

風車ブレード部材の迅速耐久性評価及び予知保全技術の開発（第2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
材料技術部 繊維・高分子科 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。劣化促進試験後の繊維強化プラスチック（FRP）試験片において、Micro Slurry-jet Erosion（MSE）試験が耐エロージョン性を評価できることを確認した。また、回転式エロージョン試験片の表面及び断面観察から、ある種の樹脂材料のレイン・エロージョンは亀裂の成長と合体による脱落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、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。

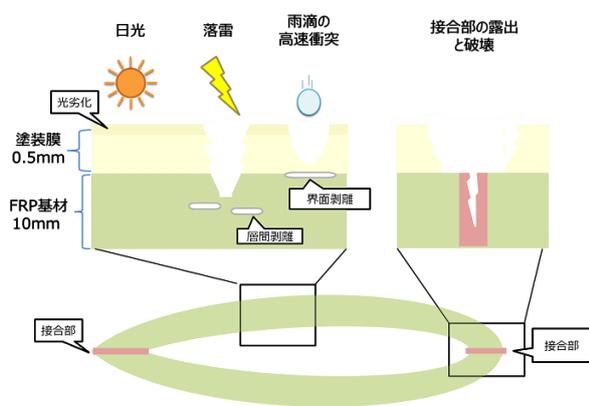


図1 ブレード断面図と代表的な不良現象

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が、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^{1,2)}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、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）が保有する回転式エロージョンテスタ（RET）による試験では、こうしたタイプの異なるシートを選定する観点で、これら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。本研究では、それに対して二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、マイ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、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。

研究2年目となる今年度は、県内企業の協力を得て、様々なタイプの高分子材料のRET試験片を入手し、劣

化後のレイン・エロージョンを観察・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。

2. 実験及び CAE 解析

2. 1. 評価対象の試験片について

本研究では、市販の FRP 試験片 (A、B の 2 種) と、RET 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。ガラス繊維と樹脂の複合下地層が約 1.5[mm]、コーティング層は A が約 0.5[mm]で B が約 0.3[mm]であった。フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR) による分析により、コーティング層及び下地層の樹脂の材質は A がいずれもポリエステル樹脂、B がいずれもポリエステル樹脂+エポキシ樹脂であった。

RET は、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、この上に塗装や保護シートを施工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。本研究においては、樹脂製保護シートを施工した RET 試験片の評価を行った。

2. 2. 劣化促進試験

屋外で使用される風車は、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。これらのストレスを耐候性試験により FRP 試験片に与え、コーティング層の変化を調査した。耐候性試験は試験機 (スガ試験機 (株) SX75Z) を用い、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 24、48、100、200、300、500 時間経過後の FRP 試験片をコーティング層の評価に用いた。

2. 3. コーティング層の評価

2. 3. 1. 耐エロージョン性

コーティング層の耐エロージョン性を評価する手法として、Micro Slurry-jet Erosion (MSE) 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。エロージョン率は、エロージョン深さ/粒子投射量[$\mu\text{m}/\text{g}$]で表され、削られやすいほど大きい。試験片は粒子と水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、表面からわずかず脱落する。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 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. 2. 切削力及び剥離強度

コーティング層の切削力計測は表面切削装置 (ダイブラ・ウィンテス (株) SAICAS EN 型) (以下 SAICAS と略す。)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。刃は水平方向 2[$\mu\text{m}/\text{s}$]、垂直方向 0.2[$\mu\text{m}/\text{s}$]の速度で移動させ、所定の切削深さとなった後は水平方向にのみ 2[$\mu\text{m}/\text{s}$]で移動させ、その間の垂直・水平方向の荷重を計測した。

コーティング層と下地層の剥離強度測定についても同様に SAICAS で行った。刃は水平方向 10[$\mu\text{m}/\text{s}$]、垂直方向 1[$\mu\text{m}/\text{s}$]の速度で移動させ、所定の切削深さとなった後は水平方向にのみ 10[$\mu\text{m}/\text{s}$]で移動させ、その間の垂直・水平方向の荷重を計測した。

2. 4. 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た RET 試験片の観察を行った。

表面に発生したレイン・エロージョンをマイクロスコープ ((株) ハイロックス RH-2000) を用いて観察し、大きさを測定した。また、断面からもエロージョンを観察するため、表面観察において特徴的なレイン・エロージョン発生部位で RET 試験片を切断、樹脂包埋・鏡面研磨したサンプルを作製し、深さ方向の大きさを観察、測定した。

2. 5. 雨滴衝突に関する CAE 解析

粒子法と有限要素解析を連携して計算を行う「粒子法-有限要素法連成解析」を行った。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。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。本年度は、新たな取り組みとして、運動エネルギー、内部エネルギーなどの変化を出力できるエネルギープローブ機能を用い、厚みや材料物性の異なる様々な保護シートの変形の特徴を調査した。

解析モデルは、厚み 0.3、1、2[mm]の保護シートを取

り付けたアルミ合金製の RET 試験片とした。図 2 にシート厚 1 [mm] のモデルを示す。雨滴はサンプル天頂部から円筒面に沿って 20 度オフセットした位置に、鉛直方向に速度 100[m/s] で衝突する条件とし、完全に雨滴の崩壊が完了する解析時間 200[μs] の計算を行った。

材料物性値としては、アルミ合金に適する弾塑性材料モデルに加えて、保護シートなど高分子材料の大変形に適した超弾性材料モデルを用いた。材料構成則としては、3 次 Ogden モデルとし、「Autodyn」材料データベースの「ゴム 1」を参考とした。図 3 に「ゴム 1」の応力-ひずみ線図の例を示す。なお、図中には、3 次 Ogden モデルの 9 つのパラメータも示す。

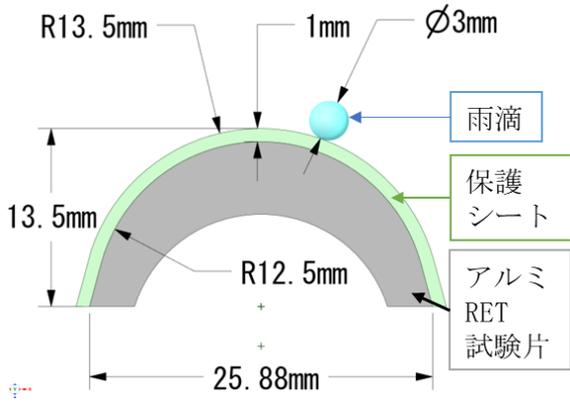


図 2 解析モデル例 (シート厚 1mm)

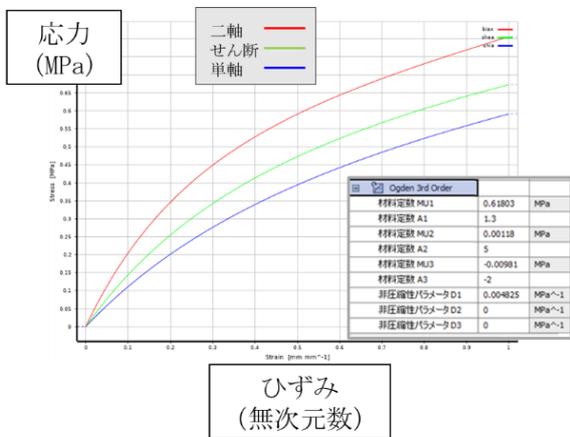


図 3 超弾性材料の応力-ひずみ線図

RET 試験後サンプルで観察された亀裂の影響を調べるため、図 4 に示す亀裂モデルの解析も併せて実施した。これはサンプル表面の任意の位置に、亀裂を模した溝を形成したものである。この例では、長さ 0.5[mm]、深さ 0.3[mm]、溝幅 0.05[mm] の模擬亀裂を雨滴の中心部や、中心から離れた位置に合計 5 個配置した。このように自由度の高い「仮想試験」を行えるのが CAE 解析の利点である。

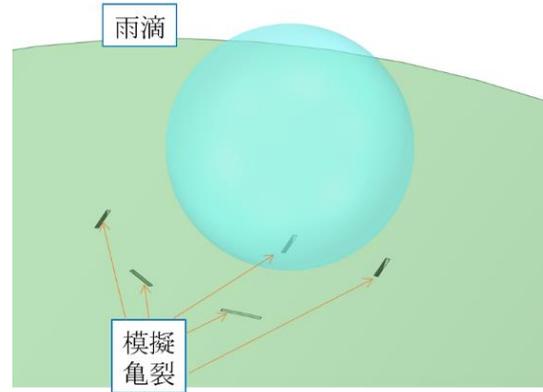


図 4 亀裂モデル

3. 結果

3. 1. FRP 試験片コーティング層の MSE 試験

3. 1. 1. 劣化促進試験時間とエロージョン率の関係

劣化促進試験前後の FRP 試験片 A、B のエロージョン深さとエロージョン率の関係を図 5 に示す。試験片 A、B はコーティングの材質が異なるが、劣化促進試験後のエロージョン率は類似した傾向を示した。試験片の最表層 (表面から 6[μm] まで) で顕著にエロージョン率が高いことが分かった。また、試験時間が長いほどエロージョン率は増加したが、表面からの深さが大きくなるにしたがって漸減し、内部 (表面から 30[μm] 以降) において、劣化促進試験前後のエロージョン率はほぼ一致した。

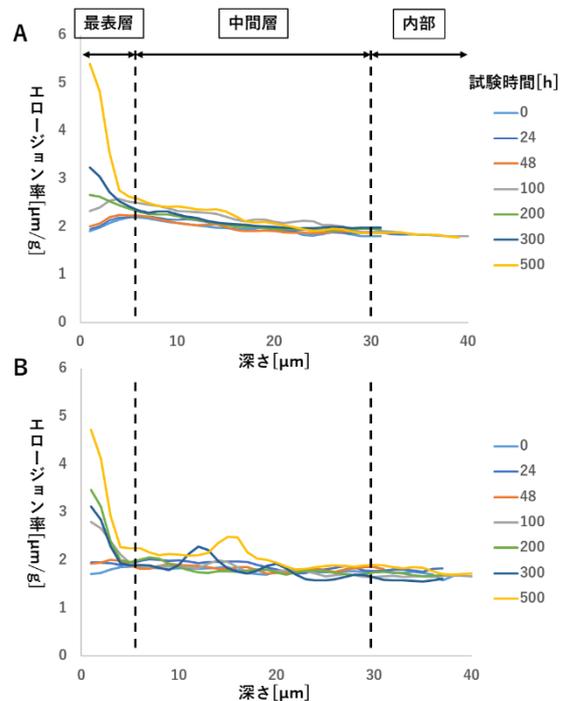


図 5 試験片 A、B の試験時間とエロージョン率の関係

一方、試験片 A は B よりエロージョン率が 10% 程度大きく、試験片 B では中間層（表面から 6~30[μm] の領域）においてばらつきが大きかった。

これらの結果から、MSE 試験を用いることで、材質の違いや劣化の程度がエロージョン率に及ぼす影響を定量的に評価可能であることが分かった。

3. 1. 2. 劣化促進試験と MSE 試験の繰り返し試験とエロージョン率の関係

上記の劣化促進試験においては、主として光や熱の影響のみを考慮しており、実環境の日光と風雨のストレスが同時に起こっている状況を再現しきれていない。そこで、日光を模擬した劣化促進試験と、風雨を模擬した MSE 試験を繰り返し行い、試験片への影響を調査した。

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[μm] 掘削する操作を 2 回繰り返した。試験前、試験 1 回後（50[μm] 削り取り）、2 回後（100[μm] 削り取り）におけるエロージョン深さとエロージョン率の関係を図 6 に示す。削り取り前の最表層を除き、それぞれの深さから測定したエロージョン率はほぼ一致し、表面から内部に向かってエロージョン率が下がること、また各サイクル間でエロージョン率に大きな差はないことが分かった。

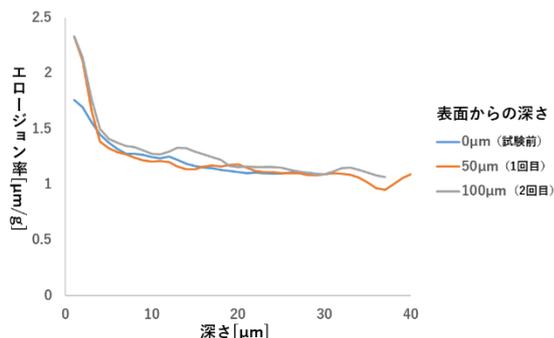


図 6 繰り返し試験のエロージョン率

3. 2. SAICAS を用いた FRP 試験片コーティング層の切削力及び剥離強度評価

劣化促進試験を 300 時間行った試験片 B の SAICAS による切削力の計測結果を図 7 に示す。安定後の水平方向の荷重を切削力として深さ 2[μm] ごとに 3 回評価した。試験片 B は、表面から内部に向かうにしたがいわずかに低下するものの、ほぼ横ばいの切削力を示した。また、切削ごとにみなし剪断強度（切削力の傾き）³⁾ を評価したところ、表面から内部までほぼ一定であることが分かった。

試験片 B のコーティング層と下地層間の剥離強度の計測結果を図 8 に示す。コーティング層の膜厚は

300[μm]であることを確認しており、その上下各 20[μm]において剥離強度は変化しなかった。

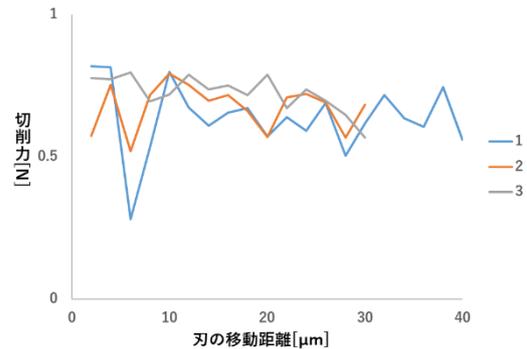


図 7 試験片 B の切削力

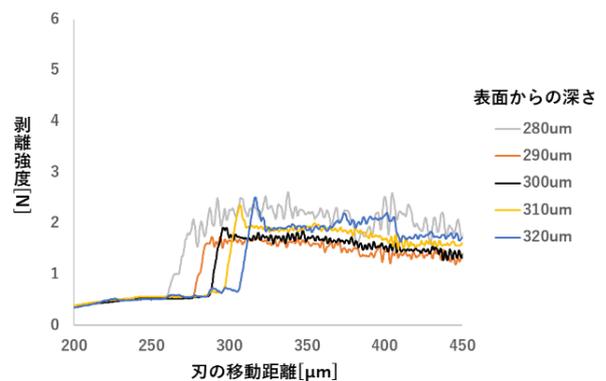


図 8 試験片 B の剥離強度

3. 3. RET 試験片の評価

RET 試験片の表面及び断面のレイン・エロージョンを、表面は 472 点、断面は 145 点観察、測定した。

エロージョンは侵食などと訳されるが、本 RET 試験片上の樹脂製保護シートで発生したレイン・エロージョンは図 9 に示すような「亀裂」、「欠け」とそれらの複合体からなることが分かった。そこで、レイン・エロージョンを分類し、大きさをそれぞれ計測して統計処理を行った。表面から見たレイン・エロージョンの大きさは、図 10 に示すとおり、高速側で大きく、低速側で小さかった。

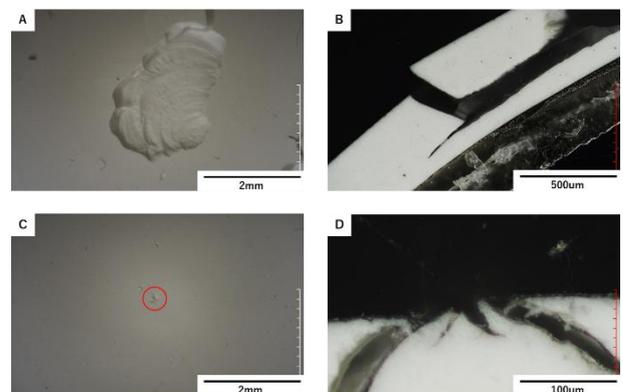


図 9 レイン・エロージョンの観察例 (A: 欠け表面、B: 欠け断面、C: 亀裂表面、D: 亀裂断面)

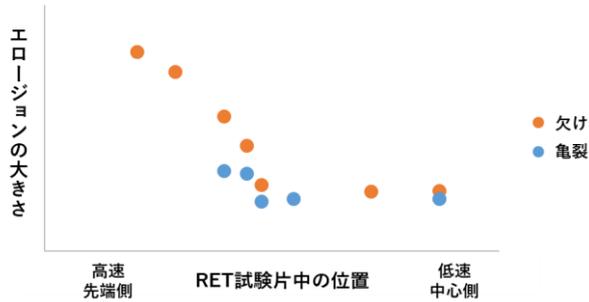


図10 レイン・エロージョンの発生位置と大きさの平均

3. 4. 雨滴衝突に関するCAE解析結果

高分子材料の特徴が分かりやすく表れた解析例として、シート厚み2[mm]の場合の解析結果を示す。

図11は変位分布図、図12は相当弾性ひずみ分布図である。いずれも最大のひずみを生じた衝突後32[μs]の結果であり、内部の変形を見やすいように仮想断面表示している。この解析例では、雨滴の衝突により、保護シート部では最大変位0.68[mm]、最大ひずみ0.55と、目視でも分かるほど大きく、雨滴の大きさに比べて広範囲に変形が広がっている。図には雨滴も併せて表示しているが、ひずみが最大となった衝突後32[μs]では、雨滴は球形状をとどめておらず、扁平状態になっている。シート厚みが薄い場合では、より早いタイミングでひずみが最大となっていることから、柔らかく厚みのあるシートは、シート側が広範囲に大変形することで衝撃を空間的にも時間的にも分散する狙いがあると考えられる。

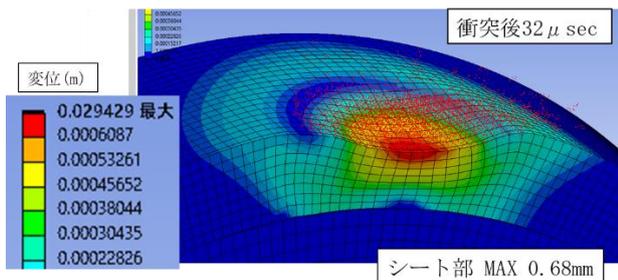


図11 変位分布 (2[mm]シート)

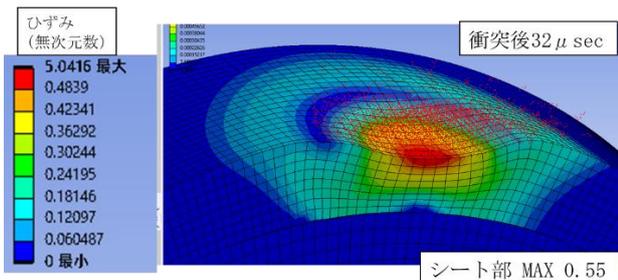


図12 相当弾性ひずみ分布 (2[mm]シート)

衝撃分散の効果をより明瞭にするため、エネルギープロープの評価例を図13、図14に示す。

図13はシート厚み2[mm]の解析における雨滴のエネルギーの変化を示したものである。図には衝突後11、32、74[μs]の雨滴の形状も併せて示す。ここで、全エネルギーは運動エネルギー、内部エネルギー及び塑性エネルギーの総和である。内部エネルギーとは変形により蓄積されたエネルギー、接触エネルギーとは接触により系外へ流失したエネルギーである。初期条件では、この系のエネルギーは雨滴の運動エネルギーだけであり、その値 7.01×10^{-2} [J]はCAEの各要素のエネルギーを合計して求めたものである。この値は、運動エネルギーの公式 $E=1/2mv^2$ に基づき、雨滴の体積、密度、速度により手計算した値とほぼ一致しており、妥当な積算ができています。エネルギー分配の様子を分かりやすくするため、雨滴の初期値を100%として、計算終了200[μs]の時点での各エネルギーを雨滴の初期値に対する比率でグラフに表記した。なお、接触エネルギーはRET試験片に受け渡されたものとみなせる。

図14はシートのみエネルギー変化を示したもので、図13同様に計算終了200[μs]の時点でのエネルギーは雨滴の初期値に対する比率で表記した。変形に伴う内部エネルギーと、運動エネルギーは相補的な変動をみせつつも、時間経過とともに、徐々に運動エネルギーが減り、内部エネルギーが増える挙動となった。なお、別途評価したモデル系外へのエネルギーの流出は、雨滴の初期運動エネルギーに対して6%ほどであった。これまで計算したエネルギーを合算すると合計は101%であり、初期値との誤差は1%と十分小さく、妥当な計算ができていていると考える。

以上の結果から、雨滴の球形状が完全に崩壊する32[μs]までの間に、雨滴からシートへエネルギー配分が起こっていると考えられる。このように、雨滴衝撃現象の評価のひとつとして、新たにエネルギー配分の観点を利用できることを確認した。

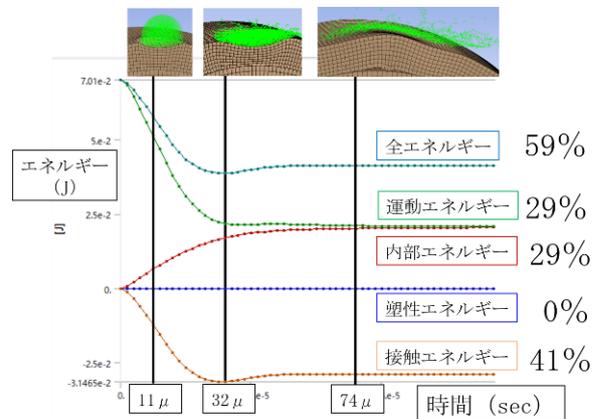


図13 エネルギー変化 (2[mm]シート、雨滴のみ)

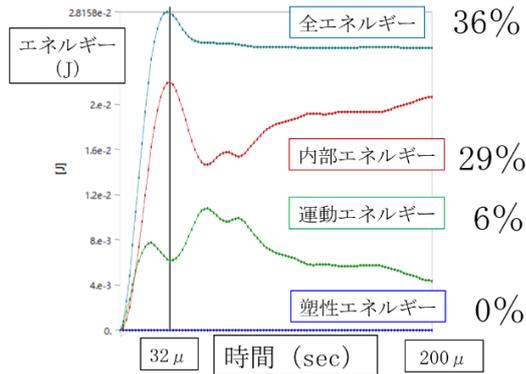


図 14 エネルギー変化 (2[mm]シート、シートのみ)

亀裂モデルの解析結果として、図 15 にひずみ分布図を示す。この図は、亀裂部の挙動が見やすいように、シート表面の結果のみを表示した上で、仮想断面図表示している。位置によりタイミングは異なるが、共通して、応力集中の影響で模擬亀裂部周辺は周囲に比べてひずみが高くなることを確認した。

また、雨滴の衝突ではシート表面の変位が時間経過により大きく変動するため、それぞれの模擬亀裂ではモード I 型あるいはモード II 型の開口変形や閉口変形など様々な変形様式に目まぐるしく移行していることが分かった。このような複雑な変形様式を統一的に正しく捉えるには破壊力学の適用が有効と思われる。

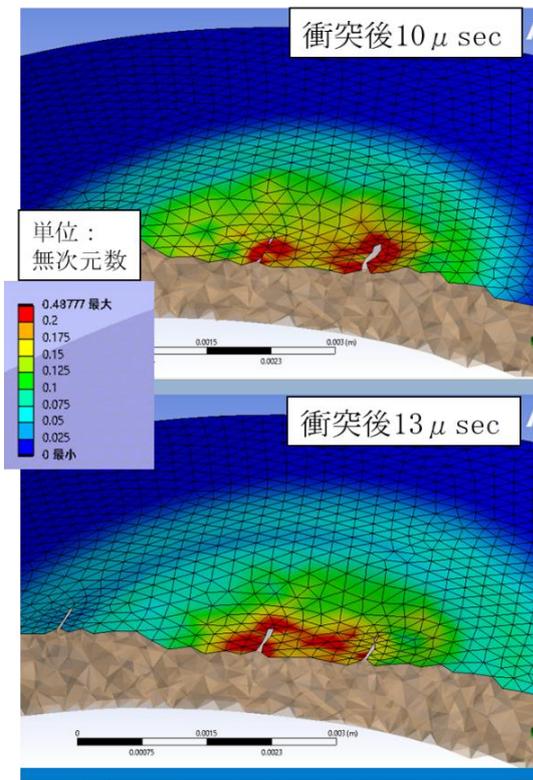


図 15 亀裂モデルひずみ分布

4. 考察

4. 1. FRP 試験片コーティング層の評価法について

繰り返し試験の結果から、コーティング層の深さ方向については同質の材料として考えられ、レイン・エロージョンで表面に露出した位置から日光等のストレスを受けたと仮定できることが示唆された。実際には、福島県の降水日数が年 110 日程度⁴⁾であることから、より短い時間で日光と風雨のストレスが繰り返し与えられていることになる。したがって、劣化度合いに応じたエロージョン率を利用し、日光によるストレスの倍率を仮定すれば実際のレイン・エロージョンによる減肉を予測できると考える。

FRP 試験片において、MSE 試験と SAICAS による切削力評価とは異なる傾向が見られた。その理由として、評価する現象が異なっていることが挙げられる。MSE 試験は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を評価するのに対し、SAICAS ではコーティング層が刃によって上下に剪断される現象を評価しており、それぞれ異なる物性を評価した結果であると考えられる。

また、SAICAS による剥離強度評価で界面における値が変化しなかった理由としては、下地層とコーティング層が同種の樹脂であり、界面が融合して明確な剥離面を形成しなかったためと考えられる。当初想定とは異なり、実質的には融合した界面の位置を刃で剪断する切削力評価になっており、この試験片の界面剥離の影響は小さいということが示唆される。例えばコーティング上に保護シートを貼っている場合など、界面で別種の樹脂が使用されている場合、本手法により界面剥離の影響を見積もることができる可能性がある。

4. 2. RET 試験片の評価と樹脂材料におけるレイン・エロージョンの発生メカニズム

RET 試験片に発生したレイン・エロージョンを表面から見たときの平均値 (図 16) から、大きく 3 点の傾向を読み取ることができる。①レイン・エロージョンに発生する閾値があること、②「亀裂」には大きさの上限があること、③「欠け」には大きさの変曲点があり、上限がないことである。一方、断面から見たレイン・エロージョンの平均値 (図 17) は、①は表面から見た場合と同様、レイン・エロージョンに発生する閾値があるが、「亀裂」(②) と「欠け」(③) は、どちらも大きさの変曲点を持ち、上限がないことが分かった。

②、③について、レイン・エロージョンを詳細に観察していくと、単独の「亀裂」と「欠け」のサイズ感はかなり近いことが分かった。また、「欠け」が表面を覆っていき複合化していくと、「亀裂」を表面から観察することができなくなる。一方で断面からは、「亀裂」や「欠け」の内部においても「亀裂」が発生している

ことが観察できた。加えて、「亀裂」同士が合流している様子も確認できた。したがって、②の「亀裂」の大きさは他の「亀裂」と出会わない限り、上限がなく成長していくものと考えられる。また、「欠け」は「亀裂」同士が出会い、表面が脱落したために形成するものと捉えることができる。

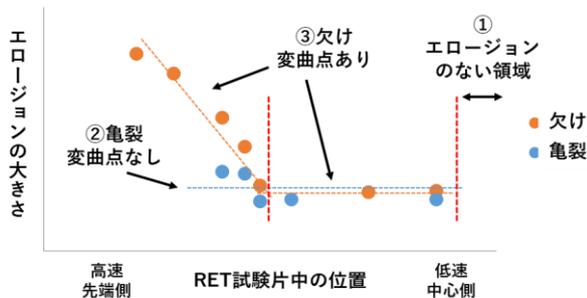


図 16 レイン・エロージョンの発生位置と大きさ (表面)

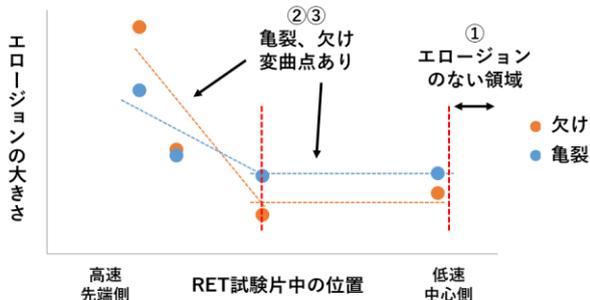


図 17 レイン・エロージョンの発生位置と大きさ (断面)

以上より、当初不明であった樹脂材料におけるレイン・エロージョンの成長過程がある程度判明し、図 18 のように仮説を立てた。段階毎にどのようなレイン・エロージョンが発生するか確認できたことから、今後、CAE 解析によりこれらの段階の間を補完し、関連性を確認することで、発生から成長までの一連のレイン・エロージョンのメカニズムを確定できると考えている。

今回の結果から、表面と断面両方からの観察による評価は、レイン・エロージョンの発生メカニズムの解明に対して強力な手法となることが示唆された。

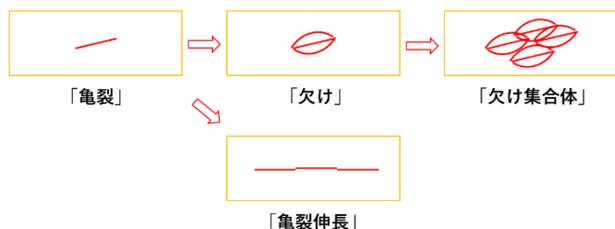


図 18 レイン・エロージョンの成長過程 (仮説モデル)

4. 3. 今後の展望

材料力学や材料強度の知見から得られた劣化メカニズムの仮説を基に、本年度は主に実験的手法により、レイン・エロージョンを定量的に評価することができた。

今後は、本報告で得られた実現象を基に、現象間をつなぐようなレイン・エロージョンの進展の CAE 解析を行い、寿命予測を行う。

特に、一連の劣化メカニズムを解明することができれば、RET 試験の代替となる耐久性試験の探索や、RET 試験自体をシミュレーションすることのできる手法の開発につながると考えている。

5. 結言

風力発電用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結果、以下の知見が得られた。

- ① MSE 試験や SAICAS による評価で、材料の深さ方向の材料特性の変化を定量的に捉えることができた。また、レイン・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レイン・エロージョンを表面及び断面から観察し、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、レイン・エロージョンの発生と成長メカニズムの一部を示した。
- ④ 超弾性材料モデルを用いた「粒子法—有限要素法連成解析」を行い、雨滴衝突の際の高分子材料の大変形を計算できることを確認した。
- ⑤ 模擬亀裂を持つ保護シートに対する雨滴衝突解析を行い、応力集中の影響で模擬亀裂部周辺は周囲に比べてひずみが高くなることを確認した。

参考文献

- 1) 3M[®] 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)
- 2) 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/satellite/industrial/products/> (参照 2024-3-4)
- 3) 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
- 4) 総務省、統計ダッシュボード (降水日数 (年間)) <https://dashboard.e-stat.go.jp/> (参照 2024-3-4)