

# 風車ブレード部材の迅速耐久性評価および予知保全技術の開発（第1報）

## Development of Rapid Durability Evaluation and Predictive Maintenance for Wind Turbine Blade

材料技術部 金属・物性科 工藤弘行 西村将志 仲沼岳  
材料技術部 分析・化学科 矢内誠人 高橋歩弓 伊藤弘康  
材料技術部 繊維・高分子科 菊地時雄 小林慶祐

風力発電用風車ブレードが受ける負荷を環境試験で与え、部材の耐久性を短期間で評価する手法を確立するとともに、それらで得られた知見を活かした予知保全技術について研究した。環境試験（光照射、高温保持）後のFRP試験片において、MSE試験や切削力計測が材料特性の深さ方向の変化を敏感にとらえることを確認した。また、回転式エロージョンテストのアルミ製標準試験片の調査から、金属材料のレイン・エロージョンは多数回の雨滴衝撃による「塑性流動」が原因であることを示した。

Key words: エロージョン、MSE試験、予知保全、粒子法

### 1. 緒言

現在、福島県内では、多数の風力発電施設を建設する計画が進行中である。風力発電コストの1/3は運転と保守（O&M）の費用であり、風力発電施設の耐用年数が概ね20から30年であるため、福島県では、近い将来、毎年数十億円規模のメンテナンスが数十年間継続的に見込まれるとの試算もあり、地元県内企業の本格的な参入が期待される。

風力発電設備は、屋外に設置され、風、日光、落雷、雨に晒されることを前提とするため、屋外の自然環境に由来する不良現象が起きやすい。図1に、一般的な風車ブレードの翼断面の模式図と代表的な不良現象を図示する。軽量化が求められるブレードは、軽量さと強度を兼ね合わせた繊維強化プラスチック（FRP）材が使用されることが多いが、屋外環境で長期間使用されることに不向きであるため、ブレード部材を保護する塗料やシートの開発も進められている。しかし、自然条件の影響で不良発生状況が大きく変わるなど、風車ブレードで生じる現象は未だ解明されていないことが多く、適切な耐久試験を行うのが困難で、せつかく開発された新製品・新技術が採用されづらいのが現状である。

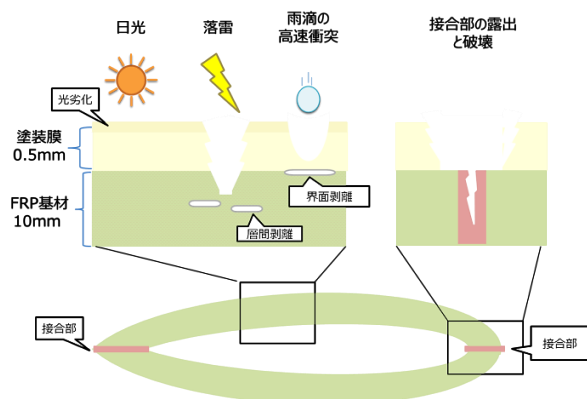


図1 ブレード断面図と表面拡大図

一方、運転事業者にとって、事故・トラブルによる運転停止は大きな問題であるため、様々な立場で安全対策が行われているが、それにもかかわらず、2014～2021年の8年間で22件のブレード損壊事例が発生していることが報告されている<sup>1)</sup>。ブレード検査については、日本風力発電協会が発行する「風力発電設備 ブレード点検及び補修ガイドライン」<sup>2)</sup>が、経済産業省所管の「発電用風力設備の技術基準の解釈」等に参考文献として位置づけられている。ブレード表面については、目視等での確認を基本とし、著しい劣化や損傷及び被雷痕が確認された場合、触手や打音検査等で確認すると記載されているのみであり、長期間で生じる損傷の予兆を捉える、あるいは進行の予測をするなど「技術革新」が求められる状態である。

以上より、本研究では、高分子材料で構成される風力発電ブレード部材の耐久性試験後のサンプルを対象に、材料の劣化分析等を行い、長時損傷のメカニズムを明らかにするとともに、初期劣化を敏感にとらえ短時間で耐久性を評価する試験方法の確立を目指す。さらに、損傷進行に伴う非破壊検査データを蓄積することで、異常の前兆を捉える予知保全技術の開発を行うこととした。

図2は、本研究の実施項目を、品質管理分野でよく使われる「ダメージ-時間モデル」に基づいて図示したものである。この図で横軸は製品の使用時間、縦軸は製品のダメージを示している。風車ブレード部材は、初期はダメージがゼロの状態であるが、時間の経過とともにダメージが蓄積し、限界がきたら破壊や事故が生じると考えることができる。ダメージの進行は、製品構造や材料の種類だけでなく、不良現象の種類により様々であるが、風車ブレードでは、複数の現象の相互作用があるとみられる。また、頻繁に近づいて観察できないため、不良が顕在化したときには、既に不良がかなり進行しており、ダメージ進行の過程の全体像は不明な点が多いことも特徴である。

本研究では、不良の進行を、潜伏期間→初期劣化→劣化進行→破断・事故の4工程として整理する。潜伏期間は目視で変化を捉えられない期間、初期劣化は変化を捉え始める期間、劣化進行は定常的に劣化が進行する期間を指し、最終的に破断・事故に至ると考える。

初年度となる今年度は、表面から深さ0.5[mm]ほどの現象である「初期劣化」に着目し、耐久試験と各種材料化学的評価を実施した。また、レイン・エロージョンの発生メカニズムの検討を行った。

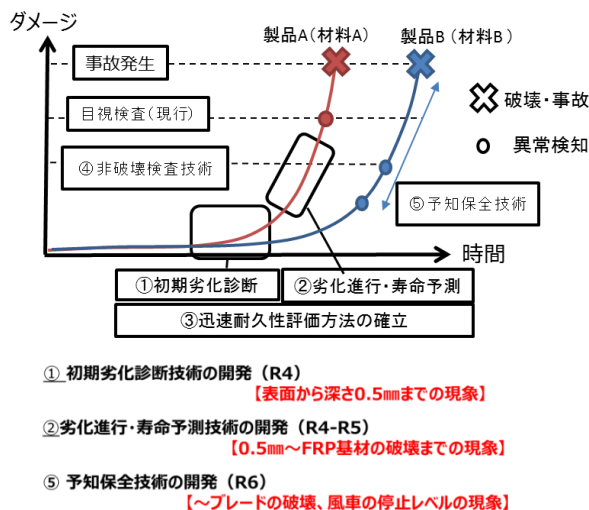


図2 本研究の実施項目のイメージ図

## 2. 実験ならびにCAE解析

### 2.1. 点検技術の概要

はじめに、ブレード点検対象となる不良現象を列記し、それぞれに対する点検技術の一般的な考え方や、本研究グループのアプローチを述べる。

(1) レイン・エロージョン・・・高速回転するブレードに雨粒が衝突することで生じる浸食現象のこと。近年、風力発電設備の大型化に伴い、雨滴の衝突速度は100[m/s]程度に達して、浸食の発生頻度が増えており、メカニズム解明と対策が急務である。図3に代表的な発生例を示す。

(2) 高分子材料の劣化・・・日光や熱、水分などにより、高分子材料の分子量や分子間力が変化することを指す。本研究では、材料化学分野における各種分析の適用により、初期劣化を早期に把握する手法を開発する。

上記2項目は相互作用が大きく、本研究では、一体的に扱い、時間経過による予測式の提案を目指す。

(3) 雷害・・・落雷による損傷で、焼け焦げて欠損し

たくぼみが形成するだけでなく、落雷に伴う衝撃で周辺の部材に損傷を与えたり、FRP部材のひびに水分がある場合、電流通過による温度上昇や、ブレード内部空洞の空気の急激膨張によりブレードが破損することもある。

(4) 層間剥離・界面剥離・・・落雷時の衝撃や、飛来物の衝撃などにより発生する損傷。FRP基材中の積層材中で生じる「層間剥離」と、FRP基材と塗膜など異種材料間で生じる「界面剥離」に大別される。

(5) 割れ、開口・・・外表面で確認できるひびや割れ、隙間が生じた「開口」は、本質的には同一のものと位置づけられる。本研究では、「亀裂」の成長により破壊を論ずる破壊力学により、統一的に評価する。

(6) ブレード折損・・・ブレード部材のうち、荷重を受け持つ一次部材が破損・分離するなど破壊・損傷し、運転ができないような状態を指す。

本研究では、点検により判明した(1)～(5)の不良の状態を反映したCAEブレードモデルの破壊力学解析により、(6)ブレード折損のリスクを定量化する手法を検討する。



図3 レイン・エロージョンの発生例<sup>3)</sup>

### 2.2. 評価対象のサンプルについて

本研究では、市販のFRP試験片と、後述の回転式エロージョンテストの標準試験片を評価対象とした。

FRP試験片は、主に初期劣化の評価に用いた。これは、ガラス繊維と樹脂の複合層が約1.5[mm]、ゲルコートが約0.5[mm]であった(図4)。フーリエ変換赤外分光法(FT-IR)による分析により、複合層の樹脂、ゲルコートはいずれもポリエステル樹脂であった。

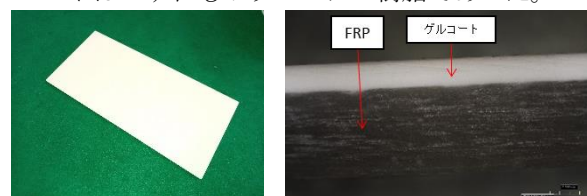


図4.FRP試験片の外観(左)と断面(右)

回転式エロージョンテスト(以降、RETと記述する)は、国立研究開発法人産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所(FREA)が、令和4年度に導入したもので、大型風車で発生する「レイン・エロージョン」を地上試験として再現する試験機である。その原理は、多数のノズルから雨滴を模した液滴を連続

的に放出・落下させ、高速回転するブレードに通常のブレードより高い頻度で雨滴を高速衝突させるものである。回転部は試験片を取り付け・取り外しできる構造を持ち、標準試験片は図5に示すようにアルミニウム合金製であり、そのまま試験することも、この上に塗装を施して試験することも可能である。形状寸法は、長さ約 480[mm]で長さ方向に同一断面を持ち、断面はU字形状で外形はおよそ、幅 25[mm]、高さ 40[mm]である。標準的な回転条件で、実ブレードと同等の衝突速度 100[m/s]前後を実現可能である。

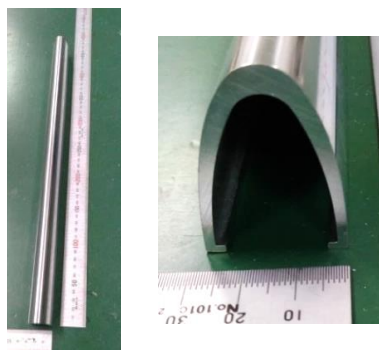


図5 回転式エロージョンテストのアルミ製標準試験片  
(左) 全体図 (右) 端部

### 2. 3. 環境試験

屋外で使用される風車ブレードは、日光、雨、風などで劣化する。有機物の化学的な劣化は主に光、熱で進行する。この2つの条件をFRP試験片に与え、ゲルコートの変化を調査した。耐候性試験は試験機（スガ試験機（株）製 SX75Z）を用い、300 から 400[nm]の放射強度が 180[W/m<sup>2</sup>]となる条件で行った。一方、高温保持試験は 100[°C]の恒温槽内で保持した。それぞれ 500 時間経過後の FRP 試験片を評価に用いた。

### 2. 4. 環境試験後のゲルコートの評価

ゲルコートの耐エロージョン性を評価する手法として、MSE (Micro Slurry-jet Erosion) 試験がある。粒子と水を試験片表面に一定量噴射したあと、表面が削られた部分を形状測定する。この操作を繰り返し、試験体の削られやすさ（エロージョン率）を評価する試験である。風車ブレードは風雨にさらされて表面から摩耗していくため、この試験は風車ブレードが実環境で摩耗する条件に近いと考えた。MSE 試験は装置メーカー（(株) パルメソ MSE-A）で実施した。

ゲルコートの切削力計測を表面切削装置(ダイプラ・ウィンテス (株) 製 SAICAS EN 型)で行った。試験体を切削する際の刃物が受ける垂直、水平方向の荷重をそれぞれ計測した。試験の様子を図6に示す。水平方向 1[μm/s]、垂直方向 0.1[μm/s]速度で刃物を移動させ、切削深さが表面から 100[μm]となるまで計測した。

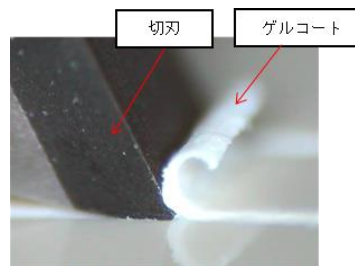


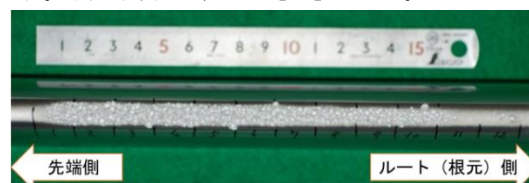
図6. 切削実験の様子

### 2. 5. アルミ製RET標準試験片の材料工学的評価

レイン・エロージョンの発生・成長メカニズムを検討するため、材料工学的な評価として、アルミ製 RET 標準試験片の組織観察、硬さ測定を行った。

図7（上）は、試験終了後の標準試験片の外観写真である。標準試験片は回転中心に近いルート側と先端側で周速度が大きく異なり、周速の遅いルート側では凹凸の形成は散発的であるが、周速の速い先端側に行くと全面凹凸形状に移行し、先端ほど凹凸の程度が激しい。場所により損傷の程度が異なるが、これを逆手に取り、測定点を周速度と紐づけ体系的な評価ができれば、単一サンプルだけで多数の速度条件の評価、あるいはエロージョン発生の経過を評価できるため、むしろ材料工学的評価には好都合と考え、図7（下）に示すように、ワイヤ放電加工により 15[mm]間隔に切断してサンプルを作成し、体系的な各種評価を試行し、その妥当性、効率性を検証した。

図8は、組織観察および硬さ測定用の樹脂埋めサンプルを示す。硬さ測定は当所が所有するマイクロビッカース硬度計(HMV-G31-FA-D)の自動測定機能を用い、硬さ分布の評価を行った。図9に、硬さ測定点を赤点で示す。測定間隔は、0.15[mm]とした。



(上) 切断前



(下) 切断後

図7 ワイヤ放電加工による切断方法

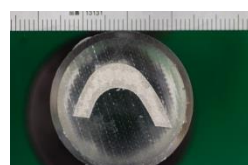


図8 樹脂埋めサンプル

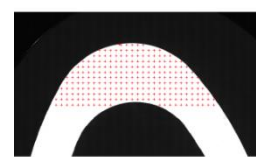


図9 硬さ測定点



## 2. 6. 雨滴衝突に関するCAE解析

レイン・エロージョンのメカニズムを検討するには、雨滴が衝突し砕け散る過程を計算する必要があるため、コンピュータシミュレーションの計算手法として、流体や固体の大変形を計算するのに適した「粒子法」を用いた。粒子法では、物体を粒子の集合体で表し、近隣にある粒子同士の力学的関係性を条件として物体の運動や変形を計算するものである。

計算には、市販ソフトウェア ANSYS Mechanical の動的陽解法 ソルバー「autodyn」を用いた。「autodyn」では、粒子法だけでなく、計算手法として最も一般的な有限要素解析も利用可能である。図 1 0 に 2 手法による雨滴のモデル化の違いを示す。レイン・エロージョンの素過程は、流体である「雨滴」の衝突と、それに伴う固体である「ブレード部材」の高速・大変形であるが、「autodyn」はこれらの現象を同一のソルバーで計算できる利点がある。

本研究では、2 手法の計算手法を両立しながら計算する「粒子法—有限要素法連成解析」を行った。アルミ合金の材料物性値は、「autodyn」データベースから、A1100-0 材の値を用い、衝突速度を 6~600[m/s]まで変えた場合の平面への直径 3[mm]の雨滴の衝突、くぼみがあった場合の衝突に加え、図 1 1 に示すように、断面写真を参考に作成した球面や円錐面の形状のくぼみを持つ「RET くぼみモデル」の解析を行った。

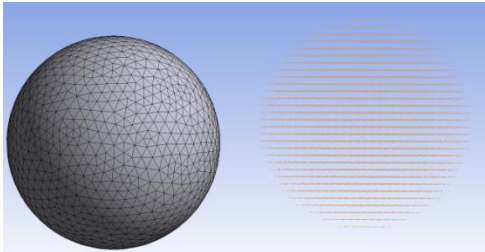


図 1 0 有限要素モデル (左) と粒子モデル (右)

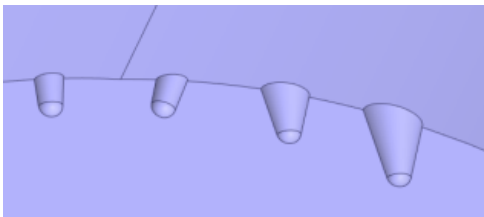


図 1 1 RET くぼみモデル (仮想断面図)

## 3. 結果

### 3. 1. ゲルコートの MSE 試験と切削実験結果

環境試験前後の FRP 試験片のエロージョン深さとエロージョン率の関係を図 1 2 に示す。FRP 試験片の表層付近で差が見られ、照射した FRP 試験片は表層付近のみエロージョン率が高いことが分かった。一方、高温保持した FRP 試験片は試験前よりもエロージョン

率が低いことが分かった。FRP 試験片表面から 20[ $\mu\text{m}$ ]以降において、環境試験前後のエロージョン率は同じ傾きとなった。

切削力計測において、水平方向の荷重計測結果を図 1 3 に示す。照射後の FRP 試験片は、試験開始から切削深さ 40[ $\mu\text{m}$ ]付近までは高温保持後と傾きがほぼ一致し、それ以降は環境試験前と傾きがほぼ一致した。この傾きは、みなしせん断強度を示すもので、FRP 試験片の途中で材料特性が変化していることを示す<sup>4)</sup>。照射後の切削実験の結果を図 1 4 に示す。この図において、垂直方向の荷重が深さ 40[ $\mu\text{m}$ ]の位置で変化していることが分かった。

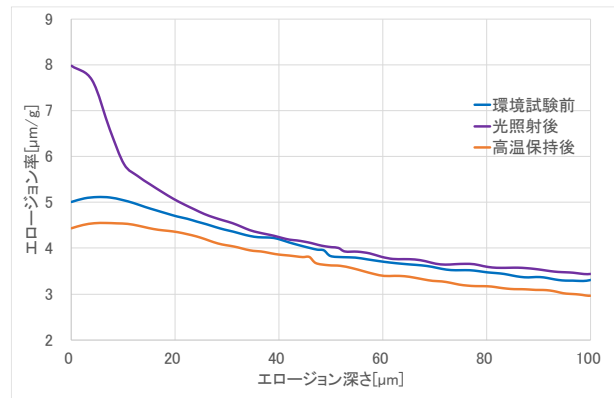


図 1 2. 環境試験前後の FRP 試験片の MSE 試験結果

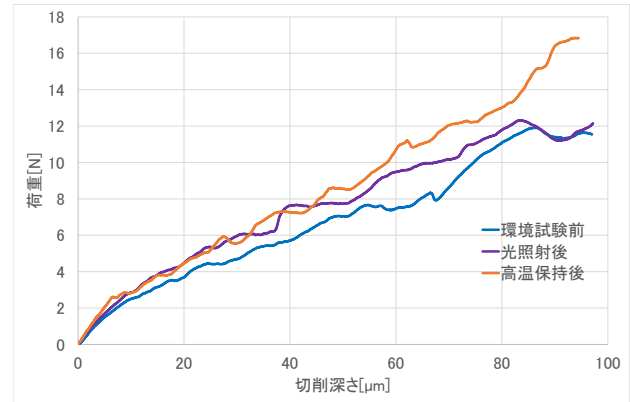


図 1 3. 環境試験前後の切削実験結果

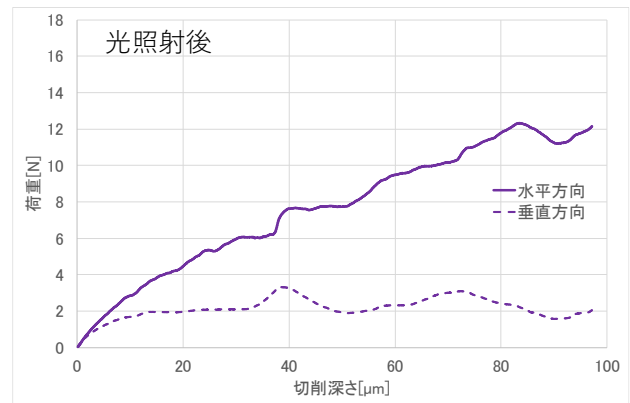


図 1 4. 照射後の切削実験結果

### 3. 2. アルミ製標準試験片の材料工学的評価結果

図15はRET試験前サンプルのマイクロ組織写真である。全体的に、析出物が多数分散している。

図16はRET試験後の断面写真例（断面AとB）である。幅・深さともに100~1000[μm]程度の滑らかな形状のくぼみと、それに挟まれた歪な形状の突起が特徴である。断面写真から推察すると、くぼみは球面や円錐面に近い3次元形状と考えられる。

断面Aの突起部の拡大写真では、多数の「重なり」や「空洞」が確認できる。また、空洞部の底部には、欠片、何らかの汚れが集まっているように見える。



図15. RET試験前サンプルのマイクロ組織写真

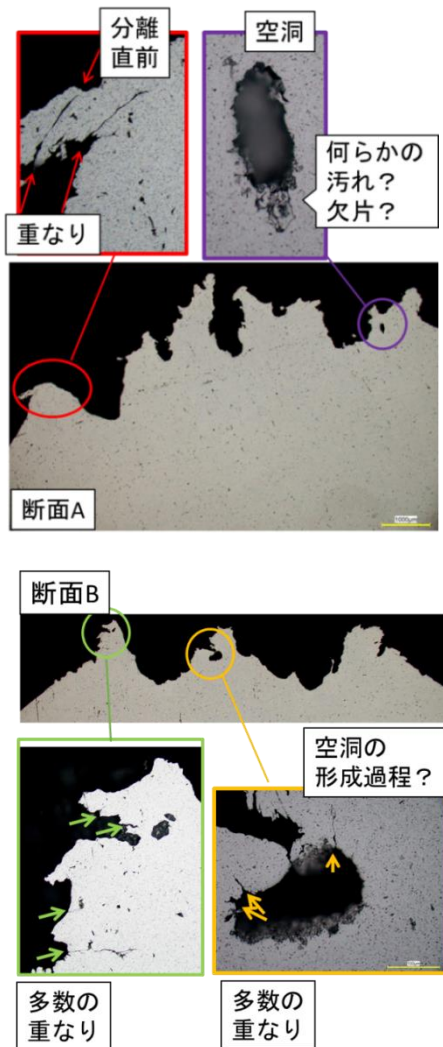


図16. RET試験後サンプルのマイクロ組織写真

図17は、アルミ製RET標準試験片の断面硬さ分布マッピング評価の例で、断面6~16の結果をカラーマップとして示す。図中、硬さの低い部分を緑、高い部分を赤で示す。別途測定した未試験材は、ビッカース硬さ34HV程度で、表面も内部も同じ硬さであった。

凹凸のない断面12から14では表面で最大38HVと、未試験材から4ポイントほど硬化した程度であった。一方、凹凸の激しい断面6~10では、凸部のいびつな形状部や、凹み部の表面などで高く、最大で56HVであることを確認した。アルミ合金は塑性変形に伴い硬化する加工硬化する金属材料の典型的なものであるが、これは最大限レベルの加工硬化に相当する。

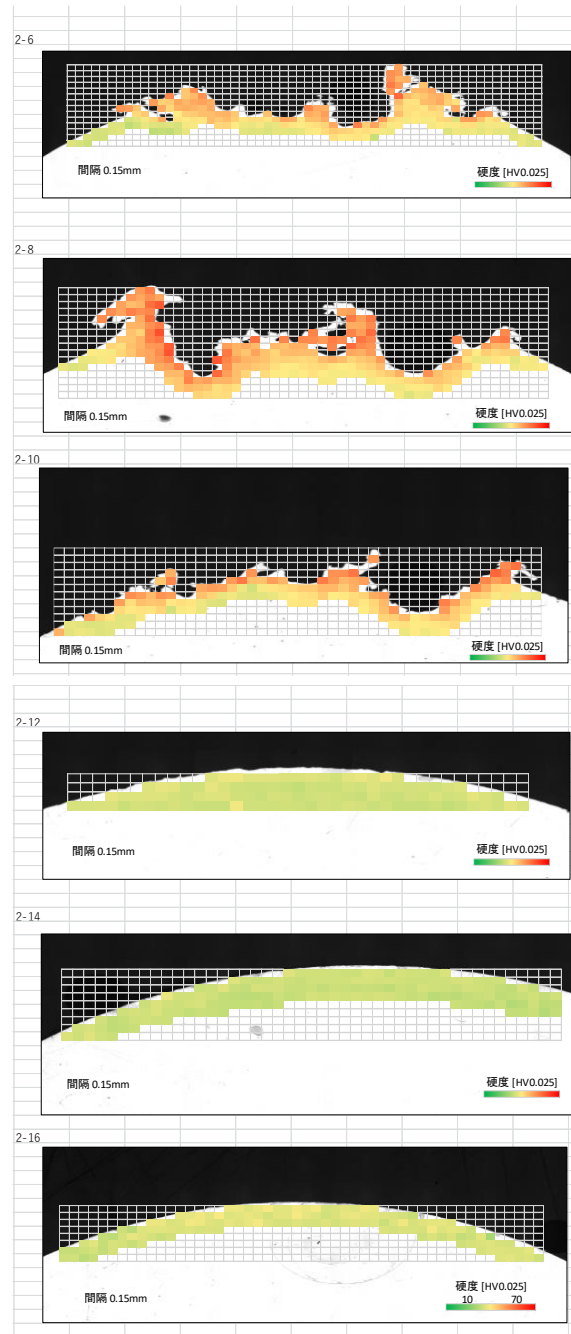


図17 RETアルミサンプルの硬さマップ

### 3. 3. 雨滴衝突に関するCAE解析結果

はじめに、雨滴が衝突速度 400[m/s]の条件で、有限要素法と粒子法で計算した場合の変位分布図を図 1 9、2 0に示す。有限要素法では、直径の 2 割程度がつぶれた時点で要素が大きくなりゆがみ計算が停止したが、粒子法では雨滴が砕けて飛び散る過程まで計算できており、粒子法の優位性を確認した。

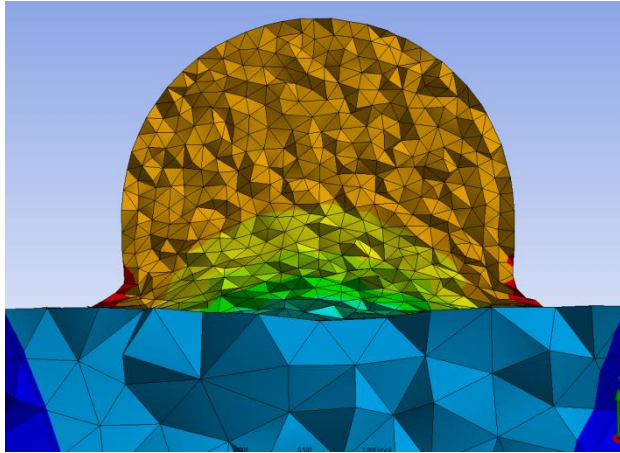


図 1 9 有限要素法の計算例 (仮想断面図)

次に、衝突速度を 6~600[m/s]まで変化させた場合の相当応力、相当塑性ひずみのグラフを図 2 1に示す。代表的な結果として、速度 400[m/s]の場合の塑性ひずみ、変位を図 2 2に、速度 100[m/s]における塑性ひずみを図 2 3に示す。400[m/s]では、放射状の応力/ひずみ分布や明瞭なクレーター形状が確認できる。一方、100[m/s]における塑性ひずみ 0.0024 であり、ちょうど弾性限界を超え、塑性変形が始まる移行期にあたる。

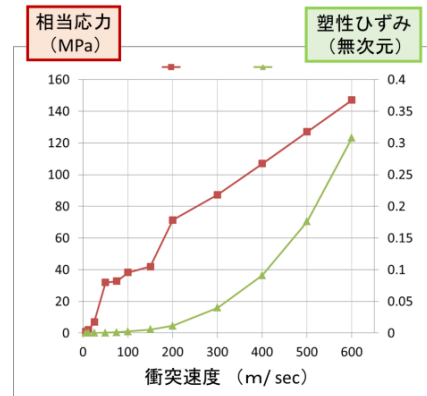


図 2 1 相当応力、塑性ひずみに及ぼす衝突速度の影響

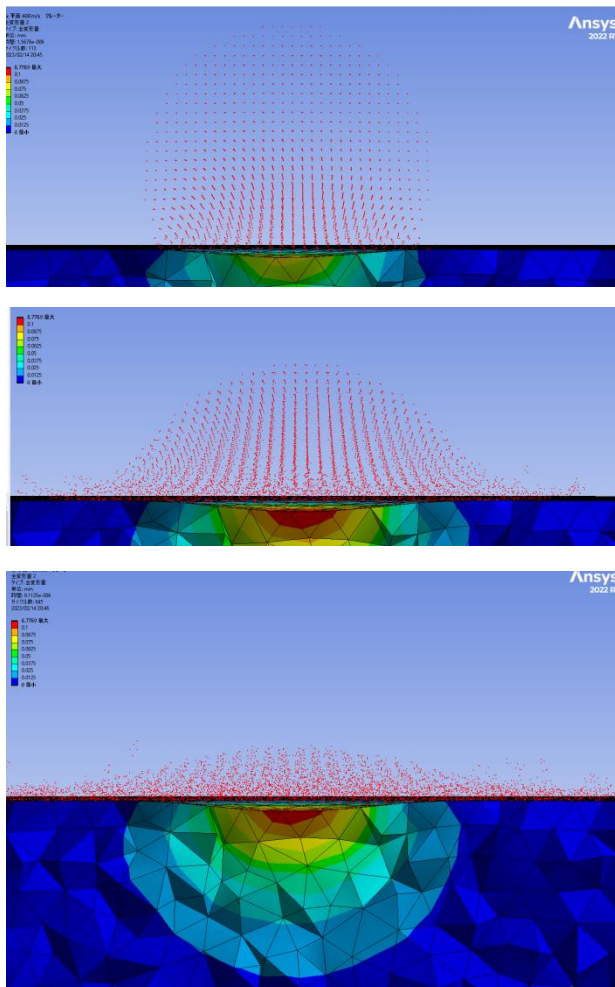


図 2 0 粒子法の計算例 (仮想断面図)

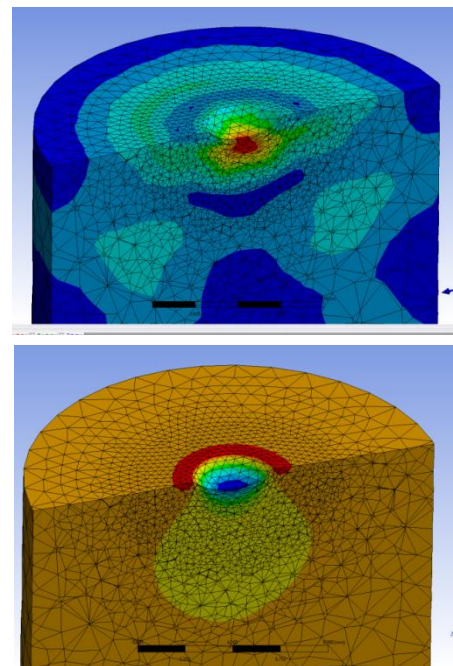


図 2 2 衝突速度 400m/s の計算結果  
(上) 相当応力 (2) 上下方向変位

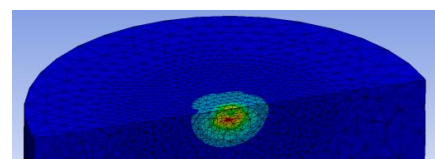


図 2 3 衝突速度 100m/s の計算結果  
(塑性ひずみ分布)



RET くぼみモデルの計算は、雨滴同士の相互作用や、くぼみ同士の相互作用を調べるため、5つのくぼみを持つモデルに直径2から3[mm]の雨滴を複数同時に速度100[m/s]で衝突する条件とした。

図24は、最大応力が生じた時点の相当応力分布を、粒子も含めて示している。くぼみ部は、通常部に比べ、応力が高くなっている。

図25は、塑性変形が終了した時点の、塑性ひずみ分布である。くぼみの入り口と、底部に平面衝突における速度200~400[m/s]の条件に相当する大きな塑性ひずみが生じる。

図26は、粒子モデルの相当弾性ひずみを示した。くぼみの中に粒子が侵入しており、くぼみ形状における粒子法の有効性を確認した。また、くぼみ中のひずみは中程度であり、円筒面表面近傍のひずみの方が大きい。

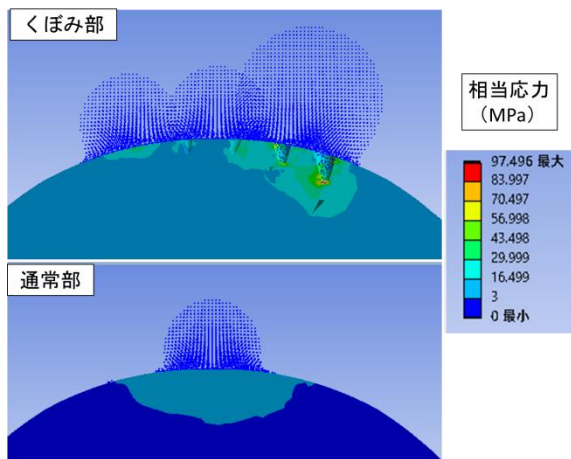


図24 相当応力分布

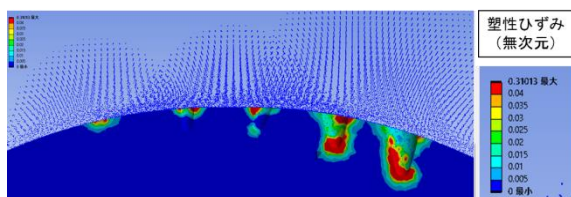


図25 塑性ひずみ分布

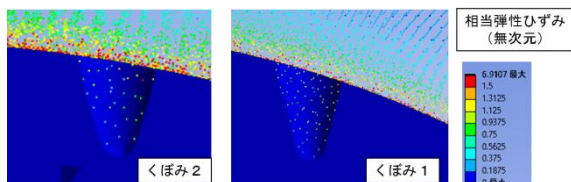


図26 雨滴の相当弾性ひずみ分布

## 4. 考察

### 4. 1. 環境試験によるゲルコート材料特性の変化

光照射したFRP試験片において、MSE試験と切削力計測の結果から、ゲルコート表層と内部は材料特性が異なることが示唆された。これは、光照射による影響が表面付近に限られるためと考えられる。光照射によりゲルコート表面の分解反応が生じ、材料特性が変化したものと考えられる。これはFT-IR分析、熱分析により確認した<sup>5)</sup>。一方で、高温保持したFRP試験片は、環境試験前と比較し削られにくく変化していた。これは、加熱によりゲルコートに含まれる未反応の原料が新たに架橋した可能性がある。

MSE試験や切削力計測は材料の深さ方向の材料特性の変化を敏感にとらえることができ、深さ方向に変化があるような試料の評価に有効であることが分かった。

### 4. 2. 金属材料におけるレイン・エロージョンの発生メカニズムの考察

硬さ測定分布により示された加工硬化とCAE解析の結果から、金属材料のレイン・エロージョンの発生は「塑性変形」と強い相関関係がある。さらに、断面組織観察によると、重なり等の突起部の折れ曲りが確認でき、多数回の雨滴の衝突により「塑性流動」が起これることで、表面のくぼみが成長し、くぼみ間の突起部で金属片の分離・脱落が起これると結論付けた。

また、RETくぼみモデルのCAE結果から、一定以上大きくくぼみが形成されると、ある種の「応力集中」により少数のくぼみの変形が加速され、選択的に成長する可能性を示した。くぼみが円錐あるいは球面形状であるため、くぼみの奥に行くほど狭くなり、流体としてひずみが大きくなると予想されたが、図26ではひずみは中程度であり、どちらかという形状作用の方が大きいようである。

発生からの成長の過程についての説明はこれからだが、本報告により、金属材料のレイン・エロージョンのメカニズムは、ほぼ確定したと考える。

現在、レイン・エロージョンの研究において、金属材料を対象にしたものが多数みられるが、高分子材料である塗膜やFRPでは、金属材料のような大きな「塑性流動」は起きず、異なる変形挙動となるため、金属のエロージョンと高分子材料のエロージョンの関連性を議論するには注意が必要である。

### 4. 3. 今後の展望

本報告で示した各項目のうち、力学的側面の内容は、金属材料・高分子材料など材料種別を問わないものであることから、来年度以降は、塗膜やFRP基材などに対象を拡大する計画である。

特に、本研究で用いたCAE手法「粒子法—有限要素法連成解析」は、現在、国内で行われている関連研究と連携することを想定した準備を進めている。図22

は、本 CAE 手法の応用イメージを示したものであり、液撃試験など各種地上試験や実ブレードの現象をつなぐ役割、気象データと紐づけるアプローチ、塗装やシート等保護効果を持つ製品群や、シートの接着などの評価など幅広い観点で利用可能と考える。

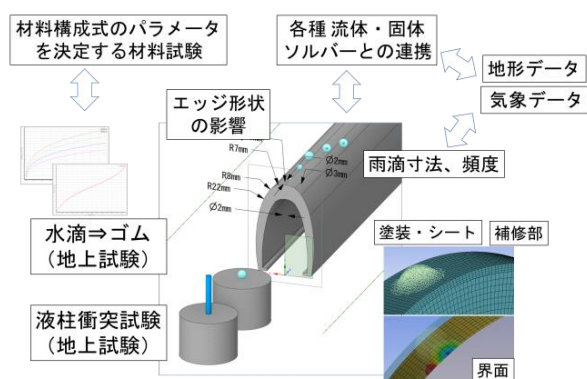


図 27 本 CAE モデルの応用イメージ

## 5. 結言

風力発電用ブレードが受ける負荷を環境試験で与え、部材の耐久性を短期間で評価する手法を確立するとともに、それらで得られた知見を活かした予知保全技術について研究した結果、以下の知見が得られた。

- ① MSE 試験や切削力計測は材料の深さ方向の材料特性の変化を敏感にとらえることができ、深さ方向に変化があるような試料の評価に有効であることが分かった。
- ② 金属材料におけるレイン・エロージョンの発生と成長メカニズムが、塑性変形による凹凸の発生、凹み部の選択的成長、塑性流動からなることを示した。高分子材料である塗膜や FRP では塑性変形は起きないので、両者の関連性を議論するには細心の注意が必要である。
- ③ 本研究が用いた CAE 手法「粒子法-有限要素法連成解析」は、雨滴が高速衝撃で砕けて飛び散る過程まで計算でき、かつ、ブレード部材内部の挙動も同時に評価できることを確認した。

なお、本研究グループでは、現在、ブレード部材と同等の塗膜や FRP 基材の材料分析を実施しており、これら高分子材料のレイン・エロージョンのメカニズムについても解明を進める計画である。

## 参考文献

- 1) 経済産業省：新エネ事故対応WGの審議対象及び

水平展開ルールの明確化等について、

[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan\\_shohi/denryoku\\_anzen/newenergy\\_hatsuden\\_wg/pdf/029\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/029_03_00.pdf) (参照 2023-2-13)

2) 日本風力発電協会：自主指針「風力発電設備ブレード点検および補修ガイドライン」,

[https://jwpa.jp/cms/wp-content/uploads/JWPAguideline\\_blade\\_inspection\\_repair-1.pdf](https://jwpa.jp/cms/wp-content/uploads/JWPAguideline_blade_inspection_repair-1.pdf) (参照 2023-2-13)

3) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：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,

<https://www.nedo.go.jp/content/100954858.pdf> (参照 2023-2-13)

4) 木嶋芳雄、西山逸雄、異種材料界面の諸特性評価システム「サイカス」、日本接着学会誌、Vol. 41, No. 6, 2005, p. 234-241

5) 藤本悦子、藤巻隆、脂肪族ポリエステルと芳香族ポリエステルの FT-IR-ATR、GPC、および DMA 測定による光分解機構の解析、高分子論文集、Vol. 52, No. 6, 1995, p. 378-387