

平成15年
知能機械システム工学科卒業論文

風力発電機用 FRP ブレードの落雷破壊対策

高知工科大学
知能機械システム工学科
材料強度・環境機械研究室
1030127
恒石卓也

目次

第1章 序章	3
1-1 風力発電機の現状	
1-2 ブレードの落雷被害	
1-3 研究目的	
第2章 落雷保護	6
2-1 落雷について	
2-2 一般建造物の保護方法	
2-3 ブレードの保護方法	
2-4 大豊町に設置されている風力発電機の対策	
第3章 保護方法と落雷実験	9
3-1 保護方法	
3-2 実験方法	
3-3 無垢FRPの落雷実験	
3-4 アルミコーティングFRPの落雷実験	
3-5 実験結果	
第4章 FRPの強度	14
4-1 アルミコーティングFRPの破壊強度実験	
4-2 実験結果	
第5章 終章	17
5-1 結言	
謝辞	18
参考文献	18
付録	19

第1章 序章

1-1 風力発電機の現状

現在、環境に優しいクリーンエネルギーとして風力発電が注目されている。風力発電機の数も10kW以上のものだけでも日本国内に300機以上設置されている。さらに近年設置台数は増加している。設置されている場所としては、風況のよい北海道・北陸地方に多いが、日本全国に設置されている。高知県にも設置されていて、大型のものでは大豊町に600kWのものが2機(図1-1)、梶原町に600kWのものが2機、野市町に250kWのものが1機、土佐山田町に225kWのものが1機、室戸市に300kWのものが1機設置されている(表1-1)。さらに今後設置が予定されているものも数機ある。しかしながら、風力発電は自然が相手であるため、安定した発電が見込めないという問題がある。また価格が高いことや騒音問題などもある。それでも火力発電や原子力発電など、環境や人に影響を及ぼす発電に比べると、自然エネルギーによる発電は望ましいと考えられる。今後も風力発電機の設置数は増えると考えられる。

表1-1 高知県に設置されている風力発電機の定格出力とメーカー

	定格出力(kW)	メーカー	設置台数	用途
室戸岬	300	三菱重工業	1	実験
大豊町	600	Lagewey	2	売電事業
野市町	300	NEG-MICON	1	売電事業
土佐山田町	225	Vestas	1	自家用
梶原町	600	NEG-MICON	2	売電事業



図1-1 大豊町に設置されている風力発電機

1 - 2 風力発電機の落雷被害

風力発電機は、風況の問題から山頂付近や海岸線に作られることが多い。風力発電機は回転体であるブレードが最頂部になりやすく、その高さは 50m 程になるものもある。そのため、ブレードの先端などは落雷の格好の的になっている。風力発電機に落雷が落ちた場合の被害としては、ブレードに落雷が落ちた場合は、ブレードの材質によっては先端や側面が破損、場合によってはブレードが全損するくらいの被害が発生することもある（図 1-2）。多くの場合、ブレードは電氣的に抵抗の高い FRP などの材質で作られているため被害が大きい。FRP は絶縁体であるが、落雷が起きる時は雨が降っていたりしてブレードが湿っていたり、ブレード表面やブレードについた小さな傷にごみが付着して、それらが落雷による損傷を発生させることがある。また、ブレードの内部には木材が使用されていることがあり、ブレードに空いたわずかな穴やひび割れから雨などの水分が浸入し、そこが導電体となって破損することもある。破損箇所が小さい場合でも発電に及ぼす影響や騒音といった問題から、一度地上に下ろして修理を行う必要がある。制御系が被雷した場合には装置が破損するなど甚大な被害が発生する。落雷による被害の半数ほどは制御系などの装置である（図 1-3）。しかしながら制御系の落雷対策は一般建造物に対する落雷対策を導入することにより、ある程度の防御をすることが可能である。また、ブレードの修理にかかる費用の 1/10 程度の費用で修理をすることができる。ブレードの落雷の被害は欧米では今のところほとんど見られないが、日本国内では表 2 に示すように多くの被害が発生している。ブレードが破損した場合、修理に要する時間が長く、再稼動するまでにはかなりの時間が必要となる。



図 1-2 破損したブレード(大豊町の風力発電機の例)

表 1-2 国内のブレードの落雷被害

施設名	被害状況	発電機は全て NEG - MICON 製 ブレード先端にエアブレイキ 用チップがついていてそこで 受雷するようになっている。
追分ソーラン風力発電研究所	レセプタ損傷	
野辺地風力発電研究所	レセプタ損傷	
立川町風力発電機	ブレード損傷	
名立風力発電研究所	レセプタ損傷	
松任海浜公園発電所	ブレード 1 枚が大破、飛散	
同上	2 枚のブレードシームにクラック	
沖縄電力宮古風力発電実証研究設備	ブレード損傷	
沖縄電力牧港発電所風力発電機	レセプタ損傷	

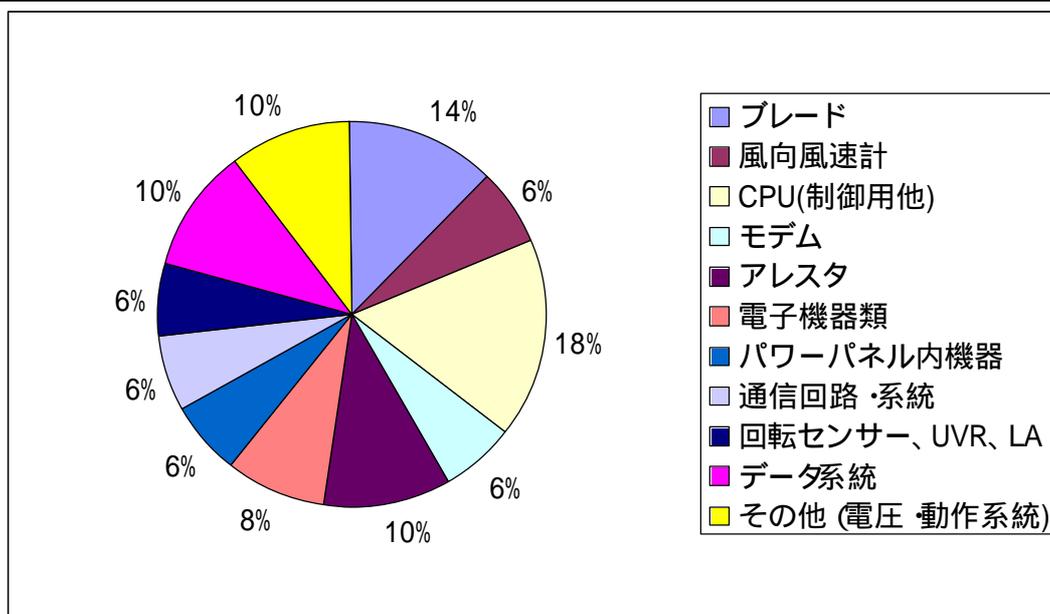


図 1-3 落雷による被害の割合⁽¹⁾

1-3 研究目的

風力発電機のブレードは、破損した場合その大きさから、修理にかなりの時間がかかり、また修理中は発電を行うことができない。ブレードメーカーの多くの拠点である欧州では、落雷によるブレードの被害が風力発電機全体の二割程度である。しかしながら被害にあった場合の修理に時間がかかったり、近年の風力発電機の高層化によって、ブレードが今までよりも落雷の被害にあう可能性が高くなってきている。このことから、落雷対策を既に行っているメーカーや、今現在さらに落雷対策を強化しようとしているメーカーは多い。しかしながら現在、大豊町で使用されているブレードも誘電チップは備えているものの、実際に落雷によってブレードが破損していることもあり、効果が十分とは言えない。そのためブレードに対する落雷対策を施すことによって、ブレードを落雷による被害から保護することが必要であると考えられる。そのため、ブレードの落雷破壊からの保護を目的としてFRPブレードの落雷対策の研究を進めていく。

落雷保護

2-1 落雷について

落雷は、雷雲の中にある+の電荷と-の電荷がそれぞれ異なる側に集まることにより、電荷の分離、蓄積が進んで電界が強まり空気の絶縁破壊が起きて、雷放電が起きる現象である。落雷には正極性のものと負極性のものがあり、夏季には負極性の雷が多く冬季には半々の割合である。冬季雷は主に上向き雷が多く電流の継続時間が長い。また雷撃 1 回あたりのエネルギーが大きい。雷は絶縁物・金属に関係なく高い位置にあるものに落ちる。そして、その後の 2 次災害は雷の落ちたものの抵抗値によって大きく変わる。しかしながら、同じ高さであれば金属に落ちる。

高いものからは絶縁体・金属を問わず先駆放電（リーダ）と呼ばれる微量な放電があり、雷を引き寄せさせる。そして、落ちた雷は落ちたものの表面を流れやすく、また抵抗の少ない部分を流れる。また、雷は少しでも流れやすいところを探し少々空間であれば火花放電してでも流れる。このことから雷電流を流すための導線の接続点には注意を要する。接続点の問題はかなり重要で接続点の径を考えて設計しないと空気を伝わって近くの流れやすいものに飛んだり、火花をちらすことがあるようである。雷は銅・鉄・アルミなど面積が等しければ金属の種類に変わりなく流れる。落雷は避雷針をもうけていても先端に落ちずに側面を襲うこともあり、東京タワーでの落雷の半数が側撃であるようである。

2-2 一般建造物の落雷対策⁽²⁾

避雷針のはじまりは風の先端に針金をつけたもので、それを地上に接地して落雷から身を守れるか検証したものであったようである。その後現在のような避雷針を建物に設置したところ設置した金属棒の先端が少し溶けていたのと設置導体を埋めてある

部分が掘り返された程度で建物には被害がなかったことで現在のような避雷針が広まったようである。避雷針は英語で Lightning rod or Lightning conductor といい、これを直訳すると導雷針となる。日本で導雷針と呼ばれない理由は恐ろしく聞こえるためであるようだ。現在一般的に用いられている避雷針の保護範囲は60度である。この範囲を超えるものに対して導雷効果は無い。

雲からの先駆放電(リーダ)が発生するといろいろな物体から上向き先駆放電が発生する。この上向き先駆放電を早く伸ばし、積極的に下向き先駆放電を吸引するのが避雷針などの避雷設備の役目である。また、中和させて落ちないようにもできるようである。

一般的に避雷設備は

受雷部：直接雷撃を受け止める部分

避雷導線：受雷部でキャッチした雷を大地に逃す接地極まで導く部分

接地極：避雷導線で導いてきた雷を大地との接点となって逃す部分

で構成されている。

避雷設備の種類は

突針方式：避雷針や、建物の外部に取り付けられた金属に雷を落として防護するものである。

水平導体方式：建物の上部に金属棒を設置するものである。手すりなどでも代用できる。

ゲージ方式：建物を金属のゲージで囲うものである。建物の鉄骨などで代用できる。

簡易方式：細い銅線などを屋根に取り付け、接地棒を地中に埋め込む。数が多いほどよい。

などがある。

送電線の落雷対策

山間部にそびえる鉄塔や送電線は落雷の格好的である。そのため送電線は、架空地線という方式を採用している。これは水平導体方式であり、電線の上に被雷しても大丈夫なように導線を張っているものである。また電線内部に絶縁油等を採用することにより被害を防ごうとしている。しかしながら、架空地線をとっても被害は多く、架空地線を増やすなどの更なる対策が必要であるようである。

航空機の落雷対策⁽³⁾

航空機の機体は、以前は金属製であったが最近ではFRPを使用しているものもある。航空機は一般的にブレードに静電気放電棒を取り付けそこから機体に発生する静電気を放電している。また落雷に対しては、航空機の先端に位置するレーダードームには金属の板を放射状に数本貼り付けて対応しているようである。またブレードの翼端などには金属を埋め込み、雷電流がスムーズに流れるようにして発熱破壊が起きるのを防いでいるようである。

2-3 風力発電機の落雷対策

一般的なブレードの落雷対策は次の通りである。

・レセプター

ブレード先端付近に導雷部を設け、そこに接続した金属ワイヤをブレード付け根まで通す方法である。導雷部で受雷した雷電流は金属ワイヤを通してブレードを通過し、その後はナセル、タワーを介して接地極へと流す方法である。(図 2-1 A,B)採用しているメーカーとしては IHI や Lagerwey などがある。

・ブレード翼端の保護

ブレードの翼端に金属製のコンダクタを取り付けるものである。ブレードに落雷が起きた時には雷電流を翼端のコンダクタを通じてブレードを通過し、その後ナセル、タワーを介して接地極へと流す方法である。(図 2-1 C)採用しているメーカーの例としては ENERCON などがある。

・金属メッシュ

これはブレードに金属製のメッシュを組み込むことにより、ブレード表面が保護され、雷撃によるブレードの破壊が起こることなく、雷電流を流れるようにするものである。この方法は GFRP や CFRP を使用した航空機のブレードに使用されているものである。(図 2-1 D)

・避雷針

これはブレードの最頂部が避雷針の保護範囲に入るように避雷針を設置するものである。風力発電機のサイズが小さい場合や、設置台数が1~2台の場合効果を発揮する。大型の風力発電機では避雷針の高さが高くなるために、設置に多大な費用がかかることや、景観を損ねることがある。また風力発電機の設置台数が多い場合、全ての風力発電機を落雷から守るには一つの避雷針では無理である。

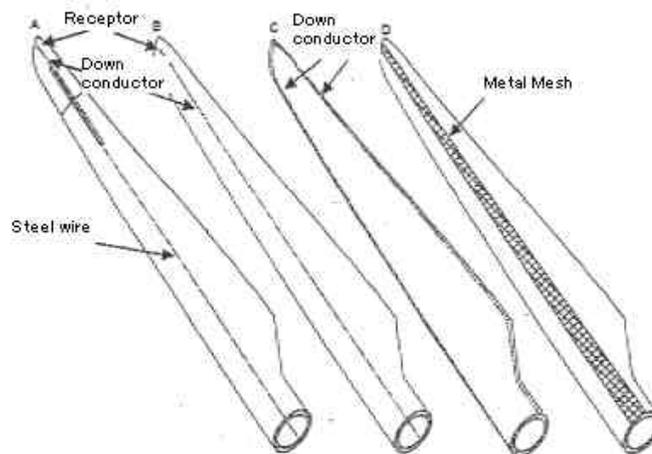


図 2-1 ブレードの落雷対策⁽⁴⁾

2 - 4 大豊町に設置されている風力発電機の対策

- ・ブレード先端に誘電チップが取り付けられている。
- ・誘電チップで受雷した雷電流をブレード内部のアルミバーでナセルまで流し、タワー 接地極を経て地中へと流す。

しかしながら、雷電流が大きいと誘電チップを垂直に突き抜けてブレードを破壊することがある。また最先端部に受雷した場合に効果が無く、ブレードが破損してしまうことがある。先端付近のエッジに従来しても誘電チップの効果は無く、ブレードは破損してしまう。既に数回落雷の被害に遭っているため誘電チップの効果は小さいと考えられる。

第3章 保護方法と落雷実験

3-1 保護方法

今回の落雷破壊対策では、金属溶射（アルミコーティング）を採用した。避雷針を設置するという案は、現在大豊町に設置されている風力発電機が大型であり、最頂部の高さが数十mある。そのため、その高さを保護できる高さの避雷針を立てた場合に、景観を損ねてしまうこと、さらに今後もし仮に風力発電機の設置台数が増加した場合などに、新たに避雷針を増設する必要があるため採用しなかった。一般的な落雷対策に使用されている他の方法は、実際に落雷の被害に遭ったケースがいくつかある。また、ブレード内部に木材が使用されていることがあり、ブレードに傷が付き内部に水分が浸入して木材に染み込んだ場合、それが導電性となって落雷を受けた場合の破損の原因になる可能性がある。そのためブレード表面で雷電流を流すことが必要だと考えた。また、航空機のレーダードームに薄い金属を貼り付けて効果があったということがある。以上のことから、アルミニウムコーティングを採用した。

3-2 実験環境

今回の落雷実験は栃木県にある塩原落雷実験場（図3-1）で行った。今回の落雷実験では、直方体の試験片を使用した。使用した試験片は、無垢のCFRP,GFRP とアルミニウムコーティングを施したCFRP,GFRP である（図3-4）。また、今回の落雷実験を行う方法は図3-2,3-3 に示す通りである。



図 3-1 塩原落雷実験場

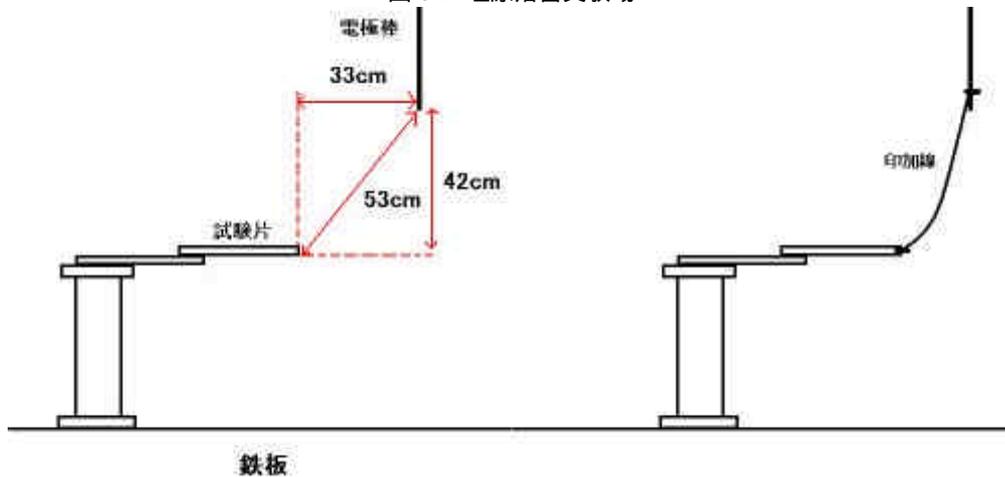


図 3-2 実験方法



図 3-3 実験方法 2



図 3-4 実験に使用する試験片

3 - 3 無垢 FRP の実験

まず始めに対策を施していない FRP の落雷実験を行った。その結果、GFRP では表面に大きな亀裂が発生していて損傷の具合が大きかった。その結果を図 3-5 に示す。また、CFRP は、試験片の角に焦げたような損傷が発生した。CFRP は絶縁性が強く表面で放電する傾向であるため損傷の具合が小さかったものの、損傷がまったくないというわけでは無かった。実験の結果を図 3-6 に示す。



図 3-5 無垢 GFRP



图 3-6 無垢 CFRP

3 - 4 アルミコーティング FRP の実験

次に、アルミコーティングを施した GFRP,CFRP の落雷実験を行った。実験の結果 GFRP では角に焦げたような跡がついた。しかしながら損傷の具合は小さいものであった。実験の結果を図 3-7 に示す。また CFRP の落雷実験の結果は GFRP と同様に角に小さな焦げたような跡がついた。こちらも損傷の具合は小さかった。実験の結果を図 3-8 に示す。



図 3-7 アルミコーティング GFRP



図 3-8 アルミコーティング CFRP 試験片

3 - 5 実験結果

落雷実験の結果から、GFRP については、アルミニウムコーティングを施している FRP と施していない FRP では損傷の具合に大きな差がついた。無垢のものは表面に大きな亀裂が走っているのに対して、アルミニウムコーティングを施したものは角が少し焦げる程度の損傷ですんでいる。また、CFRP もアルミニウムコーティングを施している FRP と施していない FRP ではアルミニウムコーティングを施している FRPの方が損傷の具合が小さい。そのことから、アルミコーティングは GFRP に対しては絶大な効果を発揮して、CFRP にも効果はあることが分かった。

第4章 FRP の強度

4-1 アルミコーティング FRP の破壊強度実験

ブレードの保護方法として、アルミニウムコーティングを採用したが、もし表面効果によってアルミコーティングを行った GFRP と CFRP の強度が落ちていた場合、アルミコーティングを施したブレードは使用できなくなってしまう。そのため GFRP,CFRP それぞれの無垢の状態とアルミコーティングをしたものの強度の比較を行う必要がある。強度実験に使用したアルミコーティング GFRP と CFRP を図 4-1 に示す。強度実験は3点曲げで行った(図 4-2,4-3)。

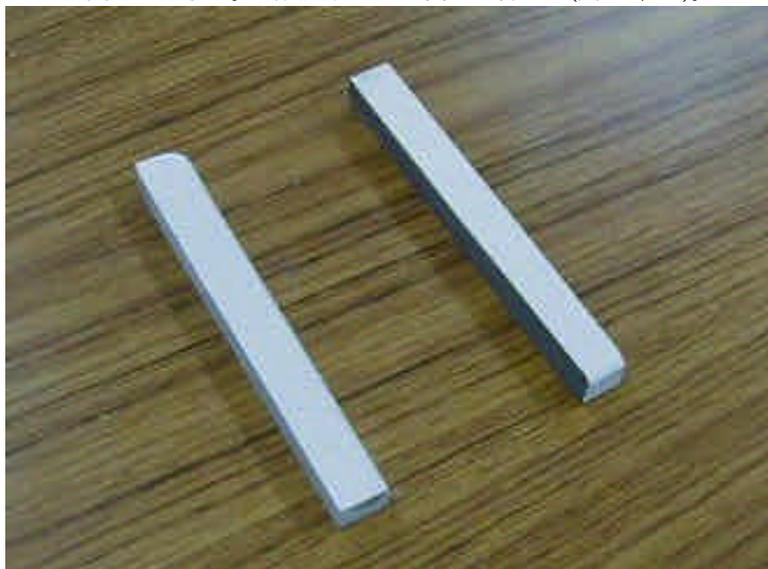


図 4-1 アルミコーティングした FRP(左 GFRP、右 CFRP)



図 4-2 CFRP の強度実験



図 4-3 GFRP の強度実験

4 - 2 実験結果

アルミコーティングした GFRP,CFRP の各実験結果を図 4-5,4-6 に示す。この結果から、無垢の状態の GFRP,CFRP とアルミニウムコーティングを施した GFRP,CFRP では強度的には、若干アルミニウムコーティングを施した方が強いもの大差がないことが分かった。そのためアルミコーティングを施した GFRP,CFRP をブレードとして使用しても問題はないと考えられる。また実験に使用された試験片を図 4-4 に示す。



図 4-4 強度試験後の FRP(左 CFRP、右 GFRP)

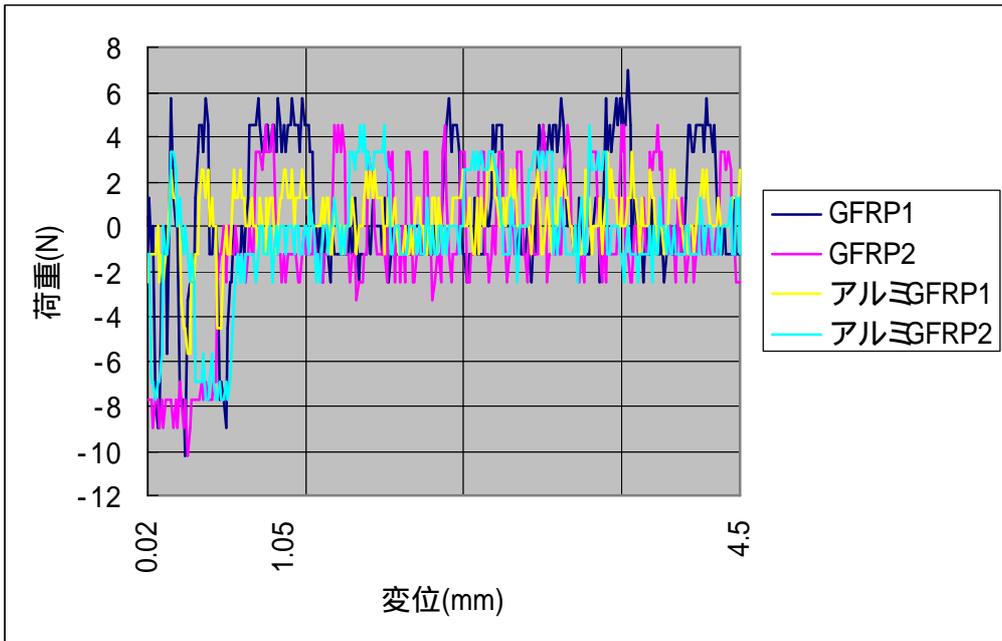


図 4-5 無垢 GFRP との比較

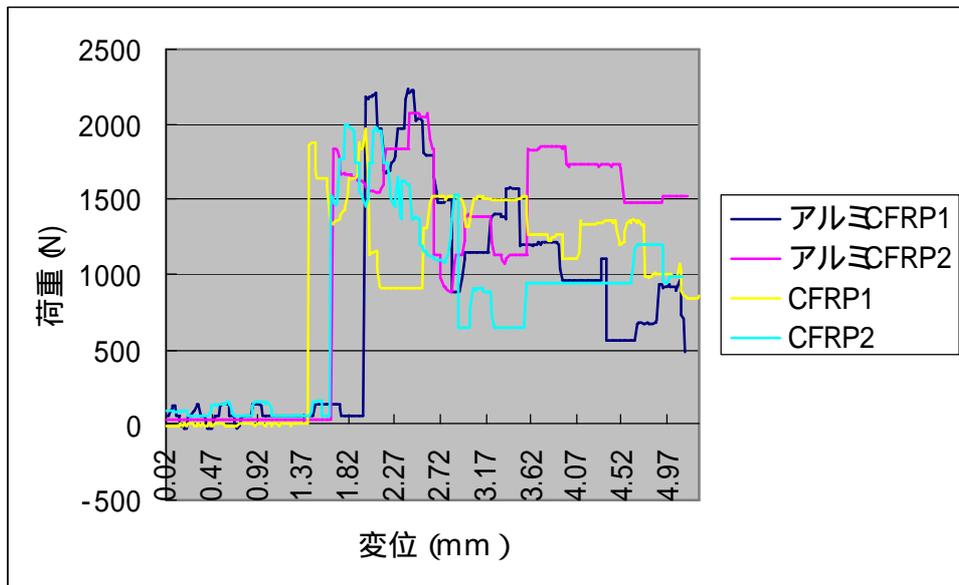


図 4-6 無垢 CFRP との比較

第 5 章 終章

5 - 1 結言

今回行った落雷実験の結果によって、CFRP,GFRP にアルミニウムコーティングを施すのは、かなりの効果があると分かった。アルミコーティングを行った場合の強度も無垢の状態とほとんど変わらないことから強度的な問題もないと考えられる。しかしながら、今回行った実験で使用した試験片は直方体であった。そのため実際に使用されている風力発電機のブレードと形状が異なる。今後の実験では、実際に使用されているブレードと同形状の試験片を作成して実験を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究において、資料を提供していただいた高知県企業局安岡高志課長補佐、落雷実験を実施していただいた中央電研塩原実験場の皆様、アルミコーティングを加工してくださった日本アルミ田辺修二課長、FRPについてご指導いただいたヤシロコンポジット橋本良明取締役、また指導教員である坂本東男教授、及び関係者各位に厚く感謝申し上げます。

学会発表

恒石卓也、坂本東男、小柳智洋
風力発電機用FRPブレードの落雷破壊対策
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に概要を記載

参考文献

- (1) NEDO-NP-9814
新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (2) 雷のはなし
武智重之
- (3) 飛行機の構造設計
日本航空技術協会
- (4) TR 61400-24
IEC

恒石卓也 (高知工科大学) 正 坂本東男 (高知工科大学)
小柳智洋 (高知工科大学)

1. 緒言

近年、環境に優しいエネルギー源として風力発電が注目を浴び、日本国内の設置台数も年々増加の傾向にある。

しかしながら、設置台数の増加、風力発電機の大型化により、落雷の被害に遭うものが増えてきている。特に、屋外に設置されていて最頂部となるブレードは、被害に遭いやすく、その被害は先端が破損するものからブレードが一枚全損するほどのものまで数多く被害に遭っている。そのためブレードに対策を施して落雷によるダメージを防ぐことが必要であると思われる。

本報告では、FRPブレードの落雷対策の第一段階としてアルミニウムコーティングを施した場合の効果を報告する。

2. 落雷対策

2-1 アルミコーティング

我々はブレードの保護手段として、金属溶射であるアルミコーティングを採用した。従来の、ブレードの落雷対策である、レセプタータイプなどでは、落雷による被害が出ている。また、ブレードの内部に木材が使用されていることがあり、その木材が水分を持った場合にその部分が導電体となってしまうブレードが破損してしまうことがある。そのためブレード表面で雷電流を流す必要があると考えた。また、以前航空機にアルミニウムコーティングを使用して効果があったことなどから、この保護方法を採用した。

2-2 アルミコーティングの強度

アルミコーティングを施した場合にFRPの強度が低下していた場合、採用することができない。そのためアルミコーティングを施したCFRP,GFRPそれぞれで強度実験を行い無垢のCFRP,GFRPとの比較を行った。そして実験の結果から、アルミコーティングをCFRP,GFRPに施しても強度的に問題は無いという結果が得られた。

3. 落雷実験

3-1 FRPブレードの落雷実験

まず始めに、落雷対策をしていない無垢のCFRP,GFRPで落雷実験を行った。結果はfig.1,fig.2に示す通りである。GFRPは表面に大きな亀裂が入っている。CFRPは角に焦げた後があり、共に落雷によって損傷したことが分かる。



Fig.1 Lightning Damage in GFRP



Fig.2 Lightning Damage in CFRP

3-2 アルミコーティングFRPブレードの落雷実験

次にアルミコーティングを行ったCFRP,GFRPで実験を行った。結果はfig.3,fig.4に示す通りである。GFRPは無垢の状態と比べて破損状況が著しく小さくなっていて、亀裂などは見られなくなっている。CFRPに関しては無垢の場合より損傷が小さくなっていて、



Fig.3 Lightning Damage in Aluminum Coated GFRP



Fig.4 Lightning Damage in Aluminum Coated CFRP

3-3 実験結果

実験の結果から、アルミコーティングを行ったCFRP,GFRPでは無垢のCFRP,GFRPと比べて、落雷の被害を軽減する効果があることが分かった。

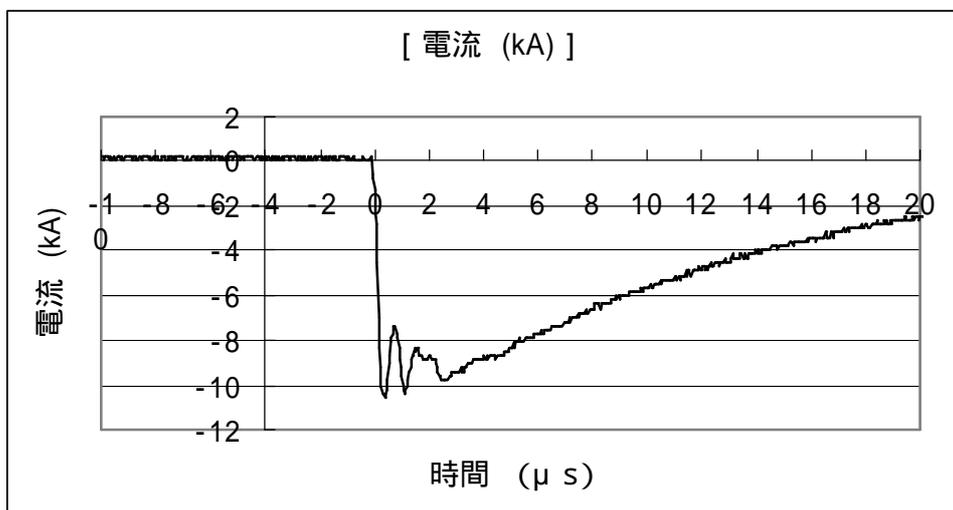
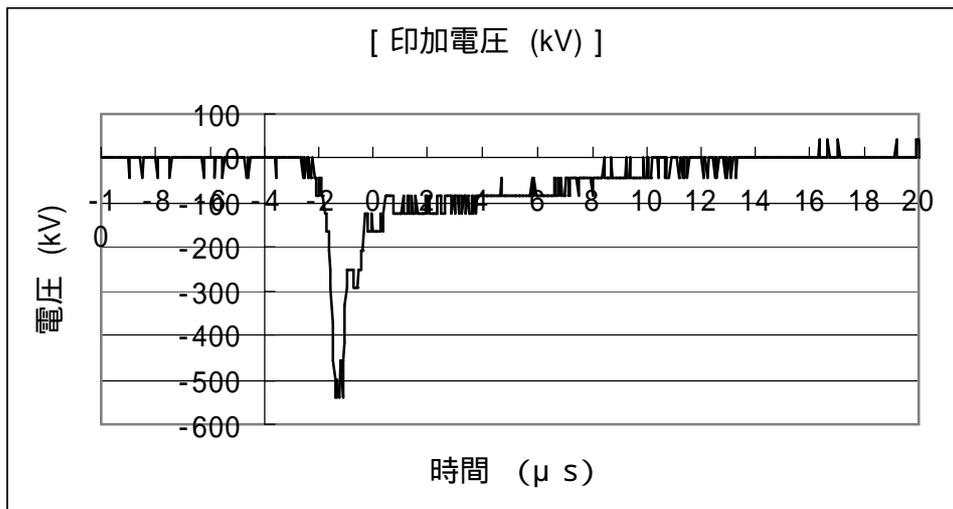
4. 結言

今後は、実際のブレードと同形状の試験片で実験を行っていく予定である。

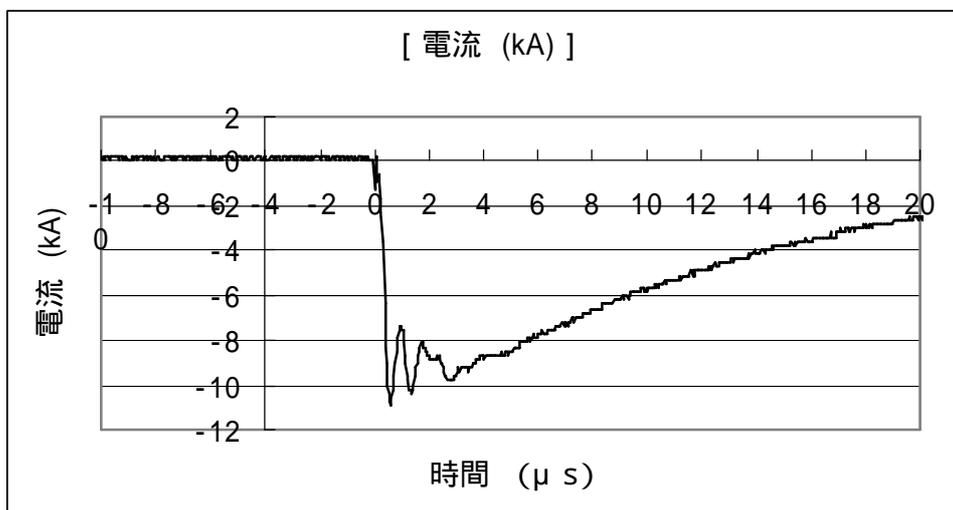
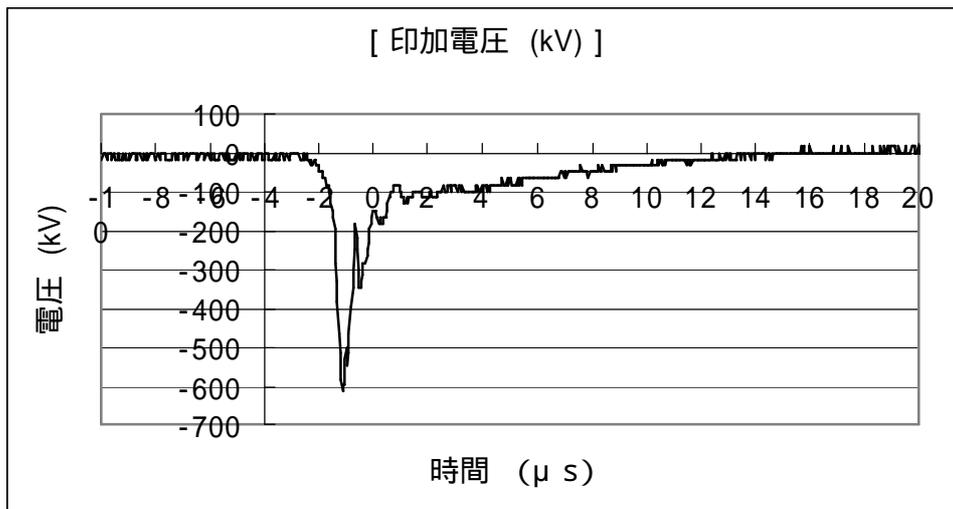
(付録 2)

表 落雷実験で使用された電圧と電流

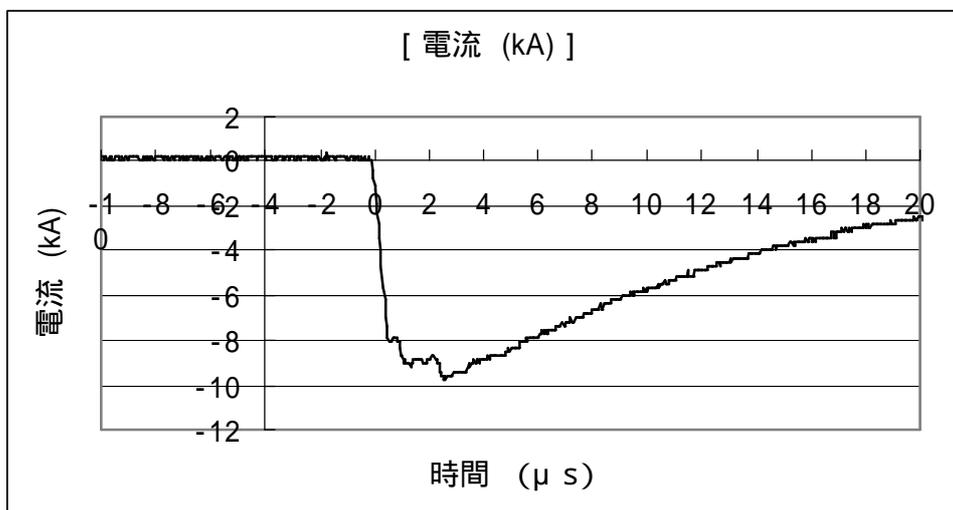
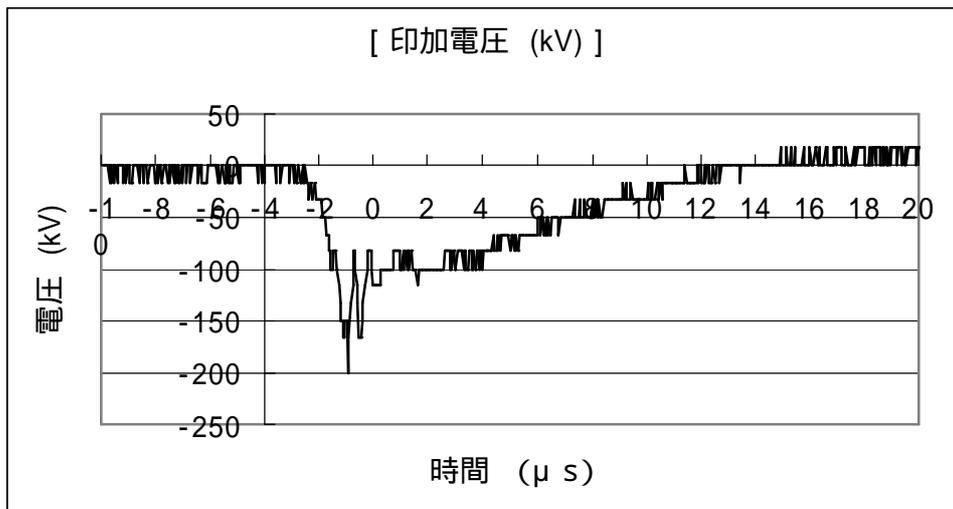
					校正		
試験条件	FO 時間(μs)	電圧(V)	電流(A)	備考	電圧(kV)	電流(kA)	
テスト1	-	-	-1.04		-	-9.81448	
	01	2.24	-2.6	-1.12	損傷なし	-539.312518	-10.56944
	02	2.32	-2.96	-1.16		-613.986559	-10.94692
	-3 は ,印加線を材料に直接接続				0	0	
	03	2.4	-0.96	-1.04	-199.130776	-9.81448	
					0	0	
	01	2.48	-2.8	-1.14	損傷なし	-580.798097	-10.75818
	02	2.36	-2.88	-1.14		-597.392328	-10.75818
	03	2.44	-3.04	-1.16		-630.580791	-10.94692
	-3 は ,印加線を材料に直接接続				0	0	
	04	1.2	-0.72	-1.04	先端に少し損傷あり	-149.348082	-9.81448
					0	0	
	01	2.4	-3.04	-1.16	損傷なし	-630.580791	-10.94692
	02	2.44	-2.56	-1.12		-531.015403	-10.56944
	03	2.4	-3.36	-1.18	少し焦げた	-696.957716	-11.13566
	-4 は ,印加線を材料に直接接続				0	0	
	04	1.56	-0.72	-1.02		-149.348082	-9.62574
					0	0	
	01	2.48	-2.88	-1.16	角にすずがあり	-597.392328	-10.94692
	02	2.52	-3.28	-1.16	角に黒い物が増加	-680.363485	-10.94692
	03	2.48	-3.04	-1.16	黒い物が 1mm 程度に広がった	-630.580791	-10.94692
	-4 は ,印加線を材料に直接接続				0	0	
	04	0.96	-0.64	-1.04		-132.753851	-9.81448
	GFRP						
	CFRP						
	アルミGFRP						
	アルミCFRP						



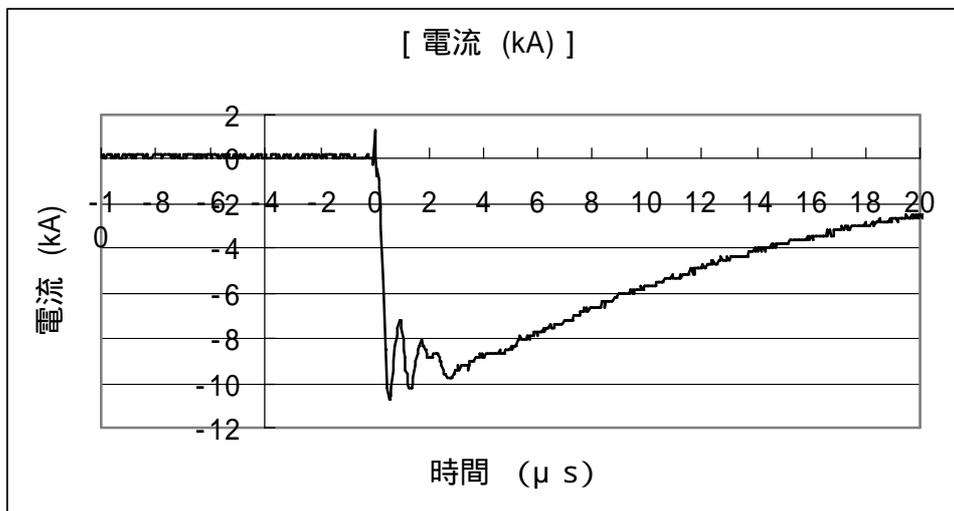
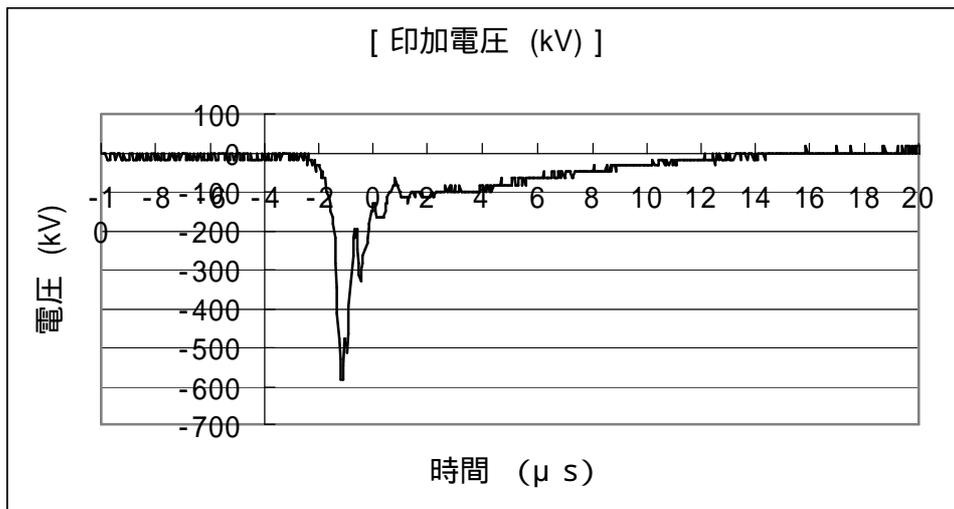
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 1



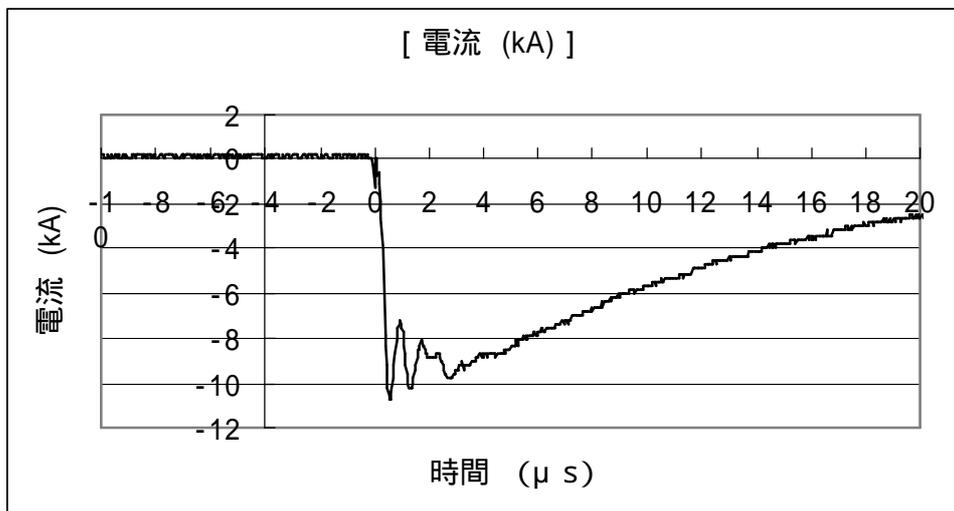
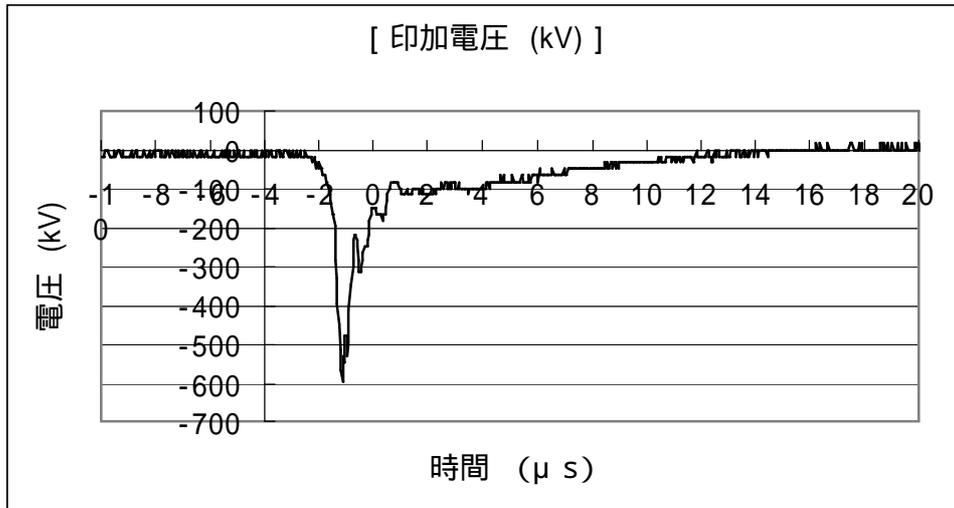
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 2



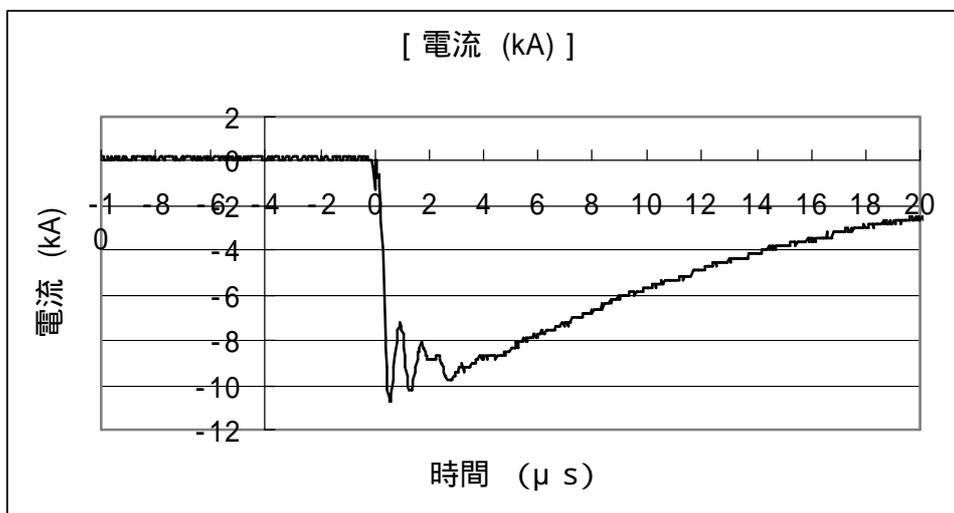
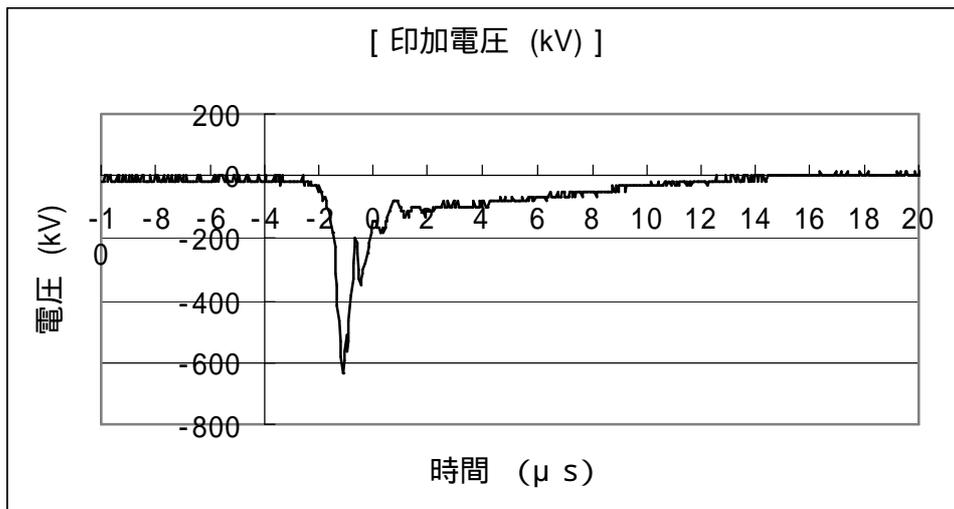
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 3



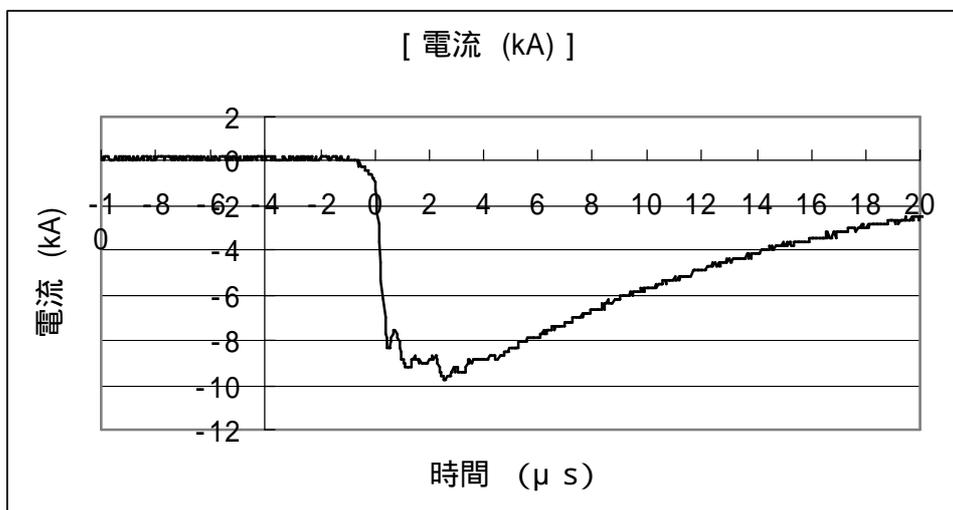
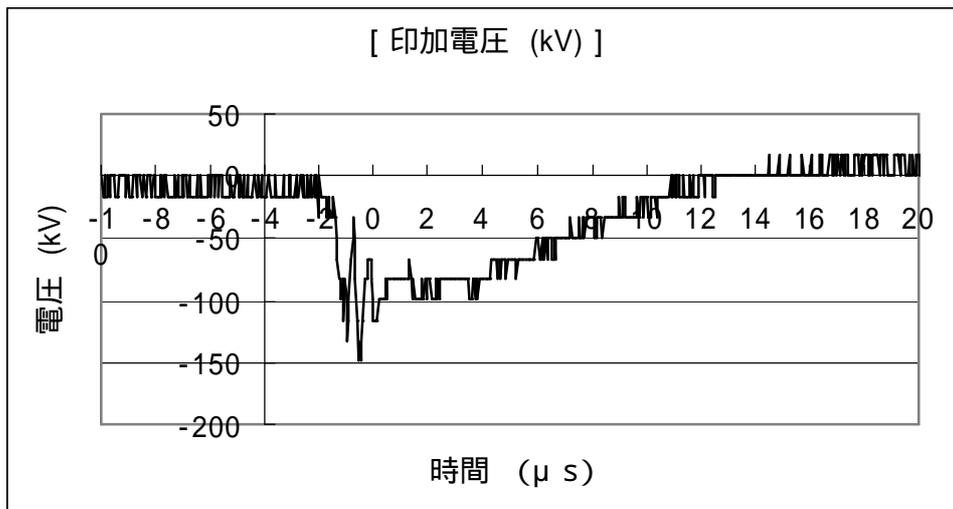
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 1



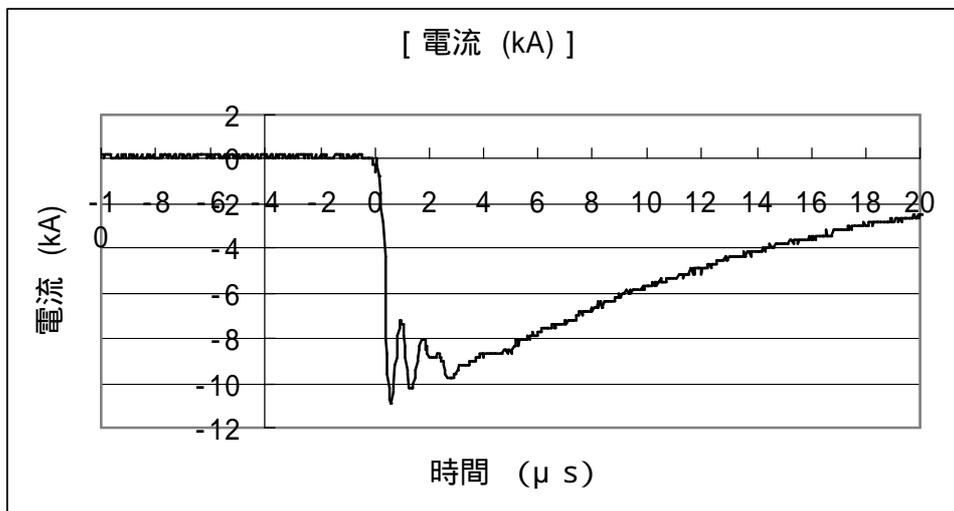
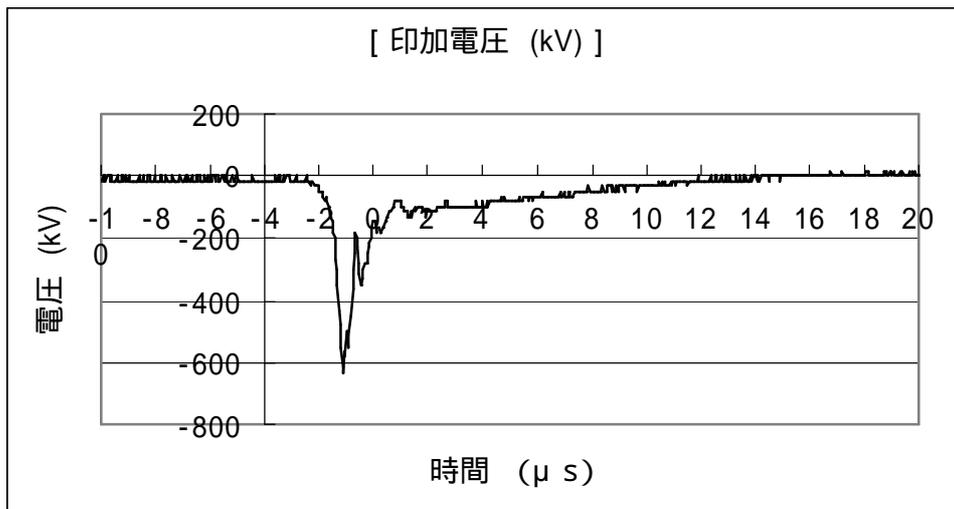
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 2



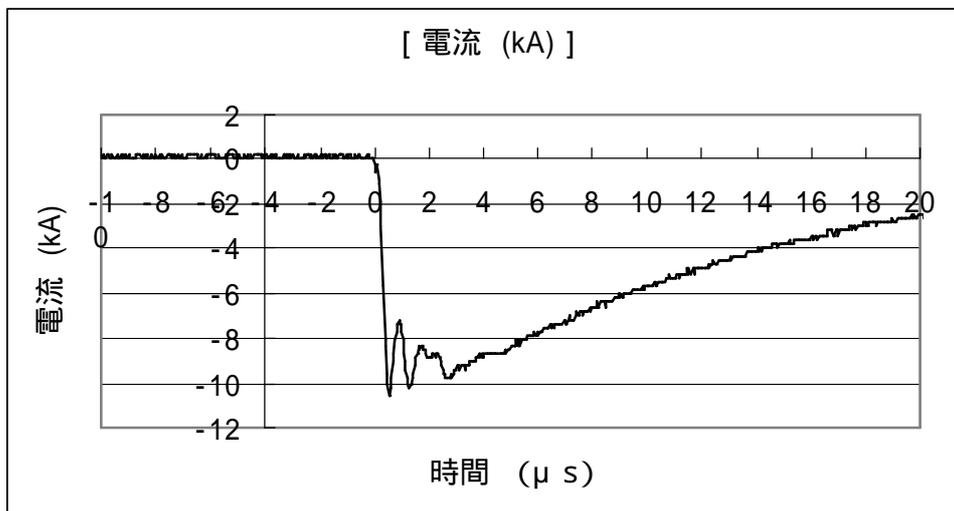
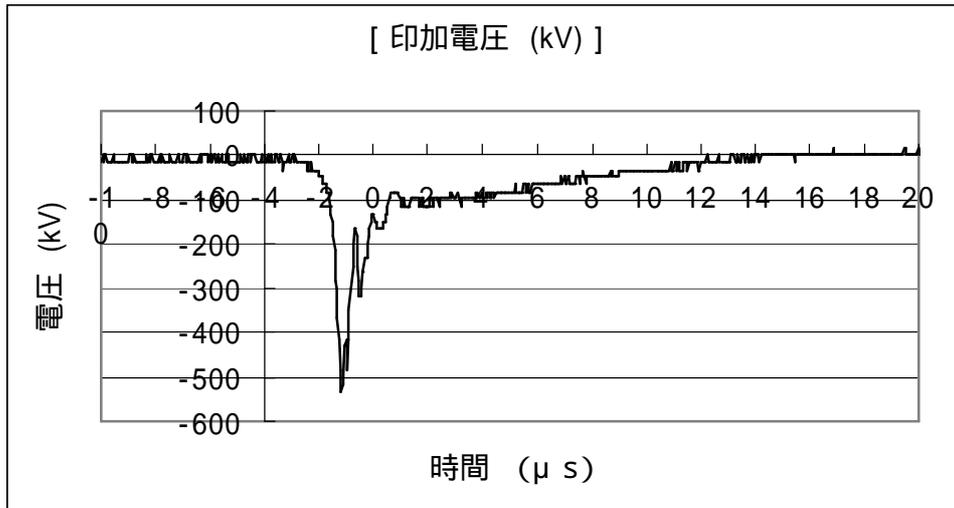
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 3



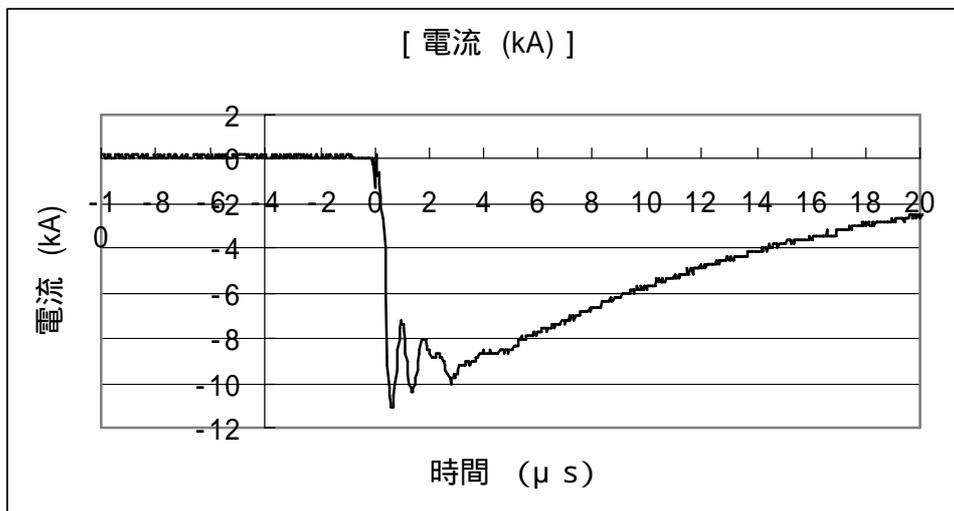
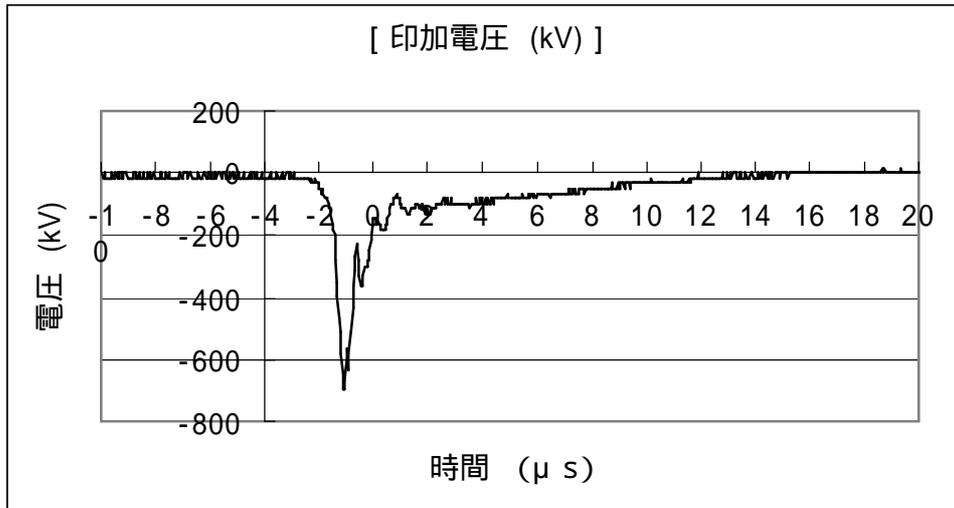
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 4



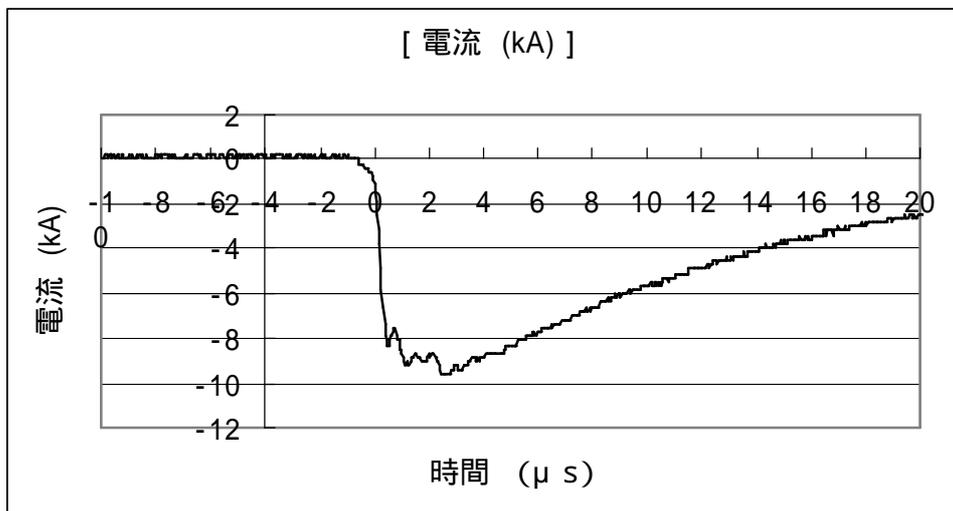
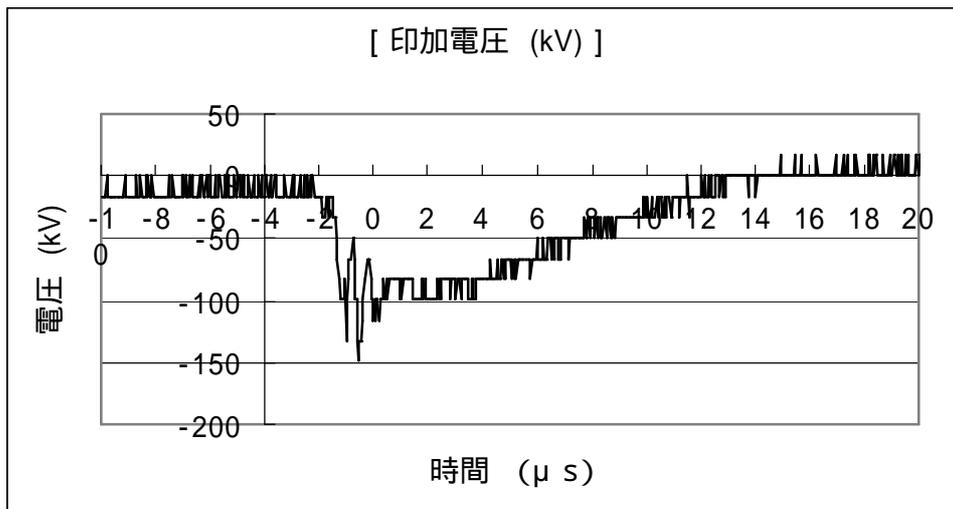
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 1



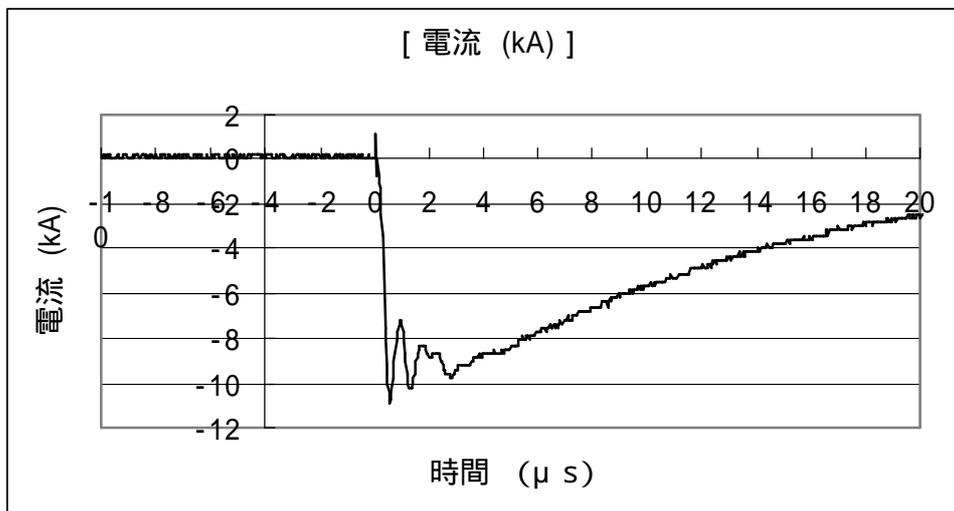
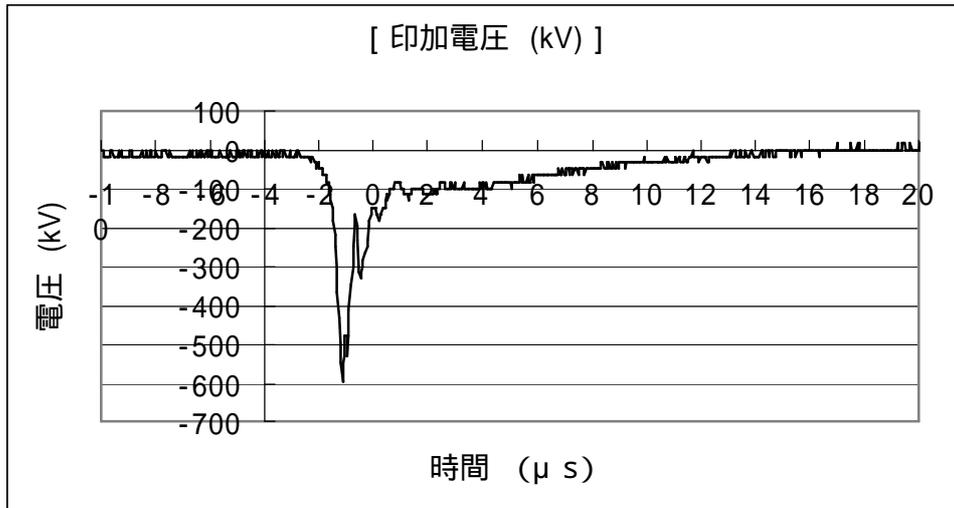
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 2



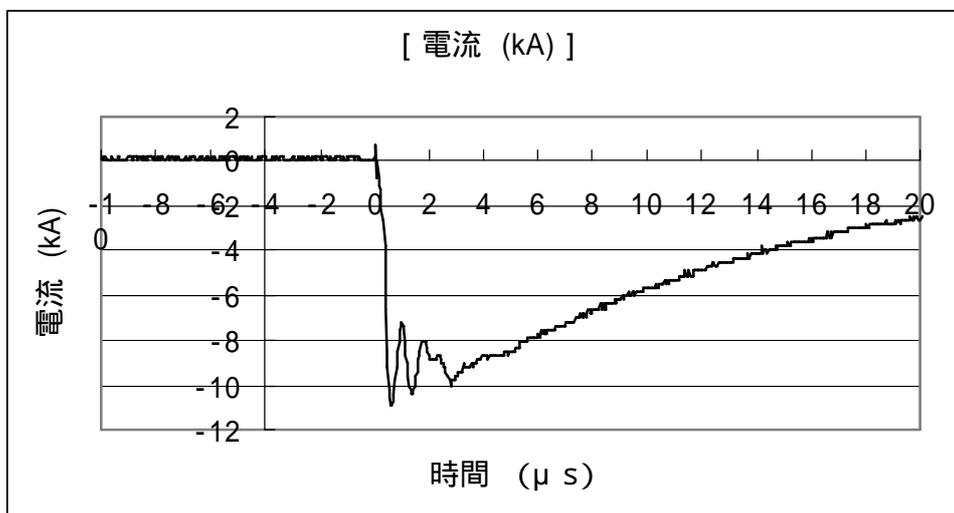
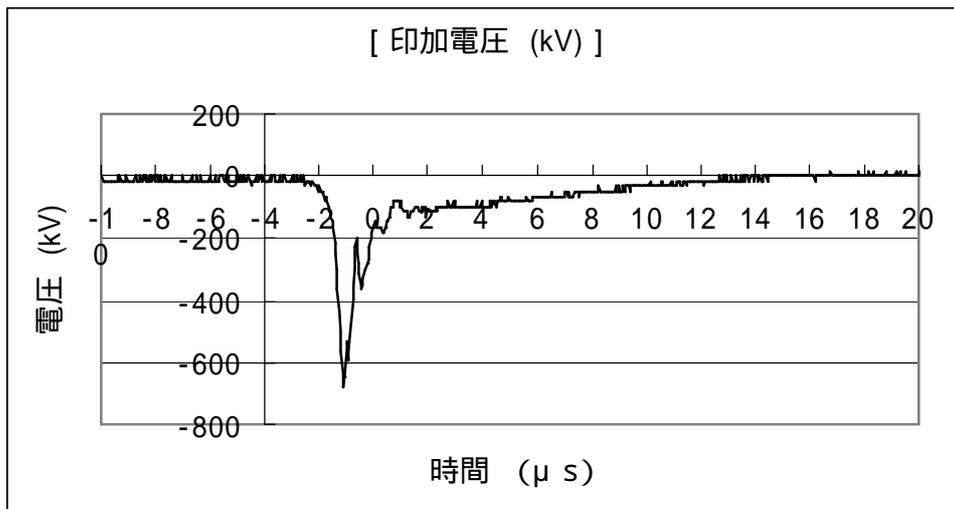
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 3



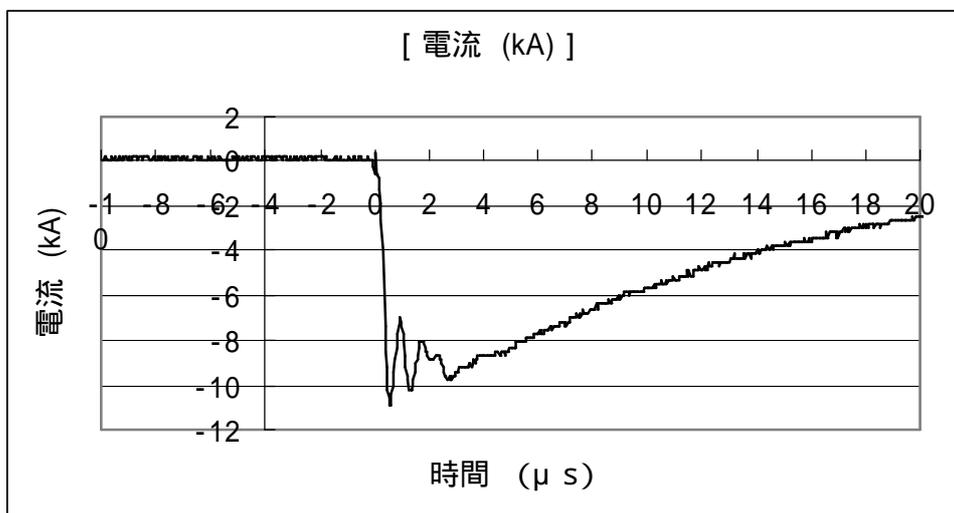
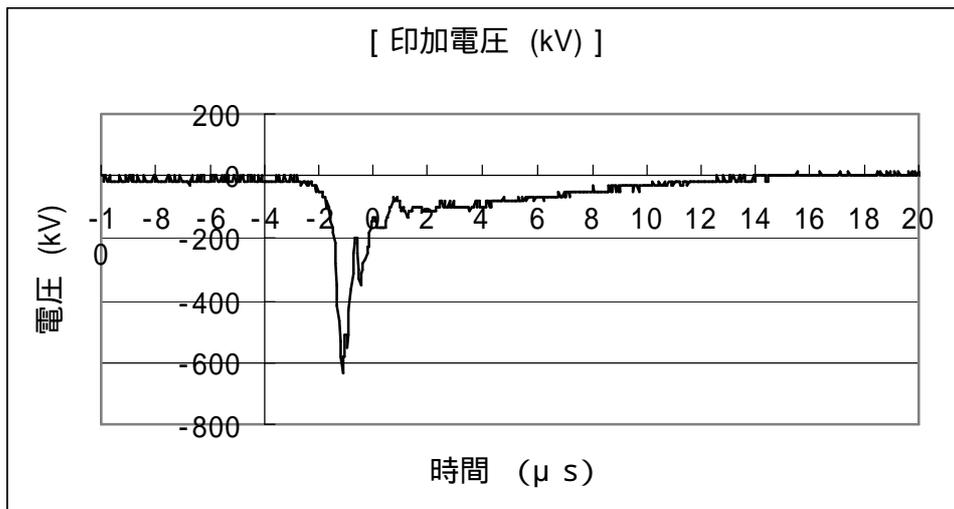
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 4



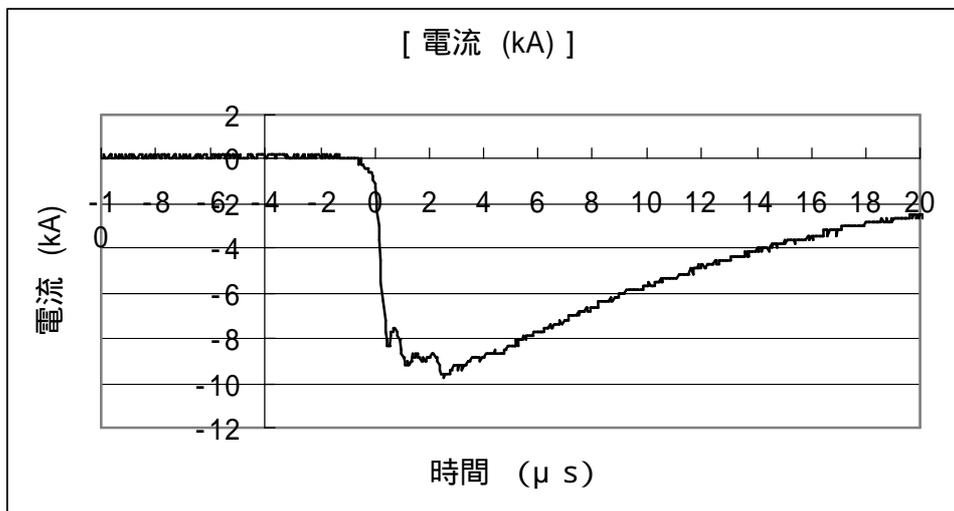
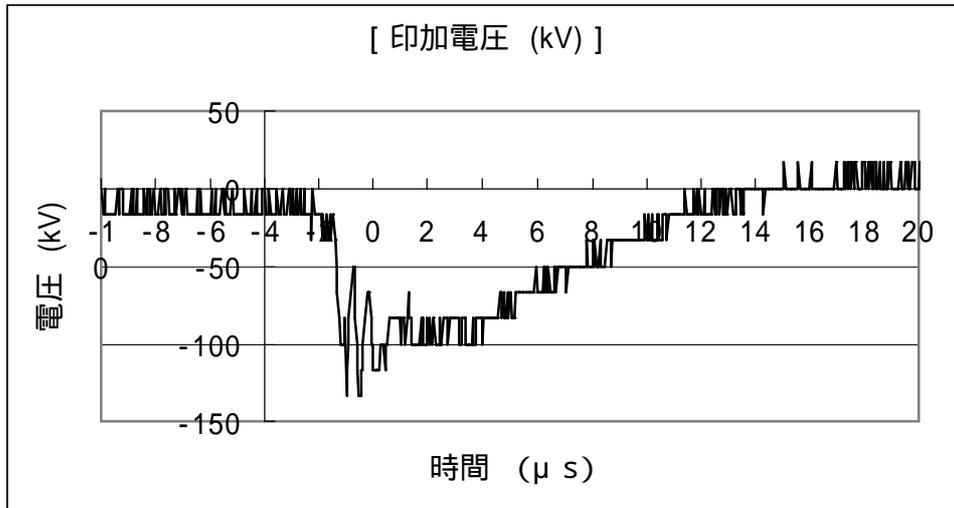
無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 1



無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 2



無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 3



無垢の GFRP の落雷実験に使用された人工雷の印加電圧 - 4