

第11回 IEA Wind セミナー  
2023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

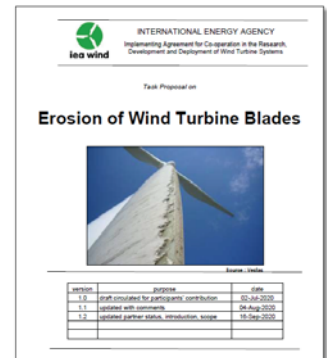
- ・洋上での高周速化や高雨量地域への市場移行でリスクが顕在化
- ・各国での大規模研究開発を経て国際連携の機運が高まりTask立ち上げ

## ●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: VTT,DTU
- ・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。
- ・参画機関: 14か国39機関(日本は2022年6月から参画)



WP2:  
エロージョン要因  
となる気象因子

WP3:  
エロージョンと  
風車オペレーション

WP4:  
エロージョンの  
地上試験

WP5:  
エロージョンの  
力学と材料特性

**Climatic conditions driving erosion (wp2)**

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

**Wind turbine operations with erosion (wp3)**

David C. Maniaci (Sandia National Laboratory)

**Laboratory testing of erosion (wp4)**

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

**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)

- ・プレナリ会議  
2021年 ①3/15 ②9/15  
2022年 ③2/2 ④9/22
- ・ワークショップ  
2023年 2/10
- ・ウェビナー  
2022年 5/31
- ・報告書



第4回プレナリ会議@Orsted

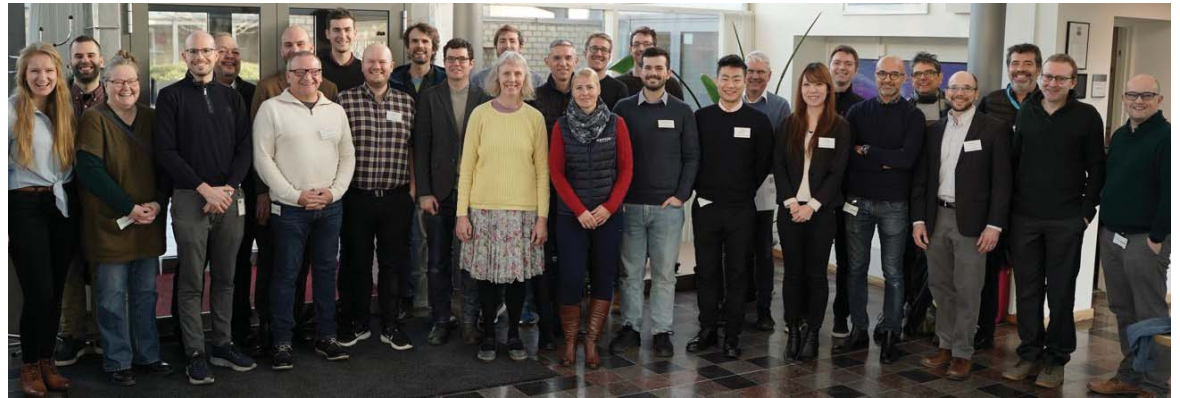
WP2: Atmospheric drivers of wind turbine blade leading edge erosion: Hydrometeors.

WP3: Leading Edge Erosion Classification System

WP4: Review on available technologies for laboratory erosion testing



TEM#98@DTU



ワークショップ@DTU

### 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

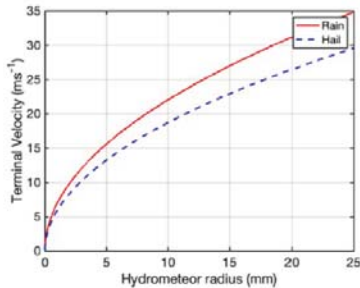
## ●技術レポート

### Atmospheric drivers of wind turbine blade leading edge erosion: Hydrometeors

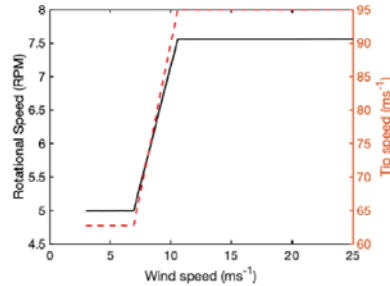
[https://usercontent.one/wp/iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/08/IEA\\_Wind\\_Task\\_46\\_WP2\\_Deliverable1\\_5Nov2021\\_approved.pdf](https://usercontent.one/wp/iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/08/IEA_Wind_Task_46_WP2_Deliverable1_5Nov2021_approved.pdf)

## ・エロージョンに影響する気象因子

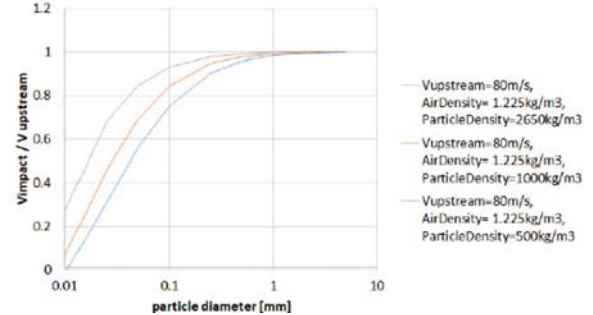
### 落下速度



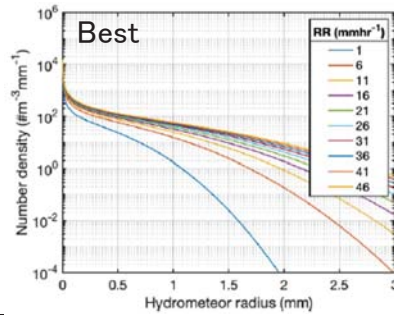
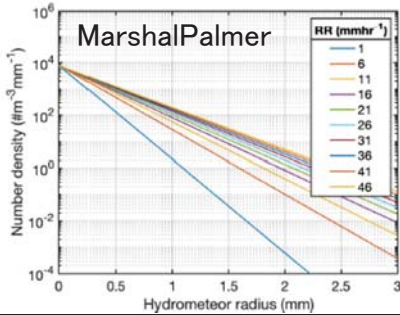
### ブレード回転速度



### 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



### 電センサー



### ○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

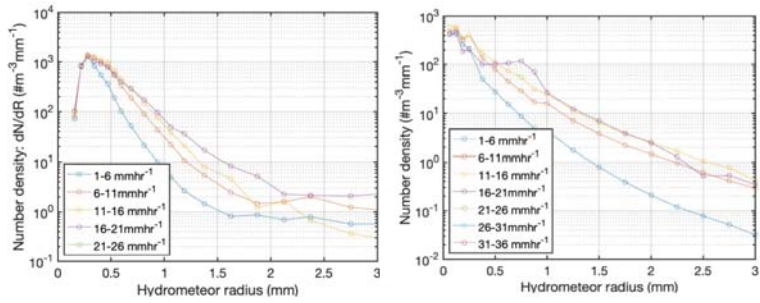
### ○DTU(デンマーク)

- ・OTT-Parsivel2

### ○Orstedサイト(Hoirns Rev2、台湾、米国)

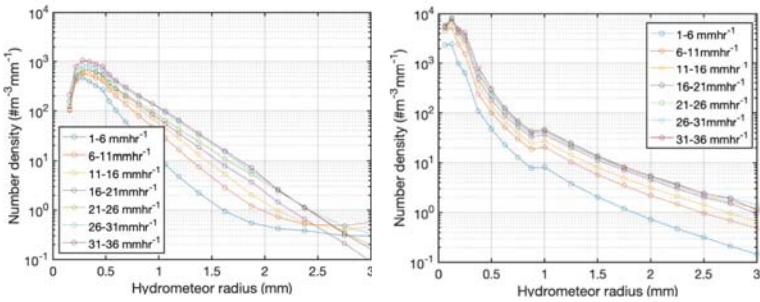
- ・OTT-Parsivel2

### ● 雨滴粒径分布の地域間比較:



Rosekilde, Denmark

Weybourne, England



Lamont, USA

Cairngorm, Scotland

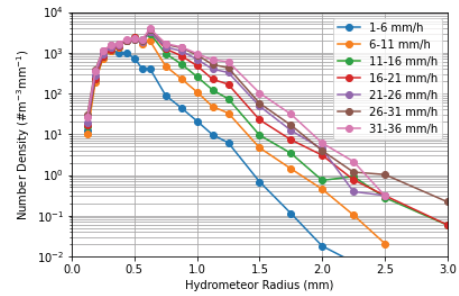
- 地域間に差あり
- イベント間、季節間でも差が見られた。

### ● 日本の参画検討(福島県補助事業)

#### ● FREAにおける降雨計測(ORE Catapultとの連携)



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



- FREAでの降雨計測データを提供し
- アジア地域での対策の重要性を周知

## 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 further, 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	Organisation						Median	Variance	Image	
		RTO	Owner/Operator	University	Turbine OEM	University	RTO				
Image 1	Visual data definition	2	1		2	0	2.5	2	2	3	
	Mass-loss or Depth	1	1			2	1		1	4	
	Aerodynamics/Performance	2	1	5	2.5	2	2	2	1	3	
	Structural	1	1		0	2.5	2	2	2	3	
Image 2	Visual data definition	4	4		4	3	4	5	4	5	
	Mass-loss or Depth	4	4			3	3		3	5	
	Aerodynamics/Performance	4	4	5	4.5	3	3.5	4	3	5	
	Structural	4	3		0	4		3	4	5	
Image 3	Visual data definition	1	2		2	1	2	2	1	2	
	Mass-loss or Depth	1	1			0	1		1	1	
	Aerodynamics/Performance	1	1		2	1	2	2	1	3	
	Structural	2	1		0	2		3	1	2	
Image 4 - Part 1	Visual data definition	3	1		2	1	2	1	2	1	
	Mass-loss or Depth	2	1			1	1		1	4	
	Aerodynamics/Performance	3	1	3	2	1	1.5	2	1	2	
	Structural	2	1		0	2		3	2	3	
Image 4 - Part 2	Visual data definition	2	2		1	1	2.5	1	2	1	
	Mass-loss or Depth	1	2			1	1.5		1	1	
	Aerodynamics/Performance	2	1	2	1	1	1.5	2	1	2	
	Structural	2	1		0	2		3	2	1	
Image 5	Visual data definition	1	1		1	0	0.5	2	1	0	
	Mass-loss or Depth	1	1			0	0		1	1	
	Aerodynamics/Performance	2	1	2	2.5	2	1	1	2	2	
	Structural	1	1		0	1		1	0		
Image 6	Visual data definition	1	1		1	1	1.5	1	1	1	
	Mass-loss or Depth	1	1			1	1		1	1	
	Aerodynamics/Performance	1	1		1	1	1	1	1	0	
	Structural	2	1		0	2		2	1	1	
Image 7	Visual data definition	2	1		1.5	0	1	1	1	3	
	Mass-loss or Depth	1	1			1	0		1	2	
	Aerodynamics/Performance	2	1		3	2	1	2	2	4	
	Structural	1	1		0	1		2	1	1	

### ・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 0-1%	Region 2 Power loss 1%-2%	Region 2 Power Loss 2%-3%	Region 2 Power loss 3-4%	Region 2 Power loss >4%
Blade Integrity		Initial erosion of topcoat	Erosion through topcoat	Initial exposure of immediate laminate layers	Erosion through immediate laminate layers	Exposure of structural laminate layers

## ●日本の参画方法の検討(福島県補助事業、シーズ支援事業)

### ・AeroBenchmarkへの参画

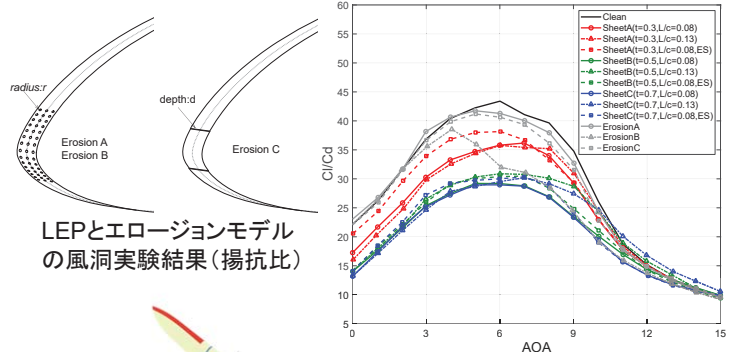
**目的**

- ・風車ブレードエロージョンに関する数値解析モデルを標準化
- ・エロージョン効果を解析する推奨指針を定義  
→ 学術論文などで発表

**ベンチマーク項目**

1. ブレード表面粗さのモデル化  
エロージョンや保護材料の損傷により変化する翼表面粗さの空力特性への影響についての検証
2. ブレードエロージョン  
各エロージョン進行度における空力特性についての検証
3. 年間発電電力量への影響  
ブレードがエロージョンした場合の年間発電電力量の損失についての検証

### ・FREAにおける風洞/実機実験と解析



LEPとエロージョンモデルの風洞実験結果(揚抗比)

#### センサー搭載ブレード

1. 液滴の可視化
2. カセンサ
3. 翼面圧力計測
4. ピトー管

#### 今年度開発中の技術

1. 音カメラによる騒音計測
2. 赤外線カメラによる乱流遷移位置の可視化



数値解析、風洞実験、風車実証により、エロージョンのAEP影響評価への参画をはかる

### 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. Cardinal 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

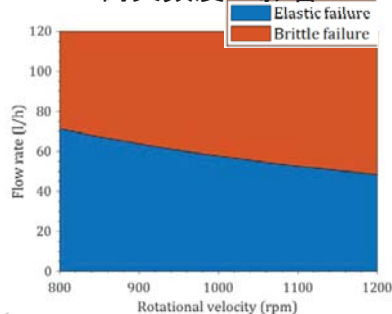
technologies for laboratory erosion testing

<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

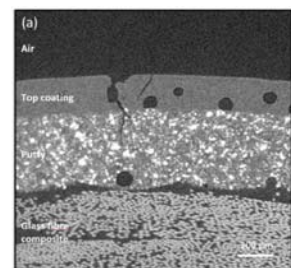
回転試験における  
衝突頻度の影響



#### ・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

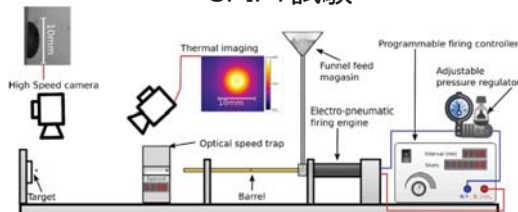
エロージョンブレードの  
X線CT画像



#### ・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

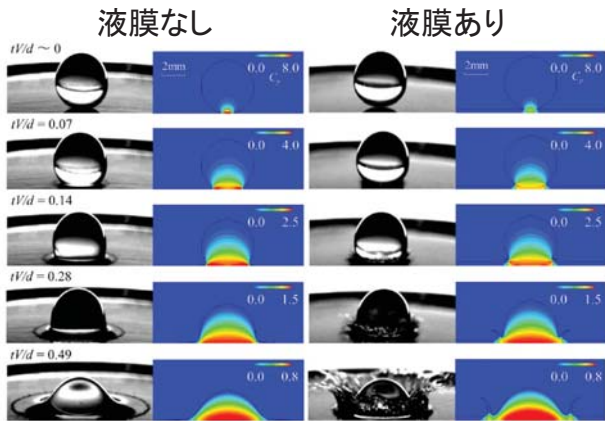
ブレードの  
テラヘルツスキャン検査



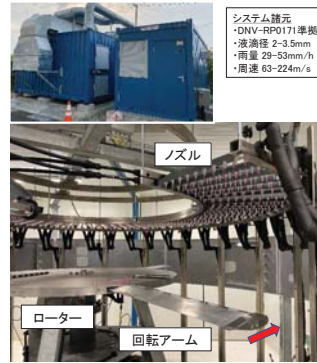


## ●日本の参画方法の検討(福島県補助事業、NEDO新革新事業)

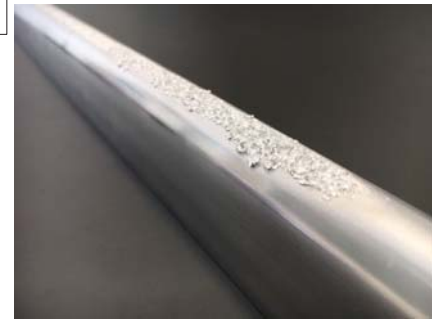
・低速液滴衝撃の観察と数値解析



・回転式エロージョン試験装置の導入

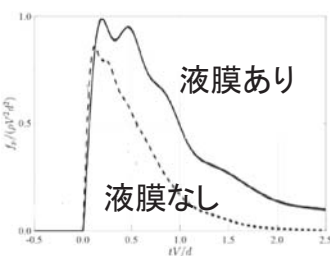


アルミ試験片の損傷状況(10h)

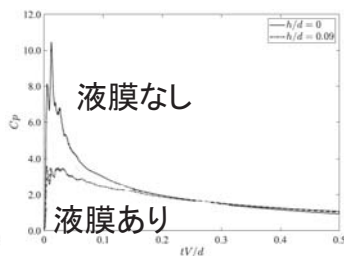


・地上試験装置間の比較と次世代試験法の提案

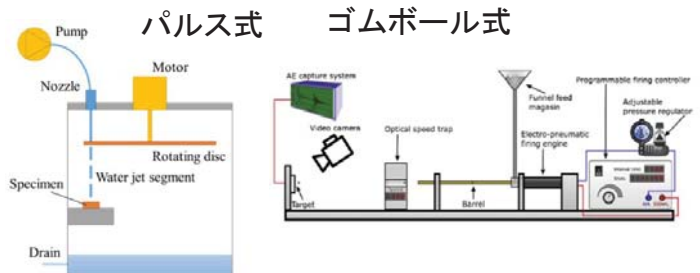
・衝撃力(実測)



・中心部圧力(解析)



回転式



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

## 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

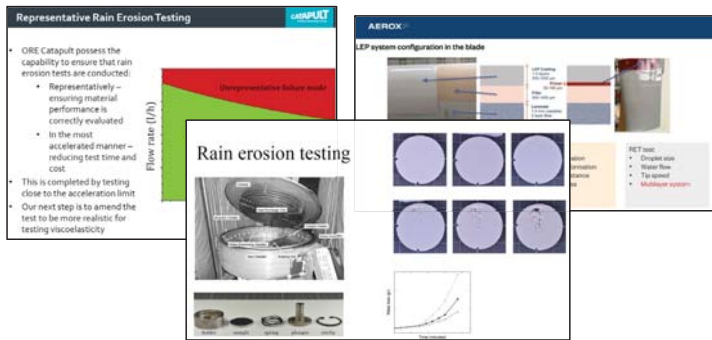
### ●日本からの参加メンバ:

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

## ●これまでの活動事例:



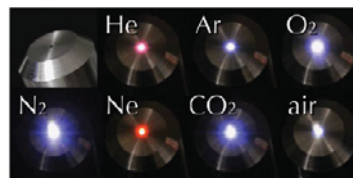
## ●各機関における研究内容の紹介

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 <sup>®</sup> やSENB <sup>®</sup> 試料 Mode II: TAST <sup>®</sup> 試料	CT SENB specimen TAST <sup>®</sup> specimen ASTM D5656-10
界面の破壊靱性	Mode I: 剥離試験 Mode II: TAST <sup>®</sup> 試料 Mixed mode: ドリーを用いたテスト	Peel test TAST <sup>®</sup> specimen Daily test ASTM D1876-01 ASTM D5656-10
疲労亀裂進展速度	コンパクトテンソル試料	CT specimen ASTM E647-15e1
粘弾性特性	動的粘弾性熱分析	DMTA Dynamic mechanical thermal analysis ASTM D5026-15
高速度試験	数種類の高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	Gravimetric measurements 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

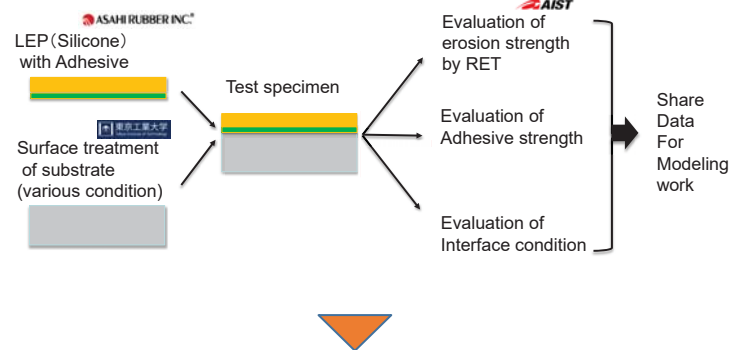


Atmospheric multi-gas plasma jet



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

## 4. 活動状況のまとめと所感

- ・各WPで知見や解析手法の共有が進展。WP間連携シナジーにも期待。
- ・日本は1年遅れで参画開始。国内研究成果をもとに貢献方法を検討中。
- ・エロージョン対策品は、依然として決め手はなく、各機関で模索中。
- ・今後拡大する国内洋上での対策検討や、優れた素材技術をもつ国内メーカーの市場参入には、欧米技術のキャッチアップとともに、国内の降雨やエロージョン実態に関する情報を共有できるしくみが必要。

### 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感じた。

### 2023/2 ワークショップ参加の栗飯原所感

- ・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