

令和2年度 修士論文

流入風観測に基づく独立ピッチ制御による  
水平軸風車の運転制御に関する研究

2021年1月29日 提出

指導教員 前田 太佳夫 教授

鎌田 泰成 准教授

三重大学 大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

エネルギー環境工学研究室

高井 健太

## 目次

第1章	緒言	1
1.1	研究背景	
1.2	風力発電の導入課題	
1.3	本研究の目的	
第2章	主な記号および実験結果を整理する式	5
2.1	主な記号	
2.2	実験結果を整理する式	
2.3	座標系	
第3章	実験装置および方法	9
3.1	テストサイトおよび実験装置概要	
3.2	供試風車	
3.3	風速測定装置	
3.3.1	風速測定マスト	
3.3.2	ナセル搭載風向風速測定装置	
3.4	計測システム	
3.5	風車運転制御	
3.5.1	回転数制御	
3.5.2	トルク制御	
3.5.3	ピッチ制御	
3.5.3.1	独立ピッチ制御	
3.5.3.2	同時ピッチ制御	
3.5.3.3	ピッチ固定時運転	
3.5.4	流入風観測支援制御	
3.5.4.1	単純時間平均手法	
3.5.4.2	誘導速度を考慮した手法	
3.6	テストサイトの風況特性	
3.6.1	鉛直方向の風速分布	
3.6.2	水平方向の風速分布	
第4章	フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証	40
4.1	定速運転における独立ピッチ制御効果の検証	
4.1.1	実験条件	
4.1.2	時系列データによる評価	
4.1.2.1	出力変動抑制効果の検証	
4.1.2.2	推力変動抑制効果の検証	
4.1.3	統計データによる評価	

## 目次

4.1.3.1	風車出力	
4.1.3.2	風車推力	
4.1.3.3	単位推力あたりの出力	
4.2	可変速運転における独立ピッチ制御効果の検証	
4.2.1	実験条件	
4.2.2	時系列データによる評価	
4.2.2.1	回転数変動抑制効果の検証	
4.2.2.2	出力変動抑制効果の検証	
4.2.2.3	推力変動抑制効果の検証	
4.2.3	統計データによる評価	
4.2.3.1	風車トルク	
4.2.3.2	風車出力	
4.2.3.3	風車推力	
4.2.3.4	単位推力あたりの出力	
第5章	時間補正の違いによる独立ピッチ制御効果の検証	70
5.1	風速予測精度評価	
5.1.1	実験条件	
5.1.2	予測精度評価	
5.2	統計データ比較による効果検証	
5.2.1	実験条件	
5.2.2	制御効果比較	
第6章	結言	77
付録 A	OpenFAST 解析	79
参考文献		95
謝辞		97

## 第1章 緒言

### 第1章 緒言

#### 1.1 研究背景

風力発電は無尽蔵に存在する自然風を利用した発電方式であり、発電時に温室効果ガスや廃棄物を排出しないクリーンな発電方式であるため、米国や欧州諸国をはじめ日本でも導入が進められてきた。図 1.1<sup>(1)</sup>に世界における風力発電の設備容量を示す。図 1.1 より、世界の風力発電設備容量は過去 10 年で急速に増加していて、2019 年では、2018 年の 590,589MW から 650,557MW まで約 10.2%増加していることが分かる。また図 1.2<sup>(2)</sup>は日本の風力発電導入量である。図 1.2 より、日本国内でも風力発電の導入量が過去 10 年間で平均 6.0%の割合で増加していることが分かり、今後も風力発電の導入拡大が期待される。

#### 1.2 風力発電の導入課題

風力発電の導入拡大のためには、風力発電の抱える問題を解消する必要がある。近年風車のサイズはエネルギー賦存量の高い高層で使用するため、陸上洋上ともに拡大する傾向がある。しかし風車の大型化は、ロータ直径の 2 乗に比例した発電量の増加をもたらす一方で、体積すなわち質量は直径の 3 乗に比例するため、結果として発電コストの増加を引き起こす。図 1.3<sup>(3)</sup>にロータ径に対する発電コストの関係の例を示す。ここで発電コスト低減のため、風車の軽量化を行うと剛性不足に繋がり安全性に支障をきたす恐れがある。そのため風力発電における発電コスト低下のために、負荷荷重を低減し大きな発電出力を得ることが必要となっている。

ここで、風車出力の向上および風車推力の抑制は風車制御により達成できる可能性がある。一般的な風車のパワーカーブは図 1.4 で示される。風車はカットイン風速で発電を開始する。定格風速未満の風況下において風車は出力を最大化するように制御される。また、定格風速以上の風況下で、風車はピッチ角操作および回転数変化により定格出力を維持するように制御される。ここで、ピッチ角とは、翼の前縁と後縁を結ぶ翼弦線と風車回転面との間の角度である。ピッチ制御とはこのピッチ角を変化させることにより、ブレードの迎角を変化させることである。迎角の変化は風車に働く空力荷重を変化させ、風車出力を制御する。カットアウト風速を超える風況下では、風車は翼の前縁を主流風向に向けるフェザー状態にし、停止するよう制御される。

これらの制御は、風車ナセル上部に設置されているナセル風速計によって取得される風速および風車出力を基に行われている。風車回転面がタワーより上流に位置するアップウィンド形風車では、ナセル風速計は風車回転面より下流側に設置されるため、ナセル風速計により取得される風速は風車翼を通過した風速である。また、風車回転面がタワーより下流に位置するダウンウィンド形風車では、ナセル風速計は風車回転面より数 m 上流側に設置される。しかし、この風速を制御に反映させるのには、制御の応答が間に合わない可能性が高く、時間遅れの改善には至らない。

このように、既存の風車制御では風速はフィードバック制御に用いられており、制御に時

## 第1章 緒言

間遅れがある。既存の風車制御はこの時間遅れにより、迎角が風速に対して過大過少となる可能性があり、常に最適な条件で風車の運転を行うことは困難である。そこで、風車の上流位置において、風車流入風をあらかじめ把握し、この流入風に対して風車を制御することが望ましい。このように、風車の流入風を把握し、最適な運転状態に風車を制御する新たな制御方法を構築することで、フィードバック制御において問題となった時間遅れを解消でき、より効果的な風車の運転が可能であると考えられる。

### 1.3 本研究の目的

流入風観測結果を用いて、フィードフォワード制御を行っている研究はいくつか存在する。E. Bossanyi と A Wright の論文<sup>(4)</sup>ではナセルに搭載したライダーから得た風況データを既存のフィードバック制御に組み合わせることでタワー振動や疲労荷重を低減できることをシミュレーションを用いて示している。また、Dimitrije Kotur と Željko Đurišić の論文<sup>(5)</sup>では風車に流入する風速の鉛直分布を考慮した独立ピッチ制御を用いることで、風車翼に作用する軸方向力が低減できることを定常風解析を用いて示している。これらの論文のように流入風観測を用いた独立ピッチ制御の効果検証はこれまで、タワー振動の低減、翼負荷の低減を目的として、数値解析を用いて実施されることが多い。しかし、流入風観測結果を出力最適化のために用いた研究や、実機試験を行った研究は稀である。

本研究は、超音波流速計で観測した風车上流風速を用いて、風車出力を向上させるとともに推力を抑制するフィードフォワード制御の開発を目的としている。この制御では上流風速の鉛直分布を考慮し、アジマス角ごとにピッチ角をそれぞれ独立に制御する独立ピッチ制御を導入し、風車運転効率の向上を目指す。実証試験には、三重大学附帯施設農場に設置されているロータ直径 10.0m、ハブ高さ 13.4m、発電機容量 37kW のアップウィンド形水平軸風車を用いる。流入風速の観測装置として風车上流 10.0m に設置された風速観測マスト上の超音波流速計を用いる。ピッチ角を固定した状態、風车上流の風速に応じて制御を行う同時ピッチ制御、風车上流の鉛直分布に応じて制御を行う独立ピッチ制御の 3 種類のピッチ制御を比較し効果を検証する。

第1章 緒言

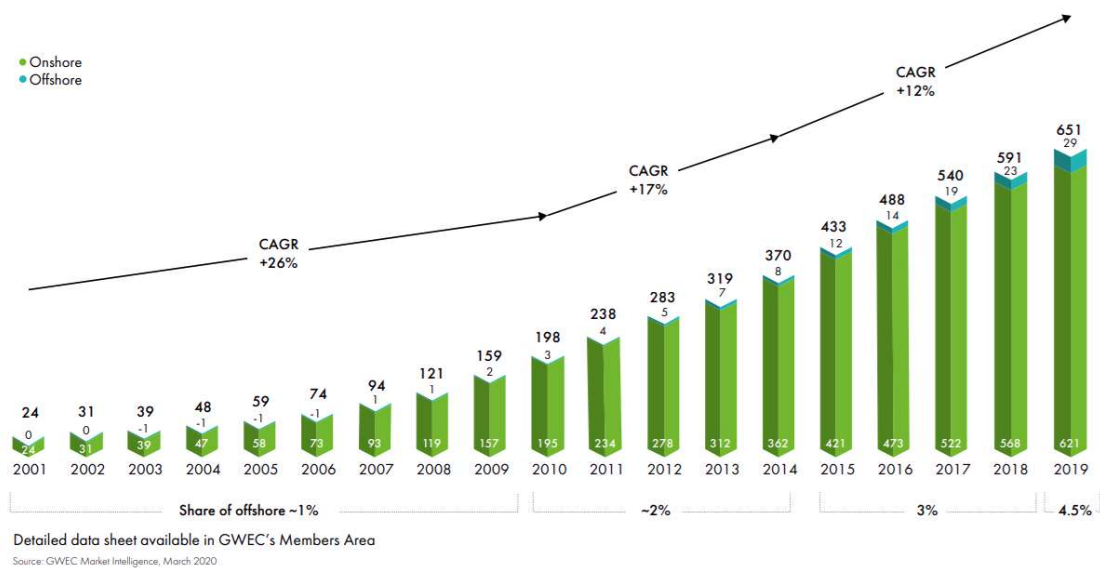


図 1.1<sup>(1)</sup> 世界の風力発電設備容量



図 1.2<sup>(2)</sup> 日本の風力発電導入量

## 第1章 緒言

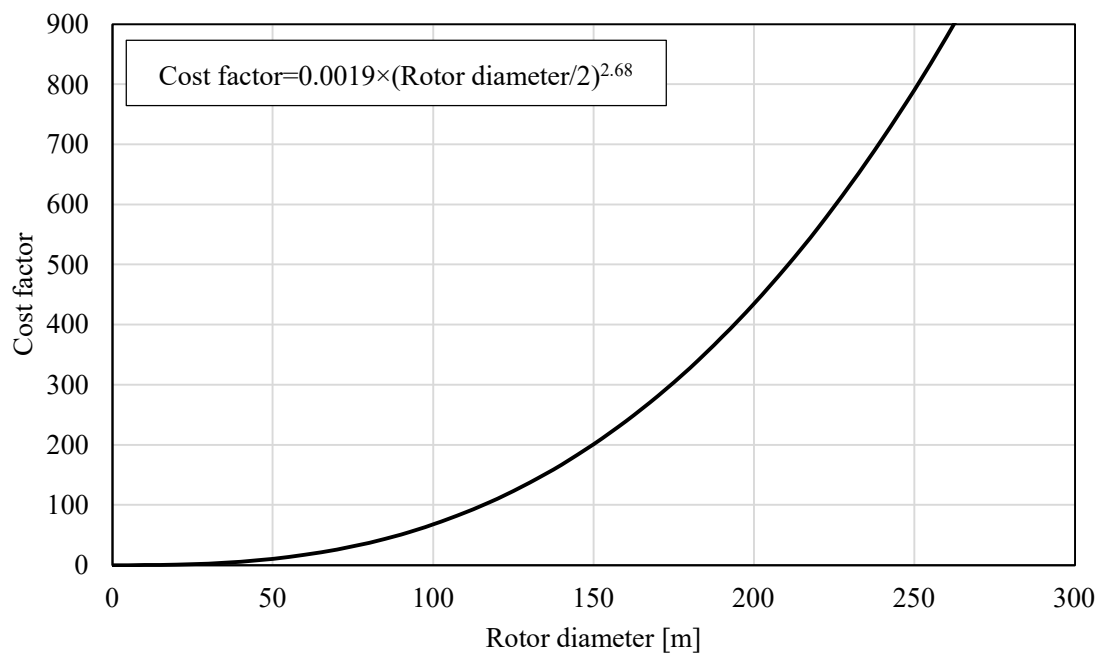
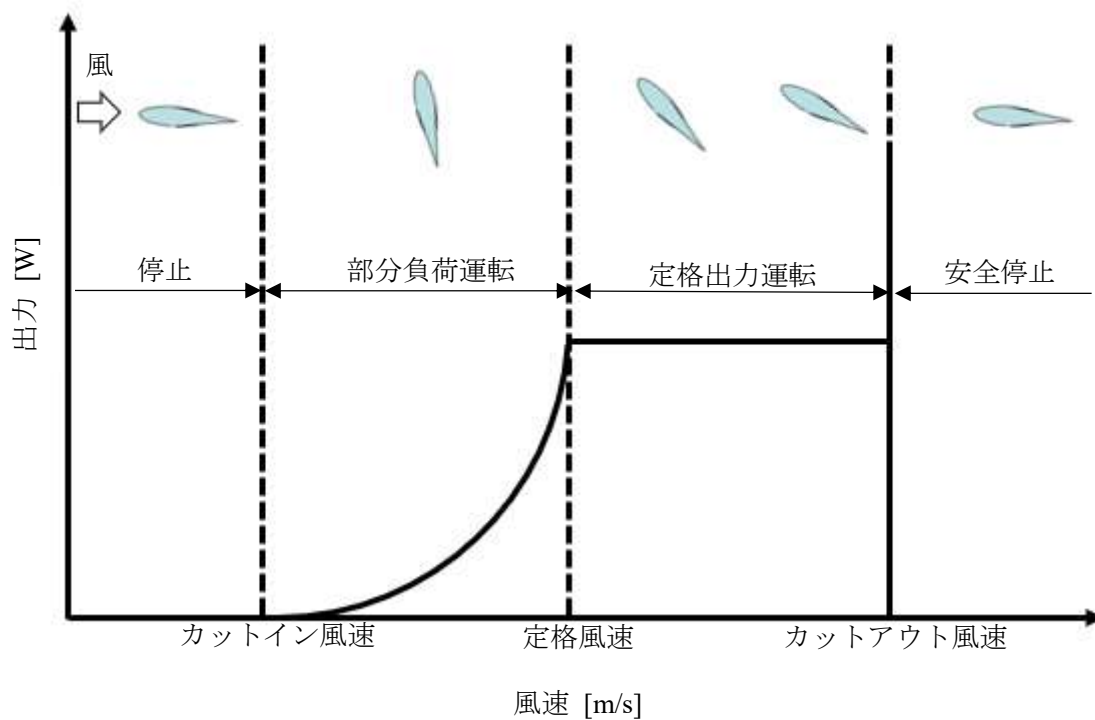
図 1.3<sup>(3)</sup> ロータ径に対する発電コストの例

図 1.4 パワーカーブ例

## 第2章 主な記号および実験結果を整理する式

## 2.1 主な記号

$A$	: 風車の受風面積	[m <sup>2</sup> ]
$a$	: 風速測定マストの風速計から風車ナセル上部の風速計までの減速係数	
$a'$	: 風速測定マストの風速計から風車ロータ中心までの減速係数	
$C_p$	: 出力係数(式(2.2))	
$C_t$	: 推力係数(式(2.3))	
$D$	: ロータ直径(=10.0[m])	[m]
$D_r$	: ドループ量	
$d_U$	: ナセル実測風速とナセル予測風速の誤差	[m/s]
$d_{Up}$	: ナセル予測風速の誤差率の平均値	
$d_{Up\_abs}$	: ナセル予測風速の誤差率の絶対値の平均値	
$G$	: ギア比(=27.28)	
$H$	: ハブ高さ(=13.4[m])	[m]
$k$	: トルク調整係数	[Nm/min <sup>2</sup> ]
$L$	: 風速測定マストの風速計から風車ロータ中心までの水平距離	[m]
$L_1$	: 風速測定マストの風速計から風車ナセル上部の風速計までの水平距離	[m]
$N$	: ロータ回転数	[min <sup>-1</sup> ]
$N_s$	: 高速軸読み取り回転数	[min <sup>-1</sup> ]
$N_{set}$	: 高速軸指令回転数	[min <sup>-1</sup> ]
$N_{rate}$	: 定格高速軸回転数	[min <sup>-1</sup> ]
$P$	: 風車運転時の電力	[W]
$Q$	: ロータトルク	[Nm]
$Q_{rate}$	: 発電機定格トルク	[Nm]
$R$	: ロータ半径	[m]
$r$	: ロータ半径位置	[m]
$t$	: 時間	[s]
$\Delta t$	: 流入風が風速測定マストからロータ面に到達するまでの時間	[s]
$\Delta t_1$	: 流入風が風速測定マストからナセル上部の風速計に到達するまでの時間	[s]
$T$	: ロータ推力	[N]
$U$	: 風速	[m/s]
$U_{ave}$	: サイトの平均風速	[m/s]
$U_{hub}$	: 風速測定マストの風速	[m/s]
$U_n$	: ナセル風速	[m/s]
$U_{npre}$	: ナセル予測風速	[m/s]
$U_{ref}$	: 流入風速	[m/s]
$U_{rotor}$	: ロータ面風速	[m/s]
$x$	: 主流方向座標	[m]
$y$	: 横方向座標	[m]
$z$	: 鉛直方向座標	[m]
$\alpha_{opt}$	: 最適迎角	[°]



## 第2章 主な記号および実験結果を整理する式

$\beta$	: ピッチ角	[°]
$\beta_{opt}$	: 最適迎角を満たすピッチ角(=2[°])	[°]
$\theta$	: ヨー偏角	[°]
$\theta_{T0.8}$	: 翼 80%位置のねじれ角	[°]
$\lambda$	: 周速比((式 2.1))	
$\lambda_{opt}$	: 最適周速比	
$\rho$	: 空気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_N$	: $N$ の標準偏差	[min <sup>-1</sup> ]
$\sigma_P$	: $P$ の標準偏差	[W]
$\sigma_T$	: $T$ の標準偏差	[N]
$\sigma_{U_{hub}}$	: $U_{hub}$ の標準偏差	[m/s]
$\varphi$	: アジマス角	[°]
$\omega$	: ロータ回転角速度	[rad/s]
$\omega_g$	: 発電機回転角速度	[rad/s]

添字

D : 減速時

opt : 最適条件

rate : 定格

U : 増速時

1,2,3 : 翼 1, 翼 2, 翼 3

## 2.2 実験結果を整理する式

本研究で得られたデータを整理する式の定義を以下に示す.

## (a)周速比

周速比 $\lambda$ はロータ翼端の周速と流入風速の比で示される. 周速比の定義を式(2.1)に示す.

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_{ref}} \quad (2.1)$$

ここで  $R$  はロータ半径,  $U_{ref}$  は基準風速,  $\omega$  はロータ回転角速度である.

## (b)出力係数

風車の性能は一般に出力係数で示される. 出力係数  $C_p$  は風車のロータ面へ流入する風の持つエネルギーに対する出力の比で示される. 出力係数の定義を式(2.2)に示す.

$$C_p = \frac{Q\omega}{\frac{1}{2}\rho AU_{ref}^3} \quad (2.2)$$

ここで  $A$  は風車の受風面積,  $Q$  はロータトルク,  $\rho$  は空気密度である. なお, 第4章にお

ける  $P$  は電力を示しており、負の値は電力消費を、正の値は発電を示す。

### (c) 推力係数

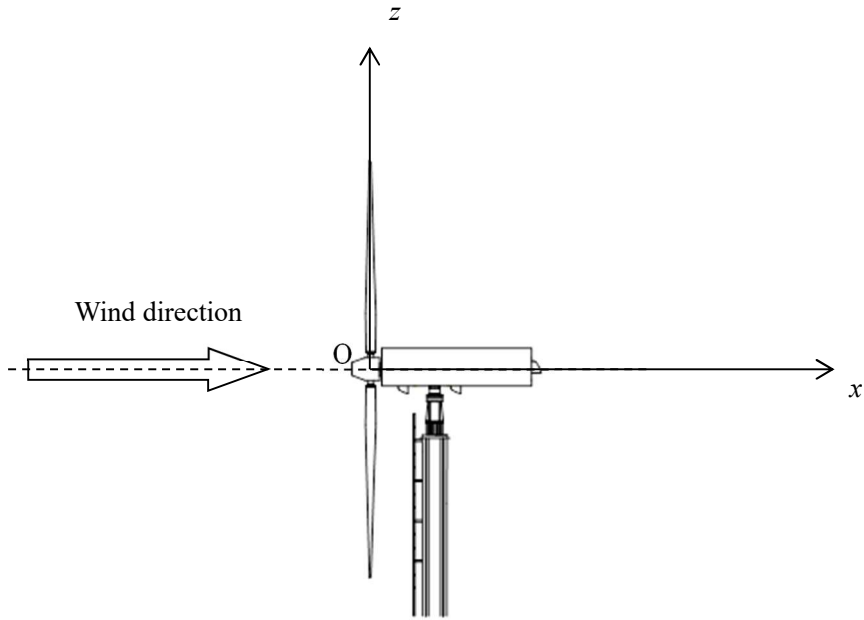
推力係数  $C_t$  はロータ面に発生するロータ軸方向の力を流入風の風速と風車の受風面積の積で無次元化して得られる。推力係数の定義を式(2.3)に示す。

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A U_{\text{ref}}^2} \quad (2.3)$$

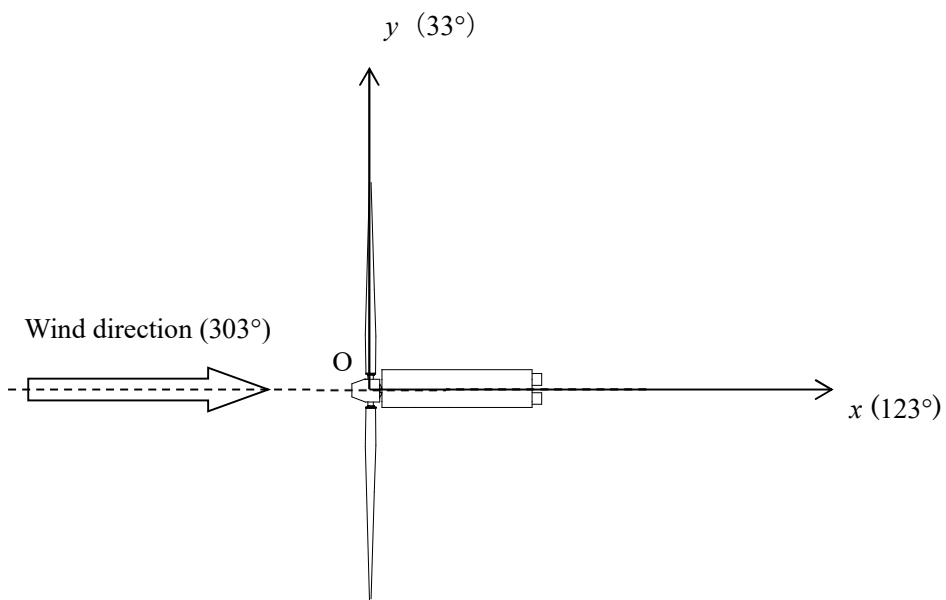
ここで  $T$  はロータ推力である。

## 2.3 座標系

図 2.1 に測定装置の配置に関する静止座標系を示す。北を  $0^\circ$  としたとき、サイトの卓越風向は  $303^\circ$  であるため、これを基準とした座標系とする。座標系はロータ回転中心を原点とする。また、鉛直方向を  $z$  軸とし、鉛直上向きを正とする。装置配置位置の  $x$  座標はロータ直径  $D$ 、 $y$  座標と  $z$  座標はロータ半径  $R$  でそれぞれ無次元化した  $x/D$ 、 $y/R$ 、 $z/R$  を用いて表す。



(a)側面図



(b)上面図

図 2.1 座標系

## 第3章 実験装置および方法

### 3.1 テストサイトおよび実験装置概要

本実験は三重大学生物資源学部附属紀伊・黒潮生命地域フィールド・サイエンスセンター 附帯施設農場にあるテストサイトにて行われた。図 3.1 は風力発電実験設備全体図を示す。本実験で用いられる装置は上流風速測定マスト (Upwind measurement mast), 基準風速測定マスト (Reference mast) と供試風車 (Test wind turbine) である。また, 図 3.2 は本テストサイトの航空写真を示す。本テストサイトは三重県津市高野尾町に位置する。本テストサイトは丘陵上に位置しており, 周りを池や丘や森に囲まれている。北を  $0^\circ$  としたときの供試風車から  $345^\circ$  の方位に樹木の生えた丘が存在する。また,  $298^\circ$  の方位,  $136\text{ m}$  の位置に  $100\text{ kW}$  の供試風車が設置されている。図 3.3 は上空からの, 図 3.4 は正面からの林と実験装置との位置関係を示す。図 3.3 および 3.4 より, 丘は  $-3.0 < x/D < -1.0$ ,  $y/R > 2.2$  の範囲に位置し, 高さは  $x/D = -2.0$ ,  $y/R = 4.2$  において  $z/R = 0.5$  程度である。風車に流入する風はこれらの地形の影響を受け, 高い乱流強度を示す。

図 3.5 および図 3.6 は本テストサイトの風配図を示す。図 3.5 の風配図は 2020 年度分 (2020 年 3 月 1 日から 2021 年 1 月 20 日), 図 3.6 の風配図はフィールド試験を実施した 2020 年 10 月 1 日から 2021 年 1 月 20 日の期間に地上高  $13.4\text{ m}$  の位置で測定された風況をそれぞれ示す。風況データは基準風速測定マストの中央に位置する超音波流速計の 10 分間平均値を使用した。図 3.5 と図 3.6 より, 本テストサイトにおいて高風速かつ高出現頻度の風の方位は主に北西であることがわかる。

### 3.2 供試風車

図 3.3, 図 3.4 に示した通り, 実験装置は上流風速測定マスト (Upwind measurement mast), 基準風速測定マスト (Reference mast), 供試風車 (Test wind turbine) から構成される。供試風車の正面図および側面図を図 3.7 に示す。供試風車は発電機容量  $37\text{ kW}$ , ロータ直径  $D = 10.0\text{ [m]}$  (ロータ半径  $R = 5.0\text{ [m]}$ ), ハブ高さ  $H = 13.4\text{ [m]}$ , 可変ピッチ機構を持つ 3 枚翼のアップウインド形水平軸風車である。ティルト角は  $0^\circ$  である。翼のピッチ制御はサーボモータによって行われる。タワーは直径  $460\text{ mm}$  の鋼管でできており, 油圧シリンダによる可倒式である。これによりナセル内の測定機器やロータ翼のメンテナンスを安全かつ容易に行うことができる。また, ナセルとタワーの間にヨーサーボモータが取り付けられており, ナセル方位を任意に設定することができる。

図 3.8 に供試風車の駆動系およびナセル内測定装置を示す。増速機の入力側の駆動軸を低速軸側, 増速機の出側側の駆動軸を高速軸側とする。ロータに生じたトルクは増速機を介して発電機に伝達される。増速機の増速比は  $27.28$  である。発電システムはインバータを用いた AC-DC-AC 変換方式の可変速発電システムであり, 発電された交流電流は, インバータを介して直流電流に変換され, コンバータにより送電システムと同じ周波数の交流電流に変換された後に系統に連系される。ロータ回転数は, インバータによってナセル内部の発電機の制御周波数を変化させることで任意に設定できる。

## 第3章 実験装置および方法

本実験で用いる供試風車は、運転に関するさまざまなデータを得るため、多くの測定装置を備える。図 3.8 に示すように低速軸にトルク検出器、高速軸に発電機とトルク検出器、回転数検出器が設置されている。ピッチサーボモータはハブ内部に設置されており、ヨーサーボモータはナセル回転軸に設置されている。表 3.1 に主な計測項目、測定装置、設置箇所を示す。

次に、ナセルに設置されたロータ推力測定装置について説明する。風車に発生するロータ推力は、風車に作用する主要な荷重の一つである。推力測定は、高精度引張型ロードセルを用いる。図 3.9 にロータ推力測定装置の概略を示す。ロータ推力測定装置はスライドユニットとロードセルで構成されている。スライドユニットのレールは、タワーとナセルの間にロータ軸と平行になるよう設置されており、ナセルはロータ軸方向に移動可能となっている。移動可能なナセルは、地面に固定されたタワーとロードセルで接続されており推力を測定できる。

表 3.2 にロータ推力測定に用いた装置の諸元を示す。推力測定に用いたロードセルの分解能は 0.12N であり、測定精度は推力 20kN のとき、 $\pm 10N$  である。

また表 3.3 に本実験で用いた測定装置の諸元を示す。

表 3.1 風車に関する計測項目と測定装置、設置箇所

計測項目	測定装置	設置箇所
低速軸トルク	トルク検出器	低速軸
高速軸トルク	トルク検出器	高速軸
増速機側ロータ回転数	電磁式回転検出器	高速軸
発電機側ロータ回転数	電磁式回転検出器	高速軸
ピッチ角	サーボモータ	ハブ内ピッチ回転軸
ナセル方位角	サーボモータ	ナセル下部ヨー回転軸
推力	ロードセル	ナセル下部

表 3.2 推力測定装置諸元

測定装置	メーカー	型番
高精度引張型ロードセル	共和電業	LTZ-2TA
動ひずみ測定器	共和電業	DPM-911A
スライドユニット	日本精工	LH45GM

表 3.3 装置諸元

	メーカー	型番	定格,適用範囲	精度
低速軸トルク検出器	東陽テクニカ	J1		
高速軸トルク検出器	ユニパルス	UTMV -500Nm	±500Nm	フルスケールの ±0.03%
電磁式回転検出器	小野測器	MP-950	300~35000rpm	
ピッチサーボ	ハーモニック ドライブ	HA-800A		位置制御時 ±0.1°
ヨーサーボ	安川電機	SGDV- 5R5A01A		トルク制御時 ±1%
超音波流速計	ソニック	SAT-550	0~60m/s	10m/s の時に読 値の±0.25m/s
超音波流速計	ソニック	SAT-900	0~90m/s	10m/s の時に読 値の±0.35m/s
三杯式風速計	Thies CLIMA	4.3351.10.141	0.3~75m/s	±0.2m/s
矢羽式風向計	Thies CLIMA	4.3150.10.141	0~360°	±1°
インバータ	富士電機	FRENIC 37VG1S-2J	37kW	トルク制御時 ±3%
パワーハイテスタ	日置電機	3193	1.2W~150kW	フルスケールの ±0.1%
レーザアプリセンサ	キーエンス	IL-S100	70~130mm	フルスケールの ±0.07%
非接触温度計	キーエンス	FT-H20	0~500°C	再現性:±0.5°C
非接触温度計 用アンプ	キーエンス	FT-50A		

### 3.3 風速測定装置

風車への流入風を計測するために風速計が必要である。本研究において、風速測定機器として、風速測定マストに設置されている風速計、ナセル搭載風速計を用いた。

#### 3.3.1 風速測定マスト

基準風速測定マストは、風車から見て方位 303°、風車ロータから 10.0m 上流の位置に設置されている。基準風速測定マストを図 3.10 に示す。また、基準風速測定マスト諸元を表 3.4 に示す。基準風速測定マストは 5 個の超音波流速計と 1 個の三杯式風速計、1 個の矢羽式風向計で構成されている。全ての風速測定機器の観測部は、ハブ高さ 13.4m の高さに位置する。超音波流速計は y 軸方向に 2.50m 間隔に設置されている。

本実験では風速測定マストに設置されている 11 個の超音波流速計を用いて風速の把握を

## 第3章 実験装置および方法

行う。基準風速測定マストの本計測に用いた風速計は、ソニック社製の超音波流速計 (SAT-550 および SAT-900) である。表 3.5 に SAT-550 の諸元を示す。SAT-550 の風速分解能は 0.01 m/s、測定精度は風速 10 m/s のとき、 $\pm 0.25$  m/s である。表 3.6 に SAT-900 の諸元を示す。SAT-900 の風速分解能は 0.01 m/s、測定精度は風速 10 m/s のとき、 $\pm 0.35$  m/s である。なお、すべての風速・風向データは 50 Hz でサンプリングされる。

ここで、超音波流速計の測定原理について示す。超音波流速計は超音波送受波器を対向させ、これらの送受波器が互いに逆向きに超音波パルスを伝播させる。この伝播時間は風によって変化するため、伝播時間を測定することで風速の速度ベクトルの視線方向成分を求めることができる。超音波流速計はこの送受信機を三対設置し、風速の三次元成分を測定する。

表 3.4 基準風速測定マスト諸元

測定装置	個数	メーカー	型番
超音波流速計	5	ソニック	SAT-550
三杯式風速計	1	Thies CLIMA	4.3351.10.141
矢羽式風向計	1		4.3150.10.141

表 3.5 SAT-550 諸元

型名	SAT-550
プローブ	3 成分型
スパン	10 cm
風速レンジ	0~60 m/s
サンプリングレート	50 Hz
風速精度	$\pm(2 \%RD + 0.05 \text{ m/s})$ (RD : 読値)
風速分解能	0.01 m/s
風向レンジ	540 °
風向精度	3 °
アナログ出力	0~20 mA, 4~20 mA(切替)
アナログ出力要素	風速の 3 成分, 気温
アナログ出力レンジ	1,2,5,10,15,20,30,40,50,60 m/s
温度出力	有り
アナログ出力分解能	12 ビット
アナログ出力応答速度	50 Hz
通信機能	RS-422 出力
電源	DC24 V
重量	プローブ, 本体一体型 約 3 kg
材質	ステンレス

表 3.6 SAT900 諸元

型名	SAT-900
プローブ	3成分型
スパン	10 cm
風速レンジ	0~90 m/s
サンプリングレート	10 Hz
風速精度	$\pm(3\%RD + 0.05 \text{ m/s})$
風速分解能	0.01 m/s
風向レンジ	540°
風向精度	3°
アナログ出力	0~20 mA, 4~20 mA(切替)
アナログ出力要素	風速の3成分, 気温
アナログ出力レンジ	1,2,5,10,15,20,30,40,50,60,70,80,90 m/s
温度出力	有り
アナログ出力分解能	12 ビット
アナログ出力応答速度	10 Hz
通信機能	RS-422 出力
電源	DC24 V
重量	プローブ, 本体一体型 約 4.5kg
材質	ステンレス

### 3.3.2 ナセル搭載風向風速測定装置

ナセル搭載風向風速測定装置の諸元を表 3.7 に示す。ナセル上部の風速風向測定装置は1個の三杯式風速計, 1個の矢羽式風向計で構成されている。三杯式風速計は Thies CLIMA 社製の 4.3351.10.141 である。4.3351.10.141 の測定範囲は 0.3~75m/s, 風速精度は風速 0.3~50m/s のとき,  $\pm 0.2\text{m/s}$  または 1%, 分解能は 0.05m/s である。矢羽式風向計は Thies CLIMA 社製の 4.3150.10.141 である。4.3150.10.141 の測定可能な最低風速は 0.5m/s, 風向精度は $\pm 1^\circ$ , 分解能は  $0.35^\circ$  である。これらの測定部は地上高 14.4m の高さに位置し, ロータ回転軸と直交方向に 0.9m 間隔に設置されている。なお, 風速・風向データは 50 Hz でサンプリングされる。

表 3.7 ナセル上部諸元

測定装置	個数	メーカー	型番
三杯式風速計	1	Thies CLIMA	4.3351.10.141
矢羽式風向計	1		4.3151.10.141



## 3.4 計測システム

風速測定装置，供試風車で取得したデータはキーエンス社製の PLC (Programmable Logic Controller) 3 台を用いて記録した．各記録項目に記載されるデータのサンプリング周波数は 50Hz である．表 3.8 から表 3.10 に各 PLC ユニットによる主な記録項目一覧を示す．また，図 3.11 に測定信号系統図を示す． PLC2 (風車小屋)， PLC3 (ナセル) は LAN ケーブルで接続されており， PLC4 (ハブ) は PLC3 と無線 LAN 通信を行っている．全ての記録項目は PLC3 に転送され，ネットワーク HDD に記録される．

表 3.8 PLC2 (風車小屋) 記録項目一覧

PLC2 ユニット	型番	個数	記録項目	測定機器
電源ユニット	KV-U7	1	-	-
CPU ユニット	KV-5000	1	-	-
アナログ入力 ユニット	KV-DA40V	1	発電機周波数 指令速度	インバータ (FRENIC 37VG1S-2J)
シリアル通信 ユニット	KV-L20V	6	上流風速測定 マスト	超音波流速計 (SAT-900)×6
アナログ入力 ユニット	KV-AD40V	3	インバータ 指令速度	インバータ (FRENIC 37VG1S-2J)
			動力電力	パワーハイテスタ (HIOKI 3193)
			動力電圧	
			動力電流	
			制御電力	
			制御電圧	
制御電流				
アナログ出力 ユニット	KV-DA40V	1	発電機周波数	

## 第3章 実験装置および方法

表 3.9 PLC3 (ナセル) 記録項目一覧

PLC3 ユニット	型番	個数	記録項目	測定機器
電源ユニット	KV-U7	1	-	-
CPU ユニット	KV-5500	1	ヨー角	サーボモータ
アナログ入力 ユニット	KV-AD40V	4	増速機側回転数	電磁式回転検出器 (MP-950)
			発電機側回転数	電磁式回転検出器 (MP-950)
			推力	ロードセル (LH45GM)
			ナセル風速	三杯式風速計 (4.3351.00.141)
			ナセル風向	矢羽式風向計 (4.3151.00.141)
			低速軸トルク	トルク検出器 (J1)
			高速軸トルク	トルクメータ (UTMV-500)
増速機変位	レーザアプリーセンサ (IL-S100)			
マルチ入力 ユニット	KV-TP40V	1	ナセル内温度	非接触温度計 (FT-H20+FT50A)
2ch 高速カウンタ ユニット	KV-SC20	1	アジマス角	自作

表 3.10 PLC4 (ハブ) 記録項目一覧

PLC4 ユニット	型番	個数	記録項目	測定機器
電源ユニット	KV-U7	1	-	-
CPU ユニット	KV-5000	1	-	-
4 軸モーション ユニット	KV-MC40V	1	ピッチ角1, 2, 3	ハーモニックドライブ (HA-800A)
アナログ入力 ユニット	KV-DA40V	4	翼ひずみ	ロードセル変換機 (MXLCF)

### 3.5 風車運転制御

本供試風車の運転制御は、発電機制御、ピッチ制御の2種類である。発電機の制御は、インバータ設定により回転数制御、トルク制御を選択できる。発電機制御は、定速運転時での計測では回転数制御、可変速運転条件下での計測ではトルク制御を使用した。なお、トルク制御は実際の商業用風車の制御に近い発電機制御である。表 3.11 に使用した風車運転制御の対応を示す。

表 3.11 風車運転制御の対応

	実験条件	制御手法
発電機制御	定速運転	回転数制御
	可変速運転	トルク制御
ピッチ制御	定速運転 可変速運転	独立ピッチ制御
		同時ピッチ制御
		ピッチ固定

#### 3.5.1 回転数制御

本研究において固定回転数条件下における制御効果を検証するため回転数制御を使用した。この制御ではインバータに回転指令周波数を与え、誘導発電機を一定回転数にして風車を運転した。これは実際の商業用風車運転状態とは異なる。そのためピッチ制御が迎角変動抑制により運転性能に与える影響をロータ回転の影響なしで考察するために用いた。

#### 3.5.2 トルク制御

風車は定格風速未満の風速範囲では、風速に応じた最適回転数で運転される。最適回転数を維持するため、発電機のトルクは、回転数の2乗に比例するトルク制御を行う。したがって、本実験の発電機制御は実際の風車運転を模擬するトルク制御とした。本供試風車の発電システムは、インバータに回転数に応じたトルク指令値を与え、インバータ内部の演算により誘導発電機を制御する。

本供試風車の設計における最適周速比 $\lambda_{opt}$ を式(3.1)に示す。

$$\lambda_{opt} = \frac{R\omega}{U} \quad (3.1)$$

本供試風車の設計における最適出力係数 $C_{p,opt}$ を式(3.2)に示す。

$$C_{p,opt} = \frac{Q\omega}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (3.2)$$

式(3.1), 式(3.2)より

$$Q = \frac{1}{2} C_p \rho A R^3 \frac{\omega_g^2}{\lambda_{\text{opt}}^3 G^3} \quad (3.3)$$

となり,  $k$  をトルク 2 乗に比例する係数とすると

$$Q = k \omega_g^2 \quad (3.4)$$

ここで

$$k = \frac{1}{2} C_p \rho A R^3 \frac{1}{\lambda_{\text{opt}}^3 G^3} \quad (3.5)$$

であり, 回転数の 2 乗に応じた最適なトルクを与えることができる.

先行研究にて 37kW 風車では先端周速比  $\lambda$  が 6 の時に, 最大出力係数  $C_p$  は 0.28 で最大値を取り, この時が最も効率よく風車が運転できることが分かっている. そこで今回はこの時の運転状態を維持するよう回転数を指令するトルク制御を作成した. 図 3.12 はこの時の発電機回転数と吸収トルクの関係である.

回転数の 2 乗に比例したトルクを指令するためにインバータのドループ設定を応用した. ここでドループ制御は, 発電機の負荷トルク変動に応じて回転速度の垂下特性を持たせることで負荷のバランスをとる制御である. 本研究ではドループ制御を回転数の急激な変動に伴う過剰な負荷を抑制するために使用した.

ドループ設定時においてインバータは以下のように回転数を指令する.

$$N = N_{\text{set}} + \frac{N_{\text{rate}} D_r}{Q_{\text{rate}}} Q \quad (3.6)$$

今回式(3.6)のドループ量は 25%(0.25)に設定した.

式(3.6)を吸収トルク  $Q$  について解くと以下の式になる.

$$Q = \frac{N - N_{\text{set}}}{D_r N_{\text{rate}}} Q_{\text{rate}} \quad (3.7)$$

式(3.4)を用いて式(3.7)の式を変形すると以下の式が得られる.

$$N_{\text{set}} = N - \frac{k D_r N_{\text{rate}}}{Q_{\text{rate}}} N^2 \quad (3.8)$$

式(3.8)を図 3.11 の PLC2 へ指令することにより, インバータが読み取った回転数に応じて最適となる回転数を送信するようにした. また式(3.8)ではインバータが駆動する際に発生する摩擦トルクの影響を考慮することができない. そこで発電機回転数 900rpm から 1600rpm の区間において, 発電機回転数 100rpm ごとに実測値と理想値が一致するよう  $k$  の値を設定

した。

### 3.5.3 ピッチ制御

翼ピッチ角の制御は、計測した運転周速比で最適迎角となるようにピッチ角を算出し、ピッチサーボへ指令を送る。最適迎角は、最適周速比と最適ピッチ角から求めた。なお、ピッチ角 $\beta$ の動作範囲は $\beta \leq 70^\circ$ の範囲である。本研究では独立ピッチ制御による制御効果検証のため、同時ピッチ制御、ピッチ固定時と比較を行う。本研究で作成したピッチ制御の風車回転中の翼1の模式図を図3.13に示す。図3.13は横軸にアジマス角 $\varphi [^\circ]$ 、縦軸に翼1のピッチ角 $\beta_1 [^\circ]$ をとる。また黒が独立ピッチ制御(IPC)のデータ、赤が同時ピッチ制御(UPC)のデータ、青がピッチ固定時(NPC)のデータとなっている。

図3.13のように独立ピッチ制御ではロータ1回転中にロータ面上側 $\varphi=0 [^\circ]$ とロータ面下側 $\varphi=180 [^\circ]$ の2点で風速分布と回転数に応じた最適迎角を維持するようにピッチ角指令を行う。同時ピッチ制御ではハブ高さ風速に対して最適迎角を維持するようにロータ1回転中に1回ピッチ角指令を行う。ピッチ固定時では上流風速によらず最適ピッチ角の $2^\circ$ を維持する。

#### 3.5.3.1 独立ピッチ制御

風車上流流入風に対応するため、本研究では独立ピッチ制御(Individual Pitch Control, IPC)の作成を実施した。独立ピッチ制御は翼80%位置における迎角を最適迎角に維持するために、以下の式を用いて制御を行う。

最適迎角 $\alpha_{opt}$ とすると

$$\alpha_{opt} = \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{opt}} \quad (3.9)$$

ここで $\beta_{opt}$ は最適ピッチ角である。

最適迎角を満たすピッチ角 $\beta$ は、次式により計測した周速比 $\lambda$ からピッチ角指令が決定される。

$$\beta = \tan^{-1} \frac{U_{80\%}}{0.8R\omega} - \alpha_{opt} - \theta_{T0.8} \quad (3.10)$$

ここで、 $\theta_{T0.8}$ は翼80%位置におけるねじれ角であり、 $U_{80\%}$ は $y=0[m]$ 、 $z/R=\pm 0.8$ 高度における流入風速を示す。独立ピッチ制御は各翼で独立に行われ、ウインドシアの影響で風速の最大と最小を示す、アジマス角 $\varphi = 0 [^\circ], 180 [^\circ]$ (図3.7)の二箇所を基準に設定する。また独立ピッチ制御では翼80%断面位置における迎角を一定に保つことで、迎角の変動に伴う出力係数低下を抑制し高い出力を得ることを目的とした。また迎角を一定に保つことにより、高迎角時に生じる推力係数の増加および、低迎角時における推力係数の低下を抑制することで推力変動の抑制を図る。制御の対象とした翼80%位置は、翼に作用する先端損失が少なく

大きなトルクが作用するとされる位置であるため、この位置を代表とした。

### 3.5.3.2 同時ピッチ制御

本研究では独立ピッチ制御にてピッチ角を独立に変更したことに関する効果を検証するため、比較用としてピッチ角を3本同時に変化させる同時ピッチ制御(Uniform Pitch Control, UPC)を実施した。ピッチ制御は各翼で同時に行われ、ロータが1回転するごとに一度制御を行う。また送信するピッチ角は、ハブ高さにおける風速に対して風車翼80%位置が最適迎角を保つようにピッチ角の指令値を送る。制御では次式によるピッチ角 $\beta$ を計算した。

$$\beta = \tan^{-1} \frac{U_{\text{rotor}}}{0.8R\omega} - \alpha_{\text{opt}} - \theta_{T0.8} \quad (3.11)$$

### 3.5.3.3 ピッチ固定時運転

本研究では流入風観測支援制御を用いたピッチ制御が風車出力や推力に与える効果を検証するため、最適ピッチ角にピッチを固定するピッチ固定(Non-Pitch Control, NPC)運転を実施した。ピッチ固定時ではピッチ角を流入風速によらず最適ピッチ角 $2^\circ$ を維持する。ピッチ固定時運転は商用風車では部分負荷運転領域のみで用いられる。また風車を $50\text{min}^{-1}$ で定速運転した場合には、最適ピッチ角 $2^\circ$ は風速 $5\text{m/s}$ の時に最適迎角となる。

## 3.5.4 流入風観測支援制御

本研究では制御の時間遅れを解消すべく、風車上流の風速測定装置で測定した風を用いてロータ面に流入する風の予測を行っている。風車上流の流入風速測定装置で計測された流入風速を時間補正することにより、ロータ面風速を算出する。本研究ではロータ面風速を予測する際に、単純時間平均手法と誘導速度を考慮した手法の2つの予測手法を使用した。各手法で算出されたロータ面風速を基にロータ面に流入する風速と到達時刻のタイムテーブルを作成する。図3.14にタイムテーブルのイメージを示す。タイムテーブルは0.1秒ごとに更新し、計10.0秒間分を作成する。まず各手法で計算した到達時刻を基に到達風速をタイムテーブルへ書き込む。

例として、風速 $5.0\text{m/s}$ の風が2.0秒でロータ面に到達すると計算された場合、タイムテーブルの2.0秒から10.0秒のテーブルに到達風速 $5.0\text{m/s}$ を記入する。次に0.1秒間隔でタイムテーブルを1つ分(0.1秒)移動させる。これら2つの工程を0.1秒間隔で繰り返すことによりタイムテーブルが0秒の時の風速(つまりロータ面に到達した風速)を予測することができる。またタイムテーブルは「ハブ高さ位置」、「アジマス角 $0^\circ$ における無次元翼高さ $r/R=0.8$ 」、「 $r/R=-0.8$ 」の計3点において作成を行う。

### 3.5.4.1 単純時間平均手法

単純時間平均手法では、風車上流で観測された風速がロータ面に到達するまでの間、加減速せずに流入すると仮定して流入風予測を実施する。単純時間平均手法において、流入風が流入風観測装置の風速計を通過し、ロータ面に到達するまでの時間 $\Delta t$ は以下の式で表され

る.

$$\Delta t = \frac{L}{U_{\text{ref}}} \quad (3.12)$$

ここで、 $L$ は基準風速測定マストから風車ロータ面中心までの距離 ( $L=10.0$  [m]) である。表 3.12 に各風速帯での上流風速計からロータ面までの到達時間  $\Delta t$  を示す。

表 3.12 各風速帯の風速到達時間

$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	1	2	3	4	5
$\Delta t[\text{s}]$	10.0	5.0	3.3	2.5	2.0
$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	6	7	8	9	10
$\Delta t[\text{s}]$	1.7	1.4	1.3	1.1	1.0

風車上流からロータ面の間で速い風が遅い風を追い抜く場合、この手法では追い越された遅い風は無視する。図3.15に上流マストで測定された風速データと、単純時間平均手法によりロータ面に到達する時刻に換算した風速データを示す。

#### 3.5.4.2 誘導速度を考慮した手法

誘導速度を考慮した手法では、上流の超音波風速計とナセル上の三杯式風速計で観測された風速から、2点間の減速係数 $a'$ を統計的に算出する。誘導速度を考慮した手法の模式図を図3.16に示す。減速係数の算出に使用するデータは2020/12/16から2021/1/07に計測された、風車を固定回転数 $50\text{min}^{-1}$ 、ピッチ角を $2^\circ$ で固定して運転した際の上流風速計による風速 $U_{\text{ref}}$ とナセル風速計による風速 $U_n$ の時系列データをデータベースとして使用した。2点間の減速係数の計算方法は、以下の通りである。

初めに、データベースの初め5.0秒間の上流風速計による風速 $U_{\text{ref}}$ の平均値とナセル風速計における風速 $U_n$ の平均値の比から減速係数 $a'$ を算出する。そして減速係数の算出に使用した時刻を0.02秒移動し、データベースの最後まで繰り返し計算を行う。繰り返し計算により算出した0.02秒毎の減速係数を、BIN法により風速ごとに分類し平均することで、上流風速 $U_{\text{ref}}$ に対する減速係数 $a'$ を算出する。このときのBIN法の風速幅は1.0m/sとした。

表3.13 に各風速帯における減速係数 $a'$ を示す。

表 3.13 各風速帯の減速係数の統計的結果

$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	1	2	3	4	5
$a'$	1.91	1.31	1.05	0.97	0.91
$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	6	7	8	9	10
$a'$	0.89	0.89	0.90	0.91	0.83

式(3.13)に、上流風速計とナセル風速計間の移動時間の算出式を示す。また表 3.13 に式(3.13)で得られた到達時間を示す。本研究では、上流風速計とナセル風速計間の距離を、風車上流で得られた風速 $U_{\text{ref}}$ と風車後流に流入すると予測される風速 $a' \times U_{\text{ref}}$ の平均風速で除したものを2地点間の移動時間とした。なお、 $L_1$  は上流風速計からナセル風速計までの距離 12m を意味する。

$$\Delta t_1 = \frac{L_1}{\frac{(1+a')}{2} U_{\text{ref}}} \quad (3.13)$$

表 3.14 上流風速計とナセル風速計間の移動時間

$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	1	2	3	4	5
$\Delta t_1[\text{s}]$	8.3	5.2	3.9	3.0	2.5
$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	6	7	8	9	10
$\Delta t_1[\text{s}]$	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3

表 3.13 および表 3.14 で示した、上流風速計とナセル風速計の間の減速係数 $a'$ や移動時間 $\Delta t_1$ を上流風速計から風車ロータ面への移動に補正する必要がある。移動時間および減速係数はそれぞれ式(3.14)および式(3.15)を用いて補正を行う。なお、上流風速計からロータ面への移動時間および減速係数は、上流風速計とナセル風速計の間での変化を距離で内挿することによって算出する。

$$\Delta t = \frac{L}{12} \Delta t_1 \quad (3.14)$$

$$a = 1 - \frac{L}{12} (1 - a') \quad (3.15)$$

以下の表 3.15, 3.16 に式(3.14)と式(3.15)で算出した、上流風速計からロータ面までの減速係数と到達時間を示す。

表 3.15 各風速帯のロータ面までの減速係数

$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	1	2	3	4	5
$a$	1.76	1.25	1.04	0.97	0.92
$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	6	7	8	9	10
$a$	0.91	0.91	0.92	0.92	0.86



表 3.16 上流風速計とロータ面間の移動時間

$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	1	2	3	4	5
$\Delta t[\text{s}]$	6.9	4.3	3.3	2.5	2.1
$U_{\text{ref}}[\text{m/s}]$	6	7	8	9	10
$\Delta t[\text{s}]$	1.8	1.5	1.3	1.2	1.1

制御に使用するロータ面風速 $U_{\text{rotor}}$ は式(3.15)で算出した、上流風速計からロータ面までの減速係数 $a$ を用いて算出を行う。

$$U_{\text{rotor}} = aU_{\text{ref}} \quad (3.16)$$

ここで表 3.13 と表 3.15 において風速 3m/s 以下の風速にて減速係数が 1 を超える値をとっているため、上流風速がロータ面に流入する際に増速する傾向が表れている。これは 4m/s 未満の風速では風車がモータリングすることで風が増速したためであると考えられる。ここで図 3.17 に回転数  $50\text{min}^{-1}$  で定速運転した際のパワーカーブを示す。図 3.17 の横軸は風速  $U[\text{m/s}]$ 、縦軸は出力  $P[\text{W}]$ となっている。図 3.17 より風速 4m/s 未満にて出力が 0W を下回っているため、風車がモータリングしていることが分かる。そのため本論文では 4m/s 以上の風速範囲について考察を行った。

### 3.6 テストサイトの風況特性

#### 3.6.1 鉛直方向の風速分布

風車上流に設置した風速測定マストを使用し鉛直方向の風速の把握を行った。その結果を図 3.18 に記す。図 3.18 はテストサイトにおける主流風向にて計測されたデータの 10 分間平均データの 1 例である。図 3.18 は横軸に風速  $U[\text{m/s}]$ 、縦軸に高さ  $Z[\text{m}]$ をとる。黒のプロットは林側に設置した超音波風速計により測定したデータを示し、赤のプロットは畑側に設置した超音波風速計により測定したデータを示す。図 3.18 より風車の北に位置する林側の風速が南に位置する畑側の風速より小さい傾向を示す。これは林近傍を通過する風速は畑側に比べて減速しているためであると考えられる。また、鉛直方向のウインドシアの影響から上下の風速の差が見られる。これにより観測高度の増加にしたがい風速は大きくなる。風力分野では大気境界層の風速の鉛直方向分布は指数則に従うとされているが、図 3.18 より本研究で用いた風車ロータ面の範囲では風速はほぼ 1 次関数的に上昇するとみなすことができる。そのため観測結果に基づき、独立ピッチ制御にて用いる翼 80% 高度における風速を線形補間により求める。また、瞬時データにおいても同様な傾向がみられることが多い。

#### 3.6.2 水平方向の風速分布

鉛直方向の風速分布と同様に風車上流に設置した風速測定マストから水平方向の風速の把握を行った。結果を図 3.19 に記す。図 3.19 は横軸にロータ面半径で無次元化した測定位置  $y/R$ 、縦軸に風速  $U[\text{m/s}]$ をとる。左側が林方向、右側に畑方向を示している。ここでも図

3.18 同様に畑側の風速の方が大きく、林側では小さくなる傾向が見られる。また、畑側に近づくにつれて風速の変化は小さくなる傾向がある。

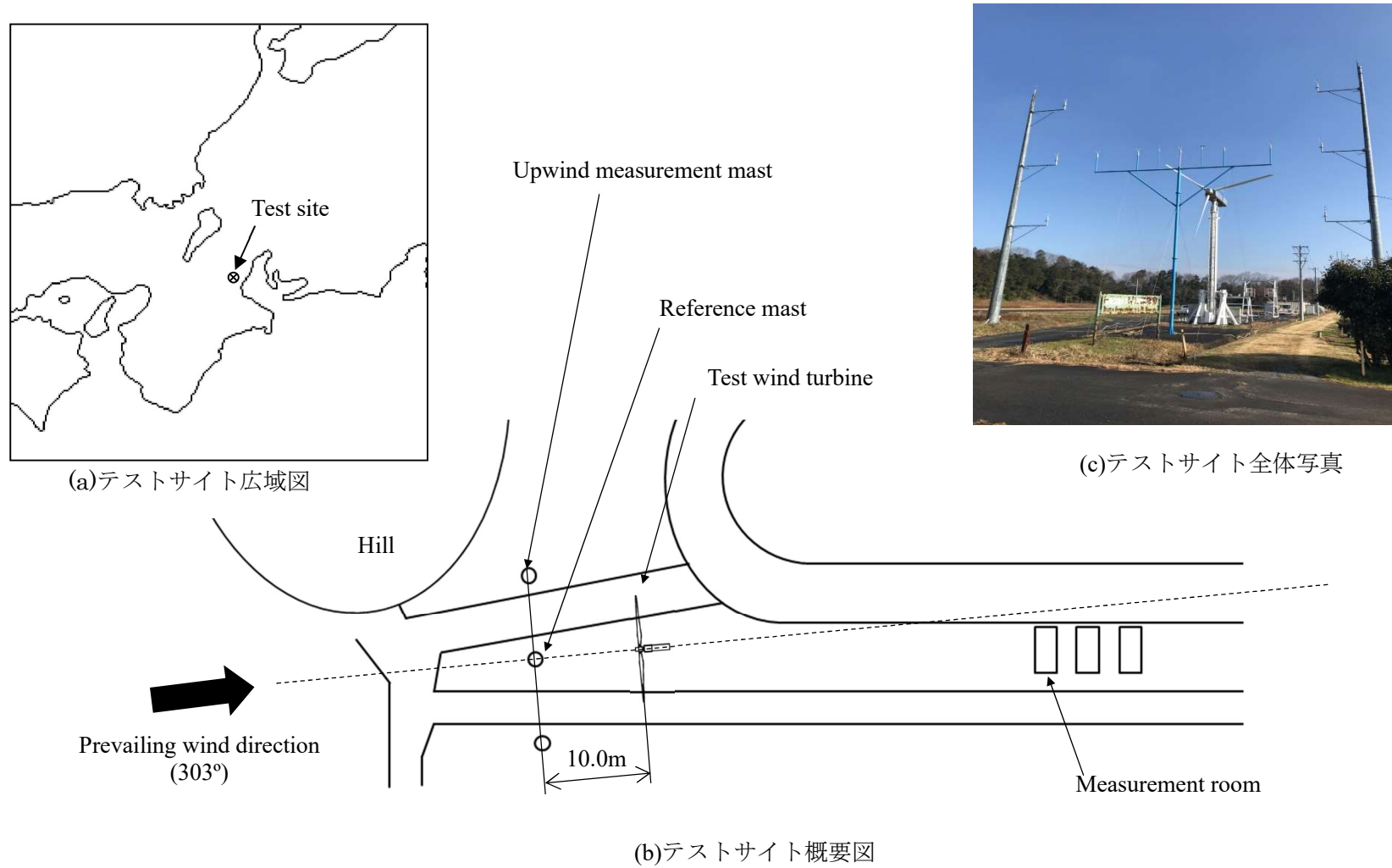


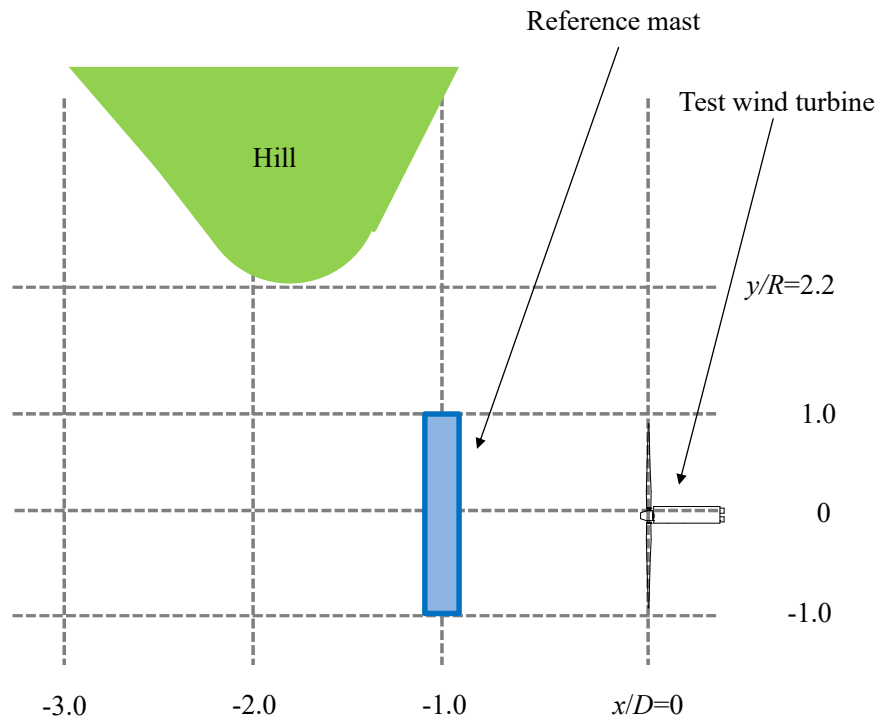
図 3.1 風力発電実験設備全体図



図 3.2 風力発電実験設備全体図



(a)航空写真

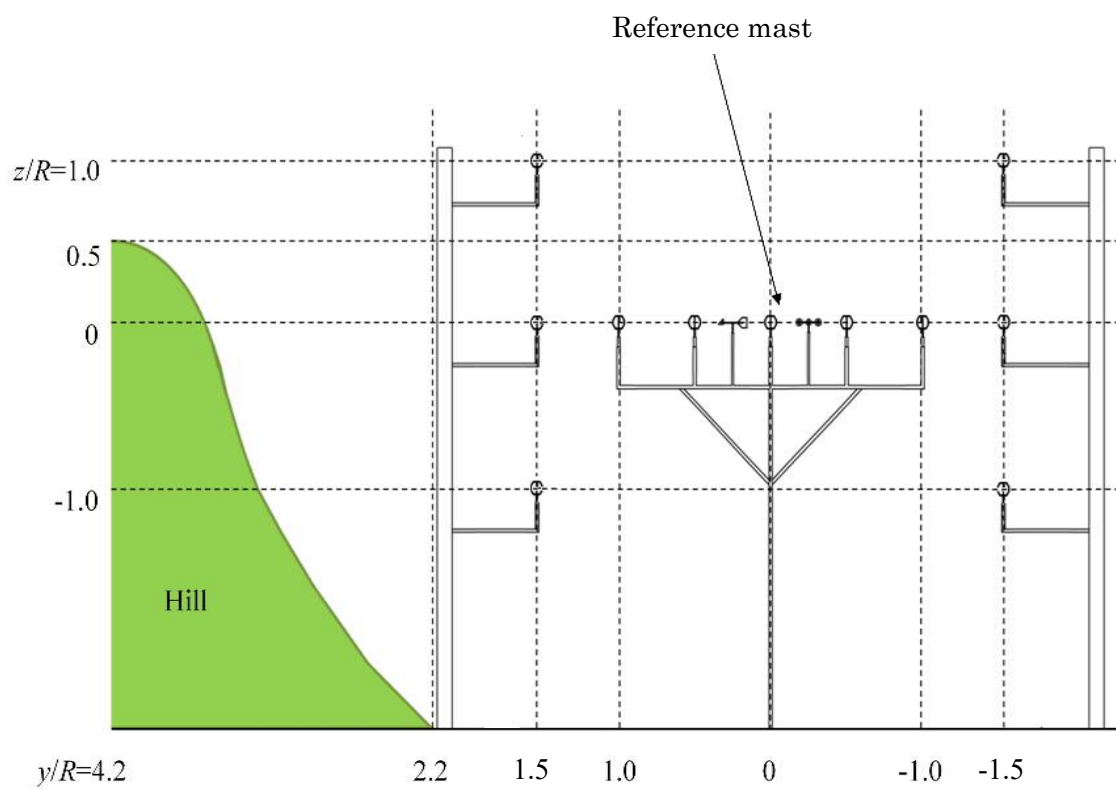


(b)概略図

図 3.3 丘と実験装置の位置関係（上面図）



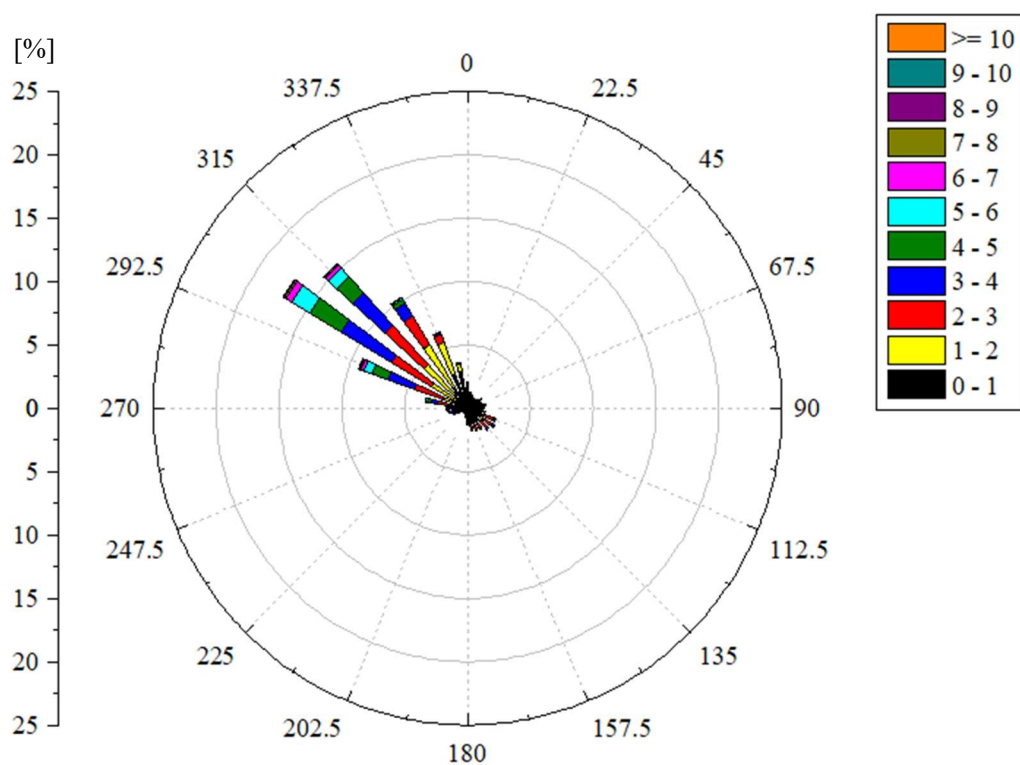
(a)写真



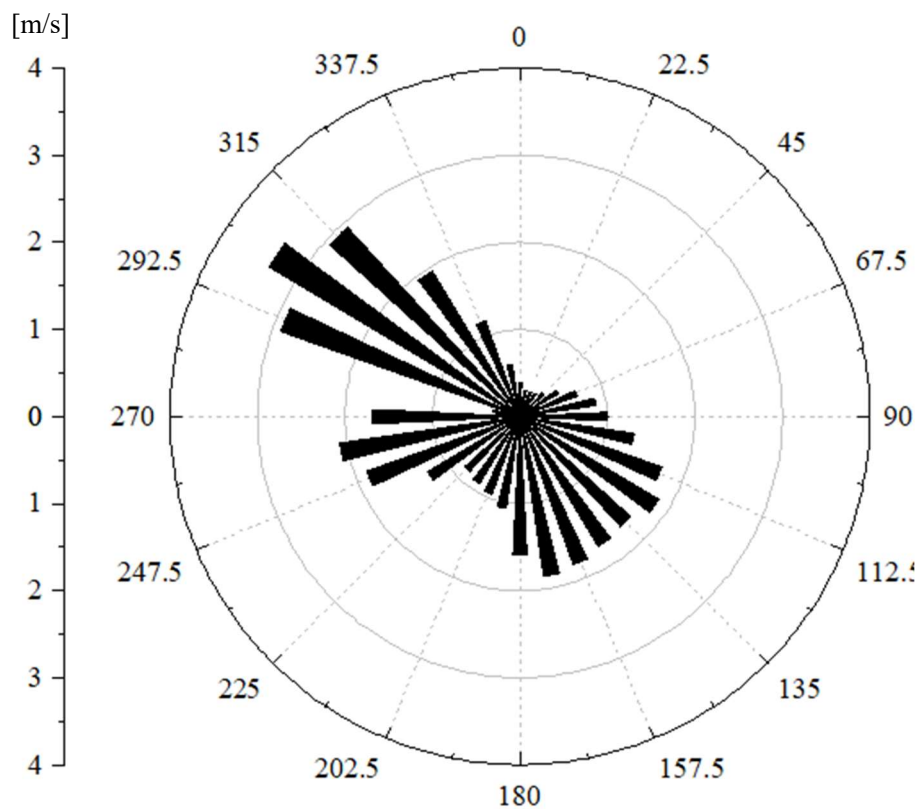
(b)概略図

図 3.4 丘と実験装置の位置関係 (正面図)

## 第3章 実験装置および方法



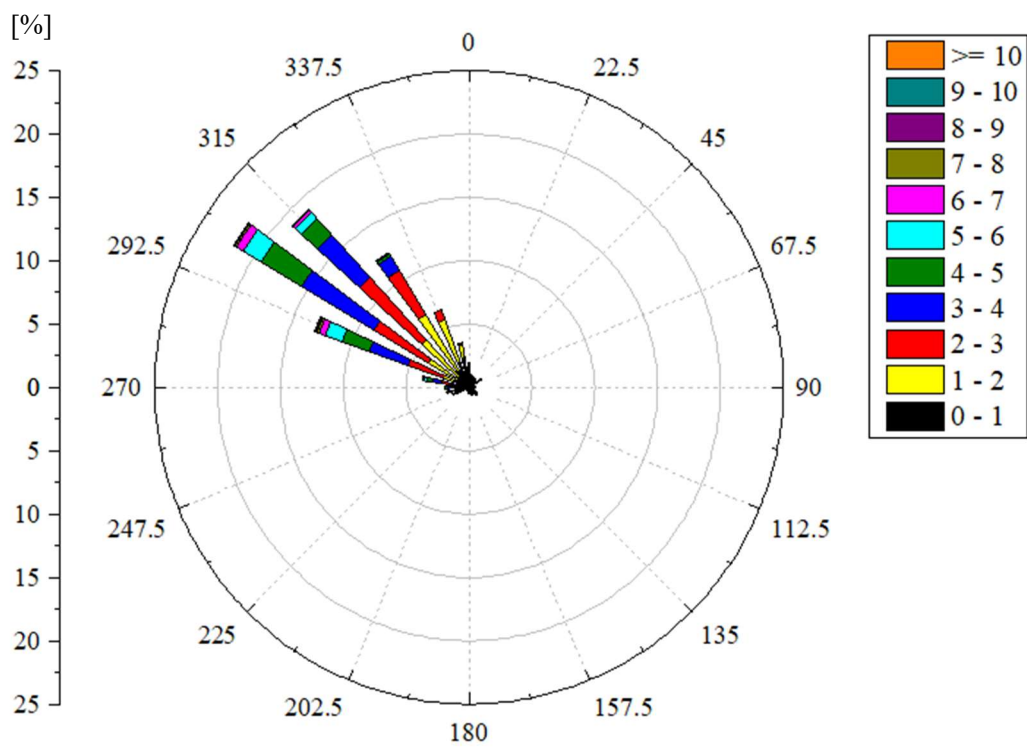
(a) 風向出現率(2020年3月1日～2021年1月20日)



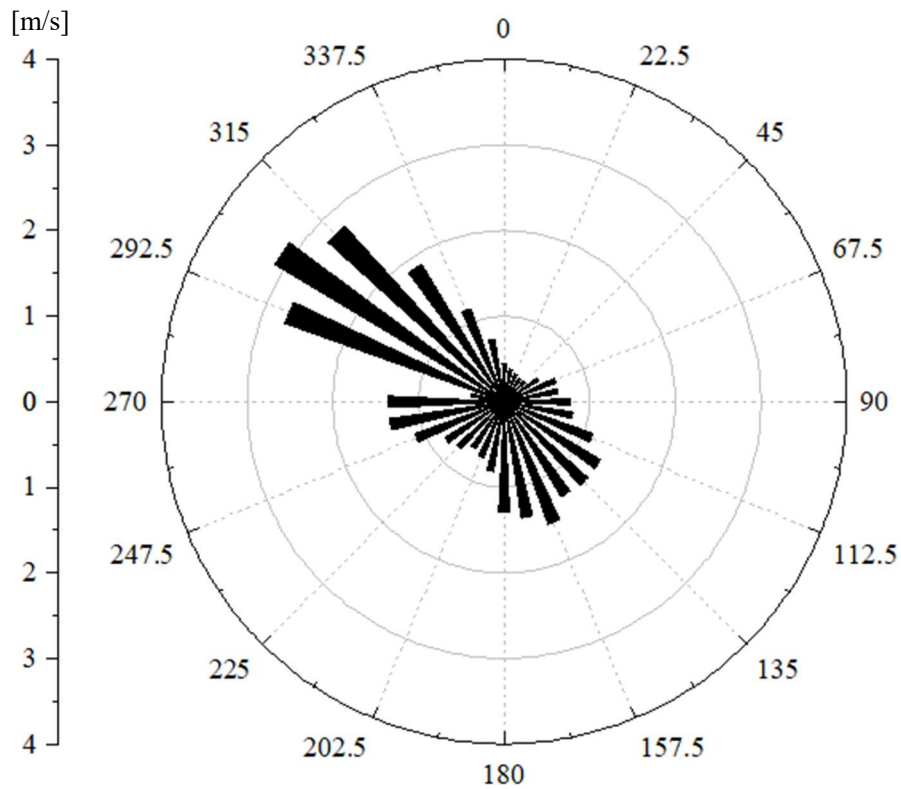
(b) 風向別平均風速(2020年3月1日～2021年1月20日)

図 3.5 テストサイトの風配図

## 第3章 実験装置および方法



(a)風向出現率(2020年10月1日～2021年1月20日)



(b)風向別平均風速(2020年10月1日～2021年1月20日)

図 3.6 風車実験時の風配図



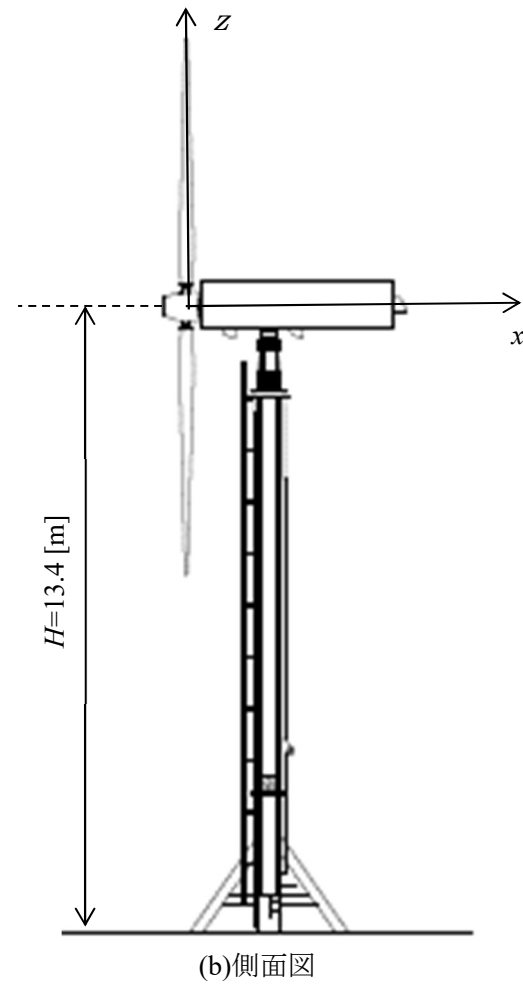
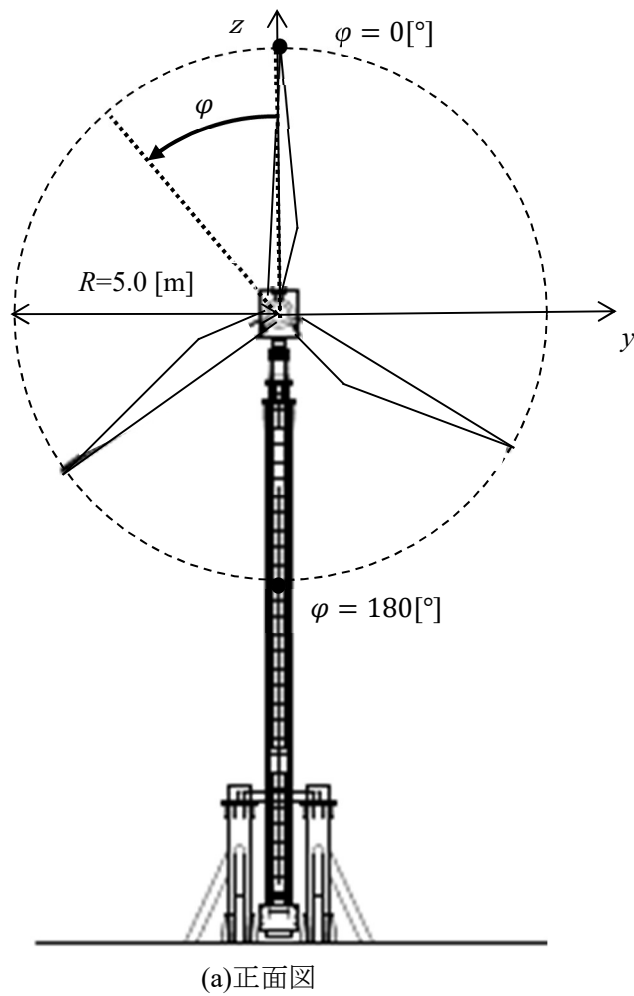


図 3.7 供試風車の正面図および側面図

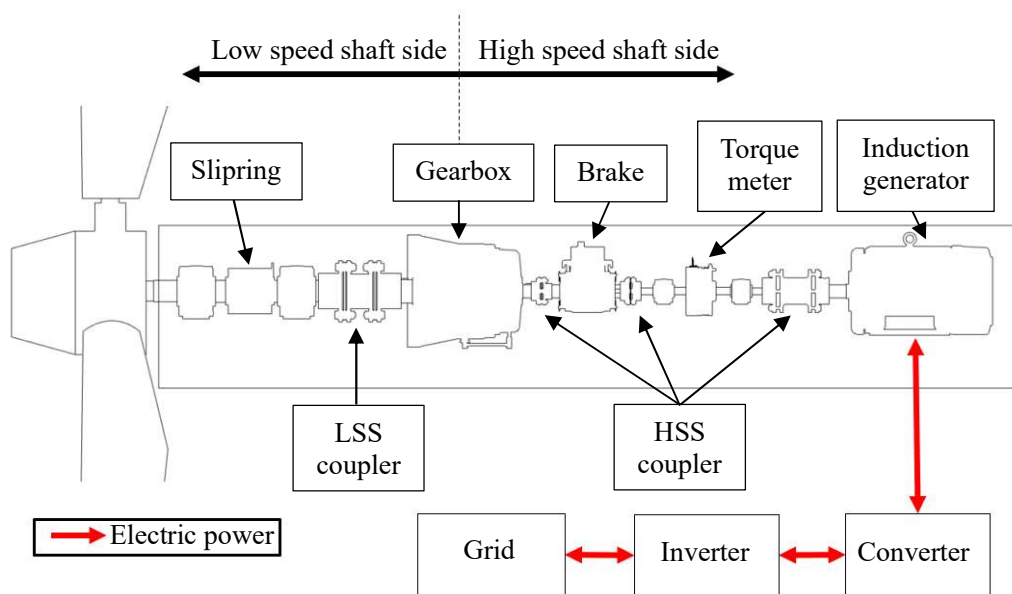
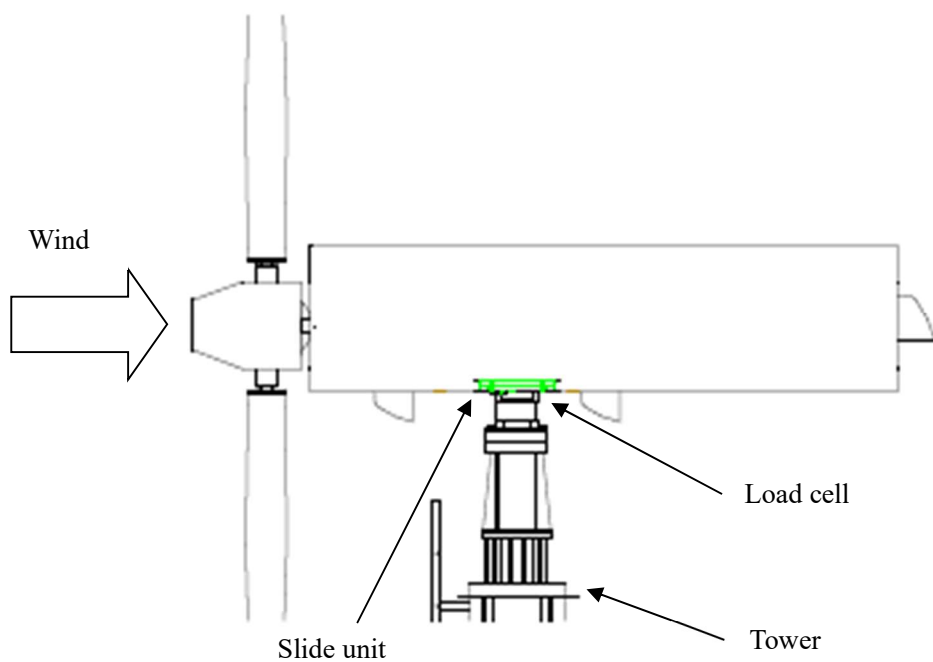


図 3.8 供試風車駆動系

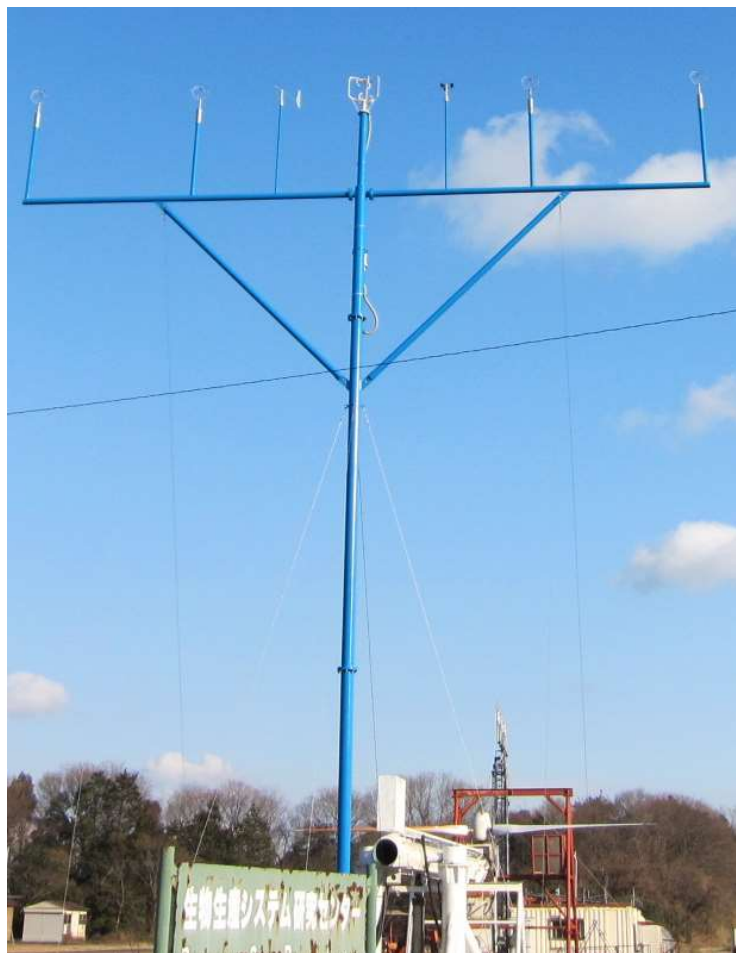


(a)ロータ推力測定装置概略

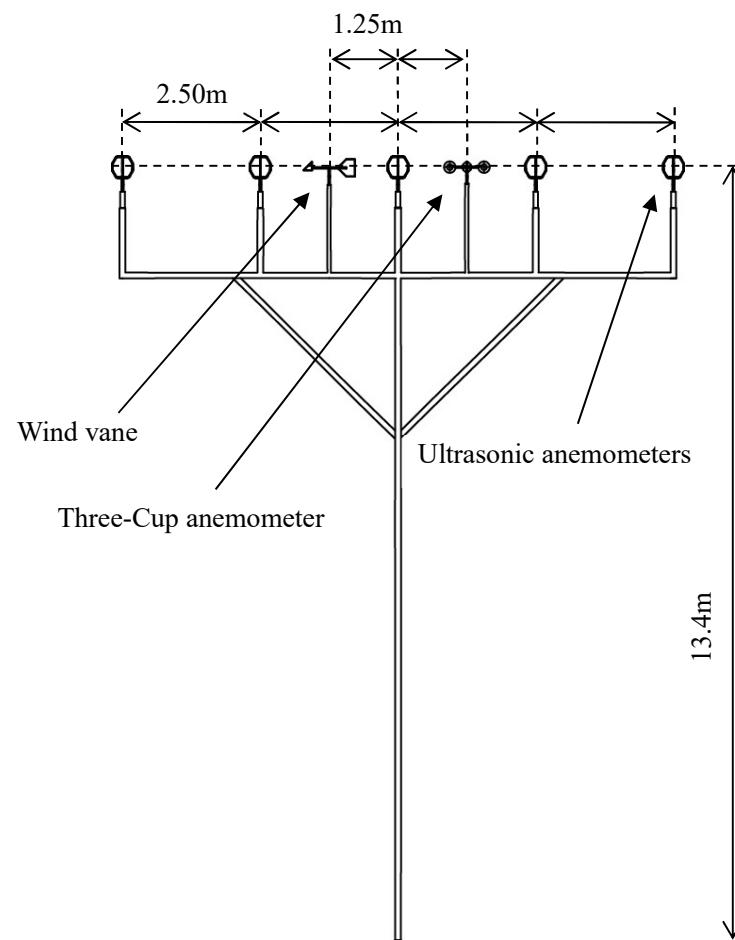


(b)ロータ推力測定装置の下面写真

図 3.9 ロータ推力測定装置



(a)全体写真



(b)模式図

図 3.10 基準風速測定マストの全体写真および模式図

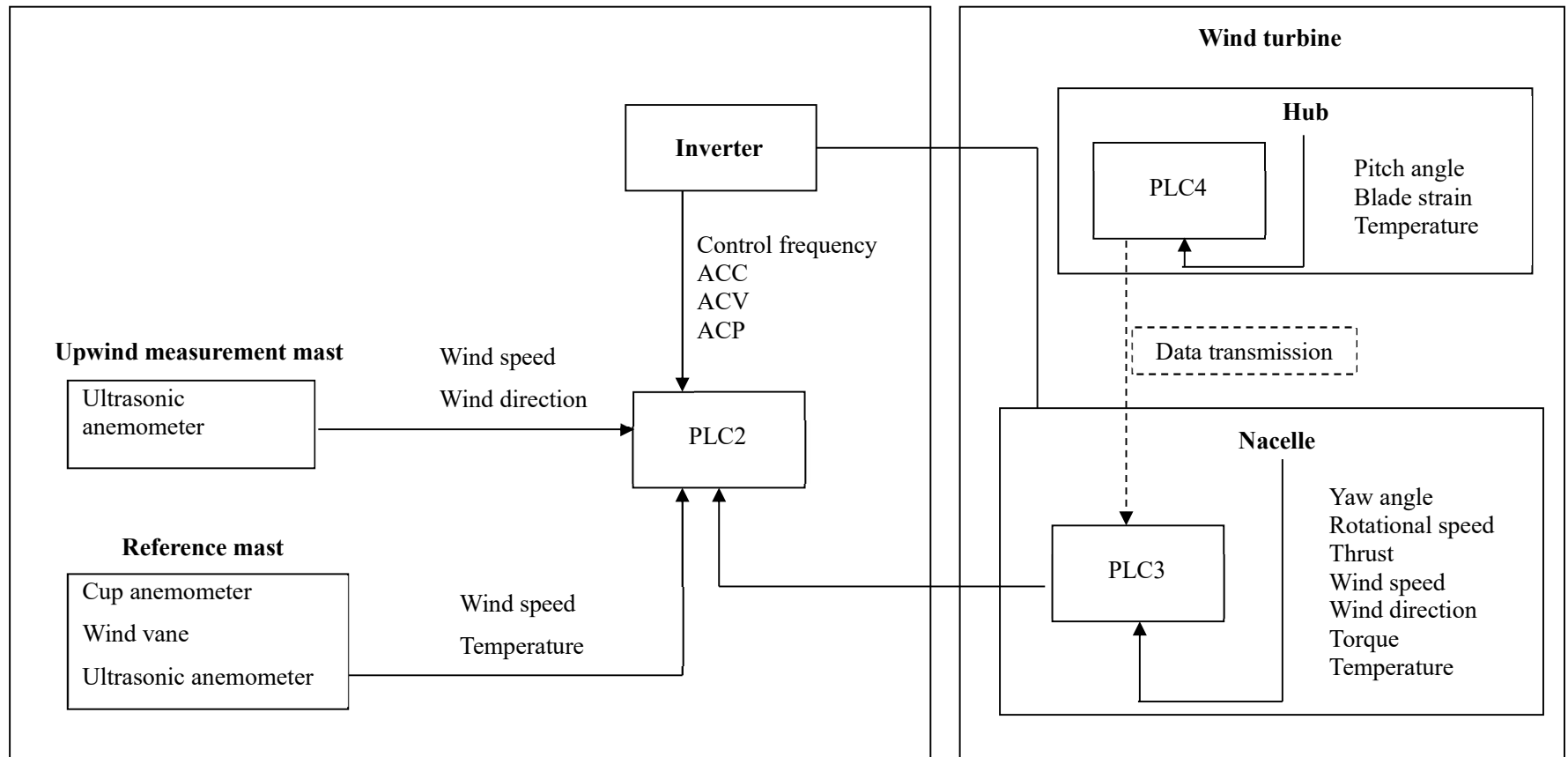


図 3.11 測定信号系統図

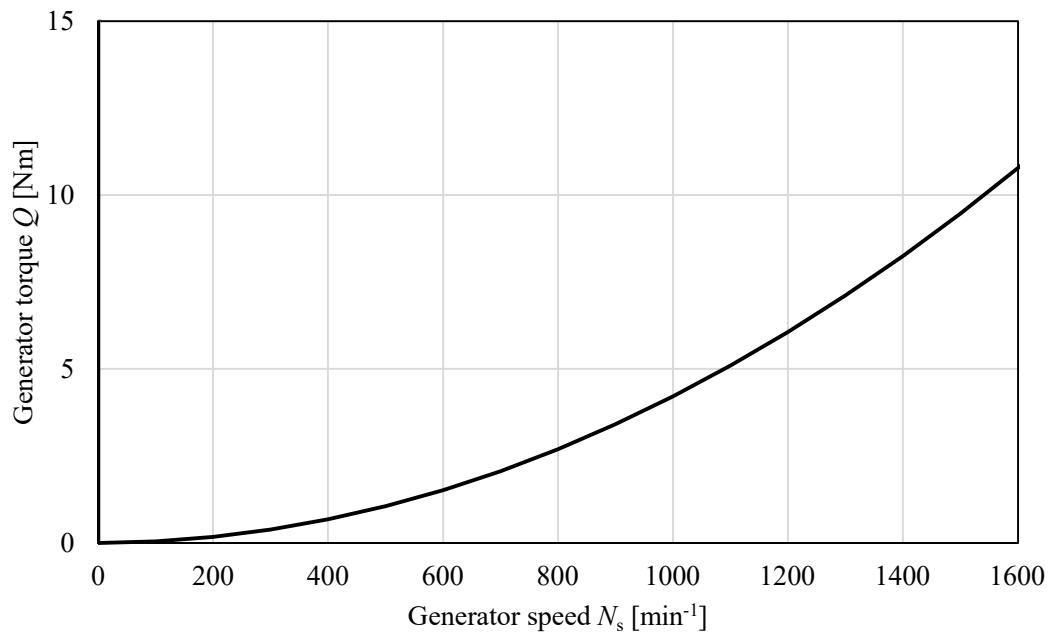


図 3.12 37kW 風車における理想的な発電機回転数と吸収トルクの関係

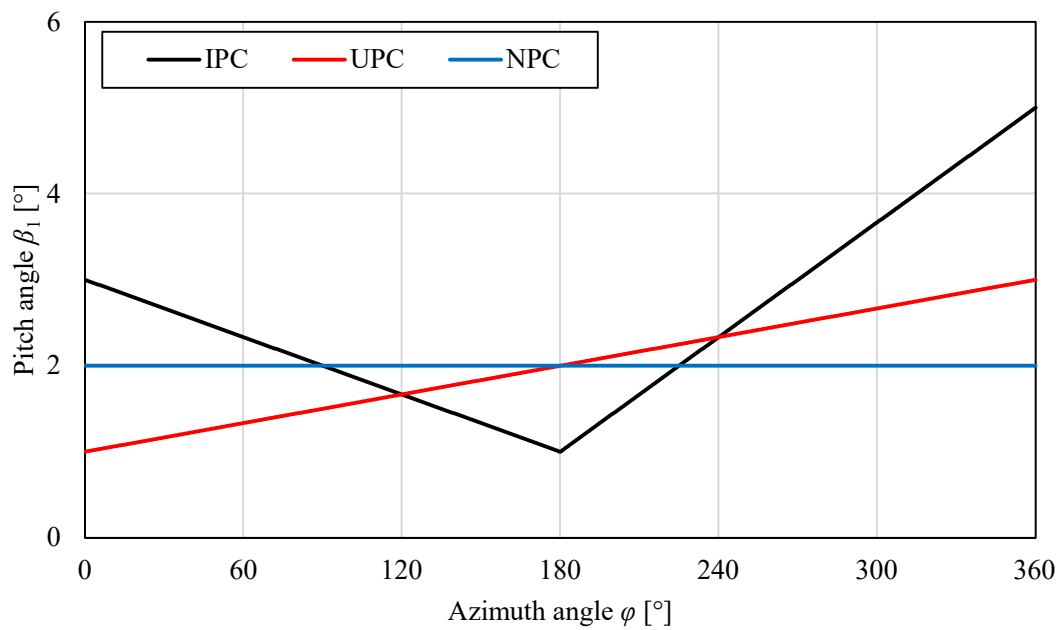


図 3.13 各ピッチ制御における翼 1 の指令値の模式図

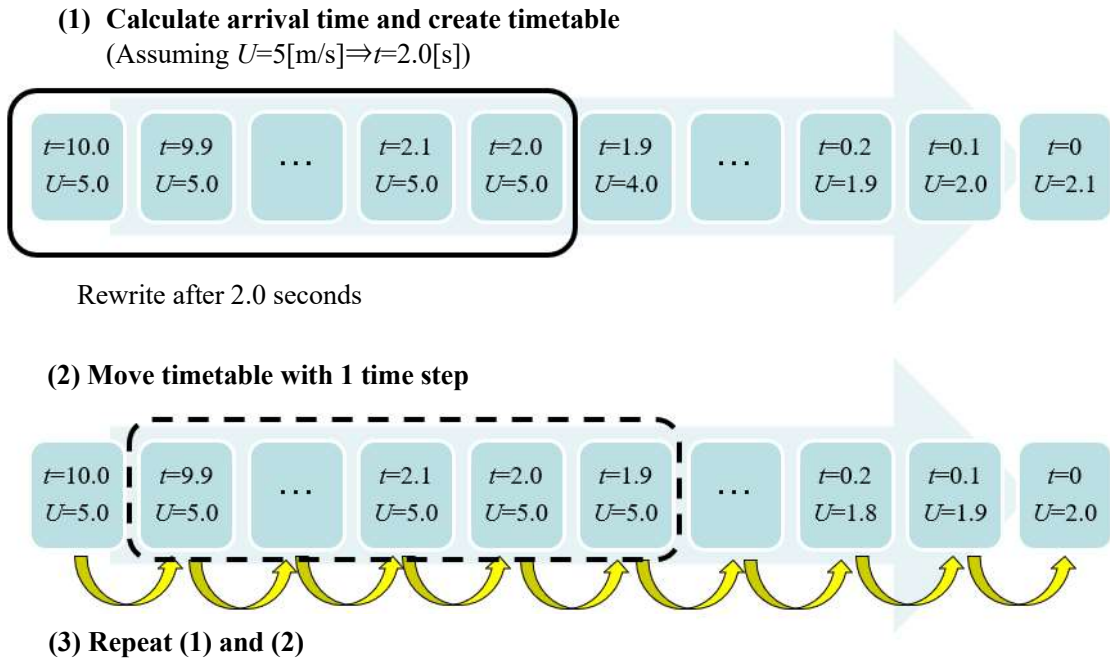


図 3.14 タイムテーブルのイメージ

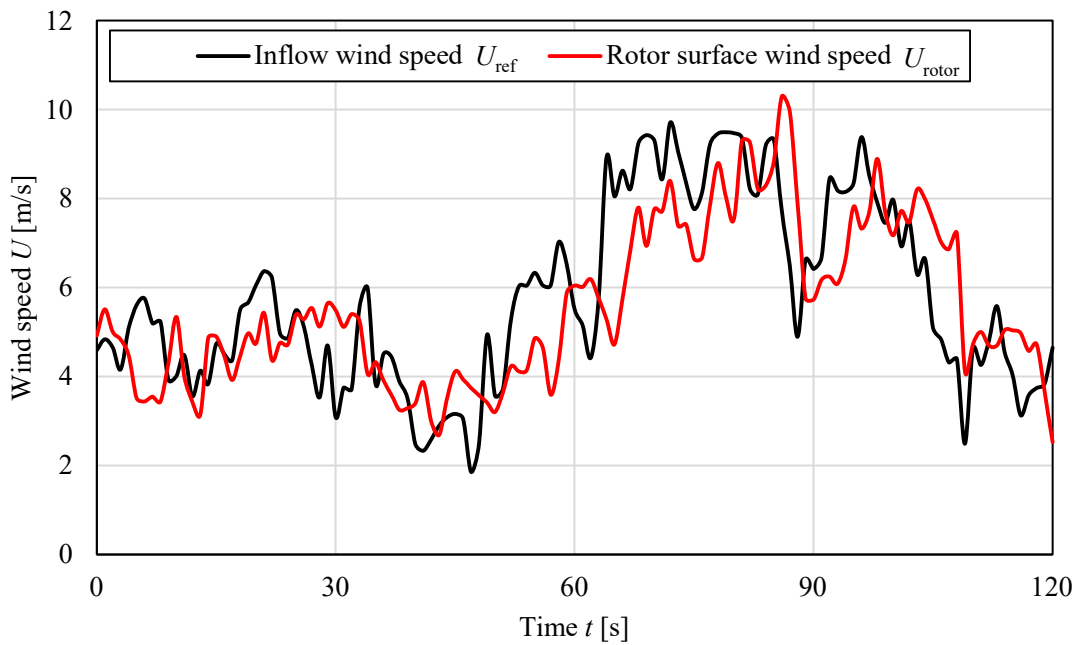


図 3.15 時間補正前後の風速の時系列データ

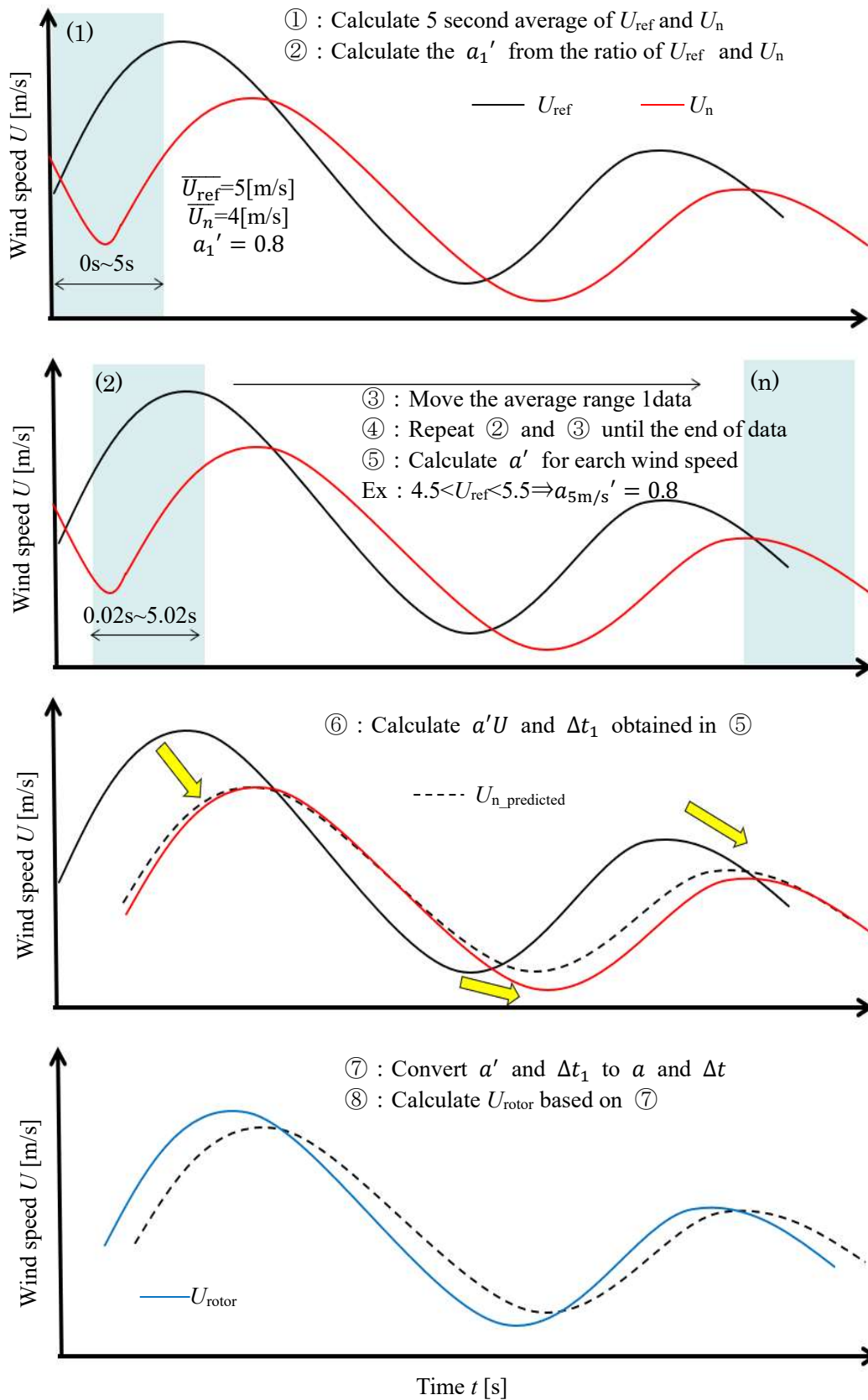
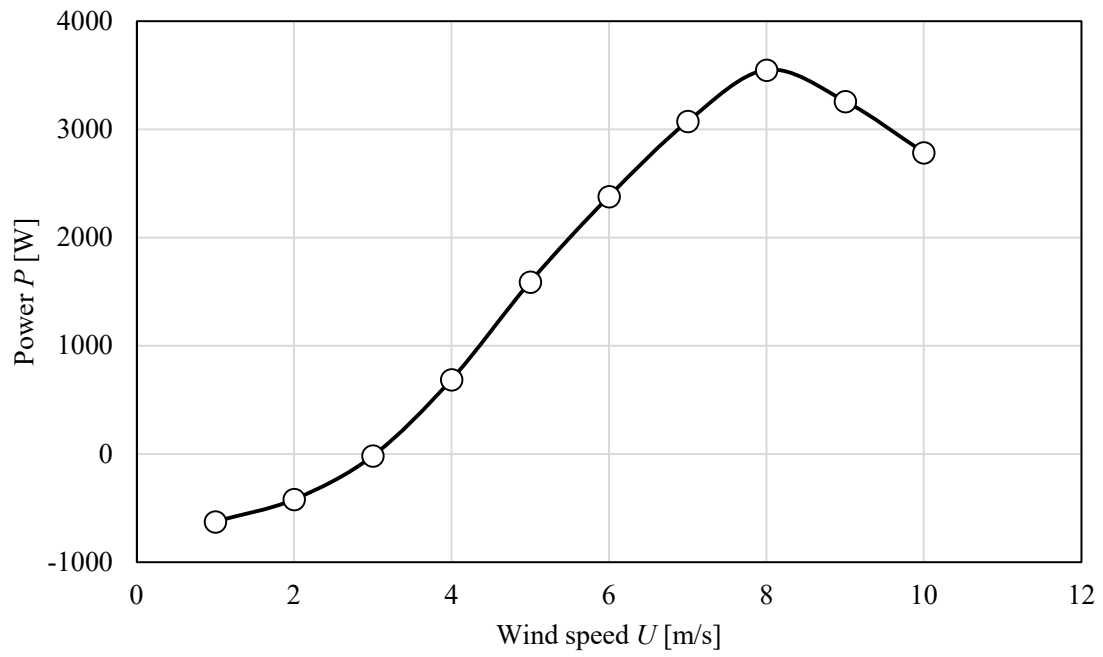


図 3.16 誘導速度を考慮した手法の模式図



図 3.17 回転数  $50\text{min}^{-1}$  で定速運転した際のパワーカーブ

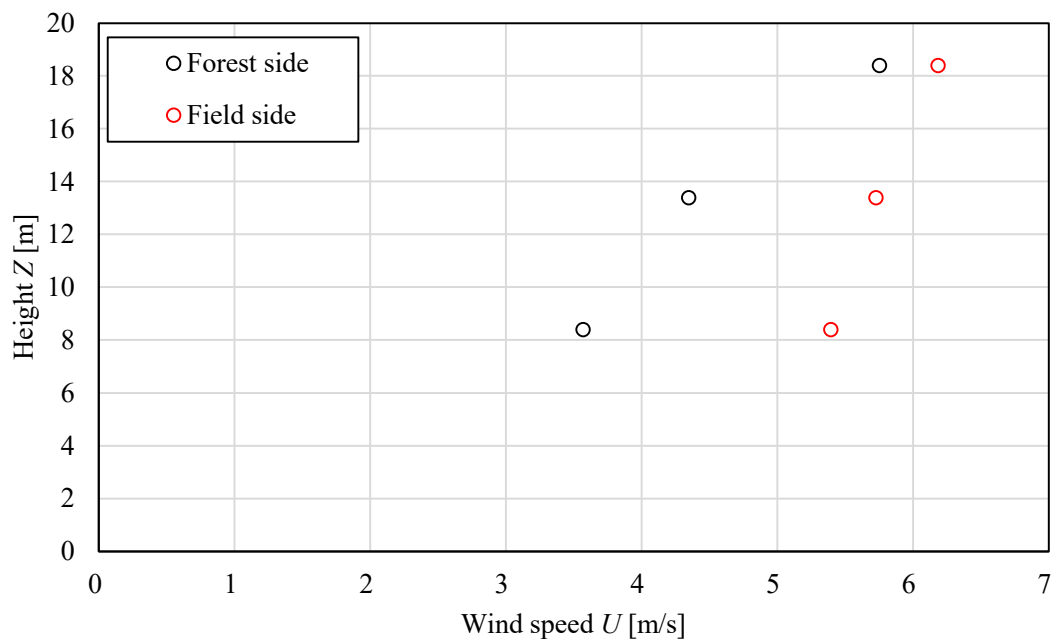


図 3.18 鉛直方向の風速分布( $x/D=-1.0$ ,  $y/R=0$ )

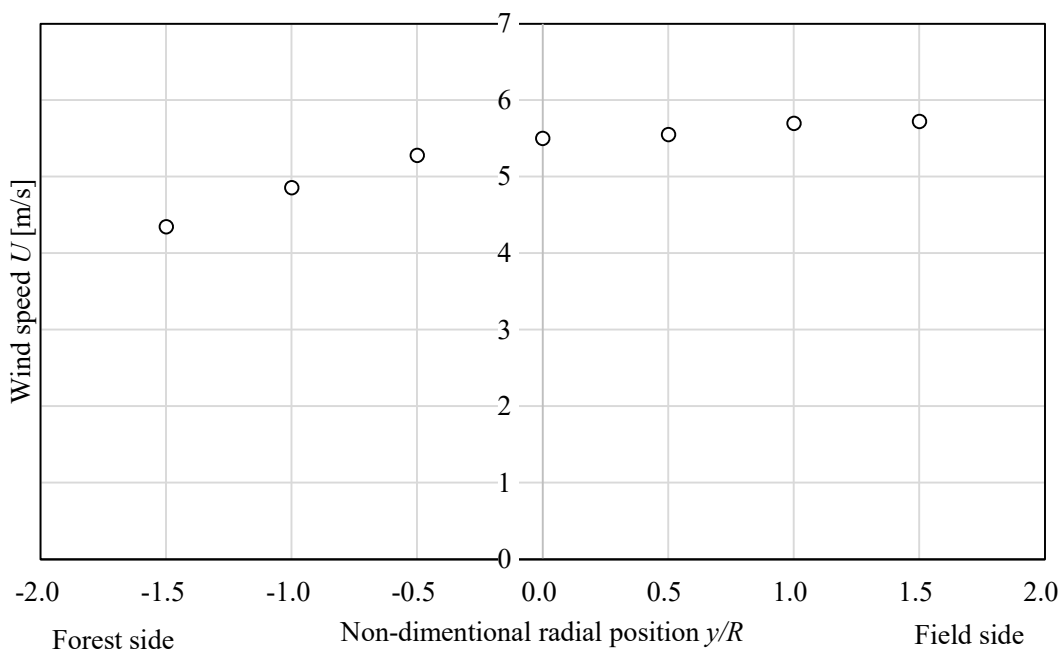


図 3.19 水平方向の風速分布( $x/D=-1.0$ ,  $z/R=0$ )

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

### 4.1 定速運転における独立ピッチ制御効果の検証

本研究にて、出力の最大化および推力の変動抑制を図るべく独立ピッチ制御を構築した。そして、それらの制御を供試風車に実装し、実証試験を行った。固定回転数制御時による制御効果は2020年10月1日から2021年1月20日に行った実証試験で明らかにした。またロータ面への流入風速を予測する手法は単純時間平均手法を用いた。

#### 4.1.1 実験条件

独立ピッチ制御を評価するための実験には3章に記載の測定装置により計測された実験データを用いる。評価対象のデータは、ナセル方位  $303^\circ$ 、10分間ベクトル平均風向範囲  $303 \pm 10^\circ$ 、一定回転数  $N=50[\text{min}^{-1}]$  で取得されたデータとした。データの平均化時間はサンプリング周波数  $50\text{Hz}$  で計測されたものを1秒平均してデータ整理を行った。また、独立ピッチ制御効果の検証に用いたデータは各ピッチ制御それぞれで、ハブ高さにおける平均風速  $\bar{U}_{\text{hub}}=5.1[\text{m/s}]$ 、風速標準偏差  $\sigma_{U_{\text{hub}}}=1.8[\text{m/s}]$  で同じ風条件のデータを比較している。また論文に記載したデータ以外についても、10分間の比較データ2個で同様の傾向が見られている。

#### 4.1.2 時系列データによる評価

図4.1(a)に独立ピッチ制御における翼1のピッチ角と風速の10分間時系列データを示す。図4.1(a)は、横軸に時間  $t[\text{s}]$ 、第一縦軸に風速  $U[\text{m/s}]$ 、第2縦軸に翼1のピッチ角  $\beta_1[^\circ]$  をとる。また、風速は1秒平均してデータ整理を行った。ピッチ制御はそれぞれの翼に対し1回転中にアジマス角  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  の2回行われる。図4.1(a)よりピッチ角は、ロータ面風速に応じたピッチ角を送信しているため、風速の変動と同様の変動を示す。したがって本提案のシステムよりピッチ角変更が可能であり、風速変動に追従した制御の妥当性を確認できた。図4.1(b)にピッチ角変化の10分間時系列データを示す。図は横軸に時間  $t[\text{s}]$ 、縦軸に3翼のピッチ角  $\beta[^\circ]$  をとる。黒線は翼1のピッチ角  $\beta_1$ 、赤線は翼2のピッチ角  $\beta_2$ 、青線は翼3のピッチ角  $\beta_3$  を表している。

図4.1(b)より3本の翼がそれぞれ独立に制御ができていることが分かる。

また図4.2に定速運転時における各ピッチ制御のアジマス角と迎角の関係を示す。図4.2は、横軸にアジマス角  $\varphi[^\circ]$ 、縦軸に翼80%位置における迎角  $\alpha[^\circ]$  をとる。またデータはBIN法によりアジマス角ごとに分類して平均した。このときのBIN法のアジマス角幅は  $30^\circ$  とした。黒が独立ピッチ制御時(IPC)のデータ、赤が同時ピッチ制御時(UPC)のデータ、青がピッチ固定時(NPC)のデータとなっている。また図における迎角はロータ回転数とピッチ角、ロータ面風速の関係から翼80%位置における迎角を算出した。

図の作成に用いた迎角の算出式を式(4.1)に示す。

$$\alpha_{0.8} = \tan^{-1} \left( \frac{U_{0.8}}{0.8R\omega} \right) - \theta_{T0.8} - \beta \quad (4.1)$$

図 4.2 より独立ピッチ制御(IPC)と同時ピッチ制御(UPC)では翼 80% 位置の迎角を最適迎角付近に維持することができていることが分かる。

#### 4.1.2.1 出力変動抑制効果の検証

出力変動抑制効果を検証するため独立ピッチ制御と同時ピッチ制御、ピッチ固定時の出力変動の比較を行った。ピッチ固定時では実験用風車における最適ピッチ角  $2^\circ$  を指令している。図 4.3 は(a)独立ピッチ制御、(b)同時ピッチ制御、(c)ピッチ固定時における風速と風車出力の 10 分間時系列データとなっている。図は横軸に時間  $t[s]$ 、第一縦軸に風速  $U[m/s]$ 、第二縦軸に出力  $\bar{P}[W]$  をとる。黒線は風速、赤線は出力を表している。また図 4.4 は図 4.3 における平均出力  $\bar{P}$  と出力の標準偏差  $\sigma_p$ 、単位出力あたりの出力標準偏差  $\sigma_p/\bar{P}$  を示す。左側は独立ピッチ制御時のデータ、中央は同時ピッチ制御時のデータ、右側はピッチ固定時のデータを示している。また黒のデータは平均出力  $\bar{P}$ 、赤のデータは出力の標準偏差  $\sigma_p$ 、青のデータは単位出力あたりの出力標準偏差  $\sigma_p/\bar{P}$  となっている。グラフの第一縦軸は出力の平均値  $P$  と標準偏差  $\sigma_p$ 、第二縦軸は単位出力あたりの出力標準偏差  $\sigma_p/\bar{P}$  となっている。

初めに各制御が風車平均出力  $\bar{P}$  に与える影響を確認する。図 4.4 より独立ピッチ制御(IPC)はピッチ固定時(NPC)と比較して平均出力が増大していることが分かる。また独立ピッチ制御は同時ピッチ制御(UPC)と比較しても平均出力が増大している。以上の結果より、定速運転においてはピッチ制御により風車出力を向上させることが可能であると言える。定速運転における独立ピッチ制御が平均出力に及ぼす効果に関しては 4.1.3.1 項にて考察する。

次に各制御が出力変動  $\sigma_p$  に与える影響を確認する。図 4.4 より独立ピッチ制御における出力標準偏差はピッチ固定時と比較して増加していることが分かる。これは独立ピッチ制御では出力最適化のために高風速時に翼ピッチ角を増加させることで迎角を低下させ、迎角の増加に伴う出力の低下を抑制させたためである。とくにピッチ固定時では図 4.3(c)の  $t=150$  から  $250[s]$  の風速  $6m/s$  を超える領域においては出力が  $3000W$  前後の値を取ることが多いことに対して、独立ピッチ制御では図 4.3(a)の  $t=400$  から  $500[s]$  における風速  $6m/s$  を超える領域において  $3000W$  から  $6000W$  の高出力を得ていることからこの違いが確認できる。また独立ピッチ制御時における出力標準偏差は同時ピッチ制御と比較して増加していることが分かる。これは独立ピッチ制御では翼 3 本それぞれで出力を最適化できているため、同時ピッチ制御と比較して平均出力が増加し出力の変動幅が広がったと考える。

また単位出力あたりの出力標準偏差  $\sigma_p/\bar{P}$  について考察を行う。図 4.4 より独立ピッチ制御において単位出力あたりの出力標準偏差は、ピッチ固定時や同時ピッチ制御と比較して低下していることが分かる。そのため独立ピッチ制御では平均出力の増加にともない、出力標準偏差も増加するが、単位出力あたりの出力標準偏差は低下することから、独立ピッチ制御

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

は出力変動抑制効果があるといえる。

次に定速運転時における出力に関して流体力学的に考察する。風力発電における風車出力は次の式で表される。

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (4.1)$$

本研究ではピッチ制御により出力係数 $C_p$ を最大出力係数に維持することを目的とした。そのため今回開発した独立ピッチ制御や同時ピッチ制御はピッチ固定時と同様に風速の3乗に比例して出力が増大する。一方で独立ピッチ制御と同時ピッチ制御では、図4.2のように迎角を最適迎角に維持することで出力係数を最大値に保持でき、ピッチ固定時と比べて出力増大効果が得られた。またピッチ固定時では高風速にて迎角が過大となり出力係数が低下、低風速時に迎角が過少となり出力係数が低下するため、独立ピッチ制御、同時ピッチ制御と比較して出力変動が低下したと考えられる。

以上の結果より独立ピッチ制御では出力増大効果があるとともに、単位出力当たりの出力標準偏差を抑制でき、出力変動抑制効果があることを示せた。

### 4.1.2.2 推力変動抑制効果の検証

推力変動抑制効果検証においても、独立ピッチ制御と同時ピッチ制御、ピッチ固定時の出力変動の比較を行った。図4.5は(a)独立ピッチ制御、(b)同時ピッチ制御、(c)ピッチ固定時における風速と風車推力の10分間時系列データである。図は横軸に時間 $t$ [s]、第一縦軸に風速 $U$ [m/s]、第二縦軸に推力 $\bar{T}$ [N]をとる。黒線は風速、青線は推力を表している。また図4.6は図4.5における平均推力 $\bar{T}$ と推力の標準偏差 $\sigma_T$ および単位推力あたりの推力標準偏差 $\sigma_T/\bar{T}$ を示す。また黒のデータは平均推力 $\bar{T}$ 、赤のデータは推力の標準偏差 $\sigma_T$ 、青のデータは単位推力あたりの推力の標準偏差 $\sigma_T/\bar{T}$ となっている。グラフの第一縦軸は推力の平均値 $T$ と標準偏差 $\sigma_T$ 、第二縦軸は単位推力あたりの推力標準偏差 $\sigma_T/\bar{T}$ となっている。

初めに各制御が風車平均推力に与える影響を確認する。図4.6より独立ピッチ制御(IPC)はピッチ固定時(NPC)と比較して平均推力が減少していることが分かる。また独立ピッチ制御は同時ピッチ制御(UPC)と比較すると平均推力が減少していることが分かる。定速運転における独立ピッチ制御が平均推力に及ぼす効果に関しては4.1.3.2項の散布図にて考察する。

次に各制御が推力変動に与える影響を確認する。図4.6より独立ピッチ制御における推力標準偏差 $\sigma_T$ はピッチ固定時と比較して抑制できていることが分かる。これはピッチ固定時では高風速時に推力が大きく増加するのに対して、独立ピッチ制御や同時ピッチ制御時では流入風観測支援制御により迎角を低下させたことで、推力の増加を抑制させたためである。これはピッチ固定時では図4.5(c)の $t=200$ から $250$ [s]の風速 $9\text{m}$ 以上の風速において推力が $1000\text{N}$ 以上の大きな荷重を受けているのに対し、独立ピッチ制御時では図4.5(a)の $t=400$ から $500$ [s]において $1000\text{N}$ を超える推力があまり存在しないことから分かる。

また独立ピッチ制御時における推力標準偏差は同時ピッチ制御と比較しても低減できて

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

いることが分かる。これは低風速域において、ロータ 1 回転中で最も風速が低下する傾向があるアジマス角 180°における迎角が向上したことにより、推力の空間的変動を抑制できたためであると考えられる。また高風速域においてはロータ 1 回転中で最も風速が増加するアジマス角 0° の時、迎角値を独立ピッチ制御により抑制したため、推力の最大値が低下したと考えられる。以上の結果より独立ピッチ制御は風車流入風の鉛直分布に対応できたため、推力の変動を抑制できたことが分かる。

次に定速運転時における推力に関して流体力学的に考察する。風力発電における風車推力は次の式で表される。

$$T = \frac{1}{2} C_T \rho A U^2 \quad (4.2)$$

本研究ではピッチ制御により推力変動を抑制するため、推力係数 $C_T$ を一定に維持することを目的とした。そのためピッチ固定時では高迎角時に推力係数が増加し、低迎角時に推力係数が低下した一方で、独立ピッチ制御と同時ピッチ制御では推力係数の変動を抑制したために、推力変動抑制効果が得られたと考える。しかし現在のピッチ制御において、推力は風速の 2 乗に比例して増加する。そのためさらなる推力変動抑制のためには、高風速時は迎角を最適迎角より低下させることで推力の最大値をさらに低下させ、低風速時は最適迎角より迎角を過大にすることにより推力を向上させる必要がある。

以上の結果から独立ピッチ制御は推力変動抑制効果があることを示せた。

### 4.1.3 統計データによる評価

独立ピッチ制御が風車出力や風車推力に与える影響を評価するため、測定で得られたデータを統計的に評価を行う。評価対象のデータは、ナセル方位 303°、10 秒間ベクトル平均風向範囲 303±10°、一定回転数  $N=50[\text{min}^{-1}]$  で取得されたデータとした。データの平均化時間はサンプリング周波数 50Hz で計測されたものを 10 秒平均化してデータ整理を行った。

4.1.3.1 項から 4.1.3.3 項は抽出されたデータを BIN 法により風速ごとに分類して平均した。このときの BIN 法の風速幅は 1.0m/s とした。BIN データごとのデータ数は以下のようになっている。

表 4.1 定速運転における風速 BIN ごとのデータ点数

風速 BIN		3	4	5	6
10s データの 個数	IPC	165	245	224	168
	UPC	295	360	285	268
	NPC	221	266	208	141
風速 BIN		7	8	9	10
10s データの 個数	IPC	106	68	35	9
	UPC	165	87	41	15
	NPC	88	56	22	4

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

## 4.1.3.1 風車出力

各ピッチ制御における出力性能を比較するために、初めに風速と出力の関係を比較する。図4.7はBIN平均されたピッチ制御ごとの風速と出力の関係である。図4.7の横軸は風速 $U$ 、縦軸は出力 $P$ となっている。また黒が独立ピッチ制御時(IPC)のデータ、赤が同時ピッチ制御時(UPC)のデータ、青がピッチ固定時(NPC)のデータとなっている。図4.7より独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して風速3m/s以上の風速で出力が増加する傾向があることが分かる。これはピッチ固定時では高風速時に迎角が過大となったことで、翼性能が低下したことに対して独立ピッチ制御では迎角を低下させることで翼の出力性能を最適状態に維持したためであると考ええる。

次に同時ピッチ制御と比較した、独立ピッチ制御の出力性能の評価を行う。図4.7より独立ピッチ制御は同時ピッチ制御と比較して、5m/s以上の風速で出力が増加していることが分かる。また出力差は風速が増加するにしたがい広がる傾向があることが分かる。これは風車出力が風速の3乗に比例して増加するため、ロータ1回転中の出力を最適化した独立ピッチ制御の方が同時ピッチ制御と比較して出力の増加が大きくなったと考える。

以上の結果より、独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、高風速時において出力増大効果が得られていることを示せた。

## 4.1.3.2 風車推力

各ピッチ制御における推力性能を比較するために、風速と推力の相関を比較する。図4.8はBIN平均されたピッチ制御ごとの風速 $U$ と推力 $T$ の関係である。図4.8の横軸は風速 $U$ 、縦軸は推力 $T$ となっている。図4.8の凡例は図4.7と同様となっている。

図4.8より、独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して5m/s以上の風速で推力が減少することが分かる。これはピッチ固定時では高風速時に迎角が過大となり翼の抗力が過大となったのに対して、独立ピッチ制御では最適な迎角を維持することで迎角増加に伴う抗力の増加を抑制出来たためであると考ええる。一方で風速4m/s以下の場合では、独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して推力が増加する傾向があることも分かる。これは独立ピッチ制御において出力最適化のために迎角を増加させたことにより推力が増加したためであると考ええる。

また独立ピッチ制御は同時ピッチ制御と比較すると、全ての風速域において推力を抑制できていることが分かる。これは前述したように、独立ピッチ制御は風速の高いロータ面上側において推力の抑制が出来たためである。ここで独立ピッチ制御はピッチ固定時の比較と同様に、同時ピッチ制御と比較しても風速の低いロータ面下側にて推力が増加していることが考えられる。しかし推力は風速の2乗に比例して増加するため、風速の低いロータ面下側にて迎角を増加させたことによる推力増加よりも、風速の高いロータ面上側にて推力を抑制した効果の方が大きく結果として表れたと考える。

以上の結果より、独立ピッチ制御は高風速時においてピッチ固定時・同時ピッチ制御と比

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

較して推力抑制効果が得られることを示せた。

## 4.1.3.3 単位推力あたりの出力

単位推力あたりの出力を評価することで、風車設計時の荷重低減による発電量の低下を想定した運転動作の効率性を評価した。図 4.9 は BIN 平均されたピッチ制御ごとの風速  $U$  と単位推力あたりの出力  $P/T$  の関係である。図 4.9 の横軸は風速、縦軸は単位推力あたりの出力となっている。また図 4.9 の凡例の黒の点線(Optimal)は出力係数を最大とする理論上の最適値であり、誘導速度係数  $a = \frac{1}{3}$  とした時の風速  $U$  と単位推力あたりの出力  $P/T$  の関係である。ここで風速  $U$  と単位推力あたりの出力  $P/T$  の関係は式(4.1)と式(4.2)から式(4.3)が導出される。

$$\frac{P}{T} = \frac{C_P}{C_T} U \quad (4.3)$$

ここで出力係数  $C_P$  と推力係数  $C_T$  は誘導速度係数  $a$  を用いて式(4.4)と式(4.5)のように表される。

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad (4.4)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (4.5)$$

式(4.3)から式(4.5)より風速  $U$  と単位推力あたりの出力  $P/T$  の関係は誘導速度係数を用いて式(4.6)で表せる。

$$\frac{P}{T} = (1 - a)U \quad (4.6)$$

図 4.9 より、独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して 5m/s 以上の風速で推力に対する出力が増加しており、運転性能が向上していることが分かる。これは定速運転では回転数に対して過大な風速が出現した際に、ピッチ固定時では迎角が過大となり出力が低下したのに加えて、推力が増加したためである。一方で 5m/s 未満の風速では独立ピッチ制御もピッチ固定時も出力がほぼ同様であるのに対して、独立ピッチ制御では推力が増大したためである。以上の結果より独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して高風速においては、商業用風車でも効率の良い運転が可能である一方で、低風速時では平均推力が増加したことにより推力に対する出力の性能が低下することが分かる。

次に独立ピッチ制御と同時ピッチ制御の比較を行う。図 4.9 より独立ピッチ制御は 4m/s 以上の風速域にて、同時ピッチ制御より効率のよい運転が出来ていると考えられる。これは流入風の鉛直分布に対応が出来る独立ピッチ制御では、ハブ高さより風速の大きいロータ面上側においても最適な迎角が維持できたことにより、出力損失を減らしつつ迎角増加に



## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

伴う過大な推力を抑制できたためであると考えられる。

次に各制御における単位推力当たりの出力と理論上の最適値の関係を考察する。図 4.9 より単位推力当たりの出力は、独立ピッチ制御と同時ピッチ制御では風速が増加するに従って最適値に接近する傾向があることが分かる。そのため式(4.6)より独立ピッチ制御と同時ピッチ制御では風速が増加するに従い誘導速度係数 $a$ が低下していると考えられる。一方でピッチ固定時では風速 6m/s 以上にて、風速が増加するに従い最適値との差が広がる傾向があることが分かる。これよりピッチ固定時では風速が高い高迎角時に失速が生じたことで、誘導速度係数が増加したと考えられる。

以上の結果より独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して少ない推力で大きな出力が得られているため、風車の荷重設計について有利であり、効率のよい運転ができていたことを示せた。

### 4.2 可変速運転における独立ピッチ制御効果の検証

商業用風車はカットイン風速から定格風速までの風速範囲では最適ピッチ角に固定して、部分負荷運転を行う。本研究では、可変速運転時（部分負荷運転領域）にて、発電出力の増加および推力変動低減を図るべく作成したピッチ制御をトルク制御に適応した。そして、それらの制御を供試風車に実装し、実証試験を行った。可変速運転時における独立ピッチ制御の効果検証は 2020 年 12 月 8 日から 2020 年 12 月 20 日に行った実証試験で明らかにした。

#### 4.2.1 実験条件

評価対象のデータは、可変速運転時におけるデータのみを評価するため、実験で計測された全データをロータ回転数  $N=30[\text{min}^{-1}]$  から  $N=60[\text{min}^{-1}]$  でフィルタリングした後にデータ整理を実施した。比較に用いたデータは、ナセル方位  $303^\circ$ 、10 分間ベクトル平均風向範囲  $303\pm 5^\circ$ 、可変速回転数  $N=30[\text{min}^{-1}]$  から  $N=60[\text{min}^{-1}]$  で取得されたデータとした。データの平均化時間はサンプリング周波数 50Hz で計測されたものを 1 秒平均してデータ整理を行った。また比較した時系列データはハブ高さにおける平均風速  $\bar{U}_{\text{hub}}=4.2[\text{m/s}]$ 、風速標準偏差  $\sigma_{U_{\text{hub}}}=0.9[\text{m/s}]$  となっている。データの平均時間は定速運転時と同様 1 秒となっている。また論文に記載したデータ以外についても、10 分間の比較データ 3 個で同様の傾向が見られている。

#### 4.2.2 時系列データによる評価

##### 4.2.2.1 回転数変動抑制効果の検証

まず独立ピッチ制御がロータ回転数に与える影響を考察する。図 4.10 は(a)独立ピッチ制御、(b)同時ピッチ制御、(c)ピッチ固定時における風速とロータ回転数の 10 分間時系列データである。図 4.10 は横軸に時間  $t[\text{s}]$ 、第一縦軸に風速  $U[\text{m/s}]$ 、第二縦軸にロータ回転数  $N[\text{min}^{-1}]$  をとる。黒線は風速  $U$ 、緑線はロータ回転数  $N$  を表している。図 4.10(a), (b)より、本

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

来ピッチ制御を必要としない部分負荷運転領域においてピッチ制御を行っても、ロータ慣性により急激な回転数低下等の悪影響を与えないことが分かる。また図 4.11 は図 4.10 の時刻における平均ロータ回転数 $\bar{N}$ と回転数の標準偏差 $\sigma_N$ 、単位回転数当たりの回転数の標準偏差 $\sigma_N/\bar{N}$ を示す。グラフの第一縦軸はロータ回転数の平均値 $\bar{N}$ と標準偏差 $\sigma_N$ 、第二縦軸は平均回転数当たりの回転数標準偏差 $\sigma_N/\bar{N}$ となっている。図 4.11 より独立ピッチ制御はピッチ固定時、同時ピッチ制御と比較して高い平均回転数を取り、回転数変動も小さいことが分かる。これより独立ピッチ制御は他制御より効率よく流入風からトルクを得られていることが分かる。

以上の結果より、独立ピッチ制御は固定ピッチ時・同時ピッチ制御と比較して平均回転数が上昇しているため、効率よくトルクが得られていることが示せた。

### 4.2.2.2 出力変動抑制効果の検証

次に独立ピッチ制御が可変速運転時に出力変動に及ぼす影響を確認するため、各制御における出力変動の比較を行った。図 4.12 は(a)独立ピッチ制御、(b)同時ピッチ制御、(c)ピッチ固定時における風速 $U$ と風車出力 $\bar{P}$ の10分間時系列データとなっている。図 4.12 は横軸に時間 $t[s]$ 、第一縦軸に風速 $U[m/s]$ 、第二縦軸に出力 $\bar{P}$  [W]をとる。黒線は風速、赤線は出力を表している。また図 4.13 は図 4.12 の時刻における平均出力 $\bar{P}$ と出力の標準偏差 $\sigma_P$ 、単位出力あたりの出力標準偏差 $\sigma_P/\bar{P}$ を示す。

まず平均出力に関して考察を行う。図 4.13 より独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して平均出力が増加していることが分かる。これは時系列グラフを確認すると、ピッチ固定時と同時ピッチ制御では $3m/s$ 付近の低風速時において $0W$ から $1000W$ 未満の範囲で出力が変動していることに対して、独立ピッチ制御においては $3m/s$ 付近の低風速時でも $1000W$ 前後の高い水準で出力が変動しているため、平均出力が増大したと考えられる。また平均出力に関する詳しい考察は後述の4.2.3.2項の散布図で行う。

次に出力変動に関して考察を行う。図 4.13 より独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して出力変動が増加していることが分かる。しかしこの結果は平均出力が増加したことにも起因している。また独立ピッチ制御は同時ピッチ制御と比較しても出力変動が増加していることが分かる。これは時系列データを参照すると、独立ピッチ制御では同時ピッチ制御と比較して風速 $6m/s$ 以上の時に出力が $4000W$ 付近まで急激に増加することが多いため、出力変動が増加したと考えられる。

次に単位出力あたりの出力標準偏差の考察を行う。図 4.13 より独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して単位出力あたりの出力標準偏差を低減できていることが分かる。これは図 4.11 において独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して平均回転数が高く、回転数の変動が抑制されていることから、独立ピッチ制御では低風速時の出力低下量がピッチ固定時と比較して小さくなり、その結果として単位出力あたりの出力標準偏差が低下したと考える。また独立ピッチ制御は同時ピッチ制御と比較して単位出力あたりの出力標準偏差はほ

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

ば同様の値を取っていることが分かる。

以上の結果より可変速運転時において、独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して単位出力あたりの出力標準偏差を抑制できていることを示せた。

### 4.2.2.3 推力変動抑制効果の検証

推力変動抑制効果の検証においても、各制御の推力変動の比較を行った。図 4.14 は(a)独立ピッチ制御、(b)同時ピッチ制御、(c)ピッチ固定時における風速  $U$  と推力  $\bar{T}$  の 10 分間時系列データとなっている。図は横軸に時間  $t[s]$ 、第一縦軸に風速  $U[m/s]$ 、第二縦軸に推力  $\bar{T}$  [N] をとる。また図 4.15 は図 4.14 の時刻における平均推力  $\bar{T}$  と推力の標準偏差  $\sigma_T$ 、単位推力あたりの推力標準偏差  $\sigma_T/\bar{T}$  を示す。

まず平均推力の考察を行う。図 4.15 より独立ピッチ制御と同時ピッチ制御はピッチ固定時と比較して低風速時において平均推力が増加していることが分かる。これは独立ピッチ制御と同時ピッチ制御では図 4.11 において平均回転数が増加したことに加えて、回転数に対して風速が小さい場合に迎角を最適化したためである。また平均推力に関する詳しい考察は後述の 4.2.3.3 項の散布図で行う。

次に推力変動に関して考察を行う。図 4.15 より同時ピッチ制御はピッチ固定時と比較して推力標準偏差が増大していることが分かる。しかしこれはピッチ制御により平均出力が増大したことに起因しており、平均推力あたりの推力標準偏差  $\sigma_T/\bar{T}$  はほぼ同等の値をとることが分かる。そのため同時ピッチ制御はピッチ固定時と比較して推力の変動率を変化させずに出力を増大させることができたことと考察できる。また独立ピッチ制御は同時ピッチ制御と比較すると推力標準偏差  $\sigma_T$  を低減できていることが分かる。これは時系列グラフを確認すると、同時ピッチ制御においては風速の変動に応じて推力が変動している一方で、独立ピッチ制御では高風速時に推力が上昇しすぎないことに加え、低風速時にも平均的な推力が上昇しているためである。以上の結果より、独立ピッチ制御は可変速運転時において平均的な推力は出力の増加に伴い増加するが、推力変動を抑制することに適していると言える。

以上の結果より独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、推力標準偏差および、単位推力あたりの推力標準偏差を抑制できたことを示せた。

### 4.2.3 統計データによる評価

独立ピッチ制御が実際の風車運転時と同じ可変速運転状態にて、風車出力や風車推力に与える影響を評価するため、測定で得られたデータを統計的に評価を行う。評価対象のデータは、ナセル方位  $303^\circ$ 、10 秒間ベクトル平均風向範囲  $303 \pm 10^\circ$ 、回転数  $30 < N < 60$  [ $\text{min}^{-1}$ ] で取得されたデータとした。データの平均化時間は 10 秒平均してデータ整理を行った。また抽出されたデータは 4.1.3 項と同様に、BIN 法により風速ごとに分類して平均する。このときの BIN 法の風速幅は  $1.0\text{m/s}$  とした。可変速運転時における BIN データごとのデータ点数は以下のようにになっている。

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

表 4.2 可変速運転制御における風速 BIN ごとのデータ点数

風速 BIN		3	4	5	6
10s データ の個数	IPC	153	228	108	42
	UPC	204	260	111	23
	NPC	109	215	108	21

## 4.2.3.1 風車トルク

各ピッチ制御におけるトルク性能を比較するために、初めに風速とトルクの関係と比較する。図 4.16(a)は BIN 平均化されたピッチ制御ごとの風速と発電機トルクの関係である。図 4.16(a)の横軸は風速  $U$ 、縦軸は発電機トルク  $Q$  となっていて、凡例は図 4.7 と同様になっている。また図 4.16(b)は図 4.16(a)を発電機回転数増速時と減速時に分けた際の風速  $U$  とトルク  $Q$  の関係である。

図 4.16(a)より独立ピッチ制御(IPC)はピッチ固定時(NPC)と比較して全ての風速にて発電機トルク増大効果があることが分かる。これはピッチ固定時において回転数に対して流入風速が高い低周速比時では、瞬間的に迎角値が高くなり翼性能が低下するが、独立ピッチ制御により回転数に応じて最適なピッチ角を維持したことで、流入風から効率良くトルクを吸収したためであると考えられる。また独立ピッチ制御では同時ピッチ制御(UPC)と比較しても発電機トルクが高くなっていることが分かる。これは独立ピッチ制御はロータ面の中でも風速が高いロータ面上側で迎角を低下させ、風速が小さいロータ面下側で迎角を向上させたことが起因していると考えられる。

次に発電機回転数増速時と減速時の比較を行う。図 4.16(b)よりいずれのピッチ制御においても、回転数増速時の発電機トルクは減速時と比較して大きくなっていることが分かる。これはトルク制御において回転数減速時は、回転数に対して流入風速が小さく周速比が大きい状態であるため、迎角が最適迎角より小さくなることで得られるトルクが減少したためである。また独立ピッチ制御時とピッチ固定時における発電機トルクの差は、発電機回転数低下時に顕著に表れることが分かる。図より独立ピッチ制御は回転数低下時においても他制御より大きなトルクを得ることができているため、図 4.11 における平均回転数増加の結果が得られたと考えられる。

以上の結果より可変速運転時において独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、同じ風速条件下にて高いトルクを得られていることを示せた。

## 4.2.3.2 風車出力

次に可変速運転時における、各ピッチ制御の出力性能を比較するために、風速と出力の関係と比較する。図 4.16(a)は BIN 平均されたピッチ制御ごとの風速  $U$  と出力  $P$  の関係である。図 4.16(a)の横軸は風速  $U$ 、縦軸は出力  $P$  となっている。また図 4.17(b)は図 4.17(a)を発

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

電機回転数増速時と減速時に分けた際の風速  $U$  と出力  $P$  の関係であり、図の凡例は図 4.16(b) と同様になっている。

図 4.17(a)より独立ピッチ制御(IPC)はピッチ固定時(NPC)と比較して全ての風速にて出力が増加していることが分かる。これは前述のトルク特性と同様の傾向を示す。独立ピッチ制御は風車が効率よくトルクをとらえたことでトルク制御により回転数が上昇し、高いトルクを高回転数でとらえることができたためこのような結果が得られたと考えられる。また独立ピッチ制御とピッチ固定時の出力差は風速が大きくなるにしたがって増加する傾向があるため、高風速時において独立ピッチ制御は適応していることが有益だと考えられる。また独立ピッチ制御は同時ピッチ制御(UPC)と比較しても大きな出力が得られていることが分かる。この結果より各翼高さで迎角を最適に保つ独立ピッチ制御の方が、より高い出力性能で風車を運転できることが分かる。

次に発電機回転数増速時と減速時の比較を行うと、図 4.17(b)と図 4.16(b)は同様の結果となることが分かる。これはトルク制御により、風車が風から吸収するトルクが増加すると回転数が増速するため同様の結果が得られたことが分かる。

以上の結果より可変速運転時において独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、同じ風速条件下にて高い出力を得られていることを示せた。

### 4.2.3.3 風車推力

次に可変速運転時における、各ピッチ制御の推力性能を比較するために、風速と推力の関係と比較する。図 4.18(a)は BIN 平均されたピッチ制御ごとの風速  $U$  と推力  $T$  の関係である。図 4.18(a)の横軸はロータ面風速  $U$ 、縦軸は推力  $T$  となっている。図 4.17(a)の凡例は図 4.7 と同様となっている。また図 4.18(b)は図 4.18(a)を発電機回転数増速時と減速時に分けた際の風速  $U$  と推力  $T$  の関係であり、図の凡例は図 4.16(b)と同様になっている。

図4.17より独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して平均推力  $T$  が増加することが分かる。また風速が増加するにしたがい、独立ピッチ制御時とピッチ固定時の推力差が小さくなっていることが分かる。この結果より独立ピッチ制御は可変速運転時においても、定速運転時と同様に高風速域にて迎角を低下させることで推力を抑制できていることが分かる。これらの結果から独立ピッチ制御は図4.14の時系列データと図4.15において推力変動抑制効果が得られたことが分かる。また独立ピッチ制御は同時ピッチ制御と比較しても推力が増加する傾向があることが分かる。これは独立ピッチ制御ではロータ1回転中の推力変動低減を目的として風速が小さくなるロータ面下側にて迎角を向上させたことにより翼の抗力が増加したためであると考えられる。

次に発電機回転数増速時と減速時の比較を行うと、図 4.18(b)より推力はピッチ固定時とピッチ制御時で異なる傾向をとっていることが分かる。ピッチ固定時には回転数増速時と減速時で風速に対する推力が近い値を取っているのに対して、独立ピッチ制御や同時ピッチ制御時には減速時に大きな推力を得ていることが分かる。これは独立ピッチ

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

チ制御と同時ピッチ制御では、回転数減速時に出力の最適化を目的として迎角を増加させたことにより推力が増加したためであると考ええる。

以上の結果より可変速運転時において独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、平均出力の増加に伴い平均推力が上昇することが分かった。

### 4.2.3.4 単位推力あたりの出力

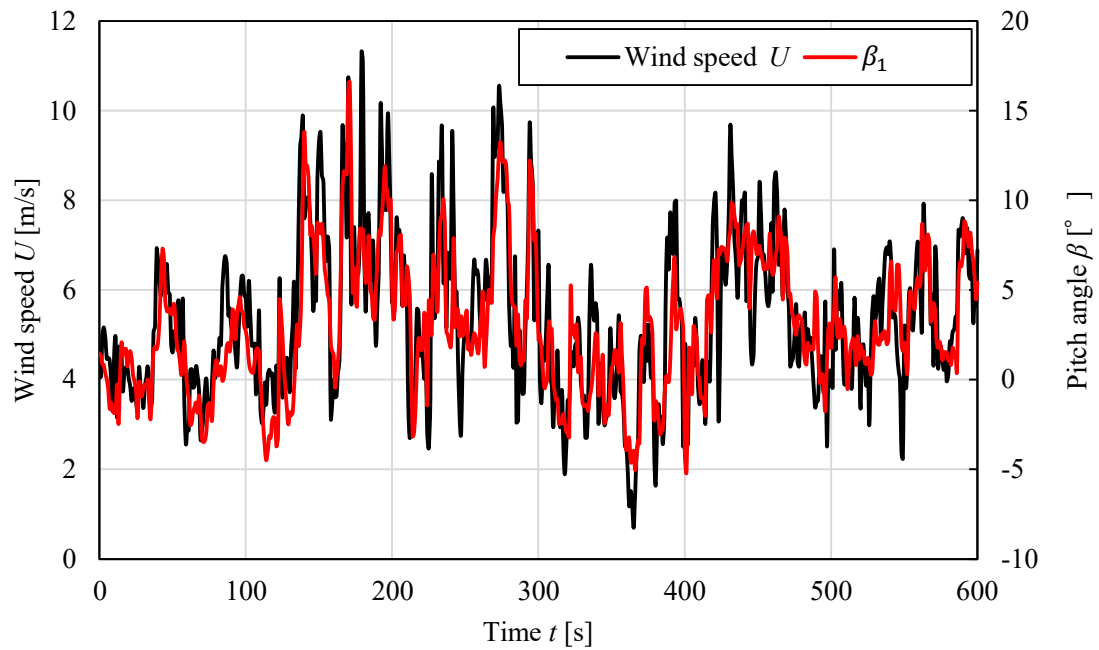
最後に可変速運転時における単位推力あたりの出力を評価することにより、運転の効率性の評価を行った。図 4.19 は BIN 平均されたピッチ制御ごとの風速  $U$  と単位推力あたりの出力  $P/T$  の関係である。図 4.19 の横軸は風速  $U$ 、縦軸は単位推力あたりの出力  $P/T$  となっている。図 4.19(a)の凡例は図 4.7 と同様となっている。

図 4.19(a)より独立ピッチ制御(IPC)はピッチ固定時(NPC)と比較して、風速 5m/s 以上の領域にて小さい推力で大きな出力を得られていることが分かる一方で、風速 5m/s 未満では得られる出力に対して推力が大きすぎる結果となっていることが分かる。この傾向は図 4.9 の定速運転時と同じ傾向を示していることが分かる。また独立ピッチ制御と同時ピッチ制御時(UPC)を比較すると、独立ピッチ制御は全ての風速にて効率のよい運転が出来ていることが分かる。これは独立ピッチ制御は同時ピッチ制御と比較して、全風速で出力と推力ともに増加しているが、風力発電の推力は風速の 2 乗に比例して増加するのに対し、出力は風速の 3 乗に比例して増加するため、独立ピッチ制御の出力増大効果が迎角増加に伴う推力増大より大きく表れたためであると考ええる。

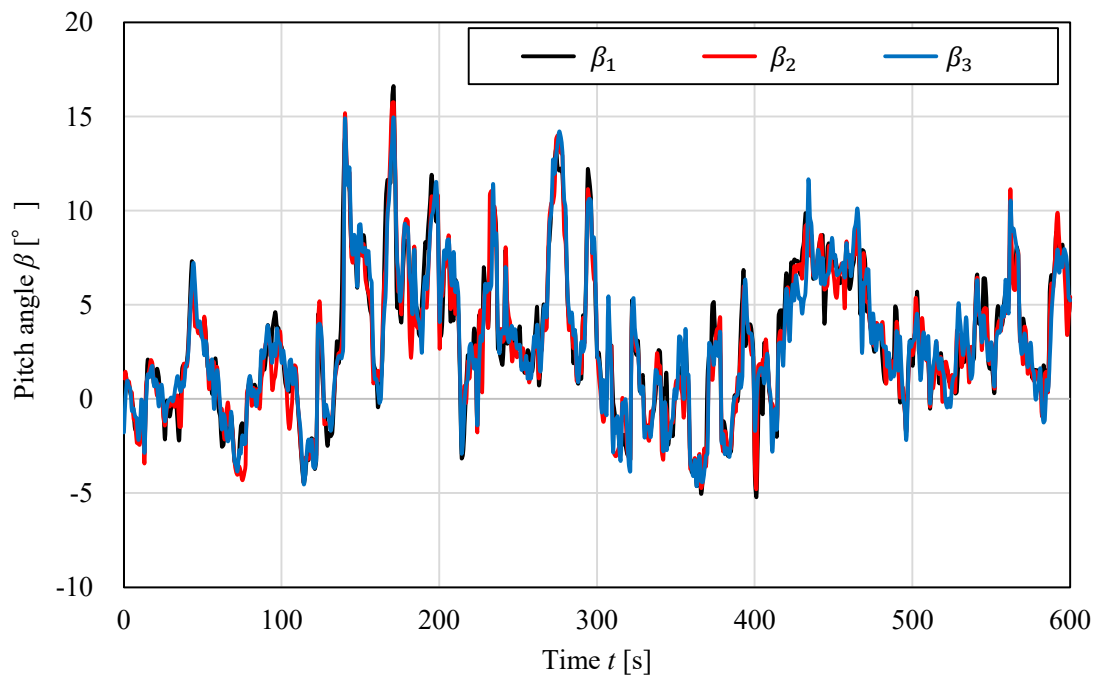
次に発電機回転数増速時と減速時の比較を行うと、各ピッチ制御ともに回転数増速時に運転効率が良くなっていることが分かる。また今回開発した独立ピッチ制御と同時ピッチ制御は回転数減速時でピッチ固定時と比べて風速が小さい場合運転効率が低下することが分かる。そのため出力最大化のために最適迎角を維持する今回のピッチ制御は、回転数に対して過大となった迎角を抑制する高風速の条件下にて大きな効果を果たすと考える。

次に各制御における単位推力あたりの出力と理論上の最適値の関係を考察する。図 4.9 と 4.19(a)より可変速運転時では定速運転時と比較して、全てのピッチ制御において単位推力あたりの出力が最適値を大きく下回ることが分かる。

以上の結果より可変速運転時において独立ピッチ制御は、ピッチ固定時・同時ピッチ制御時と比較して 5m/s 以上の高風速時において少ない推力で高い出力を得ることが出来、効率の良い運転が出来ていることを示せた。



(a) 翼1のピッチ角と風速の時系列データ



(b) 3翼のピッチ角の時系列データ

図4.1 独立ピッチ制御における時系列データ

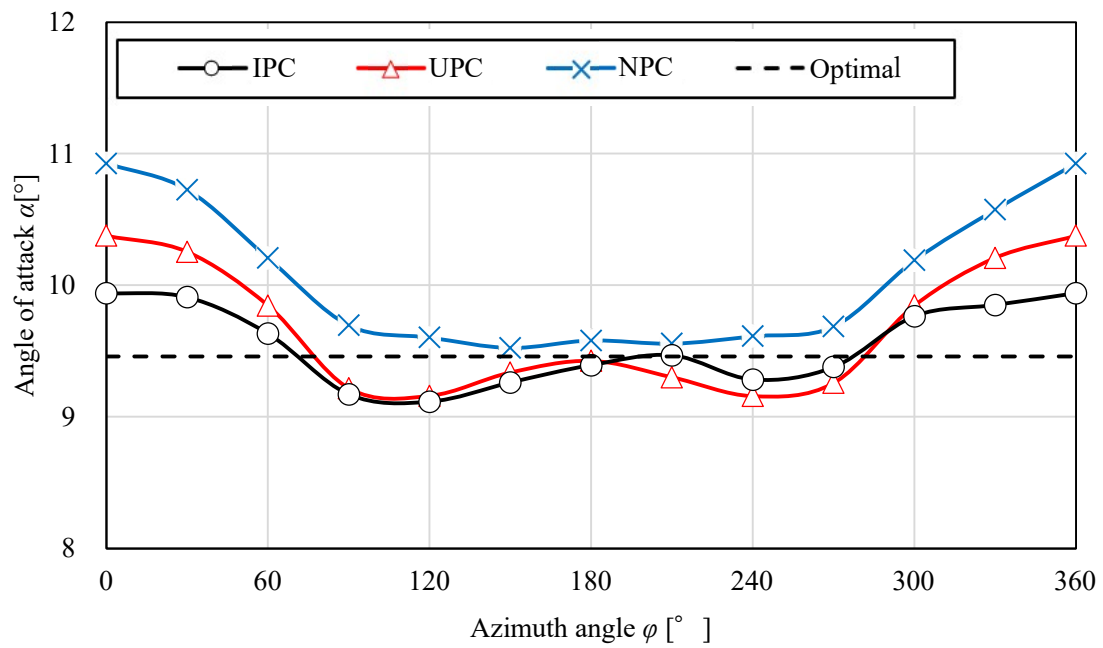
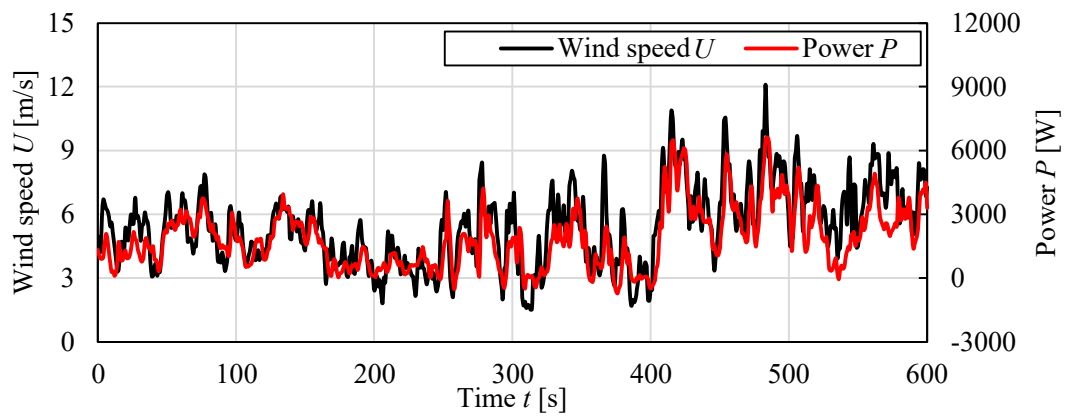


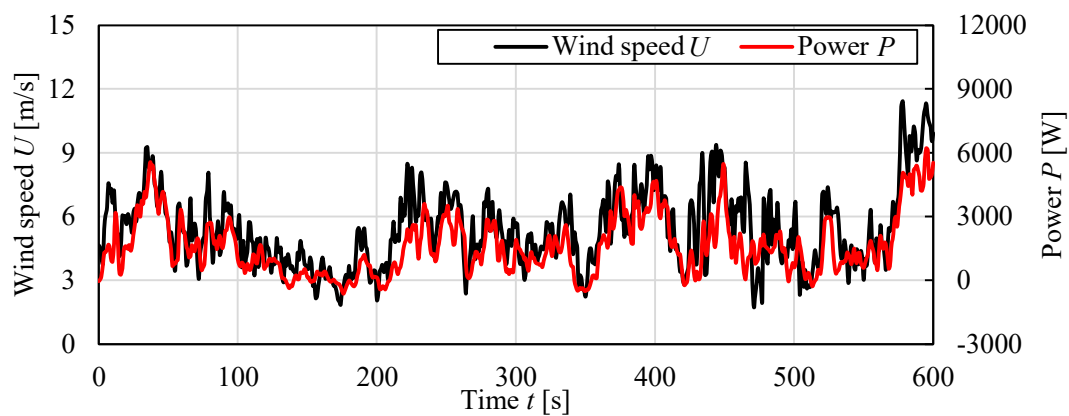
図 4.2 定速運転時における各ピッチ制御のアジマス角と迎角の関係



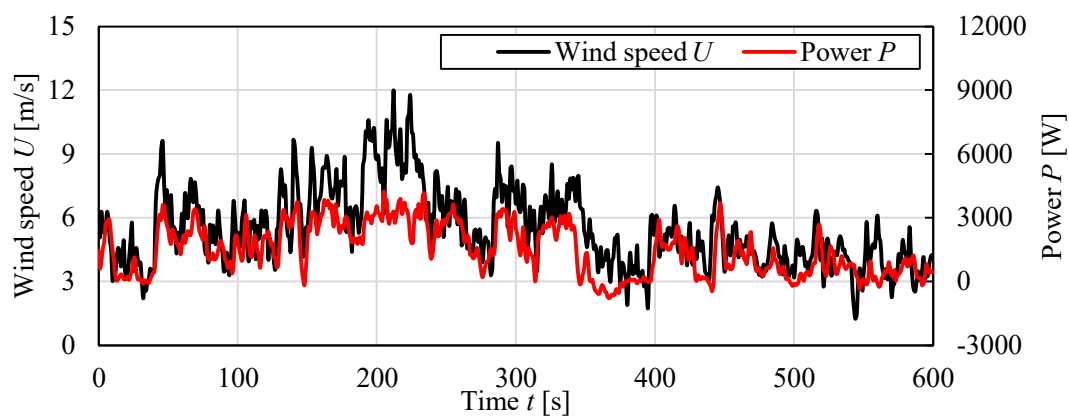
## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証



(a)独立ピッチ制御



(b)同時ピッチ制御



(c)ピッチ固定時

図 4.3 定速運転時における風速と出力の時系列データ

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

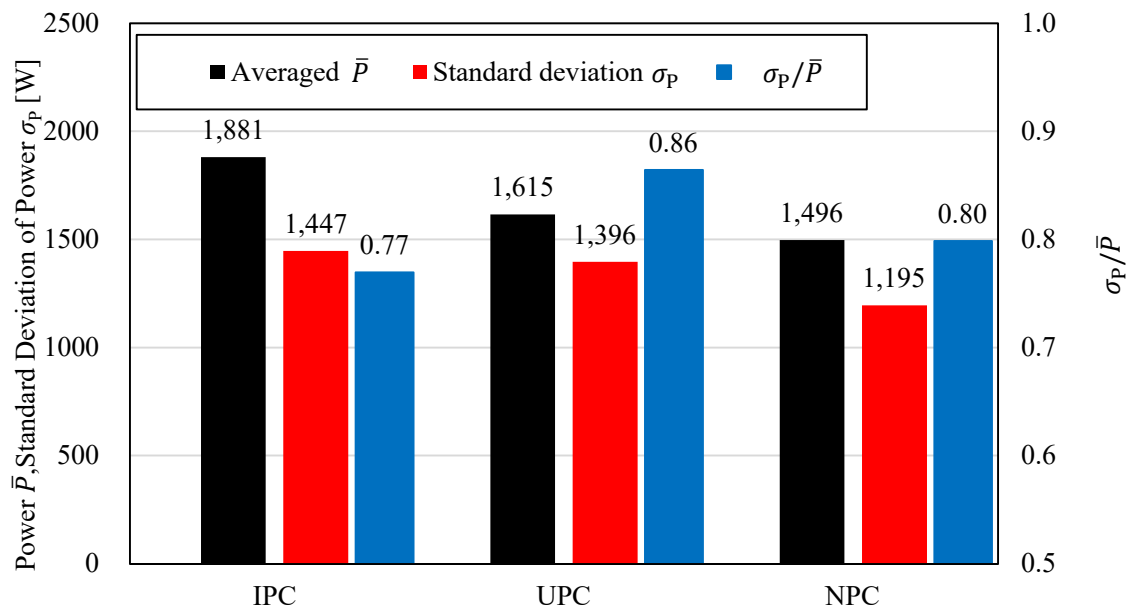
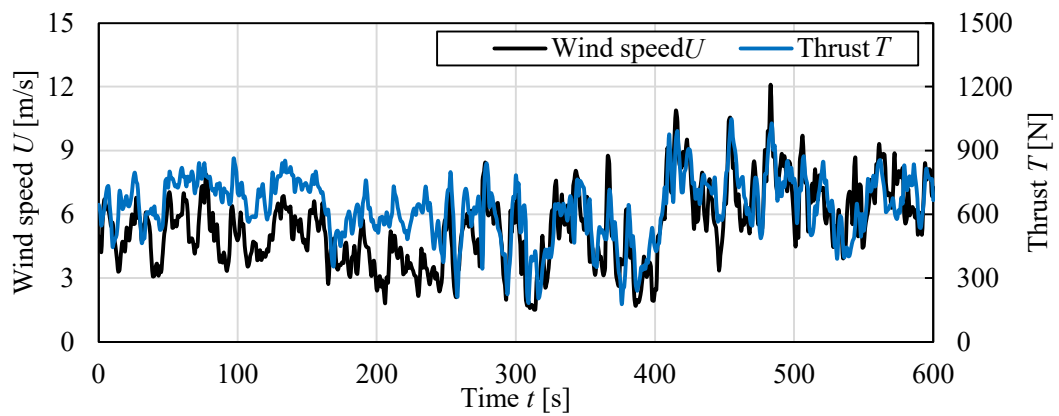
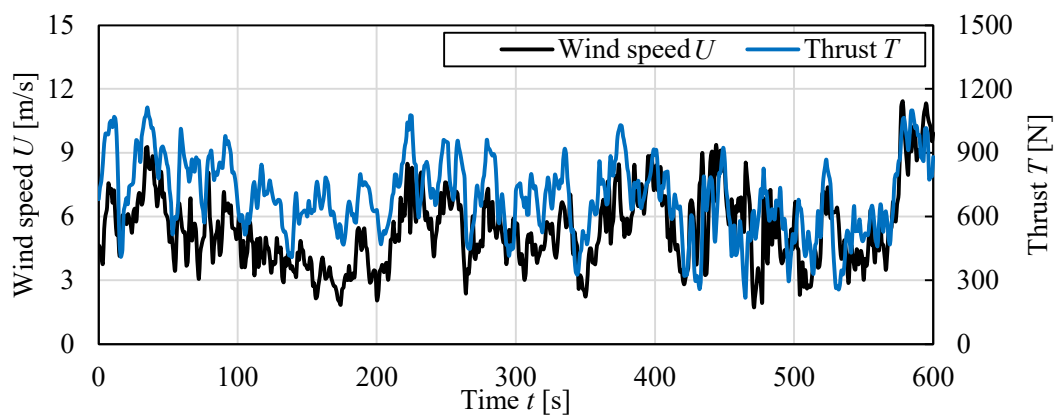


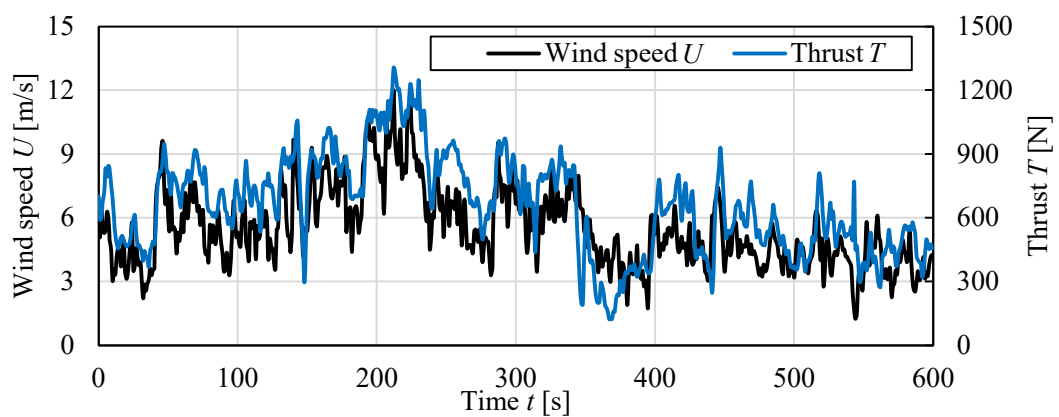
図 4.4 定速運転時における各ピッチ制御の平均出力と出力標準偏差



(a)独立ピッチ制御



(b)同時ピッチ制御



(c)ピッチ固定時

図 4.5 定速運転時における風速と推力の時系列データ

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

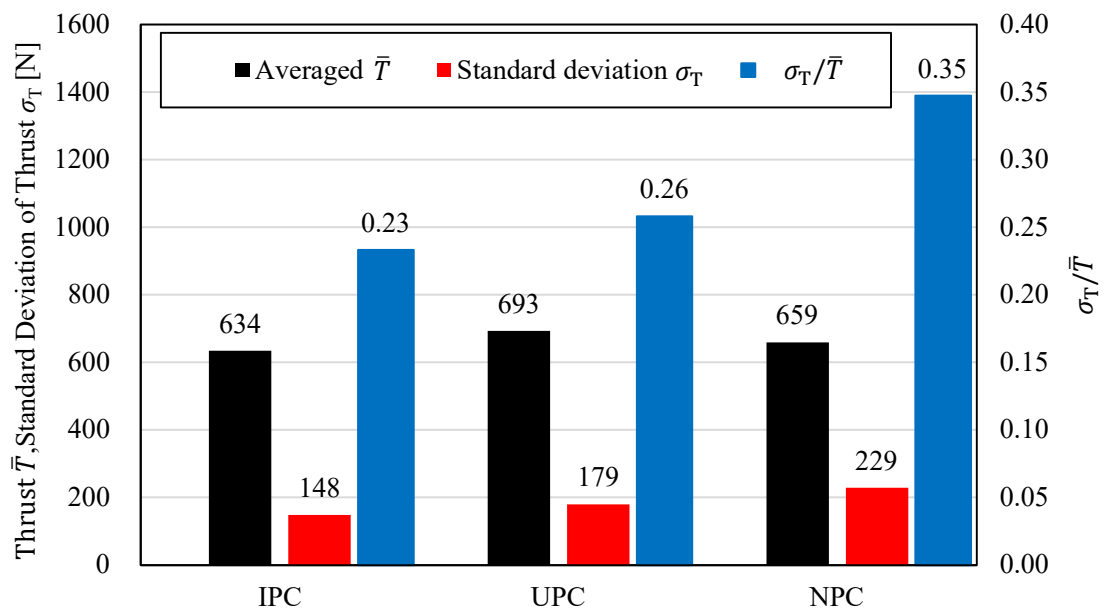


図 4.6 定速運転時における各ピッチ制御の平均推力と推力標準偏差

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

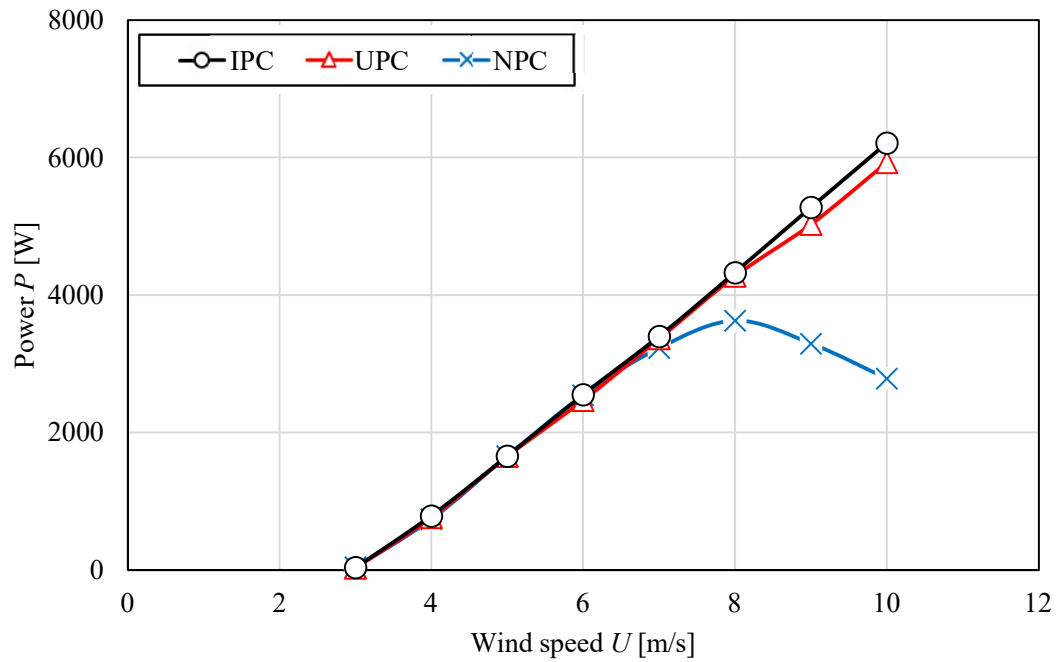


図 4.7 定速運転時における各ピッチ制御の風速と出力の関係

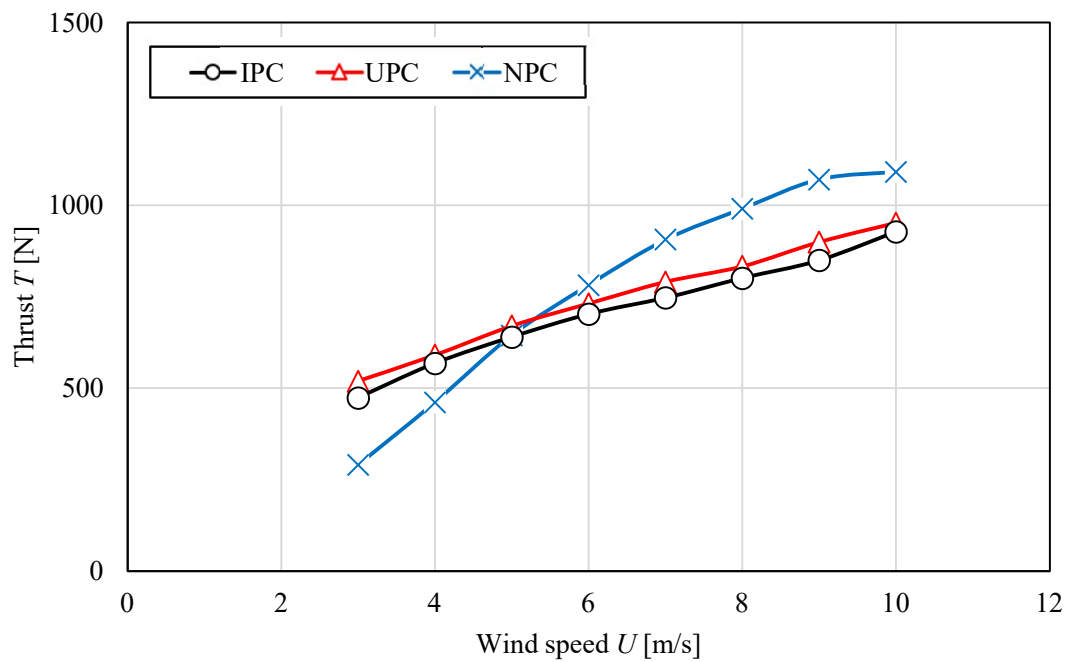


図 4.8 定速運転時における各ピッチ制御の風速と推力の関係

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

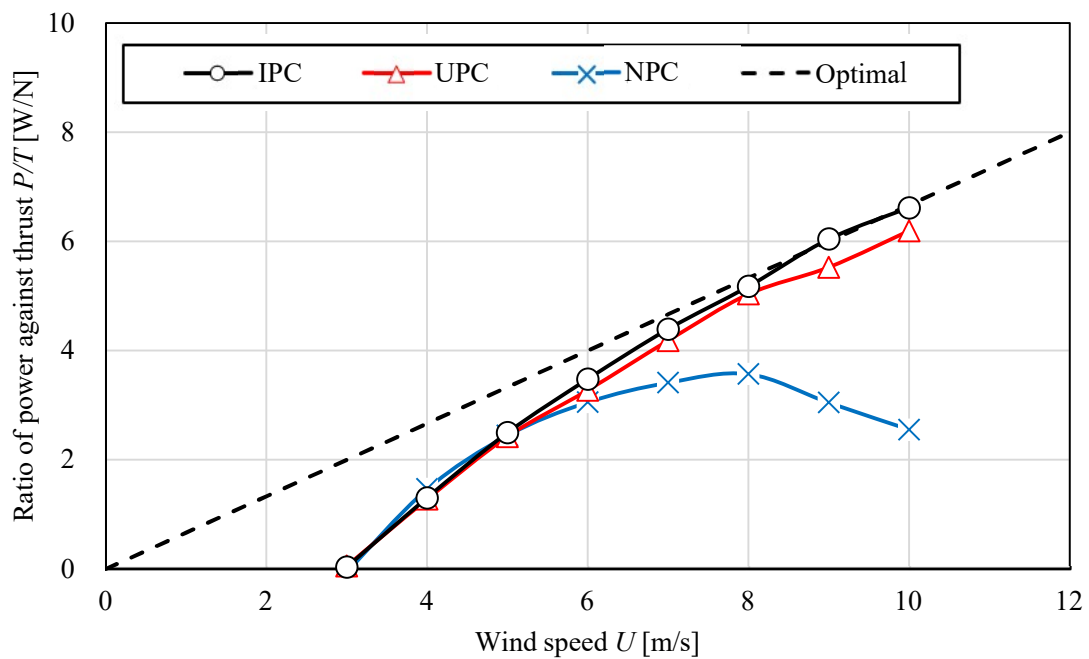
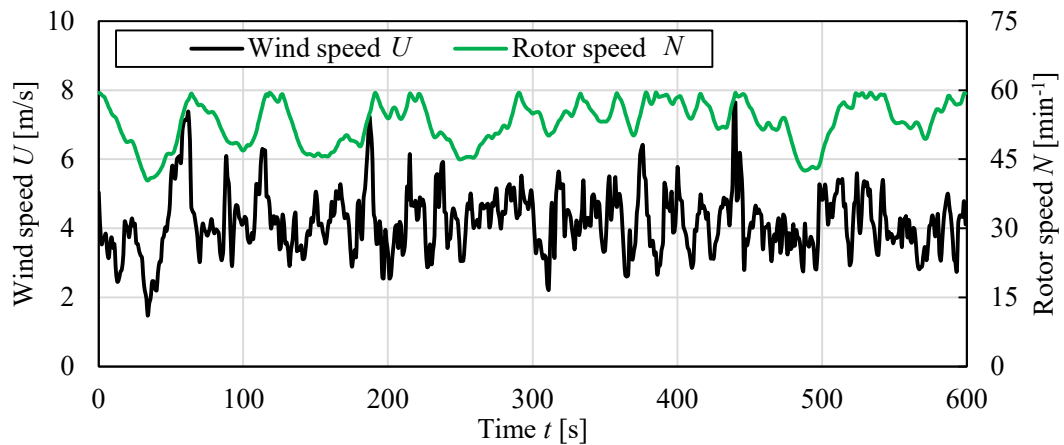
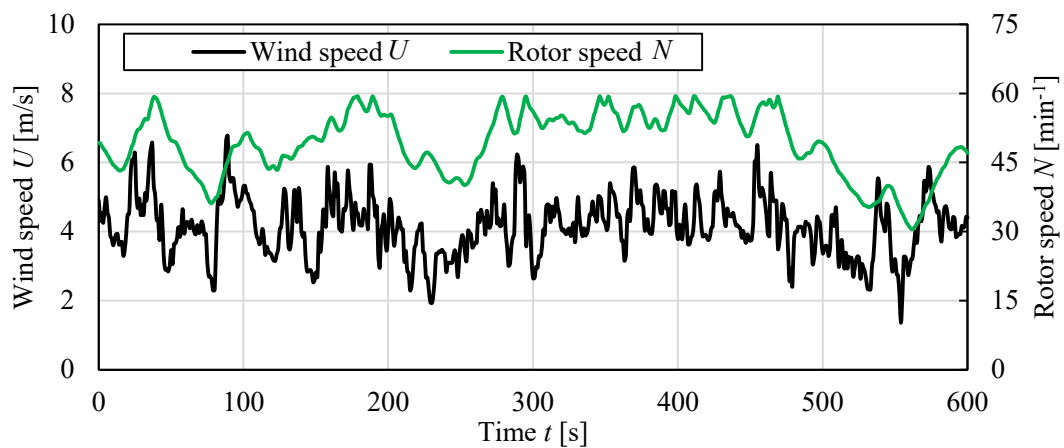


図 4.9 定速運転時における各ピッチ制御の風速と単位推力当たりの出力の関係

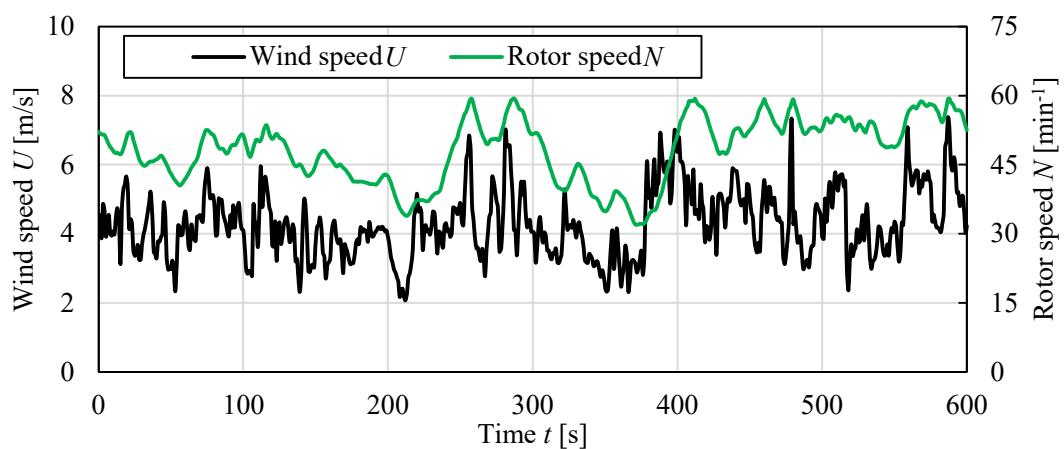
## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証



(a)独立ピッチ制御



(b)同時ピッチ制御



(c)ピッチ固定時

図 4.10 各ピッチ制御による風速とロータ回転数の時系列データ

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

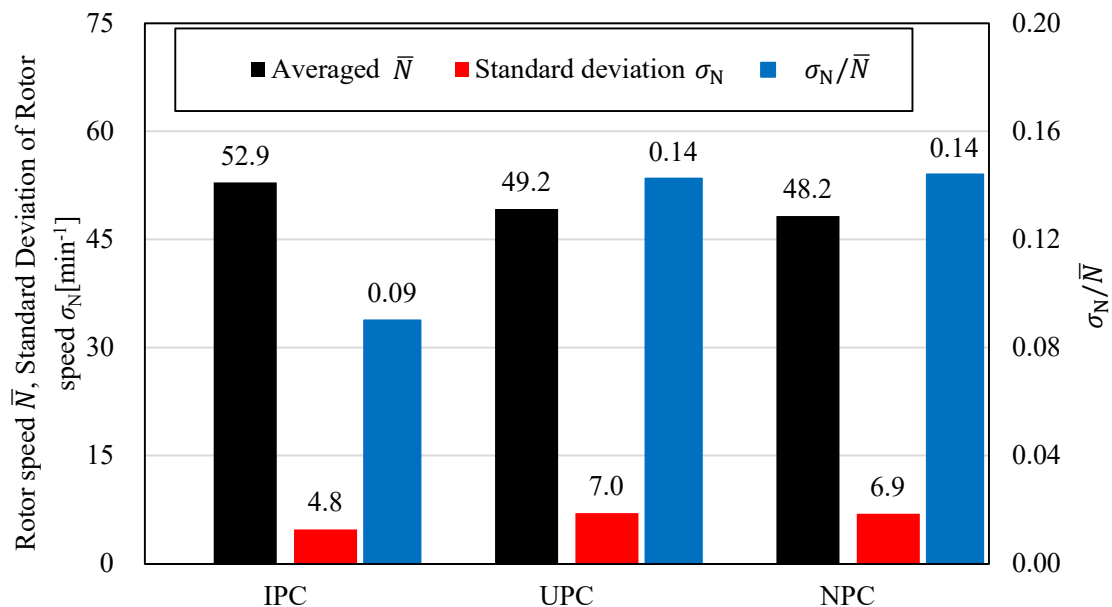
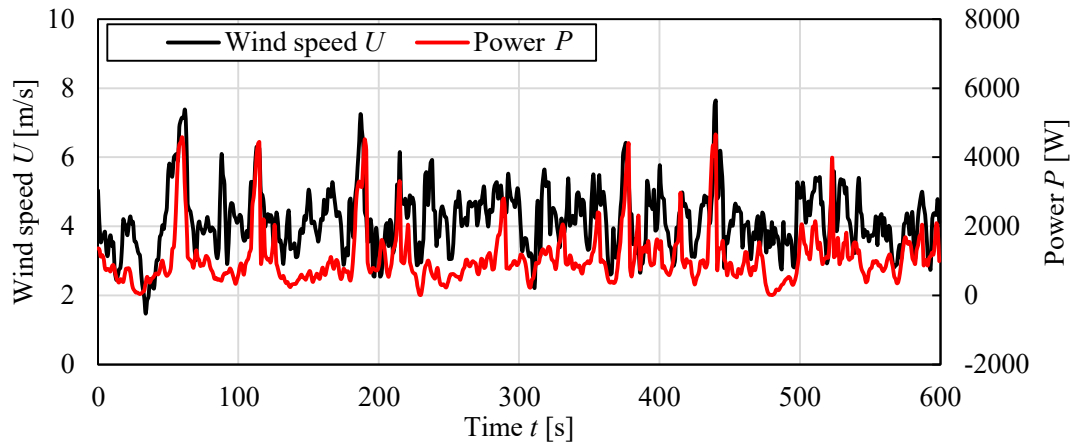


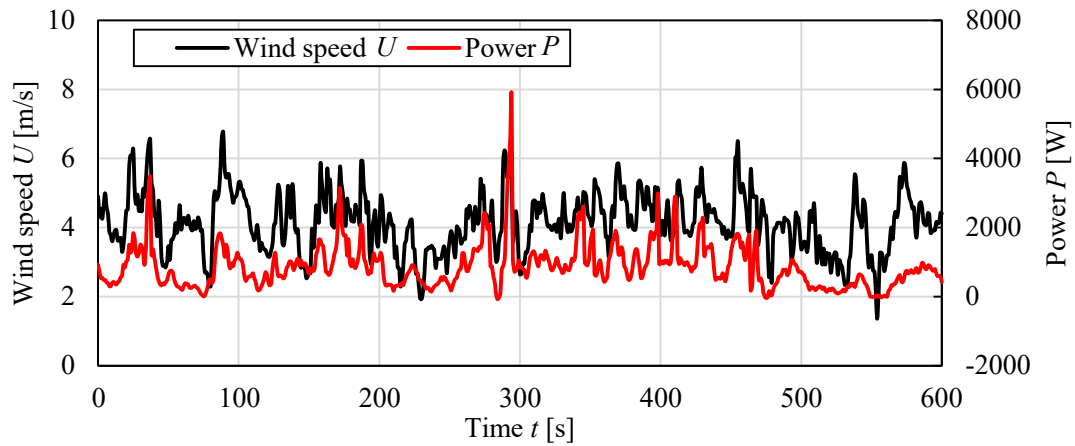
図 4.11 可変速運転時における各ピッチ制御の平均ロータ回転数と標準偏差



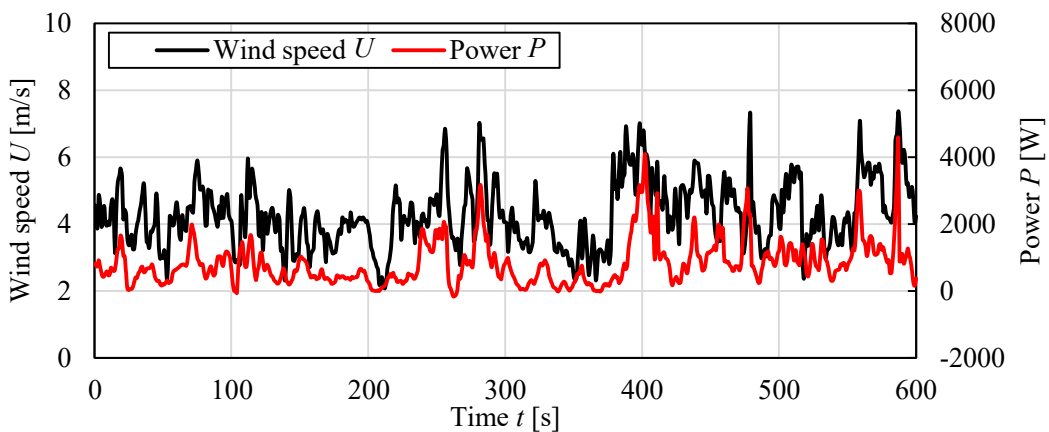
## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証



(a) 独立ピッチ制御



(b) 同時ピッチ制御



(c) ピッチ固定時

図 4.12 可変速運転時における各ピッチ制御の風速と出力の時系列データ

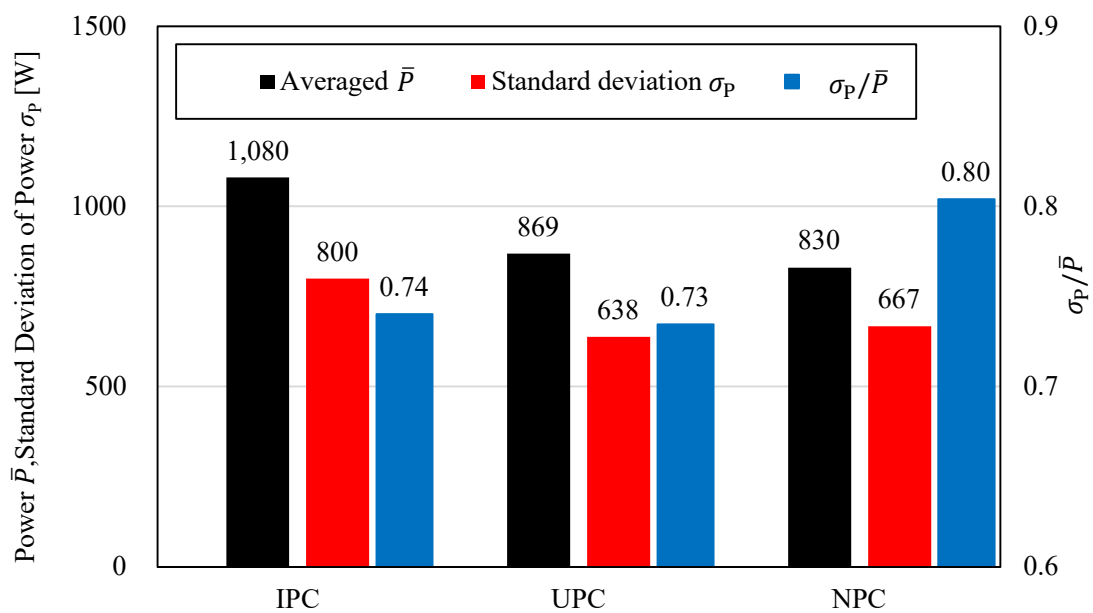
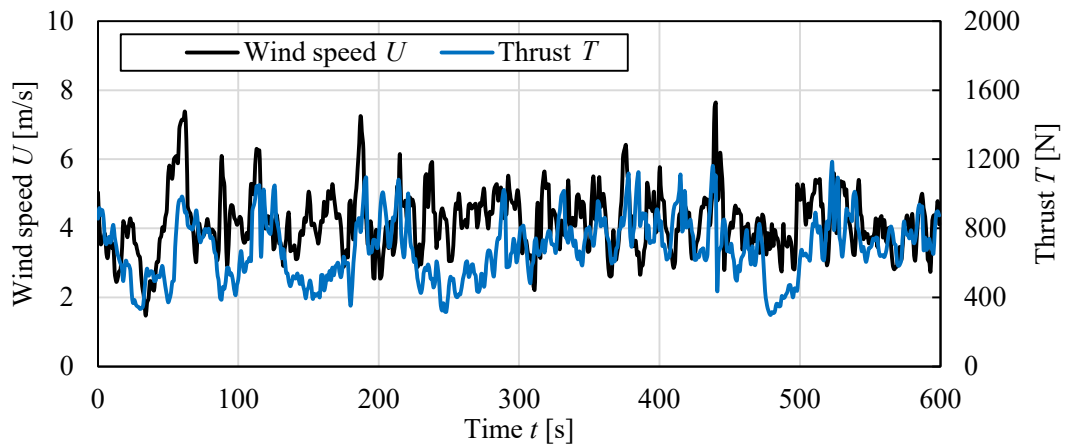
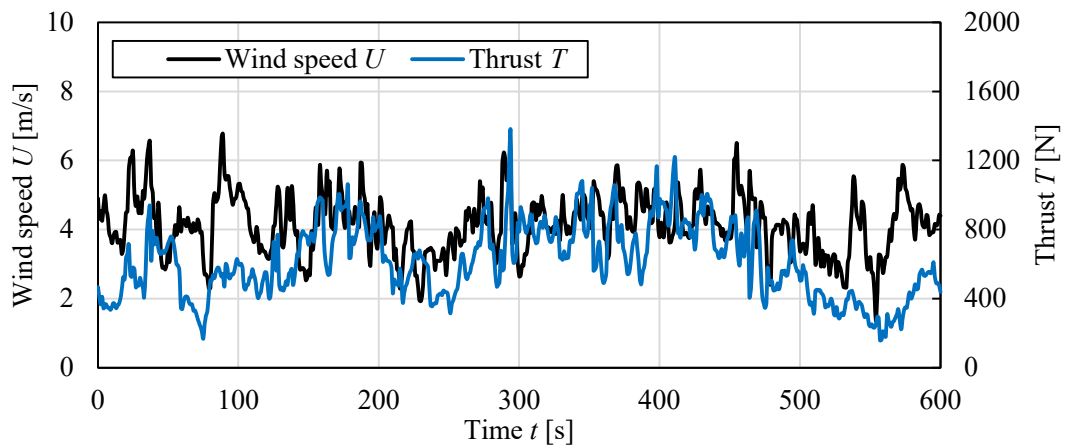


図 4.13 可変速運転時における各ピッチ制御の平均出力と出力標準偏差

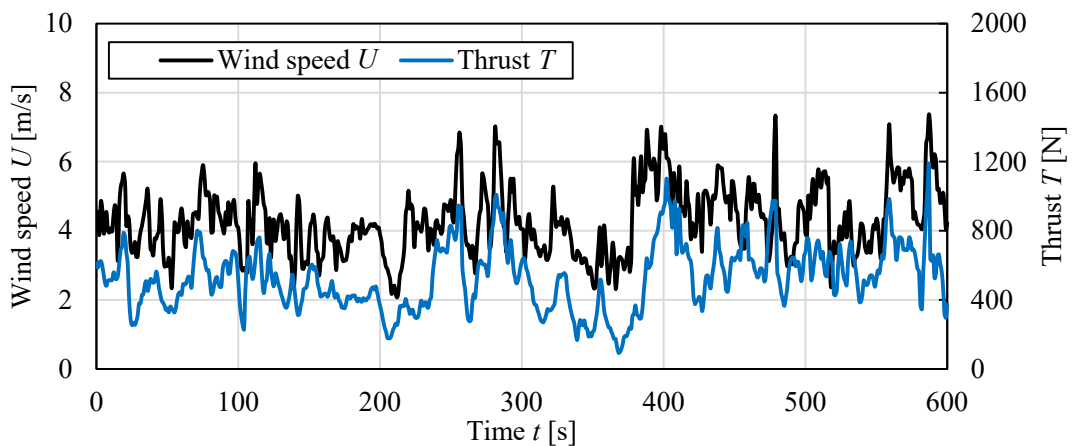
## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証



(a)独立ピッチ制御



(b)同時ピッチ制御



(c)ピッチ固定時

図 4.14 可変速運転時における各ピッチ制御の風速と推力の時系列データ

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証

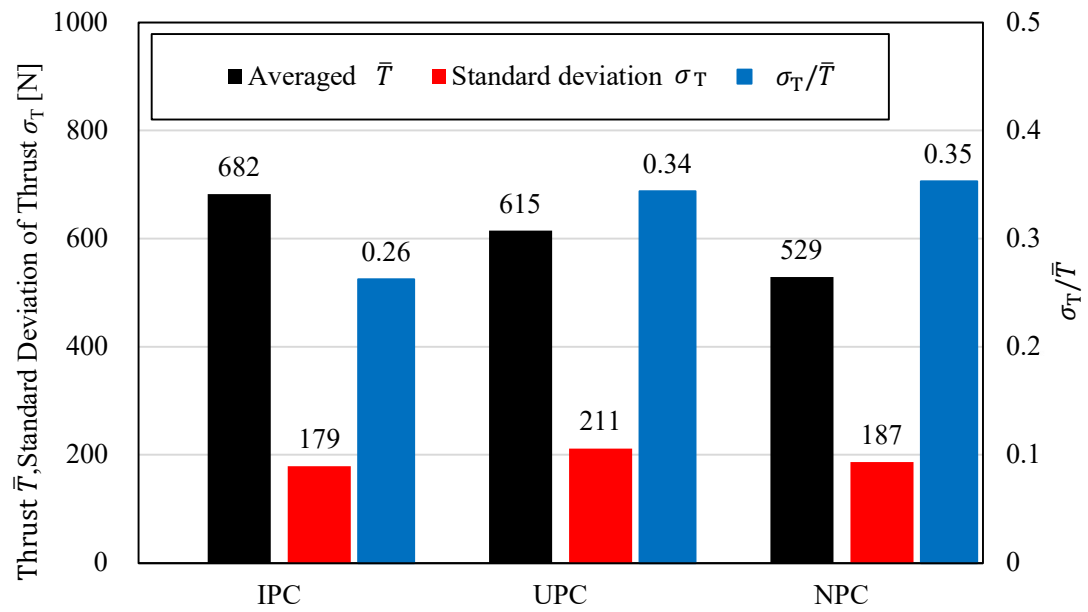
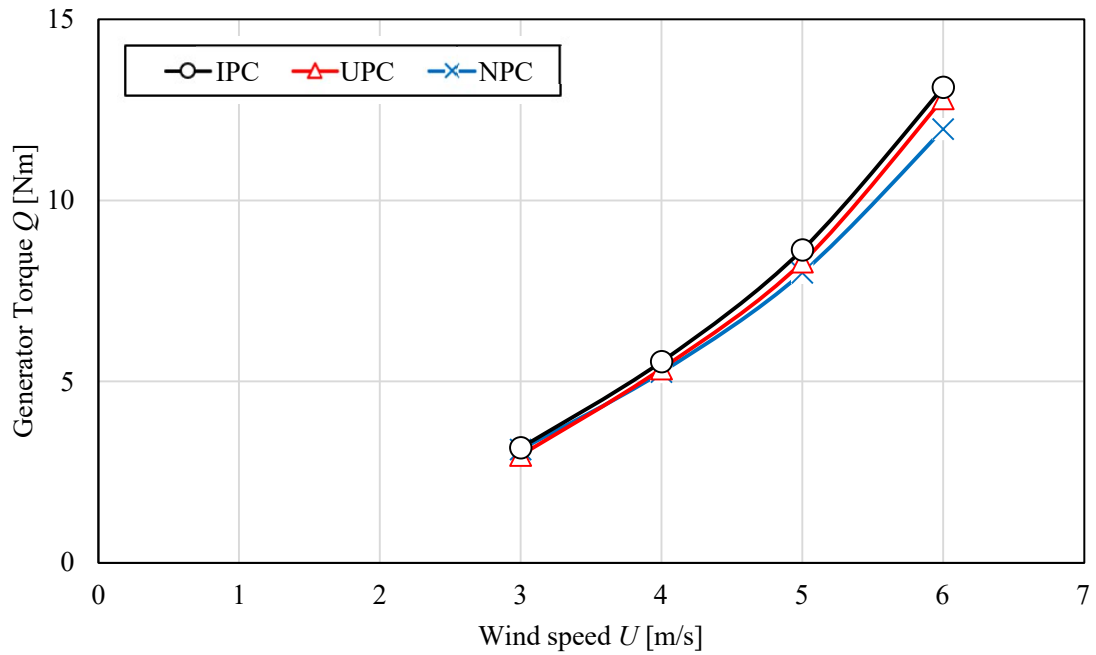
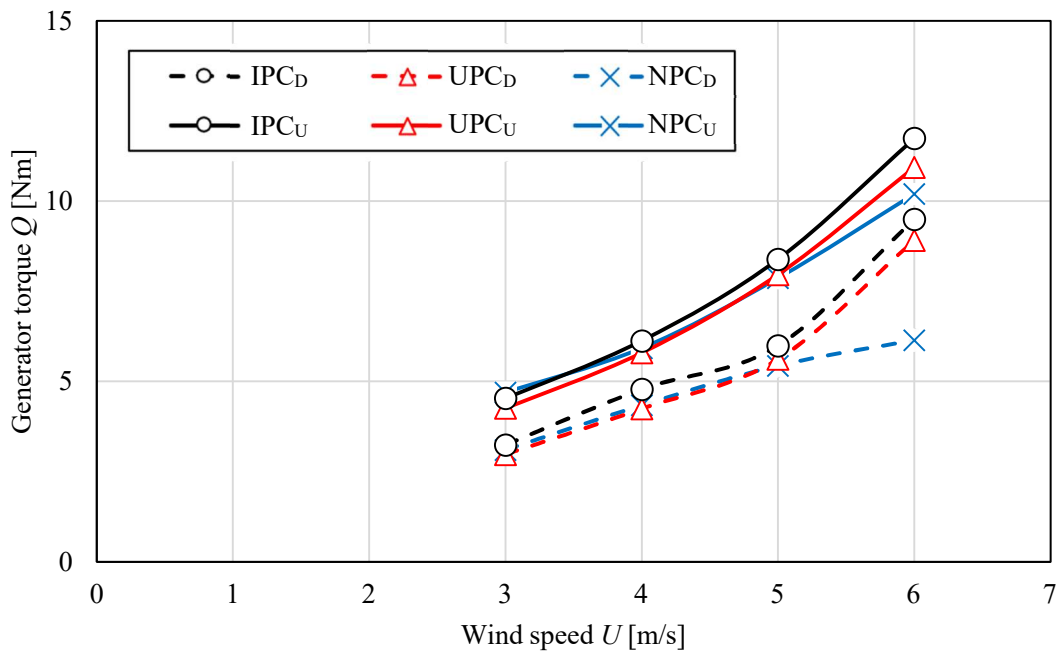


図 4.15 可変速運転時における各ピッチ制御の平均推力と推力標準偏差

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証



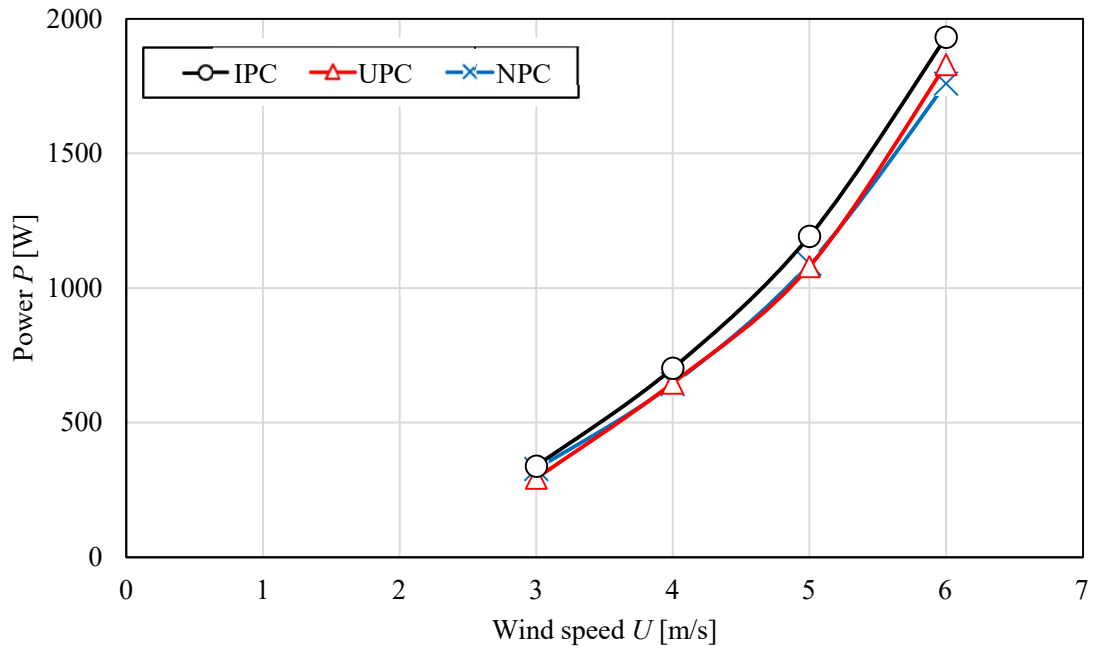
(a) 平均値



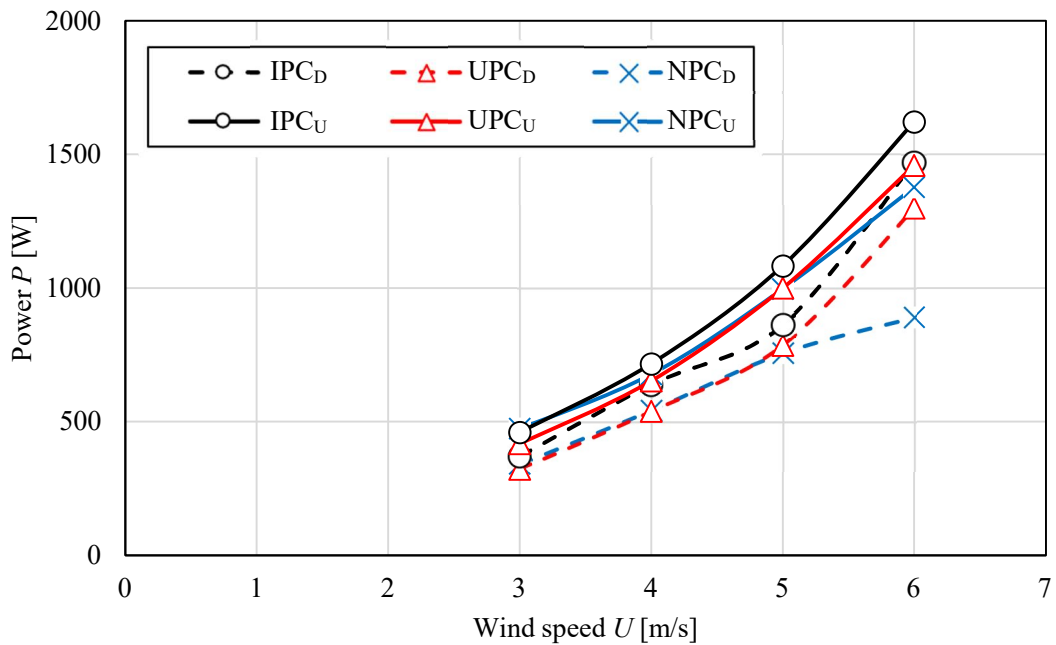
(b) 増速時と減速時の違い

図 4.16 可変速運転時における各ピッチ制御の風速と発電トルクの関係

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証



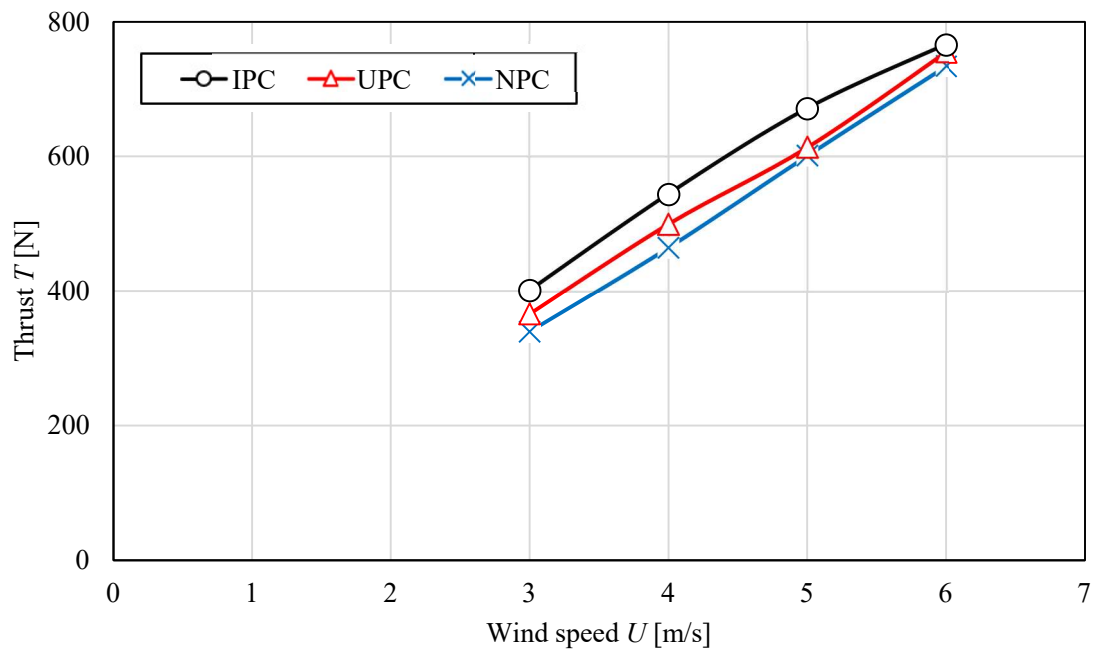
(a) 平均値



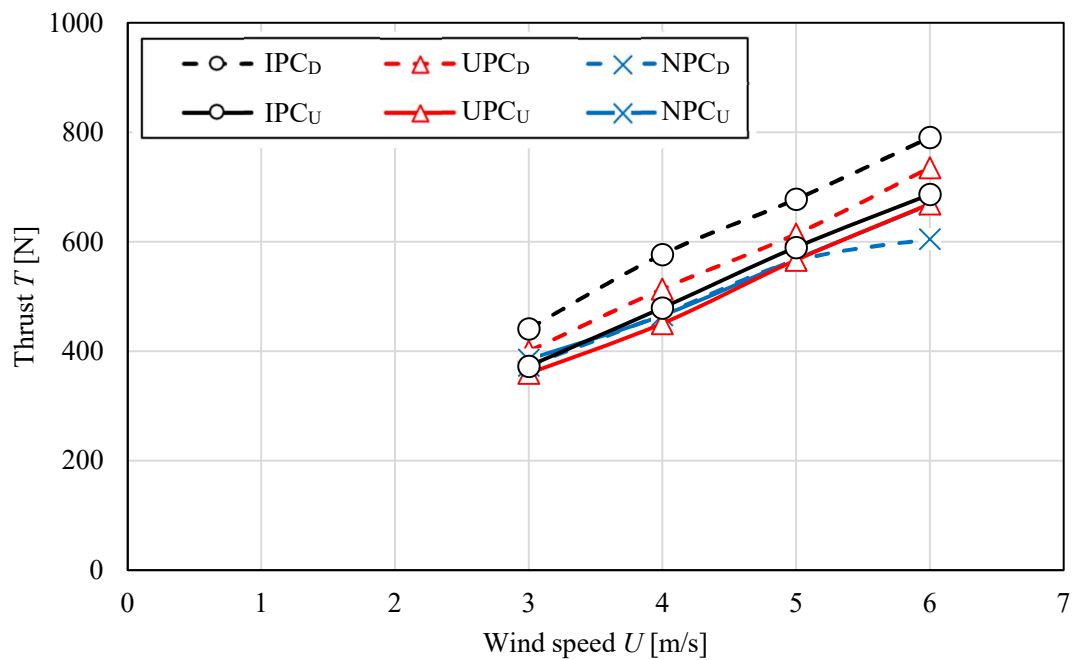
(b) 増速時と減速時の違い

図 4.17 可変速運転時における各ピッチ制御の風速と出力の関係

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証



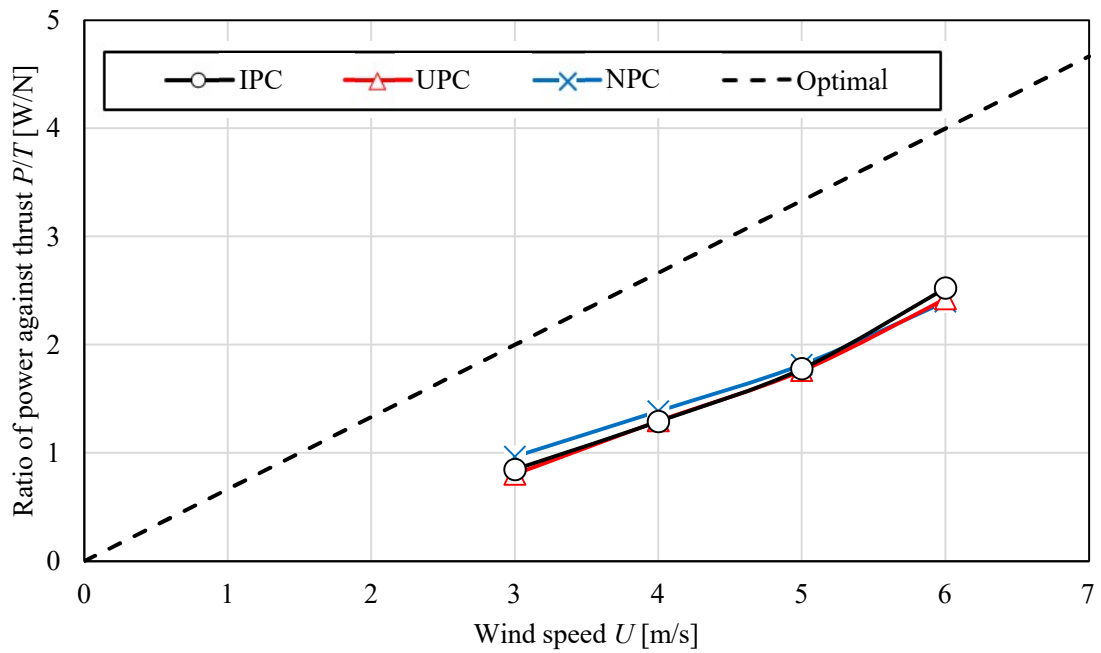
(a) 平均値



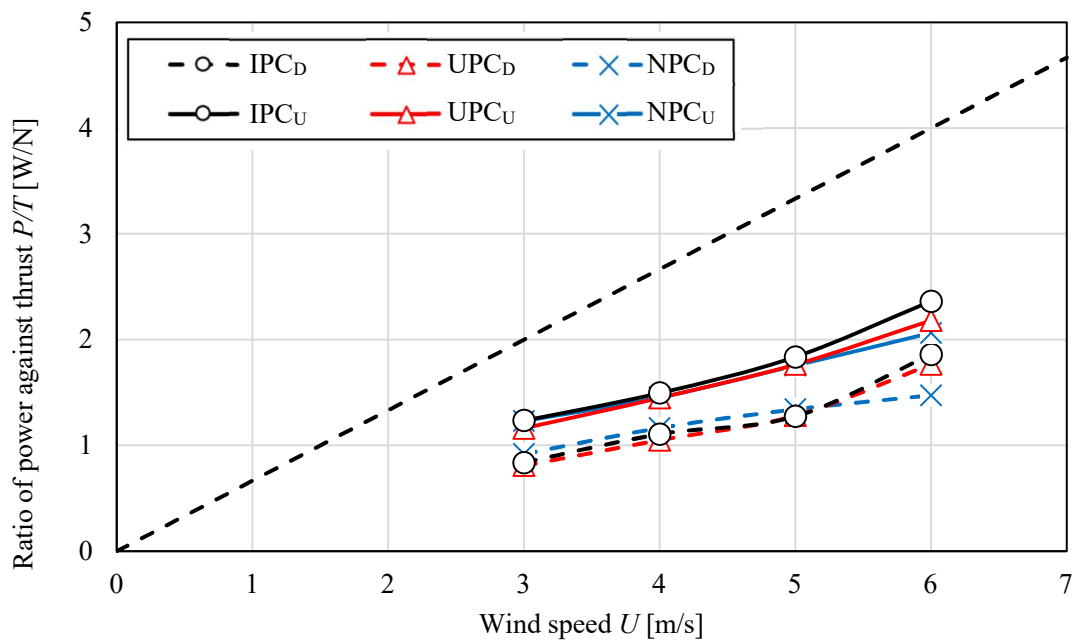
(b) 増速時と減速時の違い

図 4.18 可変速運転時における各ピッチ制御の風速と推力の関係

## 第4章 フィールド実験における独立ピッチ制御効果の検証



(a) 平均値



(b) 増速時と減速時の違い

図 4.19 可変速運転時における各ピッチ制御の風速と単位推力あたりの出力の関係



## 第5章 時間補正の違いによる独立ピッチ制御効果の検証

### 5.1 風速予測精度評価

本研究にて、出力の最大化および推力変動の抑制を図るために、ロータ面に到達する風速を高精度で予測する必要がある。そのため、3.5.4 項にて記載した単純時間平均手法と誘導速度を考慮した手法における流入風予測精度の比較を実施した。時間補正の違いにおける制御効果の比較は2020年12月30日から2021年1月20日に行った実証試験で明らかにした。

#### 5.1.1 実験条件

流入風観測支援制御における風速予測精度の評価を行うため、ナセルで測定された風速と単純時間平均手法、誘導速度を考慮した手法で予測されたナセル風速の比較を行う。評価対象のデータは、ナセル方位  $303^\circ$ 、10 秒間ベクトル平均風向範囲  $303 \pm 10^\circ$ 、一定回転数  $N=50[\text{min}^{-1}]$  で取得されたデータとした。また単純時間平均手法と誘導速度を考慮した手法ともに独立ピッチ制御を使用している。データの平均化時間はサンプリング周波数  $50\text{Hz}$  で計測されたものを1秒間平均してデータ整理を行った。

#### 5.1.2 予測精度評価

単純時間平均手法と誘導速度を考慮した手法の風速予測精度を評価するため、ナセル実測風速とナセル予測風速の比較を行う。図 5.1 は単純平均手法、図 5.2 は誘導速度を考慮した手法における実測ナセル風速とナセル予測風速の散布図である。図 5.1、5.2 の横軸はナセル実測風速、縦軸はナセル予測風速となっている。また表 5.1 に各風速帯における実測風速と予測風速の誤差と誤差の絶対値の平均値を記載する。表における誤差風速は実測風速と予測風速の差、誤差は誤差風速を実測風速で除した値の平均値となっている。誤差の評価に用いた式は以下のようになっている。

$$d_U = \frac{1}{n} \sum (U_n - U_{\text{npred}}) \quad (5.1)$$

$$d_{\text{Up}} = \frac{1}{n} \sum \frac{(U_n - U_{\text{npred}})}{U_n} \times 100 \quad (5.2)$$

$$d_{\text{Up,abs}} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{(U_n - U_{\text{npred}})}{U_n} \times 100 \right| \quad (5.3)$$

図 5.1 より単純時間平均手法では実測風速に対して予測ナセル風速の方が約  $0.8\text{m/s}$  高い風速値をとっていることが分かる。これは単純時間平均手法では減速係数を設けていないため、予測風速が過大評価されているためである。一方で図 5.2 より誘導速度を考慮した手

## 第5章 時間補正の違いによる独立ピッチ制御効果の検証

法では 4m/s から 7m/s の風速において予測値と実測値が近い値をとっていることが分かる。しかし一方で風速 6m/s より大きい場合にて予測風速が実測風速より小さい値を示すことが分かる。これは独立ピッチ制御時における誘導速度がピッチ固定時と比較して減少したためであると考えられる。3.5.4.2 項にて減速係数を算出した際は風車をピッチ固定で運転しているため、高風速時に失速に伴う誘導速度の増加を考慮した減速係数が算出されている。一方誘導速度を考慮した手法を独立ピッチ制御に適用した本章では、独立ピッチ制御を使用したことで高風速時においても失速が生じず、ピッチ固定時と比較して誘導速度が減少していると考えられる。そのため 3.5.4.2 項で作成した誘導速度を考慮した手法を独立ピッチ制御に適用すると、高風速にて誘導速度が小さい独立ピッチ制御適用時においても、誘導速度が大きいピッチ固定時で算出した減速係数を用いて流入風の予測を行うため、風速が増加するに従ってロータ面風速を過小評価する傾向が表れたと考えられる。

次に計測された全データの誤差の絶対値の平均値を比較すると、単純時間平均手法では風速の予測誤差量が 19.8%であったのに対して、誘導速度を考慮した手法では 11.2%となり、7.6%誤差を低下させることができた。

以上の結果より、誘導速度を考慮した手法は単純時間平均を用いた制御と比較して高い精度で風速を予測できていると考えられる。

表 5.1 各予測手法における風速ごとの誤差の値

風速 BIN	単純平均手法			誘導速度を考慮した手法		
	$d_U$	$d_{Up}$	$d_{Up\_abs}$	$d_U$	$d_{Up}$	$d_{Up\_abs}$
[m/s]	[m/s]	[%]	[%]	[m/s]	[%]	[%]
4	-0.83	-20.9	25.2	-0.33	-8.4	12.3
5	-0.85	-17.2	19.9	-0.11	-2.4	10.2
6	-0.40	-6.6	13.5	0.23	3.7	9.6
7	-0.40	-5.7	13.0	0.36	5.1	11.2
8	-0.56	-7.2	12.7	0.80	9.7	13.2
9	-0.41	-4.3	14.5	2.47	27.1	27.1
全風速	-0.70	-15.1	19.8	-0.11	-3.5	11.2

## 5.2 統計データ比較による効果検証

## 5.2.1 実験条件

流入風観測支援制御における時間補正の違いが風車出力や風車推力に与える影響を評価するため、計測で得られたデータを統計処理して評価を行う。評価対象のデータは、ナセル方位 303°, 10 秒間ベクトル平均風向範囲 303±10°, 一定回転数  $N=50[\text{min}^{-1}]$  で取得されたデータとした。データの平均化時間はサンプリング周波数 50Hz で計測されたものを 10 秒間

## 第5章 時間補正の違いによる独立ピッチ制御効果の検証

平均してデータ整理を行った。5.2.2 項は抽出されたデータを BIN 法により風速ごとに分類して平均した。このときの BIN 法の風速幅は 1.0m/s とした。BIN データごとのデータ点数は以下のようになっている。

表 5.2 風速 BIN ごとのデータ点数

風速 BIN		4	5	6	7	8
10s データ の個数	単純時間平均手法	105	88	53	37	16
	誘導速度を考慮した手法	94	58	43	17	3

### 5.2.2 制御効果比較

各流入風観測支援制御における効果を比較するために、独立ピッチ制御時の風速と出力、推力の関係を比較する。図 5.3 は流入風観測支援制御ごとの BIN 平均化された風速  $U$  と出力  $P$  の関係、図 5.4 は風速  $U$  と推力  $T$  の関係、図 5.5 は風速  $U$  と単位推力当たりの出力  $P/T$  の関係である。図 5.3 から図 5.5 の横軸は風速  $U$ 、図 5.3 の縦軸は出力  $P$ 、図 5.4 の縦軸は推力  $T$ 、図 5.5 の縦軸は単位推力当たりの出力  $P/T$  となっている。また黒が単純時間平均手法のデータ、赤が誘導速度を考慮した手法のデータとなっている。

まず出力について考察を行う。図 5.3 より誘導速度を考慮した手法は単純時間平均手法と比較して、4m/s 以上の風速にて出力が増加していることが分かる。これは図 5.1 から分かるように単純時間平均手法では誘導速度を考慮していないため実際のロータ面風速と比較して大きい風速を予測していると考えられる。そのため理想とする指令ピッチ角よりも大きな指令値を指令したことにより、迎角が最適迎角を下回り出力が低下したのではないかと考える。

次に推力について考察を行う。図 5.4 より誘導速度を考慮した手法は単純時間平均手法と比較して、4m/s 以上の風速にて推力が増加していることが分かる。これは単純平均手法では減速係数を考慮しないため風速を大きく見積り、理想とする指令ピッチ角よりも大きな指令値を指令することで迎角を最適迎角以下に低下させたために推力が低下したと考える。

また図 5.5 の単位推力当たりの出力を比較すると風速 4m/s から 6m/s の風速にて、誘導速度を考慮した手法は少ない推力で大きい出力が得られていることが分かる。この範囲における風速は誘導速度を考慮した手法が単純平均手法と比較して精度良くロータ面風速を予測できていると考えられる領域であるので、今後風車に流入する風の計測や、より精度の高い流入風予測することができれば、制御効果の更なる向上が期待できると考える。一方で 6m/s より大きい風速では誘導速度を考慮した手法における単位推力当たりの出力は、単純時間平均手法と比較して減少していることが分かる。これは 5.1.2 項で記述したように、3.5.4.2 項にて作成したピッチ固定時の誘導速度を考慮した手法を独立ピッチ制御に適応すると、風速が増加するに従ってロータ面風速を過小評価するためである。独立ピッチ制御では過小評価された風速に対して最適値より小さいピッチ角を指令する。そのため高風速の条件

## 第5章 時間補正の違いによる独立ピッチ制御効果の検証

下において迎角が最適迎角より高くなったことで推力が過剰に増加し、単位推力あたりの出力が低下したと考えられる。

以上の結果より、誘導速度を考慮した手法を用いた独立ピッチ制御は単純時間平均手法を用いた独立ピッチ制御と比較して出力増大効果があるとともに、ロータ面風速を高い精度で予測できたと考えられる風速において単位推力あたりの出力の増大効果があることを示せた。また本研究ではピッチ固定時の誘導速度を考慮した手法を独立ピッチ制御にも用いたが、風速予測精度の向上のためには、減速係数を算出する際に、適応予定のピッチ制御と同じピッチ制御を適応させた風車運転データを用いることで向上が可能であると考えられる。

## 第5章 時間補正の違いによる独立ピッチ制御効果の検証

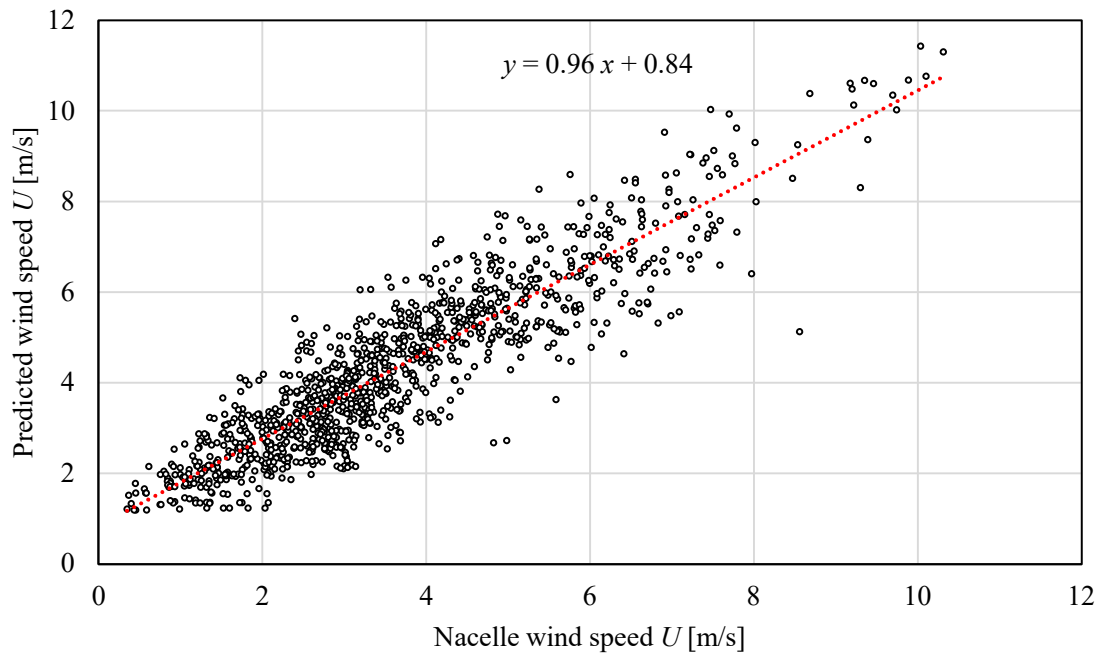


図 5.1 単純平均手法における実測ナセル風速とナセル予測風速の散布図

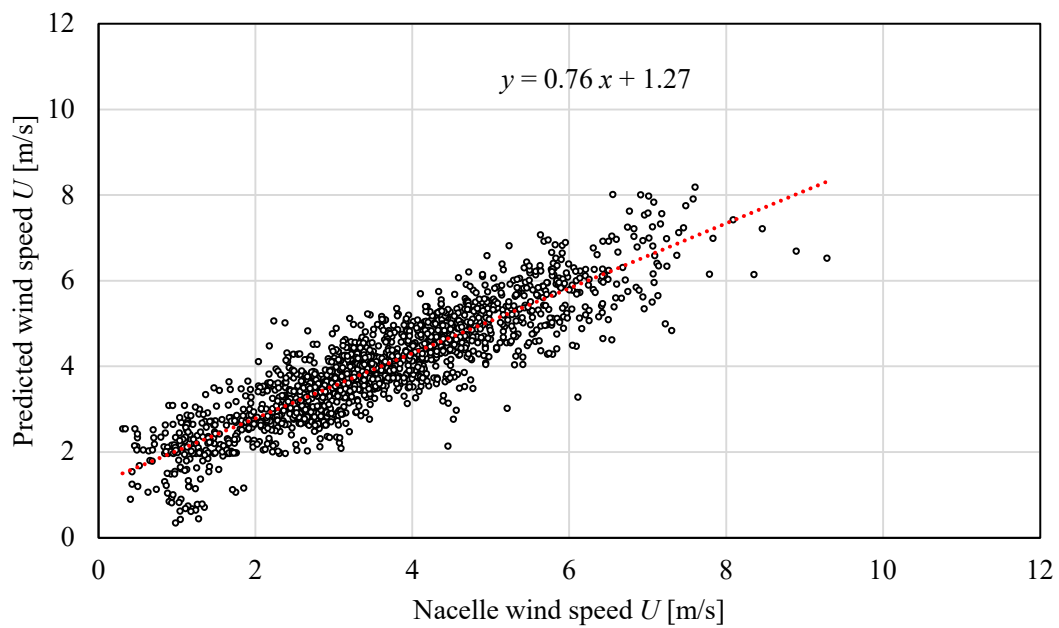


図 5.2 誘導速度を考慮した手法における実測ナセル風速とナセル予測風速の散布図

## 第5章 時間補正の違いによる独立ピッチ制御効果の検証

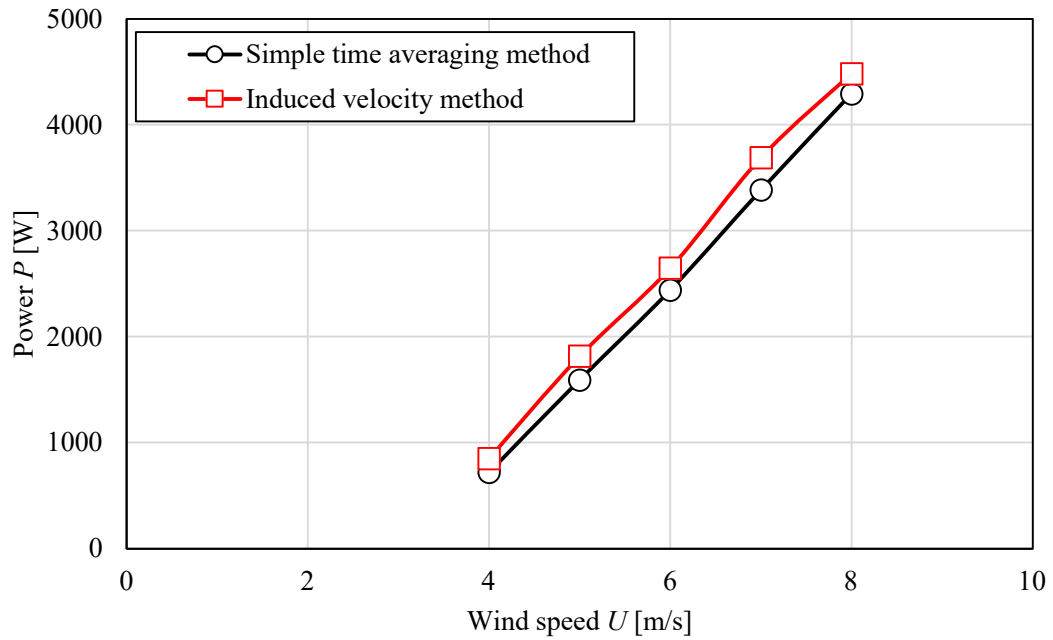


図 5.3 流入風予測手法の違いが風車出力に与える影響

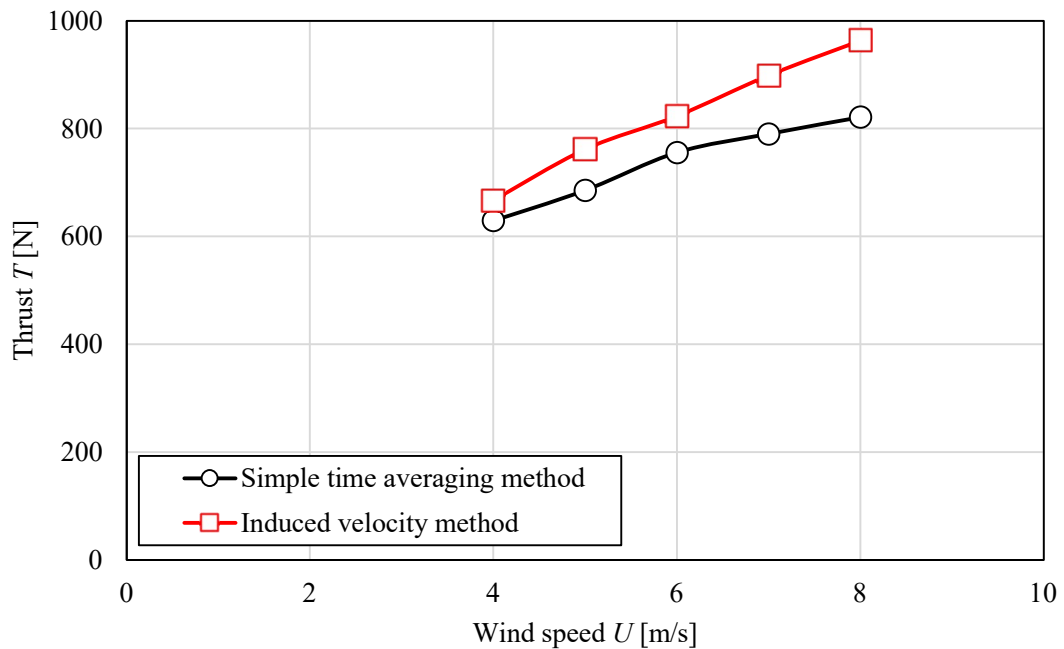


図 5.4 流入風予測手法の違いが風車推力に与える影響

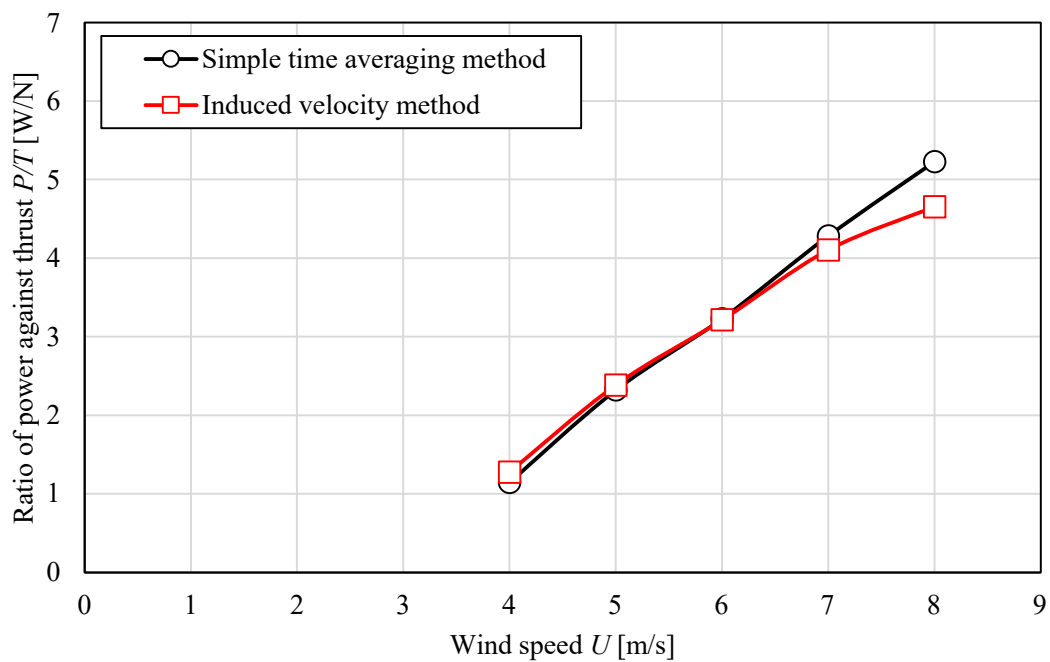


図 5.5 流入風予測手法の違いが風車単位推力あたりの出力に与える影響

## 第6章 結言

本研究では、流入風速の観測装置として風車前方に設置された風速測定マスト上の超音波流速計を用い、風車の流入風を観測し、風車制御に取り込むことで、時間遅れのない風車制御を構築し、独立ピッチ制御にて最適な迎角を維持することで出力の向上とともに推力変動の少ない風車制御の開発を目的とした。実証試験に用いる風車はロータ直径10.0m、ハブ高さ13.4m、定格出力37kWのアップウィンド形水平軸風車である。また、出力の最大化を図ることも目的とし、三種類の運転制御を行った。一つはピッチ角を最適ピッチ角に固定したピッチ固定(NPC)であり、もう一つはロータに流入する風速に応じて3翼のピッチ角を同時に制御する同時ピッチ制御(UPC)、最後の一つはロータに流入する風速の鉛直分布に応じて各翼のピッチ角をそれぞれ独立に変化させる独立ピッチ制御(IPC)である。それぞれの制御が出力および推力の挙動にどのような影響を及ぼすのかを解明するために、各制御の比較・評価を行った。

以下に本研究の主な結果を示す。

- (1) 定速運転時に各ピッチ制御を適用し、比較することで以下の結果を得た。
  - (a)独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、単位出力当たりの出力変動を抑制することができた。
  - (b)独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、推力標準偏差および、単位推力あたりの推力標準偏差を抑制することができた。
  - (c)独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御時と比較して、高風速の条件下で平均出力を増大させるとともに平均推力を抑制することができた。
- (2) 可変速運転時に各ピッチ制御を適用し、比較することで以下の結果を得た。
  - (a)独立ピッチ制御はピッチ固定時と比較して単位出力あたりの出力標準偏差を抑制することができた。
  - (b)独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、推力変動および単位推力当たりの推力標準偏差を抑制することができた。
  - (c)独立ピッチ制御はピッチ固定時・同時ピッチ制御と比較して、同じ風速条件下において高出力を得ることができた。
- (3) 単純平均手法と誘導速度を考慮した手法を独立ピッチ制御に適用し、以下の結果を得た。
  - (a)誘導速度を考慮した手法は単純平均手法と比較して、ロータ面に流入する風を高い精度で予測することができた。



- (b)誘導速度を考慮した手法を用いた独立ピッチ制御は単純時間平均手法の制御と比較して出力を向上させることができた.

本研究を行い、次に示す課題が残った.

- (1) 定格風速未満の部分負荷運転領域における風車運転状態を37kW風車にて模擬をすることが出来たが、定格発電領域における出力を定格出力に保つフィードバック制御を構築できていない. そのため今後定格発電領域におけるピッチ制御に今回作成した独立ピッチ制御を組み合わせることで適応して効果検証を実施する必要がある.
- (2) 誘導速度を考慮した手法において本研究ではピッチ固定時の風速を用いた誘導速度を独立ピッチ制御にも用いた. 流入風観測支援制御の更なる精度向上のため、誘導速度のデータベースの蓄積および他の誘導速度を考慮した手法の考案を行う必要がある.

# 付録 A

## 付録 A OpenFAST 解析

### A 数値解析および解析手法

本研究では、商業用風車への独立ピッチ制御の適応の可能性を検討するため、OpenFAST (Open, Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) を用いて、NREL 5MW 風車に本研究で開発した独立ピッチ制御を適応した際の効果検証を実施した。以下に、本研究で用いた OpenFAST の解析手法について説明する。

#### A.1 FAST 概要

本研究では、風力タービンシミュレーションツールである OpenFAST<sup>7)</sup> を数値解析に使用した。OpenFAST (Open, Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) は、アメリカの NREL (National Renewable Energy Laboratory) により開発されたシミュレーションツールであり、負荷解析、空力解析、構造解析等の解析を実行できる。

図 A.1 に OpenFAST の構成を示す。OpenFAST は、構造計算を行う ElastDyn, 空力計算を行う AeroDyn, 風速を入力する InflowWind, 制御を計算する ServoDyn を用いてシミュレーションを行うツールである。図 A.2 に示すように、OpenFAST は、これら 4 つのモジュール間でデータをやり取りし解析を行う。

OpenFAST, ElastDyn, AeroDyn, InflowWind, ServoDyn は、独自の入力ファイルを必要とする。図 A.3 に解析での入出力データファイルを示す。OpenFAST の Primary ファイルには出力時間、タイムステップ、ElastDyn 等のフォルダを指定する。ElastDyn の Primary ファイルは、Tower ファイル、Blade ファイル、タワー、ロータ、ナセルおよびドライブトレインの寸法、質量、剛性を指定する。Tower ファイルは、密度、慣性モーメント、および振動モード等を指定する。Blade ファイルは、各翼スパン位置の質量、ねじり角、慣性モーメント等を指定する。

AeroDyn の Primary ファイルでは、Blade ファイル、Airfoils ファイル、空気密度、解析設定を指定する。ここで解析設定は、動的失速、誘導速度、翼根、翼端損失等の影響を考慮するかを選択する。ここでの Blade ファイルは翼型、ねじれ角および翼弦長を入力する。Airfoils 入力ファイルは、指定された翼型のゼロ揚力角、失速角、迎角 360°範囲に対する揚力係数  $C_l$ 、抗力係数  $C_d$  を入力する。Airfoils ファイルは、風車翼に使用される翼型に合わせてそれぞれ作成する。したがって、本解析における風車翼の空力特性は、各スパン方向に配置された、翼型、翼弦長およびねじり角で表現され、翼型特性は迎角に対する空力係数として表現される。

ServoDyn の Primary ファイルでは、制御方式、発電機効率、ServoData を指定する。制御方式は、ピッチ制御、トルク制御、ヨー制御等を指定できる。ServoData はピッチ制御の手法を入力する。

InflowWind の Wind ファイルでは、解析に使用した流入風速を設定する。

## A.2 解析対応風車

本研究では解析モデルとして、NREL の 5MW 風車モデル<sup>(8)</sup>を使用する。以下に本解析の対象風車の基本仕様を示す。対象風車はアップウィンド型 3 枚翼水平軸風車で定格出力は 5MW、ロータ直径 126m、ハブ高さは 90m、定格回転数は  $12.1\text{min}^{-1}$ 、定格風速は  $11.4\text{m/s}$ 、カットイン風速は  $3.0\text{m/s}$ 、カットアウト風速は  $25.0\text{m/s}$ 、ティルト角は  $5.0^\circ$ 、コーン角は  $2.5^\circ$  である。また、定格風速まではロータの回転数によって出力を制御する可変速制御、定格出力運転以降はピッチ角を変化させることで出力を制御するピッチ制御となっている。この風車は大形風車の代表例として、多くの研究機関にて使用されるモデルである。また FAST を使用する際に初めから存在する基本的な風車があり、多くの機関で再現が可能であるという観点からこの風車モデルを解析に使用した。

## A.3 解析結果

### A.3.1 5MW 風車における独立ピッチ制御効果検証

今回 5MW 大形風車における独立ピッチ制御効果を検証するために、定常風解析を実施した。本編 3 章で提案したピッチ角指令値を OpenFAST 上で NREL 5MW 風車モデルに適応した。解析に使用した流入風条件はハブ高さで定常風速  $10\text{m/s}$  で風速の高度分布は 0.2 乗則に従うものとした。ロータ回転数は固定回転数  $11.1\text{min}^{-1}$  となっており、本来ピッチ制御を必要としない部分負荷運転領域にて解析を実施した。得られた結果を以下の図に示す。

まず、迎角変動における解析結果の評価を行う。図 A.4 は両制御における迎角変動の図である。図の横軸はアジマス角で縦軸は翼 80%位置の迎角である。黒のデータは独立ピッチ制御のデータで、青のデータはピッチ固定時のデータである。また図 A.5 は両制御における平均迎角と迎角変動の比較である。図 A.5 より、翼 80%位置における迎角標準偏差を 62% 低減することに成功した。また図 A.4 を見ると、ピッチ固定時ではアジマス角  $\varphi = 180[^\circ]$  で迎角の大きな低下が見られる。これはタワーの影響により流入する風速が低下したためであると考えられる。一方で独立ピッチ制御適応時ではこの迎角変動を抑制できているため、ロータ回転中はどのアジマス角においても同様の翼性能で風車が運転できていると考える。

次に、出力変動における解析結果の評価を行う。図 A.6 は両制御における出力変動の図である。図の横軸はアジマス角で縦軸は風車出力、凡例は図 A.4 と同様である。また図 A.7 は両制御における平均出力と出力変動の比較である。図 A.7 より、独立ピッチ制御により平均出力が 1.1%低下した一方で、出力標準偏差が 4.3%増加していることが分かる。また図 A.6 を見ても、風車出力の波形に大きな違いがないことが分かる。この結果より風車出力の変動は上流風の鉛直勾配や、迎角変動による出力性能にあまり起因していないことが分かる。また本編における出力増大効果は流入風観測支援制御によるものが大きいと考える。

次に、推力変動における解析結果の評価を行う。図 A.8 は両制御における推力変動の図である。図の横軸はアジマス角で縦軸は風車推力である。凡例は図 A.4 と同様である。また図 A.9 は両制御における平均推力と推力変動の比較である。図 A.9 より、独立ピッチ制御により平均推力を 2.7%抑制した一方で、推力標準偏差を 13.2%抑制できていることが分かる。また図 A.8 における推力変動を見ると推力の平均値に関しては、どのアジマス角においても

## 付録 A

推力が減少していることが分かる。これは図 A.7 で出力が低下したことが由来していて、流入風から得るトルクが減少したために推力の平均値が減少したのではないかと考える。また推力の振幅について着目をするると、独立ピッチ制御時ではアジマス角 $\varphi = 60^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $300^\circ$  付近の推力低下が小さくなっていることがわかる。これは図 A.4 の結果からも分かるように、ロータ面下側の迎角を増加させたために推力が増加したためである。

次に、翼根元に作用するフラップ方向せん断荷重における解析結果の評価を行う。図 A.10 は両制御におけるフラップ方向せん断荷重の図である。図の横軸はアジマス角で縦軸はフラップ方向せん断荷重である。凡例は図 A.4 と同様である。また図 A.9 は両制御における平均推力と推力変動の比較である。図 A.11 より、ロータ面上側に位置するアジマス角  $0^\circ$ 、 $360^\circ$  付近のアジマス角にて、平均荷重を低下できていることが分かる。この結果より独立ピッチ制御はロータ回転に伴う最大荷重を低減させ、最小荷重を増加させる効果があることが分かる。図 1.9 より、独立ピッチ制御によりフラップ方向せん断荷重を 2.3%抑制したことに加え、標準偏差を 60.2%と大きく抑制できていることが分かった。この結果より翼 1 枚当たり作用するせん断荷重変動を大きく低減できているので、独立ピッチ制御を適応することで、風車翼の長寿命化につながるのではないかと考える。

以上の結果より、本研究の独立ピッチ制御を大形風車に適応した場合は、出力性能に関して大きな影響を与えない一方で、ロータ回転に伴う荷重変動(標準偏差)を大きく低減できていることが分かった。

### A.3.2 荷重変動を助長させる要因の解明

風車運転時の更なる荷重変動抑制のため、風車運転時の荷重変動を増加させる要因の解明を OpenFAST の定常風解析を用いて実施した。そこで初めに三重大学 37kW 風車には存在しないが、大形風車には存在する傾向があるティルト角、コーン角が推力変動に与える影響について調べた。そしてすべての風車に共通して生じる翼のたわみや、タワーにより乱れた風が流入することによる影響についても調査を実施した。

#### A.3.2.1 ティルト角の影響

風車のティルト角の違いが推力変動に及ぼす影響を考える。OpenFAST では ElastDyn の ShftTilt を変更にすることにより、ティルト角と推力の関係を導出することが可能である。そのためティルト角を  $0^\circ$  から  $20^\circ$  まで  $2.5^\circ$  刻みに変更し、風車ティルト角が推力に及ぼす影響を調べた。解析における流入風と回転数条件は A.3.1 項と同様となっている。また A.3.2 項では本編で作成した独立ピッチ制御を適応せず、ピッチ固定時のデータを使用している。またティルト角の定義はロータ面が上に傾く方向を正と定義している。以下に解析で得られた結果を示す。

図 A.12 はティルト角が風車推力に与える影響である。図の横軸はティルト角、第一縦軸が平均推力、第二縦軸が推力標準偏差となっている。また黒のデータは平均値、赤のデータは標準偏差を示している。図 A.13 はティルト角がロータ投影面積、ロータ面平均風速に与える影響のグラフである。図の横軸はティルト角、第一縦軸はロータ投影面積、第二縦

軸はロータに流入するロータ面平均風速である。黒のデータはロータ投影面積、赤のデータはロータ平均風速となっている。

解析の結果より、ティルト角が増加するに従い平均推力が増加していることが分かった。しかし、図 A.13 だけの結果をみるとティルト角の増加はロータ投影面積やロータ面平均風速の低下をもたらすので平均推力は低下するように考えられる。そのためティルト角の増加により翼の迎角が変動することで、平均的な抗力係数が上昇し推力が上昇してしまったのではないかと考えられる。

#### A.3.2.2 コーン角の影響

次に風車のコーン角の違いが推力変動に及ぼす影響を考える。OpenFAST では ElastDyn の PreCone を変更にすることにより、コーン角と推力の関係を導出することが可能である。

図 A.14 はコーン角が風車推力に与える影響のグラフである。図の横軸はコーン角である。また縦軸と凡例は図 A.12 と同様になっている。図 A.15 はコーン角がロータ投影面積、ロータ面平均風速に与える影響のグラフである。図の横軸はコーン角である。縦軸と凡例は図 A.13 と同様になっている。

解析の結果、コーン角が  $5^\circ$  までは平均推力が増加し、その後低下することが分かる。この原因を確認するとロータ面平均風速とロータ面投影面積のバランスが関係あることが考えられる。図 A.15 よりコーン角が増加するに従いロータ投影面積は低下する一方で、ロータ面平均風速はコーン角  $12.5^\circ$  まで一時的に増加する。そのためこのような推力の変化が見られたのだと考える。以上の結果から、コーン角の有無だけに着目を行うと、コーン角が  $0^\circ$  である 30kW 風車ではコーン角がついている風車と比較して平均推力が増加するため、独立ピッチ制御を適応した際により大きな変動抑制効果が得られることを期待できる。

#### A.3.2.3 翼のたわみによる影響

次に風車翼のたわみによる風車翼に加わる推力の影響を考える。OpenFAST では ElastDyn の FlapDOF と EdgeDOF を OFF にすることにより、翼のたわみを考慮しない(翼がたわまない)条件で解析を実施することが可能である。そのためたわみ自由度を変更することで、風車翼のたわみによる推力変動への影響を考察した。以下に解析で得られた結果を示す。

図 A.16 は風車翼のたわみが風車ロータ推力に与える影響のグラフである。図の横軸はアジマス角、縦軸はロータ推力となっている。黒のデータがたわみなしのデータ、赤のデータがたわみありのデータとなっている。また図 A.17 は風車翼のたわみが風車翼根のせん断荷重に与える影響である。図の横軸はアジマス角で、縦軸は翼 1 に作用するフラップ方向せん断荷重である。また図の凡例は図 A.16 と同様となっている。図 A.16 より、風車翼のたわみにより、推力変動のピーク値が翼のたわみ  $20^\circ$  分遅れることが分かった。これは翼がロータ回転方向と逆にたわんだことにより、ブレード上の局所迎角が変動したためであると考えられる。また図 A.17 より風車翼のたわみにより回転に伴う推力変動が抑制されていることも分かる。これは翼がたわむことでロータ面上端と下端の高低差が小さくなり、翼の受ける風速差が低下したためであると考えられる。

## 付録 A

以上の結果より風車翼のたわみは推力変動を増加させないが、変動の周期にずれを生じさせることが分かる。

## A.3.2.4 流入風のタワーによる影響

最後に、タワーの影響を受けた流入風が推力変動に及ぼす影響を考える。OpenFAST では AeroDyn の TwrPotent を OFF にすることにより、流入風がタワーの影響を受けない条件で解析を実施することが可能である。そのためタワー空力モードを変更することでタワーの影響を受けた流入風の推力変動への影響解明を行った。

図 A.18 はタワーの影響が風車ロータ推力に与える影響のグラフである。横軸と縦軸は図 A.16 と同様になっている。また黒のデータがタワーの影響なしのデータ、赤のデータがタワーの影響ありのデータとなっている。また図 A.19 は風車翼のたわみが風車翼根のせん断荷重に与える影響である。横軸と縦軸は図 A.17 と同様になっている。また図の凡例は図 A.18 と同様となっている。

解析の結果、ロータ推力変動の内 62.2%がタワーの影響を受けた流入風の影響であることが分かった。そのため、定常風条件下では残りの 37.8%がロータ面平均迎角を一定に維持することで推力変動を抑制できる限界値ではないかと考える。またタワーの影響はアジマス角  $180^\circ$  付近のごく短い領域にのみ影響を及ぼすことが分かる。そのため、ロータ面下側の推力低下を抑制するピッチ制御を開発することで推力変動抑制へ更なる効果が期待できると考える。

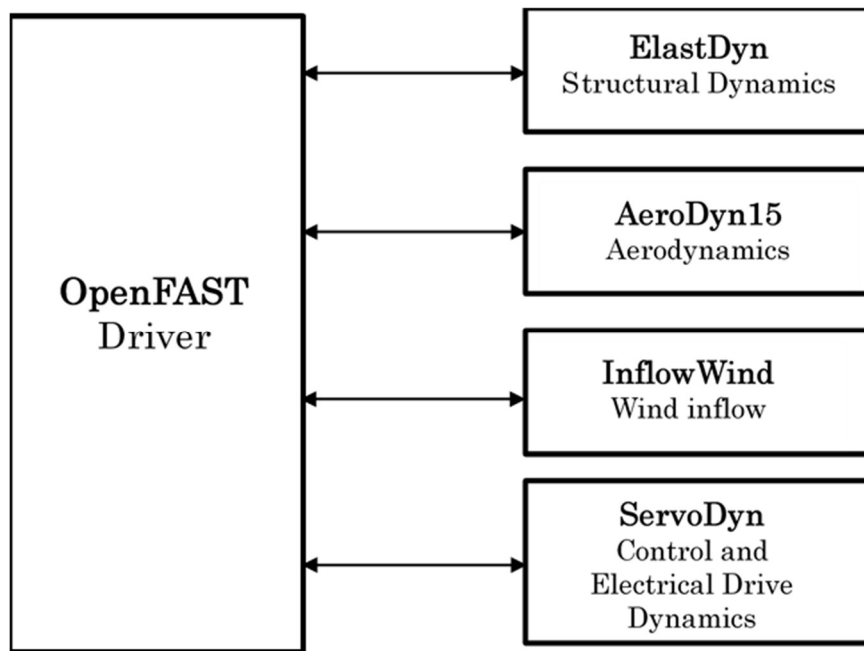


図 A.1 OpenFAST の構造

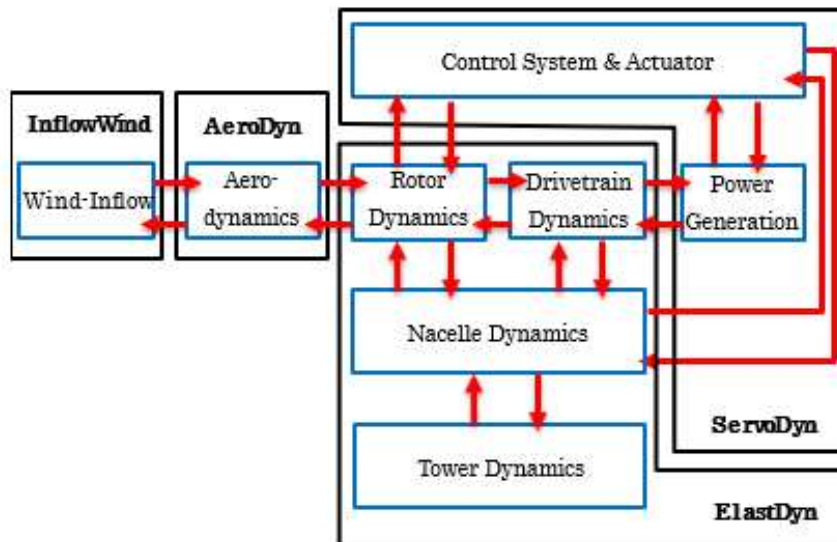


図 A.2 OpenFAST の解析



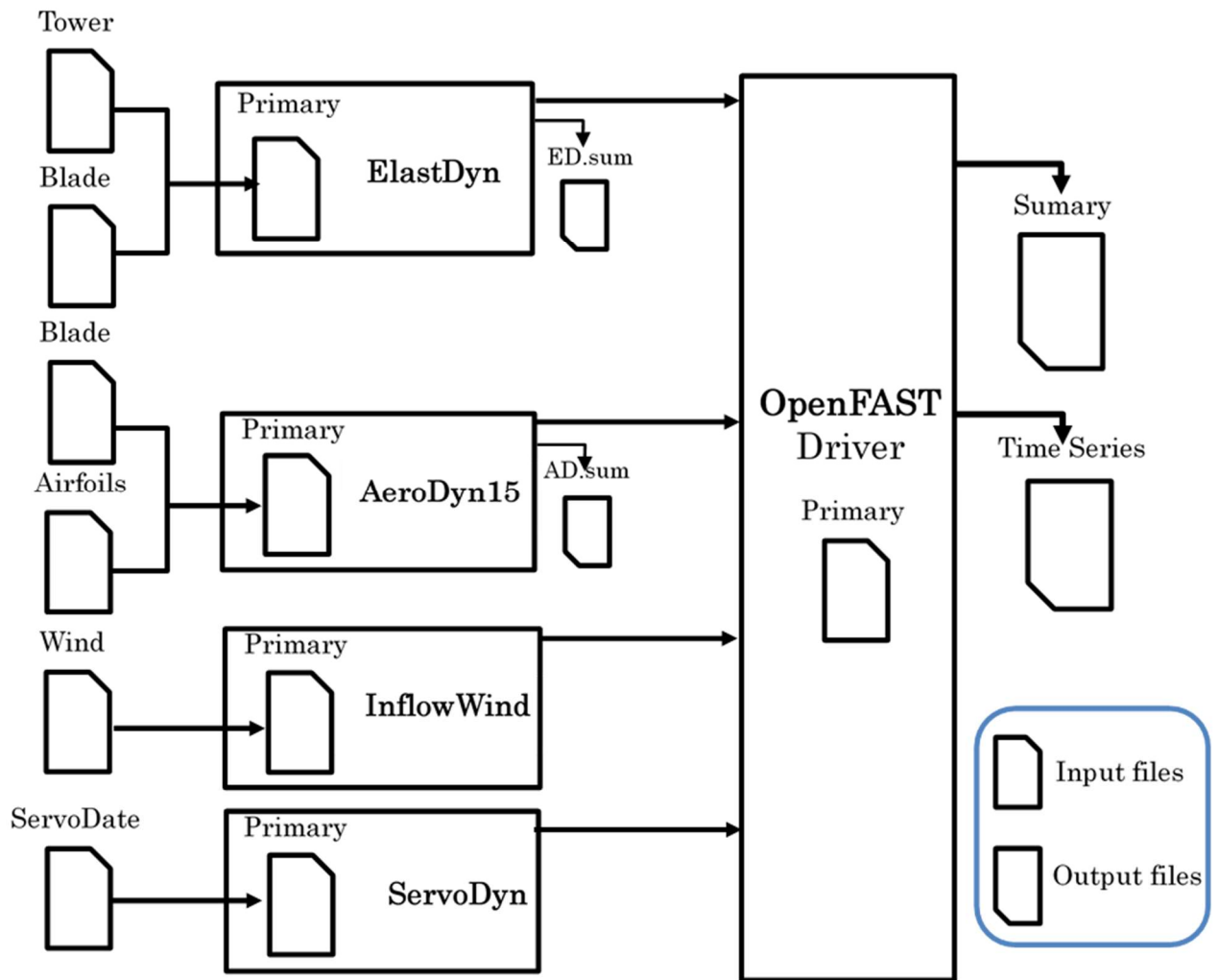


図 A.3 OpenFAST での入出力データファイル

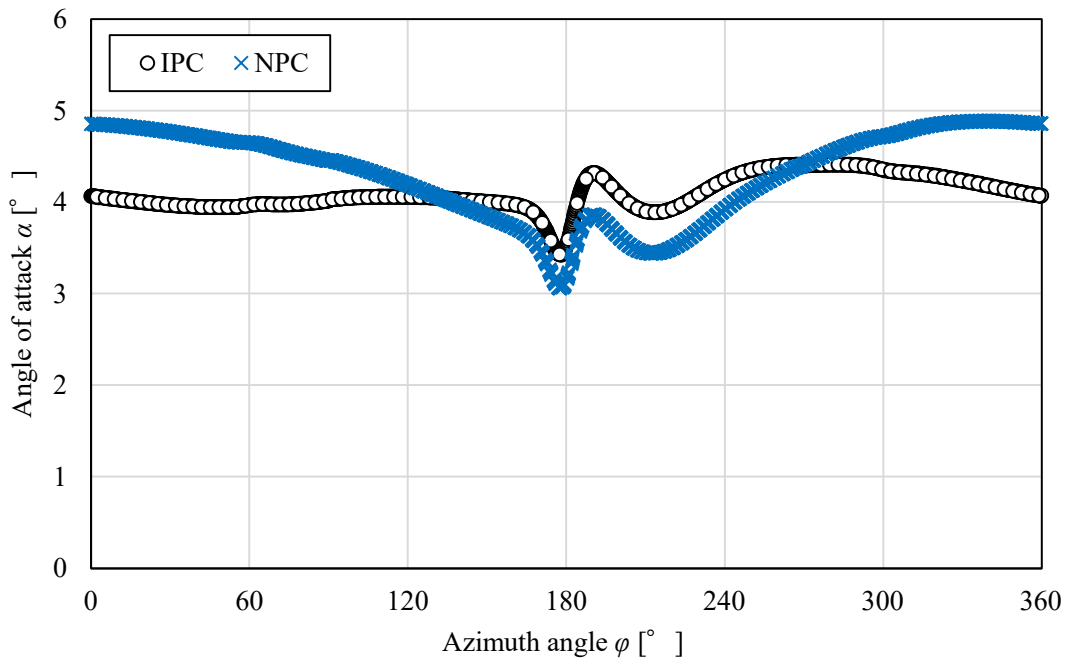


図 A.4 アジマス角毎の迎角変動の比較

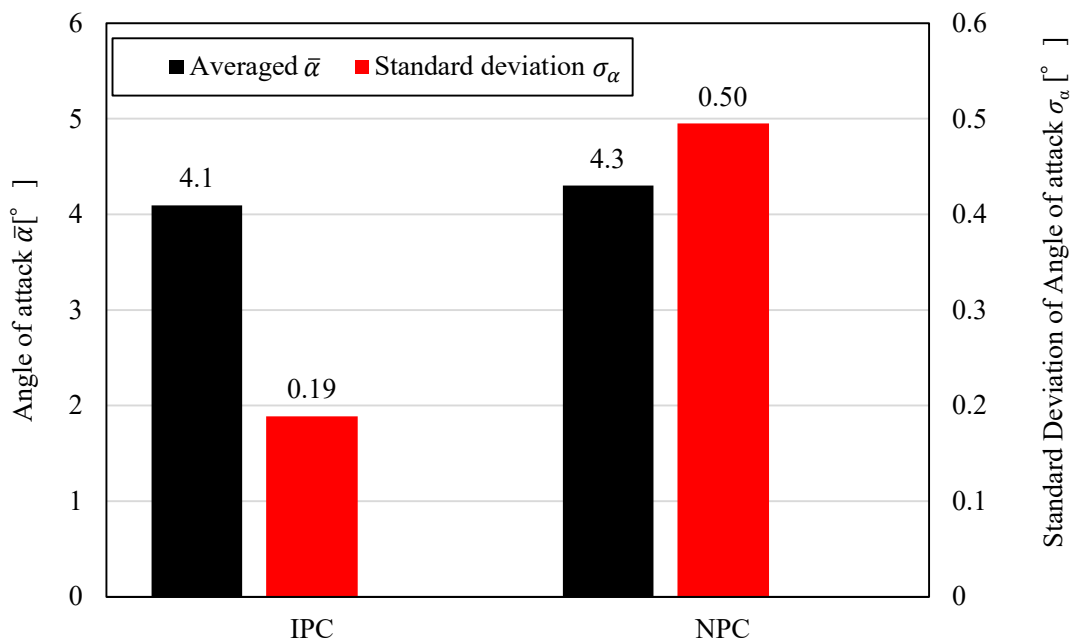


図 A.5 アジマス角毎の迎角変動の比較

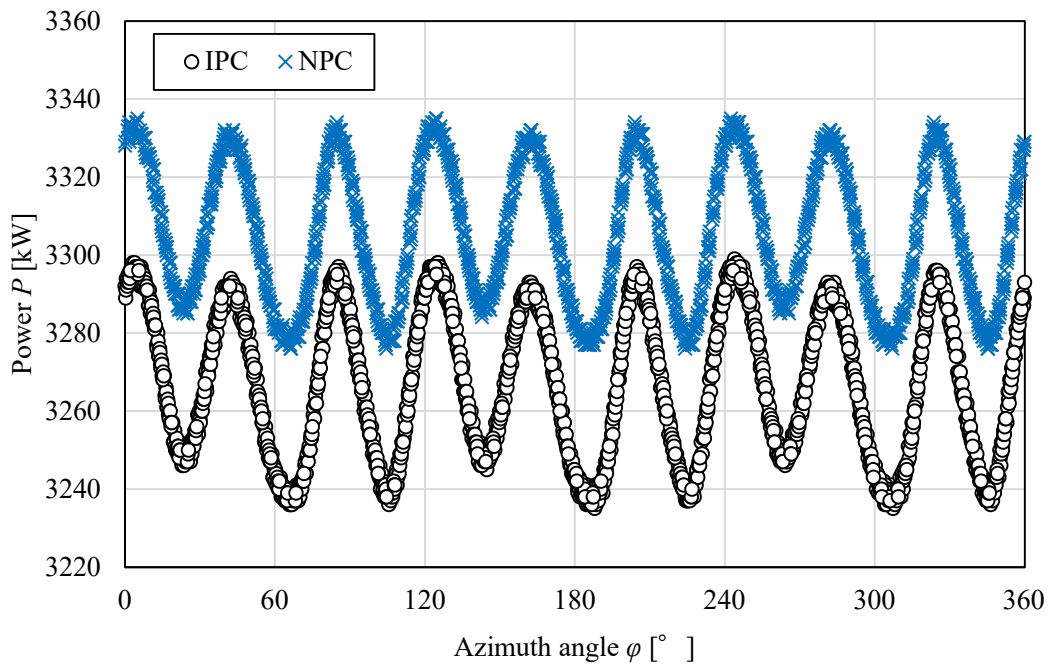


図 A.6 アジマス角毎の出力変動の比較

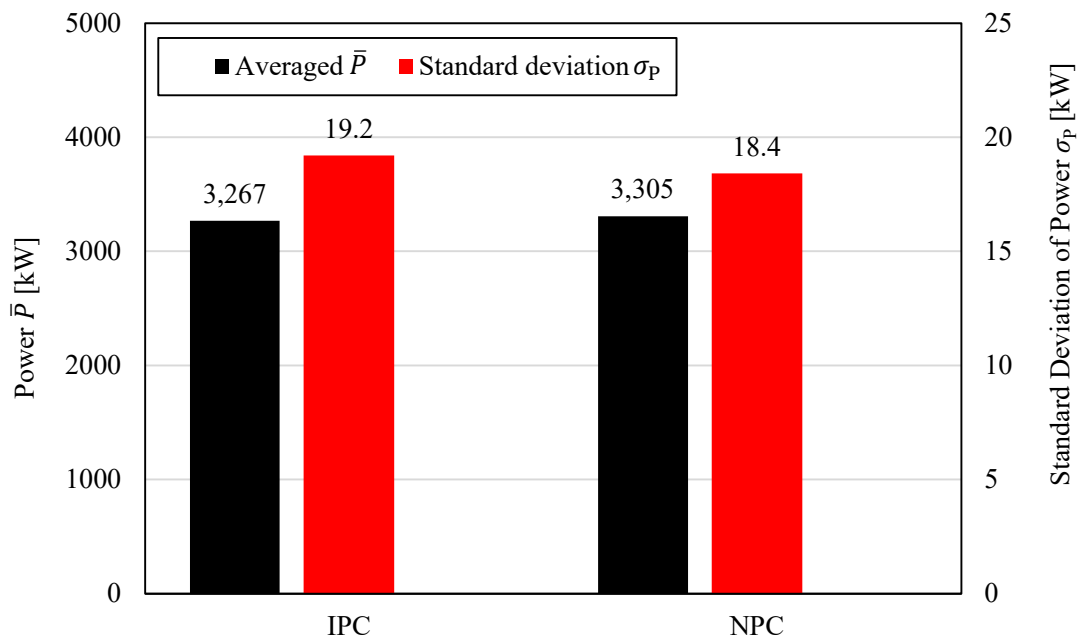


図 A.7 両制御の出力変動の比較

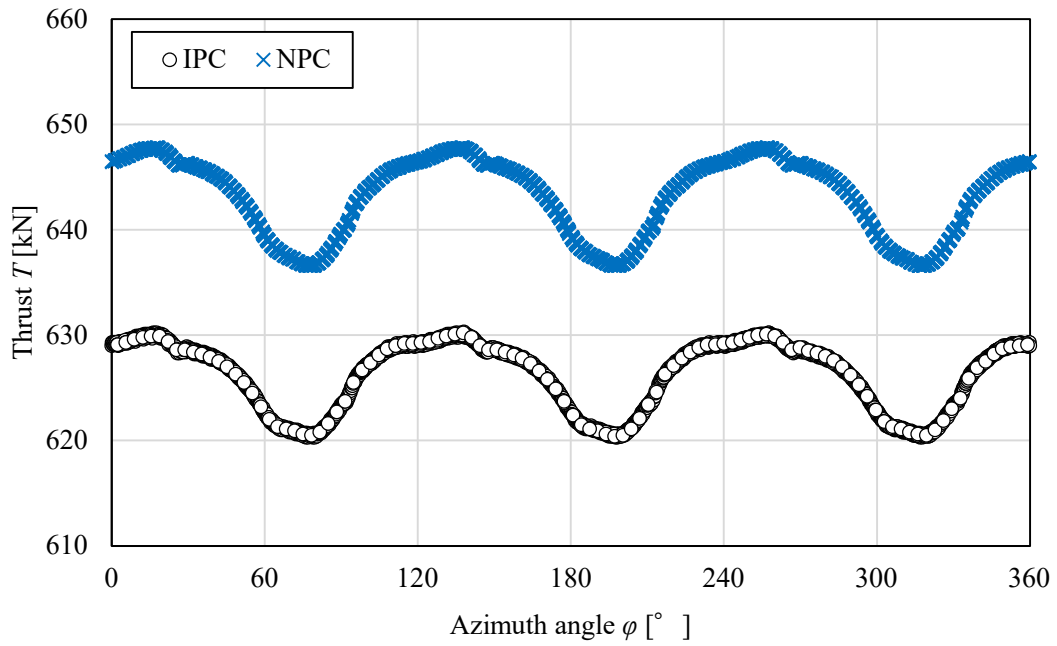


図 A.8 アジマス角毎の推力変動の比較

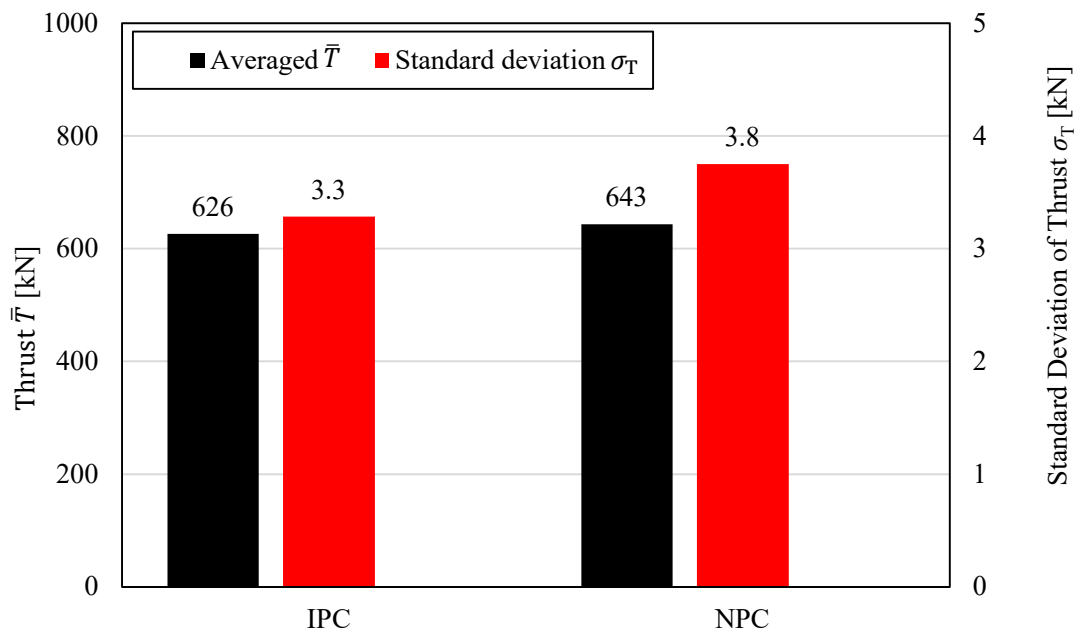


図 A.9 両制御の推力変動の比較

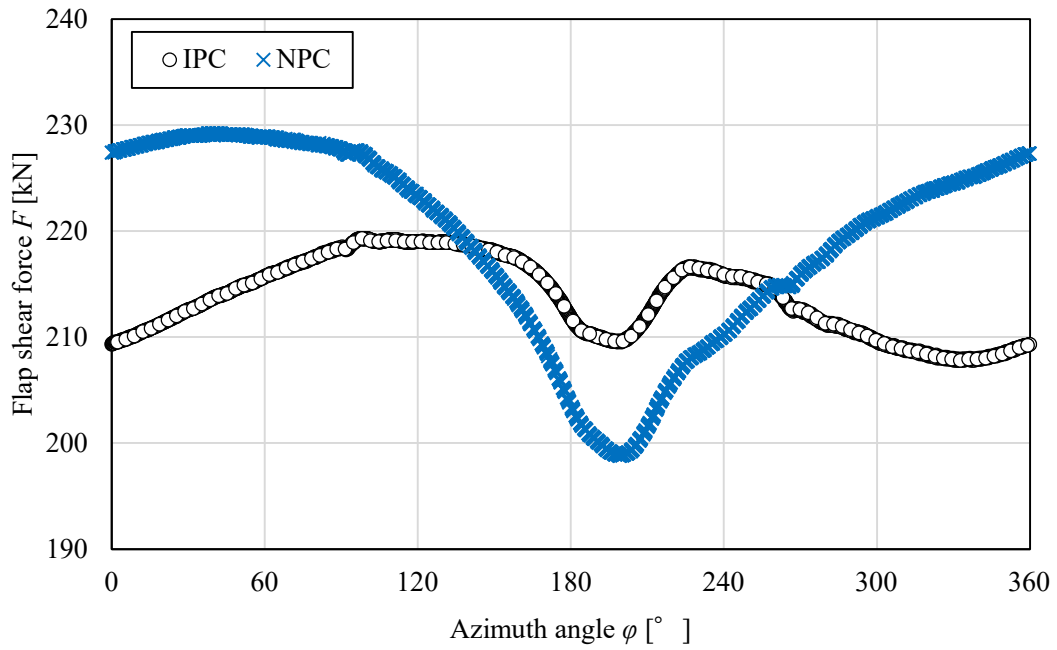


図 A.10 両制御の翼根元に作用するフラップ方向せん断荷重変動の比較

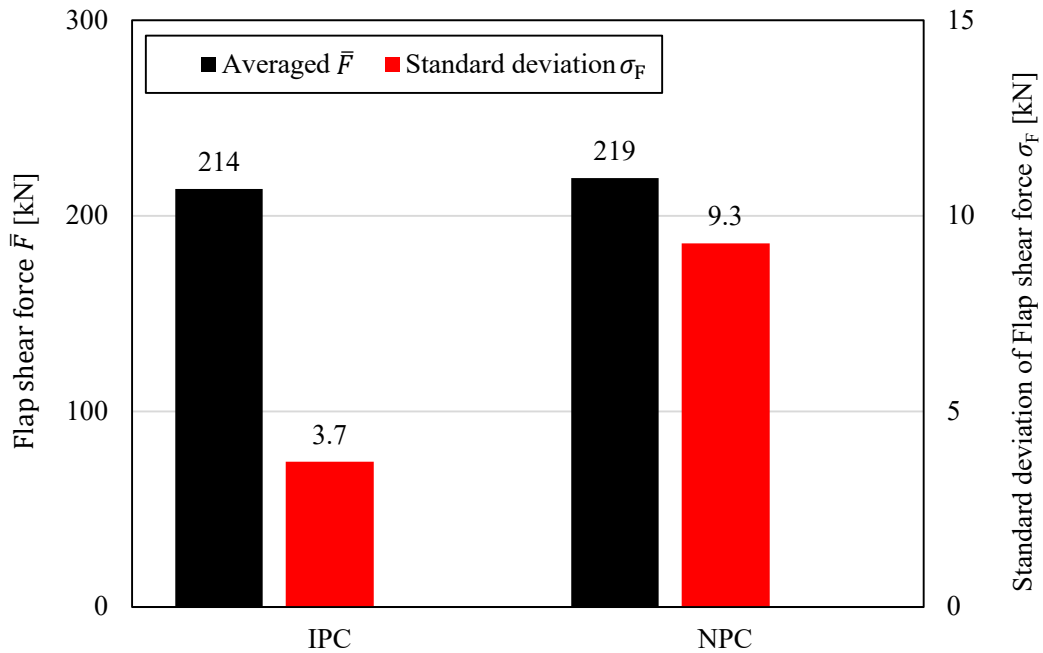


図 A.11 両制御の翼根元に作用するフラップ方向せん断荷重変動の比較

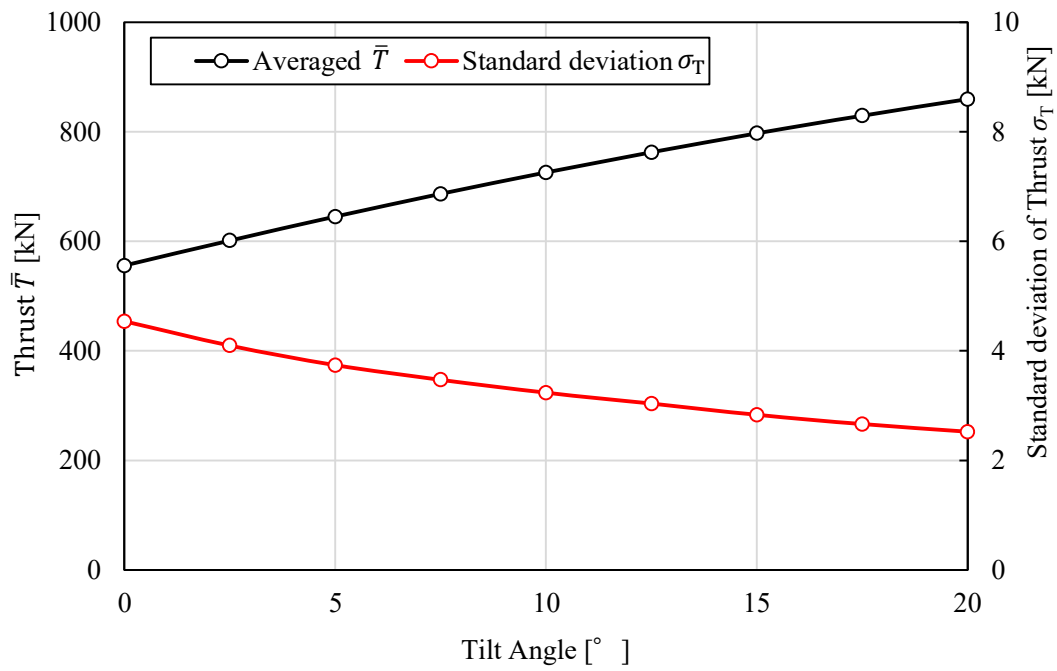


図 A.12 ティルト角が風車推力に与える影響

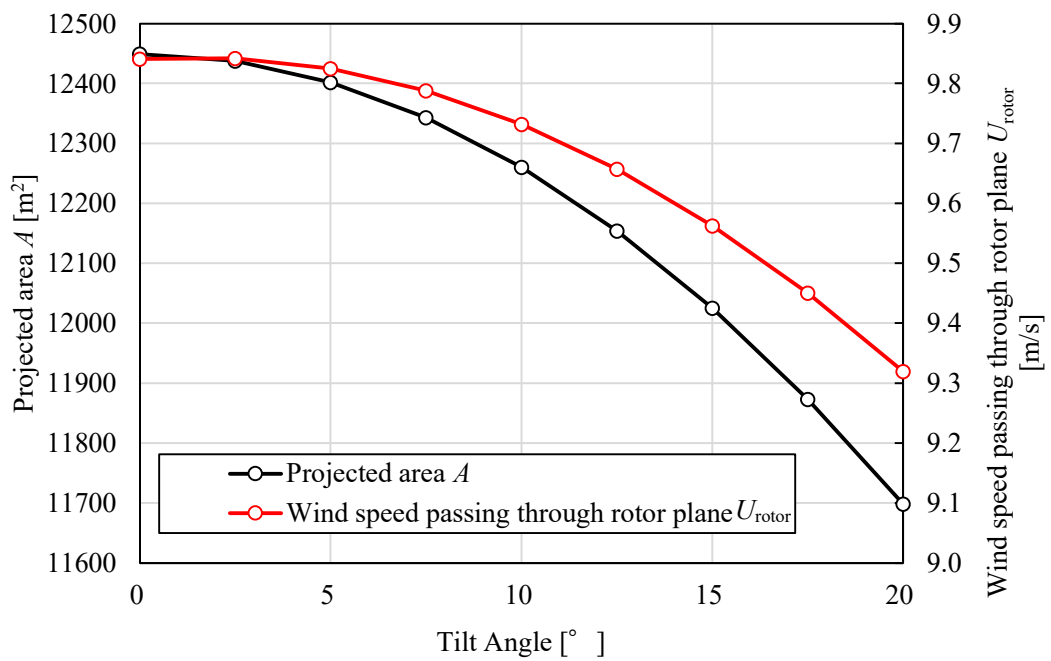


図 A.13 ティルト角がロータ投影面積，ロータ面平均風速に与える影響

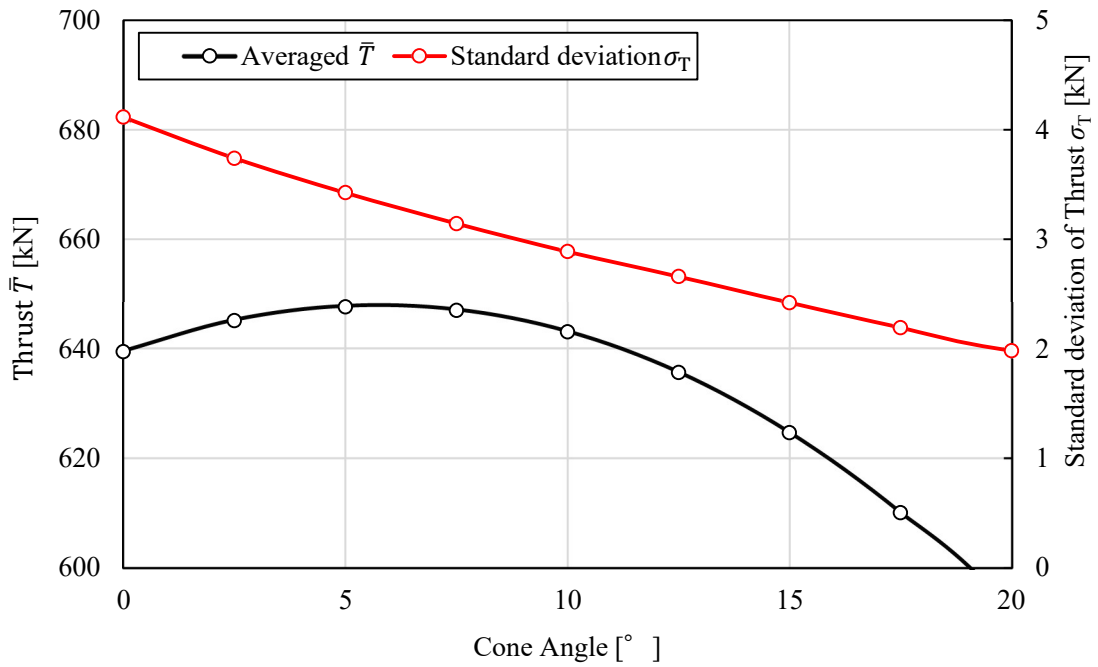


図 A.14 コーン角が風車推力に与える影響

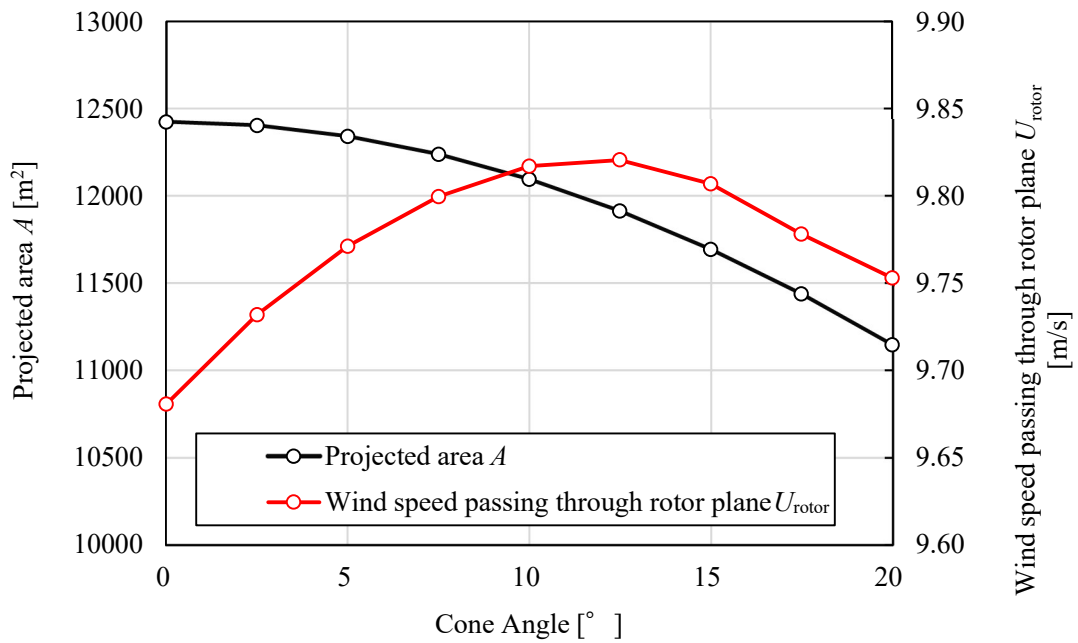


図 A.15 コーン角がロータ投影面積，ロータ面平均風速に与える影響

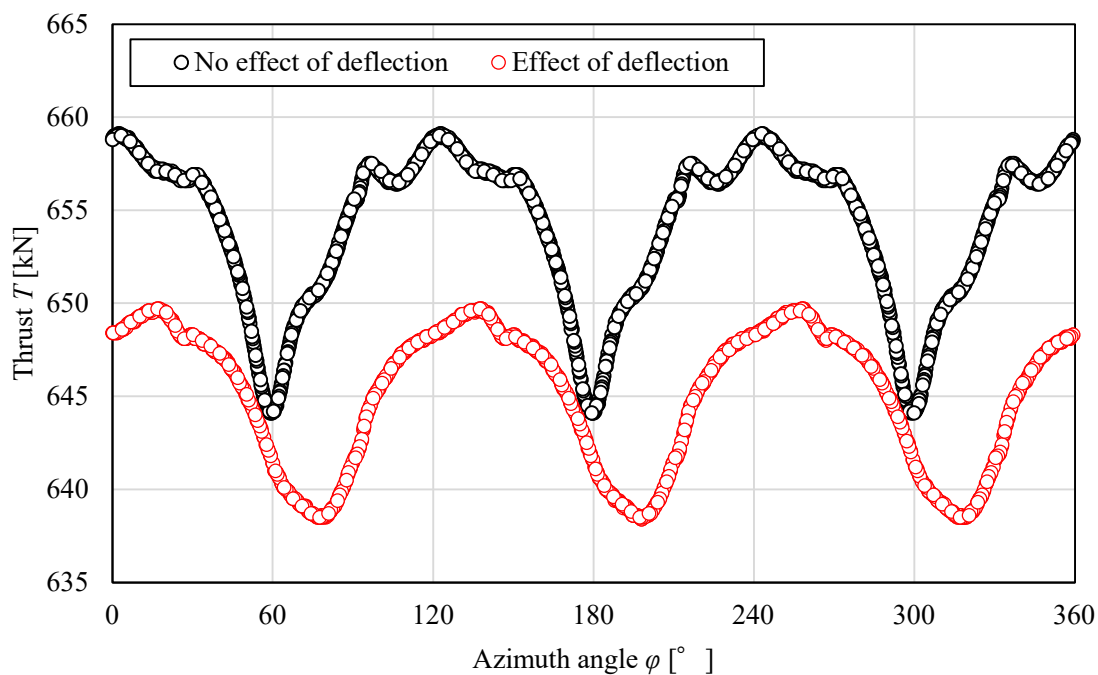


図 A.16 風車翼のたわみが風車ロータ推力に与える影響

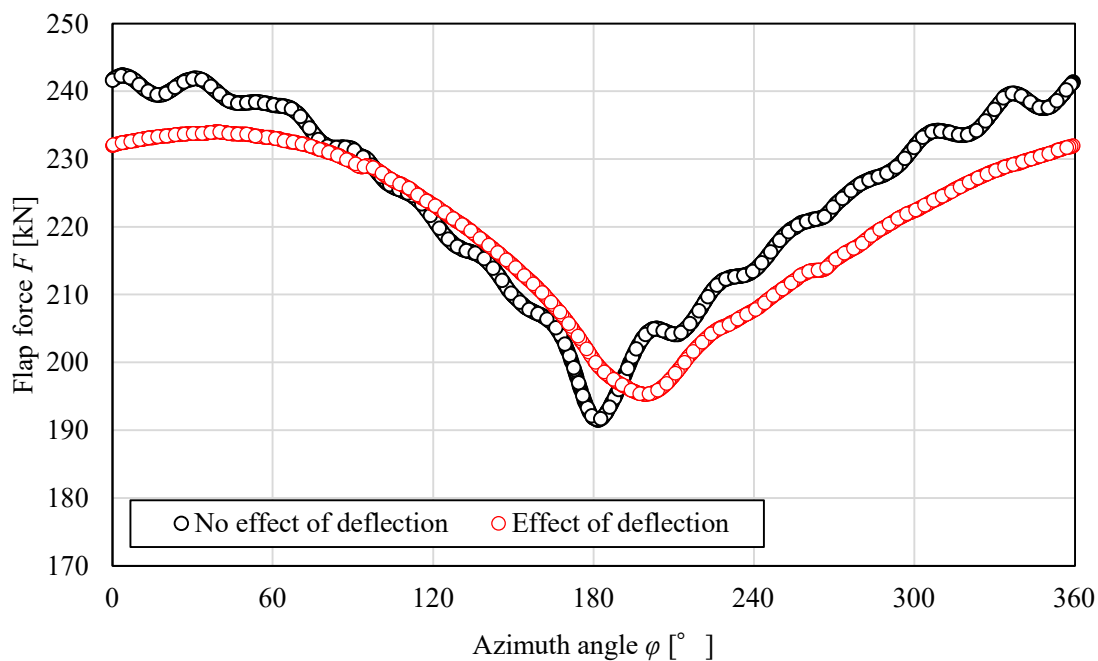


図 A.17 風車翼のたわみが風車翼根のせん断荷重に与える影響



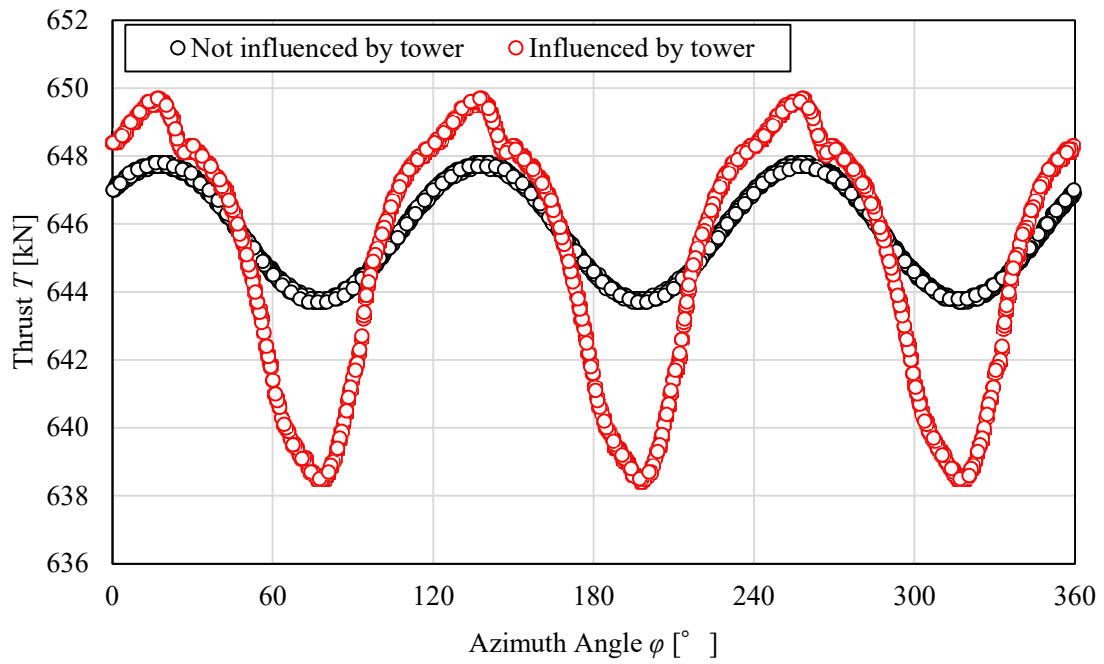


図 A.18 タワーの影響が風車ロータ推力に与える影響

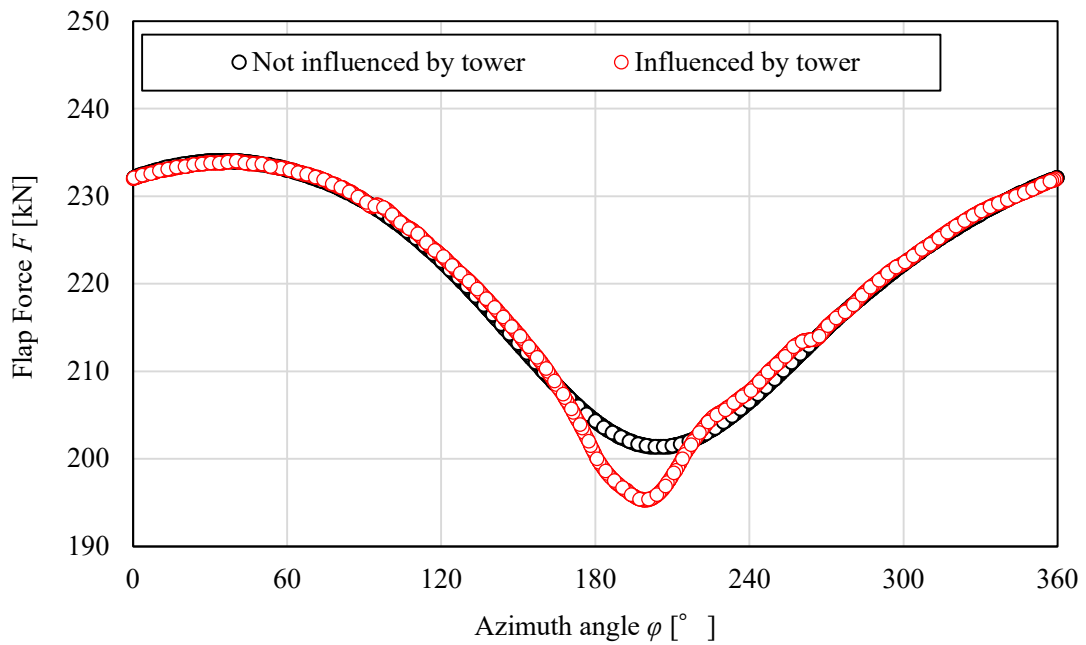


図 A.19 タワーの影響が風車翼根のせん断荷重に与える影響

## 参考文献

## 1 章

- (1) 世界風力会議(GWEC), GLOBAL WIND REPORT 2019.
- (2) 一般社団法人 日本風力発電協会, 日本の風力発電導入量,  
<http://jwpa.jp/pdf/dounyuujisseki2019graph.pdf>(アクセス 2020 年 12 月 1 日)
- (3) 本田明弘, 石井秀和, 風車の大型化に関するチャレンジ, Wind Engineers, JAWE,  
Vol58, No.3, pp.322-327, 2013.
- (4) E. Bossanyi , A. Wright, Field testing of individual pitch control on the NREL CART-2  
wind turbine, Wind Energy, pp.0-9, 2015.
- (5) Dimitrije Kotur, Željko Đurišić, Individual pitch control for wind turbine load reduction  
recognizing atmospheric stability, WindEurope2016, pp.5207-5212, 2016.

## 3 章

- (6) 坂口翔太, 水平軸風車のドライブトレインの負荷軽減に関するフィールド実験,  
修士論文, pp.0-124, 2016.

## 付録

- (7) NREL, NREL NWTC Information Portal, OpenFAST Documation,  
<https://openfast.readthedocs.io/en/master/>, (アクセス 2020 年 12 月 1 日)
- (8) J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, Definition of a 5-MW Reference  
Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Repor, pp.0-75, 2009.

## 参考

- (9) David Schlipf, Paul Fleming, Florian Haizmann,, Andrew Scholbrock, Martin Hofsäß,  
Alan Wright, Po Wen Cheng, Field Testing of Feedforward Collective Pitch Control on the  
CART2 Using a Nacelle-Based Lidar Scanner, Journal of Physics, pp.0-13, 2014.
- (10) Carlos González, Professor William Leithead, Han Yi, James Day, Field tests of Individual  
Blade Control and its impact on the wind turbine components lifetime, WindEurope2016,  
pp.0-9, 2016.
- (11) David Schlipf, Holger Fürst, Steffen Raach, Florian Haizmann, Systems Engineering for  
Lidar-Assisted Control:A Sequential Approach, Journal of Physics, pp.0-10, 2018.

## 参考文献

- (12) 瀬戸口雄介, 藤尾裕聡, 飯田誠, 荒川忠一, ナセル搭載型 LiDAR を用いた風車出力予測, 日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集, pp.0-3, 2014.
- (13) 山田遼, 田辺安忠, 青山剛史, 飯田誠, 松尾裕一, 荒川忠一, ブレードピッチ角が超大型風車性能に与える影響に関する CFD 解析, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, pp.0-6, 2015.
- (14) 大江 晴, 天守 裕也, 田辺 安忠, 山本 誠, 菅原 瑛明, 独立ピッチ制御を適用した大型風車周りの流れの数値計算, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, pp.0-1 2015.

## 謝辞

本研究のために、設備や物品等をはじめとする研究に必要な環境を揃えて頂くとともに、日々のミーティングや論文作成の際に、研究に関して的確に様々な助言をくださった前田太佳夫教授に心より感謝申し上げます。非常にお忙しい中でも、常に私たちの研究を気にかけてくださり、度重なる実験装置のトラブルや保守管理、データ整理など多岐にわたってご助力を頂いた鎌田泰成准教授に深くお礼申し上げます。先生方のおかげでこの三年間で技術者として成長できたと思っています。私も将来先生方のような知識が豊富で作業・プログラム開発何でも完璧にこなすことができる技術者になることを目標にして、社会人生活を送りたいと考えます。また丸山直樹准教授には本研究の副査を受諾して頂き、大変感謝しております。書類関係の手続き等をして下さった赤松幸子秘書、伊藤由香前秘書ありがとうございました。実験施設をお貸し頂き、私達を気にかけてくださった三重大学付帯施設農場の職員の方々ありがとうございました。

フィールドチームの皆様にも、大変感謝しております。M1の水野翔一朗君は平日のみならず、土日における実験時でも文句を言わずに計測を手伝っていただきありがとうございました。来年度はチームリーダーとして頑張ってください。鈴木涼佑君は作業の際に、物事をすぐに理解し的確に行動する力に何度も驚かされました。北川慶君は勤勉さや私が苦手とする工具の取り扱いから沢山研究を助けて下さりました。ただ北川君は自分と似て心配性過ぎる性格なので、今後研究に思い悩みすぎないようにもう少し肩の力を抜いて研究に取り組んでみてもいいかもしれません。来年度のフィールドチームの研究も困難な課題が続くと思いますが、今年度学んだことを活かしてよりよい研究ができることを期待しております。また私に研究内外の沢山のことを教えて下さった櫻井優輝先輩や樋口友昭先輩に感謝を申し上げます。

また、研究室の同期である皆様にも本当にお世話になりました。研究室を明るく盛り上げてくれた牛草君、FASTや風車性能について沢山相談にのってくれた多田君、幅広い知識と肩を貸してくれた津村君、何でもクールに卒なくこなす私の影のライバル花村君、いつも明るく元気をくれる松葉君、学部1年生の頃から仲が良くいつも相談に乗ってくれたり農場での計測を気にかけてくれた松林君、本当にありがとうございます。私はいつも農場にいるため3年間を通して、研究室にいる時間は限られていましたが、皆と過ごした時間はとても楽しく一生の思い出です。

エネ環のM1、B4の皆様には、接する機会が少ない中でも、大きな作業の際に話したりして下さり、ありがとうございます。春以降の皆様のご活躍をお祈りいたします。最後になりましたが、支えてくださった家族には深謝致します。本当にありがとうございます。そして、これからもよろしくお願ひ致します。

令和3年2月12日

高井健太