

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

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)

発表日：2026年7月21日

■事業の目的・目標

浮体式洋上風力発電を対象に、浮体動揺を伴う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として下記3項目を実施。

(1)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。

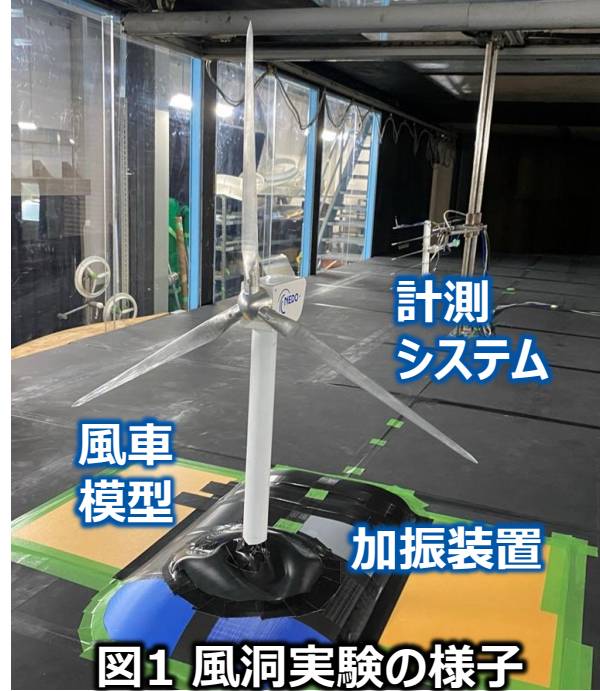


図1 風洞実験の様子

(2)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

リモートセンシング技術による気流観測と状態監視技術により、ウエイクが風車に与える影響を評価

沿岸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。



図2 雄物川風力発電所での風況観測

(3)浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発

風洞実験・サイト観測・数値解析の各種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、サロゲートモデルを構築。

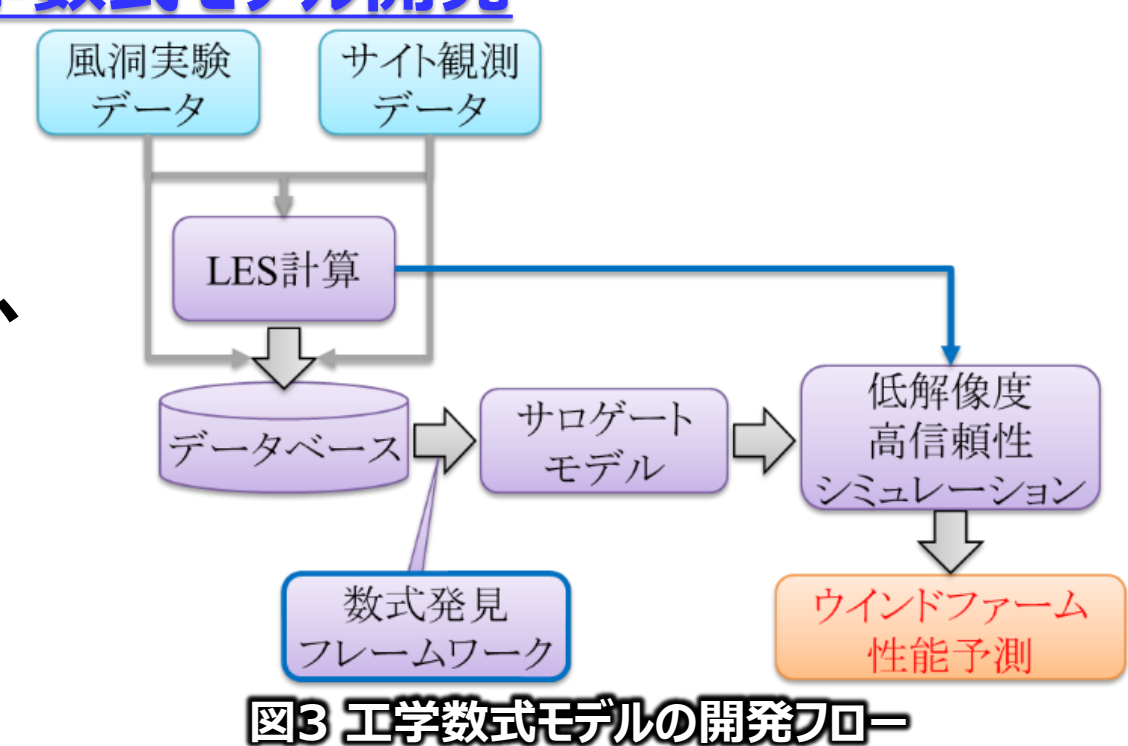


図3 工学数式モデルの開発フロー

■2025年の主な成果

(1)浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発

①風洞実験基盤の構築

：最適ブレード回転数・トルクの自動制御、風速の多点同時計測・風荷重・発電性能の時系列取得を統合した自動計測システムを整備。また、乱流格子を用いた乱流条件生成も実施。(図4,5)



図4 自動計測システムと乱流格子

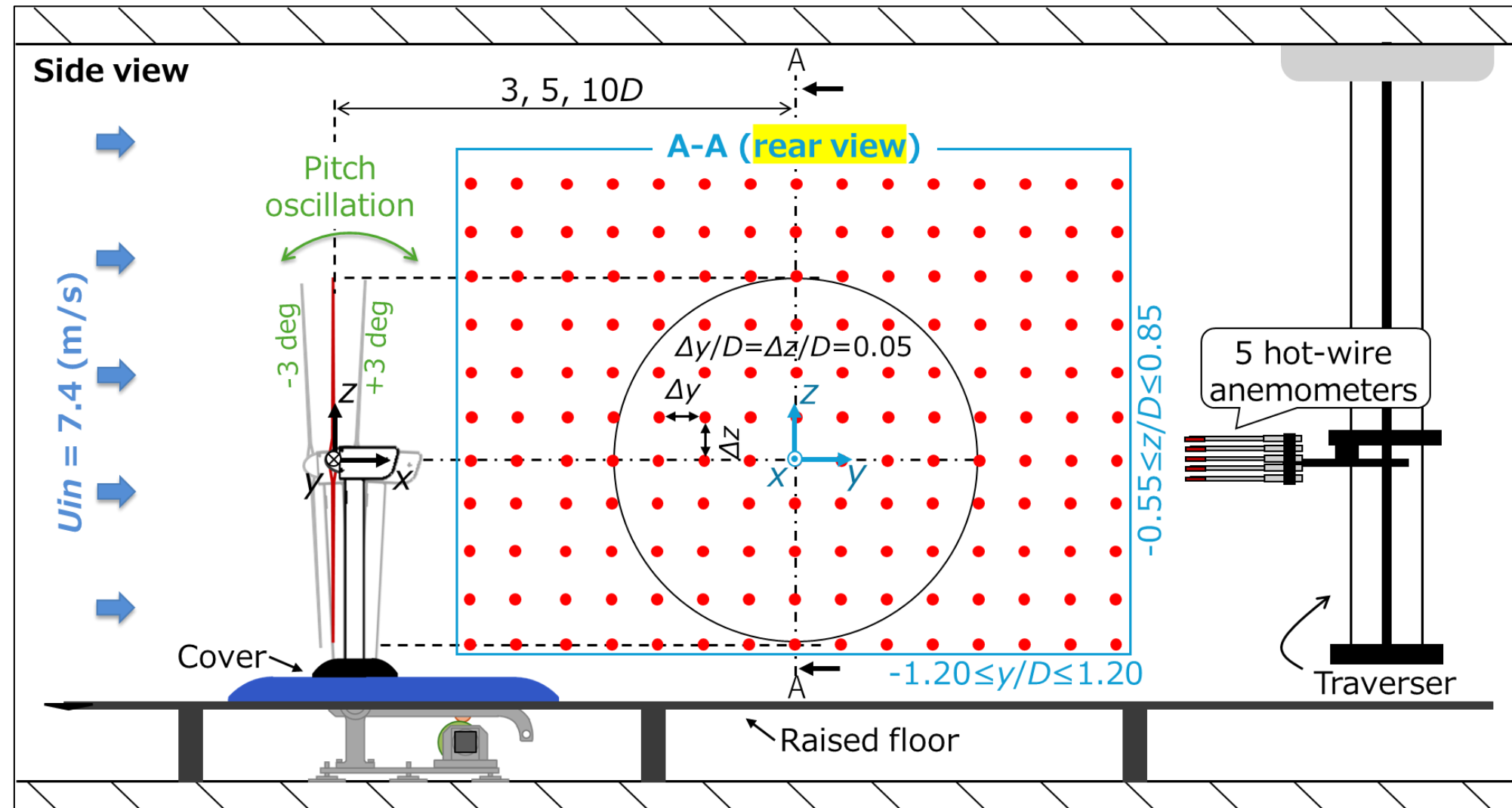


図5 ウエイクの計測点

②浮体式風車ウエイクの流体構造解明

： $x/D=3, 5, 10$ の後流位置で1200点超を計測、位相平均法によりピッチ動揺起因のウエイク上下蛇行、床面影響による楕円化、動揺振幅増加に伴い蛇行幅がほぼ線形に増大することを確認(図6)。

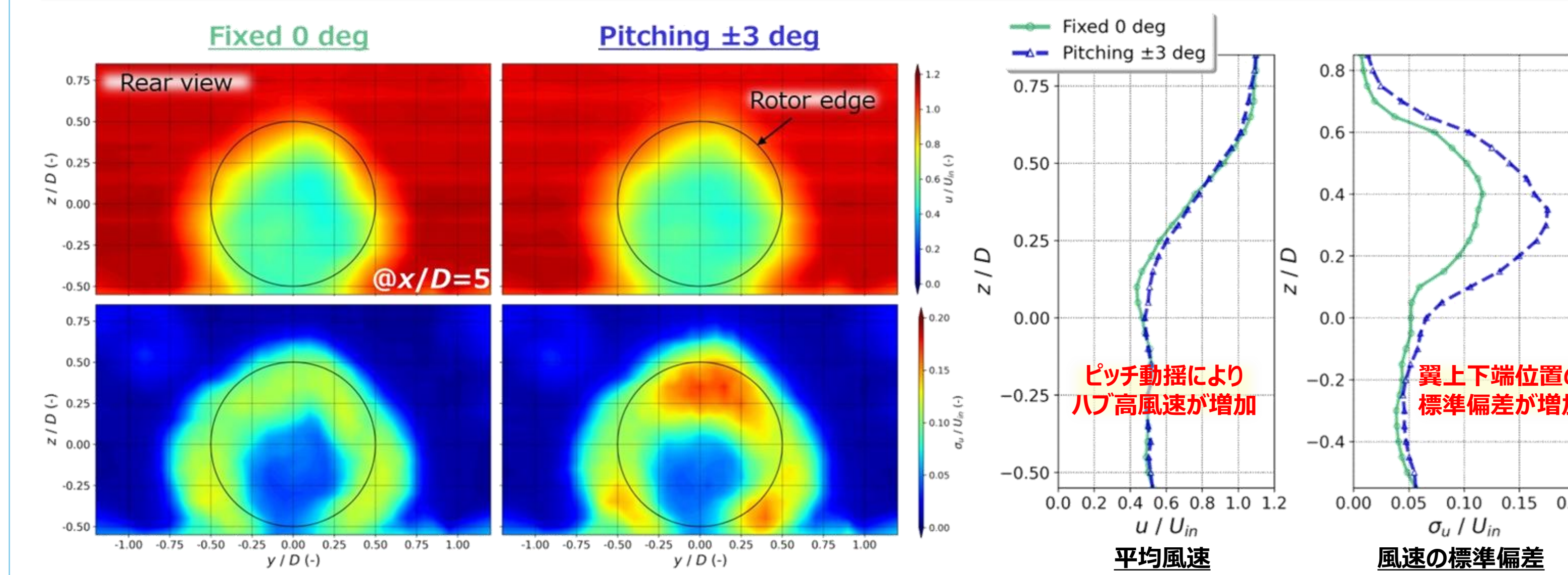


図6 $x/D=5$ 位置の断面計測結果

③浮体式風車のウエイク相互干渉(マルチウエイク)の特性把握

：風車模型を2基配置、風車間配置・動揺位相差が平均風速場、乱れ、発電量変動に大きく影響することを把握、定量化し(図7)、多基配置設計時に向けた知見を獲得。

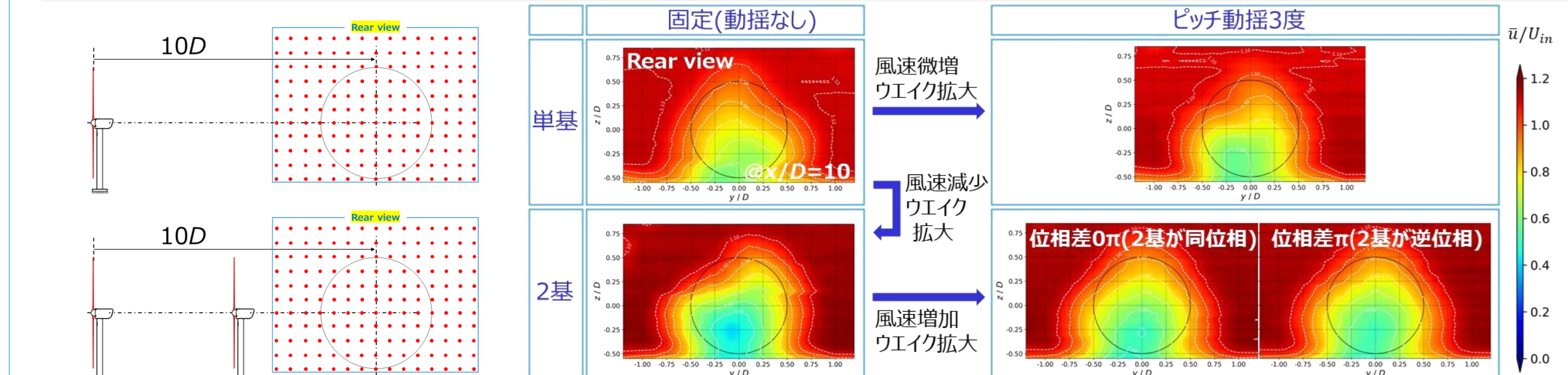


図7 $x/D=10$ (2基配置時は2基目の $x/D=5$ 後流)位置の断面計測結果

④ウエイクステアリングと可視化技術の開発

：熱線流速計データの位相平均処理による翼端渦可視化新手法を確立(図8)。チルトコントロールにより鉛直方向のウエイク偏向(図9)と2基合計発電量改善効果を実証。

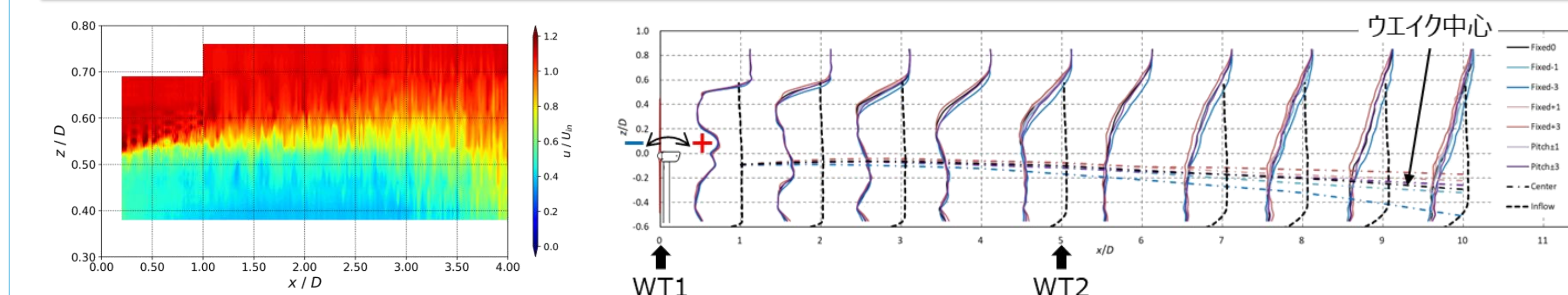


図8 ピッチ動揺条件における翼端渦

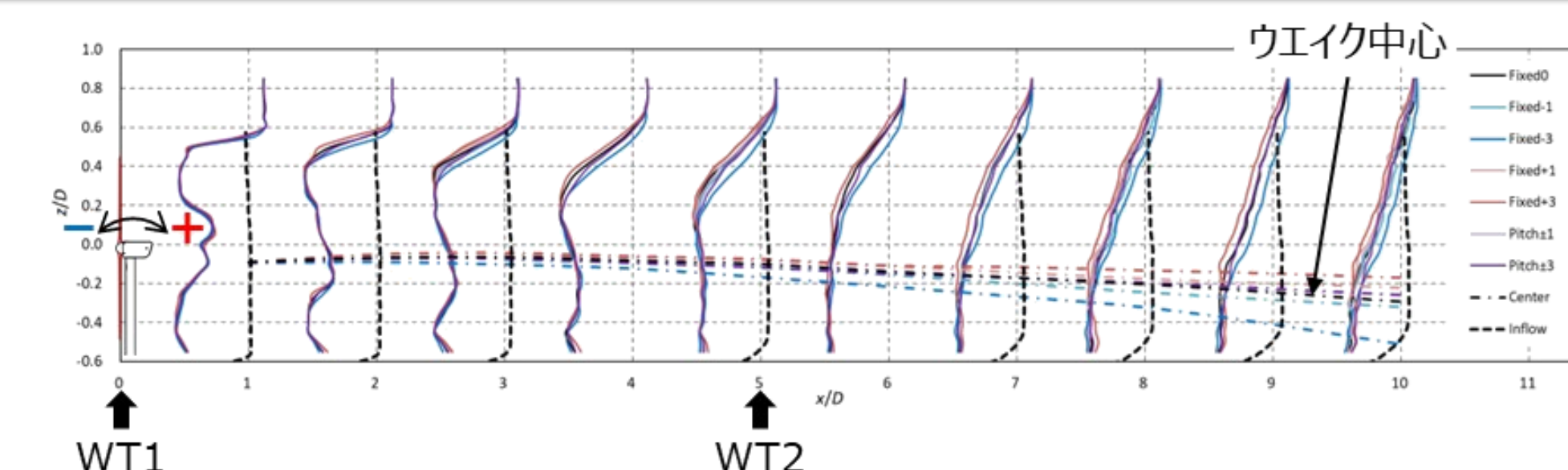


図9 チルトコントロールによるウエイク中心の変化

⑤数値解析モデルの高度化と妥当性検証

：数値風況予測モデル“RIAM-COMPACT”に浮体動揺に対応したActuator Line Modelを実装し、風洞実験で観測されたウエイクの蛇行・渦構造変化を再現、実験結果の妥当性を確認。(図10,11)

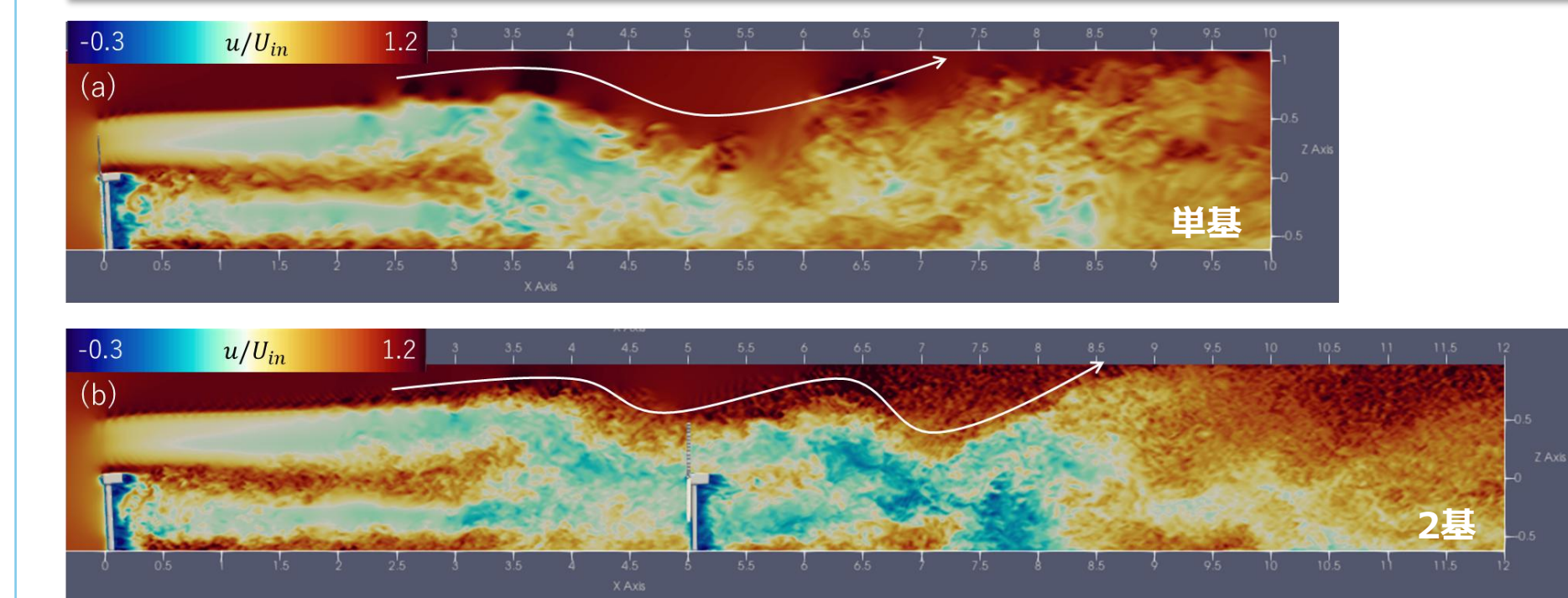


図10 浮体動揺条件における流れ場解析結果

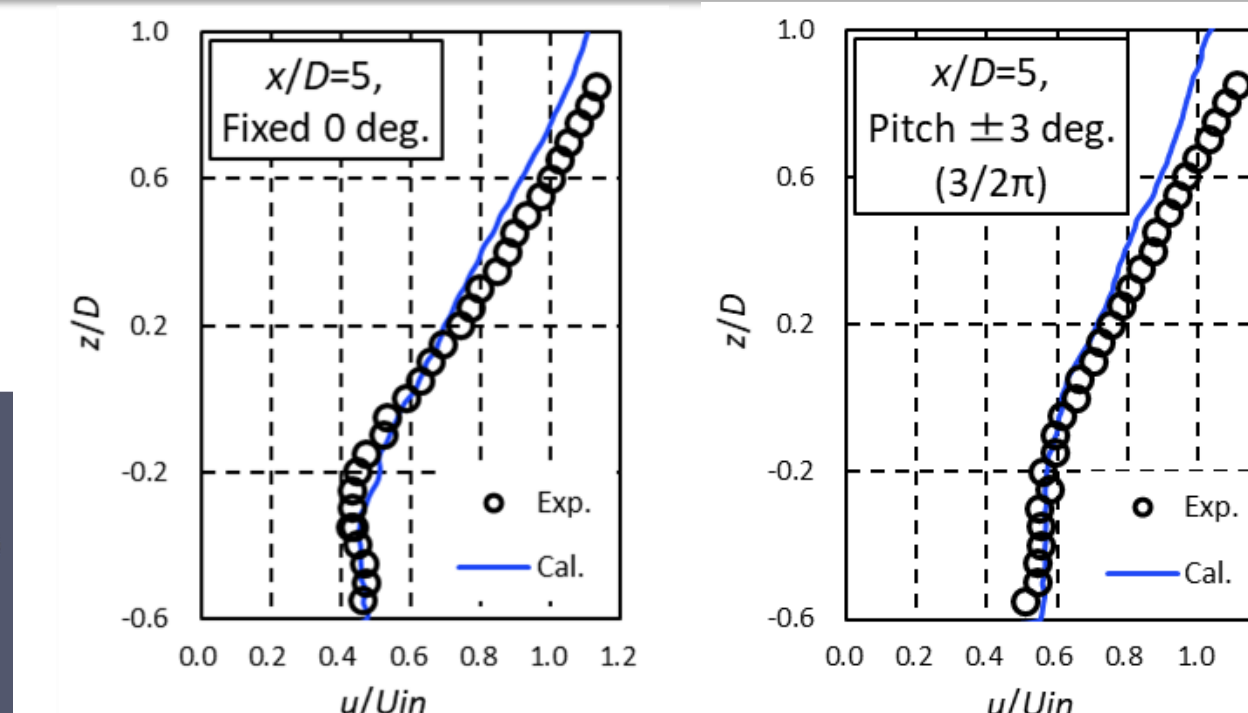


図11 鉛直風速分布の解析/実験比較

(2)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

①リモートセンシングによるウエイク観測手法の開発／ウエイク風況把握

：雄物川／第2雄物川風力発電所にて、鉛直ライダー(VL)・デュアルスキャニングライダー(DSL)による流入風・ウエイク観測を実施。DSL Fixedモードの観測条件整理、VL単独評価法、2次元ウエイク分布評価手法、RHISキャンによる時空間把握手法を確立し、ウエイク風況を把握。(図12,13)

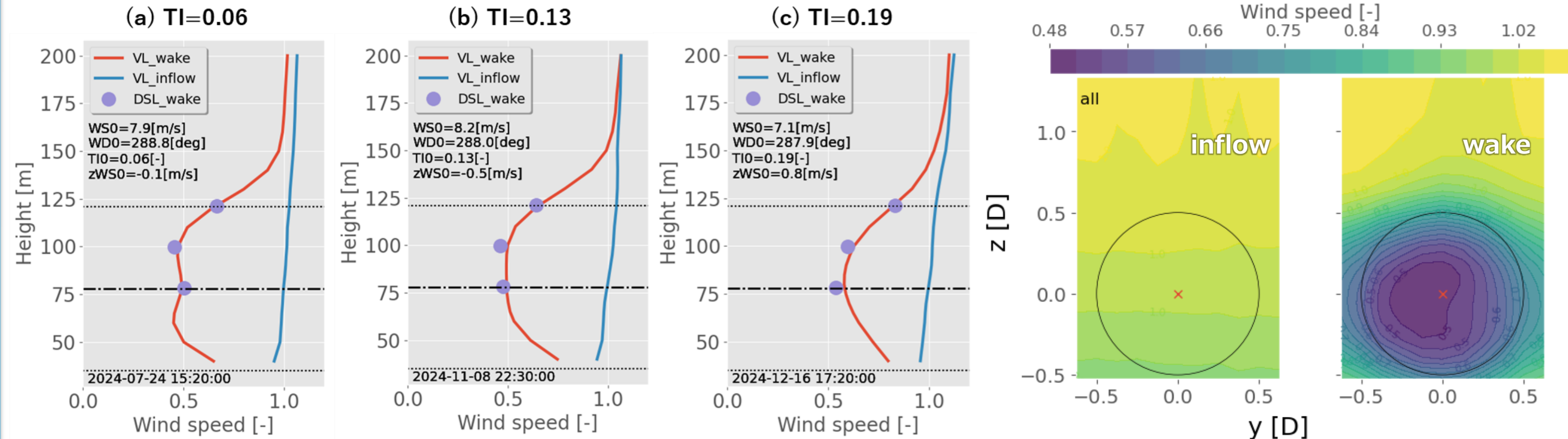


図12 乱流強度別流入風とウエイク風の鉛直分布比較

図13 流入/ウエイクの2次元風速分布

②ウエイクが風車に与える影響評価

：風況観測とCMSによる実機風車挙動計測(図14)より、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(図15)、主軸受荷重および寿命推定が可能であることを示した。また、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、ウエイクが機械的影響を及ぼす広がり角度が7～8deg程度であることを定量的に確認。

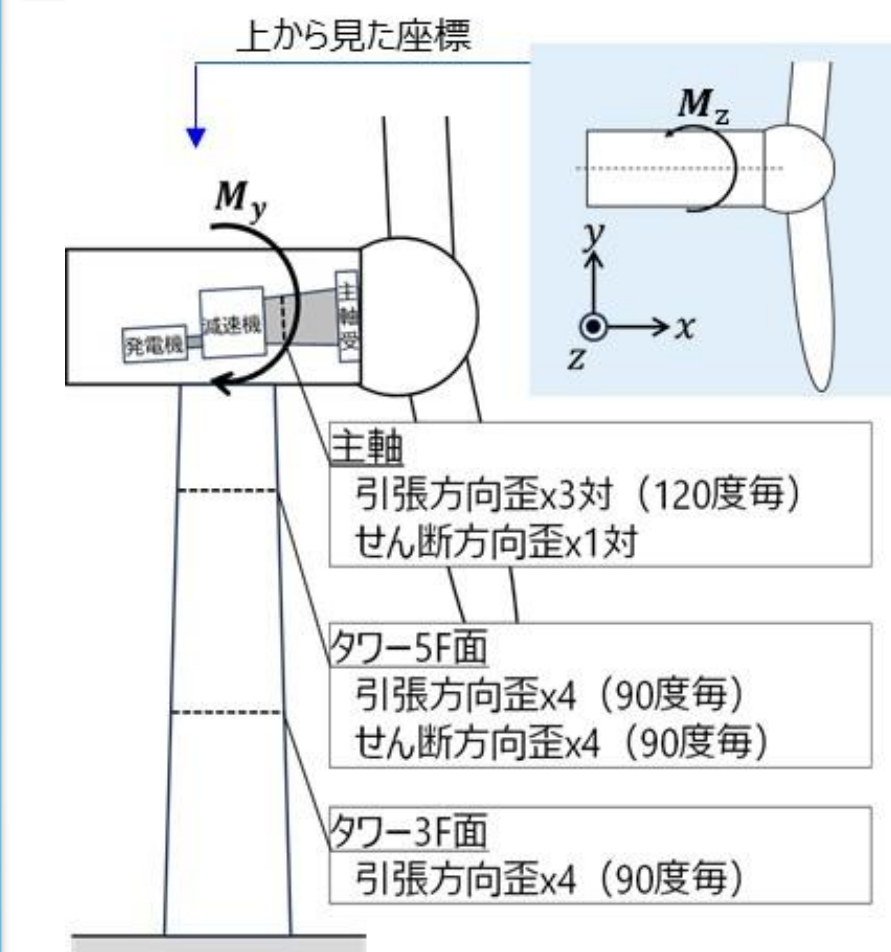


図14 風車内の歪計測位置

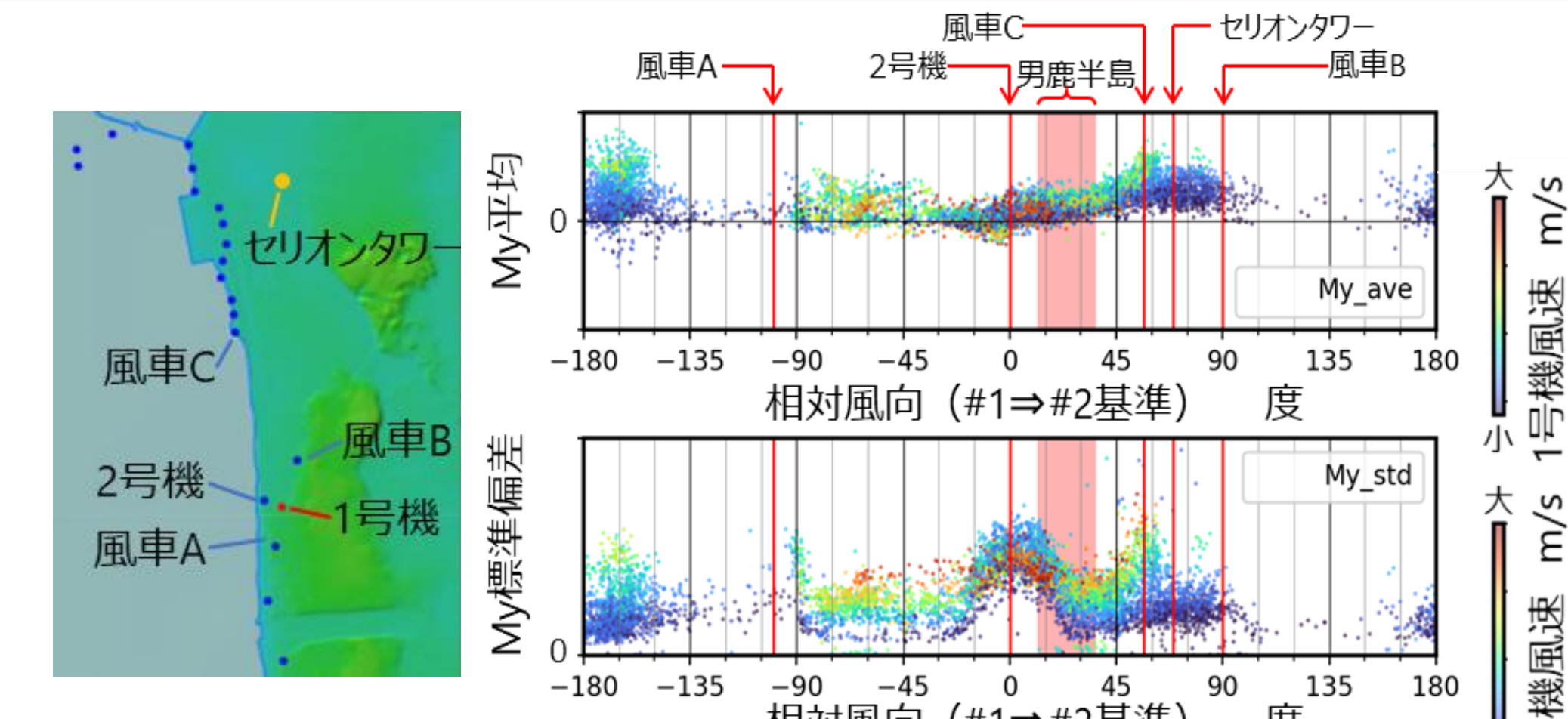


図15 観測対象風車の位置関係とMy平均・標準偏差

(3)浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発

Equation Discoveryフレームワークの構築

：風洞実験・野外計測・数値解析から得られた大規模データを対象に、実用的な時間で方程式推定を行う効率的な探索フレームワークを開発(図16)。様々な観点にて最適化した探索により、従来工学モデルと同等の表現力を持つウエイクモデルの自動発見が可能であることを実証。また、発見した新工学ウエイクモデルの予測精度と計算コストを検証し、後流干渉現象に対しても従来モデルより再現性を改善できることを確認(図17)。

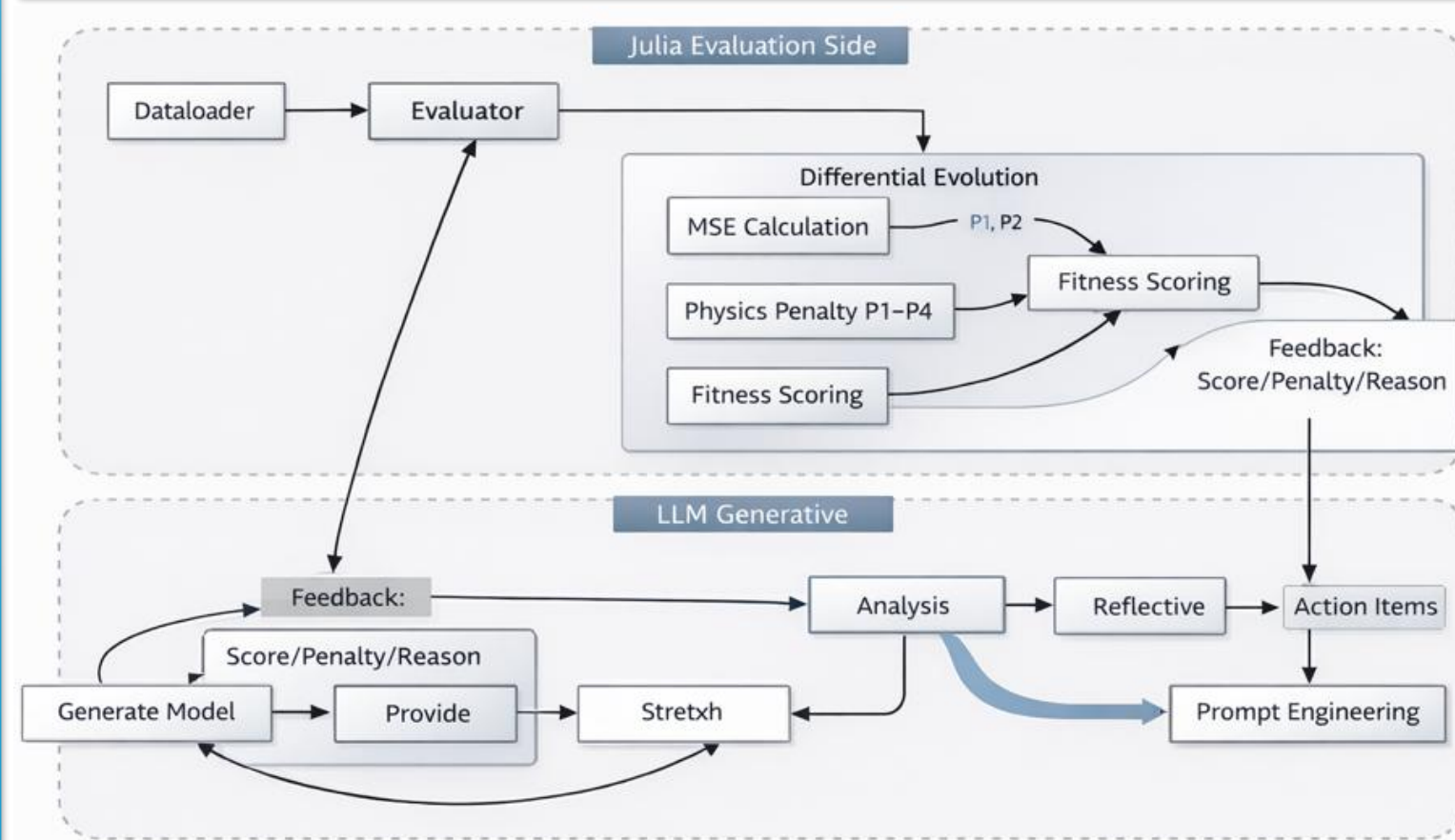


図16 LLM-Guided GP Systemのダイアグラム

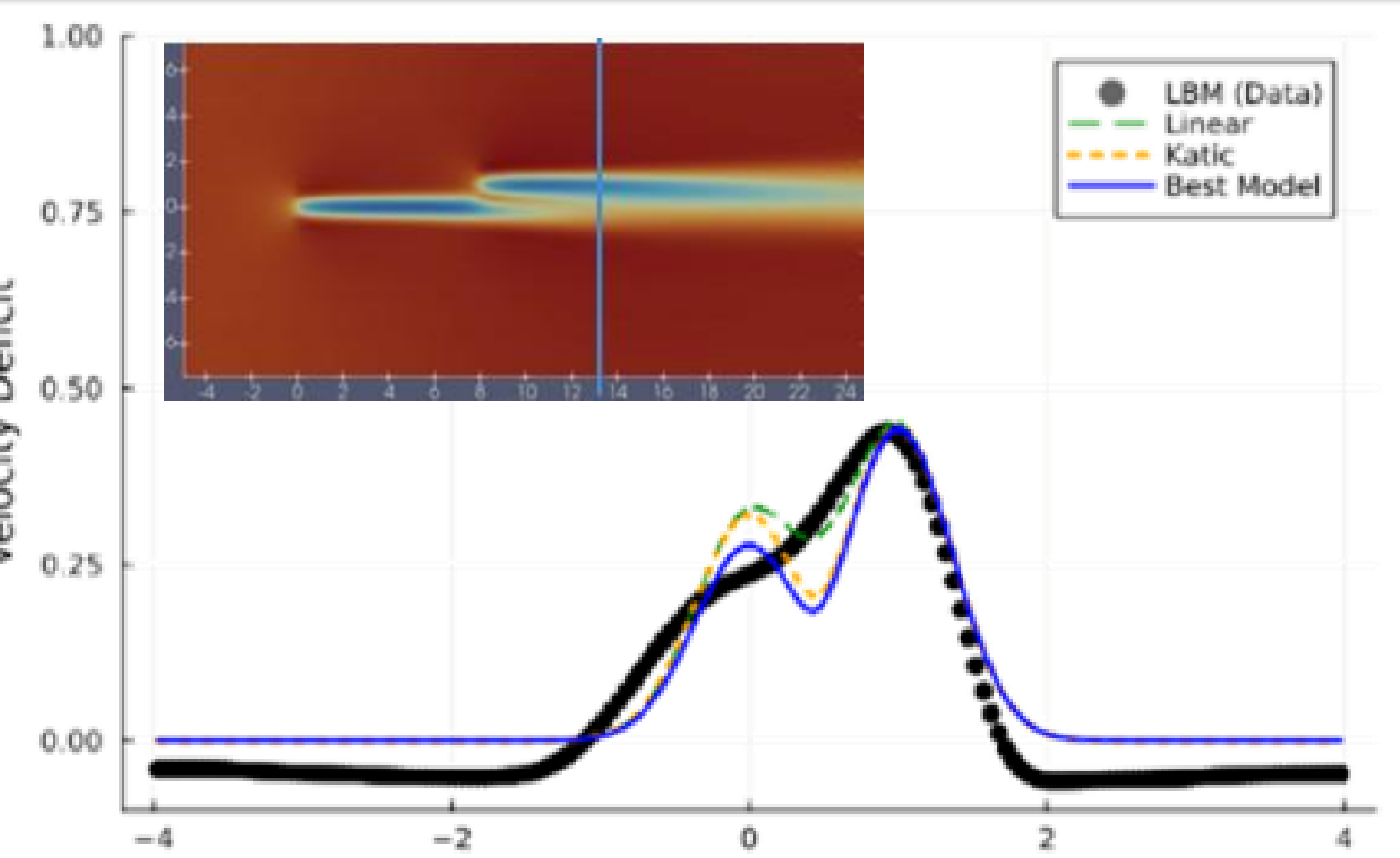


図17 2基配置時のウエイクプロファイルの比較

(4)発展的取り組みと成果 ～ 風洞実験から実サイトへの展開

風洞実験結果から実機挙動への展開に関する考察

：風洞実験と実機観測の整合性評価を実施、自然風の乱流特性を模擬したうえで風洞特有の下方シフトやブロッケージ効果の補正により、風洞実験にて実機同等のウエイク分布を再現可能であることを示した。また、補正後の風洞実験データを用いて機械学習ベースのサロゲートモデルを構築した。さらに、風洞実験で模擬したパーシャルウエイク条件下の加速度応答が、実機スラスト荷重の変動傾向と一致することを確認した。

■課題と今後の取組

本事業では、浮体式洋上風車のウエイク挙動や、そのウエイクを受けた風車が受ける影響を明らかにした。さらに、風洞実験のデータを補正することで、実機挙動が再現可能なことも示した。この成果を活用し、様々なサイト風況やウエイクコントロールを再現する風洞実験を中心に実施、より安全・安心な風力発電所の設置計画から、ライフサイクル発電量を増大させる運用に資する技術開発を推進していく。

■実用化・事業化の見通し

本事業の参画機関を中心に、陸上風車・洋上風車を問わず、「事業不確実性の低減」、「風車運用制御の改善(故障リスク低減)」、「CMS技術の向上(寿命予測精度向上)」の形で社会実装が期待され、一部技術については洋上風力向けアーキテクチャに適用していく。