

# NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.3-1

クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発  
事業/洋上風力発電の導入促進に向けた革新的要素技術の開発/

## ブレードエロージョン対策のための 地上試験標準化の国際共同研究開発

発表：2025年7月17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

発表者名 山縣貴幸\*, 藤澤延行\*\*, 藤澤慶\*\*\*, 田中元史\*\*\*\*

\*(国) 新潟大学, \*\*(国) 信州大学, \*\*\* (国) 横浜国立大学, \*\*\*\* (国研) 産業技術総合研究所

問い合わせ先 新潟大学 E-mail: yamagata@eng.niigata-u.ac.jp

# 背景および目的

日本の降水量は世界的にも多く、レインエロージョン対策が必須

世界の年間降水量 国別ランキング (2021年)

182カ国中                      mm/year

48. 日本                      1668

113. デンマーク              703

レインエロージョンの原因

液滴衝突による衝撃力あるいは衝撃圧力(レインエロージョンの主因)

紫外線によるブレード材料劣化

塩分を含む雨滴によるブレード材料の腐食(コロージョン)

飛砂や氷等の固体粒子によるエロージョン

問題点

現象が複雑なため、メカニズムの解明が不十分

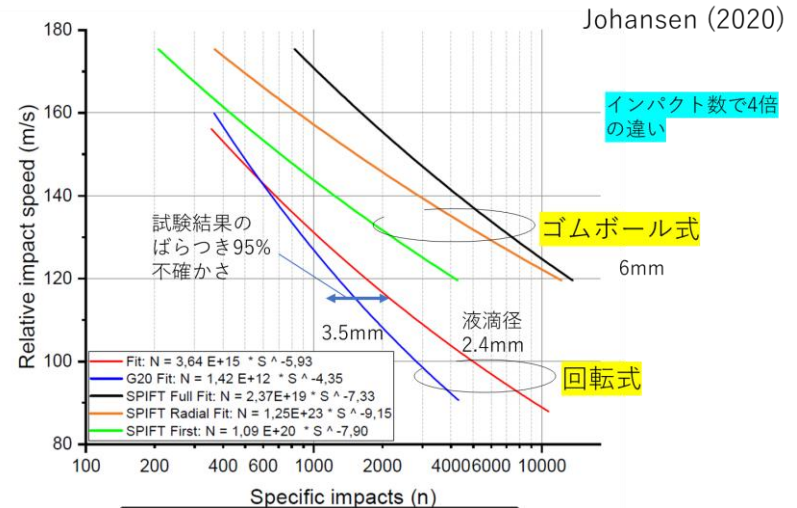
液滴の衝撃圧力を計測できるセンサーがないため、衝撃圧は計測不可能



風力発電設備ブレード点検  
および補修ガイドライン  
JWPA G0001 (2020)

# 背景および目的

地上試験ごとにばらつくV-N曲線  
(衝突速度とエロージョンに至る衝突回数)  
回転式試験とゴムボール式試験で衝突数  
に4倍の違い



## 目的

現存する3種のエロージョン地上試験法である回転式、パルス噴流式、ゴムボール式による標準試験片を用いたエロージョン試験の比較により、洋上風車ブレードのエロージョン予測と対策の基礎を確立する。

各地上試験に関連する諸問題を実験ならびに数値解析によって明らかにし、試験法の高度化と標準化を行う。

# 開発目標(プロジェクト全体)

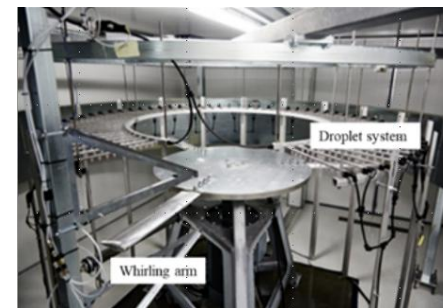
1. 標準ブレードⅠ(硬質)、Ⅱ(軟質)を対象にした回転式、パルス噴流式、ゴムボール式(機械式)によるエロージョン初生試験を通して、地上試験の標準化の基礎を確立(地上試験の実用化)
2. 地上試験ごとに大きくばらつくV-N曲線の不確かさの原因究明と液膜厚さの影響を考慮したV-N曲線の一致性の向上(V-N曲線の普遍性)
3. 地上試験に基づくエロージョン予測法の基礎の確立(次世代エロージョン予測法)

# 開発目標・開発項目・実施内容

## ブレードエロージョンの地上試験法

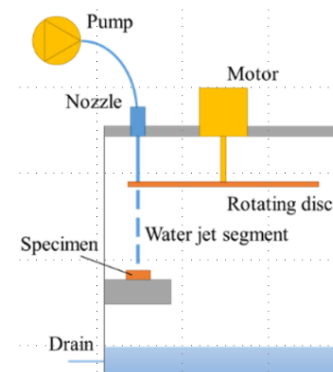
### 回転式試験 (Whirling arm tester)

多数のニードルによって生成された液滴の存在する空間を翼型のアームが高速回転する試験法



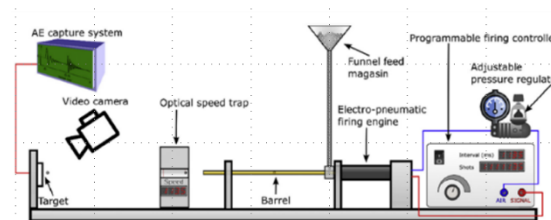
### パルス噴流式試験 (Pulsed Jet tester)

高速水噴流を穴あきの回転円盤を通過させることでパルス噴流を生成し、サンプルに繰り返し衝突させる試験法



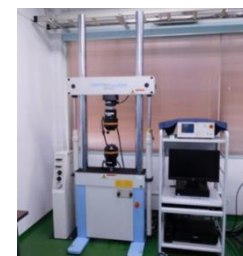
### ゴムボール式試験 (Rubber ball tester)

液滴の代わりに弾性ボールを固定したサンプルに繰り返し衝突させる試験法



### 機械式試験 (Mechanical impact test)

液滴の代わりに打撃棒をサンプルに繰り返し衝突させる試験法



# 開発目標・開発項目・実施内容

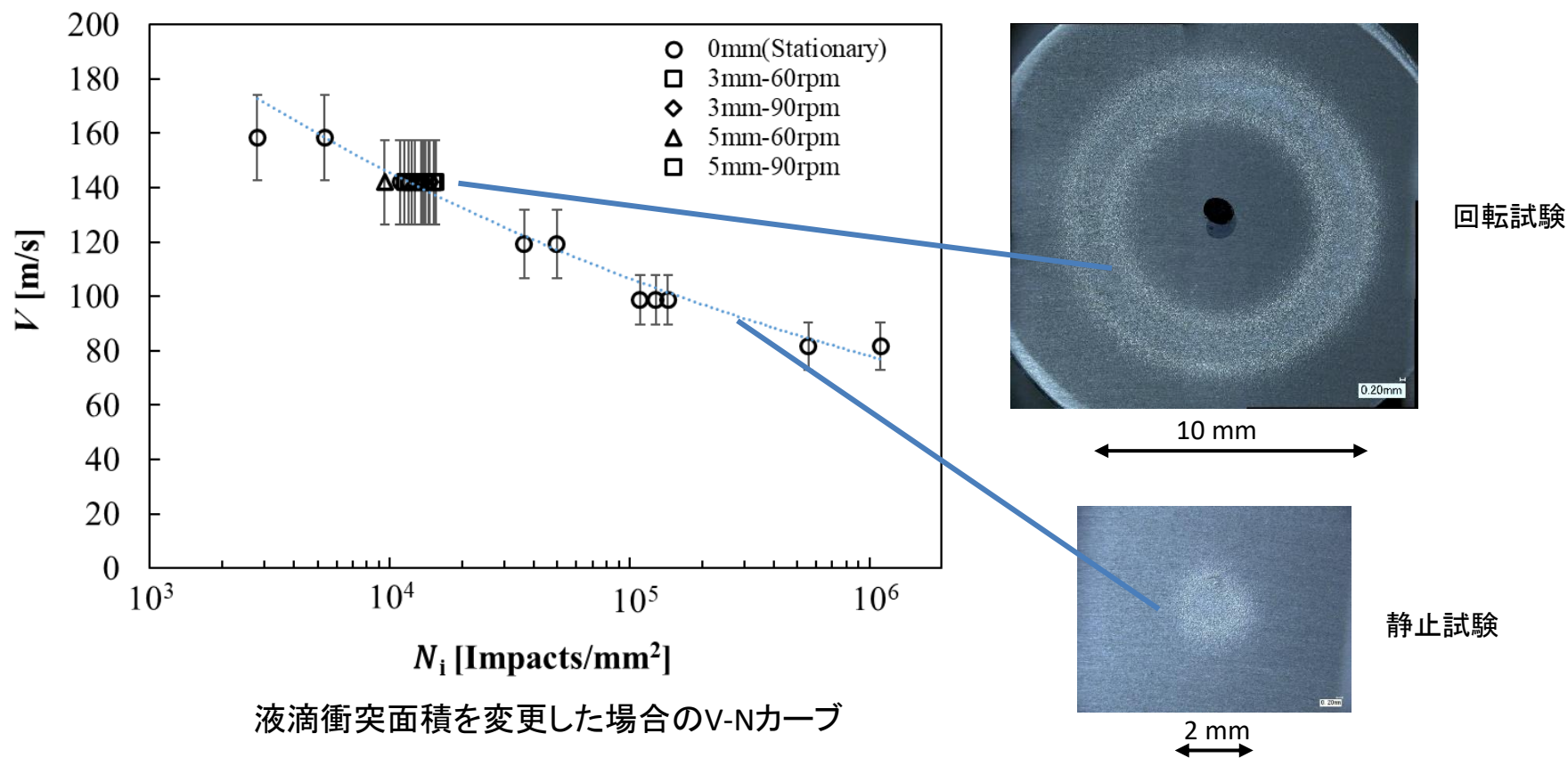
| 研究開発項目                           | 開発目標・実施内容                                                                                                                                                                                                                          | 実施担当者                                            |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| ①パルス噴流式試験の液膜厚さと液滴衝突面積の可変機構の開発と検証 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 液膜厚さと液滴衝突面積の変更可能なパルス噴流式試験装置を製作。</li> <li>2. 液膜厚さと液滴衝突面積の可変機構の動作確認。</li> </ol>                                                                                                            | 新潟大学                                             |
| ②回転式試験法の基礎現象の検討                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ブレード先端曲率半径と液滴衝撃力の関係を低速落下実験と数値解析で検討。</li> <li>2. 建屋内に発生する旋回流とブレード後流の影響を数値解析によって評価。</li> <li>3. 回転するブレードに衝突する液滴の挙動を解明。</li> </ol>                                                          | 産業技術総合研究所<br>信州大学                                |
| ③標準ブレードを用いたエロージョン試験法の比較と検討       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 標準ブレード I (硬質)を対象として、3種の試験に対してエロージョン初生試験を行い、V-N曲線を取得。</li> <li>2. 液滴の物性値、衝突パターン、液膜厚さの影響を考慮した、3種のエロージョン試験法の比較と普遍的疲労試験結果について考察。</li> <li>3. 3種のエロージョン試験法の不確かさ解析とデータのばらつきについての考察。</li> </ol> | 新潟大学<br>産業技術総合研究所<br>横浜国立大学<br>信州大学<br>デンマーク工科大学 |
| ④ブレード材料のエロージョン評価法の検討             | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 回転するブレード上の液膜厚さを数値解析から評価。</li> <li>2. 液滴衝撃力に及ぼす衝突パターンと液膜厚さの影響を定量的に評価。</li> <li>3. 標準ブレード I (硬質)を対象に、液滴衝撃力による流体・材料の数値解析からV-N曲線を取得。</li> </ol>                                              | 横浜国立大学<br>信州大学                                   |
| ⑤標準ブレードによる保護塗料の評価                | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 過去の保護塗料によるエロージョン試験結果を整理し、耐エロージョン性について整理。</li> </ol>                                                                                                                                      | 産業技術総合研究所                                        |
| ⑥国際標準化計画と戦略                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 国際標準化検討・産業競争力強化検討小委員会を開催し、国際標準化計画と戦略を策定し、会議報告書に整理。</li> </ol>                                                                                                                            | 新潟大学<br>産業技術総合研究所<br>横浜国立大学<br>信州大学              |

# 研究スケジュール

| 実施内容                                        | 2022                       | 2023年度 |           |                |              | 2024年度 |   |    |  |
|---------------------------------------------|----------------------------|--------|-----------|----------------|--------------|--------|---|----|--|
|                                             | 2                          | 5      | 8         | 11             | 2            | 5      | 8 | 11 |  |
| ① パルス噴流式試験の要素開発(新潟大)                        | 液滴衝突面積の変更実験                |        |           |                |              |        |   |    |  |
|                                             |                            |        | 液膜厚さの変更実験 |                |              |        |   |    |  |
| ② 回転式試験の要素開発(産総研、信州大)                       | 曲率半径の影響の実験と数値解析            |        |           |                | 装置内の旋回流の数値解析 |        |   |    |  |
|                                             | 液滴衝突の可視化                   |        |           |                |              |        |   |    |  |
| ③ 標準ブレードのエロージョン試験(新潟大、産総研、横国大、信州大、デンマーク工科大) | 衝撃力計測実験(パルス式、回転式、ゴムボール式)   |        |           |                |              |        |   |    |  |
|                                             | 標準ブレードIのエロージョン試験(パルス式、回転式) |        |           |                |              |        |   |    |  |
|                                             | 地上試験の不確かさ解析                |        |           | 地上試験の補正法の検討    |              |        |   |    |  |
| ④ エロージョン評価法の検討(横国大、信州大)                     | 液膜の解析的評価                   |        |           | 液滴衝突による疲労解析の検討 |              |        |   |    |  |
|                                             | 衝突パターンの影響の数値解析             |        |           | 液膜の影響の数値解析     |              |        |   |    |  |
| ⑤ 保護塗料の評価(産総研)                              |                            |        |           |                | 保護塗料の情報収集    |        |   |    |  |
| ⑥ 国際標準化計画と戦略(新潟大、産総研、横国大、信州大)               | 小委員会および協力機関からの情報収集         |        |           |                |              |        |   |    |  |

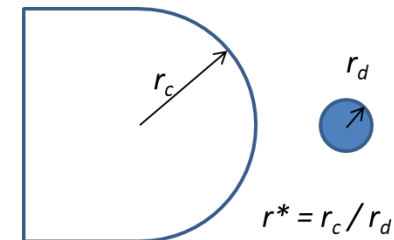
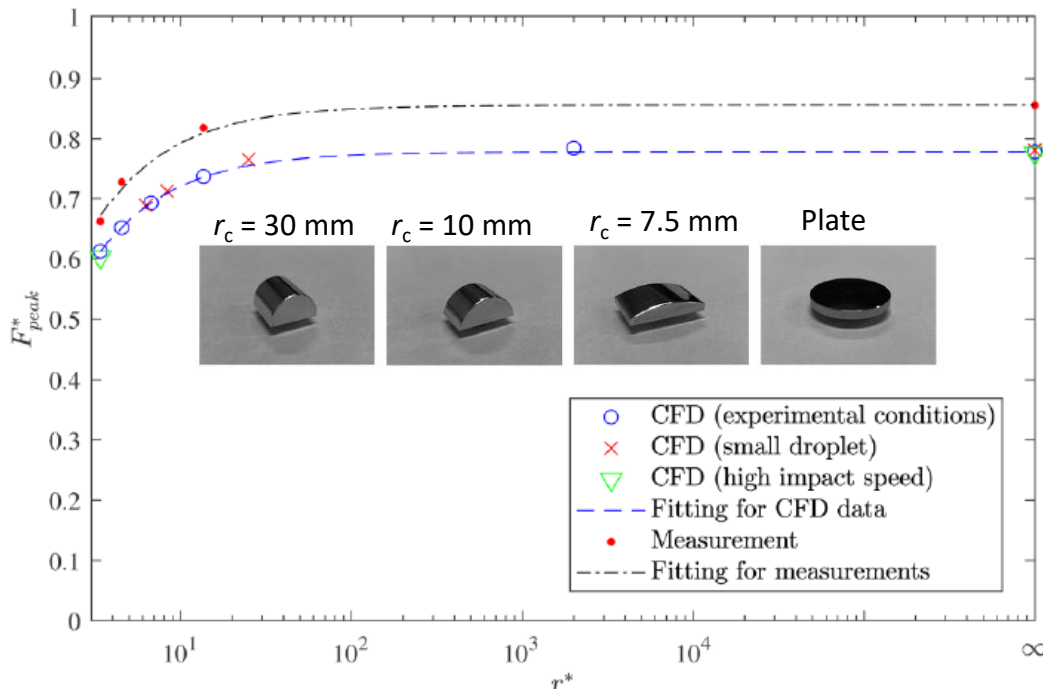
# 研究成果 ①パルス噴流式試験の液膜厚さと液滴衝突面積の可変機構の開発と検証(新潟大)

1. 液滴衝突面積の可変機構によりランダムな液滴衝突を再現
2. 単位面積当たりの衝突回数で表すと、V-Nカーブは回転の影響を受けない
3. 液膜によりエロージョンの発生が抑制されることを確認



## 研究成果 ②回転式試験法の基礎現象の検討(産総研、信州大)

1. 落下液滴の衝撃力計測と数値解析を行い、ブレード先端の曲率半径が小さいと衝撃力は低下することを示した。
2. 装置内の気流の数値解析により、旋回流のV-Nカーブへの影響は小さいことを確認
3. ブレードに衝突する液滴挙動の観察により、液膜は薄いと考えられる



曲面に衝突する液滴の最大衝撃力

Aihara et al., J. Appl. Phys., Vol. 136 (2024), 114701.

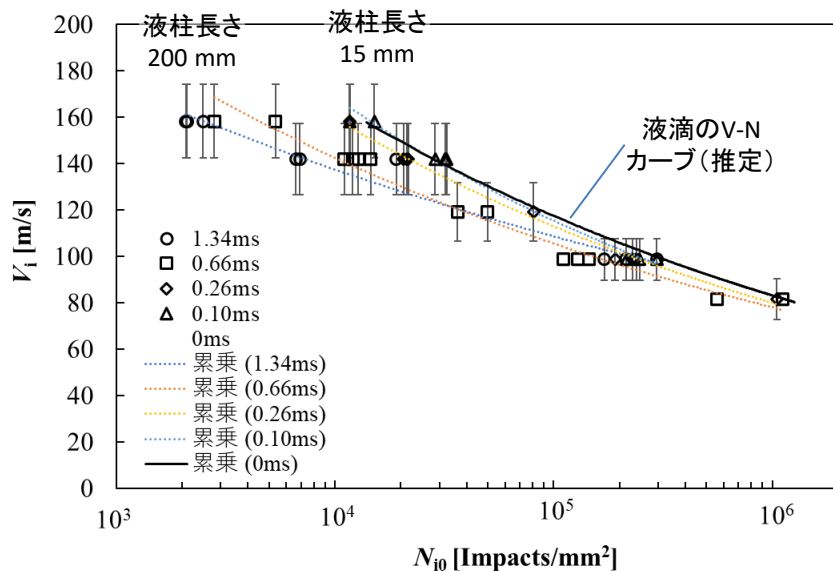
# 研究成果

③標準ブレードを用いたエロージョンの試験法の比較と検討(新潟大、産総研、横国大、信州大、デンマーク工科大)

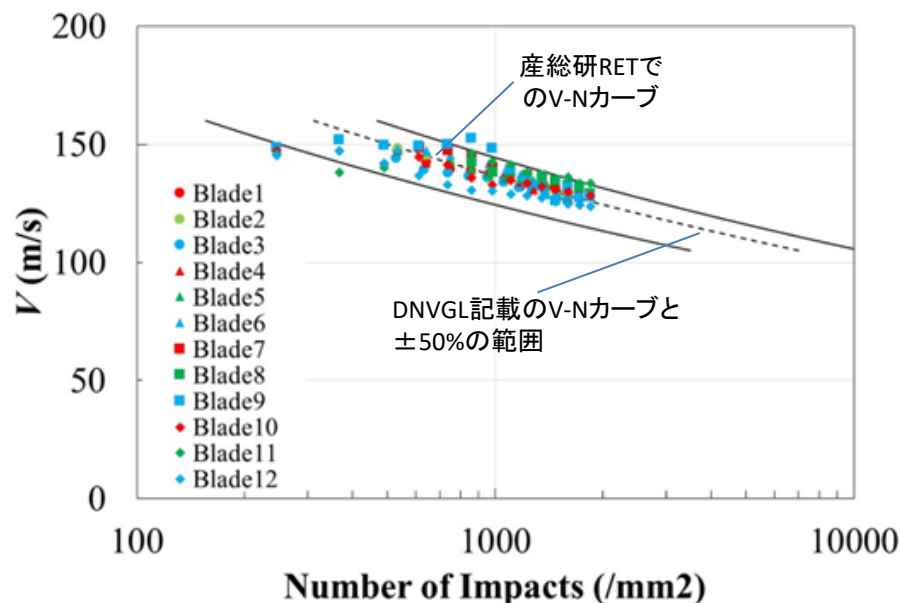
1. パルス噴流式では液柱長さが短いほどV-Nカーブの勾配は急になり、液柱長さ10 mm程度で液滴のV-Nカーブ(推定)に近づく
2. 回転式のV-Nカーブは、DNVGL-RP-0171 の試験結果と不確かさの範囲で一致する

## 標準ブレードⅠ(硬質)

A3003 (DNVGL-RP-0171, Testing of rotor blade erosion protection systems)



パルス噴流式のV-Nカーブ

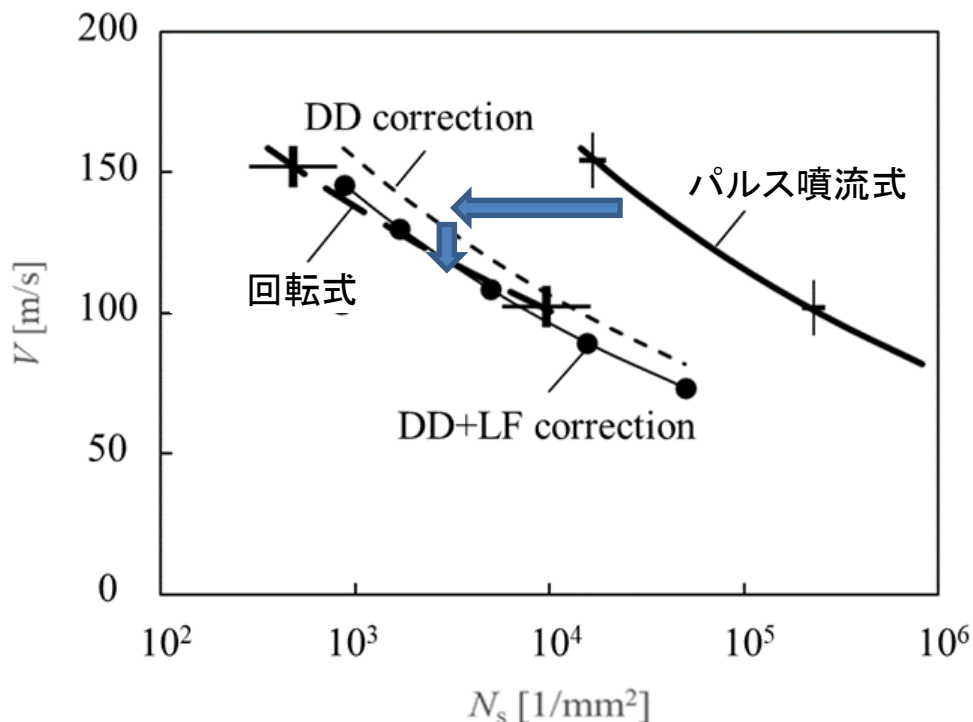


回転式のV-Nカーブ

# 研究成果

③標準ブレードを用いたエロージョンの試験法の比較と検討(新潟大、産総研、横国大、信州大、デンマーク工科大)

1. エロージョン初生に及ぼす液柱径の影響の解析的な補正方法を提案
2. パルス噴流式試験の液膜厚さの解析結果と液膜による衝撃圧力抑制効果を組み合わせて、液滴速度の補正方法を提案
3. 液滴径、液膜厚さの補正をパルス噴流に適用し、回転式(DNVGL)と計測の不確かさの範囲で一致することを示した



Fujisawa et al., Wear, Vol. 568-569 (2025), 205965.

DD correction: 液滴径の補正(実験解析)

LF correction: 液膜厚さの補正(数値解析)

これらの補正を導入することで、パルス式の結果と回転式の結果は一致。



パルス噴流式の実用化へ大きく寄与

# 研究成果

③標準ブレードを用いたエロージョンの試験法の比較と検討(新潟大、産総研、横国大、信州大、デンマーク工科大)

1. 回転式では、液滴流量、液滴径、インパクト率の計測が衝撃数の不確かさの原因であり、34%に及ぶ
2. パルス式では、液滴速度の計測が8%程度の不確かさを含む
3. ゴムボール式では、全般的に計測の不確かさは回転式やパルス式より小さい
4. コストは、回転式、パルス式、ゴムボール式の順に低くなる。

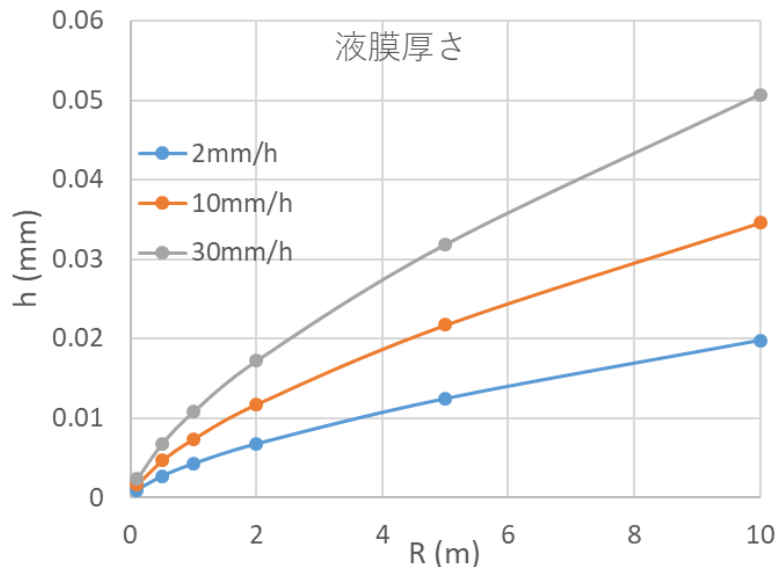
|                                           | Impact velocity<br>V                             | Number of<br>impacts N                                       | Liquid film<br>thickness | Cost  |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|
| Whirling arm for<br>wind turbine<br>blade | Theoretical<br>analysis of flow<br>field 4%      | Flow rate,<br>droplet<br>diameter,<br>synchronization<br>34% | Thin<br>$h/d = O(0.001)$ | 1億円以上 |
| Pulsating jet                             | Laser and high-<br>speed camera<br>8%            | Number of disk<br>rotations<br>2%                            | Thick<br>$h/d = O(0.01)$ | 500万円 |
| Rubber ball                               | Optical sensor<br>and high-speed<br>camera<br>3% | Number of balls<br>2%                                        | No water film            | 100万円 |

Fujisawa et al., Journal of Flow and Energy, Vol. 1 (2023), pp. 1-15.

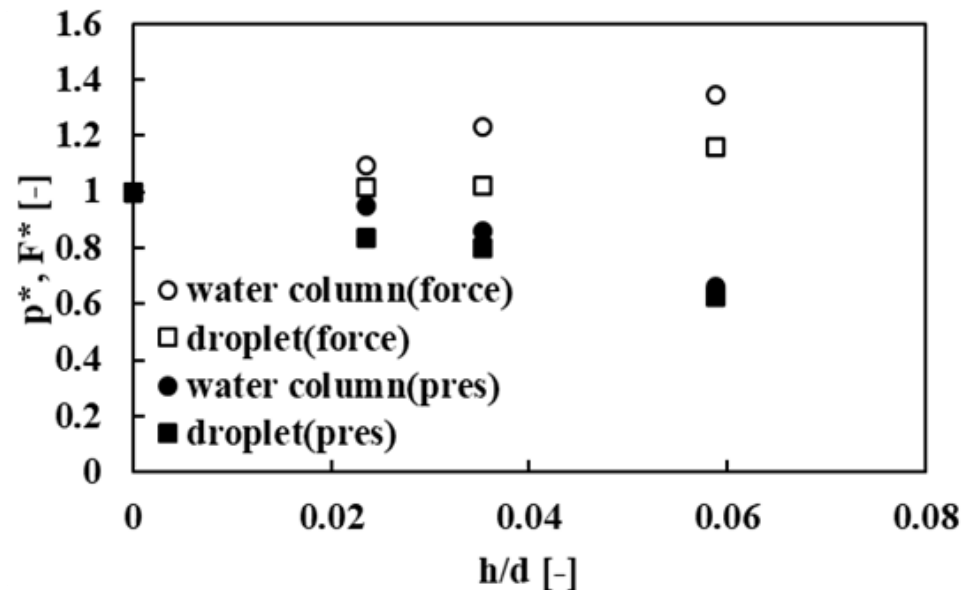
# 研究成果

## ④ブレード材料のエロージョン評価法の検討(横国大、信州大)

1. 回転式では、遠心力の影響を強く受けるため、液膜厚さ  $h$  は回転半径と降雨量によって変化する。このため、液膜厚さの補正法の検討が必要である。回転式では  $h/d=0.003$ 、パルス噴流では  $h/d=0.02$ 。
2. 液膜の影響で衝撃圧力は減少傾向にあるが、衝撃力は増大傾向にある。



回転式における液膜厚さ(解析)



液膜厚さの衝撃圧、衝撃力への影響

# 研究成果

## ⑤標準ブレードによる保護塗料の評価(産総研)

1. 国内の洋上風力発電実機フィールドでのエロージョンに関する記録 (NEDO洋上風力発電システム実証研究) より、耐エロージョン性は、  
フッ素系塗料、ポリウレタンテープ > ポリウレタン系塗料
2. 現在でも入手可能なフッ素系塗料を用いたエロージョン試験を予定

## ⑥国際標準化と戦略(新潟大、産総研、横国大、信州大)

1. 小委員会を開催し、IEA Wind Task46 WP4 (Laboratory Testing of Erosion) に関する情報を共有、WP4ワークショップとエロージョン国際会議(エロージョン研究者と風車メーカー)において活動状況の情報共有と研究発表を行った
2. 回転式試験の装置ごとのV-Nカーブの不確かさがWP4での今後の検討課題
3. パルス噴流式と回転式のV-Nカーブが一致したことから、低コストな地上試験がエロージョン研究を加速

# 今後の技術課題

- ③標準ブレードを用いたエロージョン試験法の比較と検討
  - 1. 標準ブレードⅡ(軟質)で使用する材料(例えばポリウレタン)に対する地上試験によるエロージョン試験の有効性の確認
  - 2. 地上試験の V-N カーブに基づくエロージョン予測法の確立
- ④ブレード材料のエロージョン評価法の検討  
標準ブレードⅡ(軟質)に液滴が衝突した際の流体・材料の数値解析法の構築
- ⑤標準ブレードによる保護塗料の評価  
保護塗料による耐エロージョン性の評価方法の確立

# まとめ

洋上風車ブレードのエロージョン予測と対策の基礎を確立するため、地上試験によるエロージョン初生試験の比較評価および高度化と標準化を行った。

1. パルス噴流式における衝突面積や、回転式におけるブレード先端曲率の影響など諸問題を実験ならびに数値解析によって明らかにし、地上試験の不確かさを改善した
2. 標準ブレードⅠ(硬質)に対する V-N カーブをパルス噴流式および回転式で取得し、地上試験法の有用性を確認するとともに、不確かさの原因を明らかにした
3. 液滴径、液膜の影響を補正することで、パルス噴流式と回転式の V-N カーブが一致することから、地上試験の実用化に向けた基礎を確立した