

IEA Wind Task47 TURBINIA

乱流流入下の革新的空気力学

(TURBINIA : TURBulent INflow Innovative Aerodynamics)

川端 浩和

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 風力エネルギー研究チーム

2026年9月9日 IEA Wind セミナー

NATIONAL INSTITUTE OF
ADVANCED
INDUSTRIAL
SCIENCE &
TECHNOLOGY

Task47の概要

背景

- 大型風車では、非一様流入やブレードのたわみ・ねじり変形の影響が増大し、空力現象および空力弾性現象がより複雑になっている。
- 大型風車に対する**解析モデル（空力・空力弾性解析）の妥当性確認が重要な課題**となっている。
- 大型風車を対象とした詳細な実機風車空力計測データは限られており、**モデル検証に利用可能な公開データも不足**している。

活動

①解析モデル比較

BEM、FVW、CFD等の空力・空力弾性解析手法を比較し、大型風車におけるモデル差と課題を抽出する。

②実機風車空力計測に関する知見共有

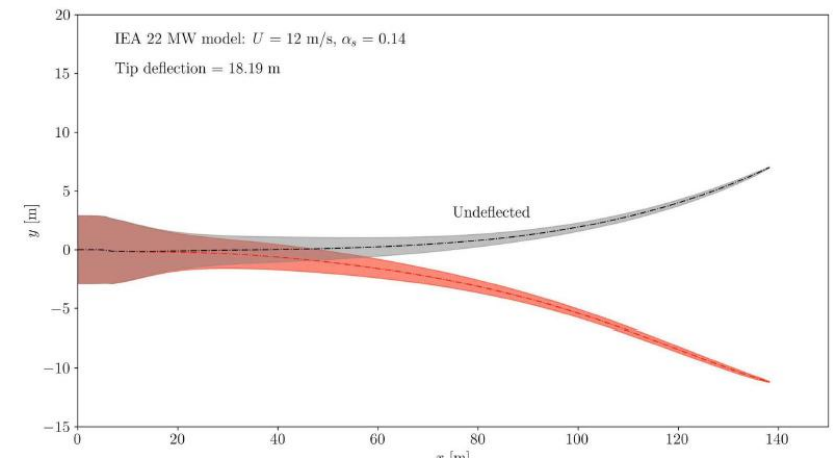
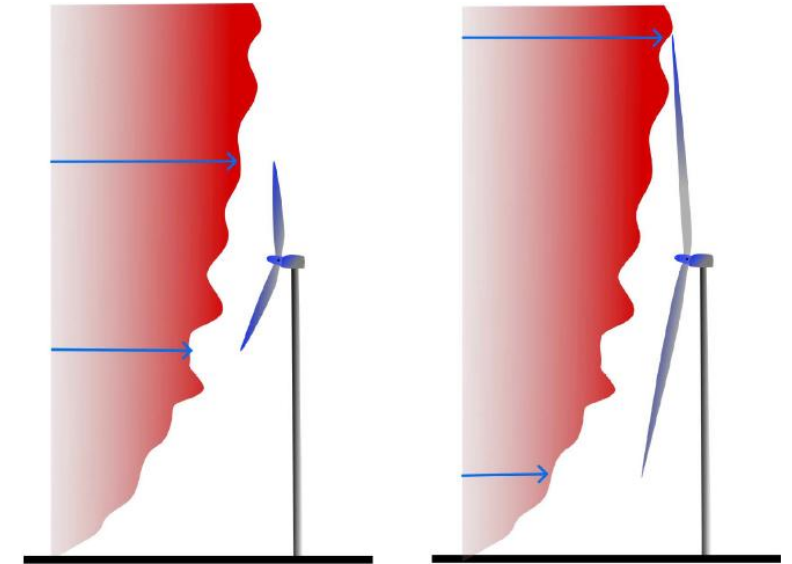
MW級風車で実施された実機風車空力計測の経験を共有し、モデル検証に必要な計測手法や実験基盤を整理する。

Phase I（～2024）

DanAero 2.3MW実機、IEA 15MW RWTを対象として検証を実施

Phase II（2025～）

IEA 22MW RWTを対象としてモデル改善と公開実験基盤の検討を実施



Source: IEA Wind Task47 workshop公開資料
(<https://zenodo.org/records/15296493>)

国・地域	参加機関
デンマーク	Technical University of Denmark (DTU) 、 Siemens Gamesa Renewable Energy
フランス	Ecole Centrale de Nantes (ECN) 、 ONERA、 IFP Energies Nouvelles
ドイツ	ForWind/Fraunhofer IWES、 University of Stuttgart (IAG) 、 Kiel University of Applied Sciences、 WINDnovation、 German Aerospace Center (DLR) 、 Enercon、 UAS Emden/Leer
ギリシャ	National Technical University of Athens (NTUA) 、 iWind Renewables
イタリア	CNR-INM、 PoliMi、 University of Rome “La Sapienza”、 University of Rome “Roma Tre”、 University of Florence、 Politecnico di Bari
オランダ	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO) 、 CWI、 Delft University of Technology、 Suzlon Blade Technology (SBT) 、 Det Norske Veritas (DNV) 、 LM、 University of Twente
スウェーデン	Uppsala University Campus Gotland
スイス	Eastern Switzerland University of Applied Sciences (OST)
米国	National Laboratory of the Rockies (NLR)



Gerard Schepers

Senior scientist at TNO And professor at Hanzehogeschool
Groningen University of Applied Sciences

The research area of my lectorship is wind energy. The focus lies on technological aspects of wind energy, e.g. turbine technology and experimental techniques, as well as on social acceptance. These research areas are largely in line with those of the TNO unit Energy Transition, department Wind Energy. My lectorship at UAS Hanze is active since November 1, 2018. Prior to that, I was lector at UAS NHL in Leeuwarden since January 1, 2012.

- 📍 Petten - Westerduinweg
- ✉ Email Gerard
- 🔗 International small wind turbine contest:
- 🔗 Inaugurational speech
- 🔗 Hanzehogeschool Groningen personal page

- 2026年にIEA Wind 国内委員会より承認をいただき、日本からの参加が認められたタスク。
- 主担当は産総研 川端、副担当は大阪大学 深見先生、加えて大阪大学 柴田先生。

OAのGerard Schepers氏
(Source: <https://www.tno.nl/en/about-tno/our-people/gerard-schepers/>)

詳細な活動紹介

(1) Phase Iの活動紹介 (WP1、WP2)

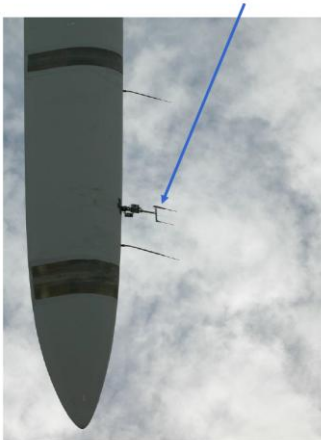
(2) Phase IIの紹介

2009年より実施された2.3MW風車の実機風車空力計測（DanAero）を解析モデルによって再現し、実測データを用いてモデルを検証した。

DanAero実験から得られたデータ

- 半径13、19、30、37mの4断面で翼面圧力を計測し、断面法線力・接線力を算出した。
- 気象観測マストは7高度で風速を計測した。

high frequency inflow sensors



DTU Wind Energy, Technical University of Denmark

five hole pitot tubes



HAA Madsen MexNext II, Pamplona September 25-26

Source: Helge Aagaard Madsen et al., The DANAERO MW experiments

解析モデル検証

- BEM、FVW、RANS CFD等、様々な解析によってDanAero実験を再現し、結果を比較した。
- 実測に基づく約400秒間の流入風の時系列データを、constrained turbulence generatorで生成した。
- 問題切り分けのために、乱流流入、回転数固定、剛体化、ウインドシア、IPC等の計算条件を順番に実施した。

Table 3.1: High-level summary of participant codes and settings.

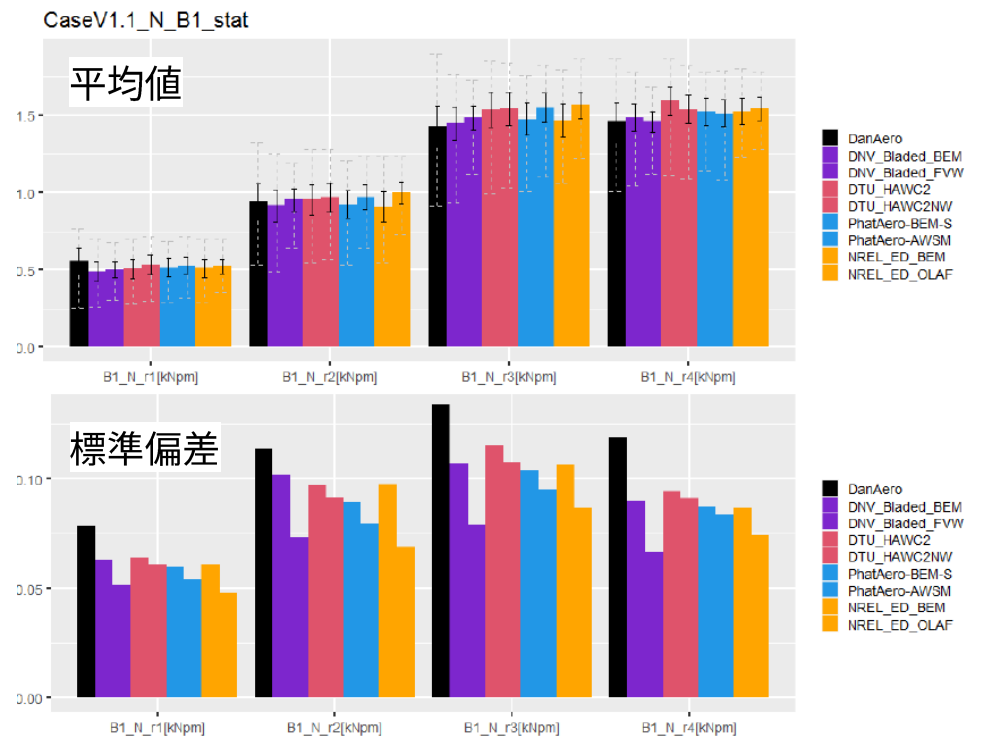
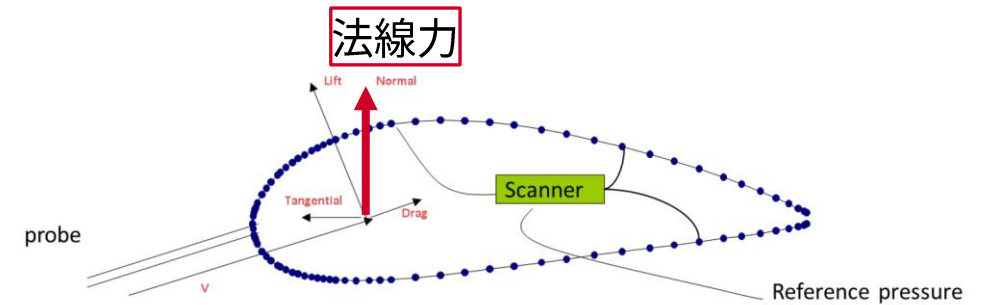
Legend Entry	Participant	Code Name	Aero Model	Struc. Model	Ref.
DNV_Blated_BEM	DNV	Bladed	BEM	multi-body	[38]
DNV_Blated_FVW	DNV	Bladed	LL-FVW	multi-body	[38, 39]
DLR_TAU	DLR	Tau	RANS	rigid	[40]
DTU_EllipSys3D	DTU	EllipSys3D	RANS	multi-body	[41, 42]
DTU_HAWC2	DTU	HAWC2	BEM	multi-body	[43, 44]
DTU_HAWC2NW	DTU	HAWC2	BEM plus nearwake	multi-body	[45, 46]
DTU_HAWC2NWVC	DTU	HAWC2	NW plus vortex cylinder	multi-body	[47]
IFPEN_BEM	IFPEN	DeepLines Wind	BEM (<i>AeroDeeP</i>)	multi-body	[48]
IFPEN_VL	IFPEN	DeepLines Wind	LL-FVW (<i>CASTOR</i>)	multi-body	[48]
NREL_BEM	NREL	OpenFAST	BEM (<i>AeroDyn</i>)	modal	[49]
NREL_OLAF	NREL	OpenFAST	LL-FVW (<i>OLAF</i>)	modal	[50]
PoliMi_Cp-Lambda	PoliMi	Cp-Lambda	BEM	multi-body	[51]
TNOAero-BEM ¹	TNO	AeroModule	BEM	multi-body	[52]
TNOAero-BEM-S ¹	TNO	AeroModule	BEM (240° sector)	multi-body	[31]
TNOAero-AWSM ¹	TNO	AeroModule	LL-FVW (<i>AWSM</i>)	multi-body	[53]

¹When coupled to the structural solver Phatas [54], the legend entry is PhatAero instead of TNOAero.

Source: Task 47, TURBINIA, Turbulent Inflow Innovative Aerodynamics Final Technical Report Phase I

主要結果

- 4断面の法線力平均値は計測と概ね一致した一方、**法線力標準偏差は計測値と解析値の間、および解析コード間で大きく異なった。**
- 実測ロータ回転数の時系列を強制的に解析に与えた場合、法線力変動予測は改善したことから、荷重変動予測には空力モデルだけでなく**実機の運転状態の再現も重要**であることが確認された。
- ブレード変形を除いた**剛体モデルであっても、法線力変動および誘導速度変動の予測には大きなモデル差が残った。**
- 非一様流入条件に対する**誘導速度および後流モデルの違いが、荷重変動予測に大きく影響**することを示唆している。
- アウトプットとして「Task 47, TURBINIA, Turbulent Inflow Innovative Aerodynamics Final Technical Report Phase I」に整理された。



Source: Task 47, TURBINIA, Turbulent Inflow Innovative Aerodynamics Final Technical Report Phase I

各機関が実施している実機風車空力計測手法と実験経験を共有し、
「Recommendations for performing aerodynamic field measurements on wind turbine rotors」にまとめた。

モデル検証に必要な計測

- 出力やスラスト力が合っても、迎角や圧力分布の予測が実測と乖離する場合があるため、**翼面圧力分布に加え、局所流入風速・流入角を同時計測することが重要**である。
- 圧力分布だけでは空力モデルの妥当性を十分に検証できないため、**局所流入、境界層遷移、剥離および抗力の計測**が望まれる。
- 大型風車ではブレードねじり変形の影響が大きく、**ねじり角計測**が重要となる。

流入場計測の重要性

- モデル差と流入条件の不確かさを切り分けるには、ロータ面近傍の**高精度な流入場計測が不可欠**である。
- 気象観測マストのみではロータ全面の流れ場を十分に再現できず、LiDAR等を用いた流入場マッピングが望ましい。

今後の課題

- モデル検証には、風車情報・流入場・空力計測・構造応答を統合的に利用できる実験基盤（理想は公開実験）が必要**である。※風車情報の守秘制約も解消する必要がある。



翼面圧力分布を計測するための圧力ベルト



(a) Complete setup as mounted on blade.

(b) Close up detailed view.

後流、局所流入角、圧力分布を計測するシステム

Source: Recommendations for performing aerodynamic field measurements on wind turbine rotors

- 目的
- 15MW級大型風車に対する空力・空力弾性モデルの予測差を評価する。
 - 実機データの無い大型風車を対象に、解析コード同士を比較する。

実施内容

Round 1：定常・一様流条件

- 剛体ロータおよび柔軟ロータの比較
- 空力モデルと構造変形の影響を評価

Round 2：乱流流入条件

- 乱流強度約8%の流入風を用いた剛体ロータ解析
- BEM・FVW・CFD等の非定常応答を比較

Round 3：Aero-elastic Benchmark

- 構造モデルおよび空力弾性解析手法を比較
- 固有振動数、減衰特性、荷重・変形応答を評価

Table 4.2: High-level summary of participant codes and settings.

Legend Entry	Participant	Code Name	Aero Model	Struc. Model	Ref.
Bladed_BEM	DNV	Bladed	BEM	multi-body	[38]
Bladed_VL	DNV	Bladed	LL-FVW	multi-body	[38, 39]
DLR_SPCK_TAU	DLR	Tau	RANS	rigid	[40]
DLR_SPCK_AD	DLR	SIMPACK-AD	BEM (AeroDyn)	multi-body	[49, 60]
DTU_EllipSys3D	DTU	EllipSys3D	RANS	multi-body	[41, 42]
DTU_HAWC2	DTU	HAWC2	BEM	multi-body	[43, 44]
DTU_HAWC2NW	DTU	HAWC2	BEM plus nearwake	multi-body	[45, 46]
DTU_HAWC2NWVC	DTU	HAWC2	NW plus vortex cylinder	multi-body	[47]
IFPEN_BEM	IFPEN	DeepLines Wind	BEM (AeroDeeP)	multi-body	[48]
IFPEN_VL	IFPEN	DeepLines Wind	LL-FVW (CASTOR)	multi-body	[48]
INM_Aeolian	CNR-INM	Aeolian	BEM	multi-body	[61]
INM_FunAero	CNR-INM	FunAero	Panel code	rigid	[62]
IWES_BD_BEM	IWES	OpenFAST	BEM (AeroDyn)	multi-body	[49]
IWES_BD_OLAF	IWES	OpenFAST	LL-FVW (OLAF)	multi-body	[50]
IWES_OpenFOAM	IWES	OpenFOAM	RANS	rigid	[63]
NREL_ED_BEM	NREL	OpenFAST	BEM (AeroDyn)	modal	[49]
NREL_ED_OLAF	NREL	OpenFAST	LL-FVW (OLAF)	modal	[50]
NREL_BD_BEM	NREL	OpenFAST	BEM (AeroDyn)	multi-body	[49]
ONERA_FAST	ONERA	FAST	URANS-AL	rigid	[64]
ONERA_PUMA	ONERA	PUMA	LL-FVW	rigid	[65]
TNOAero_ED_BEM	TNO	AeroModule	BEM	modal	[52]
TNOAero_ED_AWSM	TNO	AeroModule	LL-FVW (AWSM)	modal	[53]
TNOAero-BEM-S	TNO	AeroModule	BEM (240° sector)	rigid	[31]
PhatAero-BEM	TNO	AeroModule	BEM	multi-body	[52, 54]
TNO_OpenFOAM	TNO	OpenFOAM	RANS	rigid	[63]
PoliBa_LES	Politecnico Bari	-	LES-AL	rigid	[66]
PoliMi_Cp-Lambda	PoliMi	Cp-Lambda	BEM	multi-body	[51]
Sapienza_AL	Sapienza Rome	OpenFOAM	RANS-AL	1D-FEM	[63]
Unifi_ALM	Uni di Firenze	Converge CFD	LES-AL	modal	[67]
UU_ALM	Uppsala Uni	OpenFOAM	LES-AL	modal	[68]

Source: Task 47, TURBINIA, Turbulent Inflow Innovative Aerodynamics Final Technical Report Phase I

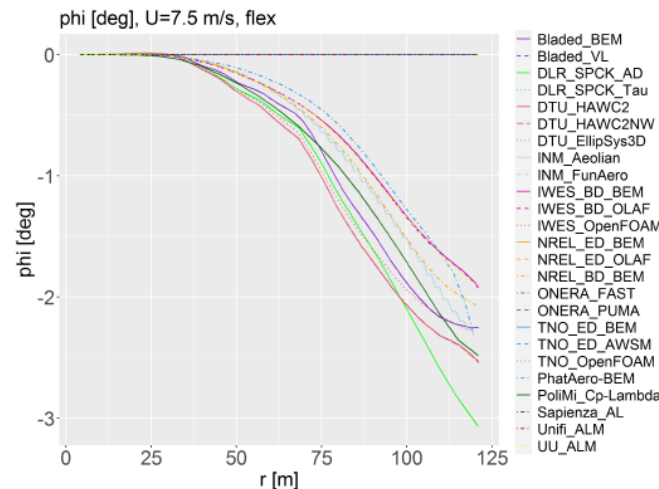
Round 1

- ブレード中央部の空力特性は概ね一致した。
- 柔軟ロータではねじり変形量に差が生じ、構造モデル差が空力荷重予測のばらつきの要因となったことが示唆される。

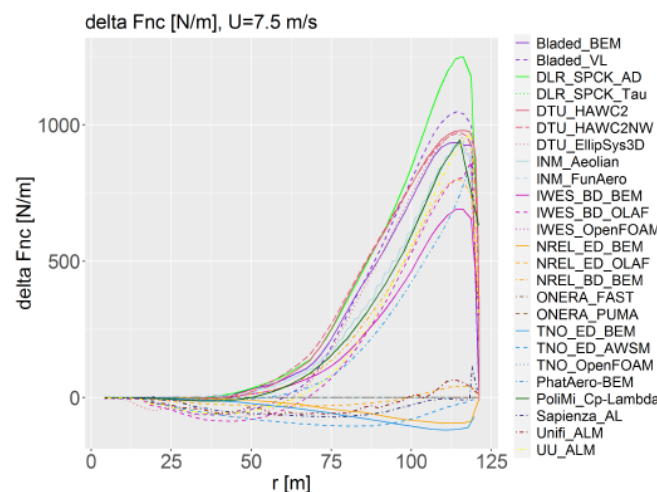
Round 2

- 法線力平均値は概ね一致したが、標準偏差には解析コード間で差が生じた。
- 解析コード間で誘導速度変動予測に大きな差が生じた。

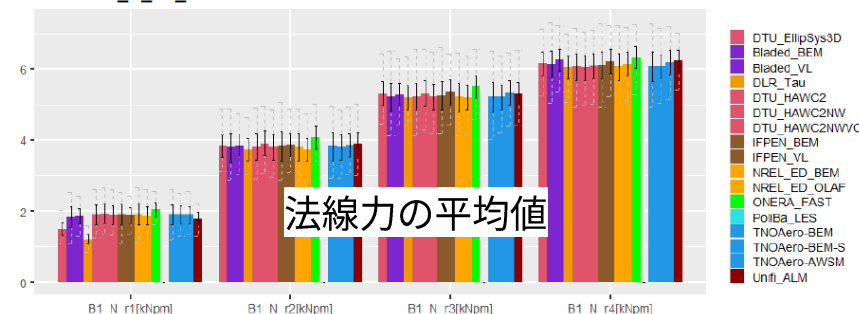
柔軟ロータのねじり変形



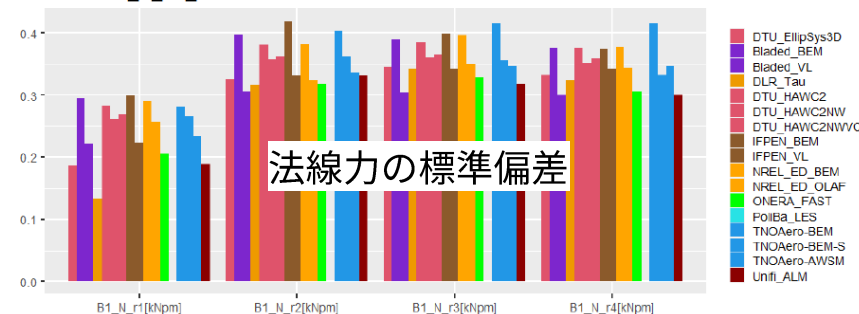
剛体と柔軟ロータの法線力差



CaseV2.3_N_B1_stat



CaseV2.3_N_B1_std



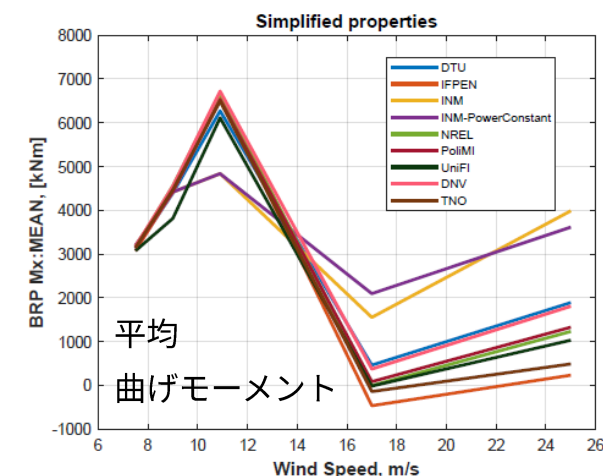
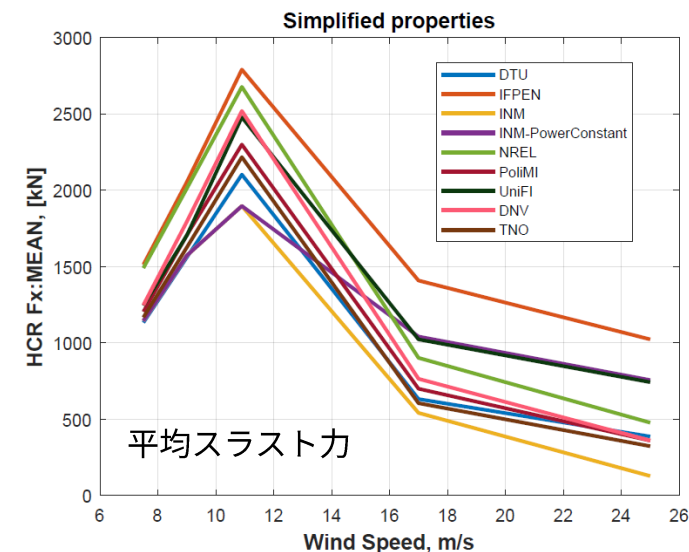
Source: Task 47, TURBINIA, Turbulent Inflow Innovative Aerodynamics Final Technical Report Phase I

Round 3

- ブレードの主要な曲げ振動の固有振動数は概ね一致した。
- ねじり振動特性には解析コード間の差が生じた。
- 振動の減衰特性は固有振動数よりばらつきが大きくなった。
- 定常ウインドシア条件下では、平均スラスト力やブレード根元荷重の予測にも解析コード間の差が見られ、構造モデルの違いが最終的な荷重予測へ影響することが確認された。

WP2の結論

- 誘導モデル、構造モデル、ねじり変形が大型風車解析の主要不確かさ要因として抽出された。



Source: Task 47, TURBINIA, Turbulent Inflow
Innovative Aerodynamics Final Technical Report
Phase I

詳細な活動紹介

- (1) Phase Iの活動紹介 (WP1、WP2)
- (2) Phase IIの紹介

Phase II開始の背景

- Phase Iでは、DanAero実機および15MW RWT比較を通じて、空力モデル、誘導モデル、構造モデルに起因する**予測差が確認**された。
- モデル差が生じる要因や各近似手法の適用範囲については、十分に解明されていない課題が残った。

Phase IIの基本アプローチ

- Phase IIでは、**解析対象をIEA 22MW Reference Wind Turbineに集約**した。
- 単一の共通風車を用いることで、モデル差の発生要因をより詳細に分析する。
- 一様流、柔軟ロータ、非一様流入、乱流流入といった解析条件を段階的に追加し、差が生じる条件や原因を調査する。得られた知見を**空力・空力弾性モデルの改善**へ反映する。（WP1）
- 実機風車空力計測データの活用方法や将来の公開実験基盤の整備についても検討する。（WP2）
- 他のタスクと技術的に連携する。（WP3）

日本からの貢献

- 2026年9月15日のSummer meetingから本格的な活動を開始し、具体的な取り組み方法を検討していく。