

第1回 IEA Wind セミナー
2024年2月28日

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
風力エネルギーチーム
田中 元史

0. エロージョンとは

出典: <https://iea-wind.org/task46/>



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

1. 背景

●洋上での大規模エロージョン事例



出典: <https://renews.biz/110279/anholt-grapples-with-blade-fix/>

●エロージョンのコスト影響

- ・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

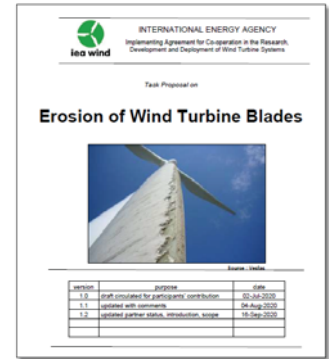
- ・洋上での高周速化や高雨量地域への市場移行でリスクが顕在化
- ・各国での大規模研究開発を経て国際連携の機運が高まりTask立ち上げ

●国際シンポジウム

International Symposium on Leading Edge Erosion of Wind Turbine Blades

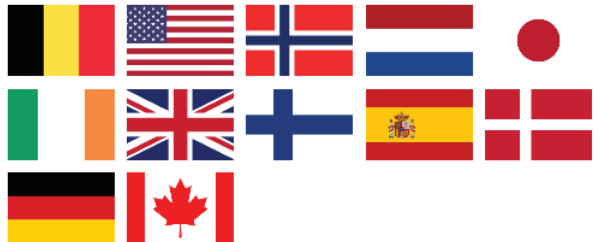
- 1st : 2020/2/3-6 @DTU
- 2nd : 2021/2/2-4 @DTU

●IEA Wind Task11:TEM#98 (2020/2/6-7)



IEA Wind Task 46 Erosion of WT Blades 提案書

2. Task概要



- ・名称: 風車ブレードのエロージョン
- ・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。

WP2:
エロージョン要因
となる気象因子

Climatic conditions
driving erosion (wp2)

Sara C. Pryor (Cornell
University) & Marijn
Veraart (Ørsted)

WP3:
エロージョンと
風車オペレーション

Wind turbine
operations with
erosion (wp3)

David C. Maniaci
(Sandia National
Laboratory)

WP4:
エロージョンの
地上試験

Laboratory testing of
erosion (wp4)

Jakob I. Bech (DTU) &
Maral Rahimi (Hempel)

WP5:
エロージョンの
力学と材料特性

Erosion mechanics &
material properties
(wp5)

Fernando Sánchez
López (Univ. Cardenal
Herrera CEU) & Bodil
Holst (Univ. Bergen)

WP1: マネジメント Management (wp1) - Raul Prieto (VTT) & Charlotte Hasager (DTU)

・参画機関
(2023年10月)

Country	Contracting Party	Task Participant
Belgium	Belgian Ministry of Economy	Engie
Canada	Natural Resources Canada	WEICan
Denmark	Danish Energy Agency	DTU
		Hempel
		Ørsted A/S
Finland	Business Finland	VTT
Germany	Federal Ministry for Economic Affairs and Energy	Covestro
		RWE
		DNV
		Emil Frei
		Fraunhofer IWES
		Nordex Energy
Ireland	Sustainable Energy Authority of Ireland	Mankiewicz
		IT Carlow
		NUI Galway
Japan	New Energy and Industrial Technology Development Organization	University of Limerick
		AIST
		Asahi Rubber Inc.
		Osaka University
		Tokyo Gas Co.
Netherlands	RVO	Eneco
		Suzlon
		TU Delft
		TNO
Norway	NVE	Equinor
		University of Bergen
Spain	CIEMAT	Aerox
		CENER
		Nordex Energy Spain
		Siemens Gamesa Renewable Energy
United Kingdom	ORE Catapult	Universidad Cardenal Herrera – CEU
		Lancaster University
		ORE Catapult
		Imperial College London
		University of Bristol
		ILOSTA
US	US DoE	Vestas
		Cornell University
		Sandia National Laboratories
		3M

- ・プレナリ会議
2021年 3/15, 9/15, 2022年 2/2, 9/22
2023年 9/21
- ・ワークショップ
2023年 2/10, 2024年 2/9
- ・ウェビナー
2022年 5/31, 2023年 12/4
- ・報告書



TEM#98@DTU



第4回プレナリ会議@Orsted

- WP2: Atmospheric drivers of wind turbine blade leading edge erosion:Hydrometeors.
- WP3: Leading Edge Erosion Classification System
- WP4: Review on available technologies for laboratory erosion testing
- WP4: Erosion failure modes in leading-edge systems



ワークショップ@DTU



第5回プレナリ会議@CEU

3. 1. 活動内容 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

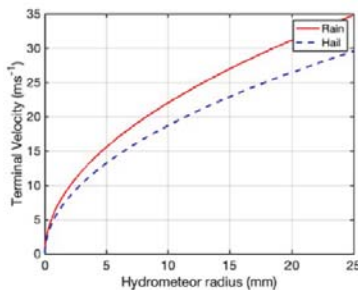
●技術レポート

Atmospheric drivers of wind turbine blade leading edge erosion: Hydrometeors

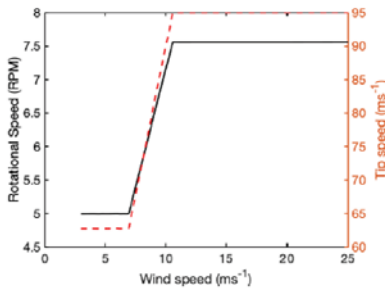
https://usercontent.one/wp/iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/08/IEA_Wind_Task_46_WP2_Deliverable1_5Nov2021_approved.pdf

・エロージョンに影響する気象因子

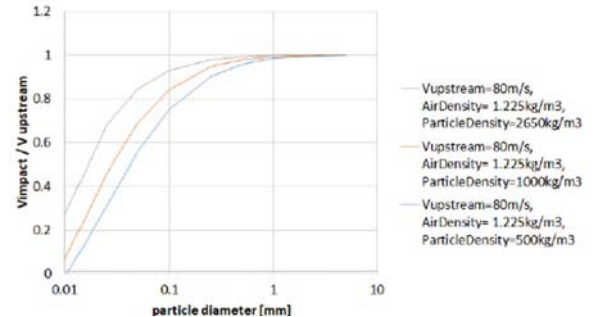
落下速度



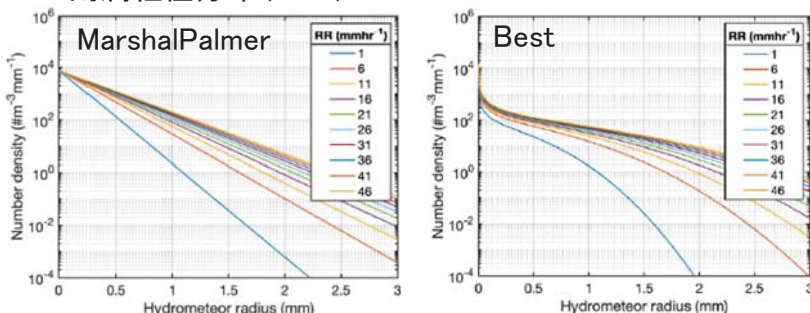
ブレード回転速度



LEでの空力的減速



雨滴粒径分布 (DSD)



粒子種類

雨、霧雨、霰、雪、霧雪
雹、霰、凍雨、着氷性の雨、細氷

・計測／解析手法

○現場での測定

転倒ます式雨量計 ディストロメータ



○リモートセンシング

- ・単偏波走査型レーダ
- ・二重偏波レーダ
- ・マイクロレインレーダ(MRR)

○その他

- ・衛星観測(GPV等)
- ・再解析(ERA5等)
- ・数値気象予報(NWP)モデル

・利用可能なデータ(メタデータ有)

○ベルゲン大学(ノルウェー)

- ・MRR
- ・OTT-Parsivel

○WEICan(カナダ)

- ・Campbell PWS100

○DoE ARM(アメリカ)

- ・放射計
- ・RADARS
- ・ライダー
- ・ディストロメータ

○DiVen、NOAH、Levenmouth(イギリス)

- ・Theis LPM
- ・Campbell PWS100

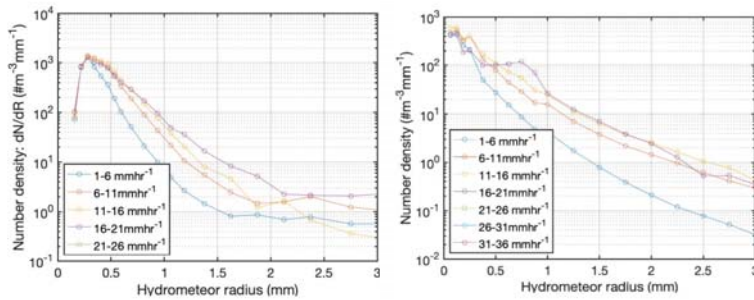
○DTU(デンマーク)

- ・OTT-Parsivel2

○Orstedサイト(Hoirns Rev2、台湾、米国)

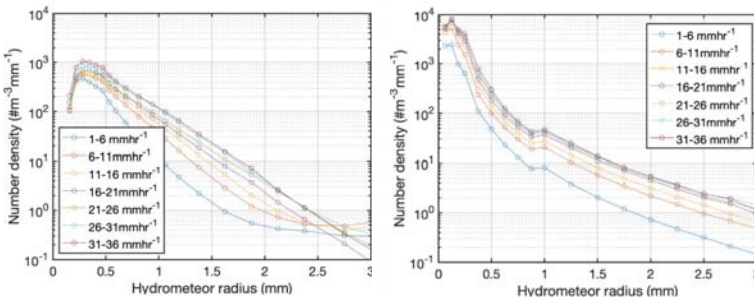
- ・OTT-Parsivel2

・雨滴粒径分布の地域間比較:



Rosekilde, Denmark

Weybourne, England



Lamont, USA

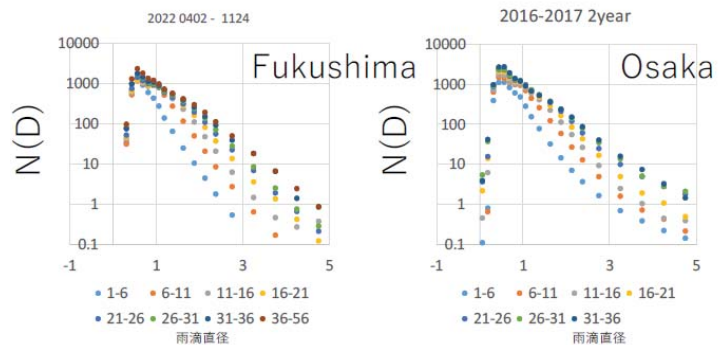
Cairngorm, Scotland

●日本の参画内容(福島県補助事業)

・FREAと阪大における降雨計測



Site	Annual Precipitation (mm)
DNVGL-RP-0573	1000
Seattle	890
Washington Pacific Coast	2670
Miami	1300
Hilo, Hawaii	3160
NOAH	566
Levenmouth	625
Koriyama	1751



- ・地域間に差あり
- ・イベント間、季節間でも差が見られた。

- ・日本での降雨計測データを提供し
アジア地域での対策につき問題提起

3. 2. 活動内容 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、粟飯原あや、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

●技術レポート

Leading Edge Erosion Classification System

<https://usercontent.one/wp/iea-wind.org/wp-content/uploads/2023/02/IEA-Wind-Task-46-Erosion-Classification-System-report.pdf>

・エロージョンダメージ分類の現状調査

DNV-RP-0573における評価項目

Result Parameter	Unit	Nominal Condition
Mass Loss	[grams]	Optional
Failure Modes	[-]	Optional
Stages of Erosion Progress	[-]	Reference point in time
End of Incubation Period [*]	[min]	document time of initial surface damage for each location
Breakthrough [†]	[min]	document time of breakthrough for each location

Gaudernらによるパターン分類

Erosion Description	Erosion Depth [mm]	Average Feature Diameter [mm]	Approximate chord coverage	Erosion Pattern
Small pinholes of missing paint distributed across LE with some grouping.	0.1-0.2	2	3%	
Pinholes have coalesced into larger eroded patches.	0.1-0.2	15	3%	
Affected area has increased, with isolated larger patches with a greater depth.	0.3-0.5	20/40	5%	
Patches have coalesced farther, and depth has increased.	0.5-0.8	40	5%	
Large areas of LE laminate exposed.	0.8-1.2	>500	8%	

Sareenらによるステージ分類

Stages	Type A Pits (P)	Type B Pits & Gouges (G)	Type C Pits, Gouges & Delamination
Stage 1	100P (1)	-	-
Stage 2	200P (2)	200P/100G (4)	-
Stage 3	400P (3)	400P/200G (5)	400P/200G/DL (7)
Stage 4 [†]	-	800P/400G (6)	800P/400G/DL+ (8)
Stage 5 [‡]	-	-	1600P/800G/DL++ (9)

Maniaciらによる分類

Damage category	Airfoil Maximum lift coefficient	Airfoil Lift/Drag ratio	Modeled AEP loss of rotor at 6 m/s mean wind speed (%)
0	1.54 (0%)	114 (0%)	0
1	1.46 (-5%)	91 (-20%)	(not modeled)
2	1.39 (-10%)	75 (-34%)	0.9
3	1.34 (-15%)	63 (-45%)	1.6
4	1.29 (-16%)	53 (-53%)	2.6

・新しい分類表の項目決定のためのワークショップ

- ・“損傷具合—深刻度(0~5)の対応表”をつくるために、実際のエロージョン写真を使って、クラス分けのテスト
- ・評価者によるばらつきが大きいものについては、評価基準見直しの議論を実施

Image	Organisation Type	Evaluation Criteria								Median	Variance	Image		
		RTO	Owner/Operator	University	Turbine OEM	University	RTO	University	RTO				Owner/Operator	Turbine OEM
Image 1	Visual data definition	2	1		2	0	2.5	2	2	3	2	0.85		
	Mass-loss or Depth	1	1		2	2	1		1	4	1	1.47		
	Aerodynamics/Performance	2	1	5	2.5	2	2		2	1	3	1.44		
	Structural	1	1		0	2.5	2	2	3		2	1.06		
Image 2	Visual data definition	4	4		4	3	4	5	4	4	5	0.36		
	Mass-loss or Depth	4	4		3	3		3	3	5	3.5	0.67		
	Aerodynamics/Performance	4	4	5	4.5	3	3.5		4	3	5	0.56		
	Structural	4	3		0	4		3	4	5		4		2.57
Image 3	Visual data definition	1	2		2	1	2		2	1	2	0.27		
	Mass-loss or Depth	1	1		0	1		1	1	1	1	0.17		
	Aerodynamics/Performance	1	1		2	1	2		2	1	3	1.5		0.55
	Structural	2	1		0	2		3	1	2		2		0.95
Image 4-Part 1	Visual data definition	3	1		2	1	2	1	2	1	2	0.50		
	Mass-loss or Depth	2	1		1	1		1	1	4	1	1.47		
	Aerodynamics/Performance	3	1	3	2	1	1.5		2	1	2	2		0.63
	Structural	2	1		0	2		3	2	3		2		1.14
Image 4-Part 2	Visual data definition	2	2		1	1	2.5	1	2	1	1	0.38		
	Mass-loss or Depth	1	2		1	1.5		1	1	1	1	0.18		
	Aerodynamics/Performance	2	1	2	1	1	1.5		2	1	2	1.5		0.25
	Structural	2	1		0	2		3	2	1		2		0.95
Image 5	Visual data definition	1	1		1	0	0.5	2	1	0	1	0.42		
	Mass-loss or Depth	1	1		0	0		1	1	1	1	0.27		
	Aerodynamics/Performance	2	1	2	2.5	2	1		1	2	2	2		0.32
	Structural	1	1		0	1		1	1	0		1		0.27
Image 6	Visual data definition	1	1		1	1	1.5	1	1	1	1	0.03		
	Mass-loss or Depth	1	1		1	1		1	1	1	1	0.00		
	Aerodynamics/Performance	1	1		1	1	1		1	1	0	1		0.13
	Structural	2	1		0	2		2	1	1		1		0.57
Image 7	Visual data definition	2	1		1.5	0	1	1	1	1	3	0.69		
	Mass-loss or Depth	1	1		1	0		1	1	2	1	0.40		
	Aerodynamics/Performance	2	1		3	2	1		2	2	4	2		0.98
	Structural	1	1		0	1		2	1	1		1		0.33

・提案されたエロージョン分類システム

- ・Visual Condition(見た目)、Mass loss(質量損失)、Aerodynamic Performance(空力性能)、Blade Integrity(完全性)の観点での分類。LEPも考慮。
- ・総合評価を出すことが目的ではない。観点毎に評価して、個別の状況を分析することを意図している。

Evaluation Criteria	Severity Level					
	0	1	2	3	4	5
Visual Condition (LEP)	Initial factory condition	Lightly worn external coating/LEP	Notable areas of localized damage on external coating/LEP	LEP is largely compromised over a large area and no longer providing protection to underlying layers	Delamination of topcoat with immediate layer underneath clearly visible and exposed	Notable damage to substrate
Visual Condition (No LEP)		Erosion barely visible or pinholes	Localized pitting	Widespread or coherent pits, some gouges		
Mass-loss		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
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
		Region 2 Power loss 0-1%	1%-2%	2%-3%	3-4%	>4%

●日本の参画内容(福島県補助事業)

・AeroBenchmarkへの参画

最終目標: エロージョン損傷による風車AEPロスを予測できる空力モデルの確立

参画機関: SNL, GENER, DTU, Nordex, LU, Vestas, 産総研

2023年度実施内容:

- ・エロージョン損傷を模擬した表面粗さのある2次元のCFD解析を実施中
- ・Texas A&M Universityの風洞試験データとの比較
- ・揚力、抗力、表面圧力分布、遷移位置
- ・これまでに結果の突き合わせを2回実施し、乱流強度、表面粗さなど計算に使用する適切な値の検討を行っている。
- ・来年2月のエロージョンシンポジウムでGENERが結果を発表する予定

2024年度計画:

- ・DTUが実施中の、実際のエロージョンパターンを再現した翼型での風洞試験(LerCat project)のデータを用いCFD解析のブラインドテストを行う

解析条件

- ・レイノルズ数: 3.2×10^6
- ・翼型: S814とNACA63-418の2種類
- ・前縁での表面粗さ: 100~200um(翼の上面2%、下面13%の領域に粗さがあると想定)

空力ベンチマークへの参画により、エロージョンのAEP影響評価技術の向上をはかる

3. 3. 活動内容 WP4: エロージョンの地上試験

●目的:

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

●参画機関:

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

●日本からの参加メンバ:

産総研 藤澤延行、田中

●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)

●技術レポート

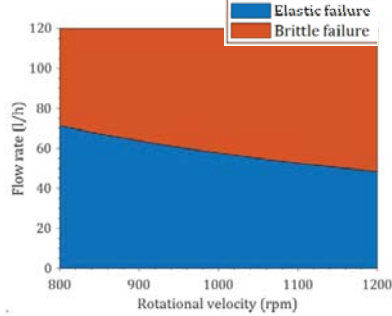
technologies for laboratory erosion testing

<https://usercontent.one/wp/iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/12/IEA-WT46-WP4.1-report-Review-on-available-technologies-for-laboratory-erosion-testing.pdf>

・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

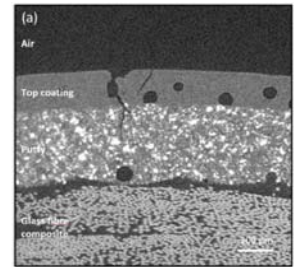
回転試験における
衝突頻度の影響



・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

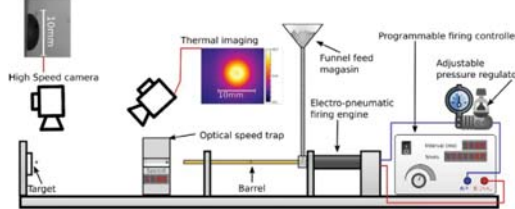
エロージョンブレードの
X線CT画像



・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

SPIFT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

ブレードの
テラヘルツスキャン検査



・粘弾性試験

- ・引張試験
- ・DMTA試験
- ・音速試験

●技術レポート

Erosion failure modes in leading-edge systems

<https://usercontent.one/wp/iea-wind.org/wp-content/uploads/2023/06/IEA-WT46-WP4.2-Erosion-failure-modes-in-leading-edge-systems.pdf>

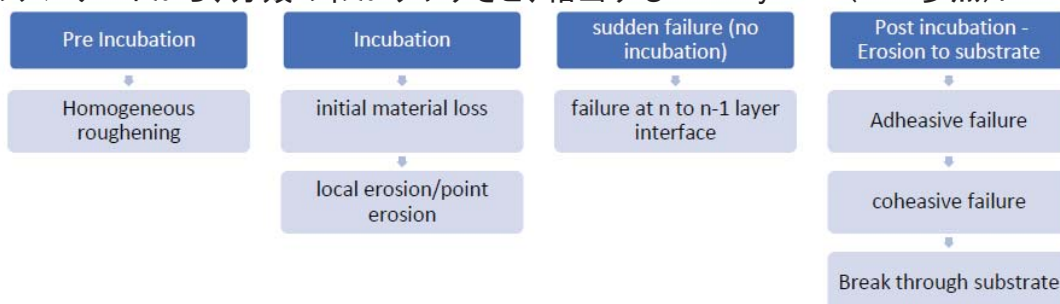
・RET(エロージョン試験装置)での浸食を目視で評価する共通指標の創出が目的

1. 初生評価の方法の例

- ・DNV-RP-0171: 液滴衝突速度Vと、損傷発生(初生)時の衝撃回数NをプロットしたV-N曲線で耐久性評価
- ・WP4参加者の経験では、初生の判定は以下のように行われている。
 - ・0.1-4mm²の損傷を目視特定
 - ・1mmより薄い塗膜の場合は異なる色の層が見えたところ
 - ・1mmより厚い厚いシェル等は0.1-4mm²の同じ大きさの穴を使うが色が似ていると目視検出は難しい。
 - ・判定した損傷の間隔は最低2dあいているもの、つながっていないものを選ぶ。

2. RETで発生する損傷形態の例

- ・RETで発生する損傷形態を分類し、イラストと写真を添えて一覧を作成した。
- ・参加者へのアンケートから、分類のわかりやすさと、相当するseverity level(WP3参照)についても数値化。

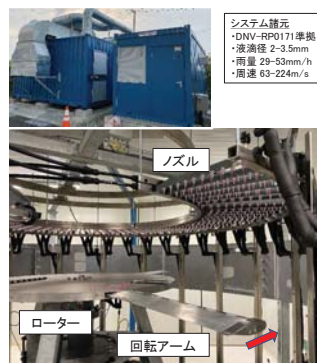
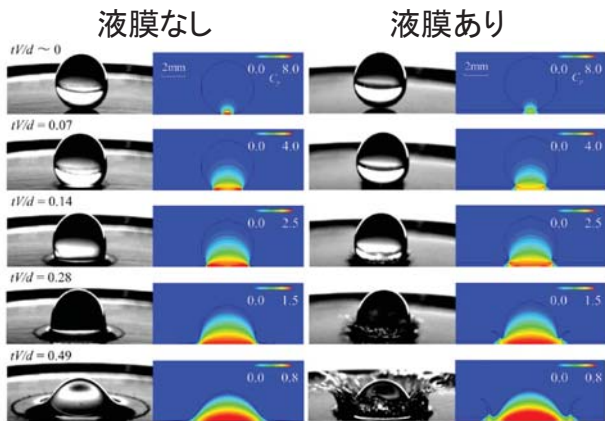


Pre incubation - Homogeneous roughening	End of Incubation - Initial material removal	Incubation - Point erosion	Failure before incubation - failure at n to n-1 layer interface	Breakthrough to substrate - cohesive failure	Breakthrough to substrate - adhesive failure	Breakthrough of substrate
<ul style="list-style-type: none"> 欠損がなく、微細クラックでマットに見える状態。 金属では光沢の変化、塗料では微細クラックが見える。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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度の縞模様が見える。 	<ul style="list-style-type: none"> 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、放射状に進展する傾向がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。
<ul style="list-style-type: none"> わかりやすさ 3.79±1.47 エロージョンレベル 1.74±1.34 	<ul style="list-style-type: none"> わかりやすさ 3.79±1.60 エロージョンレベル 1.58±1.48 	<ul style="list-style-type: none"> わかりやすさ 3.74±1.39 エロージョンレベル 1.79±1.37 	<ul style="list-style-type: none"> わかりやすさ 4.00±1.15 エロージョンレベル 3.10±1.10 	<ul style="list-style-type: none"> わかりやすさ 4.61±0.71 エロージョンレベル 4.00±0.77 	<ul style="list-style-type: none"> わかりやすさ 4.21±0.95 エロージョンレベル 4.11±0.83 	<ul style="list-style-type: none"> わかりやすさ 4.68±0.56 エロージョンレベル 4.89±0.32

●日本の参画方法の検討(福島県補助事業、NEDO新革新事業)

・低速液滴衝撃の観察と数値解析

・回転式エロージョン試験装置の導入



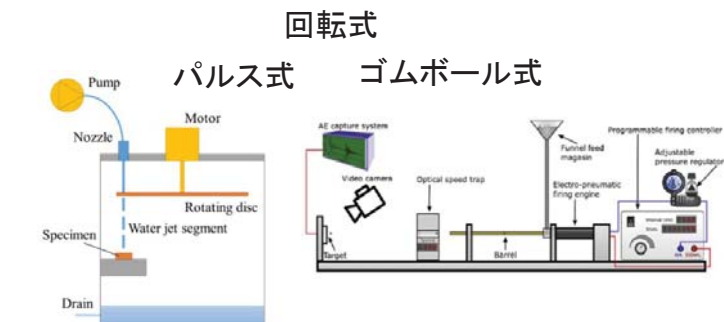
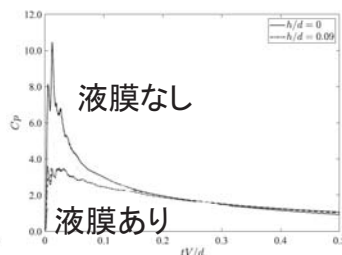
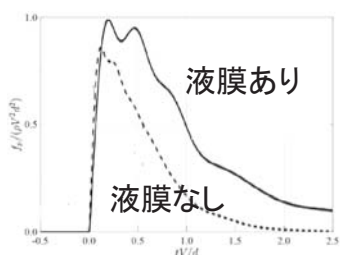
アルミ試験片の損傷状況(10h)



・地上試験装置間の比較と次世代試験法の提案

・衝撃力(実測)

・中心部圧力(解析)



実験と数値解析による試験法比較から日本の環境に適した試験法を検討・提案を狙う

●2023年9月のプレナリ会議ブレイクアウトセッションでの様々な意見

VNカーブの課題

- ・本来の疲労試験は時間軸が独立変数だがRET試験はそうでない。
- ・スプリングモデルはVNカーブを直線としているが曲線を想定すべきかも。

寿命予測の課題

- ・現場の補修はブレークスルータイミングで決めるので、現状の初生だけの議論では不足。ブレークスルーの重要性をDNV-RPに記述するべきでは。
- ・初生とブレークスルーの関係は一定でない。VNカーブはBTを特徴付けるには不適当なのではないか。
- ・RET試験の限界
 - ・初生の定量的判断が困難。
 - ・画像／目視判定が不安定。
 - ・実機との整合性が不明。
 - ・実機相当の低速試験は時間がかかる

RETから求める
寿命推定の精
度を向上したい

データ不足

現場の重要データは、実質的にOEMだけが保有している。

液滴径や衝突角度について

- ・現行試験片は揚力を発生しない空力的にニュートラルな形状で実機とは異なる。
- ・エロージョン進行速度は雨滴径やジグ周辺の気流、衝突角度により、変化する。
- ・液滴径よりも、衝突する水の量が支配的という例もある。
- ・120m/s付近以上では小粒雨による進行が速い。

多層システムの課題

- ・各層の単独RETだけでは、全体の寿命は計算できない。
- ・FRPが露出した時点で、即修理する必要がある。
- ・初生前に剥離する損傷はV-Nカーブでの評価の対象としていない。

3. 4. 活動内容 WP5:エロージョン力学と材料特性

●目的:

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

●参画機関:

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

●日本からの参加メンバ:

東京ガス(株) 西田蓉子様
(株)朝日ラバー 渡辺延由様、峰岸聖様
産総研 田中

●研究項目:

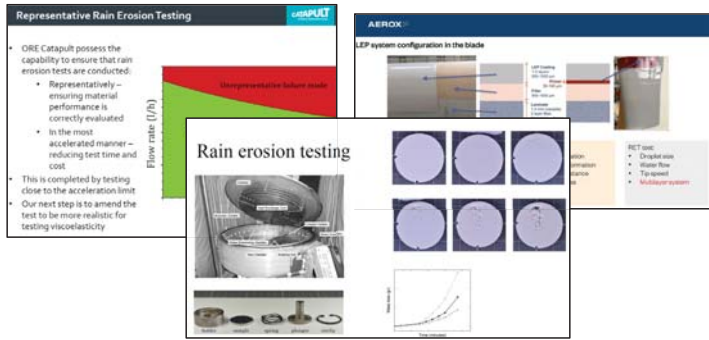
WP5.1: 基礎的材料特性に基づく損傷モデル

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」

●これまでの活動事例:



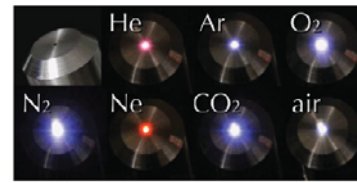
●各機関における研究内容の紹介

パラメータ	試験内容	スタンダード
密度	水中置換法による測定	ASTM D792-00
弾性率、ポアソン比、降伏応力、破壊応力、破壊ひずみ、完全な応力-ひずみ曲線	引張試験 圧縮試験 せん断試験	ASTM D882-18 ASTM D695-15 ASTM D732-17
破壊靱性	Mode I: CT [®] やSENB [®] 試料 Mode II: TAST [®] 試料 Mode III: 剥離試験	ISO 13586 ASTM D5656-10 ASTM D1876-01
界面の破壊靱性	Mode II: TAST [®] 試料 Mixed mode: ドリリーを用いたテスト	ASTM D5656-10 Dully test
疲労亀裂進展速度	コンパクトテンソル試料	ASTM E647-15e1
粘弾性特性	動的粘弾性熱分析	ASTM D5026-15
高定速度試験	数種類の高速速度下の試験を与える	各種
環境試験	数種類の環境試験を与える	各種
線膨張係数	-30°C ~ 30°Cにおいて溶融石英径を使用	ASTM D696-16
拡散係数	重量測定法	ISO 62-2008

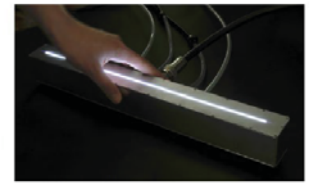
●多層LEPの材料と損傷モデルに関するレビュー論文を投稿

●日本の参画方法の検討

- ・非平衡プラズマによる接着性制御技術を活用し保護シート耐久性の接着力依存性を評価

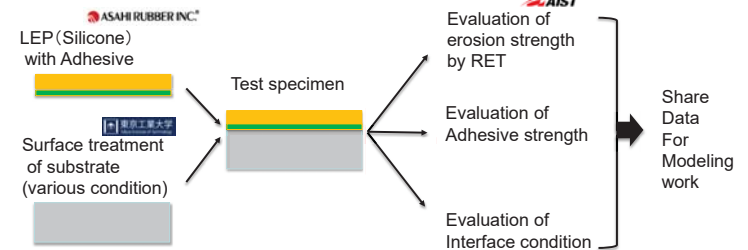


Atmospheric multi-gas plasma jet



335mm linear plasma source for surface treatment

写真提供: 東工大沖野教授



●接着力のエロージョン影響の実験データをモデリングに提供

●2023年9月のプレナリ会議ブレイクアウトセッションでの様々な意見

エロージョンデータの収集における課題

- ・実際のブレードにおけるダメージ成長を写真データなどから採取して初生を分析したところ、シミュレーションよりずっと長持ちしていることが確認された。
- ・現場の雨量や雨滴径分布も考慮したシミュレーションが必要なのではないか。
- ・初生だけではなくブレイクスルーも評価すべきではないか

多層システムにおける課題

- ・多層塗装においてプライマの有無でエロージョン結果が異なる。
- ・プライマはパテとほぼ同じ物性なので、界面の接着品質が異なる耐久性を生じることが、判明している。
- ・同様に、サンディングの有無もVNカーブにも影響を与えることがわかっている。
- ・CEU, ORE等のチームに加え、日本チームが調査に取り組んでいる。他の参加者を募集中

モデル改良へのフィードバックが必要

4. 活動状況のまとめと所感

- ・各WPでクローズした議論から、WP間連携での議論に展開。
- ・日本国内でも少しずつ研究が進展しつつあり貢献方法を模索中。
- ・国内のエロージョン実態調査が実施できていないことが課題。

2022/9 プレナリ会議参加の西田様所感

- ・実際のブレードに生じたエロージョン形状をCAD図に落とし込んでシミュレーションを行ったり、風雨の実測データの解析を行ったりと、**実環境のデータを用いた研究発表が多い印象**であった。
- ・エロージョンは、自然環境因子の観測、空力性能評価、材料評価、風車制御など様々な要因を組み合わせる必要がある複雑な劣化であるので、エロージョン対策の研究を進めるにあたっては**企業や専門性を超えた情報共有や議論が大事**であると感じた。
- ・会議に出席していたメンバーは、それぞれの業務を通じて実際に風力発電を動かし、エロージョンの影響を実感しているようで、ディスカッション中も**実感のこもった意見**が多かった。**欧州と日本の経験の差が大きい**と肌で感じた。

2023/2 ワークショップ参加の粟飯原所感

- ・実機風車のエロージョン対策法やエロージョン予測手法についてまだ十分に確立できていない段階であるが、多くの企業や大学が精力的に様々な方法を検証している印象
- ・実機ブレード表面のスキャンや画像解析についての報告がいくつかあり、エロージョン検知方法を発展させる傾向に
- ・特に今回は LEP コーティング塗装自動化ロボットの発表が多く、普及されればより簡易的に LEP 適用が可能に
- ・DNVGL 規格について更なる改善が必要とのコメントが多く、エロージョン試験法や VN 曲線の定義方法においてまだ課題が多い印象

2023/9 ワークショップ参加の峰岸様所感

- ・エロージョンによる年間発電電力量(AEP)影響については諸説あるが、Task46WP4がまとめた技術報告書の中ではAEPを～3%程度低下させるという数値を引用している。これは電力価格に換算すると全世界で年間数千億円相当の機会損失、さらにメンテナンスコストが加わる。将来の風車の大型化、洋上化、風力基地の増加に伴いこれらコストは膨れ上がるので、エロージョン問題の克服は、経済的側面にも支えられた重要な共通課題となっている。
- ・会議では、風車メーカー、発電事業者から気象、検査装置、認証の専門家まで顔を揃えて、最新の知見や課題に関する情報交換、連携呼び掛けが熱心に交わされていた。規模、蓄積データ量などで日本との違いを改めて認識する一方で、敵は気まぐれな自然であり、十分信頼できる理論や技術基盤、解決策の確立には長い時間を要することも認識、この分野で日本が世界へ貢献できるチャンスが多く残されていると感じた。

2024/2 ワークショップ参加の藤澤様所感

回転式エロージョン装置(RET)はあくまで実機風車の代替装置である。RETは、ヨーロッパを中心に8-9台ほど存在すると知られているが、今月から使用可能となるDTUのRETは、これまでのRETより一回り大きく、世界標準となる回転式エロージョン装置として相応しいと思えた。そこでは、ヒートポンプを活用した温度調整も可能なこと、北欧でしばしば問題となる氷の衝撃実験も可能であること、液滴用ニードル数は1800とかなり多いと聞いている。今後、各国に1台程度設置されている通常サイズのRETとの実験データの相関を通して、エロージョン装置の標準化が進むものと考えられる。