

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04488

研究課題名(和文) CFRP表面状態による着雷現象を反映した熱・電気連成解析に基づく被雷損傷モデル

研究課題名(英文) Lightning damage model for thermal-electrical analysis about effect of surface condition of CFRP on lightning attachment phenomenon

研究代表者

岡田 孝雄 (Okada, Takao)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員

研究者番号：50392858

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)：銅メッシュと塗装の有無による4種類の表面状態のCFRPを製作して、3種類の模擬雷撃試験を実施した。銅メッシュありの場合、初めの高電流波形により銅メッシュの溶損を生じた後、後続の低電流波形により着雷位置が移動し溶損範囲が拡大した。CFRPの損傷はなかった。銅メッシュなしの場合、初めの高電流波形によりCFRPに損傷を生じたが、後続の低電流波形による着雷位置は高電流波形によるCFRPの損傷範囲内であり、低電流波形による顕著なCFRPの損傷は見られなかった。銅メッシュありの場合、熱・電気連成解析を用いた損傷予測解析を行った結果、雷電流は銅メッシュに流れCFRPに損傷を生じない結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銅メッシュがない場合、試験初めの高電流波形が被雷損傷の主要因であり、後続の低電流波形は着雷位置及び雷電流の作用積分値からCFRPの被雷損傷への影響が低いことを明らかにした。これはCFRPの被雷損傷メカニズム解明に重要であり、学術的意義が高い。

銅メッシュありの場合、後続の低電流波形による着雷位置が高電流波形による銅メッシュの溶損範囲よりも広範囲であることを明らかにした。これは、銅メッシュの補修範囲の予測が困難であることを示しており、社会的意義がある。また、銅メッシュ及び塗装がある場合、低電流波形時における銅メッシュの溶損範囲の拡大は金属材料とは異なる挙動であり、学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：CFRP with four surface conditions, with and without Cu mesh and surface paint, were prepared and three types of simulated lightning tests were carried out. In the case with Cu mesh, the initial high current waveform caused the Cu mesh to melt, and then the subsequent low current waveform caused the shift of lightning attachment position and the melting range of Cu mesh to expand. There was no damage to the CFRP. In the case without Cu mesh, the initial waveform caused lightning strike damage to the CFRP due to Joule heat and subsequent thermal decomposition, but attachment positions due to the subsequent waveform were within the range of CFRP damage caused by the high current waveform, and no significant damage to the CFRP was observed by the subsequent waveform.

In the case with Cu mesh, a damage prediction analysis was carried out using thermal-electrical coupled analysis and the results showed that the lightning current flowed through the Cu mesh, causing no damage to the CFRP.

研究分野：航空

キーワード：lightning strike damage lightning attachment surface condition Joule heat thermal decomposition

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

航空機の主要構造へのCFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）の適用が進んでいるが、CFRPに使用される樹脂の導電率（ 10^{-4} S/cm オーダー）はアルミ合金等の導電率（ 10^5 S/cm オーダー）と比較して著しく低く、被雷時に大きな損傷を生じることが問題となっている。CFRPの被雷損傷は、雷電流によるジュール発熱、炭素繊維の破断、マトリックス樹脂の熱分解、衝撃波による力学的負荷などが短時間でおきるため、CFRPの被雷損傷メカニズムは未解明である。現在、航空機の主要構造のCFRP表面には、厚さ0.1mm程度の銅メッシュを取付け、表面の導電性を向上させ被雷損傷を低減させているが、重量増、補修の煩雑さなどの課題がある。

航空機に使用されるアルミ合金の複合波形による模擬雷撃試験では、アルミ合金に塗装がない場合、初めの高電流波形により損傷を生じた後、後続の低電流波形によって着雷位置が移動しながらアルミ合金に損傷を生じる。一方、アルミ合金に航空機用の塗装がある場合、着雷により着雷位置の塗装が破壊した後は、塗装の絶縁性により高電流波形から後続の低電流波形を通じて着雷位置は移動しない。

CFRPはアルミ合金と導電率が大きく異なることから、特に複合波形の場合、被雷時の着雷位置の挙動、被雷損傷はアルミ合金とは大きく異なる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、塗装、銅メッシュの有無の4通りの表面状態を有する航空機用CFRPに対して、航空機の認証に使用される模擬雷撃試験波形を基に修正した、高電流波形、高電流波形+低電流波形、高電流波形+低電流波形の後に高電流波形を付与、の3通りの模擬雷撃試験を実施して着雷位置の挙動及び被雷損傷について評価を行うとともに、被雷損傷メカニズムについて考察を行った。

3. 研究の方法

(1) 一方向プリプレグ東レ製 T800S/3900-2B（目付 $192\text{g}/\text{m}^2$ ）を用い、試験片の積層構成は $[45/0/-45/90]_{2s}$ の16層擬似等方積層とした試験片を製作した。試験片表面は、銅メッシュの有無、塗装の有無を組み合わせた4通りの表面状態とした。試験片寸法は、440mm 正方とした。

(2) 航空機の型式証明に使用される雷撃試験規格 SAE APR 5412B の波形を参考として、3種類の模擬雷撃試験を行った。最初の試験では、高電流波形のA波形のピーク電流を-100kAに修正した修正A波形を使用した。二番目の試験では、最初の波形に低電流波形のB、C波形のピーク電流をそれぞれ-2.8kA、-420Aに修正した修正B、C波形を加えた複合波形を使用した。最後の試験では、二番目の模擬雷撃試験後に超音波探傷による非破壊検査を行った後、高電流波形のD波形のピーク電流を-50kAに修正した修正D波形を使用した。それぞれの模擬雷撃試験時は、高速度ビデオカメラを用いて着雷の様子を撮影した。また、試験後、外観検査、超音波探傷検査を行い、被雷損傷の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 修正A、B、C波形からなる複合波形による模擬雷撃試験後の試験片を図1に示す。

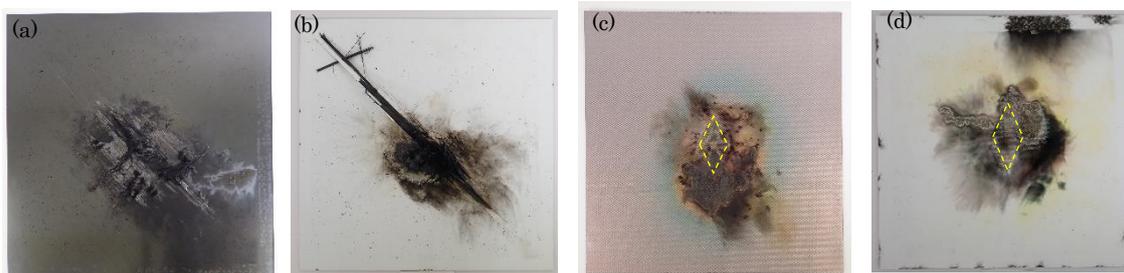


図1 雷撃試験結果 (a) 銅メッシュ・塗装なし、(b) 銅メッシュなし・塗装あり、(c) 銅メッシュあり・塗装無し、(d) 銅メッシュ・塗装あり

銅メッシュなしの場合、最表面の試験片中央部近傍で繊維方向に沿って繊維がめくれ上がっていることがわかる。また試験片中央から繊維と垂直方向に離れた場所でも繊維方向に沿った割れが見られた。銅メッシュなし塗装ありの場合、銅メッシュなし塗装なしの損傷に加えて、繊維方向に沿った割れと同じ方向に塗装の割れも見られた。銅メッシュありの場合、破線で囲った銅メッシュの形状に沿ったひし形の銅メッシュの溶損とそれ以外の銅メッシュの溶損が見られた。修正A波形の模擬雷撃試験から、修正A波形による損傷は、着雷位置におけるひし形の銅メッシュの溶損と着雷位置から離れた箇所でのジュール発熱による局所的な銅メッシュの溶損であった。このため、ひし形でない広範囲の銅メッシュの溶損は修正B、C波形により生じたと考えられる。アルミ合金の場合、修正B、C波形による損傷は塗装の有無により異なるが、銅メッ

シュの場合は、塗装の有無によらず、銅メッシュ及び塗装（塗装ありの場合）の溶損であり、銅メッシュの形状と異なっていた。

(2) 高速度カメラの画像から、銅メッシュなしの場合、塗装の有無にかかわらず修正 B、C 波形において着雷位置が移動していることを明らかにした。塗装ありの場合、塗装に損傷がない位置では塗装は絶縁層として作用し着雷を抑制すると考えられる。したがって、修正 A 波形によるジュール発熱が着雷位置から離れた箇所では樹脂の熱分解及び繊維に沿った破壊を生じ、さらに表面の塗装の割れを引き起こし、塗装による絶縁がなくなった箇所に、修正 B、C 波形における着雷を生じていると考えられる。塗装なしの場合も、修正 B、C 波形による着雷位置は修正 A 波形による損傷の範囲内であった。修正 A 波形により、樹脂の熱分解、繊維のめくれ上がりを生じた部位は損傷がない部位と比較して着雷しやすい状態になり、修正 B、C 波形において着雷位置が移動したと考えられる。

銅メッシュあり塗装なしの場合、表面はアルミ合金と同様に金属であるため、修正 B、C 波形時に、着雷位置が移動することを確認した。一方、塗装ありの場合、修正 A 波形による損傷部以外は絶縁層となる塗装があり、着雷を抑制すると考えられる。このため、修正 A 波形による損傷部に修正 B、C 波形で着雷して雷電流が流れ、ジュール発熱により修正 A 波形による損傷部以外に新たに損傷を生じ、この新たな損傷が塗装の破壊を引き起こして塗装による絶縁がなくなった後に、着雷位置が移動したと考えられる。

(3) CFRP の損傷を生じた Cu メッシュなし試験片の雷撃面裏面からの超音波探傷を行った結果を図 2、3 に示す。塗装の有無によらず、雷撃面から板厚方向に進むほど損傷範囲が小さくなった。そして、修正 A 波形、修正 A+B+C 波形からなる複合波形、修正 A+B+C 波形の後に修正 D 波形を与えた試験のいずれの場合も、損傷範囲にほとんど違いは見られなかった。これらの結果から、初めの高電流波形の修正 A 波形により CFRP に損傷を生じる後続の修正 B、C 波形は、CFRP にほとんど損傷を与えないことが分かった。修正 D 波形は高電流波形であり被雷による作用積分値が高く、CFRP への被雷損傷に与える影響は大きいと想定されたが異なる結果となった。この原因については、D 波形による雷電流の一部が、A+B+C 波形で損傷した部位に残る炭素繊維を通じて試験片に流れており、被雷損傷底部に全ての雷電流が流れていない可能性が考えられる。

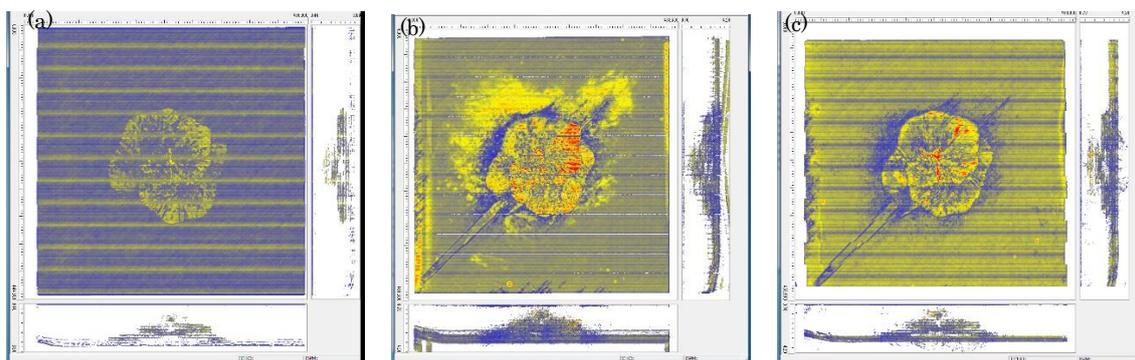


図 2 塗装なし試験片 (a)修正 A 波形、(b)修正 A+B+C 波形、(c)修正 A+B+C+D 波形

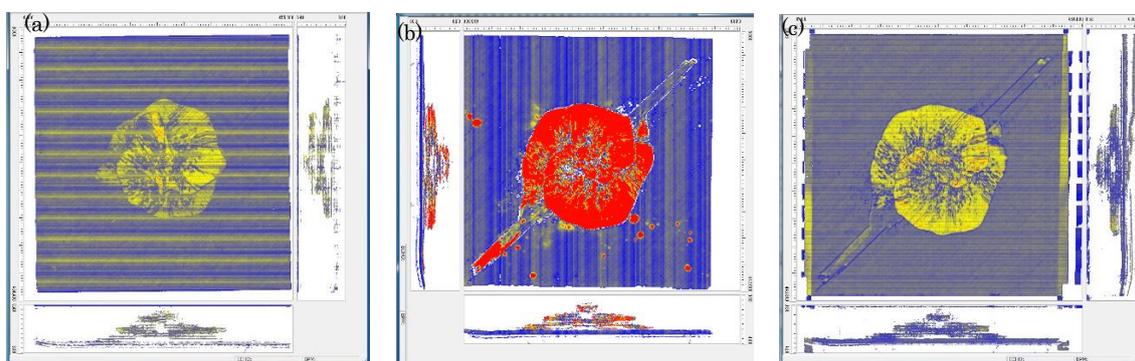


図 3 塗装なし試験片 (a)修正 A 波形、(b)修正 A+B+C 波形、(c)修正 A+B+C+D 波形

(4) 銅メッシュなしの場合、低電流波形による被雷損傷はほとんど見られないことが、試験後の損傷観察及び試験時の雷電流波形を用いた雷電流の作用積分値から示された。今後、熱・電気連成解析を行い、ジュール発熱量を用いた損傷予測を行う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岡田孝雄、小笠原俊夫、宮木博光、神山晋太郎
2. 発表標題 CFRPの表面状態が被雷損傷に与える影響に関する研究
3. 学会等名 第64回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takao Okada, Toshio Ogasawara, Hiromitsu Miyaka, Shintaro Kamiyama
2. 発表標題 Lightening strike points and damage for composite materials with different surface conditions
3. 学会等名 22nd International Workshop on the Holistic Structural Integrity Process (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田孝雄、小笠原俊夫、神山晋太郎、宮木博光、平野義鎮
2. 発表標題 CFRPの表面状態が着雷位置及び被雷損傷に与える影響に関する研究
3. 学会等名 第65回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小笠原 俊夫 (Ogasawara Toshio) (20344244)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮木 博光 (Miyaki Hiromitsu) (80358704)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員 (82645)	
研究分担者	神山 晋太郎 (Kamiyama Shintaro) (40916516)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関