接近した直列 2 円柱における上流側円柱の流れ方向および 流れ直交方向の流力振動に関する 3 次元数値解析

THREE-DIMENSIONAL COMPUTATION FOR IN-LINE AND CROSS-FLOW VIBRATIONS OF AN UPSTREAM CIRCULAR CYLINDER OF TWO CLOSE CIRCULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT

近 藤 典 夫*

Norio KONDO

We present numerical results for hydrodynamic vibrations of an upstream circular cylinder in tandem arrangement which is mounted in a uniform flow. Two circular cylinders are assumed as each rigid body, and the upstream circular cylinder is supported by dampers-spring systems in in-line and cross-flow directions. In our computations, the gap ratios of two kinds between the centers of two circular cylinders are taken into consideration and they are given as 2 and 3 which are smaller than the critical gap ratio. In addition, the Scruton number is set as 0.99. Vibration amplitudes in the in-line and cross-flow directions of the upstream circular cylinder are computed by a third-order upwind finite element scheme and the numerical results are discussed in detail.

Keywords : *Two circular cylinders, tandem arrangement, in-line and cross-flow vibrations, FEM, gap ratio, third-order upwind procedure*

2 円柱, 直列配置, 流れ方向と流れ直交方向の振動, 有限要素法, 間隔比, 3 次上流近似

1. はじめに

角柱や円柱の基本断面を有する構造物の流体力特性は古くから研究が行われ、多くの特徴的な性状が報告されてきた^{1),2),3)}。特に円柱に関しては、レイノルズ数効果が顕著に現れる構造断面として知られており、レイノルズ数の変化による流体力の変動の様子が詳細に調べられている。その一方で、円柱や角柱の流力振動に関しても実験的研究と数値的研究の両面から行われ、スクルートン数がその振動特性に大きく影響を及ぼすことが報告されている。スクルートン数が小さい場合、低い換算速度の範囲でイン・ライン振動が卓越し、換算速度を大きくしていくとイン・ライン振動は極端に小さくなり、クロス・フロー振動が卓越するようになる。スクルートン数が大きい場合は、イン・ライン振動は小さく、大きなクロス・フロー振動が生じる。構造物が液体中に存在しているならば、スクルートン数は小さくなり、たとえば海洋構造物などはこれに当たる。

Williamson⁴⁾は実験的研究により低スクルートン数領域で円柱の渦励振を詳細に調べ、4つの振動領域に分けられることを報告している。また、多くの研究者が行った渦励振の結果をスクルートン数とともに整理して報告している。King^ら⁵⁾は片持ち支持のパイルを使った実験により、低スクルートン数域で第1励振と第2励振

が表れるイン・ライン振動について言及し、岡島^ら⁶⁾は様々な低スクルートン数において円柱のイン・ライン振動を詳細に調べ、スクルートン数に依存した振動性状を報告している。Brika^ら⁷⁾はフレキシブルシリンダーに対しての渦励振を詳細に調べている。このように、多くの実験的研究ではイン・ライン振動かクロス・フロー振動のどちらか一方における研究結果を示しており、両振動を同時に捉えている実験結果⁸⁾は数少ない。数値的研究では、小野^ら⁹⁾はLES解析を使って円柱の渦励振結果を報告している。著者^{10),20),21)}は低スクルートン数の円柱に対してイン・ライン振動とクロス・フロー振動についての振動特性を詳細に報告し、実験結果と同様な性状が捉えられることを示している。

これに対して、直列配置された静止2円柱は古くから実験的研究^{11),12),13),14)}が行われ、2円柱の流体力特性が詳細に調べられてきた。これらによれば、円柱の中心間距離 S と円柱の直径 D の比 S/D が臨界間隔比 3.5~3.8 を境にして2円柱に作用する流体力が急激に変化することが報告されている。数値的研究においても、伊藤^ら¹⁵⁾はその流体力の変化を捉えており、近藤^ら¹⁶⁾も同様に流体力の変化や円柱まわりの流れの様子を報告している。

一方、このような直列配置された2円柱において、岡島^ら¹⁷⁾が低

* 日本大学理工学部海洋建築工学科 専任講師・工博

Assist. Prof., Dept. of Oceanic Architecture and Engineering, College of Science and Technology, Nihon University, Dr. Eng.

スクルートン数域を対象にした流力振動に関する実験的研究を報告している。岡島らの実験結果によれば、上流側円柱の振動は、間隔比 S/D の変化に依存してイン・ライン振動の第1励振と第2励振の性状やその振幅が大きく変化し、さらにスクルートン数の変化にも影響を受けることが示されている。しかし岡島らはイン・ライン振動のみに着目した研究内容なので、クロス・フロー振動には言及していない。

そこで本論文では、接近した直列2円柱モデルにおいて、低スクルートン数に設定された上流側円柱の流力振動特性に着目する。直列2円柱では、単一円柱に比べて流れ特性は複雑になり、これによって上流および下流側円柱の振動特性は単一円柱と異なった様子を示す。本研究では間隔比 S/D が2と3の場合を対象として、上流側円柱の流力振動を捉える上で、下流側円柱の振動が上流側円柱の振動に影響を与えないように下流側円柱を静止状態に設定する。そして静止した下流側円柱の存在および両円柱の間隔比の相違が上流側円柱の振動にどのような影響を及ぼすのかについて言及する。本論文では、低い換算速度から高い換算速度までの計算を行い、イン・ラインとクロス・フローの両方向の振動特性を同時に捉えて上流側円柱の流力振動特性、つまり、イン・ライン振動の第1励振と第2励振域の性状、クロス・フロー振動における渦励振の性状およびロック・イン、そして振動している上流側円柱まわりの流れの様子等に関して解明することを目的にしている。本研究で対象としている2円柱の間隔比 S/D が2と3の場合は、静止2円柱における上流側円柱からのはく離渦が下流側円柱の背後に達するという性質を持っている。上流側円柱は、イン・ラインとクロス・フローの2方向に対してダンパーとバネで支持された状態を仮定するので、1質点2自由度系モデルとして計算を実施する。

本論文の数値計算では、流体の運動方程式にナビエ・ストークス方程式を採用し、空間の離散化には3次元有限要素スキームを適用することによって数値解の安定化を図っている。さらに、上流側円柱は流れとともに振動するので、それに伴って全ての時間増分ごとにメッシュの再配置を行う。円柱は剛体モデルの1質点2自由度系の振動方程式を採用している。

2. 基礎方程式

2円柱まわりの流体計算には、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式と連続方程式を採用し、以下のように与える。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (1)$$

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

ここで、 u_i は無次元流速、 t は無次元時間、 f_i は無次元外力、全応力 σ_{ij} は

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

で与えられ、 p は無次元圧力、 Re はレイノルズ数を示す。

また、圧力のポアソン方程式は、ナビエ・ストークス方程式の発散を取ることに以下のようになる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = -\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \quad (5)$$

ここで

$$\tilde{u}_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - f_i \quad (6)$$

を示す。

次に、直列配置された2次元円柱は、図1に示すように、上流側円柱がダンパーとバネで支えられており、1質点2自由度系モデルに設定し、イン・ラインとクロス・フローの2方向の振動方程式を考慮する。下流側円柱は静止状態にある。また2円柱はともに剛体モデルを仮定している。

上流側円柱の運動方程式は、円柱に作用する流体力を抗力係数 C_D と揚力係数 C_L で与えるならば、以下のような無次元の運動方程式を得ることができる。

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{4\pi h}{Ur} \frac{dx}{dt} + \left(\frac{2\pi}{Ur} \right)^2 x = \frac{1}{2\chi} C_D \quad (7)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{4\pi h}{Ur} \frac{dy}{dt} + \left(\frac{2\pi}{Ur} \right)^2 y = \frac{1}{2\chi} C_L \quad (8)$$

ここで、 $x(=X/D)$ と $y(=Y/D)$ は、イン・ラインとクロス・フロー方向への無次元振動変位、 h は構造減衰定数、換算速度 Ur は

$$Ur = \frac{U_0}{f_n D} \quad (9)$$

で与えられ、円柱と流体の質量比 χ は

$$\chi = \frac{m}{\rho D^2 H} \quad (10)$$

である。 U_0 は遠方からの一様な流体速度、 D は円柱の直径、 H は円柱のスパン長さ、 f_n は円柱の固有振動数、 m は円柱の質量、 ρ は流体密度を表す。

円柱は流体流れとともに振動するので、円柱表面で次のような境界条件を与えている。

$$u_1 = \frac{dx}{dt}, \quad u_2 = \frac{dy}{dt} \quad (11)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{\partial u_i}{\partial t} n_i \quad (12)$$

以上の基礎方程式系に対し、適当な数値時間積分を施すことによって連成系の数値解を得ることができる。

3. 直列2円柱の計算モデル

図1に示すように、2円柱の中心間距離 S 、直径 D 、スパン高さ H の直列配置2円柱において、上流側円柱がダンパーとバネで支えられているモデルを研究対象にする。流体の計算領域の大きさを図2に示す。本論文の全計算でスパン比 $H/D=2.5$ に設定した。

2円柱は2次元円柱としているので、 $X_3=0$ と H の境界で周期境界条件を課している。流入境界では一様流速 U_0 を与え、流出境界では自由流出としている。図3に、 X_1 — X_2 平面上のメッシュ分割の1例を示す。各々の円柱で、円周方向には200分割、スパン方向には25分割とし、3次元領域全体の要素数は $S/D=2\sim3$ のとき565,000、 $S/D=3.2\sim4$ で595,000、 $S/D=5$ において615,000である。流体計算の数値時間積分には陰解法であるクランク・ニコルソン法を、円柱の振動方程式へは線形加速度法を適用している。

図1 直列2円柱の計算モデル

図2 流体の計算領域

3-1) X_1 — X_2 平面全体のメッシュ

3-2) 円柱周辺のメッシュ

図3 X_1 — X_2 平面のメッシュ分割, $S/D=3$

4. 直列配置の静止2円柱に関する流体力特性

直列配置における静止2円柱の流体力については、多くの実験結果が報告されており、流れのパターンが変化する臨界間隔比 S/D は $3.5 \sim 3.8$ になることが知られている。この臨界間隔比を境にして2円柱に作用する平均抗力係数 C_{Dmean} やストローハル数 St も急激に変化する。そこで本論文でも初めにこのような流体力特性を計算し、本手法の適用性を示す。本計算では、レイノルズ数 Re を 20,000 にしている。

図4に2円柱の平均抗力係数 C_{Dmean} の数値計算結果と実験データを示す。数値結果と実験データの両方とも、臨界間隔比以前では C_{Dmean} は小さい数値となっている。特に下流側円柱では負値となることが特徴的である。また、臨界間隔比以降では、 C_{Dmean} の数値は大きくなっている様子が分かる。本数値結果による臨界間隔比 S/D の数値は、実験結果より僅かながら低い数値の $3.2 \sim 3.5$ となってい

図4 静止2円柱の平均抗力係数 C_{Dmean} .

図5 静止2円柱のストローハル数 St

図6 静止2円柱まわりの瞬間渦度

るが、実験結果と同じように、平均抗力係数が急激に変化するという現象を定性的に再現していることが分かる。

図5は間隔比 S/D に依存したストローハル数 St の変化を示している。臨界間隔比以降の数値結果は、実験データより低い St 値を示しているものの、臨界間隔比前後でのストローハル数の変化を定性的に良く捉えていることが分かる。図6に臨界間隔比の前後である $S/D=3$ と 4 の場合の2円柱まわりの流れを瞬間渦度で示す。臨界間隔比以前の $S/D=3$ では、上流側円柱からはく離渦は下流側円柱の背後に至っているが、 $S/D=4$ の臨界間隔比より大きい場合には、上流側円柱背後でカルマン渦の様子を呈している。

以上の結果から、直列配置した静止2円柱の流体力特性に関して、実験データが示しているそれらの変化の様子を本数値結果は定性的に良く再現しており、本手法は数値計算手法として十分な数値解を与えていることが分かる。

5. 上流側円柱のイン・ライン振動

円柱の流力振動ではスクルートン数 Sc が小さい時、低い換算速度の範囲でイン・ライン振動が卓越することが知られている。そこでこの章では、上流側円柱のイン・ライン振動に着目して流力振動を報告し、換算速度が高い領域で卓越する渦励振に関しては次章で報告する。

本計算では、質量比 $\chi=12.73$ 、減衰定数 $h=0.0062$ で与えており、スクルートン数 $Sc=2\chi \times 2\pi h \cong 0.99$ となる。レイノルズ数 Re は静止2円柱の場合と同様に $Re=20,000$ に設定し、スパン比 $H/D=2.5$ である。上流側円柱の流力振動計算では2円柱間の間隔比 S/D を臨界間隔比以下の $S/D=2$ と 3 の2ケースに設定した。静止2円柱では、この2ケースの流れの場合、図6に見られるように、下流側円柱は上流側円柱からの離渦の中に位置している状態である。計算に用いたメッシュ分割は静止2円柱の計算のものと同じである。

上流側円柱が抗力と揚力を受けて振動するので、流体と円柱の連成解析の過程でナビエ・ストークス方程式の数値アルゴリズムの中に、Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 法が組み込まれている。また、上流側円柱の振動特性を捉えるために、各々の数値計算は無次元時間で $t=500$ までを行い、データの統計処理は、振動変位波形がほぼ規則的になる無次元時間 $t=200 \sim 300$ 以降 500 までの無次元時間の中で行った。

5.1 間隔比 $S/D=3$ に対する上流側円柱の振動性状

図7に間隔比 $S/D=3$ 、換算速度 $1 \leq Ur \leq 5$ の範囲でのイン・ライン振動 x の標準偏差 x_{sd} 、と平均変位 x_{mean} 、およびクロス・フロー振動 y の平均最大振幅 y_{amp} に関する数値結果を示す。図中には比較のために、レイノルズ数 $Re=3,000 \sim 25,000$ およびスクルートン数 $Sc=0.99$ で与えた岡島ら¹⁷⁾の実験結果 x_{sd} とレイノルズ数 $Re=10,000$ およびスクルートン数 $Sc=0.8$ のときの単一円柱¹⁰⁾の数

図7 低い換算速度領域の上流側円柱の振動性状, $S/D=3$.

8-1) 第1励振域, $Ur=2.4$

8-2) 第2励振域, $Ur=4.0$

図8 第1励振と第2励振での2円柱まわりの瞬間渦度, $S/D=3$

値結果 x_{sd} も合わせて示してある。岡島らの実験は上流側円柱の振動をイン・ライン方向にのみ許し、クロス・フロー方向には振動しない1質点1自由度系モデルなので、本論文の1質点2自由度系モデルと条件が異なっている。

図7に示す本数値結果では、第1と第2のイン・ライン励起振動振幅 x_{sd} の最大値とそれらの励起振動の始まりと終わりの Ur 値は岡島らのデータに比べ僅かに大きな数値となっているものの、本数値計算によって上流側円柱の2種類のイン・ライン振動が捉えられている。またクロス・フロー振幅も第2励振域の範囲では比較的大きな振幅になることが分かる。

図8に第1励振と第2励振での2円柱まわりの瞬間渦度を示す。第1励振域の上流側円柱背後では対称渦になり、第2励振域では非対称渦となることが捉えられている。

図9は振動している上流側円柱の抗力係数 C_d のパワー・スペクトルを $Ur=2.0$ と 3.6 の2ケースで示している。図7に見られるように数値計算結果では、 $1.7 \leq Ur \leq 4.3$ の範囲で上流側円柱のイン・

図9 $Ur=2.0$ と 3.6 に対して振動している上流側円柱の抗力係数 C_d のパワー・スペクトル, $S/D=3.0$

10-1) 振動している上流側円柱, 10-2) 静止している下流側円柱, $Ur=2.0$.
10-3) 振動している上流側円柱, 10-4) 静止している下流側円柱, $Ur=3.6$.

図10 $Ur=2.0$ と 3.6 に対して振動している上流側円柱と静止している下流側円柱の揚力係数 C_L のパワー・スペクトル, $S/D=3.0$.

ライン振動が大きくなるので、それに伴って、抗力係数 C_D は特定の無次元振動数 f_{ed} で卓越する様子が図9から分かる。

一方、静止および振動構造物からの渦放出振動数は、揚力変動の卓越振動数と概ね一致することが多いので、本論文では揚力係数の統計処理を施した数値で無次元渦放出振動数 St_{vs} を評価している。図10は、上流側円柱の振動に伴う揚力係数 C_L と静止している下流側円柱の揚力係数 C_L のそれぞれのパワー・スペクトルを $Ur=2.0$ と 3.6 について示している。これらの結果から、例えば $Ur=2.0$ の結果について示している図10-1)と10-2)を見ると、振動している上流側円柱の無次元渦放出振動数 St_{vs} と静止している下流側円柱のストローハル数 St が一致していることが捉えられている。図10-3)と10-4)に示した $Ur=3.6$ の場合でも同様の結果となっている。以上の f_{ed} 、 St_{vs} および St をイン・ライン振動が顕著に表れる $Ur \leq 5$ の範囲でプロットしたものが図11である。

図11から分かるように、振動している上流側円柱の抗力係数 C_D の無次元振動数 f_{ed} は、イン・ライン振動の第1励振が始まる $Ur=1.7$ から第2励振が終わる $Ur=4.2$ の範囲で、円柱の無次元固有振動数 $1/Ur$ に一致しており、この区間において共振状態いわゆるロック・インであることが分かる。この共振がイン・ライン振動を大きくさせる要因の一つになっている。図5に見られるように、静止2円柱の場合は両円柱のストローハル数 St は一致するが、これと同様に、振動している上流側円柱の無次元渦放出振動数 St_{vs} と静止し

図11 振動している上流側円柱の抗力係数 C_D の無次元振動数 f_{ed} と無次元渦放出振動数 St_{vs} 、静止している下流側円柱のストローハル数 St , $S/D=3$.

図12 上流側円柱のリサージュ, $S/D=3$.

ている下流側円柱のストローハル数 St も全く一致しており、振動している上流側円柱からの渦放出の影響が下流側円柱にも及んでいることが分かる。さらに、換算速度が $2.6 \leq Ur \leq 4.2$ の範囲で、 St_{vs} と St は円柱の無次元固有振動数の半分の $1/(2Ur)$ と一致しており、 $1/2$ 倍のロック・インとなっていることが分かる。

図12は、 $Ur=2.8$ と 4.0 に対する上流側円柱のリサージュを示す。図12-1) は第1励振域の場合で、イン・ライン振動成分が大きい状態にある。図12-2) は第2励振域で、クロス・フロー振幅が大きくなりはじめ、8の字の軌跡を描いている様子が分かる。

5.2 間隔比 $S/D=2$ に対する上流側円柱の振動性状

図13に、間隔比 $S/D=2$ 、換算速度 $1 \leq Ur \leq 5$ に対してのイン・ライン振動 x の標準偏差 x_{sd} と平均変位 x_{mean} およびクロス・フロー振動 y の平均最大振幅 y_{amp} に関する数値結果を、岡島らの実験結果とともに示す。岡島らの実験結果は、 $1.5 \leq Ur \leq 2.8$ でイン・ライン振幅が大きくなり、いわゆる第1励振領域となっている。しかし2円柱の間隔比 $S/D=2$ では、第2励振領域の発生が示されていない。

図13 低い換算速度領域の上流側円柱の振動性状, $S/D=2$.

図14 振動している上流側円柱の抗力係数 C_D の無次元振動数 f_{ed} と無次元渦放出振動数 St_{vs} 、静止している下流側円柱のストローハル数 St , $S/D=2$.

図 15 リサージュ, $S/D=2$.

これに対して、本数値結果は第1励振域の始まりと終わりの U_r 値が岡島らの実験データより僅かに大きくなっているが、第1励振域を的確に捉えている。また、実験では $U_r=4$ までの範囲で第2励振域の発生は見られないが、本数値結果では $3.4 \leq U_r \leq 4.4$ の範囲で、振幅の大きさは小さいものの第2励振域を捉えている。

図 14 は、換算速度 U_r に対して、振動している上流側円柱の抗力係数 C_D の無次元振動数 f_{cd} と無次元渦放出振動数 St_{vs} および静止している下流側円柱のストローハル数 St を示している。間隔比 $S/D=2$ の場合も f_{cd} 、 St_{vs} および St については、間隔比 $S/D=3$ のときと同じような性状となっている。しかし異なるところは、第1励振が始まる付近で St_{vs} と St は円柱の無次元固有振動数の $1/4$ 倍の $1/(4U_r)$ と一致していることである。よって、 $S/D=2$ の時には3種類のロック・インとなることが分かる。

図 15 は、 $U_r=2.0$ 、 2.8 および 4.2 に対する上流側円柱のリサージュを示す。これらは、 $1/4$ 倍、 $1/2$ 倍および $1/2$ 倍のロック・インに対応しており、図 15-1) と 15-2) は第1励振域、図 15-3) は第2励振域の場合の様子を示している。

6. 上流側円柱のクロス・フロー振動

この章は、換算速度 U_r が5以上の範囲の流体力学振動に焦点をあてて数値結果を示す。スクルートン数 $Sc=0.99$ 、レイノルズ数 $Re=20,000$ 、スパン比 $H/D=2.5$ は前章と同じ数値である。

6.1 間隔比 $S/D=3$ に対する上流側円柱の振動性状

図 16 は、間隔比 $S/D=3$ に対して、換算速度 U_r の変化による上流側円柱のクロス・フロー振幅 y の平均最大振幅 y_{amp} とイン・ライン振幅 x の平均値 x_{mean} および標準偏差 x_{sd} を示している。比較のために $Sc=0.8$ で計算した単一円柱¹⁰⁾の y_{amp} も合わせて示してある。

上流側円柱のクロス・フロー振幅 y_{amp} は、単一円柱と同様に、 $U_r=5$ を過ぎると急速に大きくなり、 $U_r=6.2$ で最大値 $y_{amp}=0.853$ となる。これは円柱直径の 85 % にも及ぶ大きな振幅である。そして、これ以降 y_{amp} は小さくなり、 y_{amp} が最小値になるのは $U_r=14$ に達したときで、 $U_r=6.5 \sim 7.4$ と $U_r=7.4 \sim 14$ の範囲において y_{max}

図 16 高い換算速度領域での上流側円柱の振動性状, $S/D=3$

図 17 振動している上流側円柱の無次元渦放出振動数 St_{vs} 、静止している下流側円柱のストローハル数 St , $S/D=3$.

は各々ほぼ同じ割合で減少していく。 $Sc=0.8$ の単一円柱では、Lower branch の最初の範囲 $U_r=6.6 \sim 9$ で y_{amp} の変化は小さく、ほぼ一定値で推移しているが、直列2円柱の上流側円柱のクロス・フロー振動性状はそれと異なった様子を呈している。またイン・ライン振動の平均値 x_{mean} は U_r の変化と共に単調な増加傾向にある。

図 17 は、間隔比 $S/D=3$ のとき、換算速度 U_r の変化に対して、振動している上流側円柱の無次元渦放出振動数 St_{vs} と静止している下流側円柱のストローハル数 St の変化を示している。イン・ライン振動が卓越する範囲での St_{vs} と St に関してはすでに図 11 で示したとおりであるが、クロス・フロー振動が大きくなる $5 < U_r$ においては、 $6.2 \leq U_r \leq 14$ の広い範囲でロック・インになっている。また St_{vs} と St はこの U_r の範囲においてもほぼ一致していることが分かる。以上のことから、間隔比 $S/D=3$ で配置された直列2円柱では、 U_r の広い範囲で、振動している上流側円柱からの離渦が下流側円柱から放出される渦に影響を与えていることが分かる。

図 18 は、 $U_r=6.2$ の場合の上流側円柱の振動の様子およびその周辺での流れの様子を時系列の1周期分で表示したものである。 y_{amp} の変動が大きいため、上流側円柱背後の渦の変化も相当激しい。

図 18 上流側円柱が振動している時の 2 円柱を過ぎる流れパターン（瞬間渦度表示）， $U_r=6.2$, $S/D=3$, $X_3=H/2$

図 19 $U_r=6.2$ におけるリサージュ, $S/D=3$.

図 19 は、 $U_r=6.2$ に対する上流側円柱のリサージュを示す。この場合は、ロック・イン状態にあるので、クロス・フロー方向に大きく振動している。また、 $y=0$ の位置でイン・ライン振幅 x は小さくなっていることが分かる。

6.2 間隔比 $S/D=2$ に対する上流側円柱の振動性状

図 20 は、間隔比 $S/D=2$ に対して上流側円柱のクロス・フロー振幅 y_{amp} とイン・ライン振幅 x_{mean} および x_{sd} を示している。 $S/D=2$ のときの y_{amp} は、 $5 \leq U_r \leq 12$ の広い範囲で相当大きな振幅となり、その最大値は、 $U_r=7 \sim 8$ で $y_{amp}=1.08$ にも達している。これは円柱の直径より大きな振動変位を意味している。この振動振幅の性状は、 $S/D=3$ の場合とはまったく異なった様子を示している。さらに本計算結果では、 $S/D=2$ のクロス・フロー振幅 y_{amp} が $U_r=7$ 付近で最大を示している領域の Upper branch とそれ以降の Lower branch の区別が明確に捉えられていない。

図 21 は上流側円柱の無次元渦放出振動数 St_{vs} と下流側円柱のストローハル数 St を示している。 St_{vs} と St は計算したすべての U_r の範囲で一致しており、さらに図 13 でイン・ライン振動の範囲ですでに示したように、 St_{vs} と St は $1/(4U_r)$ 、 $1/(2U_r)$ 、 $1/U_r$ に一致していることが改めて明確になり、間隔比 $S/D=2$ の 2 円柱は 3 タイプのロック・イン現象を示すことが分る。

図 22 は、 $U_r=7.0$ に対する上流側円柱の振動の様子およびその周辺での流れの様子を表示したものである。 y_{amp} の変化が大きいため、上流円柱背後の渦の変化も激しい。

図 23 は、 $U_r=7.0$ に対する上流側円柱のリサージュを示す。この場合は、図 19 のリサージュと僅かに異なった軌跡を示している。

図 20 高い換算速度領域での上流側円柱の振動性状, $S/D=2$

図 21 振動している上流側円柱の無次元渦放出振動数 St_{vs} 静止している下流側円柱のストローハル数 St , $S/D=2$.

図 22 上流側円柱が振動している時の 2 円柱を過ぎる流れパターン (瞬間渦度表示), $U_r=7.0$, $S/D=2$, $X_3=H/2$.

図 23 $U_r=7.0$ におけるリサージュ, $S/D=2$.

7. まとめ

本論文は、直列に配置された 2 円柱に対して、その間隔比 S/D を 2 と 3 の 2 ケースに設定し、スクルートン数を 0.99 で与えた上流側円柱の流力振動特性を捉えるために、3 次元数値計算を行った。上流側円柱はイン・ラインとクロス・フローの 2 方向にダンパーとバネで支持され、下流側円柱は静止状態にある。このようなモデルに対して、本論文で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 間隔比 $S/D=3$ のケースのイン・ライン振動 x_{sd} と x_{amp} については、本数値計算によって第 1 励振と第 2 励振を捉えることができ、実験結果をよく再現している。
- 2) 間隔比 $S/D=3$ のケースのクロス・フロー振動 y_{amp} については、同程度のスクルートン数に設定された単一円柱との比較において、より大きな振幅になることを示した。さらに y_{amp} の最大値以降では、 y_{amp} はほぼ一定の割合で減少していき、単一円柱の Lower branch 領域の性状と異なる。
- 3) 間隔比 $S/D=3$ のケースで、上流側円柱からの無次元渦放出振動数 St_{vs} と下流側円柱のストローハル数 St は、本計算の全ての換算速度の範囲で一致している。このことは、上流側円柱からの渦放出が下流側円柱に強く影響を及ぼしていることが分る。さらに、 St_{vs} と St は、クロス・フロー振動領域では上流側円柱の無次元固有振動数 $1/U_r$ に一致し、イン・ライン振動領域では $1/(2U_r)$ に一致することが捉えられた。よって、2 種類のロック・インが現れることが分かった。
- 4) 間隔比 $S/D=2$ のケースのイン・ライン振動 x_{sd} についても、 $S/D=3$ の場合と同様に、本数値結果では第 1 励振と第 2 励振が捉えられているが、 $S/D=2$ のケースの第 2 励振域ではその振幅は小さい。
- 5) 間隔比 $S/D=2$ のケースのクロス・フロー振動 y_{amp} については、その最大値は、同じスクルートン数の $S/D=3$ の y_{amp} より非常に大きくなる。また、Upper branch と Lower branch の区別が捉えられず、Upper branch 以降の振幅 y_{amp} は単一円柱および $S/D=3$ の場合と異なることが明らかになった。

- 6) 間隔比 $S/D=2$ のケースにおける St_{vs} と St については、上記 3) と同じことが言えるが、これに加えて、 $S/D=2$ のときの St_{vs} と St は、イン・ライン振動領域で $1/(4U_r)$ にも一致することが捉えられている。よって、 $S/D=2$ のケースでは 3 種類のロック・イン現象となる。
- 7) スクルートン数が 0.99 のとき、間隔比が 2 と 3 という接近して直列配置された 2 円柱に関しては、上流側円柱の流力振動は、その僅かな間隔比の変化が、イン・ラインとクロス・フローの両振動性状に大きな変化となって現れることが本計算結果から示された。

参考文献

- 1) 中口, 橋本, 武藤: 矩形断面の柱の効力に関する一実験, 日本航空宇宙学会誌, 第 16 巻, 第 179 号, pp.1-5, 1968.1.
- 2) B. Cantwell and D. Coles: An Experimental study entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder, J. Fluid Mechanics, 136, pp.321-374, 1983.
- 3) C. H. K. Williamson: Vortex dynamics in the cylinder wake, Annu. Rev. Fluid. Mech., 28, pp.477-539, 1996.
- 4) C. H. K. Williamson and R. Govardhan: Vortex-induced vibrations, Annu. Rev. Fluid. Mech., 36, pp.413-455, 2004.
- 5) R. King, M. J. Prosser and D. J. Johns: On vortex excitation of model piles in water, J. Sound and Vibration, 29(2), pp.169-188, 1973.
- 6) 岡島, 大津山, 永森, 中野, 木綿: 円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性, 日本機械学会論文集(B 編), 65 巻, 635 号, pp.2196-2203, 1999.7.
- 7) D. Brika and A. Laneville: Vortex-induced vibrations of a long flexible circular cylinder, J. Fluid Mechanics, 250, pp.481-508, 1993.
- 8) N. Jauvtis and C. H. K. Williamson: The effect of two degrees of freedom on vortex-induced vibration at low mass and damping, J. Fluid Mech, 509, pp.23-62, 2004.
- 9) 小野, 田村: 一様乱流中における二次元円柱の渦励振に関する LES 解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 569 号, pp.23-30, 2003.7.
- 10) 近藤: 円柱の流れ方向と流れ直交方向の流力振動に関する 3 次元解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 635 号, pp.17-24, 2009.1.
- 11) M. M. Zdravkovich: Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders, J Sound and Vibration, 101(4), pp.511-521, 1985.
- 12) 岡島: 高レイノルズ数における直列 2 本円柱まわりの流れ, 日本機械学会論文集(B 編), 44 巻, 384 号, pp.2663-2671, 1978.8.
- 13) 五十嵐: 直列 2 円柱まわりの流れ特性 (第 1 報): 日本機械学会論文集(B 編), 46 巻, 406 号, pp.1026-1036, 1980.6.
- 14) 森谷, Md. M. Alam, 高井, 坂本: 直列配置された接近 2 円柱の変動流体力特性, 日本機械学会論文集(B 編), 68 巻, 669 号, pp.1400-1406, 2002.5.
- 15) 伊藤, 姫野: 直列 2 円柱まわりの流れの相互干渉のシミュレーションによる流体力の再現性の検討, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, pp.279-284, 2002.
- 16) 近藤, 松隈: 直列 2 円柱まわりの 3 次元流れ解析 — スパン方向の高さ $H/D=1$ の 2 円柱に関する数値解析 —, 日本建築学会構造系論文集, 第 568 号, pp.43-49, 2003.6.
- 17) 岡島, 安井, 木村, 木綿: 直列 2 円柱の流れ方向流力振動に関する研究, 日本機械学会論文集(B 編), 73 巻, 726 号, pp.428-436, 2007.2.
- 18) A. Khalak, C. H. K. Williamson: Fluid forces and dynamics of a hydroelastic structure with very low mass and damping, J. Fluids and Structures, 11, pp.973-982, 1997.
- 19) A. Okajima, S. Yasui, T. Kiwata and S. Kimura: Flow-induced streamwise oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement, Int. J. Heat and Fluid flow, 28, pp.552-560, 2007.
- 20) 近藤: 低スクルートン数を有する円柱の渦励振に関する 3 次元数値解析, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 11 巻, pp.117-124, 2010.6.
- 21) N. Kondo: Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, International Journal of Numerical Methods in Fluids (to be appeared)

(2011 年 3 月 8 日原稿受理, 2011 年 8 月 26 日採用決定)