

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820301

研究課題名(和文)CFRPへの落雷時に発生する撃力計測および損傷評価

研究課題名(英文)Evaluation of damage and impact force on CFRP from lightning strike

研究代表者

明松 圭昭 (Akematsu, Yoshiaki)

筑波技術大学・産業技術学部・准教授

研究者番号：20396766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：CFRPは高強度、高剛性など優れた特性を有する材料であるので様々な構造物への適用が進んでいる。しかし、CFRPは衝撃を受けると、層間はく離など内部損傷をおこし強度を大きく低下させるため衝撃対策が重要な材料でもある。衝撃が生じる要因にはいくつかあるが、運用中に受ける衝撃のなかに落雷がある。本研究では光ファイバセンサを用いた落雷に伴い生じる衝撃力計測の可能性を調査した。その結果、落雷損傷はCFRP表面の繊維方向に進展することがわかった。さらに光ファイバセンサを用いた計測によりCFRP落雷損傷計測の可能性が見いだせた。

研究成果の概要(英文)：Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is widely used for many structures because of its high strength and rigidity characteristics. However, impact damage such as in-flight lightning strike decreases the strength of the material. In the case of metallic materials, there is only a low possibility of serious damage resulting from lightning strike, but impact damage accumulation may occur in CFRP, and damage minimization measures are important. We have investigated possibility to measure the impact force during lightning by using optical fiber sensor. As the results, a gap voltage of several hundred volts results in lightning damage, and a crater forms along the current flow direction. We found that the lightning trace depended on the direction of the carbon fibers and not on the direction of current flow. The optical fiber sensor was able to measure the pressure from the lightning strike when the applied voltage was several hundred volts.

研究分野：非破壊検査

キーワード：複合材料・物性

### 1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は単一材料にはない優れた特徴(比強度、比剛性、耐摩耗性、電気・熱の伝導性に優れているなど)を有するため様々な構造物への適用が進んでいる。特に近年、民間航空機主要構造へ適用され人々の生活に身近な材料になりつつある。しかし、CFRPは衝撃を受けると、層間はく離など内部損傷をおこし強度を大きく低下させるため衝撃対策が重要な材料でもある。衝撃が生じる要因にはいくつかあるが、運用中に受ける衝撃のなかに落雷がある。機体に落雷した際、従来の金属材料の場合には重大な損傷が発生する可能性は低かったが、CFRPの場合では衝撃および熱による損傷として材料に蓄積される可能性がある。落雷により発生した損傷の評価に関しては、雷撃損傷挙動、雷撃後の圧縮強度特性などが調査されている。また雷撃損傷を防ぐ航空機用耐雷技術に関する研究も行われている。落雷時に発生する損傷は衝撃および熱により生じると考えられるため、衝撃および熱対策は重要である。

しかし落雷中にCFRPに加わる衝撃力を直接計測した報告は見当たらない。これは雷が短時間の現象であり、高温かつ電磁波が発生することが大きな要因である。通常、短時間の撃力を計測するには圧電素子が用いられるが、300度以上の高温または電磁波が発生する環境では使用が困難である。そこで本研究では、約1000度までの高温でも撃力(弾性波)が計測可能で、電磁ノイズの影響をほとんど受けない光ファイバセンサを用いれば落雷点近傍で撃力計測が可能であると考えた。

### 2. 研究の目的

我々の研究グループでは、CFRP複合材料が落雷衝撃を受けたときに生じる損傷および変形挙動を1つの光ファイバセンサで同時に計測し、損傷画像と比較することでCFRP損傷挙動を調査している。また単一金属への落雷時に発生する弾性波を光ファイバ振動センサで計測し、落雷点近傍での変位挙動を広帯域で検知できることも明らかにした。さらに有限要素法を用いた数値解析信号と光ファイバ振動センサによって計測される信号を比較することにより、放電圧力発生メカニズムの解明、特に放電時に発生する衝撃力の推定を行っている。これらの成果をふまえ、本研究では、雷損傷に影響をおよぼすと考えられる落雷電圧、電流、持続時間、雰囲気等が損傷挙動におよぼす影響および数値解析を組合せた雷損傷発生メカニズムの解明を目指す。

### 3. 研究の方法

図1に実験装置概略を示す。電源には直流電源(菊水社製PWR800H)を用い、供給電圧を200Vから500Vの範囲で変化させた。

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の雷損傷におよぼす落雷条件の影響を調査するために雷電圧、電流、持続時間、雰囲気等を制御できるコンデンサ放電回路を適用した。陽極は銅板(30×20×1)を用いCFRP試験片に貼り付けた。陰極は銅棒(直径1mm)を用い、CFRP試験片に近づけることで落雷を発生させた。銅棒から銅板までの最短距離を10mmから50mmまで変化させた。落雷時に発生する銅棒と銅板間の電圧および電流は電圧プローブ(TEXAS社製)およびカレントトランス(ピアソン社製Model-110)を用いそれぞれ計測した。計測された信号はA/D変換(サンプリングレート10M、分解能12bit)しPCに取り込み解析した。試験片には一方向CFRP(100×100×1.4)を用いた。落雷損傷の観察はデジタルマイクロスコープ(KEYENCE CO. Ltd、VHX-1000)で行った。

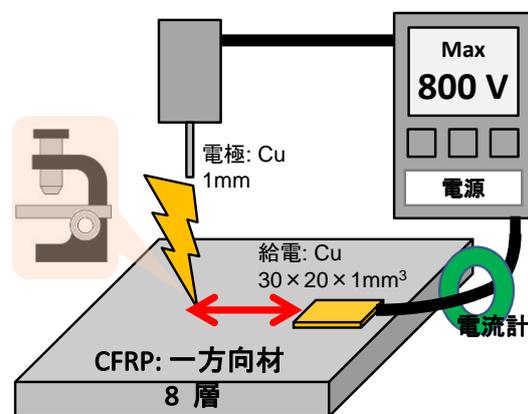


図1 実験装置概略

### 4. 研究成果

#### 4.1 コンデンサ放電回路特性の評価

作製したコンデンサ回路の特性を評価するために、コンデンサ容量1 $\mu$ F、試験片が亜鉛板(200×200×1)、印加電圧300Vの条件で落雷実験を行った。落雷点から給電点までの距離が10mmの場合に計測された落雷電流および電圧挙動を示す(図2)。

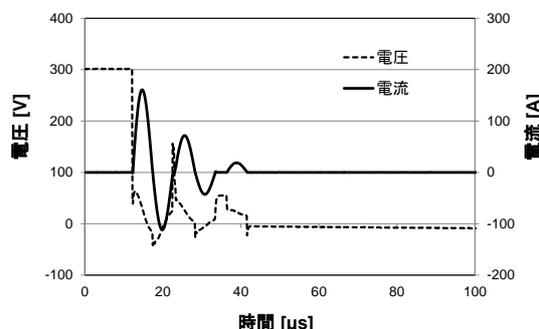


図2 落雷電流および電圧挙動 (落雷点から給電点までの距離が10mm)

図2より12 $\mu$ s付近で電圧は300Vから100V付近まで急激に減少している。一方、電流は約2 $\mu$ sの間に150A付近まで増加したあと、減衰振動し0に収束した。電流値が最

大を迎え 0 になる第一半波（持続時間）は約  $3\mu\text{s}$  であった。コンデンサ放電の電流は絶縁回復がおこると数回の振動で減衰振動が収まることから報告されており、計測された電圧および電流挙動は報告とよく一致している。また電流の第一半波の間で実際の落雷損傷がおこり、その際の電圧値は数 10V 程度を示すことが多いとの報告ともよく一致している。持続時間におよぼす給電点から落雷点までの距離の影響を調査するために落雷点から給電点までの距離が 50mm の場合に計測された落雷電流および電圧挙動を示す（図 3）。図 3 より  $12\mu\text{s}$  付近で電圧は 300V から 100V 付近まで急激に減少している。電流は約  $2\mu\text{s}$  の間に 150A 付近まで増加したあと、減衰振動し 0 に収束した。電流値が最大を迎え 0 になる第一半波（持続時間）は約  $3\mu\text{s}$  であり、亜鉛板への落雷の場合には、落雷点から給電点までの距離が 10mm から 50mm に増加した際、落雷電圧および電流挙動に変化はほとんど観察されなかった。

一般にコンデンサ放電の持続時間はインダクタンスとコンデンサ容量の積に比例することがわかっており、亜鉛の場合、持続時間は給電点から落雷点までの距離の影響がなく、実験結果とよく一致している。

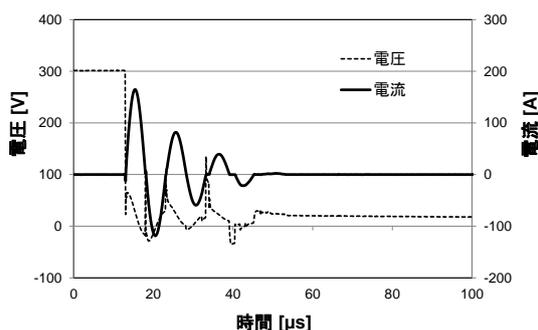
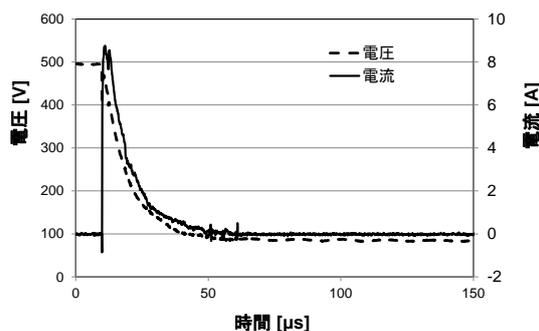


図 3 落雷電流および電圧挙動  
(落雷点から給電点までの距離が 50mm)

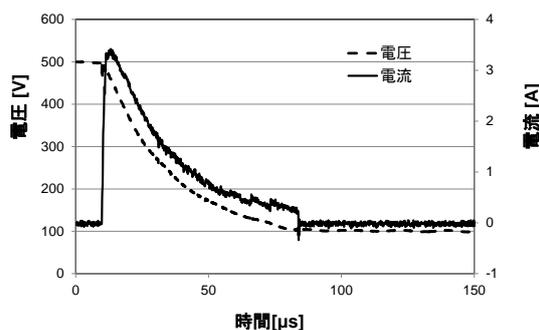
#### 4. 2 電極間距離の影響

作製したコンデンサ回路を用い CFRP へ落雷実験を行った。落雷点から給電点までの距離が 10mm および 50mm の場合に計測された落雷電流を示す（図 4）。図 4 より落雷点から給電点までの距離が 10mm の場合には、 $10\mu\text{s}$  付近で電圧は 500V から減少し始め、 $40\mu\text{s}$  付近で約 100V に収束している。電流は約  $2\mu\text{s}$  の間に 8A 付近まで増加したあと、 $40\mu\text{s}$  付近で 0 に収束している。コンデンサ放電回路特有の減衰振動は観察されなかった。落雷点から給電点までの距離が 50mm の場合には、 $10\mu\text{s}$  付近で電圧は 500V から減少し始め、 $80\mu\text{s}$  付近で約 100V に収束している。電流は約  $2\mu\text{s}$  の間に 3A 付近まで増加したあと、 $80\mu\text{s}$  付近で 0 に収束している。落雷点から給電点までの距離が 10mm の場合と同様にコンデンサ放電回路特有の減衰振動は観察されなかった。落雷が発生し電流値が最大になるまでの時間は亜鉛の場合とほ

とんど変化しなかった。しかし落雷点から給電点までの距離の増加に伴い、0 に収束するまでの時間は増加した。持続時間が増加したのはインダクタンスもしくはコンデンサ容量が落雷中に変化したと考えられた。0 に収束する電流挙動が充放電回路で計測される電流挙動に近いこと、CFRP はコンデンサのような特性を持つことが推測された。また電圧が約 100V に収束したことおよび給電点までの距離の増加に伴い最大電流値が減少したことより、電極間の抵抗が亜鉛に比べて高いことが推測された。



(a) 落雷点から給電点までの距離 10mm



(b) 落雷点から給電点までの距離 50mm

図 4 落雷電流

#### 4. 3 落雷痕におよぼす繊維配向の影響

落雷点から給電点までの距離が 10mm、印加電圧 500V、繊維方向と平行に電流を流した時に観察される落雷痕を示す（図 5）。図 5 より電流が特定の領域の炭素繊維を流れ繊維方向に損傷が広がっていることがわかる。損傷部で樹脂が溶融し炭素繊維が試験片表面に現れている。落雷電流により熱損傷が生じたと考えられる。本実験では試験片裏面には落雷痕を観察できなかった。落雷のエネルギーは試験片表面付近で消費されていることがわかった。また落雷点と推測される中心付近では炭素繊維の束が破断し試験片表面に突出していることが観察された。落雷電流による熱だけではなく、衝撃力も同時に発生していることが推測された。落雷点から給電点までの距離が 10mm、印加電圧 500V、繊維方向と垂直に電流を流した時に計測された電流および電圧挙動を示す（図 6）。図 6 より  $10\mu\text{s}$  付近で電圧は 500V から減少し始め、 $140\mu\text{s}$  付近で約 100V に収束している。電流は約  $5\mu\text{s}$  の間に 12A 付近まで増加した

あと、140 $\mu$ s 付近で 0 に収束している。コンデンサ放電回路特有の減衰振動は繊維の配向に関係なく観察されなかった。

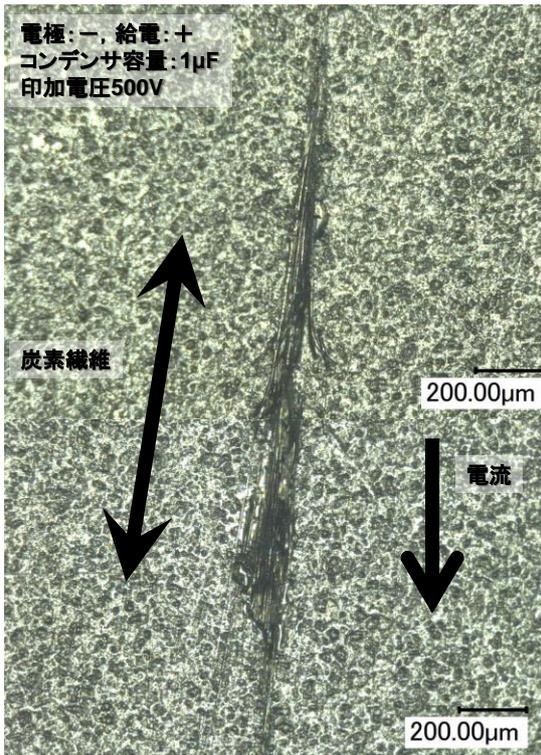


図5 落雷痕（炭素繊維と電流が垂直方向）

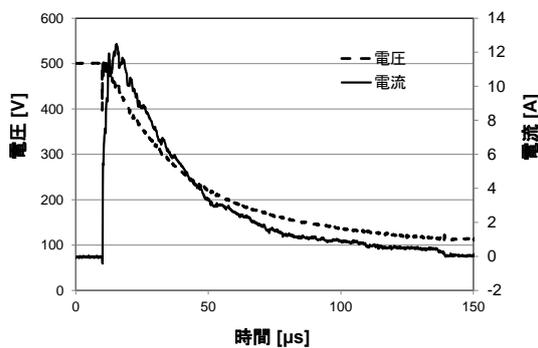


図6 落雷電流および電圧挙動  
（炭素繊維と電流が垂直方向）

電流が繊維の配向に対して平行な場合と比較して、電流の最大値に大きな差は計測されなかったが、立ち上がり時間が約2倍増加し、収束までの時間も増加した。これは繊維配向に対する電流の向きが垂直になることで、充放電回路としてコンデンサとしての特性が現れたためであると推測された。

落雷点から給電点までの距離が 10mm、印加電圧 500V、繊維方向と垂直に電流を流した時に観察される落雷痕を示す（図7）。図7より電流の向きに関係なく、繊維方向に損傷が広がっていることがわかる。損傷部で樹脂が溶融し炭素繊維が試験片表面に現れている。これは落雷電流は落雷が発生する絶縁破壊時のみ落雷点および給電点間で通電し、その後は繊維の配向に関係なく電子が导体である炭素繊維を流れ発熱し樹脂を溶融除

去していくことが推測された。本実験では試験片裏面には落雷痕を観察できなかった。電極と給電点間で電流が流れることができる回路になった後、落雷のエネルギーは試験片表面付近で消費されていることがわかった。また落雷点と推測される中心付近では炭素繊維の束が破断し試験片表面に突出していることが観察された。電流の向きが繊維と平行な場合と同様に落雷電流による熱だけではなく、衝撃力も同時に発生していることが推測された。

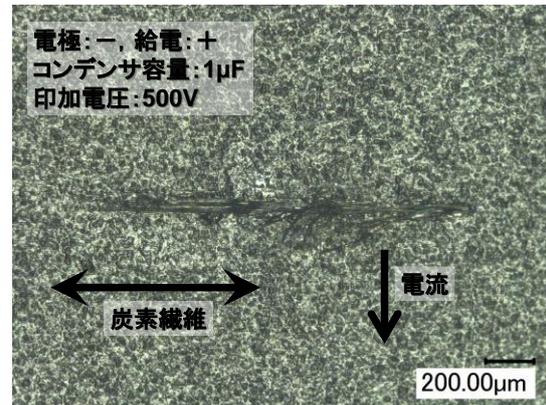


図7 落雷痕（炭素繊維と電流が平行方向）

#### 4. 4 落雷衝撃計測の可能性

落雷により生じる撃力を計測するために光ファイバセンサを用いた AE 計測の可能性を調査した。発生する AE 波を光ファイバセンサで計測し、電流波形と同時に示す（図8）。図8より電流は約 5 $\mu$ s の間に 12A 付近まで増加したあと、100 $\mu$ s 付近で 0 に収束した。

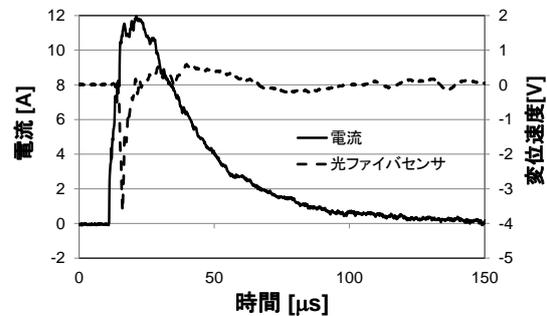


図8 落雷電流および AE 波形

最大 12A 付近の電流が 80 $\mu$ s 程度流れていることがわかる。落雷点から給電点までの距離が約 2mm であるにも関わらず電流の立ち上がり時間は、繊維方向と平行に電流を流した時に計測される電流挙動と比較すると約2倍増加し、収束までの時間も増加した。これは繊維方向と垂直に電流を流した場合と同様に、繊維配向に対する電流の向きが垂直になることで、充放電回路としてコンデンサとしての特性が現れたためであると推測された。光ファイバセンサ信号は落雷から約 5 $\mu$ s 後、-40mm/s 程度の信号が計測された。材料を伝播する A0 モードの弾性波の速度は約 1000m/s となった。他の研究で報告されてい

る速度と概ね一致していることより、光ファイバセンサにより落雷撃力計測の可能性が見いだせた。発生した撃力の周波数特性を調査するために光ファイバセンサ信号および光ファイバセンサ信号に FFT 解析した結果を図9に示す。FFT 解析結果より数 100kHz の広帯域の周波数成分が計測されることが分かった。

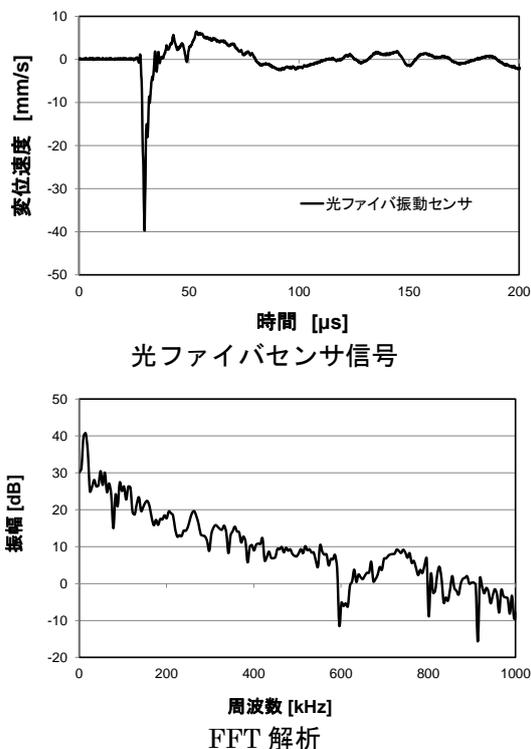


図9 光ファイバセンサ信号および FFT 解析結果

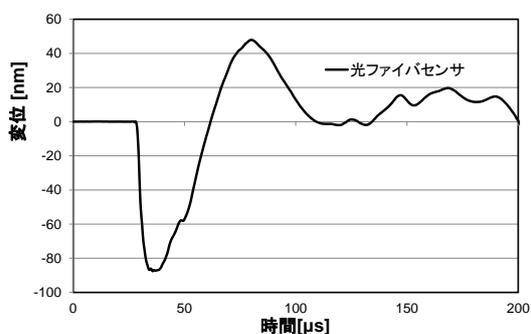


図10 変位信号

光ファイバセンサ出力は変位速度であるので積分することで変位信号に変換した結果を図10に示す。図10より変位信号は落雷直後に $-90\text{nm}$ 程度の変位が計測されている。落雷後、 $50\mu\text{s}$ 付近で $50\text{nm}$ 程度の変位が計測され、その後、0に収束していることがわかる。つまり落雷後、光ファイバセンサは $100\mu\text{s}$ 程度で圧縮・伸張していることがわかった。0Vに収束していることより光ファイバセンサは元の位置に戻っていることが推測された。よって、光ファイバセンサを用いれば数100V規模の落雷を落雷点近傍で計

測することが可能であることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Yoshiaki Akematsu, Kazuro Kageyama and Hideaki Murayama, Basic characteristics of electrical discharge on CFRP by using thermal camera, Procedia CIRP, ELSEVIER, 査読有, Vol. 42, 2016, pp. 197-200

② 明松圭昭, 影山和郎, 村山英晶, 光ファイバセンサによる CFRP 複合材料の落雷衝撃計測の可能性調査, 材料システム, 査読有, Vol. 34, 2016, pp. 51-56

[学会発表] (計3件)

① 明松圭昭, 影山和郎, 村山英晶, CFRP 複合材料への落雷基本特性, 第20回アコースティック・エミッション総合コンファレンス, 2015, pp. 129-132

② 明松圭昭, 影山和郎, 村山英晶, 赤外線サーモグラフィカメラを用いた CFRP の放電加工特性評価, 電気加工学会全国大会 (2015), 2015, pp. 59-60

③ 明松圭昭, 小向翼, 谷貴幸, AE法を用いたガラスの遅れ破壊検知, 非破壊検査総合シンポジウム平成27年度秋季講演大会, 2015, pp. 105-106

[その他]

ホームページ等

[http://www.tsukuba-tech.ac.jp/department/it/it\\_staffs.html#AKEMATSU\\_YOSHIAKI](http://www.tsukuba-tech.ac.jp/department/it/it_staffs.html#AKEMATSU_YOSHIAKI)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

明松 圭昭 (AKEMATSU Yoshiaki)

筑波技術大学・産業技術学部産業情報学科・准教授

研究者番号：20396766