

報告書

2023 年度 風力発電における推定風速によるピッチ角制御と
ウィンドファームへの革新的応用 補助事業

2024 年 3 月

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科

村上俊之

はじめに

本事業では、浮体式洋上風力発電システム（FOWTs）を想定し、従来方式の個別ピッチ制御と比較して、ピッチ角アクチュエータの動きを大きくすることなく、回転速度を定格値に保つ手法を提案している。提案システムでは、風力エネルギー変換システムのピッチアクチュエータに反力推定オブザーバ（RFOB）を適用し、推定反力からピッチングモーメントを推定することで最終的に風速を推定している。さらに、推定された風速に応じて適切なピッチ角を導出している。これにより、風車に作用する疲労荷重を最小限に抑えた新たなピッチ角制御が可能となる。さらに、ウィンドファームにおいて浮体式洋上風力発電システム（FOWTs）を想定したピッチ角制御へも展開し、スラスト力の変動による疲労荷重の低減手法の提案も行っている。

（関連論文）

1. M. Yamad, T. Murakami, " Individual Pitch Control of Wind Turbine System by Estimating Wind Speed Using Pitching Moment", Volume 12, Issue 5, 1008-1014, 2023(doi.org/10.1541/ieejjia.23000261). (JKA 謝辞あり：JKA 謝辞あり：風車のモデル化とピッチ各制御に関する論文)

事業の実施内容及び成果に関する報告書

1 事業名

2023年度風力発電における推定風速によるピッチ角制御とウィンドファームへの革新的応用補助事業

2 事業の実施経過

(1) 事務手続き関係

2003年	4月10日	交付決定通知受理(4/1付)
	5月8日	交付誓約書・前金払申請書提出
	5月25日	補助金受領(5,000,000円)
	10月12日	状況に関する報告書提出
2004年	3月31日	補助金精算申請書提出
	4月8日	補助金返還(1,415,613円)

(2) 事業関係

① 風速推定アルゴリズムとピッチ角制御

2023年	4月-8月	ピッチ各制御機構
	4月-8月	風速推定アルゴリズムの評価
	8月-2024年2月	回転速度安定化制御
	9月-2024年2月	実験装置の構築

② 模擬ウィンドファームシステムの構築

2023年	4-9月	スラスト力推定アルゴリズム
	8月-2024年2月	ウィンドファームシステム向けの風速推定実験

3 実施内容及び成果

(1) 実施内容

① 風速推定アルゴリズムとピッチ角制御

本事業では、海上に設置する浮体式洋上風力発電システム(FOWTs)を想定し、計算負荷を抑えた風速推定アルゴリズムの確立を行い、さらに推定風速に基づいたピッチ角制御アルゴリズムを提案することで風力発電システムの高機能化を目指している。

図1にウェイク(風速の減衰)の流管モデルと翼素の断面図を示している。同図のモデルに基づいて空力特性、ドライブトレイン、ピッチアクチュエータの定式化を行い、風速

(別紙1)

推定アルゴリズムの構築とその評価を行う。また、浮体式洋上風力発電システム（FOWTs）のモデル図を図2に示す。同図に基づいて各種運動方程式を導出しシミュレーションを構築する。

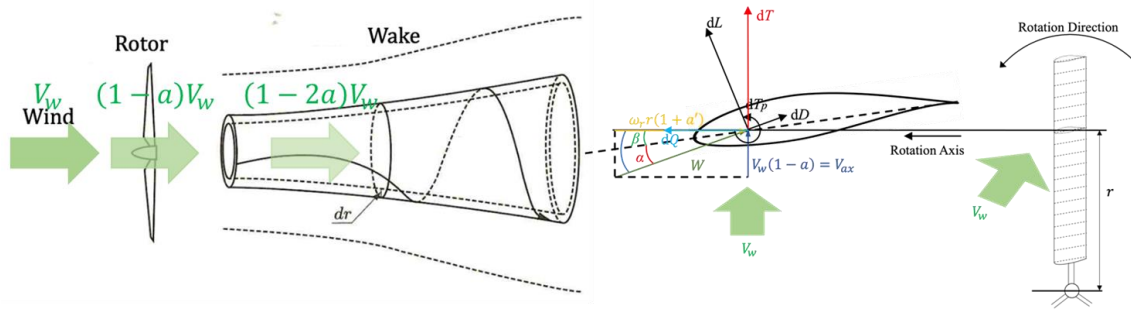


図1：ウェイクの流管モデル（左図）と翼素の断面図（右図）

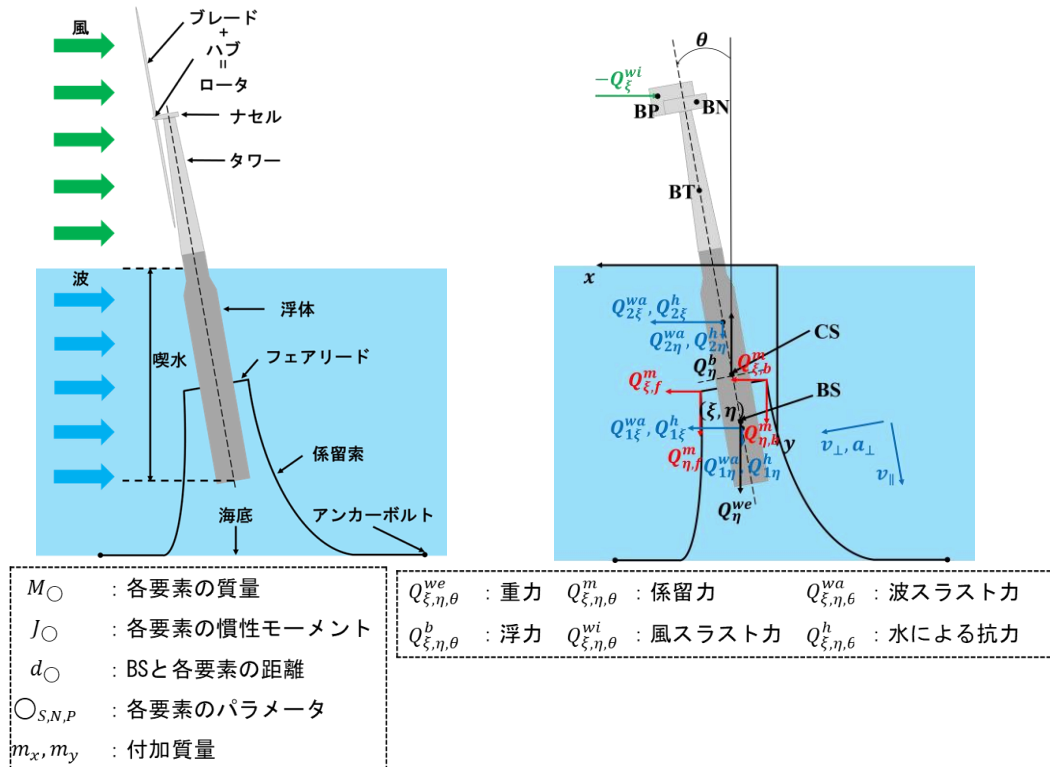


図2：FOWTに作用する力のモデル

風速推定に基づいたピッチ角制御を実現するため、次のステップに従ったアルゴリズムを実行する。

Srep1: 各ブレードのピッチアクチュエータに設置された図3に示す反力推定オブザーバによりピッチングモーメントを推定する。

(別紙1)

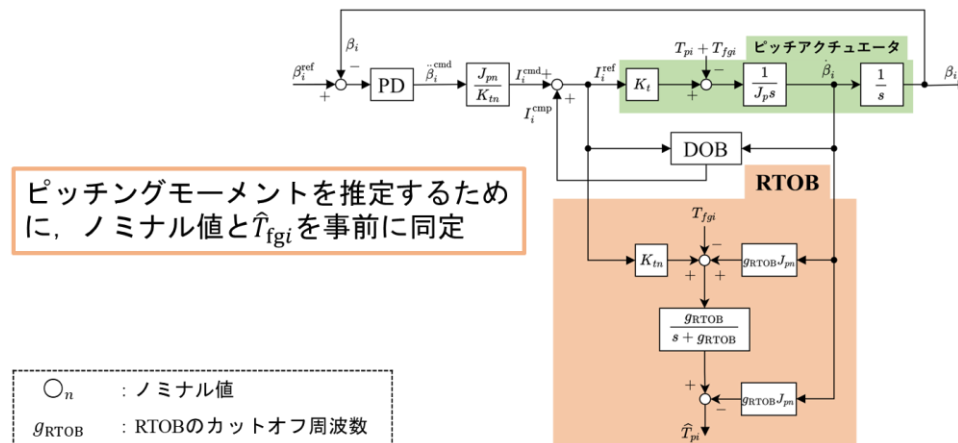


図3：反力推定オブザーバのブロック線図

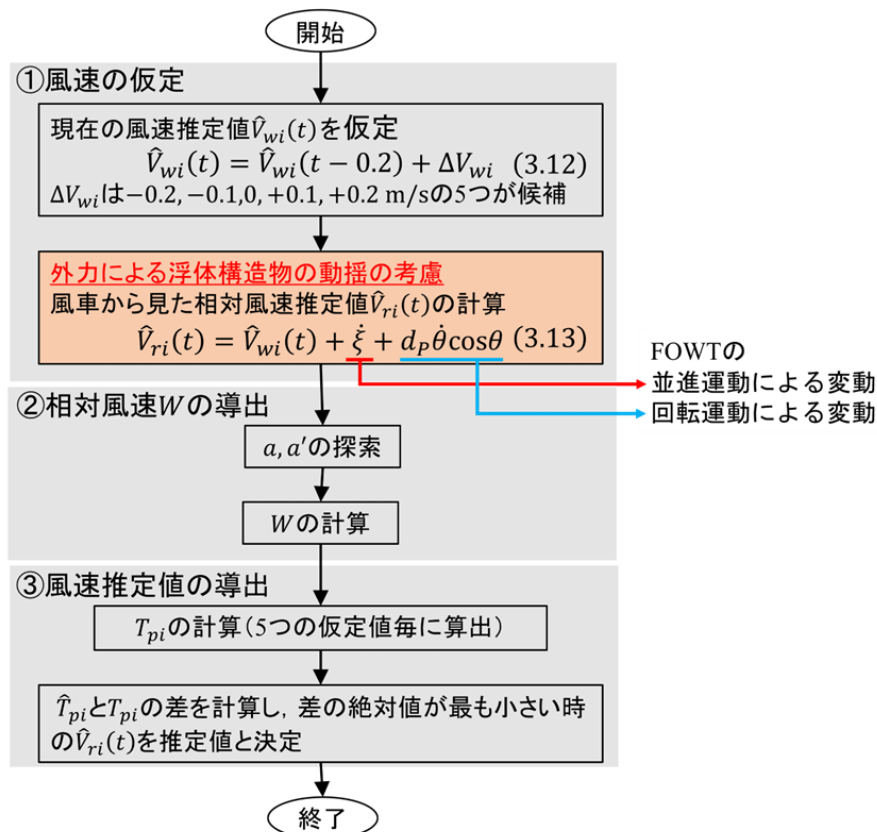


図4：風速推定のアルゴリズムフロー

Step2：風力推定を次の仮定とステップで行う。

I. 風速の仮定：

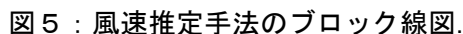
風速推定は0.2秒毎に実施し、FOWTの状態量 $\theta, \xi, \dot{\theta}$ （モデルの詳細は後半で示す）はセンサから得る既知の情報とする。

II. 相対風速 W の導出：

a, a' (図 1 の右図) は軸方向運動量理論と翼素理論の結果から導出する.

5つの T_{ni} の中で \hat{T}_{ni} と最も近い値の時の風速仮定値を $\hat{V}_{ri}(t)$ と決定する.

Step3：風速毎に最適なピッチ角を予め算出してルックアップテーブルを作成することで、風速推定値に応じたピッチ角を導出する。



風速推定精度 (MAPE) :

ブレードの疲労荷重 (DEL):

$$\text{DEL} = \sqrt[m_{sn}]{\frac{\sum_i M_i^{m_{sn}} n_i}{N_{\text{DEL}}}}$$

$$\omega_r \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{90} \int_0^{90} (\omega_r(t) - \omega_r^{\text{rated}})^2 dt}$$

表 1 : 5MW風車の特性

説明	値	単位
定格出力	5	[MW]
ロータ直径	126	[m]
ハブ高さ	90	[m]
カットイン風速	3	[m/s]
定格風速	11.4	[m/s]
カットアウト風速	25	[m/s]
定格ロータ速度	12.1	[rad/s]
ブレードピッチ角制約	$0 \leq \beta \leq 90$	[deg]
ピッチレート制約	$-8 \leq \frac{d\beta}{dt} \leq 8$	[deg/s]

表 2 : FOWTの各部品の質量と慣性モーメント

説明	パラメータ	値	単位
浮体とタワーの質量	M_S	7.716×10^6	[kg]
ナセルの質量	M_N	2.400×10^5	[kg]
ロータの質量	M_P	1.100×10^5	[kg]
浮体とタワーの慣性モーメント	J_S	9.369×10^9	[kgm ²]
ナセルの慣性モーメント	J_N	2.608×10^6	[kgm ²]
ロータの慣性モーメント	J_P	5.037×10^8	[kgm ²]

表 3 : FOWTに作用する重力に関するパラメータ

説明	パラメータ	値	単位
重力加速度	g	9.807	[m/s ²]
BS のタワー軸とナセルの平行距離	d_{Nv}	175.6	[m]
BS のタワー軸とナセルの垂直距離	d_{Nh}	-1.800	[m]
BS のタワー軸とロータの平行距離	d_{Pv}	175.6	[m]
BS のタワー軸とロータの垂直距離	d_{Ph}	5.431	[m]

表 4 : FOWTに作用する浮力に関するパラメータ

説明	パラメータ	値	単位
水の密度	ρ_w	1.025×10^3	[kg/m ³]
FOWT の 3 点の平均の水深	h_w	120.0	[m]
無波時の水深	h	320.0	[m]
BS と浮体底面の距離	d_{Sbott}	34.40	[m]
浮体の無変位時の水没高さ	h_{pt}	120.0	[m]
浮体の無変位時の水没体積	V_0	8029	[m ³]
タワーの最下部の半径	r_{tb}	3.250	[m]
浮体の半径	r_g	4.700	[m]
テーパーより下の円筒部分の水没高さ	h_c	108.0	[m]
テーパーの水没高さ	h_{tc}	8.000	[m]
テーパーより上の円筒部分の水没高さ	h_t	4.000	[m]

シミュレーションでは、提案手法と従来手法（下記2手法）との比較検証を行っている。
従来手法に関する参考文献：

1. [BC] J Jonkman, S Butterfield, W Musial, and G Scott. Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development. Technical report, NREL, 2009.
2. [Conventional method] Masashi Yamada and Toshiyuki Murakami. Individual pitch control of wind turbine system by estimating wind speed using pitching moment. IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 12, No. 5, pp. 1008-1014, 2023.

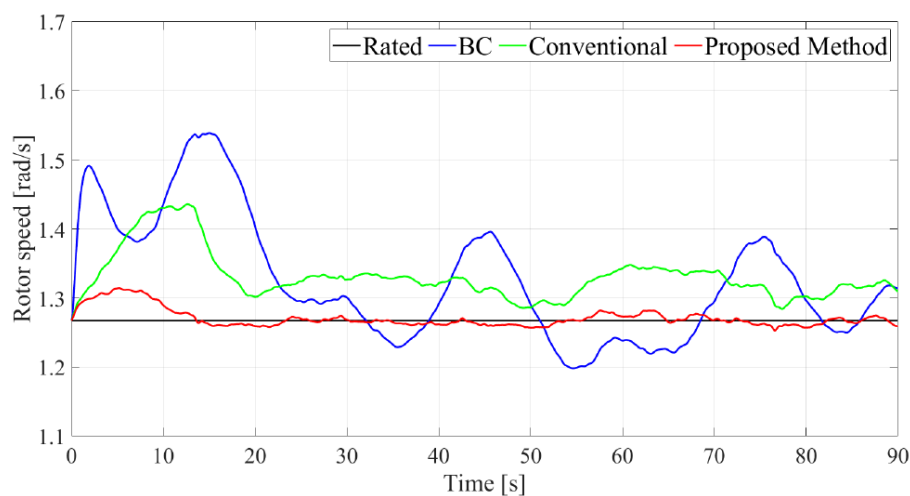


図6：ロータ速度の変動

図6に各手法における発電機の回転速度の変動を示している。これより提案手法において最も安定した応答が得られていることが分かる。

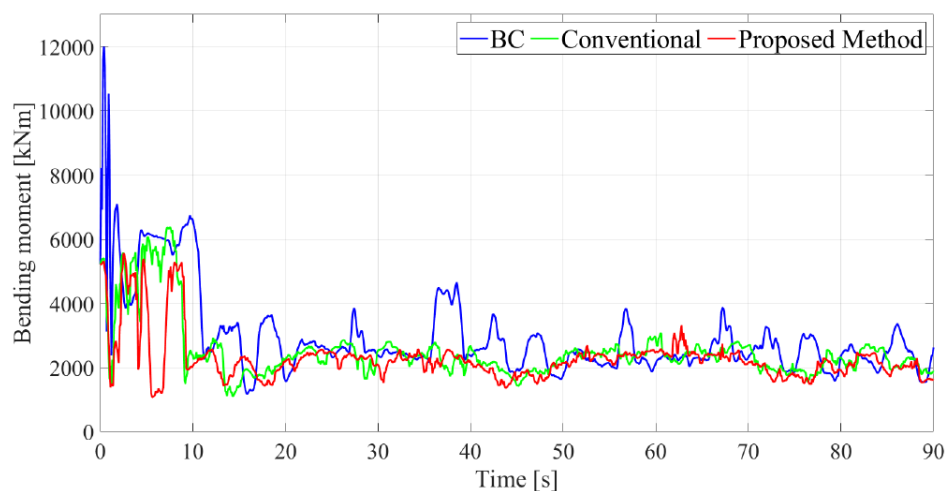


図7：曲げモーメントの時間変化（ブレード1）

図7にブレードの曲げモーメントの時間変化を示す。本シミュレーションでは3枚のブレードを持つ風車を仮定しているが、図7では1つのブレードの応答例を示している。これより提案手法により曲げモーメントが小さく抑えられており、スラスト力の低減が行えていることが分かる。また、従来手法と提案手法の風速推定精度のMAPEを表5に示す。これより、提案手法の方が高い精度で風速を推定できており、FOWTにおいて浮体の動揺による相対風速の変動は無視できない要素であることがわかる。ロータ速度の時間変化を図6、 ω_r RMSEを表6に示す。図6において、提案手法を用いた時の変動は他の2つの手法と比較して明らかに小さく、ロータ速度が安定していることが確認できる。特に、立ち上がりの10秒以降は殆ど定格ロータ速度に等しい値となっており、風速を正確に推定したことで適切なブレードピッチ角指令値を導出できたことがわかる。

表5：風速の真値と推定値のMAPE

手法	ブレード1	ブレード2	ブレード3
Conventional	6.71%	7.25%	7.05%
Proposed Method	0.897%	0.973%	0.450%

表6：各手法を用いた時の ω_r RMSE

BC	Conventional	Proposed Method
1.06×10^{-1}	$> 7.24 \times 10^{-2}$	$> 1.37 \times 10^{-2}$

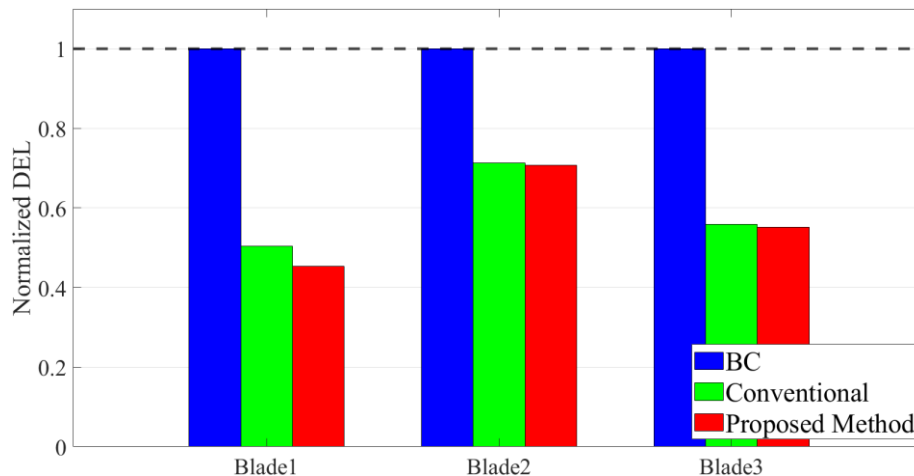


図8：各ブレードのDEL

② ウィンドファームシステム構築のための浮体式風力発電システムを仮定した風速推定実験

本項目に関しては、実験的な検証を主なものとしたが、残念ながら浮体を仮定した風車の傾きを考慮した風速指定の実験検証は十分に行えなかった。構築した実験システムの外

(別紙1)

観および各パラメータ値を図9，表7に纏める。また，実験構成ならびに実験条件を次に示す。

- 実機構成：風洞によって風を生成（ピトー管で真値を計測，3Dプリンタで作成した翼素を使用，浮体で傾いた状態を想定してブレードの回転軸を5°傾けて設置）
- 実験条件：実験時間を30秒間に設定（5秒から30秒の間の風速を推定，最初の5秒は0 m/sから 5 m/sの間を0.1m/s毎に推定，5秒以降は0.2秒前の推定値を使用）

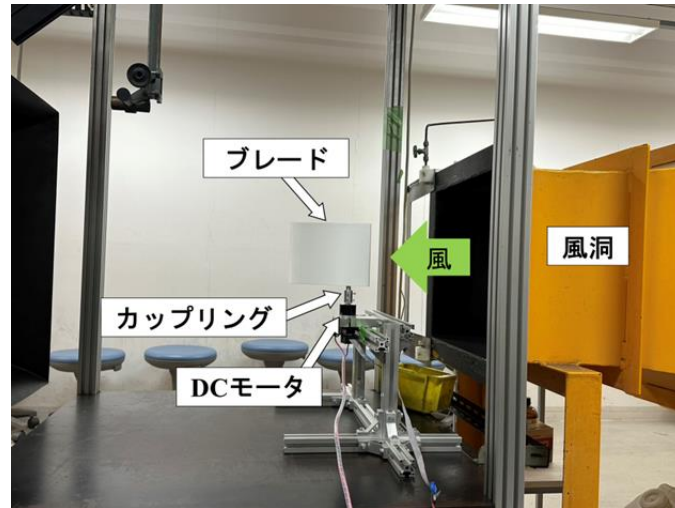


図9：実験システムの写真

表7：実験システムおよび制御系のパラメータ値

説明	パラメータ	値	単位
翼弦長	c	20	[cm]
ブレード長さ	dr	15	[cm]
ピッチ軸周りの慣性モーメントのノミナル値	J_{pn}	2.0×10^{-4}	[kgm ²]
トルク定数のノミナル値	K_{tn}	30.2	[mNm/A]
DOB のカットオフ周波数	g_{DOB}	10	[Hz]
RTOB のカットオフ周波数	g_{RTOB}	10	[Hz]
疑似微分のカットオフ周波数	g_{pd}	15	[Hz]
PD 制御器の P ゲイン	K_p	2500	-
PD 制御器の D ゲイン	K_d	160	-
制御周期	dt	1	[ms]

上記の実験システムならびに実験条件によって得られた風速ならびにピッチングモーメントの結果を図10および図11に示す。残念ながら期待した結果が得られなかった。その要因として考えられる項目を次に列挙する。

- エンコーダの分解能の低さ（500[カウント/回転]×4逡倍）
→応答値が離散的になってしまい，角速度に振動が発生

(別紙1)

→DOB（外乱オブザーバ）やRT0B（反作用力推定オブザーバ）の出力がノイズを含有，同定精度にも影響

- ブレードが傾斜していたため，外乱トルクに重力成分が含まれていた

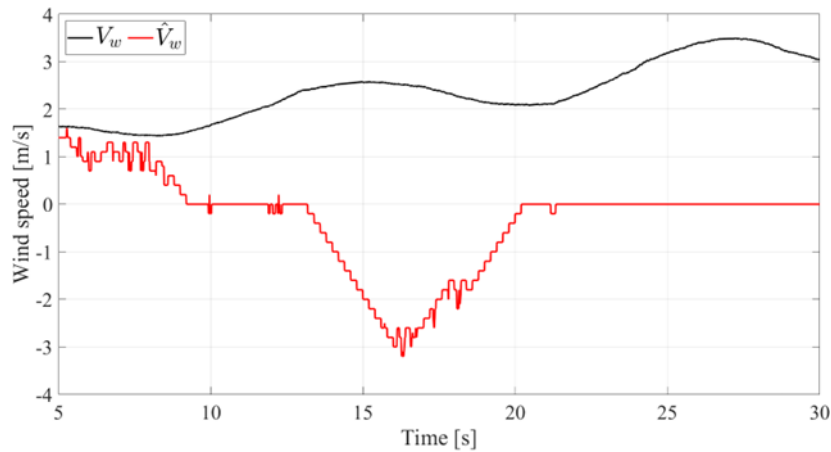


図 10：風速制御結果

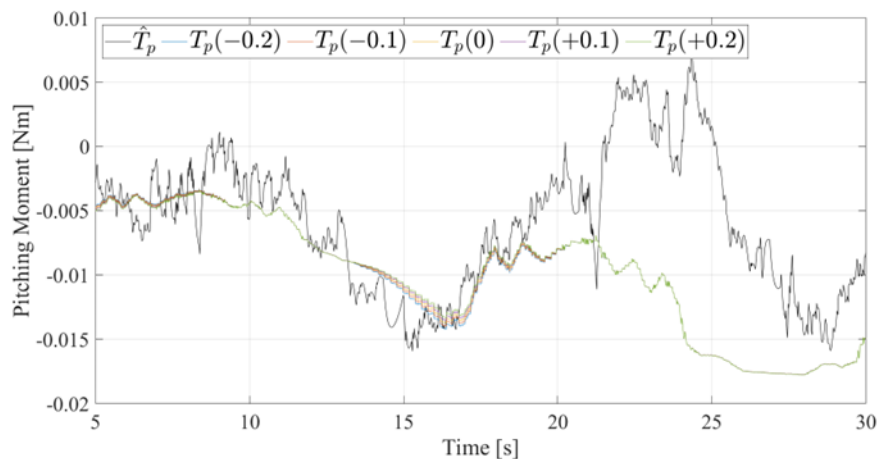


図 11：風速のピッチングモーメントの実験結果

(2) 成 果

各実施事業に対してその成果を以下にまとめる．今回はウィンドファームへの拡張が期待される浮体式洋上風力発電システムの風速推定と推定風速値に基づき，風速計を使わないIPC（Individual Pitch Control）によるロータ速度の変動とブレードの疲労荷重の低減手法を提案した．その概要を以下にまとめる．

① 風速推定アルゴリズムとピッチ角制御

浮体動揺に伴う風車から見た相対風速の変動を考慮した風速推定手法に関して

(別紙1)

次の項目の提案を行いシミュレーションによりその有効性を確認することができた。

- RT0B（反作用力推定オブザーバ）により各ブレードに作用するピッチングモーメントを推定
 - ピッチングモーメントの推定値を利用して浮体が動揺している状態の風車から見た相対風速を推定
 - 風速とブレードピッチ角の関係からピッチ角指令値を生成
- ② ウィンドファームシステム構築のための浮体式風力発電システムを仮定した風速推定実験
- 上記に示した通り、今回の事業においては浮体状況を考慮した風力発電システムにおいてピッチングモーメントの推定および風速推定の実験結果が期待通りのものでなかった。しかしながら、過年度の実験システム（浮体状況を仮定しない通常のシステム）においては成功しており、浮体状況を考慮したモデルの構築ならびにセンサシステムの改善により実験においても推定精度の高い結果が得られると考えており、引き続き検討していきたいと考えている。

(論文発表)

1. M. Yamad, T. Murakami, " Individual Pitch Control of Wind Turbine System by Estimating Wind Speed Using Pitching Moment", Volume 12, Issue 5, 1008-1014, 2023(doi.org/10.1541/ieejjia.23000261). (JKA謝辞あり：風車のモデル化とピッチ各制御に関する論文)

(3) 成果を公表している研究室ホームページ上のURL

(<https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/>)

(4) JKA補助事業バナーを表示している研究室ホームページ上のURL

(<https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/>)

(別紙1)

4 事業実施に関して特許権、実用新案権等を申請又は取得したときはその内容
特に無し

5 今後予想される効果

① 風速推定アルゴリズムとピッチ角制御

本事業で提案した「推定風速によるピッチ角制御」については風速計を使用せずに風速状況に応じたピッチ角制御やスラスト力の低減制御を実現できることから、風力発電システムへの汎用的な応用展開が行えると考えている。また、センサレスであることから悪環境での利用も可能であり、風力発電システムの安全・安心の運用に貢献できると期待している。

② ウィンドファームシステムの構築のための浮体式風力発電システムを仮定した風速推定実験

本アルゴリズムが実験でも検証でき、ウィンドファームへの応用展開が実現できれば、持続可能な風力発電システムの構築が可能となり、高効率・高寿命な発電システムの実現、およびカーボンニュートラルへの社会的な貢献が期待できる。

6 本事業により作成した印刷物（研究報告書等）

「2023年度風力発電における推定風速によるピッチ角制御とウィンドファームへの革新的応用補助事業」報告書（PDFでの配布を検討）

7 その他

特に無し

事業内容についての問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 村上俊之研究室

〒223-8522

横浜市港北区日吉3-14-1

教授 村上俊之

E-mail: mura@sd.keio.ac.jp

URL: <https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/>