論文

角柱回転振動によるウェイクギャロッピングのフィードバック制御

Feedback Control of Wake Galloping by Rotational Excitation of Rectangular Cylinder

比江島 慎二^{*1}

川東一幸^{*2}

Shinji HIEJIMA, Kazuyuki KAWAHIGASHI

SUMMARY

In order to develop a new type of wind power generation using feedback amplification of the wind-induced vibration caused between tandemly-arranged rectangular and circular cylinders, wind tunnel experiments were conducted. In the feedback control, the rotational excitation of the windward rectangular cylinder controls the vibration of the leeward circular cylinder. When the windward rectangular cylinder is excited with the time lag less than half a period of the leeward circular cylinder vibration, the leeward circular cylinder vibration is amplified efficiently. On the contrary, the feedback excitation with the time lag greater than half a period of the leeward cylinder vibration suppresses the cylinder vibration sufficiently. Although the leeward cylinder vibration is amplified more efficiently as the control gain is stronger, the amplification effect diminishes beyond a critical gain.

Key Words: Circular cylinder, Rectangular cylinder, Feedback control, Wake galloping, Wind energy

1. はじめに

地球温暖化の進行やピークオイルの到来、原発事故への不安などから、様々な再生可能エネルギーが注目されており、特に風力発電の導入が世界的に盛んである。また、海洋国家である我が国やイギリスなどでは、巨大台風に匹敵するエネルギーを有し、しかも風力のように気象に左右されることなく極めて安定した電源である海流・潮流エネルギーも注目され、本格的な開発競争が始まろうとしている。いずれも、風や水流による流体の運動エネルギーを利用したものであるが、そのエネルギー取得方法としては、一般にプロペラ回転式の風車や水車が用いられる。しかし、風車プロペ

ラから発生する空力騒音、水車プロペラの高い製造コストや海中漂流物によるプロペラ破損、鋭利なプロペラ回転で鳥や海洋生物を傷つけるなどの特有の問題がある。これに対し、フラッターや渦励振などの風工学分野でもよく知られた流力振動を動力源とする新たな発電方式^{1)~6)}が提案されている。円柱などの鈍い断面形状を有する物体のゆっくりとした流力振動であるため、上記プロペラのような問題が少ない。

このような流力振動を利用した発電法として、われわれはウェイクギャロッピングを用いた方式を検討してきた^{7)~9)}。ウェイクギャロッピングは、近接してタンデム配列された2円柱において、上流円柱の後流ウェ

*1 岡山大学大学院環境生命科学研究科 准教授

Associate Professor, Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University

*2 岡山大学大学院環境生命科学研究科 大学院生

Graduate Student, Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University

(原稿受理年月日: 2012年6月29日, 採用決定: 2012年11月16日)

イクと下流円柱との力学的相互作用によって、下流円柱が激しく振動する自励振動である。通常、上流円柱は静止し、振動の原因となる剥離せん断流れの供給源として働くのに対し、われわれは上流円柱を加振することで後流ウェイクの剥離せん断流れに人工的に脈動を与え、下流円柱の増幅・抑制を自在にコントロールすることに成功した。このとき、変位センサーで捉えた下流円柱応答に時間遅れと制御ゲインを与えてフィードバックすることで上流円柱を加振するという制御法を採用しているが、ある特定範囲の時間遅れにおいてのみ下流円柱応答が増幅することが明らかになっている。上流円柱の加振時にエネルギーを消費するが、下流円柱の応答振幅の数分の一程度の小さな加振で、無制御時の数倍程度まで下流円柱の応答振幅を増幅できるため、これを動力源にすれば消費エネルギー以上のエネルギーを獲得できる可能性がある。下流円柱に取り付けた簡易な電磁誘導装置により、わずかな出力ではあるが発電にも成功している。また、時間遅れと制御ゲインを一定に保持して制御すれば、風速が変化しても下流円柱の応答振幅がほぼ一定に維持される性質があることも分かっており、風速変動に対する発電の安定化にも応用できる。さらに、ウェイクギャロッピングが発生しない低風速域でも振動を励起できるため、低風速域の風力の有効活用が期待できるとともに、逆に下流円柱応答の完全抑制も可能であることから、高風速域で過大な応答が生じたときにすばやく応答を抑制して装置を破壊から守るのにも有用である。

これまで、コントローラーとしての上流円柱は、下流円柱と同じく流れ直角方向に並進振動させていた。しかし、下流円柱に対する後流ウェイクの供給源としてのコントローラーは円柱である必要はなく、さらに、後流ウェイクに制御力として脈動を与えるには並進振動である必要もない。そこで本研究では、より効率的な制御の可能性を探るため、並進振動の代わりにコントローラー長軸周りの回転加振を用いた制御を試みた。このとき、円柱の長軸周りの回転加振ではその後流ウェイクに脈動を効果的に与えられないため、代わりに正方形角柱をコントローラーとして用いることにした。

2. フィードバック制御の風洞実験方法

角柱の回転加振によるフィードバック制御システムの概略を Fig. 1 に示す。円柱と角柱が主流方向に直列に並んだときの中心間距離 S とすると、円柱応答変位 y が生じたときに円柱と角柱の断面中心間を結ぶ方向

が主流方向となす角度を求め、その角度に制御ゲイン G を乗じた式(1)により角柱の加振角度 ϕ を決定する。

$$\phi(t) = G \tan^{-1} \left[\frac{y(t-\tau)}{S} \right] \quad (1)$$

ただし、現時刻 t の $y(t)$ ではなく、 τ 時間前の $y(t-\tau)$ を用いて現時刻の $\phi(t)$ を規定する。 $\tau=0$ かつ $G=1$ のとき、並進振動する円柱に合わせて、角柱はその下流面が常に円柱中心に正対するように回転振動することになる。 $\tau=0$ では円柱と角柱は同位相の振動となるはずであるが、今回用いたステッピングモーターでは、信号入力から実際に駆動して角柱を強制加振するまでに機械的な時間遅れ ($=0.053s$) が生じることが分かっており、 $\tau=0$ の加振は実現できない。そこで、円柱の振動周期 T とするとき、ちょうど 1 周期後に相当する $\tau=T$ を与えることで同位相の加振を実現した。また、その他のいずれの時間遅れを設定する際にも、この機械的な時間遅れを含めて所要の時間遅れ τ が得られるように設定した。

図1 フィードバック制御システム
Fig. 1 Feedback control system

図2 バネ支持した円柱
Fig. 2 Spring-supported circular cylinder

円柱は Fig. 2 に示すように、直径 $D=20\text{mm}$ 、軸方向長さ 200mm のアクリル製で、直径 50mm の円形端板を両端に取り付け、2 枚の真鍮（黄銅）製の板バネ（厚さ 0.15mm 、幅 20mm 、長さ 150mm ）により吊り下げて弾性支持する。2 枚の板バネは一体となってせん断的に変形するため、図の波線のように円柱は床面にはほぼ平行に振動し、主流直角方向のみの 1 自由度である。自由振動実験を行ったところ、固有振動数 $f_n=1.86\text{Hz}$ 、減衰定数は 0.15% であった。なお、円柱の応答変位 y をサンプリング周波数 100Hz で 120s 取得し、その標準偏差に $\sqrt{2}$ を乗じて応答振幅 A を定義した。

一方、角柱はステッピングモーターに剛結され、Fig. 1 のフィードバック制御システムに従い、円柱の振動

変位に応じて断面中心を回転軸として回転加振を受ける。角柱の辺長 $W=10\text{mm}$ 、 15mm 、 20mm の 3 通りを用い、いずれの角柱も軸方向長さ 255mm で、直径 50mm の円形端板を両端に取り付けている。

実験には、 $225\text{mm} \times 300\text{mm}$ の矩形吹き出し口を有する開放型風洞を用いた。吹き出し口から 40mm 下流に角柱の断面中心を置き、角柱の断面中心からさらに距離 S の下流に円柱の断面中心を置いた。角柱と円柱の中心間距離 $S=45\text{mm}$ 、 55mm 、 65mm の 3 通りを検討した。なお、風洞吹き出し口での乱れ強度は最大 2% 程度であり、主流速度 U は角柱や円柱を何も設置しない状態の吹き出し口の断面中央において熱線流速計で測定した値である。

図 3 無制御時の応答振幅と振動数 ($W=10\text{mm}$)

Fig. 3 Response amplitude and frequency without control ($W=10\text{mm}$)

図 4 無制御時の応答振幅と振動数 ($W=15\text{mm}$)

Fig. 4 Response amplitude and frequency without control ($W=15\text{mm}$)

図5 無制御時の応答振幅と振動数 ($W=20\text{mm}$)

Fig. 5 Response amplitude and frequency without control ($W=20\text{mm}$)

3. 風洞実験結果

3.1 無制御時の応答特性

フィードバック制御なしで角柱を静止させた状態において、円柱に生じるウェイクギャロップingを計測した。この無制御時の円柱の応答振幅 A_0 を円柱直径 D で無次元化した A_0^* 、および円柱の振動数 f_0 を固有振動数 f_n で無次元化した f_0^* を Fig. 3 ~ Fig. 5 に示す。

Fig. 3 の角柱辺長 $W=10\text{mm}$ のとき、角柱と円柱の距離が最も近い $S=45\text{mm}$ では、風速 $U=2.0\text{m/s}$ あたりから振動が発生して A_0^* が漸増するが、 $U=5.0\text{m/s}$ 付近で A_0^* がステップ状に急上昇するハードフラッター型の応答を示す。その後、再び A_0^* が U とともに単調増加する。このとき、 f_0^* は $U=5.0\text{m/s}$ 付近でやや不連続に変化するものの、全体的になだらかに上昇している。一方、角柱と円柱の距離をさらに広げた $S=55\text{mm}$,

図6 制御パラメータの影響 ($W=10\text{mm}$, $U=8.0\text{m/s}$)

Fig. 6 Effect of control parameters ($W=10\text{mm}$, $U=8.0\text{m/s}$)

65mm の場合は、 $S=45\text{mm}$ のような A_0^* のステップ状の急上昇は見られず、 U とともに A_0^* が漸増していく。また、 f_0^* も U とともに漸増する。

Fig. 4 の $W=15\text{mm}$ かつ $S=45\text{mm}$ では、Fig. 3 の $W=10\text{mm}$ かつ $S=45\text{mm}$ のような A_0^* のステップ状の変化は見られず、 A_0^* と f_0^* が U とともに漸増する傾向が見られる。一方、 $S=55\text{mm}$, 65mm では、 U を高くしても振動がほとんど生じないの分かる。Fig. 5 の $W=20\text{mm}$ に至っては、いずれの S のケースでも振動がほとんど生じない。ただし、 f_0^* は U とともに漸増する傾向が見られる。

3.2 フィードバック制御パラメータの影響

次に、時間遅れ τ と制御ゲイン G を様々に変化させてフィードバック制御したときの円柱の応答振幅 A の結果を Fig. 6 ~ Fig. 8 に示す。横軸は τ を無制御時の円柱振動周期 $T_0 (=1/f_0)$ で無次元化した τ_0^* 、縦軸は A

図7 制御パラメータの影響($W = 15\text{mm}$, $U = 8.0\text{m/s}$)
Fig. 7 Effect of control parameters ($W = 15\text{mm}$, $U = 8.0\text{m/s}$)

を円柱直径 D で無次元化した A^* である。いずれも $U = 8.0\text{m/s}$ のときの制御結果であり、比較のため無制御時の $U = 8.0\text{m/s}$ における A_0^* を破線で示してある。

いずれのケースも、制御パラメータとして与えた τ_0^* によって A^* が大きく変化するの分かる。およそ $0.5 < \tau_0^* < 1.0$ の範囲の時間遅れを与えると、 A^* が A_0^* よりも抑制され、その他の τ_0^* の範囲では A^* が A_0^* よりも増幅する傾向が見られる。このことは、角柱加振の位相が円柱振動の位相よりも半周期以上遅れるとき、すなわち見かけ上、角柱加振の位相が円柱振動の位相よりも早いときに円柱振動が抑制され、逆に、角柱加振の位相が円柱振動の位相よりも遅いときに円柱振動が増幅することを意味する。特に、 $\tau_0^* = 0.6 \sim 0.7$ 付近で最も抑制効果が高く、 $\tau_0^* = 0.3 \sim 0.4$ 付近で最も増幅効果が

図8 制御パラメータの影響($W = 20\text{mm}$, $U = 8.0\text{m/s}$)
Fig. 8 Effect of control parameters ($W = 20\text{mm}$, $U = 8.0\text{m/s}$)

高い。また、 $\tau_0^* = 0.6 \sim 0.7$ を与えた場合には、小さい G であってもほぼ完全な振動抑制効果が得られている。一方、増幅効果が得られる τ_0^* では、 G が大きいほど増幅効果が高まり、 S の違いや無制御時の応答振幅の大きさに関わらず、いずれも同程度の A^* を励起できるの分かる。ただし、増幅時の最大の A^* は $W = 10\text{mm}$ のときよりも $W = 15\text{mm}$, 20mm の方が大きい。

角柱の回転加振ではなく円柱の並進加振を用いてフィードバック制御した既報⁷⁻⁹⁾では、角柱の回転加振の場合とは逆に、上流円柱加振の位相が下流円柱振動の位相よりも早いときに下流円柱振動が増幅され、上流円柱加振の位相が下流円柱振動の位相より遅いときに下流円柱振動が抑制された。このような増幅・抑制メカニズムはウェイクギャロッピングの発生メカニ

ムとも関連して大変興味深い。加振によって加振物体の後流ウェイクに生じる脈動と下流円柱振動との位相関係などが深く関与していると考えられるが、制御時の流れや空気力特性については現時点では不明であり、今後さらに詳しく検討する必要がある。

3.3 制御時の最大応答振幅

Fig. 6～Fig. 8 の各ケースで、 τ_0^* を変化させたときの A^* の最大値を A_{max}^* としてまとめたのが Fig. 9 である。なお、 $G=0$ は無制御時を表し、このとき $A_{max}^* = A_0^*$ である。

いずれの W でも、 G が大きいほど A_{max}^* が増加する傾向を確認できるが、 $G=0.4 \sim 0.6$ 程度以上になると、 A_{max}^* が G によらずほぼ一定の限界値に近づく。限界値が存在する要因については不明であるが、これに関連して、 $A_{max}^* = 1.5$ 程度の大きな応答振幅になると、円

柱を弾性支持している Fig. 2 の板バネが線形変形の限界に近くなることを目視で確認している。このことから、 $W=15\text{mm}, 20\text{mm}$ における $A_{max}^* = 1.5$ 程度の限界値は、板バネ部の線形変形の限界が要因である可能性が示唆される。一方、 $W=10\text{mm}$ の場合には、 $A_{max}^* = 1.5$ に達していない $A_{max}^* = 1.0$ 程度で A_{max}^* の限界値を迎えており、線形変形の限界が要因とは思われない。同様に、Fig. 6～Fig. 8 において、線形変形の限界には達していないと考えられる、例えば $\tau_0^* = 0.5$ の A^* を見ても、やはり G の増加に伴い A^* が一定の限界値に近づく傾向が見られる。また、角柱の回転加振ではなく円柱の並進加振で制御した既報⁷⁻⁹⁾でも、 G の増加に伴う増幅効果の限界が見られ、その場合も必ずしも板バネ部の線形変形の限界が要因とは考えられない結果が得られている。

図9 最大応答振幅 ($U=8.0\text{m/s}$)
Fig. 9 Maximum response amplitude ($U=8.0\text{m/s}$)

図10 最大応答振幅 ($U=4.0\text{m/s}$)
Fig. 10 Maximum response amplitude ($U=4.0\text{m/s}$)

また、Fig. 9 によれば、 W が同じであれば、 S によらず A_{max}^* の限界値はほぼ同程度の値であるが、 $W = 10\text{mm}$ の限界値は $W = 15\text{mm}, 20\text{mm}$ のそれに比べてやや小さい。 W が大きいほど角柱の後流ウエイク幅は広がると考えられることから、 A_{max}^* の限界値は角柱の後流ウエイク幅に依存することが示唆される。このことから、より高い増幅効果を得るためには、角柱以外に後流ウエイクがより広い断面形状の物体で加振するのが効果的かもしれない。本実験の角柱回転加振の場合、加振角度 $\phi = 45\text{deg}$ のときに角柱の後流ウエイク幅は最大になると推測され、このとき円柱の応答振幅も最大になると考えられる。よって、この後流ウエイク幅の限界が前述の A_{max}^* の限界値の要因である可能性が示唆される。ところが、 $W = 10\text{mm}$ の A_{max}^* の限界値を $A_{max}^* = 1.0$ および $W = 15\text{mm}, 20\text{mm}$ の A_{max}^* の限界値を $A_{max}^* = 1.5$ と見積もって、そのときの加振角度を求めると、たとえ $G = 1.0$ と仮定しても、それぞれ $\phi = 17 \sim 24\text{deg}$ および $\phi = 25 \sim 34\text{deg}$ にしかならず、いずれも $\phi = 45\text{deg}$ より小さい。すなわち、ウエイク幅の限界に達するにはまだ余裕があり、後流ウエイク幅の限界は A_{max}^* の限界値の要因になっていないと思われる。

以上、 G の増加に対して A^* が一定の限界値に近づく要因として、板バネ部の線形変形の限界や後流ウエイク幅の限界などの可能性を考察したが、それだけでは説明が付かず、今後さらに詳しく検討する必要がある。

また、Fig. 9 によれば、 $G = 0$ の無制御時にほとんど振動が生じないいくつかのケースでは、 G をある程度大きくしないと振動が励起されず、 S が大きいほど振動を励起するためにより大きな G を要する傾向があるのが分かる。ただし、いったん振動が励起されると、無制御時の振動がより大きいケースと同等の A_{max}^* が得られている。一方、 $W = 10\text{mm}$ かつ $S = 45\text{mm}$ のケースなどは、無制御時の応答は大きいものの、むしろ制御による増幅効果はそれほど大きくない。

同様に、 $U = 4.0\text{m/s}$ においてフィードバック制御したときの A_{max}^* を Fig. 10 に示す。Fig. 9 の $U = 8.0\text{m/s}$ の傾向とほぼ同じであるが、いずれの W でも、 G を強めたときの A_{max}^* の限界値が $U = 8.0\text{m/s}$ のときよりもやや小さい。また、 $G = 0$ の無制御時にほとんど振動が生じないいくつかのケースにおいて、振動を励起するためには $U = 8.0\text{m/s}$ のときよりも大きな G を必要とする傾向が見られる。

4. まとめ

流力振動の増幅効果を利用した新しい風力発電・潮流発電の実現、あるいは構造物に好ましくない流力振動の効率的な抑制のために提案したウエイクギャロッピングのフィードバック制御法に関して、これまでの上流円柱の並進加振に代わり、角柱の回転加振を用いた制御方式の効果を風洞実験により検討した。

(1) 無制御時には、下流円柱に生じるウエイクギャロッピングの応答振幅が流速とともに増大した。角柱の辺長や円柱との中心間距離によって、ハードフラッター型やソフトフラッター型のウエイクギャロッピングが生じた。このとき、角柱と円柱の中心間距離が短いほど、あるいは角柱の辺長が小さいほど大きな振幅のウエイクギャロッピングが発生する傾向が見られた。

また、円柱振動数は流速とともに漸増した。

(2) 時間遅れを様々に変化させてフィードバック制御したところ、角柱加振の位相が円柱振動の位相より遅いときに円柱振動が増幅し、逆に、角柱加振の位相が円柱振動の位相よりも早いときに円柱振動が抑制された。特に、角柱の位相が $0.3 \sim 0.4$ 周期遅いときに増幅効果が高く、 $0.3 \sim 0.4$ 周期早いときに抑制効果が高い。

(3) フィードバック増幅時には、制御ゲインが大きいほど高い増幅効果が得られる。ただし、制御ゲインが $0.4 \sim 0.6$ 程度以上になると、円柱の応答振幅がそれ以上増幅しなくなる。一方、抑制時には、比較的小さな制御ゲインであっても、ほぼ完全に円柱振動を消滅させることができた。

(4) 制御ゲインの増加に伴い円柱の応答振幅がそれ以上増幅しなくなる限界値が存在する要因として、円柱の弾性支持部の線形変形の限界や角柱後流ウエイク幅の限界が要因である可能性が示唆されたが、それだけでは説明が付かなかった。今後さらに詳しく検討していく必要がある。

(5) 角柱の辺長が大きいほど、あるいは流速が高いほど、円柱をより大きな応答振幅まで増幅できる傾向が見られた。角柱の辺長が大きいほど後流ウエイク幅が広がると考えられることから、フィードバック増幅で得られる最大の応答振幅は角柱の後流ウエイク幅に依存することが示唆される。このことから、より高い増幅効果を得るためには、角柱以外に後流ウエイクがより広い断面形状の物体で加振するのが効果的かもしれない。

(6) 無制御時にほとんど振動が生じないケースでは、ある程度大きな制御ゲインを与えないと円柱振動が励

起されず、角柱と円柱の中心間距離が長いほど、円柱の振動励起のためにより大きな制御ゲインを要する。ただし、十分な制御ゲインを与えてフィードバック制御すれば、無制御時の円柱振動の有無や応答振幅の大きさ、あるいは角柱と円柱の中心間距離に関わりなく、同程度の大きさの応答振幅まで増幅可能である。

以上、従来の円柱の並進加振に代わり、より効率的な制御の可能性を探るため、角柱の回転加振による流力振動のフィードバック増幅を試みたが、並進加振と同等の増幅効果を得ることができた。本フィードバック増幅を用いた流力振動発電を実現するには、加振で消費するエネルギーをいかに低減し、増幅した流力振動からより多くのエネルギーを獲得できるかが重要となる。円柱の並進加振と角柱の回転加振でどちらがより消費エネルギーが少ないかどうかは、加振に要する駆動力・速度やトルク・角速度の測定などから消費パワーを算出する必要がある。今後、そのような測定も行い、より効率の高い加振法を明らかにしたい。また、これまでの一連の実験により、加振物体と制御対象物体との間に特定の時間遅れを与えるときにフィードバック増幅が生じることが明らかになっており、エネルギー消費を伴うアクティブ制御ではなく、機構的な工夫によってパッシブな方法で特定の時間遅れを発生できるようなフィードバック増幅の実現の可能性も探っていきたい。

謝辞：本研究の一部は、(独)日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)No.21560502)により行われた

ことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) McKinney, W. and DeLaurier, J. "An oscillating-wing windmill", J. Energy, Vol.5, No.2, pp.109-115, (1981)
- 2) 磯貝 紘二, 山崎 正秀, 朝岡 拓也, 「CFDを用いたフラッター発電の概念設計」, 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2002論文集, pp.106-111, (2002)
- 3) 松本 勝, 大窪 一正, 伊藤 靖晃, 松宮 央登, 金 起男, 「連成フラッターを利用した発電システムの発電効率に関する基礎的研究」, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.151-156, (2006)
- 4) Bernitsas, Michael M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y. and Garcia, E. M. H., "VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow", J. Offshore Mechanics and Arctic Eng., Vol.130, 041101, (2008)
- 5) 小出 瑞康, 関崎 敬広, 山田 修一, 高橋 勉, 白樫 正高, 「水流による渦励振を利用したマイクロ発電の将来性と実証試験」, 日本機械学会論文集(B 編), Vol.77, No.775, pp.702-714, (2011)
- 6) 比江島 慎二, 岡 圭人, 林 健一, 井上 浩男, 「流体励起振動を利用した潮流発電のための基礎的実験」, 「フラッターの制御と利用」に関する第 1 回シンポジウム梗概集, pp.88-93, (2011)
- 7) 比江島 慎二, 中野 正史郎, 「上流側円柱加振によるウエイクギャロッピングのフィードバック制御」, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, pp. 363-368, (2010)
- 8) 比江島 慎二, 樋吉 佑一, 「空力振動を利用した発電のための振動増幅法」, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.96, pp.135-141, (2011)
- 9) 比江島 慎二, 中野 正史郎, 「フィードバック増幅を利用した空力振動発電の制御パラメータに関する実験的研究」, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.88-97, (2012)