

# 風力発電ブレード部材の迅速耐久性 評価と予知保全技術の開発 (第2報)

分析・化学科 ○高木 智博  
金属・物性科 工藤 弘行  
繊維・高分子科 小林 慶祐

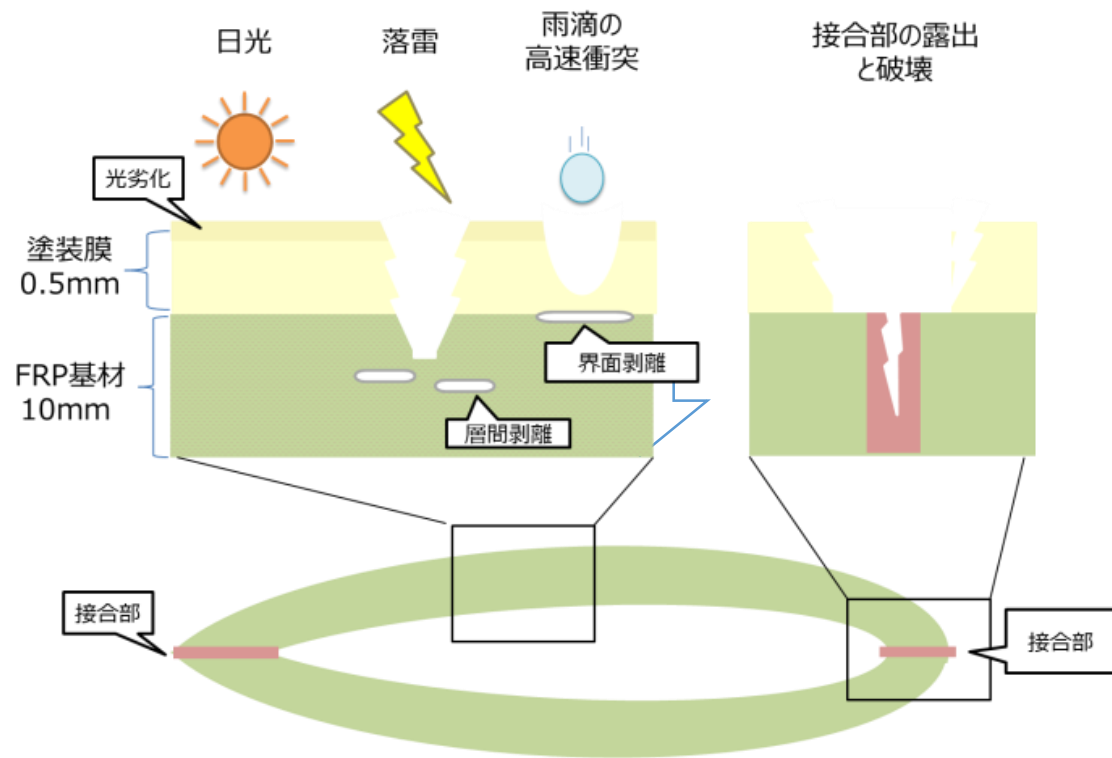
# 研究背景

## 風力メンテナンス業界

福島県内に多数の風力発電計画が進む。

ブレード関連部材や点検産業への参入が期待される。

ブレード保護シートなどは、適切な評価・試験が難しいため、活用が広まらない。



レインエロージョン事例



ブレードはFRP（ガラス繊維 + **高分子**）製  
**高分子**は日光や風雨にさらされて劣化

# 研究背景

## エロージョンとは

高速で回転するブレード前縁部に、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

IEA (国際エネルギー機関)  
Wind TCP (風力技術協力プログラム)

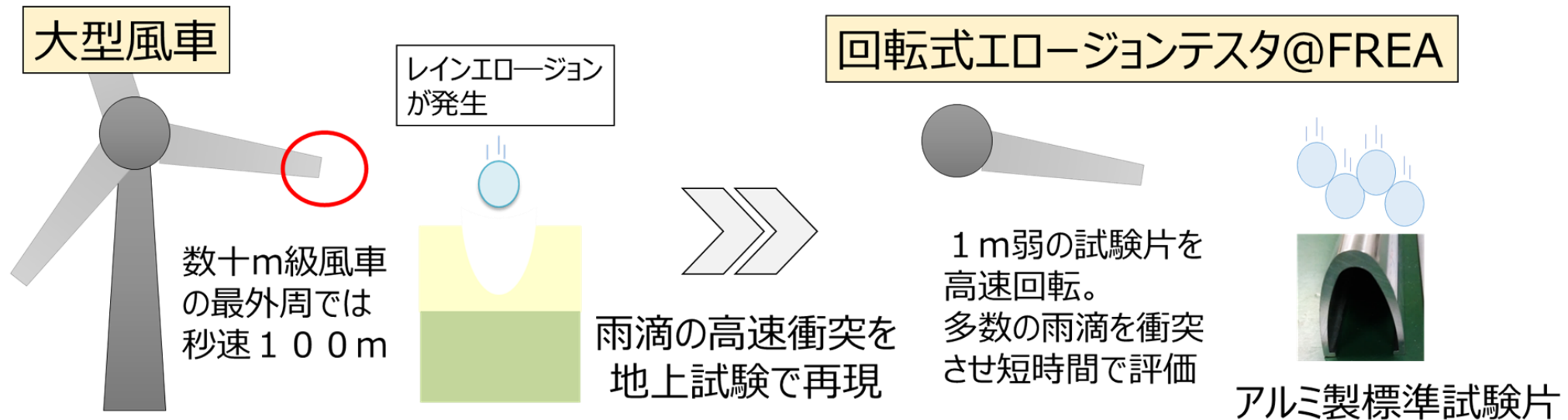
IEA Wind Task 46  
Erosion of wind turbine blades

Leading Edge Erosion Classification  
System

Technical report



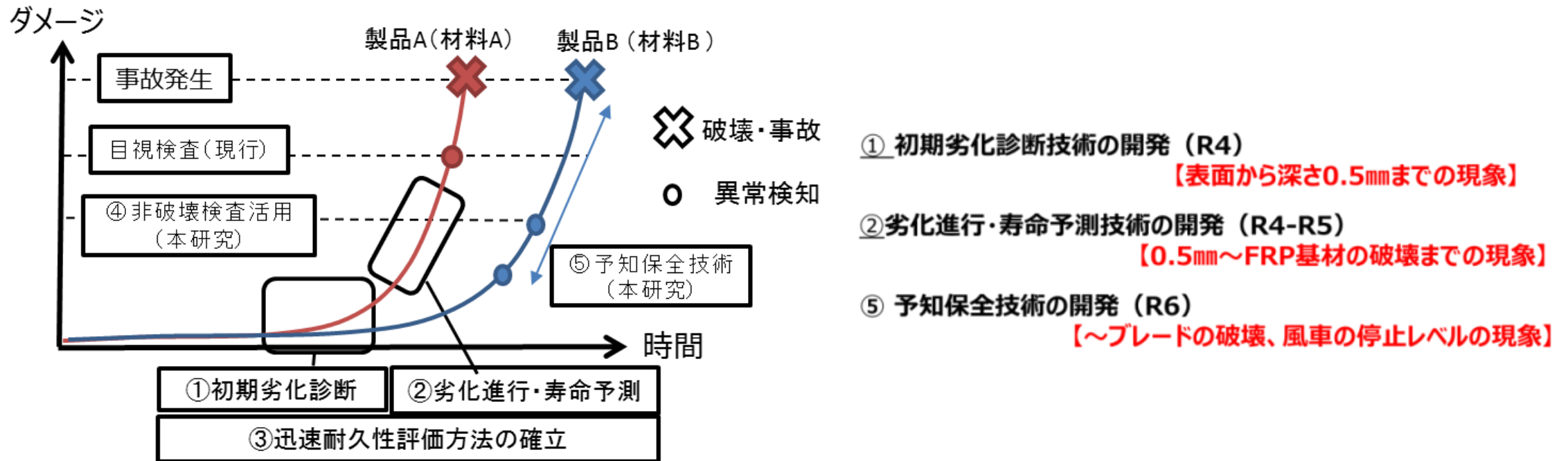
IEA Wind TCP Task46「風車ブレードのエロージョン」が実施中(2021.4~2025.3)。FREA(再生可能エネルギー研究センター)の風力エネルギーチームも参画しており、回転式エロージョンテスト(RER)を導入、エロージョンの分類法提案などを行っている。



# 研究目的

迅速耐久性評価と予知保全技術をねらう。

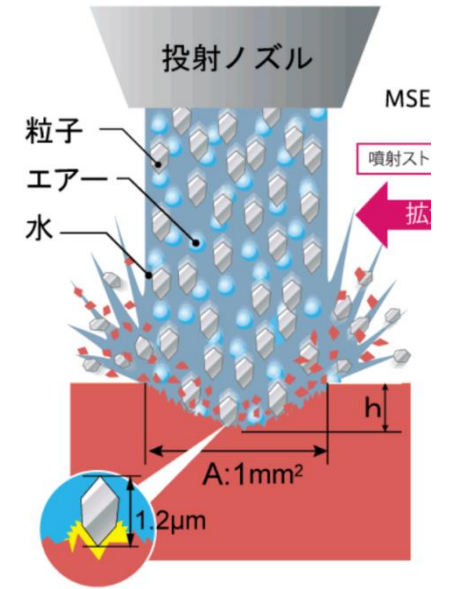
- ・ RET試験に代わる劣化定量手法の開発
- ・ ブレード材料の劣化分析と劣化メカニズムの解明



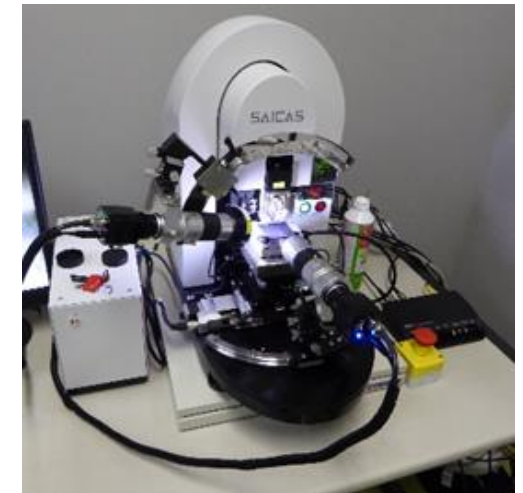
劣化は ①表面の劣化開始（無傷～見えない程度のクラック）  
②界面への到達（見える傷～界面剥離） の2つに分けて評価

# 実施内容

- FRP試験片（コーティング層、平板）
  - Micro slurry-jet Erosion (MSE) 試験  
試験片を劣化させ、MSE試験をその表面で行うことによってエロージョン率（削れやすさ）を評価
  - Surface And Interfacial Cutting Analysis System (SAICAS)  
薄膜の剥離強度とせん断強度を測定する装置を用いて、劣化したコーティング層の表面の切削力を評価
- RET試験片（保護シート、湾曲面）
  - RET試験片表面・断面の観察による劣化メカニズムの解析  
顕微鏡により表面・断面から見たエロージョンの大きさを多数測定し、劣化の進行がどのようなになっているかを解析



MSE試験の模式図



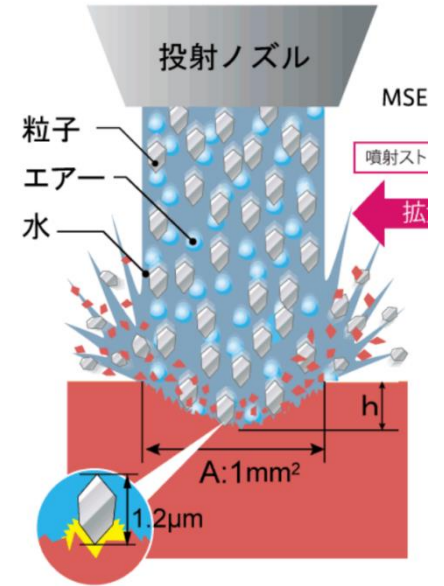
SAICAS本体

# MSE試験について

試験片を劣化させMSE（micro slurry-jet Erosion）試験によりエロージョン率（削れやすさ）を評価

対象はFRP表面のコーティング層（表面～0.5mm）で、シリカ粒子のスラリーをぶつけて表面を削る

= 風雨による表面へのストレスを模擬



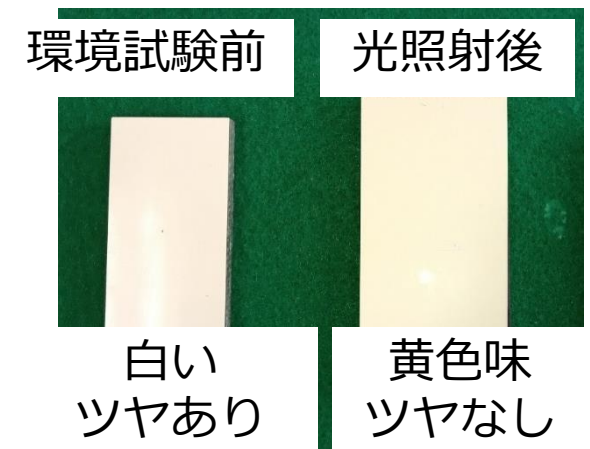
MSE試験の模式図

コーティング層をUV照射により劣化促進させた場合、材質の違いや表面と内部の違いはあるかを検討

UV照射：耐候性試験機

180W/m<sup>2</sup>(300~400nm) → 500時間

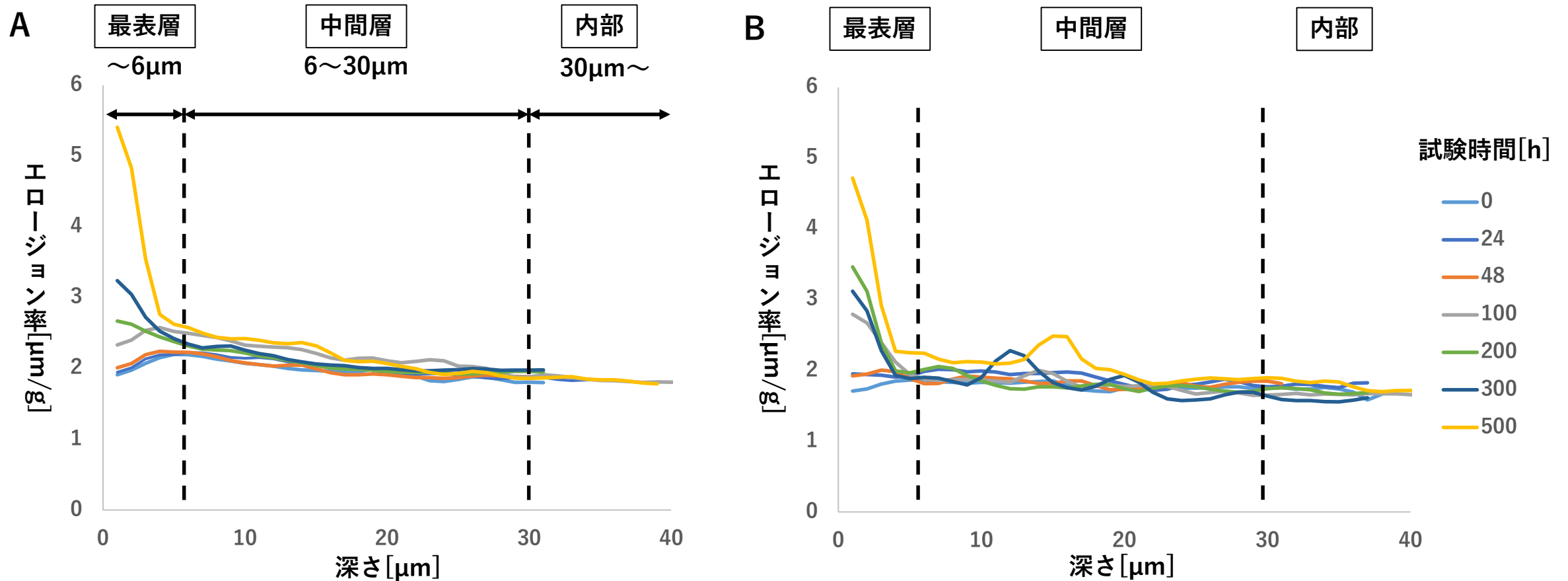
= 日光による表面へのストレスを模擬



環境試験前後の試料

# FRP試験片のMSE試験（耐エロージョン性）

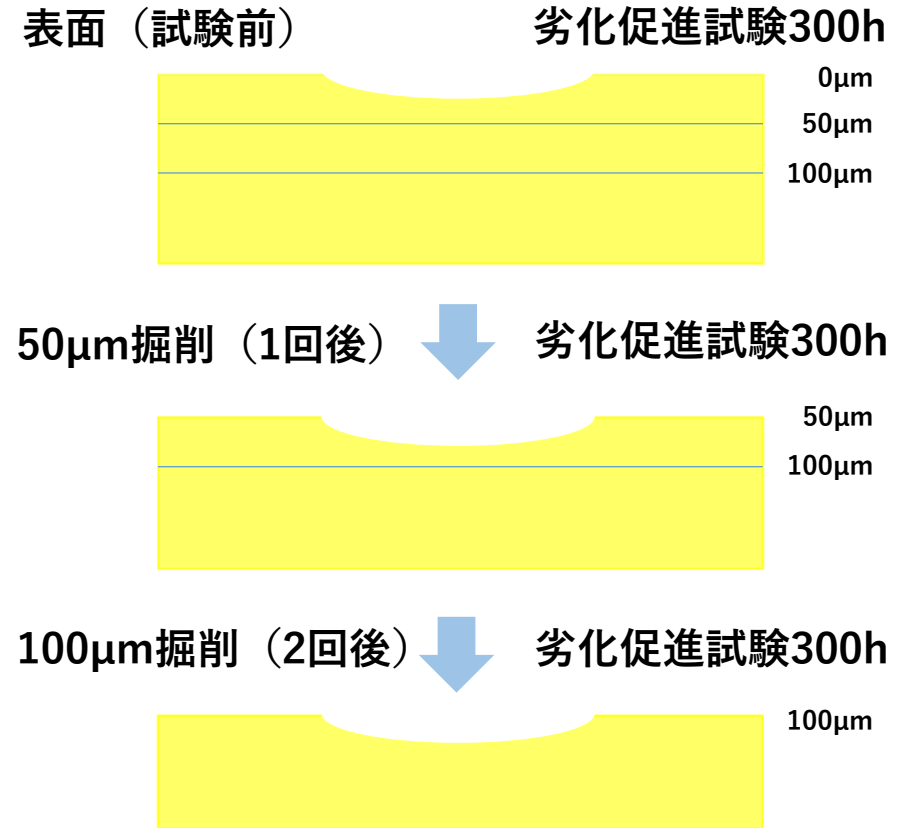
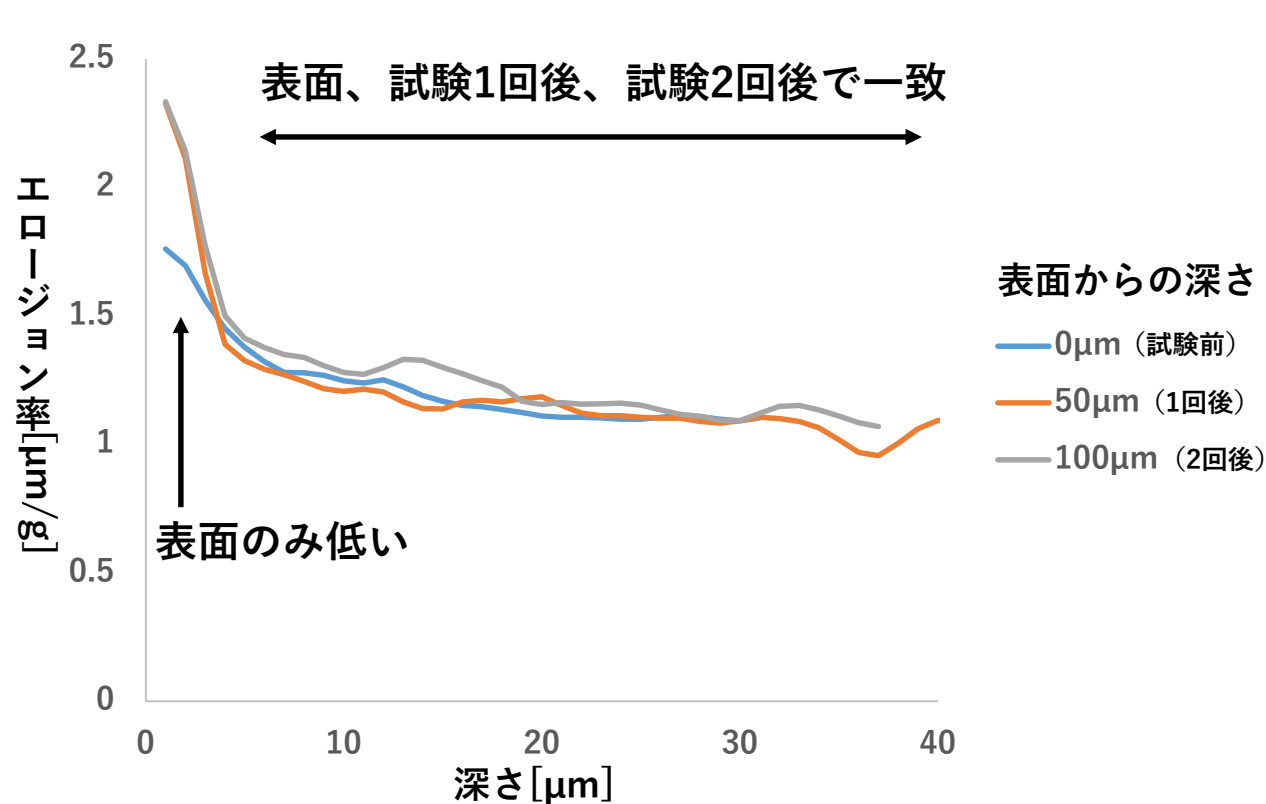
劣化促進試験（UV照射）後のFRP試験片2種を評価した。（日光のストレスを模擬）



試験片A,Bで傾向は一致し、試験時間が長いほどエロージョン率は増加した。エロージョン率は最表層で大きく、内部では試験前と変わらなかった。

# FRP試験片の繰り返し評価

FRP試験片Aについて、劣化促進試験300時間後にMSE試験装置による50 $\mu$ m掘削する操作を2回繰り返した。（風雨と日光の繰り返しストレスを模擬）

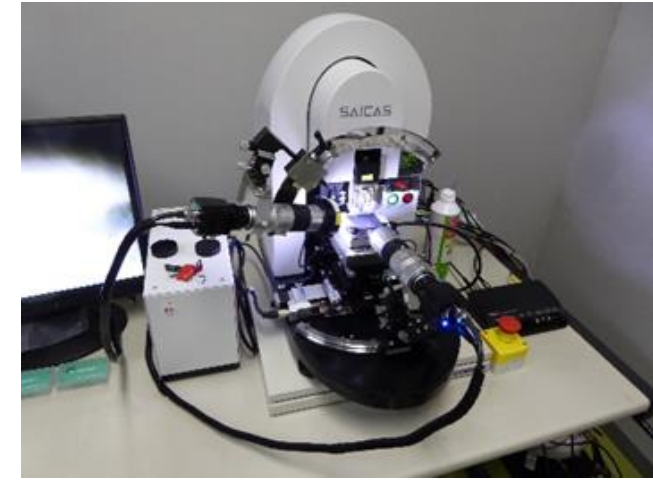


削り取り前の最表層を除き、各々の深さから測定したエロージョン率はほぼ一致した。内部は一様な耐エロージョン性を持つことが確認できた。

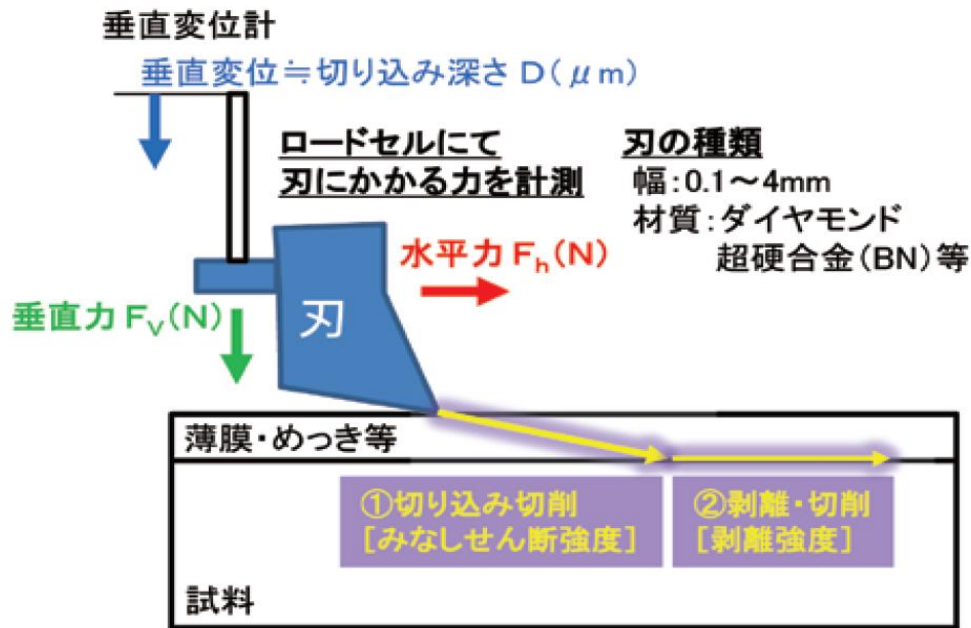


# SAICASによる切削力評価

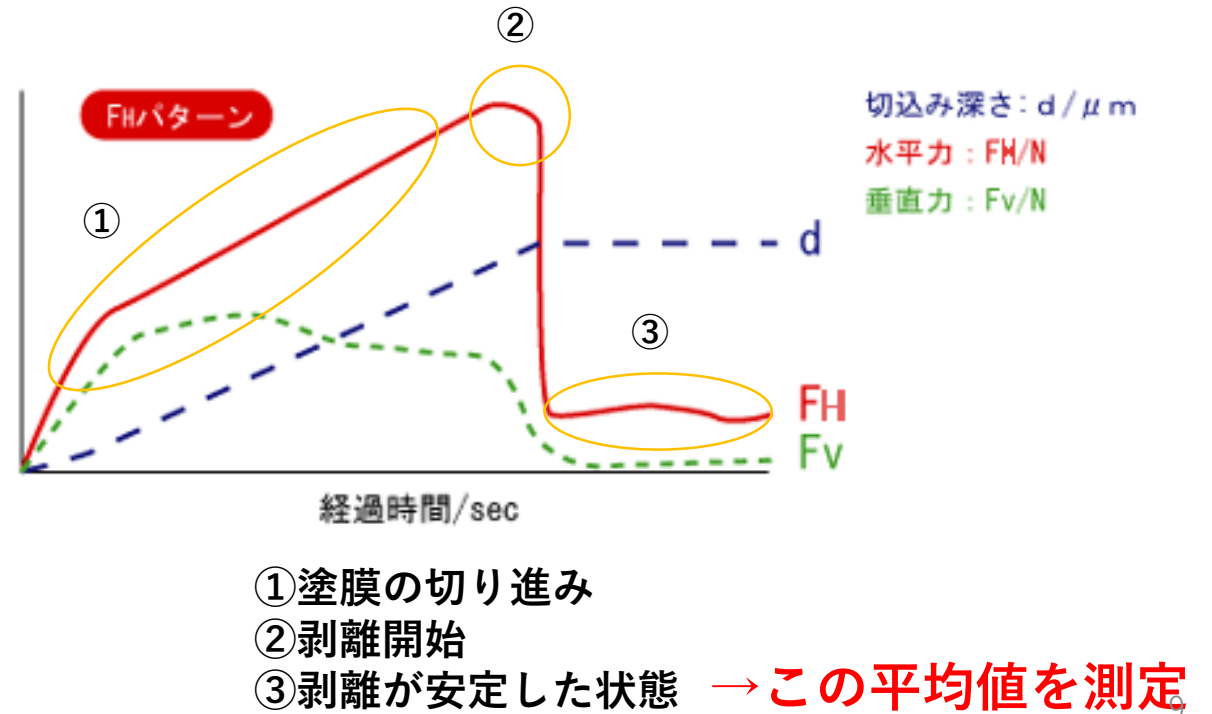
SAICAS : Surface And Interfacial Cutting Analysis System  
被着体の剥離強度とせん断強度を測定する装置を用いて、  
劣化したコーティング層の表面の切削力を測定



試験中の模式図

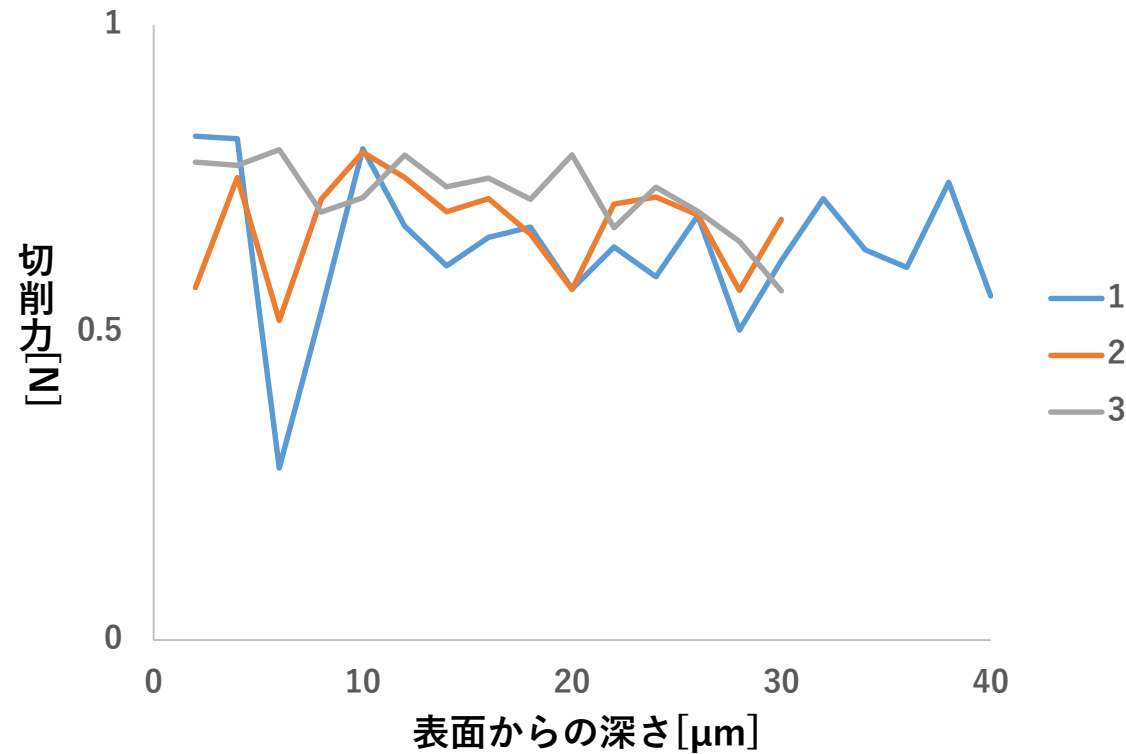


試験結果の模式図



# SAICASによるFRP試験片の切削力評価

劣化促進試験（UV照射300h）後のFRP試験片Bを評価した。  
表面から厚み2 $\mu\text{m}$ ずつ、20層程度切削する試験を3回行った。



MSE試験：コーティング層が粒子と水による衝撃により構造的に弱い部分が破壊される現象

見たパラメータが異なる？

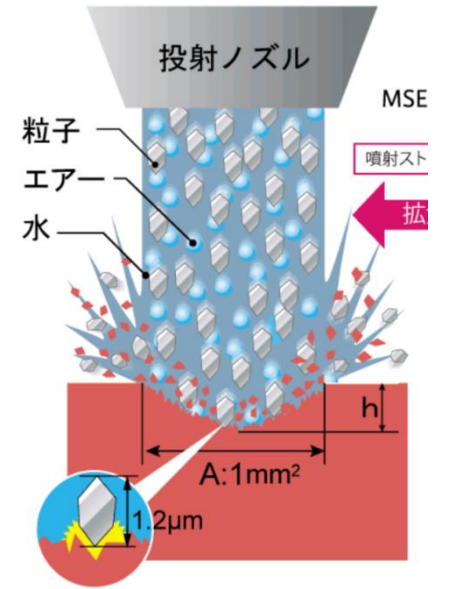
SAICAS：コーティング層が刃によって上下に剪断される現象

切削力は表面からの深さにほぼ依存しなかった。  
(MSE試験の結果と一致しなかった。)

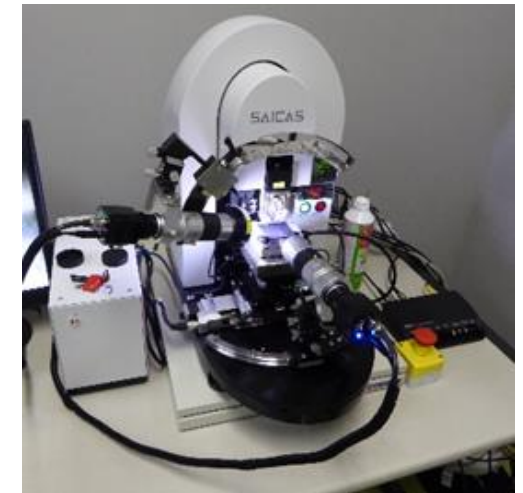
# 実施内容

- FRP試験片（コーティング層、平板）
  - Micro slurry-jet Erosion (MSE) 試験  
試験片を劣化させ、MSE試験をその表面で行うことによってエロージョン率（削れやすさ）を評価
  - Surface And Interfacial Cutting Analysis System (SAICAS)  
薄膜の剥離強度とせん断強度を測定する装置を用いて、劣化したコーティング層の表面の切削力を評価

- RET試験片（保護シート、湾曲面）
  - RET試験片表面・断面の観察による劣化メカニズムの解析  
顕微鏡により表面・断面から見たエロージョンの大きさを多数測定し、劣化の進行がどのようになっているかを解析



MSE試験の模式図



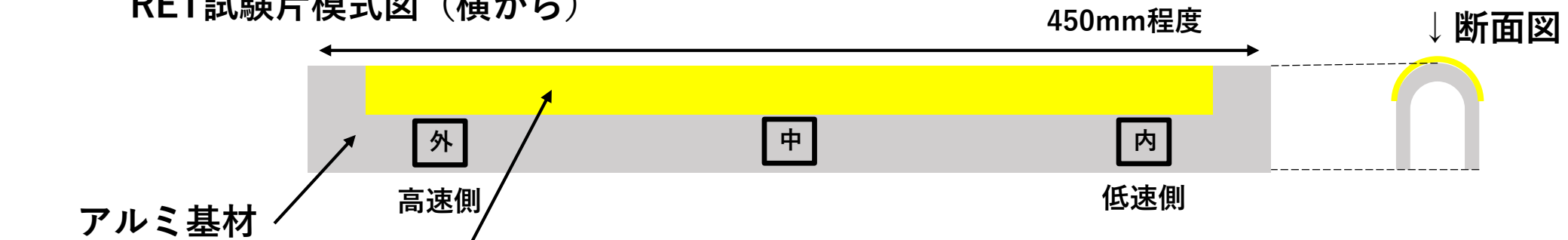
SAICAS本体

# RET試験片によるレイン・エロージョンの模擬

高速で回転する羽根に水滴を垂らすことで、数時間～数日でレイン・エロージョンを模擬した試験が可能。

FREAで試験後のRET試験片を入手できたため、エロージョンの大きさを観察した。

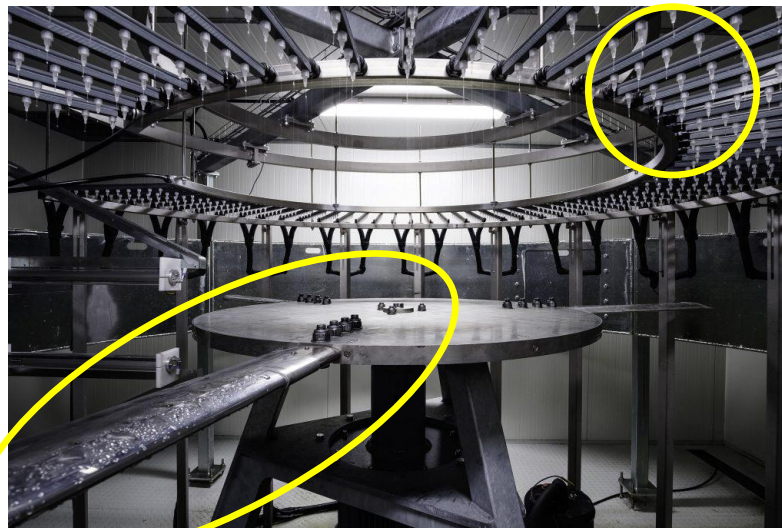
RET試験片模式図（横から）



保護シートorコーティング

試験サンプルを取り付ける羽根

写真はAreoNordic HPより引用  
<https://www.aero-nordic.com/>



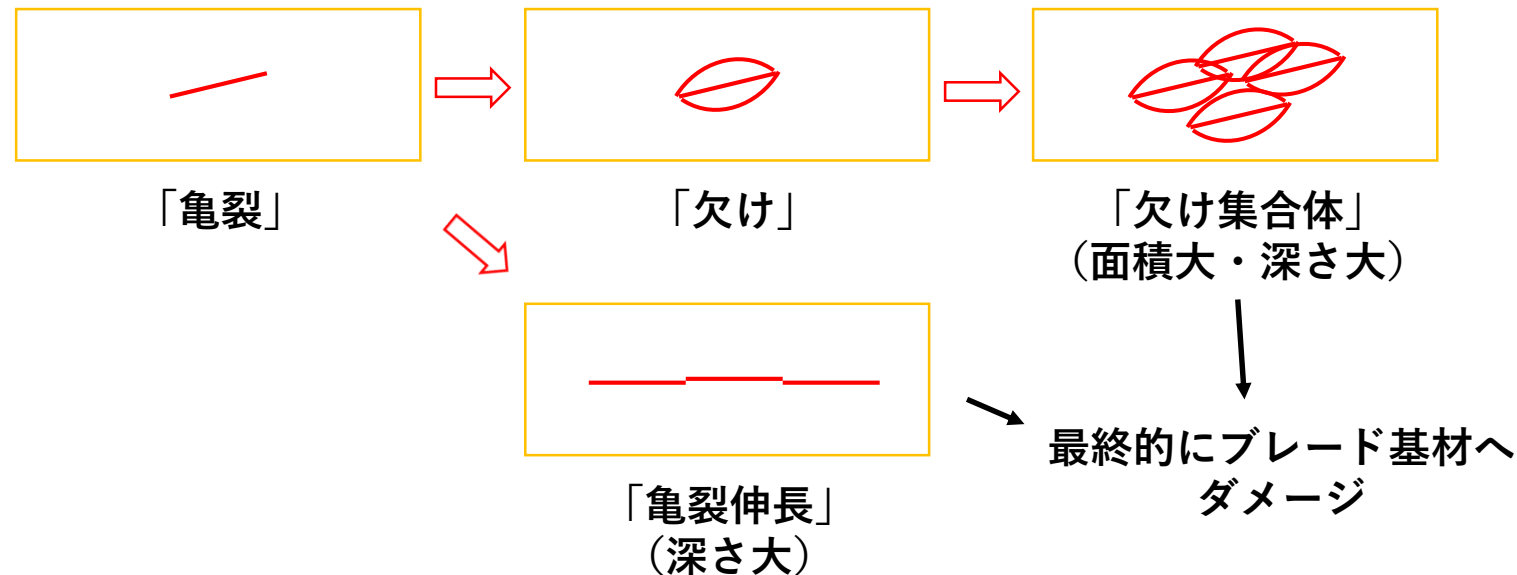
水滴（数mm）が垂れる中を  
数百m/sで羽根が回る

# レイン・エロージョンの成長メカニズム

エロージョンを表面・断面から各数百点を観察し、「亀裂」、「欠け」、その複合体に分類した。それぞれについて詳細な観察を行い、次のことが分かった。

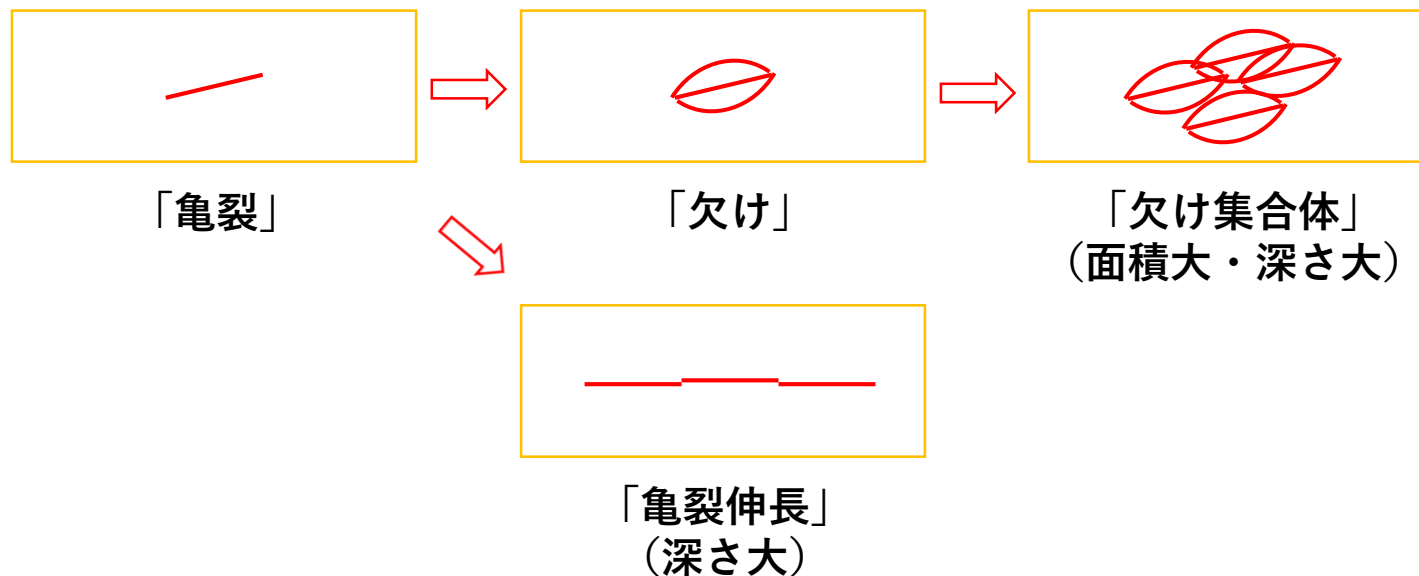
- ・単一の「亀裂」と「欠け」のサイズ感はかなり近い
- ・「亀裂」や「欠け」の内部においても「亀裂」が発生
- ・「亀裂」同士が合流している様子を確認

エロージョンの定量評価と上記観察結果より、（本RET試験片で用いた）樹脂材料のエロージョン成長過程として下のとおり提案する。



# まとめ

- ①MSE試験やSAICASにより、深さ方向の材料特性の変化を定量的に捉えた。  
また、エロージョンの種別により有効な評価手法は異なることが示唆された。
- ②ある種の樹脂材料におけるエロージョンを表面・断面から観察し、それが「亀裂」と「欠け」からなることを見出すとともに、大きさの定量的な評価を行った。
- ③定量的な評価の結果を基に、エロージョンの発生と成長メカニズムの一部を示した。



矢印を遮断できればエロージョンの進行を抑えることができる

→材料開発に役立つ

単一のモードはシミュレーションにより成長を予測できる

→寿命予測に役立つ

# 今後の展開

- ・ レイン・エロージョンの成長メカニズムをCAEで裏付け
- ・ RET試験、MSE試験、SAICASにおける破壊現象の紐づけ
- ・ 亀裂内部や内部剥離等、外から見えない現象を捉えてメカニズムを解明
- ・ ブレード全体についての破壊現象をCAEで確認