

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560991

研究課題名(和文) 接近した2円柱の流力振動および作用する流体力特性に関する数値的研究

研究課題名(英文) Numerical computation for flow-induced vibration and fluid forces of two close circular cylinders

研究代表者

近藤 典夫 (KONDO, Norio)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：90178418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：風や海流のような流体中に置かれた2円柱の流力振動に関する力学的特性の解明を図った。2円柱の振動モデルとして、2自由度系を有する剛体のバネ・ダンパーモデルを採用し、流体計算との連成系シミュレーションを行うことによって、2円柱の振動性状と作用している流体力を捉える事が出来た。この研究では、スクラートン数を極端に小さい領域を対象にしているため、イン・ライン振動とクロス・フロー振動を同時に捉える事ができ、一連の流れの中でこれら2つの現象を明らかにすることが出来た。

研究成果の概要(英文)：We present numerical results for hydrodynamic vibrations of two close circular cylinders, which are mounted in a uniform flow. Two circular cylinders are assumed as each rigid body, and the circular cylinders are supported by damper-spring systems in in-line and cross-flow directions. In our computations, the gap ratio between the centers of two circular cylinders is set as 2 or 3 which is smaller than the critical gap ratio of two stationary circular cylinders. In addition, the Scruton number is given by 0.99. Vibration amplitudes in the in-line and cross-flow directions of the circular cylinders are computed by a third-order upwind finite element scheme and the numerical results are discussed in detail.

研究分野：数値流体力学

キーワード：接近した2円柱 直列配置 並列配置 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

円柱構造物に関する過去の研究では、単一円柱を対象にした渦励振が殆どで、複数円柱構造物群の渦励振 (VIV) に関する研究は数少ない。さらに、円柱を1自由度モデルに設定し、インライン振動とクロスフロー振動を分けて研究が行われている事が多い。そこで本研究は、2円柱間の間隔が狭い場合を対象にして、構造減衰パラメータが非常に小さい2円柱の渦励振を、インライン振動とクロスフロー振動を同時に捉えられる2自由度モデルに設定し、3次元数値シミュレーション手法を使って詳細に渦励振を捉えるとともに、その数値実験システムを構築する。

(1) 国内・国外の研究動向及び位置づけ

様々な配置の静止2円柱に関する実験的研究は古くから行われてきており、流体力特性が詳細に報告されてきた。一方、数値的研究では単一円柱に関しての渦励振の3次元解析の報告[3]は多数あるものの、2円柱のような複数円柱構造物の渦励振解析の報告は少ない。このような中で研究代表者[4]による2次元解析結果、Prasanthによる低レイノルズ数域での2次元数値結果などが報告されており、2円柱の流力振動性状が定性的に解明されてきた。しかし、高レイノルズ数域の2次元計算ではその数値解が実験値と異なり、解の信頼性が低い事は多くの数値実験から報告されている。これに対して、本研究が目指す3次元計算は、高精度で渦励振現象を解明することが可能であり、2円柱の渦励振に関しても3次元数値解析が実験結果を精度良く捉えることが可能となり、本研究の現象解明の方法論および計算手法は最先端を行く内容のものと考えている。

(2) 着想に至った経緯

単一円柱に関するVIV挙動の解明は、実験と数値計算の両面からアプローチされ、質量減衰パラメータと換算速度に依存して複雑な様子を示すことが多数報告されている。このような中で、2円柱に関する渦励振は、臨界間隔比の前後で、流体力の違いと流れパターンの相違により全く異なった様子を示す。上流側円柱からのはく離渦の影響が下流側円柱に敏感に及ぶので、2円柱では相当に複雑になることが予想される。また多くの工学の場では、レイノルズ数は超臨界域を超えることが多い。よって、質量減衰パラメータとレイノルズ数の影響を考慮した2円柱の渦励振(VIV)挙動の把握およびその数値実験システム開発が必要であるという認識に至った。

(3) 研究成果を発展させる場合にはその内容

研究代表者は直列配置で接近した2円柱の上流円柱に関して、3次元計算でVIV特性を報告している。この研究では、上流円柱がVIV特性を示し、下流円柱は静止状態にある。

これに引き続き、本研究では上下の両円柱がVIV特性を示すように弾性支持された状態にして、上流円柱の振動が下流円柱の振動に及ぼす影響を詳細に検討する予定である。さらに、両円柱のVIV特性について、構造減衰パラメータとレイノルズ数の依存性についても言及する。

2. 研究の目的

本研究は、ライザー管のように海中にある複数の円柱構造物群が海流や波の影響を受けて振動する渦励振(VIV)の解明に当たることが大きな目的としてある。構造物が海中にある場合には海水に対する構造物との質量比が小さくなるので振動が励起しやすくなる。さらに減衰定数が小さい場合には、質量減衰パラメータが極端に小さくなるので、このような状態にある円柱構造物は、様々な特徴ある振動性状が現れることが単一円柱の実験結果から報告されている。本研究では、質量減衰パラメータが小さい場合の複数円柱の渦励振特性、および実験ではなかなか困難な高レイノルズ数域に対しての渦励振特性も合わせて解明を図る。

3. 研究の方法

本研究の一連の3次元数値的研究は、渦励振(VIV)解析で大きな振動振幅が生じるように、質量減衰パラメータが小さい範囲の場合に焦点を当てる。そして亜臨界レイノルズ数域を対象に、直列配置された2円柱のVIV解析と並列配置された2円柱のVIV解析に分けて研究を進め、各々の配置で、間隔比の変化に対するVIV挙動の特性を捉える。これらの結果を踏まえて、超臨界レイノルズ数域での直列配置と並列配置の2円柱のVIV解析を実施し、亜臨界レイノルズ数域と超臨界レイノルズ数域の場合とのVIV挙動の相違点を解明する。これら一連の3次元数値解析は、流体-構造連成解析により行い、2円柱の振動振幅が大きくなるので、それに合わせて流体計算領域のメッシュを動かすというArbitrary Lagrangian - Eulerian (ALE)法を採用する。

(1) 平成24年度の計画

直列配置で静止2円柱に作用する抗力係数は、図1のようになることが多くの研究から報告されている。この結果から、本年度は図2に示すように2円柱がバネとダンパーで支持された直列配置2円柱で、間隔比S/Dを臨界間隔比前後のS/D=2, 3, 5の3ケースに設定して2円柱の渦励振(VIV)挙動を3次元数値解析する。ライザー管のように海中に設置された円柱では、円柱と海水との質量比は極端に小さくなる。

Williamsomらの論文に、低レイノルズ数域を対象にして、質量減衰パラメータ m^* が0.00~0.179の範囲で多くの研究者によって報告された単一円柱の振幅の比較が載って

いる。研究代表者による単一円柱の VIV 解析でも実験結果をよく捉えていることが報告されている。

本研究では、Williamson らの論文を参考に、亜臨界レイノルズ数域で、質量減衰パラメータ $m^*\xi=0.1\sim 0.3$ 程度の範囲で 2 円柱の VIV 挙動の 3 次元数値解析を実施し、単一円柱との相違点を含めて、2 円柱の VIV 特性を解明する。特に上流側円柱からはく離渦が下流側円柱の渦励振挙動に及ぼす影響を中心に研究を推進する。

(2)平成 25 年度以降の計画

本年度以降では、はじめに 2 円柱がバネとダンパーで支持された並列配置 2 円柱で、間隔比 T/D を 1.2~2 の範囲に設定し、2 円柱の渦励振(VIV)挙動を 3 次元数値解析する。

上記の間隔比 T/D を 1.2~2 の場合は、2 円柱背後の流れは、非対称流れである「偏り流れ」になることが多くに実験結果から報告されている。本研究では低レイノルズ数域で、質量減衰パラメータ $m^*\xi$ が 0.1~0.3 の範囲程度を想定し、間隔比 T/D を 1.2~2 に対する 2 円柱の 3 次元 VIV 解析を実施することにより、間隔比が小さい、いわゆる接近した 2 円柱の VIV 特性を厳密に解明する。そして、間隔比 T/D に対して、2 円柱が衝突する条件として、質量減衰パラメータと換算速度 Ur の関係を決定する。

次に、様々な工学の場ではレイノルズ数は超臨界域であることが殆どである。単一円柱の場合で $Re=10^6$ の VIV 挙動の報告があるが、亜臨界レイノルズ数域の場合より渦励振の振幅が小さくなることが示されている。このことから、直列配置と並列配置の 2 円柱の VIV 挙動に関しても、超臨界レイノルズ数域を対象に研究を実施し、2 円柱に対する VIV 挙動を解明するとともに、亜臨界レイノルズ数域での VIV 挙動および単一円柱の VIV 挙動との相違点を明らかにする。超臨界レイノルズ数域での計算条件は、亜臨界レイノルズ数の場合とまったく同じ条件で行う。

以上のような研究計画を遂行することにより、直列配置と並列配置 2 円柱の総合的な VIV 挙動を捉えることが可能となり、加えて、様々な工学分野の流体力学現象の解明に向けて貢献する手法になるものと考えている。

4. 研究成果

(1)計算モデル

図 1 に示すように、一様流れの中に 2 円柱が直列に配置され、2 円柱が流体力を受けて自由振動する状態を仮定し、両円柱の流体力振動性状の様子を数値的に捉えることを行った。2 円柱は、2 方向（イン・ラインとクロス・フロー方向）にバネ・ダンパー系で支持された胴体運動を想定している。

計算のパラメータは、スクルートン数 Sc を比較的小さな数値の 0.99 に設定した。これは、換算速度 Ur が小さい範囲で上流円柱の

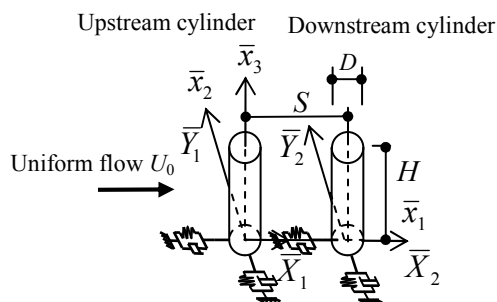


図 1 直列 2 円柱、2 円柱の剛体振動モデル

イン・ライン振動が卓越するようにするためである。レイノルズ数 Re は亜臨界域の対象にして 20,000 に設定した。

流体領域の空間離散化には有限要素法を適用し、流体の数値計算は 3 次元解析実施している。円柱は流体力を受けて振動するので、その振動とともに時間増分に毎に要素の再配置を行っている。

(2)上流円柱は自由振動モデル、下流円柱は静止モデルに対する数値結果

図 2 は、2 円柱の中心間距離 S が $3D$ (D : 円柱の直径) に対する結果で、換算速度 Ur が小さい範囲において、上流円柱のイン・ライン振動 X_{1amp} が卓越する現象を示しており、本数値計算から得られた結果である。実験と同様に現象を良く再現できていることが分かる。

円柱構造物では、換算速度 Ur が約 5 を過ぎるとクロス・フロー振動 Y_{1amp} が卓越し、いわゆる渦励振になることが過去の研究で報告されている。図 3 は 2 円柱の中心間距離 $S=3D$ において、上流円柱のクロス・フロー振動を捉えた結果を示しており、2 円柱を対象にした本研究でも、上流円柱は単一円柱と同様の振動性状を示すことが捉えられた。また、上流円柱は $Ur>5$ 以降にロックインになるが、下流円柱でも下流円柱から放出される渦列のストローハル数は、上流円柱のストローハル数に同期し、ロックイン状態になることが捉えられた。

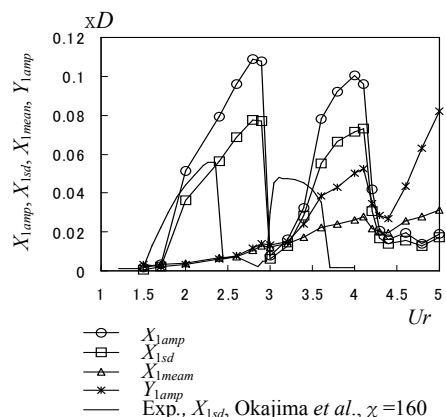


図 2. 上流円柱のイン・ライン振動, $S=3D$

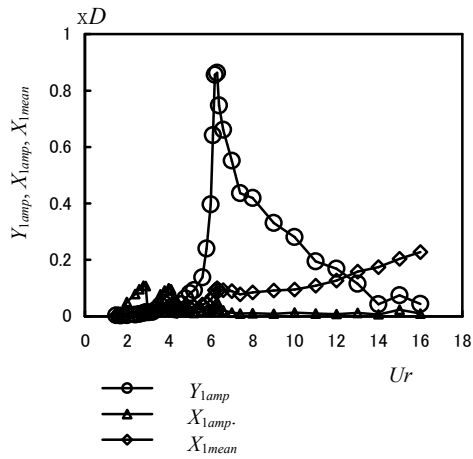


図3. 上流円柱のクロス・フロー振動, $S=3D$

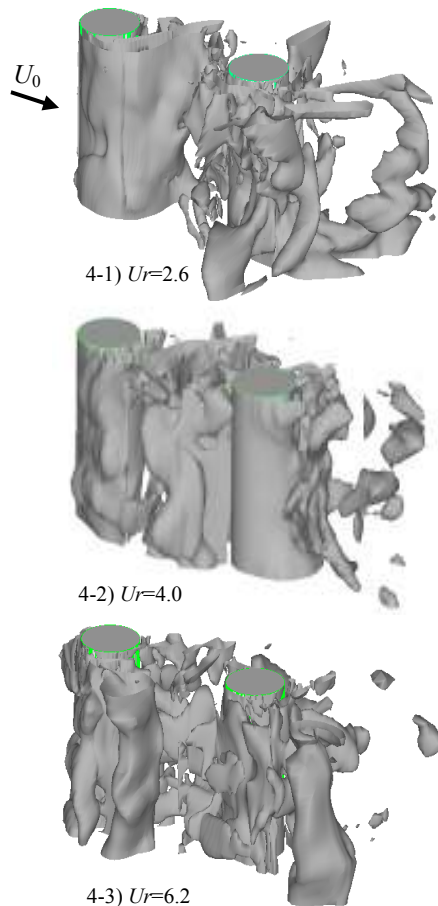


図4. 2円柱まわりの流れの鳥瞰図, 渦度表示, $S=3D$

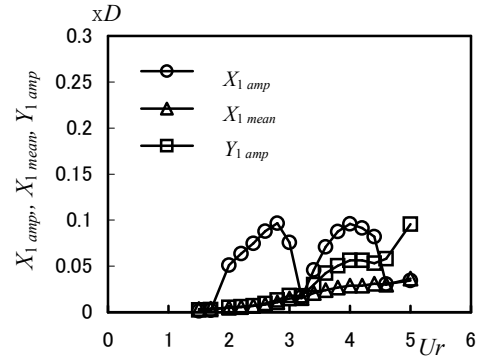
図4は、上流円柱の振動時における2円柱まわりの流れを渦度の等値面で表現し、それを鳥瞰図として示したものである。3つの図は、イン・ライン振動とクロス・フロー振動が卓越した換算速度においてのものである。2円柱まわりの渦が複雑になっていることが分かる。

(3) 直列2円柱の自由振動モデルに対する数値結果

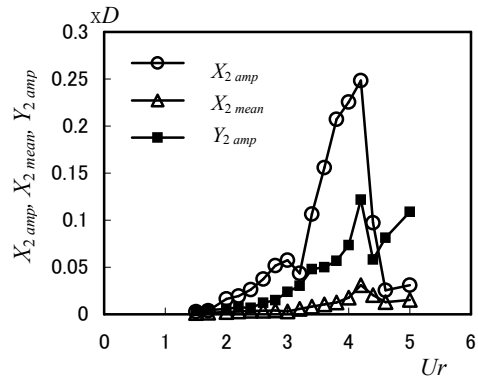
次に、上下円柱が自由振動するモデルに対しての流力振動結果を示す。このケースでは

2円柱間の間隔 $S=4D$ とした。スクルートン数 Sc とレイノルズ数 Re は、上記②と同じで、 $Sc=0.99$ 、 $Re=20,000$ に設定した。このケースでは、上流円柱からの剥離渦の影響で下流円柱も振動するタイプである。

直列配置された2円柱のが振動するタイプでは、上流円柱の振動性状は単一円柱の場合

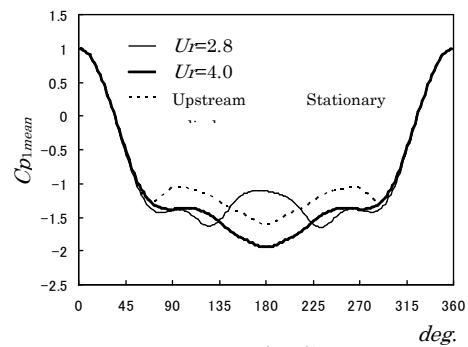


5-1) 上流円柱のイン・ライン振動, $S=4D$

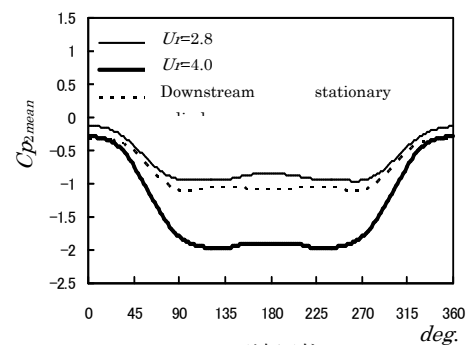


5-2) 下流円柱のイン・ライン振動, $S=4D$

図5. 2円柱の流力振動, $S=4D$



6-1) 上流円柱



6-2) 下流円柱

図6. 2円柱表面の圧力分布, $S=4D$

合とほぼ同じ振動性状を示し、イン・ライン振幅 X_{1amp} は2箇所卓越するが、下流円柱では第1励起振動は僅かみ見られる程度である。しかし、第2励起振動振動ではその振幅 X_{2amp} が極端に大きくなるのが数値計算から捉えられた。しかも、下流円柱のその振幅の大きさは、上流円柱の約2.5倍にも達していることが分かる。

図6は、換算速度 Ur の変化に対する2円柱の圧力分布 C_p を示している。2円柱が大きく振動しているために、静止状態の圧力分布との差異が明らかになった。

(4) 並列2円柱の自由振動モデルに対する数値結果

並列2円柱の数値計算モデルを図7に示す。並列2円柱が静止状態にあるときの2円柱まわりの流れは、2円柱の間隔 L が $2D$ 以下のときに偏り流れになることが実験結果から報告されている。そこで本研究では、 $L=2D$ に設定し並列2円柱の振動性状を捉えた。スクルートン数 Sc 、レイノルズ数 Re は直列2円柱のときと同じにした。

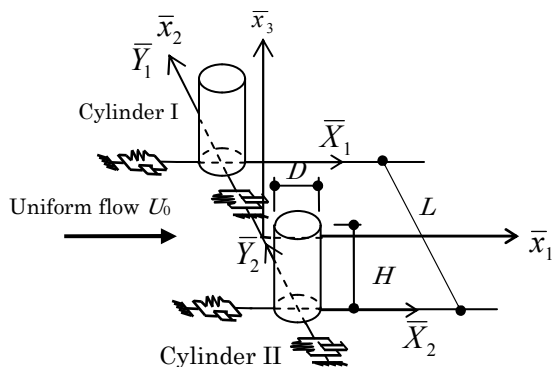


図7. 並列2円柱の計算モデル

図8は、換算速度の変化に対して、並列2円柱の振動振幅を示したものである。スクルートン数 Sc を小さく設定したことが原因で、約 $Ur=5\sim6$ の範囲で2円柱の衝突が確認された。図9は、2円柱が離れた位置にあるときの2円柱まわりの流れと衝突瞬間の流れの様子を渦度表示したものである。流れの状態は円柱間の中心で上下対称な流れにはなっていない事が分かる。

図10は、 $Ur=5$ のとき、衝突時の2円柱表面の圧力分布を示している。角度 $\theta=225^\circ$ 付近での圧力 C_p が極端に大きくなっていること

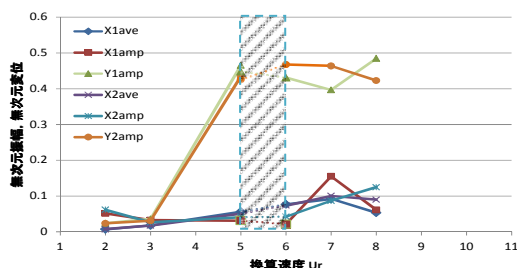
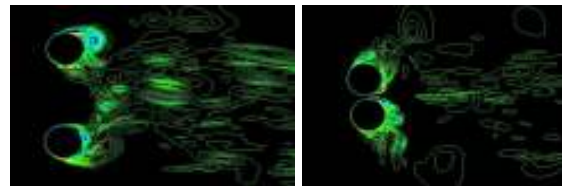
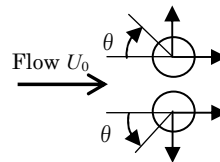


図8. 無次元振幅

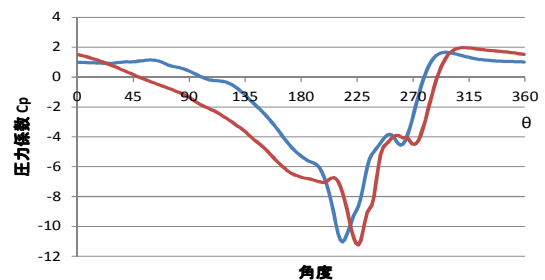


9-1) 離れた時 9-2) 衝突直前

図9 衝突瞬間の渦度分布, $Ur=5$



10-1) 2円柱表面の角度の取りかた



10-2) 圧力分布

図10. 突直時の圧力分布, $Ur=5$

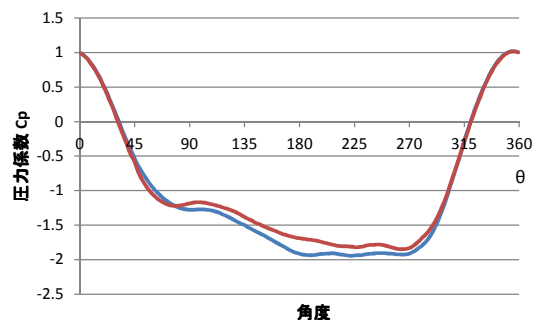


図11. 平均圧力分布, $Ur=8$

が捉えられた。角度 $\theta=225^\circ$ あたりは2円柱の衝突点の後ろ（下流側）の位置である。図11は2円柱が衝突をしないで上下振動を繰り返したときの時間平均圧力を示しており、通常の圧力分布である。これと比較すると、衝突時の圧力が如何に大きくなるのかが分かる。

(5) 超臨海レイノルズ数域での円柱の渦励震解析結果

超臨海レイノルズ数の中で、レイノルズ数 $Re=1,000,000$ 、スクルートン数 $Sc=1.0$ に設定して単一円柱の渦励震の数値シミュレーションを行った。このような超臨海レイノルズ数域では抗力係数が極端に小さくなるので、図12に見られるように、得られた円柱のクロス・フロー振幅 y_{amp} は亜臨海域の振幅と比較して相当小さくなっている。最大値でも円柱直径の6~7%程度である。

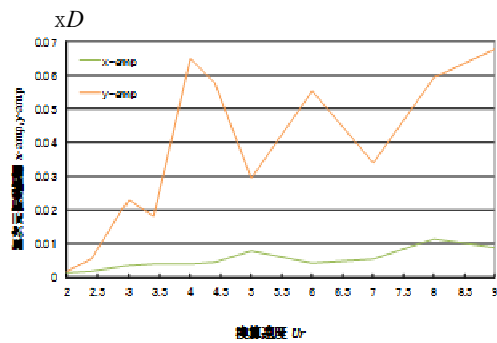


図 12 高レイノルズ数におけるクロス・フロー振動

(6) 結論

本研究は、直列配置と並列配置した 2 円柱まわりの流れの様子、2 円柱の渦励震および作用する流体力特性を捉えるために、数値シミュレーションを実施してきた。この数値シミュレーション結果より、2 円柱の間隔が狭い配置で、直列と並列配置に対する流れの変化の伴う特徴的な振動性状と流体力の一連の結果を捉えることができた。

さらに、高レイノルズ数域の流力振動の計算から、高レイノルズ数域でのクロス・フロー振幅は小さくなることが捉えられた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

① N.Kondo, Numerical computation for wake-galloping vibration of two tandem circular cylinders, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, Vol.62, 2014, pp.59-67. <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/nctam02>

② N.Kondo, Three-dimensional computation for flow-induced vibrations of an upstream circular cylinder in two tandem circular cylinder, International Journal of Computational Fluid Dynamics, 査読有, Vol.28, Nos.6-10, 2014, pp.461-476. <http://dx.doi.org/10.1080/10618562.2014.974577>

〔学会発表〕(計 6 件)

①竹下大地, 近藤典夫, 高レイノルズ数流れによる円柱の流体力特性と流体振動に関する 3 次元数値シミュレーション, 平成 26 年度日本大学理工学部学術講演会, 2015 年 12 月 6 日, 日本大学(千代田区)

②近藤典夫, 直列 2 円柱の渦励振に関する数値的精度について, 日本建築学会, 2014 年 9 月 12 日, 神戸大学(神戸市)。

③竹下大地, 近藤典夫, 高レイノルズ数における円柱の渦励振, 日本建築学会, 2014 年 9

月 12 日, 神戸大学(神戸市)。

④近藤典夫, 並列 2 円柱の渦励振解析, 第 26 回計算力学講演会, 日本機械学会, 2013 年 11 月 4 日, 佐賀大学(佐賀市)。

⑤近藤典夫, 臨界間隔以降で配置された直列 2 円柱の渦励振, 日本建築学会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道大学(札幌市)

⑥田中裕基, 近藤典夫, 惠藤浩朗, 並列配置 2 円柱構造物の渦励振挙動に関する 3 次元数値シミュレーション, 日本建築学会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道大学(札幌市)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 典夫 (KONDO, Norio)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号: 90178418