

平成30年6月27日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04220

研究課題名（和文）浮体式ウィンドファーム内の浮体動揺とブレード制御に伴う風車後流影響の定量的評価

研究課題名（英文）Estimation of wake effect on floating offshore wind farm with floater motion and blade pitch control

研究代表者

中條 俊樹（Chujo, Toshiki）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・主任研究員

研究者番号：70506477

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,100,000円

研究成果の概要（和文）：風車の3本のブレードを独立して制御可能な風車の縮尺模型を製作し、風洞試験を実施した。高度により異なる風速を模擬するために風洞内にハニカム板を設置した。風車のタワー基部には強制動揺装置を設置し、浮体式風車の波浪や風による動揺を模擬した。風車の後流を計測し、また後流中に別の風車模型を設置しその影響を計測した。ブレードピッチ制御の効果により風下側の風車の回転数動揺は減少した。また、数値計算により後流を解析し風洞試験結果と比較検証した。

研究成果の概要（英文）：Wind tunnel tests with a scale model which could control 3 blades individually were carried out. Honey comb plates were installed to create the wind speed shift according to the altitude. A forced oscillation machine was also installed at the base of the tower to imitate the floaters pitching motion in waves and wind. Wake from the upstream wind turbine model was measured and wake effect on another wind turbine model which was installed behind the upstream wind turbine model was also obtained. The individual blade pitch control developed in this research work was applied to the upstream wind turbine model and the control algorithm was effective from the viewpoint of the reduction of the fluctuation of rotor speed in the downstream wind turbine model. Numerical simulation was carried out and the results were compared with the results of the wind tunnel tests.

研究分野：海洋工学

キーワード：浮体式洋上風力発電 ブレードピッチ制御 風車後流 風洞試験

1. 研究開始当初の背景

発電用風車は、特に洋上設置型を中心に大型化が進んでおり、10MW機ではロータ直径が200m近くにも及ぶと考えられる。洋上風況の特徴は乱れが少なく風速も強いことであるが、陸上風と比較して風速の高度差も小さい。しかし、将来の超大型風車のようにロータ上下端における高度差が200mにもなると、風速の差を無視できなくなると考えられる。風車のブレードピッチ制御は3本のブレードを独立させて稼働させることが可能であるが、一般的に使用されているとは言い難い。しかし、上記のような風速差を考慮すると、3翼独立制御は有効になる可能性がある。

一方、ウィンドファーム全体の発電性能においては、風上側風車により発生する後流が風下側風車に与える影響が重要となる。洋上風車の後流については、着床型を中心に現地観測や研究が進んでいるが、浮体式の場合は波浪や風により浮体動揺が生じるが、これが後流に及ぼす影響は解明されていない。

2. 研究の目的

そこで、3翼独立制御を適用した浮体式洋上風力発電の後流影響をできる限り定量的に把握することを目的とする。

3. 研究の方法

研究は、縮尺モデルを利用した風洞試験を中心に、それに数値計算を組み合わせ実施した。

(1) 模型試験

3翼独立制御模型

模型試験は(国研)海上・港湾・空港技術研究所 海上技術安全研究所の変動風水洞において実施した。風洞の寸法や将来的に浮体模型に搭載して水槽試験を行うことを視野に入れ、従来の模型風車と同程度の寸法と重量を目指して設計した。3翼独立制御模型の写真を図1に、仕様を表1に示す。1:50から1:100程度の一般的な縮尺の浮体搭載にはさらなる小型化と軽量化が必要である。

風車模型には弦長60cmのブレードを搭載した。これはブレードピッチ角動作のアクチュエータを小型化したためである。

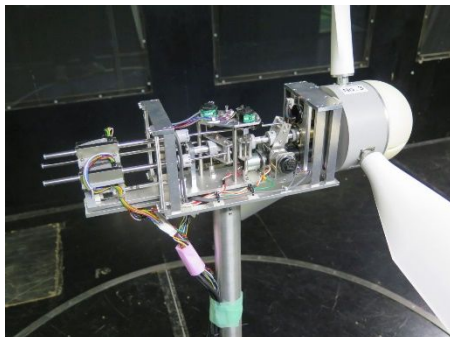


図1 3翼独立制御風車模型

表1 3翼独立制御模型仕様

Part	Item	Value	
Nacelle	Length	330	mm
	Breadth	120	mm
	Height	120	mm
	Weight	2500	g
Hub	Diameter	120	mm
	Length	130	mm
Tower	Diameter	40	mm
	Height	800	mm
	Weight	1000	g
Blade	Length	600	mm
	Weight	40	g / blade
Rotor	Diameter	1350	mm

試験施設

風速の高度分布を模擬するため、八二カム板を設置し、目的とする風速分布が得られるようガムテープを貼り調整した。図2に試験時の様子を示す。



図2 風速分布作成用八二カム板

(2) 数値計算

数値計算にはQBlade0.96を使用した。このソフトウェアはオープンソースソフトウェアであり、風車性能解析、ブレードのFRM解析に加え、揚力線理論を用いた後流解析が可能となっている。

4. 研究成果

(1) 模型試験結果

風速分布の作成

図3に得られた風速分布を示す。計測結果から、式(1)中のべき指数として  $n=3$  を採用し、数値計算にも適用した。

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{1/n} \quad (1)$$

ここで  $U_0$  は基準高さ  $Z_0$  における風速、 $1/n$  はべき指数である。

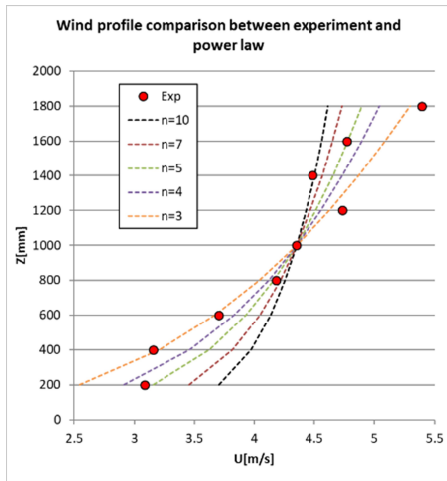


図3 風速分布

### ブレードピッチ制御

3翼独立のブレードピッチ制御は、風速の高度分布および風車動揺に対し、迎え角を一定に保つよう考案された。図4にコンセプトを示す。また、3翼独立制御時におけるブレードピッチ角の時系列データを図5に示す。

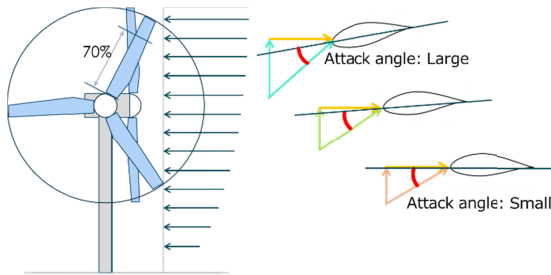


図4 ブレード制御のコンセプト

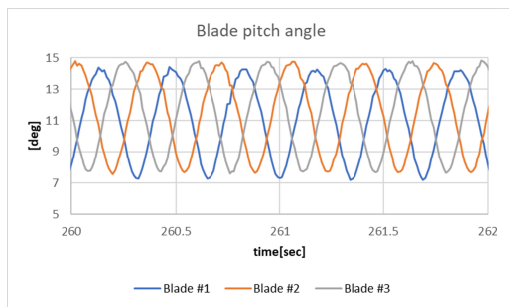


図5 ブレード動作の例

### 後流計測結果

3翼独立制御を適用し風車後流を計測した。風車基部には強制動揺装置を設置し、波浪中動揺（ピッチング運動）を模擬した。表2に試験条件を、図6から図8に一例として風車からの距離3D（Dはロータ直径を意味する）における計測結果として平均風速および乱れ強度を示す。図6中の半円はロータ回転領域を示す。

風車ナセルおよびタワーの後方では風速が低下しており、風車間距離が大きくなるにつれて回復傾向が見られる。また、風車の動

揺により乱れ強度が増加している。乱れ強度の変化は風車間距離が大きくなるにつれて小さくなった。これらのことから後流の挙動をある程度計測することができていると言える。一方、ブレードピッチ制御による有意な違いは見られなかった。これについては本研究では入手性の良い熱線風速計を用いたが、より感度の高い風速センサーを使用する必要があったと思われる。

表2 風洞試験条件

風上側風車	後流計測	風下側風車
なし	0D	なし
動揺なし/あり	1D/2D/3D	なし
制御なし/あり	距離	
動揺なし/あり	なし	1D/2D/3D
制御なし/あり		距離に設置

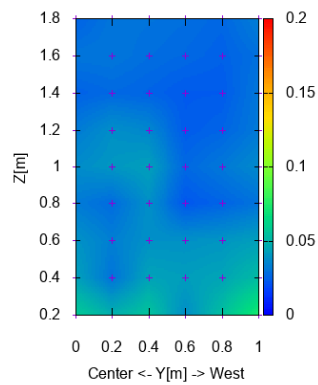
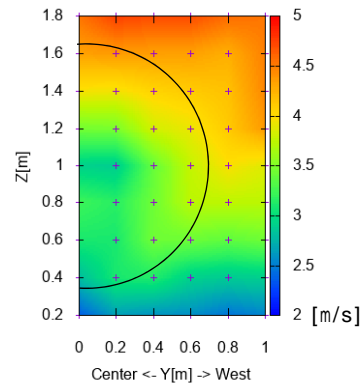


図6 後流計測結果（風上側風車の動揺なし・制御なし）

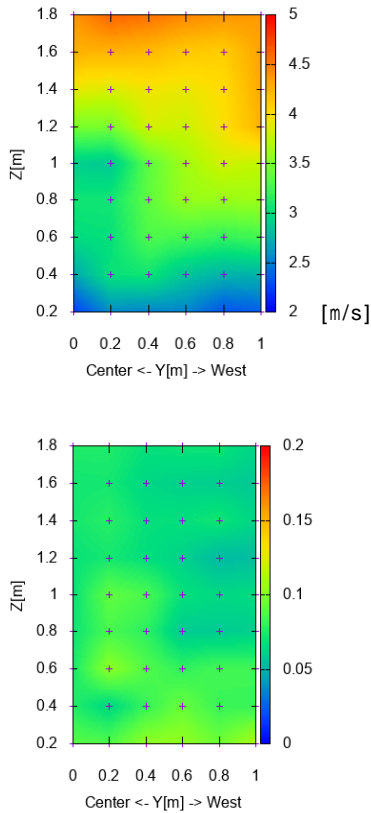


図 7 後流計測結果（風上側風車の動揺あり・制御なし）

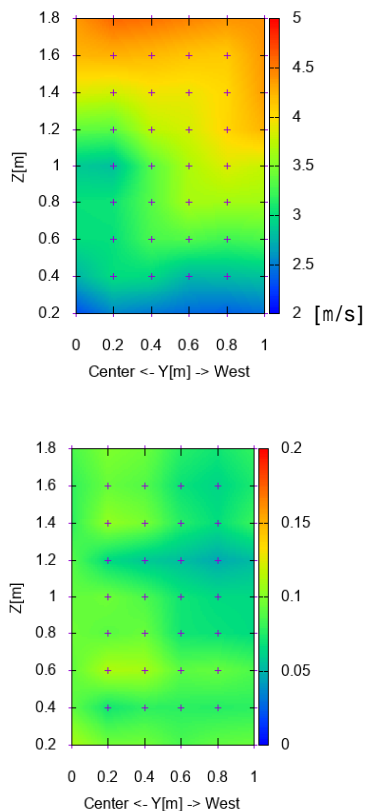


図 8 後流計測結果（風上側風車の動揺あり・制御あり）

### 後流中風車特性

後流計測時と同じ距離に従来型の風車模型を設置して後流中の風車特性を計測した。図 9 に試験時の様子を、表 3 に計測結果の一覧を示す。

回転数は距離 1D では低下したが、2D, 3D で回復傾向にある。また風上側の風車でブレードピッチ制御を適用すると回転数の変動が低下している。本研究で適用した 3 翼独立ブレードピッチ制御が有効に働いた結果と考えられる。



図 9 後流中の風車挙動計測

表 3 後流中の風車挙動計測結果

Dist.	Upstream turbine		Rotor speed[rpm]		Thrust[N]	
	Motion	Control	Ave.	Amp.	Ave.	Amp.
1D	N	N	165.42	4.20	0.49	0.79
	N	Y	166.59	4.37	0.51	0.89
	3sec	N	171.67	6.51	0.55	0.90
	3sec	Y	171.13	4.92	0.56	0.93
	4sec	N	171.95	6.41	0.57	0.96
2D	4sec	Y	171.46	5.12	0.58	0.93
	N	N	171.56	3.81	0.76	1.22
	N	Y	171.02	3.76	0.76	1.13
	3sec	N	171.84	7.12	0.77	1.03
	3sec	Y	171.32	5.22	0.79	1.08
3D	4sec	N	171.98	6.24	0.80	0.99
	4sec	Y	171.54	5.12	0.81	1.01
	N	N	171.33	4.04	0.94	1.43
	N	Y	170.72	4.03	0.95	1.35
	3sec	N	171.42	6.71	0.97	1.42
3D	3sec	Y	171.09	5.06	0.99	1.52
	4sec	N	171.32	6.10	1.00	1.43
	4sec	Y	171.02	5.19	1.01	1.39

### (2) 数値計算結果

図 10 に風上側風車の動揺なし制御なしの条件における風洞試験結果と数値計算結果を示す。CFD 等と比較して計算コストはかなり小さいにも関わらずそれなりの一致を見せているが、十分とは思われない。浮体運動を考慮できない点を含め、別の手法が有効と思われる。

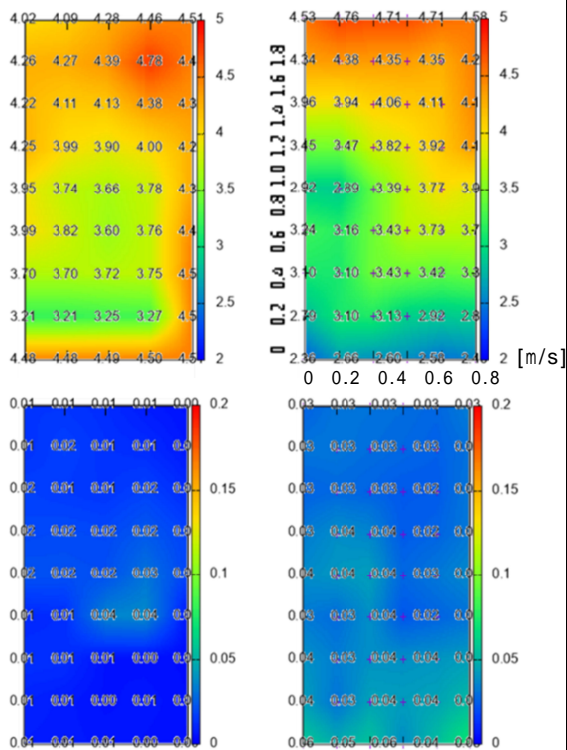


図 10 後流の風洞試験結果(右列)及び数値計算結果(左列)

<引用文献>

Gerd Habenicht, Offshore Wake Modeling, Presentation at Renewable UK Offshore Wind 2011, 2011  
 T. Chujo, et al., "EXPERIMENTAL STUDY FOR SPAR TYPE FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE WITH BLADE-PITCH CONTROL", Proceedings of the ASME2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 2013  
 QBlade, <http://www.q-blade.org/>, Access data: 2018 June, 14

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計1件)

Chujo, T., Haneda, K., Inoue, S., Wind Tunnel Test with Individual Blade Pitch Control Wind Turbine Model in Wind Shear, Proceedings of Grand Renewable Energy 2018, 2018

6. 研究組織

(1)研究代表者

中條 俊樹 (CHUJO, Toshiki)

(国研)海上・港湾・空港技術研究所 海上技術安全研究所・海洋先端技術系・主任研究員

研究者番号：70506477

(2)研究分担者

羽田 絢 (HANEDA, Ken)

(国研)海上・港湾・空港技術研究所 海上技術安全研究所・海洋先端技術系・研究員  
 研究者番号：00636813