

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026

プログラムNo. A1-1-12

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：2026年7月21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

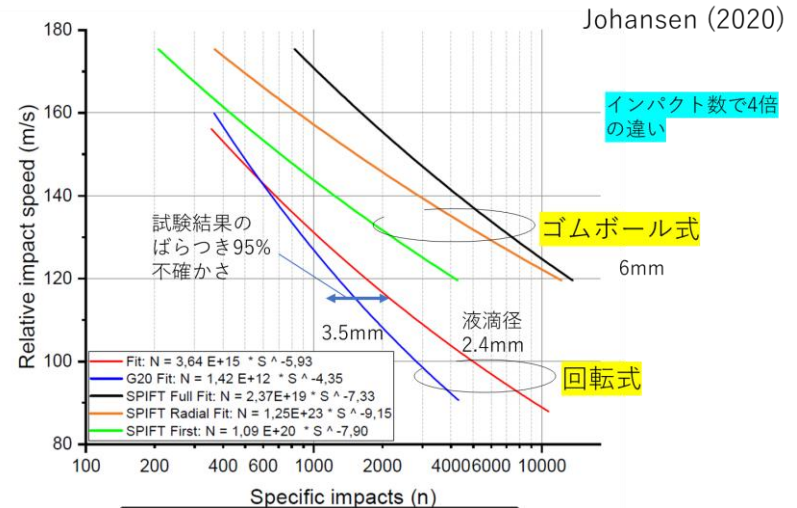
液滴の衝撃圧力を計測できるセンサーがないため、衝撃圧は計測不可能



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)

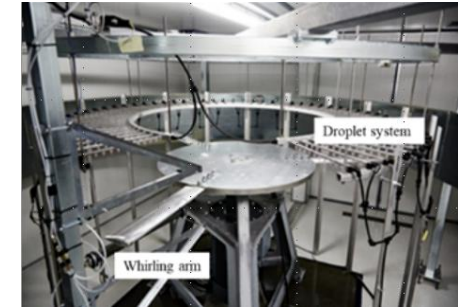
1. 標準ブレードⅠ(硬質)、Ⅱ(軟質)を対象にした回転式、パルス噴流式、ゴムボール式(機械式)によるエロージョン初生試験を通して、地上試験の標準化の基礎を確立(地上試験の実用化)
2. 地上試験ごとに大きくばらつくV-N曲線の不確かさの原因究明と液膜厚さの影響を考慮したV-N曲線の一致性の向上(V-N曲線の普遍性)
3. 地上試験に基づくエロージョン予測法の基礎の確立(次世代エロージョン予測法)

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)

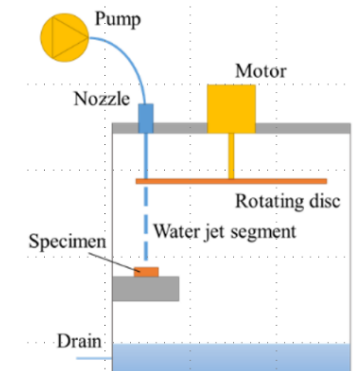
多数のニードルによって生成された液滴の存在する空間を翼型のアームが高速回転する試験法



[1]

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



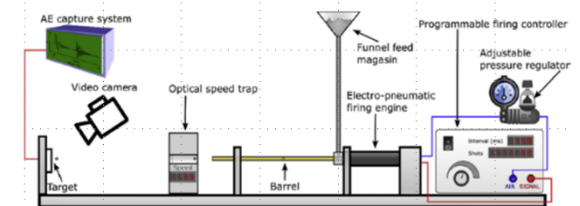
[2]

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、キャビテーションをサンプルに繰り返し衝突させる試験法



[3]

[1] R&D A/S, Rain erosion tester, April, 2021. <https://www.rd-as.com/rain-erosion-tester/>.

[2] Yamagata, T., Hasegawa, M., & Fujisawa, N. (2023). Erosion behavior of pulsed-jet test facility for wind turbine blade. Wear, 514, 204565.

[3] Fraisse, A., Bech, J. I., Borum, K. K., Fedorov, V., Johansen, N. F. J., McGugan, M., ... & Kusano, Y. (2018). Impact fatigue damage of coated glass fibre reinforced polymer laminate. Renewable Energy, 126, 1102–1112.

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	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。 2. 液膜厚さと液滴衝突面積の可変機構の動作確認。	新潟大学
②回転式試験法の基礎現象の検討	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。 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。 3. 回転するブレードに衝突する液滴の挙動を解明。	産業技術総合研究所 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	1. 標準ブレードⅠ（硬質）について3種の試験でV-N曲線を取得 2. 標準ブレードⅡ（軟質）について3種の試験でV-N曲線を取得し、保護シートのエロージョン抑制効果を評価 3. 液滴物性・衝突パターン・液膜厚さを考慮した普遍的V-N曲線の整理 4. 試験データのばらつきをファクター3程度に収束	新潟大学 産業技術総合研究所 横浜国立大学 信州大学 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	1. 標準ブレードを対象とした流体・材料連成数値解析を行い、液膜の影響をおよび保護シートのエロージョン抑制メカニズムの解明	横浜国立大学 信州大学
⑤標準ブレードによる保護塗料の評価	1. 過去の保護塗料によるエロージョン試験結果を整理・まとめ 2. 保護塗料のエロージョン試験および予測	産業技術総合研究所 新潟大学
⑥国際標準化計画と戦略	1. 国際標準化検討・産業競争力強化検討小委員会を年2回開催し、計画・戦略を策定 2. 地上試験の国際標準化・実用化に向けたロードマップを作成	新潟大学 産業技術総合研究所 横浜国立大学 信州大学

研究スケジュール

研究項目	2022年度				2023年度				2024年度				2025年度				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
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)				→													
②回転式試験法の基礎現象の検討(産総研、信州大)				→													
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(新潟大、産総研、信州大、横国大、DTU)				→													
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)				→													
⑤標準ブレードによる保護塗料の評価(産総研、新潟大)										→							
⑥国際標準化計画と戦略(新潟大、信州大、横国大、産総研)				→													
研究開発推進委員会					○		○		○		○		○		○		

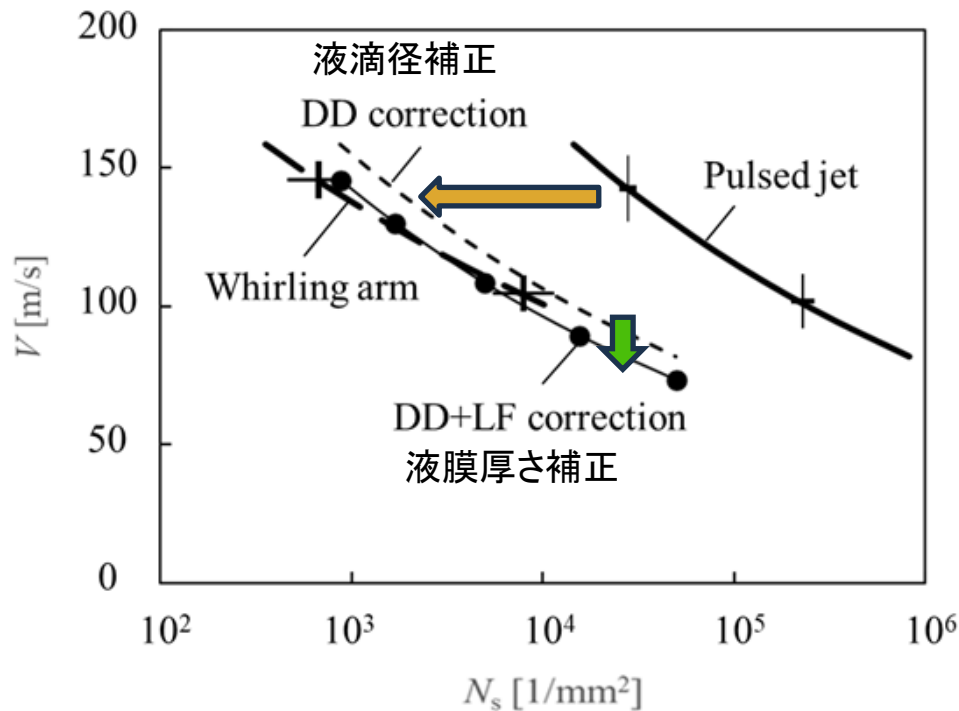
研究成果

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 (新潟大、産総研、横国大、信州大、デンマーク工科大)

標準ブレードI (硬質) のエロージョン試験

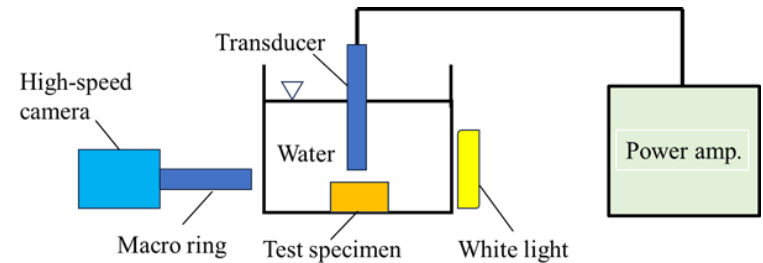
研究成果

1. パルス噴流式の液柱径および液膜厚さの影響の補正を導入することで、回転式の結果と不確かさの範囲で一致した。
2. 超音波キャビテーション試験により、パルス噴流式と似たピット形成を確認した。

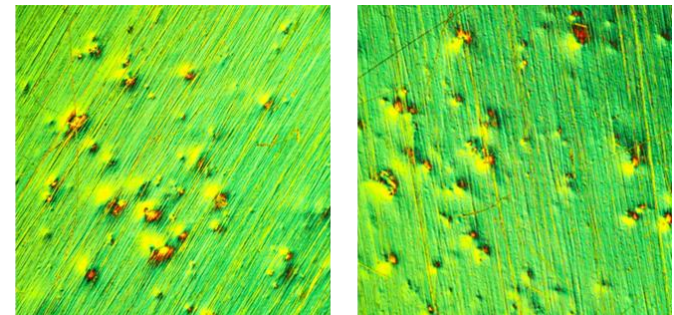


パルス式と回転式のV-Nカーブ比較

Fujisawa, N., Yamagata, T., & Fujisawa, K. (2025). On the correlation of erosion initiations using pulsed-jet and whirling-arm testers. *Wear*, 568, 205965.



超音波キャビテーション試験装置



超音波キャビテーションによるエロージョン挙動 (0.8 mm × 0.8 mm)

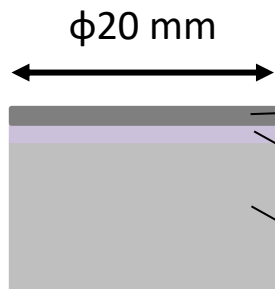
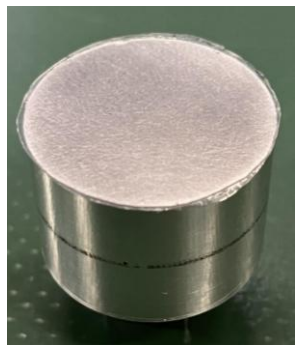
Fujisawa, N. (2026). Basic Study on Cavitation Erosion by Liquid-Droplet Impingements on Wind Turbine Blade of Metallic Material. *Energies*, 19(7), 1771.

研究成果

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 (新潟大、産総研、横国大、信州大、デンマーク工科大)

標準ブレードII (軟質) のエロージョン試験

パルス式の試験片



保護シート
ポリウレタン 0.3 mm
引張破断強度 31 MPa
ショア硬さ A70
接着剤 0.1 mm
母材 A3003
保護シート

回転式の試験片 (R&D)

衝突速度 160, 170 m/s

液滴径 2.5 mm (G27)

試験時間 50 hr

ブレード材料 アルミニウム合金



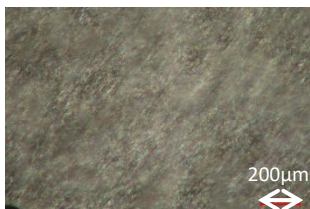
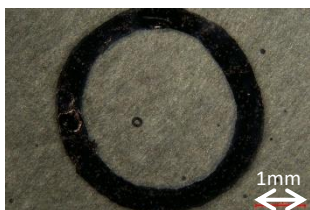
研究成果

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 (新潟大、産総研、横国大、信州大、デンマーク工科大)

標準ブレードII (軟質) のエロージョン試験

パルス式

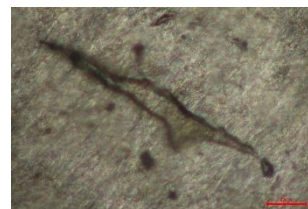
$\Phi 5 \times 1$ -2400rpm (40Hz)
18MPa (173m/s)



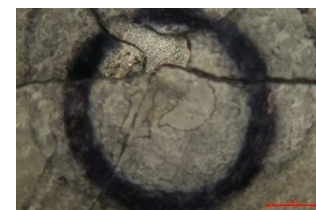
$t = 0s$



$t = 7200s$



$t = 21600s$



$t = 23400s$

回転式

Specimen initial and final image

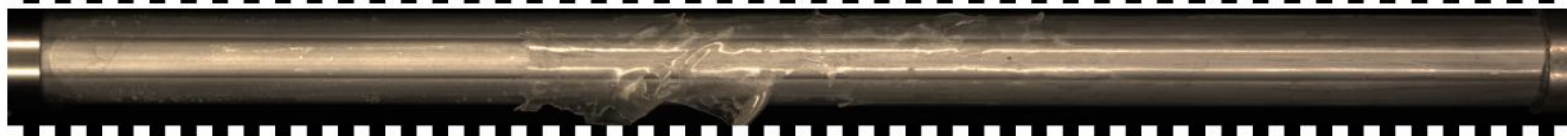
Scale unit: 10 mm.

170 m/s で6時間で中断

00:00:00



06:42:17

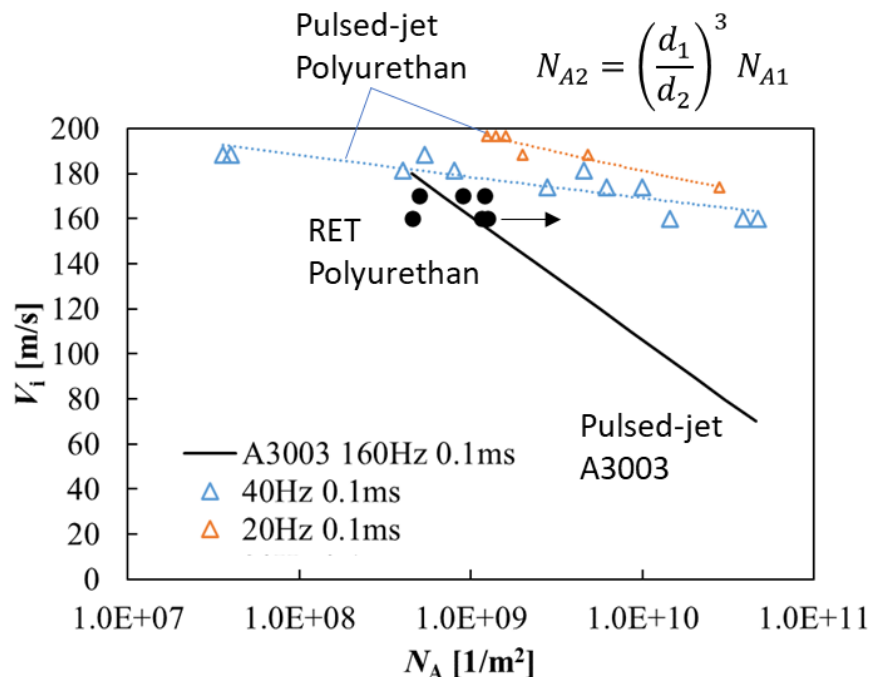


研究成果 ③標準ブレードを用いたエロージョン試験法の比較と検討 (新潟大、産総研、横国大、信州大、デンマーク工科大)

標準ブレードII (軟質) のエロージョン試験

研究成果

1. 回転式では過度な遠心力によりシートが剥離、破断し試験が中断した。
2. パルス噴流式により、標準ブレードI (硬質) よりも高い衝突速度依存性を確認した。
衝突周波数によってもエロージョン結果が変化する。

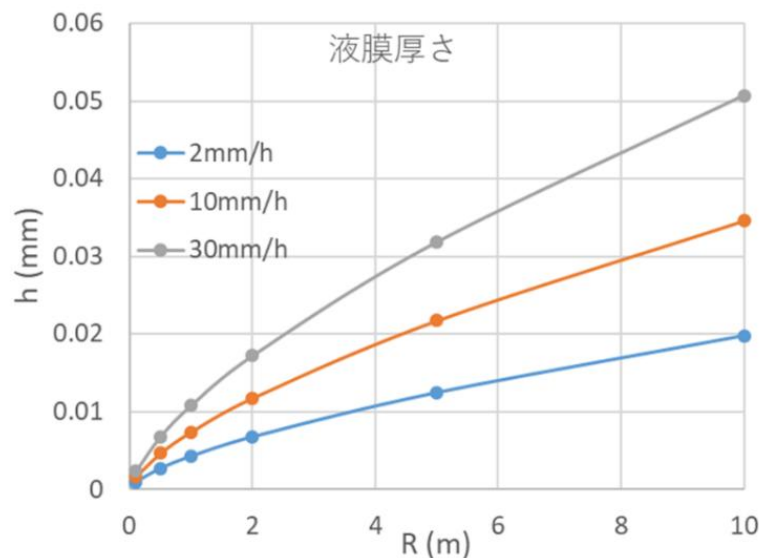


標準ブレードII (軟質) のV-Nカーブ

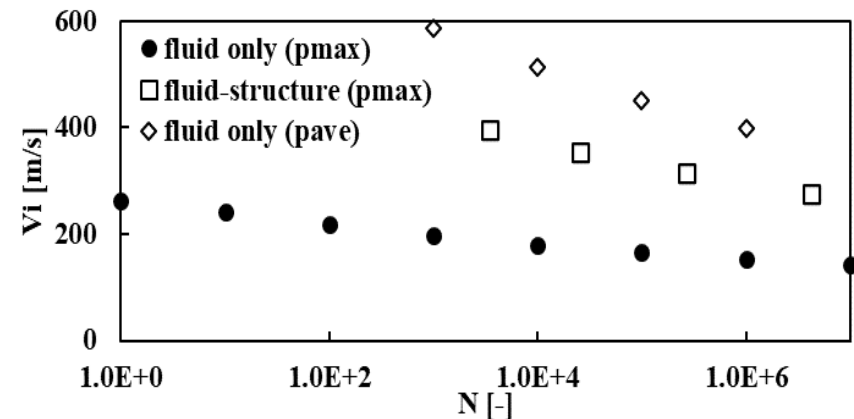
研究成果 ④ブレード材料のエロージョン評価法の検討（担当：横国大、信州大）

研究成果

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。
3. 流体・材料連成解析フレームワークを構築し、V-Nカーブ評価の基礎を確立。



回転式における液膜厚さ



流体・構造連成解析による疲労寿命

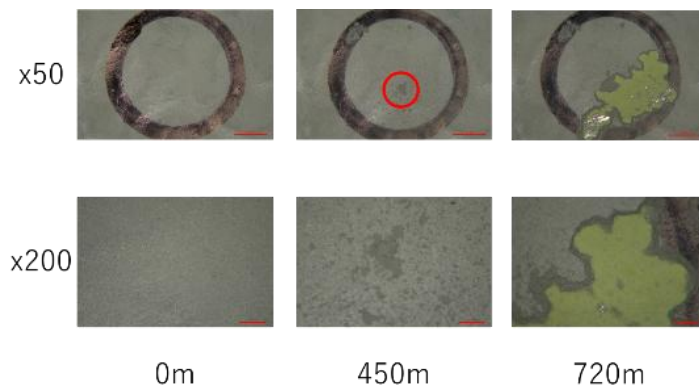
Fujisawa, K., Yamagata, T., Fujisawa, N., & Tanaka, M. (2024, November 20). "Numerical Analysis of Rain-induced Erosion in Wind Turbine Blades," in Proceedings of the 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024), Sendai, Japan.

研究成果 ⑤標準ブレードによる保護塗料の評価（担当：産総研、新潟大）

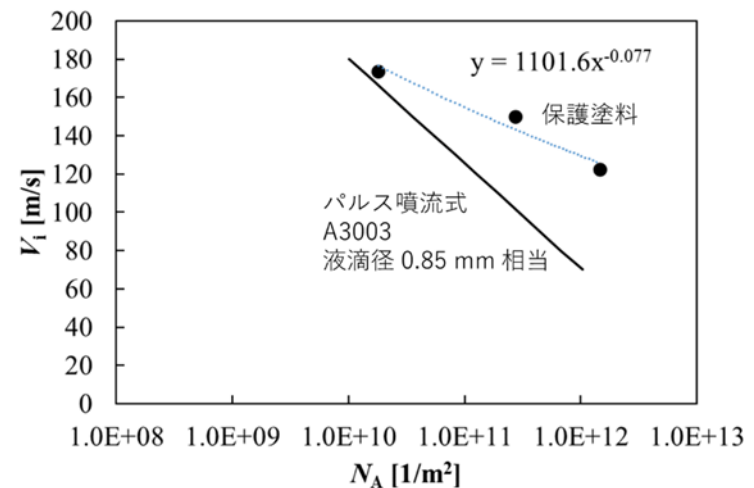
NEDO 洋上風力発電システム実証研究（銚子沖）平成29年3月より, 日本特殊塗料 Wind Hullo Topcoat F (フッ素系塗料) を使用

研究成果

1. 実機でも使用される保護塗料に対し、パルス噴流式試験によりV-Nカーブを取得した。
2. 実機エロージョン予測のためには、低速でのエロージョン試験、実機サイトでの気象データ、紫外線等による劣化影響の評価が必要と判明した。



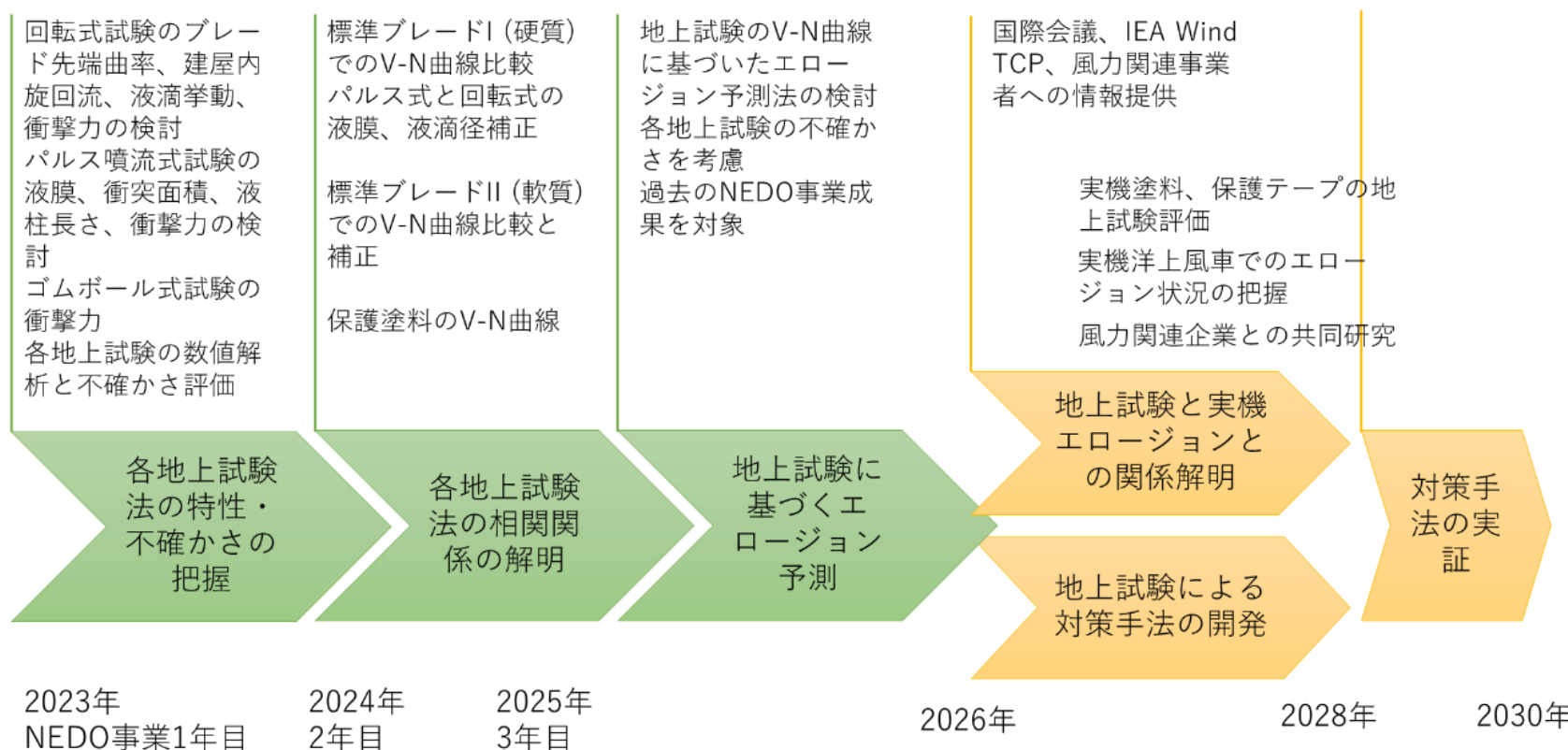
パルス噴流式試験による保護塗料の評価
白は上塗り、黄色は下塗り



保護塗料のV-Nカーブ

今後の技術課題

1. 回転式やパルス噴流式試験による加速試験でのエロージョンと実機エロージョンとの対応関係の解明。
2. 軟質材料のエロージョンメカニズムの解明や気象条件による材料劣化のエロージョンへの影響の解明。



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. 回転式のブレード先端曲率やパルス噴流式の衝突面積の影響による地上試験の不確かさを改善し、標準ブレードI (硬質) に対する V-N カーブの取得によって地上試験の有用性を確認した。
2. 回転式の液滴衝突数やパルス式の衝突速度が主な不確かさの原因であることを明らかにし、液滴径補正と液膜厚さ補正をパルス噴流式の結果に適用することで、パルス式と回転式のV-Nカーブが不確かさの範囲内で一致することを示した。
3. 液膜厚さと衝撃力の関係を数値解析で定量化するとともに、流体・材料連成解析により材料内部の応力・疲労解析ベースのV-Nカーブ評価によるエロージョン予測法の基礎を構築した。