

RIAMフォーラム2026 / 九州大学筑紫キャンパス 総合研究棟(C-CUBE) 1階 筑紫ホール  
2026年6月26日 10:40-11:00 受賞講演 (The JACM Computational Mechanics Award / 日本計算力学賞)

### 内田 孝紀 / Uchida Takanori

応用力学研究所 / 再生可能流体エネルギー研究センター / 洋上風力エネルギー高度利用分野

2025



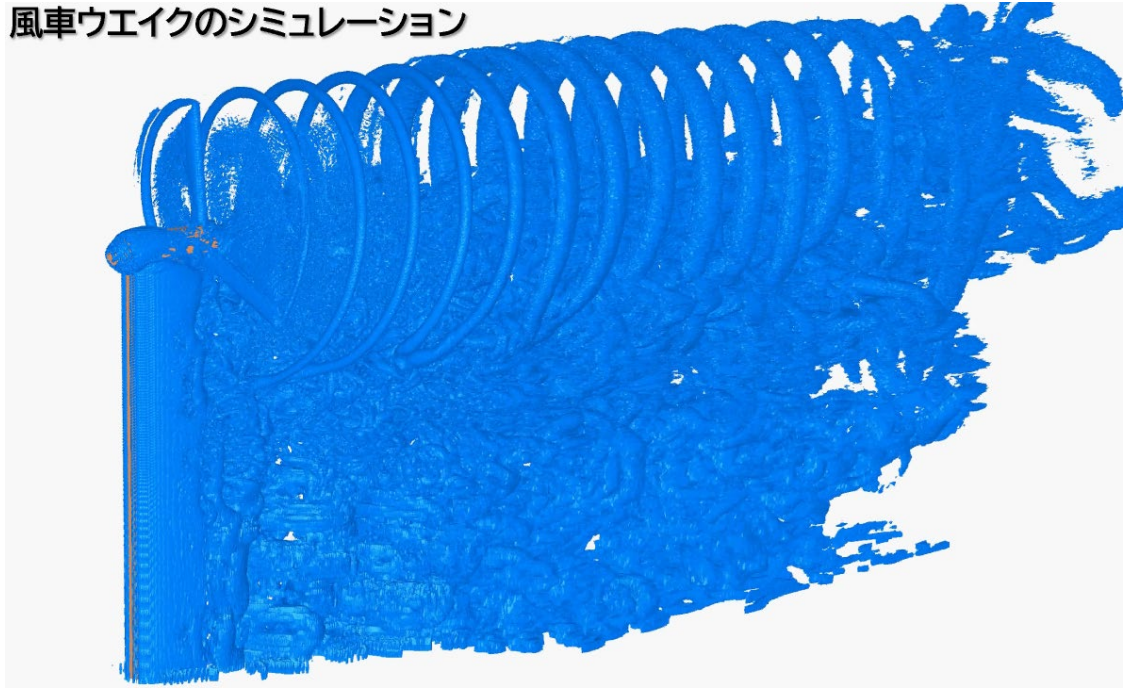
Kazunori Fujisawa

Koji Fukagata

Takanori Uchida

日本計算力学連合 / JACM / 日本計算力学賞(3名以内)  
The JACM Computational Mechanics Award

計算力学の広い分野での顕著な研究業績, ソフトウェア  
開発, 計算技術開発を行った研究者に対して与えられる.

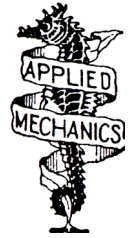


風車ウエイクのシミュレーション

<https://www.ja-cm.org/Japanese/Award/past.html>



## 風車ウエイク研究の最前線と将来展望





新技術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

エネルギー・環境分野における革新的技術の国際共同研究開発

新産業・革新技术創出に向けた先導研究プログラム

未踏チャレンジ

[略称]

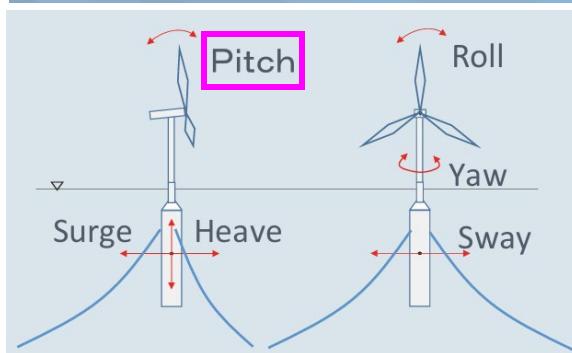
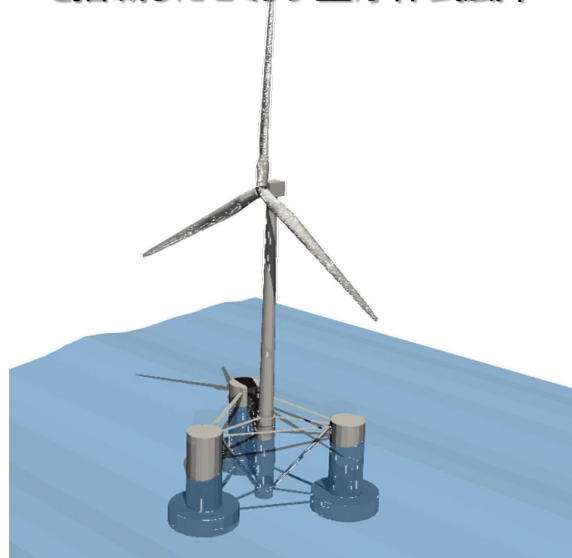
エネ環

国際

新新

未踏

IEA15MW(D=240m, H=150m)  
を搭載したセミサブ型浮体式風車



1. 並進運動(3方向)
- ✓ サージ(Surge / 前後揺れ)
  - ✓ スウェー(Sway / 左右揺れ)
  - ✓ ヒーブ(Heave / 上下揺れ)
2. 回転運動(3方向)
- ✓ ヨー(Yaw / 旋回)
  - ✓ ロール(Roll / 縦揺れ・横傾斜)
  - ✓ ピッチ(Pitch / 縦傾斜)
- 浮体式風車の6自由度



大型浮体式洋上風力に関する新たな技術開発に  
関して、産学連携による開  
発の概要が発表された。  
本開発は、新エネルギー  
1・産業技術総合開発機  
構(NEDO)の202  
3年度「NEDO先導研  
究プログラム」新技術先  
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」の中  
「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」と  
して、代表の九州大学  
及び東芝エネルギーシ  
ステムズ(ESS)、日立  
造船、日本精工と共同で  
採択された。

浮体式風車のシミュレーション  
技術開発実施へ

NEDO/九州大学/東芝ESSほか

主眼とされているのは、機械的負荷増大などの悪影響を及ぼすことで知られる浮体式風車のウエイク(風車後方の乱流・風速欠損領域)に関する評価手法開発だ。風車ウエイクは特に複数の風車が設置されているウインドファームでは、相互干渉することでウエイクの乱れ具合も複雑になり、下流側では、導入量に比例して流風車の発電量低下や、技術の開発が各方面で進められている。

従来はウエイク予測技術では、導入量に比例して洋上風力だと着床式を前提にしている例が多かった。しかし、浮体式風車は海の波浪に影響され、揺動することから、海底に固定されている着床式と異なり、ウエイクの挙動も着床式と異なることが予想される。

そこで本開発では、九州大学応用力学研究所の大型風洞設備を用いて人工的に風の流れを発生させ、実際の風の流れと浮体式風車の揺れを再現。浮体式風車特有の風車ウエイク現象と、その相互干渉現象について評価する。現象について評価する。そして評価結果を15%程度の風車へ拡張した場合のウエイク影響と相互干渉現象を解析する。また、沿岸地域の風力発電所を活用し、最新のリモートセンシング技術を用いて洋上の気流を感知・計測し、計測した気流データと風車の状態監視データによってウエイクが風車に与える影響評価も実施する。

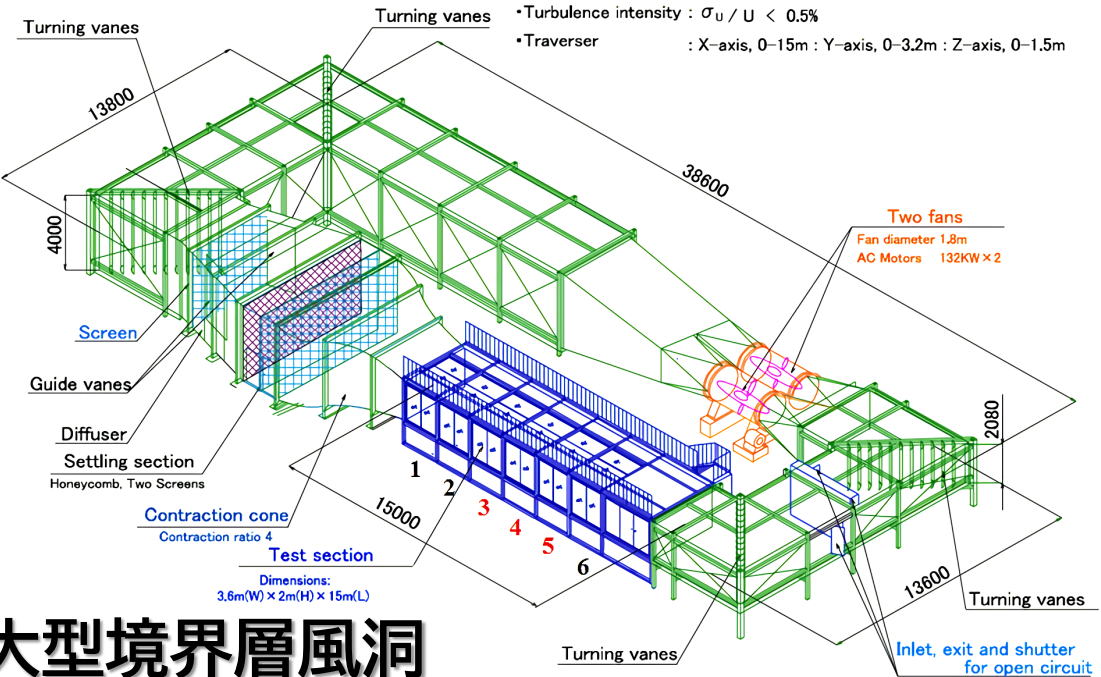
適切な発電所レイアウト  
実現しコスト削減に貢献

I-B1課題 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

(003) 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

Specifications

- Max wind speeds : U=30m/s (60m/s at 2nd test section)
- Turbulence intensity :  $\sigma_U / U < 0.5\%$
- Traverser : X-axis, 0-15m : Y-axis, 0-3.2m : Z-axis, 0-1.5m



大型境界層風洞

# 本事業の目的と概要

ピッチ動揺を伴う浮体式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の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

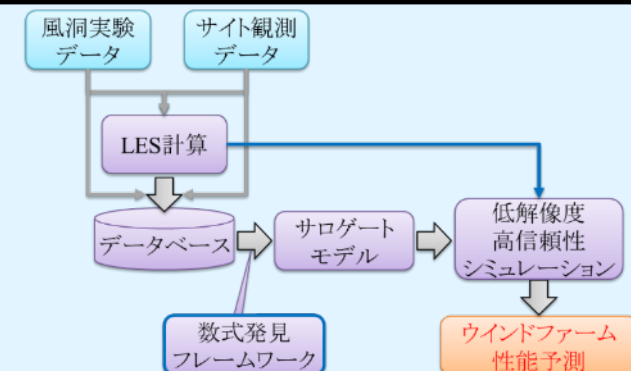
秋田県沿岸に立地する実機風車を対象とし、  
流入風・ウエイク風況と風車挙動を観測、相関性を評価



## III. 浮体式風車ウエイクの工学数式モデル開発

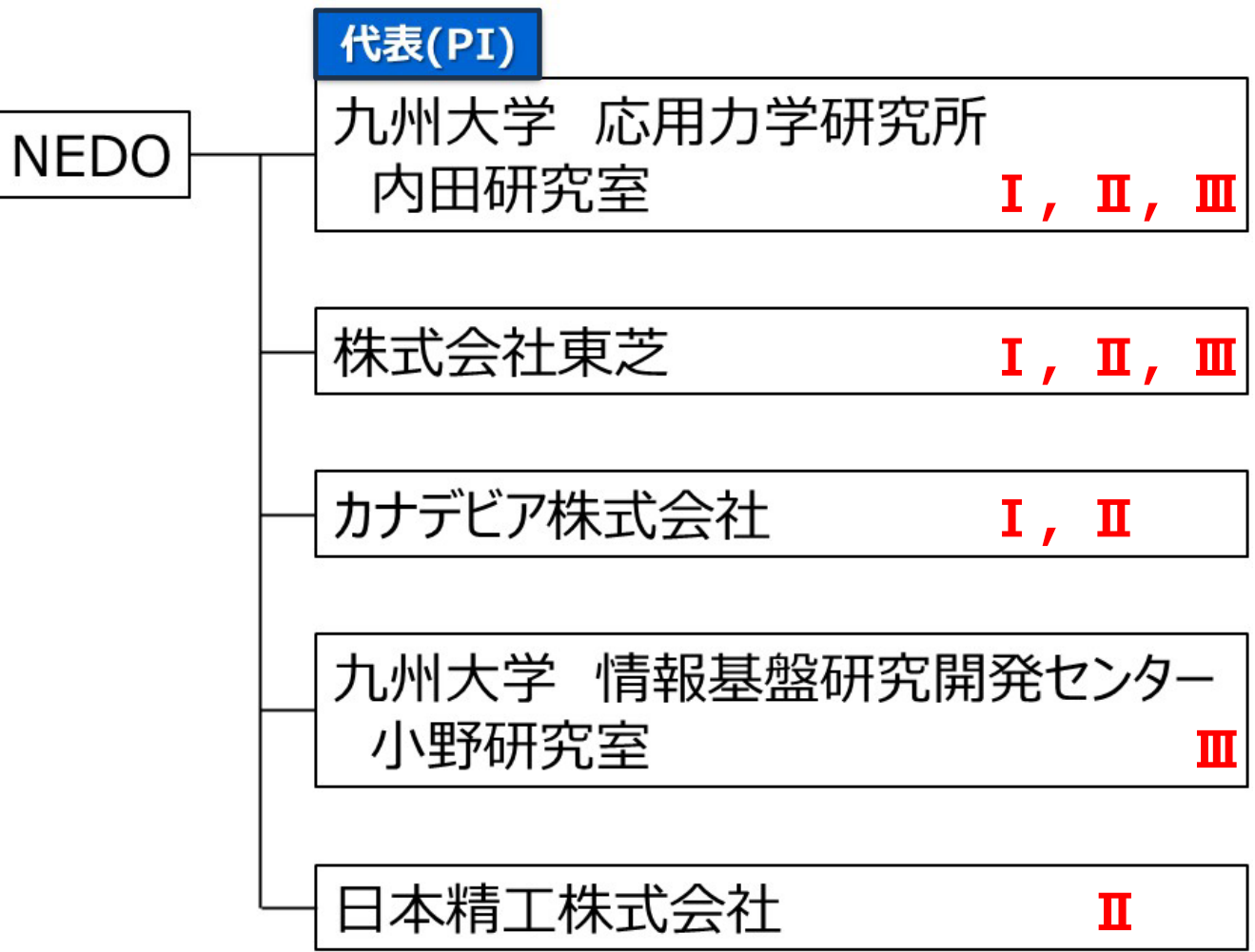
風洞実験・野外観測・数値シミュレーションから得られるデータに対して  
データ駆動科学手法を適用し、新たな工学モデルを開発

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



# 本事業の実施体制

九州大学応用力学研究所を筆頭に、5機関体制で実施／3つの研究項目を協働して推進

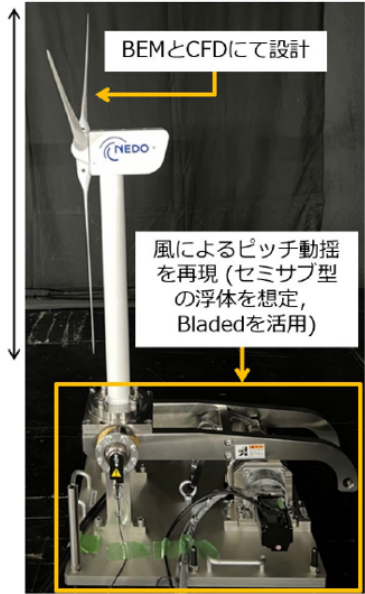


第3回研究開発推進委員会後の集合写真 (九大応力研・大型境界層風洞にて／2024.2.22)

# 将来計画：風洞実験から実サイト(ウエイク風況・風車の風荷重)への展開

高信頼性の風洞実験データ(CFDを含む)とデータ駆動科学との有機的連携により、多様な実サイトのウエイク風況・風車に対する風荷重の予測可能性を示すことが、本事業の最大の命題(サイト観測の補完)

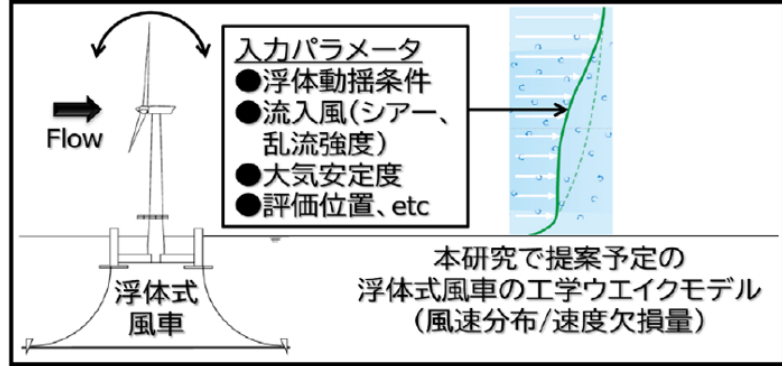
## I：風洞実験



本PJで製作した15MW風車模型(1/240)と加振装置

浮体式風車ウエイクを対象とした風洞実験データに基づき、これを模擬するサロゲートモデル構築手法を確立する。

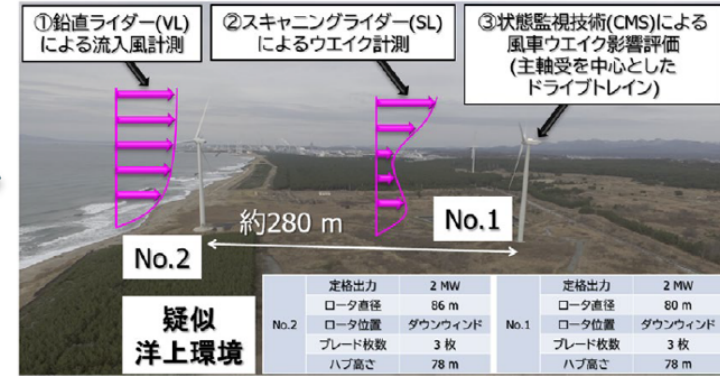
## II：数式モデル / データ駆動科学



浮体式風車ウエイクを対象としたサロゲートモデルのイメージ

風洞実験データから構築されたサロゲートモデル(浮体式風車ウエイクを対象)を、実スケールの着床式風車ウエイクに適用して実測データと比較・検証する。

## III：サイト観測



秋田県雄物川風力発電所を活用した風車ウエイク影響評価

風洞実験⇒データ駆動科学⇒実機の風況・荷重推定

# 風洞実験における精密風車模型の設計・製作①

✓15MW級風車をモチーフに、風洞実験に対応する低Re数型ブレードを設計(簡易計算, CFD)

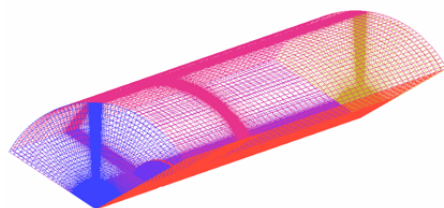
✓セミサブ形式の浮体を対象とした連成解析を実施し、ストローハル則からピッチ動揺の振幅と周を決定

## 風車模型のブレード設計の考え方

実機風車IEA 15MW(D=240 m, H=150 m)のウエイクの流動特性(特に、翼先端渦の挙動)を風洞内で再現することに主眼を置き、低レイノルズ数翼型を基礎とし、以下の3種類の空力パラメータを設計・決定した。

(目標値)

- パワー係数 : 0.4 程度
- スラスト係数 : 0.75 程度
- 最適周速比 : 8.0 程度



CFD解析(1/3モデル, 定常解析)

- 回転数 : 1,272 rpm  
(サーボモータ : 三菱電HKKT43WK)
- 最適周速比 : 9.0
- パワー係数 : 0.374

超々ジュラルミン(A7075)製のブレード



U=7.4 m/s →

↻ ピッチ動揺

D=1 m

H=0.625 m

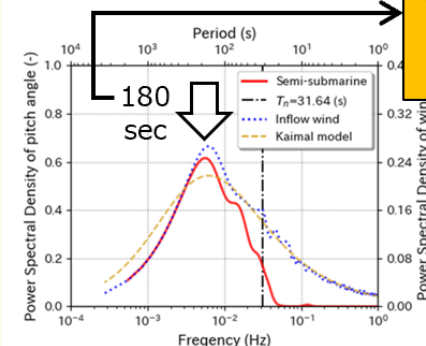
翼素運動量理論(BEM)と3次元流体解析(CFD)を併用して設計・決定

風によるピッチ動揺を再現(セミサブ型浮体, Bladedによる連成解析により諸パラメータを決定)

## 加振装置設計の考え方

IEA 15MW(D=240 m, H=150 m)を搭載したセミサブ型浮体式風車を対象とし、日本近海の気象・海象条件を外部条件とした連成解析を実施した。得られた結果に基づき、ストローハル則を適用することで加振装置の動揺条件を決定した。

- 外部条件 : IEC TS 61400-3-2:2019 (Ed.1)のDLC1.3 相当
- ピッチ動揺振幅 : 3.0d eg



流入風の変動によりピッチ動揺が発生!

カタナリ係留



$$S_t = \frac{D_r}{T_r U_r} = \frac{D_m}{T_m U_m} \quad r : \text{real} \quad m : \text{model}$$

$$(\therefore) T_m = \left( \frac{D_m}{D_r} \right) \left( \frac{U_r}{U_m} \right) T_r$$

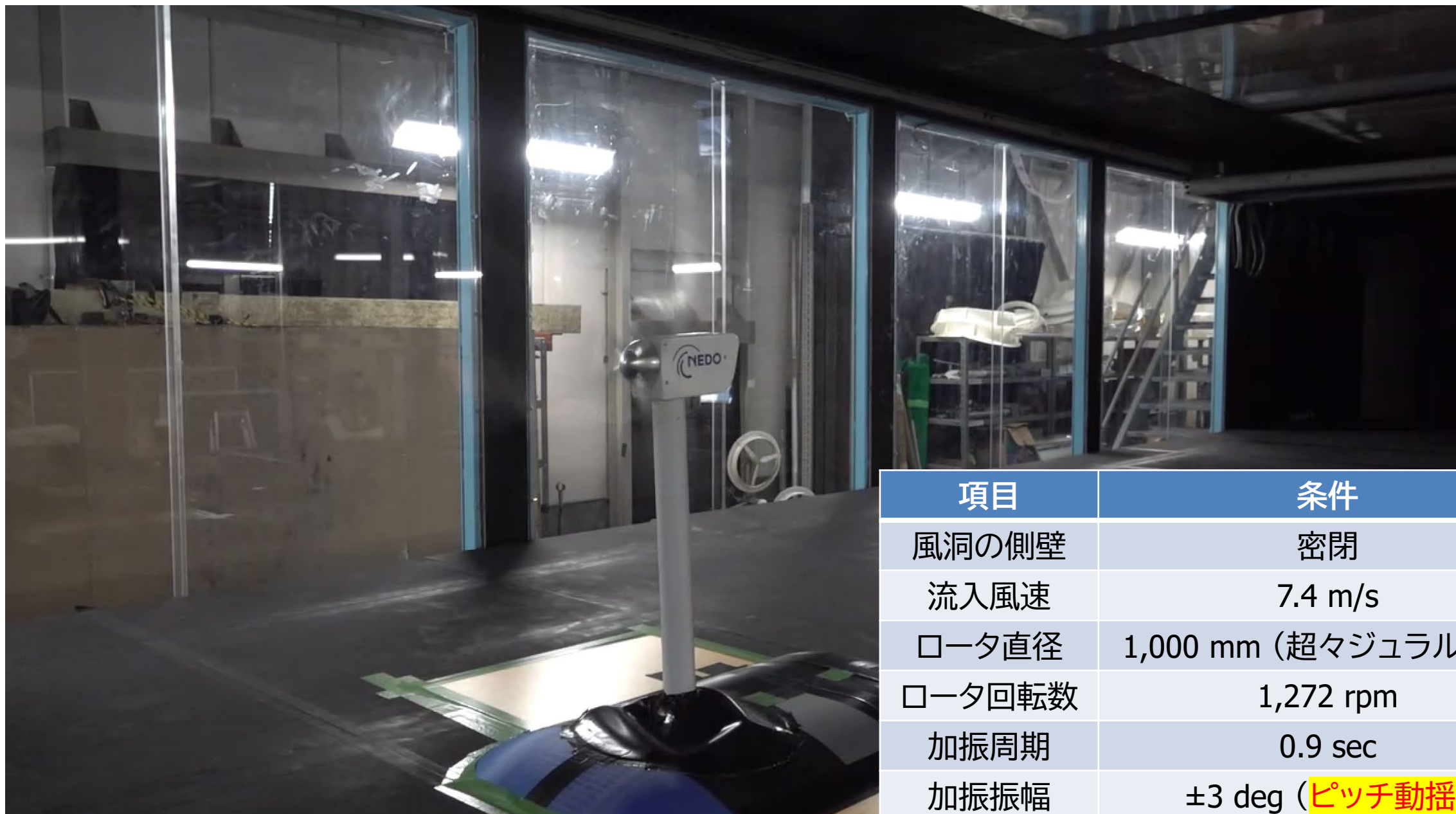
$$= \left( \frac{1}{240} \right) \left( \frac{8.5}{7.4} \right) 180 \approx 0.9 \text{ sec}$$

- 加振装置の動揺振幅 : 3.0 deg
- 加振装置の動揺周期 : 0.9 sec

加振装置は偏心カムとアームにより、モータの回転運動を風車模型のピッチ動揺に変換

連成解析ソフト: Bladed / Orcaflex

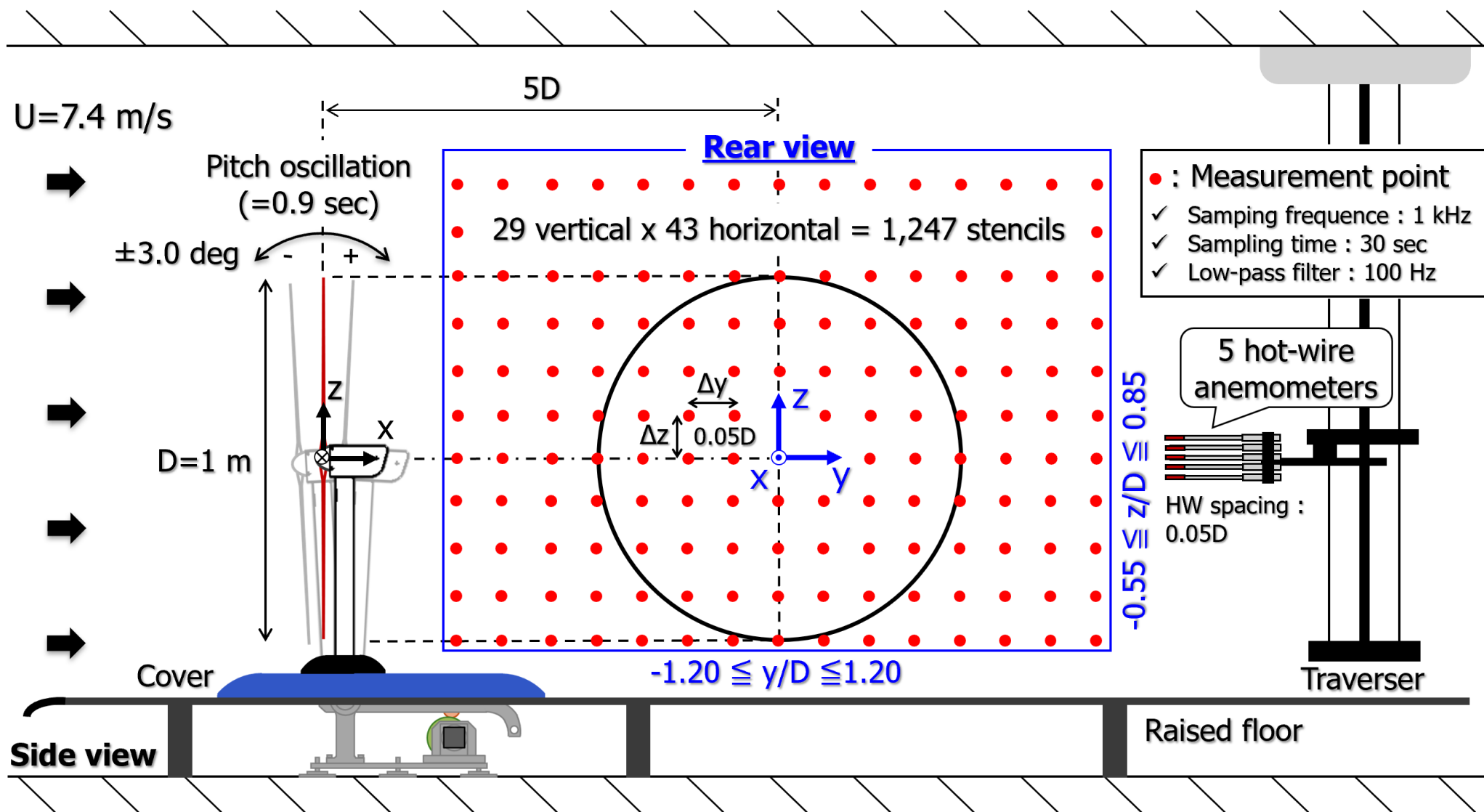
# 風洞実験における精密風車模型の設計・製作②／動画



項目	条件
風洞の側壁	密閉
流入風速	7.4 m/s
ロータ直径	1,000 mm (超々ジュラルミン)
ロータ回転数	1,272 rpm
加振周期	0.9 sec
加振振幅	±3 deg (ピッチ動揺)

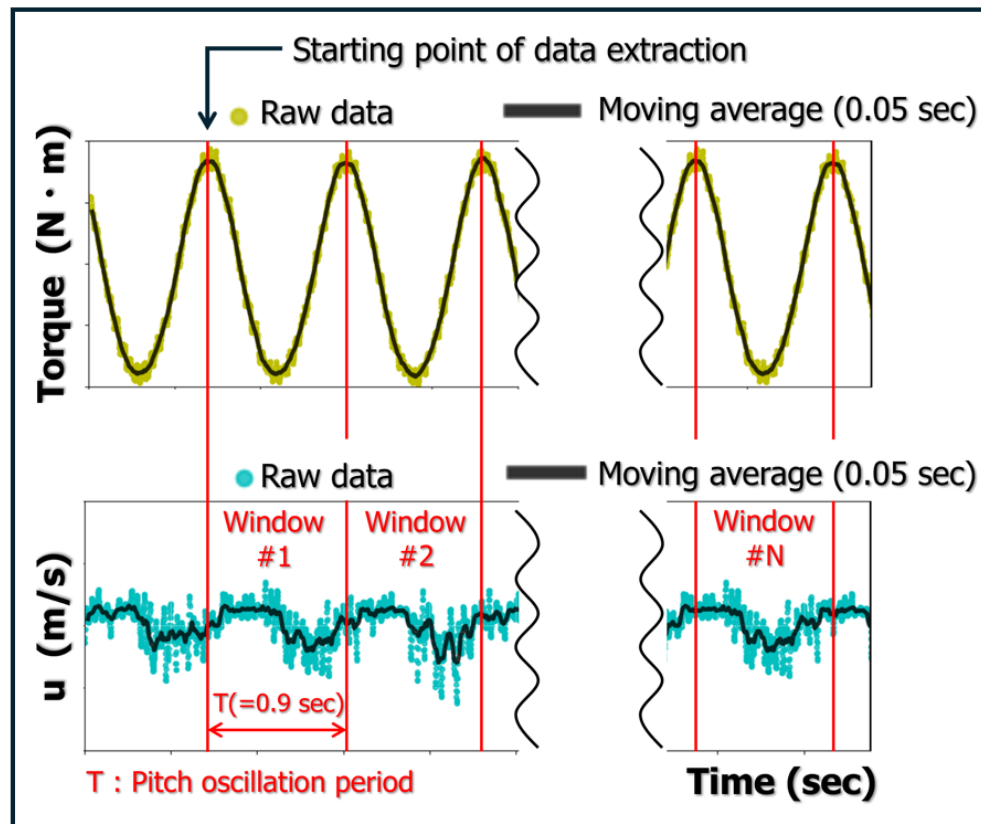
# 風洞実験における自動計測システムの構築

風車下流( $x=5D$  / rear plane)における約1200点のウエイク風速の自動計測を実施



# 風洞実験における独自のデータ処理手法の開発

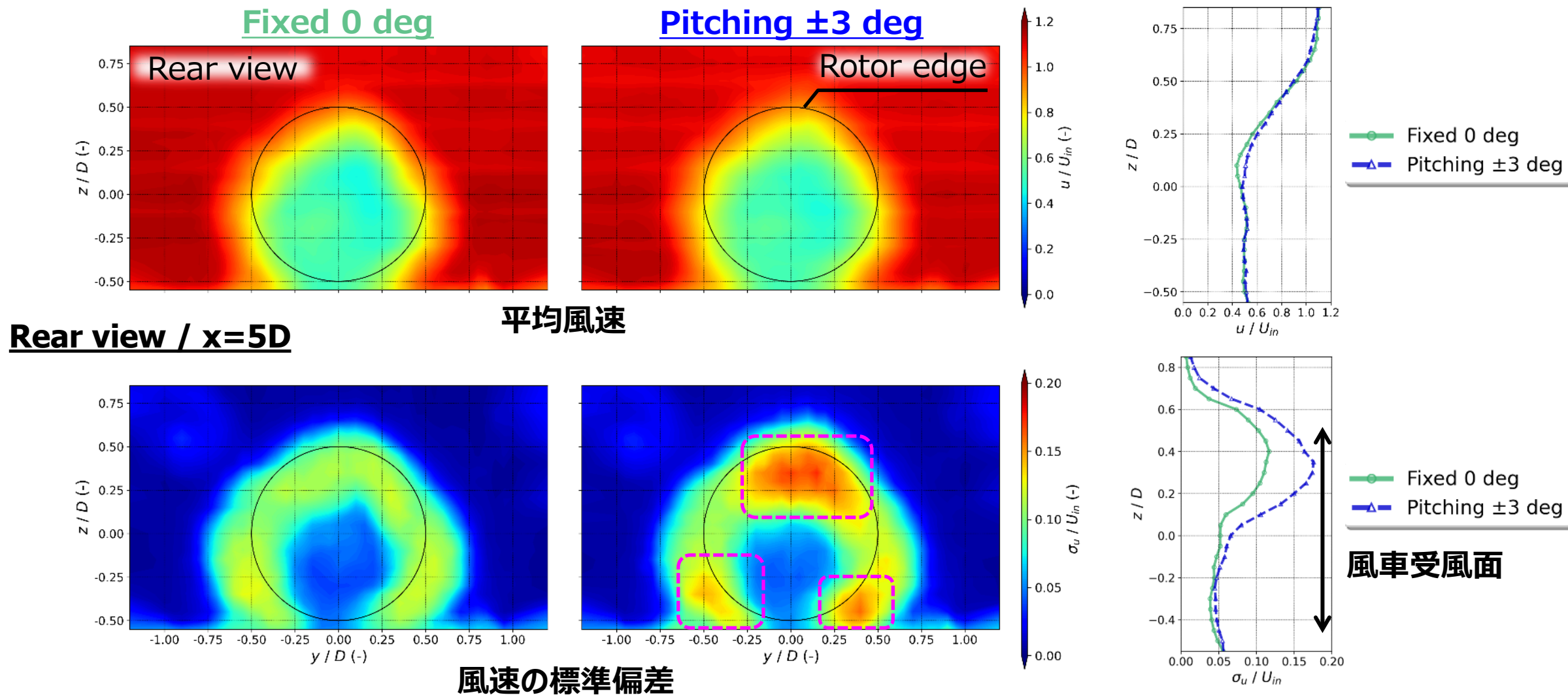
ピッチ動揺に起因した風車ウエイク現象を解明するため、独自のデータ処理手法を開発



1. ブレード回転による細かな周波数(21.2 Hz)を除去するため、トルク(風速)の時系列データに移動平均(=0.05 sec)を施す
2. トルクが最初に最大値をとる時刻を「データ切り出しの起点」に設定する
3. 上記2に合わせ、1周期分(=0.9 sec)に対応する風速の時系列データ(900個)を切り出す ※サンプリング周波数1 kHz
4. 続けて、N個のデータを切り出し、これらに位相平均を施す
5. ピッチ動揺に起因した渦構造を抽出(明確化)できる

# 風洞実験結果① / 時間平均場

ピッチ動揺の有無によらず、平均風速に有意な差異はないが、ピッチ動揺時に標準偏差は局所的に増加

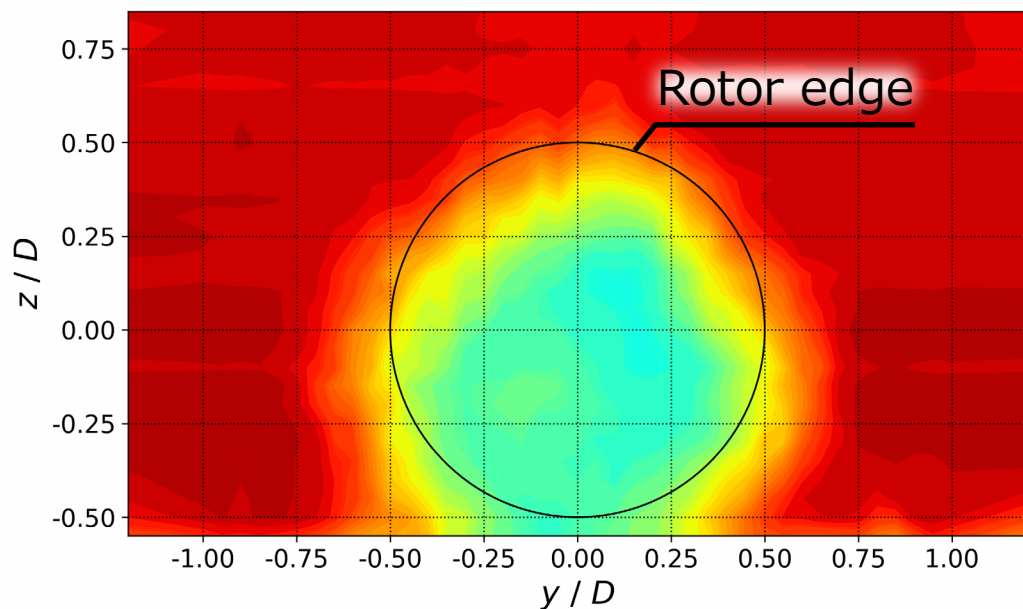


# 風洞実験結果② / 位相平均場

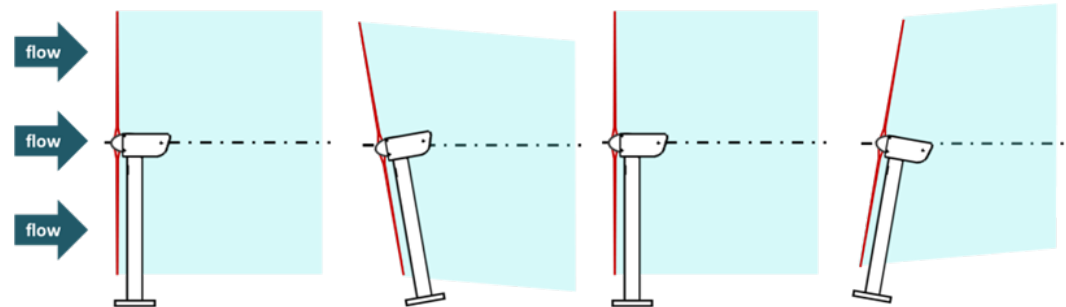
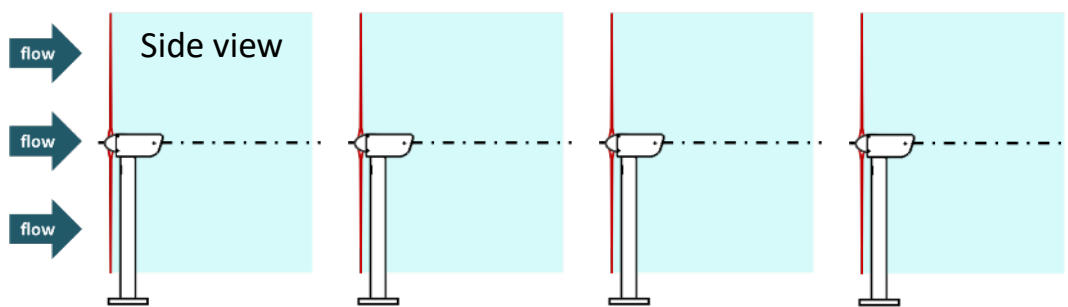
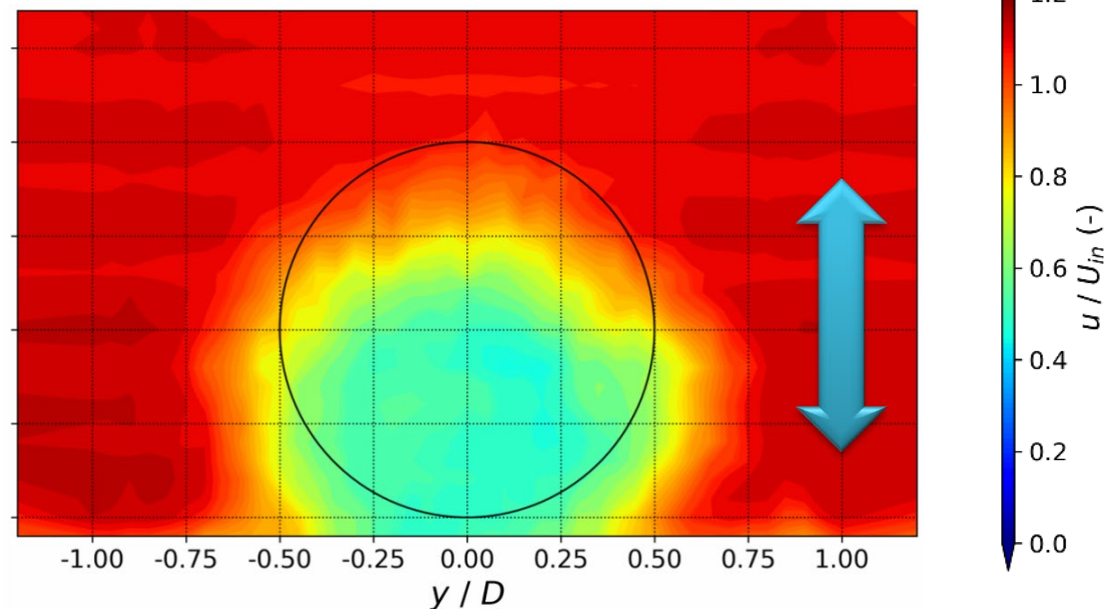
ピッチ動揺により、ウエイクは上下に蛇行し、床面の影響を受けて楕円形状になることを確認

Rear view /  $x=5D$

Fixed 0 deg



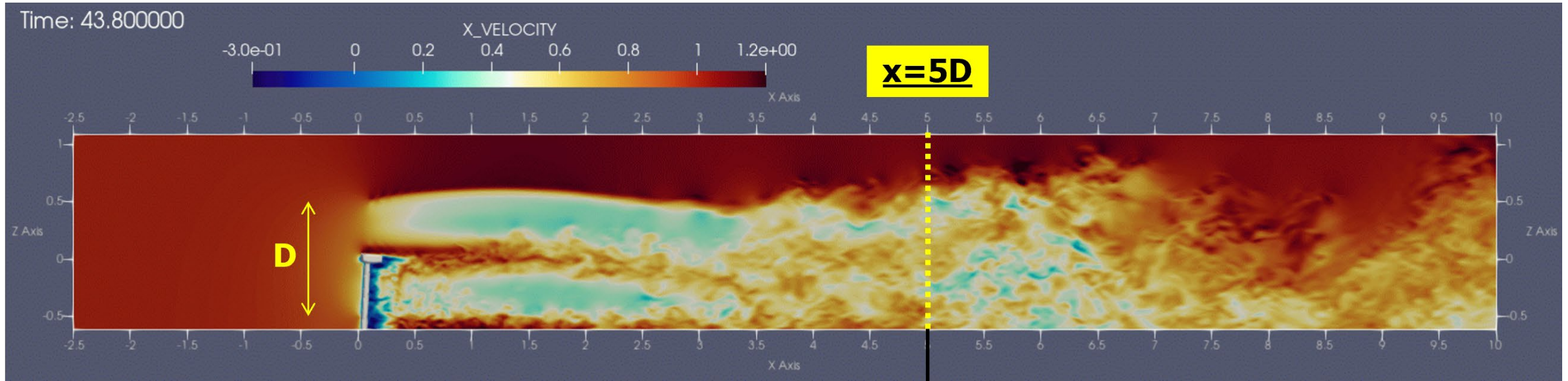
Pitching  $\pm 3$  deg



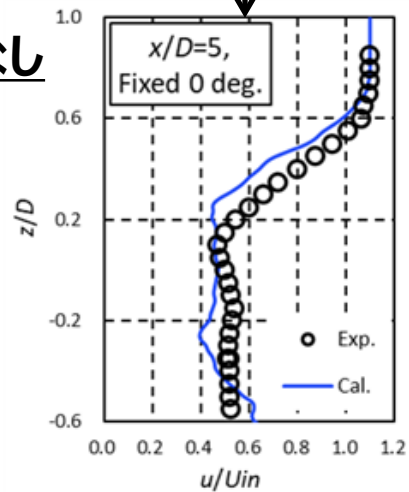
ウエイクの鉛直方向蛇行の出現 (Vertical Meandering)

# ピッチ動揺を考慮したActuator Line Modelによる風車ウエイクシミュレーション

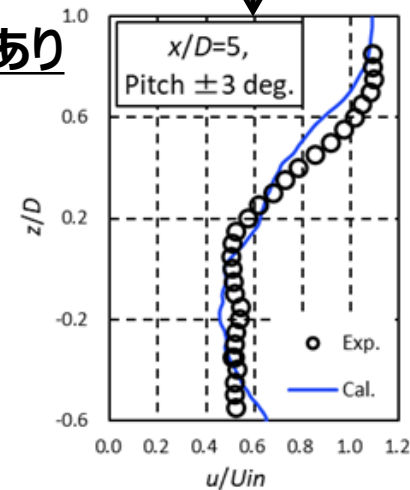
ピッチ動揺の有無によらず、LESシミュレーションは風洞実験データを良好に再現可能



ピッチ動揺なし



ピッチ動揺あり



平均風速の比較  
(CFDと風洞実験)



風洞実験



数値シミュレーション

# 大規模言語モデルLLM-SRシステムを用いた新しい工学数式モデルの開発

- ✓プログラムベースの方程式探索の代替案として、大規模言語モデル(LLM)を利用した数式発見システム(LLM-SR)を開発
- ✓本LLM-SRシステムを用い、従来の2D工学モデル(JensenモデルやBastankhahモデル)と同等の独自の風車ウエイクモデルの提案に成功
- ✓1試行あたり20個体×20世代の計算を実施し、ノートPCの1コアで20分程度で終了

ベースとなる知識

Jensenモデル  $1 - \frac{a}{(1 + bx)^2}$

Bastankhahモデル  $1 - ae^{-br^2}$



ベストモデル:  $a(1 + e \times k \times CT) / \left( (1 + bx)(1 + cr^6(1 + d \times k))^2 \right)$

物理的意味の考察:

□ Rational Squared Core  $(1 + R)^{-2}$ :

従来のガウス分布(Bastankhah)や単純な有理関数(Jensen)とは異なり、ウエイクの中心領域が平坦で、境界付近で急激に減衰する「トップハット型」に近いプロファイルを示唆している。これは実際の風車ウエイク(特に近傍～中間後流)の特性と良く一致する。

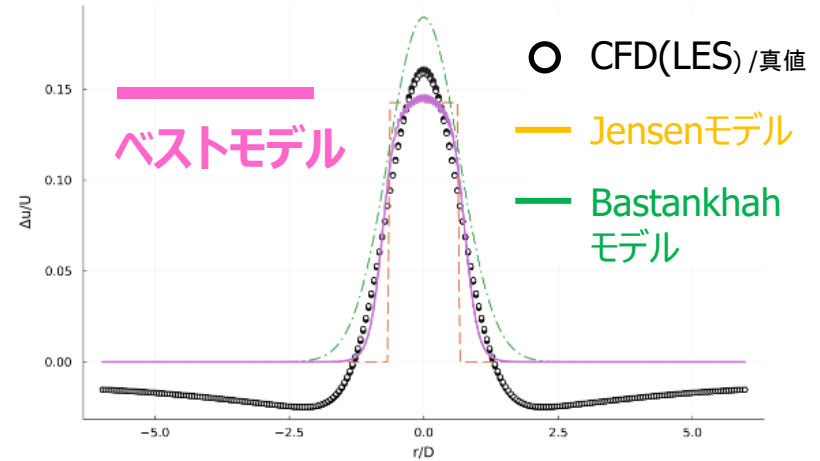
□ Width Modulation  $1 + b \times k$ :

ウエイクの幅(広がり)が乱流運動エネルギー(k)によって制御される。乱流が強いほどウエイクが早く拡散するという物理現象を直接的に表現している。

□ Amplitude Modulation  $1 + e \times k \times CT$ :

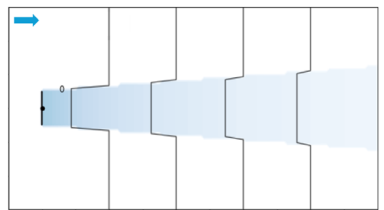
ウエイクの深さ(速度欠損の最大値)が、推力係数(CT)と乱流(k)の積によって変調されている。これは、高い推力が強いウエイクを作り、乱流がそれを混合・回復させるという相互作用を簡潔にモデル化している。

x=5Dにおける風車ウエイク内の風速分布



Jensenモデル

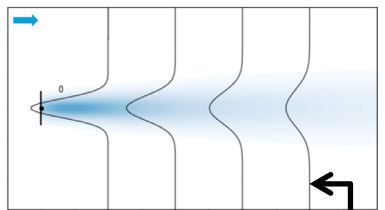
トップハット形



台形状にウエイクが広がる

Bastankhahモデル

ガウス分布形



ガウス分布状にウエイクが広がる

小 速度欠損 大

我々が知りたいこと:

風車下流の5~7D位置(Dはロータ直径)における速度欠損量(風車ウエイク領域内の速度分布を表す数式)

□ Jensenモデルに対して39.85%、Bastankhahモデルに対して45.05%の改善

□ 従来の経験則や理論的仮定にとらわれない、データ駆動型の新しいウエイクモデル構造を発見

# まとめ

浮体式風車特有の複雑なウエイク挙動を体系的に把握することに成功するとともに、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。

□ Top10ジャーナル等への投稿準備

□ データ駆動型モデル(LLM-SR)のさらなる発展(小野先生・内田)／APCOW(※)への投稿

Kenji ONO and Takanori UCHIDA, Physics-Aware LLM-Guided Equation Discovery for Wind Turbine Wake Modeling

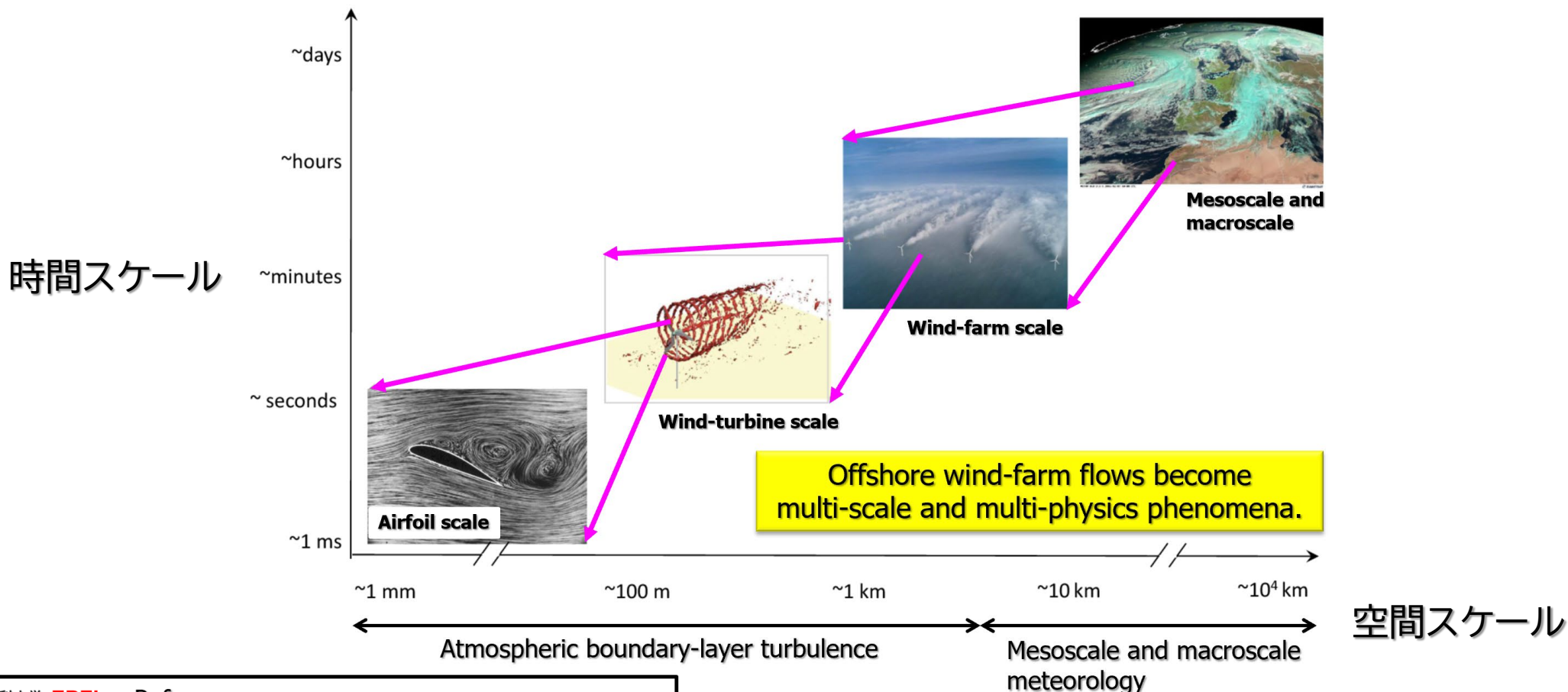
□ 次期大型国プロの準備

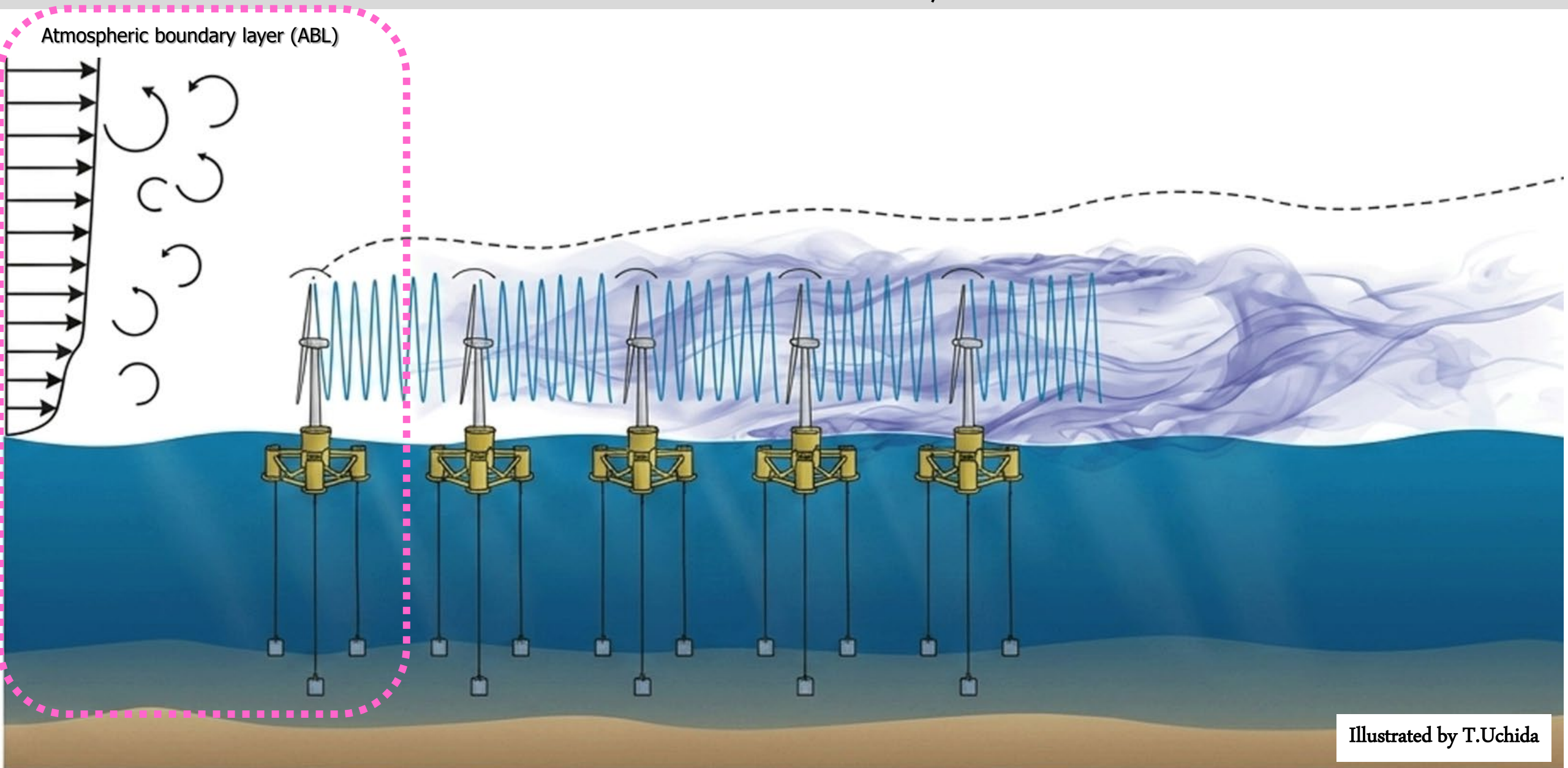
(※)

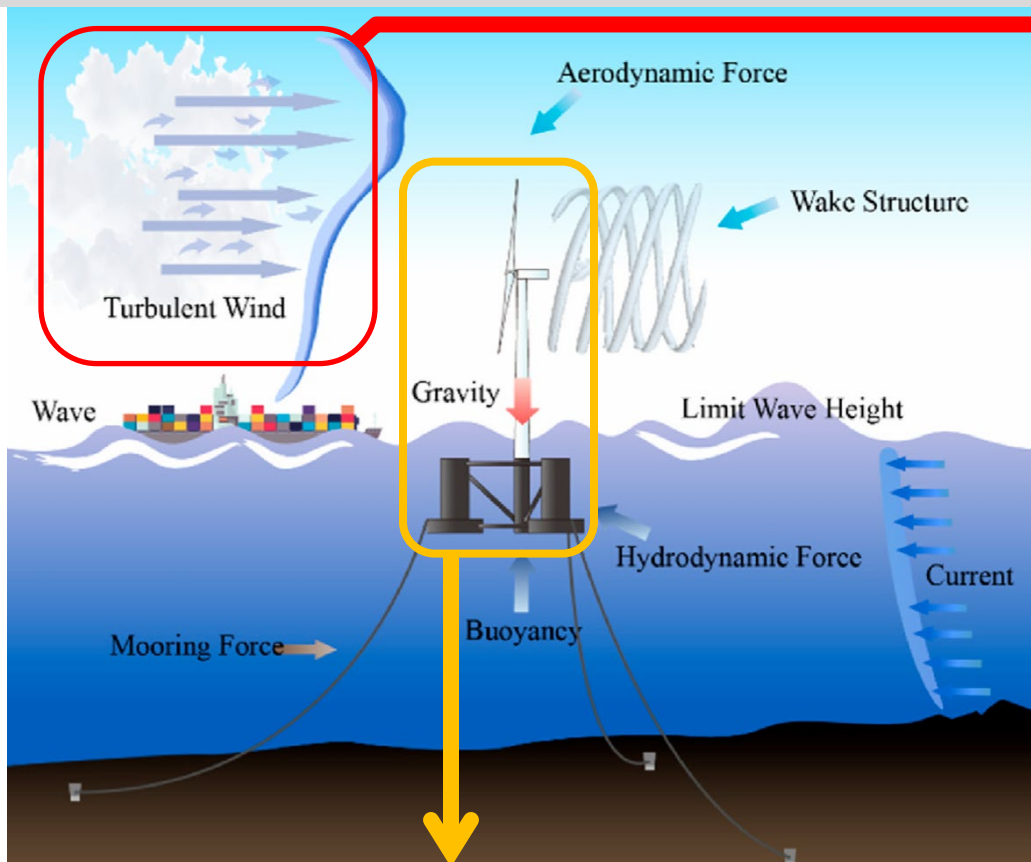
アジア太平洋洋上風力技術会議APCOW(Asia-Pacific Conference on Offshore Wind)は、九州大学応用力学研究所が長年にわたり築いてきた、中国、台湾、韓国をはじめとするアジア圏および欧米の大学との風力発電関連研究ネットワークを基盤として設立した「アジア初のアカデミア主体の学会」

- 第1回APCOW, Fukuoka, Japan, November 25-27, 2024／約200名の研究者, 専門家, 産業関係者
- 第2回APCOW, Shenzhen, China, December 15-17, 2025／約300名の研究者, 専門家, 産業関係者
- 第3回APCOW, Incheon, Korea, December 13-16, 2026／開催予定

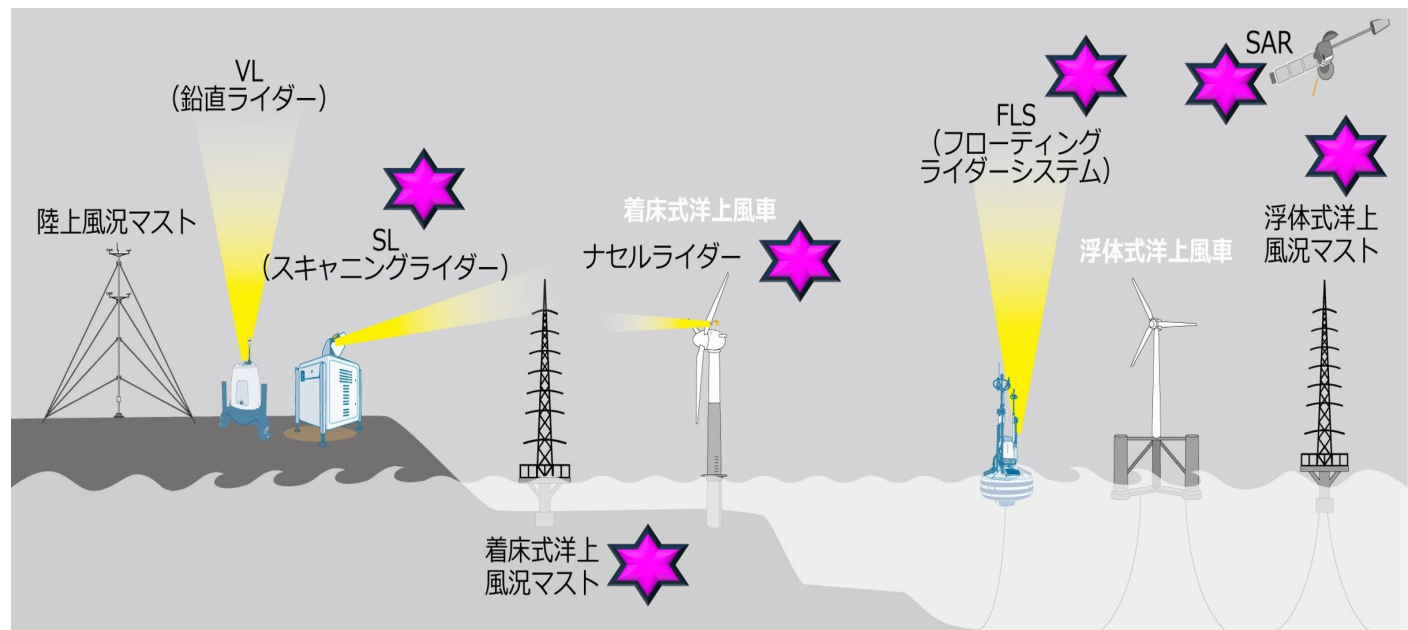
大規模洋上ウィンドファーム内に出現する風況場は、  
自然環境下でのマルチスケール・マルチフィジックス現象である。







## 高信頼性大気計測技術(リモートセンシング、小型SAR衛星etc)の充実

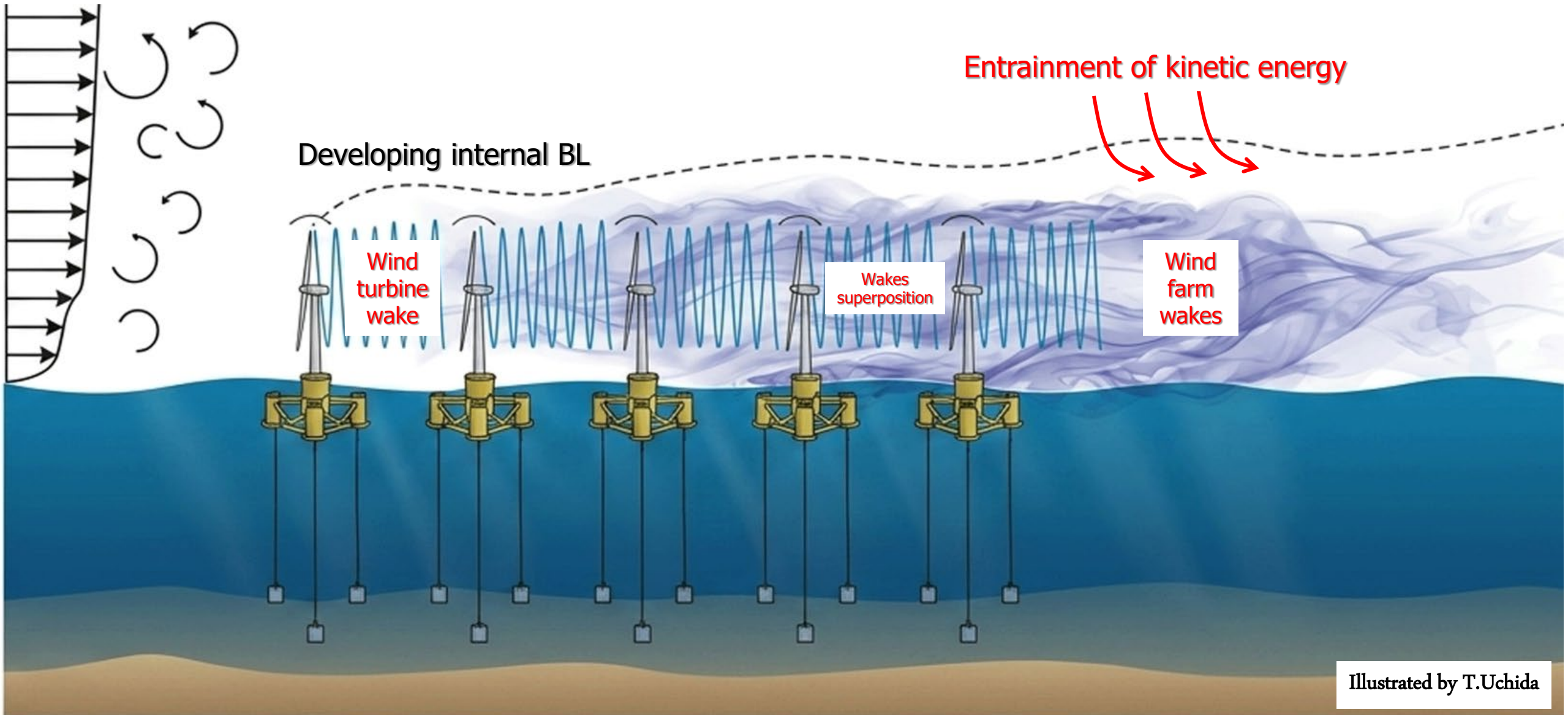


## 全連成解析(Fully-coupled simulation)(※) / 気液二相流を対象したLBMモデルの高度化

(※)「風/Aero」、「波/Hydro」、「制御/Servo」、「構造変形/Elastic」の4つの異なる物理現象を同時に、かつ相互に影響させながら計算する全連成解析(Fully-coupled simulation)

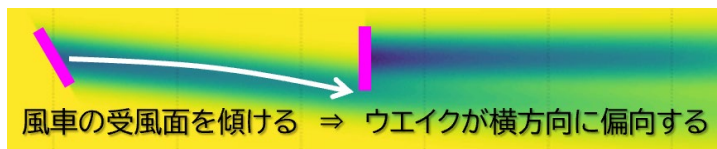
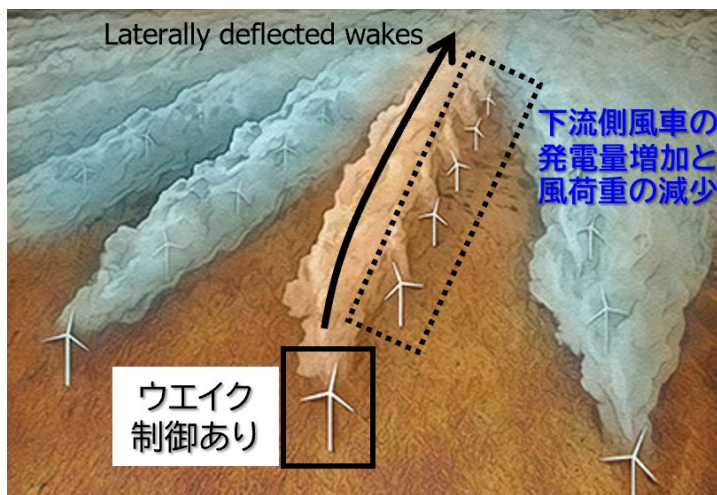
- 「風/Aero」: 風を受けて風車ブレードが回転する力、風車タワーが風から受ける力などを計算する
- 「波/Hydro」: 波や潮流の力(洋上風車の場合)海面を動く波、潮流、浮体に働く浮力や、それらがタワーや浮体構造物に与える衝撃・揺れを計算する
- 「制御/Servo」: 風速や発電状況に応じて、ブレードの角度を変える「ピッチ制御」や、風車の向きを変える「ヨー制御」、発電機のトルク制御などをリアルタイムに計算する
- 「構造の変形/Elastic」: 強風や高波を受けた際、ブレードやタワー、係留索がどのように「しなり」、どのように「振動」するか、またそれによって構造物にどれだけの負荷(応力)が作用するかを計算する

Atmospheric boundary layer (ABL)



## 制御 / Control

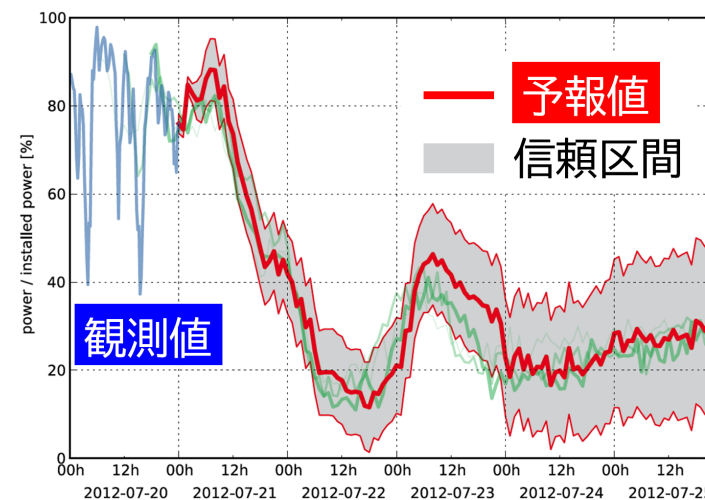
- ◆ (例)上流側風車のヨー制御を行い、ウエイクを偏向させ、下流側風車の発電量の増加、風荷重の減少を図る。



+  
同時平行

## 予報 / Forecasting

- ◆ 洋上WF全体の風況場の再構築を実施し、ウエイクを考慮した発電量を予報する。



ご清聴ありがとうございました

KYOTO, JAPAN- NOVEMBER 22, 2015: Ancient paintings of Wind and Thunder Gods on partitions at Kenninji Temple



<https://www.shutterstock.com/ja/image-photo/kyoto-japan-november-22-2015-ancient-463824266>