

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

呉 丹

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 従来の研究	7
1.2.1 風車ブレードの事故例	7
1.2.2 風車ブレードの非破壊検査.....	9
1.3 本研究の特色と目的	12
第 2 章 各種実験手法	13
2.1 はじめに	13
2.2 試験体	14
2.3 実験手法について	17
2.3.1 模擬雷撃試験	17
2.3.2 空中超音波実験.....	22
2.3.3 インパルス加振実験.....	24
2.3.4 片持ち曲げ実験	29
第 3 章 雷撃前後のブレードの実験結果.....	31
3.1 はじめに	31
3.2 空中超音波探傷試験結果.....	32
3.3 インパルス加振実験.....	44
3.4 曲げ実験.....	46
3.5 結言	48
第 4 章 有限要素法解析と実験結果の比較・検討.....	49
4.1 はじめに	49
4.2 有限要素法の定式化.....	50
4.3 雷撃前後の加振実験結果と解析結果の比較・検討.....	54
4.4 雷撃前後の曲げ実験結果と解析結果の比較・検討.....	62
4.5 構造安全性の検証	64

第 5 章 結論	68
5.1 本研究の成果	68
5.2 今後の課題	70
参考文献	71
謝辞	75

第 1 章 序論

1.1 研究背景

炭素繊維強化プラスチック(CFRP : Carbon fiber reinforced plastics)は炭素繊維の軽量、高剛性、高強度と樹脂の耐触性の特徴を受け継ぎ比弾性および比強度が高く、耐触性、耐薬品性に優れているなど多くの性質を示し、従来の金属材料にくらべて格段に優れた性質を持っている。また、この CFRP は強化繊維と樹脂を組み合わせる成形加工するが、成形加工技術は未だ改良の途上であり、様々な方法が存在する。どの方法を採用するかは、部材の形状や要求特性、コスト等による。代表的な成形方法は接触圧成形、引き抜き成形、連続成形、レジントランスファ成形(RTM:Resin Transfer Molding)、真空樹脂含浸成形(VaRTM)、CFRP プリプレグ(Figure 1-1)を用いたオートクレーブ成形、フィラメントウィデング(FW)成形等がある

近年、この CFRP は様々な業界から注目されている¹⁾。その背景として、世界的に地球温暖化抑制を目的とした二酸化炭素排出削減や省エネ対策、再生可能エネルギーの普及促進が急務とされている。その実現に向けて航空機や自動車といった輸送機分野における構造等の軽量化や、再生可能エネルギーである風力発電の市場拡大にこの材料の特性を活かした製品設計が欠かせないためであり、本格的にこの CFRP 素材の普及期を迎えようとしている。

例えば、航空機分野においては、CFRP は 1980 年代より航空機一次構造材で使用が開始されている。2012 年、ボーイング社²⁾が市場へ導入した B787 の機体重量 50%には CFRP が使用されている。機体の胴体、主翼、水平及び垂直尾翼が完全に CFRP 化された。また、2007 年に運航が開始されたエアバス A380 においては、中央翼、水平尾翼、垂直尾翼、圧力隔壁など約 20%に CFRP を使用している。また、2014 年後半に就航を目指しているエアバス A350XWB³⁾においては、主翼胴体にも複合材料に適応され、50%以上が CFRP 化される予定である。このように CFRP は航空機の軽量化に必要な不可欠な部材として認知されており、CFRP 適用拡大はさらに進むことが予想される。

自動車の分野でも CFRP の適用拡大は急速に進んでいる。1980 年代後半からはガソリンの代替燃料として天然ガスが注目を集めるようになった。現在世界中で利用されている圧縮天然ガス自動車^{4,5)}の燃料タンク(Figure 1-2)には金属ライナーあるいはプラスチックライナーにカーボン繊維を巻いた CFRP 製圧力容器が採用されている。

また、最近では排出物が水のみで CO₂ や NO_x、SO_x などの汚染物質を排出し

ない燃料電池車(FCV)が注目を浴びている。このFCVの燃料を保存するための高圧水素容器には、軽量で高強度のCFRPが必須の材料と考えられている。2013年8月15日に、経済産業省はFCVに水素を供給する水素スタンドについて、水素を圧縮貯蔵する蓄圧器にCFRPを活用した複合蓄圧器を採用できるよう省令の改正を行った⁶⁾。これにより、コスト低減と軽量化で設計自由度を高め都市部におけるインフラ整備を容易にし、FCV普及が更に加速する。

普通車においても適用が広がっている。車体自体を軽量化することで燃費を改善しCO₂を減少させ、地球の温暖化抑制に貢献することが目的である。従来のCFRPでは高速成形加工や高汎用性を有する接合を行えなかったため、いわゆるスポーツカーを始めとする高級車に限定されたCFRP適用であった。

2013年9月、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(New Energy and Industrial Technology Development Organization: NEDO)のプロジェクトにおいて、加熱すると成形しやすくなる熱可塑性樹脂を用いた、まったく新しい炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(CFRTP: Carbon Fiber Reinforced Thermal Plastics)の応用を検討している⁷⁾。これにより量産車への適応が広がり、車体の軽量化(現行比30%程度)やエネルギー消費低減などの効果が期待できる⁸⁾。

一方で、国際エネルギー機関(IEA: International Energy Agency)によると、世界各国で再生可能エネルギー(水力、太陽光、地熱、バイオ燃料、風力)の拡大は続くとされている。発電量は今後5年間で40%増加すると推定されており、拡大傾向が続くとすれば、2012年までに世界の発電量の25%のシェアを占めることになる⁹⁾。特に再生可能エネルギーの中でも、最も普及しているものは風力発電である。良好な風資源のある環境下では高い設備利用率を達成しており、CO₂排出量がきわめて少なく、発電コストも低く経済合理性も兼ね備える。2012年に世界で新設された風力発電設備容量は合計で44,799MW(メガワット)にのぼり、前年比で10.0%増加した¹⁰⁾。また、日本における風力発電の設備容量は2012年時点で2,600MWに達し、風車設置数も1,900基を超えている¹¹⁾。しかし、陸上の平野部においては風力発電に適した土地が少なく、山岳部では道路整備などのコスト負担が増加している。そのため、今後日本での風力発電導入拡大には長い海岸線を生かした洋上風力発電が期待されている。

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てきた¹²⁻¹⁴⁾

風力発電の風車にはガラス繊維強化プラスチック(Glass Fiber Reinforced Plastics: GFRP)の特性を生かした風力発電用ブレードが使用されてきた。軽量で耐食性および耐候性が優れているGFRPは、軽量化と省エネルギーの観点から適用が拡大してきた。風車ブレードのGFRP素材は不飽和ポリエステルをガラス繊維で強化したものである。この素材を使う利点は、軽くて強く成形、補

修が容易という面がある一方、製品の品質が成形法や作業者の力量に左右されるという難点¹⁵⁾がある。そのため、これをうまくコントロールすることが製品の強度管理上のポイントとなっていた。一般的に風車ブレードは輪郭を形成する外皮と、外皮荷重をローター軸に伝える主軸から構成されている。外皮と主軸の間には、外皮の座屈防止のため、ポリウレタン発泡剤が充填されている。外皮は樹脂を塗布した雌型にガラスクロスを手ドレイアップで積層する。また、主軸は金型を用いたテープワインディング法で製作する方法がとられる。GFRP 材の強度は、ガラス含有量に依存するため、作業者の積層時の樹脂の含浸、脱泡作業等には細心の注意が払われている。

風力エネルギーを効率よく取得するためには、風力発電に適した場所への風車設置が重要である。更に発電効率を高めるためには、風車の大型化が効果的である。風車の取得エネルギーは風車ブレードの回転面の受風面積に比例するためである¹⁶⁾。大型化によって1機あたりの発電出力が増大するとともに、複数設置によってウィンドファーム全体の出力が増大し、発電コストを低減することができる。現在、プロペラ式の風車の大きさは、定格出力が600kWの場合、タワーの高さは40～50m、羽根の直径は45～50mとなる。また1,000kWから2,000kWの場合、タワーの高さは60～80m、羽根の直径は60～90mが一般的である。

EWEA(European wind energy association)が調査した世界の風車の平均的サイズの推移によると、2008年に導入された世界の風車の平均サイズは国によっても異なるが2,000kW前後にまで大型化してきている。1990年ドイツにおいて風力発電施設の定格出力は100～200kW、プロペラの直径は20～30m程度であった。しかし、2004年時点では、新設される風力発電施設の平均出力は1,700kWにまで上昇している。すでに開発されている新型機の中には、出力4,000～5,000kW、プロペラの直径110～130mの大型機も見られる。また、大型風車は洋上など風の強い所に設置されるケースが多い。そのため、従来ブレードの材質として使用されてきたGFRPでは増大する風圧に耐えきれず、風車を支えるタワーに接触する恐れがある(Figure 1-3)。そのため、これからの風車ブレードの材質は、GFRPから比強度・比剛性に優れたCFRPに移行させる傾向¹⁷⁾がみられ、CFRP性風車ブレードの研究開発が活発になされているのが現状である。



Figure 1-1 CFRP prepreg



Figure 1-2 CFRP pressure vessel

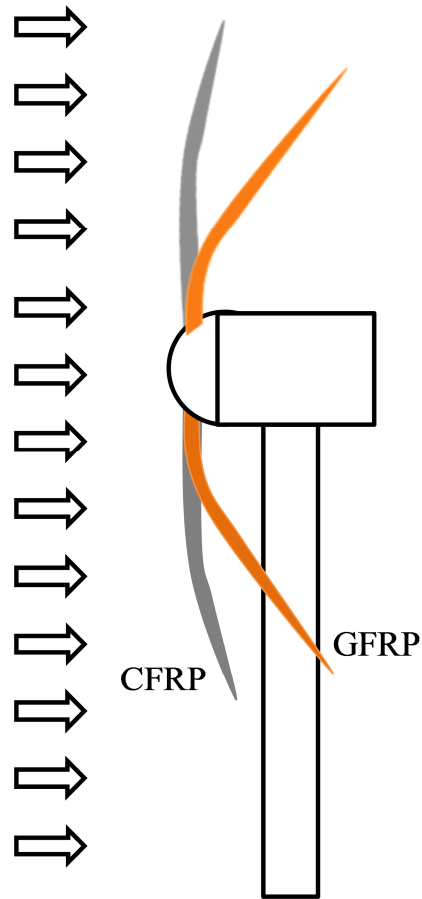


Figure 1-3 Wind turbine blade

1.2 従来の研究

1.2.1 風車ブレードの事故例

GFRP 素材が工業製品に用いられ始めた当初は、静止部材や補強用 2 次構造材への適用が主であり、求められる特性は主に引張強さや引張弾性率であった

GFRP を大型・厚肉部材や繰り返し荷重が負荷される構造部材に使用するケースが増加するようになって、引張側の強度特性と同時に圧縮側の強度特性や疲労強度が重要視されるようになった。さらに地球環境問題の世界的な高まりにより、急速に普及している風力発電装置の GFRP 型風車ブレードの強度向上や信頼性向上がますます重要視されている。この風車ブレードは常に厳しい自然環境の中にさらされる状況で稼働している。太陽光線中の紫外線の影響や、赤外線熱作用、湿度及び降雨による影響などを受ける。こういった自然環境における GFRP 素材の強度の解明のため、耐候性強度¹⁸⁻²¹⁾を明らかにする研究が行われてきた。特に風車ブレードの回転による遠心力や風の抵抗等の繰り返し荷重が GFRP 素材に対して負荷される。そこでブレードの特性を明らかにするために引張試験や疲労試験が行われている。また厳しい運動状態に晒される機器では部材の共振による疲労破壊や騒音など、振動に関わる問題が必ず生じる。また、製造中やメンテナンス中の工具落下や飛行中の雹、鳥などの衝突、被雷による素材の損傷による影響についてもこれまで精力的に研究されている²²⁾。

今後風力発電の大型化が進むことにより問題点が生じる。大型化によりその高さは 100m を超えることがあり、わが国独特の気象条件(台風、落雷等)による被害が多発することである。特に日本海沿岸では通常の雷現象よりエネルギーが大きく、放電継続時間も長期間にわたる冬季雷の存在が報告されている²³⁾。

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の次世代風力発電技術研究開発事業によると風力発電施設の故障・事故に関する調査は、平成 16 年度から継続して実施されており、平成 16 年から 20 年までの間の故障・事故発生状況を調査した結果²³⁾を(Figure 1-4)に示した。それによると、「落雷」が自然現象の故障事故原因の 77%(197 件)と最も多い

自然現象以外の故障原因としては「原因不明(調査中)」が 95 件と「原因不明(特定できず)」が 149 件で、落雷と原因不明の合計で 1/2 を超える比率となっている。

さらに NEDO の調査^{24,25)}によると風車の部位別の故障・事故発生状況は「制御装置」が最も多くなっており、次に「電気装置」、「ピッチ制御装置」、「ブレード」、「その他」、「風向風速計」となっている。これらの故障・事故の発生状況は大きく 2 つに分類すると、外部要因である落雷・暴風等の自然現象による

影響、もしくは内部要因つまり設計・製造不良やメンテナンス不備による影響のどちらかであると考えられる。状況結果からみると「ブレード」において自然現象の比率が特に高い結果となっており、風車の故障・事故は落雷により、ブレードが物理的に破壊される場合が一番多く問題視されていることがわかる。またそれに比べ欧州ドイツにおける故障発生要因は、構造部材の損傷が 37%と一番多く、落雷は 4%となっている。日本においては、風力発電における落雷被害対策が最優先課題であることは明確である。

また、課題への対策を行うにあたっては、故障・事故の発生回数が多い部位を特定するだけでなく、利用率向上の面から故障・事故による停止時間の長いものについての対策も重要である。部位別の平均停止時間を見ると、発生件数がある程度高く平均停止時間が長いものは、ハブ、主軸／ベアリング、発電機、ギアボックスとなっており、それぞれ 2,000hr/回を上回っている。次にブレードも 2,000hr/回弱と復旧に多くの時間を要していることがわかった。また、総停止時間で比較すると、ブレードの故障が最も長く計約 18 万時間となっており、特に目立った結果となっている。

また、ブレードの修理費用は、他の部位の修理費用の 10 倍程度となっているため、停止期間のコストも考えれば経済的被害は甚大となる²⁶⁾。そのため、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。これら複合材構造の直接被雷による損傷についてはいくつかの研究例がある。模擬雷撃による風車ブレードの損傷に関する研究は花井ら²⁷⁾や箕輪ら²⁸⁾によりされているが、これらは GFRP 製風車ブレードのため、導電性を有する CFRP とは損傷状況が異なってくると考えられる。また直接的、間接的な雷に対して有効な複合材構造を保護するためのシステムも提案されているが、これら保護システムを用いた場合でも被雷による損傷を完全に防ぐことは難しい。そのため、これまで風車ブレードの主材料である GFRP の対し雷のエネルギーの損傷規模や損傷モードに関する研究報告が数例なされている。しかし多くの研究は GFRP 素材に対してである。

CFRP ブレードに対する研究はまだ非常に少ない。雷撃を受けた CFRP の損傷に関する研究報告は、試験片レベルでは研究^{29,30)}がなされているが、実際の CFRP 製風車ブレードを用いて模擬雷撃実験を行い、雷撃後の振動特性、力学特性を評価した研究は、筆者が調べた範囲では見当たらない。

今後の導入が進んでゆく風車ブレードは CFRP を積層して作るため、厚さ方向に繊維が無く衝撃負荷に弱いという欠点がある。また、落雷の衝撃負荷によって材料内部に表面からでは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。また、CFRP 積層材の場合、目視検査で検知できる損傷と実際に積層板内部の損傷との規模が一致しない場合がある。

1.2.2 風車ブレードの非破壊検査

CFRP 積層材における損傷検査の方法は、非破壊検査が重要な役割を果たす。多くの非破壊検査手法は、対象物に超音波や放射線などを入力後、物理的反応及び入力データの変化を取得し、損傷や欠陥等を検出するものである。

CFRP 積層材の非破壊検査に最もよく用いられる技術は超音波探傷試験である。超音波探傷試験で、パルス発信器から発生した 1~15MHz の超音波のパルスを探触子から発信して被検体に入射させる。複合材料の層間には離れのように固体と空気が接するはく離面に達すると激しい反射や屈折が起こる。欠陥で超音波が散乱し受信音波の強度が低下することを利用し欠陥の存在位置及び大きさの程度を知る透過法、欠陥で超音波が反射することを利用し反射波の強さ、その時間から欠陥深さを検知する反射法がある。これまで航空機部品の完工検査では透過法が用いられていたが、板厚方向の詳細な情報が得られないため、近年では反射法が利用されることが多い。

超音波探傷試験の分類を以下に示す。直接接触法は、媒体を必要とすることが特徴で、探触子と被検体とを接触媒質(シリコンオイル、グリセリン、マシン油)を介して直接試験体に接触させる方法である。その他には、被検体を水中に設置して計測する水浸法³¹⁾および被検体に水を噴射しながら計測する水噴射法、被検体と探触子の間に水を満たしたデバイスを置きそれを動かして探傷する局部水浸探傷法などがある。試験片などの小さな物を探傷する場合には水を媒体とした水浸法が適用されるが、航空機や風車ブレード等の大型構造物には水浸法が適応は困難となる。そのため、探触子を直接被検体にあてて探傷を行うフェイズドアレイ超音波探傷法や超音波カメラが採用されている。

フェイズドアレイ超音波探傷法は多数の振動子を配列したアレイ探触子を用いる方法である。各振動子から発信する超音波の送受信タイミングを連続的にずらすことで合成した超音波を任意の方向に集束させることができるため、複雑な部材にも適用ができるという特徴がある。また、このフェイズドアレイの技術を応用したのが超音波カメラである。電子走査により収集した数千の超音波エコーデータを 3D 処理し、CFRP 特有の内部損傷を高精度に 3 次元画像化することで、損傷範囲の特定が容易となる。

この技術を使用したポータブル型超音波非破壊検査装置が全日空に納入され、ボーイング 787 の指定非破壊検査装置に認定されている。この他にも、超音波探傷器や探触子の性能の向上とパルス圧縮技術によって、空気中に超音波を伝搬させて、非接触で超音波探傷検査ができる非接触超音波検査の研究が進んでいる³²⁾。

超音波探傷試験の他にもよく使われる方法に、X 線透過探傷試験がある。

X線は物体を透過する力があり、その特性を利用した試験方法である。その物体の透過の度合いが物体の密度によって異なると、その影響によりフィルムや蛍光板に影絵が投影される。それによって内部のクラックやボイド、異物などを検査する方法である。X線透過探傷試験技術³³⁾には、X線を物体に透過させてフィルムで直接撮影するフィルム法と、蛍光板などを介して欠陥の観察、データ処理する透過蛍光法がある。

さらに近年では、マイクロフォーカスX線技術³⁴⁾が発達し、マイクロフォーカスX線管、X線像を強調するイメージ増幅蛍光板、データ処理のためのCCDセンサ、パソコンのデータ処理速度の向上により、複合材料の非破壊検査に十分に適用できるようになった。この他に、非接触型で検査速度の向上が期待される赤外線サーモグラフィ³⁵⁾、電磁誘導を利用した渦電流探傷試験³⁶⁾といった手法も研究が進んでいる。

以上、CFRPの非破壊検査に関する従来の研究を概説したが、従来の検査では被検体の大きさによって、検査設備の高価格化や検査時間がかかり過ぎるといった問題点がある。そのため、風力発電の風車のような大きな構造物に対するの運用面を考え、より簡単に損傷を推定する必要があり、現場で簡単にできる検査方法が必要となる。

上記以外に被検体をハンマで叩き加振する打音検査方法がある。具体的には、列車・機関車の本体や車輪の欠陥の検出³⁷⁾やコンクリート構造物の剥離やクラックの検出³⁸⁾に用いられている。ハンマを叩き加振することによってその応答を音や振動でとらえ評価する方法である。このような構造物をハンマで叩き加振することによって振動特性を調べる方法を応用しCFRP積層材の損傷同定に適用した研究はまだ数が少ないが、研究がいくつか報告されている^{39,40)}。

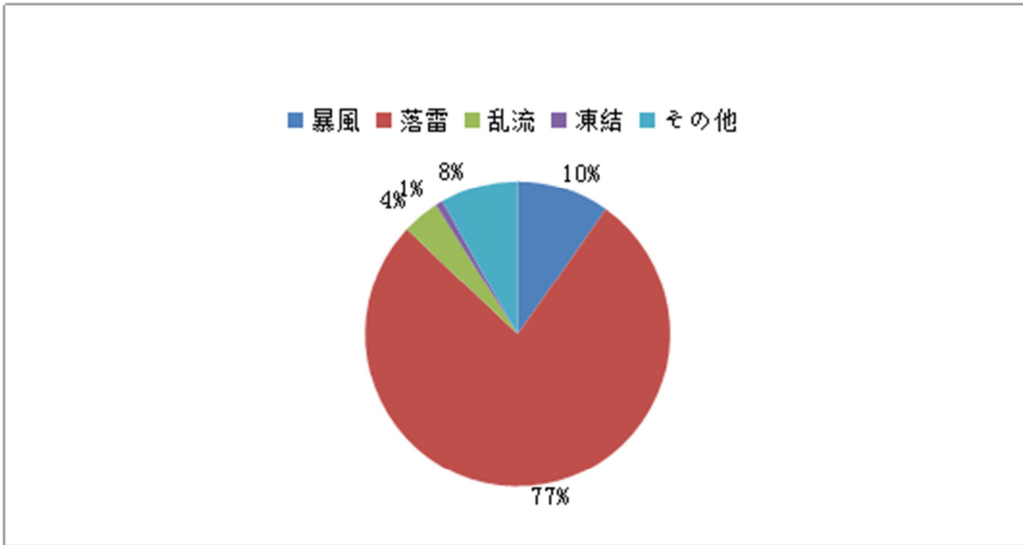


Figure 1-4 Breakdown of failure factor (2004-2009)

1.3 本研究の特色と目的

先に述べたように、近年は風力発電ブレードの大型化に伴い、ブレードの素材が CFRP へと移行されてきている。しかし運用中の落雷や、バードストライク、雹の衝突による衝撃で損傷が生じ、剛性や強度が低下する問題点が発生している。

本研究では、全長 2168mm の実物大の CFRP 製サンドイッチブレード、(定格風速 12.5 m/s、定格出力 10 kW、カットアウト風速 25 m/s、定格回転数 200 rpm、最大回転数 1000 rpm) を用いて、模擬雷撃試験を行ったことが特色であり、従来の試験片レベルとは異なる点である。

また模擬雷撃試験により CFRP 製サンドイッチブレードの損傷状態を検討し、模擬雷撃試験の前後で CFRP 製サンドイッチブレード振動特性および曲げ特性の変化を解明する。さらに風車ブレードを数値解析手法で強度評価をすることによって、CFRP 製サンドイッチブレードの構造安全性を検討することを目的とする。

第 2 章 各種実験手法

2.1 はじめに

本章では、雷撃を受けた CFRP サンドイッチ製風車ブレードの最大損傷面積、固有振動数、曲げ特性変化を明らかにするために行った、模擬雷撃試験、空中超音波探傷試験、インパルス加振実験および片持ち曲げ実験の実験方法について述べる。

2.2 において、使用した CFRP サンドイッチブレードの試験体について述べる。

2.3 において、模擬雷撃試験、空中超音波探傷試験、インパルス加振実験、および片持ち曲げ実験で用いた装置および実験方法について述べる。

2.2 試験体

実験で使用した CFRP 製風車ブレード((株)ジーエイチクラフト製)を Figure 2-1 Figure 2-2 に示す。本 CFRP 製ブレードは、平織り CF クロス(東邦テナックス : W-3101 以下 3K と略記、三菱レイヨン : TRK101M 以下 12K と略記)とエポキシ樹脂、コア材にウレタンを使用し、VaRTM にて成形された翼長 2168mm、最大翼弦長 483mm、ブレード中央翼厚 45mm のサンドイッチ構造となっている。CFRP 層の繊維体積含有率は 60% である、表面層の積層構成は、自重、風圧荷重や回転時の遠心力がブレードに作用した場合を成形前に有限要素法でシミュレーション計算をし、インフュージョン成形の条件を考慮して翼の軸への取り付け部に向かって増えている。詳しい積層構成は Table 2-1 で示す。ここでは CFRP の繊維の方向とブレードの翼長方向の軸との角度 $+45^{\circ}$ と -45° に積層した場合を ± 45 と書き、翼長方向とその直角方向に積層した場合を 0/90 と略記する。Table 2-1 の(A)では[3K(± 45)/(0/90)/(0/90))/12K(± 45)/(0/90)/(0/90) /3K (± 45)]すなわち、CFRP ブレードの外側から内側に向かって順に 3K の繊維を用いて ± 45 、0/90、0/90 の 6 層と 12K の繊維を用いて ± 45 、0/90、0/90 の 6 層、3K の繊維を用いて 2 層とし、全部で 14 層構造である。

(B)では [3K(± 45)/(0/90)/(0/90))/12K(± 45)], すなわち 3K の繊維だけを用いて ± 45 、0/90、0/90 の 6 層と 12K の繊維を用いて ± 45 の 2 層とした全部 8 層となっている。

(C)では[3K(± 45)/(0/90)/(0/90))]この場合は 3K の繊維を用いて ± 45 、0/90、0/90 の 6 層となっている。

(A)、(B)、(C)の表面層片側の板厚の設計値はそれぞれ 1.95 mm、1.08 mm、0.651mm となる。

コア材の厚さも位置によって異なり、(A)では最大 207mm、最小 62mm、(B)では最大 57mm、最小 34 mm、(C)では最大 39mm、最小 34mm となっている。したがって、全体の厚さは(A)が最大 212mm、最小 67mm、(B)が最大 67mm、最小 43mm、(C)が最大 44mm、最小 39mm である。

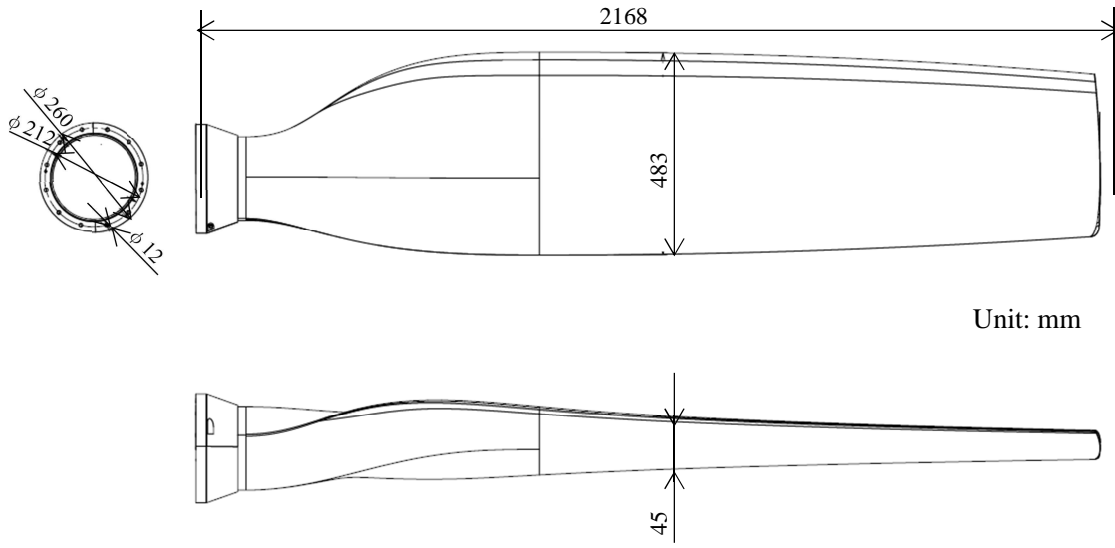


Figure 2-1 Wind turbine blade

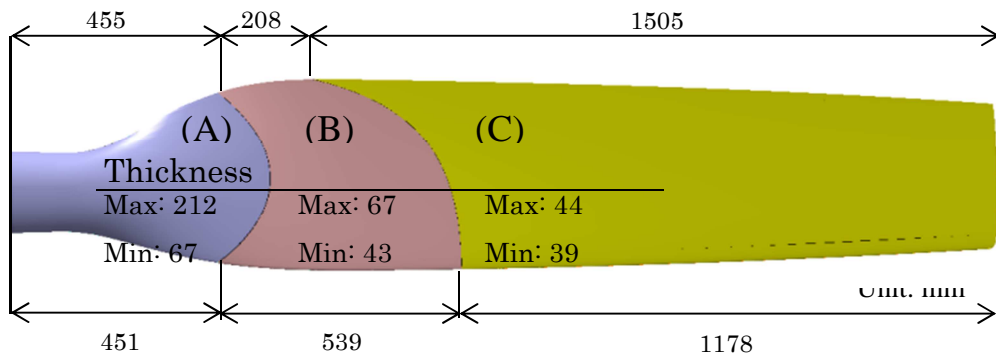


Figure 2-2 Stacking sequence

Table 2-1 Stacking sequence and thickness

	Stacking sequence	Thickness[mm]
A	[3K(±45) / 3K(0/90) / 3K(0/90) / 3K (±45) / 12K(0/90) / 12K(0/90) / 3K(±45)]	1.95
B	[3K(±45) / 3K(0/90) / 3K(0/90) / 12K(0/90)]	1.08
C	[3K(±45) / 3K(0/90) / 3K(0/90)]	0.651

2.3 実験方法について

2.3.1 模擬雷撃実験

雷撃を受ける前の状態と雷撃を受けた後の状態の CFRP 製風車ブレードの物理的特性評価の比較を行うため模擬雷撃試験を行った。

模擬雷撃実験は(株)昭電で行い、模擬雷撃発生装置には、雷インパルス電流発生装置 Figure 2-3 を用いた。本装置は JIS において建物に直撃雷が発生した場合の想定最大電流値 200kA(10/350 μ s、360kJ) を発生可能な雷インパルス電流発生装置であり、この雷インパルス電流発生装置のシステム構成図を Figure 2-4 に示す。主回路には、コンデンサバンク、メインギャップ、インダクタ・レジスタから構成されており、試験体の負荷に合わせてインダクタ・レジスタを変更して電流波形を出力している。

雷撃波形は、波頭長と波尾長の 2 つの数値の組み合わせで定義される(Figure 2-5 参照)。インパルス電圧の最大値が「波高値(Peak value)」である。また電流値が規約原点から波高値に到達する時間を「波頭長(Time of wave front : T_1 [μ s])、規約原点からインパルスの最大電流値である波高値を通過し、波高値の 1/2 に低下するまでの時間を「波尾長(Time of wave tail : T_2 [μ s])であること示している。ここで規約原点は、電流波高値の 10%と 90%を通る直線と時間軸との交点で定義される。なお、雷撃試験の結果は LCI(Lightning Current Impulse)として出力される。

雷撃試験の概要が図 Figure 2-6 である。CFRP 製ブレードの両端部を支持台に乗せ、CFRP 製ブレードの下面側を上向きにして行った。実験方法は IEC の規約⁴²⁾を参考にして行い、真鍮製の電極部の先端には絶縁体を取付けた。また、CFRP 製ブレード根元のブレード取付金具部と試験棟の接地を繋げることで CFRP 製ブレードを通過した印加電流の導通経路を確保した。

雷電流波高値が数千 kA \sim 30kA と様々であるが、雷電流波高値は累積頻度分布を参考に決定し、累積頻度分布の約 50%で 20 \sim 30kA(関東地方で通常起こる雷)と、累積頻度分布の約 15%となる 60 kA(日本海側で起こる激しい雷)に設定した。模擬雷撃実験には 3 体の CFRP 製ブレードを用いた。模擬雷撃箇所(■印)を Figure 2-7 に示すが、Blade 1 では最も落雷する可能性が高い CFRP 製ブレードの先端に 20 \sim 30kA、Blade2 では多重落雷を想定し先端、中央、根元の 3 箇所に 20 \sim 30kA、Blade3 では曲げ特性、回転時の遠心力による引張特性に最も影響が出る根元に 60 kA の模擬雷撃を行った。

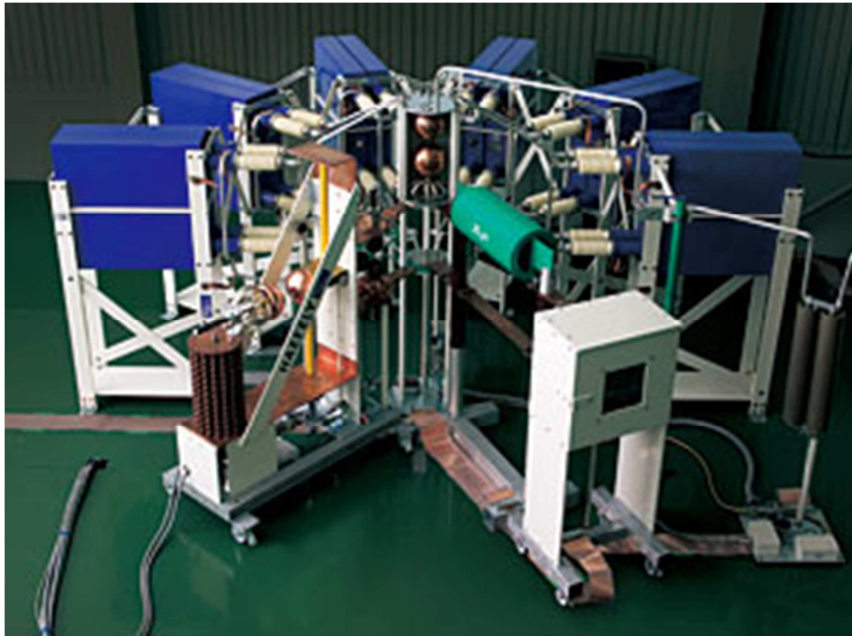


Figure 2-3 Lightning impulse current generator

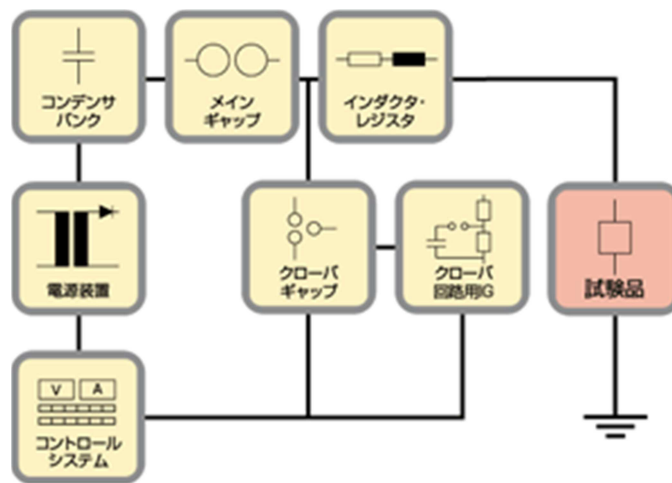


Figure 2-4 System configuration diagram

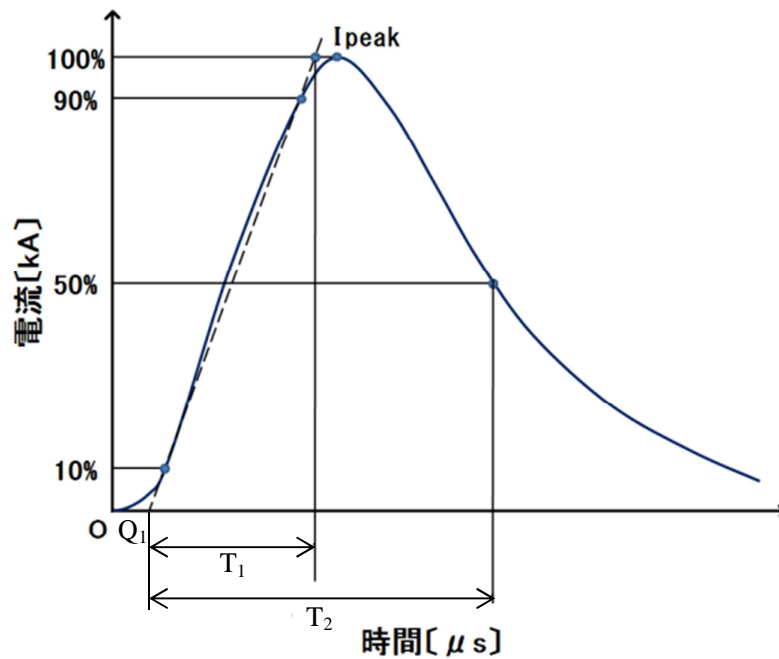


Figure 2-5 Impulse current waveform

LCI (Lightning Current Impulse)

I_{pk} : 波高点(波形上の最高点)における波高値(電流の瞬時値)、最大値

d_i : 波頭(原点から波高点にいたるまでの波形部分)における 90%波高時の電流

d_t : 波頭における 90%波頭長(波頭の継続時間)

d_i/d_t : 波頭しゅん度、波頭における電流の時間に対する上昇率

T_1 : 波頭長、電流値が規約原点から波高値(100%)までの継続時間

T_2 : 波尾長、電流値が規約原点から波高値を通過し、50%までの継続時間

Q_1 : 規約原点

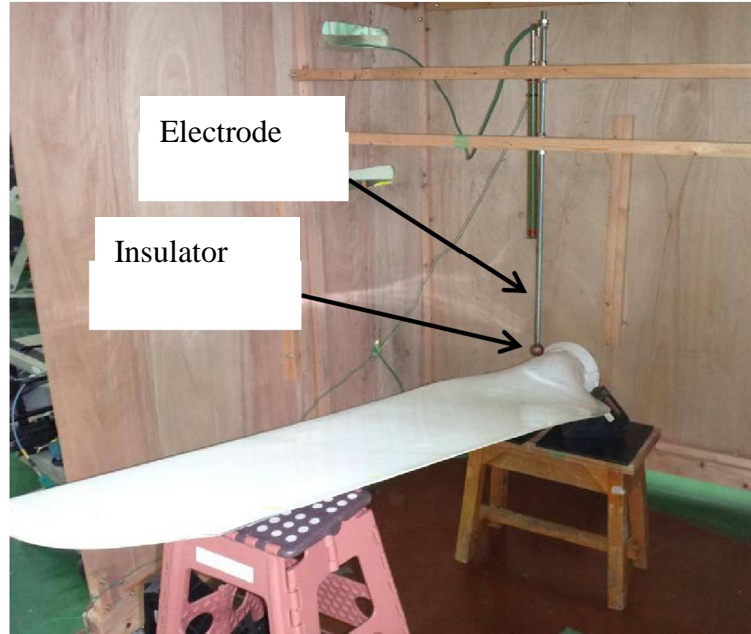
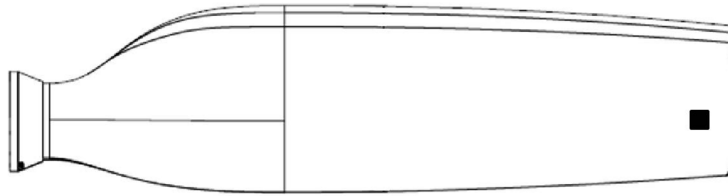
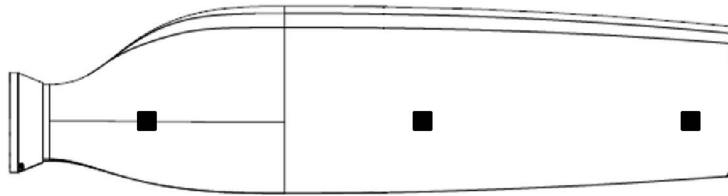


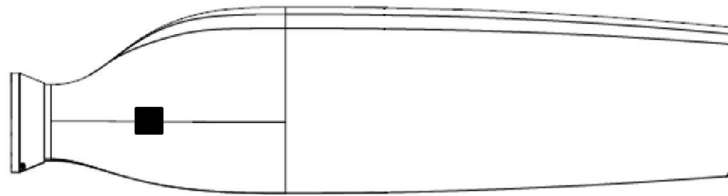
Figure 2-6 Lightning test of CFRP sandwich blade



(a)Blade 1(20~30 kA)



(b)Blade2(20~30 kA)



(c)Blade3(60 kA)

Figure 2-7 Artificial lightning impact point

2.3.2 空中超音波探傷実験

模擬雷撃試験後の損傷の確認、ブレードの最大損傷面積の算出のために非破壊検査装置の一つである空中超音波探傷試験装置 (Figure 2-8)を用いて空中超音波探傷試験を行った。この方法は送信探触子と受信探触子を使用し、送信探触子から発信された超音波ビームが材料内部を透過し、受信探触子で受信する透過法である。探触子は入出信号に決定的な影響を与えるが、探触子とは音波の発生器、受信器として使用される。本実験では送信探触子と受信探触子の2つの探触子を使用し、送信探触子から超音波パルスを発信し、材料内部を透過し受信探触子で受信する。材料内部に傷がある場合、材料内部を透過する超音波の量が減り、透過パルス高さが低下する。

空中超音波探傷は空気中に超音波を圧電効果で発生させ、さらに試験体内部に透過させる方法で、10Hz~1MHz の低い周波数の超音波を使用して探傷を行う。空気の音響インピーダンスと検査対象物の音響インピーダンスは大きく異なっているため、材料内部に伝搬する超音波エネルギーは著しく少なくなる。従って探傷には高感度の超音波探傷器と探触子が必要であり、S/N 比を改善するために透過法で探傷を行うのが一般的である。本実験では S/N 比を改善するために二探触子透過法で探傷を行う。

探傷媒質を必要としない空中超音波探傷は、探傷装置、探触子(送信側と受信側)、探傷方式の三つが密接に結びついて初めて適用可能になる。

探傷装置の特徴をして二つある。その一つは減衰の大きい空気中を超音波が伝播するためには、大きなエネルギーを探触子に印加する必要がある。本実験では印加電流 800 ボルトを持つ、透過能力の高いスタルマン社製探傷機 DIO2000 を使用した。もう一つは不必要な周波数成分によるノイズを除去し、S/N 比を向上させるため、探触子からの検出信号を処理するデジタル信号処理技術が必要である。

探傷方式は探触子と試験体との相対的な配置や角度、位置関係の微妙な調整を行うことにより、良好な S/N を確保した。それは探触子が高いエネルギーの超音波を発し、試験体と相対的な位置関係によって試験体が共振現象を起こすためである。試験体の健全部での共振によって、高い受信信号を受ける受信側探触子は、欠陥部では極端に低い信号のみを受信することになるため健全部と欠陥部の S/N 比が大幅に増加することになる。本実験では探触子は試験体に対して垂直の設置し、探傷を行った。

探触子は重要な構成要素で、振動子には高電圧の印加にも耐えられる圧電材料を選択し、印加に強いエアスター社製プローブを使用した。探傷条件はプローブの周波数が 50kHz、着雷面(下面)に送信探触子、反対面(上面)に受信探触

子を設置し、探傷感度は 30db~40db にし、走査ピッチは 2.0mm とした。探傷結果は、透過パルス高さが送信パルスの高さの 40%以下を損傷とみなし、健全部と思われる個所を青色とし透過パルス高さが小さくなるにつれて赤色に変化するようにした。最大損傷面積は C スコープ(ブレードの平面画像)の投影面積をもとに色面積から損傷部分の最大損傷面積を求めた。現在の 空中超音波探傷機の一回最大探傷エリアが 400×450mm なので、一回で全部探傷することができず、探傷はブレードを先端からエリアを分けて探傷を行った。



Figure 2-8 Air coupled ultrasonic inspection test system

2.3.3 インパルス加振実験

CFRP 製風車ブレードの固有振動数を測定するためにインパルスハンマを用いたインパルス加振実験を行った。インパルス加振実験の試験概要を Figure 2-9 に示す。試験条件は、ブレード片側端部を片持ち用固定治具によりボルトで固定した片持ち状とし、最大 2200N、8kHz 付近までの入力が可能インパルスハンマでブレードに入力波を与え、3 軸プリアンプ型小型加速度計（長さ、幅、高さともに 10.2mm の立方体型で、質量 5.3g）によって応答波を測定した。本研究では、材料に与えたインパルスハンマーの入力信号と 3 軸加速度の応答信号から伝達関数を FFT アナライザで求めた。本 FFT アナライザは入力された信号波形をデジタル的にサンプリングし、データとして記憶して短時間でフーリエ係数を求めることができ、パソコン上で随時結果を確認することができる。

インパルス加振実験は、加振点をブレード固定部最上部から周方向 45° の位置に固定(Figure 2-10 の●点)させ、応答点を翼長方向に 200mm 間隔(中心部付近は 100mm 間隔)で合計 40 点(Figure 2-10 の×点)とする応答点移動法によって行った。風車ブレード全体としての伝達関数を得るため、40 点の応答点の結果を平均化処理し最終的な伝達関数とした。また、固有振動数は、FFT アナライザで伝達関数に変換されたデータをモーダル解析ソフト ME' scopeVES(米国 Vibrant Technology Co.Ltd.製 ME'scopeVES)でモード解析して算出し、さらに振動モードも求めた。

加振実験の測定誤差を最小限にするため、一つの応答点あたり 3 回同じ強さと角度で叩いて平均化させた。また、3 回とも同じように叩いているかを判断するため、コヒーレンス関数によって確認を行い、伝達関数の信頼度を判定した。コヒーレンス関数は、周波数領域において 0 から 1 までの数字で表され、0 に近いほど入力波と応答波の関連性が無くノイズなどの影響も受けていることとなり、1 に近いほど入力波と応答波の関連性が強く、毎回同じように叩いていることとなる。

本研究では、試験中伝達関数が得られたらコヒーレンス関数を随時確認し、値が 0.9 以上でなければ試験をやり直した。そして、各試験体から得られた伝達関数より 1 次と 2 次、3 次の固有振動数の振動モードを求め、伝達関数のピーク値の共振周波数を読み取って固有振動数を求めた。

通常のインパルス加振実験では、応答点を 1 個所の固定で行い加振点を移動させる加振点移動法で行う。しかし本ブレード形状は曲面になっており、インパルスハンマをこの曲面の 40 ヶ所で垂直に叩くのが困難であるため測定精度が低下する問題点がある。また面外、面内、捩りのモードを 1 回の試験で測定を行うため、加振点をブレード固定部最上部から周方向 45° の位置に固定し、

応答点を移動させる手法で行った。

インパルス加振実験中において、パソコンの画面で確認している各測定結果を図 Figure 2-11 に示す。Figure 2-11 は、上段が各軸伝達関数の大きさ、下段が各軸コヒーレンス関数となる。

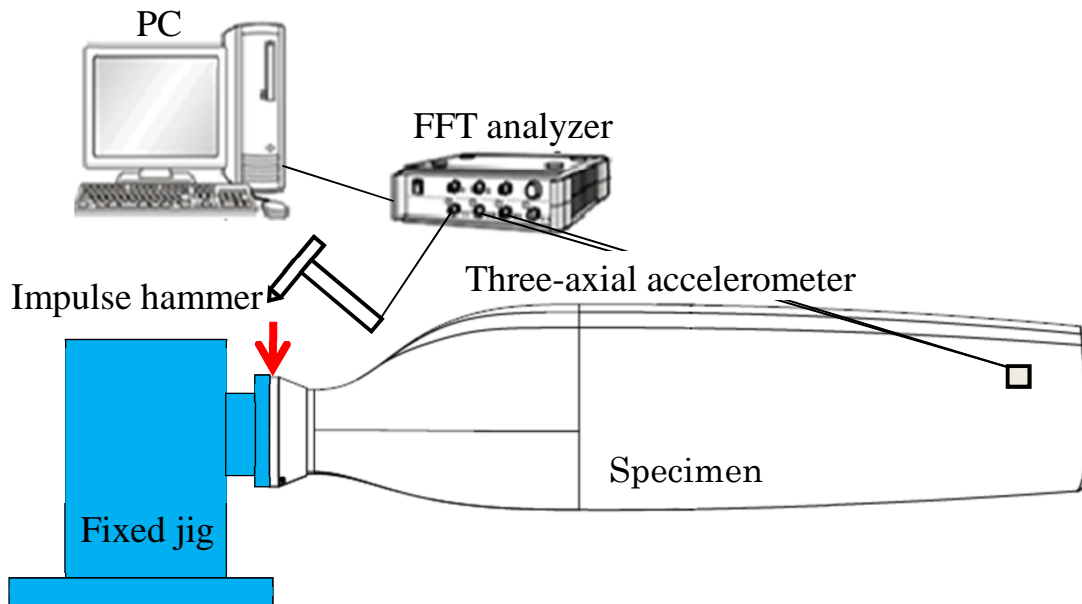


Figure 2-9 Impulse acceleration test

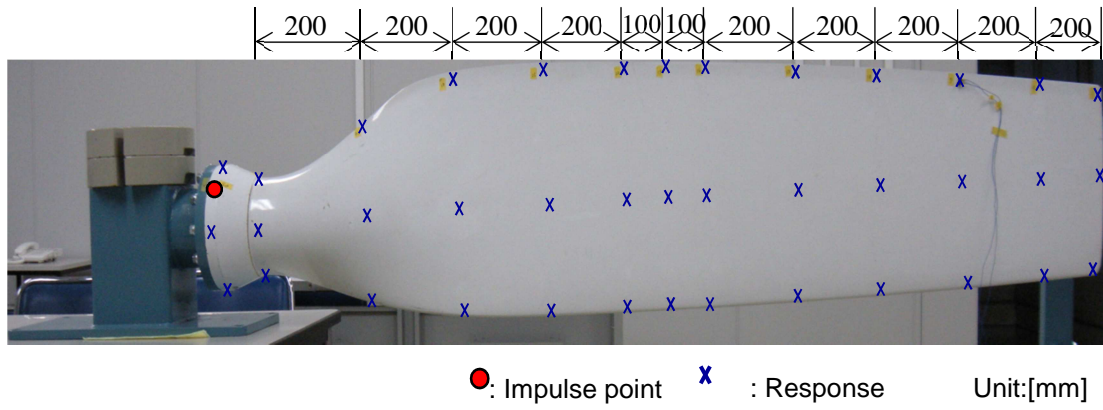


Figure 2-10 Impulse point and response points

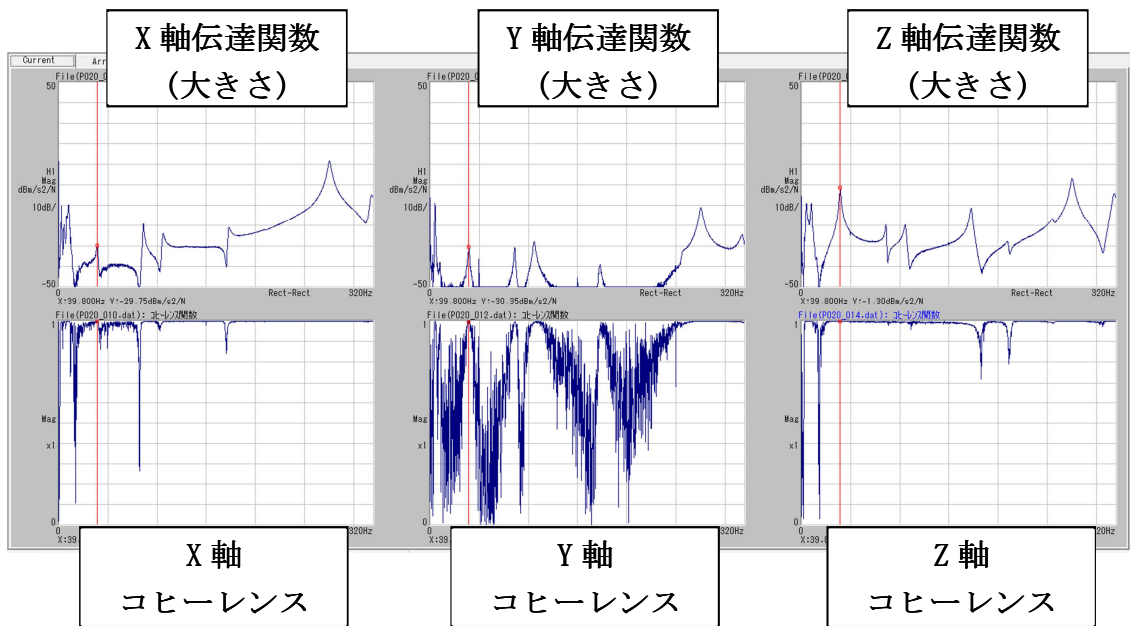


Figure 2-11 Test monitor

2.3.4 片持ち曲げ実験

CFRP 製風車ブレードのたわみを測定するために片持ち曲げ実験を行った。本実験は、風車運用時の落雷状況を想定しているため、本来であればブレードが回転する際の遠心力も想定しなければならない。しかし、それらを実験で模擬するのは非常に困難である。従ってことと雷撃前後での CFRP 製サンドイッチブレードの剛性変化を明らかにするために、曲げ特性に最も影響が出る根元に 60 kA の雷撃を与えた **Bade3** に局所分布荷重による、曲げ実験を行った。試験条件は、ブレード片側端部を片持ち用治具にボルトで固定した片持ち状態とし、ブレードの下面側に荷重を掛けた。分布荷重は Figure 2-12 で示したように、合計 4 個所で、自由端側より 30mm の位置から 500mm 間隔とした 4 個所とし、一個が 24.9N の鉛弾体を用いて全体で 598N になるまで負荷を与えた。たわみはブレードの自由端側の最端部で計測した。



Figure 2-12 Schematic of bending test

第 3 章 雷撃前後のブレードの実験結果

3.1 はじめに

本章では、模擬雷撃試験の前後で行った空中超音波探傷試験、インパルス加振実験、片持ち曲げ実験の各結果について記述する。

3.2 節において、空中超音波探傷試験の結果について述べる。

3.3 節において、インパルス加振実験について述べる。

3.4 節において、片持ち曲げ実験の結果について述べる。

3.5 節において、これらの実験から得られた結果についてまとめる。

3.2 空中超音波探傷試験結果

(A) 雷撃前の空中超音波探傷試験結果

雷撃前風車ブレードの状態を非破壊的に確認するための空中超音波探傷試験を行った。

Figure 3-1 の(a)に CFRP サンドイッチブレードの写真を示し、(b)は Blade2 の雷撃試験前の空中超音波探傷試験の結果である。図形のカラーバーにおいて、青色の部分は入力信号を 100%受信した場合、赤色は受信できなかった場合を表す。従って青色は健全部、赤色は非健全部を示す。試験体が大きいので探傷はブレードを9エリアに分けて行った、部分に透過パルス高さがかなり低下する箇所が検出され、幅方向に約 340 mm長さ断続的に続いていた。これは製造時の表面層の CFRP とコア材のウレタン間の接着不良によるものと考えられる。また根元部で透過パルス高さがかなり低下している部分は、そこでのブレード素材が厚く、特に曲面状態となっているため、超音波ビームの不透過によるものと考えられる。

(B) 雷撃後の空中超音波探傷試験結果

風車ブレードに模擬雷撃試験によって損傷を与え、模擬雷撃試験前後の状態を確認するため空中超音波探傷試験を行った。

模擬雷撃試験で出力された電流の波形を Figure 3-2 に示し、装置で計算された LCI を Table 3-2 に示す。Figure 2-7 に示した場所に雷撃を与えた模擬雷撃試験後の Blade1、2、3 の全体図及び着雷点近傍の拡大図を Figure 3-3(a)、(b)、Figure 3-4(a)、(b)、Figure 3-5(a)、(b)にそれぞれ示す。

Blade1 はブレードの根本固定部分から 2000mm、幅 245mm の箇所に雷撃を与えた。着雷点近傍の損傷の詳細を Figure 3-3(b)に示している。着雷点近傍は、長手方向と幅方向に約 26mm にわたって繊維が破断されて樹脂が焼け焦がれた状態であることが確認できた。Blade2 は計 3 箇所に雷撃を与えた (Figure 3-4)。一つ目はブレードの根本固定部分から 390mm、幅 160mm の箇所、二つ目はブレードの根本固定部分から 1120mm、幅 255mm の箇所、三つ目はブレードの根本固定部分から 2055mm、幅 210mm の箇所に雷撃を与えた。一つ目の着雷点近傍は、長手方向と幅方向に約 36mm 二つ目は約 30mm、三つ目は約 29mm にわたって繊維が損傷している状態である。Blade3 はブレードの根本固定部分から 400mm、幅 160mm の箇所に着雷が確認された(Figure 3-5)。着雷点近傍は、長手方向と幅方向に約 65mm にわたって繊維が損傷している。

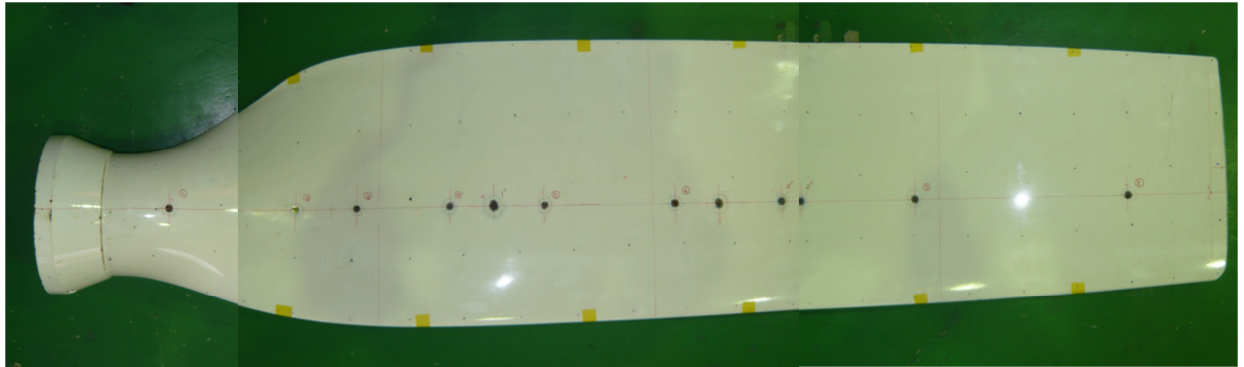
この結果から、これら 3 つのブレードの着雷点近傍はすべて着雷の影響により、繊維が破断されるだけでなく樹脂が焼け焦がれた状態であることが確認できた。その理由としては、模擬雷撃の照射によって発生した衝撃波及び雷撃の

熱エネルギーによる繊維破断、樹脂溶解、蒸発などの複合的な影響によるものと考えられる。また、CFRP 製ブレード前縁部分の塗装の一部が剥がれて落ちていることが確認された三つの試験体すべてに(Figure 3-6)。しかし、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。CFRP は導電性があるが風車ブレード内部の素材であるウレタンは導電性がない。そのため、厚さ方向には雷撃の電気は流れないが、雷撃を受けた CFRP 層の表面だけに電気が流れていることが確認できた。

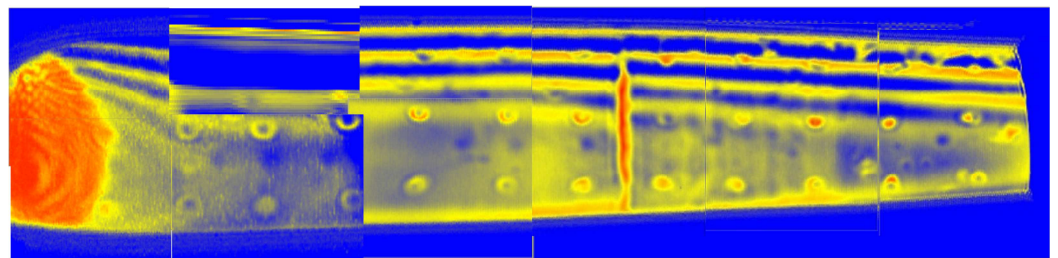
次に、CFRP 製ブレードの内部の損傷状態を確認するために、空中超音波探傷試験を行った。Figure 3-7 はブレード 2 の結果を示している。Figure 3-7(a)がブレード全体の結果、Figure 3-7 (b)が中央の着雷点近傍を集中的に探傷した結果である。Figure 3-7(a)を確認すると、先端部と中央部の損傷は着雷点近傍に集中していることが確認できた。以上の結果は平野ら⁴¹⁾の研究結果と同様な傾向を示している。しかし根元部の損傷は、その箇所ブレード素材が厚く、曲面形状となっているため、超音波ビームが透過しきれず、損傷を確認する事ができなかった。また、投下パルス高が低下する箇所が先端の着雷点と中央の着雷点との間の部分で検出されたが、この部分は雷撃試験前の結果(Figure 3-1)の透過パルス高さがかなり低下する箇所と一致した。しかし、透過パルス高さが低下の度合いに差が出ており、これは雷撃試験前と雷撃試験後の空中超音波探傷の探傷感度に少し差があった影響だと考える。この投下パルス高が低下する箇所は、CFRP 製ブレード製造時の接着不良と考えられ、模擬雷撃によるものではないと推察される。

Figure 3-8 (b)の C-scope 探傷結果から、色面積をもとに損傷面積を算出した結果、着雷点近傍の損傷は直径約 46mm の円形状となった。しかしはじめの外観目視検査において、損傷は表面層の長手方向と幅方向に 30 mm 程度しか確認できなかった。したがって、模擬雷撃により損傷は CFRP 層内部に広がっていることが確認できた。

Blade2 の中央損傷部の断面観察を行い板厚方向の破損の進展状況を確認した結果を Figure 3-9 に示す。その結果、損傷は着雷側の CFRP 層と、その CFRP 層と近傍のコア材の一部で観察された。また Figure 3-10(a)、(b)は Blade1 の写真と全体の探傷結果を比較した図である。Blade2 と同じくブレードの着雷点の損傷位置と探傷結果の着雷点の損傷位置が良好な一致を示し、Figure 3-10(b)では先端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。またこの結果でも同じように、透過パルス高が少し低下する箇所が着雷点近傍以外で検出された。この現象は Blade 2 の結果と同様に CFRP 製ブレード製造時の接着不良と考えられ、模擬雷撃によるものではないと推察される。



(a) Specimen artificial lightning strike



(b) Air coupled ultrasonic inspection before artificial lightning impact

Figure 3-1 Air coupled ultrasonic inspection (Blade 2)

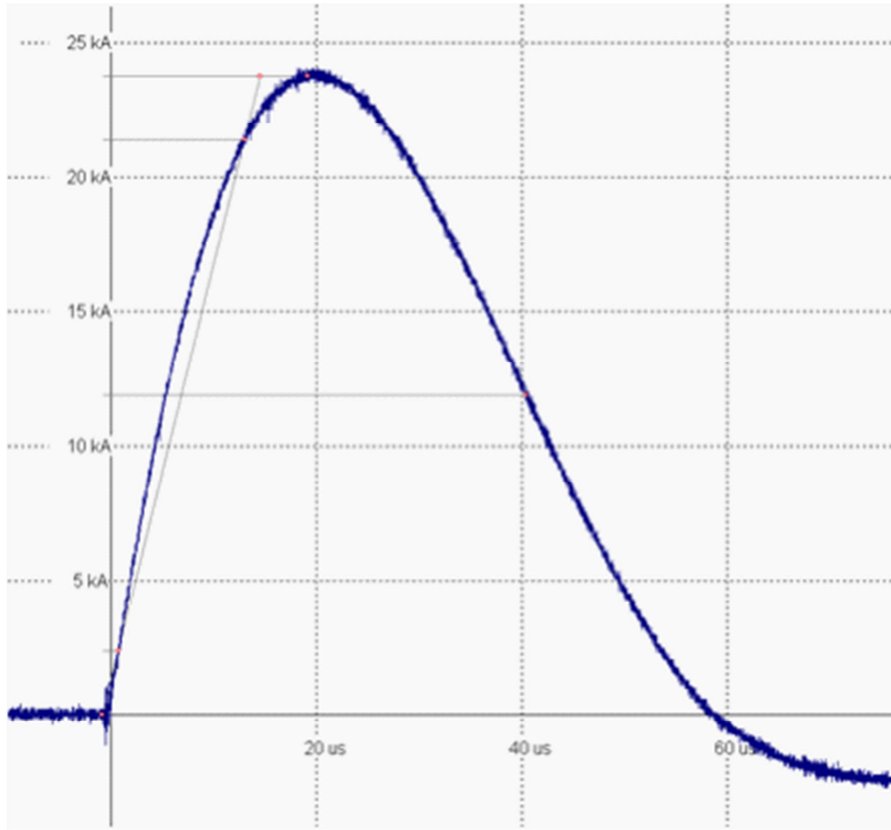
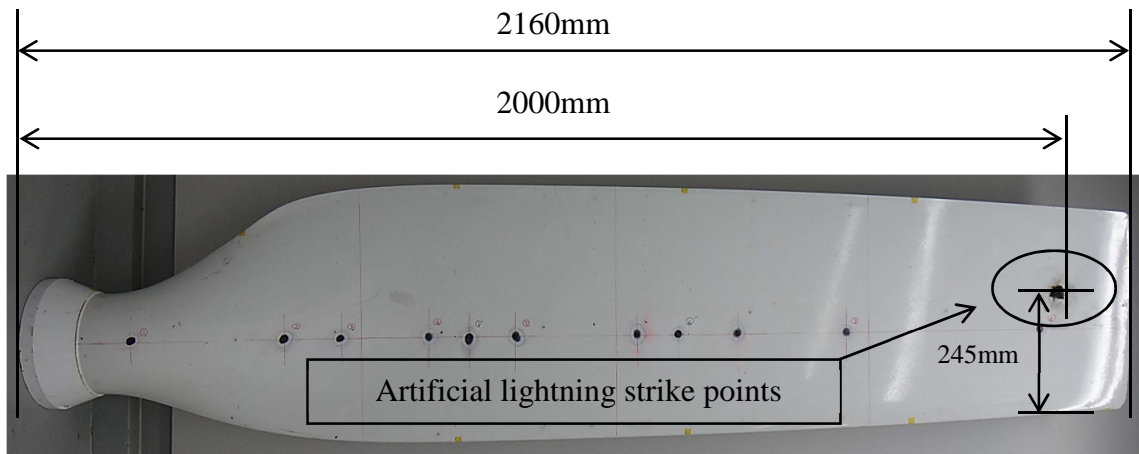


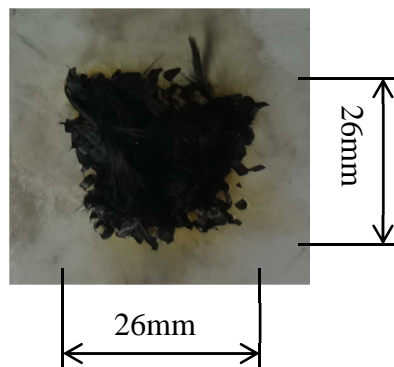
Figure 3-2 Impulse waveform definition

Table 3-1 Results of LCI

specimen	Blade2
I _{peak} [kA]	23.8
d _j [kA]	19.4
d _t [kA]	12.6
d _j /d _t [kA/μ ²]	1.5
T ₁ [μs]	15.3
T ₂ [μs]	41.2
Q _s [C]	0.739
W/R[kJ/Qhm]	15.0

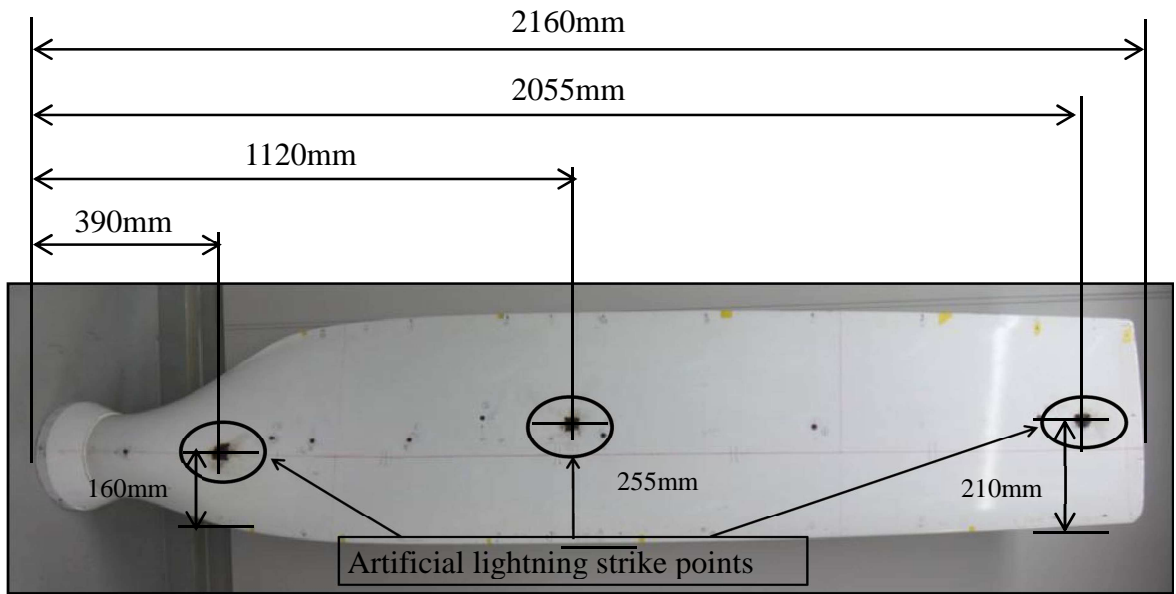


(a) Whole view of the blade specimen

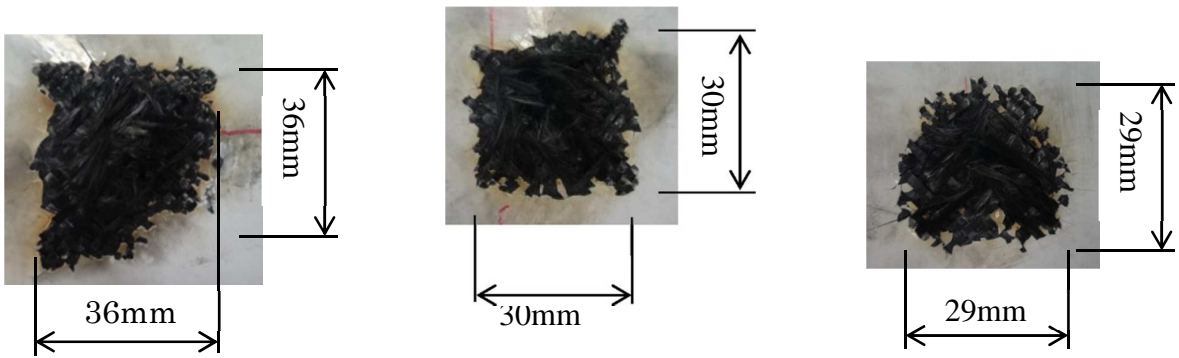


(b) Magnified view of lightning impact point

Figure 3-3 Specimen after artificial lightning impact (Blade1)

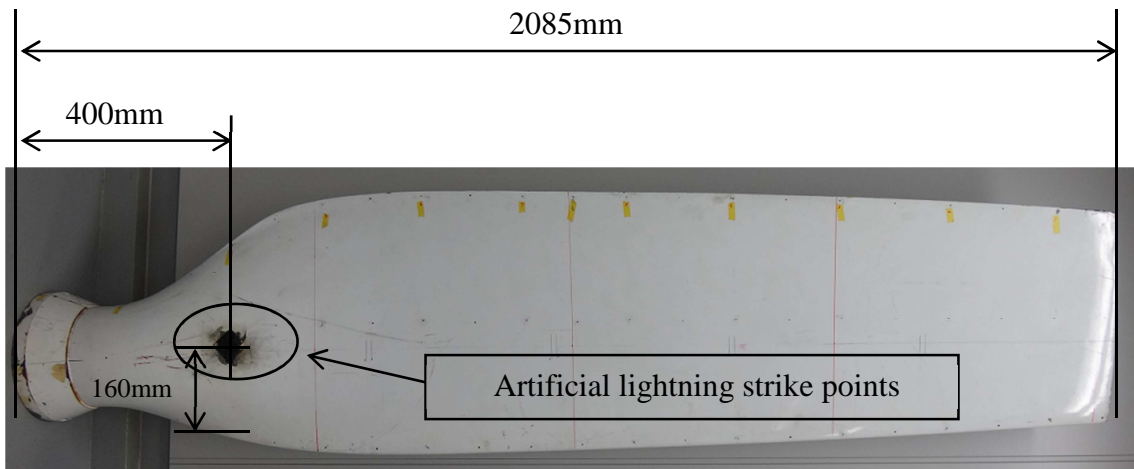


(a) Whole view of the blade specimen

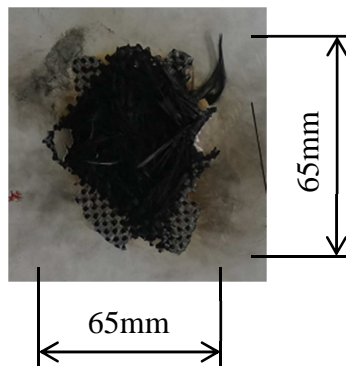


(b) Magnified view of lightning impact point

Figure 3-4 Specimen after artificial lightning impact (Blade2)



(a) Whole view of the blade specimen



(b) Magnified view of lightning impact point

Figure 3-5 Specimen after artificial lightning impact (Blade3)

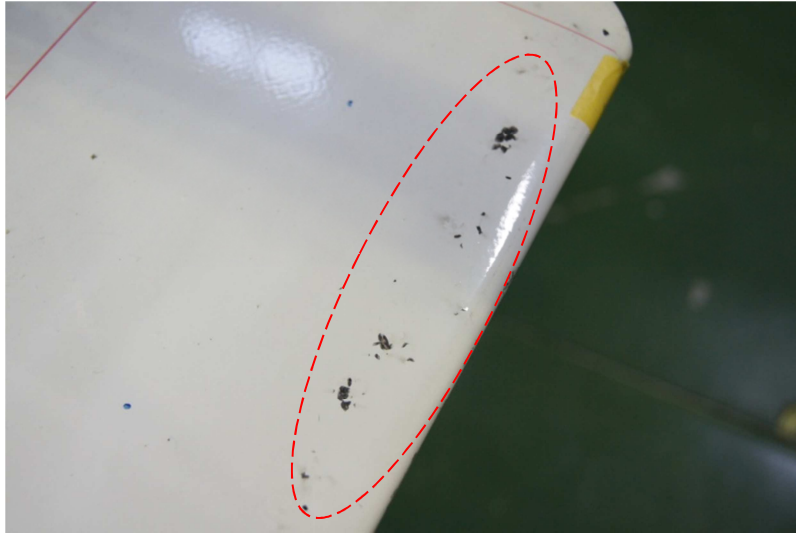
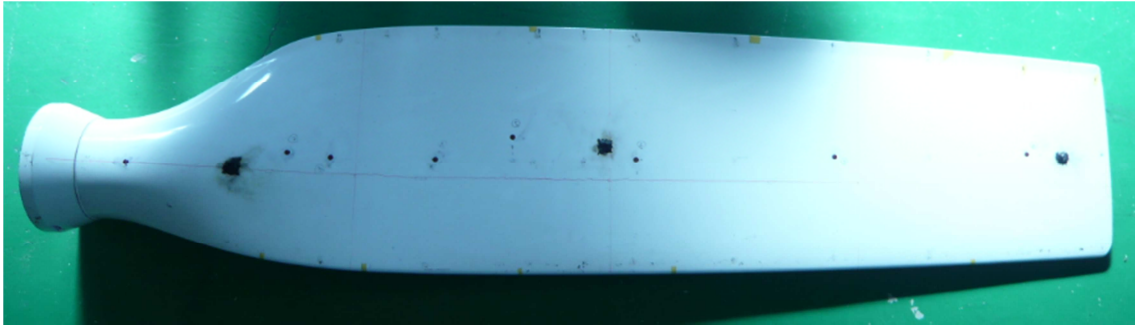
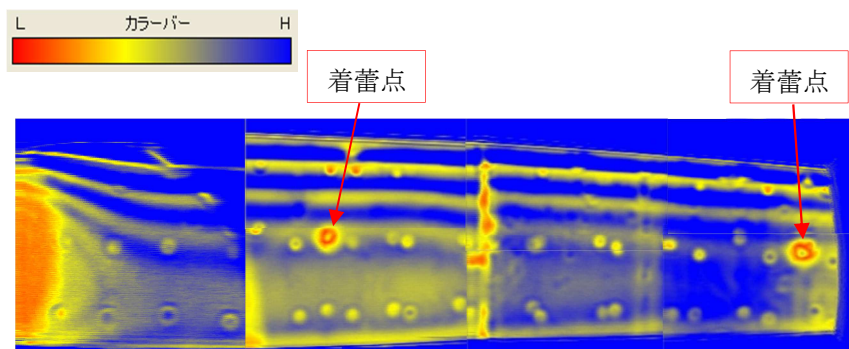


Figure 3-6 Traces of paint peeled off by the lightning impact

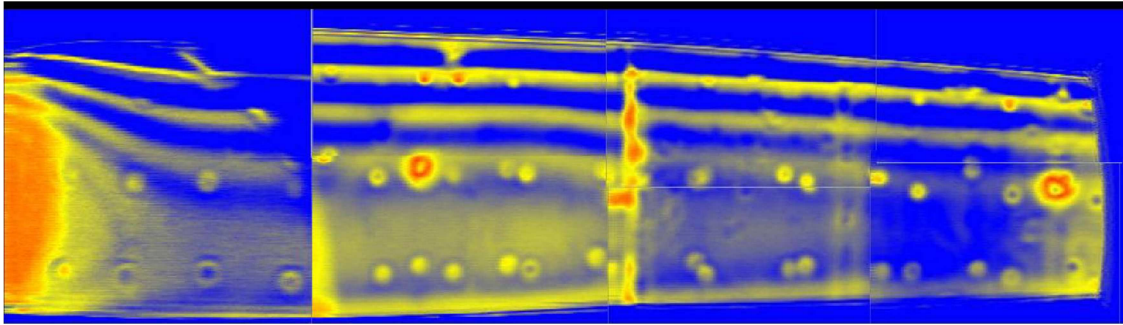


(a) Specimen after artificial lightning strike

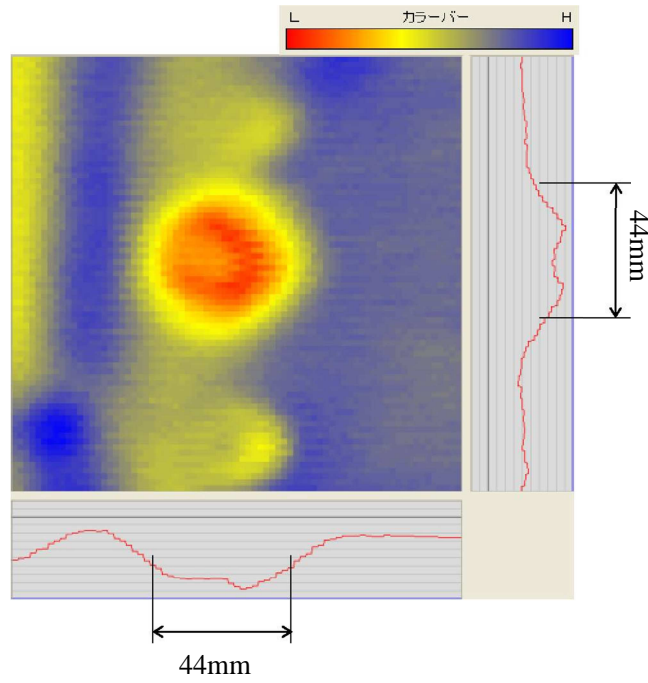


(b) Air coupled ultrasonic inspection

Figure 3-7 Air coupled ultrasonic inspection (Blade2)



(a) Whole view of the blade specimen



(b) Magnified view of the center damaged area

Figure 3-8 Results of ultrasonic inspection (Blade2)

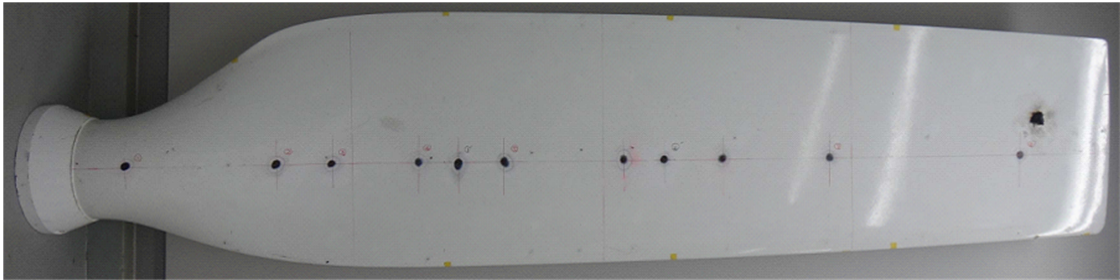


(a)Cross section view

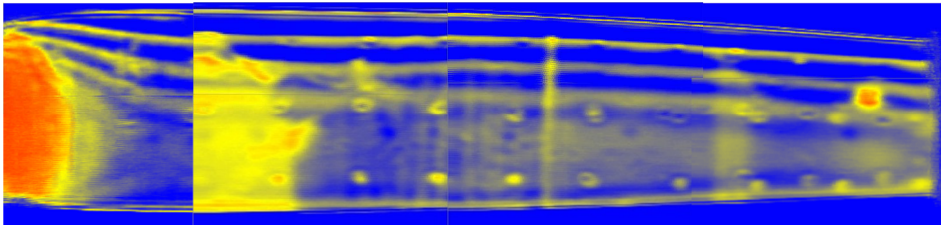


(b)Magnified view of the damaged area

Figure 3-9 Cross section view of specimen after lightning impact (Blade2)



(a) Specimen after artificial lightning strike



(b) Air coupled ultrasonic inspection

Figure 3-10 Result of coupled ultrasonic inspection (Blade1)

3.3 インパルス加振実験

CFRP 製ブレード 1、2、3 の模擬雷撃実験前後でのインパルス加振実験の結果を Table 3-2 (a)、(b)、(c)に示す。Blade 1 の実験結果より、模擬雷撃を行う前の 1 次の曲げモードの固有振動数は 13.1Hz となった。次に模擬雷撃を行った後の固有振動数は 13.7Hz と変化した。模擬雷撃実験前後での差は+4.6%となった。2 次と 3 次の曲げモードに関しても、模擬雷撃を行う前と行った後での固有振動数の差は変化し、模擬雷撃実験前後での差はそれぞれ-4.0%と-5.4%となった。

また Blade2 と Blade3 に対して行った模擬雷撃実験においても、模擬雷撃前後のブレードの固有振動数の差は±5%程度となった。損傷を有するブレードの固有振動数は損傷のないブレードの値よりも小さくならなければならないが、Table 3-2 の結果では誤差は正負の値を示している。

インパルス加振実験では、実施者を加振系の一部として行うため、加振の良否が実施者の技能に依存する度合が他の方法よりはるかに大きくなる⁴³⁾。そのため、これらの固有振動数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。従ってこれら模擬雷撃実験前後で CFRP 製ブレードの固有振動数がそれほど変わらなかったり、誤差が正負の値となったのは、Figure 2-7 に示した箇所に雷撃による局所的な損傷が生じてても、CFRP 製ブレード全体の振動特性が模擬雷撃実験前とほとんど変化しなかったことが理由だと考えられる。

Table 3-2 Comparison of natural frequencies.

(a) Blade 1

Natural Frequency [Hz]		
Mode	Before lightning	After lightning
1st	13.1	13.7
2nd	52.6	50.5
3rd	112	106

(b) Blade 2

Natural Frequency [Hz]		
Mode	Before lightning	After lightning
1st	13.1	13.6
2nd	60.1	60.1
3rd	106	100

(c) Blade 3

Natural Frequency [Hz]		
Mode	Before lightning	After lightning
1st	13.4	13.9
2nd	64.6	65.1
3rd	123	125

3.4 曲げ実験

模擬雷撃試験前後の CFRP 製風車ブレードのたわみを、片持ち曲げ実験を行って測定した。

Figure 3-11 が模擬雷撃前後の弾性域における Blade 3 の荷重-変位線図の比較のグラフである。模擬雷撃前の Blade3 の最大変位は 32.2mm である。次に模擬雷撃後の Blade3 の最大変位は 32.8mm となった。その結果、模擬雷撃実験前後で両者の差は僅か 1.86%であった。以上の結果から、固有振動数の結果と同様に、模擬雷撃試験前と模擬雷撃試験後ではほとんど変化はなく、雷撃による局所的な損傷が本 CFRP 製ブレードの曲げ剛性に与える影響はほとんどないと推察される。

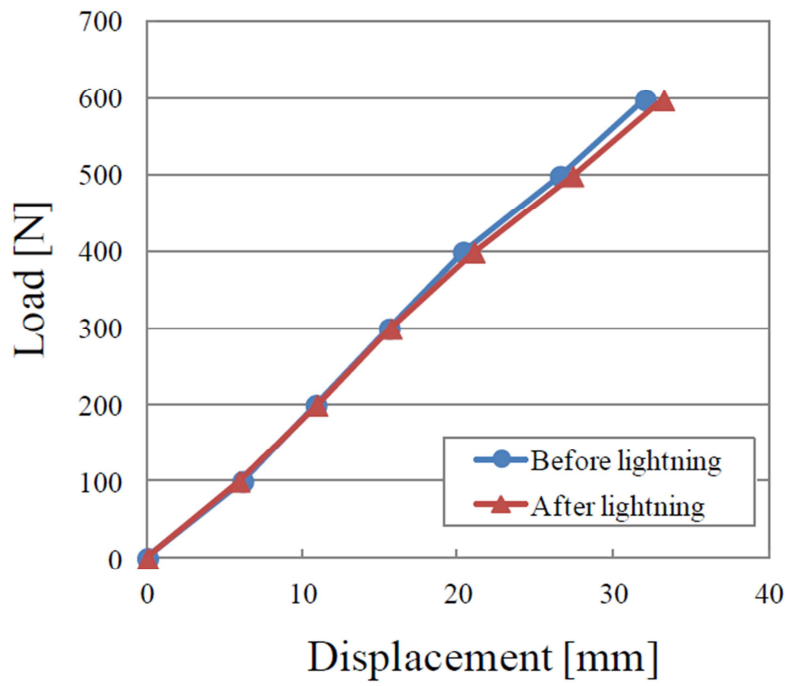


Figure 3-11 Load-displacement curves of Blade3

3.5 結言

本章で得られた結果を以下にまとめて示す。

- 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、着雷点及びその近傍で繊維破断、樹脂溶解と蒸発、繊維破断等の複合的な損傷が発生した。
- 模擬雷撃実験後のブレードを空中超音波探傷試験より損傷を検査した。雷撃損傷は、着雷点近傍に集中し、外観目視検査より大きな内部損傷が CFRP の表面層とコア材間の接着面で広がっていることが確認できたが、着雷点の裏側には損傷は生じない。
- インパルス加振実験結果より、模擬雷撃試験前後の振動特性を比較した。その結果、模擬雷撃実験前後で CFRP 製ブレードの固有振動数がそれほど変わらなかった。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、振動特性にほとんど影響を与えなかった。
- 片持ち曲げ実験の結果より、模擬雷撃試験前後の曲げ特性を比較した。その結果、曲げ特性はほとんど変化なく、雷撃による局所的な損傷がブレードの曲げ剛性に与える影響はほとんどないと推察される。

第 4 章 有限要素法解析と実験結果の比較・検討

4.1 はじめに

本章では、有限要素法を用いて CFRP サンドイッチ風車ブレードの振動解析と曲げ解析を行い、模擬雷撃試験前後の各実験結果と比較・検討する。本章で定式化した FEM の有効性を示した後で、風車運転時のブレードの遠心力解析を行い、雷撃を受けた CFRP サンドイッチ風車ブレードの構造安全性を評価した結果について記述する。

4.2 節において、有限要素法の定式化について述べる。

4.3 節において、雷撃前後の加振実験結果と解析結果と比較・検討した結果について述べる。

4.4 節において、雷撃前後の曲げ実験結果と解析結果と比較・検討した結果について述べる。

4.5 節において、構造安全性の検証について述べる。

4.2 有限要素法の定式化

有限要素法解析ではインパルス加振実験と曲げ実験によって得られた実験結果の検証と、運用中のブレードに対して作用する遠心力による応力および強度の評価を行った。さらに要素の剛性を低下させることによって雷撃試験によって生じたブレードの雷撃損傷を模擬して、構造安全性の評価を行った。

FEM 解析には汎用有限要素法プログラム ANSYS Ver 14.5 を用いて、CFRP 製ブレードの振動解析と曲げ解析、さらに JIS C 1400-2 (風車-第2部：小型風車の設計要件)の荷重ケース E を参考に、模擬雷撃実験後のブレードを最大回転数の設計値である 1000 rpm で運用した際の応力分布を求め、本 CFRP 製ブレードの構造安全性の評価を行った。

作製した FEM 解析モデルを Figure 4-1 に示す。要素には 8 節点構造ソリッド (SOLID185) を用い、境界条件は片持ち状で、CFRP 製ブレード付け根部の節点をすべて選択し、完全拘束した。CFRP 表面層の要素分割数は、厚さ方向に 1 分割、長手方向に 78 分割、幅方向に 27 分割とし、コア材のウレタンの要素分割数は厚さ方向に 6 分割、長手方向に 78 分割、幅方向に 27 分割とした。その結果、節点数は 19894、要素数は 17152 となった。表層とコア材は節点を共有することで結合させているため、表面層とコア材間の相対変位がなく、CFRP 層とウレタン層間での接触状態の変化、接触面での摩擦などは考慮していない。

Figure 4-1 に示すようにブレードの翼長方向を x 軸、翼幅方向を y 軸、厚さ方向を z 軸とし、炭素繊維の平織りクロス材を用いたので、xy 軸方向のヤング率と強さは繊維方向の値 (E_L 、 F_L) を、z 軸方向のヤング率と強さは繊維と直角方向の値 (E_T 、 F_T) をそれぞれ用いた、面内せん断と面外せん断の弾性係数に G_{LT} と G_{TZ} を用いた。

解析に用いた材料定数を Table 4-1 に示す。

ウレタンの材料定数にはカタログ値を用い、ヤング率 E を 0.015 GPa、ポアソン比 ν を 0.25 とした。

CFRP の破損基準には最大応力説を用い、損傷の位置と大きさは実験結果を参照とした、Figure 4-2 に Blade 1 では根本から 2034mm の位置に約 45×45 mm、4 要素選択、Blade 2 では根本から 2034mm、1100mm、376mm の位置にそれぞれ約 45×45 mm、全部で 14 要素選択、Blade 3 では根本から 376mm の位置に約 65×65 mm、8 要素を選択し損傷を模擬した。なお、損傷部の要素の弾性率は、損傷前の弾性率に 1×10^{-9} を掛け、ほぼゼロに定義することで表現した。

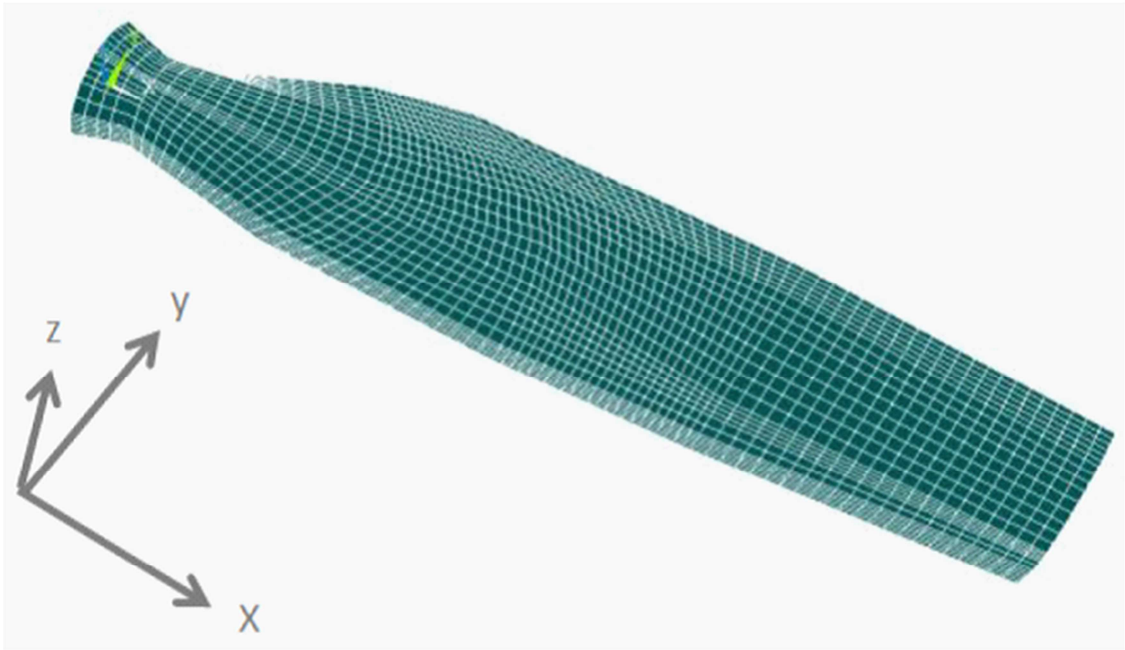
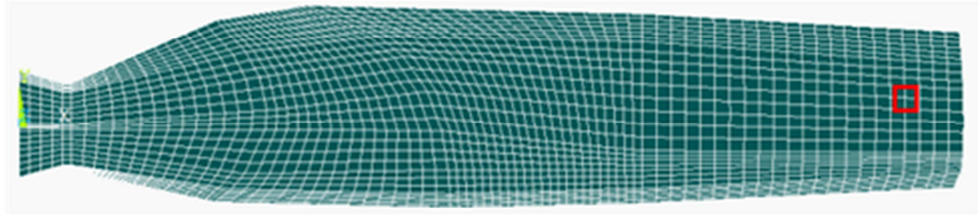


Figure 4-1 FEM modeling for blade specimen

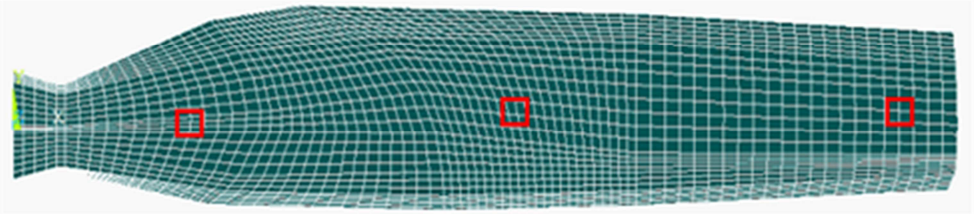
Table 4-1 Material properties of blade specimen

			W3101	TRK101M
Longitudinal modulus	$E_x=E_y$	GP _a	55.4	47.5
Transverse modulus	E_z	GP _a	8.80	8.50
Shear modulus	G_{xy}	GP _a	3.44	3.45
	G_{Tz}	GP _a	2.66	2.66
Poisson's raito	ν_{xy}		0.32	0.27
	ν_{yx}		0.06	0.078
Longitudinal strength	$F_x= F_y$	MP _a	792	591
Tranverse strength	F_z	MP _a	79.0	79.0
Shear strength	F_{xy}	MP _a	51.3	51.1

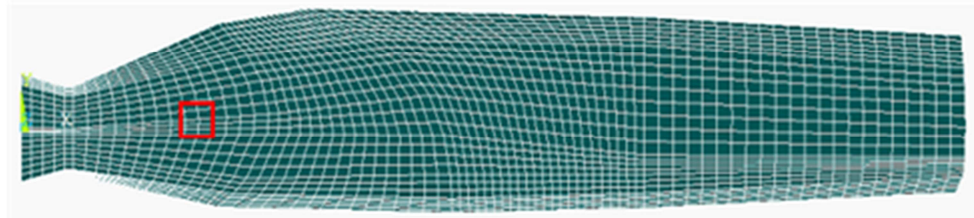
BLADE1



BLADE2



BLADE3



□ location of damage

Figure 4-2 Modeling of each blade with lightning damage

4.3 雷撃前後の加振実験結果と解析結果の比較

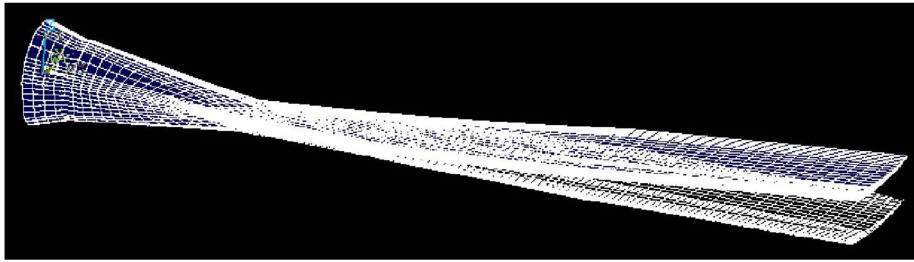
(a) 雷撃前の加振実験結果と解析結果の比較

Table 4-2 に模擬雷撃実験前の CFRP 製 Blade 1 から 3 までのインパルス加振実験の実験結果の平均値と FEM 解析結果の比較を示した。まず 1 次と 2 次の曲げモードと FEM 解析の結果に着目する。固有振動数の実験結果は 13.2Hz と 59.1Hz である。それに対し、FEM 解析結果は 13.1Hz と 60.4Hz となり、誤差は 0.7%、1.7% となり両者の結果の値はほぼ一致した。一方、3 次の固有振動数の実験結果は 114 Hz に対し、FEM 解析結果は 125 Hz となっており、誤差が 9.6% となった。

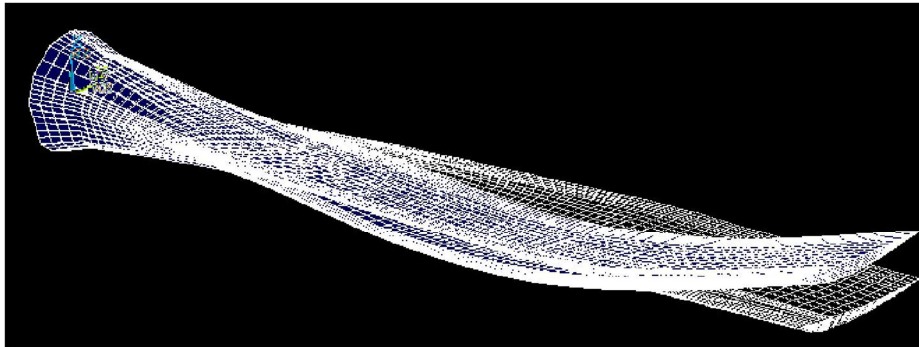
Figure 4-3 は、FEM 解析結果から得た 1 ～3 次の固有振動モード形状を示している。これらの結果はインパルスハンマ加振実験から得たアニメーションの結果(Figure 4-4)と同じようなモードを示した。

Table 4-2 Comparison of experimental and FEM results (Average)
(Before lightning impact)

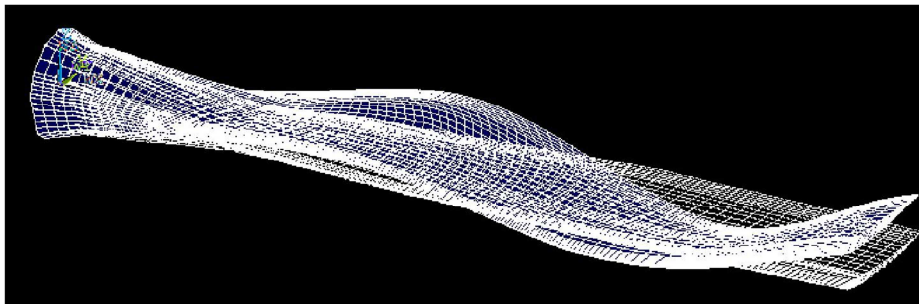
Natural Frequency[Hz]		
	Exp	FEM
1st	13.2	13.1
2nd	59.1	60.4
3rd	114	125



(a) 1st mode

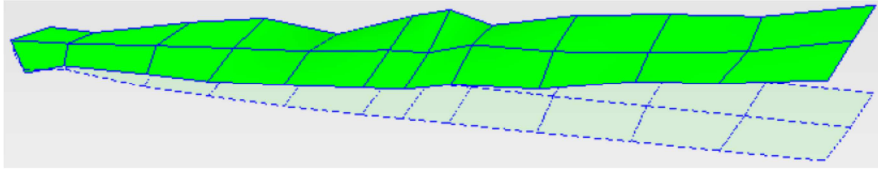


(b) 2nd mode

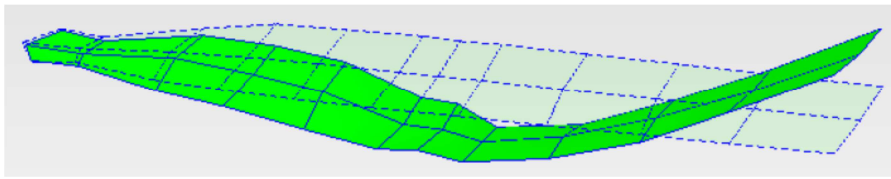


(c) 3rd mode

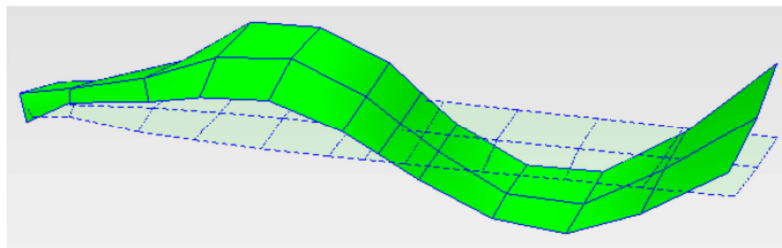
Figure 4-3 Mode shapes obtained from FEM



(a)1st mode



(b)2nd mode



(c)3rd mode

Figure 4-4 Mode shapes before lightning impact (Blade 2)

(b) 雷撃後の加振実験結果と解析結果の比較

はじめに Table 4-3 は、Blade 1 のインパルス加振実験の結果と FEM 解析結果を示している。1 次曲げモードの実験結果は 13.7Hz に対し、FEM 解析結果は 13.1Hz で誤差 4.5% と良好な一致を示した。また 2 次曲げモードの実験結果が 50.5Hz に対して FEM 解析結果は 60.4Hz と誤差が 16.0% となった。3 次曲げモードの実験結果が 106Hz に対し FEM 解析結果は 125Hz と誤差が 15.2% と大きくなった。

次に Table 4-4 は Blade 2 のインパルス加振実験の結果と FEM 解析結果を示している。実験結果の 1 次曲げモードの実験結果は 13.6Hz に対し、FEM 解析結果は 13.0Hz で誤差 4.5% と良好な一致を示した。また 2 次曲げモードの実験結果は 60.1Hz に対して FEM 解析結果は 60.3Hz と誤差が 3.3% となった。3 次曲げモードの実験結果が 100Hz に対し FEM 解析結果は 125Hz と誤差が 20.0% と大きくなった。模擬雷撃実験前に 3 次の曲げモードと FEM 解析の実験結果の差がメッシュ分割数の影響で大きくなったが、模擬雷撃実験後においても同様に、3 次の曲げモードの結果は FEM 解析結果との誤差は大きくなった。しかし、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一致を示した。

最後に Table 4-5 に Blade 3 のインパルス加振実験の結果と FEM 解析結果を示している。1 次曲げモードの実験結果は 13.9Hz に対し、FEM 解析結果は 13.1Hz で誤差 6.1% となった。また 2 次曲げモードの実験結果が 65.1Hz に対して FEM 解析結果は 60.2Hz と誤差が 8.1% となった。3 次曲げモードの実験結果が 125Hz に対し FEM 解析結果は 125Hz と一致を示した。

雷撃実験後に雷撃点近傍の要素の剛性をほぼ零にして行った。FEM 解析結果から得た 1 次から 3 次までの固有振動数の結果はインパルスハンマ加振実験から得た固有振動数と概ね一致し、雷撃による損傷のモデル化の妥当性を示すことができた。

また FEM 解析結果から得た 1 次から 3 次までの振動モードについては、雷撃前後変化がなく、さらに雷撃前後で行ったインパルス加振実験のアニメーションのモード結果も変化はなく、両方から得たモード形状は一致した。

Table 4-3 Comparison of experimental and FEM results for Blade 1
(After lightning impact)

Natural Frequency[Hz]		
	Exp	FEM
1st	13.7	13.1
2nd	50.5	60.4
3rd	106	125

Table 4-4 Comparison of experimental and FEM results for Blade 2
(After lightning impact)

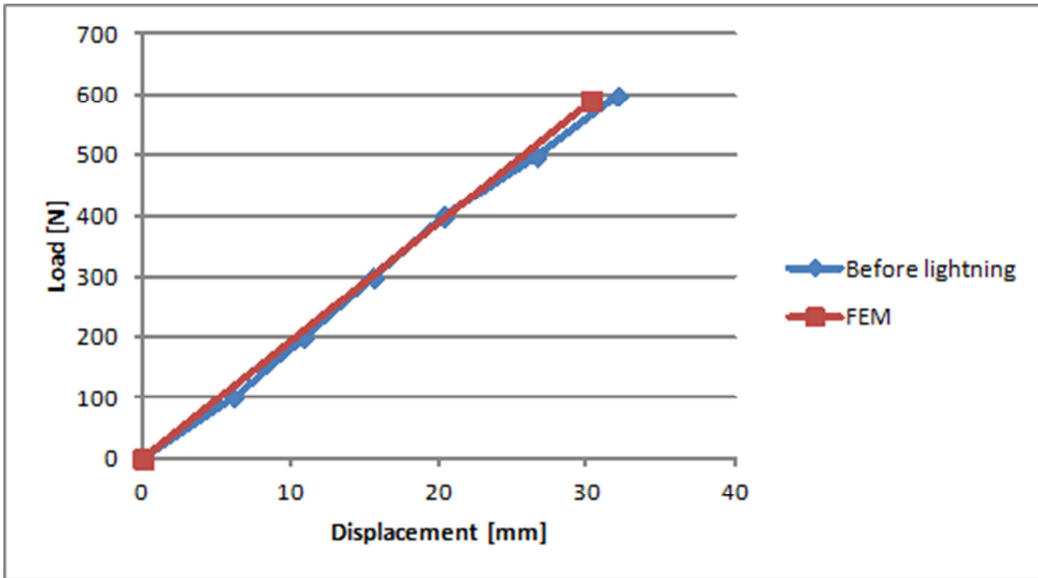
Natural Frequency[Hz]		
	Exp	FEM
1st	13.6	13.0
2nd	60.1	60.3
3rd	100	125

Table 4-5 Comparison of experimental and FEM results for Blade 3
(After lightning impact)

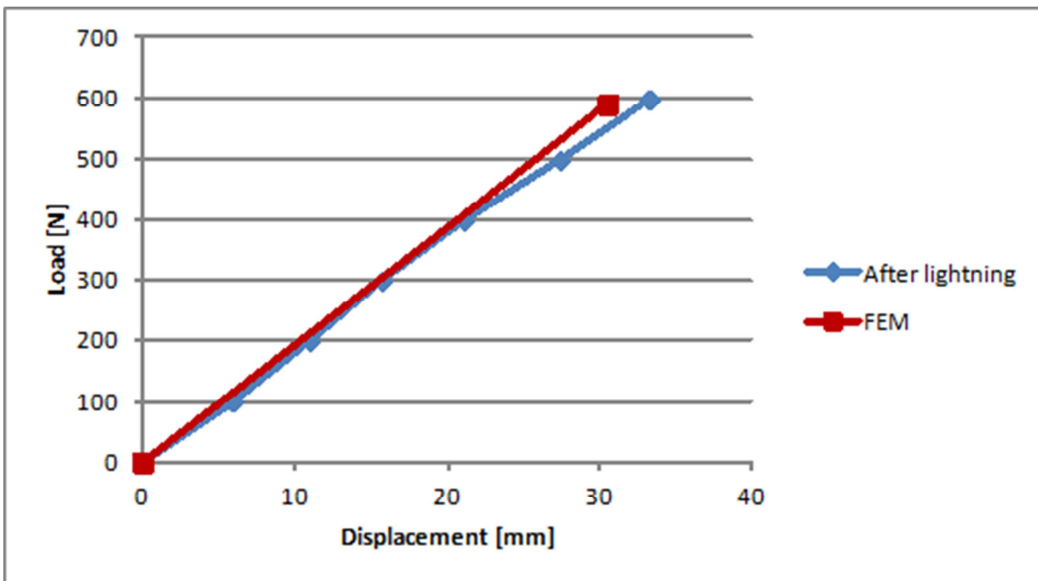
Natural Frequency[Hz]		
	Exp	FEM
1st	13.9	13.1
2nd	65.1	60.2
3rd	125	125

4.4 雷撃前後の曲げ実験結果と解析結果の比較

曲げ実験に関しても、模擬雷撃実験前の Blade 3 の最大変位が 32.2 mm であったのに対し、FEM 解析値は 30.29 mm となり、両者の値は概ね一致した。さらに模擬雷撃実験後の Blade 3 の実験結果の最大変位が 32.8 mm であったのに対し、FEM 解析値は 30.53mm となり、両者の値はほぼ一致を示した(Figure 4-5)。また、FEM 解析結果も曲げ実験同様に、模擬雷撃によるたわみの変化は小さいことを示している。



(a) Before lightning and FEM



(a) After lightning and FEM

Figure 4-5 Comparisons of FEM and experiment for load-displacement curves of Blade3

4.5 構造安全性の検証

Figure 4-6 は、模擬雷撃実験前後の Blade 3 に、最大回転数 1000 rpm で回転した際の最大応力説による引張応力を引張強度(Table 4-1)で割った値 λ のコンター図を示している。図中に挿入されている数字は、遠心力により発生した λ の最大値を表している。破損が生じるのは λ が 1 以上の値となったときである。

Figure 4-6(a)は、模擬雷撃実験前の Blade3 を示している。 λ の最大値に着目すると、根本部付近が最大値となり、数値は 0.13 となった。

Figure 4-6(b)は、模擬雷撃実験後の Blade3 を示している。模擬雷撃による損傷部近傍で λ は最大値を示し 0.31 となった。模擬雷撃実験前と比較すると λ は 29 %上昇した。しかし破壊基準である 1 以上には達しなかった。

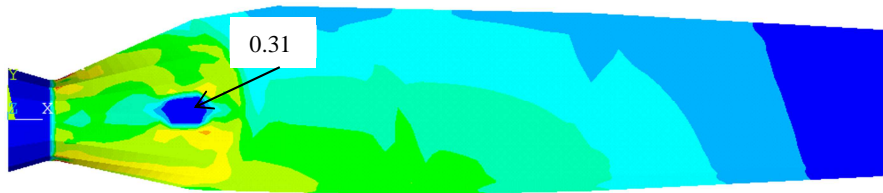
これらの結果から、本 CFRP 製ブレードでは、最大回転数で運用中に、累積頻度分布の約 15%となる 60 kA の雷が根元に落ちた場合でも、すぐに破壊基準には達しないと推察される。また、固有振動数と曲げたわみの場合に比べて、遠心力による最大応力の値については雷撃の影響は大きくなる。

Figure 4-7 は損傷面積が今回発生した 60 kA の雷撃を受けた場合の損傷面積のおよそ 1.8 倍、3.2 倍に広がった場合の最大応力説によるコンター図を示している。損傷面積が 1.8 倍の場合 λ の値は 0.36 となり、損傷面積が 3.2 倍の場合 λ の値は 0.40 となり、安全性が担保できた。

さらに損傷面積を大きくした場合の固有振動数の変化を Table 4-6 に示し、損傷面積を大きくした場合の最大たわみの変化を Table 4-7 に示す。その結果損傷面積を大きくになるに連れて固有振動数の値は小さくなり、最大たわみの値は大きくなる結果となった。これによりさらに FEM 解析のモデル化の妥当性を示すことができた。



(a) Before lightning impact



(b) After lightning impact

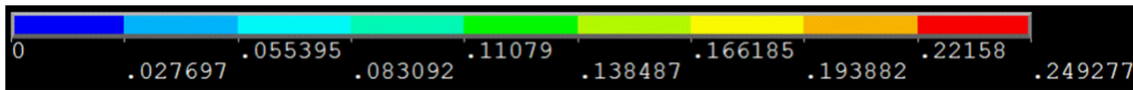


Figure 4-6 FEM results of λ based on maximum stress criterion for Blade3

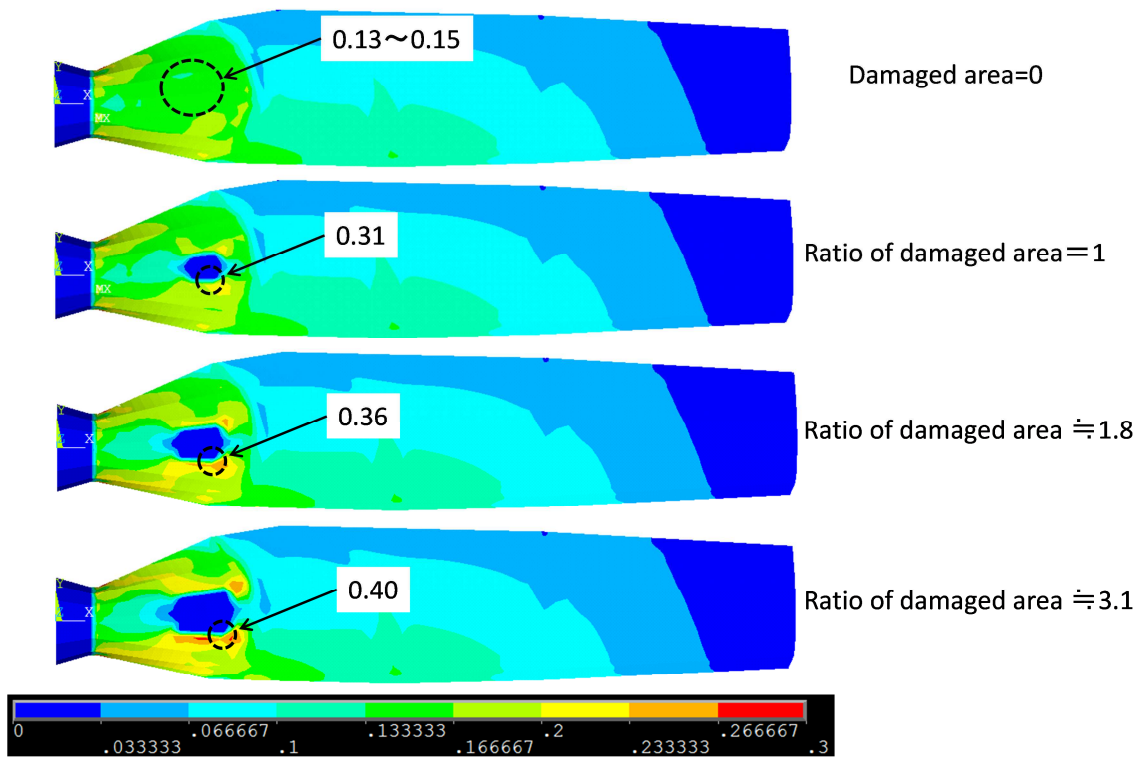


Figure 4-7 Changes in the damaged area ratio for Blade3

Table 4-6 Natural frequency and the damaged area ratio for Blade 3

	Natural Frequency [Hz]			
	Before Lightning	After Lightning(Damaged area ratio)		
	0	1	1.8	3.1
1st	13.0	12.9	12.9	12.7
2nd	59.0	58.8	58.5	58.1
3rd	123	123	123	122

Table 4-7 Displacement and the damaged area ratio for Blade 3

	Displacement [mm]			
	Before Lightning	After Lightning(Damaged area ratio)		
	0	1	1.8	3.1
	30.8	31.1	31.3	31.8

第 5 章 結論

5.1 本研究の成果

本論文では、試験体に定格風速 12.5 m/s(定格出力 10 kW)、カットアウト風速 25 m/s、定格回転数 200 rpm、最大回転数 1000 rpm、全長 2168 mm の CFRP 製サンドイッチブレードを用いて模擬雷撃実験を行い、インパルス加振実験、曲げ実験、さらに FEM 解析で CFRP 製ブレードの遠心力解析を行い、雷撃後の CFRP 製ブレードの構造安全性の評価を行った。以下に、各章で得られた知見を要約し、本論文の結論とした。

- (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 20kA から 30kA と 累積頻度分布の約 15%となる 60 kA の模擬雷撃を CFRP サンドイッチ製風車ブレードに与えた結果、着雷点近傍で繊維破断、樹脂溶解と樹脂の蒸発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)模擬雷撃実験後のブレードを空中超音波探傷試験より損傷を検査した結果損傷は、着雷点近傍に集中し、外観目視検査では確認できない内部損傷が広がっていることが確認できた。
- (3)インパルス加振実験結果より、模擬雷撃試験前後の振動特性を比較した結果、模擬雷撃実験前後で CFRP 製ブレードの固有振動数がそれほど変わらなかった。
- (4)片持ち曲げ実験の結果より、模擬雷撃試験前後の曲げ特性を比較した。その結果、曲げ特性はほとんど変化なく、雷撃による局所的な損傷がブレードの曲げ剛性に与える影響はほとんどないと推察される。
- (5)模擬雷撃実験前においてインパルス加振実験と FEM 解析を比較した結果、1次と2次の固有振動数の実験結果と FEM 解析の結果値は 1~2%の誤差範囲内で一致した。
- (6)曲げ実験に関しても、模擬雷撃実験前後の最大変位について比較した結果、FEM 解析値と実験結果は概ね一致した。
- (7)構造安全性を検証するため、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た。そのブレードに対して最大回転数で運用された際に発生する最大応力と CFRP の強度から CFRP ブレードの安全性を最大応力説で評価した結果、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。
- (8)さらに損傷面積が 60kA の模擬雷撃を受けた場合の損傷面積がおおよそ 3 倍に

広がっても、(発生応力最大値) / (CFRPの強度) の値は0.4となり、安全性が担保できた。さらに損傷面積を大きくした場合の固有振動数と最大たわみの変化を見ると損傷面積を大きくになるにつれて固有振動数の値は小さくなり、最大たわみの値は大きくなる結果となり、FEM解析のモデル化の妥当性を示すことができた。

(9)CFRP製サンドイッチブレードにおいて、遠心力による強度特性の変化は、固有振動数と曲げたわみの場合の特性変化に比べて、雷撃の影響が大きくなることが判明した。

5.2 今後の課題

本研究で行った実験と解析の結果、今後さらに必要と考えられる課題としては以下のことが挙げられる。雷撃実験により、CFRP 製ブレードに雷撃損傷を与えたが、振動特性および力学特性にほとんど影響を与えなかった。遠心力解析を用いて構造安全性を評価したが、雷撃実験による局所的な損傷はブレードの構造安全性に与える影響は少なかった。しかし、本研究で構造安全性を評価する際の負荷は遠心力のみ与えており、実際には風圧により、曲げ応力と変形が生じる。今後は風圧分布を参考にし、風圧を模擬した曲げ荷重と遠心力を同時に負荷させたときの構造安全性についても評価する必要がある。

また、CFRP 製ブレードの回転実験の検討を行い、実際に遠心力を負荷させて、有限要素法の解析結果と比較・検討する必要がある。さらにブレードの構造安全性を確立し経済的なメリットを得るために、風圧分布による曲げ応力と遠心力による引張応力の作用の下でブレードの形状を制約条件とし、CFRP の板厚、積層構成、板厚比などを設計変数とし、最適構造設計を行う必要がある。

参考文献

- 1) 炭素繊維協会 HP
<http://www.carbonfiber.gr.jp/>
- 2) ボーイング社 HP
<http://www.boeing.com/>
- 3) エアバス社 HP
<http://www.airbus.com/>
- 4) 中桐滋、FRP 容器…新しい基準、圧力技術、35 巻、1 号(1997)、p.4.
- 5) 鳴島正、天然ガス自動車と FRP 燃料容器の現状、圧力技術、35 巻、1 号(1997)、pp.9-10
- 6) 経済産業省ホームページ
「水素自動車及び水素スタンドの普及のための規則改正をしました」
(<http://www.meti.go.jp/press/2013/08/20130815002/20130815002.pdf>)
2013 年
- 7) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)ホームページ
「炭素繊維強化熱可塑性プラスチックを開発」
(http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100221.html)
- 8) 邊吾一、濱田泰以、八角恭介、青木義男、仲井浅見、金炯秀、杉本直、陽玉球：自動車の安全設計と信頼性向上に貢献する複合材料技術-VI、「NEDO プロジェクト 3」車体安全設計技術の開発、日本複合材料学会誌、33 巻 2 号(2007)、pp.41-47
- 9) International Energy Agency(IEA).RENEWABLE ENERGY Medium-Term Market Report executive summary (2013) pp.3
- 10) Global Wind Energy Council (GWEC) Global Wind Report Annual market update (2012) pp.13

- 11) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)ホームページ
「日本における風力発電設備・導入実績」
(<http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/state/1-01.html>)
- 12) Martin Leong、Lars C.T.Overgaard、Ole T.Thomsen、Erik Lund、Isaac M.Daniel:Investigation of failure mechanisms in GFRP sandwich structures with face sheet wrinkle defects used for wind turbine blades、Composite Structures、Volume 94、Issue2(2012)、pp768-778
- 13) S.Park、T.Park and K.Han:Real-Time Monitoring of Composite Wind Turbine Blades Using Fiber Bragg Grating Sensors、Advanced Composite Materials、Volume20、Issue 1(2011)、pp39-51
- 14) F.M.Jensen、B.G.Falzon、J.Ankersen、H.Stang:Structural testing and numerical simulation of a34m composite windturbine blade、Composite Structures76(2006)、pp52-61
- 15) 鳩山正義、川崎和行:風力発電用風車の開発 翼の製作と強度試験、「材料」(J. Soc. Mat. Sci.、Japan)Vol.43、No.494、(1944)、pp.1507-1508
- 16) 風力発電の技術の現状とロードマップ、NEDO 再生可能エネルギー技術白書 (2010)、pp.92
- 17) 大型化が進むドイツの風力発電、NEDO 海外レポート、NO.948 (2005)、pp.16-17
- 18) 邊 吾一、工藤 亮、北島義之、平田光男:屋外曲げばく露負荷を受ける CFRP 材の耐候性強度、日本機械学会論文集 A 編、62 巻、601 号(1997)、pp.181-186
- 19) 工藤 亮、邊 吾一、北条英光、大久保浩:促進暴露を受けた CFRP 材の耐候性曲げ強度とその非破壊的予測、日本複合材料学会誌、25 巻、1 号(2000)、pp.23-29
- 20) 工藤 亮、邊 吾一:促進暴露における CFRP 材の耐候性曲げ強度および弾性率の予測と実験値の比較、日本機械学会論文集 A 編、65 巻、632 号(2000)、pp.859-864

- 21) 邊 吾一、工藤 亮 : Weatherability Flexural Properties of CFRP subjected to accelerated and outdoor Exposures、Composites Science and Technology、Vol.13、No.13(2001)、pp.1913-1921
- 22) 邊 吾一、石川 隆司共編 : 先進複合材料工学、培風館 (2005)、p.151-158
- 23) (独)新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO) 日本型風力発電ガイドライン (2008) pp.1-10
- 24) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) : 次世代風力発電技術研究開発事業(自然環境対応技術等(故障・事故対策調査))、(2009)、pp.34-47
- 25) 出野勝、牛山泉、関和司 : 風力発電システムの雷被害に関する研究、第 27 回風力エネルギー利用シンポジウム講演会、(2005)
- 26) 横山茂 : 風車ブレードの雷害問題、電気学会論文誌 B、124、2(2004)、pp.177-180.
- 27) 花井正広、池田久利、中楯真澄、坂本東男 : 風車発電機 FRP ブレードの大電流雷模擬試験、電気学会論文誌 B、127、3(2007)、pp.531-536
- 28) 箕輪昌幸、角紳一、南正安、堀井 憲爾 : ロケット誘雷による風車ブレードの雷撃実験、電気学会論文誌 B、129、5(2009)、pp.689-695
- 29) 平野義鎮、勝俣慎吾、岩堀豊、轟章 : 模擬雷撃を加えた CFRP 積層板の損傷挙動、日本複合材料学会誌、35 巻、4 号(2009)、pp.165-174
- 30) 小笠原俊夫、平野義鎮、吉村彰記 : 模擬雷撃を受ける炭素繊維複合材料の熱-電気連成解析、日本航空宇宙学会誌論文集、57 巻、667 号(2009)、pp.336-343
- 31) 加藤 光昭、西尾 一政、山口 富子、有岡 史郎 : 超音波を用いた積層複合材料の評価に関する基礎的検討、大会講演概要集 1996(2)、11-14、1996-10-01
- 32) 常 俊杰、大平 克己、小倉 幸夫、問山 清和、川嶋 紘一郎 : 空中超音波を用いた大型構造物の非接触検査装置の開発、超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集 (33)、(2012) 、 pp.427-428

- 33) 藤岡 和俊、X 線透過試験の標準化の現状と今後の動向、特集 最新の非破壊検査に活用される X 線技術(1)、検査技術 17(1)、(2012)、pp. 35-39
- 34) 青木 卓哉、マイクロフォーカス X 線 CT による超耐熱複合材料の非破壊検査、非破壊検査 : journal of N.D.I 60(9)、(2011)、pp528-531
- 35) 関 俊力、山田 和夫:赤外線サーモグラフィ法によるコンクリートの内部評価に関する研究 : コンクリートの熱伝導特性と内部評価の推定精度、日本建築学会構造系論文集 77(681)、(2012)、pp.1605-1612
- 36) 小山 潔、星川 洋:渦電流探傷試験による炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の損傷検出 : CFRP の渦電流探傷、検査技術 17(7)、(2012)、p.7-11
- 37) 星川武 : [図説]蒸気機関車全史②、学習研究社(2006)、p.119
- 38) 魚本健人 : 図解コンクリート構造物の非破壊検査技術、オーム社(2008)、pp.44-66
- 39) G.Ben、Y.Nishi、K.Mori and T.Yamaguchi、"Estimation of Bending Strength of CFRP Cross-Ply Laminates from Damping Capacity Using by Neural Network"、Key Engineering Materials、Vol.145-149、(1998)、pp.427-432
- 40) 邊吾一、西恭一、黄一正、藤川由美 : ニューラルネットワークと実験データによる CFRP 積層材の損傷同定、日本機械学会論文集(A 編)、62 巻、602 号(1996)、pp.2338-2343
- 41) 平野義鎮、勝俣慎吾、岩堀豊、轟章 : 模擬雷撃を加えた CFRP 積層板の損傷挙動、日本複合材料学会誌、35 巻 4 号、(2009)、pp.25-34
- 42) IEC 規格、規格番号 : 61400-24、規格名称: Wind turbine generator systems - Part 24: Lightning protection for wind turbines
- 43) モード解析ハンドブック編集委員会 : モード解析ハンドブック、コロナ社(2000)、pp.74-75

謝辞

本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励とご指導、ご鞭撻を頂いた日本大学生産工学部教授 邊 吾一先生に心より感謝申し上げます。先生には、筆者の日本大学生産工学部在学中より、研究に関してご指導をいただき。研究を進めるための環境を整備いただき、また寛大な心で導いていただいたことに心より感謝申し上げます。

そして本研究の副査、数々のご助言、ご指導を賜りました、高橋進先生、網島均先生、及び遠方からいらしてくれた、東京大学の青木隆平先生に心から感謝するとともに、厚くお礼申し上げます

さらに、数々のご助言、ご指導を賜りました日本大学助教坂田憲泰先生、助教平林明子先生に心からお礼を申し上げます。

試験体を無償提供して頂き、本研究を始める契機をつくって頂いて実験にご協力頂いた株式会社ジーエチクラフトの皆様には感謝致します。

雷撃実験を実施するための環境を整備して頂き、実験に対して数多くのご助言、ご指導をいただいた昭電の皆様、数々のご助言を賜りました曾根原健夫氏に感謝致します。

実験の実施や本研究を進めるにあたり、日本大学生産工学部機械工学科 平成 24 年度卒研究生宮内貴史君、質問や相談に快く応じて頂き、数々の助言を頂いた邊研究室の大学院 1 年生の倉石宗一郎君 他、邊研究室の大学院生、学部生の皆さんの熱心な協力を得たことを記すとともに心より感謝申し上げます。

これらの研究を進めるにあたり、多大なご支援、ご協力をいただいた株式会社ジーネスの皆様、代表取締役品川議夫氏に心より感謝申し上げます。

また、ご支援、ご協力を頂きながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後に、いつも心の支えになってくれた家族に心から感謝します。