



2026年5月21日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

## 大型洋上風力ブレードの破壊特性を考慮した 設計フレームワークを開発 —炭素繊維の特性がブレード構造重量に与える影響を 世界で初めて定量評価—

### 【発表のポイント】

- 繊維スケールの微視的破壊（マトリクスき裂・繊維圧縮座屈・せん断座屈）を考慮したマルチスケール数値解析フレームワークを構築し、流体力学と構造力学を統合した自動設計を実現しました。
- 10MW 級洋上風力発電機（スパン長 90m）ブレードを対象に、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）とCFRP（炭素繊維強化プラスチック）を比較し、材料の違いが部材厚さ分布・破壊モード・全体重量に及ぼす影響を世界で初めて定量的に解明しました。
- 剛性の高いCFRP 繊維（T1100G）の採用により最も軽量の構造が得られることを実証し、早期設計段階で材料選定指針を提供できる設計支援フレームワークの有効性を示しました。

### 【概要】

風力発電の大型化が進む中、スパン長 90m に達する洋上風力発電機ブレードの設計では、高比強度・高比剛性の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の採用が有力な選択肢となっています。しかし、CFRP は繊維とマトリクス（樹脂）の特性差に起因する複雑な破壊挙動を示すため、実験のみによる設計評価は多大なコストと時間を要します。

東北大学大学院工学研究科の山崎智基氏（現：株式会社 IHI）と流体科学研究所の阿部圭晃准教授（共同筆頭著者）、大学院工学研究科の狩野良輔氏、伊達周吾氏（現：三菱重工業株式会社）、岡部朋永教授らの研究チームは、微視力学（ミクロスケール）から構造全体（マクロスケール）までを一貫して扱うマルチスケール数値解析フレームワークを開発しました。このフレームワークは、空力荷重の計算から始まり、複数の破壊モードの安全率を満足するよう部材厚さを反復自動更新する「構造サイジング」プロセスを組み込んでいます。その結果、GFRP モデルでは前縁パネルにマトリクス支配破壊が先行して局所的に肉厚となる一方、CFRP モデルでは全般的にせん断座屈が支配的となること、および繊維剛性が最も高い T1100G が最軽量ブレードを与えることが定量的に示されました。本フレームワークにより、実機製造前の早期設計段階における材料選定の設計効率化が図られます。

本研究結果は、2026 年 5 月 19 日に土木・建築・機械系の国際専門誌 Engineering Structures に掲載されました。

## 【詳細な説明】

### 研究の背景

洋上風力発電は設置面積の優位性から急速に拡大しており、発電量向上のためブレードの大型化が進んでいます。従来は GFRP とバルサ材が主流でしたが、ブレードが長くなるにつれて構造的な負荷が大きくなるため、過度な厚肉化および重量増加が避けられず、比強度・比剛性に優れる CFRP の採用が有望視されています。しかし、CFRP は繊維の引張破断・圧縮マイクロ座屈・マトリクスき裂・層間剥離など複数の破壊モードが絡み合い、大型ブレード全体の数値実験は計算コストが高いため、材料選定・部材寸法を系統的に決定する設計フレームワークが不足していました。

### 研究の内容

本研究では、繊維・樹脂の微視的特性から複合材料のマクロ弾性・強度特性を予測するマルチスケール解析<sup>(注1)</sup>と、流体構造連成解析<sup>(注2)</sup>、構造サイジング<sup>(注3)</sup>、破壊解析<sup>(注4)</sup>を組み合わせた設計フレームワークを構築しました。

数値流体力学 (RANS)<sup>(注5)</sup>により 90m 長ブレードに作用する分布空力荷重を算出し (図1)、その荷重のもとで各部材ブロック (スパーキャップ・前縁パネル・後縁パネル・ウェブ) の厚さを、マトリクス支配破壊 (Christensen 基準)・圧縮座屈・せん断座屈を含む全破壊モードの安全率を満足するよう反復自動更新します。材料は GFRP (Silenka E-Glass / MY750) および CFRP 3 種 (トレカ®T700S・T800S・T1100G / #3900-2B) を用い、繊維特性の違いが重量・厚さ分布・支配破壊モードに与える影響を系統的に比較しました。

全ブレードモデルで構造サイジングが収束し、次の知見を得ました。破壊モードについては、CFRP モデルでは前縁・後縁パネル、スパーキャップ (圧力面)、ウェブ全般でせん断座屈が支配的となりました。一方、GFRP モデルでは前縁パネルでマトリクス支配破壊が局所的に先行し、同部位が最も厚く設計されました。これは CFRP の高剛性がマトリクスき裂の発生を抑制し、代わりに座屈が限界となるためです。

材料重量については、繊維剛性が高いほど設計厚さが薄くなり、CFRP モデルの重量は T700S、T800S、T1100G の順に軽くなりました (図2)。前縁・後縁パネルが全体重量に最も大きく寄与しており、スパーキャップの材料変更は重量削減効果が相対的に小さいことも明らかになりました。

本研究は、CFRP を用いた全構造大型洋上風力ブレードを対象に、複合材料特有の複数の破壊モードにより決定される構造重量を定量評価した世界初の試みです。マルチスケール解析の統合により、物理実験なしに材料の微視的特性から大規模構造体の性能を推定できることを実証しました。

## 今後の展開

今後は複数の荷重条件（設計荷重ケース DLC）、突風応答、動的空力弾性（フラッタ）、製造誤差（繊維配向誤差）の影響を取り込み、より実用的なデジタルツイン設計技術へと発展させることが期待されます。本フレームワークの拡張は、再生可能エネルギー拡大に向けた大型洋上風力発電の早期設計効率化に直接貢献します。なお、本研究で取り上げた CFRP 材料は航空機構造分野で長年培われた繊維であり、本研究はその知見と設計方法論を洋上風力発電分野へ橋渡しする試みでもあります。

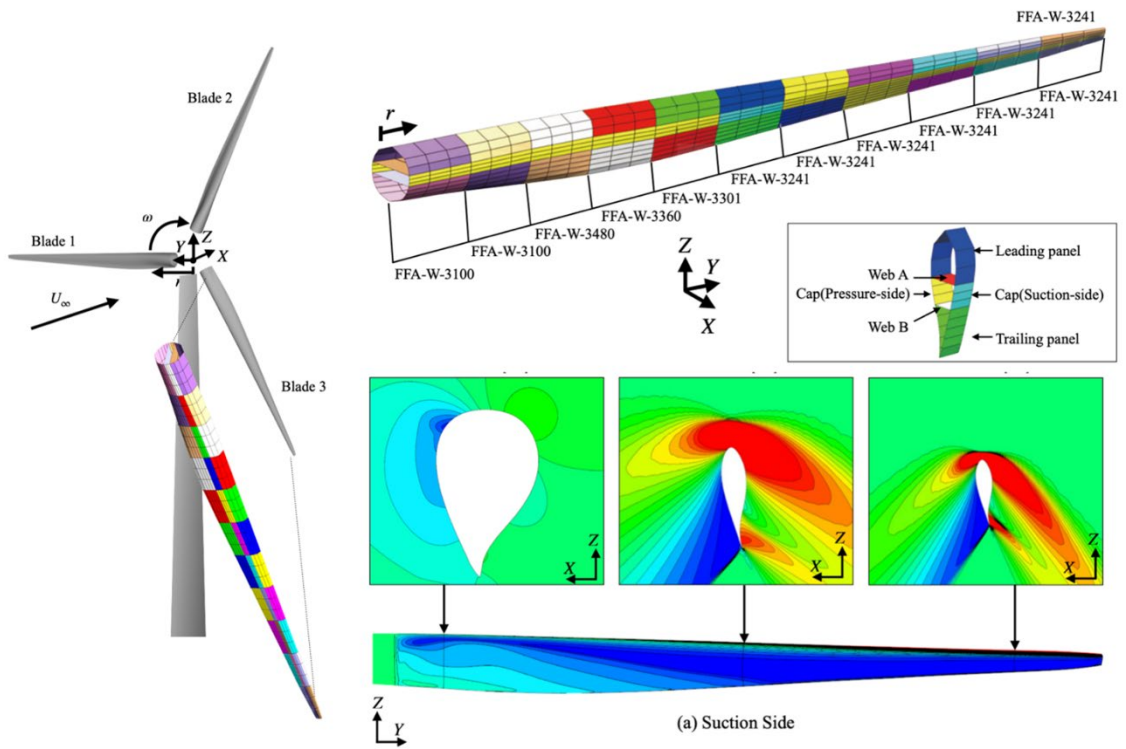


図 1. 10MW 級大型風力発電ブレードの構造モデルと空力解析結果

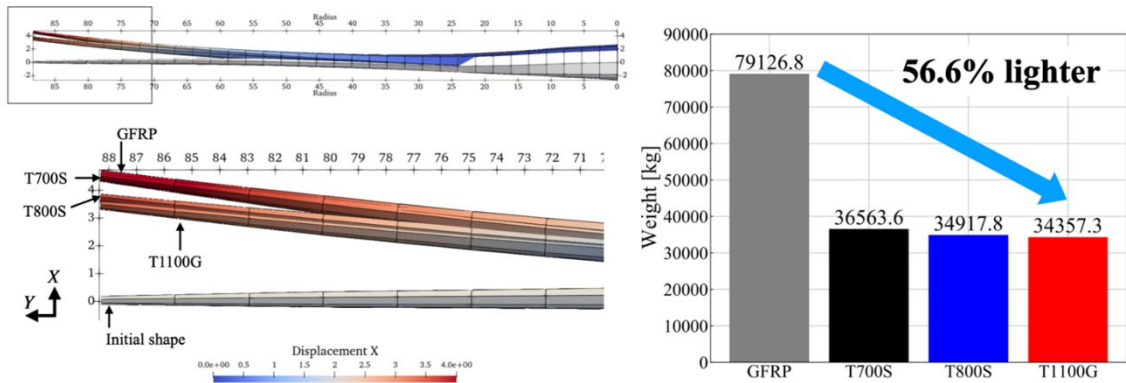


図 2. CFRP の違いによる風力発電ブレードの変形・設計重量変化

## 【謝辞】

本研究は、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業（JPMJFR2124）、次世代研究者挑戦的研究プログラム（JPMJFS2102）および日本学術振興会科学研究費助成事業（24K01074、24K02946）の支援を受けて行われました。掲載論文は『東北大学 2026 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業』の支援を受け Open Access となっています。

## 【用語説明】

- 注1. マルチスケール解析：繊維（マイクロメートルスケール）・積層板（メゾスケール）・ブレード全体（マクロスケール）の複数の空間スケールを連結して材料特性や破壊を評価する数値手法である。物理実験なしに複合材料の等価弾性特性や強度を予測できる。
- 注2. 流体構造連成解析：空気の流れ（流体）による荷重とブレードの弾性変形（構造）が互いに影響し合う現象を同時に解析する手法である。ブレードのたわみが空気の流れを変化させ荷重がさらに変わるため、両者を連成させなければ正確な性能評価はできない。
- 注3. 構造サイジング：設計荷重のもとで各部材の厚さ・断面寸法を、強度・座屈などの設計要求（安全率）を満足する最小値に自動的に決定するプロセスである。本研究では破壊判定と連動した反復計算により自動化している。
- 注4. 破壊解析：複合材料ラミネートの各部材に発生する破壊モード（マトリクスき裂、圧縮座屈、せん断座屈など）を力学基準に基づき判定し、安全率を評価する解析である。複数の破壊モードを同時に考慮することで、実際の破損に近い設計評価が可能になる。
- 注5. RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)：乱流を統計的に平均化して扱う数値流体力学（CFD）手法である。風力タービンブレード周りの分布空力荷重を数値計算で求めるために用いる。

## 【論文情報】

タイトル：Multi-scale numerical framework for effects of fiber properties on designing composite wind turbine blades

著者：Tomoki Yamazaki<sup>†</sup>, Yoshiaki Abe<sup>†\*</sup>, Ryosuke Kano, Shugo Date, Tomonaga Okabe（<sup>†</sup> 共同筆頭著者）

\*責任著者：東北大学流体科学研究所 准教授 阿部圭晃

掲載誌：Engineering Structures

DOI：10.1016/j.engstruct.2026.122885

URL：

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029626007996>

**【問い合わせ先】**

（研究に関すること）

東北大学流体科学研究所

准教授 阿部 圭晃

TEL: 022-217-5233

Email: [yoshiaki.abe@tohoku.ac.jp](mailto:yoshiaki.abe@tohoku.ac.jp)

HP: <https://www.ifs.tohoku.ac.jp/mulphd/jap>

（報道に関すること）

東北大学流体科学研究所

国際研究戦略室（広報）

TEL: 022-217-5873

Email: [ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp](mailto:ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp)