

風力発電の現状と将来展望

東京大学大学院工学系研究科教授
石原 孟

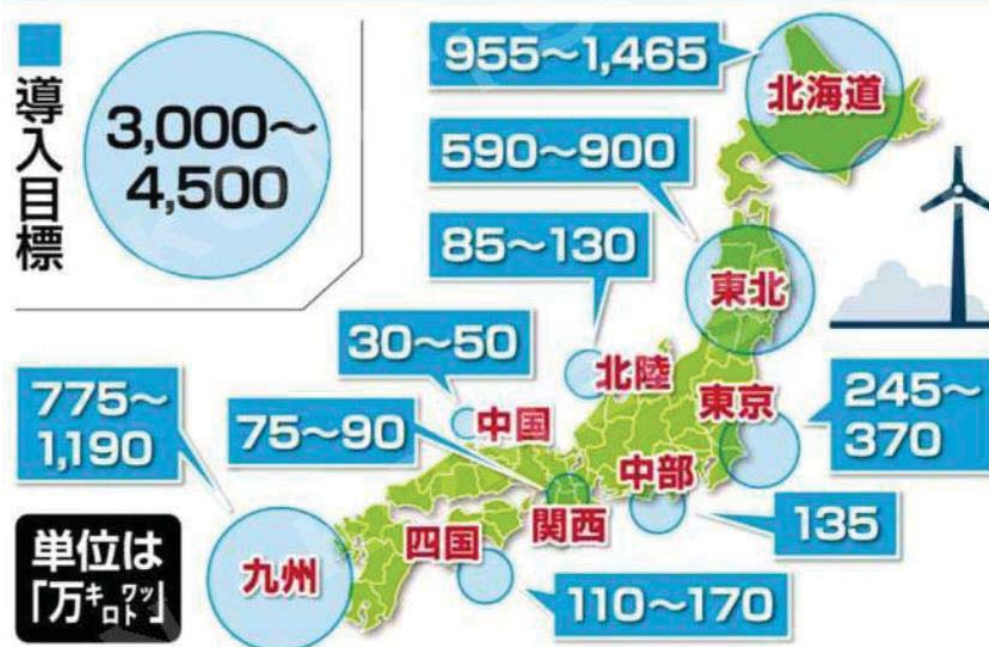
2021年2月16日

第8回 IEA Wind セミナー

2

- IEA Windには、国際共同研究活動（以下、Task（タスク））を行っています。日本の風力発電技術の更なる発展・向上及び風力発電のIEC 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。
- 本セミナーでは、特に日本が参加しているTaskについて、最先端の研究成果をご紹介するとともに、国内の風力発電関係者の皆様にとって有用な情報を提供いたします。
- 参加希望者は例年、200人から300人ですが、今年は779名を達し、これまでにない参加希望者の数となりました。

- 2020年10月総理所信表明演説で「我が国は、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体でゼロにする、すなわち、2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すこと」が宣言された。
- 2020年12月15日洋上風力の導入目標を定めた「洋上風力産業ビジョン」をまとめ、発表した。2030年までに1000万kW、2040年までに最大4500万kWの導入目標を掲げた。
- 2020年度第3次補正予算で、総額2.0兆円のグリーンイノベーション基金が創出された。



2020年11月、秋田県北部（能代市、三種町および男鹿市沖）、秋田県由利本荘市沖（北側・南側）、千葉県銚子市沖において、洋上風力発電事業者の公募が開始されました。

洋上風力発電導入拡大のための促進策

1. 洋上風力発電の研究開発（2008年から開始）

年間数十億円の研究開発費の投入、国とNEDO

2. 洋上風力発電の固定価格買取（2013年に新設）

洋上風力発電の買取区分の設定による固定価格36円/kWhの確保

3. 洋上風力発電のための海域計画（2019年施行）

2016年7月1日に施行する改正港湾法により認定事業は20年間海域利用が可能
 2019年10月18日「港湾法の一部を改正する法律案」を閣議決定、港湾区域における公募占用計画の認定の有効期間を20年から30年に延長。
 2019年4月1日「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案」が施行

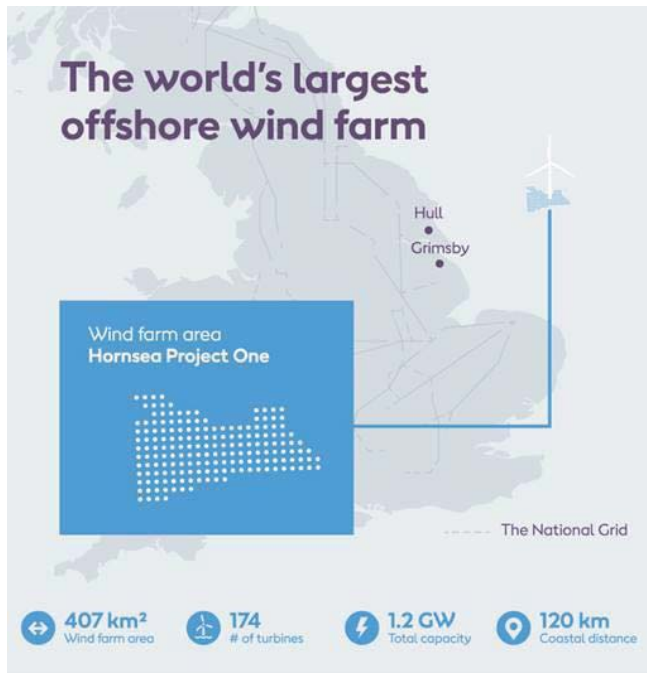
4. 洋上風力発電に関する高い導入目標の設定

2020年12月15日洋上風力の導入目標を定めた「洋上風力産業ビジョン」をまとめ、発表した。2030年までに1000万kW、2040年までに最大4500万kWの導入目標を掲げた。



洋上風力発電導入拡大の本格化

Wind farm	Total(MW)	Location	Turbines & model	Commissioning
1. Hornsea Project One	1,218	UK	174 × Siemens 7.0MW	2020

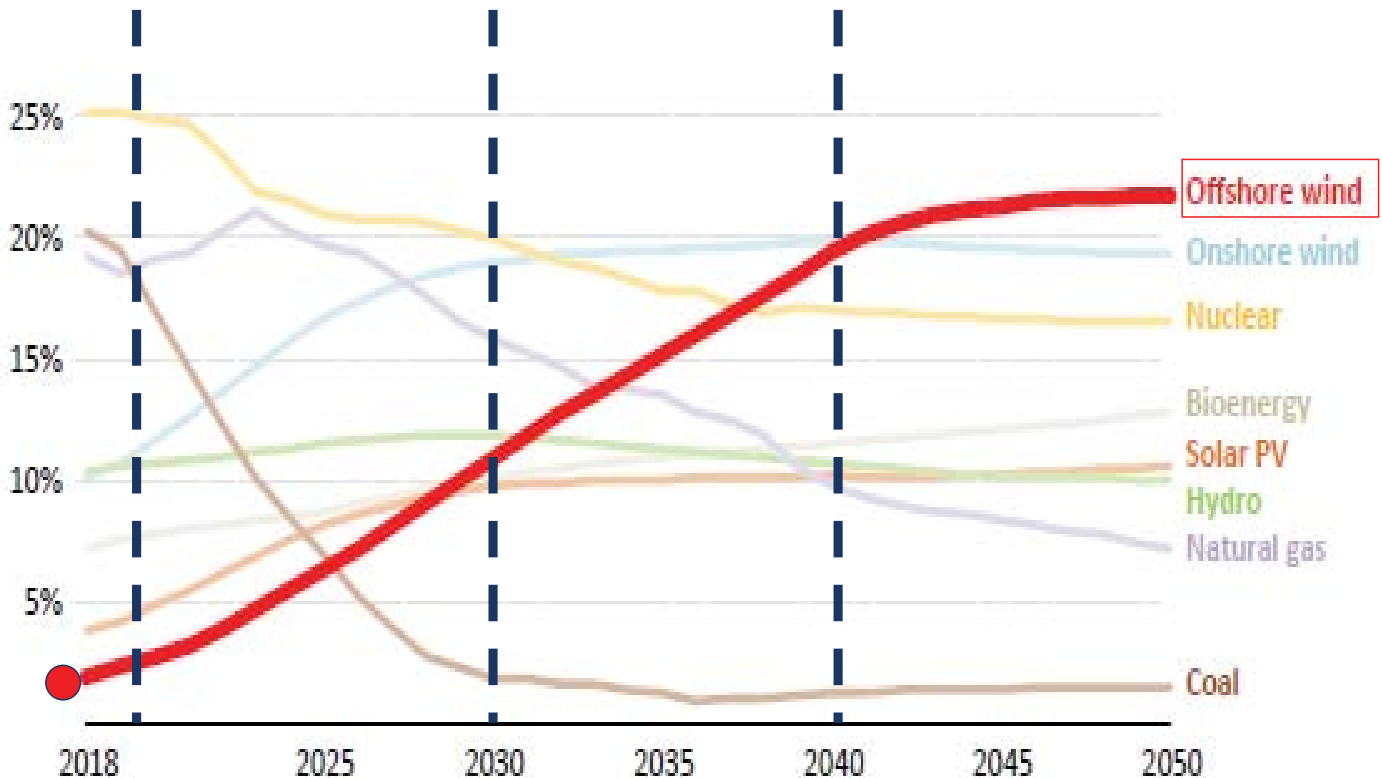


<https://hornseaprojectone.co.uk/News>

2019年10月3日最後の風車が建設され、2020年に運開

□ 2020年末UKの洋上風力の設備容量は1043万kWに達した(我が国2030年目標を超えた)

洋上風力の将来展望





講演内容及び講演者(スケジュール)

10:30 開会の挨拶

石原孟(東京大学・
IEA Wind国内委員会委員長)

10:35-11:50 午前の部

- ・IEA Windの取組概要
- ・Task11 基礎技術情報交換の活動状況
- ・Task32 風計測ライダー適用に関する検討状況

渡部良朋(NEDO)
小垣哲也(産総研)
今城勝治(三菱電機)

11:50-12:50 休憩

12:50-14:35 午後の部①

- ・Task30 洋上風車解析コードの検証(OC6)
- ・Task31 ウィンドファーム流れモデルのベンチマーク
- ・Task40 ダウンウィンド風車技術

山口敦(東京大学)
植田祐子(WINC)
吉田茂雄(九州大学)

14:35-14:50 休憩

14:50-16:35 午後の部②

- ・Task26 風力発電のコスト
- ・Task28 風力発電プロジェクトの社会的受容性
- ・Task25 風力発電大量導入時の電力系統の設計と運用

菊地由佳(東京大学)
丸山康司(名古屋大学)

安田陽(京都大学)

16:35 閉会の挨拶

伊藤正治(NEDO)

ご清聴ありがとうございました！



IEA Windの取組概要

2021年2月16日

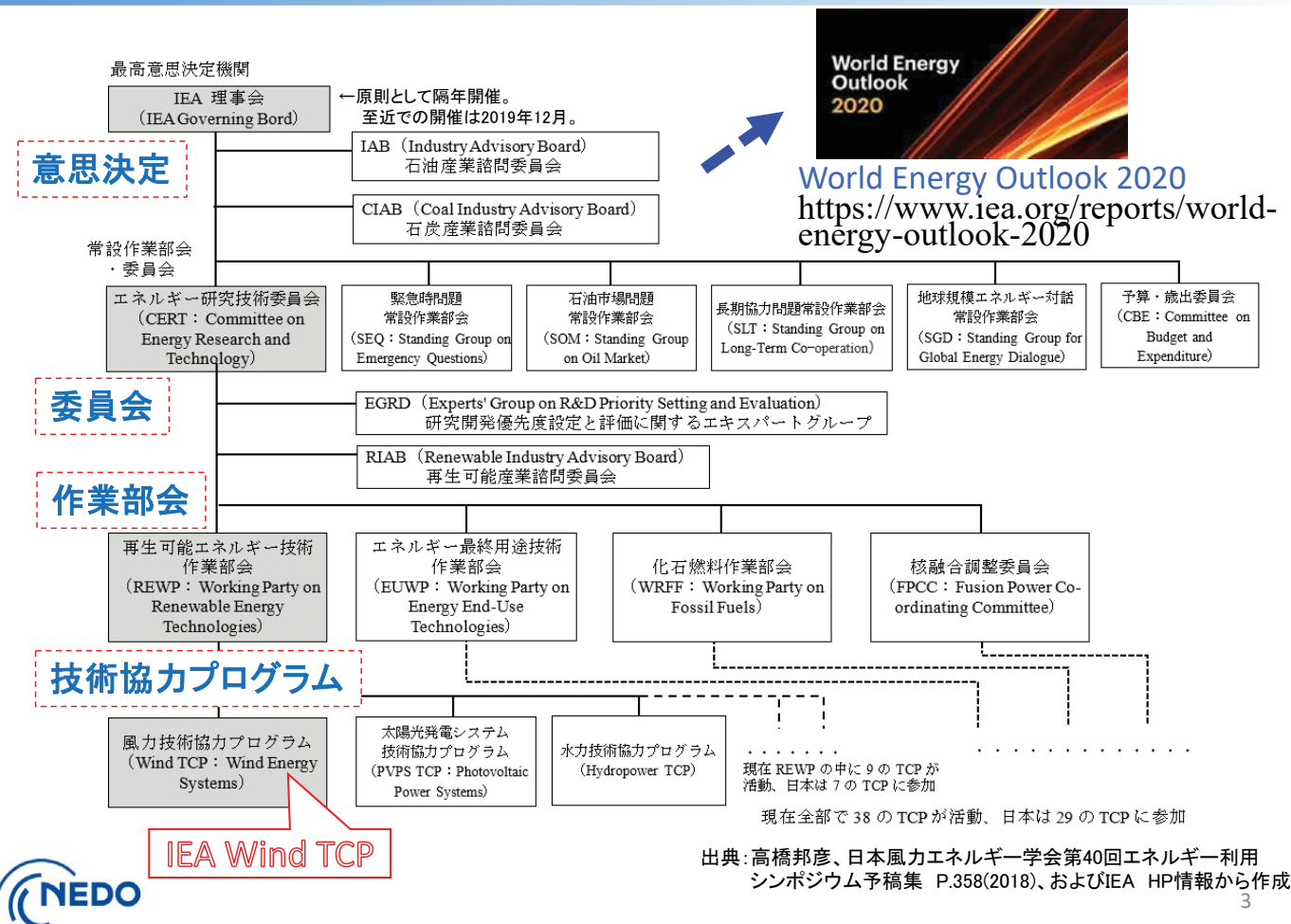
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)
新エネルギー部 風力・海洋グループ
渡部 良朋

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 국무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30カ国が加盟(2020年6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〈Engagement Worldwide〉)。
- 日本にとっては石油供給途絶の際、IEAの緊急時対応システムにより裨益することが大きい。

IEAの組織、代表的な出版物



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の下、38の技術協力プログラムがあり、そのうちの一つ。
- 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。
- 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と呼ばれる協力R&Dに取り組み、2020年12月時点で17Taskが実施中。日本は、8Taskに参加中。Task40は、日本提案のタクス。1Taskに追加参加予定。

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2回開催される執行委員会(Executive Committee, ExCo)において審議。ExCo85および86(2020年分)はCOVID-19禍によりOnline開催。
- 具体的な国際協力活動は、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。



PARTICIPANTS AT IEA WIND EXCO 85, COPENHAGEN, SEPTEMBER 2019.



ExCo85(於コペンハーゲン)におけるIEA Wind ExCoメンバー、OAおよび事務局

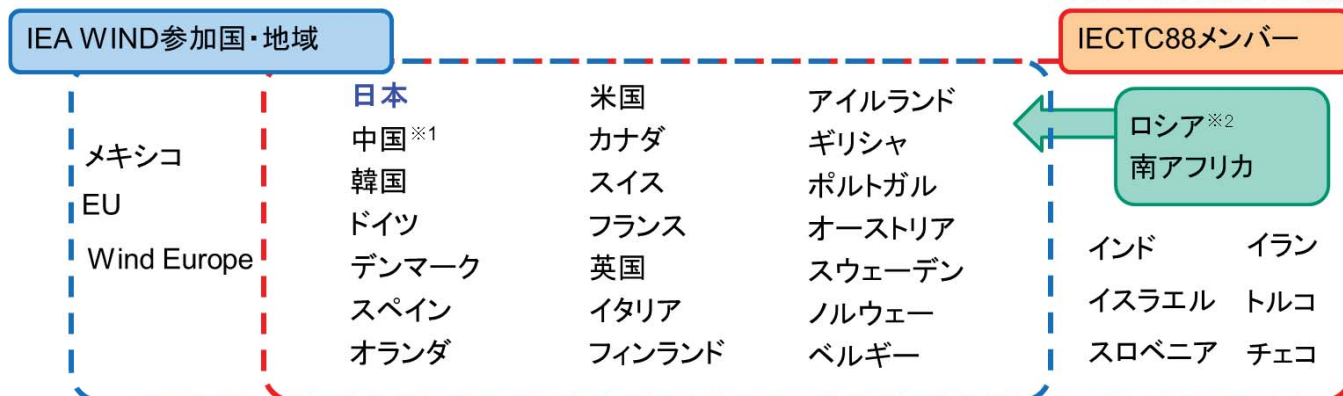
(写真:IEA Wind Annual Report2019より)

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)の風力発電関連技術国際標準化活動が、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。

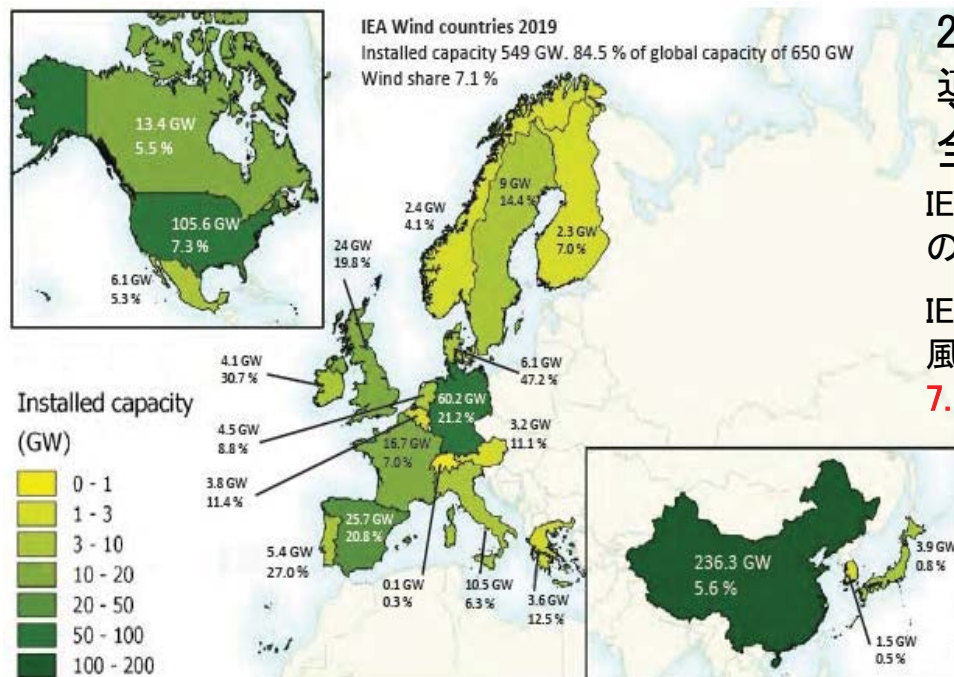


※1) 中国は中国風力エネルギー協会(CWEA)が参画。

※2) 2009年春のExCoにおいて参加承認(ただし、正式加入に向けてロシア政府と調整中)。



IEA Wind 加盟国の取組実績



2019年度末までの
導入風力発電容量と
全体の割合*

IEA Wind TCP加盟国で世界
の約**84.5%**を占める。

IEA Wind TCP参加国での
風力発電量は、電力需要の
7.1%に相当する。

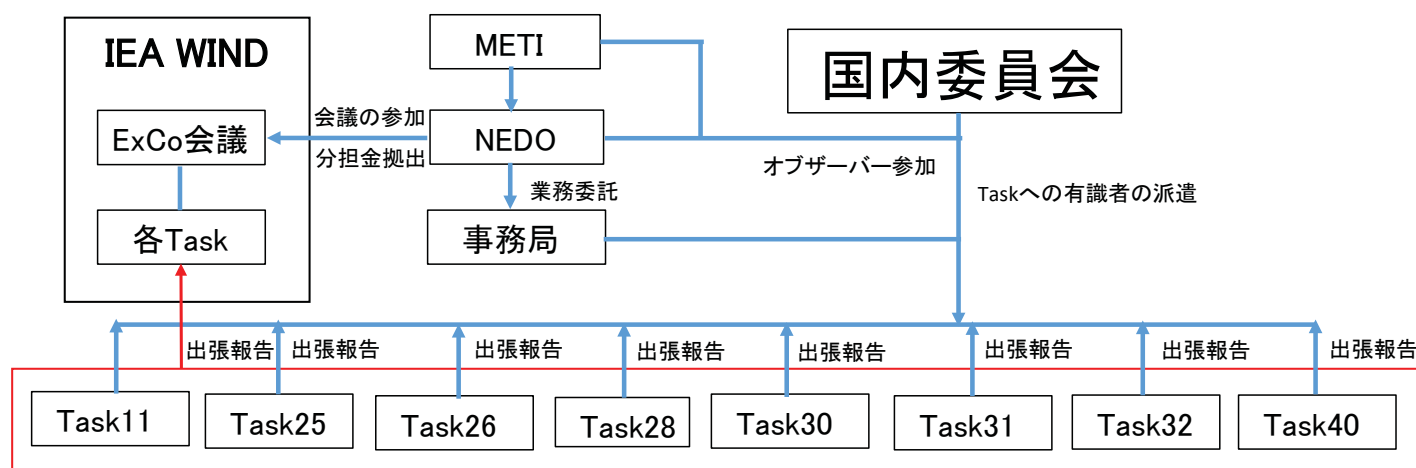
	IEA Wind TCP 加盟国	世界規模
洋上及び陸域の風力発電容量(累積)	549.1GW	650.1GW
洋上風力発電容量(累積)	29GW	29GW
2019年に設置された風力発電容量	51.7GW	60.4GW



出典: IEA Wind Technology Collaboration Programme 2019 Annual Report (2020)

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。



※Taskは2020年12月時点

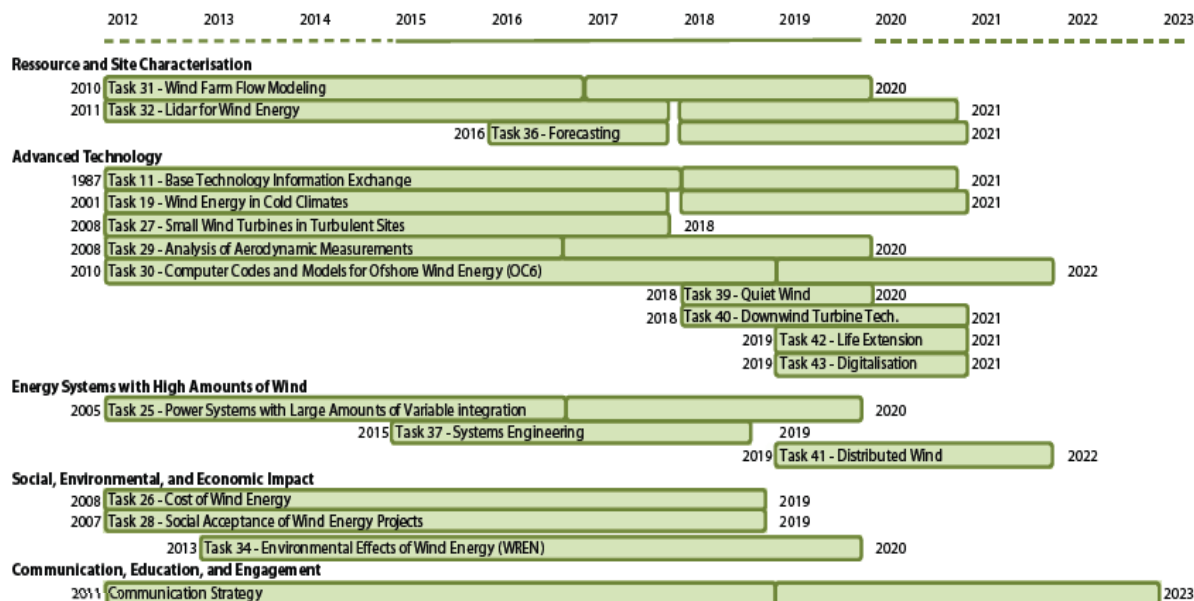


各タスクのカテゴリーとスケジュール

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、教育と取り組み (Communication, Education, and Engagement)

2015-2020 STRATEGIC PRIORITY AREAS AND TASKS



出典: IEA Wind Technology Collaboration Programme 2019 Annual Report (2020)

9

各タスクの概要-類型(1)

(1) 資源とサイト特徴化 (Resource and Site Characterization)

Task31 ウインドファーム流れモデルのベンチマーク (International Wind Farm Flow Modelling and Evaluation Framework(Wakebench)) ※日本参加Task



- ウインドファーム流れモデル(=風況シミュレーションのモデル)及びウェイクモデルの技術の向上、各モデルの妥当性の評価方法の確立。

ウェイク実験のライダー計測の事例 (SANDIA国立研究所)

Task32 風計測ライダーの風力発電への導入 (Wind Lidar Systems for Wind Energy Deployment) ※日本参加Task



- 洋上風況調査の推奨基準及び複雑地形での風況調査・ナセル搭載ライダーでの風車評価と風車制御の推奨基準の作成。

Task36 風力発電予測 (Forecasting for Wind Energy)



- 気象学に基づく発電量予測、予測モデルの不確実性の分析に基づく発電量予報の最適化。



各タスクの概要-類型(2)の1

(2) 先進技術(Advanced Technology)の1

Task11 基礎技術情報交換(Base Technology Information Exchange)



- ※日本参加Task
- 各国からのニーズが最も高い最新の研究開発トピックについて、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。

Task19 寒冷気候における風力発電(Wind Energy in Cold Climates)



- 寒冷地における風車の設置、維持管理、安全性、環境影響、稼働事例及び直近の調査結果について情報交換を行い、安全性、環境影響を考慮した大規模風車の設置を検討。

Task29 風洞実験計測データ解析と風車空力モデルの改良(Analysis of Wind Tunnel Measurements and Improvement of Aerodynamic Models)



- 風車の空気力学的モデルの妥当性の検証と改良。



写真:IEA Wind TCP Annual report 2019より

各タスクの概要-類型(2)の2

(2) 先進技術(Advanced Technology)の2

Task30 洋上風車動的解析コード比較・検証(Offshore Code Comparison Collaboration(OC6)) ※日本参加Task



- 実際の現象の再現性の評価を目的に、水槽試験及び実海域のデータを用いた検証。

Task39 低騒音風車(Quiet Wind Turbine Technology)



- 騒音が少ない風車の開発及び設置手法の検討。

Task40 ダウンウィンド風車(Down Wind Turbine Technology) ※日本参加Task



- ローターが風下に位置するダウンウィンド風車のIEC規格への適用に向けたモデルの検討、コスト分析。

○日本主導のTask



写真:IEA Wind TCP Annual report 2019より

各タスクの概要-類型(2)の3

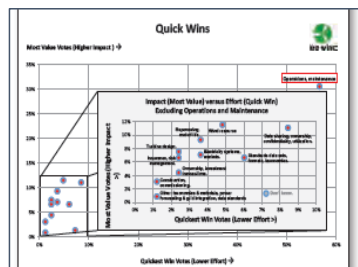
(2) 先進技術(Advanced Technology)の3

Task42 寿命延長評価(Lifetime Extension Assessment)



- 風車や風力発電機器の寿命延長のための評価技術。計画寿命(おおよそ20年)に達した多くの風車の寿命延長、リパワーリングおよび廃棄に関する実行可能な方策検討。

Task43 デジタリゼーション(Digitalization)



Digitalization検討の優先順位評価

- 風力エネルギーにとって意義あるデジタル化の内容検討、風力エネルギーセクターでのデジタル化の現状評価、ならびにデジタル化の強化によりもたらされる効果の解明、風力エネルギーセクターのためにデジタル化展開に資する他セクターでの類似事例の学習と推奨。

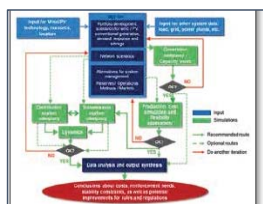


図、写真:IEA Wind TCP Annual report 2019より

各タスクの概要-類型(3)

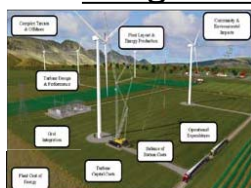
(3) 高風力量でのエネルギーシステム(Energy Systems with High Amounts of Wind)

Task25 風力大量導入時の電力システムの設計と運用(Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power) ※日本参加Task



- 電力システムへの風力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及び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。

Task37 風力発電システムの全体設計(Wind Energy Systems Engineering: Integrated Research, Design, and Development)



- 発電量、信頼性、低コストを最大限に兼ね備えた風力発電システム全体の設計手法の検討。

14

Task41 分散型風力(Enabling Wind to Contribute to a Distributed Energy Future)



- 様々な規模のタービンが一定の地域に広がる場合の電力システムの革新、もしくは次世代電力システム形成とその適正制御。



図、写真:IEA Wind TCP Annual report 2019より

各タスクの概要-類型(4)

(4) 社会、環境および経済影響 (Social, Environmental, and Economic Impact)

Task26 風力発電のコスト(Cost of Wind Energy) ※日本参加Task



- 風力エネルギーのコストに関連する知識や情報の交換を行い、参加国間でコスト要素の違いを定量化し、風力コストの計算方法を開発、共有。

Task28 風力発電事業の社会受容性 (Social Acceptance of Wind Energy Projects) ※日本参加Task



- 風力発電事業の社会的受容性についての定性的な記述と規定要因についての分析。参加国の情報を共有し、一般的傾向を踏まえて優良事例と推奨される取り組みを提言。

Task34 風力発電における環境影響の低減策 (Working Together to Resolve Environmental Effects of Wind Energy)



- 生態系や環境への影響を緩和する風力発電プロジェクトの実施方法及び技術開発方針の検討。



写真: IEA Wind TCP Annual report 2019より

新しい課題の検討

新しい課題の提案・検討

- 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。
- IEA Wind国内委員会で新タスクへの参加検討・審議。

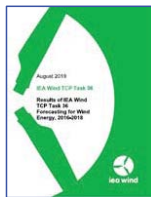
現在検討中のTEM

- TEM#101: ハイブリッドパワーの挑戦と機会 (Hybrid Power Plants Challenges and Opportunities)。(※2020年8月に開催済。Online会議。日本からも専門家が参加)
- TEM#102: 空中風力 (Airborne Wind Energy)。(※2020年9月に開催済。Online会議。日本からも専門家が参加)



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://community.ieawind.org/publications/>



Technical Report

図は2019年8月出版の「IEA Wind TCP Task 36 Results of IEA Wind TCP Task 36 Forecasting for Wind Energy, 2016-2018」の例。



Recommended Practice

図は2018年10月出版の「MICRO-SITING SMALL WIND TURBINES FOR HIGHLY TURBULENT SITES」の例。



Annual Report

図は2020年11月発行の2019年度版の例。

ご清聴ありがとうございました

IEA WIND TCP Task 11

基礎技術情報交換 (Base Technology Information Exchange) の活動状況

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 風力エネルギーチーム
小垣 哲也

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. 最近の活動の紹介
 - － 最近のTEM開催、参画状況
 - » TEM #98(エロージョン)とその後の新Task化の展開
 - » TEM #101(エアボーン風力)
 - － 最近発行のRP – 2020年に新規発行なし。
3. まとめ
 - － 今後の活動の動向

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（中国、デンマーク、ドイツ、英国、米国等）※
※：ベルギー、カナダ、デンマーク、フィンランド、ドイツ、アイルランド、イタリア、日本、メキシコ、オランダ、ノルウェー、中国、韓国、スペイン、スウェーデン、スイス、英国、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の概要

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（暫定）
- 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会社であるPlanair SAが2017年からOAとして対応することとなった。

参加国：15か国

- ベルギー、カナダ、デンマーク、フィンランド、ドイツ、アイルランド、イタリア、日本、メキシコ、オランダ、ノルウェー、中国、韓国、スペイン、スウェーデン、スイス、英国、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。



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

(2) 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(www.ieawind.org)から自由にダウンロード可能。
 - <https://community.ieawind.org/publications/rp>

TEMから新Taskへの発展

TEM #86 – Downwind Turbines、
2016/11、Tokyo、Japan

Task 40 – Downwind Turbines (ダウン
ウィンド風車)、日本が初めてTask設置提
案を行い承認され、OAを務める。

TEM #97 on Wind Farm Controls、
2019/09、Amsterdam、The Netherlands

Task 44 – Farm Flow Controls (ウィンド
ファーム流れ制御)、ExCo86 (2020.11)
にて承認、2021.1から開始。

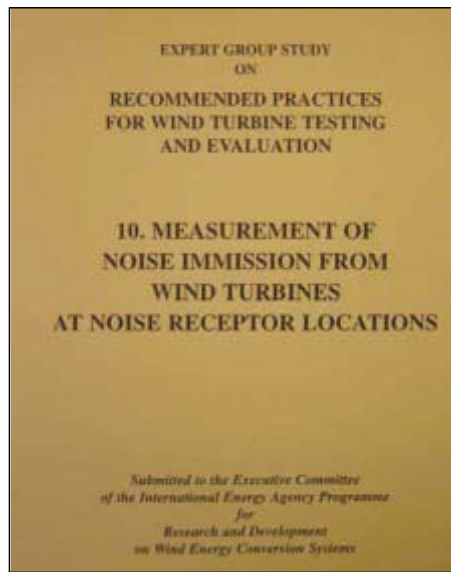
TEM #98 – Erosion of WT Blades、
2020/02、Roskilde、Denmark

Task 46 – Erosion of WT Blades (風車
ブレードのエロージョン)、ExCo86
(2020.11)にて承認、2021.1から開始。

- 2020年に開催された、TEM#99 (Floating Offshore Wind Arrays)、TEM#101 (Hybrid Power Plants)、TEM#102 (Airborne Wind) についても、新Task提案が検討、調整が進められている。

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、Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Location



IEC 61400-11
Acoustic noise measurement Techniques

最近のTEM(過去3年分)

Year	TEM #	トピック	日程	開催国	日本からの専門家の派遣・参加
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
2019	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)
	97	Wind Farm Controls	2019.9.25	オランダ	東大銭
	96	Wind Plant Decommissioning, Repowering and Recycling	2019.11.14-15	イタリア	
	95	Improving the Reliability and Availability of Electrical Infrastructure Components	2019.4.8-9	英国	
2018	94	Large Component Testing for Ultra-long Wind Turbine Blades	2019.2.25-26	米国	
	93	Wind Turbine Life Extension	2018.12.13	デンマーク	
	92	Wind Energy Digitalization	2018.10.4-5	米国	
	91	Durability and Damage Tolerant Design of Wind Turbine Blades	2018.6.12-14	米国	
	90	Community and Distributed Wind	2018.3.26-28	デンマーク	

- 2020年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。
- また、日本からも多くの専門家を派遣できた。
- 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担当委員小垣及び事務局(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 #98 on Erosion of Wind Turbine Blades

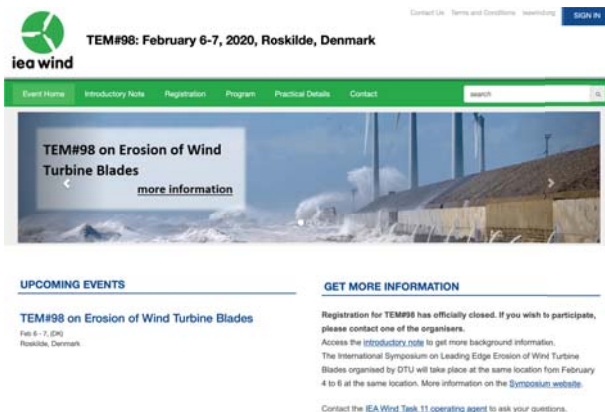
日程: 2020年2月6-7日

場所: DTU Risø Campus (デンマーク・ロスキレ)

日本からの参加: 産総研、田中元史主任研究員 (JWEAブレード技術研究会からの推薦)

概要・背景:

- フィンランドVTT、米国SNL、デンマークDTUからの提案により開催。
- International Symposium on Leading Edge Erosion of Wind Turbine Blades (LEEWTB、DTU主催) との併催 (2020.2.4-6)
- 風車ブレード前縁におけるエロージョンに対する現状の前縁保護手法 (ポリエチレン・コーティング、テープ) では、風車寿命 (陸上: 20年、洋上: 25年) に対して未だ不十分。
- 現場での補修は、稼働率の低下につながり、**運用期間全体にわたり2-3%の発電電力量の損失**となるという評価あり。
- 風車ブレードのエロージョンは、多くの学問領域にわたる課題。
 - 気象モデル: 気象現象とエロージョンとの相関性
 - 液滴・粒子軌道に関する物理学
 - エロージョンのメカニズム: 液滴・粒子・電の衝突
 - 材料特性とそのモデル
 - コーティング技術に対する実証
 - エロージョンの検出
 - エロージョンに伴う経済性への影響



IEA Wind Task 11 TEM #98 on Erosion of Wind Turbine Blades ホームページ (既にクローズ)

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

9

TEM #98参加報告 (産総研田中主任研究員)

● 3つのグループに別れて今後の課題と国際協力の可能性を議論

Group #1: Erosion mechanics and material innovations

- 劣化モデル: Liquid coring, shell, tape それぞれに特化した劣化モデルの構築。
- 対策品: 多層構造、層間物性、製造性。
- 材料物性と分析: 微細構造分析、疲労、エージング、モデリングのインプットパラメータの特定。

Group #2: Failure modes, testing & validation

- 地上試験に関する課題: 標準基材、製造欠陥、試験方法、エージング、リカバリー、評価方法、再現性
- 試験条件を液滴数で規定するのは、スプリングモデルに組み込むため。
- 次世代のモデルを構築するなら数だけではだめ。
- 回転リグは十分再現性がある。ただしアセスが難しい。

Group #3: Effect of climate and particle aerodynamics

情報交換と無駄をはぶくことと情報公開が重要。

- 優先市場 (キャパシティ×EMERGING)、洋上は、US、台湾、日本、陸上はブラジル、中国、アフリカ
- パラメータは風速、粒子径分布
- どうやってデータを集めるか。
- 実機損傷データから風洞実験を通じてAEPを求める見本のRPを作る。



- 研究者間の情報共有のツールとして、DTU主導でLinkedInグループが作られることになった (<https://www.linkedin.com/groups/12367061/>)
- 新しいTask化のプロポーザルをVTTとNRELが中心となって作成し、2020年秋のExCo会議での提案を目指すことになった。

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

10

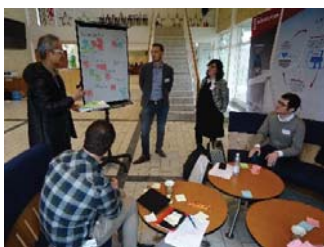
- 欧州の洋上ウィンドファームにおいて風車のブレードが運開から数年でエロージョンで損傷し、約2000本のブレードを交換する事態が発生したこともあり、欧州で多くの研究開発がスタートしたようである。日本における洋上風力発電でも今後同様の事象が発生し、事業者の負担となる可能性がある。
- エロージョンは、降雨状態予測、材料開発、空力、風車制御などの複合要因をひとつひとつ検討して対策していく必要があり、各国で、多方面の研究者が協力したプロジェクトが進められている。
- 回転試験装置は開発は進んでおり規格化の動きもあるが、肝心の実機とのバリデーションについては、そもそも実機のデータを集めることが難しく、まだ確立されていない。
- 対策品は、shell型、liquid型、tape型、metal型といった複数のものが開発されているが、それぞれに長所短所があり、完璧なものはまだない。日本では風車メーカーがないこと、降雨環境が欧州と異なる可能性があることから、欧州で開発された対策をそのまま輸入すればよいかどうかは疑問であり、日本の環境におけるブレード仕様の検討や、レトロフィットで対策できる技術が必要である。
- 欧州ではエロージョンに影響するような大雨は、降雨量の数%であるというコメントもあり、大雨時に風車の回転数を下げるエロージョンセーフモードで対処できる。これを日本の大雨環境で実施すると設備利用率に大きく影響する可能性がある。
- 以上のような状況から、欧州の先行技術の情報を収集して取り入れるだけでなく、日本独自のエロージョン対策についても、今の段階から検討していくべきと思われる。特に、降雨の状況の地域性と、その地域ごとのエロージョン状況に関するデータを収集し、欧州との違いを把握することが重要である。
- 国際連携で取り組むべき課題として、地上試験方法の確立、雨以外の粒子による影響、地域性の把握、エロージョンリスクのクラス分類等が挙げられた。これらの課題に取り組むため、新しいTask化のプロポーザルをVTTとNRELが中心となって作成し、2020年秋のExCo会議への提案を目指すことになった。

エロージョンに関する新Task提案

プロポーザルの経緯

IEA Wind Task11: TEM#98 on Erosion of Wind Turbine Blade

- 開催日: 2020/2/6-7
- 主催: IEA Wind, VTT, SNL, DTU
- 各国の研究動向を共有し、共通の課題を認識し、国際連携による解決の可能性を議論
- 情報共有ツールの整備とプロポーザルの作成開始



2020/6/9、8/5、9/16にWEBミーティング

10/12のExCo会議に提出され、Task 46として承認。

2021/1から4年間、4つのWPで実施決定。

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

Implementing Agreement for Co-operation in the Research, Development and Deployment of Wind Turbine Systems

Task Proposal on

Erosion of Wind Turbine Blades

Source: Vestas

version	purpose	date
1.0	draft circulated for participants' contribution	02-Jul-2020
1.1	updated with comments	04-Aug-2020
1.2	updated partner status, introduction, scope	16-Sep-2020

IEA Wind Task 46 Erosion of WT Blades 提案書

エロージョン新TaskのWork Package (案)

Work Package	Activity	WP code	Minimum total effort required [Person-months]
WP 1: management (Operating Agents)	task public website & task internal data platform	WP1.1	1
	technical support	WP1.2	1
	external communications (website, twitter & linkedin)	WP1.3	1
	coordination meetings / teleconferences	WP1.4	4
	outreach webinars	WP1.5	1
	reporting to IEA	WP1.6	2
WP 2: Climatic conditions	Definition of priority geographic areas for geospatial mapping of erosion potential	WP2.1	5
	Identification of crucial meteorological parameters for erosion	WP2.2	5
	Literature review and synthesize knowledge gained from projects in order to better characterize:	WP2.3	5
	(2.3) hail, rain & dust climates in target areas,	WP2.4	5
	(2.4) hydrometeor droplet size distribution as function of climat	WP2.5	2.5
	(2.5) data availability and quality for key meteorological parameters	WP2.6	7.5
	Recommended Practice (RP) for measurements of LEE drivers, including metrology development and prospects for establishing 'super sites' for testing	WP2.7	5
	Roadmap for a leading-edge erosion atlas, including Recommended Practice (RP) for use of meteo. data for determining LEE classes	WP2.8	7.5
WP 3: Wind turbine operation with erosion	Model to predict annual energy production loss based on blade erosion class	WP3.1	5
	RP on standardization of damage reports based on erosion observations	WP3.2	5
	Droplet impingement model for use in fatigue analysis	WP3.3	5
	Potential for erosion safe-mode operation	WP3.4	5
	Accuracy of LEE performance loss model based on field observations (validation)	WP3.5	5
WP 4: Laboratory testing of erosion	Available technologies report: laboratory evaluation of erosion	WP4.1	5
	Erosion failure modes in leading edge systems: coating, tape, shell	WP4.2	5
	Normalization of test substrates for rain erosion testing	WP4.3	5
	Pre-evaluation of test specimens before rain erosion testing	WP4.4	5
	Laboratory evaluation of LEE (slice length, intervals, tip speed)	WP4.5	2.5
	Laboratory simple mechanical testing for pre-evaluation of erosion resistance	WP4.6	2.5
	Correlation model to read across Laboratory erosion metrics to field erosion	WP4.7	5
WP 5: Erosion mechanics & material modelling	Literature review: damage models for rain erosion	WP5.1	5
	Literature review: material microstructure and macroscopic properties	WP5.2	5
	Literature review: on available test data for materials relevant to the erosion process	WP5.3	5
	Literature review: multilayer systems & interphase modelling	WP5.4	5
Total effort during the complete 4 year period [person-months]			127.5
Average effort per participant & year [yearly person-months]			2.5

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

13

エロージョン新Task参加国・機関

- Committed: 参加を正式に表明した機関
- Interested: 参加検討中の機関
- 現状8カ国14機関が正式に参画表明 (2020/12時点)
- 直近のWebミーティングでは、Interestedの機関のほとんどが正式に参加表明し、20以上の機関が参加する活発なTaskに発展。

#	Country/Sponsor	Participant Organization	Expert Participant	Commitment
1	Belgium	Engie	Nicolas Quiévy	Committed
2	Canada	WEICan	Carrie Houston	Committed
3	Denmark	DTU	Charlotte Hasager / Jakob Ilsted Bech	Committed
4	Denmark	Hempel	Pablo Bernad	Interested
5	Denmark	METEK Nordic	Poul Hummelshøj	Interested
6	Denmark	Ørsted A/S	Jacob Kronborg Andersen / Marijn Veraart	Committed
7	Denmark	R&D Test Systems A/S	Rasmus Buch Andersen / Rasmus Refshauge	Observer
8	Denmark	Vestas	Francesco Grasso	Interested
9	Finland	VTT	Raul Prieto	Committed
10	Germany	Fraunhofer IWES	Cate Lester	Interested
11	Ireland	Institute of Technology Carlow	Edmon Tobin	Interested
12	Ireland	NUI Galway	William Finnegan	Interested
13	Ireland	University of Limerick	Mark Hardiman	Interested
14	Japan	AIST	Motofumi Tanaka	Interested
15	Netherlands	TU Delft	Julie Teuwen	Interested
16	Netherlands	Suzlon	Sandro di Noi	Committed
17	Netherlands	TNO	Harald van der Mijle Meijer	Committed
18	Norway	Equinor	Gunnar Hognestad / Bernt Karsten Lyngvær	Committed
19	Norway	University of Bergen	Bodil Holst / Joachim Reuder	Committed
20	Spain	Aerox	Asta Šakalytė	Committed
21	Spain	Cener	Beatriz Méndez	Interested
22	Spain	CTC	Álvaro Rodríguez	Interested
23	Spain	Siemens Gamesa Renewable Energy	Gemma Gonzalez	Interested
24	Spain	Universidad Cardenal Herrera - CEU	Fernando Sánchez	Committed
25	UK	ORE Catapult	Kirsten Dyer	Interested
26	UK	Univ. Strathclyde	David Nash	Interested
27	US	Cornell University	Sara C Pryor	Committed
28	US	Sandia National Laboratories	David C Maniaci / Josh Paquette	Committed

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

14

エロージョンに関する研究動向

●大規模レインエロージョン事例

- London array 洋上風車175本中140本修理 (2018)
<https://renews.biz/110465/london-array-braced-for-blade-fix/>
- Anholt 洋上風車111本中87本修理 (2018)
<https://renews.biz/110279/anholt-grapples-with-blade-fix/>



●各国でのR&D

Surprisingly many projects

- DTU' Innovation Foundation EROSION and DURABLEGE
- EU H2020 LEAPWind: Leading Edge Advanced Protection using novel thermoplastic materials, Ireland
- COBRA Comprehensive methodology for Blade Rain erosion Analysis, DNV GL
- Blade Leading Edge Erosion Programme (BLEEP), ORE Catapult
- H2020-SMEInst-2018-2020-2 Innovative Leading Edge Protection System for Wind Turbine Blades, Spain
- "AEI-010500-2015-373 Design, validation and manufacturenew polycarbonatediol-polyurethane based coatingleading edge, Spain
- Wind turbine blade erosion, EDF
- BeLeB: Development of a method for determining the service life of rotor blade coatings, Fraunhofer,
- TU Delft.... and many others And industrial labs.... and polymer companies..

●国際連携の動き

International Symposium on Leading Edge Erosion of Wind Turbine Blades

- 1st : 2020/2/3-6 @DTU
- 2nd : 2021/2/2-4 @DTU

- 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。
- 各国での大規模研究開発を経て国際連携研究の機運が高まる。

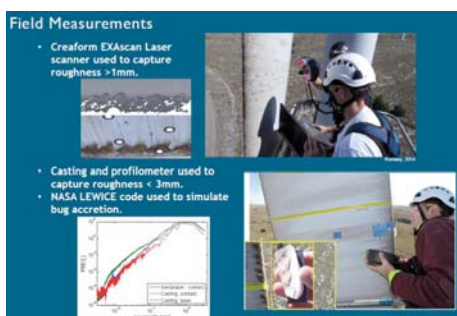
エロージョンに関する研究開発課題

1) エロージョンの要因が明確ではない



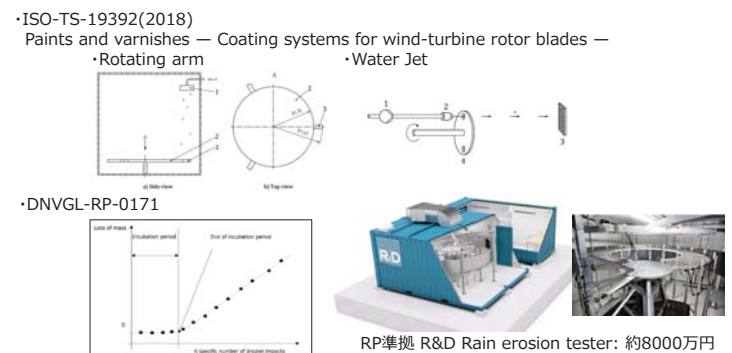
2) エロージョンの影響が明確ではない

- 翼性能 • AEP • メンテナンス ...



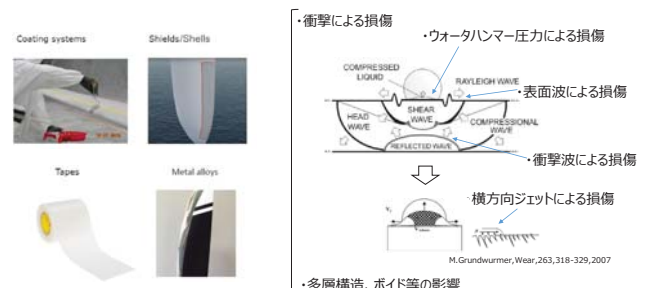
3) 地上試験の方法が明確ではない

- 規格化の動きはあるが実機とのバリデーションが未完



4) 対策技術が確立されていない

- 対策品やエロージョンセーフモード等、完璧はまだない

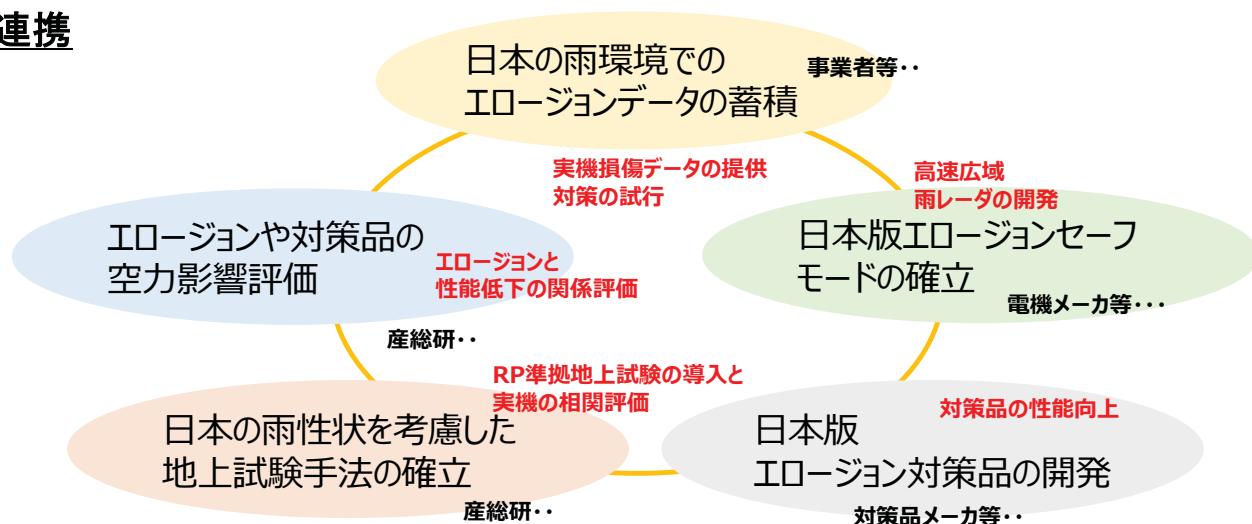


エロージョンに関する日本の対応

日本におけるエロージョン対策技術確立の意義

- 今後日本でも、陸上洋上ともに風車が大量導入される。
- 欧米と環境が異なるため、欧米の技術(対策品や風車制御等)が日本で適用できないリスクがある。
- 欧米の技術に頼ることで対策コストが増加するリスクがある。
- 国産技術にとってもビジネスチャンスである。

必要な連携



NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

17

TEM #102 on Airborne Wind Energy (AWE)

日程: 2020年9月23-24日

場所: オンライン開催

参加: 東京都立大(TMIT)藤井、九大吉田・Mostafa Rushdi、前田建設工業丸山、神奈川工科大久保、福井大高橋、トヨタ板倉(JWEA空中風力発電研究会)

概要・背景:

- ドイツ・Stuttgart大学がリーダーとなり提案がまとめられる。その他、フランス・IFP Energies Nouvelles、米国・NREL、オランダ・TU Delftに加え、日本からは九大も企画・提案に参加。
- エアボーン風力技術は、少ない材料、高い設備利用率から、従来の風力発電技術と比較して、**LCOEの劇的な向上や、環境影響・CO₂排出の劇的な改善の可能性**がある。
- Airborne Wind Europe(AWEurope)では、AWEシステムの開発は、**2030年までにGWオーダーに、2050年までには、数百GWオーダーに達すると予測・期待**している。
- しかし、**AWEを広く商業化するためには、依然として、様々な課題を克服する必要があります**、特に、**安全性、技術ガイドライン、資源量・導入ポテンシャル評価、市場性、工学的問題、社会受容性、規制に関する課題**を解決する必要がある。



Source: TU Delft

Airborne Wind Energy Systemに関連する大学・研究機関・企業 (Source: R. Schmehl, TU Delft 2020)

目的:

- これまでに、AWEに関するcommunityとしてヨーロッパを中心にAWEuropeが組織され、2年に1回、AWE Conference(前回は2019年にグラスゴーで開催)が開催されることで、課題解決に向けた連携が進んできたが、この機会にIEA Wind Task 11 TEMとして、**広くヨーロッパ以外の関係者と連携することにより、AWE技術の発展が加速され、関連する技術のブレークスルーにつながることが期待される。**

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

18

- 多種多様な形態のプロジェクトが走っているので、これらの横断的な要素の抽出、さらに、現在進行中の各プロジェクトの代表する要素を抽出して、できれば代表的なモデルを構成して試金石的に開発を試みる必要がある。
- 現在AWEはよく知られている研究・開発と商業化との間の「死の谷: Death Valley」に入っており、脱出のためには交互の協力と国際協力などによる開発が必要である。特に、Makani Powerの資料(近く公開の予定)とデルフト工科大で得られた貴重な実験データの検証を行う。
- AWEの研究開発から商業化、および法律関係や教育まで幅広いトピックに関して問題提起とそれに対する議論が活発に行われた。
- AWEに関しては本質的な必要技術力の高さが一つの課題であり航空工学だけの技術では太刀打ちできない専門性がある。100kW級以上の実システムの研究開発でも1つのグループが行える範囲を超えており、航空工学、制御工学のみならず、発電や蓄電、配電など多くの技術が求められる。
- AmpyPower社やMakaniPower社においても商業的な過程に進むためには、今後も多くの研究開発資金やヒューマンリソース、実験スペースや各関係省庁との交渉が必須である。
- AWEでは柔軟なカイト、固定翼、上空/地上発電、風車の有無など多くのタイプがあり、またその特性や発電容量、向き不向きなどが多様である。

今後の見通し・所感:

- **AWEをExCoで新タスクとして提案する。**内容の絞り込みも議論になっており、テーマが多く、長期的なタスクとなることが予想される。
- 既に、発電可否に関する話題はなく、規模、コスト、導入の議論になっており、国内の取り組みと比較して進捗している印象。日本の出遅れ感が大きい。
- 我が国の活動としては、これらの多様性を認めつつ、しかし効率よく研究開発を行うため、当然国際的な協力を仰ぎながら、しかし模倣だけに終わらず貢献していく必要がある。
- 我が国でもAWEのような新産業が商業的に成立する為には、産学官が協力して“しっかり学ぶ”組織を形成して、“産学官協力”を進める必要がある。

RP, Recommended Practice

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	
17	Wind Farm Data and Reliability Assessment for O&M Optimization	O&M最適化のためのウィ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	2019		

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。
- 新タスク化の動向
 - TEM#97(Wind Farm Controls) - Task 44として提案・審議中。
 - 東大銭先生・石原先生の参加について検討・調整中
 - TEM#98(Erosion of Wind Turbine Blades) - Task 46として承認。活動開始
 - 産総研田中主任研究員がオブザーバ参加。正式参加に参加について検討・調整中
 - TEM#99 - Floating Offshore Wind Arrays – 新Taskとして検討・調整中。
 - TEM#101- Hybrid Power Plants – 新Taskとして検討・調整中。
 - TEM#102(Airborne Wind) – 新Taskとして検討・調整中。

【第9回 IEA Wind セミナー】 Task32：風計測ライダー適用に関する検討状況

三菱電機株式会社 情報技術総合研究所
光技術部 EOシステムグループ

今城 勝治

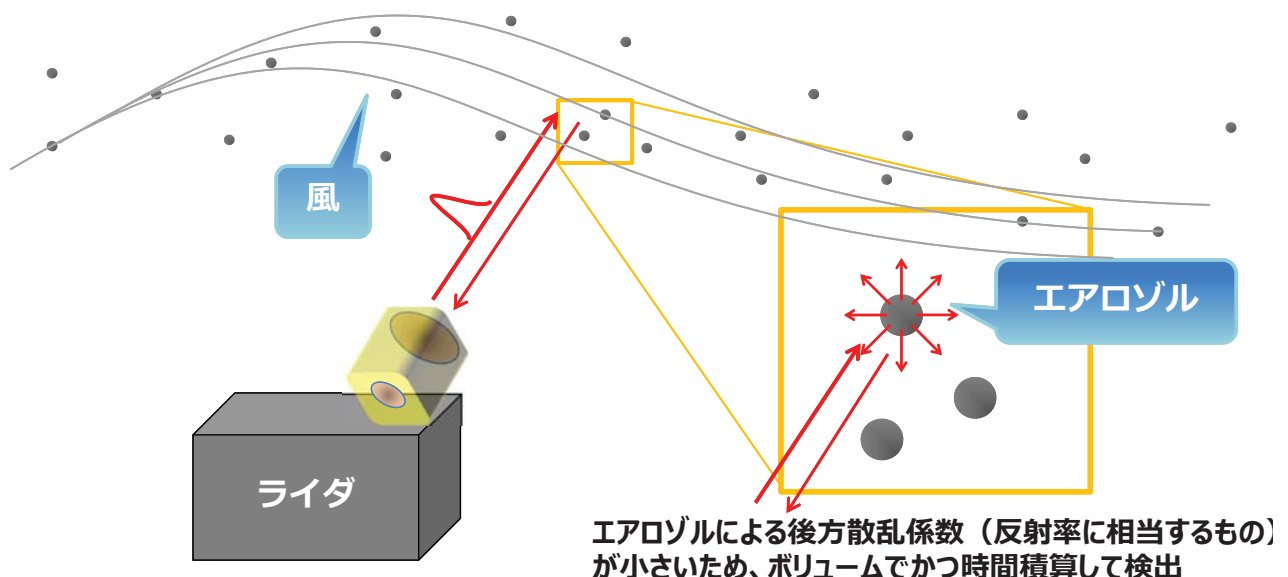
2021年2月16日

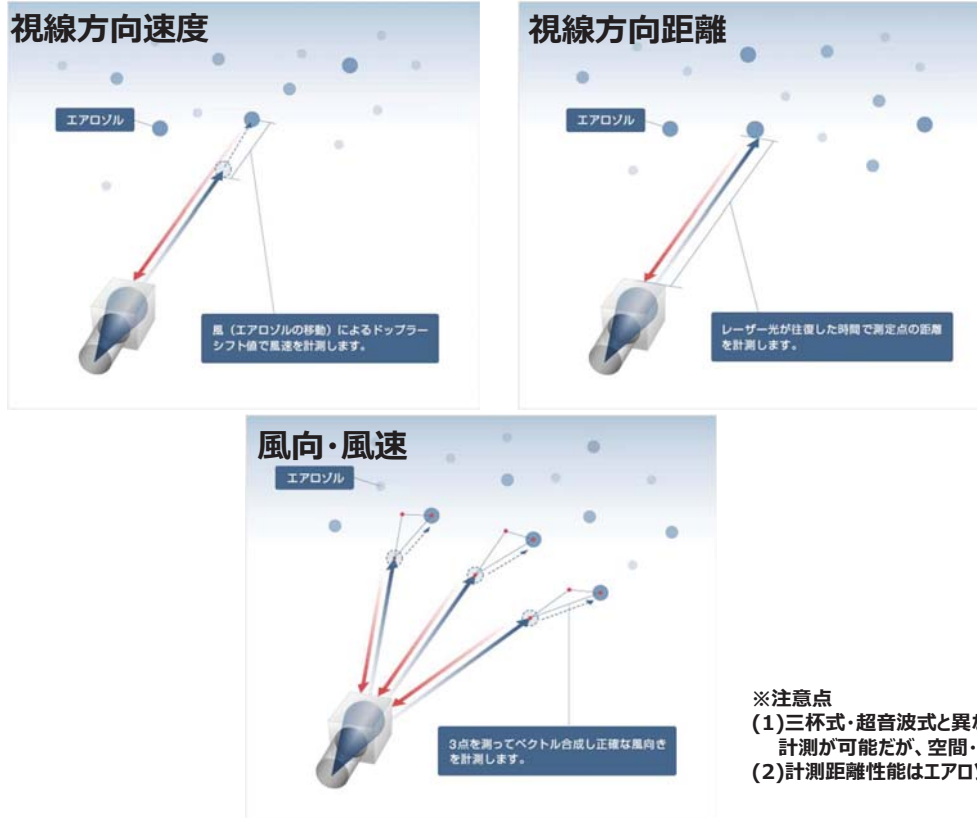
ドップラーライダー

レーザー光を用いて、遠隔に風速の分布（風向・風速）を計測する装置

ライダーの特徴

- ・ レーダー（電波）に比べてレーザー光の波長が短いため、大気中に浮遊しているエアロゾルのドップラー信号を受信でき、晴天時でも風況観測ができる
- ・ ソーダー（音波）に比べ、局所空間での計測が可能





Task32の目的

- ドップラーライダーの風力発電での利用ガイドラインの策定が目的
→ 具体的には、
①発電サイトのアセスメント、②パワーカーブ評価、③風車制御、④複雑な気流、
に対する、ライダー使用時の課題整理と改善方法
- Recommended Practice(RP)や論文を発行して成果とする
→ 本成果をたたき台として、IECでの標準化が検討される
- Operating Agents(OA)は
Andy Clifton (University of Stuttgart, GE),
David. Schlipf (University of Applied Sciences, GE)

大学・研究機関・評価機関

AIST, DNV-GL, DTU, ECN, Fraunhofer IWES, IFPEN, Korea Testing Laboratory, NREL, SWE, UL

コンサル会社

CTC, Deutsche Windguard Consulting, DEWI, Energiewerkstatt, Meteotest, Navigant, Offshore Wind consultants, Sowento

発電事業者

EDF energy, EnBW, Engie, **Green Power Investment**, IDA Energi, Orsted, SgurrEnergy

タービンメーカー

Enercon, Envision, General Electric, Goldwind, MingYang wind power, Nordex, Siemens-Gamesa, Vestas

浮体・その他機器メーカー

AXYS, Fugro,
NRG Systems, METEK Nordic

ライダメーカー

Leosphere, **Mitsubishi Electric**, Nanjing Movelas, Windar Photonics, ZX Lidars

エンジニアリング会社

Black & Ceatch, SSE renewables, Tractebel Engie, Wood renewables

これまでの活動状況（1）

風況調査

平坦地形、複雑地形、浮体搭載による洋上風況調査



<https://www.ieawindtask32.org/wp-content/uploads/2017/12/WS07-Christos-Tsouknidas-Ground-Based-LIDARS-for-Site-Calibration-in-Forested-Flat-Terrain.pdf>

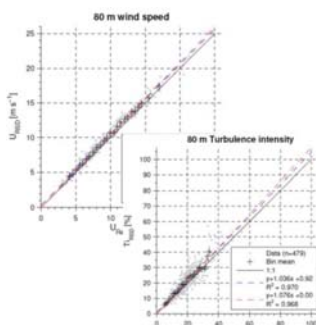


<https://www.ieawindtask32.org/wp-content/uploads/2017/12/WS07-Sara-Koller-LIDAR-in-complex-terrain-Validation-of-CFD-correction-tools.pdf>



<https://www.ieawindtask32.org/wp-content/uploads/2016/03/WS01-Arve-Berg-Fugro-OCEANOR-SEAWATCH-Wind-LIDAR-BUOY.pdf>

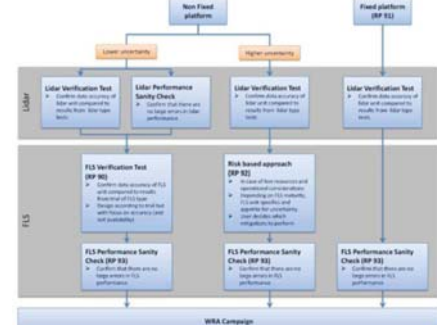
カップ風速計との比較法について整理



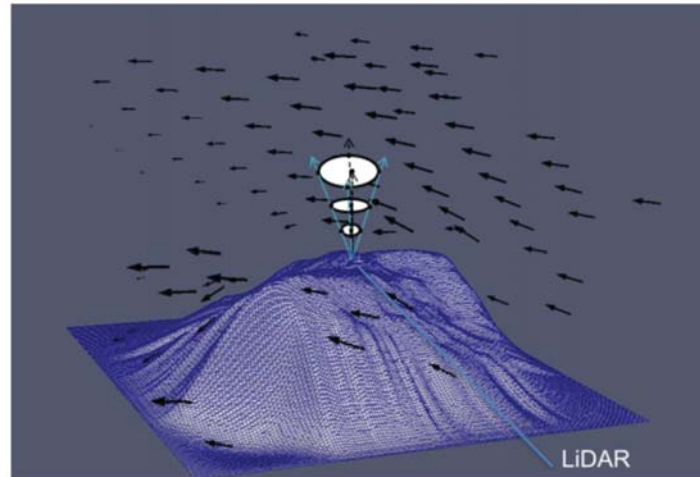
ライダータイプに対するユースケースを整理

- Use cases based on conical scanning lidar
- Flow reconstruction from conical scans in homogenous flows
 - Flow modeling to convert wind lidar measurements to point values
 - Flow reconstruction from conical scans without assuming homogenous flow
 - Vertical beam use to reduce uncertainty in the vertical component
 - Use of a smaller lidar sampling volume to reduce differences compared to cups
 - Use of a short met mast to scale lidar measurements.
- Use cases based on scanning lidar
- Use of conical sector or slice scans to qualitatively identify flow features
 - Flow reconstruction from conical sector or slice scans in complex flows
 - Scanning lidar use for quantitative analysis of wakes
 - Multiple lidar use to measure wind vectors.

浮体タイプに対する評価法を整理

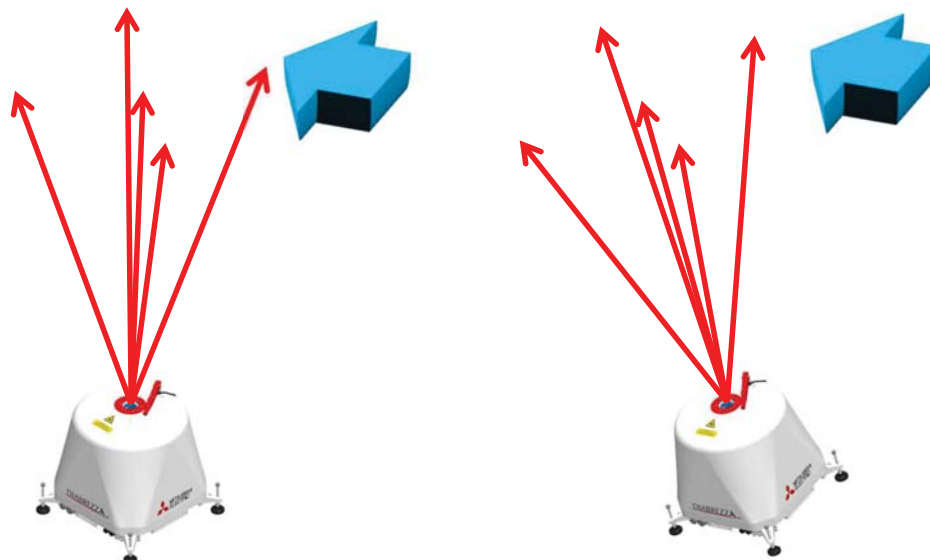


地形の影響により、一様でない風速場においてはオフセット誤差が生じる
→**地形に応じた補正が必要**



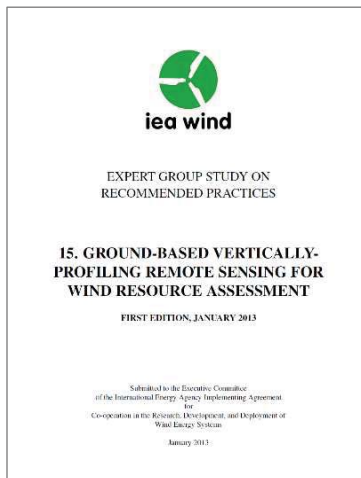
S.Nabi, *et al.*, Improving LiDAR performance on complex terrain using CFD-based correction and direct-adjoint-loop optimization. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, (2020), 012082.

動揺により観測領域とビーム照射方向が変化し、観測データに誤差が生じる
→**動揺補正（高度補正・傾斜補正・速度補正）が必要**

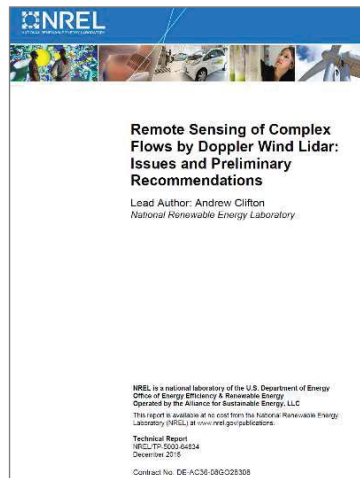


風況調査

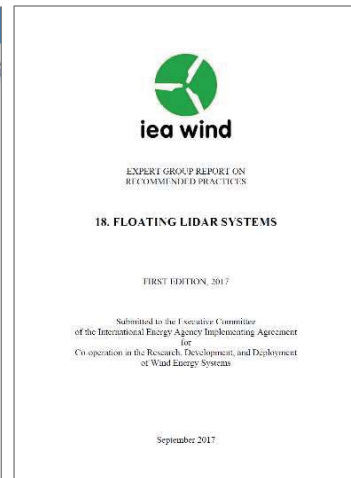
平坦地形、複雑地形、浮体搭載による洋上風況調査
→ RP, Technical Reportとして発行



<https://community.ieawind.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=7492ade3-03e1-419f-466f-4b6aacc271df&forceDialog=0>



<https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/64634.pdf>

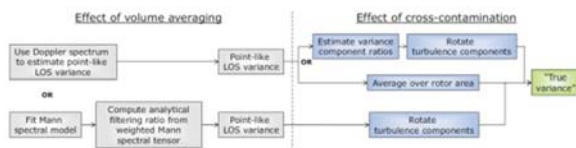


<https://community.ieawind.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=99ec44ff-4493-4bad-6510-d42d152ae963&forceDialog=0>

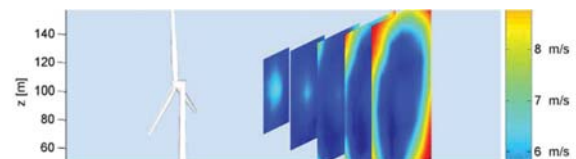
風速場調査

- ・乱流強度計測、wake計測、風速場再構成・風況予測に関する議論
- ・ライダーによる観測法や課題を共有

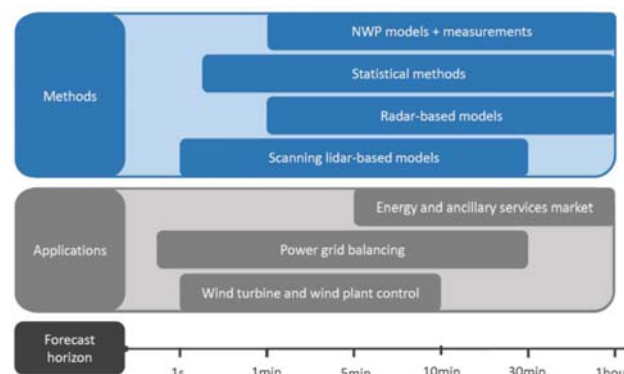
-----乱流強度の算出法-----



-----wakeの計測-----



-----風速場再構成と風況予測（task36とコラボ）-----

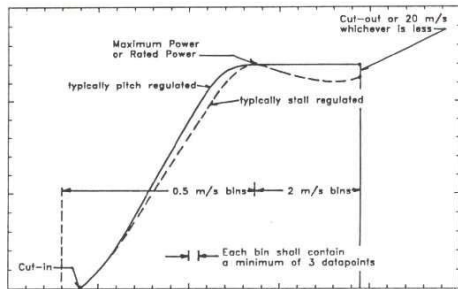


I. Wurth et al., Minute-Scale Forecasting of Wind Power –Results from the Collaborative Workshop of IEA Wind Task 32 and 36, *Energies* 12, 712, (2019)

風車評価

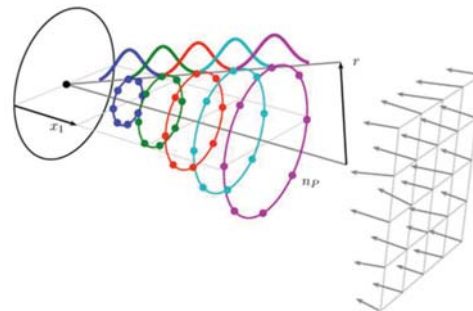
- ・ナセル搭載ライダーでのパワーカーブ評価、風車制御
- ・ライダーによる観測法や課題を共有

-----ライダーによるパワーカーブ計測-----



S. T. Frandsen and B. M. Pedersen, Recommended practices for wind turbine testing. 1. Power performance testing. 2. Edition 1990.

-----ライダーによるタービン制御-----



1. Wind lidar in complex terrain
Who: Pedro Santos, Jochem Vermeir, Senthilnathan K, Alexander Stoekl, Peter Rosenbusch, Yasmin Hubmann
2. Wind lidar for wind energy in cold climates
Who: Vasilis Vasileiadis, Sara Koller, Charles Godreau, Timo Karlsson, Nicolas Jolin
3. Floating lidar systems
Who: Julia Gottschall, Hugo Rubio, Velmurugan Karuppiiah, Christopher Gutierrez, Tunahan Akbas, Felix Kelberlau, Oliver Bischoff
4. Turbulence intensity from wind lidar
Who: Reesa Dexter, Marcel Weber, Anish Venu, Arjun Anantharaman, Maria José Pedrayes, Zachary Parker
5. Lidar-assisted control
Who: Fabrice Guillemin, Andrew Scholbrock, Rhys Neild, Thom Homsma, Christophe Lepaysan, David Schlipf, Masaharu Imaki, Feng Guo, Eric Simley, Chris Slinger
6. Forecasting using wind lidar
Who: Ines Würth, Elliot Simon, Poul Hummelshøj
7. Nacelle-mounted lidar in complex terrain
Who: Alkistis Papetta, Okan Sargin, Hans Ejning Jørgensen, Jacob Burrows, Ioannis Antoniou N.B. Don't worry about overlap with "Power performance". You'll come up with different ideas!
8. Power performance verification using measurements in the induction zone
Who: Wiebke Langreder, Davide Trabucchi, Rebeca Rivera Lamata, Ellie Weyer, Alvaro Matesanz, Andrew Davidson, Arthur Ostyn, Sebastian Streitz, Carolin Schmitt N.B. Don't worry about overlap with "Nacelle-mounted lidar". You'll come up with different ideas!
9. Collaboration on wind lidar hardware and software
Who: Francisco Costa

Wind lidar in complex terrain

協力担当者 (株)グリーンパワーインベストメント 吉村様

Our goal

Data products from wind lidar in complex terrain have lower uncertainty than data from met masts

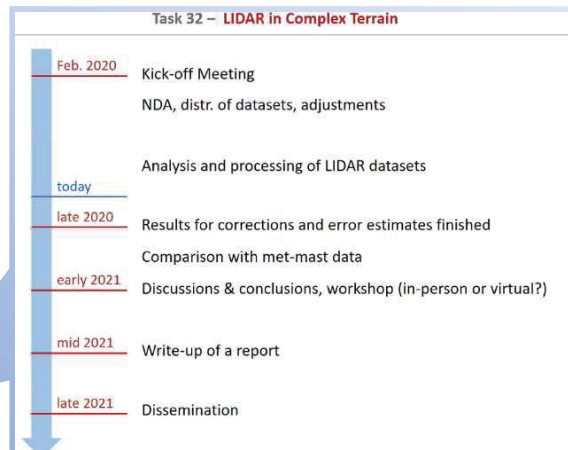
How we're getting there

- Understanding how lidar data are used in complex terrain
- Helping users develop processes for analysing wind lidar data
- Supporting evidence-based assessment of methods to compare wind lidar data with cup anemometers

Activities

2013 Jan.	Recommended Practice 15: Ground-based vertically-profiling remote sensing for wind resource assessment <i>Use of remote sensing in flat terrain [2]</i>
2017 Nov.	Workshop 7: Wind Lidar in Complex Terrain <i>Experience, challenges, and needs for wind lidar in complex terrain</i>
2019 Oct.	Comparative Exercise: Wind lidar in complex terrain <i>Focus on mean wind characteristics. Runs through end 2020. 🔗</i>
2019	<i>CFARS: Ongoing investigations into the use of models with wind lidar</i>
2020	Comparative Exercise: Wind lidar in complex terrain (ongoing)
2021	Report: Methods for analysing wind lidar data in complex terrain

- ユースケース整理から、現状は複雑地形でのライダー計測誤差評価
- 現状、オーストリアの4か所のデータを基に解析
- 国内にも複雑地形データが多数あるため、データ保有元に協力を仰ぎ、日本からも解析結果の展開を行う予定



Wind lidar in cold climate

協力担当者 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 早崎様

Our goal

Wind lidar are an integral part of wind energy in cold climates, used to compliment and extend other measurement technologies

How we're getting there

In collaboration with IEA Wind Task 19:

- Documenting the uses of wind lidar to support wind energy deployment in cold climates.
- Identifying the challenges in using wind lidar in cold climates
- Identifying solutions so that wind lidar can be used effectively

Activities

2013	Recommended Practice 15: Ground-based vertically-profiling remote sensing for wind resource assessment <i>Advice for deploying and operating wind lidar in cold climates [2]</i>
2018 Oct.	General Meeting: Calgary, AB <i>Identified potential opportunities and challenges for wind lidar in cold climates, including the need for a working group</i>
2020 Jan.	Working Group: wind lidar in cold climates <i>Formed a group of stakeholders from Task 32 and Task 19 to drive activities. 🔗</i>
2020 Q4	Working Group: wind lidar in cold climates <i>Summary of results so far</i>

- エアロゾル量が少ないことが課題
- ➔ 当社環境適応制御により、エアロゾル量が少なくSNRが低い場合は装置パラメータを自動制御して計測距離をキープする、処理が有効
- 雲高、データ取得率, SNR, などから氷との相関関係の評価する
- 着氷の検出や雨滴検出の有効性について検証
- まずは氷のクラス分け (IEA基準) について行う予定

Floating lidar systems

Our goal

Floating wind lidar should achieve an uncertainty of lower than 2% and be acceptable sources of wind speed, direction, and turbulence information

How we're getting there

Support the commercialisation of floating wind lidar systems and the transfer of research experience into everyday practice

Activities

2016 Feb	Workshop 1: Floating Lidar
2018	Recommended Practice 18: Floating Lidar Systems [3]
2018 Nov.	Workshop 13: Floating Lidar Follow-up <i>Reviewed immediate and near-future needs for collaborative R&D</i>
2019 June	<i>Floating wind lidar proposed for standardisation; will be IEC 61400-50-4</i>
2020 Q1	<i>Early-stage researchers start 3-year PhD programmes in EU-funded Innovative Training Networks Lidar Knowledge Europe (ITN LIKE) and FLOating-Wind Energy network (ITN FLOWER)</i>
2020	Recommended Practice 18: Floating Lidar Systems <i>Update to align with recent, related publications</i>
2021	Workshop: Stakeholder workshop and technology review <i>Update on current interests and identify applications beyond pre-construction wind measurements</i>
2022	Appendix to RP18: Ship-based wind lidar

- RP18をベースに、現在IECでの標準化プロセス実施中
- 本task32での活動は2021年度後半以降となる予定

Turbulence intensity derived from wind lidar

Our goal

Wind data derived from wind lidar can be used as part of a site assessment or wind turbine loads certification process

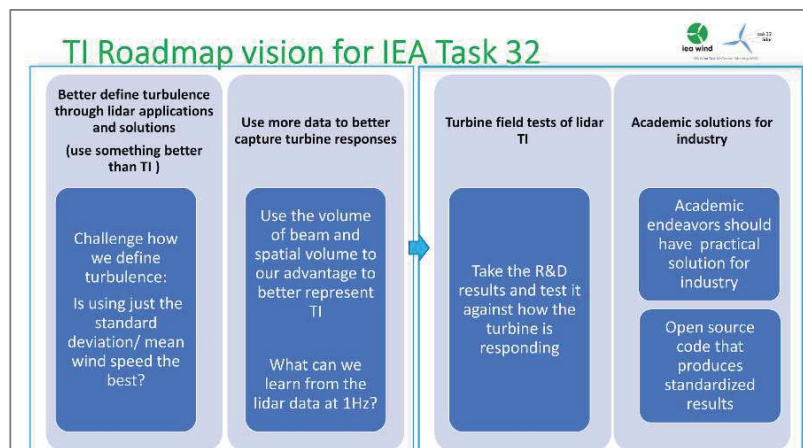
How we're getting there

Understanding what wind lidar measure and how it relates to met-mast data and turbine response.

Activities

2015	IEA Wind Expert Report: Estimating turbulence statistics and parameters from ground- and nacelle-based Lidar measurements <i>Summary of methods and results [4]</i>
2018 Oct.	Workshop 10: Turbulence intensity measurements with lidars – applications to loads verification and site suitability <i>Identified barriers and solutions to the widespread application of lidar for these applications</i>
2019 June	<i>DNV-GL announce wind lidar turbulence Joint Industry Project (JIP)</i>
2019	<i>CFARS starts to explore the use of turbulence intensity data from lidar</i>
2020 Q1	Working group on lidar TI: Working group with Task 32, CFARS, and DNV-GL JIP to coordinate activities, share results, and ensure stakeholder buy-in
2020 Q3	Joint roadmap with Task 32, CFARS and DNV-GL JIP: Clearer understanding of methods to measure wind turbulence, how they relate to existing metrics, and how they relate to wind turbine applications

- 乱流に対する測定法の検討
 - 既存計測器とのデータの関連性
 - 風力タービンへの影響性の検討
- を深堀していく



Lidar assisted controls

協力担当者 産総研 川端様

Our goal

Wind lidar are used as an additional sensor and input to control systems, to improve wind turbine and wind plant performance

How we're getting there

Activities

- 2016 Jul. **Workshop 2:** Optimizing lidars for wind turbine control applications [7]
- 2018 Jan. **Workshop 8:** Certification of lidar-assisted controls applications [8]
- 2019 Oct. **Workshop 15:** Optimizing wind turbines using LAC using Systems Engineering methods
Joint workshop with Task 37
- 2020 **Workshop:** Lidars for wind farm control applications
- 2020 Q4 **Report:** Research plan on how to evaluate the benefit of lidar-assisted controls
Joint report together with IEA Wind Task 37

- ・LACの効果はシミュレーションにて確認
引き続き、ライダーのコストに対して検討を
実施しホワイトペーパーで報告
- ・他のIEA風力タスク（タスク37、“風力発電所
フロー制御”タスク）とのコラボレーションを強化

LCOE Category	LAC Application	Potential Impact	Required Availability	TRL	Comments
AEP	Yaw error bias correction	Medium	Low	High	AEP impact depends on level of wind vane calibration
CapEx	Fatigue load reduction	Medium	Medium	High	Requires fatigue-driven design
CapEx	Extreme load reduction	High	High	Low	Sensitive to lidar availability; unclear how to simulate extreme wind fields for design
CapEx	Wind class upgrade	Medium	Medium	Medium	Scenarios in which fatigue load reduction can enable a wind class upgrade should be identified
Lifetime energy production	Lifetime extension from load reduction	Medium	Medium	Medium	Uncertainty on economic impact of lifetime extension

Eric Simley et al, 2020 J. Phys.: Conf. Ser. **1618** 042029.
LCOE: Levelized Cost Of Energy, TRL: Technology readiness level

Nacelle mounted lidar in complex terrain

Our goal

Easier power performance verification in complex terrain

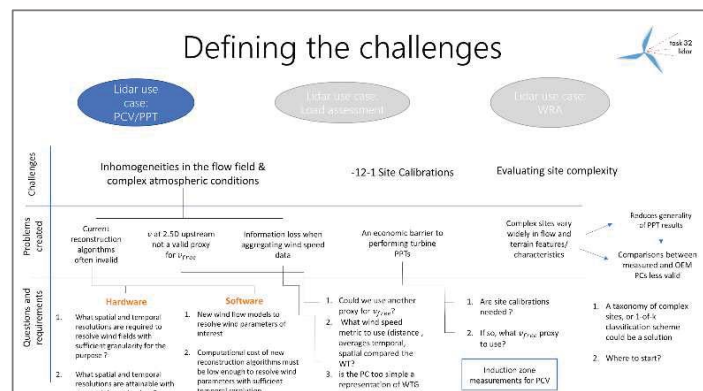
How we're getting there

Identifying and testing ways to use nacelle-mounted lidar in complex terrain

Activities

- 2017 *Start of development of IEC 61400-50-3 for nacelle-mounted lidar for wind measurements*
- 2020 Q4 **Round Robin:** Comparison of nacelle-mounted lidar methods for power performance testing in complex terrain
Application of several methods and comparison of experience
- 2020 Q4 **Workshop:** Comparison of nacelle-mounted lidar methods for power performance testing
Presentation and discussion of results from the round robin exercise
- 2021 *Proposal to IEC 61400-50-3 for nacelle-mounted lidar for wind measurements*

- ・複雑地形でのパワーカーブの検証は、
induction zoneとの結果とも共有していく



Power performance verification using measurements in the induction zone

Our goal

More accurate power performance testing of wind turbines in operational wind plants

How we're getting there

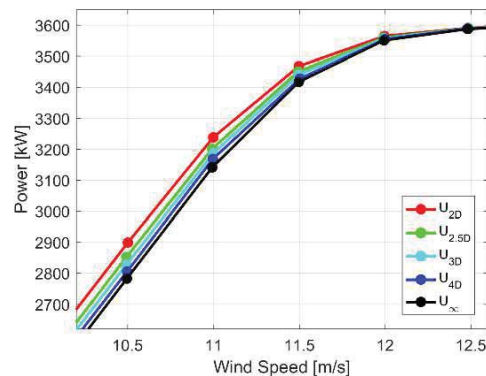
Testing new methods to measure wind speed in the induction zone of wind turbines

Activities

- | | |
|----------|--|
| 2018 | Round Robin: Windfield reconstruction in the induction zone
<i>Estimate of free-stream wind speed from a common data set</i> |
| 2019 Jan | Workshop 11: Windfield reconstruction in the induction zone
<i>Joint workshop with the Power Curve Working Group to present the results of the round robin</i> |
| 2020 | Round Robin: Windfield reconstruction in the induction zone with wind plant blockage
<i>Builds on experience gained in the previous round-robin to consider the effects of flow blockage associated with other turbines in an offshore array</i> |
| 2021 | Workshop: Windfield reconstruction in the induction zone with wind plant blockage
<i>Presenting the results of the round robin.</i> |

Task 32: Power-performance verification using induction zone measurements

- ▶ **Challenge with 2.5 D:** Large rotors – 10 min mean not representative anymore, too large a distance for some nacelle LiDARs (esp. with offshore rotors), still induction zone impact and the 'free' V is too far away anyway, 'complex terrain' more often – avoid site calibrations
- ▶ **Industry knowledge gap:** Work on and establish experience and industry best practices rather than changing the IEC directly (exp. Nacelle LiDAR round robin)
- ▶ **Modelling:** Of the induction zones / to free wind stream → 'Standardize', associated uncertainties and how to determine
- ▶ **Impact on PC verification and warranties:** How to adopt the warranted power curves to this approach, measurement and uncertainties again
- ▶ **Measurement:** Which technology, set-up, etc. to choose, clash?: mast/cup vs. LiDAR



F. E. Brink et al 2016 21th meeting of the Power Curve Working Group.

19

© Mitsubishi Electric Corporation

TI estimations using nacelle mounted lidars

Schedule

- Selection of data sets (October 2020)
- Preparation of data/documentation package (November 2020)
- Kick-off meeting (December 2020)
- Work in progress phase (December 2020 – March 2021)
- Assessment phase (April 2021)
- Presentation of results (April/May 2021)

・DNV-GLが保有するCW型と2beam型の2機種にて評価を実施

これまで

遠方風速を計測できる風ライダーは有効

状況

ライダー取得データに対してカップ式風速計と差異があり、モデルを用いた補正方法を検討中
また、ライダーによる計測法の検討や、従来の計測基準の見直しにまで議論が広がる

今後

国内風力事業者と協力し、当社としてもライダー取得データの解析サポートを実施
その結果をIEA task32と共有し、その後の標準化に貢献する

協力機関として参加可能な方は、ご連絡下さい！

Task30 洋上風車解析コードの検証(OC6)

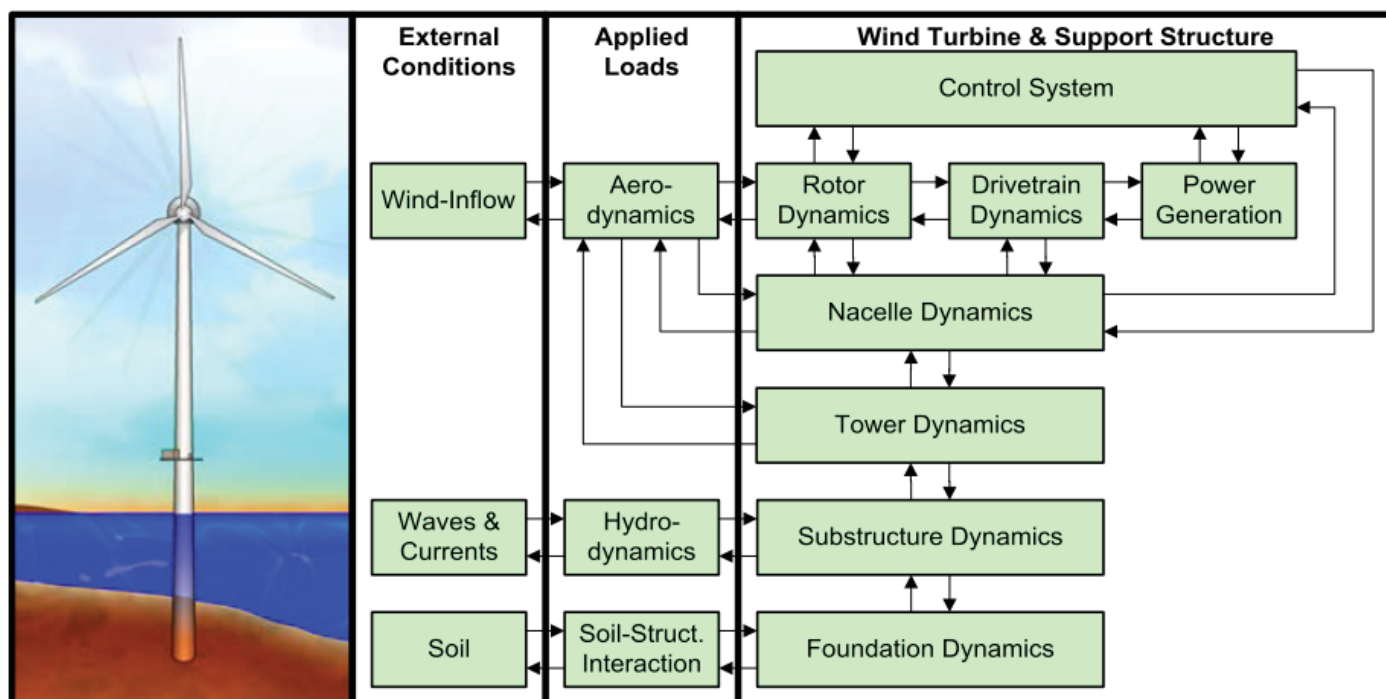
Offshore Code Comparison Collaboration Continuation with Correlation and Uncertainty (OC6)

山口 敦

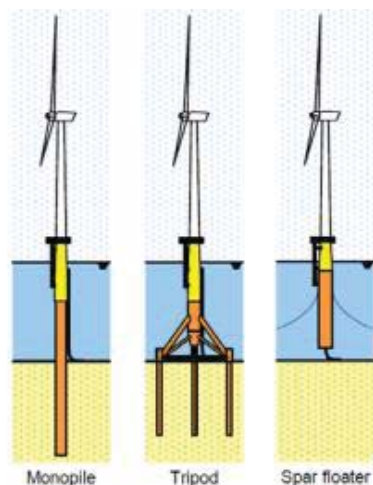


OC3(Task23)とOC4/OC5/OC6(Task30)の背景

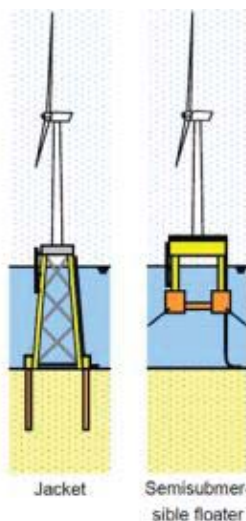
- 洋上風力発電設備は、空力-制御-弾性-流体力の連成解析コードによって設計される。
- 連成解析コードの検証が必要である。



OC3(Offshore Code Comparison Collaboration)ではモノパイル、三脚、スパー浮体、OC4(Offshore Code Comparison Collaboration Continuation)ではジャケット、セミサブ浮体を対象として、支持構造物の応答に着目し、解析コードの相互比較・検証(verification)を行ってきた。



OC3 (Phase I, II, III)
2005-2009



OC4 (Phase I, II)
2010-2013

モデル

- ・ 風車はNREL 5MW
- ・ 支持構造物を定義
- ・ 風と波のデータセットを定義

段階的实施

- ・ 各支持構造物に合わせた荷重ケースを選定

OC5

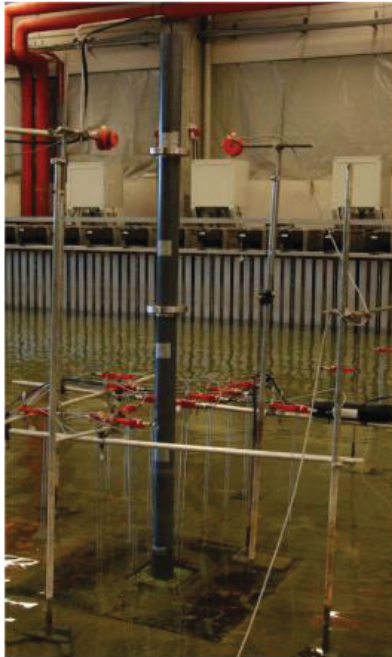
- ・ OC5ではverificationよりもvalidationに重点を置く
 - ・ verification: モデルの相互検証、物理モデルが正しく数値モデルに実装されているか?
 - ・ validation: データによる検証、数値モデルが物理現象と合致するか?
- ・ 参加者は3つのシステムをモデル化し、計算結果を実測値と比較する。
 - ・ 着床式と浮体式両方対象
 - ・ データは水槽試験と実海域のデータ両方を使う
- ・ 正式名称はOC5(Offshore Code Comparison Collaboration Continuation with Correlation)



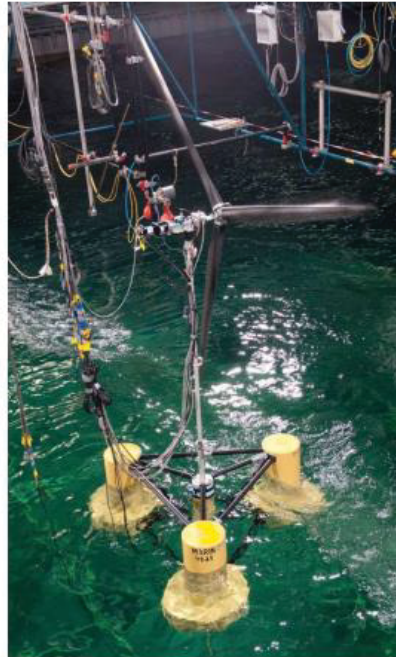
DeepCwind Tank Tests
@ MARIN

OC5の各フェーズ

2014/1～2015/5 風車なしのモノパイル基礎(流体カモデルの適用可能性を検証)
2015/1～2016/5 1:50スケールセミサブ浮体(空気力・流体力・制御の連成問題検証)
2016/1～2018/5 実スケールジャケット基礎風車(実スケール風車の検証)



Phase I:
Monopile - Tank Testing



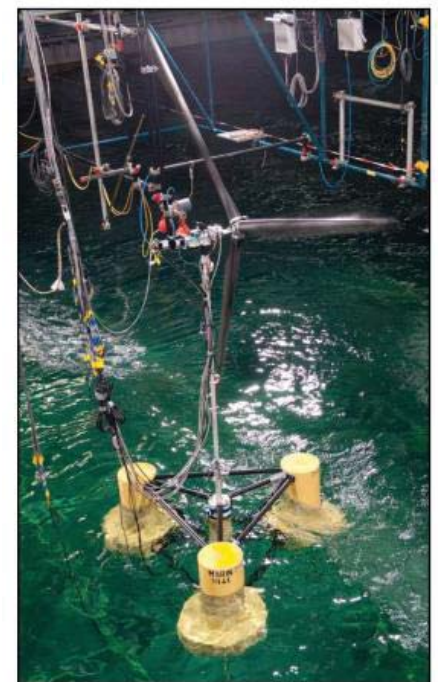
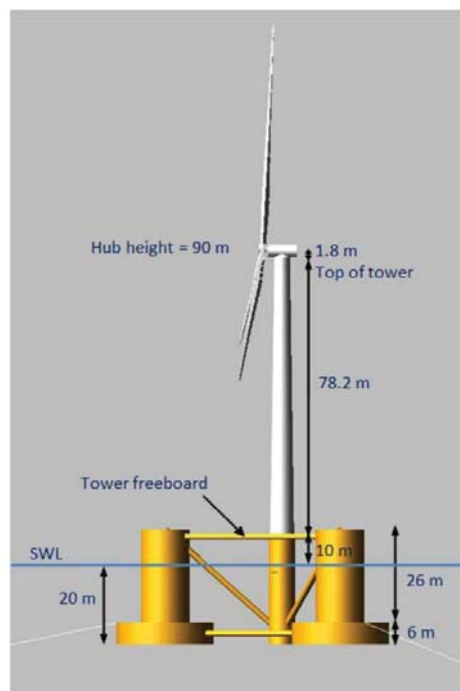
Phase II:
Semi - Tank Testing



Phase III:
Jacket/Tripod - Open Ocean

OC5 Phase II

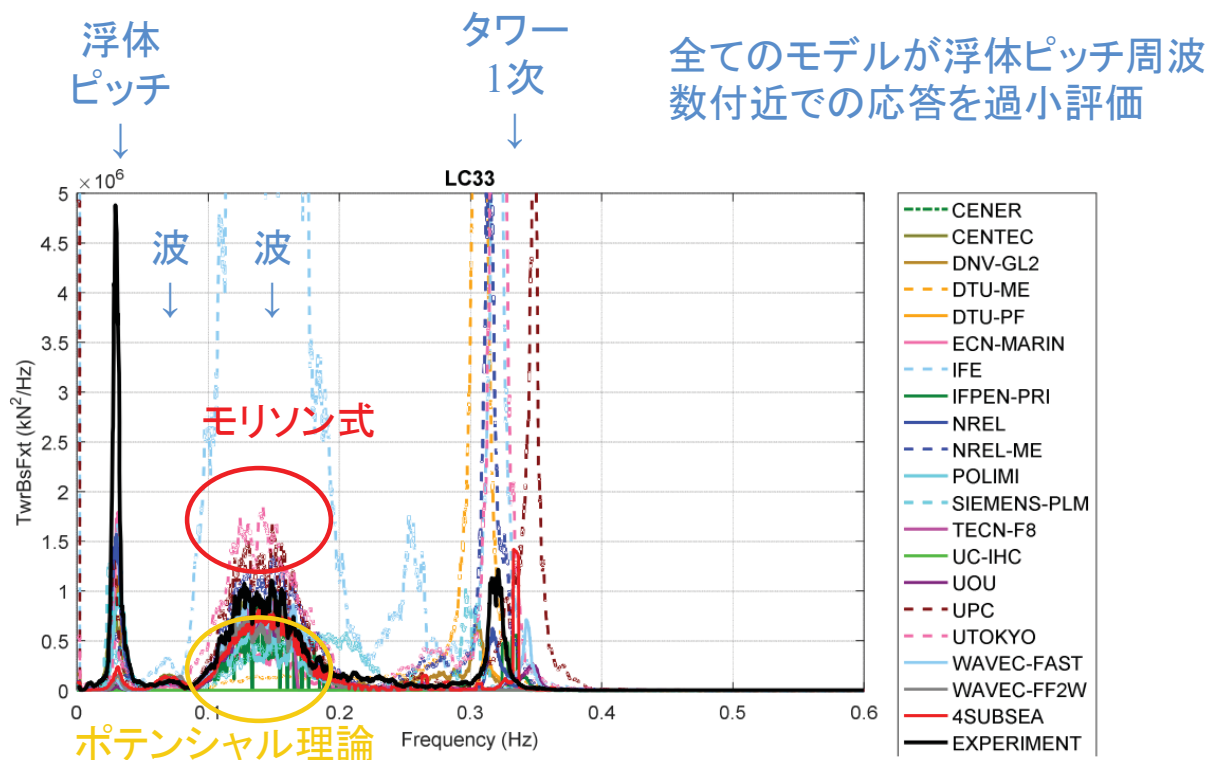
Marin (US) で行われた
DeepCwind の水槽実験
を対象としたValidation



DeepCwind Tank Tests
@ MARIN

LC3.3におけるタワー基部せん断力のPSD

線形不規則波・ $H_s=7.1\text{m}$, $T_p=12.1\text{s}$, JONSWAPスペクトル



IEA Wind セミナー 2021



OC5のまとめ

- 平均的に、どのコードもタワーに作用する荷重を過小評価する。
 - 過小評価の大きな原因は、低周波領域(浮体のピッチおよびサージの固有周期)にある。
 - この領域では、波強制力が直接作用しないため、何らかの非線形流体力が作用している。
 - 非線形流体力には、2次のポテンシャル流れ理論、高次の波運動、ストレッチング、浮体位置での流体粒子運動を考慮すること、などが含まれる。
- 係留索張力の評価には、動的モデルを使用することが重要であるが、波および流れが係留索に作用する力は重要ではない。

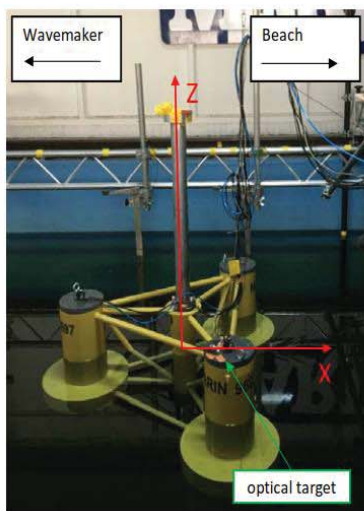
IEA Wind セミナー 2021



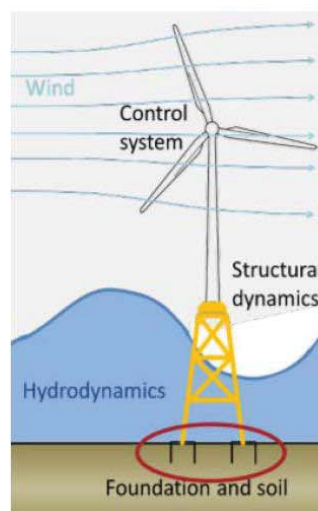
- 検証(Validation)に焦点
 - 流体力・空気力およびその組み合わせに着目
- 3つのデータを使った検証
 - 工学モデル、高精度モデル(CFD)、実験データ
 - OC5にてシミュレーション結果と実験データが合わなかった原因を高精度モデル(CFD)を用いて解明
- 厳密な検証方法を開発し、使用する
 - 検証の目的を明確にする
 - 定量的な検証
 - 不確かさ(uncertainty)を明らかにする

OC6の各フェーズ

10/10



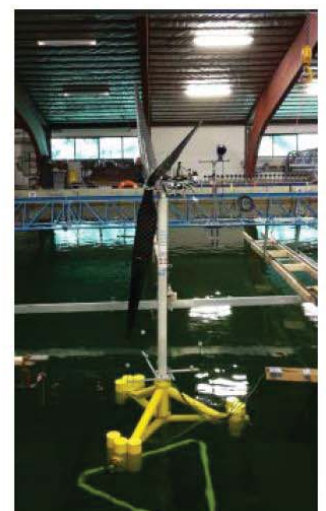
Phase I:
Nonlinear Hydrodynamics
Jan 2019 – Dec 2019
(OWN TESTING)



Phase II:
Soil/Structure Interaction
Jan 2020 – June 2020
(REDWIN)



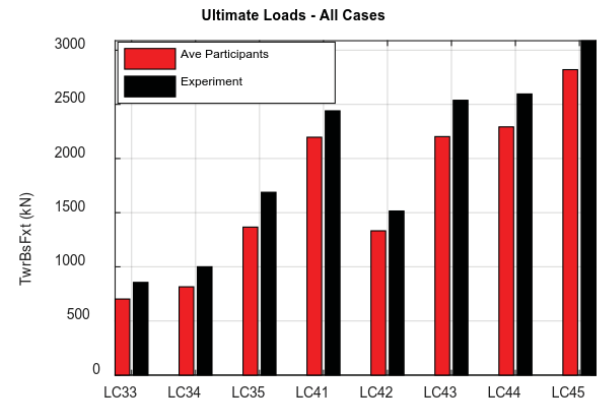
Phase III:
Aerodynamics under Motion
July 2020 – June 2021
(LIFES50+)



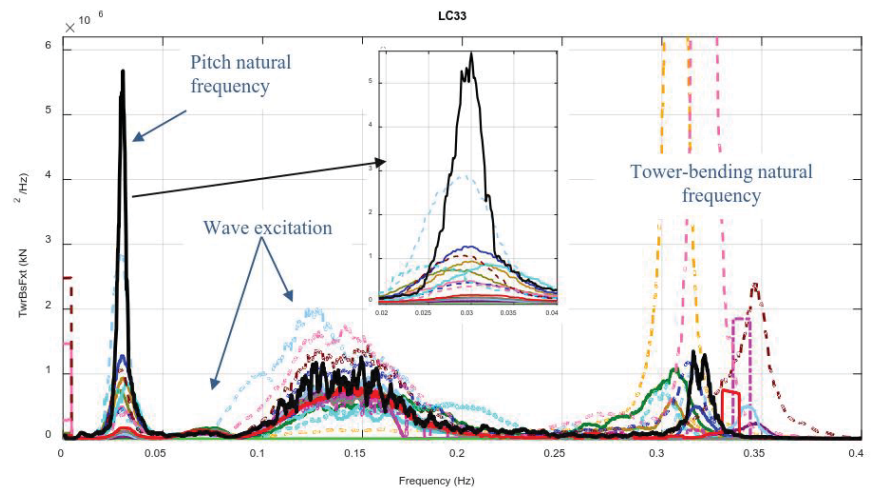
Phase IV:
Hydrodynamic Challenges
July 2021 – June 2022
(STIESDAL)

- 浮体のピッチ/サージ固有周期での応答の過小評価の原因を明らかにする

- OC5 Phase 2 の結果によると平均でシミュレーション結果は20%の過小評価。これはピッチ/サージ固有周期での応答の過小評価による。

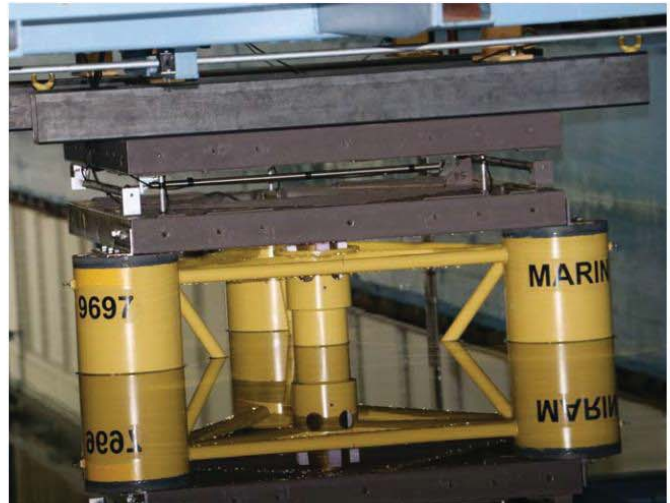
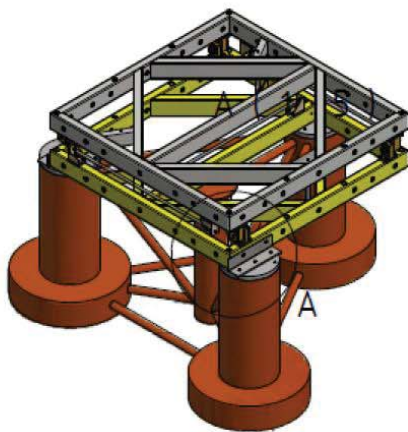


- 浮体を固定した実験・浮体を係留した実験の結果を利用

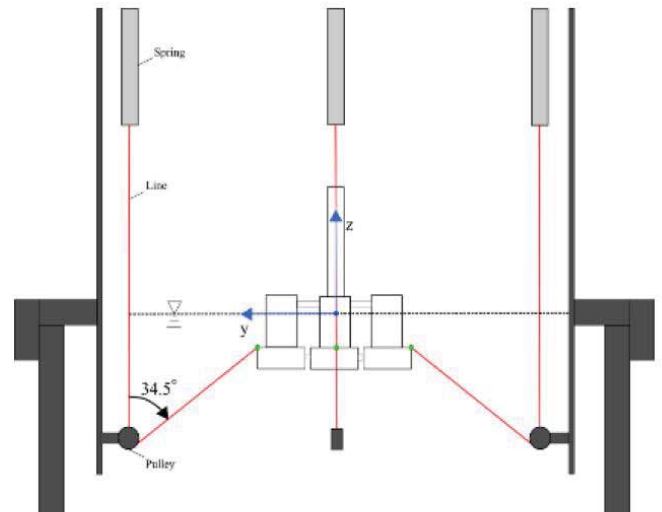
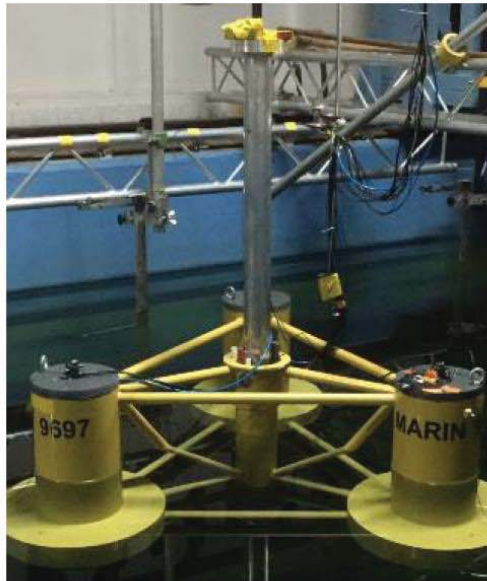


浮体を固定した実験

12/10



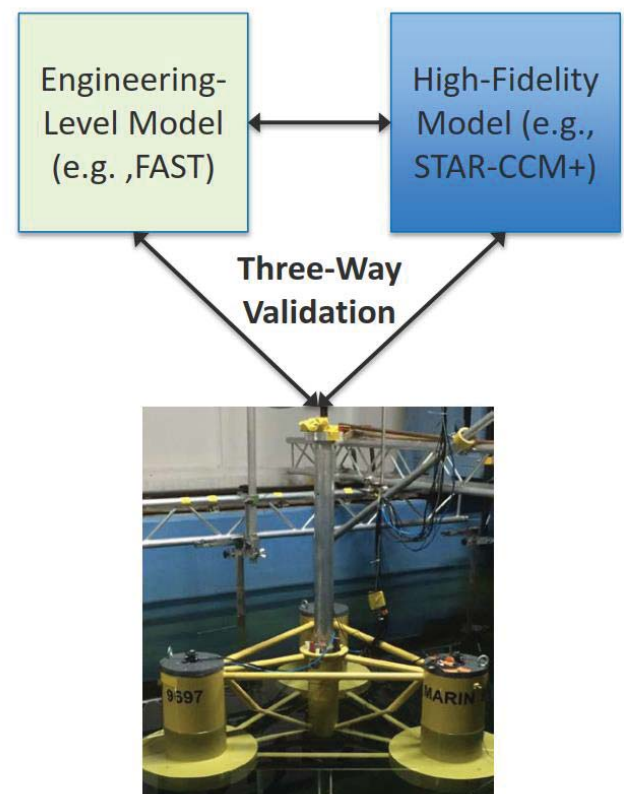
- フレームに浮体を固定
- 浮体に作用する力とモーメント各3成分、計6成分を計測
- サージ方向の強制動揺試験と、曳航試験も実施

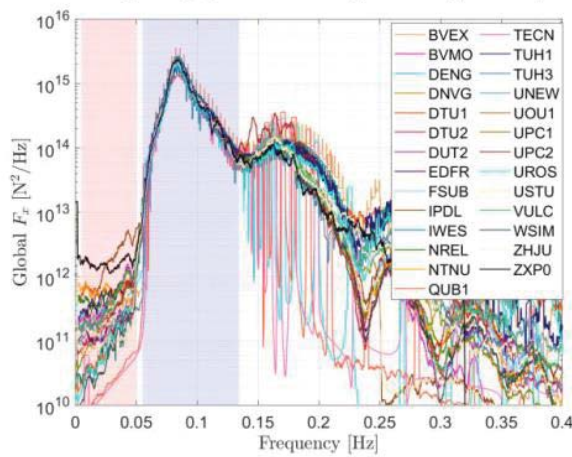


- 風車なし、タワーと浮体のみ
- 光学計測装置で動揺を計測
- 実験の不確かさに焦点

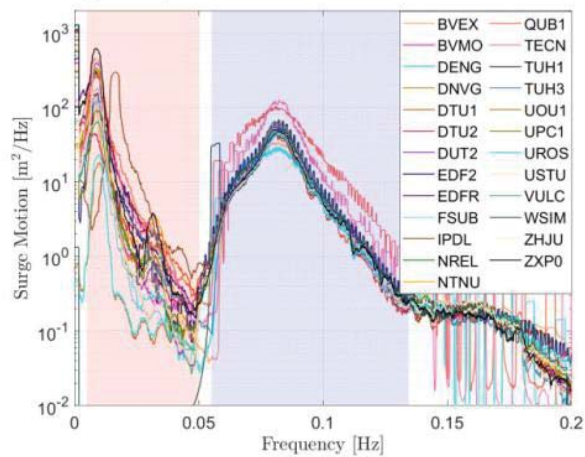
3-way validation

- CFDにより工学モデルが実現象と一致しない原因を明らかにする
- CFDの結果を用いて工学モデルを改良する。
- CFDの結果を利用して、工学モデルをチューニングする方法を確立する。



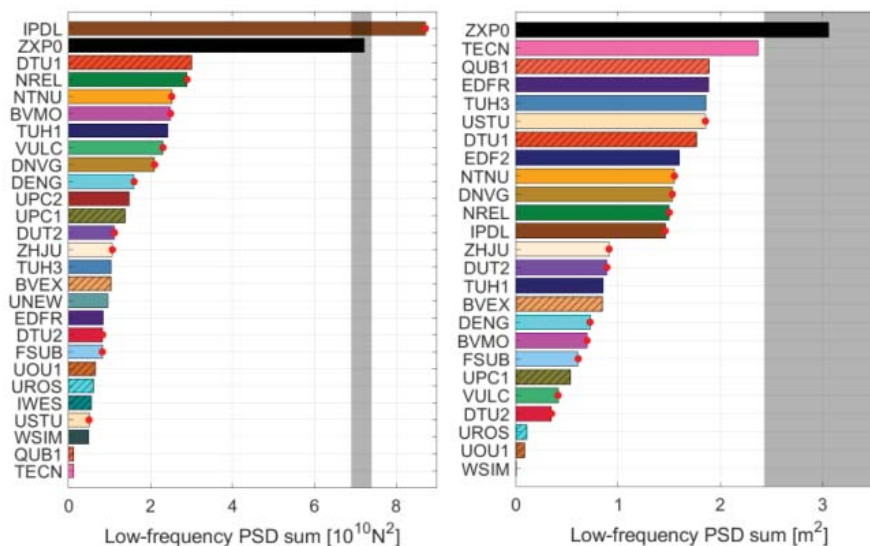


LC3.3 浮体を固定した実験
不規則波中での、浮体に作用する流体力(F_x)のパワースペクトル

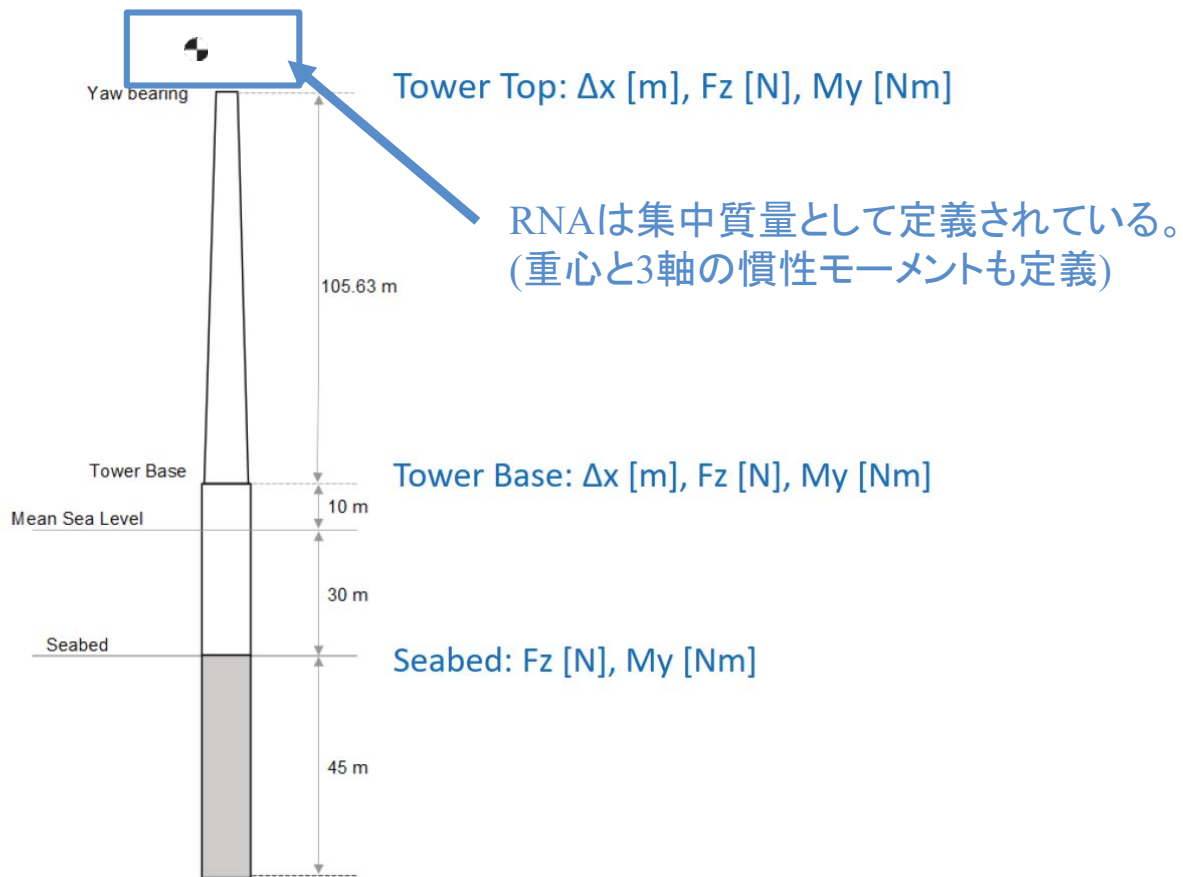


LC5.3 浮体の応答
不規則波中での、浮体のサージ動揺

低周波域でのスペクトルの積分値



- ポテンシャル理論の場合は、2次の波強制力を含めた方がよい結果
- モリソン式の場合は、ストレッチングを導入し、非線形の波モデルを用いる方がよい



Load Case Table (1.x / 2.x)

	Load Case	Enabled DOFs	Wind Conditions	Marine Conditions	Comparison Type
Static Analysis	1.1	Tower, substructure (clamp at seabed)	None	None	Static response
	1.2	Tower, substructure, foundation	None	None	Static response
	1.3	Tower, substructure, foundation	$F_x = 1500$ kN at yaw bearing	None	Static response
Eigen-analysis	2.1	Tower, substructure (clamp at seabed)	None	None	Frequencies, damping, and mode shapes
	2.2	Tower, substructure (clamp at seabed)	None	Still water	Frequencies, damping, and mode shapes
	2.3	Tower, substructure, foundation	None	Still water	Frequencies, damping, and mode shapes

1.x 静的解析

2.x 固有値解析

風荷重

Wind-Only	3.1	Tower, substructure, foundation	Prescribed time series at yaw bearing $V_{hub} = 9.06 \text{ m/s}$	None	Time series (t = 3600 s)
	3.2	Tower, substructure, foundation	Prescribed time series at yaw bearing $V_{hub} = 20.90 \text{ m/s}$	None	Time series (t = 3600 s)
Wave-Only	4.1	Tower, substructure, foundation	None	Regular waves: $H = 5.50 \text{ m}, T = 9.0 \text{ s}$	Time series (t = 90 s)
	4.2	Tower, substructure, foundation	None	Irregular waves: Pierson-Moskowitz wave spectrum $H_s = 1.25 \text{ m}, T_p = 5.5 \text{ s}$	Time series (t = 3600 s)
	4.3	Tower, substructure, foundation	None	Irregular waves: JONSWAP wave spectrum $H_s = 7.60 \text{ m}, T_p = 8.6 \text{ s}, \gamma = 5.00$	Time series (t = 3600 s)
Wind + Waves	5.1	Tower, substructure, foundation	Prescribed time series at yaw bearing $V_{hub} = 9.06 \text{ m/s}$	Irregular waves: Pierson-Moskowitz wave spectrum $H_s = 1.25 \text{ m}, T_p = 5.5 \text{ s}$	Time series (t = 3600 s)
	5.2	Tower, substructure, foundation	Prescribed time series at yaw bearing $V_{hub} = 20.90 \text{ m/s}$	Irregular waves: JONSWAP wave spectrum $H_s = 3.75 \text{ m}, T_p = 7.5 \text{ s}, \gamma = 1.37$	Time series (t = 3600 s)

波荷重
+
波荷重

IEA Wind – Task 31 WAKEBENCH Phase 3

ウインドファーム流れモデルのベンチマーク

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9回 IEA Wind セミナー 2021年2月16日

Task 31 Wakebench 概要



◆ 目的

- ウインドファームのフローモデル及びウェイクモデルの開発、評価及び精度向上を目指した国際的な産学によるベンチマークプロジェクト
- モデル評価手順の合意形成をし、国際的なV&Vフレームワークを構築する

◆ 参加国（10カ国）

- 中国、デンマーク、フランス、ドイツ、日本、オランダ、スペイン、スウェーデン、スイス、米国

◆ Phase

- **Phase3 2018年6月～2021年5月： 国際的V&V戦略、IEC61400-15及び61400-12-4を通じた産学連携、オープンサイエンスベンチマーク**
- Phase2 2015年6月～2018年5月： 関連スケールに拡張したフレームワークの構築
- Phase1 2011年10月～2014年9月： マイクロスケールモデル、V&Vフレームワークの定義

◆ ワークパッケージ

- WP1: 外部風条件に対するモデルのベンチマーク（CENER）
 - 国際規格へのV&Vの実装検討 IEC61400-15 及びIEC61400-12-4
 - 風モデルのベンチマークの設定及び実施
- WP2: ウェイクモデルのモデルベンチマーク（NREL）
 - 国際規格へのV&Vの実装検討 IEC61400-15
 - ウェイクモデルのベンチマークの設定及び実施
- WP3: 検証と妥当性確認及び不確かさの定量化のベンチマーク（SNL）

国	契約組織	参加組織
中国	中国再生可能エネルギー学会	華北電力大学(NCEPU) ミンヤン ゴールドウインド エンヴィジョン 華能クリーンエネルギー研究所 (HCERI)
デンマーク	エネルギー庁	デンマーク工科大学(DTU) ベスタス
フランス	EDF R&D IFP Energies Nouvelles	EDF R&D IFP Energies Nouvelles Metedyn
ドイツ	ユーリッヒ総合研究機構	オルデンプルグ大学 ForWind ブラウンホーファーIWES エネルコン シュトゥットガルト大学 ミュンヘン工科大学 エスリングン大学
日本	NEDO	東京大学 ウインドエナジーコンサルティング(WINC) 豊橋技術科学大学 みずほ情報総研 東芝エネルギーシステムズ
オランダ	オランダ企業局	デルフト工科大学(TU-Delft)
スペイン	CENER	CENER
スイス	スイス連邦エネルギー庁	スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL) ラッペルスウィル応用科学大学(HSR)
スウェーデン	ウプサラ大学	ウプサラ大学
米国	NREL	NREL サンディア国立研究所(SNL) コロラド大学ボルダー校 ワイオミング大学

Task31 Phase3 スケジュール

2018年6月 ~ 2021年5月

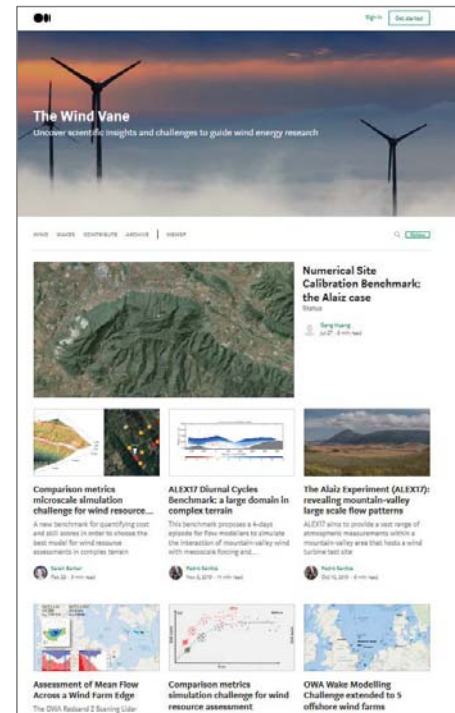
2018年6月

2020年11月

IEA Task 31 "Wakebench" Phase 3 Work Plan	Year 1		Year 2		Year 3	
	M6	M12	M18	M24	M30	M36
WP0: Management and Coordination (CENER)						
Task 0.1: Administrative management						
Task 0.2: Scientific and technical management						
Task 0.3: Communication and dissemination						
D0.1, M0.2: Website in IEA-Wind	O					
D0.2, M0.2: Progress Reports/ ExCo meetings	R/M	R/M	R/M	R/M	R/M	M
D0.3: Final management report						R
M0.1: Kick-off meeting	M					
M0.3: Annual in-person meetings		M		M		M
WP1: Benchmarking of models for external wind conditions (CENER)						
Task 1.1: Review & implementation of V&V strategy for IEC-15 and IEC-12-4						
Task 1.2: Setting-up and execution of "wind" benchmarks						
D1.1: Quality acceptance criteria for wind flow models			R			
D1.2: "Wind" benchmark repositories (Windbench)	O	O	O	O	O	O
D1.3: Roadmap for wind flow models			R			
M1.1: Roadmap for wind flow models reviewed			Ms			
WP2: Benchmarking of wind farm wake models (NREL)						
Task 2.1: Review & implementation of V&V strategy for IEC 61400-15						
Task 2.2: Setting-up and execution of "wake" benchmarks						
D2.1: Quality acceptance criteria for wake models			R			
D2.2: "Wake" benchmark repositories (Windbench)	O	O	O	O	O	O
D2.3: Roadmap for wake models			R			
M2.1: Roadmap for wake models reviewed			Ms			
WP3: V&V framework, uncertainty quantification and user guidelines (SNL)						
Task 3.1: PIRT analysis and V&V strategy						
Task 3.2: Best practice procedures						
D3.1: 3rd edition of Model Evaluation Protocol						R
D3.2: 3rd edition of best practice procedures						R
D3.3: White paper on wind farm flow modeling and evaluation						R
M3.1: International PIRT implemented		Ms				

M = Meeting; Ms = Milestone; R = Report; O = Online

- ◆ 中間会議
 - 2020年6月17日
 - オンライン
 - 進捗報告
- ◆ 中間会議
 - 2020年10月30日（欧米）、11月4日（アジア）
 - オンライン
 - 次期のWakebenchテーマについて
- ◆ 関連会議
 - WESC 2021 <https://www.wesc2021.org/en/>
 - 2021年5月25日～28日
 - オンライン（ハノーバー、ドイツ）
- ◆ ブログ：<https://thewindvaneblog.com>
 - V&Vのためのコミュニケーション及び広報
- ◆ 最終成果物：<https://wemep.readthedocs.io/en/latest/index.html#>
 - 風力エネルギーモデル評価手順（ドラフト）



ブログ “The Wind Vane”

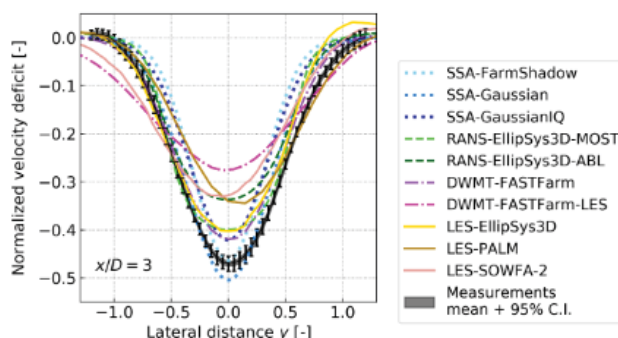
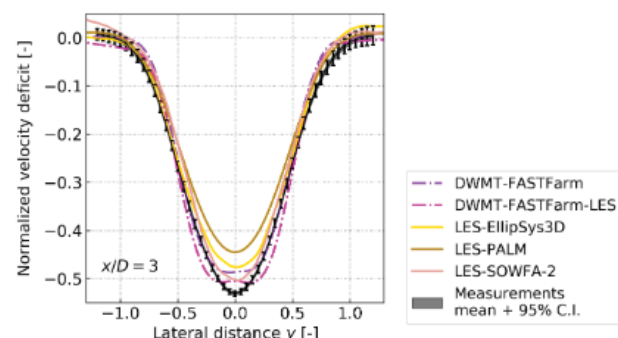
A2e - SWiFT (NREL) - Power & Loads

◆ NRELの実証研究設備 SWiFT

- スケール風車（V27, ロータ径27m）によるシングルのウェイク計測（大気安定度別の評価）
- 風車間距離：3D, 5D, 6D
- 6チームの参加者、11種類のモデル
- 流入風、風車応答（風車トルク、ロータスピード、曲げモーメント等）のブラインドテスト

モデルベンチマーク²⁾

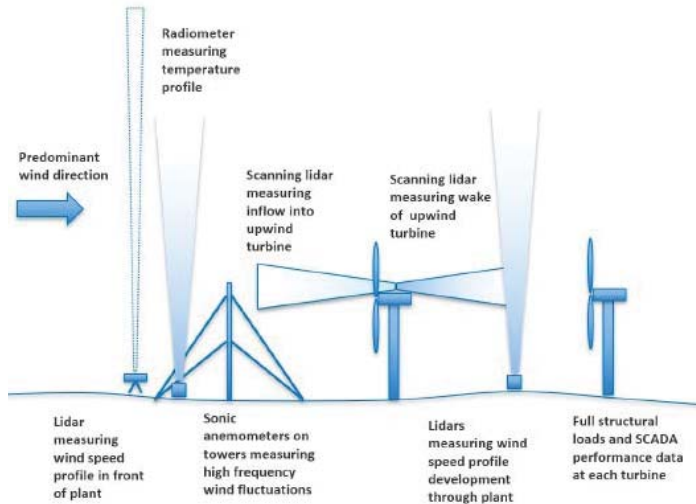
Simulation Name	Inflow Model	Turbine Model	Wake Model	Cases	Institution
SSA-FarmShadow	Prescribed	C_p, C_t	FarmShadow (SSA)	NUS	IFPEN
SSA-Gaussian	Prescribed	C_p, C_t	FLORIS (SSA)	NUS	NREL
SSA-GaussianIQ	Prescribed	C_p, C_t	FLORIS (SSA)	NUS	NREL
RANS-WakeBlaster	Prescribed	C_p, C_t	WakeBlaster (RANS)	NS	PPE
RANS-EllipSys3D-MOST	MOST	Actuator Disk	EllipSys3D (RANS)	NUS	DTU
RANS-EllipSys3D-ABL	ABL	Actuator Disk	EllipSys3D (RANS)	NUS	DTU
DWMT-FASTFarm	Stochastic	BEM	FAST.Farm (DWMT)	NUS	NREL
DWMT-FASTFarm-LES	LES	BEM	FAST.Farm (DWMT)	NUS	NREL
LES-EllipSys3D	LES	Actuator Line	EllipSys3D (LES)	NU	DTU
LES-PALM	LES	Actuator Line	PALM (LES)	NU	ForWind
LES-NaluWind	LES	Actuator Line	Nalu-Wind (LES)	NU	SNL
LES-SOWFA	LES	Actuator Line	SOWFA (LES)	N	IFPEN
LES-SOWFA-2	LES	Actuator Line	SOWFA (LES)	NUS	NREL

MEANDERING有り²⁾MEANDERING無し²⁾Ref.1) P. Doubrawa, et al., Multimodel validation of single wakes in neutral and stratified atmospheric conditions, <https://doi.org/10.1002/we.2543>, July 2020.

Ref.2) P. Doubrawa, IEA Task31 Meeting June 17, 2020.

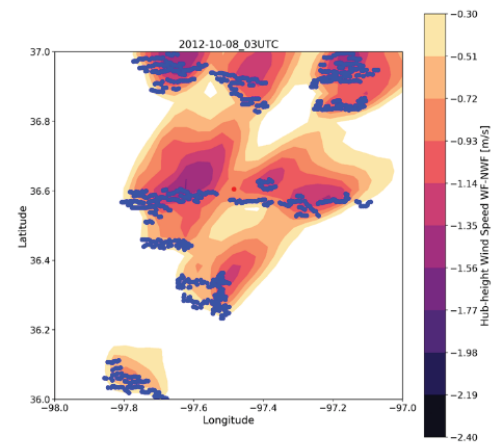
◆ ウィンドファーム風況観測プロジェクト

- 米国中西部、地形的にはシンプル、気象条件が複雑
- 国際的なウィンドファーム観測プロジェクト (NSF, Horizon2020, NOAA等の外部研究資金)
- 風車とウィンドファームの相互作用の理解が目的
- WP1: 機器開発、WP2: シミュレーション、WP3: データ管理

観測戦略⁴⁾

スケジュール

- 2020年 9月 観測機器開発ロードマップ
- 2021年 6月 観測設計完了
- 2021年10月 現地設置及び校正
- 2022年 1月 長期間観測キャンペーン (2023年9月まで)
- 2023年 1月 短期間観測キャンペーン (2023年9月まで)
- 2022年 4月 モデル検証、データ分析、蓄積 (2024年9月まで)
- 2024年 9月 プロジェクト終了

ハブ高における風速分布³⁾

Lundquist, 2020

Ref.3) P. Moriarty, IEA Task31 Meeting June 17, 2020.

Ref.4) P. Moriarty, et.al., American WAKE experiment (AWAKEN), NREL/TP-5000-75789, May 2020.

第9回 IEA Wind セミナー 2021年2月16日

7

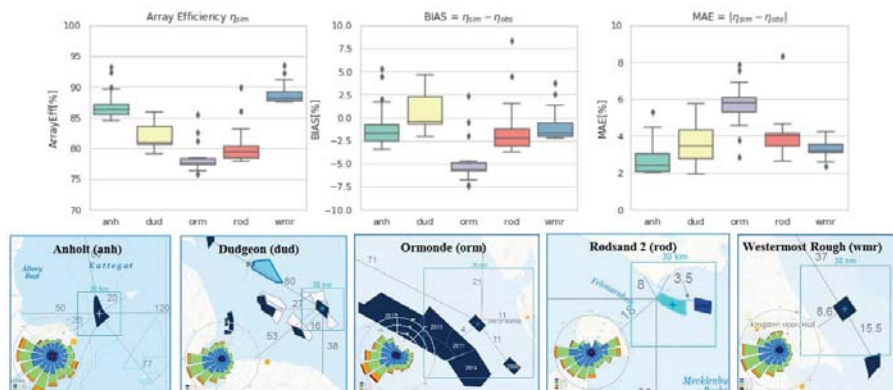
OWA ウェイクモデルチャレンジ (CENER) - Offshore

◆ Carbon TrustのOWAプログラム: Wake Modelling Challenge

- 5つのウィンドファーム
- メソスケールシミュレーションによる流入風 (メソ-ウェイクアプローチ)
- 風速ビン平均のアレイ効率の評価
- オープンソースモデル評価手法の構築
- 全体的にネガティブのバイアス
- ファーム間ウェイク予測のバイアスが大きい

モデルベンチマーク

ID	Participant	Models (Code)	Type	Approach	Input
0	CENER	Porté-Agel, Jensen, Multi-zone (FLORIS)	ENG	time-series	ref
1	ProPlanEn	WakeBlaster	RANS-Parabolic	time-series	wt
2	TU-Delft	PARK33, Bastankah&Porté-Agel (eWakeLab)	ENG	time-series	wt
5	EMD	PARK2 (windPRO)	ENG	time-series	wt
7	IFP Energies Nouvelles	Ishihara&Qian, Bastankah/Ishihara&Qian, super-Gaussian/Ishihara&Qian	ENG	time-series	ref
8	EDF Renewables	PARK, PARK2 (windPRO)	ENG	time-series	wt
9	Lloyd's Register	WindPro/WakeBlaster	ENG	bin-averages	ref
10	Anonymous	Anonymous	ENG	bin-averages	ref
11	Anonymous	Anonymous	RANS	bin-averages	ref
12	Anonymous	Anonymous	ENG	bin-averages	ref
13	Anonymous	Anonymous	RANS	bin-averages	ref
13	Ensemble	1 + 2 + 5 + 8		time-series	wt

ベンチマーク結果サマリー⁵⁾

Ref.5) J.S. Rodrigo et.al, Validation of Meso-Wake Models for Array Efficiency Prediction Using Operational Data from Five Offshore Wind Farms. J. Phys. Conf. ser. Vol.1618, 062044, (2020).

第9回 IEA Wind セミナー 2021年2月16日

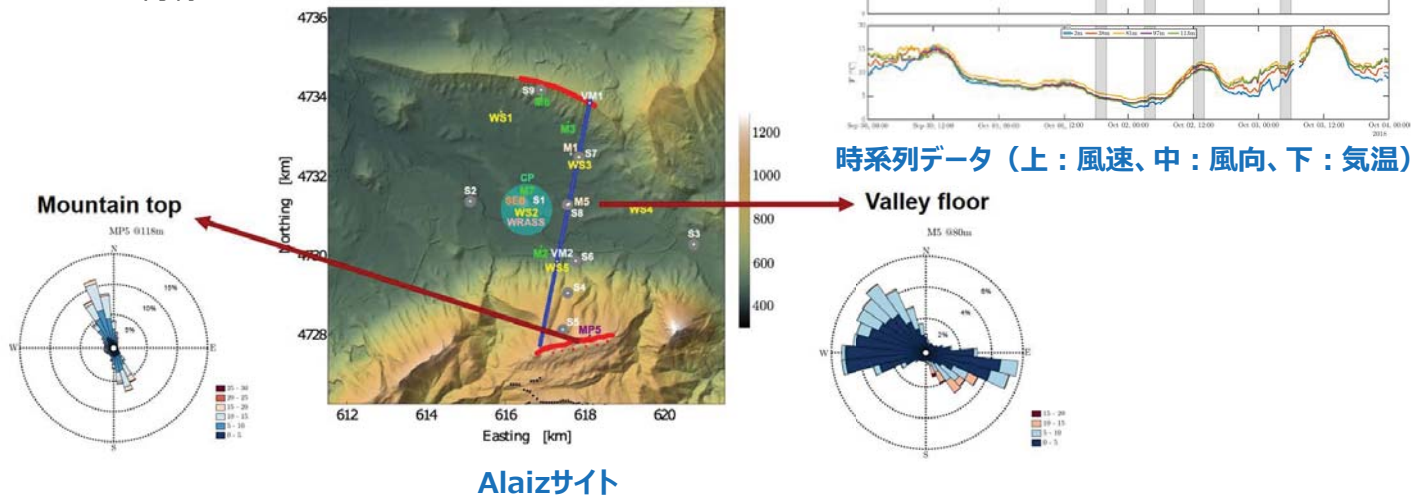
8

◆ CENERのAlaizサイト

- 複雑地形における日変化（4日間）
- 谷間と尾根での風況の違い
- 大気安定度の影響評価
- ベンチマーク用入力データ：高解像度地形データ、粗度データ、WRFデータ（netCDF）、マストデータ
- Validationデータ：マスト地点のプロファイル、水平断面@126m高、鉛直断面（RHI）@青線

スケジュール

- 2019年11月 キックオフ
- 2020年Q2: 結果の提出
- 2020年Q3: 議論及び論文素案
- 2020年Q4: 論文提出 (TORQUE2021?)



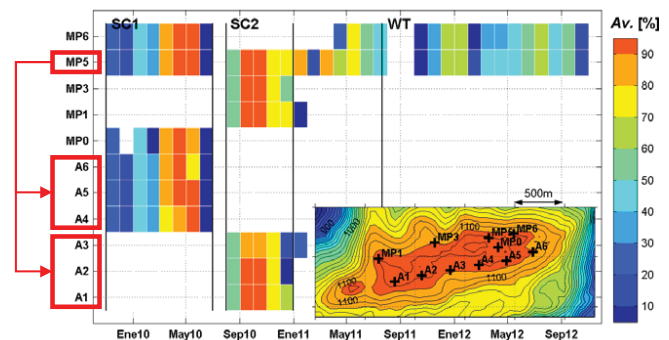
第9回 IEA Wind セミナー 2021年2月16日

9

Alaiz (CENER) NSC

◆ Numerical Site Calibration

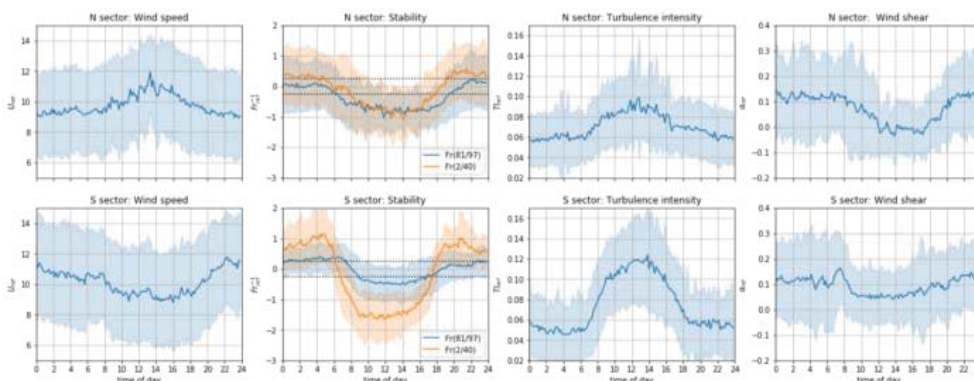
- IEC61400-12-4 のベンチマーク
- Flow Correction Factor (FCF)の算出
- 観測期間：2009/11/24 – 2012/10/7
- IEC61400-12-1準拠のマスト
 - MP5 → A4, A5, A6の予測 (SC1)
 - MP5 → A1, A2, A3の予測 (SC2)
- 入力データ：2m解像度の地形データ、10m解像度の粗度データ、20m解像度のキャノピー高さ、LAD及びLAIマップの提供



Alaizテストサイトにおけるマスト観測データ6)

スケジュール

- 2020年6月 キックオフ
 - 2021年2月: 結果提出
- 延長



日変動（風速、安定度、乱流強度、シア）6)

Ref.6) J.S. Rodrigo, <https://thewindvaneblog.com/numerical-site-calibration-benchmark-the-alaiz-case-b3767918d812>

◆ 目的

- 発電量評価と風条件評価のためのエンジニアリング流れモデルの品質保証
- FAIRデータ※による追跡可能なモデルの評価

◆ ワークパッケージ

- WP1: 影響が大きい流れの現象のベンチマーク
 - 多くの実験データが利用可能であり、そこから選択をする
- WP2: ウィンドファームモデルのベンチマーク
 - 産業界への展開に焦点を当て、よりアプリケーションに関連したベンチマークをする(例: OWA チャレンジのフォローアップ)
- WP3: エンドユーザーガイドライン
 - 認証コミュニティ(例: DNV-GL)から専門家を招き、改善されたモデルと V&V プロセスの業界標準への採用を促進するためのベストプラクティスを導く

◆ 成果物

- WEMEP 2.0
- ウィンドファームエンジニアリングモデルのベストプラクティス

◆ タスク名

- タスクの名前を変更して、ウェイクだけのコミュニティとして認識されないようにすることを検討する

※FAIRデータ原則: 「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)」というデータ共有の原則

Task31の今後の予定

◆ WEMEP (Wind Energy Model Evaluation Protocol) の完成

◆ 次回会議は、2021/4月頃。2021/5/17-21開催のExCo87会議前に実施する可能性が高い(候補: アジア地域)。

◆ 継続ではなく、新規タスクとして提案

◆ 成果の発表

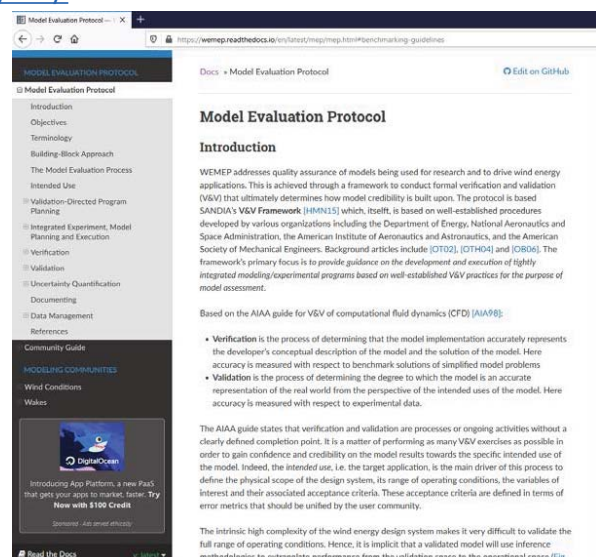
- WESC 2021 <https://www.wesc2021.org/en/>
- 2021年5月25日~28日
- オンライン(ハノーバー、ドイツ)

◆ 新規タスクに関するアンケート調査結果

現象:
乱流, 安定度, ブロッケージ, ラージクラスター, ディープレイ,
ウェイクカ学, 複雑地形

V&Vフレームワーク
公開データベース, 3-方向 V&V, 不確かさの定量化, ガイドライン

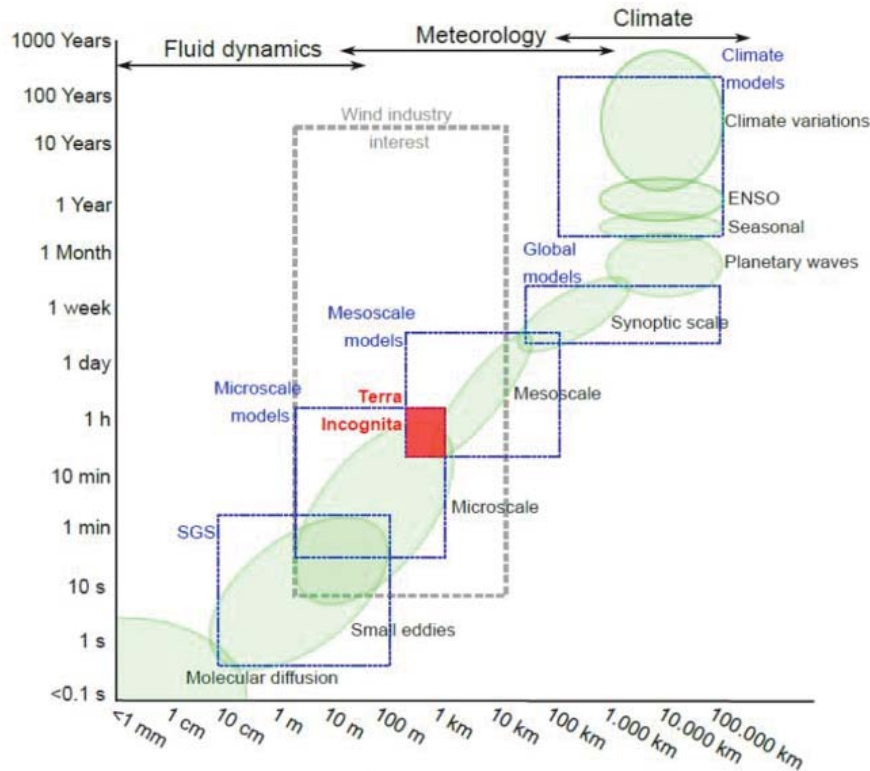
手法:
工学モデルのキャリブレーション, 機械学習, ウィンドファーム
コントロール



風力エネルギーモデル評価手順 (WEMEP)

◆ マイクロスケールとメソスケールのインタフェース

- 風車の大規模化、ウインドファームの大規模化により、一層重要性が高まる



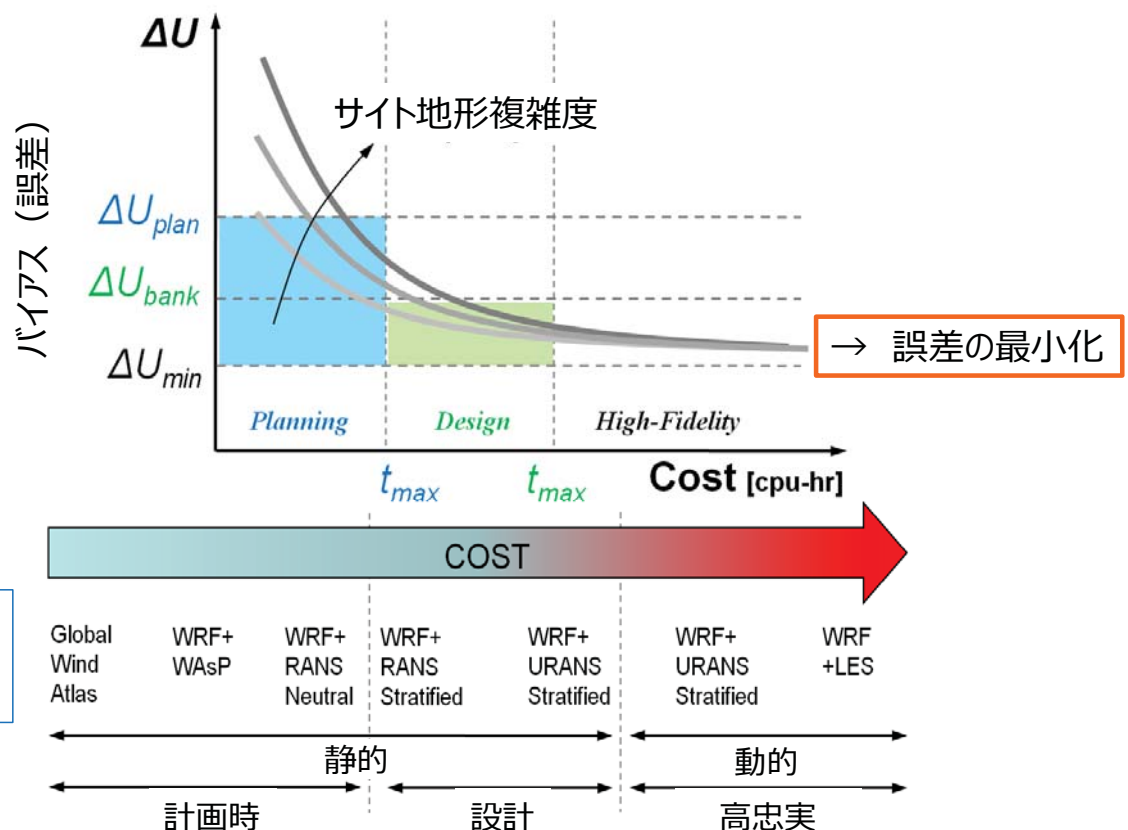
時間-空間スケール²⁾

Ref.7) Gil Lizcano, "Can Mesoscale models reach the Microscale?", EWEA2015 Workshop Resource Assessment 2015.

第9回 IEA Wind セミナー 2021年2月16日

流れモデルの高忠実度と精度の関係

◆ コスト（時間） VS 精度



Ref.8) <http://windbench.net/newa-meso-micro-challenge-wind-resource-assessment>

第9回 IEA Wind セミナー 2021年2月16日

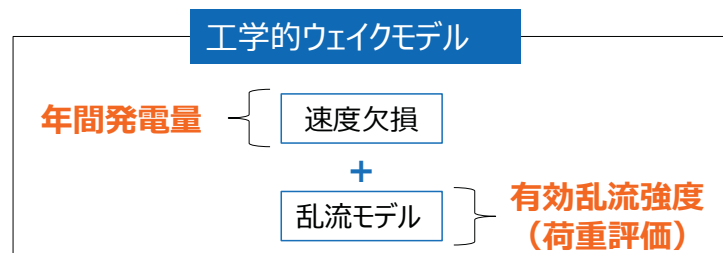
モデル		特徴	ソフトウェア	
メソ スケー ル	気象モデル	100km程度のスケールを対象とし、気象現象（気圧、気温、湿度等）がモデル化されている。	WRF	
	線形モデル	流れの方程式を一部簡略化し（線形化）、短時間に解くことが可能。平坦地に適用が可能。	WAsP	
マイク ロスケ ール	CFDモ デル （非線 形モデ ル）	RANSモデル	複雑地形で発生する乱れた流れを解くことができる。中程度の複雑地形に適用が可能。はく離を伴う流れを解くのは困難。計算時間がややかかる。	MASCOT, WindSim, WAsP CFD, Meteodyn, OpenFOAM, ANSYS CFX
		LESモデル	複雑地形で発生する乱れた流れを解くことができる。中程度の複雑地形に適用が可能。はく離を伴う流れを取り扱うことが可能。計算時間がかなりかかる。	RIAM-COMPACT, OpenFOAM, ANSYS CFX

はく離： 流れが物体の表面から剥がれること。地表面の傾斜角が大きくなると、はく離が発生する。

ウェイクモデルの重要性

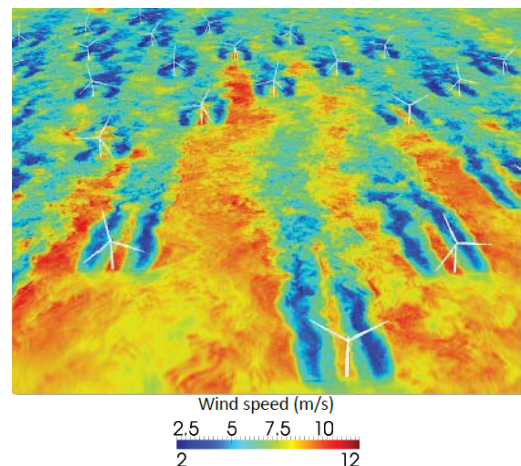
- ◆ 精度の高いウェイクモデルは、ウィンドファームの年間発電量予測及び風車の荷重を把握する上で重要

- 年間発電量
- 風車の荷重
- 風車制御方法



- ◆ ウェイクの特徴

- 風速低減
- 大きなスケールの蛇行
- 乱流
- 3次元的な構造
 - ウィンドシア・大気安定度の影響



Lillgrund風力発電所におけるシミュレーション¹⁾

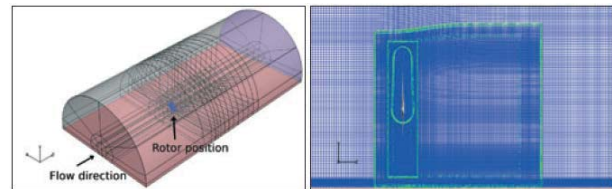
Ref.9) M.J. Churchfield, A review of Wind turbine wake models and future direction, 2013 NAWEA symposium

◆ 工学モデル

- N.O. Jensen (DTU-WAsP/Park)
- Ainslie (Eddy viscosity model) (RES)
- DWM(Dynamic Wake Meandering), RDWM(Rapid DWM) (DTU)

◆ CFD

- Linearized / Parabolized CFD
 - Fuga (DTU)
 - FarmFlow (ECN)
- RANS
 - CRES-flowNS: RANS AD (CRES)
 - CRES-farm: flowNS + engineering model (CRES)
 - CFDWake: OpenFoam RANS AD (CENER)
 - VENTOS: RANS AD (UPORTO)
 - EllipSys: RANS AD/AL (DTU)
- LES
 - ECNS: LES AD/AL (ECN)
 - EllipSys: LES AD/AL (DTU)
 - EllipSys: LES フルローター (DTU)

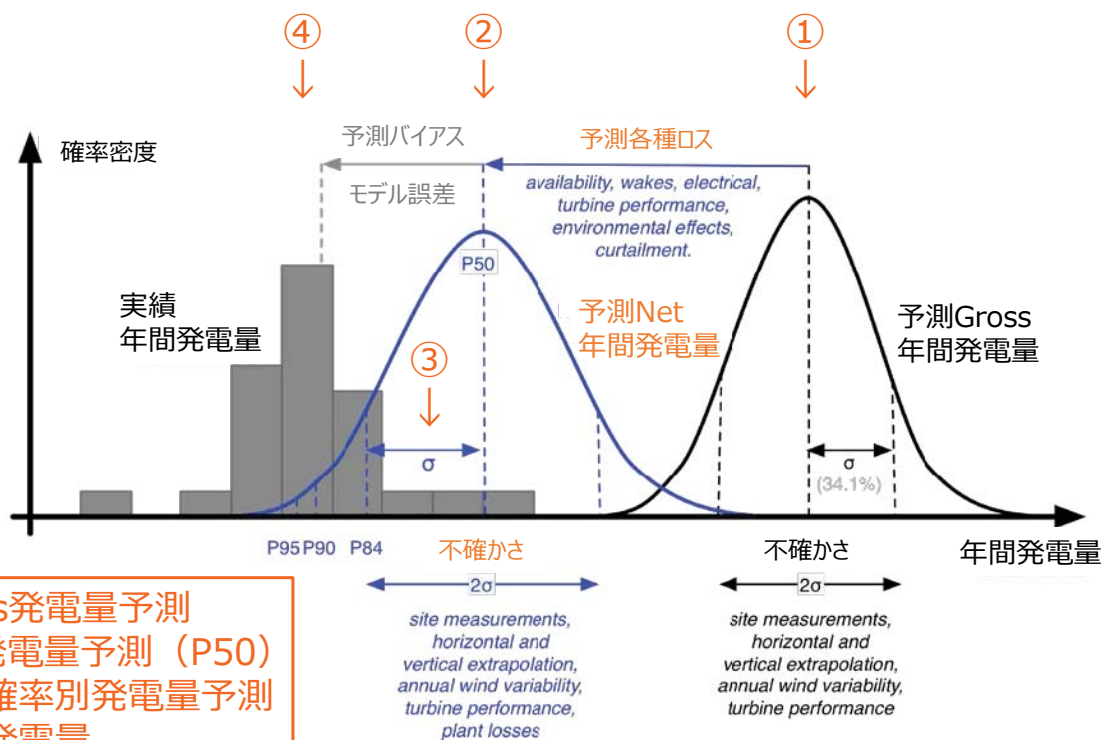


EllipSysによるフルローターシミュレーション¹⁾

高コスト・高忠実度

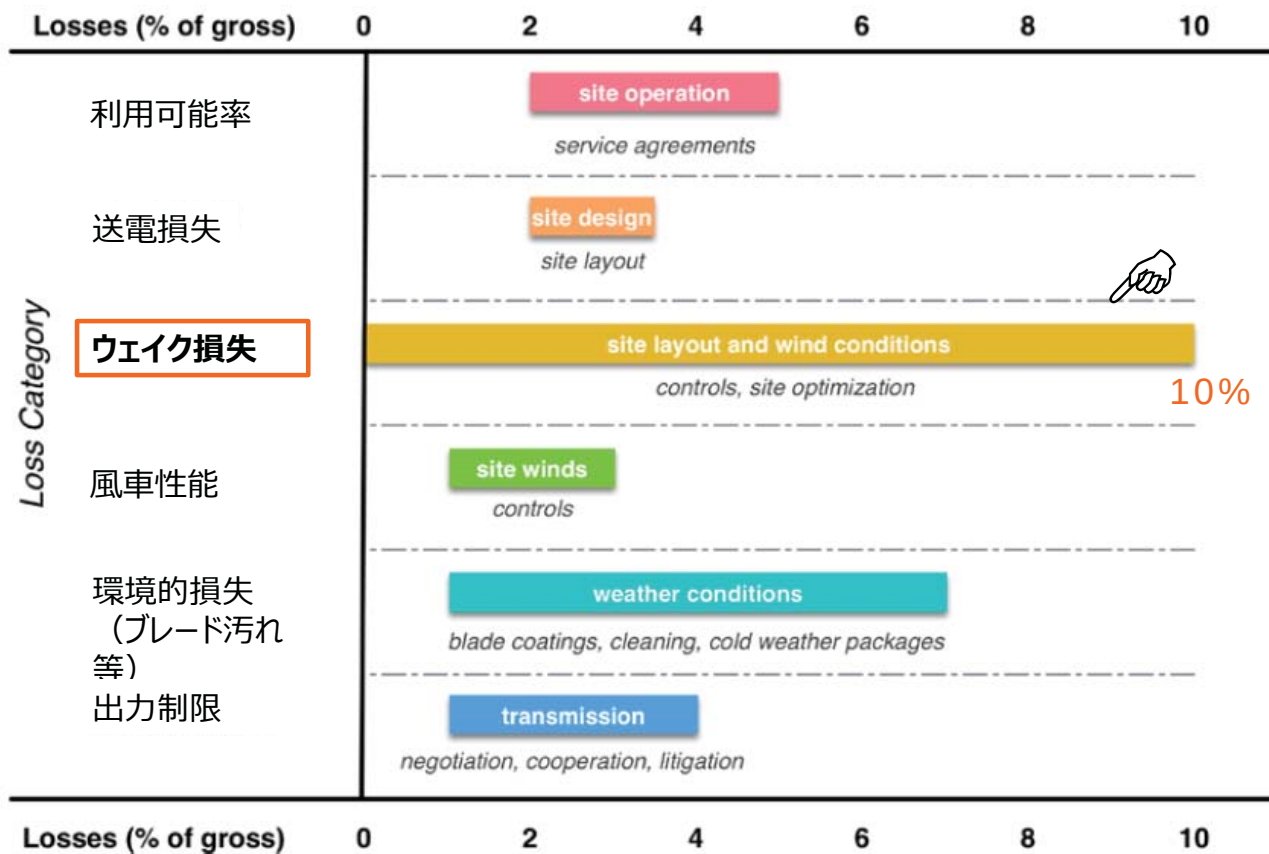
Ref.10) P.E. Réthoré et al., Verification and Validation of an actuator disk model, Wind Energy, 17, pp919-937, 2014

予測と実績の誤差（バイアス）、ロス及び不確かさの関係

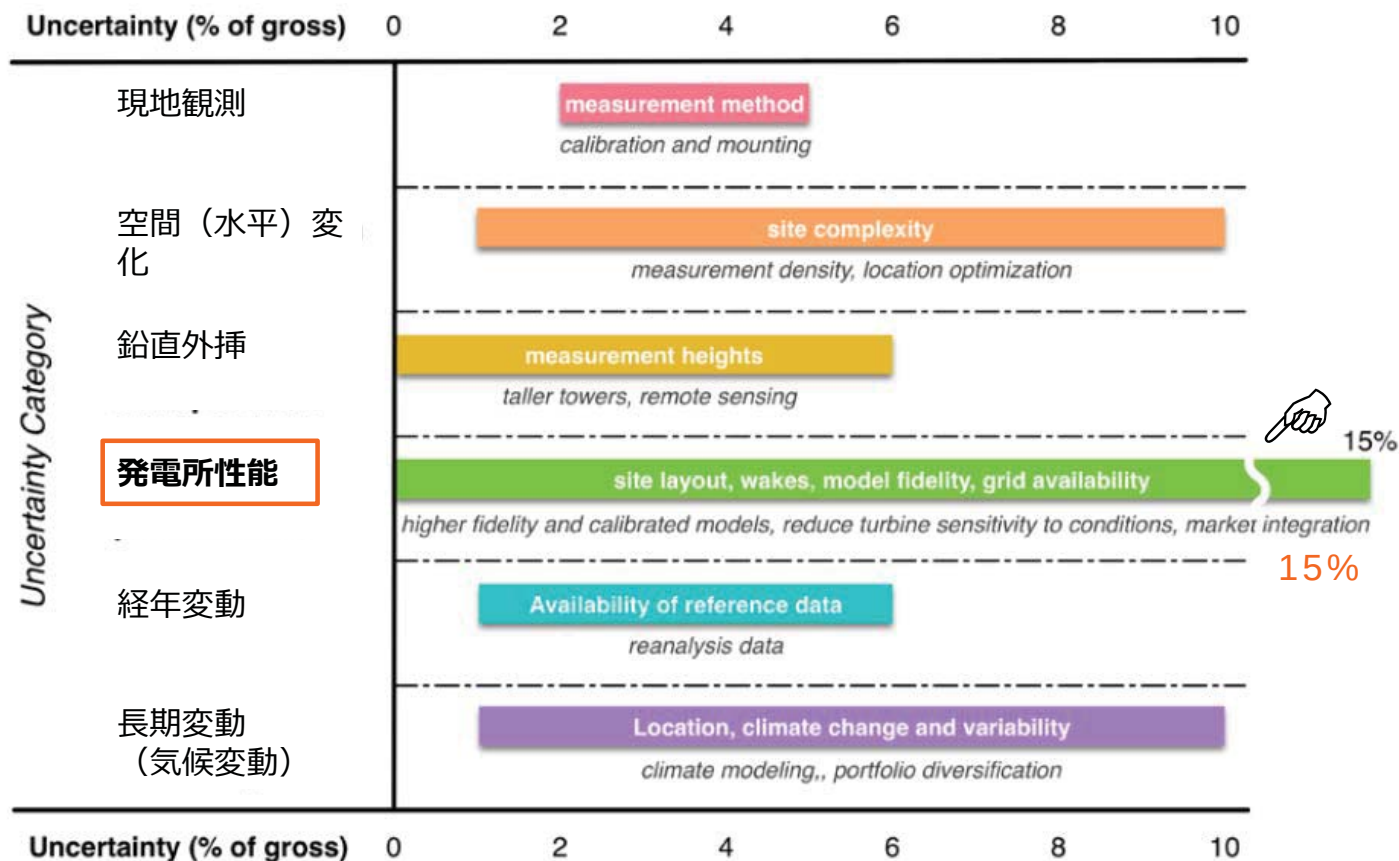


発電量予測と実績の差の主要原因³⁾

Ref.11) A.Clifton, et. al "Wind Plant Preconstruction Energy Estimates: Current Practice and Opportunities", NREL/TP-5000-64735, 2016.



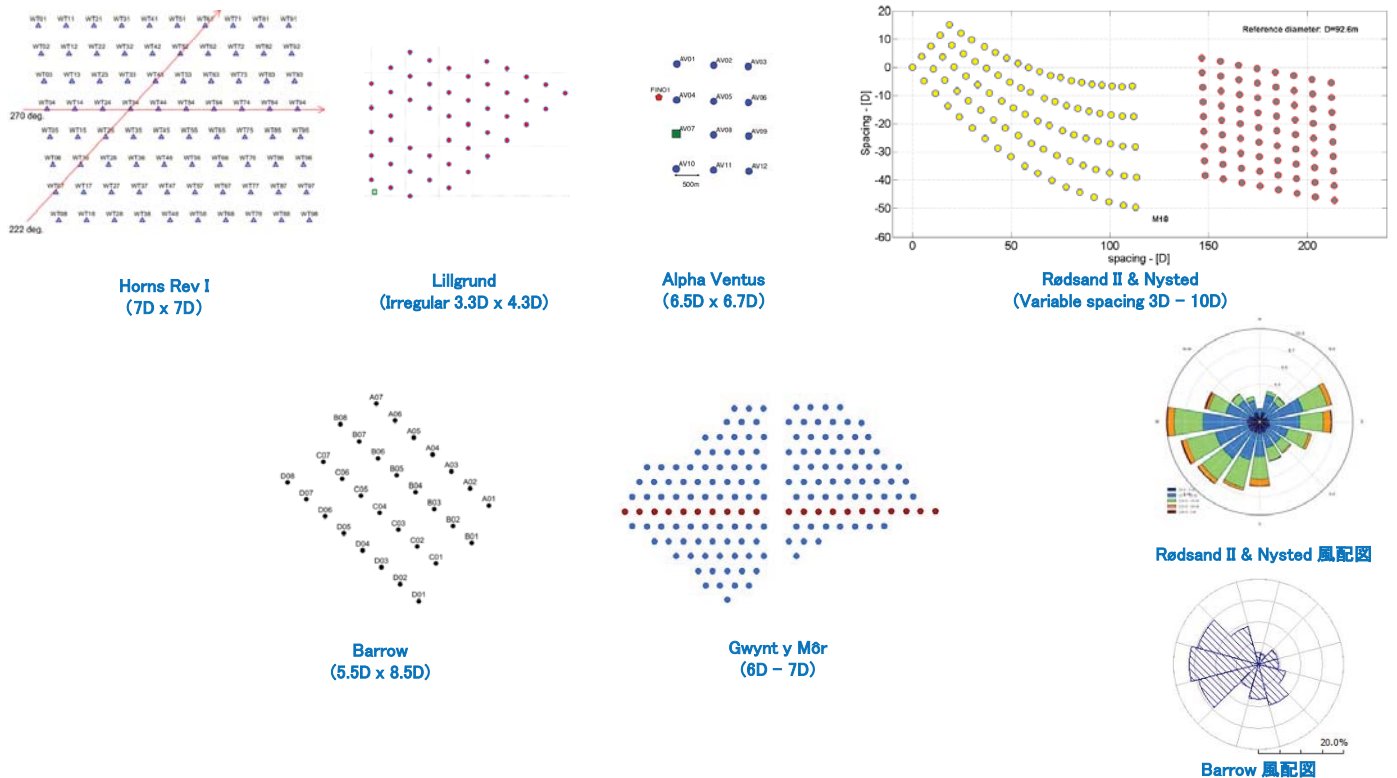
Ref.12) A.Clifton, et. al "Wind Plant Preconstruction Energy Estimates: Current Practice and Opportunities", NREL/TP-5000-64735, 2016.



Ref.13) A.Clifton, et. al "Wind Plant Preconstruction Energy Estimates: Current Practice and Opportunities", NREL/TP-5000-64735, 2016.

◆ レイアウトは場所・風車基数などにより異なる。

- 従来、陸上では10D（主風向）×3D（横方向）と言われてきたが、洋上では6D×4D⁵⁾。

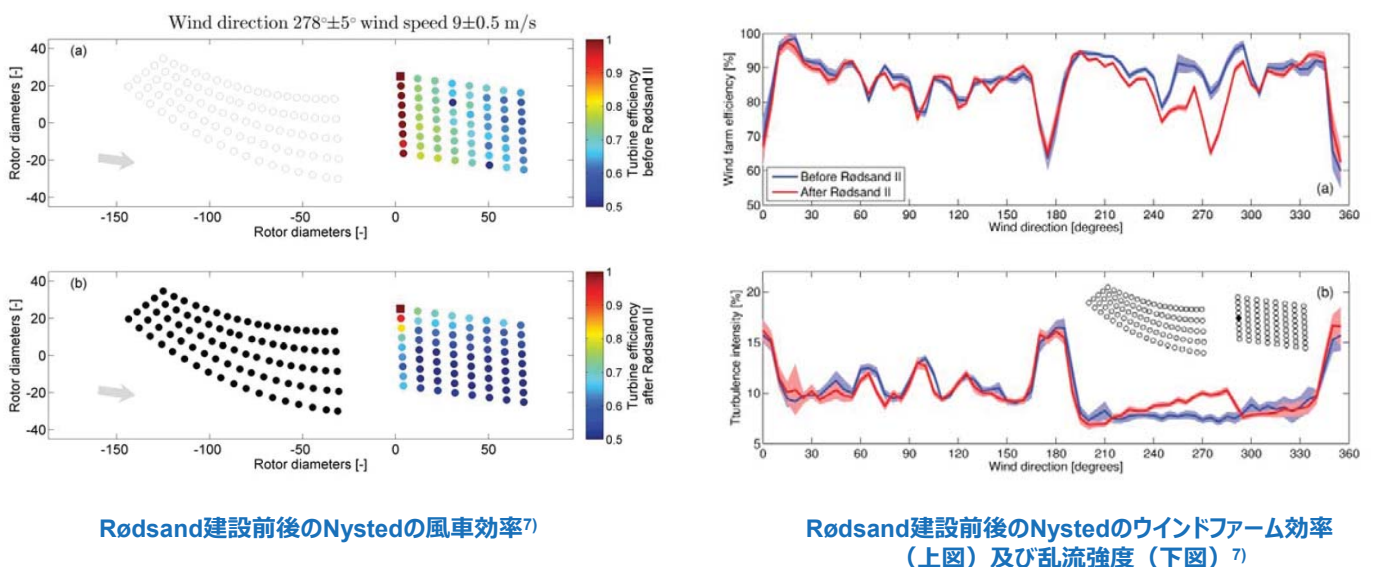


Ref.14) DNV GL, Offshore Wind Farm Layout Optimization. <https://www.dnvgl.com/publications/offshore-wind-farm-layout-optimization-23951>

隣接するウインドファーム間のウェイク（Rødsand II & Nystedの事例）

◆ Nystedに対するRødsand II 建設前後の比較

- 約3km離れたウインドファーム（約25D）
- Nystedは、Rødsand IIの建設により、ウェイク損失及び乱流強度が増加



Ref.15) Nicolai Gayle Nygaard, Wakes in very large wind farms and the effect of neighbouring wind farms, 2014 J. Phys.: Conf. Ser. 524 012162.

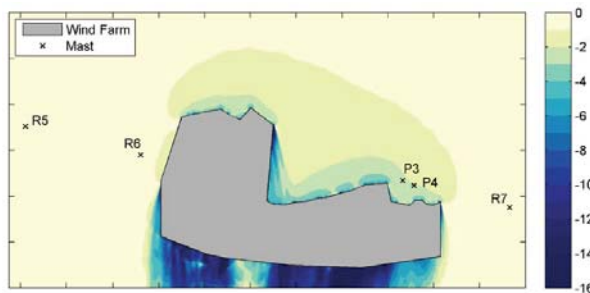
◆ Orstedが発電量予測値を下方修正^{16),17)}

- ウェイク影響を過少評価
- 8つの新規ウインドファームのIRRを下方修正

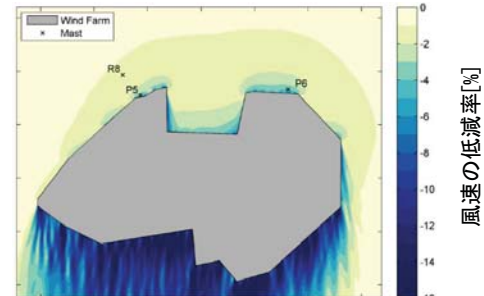


◆ ブロッケージ効果

- 発電時の風車の上流側の風速が低減する効果
- ウインドファームでは、単機の風車による影響の合計よりも大きくなることが判明
 - 従来のモデルはブロッケージ効果を過小評価



a) ウインドファームB



b) ウインドファームC

DNV-GLによるブロッケージ効果の評価結果 (0°を中心とした30°方位区分)¹⁸⁾

Ref.16) <https://renewbiz/56101/orsted-cuts-offshore-wind-output-estimates/>
 Ref.17) <https://orsted.com/en/Company-Announcement-List/2019/10/1937002/>

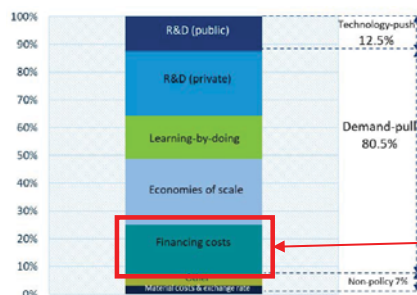
Ref.18) J.Bleeg, M.Purcell, R.Ruisi and E.Traiger, Wind Farm Blockage and the Consequences of Neglecting Its Impact on Energy Production, Energies 2018, 11(6), 1609.

◆ 2021年2月4日、OWA GloBE (Global Blockage Effect in Offshore Wind) プロジェクト開始¹⁹⁾

- RWEが主導するウインドファーム閉塞効果に関する研究プロジェクト
- 研究目的は、洋上風力発電の発電量予測の確実性を高め、それによってエネルギーコストの低減に貢献すること
- 3つのウインドファームNordsee Ost, Amrumbank West及びKaskasi での観測キャンペーン
- デュアルスキャニングライダーを含む複数のライダーによるウェイク計測

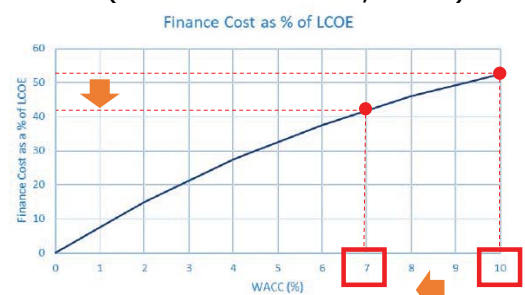
◆ 発電コストの低減に対するWACCの寄与

- 欧州ではウインドファームの流れ、ウェイクの影響の「理解を深めること」により、発電量予測の「不確実性低減」をすることで、洋上風力発電プロジェクトのWACC (ファイナンスコスト) を大幅に低減してきた。 “10% in 2010 to below 7% by 2020 ”(BVG Associates,2020)



コスト低減ドライバー²⁰⁾

ファイナンスコスト



WACCのLCOE寄与度²⁰⁾

Ref.19) <https://www.carbontrust.com/news-and-events/news/offshore-wind-global-blockage-effect>

Ref.20) Carbon Trust, UCL BSERR, "Policy, innovation and cost reduction in UK offshore wind", 2020.

Task 40: ダウンウィンド風車技術

Task 40: Downwind Turbine Technologies



第9回IEA Windセミナー
2021/02/16 @Online

吉田 茂雄(OA):九州大学



KYUSHU UNIVERSITY

内容

1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①:WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②:WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③:WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④:WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤:WP2-2) 超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥:WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

1. 背景

1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①: WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②: WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③: WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④: WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤: WP2-2) 超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥: WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

1.1 ダウンウィンド風車実証機・商業機



MOD-2
P=2.5MW, D=91m



WTS-4
P=4MW, D=78m



GROWIAN
P=3MW, D=100m



Mingyang 6.5MW



Proven
P=2.5kW, D=3.5m



VERGNET GEV275
P=275kW, D=32m

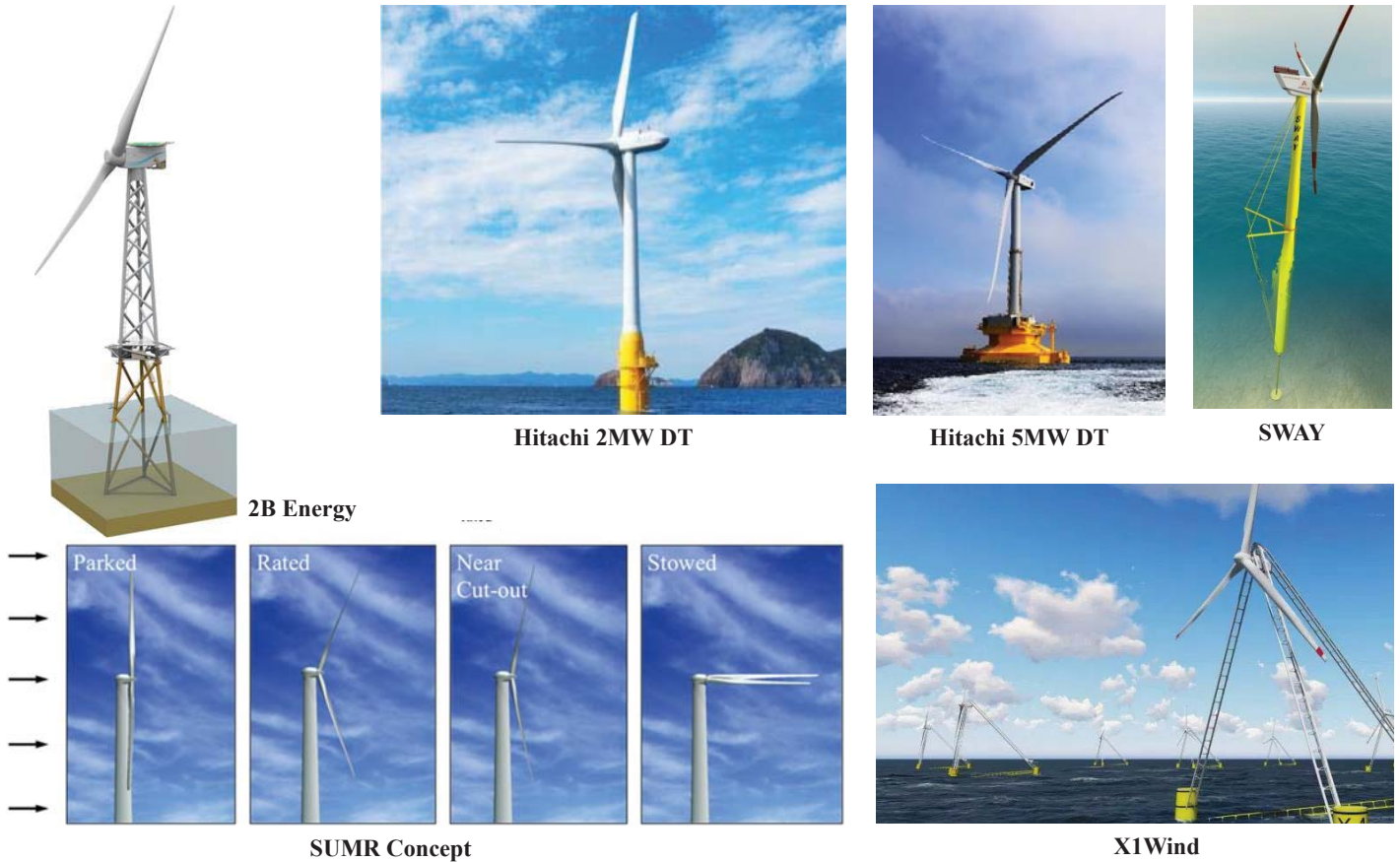


Hitachi 2.1MW



Hitachi 5.2MW

1.2 ダウンウィンド超大型風車・浮体式洋上風車



1.3 ダウンウィンド風車に対する各国の取り組み状況

	国名	取組状況	関係機関	Task40
①	米国	50MWコンセプト検討中	NREL他	参加済
②	日本	2MW, 5MW級実用化 浮体式洋上風力研究開発	日立他	参加済
③	ドイツ	8MW, 15MWコンセプト検討中	Fraunhofer IWES	参加済
④	スペイン	10MWのFS 浮体式洋上風車実証機	CENER X1Wind	参加済
5	デンマーク	10MWのFS	DTU	不参加
6	オランダ	6MW陸上実証試験中 洋上実証機建設中	2BE TUDelft	不参加
7	スイス	ダウンウィンド技術の基礎研究	ETHZ	不参加
8	中国	洋上実証機6.5MW建設・試験中	MingYang	不参加

2. Task40概要

1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①: WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②: WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③: WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④: WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤: WP2-2) 超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥: WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

2.1 Task40概要

- 1) 名称: Downwind Turbine Technologies
- 2) 期間: 2018/3-2021/2 (3年間)
- 3) ホスト国: 日本
- 4) OA: OA 吉田茂雄(九州大学), Co-OA 大和田政孝(風力エネルギー研究所)
- 5) 目的:
 - ① ダウンウィンド風車モデルの構築と検証 (WP1)
 - ② 大型ダウンウィンド風車の最適化 (WP2)
 - ③ 規格・基準への改善提案 (WP3)
- 6) 参加国(機関): 4カ国(14機関)
 - ・ドイツ: Fraunhofer IWES
 - ・スペイン: X1Wind
 - ・米国: National Renewable Energy Laboratory (NREL), Boulder Wind Consulting (BWC), University of Texas Dallas (UT Dallas), University of Massachusetts (UMass), University of Virginia (UVA)
 - ・日本: 東京大学, 九州大学, 産業技術総合研究所(AIST), 日本海事協会(ClassNK), 日立製作所, 風力エネルギー研究所(WEIT), 計算力学研究センター(RCCM)

2.2 ワークパッケージ

No	WP (Leading Org.)	Sub-WP	Participants (Leading Org.)
WP1	Model Development & Verification (Kyushu Univ.)	WP1-1) 2MW Baseline Turbine Model	UTokyo, Hitachi
		WP1-2) Tower Shadow	KU, IWES, Hitachi, X1Wind
		WP1-3) Nacelle-Rotor Interaction	KU, NREL
		WP1-4) Stability & Control	Hitachi, KU, UTokyo, IWES
		WP1-5) Complex Terrain	AIST, Hitachi, IWES
WP2	Design & LCOE Assessment (NREL)	WP2-1) Blade Optimization for DTs	NREL, Hitachi, IWES, UT Dallas, UMass, UVA
		WP2-2) Scalability Benefits for DTs	NREL, Hitachi, X1Wind, UT Dallas, UMass, UVA
WP3	Recommended Practice (Kyushu Univ.)	WP3-1) Standards Evaluation for DTs	KU, ALL
		WP3-2) RP for DTs	KU, ALL

2.3 スケジュール

WP	Sub-WPs	Year 1	Year 2	Year 3
Milestones /Events	Plenary Meeting Workshop	Tokyo	Pamplona Hitachinaka Online	Online Online
WP0) Management	Management Final Report			
WP1) Model & Validation	Reference Model Other Modeling SWPs	model		
WP2) Design & LCOE	Blade Optimization Scalability Benefit			
WP3) RP	Survey RP Proposals			

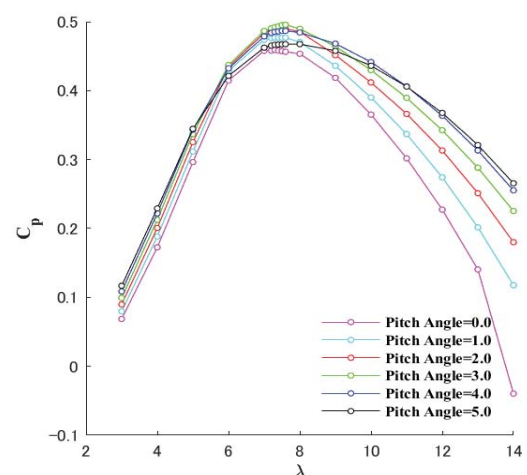
3. 成果概要①:WP1-1) 2MWベースラインモデル

1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①:WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②:WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③:WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④:WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤:WP2-2)超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥:WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

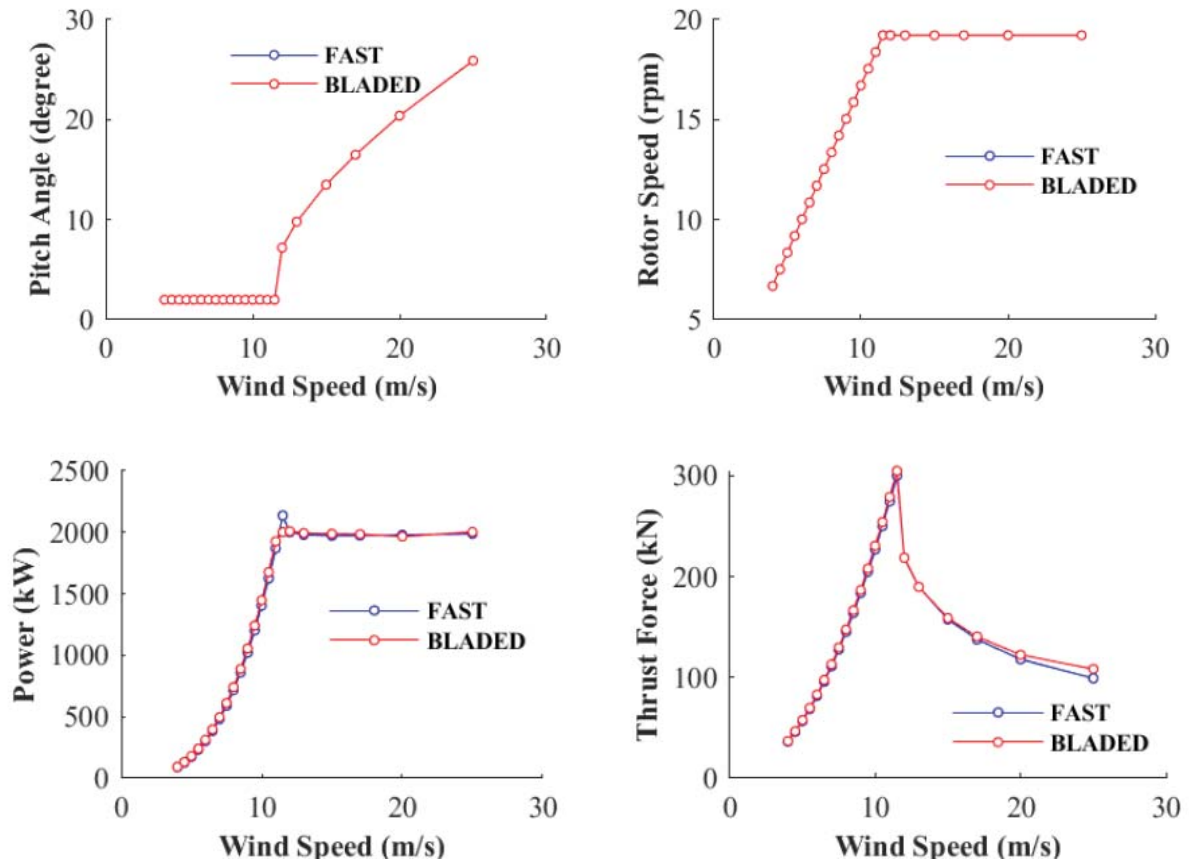
3.1 空力弾性モデルの概要(東京大学/日立)

1. 目的
 - ・ 2MWアップウィンド/ダウンウィンド風車空力弾性モデル(Bladed/FAST)を定義する.
 - ・ 複数の解析コードを比較する.
2. アプローチ
 - ・ 実機に特性の近いモデルの定義.
3. 成果概要
 - ・ 空力弾性モデル(UT80d-2MW)を定義した.
4. 今後の予定
 - ・ コントローラの定義.
 - ・ 代表的な荷重ケースにおける解析と比較.

Rated power	2 MW
Rotor configuration	Downwind, 3 Blades
Rotor diameter	80 m
Hub height	78 m
Cut-in, rated, cut-out wind speed	4, 12, 25 m/s



3.2 空力弾性モデルの特性(東京大学/日立)



4. 成果概要②:WP1-2) 実機データ解析

1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①:WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②:WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③:WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④:WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤:WP2-2) 超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥:WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

4.1 データ概要(日立/九州大学)

1. 目的

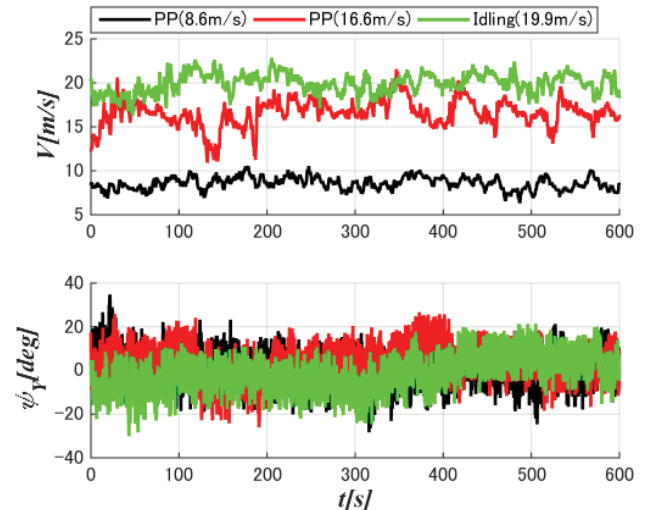
- 各種検討の検証用に2MWダウンウィンド風車商業機の計測データの提供を受け、データを解析した。

2. データ概要

- 運転条件データ: 風速, 風向, ナセル方位角, ロータ速度, ピッチ角, ロータアジマス角。
- 荷重データ: 翼根フラップ/エッジ曲げ, タワー頂部/基部曲げ(2方向)

3. 計測条件

- 発電時(最適条件/定格)
- 高風速待機時



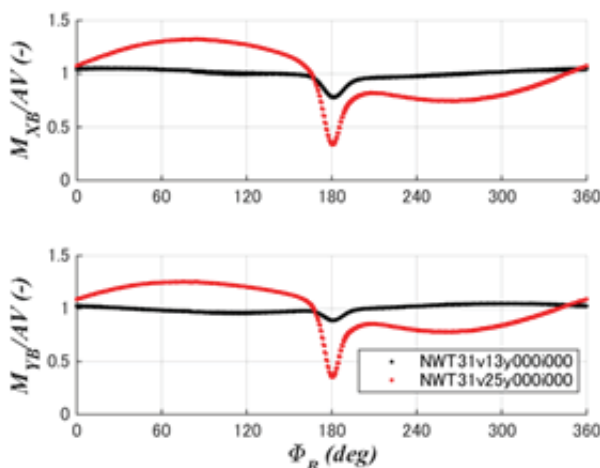
Wind Speed and Yaw Angle

Mode	Power Production	Power Production	Idling
Av. Wind Speed (TI)	8.6m/s (8.3%)	16.6m/s (9.2%)	19.9m/s (5.5%)
Av. Wind Direction	90deg (E)	306deg (NW)	278deg (W)
Av. Yaw Angle Av. (Sd.)	0.7deg (7.5deg)	3.6deg (7.5deg)	-1.7deg (7.5deg)

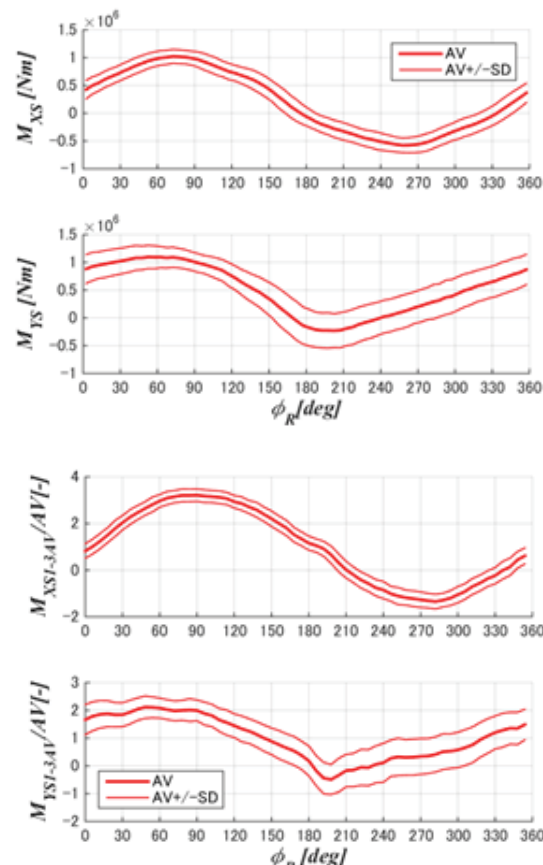
4.2 解析結果概要(九州大学)

4. 解析結果概要

- 実機(弾性体, 自然風)の方がタワーシャドウの影響は, CFD(剛体, 一様・定常風)ほど顕著ではない。
- 参照用に解析したプロトタイプと差あり。
→商業機との差は検討中。



CFD Prototype 13m/s
(Normalized by Av.)



Commercial
(T40)
16.6m/s

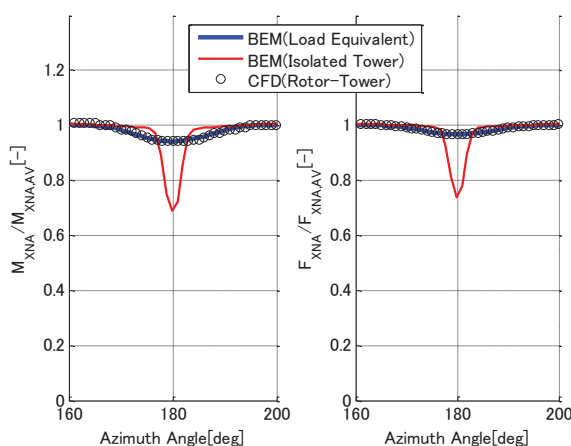
Prototype
17m/s
(Normalized
by the Av.)

5. 成果概要③:WP1-2) タワーシャドウモデリング

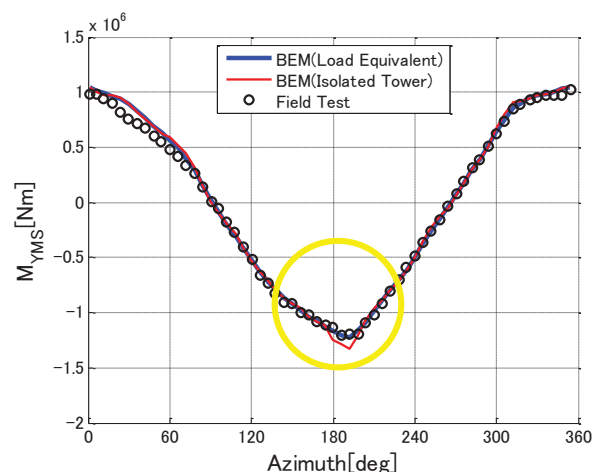
1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①:WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②:WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③:WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④:WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤:WP2-2)超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥:WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

5.1 荷重等価タワーシャドウモデル(九州大学)

- ・ 従来の孤立タワーの後流によるモデル化では、ロータ～タワー間の干渉を無視するため、タワーシャドウによる変動荷重が過剰.
- ・ 変動荷重が等価となる荷重等価モデルによりタワーシャドウによる変動荷重をモデル化し、2MW実機にて概ね妥当であることを確認した.
- ・ 課題: ケースごとにCFDが必要.



Torque and Thrust at 13m/s (Rigid Model)

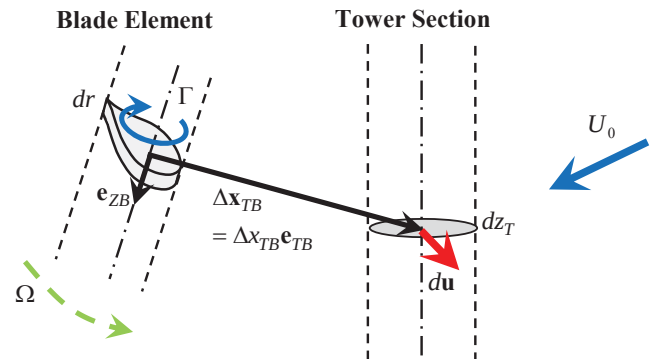


Main Shaft Bending to Azimuth (13m/s)

5.2 タワー変動荷重モデル(九州大学)

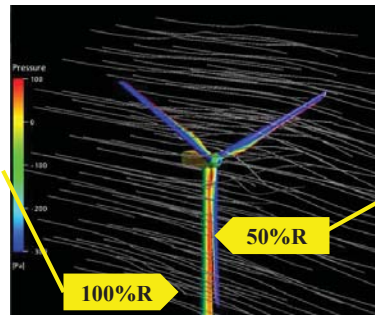
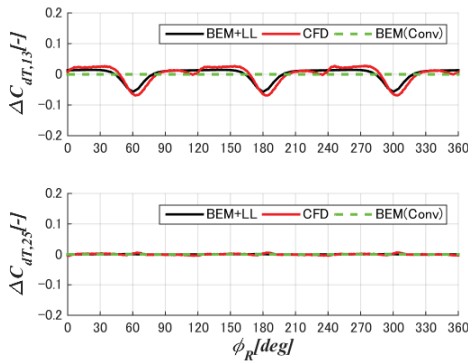
- 従来無視していたタワーシャドウによるタワー変動荷重を揚力線理論によりモデル化した。
- CFDとの比較で、タワー変動荷重を概ね再現することを確認した。

Yoshida, S., *Combined Blade-Element Momentum - Lifting Line Model for Variable Loads on Downwind Turbine Towers, energies*, 2018.

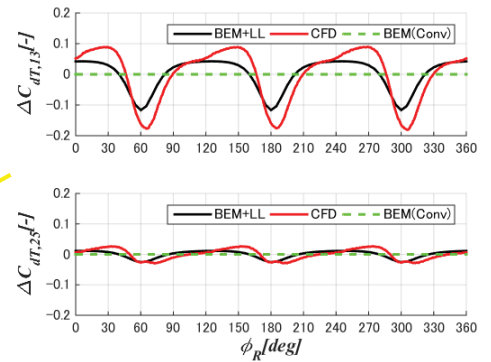


$$\mathbf{u} = \sum_{n=1}^B \left(\int_0^R \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{e}_{BZ} \times \mathbf{e}_{TB}}{\Delta x_{TB}^2} dr \right)_n$$

$$\Delta C_{dT} = \frac{\pi D_T}{2U_0^2} \left(-U_0 \frac{du}{dx_T} + r\Omega \frac{dv}{dx_T} - w \frac{dw}{dx_T} \right)$$



Tower Load Variation (100%R and 50%R)



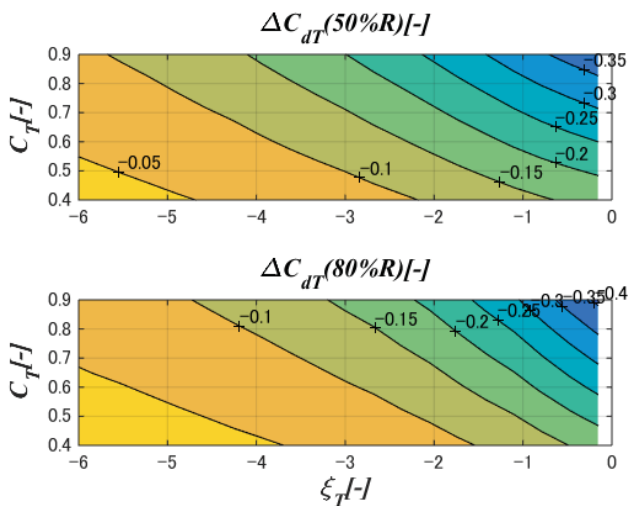
5.3 タワー平均荷重モデル(九州大学)

- 従来無視していたタワー平均荷重に対するロータスラストの影響を運動量理論によりモデル化した。
- 同モデルを風洞試験で検証し、タワー抗力係数に対するロータスラストの影響を30 %以下の推算精度で解析した。

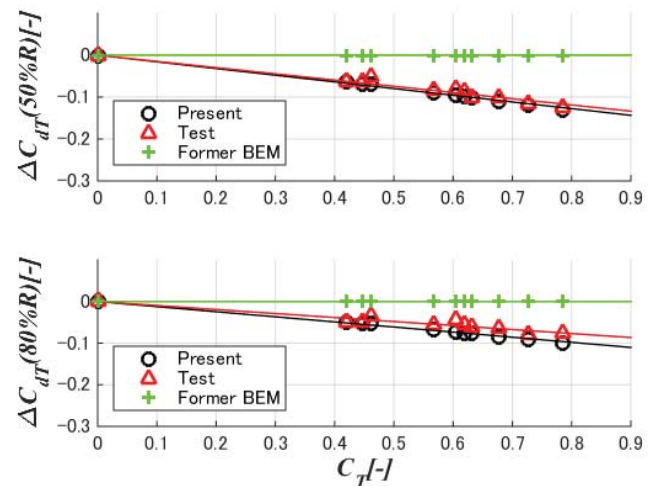
Yoshida, S., et al., *Effect of Rotor Thrust on the Average Tower Drag of Downwind Turbines, energies*, 12, 2, 227-241, 2019.01.

$$\Delta C_{dTV} = \Delta C_{dTV} + \Delta C_{dTP}$$

$$= -C_{dT0} (1 - \mu_T^2) + \frac{\pi}{2} \mu_T \frac{d\mu_T}{d\xi_T}$$



ΔC_{dT} to C_t and Tower Relative Position ξ_T



C_{dT} Deviation to $C_T (-4D_T)$

5.4 動的タワーシャドウモデル(九州大学)

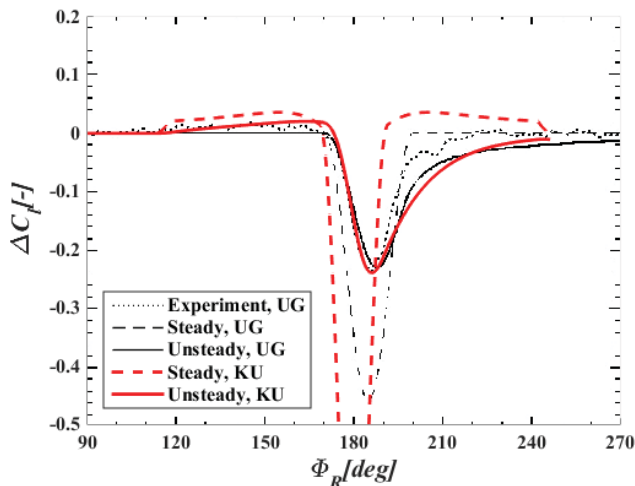
- 薄翼理論によりタワーシャドウに対する動的失速の影響のモデルを開発し、風洞試験で検証した。
- サイズが大きいほど揚力係数の変化は小さい。

Yoshida, S., Dynamic Stall Model for Tower Shadow Effects on Downwind Turbines and Its Scale Effects, *Energies* 2020, 13, 5237, 2020.10.

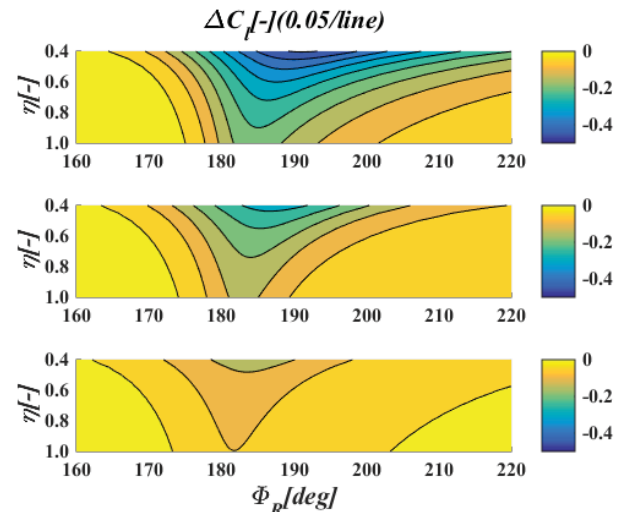
Munduate, X., et al., An Investigation of the Aerodynamic Responses of a Wind Turbine Blade to Tower Shadow, *J. Solar Energy Engineering*, 126, 2004, 1034-1040.

$$C_l = \frac{2\pi w_{ge}(s)}{W} \quad w_{ge}(s) = w_g(s) - X(s) - Y(s)$$

$$\begin{cases} X(s) = A_1 \int_0^s \frac{dw_g}{ds} \exp[-b_1(s-\sigma)] d\sigma \\ Y(s) = A_2 \int_0^s \frac{dw_g}{ds} \exp[-b_2(s-\sigma)] d\sigma \end{cases}$$



Validation with the Wind Tunnel Test



Deviation of Lift Coefficient: (T) x1, (M) x3, (B) x10

6. 成果概要④:WP1-4) パッシブヨー暴風待機中の荷重計算法

- 背景
- Task40概要
- 成果概要①:WP1-1) ベースラインモデル定義
- 成果概要②:WP1-2) 実機データ解析
- 成果概要③:WP1-2) タワーシャドウモデリング
- 成果概要④:WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
- 成果概要⑤:WP2-2) 超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
- 成果概要⑥:WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
- マネジメント

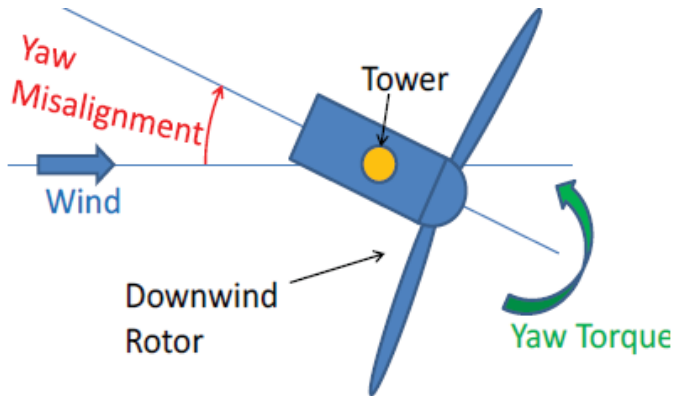
6.1 パッシブヨー概要(日立)

1. 背景

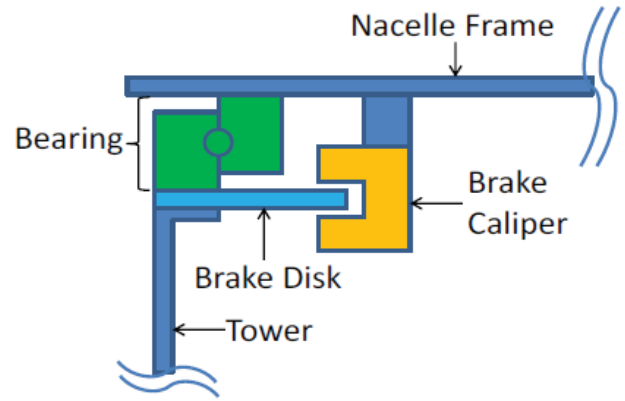
- ・ダウンウィンド風車に特有のパッシブヨー(フリーヨー)は暴風荷重低減に効果が見込める。
- ・その特性は、待機中のヨーブレーキトルクなどの条件に依存する。

IEC61400-1 ed.3,1

- ・アクティブヨー: $\pm 8\text{deg}$ (乱流)
- ・パッシブヨー: 乱流を使用するが, 風向変化に依存する。



Passive Yaw Outlines



Typical Yaw System

Kiyoki, S., et al., Evaluation of wind loads by a passive yaw control at the extreme wind speed condition and its verification by measurement, GRE2018, 2018.

Okuno, A., et al., Validation of Extreme Loads of Wind Turbine by Measurement Data and Simulation, JWEA Wind Energy Utilization Symposium 2018.

6.2 パッシブヨー暴風時の荷重計算法検討結果

2. 目的

- ・パッシブヨーによる暴風待機条件を勘案した新しい設計荷重条件(DLC6.x)の提案。

3. アプローチ

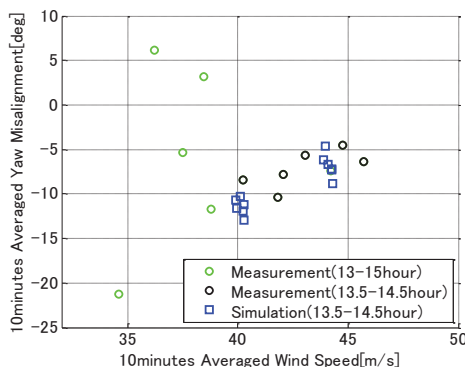
- ・空力弾性モデルを実測値で検証。

4. 成果概要

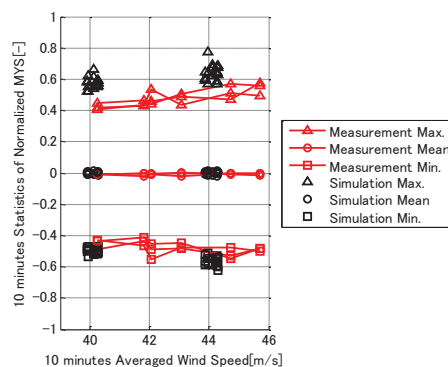
- ・翼根フラップ曲げ荷重について, 現在の設計基準で規定されていない風向変化(速度, 向き)を考慮することにより, 実機計測結果によく一致することを確認した。

5. 今後の予定

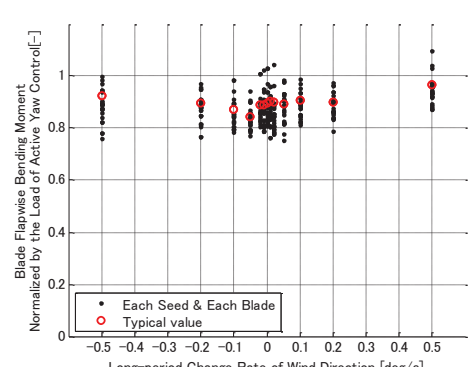
- ・他の荷重も検証する。
- ・新しいDLCを提案する。



WS to yaw misalignment



WS to blade flapwise bending

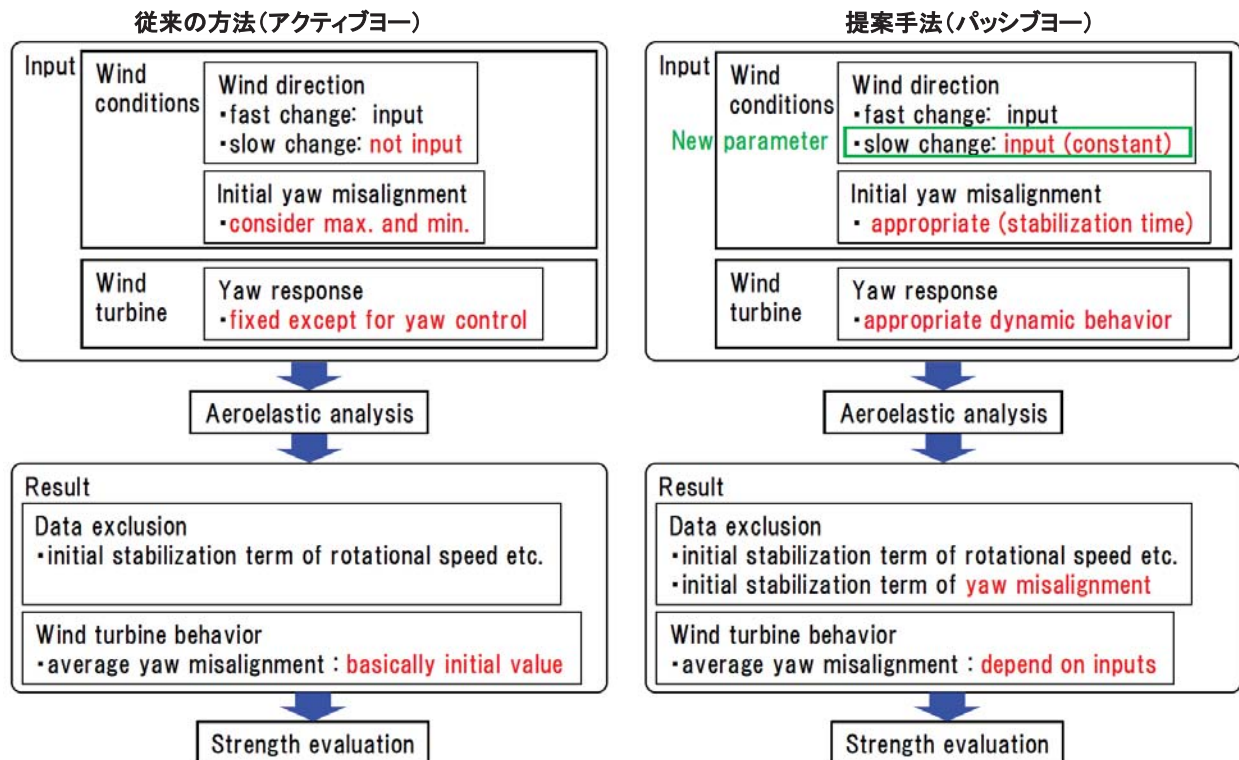


WD rate to blade flapwise bending

Kiyoki, S., et al., Evaluation of wind loads by a passive yaw control at the extreme wind speed condition and its verification by measurement, GRE2018, 2018.

Okuno, A., et al., Validation of Extreme Loads of Wind Turbine by Measurement Data and Simulation, JWEA Wind Energy Utilization Symposium 2018.

6.3 パッシブヨー暴風待機中の荷重計算法概要(日立)



Kiyoki, S., et al., Evaluation of wind loads by a passive yaw control at the extreme wind speed condition and its verification by measurement, GRE2018, 2018.

Okuno, A., et al., Validation of Extreme Loads of Wind Turbine by Measurement Data and Simulation, JWEA Wind Energy Utilization Symposium 2018.

7. 成果概要⑤:WP2-2) 超大型化におけるダウンウィンド風車の得失

1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①:WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②:WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③:WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④:WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤:WP2-2)超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥:WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

7.1 検討目的・内容(日立)

1. 背景

- ・ダウンウィンド風車ではアップウィンド風車よりも軽量でフレキシブルなブレードが適用可能.
- ・ダウンウィンド風車のフリーヨーは、クラス1またはTで有利.

2. 目的

- ・クラス1の10MW風車において、ロータ位置による得失を評価する.
- ・LCoEに対するプリベントの影響を検討する.

3. 検討方法

- ・NRELのシステムエンジニアリングコードWISDEMでタワーシャドウの影響を考慮して改修した.

4. 解析条件

- ・風速クラス: 1A
- ・ダウンウィンド: プリベントなし
- ・アップウィンド-1: プリベント上限6m
- ・アップウィンド-2: プリベント上限20m

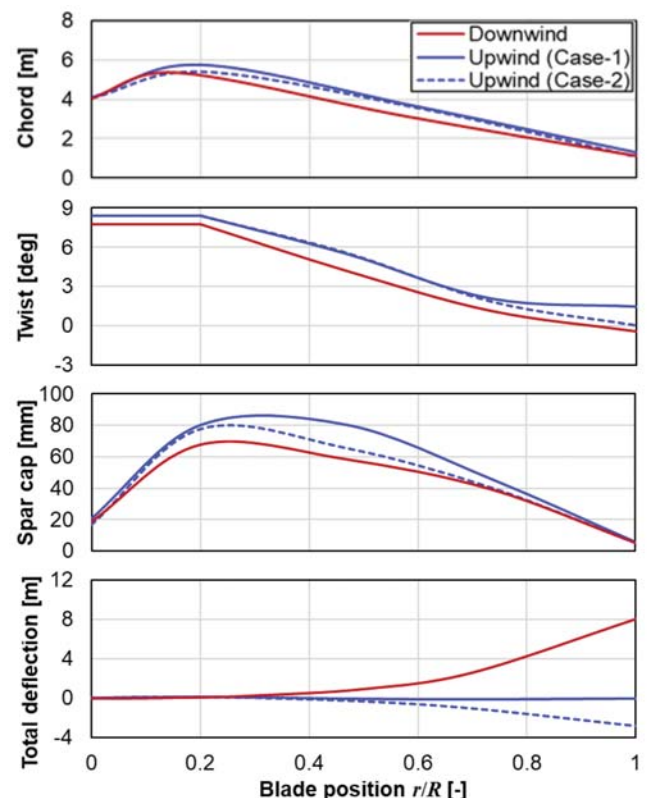
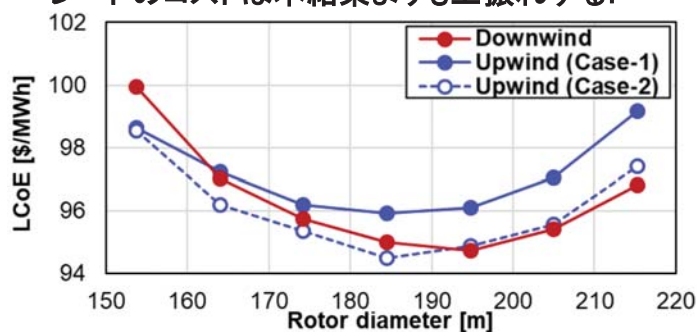
Objective	LCoE (minimization)
Constraints	Blade: Ultimate, buckling, and fatigue strength, natural frequency, angle of attack, tip speed, root diameter, and deflection (upwind)
	Tower: Ultimate and buckling strength, natural frequency, manufacturability, and weldability
Design variables	Blade: Chord, twist, airfoil, spar cap thickness, TE panel thickness, and prebend (upwind)
	Tower: Outer diameter, wall thickness, and waist position
	Others: Tip speed ratio, rated rotational speed

Namura, N., Shinozaki, Y., Design Optimization of 10MW Downwind Turbines with Flexible Blades and Comparison with Upwind Turbines, J.Phys.: Conf. Ser. 1618 042021, 2020.

7.2 10MW風車LCoE解析結果(日立)

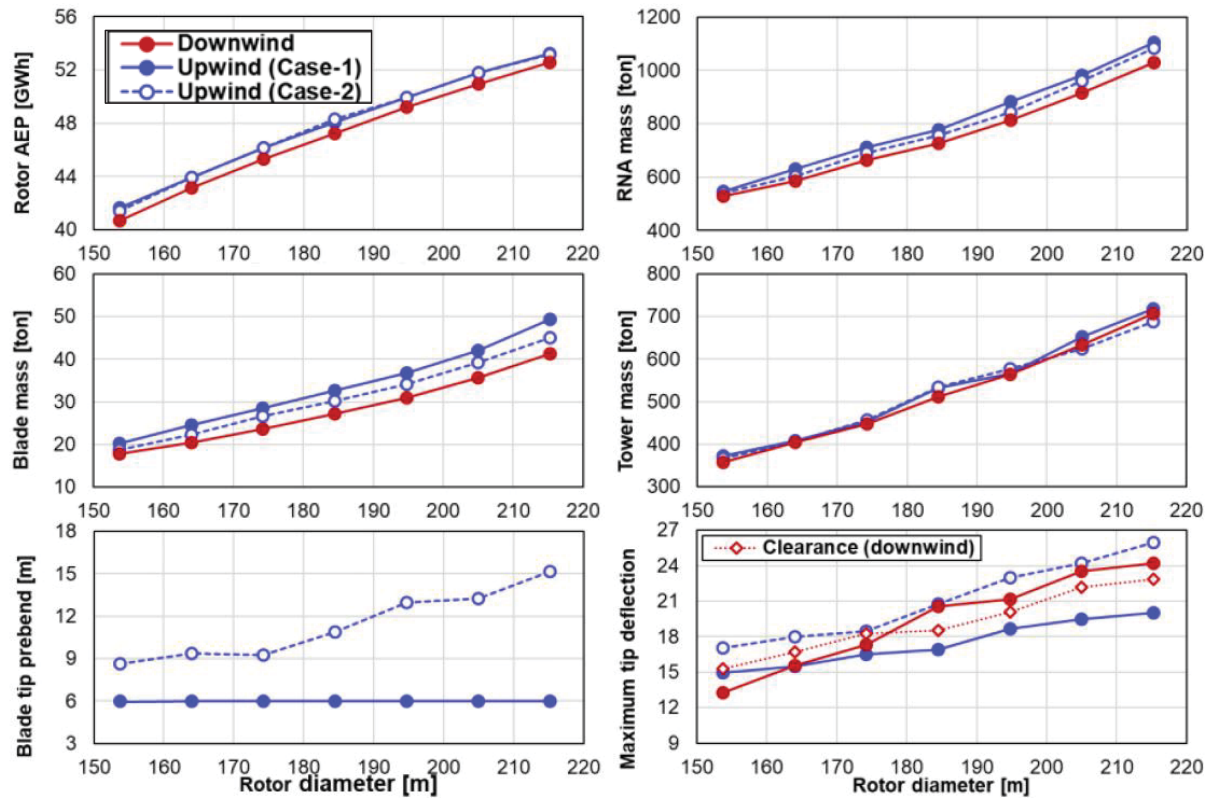
5. 検討結果概要

- ・想定した10MW/クラス1Aにおいて、ダウンウィンド風車はアップウィンドよりもLCOEが低くなる.
- ・これは、軽量でスレンダーかつフレキシブルなブレードにより、発電電力量は低下するが、スラスト力低減とRNAの軽量化に寄与するためである(次頁).
- ・ここで、プリベントブレードのコストに製造、輸送の影響は考慮していないため、プリベントブレードのコストは本結果よりも上振れする.



Namura, N., Shinozaki, Y., Design Optimization of 10MW Downwind Turbines with Flexible Blades and Comparison with Upwind Turbines, J.Phys.: Conf. Ser. 1618 042021, 2020.

7.3 10MW風車の性能・特性に対するロータ直径の効果(日立)



Namura, N., Shinozaki, Y., Design Optimization of 10MW Downwind Turbines with Flexible Blades and Comparison with Upwind Turbines, J.Phys.: Conf. Ser. 1618 042021, 2020.

8. 成果概要⑥: WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼

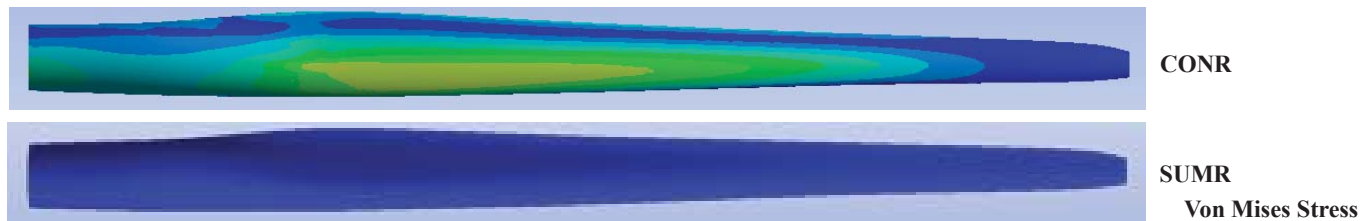
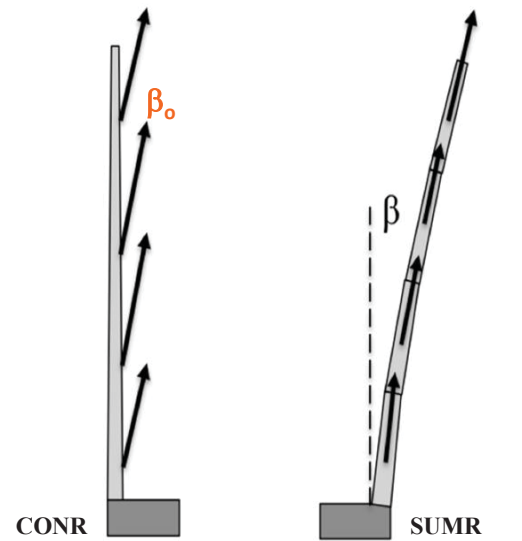
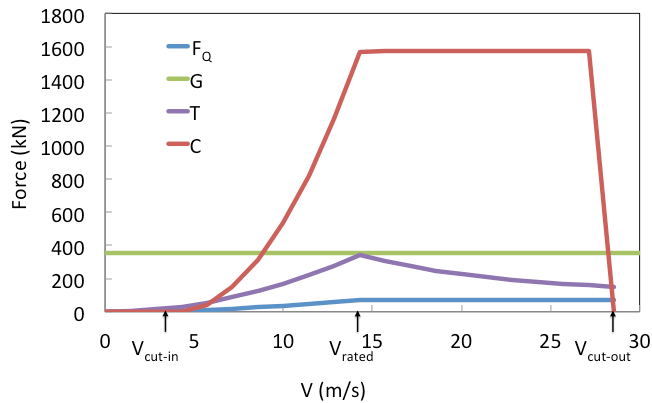
1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①: WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②: WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③: WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④: WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤: WP2-2) 超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥: WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

8.1 モーフィングの概要(UVA/NREL)

1. 背景

- スラストと遠心力により β_0 方向の荷重が風速により変化する。
- ダウンウィンドロータのモーフィングにより荷重・応力が低下する。

Noyes, C., et al., Analytic analysis of load alignment for coning extreme-scale rotors, Wind Energy, 2020:23:357-369, 2020.



8.2 モーフィングの効果(UVA/NREL)

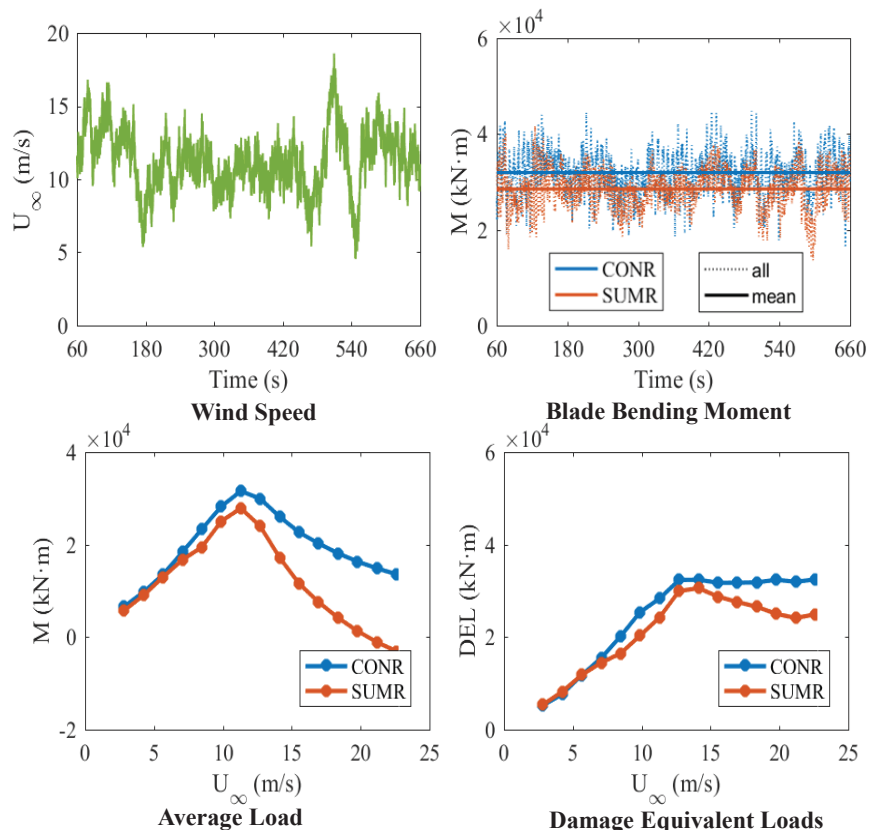
2. 検討結果概要

- モーフィングにより平均荷重ならびに疲労荷重が低下する。
- 発電量は2%低下, LCOEは24%低減する。
- CART-2によるスケールモデルによる実証試験準備中。

	CONR 3-Blades	SUMR 2-Blades
Rotor Mass	100%	73%
Power Output	100%	98%



CART-2



Noyes, C., et al., Analytic analysis of load alignment for coning extreme-scale rotors, Wind Energy, 2020:23:357-369, 2020.

9. マネジメント

1. 背景
2. Task40概要
3. 成果概要①: WP1-1) ベースラインモデル定義
4. 成果概要②: WP1-2) 実機データ解析
5. 成果概要③: WP1-2) タワーシャドウモデリング
6. 成果概要④: WP1-4) フリーヨーの暴風待機荷重解析法
7. 成果概要⑤: WP2-2) 超大型化におけるダウンウィンド風車の得失
8. 成果概要⑥: WP2-2) ダウンウィンドモーフィング翼の効果
9. マネジメント

9.1 マネジメント成果概要

1. 活動概要

- ExCo会議: 8回
- Plenary Meeting: 2回
 - #1) 2019/05/13-14, Pamplona
 - #2) 2020/05/19-20, Online
 - #3) 2021/03/16-17, Online(Planned)
- ワークショップ: 3回
 - #1) 2019/01/22-23, Tokyo
 - #2) 2019/10/23-24, Hitachinaka
 - #3) 2020/10/21-22, Online

2. 他タスクとの連携

- T37) Systems Engineering
- T39) Quiet Wind Turbine (協議中)

3. アウトリーチ活動

- 2018/06/29, 足利大学, 第19回風力エネルギー利用総合セミナー
- 2018/12/03, JWEAシンポジウム(ダウンウィンド風車セッション)
- 2019, 2020, 2021, IEA Windセミナー



Online Plenary Meeting

Thank you!



吉田 茂雄

九州大学 応用力学研究所

yoshidas@riam.kyushu-u.ac.jp



KYUSHU UNIVERSITY

IEA Task26 風力発電のコスト

2021年2月16日

東京大学工学系研究科
総合研究機構 特任助教
菊地由佳



THE UNIVERSITY OF TOKYO

Task26の概要

2

名称: Cost of Wind Energy

目標: 一貫性、透明性のある共通の方法論を用いて過去、現在、及び将来の各国の風力発電コストの結果を整理し分析する。

活動内容: 各国のコスト分析の専門家が所定のWork(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。第4期は3つのWork Packageがあり、各国の事情、関心から関与するWorkを選択。年2回のTask Meeting、毎月のWeb Meeting等を通じてディスカッション。直近のTask Meetingは、11/11-13にオンラインで開催された。

活動期間: 2009年～現在(第4期)

第4期: 2018年10月～2021年9月 (日本は2017年から参加)

参加国: 米国(US)、英国(UK)、デンマーク(DK)、ドイツ(DE)、ノルウェー(NO)、スウェーデン(SW)、欧州連合(EU)、日本、アイルランド(IE)

Operating Agent(OA): Eric Lantz (NREL)



THE UNIVERSITY OF TOKYO

活動項目	主担当機関	期日	状況
WP1: 風力発電のコスト			
陸上風力の年間データベースの作成	US (NREL)	毎年	完了
陸上風力のコスト	US (NREL)	2021/03	実施中
リパワリングに関する研究	DK (DTU)	2020/09	完了
洋上風力のコスト	UK	2020/09	実施中
O&Mコストのモデル化	DE (Fraunhofer), US(NREL)	2020/03	実施中
技術と発電所の違いがコストに与える影響	US (NREL)	2020/03	実施中
WP2: 将来のコスト予測			
将来コストの予測	US(NREL)	2020/09	完了
コストと性能データ整備	DK(Ea Energy Analysis)	2020/03	実施中
WP3: 風力の価値			
LROEの比較	US(NREL),DK(DTU)	2021/09	完了
蓄電池と風力の価値のモデル化	DK(Ea Energy Analysis)	2021/03	実施中



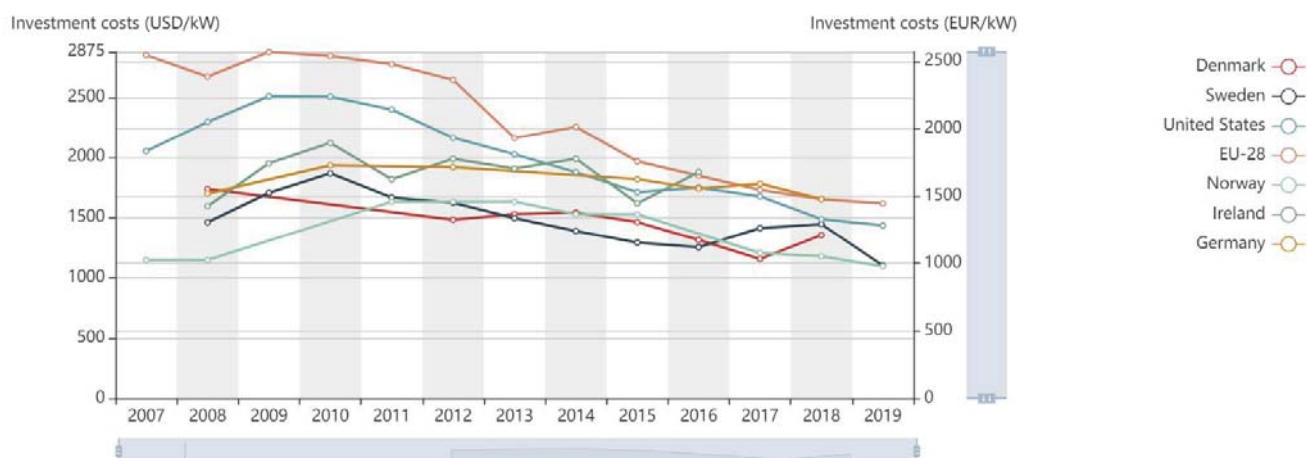
陸上風力の年間データベースの作成

IEA Task26のウェブサイト Dataviewer

<https://community.ieawind.org/task26/dataviewer>

Investment Costs [Log in](#) [Download image](#) [Download CSV](#)

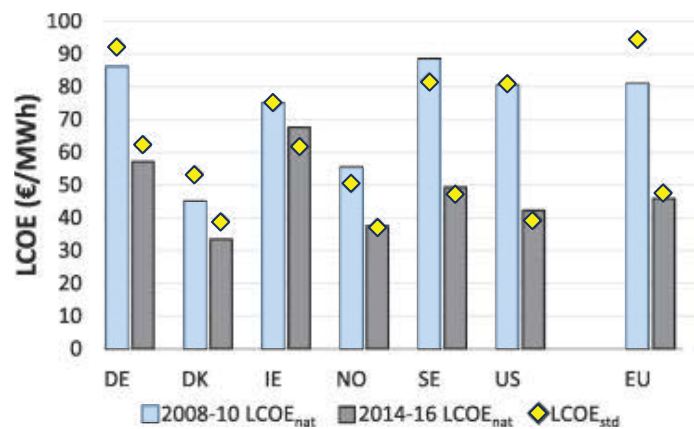
Investment Costs



参加国が陸上風力発電所の統計データをアップロードしている
各国のデータの性質が異なるため、注釈に注意が必要



- A. Duffy et al., Land-based wind energy cost trends in Germany, Denmark, Ireland, Norway, Sweden and the United States, Applied Energy, 2020
- 報告書の内容について日本語の概要(菊地, IEA Task26: 風力発電コストの国際比較, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.44, No.1, 2020)



(文献2より転載、発表者色づけ)

2008-10年と2014-16年の間で、均等化発電コストが低減している



THE UNIVERSITY OF TOKYO

均等化発電コスト(Levelized cost of energy: LCOE)

6

$$\sum_{n=0}^N LCOE \times E_n \times (1 + r_n)^{-n} = \sum_{n=0}^N (C_n + OM_n + D_n) (1 + r_n)^{-n}$$

$$LCOE = \frac{CRF \times C_0 + OM}{E} \quad CRF = \frac{1}{\sum_{n=1}^N (1 + r)^{-n}}$$

C_0 初期建設費

OM 維持管理費

D 撤去費

r 割引率

n 運転年数

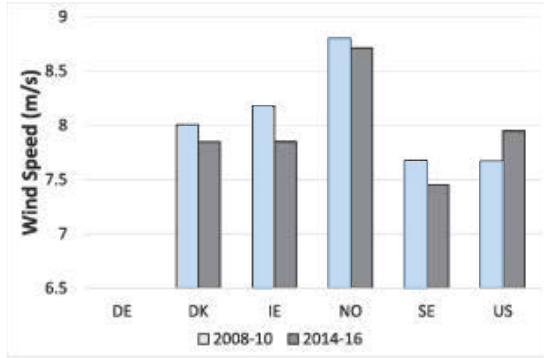
E 年間発電量

“Wind power deployment has been supported by energy policies and by **cost reductions**.” Wiser et al., 2017



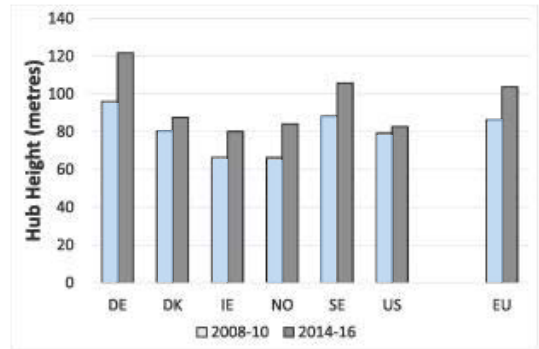
THE UNIVERSITY OF TOKYO

風速



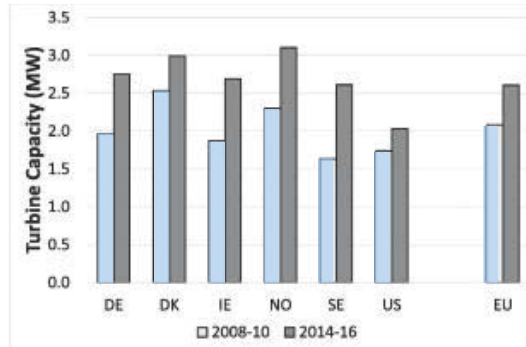
適地が限られていることを示す

ハブ高さ



ドイツはハブ高さの高度化が顕著

定格出力



比出力が低下→設備利用率向上

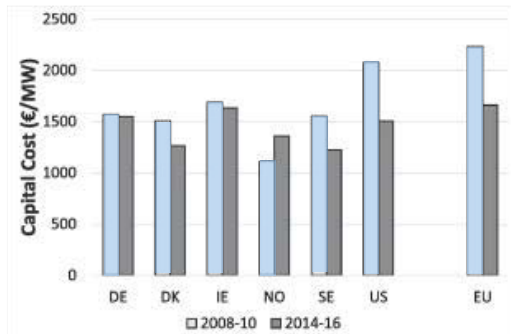
(文献2より転載)



THE UNIVERSITY OF TOKYO

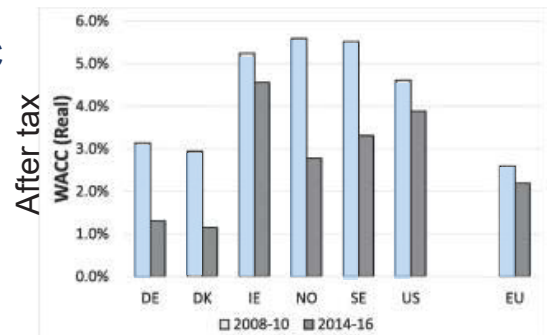
発電コスト要素の比較

資本費



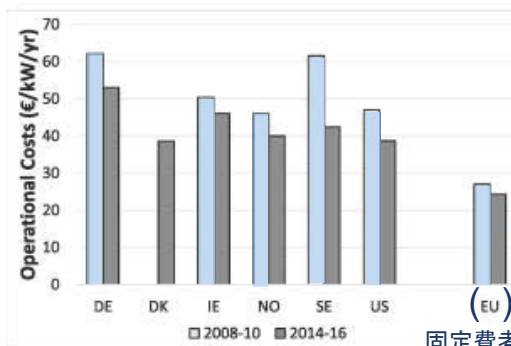
各国の平均で10%減少
風車コスト減、工事費増

WACC



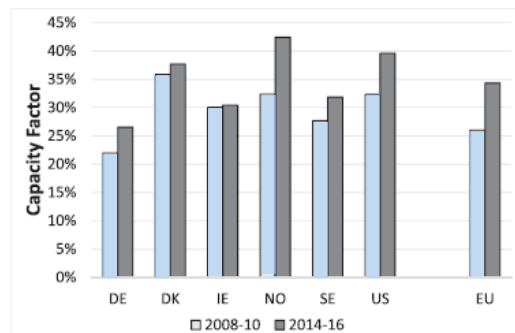
金利の減少、リスク低下が影響

維持
管理費



各国の平均で8-18%減少

設備
利用率

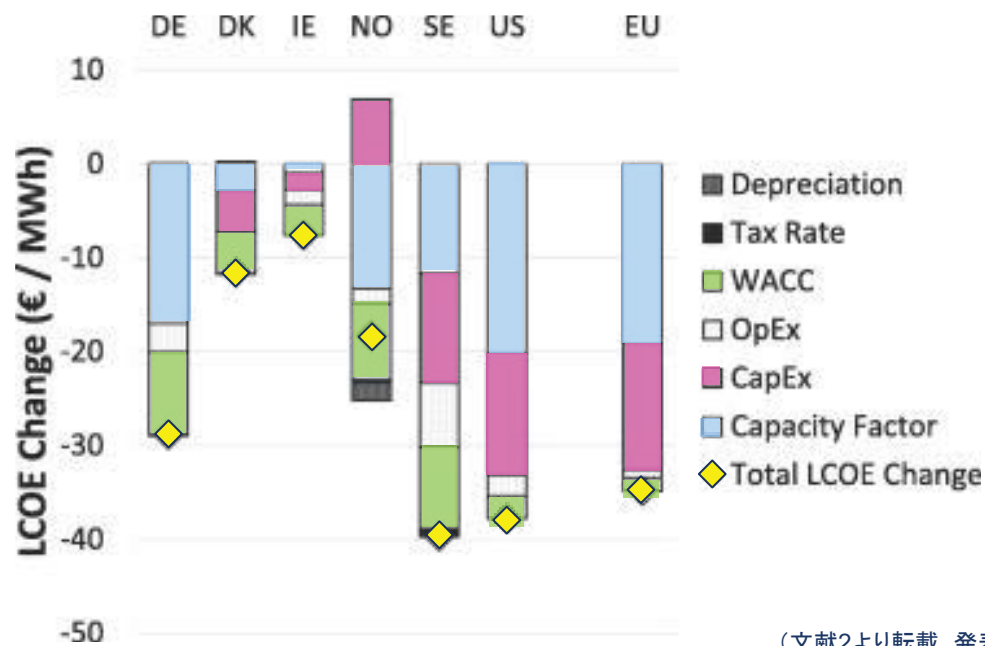


風車の大型化により増加

(文献2より転載)



THE UNIVERSITY OF TOKYO

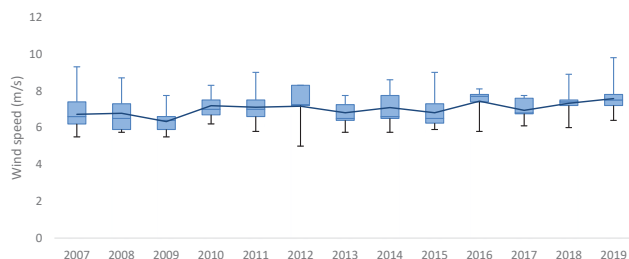


設備利用率の向上、WACCの低減、建設費の低減が発電コスト低減に寄与していることを定量的に評価

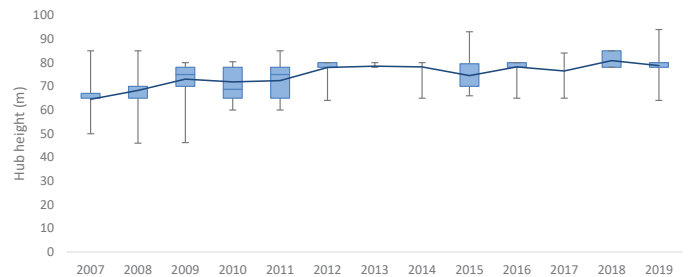


日本の物理条件の推移

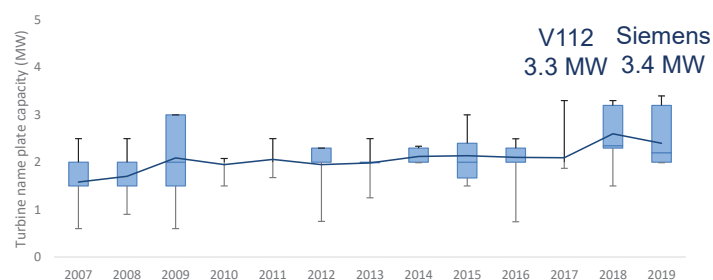
70m高さでの風速 (m/s)



ハブ高さ (m)



風車の名目定格出力 (MW)

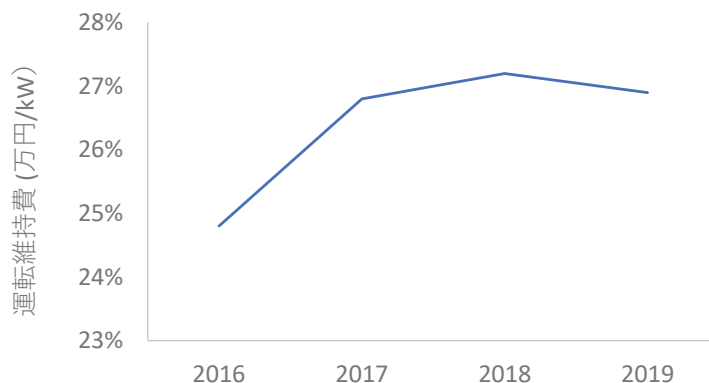


2017年まで、NEDO導入量調査を元にデータを収集
2018年、2019年の日本のデータを環境影響評価書、ウェブソースより整理



■ 資本費・運転維持費(7500kW以上中央値)

■ 設備利用率(2011年以降に建設)



IEAではCapacity weighted average、
P25,P50,P75を収集

(文献4より発表者作成)

- ・ 資本費・運転維持費はほぼ一定、設備利用率は直近4年で向上
- ・ ドイツ型のコスト低減タイプといえる
- ・ LCOEをモニタリングし、低減の戦略を持つことが重要



THE UNIVERSITY OF TOKYO

IRENAとの協働による金融コストに関する調査

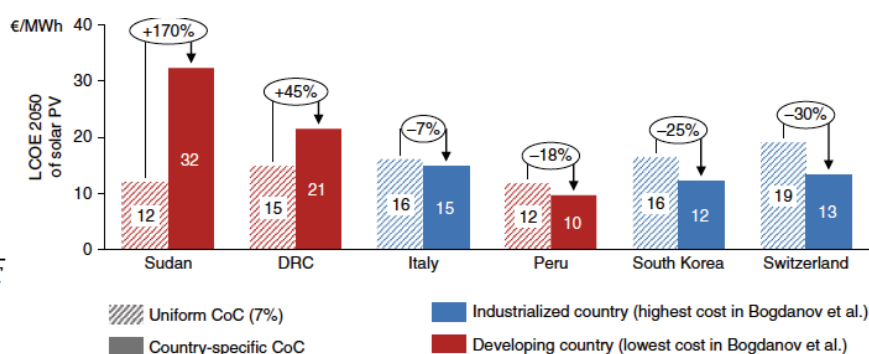
12

- 金融コストWACCはLCOEの評価に大きな影響を及ぼすに関わらず、どのように評価すべきか統一の見解がないことが問題とされている。

Global RE Finance Survey

WACCの定義

$$WACC = c_e \frac{E}{D+E} + c_d * (1-T) * \frac{D}{D+E}$$



IRENAおよびIEA Wind Task26において調査を実施する予定



THE UNIVERSITY OF TOKYO

- 需要が高まっているに関わらず、リパワリングの実態は体系的に調査されていない

Table 1 | Turbine fleet age structure in leading countries for onshore wind energy

	Denmark	Germany	Spain	EU28	USA	China
Cumulative capacity installed in 2019 (GW)	4.4	53.2	23.5	160.7	97.7	206.8
Share of cumulative capacity						
>10 years	55%	43%	73%	39%	34%	7%
>15 years	53%	26%	27%	17%	6%	0.4%
>20 years	23%	4%	3%	3%	1%	0.2%

The table shows the cumulative capacity of installed onshore wind energy and the age distribution of installed turbines in selected countries. Data from refs. ^{1,42,43}. EU-28, European Union 28 countries.

(文献5より転載)

- Kitzing, L., Jensen, M.K., Telsnig, T. and Lantz, E. Multifaceted drivers for onshore wind energy repowering and their implications for energy transition. *Nat Energy* (2020).

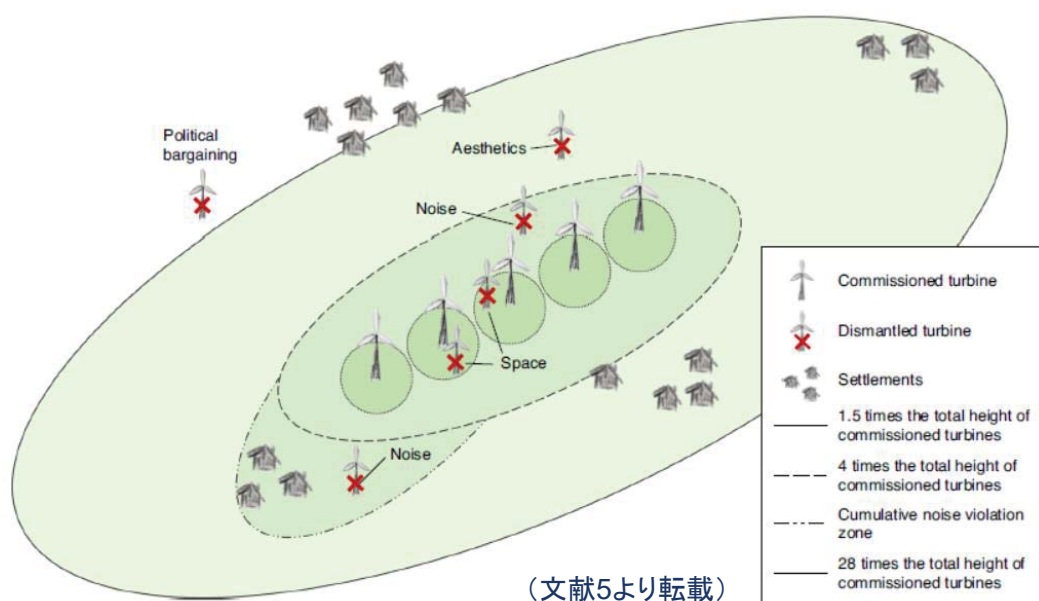
リパワリングの実態と効果を体系的に整理する必要



THE UNIVERSITY OF TOKYO

リパワリングの定義

- On-site approach to repowering ⇔ Off-site approach



(文献5より転載)

同じ場所に建設されるプロジェクトのみがリパワリングではない



THE UNIVERSITY OF TOKYO

■ デンマークにおいて2012-2019年に建設された102個のプロジェクトについて調査

Table 2 | Onshore wind energy projects developed in Denmark 2012-2019

	Number of projects	Total number of turbines	Average number of turbines per project	Range of number of turbines per project	Total capacity (MW)	Average capacity per project (MW)	Average capacity per turbine (MW)	Range of capacity per project (MW)	Average turbine age at dismantling (yr)
Greenfield projects	58	272	4.7	1–21	804.3	13.9	3.0	2–46.8	
Repowering projects (net)	36	–1	0	–14–16	576.8	16.04		0.15–65.9	
Repowering projects (gross additions)		220	6.1	1–22	731.9	20.3	3.3	0.2–77.4	
Repowering projects (gross reductions)		221	6.1	1–35	155.1	4.3	0.7	0.075–23.0	18.6
Non-repowered dismantled turbines		380			78.8		0.2		24.4

See Methods for details on the derived numbers, and Supplementary Note 3 for more detailed results.

(文献5より転載)

- 新規プロジェクトのうち、38%がリパワリングプロジェクト
- 撤去時の風車の経年数は、撤去風車が24.4年に対し、リパワリング風車は18.6年



リパワリングが実施された理由の分析

Table 6 | Wind turbines dismantled in repowering projects by dismantling reason

	Space	Noise	Aesthetics	Aesthetics or noise	Politics	Politics or aesthetics	Politics, aesthetics or noise	Unclassified
Number of turbines	139	28	20	10	6	6	10	2
Capacity (MW)	103.8	12.2	11.3	6.7	6.3	5.9	7.4	1.5
Average capacity per turbine (MW)	0.747	0.435	0.566	0.669	1.050	0.983	0.740	0.750
Share of number (%)	63	13	9	5	3	3	5	0.9
Share of capacity (%)	67	8	7	4	4	4	5	1.0

(文献5より転載)

- 場所変更の理由は、空間制約の他に騒音・景観・政治的理由がある
- On-site approachではリパワリングの効果(撤去された風車とリパワリングにて建設された風車の出力の比率)は7.05倍とされたが、Off-site approachでは4.72倍と評価される。
- リパワリングは、技術的改善だけではなく、社会的便益向上も同時に達成可能



	(参考) 2014年度から2019年度までの 着床式洋上風力発電	対象となる促進区域 ・秋田県能代市、三種町及び男鹿市沖 ・秋田県由利本荘市沖（北側） 秋田県由利本荘市沖（南側） ・千葉県銚子市沖
供給価格上限額	36円/kWh ※調達価格	29円/kWh
資本費（接続費含む）	56.5万円/kW	51.2万円/kW
運転維持費	2.25万円/kW/年	1.84万円/kW/年
撤去費	資本費の5%	10.7万円/kW
設備利用率	30%	33.2%
IRR（税引前） （法人税等の税引前の内部収益率）	10%	10%
調達期間	20年間	20年間

（文献6より転載）

政府は2030年までに8～9円/kWhとしており、低減シナリオが求められる



THE UNIVERSITY OF TOKYO

洋上風力発電のコスト分析の状況

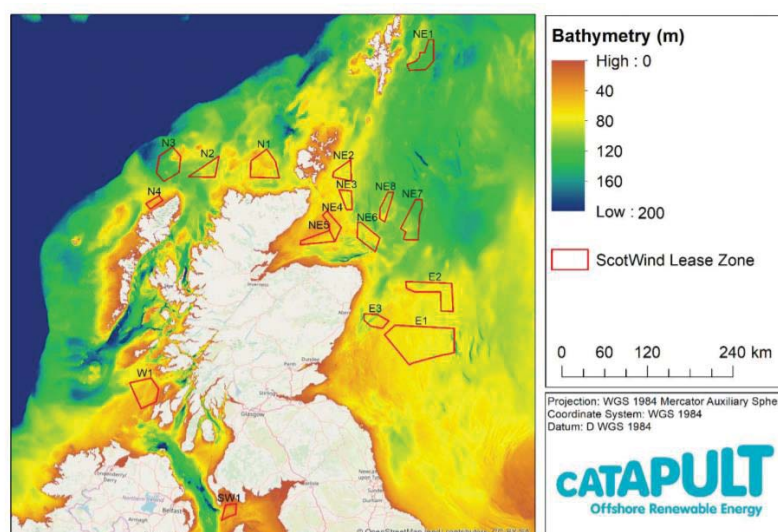
18

Market Analysis and Insight

<https://ore.catapult.org.uk/our-impact/market-analysis-insights/>

‘Macroeconomic benefits of floating offshore wind in the UK’

‘The benefits of hybrid bottom-fixed and floating wind sites’



（文献7より転載）

ORE Catapultによるスコットランドの洋上風力の分析



THE UNIVERSITY OF TOKYO

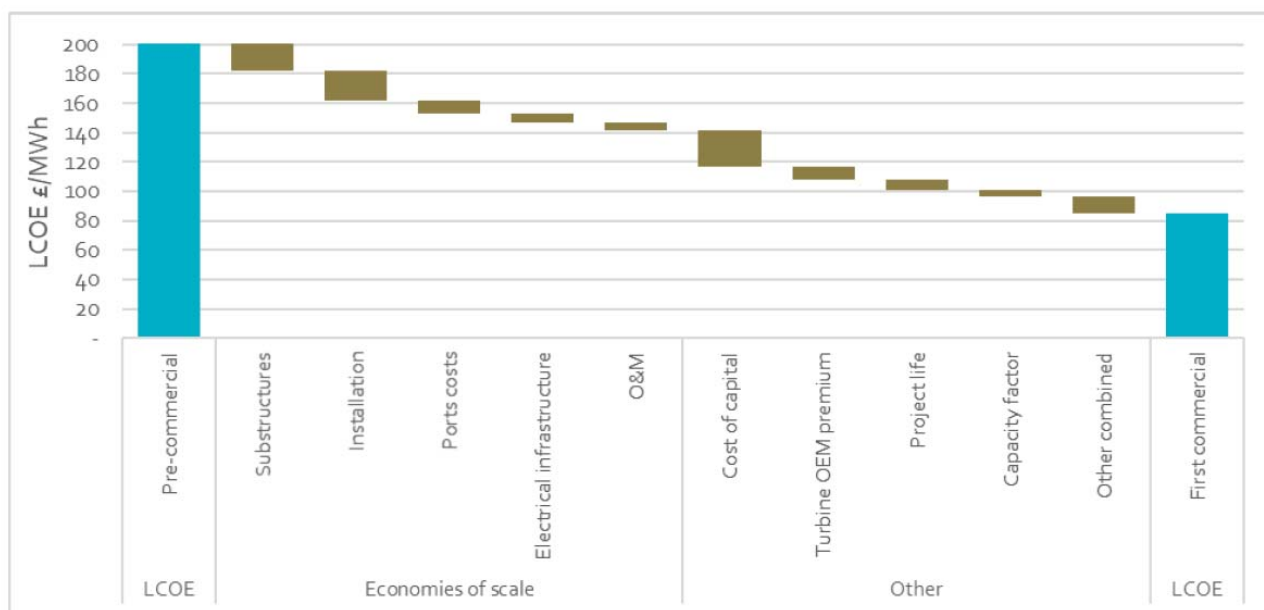


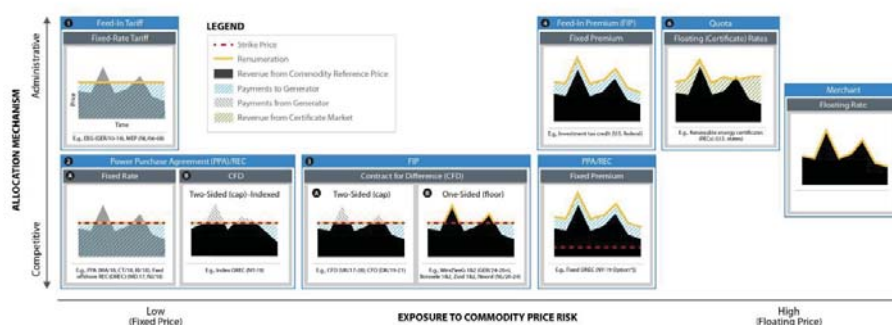
Figure 2: Floating wind cost reduction drivers from Pre-commercial to First Commercial Projects

(文献8より転載)

イギリスにおける浮体式洋上風力発電所の発電コスト低減の展望

LROEを論じる必要性

- コストの情報が企業内部に留まることが多いなか、価格を指標に論じることが多くなっている。しかし、国によって補助政策、税制等が異なり、適正な比較が行われていないという問題がある。



(文献9より転載)

	既知のパラメータ	Coverage
<i>LCOE</i>	Cost	プロジェクトコスト
<i>System LCOE</i>	Cost	電力システムコスト
<i>LRVE</i>	Price	プロジェクト収入と価値
<i>LPPA</i>	Price	PPA 収入
<i>HER</i>	Price	発電量ベースの収入

LROEとLCOEとの関係を定式化し、国際比較の実施

Beiter, Philipp and Kitzing, Lena and Spitsen, Paul and Noonan, Miriam and Berkhout, Volker and Kikuchi, Yuka, Toward Global Comparability in Renewable Energy Procurement. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3770991> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3770991>

Levelized Revenue and Value of Electricity

$$LROE + LTV + LIDV = LRVE \equiv LCOE_{eq}$$

- LROE** : Levelized revenue of energy
capture all possible revenue streams from energy production and capacity provision
- LTV** : Levelized tax value (米国の投資税控除ITC)
capture dedicated fiscal support received by a project in the form of preferential tax and depreciation rules
- LIDV** : Levelized infrastructure and development value (ドイツ、デンマークでの送電線に対する補助)
capture the value of broader infrastructure and development expenditures that benefit a project regardless of the paying entity



LRVE指標の妥当性の検証

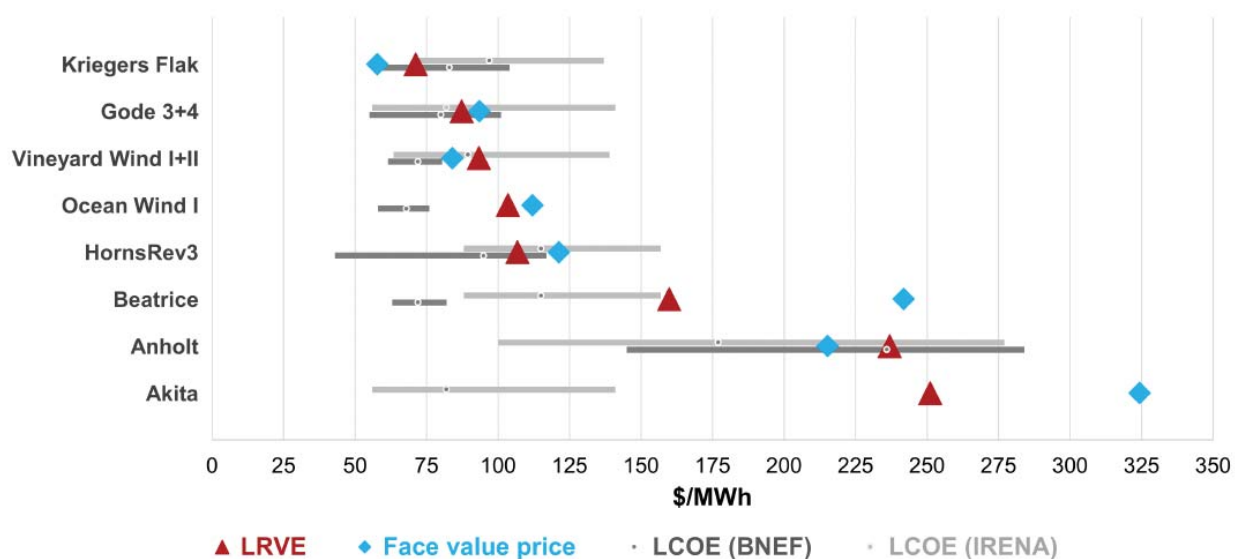


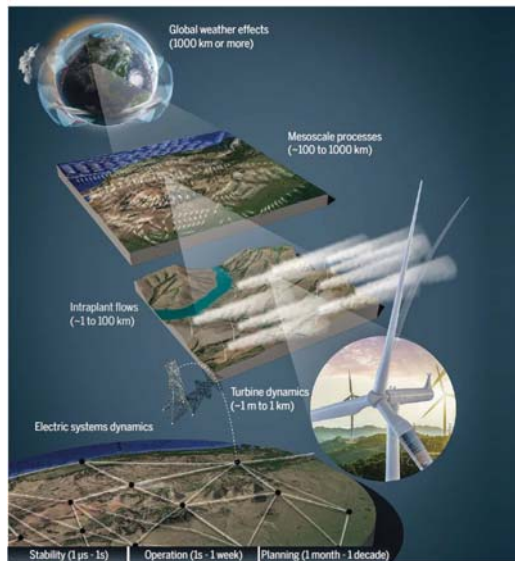
Figure 2: Calculated LRVE compared to face value prices and LCOE estimates

Notes: Data from Bloomberg New Energy Finance (2020) shown in dark grey; International Renewable Energy Agency (2019) shown in light grey. Bloomberg data depict the low to high range (midpoint indicated by a dot); International Renewable Energy Agency data depict the range from the 5th to 95th percentile (weighted average indicated by a dot). LCOE ranges are depicted for the commercial operation date of the selected projects and both are not available for all projects.

<https://ssrn.com/abstract=3770991>



- 11月16-17日にかけて、3タスク合同のワークショップが開催された
- Reference wind farm モデルを作る意義と活用方法について議論



(文献10より転載)

- システムコストを含めたエネルギーシステム全体としてのコスト評価
- コスト最小を目的関数とするエネルギーシステム最適化

エネルギーシステム全体の最適化に向けた議論の必要性



THE UNIVERSITY OF TOKYO

まとめ

- 日本の陸上風力発電コストの低減に向けたシナリオ分析が必要。継続的な発電コスト分析が重要。
- リパワリングについて分析し、発電量向上、地域受容性向上に繋がるように方向付けをしていく必要。
- 今後の風力発電を含む電力システムの構築を議論していくためには、発電コストの他に、価格による指標やシステムコスト等を考慮した新しい指標も一緒に議論していく必要がある。
- 2021年度は、洋上風力の現状分析、将来のコスト予測等について、成果をまとめる予定。



THE UNIVERSITY OF TOKYO

1. Hand, M.M., ed. 2018. IEA Wind TCP Task26-Wind technology, cost and performance trends in Denmark, Germany, Ireland, Norway, Sweden, the European Union, and the United States: 2008-2016. NREL/TP-6A20-71844.
2. Duffy, A., et al. Land-based wind energy costs trends in Germany, Denmark, Ireland, Norway, Sweden and the United States, *Applied Energy*, 2020.
3. 菊地, IEA Task26:風力発電コストの国際比較, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.44, No.1, 2020.
4. 調達価格等算定委員会, 平成31年度以降の調達価格等に関する意見, 2019.
5. Kitzing, L., Jensen, M.K., Telsnig, T. *et al.* Multifaceted drivers for onshore wind energy repowering and their implications for energy transition. *Nat Energy*, 2020.
6. 第59回調達価格等算定委員会, 資料2, 再エネ海域利用法に基づく公募占用指針に関する供給上限額についての委員長案, 2020.
7. Naoon, M., The benefits of hybrid bottom-fixed and floating wind sites, ORE Catapult Report, 2021.
8. ORE Catapult, Macroeconomic benefits of floating offshore wind in the UK, ORE Catapult report, 2018.
9. Beiter, P., Heeter, J., Spitsen, P., and Riley, D, Comparing Offshore Wind Energy Procurement and Project Revenue Sources Across U.S. States. Technical report, National Renewable Energy Laboratory, 2020. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/76079.pdf>
10. Veers. P. et al., Grand challenges in the science of wind energy, science, 2020



Task 28

Social Science of Wind Energy Acceptance

タスク28 風力発電プロジェクトの社会的受容性

丸山康司（名古屋大学大学院環境学研究科）

ym@nagoya-u.jp

Technology Collaboration Programme
by IEA



タスク28概要

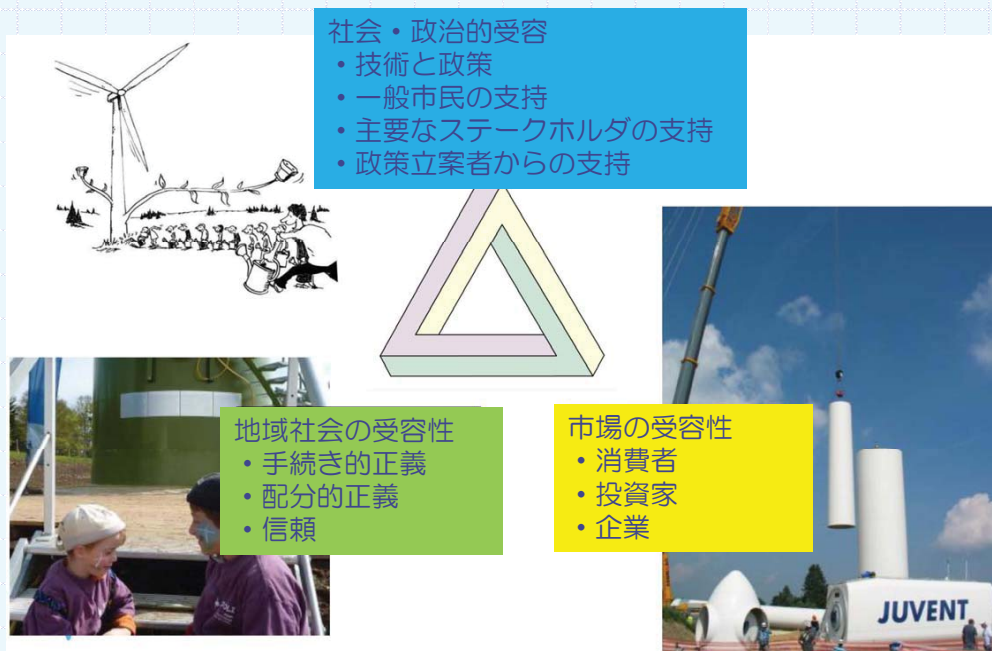
- ◆ 2009年開始（現在フェーズ4）
- ◆ 活動目的
 - 社会受容性に影響する要因の特定
 - 信頼、地域コミュニティ/福利
 - 手続きの設計
 - 経済的配分の正義
 - 導入戦略
 - 問題解決方法の提案
 - 技術的手法＋社会的手法のハイブリッド
 - 主観的に構成される「被害」の軽減
 - 能動的な賛同を得るための方策

社会的受容性の定義

(Wüstenhagen et al. 2007)



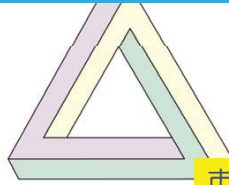
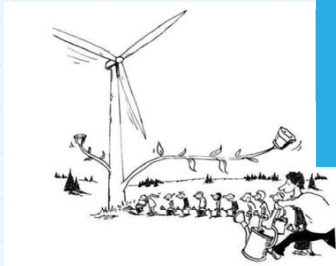
社会受容性の要素



社会受容性とステークホルダ

社会・政治的受容性

- ・ 地方行政・行政機関
- ・ 国行政の支局
- ・ 政治家
- ・ 首長
- ・ 土地利用計画策定者
- ・ 環境保護団体
- ・ 教育者
- ・ 観光業
- ・ メディア
- ・ 専門家
- ・ 世論



地域社会の受容性

- ・ 地方行政・行政機関
- ・ 首長
- ・ 公営企業
- ・ 地元事業者
- ・ 一般大衆
- ・ 新住民
- ・ 別荘居住者
- ・ 地権者
- ・ 地域環境保護団体



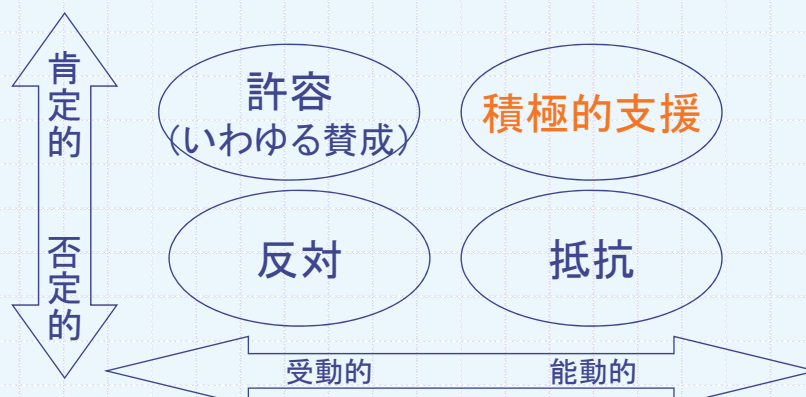
市場の受容性

- ・ 事業者
- ・ 技術者
- ・ 運営会社
- ・ 配電事業者
- ・ 消費者
- ・ 系統管理者
- ・ 投資家
- ・ 企業広報
- ・ 業界団体

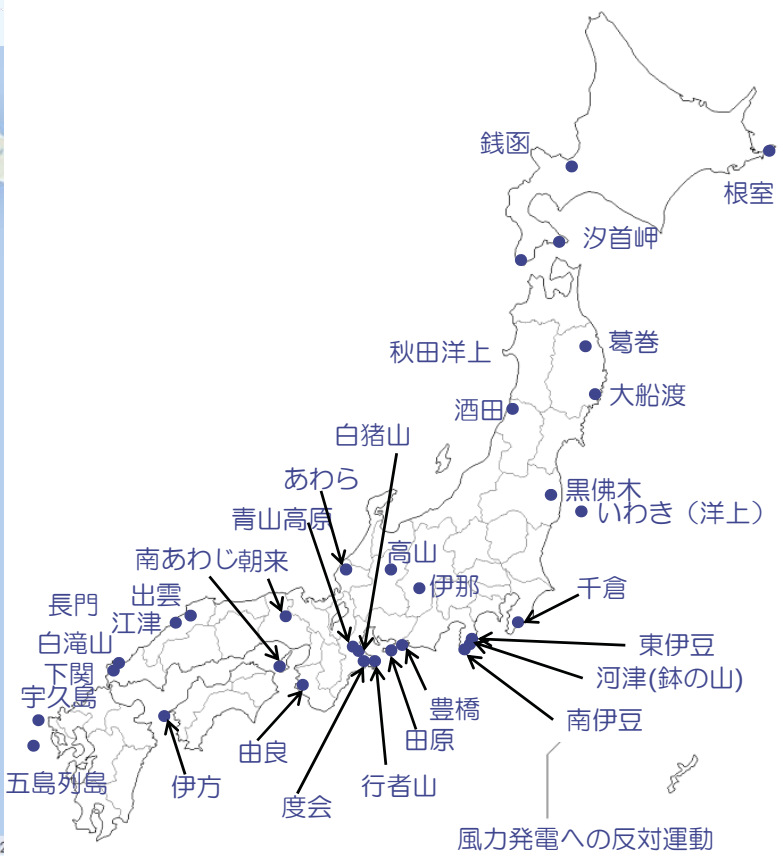


社会的受容性とはなにか

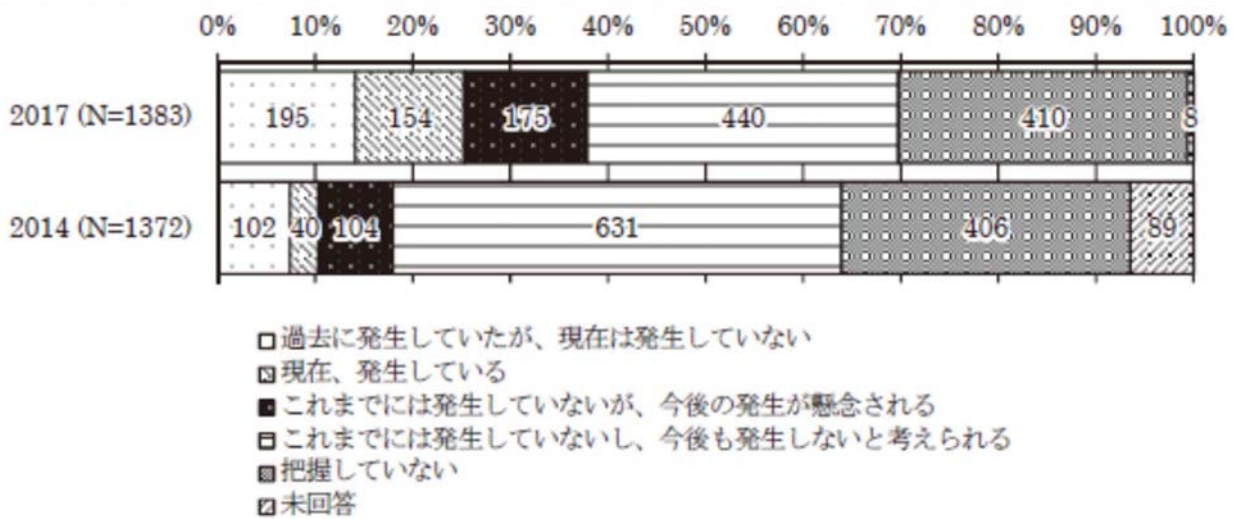
- ◆ 辞書的な意味では「理解・賛同を得て受け入れられること」
- ◆ 再生可能エネルギー事業者の立場からみると、「事業を実施することに対して、多様なステークホルダの理解・賛同を得ること」
- ◆ 法令遵守プラスアルファ
- ◆ さまざまな「影響」や「同意」のあり方に注意



社会受容性の二極化

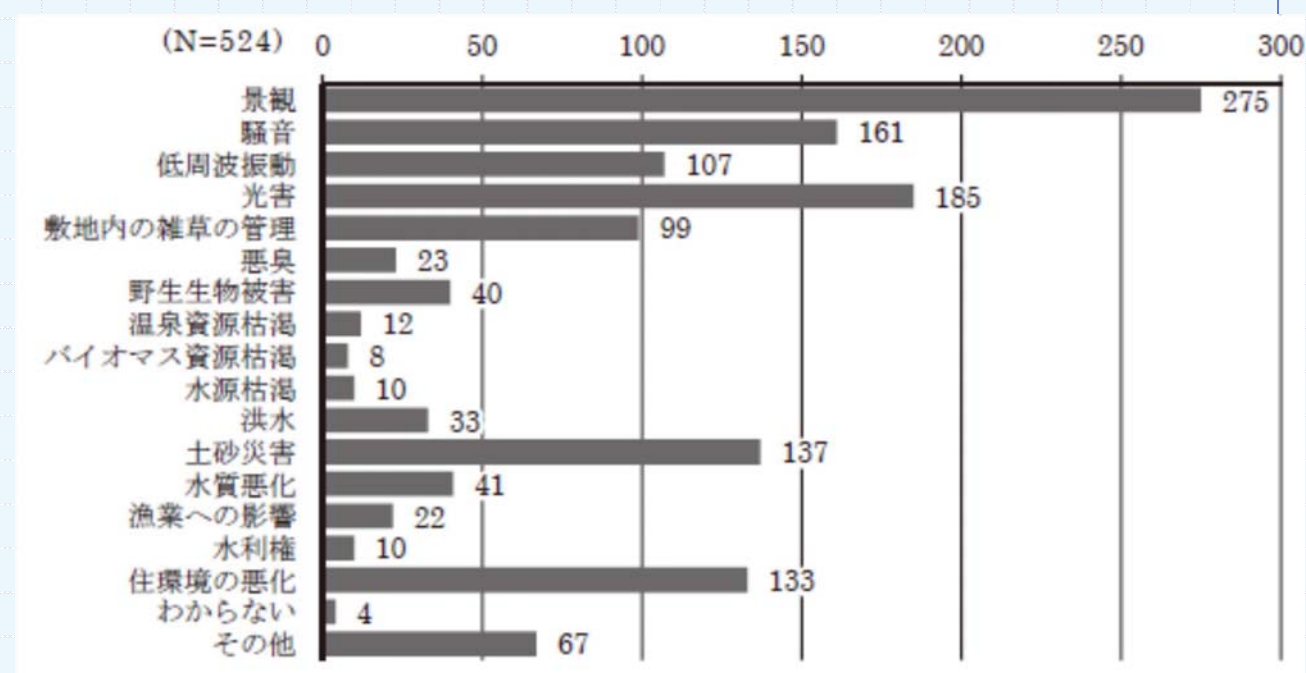


再生可能エネルギーの設置、運営をめぐるトラブル



「全国自治体再工ネ調査（第二回）」
http://www5.econ.hit-u.ac.jp/kankyoprj/ssk/?page_id=3162

発生している、発生が懸念される苦情やトラブルの内容



「全国自治体再エネ調査（第二回）」

http://www5.econ.hit-u.ac.jp/kankyoprj/ssk/?page_id=3162

9

日本における社会的受容性の状況

開発案件の絶対数の増加

開発スピード

発電所が希薄だった地域での開発

未経験の開発事業への警戒と期待

（社会経済的なことも含めて）

不定性（何が起こるかについての知見が乏しい状態）

法整備（規制と権限のあり方）

地域的受容性の両極化

10

所有関係とプロジェクトへの評価（スコットランド）

風車増設への意見
反対 ⇔ 賛成

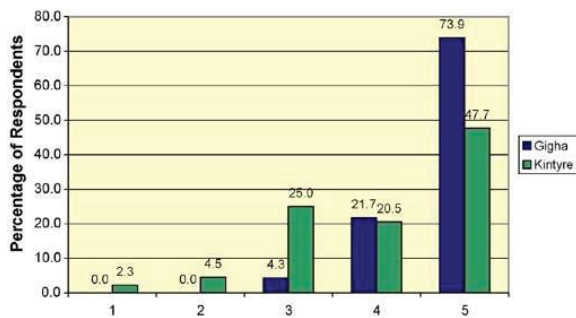


Fig. 4. Attitudes towards increasing development of wind power in Scotland. 1 = Very opposed, 2 = opposed, 3 = neutral, 4 = supportive, 5 = very supportive.

景観への影響
悪い ⇔ 良い

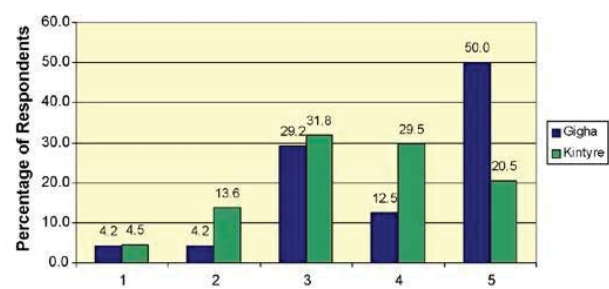


Fig. 5. Respondents' evaluation of the visual impact of windfarms on the local landscape. 1 = Very negative, 5 = very positive.

企業所有

住民所有

Source: „Does community ownership affect public attitudes to wind energy? A case study from south-west Scotland“, published 2009
Charles R. Warren, Malcolm McFadyen, School of Geography & Geosciences, University of St Andrews, United Kingdom

11

立地地域にとって望ましい事業とする方法（IEA）

社会政策面

- 技術政策
- 一般大衆からの支持
- 主要な利害関係者からの支持
- 政策立案者からの支持

市場（経済性）

- 消費者の選好
- 投資家からの支持
- 企業的意思決定

地域社会

- 手続きの透明性
- リスク便益の配分構造
- 信頼

一般論としての再エネ支持と
立地地域での合意は別問題

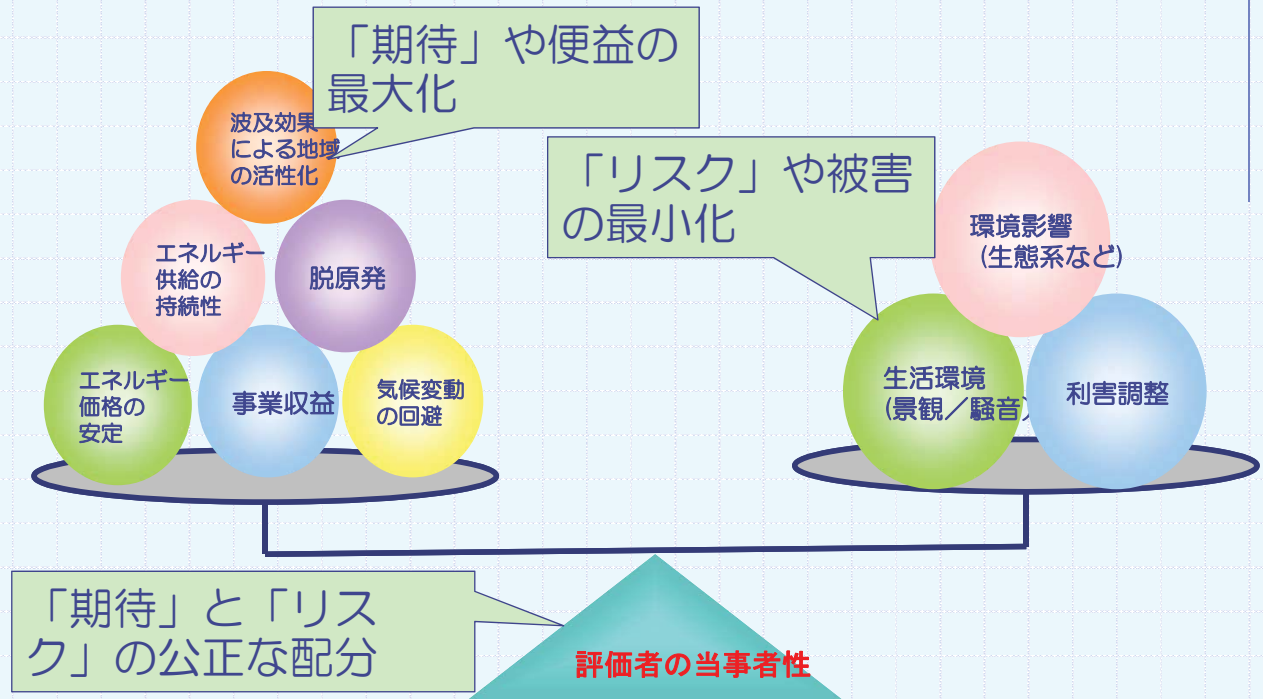
- ◆ 何が問題となるか⇔誰が利害関係者になるのか
- ◆ どうすれば問題が解決するのか
 - 法令遵守
 - 物理的な影響そのものを少なくする努力
 - 物理的な影響への主観的評価による「被害」の軽減

不確実性の扱い

手続きの透明性

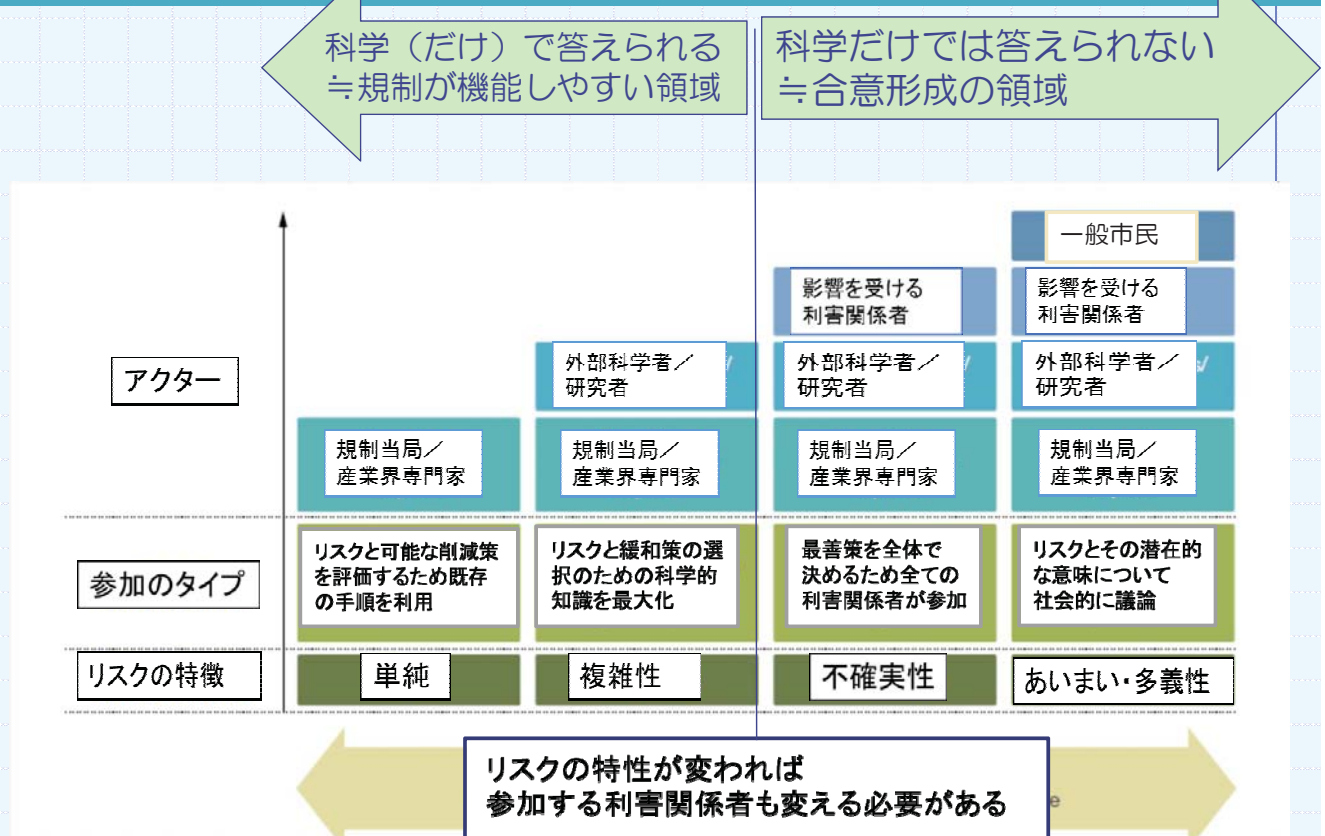
懸念（リスク）と利益の配分構造

地域受容性の多様性



地域それぞれの「便益」と「リスク」それは誰がどのように決めるのか？

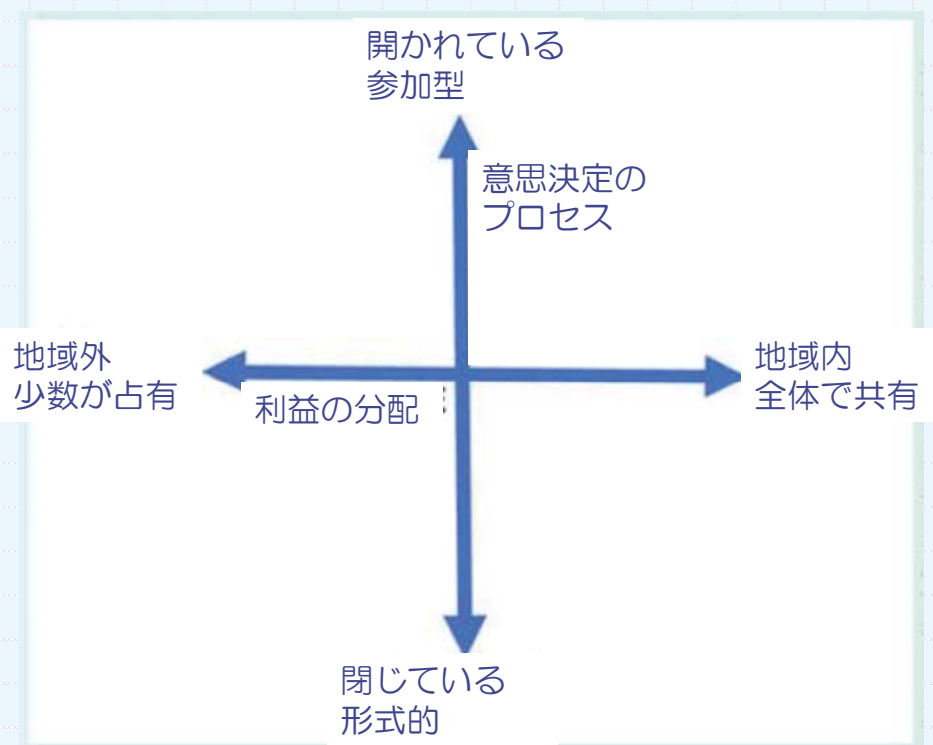
問題の複雑化と合意形成手法の多様性



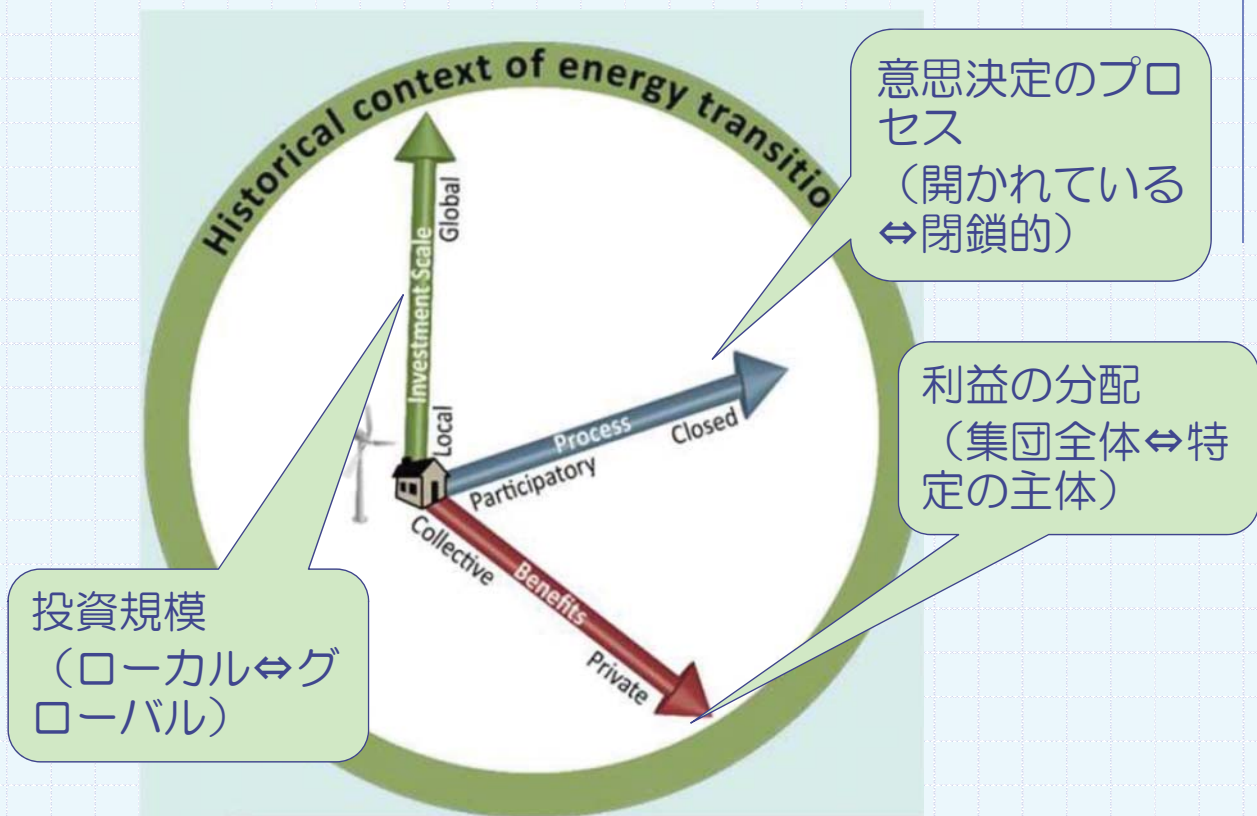
フェーズ3成果より

- ◆ 活動期間:2017年1月 – 2019年12月
- ◆ 参加国
 - アメリカ合衆国
 - ドイツ
 - デンマーク
 - アイルランド（事務局）
 - ポルトガル
 - 日本
 - スイス
 - フィンランド
 - 準参加国：カナダ、Wind Europe、英国、ノルウェー
- ◆ 主な会合
 - ダブリン（アイルランド）, 2017年3月
 - ロスキルデ（デンマーク）2018年3月
 - ハンブルク（ドイツ）, 2017年9月
 - リスボン（ポルトガル）, 2019年3月
 - ベルファスト（北アイルランド）, 2019年9月
 - デンバー（アメリカ合衆国）, 2019年12月
- ◆ 短報集
<https://community.ieawind.org/task28/ourlibrary>

フェーズ3成果（社会受容性の理論）

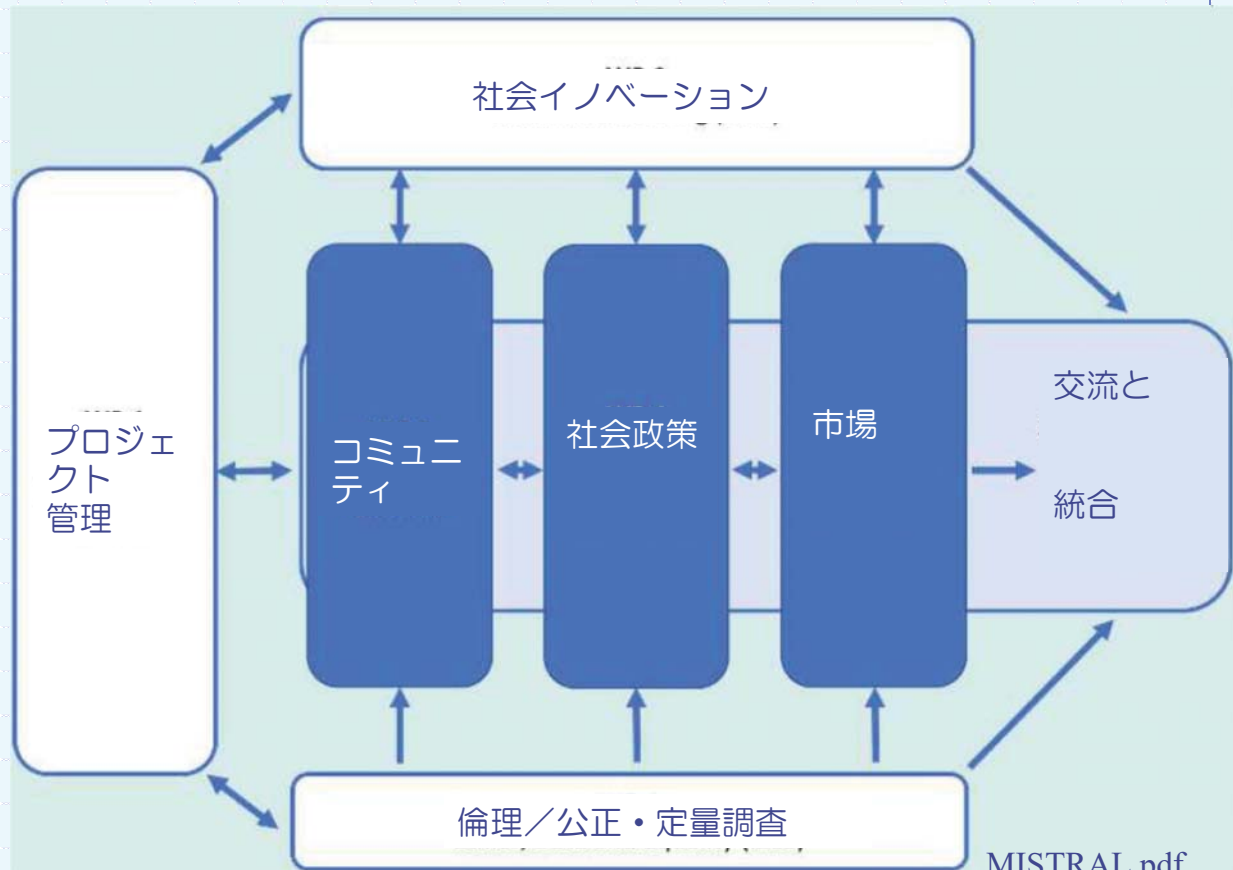


フェーズ3成果（社会受容性の理論）



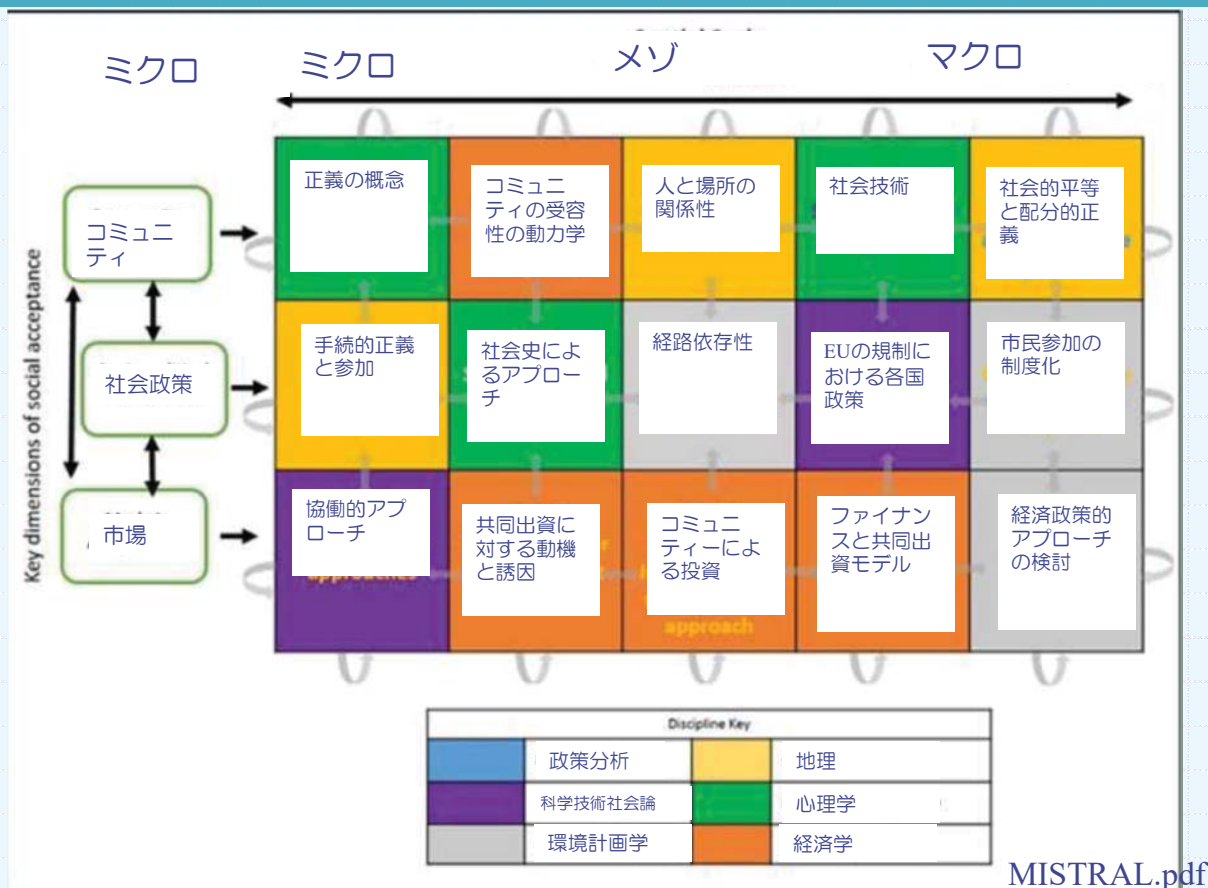
JAMIE BAXTER CANADIAN PERSPECTIVE.pdf

フェーズ3成果（統合的アプローチと人材育成）

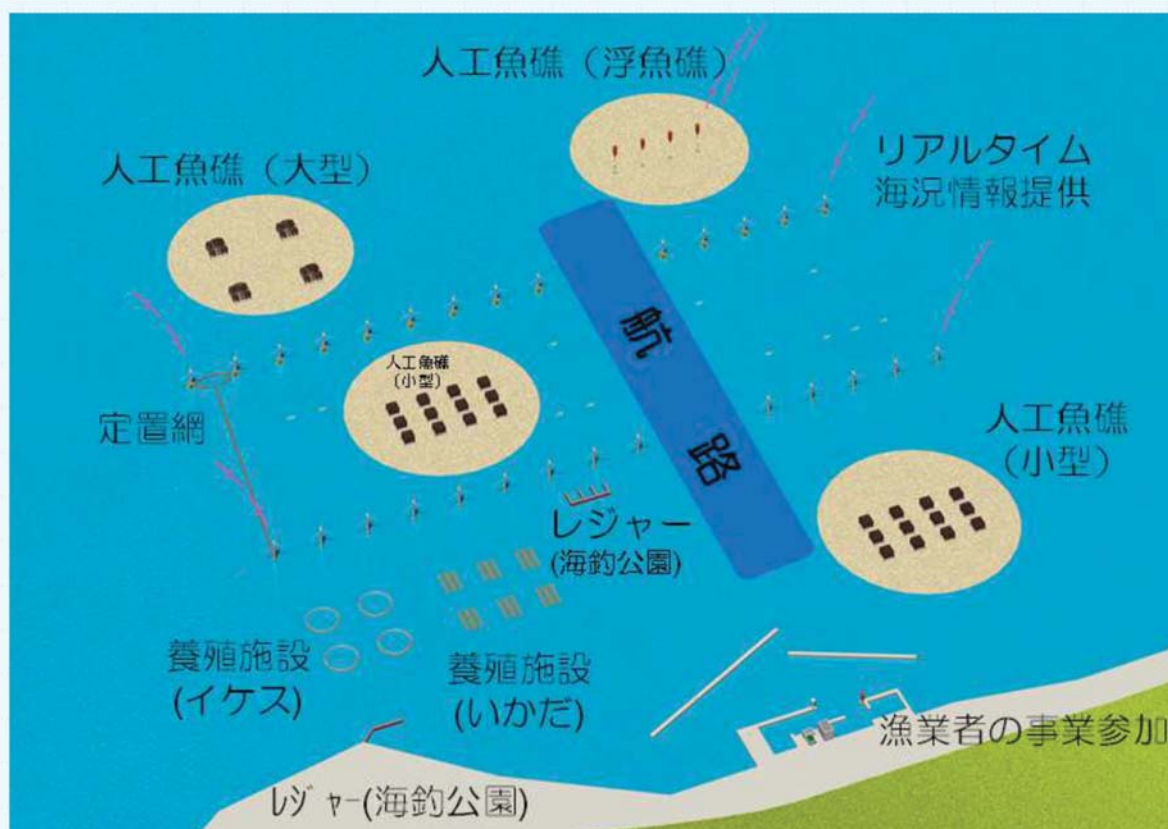


MISTRAL.pdf

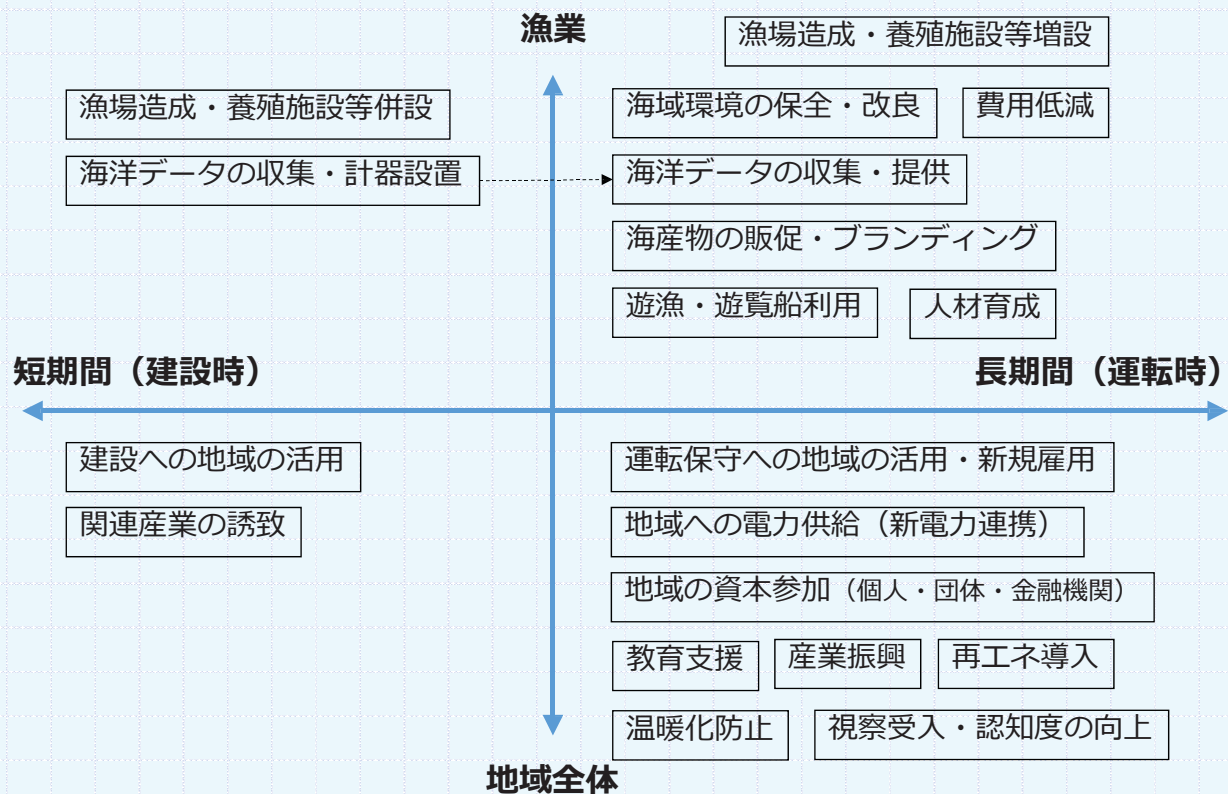
フェーズ3成果（統合的アプローチと人材育成）



フェーズ3成果（洋上風車）



フェーズ3成果（洋上風車）



兵庫県洲本市洋上風力発電ソーニング

21

フォトモンタージュを用いた景観ワークショップ（ドイツ）

- ◆ ドーム型テントに合成された景観を投影
- ◆ リアルな縮尺
※通常のプロジェクタでも縦2m×横2.5mのスクリーン、投影距離2mで実際の見え方と近くなる
- ◆ 仮想現実と異なり景観を見ながら参加者同士が話し合うことが可能



BATEL & HUBNER Landscape and visualization.pdf

フェーズ3成果（被害感情調査）

% (n) total n	アメリカ合衆国 全国調査	ヨーロッパ 調査
騒音	1.1% (16) 1441	4.3% (28) 657
景観	1.5% (22) 1441	0.0% (0) 445
光	1.2% (18) 1441	1.2% (10) 817
シャドウフリッカー	0.2% (3) 1441	0.2% (1) 445
total	2.3% (33) 1441	3.7% (38) 1029

GUNDULA HUBNER HEALTH & ANNOYANCE.pdf

フェーズ3成果（被害感情調査）

- ◆ プロジェクトへの評価と風車から住居の距離との間には関係がない
- ◆ 音の認知と不快感との関係もない ⇨ 計画プロセスへの評価・受益の有無・音への感受性の影響

近隣の風力発電事業をどのように評価していますか？

3-8キロメートル (n=258)

mean attitude = 0.52



1.5-3キロメートル (n=311)

mean attitude = 0.74



0.75-1.5キロメートル (n=496)

mean attitude = 0.65



<0.75キロメートル (n=609)

mean attitude = 0.43



非常に悪い

どちらともいえない

非常に良い

(-2)

(-1)

(0)

(1)

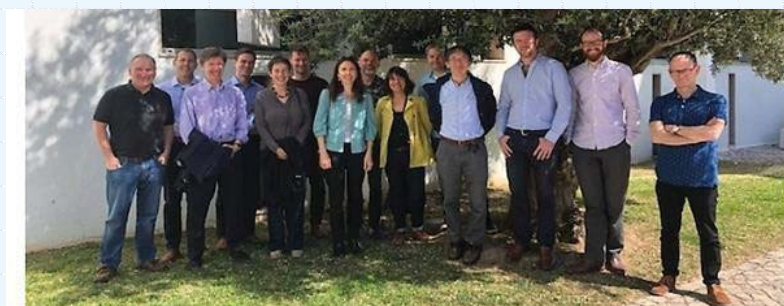
(2)

Source: LBNL. Responses are weighted by age, sex, education and sampling cohort to represent the underlying population. Mean attitude of <1/2 mile is statistically different (SD) from 1/2-1 (p=0.045) and 1-3 (p=0.003). Also, 1-3 is SD from 3-5 (p=0.046).

<https://emp.lbl.gov/projects/wind-neighbor-survey>

今後の予定（フェーズ4）

- 2020年9月開始（4年間）
- 共同OA： ギャリー・キーガン（アイルランド）、スザンヌ・テージェン（アメリカ）
- 会員増強（参加国8カ国から12カ国へ）
- 2つのトラック、5つのワークパッケージ
 - トラック1：研究の集約と分析
 - トラック2：研究の普及、ファシリテーション、知見の交換



25

フェーズ4 活動内容 ワークパッケージ1-5 (2020-2024)

Track 1: トラック1：研究の集約と分析

- | | |
|-----|---|
| WP1 | 風力発電事業の付加価値と利益にかかわる（社会）イノベーション |
| | フェーズ3までの成果と現状のギャップを踏まえた研究課題の提示 |
| WP2 | コミュニティの関与と反対に関連するコストの把握 |
| WP3 | 風力エネルギー受け入れにおける新たな課題（超大型タービン、廃炉・リパワリング、浮体式洋上システムなど） |

Track 2: 研究成果の普及、ファシリテーション、知見の交換

- | | |
|-----|--|
| WP4 | 風力エネルギーの社会受容性と社会科学に関する世界レベルでの知識交換の充実（バーチャル/オンライン、可能な場合は対面） |
| WP5 | 洋上風力発電の社会的受容性：専門家の招集と情報発信 |

26

- 研究成果と政策決定や導入の現場における知識のギャップに留意しながら、過去の研究による科学的知見を再構築する。
- より多くの国（発展途上国を含む）と多様な社会学者からの参加を奨励する。
- 研究成果の応用を重視し、政策立案者や地域のリーダーに対して幅広くかつ丁寧に整理された成果普及を図る
- 産業界やコミュニティエンゲージメント実践者との連携を強化する。
- 社会科学が伝統的な風力エネルギー科学と工学の分野に統合されるようにシステム思考を取り入れる。
- 関連する IEA タスク（例：IEA 風力タスク 34、11）間の協力とコミュニケーション／協力を促進する。
- タスクの範囲を拡大し、他の産業（太陽光・地熱・・・）への展開を図る。



第9回 IEA Wind セミナー

2021年2月16日



Task 25:

風力発電大量導入時の電力の設計と運用



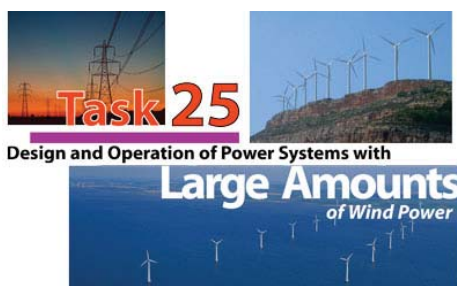
京都大学大学院 経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座 特任教授

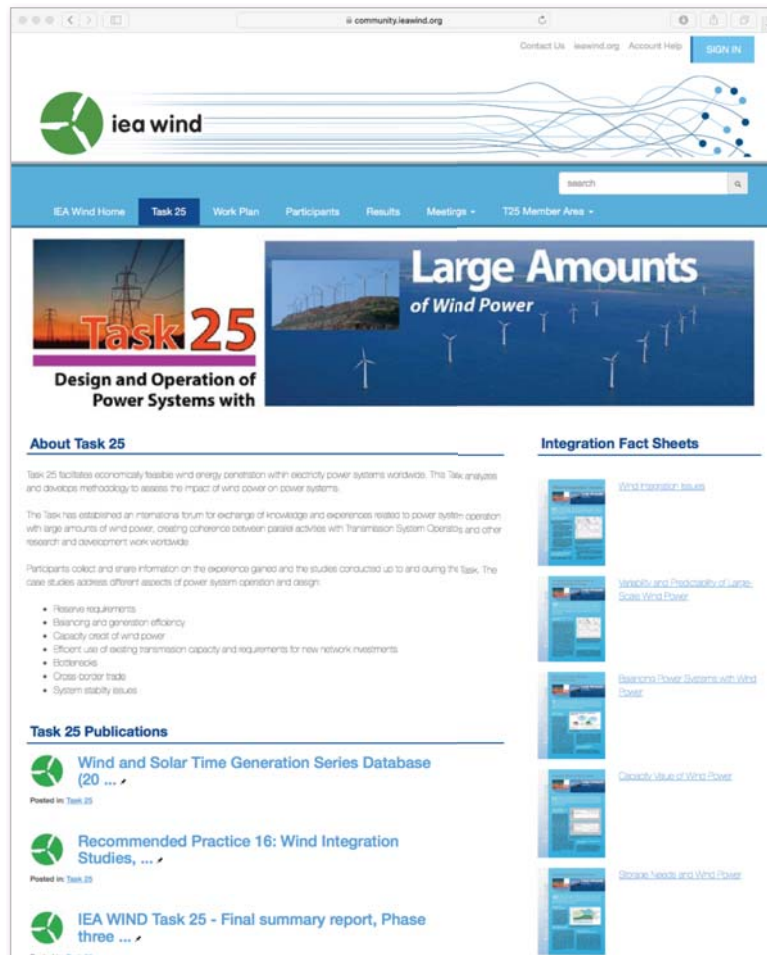
安田 陽



Task 25 の紹介

- 名称 **エネルギーシステム**
 - 風力発電大量導入時の~~電力系統~~の設計と運用
- 目的
 - 電力システムへの風力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





<https://community.ieawind.org/task25/home>



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予定), 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)
- 第5期 (2017～2020年, 18ヶ国+1)
 - Fact Sheet 2020年版 → 日本語訳(2020)
- 第6期 (2021年～, 承認済)

+ Task25の構成

■ 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)



■ 日本からは、以下の専門委員が参加

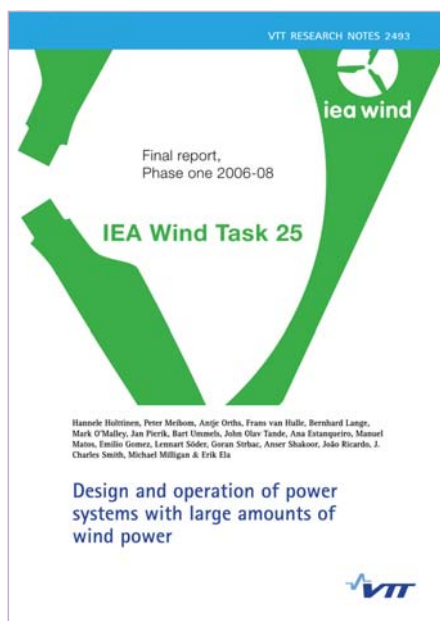
- 近藤潤次 (東京理科大) 2009年～
- 安田 陽 (京都大学) 2010年～
- 田辺隆也 (東京電力/電力中央研究所) 2014年～
- 荻本和彦 (東京大学), 辻 隆男 (横浜国立大学) 2020年～

+ 第1期報告書 (2009年)

■ 2012年に日本語訳を公開

■ NEDO事業の一環

- <http://jema-net.or.jp/Japanese/res/wind/shiryo.html>



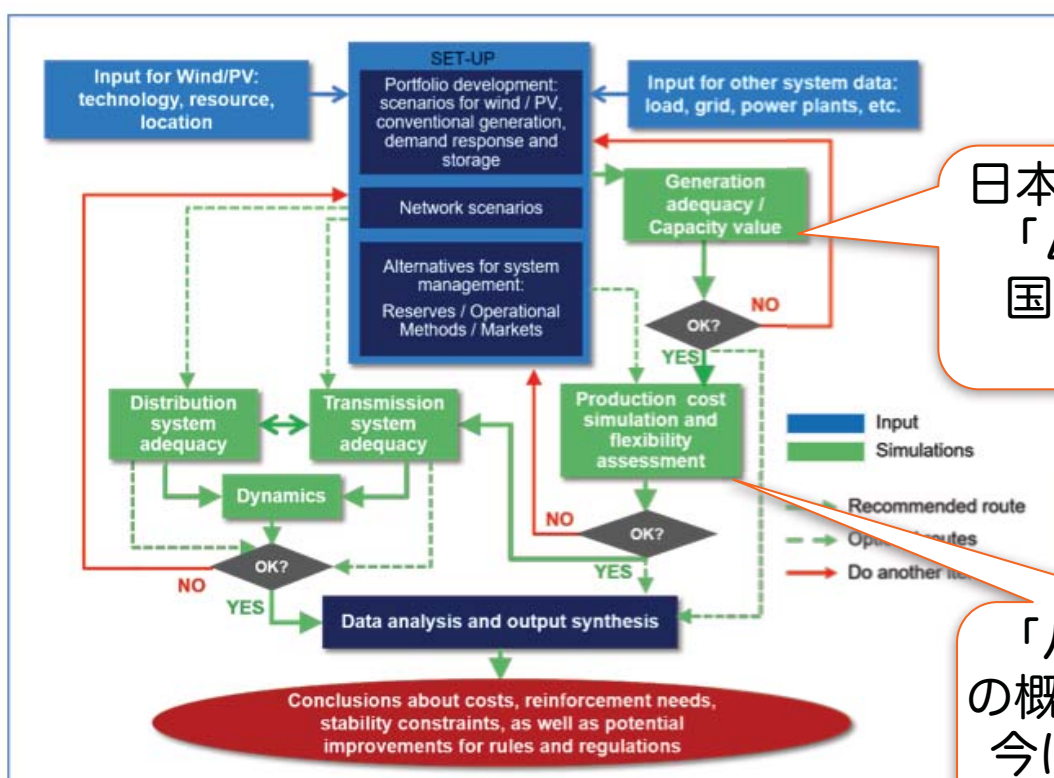
推奨技術基準RP16 (2018年)

■ 推奨技術基準 (Recommended Practice) RP16

- IEA PVPS Task14
(太陽光系統連系)
との共同報告書
- 各国の風力系統連系に際して
系統計画・運用・評価に
対する推奨技術



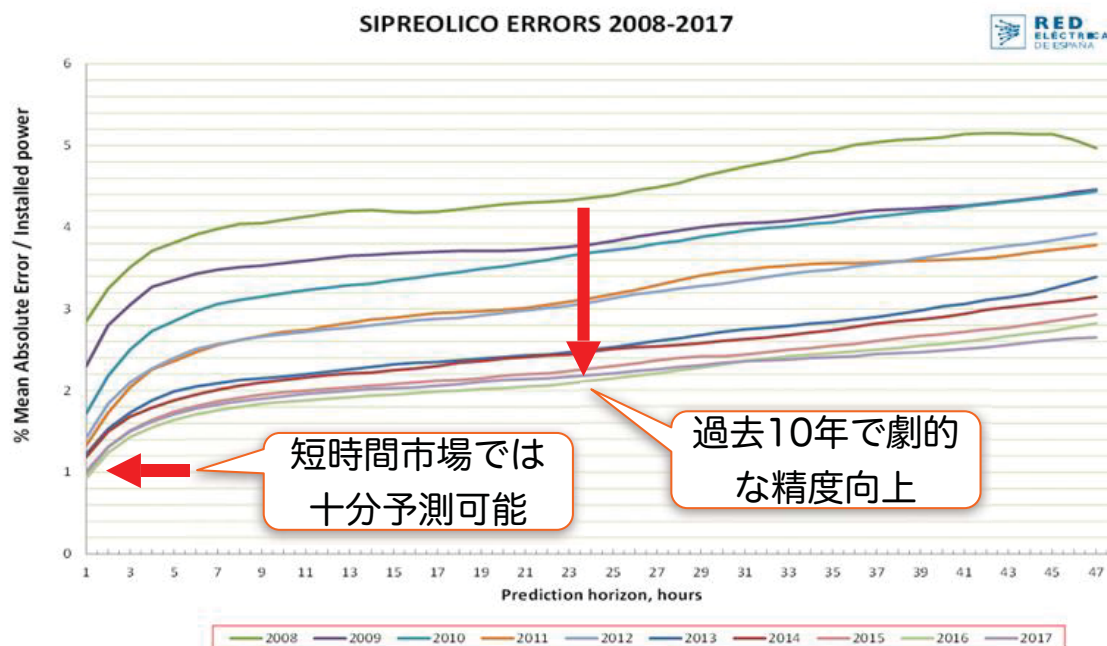
推奨技術基準 RP16より



日本の「kW価値」「ΔkW価値」は
国際推奨の概念
から乖離

「バックアップ」
の概念は最早古い。
今は「柔軟性」の
時代。

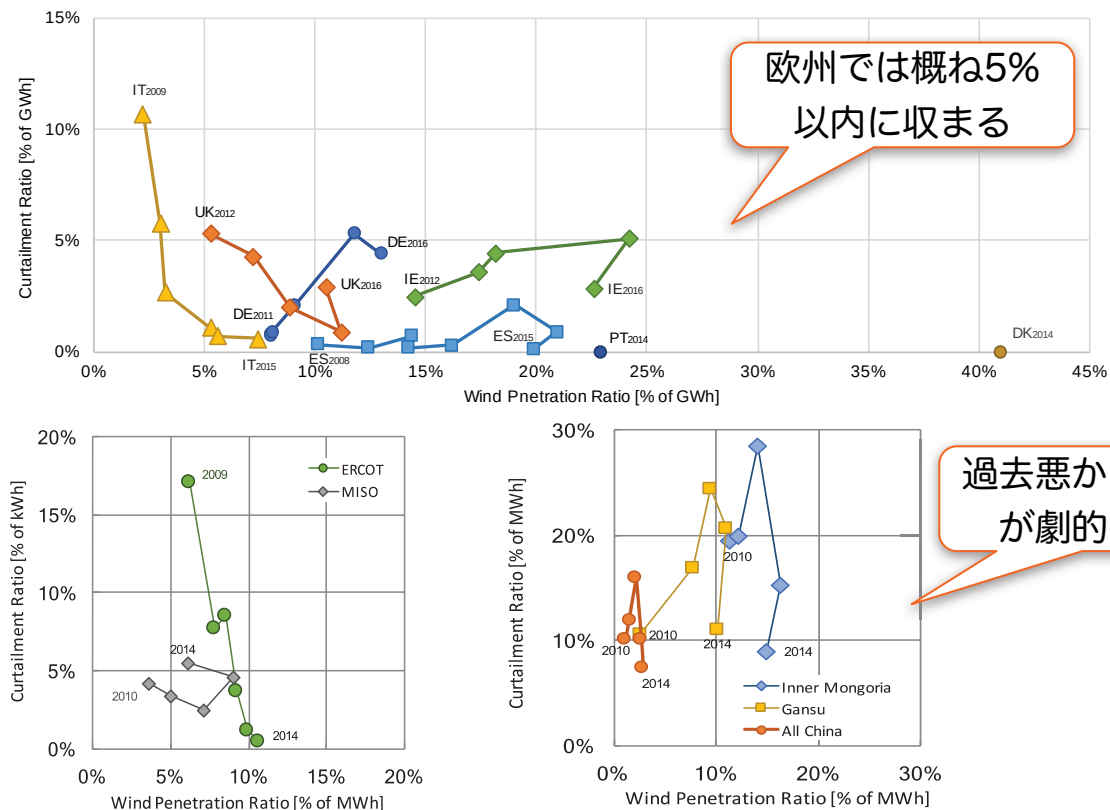
- Design and operation of power systems with large amounts of wind power
- Final summary report, IEA Wind Task25, Phase 2015-2017
 - <https://community.ieawind.org/task25/viewdocument/task-25-final-summary-report-phase>





出力抑制国際比較

11



(source) IEA Wind Task25: Design and operation of power systems with large amounts of wind power, Final summary report, IEA Wind Task25, Phase 2015-2017 (2019)



2020年度の活動

12



- 春季Online会議
 - 3月23～24日
 - デルフトで開催予定 → オンラインで代替
 - 参加者: 約30名
- 秋季Online会議
 - 10月20日～10月21日
 - 参加者: 約40名
- 翻訳 (日本国内委員会)
 - 第3期最終報告書
 - ファクトシート

online会議の方がリアル開催よりも参加者が多い傾向

+ Task25成果物の翻訳

13



■ 2020年10月: 日本語訳を公開

■ ファクトシート

https://www.nedo.go.jp/library/ZZFF_100033.html

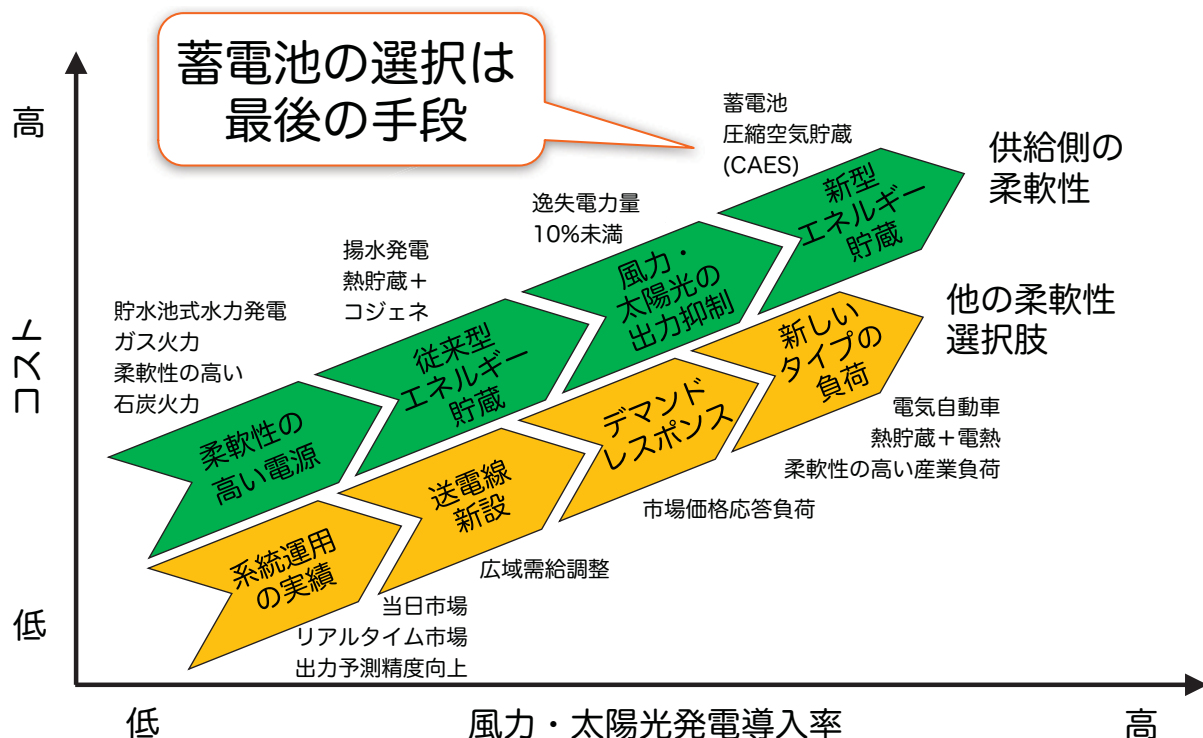
■ 第3期最終報告書

https://www.nedo.go.jp/library/ZZFF_100035.html



+ ファクトシート No.1 風力・太陽光発電の系統連系

14



(出典) IEA Wind Task 25: ファクトシート No.1 「風力・太陽光発電の系統連系」 (2020)

+ 系統柔軟性 flexibility

世界で活発に議論
(日本ではまだ?)

15



- 再エネ大量導入のための重要な指標
- 系統の変動に対応し需給バランスを維持するための能力。

■ 調整力のある電源

- 貯水池式水力発電
- コージェネレーション
- コンバインドサイクルガス発電 (CCGT)

■ エネルギー貯蔵装置

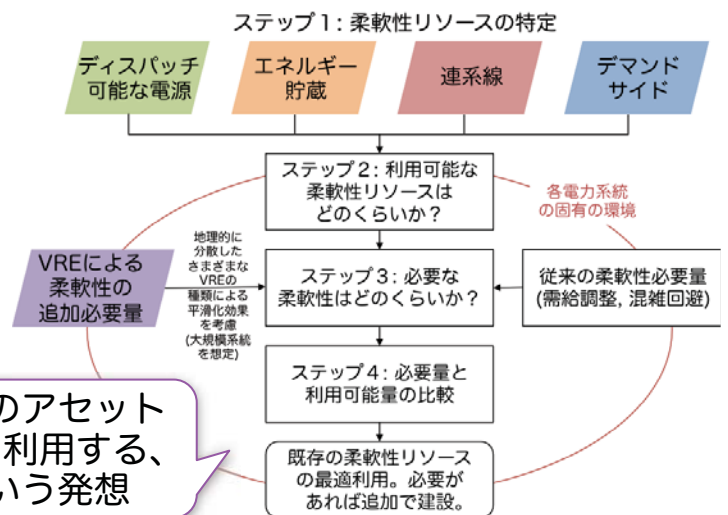
- 揚水発電
- 蓄電池

■ 連系線

■ デマンドレスポンス

- 電気自動車

風力・太陽光を調整するのは
火力だけではない



(出典) IEA: Harnessing Variable Renewables (2011) を筆者翻訳

+ ファクトシートNo.5

風力発電がCO₂排出量に与える影響

16



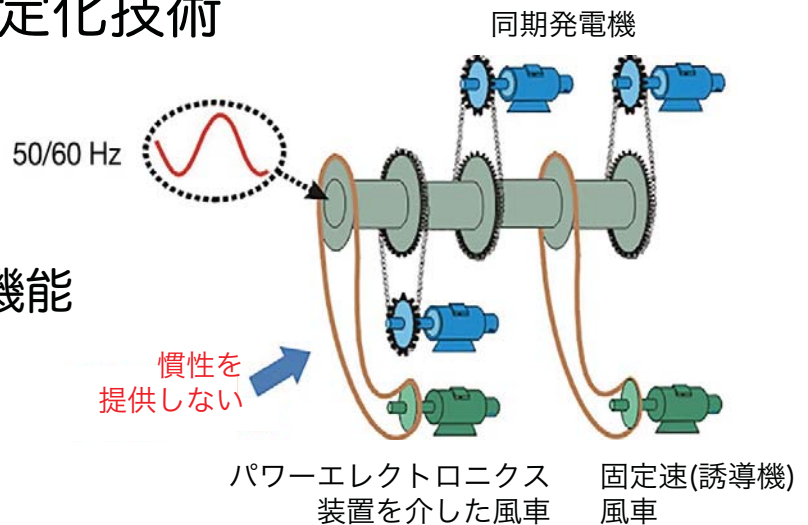
	再生可能エネルギーの増加による削減効果	需給調整の増加による増減
CO ₂	1.17~1.35億t 29% - 34%	無視できる
NO _x	0.675~1.035億t 16% - 22%	135~180万t
SO ₂	0.36~0.63億t 14% - 24%	135~180万t

(出典) IEA Wind Task 25: ファクトシート No.5 「風力発電がCO₂排出量に与える影響」 (2020)

ファクトシートNo.6 系統安定度への影響

■ 風力・太陽光の系統安定化技術

- 電圧安定性(電圧維持)
 - 無効電力供給
- 過渡安定度
 - 事故時運転継続(FRT)機能
- 定態安定度
- 周波数安定性
 - ガバナ応答・垂下特性
 - 擬似慣性
 - ブラックスタート



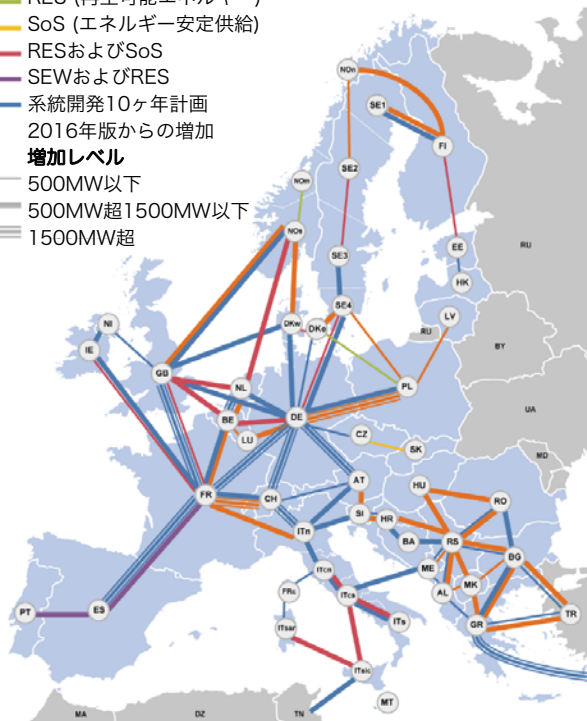
近年はグリッドフォーミング
コンバータの議論が盛ん

(出典) IEA Wind Task 25: ファクトシート No.6 「風力・太陽光発電の系統安定度への影響」 (2020)

ファクトシートNo.8 風力発電と系統増強

妥当性の根拠

- SEW (社会経済厚生)
- RES (再生可能エネルギー)
- SoS (エネルギー安定供給)
- RESおよびSoS
- SEWおよびRES
- 系統開発10ヶ年計画
- 2016年版からの増加
- 増加レベル
 - 500MW以下
 - 500MW超1500MW以下
 - 1500MW超



- 送電網の増強は電力系統全体に便益をもたらす
- 通常、コストは単一の発電所や電源に割り当てられることはない
- 送電に係るコストは消費者のエネルギー価格全体のごく一部にすぎない
- 動的線路定格(DLR)やフレキシブル交流送電系統 (FACTS) などより費用効果の高い方法もある

(出典) IEA Wind Task 25: ファクトシート No.8
「風力発電と系統増強」 (2020)

- 再生可能エネルギーの系統連系に関する情報や概念は、依然として日本と世界で乖離
- Task25から得られる情報は非常に貴重

今後の課題

- **Input:** Task25の情報の日本への普及啓発
- **Output:** 日本の知見のTask25への貢献



Task 25: 風力発電大量導入時の 電力系統の設計と運用

ご清聴有り難うございました。

yasuda@mem.iee.or.jp

第9回
IEA Wind
セミナー



「洋上風力産業ビジョン（第1次）」案の概要

洋上風力発電の意義と課題

- 洋上風力発電は、①大量導入、②コスト低減、③経済波及効果が期待され、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札。
- 欧州を中心に全世界で導入が拡大。近年では、中国・台湾・韓国を中心にアジア市場の急成長が見込まれる。（全世界の導入量は、2018年23GW→2040年562GW（24倍）となる見込み）
- 現状、洋上風力産業の多くは国外に立地しているが、日本にも潜在力のあるサプライヤーは存在。

洋上風力の産業競争力強化に向けた基本戦略

1.魅力的な国内市場の創出

2.投資促進・サプライチェーン形成

3.アジア展開も見据えた次世代技術開発、国際連携

官民の目標設定

(1)政府による導入目標の明示

・2030年までに1,000万kW、
2040年までに3,000万kW～4,500万kW
の案件を形成する。

(1)産業界による目標設定

・国内調達比率を2040年までに60%にする。
・着床式発電コストを2030～2035年までに、
8～9円/kWhにする。

(2) 案件形成の加速化

・政府主導のプッシュ型案件形成スキーム
（日本版セントラル方式）の導入

(2)サプライヤーの競争力強化

・公募で安定供給等に資する取組を評価
・補助金、税制等による設備投資支援（調整中）
・国内外企業のマッチング促進（JETRO等）等

(3) インフラの計画的整備

・系統マスタープラン一次案の具体化
・直流送電の具体的検討
・港湾の計画的整備

(3)事業環境整備（規制・規格の総点検）

(4)洋上風力人材育成プログラム

(1)浮体式等の次世代技術開発

・「技術開発ロードマップ」の策定
・基金も活用した技術開発支援

(2)国際標準化・政府間対話等

・国際標準化
・将来市場を念頭に置いた二国間対話等
・公的金融支援

2

洋上風力産業ビジョン第1次(案)概要(令和2年12月15日)
洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会 P.2より

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/pdf/002_02_01_01.pdf

洋上風力発電等の導入拡大に向けた研究開発事業

令和3年度予算案額 82.8億円（76.5億円）

資源エネルギー庁
省エネルギー・新エネルギー部
新エネルギー課
03-3501-4031

事業の内容

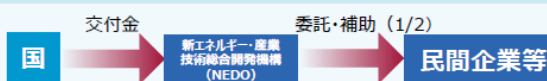
事業目的・概要

- 洋上風力発電は、世界的にコストの低減と導入拡大が急速に進んでいます。陸上風力発電の導入可能な適地が限定的な我が国において、洋上風力発電の導入拡大は不可欠です。
- 一方、我が国における洋上風力発電の主力電源化を図る上では、諸外国と比べて高い発電コスト、低調な設備利用率、自然条件に関する情報の不足、日本の気象・海象条件に適した洋上特有の技術課題、国内事業者における実績の不足など、様々な課題を解決していくことが必要です。
- さらに再エネ海域利用法の制定により、今後我が国における洋上風力発電の導入拡大が見込まれる中で、関連産業の競争力強化を図り、もって低廉かつ強靱なエネルギー供給体制を構築することが重要です。
- 本事業では、こうした課題を解決するため、以下の技術開発を行います。
 - ①次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究
 - ②洋上ウインドファーム開発支援事業
 - ③洋上風力発電低コスト施工技術開発
 - ④風車維持管理技術高度化研究開発
 - ⑤風車部品高度化技術研究開発
- これらの研究開発を実施することにより、我が国の洋上風力発電の更なる導入拡大、低コストかつ安定的な再エネ電気の供給、風力関連産業の競争力強化等に貢献します。

成果目標

- 平成20年度から令和4年度までの15年間の事業であり、令和4年度までに、本事業を通じて、我が国の気象・海象条件に適した洋上風力発電に関する技術・システム等（11件）を確立し、2030年のエネルギーミックスの実現に貢献します。

条件（対象者、対象行為、補助率等）



事業イメージ

(1)次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究

低コスト浮体式洋上風力発電システム技術の確立にむけた実証等を実施します。令和3年度は、

- 水深50m～100mにおける低コスト浮体式洋上風力発電システムの実証データによる設計検証、効率的な保守管理技術等の技術開発の継続実施
- 風車・浮体・タワーを一体化した軽量浮体式洋上風力発電システムの実証機の製作等を行います。 ※委託



低コスト浮体式洋上風力発電システム実証機

(2)洋上ウインドファーム開発支援事業

- 洋上風力発電事業の実施のために必要な基礎調査等を実施します。令和3年度は、一般海域における海底地盤、気象・海象等の調査及び港湾区域の基礎調査を行う事業者の支援を行います。また、適切な洋上風力発電スベック算定に必要な風況観測データ取得を目的とした風況観測タワーを設置するためのFSを行います。 ※港湾区域：補助（1/2）、一般海域：委託

(3)洋上風力発電低コスト施工技術開発

- 我が国の海底地形・地盤に適した洋上風力発電設備の基礎構造、施工技術等の実証を行います。
- 令和3年度は、試験海域に向けた機器の設計、製作等を実施し、実海域での実証を行います。 ※補助（1/2）

(4)風車維持管理技術高度化研究開発

- 洋上風力発電設備の効率的な維持管理を行うための技術開発を行います。
- 令和3年度は、効率的であると提案された洋上メンテナンスシステムの製作等を行い、試験運転・運用等を行います。 ※補助（1/2）

(5)風車部品高度化技術研究開発

- 我が国の気象条件等に適し、かつコスト競争力を有すると見込まれる風車部品について、国内に設置される洋上風車への搭載率向上等に資する技術開発を行います。
- 令和3年度は、対象となる風車部品の試作機の製造を行い、並行して試作機の実機による信頼性の評価を実施するために試験設備の設計を実施します。 ※補助（1/2）



「令和3年度経済産業省概算要求のPR資料一覧:エネルギー対策特別会計」より
「洋上風力発電等の導入拡大に向けた研究開発事業」

https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2021/pr/en/shoshin_taka_26.pdf

第9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

#	ご質問	回答
1	日本で風況が良いところは東北や北海道など（全体の 6-7 割）の寒冷地であるが、なぜ、日本は Task19 に参加していないのですか？ 今後、参加する可能性はありますか？	Task19 には新たに参加する予定で、参加するための手続きを進めています（渡部）。 Task19 にはこれまでもオブザーバーとして参加してきましたが、2021 年度から正式に参加する予定です（石原、当日回答）。
2	エロージョンについて、日本の環境は欧州と異なるとの事ですが、欧州と比較して雨や風の具体的な差異について、どのようなものが想定されますか？	ヨーロッパと比較した雨の差異について、降雨量等については気象分野における観測である程度わかっているかと思いますが、雨滴径、成分、それらの日本国内での地域性、さらにはそれらのエロージョンへの影響がわかっておらず、どのような差異があるかについてもこれから調査、観測が必要な状況です（小垣）。
3	日本と欧州でエロージョン環境が違うと言いますが、他のアジア諸国や北南米など、世界の他の地域と比べても有意に違うのでしょうか？ 他の国々にも熱帯性低気圧がある中、新規に独自の研究を始めなければいけないほどの違いとは何なのでしょう？	エロージョンに影響する気象条件がどの程度国際的に差異があるかについては、未解明な課題であり、対ヨーロッパだけでなく、アジア内でも東南アジアと東アジアとでは差異があることが考えられ、これから解明していく必要があると考えています（小垣）。
4	ブレードの摩耗問題について興味深くお聞きしました。ブレード以外に、タワーやトランジションピース、モノパイルの錆等による腐食（Corrosion）の問題は発生していないのでしょうか？	ブレード以外のタワー、トランジションピース、モノパイル等については、ブレードと異なり高速回転しないため、エロージョンのような問題は発生しませんが、挙げていただいたような化学的な作用による腐食等については環境条件によって発生し問題となる可能性はあり、これまでの海洋構造物や船舶における対策技術が流用可能であると考えております（小垣）。
5	今後のエロージョンの新 Task での議論について、Task42 の 寿命延長評価とも関係しそうですが、今後、他の Task との連携などはあるのでしょうか？	現在、Task 46 (Erosion of wind turbine blades) は、1 月に活動開始、3.11 にキックオフミーティングが予定されておりますが、現状では他の Task との具体的かつ直接的な連携については未だ計画されていないようです。ご指摘のように、今後、Task 42 等、関係する Task との合同

#	ご質問	回答
		ミーティング等、連携が企画される可能性があるかと考えております(小垣)。
6	風力発電設備維持のために、雨や雪、エアロゾルなどの成分分析は必要でしょうか？その必要性・重要度はどの位あるのでしょうか？	現状では、雨・雪・エアロゾルの化学的成分がエロージョンにどのように影響しているかさえもわかっていないため、まずは成分分析するとともに、成分とエロージョン状況との比較、検証により、その影響を明らかにすることで、影響因子を特定する必要がある、そうしないと、有効なエロージョン対策技術を確立することができないため重要であると考えております(小垣)。
7	ドップラライダーの最長測定可能距離はどのくらいでしょうか？	装置規模にも依存し、最大で距離 30km まで計測した実績がございます(今城)。 http://www.mitsubishielectric.co.jp/lidar/products/coherent/index.html
8	日本で、ライダーによる Power Curve の測定実績はありますか？	産総研様での実施例がございます。以下文献です(今城)。 H. Kawabata, Y.Kikushima, and T.Kogaki. "Wind Profile and Power Performance Measurements Using a Nine-beam Nacelle Lidar." American Journal of Mechanical Engineering 6.2 (2018): 75-82.
9	ライダーで計測した乱流値は、風杯風速計で計測したものとどのような違いが見られますか？	ライダーはボリューム(時間・空間共に)での計測に対し、風杯風速計は点での計測になりますので、微小スケールの風(乱流など)に対する計測結果に差が出てきます また、風杯式は風杯自身の慣性の影響をうけるので乱流強度はライダーよりも小さくなる傾向があります。以下、参考文献です(今城)。 Bot, E. T. G. Turbulence assessment with ground based LiDARs. No. ECN-E--14-043. ECN, 2014.

#	ご質問	回答
10	風速・風向は KPI など精度の指標はありますが、乱流強度についても同様に指標を策定していく予定でしょうか？	現時点では決まっておりませんが、何かしら指標を取り決めて評価することになると思います(今城)。
11	同一空間を測定したときの機差はどの程度でしょうか？またメーカー間での精度差は問題になるほどあるのでしょうか？	ライダーはボリューム(時間・空間共に)での計測になりますので、その条件が異なれば、値が異なる可能性もあります。メーカー間による精度差は、平坦快晴時ではほとんどないと思います。ビーム照射角度や計測条件等から、複雑地形での値に差が出てきますので、それぞれのメーカーのライダーに対する補正が必要になります。また、低エアロゾル濃度条件時での性能としては、観測パラメータ制御による SN 比改善対応を当社ライダーのみ実施しておりますので、他メーカーに対して大きな優位性を持っていると思います。以下、比較に関する報告事例です(今城)。 水戸俊成, et al. "3 機種 の鉛直照射型ドップラーライダーの特性および観測タワーの風況観測値との比較精度検証." 風力エネルギー利用シンポジウム 38 (2016): 209-212. Nishio, Nobutoshi, et al. "Field test comparison using different LiDAR systems for Complex terrain." Measurements 61400: 12-1.
12	今回の発表の中で、日本の研究成果はどの部分に該当しますでしょうか？	本日の発表の中では、ご紹介は致しませんが、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「スーパーシミュレーションと AI を連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」プロジェクトのチームと連携して、タスクに参加をしています(植田)。
13	ブロッケージ効果についてご教示ください。	ウィンドファーム規模が大きいことにより、流入風速が低減する効果のことを意味します(植田)。

#	ご質問	回答
14	流れモデル(特に RANS、LES)について、具体的な課題に対してどのモデルを適用しているか、事例についてご紹介ください(wake は〇〇モデルなど)。また、その中での課題があれば教えてください(モデルで不足している要素は？など)。	本タスクは、モデルのベンチマークになるので、各課題に対し、各研究機関が提案するモデルをそれぞれ使用しています。大規模なウィンドファーム内のウェイク、隣接するウィンドファームからのウェイクを過小評価しているという課題があります(植田)。
15	各研究機関で、ウェイクモデルが作成されていますが、日本の洋上風力に適応したモデルはありますか？	一般ユーザが利用可能な商用の風況解析ソフトで採用しているウェイクモデルは以前からあまり大きく変わりません。日本の洋上風力を考えた場合、ウェイク予測の前に、まず、地形影響と気象条件がフローモデルで再現されているかが重要と思います(植田)。
16	ダウンウィンド風車は、ブレードが2枚のものが多いようですが、何か理由があるのでしょうか？	1980 年代ごろはブレードのコストが高く、低コスト化の方向性として 2 枚翼が考えられていました。そこで発電時の変動荷重軽減のために 2 枚の翼をつなげて、ハブで回転運動を許容するティータードハブの併用が想定されており、大きなティータ変位を許容するダウンウィンドロータが 2 枚翼ロータと併用されることが多かったと思います。なお、今日の大型の 2 枚翼風車では、ブレードの可撓性が大きいのとピッチ制御技術の進歩によりティータードハブを前提としたものはほとんどありません(吉田)。
17	ダウンウィンドだと、なぜブレードの軽量化が可能なのでしょう？	ダウンウィンドロータでは、一般にロータとタワーの離隔が大きいため、ブレードに大きな変形を許容できます。そのため、ブレードの設計を決定している要素のうち、剛性に対する要求が低くなるため、より細くスパーキャップの薄いブレードが適用可能となりブレードが軽量になります。また、細いブレードでは空力荷重も重力荷重も低下するため、ナセルも軽量化します(吉田)。

#	ご質問	回答
18	ダウンウィンド風車の大規模普及について、技術的な課題は何かありますか？	タワー後流をブレードが通過する際の変動荷重と騒音は歴史的な課題ですが、大型化・可撓性の向上により軽減しつつあります。しかし、超大型風車や浮体式洋上風車におけるダウンウィンド風車の優位性は顕著なので、いずれかのメーカーが一旦商業的に成功を収めた場合には急速に普及する可能性もあると考えています(吉田)。
19	モーフィング翼も含めて「フレキシブル」なブレードを用いた際に、耐用年数等の特性は、アップウィンドの固い翼と比較して変わってくるのでしょうか？	今回の発表で紹介した日立ならびに UVA のシステム設計の結果は、いずれも疲労強度も考慮した結果ですので、いずれも設計寿命を満たすものとして比較しています(吉田)。
20	100 万 kW の洋上風力発電と 100 万 kW の火力発電を比較する場合、 ①大雑把な全設備費用の比較 ②燃料費用の比較 ③メンテナンス費用の比較 ④カーボンニュートラルの比較(CO2 トン) 直感的な比較で結構ですので、ご教授ください。	火力は火力の中でコストの低い LNG 火力を想定し、経済産業省の発電コスト検証ワーキンググループの資料にある 2030 年モデルプラントによる計算結果を基に回答します。 (https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_01.pdf) 設備利用率は、LNG 火力 70%、洋上風力 30%を仮定しており、それぞれ 100 万 kW の発電所において、年間発電量は LNG 火力 70 万 kWh、風力 30 万 kWh となります。 ① 初期投資費用は、火力 1.0 円/kWh に対し、洋上風力 14.7/kWh です。 ② 燃料費は、火力は 約 10 円/kWh に対し、風力は 0 円/kWh です。 ③ メンテナンス費用は、火力 0.6 円/kWh に対し、風力 8.6 円/kWh です。 ④ CO2 は、建設時と運転時を含め、火力 474 トン/kWh に対し、陸上風力 26 トン/kWh です。 LNG 火力と風力を比較するために、①～④を考慮して計算した発電コストは、LNG 火力 13.4 円/kWh、風力 13.6~21.5 円/kWh です。

#	ご質問	回答
		風力に関して、政府は、2030 年までに発電コスト 8~9 円/kWh に低減することを目指しています(菊地)。
21	発電コスト低減の寄与率のグラフ(スライド 9 枚目)で、EU 全体で CAPEX 削減の比率が高いが、どの国の影響が大きいのですか？	EU より示されておらず、不明です(菊地)。
22	電力システムシステム全体の調整力や送電網を含めたインテグレーションコストを評価した研究はありますか？	セミナーで Task26 ではないとお答えしてしまいましたが、前期にて、システムコストも含めた発電コストの比較を実施したレポート「Impacts of Wind Turbine Technology on the System Value of Wind in Europe」を出版しています。また、Task25 では、多くの研究がされています(菊地)。
23	日本における 2017 年以降の陸上風力の設備利用率の増加は、風車の大型化によるものでしょうか？	風車の大型化と若干の風況の改善、さらにメンテナンスの効率化による利用可能率の向上が関係していると考えられます。正確には、分析が必要です(菊地)。

#	ご質問	回答
24	海外では、設置容量、定格出力が大きくなると、学習効果によってコストが下がると言われており、実際、コストの低減が見られています。日本では、なぜ資本費・運転維持費のコストは低減にならず、横ばい、やや微増傾向になっています。その要因は何でしょうか？	資本費:設備容量、定格出力が大きくなると資本費が低減するというのは、ドイツの例を見ると必ずしもそうではありません。日本は複雑地形であるため、大型化するほど、土木工事費等が必要となり資本費低減が見込めない可能性があります。ありますが、正確には分析が必要です。 また、留意頂きたいのは、公開されている日本の資本費の統計データは年に数件分と、統計的に十分ではありません。分析可能な機関が、より精度の高い分析を実施する仕組みを整える必要があると考えています。 運転維持費:NEDO スマートメンテナンス研究にて、大規模ウィンドファームにおいては維持管理費は低減していることが報告されています。一方、市所有等の風力発電所は維持管理体制等の問題から維持管理費が高止まりしていることが知られ、全体の中央値をみるとこのような結果となっています。維持管理費に関しては、今後低減していくことが見込まれます(菊地)。
25	リパワリングによる効果とは、具体的にどういったものでしょうか？	紹介論文の中では、撤去した風車の定格出力に対する、新しい風車の定格出力の比率と定義されています(菊地)。
26	国内では、リプレイスとよく言われていますが、リパワリングとの大きな違いは何でしょうか。	日本におけるリプレイスは欧米におけるリパワリングと同等で、「耐用年数を迎えた風車を、より大型の最新の風車に建て替える」という意味として使われることが多いです。日本においてリパワリングといった場合、建て替えなしに部分的な交換や設備の追加をすることにより、出力を増加させることを意味する場合があります(菊地)。

#	ご質問	回答
27	日本の電力価格は高すぎます。デンマークと比較して、3 倍も高い理由は何でしょうか？	日本の電力価格は、FIT 制度の基、計算されています。kWh あたり 36 円/kWh と港湾区域について定められております。 デンマークは既に、競争入札・FIP の段階に入っていますので、価格が安くなっています。 3 倍も高い理由は、デンマークを含む欧州は商用期(Commercial phase)であるのに対して、日本は導入初期(Pre-industrialization phase)であり、船舶・港湾のインフラ整備度、サプライチェーンの整備度等、施工の経験が異なり、発電コストが高いためです。 この研究は、国の違いというより、洋上風力産業の成熟度の違いを反映するものと捉えて頂ければと思います。デンマークは日本より 20 年早く洋上風力の設置を始めており、日本と同じくらい高かった所から、ここまで低減しています。日本も導入に従って、上記に上げたインフラやサプライチェーンの整備度、施工の経験、風車大型化等により、発電コスト低減ならびに電力価格低減を実現していく必要があります(菊地)。
28	風力発電事業の地域的な偏りが大きく、それが地域で受け入れられない要因になっていると思います。環境省が推奨している風車設置のゾーニングについて、どのようにお考えでしょうか？	地域全体で予め適地を合意しておくことには一定の意味があり、紛争回避の効果もそれなりにあると思います。どのような項目に配慮するかという項目の選定や、各項目における線引きや重み付けには課題があると思います。地域ごとの導入目標や地域作りの中での位置づけと関連させない限り安全サイドに偏った判断になりやすく、そこは課題だと思います(丸山)。
29	社会的受容性を形成する責任は誰にありますか？	原因者である事業者が責任を負うのが基本ですが、制度設計や協議の場の設定など行政の果たすべき役割もそれなりに大きいと思います(丸山)。

#	ご質問	回答
30	社会的受容で、日本と世界で異なる特徴や、共通している点はどのようなものがあるでしょうか？	景観、野鳥、騒音といった項目そのものは共通しています。反対運動はある程度世界レベルでネットワークされているので、温暖化懐疑論などとの親和性もあります。関心の濃淡は国によって異なります。ヨーロッパや北米と比較して、日本の場合は景観が問題化しにくく、低周波音や騒音には強い関心が寄せられているというのは特徴かと思います。制度の違いの影響にも注意が必要で、たとえばヨーロッパだと林地開発は基本的に禁止されてきたので案件がないので問題化しないということもあります(丸山)。
31	世界各国で発電所の大規模化が進んでいますが、他国での住民参加の事例があれば教えてください。	欧州だと土地利用計画と紐づいているので、住民参加が基本です。よりよい地域貢献プログラムを実現するために発電事業者が現地のNPOに調査を委託し、住民参加型ワークショップなどの結果を反映させている例もあります(丸山)。
32	推奨技術基準 RP16 では ΔkW 価値の概念は国際概念からは乖離しているとのことですが、再エネは電力系統に変換器(インバータ)を介して連系する電源であるため、イナーシャル(慣性力)をフライホイール等で確保しないと、周波数や系統安定度を物理的に維持できないのではありませんか？	ΔkW 価値という日本独自の用語の定義が曖昧なのでなんとも言えないのですが、一般に国際的に共通の用語である予備力(reserve)には慣性(inertia)応答の時間領域は含まれておらず、新しい概念である柔軟性(flexibility)にも慣性応答が含まれるかどうか議論が分かれています。したがって、 ΔkW 価値と慣性の問題はごちゃまぜにせず、切り分けて考えて下さい。また、慣性応答ができるものはフライホイールだけではありません(安田)。

#	ご質問	回答
33	バックアップ概念は古いとおっしゃるが、この冬は大雪で暖房の電力需要が高く天然ガスの在庫が尽きて、電力価格が上昇して危うく停電するところでした。将来的に天然ガスを含めた化石燃料火力発電がすべて電力市場から撤退したとき大雪や、大型台風で太陽光が使えない中で風力もプロペラを守るため止めざるを得なくなった時に、どのような柔軟性で同時同量を達成して、必要な電力を確保するのでしょうか？ デマンドレスポンスや圧縮空気だけで十分でしょうか？ または、貯水池式水力発電や揚水発電所を大量に建設するのでしょうか？ いくら理想的な系統増強をしたとしても、火力発電に代わる調整力が確保できなければ、同時同量は達成できず、逆に言えば調整力の分しか再エネ電力を系統接続できないのではないのでしょうか？ 調整力を増やしていくような市場メカニズムは考えられていますか？	熱貯蔵や EV など(さらに将来的にはフェーズ 6 に達すれば水素貯蔵も)、さまざまな柔軟性供給源があり、特に熱や運輸との連携はセクターカップリングと呼ばれます。極寒時や酷暑時に停電になって生命・健康の危機が発生するのは、ひとえにエネルギー供給を電気に過度に依存しているからであり、特に熱供給とのセクターカップリングは、レジリエンスやリスクマネジメントに貢献します。このような議論は、現在、日本でも経産省の審議会等で議論が進んでいます(安田)。
34	風力、太陽光導入率とコストのお話、また、系統柔軟性のお話がありましたが、日本では現実的に最大何%くらい風力発電を導入することが可能だとお考えでしょうか？	IEA での国際的な議論によると、現在の技術でも発電電力量導入率で 30～40% の導入は可能です。蓄電池や水素からの柔軟性を活用すれば、太陽光と風力だけで 50～60% も可能でしょう(安田)。
35	送電網の増強について、コストと得られる便益はどのように比較されているのでしょうか？	送電線の増強をせず送電混雑が発生して送電線の両端で市場価格の値差が発生した場合、社会厚生損失が発生します。送電線を増強することにより社会厚生損失を解消することができればそれが便益となります。また、送電線増強によりより多くの再エネ電源が導入できれば、CO2 削減、市場価格低下等の便益も発生します(安田)。
36	日本から海外に発信できる具体的な情報とは何でしょうか？	具体的には、NEDO プロジェクトの進捗状況や成果を英語にして Task25 に報告しています

#	ご質問	回答
		(安田)。
37	託送料金について、日本では今後どのような方向(150 円/kW/月が確定?)に進んでいくのでしょうか?	国際的には、発電側課金や kW 課金が(結果的に再エネ導入を促進するとして)前向きに議論されています。日本の政策に関しては、予想することがなかなか困難なため、正直わかりません。申し訳ありません(安田)。
38	日本では、将来何年後くらいにフェーズ 4 レベルに普及到達できるものとお感じでしょうか?	日本の政策が再エネ導入に積極的になれば、2030 年にはフェーズ4に達するでしょう。再エネ導入に消極的であれば、到達時期はどんどん遅くなります(安田)。