

振り子の流体励起振動のフィードバック制御

岡山大学大学院 学生会員 ○佐々木 拓人
 岡山大学大学院 正会員 比江島 慎二

1. 目的

風力発電や潮流発電はプロペラを回転させて発電する方式が主流であるが、我々はプロペラを使わず、円柱などの柱状物体に生じる流体力振動を利用した新たな発電方式の開発に取り組んでいる¹⁾。Hydro-VENUS (Hydrokinetic Vortex ENergy Utilization System)と名付けたこの方式では、流体力振動をいかに効率的に増幅してより多くのエネルギーを得るかが重要となる。流体力振動を増幅する手法として、我々は流れに対してタンデム配置した2つの円柱のうち、上流側の円柱を下流側の円柱応答のフィードバックに基づいて並進加振し、その変動流を下流円柱に作用させることで、下流円柱応答の増幅・抑制を自在にコントロールするアクティブ制御法を開発してきた^{2)~5)}。本研究では、このフィードバック増幅手法を Hydro-VENUS の振り子振動に適用した。上下流に2つの振り子を近接設置し、上流振り子の加振による下流振り子応答の増幅効果を検討した。

2. 実験方法

円柱振り子の回転加振による空力振動制御の概略を Fig. 1 に示す。振り子は ABS 樹脂製でいずれも長さ $L=150\text{mm}$ 、直径 $D=18\text{mm}$ である。下流振り子はコイルバネを用いて固有振動数 f_n を調整し、 $f_n = 1.78\text{Hz}$ とした。下流振り子の応答変位 y をレーザー変位計で常時計測し、振り子の回転角 θ に変換した後、ゲイン G を乗じて求めた回転角 ϕ を上流振り子に与えて加振するフィードバック制御である。

$$\phi(t) = G \cdot \theta(t - \tau) \quad (1)$$

このとき、現時刻 t における $\theta(t)$ ではなく、式(1)のように τ 時間前の $\theta(t - \tau)$ を用いて現時刻の $\phi(t)$ を規定する。すなわち、下流振り子応答に対して一定の時間遅れ(位相差)を与えて上流振り子を加振する。

3. 実験結果

(1) 増幅時の過渡応答

振り子間の隙間距離 $S = 54\text{mm}$ 、換算流速 $U^* = U/(f_n D) = 190$ (U は風速で $U = 6\text{m/s}$ に相当)、 $G = 1.0$ において、上下流の振り子が逆位相で振動する無次元時間遅れ $\tau^* = \tau/T$ (T は制御後の下流振り子の振動周期) $= 0.5$ を与えて制御を開始し、10s 経過後に下流振り子応答の増幅効果が最も高い時間遅れ $\tau^* = 0.9$ を与えたときの下流振り子応答 θ の時間変化を Fig. 2 に示す。10s 時点から徐々に振動が増大し始め、20s 以降にはほぼ定常の振動角応答に達することが分かる。

(2) 時間遅れ τ による応答変化

$U^* = 379$ ($U = 12\text{m/s}$ に相当) でゲイン $G = 1.0$ を与えたとき、様々な τ^* に対する下流振り子の回転角応答増幅 Θ の変化を Fig. 3 に示す。振り子間の隙間距離 S ごとに示しているが、いずれの S においても、 $\tau^* = 0.9$ 付近で Θ が最大になった。このことから、上流振り子が下流振り子に 0.9 周期遅れて振動するとき、すなわち上流振り子が下流振り子より 0.1 周期早い位相で振動するとき最も増幅しやすいことになる。なお、無制御時には同じ $U^* = 379$ で下流振り子は振動せず、ほとんど $\Theta = 0$ であった。逆に、 $\tau^* = 0.9$ 付近の時間遅れを与えて下

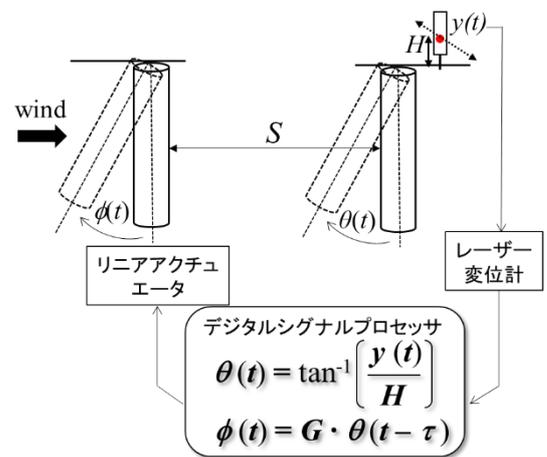


Fig. 1 フィードバック制御の概略

キーワード 風力発電, 潮流発電, 流体励起振動, フィードバック制御, 円柱振り子

連絡先 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1 岡山大学大学院環境生命科学研究科 hiejima@okayama-u.ac.jp

流振り子を大きく振動させた状態から、 $\tau^* = 0.3$ 付近の時間遅れに変更すると、下流振り子の振動を効率的に抑制することができた。Fig. 3を見ると、 $\tau^* > 0.5$ において振動が励起されていることから、上流振り子が下流振り子よりも早い位相で振動しているときは増幅し、逆に遅い位相で振動しているときは抑制されると言える。

(3) 隙間距離 S の影響

G を一定のもとで時間遅れ τ を変化させたときの下流振り子の回転角応答 θ の最大値を θ_{max} とするとき、換算流速 $U^* = 190, 253, 379$ (それぞれ $U = 6, 8, 12\text{m/s}$ に相当) で隙間距離 S を様々に変化させて θ_{max} を求め、各ケースの結果をまとめて示したのが Fig. 4 である。このとき $G = 1.0$ である。 θ_{max} が最も大きかったのは $U^* = 379$ の $S = 54\text{mm}$ の時で $\theta_{max} = 43.19^\circ$ である。このとき $\tau^* = 0.87$ であった。いずれの風速でも $S = 54\text{mm}$ で θ_{max} が最大となっている。特定の隙間距離 S で応答が最大となる要因については、上流振り子からの渦の巻き込み位置などに関連している可能性があるが、現時点では不明であり、今後検討する必要がある。

4. まとめ

円柱振り子の空力振動の応答変位に時間遅れと制御ゲインを与えてリアルタイムでフィードバックし、上流の別の円柱振り子を加振することで下流円柱振り子の空力振動応答を増幅するアクティブ制御法について風洞実験を行った。

- (1) 制御後の下流振り子応答の周期を基準に 0.6~0.9 周期の時間遅れで上流振り子が加振されるとき、下流振り子の回転角応答が増幅する。特に、0.9 周期付近の時間遅れのときの増幅効果が高い。
- (2) 振り子間の隙間距離 S を広げるにしたがって、制御時の下流振り子の回転角応答は増大し、いずれの風速域やゲインにおいても $S = 54\text{mm}$ のとき最大となり、 $S > 54\text{mm}$ では減少した。

参考文献

- 1) 比江島, 岡, 林, 井上: 倒立振り子を用いた流力振動発電のためのエネルギー取得性能の検討, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp.425-430, 2012.
- 2) 比江島, 中野: 空力振動発電のためのフィードバック増幅特性の検討 (円柱距離の影響), 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.105, pp.8-13, 2013.
- 3) 比江島, 中野: 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.
- 4) 比江島, 樋吉: 空力振動を利用した発電のための振動増幅法, 風力エネルギー, Vol.96, pp.135-141, 2011.
- 5) 比江島, 中野: 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.

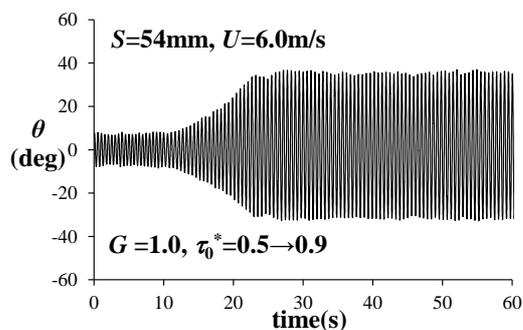


Fig. 2 フィードバック増幅時の過渡応答

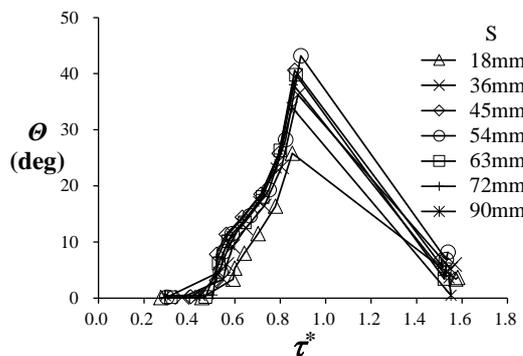


Fig. 3 時間遅れによる応答変化

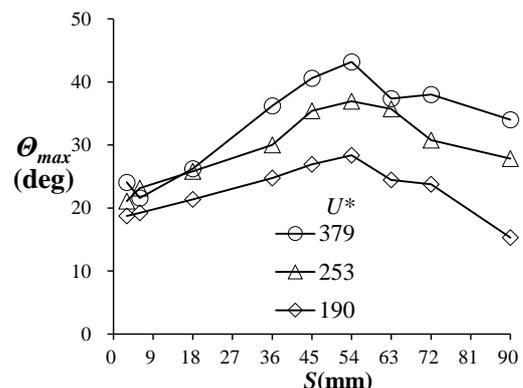


Fig. 4 隙間距離による応答変化