

2023年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	国立研究開発法人産業技術総合研究所
職位または役職	主任研究員
氏名	小室 淳史

1. 研究題目

回転円柱により誘起される流れ場の動的制御に関する研究

2. 研究目的

本研究では小型風力発電システムの普及を目指し、垂直軸型風車の一種として提案されているマグナス風車の発電効率の向上を目的とする。近年、再生エネルギーに対する需要が高まっている。特に日本は資源が少ない島国であるために、とりわけエネルギー自給率が低く、大部分のエネルギー源を他国に依存せざるを得ない。このような問題を解決するために、総発電電力に対する再生可能エネルギーの割合を増加させることは現代日本における重要な課題となっている。

マグナス風車は風車の回転軸が地面に対して垂直であり、またプロペラに円柱を用いる点の特徴である。プロペラに円柱を用いることで突風などの自然外乱に対して堅牢であり、日本のような丘陵地が多い島国では特に環境に適合する。また、通常の風車に対して小型化できることもメリットであり、小規模の発電網を形成することが出来る。一方で、マグナス風車は風力発電の効率という観点では、従来のプロペラ型には及ばず、風力に対する発電量を改善することが課題である。このような課題を解決するために、本研究では、円柱の回転に用いられるモーターを気流制御用のアクチュエータとして活用し、モーターの回転速度や向きを動的に変えることで動的な気流制御を実現し、マグナス風車の平均発電電力を向上させることを目指す。

3. 研究内容及び成果

実験は前年度に整備した風洞設備と円柱の回転制御機構を用いて行った。風洞にはステッピングモーターを用いた回転制御機構を取り付け、カップリングにより円柱と結合した。円柱は表面圧力を計測するために中央部分のみを3Dプリンターで作成し、アクリルの円柱と接着することで製作した。円柱の直径は50 mm、長さは98 mmである。3Dプリンターで製作した部位に直径1.5 mmのステンレスパイプを取り付けて円柱表面の圧力を引き出している。表面圧力の計測位置と、風洞中の流れに対する角度の関係を図1のように定義した。 $\theta = \theta_i$ の位置に幅3 mm、厚さ25 μm ポリイミドフィルム(650S #25 寺岡製作所)を張り付けた。圧力計測用のセンサとして、Endevco社製の非定常圧力センサを用い、円柱周囲にかかる圧力を周方向に積分することで揚力を算出した。圧力の絶対値は圧電素子を用いて校正した。構築した実験系を用いて、一様流れ中において円柱を90度ピッチング運動させたときの円柱周りの圧力分布を計測した。図2には0度から90度、図3には45度から135度の間で90度ピッチングさせたときの揚力係数の変化を表している。揚力係数とは揚力を動圧と代表面積で無次元化したものである。実線は θ が増加する方向(ピッチアップ)、つまり流れと同方向に回転するときで、点線は θ が減少する方向(ピッチダウン)、つまり流れと逆方向に回転する変化を意味している。グラフより、円柱を回転させることによって揚力係数が変化することが示されており、これは円柱に働くマグナス力が変化していることを示唆している。実験では揚力係数の評価に加え、スモークワイヤ法と粒子画像流速測定法を用いた気流の可視化実験を行い、円柱を回転させたときの流れの変化が確認できた。

今後の課題としては、気流制御効果を最大化するための条件を探ることである。今年度の研究では円柱形状を変更して実験を行うことができなかったため今後検討していきたい。またピッチング運動でも気流制御効果があったことから、回転速度を動的に変化させることも性能向上に有用であると考えられるため、制御方式についての検討も必要である。

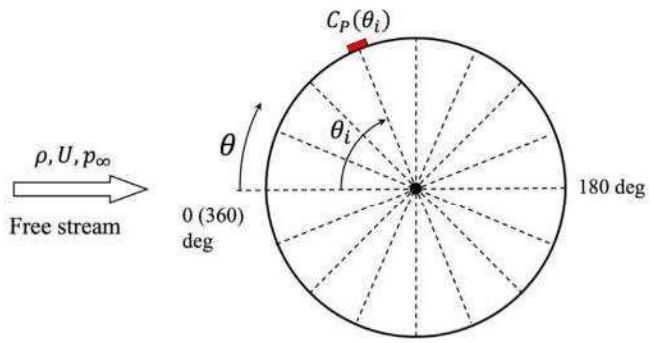


図 1. 円柱表面角度の定義

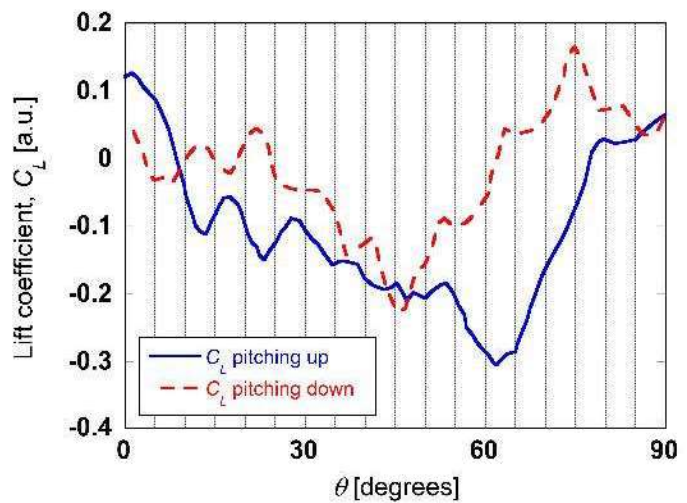


図 2: 円柱を $0 < \theta < 90$ 度でピッチング運動させた場合における揚力係数 C_L のヒステリシス特性

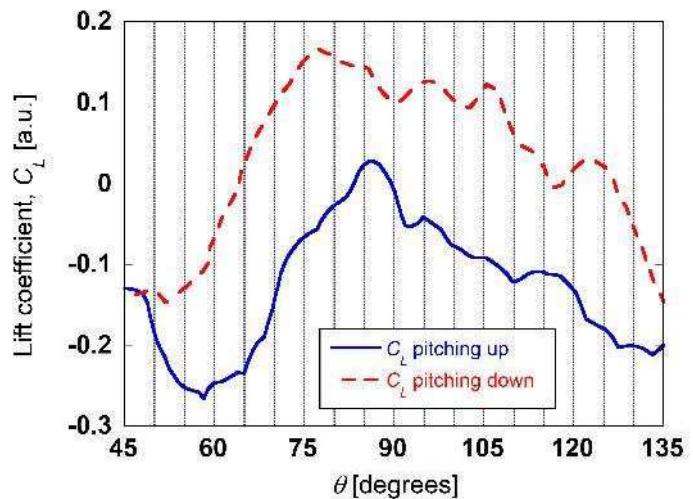


図 3: 円柱を $45 < \theta < 135$ 度でピッチング運動させた場合における揚力係数 C_L のヒステリシス特性

4. 今後の研究の見通し

本研究では、円柱を動的に回転させることで円柱周りの流れ場が変化し、風車性能向上の可能性が示唆された。この成果は、特にマグナス風車において回転速度を動的に制御することで、風車の効率を高める可能性を示している。しかし、現状の実験では円柱の直径、長さ、回転周波数に注目したのみであり、円柱の形状（例えば、スパイラル型円柱やエンドプレート付き円柱）や、他の運動（ピッチング運動など）による流れ場の変化にも注目する必要がある。これらの要因が気流制御に与える影響をさらに詳しく調査することで、マグナス風車の性能向上が図れると考えられる。

また、実環境におけるマグナス風車の運用を考えた場合には、実際の風環境に即した制御技術が求められる。風速や風向きが急激に変化する自然外乱に対して、円柱の回転速度を最適化する制御アルゴリズムを開発することが必要である。この点においては、AI や機械学習を活用したリアルタイム制御手法を導入することにより実現可能であると考えられる。加え、本研究では円柱の回転運動のみを制御し、風条件は一様流として変化させなかったため、今後は突風などの自然外乱を模擬した風洞実験を計画する必要がある。

さらに、本研究の成果は、風力発電に限らず、他の回転体を用いたエネルギー変換技術にも応用できる可能性がある。特に、垂直軸風車や新しい設計の風車システムにおいても、円柱回転制御が効率化に寄与する可能性があるため、今後はこれらのシステムにも適用できるか検討する必要がある。

最後に、本研究が進展することで、マグナス風車をはじめとする風力発電技術が、より低コストで効率的なエネルギー源として実用化されることが期待される。特に、再生可能エネルギーの重要性が増す中で、気流制御技術が社会や経済に与える影響は大きいと考えられる。モーターや MEMS といったアクチュエータ技術を気流の動的制御に積極的に活用することでより自然に調和した流体機器の開発が可能になるだろう。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国内会議（査読なし）

1. 小室淳史、“電動アクチュエータを用いた気流制御技術の開発と風力発電・ドローンへの応用”(2025年1月産業技術連携推進会議環境・エネルギー部会・分科会・研究合同総会発表予定)