

平成 14 年度 卒業論文

風力発電機用
FRP ブレードの
落雷破壊メカニズム

知能機械システム工学科

1030111

環境機械・材料強度研究室

小柳 智洋

目次

1. 序章	3
1.1 緒言	
1.2 研究の目的と概要	
2. 文献調査	3
2.1 FRP について	
2.2 雷による破壊について	
3. 落雷破壊実験	7
3.1 実験目的	
3.2 実験準備	
3.3 実験条件	
3.4 実験結果	
4. 曲げ試験	12
4.1 試験目的	
4.2 試験準備	
4.3 試験結果	
5. 考察	16
6. 終章	17
6.1 結言	

6.2 今後の課題

謝辞・・ 19

学会発表

参考文献

付録 1 日本機械学会中国四国支部講演会での発表の概要

付録 2 走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した GFRP 試験片の傷

付録 3 落雷破壊実験より得られた電流波形

付録 4 3点曲げ試験用治具の製図

1. 序章

1.1 緒言

近年、地球温暖化などの環境破壊の深刻化からクリーンエネルギーを生み出す風力発電機が注目されている。風力発電機は北ヨーロッパで普及率が高く、世界中の国々でも普及されている。日本でも年間を通して風の強い沿岸地域や山間部で使用されている。日本で設置されている風力発電所は地方自治体が売電を目的に運営しているケースが多く、風力発電機自体は国内の代理業者から海外メーカーの風力発電機を購入したものがほとんどである。しかしながら日本での風力発電事情はヨーロッパに比べ、とても困難な問題がある。日本ではヨーロッパよりも雷が発生しやすいため、風車に落雷する頻度も高い。しかも雷が風車に与えるダメージが大きい。このままでは日本の風力発電の普及が伸び悩んでしまいかねないため、落雷対策が望まれている。

1.2 研究の目的と概要

いままでに国内で起こった風車ブレードの落雷による被害の状況は表面の FRP が破裂してめくれ上がってしまう場合が多い。FRP の強度は十分に研究されているものの、FRP の落雷破壊のメカニズムはあまり研究されていない。本研究ではまずインターネットや文献から FRP と雷について調査を行い、そしてブレードに使われている FRP の板を人工雷で破壊することで被害の状況を再現し、FRP の落雷による破壊メカニズムを調べた。さらに同じ材料で曲げ試験を行い、破壊メカニズムを比較した。

2. 文献調査

2.1 FRP について

繊維強化プラスチック(FRP)は軽量でプラスチックより強度があることから航空機や自動車や船舶、身近にあるバスタブや Fig.1 に示すテニスラケットまで幅広く利用されている。FRP はガラス繊維を強化材としたガラス繊維強化プラスチック (GFRP) と炭素繊維を強化材とした炭素繊維強化プラスチックが主流である。



Fig.1 FRP の製品例：テニスラケット

航空機では機体の多くの箇所に CFRP や GFRP などが使われ、機体の軽量化により航空機の飛行性能を向上させている。近い将来 FRP は巨大な構造物にも使われ始めようとしている。中でも高さ数百メートルもの極超高層ビルは従来のコンクリートや鉄筋で設計しようとしても、材料の自重で支えきれなくなってしまう。この問題を解決するのに適している材料が FRP と言われている。FRP は人々の想像を越えるような巨大な構造物も実現できる有望な材料である⁽¹⁾。

FRP はプラスチック（樹脂）という強化される母材と繊維という強化する材料から成る。FRP は樹脂や繊維マットの選択、成形方法によって様々な特性を持つので、材料の用途にあったものを作ることができる。FRP は通常、繊維マットに樹脂を染み込ませて、同じものを何枚も積み重ねて成形する。GFRP 用のガラス繊維マットでは主にチョップドストランドマットや平織クロスマット、ロービングクロスマットがある。チョップドストランドマットは短く切ったガラス繊維を不定方向に均一に降り積もらせて、厚手のマットに成形したものである。強度に方向性がなく安価で最も広く使われている。平織クロスマットは数本のガラス繊維を束ねてひねりをかけたものを織った薄手のマットである。ロービングクロスマットは十数本のガラス繊維を束ねて織ったマットで、補強効果が高いので構造用によく利用される。CFRP 用の炭素繊維マットはクロスがほとんどであり、マットの強度はガラス繊維マットの 2 倍から 5 倍にもなる⁽²⁾。

代表的な FRP の成形方法にはハンドレイアップ成形法、スプレーアップ法、プレス成形法などがある。ハンドレイアップ成形法は、はけ、へら、ローラーといった簡単な道具を使い、人の手でガラス繊維マットに樹脂を染み込ませて、必要な厚さまで積み重ね、適切な温度管理の下で樹脂を硬化させて成形品を得る方法である。大型で複雑な形状を少量生産するには適している成形方法ではあるが、手作業が多いため品質には技能が必要になる。スプレーアップ法はスプレーガンを用いて短く切ったガラス繊維と樹脂を同時に型の上に噴き付けて成形する方法である。この成形方法には強度をあまり必要としない大型製品や曲面が多い製品を多量生産するのに適している。プレス成形法は雄雌一対の型を用意し、これらの中に樹脂と繊維を供給して加圧流動を行い成形する方法である⁽³⁾。

風力発電機ブレードは、中身がウレタンなどの充填材で満たされていて、表面が GFRP である。GFRP は材料として安価であるので、ブレードの材料は GFRP が主流になっている。現在ブレードの生産方法は手作業で、表面の GFRP はハンドレイアップ成形法が採用されている。

2.2 雷による破壊について

雷には夏季雷と冬季雷がある。夏季雷を起こす雷雲（積乱雲）は高さ 16km にも達し、雷雲の内部では雷が発生しやすい。しかし雷雲の範囲は狭い。冬季雷を起こす雷雲は高さ 5~6km と低いが、水平方向に範囲が広い。冬季雷は雷撃のエネルギーが高く、電流の継続時間が長い。また地上から上向きに枝わかれする雷も発生する⁽⁴⁾。雷は突出した物や構造物、金属を好んで落ちる。さらに雷は物体に落雷すると物体の表面を伝わって地上に流れていく性質を持っている。これを沿面放電という。雷雲は 150 クーロンほどの電気量を持ち、一回の雷撃では 25 クーロンほどだと知られている⁽⁵⁾。

雷のエネルギーは莫大であるため、時には落雷して衝撃抜けた物体も破壊する。例えば樹木に落雷すると二つに割れたり、発火することがある。また鉄筋コンクリートの建物の屋上に設避雷針が設置されていることがよくあるが、その避雷針の根元のコンクリートが雷によって破壊されてしまうこともある⁽⁶⁾。さらに航空機の落雷による被害を調査したところ次のような被害があったことがわかった。

2001 年 9 月 6 日、広島西発鹿児島行き J-AIR の 571 便 CRJ200 が大分県上空を飛行中、機体に落雷を受け右主翼の翼端板（ウイングレット）が欠けた。ウイングレットは機体の安定性と省燃費化のための装置である。ウイングレットは GFRP 製で、主翼の先端に取り付けるほぼ三角形の高さ 1200mm、底辺 1300mm の板。破損は着陸後の点検で見つかり、進行方向に向かって後端部分の長さ 300mm、幅 50mm 程度にわたって欠けていた⁽⁷⁾。機体の CRJ200 はカナダ・ボンバルディア・エアロスペース社製の小型ジェット機である。この他にも金属製のプロペラが欠けたり、レドームに穴が空く事故も起こっている。



Fig.2 カナダ・ボンバルディア・エアロスペース社の CRJ200 のウイングレット⁽⁸⁾

風力発電機用ブレードの落雷による被害の状況は深刻である。高知県長岡郡大豊町に設置されている風力発電機は 3 度も落雷でブレードが損傷する被害を受けている。以下の Fig.3 と Fig.4 に最初の被害の状況を示す。



Fig.3 大豊風力発電所 1999 年 9 月 15 日の被雷でのブレードの損傷状況その 1

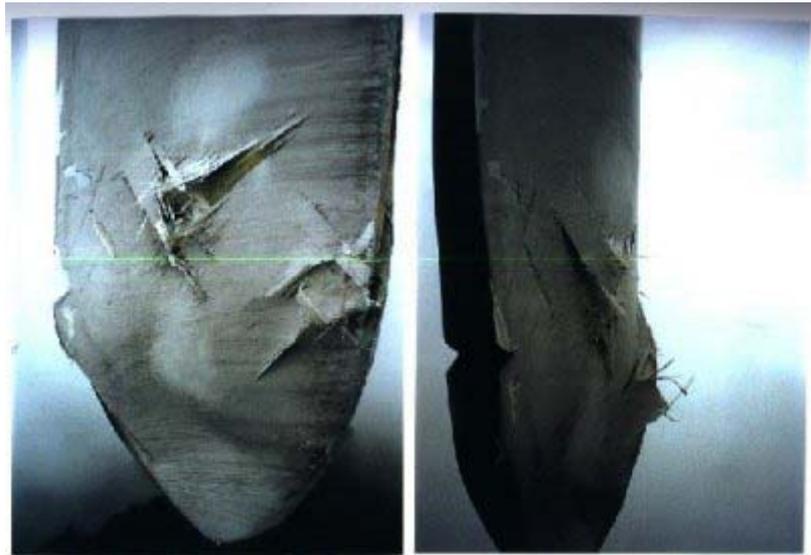


Fig.4 大豊風力発電所 1999年9月15日の被雷でのブレードの損傷状況その2

さらに石川県松任市の松任海浜公園にある風力発電機のブレードは高知県大豊町に設置されている風力発電機よりも深刻な被害を受けた。その被害の状況を以下の Fig.5 と Fig.6 に示す。

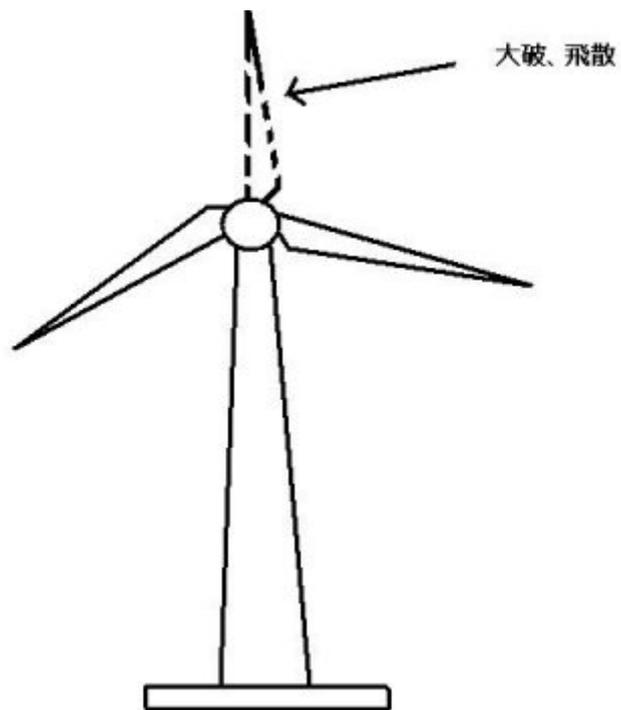


Fig.5 松任海浜公園発電所の風車ブレードの損傷状態その1

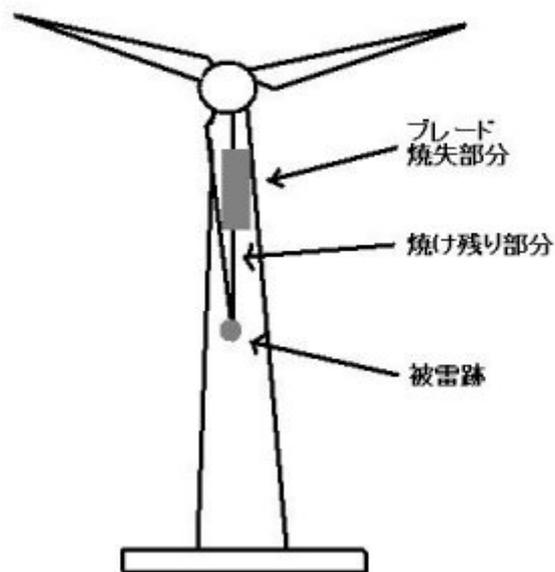


Fig.6 松任海浜公園発電所の風車ブレードの損傷状態その2

松任海浜公園に設置されている風力発電機は2回の被害を受け、2回とも季節が冬だった。この風力発電機はエネルギーの大きい冬季雷を受けたために、深刻な被害を被ったと考えられる⁽⁹⁾。

3. 落雷破壊実験

3.1 実験目的

今回の実験の目的は風力発電機のFRPブレードの落雷破壊を再現するため、FRPの板(試験片)を落雷によって破壊させ、観察することである。

3.2 実験準備

FRP試験片は海外の風力発電機メーカーNOIより同社風力発電機の販売代理店である日本鋼管株式会社を通じてブレードに使用されているGFRPとCFRPの板を2枚ずついただいた。試験片の詳細な物性データは諸事情により不明であるが、よく調べたところGFRPは+45°方向の繊維マットと-45°方向の繊維マットが28枚積み重なってできていることがわかった。またCFRPは繊維マットの繊維方向が板の長手方向であることがわかった。GFRPの板とCFRPの板はそれぞれ1枚ずつを株式会社日本アルミに厚さ約0.1mmのアルミコーティングを施していただいた。なお本研究では無垢のGFRPの板と無垢のCFRPの板を試験片として使用する。本報告ではこれ以降、無垢のGFRP試験片は単にGFRP試験片、無垢のCFRP試験片は単にCFRP試験片と呼ぶことにする。以下のFig.7にGFRPとCFRPの試験片を示す。



Fig.7 4枚の試験片(左上が無垢のGFRP、左下が無垢のCFRP)

今回の実験を実施するため財団法人電力中央研究所に協力をいただき、狛江研究所塩原実験場にある12MV 衝撃電圧発生装置を使わせてもらうことになった。以下の Fig.8 に実験装置の外観を示す。



Fig.8 塩原実験場の衝撃電圧発生装置の外観

3.3 実験条件

この実験では試験片に人工雷を落とすだけで良いのだが、最も人工雷が確実に落ちて、かつ試験片に何らかの変化がでるように条件を設定しなければならない。今回の実験では電極棒から人工雷を試験片に落とす条件と、電極棒と試験片を金属製の印加線で結び短絡させる条件を設定することにした。電圧は80kVで、回数は短絡なし3回と短絡あり1回を1セットとしてそれぞれの試験片に試験を行うことになった。試験片の固定は実験場の方の意見から、まず長さ90cm位の碍子を土台にして、碍子の平らな金属部分に長さ50cm くらいの木のを置き、さらにその上に試験片を置いた。試験片と電極棒の位置関係は以下の Fig.9 と Fig.10 に示す。

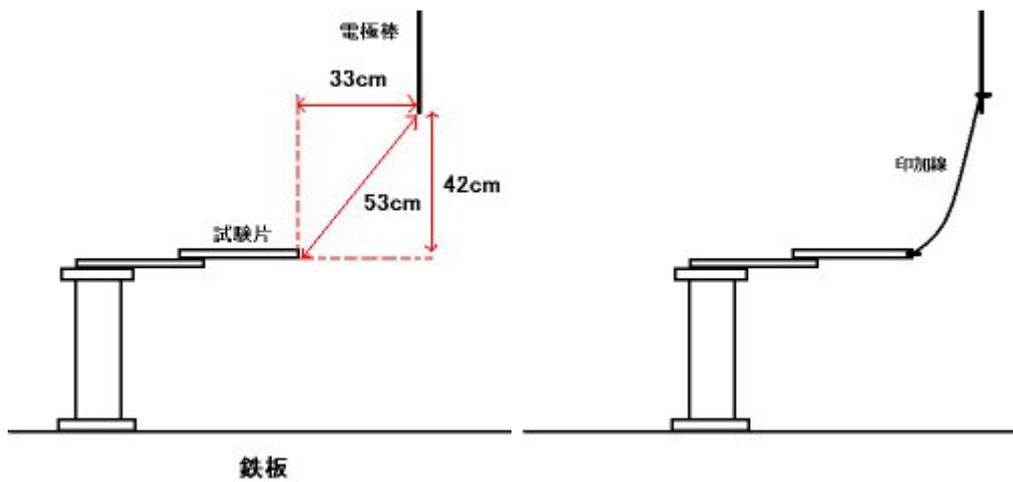


Fig.9 電極棒と試験片の位置関係（模式図）



Fig.10 電極棒と試験片の位置関係(写真)

3.4 実験結果

実験結果は試験片の順番に結果を説明すると、GFRP は一度目の被雷で表面に損傷が発生した。しかしその後の短絡なし 2 回と短絡ありの試験を行ったが、変化は見られなかった。試験後の GFRP 試験片の状態は以下の Fig.11 に示す。



Fig.11 試験後の GFRP 試験片

次に行った CFRP 試験片には損傷が発生しなかった。ただ 3 度目の短絡なしの試験で、試験片の電極に近いほうの角が焦げた。短絡ありの試験では、CFRP に噛ませている印加線のクリップの周りが焦げた。試験後の CFRP 試験片の状態は以下の Fig.12 に示す。

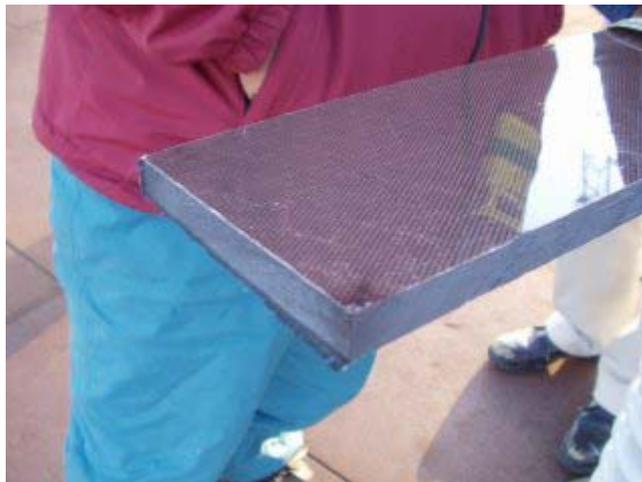


Fig.12 試験後の CFRP 試験片

以下の表 1 に試験片ごとの結果データを示す。

Table.1 落雷破壊試験の試験片別の結果

試験対象		電圧(kV)	電流(kA)	損傷状況
GFRP	1	none	9.81448	表面にささくれ
	2	539.313	10.5694	材料内部に白濁
	3	613.987	10.9469	変化なし
	4	199.131	9.81448	変化なし
CFRP	1	580.798	10.7582	変化なし
	2	597.392	10.7582	変化なし
	3	630.581	9.81448	角に焦げ
	4	149.348	10.9469	クリップ周りに焦げ

では印加線を試験片に直接接続

次に GFRP 試験片にできた傷を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察するために次の Fig.13 と Fig.14 に示すように 5mm 角に傷を切り取った。Fig は表面に金属を蒸着させたため、鉛色をしている。

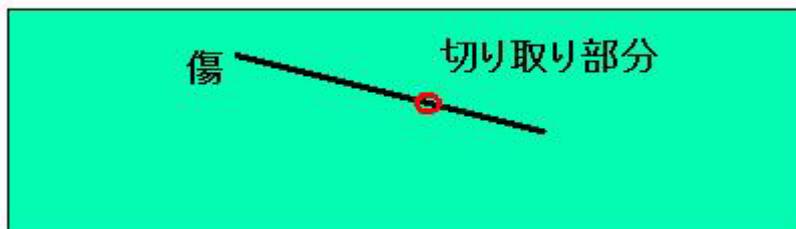


Fig.13 GFRP の傷の切り取り部分(模式図)



Fig.14 切り取った GFRP の傷

切り取った GFRP は知能精密機構工学研究室で表面処理をしていただき、同研究室内の SEM で観察させていただいた。以下の Fig.15 はその SEM の外観である。SEM で 500 倍で撮影した傷を Fig.16 に示す。また付録 1 に異なる倍率で撮影した傷を収録する。



Fig.15 SEM装置の外観

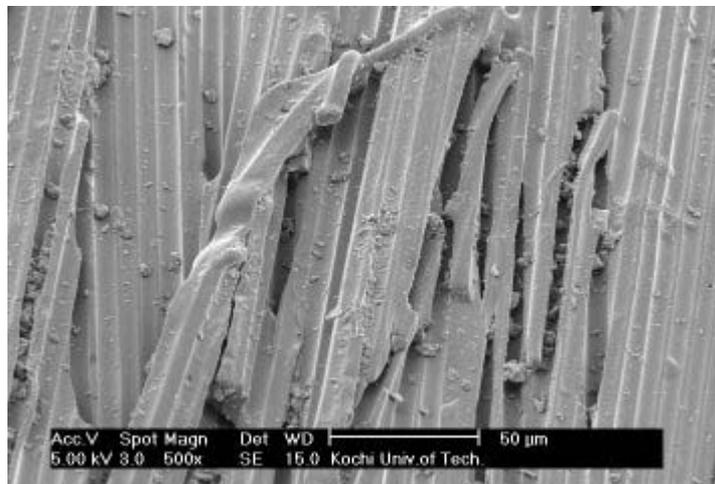


Fig.16 500倍に拡大して撮影したGFRPの表面の傷(Fig.14の右のGFRP片)

Fig.16を見ると右上の方向の繊維と左上の方向の繊維が並んでいることがわかる。右上の方向の繊維は一番上の層であり、その下の層に左上の方向の繊維がある。このことから試験片の傷は一番上の層が剥がれていたことがわかった。

4. 曲げ試験

4.1 試験目的

この曲げ試験では3章で行った落雷実験と同じ材料で3点曲げを行い、破壊状況を調べることを目的とする。

4.2 試験準備

今回の3点曲げ試験は試験片の形状に制限があるためJIS規格を参考にした^{(10),(11)}。3点曲げ試験で使

用する試験片は GFRP が長さ 100mm、幅 14mm、厚さ 10mm である。CFRP は長さ 100mm、幅 14mm、厚さ 12mm である。試験片はそれぞれ 4 本ずつ用意した。その試験片を以下の Fig.17 に示す。



Fig.17 切り出した CFRP (上) と GFRP (下) の試験片

以下の Fig.18 と Fig.19 にこの 3 点曲げ試験のために製作した治具とその製作過程、使用した試験機を示す。また付録 3 に治具の製図を収録する。



Fig.18 3点曲げ試験用治具の製作の様子と完成した治具



Fig.19 インストロン引張-曲げ試験機

試験の条件は支点間距離が80mm、試験速度が0.9mm/min、荷重は試験機が出力可能な最大荷重2045N、最大変位はGFRPが12mm、CFRPが5mmに設定した。

4.3 試験結果

Fig.20 に試験終了直後のGFRPとCFRPの試験片の様子を示す。



Fig.20 試験終了直後のGFRP試験片(左)とCFRP試験片(右)

GFRP試験片の曲げ試験の結果、4本とも破断しなかった。圧子を下ろしていくとたわんでいったが、破壊音は聞こえなかった。試験片の破壊状況は4本とも圧子と垂直方向の位置で試験片の裏面に剥離が起きた。Fig.21に試験後のGFRP試験片を、Fig.22に荷重-変位曲線を示す。



Fig.21 試験後のGFRP試験片の破壊状況

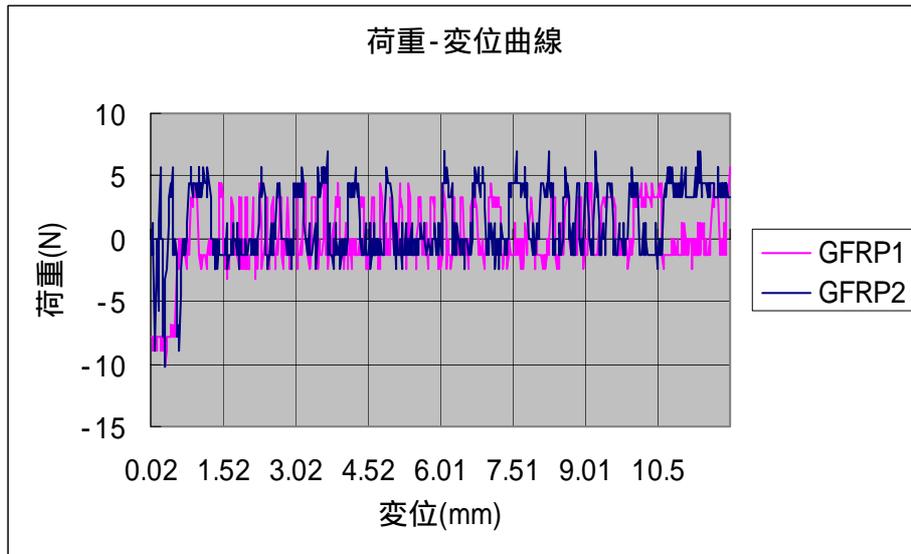


Fig.22 GFRP 試験片の荷重-変位曲線

一方 CFRP は圧子を下ろしていくうちに試験片がたわんでいき、そして突然試験片の端から中央に向かって水平に割れた。破壊は 1 回だけでなく 2 回、3 回起こった。破壊音は陶器が割れる音と似ていた。以下の Fig.23 に試験後の CFRP 試験片を、Fig.24 に荷重-変位曲線を示す



Fig.23 試験後の GFRP 試験片の破壊状況

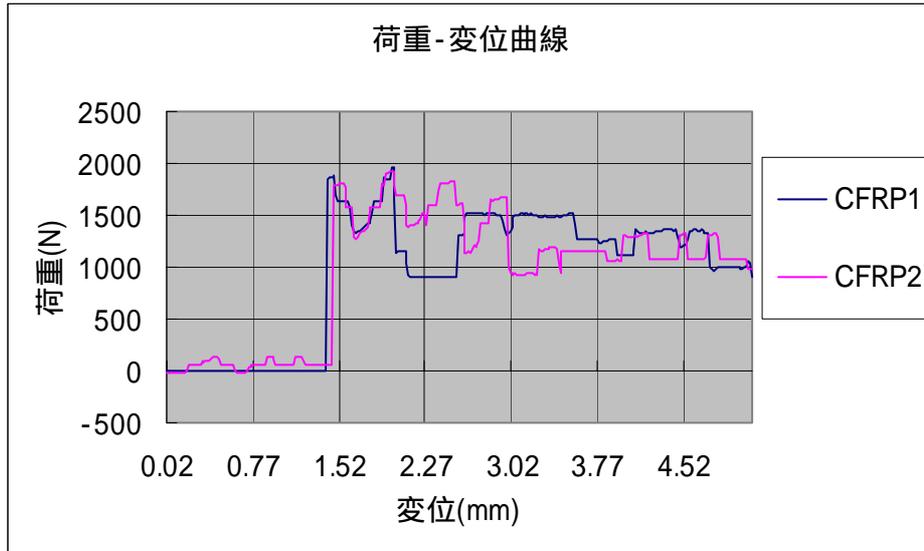


Fig.24 CFRP の試験片の荷重-変位曲線

5. 考察

GFRP 試験片では約 15cm の長さの損傷しか発生しなかった。試験片の厚みは 10mm もあり、衝撃電圧発生装置の出力電圧が自然雷の 10 分の 1 程度なので損傷が小さくなったと考えられる。下の Fig.25 に落雷破壊実験で GFRP 試験片に傷ができたときの電流波形を示す。他に得られた電流波形は付録 2 に収録する。

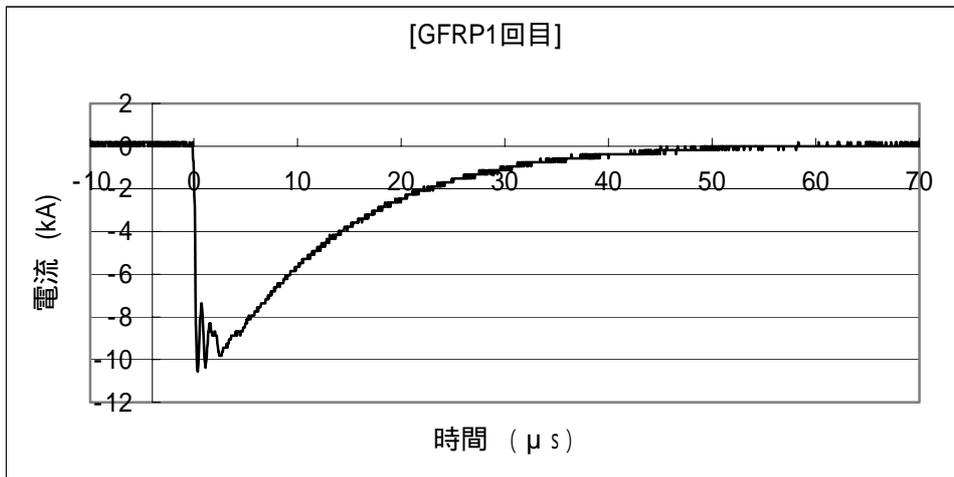


Fig.25 GFRP 試験片の表面に傷ができたときの電流波形

上の Fig.25 から GFRP 試験片に傷を与えた雷のエネルギーを求めてみる。まず雷の電気量 Q は SI 単位で電流 A と時間 s の積で表されるので、Fig の波形を積分すればよいことになる。電流を i 、時間を t とすると電気量 Q は

$$Q = \int idt \quad (1)$$

で表すことができる。上記の(1)式より Fig の 0s から 50 μ s の間、頂点を -10kA として近似して積分すると

$$Q = (10 \times 10^3) \times (50 \times 10^{-6}) \times \frac{1}{2} = 0.25$$

0.25 クーロンとなる。一般的に言われている自然雷の雷撃の電気量が 25 クーロン程度であるので、GFRP に傷をつくった人工の雷エネルギーは自然雷の 100 分の 1 程度であることがわかった。本研究で使った GFRP は成形方法がハンドレイアップ成形法のため、層の間にわずかな空気が残り、その空気が雷のエネルギーで破裂して傷になったと考えられる。CFRP は導電性が高いので破壊に至らず、表面の樹脂だけが焦げたのだと考えられる。

曲げ試験において Fig.22 を見ると GFRP 試験片の荷重は激しく上下に振れている。これは FRP の性質で、層が破壊されると一瞬荷重が下がるからである⁽⁴⁾。Fig.22 から GFRP 試験片の 3 点曲げは破壊の音こそしなかったものの、内部で連続して破壊が起こっていたことになる。そして徐々にたわんでいき、長手方向に対し 45° 方向で平行にならんでいる裏面の層の繊維が引張の力で引き離され、Fig.21 に示すように繊維が端から捲れあがった。CFRP 試験片の 3 点曲げで試験中に破壊音がしたが、破壊音がした時刻と Fig.24 で荷重が低下したときの時刻は一致している。CFRP 試験片は繊維方向が長手方向のため引っ張りに強く、GFRP のように繊維は捲れあがらなかった。CFRP 試験片は端から中央にかけて割れ、割れた部分を観察すると層と層がきれいに剥がれていた。これは試験片に荷重をかけると試験片の上半分が圧縮の力を受け、下半分が引張の力を受けるので、層と層の間の接着が破壊されたと考えられる。これは層間せん断破壊と呼ばれる。Fig.22 の Y 軸のスケールは Fig.24 の Y 軸のスケールと大きく異なるが、これは GFRP 試験片の曲げ試験で測定にミスがあったか、測定器の不調だと思われる。本来ならば Fig.22 の Y 軸のスケールは 200 倍程でなければならない。しかし Fig.22 の波形が上下に激しく振れていることから GFRP は CFRP より強度が低いことがわかる。

落雷破壊実験と曲げ試験による破壊メカニズムを比較すると、GFRP では落雷破壊で表層が破裂して傷ができ、曲げ試験では表層が捲れあがったので、層の間で破壊が起こることで共通している。CFRP は曲げ試験では層の間で破壊が起きたが、落雷破壊では導電性のために破壊がほんのわずかに留まった。今回行った 2 つの実験で GFRP 試験片だけが両実験で破壊されたことから、ブレードの材料には GFRP より強度が高く、導電性も兼ね備える CFRP が向いていると言える。

6. 終章

6.1 結言

本研究でブレードの材料には CFRP が向いているとわかったが、実際に CFRP を採用するには材料の値段が高すぎる。そのため CFRP をブレード材料に採用するには材料の値段を下げるため生産性の研究も必要になるだろう。またブレードの材料が GFRP でも CFRP でも、ブレードが落雷を受けると表面が焦げるため、メンテナンスフリーで落雷保護は難しい。

6.2 今後の課題

本研究で使用した GFRP と CFRP は物性がわからないために実験結果も満足できるとは言えない。今後は厚さ 3 ~ 4mm ほどのブレードの形状に似せた試験片を製作し、再度実験に挑む予定である。

謝辞

今回の落雷破壊実験にご協力いただいた電力中央研究所の関係者をはじめ、試験片を提供していただいた日本鋼管株式会社、日本アルミ株式会社、ヤシロコンポジット株式会社橋本良明取締役、そして高知県企業局安岡高志課長補佐にお礼を申し上げたい。また知能精密機構工学研究室の河田耕一教授、指導教員の坂本東男教授からのご指導にも大変感謝している。

学会発表

小柳智洋 坂本東男 恒石卓也

風力発電機用ブレードの落雷破壊メカニズム

日本機械学会中国四国支部講演会 2003年3月 発表予定

付録1に発表の概要を記載

参考文献

- (1) 三木光範 福田武人 元木信弥 北条正樹 機械システム入門シリーズ 8 複合材料 共立出版株式会社
- (2) 塩田一路 横田力男 福田博 複合材料基礎工学 日刊工業新聞社
- (3) 社団法人 強化プラスチック協会 FRP ポケットブック
- (4) 株式会社 応用気象エンジニアリング 「風力発電システムにおける落雷と対策」
- (5) 饗庭 貢 新コロナシリーズ 「雷の科学」 コロナ社
- (6) 武智重之 著 「雷のはなし」 四電エンジニアリング株式会社
- (7) 南日本新聞ニュース 2001年7月7日
http://www.minaminippon.co.jp/2000picup/2001/07/picup_20010707_4.htm
- (8) カナダ・ボンバルディア・エアロスペース社ホームページ
http://www.bombardier.com/en/3_0/3_1/3_1_1_1.html
- (9) 日本鋼管株式会社 風力発電カンパニー技術部作成の大豊風力発電所における落雷事故修理報告書
- (10) JIS K7055 ガラス繊維強化プラスチックの曲げ試験方法
- (11) JIS K7074 炭素繊維強化プラスチックの曲げ試験方法

風力発電機用 FRP ブレードの落雷破壊メカニズム

小柳 智洋 (高知工科大学)
恒石 卓也 (高知工科大学)

正 坂本 東男 (高知工科大学)

1. 緒言

近年、地球温暖化などの環境破壊の深刻化からクリーンエネルギーを生み出す風力発電機が注目されている。風力発電機は北ヨーロッパで普及率が高く、世界中の国々でも普及されている。しかしながら日本ではヨーロッパよりも雷が発生しやすいため、風車に落雷する頻度も高い。しかも雷が風車ブレードに与えるダメージが大きいため、落雷対策が望まれている。風力発電機の風車ブレードは表面がガラス繊維強化プラスチック (GFRP) で中はウレタンなどの充填材で構成されている。いままでに国内で起こった風車ブレードの落雷による被害の状況は表面の FRP が破裂してめくれ上がってしまう場合が多い。FRP の強度は十分に研究されているものの、FRP の落雷破壊のメカニズムはあまり研究されていない。本研究では FRP の板を人工雷で破壊することで被害の状況を再現し、FRP の落雷による破壊メカニズムを調べた。さらに同じ材料で曲げ試験を行い、破壊メカニズムを比較した。

2. 文献調査

省略

3. 落雷破壊実験

落雷破壊実験でガラス繊維強化プラスチック (GFRP) と炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の板を対象に行ったがその FRP は海外の風力発電機メーカーより国内の代理業者を通じて譲り受けた物で諸事情により詳細が不明である。しかしよく調べたところ GFRP は成形方法がハンドレイアップ、繊維方向が $\pm 45^\circ$ の繊維マットで 28 枚積層されていることがわかった。また CFRP は繊維が長手方向の繊維マットが使われていることがわかった。

この実験では国内高電圧発生装置のうちインパルスジェネレーターを使わせていただき、80kV の人工雷で Fig.1 に示す設置方法で行った。1 つの材料につき 4 回行い、そのうち 1 回は金属製のリボンで電極棒と FRP 板を結び、短絡させた。Fig.2 に実験結果を示す。GFRP の表面には傷ができた。CFRP は雷が侵入してきた角の部分が焦げるだけで、ほかに変化はなかった。GFRP の傷の周りを 5mm 角で切り出し、SEM で観察した。Fig.3 に SEM で撮影した写真を示す。Fig.3 を見たところ 1 番上の層が剥がれたことがわかった。

4. 曲げ試験

曲げ試験では 3 点曲げを行った。試験片は FRP の板を幅方向に切り出し、長さ 10mm、幅 12mm にした。なお GFRP の試験片の厚みは 10mm、CFRP では 12mm である。試験方法は試験実施に制限があるため JIS 規格を参考にした。Fig.4 に試験後の試験片の破壊状況を示す。Fig.4 では上が CFRP、下が GFRP である。

5. 考察

落雷による破壊メカニズムは CFRP では導電性が高いため、表面にコーティングしてある樹脂だけが燃えたと考えられる。GFRP は成形方法が手作業のため層の間にわずかな空気が残り、その空気が雷のエネルギーで破裂して傷になったと考えられる。曲げ試験による破壊メカニズムでは GFRP は試験片の裏側の中央付近で層間剥離した。CFRP は繊維方向が長手方向のため繊維が破断することがなかったが、曲げによって起こる引張と圧縮の力で層と層の接着が破壊され

たとえられる。

GFRP の落雷による破壊メカニズムと曲げによる破壊メカニズムは層の間で破壊が起こることで共通している。一方 CFRP は曲げ試験では層の間で破壊が起きたが、雷では導電性のために破壊がほんのわずかで終わった。したがって GFRP は雷と曲げ試験の両方で破壊し易いことから、ブレードの材料には CFRP が向いていると言える。

6. 結言

今回行った 2 つの実験は試験対象となる FRP の物性がわからないために、結果も満足できるとは言えない。今後 FRP の試験片を製作し、再度実験に挑む予定である。



Fig.1 Position of Test Piece and Thunder Discharge Bar



Fig.2 Damages after Artificial Thunder Striked.
(Left) GFRP (Right) CRP

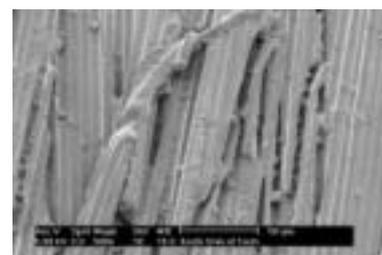


Fig.3 Observation of Scratch on GFRP by SEM



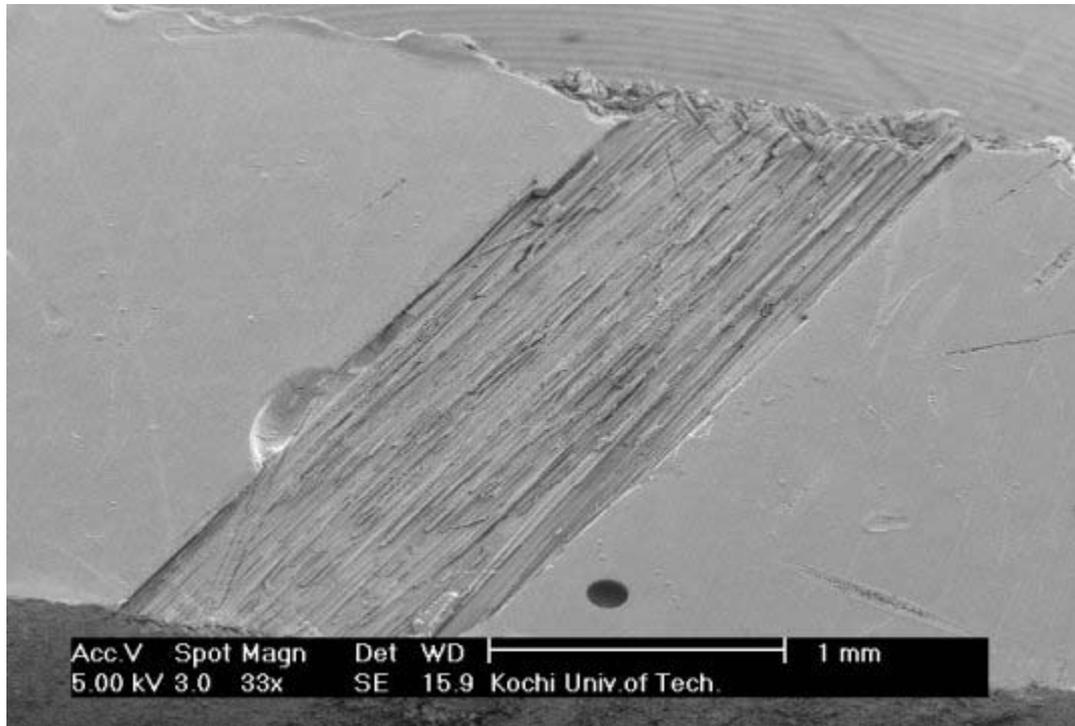
Fig.4 Destructive Mode of GFRP and CFRP

参考文献

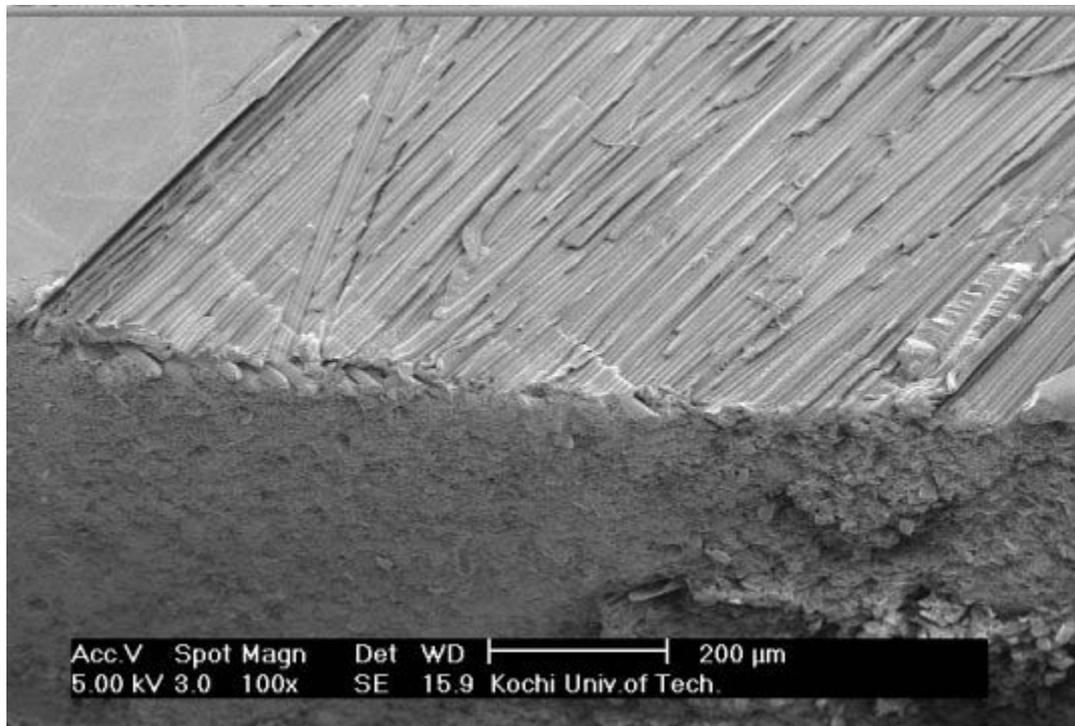
省略

付録 2 走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した GFRP 試験片の傷

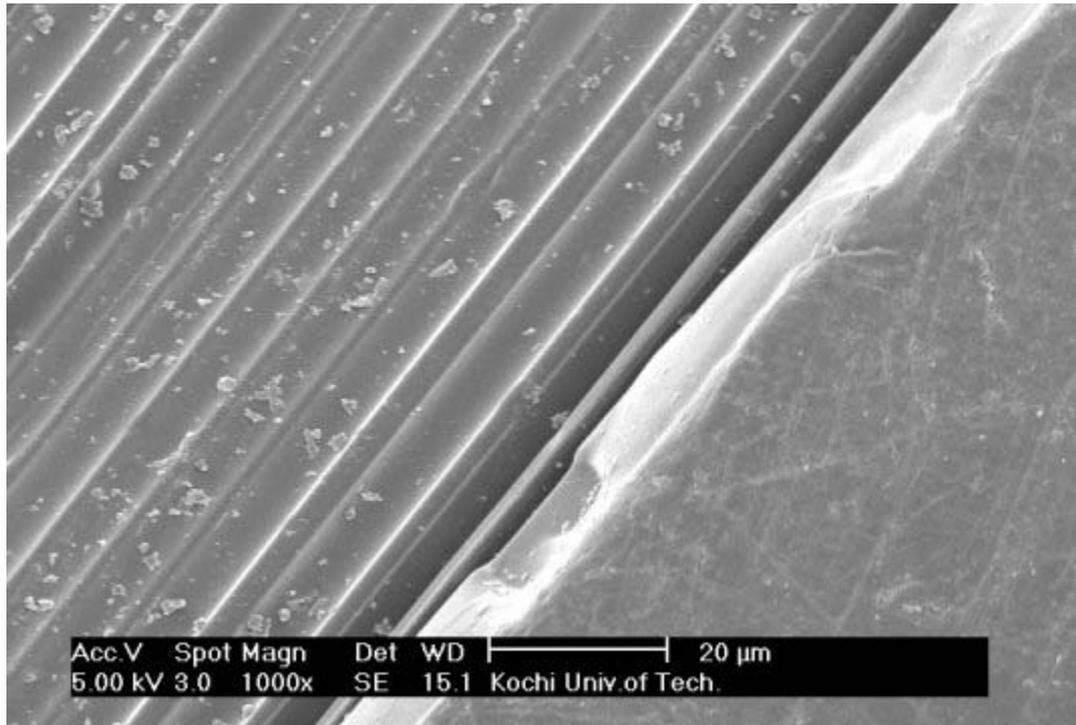
1. Fig.14 左側の GFRP 片の拡大写真



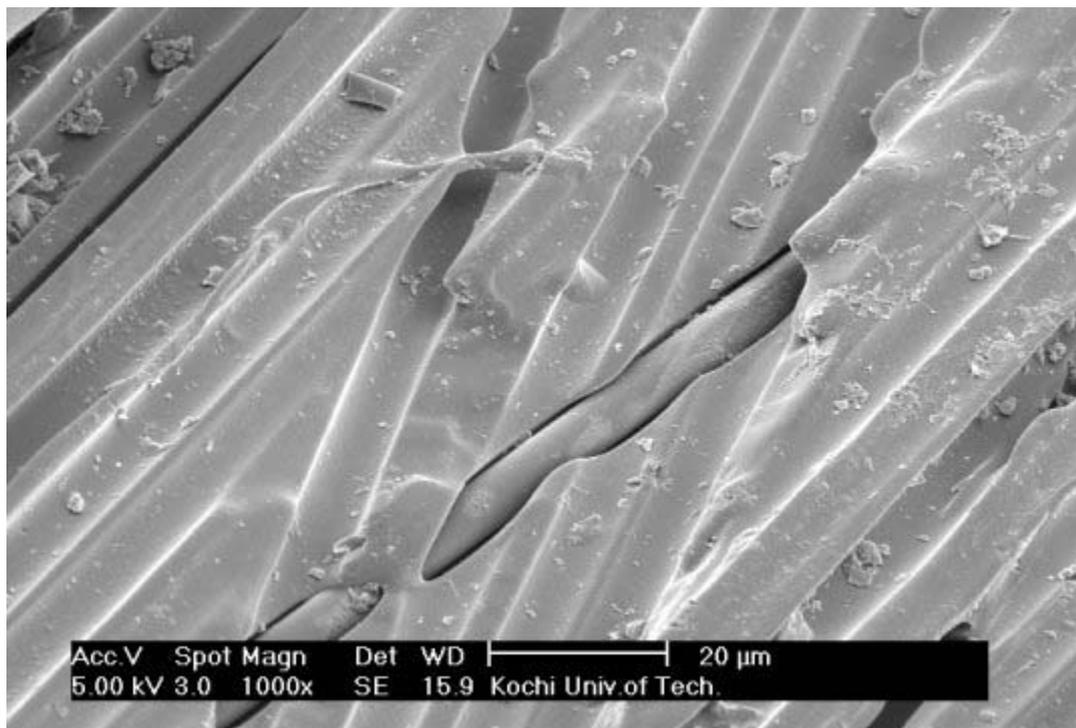
33 倍、35° 方向より撮影



100 倍、35° 方向より撮影

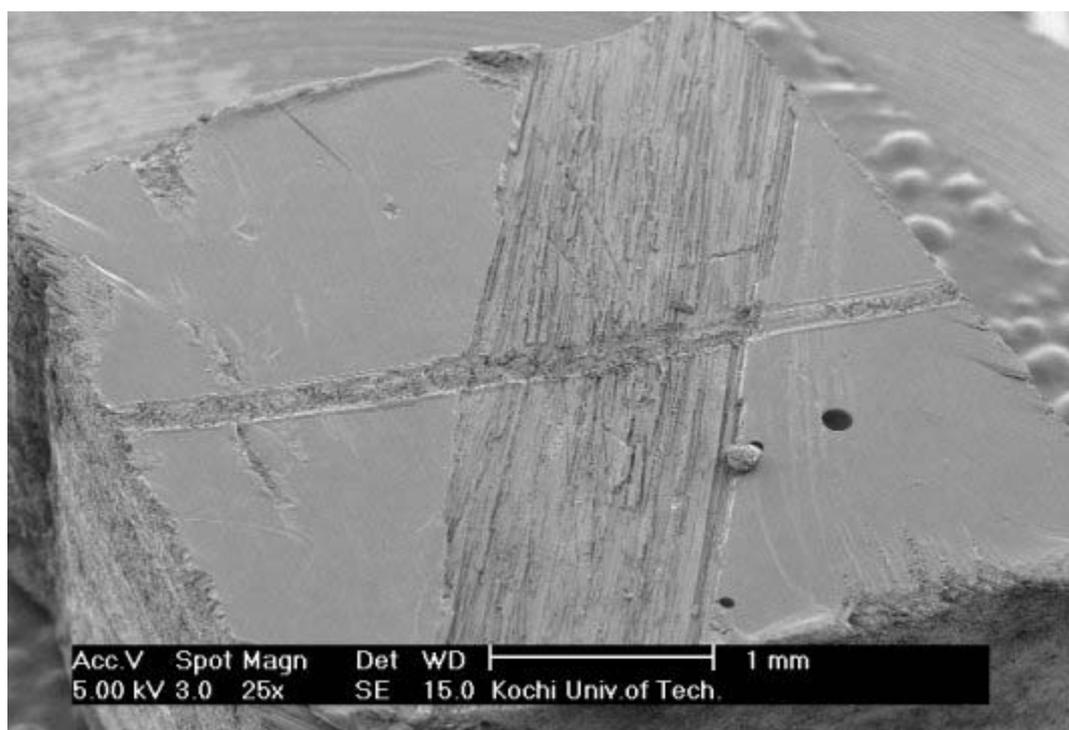


1000 倍、35° 方向より撮影（平らな面は樹脂）

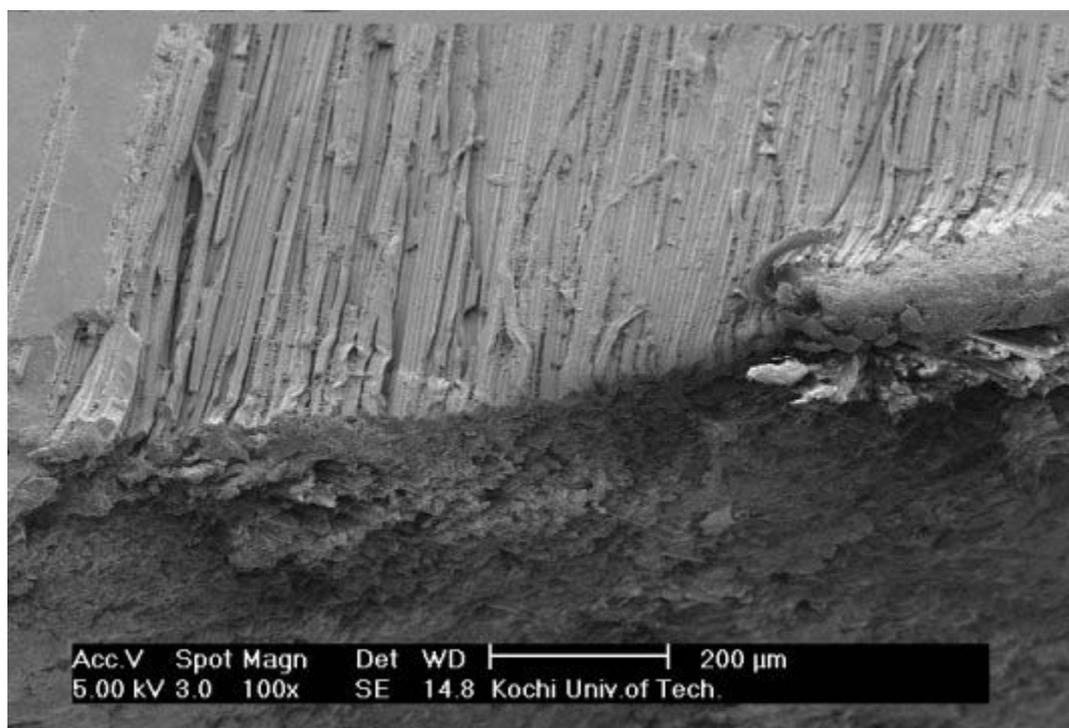


1000 倍、35° 方向より撮影

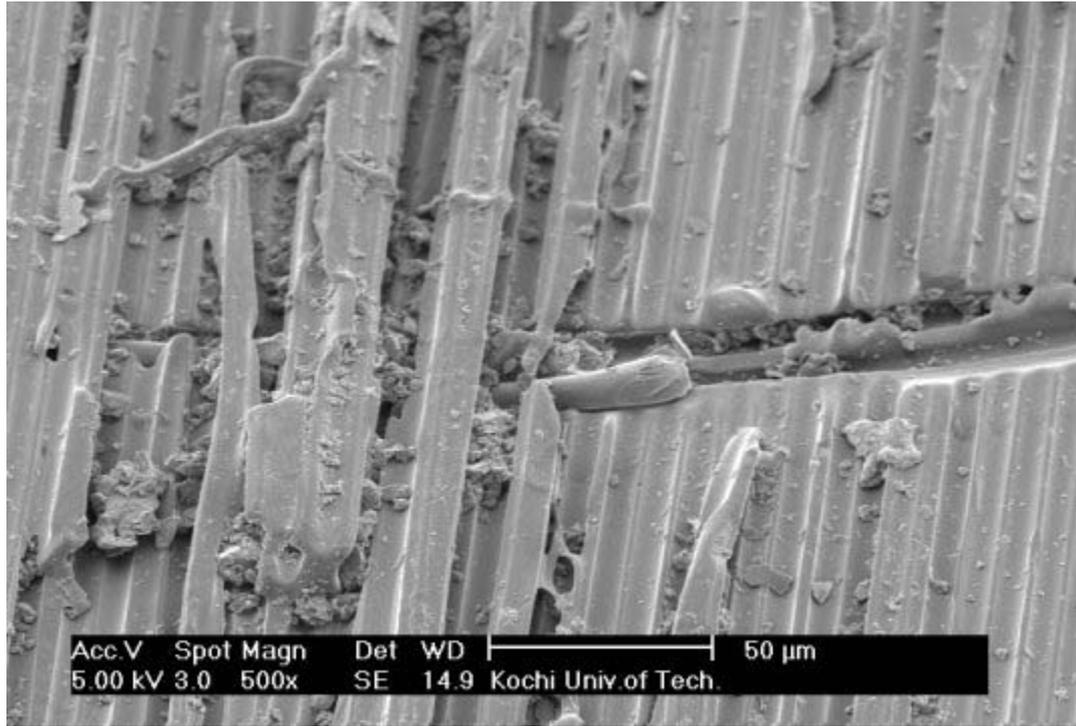
2. Fig.14 右側の GFRP 片の拡大写真



25 倍、35° 方向より撮影

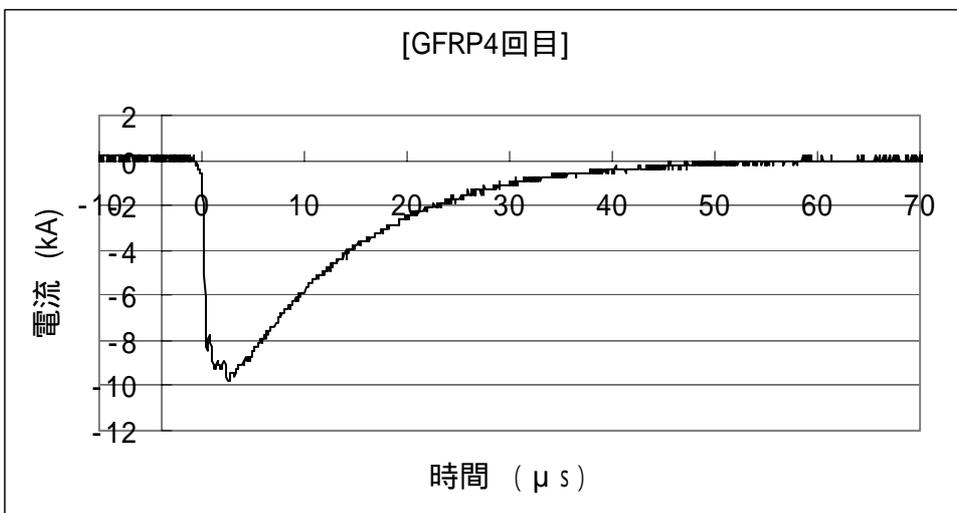
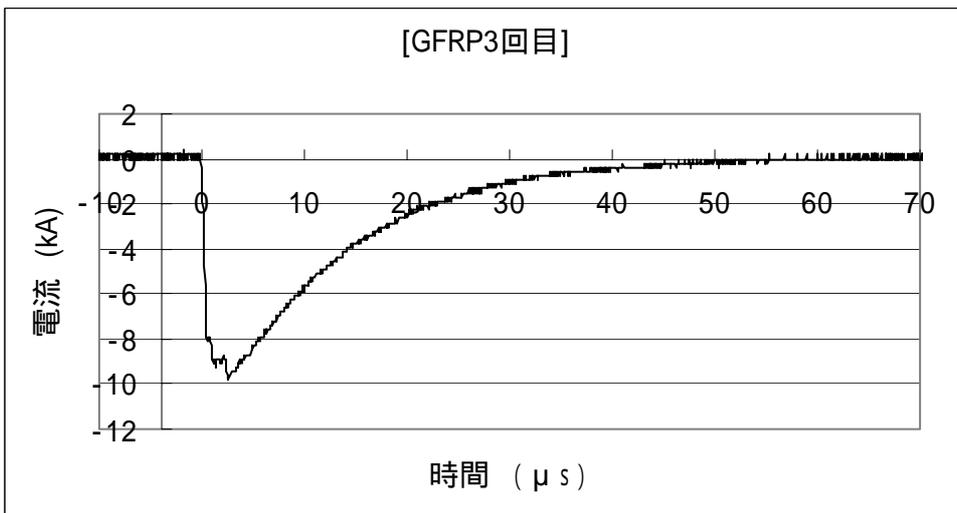
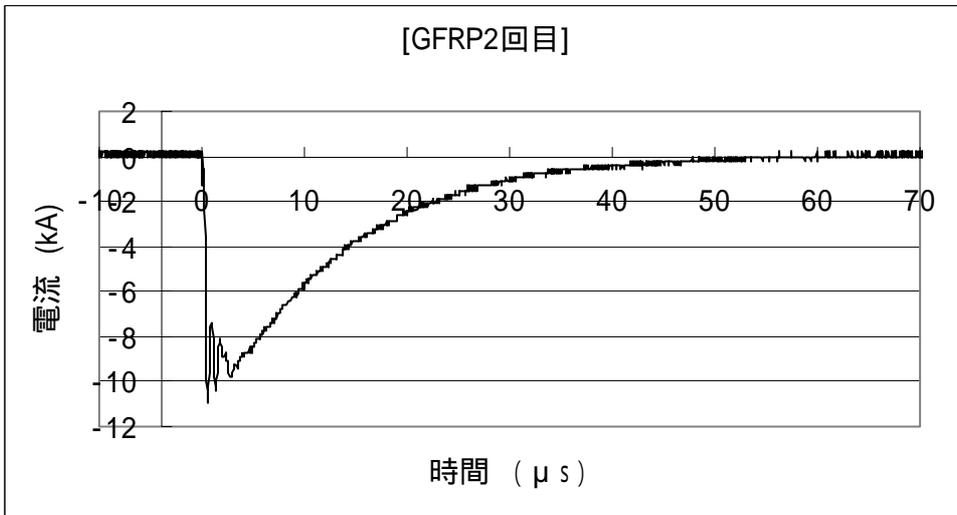


100 倍、35° 方向より撮影

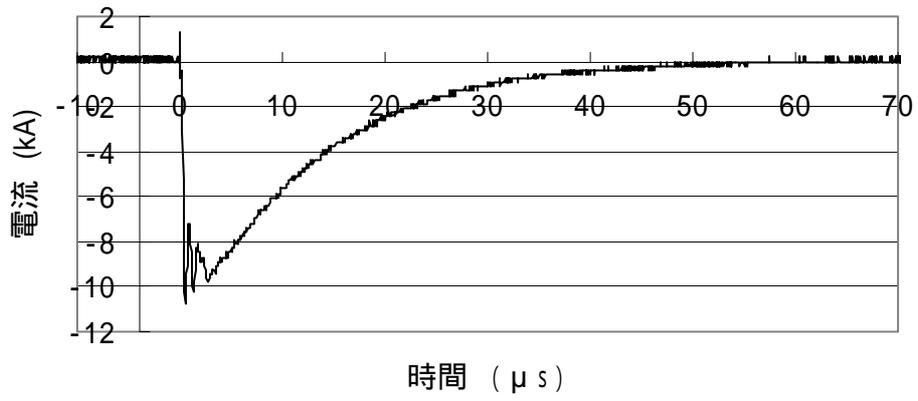


500倍、35°方向より撮影

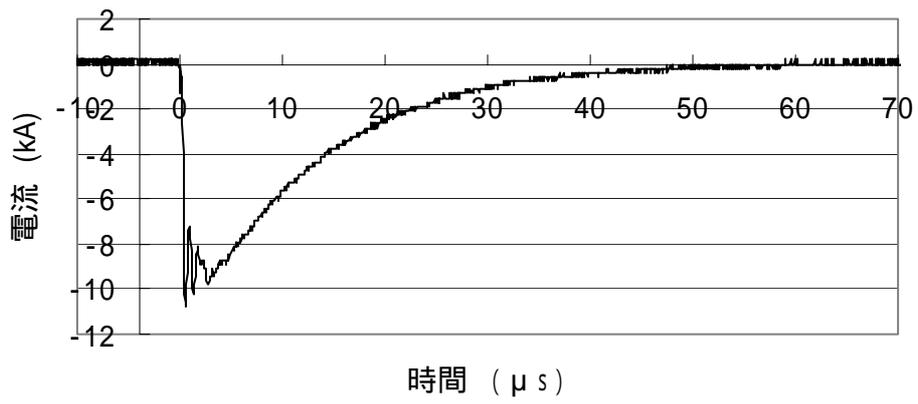
付録3 落雷破壊試験より得られた電流波形



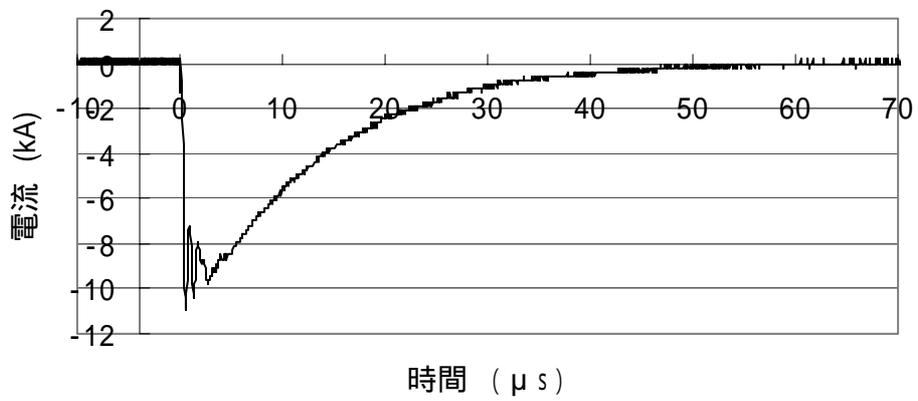
[CFRP1回目]



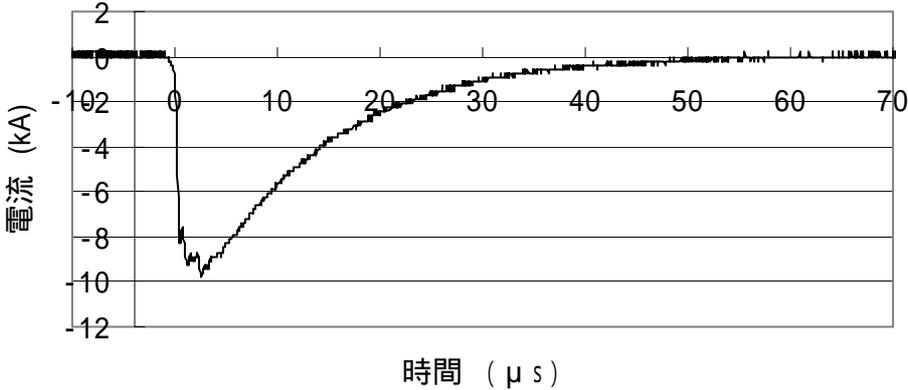
[CFRP2回目]



[CFRP3回目]



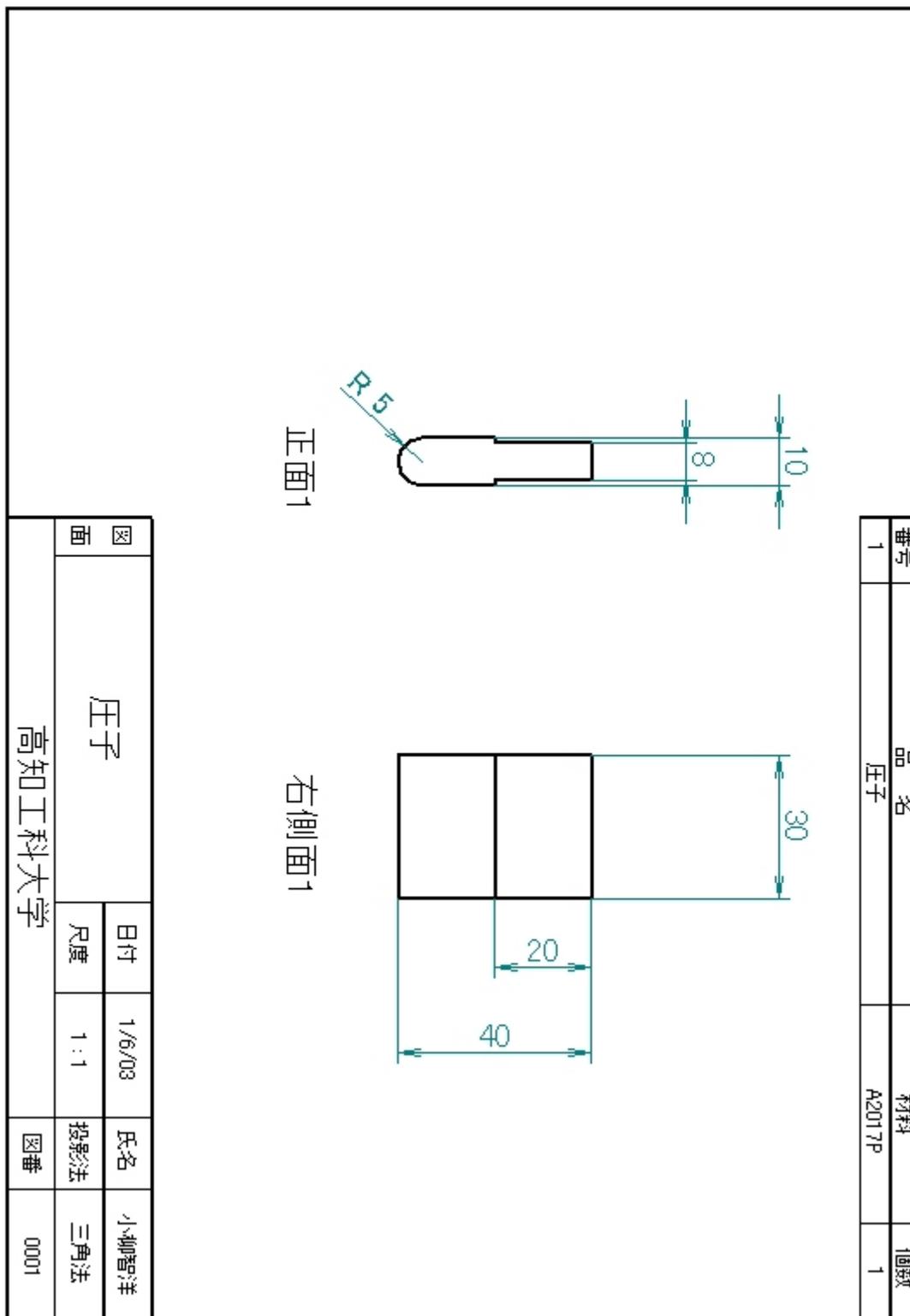
[CFRP4回目]



付録 4

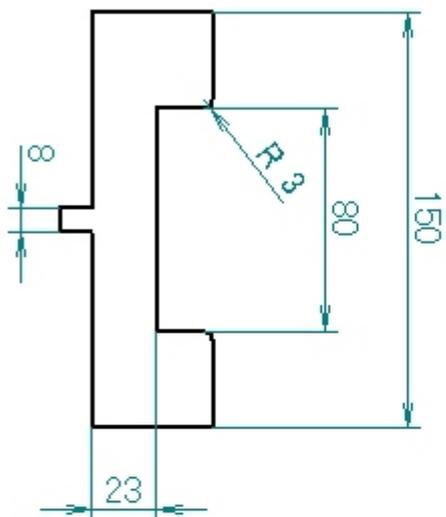
3 点曲げ試験用治具の製図

1. 圧子

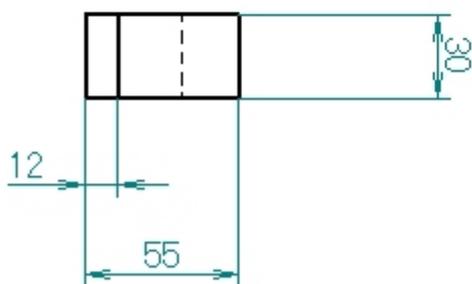


2. GFRP 用試験台

番号	品名	材料	回数
1	GFRP用治具	A2017P	1



正面1

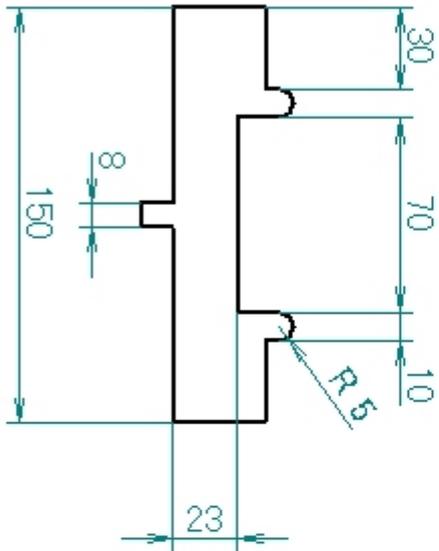


右側面1

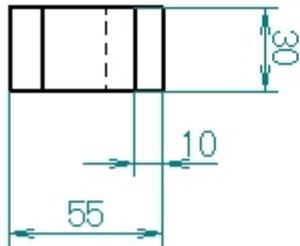
図面	GFRP用治具		氏名	小柳智洋
	日付	1/6/03		
高知工科大学			図番	0002

3. CFRP 用試験台

番号	品名	材料	回数
1	CFRP用治具	A2017P	1



正面1



右側面1

図面	CFRP用治具		氏名	小柳智洋
	日付	1/6/03	投影法	三角法
	尺度	1:2	図番	0003
高知工科大学				