

浮体式洋上風車における後流影響の評価：その1： 浮体動揺を模擬する風洞試験用加振装置の開発

谷山, 賀浩
東芝エネルギーシステムズ(株) エネルギーシステム技術開発センター

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

深谷, 侑輝
東芝エネルギーシステムズ(株) エネルギーシステム技術開発センター

吉田, 忠相
日立造船(株)

他

<https://hdl.handle.net/2324/7432672>

出版情報：Proceedings of Japan Wind Energy Symposium. 44, pp.57-60, 2022. 日本風力エネルギー学会
バージョン：
権利関係：© 2022 JWEA



浮体式洋上風車における後流影響の評価

その 1：浮体動揺を模擬する風洞試験用加振装置の開発*

Evaluation of wake effect on floating offshore wind turbines

(I) Development of a 2DoF actuator simulating the floating platform motion for wind tunnel tests

谷山 賀浩** 内田 孝紀*** 深谷 侑輝** 吉田 忠相****

馬詰 佳亮**** 大窪 慈生**** 森脇 規太** 渡邊 和**

Yoshihiro TANIYAMA Takanori UCHIDA Yuki FUKATANI Tadasuke YOSHIDA
Keisuke UMAZUME Shigeki OHKUBO Noritaka MORIWAKI Urara WATANABE

1. はじめに

複数基の風車で構成されるウインドファームでは、上流風車を通過した後流風において、風速の欠損（ウェイク）や風速の時間・空間変動が生じる。これらは下流風車の故障や発電量低下などを招くことから、上流風車によるウェイクの影響を正しく評価し、ウインドファーム設計における風車配置、すなわち風車間の離隔距離を検討することが重要となる。そこで、当社では、2018 年度より九州大学応用力学研究所および日立造船(株)と汎用性のあるウェイクモデルの開発を目的とした共同研究を実施、複雑地形や沿岸に立地する風力発電所を対象とした流入風とウェイク風を計測、モデル妥当性の評価を進めている[1,2]。

一方、今後導入が期待される浮体式洋上風車では、風に加えて波も同時に作用することから風車本体が動揺、すなわち流入風に対して受風面が 6 自由度で動くこととなるため、ウェイクの放出ベクトルが動揺に伴い変化し、下流風車位置におけるウェイクの拡がりや 3 次元的な構造も変化することが推測される。

本研究では、風車動揺がウェイク構造に与える影響、および下流風車位置での風速欠損量などを明らかにし、上述の汎用的なウェイクモデルを浮体式洋上風車へ拡張することを目的とする。本報では、これらの影響の有無、およびレベル把握に向け、6 自由度のうち動揺角度の大きいピッチ方向と上下流風車の離隔距離変化に相当するサージ方向の 2 自由度を模擬可能なアクチュエータを製作[3]、模型風車を搭載し、風洞試験にて評価を行った結果を紹介する。

2. 浮体動揺加振装置

標準的な波（生成周期：8sec，波高：0.5, 1.5, 4.0m）に対する動揺量は、DTU10MW [4]風車を搭載したセミサブ型の浮体を想定、Bladed を用いたシミュレーションによって算出した。さらに、[5]の水槽試験の結果か

ら得られた条件を含め、風洞試験における動揺条件を検討する基本条件を表 1 のように選定した。

風洞試験は九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞（測定部寸法：L15m, W3.6m, H2.0m）で実施し、寸法の制約から表 2 の大きさの模型風車を製作した（ハブ高さは加振装置設置後の値）。模型風車は、表 1 の動揺量を算出する際に参照したモデル風車と比較してハブ高さで約 1/100 のスケール、[5]の水槽試験との比較では約 1/2 のスケールとなる。

表 1 選定した動揺条件

波高 [m]	Pitch [deg]	Surge [m]
0.5	±0.11	±0.5
1.5	±0.32	±1.5
4.0	±0.87	±4.0
[ref]	±10.5	±0.355

今回は波による動揺による影響を主として扱うため、フルード数での相似則を優先、表 1 および表 2 を参照し、試験での動揺条件を算出する。代表速度として、代表長さを代表時間で割った値をとると、時間スケールの比は空間スケール 1 の比の 1/2 乗に比例する。模型風車のスケール（1/100）とアクチュエータ部品の加工精度の制約を考慮して、装置寸法とピッチとサージの動揺条件を表 3 のように決定した。

浮体動揺を実現する機構について、ピッチ動揺には偏心円形カムを、サージ運動にはクランク機構を採用した。実際の浮体動揺加振装置を図 1 に示す。ピッチ動揺を実現する偏心円形カムでは、カムの偏心量によってピッチ振幅を調整し、モータの回転運動を前傾後傾運動に変換する。±5deg のピッチ動揺時の偏心量は 43.5mm であった。サージ運動を実現するクランク機構では、モータに接続された第一リンクと風車ベースに接続された第二リンクによってモータの回転運動を上下運動に変換する。図 2 に偏心カム機構によるピッチ動揺変位の時系列のサンプルシミュレーション結果を示す。偏心円形カムを使うため振幅量に正負でややずれが生じるものの、おおむね正弦波を再現している。同様に、

*令和 4 年 12 月 2 日第 44 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**会員 東芝エネルギーシステムズ(株) エネルギーシステム技術開発センター
〒230-0045 横浜市長見区末広町 2-4

***会員 九州大学 応用力学研究所

****会員 日立造船 (株)

クランク機構によるサージ運動の変位を図 3 に示す。こちらにも振幅量の正負でずれが生じるが、基本的には正弦波と見なせる。

表 2 模型風車の寸法

	模型風車	DTU10MW	比率
D_{rot} [m]	0.442	178.3	1 : 400
D_{hub} [m]	0.083	5.6	1 : 68
H_{hub} [m]	1.0	109	1 : 109

表 3 加振装置仕様

	項目	仕様値
寸法	長さ方向	1300 mm
	幅方向	531 mm
	高さ方向	377.7mm
動揺	Pitch	0, ± 1 , ± 5 deg
	Surge	± 10 , ± 15 , ± 60 mm

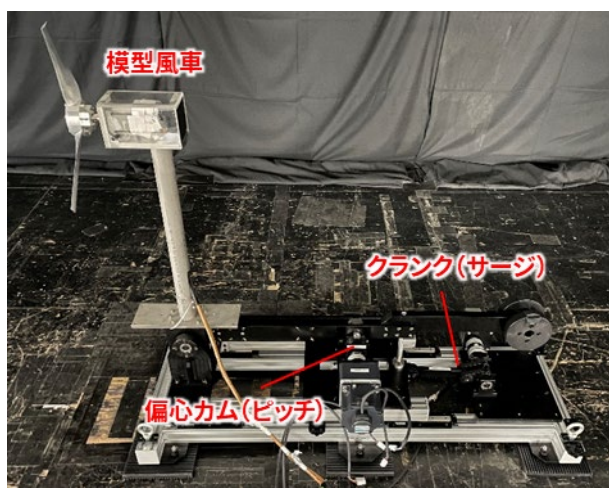


図 1 加振装置全体

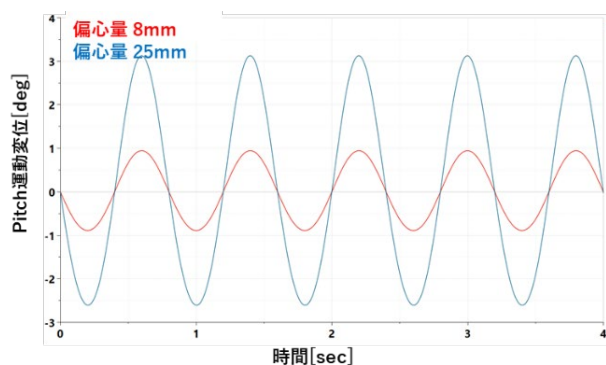


図 2 ピッチ動揺シミュレーション

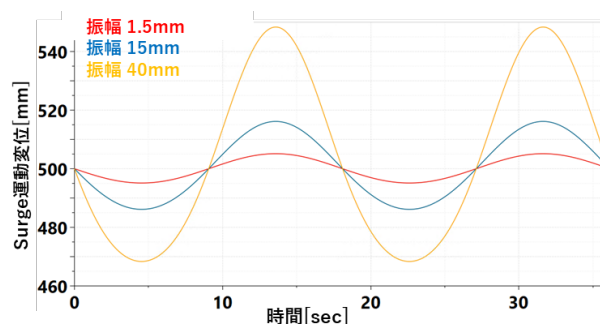


図 3 サージ動揺シミュレーション

3. 動揺ウェイク可視化試験

動揺がウェイクに与える影響有無の確認を目的に、可視化試験を実施した。この時、動揺に伴う変化が判断しやすいように風速は1m/sとし、上流から煙を流し、模型風車を回転させた状態で流れ場を確認した。図 4 に示す動揺なしの条件では、風車後流がほぼ一定の幅で流れているが、図 5 のピッチ 5deg 動揺条件では、風車通過後に煙が周期的に広がっている状況を確認できる。これより、風車動揺は少なからずともウェイクに影響を与えることが示され、この影響度把握を目的とする詳細計測を実施した。

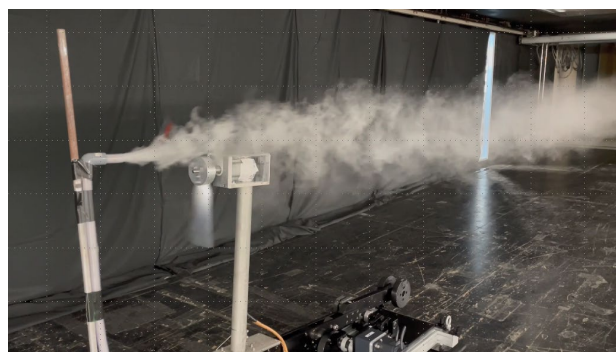


図 4 ウェイク可視化試験（動揺なし）

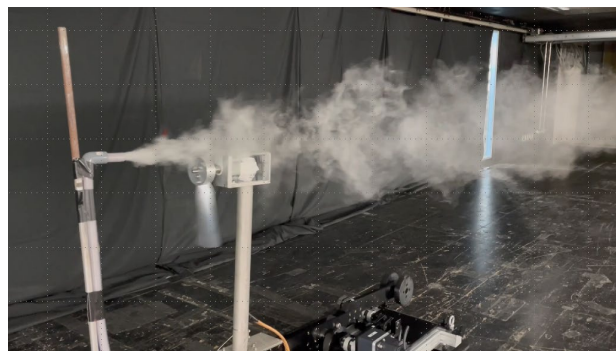


図 5 ウェイク可視化試験（ピッチ動揺）

4. 動揺ウェイク計測試験

詳細計測では、複数の熱線流速計を模型風車の後流に配置することでウェイクによる風速の欠損及びその変動を確認した。本報では、代表的な試験条件として表 4 に示すパラメータにおいて、風車から $3D_{rot}$ 後流の翼上端高さに設置した熱線流速計の時系列データについて紹介する。

表 4 風洞試験条件

項目	値
風速	8 m/s
風車回転速度	1469 rpm (=25.4 rps)
周速比	4.25
熱線流速計 サンプリング周波数	1000 Hz

図 6 は動揺を与えない条件での計測・分析結果を示す。上段(a)の時系列プロットでは黒線で 1 秒間の移動平均データも追記した。下段(b)は、(a)の時系列プロットに示した垂線以降のデータを対象とした FFT の結果を示す。この条件では、陸上や着床式風車を模型したウェイクの計測に相当するため、流速はやや変動しており、FFT の分析結果からは風車の回転速度に対応する周波数 (25.4Hz) にピークが現れることが確認できる。

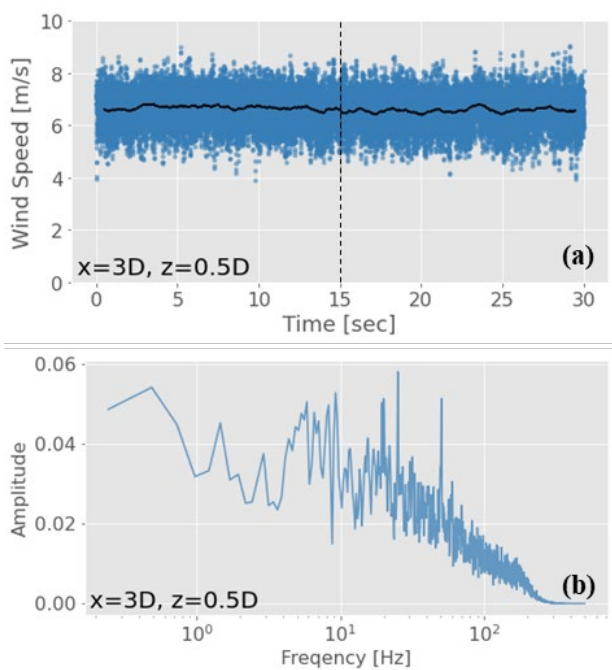


図 6 動揺なし時の流速分析 (a: 時系列, b: FFT)

次に図 7 にピッチ動揺 5deg の場合の計測・分析結果を示す。時系列データは、ある明確な周期を持って流速が変動している。FFT 分析からはピッチの動揺周期付近の周波数 (1.25Hz) において、強いピークが表れており、可視化試験で確認されたとおり、ピッチ動揺がウェイクに大きく影響していることが分かる。

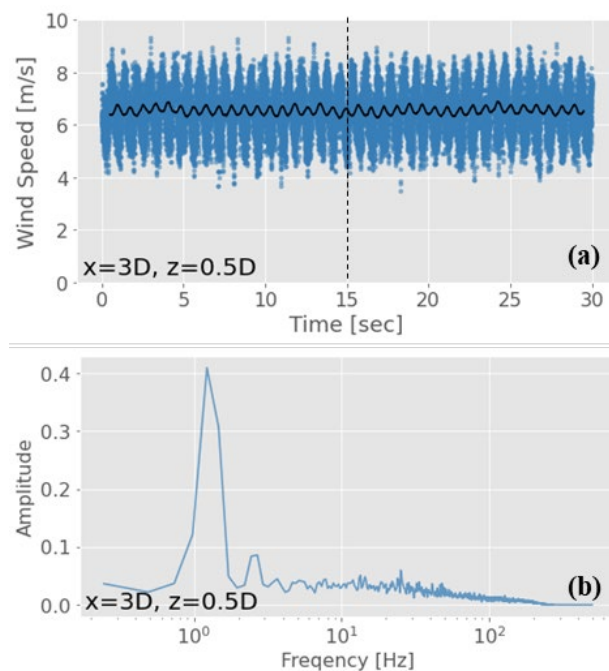
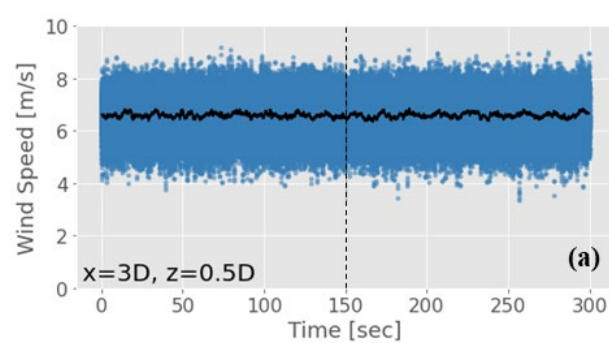


図 7 ピッチ動揺時の流速分析 (a: 時系列, b: FFT)

さらに図 8 はサージ動揺 60mm の条件での分析結果である。動揺のない結果 (図 6) と比較すると、流速変動は若干大きくなっているものの、明確な周期は確認できない。FFT 分析の結果からも、サージ動揺に対応する周波数 (0.0556Hz) 付近に顕著なピークは確認できず、風車の回転速度に対応する周波数 (25.4Hz) 成分にピークが表れる結果となった。



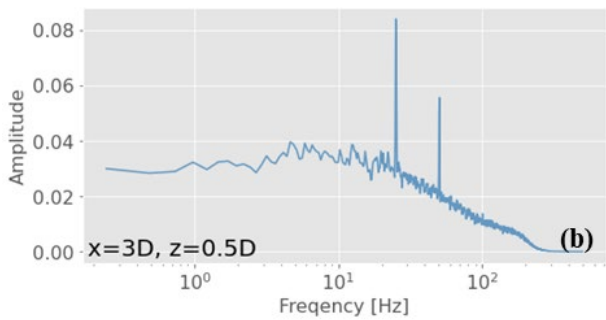


図 8 サージ動揺時の流速分析 (a: 時系列, b: FFT)

5. まとめ

浮体式洋上風車の動揺がウェイク構造に与える変化、および下流風車に与える影響を明らかにし、浮体式ウインドファーム向けの汎用的なウェイクモデル構築に向け、浮体動揺のうちピッチとサージの 2 自由度を模擬するアクチュエータを製作、模型風車を搭載した上で風洞試験を行い、下記知見を得た。

- 1) 偏心カムとクランク機構を設けたアクチュエータにより、ピッチとサージの 2 自由度の動揺を模擬する風洞試験が可能なことを確認した。
- 2) 風洞における可視化試験より、動揺がウェイクに影響を与えることを確認した。
- 3) ピッチ動揺の周波数成分がウェイクに現れることを確認した。

引き続き、動揺条件をパラメータとした試験評価を進め、ウェイクに与える影響を定量的に評価するとともに、下流側にも風車を配置、荷重など風車への影響についても詳細に評価を進めていく。

参考文献

- [1] UCHIDA, Takanori, et al. A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design. *Energies*, 2020, 13.12: 3197.
- [2] UCHIDA, Takanori, et al. Doppler Lidar Investigations of Wind Turbine Near-Wakes and LES Modeling with New Porous Disc Approach. *Energies*, 2021, 14.8: 2101.
- [3] I. Bayati1, et al. Wind tunnel validation of AeroDyn within LIFES50+ project: imposed Surge and Pitch tests. TORQUE 2016/Journal of Physics: Conference Series **753** (2016) 092001
- [4] BAK, Christian, et al. The DTU 10-MW reference wind turbine. In: Danish wind power research 2013. 2013.
- [5] 田村大樹, et al. 不規則波中動揺実験による洋上風

力発電用バージ型浮体の安定性および安全性の検証 (社会インフラ特集号). *Hitz 技報= Hitz technical review*, 2019, 80.1: 19-26.

※掲載された製品名はそれぞれの会社の商標として登録されている場合があります。