

第14回 IEA Wind セミナー

IEA Wind国内委員会委員長
東京大学 石原孟

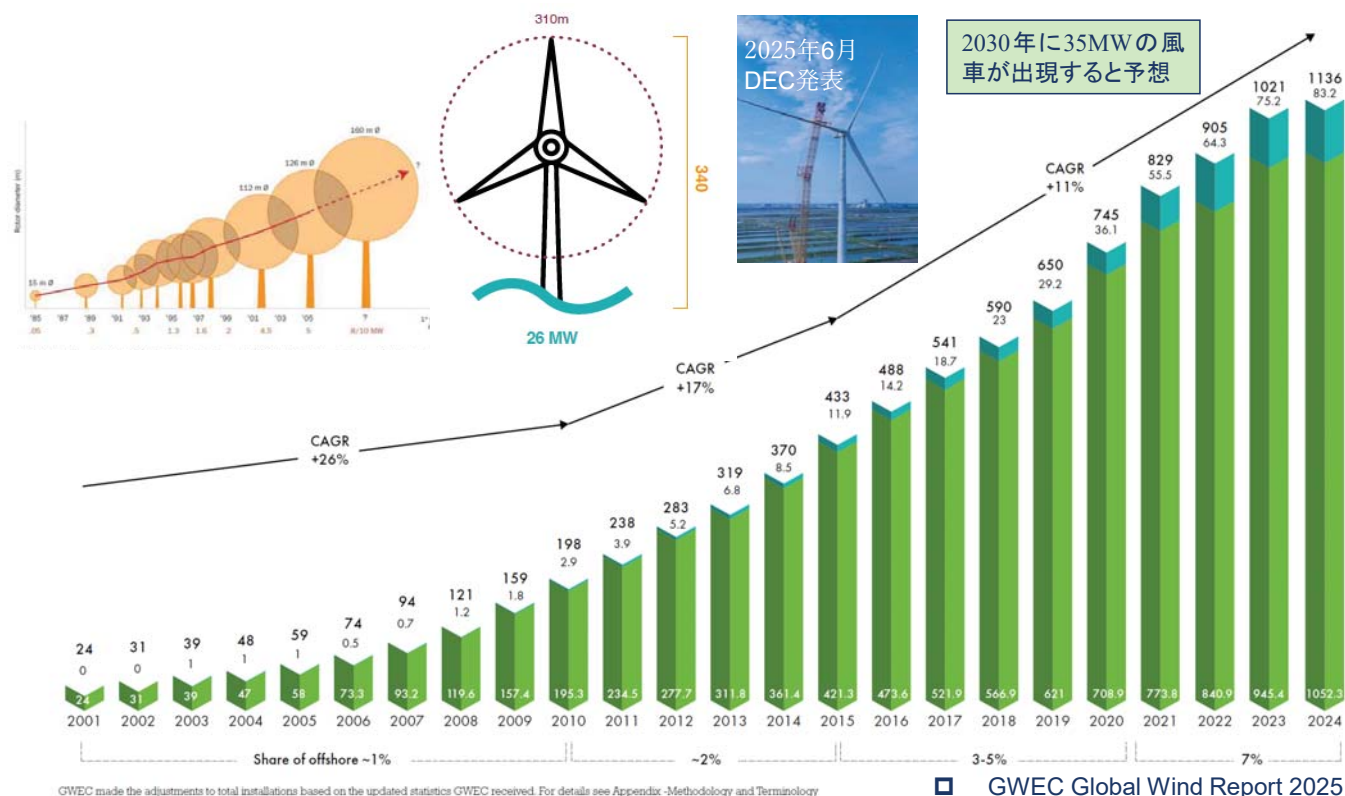
2025年9月24日

第14回 IEA Wind セミナー

2

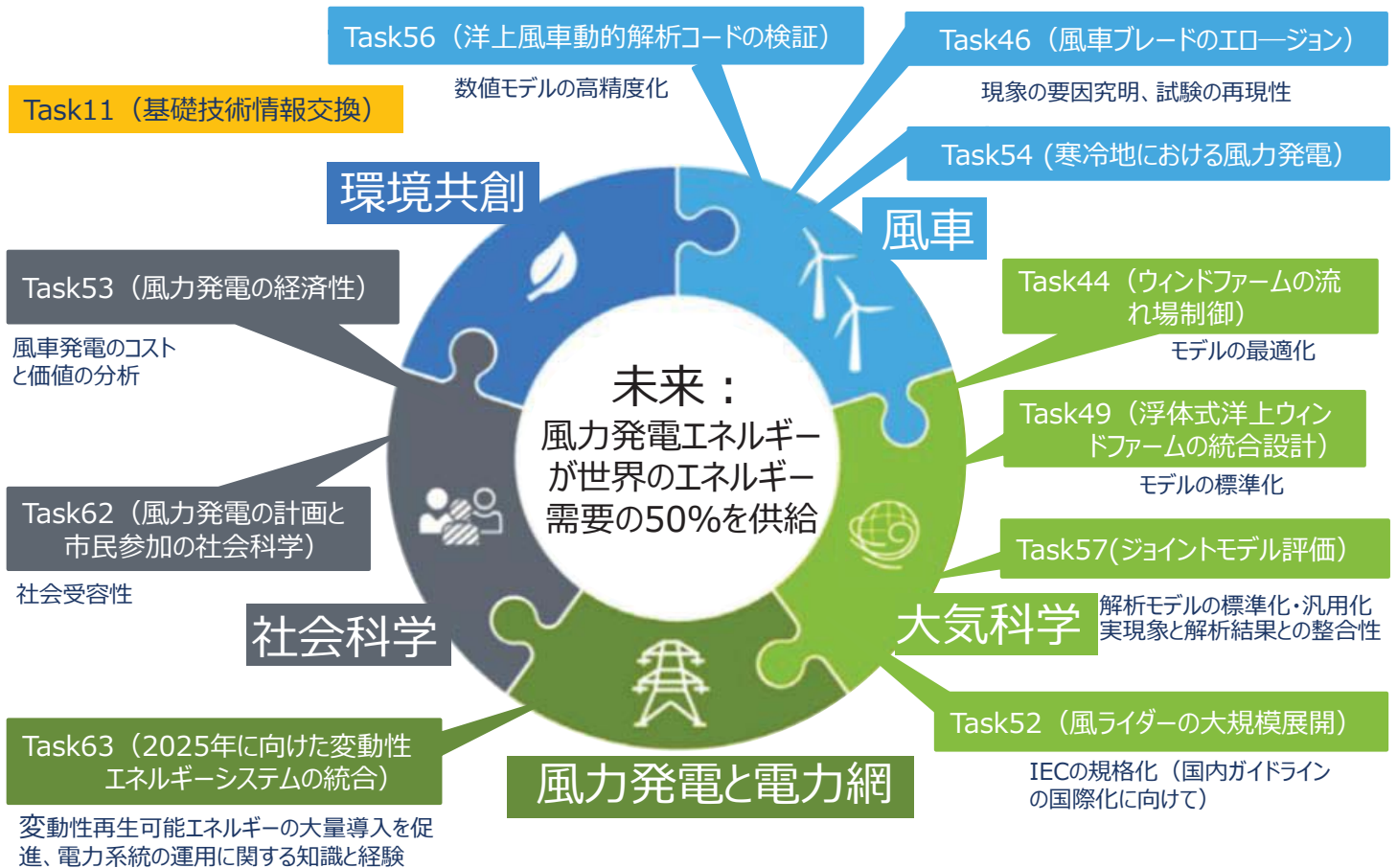
- IEA Windでは、国際共同研究（以下、Taskと呼ぶ）を行うことを通じて、日本の風力発電技術の発展及び風力発電の国際標準策定における日本の発言力向上を目指しています。
- 本年度は、例年のIEA Windの活動紹介や講演に加え、パネルディスカッションも一緒に開催します。またセミナーは、昨年度同様、会場とオンライン配信のハイブリッド方式にて開催しています。
- 本日のセミナーでは、第1線でご活躍しておられる講師の皆様から、日本が参加しているTaskに関する最新の研究成果をご紹介します。風力発電関係者の皆様のお仕事や研究開発にお役に立てればと期待しております。

世界風力会議GWECの発表によると、風力発電の設備容量は、2001年から2010まで平均26%の年間成長率で増加してきた。2015年以後11%になったが、**2024年末時点累積設備容量は11億3600万kWになり、日本における総発電設備容量の約6倍に達している。**



国内の動き

- 2030年までに1000万kW、2040年までに最大4500万kWの導入目標を確実に実現するため、2025年6月11日に「**海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律(再エネ海域利用法)の一部を改正する法律**」は公布し、今後洋上風力は領海内だけでなく、EEZにも展開される予定。
- 2050年CNの目標を実現するため、10年間約1200億円を投じ、技術開発を行っている。「**グリーンイノベーション基金事業／洋上風力発電の低コスト化／浮体式洋上風力実証事業**」のフェーズ2は、2030年度まで実施される予定。また「**浮体式洋上風力発電の導入促進に資する次世代技術の開発**」は今年度までFSとして実施されている。
- 2025年2月18日に閣議決定された**第7次エネルギー基本計画**では、2040年まで風力発電は**全発電量の4-8%まで導入目標**が制定された。また、陸上風力、着床式洋上風力に加え、2025年8月8日に開催された官民協議会で示された「**第2次洋上風力産業ビジョン**」に**2040年までに1500万kWの浮体式風力の導入目標**が盛り込まれた。



[Task Directory](#) | IEA Wind TCP (iea-wind.org)

今日の講演内容と講師

09:30	開会の挨拶	石原孟 (東京大学・IEA Wind国内委員会委員長)
09:35-10:35	午前の部①	
	・IEA Windの活動について	川島秀之 (NEDO)
	・Task11 (基礎技術情報交換)	嶋田進 (産総研)
	・Task44 (ウインドファームの流れ場制御)	内田孝紀 (九州大学)
	・Task46 (風車ブレードのエロージョン)	田中元史 (産総研)
10:35-10:45	休憩	
10:45-11:45	午前の部②	
	・Task49 (浮体式洋上ウインドファームの統合設計)	山口敦 (足利大学)
	・Task54 (寒冷地における風力発電)	岩井憲一 (駒井ハルテック)
	・Task56 (洋上風車動的解析コードの検証)	吉本治樹 (ジャパンマリンユナイテッド)
11:45-12:45	休憩	
12:45-14:00	午後の部①	
	・パネルディスカッション1: 風力発電の技術開発の課題と取り組み	
	＜モデレーター＞ 橋本 淳 (日本電機工業会)	
	＜パネリスト＞ 内田孝紀、田中元史、山口敦、岩井憲一、吉本治樹、石原孟	
14:00-14:15	休憩	
14:45-15:55	午後の部②	
	・Task52 (風ライダーの大規模展開)	種本純 (清水建設)
	・Task57 (ジョイントモデル評価)	植田祐子 (ウインドエナジーコンサルティング)
	・Task53 (風力発電の経済性)	菊地由佳 (東京大学)
	・Task62 (風力発電の計画と市民参加の社会科学)	丸山康司 (名古屋大学)
	・Task63 (2050年に向けた変動性エネルギーの統合)	安田陽 (ストラスクライド大学)
15:55-16:10	休憩	
16:10-17:25	午後の部③	
	・パネルディスカッション2: 大気科学と社会科学からみた風力発電の課題と取り組み	
	＜モデレーター＞ 三保谷 明 (日本風力エネルギー学会)	
	＜パネリスト＞ 植田祐子、菊地由佳、丸山康司、安田陽、角谷靖明 (日本風力発電協会)	
17:25	閉会の挨拶	米倉秀徳 (NEDO)

IEA Windの活動について

2025年9月24日

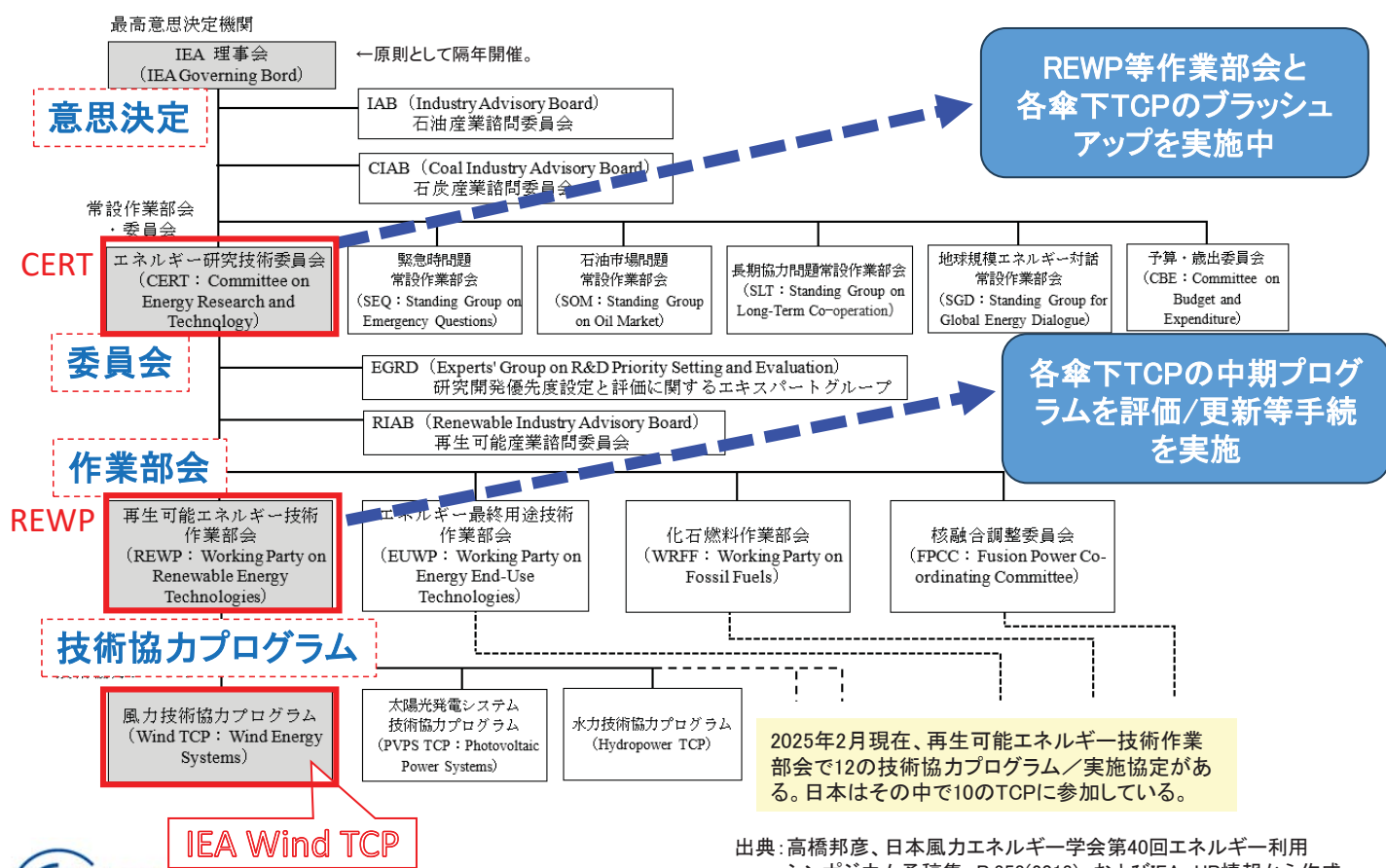
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)
再生可能エネルギー部 風力・海洋ユニット
川島 秀之

IEAについて

■ 国際エネルギー機関(IEA)

- 第1次石油危機後の1974年に、**キッシンジャー米国务長官**(当時)の提唱を受けて、OECDの枠内における自律的な機関として設立。日本を始めとする32カ国が加盟(2025年4月時点)。
- 「4つのE」を目標に活動推進(①エネルギー安全保障の確保〈Energy Security〉 ②経済成長〈Economic Development〉 ③環境保護〈Environmental Awareness〉 ④世界的なエンゲージメント(世界協調)〈Engagement Worldwide〉)。
- 日本では、石油供給が不安定の際、IEAの緊急時対応システムにより各国の石油備蓄の共同放出による価格上昇を抑制の**恩恵**。
- 近年は、エネルギー政策全般にわたる**意見交換**の場として重要との認識。**政策提案**も参加各国に対する重要なInputである。

IEAの組織、風力にとって重要な会議体



IEA Windの経緯

■国際エネルギー機関風力技術協力プログラム

(IEA Wind Technology Collaboration Programmes: IEA Wind TCP)

- IEA下の技術協力プログラムの一つ。
- 1977年に発足した実施協定から2015年に技術協力プログラムに改定。日本は1978年から参加(機械技術研究所(産総研の前身))。
- 各国の最新の研究開発、政策動向等についての情報収集が可能となるとともに、**IEA Windの成果(技術推奨基準)**が**IEC国際規格**に発展するケースが多いため、日本の実情にあった有利な国際標準策定に資するため参画中。
- 2017年(平成29年)3月14日より**産総研からNEDOにIEA Wind締約者**を変更し、NEDOのマネジメントのもと活動を実施。
- 参加国(機関)はTaskと呼ばれる国際協力R&Dに取り組み、23Taskが実施中。日本は、24年9月～25年11月の間で11のTaskに参加しています。

IEA Wind の目的・実施活動

IEA Windの目的

- 風力新技術の研究開発における効率的な国際協力の推進。
- 高品質な風力情報の収集と風力技術・政策・普及の分析等。
⇒各国の風力関連施策、研究開発プログラム策定に対する支援。

IEA Windの実施活動

- IEA Windの活動方針は、年3回開催される執行委員会(ExCo)において審議。
⇒COVID-19奇禍明けの2023年春季に、ExCo会議が日本で開催。2023年までは
年2回の対面会議であったが、2024年より、**Online開催2回+In Person開催1回**
の新体制に変更された。
- 具体的な国際協力R&D活動は、重要な研究開発テーマごとに設置される「Task」を通じて行われる。 ◎各Taskは、Operating Agent(OA)が主導。



In Person会議の様子
(ExCo91、於北九州)

On line会議
の様子
(ExCo93、
2024年春季)



IEA WindとIEC

IEA WindとIEC～2つの国際活動～

- IEA Windの研究開発国際共同活動とIEC(国際電気標準会議)の「風力発電システムの国際標準化」での活動が、ドイツ、スペイン、英国、米国といった風力発電先進国の国際活動の基本戦略。
- IEA Windの推奨基準が、IEC国際標準のベースとなる事例多数。二つの国際活動は、各々独立した体制・組織により行われているが、技術的には相互補完的關係。
- 我が国でも、IEA WindとIECが国際活動の両輪として重要との認識。

Pメンバーのみ。Oメンバーは除く。

IEA WIND参加国・地域

メキシコ※4
EU
Wind Europe
新規検討中※5

日本
中国※1
韓国
ドイツ
デンマーク
スペイン
オランダ

米国
カナダ
スイス
フランス
英国
イタリア
フィンランド

アイルランド
ギリシャ
ポルトガル
オーストリア
スウェーデン
ノルウェー
ベルギー

IECTC88メンバー

ロシア※2
南アフリカ

インド※3
イスラエル
スロベニア
イラン
トルコ
チェコ

※1) 中国は中国風力エネルギー協会(CWFA)が参画

※2) 2009年春のExCoにおいて参加承認(正式加入に向けてロシア政府と調整中であったが、今般の状況により、2022年、調整停止)

※3) 2021年より参加 ※4) 2022年に脱退 ※5) ポーランド、トルコが招待中。オーストラリア、ブラジル、ウルグアイが興味を示す。



IEA Wind 加盟国の風力導入実績

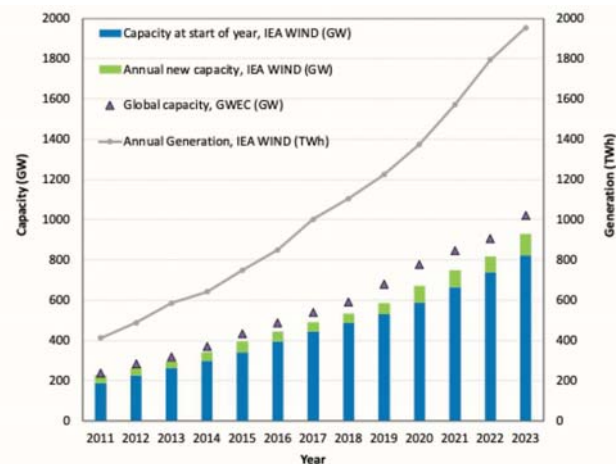
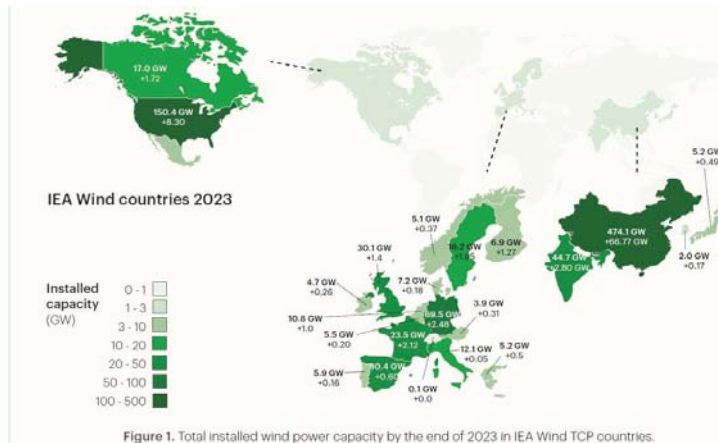


図1 風力発電の総導入量・新規導入量(2023暦年)

図2 2011～2023暦年の風力発電の導入トレンド

- 世界の風力発電産業の設備容量は1 TW (1000 GW) を超過。
- IEA Wind TCP参加国の風力発電量は2000TWhに迫る勢い。
- 欧州・米国の導入量が多いが、中国はそれを越える状況。

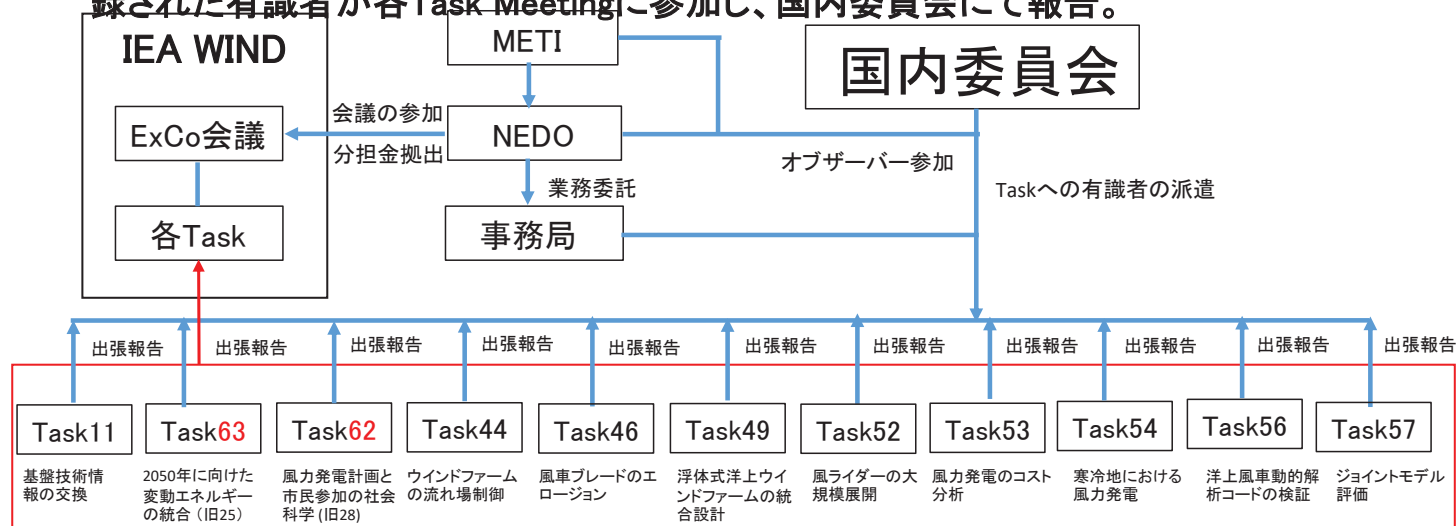
出典: IEA Wind Technology Collaboration Programme 2024 Annual Report (for 2023)



7

IEA Wind の国内体制

- 国内委員会は国内のIEA Windに関する最高意思決定機関として、各Taskへ派遣する有識者、参加するTask、分科会の設置等を審議(年間3回程度実施)。
- 国内委員会の審議内容より詳細な項目の意見集約等を要する場合は、必要に応じて分科会を設置し、国内委員会で承認された主査の下、各Taskの専門的な議論を実施。
- 事務局はNEDOの委託業務においてWEITに設置。NEDOは、締約者及び委託元としてMETIの監督の下、ExCoへの参加等を通じて、IEA Wind全体を管理。各Taskでは、登録された有識者が各Task Meetingに参加し、国内委員会にて報告。



赤字: 旧Taskから延長

注) 各Taskは2024年10月～2025年9月での参加状態

8

各タスクのカテゴリー

IEA Wind 実施協定 2019－2023

各タスクのカテゴリーは4類型＋1

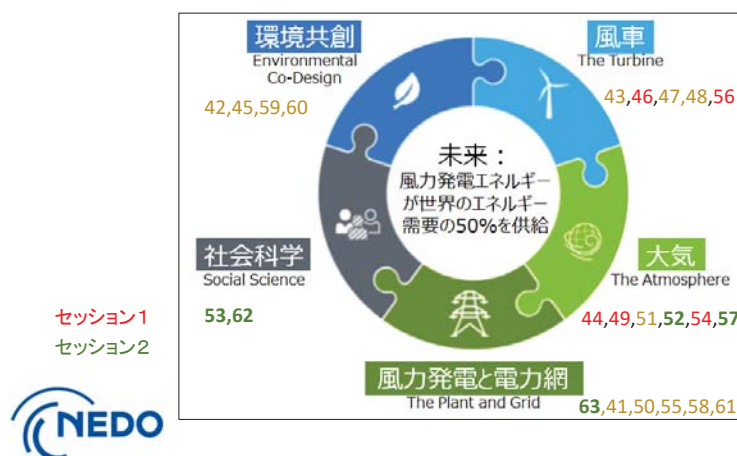
- (1) 資源とサイト特徴化 (Resource and Site Characterization)
- (2) 先進技術 (Advanced Technology)
- (3) 高風力量でのエネルギーシステム (Energy Systems with High Amounts of Wind)
- (4) 社会的、環境および経済影響 (Social, Environmental, and Economic Impact)
- +1 (戦略) コミュニケーション、教育と取り決め (Communication, Education, and Engagement)



IEA Wind 実施協定 2024－2028

各タスクのカテゴリーは5類型＋1

- (1) 風車 (The Turbine)
- (2) 大気 (The Atmosphere)
- (3) 風力発電と電力網 (The Plant and Grid)
- (4) 社会科学 (Social Science)
- (5) 環境共創 (Environmental Co-design)
- +1: 協働的なコミュニケーション (Collaborative Communication)



9

TEM 新しい課題の検討(TEM)

新しい課題の提案・検討のプロセス

- Task11で新しいTEM(Topical Expert Meeting)候補を検討・提案。
- ExCoで提案TEM候補を審議、新TEMを選択・採択。
- 新TEM事務局がTEM開催準備/開催。
- IEA Wind 国内委員会 で新TEMに参加する専門家を検討。
- 新TEMへ専門家を派遣。
- 新TEM事務局が新タスクを提案、ExCoにおいて新タスクの採択・承認。
- 新TEM参加専門家から、IEA Wind国内委員会に日本参加の申請、国内委員会が新タスクへの日本参加の検討・審議。
- 参加が承認された後、NEDOがIEA Wind事務局および新TEM事務局へ日本参加を申請。

活動報告書はIEA Windのホームページから自由にダウンロードが可能です

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



Technical Report

図はTask40*による「Downwind Turbine Technologies Technical Report」(2022年4月)の例。
*日本がOAを務めた。



Recommended Practice

図はTask25による「WIND/PV INTEGRATION STUDIES」の例。



Annual Report

図は2024年出版の2023年(暦年)版の例。

ご清聴ありがとうございました。

IEA Wind Task 11

基礎技術情報交換 (Base Technology Information Exchange) の活動紹介

嶋田 進

国立研究開発法人産業技術総合研究所

エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター 風力エネルギー研究チーム

2025年9月24日、AP日本橋
第14回 IEA Wind セミナー

本日の報告内容

1. IEA Wind Task 11の概要

- 専門家会議（TEM、Topical Expert Meeting）
- 推奨基準（RP、Recommended Practice）

2. 体制

- 2024年のTEM活動
- 新TEM

3. まとめ

IEA Wind Task 11の概要

Task 11のポイント

- 歴史： Task 11は、IEA Wind発足（1978）当時からIEA Windの取り組みの一環として、**IEA Windメンバー国のほぼ全てが参画する基礎的なTask**
- 参加国： 18の国・地域※（日本、中国、ヨーロッパ（デンマーク、ドイツ、スペイン）、英国、米国等）
※：ベルギー、スイス、カナダ、中国、デンマーク、スペイン、フィンランド、フランス、ドイツ、アイルランド、イタリア、日本、韓国、オランダ、ノルウェー、スウェーデン、イギリス、米国
- Task 11の目的： Task 11に参加する各国メンバーが重要と認識する共通の研究開発トピックに関して、**専門家間の技術情報交換を通じて風車技術を振興**すること
- 主な活動： **TEM**（Topical Expert Meeting、専門家会議）を通じた風力研究開発の最新状況の情報交換と**RP**（Recommended Practice、推奨基準）の策定
- TEM： 年4回程度開催
メンバー国からのニーズが高い研究開発トピックについて、専門家を招集し情報交換を行うことにより、風力関連技術の理解の深化を促進
- RP： Task 11 TEM、IEA Wind内の他のTask活動の成果を**推奨基準**として発行
- その他： Task 11のTEMとして議論された研究開発テーマが**新たなTaskとして発展**するケースが多く、**IEA Windの中でも最も基本的なTask**
IEA Windが発行した推奨基準が原案となり、**IEC 61400シリーズ**が策定されるケースも多く、**風力発電技術の国際標準化に対して大きく貢献**

Task 11の目的：

- Task 11に参加する各国メンバーが重要と認識する共通の研究開発トピックに関して、専門家間の技術情報交換を通じて風車技術を振興すること

OA (Operating Agent)：

- ～2008年 スウェーデン、FFA（航空研究所）、Sven Erik Thor
- 2009～2015年 スペイン、CENER（国立再生可能エネルギーセンター）、Felix Avia Aranda
- 2015～2016年 スペイン、CENER、Xabier Munduate
- 2017年～ スイス、Planair SA

【補足】これまで国立研究機関の研究マネージャークラスの方がTask 11 OAを務めてこられたが、TEM等のイベント企画・運営を効率的・効果的に実施する観点から、公募により、再生可能エネルギー関連の技術コンサルティング会社であるPlanair SAが2017年からOAとして対応することになった。

参加国：18の国・地域：

- ベルギー、スイス、カナダ、中国、デンマーク、スペイン、フィンランド、フランス、ドイツ、アイルランド、イタリア、日本、韓国、オランダ、ノルウェー、スウェーデン、イギリス、米国

Task 11の主な活動内容

(1) TEM (Topical Expert Meeting) を通じた風力研究開発の最新状況の情報交換

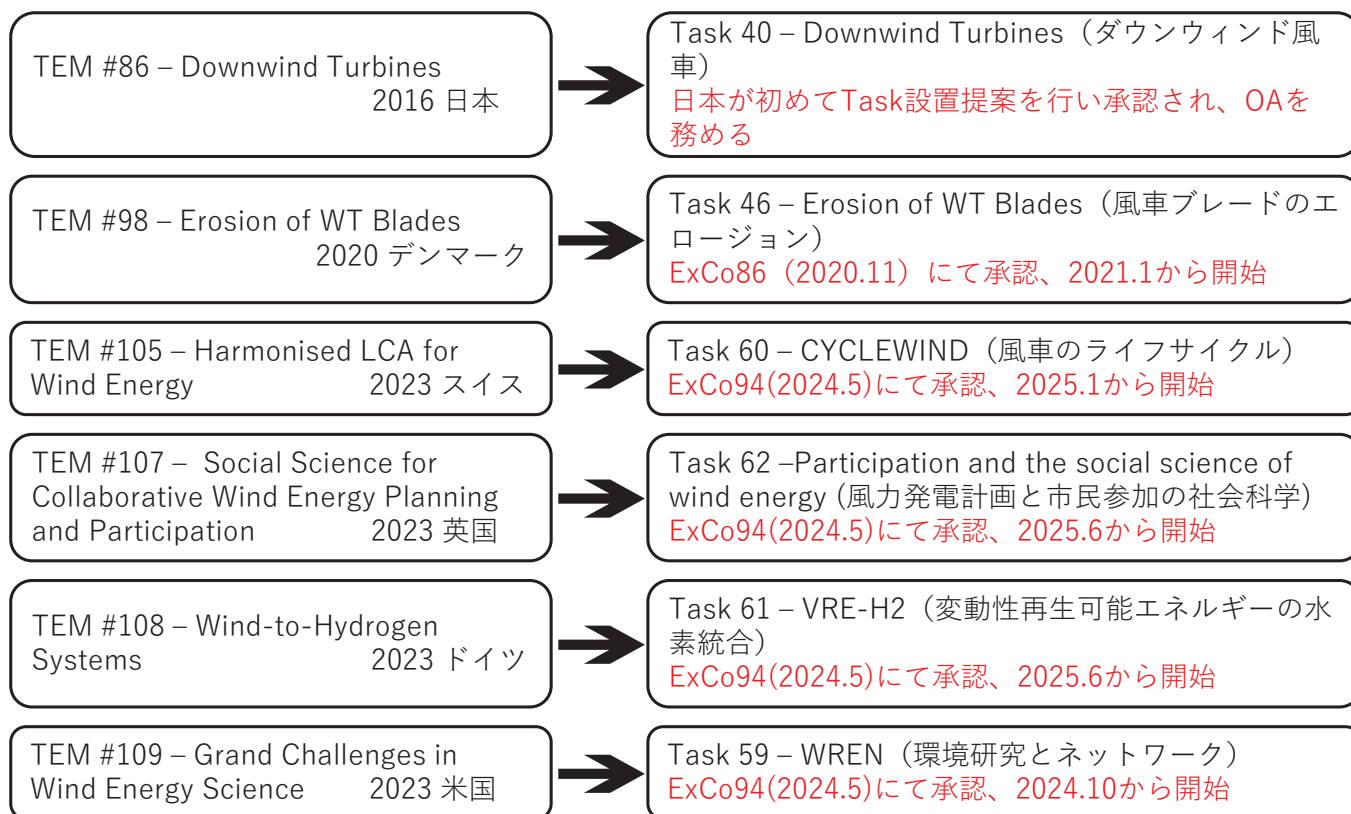
- 年4回程度開催
- その時点での各国からのニーズが最も高い研究開発トピックについての情報交換を行うことにより、風力関連技術の理解の深化を促進
- Task 11のTEMとして議論された研究開発テーマが**新たなTaskとして発展するケースが多く、IEA Windの中でも最も基本的なTask**

(2) RP (Recommended Practice、推奨基準) の策定

- 風車の各種試験方法等、国際的に統一したルールが必要であると考えられる風力関連の推奨基準について、各国からのエキスパートが参加して策定する
- この各種推奨技術基準が、IEC 61400シリーズの原案となり、風力技術の国際標準化に対して大きな貢献を果たしている
- IEA Windのホームページから自由にダウンロード可能
 - <https://iea-wind.org/recommended-practices/>



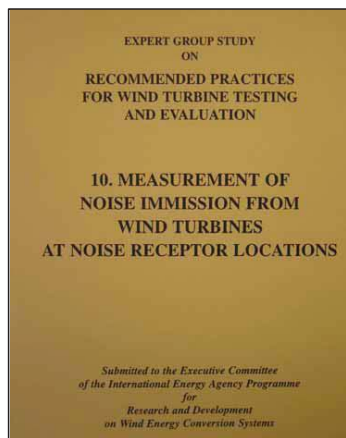
TEM #83 on "Mitigation of Wind Turbine Impacts on Radar" (2015/10、ドイツ) 開催を記念した集合写真



- ExCo95 (2024年11月) ~ ExCo97 (2025年5月) は既存Taskの延長のみでTEMから新Taskは無し

IEA Wind RP ⇒ IEC 61400シリーズ

- IECにおける国際規格文書の策定には、時間を要する (通常5年以上)
- IEA Wind Task 11において策定される推奨基準 (RP、Recommended Practice) は、より短い期間 (通常、1~3年程度) で策定され、このRPがIEC 61400シリーズの原案となるケースが多く、風力技術の国際標準化に対して大きな貢献を果たしている



IEA Wind Recommended Practice 10 (RP10), Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Location

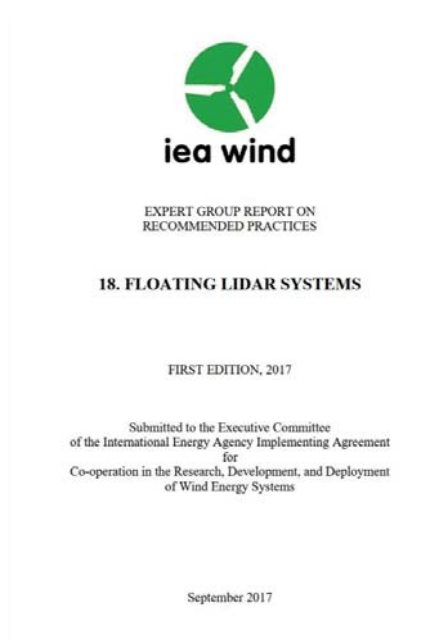


IEC 61400-11
Acoustic noise measurement Techniques

No.	タイトル	タイトル(邦訳案)	1版	2版	3版
1	Power Performance Testing	風車性能試験方法	1982	1990	
2	Estimation of Cost of Energy from Wind Energy Conversion Systems	風力変換システムのエネルギーコストの推定方法	1983	1994	
3	Fatigue Loads	疲労荷重	1984	1990	
4	Acoustics Measurement of Noise Emission from Wind Turbines	風車の騒音計測方法	1984	1988	1994
5	Electromagnetic Interference)	電磁波障害	1986		
6	Structural Safety	構造の安全性	1988		
7	Quality of Power. Single Grid-Connected WECS	系統連系・単一風車の電力品質	1984		
8	Glossary of Terms	用語	1987	1993	
9	Lighning Protection	落雷保護	1997		
10	Measurement of Noise Imission from Wind Turbines at Receptor Locations	風車の環境騒音測定方法	1997		
11	Wind Speed Measurements and Use of Cup Anemometry	風速計測とカップ式風速計の利用	1999		
12	Consumer Labelling of Small Wind Turbines	小形風車の消費者ラベリング	2011		
13	Wind Projects in Cold Climates	寒冷地の風力発電プロジェクト	2012	2017	
14	Social Acceptance of Wind Energy Projects	風力発電プロジェクトの社会受容性	2013		
15	Ground-Based Vertically-Profiling Remote Sensing for Wind Resource Assessment	風力資源量評価のための地上設置型垂直プロファイリングリモートセンシング	2013		
16	Wind Integration Studies	風力発電の系統連系に関する調査	2013	2018	2024
17	Wind Farm Data and Reliability Assessment for O&M Optimization	O&M最適化のためのウインドファームデータ収集及び信頼性評価	2017		
18	Floating Lidar Systems	浮体式ライダーシステム	2017		
19	Micro-Siting Small Wind Turbines for Highly Turbulent Sites	高乱流サイトにおける小形風車のマイクロサイティング	2018		
20	Selecting Renewable Power Forecasting Solutions	再生可能エネルギー発電電力量予報	2018		

- <https://iea-wind.org/recommended-practices/> から、自由にダウンロード可能
- **RP16 Wind Integration Studiesの第3版2024年にリリース**

RP, Recommended Practiceの例



IEA Wind Recommended Practice 18 (RP), 1st Edition (2017),
FLOATING LIDAR SYSTEMS

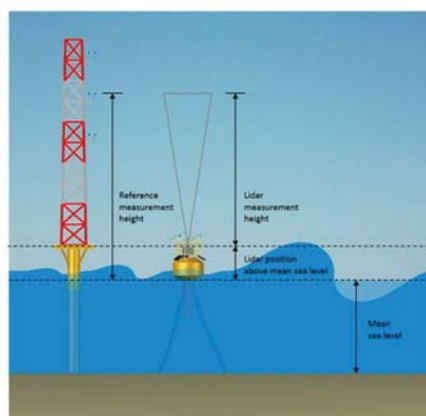


Figure 8: Typical dimension for FLS deployments. The reference of the measurement height of the FLS and the measurement height of the reference system should be the same, for example mean sea level.

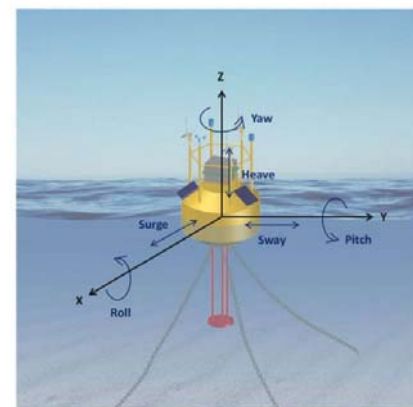
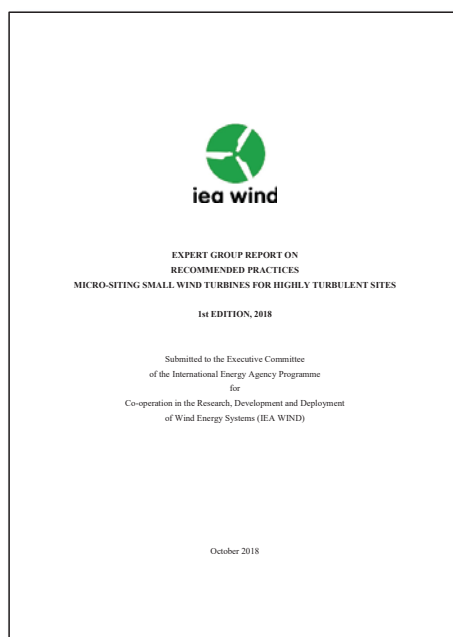


Figure 4: The six degrees of freedom of an FLS.



IEA Wind Recommended Practice 19 (RP), 1st Edition (2018), Micro-Siting Small Wind Turbines for Highly Turbulent Sites

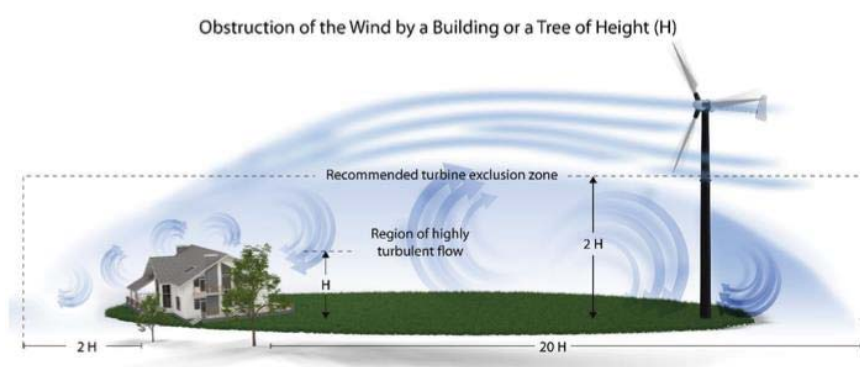


Figure 1. Zone of disturbed flow over a small building [1]

Year	TEM#	トピック	日程	開催国	日本からの参加者
2024	113	Net Zero Electricity System Studies（ネットゼロ電力システム調査）	2024.4.8-9	アイルランド	ISEP・安田、電中研・田辺
	112	Impact of Extreme Weather on Offshore Wind Energy Systems（洋上風力における異常気象の影響）	2024.10.28-29	米国	
	111	Reanalysis for Wind Energy（風力エネルギーの再解析）	2024.4.25-26	デンマーク	足利大学 山口
Year	TEM #	トピック	日程	開催国	日本からの参加者（敬称略）
2023	110	Instrumentation Development（計測機器開発）	2023.11.2	米国	-
	109	Grand Challenges in Wind Energy Follow-on（風力のグランドチャレンジ）	2023.2.28-3.1	米国	-
	108	Technology Transfer（技術移転）	2023.2.22-23	オンライン開催	-
	107	Wind Energy Research Needs in Emerging Wind Energy Markets（新興市場における風力研究の必要性）			未定
	106	Renewable Hydrogen in 100% Renewable Energy Systems（再生可能エネルギー水素）	2023.9.5-6	米国 & オンライン	横浜国立大相原・松澤 熊本県産業技術センター大城
	105	Sustainability / Harmonized Life Cycle Analysis（持続可能性/ハーモナイズドLCA）	2023.9.21-22	スイス	-
2022	104	Wind Farm Asset Management（風力発電所の資産管理）			未定
	103	Offshore Wind Licensing and Consenting（洋上風力発電の許認可）	2022.2.8-11	オンライン開催	-
2021		開催なし			
2020	102	Airborne Wind Energy（エアボーン風力）	2020.9.23-24	オンライン開催	東京都立大藤井、九大吉田・Mostafa Rushdi、前田建設工業丸山、神奈川工科大大久保、福井大高橋、トヨタ板倉（JWEA空中風力発電研究会）
	101	Hybrid Power Plants Challenges and Opportunities（ハイブリッド発電）	2020.8.24-26	オンライン開催	日立パワーソリューションズ紺谷・寺山・林
	100	Aviation System Cohabitation（航空システムとの両立）	2020.12.8-9	オンライン開催	
	99	Floating Offshore Wind Arrays（浮体式洋上風車の配列効果）	2020.7.15&17&20	オンライン開催	清水建設嶋田
	98	Erosion of Wind Turbine Blades（風車翼のエロージョン）	2020.2.6-7	デンマーク	産総研田中（JWEAブレード技術研究会）

- 年4回のTEMの開催が基本
 - 2022年は1回、2023年は5回、2024年は4回
- 2020年からはオンライン開催がメインとなり、このため、毎回の参加者が100名（以前は20名程度）程度に増えるケースも
- 派遣する専門家は、IEA Wind国内委員会における委員からのご意見を踏まえ、Task 11担当委員及び事務局（WEIT様）が検討・調整の上、国内委員会及びNEDO様に了承いただくという形で選任する

TEM開催状況

2024年には、トータル4回のTEMが開催された。

- TEM #110 on Wind Instrumentation Development follow up online
 - 提案：米国
 - 開催日程：2024年5月2日
 - 開催地：オンライン
 - 参加者：26名
- TEM #111 on Reanalyses for Wind Energy
 - 提案：ドイツ/デンマーク
 - 開催日程：2024年4月25～26日
 - 開催地：デンマーク
 - 参加者：64名（日本から1名参加）
- TEM #113 on Net Zero Electricity System Studies
 - 提案：アイルランド
 - 開催日程：2024年4月8～9日
 - 開催地：アイルランド
 - 参加者：32名（日本から2名参加）
- TEM #112 on Impact of Extreme Weather on Offshore Wind Energy Systems
 - 提案：米国
 - 開催日程：2024年10月28～29日
 - 開催地：米国
 - 参加者：31名

TEMs realised since last ExCo in May 2024

- 3 TEMs plus an online follow up from TEM 110

TEM #	New TEM Title	Proposed by (Lead Member)	Core Team Lead	Date TEM Approved	Date	Location	Status	# of participants
110*	Wind Instrumentation Development follow up online	USA (Jim Ahlgrim)	Tommy Herges, Pat Moriarty, David Maniaci	1-Mar-22	2-May-24	Online	Realised	26
111	Reanalyses for Wind Energy	Germany/Denmark	Rémi Gandoïn, Julia Gottschall, Rogier Ralph Floors	Oct. 23	April 25-26, 2024	DTU Lyngby (Denmark)	Realised	64
113	Net Zero Electricity System Studies	Ireland	John McCann, Abbas Rabiee	Oct. 23	April 8-9, 2024 (Task 25 and Task 53 spring meetings side)	Dublin (Ireland)	Realised	41
112	Impact of Extreme Weather on Offshore Wind Energy Systems	USA	Georgios Deskos, Walt Musial	Oct. 23	October 28-29th 2024	Rutgers University - NJ (USA)	Realised	31

Technology Collaboration Programme

by IEA

第97回ExCo会議（2025年5月）におけるTask 11報告資料（抜粋）

- 提案：ドイツ／デンマーク
- 開催日程：2024年4月25～26日
- 開催地：デンマーク
- 参加者：64 名
 - 日本からの参加者：
 - 足利大学・山口

TEM概要

課題：

風力エネルギー分野では多くのデータセットが存在しているが、これらのデータセットは各人が独自に取得しているものが多く、データセット間で統一性がないため、データ分析が非効率となっている。

目標：

- 再解析データセットへのアクセス性と文書化の改善
- 風力エネルギーや電力系統への応用における再解析データセットの検証を促進し、成功事例を広く紹介することで、その価値を高める
- 再解析データ提供者と風力エネルギー分野の関係者との連携・協力の場を提供する

Time	Day 1
08:30	Welcome Opening Remarks
09:00	Introduction
09:15	Regional reanalysis from Australia / New Zealand.
09:45	Short presentations on use cases (state of the art).
10:45	Break w food and drinks
12:45	Lunch
13:45	Regional reanalysis
15:15	Break w food and drinks
15:30	Future uses / improvements and shortcomings
17:00	Debriefing in small groups - unwinding - preparation of Day2

Time	Day 2
08:30	Welcome
09:00	Debrief of day 1 + results of online survey
09:15	Session 1: improvement of existing datasets (access, usage, validation)
10:15	Debriefing Session 1
10:45	Break w food and drinks and group picture
11:00	Session 2: improvement of future datasets and potential future
12:00	Debriefing Session 2
12:30	Closure and lunch thereafter for those who can stay

TEM #113 Topical Expert meeting on Net Zero Electricity System Studies

- 提案：アイルランド
- 開催日程：2024年4月8～9日
- 開催地：アイルランド
- 参加者：41名
 - 日本からの参加者：
 - ISEP・安田、電中研・田辺

TEM概要

課題：

風力エネルギー分野では多くのデータセットが存在しているが、これらのデータセットは各人が独自に取得しているものが多く、データセット間で統一性がないため、データ分析が非効率となっている。

目標：

- 再解析データセットへのアクセス性と文書化の改善
- 風力エネルギーや電力系統への応用における再解析データセットの検証を促進し、成功事例を広く紹介することで、その価値を高める
- 再解析データ提供者と風力エネルギー分野の関係者との連携・協力の場を提供する

Time	Day 1
9:30 AM	Welcome and meeting overview
9:45 AM	Public Session – Net Zero Power System Studies
11:15 AM	•A Review of Global Net Zero Electricity and Energy System Studies, •IEA Global Net Zero Assessments, Net Zero Planning in Denmark •UCC Net Zero Energy System Modelling for Ireland
11:30 AM	•Net-Zero 2050U.S. Economy-Wide Deep Decarbonization Scenario Analysis, •Lessons from Ireland for Net Zero Energy System, Impact of Sector Coupling on the Cost Efficiency of Net Zero Carbon Energy Systems, •Studying large shares of wind and solar in the energy system - IEA Wind Task 25 Recommended Practices, •Co-Production of Long-Term Decarbonisation Plans
13:00 PM	
2:00 PM	TEM 113 Closed Session

Time	Day 2
9:00 AM	TEM 113 Breakout Sessions
9:00 AM	Introduction to objectives of session
9:10 AM	Short break and division in breakout sessions
9:15 AM	Breakout Session 1State of the art
11:00 AM	Discussion of state of the current art in small groups. Groups divided by sub-topic and will elaborate on or challenge the state of the art findings from the questionnaire, initial talks. Results presentation & discussion
11:15 AM	Breakout session 2Knowledge gaps and disagreement Building on the questionnaire and breakout session 1, and using the same groups, discussion focuses on where is there knowledge gaps, disagreement, unknowns or need for more data? Potential Sub-Groups
12:30 PM	Results presentation & discussion
2:00 PM	Breakout Session #3Research needs identification
3:00 PM	Topics and priorities to be developed from break out discussion Results presentation & discussion
3:00 PM	Full group open discussion Research needs identification
4:15 PM	Topics and priorities to be developed from break out discussion Interactive poll or Additional Discussion
4:30 PM	Collect main points & identify follow-up responsibilities
4:45 PM	Wrap up
5:00 PM	Event close

- TEM #114 Artificial Intelligence for Wind Energy
(風力発電へのAI適用)
 - 提案：米国
 - 開催日程：2025年6月
 - 開催地：米国
- TEM #115 Navigating the wind of change
(風力発電に対する世間の風当たり)
 - 提案：米国／デンマーク
 - 開催日程：2025年Q2(調整中)
 - 開催地：デンマーク
- TEM #116 Cybersecurity for Wind Energy
(風力発電へのサイバーセキュリティ)
 - 提案：米国
 - 開催日程：2025年Q3
 - 開催地：調整中
- TEM #118 Automated Robotics for Wind Farms
(風力発電へのロボット適用)
 - 提案：アイルランド
 - 開催日程：2025年10月
 - 開催地：アイルランド

TEM #	New TEM Title	Proposed by (Lead Member)	Core Team Lead	Date TEM Approved	Target Date for TEM (Qtr/Yr)	Location
114	Artificial Intelligence for Wind Energy	USA	Ryan King (NREL); Gianluca Geraci (Sandia) + PNNL, ORNL	01 nov-23	11 & 12 June 2025	Boulder (US)
115	Navigating the wind of change : Communications	USA/Denmark	Alexandra Lemke (NREL); Simos Rubis (DTU)	23 may 2024	Q2 2025 ?	DTU (Denmark)
116	Cybersecurity for Wind Energy Systems	USA	Jake P. Gentile; Meg Egan ;Dan Ricci; Megan Culler; Sam Chanowski, (INL)	23 may 2024	Q3 2025	TBC

TEM #	New TEM Title	Proposed by (Lead Member)	Core Team Lead	Target Date for TEM (Qtr/Yr)	Location
117	Circular Economy for Wind Supply Chains (再考中)	UK	Dr Anne Velenturf (University of Leeds)	Q3 - Q4 2025 TBC	Online - TBC
118	Automated Robotics for Wind Farms	Ireland / Portugal	Prof. Gerard Dooly (University of Limerick)	Q3 - Q4 2025 TBC	In Person / Online - TBC

第97回ExCo会議（2025年5月）におけるTask 11報告資料（抜粋）

※TEM #117 Circular Economy for Wind Supply Chains は審議されたが「再考必要」となった。

TEM トピック選定最新状況

2025年候補(P1, P2) 2つがExCoメンバーの投票により選定された。

- Circular Economics for Wind Supply Chains (風力発電のサプライチェーンにおける循環型経済) – TEM #117 (イギリス)
- Automated Robotics for Wind Farms (風力発電へのロボット技術) – TEM #118 (アイルランド)
2025年10月にTEM開催予定 (アイルランド)

2026年候補(P3, P4, P5)の関心を探る投票が行われ、P4, P5への関心が高い結果となった。

- P3 Industrialization – Wind Supply Chain integration (風力発電産業全体のサプライチェーン化) 提案国：中国
- P4 Grand Challenges in the Social Aspect of Wind Energy Development (風力エネルギー開発に伴う社会的課題の克服) 提案国：デンマーク
- Joint TEM between Wind and PVPS on end-of-life strategies (風力発電とPVPSによる使用終了後に関する技術開発戦略)

TEM #	New TEM Title	Proposed by (Lead Member)	Core Team Lead	Target Date for TEM (Qtr/Yr)	Location	Status
P1 (117)	Circular Economy for Wind Supply Chains	UK	Dr Anne Velenturf (University of Leeds)	Q3 - Q4 2025 TBC	Online - TBC	Proposal received
P2 (118)	Automated Robotics for Wind Farms	Ireland / Portugal	Prof. Gerard Dooly (University of Limerick)	Q3 - Q4 2025 TBC	In Person / Online - TBC	Proposal received
P3	Industrialization – Wind Supply Chain integration	Task 11/CWEA	Zhang Chao (CWEA)	2026 ?		Written Proposal
P4	Grand Challenges in the Social Aspect of Wind Energy Development	DTU	Julia Kirch Kiregaard (DTU) David Rudolph (DTU) ?	2026 ?		Proposal received but withdrawal by the TL
P5	Joint TEM between Wind and PVPS on end-of-life strategies	DTU	Justine Beauson (DTU) & Task 12 PVPS	2026 ?		First draft proposal received

第97回ExCo会議（2025年5月）におけるTask 11報告資料を基に作成

まとめ

まとめ – IEA Wind Task 11

- IEA Wind Task 11は、年4回程度開催されるTEM（Topical Expert Meeting）を通じ、風力関連ホットトピックの情報共有を行う、国際的にも価値の高い場を提供
 - TEMに参加し各テーマに関する他国の専門家と議論する事により、国内の関連技術レベル向上が期待される
- IEA Wind Task 11のTEMが、IEA Windにおける新Taskへ発展するケースが多く、技術の確立に関してイニシアチブを取る一つの有力な手段である
 - Task 11が、IEA Windの中で最も基礎となるTask活動
- 今後のTEMトピック
 - 風力発電へのAI適用
 - 風力発電に対する世間の風当たり
 - サイバーセキュリティ対策
 - 風力発電へのロボット適用

第14回「IEA Windセミナー」

Task44: ウィンドファームの流れ場制御

■ Operating Agents, Paul Fleming (NREL)

■ Web Page, <https://iea-wind.org/task44/>



うちだ たかのり

内田 孝紀

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/教授

兼務: 洋上風力研究教育センター/マルチスケール洋上風況研究部門/部門長

E-mail: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp



IEA Wind TCP Task44



- 国際エネルギー機関(IEA)は、風力技術協力プログラム(略称:IEA Wind TCP)を主催している
- IEA Wind国内委員会(締約機関:NEDO)からの推薦・審議を経て、IEA Windの国際共同研究活動(Task 44)に参画している(2021年12月15日～)

Task 44 (Wind Farm Flow Control) のスコープ

- ・ 風力発電所の制御分野における**国際共同研究**
- ・ 風力発電所の制御アルゴリズムと性能向上への貢献が焦点

研究の目的

- ✓ 風力発電量の増産による電力システムや電力市場における風力発電の価値の最大化
- ✓ 風車のウェイク荷重の低減による、風力発電コストの低減化
- ✓ 風力発電所の制御モデルのベンチマークとベストプラクティスの開発、ベストプラクティス・データ交換の促進

IEA Wind TCP Task44



主な参加機関

洋上風力研究に関する海外トップ大学/研究所が参画



国立再生可能エネルギー研究所(NREL)
アメリカ



国立再生可能エネルギーセンター(CENER)
スペイン



デルフト工科大学(TUD)
オランダ



デンマーク工科大学
デンマーク

参加国

米国, オランダ, 英国, フィンランド, アイルランド,
デンマーク, スペイン, ドイツ, ノルウェー, 日本



日本の体制

- 九州大学／内田 孝紀 (代表者)
- ENEOSリニューアブル・エナジー
- 東芝エネルギーシステムズ
- カナデビア
- 東京ガス

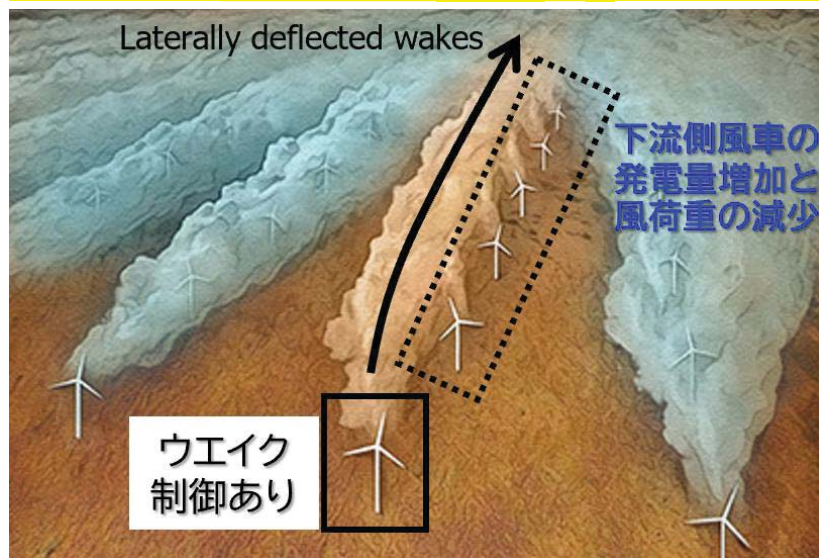


IEA Wind TCP Task44

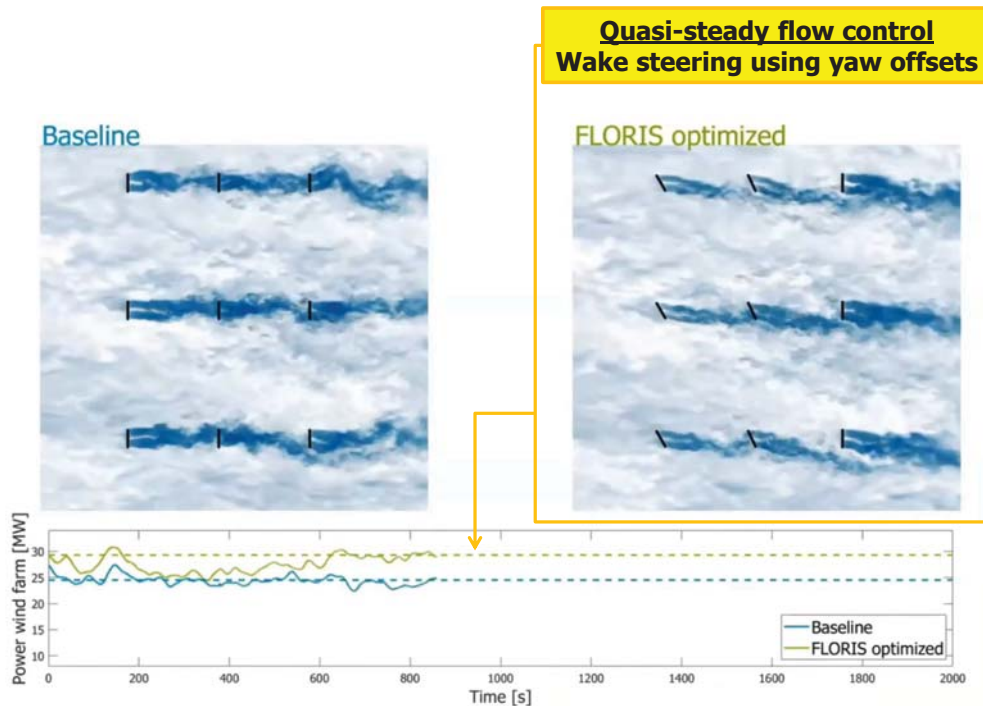


風車ウエイク現象の可視化
九州大学応用力学研究所
温度成層風洞にて撮影
2020年11月12日

What is the wind turbine wake phenomenon and wake steering ?



ウエイクステアリングのイメージ図



Task44 ワークパッケージ(WP)

Work Package 1

Track the evolving state of the art in wind farm control through collection of research results and expert elicitations

Develop set of recommendations and best practices

研究成果の収集

Work Package 2

Characterize and quantify sources of uncertainties

Develop methods for estimating AEP/loads with overall uncertainty

Develop set of recommendations and best practices



Work Package 3

Characterize the building blocks which define wind farm control

Build an overview of available options, specifications and assess TRL of each

Give a full landscape of the solution space

技術・アルゴリズムの開発

Work Package 4

Collaborate and coordinate with other IEA Tasks and other wind farm control R&D activities

Based on tasks 1-3 and external projects, identify research gaps

Develop research roadmap

他のプロジェクトとの連携

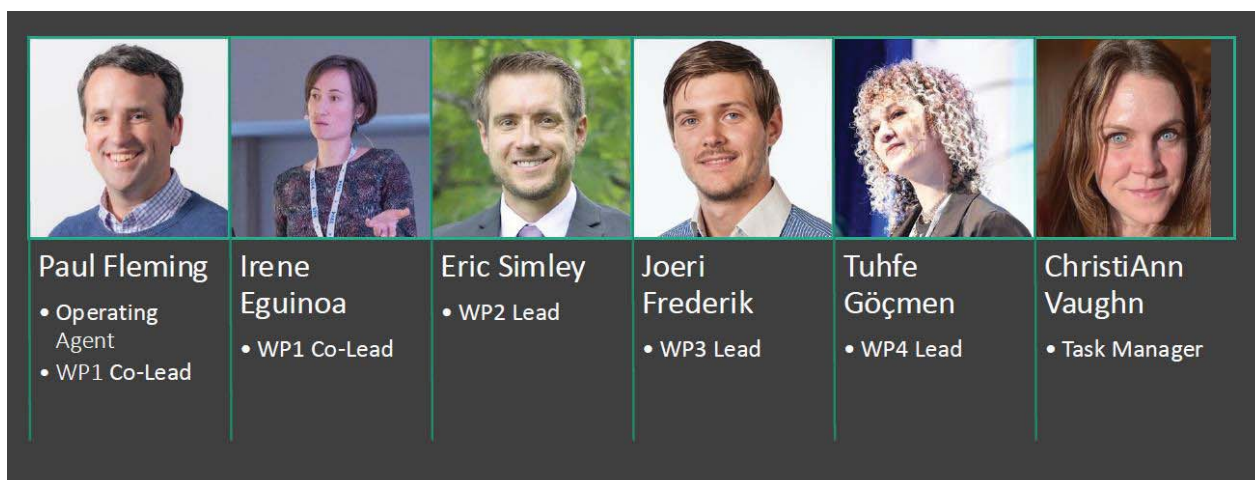
メインにWP2へ参加

Uncertainty Quantification / 不確実性の定量化

IEA Wind TCP Task44



Task44 主要メンバー



IEA Wind TCP Task44



- ✓ WESC2025にあわせてナント市(フランス)で開催
- ✓ 目的: Task44の各WPの進捗と、ファーム制御に関する研究プロジェクトの成果を共有した上で、ファーム制御の社会実装に向けて本タスクの次フェーズの実施内容を議論する



✓ IEA Wind task 44のGeneral Meeting(@ナント市会議場)

IEA Wind TCP Task44



Task44 Work Package Updates Task44の各進捗状況

Work Package 1: 研究結果の収集

- WIKIの作成(<https://ieawindtask44.tudelft.nl/>)

2013	Fleming et al. Evaluating techniques for redirective turbine wake using SOWFA
2012	Wagner et al. Controlling wind in EON's loaded wind farm
2004	Gertsen et al. Micro power and access load in wind farms: heat and flux
2003	Dahlberg et al. Potential improvement of wind turbine array efficiency by active wake control (AWC)
1988	Almström. Calculating the flowfield in the wake of wind turbines
1986	Steinbach et al. Optimal Control Of Wind Power Plants
1986	Katib et al. A simple model for cluster efficiency

- Research Database
- IEA Wind Task 44 youtube Talks
- Wind farm control in the news
- Data sets
- Terminology
- Other Tasks and Projects

Wind Farm Control in the News

Tracking mentions of wind farm controls in news publications and press releases.

Headline	Source	Date	Link to article
WindESCo successfully completes wind industry's first major wake steering installation	WindPower	2023-05-02	https://www.windpowerengineering.com/windesco-successfully-completes-wind-industrys-first-major-wake-stering-installation/
DNV launches wind control technology JIP	renewEWS.biz	2023-04-04	https://renewEWS.biz/84912/dnv-launches-wind-control-technology-jip/
ventodyne and Energekonzern completed a successful field demonstration of wake steering	LinkedIn	2023-04-11	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7051524716497443841/ (Announcement) and https://doi.org/10.5281/zenodo.7781282 (Presentation)

Wind farm control terminology

Wind Farm Control Terminology
Wind farm control terminology is not used consistently across the research and industrial communities. This page is a reference of preferred language to develop consistent terms across the field.

Note for reference taxonomy of terms created by DTU in the FarmConners project:

ASPECT | wind energy variables Parameters and Controls

NEAT | wind Energy Allocation of Turbines

Terms around wind farm flow control

Initially suggested by Adam Scott, Scott Dallas, Valentin Chabaud, Konstanze Kölle and Laurence Morgan

Control Types

Name	Description
Wake Steering	The yawing or tilting of turbines to redirect the flow of the turbine wake, typically to increase the power output of the wind farm.

IEA Wind TCP Task44



Task44 Work Package Updates Task44の各進捗状況

Work Package 2: 不確実性の定量化(UQ: Uncertainty Quantification)と実証実験

- UQと実証実験に関してWP2のメンバーによる9つの発表

→ [YouTubeチャンネル](https://www.youtube.com/@ieawindtask44talks21)

IEA Wind Task 44 Talks
@ieawindtask44talks21 • チャンネル登録者数 261人 • 24本の動画

このチャンネルの投稿 ... さらに表示

チャンネル登録

ホーム 動画 再生リスト

おすすめ

- Active Wake Control Validation Methodology
IEA Wind Task 44 Talk: "Active Wake Control Validation Methodology" by Nassir Cassano
217 回視聴 • 1 年前
- Affect of Quantity, Resolution, & Scaling of Turbulence Boxes on Aerodynamic Simulation...
157 回視聴 • 1 年前
- ROSCO - A Standard Workflow
Nikhar Abbas - ROSCO: A reference controller for fixed and floating wind turbines
1754 回視聴 • 3 年前
- Forward and Inverse Uncertainty Quantification for robust wind design and control
Perry S. Zimmerman, Michael J. Griffin
279 回視聴 • 1 年前

動画

- Comparing Methods for Estimating the Change in...
45 回視聴 • 1 年前
- Analysis of leading-edge erosion impact on the design...
95 回視聴 • 5 年前
- IEA Wind Task 44 Virtual Talk: "Towards Active Wake..."
85 回視聴 • 6 年前
- IEA Wind Task 44 presents "Closed-loop model..."
170 回視聴 • 7 年前
- "Inverse UQ: Intro, Case Study and Bayesian Inference, and..."
134 回視聴 • 1 年前
- Predicting minimum measurement and...
45 回視聴 • 1 年前

<https://www.youtube.com/@ieawindtask44talks21>

IEA Wind TCP Task44



Task44 Work Package Updates Task44の各進捗状況

Work Package 2: 不確実性の定量化(UQ: Uncertainty Quantification)と実証実験

- 「Field Assessment Review and Best Practices Paper」の作成
 - ✓ ドラフトは80%作成
 - ✓ Task 44フェーズ1の終了時(12月)にジャーナルへ提出予定

IEA Wind Task 44: Review and Best Practices for Wind Farm Flow Control Field Assessment

Eric Simley, Søren Juhl Andersen, Maria Aparicio-Sanchez, Ervin Bossanyi, Nassir Cassamo, Bart Doekemeijer, Thomas Duc, Irene Eguinoa, Tuhfe Göçmen, Hadi Hoghooghi, Daniel Houck, Matt Harrison, Michael Howland, Paul Hulsman, Yan Jie, Vile Kipke, David Onnen, Nathan Post, Julian Quick, Johannes Schreiber, Balthazar Sengers, Rafael Valotta Rodrigues, Pragya Vishwakarma, and Stoyan Kanev

IEA Wind TCP Task44



Task44 Work Package Updates Task44の各進捗状況

Work Package 3: 用語とアルゴリズムの概要

- ✓ 2024年後半にアンケート調査の実施([後のスライドで調査結果を紹介](#))
- ✓ 10月28日にファーム流れ場制御の実装への課題に関するワークショップを開催

Work Package 4: 他プロジェクトとの交流

- ✓ 関連するIEA Taskやプロジェクトの情報をWIKIに整理
- ✓ 他Taskメンバーによるワークショップの開催

IEA Wind TCP Task44

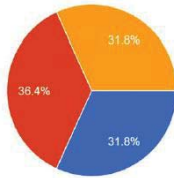


WFFC Survey Results: Reviews & Discussion

ファーム流れ場制御に関するアンケート調査:レビューと議論

What sector best describes your current work?

44 responses



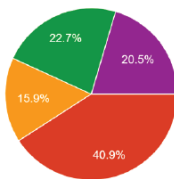
- Industry (e.g., private companies, startups)
- Research Institute (e.g., national labs, independent research centers)
- Academia (e.g., universities, teaching & research)

➤ 44名の回答を集計

➤ 産業・研究所・大学それぞれのメンバーが回答

How do you rank the level of implementation of your work in WFFC?

44 responses



- Purely academic – My work is mostly theoretical, with no direct industry appl...
- Early-stage research – I develop models, simulations, or concepts with...
- Prototype/testing phase – My work involves lab-scale or limited field testin...
- Industry collaboration – I work on applied research, collaborating with in...
- Field implementation – My work is actively deployed in operational wind f...

各々のWFFCに関する研究の実装レベルについて

➤ 半数近くが初期段階のレベル

IEA Wind TCP Task44

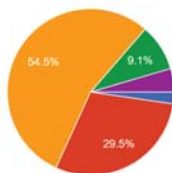


WFFC Survey Results: Reviews & Discussion

ファーム流れ場制御に関するアンケート調査:レビューと議論

How close do you believe we are to widespread commercial implementation of WFFC strategies?

44 responses



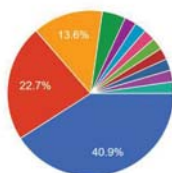
- Fully ready – Can be deployed at scale now.
- Mostly ready – Some refinements needed, but large-scale adoption is fe...
- Partially ready – Some commercial pilots exist, but widespread adoption i...
- Not ready – Significant barriers still exist.
- Too early to tell – More research is needed before assessing commercial...

WFFC状態は社会実装できる状態にどれほど近いと考えられるか

➤ ほぼ半数が一部は実装準備ができていると考えている

What are the remaining barriers?

44 responses



- OEM concerns regarding loads / dam...
- Uncertainty of use or effectiveness
- Feasibility of practical implementation
- Modeling capacities
- All of the above, but I think I'd start wit...
- I think barriers are not technical. Oper...
- I think "Uncertainty of use and effectiv...
- Uncertainty of use or effectiveness an...

引き続き残る課題

➤ 一番は、OEMによる荷重疲労評価

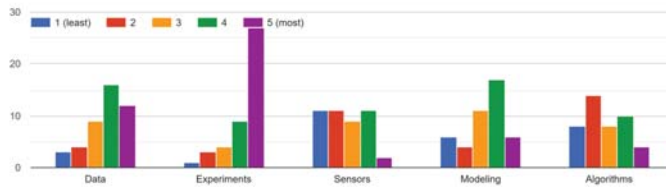
➤ 次に、不確実性や効率性、実装の可能性など

OEM：風力発電機メーカー

WFFC Survey Results: Reviews & Discussion

ファーム流れ場制御に関するアンケート調査:レビューと議論

How important are the following things to remove these barriers? 1: More (public) data / data sharing 2: Demonstration projects / field experiments 3: ...oved modeling/predictions 5: Improved control algorithms



課題を解決するために次の項目はどれほど重要か

➤ 実証実験, (オープン)データ, モデル化の順が多い

Which technology do you think will have the biggest impact on improving WFFC in the next 5 years? 44 responses



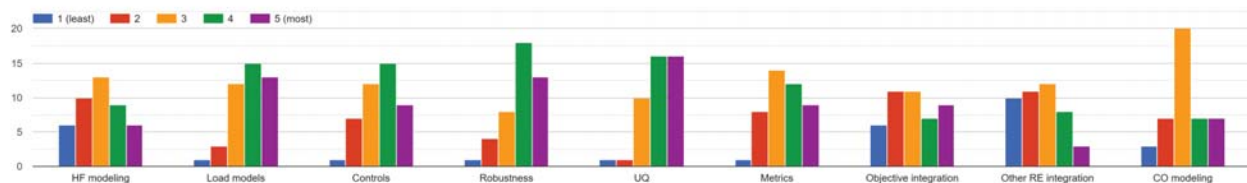
WFFCを改善するために今後5年で一番効果のある技術と考えられるのは

➤ 機械学習, 観測機器の改善, 風車設計の改善など

WFFC Survey Results: Reviews & Discussion

ファーム流れ場制御に関するアンケート調査:レビューと議論

Which area of WFFC research do you think needs the most attention? 1: High-fidelity (HF) modeling of transient effects 2: Wake models for fatigue load investigations 3: Control implementation and hierarchy 4: Robust control algorithms for uncertain conditions 5: Uncertainty quantification (UQ) 6: Def... 8: Integration with other renewable energy sources and storage 9: Control-oriented (CO) wake modeling



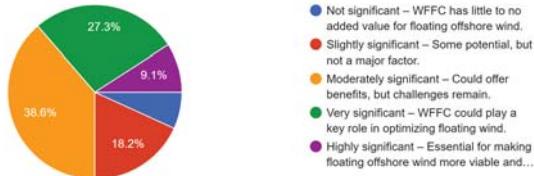
WFFCで最も注目する必要がある分野は

- 不確実性の定量化
- 不明瞭な条件でも対応できるアルゴリズム
- 疲労荷重に対するウエイクのモデル化

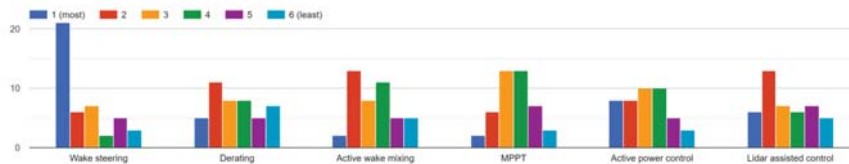
WFFC Survey Results: Reviews & Discussion

ファーム流れ場制御に関するアンケート調査:レビューと議論

How significant do you consider the potential of floating offshore wind farms to leverage WFFC strategies?
44 responses



Rank these technologies from most (1) to least (6) theoretical potential to reduce the LCOE (or increase the net value) of wind farms 1: Wake steering 2: Derating 3: Active wake mixing 4: Maximum Power Point Tracking 5: Active power control 6: Lidar assisted control



WFFCを活用するために浮体式ウインドファームのどれほど重要と考えているか

➤ 半分以上が中程度に重要と考えている

LCOEを低減するために理論的に重要な技術は

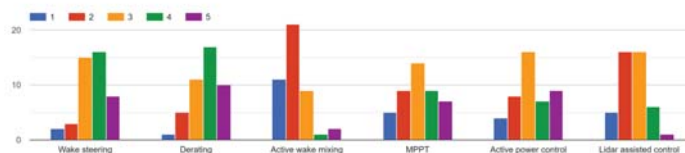
- ウェイクステアリング
- アクティブウェイクミックス
- ライダー支援制御

LCOEとは、Levelized Cost Of Electricity (均等化発電原価)の略で、発電設備の建設から運用、廃棄までを含めた発電ライフサイクル全体にかかるコストを、想定される発電量で均等に割ったもの

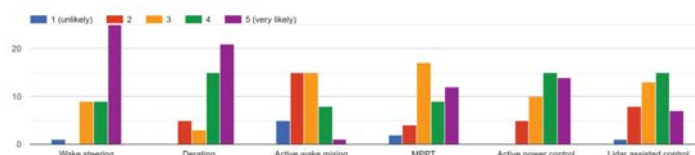
WFFC Survey Results: Reviews & Discussion

ファーム流れ場制御に関するアンケート調査:レビューと議論

How far advanced would you say the development of wind farm flow control (WFFC) technologies is? (1 = purely academic, 5 = implemented on a large scale)



How likely do you think it is that each of these technologies will be implemented on wind farms within 10-20 years? 1 = Highly Unlikely (very little chance of adoption) 5 = Close to Certain (Widespread implementation is very likely.)



各技術がどれほど開発が進んでいるか

- ウェイクステアリングは実装寄り
- アクティブウェイクミックスはアカデミック寄り
- ライダー支援制御はアカデミック寄り

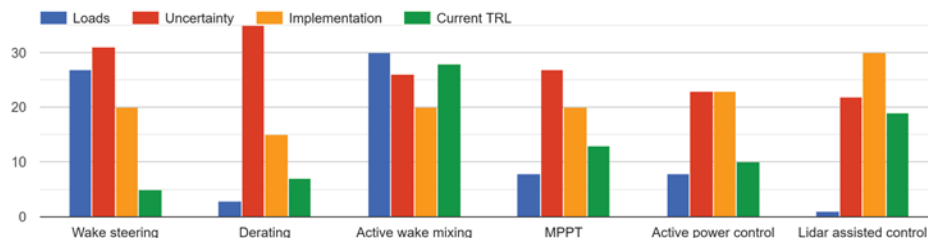
今後10年から20年の間に各技術が実装される可能性が高いのは

- ウェイクステアリング
- 出力抑制
- 動的出力制御

WFFC Survey Results: Reviews & Discussion

ファーム流れ場制御に関するアンケート調査:レビューと議論

What is holding this technology back from being implemented on a larger scale? 1: OEM concerns regarding loads / damage / lifetime of the turbine. 2: Uncertainty of use,...ion challenges 4: Current Technology Readiness Level (TRL)



各技術を実装するために解決が必要な課題は

- ウェイクステアリングは, 不確実性の評価・風車寿命や疲労に関するOEM評価
- アクティブウェイクミックスは, 風車寿命や疲労に関するOEM評価・技術成熟度
- ライダー支援制御は実装

Plan Task 44 Phase 2

Task44 フェーズ2の計画

- フェーズ1の終了は, 2025年7月から2025年12月に延長された
- フェーズ2は, 2025年11月のIEA Wind ExCo会議で申請される
- フェーズ2は, 2026年1月から開始予定(3-4年継続)

Phase 1 extended to
December 2025
(orig. July)

Phase 2 will be
proposed at the IEA
Wind ExCo meeting
in November 2025

Phase 2 planned to
start January 2026
(3-4 years)

IEA Wind TCP Task46 Erosion of Wind Turbine Blades 活動状況

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
再生可能エネルギー研究センター 風力エネルギー研究チーム
(併任)九州大学洋上風力研究教育センター 社会実装部門

田中 元史

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

1



Task46(Phase1)概要

●エロージョンとは

高速で回転するブレード前縁に雨滴等が衝突する際に発生する繰り返し衝撃力によってブレード材料の疲労破壊が進行する現象。洋上での高周速化や高雨量地域への市場移行でリスクが顕在化。



出典: <https://iea-wind.org/task46/>

●エロージョンの影響

- ・パワーカーブへの影響
 - ・補修によるダウンタイム
 - ・点検や監視のコスト
 - ・補修やメンテナンスのコスト
- ▼
- ・事業予見性への影響

●活動概要

- ・期間: 2021年4月～2025年3月
- ・OA: DTU,VTT(2023/5まで)
- ・目的: エロージョン要因の理解を深め、エロージョン予測のためのデータセットとモデルツールを開発し、可能な限り早い段階での損傷特定法と、対策手法を開発すること。

・ワークパッケージ

WP1: マネジメント

Charlotte Bay Hasager(OA,DTU)

WP2: エロージョン要因となる気象因子

Sara Pryor(Cornell Univ.)

WP3: エロージョンと風車オペレーション

David Maniaci(SNL)

WP4: エロージョンの地上試験

Nicolai Frost-Jensen Johansen(DTU)

WP5: エロージョンの力学と材料特性

Fernando Sánchez López(CEU)

・参画機関

Country ^{※2}	Contracting Party ^{※2}	Active Organizations ^{※2}
Belgium ^{※2}	The Federal Public Service of Economy, SMEs, Self-Employed and Energy ^{※2}	Engie ^{※2}
Canada ^{※2}	Natural Resources Canada ^{※2}	WEICan ^{※2}
Denmark ^{※2}	Danish Energy Agency ^{※2}	DTU (OA), Hempel, Ørsted A/S, PowerCurve, Siemens Gamesa Renewable Energy ^{※2}
Finland ^{※2}	Business Finland ^{※2}	VTT ^{※2}
Germany ^{※2}	Federal Ministry for Economic Affairs and Energy ^{※2}	Fraunhofer IWES, Covestro, Emil Frei (Freilacke), Nordex Energy SE, RWE, DNV, Mankiewicz, Henkel ^{※2}
Ireland ^{※2}	Sustainable Energy Authority of Ireland ^{※2}	South East Technology University, University of Galway, University of Limerick ^{※2}
Japan ^{※2}	New Energy and Industrial Technology Development Organization ^{※2}	AIST, Asahi Rubber Inc., Osaka University, Tokyo Gas Co. ^{※2}
Netherlands ^{※2}	Netherlands Enterprise Agency ^{※2}	TU Delft, TNO ^{※2}
Norway ^{※2}	Norwegian Water Resources and Energy Directorate ^{※2}	Equinor, University of Bergen, Statkraft ^{※2}
Spain ^{※2}	CIEMAT ^{※2}	CENER, Aerox, CEU Cardenal Herrera University, Nordex Energy Spain ^{※2}
United Kingdom ^{※2}	Offshore Renewable Energy Catapult ^{※2}	ORE Catapult, University of Bristol, Lancaster University, Imperial College London, Ilosta, Vestas ^{※2}
United States ^{※2}	U. S. Department of Energy ^{※2}	Cornell University, Sandia National Laboratories, 3M ^{※2}

・プレナリ会議

2021/3/15, 9/15, 2022/2/2, 9/22

2023/9/21, 2024/4/18, 9/18, 2025/3/10

・ウェビナー

2022/5/31, 2023/12/4, 2024/12/5

・国際会議

EERA JP Wind FALCON Workshop, 2021

EERA DeepWind 2022 offshore wind R&I conference, 2022

3rd Erosion Symposium, 2022

ECCM European Conference on Composite Materials, 2022

AIAA SciTech Forum, 2023

4th Erosion Symposium, 2023

WESC Mini-symposium, 2023

12th Asia-Pacific Forum on Renewable Energy, 2023

5th Erosion Symposium, 2024

The Science of Making Torque from Wind, 2024

Sandia Blade Workshop, Albuquerque, 2024

6th Erosion Symposium, 2025

Wind Europe, Copenhagen, 2025

WESC Mini-symposium, 2025

・レポート <https://iea-wind.org/task46/t46-results/>

次項以降で紹介

WP2: エロージョンの要因となる気象因子

●目的:

サイトのエロージョンリスクに関する評価手法と、ブレード寿命を最適化するためのウィンドファーム運用情報の提供。長期的にはエロージョンアトラスの実現を目指す。

●参画機関:

Engie, WEICan, DTU, Ørsted A/S, VTT, AIST, Osaka Univ., Fraunhofer IWES, TU Delft, TNO, ENECO, Univ. of Bergen, CHU, ORE Catapult, Cornell Univ.

●日本からの参加メンバー:

大阪大学 牛尾知雄教授
産総研 田中

●研究項目:

WP2.1: エロージョンポテンシャルマッピングのための優先研究エリアの設定(降水粒子に焦点)

WP2.2: エロージョンに影響する追加的な気象学的因子の同定

WP2.3: 雹、雨、粉塵頻度の文献調査

WP2.4: 雨滴粒径分布の気候依存の文献調査

WP2.5: 気象因子データの可用性と質

WP2.6: 気象因子データによる

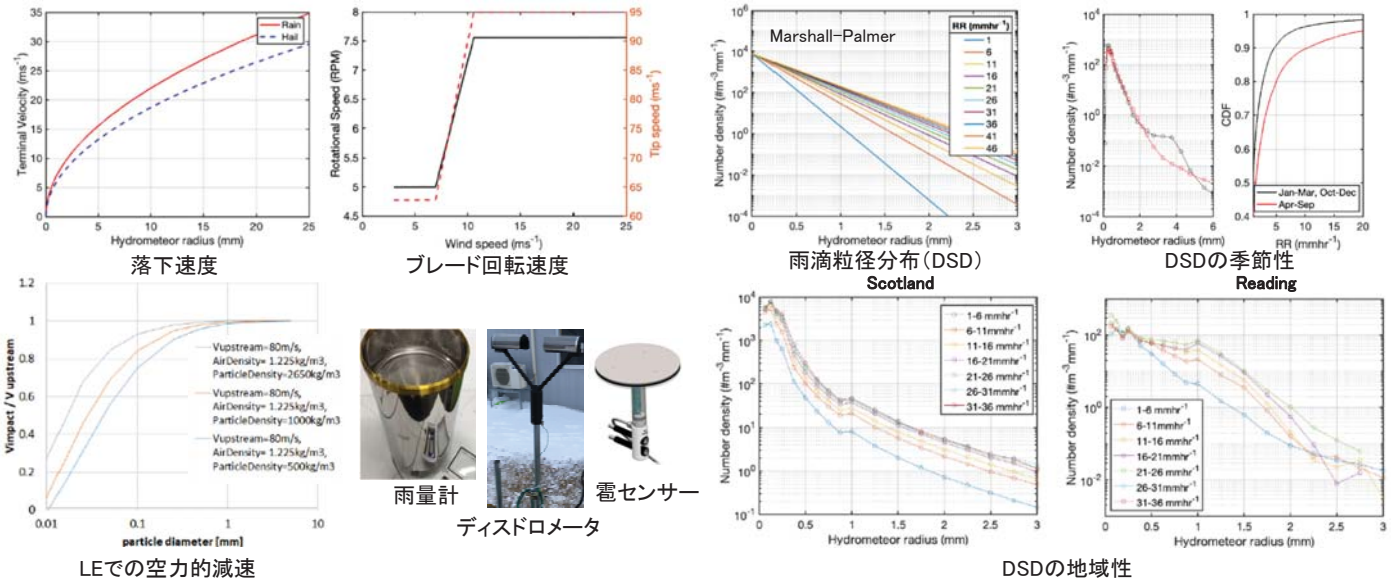
エロージョンクラス同定に関するRPを含むエロージョンアトラスのロードマップ

WP2.7: エロージョン影響因子の計測に関するRPと計測器の開発・試験・モデルV&Vのための「スーパーサイト」設立の検討。

WP2.8: エロージョンに関するモデルV&Vの手法と、主要気象因子のモデリングツールの改善

●WP2.1+WP2.2 Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., Cadance, J., Dyer, K., Hasager, C., Herring, R., Kral, S.T., Prieto, R., Reuder, J., Rodgers, M., Veraat, M. (2022). Atmospheric drivers of wind turbine blade leading edge erosion: Hydrometeors.

- ・エロージョンに影響する因子と計測方法、データの可用性の概要まとめ（メタデータあり）
- ・影響因子：近寄り速度、衝突数、液滴の形状と相、衝突効率
- ・降雨計測／予測方法：ディストロメータ、レーダー、再解析データ、数値解析モデル
- ・雨滴粒径分布DSDは地域性や時間変動が大きく実測が重要である。



●WP2.3+WP2.4+WP2.5 Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., Campobasse, S., Dellwik, E., Hannesdóttir, Á., Hasager, C., Kral, S.T., Reuder, J., Rodgers, M., Veraat, M. (2023). Atmospheric drivers of wind turbine blade leading edge erosion: Ancillary variables.

- ・エロージョンに影響する付属的因子（太陽放射、空気中浮遊粒子、気温変化、氷結等）の整理
- ・Task内で、各要因の重要度に対する意見を収集。
- ・UVではUV-A(315-400nm)がコーティング劣化に影響が大きいとの報告がある。
- ・気温変化は、ポリウレタン塗装低温劣化や熱サイクルによる材料劣化の要因となる。
- ・エアロゾルはUS SGP DoE ARMサイトで計測事例がある。
- ・再解析(ERA5等)で太陽放射や気温変化はよく再現できる。
(ただし、雨量、DSD、風速の精度はエロージョン予測には十分ではない)

Variable	Importance (# of positive responses from the 3 WPs)	Described variable	Narrative
Wind speed	Essential to closing velocity between hydrometeor and blade (3)	Weibull distribution parameters at/close to wind turbine hub-height	
Freezing rain & icing	1	Frequency and duration	Challenging to measure and not included in WP5 modelling.
Solar radiation	Very important (3)	Annual total downwelling shortwave radiation	Included in WP5 in terms of polymer chemistry linked with erosion performance.
Temperature variability	Very important (3)	Diurnal amplitude and seasonal amplitude	Included in WP5 in terms of viscoelasticity relation with erosion mechanics.
Aerosols	1	pH/salinity and size distribution	Possible pH/salinity may be important from chemical corrosion perspective and/or mechanical erosion due to sand blasting on a local scale in some environments. But due to a lack of consistent measurements this is not a priority.

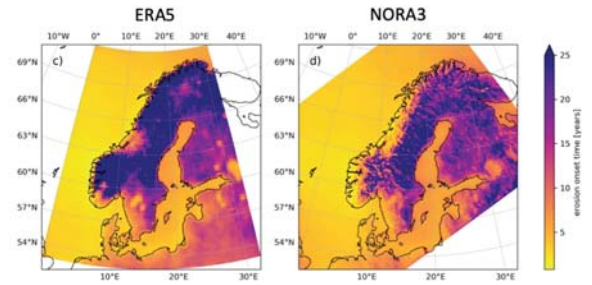
付属的因子の重要性に関する各WPへのヒアリング結果

Location label used here	Site	Seasonal Difference: Month with highest Tmax minus month with lowest Tmax	Seasonal Difference: Month with highest Tmin minus month with lowest Tmin	Mean DTR	Total SW radiation (Jm ⁻² per year)
US SGP	DoE ARM, Lamont, SGP, USA	24.5	23.9	12.9	6.02x10 ⁹ (from observations)
Canada coastal	WEICan, Canada	27.5	26.6	5.7	5.1x10 ⁹ (from ERA5)
Coastal UK	Weybourne Atmospheric Observatory, UK	11.2 (ERA5)	11.2 (ERA5)	6.5 (ERA5)	4.131x10 ⁹ (from ERA5)
Norway coastal	Bergen, Norway	11.7	5.7	6.0	3.27x10 ⁹ (from ERA5)
North Sea	Horns Rev, Denmark	13.6 (ERA5)	13.7 (ERA5)	2.2	4.131x10 ⁹ (from ERA5)
Denmark inland	DTU, Denmark	18.4	14.5	5.9	3.78 x10 ⁹ (from observations)
UK inland	Lancaster, UK	11.9	9.8	5.6	3.35x10 ⁹ (from observations)

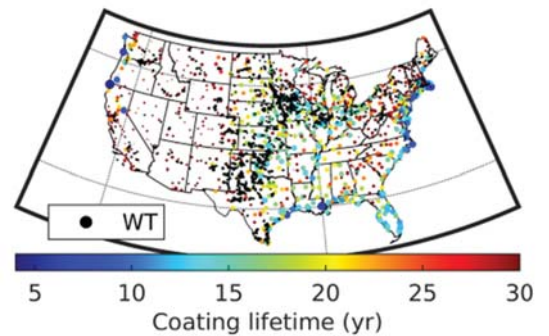
付属的因子の計測事例

●WP2.6 Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., Hannesdóttir, Á. (2025). A roadmap for producing wind turbine blade coating leading edge erosion atlases: Preliminary results.

- ・エロージョンリスクの地域性や、短時間予報を目指す、エロージョンアトラスの事例と課題
- ・使用される気象データの特徴と課題
 - 再解析: グリッドデータで使いやすいが、精度の時空間依存や20分以下の時間分解が課題。
 - レーダ計測: 雹の情報を得られるが、ハブ高の風速はない。データがある地域は限られる。
 - 気象観測所データ: 最もデータが充実しているが、ハブ高の風速はない。
 - メソスケールモデル: 時空間グリッドデータで使いやすいが精度に課題あり。
- ・エロージョンへの変換法と課題
 - 運動エネルギーを指標: 材料依存が入れない
 - Springer model(材料物性と耐久性のモデル): 市販品の物性はオープンになっていない
 - 地上試験のV-Nカーブ: 実機との相関は不明
- ・アトラスの課題
 - 気象データ依存性、雹の考慮、風車モデルの統一、ハブ高風速の使用、材料のエロージョン特性の精度



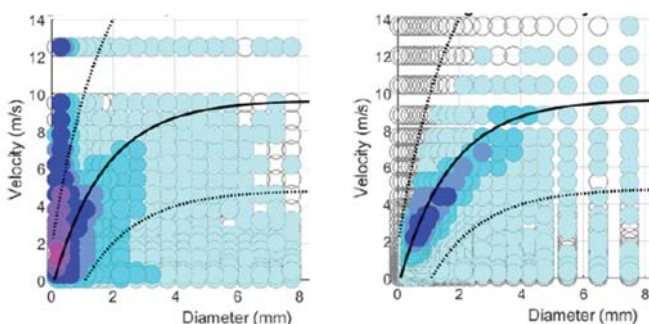
スカンジナビアのアトラス (DTU)



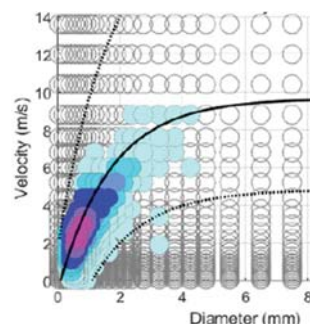
アメリカのアトラス (コーネル大)

●WP2.7 Dellwik, E. Pryor, S.C., Hasager, C.B., Hannesdóttir, Á., Barthelmie, R.J., Reuder, J., Rodgers, M., Sanderson, R., Norton, H., Tanaka, M., Ushio, T. (2025). Report on measurements of LEE drivers including metrology development and prospects for establishing ‘super sites’ for instrument testing the status of deployed measurement techniques.

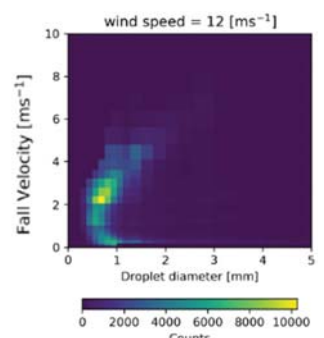
- ・降水計測における課題と、それを解決するためのSuper sitesの必要性
- ・降水量や降水種は雨量計、二重偏波気象ドップラーレーダー、マイクロレインレーダ(MRR)で計測
- ・雨滴粒径分布DSDは、光学式、衝突式、ビデオ式のディストロメータで計測、降水量に換算可能
- ・普及している光学式ディストロメータでは、落下速度異常データの処理方法、高風速下での異常データの取扱い等が定められておらず誤差の原因となる。
- ・ディストロメータの機種間誤差やMRRとの誤差も指摘されており標準化が必要。
- ・計測器の精度検証やデータ解析手法の確立にはスーパーサイトの設置を推奨。



高雨量での機種間比較 (左: LPM, 右: Parsivel)



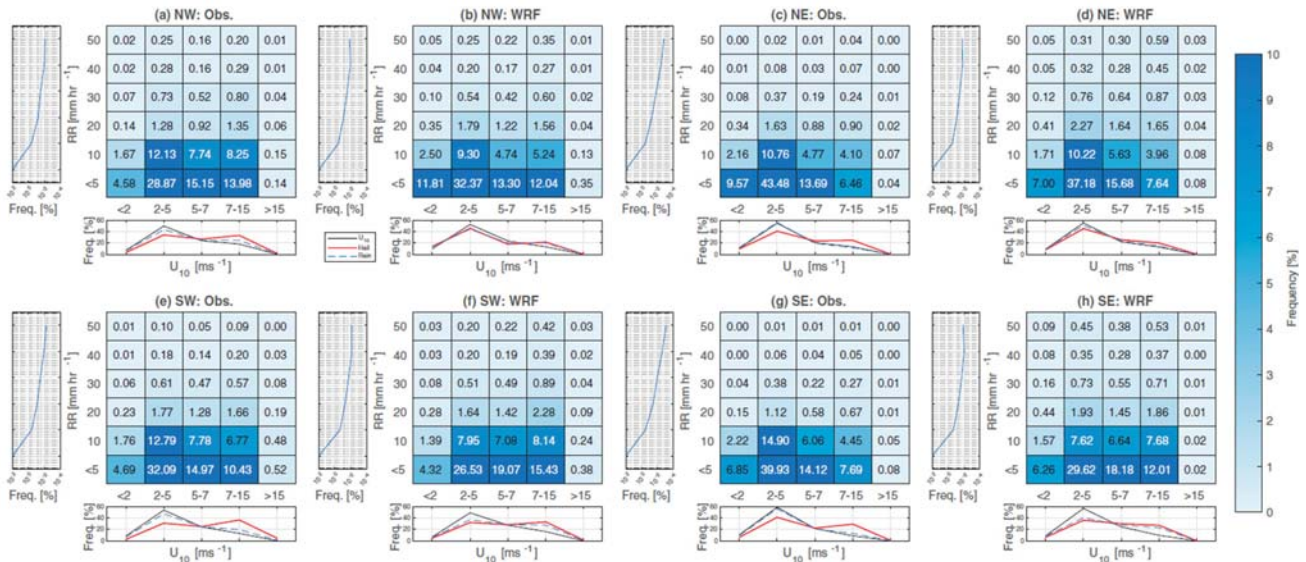
中雨量でのParsivelによる計測



Parsivel計測への風の影響

●WP2.8 Pryor, S.C., Barthelmie, R.B., Zhou, X. (2025). A V&V framework for numerical simulations of LEE drivers: Preliminary results.

- ・降水強度、降水種、風速の時空変化を解析できる数値気象モデル(WRF等)を、エロージョンリスクの地域性や短時間予報のためのアトラス作成に活用するため、解析精度の評価を行った。
- ・グレートプレーンズでのWRFシミュレーションの事例では、風速、降水強度、雹のそれぞれの確率分布(周辺確率)は精度よく求められるが、これらの同時確率や最大雹直径の精度は不十分。
- ・今後、風速と降水の結合確率分布、雹の発生頻度と直径の予測精度に着目したV&Vを行うべき。



WP3: エロージョンと風車オペレーション

●目的:

エロージョンにおける液滴衝突現象と、表面形状変化の空力影響を理解し、風車制御(エロージョンセーフモード)によるブレード保護効果を評価する

●参画機関:

Engie, WEICan, METEK Nordic, Vestas, VTT, AIST, Cener, Nordex Energy Spain, DNV Iberica, ORE Catapult, Univ. Bristol, Lancaster Univ., Sandia National Laboratories

●日本からの参加メンバ:

産総研 川端浩和、栗飯原あや、田中

●研究項目:

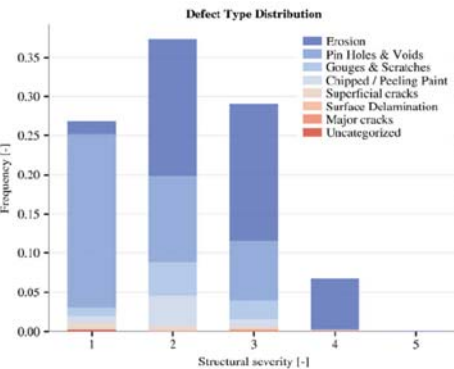
- WP3.1: ブレードエロージョンクラスに基づく AEP損失の予測モデル
- WP3.2: エロージョン観察結果に基づく 損傷報告書の標準化(レポート)
- WP3.3: 疲労解析に使用する液滴衝突モデル
- WP3.4: エロージョンセーフモードの可能性
- WP3.5: フィールド観察に基づく 性能損失モデルの精度検証

●WP3.1 Maniaci, D.C., Meyer Forsting, A., Barlas, A., Bak, C., Olsen, A.S. (2025) Model to predict annual energy production loss based on blade erosion class.

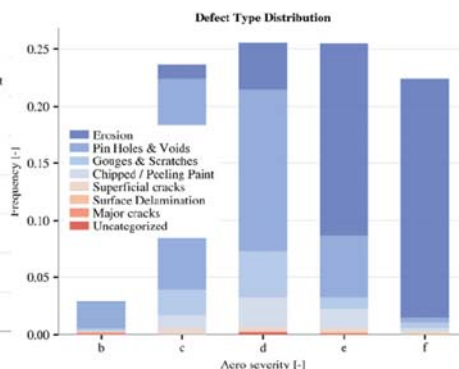
北欧の単一機種洋上WFのLEPなしブレードの3年分の地上カメラによる点検結果(233ブレード、2903損傷)を分析。構造影響ベースであった分類を空力影響ベースに再分類。損傷長さの総和を評価指標とするとチップ側ほど損傷度が高い傾向を確認。b=1,c=2,...f=5で損傷を定量化して半径方向分布関数を作成した。

- 1.Minor non-structural with no influence on structure or performance
- 2.Minor structural with potential performance impact. No risk of fast progression.
- 3.Minor structural with performance impact. Risk of fast progression.
- 4.Structural defects requiring timely action
- 5.Major structural defects that requiring immediate action to avoid catastrophic failure

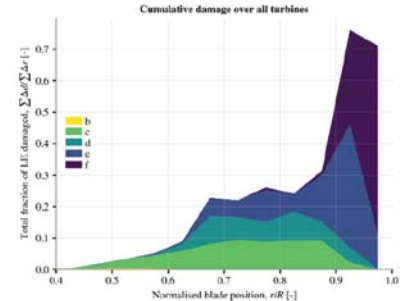
- a. Factory clean
- b. Few pits and gouges
- c. Frequent pits and gouges
- d. Eroded top coat
- e. Onset of laminate exposure
- f. Laminate exposure + sharp edges



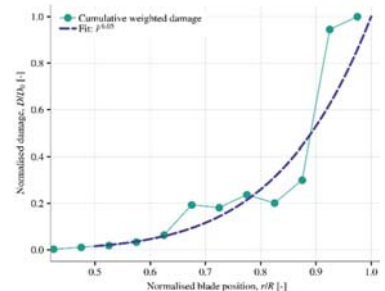
構造影響ベースの損傷度分類



空力影響ベースの損傷度分類



損傷長さ総和の半径方向分布



損傷度の半径方向分布

●WP3.2 Maniaci, D.C., MacDonald, H., Paquette, J., Clarke, R. (2023) Leading Edge Erosion Classification System

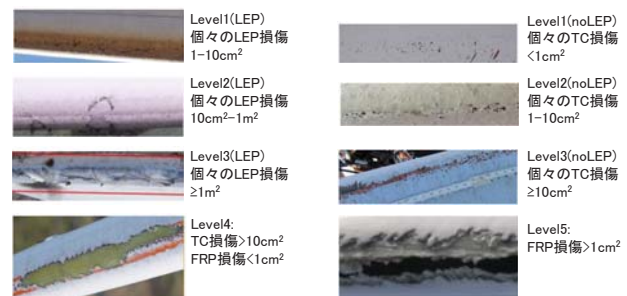
エロージョン損傷度を共通言語化するため、評価指標と損傷度を定義した表を作成。初期の表を用いたWP参加者による試験的評価を経て改良した。今後継続的に改良されるべきもの。

	Severity Level					
Evaluation Criteria	0	1	2	3	4	5
Visual Condition (LEP)		Lightly worn external coating/LEP	Notable areas of localized damage on external coating/LEP	LEP is largely compromised over a large area and no longer providing protection to underlying layers	Delamination of topcoat with immediate layer underneath clearly visible and exposed	Notable damage to substrate
Visual Condition (No LEP)		Erosion barely visible or pinholes	Localized pitting	Widespread or coherent pits, some gouges		
Mass-loss	Initial factory condition	Coating <10% Laminate 0%	Coating 10-50% Laminate 0%	Coating 50-100% Laminate <10%	Coating 100% Laminate 10-100%	Coating 100% Laminate 100%
Aerodynamic Performance	Normal surface roughness	Region 2 Power loss 0-1%	Region 2 Power loss 1%-2%	Region 2 Power loss 2%-3%	Region 2 Power loss 3-4%	Region 2 Power loss >4%
Blade Integrity	Initial erosion of topcoat	Erosion through topcoat	Initial exposure of immediate laminate layers	Erosion through immediate laminate layers	Exposure of structural laminate layers	

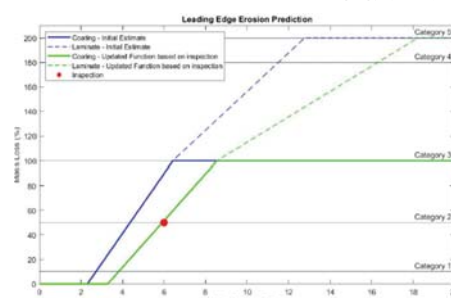
エロージョン分類システム

Category 0: Flow not disturbed. Roughness effects are damped by the viscosity of the flow.
 Category 1: Region 2 power loss <1%. The transition point is moved forward toward the leading edge.
 Category 2: Region 2 power loss 1%. Moderate loss to L/D and CLmax, (-20% and -5%). The transition point is moved forward to the leading edge. Incubation length (distance rough element to transition point) is modified.
 Category 3: Noticeable loss to L/D and CLmax (-30% and -5-10%). The flow is fully turbulent downstream of the roughness elements in eroded regions of the blade span.
 Category 4: Significant loss to L/D (> -40%) and CLmax (> -10%). The flow separates in downstream locations due to the boundary layer weaknesses against adverse pressure gradients given by airfoil geometry.
 Category 5: Severe loss to L/D and CLmax due to flow separation and a lack of laminar flow.

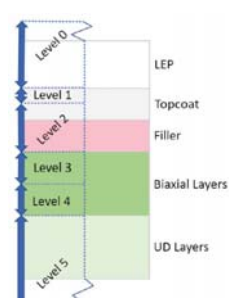
空力特性に関する損傷度の定義



目視判定損傷度の定義



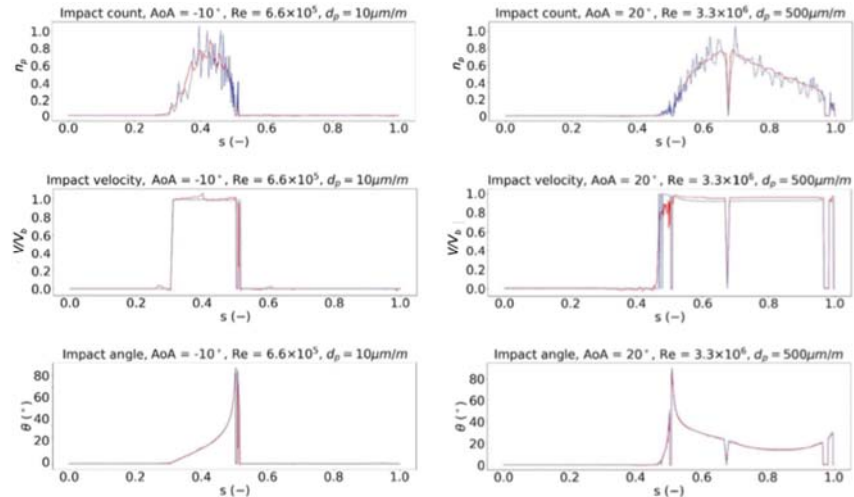
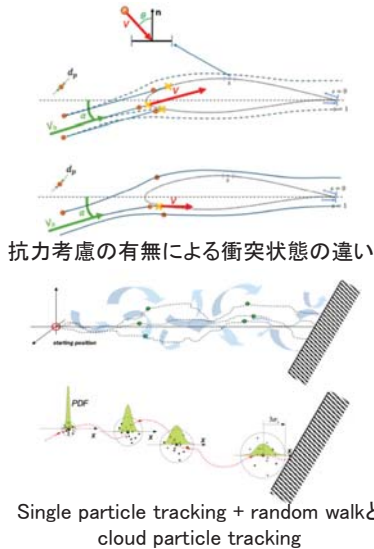
質量欠損の線形モデル



構造影響度の定義

●WP3.3 Castorrini, A., Campobasso, M.S (2025) Approaches for droplet impingement computation

エロージョン予測モデルにおいて、ブレードの特定部分への雨滴の衝突状態（速度、角度、頻度）は重要な因子である。ブレード周り流れが粒子軌跡に及ぼす影響を考慮するためCFD(2D-RANS)結果から球形粒子への抗力を算出し軌跡に反映(Lagrangian particle tracking)させるモデルを構築。これにより予測寿命が約10%長くなる例もあり、表面形状変化にも影響する。計算コストを抑えるための機械学習ベースモデル(複数のCFD解析結果のセットで学習することで、流れ場(Re,AOA)と粒径から衝突状態を導出するモデル)を構築し、CFDと近い結果が得られることも確認した。



2条件における雨滴衝突状態解析におけるCFDと機械学習ベースモデルの比較

●WP3.4 Hasager, C. Bech, J.I., Maniaci, D.C. (2025) Potential for erosion safe operation

エロージョンセーフモードESO(エロージョンリスクの高い気象条件で回転速度を制限する手法)を適用・最適化するには多くの要因を慎重に検討する必要がある。現在まで、風力エネルギー業界ではESOは使用されていないため、ESOの本格的なフルスケールの実証試験実施に必要な関連知識をまとめた。

- ・LEPの耐久性
 - LEP耐久性の速度依存性、エロージョン進展速度の損傷度依存性
- ・風車の特性
 - 周速(≒雨滴との衝突速度)、
- ・空力性能とAEP損失
 - 空力性能やWF-WAKEへのエロージョンや補修の影響
- ・補修や損傷モニタリングに係るコスト
 - アクセス性、陸上／洋上、天候、補修方法、ダウンタイム、点検
- ・気象条件
 - 現地計測、数値モデル、衛星データ、風雨複合確率、時系列／平均
- ・リアルタイム降雨計測法
 - 風車近傍での高サンプリングの降雨計測
- ・売電収益
 - 売電価格の変動
- ・風車荷重と安全性
 - ブレード寿命からの観点
- ・系統安定性
 - 出力制限による影響
- ・windfarm設備計画
 - 点検／補修の周期

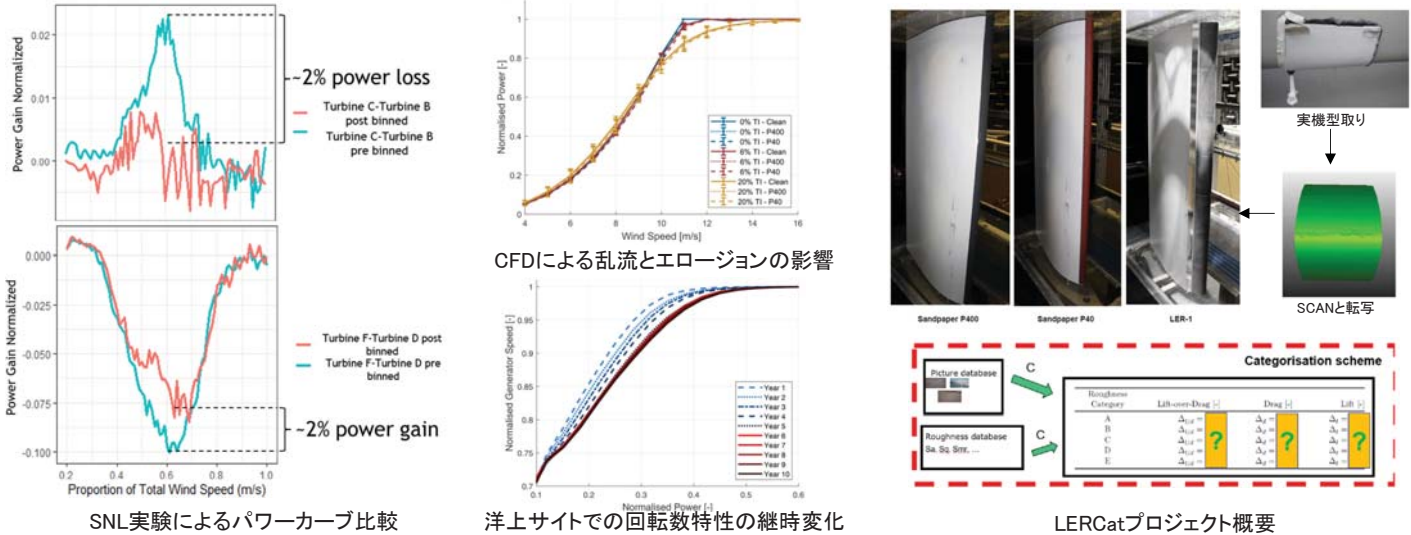
- ・風車／windfarmスケールでの計画
 - 風車1基／2基比較／複数基での統計的評価
- ・エロージョンセーフ運転
 - 速度制限の動作を決める3つのパラメータと閾値
 - 降雨パラメータ:空間中の液滴存在に関する因子
 - 降雨量、降水強度、降水速度、雨滴径、運動エネルギー、気温、レーダー反射率
 - 衝突パラメータ:衝突現象を支配する因子
 - ブレード速度、衝突効率、衝突速度、衝突頻度、Specific impact frequency(ASTM G73/DNV RP 0171) 運動エネルギー頻度
 - 損傷速度:衝突現象と材料に依存する因子
 - 最大損傷速度、発電電力量あたりの最大損傷速度
 - 制御戦略:いつどの程度制限するかを決める因子
 - 電力コスト、次の補修までの期間、ブレード残寿命 現状のブレード状態、エロージョンの進展状態

実証試験計画で考慮すべき事項

実証試験実施に必要な知見

●WP3.5a Maniaci, D.C., Olsen, A.S., Bak, C., Meyer Forsting, A. (2025) Accuracy of LEE performance loss model based on field observations

SNLの研究では、エロージョンクラス2-4で補修有無のペアx2組のSCADAデータを分析し、パワーカーブPCを比較したが、補修の影響は一方では出力増加、一方では減少しとなり、ばらつきを考慮すると最低10組の長期計測が必要と判明。DTUの研究では、CFDとBEMを用いた検討でPCにはエロージョンより乱流強度の影響のほうが大きいこと、洋上SCADAデータ分析では出力回転数依存性に経年変化が見られたがOEMによる制御改変の影響が疑われるなど、エロージョンの出力影響検証の難しさが浮き彫りになり、更なるCFDベンチマークやLERCat-PJ等での風洞実験が必須。



SNL実験によるパワーカーブ比較

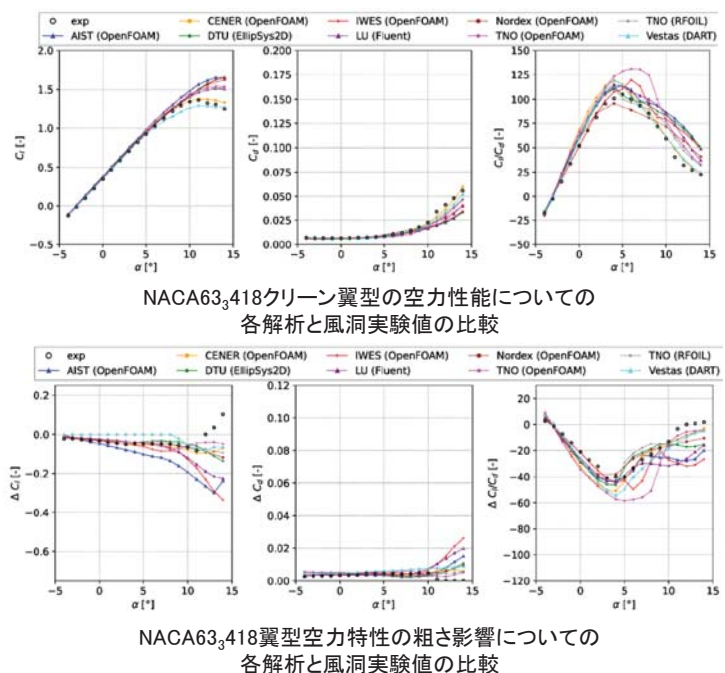
洋上サイトでの回転数特性の経時変化

LERCatプロジェクト概要

●WP3.5b Campobasso, M.S., Castorrini, A., Bretos, D., Mendez, B., Maniaci, D.C., Theron, J.N., Meyer-Forsting, A., Sorensen, N.N., Aihara, A., Vimalakanthan, K. (2025) Validation of the Predictive Capabilities of Computational Aerodynamics Codes to Assess Eroded Blade Performance: First Aerodynamic Benchmark

風力タービンブレードの侵食による空力性能低下を予測するために産業界および学術界で使用される空力解析コードの予測能力の比較評価を行った。クリーンと初期エロージョン程度の表面粗さのNACA63₄18とS814翼型について、高精度解析(ナビエ・ストークス計算流体力学コード)と低精度解析(積分境界層方程式と遷移モデルを連成し経験的相関式で補完されたポテンシャル流コード)を複数機関で実施し、風洞実験と比較。実機で運用される低迎角範囲ではどの手法も実験と良好な一致。さらにBEMコードで得られたAEP損失値のコード格差はより小さくなった。

	AISt	CENER	DTU	IWES	LU	NORDEX	TNO	VESTAS
OpenFOAM	x	x		x		x	x	
EllipSys2D			x					
FLUENT					x			
RFOIL							x	
DART								x



NACA63₄18クリーン翼型の空力性能についての各解析と風洞実験値の比較

NACA63₄18翼型空力特性の粗さ影響についての各解析と風洞実験値の比較

WP4: エロージョンの地上試験

●目的:

実機を再現できる忠実度の高い
地上試験手法を構築するために
地上試験事例を集積し
試験準備、試験方法、データ解析の
不確定性を低減する。

●参画機関:

Engie, DTU, Hempel, Covestro,
Emil Frei, Mankiewicz, Institute of
Technology Carlow, NUI Galway,
Univ. of Limerick, AIST, TU Delft,
Univ. of Bergen, Univ. Cardenal
Herrera-CEU, DNV Iberica,
ORE Catapult, Univ. Bristol

●日本からの参加メンバ:

産総研 田中、栗飯原、藤澤

●研究項目:

- WP4.1: ラボ試験で利用可能な技術調査
- WP4.2: 前縁システムにおける
エロージョン損傷モードの文献調査
- WP4.3: 試験用基材の規格化 (RP)
- WP4.4: 試験片の事前評価 (RP)
- WP4.5: 試験データの解析、
損傷蓄積とVN曲線 (RP)
- WP4.6: パラメータスクリーニングのための
簡単な機械的試験に関する報告書
- WP4.7: RETデータとフィールド寿命との相関
(報告書およびモデル)
- WP4.8: 無負荷時および試験時の経年劣化
(文献調査およびRP)

●WP4.1 Finnegan W., Bech J.I., (Eds.) (2022) Review on available technologies for laboratory erosion testing.

実験室でのエロージョン評価試験に利用可能な技術をリストアップして概説した。

・レインエロージョン試験

- ・回転アーム試験
関連規格:
ASTM G73-10
DNVGL-RP-0171
- ・パルス噴流試験
- ・連続噴流試験
- ・風洞試験

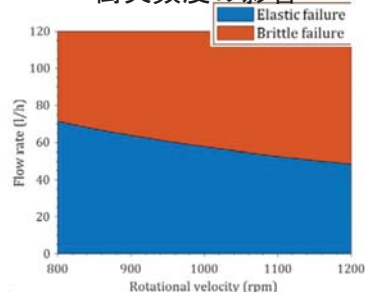
・衝撃試験と疲労試験

- ・SPIFT試験
- ・ナノインデンテーション
- ・おもり落下試験
- ・振子式衝撃試験

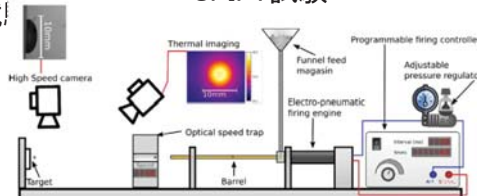
・粘弾性試験

- ・引張試験
- ・DMTA試験
- ・音速試験

回転試験における
衝突頻度の影響



SPIFT試験



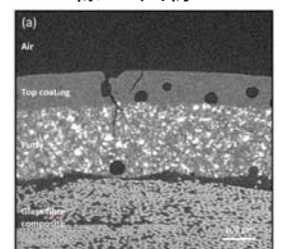
・層状構造の破壊試験

- ・引張試験
- ・Xカット付着性試験
- ・引張プルオフ試験
- ・ひずみ速度依存界面試験
- ・二重カンチレバービーム試験
- ・引張疲労試験
- ・単体衝撃試験

・微細構造特性評価と非破壊検査

- ・顕微鏡とAFM
- ・光沢と目視検査
- ・分光分析
- ・顕微鏡断面観察
- ・X線CT
- ・顕微鏡発光観察
- ・SEMとEDX
- ・NMR
- ・超音波Cスキャン
- ・テラヘルツ波スキャン
- ・光コヒーレンス・トモグラフィ・OCT

エロージョンブレードの
X線CT画像



ブレードの
テラヘルツスキャン検査



●WP4.2 Johansen, N. F.-J. (2023) Erosion failure modes in leading-edge systems.

RET(エロージョン試験)でのエロージョン損傷を目視で評価する共通指標の創出を目的に、メンバーの知見を集めて分類表を作成

Pre incubation - Homogeneous roughening	End of Incubation - Initial material removal	Incubation - Point erosion	Failure before incubation - failure at n to n-1 layer interface	Breakthrough to substrate - cohesive failure	Breakthrough to substrate - adhesive failure	Breakthrough of substrate
- 欠損がなく、微細クラックでマットに見える状態。 - 金属では光沢の変化、塗料では微細クラックが見える。	- 局所的な材料欠損が最外層のみに、単独で発生。 - 大きさは層の厚み程度。	- 局所的な材料欠損が下層が見えるレベルまで、単独で発生。 - 大きさは層の厚み以上。下層が見えるのでわかりやすい。	- 層間の接着不良。 - 下層は影響を受けていない状態。 - ポイントエロージョンがこの損傷による場合もある。	- コーティングと充填剤が基材表面とともに損傷。 - 樹脂では最外層の繊維の方向に沿った損傷、ガラス層では45度の縞模様	- コーティングと基材の界面が剥離して基材は損傷を受けていない状態。 - つながった剥離領域ができ、放射状に進展。	- 基材が貫通し背後の空が見える状態。 - 基材の穴が見える。

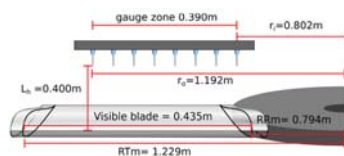
●WP4.3 Simon, J. E. and Johansen, N. F.-J. (2024) Rain erosion test data analysis, damage accumulation and VN curves.

RET結果から実機寿命を予測するPythonコードの機能と、その基礎となる関数や仮定についての解説 (<https://gitlab.windenergy.dtu.dk/jaensi1/leading-edge-erosion-lifetime-calculations>)

■コードの構成



■インピンジメントの導出



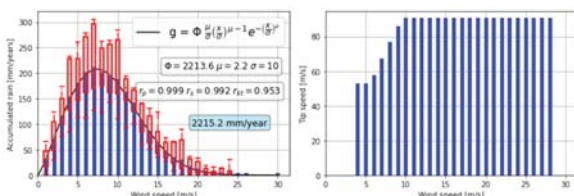
$$Y_H = \frac{F \omega t}{2\pi(r_0^2 - r_1^2) \cdot v_d}$$

F: 流量 [L/h] ω : 回転数 [rpm]
t: 経過時間, v_d : 落下速度

■損傷累積計算における選択枝

マイナー則(線形累積損傷則)による損傷度積算では以下を選択可。

- 1) ロータ回転数と降水量に年平均値を使用
- 2) ロータ回転数と降水量を風速ビンごとに平均して使用(下図)
- 3) ロータ回転数と降水量に時系列値を使用



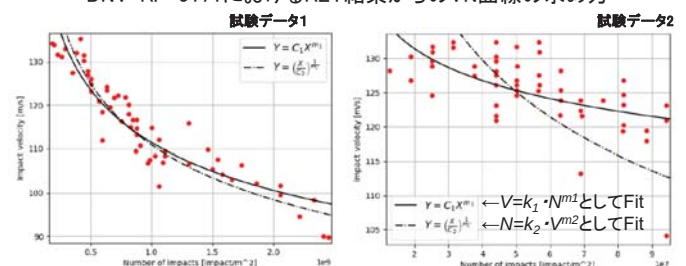
■フィッティングにおける選択枝

DNV-RP-0171ではVN曲線を通常のSN曲線と同様にNを従属変数とした指数則を仮定してフィッティング。実際のRET試験は、一定時間ごとに損傷の半径位置($\propto V$)をプロットするのでVを従属変数とすべきともいえるため、どちらかを選択可。



Nを従属変数とした指数則を仮定し
最小二乗法でmを求める

DNV-RP-0171におけるRET結果からのVN曲線の求め方



従属変数の取り方によるフィッティングの差

●WP4.4 Johansen, N. F.-J. and Nash, J. (2025) Pre-evaluation of specimen.

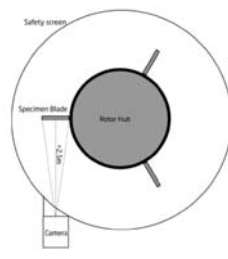
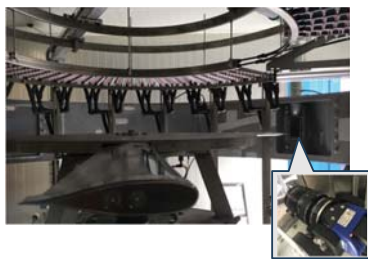
RET(エロージョン試験)において、エロージョン耐久性に影響を与える因子の一つである、試料上の初期欠陥を評価する検査手法の検討

■RETに適用できる可能性のある検査手法

- ・レベル1: In-situ検査
 - RET内の自動試験プロセスを中断せずに実施する検査
- ・レベル2: RET近傍撮影
 - RET外での撮像、または試験の一時中断を必要とする検査
- ・レベル3: 高度光学検査
 - 詳細な損傷評価のため、RET外で相当な時間を要する光学手法
- ・レベル4: 非光学外部検査 UT
 - 光学技術以外の、RET外で実施される損傷評価

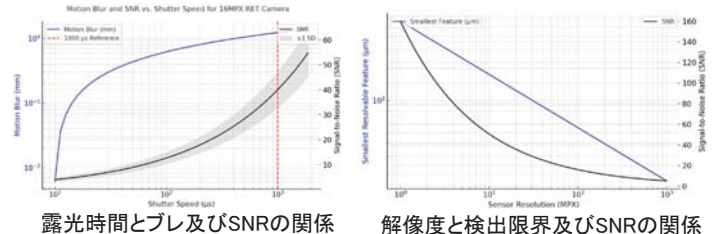
■レベル1: RETインラインカメラによる検査の課題

- ・RETインラインカメラ: インターバル時間ごとに回転を0.5rad/sまでおとして各サンプル表面を撮影できる16MPXのカメラ。
- ・課題1: 視差エラー
 - 撮影距離2.5mは画角10°に相当し視差エラーの考慮が必要。よりカメラを遠くするか、テレセントリックレンズの使用が有効。



・課題2: モーションブラー、センサ解像度とSNR

現システムは回転を停止させない撮影のためブレが発生。例えば1mmの傷の検出には露光時間900us以下にする必要があるが、露光時間を短くするとゲインを上げる必要がありノイズが増えSNRが下がる。また、解像度増大も、光量を上げなければSNR低下につながる。高輝度ストロボに交換するのがベストである。



■レベル4: 超音波検査の検討

- ・検査には、サンプルの水への浸漬と検査後の乾燥が必要、曲面の検査用の治具が必要。
- ・最小分解能サイズは、検査周波数の波長の約0.5倍。
- ・気泡、空隙、または層間剥離など、音響インピーダンスの差が大きい欠陥は検出が容易。
- ・類似した2つのポリマー間の界面など、材料特性が類似した二つの物体間の特徴を抽出すること、複合材料中の繊維サイズと同等の小さな空隙の検出、多層LEPの検査などは困難。
- ・複合材料を保護するコーティング層、およびこれらのコーティング層と複合材料の界面を調査することは可能

●WP4.5 Johansen, N.F.-J., Weinhold, A., Tanaka, M. (2025) Test aluminum data analysis, damage accumulation and VN curves.

DTU、マンケビッツ、産総研でアルミのラウンドロビン試験を行い、DNV-RP-0171(AppendixC)記載の試験結果と比較。また、RPに規定されている校正用材料A3003とその代替であるA3103を比較。

■初生の定義

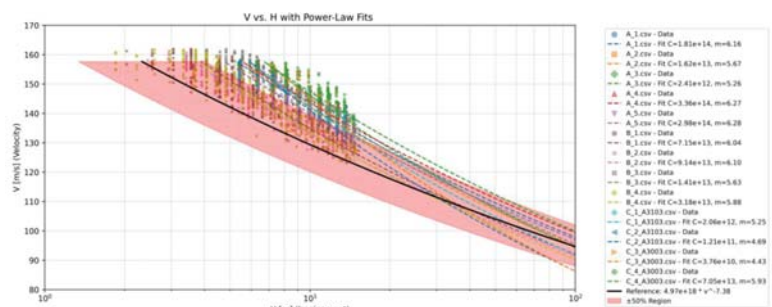
- ・初生判定はDTUが実施。試料表面に発生した独立したピットを初生と定義。



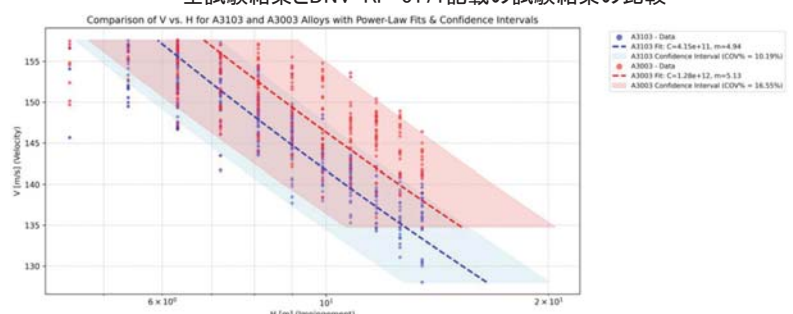
■試験条件と試験結果

- ・3機関で試料表面に発生した独立したピットを初生と定義。
- ・RP記載の試験結果に比べやや耐久性が高い結果。
- ・変動係数はRPが50%に比べ今回は約20%。3機関とも、ブレード取付ボルトが改良された機種を使用している影響か。
- ・当初RPでA3003が規定されたが、現在欧州では入手性の観点で代替材料A3103が使用されている。A3003はA3103に比べて耐久性がやや高いが表面状態等異なる検討が必要。

Tester	Run	Material	U	E	Droplet size [mm]	Fall velocity [m/s]	Flow rate
Reference	Mean	3003	4.970985e+18	7.379	Assumed 2.4mm from DNV-GL RP 0171	Assumed 2.3m/s from DNV-GL RP 0171	60
	-50%		8.61e18	7.379			
	+50%		2.87e18	7.379			
A	1	3103	2.765471e+16	6.157855	2.32	2.35	60
	2		2.459115e+15	5.670409			
	3		3.667908e+14	5.256987			
	4		5.127435e+16	6.270723			
	5		4.548809e+16	6.27726			
B	1	3103	1.249092e+16	6.035431	2.221	2.333	65
	2		1.482544e+16	6.0999	2.276	2.428	
	3		2.739779e+15	5.632329	2.142	2.397	
	4		5.003032e+15	5.881307	2.298	2.4	
C	1	3103	3.232162e+14	5.254263	2.3	2.35	60
	2		1.901051e+13	4.691523			
	3	3003	5.902273e+12	4.29618			
	4		1.106065e+16	5.925293			



全試験結果とDNV-RP-0171記載の試験結果の比較



A3003とA3103の試験結果の比較

●WP4.6 Teuwen, J., Johansen, N.F.-J., Bech, J. I. (2025) Simple laboratory test. Mechanical characterization of LEP materials.

- ・コーティング材料の粘弾性特性を定量化する動的機械温度分析(DMTA)試験とエロージョン試験との関係を検討した。
- ・DMAにおける $\tan(\delta)$ とエロージョン耐久性の間に決定的な傾向は見られなかった。今後、材料劣化や損傷進展(疲労、き裂進展、破壊)に伴う粘弾性特性の変化を詳細に検討する必要がある。

■DMTA(DMA)試験

試料に時間的に変化する振動荷重を加え、発生する変形や応力を測定することで、貯蔵弾性率、損失弾性率、 $\tan \delta$ 、ガラス転移温度を評価する分析法。時間温度換算則を用いてマスターカーブを作成することで、試験周波数($10^{-6} \sim 10^2 \text{Hz}$)外の帯域の粘弾性情報を得られる。

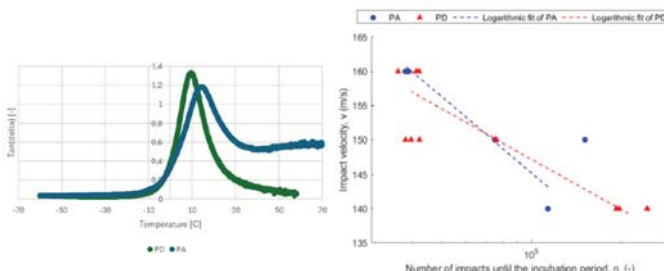
エロージョン現象の周波数帯($10^4 \sim 10^5 \text{Hz}$)での $\tan \delta$ が大きいほどエロージョン特性が高いと仮定すると低温域でのDMA試験が重要となる。

■パルスジェットエロージョン試験とDMTA

2種類のポリウレタンPA、PDにDMA試験を行った。 $-3^\circ\text{C} \sim 12^\circ\text{C}$ での $\tan \delta$ は $\text{PA} < \text{PD}$ 、より低温側では $\text{PA} > \text{PD}$ であった。パルスジェット試験によるVNカーブから、エロージョン耐久性は 150m/s 以上の高周波帯では $\text{PA} > \text{PD}$ 、それより低周波側では $\text{PA} < \text{PD}$ となっており、DMAで得られた粘弾性測定を反映している可能性がある。

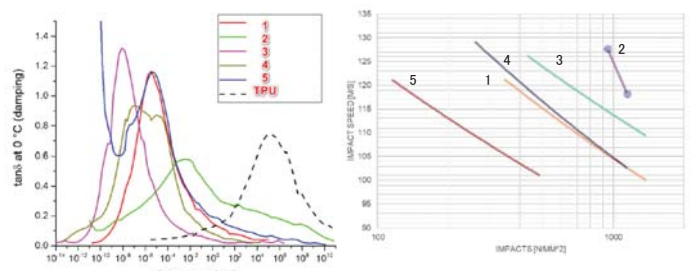
■回転式RET試験とDMTA

6種類の材料のDMA試験結果から、エロージョン現象の周波数帯($10^4 \sim 10^5 \text{Hz}$)での $\tan \delta$ は $\text{TPU} > 2 > 5 > 1 > 3, 4$ となった。一方、回転式エロージョン試験のVNカーブから、 120m/s でのエロージョン耐久性は $2 > 3 > 4 > 1 > 5$ となり、DMTAの結果だけからエロージョン耐久性が予想できるとは言えない結果となった。



DMTA試験結果

パルスジェット試験結果



DMTA試験結果

回転式エロージョン試験結果

WP5: エロージョン力学と材料特性

●目的:

LEP技術のエロージョン力学を理解し性能への影響を評価するために、適切なモデリング技術と材料特性評価方法を定義する。

●参画機関:

DTU, Hempel, Covestro, Emil Frei, Mankiewicz, NUI Galway, Univ. of Limerick, AIST, TOKYO Gas Co., Asahi Rubber Inc., TU Delft, Equinor, Univ. of Bergen, Univ. Cardenal Herrera-CEU, ORE Catapult, Imperial College

●日本からの参加メンバ:

東京ガス(株) 西田
(株)朝日ラバー 渡辺、峰岸
産総研 田中

●研究項目:

WP5.1:

基礎的材料特性に基づく損傷モデル

WP5.2:

多層システム

WP5.3:

微細構造と巨視的材料特性

→「モデル妥当性検証のための試験データ収集」

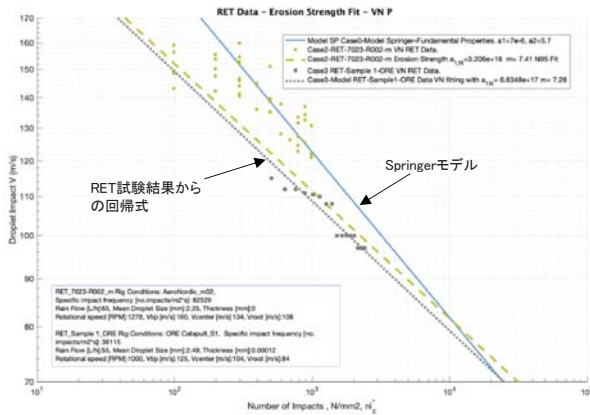
●WP5.1 Sánchez, F. and Hao, H. (Eds.) (2025) Review and assessment and review of erosion damage models based on fundamental material properties and DNV-GL-RP0573

・材料物性からエロージョン耐久性を予測するSpringerモデルと、RETデータを用いてその材料物性を補正するDNV-GL-RP0573モデルの妥当性を、3M W4600塗料を用いて評価した。RET試験のVNカーブはSpringerモデルと一致せず補正の必要性を示唆したが、デンマーク洋上風力発電所におけるエロージョン寿命は両モデルともおよそ再現できた。より高精度の予測には更なる評価が必要。

■Springerモデル

一般的な疲労曲線(S-Nカーブ)で寿命Nと荷重 σ_e の関係: $N = b_1 \sigma_e^{-b_2}$
Springerは種々の材料のエロージョン試験から以下を導いた。

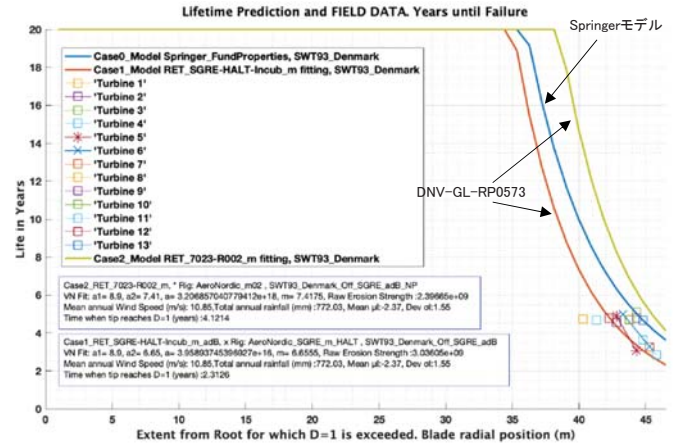
$$N_i = \frac{8.9}{\phi^2} \left(\frac{S}{P} \right)^{5.7} \left(\frac{\#}{mm^2} \right) \quad \begin{array}{l} S: \text{材料のエロージョン強度} \\ P: \text{衝撃圧力} \end{array}$$



3M W4600塗料に対するVNカーブ

■DNV-GL-RP0573モデル

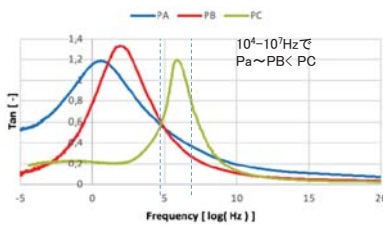
SpringerはPをウォーターハンマー $\propto V$ (速度) としたため材料によらず $N_i \propto V^{-5.7}$ となってしまう。この乗数-5.7を、RET試験に合うよう補正する。



デンマーク洋上サイトのエロージョンと各モデルによる予測

●WP5.2 Sánchez, F. (Ed.) (2025) Microstructure and macrostructure material analysis for the erosion damage progression development based on different accelerated rain erosion testing rigs.

3種類のエロージョン試験装置で複数材料の耐久試験を実施し、DMAによる粘弾特性と比較した。異なるエロージョン試験装置でも、同様の破壊モードと耐久性優劣が得られた。高速衝撃域 (10^4 – 10^7 Hz) において $\tan \delta$ が高い材料が最もエロージョン耐久性に優れていた。



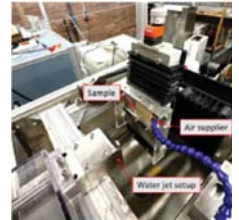
DMAマスターカーブ



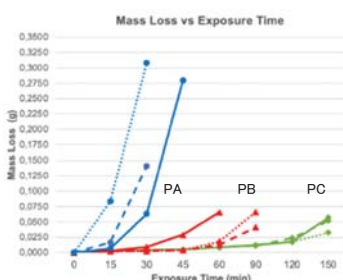
WARER試験



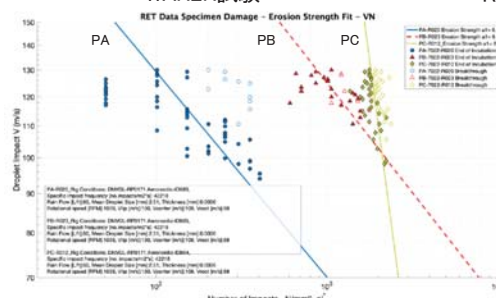
R&D RET試験



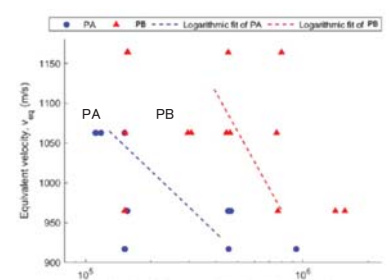
パルスジェット試験



WARER試験での質量欠損の時間変化



R&D RET試験でのVNカーブ



パルスジェット試験でのVNカーブ

●WP5.3 Sánchez, F. (Ed.) (2025) Use of in-field turbine blades inspection data for the modelling of the rain erosion damage initiation.

材料の物性情報が得られない場合に、DNVGL-RP-0571に基づいて実機のブレード表面の点検結果を用いてブレードのエロージョン初生寿命を予測するツールBEETOOL(Blade Erosion Evaluation Tool)とその妥当性検証の紹介

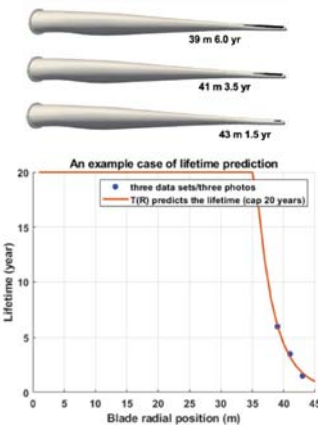
・SpringerモデルとDNVGL-RP-0571から、降水量と回転数(風速の関数)が独立という仮定において、半径位置Rにおけるエロージョン寿命LTは右の式で表せる。

$$LT(R) - LT_0 = A(m, M) \cdot R^{B(m)}$$

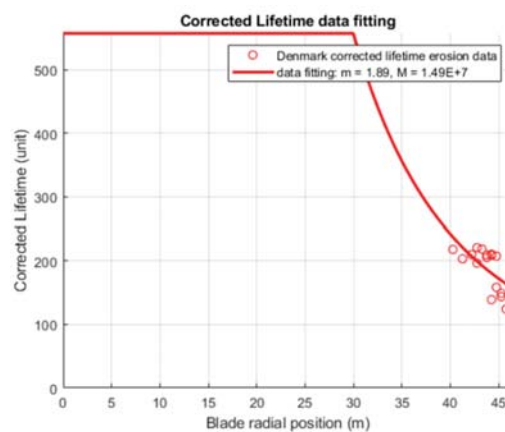
$$A = \frac{8.9 M^m (\cos(\alpha))^{-m-1}}{C_r T_{year} C_{\omega}(m)} \quad B = -m - 1$$

材料因子
降水量因子
365*24*60*60
回転数因子

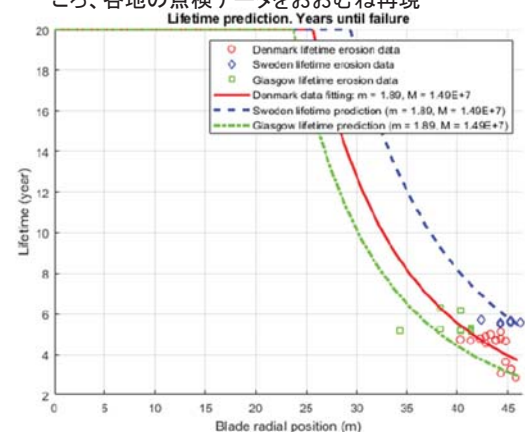
・点検で初生が3点とればm, M, LT0を決定することができる



・デンマーク洋上の点検データからBTOOLでm, Mを求めた



・同じ機種、ブレード材料であるスウェーデン洋上、グラスゴー陸上の寿命を同じm, Mで予測したところ、各地の点検データをおおむね再現



Task46(Phase2)概要

- ・期間: 2025年4月～2029年3月
- ・OA: DTU
- ・ワークパッケージ

Work Package	Lead organization	Deliverables
WP 1: Management	DTU (DK) Professor Charlotte Bay Hasager (Operating Agent) Professor Christian Bak (Co-operating Agent)	D1.1 to D1.6
WP 2: Climatic conditions	Cornell University (US) Professor Sara Pryor (WP-lead) Professor Rebecca Barthelmie (Co-lead)	D2.1 to D2.4
WP 3: Wind turbine operation with erosion	Sandia National Laboratories (US) David Maniaci, PhD, Rotor Blade and Wind Plant Aerodynamics Lead (WP-lead) CENER (ES) Beatriz Mendez, PhD, Head of Aerodynamics and Hydrodynamics (Co-lead) University of Lancaster (UK) Sergio Campobasso, PhD, Senior Lecturer (Co-lead)	D3.1 to D3.8
WP 4: Laboratory testing of erosion and material blade integration	DTU (DK) Nicolai Frost-Jensen Johansen, PhD, Development Engineer (WP-lead) AIST (JP) Motofumi Tanaka, PhD, Senior Researcher (Co-lead)	D4.1 to D4.8

WP2: 22名(嶋田・田中(産総研)、牛尾(阪大))
WP3: 40名(川端・栗飯原・田中(産総研)、酒井(電中研))
WP4: 50名(栗飯原・田中(産総研)山縣(新潟大)、高木(福島県ハイテクプラザ)、渡辺・峰岸(朝日ラバー)、西田(東京ガス))

Country	Contracting Party	Participant Organization
Belgium	Belgian Ministry of Economy	Engie
Canada	Natural Resources Canada	WEICan
Denmark	Danish Energy Agency	DTU, Hempel, Ørsted, PowerCurve, Siemens Gamesa Renewable Energy
Finland	Business Finland	VTT
Germany	Federal Ministry for Economic Affairs and Energy	Fraunhofer IWES, Emil Frei (Freilacke), Nordex Energy SE, Mankiewicz, RWE, Henkel
Ireland	Sustainable Energy Authority of Ireland	South East Technological University, University of Galway, University of Limerick
Japan	New Energy and Industrial Technology Development Organization	AIST, Osaka University, Tokyo Gas Co. Asahi Rubber Inc., CRIPI, Industrial Technology Institute Fukushima prefectural government, Niigata University
Netherlands	Netherlands Enterprise Agency	TU Delft, TNO, Suzlon
Norway	Norwegian Water Resources and Energy Directorate	University of Bergen, Statkraft
Spain	Centre for Energy, Environmental and Technological Research	Aerox, CENER, DNV Iberica, Nordex Energy Spain, Universidad Cardenal Herrera - CEU
UK	Offshore Renewable Energy Catapult	ORE Catapult, University of Bristol, Lancaster University, Imperial College, Vestas UK, Ilosta, Armour Edge
US	US Department of Energy	Cornell University, Sandia National Laboratories, 3M



・日本から提案のサブタスク

4.6-4.8 Erosion from material science perspective



IEA Wind TCP

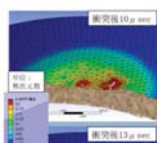
The discussion will also include the materials science perspectives necessary to achieve this objective. One of the objectives of this work package is to accumulate knowledge on the relationship between fatigue properties and material properties, various factors affecting them, and testing methods for evaluation for various soft materials through computer-aided engineering (CAE) and experiments, and to share this knowledge widely in the industry in order to develop materials that will sufficiently endure for the life of wind turbines, or materials and application methods that minimize uncertainties in life-time prediction.

4.6 Bridging the gap between several durability testing and material properties



- focusing on erosion initiation
- understand the difference among testing

4.7 Analysis on failure modes and mechanisms of various soft materials to integrate into modelling



- focusing on erosion progress
- understand elementary process on soft materials

4.8 Material failure in the real blade erosion



- focusing on erosion in field
- understand realistic erosion from the knowledge of 4.6 & 4.7

Technology Collaboration Programme
by IEA

・日本から提案のローカルミーティング

Extra optional WP4 meting in Japan Sep 26.



IEA Wind TCP

- 14:00-15:30 Site tour at Hibiki offshore wind farm
- 15:30-17:30 Discussion at office near Kokura sta.
- Please contact Moto for more information



Technology Collaboration Programme
by IEA

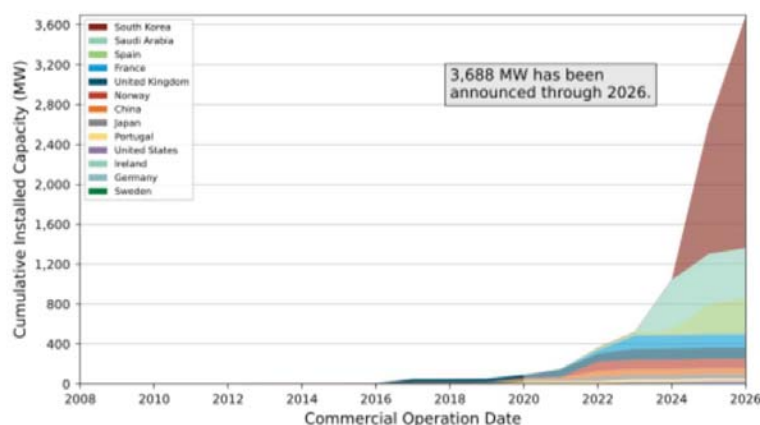
Task49 浮体式洋上風力発電所の統合設計 Integrated Design on Floating wind Arrays (IDeA)

Atsushi Yamaguchi
yamaguchi.atsushi@g.ashikaga.ac.jp



Task49 の目的

- 浮体式洋上風力発電所は2020年現在、世界で79MWが運転しているに過ぎないが、今後10年間で飛躍的な増大が期待されている。

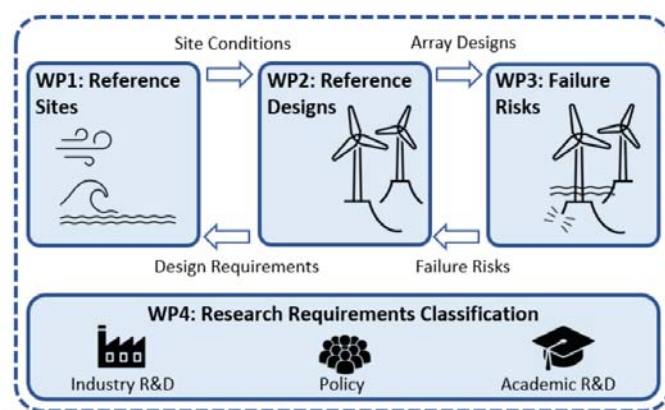


Musiel et al., (2021)

- Task49は、世界各国における浮体式洋上風力発電所の最適設計に資するため、標準的な浮体式洋上風力発電所を定義し、標準的な設計手法の枠組および設計ツールを開発する。

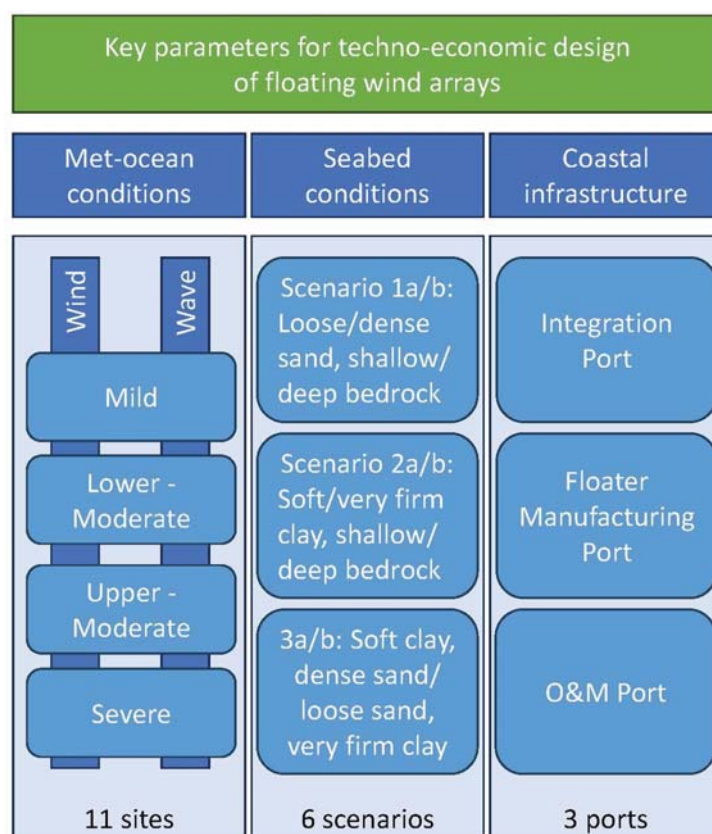
Task49 ワークパッケージ

- WP1: 標準設計条件の定義
世界各国の観測データ、シミュレーションデータを元に、標準設計条件を定義する。
- WP2: 標準発電所(Array)の定義
風車配置、ユニット(風車-浮体)、係留方法、送電ケーブル、変電所、等を含む標準浮体式風力発電所を定義する。
- WP3: 発電所レベルでの損傷リスクと低減
発電所レベルでの損傷モードを明らかにし、その影響を明らかにする。
- WP4: 問題点の明確化
各ワークパッケージにおける問題点を明らかにし、今後の研究課題を明らかにする。



WP1 標準設計条件の定義

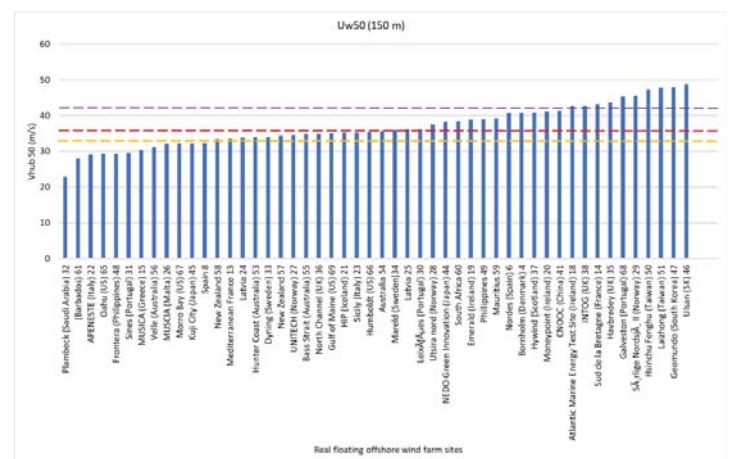
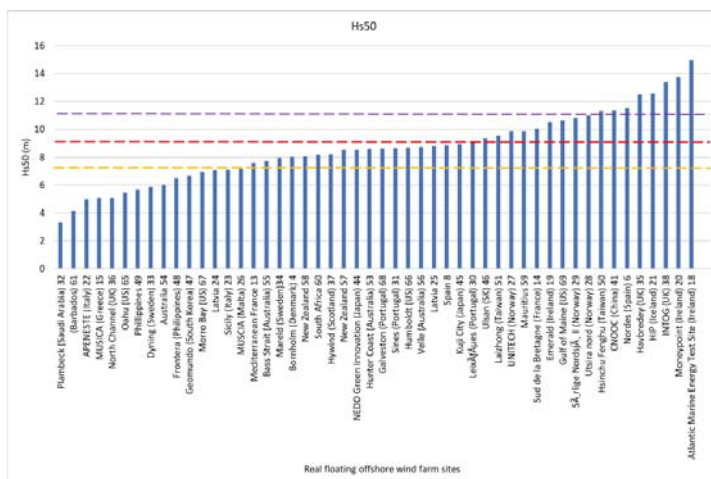
- 気象海象条件
- 海底地盤条件
- 沿岸インフラ
- 環境影響
- 社会・経済影響
- 規制と許認可



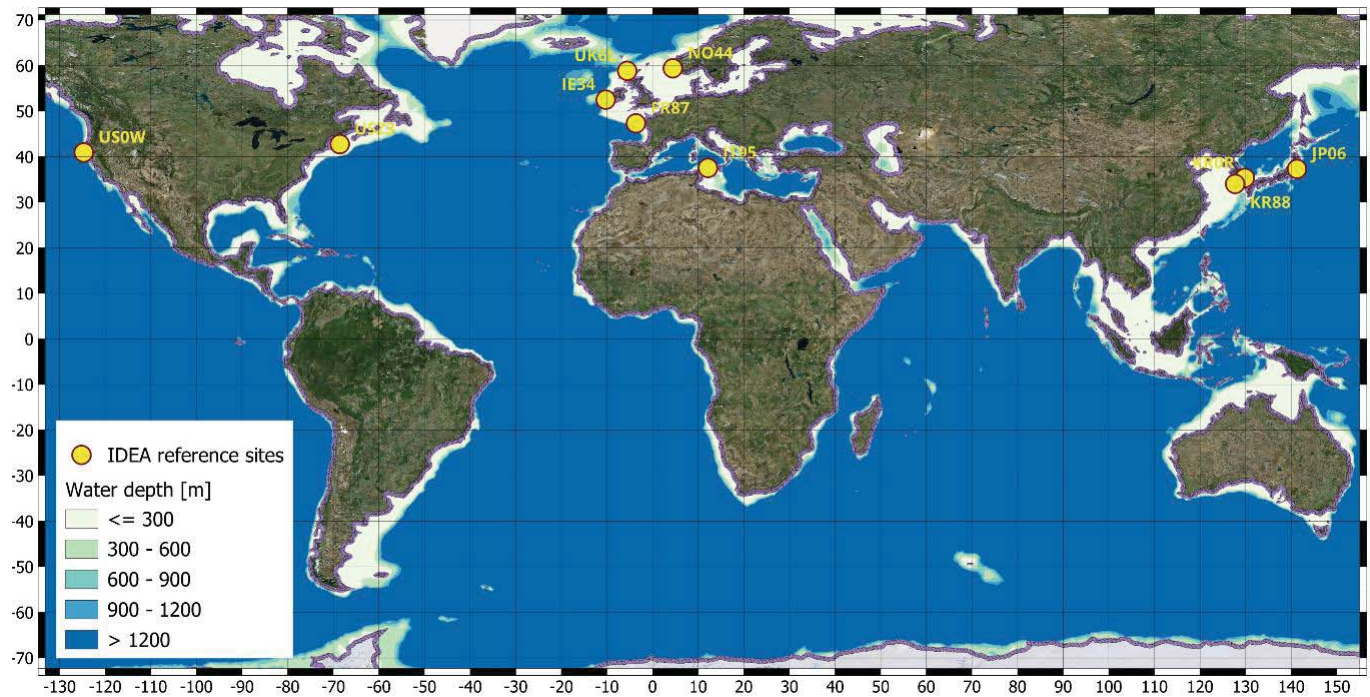
- 全世界69サイトにおいて、ERA5再解析データ(気象:0.25度解像度;海象0.5度解像度)の生データを用いて、風速と波浪の極値を推定した。
- 各サイトの水深をGEBCO(GEneal Bathymetric Chart of the Oceans)データから抽出。

49サイトの極値の分類

6



Severity	Wind threshold (m/s)	Wave threshold (m)
Mild	< 33	< 7.5
Lower Moderate	33 < 36	7.5 < 9
Upper-Moderate	36 < 42	9 < 11
Severe	> 42	> 11



サイトデータの例

ID*	Name	Latitude [deg]	Longitude [deg]	Water depth [m]	Distance from shore [km]
IT95	Hannibal	37.536	12.12	-353	35
US0W	Humboldt	40.928	-124.708	-707	43.8
KR0R	Ulsan	35.344722	129.841389	-188	32
IE34	MoneyPoint One	52.519	-10.276	-102	23.4
UK6L	Havbredey	58.84328	-5.580929	-91	41.6
JP06	Fukushima	37.311	141.251	90	19.4
NO44	Utsira Nord	59.411	4.433	-273	42.4
USZ3	Gulf of Maine	42.755	-68.583	-148	138
KR88	Geomundo	34.026	127.7	-70	47
FR87	Sud de la Bretagne II	47.325	-3.659	-94	30.7

WP2: 標準風力発電所の考え方

Feature	Greatest Interest	Secondary Interest
Layout	Regular rectangular	Triangular, irregular, optimized
Turbine size	15 MW	~20 MW or a range of sizes (12, 15, 18)
Turbine number	Multiple array sizes in the range of 20-100 turbines	As few as 7-10 turbines
Platform type	Steel semisubmersible	Spars, TLPs, barges, concrete construction
Mooring configuration	All basic types (cat-TLP)	Different rope materials, shared configurations, load reducers, multiple anchor types, seabed dependence
Dynamic Cable Configuration	Lazy wave	Catenary free-hanging, suspended W, etc.
Intra-array cable rating	66 kv and 132 kV	
Depth	Shallow, medium, and deep options	
Misc	Seabed changes and anchor/mooring implications	Substation, cable connections, and export cable

Scenario	Shallow	Intermediate	Deep
Key features	Shallow-water mooring/cabling design challenges and innovations	Seabed feature constraints on anchor positions, and innovations on anchoring	Deep-water constraints on mooring layout and turbine spacing, use of W-shaped cables and deep-water mooring innovations
Design variants (sequential)	V1: uniform <i>Secondary options:</i> V2: depth gradient with adapted mooring designs V3: spring option	V1: uniform <i>Secondary options:</i> V2: complex seabed, adapted layout and anchor positions V3: shared anchor option V4: cable layout designs	V1: uniform <i>Secondary options:</i> V2: depth gradient with adapted layout, moorings, cables V3: shared mooring option V4: TLP option
Metocean	Sørlige Nordsjø II	Utsira Nord	Humboldt
Depth	60 meters (m) <i>Secondary option:</i> sloped 40–120 m	300 m <i>Secondary option:</i> irregular 200–400 m	800 m <i>Secondary option:</i> irregular 600–1,000 m
Seabed	Generic	Generic <i>Secondary option:</i> irregular with bedrock/ridges	Generic

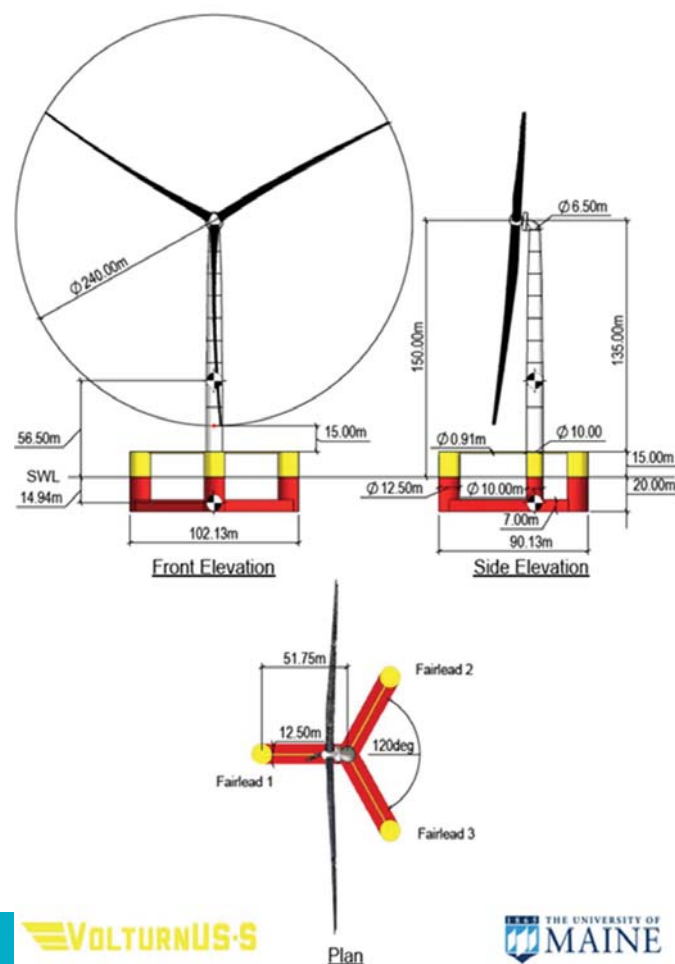
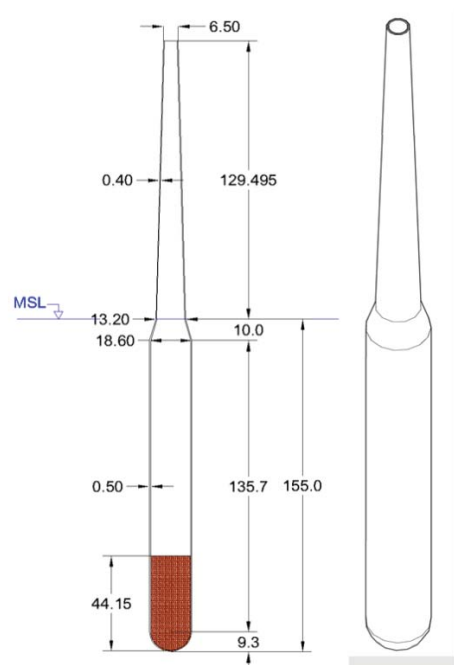
Scenario	Shallow	Intermediate	Deep
Array layout	Rectangular	Rectangular <i>Secondary option: varied</i>	Rectangular <i>Secondary option: varied</i>
Platform type	Semi	Semi or Spar <i>Secondary option: TLP</i>	Semi or Spar <i>Secondary option: TLP</i>
Mooring configuration	Semi-taut shallow water	Catenary chain (+wire?) <i>Secondary option: semi-taut intermediate water</i>	Taut synthetic <i>Secondary options: shared taut, TLP</i>
Mooring layout	Regular	Regular <i>Secondary option: varied</i>	Regular
Anchors	Drag embedment <i>Secondary option: suction pile</i>	Drag embedment <i>Secondary option: shared suction pile</i>	Suction pile <i>Secondary option: drag embedment</i>
Cable configuration	Lazy wave	Lazy wave	Fully suspended
Cabling layout	Regular	Regular or irregular if seabed constraints	Regular

- NREL 5MW, DTU 10MW などいくつかの公的に利用可能な風車モデルがあるが、IEA 15MW (Task37) 風車を標準風車として考える。

Parameter	Value
Power rating (MW)	15
Turbine class	International Electrotechnical Commission (IEC) Class 1B
Specific rating (watts per square meter [W/m ²])	332
Rotor orientation	Upwind
Cut-in wind speed (meters per second [m/s])	3
Rated wind speed (m/s)	10.59
Cut-out wind speed (m/s)	25
Design tip-speed ratio	9
Minimum rotor speed (rpm)	5
Maximum rotor speed (rpm)	7.56
Maximum tip speed (m/s)	95
Rotor diameter (m)	240
Hub height (m)	150
Hub diameter (m)	7.94
Hub overhang (m)	11.35
Rotor precone angle (deg)	-4
Blade prebend (m)	4
Blade mass (tonnes [t])	65
Drivetrain	Direct drive
Shaft tilt angle (deg)	6
Rotor-nacelle assembly mass (t)	1,017

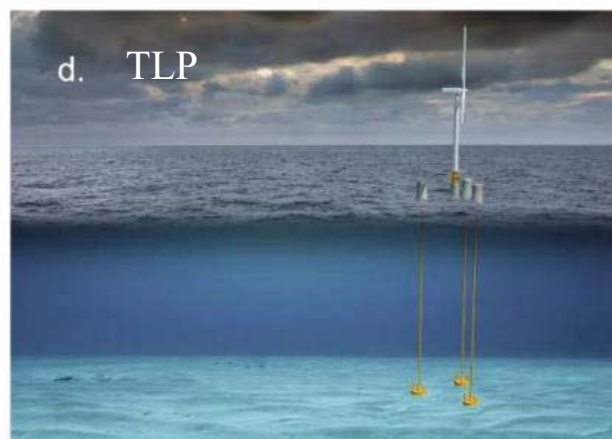
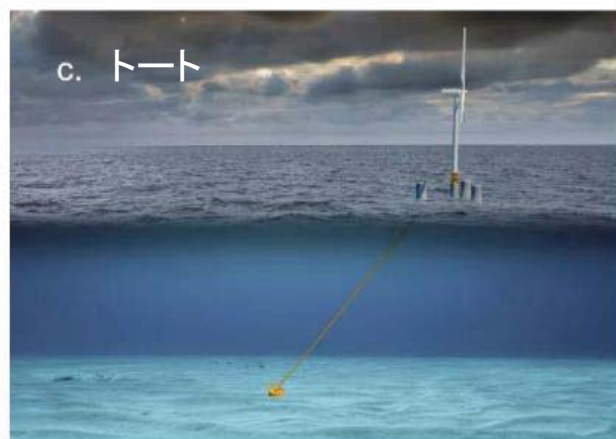
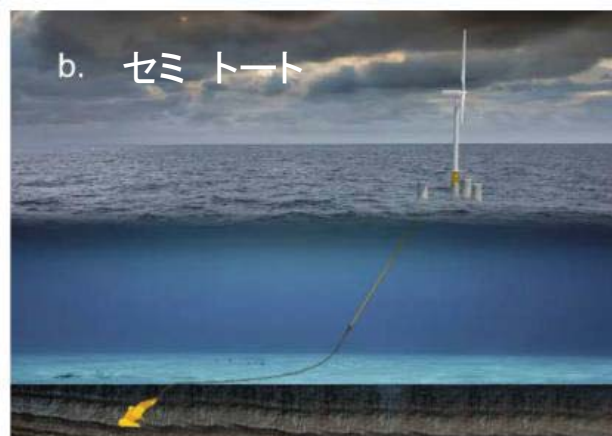
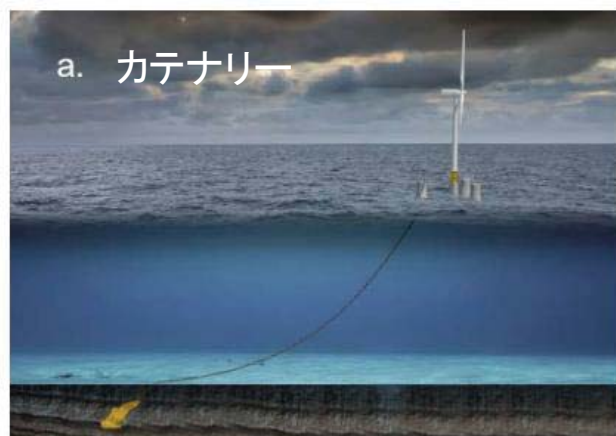
標準浮体

- メイン大学(アメリカ) VoltturnUS-S セミサブ浮体
- カタルーニャ工科大学(スペイン) Wind Create スパー浮体



WP2:係留索の種類

14

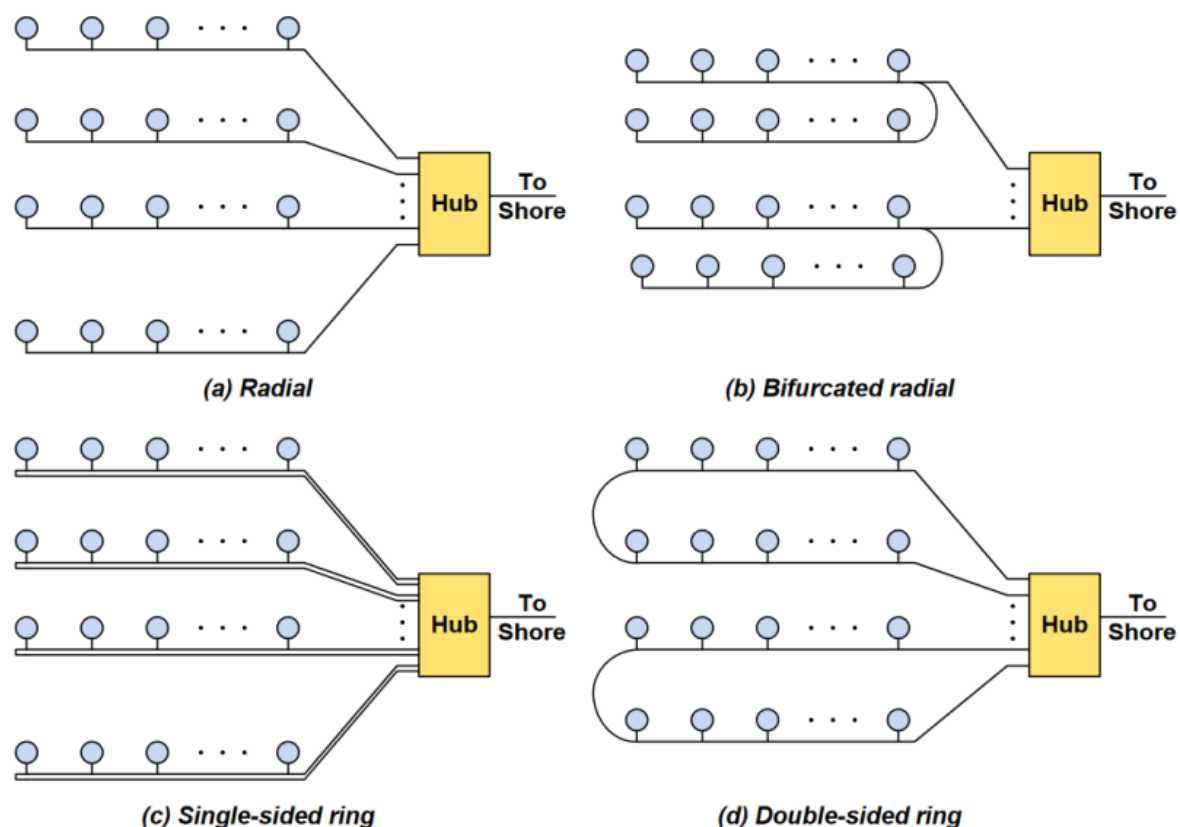


WP2:係留設計－既存の係留のレビュー

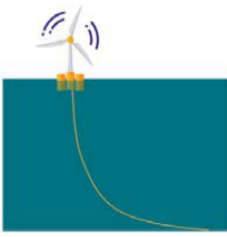
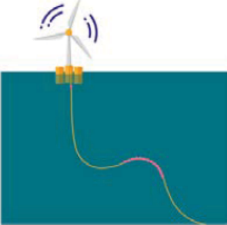
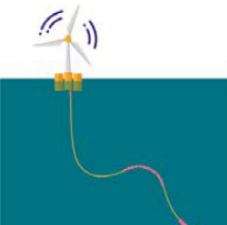
Project	Mooring Arrangement	Mooring Line Configuration	Expected Reasoning
	nylon hawsers and 3 semi-taut mooring lines	hawsers tether the platform to the single-point, 3 semi-taut mooring lines connect to suction pile anchors	turbine to weathervane with the wind and allows a single point of mooring/cable disconnection for marine operations
FloatGen	6 mooring lines made of synthetic fiber (nylon)	Nylon mooring lines with chain segments at the anchor and fairlead	Nylon absorbs wave-induced platform motions, has adequate fatigue performance, and does not corrode. Chain length was minimized to minimize the mooring radius. Use of chain near the seabed avoids rope chafing degradation at the seabed.
Provence Grand Large	TLP with 3 double tension legs (6 tendons total)	Three bundles of two mooring legs each. Tension legs are majority wire rope with short top and bottom chain sections for connection/installation, attached to gravity-suction anchors	TLP platform requires stiff high-tension mooring lines, as provided by wire rope. Suction-gravity anchors are suited for TLP because weight provides steady vertical capacity and suction can provide strong capacity against dynamic loads.
DemoSATH	Single-point turret mooring with 6 semi-taut rope-chain mooring lines	Single-point mooring from turret rigidly attached to platform, 6 semi-taut mooring lines with rope and chain, drag embedment anchors	Concrete platform is directional and designed to face into the waves, so a single-point mooring allows weathervaning and simplifies installation
New England Aqua Ventus I	3 lines considering catenary, semi-taut, and taut configurations	Catenary chain, semi-taut rope-chain, or taut rope configuration (with minimal if any chain at seabed), drag embedment anchors	Three options offer trade-offs between minimizing seabed impact and logistical simplicity

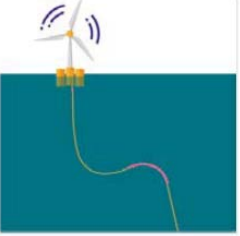
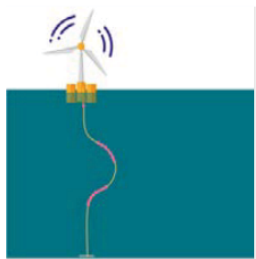
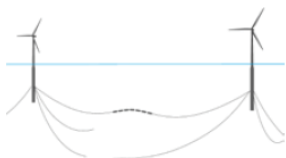
IEA Wind セミナー 2025

WP2: 電力ケーブルの配置



IEA Wind セミナー 2025

	Configuration Type	Ancillaries	General Comments
	Catenary (freely hanging)	Bend stiffener (at hang-off), cable protection at touchdown point (TDP)	Does not decouple the motions of the FOWT from the TDP (critical for damage) Use in deep water would require distributed buoyancy to avoid excessive tensions due to weight
	Lazy wave	Buoyancy modules, bend stiffeners, cable protection (at TDP)	A common configuration; currents could cause excess TDP motion (critical for damage)
	Tethered wave (reverse pliant wave)	Tether, clamp, buoyancy modules, bend stiffeners, hold-down/hold-back anchors	A common configuration; the tether limits TDP motion, making it more suitable for areas where currents or shallow water would otherwise lead to large TDP motion

	Steep-wave	Buoyancy modules, subsea base, bend stiffeners	Cable vertically connected to a subsea base through a bend stiffener; difficult to install
	Lazy S	Buoy with anchor and tether system, clamp, bend stiffener (at hang-off)	Like lazy wave but uses a tethered subsea buoy instead of buoyancy modules
	Chinese lantern	Buoyancy modules, bend stiffener, subsea base	Often used to connect hoses to oil and gas offloading buoys; not practical for power cables
	Suspended configuration	Buoyancy modules or subsea buoys, bend stiffeners	Used for offloading hoses in oil and gas applications; coupling analysis effects

- WP内での議論の結果、WP2で対象とするアレイ(浮体式ウィンドファーム)の特性は、風車配置・係留システム・電力ケーブル配置とした。浮体と風車は既存のものを用いた。
- それぞれの特性について、既存のウィンドファーム、文献等の包括的なレビューを行った。
- 3種類の参照ウィンドファームについて、設計を実施中である。



Task54

寒冷地における風力発電

2025年度 第14回 IEA Wind セミナー

プログラム No. 6

TASK54の経緯

2002 年Task19 'Wind Power in Cold Climates' 設立

2022年1QまでTask19を継続

2022 年 2Q から 2025 年 1Q まで Task54として継続

2025年2QからTask54第2フェーズを4か年計画で開始

Task19の成果

寒冷地の風力に関連する一般的な慣行と用語を推進

多くのTask 19 の取り組みは、業界標準として採用

IEA Wind の出版物や会議で共有

ワークショップを開催

公開ウェビナーを開催

成果物を発表（Webサイトで公開）

TASK54フェーズ2

2024年末までに208 GWの設置容量が見込まれ、寒冷気候は大きな市場。

寒冷気候の大気条件は、タービン、発電所、電力網に影響を与える。

産業協力の良好な経験と業界標準が存在。

推奨実践の更新が必要。

欧州、北米、中国、日本での風力産業の活発な活動。

#	国	機関	概要
1	オーストリア	Energiewerkstatt Verein	再生可能エネルギーの利用を研究
2	カナダ	Nergica	再生可能エネルギー産業の応用研究
3	デンマーク	DTU Wind Energy	風力発電技術の研究と開発
4	フィンランド	VTT	研究・技術の商業・社会への活用を促進する研究機関
5	ドイツ	Fraunhofer IFAM Fraunhofer IEE	材料技術研究機関 エネルギーシステム研究機関
6	ノルウェー	Kjeller Vindteknikk	風力発電コンサルタント
7	スウェーデン	WindREN Vattenfall	風力発電コンサルタント 電力会社
8	スイス	Meteotest	気象・気候・環境の調査・分析
9	UK	DNV	第三者認証機関

Task54フェーズ2のワークパッケージ

#	コンテンツ	内容
1	Operational strategies	風車運用戦略
2	Managing the ice throw risk	アイススローリスク管理
3	Wind turbine and blade heating performance	風車とブレード加熱性能
4	Offshore wind	洋上寒冷気候
5	Icing events complexity	氷付着イベントの複雑さ
6	Uncertainty	不確実性の検証と改善
7	Climatic wind tunnel validation	気候風洞の検証と校正
8	Dissemination	普及活動

ワークパッケージ 1（風車運用戦略）

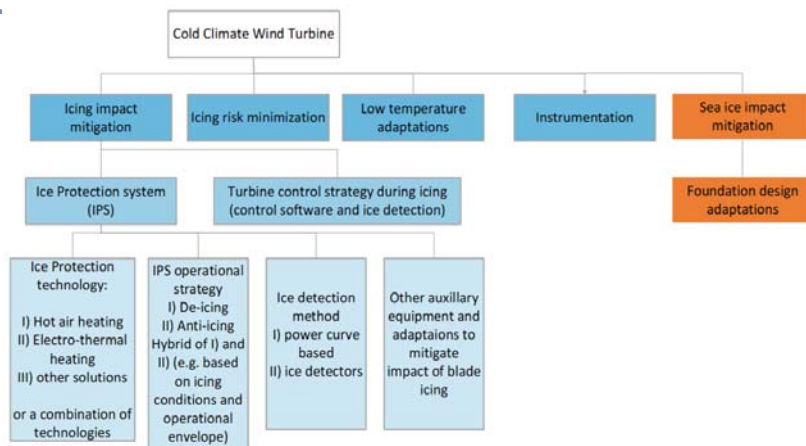
洋上における運用戦略の策定

寒冷気候における風力タービンの運転は、以下の4つのバランスをとる作業です。

- 氷の落下による安全性
- 生産の最適化
- 収益に基づく最適化
- 寿命の維持

業界の経験に基づき、寒冷気候におけるモニタリングのためのKPIを提案する

運用に関する推奨プラクティス

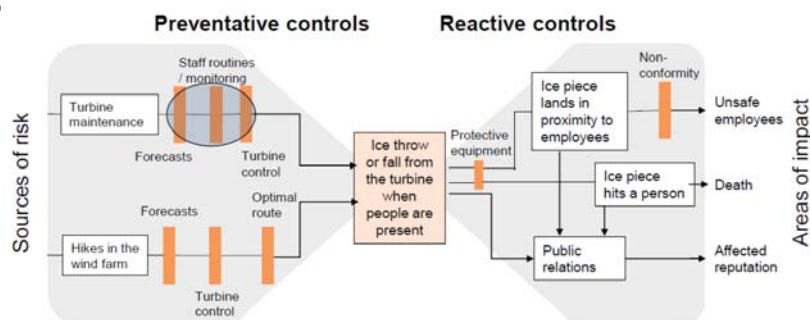


5

ワークパッケージ 2（アイススローリスク管理）

各国の現状を整理

- 地域ごとの法律やルールが異なる。
- 各国のリスク管理戦略を収集し、ベストプラクティスを編纂。
- 年間変動の影響や氷投げリスク低減技術の効果を評価。

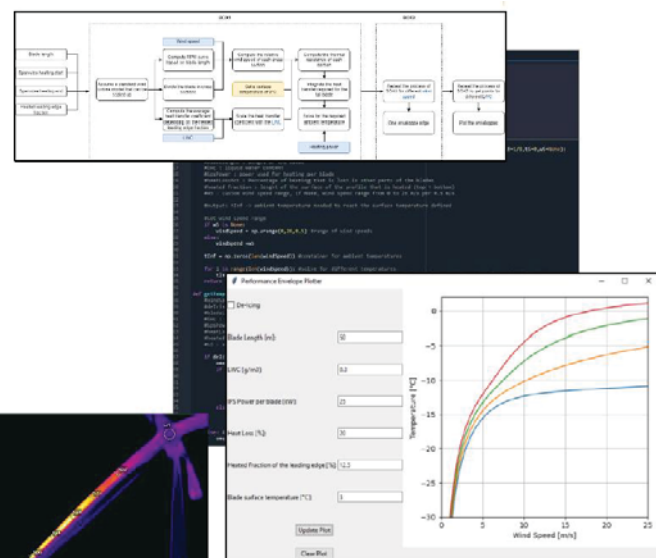
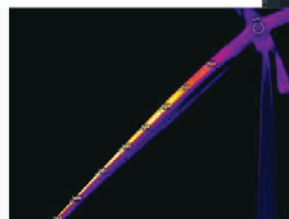
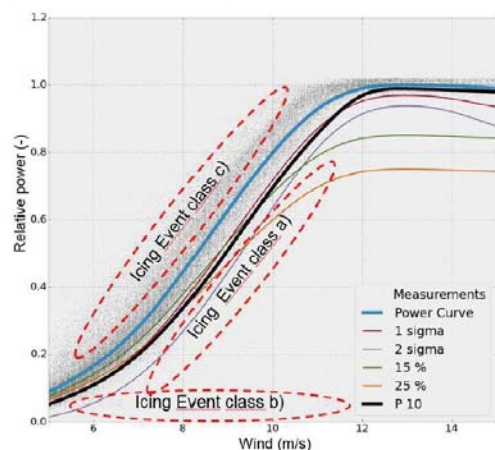


6

ワークパッケージ3（風車とブレード加熱性能）

ブレード加熱システム

- ブレード加熱性能の評価とオープンソースツールの開発。
- 業界ワークショップを開催し、経験と要件を収集。



7

ワークパッケージ4（洋上寒冷気候）

洋上における寒冷地気候

- 海氷に関する業界のベストプラクティスを収集。
- 海上での氷付着の評価と気象モデルの検証。

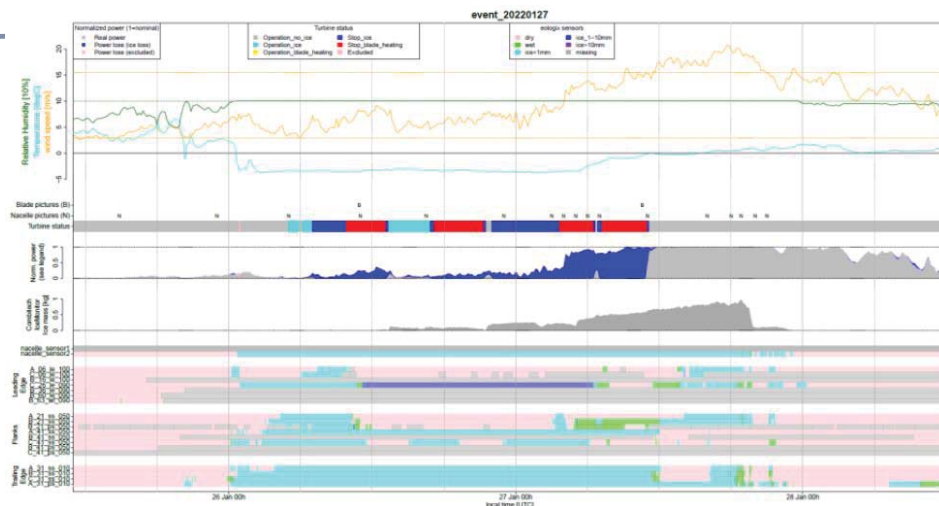


8

ワークパッケージ 5（氷付着イベントの複雑さ）

現状の整理

- 氷付着の影響は地域やイベントによって異なる。
- 現在の知識のレビューと将来の研究ニーズをまとめた文書を発表予定。



9

ワークパッケージ 6（不確実性）

IEC標準の更新

- 氷付着に関する不確実性が多く存在。
- 不確実性指標を開発し、IEC標準を更新。
- 予測フレームワークを構築し、氷付着の影響を伝達。

着氷クラス

IEA Ice Class	Duration of Meteorological Icing [% of Year]	Duration of Instrumental Icing [% of Year]	Production Loss [% of AEP]
5	>10	>20	>20
4	5-10	10-30	10-25
3	3-5	6-15	3-12
2	0.5-3	1-9	0.5-5
1	0-0.5	<1.5	0-0.5

10

ワークパッケージ7（気候風洞の検証）

着氷風洞ラウンドロビンベンチマークテスト

- ・ ラウンドロビンは、一部のケースでは同等の結果を示したが、すべてのケースで同等の結果を示したわけではない。
- ・ 特に空気中の液体水分量に関しては、校正が課題とみなされた。
- ・ 校正装置は高価で、専門家の使用が必要である。
- ・ 着氷風洞で液体水分量を測定できる低コストの汎用校正方法を開発し、試験を行い、その方法を公開する予定。



11

ワークパッケージ8（普及活動）

着氷が市場に与える影響

- 1 - 業界への周知：会議への参加、公開レポート、ソーシャルメディア
- 2 - 他のタスクとの連携：合同会議（タスク41、51、52）、共同出版物、プレゼンテーション
- 3 - 寒冷地市場規模調査（2025～2030年）：タスク54は、これまでに市場予測を発表し、a) 寒冷地の風力市場の成長を評価し、b) 以前の予測が達成されたかどうかを検証してきました。
- 4 - 推奨プラクティスの更新：作業計画の4年目は、新期間（サブタスク1～7）のすべての作業を活用し、IEA Wind TCP 推奨プラクティス13「寒冷地における風力エネルギー」の更新に充てられます。この文書の第2版は2017年に発行されており、2028年（第3版の発行予定年）には、ベストプラクティスは大幅に進化しているでしょう。

Task54フェーズ2の目標

- ・ 2028年に推奨実践文書の改訂を予定。
- ・ このフェーズの鍵となるのは、フェーズ2終了時に推奨される実践文書です。タスク19は2017年にRP 13. 寒冷地における風力エネルギープロジェクトを公開しました。それ以来、多くの変更があり、一部は古くなっています。

12

スケジュール

- 各作業パッケージ
に対する具体的な
成果物と期限を設
定。

WP	Title	Deliverable	Due date
1	Operational strategies	1 - Review of operational strategies of wind turbines in cold climates	Q3/2026
2	Managing the ice throw risk	1- Comparative study of the handling of ice throw risk in wind farm licensing and operation	Q1/2028
3	Wind turbine and blade heating performance	1 - IceLoss 3.0 2 - IEA Ice Class 2.0 3 - Framework for field validation of blade heating systems performance	Q1/2027
4	Offshore wind	1 - State-of-the-art of offshore icing assessment	Q1/2028
5	Icing events complexity	1 - Review of current knowledge 2 - Future research needs	Q1/2028
6	Uncertainty	1 - Review of uncertainty in cold climate wind projects	Q2/2028
7	Climatic wind tunnel validations	1- Technical report on measurement technique recommendations and impact of surface roughness	Q1/2028
8	Dissemination	1 - Industry awareness 2 - Collaboration with other tasks 3 - Cold climate market size study (2025-2030) 4 - Recommended practices	1- Continuous 2- Continuous 3- Q1/2026 4- Q4/2028

13

日本の取り組み（寒冷地風車の制御戦略）

寒冷地風車開発の経緯

2011年	インフラ・システム輸出促進調査等委託事業として、独立系統地域における風力発電を利用したスマートマイクログリッドシステムの導入可能性を調査
2016年	国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業として、独立電力系統地域における寒冷地気候に対応した風力発電システムを実証
2017年	エネルギーの消費効率化等に資する我が国技術の国際実証事業として、風力発電システムを含むエネルギーインフラ実証事業可能性を調査
2021年	エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業として、風力発電システムを含むエネルギーインフラ実証事業を実施
2022年	IEA Wind Task54開始

寒冷地仕様風車の設計は、IEC61400-1第4版附属書L（委員会草案：2014年）およびGLテクニカルノート「寒冷地における極度の温度に対する風力タービンの認証 Rev.4（2013年）」を参照して開発された

14

日本の取り組み（寒冷地風車の仕様比較）

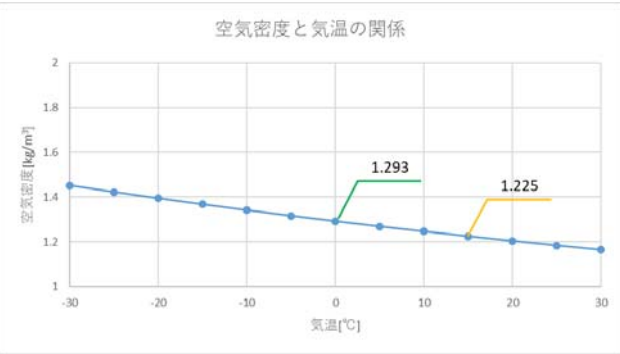
項 目		標準仕様	寒冷地仕様	極寒冷地仕様
設計条件（外気温）		15℃	0℃	
風速条件	カットイン	3.0m/s		
	カットアウト	25m/s		22m/s
停止時ピッチ角		88°		85°
温度仕様	運転温度	-15℃～+45℃	-30℃～+30℃	-35℃～+30℃
	停止温度	-20℃～+55℃	-40℃～+40℃	-50℃～+40℃
低温時出力制御		なし	-15℃以下	-30℃以下
センサー	風向風速計	風速計：カップ式×2 風向計：矢羽根式×2	超音波風向風速計の併用	
	気象センサー	なし	温湿度計、感雨計	温湿度計、感雨計
	着氷センサー	なし	あり(着氷予測)	あり(着氷検出)
材料	タワー	-20℃ (Charpy=27J)	-40℃ (Charpy=27J)	-50℃ (Charpy=27J)
	ブレード	普通コーティング	着氷防止コーティング	
ヒーティング		なし	FANヒータ 低温停止時のヒータON/OFFの切替え可能	FANヒータ 低温時は常にON
断熱材（ナセルカバー）		なし	5cm	8cm
その他		---	---	非常用発電機 (電源喪失時対策)

15

日本の取り組み（寒冷地風車の設計）

風車設計要件（荷重）

- 風車に作用する風荷重は、温度で変化する空気密度に依存する



風車設計要件（温度）

- 風車に使用する機械部品のほとんどの温度保証は -30℃であるため、機器の保護のため室内にヒーターや断熱材を設置（図は冷凍庫試験の様子）



16

日本の取り組み（寒冷地風車の気象観測）

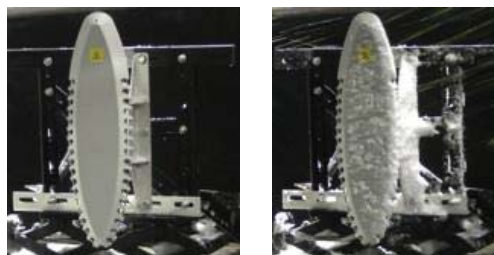
気象観測機器

- カップ式や矢羽根式の風況観測機器は凍結する可能性があるため、超音波風速計を使用
- 積雪と風速の関係を確認した
(図は着氷風洞試験の様子)



着氷検出機器

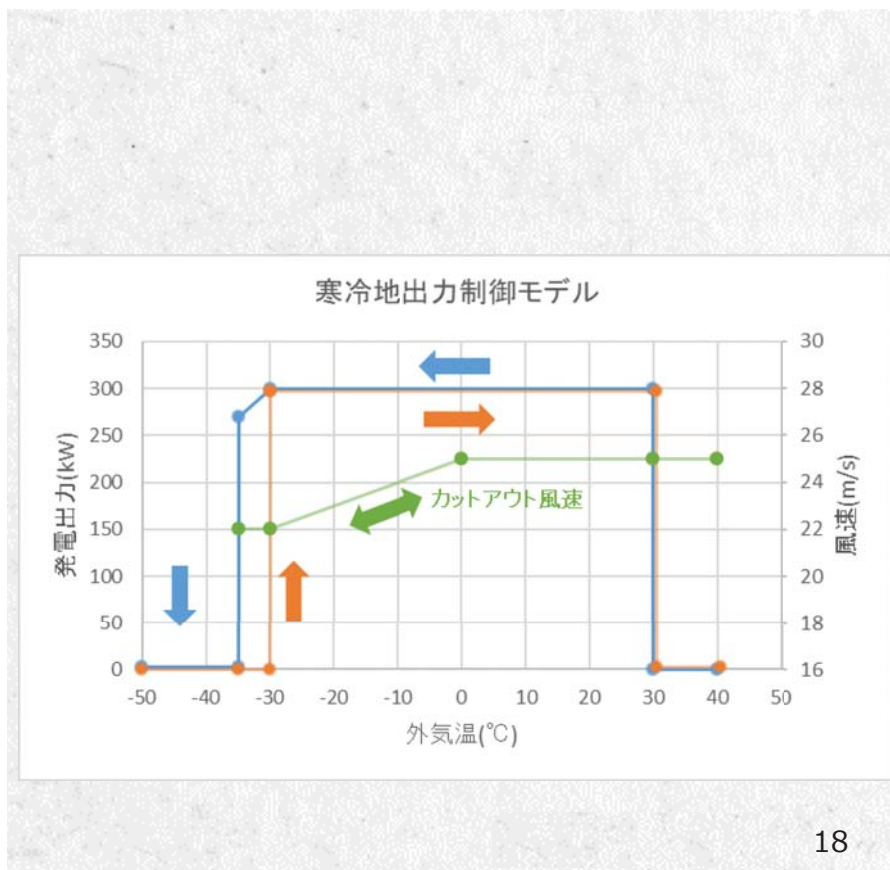
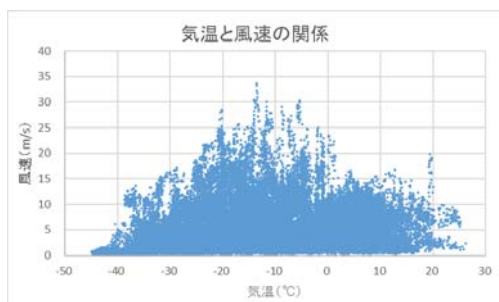
- 着氷の可能性を判断するための気象観測機器として、温湿度計や感雨計を追加
- 着氷センサーを追加し、着氷環境を判断
(図は着氷風洞試験の様子)



17

日本の取り組み (寒冷地風車の 運転制御)

風車の荷重設計計算は、気温0℃を基準として計算されているが、0℃以下で風車を運転する場合、カットアウト風速の判定基準を下げることで、風車にかかる荷重を低減する。また、-30℃を下回る環境では、定格出力を下げることで風車荷重を低減する

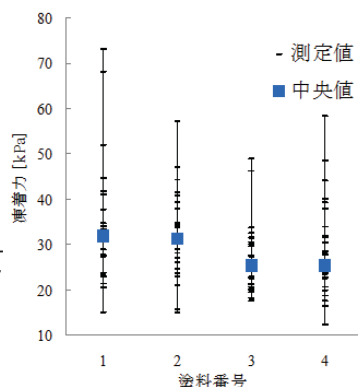


18

日本の取り組み（ブレード塗料試験）

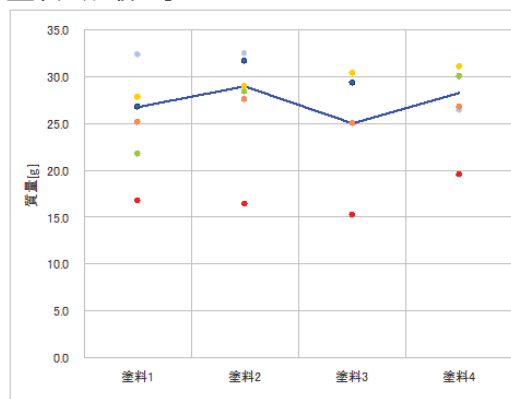
親水性試験

- 予め選定した4種の塗料より、親水性および撥水性の試験を実施
- 凍着力は、付着力試験装置で計測したせん断応力
- 塗料3、4が塗料1、2に比して20%低い



撥水性試験

- 縦軸は試験体に付着した氷の質量。着氷質量は、塗料3が最も小さい

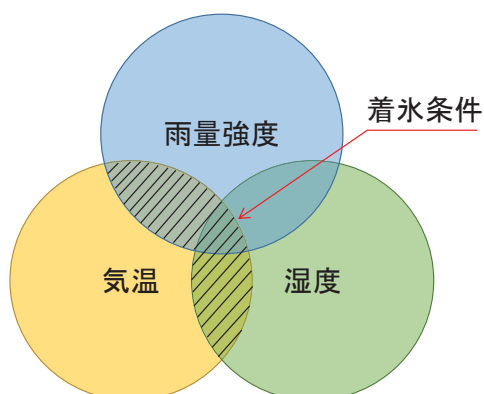


19

日本の取り組み（寒冷地風車の着氷対策）

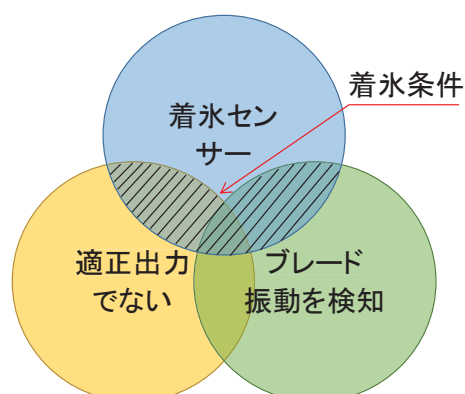
着氷予測

- 温湿度計と感雨計を用いて、着氷環境を判断し、運転を停止する



着氷検出

- 着氷センサーと風速に対する発電出力値およびナセル内の加速度計で運転状況を判断する



20



ありがとう ございました

株式会社駒井ハルテック

Task56(洋上風車動的解析コードの検証) 進捗報告

第14回 IEA Windセミナー

2025.09.24

ジャパンマリンユナイテッド株式会社
洋上風力プロジェクト部 吉本 治樹

報告内容

- Task56 概要
- Phase1 結果
- Phase2 進捗
- 日本としての取組み

Task56 概要

Task 56 : 洋上風車動的解析コードの検証 (Offshore Code Comparison Collaboration 7 Project – OC7)

▶Task取組み概要

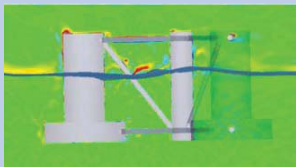
- 洋上風力発電システムの設計に使用される解析ツールの予測精度の評価・向上
- 2024年～2027年の4年間で、浮体式洋上風力発電設備を対象とした3つの現象に焦点を当てた活動を実施予定
- 現在（2025年9月時点）、Phase2に取り組中

Task56 スケジュール

	2024	2025	2026	2027
Phase1	→			
Phase2		→		
Phase3			→	

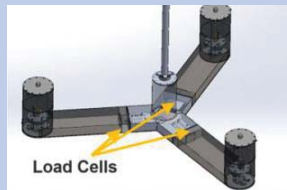
Phase 1 粘性流体力

- さまざまな風車浮体構造の流体力学的粘性荷重モデルの検証
- CFDによるバリデーション
 - モデル化方針の検討



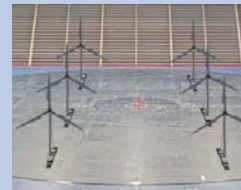
Phase 2 浮体弾性応答

- 水槽実験から得られた計測値との比較を通じて、風車浮体構造内のメンバーレベルの荷重の検証
- 浮体弾性検証
 - 全体構造解析



Phase 3 浮体式WFの空力

- 浮体特有の後流影響を考慮した、ウィンドファーム内の異なる場所の風車浮体荷重の検証
- ウィンドファームの空力検証
 - CFD解析



参加国

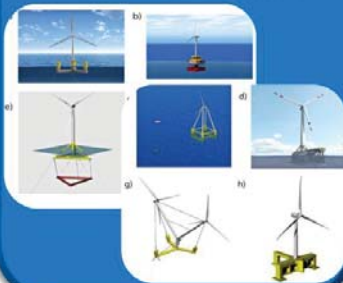
Belgium
CWEA
France
Germany
Ireland
Italy
Japan
Netherland
Norway
Spain
United Kingdom
United States

Task56の背景

▶Taskが取り組む課題

多様化する浮体デザイン

Novel Floating Designs



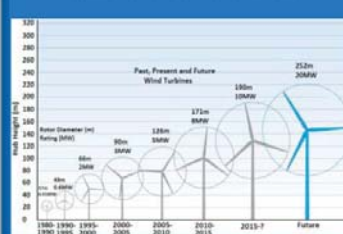
Innovation has brought new, unique floating wind designs → need to ensure we can accurately model them and continue innovation

Addresses Wind Grand Challenge* – hydrodynamics of enlarged wind turbines

大型風車浮体の流体力推定
→ Phase1

風車大型化

Increased Turbine Size



As we continue to grow turbine size to decrease cost, support structure has become more flexible → need to enable and validate flexibility in our tools

Addresses Wind Grand Challenge* – structural dynamics of enlarged wind turbines

大型風車浮体の構造動的特性把握
→ Phase2

浮体式ウィンドファームの計画

Floating Wind Farm Design



Wind systems don't operate in isolation → need to ensure we can accurately predict loads throughout a wind farm, especially for unique floating wake conditions

Addresses Wind Grand Challenge* – improved understanding of plant flow physics

ウィンドファームの流れ場理解
→ Phase3

Phase1 結果

Phase1 粘性流体力 (Viscous Loading)

▶Phase1の概要

目的: 浮体式洋上風力タービンプラットフォーム（FOWT）の粘性流体荷重のモデリング精度向上を目指す。
対象: 中程度の精度（mid-fidelity）モデリングツールを主に対象とし、一部の現象については高精度CFDも実施。
期間: 2024年1月～2025年3月

▶Phase1スケジュール

使用するツールや対象となる浮体を変え、複数の取組みを実施

- 主な取り組みは4つ（Phase 1a、1b、1c、CFD）
 - いずれも複数の組織により実施される数値解析結果と、事前に実施された水槽試験結果を**比較検証**し、解析手法の影響を調査

Table 1. Overall project timelines for OC7 Phase I.

		2024												2025		
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
1.1	Phase 1a: Component-level test campaign															
	Phase 1b: WINDMOOR Campaign															
	Phase 1c: FOCAL Campaign IV															
1.2	Develop suggested modeling and tuning practices (Joint publication planned)															
1.3	CFD Part I: Pontoon loads under forced oscillation															
	CFD Part II: Vortex-induced motion (Tentative)															

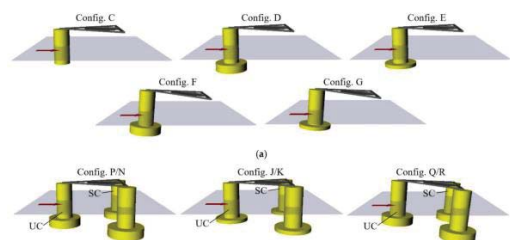
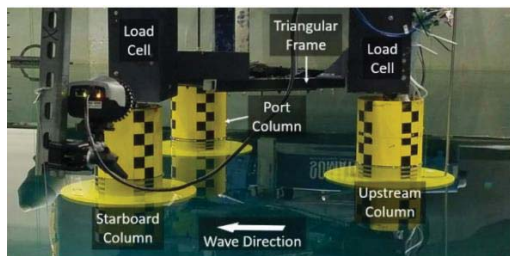
WP1.1 Phase1a Component-Level Test Campaign

▶Phase1a 解析条件

対象浮体: 固定構造（セミサブ型DeepCwind由来の円柱＋円形ヒュープレート）

目的: 粘性荷重が波力の低周波励起（Low-frequency hydrodynamic excitation）に与える影響の調査

実験: メイン大学の水槽実験（コンポーネント単位）



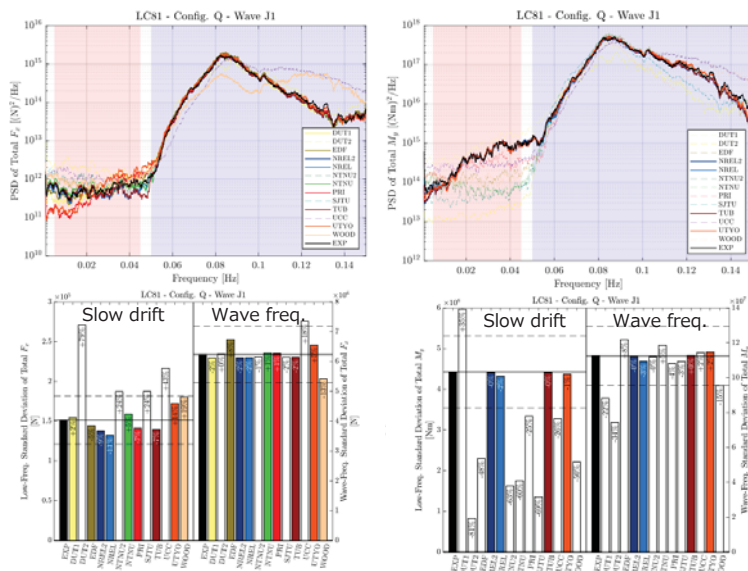
List of load cases to be simulated.

Load Case	Model Configuration	Wave Condition
LC 1.1	C (1 × Upper Column at UC position)	J1 ($H_s = 7$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 1.2	C (1 × Upper Column at UC position)	J2 ($H_s = 5$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 2.1	D (1 × Upper Column and Heave Plate 1 at UC position)	J1 ($H_s = 7$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 2.2	D (1 × Upper Column and Heave Plate 1 at UC position)	J2 ($H_s = 5$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 3.1	E (1 × Upper Column and Heave Plate 2 at UC position)	J1 ($H_s = 7$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 3.2	E (1 × Upper Column and Heave Plate 2 at UC position)	J2 ($H_s = 5$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 4.1	F (1 × Upper Column and Heave Plate 1 at UC position)	J1 ($H_s = 7$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 4.2	F (1 × Upper Column and Heave Plate 1 at UC position)	J2 ($H_s = 5$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 5.1	G (1 × Upper Column and Heave Plate 2 at UC position)	J1 ($H_s = 7$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 5.2	G (1 × Upper Column and Heave Plate 2 at UC position)	J2 ($H_s = 5$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 6.1	K (3 × Upper Column and Heave Plate 2)	J1 ($H_s = 7$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 6.2	K (3 × Upper Column and Heave Plate 2)	J2 ($H_s = 5$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 7.1	P (3 × Upper Column and Heave Plate 1)	J1 ($H_s = 7$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 7.2	P (3 × Upper Column and Heave Plate 1)	J2 ($H_s = 5$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 8.1	Q (3 × Upper Column and Heave Plate 1)	J1 ($H_s = 7$ m, $T_p = 11.9$ s)
LC 8.2	Q (3 × Upper Column and Heave Plate 1)	J2 ($H_s = 5$ m, $T_p = 11.9$ s)

WP1.1 Phase1a Component-Level Test Campaign

▶Phase1a 解析結果例

ID	Spectrum	Significant Wave Height, H_s [m]	Spectral Peak Period, T_p [s]	Peak Shape Factor, γ [-]	Duration [s]
J1	JONSWAP	6.9	11.9	3.3	11.030



- 23組織が比較解析に参加（日本からは東大殿）
- 浮体にかかる波荷重スペクトル(PSD)の解析結果を長周期成分、波周期成分に分け、水槽実験結果との整合性を比較
- 解析手法と解析精度との関係性を整理

Models that agree with the experiment in total low- and wave-frequency pitch moment on all three columns

	LC 6.1	LC 6.2	LC 7.1	LC 7.2	LC 8.1	LC 8.2
EDF						
NREL						
NREL2						
NTNU2						
TUB						
UCC						
UTYO						

WP1.1 Phase1b WINDMOOR Campaign

Phase1b 解析条件

対象浮体: INO WINDMOOR (円柱 + 三角形に配置された矩形ポンツーンのセミサブ浮体)
目的: 海象条件 (波高・周期) による流体力係数の変化を調査
実験: SINTEF Ocean提供のWINDMOOR実験データ (波 + 流れ)

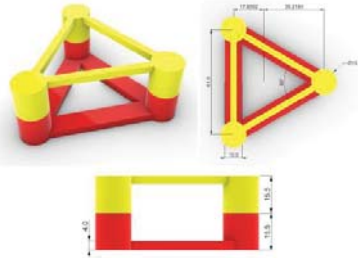


Figure 8. The INO WINDMOOR 12-MW floating offshore wind turbine platform. The section in red is below the still water level. All dimensions at full scale in meters and degrees.

Load Case	H_s [m]	T_p [s]	γ [-]	Wave Dir. [deg]	Duration [s]
5.1	3.74	7.0	4.90	0	TBD
5.2	6.19	9.0	4.90	0	TBD
5.3	11.0	12	4.90	0	TBD
5.4	3.74	12	1.00	0	TBD
5.5	6.19	9.0	4.90	90	TBD

Load Case	H_s [m]	T_p [s]	γ [-]	Wave Dir. [deg]	Duration [s]	Notes
6.1	3.74	9.0	1.49	0	TBD	
6.2	6.19	9.0	4.90	0	TBD	LC 5.2 with alternative wave realization
6.3	11.0	12	4.90	0	TBD	LC 5.3 with alternative wave realization
6.4	6.19	12	1.23	0	TBD	
6.5	14.97	14	4.90	0	TBD	
6.6	6.19	12	1.23	90	TBD	
6.7	6.19	12	1.23	0	TBD	With a constant body-fixed thrust of 1.57*10 ⁶ N at the tower top

比較対象量

Degree of freedom	Quantity	Description
Surge	ϕ_{sd}	Mean drift in surge
	ϕ_{sr}	Standard deviation of surge resonance motion
	ϕ_{sw}	Standard deviation of wave-frequency surge motion
Heave	ϕ_{hr}	Standard deviation of heave resonance motion
	ϕ_{hw}	Standard deviation of wave-frequency heave motion
Pitch	ϕ_{pr}	Standard deviation of pitch resonance motion
	ϕ_{pw}	Standard deviation of wave-frequency pitch motion

Phase1b 解析結果

Percentages of successful predication, defined as within +/-15% of experiment.

	Load Case	Surge			Heave		Pitch	
		ϕ_{sd}	ϕ_{sr}	ϕ_{sw}	ϕ_{hr}	ϕ_{hw}	ϕ_{pr}	ϕ_{pw}
Model calibration	LC 5.X	58.6%	87.1%	95.7%	77.1%	98.6%	68.6%	85.7%
Model validation	LC 6.X	64.5%	77.4%	94.6%	73.1%	94.6%	61.3%	67.7%
All cases	-	62.0%	81.6%	95.1%	74.8%	96.3%	64.4%	75.5%

不規則波解析と水槽試験の比較結果

- 高い整合性： Surge・Heave波周期動揺
- 低い整合性： Surge定常波漂流、ピッチピーク動揺

WP1.1 Phase1c FOCAL Campaign IV

Phase1c 解析条件

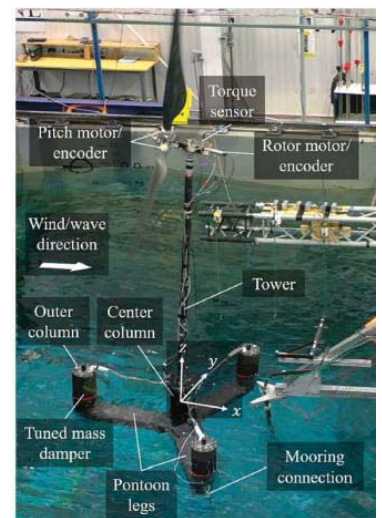
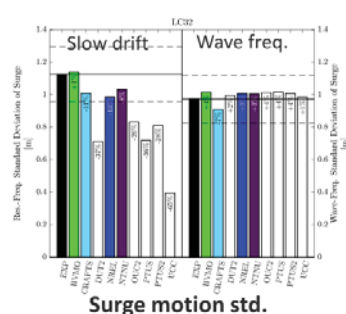
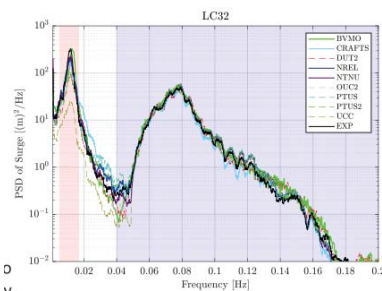
対象浮体: VoltturnUS-S (円柱 + Y字型ポンツーンのセミサブ浮体)
目的: Ia・Ibで得られた流体力係数モデルのブラインド検証
実験: FOCALプロジェクトの実験データ

Table 30. Irregular-wave (JONSWAP) load cases for blind validation.

Load Case	H_s [m]	T_p [s]	γ [-]	Duration [s]
3.1	3.1	8.96	1.80	9,294.6
3.2	8.1	12.8	2.75	9,754.4

Phase1c 解析結果

- 同様の C_{dw} を用いた4組織が比較よくSurge長周期動揺を再現
- 類似のデザインに対しては、共通の流体力係数モデルを適用できる可能性がある

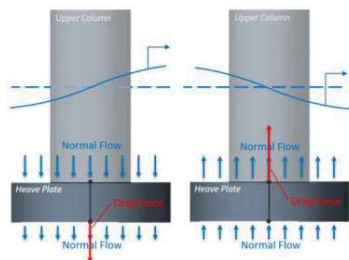


▶Phase1a~1cの比較検証を受けて

- 比較検証の結果、低周波Heave Force、低周波Pitch Momの推定精度に課題
- ポテンシャルモデルを用いる場合、**Suction-side-only drag model**が推定精度の向上に有効
 - ストリップ法（モリソン法）を用いる場合は不要である。
- NRELが用いたVelocity Filteringにより、推定精度が向上する可能性がある。

Suction-side-only drag model

$$F_{D_{Ax}} = \frac{1}{2} C_{D_{Ax}} \rho A |v_{r,n}| \max(v_{r,n}, 0)$$



Split drag force into two parts with

$$F_D = \alpha F_{D0} + (1 - \alpha) F_{Df}$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

$\alpha = 0$ drag based on filtered velocity only

$\alpha = 1$ drag based on unfiltered velocity only

Based on the unfiltered velocity, v_{rn}

$$F_{D0} = \frac{1}{2} C_D \rho A |v_{rn}| \max(v_{rn}, 0)$$

Based on the high-pass-filtered velocity, $\tilde{v}_{rn}$

$$F_{Df} = \frac{1}{2} C_D \rho A |\tilde{v}_{rn}| \max(\tilde{v}_{rn}, 0)$$



WP1.3 CFD Pontoon Loads under Forced Oscillation

▶WP1.3 CFD 解析条件

- CFDを用いた粘性流体荷重の高精度モデリングを通じて、中精度モデルの精度向上を目指す。
- 特に矩形ポンツーン、ヒーププレート、円柱構造に作用する粘性荷重の解析が焦点。
- Keulegan-Carpenter (KC) 数に基づく流体力係数の変化を調査。

▶WP1.3 解析結果

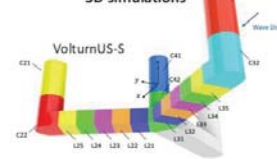
- 2.5Dシミュレーションにおいて、KC数とCdとの傾向が確認された。
- 3Dシミュレーションの結果、ポンツーンのCdが浮体の中央に近づくにつれて大きくなる傾向が確認された。

2.5D simulations

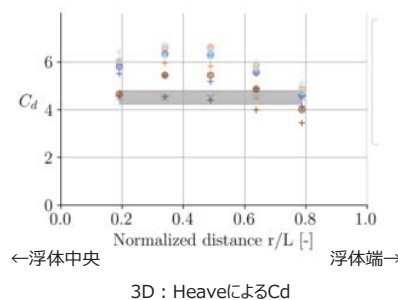
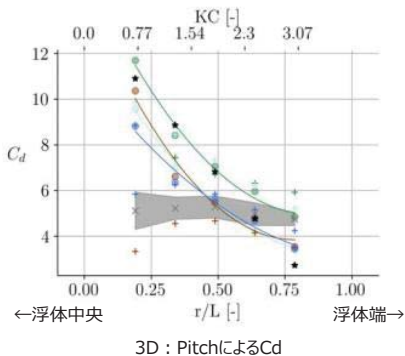
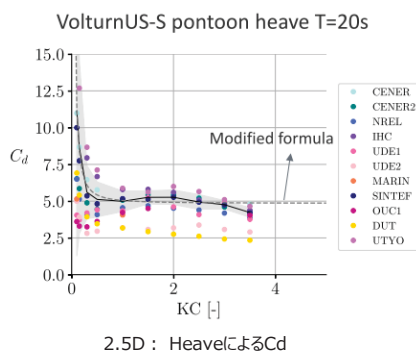


Investigate isolated pontoon loads with 2.5D forced oscillation simulations without free surface.

3D simulations



Investigate forced oscillations, free decay, fixed structure and floating structure in regular waves with outputting detailed loads on sub-components.

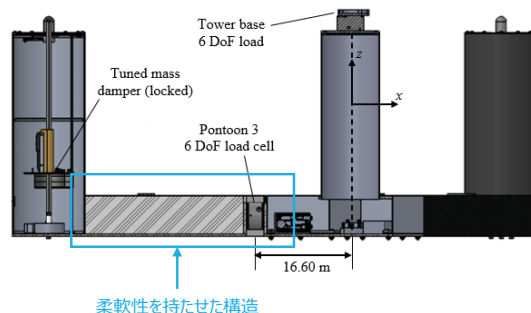
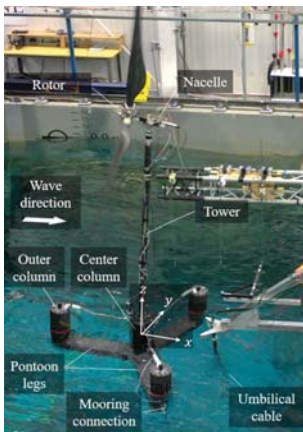


Phase2 進捗

Phase2 WP2.1 Substructure Flexibility

▶WP2.1 解析条件

目的: 浮体式洋上風力構造物内の部材レベルの荷重を検証・評価
背景: 過去のOC3~OC6では構造物を剛体として扱っていたが、OC7 Phase IIでは柔軟性（弾性）を考慮
対象浮体: IEA 15MW風車 + VoltturnUS-Sセミサブ型プラットフォーム（1:70スケール）
実験: FOCALプロジェクトの実験データ



荷重ケース一覧

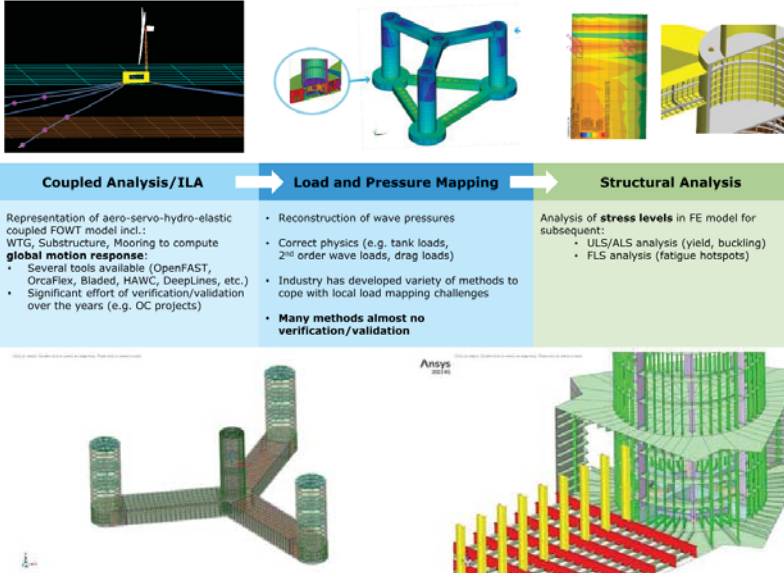
Load Case	Components included	Marine Conditions	Initial Conditions	Comparison Type
1.1	Platform pontoon (clamped at base*) and outer column	None	$F_z = 1.345 \times 10^7$ N (downward)	Static response
1.2	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Still water	Prescribed surge	Static response
1.3	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Still water	Prescribed sway	Static response
1.4	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Still water	None	Static response
2.1	Platform pontoon (clamped at base*) and outer column	None	None	Natural frequency and damping
2.2	Platform pontoon (clamped at base*) and outer column	Still water	None	Natural frequency and damping
2.3	RNA, tower (clamped at base), tower wire	None	None	Natural frequency and damping
2.4	RNA, tower (with tower base load cell and clamp underneath), tower wire	None	None	Natural frequency and damping
2.5	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Still water	None	Natural frequency and damping
3.1	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Still water	Surge = 4.10 m	Time series (t = 600 s)
3.2	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Still water	Heave = -3.05 m	Time series (t = 250 s)
3.3	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Still water	Pitch = -6.21 deg	Time series (t = 350 s)
4.1	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Regular waves: $H = 10.35$ m, $T_p = 13.5$ s	None	Time series (t = 2,560 s)
4.2	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Irregular waves: JONSWAP, $H_s = 3.1$ m, $T_p = 8.9$ s, $\gamma = 1.80$	None	Time series (t = 250 s)
4.3	RNA, tower (+ wire), platform, moorings, umbilical cable	Irregular waves: JONSWAP, $H_s = 8.1$ m, $T_p = 12.8$ s, $\gamma = 2.75$	None	Time series (t = 9,754 s)

H: regular wave height
 H_s : significant wave height
 T_p : regular wave period
 T_p : peak spectral wave period
 γ : peak enhancement factor
 t : time

*See Figure 6

▶WP2.2 解析条件

目的: 浮体式洋上風力（FOWT）の連成解析を用いた荷重マッピングによる荷重・応力を検証・評価
対象浮体: IEA 15MW風車 + VoltturnUS-Sセミサブ型プラットフォーム



荷重ケース一覧

Focus Area	DLC ID	Description
Mass/Inertia Check	1.1	Mass/Inertia Check
Static Load Checks	2.1	Static Hub Load Check
	2.2	Static Gravity Load Check
	2.3	Static Freely Floating Check
	2.4	Static Freely Floating Check
Frequency Analysis	3.1	Natural Frequency Analysis - unconstrained - Floater only
	3.2	Natural Frequency Analysis - constrained - Floater only
	3.3	Natural Frequency Analysis - unconstrained - Floater and WTG
	3.4	Natural Frequency Analysis - constrained - Floater and WTG
	3.5	Natural Frequency Analysis - floating in water
	3.6	Natural Frequency Analysis - floating in water
	3.7	Free Decay Surge
	3.8	Free Decay Heave
	3.9	Free Decay Pitch
RNA loads	4.1	Time Varying RNA Load
Regular Waves	5.1	Regular Waves - Constrained
	5.2	Regular Waves - Freely Floating
Irregular Waves	6.1	Irregular Waves - Waves Only - Constrained
	6.2	Irregular Waves - Waves Only - Freely Floating
	6.3	Irregular Waves - Waves + RNA Load - Freely Floating

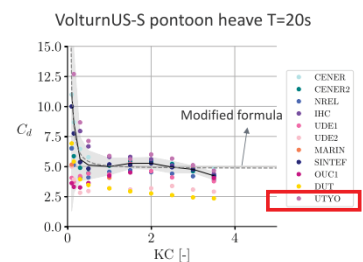
日本としてのTaskへの取り組み

- 各登録有識者様のご協力により、取り組まれている比較解析に参加、結果をTaskに提供。
- 面着会議を含む定例会議に出席、継続的に存在感をアピール

▶Phase1への取組み

- 東京大学 (Rodolfo先生)**において、流体力解析を実施いただきTaskに提出。
 - 全23組織が参加した中で、最後まで解析を終え、**4番目に高精度な解析**。
 - 高い技術力で十分に存在感を示す。
- 東京大学 (平林先生)**において、CFD解析を実施いただきTaskに提出。
 - 計算負荷の極めて高いCFD解析を実施、Task共著論文にもご協力。

	Pass Rate
DUT1	0.87
DUT2	0.28
EDF	0.25
NREL	0.83
NREL2	0.76
NTNU	0.83
NTNU2	0.74
OUC2	0.75
PRI	0.72
SITU	0.52
TUB	0.80
UCC	0.41
UTYO	0.74
WOOD	0.17
Pass Rate	

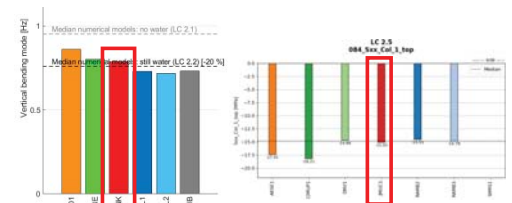


▶Phase2への取組み

- ClassNK 樋口様**において、連成解析を実施いただきTaskにご対応中。
 - 参加検討中：大阪大学 飯島先生
- JMU**が構造解析を実施しTaskに対応中。
 - 参加検討中：海上技術安全研究所 中條様

▶会議出席

- In-Person Meetingを含む全ての会議に日本から出席。
 - 2024年6月13日 @シンガポール
 - 2025年1月17日 @ノルウェー
 - 2025年6月26日 @カナダ
 - 【予定】2025年10月27日 @フランス



ご清聴ありがとうございました

IEA Wind Task 52 : 風ライダーの大規模展開 Large-Scale Deployment of Wind LiDAR

清水建設株式会社
種本 純

Task 52の概要

- IEA Wind Task 52
 - 正式名称 : Large-Scale Deployment of Wind LiDAR (風ライダーの大規模展開)
 - 別名: (Wind) Lidar Task
 - 2011年に発足したTask 32: Wind LIDAR systems for Wind Energy Deploymentの後継タスク
- OA (オペレーティングエージェント)
 - Julia Gottschall (Fraunhofer IWES)
- 目的
 - 風ライダーを最適な風況観測ツールにするための研究に取り組むことで、将来風ライダーの使用が容易になり、風力発電の発展を可能にするに利点と機会をもたらすものにする。
- 活動内容
 - 風ライダーにとって重要となる、様々なテーマへの取り組み
 - 他のTaskとコラボレーションによる知識の共有
- 活動期間
 - 2022年6月~2026年5月 (4年)
(2022年5月24日キックオフ)



Task 52 参加国
(Task 52HPより引用)

Task 52の特徴

- オープンなグループ
 - LinkedInのフォロワー数は2,035人（2025年6月現在。昨年同時期より約200人増）
 - General Meeting（全体会議）
 - ✓ 2023年6月（オンライン）：108名
 - ✓ 2024年5月（対面）：58名

Join our Task 52 community ...



2,035 (Stand: 30 June 2025)
followers on LinkedIn
(<https://www.linkedin.com/showcase/4037465/>)

Presentations from Lunch Seminar Series are also shared here



Zenodo community
(<https://zenodo.org/communities/ieawindtask52/>)
for published documents

Our website:
<https://iea-wind.org/task52/>



Mailing list for regular newsletter (every six months) and event invitations – to be added (and for all further requests) send e-mail to IEAWind_Task52@iwes.fraunhofer.de

All working groups have their individual channel in MS Teams (coordinated by the OA)

Task 52 Lunch Seminar
資料 (2025)より引用

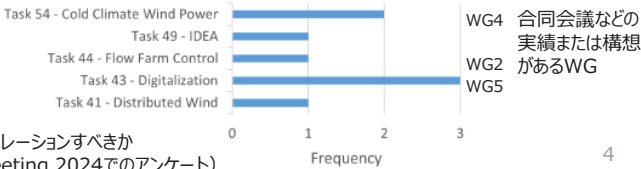


研究テーマと日本からの参加者

	テーマ	役割	ワーキンググループ (日本からの参加者（50音順敬称略）)	予定成果物
#1	ユニバーサル流入風特性 Universal inflow characterization	風車への流入条件に関する最良の情報 を取得して使用するためのツールと 方法論への取り組み。	WG1：乱流強度 WG2：ライダーアシスト制御（LAC） 川端（産総研）	報告書（エキスパートレポート） 推奨事項 (Recommended Practice)
#2	風況観測マストの代替 Replacing met masts	サイト評価用のさまざまなタイプの風ラ イダーとソフトウェアの選択と使用に関 するガイドラインの作成。	WG3：複雑地形 吉村（GPI） WG8：複雑地形のナセル搭載ライダー (2024年3月発足)	報告書（エキスパートレポート）
#3	風ライダーの繋がり Connecting wind lidar	LIDAR データをFAIRにすることで、 ユーザーの観測精度改善の支援と、 LIDAR とデータの価値の創出	WG4：寒冷地 WG5：デジタル化 WG7：ライダーオントロジ	報告書（エキスパートレポート） 報告書（エキスパートレポート） 論文
#4	洋上風力の展開促進 Accelerating offshore wind deployment	洋上風力プロジェクトのライフサイクル 全体における主要技術としてのライダー の推進。	WG6：洋上スキャニングライダー 植田（WINC）、種本（清水建設）、 吉村（GPI）、渡邊（ERE） WG9：浮体式ライダー (2025年7月発足)	推奨事項 (Recommended Practice) IEC TS 61400-50-4の出版後 のレビュー

*FAIR（Findable（見つけられる）、Accessible（アクセスできる）、Interoperable（相互運用できる）、Reusable（再利用できる））。

- 様々なテーマが並列に動いているのが特徴
- 他のタスクとの連携



どのタスクとコラボレーションすべきか
(General Meeting 2024でのアンケート)

タスク全体の工程

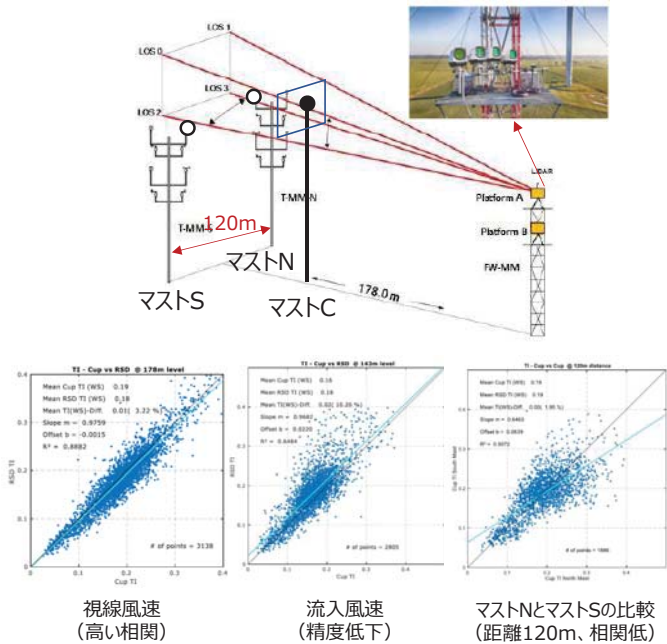
2022年6月 2023年6月 2024年6月 2025年6月 2026年6月

	1年目				2年目				3年目				4年目			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
全体会議	'22/5				'23/6			'24/5						'25/9		
年間進捗報告							'23/12			'24/11				'25		
ニュースレター (年2回)				'23/1	'23/11	'24/2		'24/6		'24/12		'25/6				
テーマ成果物								WG3,5 (遅れ) WG7 (完了)						WG1, 8,9		WG2, 4, 6
ランチセミナー			'23/2				'24/2-3						'25/6-7			
他タスクとの合同会議 その他、イベント	Task 41,54 '22/10		WESC ミニシンポ '23/5 WG8ワークショップ '23/5 (日本開催)						IEC PT 50-5 '24/11 Task 44 '24/10 NAWEA Wind Tech サイドイベント '24/10				Task 57 '25/06			

5

WG1：乱流強度

- 目的
 - 様々なライダーに関する乱流強度の推定手法の改善
- これまでの活動
 - ナセル搭載ライダーによる乱流強度推定手法ラウンドロビンを実施。
 - ライダーとマストの乱流強度観測値の空間代表性が違い、単純な検証に意味がないことに気づいた（ライダーは REWS、マストは1点）。
- 今後の方向性
 - ライダーで計測した乱流強度の用途別（発電量、パワーカーブ、荷重、寿命延長）の解釈と将来の標準化に向けた提案をまとめる。
- 成果物
 - 文献調査とその報告書。ライダーの乱流強度をIECに取り込むためのアプローチ方法の提案（2026年5月）

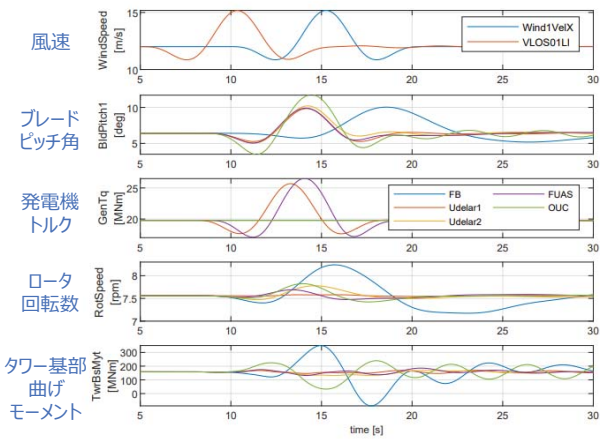


視線風速（高い相関） 流入風速（精度低下） マストNとマストSの比較（距離120m、相関低）
ナセル搭載ライダーとマストの観測値の比較
WESC 2023 Mini sympo資料より引用

6

WG2 : ライダーアシスト制御 (LAC)

- 目的
 - LACの経験と議論を交換するためのコミュニティの提供
 - LACの利用の促進、ベンチマーク用のオープンソースツールの開発
- これまでの活動
 - LACのオープンソースツールを開発し、OpenFAST ※に実装。IEA 15MWリファレンス風車（着床式、浮体式）を題材とした例題を作成し、githubで公開。
 - 開発したツールの、演習、ベンチマーク、新しいアイデア開発のための Summer Gameを開催。
 - ✓ 極値ガスト（EOG）、乱流流入風18m/s、DLC1.2（疲労荷重評価）について、評価関数を設定して、参加者で評価関数の最小化／最大化を競い合った。
 - ✓ 各ケースにより、風車の制御方法やナセルと搭載ライダーのスキャン設定など、最適な方法の傾向がつかめた（Schlipf et al. 2025）。
 - Task 44とのJoint workshopの開催。産総研の嶋田様がNEDO事業のスキャニングライダーの成果について講演（オンライン）
- 成果物
 - LACの推奨事項（Recommended Practices）（2026年5月）



FB（初期設定（フィードバック制御）、J=0.849）

1. Udelar1:	0.0746	3. FUAS:	0.3110
2. Udelar2:	0.1926	4. OUC:	0.8291

評価関数 (最小化)
$$J = \frac{\max(|\Omega - \Omega_0|)}{\Omega_0} + \frac{\max(|M_{yT} - M_{yT0}|)}{M_{yT0}}$$

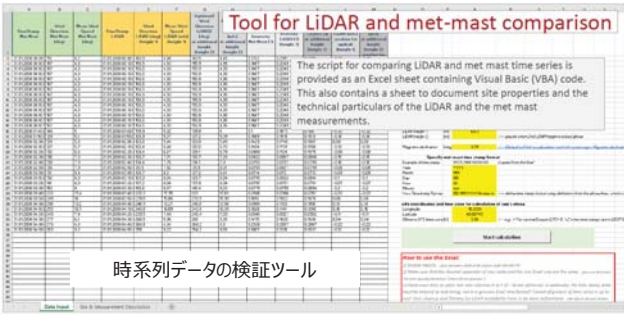
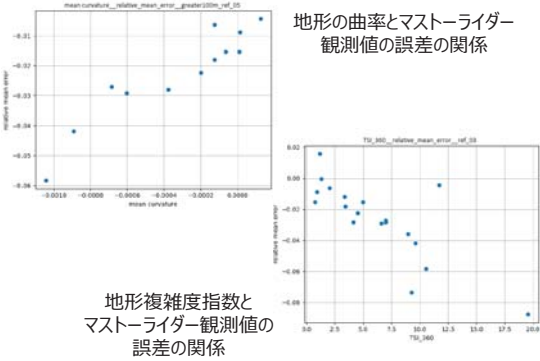
ロータ回転数一定 タワー曲げモーメント一定

Schlipf et.al.(2025)より引用

※OpenFAST : NRELが開発したオープンソースの風車荷重解析ツール

WG3 : 複雑地形

- 目的
 - 複雑地形上でライダーの展開と補正方法の適用性、その限界を明らかにする。
- これまでの活動
 - Task 32時代に実施した、複雑地形上のライダー観測値の補正手法と検証結果のレポートを作成（2022年12月公開）。
 - 引き続き鉛直ライダーとマストの検証を実施中。地形評価ツール、時系列データの検証ツールを作成、ユーザー間で共有し、評価方法の統一に取り組んでいる。
- 成果物
 - 複雑地形での鉛直LiDARの適用に関するガイドライン（2025年上旬（当初予定））



REPORT

IEA Wind TCP Task 32: Comparative Exercise on Ground Based Lidar in Complex Terrain

Authors: Alexander Söhl (Energiewerkstatt e.V.)
Sara Küller (Metsätest AG)
Johannes Cordes (Deutsche WindGuard Consulting GmbH)
Oliver Gröning (Plansee Deutschland GmbH)
Andreas Black (Vestas France)
Rafaela Viala (Green Power Investment)

Revision 0
December 2022

Task 32レポート (2022)
日本から吉村様 (GPI) が著者と
して貢献

Task 52 General Meeting(2024)資料より引用

WG8：複雑地形のナセル搭載ライダー

目的

- 複雑地形の性能計測とパワーカーブ検証の業界コンセンサスを作る。

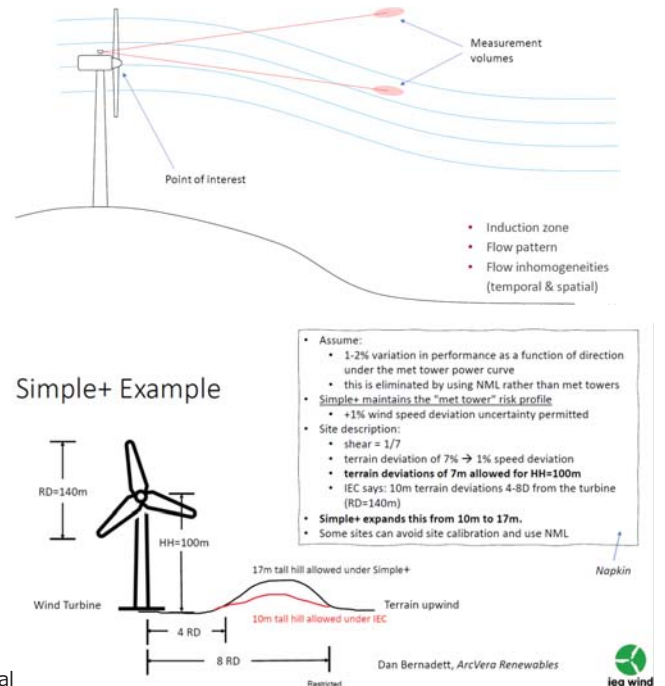
これまでの活動

- 2024年3月にキックオフ会議。
- ナセル搭載ライダーは常に風車の上流を計測でき、地形の制約を緩和できれば利点があるため、IECで定義されるシンプル地形の条件を緩和した場所で使えるようにしたい。草案を協議中。

例：マスト観測には構造物の影響により風向によって1~2%観測値の変動があるが、これをNML使用時にはこれと同等の範囲まで地形複雑度の制約の緩和をする。

成果物

- 「シンプル+（少し複雑）」な地形に関するコンセンサスと、複雑地形の観測キャンペーンの推奨事項のまとめ（2025年末）



9

WG4：寒冷地

目的

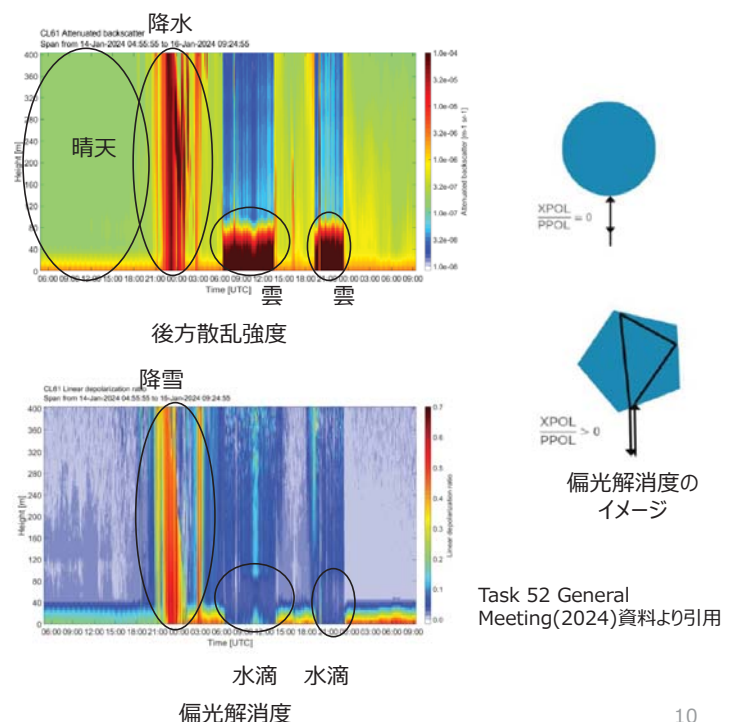
- 寒冷地でライダーのデータ取得率が低い理由の原因究明とデータ取得率の改善
- ライダーによる着氷検出手法

これまでの活動内容

- ライダーメーカーが開発した低エアロゾルでのデータ取得率向上手法を検証。
- VaisalaのC61というシーロメーター（ライダー原理による雲高測定器）による着氷検出手法の開発に成功し、WindEuropeで発表
 - ✓ 後方散乱強度により、晴天時のエアロゾル、降水、雲の区別可能
 - ✓ 偏光解消度（垂直偏光（XPOL）と水平偏光（PPOL）の比）により、雲や降水のタイプを区別可能
 - ✓ 気温の情報は得られないので、気象モデルで代替し、上記と組み合わせて着氷検出
 - ✓ 風ライダーのシグナルで検出できるかWindCube V2とZX300で検証中。

成果物

- 技術ノートまたはプレゼンテーション資料（2026年5月）



10

WG5 : デジタル化

- 目的
 - ライダーと風力発電所のライフサイクル全体にわたるデジタル化のビジネスケースの特定
 - 既存のソリューションとのギャップの特定
 - 例：風況データアナリストが新しい種類のライダーデータの分析の準備をしたい→データが入手できない→サンプルデータ集を作成して公開する。
 - ライダーオートロジーやオープンソースツールに基づくデータ処理などによるデジタル化の実演
- これまでの活動内容
 - ライダーのサンプルデータを集め、githubで公開
 - ライダーのユーザーストーリー、直面する課題・内容・業種、解決のためのビジネスケース、解決策、必要な研究開発をデータベースとしてまとめた。
 - 文章化方法について検討中。
- 成果物
 - デジタル化に関するレポート（2025年上旬（当初予定））

Task 52 General Meeting(2024)資料より引用

Data samples

ID	Device	Operating mode	Format	Source	Link to data	Description	License
0	ZXC300	VAD	Manufacturer's own	Data provided by ZV Lidars	drive.google.com	Data are direct from the wind lidar and have not been modified.	no license provided
1	WindCube V1	DBS	Manufacturer's own	Data provided by CU Boulder through A2x	a2x.energy.gov	According to the metadata, data files are direct from the wind lidar and have not been modified.	CC0 Public Domain Dedication
2	WindCube V2.1	DBS	Manufacturer's own	Data provided by NREL through A2x	a2x.energy.gov	According to the metadata, data files are direct from the wind lidar and have not been modified.	CC0 Public Domain Dedication
3	WindCube 200s	3-D scanning	Manufacturer's own	Data provided by UTD through A2x	a2x.energy.gov	According to the metadata, data files are direct from the wind lidar and have not been modified.	CC0 Public Domain Dedication
4	Halo XR	3-D scanning	Manufacturer's own	Data provided by AWS through A2x	a2x.energy.gov	According to the metadata, data files are direct from the wind lidar and have not been modified.	CC0 Public Domain Dedication

ライダーサンプルデータ集

Database of wind lidar user stories ...

Design	Manufacturing	Lid
on land offshore Now A wind lidar product owner specifying a new product on land offshore Now A wind lidar designer creating a new wind lidar design on land offshore Now A wind lidar designer seeks to	on land offshore Now A wind lidar manufacturing technician needs to validate components for use in a wind lidar on land offshore Now A wind lidar designer seeks to improve an existing design on land offshore Now A wind lidar business manager	on land offshore Now A lidar verify 200m on land offshore Now A data verify requin on land offshore Now

ユーザーストーリーデータベース

WG7 : ライダーオートロジー

- 目的
 - Lidarに関する明確な語彙の開発
 - Lidar知識のFAIR化（Findable, Accessible, Interoperable and Reusable）
- これまでの活動内容
 - Lidar Ontologyに関する論文をRemote Sensingに投稿、受理された。
- 【概要】

ライダーの知識（概念、用語）の標準化に向け、階層化した統制語彙の用語集を作成、翻訳（スペイン、イタリア、中国語）、ダウンロード、検索、フィルタリング、他ソフトへのインポート機能の開発をした
- 成果物：Lidar Ontologyに関する論文をオープンアクセスジャーナルに投稿（済）



Technical Note
An Ontology for Describing Wind Lidar Concepts

Francisco Costa ^{1,*}, Ashim Giyanani ², Dexing Liu ¹, Aidan Keane ³, Carlo Alberto Ratti ⁴ and Andrew Clifton ⁵

- ¹ Institute of Aircraft Design, University of Stuttgart, Allmandring 5b, 70569 Stuttgart, Germany; liu@ibf.uni-stuttgart.de
 - ² Fraunhofer IWES, 27572 Bremerhaven, Germany; ashim.giyanani@wes.fraunhofer.de
 - ³ Wood Renewables, Floor 2 St Vincent Plaza, 319 St Vincent Street, Glasgow G2 5LP, UK; aidan.keane@woodplc.com
 - ⁴ Enlight Renewable Energy, Ha'amal St, Afek Industrial Park 13, Rosh Ha'ayin 4809249, Israel; carloalberto@enlightenergy.eu
 - ⁵ TCU Enerlace, TTI GmbH, Nobelstrasse 15, 70569 Stuttgart, Germany; andyclifton@enerlace.de
- * Correspondence: costaf@ibf.uni-stuttgart.de; Tel.: +34-691-020-173

Abstract: This article reports on an open-source ontology that has been developed to establish an industry-wide consensus on wind lidar concepts and terminology. The article provides an introduction to wind lidar ontology, provides an overview of its development, and provides a summary of its aims and achievements. The ontology serves both reference and educational purposes for wind energy applications and lidar technology. The article provides an overview of the creation process, the outcomes of the project, and the proposed uses of the ontology. The ontology is available online and provides standardisation of terminology within the lidar knowledge domain. The open-source framework provides the basis for information sharing and integration within remote sensing science and fields of application.

Keywords: wind energy; wind lidar; remote sensing; wind characterisation; domain knowledge; ontology; open-source



Citation: Costa, F.; Giyanani, A.; Liu, D.; Keane, A.; Ratti, C.A.; Clifton, A. An Ontology for Describing Wind Lidar Concepts. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 1982. <https://doi.org/10.3390/rs16111982>

Academic Editor: Qinghua Guo

WG6：洋上スキャニングライダー

・目的

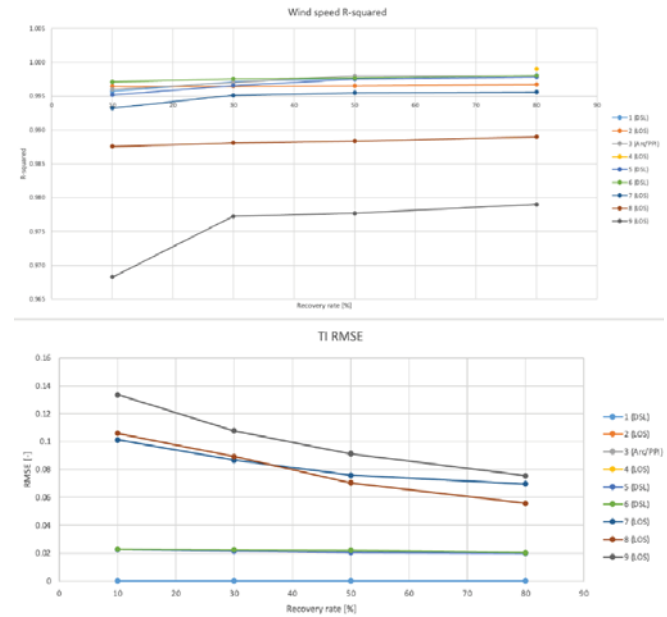
- ユーザーの経験と推奨事項から、ベストプラクティスを作成し、その他のライダー技術と同様に、より多くのスキャニングライダーの利用を実現にする。

・これまでの活動内容

- 日本でワークショップを開催（2023年5月）
 - ✓ 日本提案のIEC PT61400-50-5（スキャニングライダーを使用した風観測の技術仕様（TS））の国際提案の承認に繋がった。
 - ✓ [IEA Wind Annual Report 2023 \(Task 52\)](#) にも取り上げられた
- Datathonと呼ばれるデータ分析を実施中。日本からは嶋田様（AIST）、渡邊様（ERE）がデータ提供で貢献。
 - ✓ Datathon 1：10分間内のデータ取得率別の精度分析
 - ✓ Datathon 2：視線風速と水平風速の検証と不確かさの評価
 - ✓ Datathon 3：ハードターゲットテスト

・成果物

- スキャニングライダーに関する推奨事項（Recommended Practices）（2026年5月）



Datathon 1の結果
Task 52 General Meeting(2024)資料より引用

13

WG9：浮体式ライダー（FLS）

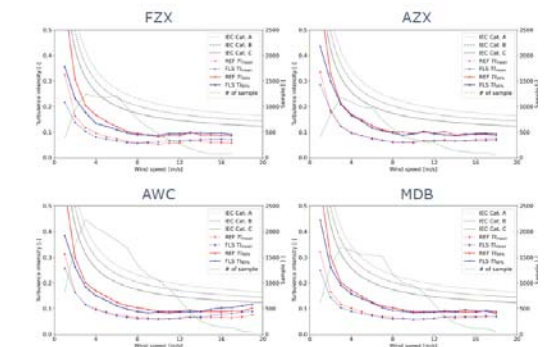
- ・ 2025年7月発足。Task 52最後のWG
- ・ 2025年7月に開催されたランチセミナーで2件の関連研究発表（日本から内山様（神戸大／RWD）が発表）

・目的

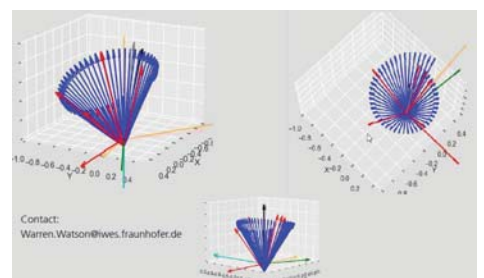
- 浮体式ライダーシステムの運用・開発の技術的疑問に対処する
 - ✓ 技術成熟度とバンカビリティの評価
 - ✓ データ品質の要求事項（有効データ率、精度、不確かさなど）
 - ✓ 観測キャンペーンの設定
 - ✓ FLSの技術的限界と機械学習の有効性
 - ✓ 許容不確かさのコンセンサス

・成果物

- 技術的な疑問に対処・回答するコンセンサス文章（2026年初旬）
 - ✓ 2025年に出版された、IEC TS 61400-50-4（浮体式ライダーを使用した風観測の技術仕様）に記載がない事項に関する回答
 - ✓ 乱流強度の補正などにも焦点が当てられる



Uchiyama et al.(2025)



Watson et. al. (2025)

Task 52 Lunch Seminar 2025資料より引用

14

まとめ

- Task 52は4つのテーマ、9つのWGから構成される。
- 引続き、風ライダーの利用を加速させるための共同研究を続ける。
- 最終年度に入り、今後各WGで成果をまとめる。

	テーマ	役割	ワーキンググループ	予定成果物
#1	ユニバーサル流入風特性 Universal inflow characterization	風車への流入条件に関する最良の情報を取得して使用するためのツールと方法論への取り組み。	WG1：乱流強度 WG2：ライダーアシスト制御（LAC）	報告書（エキスパートレポート） 推奨事項 (Recommended Practice)
#2	風況観測マストの代替 Replacing met masts	サイト評価用のさまざまなタイプの風ライダーとソフトウェアの選択と使用に関するガイドラインの作成。	WG3：複雑地形 WG8：複雑地形のナセル搭載ライダー（2024年3月発足） WG4：寒冷地	報告書（エキスパートレポート） 報告書（エキスパートレポート） 報告書（エキスパートレポート）
#3	風ライダーの繋がり Connecting wind lidar	LIDAR データをFAIRにすることで、ユーザーの観測精度改善の支援と、LIDAR とデータの価値の創出	WG5：デジタル化 WG7：ライダーオントロジ	報告書（エキスパートレポート） 報告書（エキスパートレポート） 論文
#4	洋上風力の展開促進 Accelerating offshore wind deployment	洋上風力プロジェクトのライフサイクル全体における主要技術としてのライダーの推進。	WG6：洋上スキャニングライダー WG9：浮体式ライダー（2025年7月発足）	推奨事項 (Recommended Practice) IEC TS 61400-50-4の出版後のレビュー

Task 52に関する参考資料

- Ontology Viewerホームページ：
<http://data.windenergy.dtu.dk/ontologies/view/ontolidar/en/index/>
➢ ライダーオントロジ（用語集）
- Task 52ホームページ：<https://iea-wind.org/task52/>
➢ Task 52の全般情報
- Task 52 GitHub：<https://github.com/IEAWindTask52>
➢ LACオープンソースツール、ライダーデータサンプルなど
- Task 52 LinkedIn：<https://de.linkedin.com/showcase/iea-wind-task-52>
➢ Task 52に関するイベントの案内など
- Task 52 Zenodo：<https://zenodo.org/communities/ieawindtask52>
➢ Task 52の会議資料、成果物、関連出版物など

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

第14回 IEA Wind セミナー 2025年9月24日

Task 57 JAM 概要

WINC

◆ 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（15カ国）

- ベルギー、中国、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、インド、イタリア、日本、オランダ、ノルウェイ、スペイン、スイス、スウェーデン、米国

◆ OA

- NREL

◆ サブタスク

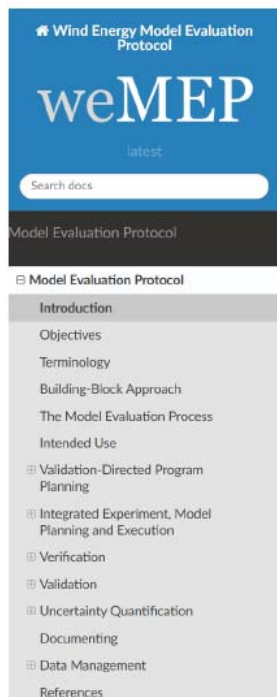
- サブタスク1: マネジメント
 - タスクの実現と時間の管理。スコーピング、予算管理。
- サブタスク2: アウトリーチ
 - 技術ワーキングの価値を最大化：多様な利害関係者のコミュニティからのインプットを促進し、技術ワーキングの終了時に実用的なアウトプットを普及させ、技術ワーキングの価値を最大化
- サブタスク3: ベンチマーク
 - コミュニティ調査をし、ベンチマークに十分な関心があった場合、実験データセットの所有者と協力してベンチマークリーダーを割当。ベンチマークの定義、実行、完了までの活動を開始
- サブタスク4: 不確かさ
 - 不確かさの定量的な推定により、サブタスク3を支援

スケジュール	ベンチマーク	機関	内容
Spring 2024	AWAKEN plant wake	NREL	ウィ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
Fall 2024	RAAW rotor inflow	NREL	流入風、平坦地形
Spring 2025	WINSSENT	WindForS	複雑地形、2台の風車
Fall 2025	AWAKEN waves	NREL	ランプ、安定成層、内部重力波
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



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 neither a one-time nor a V&V exercise as possible in

◆ 専門家からのフィードバックを得ること

- JAMの目的の一つとして、ベンチマークを通した専門家のフィードバックが挙げられる

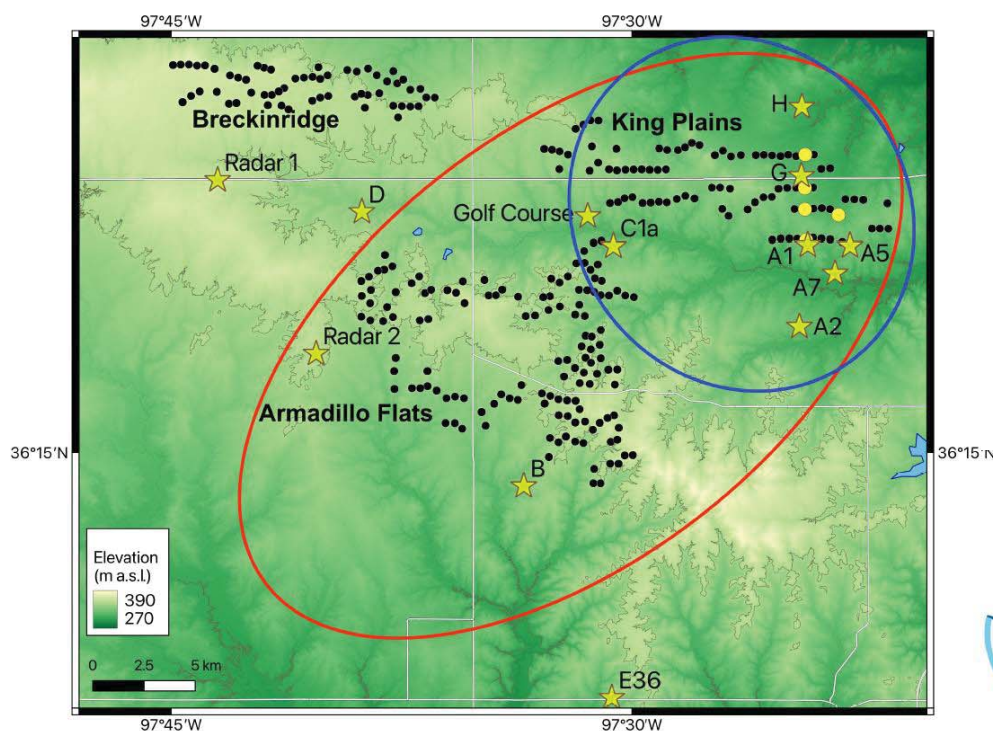
◆ より一般化された質問をJAMコミュニティに問う

あなたが担当している具体的な業務において、どの業務に時間を割くべきか？

◆ アンケート結果は、集約して、今後公開予定

第14回 IEA Wind セミナー 2025年9月24日

AWAKEN ウェイクベンチマーク用の完全なデータセット



- 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



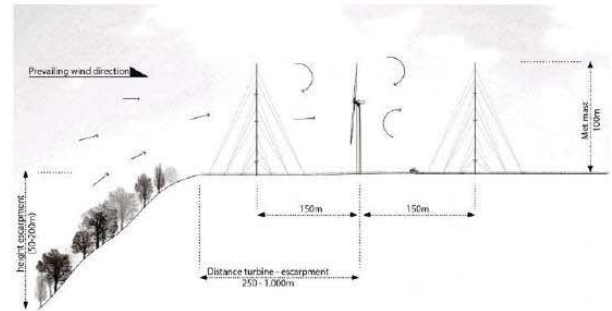
ARM: Atmospheric Radiation Measurement
SGP: Southern Great Plains

参考 <https://zenodo.org/records/11507768>

第14回 IEA Wind セミナー 2025年9月24日

- 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]

参考 <https://zenodo.org/records/11507768>

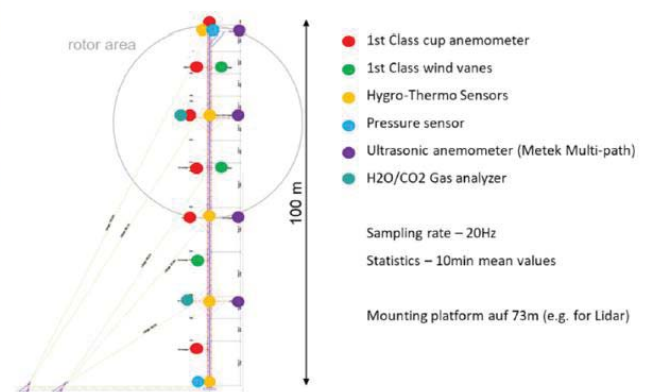
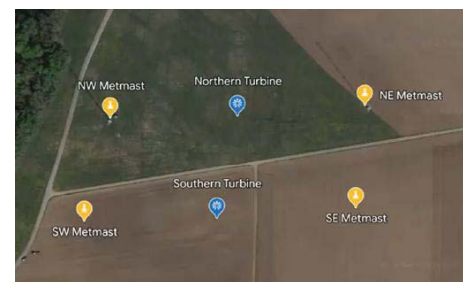
第14回 IEA Wind セミナー 2025年9月24日

7

WINSENT 研究テストサイト [2/3]

◆ 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ウインドプロファイラ
- 3つの渦共分散システム & 雲高計
- 無人航空機システム



[ZSW]

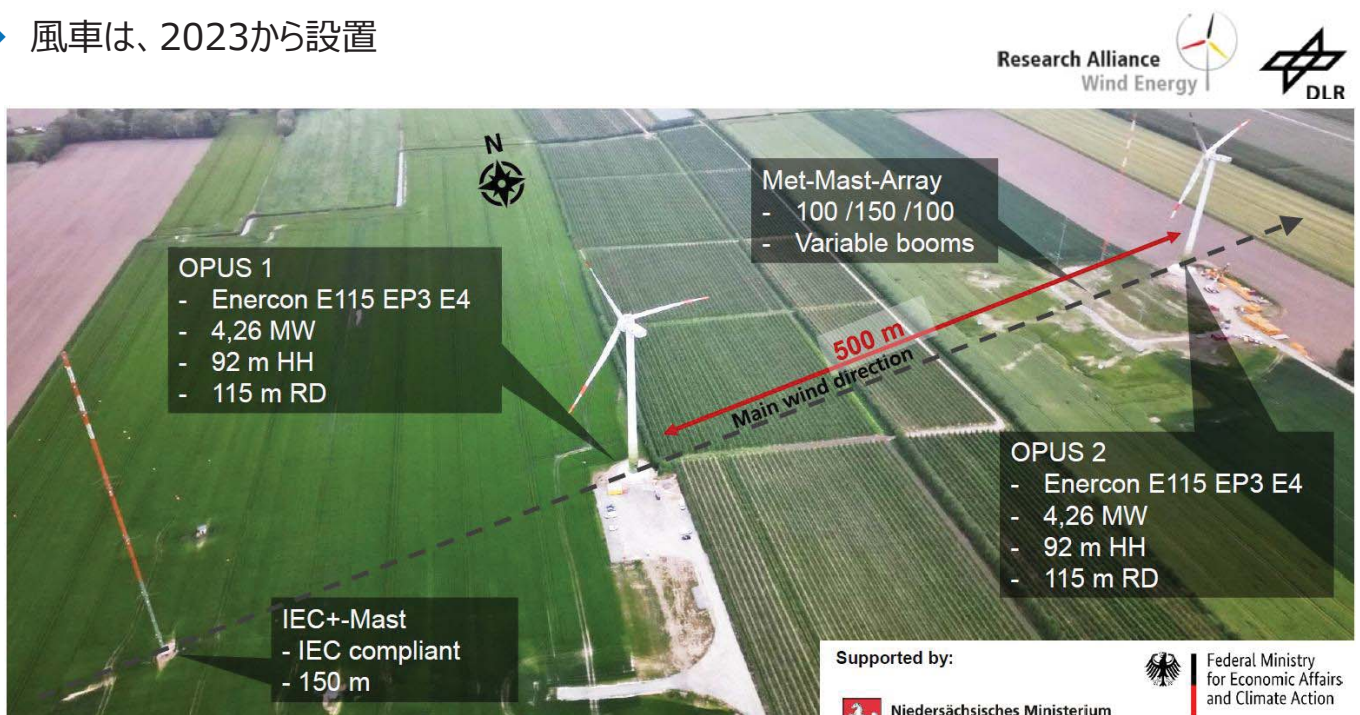
◆ 研究風車

- ZSW社製（コントローラーとHILテストリグを含む）
- ハブ高73m、ローター直径50m- 定格出力：750 kW- 可変速度- 個別駆動ピッチモーター
- 監視制御を含むタービンコントローラーへのフルアクセス- IEC 61400-13に準拠した計測センサーを完備
- 以下のような計測機器の設置が可能
 - ブレード、メインシャフトなどの荷重センサー（ひずみゲージ、FBG）
 - ブレード先端の加速度センサー
 - ブレード形状曲げセンサー
 - 基礎の土圧発信器と伸縮センサー
 - 周辺の地震センサー
- コンバーター・システムは、さらなる再生可能エネルギー源や蓄電装置で拡張可能



VIVALDI テストサイト [1/4]

- ◆ 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

参考 <https://zenodo.org/records/15692920>

◆ 150m高、100m高、100m高からなる3つの風況観測塔アレイ

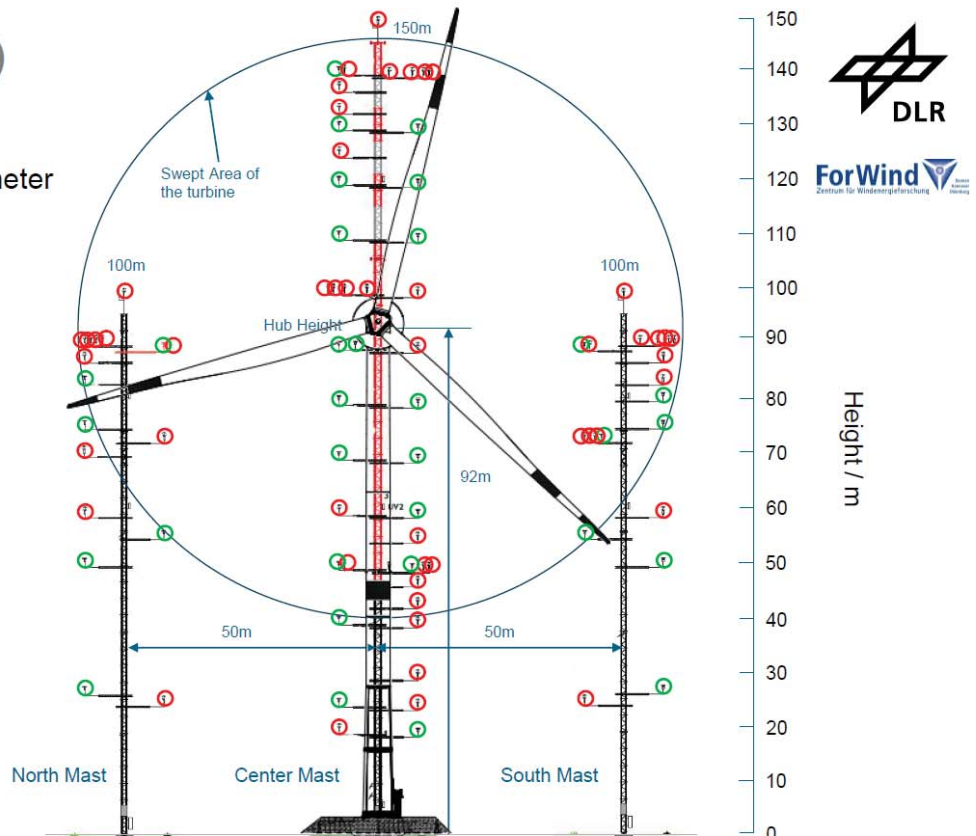
Met Mast Array (MMA)



51 x 3D Ultrasonic anemometer



32 x Cup anemometer



Norman Wildmann, DI R-PA, 17 June 2025

第14回 IEA Wind セミナー 2025年9月24日

◆ テスト風車 (OPUS1 & 2) に設置されたセンサー

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			

Norman Wildmann, DLR-PA, 17 June 2025



第14回 IEA Wind セミナー 2025年9月24日

◆ フィールド観測

- (a) ロングレンジライダー及びマイクロ波放射計
- (b) ショートレンジライダー
- (c) ナセル設置ショートレンジライダー
- (d) スピナーライダー

Remote sensing of wind, temperature, humidity, clouds, rain etc.

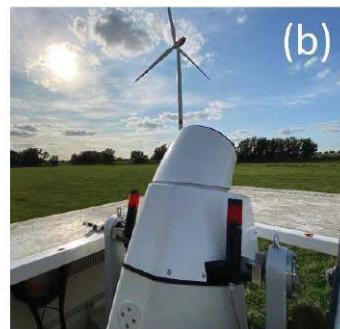
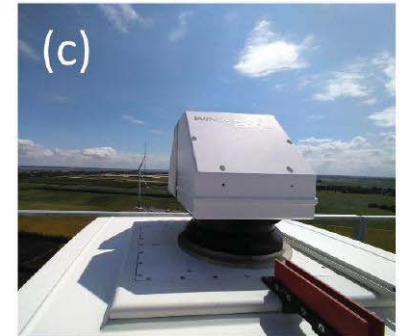
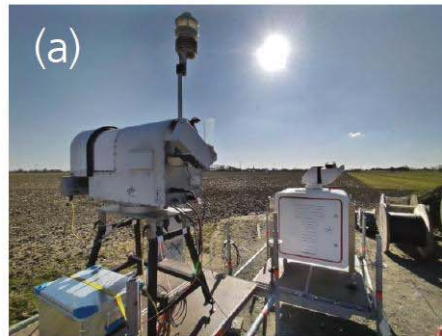
- (a) Long-range Windlidar und Microwaveradiometer
- (b) Short-Range Windlidar
- (c) Long-Range Windlidar on OPUS1
- (d) Spinner-Lidar
- Micro-Rain-Radar (MRR) マイクロレインレーダー
- Dysdrometer 雨滴計
- Ceilometer 雲高計
- Eddy-Covariance station 渦相関計測ステーション

Noise

- single-microphones
- Microphone-array

... and more

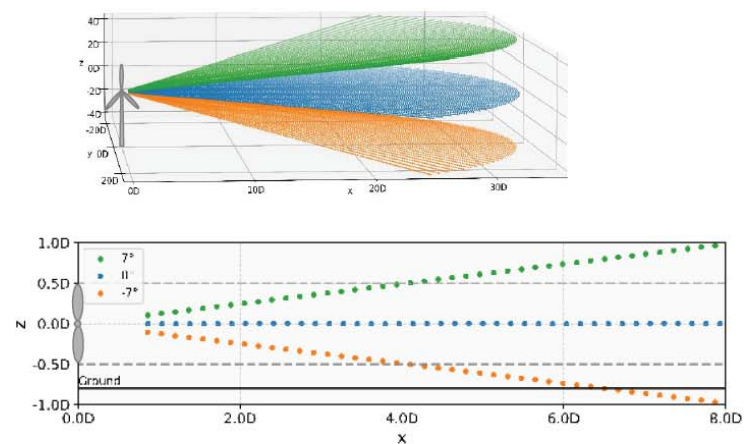
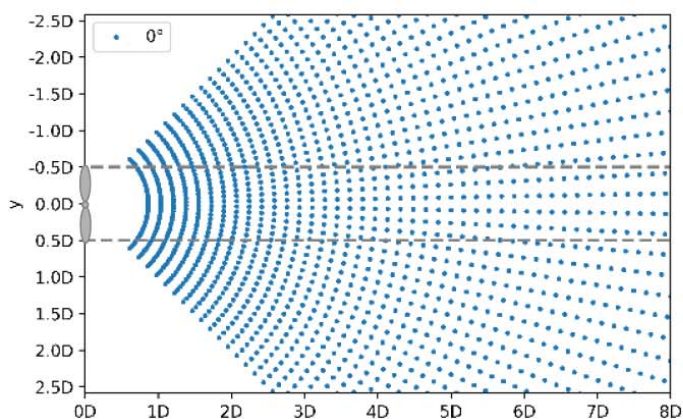
Moritz Wildmann, DLR, 17. Juni 2025



第14回 IEA Wind セミナー 2025年9月24日

VIVALDI ベンチマーク用観測

- ◆ ナセルライダー観測（3つの仰角）を使用
- ◆ ～27s/スキャン
- ◆ 2023年11月から計測
- ◆ 2025年6月までに、274日以上ウェイク観測



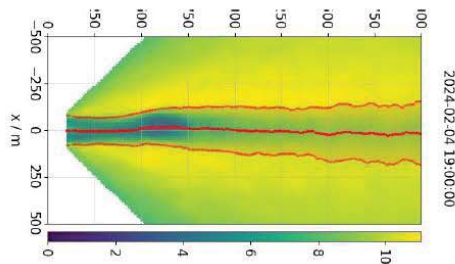
第14回 IEA Wind セミナー 2025年9月24日

◆ OPUS1のウェイク内のOPUS2

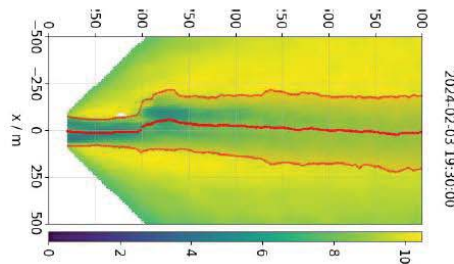
- フルウェイク
- ハーフウェイク
- 暗黙的なウェイク影響

OPUS2 in wake of OPUS1

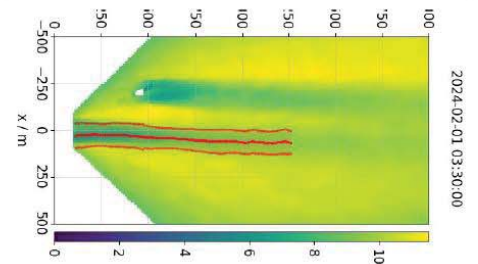
Full-waked



Half-waked



Implicit wake effects



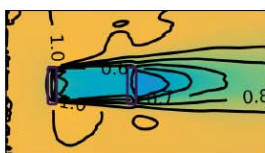
Two possible goals

◆ ウェイク干渉／重ね合わせ

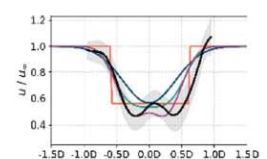
- ウェイク速度欠損モデルの検証
- エンジニアリングモデル
- 下流の風車の下流におけるマルチウェイク

◆ ニアウェイクモデルの精度

- LESによるニアウェイク特性の詳細調査
- エンジニアリングモデルのニアウェイクモデル



Atmospheric impact on wake



IEA Task53（風力発電の経済性） 活動成果と今後の活動計画

2025年9月24日

東京大学大学院工学系研究科
社会基盤学専攻
菊地由佳



Task53の概要

2/16

名称: Wind Energy Economics

目標: 脱炭素社会における風力発電のコストと価値を分析する

活動内容: 各国のコスト分析の専門家が所定のWork Packageに基づき、
それぞれの国の現状及び将来の動向を分析・整理。
6つのWork Packageがあり、各国の関心から関与するWorkを選択。
年2回のIn-person meeting、毎月のWeb meeting等を通じてディスカッション。
直近では、**2025年4月15-17日に東京でIn-person meeting**が開催された。

活動期間: 2021年12月1日～**2025年11月30日**

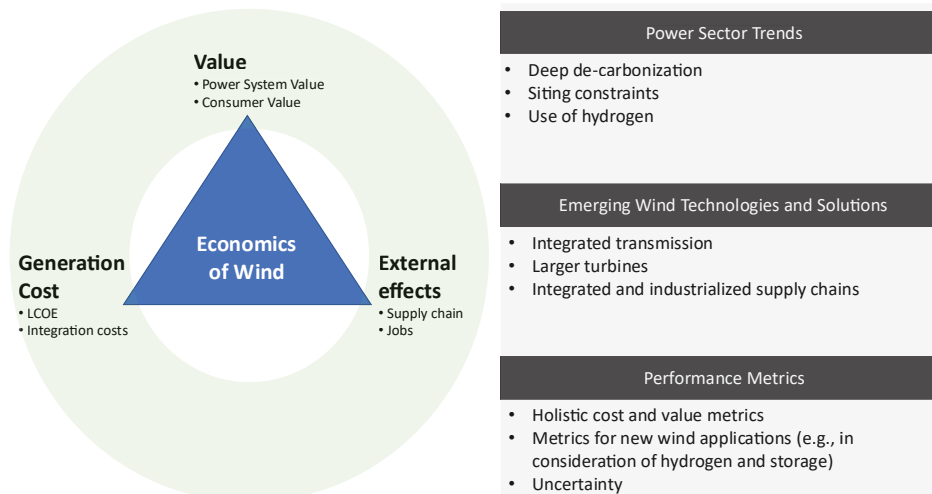
参加国: 米国、英国、デンマーク、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン、EC (European Commission)、
日本、アイルランド、オランダ

Operating Agent(OA): Tyler Stehly、Philipp Beiter (NREL)

委員: ○菊地由佳(東京大学)、木村啓二(大阪産業大学)



- 高い普及率下での未来における風力エネルギーの設計、運用等の傾向を予測し、コストと価値を含む風力エネルギーの経済的提供への影響を理解する。
 - 国際的な協力と協調によって得られた最先端の手法で、進化する風力エネルギーの経済性を分析する。
 - 様々なステークホルダーにコストと価値を伝えるためのデータを提供する。
 - 脱炭素化が進んだ未来における技術進化、研究開発の必要性、コストと価値の傾向を明らかにする。
 - 技術報告書や雑誌記事、その他の普及手段で研究成果を発表する。



Task53: 活動内容

WP	題目と内容	担当者
WP1	“風力発電所の設計・運転維持管理・価値は、脱炭素化に伴い、どのように変化するか？” 専門家へのインタビュー(Expert elicitation)を用いて、風力発電所の技術、設計、運転維持管理について現在検討されている技術革新について調査する。	NREL (USA)
WP2	“個別の技術革新、運転維持管理方法はコストと価値にどのように影響を与えるか？” エンジニアリングコストモデルを構築し、技術、設計、維持管理の革新がコストに与える影響を調査する。地域と送電線のタイプに対して比較のケーススタディを実施する。	UTokyo (JPN)
WP3	“不確かさは風力発電のコスト、価値と金融にどのように影響を与えるか？” 現在進んでいる金融コストにたいする専門家への調査の結果を分析することにより、不確かさやリスクが実際に及ぼす影響について調査する。次に、これらの不確かさがLCOEに与える影響を明らかにする。 最後に、シナリオベースの風力の金融コストの予測モデルを構築する。	NREL (USA)
WP4	“どのようなデータと分析手法が、現在と過去の風力発電コストをより良く理解するためにふさわしいか？” 毎年の各国の風力発電に関する技術・経済に関するデータの調査を行うとともに、発電コスト等による経済性評価手法の提案と検証を行う。	NREL (USA)
WP5	“新しい送電網と水素はコストと価値にどのように影響を与えるか？” シナリオ研究により、参加国が保有しているモデルを用いて、水素と送電線がコストと価値に与える影響を評価する。	EA (DNK)
WP6	“成熟した将来の市場においてサプライチェーンはどのように発展し変化するか？” 2030年、2050年までの雇用創出数、売り上げ規模といった将来の価値を評価 認証機関、EPDやその他から風車の部品とその製造拠点を調査する。さらに、その地域で作り出される価値について評価する。	JRC (EU)

- 脱炭素化する電力部門における将来の**陸上風力**に関する技術、立地選択、製造、価値について、専門家へのヒアリングにより予測する。
- ヒアリングが完了し、現在、論文投稿中。

■ 立地選択について

- 立地選択の要因(農業、野生動物、航空レーダ、社会基盤、景観、複雑地形等)/共同立地について
- 大型風車(5MW)が望ましいか、小さい風車(2.5MW)が望ましいか
- 陸上風力の発展に寄与する技術開発(市民風車、水素、蓄電池、PV、政策等)
- 今後10年間の陸上風力発電の成長の阻害要因

■ 製造について

- 製造拡大に必要な技術(風車の大きさ、自動化、グローバルサプライチェーンの構築、輸送技術 etc.)

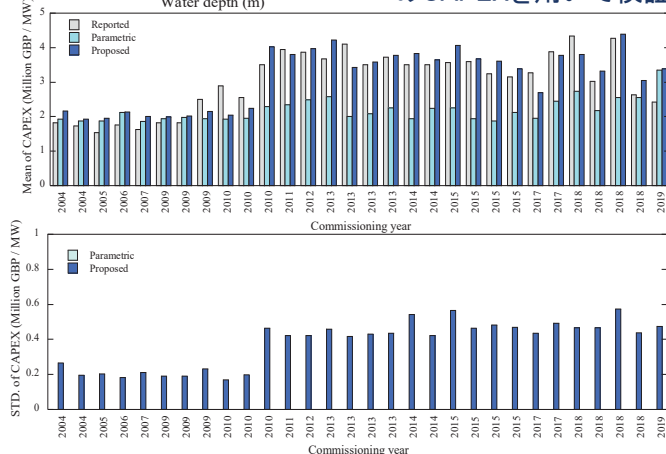
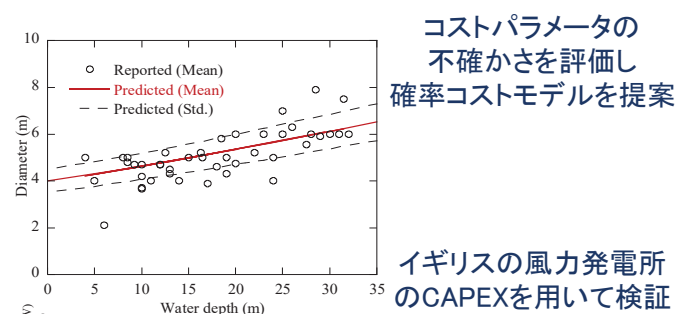
■ 価値について

- 風力発電の価値向上に必要な技術(低出力比の風車、データ分析技術、蓄電池併用、水素併用等)

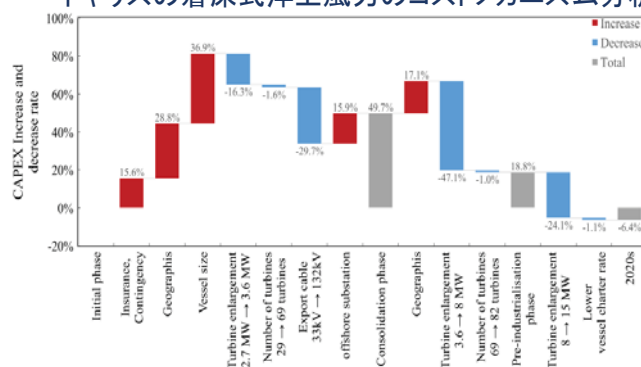
参考) Wiser, R., Rand, J., Seel, J., Beiter, P., Baker, E., Lantz, E., and Gilman, P. 2021. "Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050." Nature Energy volume 6, pages 555–565.

WP2: 技術革新によるコスト低減・価値向上 (UTokyo)

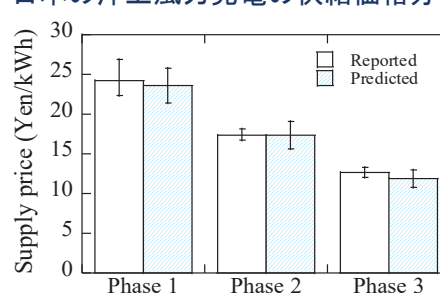
Y. Kikuchi, T. Ishihara, Assessment of capital expenditure for fixed-bottom offshore wind farms using probabilistic engineering cost model, Applied Energy, 341, 120912, 2023



イギリスの着床式洋上風力のコストメカニズム分析



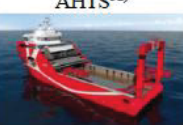
日本の洋上風力発電の供給価格分析



菊地由佳, 石原孟, 製造と施工方法を考慮したスパー型浮体式洋上洋上風力発電所の建設費評価, 日本風力エネルギー学会論文集, 2024

スパー型浮体施工の 従来手法と提案手法

Table 3 Description of conventional and advanced technologies

	Conventional	Advanced
Floater	Cylinder ²⁷⁾ 	Flat panel ³⁰⁾ 
Mooring line	Steel ²⁸⁾ 	Hybrid ²⁹⁾ 
Wind turbine Installation	Floating-to-floating ²⁹⁾ 	Floating-to-fixed ³⁰⁾ 
Mooring line installation	Barge type vessel ³¹⁾ 	AHTS ³²⁾ 

エンジニアリングモデルを用いた 提案手法による建設コストの低減量評価

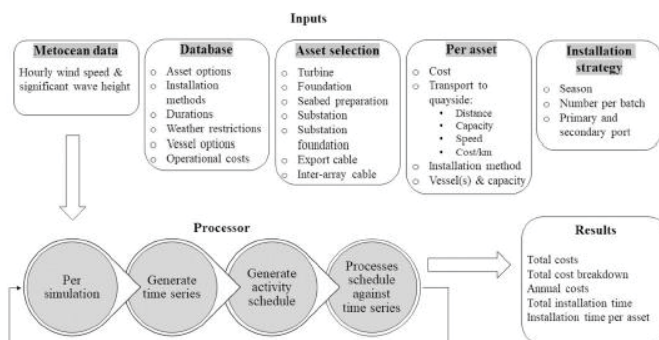
Table 15 Comparison of CAPEX between baseline and advanced models (10,000JPY /kW)

Item	Baseline	Advanced	Reduction rate (%)
DEVEX	2.3	2.3	-
Turbine	13.9	13.9	-
BOP			
Floater	13.4	11.4	15
Mooring and anchor	6.8	4.3	37
PTS	3.1	3.1	-
Installation			
Turbine	6.0	3.1	48
Mooring and anchor	2.5	2.1	16
Floater	1.1	1.1	-
PTS	5.3	5.3	-
Port	0.1	0.1	-
Others	6.0	4.7	22
Total	60.6	51.5	15

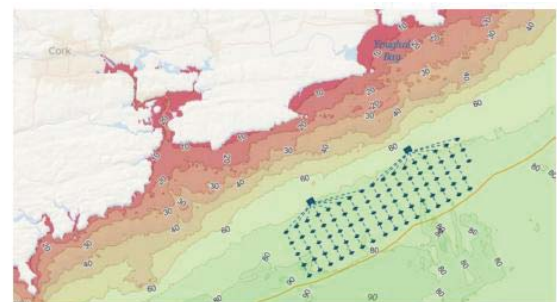
WP2: 技術革新によるコスト低減・価値向上

Devoy McAuliffe F. et al., Modelling the installation of next generation floating offshore wind farms, Applied Energy, 2024.

浮体式洋上風力発電所の施工モデル



仮想的発電所の設定



Hywindを用いた検証

	Installation model results	Published Hywind data
Dry CAPEX ¹	€109 m	
Anchor installation	€4 m	
Turbine assembly, towing & hook-up	€8.6 m	
Cabling	€12 m	
Additional installation costs	€52 m	
Project management, construction insurance & contingency	€19 m	
Total installation costs	€95.6 m	Breakdown unavailable
Total CAPEX	€204.6 m	€200 m

¹ Includes development and asset costs on and offshore.

発電コストの評価

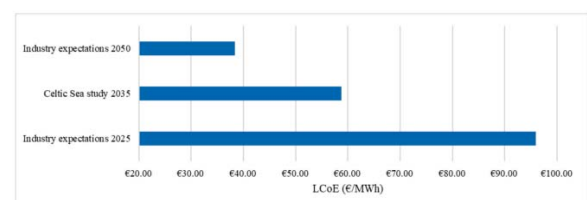
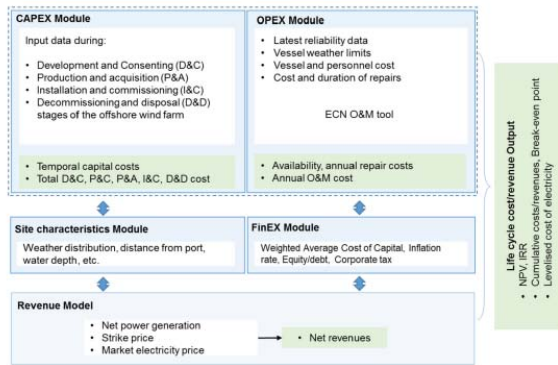


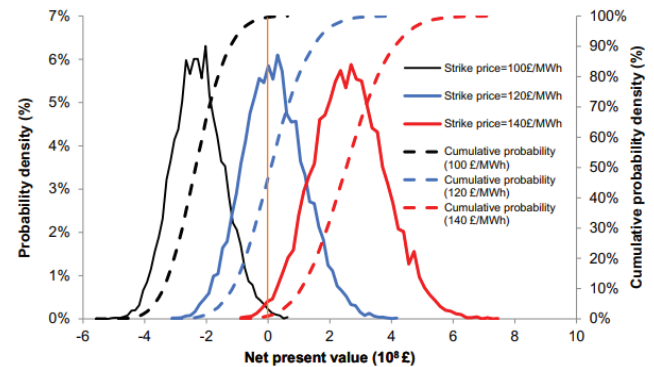
Fig. 7. LCoE estimate summary.

A. Ioannou et al., Stochastic financial appraisal of offshore wind farms, Renewable Energy, 2020.

提案エンジニアリングモデル



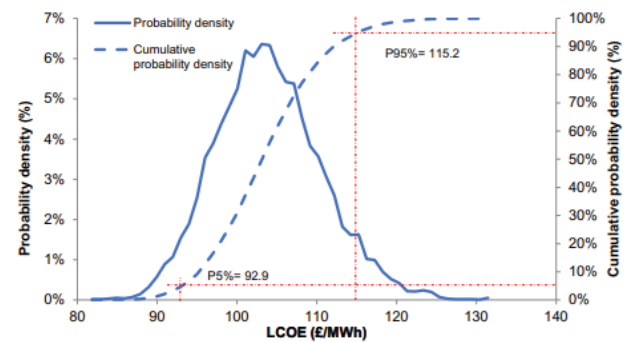
異なる基準価格でのNPV



電力価格の予測値の検証



LCOEの不確かさの評価



Wagner F, Malet J, Kitzing L, How do two-way contracts-for-difference affect futures markets? A novel modelling approach of future market liquidity, Preprint, Energy Economics, 2025.

直近の電力法市場に関する制度改正では、加盟国が新しい非化石燃料発電に対する直接価格支持制度を実施する場合、CfDの使用を義務付け

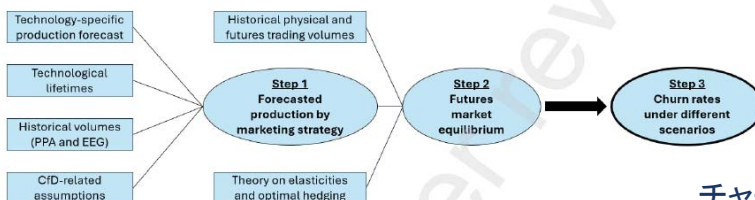


Figure 1: Overview of inputs and respective modelling steps.

市場予測均衡モデル

チャーンレートと発電量予測

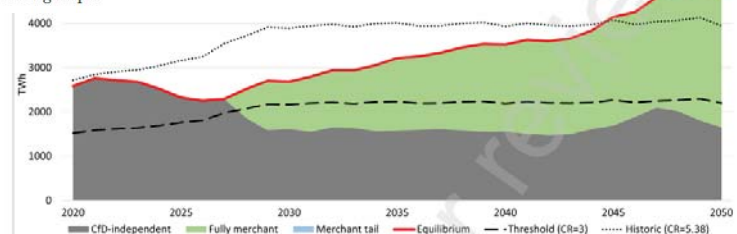


Figure 7: Volumes are calculated as laid out in section 2. The minimum and average churn rates are 3.49 and 4.68, respectively. 2027 is assumed to be the last year EEG installations come online. Afterwards, all additional RE volumes operate solely on market terms.

参考) Beiter, P., Guillet, J., Jansen, M. et al. The enduring role of contracts for difference in risk management and market creation for renewables. Nat Energy 9, 20–26 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41560-023-01401-w>

- 各国の陸上風力発電のコストを収集し、Data viewerとしてIEA Task53のホームページにて公開している

日本の状況

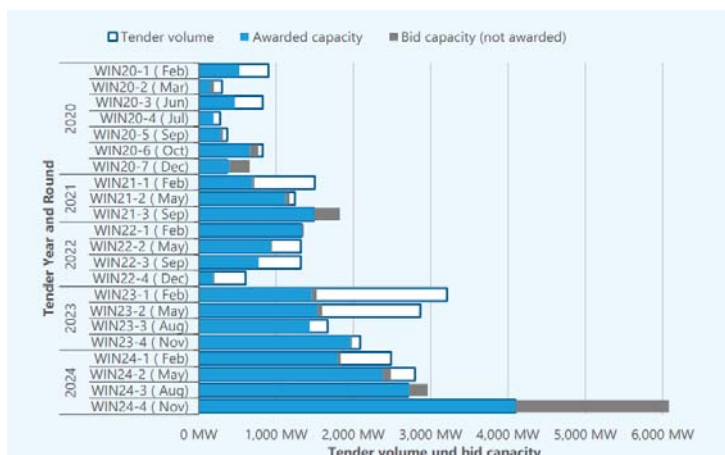
- 導入量に関する公的資料が存在しないため、JWPAの報告値を基に、毎年建設された発電所のホームページを調査し、提出している。
- 発電所の風速はNeoWindsを用いて評価。
- CAPEX・OPEXは調達価格等算定委員会の資料を基に評価。最大値・最小値・中央値は不明。

<https://iea-wind.org/task53/task-53-data-viewer/>

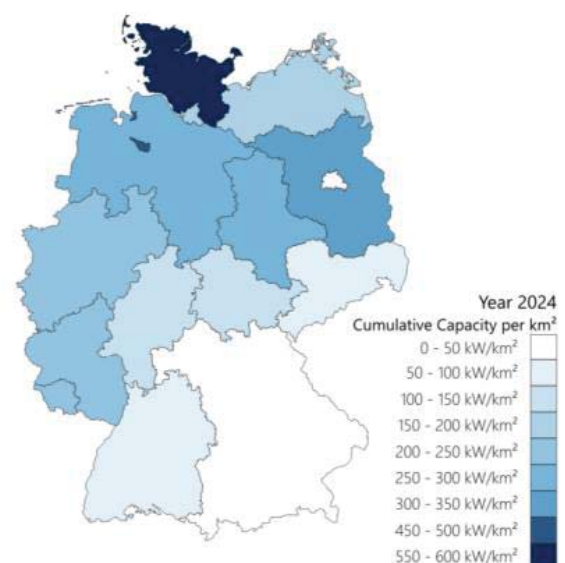


- ドイツの統計資料が最も体系的で明瞭である
- <https://www.windguard.com/publications-wind-energy-statistics.html>

Wind Guard, Status of onshore wind energy development in Germany, 2024.



(Wind Guard, 2024)



Base map: © GeoBasis-DE / BKG 2022 | Database: MaSiR with own modifications
Source: Deutsche WindGuard

Regional distribution of cumulative capacity

(Wind Guard, 2024)

- BALMOREモデルを用いて、水素の導入が風力発電と水素の価格に及ぼす影響を評価
- 年末までに報告書をまとめる予定

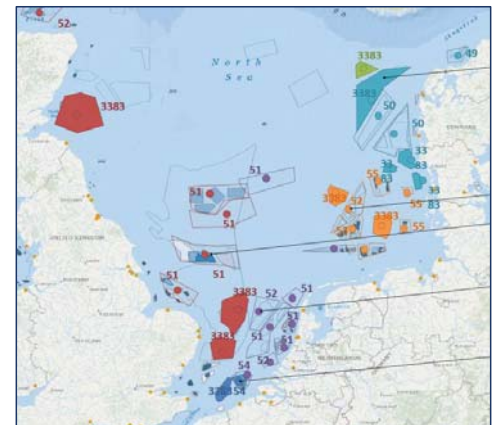
分析例:

- Case I: 100%を電力として送電
- Case II: 水素と電力に半分ずつに分けて送電
- Case III: 100%を水素として送電
- Case IV: 水素の最適な配分を評価するケース

DK, NL – 4 GW offshore wind in 2035,
10 GW in 2050

DE, GB – 6 GW offshore wind in 2035,
12 GW in 2050

BE – 6 GW in 2035

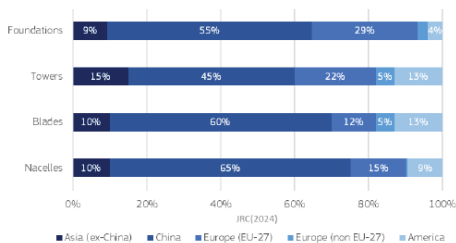


WP6: サプライチェーンの発展と需要分析 (JRC)

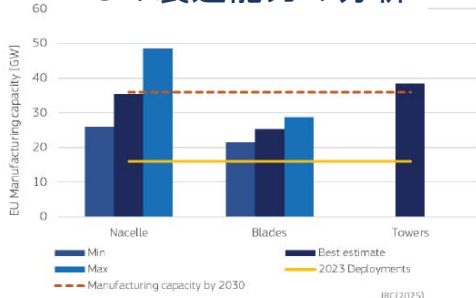
Tapoglou E et al., Knowledge gaps in the wind energy technology supply chain, 2025.

The Net Zero Industry ActおよびThe Critical Raw Material Actを背景に、サプライチェーンに関するデータベースを統合、可視化、分析および検証

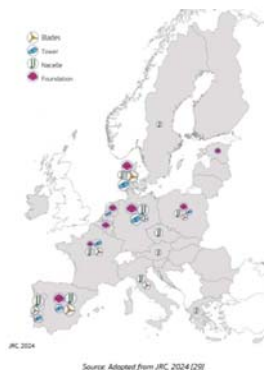
主要部品の地域別製造能力



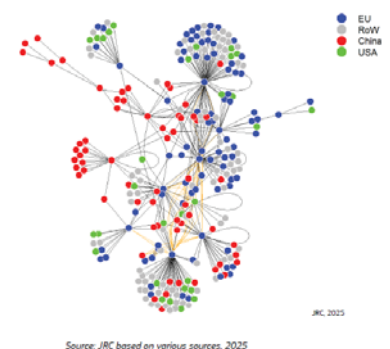
EUの製造能力の分析



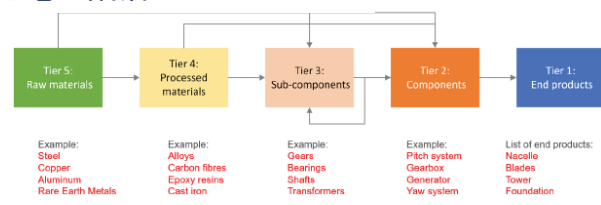
EUの製造拠点を



サプライヤーと顧客の関係



風力発電の階層化システム



研究のまとめ (Tapoglou E. et al., 2025)

- ❑ 業界レポート、企業の Web サイト、取引データベースなど、複数ソースを組み合わせて、風力発電のサプライチェーンに関する**包括的データベースを構築した**
- ❑ 企業間および部品間の重要な関係と依存関係が明らかとなるような**サプライチェーンを可視化した**
- ❑ 構築したサプライチェーンマップを用いて、**集中領域、ボトルネック、改善の余地などの主要な傾向、パターンを分析した**
- ❑ 業界の専門家のフィードバック、企業によるの検証、およびデータ検証手法を用いて、**構築したサプライチェーンマップの妥当性を検証した**

サプライチェーンマップの今後の活用方法 (Tapoglou E. et al., 2025)

- ❑ 国内サプライチェーンの発展を支援し、国際輸入への依存を減らし、地域経済の成長を促進するための戦略を策定
- ❑ 業界内の競争と革新を促進し、コストを削減し、効率を向上させる政策を策定
- ❑ 送電網インフラやエネルギー貯蔵を含む広範なエネルギーシステムへの風力エネルギーの統合を支援する政策の策定
- ❑ 既存の政策やプログラムの有効性を監視・評価し、データに基づいた意思決定およびその影響の評価

まとめ

16/16

- すべてのWPについて計画された内容が完了し、報告書等にまとめている。成果は IEA Task53のホームページに掲載される予定
- 日本は、本フェーズにおいて、WP2におけるエンジニアリングコストモデルによるコスト評価を担当した
- 国外の風力発電の経済性に関する最先端の議論を学び、日本の風力発電の研究課題にフィードバックしていく



In-person meetingの様子
2025年4月15-17日東京

タスク62

協働に基づく風力エネルギー計画と参加のための社会科学

Social Science for collaborative wind energy planning & participation

丸山康司（名古屋大学）

Suzanne Tegen, John Aston（Task62 事務局）

1



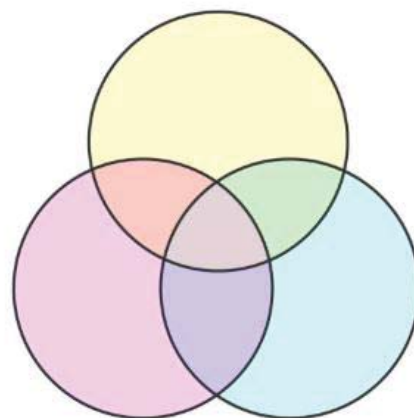
IEA風力タスク62：

協働による風力エネルギー計画と参加のための社会科学

社会科学的研究と知見を活用し、

- 風力エネルギー開発者
- 地域コミュニティー
- 行政当局

それぞれにとって、公正でバランスが取れ、責任ある風力エネルギープロジェクトの実現を目指す。



タスク62とは？

タスク62は、風力エネルギーの社会的側面を焦点とする国際エネルギー機関（IEA）の風力イニシアチブ

タスク62は13カ国のメンバーで構成され、開発者、地域コミュニティ、行政間の協力関係を促進し、より良い風力エネルギー導入を目指しています。



タスク62メンバーと国際MISTRALプログラムの大学院生（2023年）

風力エネルギーに社会科学が必要なのはなぜか？

風力エネルギー開発は技術的な側面だけでなく、社会的文脈や地域社会の力学に根ざしている

社会科学は、地域社会の懸念、公平性、参加といった課題に初期段階から取り組むことが可能



目的と使命

目的：社会科学の研究と専門知識を活用し、公正で責任ある持続可能な風力エネルギー開発を支援すること

ミッション：責任ある持続可能な風力エネルギー導入を可能にする実践的な知見とツールを提供すること。



タスク62の実践：作業パッケージ

1. **社会・環境・技術的連携：**騒音や環境要因などの影響への対応。
2. **地域の関与と承認：**計画プロセスを強化し、コミュニティの承認を得るための取り組み—法的な要件を超える必要性。
3. **組織文化：**中核事業に有意義な関与を統合する力、およびそうしないことで生じる障壁。
4. **プロジェクト参加とビジネスモデル：**利益共有のモデルを探る。
5. **計画改善のためのツール：**対話促進のためのゲーミフィケーション等の手法活用。

タスク62がもたらすメリット：

開発者／業界向け：効果的な地域連携のためのツールを提供し、遅延やプロジェクト中止を削減します

地域コミュニティ：ホストコミュニティおよび潜在的なホストコミュニティの声が収集され、尊重され、協働関係が構築されることを保証します

当局：データ、社会的受容性に関する知見、協働を通じて、地方・州・連邦レベルの政策立案を支援します。

研究者：タービンや風力発電所の設計が確定する前に、国際的な協力と知識の交換を可能にします。



タスク62 - 専門家による専門家への学び

タスク62のメンバーは各自の国で以下の活動を展開している

カナダでは、地域住民、特にコミュニティベースの開発モデルを活用する住民や先住民族住民と連携し、参加型計画策定、利益の伝達、先住民族との和解が果たす役割を含め、彼らが風力タービンをどのように捉えているかを理解する。

フィンランドでは、地方自治体、再生可能エネルギー企業、中央政府と連携し、風力エネルギー開発が地域のニーズに適切に対応する方法に関する協力体制と新たな能力構築を推進する。



デンマークでは、開発業者、エネルギー企業、エネルギー庁、NGO、地方自治体と連携し、陸上・洋上風力発電所の拡大に伴う手続き的・分配的課題への理解深化と配慮強化を促進する。

アイルランドでは、地域社会の信頼獲得、協働プロジェクトの促進、公平な負担と利益の分配を確保するための革新的なコミュニティエンゲージメント手法を研究・実践しています。具体的な取り組みには「[Co-wind](#)」や「[地域支援獲得アカデミー](#)」が含まれます。また、新規風力発電所近隣世帯へのコミュニティ利益基金拠出や現金給付を義務付ける国家政策の影響を注意深く監視しています。

タスク62 - 専門家による専門家の学び

タスク62メンバーは各自の国で以下の活動を展開中：

日本では、地方自治体や県政府の指導層、ステークホルダーと連携し、洋上・陸上風力発電の導入に向けた政策（ゾーニングや地域還元策など）の策定を支援しています。

ドイツでは、風力発電プロジェクトに強く不快感を抱く隣住民、プロジェクト所有者、技術者と連携し、騒音やリッカー現象などの問題解決に取り組んでいます。自治体とは財政的参加や地域付加価値について協働し、市民や計画当局との協力のもと、より広範で若い層の創造的な参加を促進するデジタル参加ツールを開発しています。

ノルウェーでは、風力エネルギーが地域社会に与える影響、風力エネルギーシステムが自然環境や地域土地利用に及ぼす影響に関する研究を実施しています。風力エネルギー開発が先住民族とその伝統的慣習と衝突する事例も確認しています。



英国では、地域に根差した投資ポートフォリオの開発を通じ、開発ニーズと社会的・環境的解決策の提供を整合させるため、地域の戦略的組織、プロジェクト開発者、意思決定者（地方から国家レベルまで）と連携しています。

米国では、主要な風力エネルギー関係者（地域コミュニティ、開発業者、許可担当官など）に対する調査を実施し、感情や認識を理解するとともに、実証的な計量経済分析を通じて資産価値などの影響を検証しています。さらに、風力産業や政策立案者と連携し、ベストプラクティスの促進と利害の一致を図っています。

参加者とその所属機関

国	所属機関	参加者
カナダ	ウェスタンオンタリオ大学	ジェイミー・バクスター
デンマーク	デンマーク工科大学、オールボー大学	デビッド・ルドルフ、クリスチャン・ボルシュ
フィンランド	東フィンランド大学	ラッセ・ペルトネン
フランス	トタルエナジーズ	マガリ・コリンズ
ドイツ	連邦経済エネルギー省（BMWE）、ハンブルク医科大学（MSH）、未来エネルギー・物質フローシステム研究所（IZES）	グンドウラ・ヒュブナー、ヤン・ヒルデブランド
アイルランド	アストンECO、コーク大学、アイルランド持続可能エネルギー庁	ジョン・アストン、バーナデット・パワー、コナー・マロイ
日本	名古屋大学、東邦大学	丸山康司、本巢芽美、竹内綾乃
オランダ	ボンデラ/ハスコニング	マリエル・デ・セイン
ノルウェー	ノルウェー自然研究所 (NINA)	クリスティン・E・マティセン
スウェーデン	スウェーデンエネルギー庁 - Energi Myndigheten Sweden	アマンダ・ロス
スイス	スイス連邦エネルギー庁 (BFE)	
U.K.	ケルト海パワー、エクセター大学、ザ・クラウン・エステート	ニール・ファリントン、パトリック・デヴァイン・ライト、パメラ・ブキャン
米国	ローレンス・パークレー国立研究所、国立再生可能エネルギー研究所、コロラド州立大学	ジョー・ランド、マチルダ・クライダー、スザンヌ・ティーゲン

ワークパッケージ

1. 社会・環境・技術的コラボレーション	大きな課題への問題意識に基づき、風力エネルギー分野を横断して、IEA Wind 内外の関連タスクと協力し、技術由来の社会的問題を解決する。
2. 地域承認とエンゲージメント	法律で義務づけられているものを含みつつ、それを超えて、公平かつ公正な風力発電導入を達成することでエネルギー転換を加速できるかを検討する。
3. 企業／行政の組織文化が計画や地域社会に与える影響	地域社会とのパートナーシップを風力発電プロジェクト設計に組み込む：企業と地方自治体を位置づけ、意味のある地域社会の関与を可能にする。
4. 財政参加とビジネスモデル	共益、共同所有など、地域社会と利益を共有することで、プロジェクトの受容性が高まる可能性を検証
5. 風力発電計画の体験改善のためのツール	可視化、ゲーミフィケーション等に関する研究を通じて、(i) 地域社会の計画体験を改善し、(ii) 開発者による地域ニーズ理解を向上させる。

日本で進行中のプロジェクト

1. 脱炭素社会シナリオの多面的評価

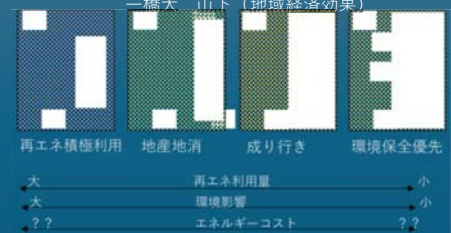
各シナリオに対応する再エネ比率・脱炭素率・エネルギーコスト・地域経済効果などを評価

2. 多様な脱炭素手段への選好と要因の解明

シナリオへの選好と要因を把握した上で、地域毎の特性を踏まえて合意されやすい組み合わせを提示

脱炭素社会シナリオの多面的評価

名古屋大 丸山（研究代表、成行きシナリオ）
名古屋大 白木・国環研 小野寺（エネルギーシステムモデリング）
一橋大 山下（地域経済効果）



多様な脱炭素手法の想定とシナジーとトレードオフの多面的評価



属性別の選好の比較による合意形成の難易度の評価

多様な脱炭素手段への選好と要因の解明

早稲田大 西城戸（統計解析、マニュアル作成）
名古屋大 丸山・本巢（調査票、統計解析、ワークショップ）

風力FAQ

- ◆再エネに関する様々な指摘について最新研究などをレビューしながら検証
- ◆メルマガ形式で更新情報を配信

The screenshot shows the website of the Maruyama Research Room (丸山研究室). The navigation bar includes links for Home, Profile, About the Research Room, Projects, News, and Contact. The main content area is titled 'Research Project: Renewable Energy Q&A'. It features three columns of Q&A topics related to wind power and low-frequency noise. On the right, there is a 'Mail Subscription' section with a form for name and email, and a language selection dropdown menu.

丸山研究室

ホーム プロフィール 研究室について プロジェクト ニュース お問い合わせ

研究プロジェクト
再生可能エネルギーQ&A

再エネQ&A
Q. 低周波音や超低周波音によって人体に直接的な影響はありますか？

再エネQ&A
Q. 風力発電所の低周波音で、建具ががたつくことはありますか？

再エネQ&A
Q. 風力発電所で火災は起きますか？

メール配信登録
新着情報の配信をご希望の方は、お名前とメールアドレスの登録をお願いします。

姓

名

Select Language

<https://www.social.env.nagoya-u.ac.jp/sociology/maruyama/projects/renewables-qa/>

13

まとめ

- ◆多様な地域コミュニティを与件として、事業者側が適応的に振る舞うための方法論を提供
- ◆「脱炭素」やSDGsといった支配的言説の効力は限定的
- ◆「社会受容性」と「協働」の違い

14



第14回 IEA Wind セミナー

2025年9月24日



Task 63: 2050年に向けた 変動性エネルギーの統合



ストラスクライド大学 アカデミックビジター
九州大学 洋上風力研究教育センター 客員教授
環境エネルギー政策研究所 主任研究員

安田 陽



Task 63 の紹介



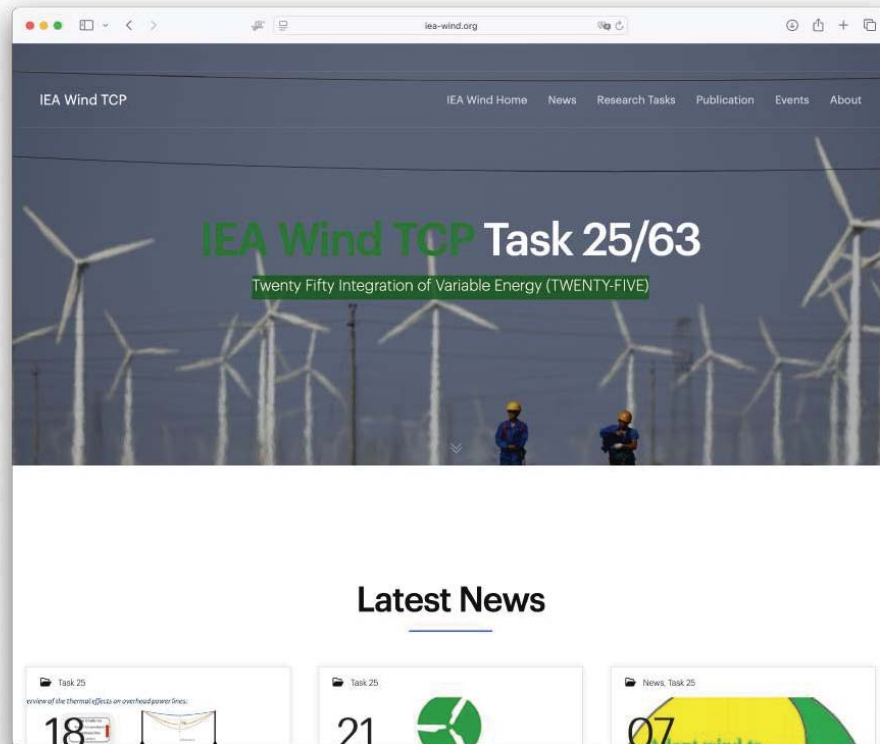
■ 名称

- Twenty Fifty Integration of Variable Energy (TWENTY-FIVE)
- 2050 年に向けた変動性エネルギーの統合

■ 目的

- エネルギーシステムへの変動性再生可能エネルギーの大量導入を促進する最も経済的に実現可能な方法に関する情報の提供
- 風力発電が大量導入された電力システムの運用に関する知識と経験の情報交換
- 旧Task25の後継委員会

+ Task 25/63 のウェブサイト



<https://iea-wind.org/task25-63/>

+ Task25のこれまでの活動経緯



- 第1期 (2006～2008年, 11ヶ国+1団体(EWEA))
 - 第1期報告書(2009) → 日本語訳(2012)
- 第2期 (2009～2011年, 14ヶ国+1) ← 日本参加
 - 第2期報告書(2012)
- 第3期 (2012～2014年, 15ヶ国+1)
 - 第3期報告書(2015) → 日本語訳(2020), RP16(2013)
- 第4期 (2015～2017年, 16ヶ国+1)
 - 第4期報告書(2018)
 - RP16(2018)(PVPS Task14と共同) → 日本語訳(2023)
- 第5期 (2017～2020年, 18ヶ国+1)
 - Fact Sheet 2020年版 → 日本語訳(2020)
 - 第5期報告書(2021) → 日本語訳(2023)
- 第6期 (2021年～2024, 15ヶ国+2)
 - RP16(2024) 3rd Edition (PVPS Task14と共同)
 - Fact Sheet 2025年版

+ Task25/63の構成

女性率も高い
(ジェンダーバランス)

■ 構成メンバー

■ TSOなど実務者も多い

- Hydro Québec(CA)
- Energinet.dk (DK)
- TenneT (DE)
- RTE (FR)
- Terna (IT)

■ 日本委員

- 安田 陽
(ISEP/九大)

2010年～

- 田辺隆也
(電力中央
研究所)

2014年～

Country	Organisation
	HydroQuebec
	DTU TSO Energinet
	Recognis Oy VTI
	EdF R&D TSO RTE MINES ParisTech
	Fraunhofer IEE The Research Center for Energy Economics (FfE)
	University College Dublin (UCD), School of Electrical & Electronic Engineering
	TSO Terna
	Kyoto University Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)

	Delft University of Technology (TU Delft) TNQ
	NTNU SINTEF Energy Research
	Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) Institute for Systems and Computer Engineering, Technology and Science (INESC TEC)
	University of Castilla-La Mancha (UCLM) Comillas Pontifical University
	Royal Institute of Technology (KTH)
	Imperial College
	National Renewable Energy Laboratory (NREL) Energy System Integration Group (ESIG, formerly UVIC) U.S. Department of Energy (DOE)

5

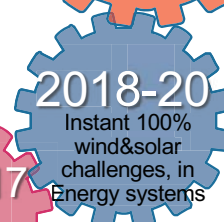
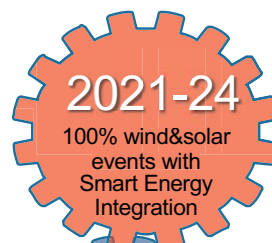
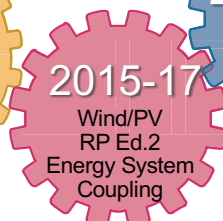
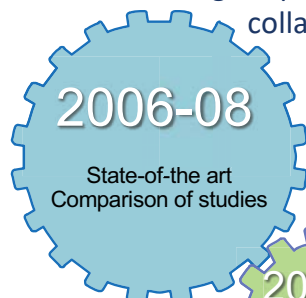


iea wind

+ 旧Task25の活動経緯

Task Objectives & Expected Results

- Objectives: recommend methodology to assess the impact of wind (and solar) power on energy systems, **and mitigation**
- Outcomes: RP16 Ed 3 / articles / fact sheets / bibliography / benchmarking simple tool / reference systems + collaboration: IEA Paris, **Inter-TCP**, **G-PST**



6



iea wind

+ Task25/63のワークプラン



- **WP1: Planning Topics** 系統計画
 - Transmission Planning
 - Generation capacity expansion and security of supply
 - Energy System Integration
- **WP2: Balancing Topics** 需給調整 (含む柔軟性)
 - Balancing the system
 - Need for flexibility and options to provide flexibility
 - Smart sector integration
- **WP3: Stability Topics** 安定度 (含む慣性問題)
 - Operation and stability of low-inertia RES power systems
 - Design and operational requirements
 - Reliability services
- **WP4: Market Topics** 電力市場
 - Ancillary Service markets to energy markets and capacity market
 - New market products, such as flexible ramping products.

+ 2024～25年度の活動



- 2024年春季
 - 開催都市: Dublin, Ireland 
 - ホスト: SEAI (アイルランド持続可能エネルギー庁)
 - 2024年4月10～12日
 - 参加者: 約40名
 - TEM#113 (Net Zero Electricity System)と併催
 - Task25の後継委員会の提案

+ 2024～25年度の活動



■ 2024年秋季

- 開催都市: Victoria, Canada 
- 2024年10月28日～30日
- ホスト: University of Victoria
- 参加者: 約20名
- 併催イベント: IESVic (Institute for Integrated Energy Systems) Workshop
- Task25として最後の会合

+ 2024～25年度の活動



■ 2025年春季

- 開催都市: Oslo, Norway 
- ホスト: SINTEF (ノルウェー産業技術研究所)
- 2025年5月12～14日
- 参加者: 約30名
- 併催イベント: Energy modelling workshop
- Task63として最初の会合

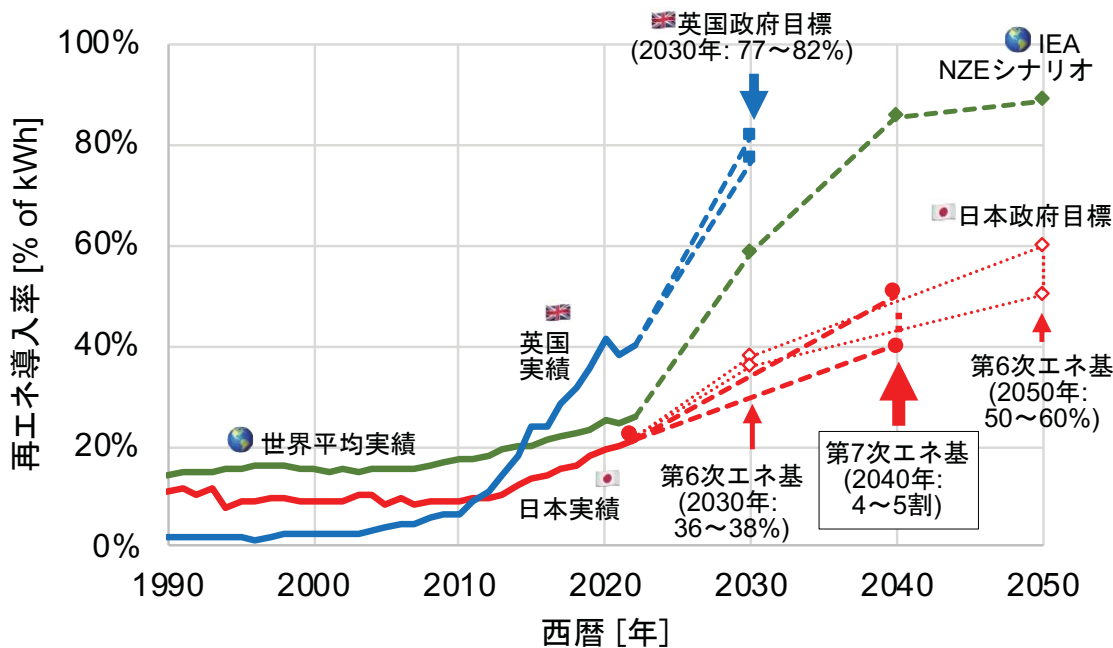
- 1. はじめに
- 2. 電力システム全体にわたる
風力・太陽光発電の**変動性**と**不確実性**
- 3. 送電計画
- 4. 長期的**供給信頼度**と電力の安定供給の確保
- 5. 短期的**システム信頼度**の確保
- 6. 運用中の**風力発電の価値**を最大化する
- 7. 現状を打破する：
再生可能エネルギー100%シェアに向けて

再生可能エネルギー100%に近い システム運用のための課題

- 従来型電源がなくても電力システムの強度を維持する、つまり**システム安定度を確保するための技術的なソリューションが、いくつかの場合で存在することは、一般的な科学的コンセンサスとなっている**。分散型太陽光発電の比率が大きい電力システムの場合、特定の困難が予想される。分散型太陽光発電が配電網やセキュリティに与える影響について、さらなる評価が必要である。(p.116)
- **風力や太陽光などの変動性電源が中心のシステムでも、デマンドレスポンス、大規模エネルギー貯蔵、ピーク電源、整備された送電網や連系線などの柔軟性があれば、システムアデクシー(電力システムがつねに負荷に対処する能力)を確保することができる**。これらの柔軟性電源の成熟度、利用可能性、コストについて検討する必要がある。(p.117)

+ 【参考】再エネ将来目標日英比較

13



(data source) IEA: Energy Statistics Data Browser

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>

IEA: World Energy Outlook 2024, Oct. 2024

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

資源エネルギー庁: エネルギー基本計画, 2021年10月22日

<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>

資源エネルギー庁: エネルギー基本計画, 2025年2月18日

https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/067/067_005.pdf

UK Government: Clean Power 2030 Action Plan: A new era of clean electricity, 13 December 2024

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf

+ Fact Sheet 2025年版 (出力抑制)

14



WIND AND SOLAR ENERGY CURTAILMENT

Curtailment of wind and solar sometimes occurs in surplus periods when electricity demand is low or when network capacity is congested. Curtailing wind and solar is not necessarily a bad thing as it may enable larger shares of renewables through making them flexible. Although a moderate amount of curtailed energy can be tolerated, huge amounts of wasted energy from near-zero operating cost renewable energy sources would be inefficient and unprofitable.

Is wind and solar curtailment required?

If curtailment of wind and solar would be strictly prohibited in a power system, only limited amounts of wind and solar could be installed and connected to the system. Not everyone needs electricity exactly when the wind blows and the sun shines, so sometimes the power generated from wind and solar is excessive. Zero curtailment may represent a sub-optimal solution.

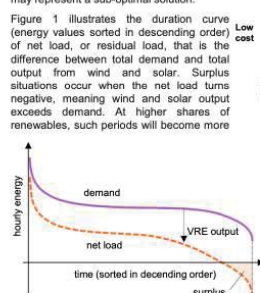


Figure 1. Conceptual illustration of surplus energy in duration curve of net load with large amounts of VRE (wind + solar).

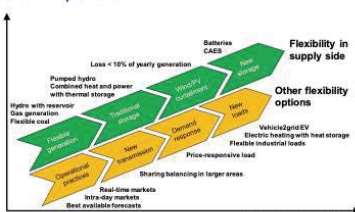


Figure 2. Methods to increase flexibility in power systems. (The relative order of options is illustrative only.)

common, and the amount of surplus energy tends to increase with the installed capacity of wind and solar. Surplus energy can be caused by local constraints, leading to curtailments at some parts of the system before system-wide limits. Building transmission helps export the surplus to high-demand areas.

Options to reduce surplus energy are: output reduction of conventional power plants, export to other areas, demand side management, and energy storage. If these options are costly or have been exhausted, curtailment could be appropriate to manage the surplus energy of wind and solar. Large amounts of curtailment, however, show lack of system flexibility or appropriate market design.

Wind and solar operators can provide upward reserves when a part of the available energy from wind or solar resource is curtailed, where the lost energy provides the basis for the provision of these valuable system services. Curtailment is a way for wind and solar to provide flexibility (Figure 2).

Evaluation and comparison of curtailment

The level of curtailment depends on system being analysed. It also varies depending upon the time of year, such as by hour, day, week and month. Hence, comparisons of annual curtailments in different systems are more insightful than those made based on an arbitrary period.

Figures 3 and 4 illustrate wind and solar curtailment, respectively, in selected countries or areas in the form of C-E maps (correlation maps between energy share of wind/solar/wind+solar and annual curtailment ratio). Figure 5 illustrates total wind and solar curtailment.

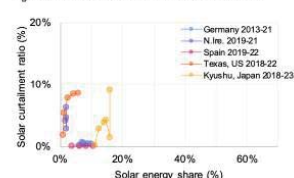


Figure 3. C-E map of solar in selected countries/areas. (Source: adapted from Yasuda et al., 2023).

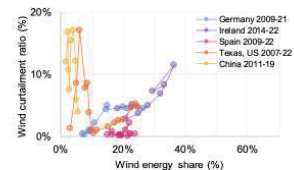


Figure 4. C-E map of wind in selected countries/areas. (Source: adapted from Yasuda et al., 2023).

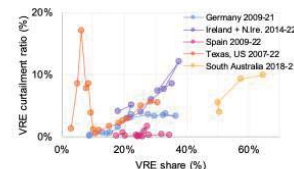


Figure 5. C-E map of VRE (wind + solar) in selected countries/areas. (Source: adapted from Yasuda et al., 2023).

The three graphs show that there are several countries/areas where the curtailment ratio is large, despite the small energy share. The sharp decline in some countries/areas, such as China and Texas, is likely to be due to the rapid development of transmission lines following large curtailments, which means that the curtailment problem could be quickly resolved through appropriate measures. The Irish curtailments in Figure 4, where large wind share is managed in a small synchronous zone, gives a reference on how curtailments develop as wind share increases in the future.

Remark on Figures 3-5: Note that curtailment in some of the countries, such as Australia and US, may include 'economic dispatch' that is voluntary market behaviour, which should be distinguished from the curtailment that is forced by transmission system operators. Note also that evaluating the C-E map by the total volume of wind and solar could be misleading as it may result in an underestimation/overestimation of the levels of individual wind/solar curtailment in some countries/areas where the share of one of the two sources is very large and the other very small.

Associated publications

- Holtinen, H. et al. (2021). Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation. Final summary report. IEA Wind TCP Task 25. https://doi.org/10.30402/25-122X-2021_T396
- Yasuda, Y. et al. (2022). C-E (curtailment - Energy share) map: An objective and quantitative measure to evaluate wind and solar curtailment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 160 (2022) 112212. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112212>
- Yasuda, Y. et al. (2023). Latest wind and solar curtailment information: statistics and future estimations in various countries/areas. 22nd Wind and Solar Energy Workshop. <https://iea-wind.org/task25/publications/>

More information

This Fact Sheet draws from the work of IEA Wind TCP Task 25, a research collaboration among 17 countries. The vision in the start of this network was to provide information to facilitate the highest economically feasible wind energy share within electricity power systems worldwide. IEA Wind TCP Task 25 has since broadened its focus to analyze and further develop the methodology to assess the impact of wind and solar power on power and energy systems.

See our website at

<https://iea-wind.org/task25/>

See also other fact sheets

- Flexibility for Power Systems
- Balancing Power Systems with Large Shares of Wind and Solar Energy
- Storage for Power Systems
- Wind and Solar Integration Issues



FLEXIBILITY FOR POWER SYSTEMS

Flexibility is the ability of a power system to manage variability of demand and generation. Flexibility includes power regulation and operational reserves, which have historically depended on thermal power plants. On top of dispatchable power generators, there are new sources of flexibility increasingly used, like energy storage, interconnectors and demand side management. The optimal combination of flexibility is a key issue for grid operation under large amounts of wind and solar.

What is flexibility?

Traditionally, intra-hour, hourly, daily, weekly, seasonal, and inter-annual variations in demand have been mainly managed by conventional power plants.

The ability and commitment of a power plant to regulate its power output has been called regulating power, balancing power or reserve, and various types of these products with different time scales are prepared, so that they can be activated in seconds, minutes, or hours.

Today, a broader concept of flexibility is increasingly applied by grid operators to accommodate larger amounts

of wind and solar.

The term "flexibility" is simply defined as "the ability of a power system to reliably and cost-effectively manage the variability and uncertainty of demand and supply across all relevant timescales" (IEA 2018).

Who can provide flexibility?

Flexibility can be provided from many grid elements, by larger or (aggregated) smaller power plants, storage systems, and demand side resources, depending on the time scale (Figure 1).

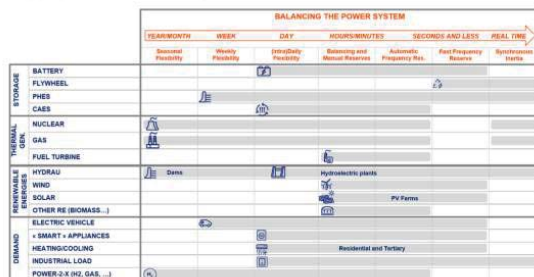


Figure 1. Flexibility solutions at various time scales. (Source: EDF).

IEA WIND TCP Task 25 – Fact Sheet

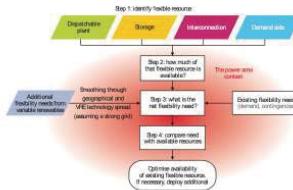


Figure 2. Flexibility Assessment Method proposed by IEA. (Source: IEA, 2011).

Flexibility sources can be divided into 4 types (Figure 2):

- **Dispatchable plant:** Hydropower plant with reservoir, bio-fuelled combined heat and power plant, gas-fired power plant, etc. A part of wind and solar can also be considered dispatchable.
- **Storage:** Hot water storage, pumped hydro storage, flywheel, battery energy storage system, etc.
- **Interconnection:** Sharing flexibility resources via interconnectors will mutually enhance flexibility in both areas. HVDC (High Voltage Direct Current) links can also provide flexibility by themselves.
- **Demand side:** Autonomous or remote control of demand side equipment can provide flexibility. Industrial processes also have significant potential for flexibility provision.

Flexibility strongly relates to the concept of sector coupling. Flexibility can be provided from the heating sector (hot-water storage and heat pumps), the transport sector (electric vehicle charging), and the industrial sector (new electric loads combined with storage buffers as well as power-to-X solutions like hydrogen derivatives).

How can the flexibility potential be assessed?

Flexibility assessment tools have been proposed by several researchers and international organisations. A simple, easy-to-understand and at-a-glance tool is Flexibility Chart developed by IEA Wind Task 25 (Yasuda et al., 2023).

The standard Flexibility Chart contains five axes that represent the proportion of selected flexibility sources (interconnector, combined heat and power, gas turbine, pumped hydro storage and reservoir hydro) relative to the peak demand in the given country or area. As these statistical data are easily available in many countries, the tool can be used even by non-experts. A further sixth axis of battery can be added if reliable statistical data is available.

Figure 3 shows an example of the Flexibility Chart, where the potential of flexibility resources in Germany is visually illustrated. Although it is often thought that Germany can accommodate renewables because of rich

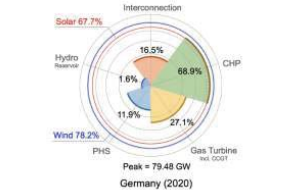


Figure 3. An example of a flexibility chart: German flexibility resources in 2020. (Source: Yasuda et al., 2023).

interconnection capacity, the Flexibility Chart shows that combined heat and power capacity can contribute more flexibility to a high share of VRE.

An example of a more detailed flexibility assessment tool is IRENA FlexTool (IRENA 2018).

Associated publications

- Holttinen, H. et al. (2021). **Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation**. Final summary report, IEA WIND TCP Task 25. <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2021.T396>
- IEA (2018). **Status of Power System Transformation 2018**. <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2018>
- IEA (2011). **Harnessing Variable Renewables**. <https://www.iea.org/reports/harnessing-variable-renewables>
- IRENA (2018). **Power System Flexibility for the Energy Transition, Part 1: Overview for Policy Makers**. <https://www.irena.org/publications/2018/Nov/Power-system-flexibility-for-the-energy-transition>
- Yasuda, Y. et al. (2023) **Flexibility chart 2.0: An accessible visual tool to evaluate flexibility resources in power systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174 (2023) 113116. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113116>

More information

This Fact Sheet draws from the work of IEA Wind TCP Task 25, a research collaboration among 17 countries. The vision in the start of this network was to provide information to facilitate the highest economically feasible wind energy share within electricity power systems worldwide. IEA Wind TCP Task 25 has since broadened its focus to analyze and further develop the methodology to assess the impact of wind and solar power on power and energy systems.

See our website at

<https://iea-wind.org/task25/>

See also other fact sheets

[Balancing Power Systems with Large Shares of Wind and Solar Energy](#)
[Storage for Power Systems](#)
[Flexibility Through Electrification](#)
[Impact of Wind and Solar on Transmission Upgrade Needs](#)
[Wind and Solar Integration Issues](#)

February, 2025

+ 日本からの貢献



- Task25有志による共同論文 (安田)
- 出力抑制国際比較
 - Phase 4 Summary Report (2018)に掲載
 - Renewable and Sustainable Energy Review に掲載 (Volume 160, May 2022, 112212)
- 柔軟性チャート
 - Renewable and Sustainable Energy Review に掲載 (Volume 174, March 2023, 113116)



C-E マップ 最新版

Solar

当日スライドにて投影

17



Wind

当日スライドにて投影

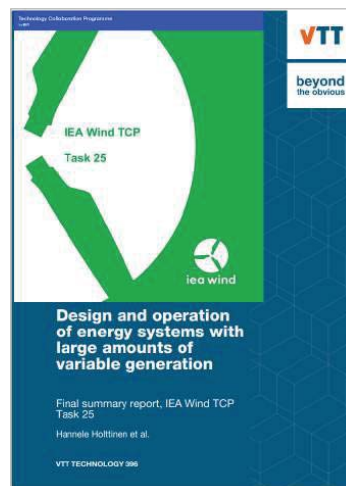
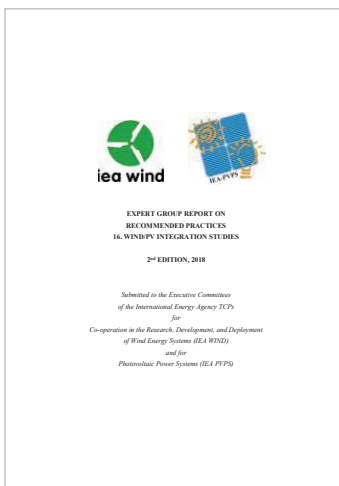
(source) Y. Yasuda et al.: Latest Wind and Solar Curtailment Information: statistics and future estimations in various countries/areas, 22nd Wind & Solar Integration Workshop, WISO23-143 (Sep. 2023) に最新データを加筆して修正



Task25成果物の翻訳

- RP16 (2018)_(PVPS Task14と共同)
- 第5期報告書 (2021)
 - https://www.nedo.go.jp/library/ZZFF_100047.html
- ファクトシート (2020年版)
 - https://www.nedo.go.jp/library/ZZFF_100033.html

18





まとめと今後の方針

毎年同じこと
言ってますが...

19



- 再生可能エネルギーの系統連系
（エネルギー統合）に関する情報や概念は、
依然として日本と世界で乖離
- Task25/63から得られる情報は非常に貴重
- 世界👉日本: Task25/63の情報の普及啓発
 - 報告書の翻訳
- 日本👉世界: 日本からTask25/63への貢献
 - 国際共同論文
 - NEDOプロ成果などの発表



Task 63: 2050年に向けた 変動性エネルギーの統合

ご清聴有り難うございました。

第14回
IEA Wind
セミナー



第 14 回 IEA Wind セミナーの Q&A に寄せられたご質問に対する回答一覧

「Task44: ウィンドファームの流れ場制御」へのご質問と回答

#	ご質問	回答
1	ウィンドファーム間のウェイク(風の影響)の問題について、どの程度議論や関心が高まっているのか教えてほしい。	イギリスでは多数のウィンドファーム建設に伴い、ウェイクや風の影響が問題視されているものの、産業界の会議では大きな議題にはなっていない。一方、国際会議では活発に議論されており、問題意識は広がっている。研究者は主に科学的評価や啓発に注力しており、実際のプロジェクトへの影響や訴訟のエビデンス化までは進んでいないが、将来的にはプロジェクト推進に関わる重要課題と認識されている。また、ウィンドファームの影響がすべて悪いわけではなく、局所的な風の緩和などプラスの効果もある。(Task44 内田氏回答)。

「Task46: 風車ブレードのエロージョン」へのご質問と回答

#	ご質問	回答
1	「企業がデータを出したがないので TASK が無くなる場所だった」、というお話が最後にありましたが、他国では素材に対する興味関心や連携が薄いのでしょうか？	詳しい状況は分からないが、タスク開始時にはコーティングメーカーやテープメーカーが参加していました。ただし、WP5 でオープンな議論がしにくかったのは、競合他社が一緒に参加している場でなかなか発言できなかったためだろうと考えています。その上で、各国で大学と企業がタッグを組んでデータを交換ししっかり研究を進めているプロジェクトが動いているため、材料が重要ではないと考えているということは決していない。(Task46 田中氏回答)。
2	発表において、20～30 年持つ対策塗料なり対策テープが出来ていないというコメントをさせられていますが、何の情報を根拠にした情報でしょうか？	タスクの OA も含めてタスク参加者間の共通理解に基づいています。20 年から 30 年もつ対策塗料やテープが「できていない」という状況については、確かに良さそうな材料はできてきているが、それらの材料が開発されて数年しか経っ

#	ご質問	回答
		てないため、風車の寿命期間にわたっての実証が完了していないことが理由であります。そのため「今後出てくる可能性はある」ものの、現状では「基本的には数年しかもたない」という認識であり、何年で取り替えなければいけないかの予測をできるようにしていくことが必要というのが研究者の中での共通の理解である。 (Task46 田中氏回答)。
3	学術研究の立場からは、国際的な連携やオープンな研究開発の推進が重要だと考える。一方で、企業にとっては国際競争力の維持のため、自社のコア・コンピタンスとなる技術やデータを容易に公開できないという現実もある。このように、国際協力によるオープンな研究開発を進めるべき領域と、企業が自社の強みとして守るべき領域との間でどのようにバランスを取るべきか？また、日本の強みを国際標準化の過程で他国に先取りされるリスクもあるが、そのような状況を踏まえ、日本としてどのように国際標準化や協調に向き合うべきか？	研究機関として企業の戦略には踏み込めないが、企業と共同研究の形で協力し、出せる技術やデータを活用しつつ自施設の試験設備も利用して研究を進めている。日本のメーカーは短期間で装置や材料の耐久性を高める技術力があり、関係者と議論しながら進めることで十分なデータが得られると考えています。(Task46 田中氏回答)。 国際共同研究を通じて、日本の強みである材料や試験技術を確立・標準化し、世界に発信することが重要である。企業との協力では、出せる情報と守るべき技術のバランスを取りつつ、特許や標準化を活用して日本の技術力や産業ポテンシャルを高めていくことが望ましい (国内委員会委員長 石原氏コメント)。
4	エロージョンの長期モニタリング(テストサイト)について、対象となるサイトの条件(陸上でも可能か、規模や期間など)や、現在そのようなサイト募集や取り組みが行われているかを確認したい。	実証フィールドでのエロージョン試験については、定量化の標準方法はまだ確立されていない。そのため、共通の評価シートや施工方法を用いるなど、複数サイトで統一的に評価できる仕組みを検討しており、短期間での評価手法も模索中である。(Task46 田中氏回答)。

「Task49:浮体式風力発電所の統合設計」へのご質問と回答

#	ご質問	回答
1	着床式と浮体式の風力発電における水深の目安や閾値について、IEA ではどの程度を想定しているか、また設置可能な最大水深について議論があるかを教えてほしい。	タスク 49 では水深の具体的な議論は行っていないが、例として浅いところで約 60m, 着床式では実際には 50m 程度までが一般的と考えられる。浮体式については石油・ガス分野で 1000m までの実績があり技術的には可能だが、コストや現実性の問題が制約となる。(Task49 山口氏回答)。
2	実際の工事で潜水作業が可能な深さはどの程度か(ダイバーでは約 450m と聞くが、この認識で合っているか)、また石油・ガス分野で 1000m までの設置実績があるとのことだが、実際にはそこまでダイバーが深く潜らずに設置できるのか、技術的・作業面での制約について教えてほしい。	福島での事例では水深 150m 程度だが、アンカーはドラッグアンカーで設置されるため、人が潜って作業する必要はなく、点検も ROV などの遠隔操作装置で行えるため、潜水作業の深さは直接の制約にはならない。(Task49 山口氏回答)。

「Task53:風力発電の経済性」へのご質問と回答

#	ご質問	回答
1	日本においては三菱商事が撤退となり、その他のプロジェクトも経済性が厳しいとの話が聞こえてきます。 WP2 のコストモデルでは 近年 コストが厳しくなっていることが再現されるでしょうか。	WP2 のモデルでは物価上昇などの要素をまだ考慮していない一方、WP3 では物価上昇を含む不確実性を評価する取り組みが進められています。不確かさの評価とともに、その不確かさを誰が負担するのかという議論が必要だと考えております。(Task53 菊地氏回答)。
2	浮体式風力に先立ち、既存の陸上・着床式風力のコストや経済性を整理・発信する重要性について御教示いただきたい。	陸上風力・着床式洋上風力の実績があるため、モデルの検証が可能であり、これからのコスト低減にどのような技術・制度が必要かを議論するために重要となります。また、日本における 2030 年までに 10GW の導入目標は着床式洋上風力の導入が主要であり、着床式洋上風力のコスト低減・価値増加をいかにするかが喫緊の課題となっています。(Task53 菊地氏回答)。

#	ご質問	回答
3	洋上風力の研究可能性について、特に海底送電ケーブルのコストが高く軽減が難しいため、経済性の観点から陸岸からの距離が制約になるのではないかと。	送電ケーブルコストは着床式洋上風力で CAPEX の 15%程度とイギリスでは報告されています。送電ケーブルコストを負担する機関は、国・送電事業者・発電事業者と国ごとに異なっており、将来的な離岸距離の拡大に向けて日本でも重要な論点になると考えられます。(Task53 菊地氏回答)。 ドイツでは 10 年前から着床式風力が 100km 以上の距離で接続されており、長いケーブルや高コストの洋上変換ステーションが必要です。しかし、コストだけでなくベネフィットも考慮すると、約 10 年で回収可能だと試算されています。コスト論だけで議論すると将来得られる予定だったベネフィットを見逃すことになり、却って世代に負担を押し付けるリスクがあります。(Task63 安田氏コメント)。

「Task56: 洋上風車動的解析コードの検証」へのご質問と回答

#	ご質問	回答
1	万が一のトラブルや撤去作業の際に、人が潜れる範囲の深さでないと安全面や作業の心配があるが、その点についてどのように考えられているか。	500m 程度の水深でも技術的には問題なく、ROV (水中ロボット) を用いた点検や作業技術は石油・ガス分野で確立されており、2500m 級でも実績があるため、潜水が必要になることはほぼない。(Task56 吉本氏回答)。 ドラッグアンカー方式では引張試験で安全性を確認できるが、TLP のような高いテンションの構造では破損リスクが高く、現地確認の必要性も理解できる。今後は人の代わりにロボット技術を活用して、深海での点検精度を高めていくことが重要である。(国内委員会委員長 石原氏コメント)。

「Task62: 風力発電の計画と市民参加の社会科学(Task28 の後継)」へのご質問と回答

#	ご質問	回答
1	講演やパネルで触れられたように、環境評価だけでなく社会影響評価も必要だと思います。どのような項目を調査すべきか、評価期間なども含めて、先生の考えやアイデアをお聞かせいただけますか。	戦略的環境アセスメントでは、環境だけでなく社会的影響も評価します。具体的には、地域経済効果や災害時のレジリエンス、土地利用の最適化などを総合的に考慮します。個別事業については、利益分配や事業説明の方法、関係者へのコミュニケーションをチェックリスト方式で評価・認証する仕組みがあります。事業者自身が公表する方法や、第三者機関が評価する方法の両方があり、社会的影響を可視化することが可能です。これにより、風力開発の社会的受容性や持続可能性を高めることができます。(Task62 丸山氏回答)。

「Task63: 2050 年に向けた変動性エネルギーの統合(Task25 の後継)」へのご質問と回答

#	ご質問	回答
1	コストだけでなく、Benefit も議論に含める必要があるとのことでしたが、議論から漏れやすい Benefit には、具体的にどのようなものがあるのでしょうか。よろしくお願いいたします。	議論から漏れやすい Cost や Benefit はまさに「外部不経済」と呼ばれます。日本では、従来電源の外部不経済があまり定量評価されず、それが再エネの便益(ベネフィット)が強調されない理由の一つです。(Task63 安田氏回答)。
2	先ほどスペインの市場取引につきまして、1次調整力については、記載されておりましたが、スペインでも一次調整力は、ガス火力や水力に依存しているのでしょうか。	1次調整力 (FFR) については、TSO からデータが公開されていないため不明です。おそらく、相当部分、再エネ (特に水力および風力) が貢献していると推測できます。しかし、データがないため、現時点では断定はできません。(Task63 安田氏回答)。
3	日本が風力拡大にどう貢献できるか、特に技術面や政策面での支援方法についてご教示頂きたい。	日本の浮体式洋上風力の要素技術はすでに整っており、雷対策や台風対策、無人化構造などの技術など、日本から国際的に発信されている分野もます。しかし、市場拡大が低い目標設定のために進まず、産業や雇用、GDP への貢献も制限されており、技術の普及は制度設計や政策の課題に依存しています。また、系統

#	ご質問	回答
		連系分野でも国内案件の少なさが産業活性化を妨げています。(Task63 安田氏回答)。
4	現在の日本の電力市場の柔軟性の課題に関連して、具体的にフレキシビリティを集めて系統安定性を保つ運用をしている国や、それを市場設計に活かしている国があるかどうかについてお聞きたい。	フレキシビリティを活用した系統運用・市場運用を行っている国として、スペインが挙げられます。スペインでは 10 年以上前から日本の二次・三次調整力に相当する需給調整市場で風力・太陽光・水力なども入札でき、柔軟性の能力が市場で取引されています。デンマーク、ドイツ、イギリス、アメリカの一部の自由化された市場でも同様の取り組みが進んでいます。一方、日本では 2022 年から需給調整市場が段階的に始まったものの、まだ公平で非差別的な市場とは言えず、小規模な柔軟性供給源が十分に参入できない課題があります。(Task63 安田氏回答)。
	ヨーロッパで再生可能エネルギー100%を達成している国では、各電源の比率はどのようになっているのか、特に風力はどのくらいの割合を占めているのか教えてください。また、日本が 2030 年に再生可能エネルギー100%を目指す場合、風力・太陽光・水力のうち、どの電源を主力として伸ばすのが適切か、ご意見をお聞かせください。	どれかの電源だけを突出させると柔軟性が低下するため、バランスが重要です。IEA のシミュレーションでは、太陽光と風力がそれぞれ約 30% ずつ、残りをバイオマスや水力が占める構成が最適とされています。日本でも同様に、土地条件や系統制約を考慮しつつ、シミュレーションや経済モデルに基づいたバランスの良い電源構成が望ましいです。(Task63 安田氏回答)。

「パネルディスカッション 1: 風力発電の技術開発の課題と取り組み」へのご質問と回答

#	ご質問	回答
1	発表有難う御座いました。産業界を巻き込んだ考え方を進めて行こうとされているとの事ですが、現在の進め方の中で本当に産業界に繋がっていくのかと思います。実際の産業の声を集める為にも、様々な一次産業等も含め、各産業へ大きなコミュニティを作っていくお考えはありますでしょうか？	現在日本が参加しているタスクの中にはサプライチェーンを作るような話は含まれていません。IEA Wind は基本的に国際共同研究の場であり、情報を取りに行くだけでなく、共同研究としてプレゼンをする必要があるため、ただ情報収集をするだけでは認められません。サプライチェーンを構築し、産業界を巻き込んだコミュニティを IEA Wind の中で立ち上げたいのであれ

#	ご質問	回答
		ば、提案者が手を上げ一緒に検討していくこと になります。(国内委委員会委員長 石原氏回 答)。
2	ウィンドファームが海洋生態系や沿岸に影響を 与えているとされる事例について、特にイギリス で訴訟に発展している背景や、具体的にどの ような事象が問題となっているのかを教えてほ しい。	イギリスでは新しいウィンドファームが既存の風 車から風エネルギーを奪う「風影響」の問題が 指摘され、報道では「風を盗んだ」と表現される こともある。実際には風車の間隔や風の変動に より、遠く離れた風車の発電量が数%減少する ことがあり、これが争点となっている。現在、イ ギリス政府や研究機関が実データをもとに定量評 価を行い、影響を明らかにする取り組みを進め ている。(国内委員会院長 石原氏回答)。
3	地球環境シミュレートにおいて「風力発電」での 影響を組み込まないと計算が合わない、と言わ れているようなコメントありましたが、それは風力 発電が環境負荷になるという意味でしょうか？	寒冷地機構における着氷シミュレートにおいて も同じですが、不確実性が含まれる限り、〇〇 が要因であると断言できないと思います。要因 の一部となる可能性があるという表現にとどめ るべきかと思います。また、風力発電の影響が 環境負荷を与えたとしても、風力発電によって 削減された化石燃料発電の環境負荷を評価す ることで相殺されると考えることもできます。 (Task54 岩井氏回答)。 環境負荷ということではなく、それなりのボリュ ームを持ってきているので無視できない、と理 解しております。(Task44 内田氏回答)。 風車の大型化に伴い乱流を避けるため風車間 の距離を広げるようになってきています。そ の結果、風車音の合成が減って騒音問題が改 善しているという例もあります。(Task62 丸山 氏回答)。