

## 論文の内容の要旨

氏名：呉 丹

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：雷撃を受けた CFRP サンドイッチ製風力発電ブレードの構造安全性  
に関する研究

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP）は従来の金属材料に比べて、軽量で比剛性・比強度に優れており、現在では航空機部材に多く使用されている。近年では風力発電用ブレードの大型化に伴い FRP 製ブレードに関する研究が多く行われ、従来使用されていたガラス繊維強化プラスチック（Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP）から CFRP へ移行されている。CFRP サンドイッチ製風力タービンブレード（以下、CFRP 製ブレード）が運用中に雹や鳥の衝突や落雷などによって衝撃負荷を受けると、CFRP 製ブレードの厚さ方向に繊維が無く衝撃負荷に弱いため、材料内部に表面から確認できない層間はく離、樹脂割れ、繊維破断が生じる可能性がある。さらに損傷した部分に曲げや圧縮負荷が加わると層と層がはがれ、圧縮強度が低下し、座屈や圧縮破壊が起こりやすくなるため、内部損傷を非破壊的検査する必要がある。風力発電施設の故障・事故の調査報告によると、日本では落雷による被害が最も多く、風車の利用率を向上させるためには、雷撃を受けた後のブレードの振動特性と力学特性を把握しておく必要がある。

本研究では定格風速 12.5m/s（定格出力 10 kW）、カットアウト風速 25m/s、定格回転数 200 rpm、最大回転数 1000 rpm の性能を有し、実際に運用されている翼長 2168mm、最大翼弦長 483mm、最大厚さ 212mm の CFRP 製ブレードを供試体に用いて模擬雷撃実験の前後で、超音波探傷実験、インパルス加振実験、曲げ実験を行い、さらに FEM 解析で CFRP 製ブレードに遠心力が作用した場合の応力解析を行い、雷撃を受けた後の CFRP 製ブレードの構造安全性を評価した結果について報告する。本論文は全 5 章から構成されている。

第 1 章は序論で、本研究の背景、従来の研究について述べ、最後に本研究の目的について述べている。

第 2 章は実験の章で、種々の実験を行ったが、それらの方法をまとめて説明した。まず実験に用いた 3 体の CFRP 製ブレードの表面層の積層構成と心材について説明し、模擬雷撃実験を IEC 61400-24 を参考にして行った。雷撃の大きさを表す雷電流波高値は累積頻度分布を参考に決定し、日本での累積頻度分布の約 50% の場合で 20~30kA と、累積頻度分布の約 15% の場合で 60 kA に設定した。

次に、模擬雷撃試験後の内部損傷を確認するために空中超音波探傷試験を行った。探傷方法は非接触空中法で 2 探触子透過法とし、探傷条件はプローブの周波数を 50 kHz、走査ピッチを 2.0 mm、探傷感度を 30~40 dB とした。透過パルス高さが送信パルスの 40% 以下を損傷部とみなした。さらにインパルスハンマーで CFRP 製ブレードに入力波を与え、3 軸の加速度計によって応答振幅を測定した。計測は 1 つの応答点に対して加振を 3 回行った。合計 40 点の入力波と応答波を FFT アナライザー内で伝達関数に変換し、その伝達関数から 1 次から 3 次までの曲げモードの固有値と振動モードを求めた。

最後に、3 章では風圧分布を模擬した CFRP ブレードにデットウェイトの荷重を与えて行った曲げ実験の方法についても述べた。

第 3 章は前章に規定した実験方法に従って行った実験結果とその考察を記述した。模擬雷撃実験後の試験体において、ブレードの長手方向と幅方向に約 30mm にわたって繊維破断及び樹脂が焼失した様子が確認できた。これは雷の発生による衝撃波及びその際に発生する高温による樹脂溶解と蒸発の複合的な影響によって発生したと考えられるが、着雷点の裏側の CFRP 製ブレード表面に損傷は確認されなかった。

ブレードの内部損傷を確認するために空中超音波探傷試験を行った結果、先端部と中央部の損傷は着雷点近傍に集中していることが確認できたが、根元部は厚く、曲面形状となっているため、根元部での着雷点近傍に超音波ビームが透過しきれず、損傷を確認する事ができなかった。

模擬雷撃実験前後での CFRP 製ブレードのインパルス加振実験の結果、Blade 1 の模擬雷撃前の 1 次の曲げモードの固有振動数が 13.1Hz であったのに対し、模擬雷撃後の固有振動数は大きく 13.7Hz となり、

模擬雷撃実験前後での差は 4. 6%となった。2 次と 3 次の曲げモードについても、模擬雷撃実験前後での固有振動数の差はそれぞれ 4. 0%と 5. 4%となった。さらに、Blade2 と Blade3 においても模擬雷撃実験前後で、固有振動数の差は 5%程度となった。これらの差はインパルス加振実験の測定誤差範囲内と考えられる。本 CFRP 製ブレードの数箇所にて雷撃による局所的な損傷が生じて、CFRP 製ブレード全体の剛性が模擬雷撃実験前とほとんど変化しないと考えられる。

模擬雷撃前後の弾性域における Blade 3 の荷重-変位線図の比較してみると、模擬雷撃前の Blade3 の最大変位が 32. 2mm であったのに対し、模擬雷撃後の Blade3 の最大変位は 32. 8mm となり、模擬雷撃実験前後で両者の差は僅かであった。このことから、固有振動数の結果と同様に、雷撃による局所的な損傷が本 CFRP 製ブレードの曲げたわみに与える影響はほとんどないと考えられる。

第 4 章の FEM 解析では、先ず FEM 解析方法について説明した。FEM 解析は汎用有限要素法プログラム ANSYS Ver14. 5 において要素には 8 節点構造ソリッド (SOLID185) を用い、境界条件は、CFRP 製ブレードの取付け部の節点を完全拘束して、片持ち状態とした。その結果、節点数は 23848、要素数は 20781 となった。次に、CFRP 製ブレードの振動解析と曲げ解析を行い、前述の実験結果と比較検討した結果、定式化した有限要素法の妥当性を確認した。

CFRP 製ブレードのインパルス加振実験と FEM 解析のそれぞれにおいて、模擬雷撃実験前後での固有振動数の変化は小さく、両方において雷撃の影響は大きくないことを明らかにした。次に、インパルス加振実験と FEM の解析を比較した結果、1 次と 2 次の実験結果と FEM 解析の誤差は 5%程度となり、インパルス加振実験の誤差範囲内で、両者は一致を示した。また、FEM 解析結果から得た 1 ～3 次のモード形状はインパルスハンマー加振実験から得たアニメーションの結果と一致した。

曲げ実験においても、模擬雷撃実験前後での最大たわみの差は小さく、雷撃による損傷の影響は固有振動数の場合と同様に小さいことを明らかにした。また、曲げ実験と FEM の解析における最大たわみの値はほぼ一致した。これらのことにより、本研究で定式化した FEM 解析の妥当性を示した。

CFRP ブレードの構造安全性の検証するために、模擬雷撃実験前後の Blade3 に、最大回転数 1000 rpm で回転させた際に生じる引張応力を CFRP の引張強度で割った無次元量  $\lambda$  で表した。模擬雷撃実験前の Blade3 では、積層構成が変わる境界近傍で  $\lambda$  は最大値を示し、0. 24 となった。一方、模擬雷撃実験後の Blade3 では、模擬雷撃による損傷部近傍で  $\lambda$  は最大値を示し 0. 31 となり、模擬雷撃実験前より  $\lambda$  は 29% 大きくなったが、破壊基準の 1 には達しなかった。この結果から本 CFRP 製ブレードでは、最大回転数で運用中に、累積頻度分布の約 15%となる 60 kA の雷がブレードの根元に落ちた場合でも、すぐに破壊基準には達しないと推察される。また、遠心力による最大応力の値は、固有振動数と曲げたわみの場合に比べて、CFRP ブレードの局所変化に敏感なため、雷撃の影響は大きくなる。

第 5 章は結論で、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題についても述べている。

1) 累積頻度分布を基に、雷電流波高値の累積頻度分布の約 50%となる 20～30 kA と、累積頻度分布の約 15%となる 60 kA の模擬雷撃を CFRP 製風車ブレードに与えた結果、着雷点近傍で樹脂溶解と蒸発、繊維破断等の複合的な損傷が発生した。しかし、損傷範囲は小さく、着雷側の表面層とコア材の近傍に限定されるため、振動特性と曲げ特性にほとんど影響を与えなかった。

2) 模擬雷撃前後で固有振動数と最大たわみの実験結果と FEM 解析結果は一致し、モード形状も一致した。

3) CFRP 製ブレードの根元近傍に模擬雷撃による損傷を模擬し、最大回転数で運用された際の安全性を最大応力説で評価した結果、本 CFRP 製ブレードでは、累積頻度分布の約 15%となる 60 kA の雷撃を受けた後でもすぐに破壊基準に達しないことが明らかになった。また、遠心力による最大応力の値は、固有振動数と曲げたわみの場合に比べて、CFRP ブレードの局所変化に敏感なため、雷撃の影響が大きくなる。

4) 雷撃を受けた CFRP サンドイッチ製風力タービンブレードの振動特性の変化はインパルスハンマー実験の測定誤差範囲内に入るため、インパルス実験で雷撃を受けた CFRP サンドイッチ製風力タービンブレードの損傷有無の推定は定量的には困難であるが、定性的に可能であることを示した。

5) CFRP サンドイッチ製風力タービンブレードを継続的に安全に使用するためには、雷撃によって損傷が生じた CFRP サンドイッチ製風力タービンブレードに遠心力を負荷させるための回転試験、さらに疲労およびクリープ強度を明らかにする必要がある、今後の課題とする。