横流れ中に弾性支持された4×4 正方格子円柱集合体 P/D の円柱間隙流れ偏流に及ぼす影響

Effect of P/D Ratio Associated with Square-Pitched 4 × 4 Cylinder Arrays in Cross Flow on Gap Jet Drift Characteristics

菱田久志、足立 孝、埼玉工大、埼玉県大里郡岡部町、e-mail: <u>hishida@sit.ac.jp</u>、<u>adachi@sit.ac.jp</u> 小池修一、三菱総合研究所、東京都千代田区大手町 2-3-6、e-mail: <u>koike@mri.co.jp</u> 神田憲男、埼玉工大大学院システム工学専攻

H. Hishida, T. Adachi, Saitama Inst. Tech., Okabe Machi, Saitama Ken, e-mail: <u>hishida@sit.ap.jp</u>, <u>adachi@sit.ap.jp</u> S. Koike, Mitsubishi Research Institute, Inc., 2-3-6 Otemachi, Chiyoda-Ku, Tokyo, e-mail: <u>koike@mri.co.jp</u> N. Kanda, System Engineering, Graduate School, Saitama Inst. Tech.

For 4×4 square-pitched circular cylinders with P/D = 1.35 and 1.5 elastically supported inline to the cross fluid flow under Re = 1000, it was numerically found that the gap jet between rows of cylinders drifts its flow trajectory periodically and partly diverges from the outermost raw gap into the external free flow region. The Strouhal frequency associated with such periodic biasing of the gap jet flow was found to be St = 0.09. This periodic biasing was found to be the primary cause for the time-variation in the lift and the drag acting on cylinders. Vortices are formed and advance in the close vicinity of cylinders only in the outermost rows or the trailing column in synchronization with such periodic biasing of the gap jet flow affecting the lift and the drag on the corresponding cylinders but no appreciable vortex is formed inside the array. However, for assemblies with P/D > 2.0, the Strouhal frequency component of St = 0.18 was found in the time-variation in the lift and the drag. The corresponding vortex shedding is seen on cylinders inside the array.

1. 緒言

流体中に保持された構造物の流力振動挙動評価はその疲 労破壊等に係る安全性確認に重要であり、過去に多くの実験 データの蓄積と解析手法の開発がなされてきた⁽¹⁾。なかでも、 管群構造物は伝熱工学の分野で一般的であるが、密な構造の 場合、横流れに起因する管群の流力振動挙動を実験的に把握 するにはかなりの困難を伴う⁽²⁾。近年、電算機の性能と数値 計算技術の著しい進歩により電算機シミュレーションがモ ックアップ実験と平行して各種形状の管群構造物を対象と した流力振動挙動評価に採用されるに至った^{(3)~(7)}。

管群構造物の流力振動挙動評価に関連して実施した一様 な横流れ中に置かれた side by side 構成 2 円柱についての円 柱中心間距離 P と直径 D の比 P/D をパラメータとした電算 機シミュレーション結果によると、P/D 2.0 では各円柱に対 する揚力変動の Strouhal 周波数は Kármán 渦放出周波数と 概略一致する St = 0.21 を与え、2 円柱の揚力変動はほぼ 180° の位相差を示すが、P/D が 2.0 より減少するに従い円柱間隙 を流れるジェット流の周期的偏流挙動が揚力変動の Strouhal 周波数に重要な影響を及ぼすこが示された⁽⁸⁾。また、具体的 な管群構造物の一部である 4×4 正方格子配列円柱集合体に ついては、P/D=1.35 及び 1.50 の場合、集合体を構成する円 柱に作用する抗力及び揚力の時間挙動に対し上記 side by side 構成 2 円柱の場合と同じく集合体行間隙内ジェット流 の垂直方向への周期的偏流が支配的である事が明らかとな った⁽⁹⁾。

本研究の主目的は、上述の数値解析結果を踏まえ、一様な 横流れ中に置かれた 4×4 正方格子配列円柱集合体について P/Dをパラメータとした集合体周辺流域における流速場及び 円柱表面周方向圧力分布の時間変動挙動を電算機シミュレ ーションにより求めることで、集合体行間隙内ジェット流及 び集合体外部流域より流入する列間隙ジェット流の周期的 偏流と、渦の発生とその移動及び円柱表面周方向圧力分布の 時間変動挙動との相関性を検討し、それらに起因する抗力及 び揚力の周期特性の P/D に対する依存性を明らかにするこ とにある。

2.数値解析モデル

以下に、本シミュレーションで用いられた解析モデルの概要を記述する。円柱群を包括する物理空間において、流れ場(u,v)は Navier-Stokes 方程式及び連続方程式によって支配される。これらの式より圧力 p に関する Poisson 方程式が得られ、差分化した後 Navier-Stokes 方程式と連立させて SOR 法により逐次数値解を求める。Navier-Stokes 方程式に含まれる対流項については3次の風上差分⁽¹⁰⁾を適用しシミュレーション精度の向上を図っている。通常、シミュレーションの対称となる構造物の流れと接触する境界形状は単純でなく時間と共に移動するため、物理空間(x,y,t)で記述された支配方程式を一般曲線座標系で記述される計算空間(x,h,t)に変換して数値解を求める手法が境界条件の設定等の点でより有利である⁽¹¹⁾。

無次元時刻 t_n における流れと接触する円柱境界面上の圧 力分布及び周辺の流速分布が求まると、円柱に対する揚力及 び抗力と、無次元時間Dt 経過後の円柱中心軸の無次元変位が 運動方程式の数値解より得られるので、円柱表面の無次元移 動速度と計算グリッド座標を更新して次のタイムステップ $t_{n+i}=t_n+Dt$ に逐次移行する。Fig.1 に数値計算の流れ図を示す。 移動境界条件を含む解析モデルの詳細については既報⁽¹²⁾を 参照されたい。

3. 数值解析結果

Fig.2 に円柱集合体配列の概略図を示す。円柱はそれらの 位置する行番号 *i* 及び列番号 *j* を用い(*i*,*j*)にて識別する。物理 空間座標(*x*,*y*)は円柱直径で無次元化され、計算領域は *x*-方向 に第 1 列円柱の左側無次元距離 15 に位置する *y*-軸と平行な 境界面より第 4 列円柱の右側無次元距離 25 に位置する *y*-軸 と平行な境界面までと、*y*-方向に第 4 行円柱の上側無次元距 離 10 に位置する *x*-軸と平行な境界面より第 1 行円柱の下側 無次元距離 10 に位置する *x*-軸と平行な境界面までとし、左



Fig.1 Schematic Diagram of Computational Flow



Fig.2 Schematic Presentation of Cylinders in Physical Domain

側境界面よりx-軸に平行に無次元速度1の横流れを設定した。 数値シミュレーションのパラメータとして選択した P/D

値は1.35, 1.50, 1.80, 2.10 及び2.50 であり、Reynold 数 *Re*= 1000、無次元時間刻み幅*Dt*=0.001、計算グリッド数=296×271、 また弾性支持された円柱の質量減衰パラメータ及び無次元 固有振動数はそれぞれ0.236 及び0.853 に固定した。隣接す る各円柱間隙内及び円柱表面の境界層内に設定された計算 格子数はそれぞれ30本及び約10本である。

3.1 P/D=1.5 の場合の流れ挙動

以下に、揚力及び抗力係数の時間変動幅が大きい集合体最 外層に位置する円柱の代表例として円柱(4,3)及び(4,4)を取 り上げ、それら円柱周辺流域における流れ挙動についての数 値解析結果を報告する。

Fig.3a 及び Fig.3b に 100 t 115 における円柱(3,3)と(3,4) 及び円柱(4,3)と(4,4)の行間隙を流れる x-方向無次元質量流束 の時間変動挙動を、Fig.4a 及び Fig.4b に円柱(2,4)と(3,4)及び 円柱(3,4)と(4,4)の列間隙を流れる y-方向無次元質量流束の時 間変動挙動をそれぞれ示す。これらの図から円柱間隙無次元 質量流束は周期的に偏流し、その Strouhal 周波数は St 0.09 であることが理解し得る。当然のことながら Fig.3a 及び Fig.4a より円柱(2,4)と(3,4)の間隙を外部流域に向かって流出 する無次元質量流束がピーク値を示す t 108 近傍で円柱 (3,3)と(3,4)の行間隙を流れる x-方向無次元質量流束は最小値 を示し、Fig.3b 及び Fig.4b より円柱(3,4)と(4,4)の間隙を外部 流域に向かって流出する無次元質量流束がピーク値を示す t

109 近傍で円柱(4,3)と(4,4)の行間隙を流れる x-方向無次元 質量流束は最小値を示す。数値解析の結果、これら行間隙及 び列間隙ジェット流の周期的偏流が円柱の抗力及び揚力の 時間挙動に支配的であることが明かとなった。以下に代表例 として取り上げた円柱(3,4)及び(4,4)周辺流域における流れ 挙動について示す。



Fig.3a Time-Variation in Mass Flow Rate through Gap (3,3) and (3,4)



Fig.3b Time-Variation in Mass Flow Rate through Gap (4,3) and (4,4)

(1) 円柱(3,4) 周辺流域における流れ挙動

Fig.5 及び Fig.6 に *t*=108 における円柱(3,4)周辺流域の無次 元流速ベクトル場と円柱(3,4)表面周方向静圧分布をそれぞ れ示す。円柱表面周方向位置*q*は円柱上流側を原点とし時計 回りに定義する。Fig.4a に示す円柱(2,4)と(3,4)の列間隙を流 れる無次元質量流束が *t* 108 近傍で上向きのピーク値を取 ることに関連して Fig.5 に示す様に円柱(3,4)周方向位置 q =310°~320°周辺で集合体行間隙ジェット流の上側への偏流 に起因したよどみ点の発生が見られる。これは Fig.6 に示す 無次元静圧分布のピークに対応する。

Fig.7 及び Fig.8 に円柱(3,4)に対する揚力係数及び抗力係数の時間挙動と、対応するフーリエパワースペクトルをそれぞ



Fig.5 Flow Velocity Vector Field at t=108.0, P/D=1.5



Fig.6 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (3,4) at t=108.0

れ示す。揚力係数及び抗力係数が共に t=105~109 で正の値を 示すのは主に上述のよどみ点に起因している。揚力係数が t=107 で一旦下降して再び上昇するのは、t=104 で円柱表面周 310°に形成されたよどみ点が t=107 でq 方向位置q 325° へ移動し、再び t=109 でq 310°に戻って消滅すること及び、 Fig.5 に見られる様に円柱(3,4)表面周方向位置q 140°近傍 を渦が上向きに移動し Fig.6の対応する周方向位置における 静圧が局所的に低下することの相乗効果によるものと考え られる。Fig.9 及び Fig.10 に t=102 における円柱(3,4)と(4,4) の列間隙流域及び(4,4)下流側流域における無次元流速ベク トル場と、円柱(3,4)表面周方向静圧分布をそれぞれ示す。 Fig.4b は円柱(3,4)と(4,4)の列間隙部に外部流域から t 102 で 流入する無次元質量流束がピーク値をとることを示し、この とき Fig.9 の無次元流速ベクトル場より明かな様に列間隙ジ ェット流は円柱(4,4)側に偏流し、対向する円柱(3,4)の表面に は非常に緩やかな反時計回りの逆流が誘起され、q 230°近 傍で円柱(3,4)に向かって進む局所流が見られる。従って、



Fig.7 Time-Variation in the Drag and the Lift on Cylinder (3,4)



Fig.8 Fourier Power Spectra associated with the Drag and the Lift on Cylinder (3,4)



Fig.9 Flow Velocity Vector Field at t=102.0, P/D=1.5

Fig.10 に見られる様に *t*=101~104 で円柱(3,4)周方向位置*q* =180°~270°周辺で無次元静圧が上昇し、Fig.7 に示す円柱(3,4) に対する揚力係数及び抗力係数はこれに対応して正及び負のピーク値をそれぞれ示す。



Fig.10 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (3,4) at t=102.0

(2) 円柱(4,4) 周辺流域における流れ挙動

Fig.3b に示した様に、円柱(4,3)と(4,4)の行間隙を流れる無次元質量流束はt 102 でピーク値を取り、Fig.9 で行間隙ジェット流は殆ど上下に偏流することなく吐出し円柱(4,4)下流側に渦の形成が見られる。Fig.11 にt=102 における円柱(4,4)表面周方向静圧分布を示す。ここで周方向位置q 270°及び180°近傍における静圧の低下は、行間隙ジェット流速がq=270°近傍において大である事と下流側の渦の発生に対応する。Fig.12 及び Fig.13 に円柱(4,4)に対する揚力係数及び抗力係数の時間挙動と、対応するフーリエパワースペクトルをそれぞれ示す。ここで、特に揚力係数がt=102 で下向きピーク値を示すのは Fig.11 の表面周方向静圧分布より明かである。



Fig.11 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (4,4) at t=102.0



Fig.12 Time-Variation in the Drag and the Lift on Cylinder (4,4)



Fig.13 Fourier Power Spectra associated with the Drag and the Lift on Cylinder (4,4)

Fig.14 及び Fig.15 に t=105 における円柱(4,4)周辺流域の無次 元流速ベクトル場と円柱(4,4)表面周方向静圧分布をそれぞ れ示す。Fig.14 で、集合体後流域に向かう円柱(4,3)と(4,4)の 行間隙ジェット吐出流は下向き偏流しつつあり、それに起因 して円柱表面周方向位置q 230°近傍に円柱(4,4)に向かって 進む局所流が誘起され静圧が上昇している。Fig.12 で、t=105における揚力係数及び抗力係数の正及び負のピーク値はこ れに因るものである。



Fig.14 Flow Velocity Vector Field at t=105.0, P/D=1.5



Fig.15 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (4,4) at t=105.0



Fig.16 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (4,4) at t=108.0

Fig.5 に示した様に t=105~110 で円柱(3,4)と同様(4,4)周方向 位置 q =300°~340°周辺でも集合体行間隙ジェット流の上側へ の偏流に起因したよどみ点の発生が見られる。Fig.16 に t=108 における円柱(4,4)表面周方向静圧分布を示す。行間隙ジェッ ト流の急激な上側への偏流により Fig.15 と比較して静圧ピ ーク位置が約 40°正側に移動した事がわかる。揚力係数が t=107~109 で増減を繰り返すのは Fig.5 に示した円柱(3,3)と (4,3)の列間隙を上昇するジェット流によって t=109 に円柱 (4,4) 表面周方向位置 q 310°近傍によどみ点が発生して静 圧分布の表面周方向ピーク位置が短時間に移動を繰り返す こと及び、t=107 で円柱(4,3)と(4,4)の行間隙ジェット吐出流 の偏向角が 0 となった時円柱(4,4)下流側に渦が形成され t=108 でその渦が発達して q=180°~240°周辺の静圧が低下す ることに起因するものと考えられる。即ち、最下流列に配置 された円柱からの渦の発生に係る Strouhal 周波数は円柱間隙 無次元質量流束変動の Strouhal 周波数の凡そ2 倍である。 (3)その他の円柱に作用する流体力

最外周以外に位置する円柱については、その周辺で渦の発 生は見られなかった。円柱に作用する揚力及び抗力は基本的 に円柱間隙流れの周期的偏流に起因すると考えられ、偏流は 外部流域に近い程発生し易いので最前列の円柱を除いてこ れら内部に位置する円柱に対する流体力は最外周に位置す るものに比べ小さく、その Strouhal 周波数成分は基本的に円 柱間隙流れの周期的偏流周波数と一致した。

3.2 P/D=2.5 の場合の流れ挙動

以下に、集合体最外層に位置するの円柱の代表例として円 柱(4,3)及び(4,4)を、集合体内部に位置する円柱の代表例とし て円柱(3,3)を取り上げ、それら円柱周辺流域における流れ挙 動についての数値解析結果を報告する。

Fig.17a 及び Fig.17b に 120 t 140 における円柱(3,3)と (3,4)及び円柱(4,3)と(4,4)の行間隙を流れる x-方向無次元質量 流束の時間変動挙動を、Fig.18a 及び Fig.18b に円柱(2,4)と (3,4)及び円柱(3,4)と(4,4)の列間隙を流れる y-方向無次元質量 流束の時間変動挙動をそれぞれ示す。これらの図から円柱間 隙無次元質量流束の周期的変動の Strouhal 周波数は St 0.19 で単円柱の場合の Kármán 渦放出周波数と概略一致する値 が得られた。また行間隙及び列間隙ジェット流の周期的偏流 が P/D=1.5 の場合と同様円柱の抗力及び揚力の時間挙動に支 配的であることが明かとなった。以下に代表例として取り上 げた円柱(3,4)、(4,4)及び(3,3)周辺流域における流れ挙動につ いて示す。

(1)円柱(3,4)周辺流域における流れ挙動

Fig.19 及び Fig.20 に *t*=120 における円柱(3,4)周辺流域の無次元流速ベクトル場と円柱(3,4)表面周方向静圧分布をそれぞれ示す。Fig.18a に示す円柱(2,4)と(3,4)の列間隙を下向きに流れる無次元質量流束は *t*=120 でピーク値を示す。従って円







Fig.17b Time-Variation in Mass Flow Rate through Gap (4,3) and (4,4)

柱(3,4)周辺流速は q 290°近傍において上昇し Fig.20 に示す 無次元静圧が低下する。また、このとき、Fig.19 の円柱(3,4) 周方向位置 q 180°近傍で渦が見られ、これに起因して無次 元静圧分布が q 180°で局所的に低下する。Fig.21 及び Fig.22



Fig.18a Time-Variation in Mass Flow Rate through Gap (2,4) and (3,4)



Fig.18b Time-Variation in Mass Flow Rate through Gap (3,4) and (4,4)



Fig.19 Flow Velocity Vector Field at t=120.0, P/D=2.5



Fig.20 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (3,4) at t=120.0

に円柱(3,4)に対する揚力係数及び抗力係数の時間挙動と対応するフーリエパワースペクトルをそれぞれ示す。揚力係数及び抗力係数が共に t=120 近傍でそれぞれ負及び正の局所ピーク値を示すのは上述の周方向静圧分布に因るものである。



Fig.21 Time-Variation in the Drag and the Lift on Cylinder (3,4)



Fig.22 Fourier Power Spectra associated with the Drag and the Lift on Cylinder (3,4)

Fig.23 及び Fig.24 に *t*=124 における円柱(3,4)周辺流域の無 次元流速ベクトル場と円柱(3,4)表面周方向静圧分布をそれ ぞれ示す。Fig.23 の円柱(3,4)周方向位置*q*0°近傍で円柱(2,4) で放出され円柱(3,4)に向かって移動した渦が見られ、これに 起因して Fig.24 に示す無次元静圧分布は*q*0°近傍で局所的 に低下する。また円柱(3,4)の上流側近傍で、流は渦の影響に より外部流域に向かって上向きであるため円柱(3,4)周方向 位置*q*310°によどみ点が発生し、静圧分布の局所ピークが Fig.24 に現れる。Fig.21 に示す円柱(3,4)の揚力係数及び抗力 係数が*t*=124 近傍でそれぞれ正及び負の局所ピーク値を示す のは上述の周方向静圧分布に因るものである。



Fig.23 Flow Velocity Vector Field at t=124.0, P/D=2.5



Fig.24 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (3,4) at t=124.0

Fig.18a の円柱(2,4)と(3,4)の列間隙を下向きに流れる無次 元質量流束は t=126 で再びピーク値を示し、このとき円柱 (3,4)周辺流域の無次元流速ベクトル場と円柱(3,4)表面周方 向静圧分布は t=120 の場合と類似した特徴を示す。但し、 Fig.18a に示した様に、t=126 での下向き列間隙質量流束のピ ーク値は t=120 の場合に比べてやや小さく、また周方向位置 q 180°近傍で見られる渦は t=120 の場合に比較して円柱表 面より若干離れて存在するため周方向位置q 180°及び 290° 近傍で見られる無次元静圧の局所的低下は比較的小さく、 Fig.21 で示す揚力係数及び抗力係数の t=126 におけるピーク 値は t=120 の場合に比較して小さい。

(2)円柱(4,4)周辺流域における流れ挙動

Fig.25 及び Fig.26 に *t*=123 における円柱(4,4)周辺流域の無 次元流速ベクトル場と円柱(4,4)表面周方向静圧分布をそれ ぞれ示す。Fig.25 の円柱(4,4)周方向位置*q* 20°近傍で円柱 (3,4)で放出され円柱(4,4)に向かって移動した渦が見られ、ま た円柱(4,4)の表面周方向位置*q* 60°近傍で渦が発生しつつ ある。これらの影響で Fig.26 に示す無次元静圧分布は*q* 0°~70°近傍で局所的に低下する。また Fig.25 に見られる様に 円柱(4,4)の表面周方向位置*q* 20°近傍で成長する渦の反時 計回りの流と円柱(4,3)と(4,4)の行間隙流とにより*q* 310°に よどみ点が発生し、これが Fig.26 の静圧分布の局所ピークに 対応する。

Fig.27 及び Fig.28 に円柱(4,4)に対する揚力係数及び抗力係 数の時間挙動と対応するフーリエパワースペクトルをそれ ぞれ示す。揚力係数及び抗力係数が共に t 123 近傍でそれ ぞれ正及び負の局所ピーク値を示すのは上述の周方向静圧



Fig.25 Flow Velocity Vector Field at t=123.0, P/D=2.5

分布に因るものである。*q* 20°近傍の渦は時間の経過と共に 円柱(3,4)と(4,4)の列間隙を上向きに移動して外部流域に到 達する。



Fig.26 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (4,4) at t=123.0



Fig.27 Time-Variation in the Drag and the Lift on Cylinder (4,4)



Fig.28 Fourier Power Spectra associated with the Drag and the Lift on Cylinder (4,4)



Fig.29 Flow Velocity Vector Field at t=124.0, P/D=2.5

Fig.17b に示した様に円柱(4,3)と(4,4)の行間隙を流れる無次 元質量流束は t=124 でピーク値を取り、Fig.29 で行間隙ジェ ット流は殆ど上下に偏流することなく集合体下流側流域吐 出し、円柱(4,4)下流側に渦の発生が見られる。また、t=123に対応する Fig.25 で見られた表面周方向位置q 60°近傍の渦 が t=124 で発達しながら上部自由流域に向かって移動し、同 時にq 30°近傍を上部自由流域に向かって移動する渦との 相関によりq 50°近傍の円柱表面静圧が上昇する。これらに 起因して Fig.26 より変化した t=124 の円柱(4,4)表面周方向静 圧分布を Fig.30 に示す。Fig.27 に示す揚力及び抗力係数の t=124 近傍におけるそれぞれ負及び正のピーク値はこれに対 応する。



Fig.30 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (4,4) at t=124.0

Fig.31 及び Fig.32 に t=126 における円柱(4,4)周辺流域の無 次元流速ベクトル場と円柱(4,4)表面周方向静圧分布をそれ ぞれ示す。Fig.17b に示した円柱(4,3)と(4,4)の行間隙無次元質 量流束は t=124 のピーク値から減少に転じて t=126 近傍で極 小値を取り、Fig.31 に見られる様に表面周方向位置q 270° 近傍の流速は Fig.29 に示した t=124 の場合に比べ低下する。 また t=124 で円柱(4,4)周方向位置q 220°近傍に存在した渦 が t=126 で下流側に移動するので、これらに起因して円柱 (4,4)表面周方向静圧分布がq=180°~300°周辺で上昇し Fig.32 の静圧分布を与える。Fig.27 で示す揚力係数の t=126 におけ るピーク値はこれに対応する。

Fig.17b に示した円柱(4,3)と(4,4)の行間隙無次元質量流束 は t=128 近傍で次のピーク値をとる。この時、Fig.33 に示す 様に円柱(3,4)で放出され円柱(4,4)に向かって移動した渦が t=124 の場合と若干異なり円柱(4,4)周方向位置 q 330°近傍



Fig.31 Flow Velocity Vector Field at t=126.0, P/D=2.5



Fig.32 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (4,4) at t=126.0

で見られる。このため t=124 でq 310°に発生したよどみ点は 見られず、Fig.27 に示した揚力及び抗力係数の t=129 近傍に おけるピーク値は t=124 でのそれぞれの値に比べ低下する。 Fig.34 に t=129 における周方向静圧分布を示す。q 330°近傍 の渦は時間の経過と共に円柱(4,3)と(4,4)の行間隙を下流側 に移動して外部流域に到達する。即ち、円柱(3,4)で放出され 円柱(4,4)に向かって移動した渦は時間の経過と共に円柱 (3,4)と(4,4)の列間隙を上向きに外部流域に移動するか、或い は円柱(4,3)と(4,4)の行間隙を下流側に移動するかを円柱(4,3) と(4,4)の行間隙無次元質量流束の変動周期を以って交互に 繰り返す。従って円柱(4,4)周辺の渦の運動周期は行間隙無次 元質量流束の変動周期の2倍であると言える。Fig.28 に見ら れる St 0.09 成分はこれに対応するものと推測される。



Fig.33 Flow Velocity Vector Field at t=128.0, P/D=2.5



Fig.34 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (4,4) at t=129.0

(3)円柱(3,3)周辺流域における流れ挙動

円柱(3,3)の上下行間隙における流量の時間挙動を明らか にするため、Fig.35a 及び Fig.35b に 120 t 140 における円 柱(3,2)と(3,3)及び円柱(3,3)と(3,4)の行間隙を流れる無次元質 量流束の時間変動挙動を示す。これらの図から、円柱(3,3)の 上側及び下側行間隙流量は相反する極値を交互に取り、その Strouhal 周波数は凡そ St 0.19 である事がわかる。Fig.36 及 び Fig.37 に上側行間隙流量が極大値を取る t=121 での円柱 (3,3)周辺流域の無次元流速ベクトル場と円柱(3,3)表面周方 向静圧分布をそれぞれ示す。Fig.36 の円柱(3,3)周方向位置**q**

90°近傍で渦の発生が見られ、Fig.37の対応する位置で静圧 は局所的に低下する。時間の経過に従って t=123.5 で下側行 間隙流量が極大値を取るので周方向位置 q 270°近傍で静 圧は局所的に低下し、t=126 で再び上側行間隙流量が極大値 を取って表面周方向静圧分布は t=121 の分布に戻る。Fig.38 及びFig.39 に円柱(3,3)に対する揚力係数及び抗力係数の時間 挙動と対応するフーリエパワースペクトルをそれぞれ示す。



Fig.35a Time-Variation in Mass Flow Rate through Gap (3,2) and (3,3)



Fig.35b Time-Variation in Mass Flow Rate through Gap (3,3) and (3,4)



Fig.36 Flow Velocity Vector Field at t=121.0, P/D=2.5



Fig.37 Peripheral Pressure Distribution on Cylinder (3,3) at *t*=121.0



Fig.38 Time-Variation in the Drag and the Lift on Cylinder (3,3)



Fig.39 Fourier Power Spectra associated with the Drag and the Lift on Cylinder (3,3)

Fig.38 より明らかな様に揚力係数及び抗力係数は円柱(3,4)及 び(4,4)に比べ非常に単純な時間挙動を示す。抗力係数が t=122 で僅かながら揺らぐのはq 150°近傍を移動する渦の 影響で静圧が局所的に低下することに起因すると推測され る。

3.3 P/D=1.8 及び 2.1 の場合の流れ挙動

P/D=2.1 の場合、円柱(3,3)と(3,4)及び円柱(4,3)と(4,4)の行 間隙を流れる x-方向無次元質量流束及び円柱(2,4)と(3,4)及び 円柱(3,4)と(4,4)の列間隙を流れる y-方向無次元質量流束の周 期的変動挙動は P/D=2.5 の場合と殆ど変わらず、従ってそれ ぞれの円柱に作用する揚力及び抗力の時間変動も基本的に Strouhal 周波数 St 0.19 が卓越した類似挙動を示した。

しかし P/D=1.8 の場合には、これら行間隙および列間隙無 次元質量流束の時間変動挙動は Strouhal 周波数成分 St 0.19 及び 0.09 が混在し、特に列間隙無次元質量流束については St 0.09 成分が卓越した。P/D<2.0 の円柱集合体内部で円柱表 面よりの渦の周期的な放出が見られないとする実験結果⁽¹³⁾ より勘案して、Kármán 渦放出周波数と概略一致する St 0.19 成分が P/D 値の低下に起因して減衰した結果と推測され る。Fig.40 及び Fig.41 に 110 t 130 における円柱(4,3)と(4,4) の行間隙を流れる x-方向無次元質量流束の変動挙動をそれ ぞれ示す。また一例として P/D=1.8 の円柱(3,4)に作用する揚 力及び抗力の時間変動挙動を Fig.42 に示す。これら時間変動 挙動は、円柱(3,3)と(3,4)の行間隙ジェット流の周期的偏流挙 動に起因して円柱(3,4)周方向位置q 310°近傍で発生するよ どみ点での静圧上昇と、円柱(3,4)と(4,4)の列間隙ジェット流



Fig.42 Time-Variation in the Drag and the Lift on Cylinder (3,4)



Fig.43 Flow Velocity Vector Field at t=125.0, P/D=1.8

の周期的偏流挙動に起因した周方向位置 q 90°~270°の静圧 変動に因るものである。Fig.43 に P/D=1.8 の場合の t=125 に おける円柱(3,3), (3,4), (4,3)及び(4,4)周辺流域の無次元流速ベ クトル場を示す。隣接する円柱列間隙で見られる渦は基本的 に列間隙ジェット流の偏流に起因して形成され、外部流域に 接する渦は列間隙ジェット流の偏流周期をもって外部流域 に移動し、集合体内部の列間隙では渦がほぼ定位置に停滞し て列間隙ジェット流の偏流周期をもって生成消滅を繰り返 すことが結果として得られた。

4. 結論

ー様な横流れ中に置かれた 4×4 正方格子配列円柱集合体 について P/D をパラメータとした集合体周辺流域における 流速場および円柱表面周方向圧力分布の時間変動挙動を電 算機シミュレーションにより求め以下の結論が得られた。

- (1) 円柱群の行間隙を流れる x-方向無次元質量流束及び列間 隙を流れる y-方向無次元質量流束の時間変動挙動は周期 性を持ち、その Strouhal 周波数は P/D=2.1 及び 2.5 に対 して St 0.19、P/D=1.35 及び 1.5 に対して St 0.09 が得 られた。P/D=1.8 の場合については Strouhal 周波数成分 St 0.19 及び 0.09 が混在し、特に列間隙無次元質量流束 については St 0.09 成分が卓越した。
- (2) 行間隙及び列間隙質量流束の時間変動挙動が円柱に作用 する抗力及び揚力の時間挙動に対して支配的であること が明かとなった。
- (3) P/D=2.1 及び 2.5 の円柱集合体の場合、円柱間隙質量流束 の変動に同期して円柱表面よりの渦の放出が見られ、これに連動して円柱に作用する抗力及び揚力の時間挙動は 基本的に Strouhal 周波数 St 0.19 を示した。
- (4) P/D=1.8 の円柱集合体の場合、円柱間隙質量流束の変動 周期に St 0.19 及び 0.09 の成分が混在し、円柱に作用す る抗力及び揚力の時間挙動はこれら成分によって支配された。また、渦が円柱列間隙に存在し、列間隙ジェット 流の偏流周期をもって外部流域に接する渦は外部流域に 移動し、集合体内部ではほぼ定位置に停滞して生成消滅 を繰り返した。
- (5) P/D=1.35 及び 1.5 の円柱集合体の場合、集合体内部では 渦の放出は見られず、円柱間隙質量流束の変動に起因して周期的に円柱表面に発生するよどみ点に連動し円柱に 作用する抗力及び揚力の時間挙動は St 0.09 を示した。 最外周に位置する円柱については渦の放出が見られ、円 柱間隙質量流束の変動に起因して周期的に円柱表面に発 生するよどみ点に連動した流体力の他に、渦の発生に伴い円柱表面の静圧分布が周期的に影響を受ける。特に最 も下流側の列に位置する円柱に対しては、後流域への行 間隙ジェット吐出角の周期的偏向に同期して円柱間隙質 量流束の変動周期のほぼ2倍で渦が放出される。従って、 これら円柱に作用する抗力及び揚力の時間挙動は St 0.09 の他に St 0.19 の成分が見られた。
- (6) 円柱の St 数の Re 数に対する依存性が Re =10³ ~ 10⁴の範 囲で非常に小さいことを勘案すると、上記パラメータ範 囲において数値解析によって得られた流体力変動の St 数は既存の実験データ⁽¹⁴⁾と満足すべき一致が得られた。

謝辞

本研究の一部は埼玉工業大学ハイテクリサーチセンター の援助によって実施された。

参考文献

- (1) Bohm, G. T. and Tagart, S. W., "Flow-Induced Vibration in the Design of Nuclear Components", ASME Flow-Induced Vibration Design Guidelines, PVP- **52** (1981), pp. 1-10.
- (2) Connors, H. J., Savorelli, S. J. and Kramer, F. A.," Hydrodynamic Damping on Rod Bundles in Axial Flow", ASME Flow-Induced Vibration Design Guidelines, PVP-63 (1982), pp. 109-124.
- (3) Ichioka T., Kawata Y., Izumi H., Nakamura T. and Takamatsu

H.,"Two-dimensional flow analysis of fluid-structure interaction around a tube row and tube arrays in cross-flow," 3rd JSME/ASME Joint Int. Conf. Nuclear Engng., Kyoto, Japan, **1** (1995), pp. 603-608.

- (4) Blevins R. D.,"Flow-induced vibration," Van Nostrand Reinhold Co. (1977).
- (5) Hishida H., Sakai K., Shibata K.,"Evaluation of hydrodynamic damping force acting on a plate in motion in the vicinity of baffle plate under coolant flow," SMiRT 11, Tokyo, Japan, J (1991), pp. 189-194.
- (6) Yamaguchi A.," Numerical simulation and water experiment of flow induced vibration of a thermocouple well," Proc. NURETH-8, Kyoto, Japan, 2 (1997), pp. 1130-1131.
- (7) 菱田, "流力振動シミュレーションを目的とした計算プログラムのキャビティ流解析による検証,"日本シミュレーション学会, 13, No.2 (1997), pp. 9-20.
- (8) 菱田,足立,泉,神田,石井,"流に軸が垂直保持され た複数円柱周りの流れ挙動及び流体力のシミュレーション解析,"第13回数値流体力学シンポジウム,F09-3 (1999) pp.1-5.
- (9) H. Hishida, T. Adachi, S. Koike, H. Izumi, N. Kanda, "Numerical Simulation on Flow-Induced Vibration of Square-Pitched 4 × 4 Cylinder Arrays in Cross Flow," 9th Int. Sym. Flow Visualization, Edinburgh, **133**(2000), 1-10.
- (10) Kawamura T., "Numerical study of high Reynolds number flow around a circular cylinder," Ph.D. Thesis of the University of Tokyo, (1983).
- (11) Thompson J. F., Warsi Z. U. A. and Mastin C. W., "Boundary fitted coordinate system for numerical solution of partial differential equation-a review," J. Comp. Phy., 47,(1982), pp. 1-108.
- (12) Hishida H., Adachi T., Izumi H., Ishii T. and Kanda N., "Numerical simulation of the effect of cross flow on arrays of circular cylinders," Int. J. Appl. Math., 2, No. 3(2000), pp. 353-380.
- (13) 石谷,西川,"円管群に直交する管外流の構造に関する 研究(第2報),"機論,40-337 (1974), pp.2599-2608.
- (14) Savkar S. D.," Buffeting of cylindrical arrays in cross flow," Symp on Flow-Induced Vibrations, ASME Winter Ann. Meeting, Mew Orleans, U.S.A., 2(1984), pp. 195-210.