

# 風車ブレード保護材の劣化メカニズム解明と評価手法の開発（第1報）

## Characterization of Leading-edge Erosion Mechanisms and Development of a Unified Evaluation Method for Wind Turbine Blade Protective Materials

材料技術部 分析・化学科 高木智博 松浦和俊 添田友貴  
材料技術部 金属・物性科 工藤弘行 太田悠翔  
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

多様なブレード保護材の耐エロージョン性を統一的に評価可能な手法を開発する上で、レイン・エロージョンの進行メカニズムを明らかにするため、弾性率の異なる複数の保護材についてレイン・エロージョンの進行段階に関連する材料の物性パラメータを取得し、進行メカニズムについて検討した。

Key words: レイン・エロージョン、MSE 試験、SAICAS

### 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（2024年時点で315 [MW]<sup>1)</sup>）。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。ブレードにとって特に深刻な影響を及ぼすのが、雨滴（雹、砂粒）の衝突である。ブレード前縁部の回転速度は70-150 [m/s]に達するため、雨滴衝突の衝撃によりレイン・エロージョン現象が発生する。これは長期的にブレード表面を浸食する現象であり、年間発電量の減少、メンテナンスコストの増加、タービン寿命の短縮等につながる<sup>2)</sup>。

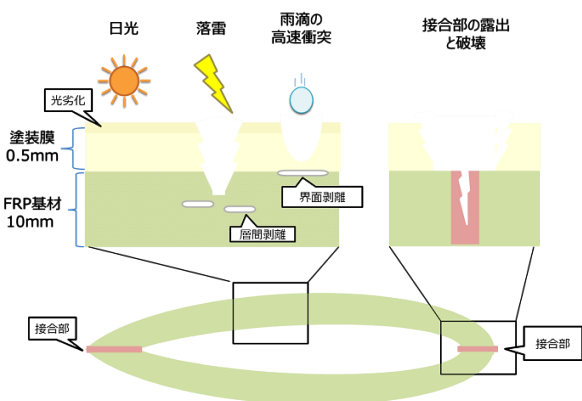


図1 ブレード断面図と代表的な不良現象

軽量化が求められるブレードは、軽さと強度を兼ね備え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。加えて風力発電市場の拡大に伴い、発電機の大型化が進むことでブレードの受ける負荷も大きくなるため、長寿命化を目指すうえでレイン・エロージョンの発生しやすい部位に保護材（塗料や保護シート）を施工することが世界的なトレンドである。しかし、ブレード表面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。そこで我々はこれまでの研究で、ブレードの耐久性評価手法の開発を目指し、ブレード表面に発生するレイン・エロージョンの劣化の定量を行ってきた<sup>3)</sup>。中でもブレード前縁部の保護材による効果が大いことがわかっている。

ブレード保護材は、優れた耐候性（紫外線耐性など）、温度適応性、耐エロージョン性、防氷性、耐酸・塩基腐食性、耐摩耗性、密着性などを備えた多機能材料である。中でも、耐エロージョン性は重要な特性の一つである。こうした保護材を施工することにより、ブレードの長寿命化が図れるほか、適切な交換時期で貼りなおすことで長期的なダウンタイムの削減にもつながることが期待される。

より耐エロージョン性の高いブレード保護材を開発する上で、適切な評価試験法は大事である。レイン・エロージョンの進行には通常数年かかるが、迅速な加速評価試験（Rain erosion testing、RET 試験）はブレード保護材の浸食評価のプロセスを加速することができる。特に回転式 RET 試験は規格（DNV-RP-0171<sup>4)</sup>）にもなっており、世界で広くブレード保護材の実力評価に利用されている。県内でも、産総研福島再生可能エネルギー研究所（FREA）が主催するRET ユーザーグループに複数の県内企業が参画し、ブレード保護材を設計・開発しており、回転式 RET 試験で様々な材質の保護材が評価されている。

しかしながら、回転式 RET 試験は試験途中での評価が難しく、試験後の結果を見ることで材質ごとの傾向

はわかるが、その材質のどこが耐エロージョン性に寄与しているのかは明らかにならない。

より良いブレード保護材を開発するためには、RET試験のような迅速な加速評価試験に加え、レイン・エロージョンの進行メカニズムの理解も不可欠である。進行メカニズムを理解することにより、耐エロージョン性の向上に寄与する物性が明らかとなり、どの方向に材料を改良すべきかの指針となる。このような開発指針を示すことで県内企業の競争力強化につなげるため、我々は本研究を実施することとした。

我々は、レイン・エロージョンの進行メカニズム解明について、2段階のアプローチを考えている。

一つ目は単独の雨滴が衝突したときの「素過程」の理解である。レイン・エロージョンが起こるとき、保護材に雨滴が衝突したときの素過程の変形挙動はその保護材の特性（厚み、材質、硬さ、層数等）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。この素過程においては、コンピューターシミュレーションによる解析（CAE）が有効だと考えている。

二つ目は、レイン・エロージョンの進行段階ごとに分解した際に、各段階でどのようなことが起きているか理解することである。これについて、我々は主として2方向からのアプローチを行う。一つは各種材質ごとのエロージョンをマイクロレベルで観察し、共通した破壊現象を見出し、その破壊現象の進行に伴う物性パラメータを見つけ出すことである。もう一つは、その共通した破壊現象についてCAEを用いて評価を行い、エロージョン各過程における破壊現象についてより深く理解することである。CAEと観察を互いにフィードバックさせることで、進行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。

本研究では、様々なブレード保護材の加速評価試験後のサンプルを対象に共通した劣化現象を見出し、レイン・エロージョンのメカニズムを明らかにする。加えて、レイン・エロージョンの進行段階に関連する材料の物性パラメータの変化を追い、様々な保護材の統一的な評価方法の確立を目指す。今年度は、FREA及び県内企業の協力を得て、弾性率の異なる複数の保護材樹脂サンプルについて種々の物性パラメータを評価するとともに、進行メカニズムについて検討した。

## 2. 実験

### 2. 1. 初期物性評価

本評価では、レイン・エロージョンの加速評価試験に供する試験片について、基本的な物性パラメータのほか、レイン・エロージョンに関連することが想定される物性パラメータを取得した。

### 2. 1. 1. 試験片について

同じシリコン系樹脂で、弾性率の異なる3種のシート（厚み2 [mm]）を県内企業から購入した（図2）。以下、最も弾性率が大きく硬い試験片をhard、中間をmedium、最も柔らかいものをsoftと呼称する。

シリコン系樹脂はブレード保護材として選択されることのある樹脂であり、入手のしやすさからこの材質を選択した。なお、ブレード保護材の材質としてはウレタン樹脂が多いが、エポキシ樹脂やシリコン系樹脂、フッ素系樹脂も使われている。

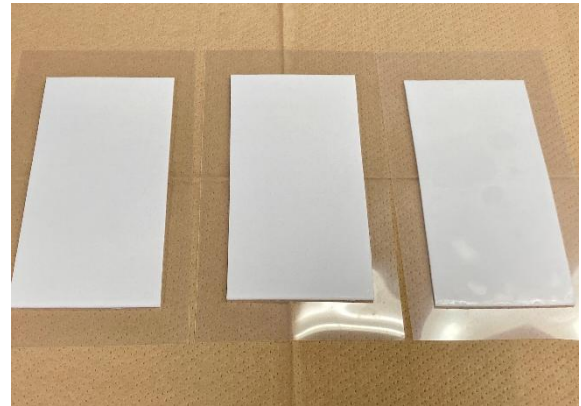


図2 各種保護材試験片  
(左から、hard、medium、soft)

### 2. 1. 2. 物性評価

まずは、新品のシリコン系樹脂3種について初期物性パラメータを取得した。

今回取得した物性パラメータは、弾性率、ナノインデンテーション硬さ、SAICASによる切削力評価、Micro Slurry-jet Erosion (MSE) 試験によるエロージョン率である。レイン・エロージョンは表面から起きる現象であるため、バルク物性ではなく表面物性に着目してパラメータを取得した。

#### 2. 1. 2. 1. 弾性率およびナノインデンテーション硬さ

弾性率、ナノインデンテーション硬さはナノインデンテーション試験機（XE7+Triboscope1D、ParkSystems社+Hysitron社製）を用いて測定した。試験力は50 [μN]に設定し、試験時間は20 [s]負荷、20 [s]除荷とした。測定は5回行い、その平均値を結果の値とした。

#### 2. 1. 2. 2. 切削力評価

切削力評価はSAICAS（SAICAS EN型、ダイプラ・ウインタス（株）製）を用いて測定した。SAICASは、刃を超低角度で侵入させ、表面を薄く削る際の剪断強度を測定することのできる装置である。刃は幅1 [mm]のダイヤモンド製を使用し、削り取り厚さ50 [μm]、水平速度4 [μm/s]における水平切削力を測定した。3回

測定を行い、切削力の値は 200-600 [s]における平均値を用いた。

### 2. 1. 2. 3. エロージョン率 (MSE 試験)

エロージョン率は MSE 試験装置 (MSE-A、(株) パルメソ製) を用いて、装置メーカーにおいて実施した。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 [ $\mu\text{m}/\text{g}$ ] で表され、削られやすいほど大きくなる。3 回の試験を行い、深さ数十 [ $\mu\text{m}$ ] までのエロージョン率のプロットを得た。

## 3. 結果

### 3. 1. 初期物性評価

#### 3. 1. 1. 弾性率およびナノインデンテーション硬さ

図 3 に弾性率およびナノインデンテーション硬さの取得データ (一例) を示す。これらは、荷重-変位曲線のうち主に除荷曲線とその接線形状より求められる値である。

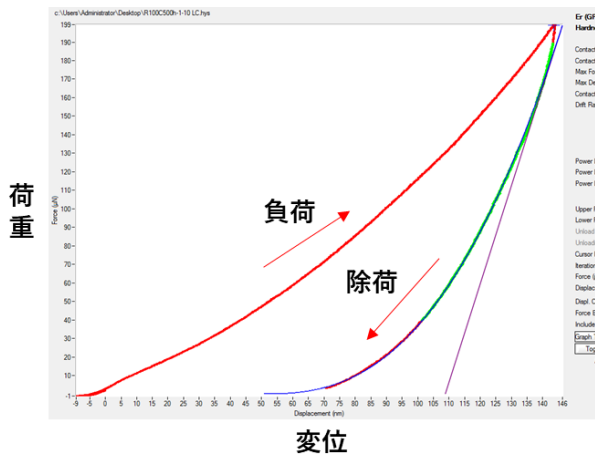


図 3 ナノインデンテーション試験における荷重-変位曲線の例

試験力を 50 [ $\mu\text{N}$ ] にしたときに押し込み深さは 1-3 [ $\mu\text{m}$ ] 程度となり、意図したとおりに表面の情報が得られた。弾性率は hard が 29.5 [MPa]、medium が 15.3 [MPa]、soft が 3.6 [MPa] であった (図 4 (a))。当初の想定どおり、最も硬い hard と最も柔らかい soft の弾性率の比はおおよそ 10 倍であった。ナノインデンテーション硬さもほぼ同様の变化を示し、hard が 4.4 [MPa]、medium が 3.2 [MPa]、soft が 0.5 [MPa] とな

った (図 4 (b))。縦軸に弾性率、横軸に硬さをプロットすると、硬さは弾性率に応じて増加する (図 5)。

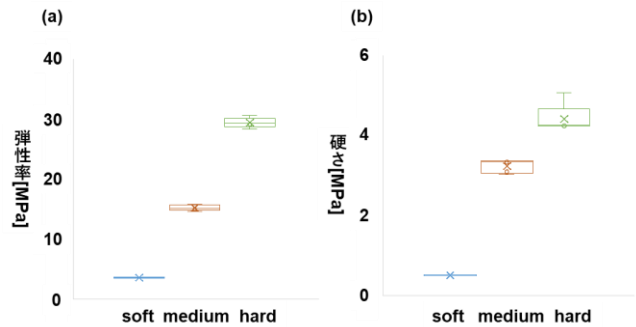


図 4 (a) 弾性率 (N=5)、(b) 硬さ (N=5)

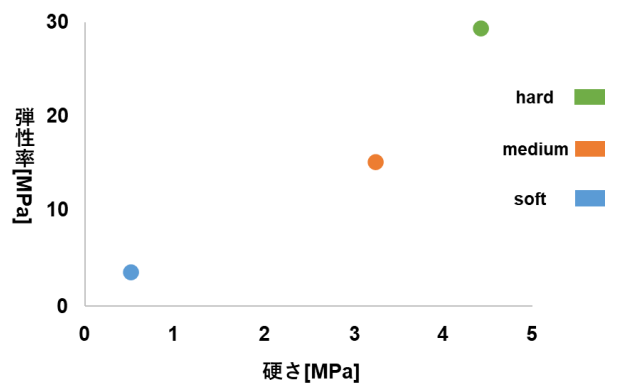


図 5 弾性率と硬さの関係

### 3. 1. 2. 切削力評価

切削力評価の一例と結果を次に示す。図 6 のようにそれぞれ再現性良く測定できた。弾性率とは異なり、3 回の平均値は hard が 0.18 [N]、medium が 0.18 [N]、soft が 0.21 [N] と、ほぼ同じ値を示した。縦軸に弾性率、横軸に切削力をプロットすると、弾性率にかかわらずほぼ変化しないため縦に並ぶ (図 7)。

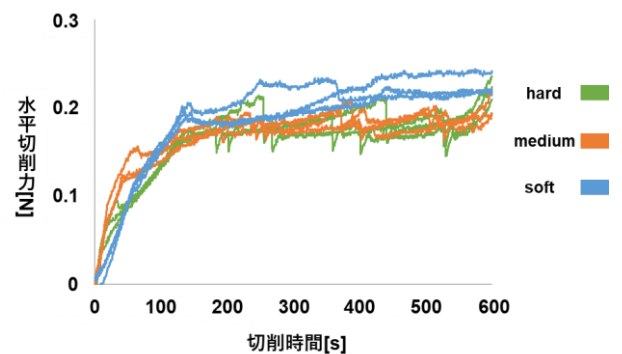


図 6 水平切削力評価

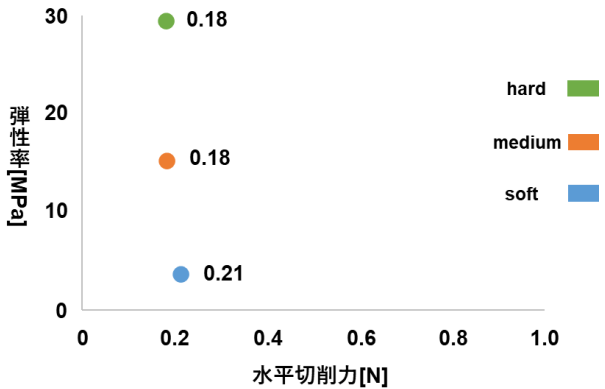


図7 弾性率と切削力の関係

### 3. 1. 3. エロージョン率 (MSE 試験)

エロージョン率をMSE試験により求めた。図8のとおり、深さ40~60 [μm]におけるエロージョン率の平均値は、hardが1.8 [μm/g]、mediumが0.8 [μm/g]、softが1.4 [μm/g]となった。切削力評価と同様に3種が比較的近い値を示したが、hardとsoftに比べmediumの値が低く、より削られにくい。また、今回取得したパラメータの中では唯一hard-medium-softの順にならない結果であった(図9)。

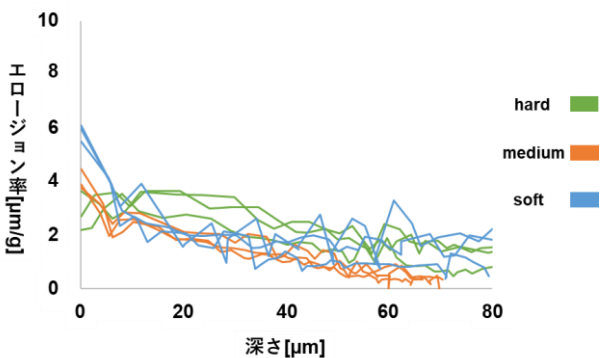


図8 各深さにおけるエロージョン率

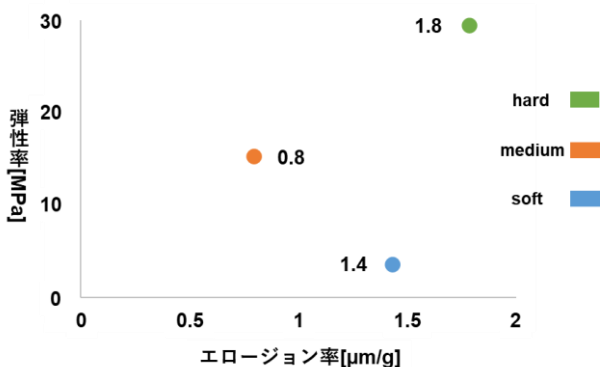


図9 弾性率とエロージョン率の関係

## 4. 考察

### 4. 1. レイン・エロージョンの進行メカニズム

レイン・エロージョンの進行は、大きく3つに分けられる。表面に傷が発生していない潜伏期(incubation period)、初生と呼ばれる初期の微細な傷が発生し、成長していく増加期(increasing period)、そして傷が下地まで到達して剥がれ落ちるブレークスルーが起きる平静期(placid period)である<sup>2,5,6</sup>。各過程の詳細について、先行研究によるといくつかのことがわかっている。

#### 4. 1. 1. 初期の亀裂(初生)

液滴が高速で保護材表面に衝突するとき、ウォーターハンマー圧力と呼ばれる衝撃圧力により、衝撃エネルギーが液滴から保護材に(場合により基材まで)伝達される。この圧力は主に3つの波により伝達される。

液滴が表面に衝突すると、まず縦方向の圧縮波と横方向のせん断波が発生する。その後、液滴の変形により、レイリー波と呼ばれる3番目の衝撃波が発生し、表面に高速の横方向噴流が発生する。短時間の衝突の後、保護材下部から上向きに反射した波が接触面に向かって伝播する。3種類の波のうち、横波とレイリー波がレイン・エロージョンの主な発生源であり、特に保護材表面で伝達され、衝突エネルギーの約2/3を占めるレイリー波は、保護材表面に最も大きな損傷を与えると考えられている。

このようにして衝突エネルギーが保護材表面へと受け渡され、保護材内部でそのエネルギーが吸収される。したがって現時点の仮説として、1回の衝突でははっきりとした傷はつかないが、複数回の衝突により外観上観察されないダメージが表面に蓄積されていき、最終的に限界に達した弱点部(主として成型時の凹凸や分子量分布のムラだと予想している)において亀裂が入り、初生として観察されるというメカニズムが想定される。この保護材内部で損失可能なエネルギー量が多いほど初生が起こりにくいと推察しており、今後これを見積もるパラメータを取得していく予定である。

#### 4. 1. 2. 亀裂の成長

以前の研究結果より、保護材表面で発生した亀裂が成長し、亀裂同士が会うことにより表面の脱落が生じ、最終的に界面まで亀裂が到達して剥離しブレークスルーとなる、というメカニズムを提唱した。図10はその一例で、垂直方向と水平方向の亀裂が会うことで表面から脱落していく様子が見て取れる。また、こうした傷の大きさと深さを観察することにより、回転式RET試験の回転速度との関係性を調べることでブレードの寿命の算出を試みた。しかしながら、液滴の衝突現象については議論しておらず、どのような素過

程で亀裂が伸長しているかはまだ理解できていない。

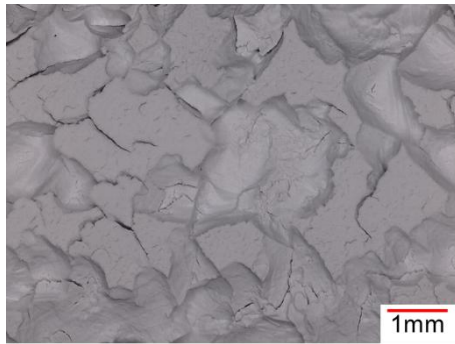


図10 回転式RET試験によるレイン・エロージョン

弾性体における亀裂の進展は、亀裂に対する荷重の作用の仕方から、3つのモードに分類されている。亀裂面に対して垂直に作用し、亀裂が開く向きに応力が働くモード I、亀裂面に対して水平に作用する面内剪断型のモード II と面外剪断型のモード III である。

液滴が衝突した際、どのモード（もしくは組み合わせ）が起きるかについて、CAE による評価も大きな助けとなると考えており、実現象との突合せを今後検討していく。ただし、通常と比べかなりの高速現象のシミュレーションとなるため、計算の妥当性の確認が重要と考えている。

#### 4. 2. 物性評価

レイン・エロージョンの加速評価試験に供する試験片について、基本的な物性パラメータのほか、上記で議論した初生や亀裂の成長に関連することが想定される物性パラメータを取得した。特に、液滴により樹脂が受ける変形を考慮した。

例えば、弾性率は弾性変形領域についてのパラメータであるが、硬さ測定では多少の塑性変形が残るため、弾性変形領域を超える領域を表現するパラメータである。さらに変形が進んだ際のパラメータとして、保護材を刃で引き裂くときの SAICAS の切削力やスラリーで削り取るときのエロージョン率を取得した。

表1 3種のシリコン系樹脂の初期物性

	hard	medium	soft
弾性率[MPa]	29.5	15.3	3.6
硬さ[MPa]	4.4	3.2	0.5
切削力[N]	0.18	0.18	0.21
エロージョン率 [μm/g]	1.8	0.8	1.4

結果は上記表1の通りで、弾性率や硬さに対し、切削力やエロージョン率は異なる傾向を見せた。切削力

はほぼ変わらず、エロージョン率は hard や soft に比べ medium が多少強いという結果であった。これは、図11のように各試験に応じて変形時の変形度合いが異なり、その変形度合いに対応したパラメータを取得できた結果だと考えている。今回の結果を改めて解釈すると、3種の材料は各々異なる硬さを持つが、切れにくさ（靱性）の点では大きな差がないということになる。液滴の高速衝突により保護材は大変形することから、今回取得したパラメータの中では切削力やエロージョン率がより適切に現象を反映するパラメータであると考えている。

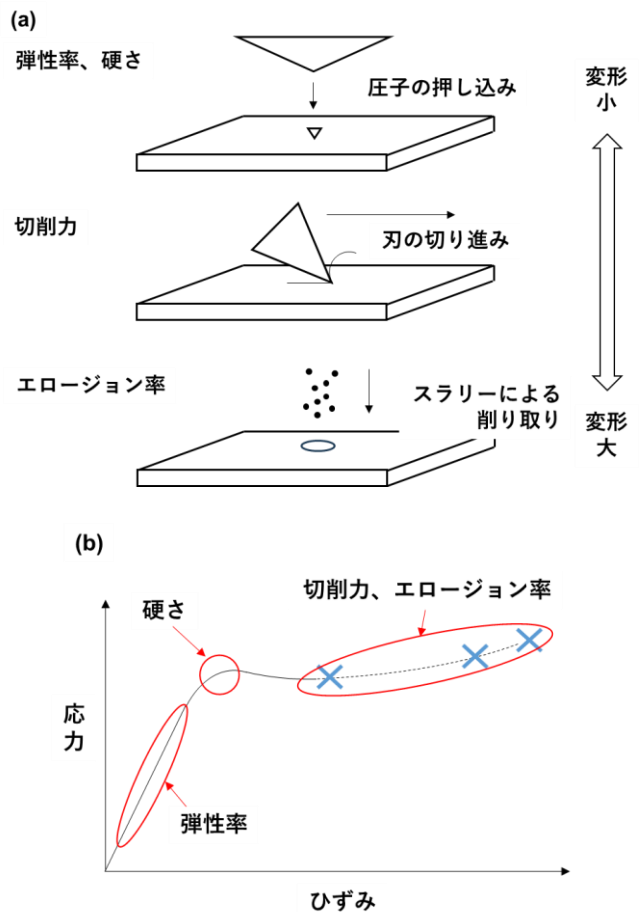


図11 各物性パラメータと変形度合いの関係  
(a)各物性試験の模式図、(b)応力-ひずみ曲線において各物性が対応する位置

ただし、この2つのパラメータは変形速度について考慮していないため、その影響は未知数である。そのため、初生や亀裂の成長をより直接的に表すと考えられるパラメータとして、変形速度依存性を考慮した損失弾性率 ( $G''$ ) や損失係数 ( $\tan \delta$ ) 等の動的粘弾性があげられる。今後はこうしたパラメータを取得していく予定である。

加えて、緒言で述べたように、ブレード表面はレイン・エロージョン以外にも様々な要因で劣化する。特に紫外線は高分子物性に対して大きく影響する。紫外

線により分子量が低下し、より耐エロージョン性が低下する方向へと物性が変化していくと考えられるため、複合的な劣化条件における物性パラメータの取得も今後必要である。

## 5. 結言

レイン・エロージョンの進行メカニズムを明らかにするため、弾性率の異なる複数の保護材樹脂サンプルについてレイン・エロージョンの進行段階に関連する材料の物性パラメータを取得するとともに、進行メカニズムについての検討を行った結果、保護材の変形度合いに応じた物性パラメータを取得することができた。来年度は水滴衝突の変形速度を考慮した物性パラメータを取得し、これまで取得した各物性パラメータの変化による耐エロージョン性の変化について検証する。加えて、水滴衝突によるレイン・エロージョン進展のメカニズムについてCAEによる検証を行う。

## 参考文献

- 1) 「令和6（2024）年度の福島県内における再生可能エネルギー導入量について」（福島県 HP）  
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/708171.pdf>（参照 2026-2-24）。
- 2) L. Bartolomé, J. Teuwen, Prospective challenges in the experimentation of the rain erosion on the leading edge of wind turbine blades, *Wind Energy*. 22 (2019) 140-151.
- 3) 高木智博 他、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）、令和6年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告書。
- 4) DNV, Testing of rotor blade erosion protection systems, (2018).
- 5) A. Dashtkar et al, Rain erosion-resistant coatings for wind turbine blades: A review, *Polymers and Polymer Composites*, 27 (2019) 443-475.
- 6) T.H. Hoksbergen et al, Rain droplet erosion behavior of a thermoplastic based leading edge protection system for wind turbine blades, 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 942 (2020) 012023.