

(別紙)

事業の実施状況

1 実施経過

① 風速推定アルゴリズムとピッチ角制御

- 2023年 4-8月 ピッチ角制御機構
- 4-8月 風速推定アルゴリズムの評価
- 8月- 回転速度安定化制御
- 9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- ウィンドファームシステムの最適制御

2 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養生風力発電システム（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。

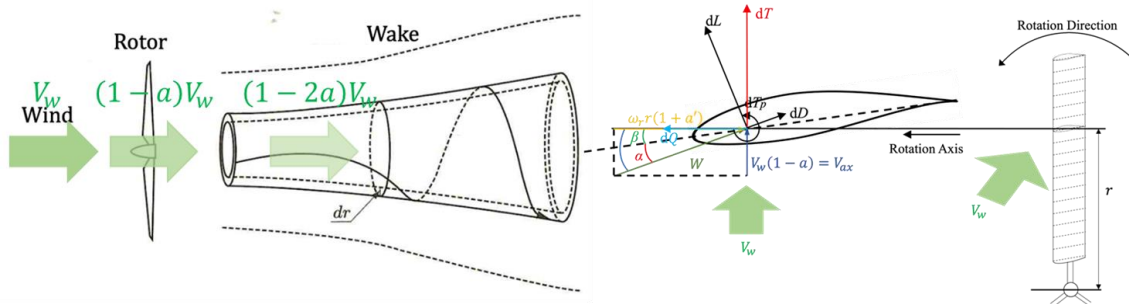


図1：ウェイクの流管モデル（左図）と翼素の断面図（右図）

図1にウェイク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、風速推定アルゴリズムの構築とその評価を行う。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。

Step1：各ブレードのピッチアクチュエータに設置された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。

Step2：風力推定

手法①（従来手法）：風速推定は0.2秒間隔で行う。まず、0.2秒前の風速推定値から、-0.2、

(別紙)

-0.1, 0, 0.1, 0.2 m/s ずらした値を現在の風速の仮定値とし、さらにピッチングモーメントを求めるためのパラメータを探索アルゴリズムにより決定し、各風速の仮定値に対してモデルによって得られるピッチングモーメントを算出する。算出された各ピッチングモーメント値とStep1で推定されたピッチングモーメントの差が最も小さくなる風速を風速推定値とする。

方法②(改善手法): 風速推定は0.2秒間隔で行う。まず、0.2秒前の風速推定値から、-0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2 m/s ずらした値を現在の風速の仮定値とし、さらにピッチングモーメントを求めるためのパラメータのモデルに基づいた解析値を用いて、各風速の仮定値に対してモデルによって得られるピッチングモーメントを算出する。算出された各ピッチングモーメント値とStep1で推定されたピッチングモーメントの差が最も小さくなる風速を風速推定値とする。

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。

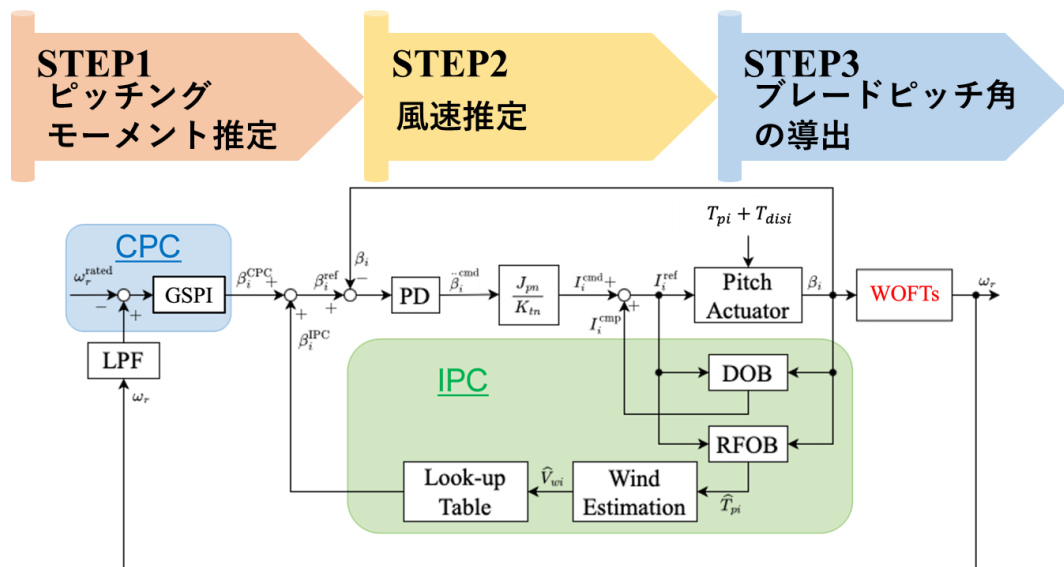


図2: 風速推定手法のブロック線図。

上記のステップに準じたピッチ角制御全体のブロック線図を図2に示す。提案手法の有効性を検証するため、5MW陸上風力発電モデルを制御対象としてシミュレーションを行い、方法①および②の比較を行った。風速推定精度の結果を表1に示す。従来手法と今回の改善手法がそれぞれMethod 1,2である。表1の通り、2つの手法の風速推定精度は殆ど同等となった。更に、本シミュレーションの計算時間は従来手法が約138秒、改善手法が約10秒であることが確認でき、計算負荷が大幅に軽減されている。また、各手法のロータ回転角速度のRMSE(二乗平均平方根誤差)を表2に示す。計算負荷の低減ははかれたものの、ロー

(別紙)

タ回転角速度の変動については若干大きめとなっている。ロータ回転角速度の変動の様子については図3に示す通りである。

表1：風速推定精度

Method	Blade1	Blade2	Blade3
1	2.94%	2.26%	2.75%
2	2.79%	2.29%	2.80%

表2：各手法のロータ回転角速度のRMSE

Method	Conventional	Wind estimation 1	Wind estimation 2
ω_r RMSE	3.509×10^{-2}	1.237×10^{-2}	1.760×10^{-2}

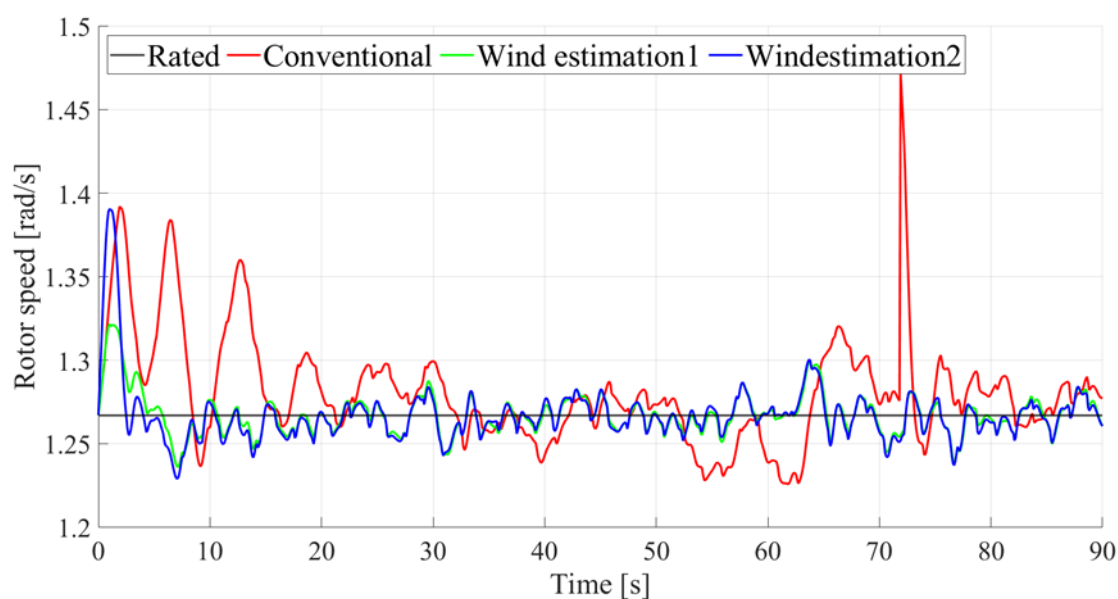


図3：各手法のロータ角回転速度変動

風速推定アルゴリズムとピッチ角制御のシミュレーションによる検証については計画通り進められているが、実験装置の構築については計画が遅れている。

② 模擬ウィンドファームシステムの構築

模擬ウィンドファームシステムの構築においては新たな検討が大幅に遅れており、過年度から得られている結果を含めて今回の報告書にまとめる。近年の風力発電は洋上ウィンドファームの開発が進んでおり、更なる普及が期待される。しかし、風車の集合配置化や大型化に伴い風車下流に発生するウェイク効果による発電効率低下、疲労荷重増大といっ

(別紙)

た問題が顕在化している。発電効率向上に関する従来研究では疲労荷重の考慮が無いものが多く、疲労荷重抑制は今後の課題となる。本研究課題の②では、ウェイク効果に起因する風速変動の増加に応じたピッチ角制御による疲労荷重抑制を実現できるアルゴリズムの確立と検証を目的としている。

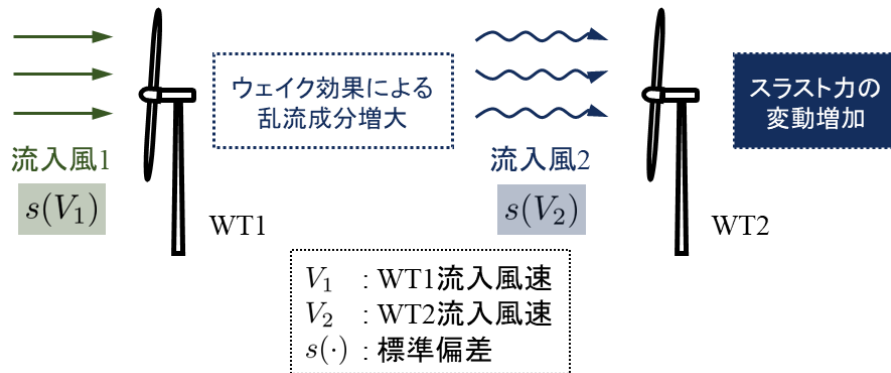


図4：ウェイク効果による乱流成分増大の概念図

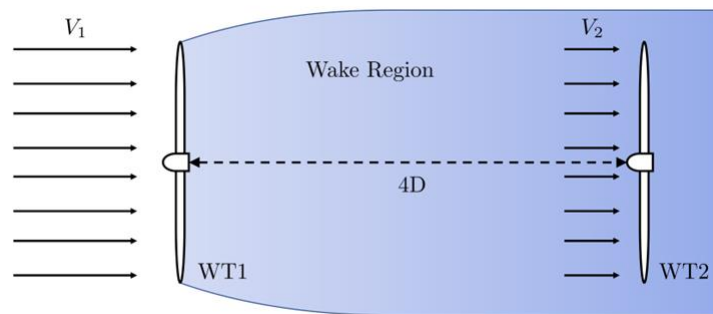


図5：想定する風車の配置および風況の様子

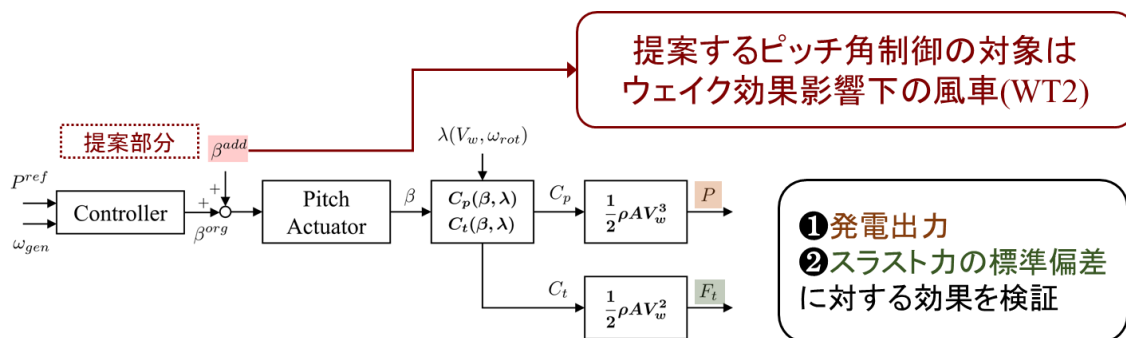


図6：風力発電システムにおける発電出力，スラスト力算出フロー

ウィンドファームにおけるウェイク効果発生概念図を図4に示す。また、2台の風車を仮定した風況のモデルを図5に示す。本モデルに基づき、図6に示すフローに従って発電出力ならびにスラスト力の評価を数値シミュレーションにより検証する。アルゴリズムに関する詳細な概念は図7に示す通りである。提案するアルゴリズムでは、風速の標準偏差を100sec毎に算出し、現在（n回サンプリング）の標準偏差に対する前回（n-1回サンプリング）の標準偏差の比を求めて、スラスト係数の調整を行う。さらに、調整されたスラ

(別紙)

スラスト係数を用いて、各ブレードのピッチ角の指令を調整する。これにより、風速が増加傾向にある場合にはピッチ角が抑えられ、逆に減少する傾向にある場合にはピッチ角が増加することになる。これにより、発電効率の低下を抑えながらスラスト力を抑制することが期待できる。しかしながら、表3に示す通りスラスト力は抑えられているが、表4にあるように発電出力については予想より低下する結果となった。ただし、スラスト力の低下に伴う発電出力の低下は最低限に抑えられていると考えている。

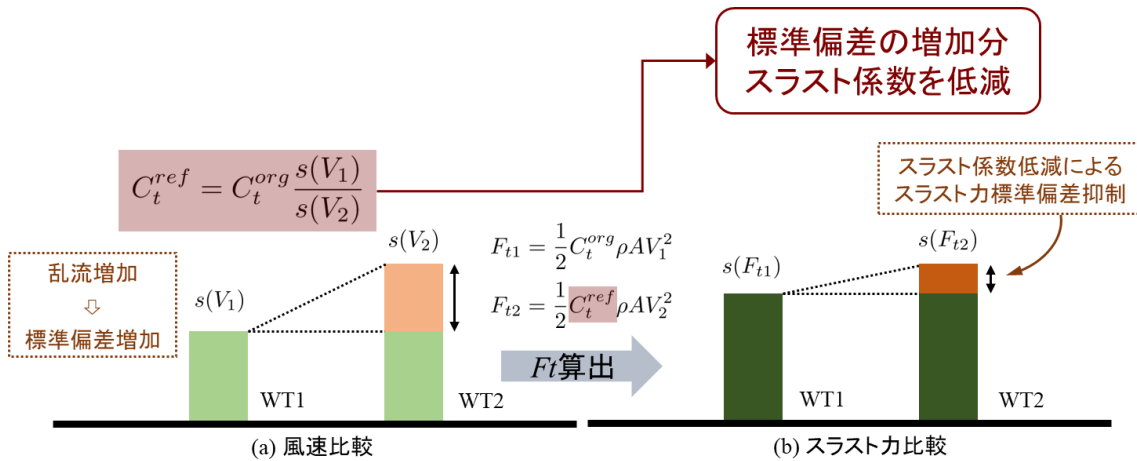


図7：風速の標準偏差比を用いたスラスト係数参照値の効果



図8：スラスト係数の調整によるピッチ角の修正

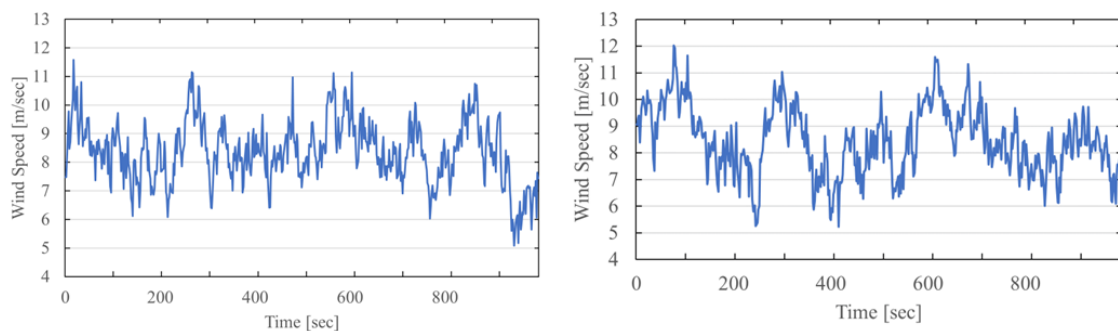


図9：シミュレーションで用いた風力モデルA（右図）および風力モデルB（左図）

表3：提案手法適用時のスラスト力の標準偏差

風速モデル	$s(F_{t2})$ [kN]	従来比	前後比
A	89	0.76	1.44
B	81	0.65	0.92

(別紙)

表 4 : 提案手法適用時の発電出力平均

風速モデル	$s(F_{T2})$ [kN]	従来比	前後比
A	89	0.76	1.44
B	81	0.65	0.92

(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：人の動作モデル化に関する論文)

3 事業の実施状況表

事業項目 (段階)	期・月別	上半期						下半期						
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
① 風速推定アルゴリズムとピッチ角制御														
・ ピッチ角制御機構		→												
・ 風速推定アルゴリズムの評価		→												
・ 回転速度安定化制御														
・ 実験装置の構築														
・ 実験による検証														
② 模擬ウィンドファームシステムの構築														
・ スラスト力推定アルゴリズム		→												
・ ウィンドファームシステムの最適制御														
・ 実験によるアルゴリズムの検証														
③ 総括														

上記の報告の通り、上半期においては基本的に①については予定通り計画（点線）が進んでいる。ただし、実験による検証については、実験装置の見直しが必要となっており、引き続き検討事項となる。また、②については大幅な遅れが生じている。この理由として、風力システムのモデルとして、現状において関心が高まっている浮体式のものに変更したことが起因している。陸地での固定式のものについては過年度において検証した結果があ

(別紙)

ったため、今回の報告ではその検証を行うことに留めている。浮体式のファームのモデルについては、風車一基のモデルが構築・検証が行えてから進める予定としている。