# 風力発電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3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 材料技術部 分析・化学科 高木智博 杉原輝俊 添田友貴 材料技術部 繊維・高分子科 小林慶祐 電子・機械技術部 機械・加工科 坂内駿平

風力発電用風車ブレードが受ける負荷を劣化促進試験で与え、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。レイン・エロージョンの進行メカニズムを明らかにし、それを基に複数の評価 法を組み合わせ、初期劣化評価、迅速な寿命評価ができることを示した。 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(0&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、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 塗料や保護シートの開発も進められている。しかし、 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、せっか 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 ブレード断面図と代表的な不良現象

研究当初においては、風車ブレードの構造として、 FRP 部材の表面に 0.5[mm]程度の塗膜が形成された構 造を想定していた。しかし近年、例えば1~2[mm]程度 とかなり厚く、塗膜より柔らかいシートなど、様々な 材料・構造を持つ保護シートが実用化<sup>1,2)</sup>されており、 十分な保護性能を持つことが明らかになってきた。衝 突する雨滴の直径が2~3[mm]程度であるから、この厚 みの影響は大きい。厚みの違いの他にも、材質や硬さ が異なるシートに一つの雨滴が衝突したときの「素過 程」の変形挙動はシートのタイプにより大きく異なり、 結果として現れる破壊現象も亀裂、脱落、剥離やその 複合等多岐にわたるものと考えられる。

現在、産総研福島再生可能エネルギー研究所(FREA) では、回転式エロージョンテスタ(RET)を用いて、こ うしたタイプの異なるシートの寿命について同一の試 験による評価を行っている。シート開発のための材料 開発や構造設計を行うには、各シートの変形挙動や寿 命までの過程、メカニズムの把握が重要である。我々 の研究グループは、それに対して2方向からアプロー チする。シートの変形挙動の把握には、「素過程」であ る雨滴の衝撃現象に関するコンピュータシミュレーシ ョン(CAE)を用いて評価し、寿命への過程、メカニズ ムの理解には、ミクロレベルの観察を用いる。CAE と 観察をうまく組み合わせることで、メカニズムへのよ り深い理解が期待できると考えている。

以上より、本研究では、高分子材料で構成される風 カ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、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した。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についても検討 した。

昨年度は、FREA 及び県内企業の協力を得て、劣化後 のレイン・エロージョンを表面・断面から観察・計測 することでブレード部材表面の劣化現象を評価した。 また、劣化を模擬した高分子材料へ雨滴を衝突させる CAE 解析を行い、劣化の影響を評価した。 研究3年目となる今年度は、これらの実験・CAE 結 果を基に、劣化メカニズムの解明を行い、劣化進行速 度や寿命の見積もりを行うことで迅速評価法の開発を 行った。さらには予知保全に向けた取り組みも実施し た。本報告では、①劣化メカニズム評価、②劣化進行 速度の見積もり、③迅速評価法の開発に大きく分けて 報告する。

## 2. 実験

## 2. 1. 劣化メカニズム評価

本評価では、レイン・エロージョンの発生・成長に おける素過程ごとのメカニズムを解明することを目的 とし、RET 試験片の観察を行った。

### 2. 1. 1. RET 試験

本評価では、FREA 及び県内企業より提供を受けた RET 試験片を評価対象とした。RET は、FREA が令和4 年度に導入した試験機で、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ものである。 具体的には、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試験 である。回転部は試験片を取付け・取外しできる構造 を持ち、試験片はアルミニウム合金やFRP で構成され、 そのまま試験することも、上に塗装や保護シートを施 工して試験することも可能である(図2)。長さは約 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。

今回は 1080~1200[rpm]、12~155[min]の範囲で試 験した 3 サンプルを評価に用いた。



### 図2 保護シートを施工した RET 試験片

### 2. 1. 2. RET 試験片の観察

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、樹脂製保護シートを施工し上記 RET 試験 を行った試験片を観察した。

表面に発生したレイン・エロージョンを 3D ワンショ ット形状測定機((株) キーエンス VR-6000)を用い て大きさや深さを測定した。7.5[mm]×5.0[mm]角の画 像を試験片の長手方向に連続取得し、得られた形状か らレイン・エロージョンをその成長段階ごとに分類した。

# 2.2. RET 試験によるレイン・エロージョン進行速度の定量評価

保護シート膜厚方向へのレイン・エロージョンの進 行速度を見積もるため、2.1.2.の観察結果を基に定量 的に評価した。試験条件の異なる3サンプルそれぞれ から50枚程度画像を取得し、図3のように各画像から 2[mm]角の領域を3か所ずつ取り出すことで計456点 の面粗さデータを得た。各位置におけるクルトシス (Sku)、最大高さ(Sz)<sup>3)</sup>の3点平均を算出した。



図3 測定した画像と面粗さ取得領域

# 2.3.化学的劣化によるレイン・エロージョンの加 速度合いの見積もり

屋外で使用される風車は、レイン・エロージョン以 外にも紫外線(UV)などで化学的な劣化が進行する。 特にUVによる劣化が顕著であると考えられ、寿命を見 積もる上でレイン・エロージョンに加えて評価すべき パラメータである。しかし、これを考慮に入れた形で RET 試験を行うことは、試験片の数や時間に限りがあ るため困難である。そこで今回は、UV劣化によるレイ ン・エロージョンの加速度合いを別の方法で見積もる こととした。

### 2.3.1.劣化促進試験

UV による劣化を模擬した試験片を作製するため、キ セノンウェザーメータ(スガ試験機(株) SX75Z)に よる促進劣化試験を行った。県内企業より提供を受け た平板状の樹脂製材料を用いて、300~400[nm]の放射 照度が 180[W/m2]となる条件で行った。照射を1時間 42分、シャワーを18分の計2時間のサイクルで行い、 それぞれ累計試験時間が 333、666、1000時間の平板試 験片を作製した。

## 2.3.2.MSE 試験

UV 劣化した平板試験片を用いて、Micro Slurry-jet Erosion (MSE) 試験を実施した。本試験は、粒子と水

のスラリーを試験片表面に一定量噴射する操作と、表 面が削られた部分を形状測定する操作を繰り返し、試 験片の削られやすさ(エロージョン率)を評価する試 験である。試験片はスラリーによる衝撃を繰り返し与 えられ、構造的に弱い部分にダメージが蓄積し、表面 からわずかずつ脱落する。エロージョン率は、エロー ジョン深さ/粒子投射量[µm/g]で表され、削られやすい ほど大きい。本試験は MSE 試験装置((株) パルメソ MSE-A)を用いて、装置メーカーにおいて実施した。

#### 2.3.3.劣化促進試験とMSE 試験の繰り返し試験

UV 劣化によるレイン・エロージョンの加速度合いを 見積もるため、2.3.1.の劣化促進試験と表面の削り取 りを最大3セット繰り返し、MSE 試験によりエロージ ョン率を求めた。繰り返し実施したのは、物理的劣化 であるレイン・エロージョンと化学的劣化であるUV劣 化の相乗効果を考慮に入れるためである。

次の5水準(図4)についてエロージョン率を求めた。

- ①:新品の試験片に MSE 試験したもの
- ②:333時間のUV劣化試験後にMSE試験したもの
- ③:1000時間のUV劣化試験後にMSE試験したもの
- ④:333 時間の UV 劣化試験後に深さ 20[µm]表面を削り取り、さらに 333 時間の UV 劣化試験後に MSE 試験したもの(計 666 時間)
- ⑤:333 時間の UV 劣化試験後に深さ 20[µm]表面を削り取る操作を2セット繰り返し、さらに 334 時間の UV 劣化試験後に MSE 試験したもの(計1000時間)



#### 2. 4. 化学的劣化を考慮した寿命の見積もり

2.2.の RET 試験及び2.3.3.の繰り返し試験を基に寿命の見積もりを行った。

まず、RET 試験結果から新品の寿命を算出した。その上で降雨頻度や降雨時間を仮定し、UV 劣化によるレイン・エロージョンの加速度合いを乗算して全体としての寿命を算出した。

## 3. 結果

- 3.1.劣化メカニズム評価
- 3.1.1. RET 試験片の観察結果

3D ワンショット形状測定機で測定したレイン・エ ロージョンの例を図5に示す。概ね回転速度の速い部 分でレイン・エロージョンのサイズは大きく、遅くな るにしたがって小さくなる傾向があった。また、速度 の違いに応じて様子が異なることも分かった。さらに 得られた画像を詳細に観察、分類したところ、これを 大きく5つの段階に分けることができた。

## 3.1.2. レイン・エロージョンの分類結果

レイン・エロージョンの分類結果は次の通りであ る。

段階0:成型時の表面凹凸

段階1: 亀裂の形成(初生)

段階 2-1:脱落、穴形成

段階 2-2: 亀裂の伸長

段階3:脱落集合体(脱落内部に亀裂や脱落が形成) 段階4:基材到達、剥離(ブレークスルー)



# 図5 レイン・エロージョンの進行メカニズム (段階 0~4 はサンプル 1 の 95 [m/s]、100 [m/s]、 112 [m/s]、130 [m/s]、133 [m/s]における表面形状)

ここで、段階 2-1、2-2 は競争的に起こり、両方が 観察されるため枝番とした。また、各段階は多少前後 し重なり合う部分が存在しており、亀裂から脱落、そ の集合体へと変遷していくことを確認した。

また、各位置におけるクルトシス(Sku)を算出したところ、特異的に段階1において大きくなることを

見出した。Sku は尖度とも呼ばれ、表面のとがり具合 を示すパラメータである。図6、図7中の画像Bにお いて、Sku(橙線)が大きくなっていることを確認で きる。





(A~Cはその回転速度における表面形状)

# 3. 2. RET 試験によるレイン・エロージョン進行速度の定量評価と寿命の見積もり

# 3. 2. 1. レイン・エロージョン進行速度の定量評 価

領域各々について最大高さ(Sz)を算出した。ここ でSzは(最高点高さ)-(最低点高さ)で算出され、 表面からのレイン・エロージョンの最大深さを表すパ ラメータとして採用した。その領域の中心位置におけ る回転速度(Vrot)に対してSzをプロットすること で、各位置の最大深さを表すことができる。これを試 験時間で割り、保護シート膜厚方向へのレイン・エロ ージョンの進行速度(Vz)を見積もった。図8のプロ ットより、例えばサンプル1では、Vrot=100[m/s]の とき Vz=0.37[µm/min]、Vrot=120[m/s]のとき Vz=2.5[µm/min]となる。3 サンプルのデータを1つの 曲線で近似すると、Vz=1.5×10<sup>-4</sup>×exp(0.085×Vrot) が得られた。



図8 レイン・エロージョンの進行速度と回転速度

さらに、これを用いて保護シート膜厚に到達するま での時間(T)を算出した。保護シートが2[mm]厚の 場合、Vrot=100[m/s]ならT=2.7×10<sup>3</sup>[min]、 Vrot=120[m/s]ならT=4.9×10<sup>2</sup>[min]となる。

### 3. 2. 2. RET 試験による寿命の見積もり

上記結果で得られた T は、その時間ずっとレイン・ エロージョンが進行し続けた(雨が降り続けた)場合 の膜厚までの到達時間である。一方、実環境において は晴れの時間帯が存在し、降雨回数は年間で 150 回程 度、うち降雨量 10[mm/h]以上は 50 回程度<sup>4)</sup>であり、 総降水時間は 700 時間程度<sup>5)</sup>となる。今回は簡単の ため、RET 試験と同等の雨粒サイズ(2[mm]程度)の 雨が 1 か月に 1 度 20 時間(=1 年に 240 時間)降り、 レイン・エロージョンしたものとして考える。

また、風車ブレードの回転速度は、GE2.5MW 級を例 にとると最外周で 50~90 [m/s] となるため、平均の 70 [m/s] を計算に用いる。図8の近似曲線を外挿する と、Vrot=70 [m/s] における Vz は 0.057 [µm/min]、つ まり1か月に1度 68 [µm] 進行することになる。

したがって、2[mm]厚到達までの寿命は2.4年と算 出できた。

さらに、基材についても簡単に計算した。風車ブレ ードの基材は通常 FRP が使用され、厚みが数+[mm]あ る。このうち10%程度亀裂が入れば構造体としての 機能に影響があると考え、深さ5[mm]まで到達した時 点を寿命とする。FRP は硬いがガラスと樹脂の界面が 存在しており、レイン・エロージョンに対しては保護 シートより弱いとされている。しかし、FRP の RET 試 験片は手に入らなかったため、Vz を保護シートの2 倍と仮定して計算した。計算結果は3.0年で、合計の 寿命は5.4年と算出できた。

## 3.3.化学的劣化によるレイン・エロージョンの加 速度合いの見積もり

3.2.1. で得られた Vz が化学的劣化によりどの程度 増加するかを検討するため、2.3.1.の劣化促進試験と 2.3.2.の MSE 試験とを最大3セット繰り返し、エロー ジョン率(削られやすさ)を求めた。図9に MSE 試験 結果、表1に最表面のエロージョン率を示す。

単純に表面を UV 劣化させた①、②、③について は、最表面で②が①の 46 倍、③が①の 161 倍とな り、UV 劣化の影響が時間に応じて蓄積されることが 分かった。また、劣化深さはおおむね 50 [µm] 程度で あった。

一方、レイン・エロージョンとUV 劣化の相乗効果 を確認するため、累計試験時間が同じ1000時間で比 較したところ、⑤は③に比較して2.3倍程度となっ た。また、劣化深さも大きく、70[µm]まで影響があっ た。それより深くでは、UV 劣化の影響は無視できる ことが分かった。



	1	2	3	4	(5)
UV試験 時間[h]	0	333	1000	333 +333	333 +333 +334
エロー ジョン率 [µm/g]	0.126	5.79	20.3	24.3	46.7

表1 UV劣化した表面におけるエロージョン率

# 3. 4. 化学的劣化を考慮した寿命の見積もり

実環境においては、晴れ(UV劣化)と雨(レイン・ エロージョン)が交互に起こり、レイン・エロージョ ンしやすい表面が削り取られては新たな表面が生成す る。そこで、3.2.2.で得た1か月あたりの進行速度と、 3.3.で得た加速度合いから化学的劣化を考慮した寿命 を見積もった。

3.3.における結果より、④は深さ70[µm]までのエロ ージョン率を平均したとき、①の30倍程度レイン・エ ロージョンが促進されることが分かった。削り取り後 333 時間で 30 倍程度の促進効果があることから、100 時間では9 倍程度となる。

また、ウェザーメータによる促進試験は 100 時間で 1 か月分の UV 照射量とされることがある。3.2.2.で1 か月に1度レイン・エロージョンが起こることを仮定 したため、劣化した表面が1か月に1度削り取られ、 新たな表面が出ることとなる。

したがって、68+70×(1-1/9) =130[µm]がUV 劣化を 含めた1か月あたりの進行速度となる。したがって、 2.4×(68/130)で算出される1.3年が化学的劣化を考 慮した寿命となる。

基材を含めて考えると 4.3 年で、保護シートと基材 の寿命の比は1:2.3 となった。

## 4. 考察

# 4. 1. 劣化メカニズムと初期段階の劣化の検出について

3.1.2.で分類した通り、レイン・エロージョンを大 きく5つの段階に分けることができた。サンプル間で もその傾向は一致しており、これらの形状がこの材料 における劣化の進行を表すものと考えられる。段階ご との変遷は、次のとおりと考えている。

まず、段階0におけるわずかな凹凸と段階1の初生 のサイズが数十[µm]と近しいことから、表面のわずか に弱い部分が雨粒の衝突により裂け、亀裂となったと 考えられる。

一度亀裂が形成されると、雨粒の衝突によりその亀 裂は徐々に伸長していく。その際に偶然伸長中の亀裂 同士が出会うことで、脱落が発生する。

その後は脱落による穴の占める割合が増加すること で徐々に穴内部に雨粒が衝突するようになり、穴内部 での亀裂、脱落の発生が見られるようになる。

最終的には、膜厚まで穴が到達し、界面から水が浸 入するようになり剥離が発生する。

なお今回の RET 試験はブレークスルーまでで試験を 終了している。そのため基材到達以降のメカニズムは 不明であるが、基材も保護シートと同様に進行するも のと考えられ、亀裂、脱落と進行することを想定して いる。

また、初生はサイズが小さく肉眼で観察することが 難しいが、本研究では Sku を用いて検出可能であるこ とを見出した。Sku は粗さの一種であり非破壊で検出 可能であるため、レイン・エロージョンの初期劣化を 捉えるための一つのパラメータとなると考えられる。

#### 4. 2. 寿命の見積もりについて

今回算出された保護シート 2[mm]厚到達の時間と基 材深さ 5[mm]到達の時間はそれぞれ 1.3 年、3.0 年で あり、現実的な数値を算出することができた。また、 年に1回の点検が義務付けられている<sup>の</sup>ことから、大 きな初期不良や不慮の事故がない限りレイン・エロー ジョンの進行を見ながら補修を実施することができる と考えられる。

より精密に寿命を見積もるためには、RET 試験時間 を細かく区切り、レイン・エロージョンの進行をより 細かく評価していくのが一つの手法である。今回は 1 本の近似曲線を用いたため、サンプルごとに近似曲線 が異なった。本来はレイン・エロージョンの段階ごと に進行速度が異なり、各段階で曲線の形状が変化する はずである。これを考慮に入れることで、段階ごとの 寿命が分かるようになると考えられる。また、今回は 計算の都合上降雨の頻度や雨粒サイズを画一化したが、 これを実データに置き換えることでより実環境に近い 評価が可能となる。

なお、今回は保護シートが単層(接着剤を除く)に ついての評価であり、材質の異なる複数層からなる場 合はより複雑な進行メカニズム、進行速度を持つこと が考えられる。それについては今後の検討課題である。

#### 4.3.迅速評価について

本研究において、RET 試験とUV 劣化試験片の MSE 試 験を併用した評価を行うことにより、実環境における 風車ブレードの寿命を算出することができた。RET 試 験で新品の寿命を見積もり、別途UV 劣化試験片の作製 と MSE 試験の実施により加速度合いを見積もることで、 寿命を算出することができる。

RET 試験に数日、UV 劣化に 100 時間程度、MSE 試験 に数日、解析に数日かかるが、実時間の評価に対して は大きく時間を削減することができる。

一方で、RET 試験機は国内に1つしかなく、実施の ハードルは高い。また、一つの試験で代替する場合、 その試験も大掛かりになることが考えられる。そこで、 今回明らかにしたレイン・エロージョンの各段階につ いて、それぞれの進行速度を評価する試験で代替させ ることを考えている。これが可能になれば RET 試験が 不要となり、より簡単に評価を行うことができると考 えられる。

# 5. 結言

風車ブレードが受ける負荷を劣化促進試験で与え、 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、予知保全技術についても検討し、以下の知見を 得た。

- 風車ブレードの劣化の一つであるレイン・エロー ジョンの進行メカニズムを明らかにした。
- ② 非破壊の手法により初期劣化である初生をSkuで

検出可能であることを見出した。これは肉眼で見 つけることの難しいサイズの劣化を検出可能で ある。

- ③ レイン・エロージョンの進行速度を見積もり、UV 劣化を含めた寿命評価を定量的に行った。
- ④ ①~③をまとめ、風車ブレード部材の寿命を迅速
  に評価可能であることを示した。

#### 参考文献等

- 1) 3M<sup>™</sup> Wind Protection Tape 2.1 (3M HP 製品ページ). https://www.3m.com/3M/en\_US/p/d/b5005165002/, (参照 2024-3-4).
- 風力発電機用ブレード保護シート(藤倉コンポジ ット(株) HP 製品紹介).
- https://www.fujikuracomposites.jp/fjk/satellite/ industrial/products/#blade-protective-sheet, (参照 2025-2-27).
- クルトシス (Sku): 二乗平均平方根高さ Rq の四乗 によって無次元化した基準長さにおいて、高さ Z (x, y)の四乗平均を表す。

$$Sku = \frac{1}{S_q^4} \left[ \frac{1}{A} \iint_A Z^4(x, y) \, dx \, dy \right]$$

最大高さ(Sz):もっとも高い山の高さ(Zp)ともっ とも深い谷の深さ(Zv)の和を求め、表したもの。

$$Sz = Zp + Zv$$

- 4)気象庁、過去の気象データ検索(福島県郡山市の 2020-2024年のデータの平均値を求めた).
- https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php? prec\_no=36&block\_no=0299&year=&month=&day=&vi ew=a1, (参照 2025-2-26).
- 5) 千葉晃. AMeDAS 府中(東京) における 2009 年以 降の年間降水時間. 2022 年度日本地理学会秋季学 術大会要旨.
- https://www.jstage.jst.go.jp/article/ajg/2022a/0 /2022a\_45/\_pdf/-char/ja, (参照 2025-2-26).
- 6)風力発電設備ブレード点検および補修ガイドライン.
  (一社)日本風力発電協会. 2020.