

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

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

田中 元史

Task46(Phase1)概要

●エロージョンとは

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



出典: <https://iea-wind.org/task46/>

●エロージョンの影響

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



- ・事業予見性への影響

●活動概要

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

・ワークパッケージ

WP1: マネジメント

Charlotte Bay Hasager(OA,DTU)

WP2: エロージョン要因となる気象因子

Sara Pryor(Cornell Univ.)

WP3: エロージョンと風車オペレーション

David Maniaci(SNL)

WP4: エロージョンの地上試験

Nicolai Frost-Jensen Johansen(DTU)

WP5: エロージョンの力学と材料特性

Fernando Sánchez López(CEU)

・参画機関

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

・プレナリ会議

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

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

・ウェビナー

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

・国際会議

EERA JP Wind FALCON Workshop, 2021

EERA DeepWind 2022 offshore wind R&I conference, 2022

3rd Erosion Symposium, 2022

ECCM European Conference on Composite Materials, 2022

AIAA SciTech Forum, 2023

4th Erosion Symposium, 2023

WESC Mini-symposium, 2023

12th Asia-Pacific Forum on Renewable Energy, 2023

5th Erosion Symposium, 2024

The Science of Making Torque from Wind, 2024

Sandia Blade Workshop, Albuquerque, 2024

6th Erosion Symposium, 2025

Wind Europe, Copenhagen, 2025

WESC Mini-symposium, 2025

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

次項以降で紹介

WP2: エロージョンの要因となる気象因子

●目的:

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

●参画機関:

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

●日本からの参加メンバ:

大阪大学 牛尾知雄教授
産総研 田中

●研究項目:

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

WP2.2: エロージョンに影響する追加的な
気象学的因子の同定

WP2.3: 雹、雨、粉塵頻度の文献調査

WP2.4: 雨滴粒径分布の気候依存の文献調査

WP2.5: 気象因子データの可用性と質

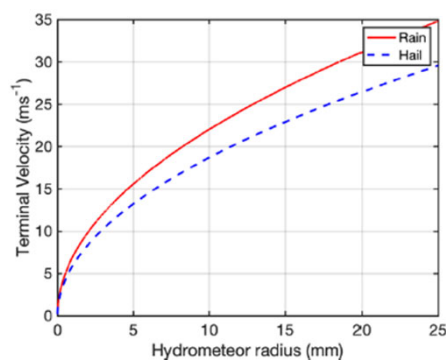
WP2.6: 気象因子データによる
エロージョンクラス同定に関するRPを含む
エロージョンアトラスのロードマップ

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

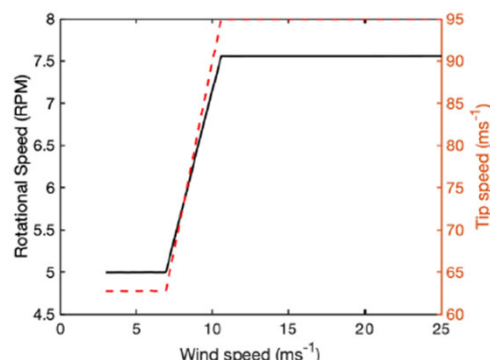
WP2.8: エロージョンに関するモデルV&Vの手法と、
主要気象因子のモデリングツールの改善

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

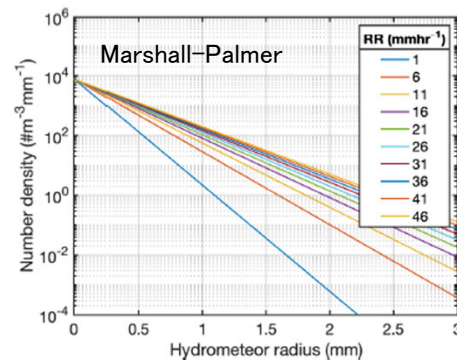
- ・エロージョンに影響する因子と計測方法、データの可用性の概要まとめ（メタデータあり）
- ・影響因子：近寄り速度、衝突数、液滴の形状と相、衝突効率
- ・降雨計測／予測方法：ディストロメータ、レーダー、再解析データ、数値解析モデル
- ・雨滴粒径分布DSDは地域性や時間変動が大きく実測が重要である。



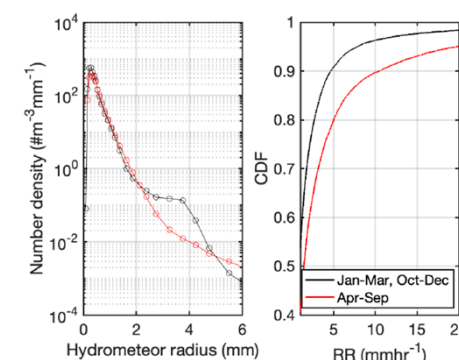
落下速度



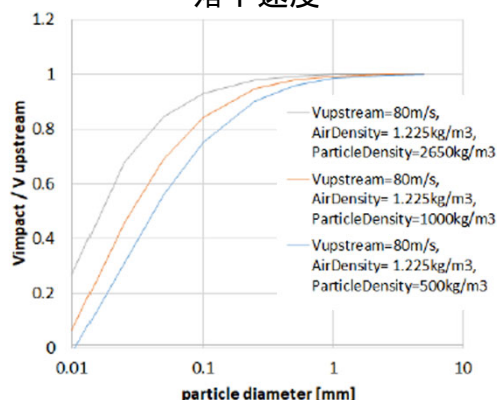
ブレード回転速度



雨滴粒径分布 (DSD)
Scotland



DSDの季節性
Reading



LEでの空力的減速



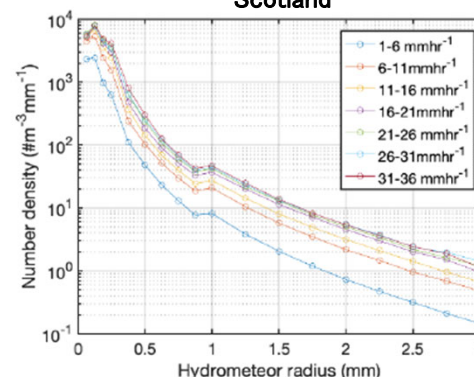
雨量計



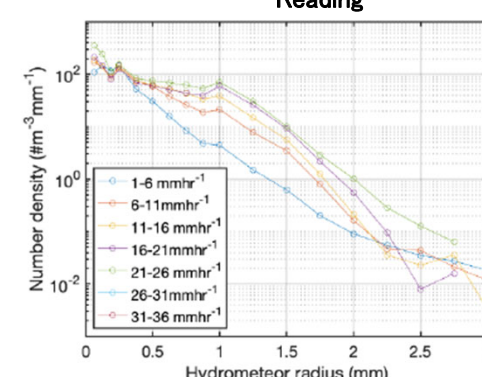
ディストロメータ



電センサー



DSDの地域性



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

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

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

付属的因子の重要性に関する各WPへのヒアリング結果

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

付属的因子の計測事例

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

・エロージョンリスクの地域性や、短時間予報を目指す、エロージョンアトラスの事例と課題

・使用される気象データの特徴と課題

–再解析: グリッドデータで使いやすいが、精度の時空間依存や20分以下の時間分解が課題。

–レーダ計測: 雹の情報を得られるが、ハブ高の風速はない。データがある地域は限られる。

–気象観測所データ: 最もデータが充実しているが、ハブ高の風速はない。

–メソスケールモデル: 時空間グリッドデータで使いやすいが精度に課題あり。

・エロージョンへの変換法と課題

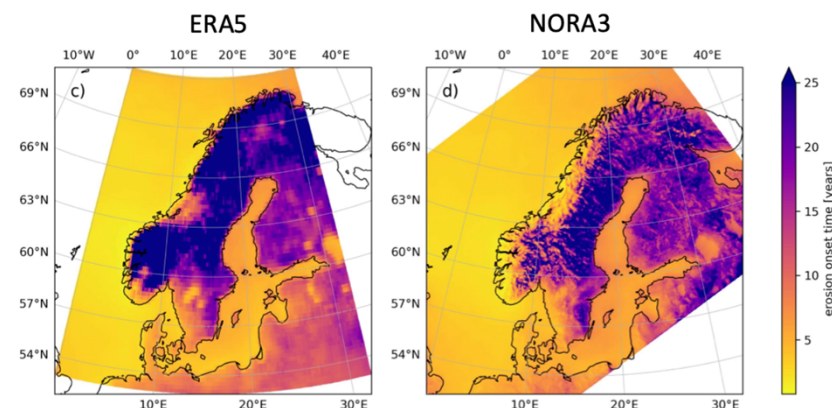
–運動エネルギーを指標: 材料依存が入れられない

–Springer model (材料物性と耐久性のモデル): 市販品の物性はオープンになっていない

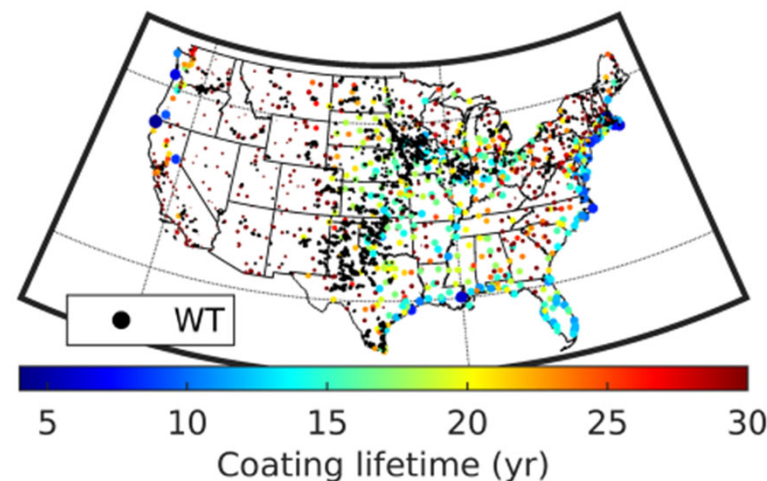
–地上試験のV-Nカーブ: 実機との相関は不明

・アトラスの課題

気象データ依存性、雹の考慮、風車モデルの統一、ハブ高風速の使用、材料のエロージョン特性の精度



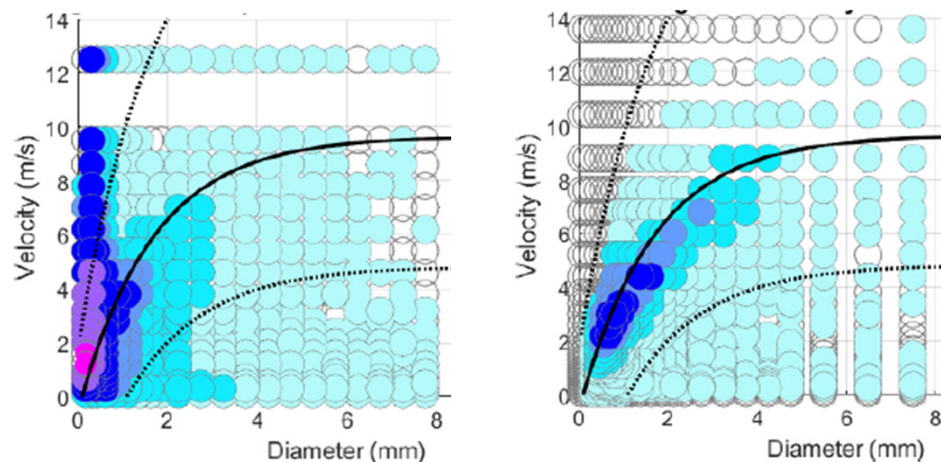
スカンジナビアのアトラス (DTU)



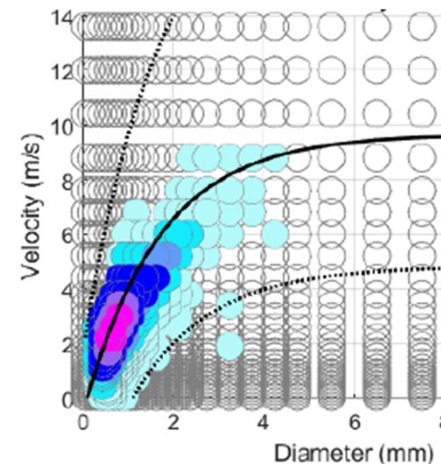
アメリカのアトラス (コーネル大)

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

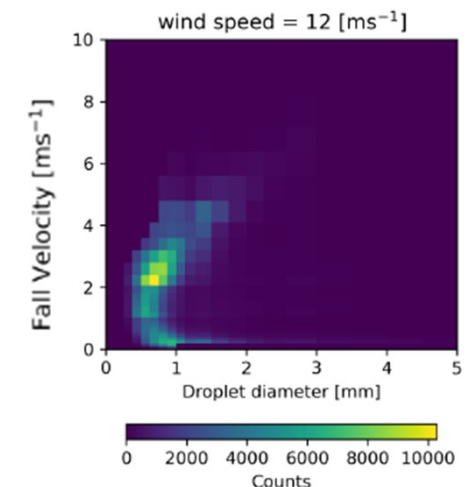
- ・降水計測における課題と、それを解決するためのSuper sitesの必要性
- ・降水量や降水種は雨量計、二重偏波気象ドップラーレーダー、マイクロレインレーダ(MRR)で計測
- ・雨滴粒径分布DSDは、光学式、衝突式、ビデオ式のディストロメータで計測、降水量に換算可能
- ・普及している光学式ディストロメータでは、落下速度異常データの処理方法、高風速下での異常データの取扱い等が定められておらず誤差の原因となる。
- ・ディストロメータの機種間誤差やMRRとの誤差も指摘されており標準化が必要。
- ・計測器の精度検証やデータ解析手法の確立にはスーパーサイトの設置を推奨。



高雨量での機種間比較(左:LPM、右:Parsivel)



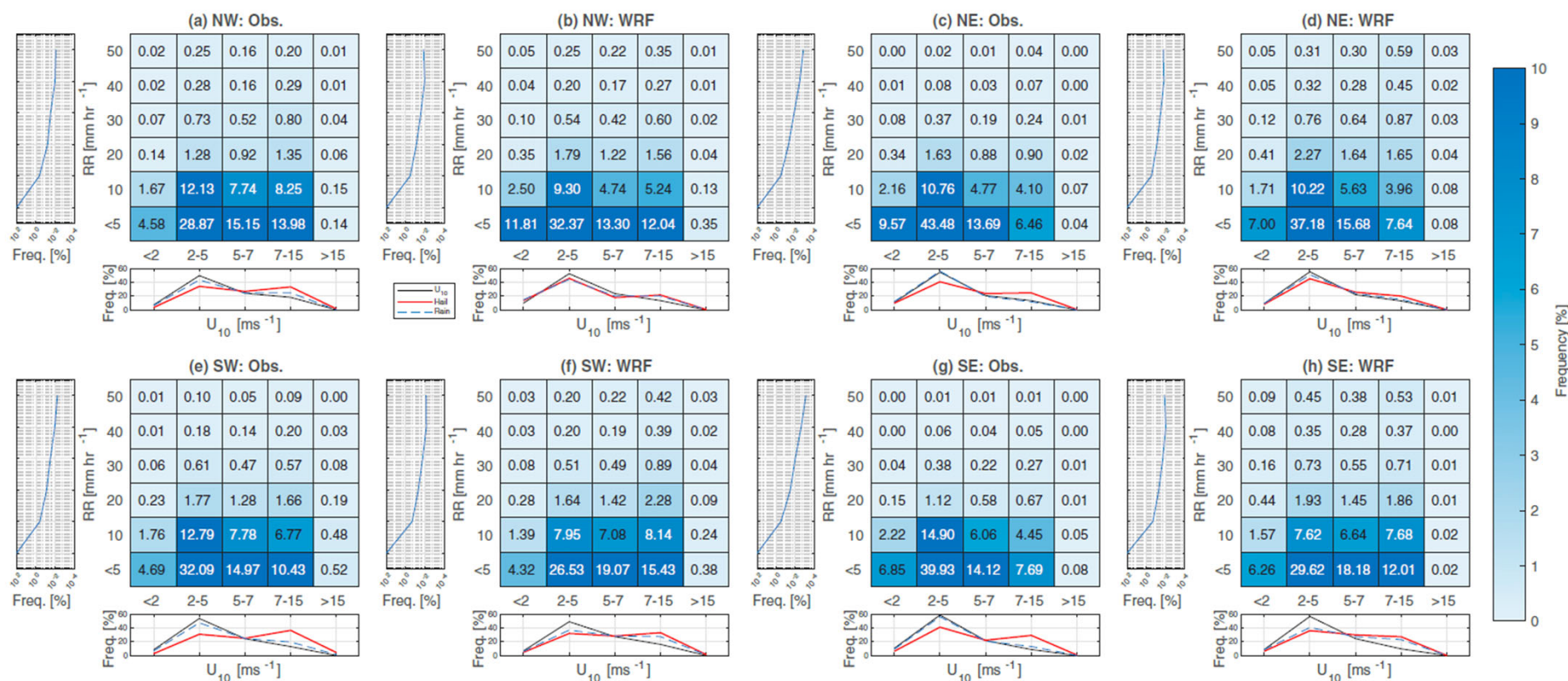
中雨量でのParsivelによる計測



Parsivel計測への風の影響

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

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



WP3: エロージョンと風車オペレーション

●目的:

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

●参画機関:

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

●日本からの参加メンバ:

産総研 川端浩和、栗飯原あや、田中

●研究項目:

WP3.1: ブレードエロージョンクラスに基づく
AEP損失の予測モデル

WP3.2: エロージョン観察結果に基づく
損傷報告書の標準化(レポート)

WP3.3: 疲労解析に使用する液滴衝突モデル

WP3.4: エロージョンセーフモードの可能性

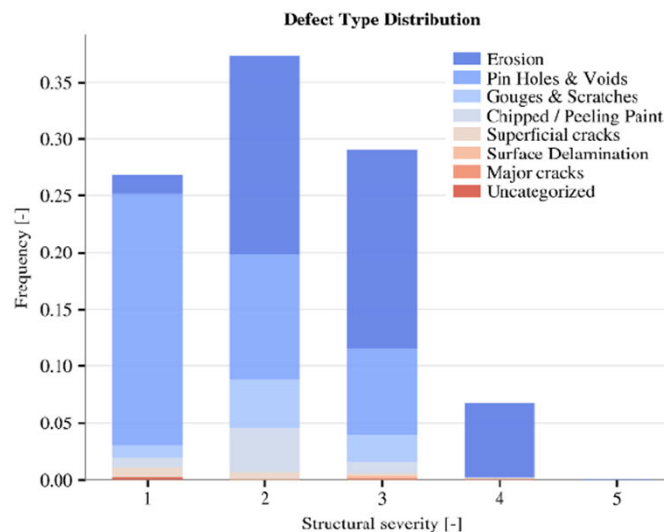
WP3.5: フィールド観察に基づく
性能損失モデルの精度検証

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

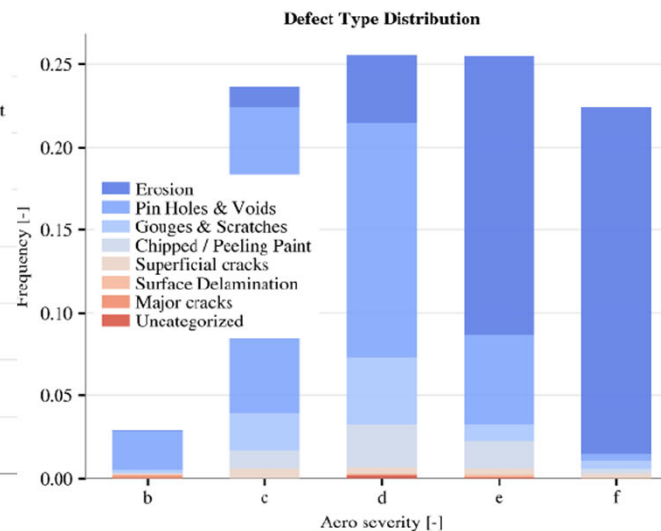
北欧の単一機種洋上WFのLEPなしブレードの3年分の地上カメラによる点検結果(233ブレード、2903損傷)を分析。構造影響ベースであった分類を空力影響ベースに再分類。損傷長さの総和を評価指標とするとチップ側ほど損傷度が高い傾向を確認。b=1,c=2,...f=5で損傷を定量化して半径方向分布関数を作成した。

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

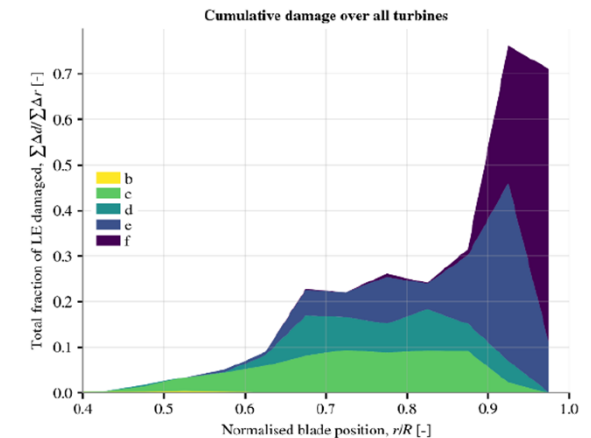
- a. Factory clean
- b. Few pits and gouges
- c. Frequent pits and gouges
- d. Eroded top coat
- e. Onset of laminate exposure
- f. Laminate exposure + sharp edges



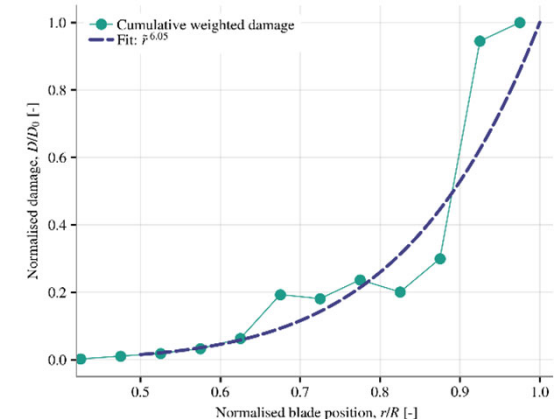
構造影響ベースの損傷度分類



空力影響ベースの損傷度分類



損傷長さ総和の半径方向分布



損傷度の半径方向分布

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

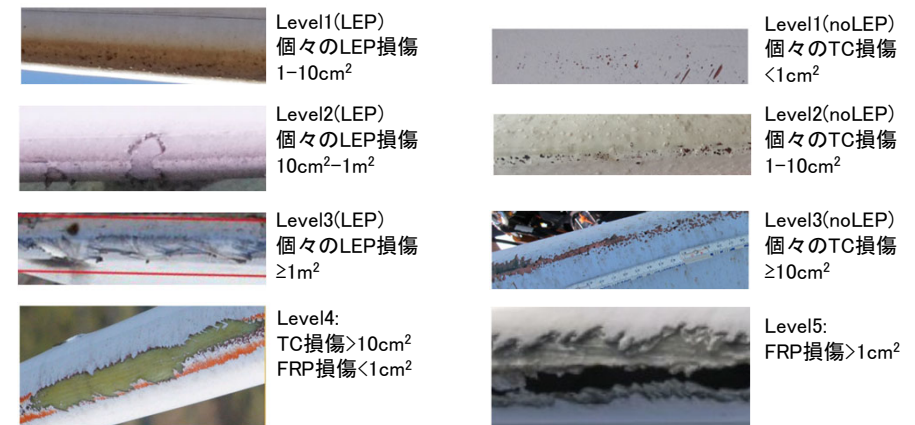
エロージョン損傷度を共通言語化するため、評価指標と損傷度を定義した表を作成。初期の表を用いたWP参加者による試験的評価を経て改良した。今後継続的に改良されるべきもの。

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

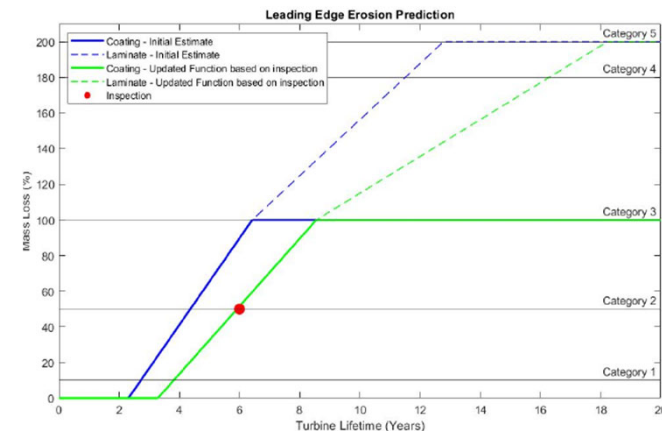
エロージョン分類システム

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

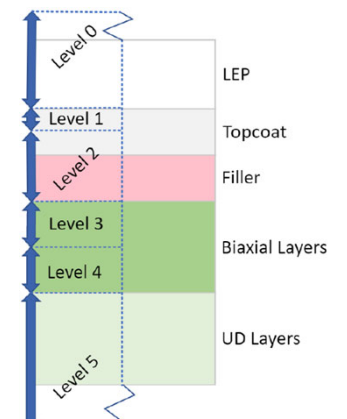
空力特性に関する損傷度の定義



目視判定損傷度の定義



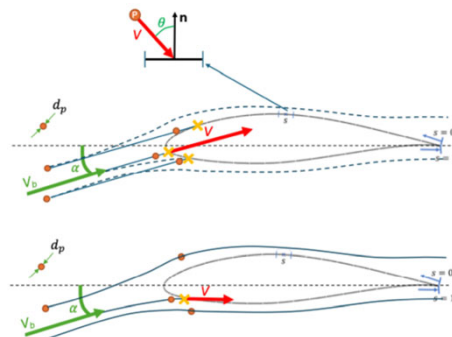
質量欠損の線形モデル



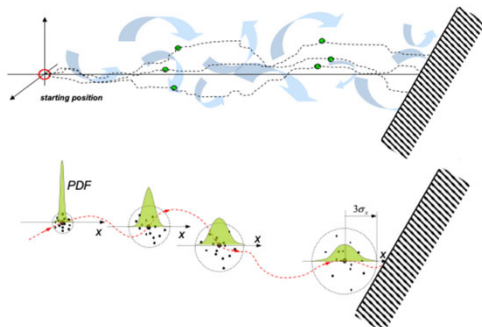
構造影響度の定義

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

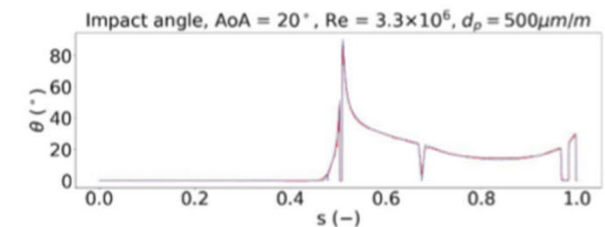
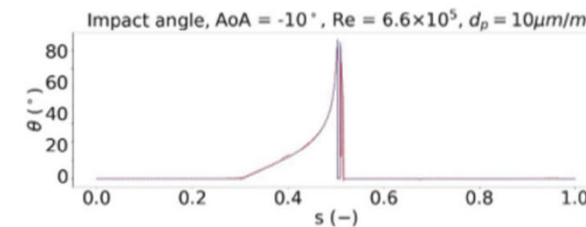
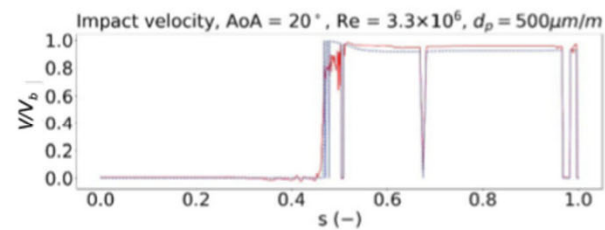
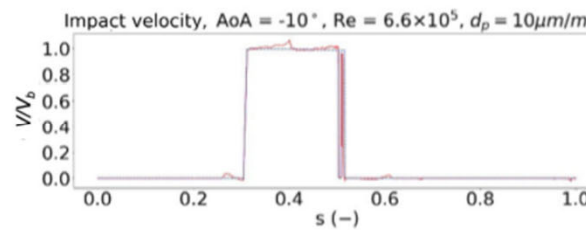
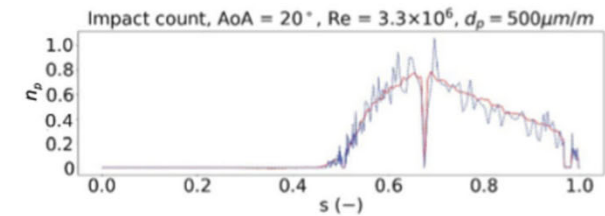
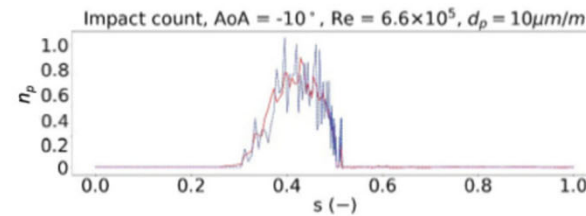
エロージョン予測モデルにおいて、ブレードの特定部分への雨滴の衝突状態(速度、角度、頻度)は重要な因子である。ブレード周り流れが粒子軌跡に及ぼす影響を考慮するためCFD(2D-RANS)結果から球形粒子への抗力を算出し軌跡に反映(Lagrangian particle tracking)させるモデルを構築。これにより予測寿命が約10%長くなる例もあり、表面形状変化にも影響する。計算コストを抑えるための機械学習ベースモデル(複数のCFD解析結果のセットで学習することで、流れ場(Re,AOA)と粒径から衝突状態を導出するモデル)を構築し、CFDと近い結果が得られることも確認した。



抗力考慮の有無による衝突状態の違い



Single particle tracking + random walkと
cloud particle tracking



2条件における雨滴衝突状態解析におけるCFDと機械学習ベースモデルの比較

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

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

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

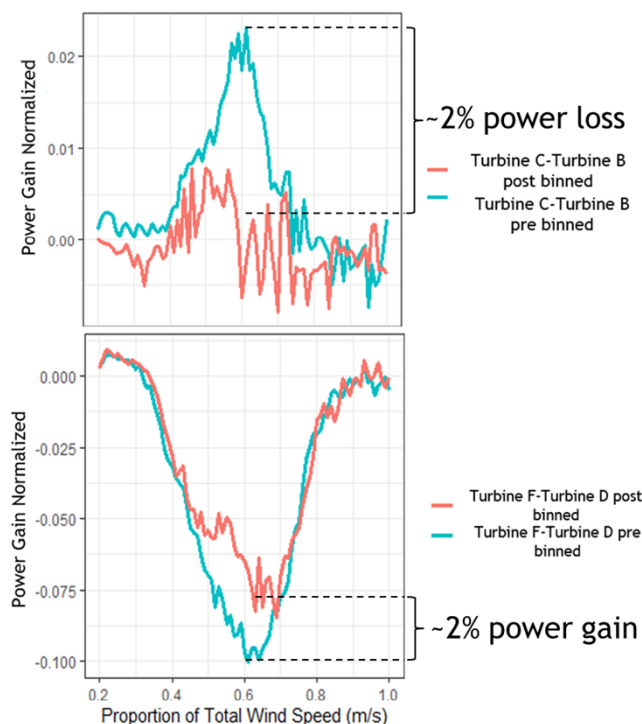
実証試験実施に必要な知見

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

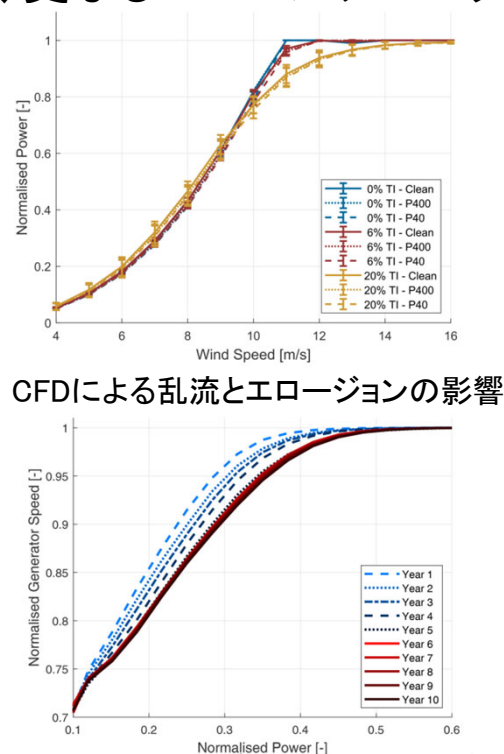
実証試験計画で考慮すべき事項

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

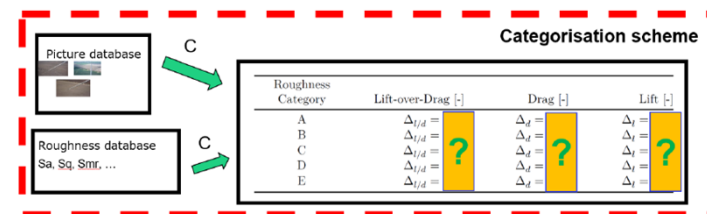
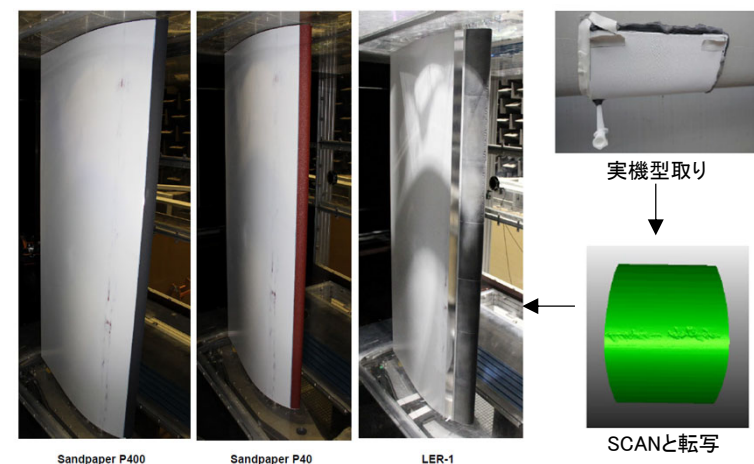
SNLの研究では、エロージョンクラス2-4で補修有無のペアx2組のSCADAデータを分析し、パワーカーブPCを比較したが、補修の影響は一方では出力増加、一方では減少しとなり、ばらつきを考慮すると最低10組の長期計測が必要と判明。DTUの研究では、CFDとBEMを用いた検討でPCにはエロージョンより乱流強度の影響のほうが大きいこと、洋上SCADAデータ分析では出カ一回転数依存性に経年変化が見られたがOEMによる制御改変の影響が疑われるなど、エロージョンの出力影響検証の難しさが浮き彫りになり、更なるCFDベンチマークやLERCat-PJ等での風洞実験が必須。



SNL実験によるパワーカーブ比較



洋上サイトでの回転数特性の経時変化

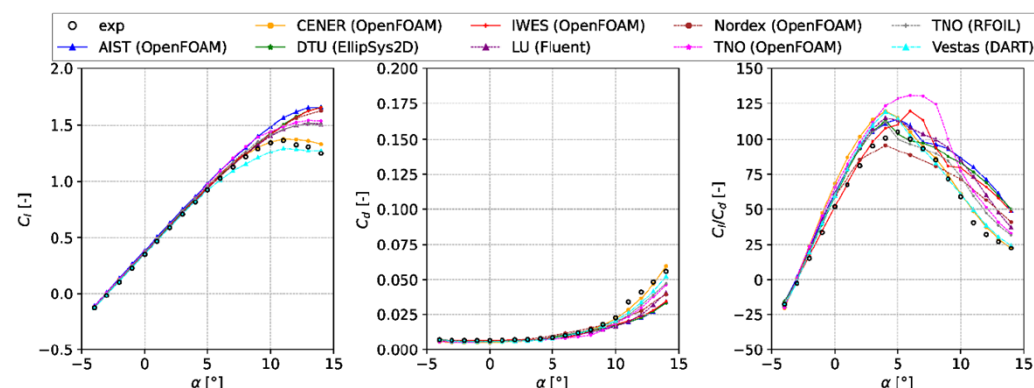


LERCatプロジェクト概要

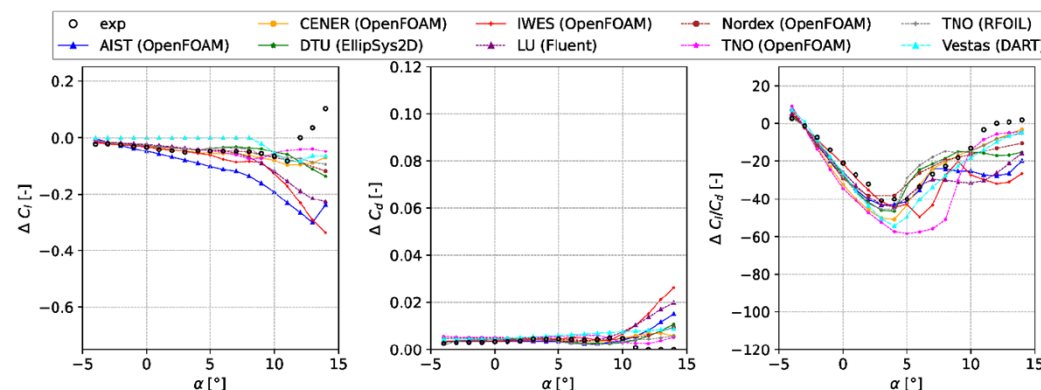
●WP3.5b Campobasso,M.S., Castorrini,A., Bretos,D., Mendez,B., Maniaci,D.C., Theron,J.N., Meyer-Forsting,A.,Sorensen,N.N., Aihara,A., Vimalakanthan,K. (2025) Validation of the Predictive Capabilities of Computational Aerodynamics Codes to Assess Eroded Blade Performance:First Aerodynamic Benchmark

風力タービンブレードの侵食による空力性能低下を予測するために産業界および学术界で使用される空力解析コードの予測能力の比較評価を行った。クリーンと初期エロージョン程度の表面粗さのNACA63₃418とS814翼型について、高精度解析(ナビエ・ストークス計算流体力学コード)と低精度解析(積分境界層方程式と遷移モデルを連成し経験的相関式で補完されたポテンシャル流コード)を複数機関で実施し、風洞実験と比較。実機で運用される低迎角範囲ではどの手法も実験と良好な一致。さらにBEMコードで得られたAEP損失値のコード格差はより小さくなった。

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



NACA63₃418クリーン翼型の空力性能についての
各解析と風洞実験値の比較



NACA63₃418翼型空力特性の粗さ影響についての
各解析と風洞実験値の比較

WP4: エロージョンの地上試験

●目的:

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

●参画機関:

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

●日本からの参加メンバー:

産総研 田中、栗飯原、藤澤

●研究項目:

WP4.1: ラボ試験で利用可能な技術調査

WP4.2: 前縁システムにおける
エロージョン損傷モードの文献調査

WP4.3: 試験用基材の規格化 (RP)

WP4.4: 試験片の事前評価 (RP)

WP4.5: 試験データの解析、
損傷蓄積とVN曲線 (RP)

WP4.6: パラメータスクリーニングのための
簡単な機械的試験に関する報告書

WP4.7: RETデータとフィールド寿命との相関
(報告書およびモデル)

WP4.8: 無負荷時および試験時の経年劣化
(文献調査およびRP)

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

実験室でのエロージョン評価試験に利用可能な技術をリストアップして概説した。

・レインエロージョン試験

・回転アーム試験

関連規格:

ASTM G73-10

DNVGL-RP-0171

・パルス噴流試験

・連続噴流試験

・風洞試験

・衝撃試験と疲労試験

・SPIFT試験

・ナノインデンテーション

・おもり落下試験

・振子式衝撃試験

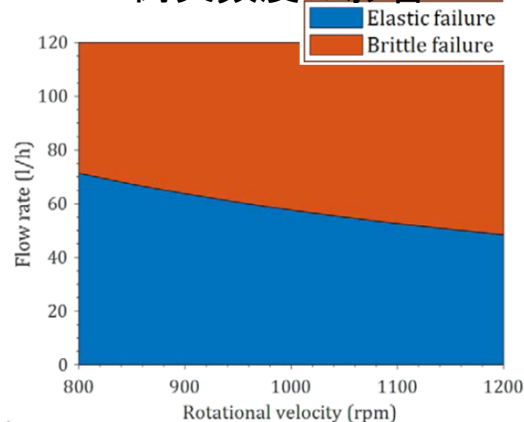
・粘弾性試験

・引張試験

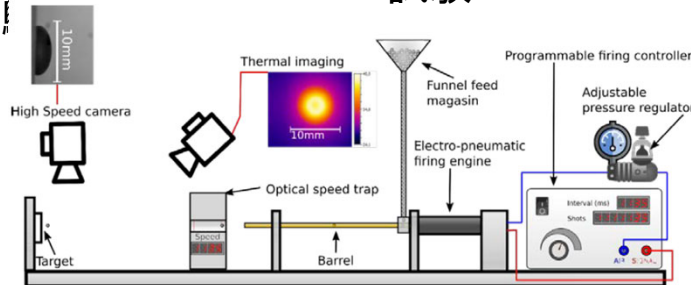
・DMTA試験

・音速試験

回転試験における
衝突頻度の影響



SPIFT試験



・層状構造の破壊試験

・引張試験

・Xカット付着性試験

・引張プルオフ試験

・ひずみ速度依存界面試験

・二重カンチレバービーム試験

・引張疲労試験

・単体衝撃試験

・微細構造特性評価と非破壊検査

・顕微鏡とAFM

・光沢と目視検査

・分光分析

・顕微鏡断面観察

・X線CT

・顕微鏡発光観察

・SEMとEDX

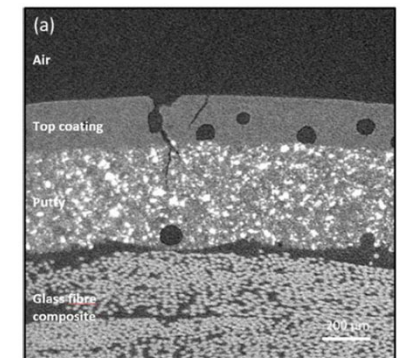
・NMR

・超音波Cスキャン

・テラヘルツ波スキャン

・光コヒーレンス・トモグラフィーOCT

エロージョンブレードの
X線CT画像

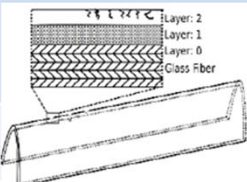
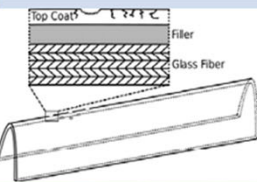
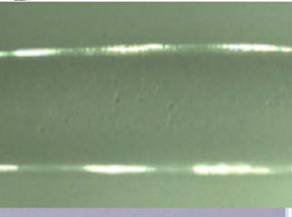
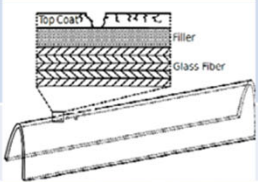
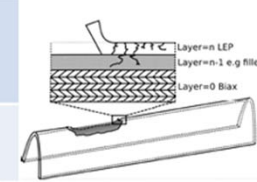
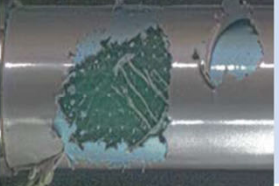
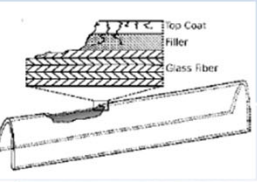
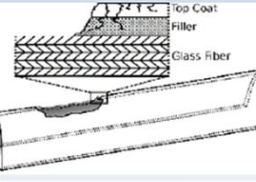
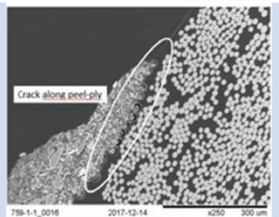
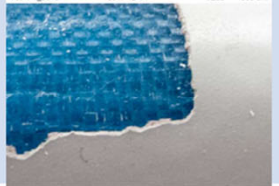
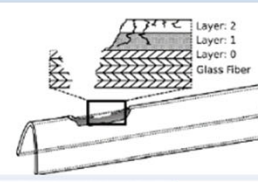
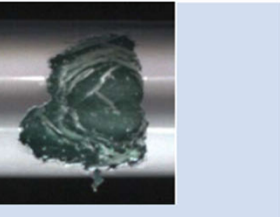
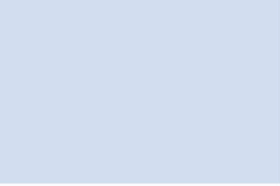


ブレードの
テラヘルツスキャン検査



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

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

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

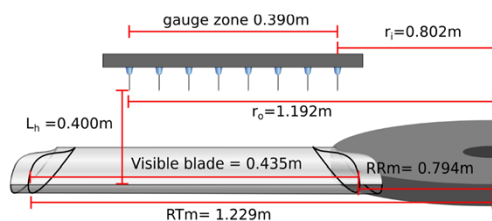
●WP4.3 Simon, J. E. and Johansen, N. F.-J. (2024) Rain erosion test data analysis, damage accumulation and VN curves.

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

■コードの構成



■インピンジメントの導出



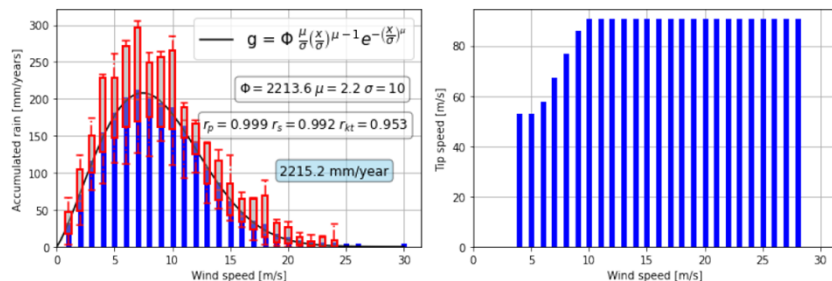
$$Y_H = \frac{F\omega t}{2\pi(r_0^2 - r_i^2) \cdot v_d}$$

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

■損傷累積計算における選択肢

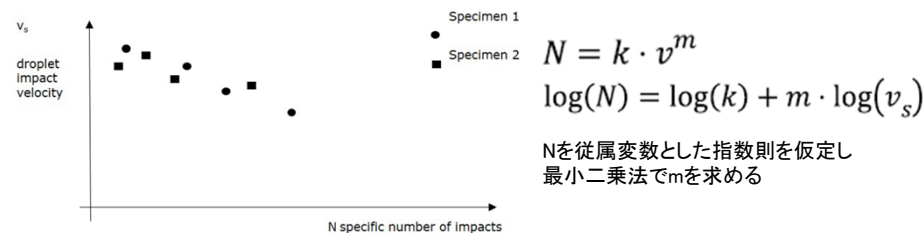
マイナー則(線形累積損傷則)による損傷度積算では以下を選択可。

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

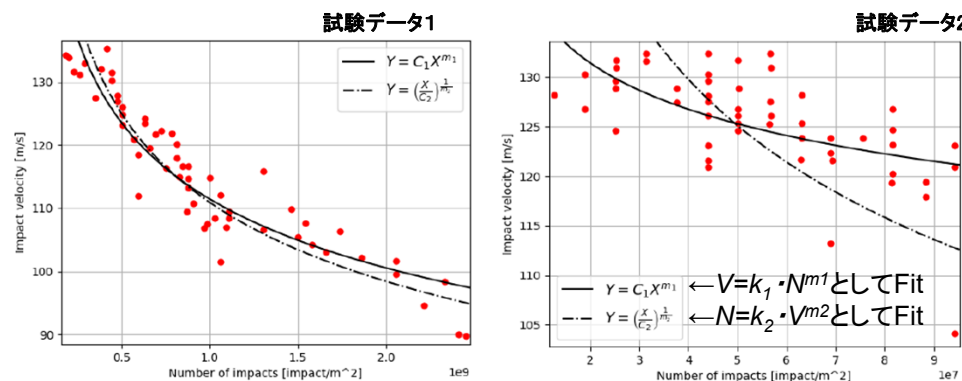


■フィッティングにおける選択肢

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



DNV-RP-0171におけるRET結果からのVN曲線の求め方



従属変数の取り方によるフィッティングの差

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

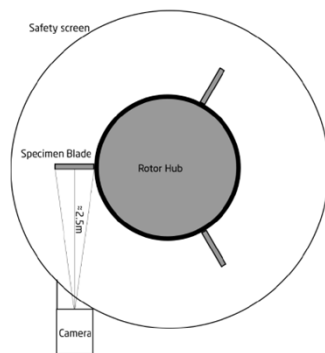
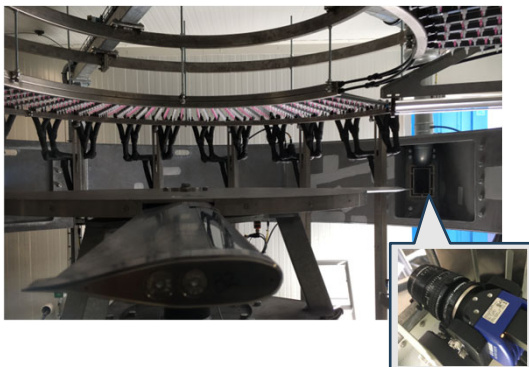
RET(エロージョン試験)において、エロージョン耐久性に影響を与える因子の一つである、試料上の初期欠陥を評価する検査手法の検討

■RETに適用できる可能性のある検査手法

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

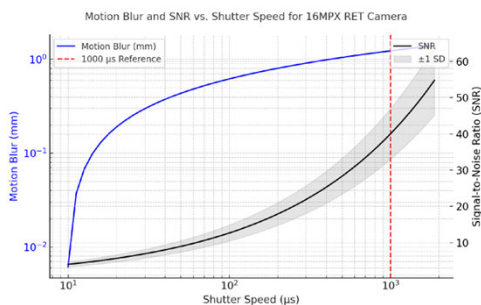
■レベル1: RETインラインカメラによる検査の課題

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

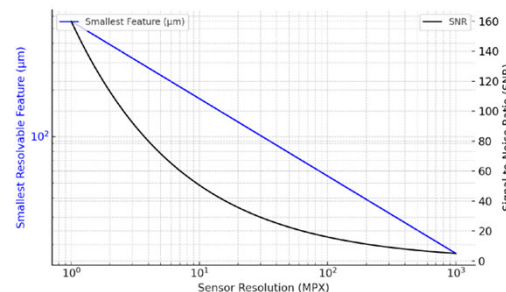


・課題2: モーションブラー、センサ解像度とSNR

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



露光時間とブレ及びSNRの関係



解像度と検出限界及びSNRの関係

■レベル4: 超音波検査の検討

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

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

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

■初生の定義

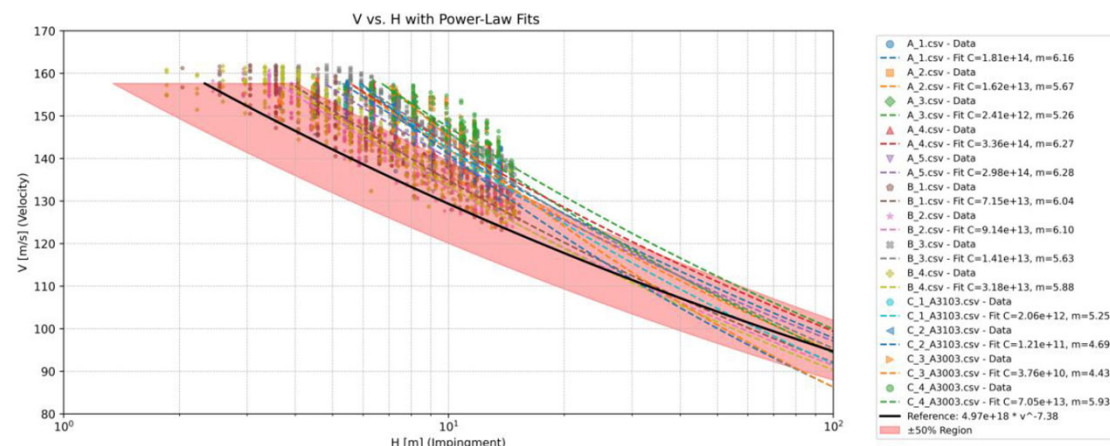
・初生判定はDTUが実施。試料表面に発生した独立したピットを初生と定義。



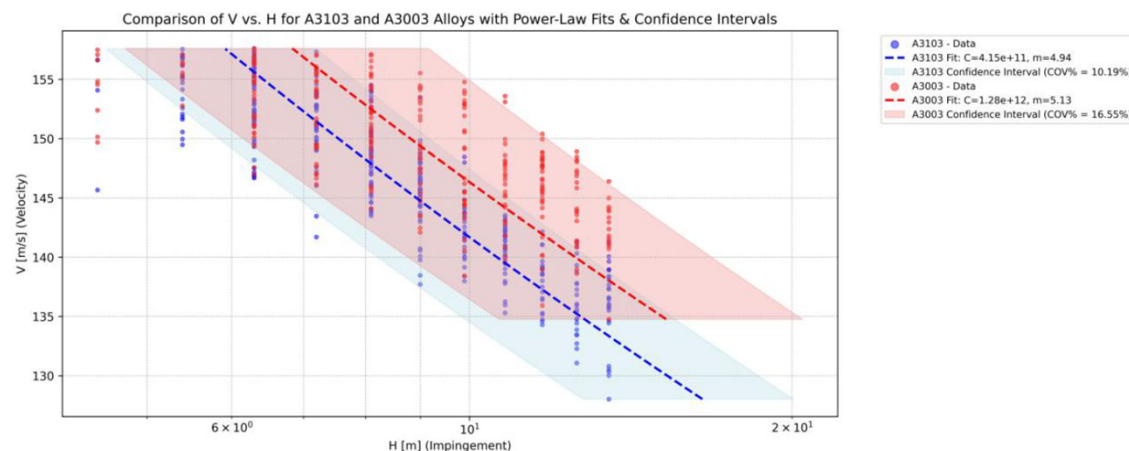
■試験条件と試験結果

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

Tester	Run	Material	C	m	Droplet size [mm]	Fall velocity [m/s]	Flow rate
Reference	Mean	3003	4.970985e+18	7.379	Assumed 2.4mm	Assumed 2.3m/s from DNV-GL RP 0171	60
	-50%		8.61e18	7.379			
	+50%		2.87e18	7.379			
A	1	3103	2.765471e+16	6.157855	2.32	2.35	60
	2		2.459115e+15	5.670409			
	3		3.667908e+14	5.256987			
	4		5.127435e+16	6.270723			
	5		4.548809e+16	6.27726			
B	1	3103	1.249092e+16	6.035431	2.221	2.333	65
	2		1.482544e+16	6.0999	2.276	2.428	
	3		2.739779e+15	5.632329	2.142	2.397	
	4		5.003032e+15	5.881307	2.298	2.4	
C	1	3103	3.232152e+14	5.254263	2.3	2.35	60
	2		1.901051e+13	4.691523			
	3	3003	5.902273e+12	4.429618			
	4		1.106065e+16	5.925293			



全試験結果とDNV-RP-0171記載の試験結果の比較



A3003とA3103の試験結果の比較

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

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

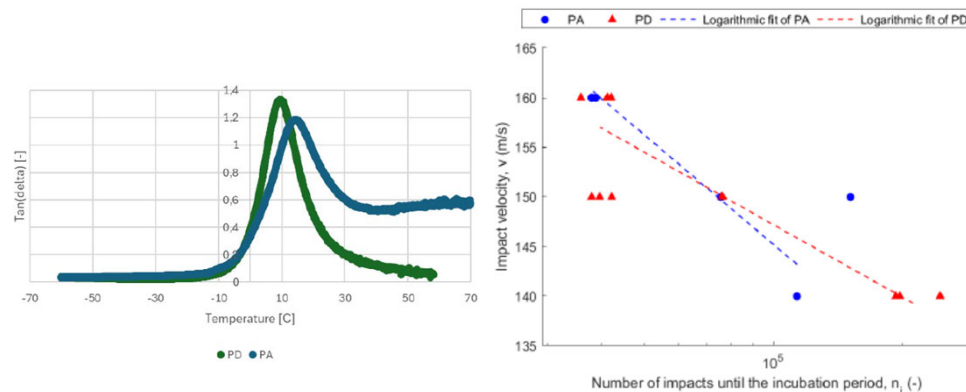
■DMTA(DMA)試験

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

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

■パルスジェットエロージョン試験とDMTA

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

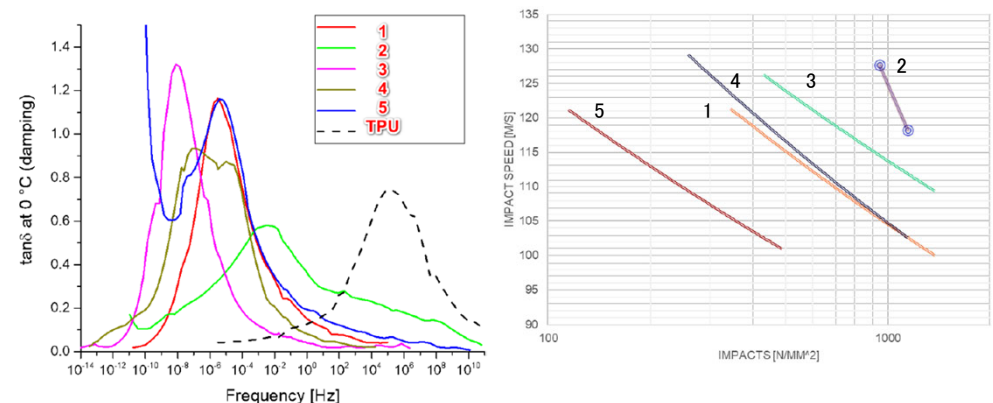


DMTA試験結果

パルスジェット試験結果

■回転式RET試験とDMTA

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



DMTA試験結果

回転式エロージョン試験結果

WP5: エロージョン力学と材料特性

● 目的:

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

● 参画機関:

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

● 日本からの参加メンバー:

東京ガス(株) 西田
(株)朝日ラバー 渡辺、峰岸
産総研 田中

● 研究項目:

WP5.1:

基礎的材料特性に基づく損傷モデル

WP5.2:

多層システム

WP5.3:

微細構造と巨視的材料特性

→「モデル妥当性検証のための試験データ収集」

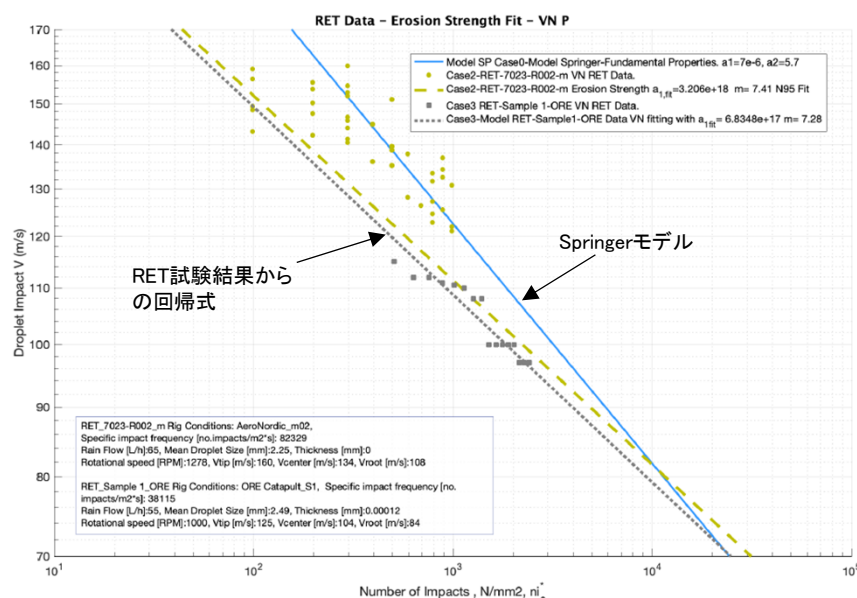
●WP5.1 Sánchez, F. and Hao, H. (Eds.) (2025) Review and assessment and review of erosion damage models based on fundamental material properties and DNV-GL-RP0573

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

■Springerモデル

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

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

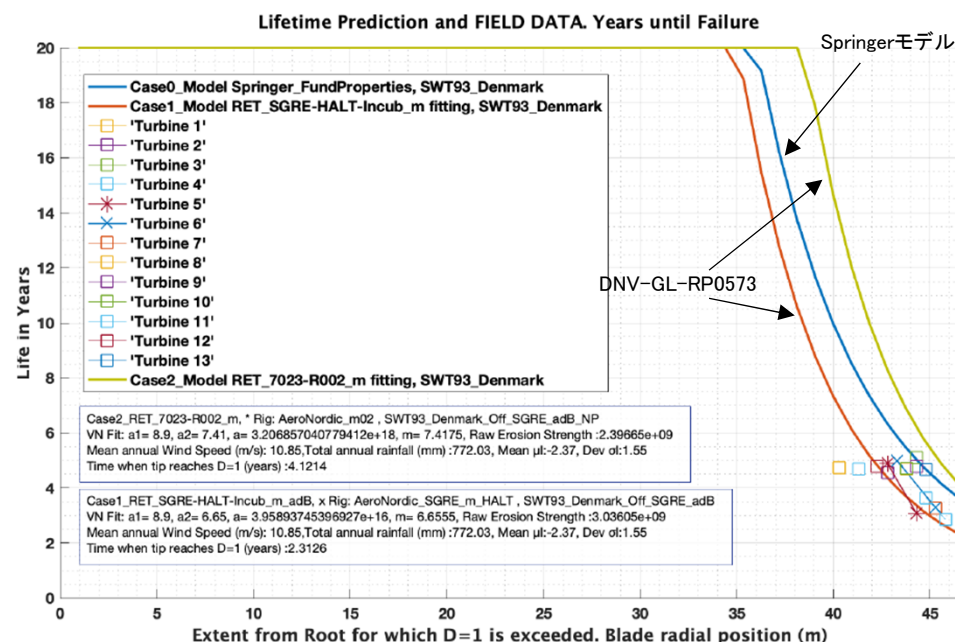


3M W4600塗料に対するVNカーブ

■DNV-GL-RP0573モデル

SpringerはPをウォータハンマー $\propto V$ (速度)としたため材料によらず $N_i \propto V^{-5.7}$

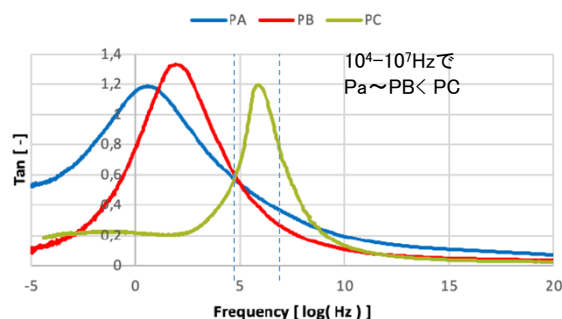
となってしまう。この乗数-5.7を、RET試験に合うよう補正する。



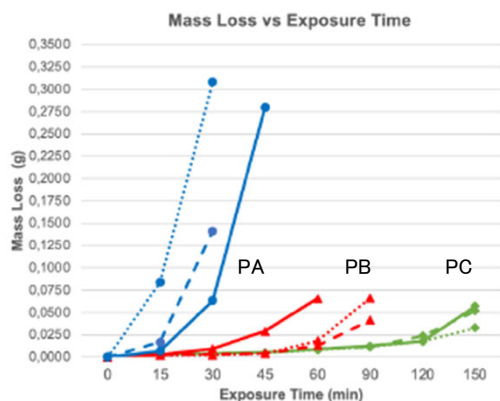
デンマーク洋上サイトのエロージョンと各モデルによる予測

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

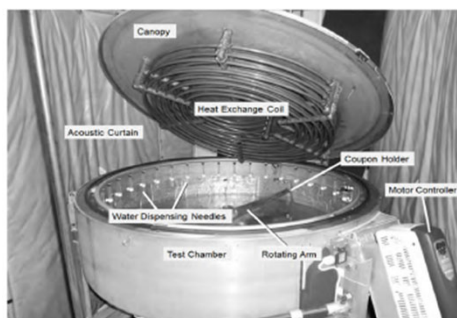
3種類のエロージョン試験装置で複数材料の耐久試験を実施し、DMAによる粘弾特性と比較した。異なるエロージョン試験装置でも、同様の破壊モードと耐久性優劣が得られた。高速衝撃域 (10^4 – 10^7 Hz) において $\tan \delta$ が高い材料が最もエロージョン耐久性に優れていた。



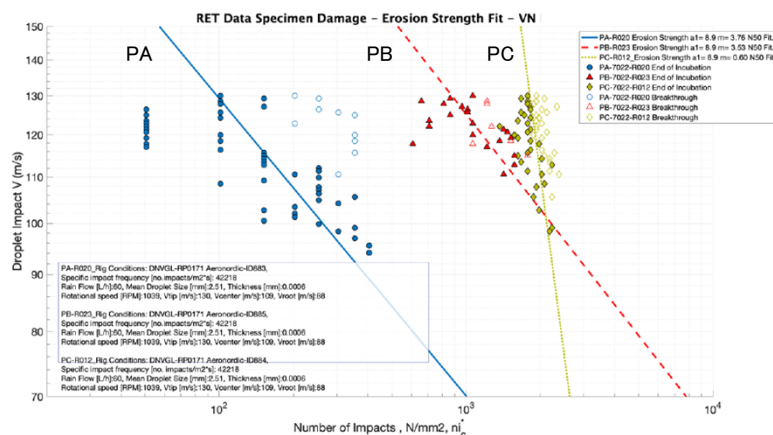
DMAマスターカーブ



WARER試験での質量欠損の時間変化



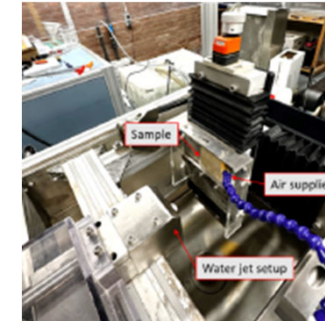
WARER試験



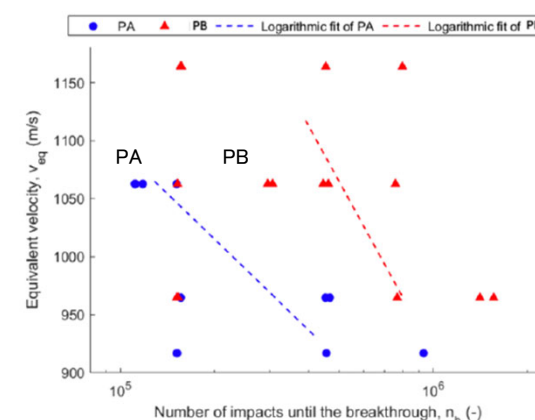
R&D RET試験でのVNカーブ



R&D RET試験



パルスジェット試験



パルスジェット試験でのVNカーブ

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

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

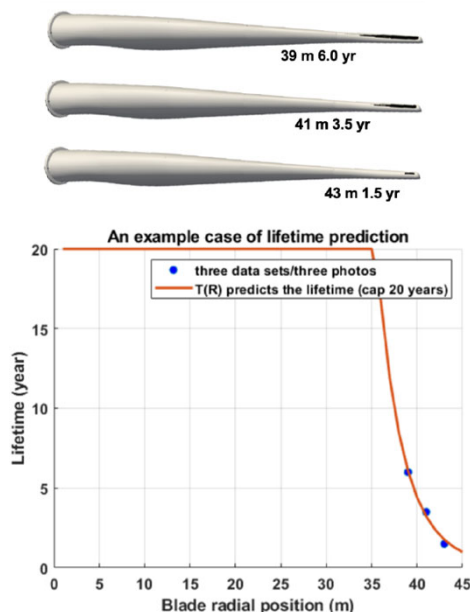
・SpringerモデルとDNVGL-RP-0571から、降水量と回転数(風速の関数)が独立という仮定において、半径位置Rにおけるエロージョン寿命LTは右の式で表せる。

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

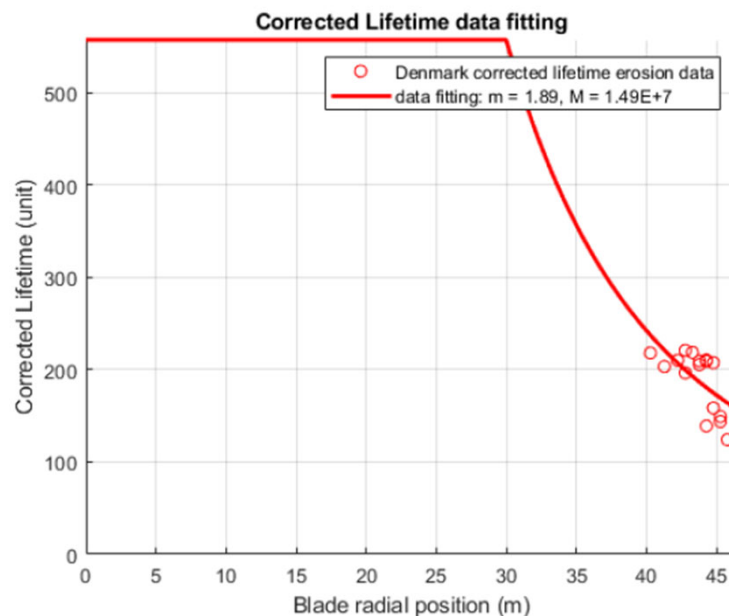
$$A = \frac{8.9 M^m (\cos(\alpha))^{-m-1}}{C_r T_{year} C_\omega(m)} \quad B = -m - 1$$

材料因子
降水量因子
365*24*60*60
回転数因子

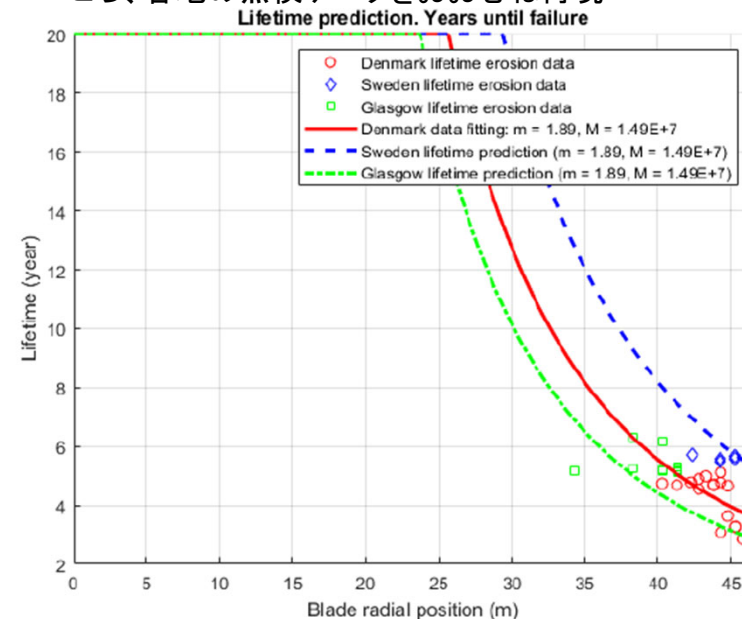
・点検で初生が3点とれば m, M, LT0 を決定することができる



・デンマーク洋上の点検データから BTOOL で m, M を求めた



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



Task46 (Phase2)概要

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

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

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

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



・日本から提案のサブタスク

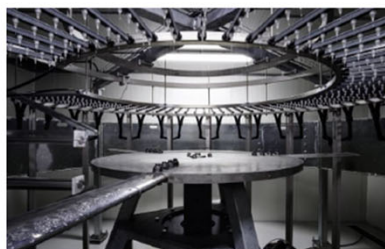
4.6-4.8 Erosion from material science perspective



IEA Wind TCP

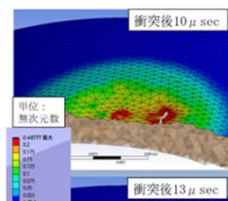
The discussion will also include the materials science perspectives necessary to achieve this objective. One of the objectives of this work package is to accumulate knowledge on the relationship between fatigue properties and material properties, various factors affecting them, and testing methods for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

4.6 Bridging the gap between several durability testing and material properties



- focusing on erosion initiation
- understand the difference among testing

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



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

4.8 Material failure in the real blade erosion



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

・日本から提案のローカルミーティング

Extra optional WP4 meting in Japan Sep 26.



IEA Wind TCP

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

