

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月28日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560480

研究課題名(和文)

既設構造物背後における円柱の空力振動の発生機構解明と風力発電可能性に関する研究

研究課題名(英文)

Study on the investigation of excitation mechanism and wind-power-generation possibility of aerodynamic vibration of a circular cylinder situated behind established structures

研究代表者 長尾 文明 (NAGAO FUMIAKI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：40172506

研究成果の概要(和文)：複数物体の背後において、上流側物体のウェイクに位置する円形断面の構造物や部材に生じる振動現象(ウェイクエクサイテーション)を対象として、円柱の表面粗度がウェイクエクサイテーションの応答特性に及ぼす影響の把握と流れの可視化によるその振動発生メカニズムの解明、建物屋上部における自然風作用下の円柱に生じるウェイクエクサイテーションの発電可能性を調査検討した。

研究成果の概要(英文)：For the wake excitation of tandem and staggered circular cylinders, the effects of surface roughness of circular cylinders on it were experimentally investigated. Furthermore, the power generation possibility of the wake excitation under the action of the natural wind in a building roof part was also examined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：ウェイクエクサイテーション、直列円形断面物体、風力発電

1. 研究開始当初の背景

本研究グループは、複数構造物背後に生じる振動現象について古くから着目しており、我が国におけるこの分野の研究の魁となっている[論文1(研究代表者は実験と結果の検討に参画していた。)]。ここでは、近接した円柱の空力振動問題を後流側円柱の主たる振動モードである主流直交方向に注目した検討を実施し、1自由度で振動している後流側円柱に作用する非定常空気力特性を実験的に検討し、空気力形成のメカニズムを明らかにしている。その後、上流側円柱からの剥離や後流特性がレイノルズ数の影響を受け

ることにより、後流側円柱の応答特性が著しく影響を受けることが明らかとなった[2]。この影響を排除するために、上流側の円柱の代わりに後流発生装置として各種の角柱を用いた実験を実施して、後流側円柱の応答特性や非定常空気力特性を検討し、得られた成果を国内外の学会等で順次発表している[3、4、5、6、7]。研究開始当初は、自由振動状態を再現した強制振動法を用いて後流側円柱に作用する非定常空気力特性と高速ビデオカメラによる流れの可視化の面から詳細な検討を加えているところであった。

なお、本研究グループ以外にも、近接した

複数の円柱の流体振動に関する問題については、海外並びに我が国の多くの研究グループによって、系統的に検討されてきているが、普遍的な振動発生メカニズムの解明には至っていないのが現状である。

本研究は、斜張橋の並列ケーブルの振動がケーブルの固有振動数の変化による応答特性を検討する研究を実施中、わずか直径 0.75 mm のピアノ線や厚さ 1mm、幅 8mm の扁平な長方形の後流に位置する直径 40mm の円柱に気流直交方向を主とする楕円状の大振幅の空力不安定振動が発生することが明らかとなり、構造物の下流側に位置する円柱の空力振動特性の新たな側面が明らかとなったことに端を発している。下流側円柱の直径の 50 分の 1 程度という相対的に極めて小さな寸法の構造物の後流中において、下流側円柱に空力不安定振動が発生する現象の解明そのものも本研究の特色・独創的な点であるが、さらに、従来の発想を転換し、下流側円柱に生じる空力振動を抑制することだけではなく、その振動現象そのものを風力発電装置の源に利用できるのではないかと考えるようになった。

さらに、この振動発生の条件として、上流側物体の片側からの剥離せん断層と円柱の干渉のみによっても空力不安定振動が発生することが判明した。この特性をビルや橋梁等の背後に生じる剥離流との干渉によっても同様な振動が発生することが予想され、この振動エネルギーを効率よく発電に利用する可能性を探るべきであると確信するに至った。

参考文献

- [1] 宇都宮英彦、鎌倉米康;近接する並列円柱系の空気力学的挙動、土木学会論文集、pp.1-8、1983.
- [2] F. Nagao, H. Utsunomiya, M. Noda, M. Imoto & R. Sato; Aerodynamic Properties for Closely Spaced Triple Circular Cylinders, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.91, pp.75-82, 2003.
- [3] F. Nagao, H. Utsunomiya, M. Noda, & M. Katayama; Properties of Aerodynamic Vibrations of a Circular Cylinder in the Wake of Several Kinds of Rectangular Cylinder, Proc. Eleventh Int. Conf. On Wind Engineering, pp.2469-2476, 2003.
- [4] 宇都宮英彦、長尾文明、野田稔、片山真文、郡崇志;角柱後流内の円柱のウェイクエクサイテーションに関する研究、第 18 回風工学シンポジウム論文集、pp.395-400、2004.
- [5] 長尾文明、野田稔、他 2 名、宇都宮英彦;

角柱後流による円柱のウェイクエクサイテーションの励振機構に関する研究、第 19 回風工学シンポジウム論文集、pp. 417-422、2006.

- [6] F. Nagao, M. Noda, T. Koori, W. Hiroyuki & H. Utsunomiya : Wake-Excitation Mechanism for a Circular Cylinder in the Wake of a Square Cylinder, Proc. 12th Int. Conf. on Wind Eng. Vol.2, pp.1711-1718, 2007.
- [7] 野田稔、長尾文明、他 2 名、角柱後流で振動する円柱に作用する非定常圧力、構造工学論文集 Vol. 55A、pp. 799-808、2009.

2. 研究の目的

複数物体の背後において、上流側物体のウェイクに位置する円形断面の構造物や部材に生じる振動現象は、発電施設の冷却塔の振動、斜張橋等の複数ケーブルにおけるウェイクギャロッピング、送電線におけるウェイクインデューストフラッター等が知られており、古くから実験的ならびに解析的な研究がなされている。これらの現象は、上流側物体の後流と下流側物体の相互干渉作用による自励振動であることは明らかであるが、その振動発生のメカニズムは完全には明らかになっていない。本研究グループにおいては、上流側円柱のレイノルズ数の影響を除去するために上流側円柱の代わりに角柱を用い、各種の精緻な各種風洞実験を継続して行ってきた結果、上流側物体から剥離した流れを後流の円柱が横切るタイミングが振動発生に大きく寄与していることを明らかにしてきた。

本研究においては、この極めて空気力学的に不安定な現象を、上流側物体として橋梁の地覆やビル屋上のパラペットに置き換え、地覆やパラペット上に設置される落下防止柵の最下段部材等を下流側円柱とするような工夫を行うことによって、最下段部材に空力振動を発生させ、そのエネルギーを風力発電に利用する。これによって、近年の懸案事項である CO2 削減に多大な貢献を果たそうとするものである。

3. 研究の方法

本研究は、平成 22 年度において、固体壁や地覆の下流側に設置された円柱に生じる空力振動特性を精緻な各種風洞実験（主流方向と気流直交方向の 2 自由度支持の応答実験、気流直交方向のみの 1 自由度支持応答実験、可視化実験、熱線風速計による気流計測実験、微風圧計による静止時・振動時における圧力計測実験等）によって把握し、さらには、この空力不安定振動現象の発生メカニズ

ムについても調査・検討を行った。平成 23 年度には、この極めて空気力学的に不安定な断面の特性を風力発電装置として利用するための風洞実験を行い、最終年度の平成 24 年度において、自然風の作用下において風力発電装置としての可能性について検討した。

具体的な調査研究項目を、以下に記す。

- 1) 固定物体背後の円柱のウェイクエクサイテーションの特性把握
- 2) 円柱の表面粗度がウェイクエクサイテーションに及ぼす影響の把握
- 3) 圧力分布特性から下流側円柱のウェイクエクサイテーション発生メカニズムの把握
- 4) 複数物体断面周りの流れの特性から円柱の空力振動の発生メカニズムの把握
- 5) 下流側円柱の空力振動の風力発電への利用可能性の基礎的検討
- 6) 乱れた気流中における下流側円柱の応答特性把握
- 7) 簡易模型による風力発電調査
- 8) 自然風中における風力発電のための風況特性調査
- 9) 自然風中におけるウェイクエクサイテーションを利用した発電可能性の検討

4. 研究成果

・下流側円柱の応答特性は、円柱の固有振動数 f と円柱の直径 D で風速 U を無次元化した換算風速 U/fD によって説明することができず、レイノルズ数 UD/v に依存していることが再確認された。

・上流側円柱からの剥離せん断層の影響を調査するため円柱表面に粗度を付与した場合には、気流直交方向とともに気流方向にも応答振幅が増大することもあることが明らかとなった。

・ヘリカルワイヤーを 30 度の傾きで 3 本設置した場合には、ヘリカルワイヤーの直径が円柱の 4 % 程度以上になると円柱の直径と同程度の大振幅のウェイクエクサイテーションの応答が発生しなくなり、円柱の半径と同程度の応答は安定して発生することが確認された。

・2 段階の応答振幅は、上流側円柱背後の風速分布計測から、上流側円柱のカルマン渦のほぼ中心（円柱の半径と同程度の小振幅応答）と上流側円柱の剥離境界層（円柱の直径と同程度の大振幅応答）に密接に関連していることが明らかとなった。これは、円柱周りの流れの可視化実験から、小振幅の振動現象は上流側円柱背後に形成される止水領域に後流側円柱が位置し、振動時に上流側円柱の剥離流が下流側円柱の上流側剥離流の発生している側面と逆方向の側面に流れ込む従来から指摘されている流れのスウィッチング現象に起因していることが確認できた。一方、

大振幅現象は上流側円柱背後にカルマン渦が生じており、平均的な上流側円柱の剥離境界層に応答振幅が密接に関連していることが明らかとなった。

・円柱の表面に設置した粗度を定量的に評価するために、平板上に粗度を敷き詰めて、その表面粗度上に発達する境界層特性から、粗度長を求めた。

・円柱表面に粗度を付与した場合には、後流側円柱に生じるウェイクエクサイテーションの振動が低風速で生じるとともに応答振幅が増大することもあるが、逆に、高風速においては、大振幅の応答が発現せず、応答振幅が円柱の半径と同程度に留まることも明らかとなった。この低風速における大振幅応答のウェイクエクサイテーションも表面粗度を付与していない円柱の高風速におけるウェイクエクサイテーションの振動と同様なメカニズムで発生していることが流れの可視化から明らかとなった。

・ヘリカルワイヤーの傾きを大きくすると気流の 2 次元性が低下し、円柱の軸方向から 20 度以上の傾斜を与えると不安定振動が抑制されることが確認できた。

・5 階建て建物の屋上のパラペットや手摺の背後に上下振動が可能なように支持された 1 本の円柱の自然風中におけるウェイクエクサイテーションの応答特性について設置位置等を変化させて調査を行ったが、観測期間中においては、明確なウェイクエクサイテーションの発生について確認できなかった。同時にパラペット背後の自然風を超音波風速計を用いて観測した結果、風向風速の変動、特に風向の変動が大きく安定した気流が円柱に作用していないことが、円柱の自然風中におけるウェイクエクサイテーションが確認できなかった原因であると考えられる。

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）

〔学会発表〕（計 9 件）

- ① 長尾 文明、円柱の表面粗度の変化がウェイクエクサイテーションに及ぼす影響、第 67 回土木学会年次学術研究発表会、2012. 9. 7、名古屋大学（愛知県）
- ② 長尾 文明、Properties of wake excitation in tandem circular cylinders with several kinds of surface roughness、7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications、2012. 9. 3、Jin Jiang Tower Shanghai Hotel（中国・上海）
- ③ 長尾 文明、並列円柱周りの流れ場とウェイクギャロッピング特性、平成 23 年度土

- 木学会 四国支部 技術研究発表会、
2012.5.19、高知工科大学（高知県）
- ④ 長尾 文明、Basic Study on Wake Excitation of Tandem Circular Cylinders under Central Distance of Three Diameters、9th International Symposium on Cable Dynamics、2011.9.16、同済大学（中国・上海）
 - ⑤ 長尾 文明、ウェイクギャロッピングに及ぼす円柱表面粗度の影響、フラッターの制御と利用」に関する第1回シンポジウム、2011.9.16、東京大学（東京都）
 - ⑥ 長尾 文明、並列円柱のウェイクエクサイテーションに対する表面粗度の影響、第66回土木学会年次学術研究発表会、2011.9.7、愛媛大学（愛媛県）
 - ⑦ 長尾 文明、Effects of surface roughness of circular cylinders on wake galloping、13th International Conference on Wind Engineering、2011.7.11、Amsterdam RAI（Amsterdam オランダ）
 - ⑧ 長尾 文明、円柱周りの流れ場がウェイクエクサイテーションに及ぼす影響、平成23年度四国支部技術研究発表会、2011.5.14、香川大学（香川県）
 - ⑨ 長尾 文明、ウェイクエクサイテーションのレイノルズ数依存性に関する研究、第65回土木学会年次学術講演会講演会、2010.9.1、北海道大学（北海道札幌市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長尾 文明 (NAGAO FUMIAKI)
徳島大学・大学院 ソシオテクノサイエンス
研究部・教授
研究者番号：40172506

(2) 研究分担者

野田 稔 (NODA MINORU)
徳島大学・大学院 ソシオテクノサイエンス
研究部・准教授
研究者番号：30283972

(3) 連携研究者