

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 23 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 日本大学

氏 名 : 長谷部寛

研究課題名 : 流れの可視化に基づく複数平板のフラッター振動を利用した
風力発電システムの効率化

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和7年4月1日 ~ 至 令和8年3月31日

流れの可視化に基づく複数平板のフラッター振動を利用した

風力発電システムの効率化

Improving the Efficiency of Wind Power Generation System

by Using the Flutter Vibration of Multiple Flat Plates Based on Flow Visualization

日本大学 准教授 長谷部 寛

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究背景と研究計画の概略

現在、再生可能エネルギーの活用が世界的に進む中で、都市部における風力発電の導入が課題となっている。風力発電の主流であるプロペラ型風車は、回転翼の背後に「後流（ウェイク）」と呼ばれる強い乱流を発生させる。この後流は下流に設置された風車の効率を著しく低下させ、構造損傷のリスクも高めるため、風車間には直径の数倍から十数倍程度の大きな離隔距離が必要となる。この制約により、設置面積の限られた都市部での活用は困難であった。一方で、都市部の内部には、地下鉄ホーム、工場ダクト、高速道路の脇など、狭小ではあるが定常的に風が生成される場所が多数存在する。しかしこれらのエネルギーは未利用である。そこで、このような環境下でも効率的に動作し、かつ高密度配置が可能な、複数平板の空力弾性振動（ねじれ振動）を利用した新たな風力発電システムの開発に取り組んでいる。

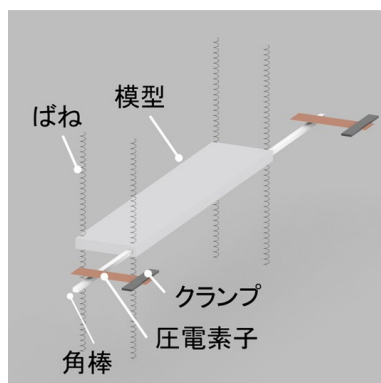
開発中のシステムのコア技術は、直列に配置された複数平板のねじれ振動である。これまでの検討で、平板の配置間隔を変えると複数体が同程度に振動するケースもあれば、上流側から2体目の平板が激しく振動する一方、3体目の平板の振動が抑制されるケースもあった。このように平板間の相互作用のメカニズムは十分に検討できていなかった。そこで本研究では、煙による可視化実験およびPIV（粒子画像流速測定法）解析を通じて、力学的に解明することを目的とした。

2. 複数平板のねじれ振動を利用した風力発電システムの概要

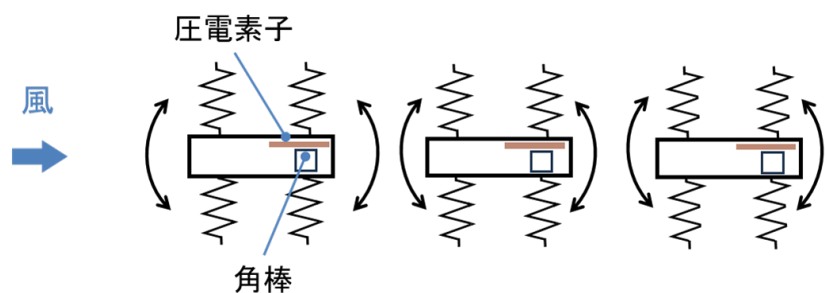
本風力発電システムは、気流中に配置した平板のねじれ振動をエネルギー源とする。発電システムの概要を図1に示す。振動子である平板をバネ支持し、大振幅で振動するように質量とバネ定数を調整する。平板のねじれ振動からエネルギーを回収するためのデバイスには圧電素子を採用した。ねじれ振動する平板を圧電素子に接触させ、変形した圧電素子が発電するアイデアである。ただし、気流への干渉を最小限に抑えるため、圧電素子は風洞内の気流の外側に配置し、平板のねじれ軸の側面から、剛性を持つ軽量の角材を外側へと延長し、平板のねじれ振動に伴ってこの角材が圧電素子を変形させることで、振動エネルギーを電気エネルギーに変換する独自の抽出機構を構築した。この工夫により、流況を乱すことなく効率的な発電を可能とするシステムにしている。

複数平板の振動特性の一例を図2に示す。この結果は、平板4体を直列に配置した際の各平板のねじれ倍振幅 φ' を示す。ここで流入流速は2 m/s～7 m/sまで、1 m/s刻みで変化させた。実験の結果、平板の配置枚数が全体の振動挙動に顕著な影響を及ぼすことが確認された。平板1体目の後流に平板2体目を配置した場合、平板2体目の振幅は平板1体目の振幅の増

加に伴って増大し、結果として平板 1 体目を上回る振幅で振動することが確認された。また、平板 1 体のみと比較しても、平板 1 体目と平板 2 体目は同程度振動していることが分かる。一方、さらに後方に平板 3 体目、4 体目を追加した場合、振動性状は大きく異なった。これら後方の平板では、前方の平板に比べてねじれ振幅が顕著に抑制される傾向が認められた。具体的には、平板 1 体目、平板 2 体目が平板 1 体のみを配置した時と同等以上の振幅を示すのに対し、平板 3 体目、4 体目は平板 1 体のみを配置した時の半分程度にまで振幅が減衰することが確認された。発電システム全体の発電出力を最大化するためには、下流において振動が減衰する要因を特定する必要がある。そのため、可視化実験、PIV 解析を行い、流体構造に関する詳細な検討を実施した。



(a) 振動子



(b) 全体イメージ

図 1 発電システムの概要

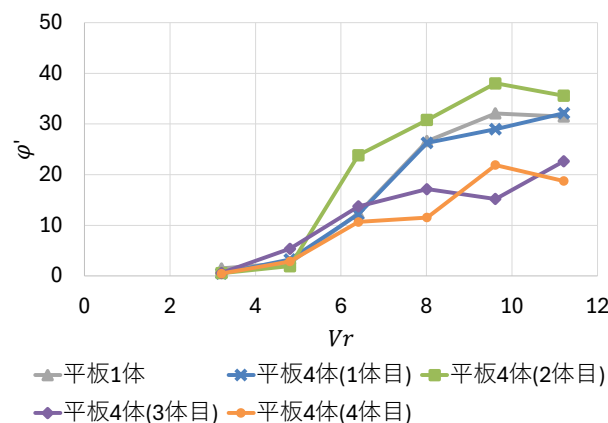


図 2 平板 4 体を直列配置した際の各平板のねじれ振幅

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 可視化実験および PIV 解析の条件

図 2 に示したこれまでの実験結果から、平板を 3 体配置したとき、1 体目と 2 体目のねじれ振幅は大きくなるのに対し、3 体目の振幅が抑制される場合があったことから、平板 3 体を配置したケースを対象に、流れの可視化に基づいて振動メカニズムを検討した。

可視化実験は、測定部の断面が幅 0.3 m、高さ 0.6 m の押し出し型風洞で実施した。風洞の上流側から煙を噴霧、下流側、もしくは平板下方からレーザー (KLD-V, カトウ光研) を照射し、側方からハイスピードカメラ (KT1610, Phantom) で撮影した。撮影速度は、流れ

場全体の様子を把握する場合は 2000 fps, 後述の PIV 解析のための撮影は 10000 fps で実施した。風速は 6~7 m/s とした。

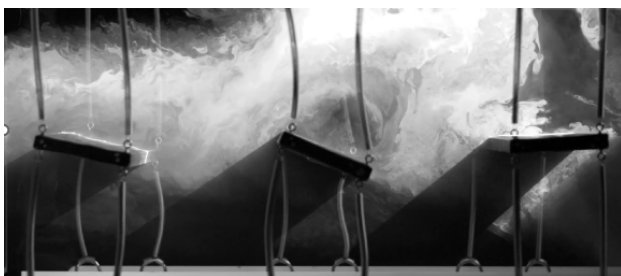
2. 可視化実験および PIV 解析の結果

図 3 に可視化実験の様子を示す。平板 2 体目の周辺においては、振動周期に同期したスケールの大きい渦が形成されることを確認した。しかし、このスケールの大きい渦は流下する過程で急速に崩壊、散逸する様子が観察された。これらの現象をより詳細に検証するため、PIV 解析による詳細な流れ場の検討を行った。

図に風速の鉛直方向成分 (V 成分) の PIV 解析結果を示す。図 4 (a) に示す 1 体目の平板の後流域では、強い鉛直成分を持つ領域が周期的に形成されることが分かった。これは、図 3 の可視化結果において、平板間を斜めに流れる脈動流が見られたことと一致する。一方で、図 4 (b) の 2 体目の後流では、全体的に風速の鉛直成分が低下した。これも可視化実験の結果と対応しており、平板 2 体目周辺に形成された大きな渦の早期崩壊に伴い、風速が低下したことを裏付けている。

さらに、それぞれの平板の後縁から $0.5B$ 下流側の位置の鉛直方向の流速変動 (V 成分) の時系列グラフを示す。PIV 解析の結果、大振幅で振動する平板 1 体目の後流には、平板の固有振動数と同期して垂直方向に変動する周期的な脈動流が形成されていることが明らかとなった。この脈動流が平板 2 体目に作用し、前述した大規模な渦の形成を促進している。すなわち、上流からの周期的な脈動流の発生が、平板 2 体目の振幅を増大させる要因であると考えられる。

一方、前述の通り平板 2 体目から放出された渦は流下してすぐに急速に崩壊する。これに対応して PIV 解析の結果においても、平板 2 体目の後流では、鉛直方向の流速変動が間欠的にほぼ消失する期間が断続的に発生することが確認された。これは、平板 3 体目に作用する気流において、フラッターを誘発するための流れの脈動が減衰していると考えられる。以上より、励振力となる周期的な脈動流の喪失が、平板 3 体目以降における顕著な振幅低下を引き起こす原因であると推測される。

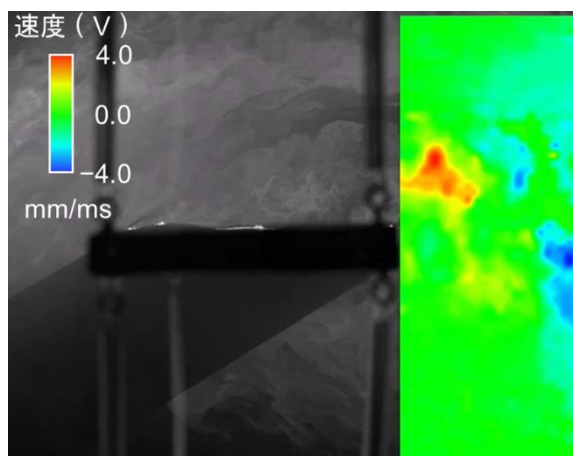


(a) 平板 2 体目にスケールの大きい渦が
形成される様子

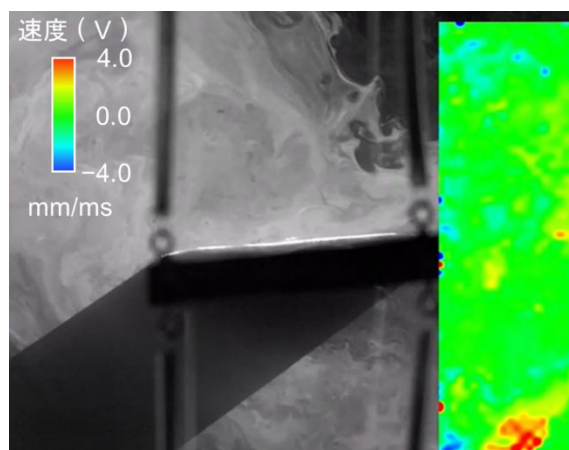


(b) 平板 2 体目に形成された渦が
流下する様子

図 3 煙を用いた可視化実験の様子

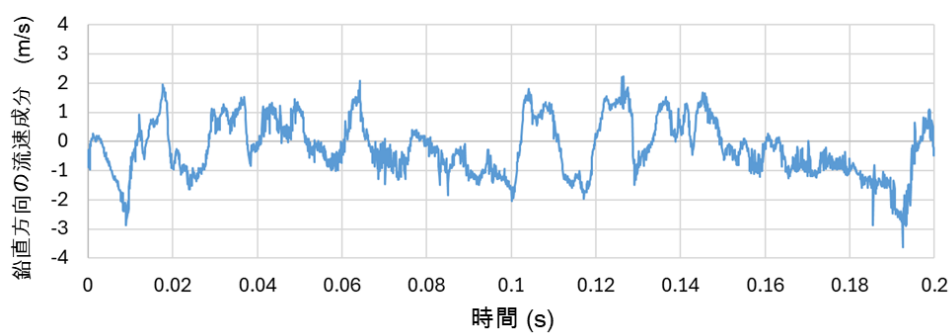


(a) 平板 1 体目の後流

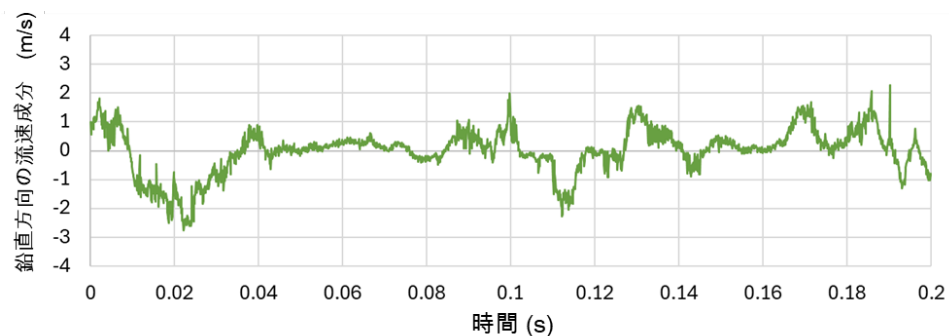


(b) 平板 2 体目の後流

図 4 PIV 解析結果 (鉛直 V 方向成分)



(a) 平板 1 体目の後流



(b) 平板 2 体目の後流

図 5 平板後流での鉛直方向の流速変動

3. 研究のまとめ

本研究では、都市部の狭小空間などにおける未利用の風力エネルギーを活用するため、複数平板のねじれ振動をエネルギー源とする新たな風力発電システムの開発に向けた流体構造の検討を行った。直列配置された複数平板において、下流側の平板の振動が減衰する要因を特定し、発電システム全体の出力を最大化することを目的として、煙による可視化実験および PIV 解析を実施し、以下の知見を得た。

- ・ 大振幅で振動する 1 体目の平板の後流域には、平板の固有振動数と同期して鉛直方向に

変動する周期的な脈動流が形成される．この流速変動が 2 体目の平板に対する主要な励振力として作用することで、大規模な渦の形成を促進し、2 体目の振幅を増大させる要因となっている．

- ・ 2 体目の平板周辺で形成されたスケールの大きい渦は、下流へ流下する過程で急速に崩壊し、散逸する様子が観察された．PIV 解析の結果からも、この渦の早期崩壊に伴って 2 体目の後流域では風速の鉛直成分が全体的に低下し、鉛直方向の流速変動が間欠的にほぼ消失する期間が断続的に発生することが確認された
- ・ 平板 3 体目に到達する気流においては、フラッターを誘発するための流れの変動がすでに減衰している状態となる．すなわち、励振力となる周期的な気流変動が喪失することが、3 体目以降の平板における顕著な振幅低下を引き起こす原因であると推測される．

今後は、本研究で明らかとなった下流における気流変動の減衰メカニズムを踏まえ、システム全体の発電出力を最大化するためのさらなる検討が求められる．

（ 発 表 論 文 ）

- 1) N. Suzuki, H. Hasebe: Vibration characteristics of multiple flat plates based on flow visualization, Proceedings of the 9th European African Conference on Wind Engineering, pp.416-419, 2025
- 2) N. Suzuki, H. Hasebe: PIV analysis of flow characteristics of oscillating multiple flat plates, Proceedings of the 10th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Paper No.16-27, 2025