

浮体式洋上風車の動揺による後流影響に関する研究

三輪, 哲聖
九州大学総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/6788184>

出版情報：九州大学, 2022, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：

令和4年度

修士論文

浮体式洋上風車の動揺による
後流影響に関する研究

九州大学大学院総合理工学府

総合理工学専攻

機械・システム理工学メジャー

風工学研究室

三輪 哲聖

指導教員 内田 孝紀

提出年月日 令和5年2月7日

目次

パラメーター一覧	3
第1章 序論	4
1.1 研究背景	4
1.1.1 エネルギー問題	4
1.1.2 風力発電とウィンドファームの洋上進出	6
1.1.3 風車後流について	8
1.1.4 浮体式風車とその特有な後流	10
1.2 研究目的	10
1.3 論文構成	11
第2章 風洞実験手法	12
2.1 実験環境	12
2.1.1 単回路回流式大型境界層風洞	12
2.1.2 風車模型	14
2.2 計測手法	16
2.2.1 ロータ回転の制御方法について	16
2.2.2 風車後流の気流計測手法	19
2.2.3 風車出力の計測手法	21
2.2.4 風車抗力の計測手法	22
2.2.5 全計測で使用した機器	25
2.2.6 風車後流可視化実験手法	25
2.2.7 風車模型の性能曲線について	28
第3章 浮体動揺を模擬する装置（加振装置）	29
3.1 加振装置の動揺方向の決定	29
3.2 加振装置の動揺パラメータについて	30
3.2.1 浮体動揺を想定する実機風車について	30
3.2.2 実機風車の浮体動揺の変位量推定	31
3.2.3 加振装置の製作で採用した相似則について	32
3.2.4 加振装置の動揺パラメータについて	33
3.3 加振装置の仕様について	33
3.4 ピッチ・ロール角度の定義について	35
3.5 ピッチ角度固定方法について	36
第4章 単基風車後流についての風洞実験	38
4.1 単基風車後流の可視化実験	38
4.1.1 煙発生装置を用いた可視化実験	38

4.1.2	スモークケーキを用いた可視化実験.....	41
4.2	動揺状態による単基風車後流の気流計測結果の比較と考察.....	45
4.2.1	ピッチ・サージ方向の動揺が後流の気流性状に与える影響について.....	45
4.2.2	ロール方向の動揺が後流の気流性状に与える影響について.....	54
4.2.3	ニアウェイク領域の気流計測について.....	65
4.2.4	ピッチ動揺による過渡現象について.....	67
4.2.5	ピッチ動揺周期の影響について.....	70
4.2.6	タワー・ナセルが後流に与える影響について.....	73
4.2.7	ピッチ角度固定時の後流の気流計測.....	76
4.2.8	ロール角度固定時の後流の気流計測.....	78
第5章	2基風車模型を用いた風洞実験.....	81
5.1	下流側風車の出力計測.....	81
5.1.1	風車模型のロータ回転数固定時の計測結果.....	82
5.1.2	風車模型のロータ回転数自動制御時の計測結果.....	86
5.2	下流側風車の抗力計測.....	89
5.2.1	風車模型のロータ回転数固定時の計測結果.....	90
5.2.2	風車模型のロータ回転数自動制御時の計測結果.....	93
5.3	下流側風車の後流の気流計測.....	95
第6章	結論.....	101
	参考文献.....	105
	謝辞.....	107
	Appendix.....	109
A	ピッチ動揺の状態をモニターする方法について.....	109
B	単基風車試験.....	111
B-1	ピッチ，サージ方向の動揺を同時に行った場合.....	111
B-2	加振装置に装着するカバーの考案.....	114
B-3	乱れを有する流入風による後流計測.....	116
B-4	風車後流の多点での気流計測.....	119

パラメータ一覧

D	ロータ直径
F_x	風車の抗力の主流方向成分
F_y	風車の抗力の主流に直行する方向成分
$Power$	風車出力
Re	レイノルズ数 (代表長さ=ロータ直径)
T_r	風車トルク
U	任意点の流速 主流方向成分
U_{mean}	任意点の平均流速 主流方向成分
U_0	流入風速
U_{ref}	正規化する際に用いる風速 主流方向成分
σ_U	主流方向速度の標準偏差
ω	ブレードの角速度

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 エネルギー問題

現在、二酸化炭素などの温室効果ガスによって引き起こされる地球温暖化の進行が問題となっている。地球温暖化は、石炭や石油の化石燃料を燃やし、エネルギーを得ると同時に排出される二酸化炭素が1つの原因として挙げられている。地球温暖化は、気温や水温を変化させ、海面上昇、降水量の変化やそのパターン変化を引き起こすとされている。これにより、台風や猛暑等の異常気象を増加させ、生物種の大規模な絶滅、農作物の不作、漁業の不漁を引き起こす恐れがある。

図 1.1 により、世界のエネルギー消費量は、経済成長とともに増加を続け、石油換算で 1965 年の 37 億トンから、2020 年には 133 億トンに達していることが分かる^[1]。今後、発展途上国の経済発展に向けて、さらにエネルギーの消費量が増加することが懸念される。二酸化炭素の排出に繋がり、採取に限界のある化石燃料だが、図 1.2 の 2020 年の結果を見て分かるように、世界各国で主なエネルギー源として、使用されている。

地球温暖化の影響を阻止するべく、温室効果ガスの低減に向け、国際的にパリ協定が取り決められたり、またそれに付随した目標等が設定されたりと、問題解決に向け世界各国の動きが加速している。このような国際的な動向により、化石燃料依存のエネルギー源の割合を再生可能エネルギーによって減少させる動きがある。図 1.2 は、現在の世界のエネルギー供給源と国際的に定められた目標達成に向け定められた各国の政策、公約に基づいたエネルギー供給源の割合の目標である。ネット・ゼロ・エミッション 2050 年実現シナリオ (Net Zero Emission by 2050 Scenario) は、地球の気温上昇を 1.5[°C]に抑え (パリ協定によるもの)、その他の目標を達成するための、達成可能なケースである。この図から、再生可能エネルギーの拡大が必須であることは明らかである。

また特に日本では、これらの環境問題に加えて、エネルギーの自給率が非常に低い水準であることが問題視されている。図 1.3 は世界各国のエネルギー自給率の割合であり、日本が他国に比べ、非常に低い水準であることを確認できる。今後、国内でエネルギーを生産していくためにも、再生可能エネルギーの拡大を推し進めていくことが必須である。

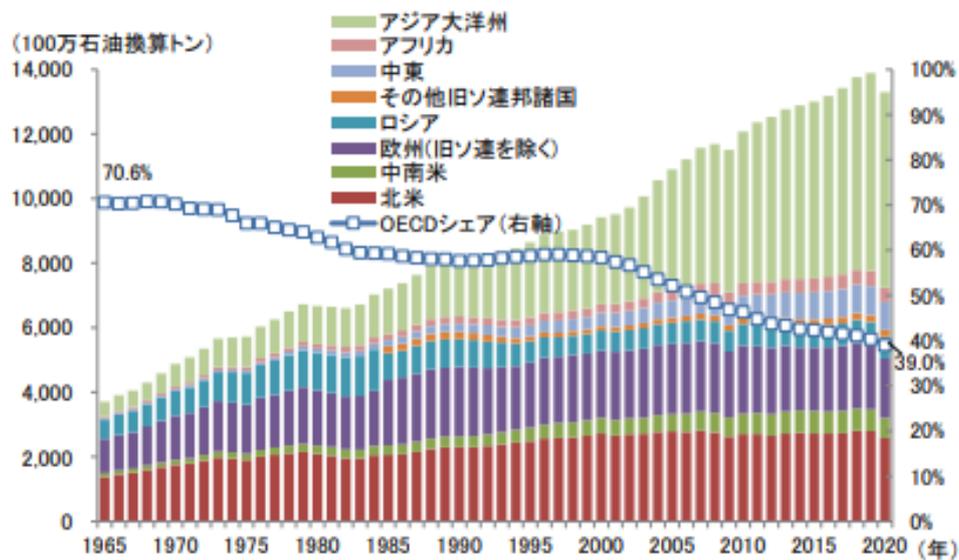


図 1.1 世界のエネルギー消費量の推移（地域別，一次エネルギー）^[1]

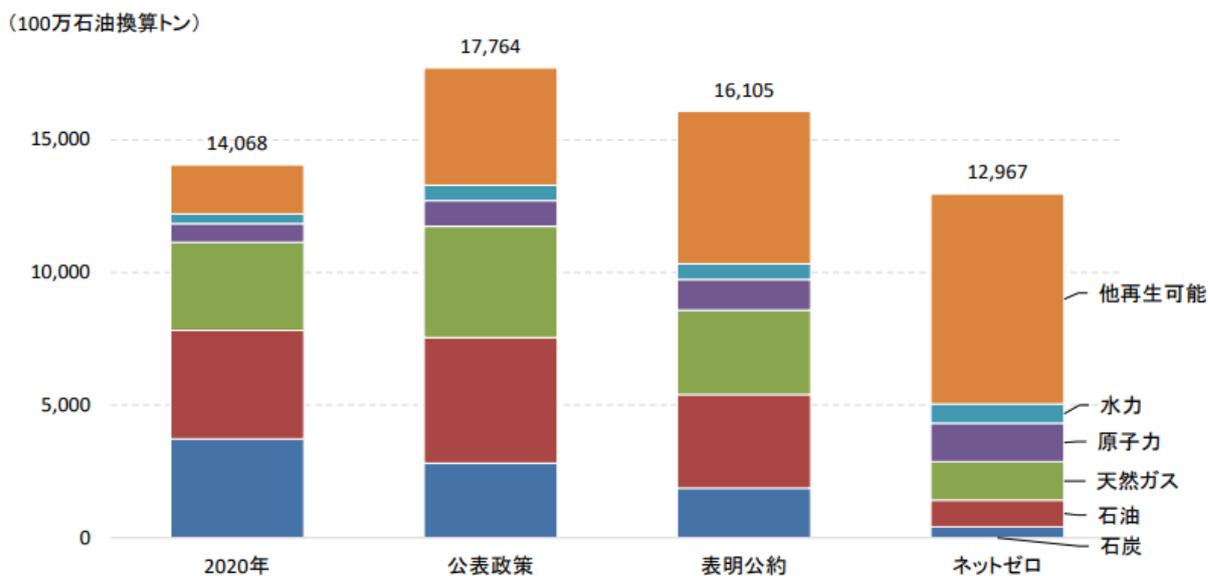


図 1.2 世界のエネルギー供給展望（エネルギー源別，一次エネルギー供給量）^[2]

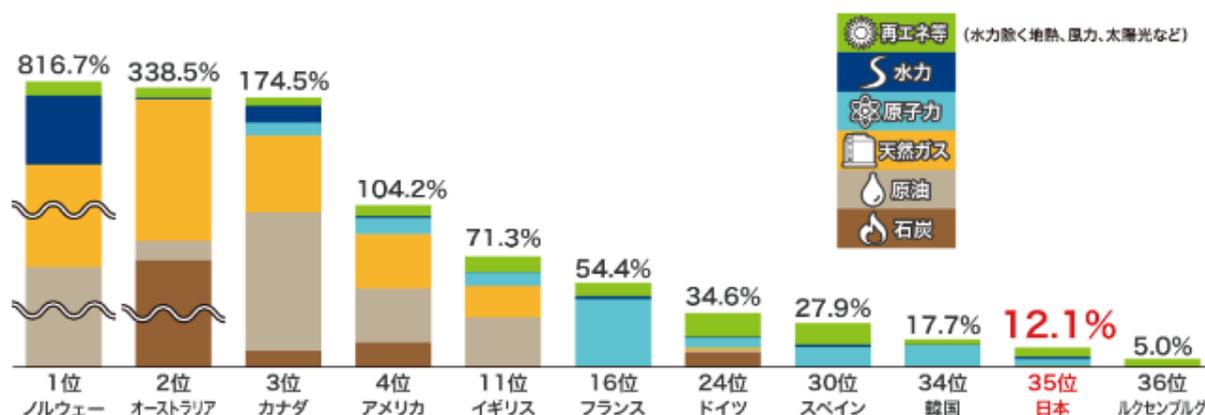


図 1.3 主要国の一次エネルギー自給率比較（2019年）^[3]

1.1.2 風力発電とウィンドファームの洋上進出

エネルギー問題の観点からも示されたように、現在、再生可能エネルギーの拡大が推し進められている。その中でも、経済性や発電ポテンシャルを併せ持つ、風力発電の導入が進められている。世界各国においても、風力発電の導入拡大が見られ、図 1.4 に示すように、2022 年に風力発電の導入量は 837[GW]^[4]に達している。

国内においても、図 1.5 に示すように風力発電の導入量は増加している。しかし、風力発電の導入が進むヨーロッパ各国や中国等と比較すると、総導入量は低く、風力発電の拡大が遅れているのが現状である。主な理由として、陸上に風車を建設できる風況の良い地域が先述の各国よりも少ないことが挙げられる。また、風況の良い平野部には、建設地の近隣住民との問題があり、風車による騒音、バードストライク、景観への影響等に対して、対処することが必要になる。これらの問題に対処できる法改正等の風車建設を推進できる環境づくりの遅れも風力発電の導入拡大が遅れた 1 つの問題である。

現在では、洋上に複数、風車を建設する洋上ウィンドファームに注目が集まっている。図 1.6 に示すように、洋上は、山や建物等の障害物がないことにより、安定した大きい風力を得ることが出来る。また、洋上は陸上に比べて約 7 倍の風力発電の導入ポテンシャルを持つことが算出されている^[7]。国土を海に囲まれている日本にとって、洋上風力発電は最適な発電方法であり、これから導入の拡大が期待されている。

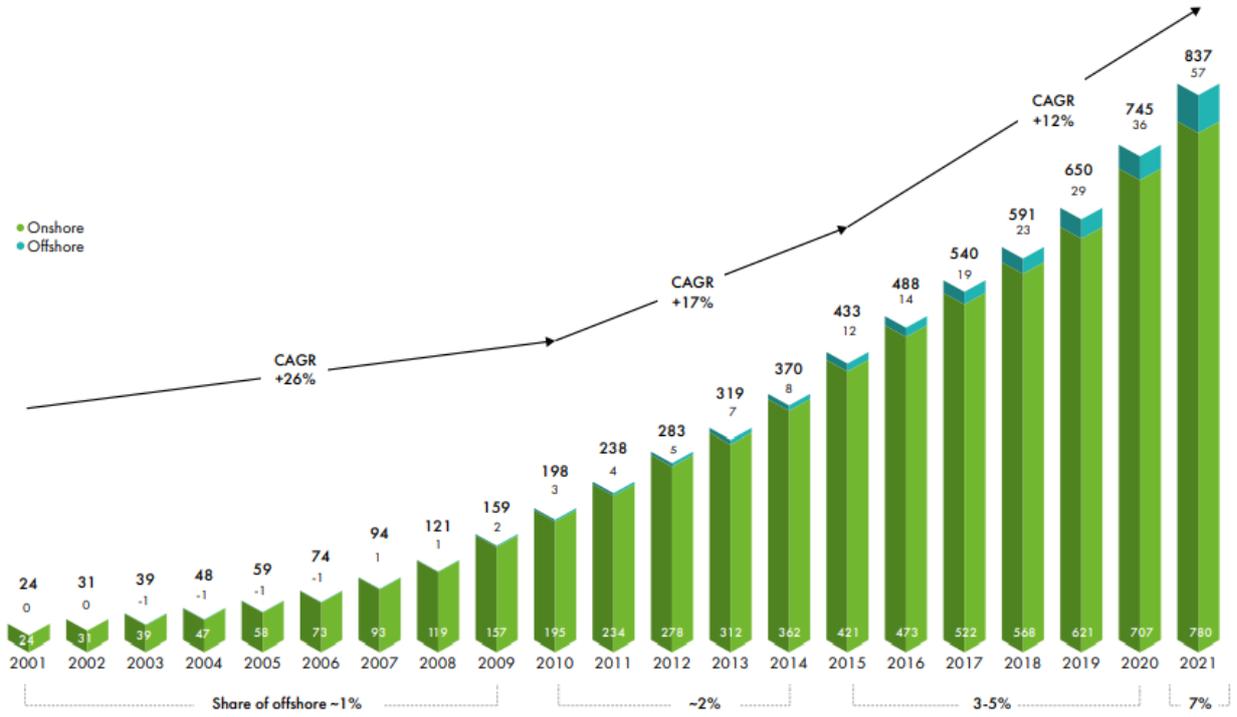


図 1.4 世界における風力発電の総導入量の推移^[4]

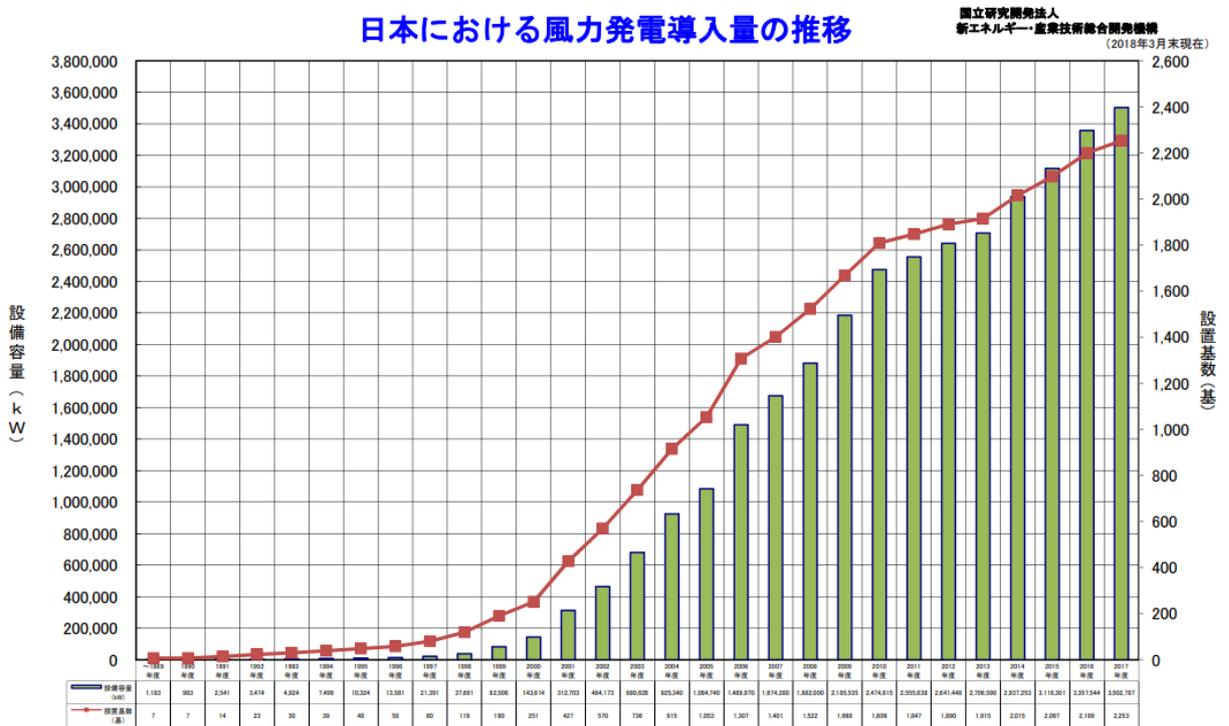


図 1.5 日本における風力発電導入量の推移^[5]

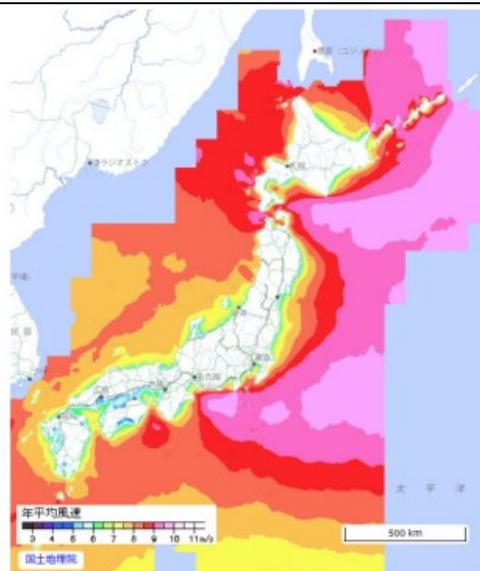


図 1.6 日本の洋上風況マップ^[6]

1.1.3 風車後流について

複数の風車を限られたスペースに建設するウィンドファームだが、風車後方で発生する低速で乱れた流れによって、下流側に設置された風車の発電出力の低下、風車部品の疲労損傷の原因となる。発電量は風速の3乗で比例するため、風車後方のわずかな速度欠損によって、大きな発電量のロスとなる。そのため、ウィンドファームにおける風車間の最適な離隔距離を決定するためにも、風車後流の風速欠損、また後流回復までの過程をしっかりと把握する必要がある。

風車後流の構造は、図 1.7 に示すように、速度欠損の大きいニアウェイク領域、速度欠損の小さいファーウェイク領域の大きく2つの領域に分けられる。ニアウェイク領域では、風車翼端から発生する翼端渦が外部流と風車後流内部との混合を阻止するような働きをするため、強い速度シアが発生する。また、ナセル、タワーの影響によって、後流の構造はさらに複雑になる。そして、翼端渦が崩壊し、外部流との乱流混合が促進することで、ファーウェイク領域では、後流の回復が見られる。

現在、後流による下流側風車の発電出力への影響を低減させるべく、様々な研究がされている。ヨーステアリング手法はその中の一つである。実機での計測結果や数値シミュレーションの結果から、年間発電量にポジティブな影響を与える可能性が示唆されている^[8]。また、最適な風車配置を検討すべく、多数の風車模型 (Porous disc) を使用し、ウィンドファームを模擬した実験的研究が行われている^[9]。これにより、ウィンドファームによる風車の最適な配置を発電出力や風荷重の計測結果の観点から考察している。しかし、それらの結果をもたらす風車後流の構造は非常に複雑であ

り、風車後流の発達と発電出力や風荷重の相互の影響を検討する必要がある。

特に日本では、洋上風力発電に関して、特有の問題を抱えている。洋上に風車を建設することは、その海域で漁業をする関係者と共存していく必要がある。共存共栄に向け、再エネ海域利用法の制定や補助金の支給等の環境づくりが行われてきたが、限られた海域でのウィンドファーム建設が求められる。また、日本海沖、欧州北海の平均風速を比較すると、約2[m/s]の差があることを図1.8から示されている。発電効率を最大化し、かつ限られた海域でのウィンドファームの設置を実現するためには、一層慎重に、風車後流の流動メカニズムの解明に向け、研究を推進していくことが必須となる。

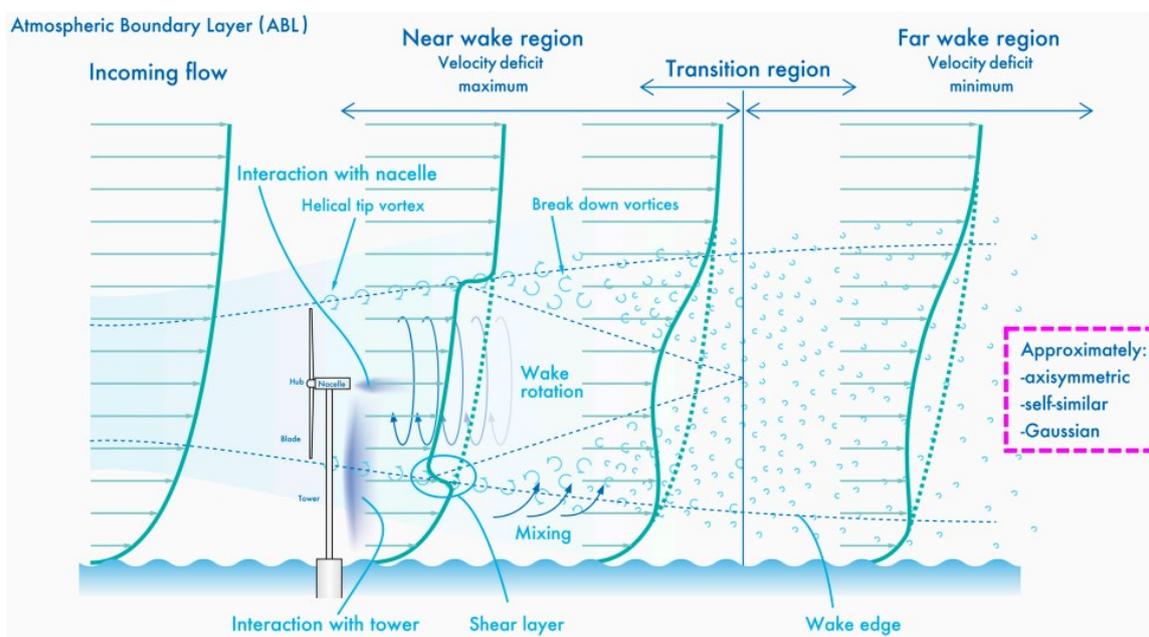


図 1.7 風車後流の構造 (side view) [10]



図 1.8 日本海沖と欧州北海の平均風速の比較[11]

1.1.4 浮体式風車とその特有な後流

洋上風力発電は、大きく着床式と浮体式の 2 種類に分類される。着床式は、海底に固定した基礎に風車を設置する方式である。一方で、浮体式は、海上に浮かぶ浮体構造物に風車を設置する方式である。一般的に、着床式の適地は水深 60[m]未満の海域とされている。従って着床式は比較的海岸に近い海域に設置される。水深 60[m]を超えると、浮体式にコスト優位性があるとされている。日本の周辺海域は急峻な海底地形であるため、浮体式により、大水深の沖合にも洋上風力発電を設置することが可能となる。

浮体式風車と着床式風車の大きな違いとして、浮体式風車は浮体構造物と海底を繋げている係留によって、固定しているため、風や波等の外力によって浮体動揺を引き起こすことが挙げられる。これによって、図 1.9 に示すように風車自体が 6 自由度で動くため、ロータ面への流入風速の変動が大きくなり、着床式風車の後流と比較して後流の構造を大きく変化させる恐れがある。Bayati らの研究^[12]では、浮体動揺によって後流の構造がゆがみ、非線形な空力挙動を示す可能性が示唆されている。

特に日本では、浮体式の導入が拡大することが予測される。ウィンドファームの建設に向けて、浮体式特有の後流構造の解明に向けた研究を推進していく必要がある。

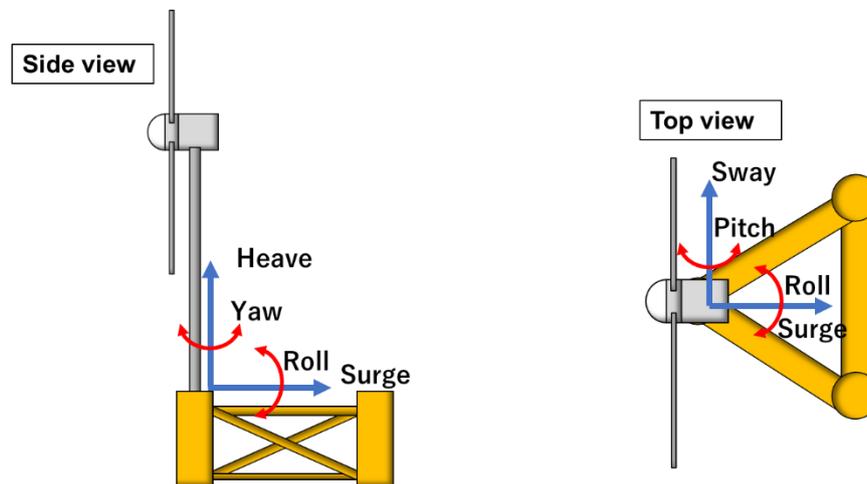


図 1.9 浮体式風車の動揺方向

1.2 研究目的

前節の通り、特に日本では、浮体式風車の導入が大いに期待されており、浮体式の最適なウィンドファームの風車レイアウトを検討する際には、後流の気流性状や下流側に設置される風車への影

響について理解を深める必要がある。現在、浮体式に関する実験的研究を行った例は少ない。本研究では、風洞実験を通して、以下の項目について、知見を得ることを目的とする。

1. ピッチ方向，サージ方向，ロール方向の浮体動揺が伴った後流の気流性状の解明
2. 上流側風車がピッチ方向の動揺を行う際，下流側風車基部の風荷重，発電性能へ与える影響
3. ピッチ方向の動揺を伴った上流側風車後流が干渉した際の下流側風車後流の気流性状の解明

1.3 論文構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章

風洞実験の手法，実験に使用した機器について具体的に記す。また，2 基の風車模型を使用した際，下流側風車のロータ回転数を自動制御するシステムを構築した。その詳細について記す。

第 3 章

浮体動揺を模擬する装置（加振装置）の製作について詳細を記す。

第 4 章

加振装置を用いた，単基風車後流の気流計測結果について記す。

第 5 章

風車模型 2 基を用いた，下流側風車の発電性能や風荷重の計測結果，下流側風車後流の気流計測結果について記す。

第 6 章

本論文の結論とする。

第2章 風洞実験手法

2.1 実験環境

本実験は、九州大学応用力学研究所 (Research Institute for Applied Mechanics : RIAM)が所有する単回路回流式大型境界層風洞を用いて行った。本節では、本実験で使用した風洞設備、実験で使用した装置や機器について記す。

2.1.1 単回路回流式大型境界層風洞

図 2.1 と表 2.1 に大型境界層風洞の概要図および仕様を示す。風洞のテストセクションは図 2.1 において青色で示される部分であり、幅 3.6[m]×高さ 2[m]×長さ 15[m]の大きさを有する。本研究においては 6 区間の領域に分割されたテストセクションの 3 区間目以降に風車の模型を配置した。過去の本研究室の修士論文から、単基風車後流の気流計測の結果を用いて、天板・側壁およびアクリル板の有無が実験結果に影響を及ぼさないこと^[13]、設定した風速が安定して流入すること^[14]が明らかになっている。

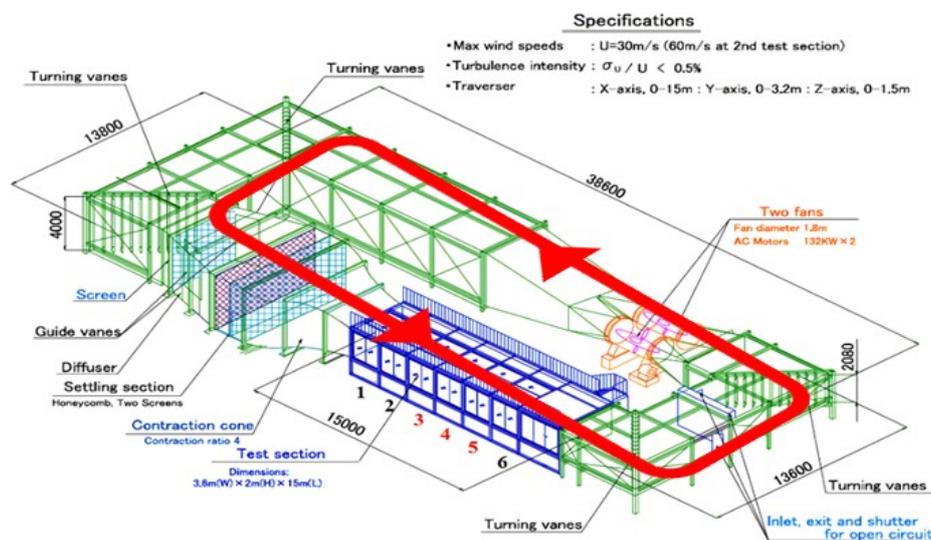


図 2.1 単回路回流式大型境界層風洞装置の概要

表 2.1. 単回路回流式大型境界層風洞装置の仕様

装置名	地球大気動態シミュレーション装置
型式	単回路回流型

型番	ESWT-3B
測定洞	幅 3.6[m]×高さ 2[m]×長さ 15[m]
風速範囲	0.5~30[m/s]
第 2 縮流洞	最大 60[m/s]
風速分布	±1%以下
乱れ度	0.5%以下
納入年月	1999 年 3 月
製作会社	株式会社 西日本流体技研

流入風速の測定や風洞設備の風速制御のために、上流側に図 2.2 ように超音波流速計が設置されている。設置位置に関しては、床面から高さ 0.75[m]，側壁から 0.52[m]である。超音波流速計の仕様を表 2.2 に記す。

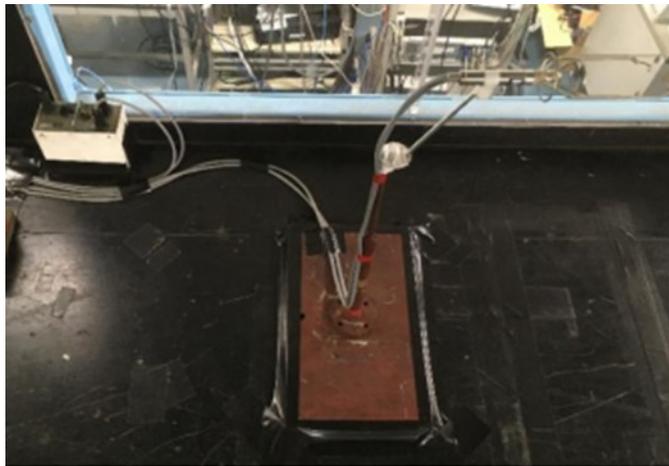


図 2.2 風洞上流側に設置された超音波流速計

表 2.2 風洞上流に取り付けられた超音波流速計の仕様

装置名	超音波風速計
型番	TR-90AH
測定方式	時分割送受切換型超音波パルス法
分解能	0.005[m/s]

測定範囲	0~20[m/s]
納入年月	2010年5月 2010年5月
製作会社	SONIC CORPORATION

2.1.2 風車模型

本実験では、2種類の風車模型を使用した。それぞれ、計測内容別で風車模型を変更した。図 2.3 はトルク計測を行う際に使用した風車模型（以下、Type A と称する）である。末端にあるモーターとロータの間にトルク計が搭載されている。この風車模型のハブ高さは、0.975[m]であり、主流方向の長さが 0.945[m]である。

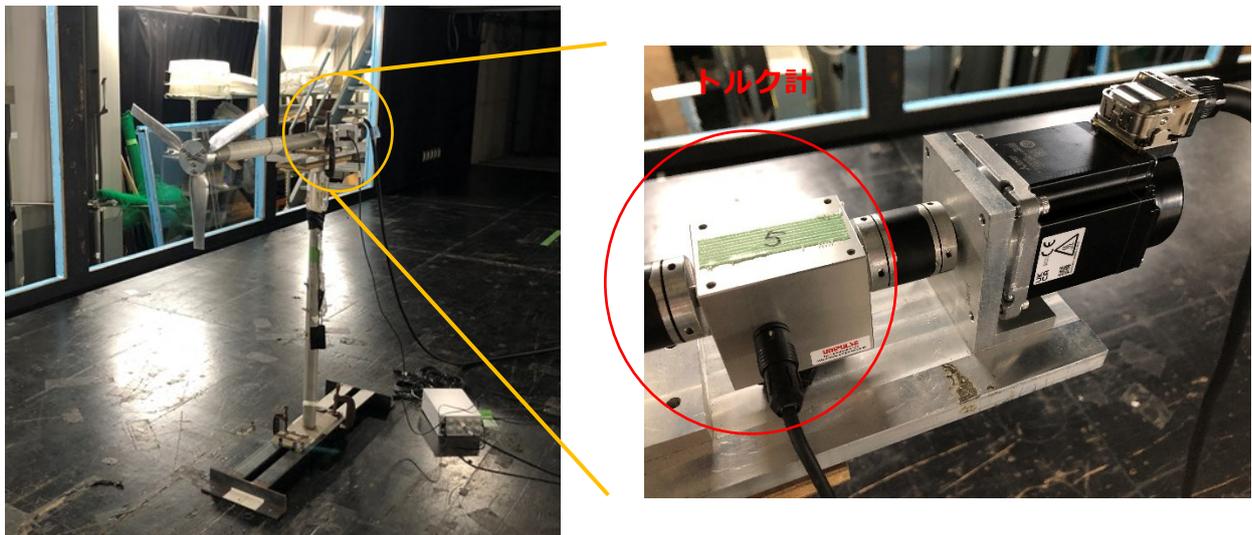


図 2.3 Type A の外観

図 2.4 は、風車後流や抗力計測で使用した風車模型（以下、Type B と称する）である。この風車模型はハブ高さが 0.6[m]、主流方向の長さが 0.286[m]であり、設計寸法の詳細は図 2.5 に示す通りである。



図 2.4 Type B の外観

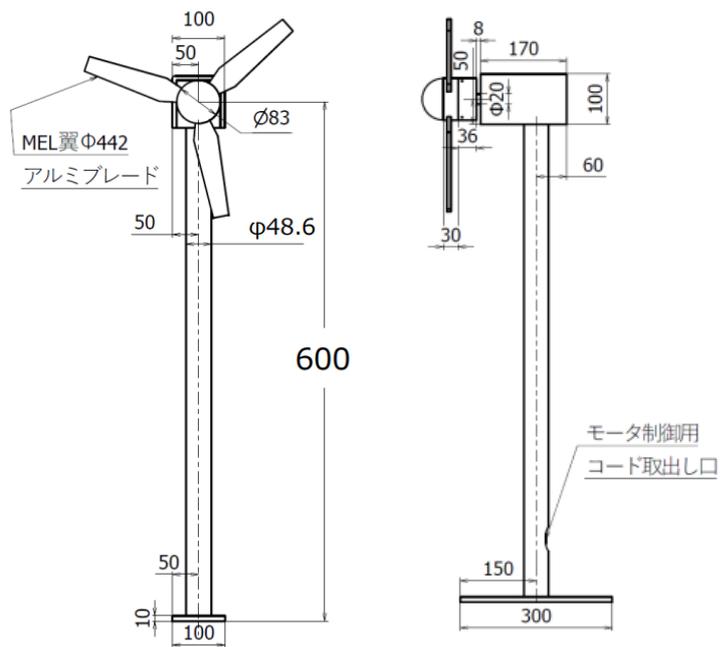
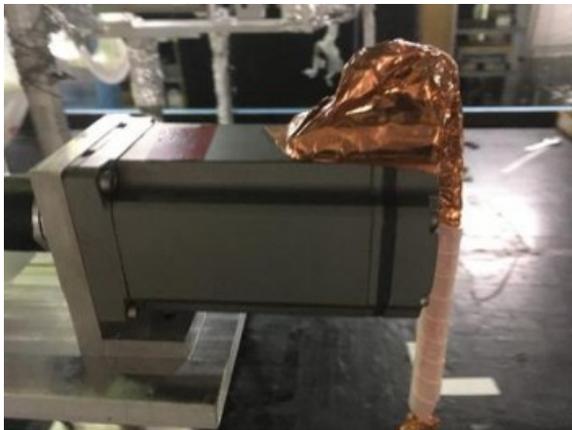


図 2.5 Type B の模式図

2.2 計測手法

2.2.1 ロータ回転の制御方法について

本節は，ロータの回転の制御方法について詳細を記す．従来の方法では，図 2.6 に示すデータ設定機で，ロータの回転数を入力し，サーボアンプを介し，サーボモーターの制御を行っていた．この制御方法は，固定の回転数でモーターを回転させるので，流入風速によって回転数を変更した．風車模型を 2 基使用する場合，下流側風車の回転数は，設置する地点の平均風速を参考に，ロータの回転数を決定した．表 2.3 にロータの回転数制御に用いた機器の仕様を示す．



(a) モーター（Oriental motor 製）



(b) データ設定機



(c) サーボアンプ

図 2.6 従来のロータ回転を制御していた際に使用していた機器

表 2.3 ロータの回転数制御に用いた機器の仕様

図番号	機器名	製造元	型番
(a)	AC サーボモーター	Oriental motor	NXM640A
(b)	データ設定機	Oriental motor	OPX-2
(c)	サーボアンプ	Oriental motor	NXD75-S

本年度では、流入風速によってロータの回転数を自動制御するシステム（以下、回転数自動制御と称する）を構築し、実験で使用した。風車模型 2 基を使用する場合、下流側風車に流入する風速は強い非定常性を持つため、従来の方法では、常に最適周速比を満たす回転数で制御を行えない点が課題となっていた。本年度から、より実機に近いシチュエーションで実験を行うべく、本システムを構築した。

図 2.7 に、回転数自動制御のシステム概略図を示す。下流側風車のロータ直径分前方に設置した熱線流速計により流入風速のモニターを行う。これを、AD コンバーターを介し、回転数制御用 PC に取り込み、最適周速比を満たす回転数を制御盤に指令を出す。これにより、サーボモーターが指令値通りに運転する仕組みである。

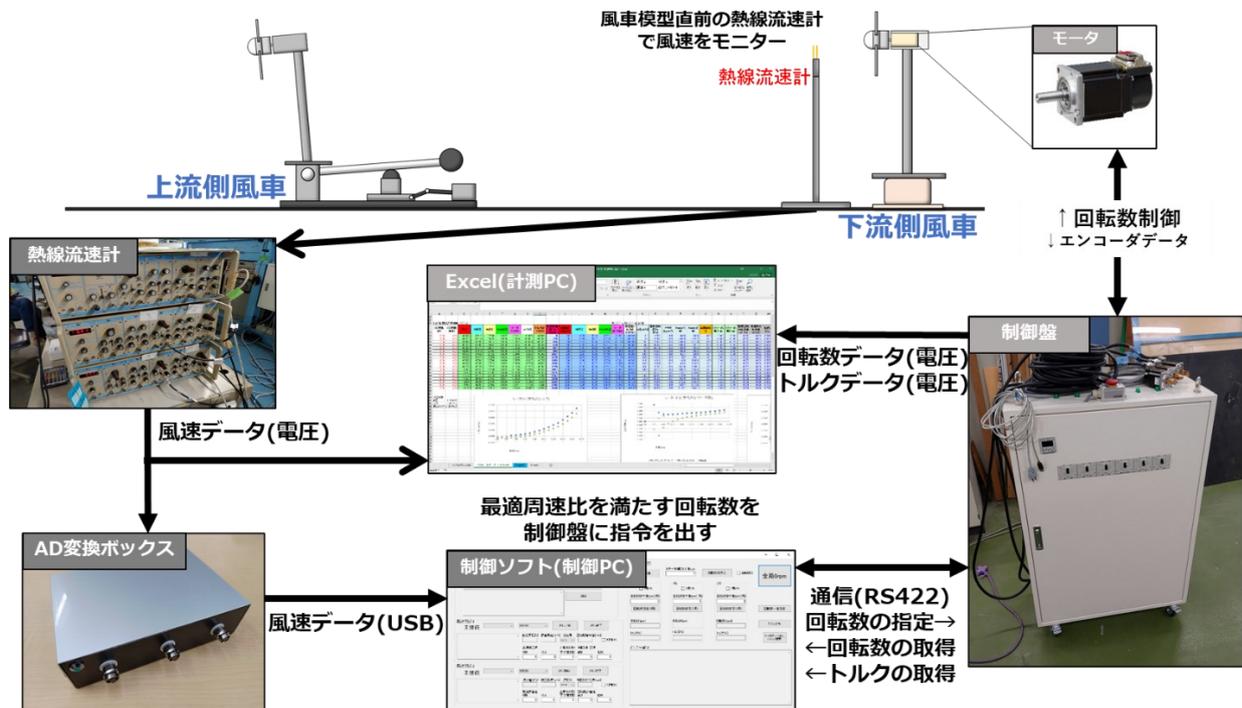


図 2.7 回転数自動制御のシステム概略図

回転数自動制御には、3つのパラメータを変更することが可能である。

1. サーボアンプ加速・減速設定 [rpm/s]

このパラメータは、ある回転数から、取り込んだ風速に対する設定した周速比を満たす回転数まで、到達する回転速度である。例としては、サーボアンプ加速・減速設定を 300[rpm/s]と設定した場合、1400[rpm]から 1430[rpm]に制御する際、0.1[s]必要になる。

2. 風速サンプリング周期 [s]

このパラメータは、回転数自動制御を行うために、風速を取得する周期である。

3. 風速サンプリング数 [個]

このパラメータは、風速を取得する風速サンプリング周期の中で、何点の風速を取得するかを決めるものである。

風速サンプリング周期とサンプリング数の具体的な説明をする。図 2.8 は、回転数自動制御を行った際に、下流側風車直前でモニターした風速の時系列データの一部である。例えば、風速サンプリング周期を 0.2[s]、風車制御の風速サンプリング数を 2 個とした場合、図 2.8 に赤線で示す 0.2 秒間に、図 2.8 の赤丸のように、ランダムで 2 点風速を取得する。この 2 点の風速を平均した値が、次の 0.2[s]間の回転数を決定する際の参考値となる。

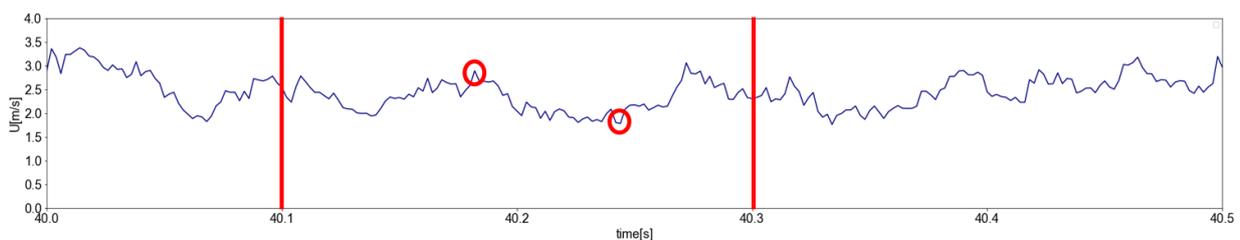


図 2.8 下流側風車直前でモニターした風速の一例

流入風速に対する、回転数の応答性を高めるべく、紹介した 3つの最適なパラメータの検討を行い、以下の表 2.4 の通りで決定した。このパラメータを用いて、実験を行った。回転数自動制御のパラメータ決定に関する実験については、参考文献[15]を見ていただきたい。

表 2.4 実験の際使用する回転数制御のパラメータ

サーボアンプ加速・減速設定 [rpm/s]	風速サンプリング周期[s]	風速サンプリング数[個]
300	0.1	1

図 2.9 に回転数自動制御に用いた機器の外観，表 2.5 にその仕様を示す。



(d)サーボアンプ



(e)モーター

図 2.9 回転数自動制御に用いた機器の外観

表 2.5 回転数自動制御に用いた機器の仕様

図番号	機器名	製造元	型番
(d)	サーボアンプ	三菱電機	MR-J5-40A
(e)	モーター	三菱電機	HK-KT43WK

2.2.2 風車後流の気流計測手法

風車後流中の気流計測には，熱線流速計を用いた．図 2.10 のように，取り付けた熱線流速計を，トラバースに装着し，PC でトラバースを制御しながら計測を行った．熱線流速計によって，出力された電圧を，ローパスフィルター，A/D コンバーターを介し，PC に時系列データが出力される流れである．熱線流速計を用いた計測を行う日には，1 日数回，風洞の上流側に設置された超音波流速計によって校正を行った．出力される電圧が，その日の気温差に依存するためである．図 2.11 に流

速測定時の実験概略図を示す。熱線流速計による速度計測に使用した機器の外観を図 2.12 に、図 2.12 で示した機器の仕様を表 2.6 に示す。

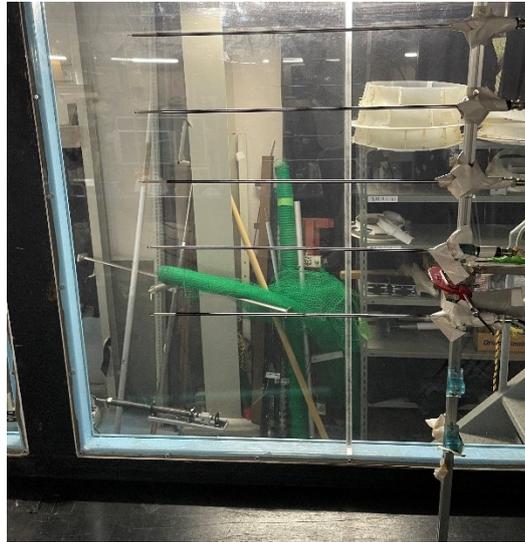


図 2.10 鉛直方向にトラバーサに取り付けた熱線流速計

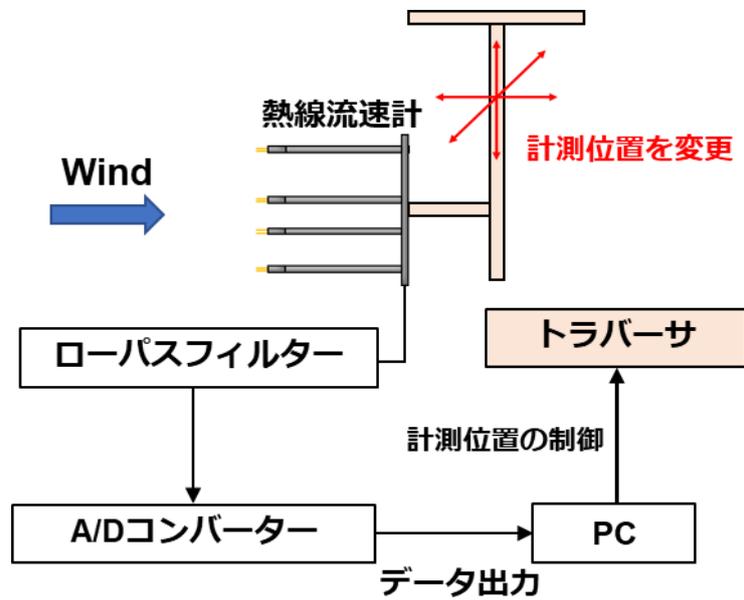
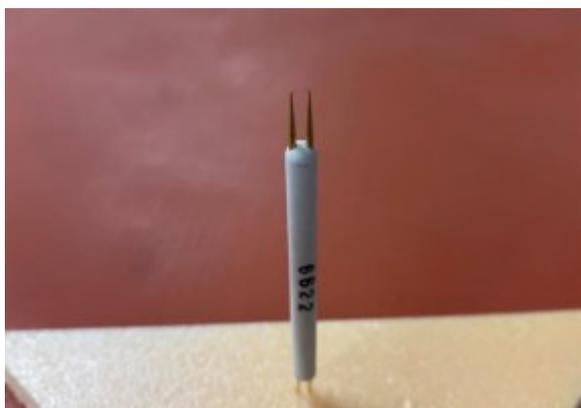


図 2.11 風速測定時の実験概略図



(f) I 型プローブ



(g) リニアライザ

図 2.12 熱線流速計による後流測定で使用した機器の外観

表 2.6 熱線流速計とその周辺機器の仕様

図番号	機器名	製造元	型番
(f)	I 型プローブ	KANOMAX	MODEL 0251R-T5
(g)	リニアライザ	NIHON KAGAKU KOGYO	MODEL1023 LINEARIZER

2.2.3 風車出力の計測手法

風車出力については、2.1.2 節で紹介した通り、Type A の風車模型を使用した。風車出力は、ロータの回転数 ω とトルク T_r の積で表される。Type A では、軸に対してねじり方向の力を評価するトルクの計測が可能である。トルクは、軸の回転を加速させたり、ブレーキをかけたりするような力である。風洞内にある程度の風を発生させた場合、風のエネルギーによりロータの回転数が上昇することになるが、それをサーボモーターによって最適なロータ回転数で制御しているので、回転を止めようとする力が発生する。そのブレーキの力をトルク計によって計測をすることができる。トルク計測の流れについては、トルク計により出力された電圧を、ローパスフィルター、A/D コンバーターを介し、PC に時系列データが出力される。トルク計測システムの概略図を図 2.13 に示す。測定に用いた機器の外観を図 2.14 に、その仕様を表 2.7 に示す。

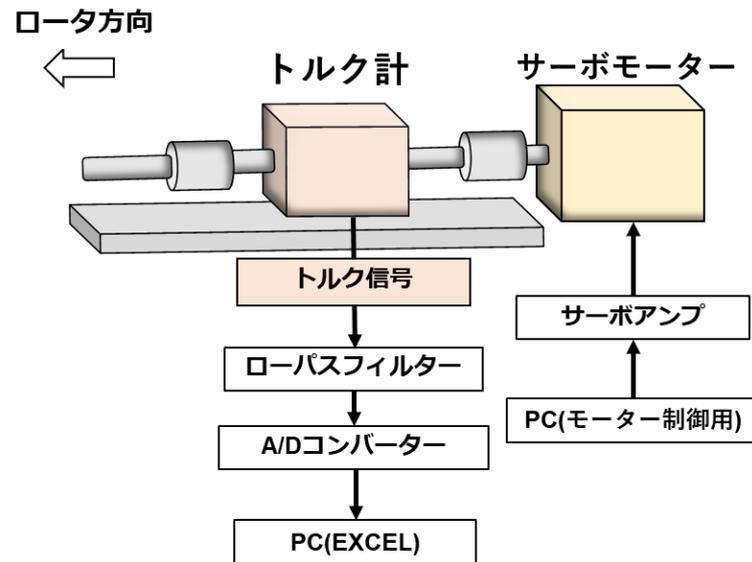


図 2.13 出力計測時の概略図



(h)トルク計

図 2.14 トルクの計測に用いた機器の外観

表 2.7 出力計測に用いた機器の仕様

図番号	機器名	製造元	型番
(h)	トルク計	UNIPULSE	UTMII1Nm

2.2.4 風車抗力の計測手法

風車模型 2 基を使用した計測時，下流側風車基部の抗力を計測するため，3 成分検力計を Type B の風車模型の下に取り付けた．計測する抗力は，図 2.15 に示すように主流方向の抗力を F_x ，横方向の抗力を F_y と定義した．上流側風車のハブ高さに合わせるため，図 2.16 のように，台座を設置した．また，ロータ面を風洞床面と垂直にするため，風車模型と検力計の間にアルミ板を挟むことで，調

整を行った。抗力計測の流れとしては、検力計により出力された電圧を、ローパスフィルター、A/Dコンバーターを介し、PCに時系列データが出力される流れである。抗力計測システムの概略図を図2.17に示す。測定に用いた機器の外観を図2.18に、その仕様を表2.8に示す。

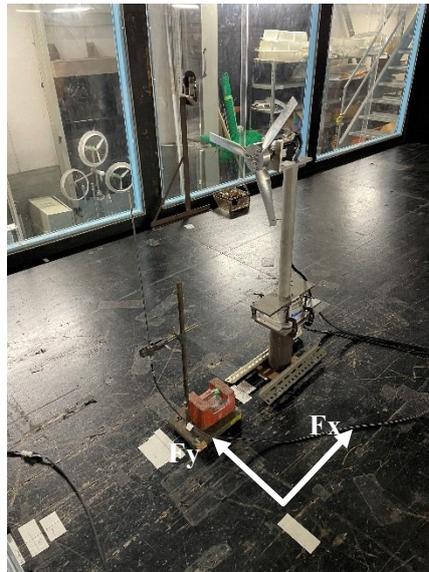
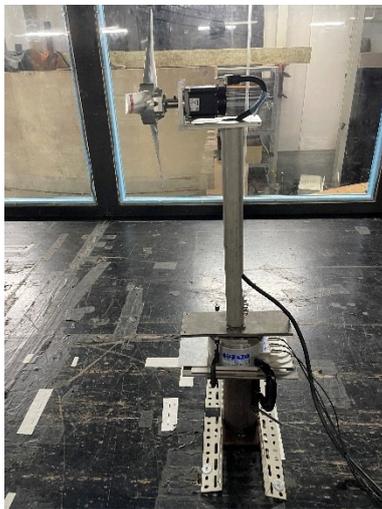


図 2.15 計測する抗力の方向



(i)side view



(ii)風車模型下に設置した検力計

図 2.16 検力計を設置した風車模型の外観

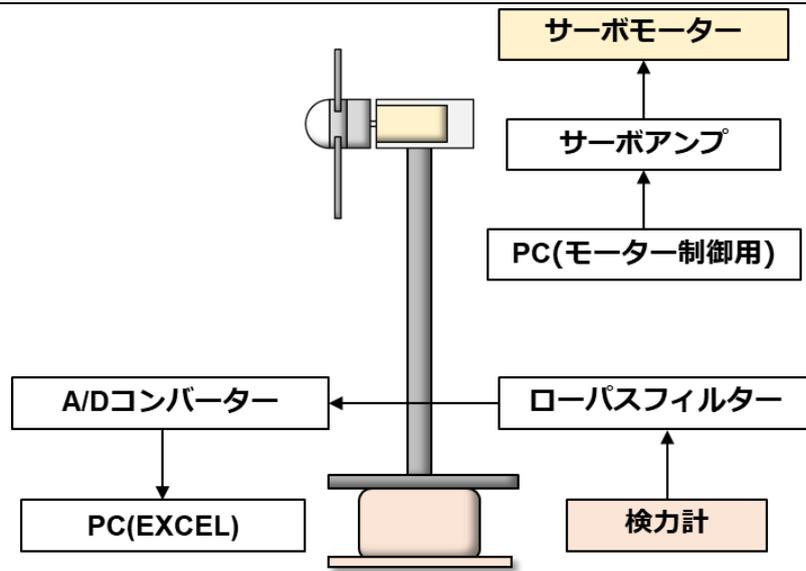


図 2.17 風車抗力計測時の概略図



(i)3 成分検力計



(j)DC strain amplifier

図 2.18 抗力計測に使用した機器の外観

表 2.8 抗力計測に使用した機器の仕様

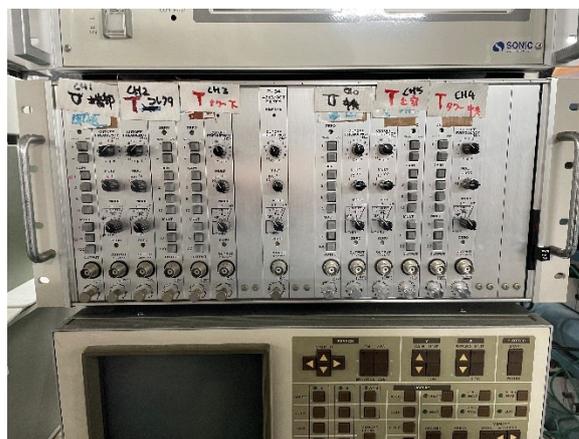
図番号	機器名	製造元	型番
(i)	3 成分検力計	和泉測器	FM-3H10
(j)	直流型歪増幅器	日章電機	DSA-100

2.2.5 全計測で使用した機器

本実験で行う計測の中で、共通して使用する機器の外観を図 2.19 に示す。表 2.9 にその仕様を示す。



(k)コンバーターボード



(l)DC アンプ

図 2.19 共通して使用する機器の外観

表 2.9 共通して使用する機器の仕様

図番号	機器名	製造元	型番
(k)	コンバーターボード	株式会社インターフェース	TRM-7101
(l)	DC アンプ	SAN-EI instrument co.LTD	6L5 DC

2.2.6 風車後流可視化実験手法

風車後流の構造を確認するため、可視化実験を行った。本実験は、2種類の可視化方法で実験を行った。

1つ目は、煙発生装置を用いた可視化方法である。図 2.20 に、煙発生装置を用いた手法の概要を示す。コンプレッサーから圧縮された空気が煙発生装置に送られ、ホースを介して、設置したノズルから煙が出る。図 2.21 に使用した機器の外観、表 2.10 にその機器の仕様を示す。

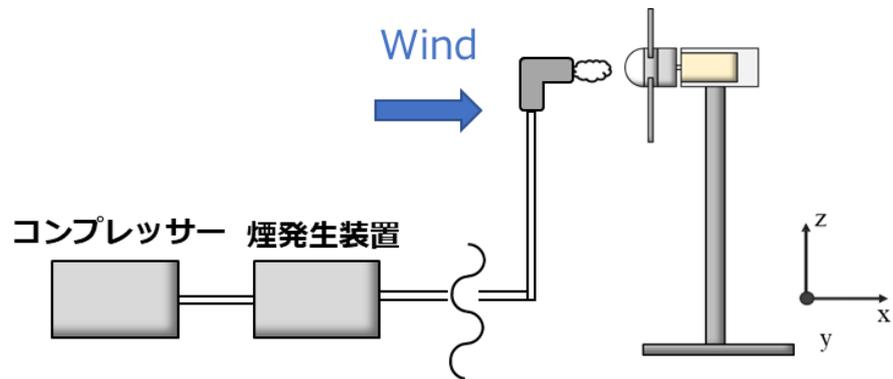


図 2.20 煙発生装置を用いた可視化実験の手法の概要



(n)コンプレッサー



(o)煙発生装置

図 2.21 可視化実験で使用した機器の外観

表 2.10 煙発生装置を用いた可視化実験で使用する機器の仕様

図番号	機器名	製造元	型番
(n)	コンプレッサー	アネスト岩田社	OFP-071C
(o)	煙発生装置	日本カノマックス社	8304

2 つ目の可視化実験の方法は、スモークケーキを用いた手法である。スモークケーキとは、硫黄やおがくずを原料とした、発煙剤である。スモークケーキ本体に着火することで、発煙する。本実験は、図 2.22 の通りに、スモークケーキを装着し、風車翼端周りから発される後流の流れを可視化した。図 2.23 に、スモークケーキの外観を示す。

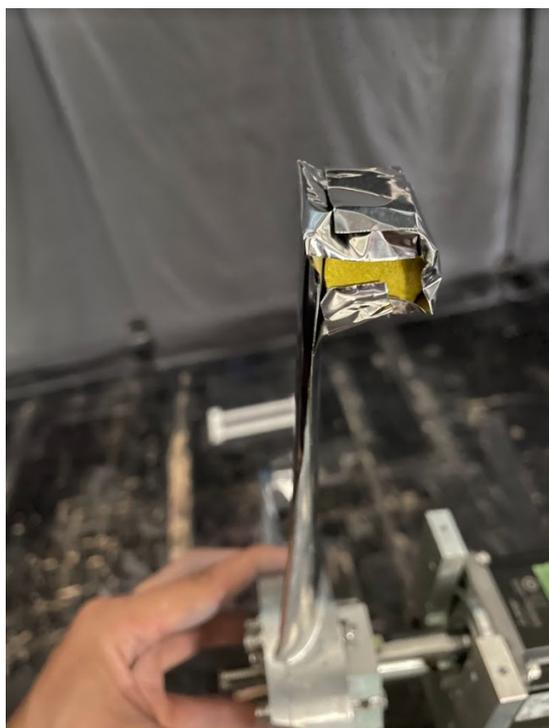


図 2.22 風車翼端に装着したスモークケーキ



図 2.23 スモークケーキの外観

2.2.7 風車模型の性能曲線について

実験で風車模型のロータ回転数の決定に採用した周速比に関しては，風車模型の性能試験結果より，出力係数が最大となる最適周速比 4.25^[14]を使用した．図 2.24 に，性能試験の結果を示す．

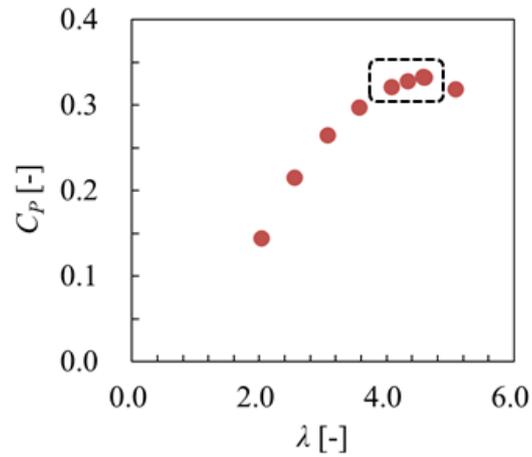


図 2.24 風車模型の性能曲線

第3章 浮体動揺を模擬する装置（加振装置）

本章は，本年度に導入された風車模型に対して浮体動揺を模擬する装置（以下，加振装置と称する）の仕様や，動揺方向，動揺パラメータ決定への流れ等，詳細に記す．本装置は，東芝エネルギーシステムズ（株），日立造船（株），九州大学の三者で協力し製作された．

3.1 加振装置の動揺方向の決定

第1章で述べた通り，浮体式風車は表3.1にあるように6自由度で浮体動揺を引き起こす．加振装置に設定する動揺方向の決定には，福島沖と北九州沖での海象データを参考にした．過去10年間の海象を調査し，ピッチ方向とサージ方向の動揺が頻出であることから，2つの動揺方向にフォーカスして装置は製作された．ピッチ，サージ方向の浮体動揺のイメージを図3.1に示す．

表 3.1 浮体動揺の方向

	x 軸	y 軸	z 軸
並進	Surge	Sway	Heave
回転	Roll	Pitch	Yaw

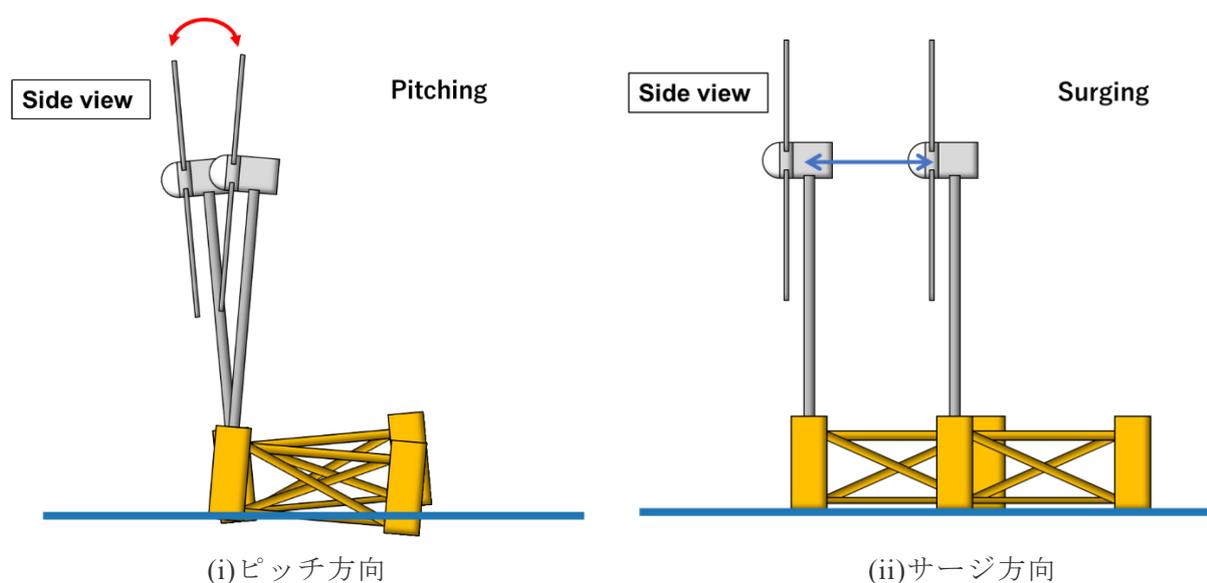


図 3.1 ピッチ，サージ方向の浮体動揺のイメージ

3.2 加振装置の動揺パラメータについて

本節では，加振装置の動揺変位量や動揺周期が決定するまでの流れを詳細に記す．その流れを図 3.1 に示している．

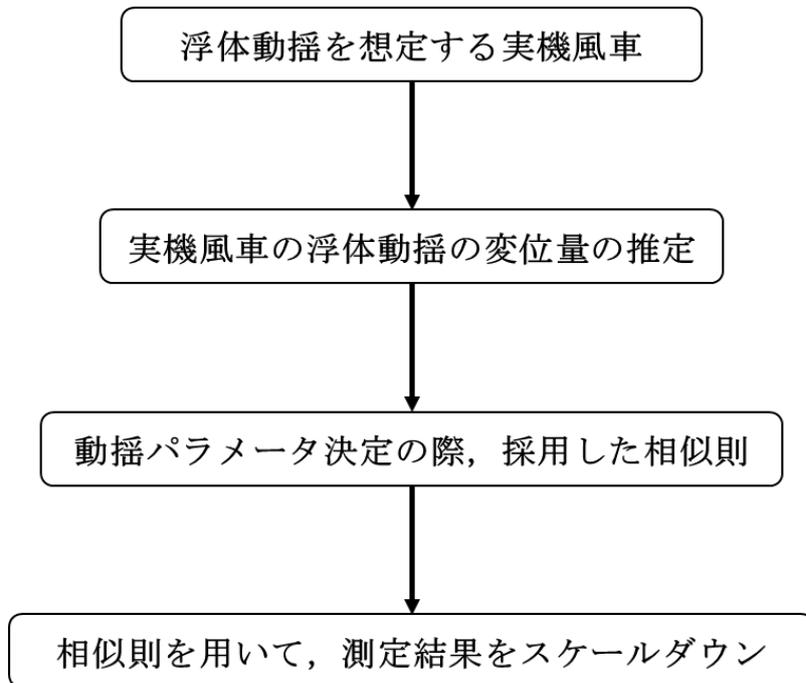


図 3.1 加振装置の動揺パラメータ決定までのフローチャート

3.2.1 浮体動揺を想定する実機風車について

浮体動揺のパラメータを決めるには，実機レベルの浮体動揺を，実験する風車モデルに対してスケールダウンする必要がある．今回は，参考にする実機の風車を DTU 製の 10MW の風車とした．表 3.2 に本研究室の所有する風車模型，DTU 製の 10MW 風車の各パラメータと両者の縮尺を示している．

表 3.2 風車模型と DTU 製風車の各パラメータと縮尺

	風車模型	DTU 10MW WT	縮尺
ロータ直径[m]	0.442	178.3	1:400
ハブ直径[m]	0.083	5.6	1:68
ハブ高さ[m]	1	109	1:109

3.2.2 実機風車の浮体動揺の変位置量推定

次に、実機レベルの風車が行う浮体動揺の変位置量と動揺周期を調査する必要がある。調査する上で、2つのケースを考えた。1つ目は、一般的な自然環境で起こりうるパラメータ（一般事例）、2つ目は、暴風時等に起こりうる最大限の浮体動揺を模擬したパラメータ（極端事例）である。

一般事例については、空力弾性風車設計ソフトウェアである **Bladed** を使用し、そのシミュレーション結果を反映させた。DTU 製の風車とセミサブ型浮体を組み合わせた状態を想定し、シミュレーションが行われた。表 3.3 にシミュレーションの概要を示す。表 3.4 には、代表的なシミュレーションの結果を示している。

表 3.3 Bladed を使用したシミュレーションの概要

想定した波高 [m]	0.5 (静穏時)
	1.5 (中規模)
	4.0 (高波浪時)
水深 [m]	100
係留	カナテリー係留

表 3.4 サージ、ピッチ方向への動揺変位置量の結果

想定した波高 [m]	サージ方向変位置量 [m]	ピッチ方向変位置量 [deg]
0.5	±0.5	±0.11
1.5	±1.5	±0.32
4.0	±4.0	±0.87

シミュレーションの結果より、サージ動揺の周期が 180[s]、ピッチ動揺の周期が 8[s]である結果となった。

極端事例については、日立造船が実施した浮体構造モデルを用いた水槽実験の結果を参考にした。浮体構造モデルは、実験で対象となった実機風車の 1/50 で縮尺されたものである。実験内容に関しては、スパー式の浮体構造モデルに対して、様々な不規則波を発生させたり、それに応じた風荷重をモデルに掛けたりすることにより、どの程度の浮体動揺を引き起こすかを調査したものである。この実験で計測されたサージ、ピッチ方向の最大動揺変位置量の結果を表 3.5 に示す。実験の詳細は、参考文献[16]を見ていただきたい。

表 3.5 水槽実験で計測されたサージ、ピッチ方向の最大変位量

サージ方向変位量 [m]	ピッチ方向変位量 [deg]
±0.335	±10.5

3.2.3 加振装置の製作で採用した相似則について

相似則に関しては、重力が影響する流れ場の解析に用いられるフルード則を適用した。フルード数は以下のように表される。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad (3.1)$$

動揺パラメータを決定するには、模型縮尺（代表長さの縮尺）に対して、時間スケールの縮尺を知る必要がある。添え字 m , p をそれぞれ模型および実機での値として、模型と実機のフルード数は以下のように表される。

$$Fr_m = Fr_p \quad (3.2)$$

これらに、それぞれフルード数の値を代入する。

$$\frac{v_m}{\sqrt{g_m l_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g_p l_p}} \quad (3.3)$$

$$\frac{v_m}{v_p} = \sqrt{\frac{g_m l_m}{g_p l_p}} \quad (3.4)$$

作用する重力は同じであることから、以下のように示すことができる。

$$\frac{v_m}{v_p} = \sqrt{\frac{l_m}{l_p}} \quad (3.5)$$

ここで、時間の代表値を t とすると代表速度は以下のように示すことができる。

$$v = l/t \quad (3.6)$$

代表速度を式(3.6)のように表すと、式(3.5)は以下のようになる。

$$\frac{t_m}{t_p} = \sqrt{\frac{l_m}{l_p}} \quad (3.7)$$

式(3.7)より、時間の代表値は、模型縮尺の 1/2 乗に比例することがわかる。

今回は、ハブ高さを代表長さとしたので、フルード則を適用すると長さのスケールが $l_m/l_p = 1/100$ の場合、 $t_m/t_p = 1/10$ となる。

3.2.4 加振装置の動揺パラメータについて

これまで紹介したシミュレーションや水槽実験の結果をフルード則でスケールダウンする．シミュレーションの結果については，波高 1.5[m]の結果を採用した．表 3.6 に加振装置の動揺パラメータに反映する結果を示している．

表 3.6 フルード則を用いてスケールダウンしたシミュレーション，水槽実験の結果

一般事例		極端事例	
サージ方向 変位量 [mm]	ピッチ方向 変位量 [deg]	サージ方向 変位量 [mm]	ピッチ方向 変位量 [deg]
±15	±0.32	±175	±10.5

動揺周期に関しては，シミュレーションの結果である，サージ動揺の周期 180[s]，ピッチ動揺の周期 8[s]を，フルード則を用いて，サージ動揺の周期 18 [s]，ピッチ動揺の周期 0.8[s]とした．

以上の結果を踏まえ，加振装置の動揺パラメータを決定した．設計都合上，全てのパラメータを想定通り製作できなかつた部分があつた．最終的に，決定した加振装置の動揺パラメータを表 3.7 に示す．

表 3.7 加振装置の浮体動揺パラメータ

	ピッチ動揺	サージ動揺
変位量	±1, 5[deg]	±15, 60[mm]
周期[s]	0.8	18

3.3 加振装置の仕様について

図 3.2 が加振装置に本研究室の所有する風車模型を設置したものである．加振装置は，図 3.3 に示す機構を有する．カム機構と装置末端に備えた重りを利用して，ピッチ動揺を再現し，クランク機構を用いてサージ動揺を再現している．

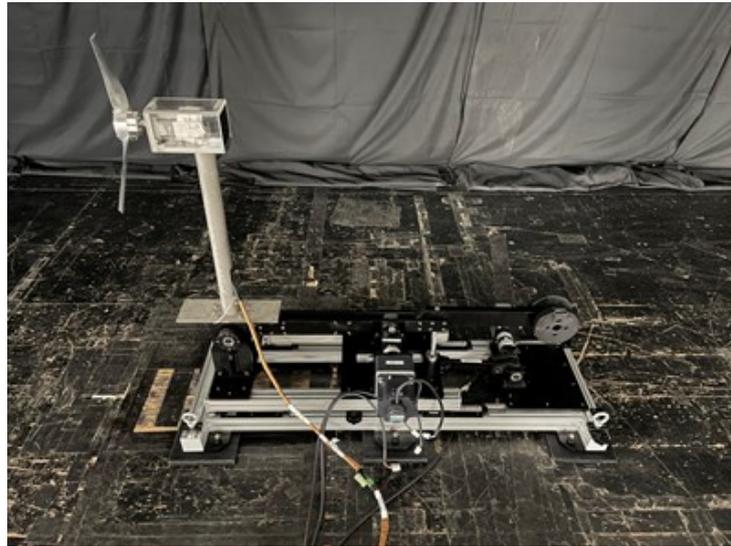


図 3.2 加振装置に風車模型を設置した様子

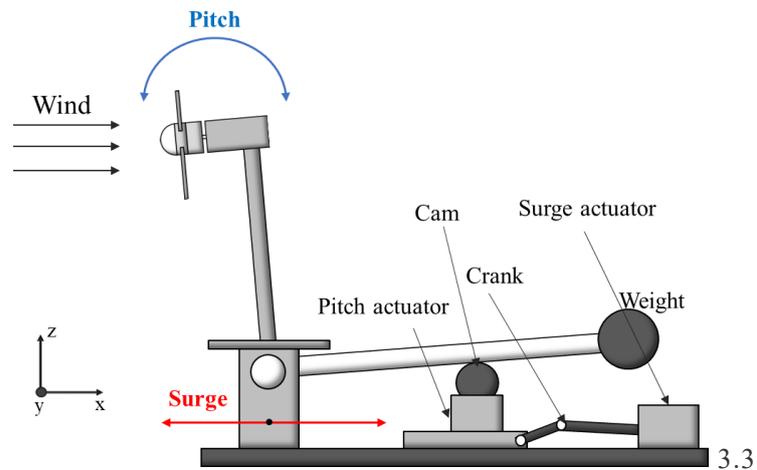


図 3.3 加振装置の機構について

動揺パラメータの変更は図 3.4 に示すような、それぞれの機構で用いられるユニットを変更することで可能である。



(i)ピッチ動揺±1[deg]



(ii)ピッチ動揺±5[deg]



(iii)サージ動揺±15[mm]



(iv)サージ動揺±60[mm]

図 3.4 動揺パラメータ変更時に使用する加振装置用のユニット

3.4 ピッチ・ロール角度の定義について

風車模型のピッチ角度は、主流方向の正の向きに倒れる方向を正とした。ロール方向の動揺は、加振装置製作の際、想定されていなかったが、加振装置の向きを変えることで再現が可能となった。ロール方向の浮体動揺のイメージを図 3.5 に示す。ロール角度に関しては、主流方向正の向きから見て、左に倒れる向きを正とした。図 3.6 に詳細を示す。

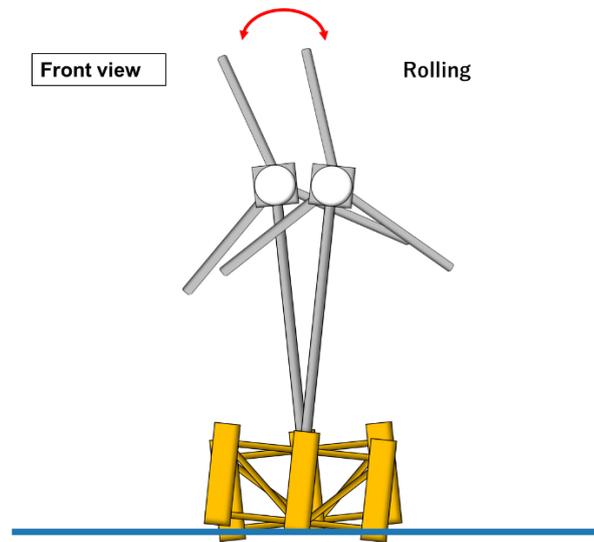


図 3.5 ロール方向の浮体動揺のイメージ

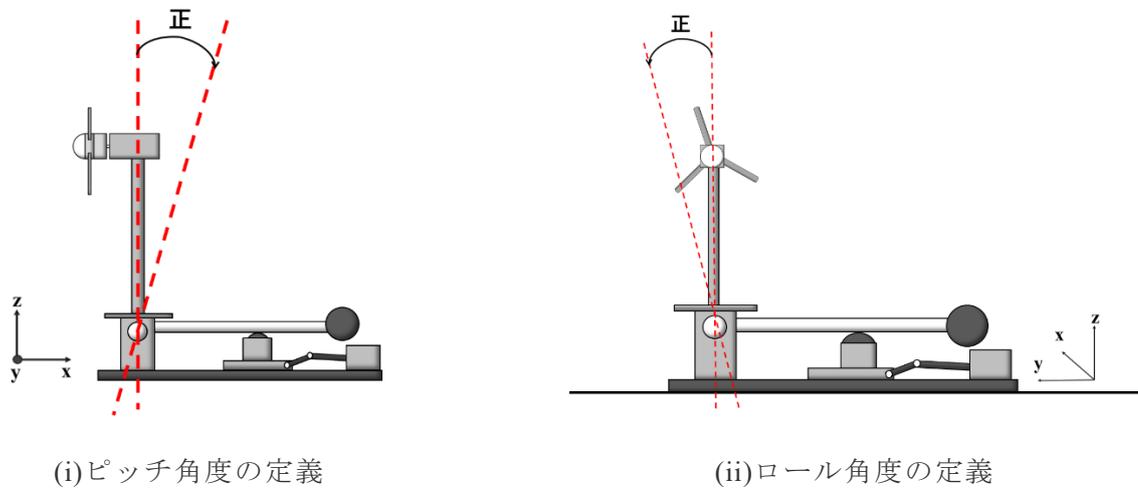


図 3.6 動揺方向の角度の定義について

3.5 ピッチ角度固定方法について

ピッチ角度 $5[\text{deg}]$ の場合、ピッチ角度 $0[\text{deg}]$ 用の治具を外すことで固定は可能となるが、ピッチ角度 $-5[\text{deg}]$ で固定するユニットがなかったため、新たな治具を製作した。ピッチ角度を $0[\text{deg}]$ に固定する治具に図 3.7 のような高さを持たせ、ピッチ角度 $-5[\text{deg}]$ を実現させた。



図 3.7 ピッチ角度 0[deg]用の治具に高さを持たせる真鍮を導入した様子

第4章 単基風車後流についての風洞実験

4.1 単基風車後流の可視化実験

はじめに，浮体動揺が風車後流の気流性状へ与える影響を視覚的に確認するべく，風車後流の可視化実験を行った。

4.1.1 煙発生装置を用いた可視化実験

本節は，煙発生装置を用いた可視化実験の結果を記す．実験条件は表 4.1 の通りである．

表 4.1 煙発生装置を用いた可視化実験の実験条件

パラメータ	値
流入風速[m/s]	8
ロータ回転数[rpm]	183
周速比[-]	4.25
ピッチ動揺振幅[deg]	±1, ±5
サージ動揺振幅[mm]	±60

図 4.1～4.4 に動揺振幅別で，煙発生装置を用いた可視化実験の結果を示す．視覚的に浮体動揺の影響を確認することができた．ピッチ動揺の場合，動揺なし状態と比較すると，後流の幅が縦横に大きく伸びており，形成された後流は下流方向に行くほどに，その影響が拡散していることを確認した．サージ動揺の場合，風車自体が前後に移動することから，わずかに風車後流の回復が遅れるような挙動を見せたが，有意な差異は見られなかった．また，ピッチ動揺の実験結果をパラメータ別で比較すると，パラメータが大きくなるにつれ，後流の幅も大きくなるような傾向が示された．

ピッチ動揺の実験結果を詳しく見ていくと，動揺していない静止状態からピッチ動揺を始めた直後に生成される渦が，その後生成される渦よりも大きい結果が示された．図 4.5, 4.6 に定常的に形成される渦と，動揺開始直後に形成される渦の比較を示している．この過渡現象のような結果から，浮体動揺が伴うことで後流の非定常性がより強くなることが示唆された．

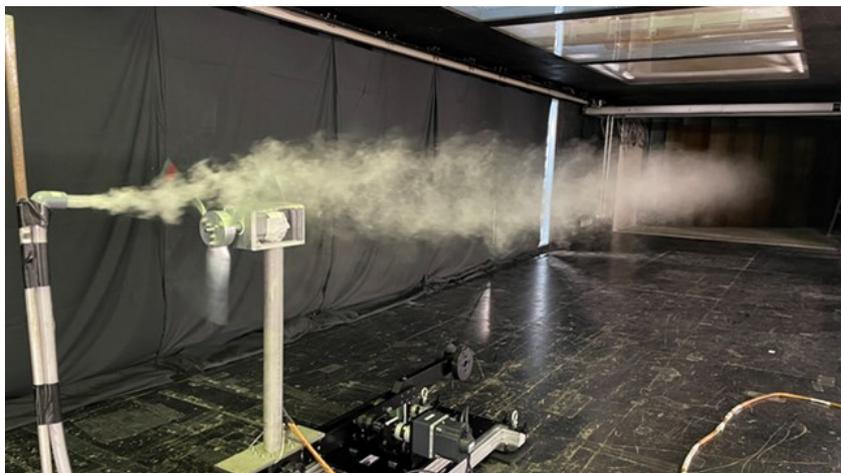


図 4.1 煙発生装置を用いた動揺なし状態の可視化実験結果

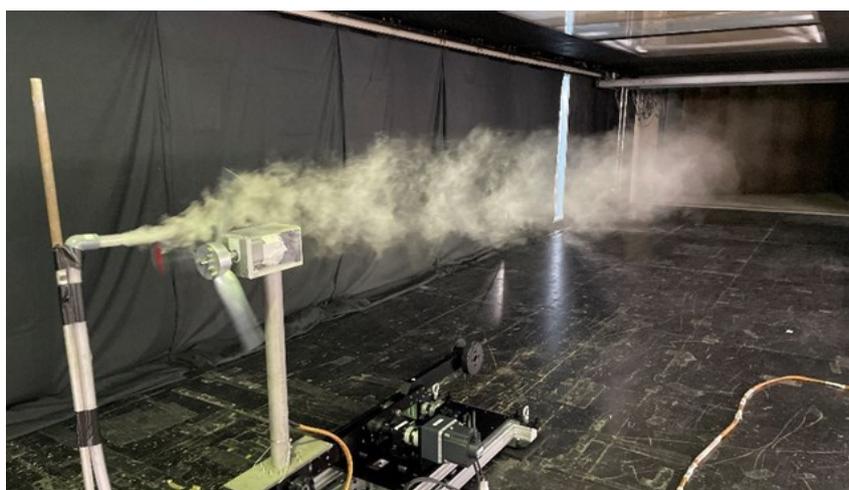


図 4.2 煙発生装置を用いたピッチ動揺 $\pm 1[\text{deg}]$ 状態の可視化実験結果

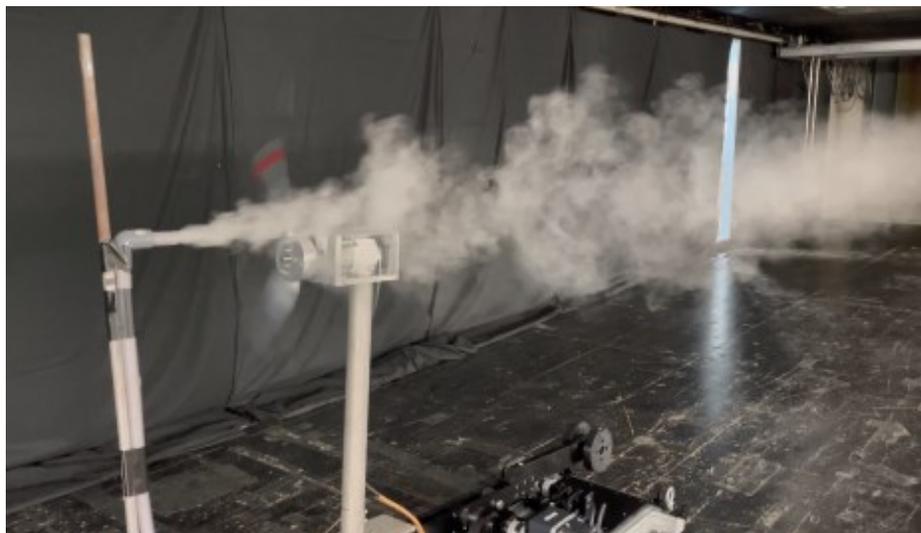


図 4.3 煙発生装置を用いたピッチ動揺±5[deg]状態の可視化実験結果

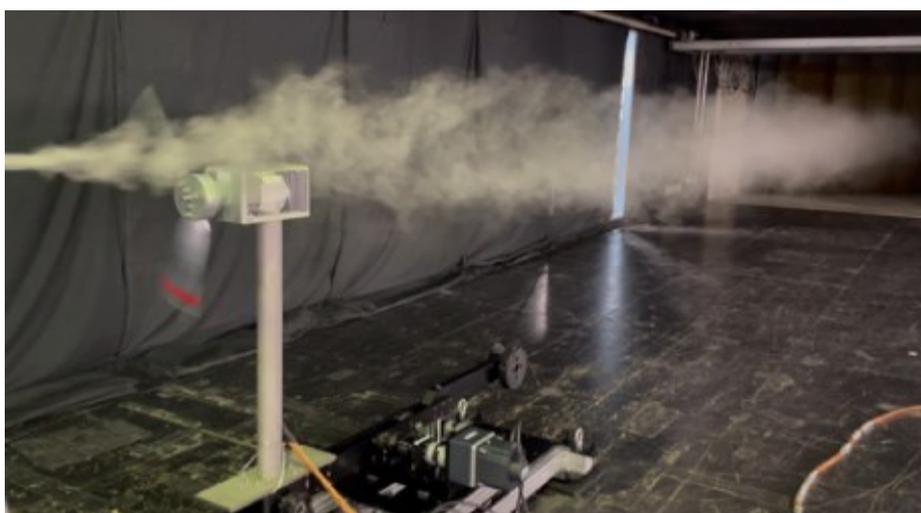


図 4.4 煙発生装置を用いたサージ動揺±60[mm]状態の可視化実験結果

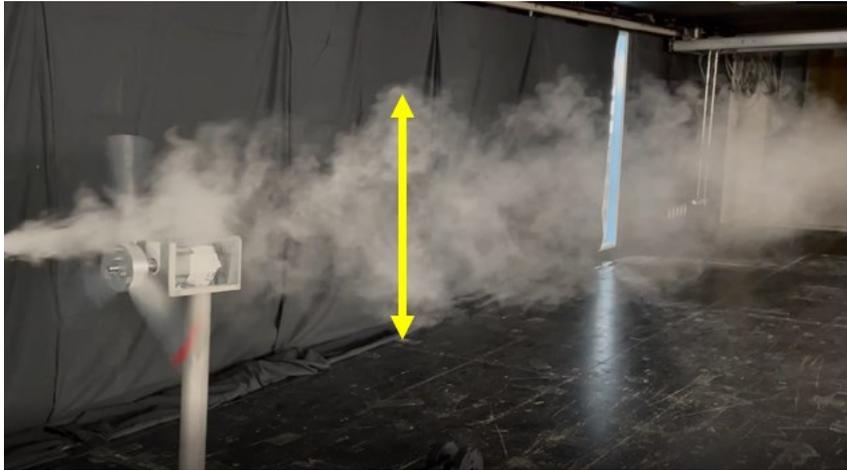


図 4.5 ピッチ動揺時に定常的に形成される渦

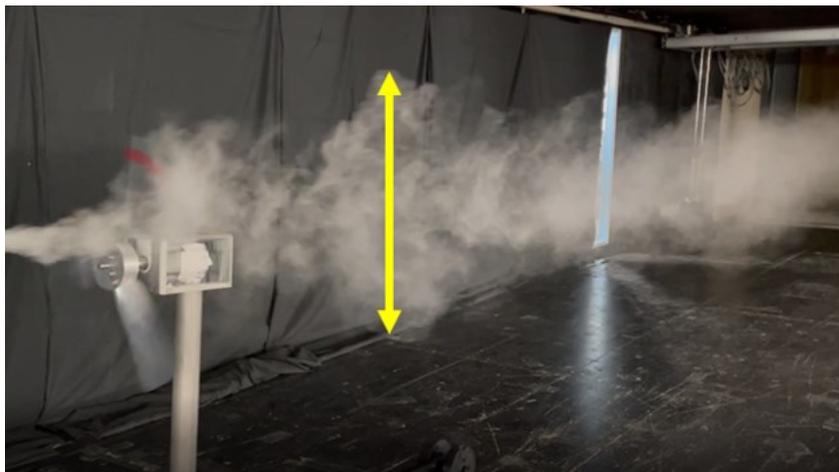


図 4.6 ピッチ動揺を開始直後に形成される大規模渦

4.1.2 スモークケーキを用いた可視化実験

本節は、スモークケーキを用いた可視化実験結果を記す。本実験の目的としては、翼先端から形成される後流の気流構造や、浮体動揺がその構造に与える影響を視覚的に確認することである。実験条件は、4.1.1 節と同様である。

図 4.7, 図 4.8 にピッチ動揺振幅別で、スモークケーキを用いた可視化実験の結果を示す。動揺なしの状態の結果から、風車特有の翼端から発する後流の螺旋構造が形成されていることが確認できる。斜め前方から撮影した実験結果を動揺状態別で比較すると、ピッチ動揺時、螺旋構造がわずかに崩壊していることが確認できる。また、煙発生装置を用いた可視化実験の結果からも示された、

後流幅の伸長も確認された。ピッチ動揺時の螺旋構造を詳しく見るため、真横視点の結果を動揺状態別でそれぞれ、図 4.9, 図 4.10 に示す。動揺なし状態では、綺麗な螺旋構造が形成されているのに対して、ピッチ動揺時にはそのような構造は見られず、煙が拡散しているような結果が示された。これは、図 4.10 の黄線で示したように、ピッチ動揺により、後流の偏向を繰り返すことで、後流内に外部流が侵入する。これにより、後流内部の乱れが大きくなっていることが起因していると考えられる。



図 4.7 スモークケーキを用いた動揺なし状態の可視化実験結果（斜め前方視点）



図 4.8 スモークケーキを用いたピッチ動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ 状態の可視化実験結果（斜め前方視点）



図 4.9 スモークケーキを用いた動揺なし状態の可視化実験結果（真横視点）



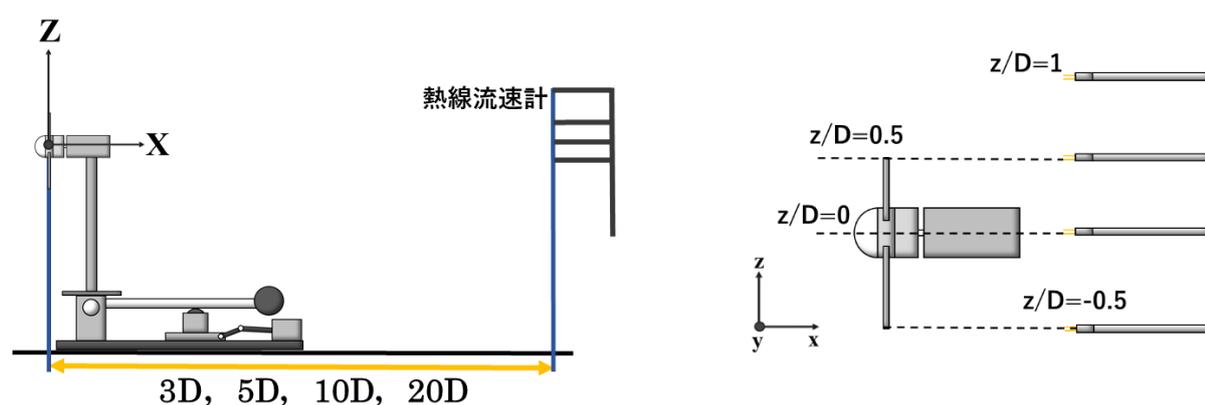
図 4.10 スモークケーキを用いたピッチ動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ 状態の可視化実験結果（真横視点）

4.2 動揺状態による単基風車後流の気流計測結果の比較と考察

加振装置に取り付けた風車模型を用いて、後流の気流計測を行った。多点での計測を行ったので、その計測結果を動揺状態別で比較を行う。

4.2.1 ピッチ・サージ方向の動揺が後流の気流性状に与える影響について

本節では、ピッチ方向、サージ方向の動揺と動揺なしの状態の後流の気流計測結果を比較し、浮体動揺の影響を検討する。実験の概要や条件は以下の図 4.11、表 4.2 の通りである。熱線の配置は図 4.11(ii)の通りで、4 点の同時計測を行った。座標系については、図 4.11(i)のようにロータ中心を原点として、実験を行った。これから紹介する計測結果についても、ロータ中心地点を原点とする。後流を測定する主流方向の距離を $X=3D$, $5D$, $10D$, $20D$ の 4 パターンで計測を行った。



(i) 風車模型と熱線流速計の離隔距離

(ii) 熱線流速計の配置位置

図 4.11 単基風車後流の気流計測に関する実験概要

表 4.2 後流の気流計測に関する実験条件

パラメータ	値
流入風速[m/s]	8
周速比[-]	4.25
ロータ回転数[rpm]	1469
サンプリング周波数[Hz]	1000
計測時間（ピッチ動揺）[s]	30
計測時間（サージ動揺）[s]	300

計測時間（動揺なし）[s]	30
カットオフ周波数（熱線流速計）[Hz]	200
レイノルズ数[-]（ブレード直径に基づく）	1.9×10^5

図 4.12 にピッチ動揺と動揺なし状態を比較した風速の鉛直プロファイル，図 4.13 に標準偏差の鉛直プロファイルを示している．また，図 4.14 にサージ動揺と動揺なし状態を比較した風速の鉛直プロファイル，図 4.15 に標準偏差の鉛直プロファイルを示している．それぞれの鉛直プロファイルは，風車や動揺の影響を比較的受けていない， $z/D=1.0$ の平均風速の結果で無次元化している．それぞれの図中のグレーの印字が後流の気流計測を行った主流方向の距離である．平均風速の鉛直プロファイルを比較すると，ピッチ動揺と動揺なし状態で有意な差異は見られない結果となった．X 方向の距離が大きくなるほど，ピッチ動揺状態も動揺なし状態と同様に風速の回復が確認された．標準偏差の鉛直プロファイルを比較すると，ピッチ動揺状態の方が，ロータ中心，上翼端地点で乱れが大きいことを確認できる．その乱れの差はわずかではあるが，下流方向の距離が大きくなっても，その効果は持続している傾向が見られる．サージ動揺の結果に関しては，風速，標準偏差の鉛直プロファイルの結果で動揺なしとの有意な差異は見られなかった．

図 4.16～4.27 に，動揺状態，後流測定地点それぞれの風速の時系列データを示している．時系列データは $0.1[s]$ の移動平均処理を施し，同時計測した 4 点を， $z/D=1.0$ の風速の結果で無次元化した結果である．ピッチ動揺時には，その周期に同期するような変動をしており，動揺なし時の結果との有意な差異が確認された．特に $X=3D$ ， $z/D=0.5$ の翼先端部分でその変動は，顕著に現れた．下流方向に進むほど， $z/D=0.5$ のピッチ動揺による変動は小さくなり，ロータ中心地点にその変動は見られる傾向となった． $z/D=-0.5$ の下方の翼先端部分では，タワーやナセルの影響もあり，ピッチ動揺の影響は明確に見られなかった．ピッチ動揺の影響は， $X=20D$ の場合にも，持続していることが時系列データの結果から確認することができる．サージ動揺の風速の時系列データから，動揺なしの結果との有意な差異は確認できなかった．

ピッチ動揺の影響がどの程度，下流方向に持続するのかを確認するため，ピッチ動揺の影響が明確に現れる $z/D=0.5$ ，ロータ中心地点の時系列データの結果を用いて，周波数解析を行った．各後流測定距離で周波数解析を行った結果を図 4.28，4.29 に示している．図中に示した赤線は，ピッチ動揺の周期 $0.8[s]$ を周波数に変換した $1.25[Hz]$ の地点を指している．それぞれの結果で，その周波数帯で一番大きなピークが確認された． $z/D=0.5$ の結果では，下流方向に進むほど，ピッチ動揺の影響はだんだんと小さくなっていることを確認できるが， $X=20D$ の場合でも，わずかにピークが見られる．

ロータ中心地点の結果では、 $X=10D$ 時に一番大きなピークが示される結果となり、下流方向に進むほど、ピッチ動揺の影響がロータ中心方向に移行することが確認できた。

図 4.30 に、 $X=3D$ 時における、動揺なし、ピッチ動揺 $\pm 1, 5[\text{deg}]$ 状態のロータ中心地点で計測した風速の時系列データを同時に示している。この結果より、ピッチ動揺 $\pm 1[\text{deg}]$ の場合、 $\pm 5[\text{deg}]$ のような変動は見られず、動揺なしとの有意な差異は見られない結果となった。

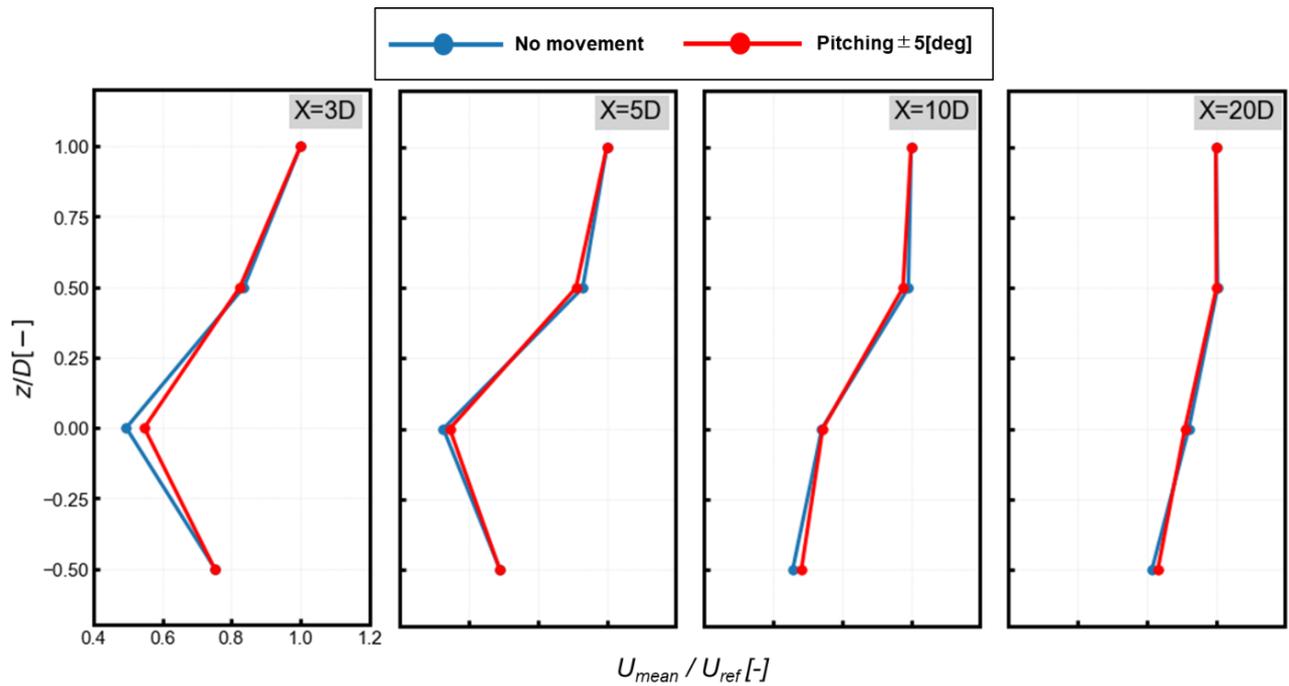


図 4.12 ピッチ動揺と動揺なし状態を比較した風速の鉛直プロファイル

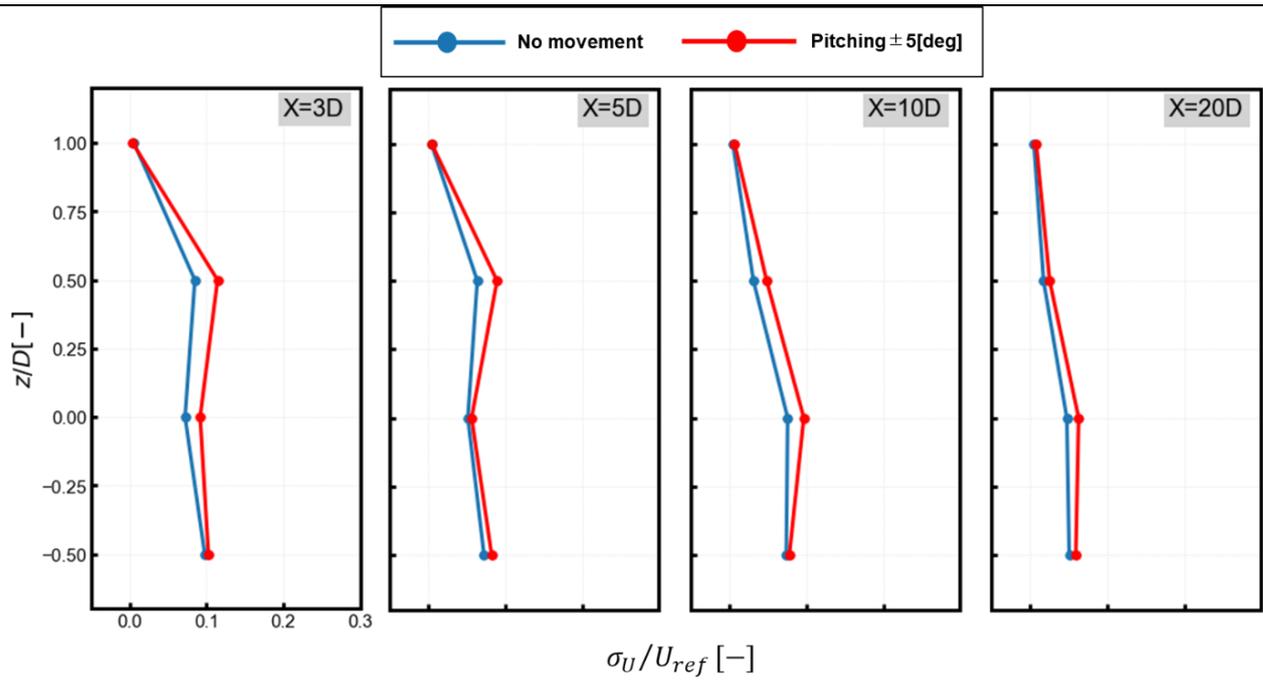


図 4.13 ピッチ動揺と動揺なし状態を比較した正規化した標準偏差の鉛直プロファイル

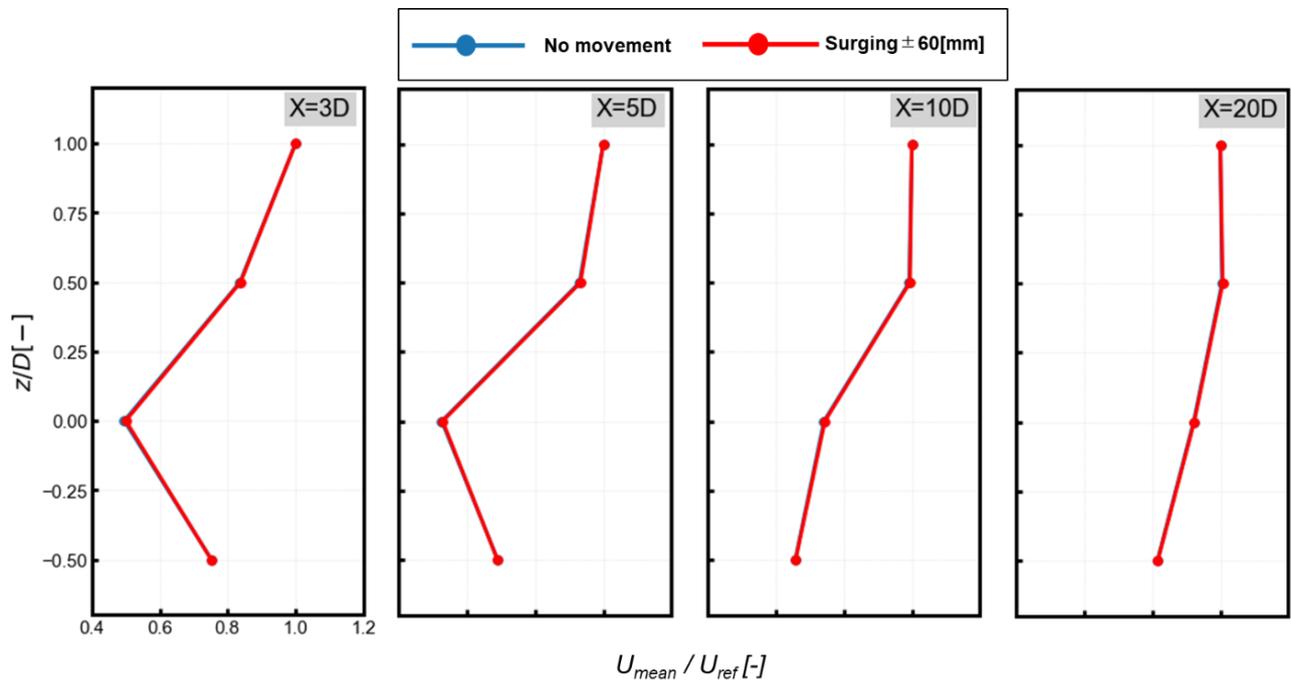


図 4.14 サージ動揺と動揺なし状態を比較した風速の鉛直プロファイル

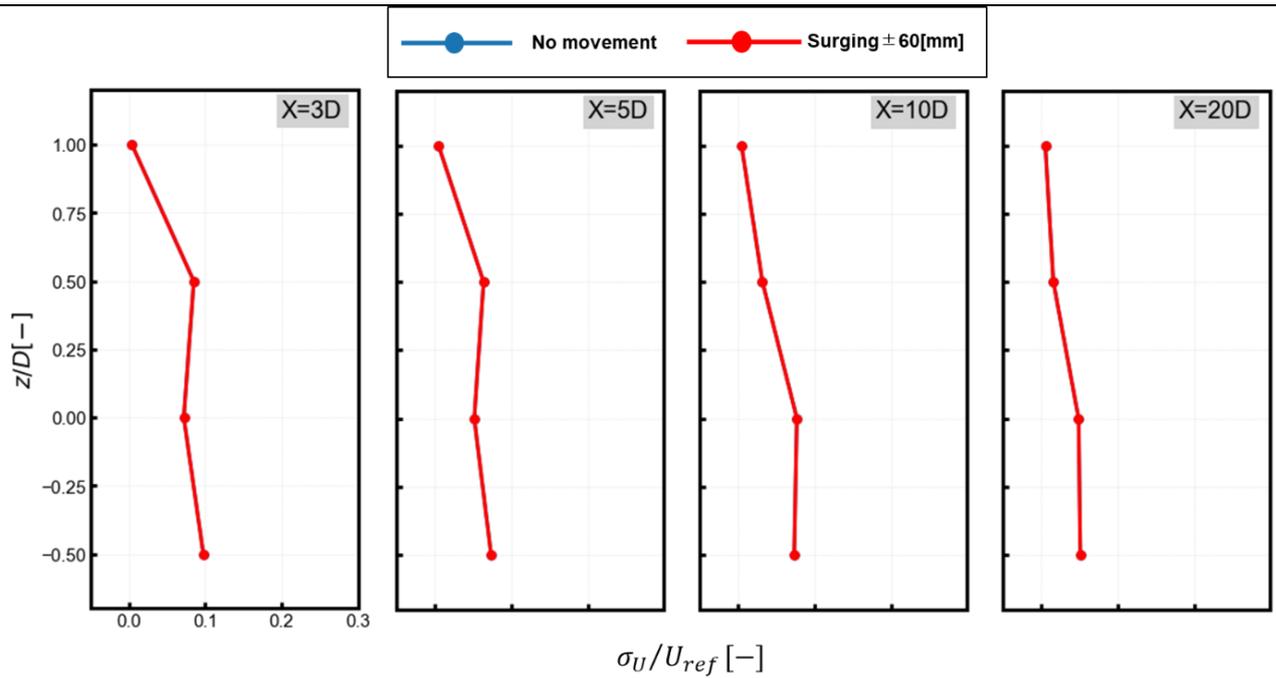


図 4.15 サージ動揺と動揺なし状態を比較した正規化した標準偏差の鉛直プロファイル

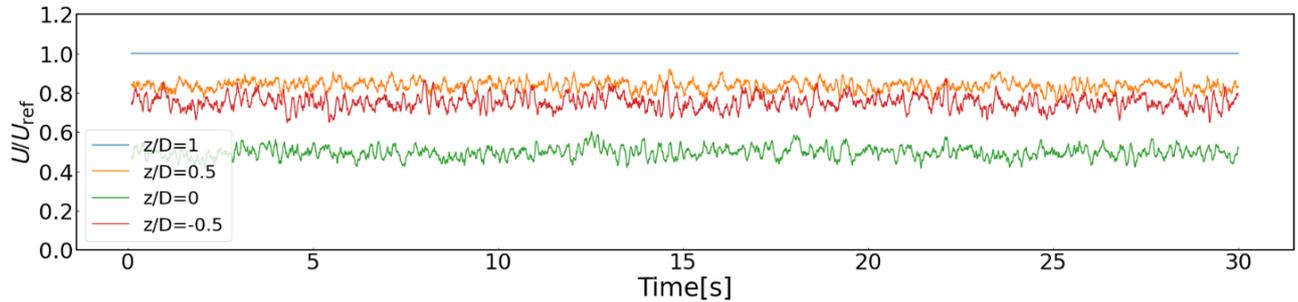


図 4.16 X=3D 地点、動揺なし状態での後流風速の時系列データ

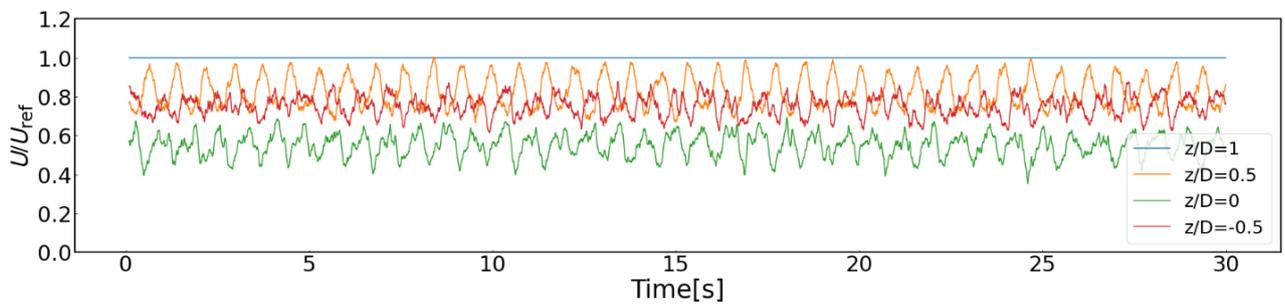


図 4.17 X=3D 地点、ピッチ動揺±5[deg]状態での後流風速の時系列データ

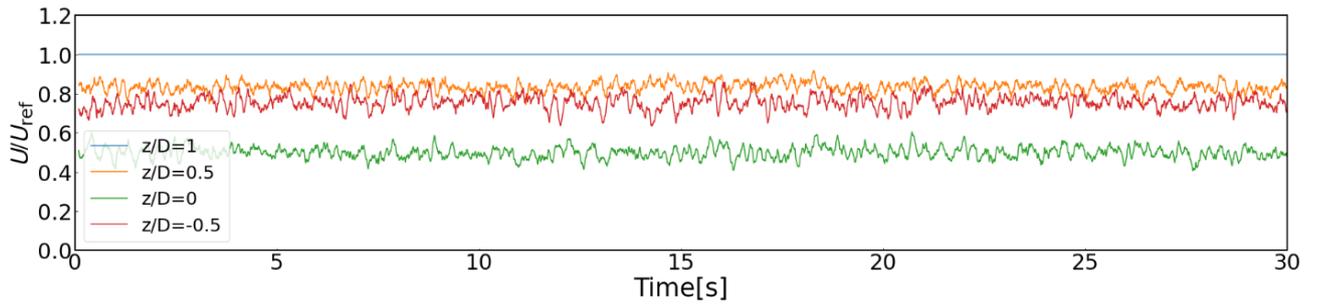


図 4.18 $X=3D$ 地点, サージ動揺±60[mm]状態での後流風速の時系列データ

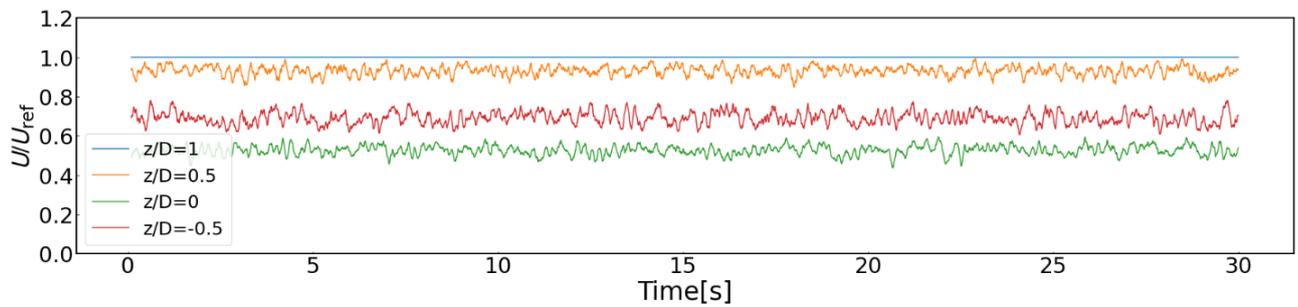


図 4.19 $X=5D$ 地点, 動揺なし状態での後流風速の時系列データ

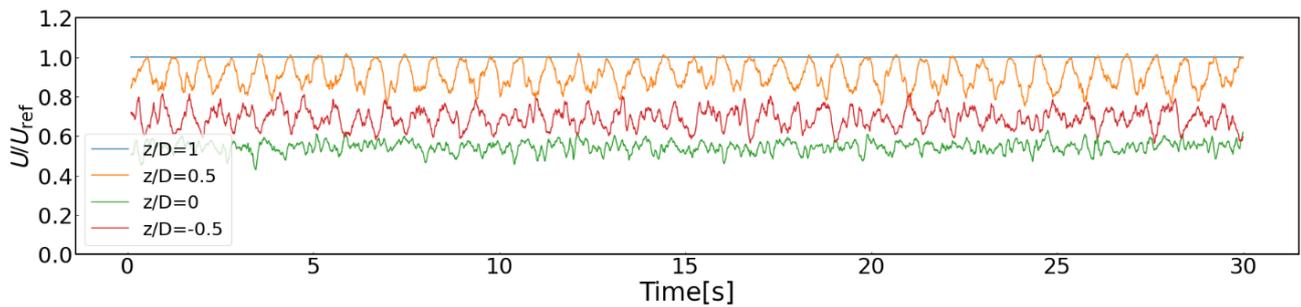


図 4.20 $X=5D$ 地点, ピッチ動揺±5[deg]状態での後流風速の時系列データ

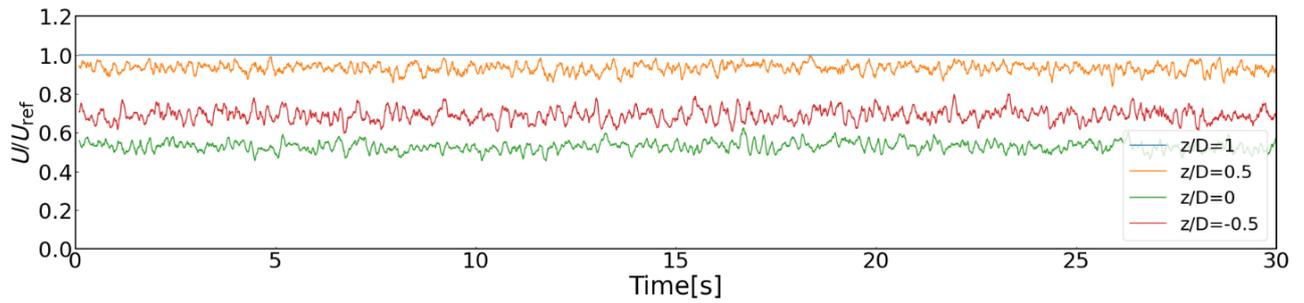


図 4.21 X=5D 地点，サージ動揺±60[mm]状態での後流風速の時系列データ

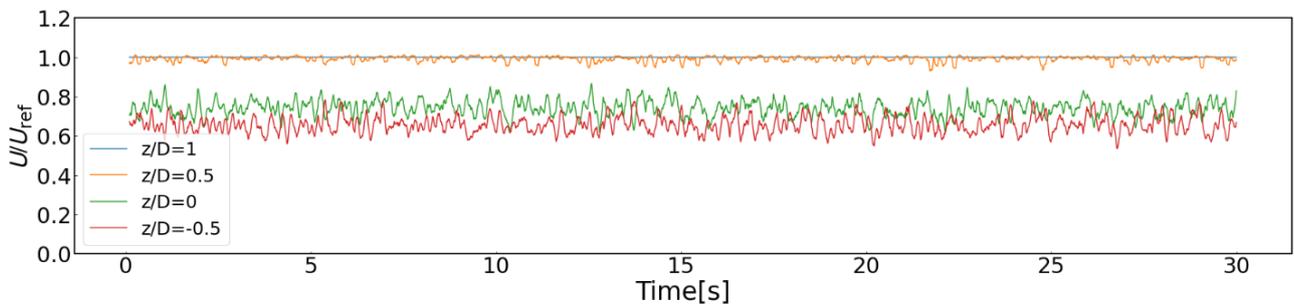


図 4.22 X=10D 地点，動揺なし状態での後流風速の時系列データ

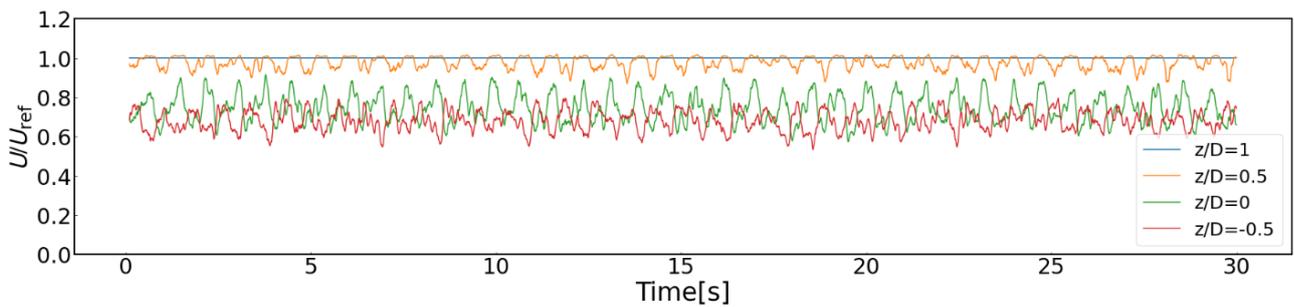


図 4.23 X=10D 地点，ピッチ動揺±5[deg]状態での後流風速の時系列データ

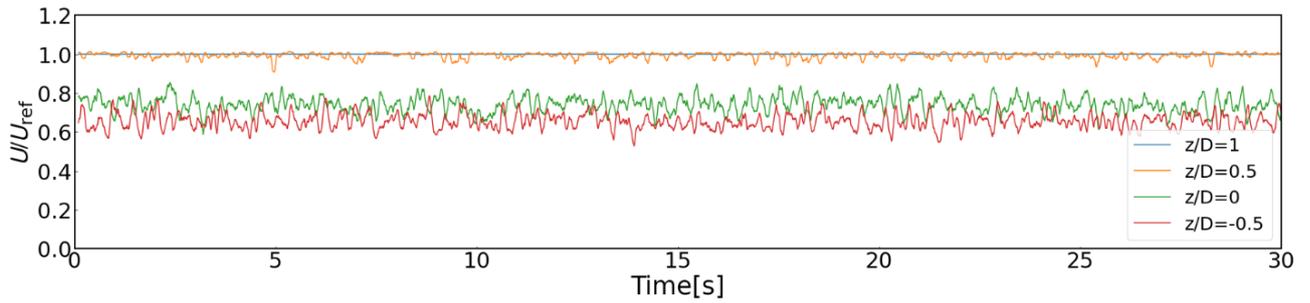


図 4.24 X=10D 地点，サージ動揺±60[mm]状態での後流風速の時系列データ

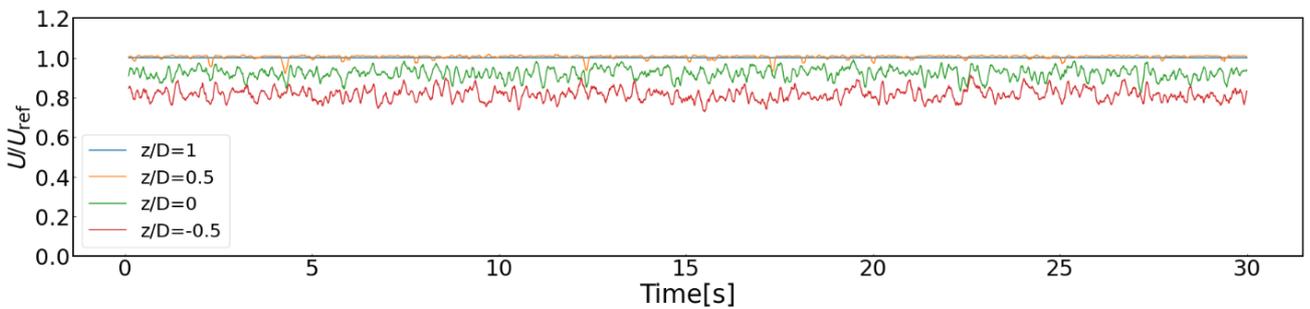


図 4.25 X=20D 地点，動揺なし状態での後流風速の時系列データ

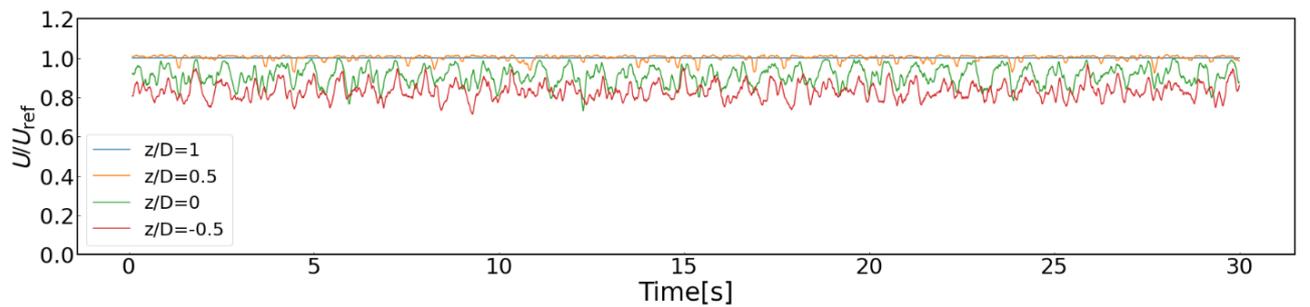


図 4.26 X=20D 地点，ピッチ動揺±5[deg]状態での後流風速の時系列データ

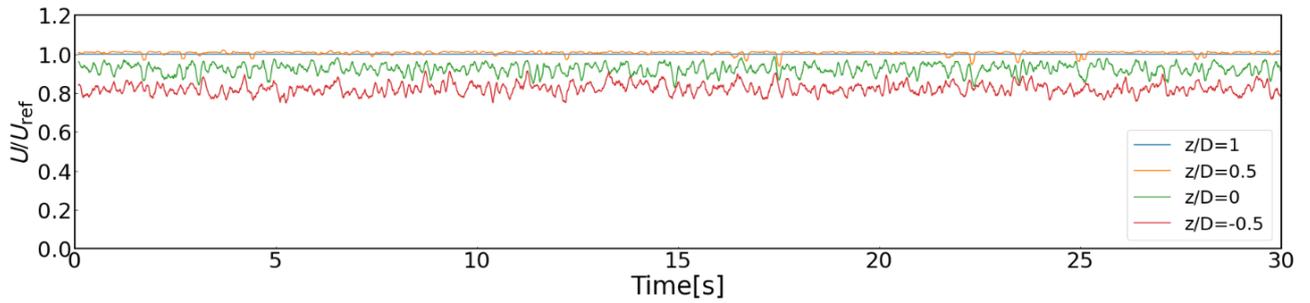


図 4.27 X=20D 地点，サージ動揺±60[mm]状態での後流風速の時系列データ

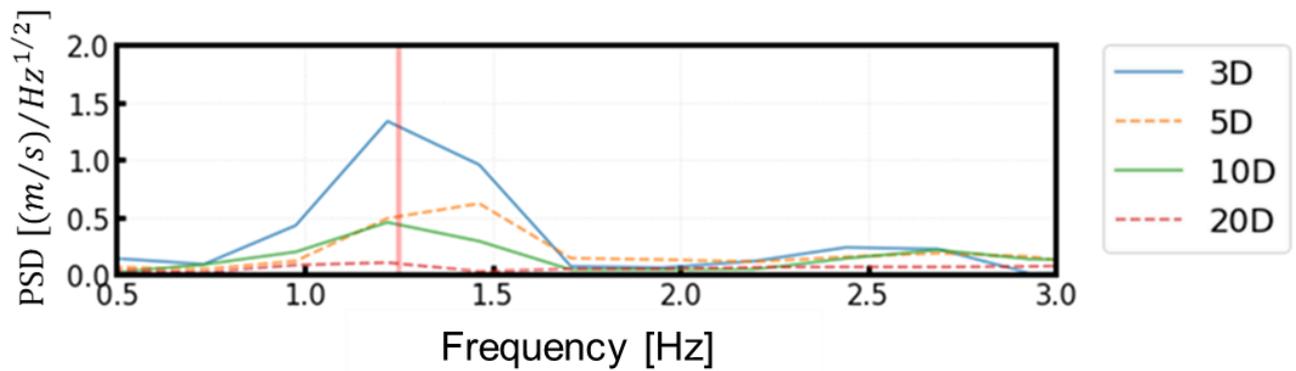


図 4.28 それぞれの下流方向の距離における，ピッチ動揺状態時，
z/D=0.5 地点で計測した風速の時系列データに対して行った周波数解析結果

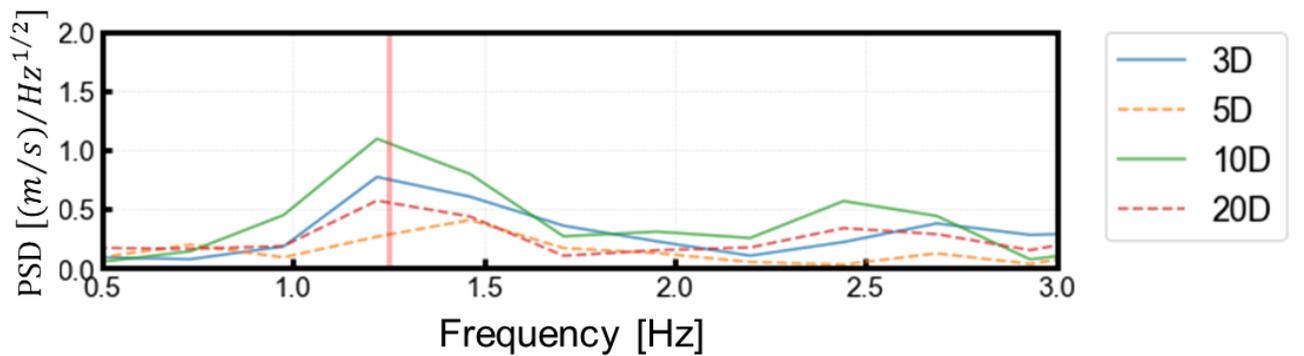


図 4.29 それぞれの下流方向の距離における，ピッチ動揺状態時，
ロータ中心地点で計測した風速の時系列データに対して行った周波数解析結果

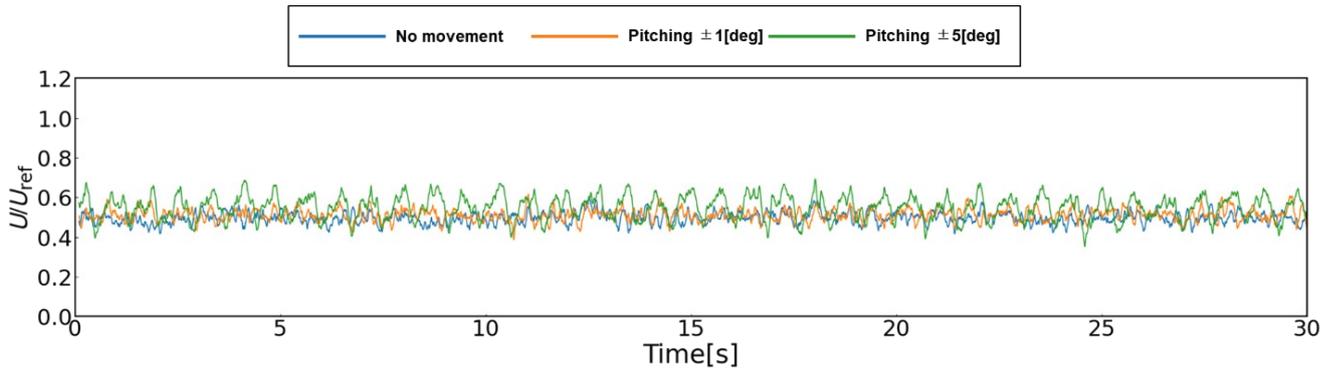


図 4.30 X=3D 時における，動揺なし・ピッチ動揺±1，5[deg]で比較したロータ中心地点において計測された風速の時系列データ

4.2.2 ロール方向の動揺が後流の気流性状に与える影響について

加振装置の回転方向の動揺は，ピッチ方向のみを模擬する目的で製作されたが，加振装置の向きを図 4.31 のように変更することで，ロール方向の動揺の再現が可能となった．図 4.32 に示すような熱線流速計の配置で後流の気流計測を行った．水平方向に 5 点の同時計測を行い，それを風洞中央と対称に 2 回計測を行うことで，1 つの動揺状態に対して 9 点の計測を行った．測定は X=3D，5D，10D の 3 つの地点で行った．座標系については，ロータ中心地点を原点とし，Y 方向に関しては，主流方向の正の向きから見て，左方向を正とした．加振装置自体がブラフボディになることを考慮し，加振装置を図 4.31 のように 2 つの向きで計測を行い，加振装置の影響についても検討した．表 4.3 に実験条件を示している．

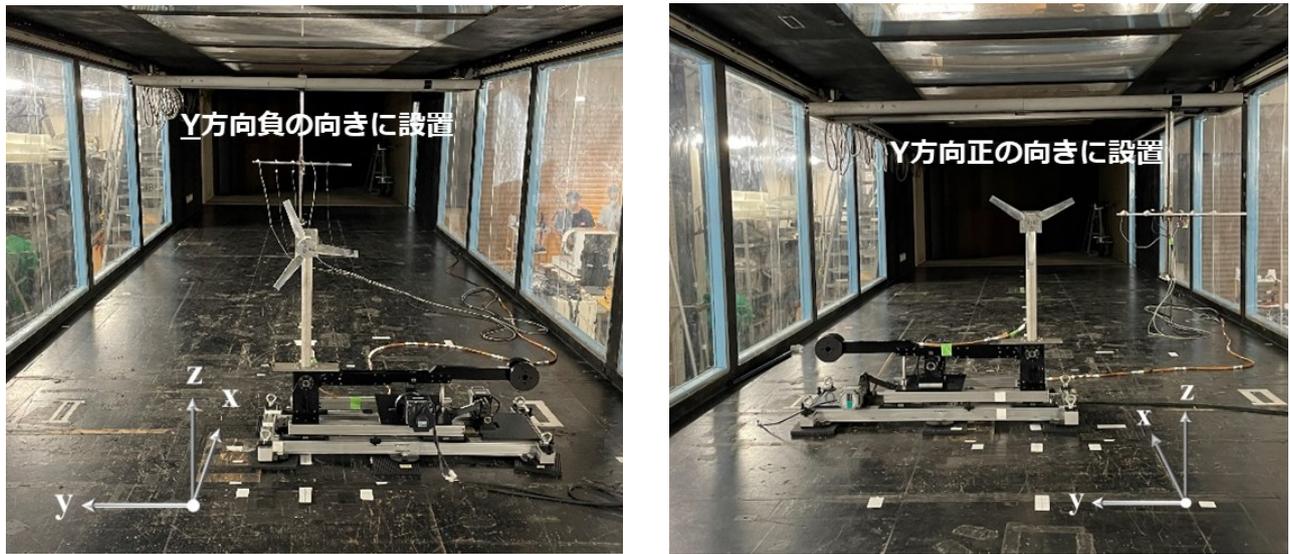


図 4.31 ロール方向の動揺による風車後流の気流計測時に風車模型を設置した様子

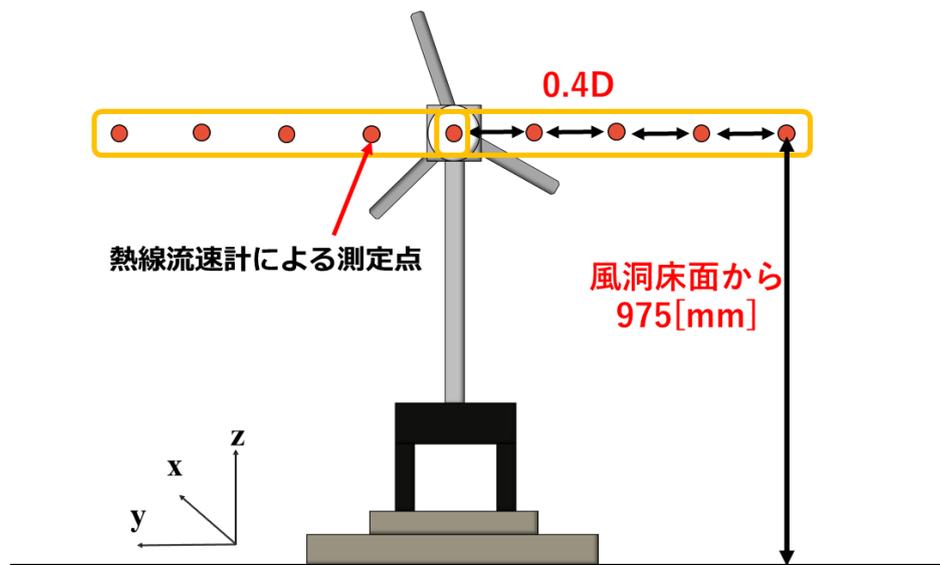


図 4.32 ロール動揺による気流計測時の熱線流速計の配置

表 4.3 ロール動揺による後流の気流計測に関する実験条件

パラメータ	値
流入風速[m/s]	8
周速比[-]	4.25
ロータ回転数[rpm]	1469
サンプリング周波数[Hz]	1000

計測時間（ロール動揺）[s]	50
計測時間（動揺なし）[s]	40
カットオフ周波数（熱線流速計）[Hz]	200
レイノルズ数[-]（ブレード直径に基づく）	1.9×10^5

図 4.33, 4.34 に動揺状態で比較した風速の水平プロファイルを示している。水平プロファイルは、風車や動揺の影響を比較的受けていない、 $y/D = \pm 1.6$ の結果で無次元化している。図 4.33 が加振装置を y 方向負の向きに設置した結果、図 4.34 が Y 方向正の向きに設置した結果である。図 4.33 の $X=3D$ の結果では、ロール動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ 時にロータ中心地点で、風速の回復が早い傾向が示された。 $X=5D, 10D$ 地点では、動揺状態で有意な差異は見られない結果となった。また、 $X=3D, 5D$ の結果では、後流軸に対して非対称性が生じていることを確認できる。これは、本研究室の過去の修士論文^[13]で示されたように、タワーの影響とブレード旋回の相互の影響によるものであると考えられている。加振装置の設置向きで水平プロファイルと比較すると、わずかに風速の回復が早い地点、遅い地点が確認できる。これは、加振装置の向きと旋回流の方向が関係しており、主流方向正の向きから見て、反時計回りに旋回する風車後方の流れが、加振装置のブラフボディとしての働きによって、後流構造の違いが生じていることが起因していると考えられる。一般的に風速の回復が遅れるのはロータ中心地点だが、図 4.34(iii)の水平プロファイルを確認すると、そのような結果は見られず、 $y/D=0.4$ 地点が一番風速の回復が遅い地点となっている。どちらの向きにしても、加振装置がブラフボディとなって、後流の気流計測に、良い影響は与えることはないが、ロール動揺を用いた、実験を行う場合、 Y 方向負の向きに加振装置を設置することで、実機に近い計測結果を得られることが示唆された。

図 4.35～4.52 にそれぞれの計測地点、動揺状態、加振装置の設置向き別で、風速の時系列データを示している。これらの風速の時系列データは、 $0.1[\text{s}]$ の移動平均処理を施し、 $y/D = \pm 1.6$ の結果により無次元化したものである。ロール動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ の結果では、非常に大きい風速の変動が見られる結果となった。これは、ピッチ動揺時に、その影響が顕著に現れた $X=3D, z/D=0.5$ の結果よりも、さらに大きな振幅であることがわかる。最もロール動揺の影響が現れた $X=3D, y/D=-0.4$ 地点の結果で、 U/U_{ref} の値が、 $0.5 \sim 1.0$ 付近で変動している。これは、動揺なし時に見られる、ロータ中心から翼先端付近での U/U_{ref} の値であり、ピッチ動揺の風速の変動振幅が大きい $X=3D, z/D=0.5$ の結果と比較して、後流の偏向幅が非常に大きいことが推察される。ピッチ動揺の場合、鉛直方向の変動であるため、タワーやナセルの影響が大きいことで、ロール動揺の変動振幅よりも、小さい結果

となったと考えられる。ロール動揺 $\pm 1[\text{deg}]$ の場合、動揺なし状態と有意な差異は見られない結果となった。ロール動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ の場合、下流方向に向かうほど、動揺の影響は小さくなっていくが、 $X=10D$ においても、動揺の影響を視覚的に確認できる。

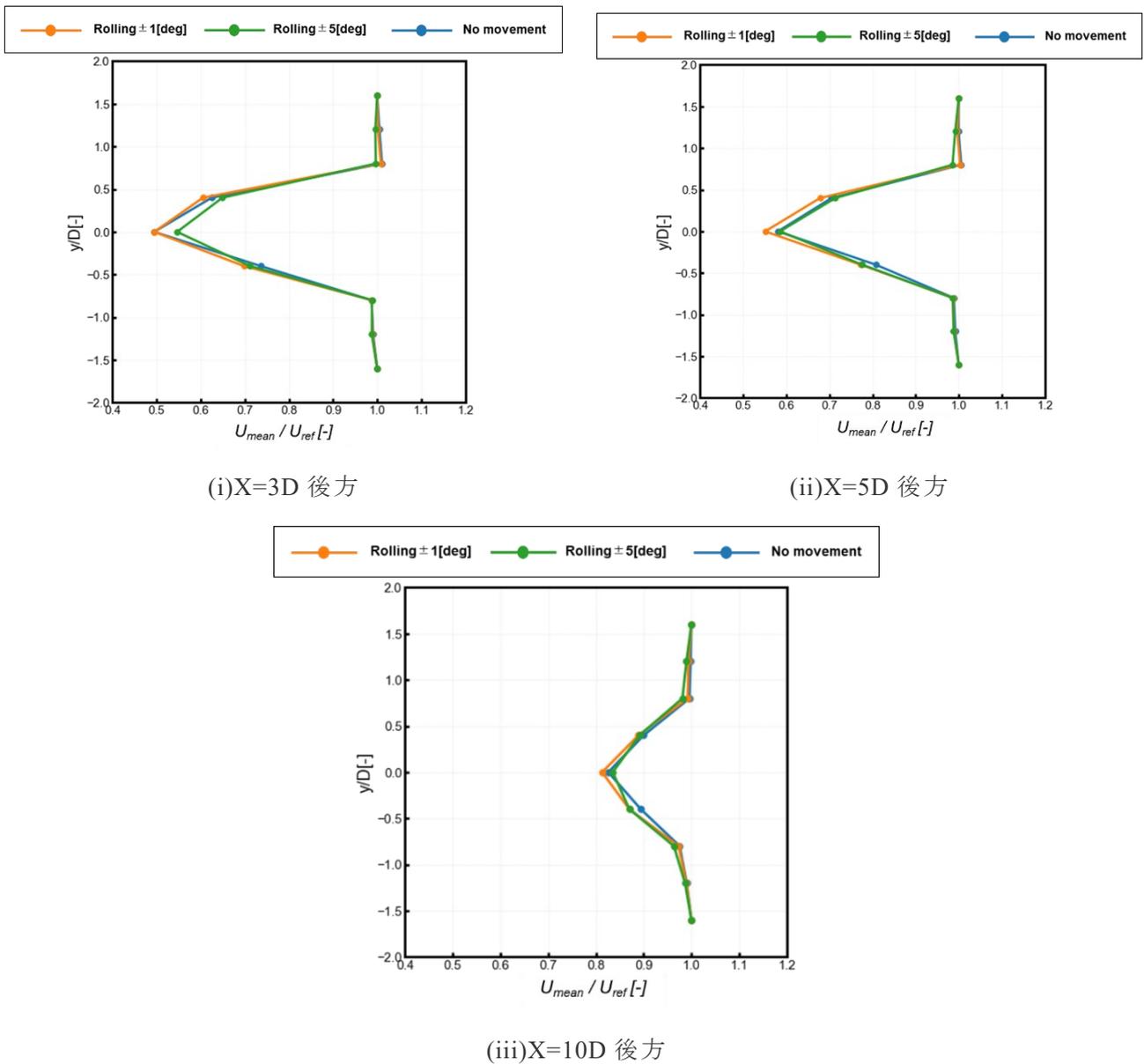
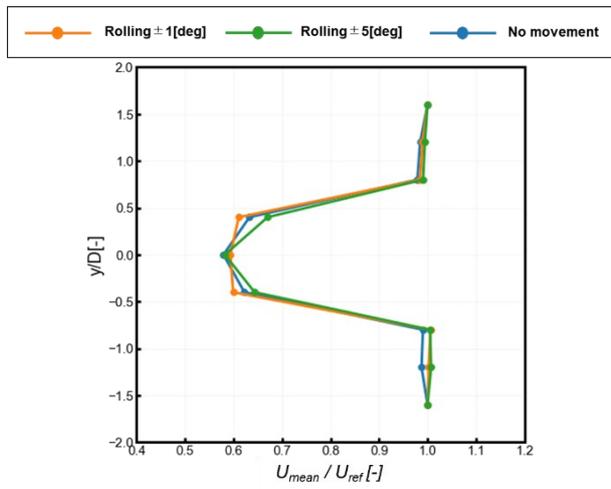
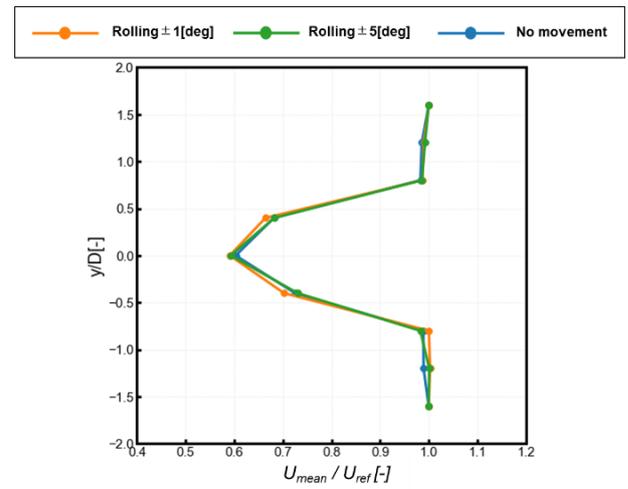


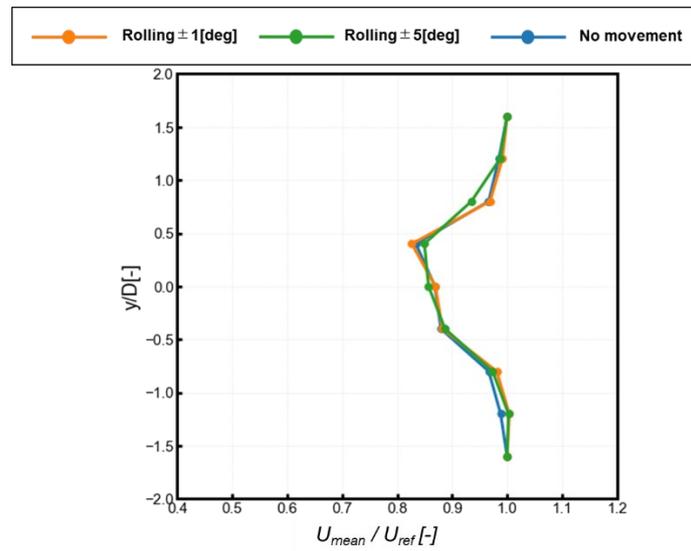
図 4.33 各地点で測定した風速の水平プロファイルの動揺状態による比較
(Y 方向負の向きに設置)



(i)X=3D 後方



(ii)X=5D 後方



(iii)X=10D 後方

図 4.34 各地点で測定した風速の水平プロファイルの動揺状態による比較
(Y 方向正の向きに設置)

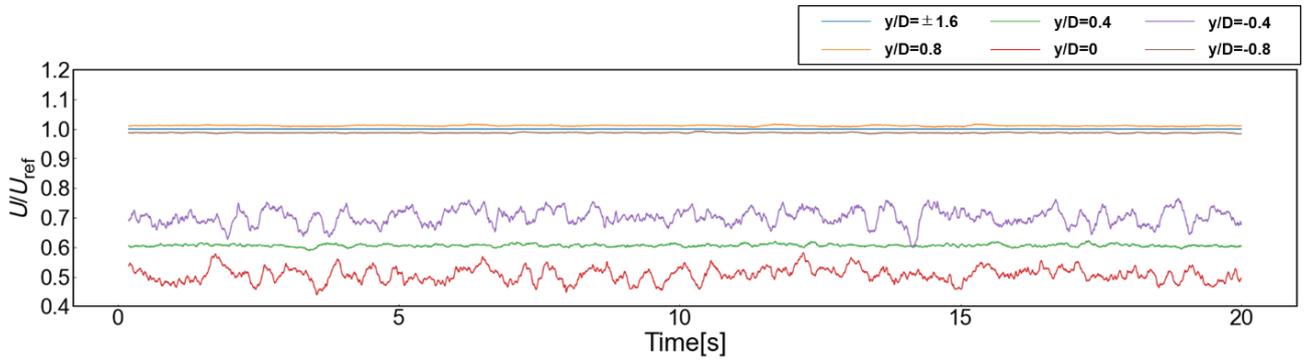


図 4.35 $X=3D$ 地点で測定した動揺なし状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

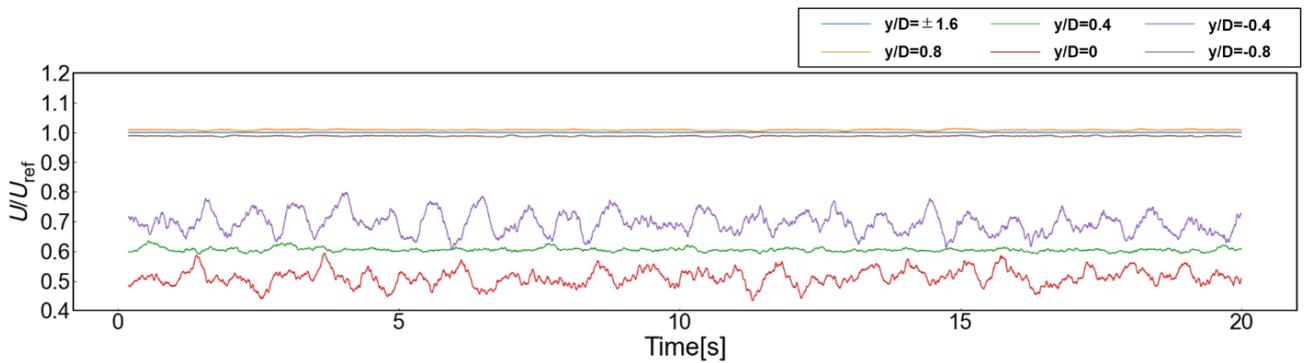


図 4.36 $X=3D$ 地点で測定したロール動揺 ± 1 [deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

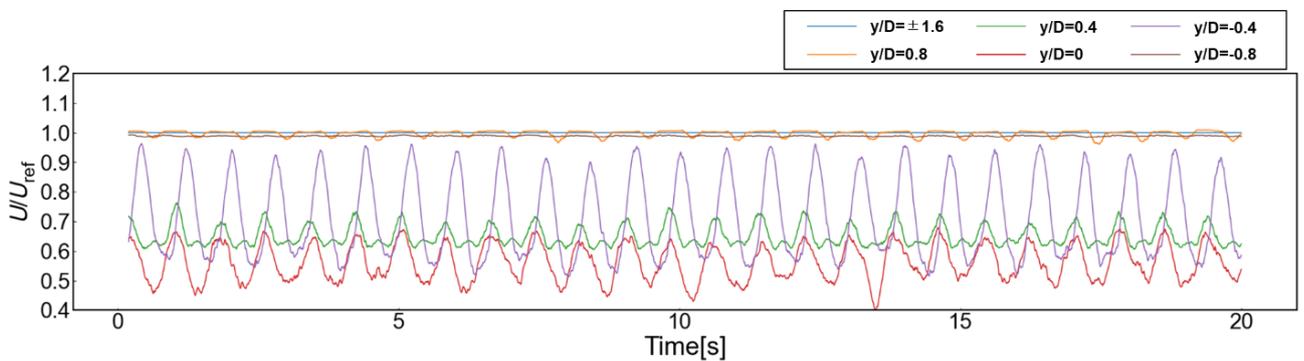


図 4.37 $X=3D$ 地点で測定したロール動揺 ± 5 [deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

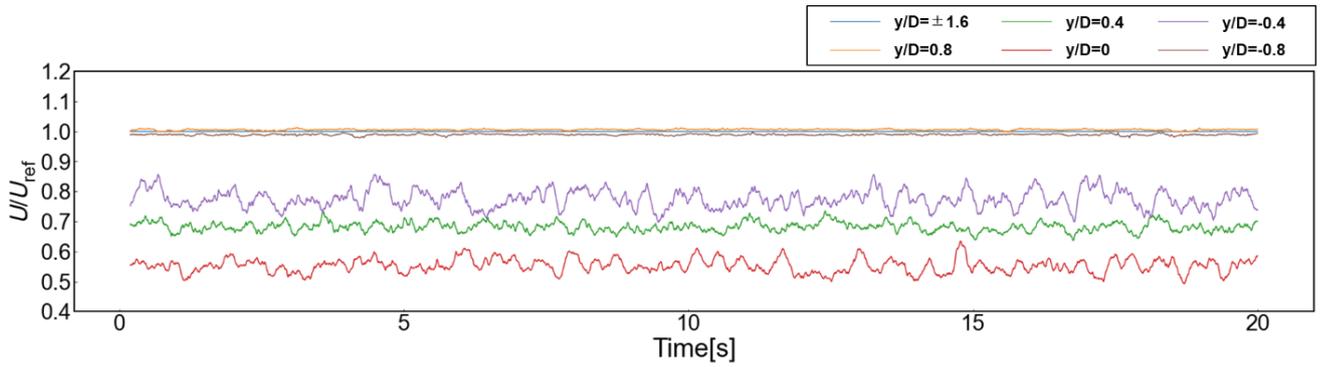


図 4.38 X=5D 地点で測定した動揺なし状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

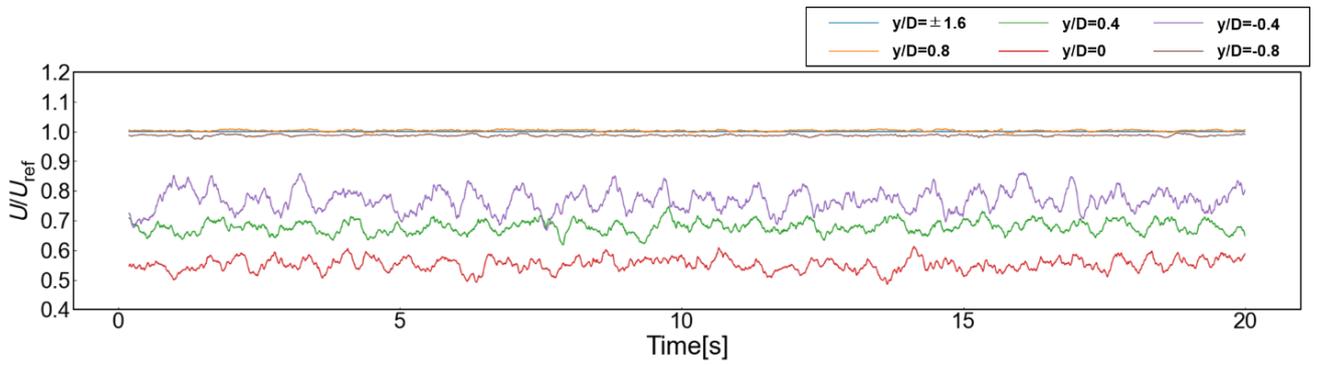


図 4.39 X=5D 地点で測定したロール動揺 ± 1 [deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

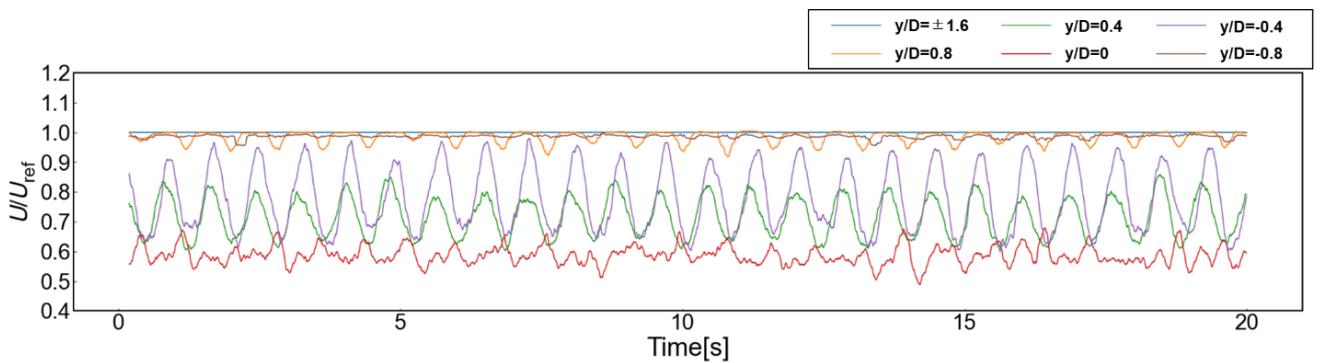


図 4.40 X=5D 地点で測定したロール動揺 ± 5 [deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

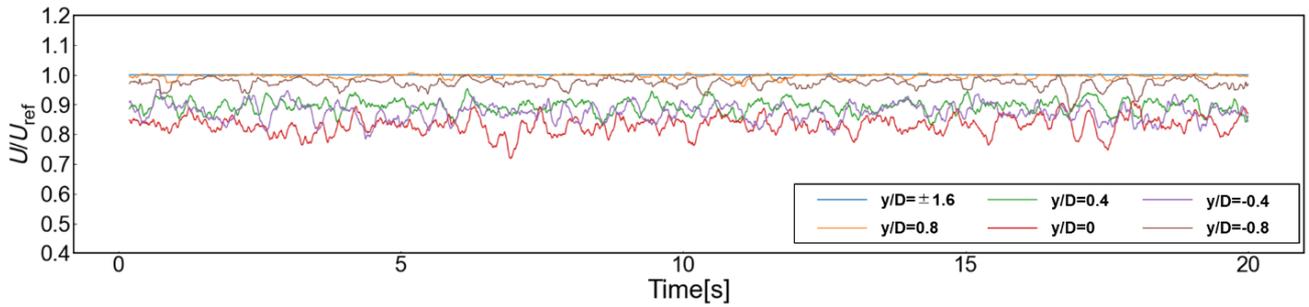


図 4.41 X=10D 地点で測定した動揺なし状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

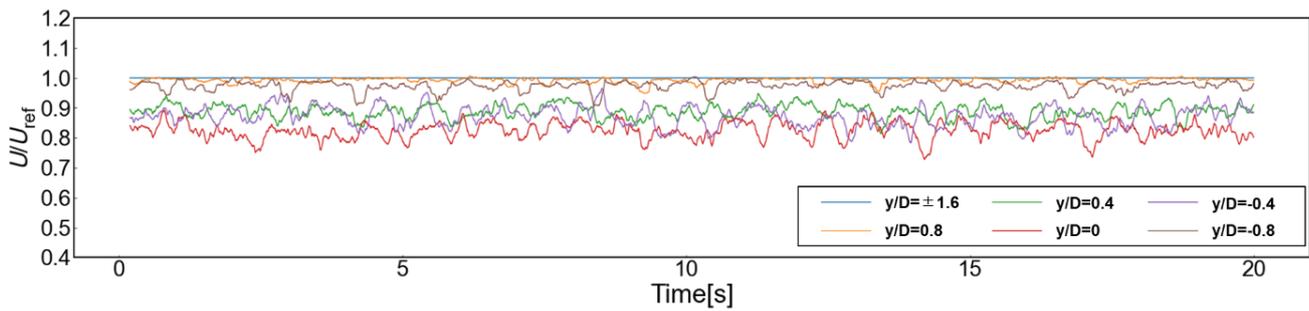


図 4.42 X=10D 地点で測定したロール動揺±1[deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

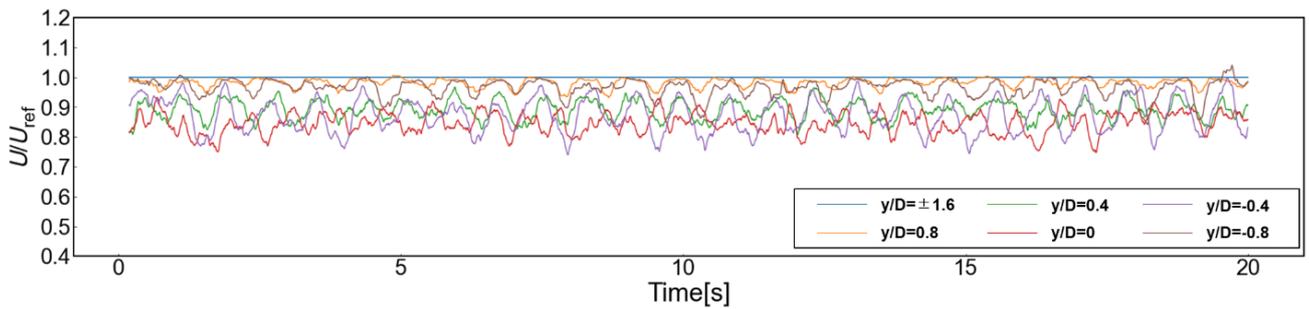


図 4.43 X=10D 地点で測定したロール動揺±5[deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向負の向きに設置)

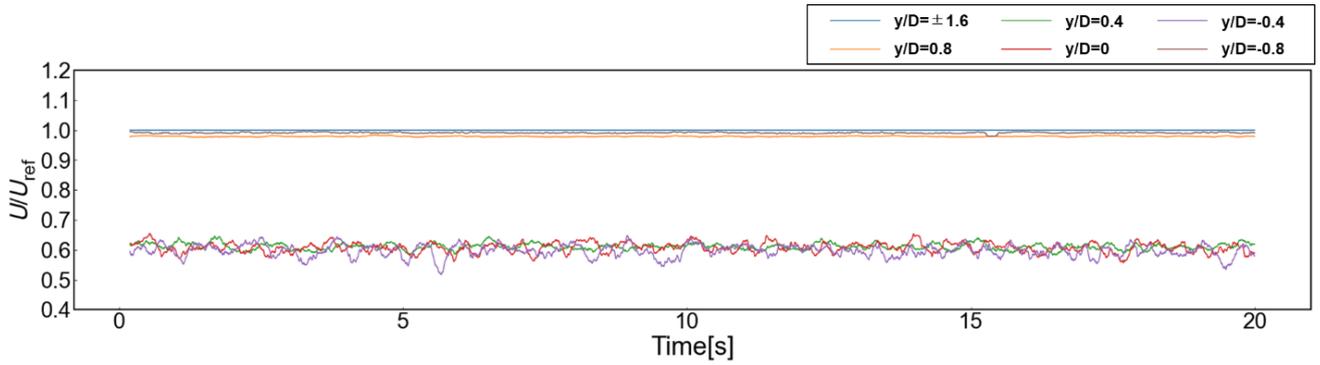


図 4.44 $X=3D$ 地点で測定した動揺なし状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

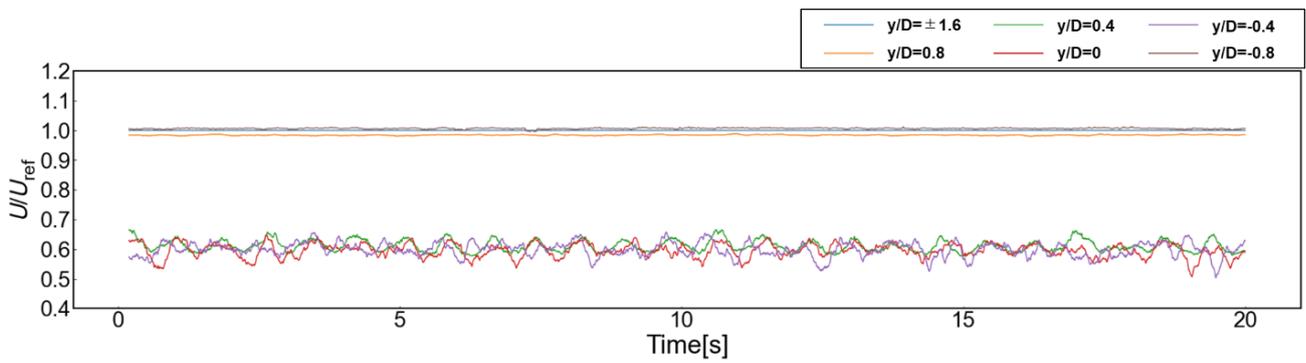


図 4.45 $X=3D$ 地点で測定したロール動揺 ± 1 [deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

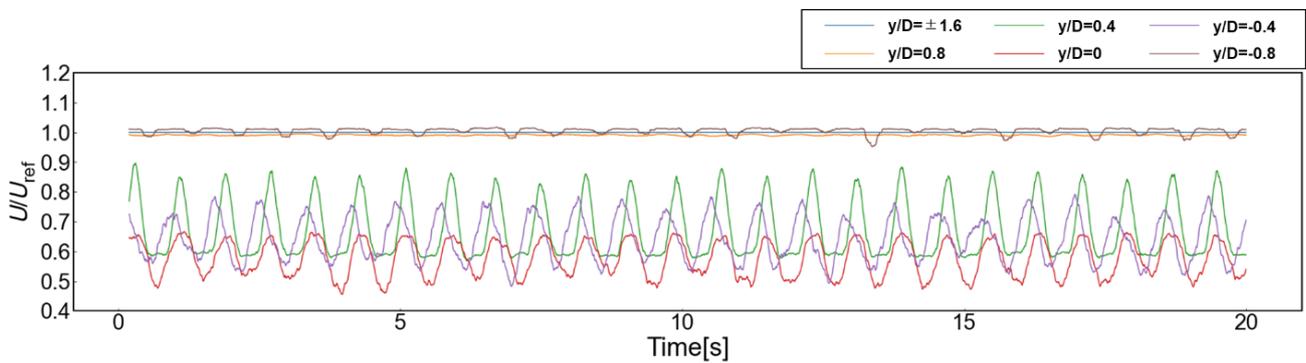


図 4.46 $X=3D$ 地点で測定したロール動揺 ± 5 [deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

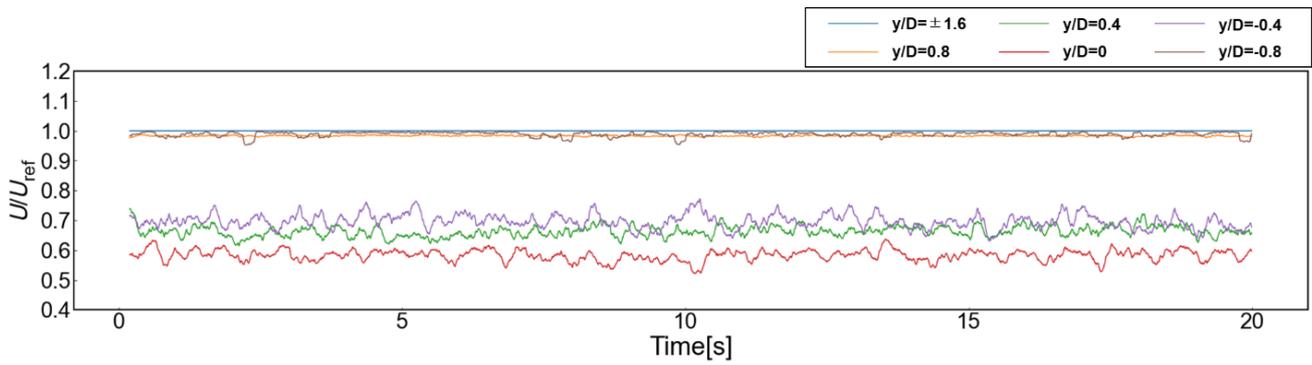


図 4.47 X=5D 地点で測定した動揺なし状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

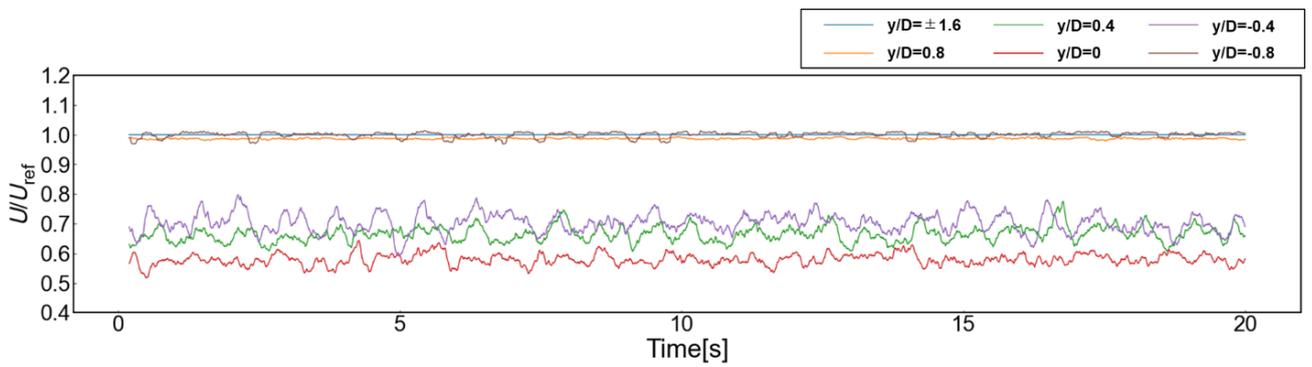


図 4.48 X=5D 地点で測定したロール動揺 ± 1 [deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

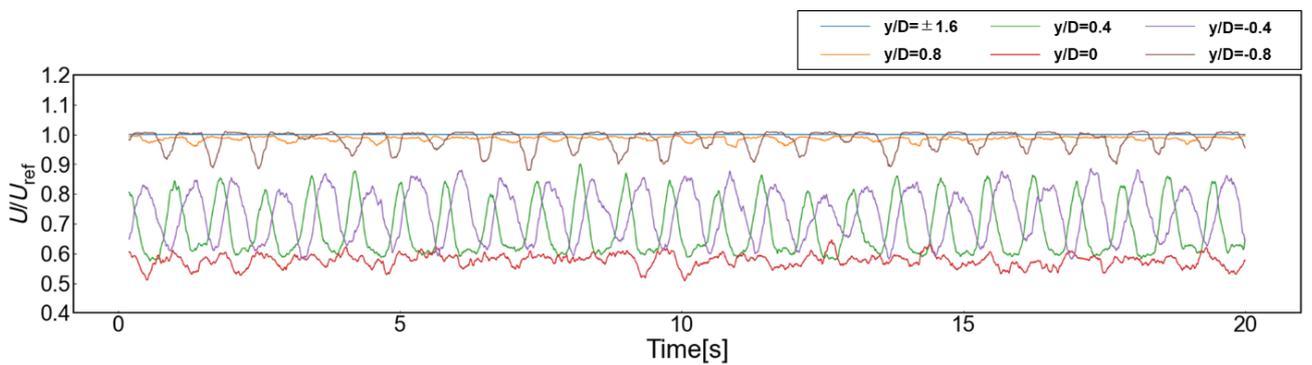


図 4.49 X=5D 地点で測定したロール動揺 ± 5 [deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

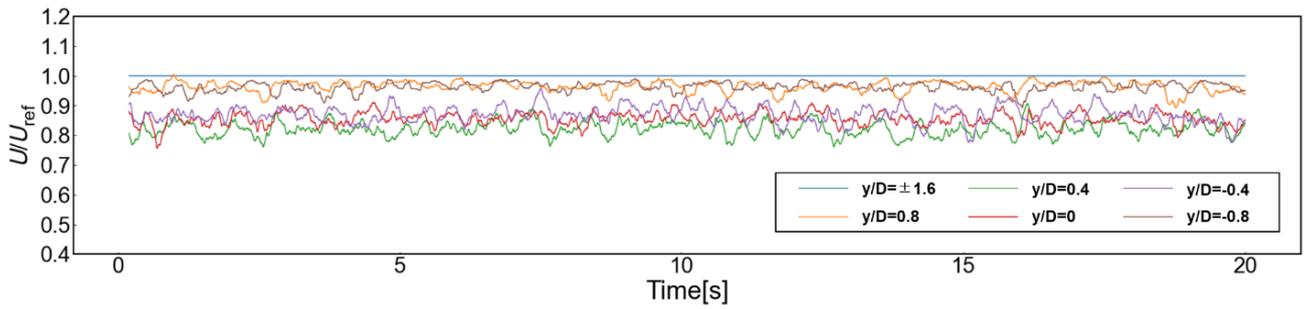


図 4.50 X=10D 地点で測定した動揺なし状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

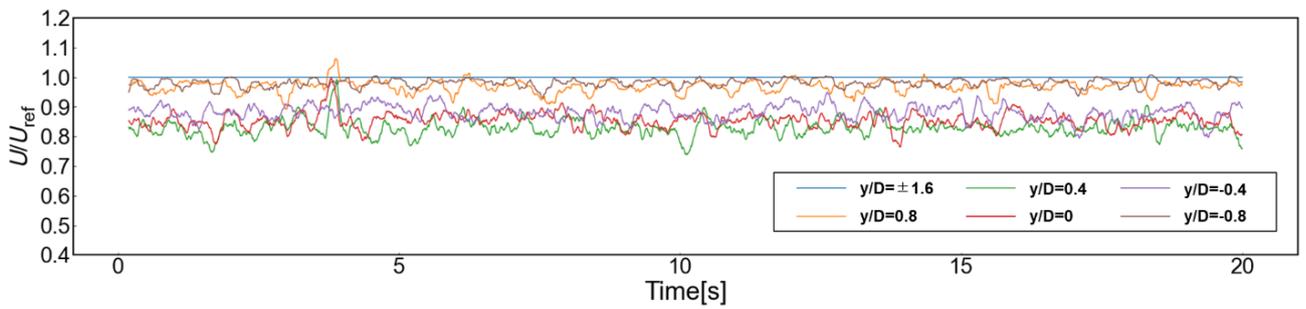


図 4.51 X=10D 地点で測定したロール動揺±1[deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

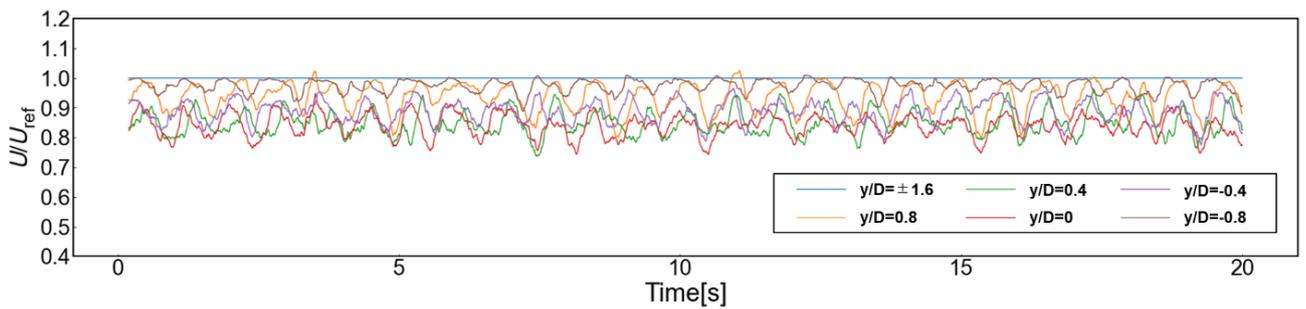
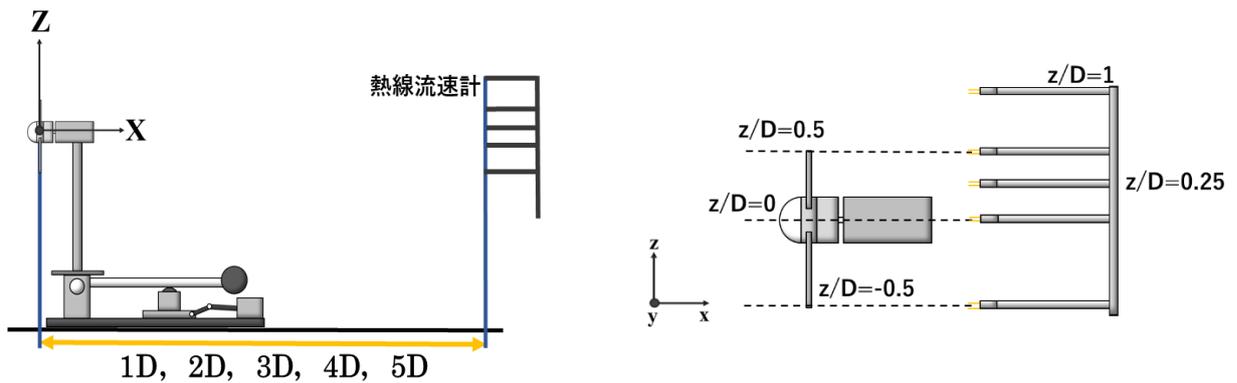


図 4.52 X=10D 地点で測定したロール動揺±5[deg]状態の風速の時系列データ
(Y 方向正の向きに設置)

4.2.3 ニアウエイク領域の気流計測について

この計測は、後流回復の過程を確認すると同時に、加振装置のブラフボディとしての影響がどのように現れるか確認することが目的である。図 4.53(i)のように、計測は $X=1D\sim 5D$ の 5 地点で計測を行った。熱線流速計の配置位置は、図 4.53(ii)の通り、鉛直方向に 5 点設置した。実験条件は、表 4.4 に示す通りである。



(i) 風車模型と熱線流速計の離隔距離

(ii) 熱線流速計の配置位置

図 4.53 ニアウエイク領域の気流計測の実験概要

表 4.4 ニアウエイク領域の気流計測の実験条件

パラメータ	値
流入風速[m/s]	8
周速比[-]	4.25
ロータ回転数[rpm]	1469
サンプリング周波数[Hz]	1000
計測時間（ピッチ動揺）[s]	60
計測時間（動揺なし）[s]	60
カットオフ周波数（熱線流速計）[Hz]	300
レイノルズ数[-]（ブレード直径に基づく）	1.9×10^5

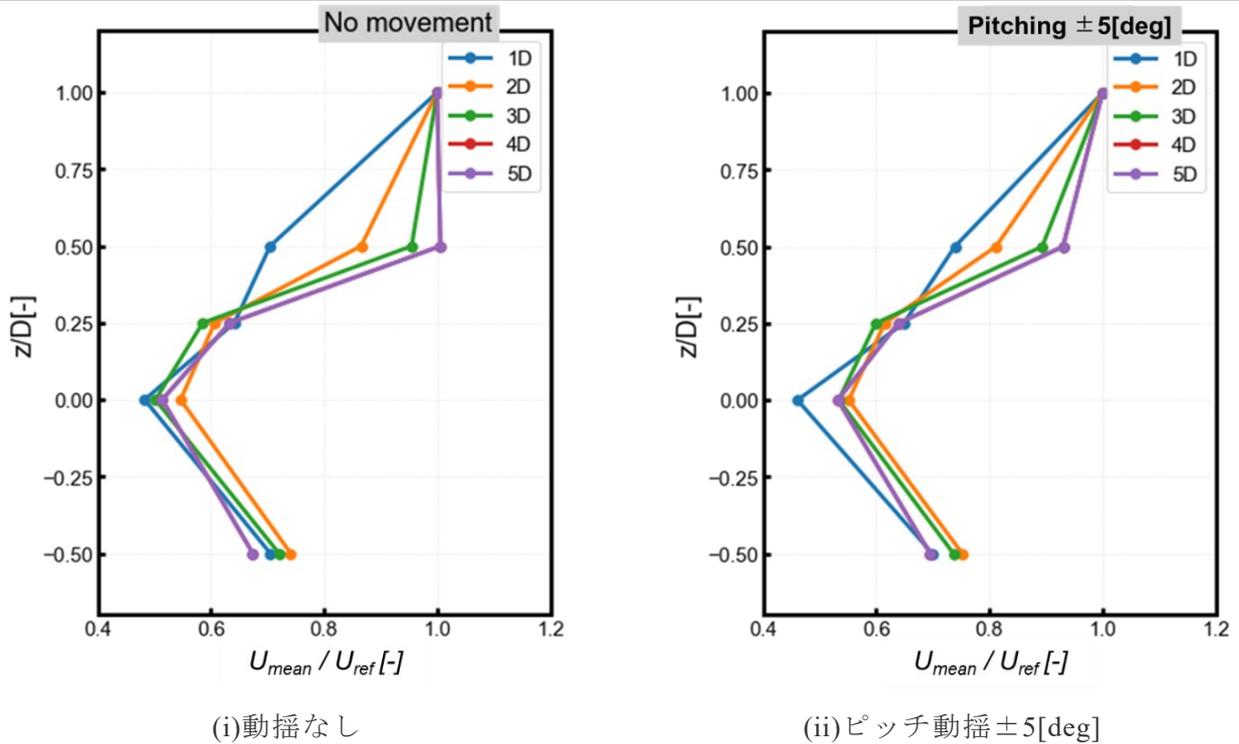


図 4.54 各地点で測定した風速の鉛直プロファイルの動揺状態による比較

図 4.54 に計測した各地点の鉛直プロファイルを動揺状態別で示している．それぞれ， $z/D=1.0$ の結果で無次元化している．測定距離別で鉛直プロファイルを示すことで，後流回復のプロセスを確認できると予測していた．しかし， $X=2D$ の結果は $X=3D$ よりも早く回復している結果となった点があったり，下翼端部では，それぞれの測定距離の結果が入り混じったりした結果となった．原因としては，加振装置自体がブラフボディとなっており，後流の計測に影響を与えていることが挙げられる．また，上翼端部では，動揺なしの場合，ピッチ動揺の状態に比べて，回復が早くなる結果となった．これは，風車後方で作られる翼端渦によって増速している点を計測したことが起因しており，ピッチ動揺をした際は，後流の構造が上下に偏向するため，動揺なし時のような結果は見られなかったと考えられる．

4.2.4 ピッチ動揺による過渡現象について

可視化実験で確認された，ピッチ動揺開始直後に形成される渦が定常的に形成される渦よりも大きくなる，過渡現象について考察するために，様々な計測を行った．後流の気流計測中に，動揺なしからピッチ動揺状態にすることで，その移行過程における気流計測を基に考察を行った．風車模型と熱線流速計の離隔距離は $5D$ とした．可視化実験では，流入風速を $1[\text{m/s}]$ としていたため，流入風速を $1\sim 8[\text{m/s}]$ の 8 パターンで行った．

図 4.55～4.62 に，風速の時系列データに対して $0.1[\text{s}]$ の移動平均処理を施し， $z/D=1.0$ の結果で無次元化した結果を流入風速別で示している．動揺なしの状態 $5[\text{s}]$ 間の後にピッチ動揺に移行させた．グラフ内の赤線は，ピッチ動揺に移行した計測時間を示している．

いずれの測定地点に関しても，流入風速が上がるにつれ，ピッチ動揺の挙動が顕著に表れることが確認できるが， $1[\text{m/s}]$ や $2[\text{m/s}]$ の低流入風速では，風車の旋回流やブラフボディとしての影響とピッチ動揺の影響が入り混じったような結果となっている．これは，流入風速が低いことで，後流の移流が遅れていることが起因していると考えられる．可視化実験で過渡現象のような結果が示されたのも，移流の遅れが起因していると考えられ，動揺なしの状態から発された渦が滞留し，ピッチ動揺開始直後に形成される渦と重ね合わされることで，大規模渦のように見えたのではないかと考えられる．本研究の一連の実験で使用している流入風速， $8[\text{m/s}]$ で計測した後流の風速の結果では，過渡現象のような挙動は見られなかった．

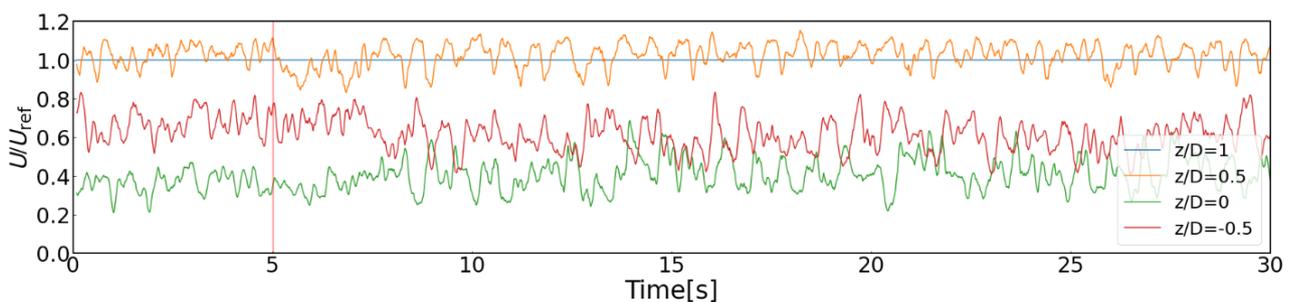


図 4.55 流入風速 $1[\text{m/s}]$ 時の風速の時系列データ

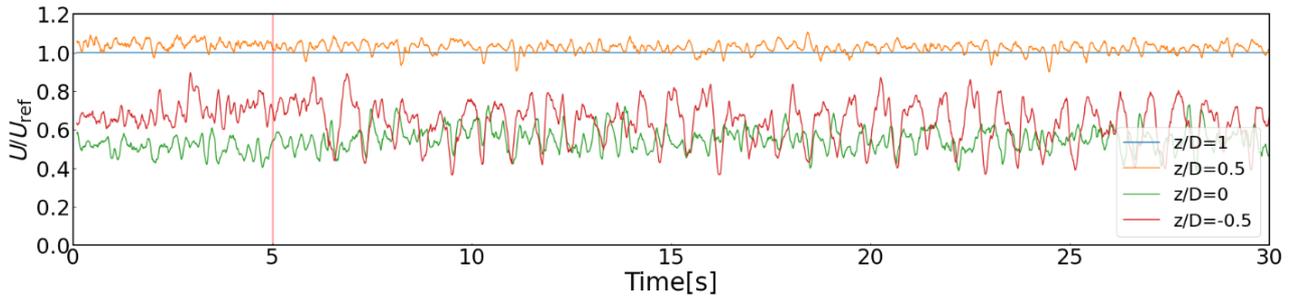


図 4.56 流入風速 2[m/s]時の風速の時系列データ

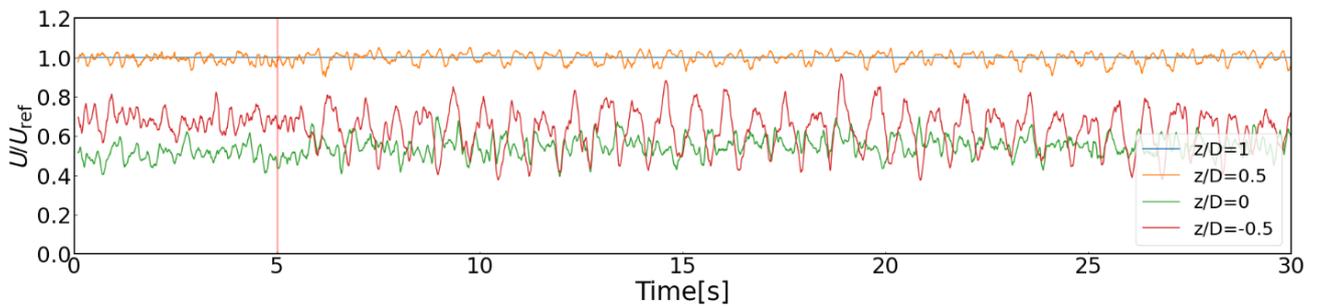


図 4.57 流入風速 3[m/s]時の風速の時系列データ

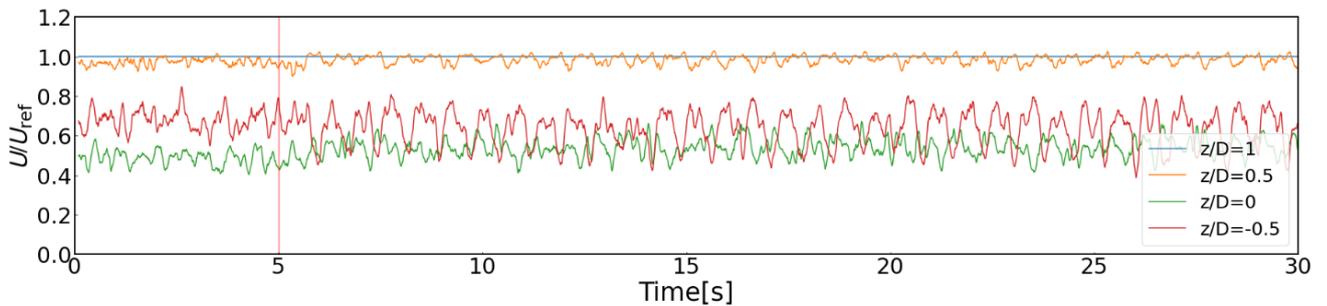


図 4.58 流入風速 4[m/s]時の風速の時系列データ

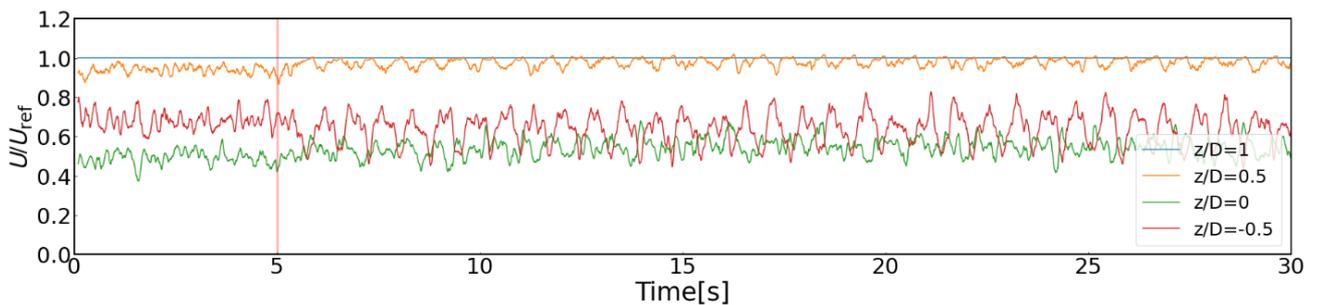


図 4.59 流入風速 5[m/s]時の風速の時系列データ

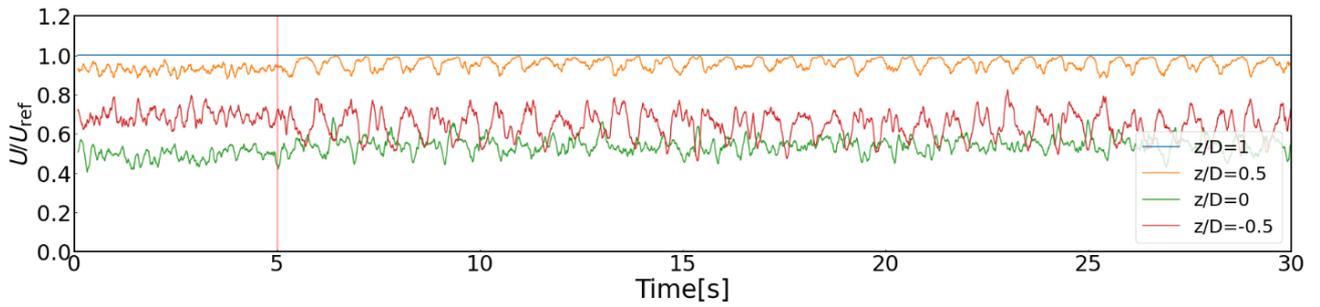


図 4.60 流入風速 6[m/s]時の風速の時系列データ

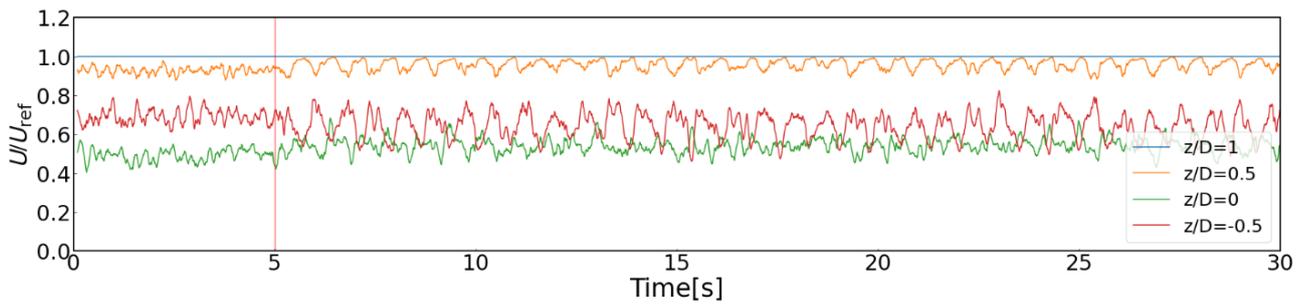


図 4.61 流入風速 7[m/s]時の風速の時系列データ

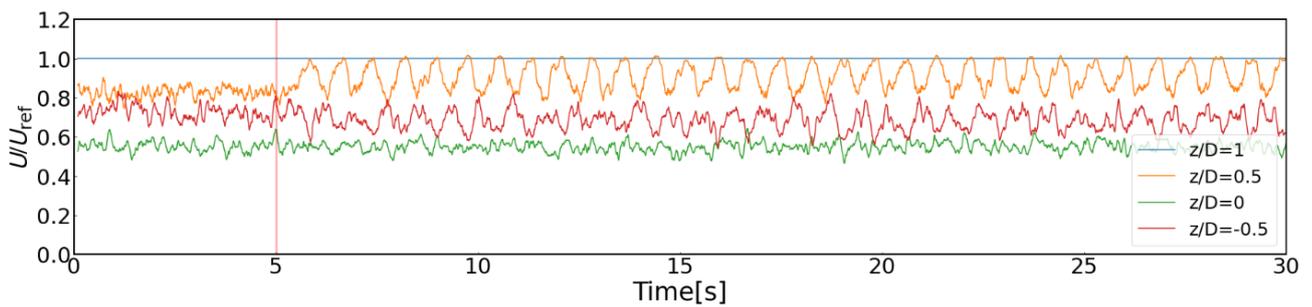


図 4.62 流入風速 8[m/s]時の風速の時系列データ

4.2.5 ピッチ動揺周期の影響について

相似則を用いて決定したピッチ動揺の周期だが，それを変更することで，後流に対してどのような影響を与えるのか検討した．ピッチ動揺の周期は，加振装置の制御盤内にある，図 4.63 のパラメータを変更することで可能である．この数値を変更することで，カム機構の回転速度を調整することができる．

実験の概要は，4.2.3 節と同様だが，相似速の影響を考慮し，流入風速 4[m/s]，8[m/s]の 2 パターンで計測を行った．また，ピッチ動揺周期別で，風速の測定時間を表 4.5 の通り変更した．

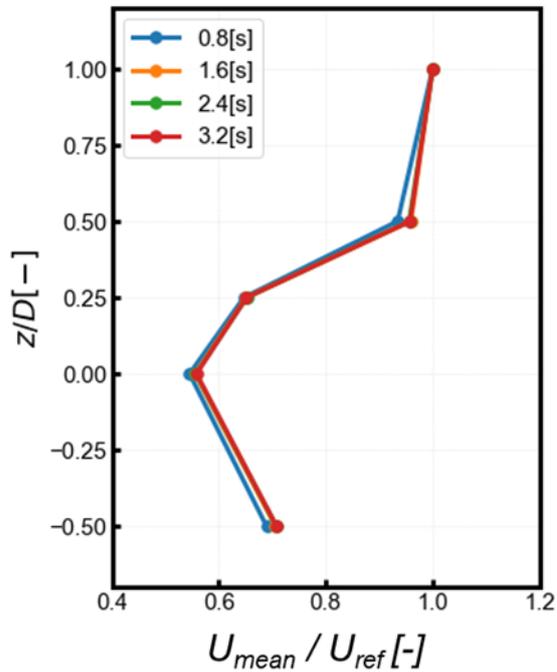


図 4.63 ピッチ動揺の周期を変更する際に設定する制御盤内の数値

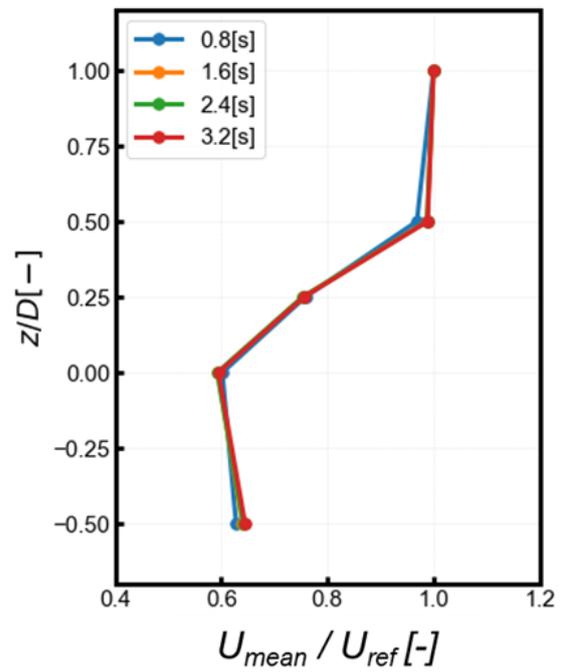
表 4.5 ピッチ動揺の周期と風速の計測時間

周期[s]	計測時間[s]
0.8	30
1.2	45
1.6	60
2.4	90
3.2	120

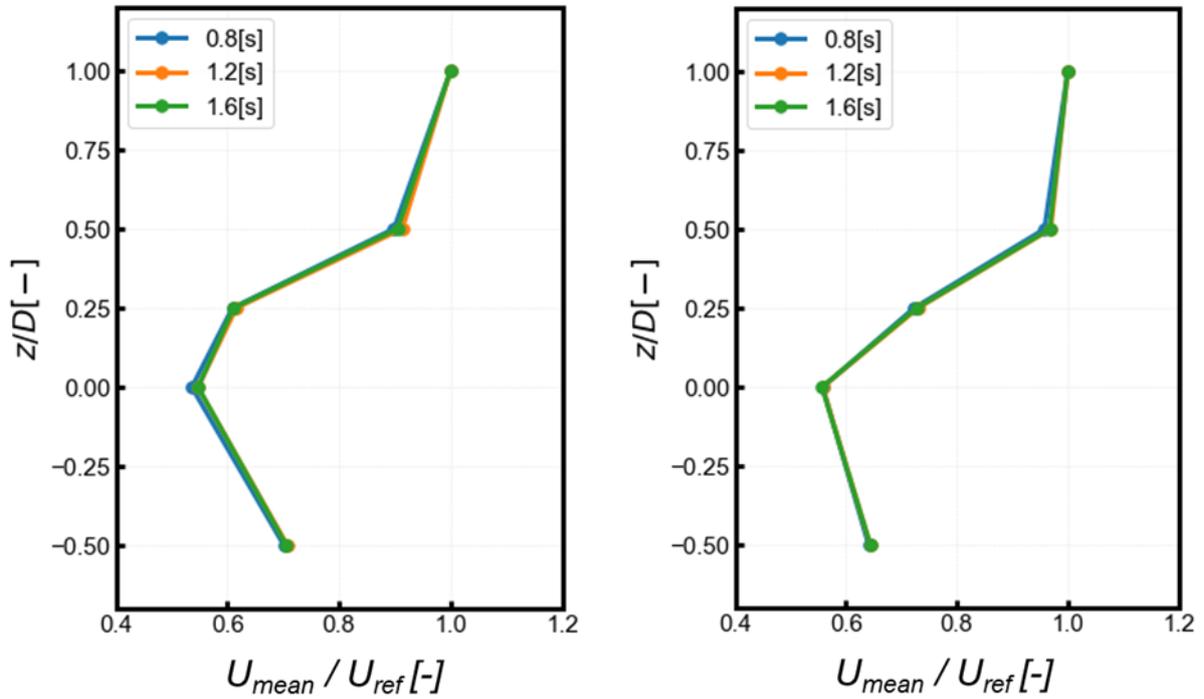
図 4.64 にそれぞれの流入風速，後流の測定距離で風速の鉛直プロファイルを示している．4 パターンの動揺周期で比較している．いずれの流入風速や測定距離の結果では，動揺周期を変更しても鉛直プロファイルには有意な差異は見られない結果となった．図 4.65 は，流入風速と動揺周期を変更し，比較を行った結果である．ここからも，流入風速で有意な差異は見られず，鉛直プロファイルでは，流入風速，動揺周期は大きく影響を与えない結果となった．



(i) X=3D 流入風速 4[m/s]



(ii) X=5D 流入風速 4[m/s]



(iii) X=3D 流入風速 8m/s

(iv) X=5D 流入風速 8m/s

図 4.64 それぞれの流入風速，測定距離で計測した動揺周期別で示す風速の鉛直プロファイル

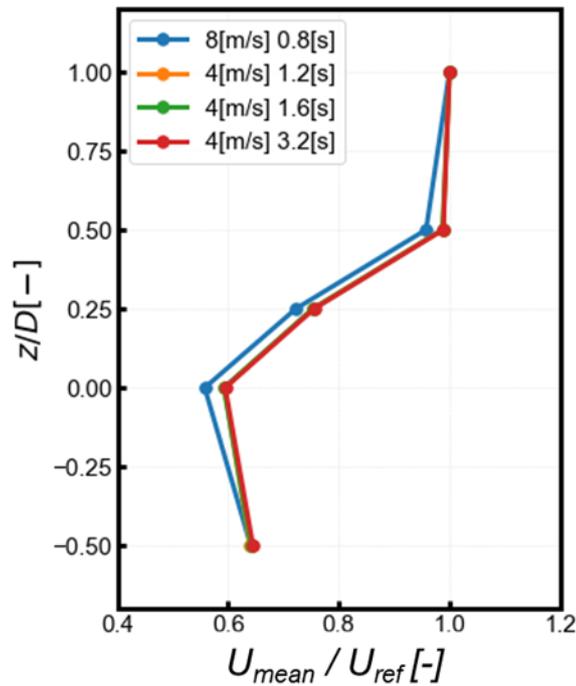


図 4.65 流入風速で比較した動揺周期別で示す風速の鉛直プロファイル

4.2.6 タワー・ナセルが後流に与える影響について

過去の修士論文より，タワーやナセルが後流の気流性状に与える影響を考察しており，風車後流の非定常性はタワーやナセルのブラフボディとブレードの回転による旋回流との相互作用によるものであることを明らかにしていた．本実験は，タワーとナセルが与える風車後流の影響と動揺状態の影響の関係性を確認した．実験条件は，4.2.1節と同様である．計測結果は，図 4.66 のようにブレードを取り外した状態と通常通りブレードを回転させた状態を比較した．



図 4.66 ブレードを取り外した風車模型

図 4.67 にブレードの有無で比較した風速の鉛直プロファイルを動揺状態別で示している．これらの結果から，ロータ中心から $z/D=-0.5$ にかけて，タワーやナセルの影響を受けていることを確認できる．図 4.67(iii)から，動揺状態で大きな変化は確認されない結果となった．図 4.68 にブレードの有無で比較した風速の標準偏差を $z/D=1.0$ の平均風速で無次元化した鉛直プロファイルを動揺状態別で示している．先ほどの結果と同様に，ロータ中心から $z/D=-0.5$ にかけて変化が見られ，タワーやナセルの剥離渦によって，乱れが大きくなっていることを確認できる．4.2.1節より，ピッチ動揺により， $X=5D$ では， $z/D=0.5$ の地点で乱れの大きい傾向を確認した．図 4.68(iii)から，ブレードのない状態では，動揺状態で有意な差異は見られず， $z/D=0.5$ 地点の乱れの増大は，タワーやナセルによるものではないことが，明らかとなった．

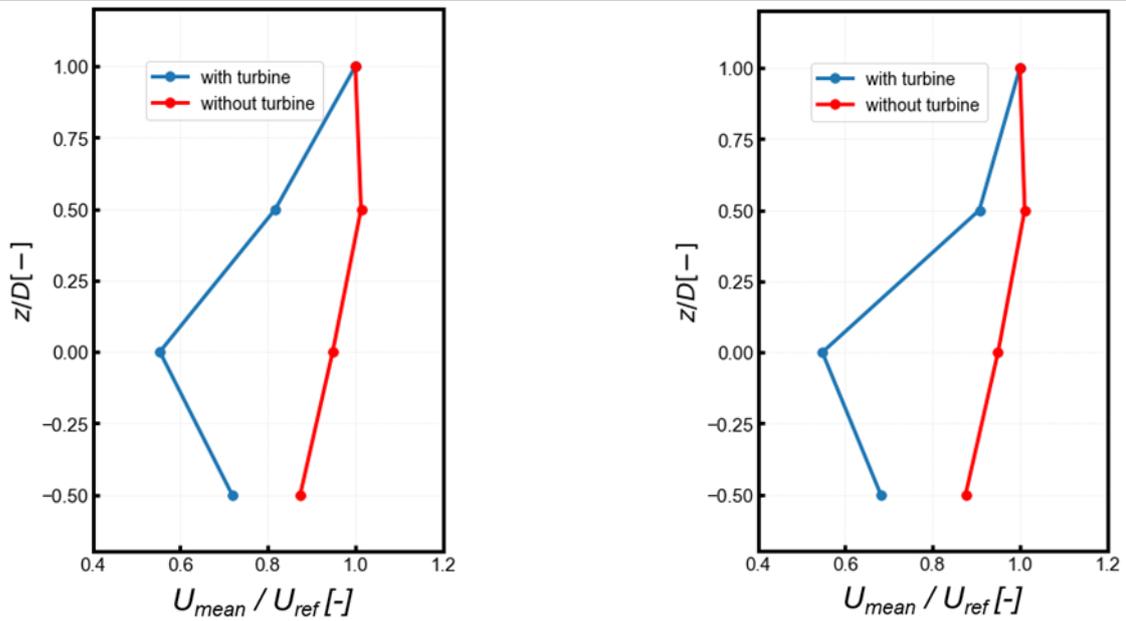
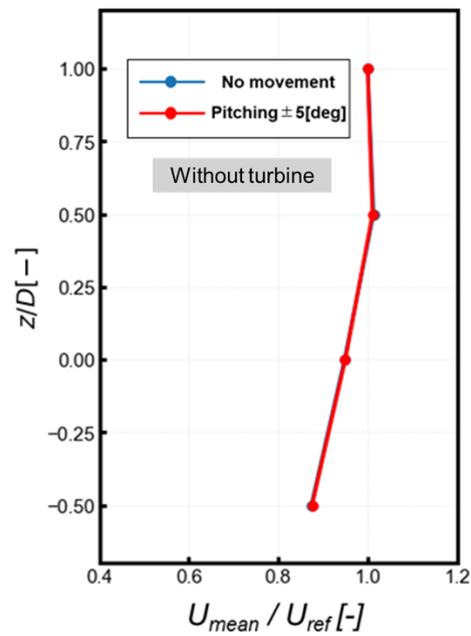
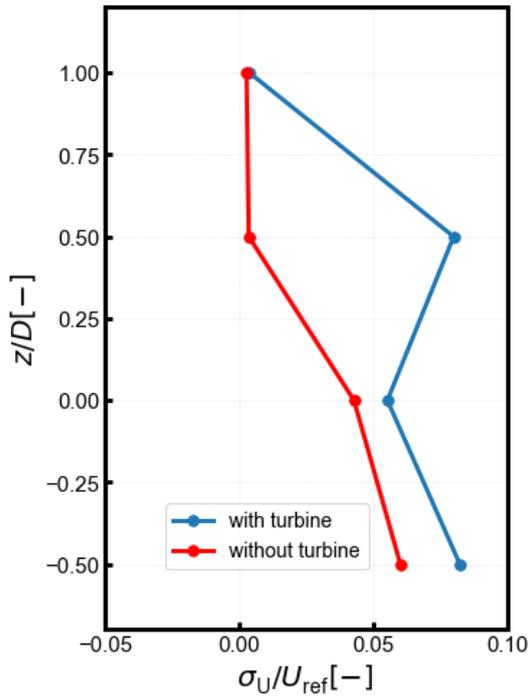
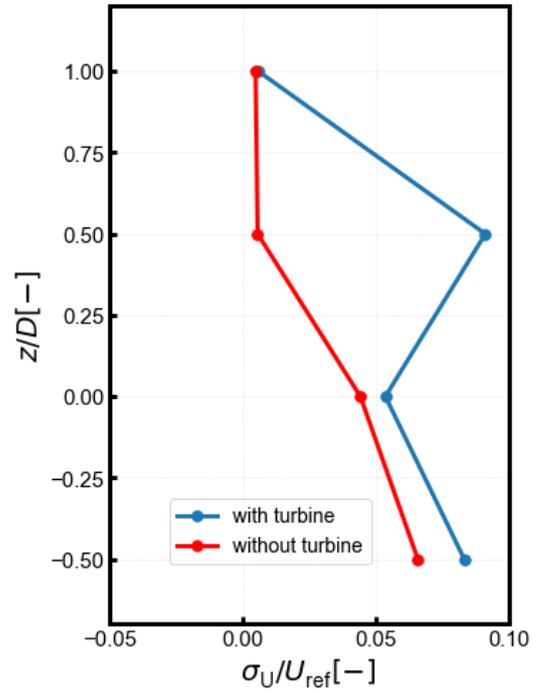
(i) 動揺なし $X=5D$ (ii) ピッチ動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ $X=5D$ (iii) ブレードなし $X=5D$

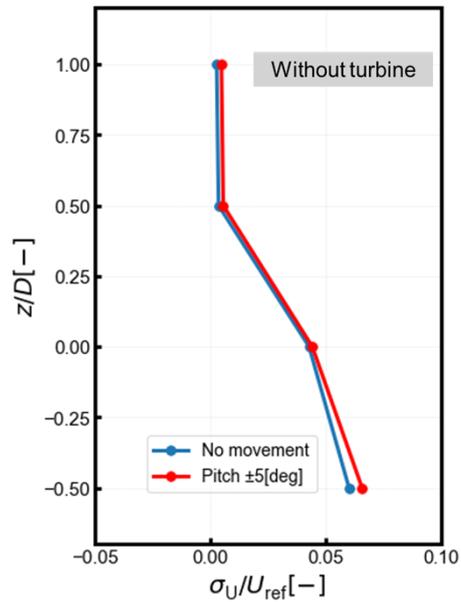
図 4.67 動揺状態別で示すブレードの有無で比較した風速の鉛直プロファイル



(i) 動揺なし X=5D



(ii) ピッチ動揺 ±5[deg] X=5D



(iii) ブレードなし X=5D

図 4.68 動揺状態別で示すブレードの有無で比較した標準偏差の鉛直プロファイル

4.2.7 ピッチ角度固定時の後流の気流計測

これまでの可視化実験や、単基後流の気流計測結果から、ピッチ動揺によって、後流が上下に偏向し、その影響が顕著に表れていた。平均場の結果では、動揺状態で有意な差異は見られず、時系列での評価が必要であることが示唆された結果となった。しかし、ピッチ動揺特有の変動振幅の伸長が、風車後流との相互作用によって、現れるものであるのか、また、ピッチ角度を持たせることにより、偏向した後流により、形成される自明な結果であるのかを確認すべく、図 4.69 のようにピッチ角度固定の状態では、風車後流の気流計測を行った。

図 4.70～4.73 に 0.1[s]の移動平均処理を施した時系列データを、ピッチ角度固定時、ピッチ動揺時と比較し、各計測地点で示している。全ての時系列データは、 $z/D=1.0$ の結果で無次元化している。ピッチ動揺の影響が顕著に現れる $z/D=0.5$ 地点の計測結果では、ピッチ動揺の変動の最大値、最小値付近で、各ピッチ角固定時の結果は変動している。これにより、動揺による変動振幅の伸長は見られず、後流の偏向によって現れる結果であることが明らかとなった。ロータ中心地点では、 $z/D=0.5$ のような結果は見られなかった。ピッチ動揺状態の結果では、明確にその影響が現れているが、ピッチ角固定時では、それぞれ同じ風速帯で変動している。この結果から、一般的に示されるロータ中心地点の、旋回流やタワー、ナセルによって形成される後流の非定常性は、ピッチ動揺時には見られず、 $z/D=0.5$ 時のような後流の偏向による変動ではないことが示唆された。

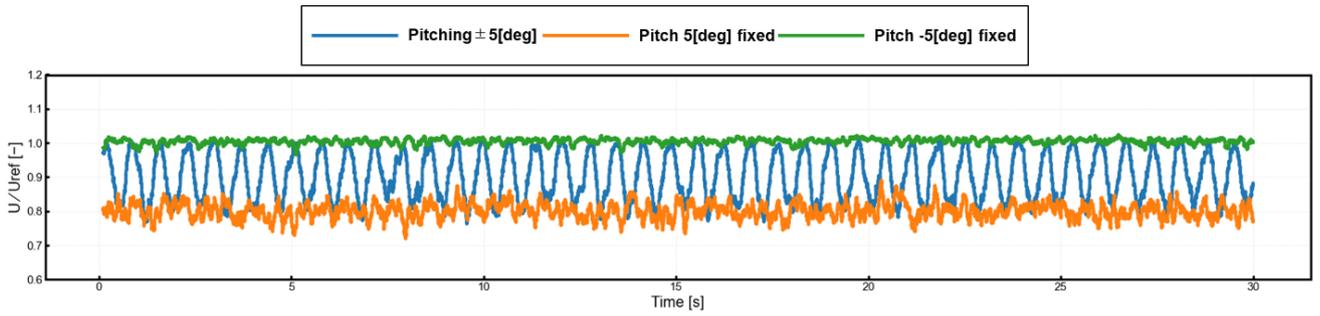
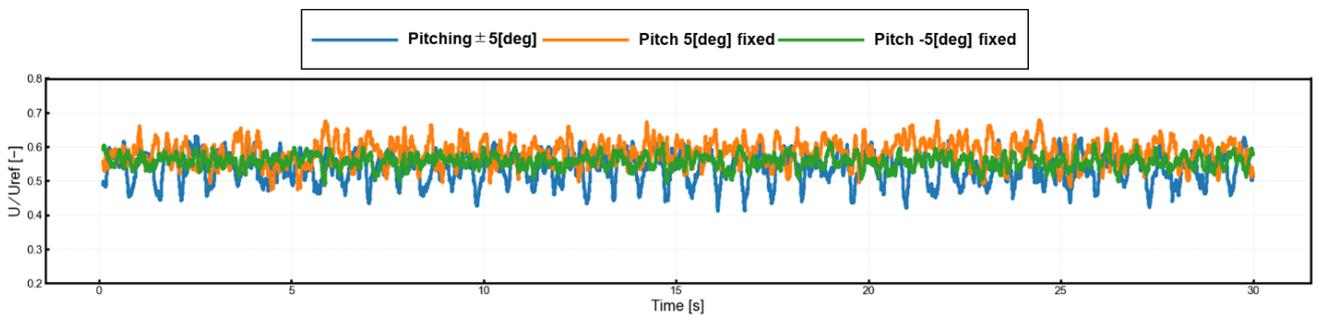
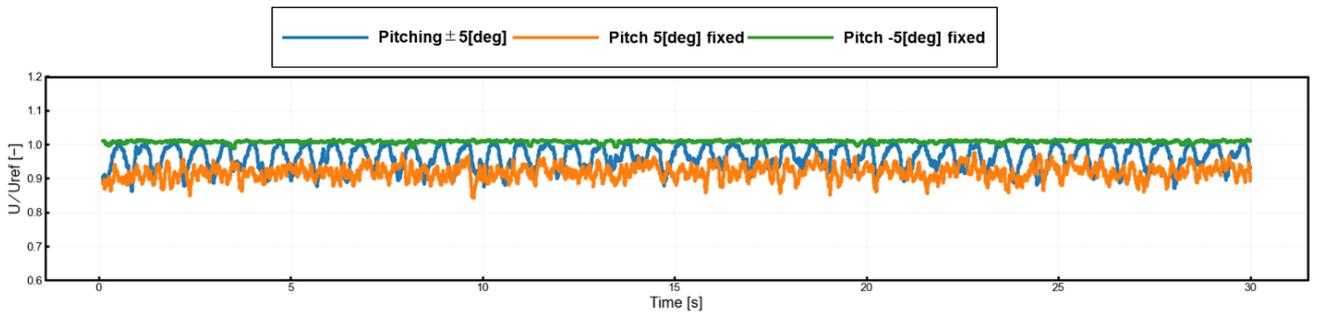


(i)ピッチ角度 5[deg]で固定



(ii)ピッチ角度-5[deg]で固定

図 4.69 ピッチ角固定時の気流計測を行った際の加振装置の様子

図 4.70 $X=3D$ の $z/D=0.5$ における風速の時系列データ図 4.71 $X=3D$ のロータ中心における風速の時系列データ図 4.72 $X=5D$ の $z/D=0.5$ における風速の時系列データ

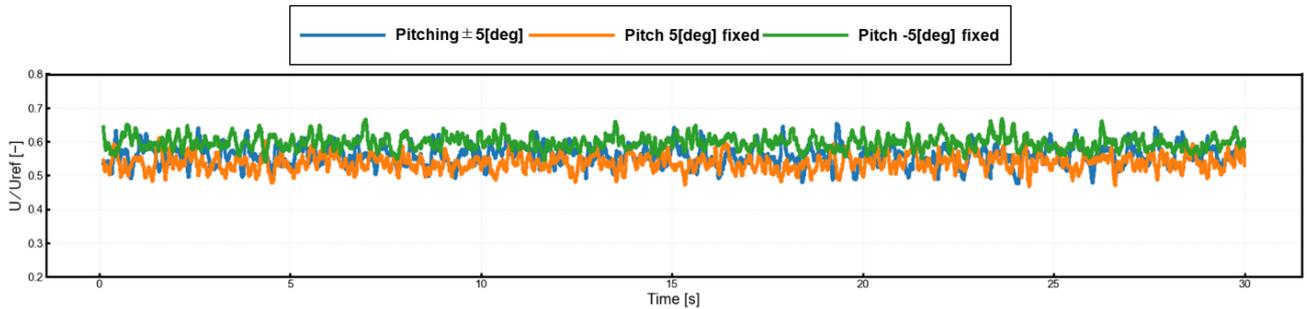


図 4.73 X=5D のロータ中心における風速の時系列データ

4.2.8 ロール角度固定時の後流の気流計測

4.2.7 節と同様，ロール動揺による後流の風速の変動振幅が伸長する現象が，偏向した後流によるものであるかを確認すべく，ロール角度を固定した状態で計測した結果とロール動揺状態の結果を比較した。

図 4.74～4.77 は，0.1[s]の移動平均処理を施した，各計測地点で示すロール角度固定状態とロール動揺状態を比較した時系列データである．全ての時系列データは， $y/D=-1.6$ の結果で無次元化している．ロール動揺の影響を最も受けている結果となった $y/D=-0.4$ の結果だが，4.2.7 節の結果と同様，ロール動揺の変動の最大値，最小値付近で，各ロール角固定時の結果は変動している．この結果より，ロール動揺の変動は，後流の偏向が起因した結果であることが明らかとなった． $X=3D$ ，ロータ中心地点の結果では， $y/D=-0.4$ の結果ほど，顕著ではないが，最大値，最小値付近でロール角度固定時の結果は変動している．しかし， $X=5D$ の場合，そのような変動は見られず，変動振幅の大きさも時間によって変化が確認できる．ロール動揺の場合も，ピッチ動揺時と同様に， $y/D=-0.4$ 時のような後流の偏向による変動ではないことが示唆された。

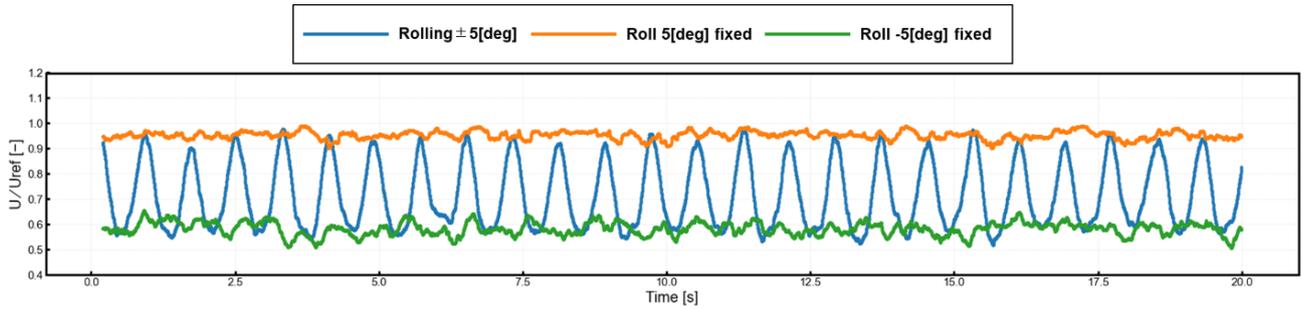


図 4.74 X=3D の $y/D=-0.4$ におけるロール角度固定状態と
ロール動揺状態を比較した時系列データ

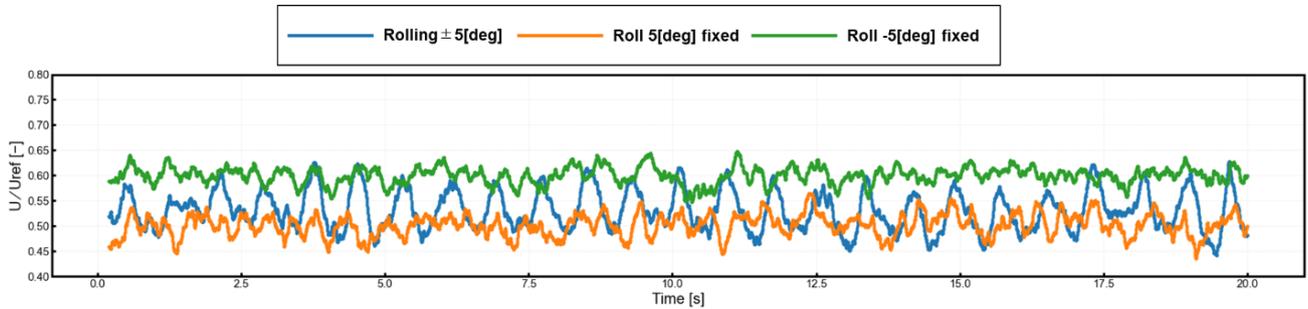


図 4.75 X=3D のロータ中心地点におけるロール角度固定状態と
ロール動揺状態を比較した時系列データ

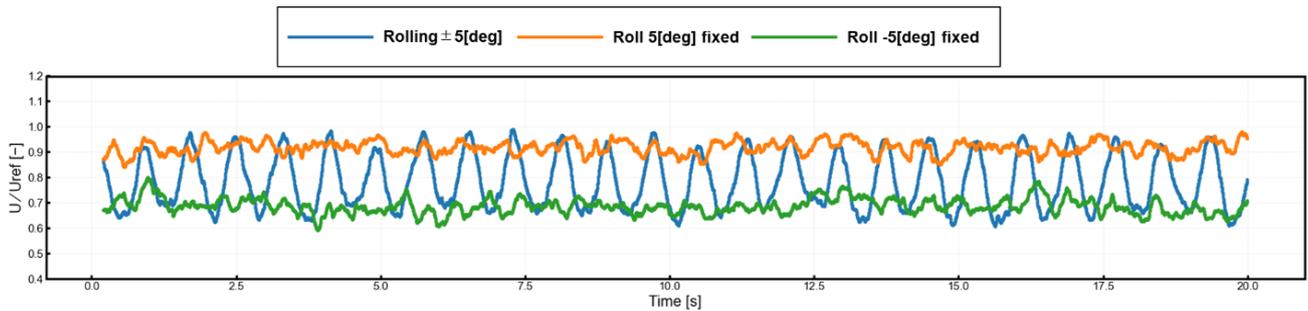


図 4.76 X=5D の $y/D=-0.4$ におけるロール角度固定状態と
ロール動揺状態を比較した時系列データ

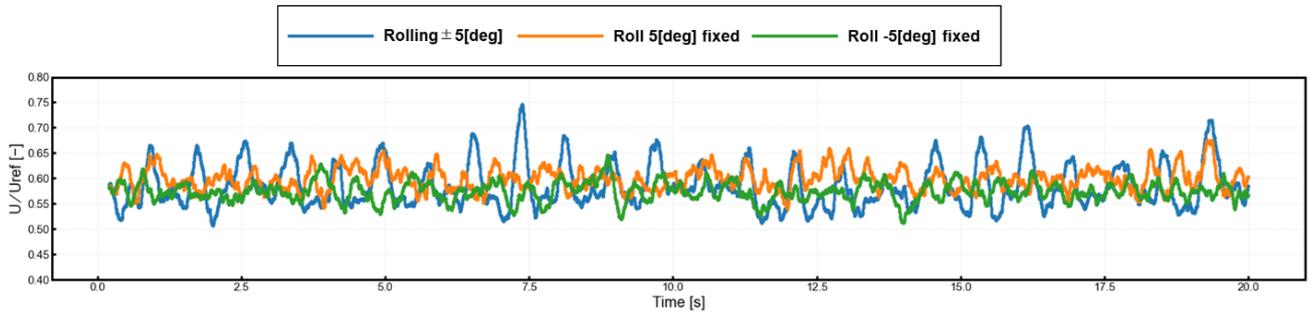


図 4.77 X=5D のロータ中心地点におけるロール角度固定状態と
ロール動揺状態を比較した時系列データ

第5章 2基風車模型を用いた風洞実験

浮体動揺する上流側風車の後流によって、下流側風車の性能や後流に与える影響を検討するため、2基の風車模型を用いて実験を行った。本章は、その計測結果の詳細と考察を記述する。単基風車後流の計測結果から、サージ方向の動揺の影響はほとんど見られなかった。よって、2基風車模型を用いた実験の計測結果は、ピッチ方向の動揺と動揺なしの状態と比較する。

5.1 下流側風車の出力計測

本節は、下流側風車のトルク計測の詳細を記す。風車の設置レイアウトは図 5.1 の通りである。下流側風車は Type A を使用した。風車間の離隔距離は 3D, 5D の 2 パターンで計測を行った。また、2.2.1 節で紹介したロータの回転数自動制御を行うため、下流側風車の直前 1D に熱線流速計を設置した。表 5.1 に実験条件を示す。

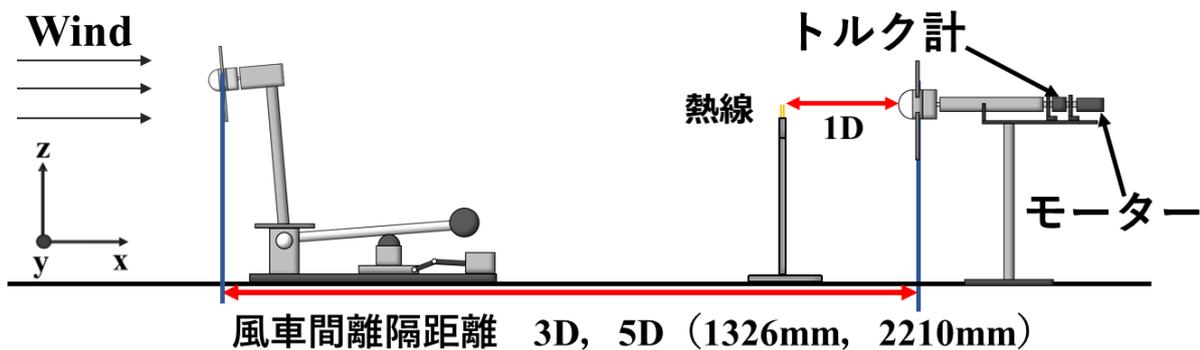


図 5.1 トルク計測時の風車模型の設置レイアウト

表 5.1 下流側風車トルク計測の実験条件

パラメータ	値
流入風速[m/s]	8
周速比[-]	4.25
ロータ回転数（上流側風車）[rpm]	1469
ロータ回転数（下流側風車）[rpm]	735
サンプリング周波数[Hz]	500
計測時間（ピッチ動揺）[s]	60

計測時間（動揺なし）[s]	50
カットオフ周波数（熱線流速計）[Hz]	300
カットオフ周波数（トルク）[Hz]	200
レイノルズ数[-]（ブレード直径に基づく）	1.9×10^5

5.1.1 風車模型のロータ回転数固定時の計測結果

図 5.2 にそれぞれの風車間離隔距離，動揺状態で示した発電出力を示す．動揺なしとピッチ動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ の状態を比較すると，ピッチ動揺時の方が，わずかに出力が大きい結果となった．これは，可視化実験で示されたように，ピッチ動揺によって後流構造が崩壊し，外部流とのエネルギーの交換が促進されることが起因していると考えられる．

図 5.3～5.6 に風車間離隔距離，動揺状態別で下流側風車のトルクの時系列データに $0.1[\text{s}]$ の移動平均処理を施して作成したグラフを示す．各動揺状態で比較すると，ピッチ動揺の影響を受けていることを視覚的に確認できる．また，風車間離隔距離が大きくなるにつれ，動揺の影響は大きくなるような結果となった．この変動が，ピッチ動揺の影響であることやその影響の大小を確認すべく，先に紹介した 4 つのトルクの時系列データに対して周波数解析を行った．図 5.7, 5.8 に各風車間離隔距離，動揺状態別で示す下流側風車のトルクの周波数解析結果を示す．この結果より，下流側風車のトルクの変動が上流側風車のピッチ動揺の影響を受けていることが明確に示された．また，風車間離隔距離が大きくなるに伴い，ピッチ動揺の影響が大きくなることも確認できた．図 5.9, 5.10 に動揺なしとピッチ動揺状態の後流構造のイメージを示している．ニアウェイク領域では，ロータ回転やナセル，タワーの影響が大きいため，浮体動揺の影響が支配的ではない．下流方向に距離を進めると，タワーやナセルの影響が小さくなり，後流幅の拡散により，動揺の影響が支配的になる．それによって，風車間離隔距離 3D と 5D の結果を比較すると，ピッチ動揺の影響が増強された結果に繋がったと考えられる．

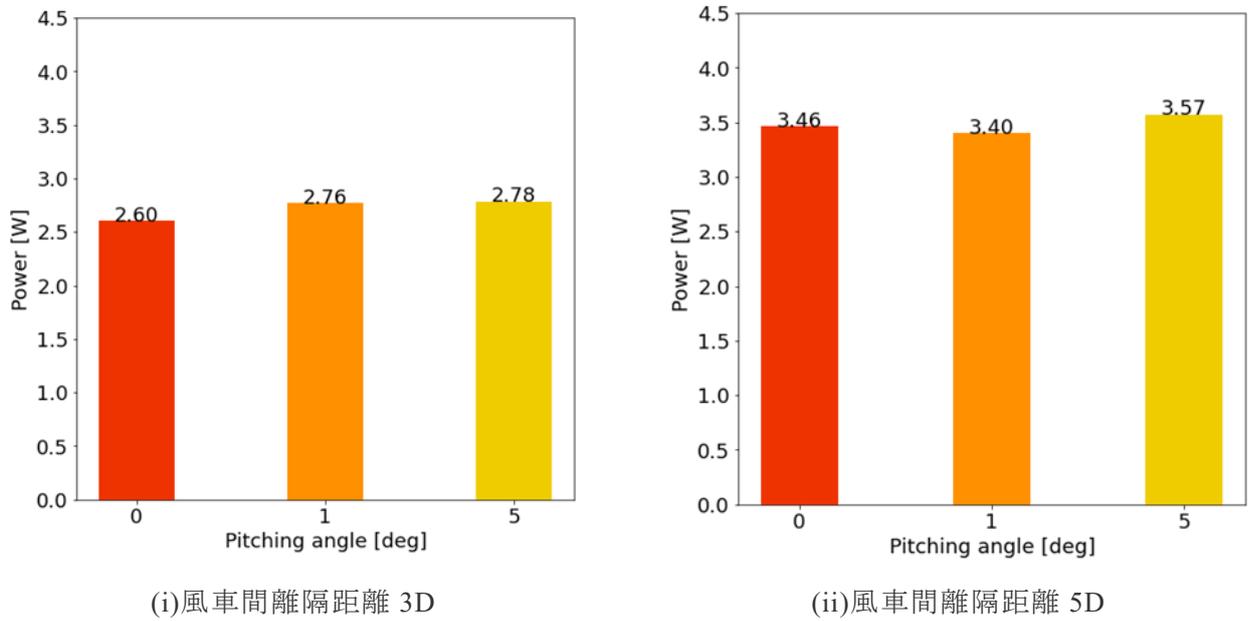


図 5.2 動揺状態で比較した発電出力

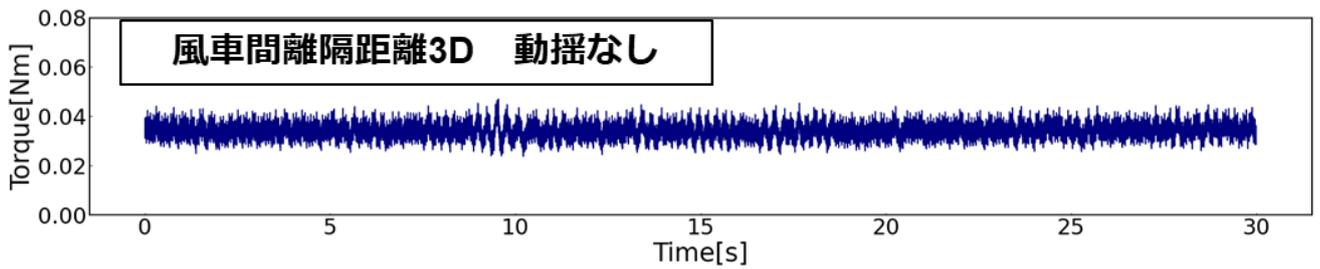


図 5.3 下流側風車における風車間離隔距離 3D, 動揺なし状態でのトルク時系列データ

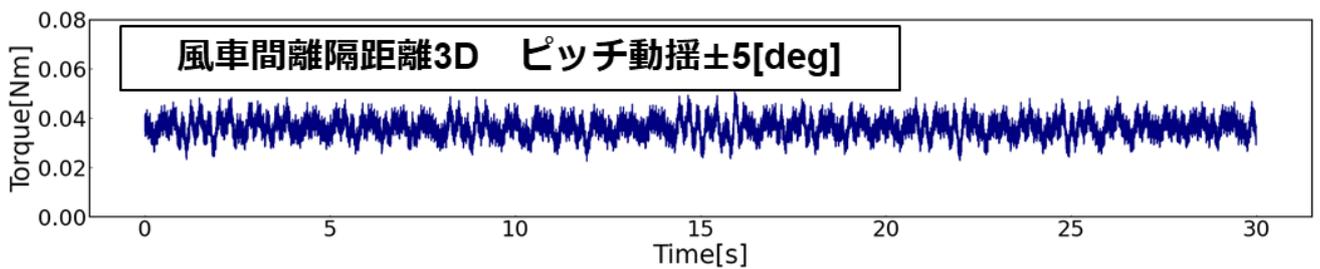


図 5.4 下流側風車における風車間離隔距離 3D, ピッチ動揺 ± 5 [deg]でのトルク時系列データ

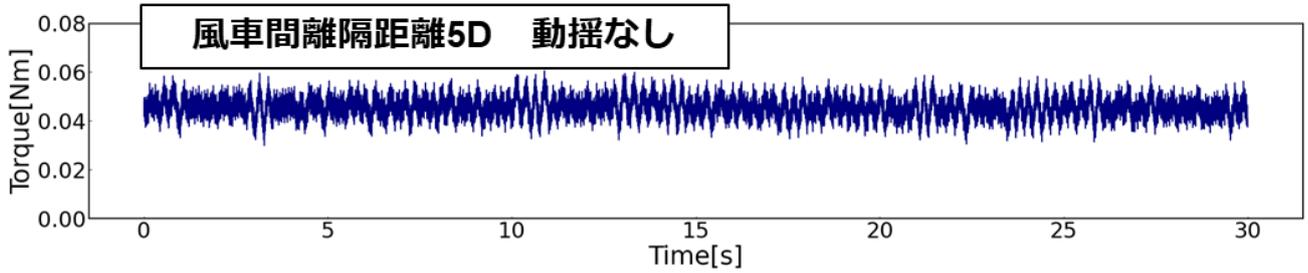


図 5.5 下流側風車における風車間離隔距離 5D，動揺なし状態でのトルク時系列データ

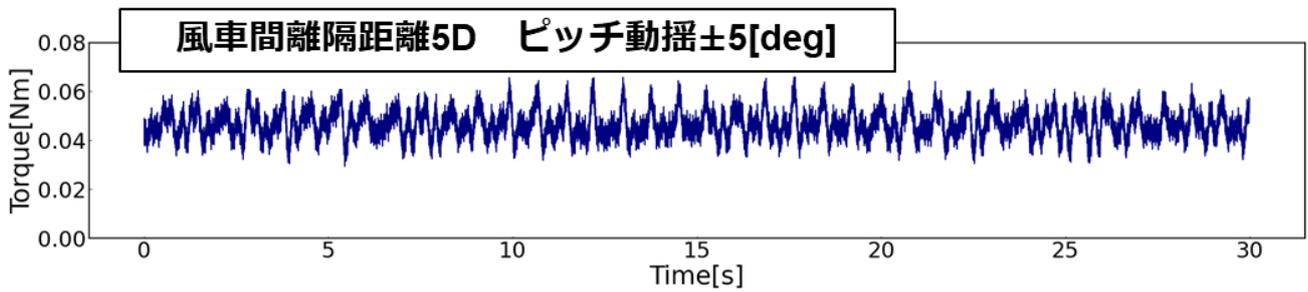


図 5.6 流側風車における風車間離隔距離 5D，ピッチ動揺±5[deg]でのトルク時系列データ

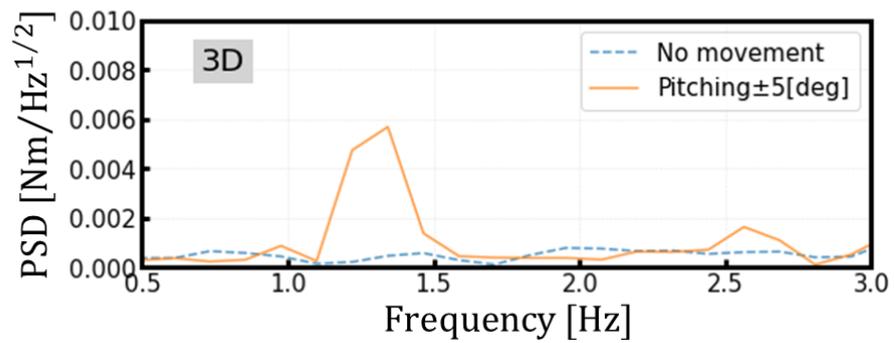


図 5.7 風車間離隔距離 3D でのトルクの周波数解析結果

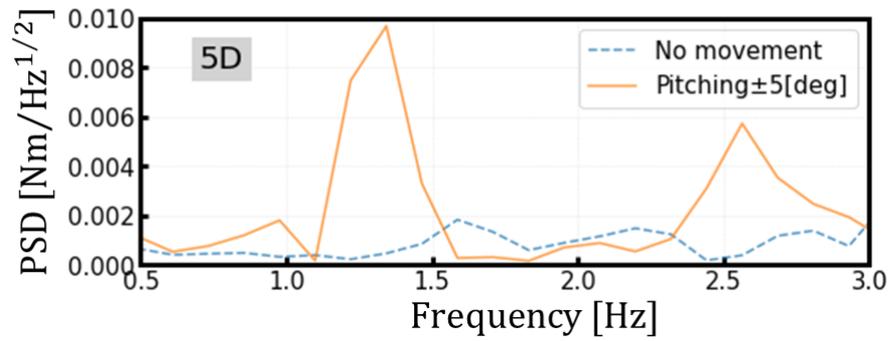


図 5.8 風車間離隔距離 5D でのトルクの周波数解析結果

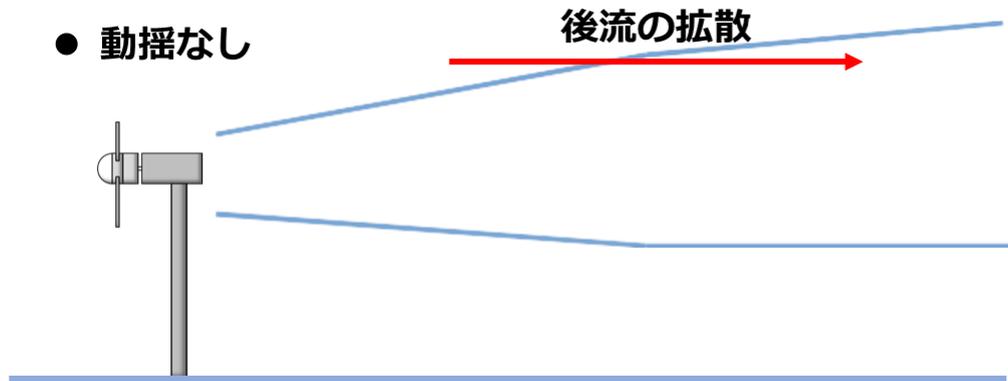


図 5.9 動揺なし状態の後流構造のイメージ

● ピッチ動揺時



図 5.10 ピッチ動揺状態の後流構造のイメージ

5.1.2 風車模型のロータ回転数自動制御時の計測結果

本節は、下流側風車のロータ回転数を自動制御し、トルク計測を行った結果の詳細を記す。本計測は、表 5.2 の回転数自動制御のパラメータを使用している。風車間離隔距離 3D の場合、下流側風車に流入する風速をモニターしていた熱線流速計を設置できなかったため、風車間離隔距離 5D 時のみの計測結果となる。

表 5.2 本計測で用いた回転数制御のパラメータ

サーボンプ加速・減速設定[rpm/s]	風速サンプリング周期[s]	風速サンプリング数[個]	熱線（制御用）のLPF[Hz]
300	0.1	1	1.5

図 5.11 は、動揺状態別で比較した発電出力の平均値である。ロータ回転数固定時と大きく値に差異はないことが確認できる。ピッチ動揺をした際は、わずかにロータ回転数固定時よりも、発電出力が上がったことが確認できる。動揺なし時は、回転数自動制御の有無で差異がないことから、浮体動揺によるものであると考えられる。図 5.12, 5.13 に、回転数自動制御を行った際の、下流側風車の流入風速とロータ回転数の関係を示した時系列データに 0.1[s]の移動平均処理を施して作成したグラフを示す。動揺なしの場合、後流の乱れた変動に追従できていない部分があった。また、ピッチ動揺の場合、LPF が 1[Hz]であることからピッチ動揺の変動を捉えられていない部分があった。図 5.14, 5.15 は、0.1[s]の移動平均処理を施して作成した、下流側風車のトルクとロータ回転数の関係を示した時系列データである。下流側風車の流入風速の非定常性に追従できず、トルクが負の値として出力されている点が見られる。表 5.3 は、下流側風車の周速比とその標準偏差を示している。また、図 5.16, 5.17 は各動揺状態の周速比の時系列データを示している。赤線は、ロータ回転数自動制御の際に設定した、周速比 4.25 を指している。動揺なし時には、ロータ回転数の制御通り、周速比 4.25 に追従できている結果となっている。ピッチ動揺の場合、制御の設定より少し下振れた結果となり、時系列データや標準偏差の結果からも、動揺の影響を受け、動揺なし時よりも、追従ができていないことを確認できる。

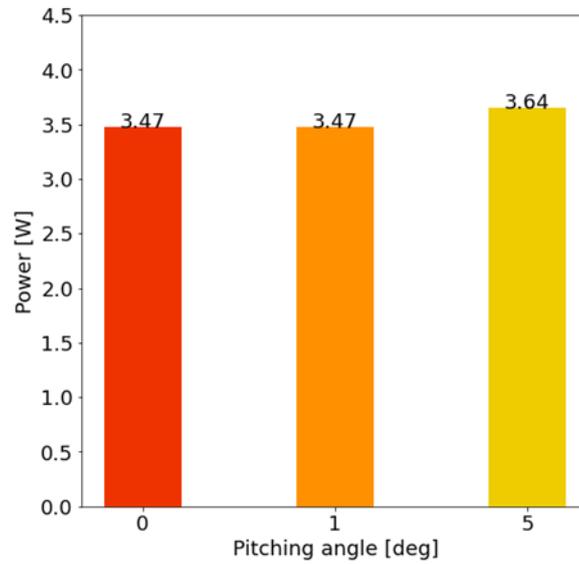


図 5.11 動揺状態別で比較した発電出力の平均値

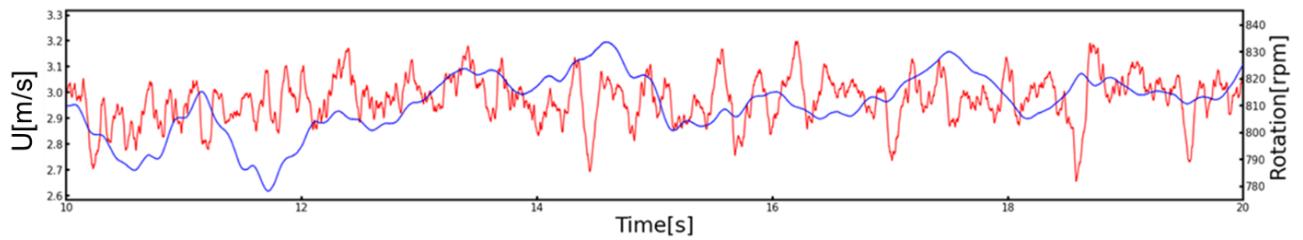


図 5.12 動揺なし時の下流側風車の流入風速とロータ回転数の時系列データ

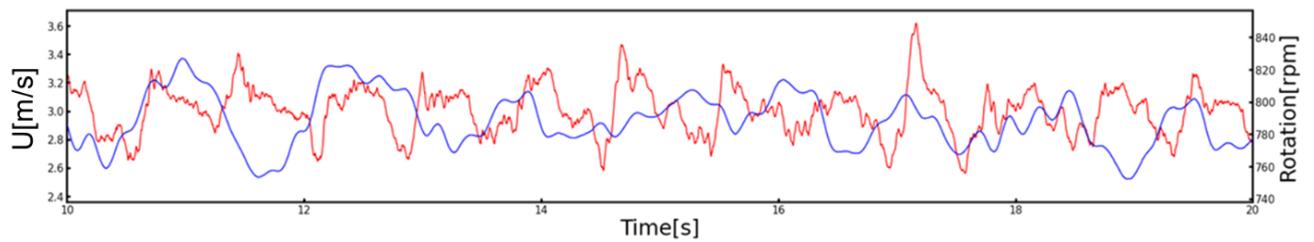


図 5.13 ピッチ動揺±5[deg]時の下流側風車の流入風速とロータ回転数の時系列データ

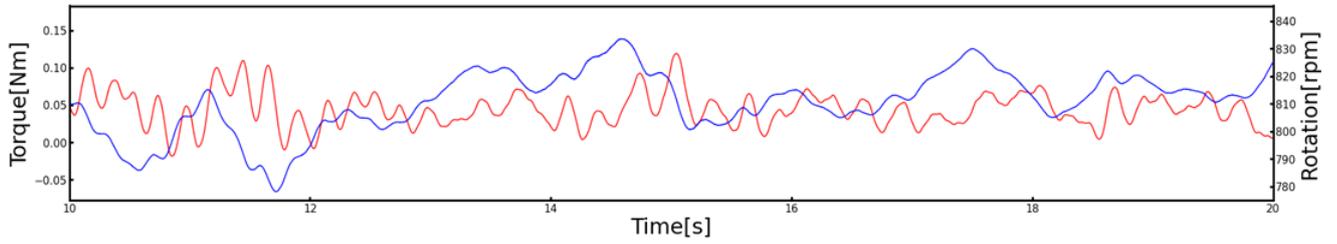


図 5.14 動揺なし時のトルクとロータ回転数の時系列データ

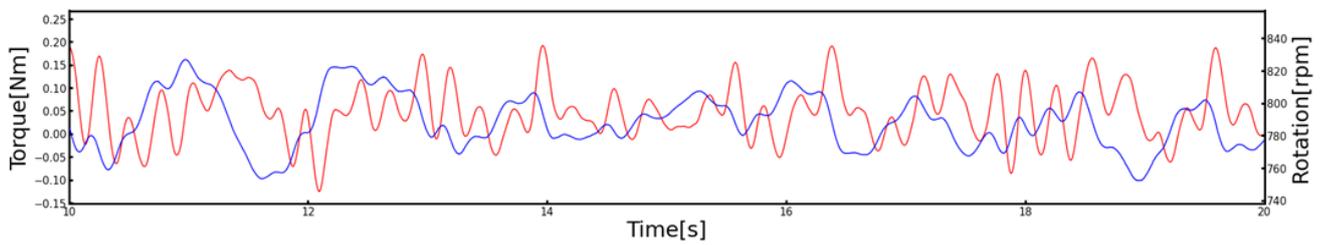


図 5.15 ピッチ動揺±5[deg]時のトルクとロータ回転数の時系列データ

表 5.3 下流側風車の周速比とその標準偏差

	動揺なし	ピッチ動揺 ±5[deg]
周速比[-]	4.25	4.11
標準偏差[-]	0.38	0.47

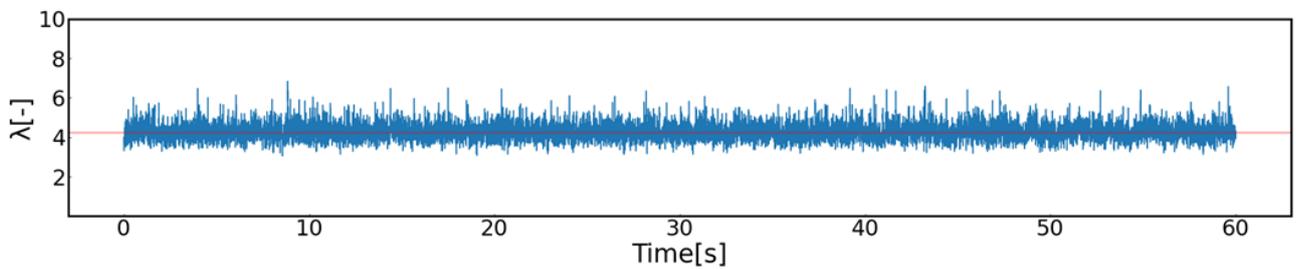


図 5.16 動揺なし時の下流側風車の周速比の時系列データ

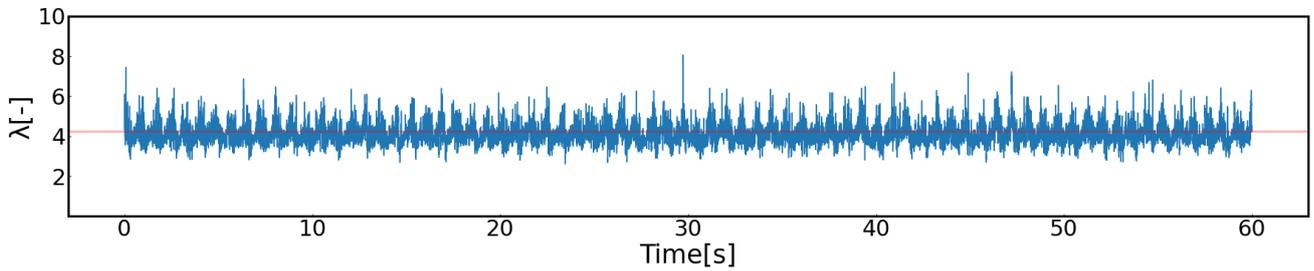


図 5.17 ピッチ動揺±5[deg]時の下流側風車の周速比の時系列データ

5.2 下流側風車の抗力計測

本節は、下流側風車の抗力計測の詳細を記す。風車の設置レイアウトは図 5.18 の通りである。下流側風車は Type B を使用した。風車間の離隔距離は 3D, 5D の 2 パターンで計測を行った。また、トルク計測時と同様に、下流側風車の直前 1D に熱線流速計を設置した。表 5.4 に実験条件を示す。

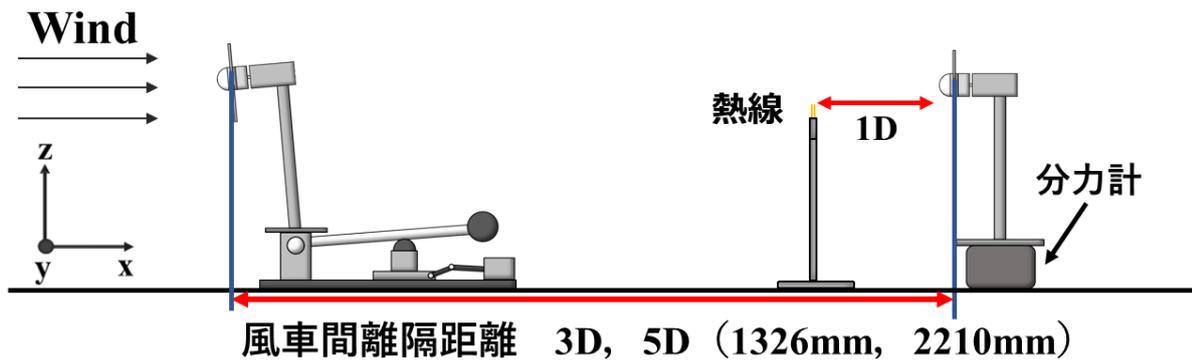


図 5.18 抗力計測時の風車模型の設置レイアウト

表 5.4 下流側風車抗力計測の実験条件

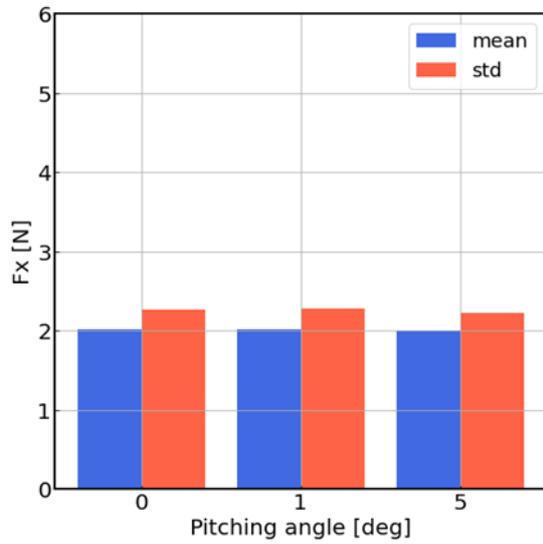
パラメータ	値
流入風速[m/s]	8
周速比[-]	4.25
ロータ回転数（上流側風車）[rpm]	1469
ロータ回転数（下流側風車，回転数固定時）[rpm]	735
サンプリング周波数[Hz]	500
計測時間（ピッチ動揺）[s]	60
計測時間（動揺なし）[s]	50

カットオフ周波数（熱線流速計）[Hz]	300
カットオフ周波数（分力計）[Hz]	300
レイノルズ数[-]（ブレード直径に基づく）	1.9×10^5

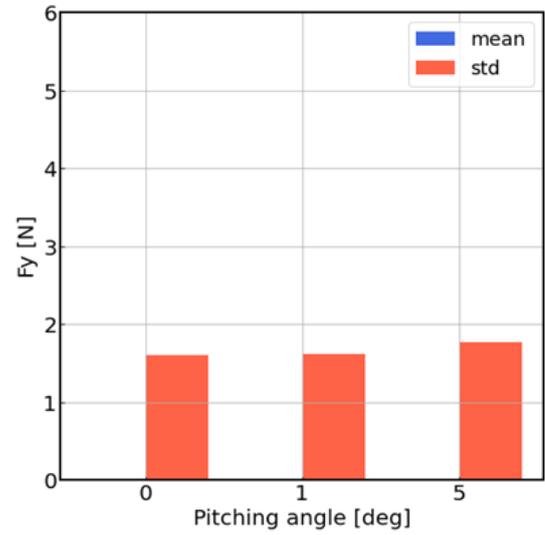
5.2.1 風車模型のロータ回転数固定時の計測結果

図 5.19 にそれぞれの風車間離隔距離，動揺状態別の X, Y 方向の抗力の平均値，標準偏差の結果を示す。風車間離隔距離が大きくなると，標準偏差の値が大きくなり，変動が激しくなることが示された。動揺パラメータ別で比較すると，抗力の平均値では有意な差異は確認できなかった。ピッチ動揺によって流入する風速の乱れが大きくなることから，抗力も変動の激しい結果となることを予測していたが，標準偏差の結果も動揺なし状態と有意な差は得られなかった。これにより，ピッチ動揺を伴った後流は，タワー支持構造部の荷重に大きく影響を与えないことが示唆された。

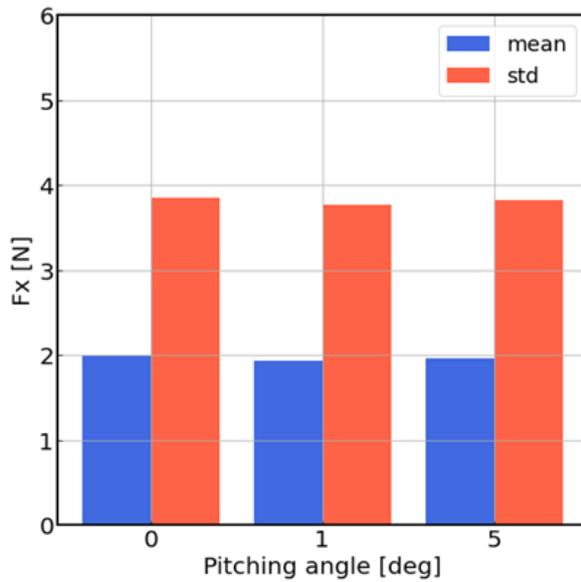
図 5.20～5.23 に風車間離隔距離，動揺状態別で下流側風車の X 方向抗力の時系列データに 0.1[s] の移動平均処理を施して作成したグラフを示す。風車間離隔距離 3D の場合，動揺の有無に伴い，有意な差異が存在することが確認できる。しかし，風車間離隔距離 5D の場合，3D 時のような結果は見られず，浮体動揺の影響を視覚的に確認できなかった。動揺なし状態の時系列データをそれぞれ確認すると，動揺なし状態であるにも関わらず，大きく変動している。それが，風車後流の特性であるのか，またノイズ等の実験設備に関わるものであるのかを確認すべく，先に示した時系列データに対して周波数解析を行った。図 5.24 に風車間離隔距離 3D，動揺なし状態での主流方向抗力の時系列データに対して行った周波数解析結果を示す。約 12[Hz]地点に大きなピークを確認できる。この 12[Hz]の変動が，先に示した時系列データの大きな変動に起因していると考えられる。図 5.25 に，タワーを叩いた際に計測された主流方向抗力の時系列データに対して行った周波数解析結果を示す。これは，タワーの固有振動数を確認すべく，ハンマーでタワーを叩き，風車抗力を計測した結果である。この結果から，約 12[Hz]に大きなピークを確認し，タワーの固有振動数と抗力の大きな変動に起因した周波数帯が一致した。おそらく，タワーの固有振動数と何らかの周波数帯が一致し，共振をしていることが原因である。約 12[Hz]であるロータ回転周波数と一致しているため，ロータ回転とタワーの固有振動数によって共振を引き起こしたことが，本実験の結果に繋がったと考えられる。



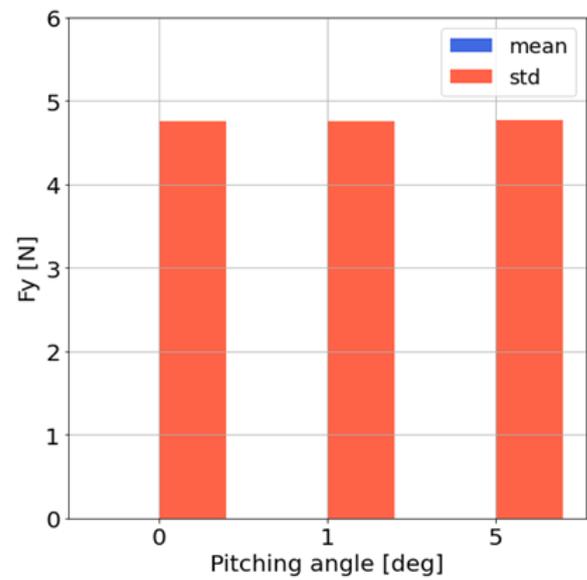
(i) 風車間離隔距離 3D 時の主流方向の抗力



(ii) 風車間離隔距離 3D 時の水平方向の抗力



(iii) 風車間離隔距離 5D 時の主流方向の抗力



(iv) 風車間離隔距離 5D 時の水平方向の抗力

図 5.19 動揺状態で比較した X 方向, Y 方向の平均抗力と標準偏差

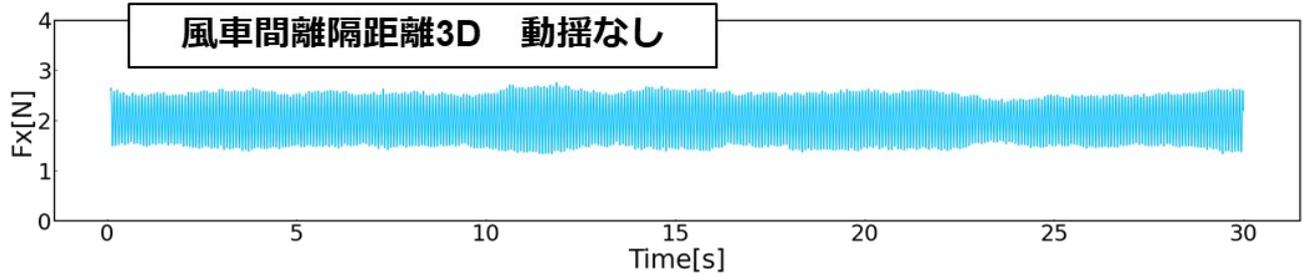


図 5.20 下流側風車における風車間離隔距離 3D, 動揺なし状態での主方向抗力の時系列データ

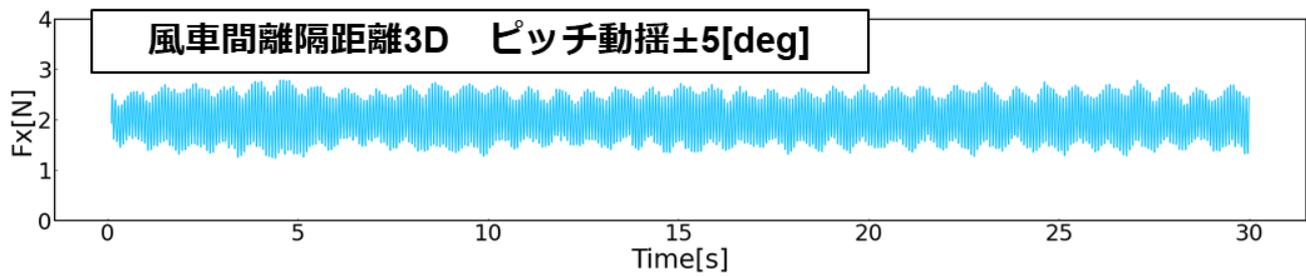


図 5.21 下流側風車における風車間離隔距離 3D,
ピッチ動揺±5[deg]状態での主方向抗力の時系列データ

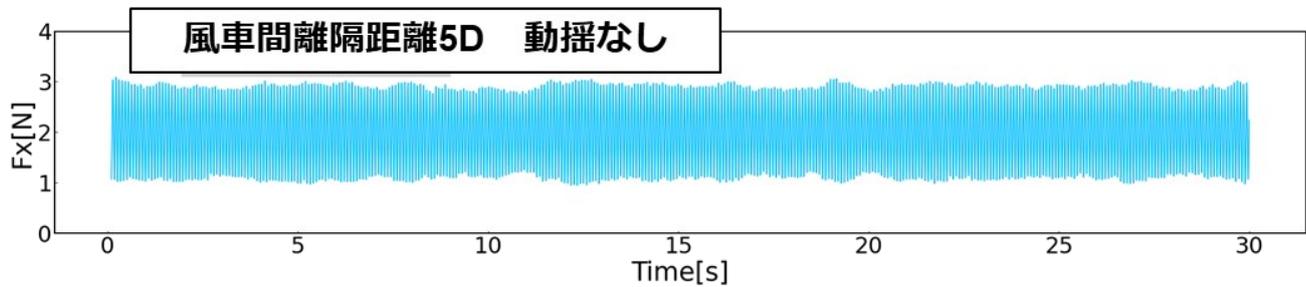


図 5.22 下流側風車における風車間離隔距離 5D, 動揺なし状態での主方向抗力の時系列データ

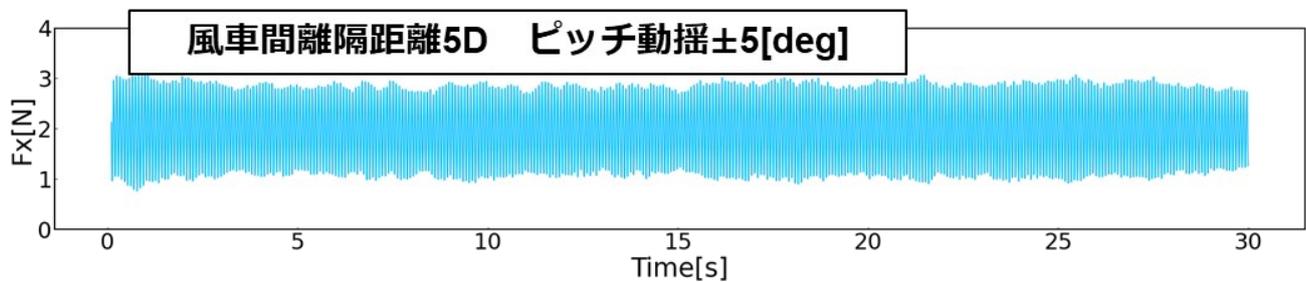


図 5.23 下流側風車における風車間離隔距離 5D,
ピッチ動揺±5[deg]状態での主方向抗力の時系列データ

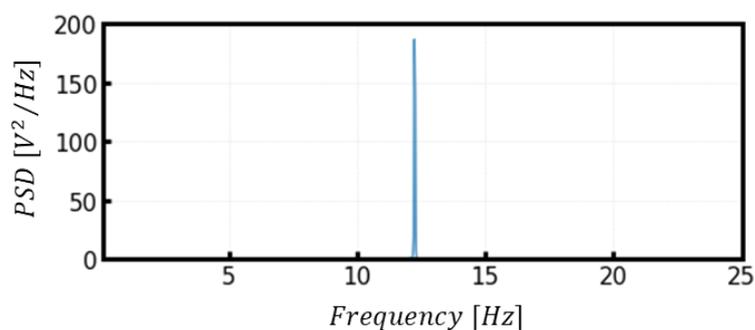


図 5.24 下流側風車における風車間離隔距離 3D，動揺なし状態での主方向抗力の時系列データに対して行った周波数解析の結果

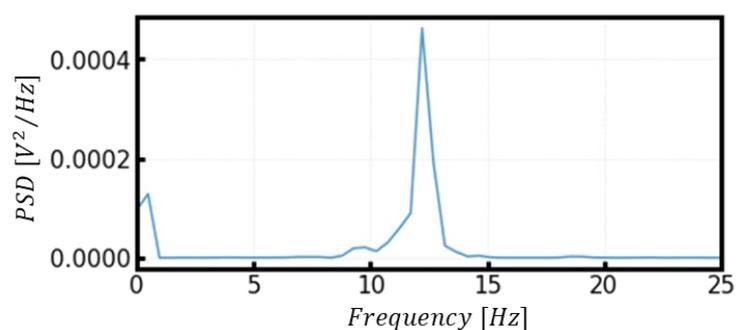
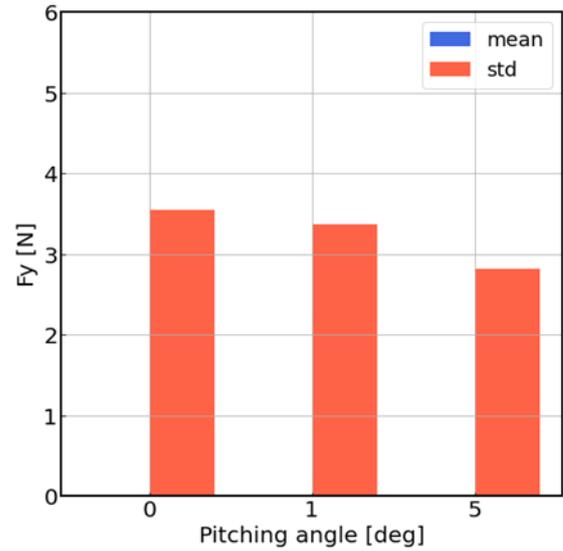
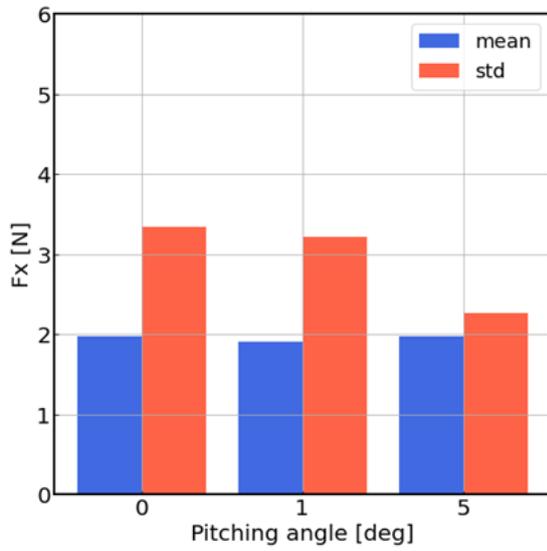


図 5.25 タワーを叩いた際に計測された主流方向抗力の時系列データの周波数解析結果

5.2.2 風車模型のロータ回転数自動制御時の計測結果

図 5.26 にそれぞれの風車間離隔距離，動揺状態別の X, Y 方向の抗力の平均値，標準偏差の結果を示す．平均値に関しては，有意な差異は見られないが，標準偏差の結果では，回転数固定時の結果よりも，動揺状態で差異が示された．これは，ピッチ動揺の変動によって，タワーの固有振動数の周波数帯からロータ回転周波数が離れる時間が多くなることが起因していると考えられる．

図 5.27, 5.28 に動揺状態別で下流側風車の X 方向抗力の時系列データに 0.1[s]の移動平均処理を施して作成したグラフを示す．回転数自動制御時の結果では，ロータ回転数固定時に確認された，変動振幅の伸長は見られず，5.2.1 節で述べた共振の影響は小さくなったと考えられる．



(i) 風車間離隔距離 5D 時の主流方向の抗力

(ii) 風車間離隔距離 5D 時の水平方向の抗力

図 5.26 下流側風車ロータ回転数自動制御時の動揺状態で比較した

X 方向, Y 方向の平均抗力と標準偏差

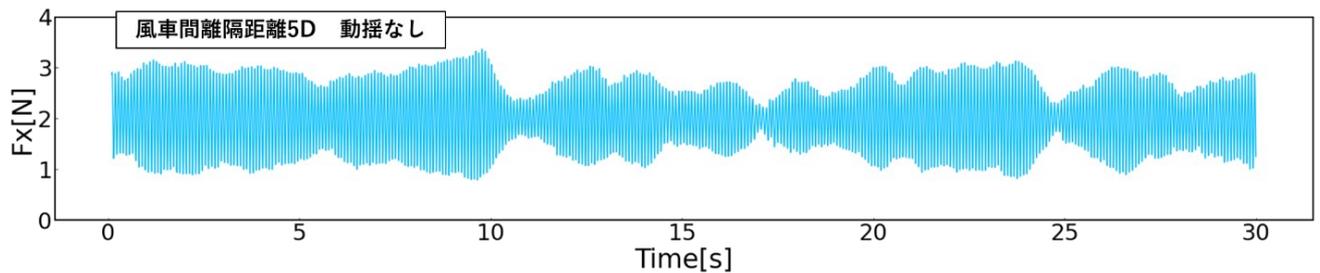


図 5.27 下流側風車における風車間離隔距離 5D, 動揺なし状態での主方向抗力の時系列データ

(ロータ回転数自動制御時)

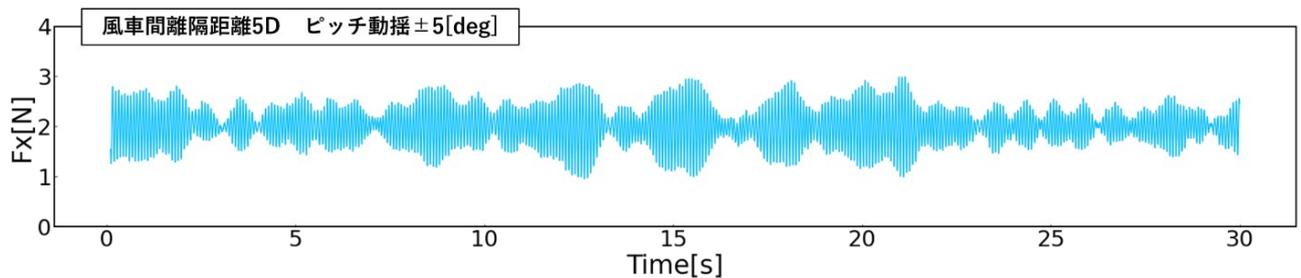


図 5.28 下流側風車における風車間離隔距離 5D, ピッチ動揺±5[deg]状態での

主方向抗力の時系列データ (ロータ回転数自動制御時)

5.3 下流側風車の後流の気流計測

本節は、浮体動揺する上流側風車によって形成される後流によって、下流側風車の後流が示す気流性状を検討するため、下流側風車後流の気流計測を行った。この気流計測は、下流側風車の抗力計測と同時に行った。実験の概要を図 5.29 に示す。風車間離隔距離は $3D$, $5D$ の 2 パターンで行い、気流計測を行った地点は、下流側風車の後方 $3D$, $5D$ の 2 パターンで行った。熱線流速計は図 5.29(ii) のように鉛直方向に 4 点設置した。実験条件は、下流側風車抗力の計測時と同様である。

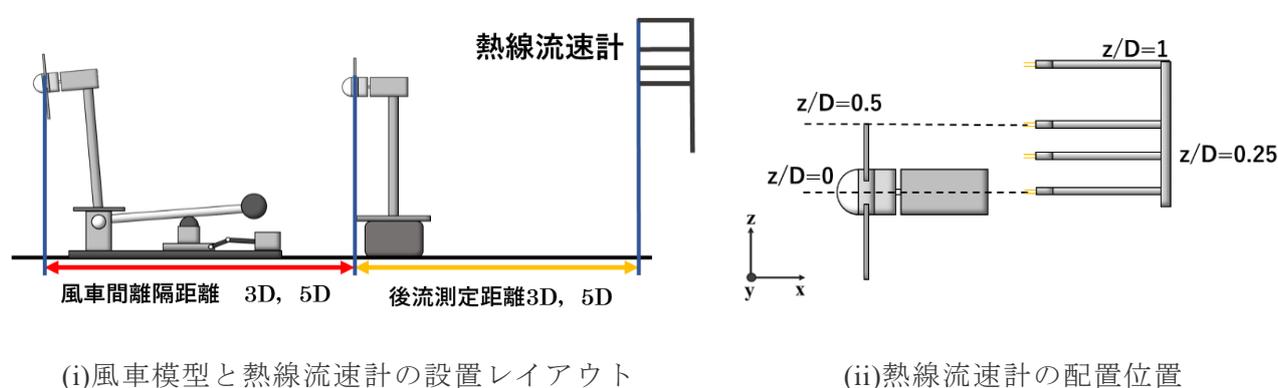
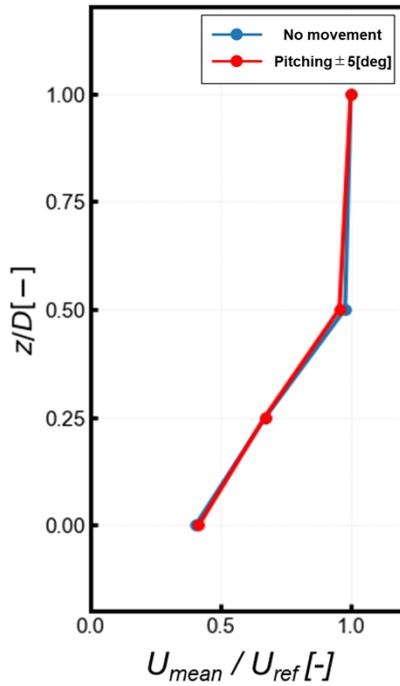
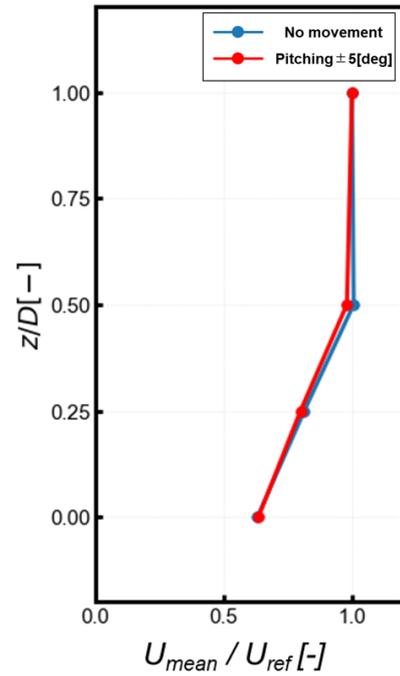


図 5.29 下流側風車後流の気流計測の実験概要

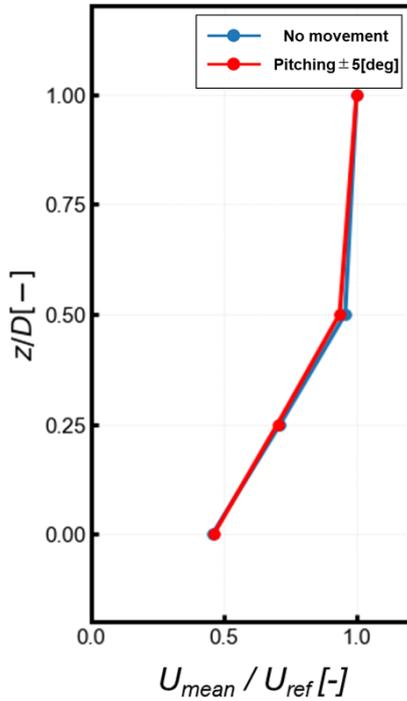
図 5.30 に各風車間離隔距離と後流測定距離を動揺状態で比較した風速の鉛直プロファイルを示す。鉛直プロファイルは、 $z/D=1.0$ の結果で無次元化したものである。すべての結果で、動揺状態では、有意な差異は見られない結果となった。図 5.31～5.34 に風車間離隔距離、動揺状態別で下流側風車後流の風速の時系列データに $0.1[s]$ の移動平均処理を施し、 $z/D=1.0$ の結果で無次元化したグラフを示す。各地点の結果で、上流側風車がピッチ動揺している場合には、下流側風車の後流にはその影響が明確に生じていることが視覚的に確認できる。また、動揺なしの場合と比較すると、ピッチ動揺がある場合には、風速の変動振幅が非常に大きくなることも示された。この変動は、上流側風車のピッチ動揺による影響が大きいのかを検討するため、先に示した時系列データに対して周波数解析を行った。図 5.35～5.38 に後流測定距離 $3D$ における動揺状態、風車間離隔距離別で周波数解析結果を示す。この 4 つのグラフから、各計測地点で、ピッチ動揺の周波数 $1.25[Hz]$ にピークがあるものの、その変動が支配的になっていないことが示された。上流側風車のピッチ動揺による下流側風車後流の風速の変動は、動揺の影響によるものであると考えられるが、変動振幅が非常に大きくなる現象は、下流側風車後流と上流側風車の動揺の相互作用によるものであると示唆される。



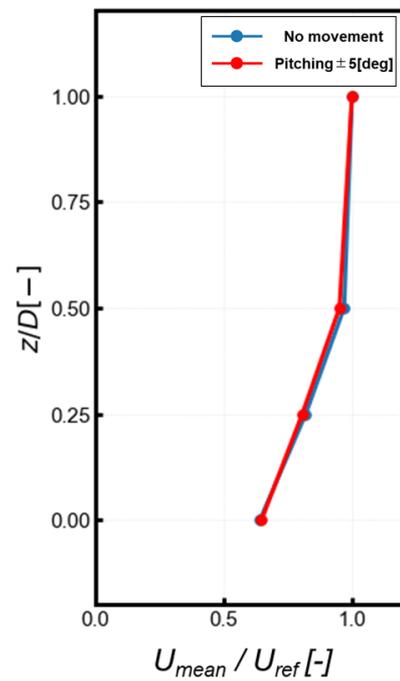
(i) 風車間離隔距離 3D, 後流測定距離 3D



(ii) 風車間離隔距離 3D, 後流測定距離 5D



(iii) 風車間離隔距離 5D, 後流測定距離 3D



(iv) 風車間離隔距離 5D, 後流測定距離 5D

図 5.30 下流側風車後流の風速の鉛直プロファイル

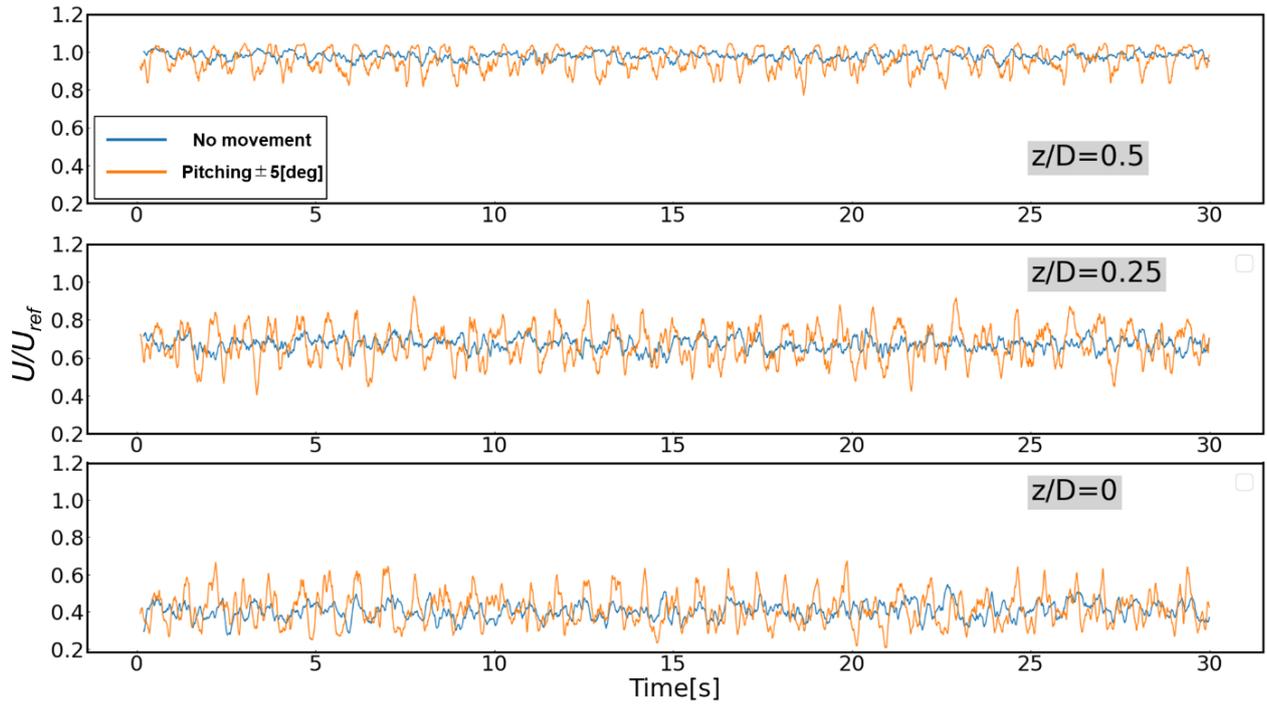


図 5.31 下流側風車の後方 3D における風速の時系列データ，風車間離隔距離 3D の場合

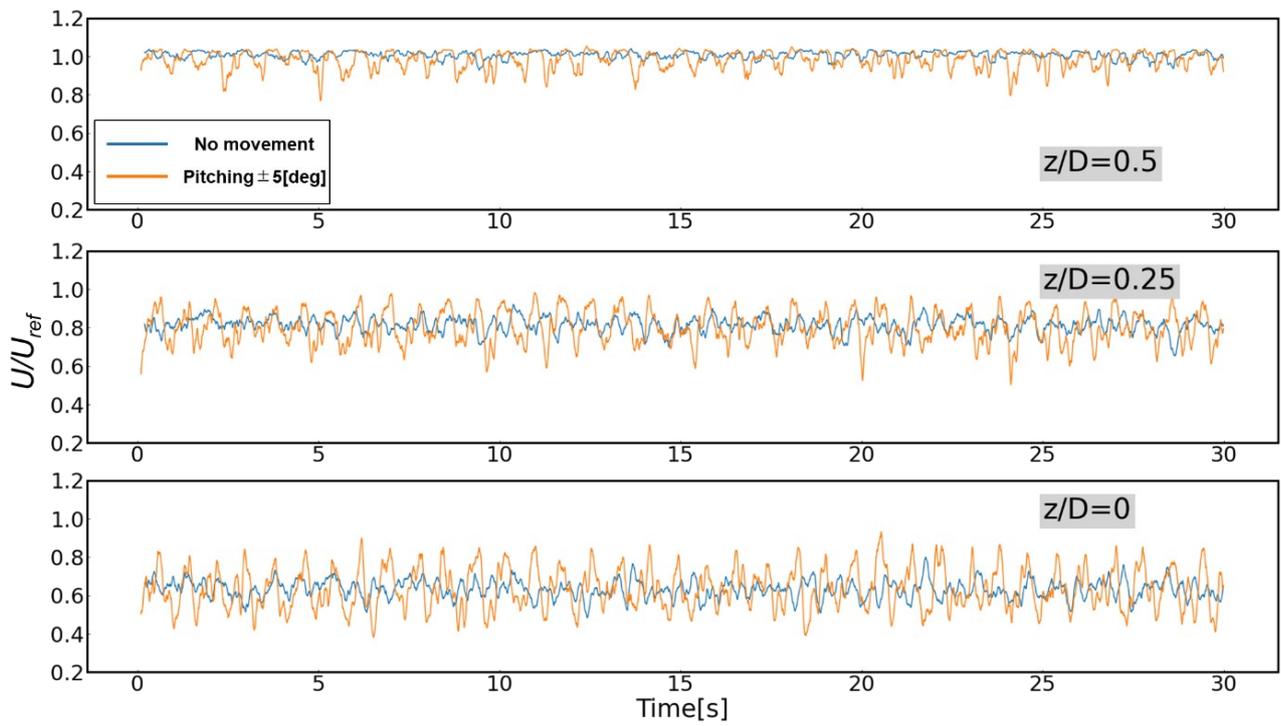


図 5.32 下流側風車の後方 5D における風速の時系列データ，風車間離隔距離 3D の場合

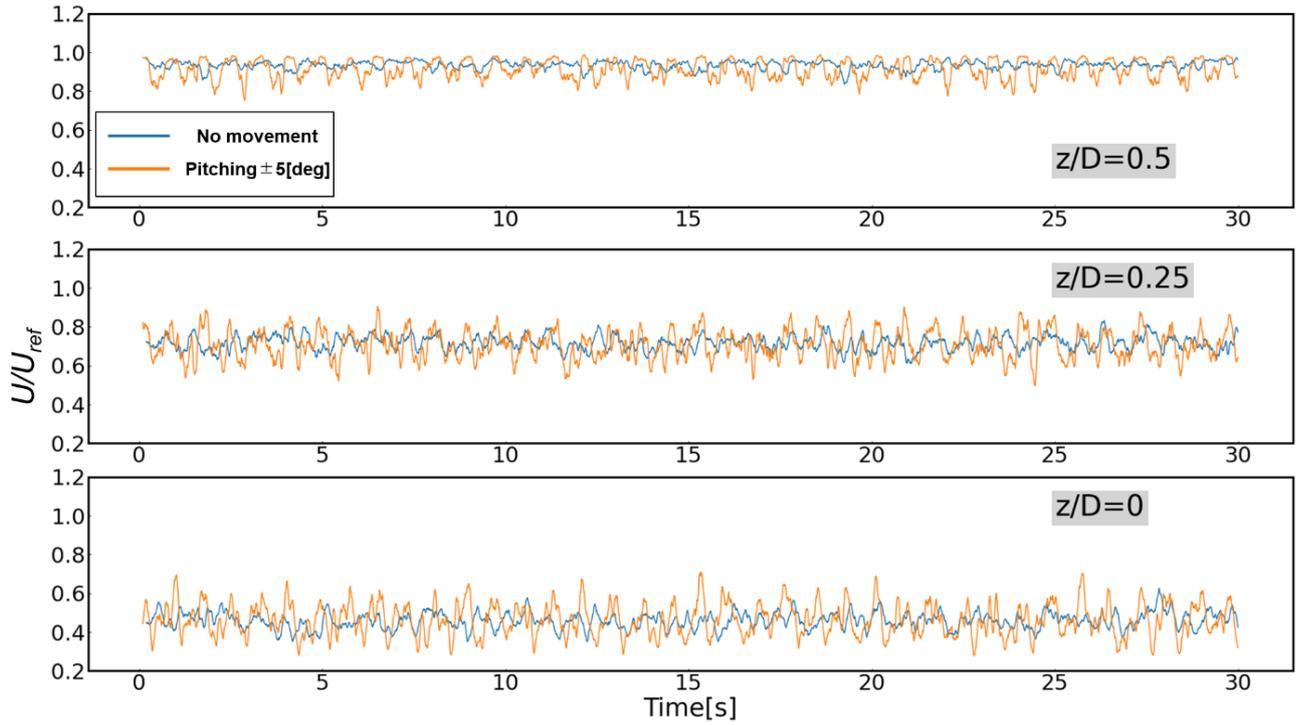


図 5.33 下流側風車の後方 3D における風速の時系列データ，風車間離隔距離 5D の場合

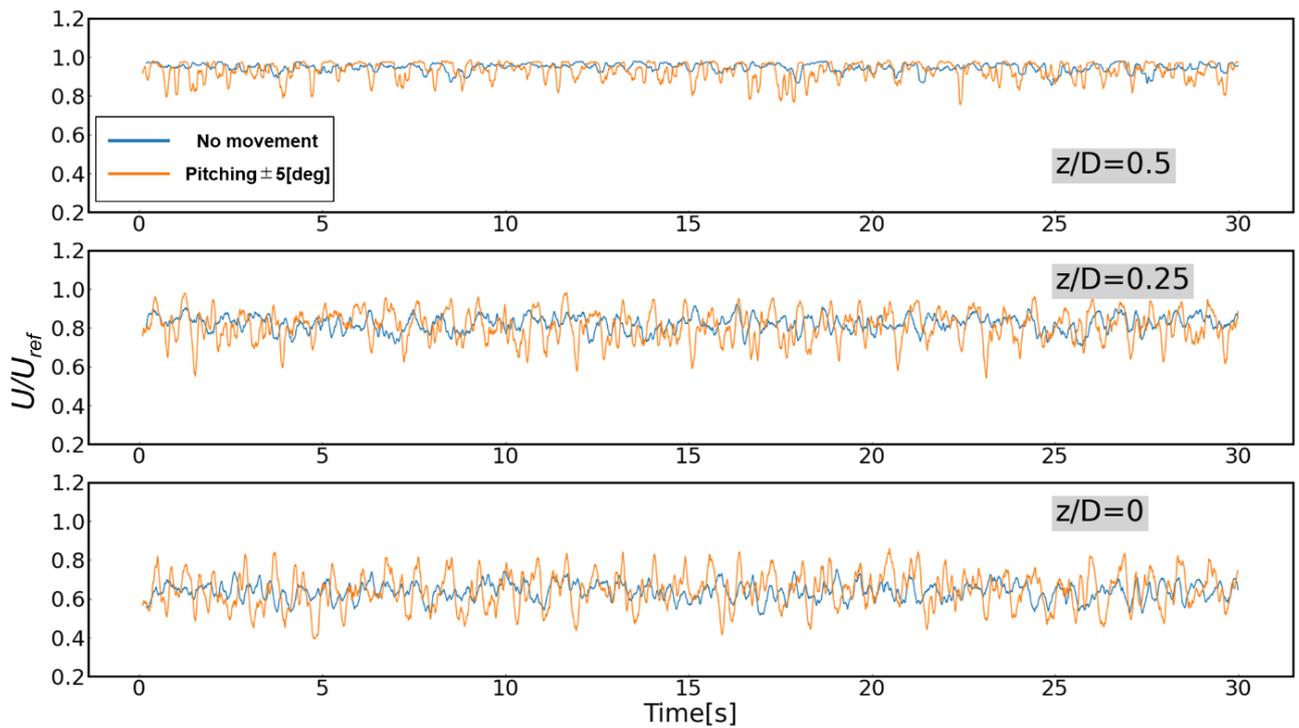


図 5.34 下流側風車の後方 5D における風速の時系列データ，風車間離隔距離 5D の場合

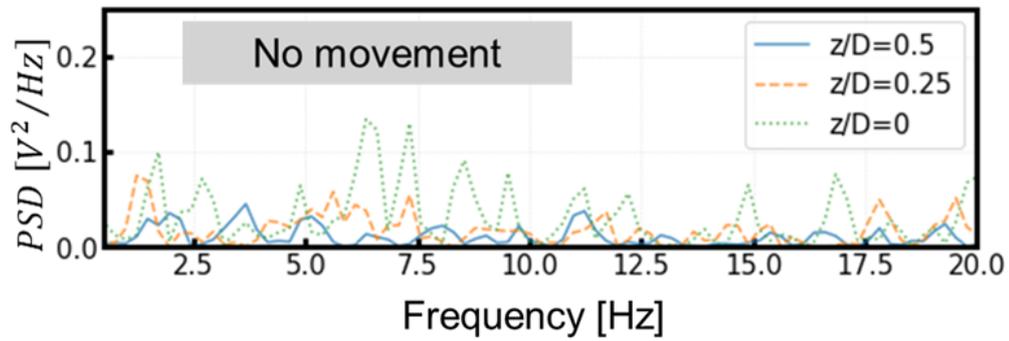


図 5.35 下流側風車の後方 3D における風速の時系列データの周波数解析結果，
風車間離隔距離 3D の場合（上流側風車は動揺なし状態）

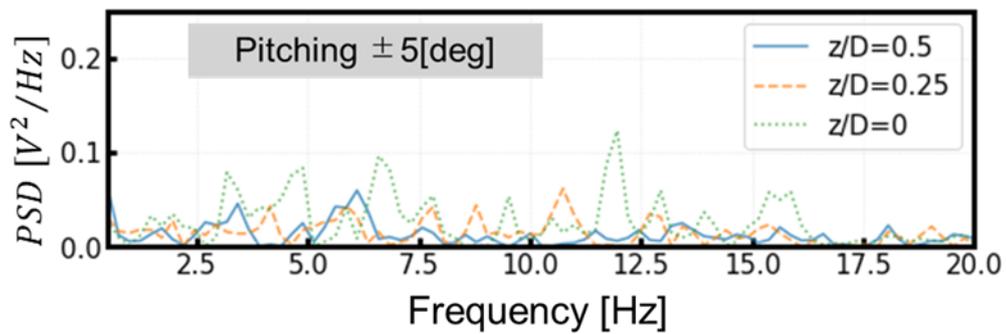


図 5.36 下流側風車の後方 3D における風速の時系列データの周波数解析結果，
風車間離隔距離 3D の場合（上流側風車はピッチ動揺±5[deg]状態）

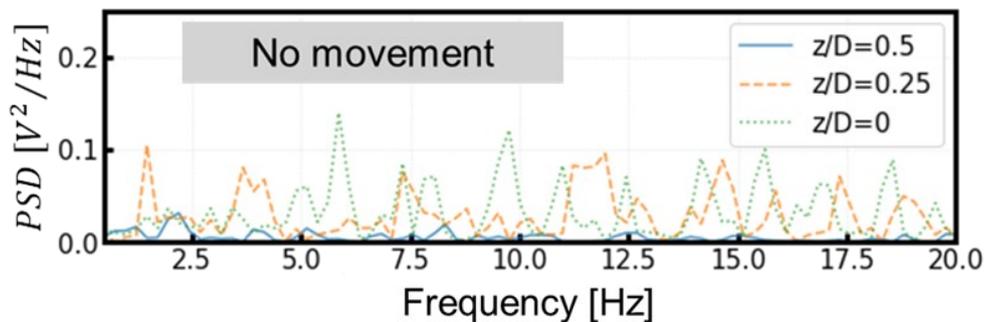


図 5.37 下流側風車の後方 3D における風速の時系列データの周波数解析結果，
風車間離隔距離 5D の場合（上流側風車は動揺なし状態）

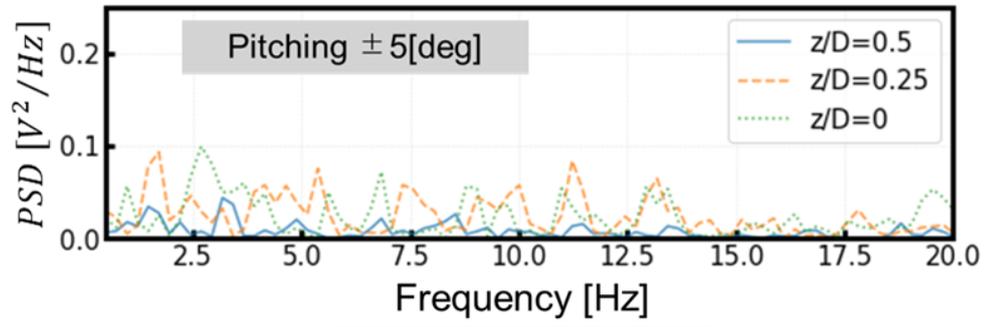


図 5.38 下流側風車の後方 3D における風速の時系列データの周波数解析結果，
風車間離隔距離 5D の場合（上流側風車はピッチ動揺 ± 5[deg] 状態）

第6章 結論

本研究では、風洞実験にて浮体式風車の動揺を模擬するための加振装置を製作し、これを用いて、風車が浮体動揺をする際に形成される後流を再現し、それぞれの浮体動揺による風車後流の特性に関する検討を行った。また、浮体式風車の動揺を再現した後流によって、下流側に位置する風車に与える影響を検討した。主な結果は、以下に示す通りである。

単基風車後流の可視化実験に関して

- ピッチ動揺の場合、動揺なし状態と比較すると、後流の幅が縦横に大きく伸びており、形成された後流は下流方向に行くほどに、その影響が拡散していることを確認した。
- サージ動揺の場合、風車自体が前後に移動することから、わずかに風車後流の回復が遅れるような挙動を見せたが、有意な差異は確認できなかった。
- ピッチ動揺の実験結果をパラメータ別で比較すると、パラメータが大きくなるにつれ、後流の幅も大きくなる傾向が示された。
- 浮体動揺していない静止状態からピッチ動揺を始めた直後に生成される渦が、その後生成される渦よりも大きい結果が見られ、浮体動揺が伴うことで後流の非定常性がより強くなることが示唆された。
- 初めての試みである、スモークケーキを用いた風車後流の可視化実験から、風車特有の翼端による風車後流の螺旋構造が形成されていることが確認できた。
- 動揺なし状態では、綺麗な螺旋構造が形成されているのに対して、ピッチ動揺時は、後流の偏向により、そのような構造は見られず、煙が拡散しているような結果が確認された。

単基風車後流の気流計測結果に関して

- ピッチ動揺、動揺なし状態の風速の鉛直プロファイルと比較すると、有意な差異は見られない結果となった。
- 風速の標準偏差の結果から、動揺なし状態よりピッチ動揺状態の方が、ロータ中心、上翼端地点で値が大きいことを確認し、下流方向の距離が大きくなっても、その効果は持続している結果となった。
- サージ動揺の結果に関しては、風速、標準偏差の鉛直プロファイルの結果で動揺なしとの有意な差異は示されなかった。

-
- 風速の時系列データから、ピッチ動揺の場合、その動揺に同期する変動が確認でき、 $X=3D$ 地点、 $z/D=0.5$ の翼先端部分でその変動が顕著に確認できた。
 - ピッチ動揺の影響は、 $X=20D$ の場合にも、持続していることが時系列データの結果から確認できた。
 - サージ動揺を課した際の、風速の時系列データから、動揺なしの結果との有意な差異はないことが確認できた。
 - 風車にピッチ動揺を課し、計測した風速の時系列データに対して周波数解析を行うことで、各後流測定距離の結果で、ピッチ動揺の周波数帯で一番大きなピークが確認され、 $X=20D$ の場合でも、わずかにピークが示された。
 - 時系列データを比較することで、ピッチ動揺 $\pm 1[\text{deg}]$ の場合、 $\pm 5[\text{deg}]$ のような変動は見られず、動揺なしとの有意な差異は見られない結果となった。
 - ロール動揺を課した気流計測時、加振装置を設置する向きによって、後流の水平プロファイルの結果に差異が示された。
 - 後流の水平プロファイルを比較すると、 $X=3D$ 時には、ロール動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ 時にわずかに、風速の回復が早い傾向が示されたが、 $X=5D$, $10D$ 地点の結果では、有意な差異は見られなかった。
 - ロール動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ の時系列データでは、非常に大きい風速の変動が見られる結果となった。これは、ピッチ動揺時に、その影響が顕著に現れた $X=3D$, $z/D=0.5$ の結果よりも、さらに大きな振幅であった。
 - ロール動揺 $\pm 1[\text{deg}]$ の時系列データでは、動揺なし状態と有意な差異は見られない結果となった。
 - ニアウェイク領域の気流計測結果から、加振装置のブラフボディとしての影響は大きく、風車後流の回復過程を確認することはできなかった。
 - 可視化実験で確認されたピッチ動揺による過渡現象のような結果は、気流計測時には確認できず、可視化実験の流入風速が低かったことから、風車後流の移流の遅れによるものであると推察される。
 - ピッチ動揺周期を変更した気流計測結果から、動揺周期の変更は、風速の鉛直プロファイルに大きく影響を与えない結果となった。
 - ブレードを取り外した状態で行った風車後流の気流計測結果では、動揺状態で有意な差異は見られず、タワーやナセルは、動揺状態によって乱れを大きくする影響はないことが示唆された。
 - ピッチ角度を固定した状態とピッチ動揺状態の風車後流の時系列データを比較することで、

$z/D=0.5$ 地点においては、動揺による、変動振幅の伸長は見られず、後流の偏向によって現れる結果であることが明らかとなった。

- ロール角度を固定した状態とロール動揺状態の風車後流の時系列データを比較した際も、 $y/D=0.4$ 地点においては、動揺による、変動振幅の伸長は見られず、後流の偏向によって現れる結果であることが明らかとなった。
- 動揺状態の風速の変動振幅を比較すると、ロール動揺の場合、ピッチ動揺よりも大きい結果となり、後流の偏向幅が非常に大きいことが推察された。

下流側風車の出力計測に関して

- 発電出力の結果から、ピッチ動揺した際の方が、わずかに出力が大きい結果となった。
- 下流側風車のトルク時系列データを取得し、これを周波数解析した結果、上流側風車のピッチ動揺の影響を直接的に受けていることが確認された。また、風車間離隔距離が大きくなるに伴い、ピッチ動揺の影響が大きくなることも確認された。
- 下流側風車のロータ回転数を自動制御した際、後流の風速の非定常性に追従できず、トルクが負の値として出力されている点を確認された。
- ピッチ動揺の場合、回転数自動制御の周速比の設定より少し下振れた結果となり、時系列データや標準偏差の結果からも、動揺の影響を受け、動揺なし時よりも、回転数の追従ができていないことを確認した。

下流側風車の抗力計測に関して

- 取得した抗力の時系列データから、風車間離隔距離 $3D$ の場合、動揺の有無に伴い、有意な差異が存在することが確認できたが、風車間離隔距離 $5D$ の場合、 $3D$ 時のような浮体動揺の影響を視覚的に確認できなかった。
- 取得した抗力の時系列データより、動揺なし時も、大きく変動している結果となった。タワーの固有振動数とロータ回転周波数が一致することで、引き起こされた結果であると考えられる。
- 下流側風車のロータ回転数を自動制御した際、抗力の標準偏差の結果では、回転数固定時の結果よりも、動揺状態で差異が示された。ピッチ動揺の変動によって、タワーの固有振動数の周波数帯からロータ回転周波数が離れる時間が多くなることが起因していると考えられる。

下流側風車後流の気流計測に関して

- 風速の鉛直プロファイルから、動揺状態では、有意な差異は見られない結果となった。
- 取得した風速の時系列データから、各地点の結果で、上流側風車がピッチ動揺している場合には、下流側風車の後流にその影響が明確に生じていることが視覚的に確認できた。また、動揺なしの場合と比較すると、ピッチ動揺がある場合には、風速の変動振幅が非常に大きくなることも示された。

以上の知見から、浮体式洋上風車の動揺による後流影響について以下のようにまとめられる。

- 浮体動揺の並進、回転方向によって、風車後流の特性は異なり、ピッチ、ロール方向の動揺は、風車後流の非定常性を増強させる結果となった。
- 上流側風車のピッチ動揺状態によって、下流側風車のトルク、風荷重、後流は強い非定常性を持ち、平均場ではなく、時系列での評価が必要であることが示唆された。
- 上流側風車の動揺状態は、下流側風車のトルクの挙動に影響を与え、風車間離隔距離が大きくなるにつれ、その影響は大きくなった。
- 下流側風車の抗力、後流の計測結果においても、上流側風車のピッチ動揺の影響が出現することを視覚的に確認できた。

本研究では、特に日本で例の少ない、風洞実験を通じた浮体式風車の後流影響に関する研究を行った。風洞実験を通じた、浮体式風車の後流影響を検討するため、浮体動揺を模擬する加振装置を製作し、再現した浮体式風車の後流の気流計測、下流側風車の出力、抗力の計測、考察を行った。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁：「第2部 第2章 国際エネルギー動向 第1節」，エネルギー白書 2022, pp.113-115. 2022
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁：「第2部 第2章 国際エネルギー動向 第1節」，エネルギー白書 2022, pp.115-116. 2022
- [3] IEA：”World Energy Balances 2020 “， Key World Energy Statistics 2020， 2020
- [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：「日本における風力発電設備・導入実績」，（閲覧日：2022年12月7日.） ， <https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/state/1-01.html>
- [5] GWEC：”MARKET STATUS”， GLOBAL WIND REPORT 2022， p.111， 2022
- [6] NEDO ， NeoWins（洋上風況マップ）.（閲覧日：2022年12月7日.） ， https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/top.html.
- [7] 環境省：再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書， 2010， p.98
- [8] Paul Fleming, et al. “Full-Scale Field Test of Wake Steering”， J Phys Conf 2017;854.
- [9] Juliaan Bossuyt, “Measurement of unsteady loading and power output variability in a micro wind farm model in a wind tunnel”， Energies 2017
- [10] UCHIDA Takanori, et al. A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design. Energies, 2020, 13.12: 3197.
- [11] 日経 ESG：「50年カーボンニュートラルの課題を聞く」，（閲覧日：2022年12月7日.） ， <https://project.nikkeibp.co.jp/ESG/atcl/column/00005/022500054/?P=2>

-
- [12] Bayati et al., “Wind tunnel validation of AeroDyn within LIFES50+ project: imposed Surge and Pitch tests”, *The Science of Making Torque from Wind*, 1(2016), pp. 9-10.
- [13] 澁谷光一郎：「ヨーステアリング手法を適用した大規模洋上ウィンドファームの最適化に関する研究」，九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士論文，2020.
- [14] 吉岡達也：「日本に最適な洋上風力発電の導入に向けたウェイクステアリング手法の実験的研究」，九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士論文，2021.
- [15] 鞭馬宏太：「ウェイクの影響を考慮した洋上ウィンドファームの最適設計・制御に関する研究」，九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻修士論文，2022.
- [16] 田村大樹, et al. 不規則波中動揺実験による洋上風力発電用バージ型浮体の安定性および安全性の検証 (社会インフラ特集号). *Hitz 技報 = Hitz technical review*, 2019, 80.1: 19-26.

謝辞

本論文を執筆するにあたり，九州大学応用力学研究所風工学研究室の皆様には多大なるご支援を賜りました．心より感謝申し上げます．内田孝紀准教授には，この2年間，大気流体力学や風車業界のことなど，様々なことを教えて貰っただけでなく，研究活動に関するご助言やご指導を頂きました．共同研究先の打ち合わせに積極的に参加させていただいたことや，スライド，要旨の修正等を通して，社会人になる前の貴重な経験をさせていただきました．また，実験時や就職活動等，私たちの意見を温かく受け入れ，励ましていただきました．研究室での生活を振り返ると，本当にこの研究室に来てよかったと思える2年間でした．私も将来，先生のように，懐が深く，皆に愛されるような上司になれるように頑張ります．本当にありがとうございました．渡邊康一准教授には，ゼミの課題について相談させていただいたり，スライドの修正等を通して，新たな視点から意見をくださったりと，色々な形で研究室での活動をサポートしていただきました．お会いした時には，労いの言葉をかけてくださり，研究活動の励みになりました．先生の研究に取り組む姿勢や，どんなことでも親身に相談に乗ってくださる姿は本当に尊敬しています．ありがとうございました．昨年度を持って退官された大屋裕二特任教授には，風車や流体力学に関するお話を，面白く教えていただきました．大変興味深いお話ありがとうございました．

渡邊公彦技官，松島啓二技官，高田青技官には，風洞実験の際に実験方法や機器の取り扱いなど，あらゆる面でご支援頂き，貴重な実験データを得ることができました．渡邊公彦技官は，気さくにお話して下さったり，実験中に差し入れをさせていただいたりしました．松島啓二技官には，一から，実験手法やエクセルの使い方を教えていただき，大変勉強になりました．高田青技官は，色々な面から研究活動をサポートして下さり，円滑に研究活動を進めることができました．本当にありがとうございました．

テクニカルスタッフの小野裕子様，技術補佐員の篠原由香様には，学会の際の手続きなど，事務作業全般でご助力いただきました．お二人とお話するのがとても楽しく，心の支えになっていました．ありがとうございました．

本研究室の博士課程に在学されている澁谷光一郎さんには，大変お世話になりました．実験について親密に相談させていただいたり，研究に関する様々なことを教えていただいたりしました．本当にありがとうございました．

昨年度九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻を修了された吉岡達也さんには風洞実験など研究に関することから，研究以外の大学院生活についても多くのことを教えて頂きました．同期の鞭馬

宏太君，柳川泰我君，戸越將太君には実験の補助や，研究に関する議論に付き合ってもらいました．修士 1 年の北村虎太郎君，林昇吾君は，実験の補助をしてもらいました．2 年間，非常に楽しい研究室生活でした．ありがとうございました．北村君，林君，そして来年度入学予定の後輩の皆様，これからの研究生活頑張ってください

Appendix

A ピッチ動揺の状態をモニターする方法について

後流の気流計測や発電性能の計測などと同時に、ピッチ動揺の状態をモニターできるシステムを構築するため、様々な手法を用いて試行錯誤した。本節は、その中で一番、動揺状態のモニターに適した手法を紹介する。

動揺状態のモニターに使用するのは、図 A.1 に示す回転計である。表 A.1 に回転計の仕様を示す。一般的に回転計は、回転体の回転数を計測する機器である。仕組みとしては、図 A.2 で示す白いシールを被検体に取り付け、それを回転計のレーザーが感知することで、回転数を計測できる。今回は、上下する加振装置の尾の部分にシールを取り付け、レーザーでシールを感知した際に発される、信号を取り込むことで、動揺状態をモニターした。

図 A.3 が、回転計から出力された電圧の時系列データである。シールに反応すると、電圧が出力される仕組みなので、矩形型のグラフであることがわかる。図中の赤丸が、ピッチ角+5[deg]の状態、青丸がピッチ角-5[deg]の状態である。この時系列データに対して周波数解析を行った結果を図 A.4 に示す。この結果から、約 1.7[Hz]に LPF を設定することで、動揺状態を綺麗にデータとして再現することができた。図 A.5 に出力された電圧を、ピッチ角の変動に変換した時系列データを示す。

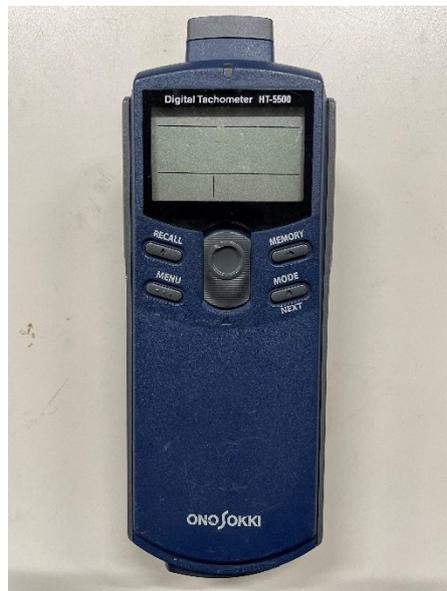
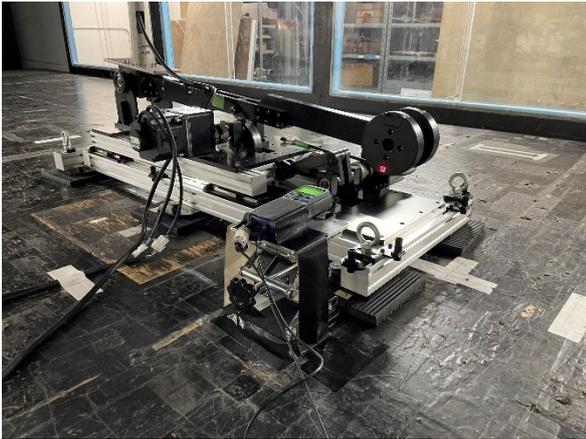


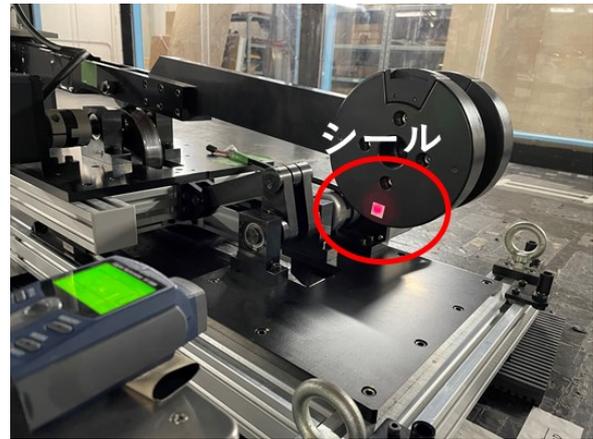
図 A.1 回転計の外観

表 A.1 動揺状態のモニターに使用した回転計の仕様

機器名	製造元	型番
回転計	Oriental motor	CC36WT10AE



(i)回転計設置図



(ii)シールを貼った位置

図 A.2 動揺状態モニター時の概観

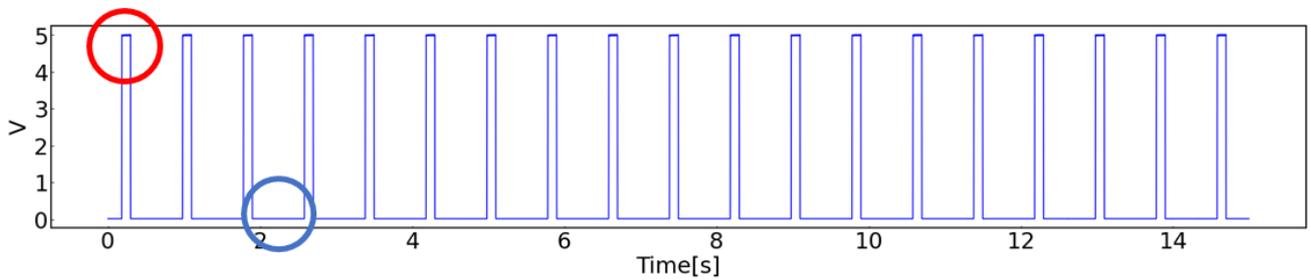


図 A.3 回転計から出力された電圧の時系列データ



図 A.4 回転計から出力された電圧の時系列データに対して周波数解析を行った結果

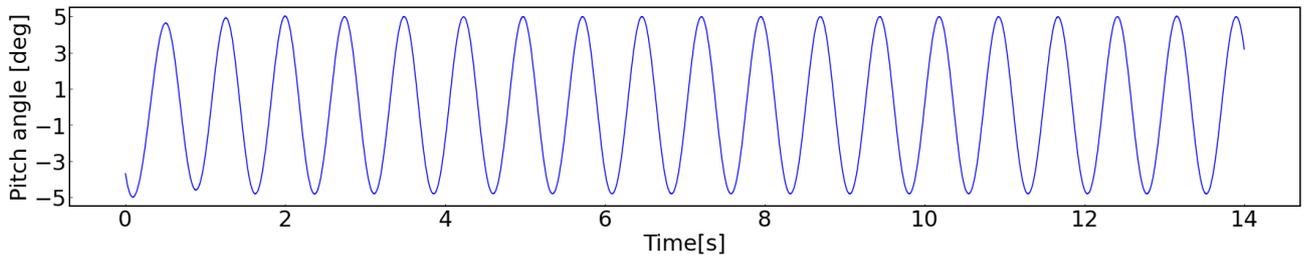


図 A.5 出力された電圧をピッチ角の変動に変換した時系列データ

B 単基風車試験

B-1 ピッチ，サージ方向の動揺を同時に行った場合

ピッチ動揺とサージ動揺は，加振装置の仕様上，同時に行うことができたので，それを課した状態で単基風車後流の気流計測を行った．実験の概要や条件は 4.2.1 節と同様である．

図 B.1 にピッチ，サージ動揺と動揺なし状態を比較した風速の鉛直プロファイル，図 B.2 に標準偏差の鉛直プロファイルを示している．風速の鉛直プロファイルでは，下流方向の距離で，動揺なし状態と有意な差異は確認されなかった．標準偏差のグラフでは，上翼端付近やロータ中心地点で，わずかに乱れが大きいことが確認されたが，これは，ピッチ動揺状態の結果とほぼ同様の結果となり，ピッチ動揺の影響が支配的であることが示唆された．

図 B.3～B.6 に後流測定地点それぞれの風速の時系列データを示している．時系列データは 0.1[s] の移動平均処理を施し，同時計測した 4 点を， $z/D=1.0$ の風速の結果で無次元化した結果である．時系列グラフでは，ピッチ動揺時と同様の挙動が確認され，サージ動揺よりもピッチ動揺の影響が大きく，2つの動揺の相互作用による結果は確認されなかった．

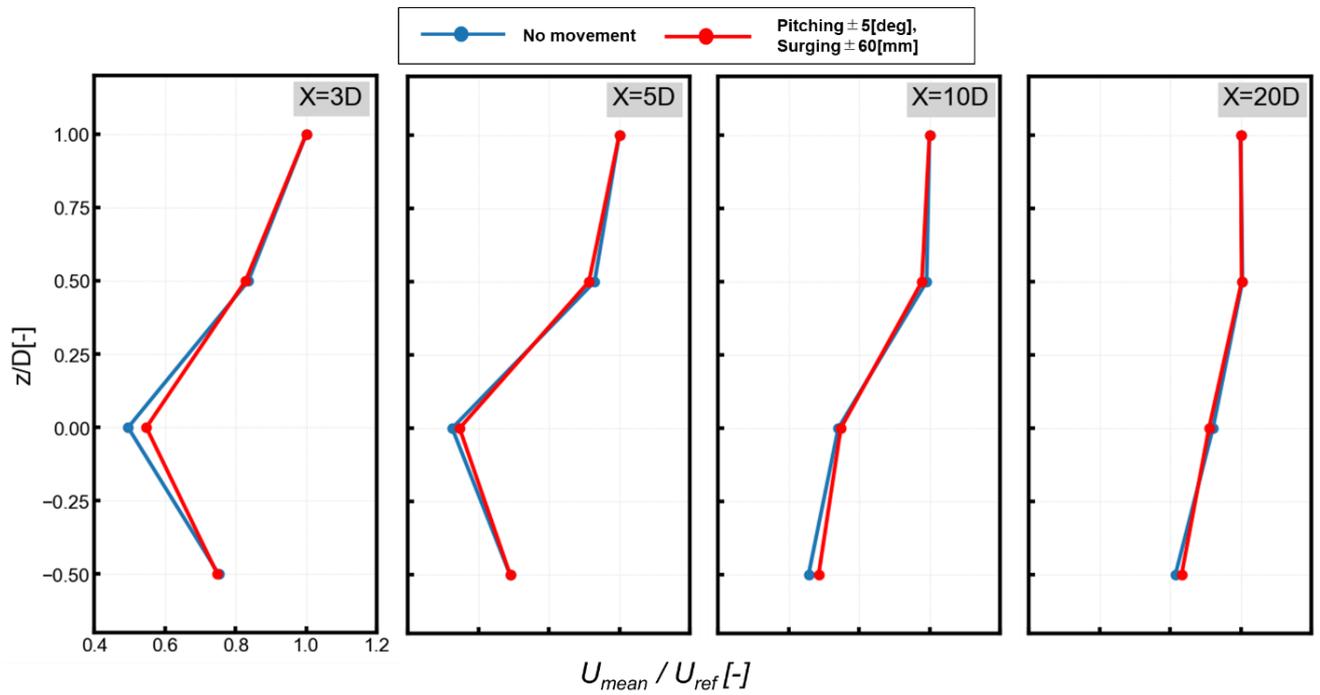


図 B.1 ピッチ動揺・サージ動揺と動揺なし状態を比較した風速の鉛直プロファイル

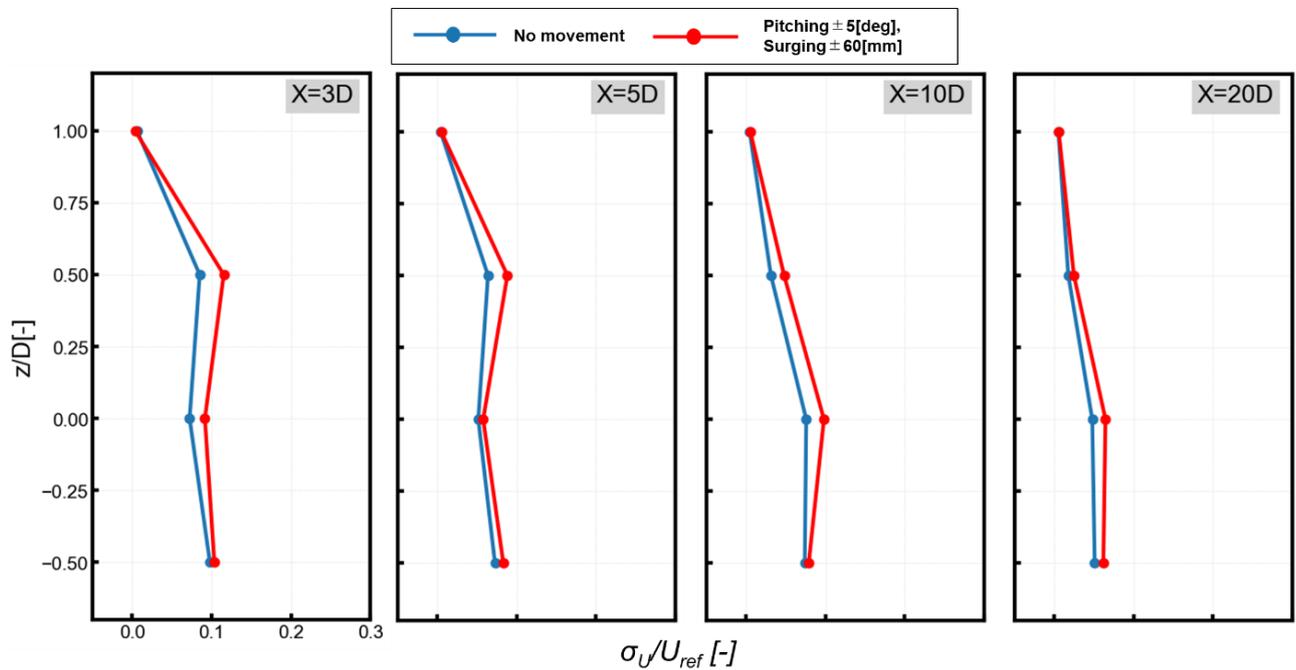


図 B.2 ピッチ動揺・サージ動揺と動揺なし状態を比較した
正規化した標準偏差の鉛直プロファイル

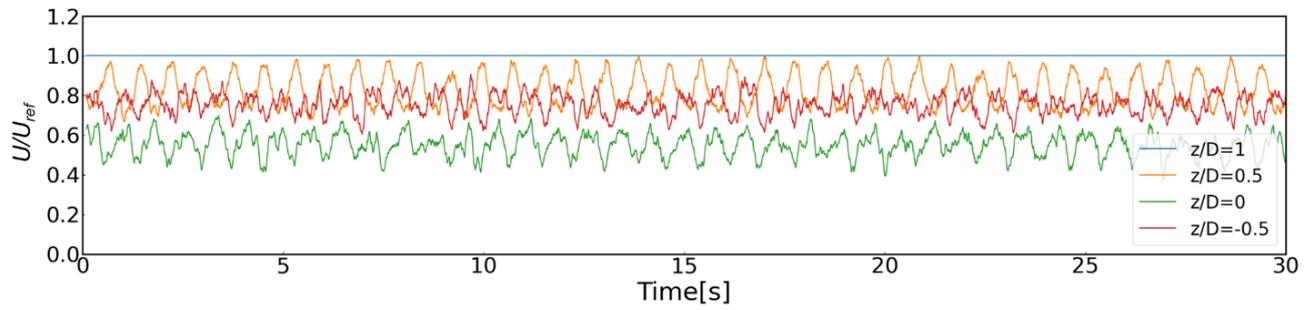


図 B.3 X=3D 地点，ピッチ動揺 ± 5 [deg]，サージ動揺 ± 60 [mm]状態での後流風速の時系列データ

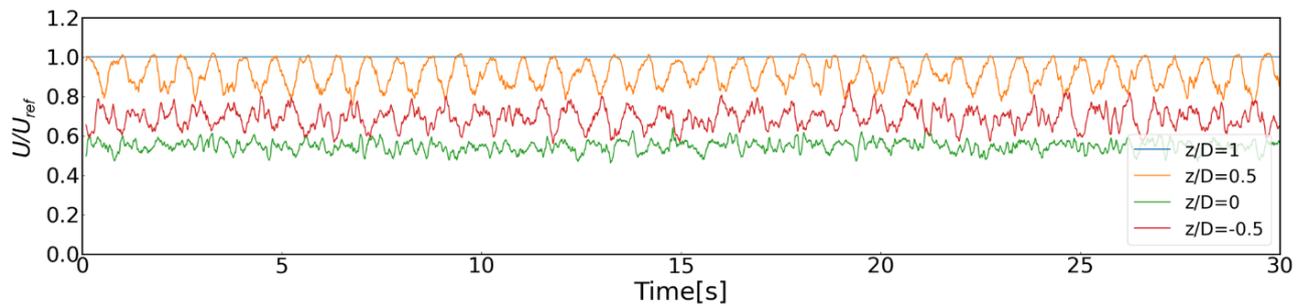


図 B.4 X=5D 地点，ピッチ動揺 ± 5 [deg]，サージ動揺 ± 60 [mm]状態での後流風速の時系列データ

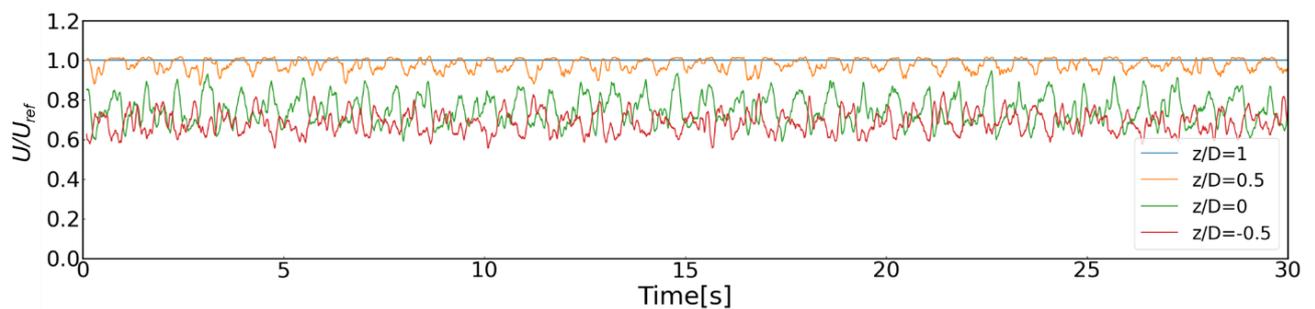


図 B.5 X=10D 地点，ピッチ動揺 ± 5 [deg]，サージ動揺 ± 60 [mm]状態での後流風速の時系列データ

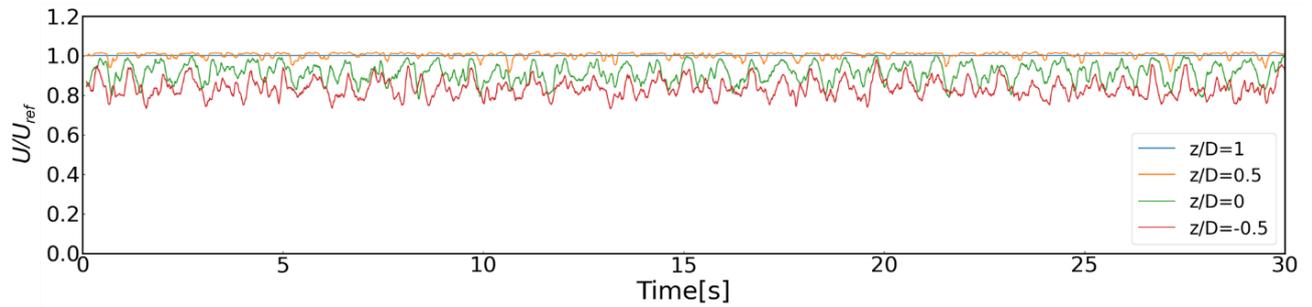


図 B.6 X=20D 地点，ピッチ動揺 ± 5 [deg]，サージ動揺 ± 60 [mm]状態での後流風速の時系列データ

B-2 加振装置に装着するカバーの考案

加振装置は、装置自体が大きいため、ブラフボディとしての影響が大きいことが考えられていた。そのため、加振装置を覆うために、図 B.7 のようなカバーを製作した。本節は、カバーを装着した状態、していない状態、図 B.8 のようなブラフボディの影響がないと考えられる状態の 3 つを比較し、製作したカバーの性能を確認した。



図 B.7 製作したカバーを加振装置に装着した様子



図 B.8 ブラフボディの影響がないデータとして参考にした風車模型の配置図

図 B.9 は、先述した 3 つの状態を比較した、風速の鉛直プロファイルである。この結果から、カバーを装着した状態の方が、ブラフボディの影響が小さいことが示唆される結果となった。しかし、下流方向 $5D$ の結果のみの計測となったため、後流の拡散に与える影響が考察しにくいこと、カバーによってタワーの影響を考慮しにくい観点から、本研究の一連の実験では使用していない。しかし、改良を重ねることで、実機に近い状況を模擬することができることが示唆された。

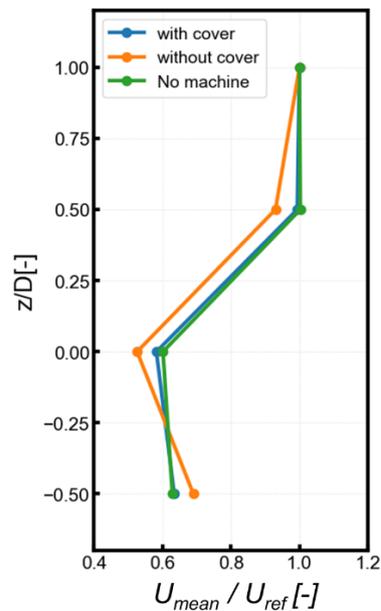


図 B.9 カバーの有無、ブラフボディの影響がない状況を比較した風速の鉛直プロファイル

B-3 乱れを有する流入風による後流計測

本研究の一連の実験で使用している流入風は、速度シアのない一様流である。本節では、風洞内の流入口に図 B.10 のようなブロックを設置し、意図的に乱れを引き起こした流入風による、後流計測を行ったので、それについて記述する。

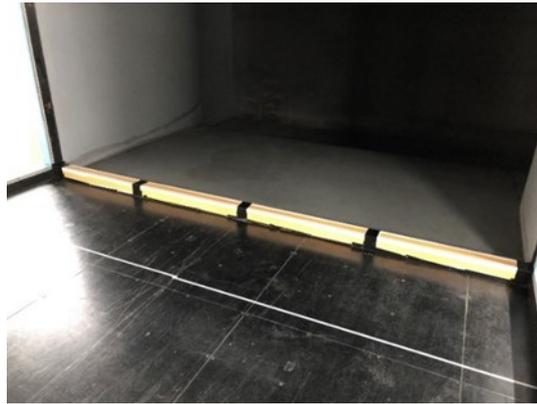


図 B.10 流入口にブロックを設置した様子

図 B.11 に $X=-0.7D$, $Y=0$, $Z=0$ で計測した流入風速の時系列データを示す。非常に小さい乱れであり、 $\sigma_U/U_{ref} = 0.005$ であった。一様流と乱れを有する流入風で比較した風速の鉛直プロファイルを図 B.12 に示す。 $z/D=-0.5$ 地点で、タワーによって剥離した渦による低速域が、流入風の乱れによって、わずかに風速の回復が早いことを確認できる。一様流と乱れを有する流入風で比較した標準偏差の鉛直プロファイルを図 B.13 に示す。全ての結果より、乱れを有する流入風の場合、わずかに乱れが大きくなっていることを確認できる。この結果から、風速の鉛直プロファイルで確認された、風速の回復が早い傾向は、乱れによって後流内部とのエネルギーの交換が促進したことによるものであると考えられる。

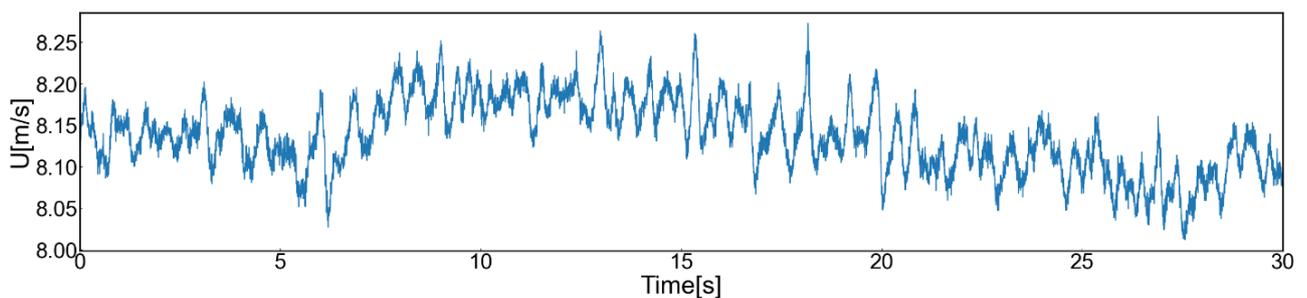
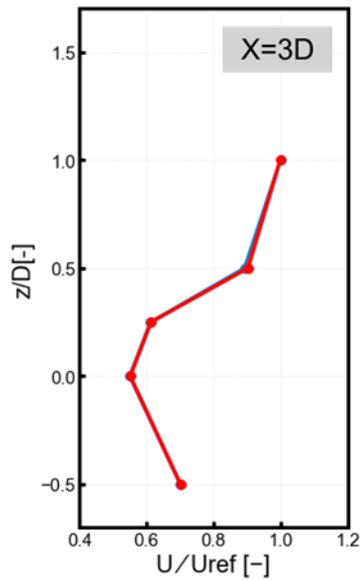
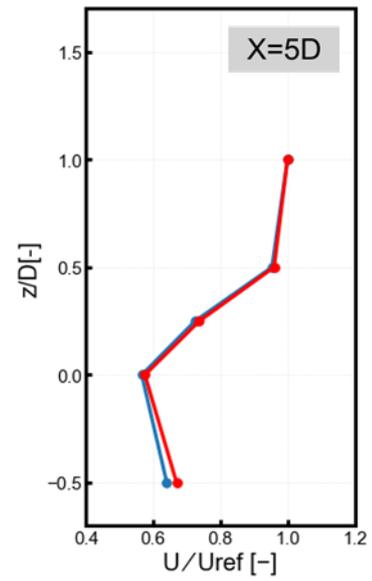


図 B.11 $X=-0.7D$, $Y=0$, $Z=0$ で計測した流入風速の時系列データ



(i) 動揺なし, X=3D



(ii) 動揺なし, X=5D

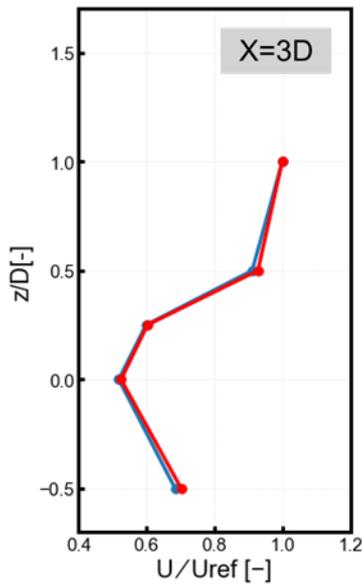
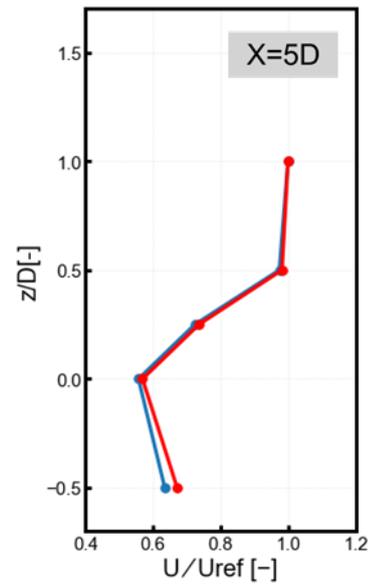
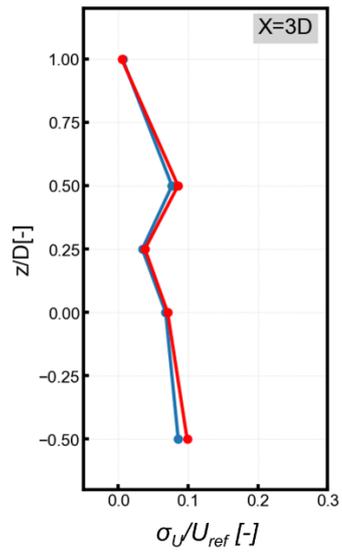
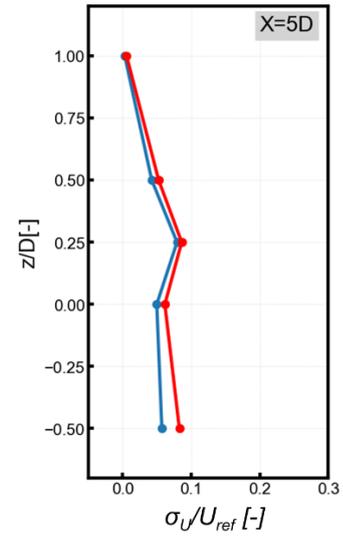
(iii) ピッチ動揺 $\pm 5[\text{deg}]$, X=3D(iv) ピッチ動揺 $\pm 5[\text{deg}]$, X=5D

図 B.12 流入風による風速の鉛直プロファイルの比較

(赤線：乱れを有する流入風，青線：一様流)



(i) 動揺なし, X=3D



(ii) 動揺なし, X=5D

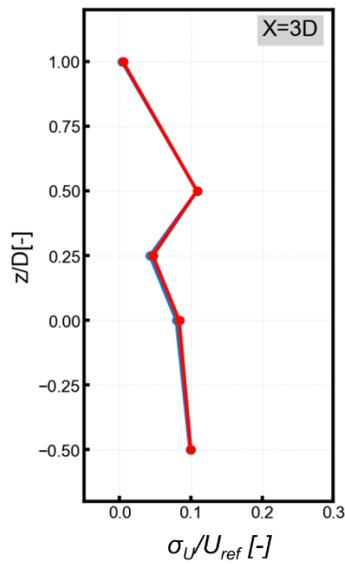
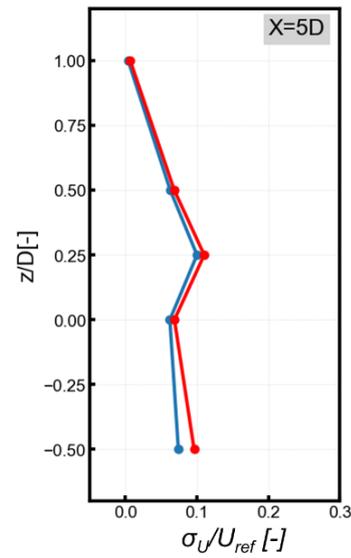
(iii) ピッチ動揺 ± 5 [deg], X=3D(iv) ピッチ動揺 ± 5 [deg], X=5D

図 B.13 流入風による標準偏差の鉛直プロファイルの比較

(赤線：乱れを有する流入風，青線：一様流)

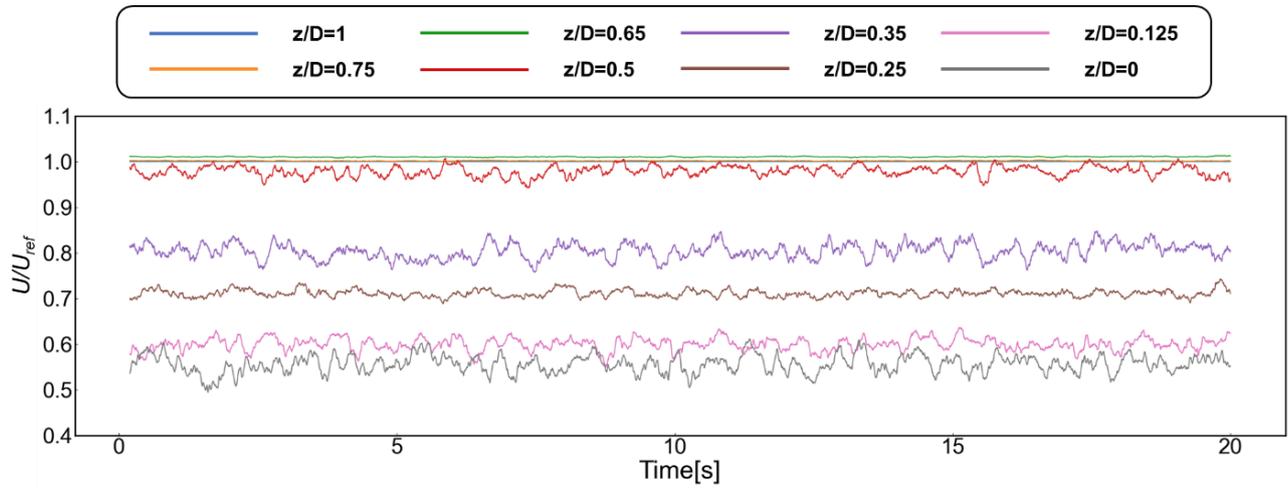
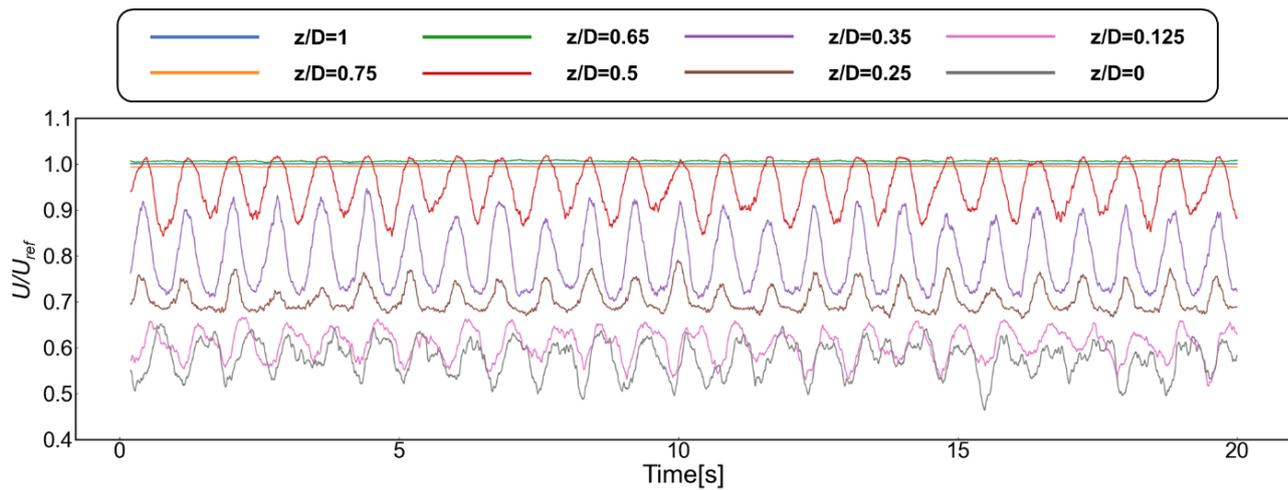
B-4. 風車後流の多点での気流計測

本節では、ピッチ動揺が、鉛直方向の距離毎にどのように影響を与えるかを検討すべく、ロータ中心から鉛直方向正の方向に向け、多点で後流の気流計測を行った。実験方法は、設置した熱線流速計をトラバーサによって制御し、風速の計測を行った。実験条件を表 B.1 に示す。

表 B.1 多点で行った後流計測の実験条件

パラメータ	値
流入風速[m/s]	8
周速比[-]	4.25
ロータ回転数[rpm]	1469
サンプリング周波数[Hz]	500
計測時間（ピッチ動揺）[s]	50
計測時間（動揺なし）[s]	40
カットオフ周波数（熱線流速計）[Hz]	300
レイノルズ数[-]（ブレード直径に基づく）	1.9×10^5

図 B.14～B.17 に、動揺状態、後流測定距離別で、風速の時系列データを示す。時系列データは、0.1[s]の移動平均処理を施し、 $z/D=1.0$ の結果で無次元化している。動揺なし状態の場合、 $X=3D$ 時では、 $z/D=0.5$ まで、後流域内にあるが、 $X=5D$ 時には、後流域が狭まり、 $z/D=0.35$ までが後流域内となる結果となった。また、 $z/D=0.25$ の値は下流方向の距離が大きくなると、大きく風速の回復が確認されたが、ロータ中心付近は、大きな風速の回復は確認されなかった。ピッチ動揺状態の場合、 $X=3D$ 時では、翼端付近でピッチ動揺の影響が顕著に現れたが、 $X=5D$ 時では、 $z/D=0.25 \sim 0.35$ 付近で動揺の影響が現れた。また、両方の結果から、 $z/D=0.65$ 付近は、後流域外であり、後流域の境界は非常にセンシティブであることが確認された。

図 B.14 $X=3D$ 地点で測定した動揺なし状態の風速の時系列データ図 B.15 $X=3D$ 地点で測定したピッチ動揺 $\pm 5[\text{deg}]$ 状態の風速の時系列データ

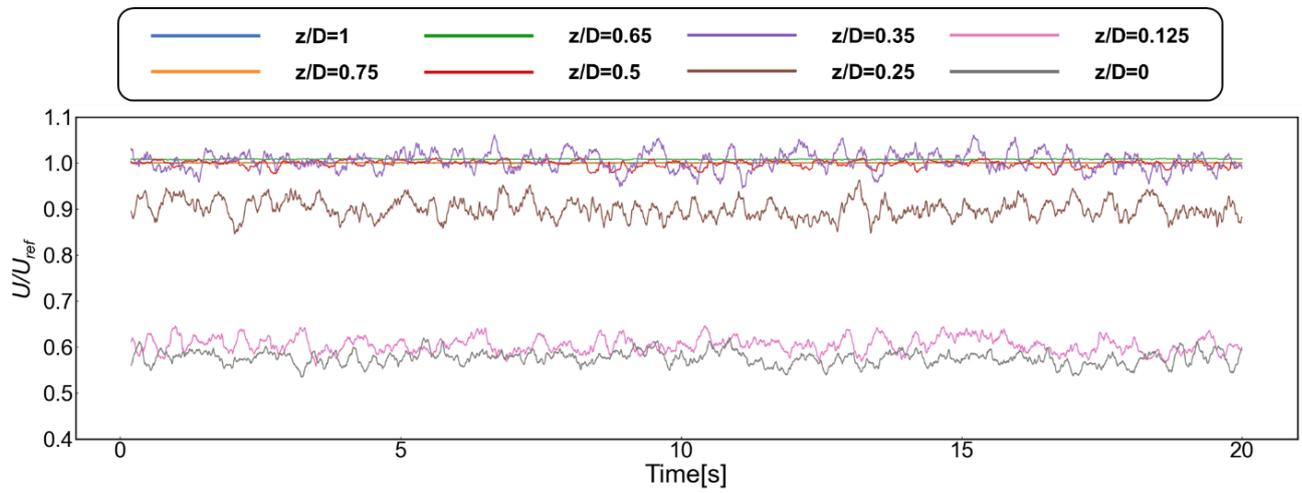


図 B.16 $X=5D$ 地点で測定した動揺なし状態の風速の時系列データ

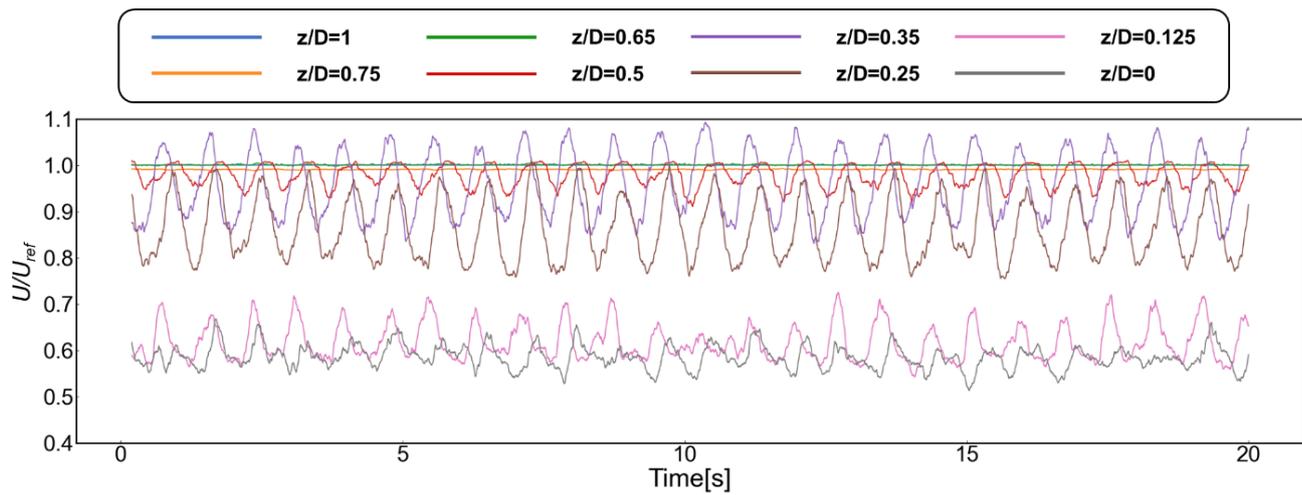


図 B.17 $X=5D$ 地点で測定したピッチ動揺 ± 5 [deg]状態の風速の時系列データ