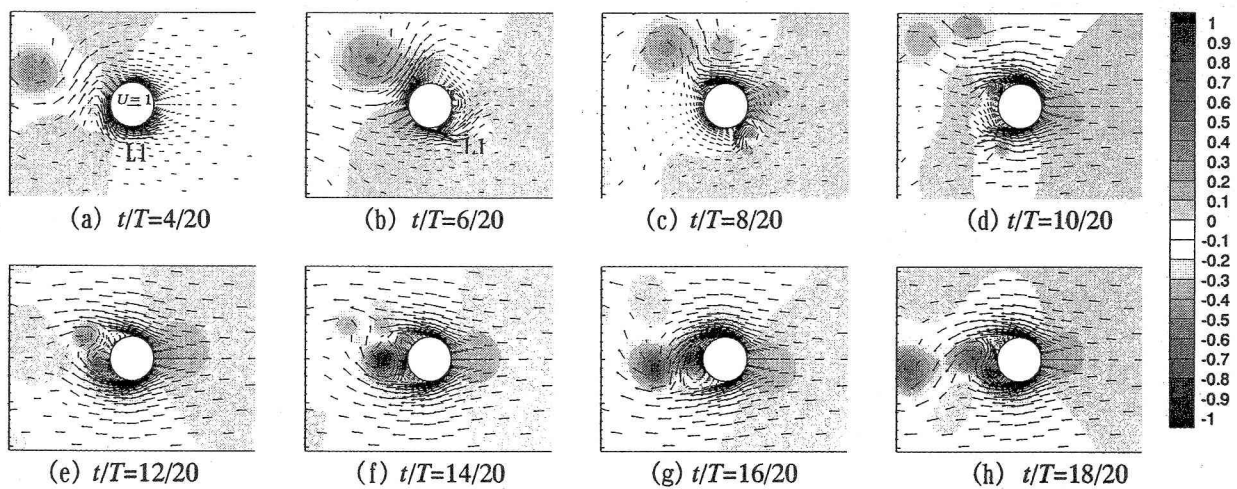


図-9 流況パターン ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=-0.5$)

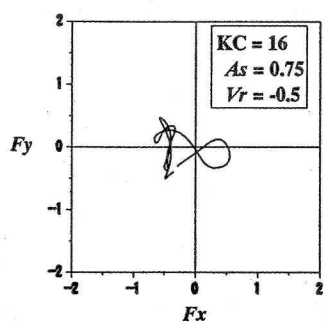
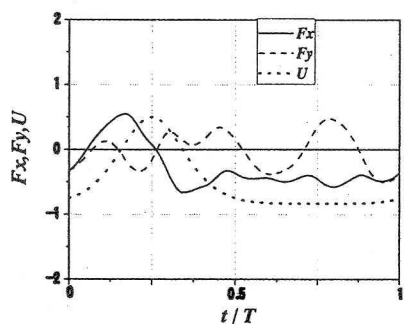


図-10 流体力の時間変化 ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=-0.5$) 図-11 流体力 F_x, F_y の関係 ($KC=16$, $A_s=0.75$, $V_r=-0.5$)

り、後流渦や流れ場の非対称性が十分に発達しないために、揚力の値が抑えられたものと考えられる。このように、揚力を考える場合には、流速の最大値のみでなく、一定強度を有する流れの継続作用時間にも注意を払う必要がある。一方、 $KC=16$ では、 $V_r=+0.25$ の場合を除いて、全体に V_r が増えるにつれて揚力の値が増加する傾向が確認できる。これは、図-13の場合と同様に、最大流速が増加することに対応している。 $V_r=+0.25$ の場合で F_{ymax} が減少した理由については更なる検討が必要である。

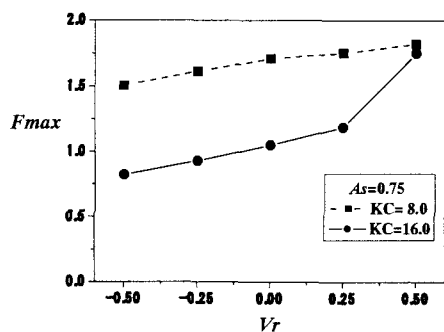


図-12 最大流体力のKC, V_r に対する変化

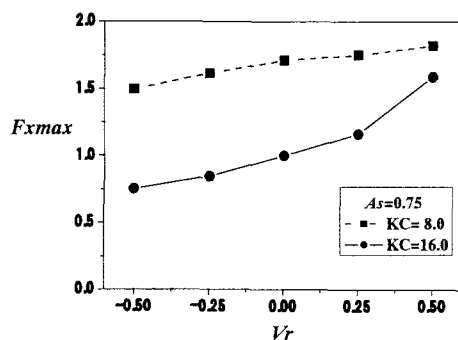


図-13 振動方向流体力の最大値のKC, V_r に対する変化

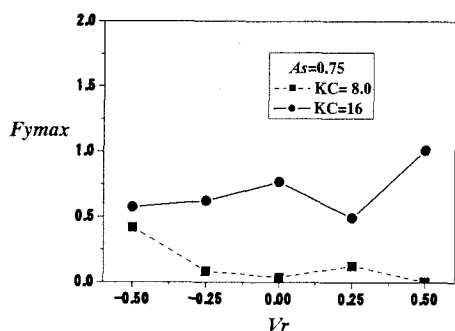


図-14 揚力の最大値のKC, V_r に対する変化

5. 結 論

一般曲線座標系に変換された2次元Navier-Stokes方程式に対する数値解析モデルに基づいて、非対称振動流と定常流が共存する流体場中に設置された円柱周辺流体場に対する数値解析を行い、流況および

流体力特性を検討した。本研究で得られた主要な成果は、次のようにまとめられる。

- 1) クノイド波の流速波形を模擬した非対称振動流と一様流の平行共存場を考え、 V_r およびKC数の違いによる渦放出パターンの変化や対応する流体力変動の特性等、一様流成分が付加されることによる影響を明らかにした。
- 2) 非対称振動流と一様流の共存場においては、一様流の大きさのみでなくその作用方向が重要であり、逆流共存場と順流共存場では、最大流体力の値が2倍程度まで変化し得ることを示した。
- 3) 振動方向流体力の最大値は、主に流速の最大値に依存し、 V_r の値とともにその値も増加することを示した。一方、揚力に関しては、場合により、流速の最大値に加えて、一定強度を有する流れの継続作用時間を考慮する必要があることを示した。

謝辞：本研究の実行に際し、助力を賜った中田貴之氏（元金沢大学学生）に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Williamson, C. H. K., Sinusoidal flow relative to circular cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 155, pp.141-174, 1985.
- 2) 林建二郎 静止円柱に作用する流体力, 土木学会水理委員会基礎水理部会研究分科会報告, pp.1-16, 1996.
- 3) 由比政年・石田啓・榎田真也 正弦振動流中に設置された円柱に作用する流体力特性の数値解析, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.736-740, 1998.
- 4) Yuhi, M., Ishida, H. and Umeda, S., A numerical study of sinusoidal oscillatory flows around a vertical wall-mounted cylinder, *Coastal Engineering Journal*, Vol.41, No.3&4, pp.225-246, 1999.
- 5) Obasaju, E.D., Bearman, P.W. and Graham, J.M.R., A study of forces, circulation and vortex patterns around a circular cylinder in oscillating flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 196, pp.467-494, 1988.
- 6) 岩垣雄一・浅野敏之・永井文博 波と流れの共存場に置かれた円柱に作用する流体力 第29回海岸工学論文集, pp.433-437, 1982.
- 7) Justesen, P.A., Numerical study of oscillating flow around a circular cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 222, pp.157-196, 1991.
- 8) 榎田真也・馬替敏治・由比政年・石田啓 振動流と定常流の共存場に設置された円柱に作用する流体力特性の数値解析 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.886-890, 2001
- 9) 田中仁・山路弘人・アーマドサナ・首藤伸夫 クノイド波を模擬する非対称振動流発生装置の提案とその基本特性の検討, 土木学会論文集, No.565/II-39, pp.111-118, 1997