

NEDO先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/
大型風洞設備による浮体式風車ウエイク現象の
評価技術の研究開発

発表：2026年7月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

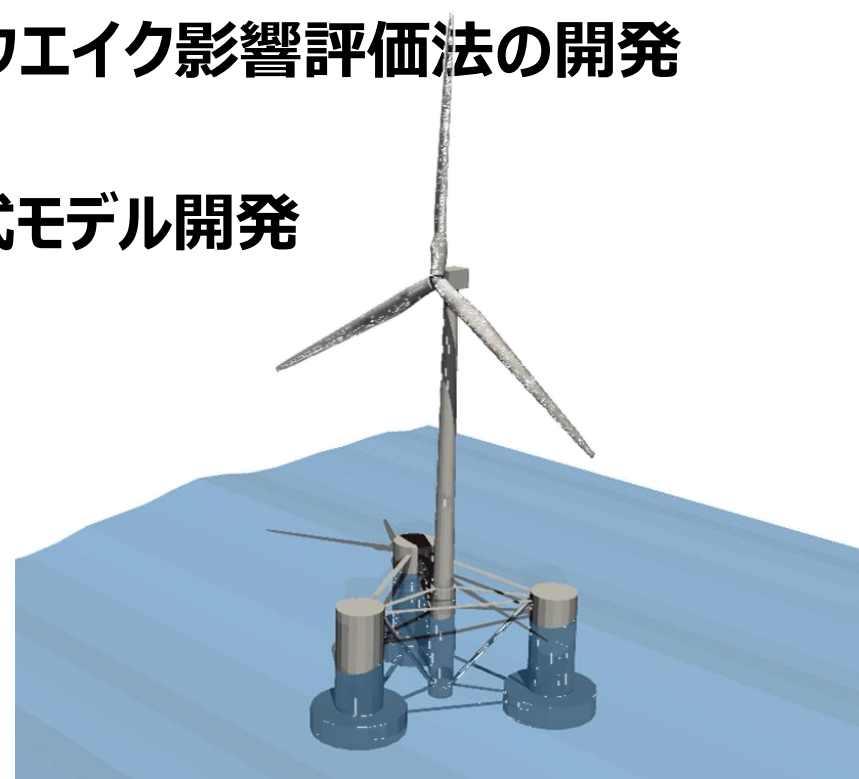
発表者名:(株)東芝 谷山 賀浩

団体名 :(国)九州大学(応用力学研究所、情報基盤研究開発センター)、(株)東芝、カナデビア(株)、日本精工(株)

問い合わせ先: 株式会社東芝 E-mail:yoshihiro.taniyama.d82@mail.toshiba

Contents

- 01 事業目的と概要・実施体制
- 02 研究項目Ⅰ：浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発
- 03 研究項目Ⅱ：状態監視技術を活用した風車ウエイク影響評価法の開発
- 04 研究項目Ⅲ：浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発
- 05 風洞実験から実サイトへの展開
- 06 まとめ



Contents

01 事業目的と概要・実施体制

02 研究項目Ⅰ：浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発

03 研究項目Ⅱ：状態監視技術を活用した風車ウエイク影響評価法の開発

04 研究項目Ⅲ：浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発

05 風洞実験から実サイトへの展開

06 まとめ

事業の目的と概要

浮体動揺を伴う洋上風車ウエイク現象の解明と、その高精度な予測・評価技術の確立を目的に、下記3項目を推進

I. 浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発

大型風洞設備を用い、浮体式風車特有のウエイク現象と
その相互干渉現象の正確な理解、およびこれらの予測評価技術を開発

15MW級浮体式風車をモチーフに風洞実験用風車模型と浮体動揺を模擬する加振装置を設計・製作。
風洞実験にてウエイク、ウエイクの相互干渉を再現、その挙動を分析・評価。



II. 状態監視技術を活用した風車ウエイク影響評価法の開発

沿岸域の風力発電所を対象に、リモートセンシング技術による気流観測と
その観測結果と連携した状態監視技術による風車ウエイク影響の評価

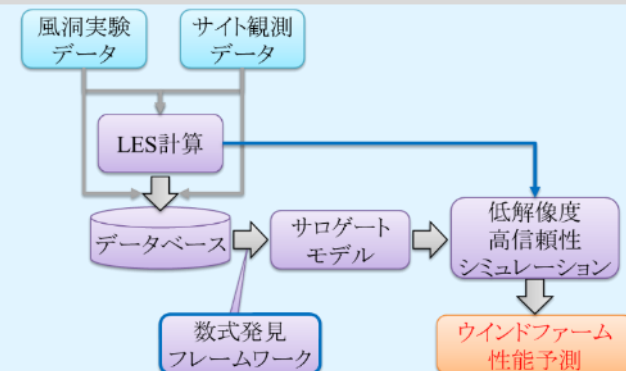
秋田県沿岸に立地する風力サイトにおいて流入風・ウエイク風況と風車挙動を観測、
相関性を評価。



III. 浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発

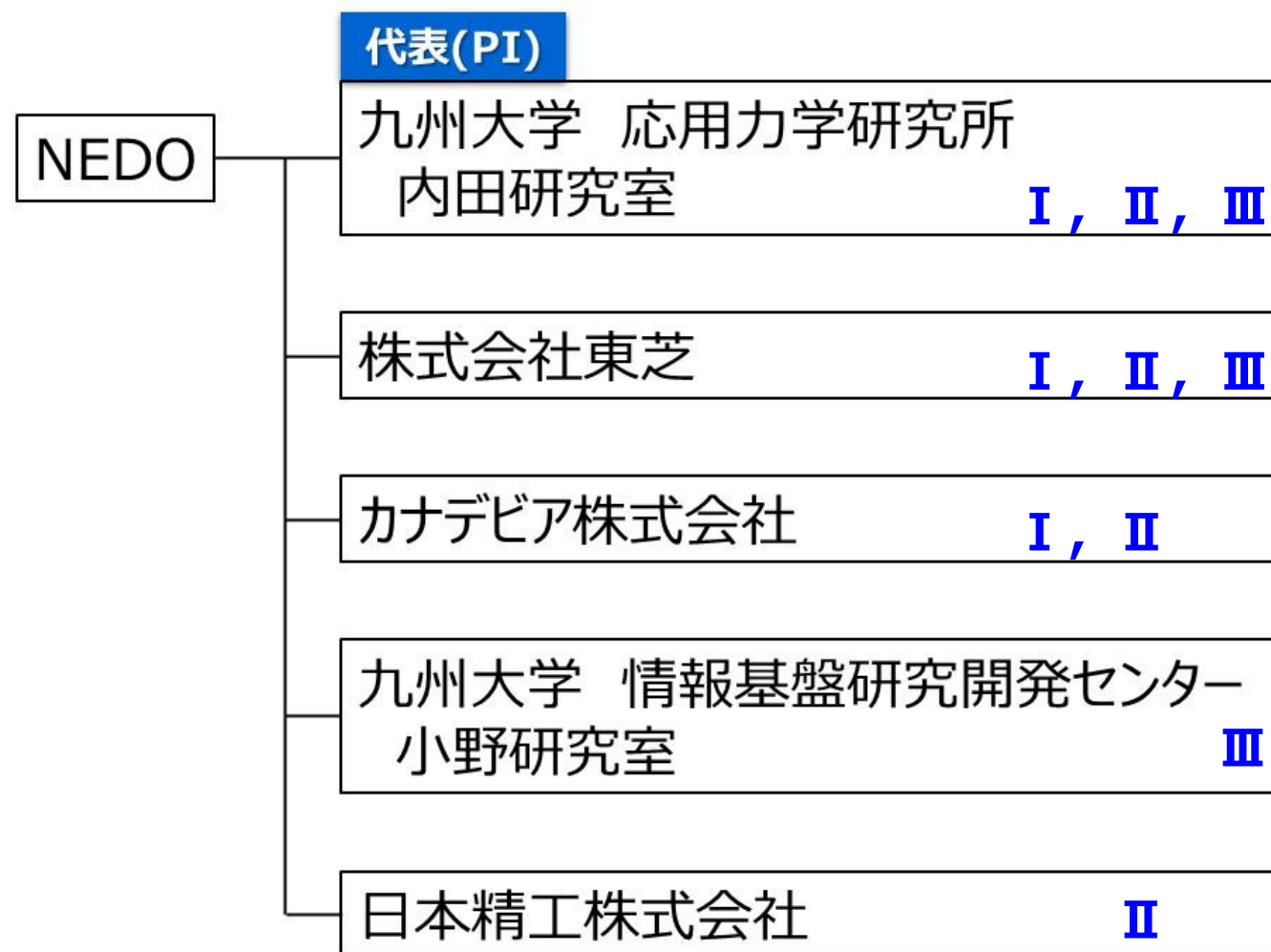
風洞実験・野外観測・数値シミュレーションから得られるデータに対して
データ駆動科学手法を適用、工学モデルを開発

風車間の非線形相互干渉を再現する解析手法を確立。
ウエイクデータベースにより、サロゲートモデルを構築。



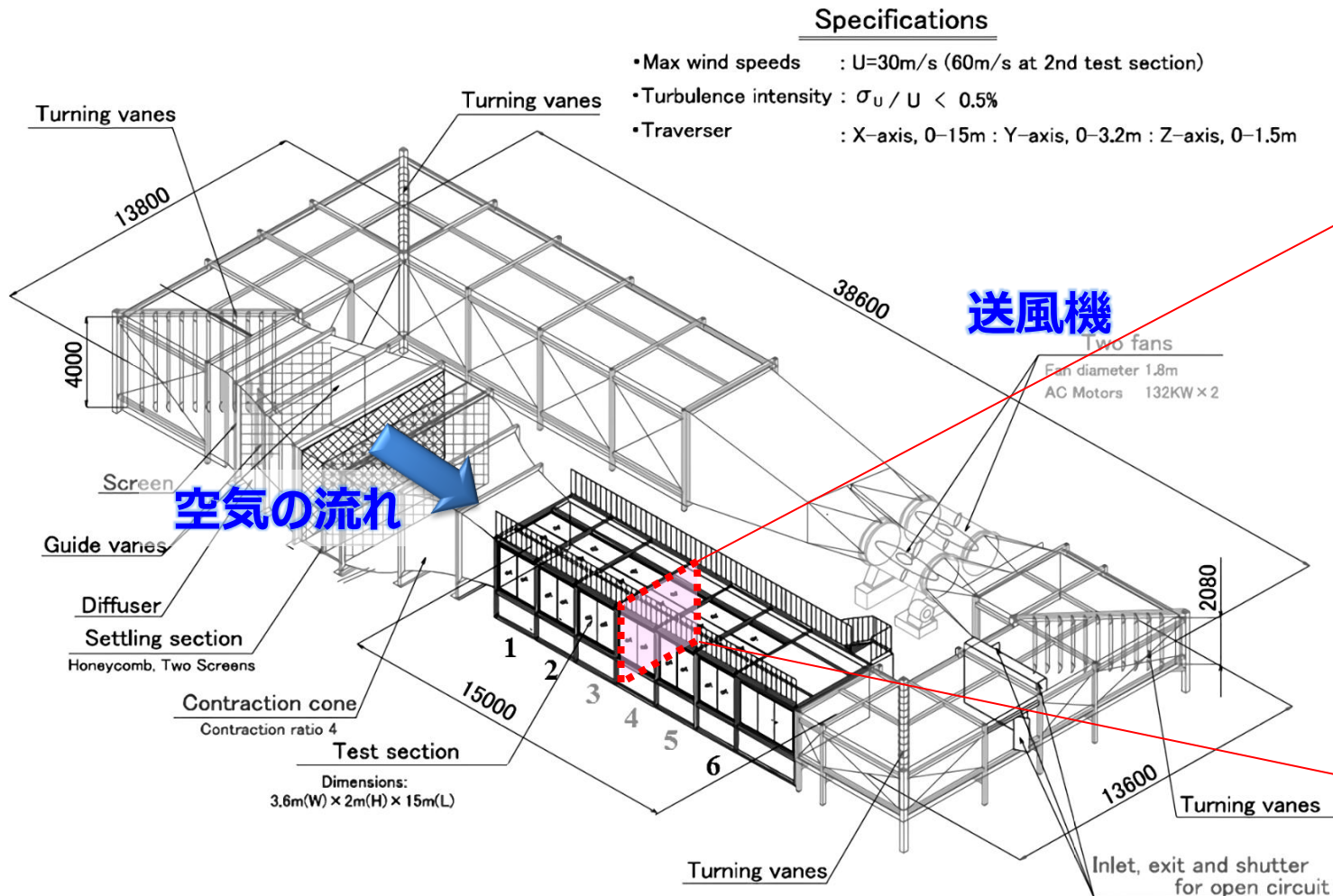
実施体制

九大応力研を筆頭に、5機関体制で実施。3つの研究項目を協働して推進。



風洞仕様

長さ15m×幅3.6m×高さ2mの測定胴を有する大型境界層風洞を活用



風洞仕様に対応した風車模型を設計

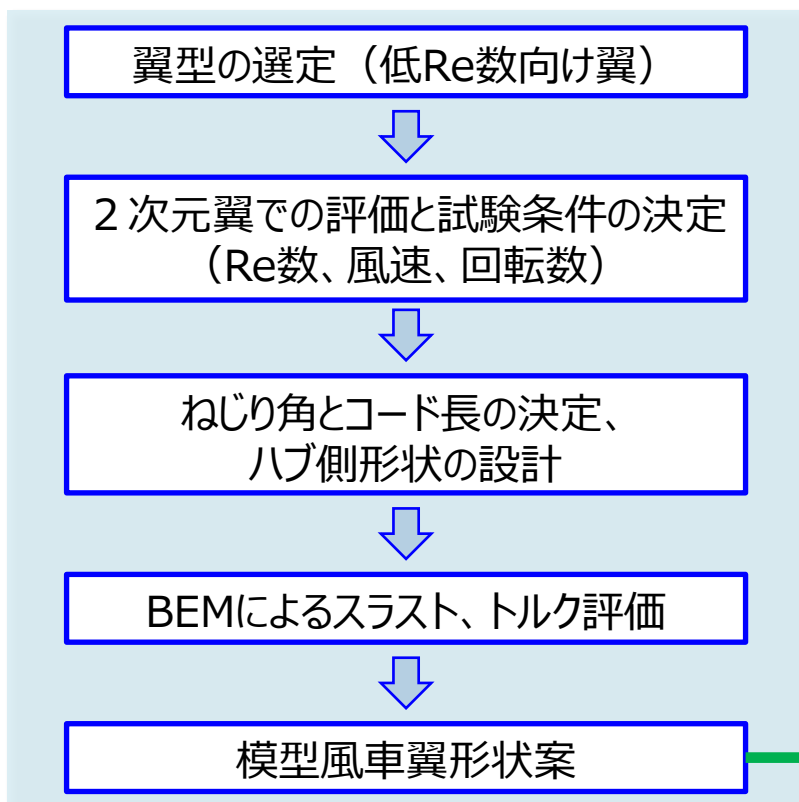
九州大学応用力学研究所 大型境界層風洞

風洞実験向け風車模型の設計

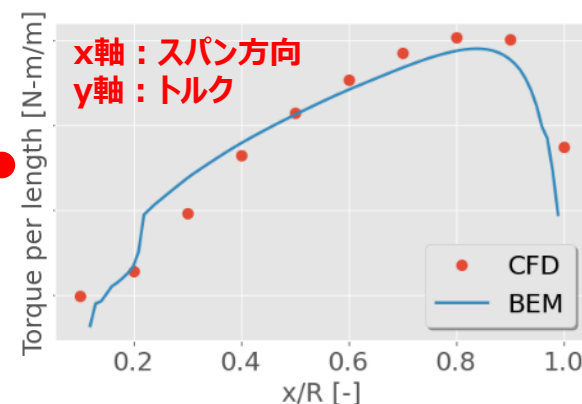
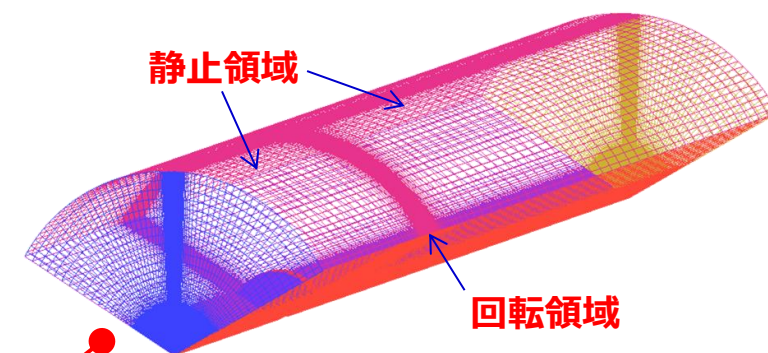
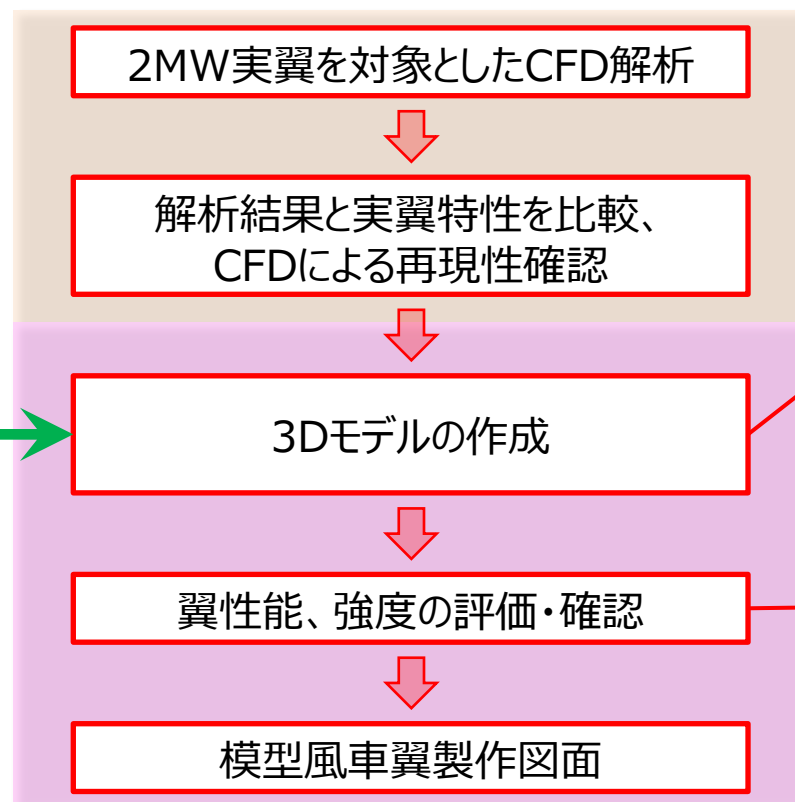
15MW級風車をモチーフに風洞仕様に対応する低Re数型ブレードを設計

- スケール比1/240、風洞Re数(10^4 オーダー)にて、翼性能が十分な翼型を設計
- ①簡易計算にて翼形状を決定し、②3D-CFDにて解析、翼性能・強度を確認

①簡易計算による翼型の検討



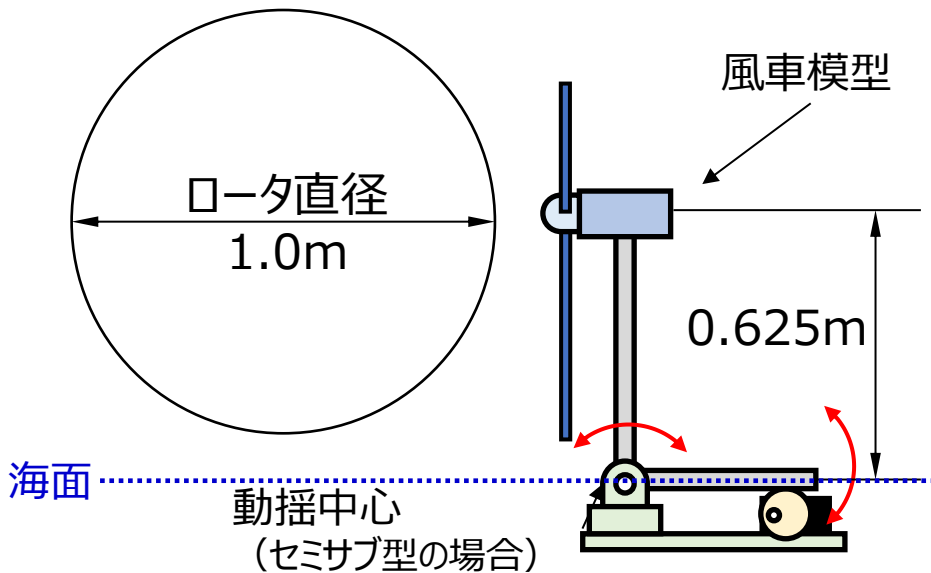
②3D-CFDによる翼型の決定



風洞実験向け浮体動揺模擬加振装置の設計

セミサブ・バージ・スパー型の3種の浮体形式の6自由度の動揺条件を分析

- 加振装置の要求仕様は、
動揺振幅：±3deg
動揺周期：0.9s～
- ストローハル数を相似則に用い、
実機－模型間の相対的な流入
風速の変化率を揃える



2台の同期・位相差の
コントロールが可能

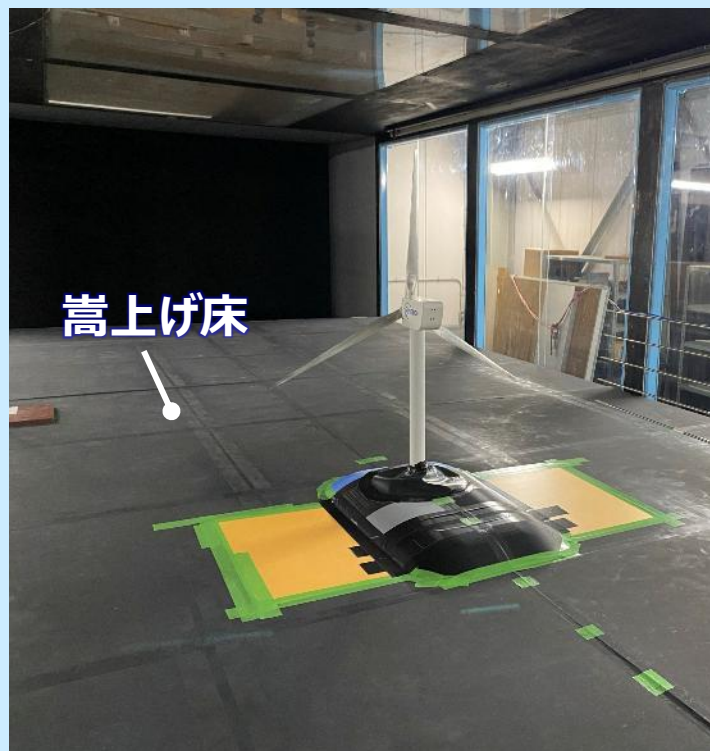
項目	15MW級実機	風洞実験条件	実験装置設計条件
ロータ直径 [m]	240	1	1
ハブ高さ [m]	150	0.625	0.625
風速 [m/s]	8.5	7.4	最大 12.0
浮体動揺周期 [sec]	188	0.9	最短 0.9
浮体動揺最大振幅 [deg]	3	3	±1、±3の2段階

風洞実験基盤の構築①

最適ブレード回転数・トルクの自動制御と時系列データ取得を統合した自動計測システムを整備

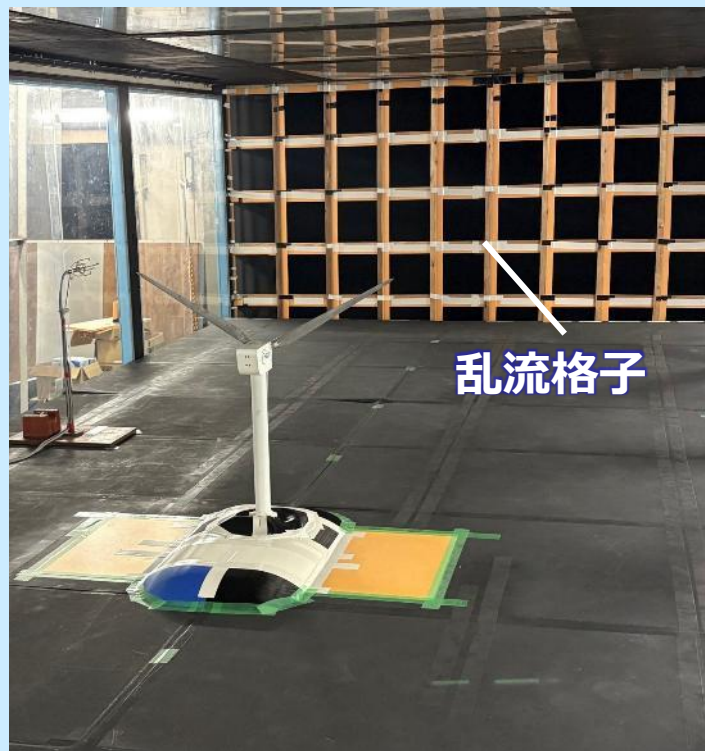
1 単基風車試験

風速の多点計測



2 乱流格子試験

洋上自然風の乱れを再現



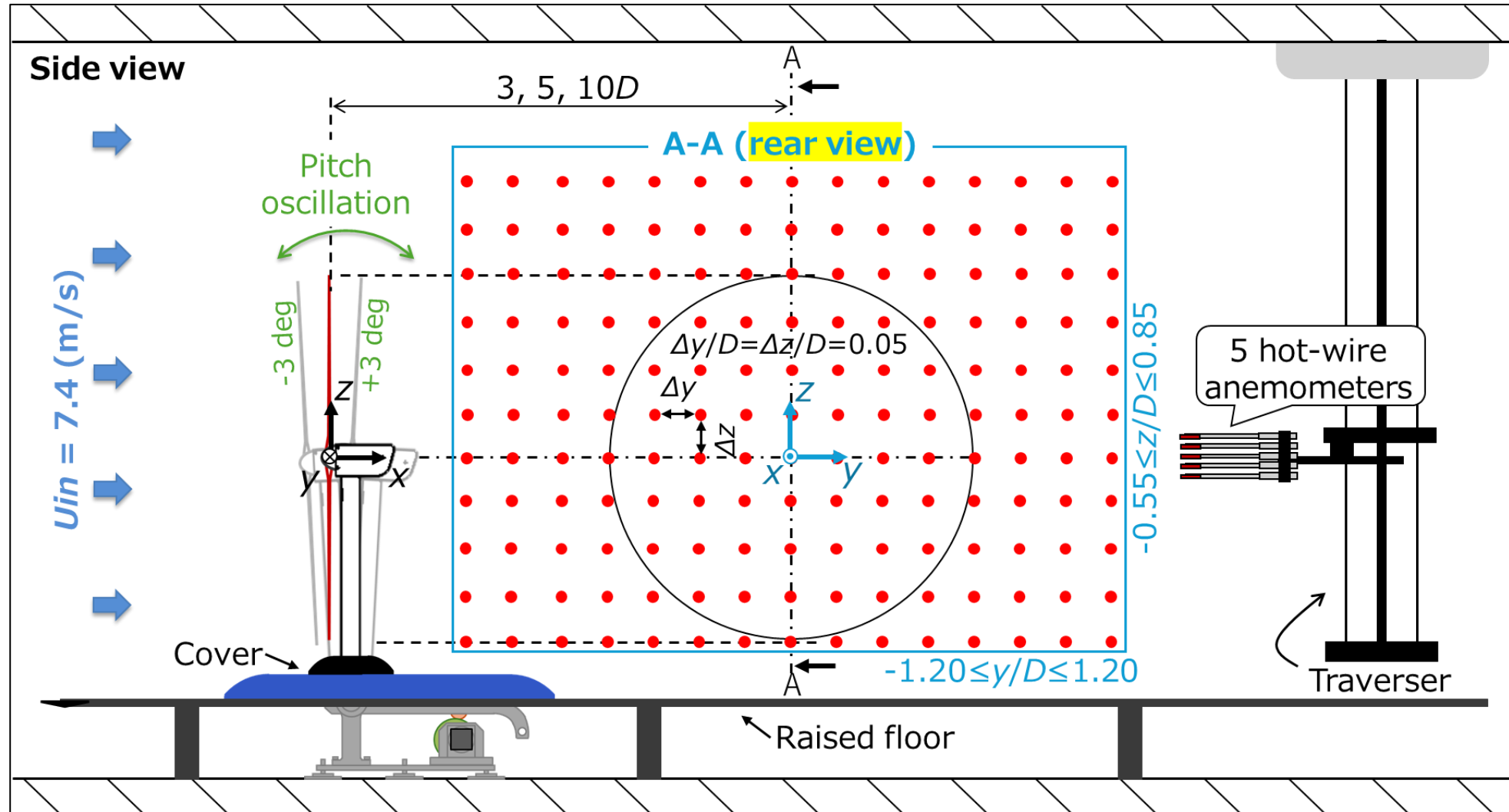
3 2基風車試験

風荷重・発電性能の時系列計測



風洞実験基盤の構築②

$x/D=3, 5, 10$ の後流位置で1200点超のウエイク風速を計測

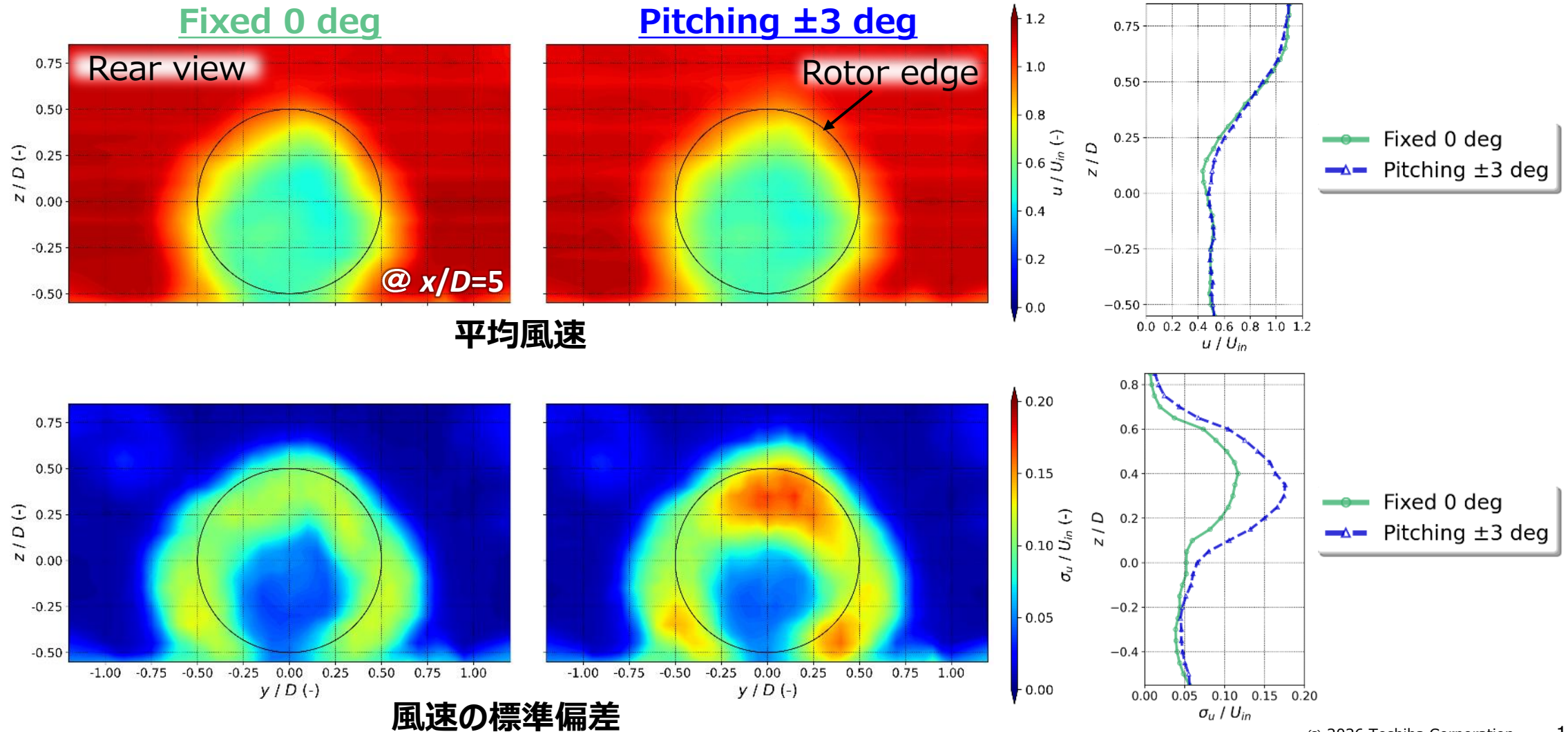


風洞実験の様子



風洞実験結果 ①シングルウェイク(時間平均)

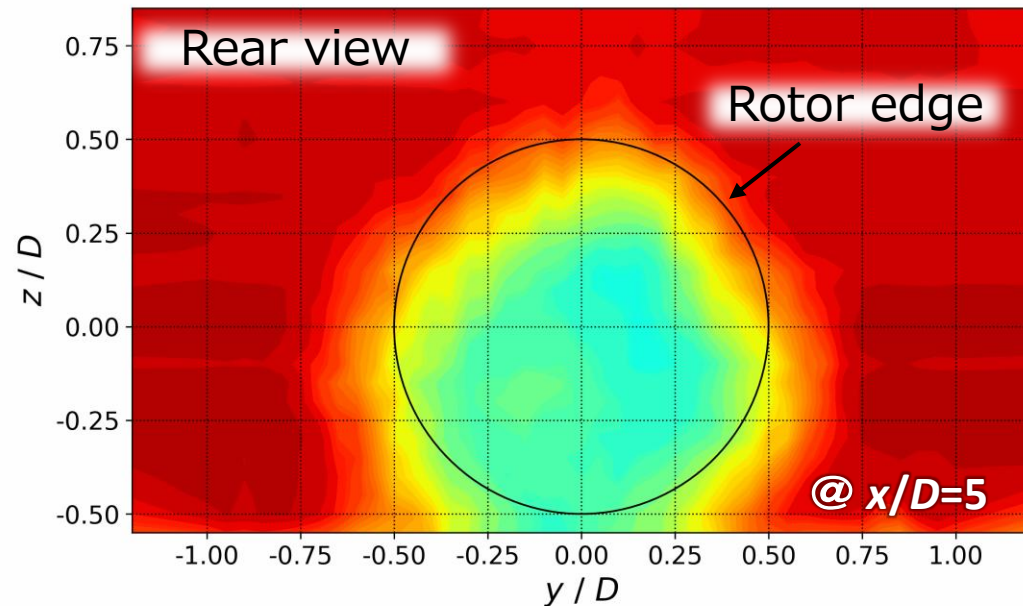
ピッチ動揺により、風速はハブ高位置で増加、標準偏差は翼上下端位置にてそれぞれ増加



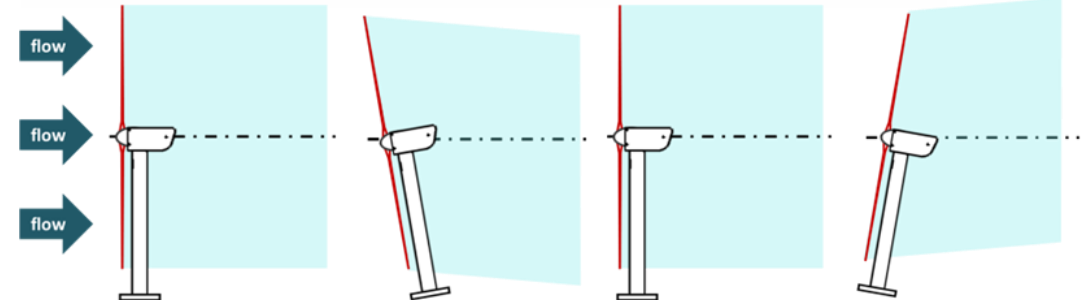
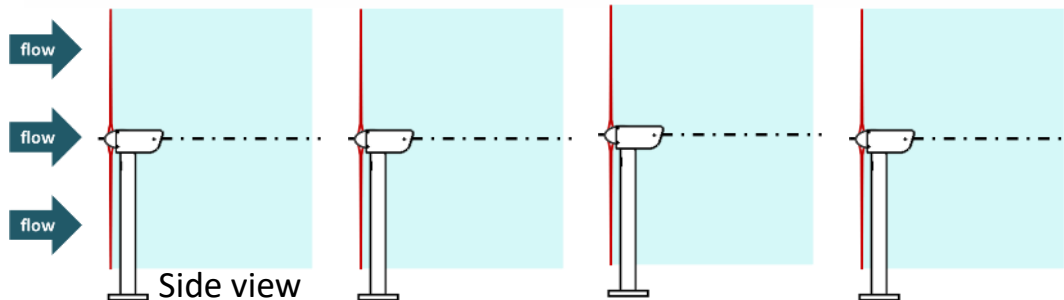
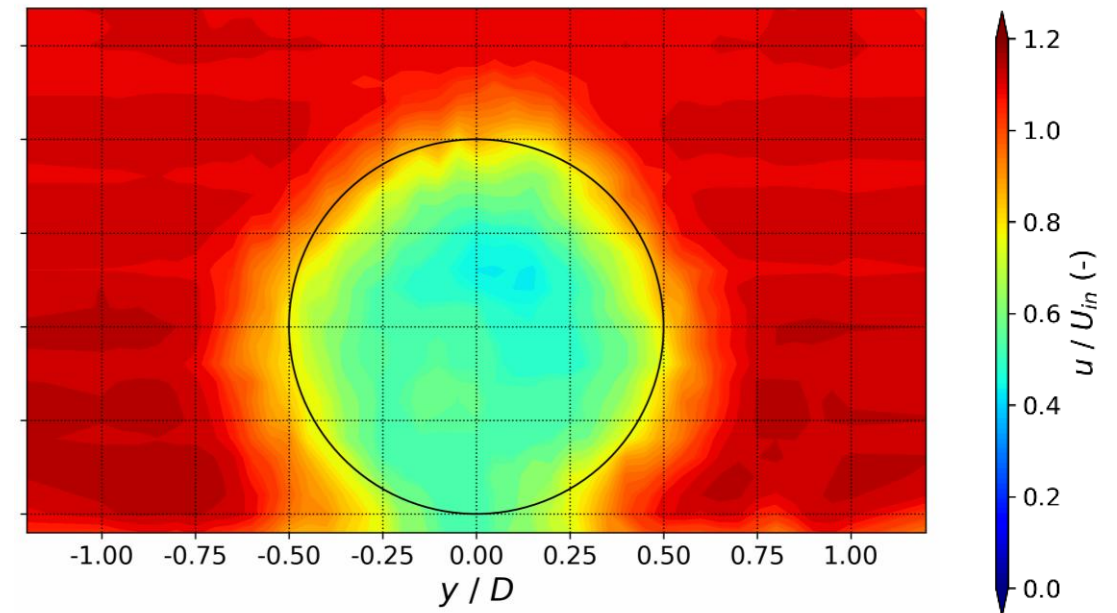
風洞実験結果 ②シングルウェイク(位相平均)

ピッチ動揺により、ウェイクは上下に蛇行、床面(海面)の影響を受けて楕円形状になることを確認

Fixed 0 deg

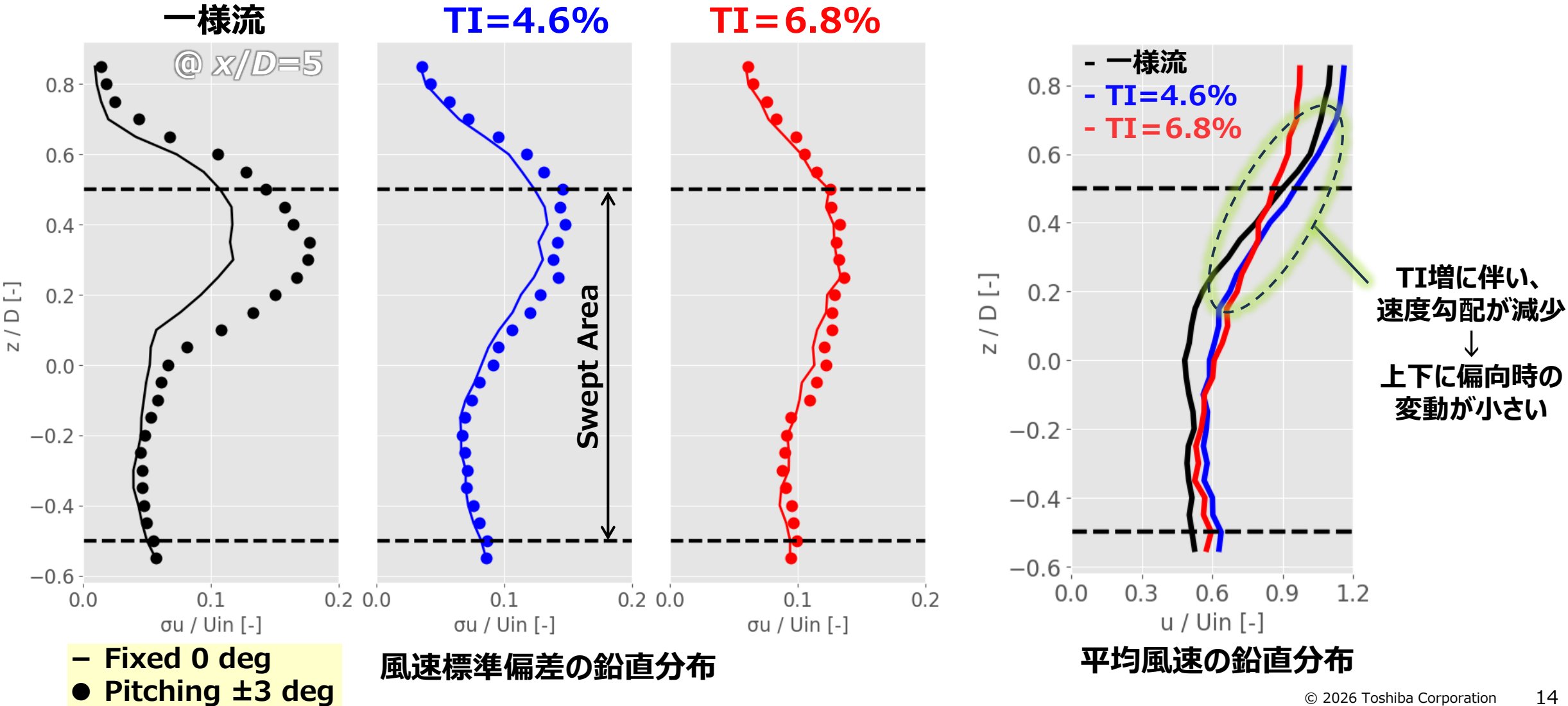


Pitching ± 3 deg



風洞実験結果 ③乱流強度による差異(時間平均)

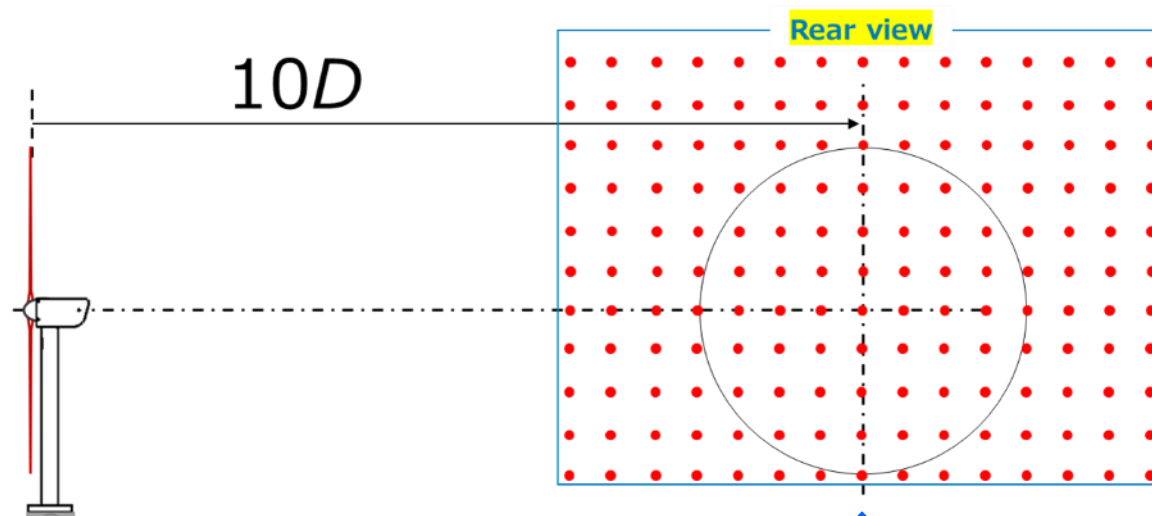
流入乱流強度が増加するに従い、ピッチ動揺に伴う標準偏差の増加傾向は縮小



風洞実験結果 ④ウエイクの相互干渉(計測位置)

単基、2基のいずれも、上流側風車から10D後流位置のウエイクを計測

単基

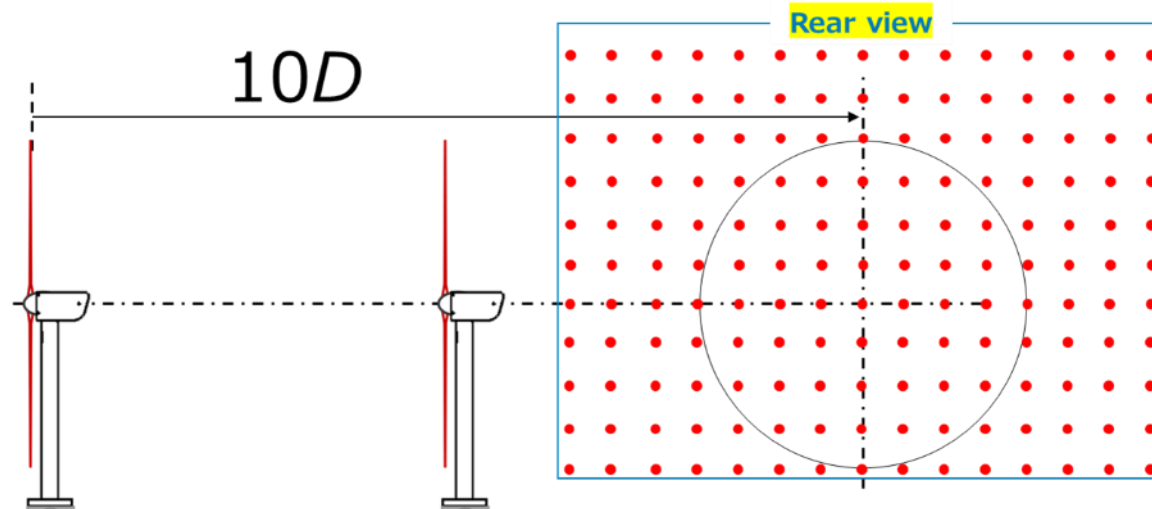


x/D =位置の断面を計測



上流風車からの位置は同じ

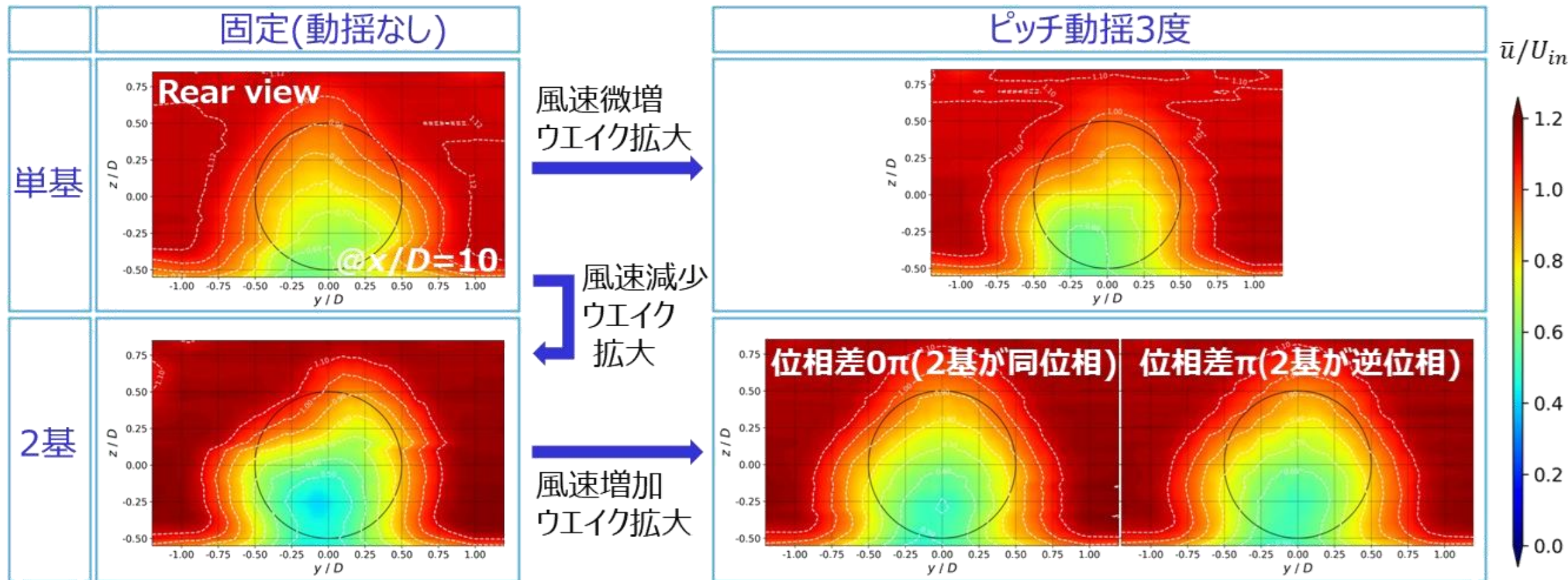
2基



2基目の $x/D = 5$ 後流位置を計測
(1基目の $x/D = 10$ 後流位置)

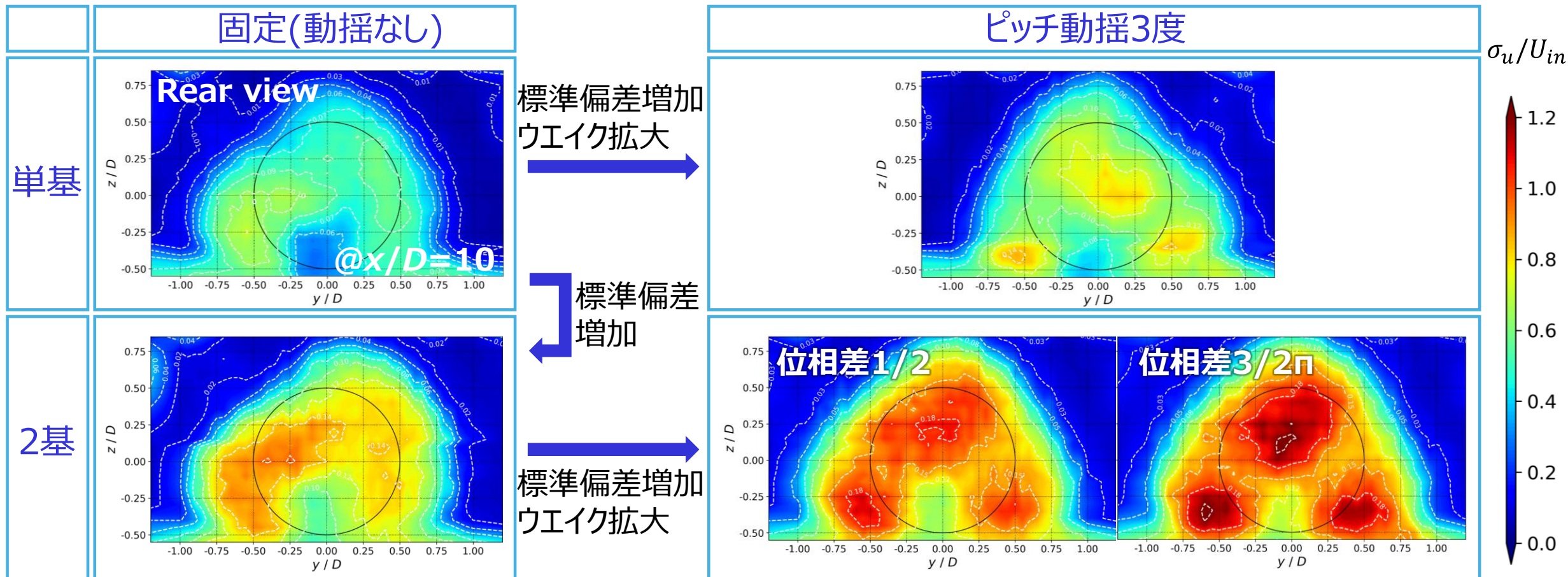
風洞実験結果 ⑤ウエイクの相互干渉(風速)

2基風車の配置関係、動揺位相差が平均風速場、乱流、発電量変動に大きく影響を与える



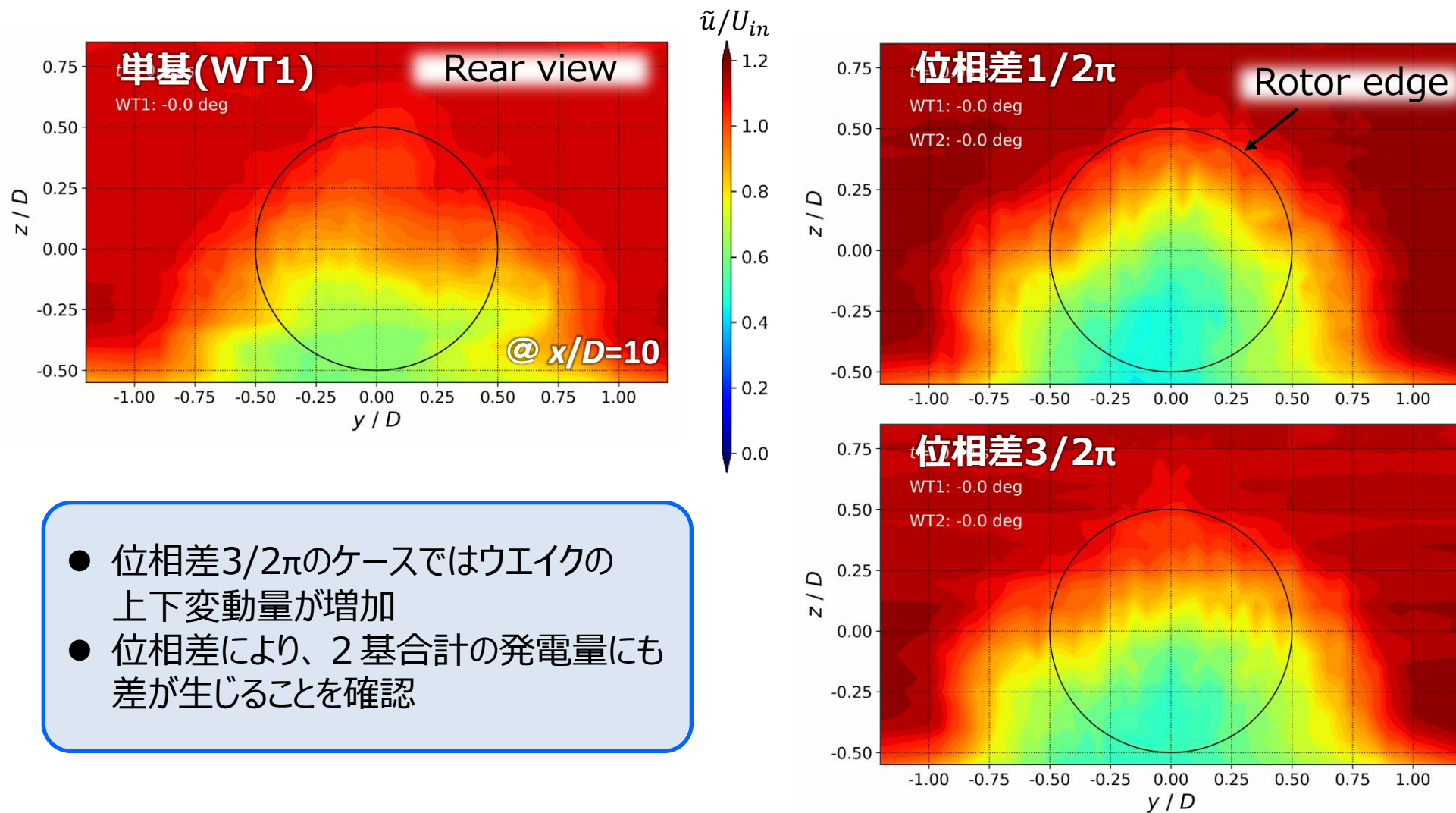
風洞実験結果 ⑥ウエイクの相互干渉(標準偏差)

2基風車の配置関係、動揺位相差が平均風速場、乱流、発電量変動に大きく影響を与える



風洞実験結果 ⑦ウエイクの相互干渉(位相平均)

相互干渉により形成されるウエイク挙動は、上流風車ウエイクの変動とピッチ位相の影響を受ける

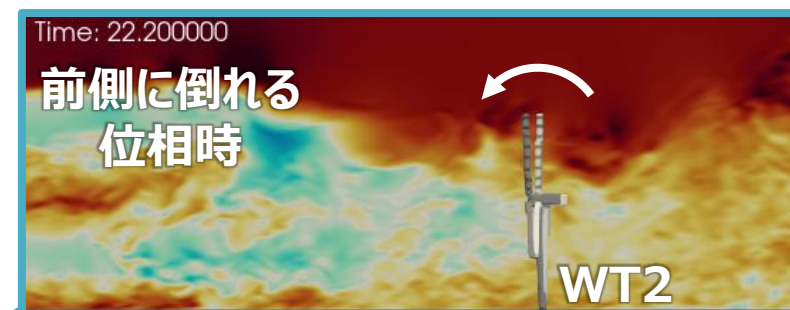
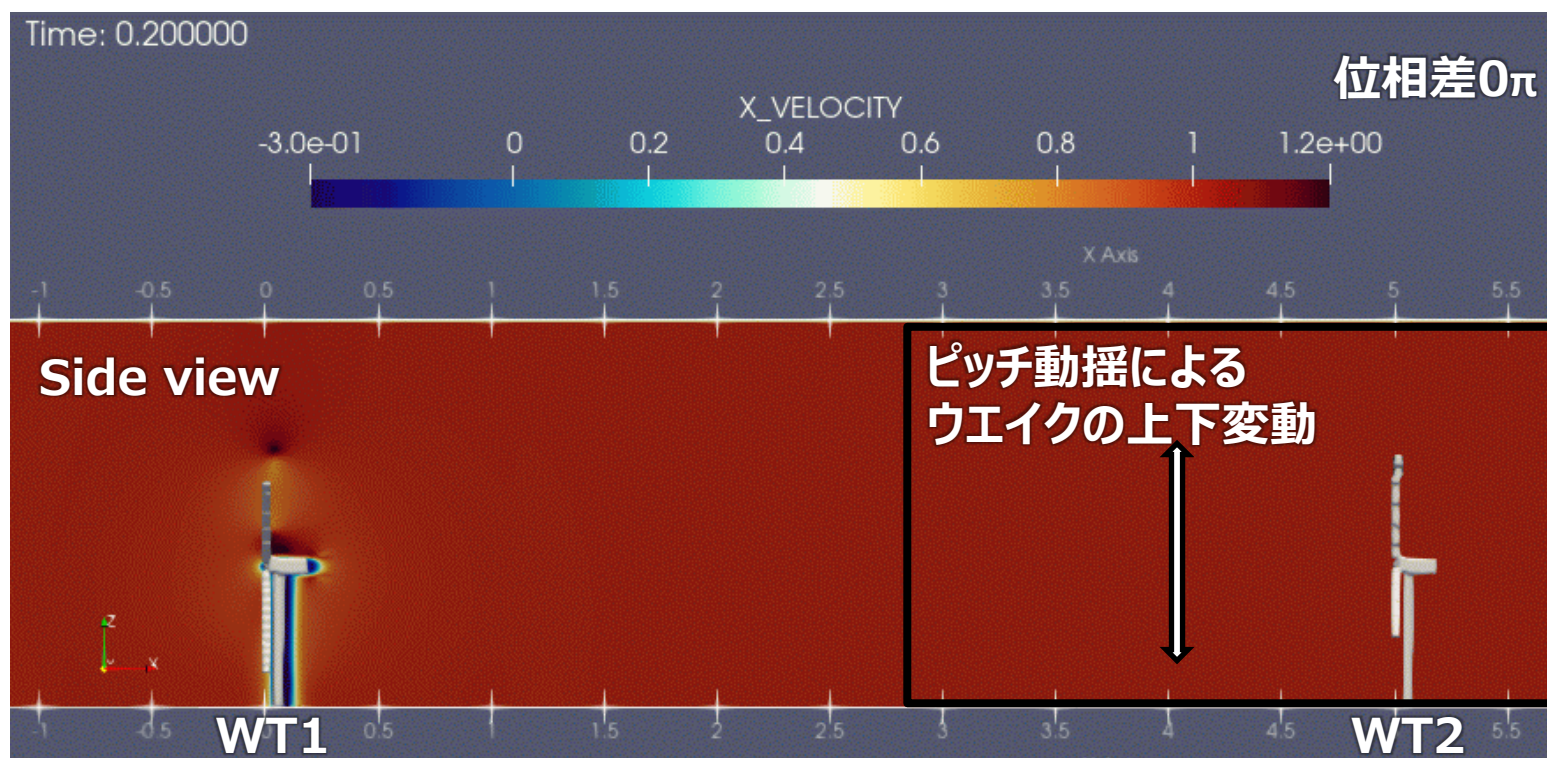


- 位相差 $3/2\pi$ のケースではウエイクの上下変動量が増加
- 位相差により、2基合計の発電量にも差が生じることを確認

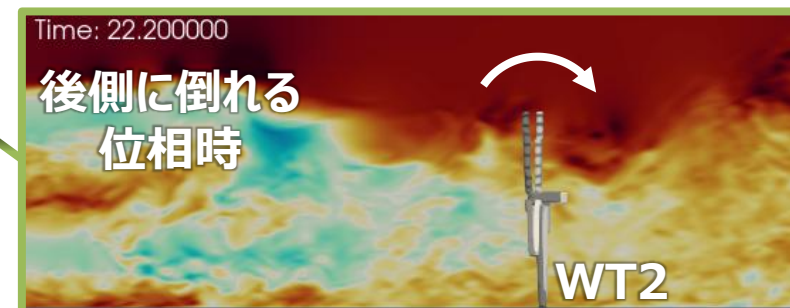
数値解析モデルの高度化と妥当性検証

上流風車のウェイクが下方向に変位時、下流風車が前側に倒れる位相時に標準偏差が増加

- 下流側風車のピッチ動揺が前方方向の場合、相対風速の増加により、発電量の標準偏差が極端に増加する



発電量の標準偏差が**2.5倍**に増加



発電量の標準偏差が**1.5倍**に増加

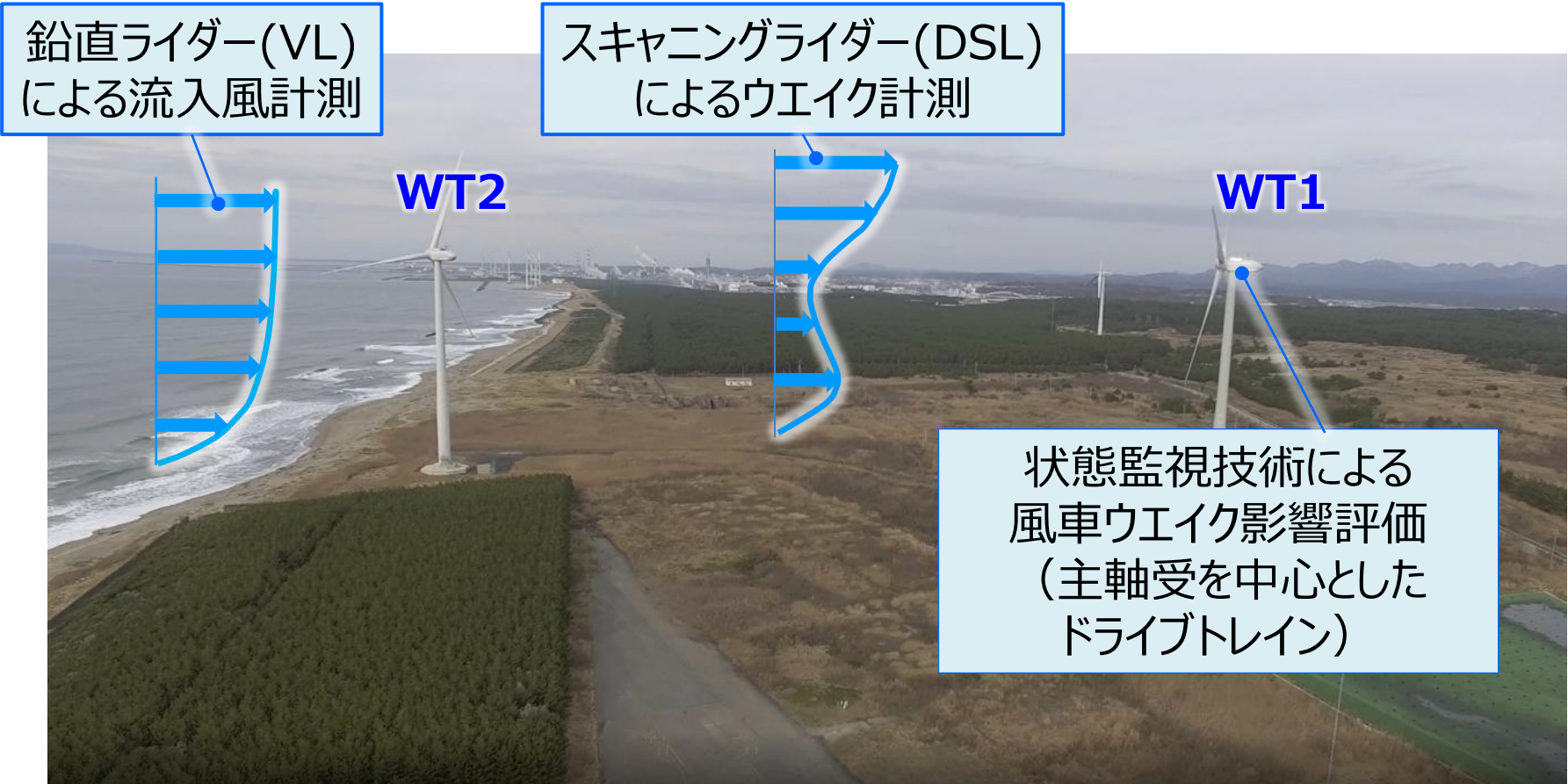
Actuator Line modelによる数値シミュレーション結果

Contents

- 01 事業目的と概要・実施体制
- 02 研究項目Ⅰ：浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発
- 03 研究項目Ⅱ：状態監視技術を活用した風車ウエイク影響評価法の開発
- 04 研究項目Ⅲ：浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発
- 05 風洞実験から実サイトへの展開
- 06 まとめ

サイト観測概要

沿岸域WFの2MW風車を対象に、VLとDSLによる風況観測と風車の状態監視を実施



雄物川風力発電所／第2 雄物川風力発電所と観測イメージ

	WT2	WT1
定格出力	2MW	
ロータ直径	86m	80m
ロータ位置	ダウンウィンド	
ハブ高さ	78m	

風車仕様

ウェイク風況観測 ①概要

海風を対象にDSLとVLによる流入風とウェイクを同時観測

- 2号機風車から1号機へのウェイク
- FixモードDSLによるウェイク観測
- VLによる流入風とウェイクの観測

SL設定条件

	SL1	SL2
Type	WLS200S	WLS100S
Obs. mode	Fixed	
Obs. Height	78, 99.5, 121m	
Range gate length	50m	
Accumulation time	1sec	
Total Running time	5sec	

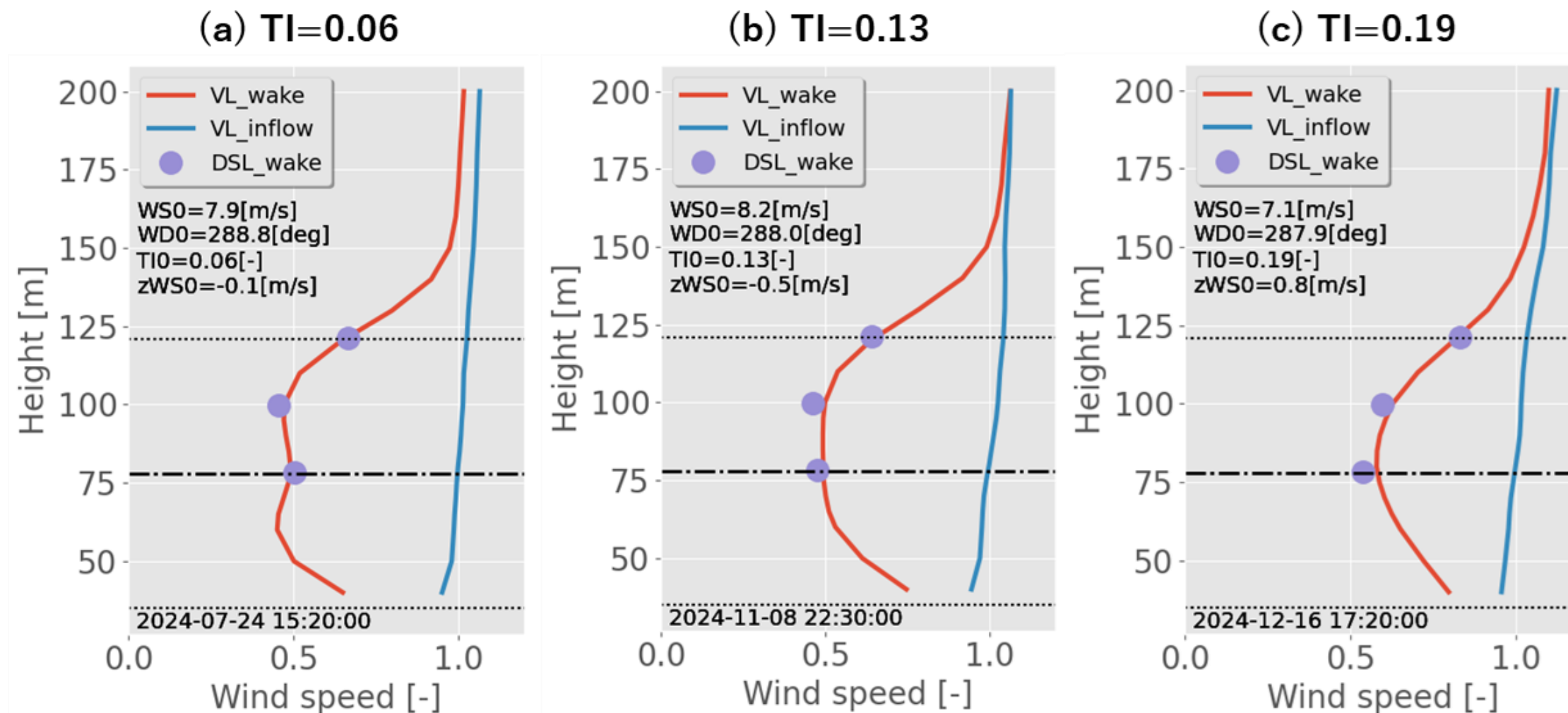
VL設定条件

	VL1	VL2
Type	WindCube v2.1	
Obs. Height	40 ~ 200m (20points)	
Orientations	8deg	289deg



ウェイク風況観測 ②観測結果(鉛直分布)

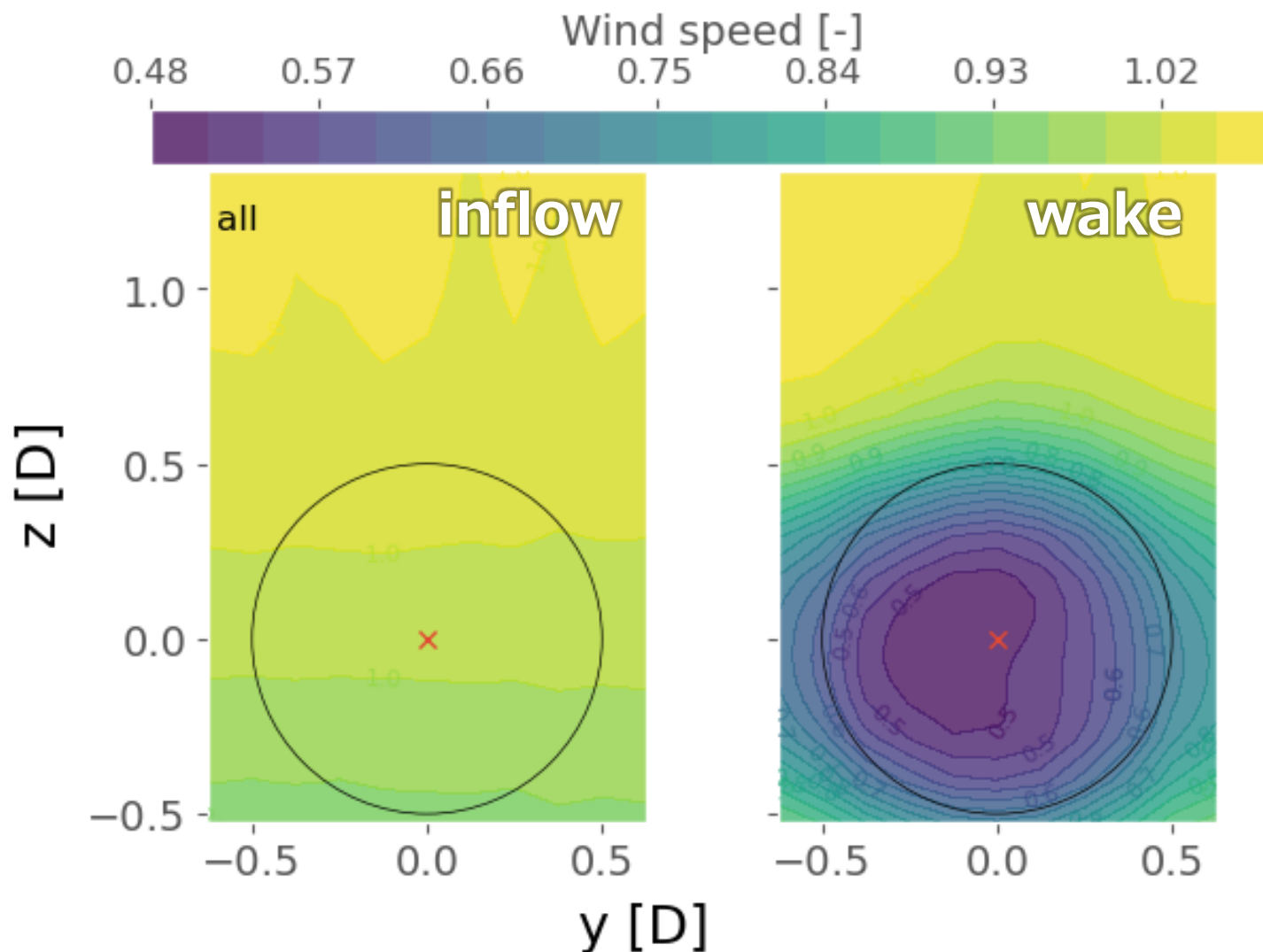
乱流強度大に伴って風速欠損率は低下、形状はダブルガウスからシングルガウスに変化



乱流強度別の流入風とウェイク風の鉛直分布比較

ウェイク風況観測 ③観測結果(断面分布)

流入風向の差を考慮し、乱流強度が大きくなるほど、風速欠損率は低下する



<流入風>

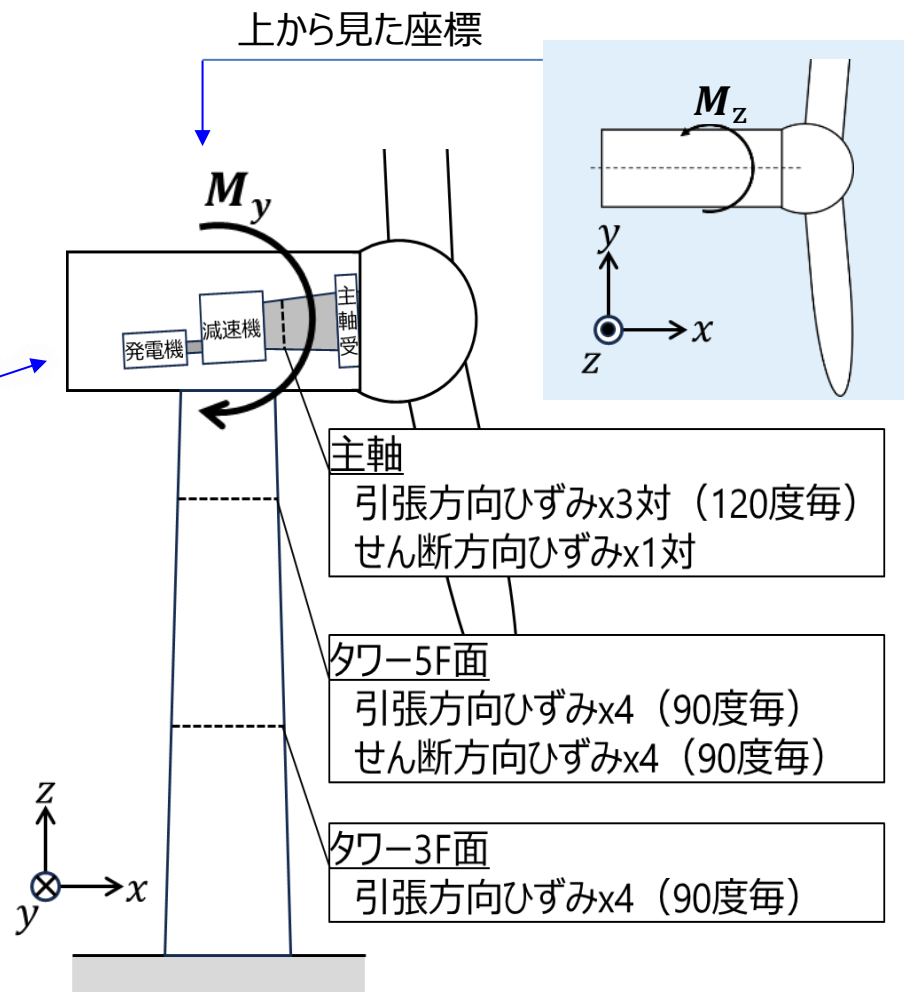
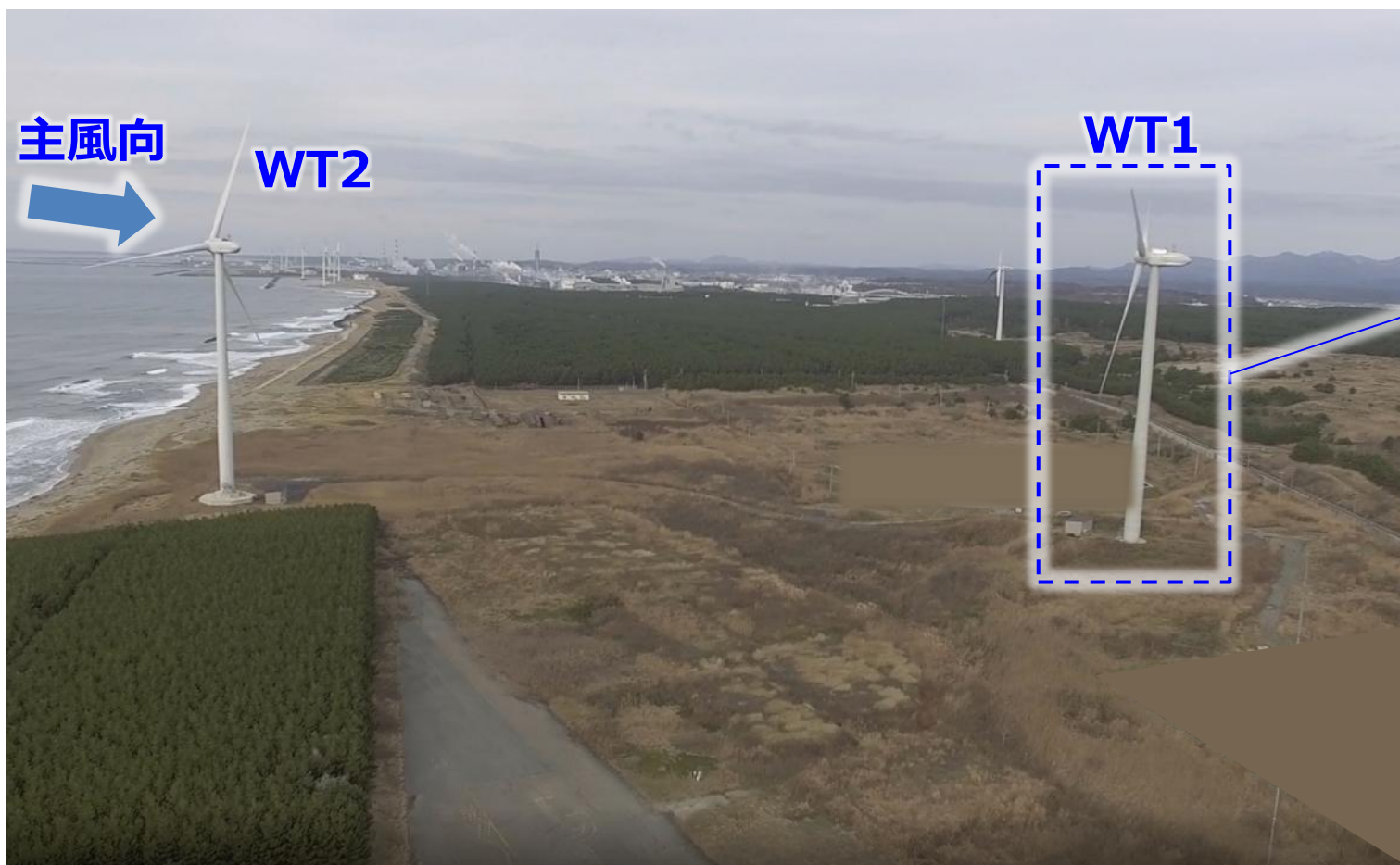
- ・水平方向には、ほぼ一様な風速分布
- ・鉛直方向には、弱い風速シアを確認

<ウェイク風>

- ・ロータ中心付近で風速低下が最大
 - ・中心から離れるに伴い、欠損が同心円状に緩やかに減衰
- 二次元ガウス分布で近似されるウェイク分布の典型形状と整合

状態監視技術による風車挙動評価 ①概要

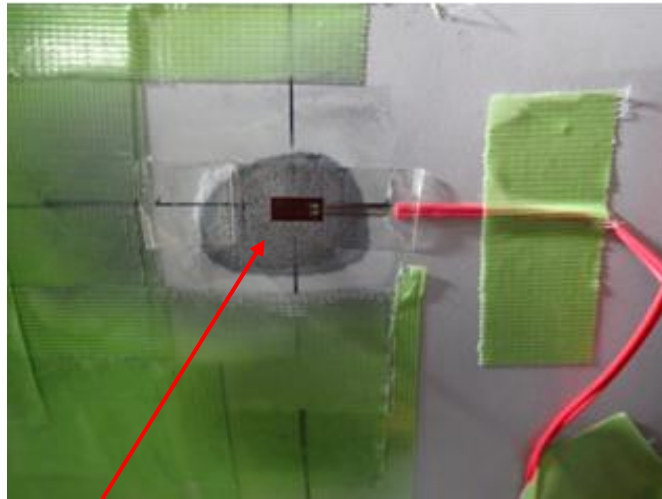
2号機のウエイクが1号機へ与える影響を荷重の観点で評価



雄物川風力発電所／第2雄物川風力発電所と風車内のひずみ計測位置

状態監視技術による風車挙動評価 ②センサ設置状況

タワー、主軸のひずみを計測、ドライブトレインへの影響が大きいモーメントを評価



ひずみゲージ



主軸部のひずみゲージ貼付状況

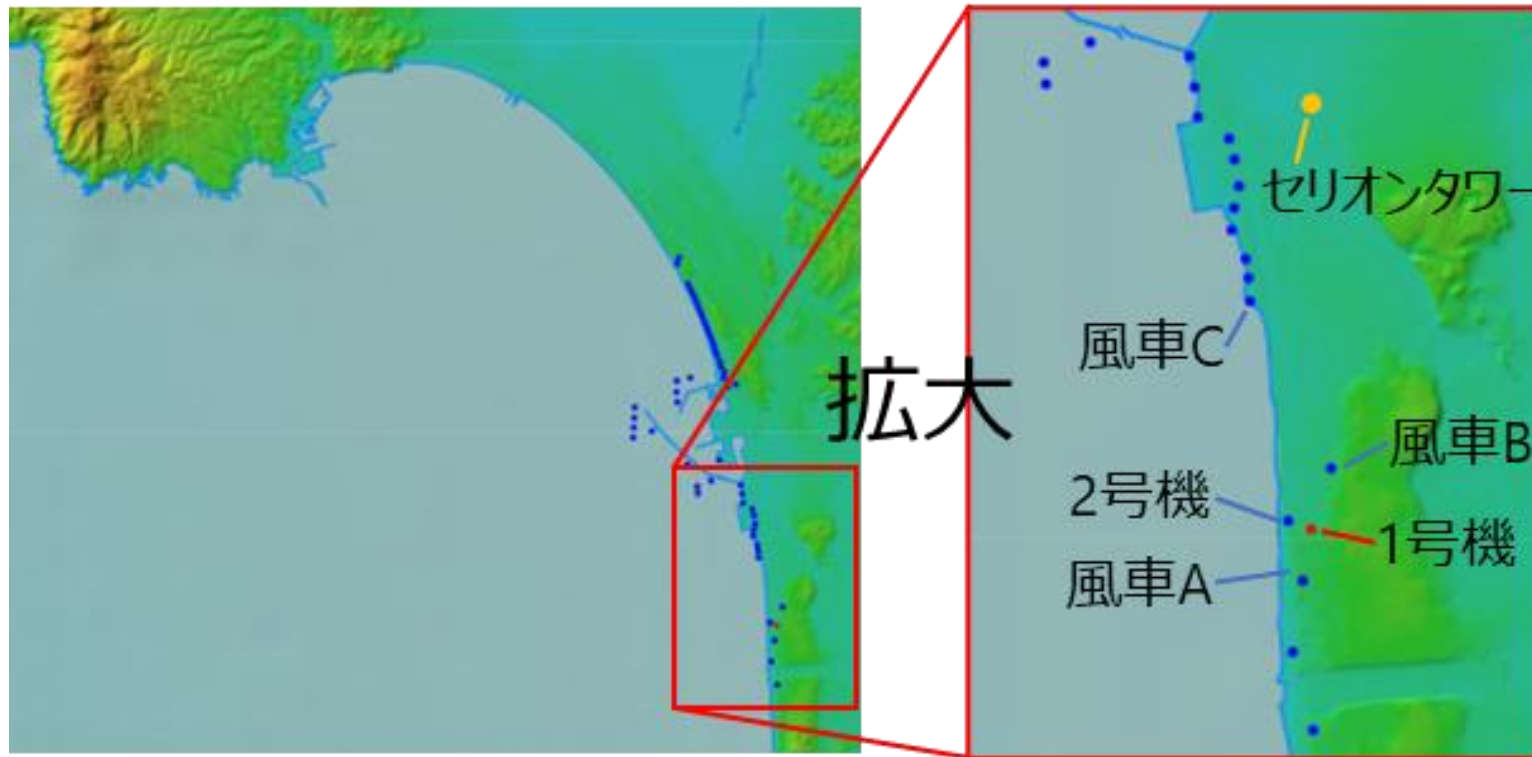


タワー部のひずみゲージ貼付状況



状態監視技術による風車挙動評価 ③周囲風車の位置関係

風向により、今回の対象風車以外の影響を受ける可能性から、周囲状況を事前把握



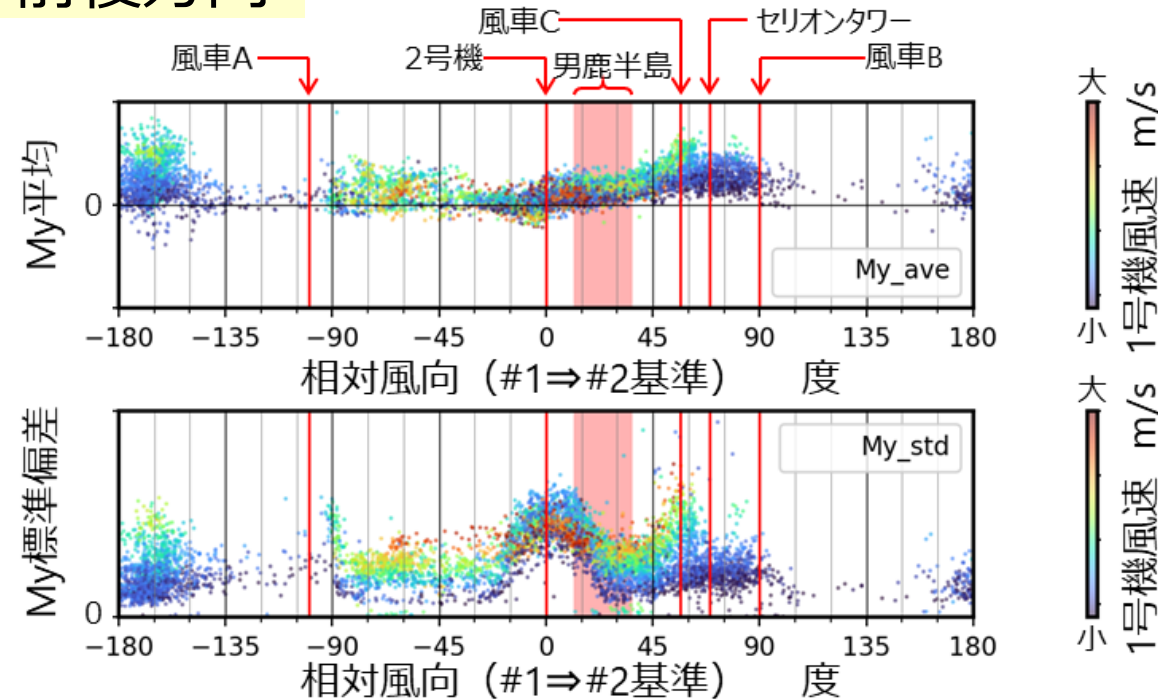
- 半径1km内に2号機と風車A、Bが、2.7km離れた位置に風車Cが存在
- 2号機の方位には2号機のみ
⇒この方位は2号機ウェイクの影響
- Cの背後には、海岸線に沿って多数の風車群が林立

「地理院地図データ」(国土地理院: <https://maps.gsi.go.jp>)を元に作成
「海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成」

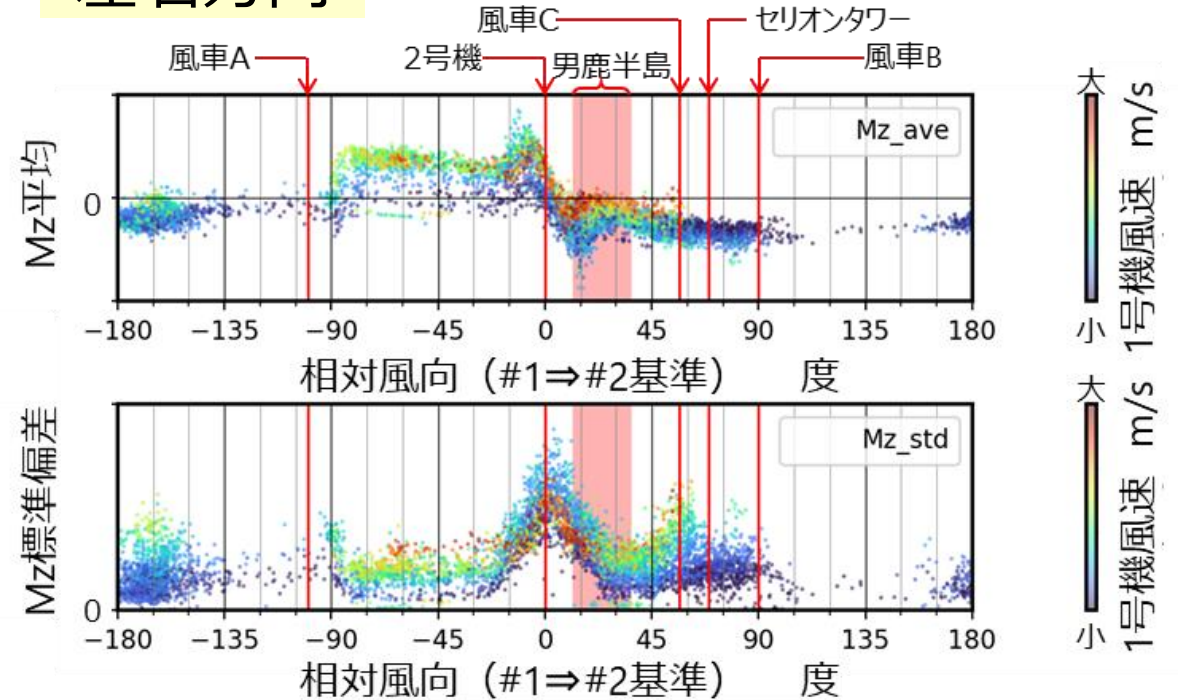
状態監視技術による風車挙動評価 ④ウエイクの影響

タワー歪から得られたMy、Mzの平均、標準偏差と、相対風向の関係を評価

前後方向



左右方向



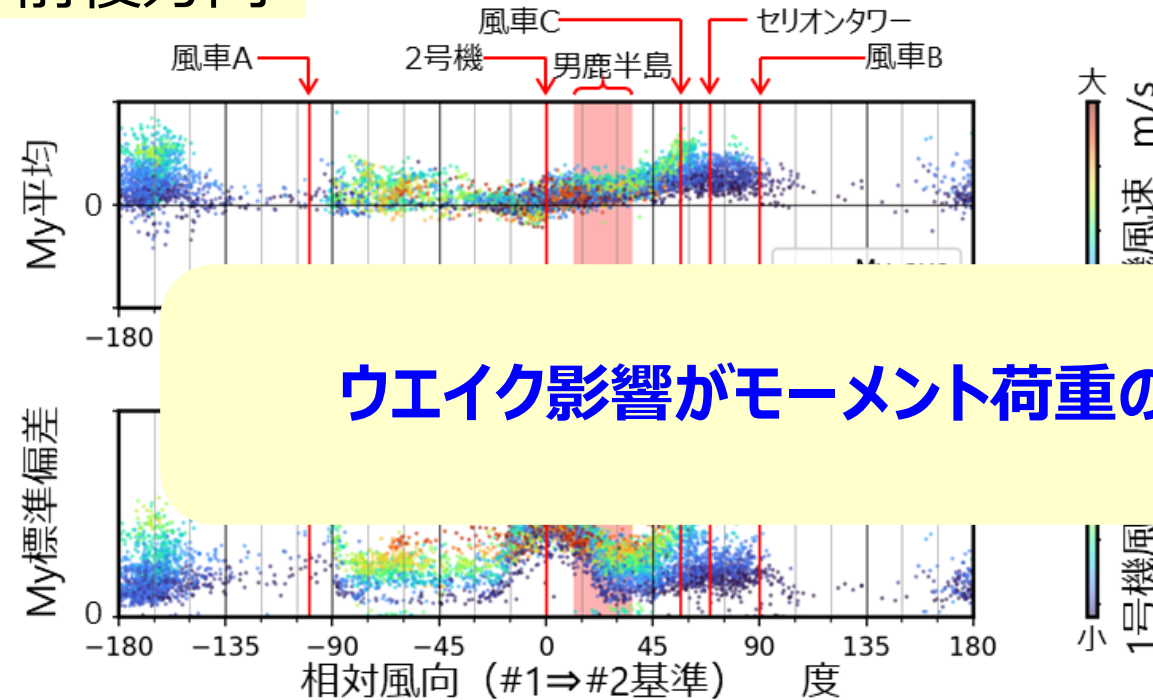
- My平均値への影響は小、Mz平均値は、0度近傍で負の相関、それぞれ±（10～15）度にピーク
- My,Mz標準偏差（=変動成分）は、0度近傍で増大
- ウエイクの影響が及ぶのは、相対風向±30度の範囲

観測期間：2024/1/17～3/31

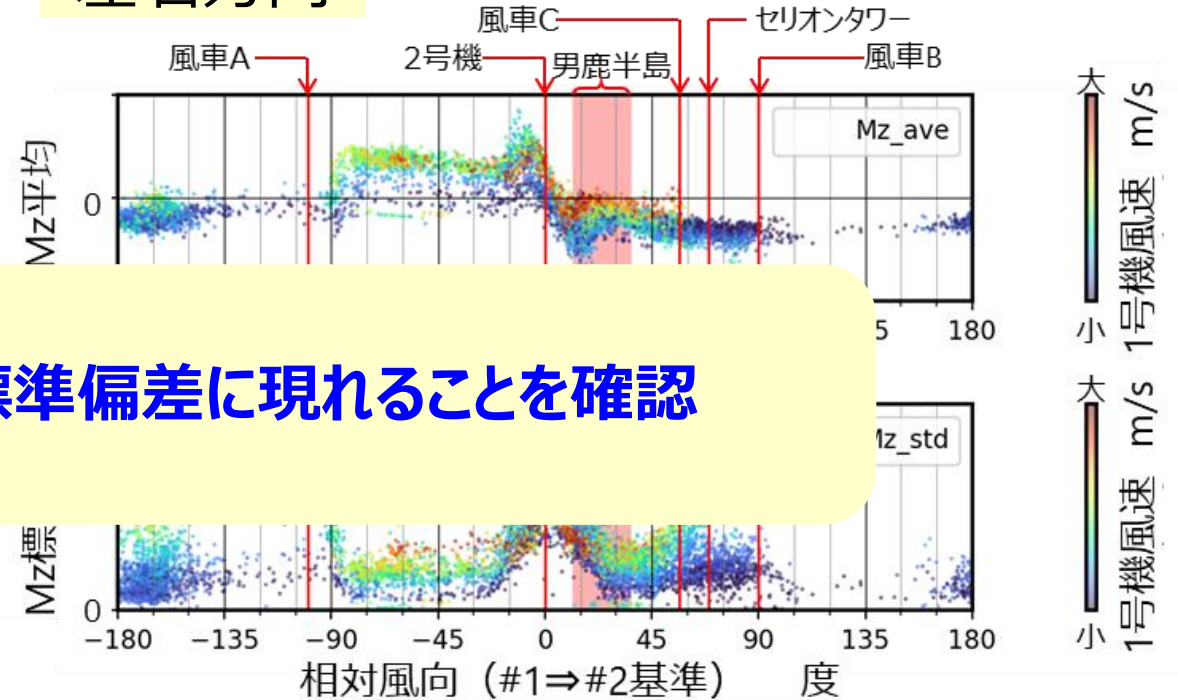
状態監視技術による風車挙動評価 ④ウエイクのモーメントへの影響

タワー歪から得られたMy、Mzの平均、標準偏差と、相対風向の関係を評価

前後方向



左右方向



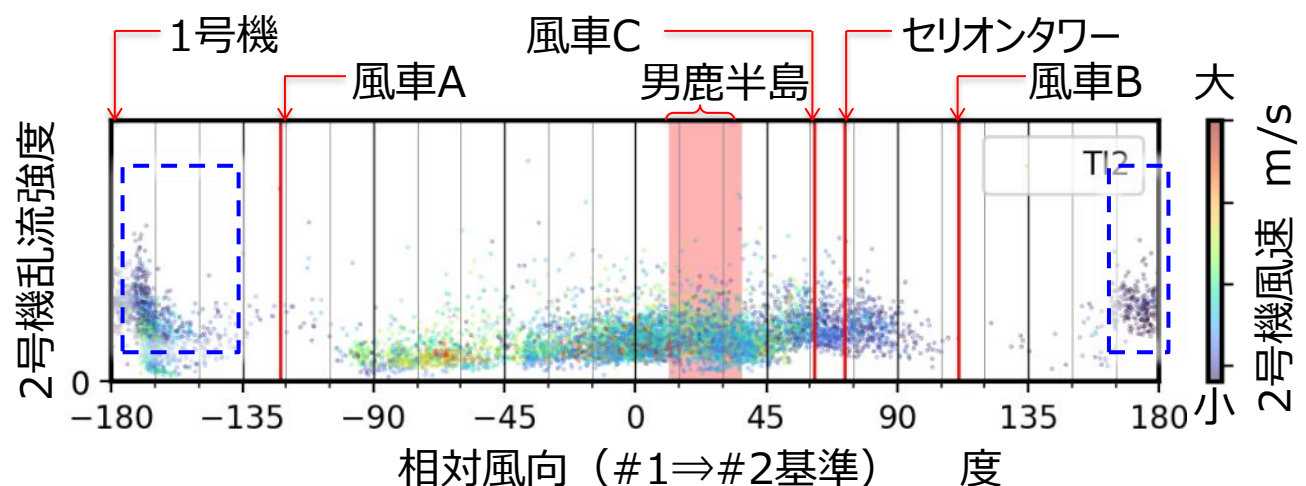
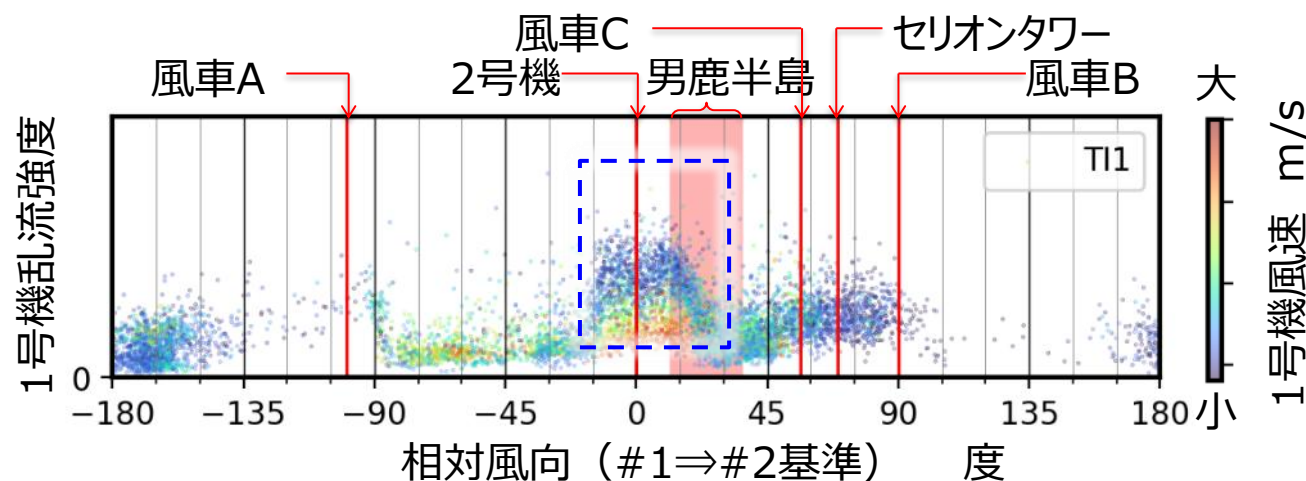
ウエイク影響がモーメント荷重の標準偏差に現れることを確認

- My平均値への影響は小、Mz平均値は、0度近傍で負の相関、それぞれ±（10～15）度にピーク
- My,Mz標準偏差（=変動成分）は、0度近傍で増大
- ウエイクの影響が及ぶのは、相対風向±30度の範囲

観測期間：2024/1/17～3/31

状態監視技術による風車挙動評価 ⑤乱流強度への影響(風向)

1号機、2号機相互方位の風向にて、それぞれのウェイクの影響で乱流強度が増大



- 1号機乱流強度は相対風向0度で増大、2号機ウェイクの影響と推定
- 逆に、2号機乱流強度は180度で増大、1号機ウェイクの影響と推定
- その他の風向でも乱流強度の増大傾向が確認されており、非常に興味深い結果

状態監視技術による風車挙動評価 ⑥乱流強度への影響(鉛直)

高度別に乱流強度を分析、40～120mで増大を確認

ブレード下端
40m高さ

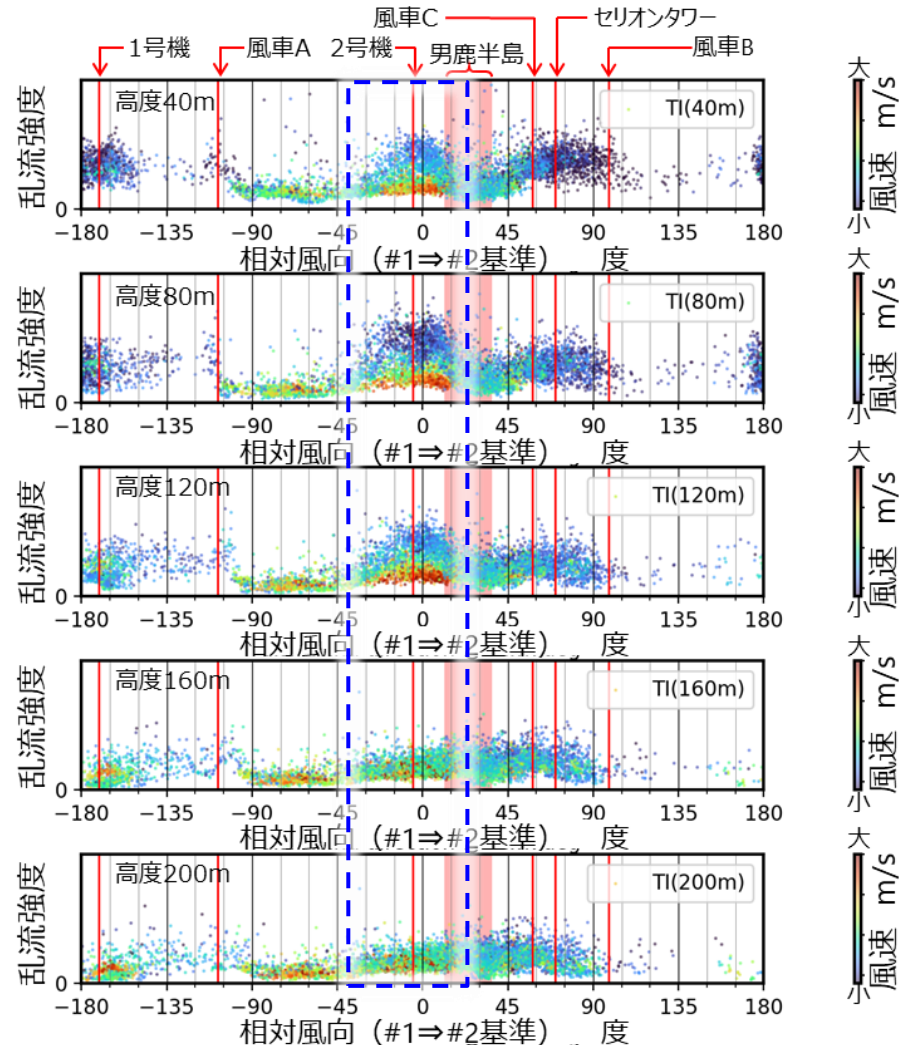
ハブ高

80m高さ

ブレード上端
120m高さ

160m高さ

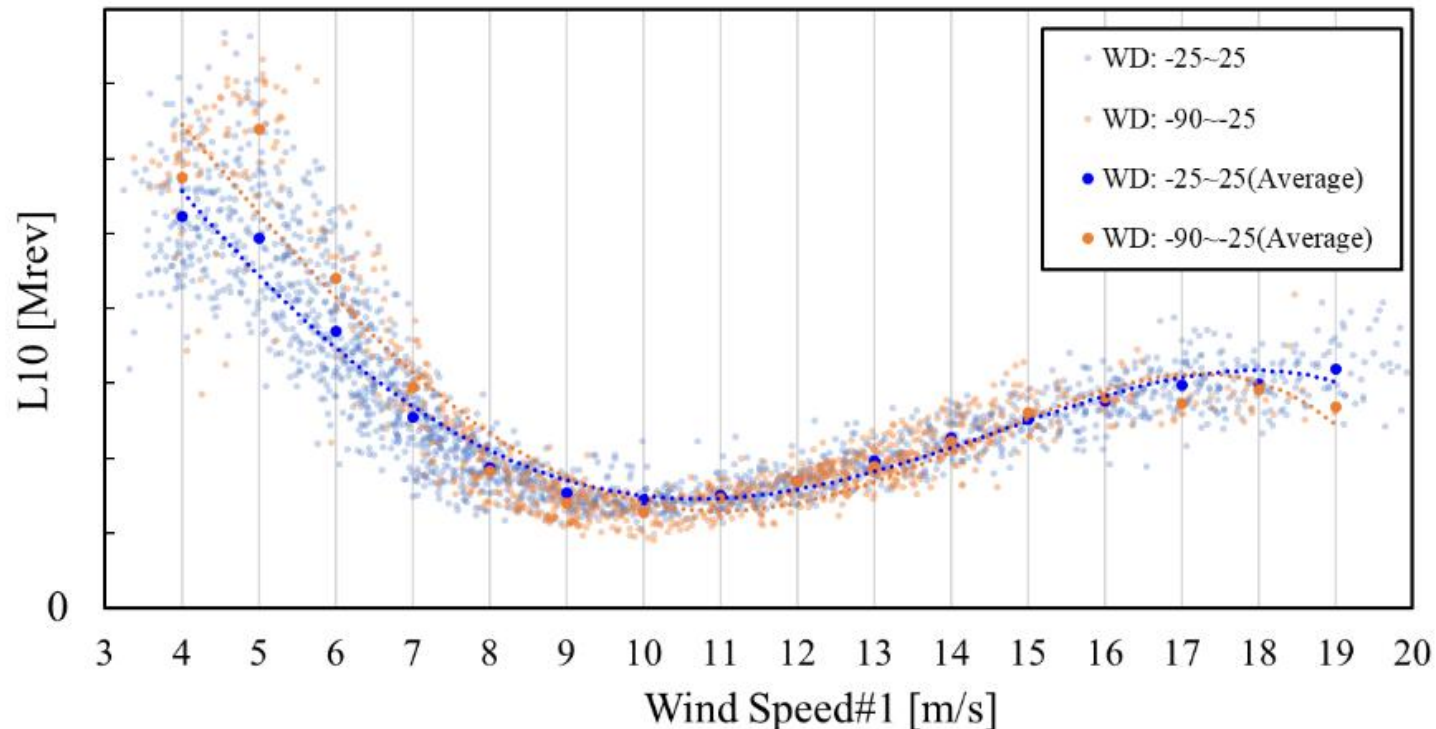
200m高さ



- 乱流強度が増大している範囲は、風車受風面と概ね一致
- これらデータは、上流側風車の影響、すなわち、ウェイク影響と推定される

状態監視技術による風車挙動評価 ⑦主軸受寿命への影響

定格風速7m/s以下でウエイク作用時に主軸受寿命が10～20%程度低下し得ることを確認



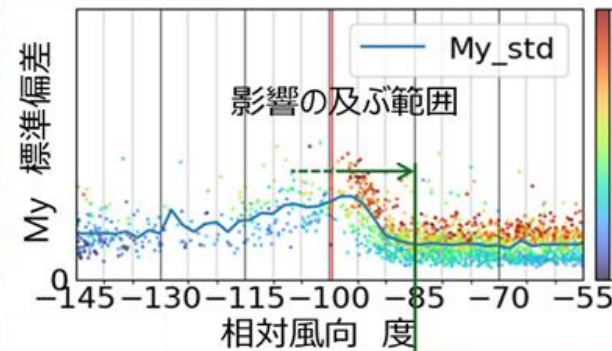
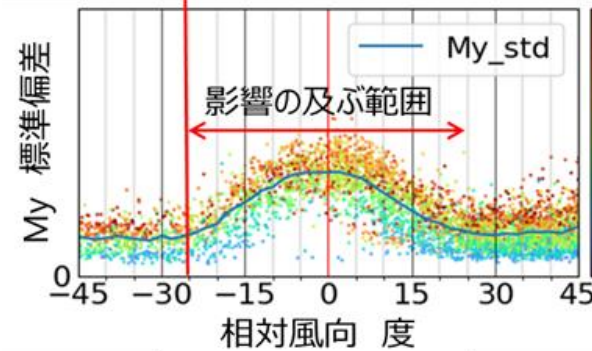
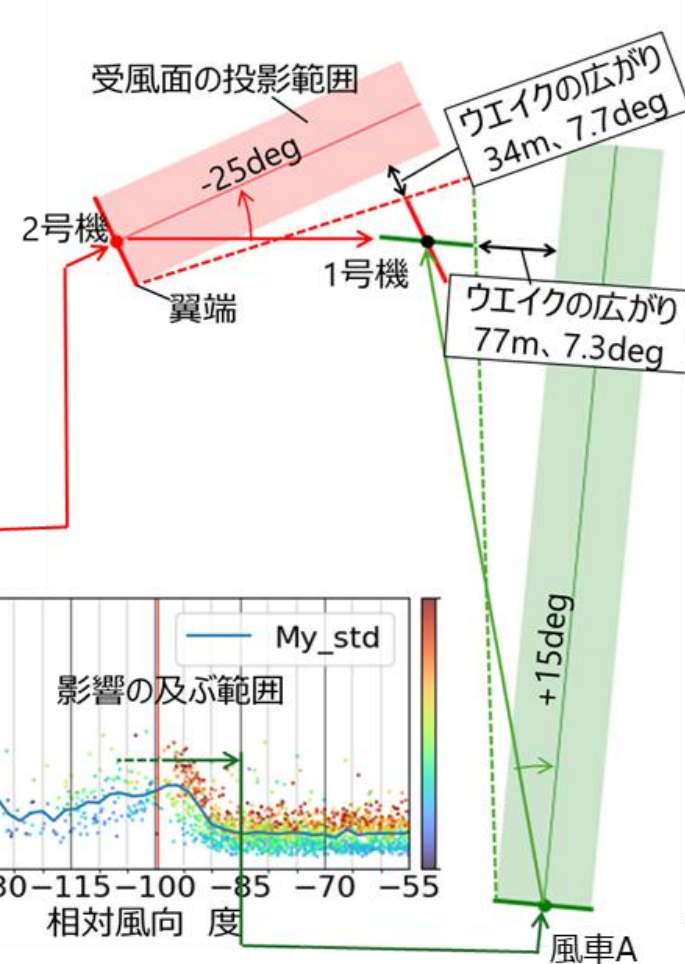
ウエイク影響の大小に基づいて分類した
風速に対する主軸受寿命計算結果

- タワーひずみ計測から得られた風荷重データに対し、主軸受のL10計算による評価を実施
- ウエイク現象が主軸受に与える影響は低風速域で顕著に現れる。

状態監視技術による風車挙動評価 ⑦ウエイク影響範囲

ウエイクが機械的影響を及ぼす広がり確度が7～8deg程度であることを確認

- 2号機風向では、 $\pm 25\text{deg}$ の範囲でウエイク影響
→ 翼端を結ぶ赤破線がウエイクの広がり
(7.7deg および 34m)
- 同様に風車Aの風向では、 7.3deg および 77m



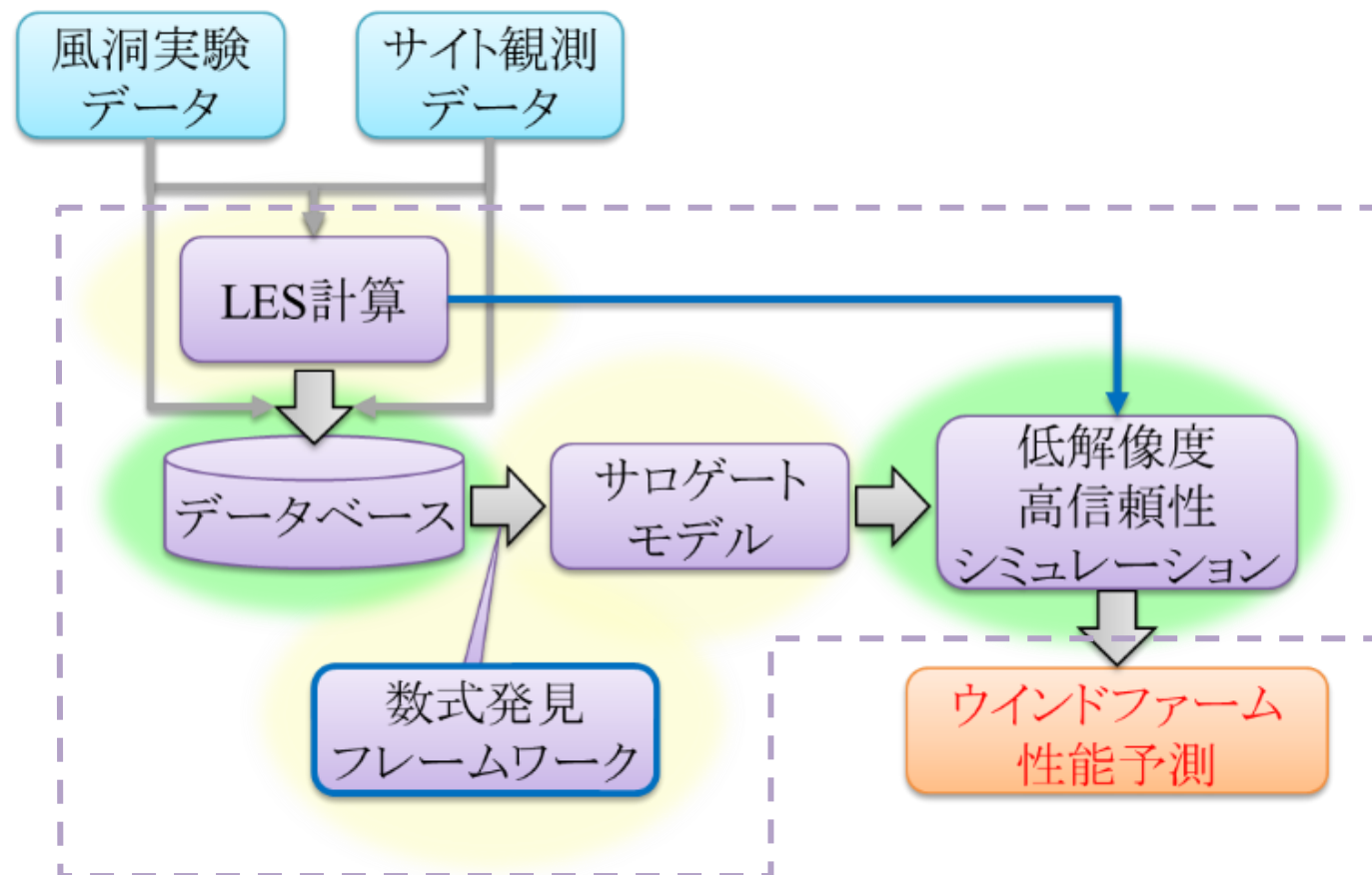
モーメント変動から推定されるウエイクの広がり

Contents

- 01 事業目的と概要・実施体制
- 02 研究項目Ⅰ：浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発
- 03 研究項目Ⅱ：状態監視技術を活用した風車ウエイク影響評価法の開発
- 04 研究項目Ⅲ：浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発
- 05 風洞実験から実サイトへの展開
- 06 まとめ

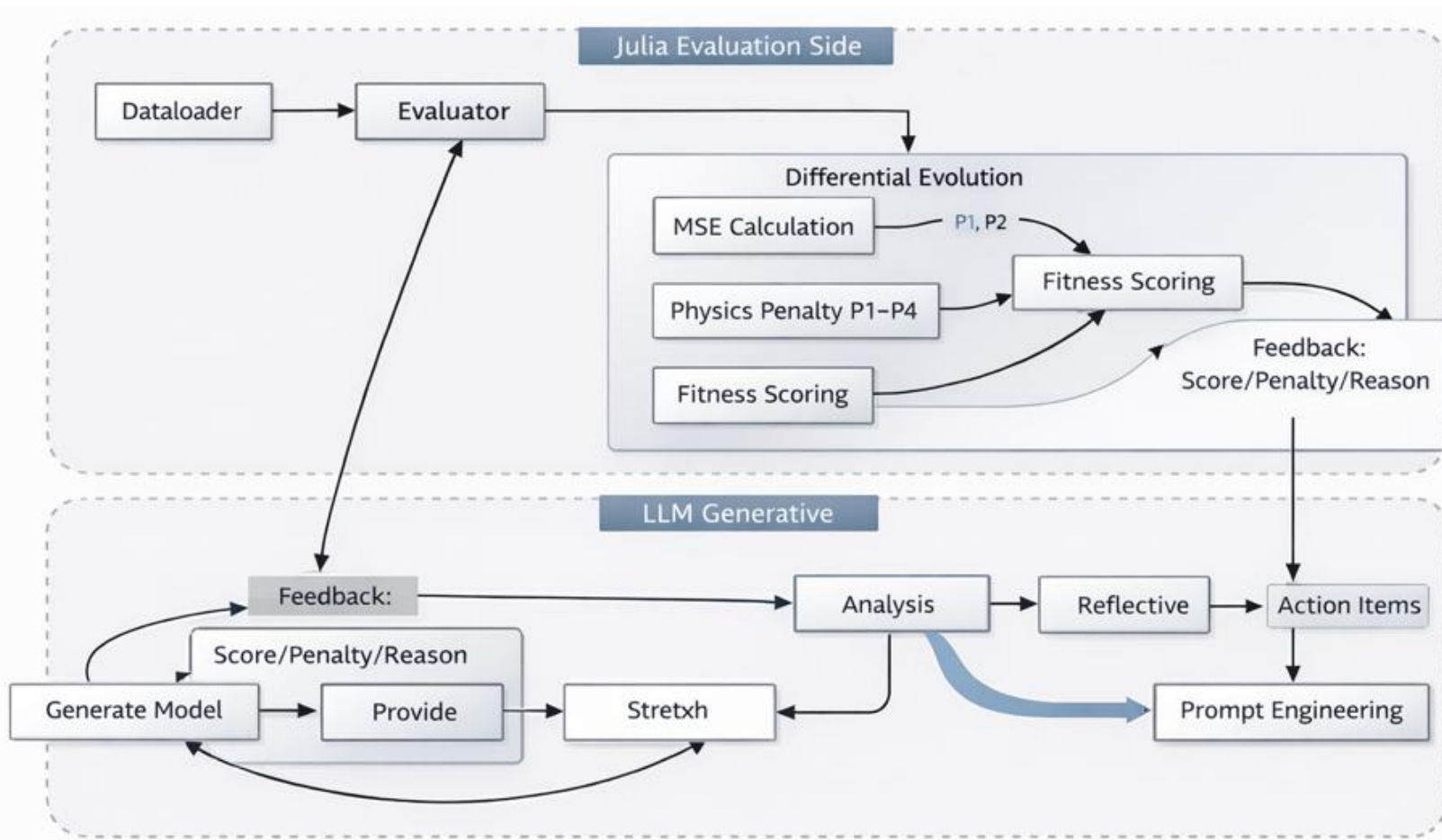
工学数式モデルの開発 ①開発概要

風洞実験データとサイト観測データに、精緻なLESデータを用いたデータベースに対し、Equation Discoveryを適用、ウエイクを表現するサロゲートモデルの構築、低解像度でかつ高信頼性のウエイクシミュレーションの実現に向けた仕組みを開発する。



工学数式モデルの開発 ②LLM-GPシステムの開発

探索処理の一部をLLMに委譲、プログラムコードと連携させたLLM-Guided GPシステムを構築



LLMコンポーネントは4つのモードで動作

1. 初期集団生成モード
2. 変異・交叉ガイドモード
3. サロゲート評価モード
4. 戦略決定モード

ウェイクによる速度欠損プロファイルを表す
解析式の探索を実施。
収束までの世代が300以上⇒約20へ

LLM-Guided GP Systemのダイアグラム

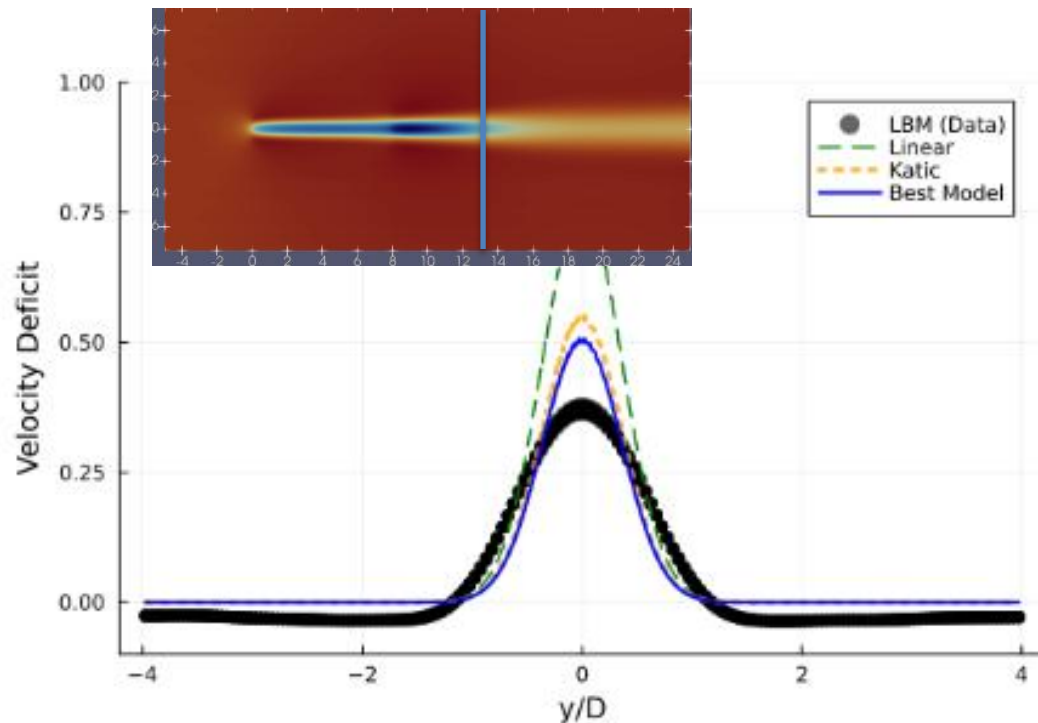
工学数式モデルの開発 ②LLM-GPシステムの有効性評価

ウエイク中心付近の最大速度欠損の再現性が高く、非対称な分布も滑らかに捉えるモデルを確認

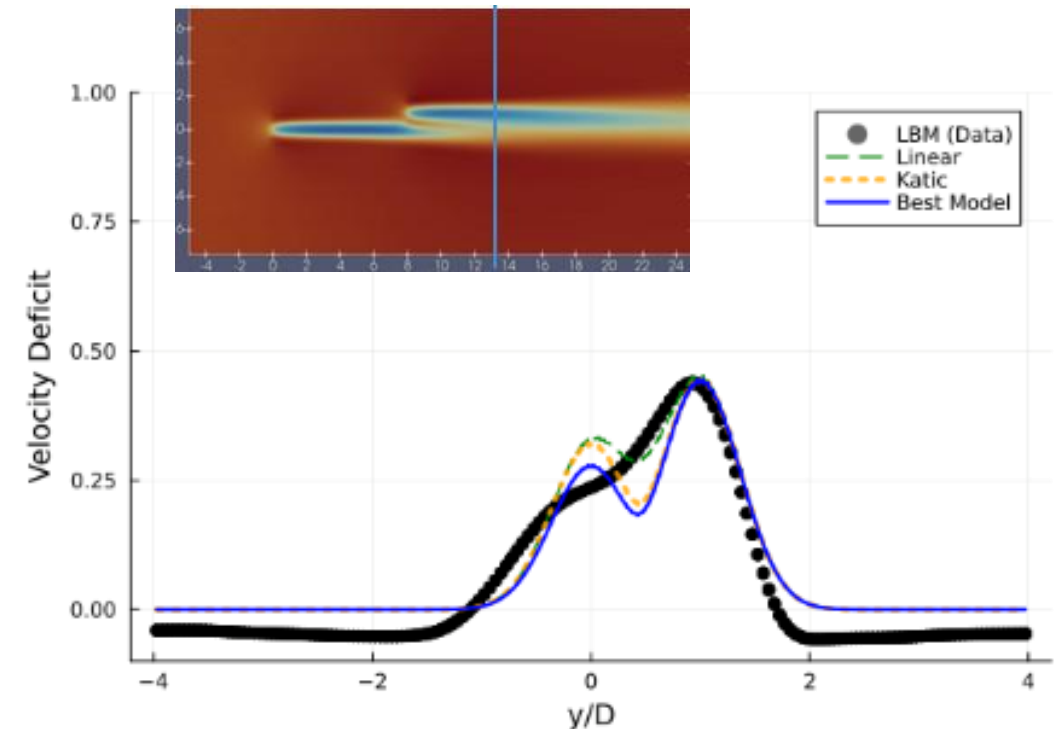
Trial A: 基本的な距離 $dist$ と相対座標を用いた探索

Trial B: 横方向のずれ dy と下流方向の距離 dx を明示的に式に組み込んだ探索

Trial C: Trial AとBに加えて物理的な考察（近距離での挙動適正化）を考慮した探索



Trial Cのタンデム位置（2基めの風車は8D後方に配置）
の後流プロファイル比較



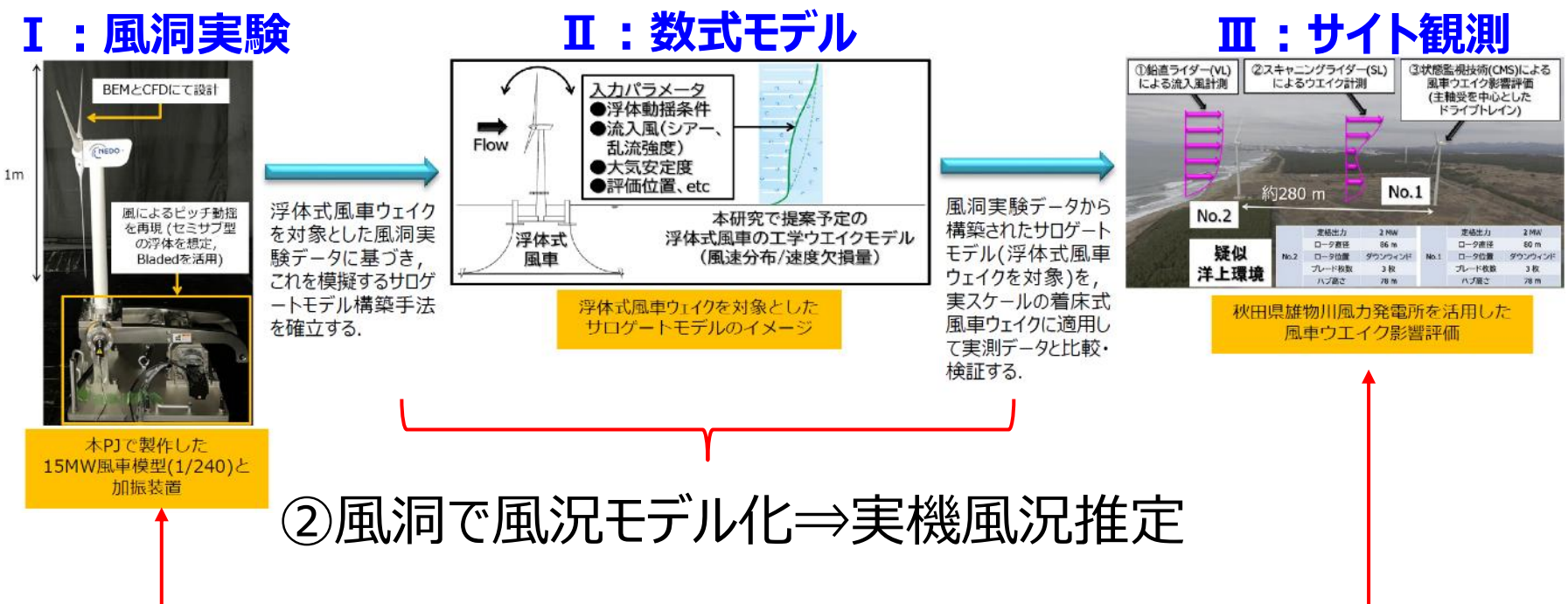
Trial Cのスタガード位置（2基めの風車は8D後方、
Y方向に0.5Dずれ）の後流プロファイル比較

Contents

- 01 事業目的と概要・実施体制
- 02 研究項目Ⅰ：浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発
- 03 研究項目Ⅱ：状態監視技術を活用した風車ウエイク影響評価法の開発
- 04 研究項目Ⅲ：浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発
- 05 風洞実験から実サイトへの展開
- 06 まとめ

風洞実験から実サイトへの展開 ①概要

サイト観測におけるウエイク風況特性、および風車荷重特性を風洞実験にて再現・評価し、シミュレーションで詳細分析が可能なることを示すことが、本事業の最大の命題



②風洞で風況モデル化⇒実機風況推定

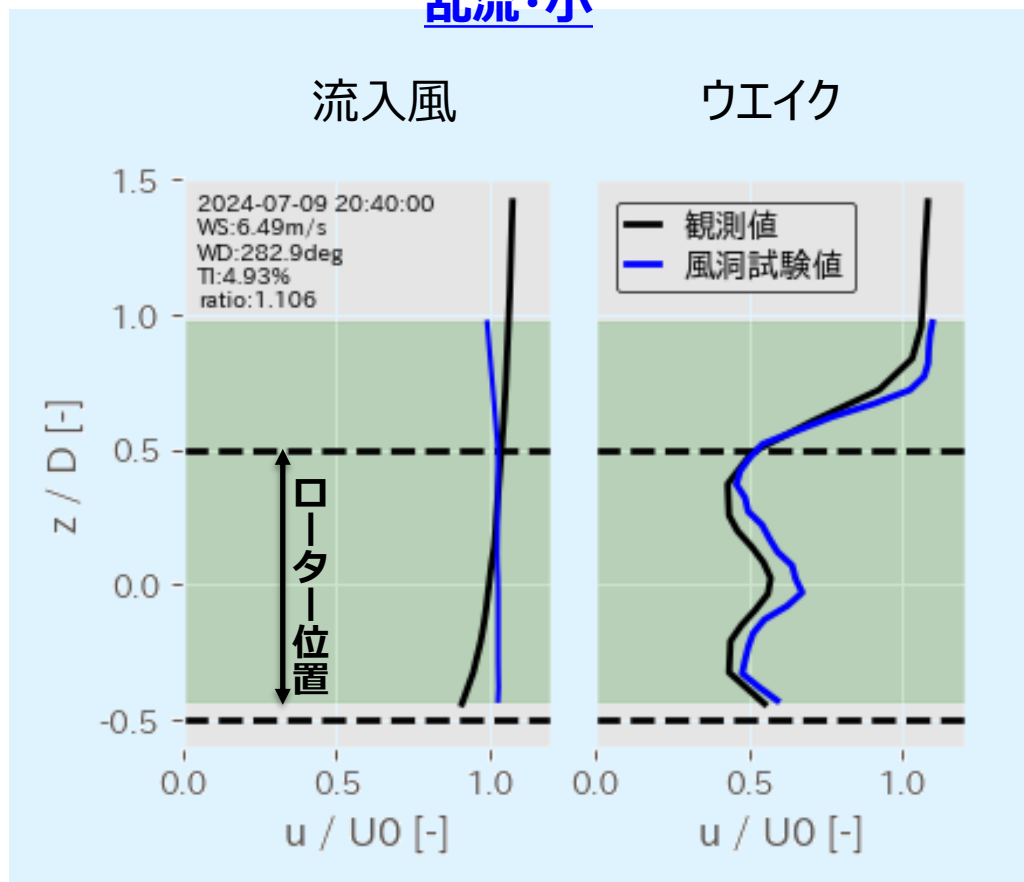
- ①風洞－実機の風況条件の比較
- ③風洞－実機の荷重条件の比較

将来的に②を用いて実機荷重推定

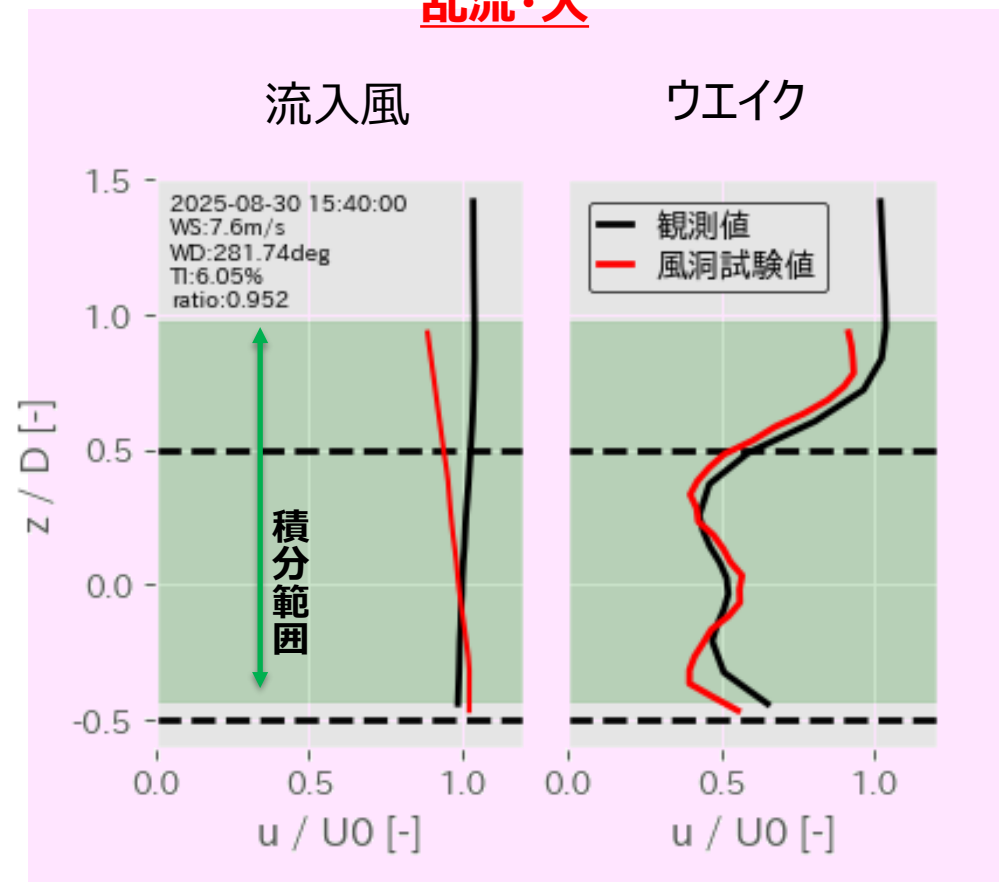
風洞実験から実サイトへの展開 ②風洞－実機の風況条件の比較

質量保存則から風洞実験のブロックージ影響を、運動量欠損の重心からウエイク中心を推定

乱流・小



乱流・大

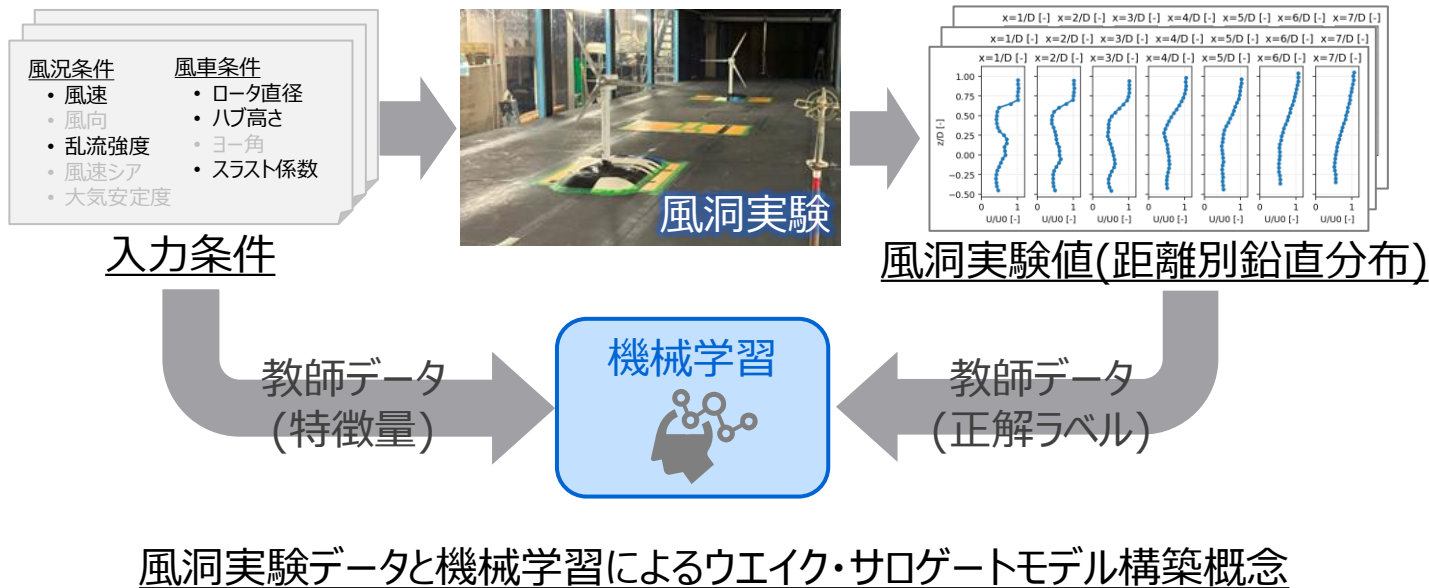


風洞実験特有の現象を補正することで、実機と同等のウエイク分布を再現できることを確認

風洞実験から実サイトへの展開 ②風洞ー実機の風況条件の比較

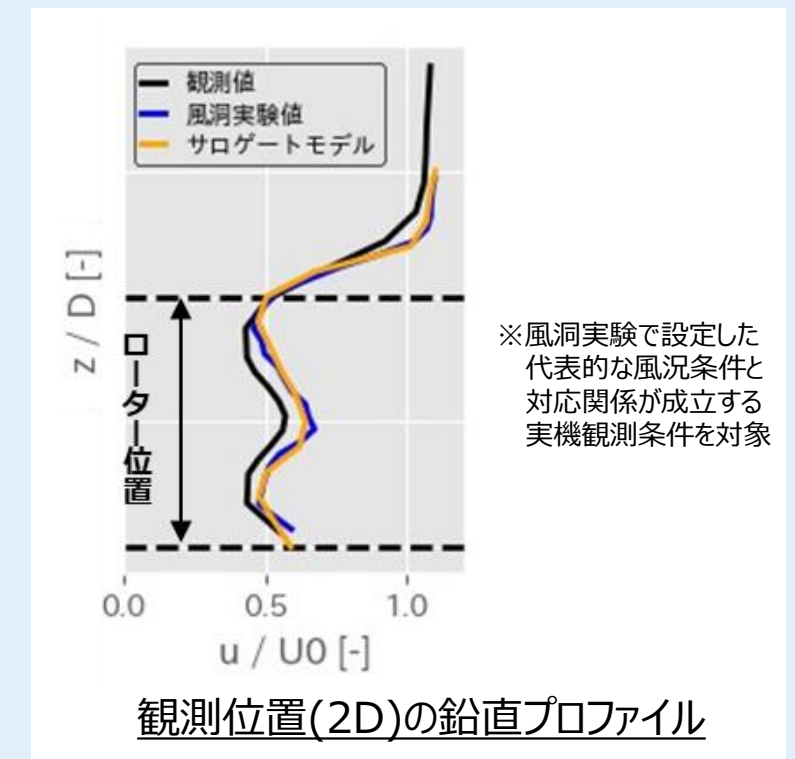
風洞実験データに基づくウエイク・サロゲートモデルにより実機観測の後流風速分布を良好に再現

風洞実験データに基づくウエイク・サロゲートモデルの構築



風洞実験で取得した後流の鉛直風速分布を教師データとし、風況および風車条件との関係を機械学習でモデル化することで、任意条件における後流風速分布を推定可能なサロゲートモデルを構築

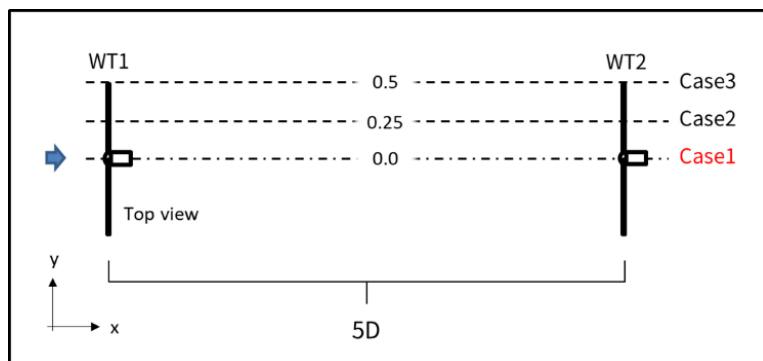
ウエイク・サロゲートモデル予測値と実機観測値の比較



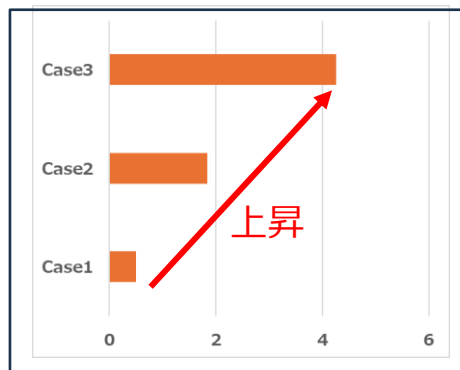
風速欠損から回復までの鉛直構造が実機観測値と整合

風洞実験から実サイトへの展開 ③風洞－実機の荷重条件の比較

風洞実験における加速度応答と実機のスラスト荷重の標準偏差の傾向が一致することを確認

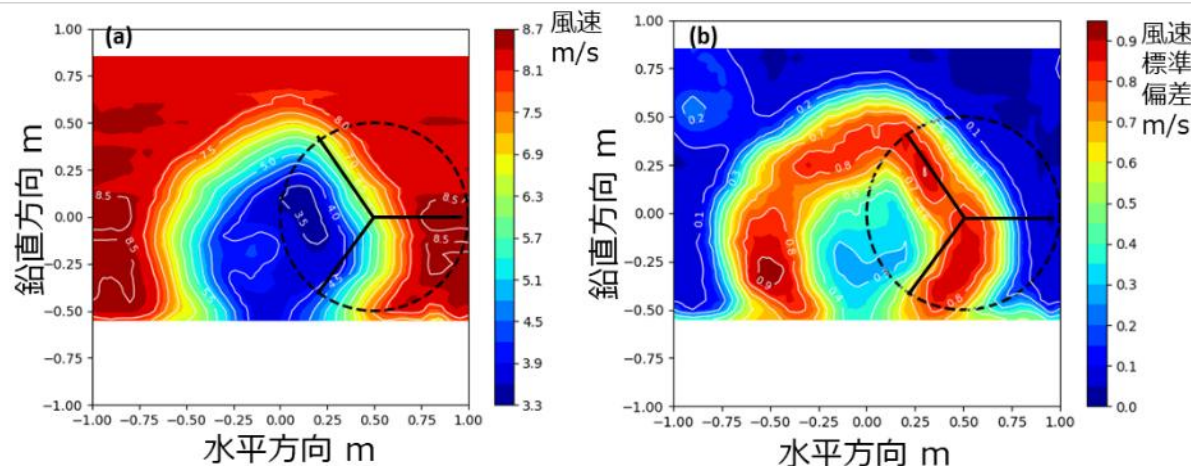


風洞実験における風車2基の位置関係

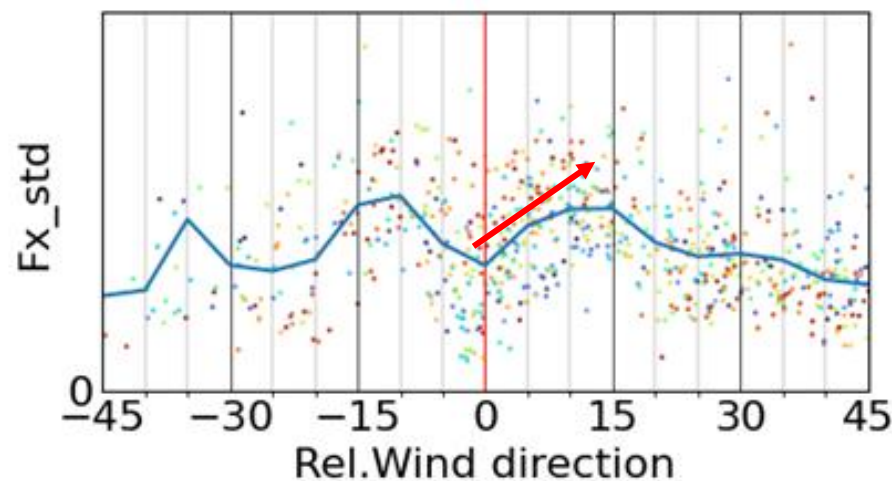


WT2加速度レベル

- ウェイク風向と一致する0度の条件に対して、パーシャルウェイク時の±15度で大きくなり、その後小さくなっていく傾向を確認
- 風洞実験でも同様傾向を確認



WT2設置位置における風速分布(左)と風速標準偏差分布(右)



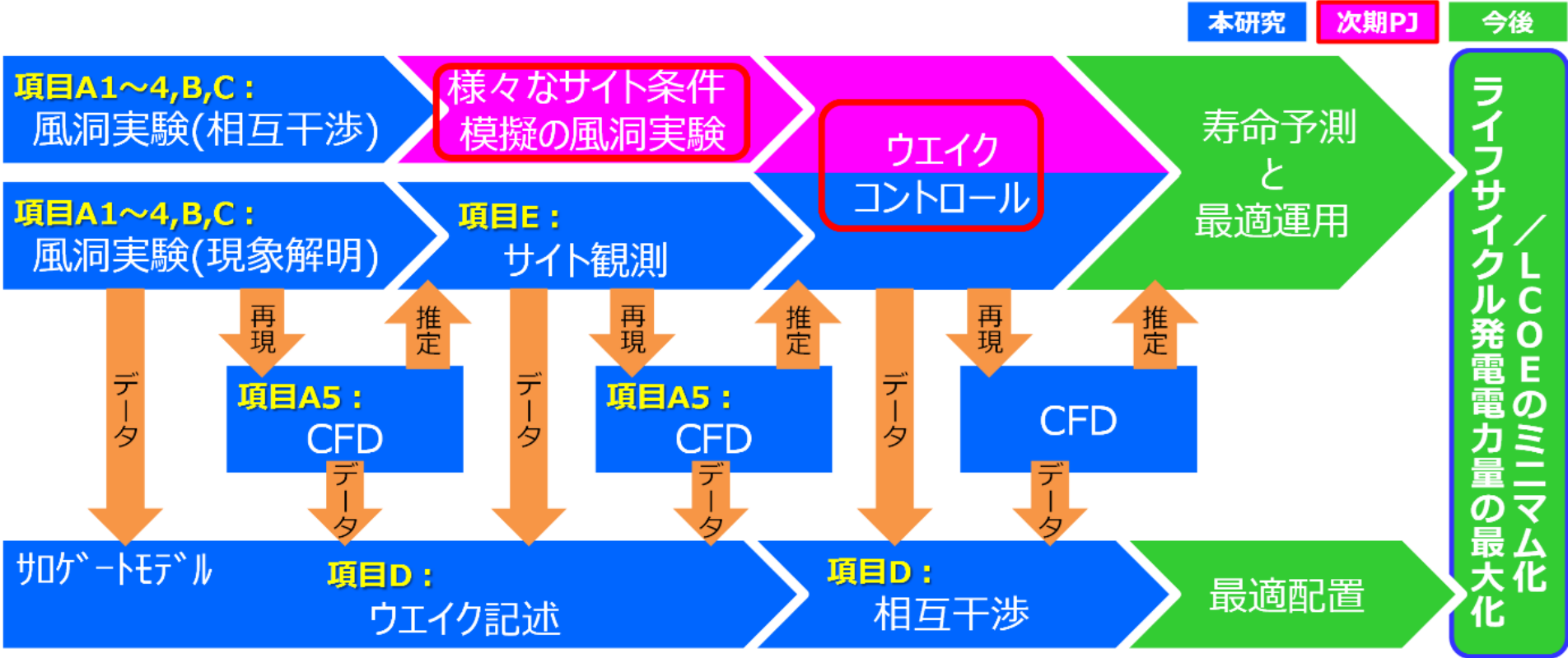
下流側風車のスラスト荷重の標準偏差

Contents

- 01 事業目的と概要・実施体制
- 02 研究項目Ⅰ：浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発
- 03 研究項目Ⅱ：状態監視技術を活用した風車ウエイク影響評価法の開発
- 04 研究項目Ⅲ：浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発
- 05 風洞実験から実サイトへの展開
- 06 まとめ

まとめ ①今後の課題

風洞実験によりサイト固有の風条件を再現する手法を確立することで、様々なサイト風況を条件とする風洞実験に実施するとともに、ウエイクコントロールを風洞実験に取り入れることにより、メリット・デメリットを明らかにしていく。



まとめ ②技術成果のPR

研究発表・講演・論文

2023年度 : 4件

2024年度 : 18件

2025年度 : 20件

受賞 : 1件

プレス発表等 : 10件

大型風洞設備による 浮体式風車ウエイク現象の評価技術の開発

九州大学応用力学研究所	内田 孝紀
九州大学情報基盤研究開発センター	小野 謙二
東芝エネルギーシステムズ株式会社	谷山 賀浩*
日立造船株式会社	吉田 忠相
日本精工株式会社	神田 裕

大規模洋上ウィンドファームの導入促進には、風車ウエイクの相互干渉現象の高精度予測、およびその影響を最小化する風車運用制御の開発が重要である。特に今後普及が進む浮体式は、風と波が同時に作用、その現象は未解明な部分も多い。そこで、NEDO先導研究プログラムを活用し、大型風洞設備を用いた浮体式風車におけるウエイクの現象理解と評価技術の開発、工学数式モデルの検討や沿岸域風車を活用した各種計測にてこれらの妥当性検証を開始、その研究開発計画を紹介する。

1. 背景と全体概要

一般的に、風車はブレードの回転に伴い、下流側に風車ウエイクと呼ばれる風速欠損領域が形成される。風車群から構成される大規模洋上ウィンドファームでは、風車ウエイクが相互に干渉し、下流側風車群に発電量低下や風荷重増大の影響を与える。特に浮体式風車では、周波数の異なる風と波が同時に作用、ウエイク現象はさらに複雑な様相を呈することが予想される(図1)。

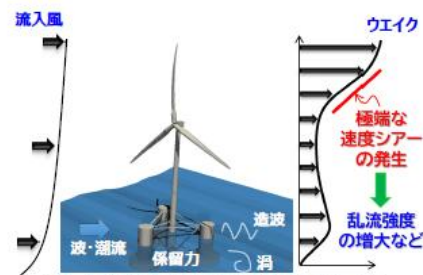


図1 浮体式風車に作用する外力とウエイク

そこで本研究では、23年度よりNEDO先導研究「風力発電の調査開発・O&Mの高度化に向けた革新的解析・評価技術の開発」にて、浮体式風車のウエイク現象の高精度予測に向け、下記3項目を推進する。

- I. 大型風洞設備を用いた浮体式風車ウエイクの実験評価技術開発、及びシミュレーションによる妥当性検証
- II. 沿岸域商用風車を対象にした気流計測、及びウエイクが風車に与える影響評価
- III. データ駆動科学手法により、風洞実験・野外計測・シミュレーションの各データから浮体式風車ウエイクの工学数式モデルの開発

2. 研究開発項目

項目Iでは、浮体動揺を模擬する加振装置に風車模型を搭載、国内の代表的な海域条件を再現した条件にて風洞実験を実施する(図2左)。風車模型は、低Re数型ブレードに再設計、ロータ直径1mの実機風車スケールモデルとし、2基直列に配置、相互干渉も評価する(図2右)。



図2 浮体動揺を模擬した風洞実験

項目IIは、沿岸に立地する風車を対象にライダーを用い、流入風とウエイク位置の気流を同時計測するとともに、風車にCMSや特殊センサを設置、ウエイクが風車に与える荷重を評価する(図3)。さらに項目IIIで、これら多面的で大規模なデータを対象に、データ駆動科学手法により、浮体式風車ウエイクの工学数式モデルの構築を検討する。

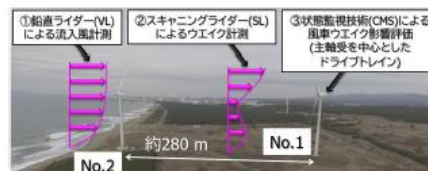


図3 沿岸の風力発電所を対象とした観測

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

まとめ ③さいごに

九大応力研所有の大型風洞設備を中核に、

- ・ラボスケール風車模型および浮体動揺模擬加振装置を組合せた風洞実験
- ・実サイトでの風況・ウエイク・風車挙動の観測
- ・データ駆動型モデル化の構築

を連携して実施し、浮体式風車特有の複雑なウエイク挙動を体系的に把握。

また、得られた知見を風洞実験から実サイトへの展開に向けて、

- ・実機風況とウエイクの再現モデル化
- ・風車荷重評価への適用可能性

について追加検証を実施、将来的な風車最適配置、運用最適化、保守・メンテナンス高度化に資する基盤技術を構築した。