

IEA Wind – Task 57 JAM

モデルの共同評価

植田祐子

株式会社ウインドエナジーコンサルティング

◆ 目的

- 各国の専門家が協力することで、モデル検証活動を標準化し、加速させ、可能な限り多くの利害関係者に利益をもたらすことを目的とするフローモデル及びウェイクモデルのベンチマークプロジェクト
- Task31の後継タスク

◆ 参加国（8カ国+1カ国）

- カナダ、デンマーク、フランス、ドイツ、日本、オランダ、スウェーデン、米国
- ブラジル（限定的）

◆ OA

- NLR

◆ サブタスク

- サブタスク1: マネジメント（NRL）
 - タスクの実現と時間の管理。スコーピング、予算管理。
- サブタスク2: アウトリーチ（NRL）
 - 技術ワーキングの価値を最大化：多様な利害関係者のコミュニティからのインプットを促進し、技術ワーキングの終了時に実用的なアウトプットを普及させ、技術ワーキングの価値を最大化
- サブタスク3: ベンチマーク（NRL）
 - コミュニティ調査をし、ベンチマークに十分な関心があった場合、実験データセットの所有者と協力してベンチマークリーダーを割当。ベンチマークの定義、実行、完了までの活動を開始
- サブタスク4: 不確かさ（DTU）
 - 不確かさの定量的な推定により、サブタスク3を支援

◆ 対象

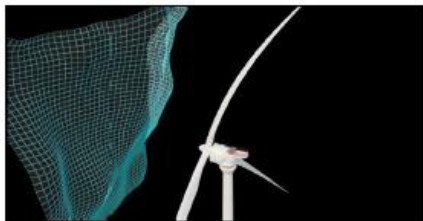
- JAMは、風の流れ、風車、ウィンドファームのモデル評価に関する世界各国の取り組みを連携・統合し、技術開発や社会実装、運用の高度化をより迅速かつ効果的に推進

◆ 方法

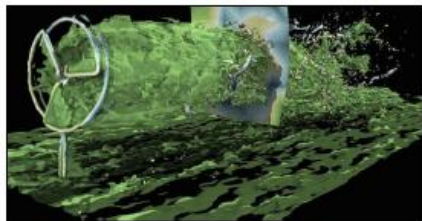
- JAMは、実験研究者およびモデル開発者から構成される国際的なコミュニティを形成し、知見や実機スケールの実験データの交換を促進するとともに、モデルの多様性とステークホルダーの多様性を重視しながら協力体制を運営

複数のフィデリティのコード群

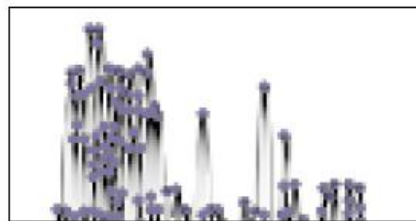
低フィデリティ
風車シミュレーション



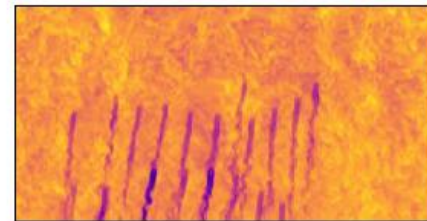
高フィデリティ
風車シミュレーション



低フィデリティ
ウィンドファームシミュレーション



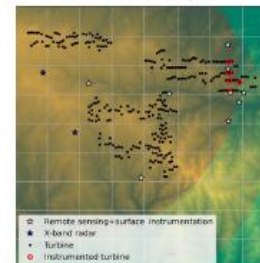
高フィデリティ
ウィンドファームシミュレーション



- ◆ 検証およびベンチマーキングプログラムの国際的な連携を通じて、研究成果のインパクトを高める。
- ◆ 幅広いコミュニティで活用できる、標準化され、再現性を備えたベンチマークを構築する。
- ◆ 流入風条件や不確実性要因を適切に評価することで、モデル評価の信頼性を向上させる。
- ◆ 産業界および研究分野のステークホルダーの意見を取り入れてベンチマークの目標を設定し、その実用性と普及を最大化する。
- ◆ 風力エネルギー分野全体において、用途に応じたベストプラクティスを提供し、適切なモデルの選定と活用を支援する。

フルスケール実験データセット

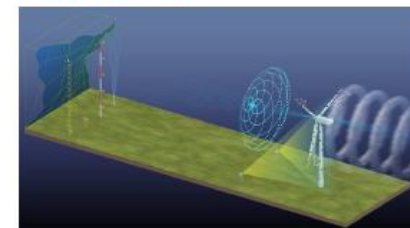
Land-based
wind plants



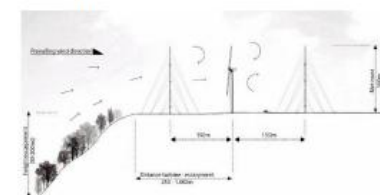
WiValdi



Land-based
wind turbine



Turbines under
complex terrain



◆ スケジュール

- フェーズIは、2024年2月から2027年1月までの期間で実施。
- 次回のIEA Wind TCP執行委員会において、1年間の延長を提案予定。
- JAMのフェーズIIを計画している。

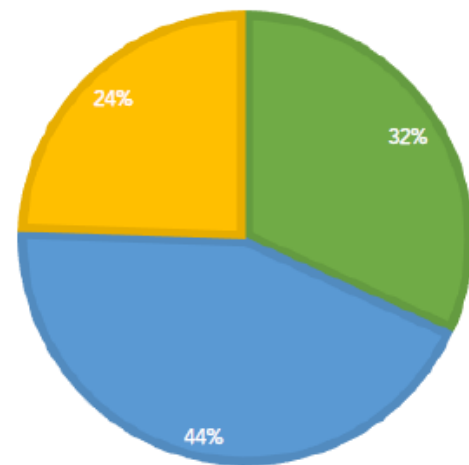
◆ タスクマネジメント

- DTUのJulian Quick氏を不確かさの定量化のサブタスクのリーダーとして迎えた。

◆ メンバー構成

- 昨年から、産業界のメンバーが増加。

■ ACADEMIA ■ INDUSTRY ■ LABORATORY

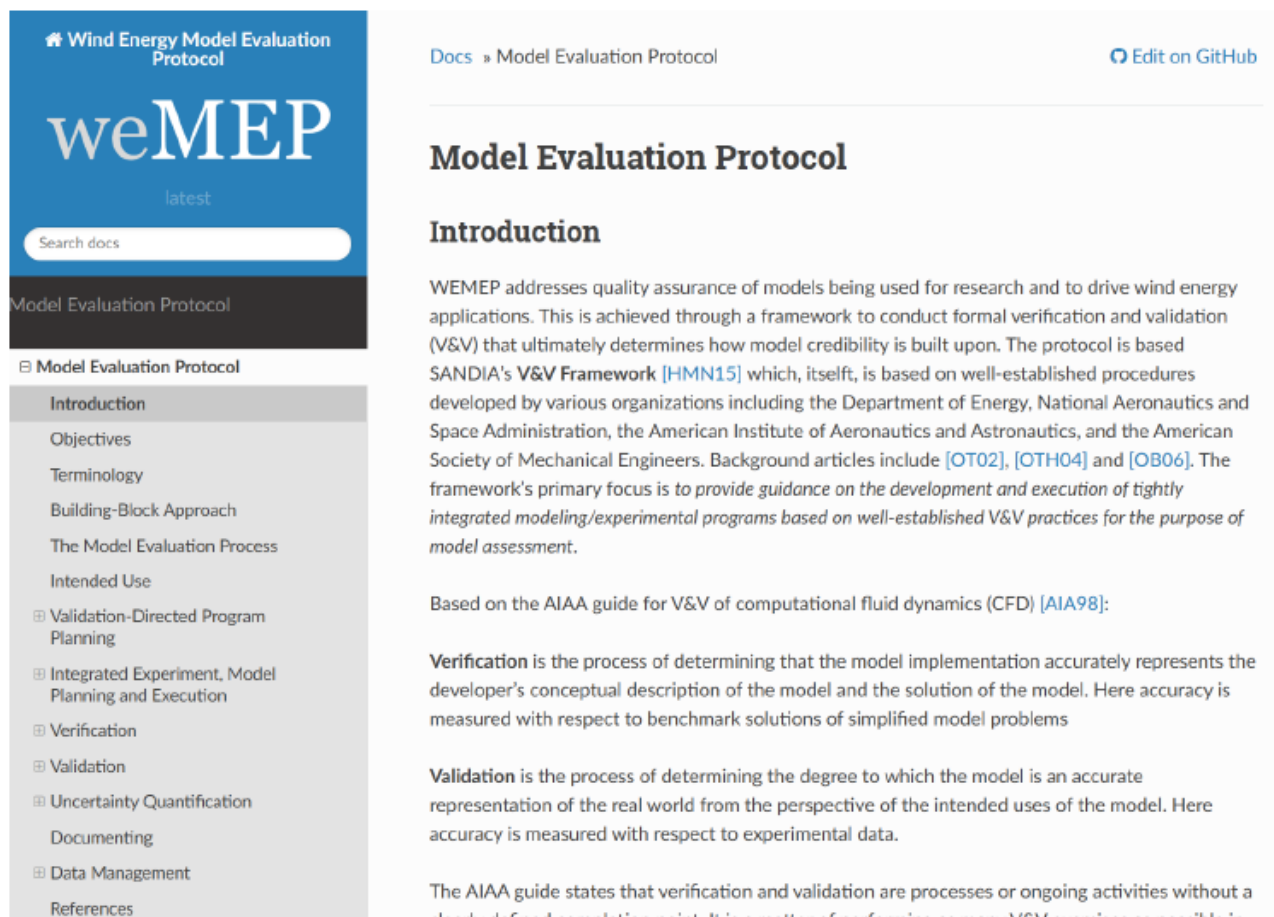


スケジュール	ベンチマーク	機関	内容
Spring 2024, Fall 2025	AWAKEN plant wake	NLR	・ウインドファームウェイク - Phase1: ベースライン - Phase2: 流入風によるモデル改善 - Phase3: 流入風及びウェイク観測によるモデル改善 ・ランプ、安定成層、内部重力波
Fall 2024	RAAW rotor inflow	NREL	流入風、平坦地形
Spring 2025	WINSENT	WindForS	複雑地形、2台の風車
Spring 2026	WiValdi	DLR	ニアショア、2台の風車

WindForS: University of Stuttgart, TU Munich, Karlsruhe Institute of Technology, University of Tübingen, University of Applied Science Esslingen, University of Applied Science Munich, ZSW

◆ 風力エネルギーモデル評価手順

- 国際的なV&V（妥当性確認と検証）及びUQ（不確かさの定量化）のベストプラクティスガイドライン
- 文書開発のマイルストーン： 3年間



Wind Energy Model Evaluation Protocol

weMEEP

latest

Model Evaluation Protocol

- Model Evaluation Protocol
- Introduction
- Objectives
- Terminology
- Building-Block Approach
- The Model Evaluation Process
- Intended Use
- Validation-Directed Program Planning
- Integrated Experiment, Model Planning and Execution
- Verification
- Validation
- Uncertainty Quantification
- Documenting
- Data Management
- References

Docs » Model Evaluation Protocol [Edit on GitHub](#)

Model Evaluation Protocol

Introduction

WEMEP addresses quality assurance of models being used for research and to drive wind energy applications. This is achieved through a framework to conduct formal verification and validation (V&V) that ultimately determines how model credibility is built upon. The protocol is based SANDIA's V&V Framework [HMN15] which, itself, is based on well-established procedures developed by various organizations including the Department of Energy, National Aeronautics and Space Administration, the American Institute of Aeronautics and Astronautics, and the American Society of Mechanical Engineers. Background articles include [OT02], [OTH04] and [OB06]. The framework's primary focus is to provide guidance on the development and execution of tightly integrated modeling/experimental programs based on well-established V&V practices for the purpose of model assessment.

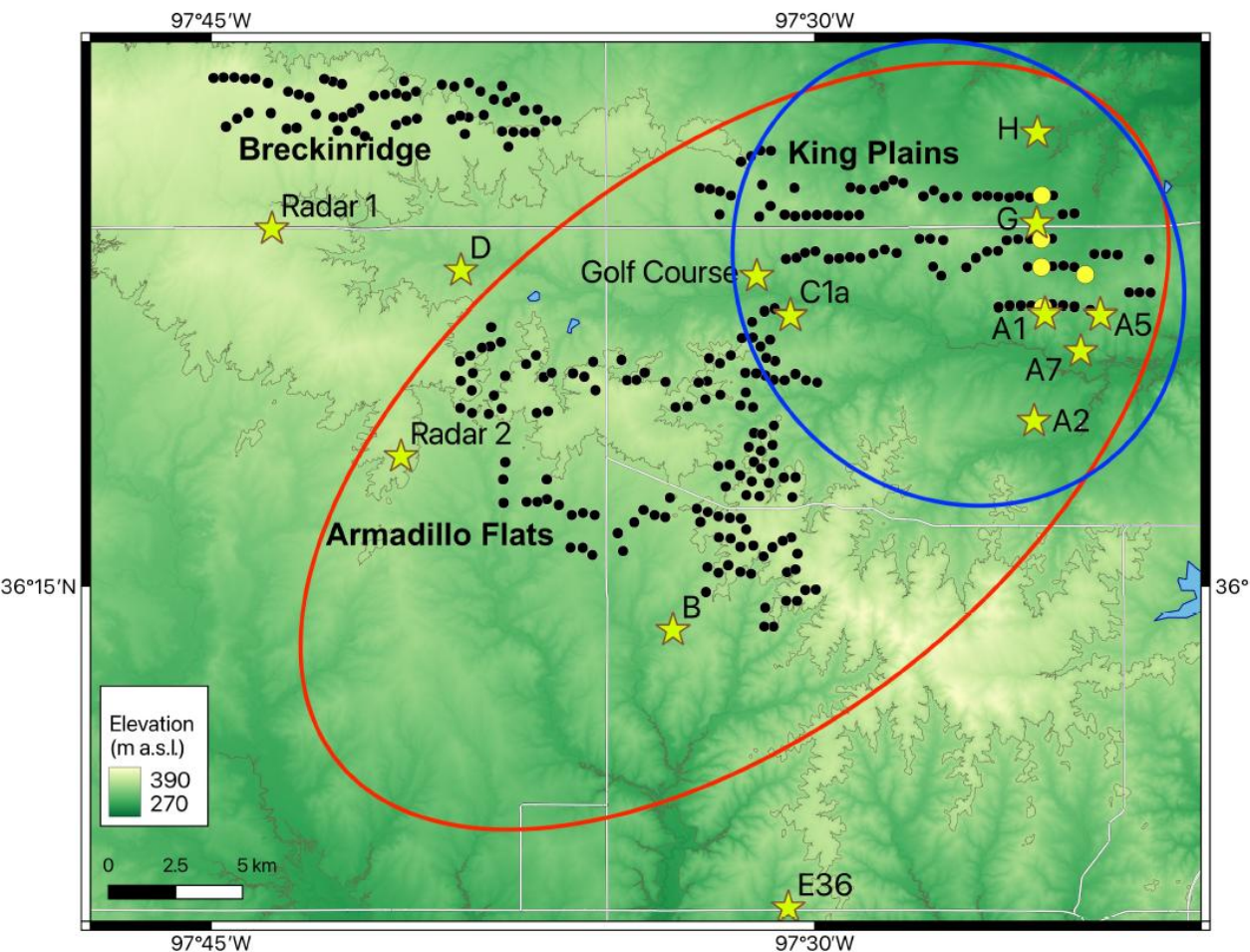
Based on the AIAA guide for V&V of computational fluid dynamics (CFD) [AIA98]:

Verification is the process of determining that the model implementation accurately represents the developer's conceptual description of the model and the solution of the model. Here accuracy is measured with respect to benchmark solutions of simplified model problems

Validation is the process of determining the degree to which the model is an accurate representation of the real world from the perspective of the intended uses of the model. Here accuracy is measured with respect to experimental data.

The AIAA guide states that verification and validation are processes or ongoing activities without a clearly defined completion point. It is a matter of conforming to some V&V practices as possible in

- ◆ ウェイクモデル（流入風・ウェイク観測によるモデル改善）
- ◆ ランプ、安定成層、内部重力波



- 北オクラホマ、米国
- 2022-2024
- 13の地上サイト+風車設置の5つ計測
- 複数のウィンドファーム
- 長期のARM SGP観測



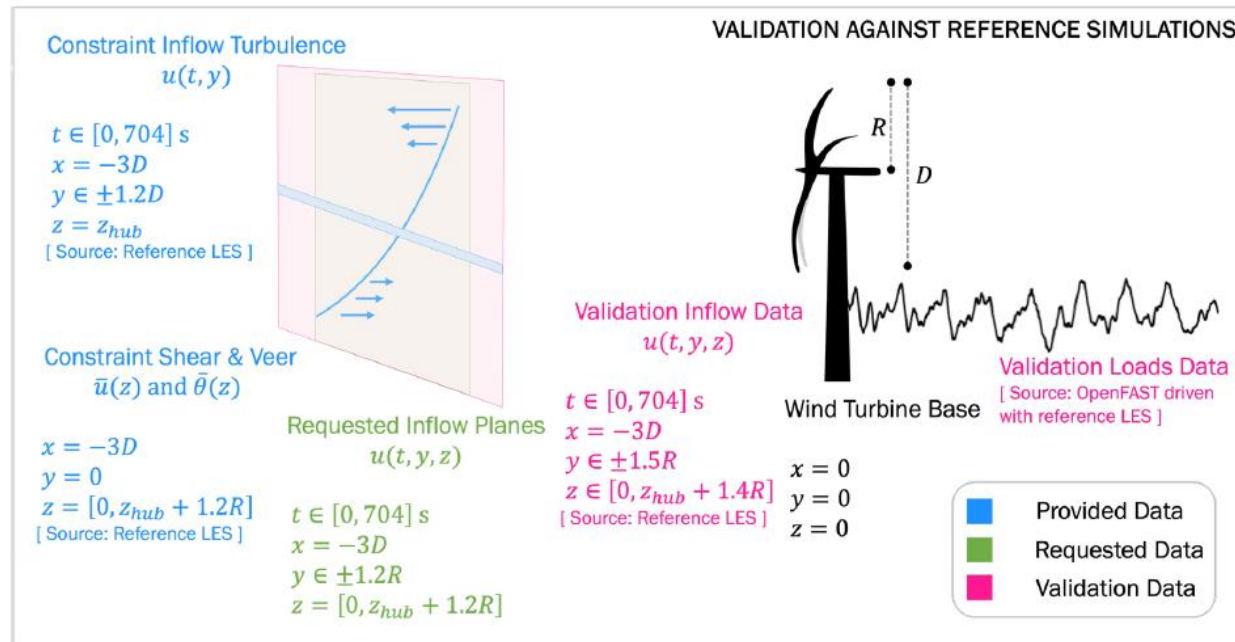
ARM: Atmospheric Radiation Measurement
SGP: Southern Great Plains

JAM In-Person Kickoff Meeting 2024, <https://zenodo.org/records/11507768>

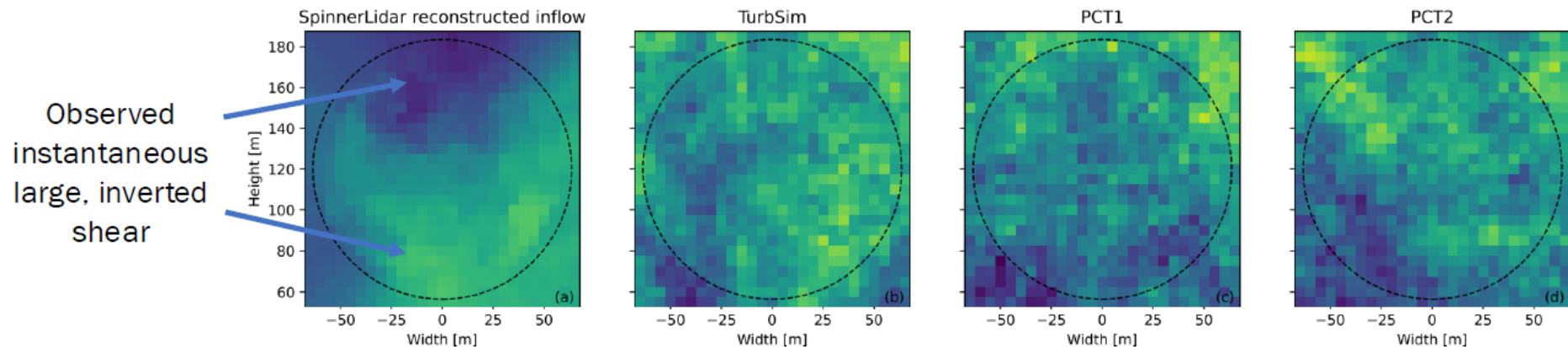
- ◆ 幅広い種類のモデルに対し、有用なベンチマークを構築することは極めて困難である。単純な地形であっても（平坦ではない場合）、地形は風速および発電電力量に影響を与える。
- ◆ 低層ジェット（LLJ: Low-Level Jet）は、地形と密接に相互作用しており、そのジェットコア高度がわずかに変化するだけでも発電電力量に大きな影響を及ぼす。
- ◆ 地形を考慮しないモデルでは、ウィンドファーム内における地形起因の変動を適切に捉えることが難しい。
- ◆ 粗い空間解像度の再解析データ（Reanalysis）を入力条件として用いるモデルでは、ウィンドファーム内の局所的な地形起因の変動を十分に再現することが困難である。
- ◆ 観測データを容易に取り込めないモデルは、その観測データの恩恵を受けることができない（データ同化が重要）。
- ◆ さらに、ウェイク（風車後流）の問題もある。ただし、大規模な実フィールド条件では、地形や流入風条件の影響は、ウェイク表現の詳細さと同程度、あるいはそれ以上に重要であるように思われる。
- ◆ AWAKENデータを用いた長期平均ベースのベンチマーク評価を実施してほしいという要望も寄せられた。

<https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2026-33/>
<https://wes.copernicus.org/articles/11/3107/2026/>

- ◆ 風車設計ツールによる単一風車の荷重シミュレーション
- ◆ 大型化に伴い、小さい風車を前提としていた今までのモデルの仮定が成り立たないことが懸念される
- ◆ ベンチマーク フェーズ1
 - 中程度の対流活動を伴う大気境界層（ABL）
 - 風速：約9 m/s、熱フラックス：約0.175 K・m/s
- ◆ ベンチマーク フェーズ2
 - 強風および強い鉛直風速シアを伴う弱安定な大気境界層（ABL）

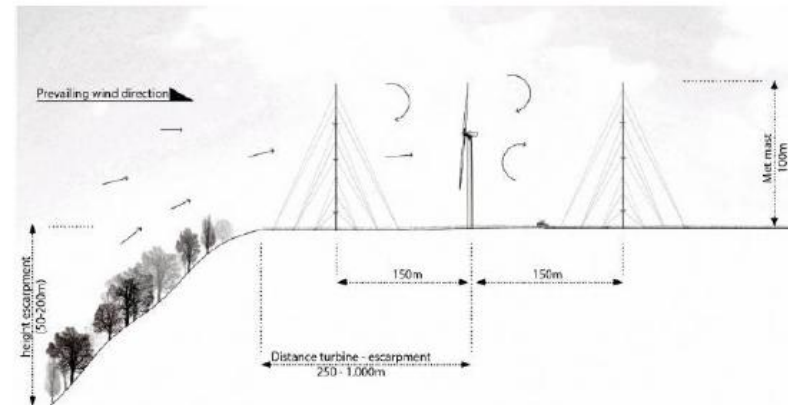


- ◆ 実環境データおよびLESから得られた9つの10分間区間を対象に、8種類の拘束付き乱流生成モデルの妥当性確認・検証を実施した。
- ◆ 従来のMannモデルに基づく流入風モデルと、Kaimalモデルに基づく流入風モデルは、ほぼ同等の再現性能を示した。
- ◆ 計算コストがより高いモデル（Superstatistical MannモデルやLarge Eddy Reconstruction）は、従来モデルを上回る性能を示した。
- ◆ しかし、すべてのモデルにおいて、個々の大規模コヒーレント構造の再現は困難だった。



- WINSENTは、シュヴァーベンアルプの北側に沿った森林の急斜面 Albtrauf に近い複雑地形に位置している。
- Albtraufは研究テストサイトの西側に位置し、森林地帯である。
- 高度変化はテストサイトの前で150m以上あり、卓越風向は西南西である。气流傾斜角と乱れが大きい。
- テストサイトは森林のない高原に位置する
- 冬と夏の主な風向は東南東
- 冬季は凍結状態

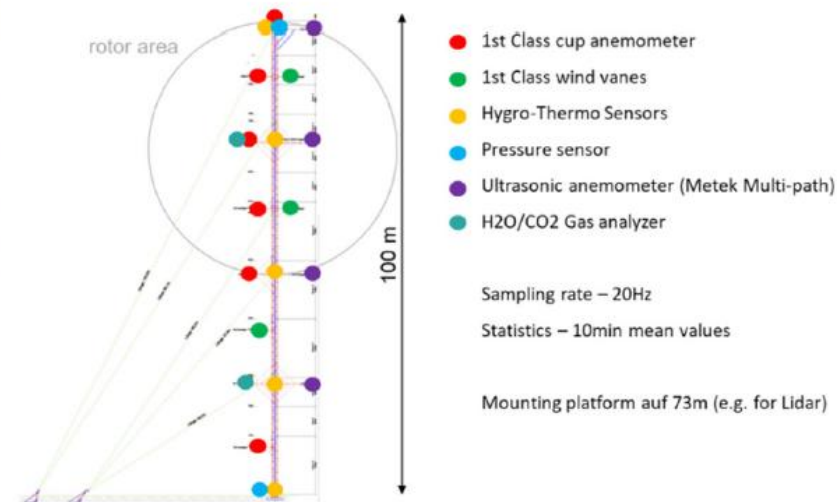
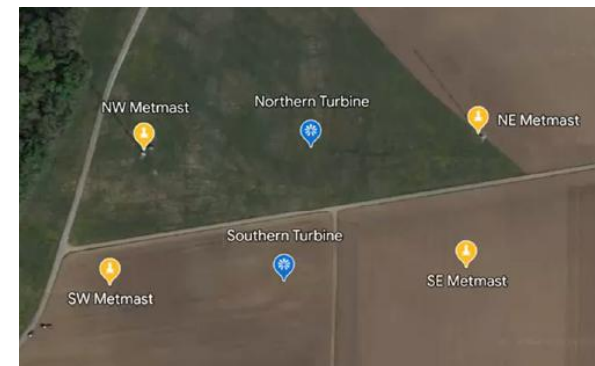
*) www.swabianalb.info



[ZSW, TUM-LAREG]

◆ フィールド観測

- 4本の気象マスト（流入風とウェイク）
- 3台のLR-LiDARシステムを同期スキャンするバーチャルマスト
- 谷間に設置したLiDARウィンドプロファイラ
- 3つの渦共分散システム & 雲高計
- 無人航空機システム



[.ZSW]

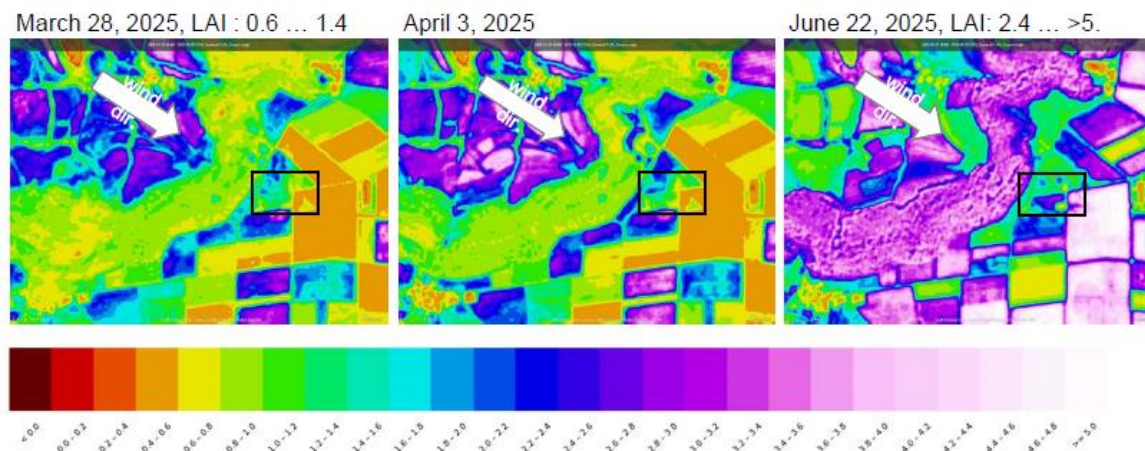
	Phase 1	Phase 2
目的	流入データの検証	風車データ及び風車ウェイクの検証
条件	● 西北西 ● LAI（高・低）	● 西北西 ● LAI（高・低） ● WINSENT標準コントローラ ● 発電時条件 ● 風車荷重データを取得可能
入力データ	● 谷側のLiDARによる流入風データ ● 大気安定度 ● LAI（葉面積指数） ● LiDARおよび試験サイト内構造物の配置情報 ● 地形データ	● Phase 1の全データ ● 西側マストの各高度の風速・風向データ ● 10分平均値 ● 高周波データ ● OpenFASTモデル
出力データ	指定地点の10分間平均風速	● 指定地点の10分間平均風速 ● 2台の風車の10分間平均のSCADA及び荷重データ

LAI: 葉面積指数

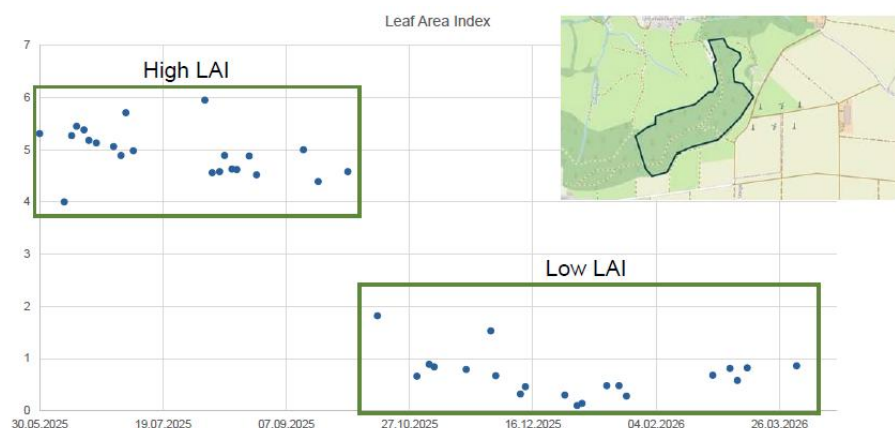
◆ LAIの推定及びベンチマーク条件



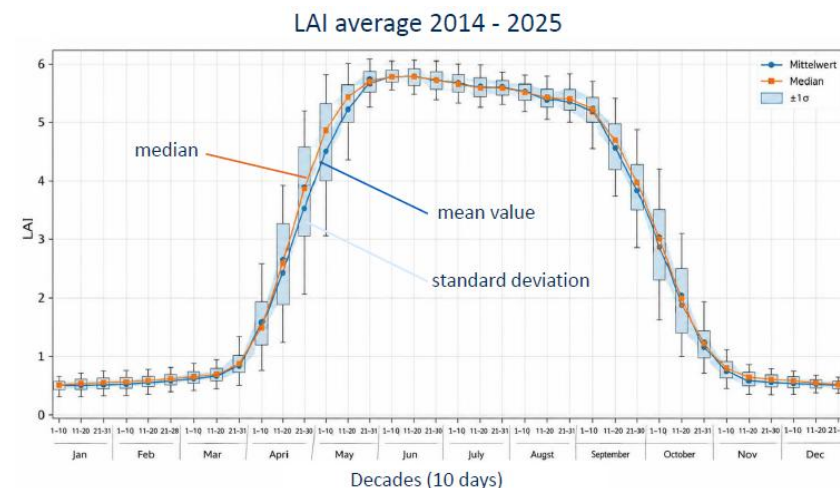
ESSLINGEN
UNIVERSITY



衛星データによるLAI推定



ベンチマーク期間のLAI条件 (高・低)



COPERNICUS土地利用データ
による月別LAI の長期平均

◆ 進捗報告

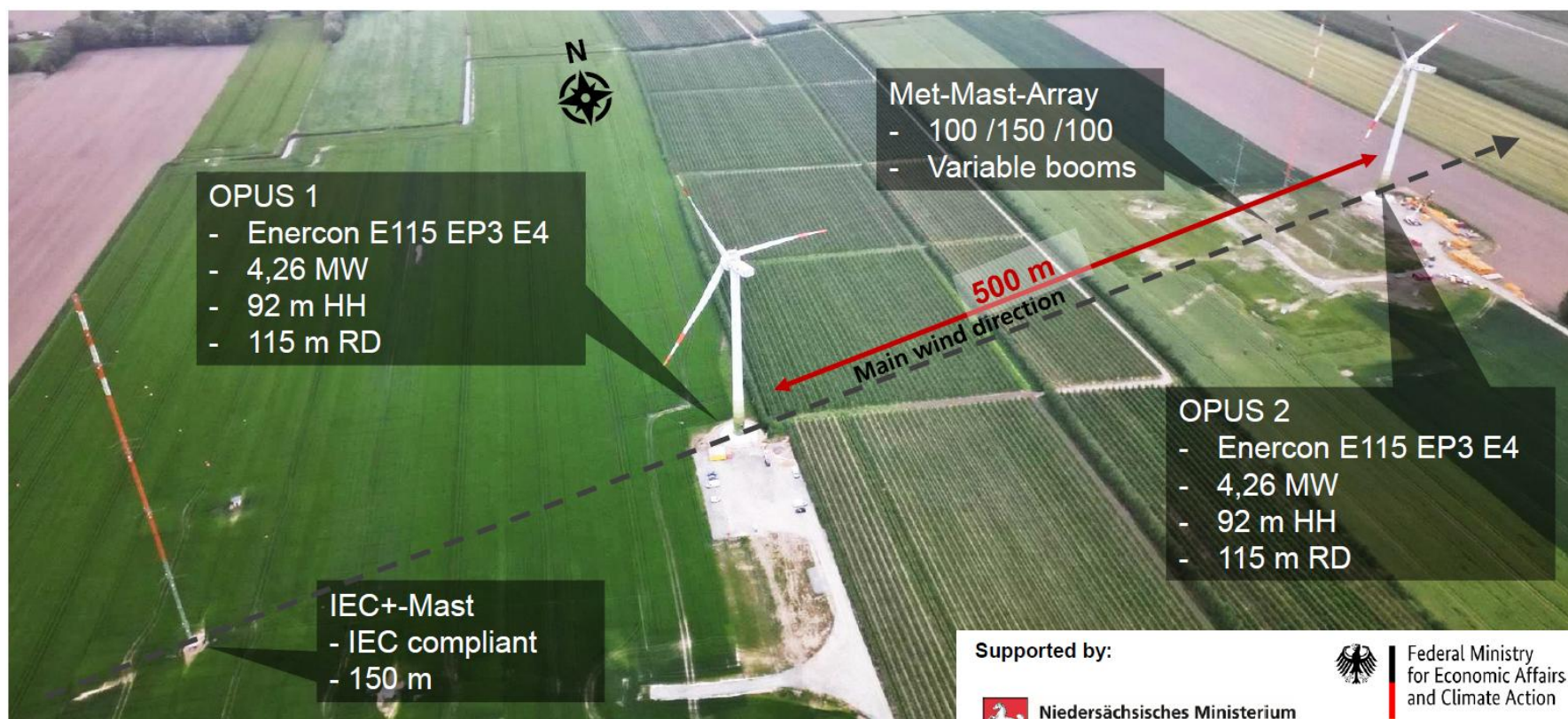
- 2025年9月に第1回WG会合を開催し、その後2回の会合とアンケートを実施
- 1回目の集中観測期間の 1日分のデータ利用案は、データ量不足のため中止
- 特定週のデータ利用案は、流入条件のばらつきが大きいため中止
- 条件ができるだけ均一なデータを抽出し、統計解析を実施
- 葉の有無を考慮したフェーズ2のベンチマークデザインを検討
 - 流入風（斜面流）の検証
 - 風車データおよびウェイクの検証
- 風向、風速、大気安定度、葉面積指数（LAI）でデータを選別

◆ 今後の予定

- 懸案事項を整理後、フェーズ1の入力データとドキュメントを公開予定
- フェーズ2向けのOpenFAST 5.0モデルはほぼ完成
- フェーズ2の条件をWG会合で決定予定
- 高LAI期は、環境保護上の制約が大きく、フェーズ2に適したデータの確保が課題

◆ テストサイト

- ドイツ北部、エルベ川の河口付近に位置
- ライダー及びマストによる長期観測を2020年から実施
- 風速、乱流強度、LLJ、ガストなどの風特性を評価
- 風車は、2023から設置



Norman Wildmann, DLR-PA, 17 June 2025

Supported by:



Niedersächsisches Ministerium
für Wissenschaft und Kultur



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

◆ テスト風車 (OPUS1 & 2)

- 設置されたセンサーリスト

OPUS 1 & 2

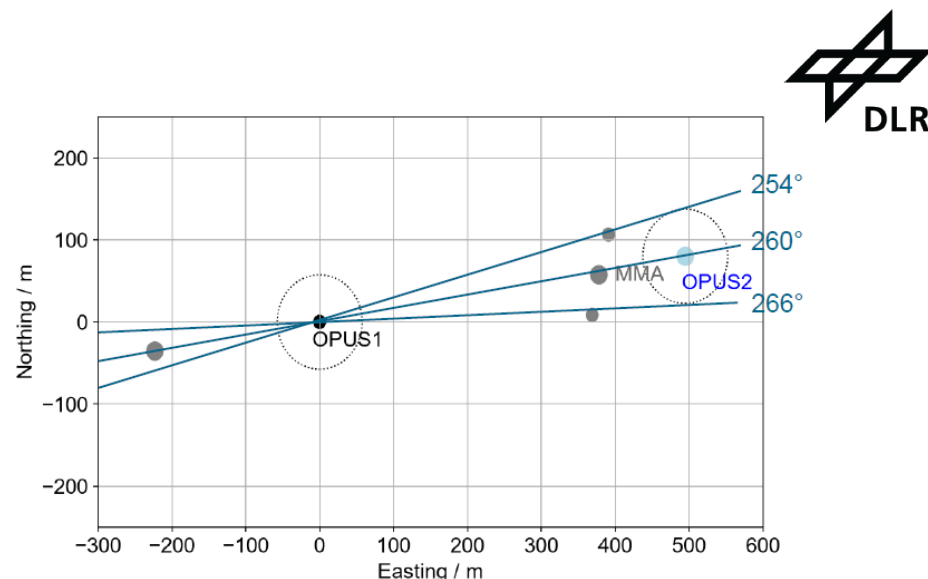
(total installed sensors OPUS 1: 1225 / OPUS 2: 689)

Sensor type	QTY	Sensor type	QTY
Foundation (total)	229	Generator (total)	95
Inclinometer		Electrical acceleration sensors	
Electrical strain gauges		Electrical strain gauges	
Electrical displacement sensors		Air gap sensors	
Fiber optic strain and temperature		Electrical temperature sensors	
Tower (total)	167	Grease sensors	
Electrical acceleration sensors		Rotor (total)	1381
Electrical strain sensors		Electrical acceleration sensors	
Electric strain gauges		Electrical strain gauges	
Electrical temperature sensors		Torque measuring shafts	
Pressure measuring belt		Electrical temperature sensors	
Nacelle & azimuth (total)	42	Distance sensor	
Electrical acceleration sensors		Fiber optic strain sensors	
Electrical strain gauges		Fiber optic acceleration sensors	
Power meter		DuraAct surface converters	
Rotary encoder		DIC marker system	
Electrical temperature sensors		Lidar (spinner)	
Current clamp meters			



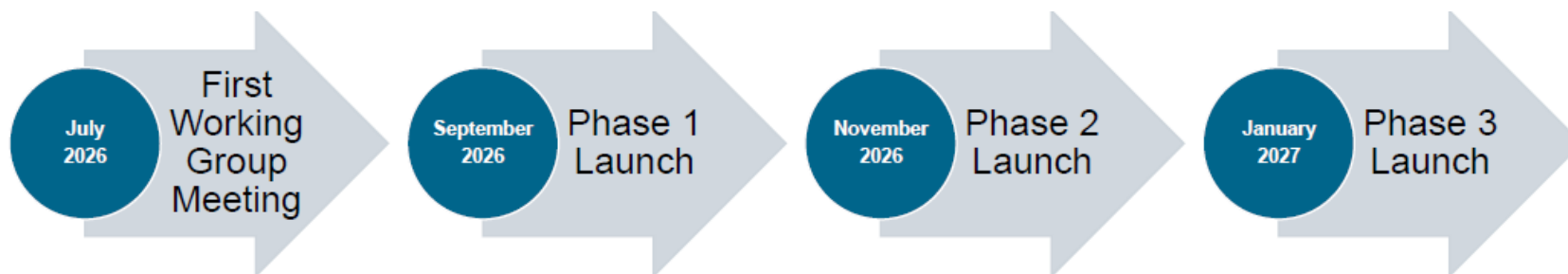
◆ サイト及びデータ条件

- 利用可能なデータ
 - マスト、鉛直ライダー、ナセルライダー
- 風向・風速
 - $260^\circ \pm 2^\circ$ フルウェイク、5~12m/s
- 風車
 - OPUS1 + OPUS2 発電時

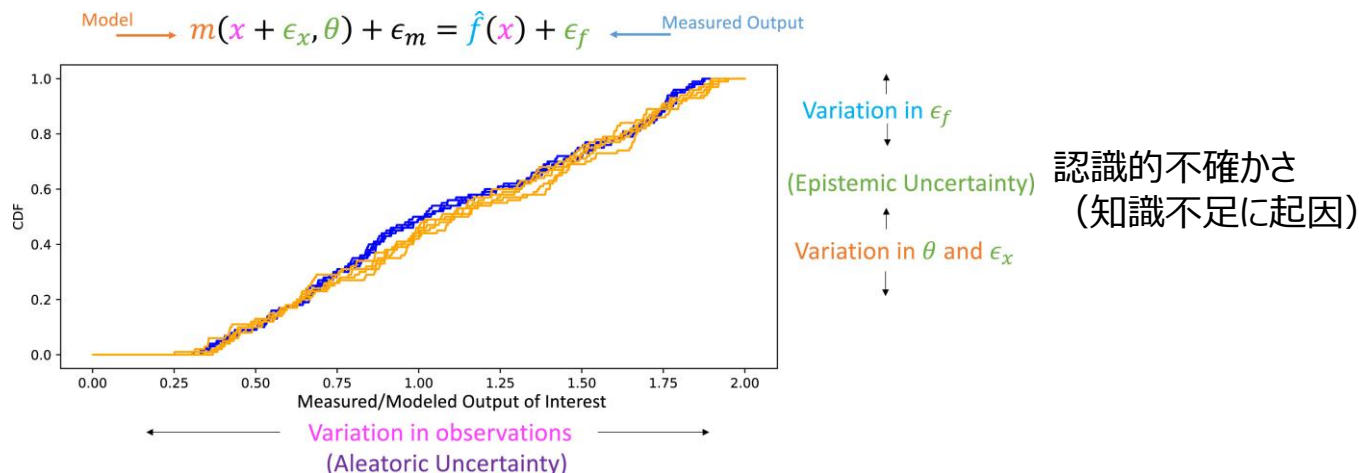


◆ 今後の予定

- 2026年7月 最初のWG会議
- 2026年9月 Phase1 開始 フルウェイク、中立条件
- 2026年11月 Phase2 開始 フルウェイク、安定条件
- 2027年1月 Phase3 開始 パーシャルウェイク



◆ 偶然的不確かさ (Aleatoric Uncertainty) と認識的不確かさ (Epistemic Uncertainty)



◆ JAMにおける不確かさ評価

- AWAKENベンチマーク解析では、流入風計測に起因する認識的不確かさ (epistemic uncertainty) が検証結果を支配していることが判明
- RAAWの観測データは、モデル誤差を評価するために利用可能なデータセットを提供されている
- 測定不確かさを伝播したデータベースをRAAWベンチマークチームと構築中
- 空力弾性モデルの誤差特性を運転条件ごとに評価可能
- 将来のベンチマークでは測定誤差を明示的に考慮する予定

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148124020962>

◆ 3つの基本原則

- 不確かさは可能な限り低減すべきである。
 - 測定不確かさが大きい場合、その影響が評価指標に適切に反映されるべきである。
- 長期間の観測は有益である。
 - 観測期間が長くなるほど、評価結果の信頼性は向上する。
- 単に観測数を増やすだけでは十分ではない。
 - 観測期間延長による効果には限界があり、その上限はモデル精度によって決まる。

◆ 検証メトリクスの判断テスト

- 測定不確かさ感度評価
 - データセット全体に対して測定誤差を人工的に付加し、その影響を評価する。
 - 測定不確かさが大きくなるほど、検証指標は一貫して悪化（増加）することが望ましい。
- 観測期間延長の効果評価
 - データを異なる長さの時間区間に分割し、観測期間の長さが評価結果に与える影響を統計的に分析する。
 - 観測期間が長くなるほど、検証指標は一貫して改善（減少）することが望ましい。

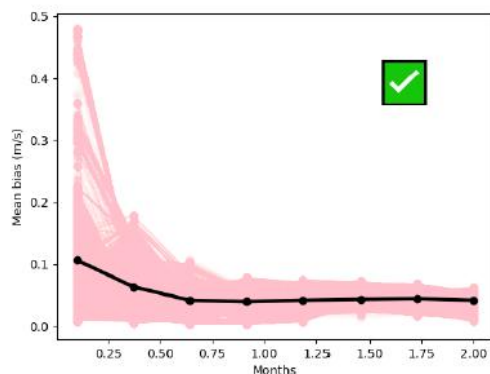
- ◆ 3つの基本原則に照らし、指標は絶対誤差の90パーセンタイルの採用を推奨。
- ◆ 広い分布を持つガウス過程回帰（Gaussian Process Regression）を用いることを推奨（＝事前の不確かさを大きくする）

検証メトリクスの比較

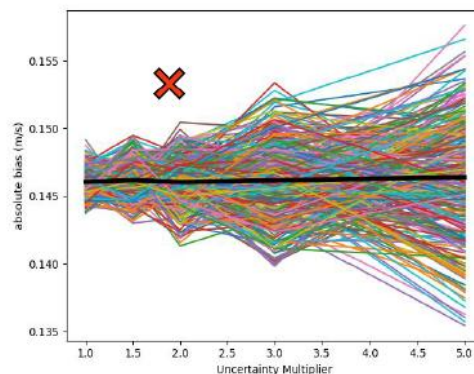
	Absolute Bias		RMSE		KL Divergence		Area Metric	
	Mean	P90	Mean	P90	Mean	P90	Mean	P90
	Mean	P90	Mean	P90	Mean	P90	Mean	P90
Uncertainty	×	✓	✓	✓	×	×	✓	✓
Time	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	✓

✓ Passed Test
× Failed Test

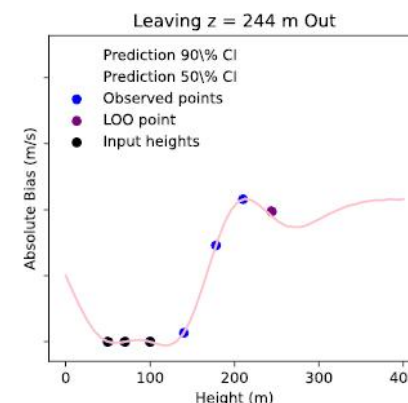
KL Divergence: カルバック・ライブラー情報量
Area Metric: 面積ベースの指標



観測期間の長さの感度分析の例



不確かさの大きさの感度分析の例



未観測高度の予測の例

◆ ベンチマークの進捗報告

- AWAKEN ファームウェイは、完了
- RAAW ロータ流入風は、完了
- WINSENT 複雑地形は、実施中
- Wivaldi 今年6月にキックオフ

◆ 今後のスケジュール

- フェーズIは、2024年2月から2027年1月までの期間で実施。
- 次回のIEA Wind TCP執行委員会において、1年間の延長を提案予定。
- JAMのフェーズIIを計画している。
- 将来のベンチマークについて、検討中（重力波、風車制御実験等）

- ◆ IEA Wind Task57 JAM ホームページ

<https://iea-wind.org/task57/>

- ◆ IEA Wind Task57 JAM Zenodo

<https://zenodo.org/communities/jam/records>

IEA Wind Task57 JAM Annual General Meeting 2026

<https://zenodo.org/records/20833043>

- ◆ IEA Wind Task57 JAM GitHub

<https://github.com/IEA-Wind-Task57-JAM>

- ◆ weMEP Wind Energy Model Evaluation Protocol

<https://wemep.readthedocs.io/en/latest/index.html>