

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02342

研究課題名（和文）航空機用CFRPの雷撃損傷メカニズムの解明とマルチフィジックス数値解析

研究課題名（英文）Lightning damage mechanism elucidation and multiphysics numerical analysis of carbon fiber reinforced polymer composites for aircraft structures

研究代表者

小笠原 俊夫 (Ogasawara, Toshio)

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：20344244

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：航空機用CFRPにおける雷撃損傷メカニズムの解明を目指して、インパルス電流を直接印加したCFRPの電撃損傷現象の解明とモデル化、模擬雷撃試験におけるCFRPへの電氣的・力学的荷重の実験による同定と検証、熱・電気・力学連成による雷撃損傷のマルチフィジックス数値解析手法について検討した。実験結果に基づきCFRP厚さ方向の非線形I-V特性と電撃印可点におけるアークルートの時間発展を考慮した熱・電気連成による雷撃損傷解析モデルを構築し、実験結果により合致した解析結果が得られることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機用炭素繊維強化プラスチック（CFRP）における非線形の電流-電圧挙動を実験的に解明し、この現象を考慮することによって、雷撃による損傷挙動を精度良く予測できることを明らかにした。この成果は、航空機のみならずエネルギーやインフラなどCFRPの適用が拡大している多くの分野において有用であり、社会的な意義も高い。また、耐雷撃損傷性に優れた材料開発にも寄与できる。

研究成果の概要（英文）：To elucidate the mechanism of lightning damage in CFRP for aircraft structures, the following were conducted: elucidation of lightning damage phenomena in CFRP to which an impulse current is directly applied; identification and verification of electrical and mechanical loads on CFRP in a simulated lightning test by experiment; and multiphysics numerical analysis of lightning damage using thermal-electrical coupling. Based on the experimental results, a coupled thermo-electrical strike damage analysis model was developed, taking into account the nonlinear I-V characteristics in the CFRP thickness direction and the time evolution of the arc root near the current source. It was confirmed that the analytical results were consistent with the experimental results.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 複合材料 落雷 損傷・破壊 数値解析

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック複合材料(CFRP)は比強度・比剛性に優れ、航空機の主構造への適用が拡大している。航空機のCFRP構造が喫緊に解決すべき問題の一つに、運行中の落雷による雷撃損傷がある。図1に雷撃損傷の例を示す[1]。炭素繊維の破断や大規模な層間はく離が発生し、場合によってはこれらの損傷がCFRPの強度低下を引き起こすことが知られている。実用化されている航空機のCFRP構造では、CuやAlの金属メッシュからなる雷保護システム(LPS)を適用することで雷撃損傷の軽減が図られている。しかしながら、LPSの適用だけで雷撃損傷を完全に防ぐことは困難で、航空機の落雷に伴う検査・修理に対して多大なコストと時間を要しているのが現状である。雷撃損傷は風力発電用CFRPブレード等でも問題となっている。

CFRP構造の雷撃損傷低減を図るためには、第一に雷撃によるCFRPの損傷メカニズムの解明が不可欠である。CFRPの雷撃損傷は、図2に示すように熱・電気・力学的な現象が短時間に重畳して影響する複雑な現象である。雷撃によるインパルス電流の持続時間は10~100 μ s、ピーク電流は10~200kAにも達する。ジュール熱により積層板表面および内部では数百 $^{\circ}$ Cという温度になるため、マトリクス樹脂の熱分解による層間はく離等が発生する[2]。

雷撃損傷の推定を目的として、有限要素法(FEM)による熱・電気連成解析も行われている[3]。熱・電気連成解析によってジュール発熱によるCFRP表面および内部温度を計算し、更にCFRPの熱分解モデルに基づいて層間はく離を定量的に推定することを目指した数値解析であり、近年、国内外の多くの研究者によって積極的な研究が進められている。熱・電気連成解析による損傷解析結果は、定性的には実験結果と概ね対応しているが、現状、十分な精度での損傷予測は達成できていない[3]。その最も大きな理由は、インパルス電流を直接印加したCFRPの電撃損傷現象の解明されていないこと、またローレンツ力や衝撃波による力学的荷重の影響を考慮せず、図1に示すように模擬雷撃試験で観察される層間はく離が、基本的にジュール発熱によるCFRPの熱分解に起因するものと仮定している点にある。換言すれば、CFRPの雷撃損傷メカニズム解明において、「ジュール発熱」と「力学的荷重」が雷撃損傷に及ぼす影響について、定量的に解明することが重要である。

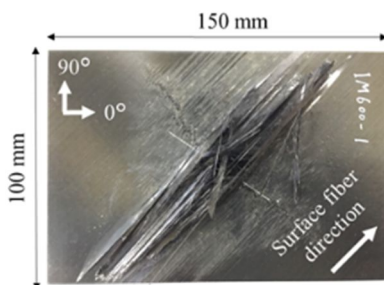


図1 CFRPの雷撃損傷(例)

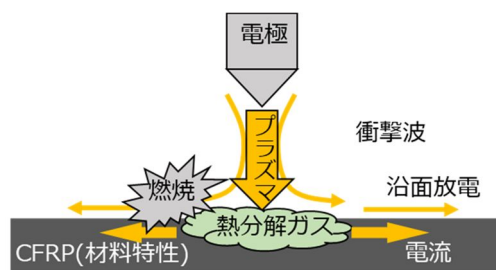


図2 雷撃試験における損傷現象と要因

2. 研究の目的

航空機用CFRPにおける雷撃損傷メカニズムの解明を目的として、ジュール熱および力学的荷重が雷撃損傷に及ぼす影響について、それぞれを分離し、定量的に明らかにすることを目的とする。そのため、インパルス電流を直接印加したCFRPの電撃損傷現象の解明とモデル化、模擬雷撃試験におけるCFRPへの電氣的・力学的荷重の実験による同定と検証、を実施する。更にこれらの知見を統合し、熱・電気・力学連成による雷撃損傷のマルチフィジックス数値解析手法を構築する。

3. 研究の方法

(1) インパルス電流の直接印加によるCFRPの電氣的・熱的応答評価

CFRPの雷撃損傷評価試験方法としては、図2に示すような模擬雷撃試験(アークエントリー試験)が一般に行われている。この試験では電極とCFRP積層板の間に空隙(ギャップ)があるため、この間で発生するプラズマによる衝撃波や、CFRP表面での沿面放電等によるアークルートの時間発展などにより物理現象が極めて複雑となる。そこで本研究では、CFRP試験片に対して雷撃と類似した波形のインパルス電流を直接通電することで、電流印加のみによるCFRP(材料)の物理的・化学的応答と電撃損傷挙動を評価した。直接電流印加試験は、CFRPの面内方向および厚さ方向(面外方向)を対象とした。

CFRP面内(繊維方向)へのインパルス電流印可試験
 実験方法の概要を図3(a)に示す。航空機用CFRP(IMS60/133, 帝人)の一方積層板を対象と

し、航空機構造の耐雷性評価に使用される標準的な雷波形 (SAE ARP 5412B) のうち、帰還雷波形を模擬した正極性の Component A 波形を積層板の繊維方向に対して印加した。試験にはインパルス電流発生装置(Haefely Hipotronics)を、電流印可中の電流-電圧 (I-V) 特性評価およびサーモカメラによる表面温度測定を実施した。試験片寸法は、長さ 100 mm もしくは 50mm (0° 方向) × 幅 10 mm × 厚さ 約 2.2 mm とした。

CFRP 厚さ方向 (面外) へのインパルス電流印可試験

実験方法の概要を図 3(b)に示す。航空機用 CFRP (T800/3900-2B、東レ)と汎用 CFRP (T800/2592、東レ)の擬似等方積層板を対象として、積層板の厚さ方向に対して SAE ARP 5412B の Component A 波形に類似したインパルス電流を印加し、高電流・高電圧下における I-V 特性を評価した。電流印可前後での導電率の変化も実施した。実験にはインパルス電源 (LSS-15AX, ノイズ研究所社製)を使用した。試験片寸法は長さ 50 mm × 幅 50 mm × 厚さ 約 3mm とした。

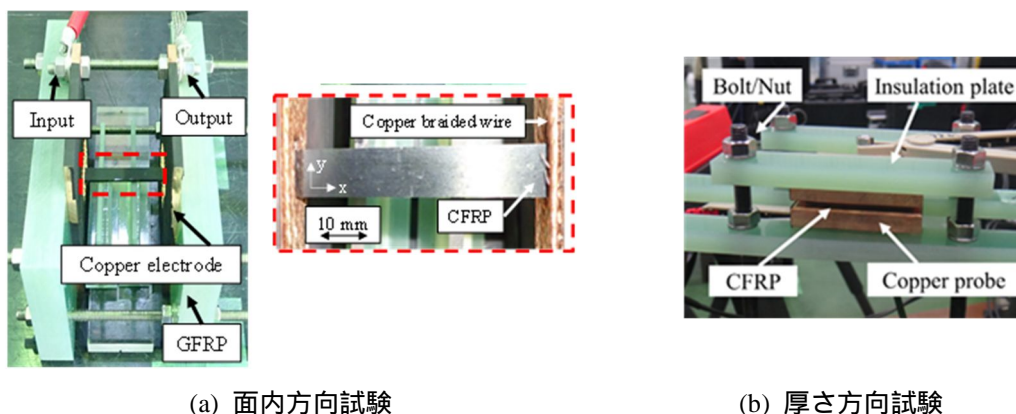


図 3 インパルス電流の直接印加による CFRP の電氣的・熱的応答評価

(2) CFRP の模擬雷撃試験における背面変位分布評価と動的荷重の推定

平野らが実施した CFRP の模擬雷撃試験における背面の高速度撮影結果もとに[5]、デジタル画像相関法 (DIC 法) によって背面での変位分布の時間変化データを取得した。供試体は金属メッシュからなる LSP を適用した CFRP 積層板 (積層構成: [45/0/-45/90]3s、寸法: 500 mm × 500 mm × 3.5 mm) であり、直径 360 mm の円形容を持つアルミニウム製の治具に円周状に 12 本の M8 ボルト/ナットで固定したものである。インパルス電流波形として SAE ARP 5412B の Component A 波形を適用し、最大電流は 100 kA とした。DIC 法によって得られた背面での変位分布の実験結果に対して、Karch らの衝撃波の空間分布および時間発展に関する実験式を適用し[8]、動的荷重の推定を行った。

(3) 非線形 I-V 特性とアークルート進展を考慮した熱・電気連成解析

CFRP 擬似等方積層板 (T800/3900-2B、東レ)に対して模擬雷撃試験(アークエントリー試験)を実施し、雷撃印加点近傍を高速度カメラによって時系列で観察することにより、アークルートの時間変化を実験的に取得した。インパルス電流波形として SAE ARP 5412B の Component A 波形を適用し、最大電流 20 kA とした。得られた結果から、時間経過に伴うアークルート形状および電流密度分布を同定した。

電氣的・熱的現象を考慮した CFRP の雷撃損傷に関するマルチフィジックス数値解析を実施した。具体的には FEM 解析コード ABAQUS をプラットフォームとし、上述の実験およびデータ評価によって得られた素過程の物理モデルをユーザサブルーチン機能によって組み込むことで統合的な解析方法を構築した。模擬雷撃試験および直接通電試験によって得られた CFRP の電氣的・熱的応答挙動に基づき、雷撃損傷の解析結果を検証した。

4. 研究成果

(1) インパルス電流の直接印加による CFRP の電氣的・熱的応答挙動

CFRP 面内 (繊維方向) へのインパルス電流印可試験結果と考察

一方向 CFRP の繊維方向 (0° 方向) に対してインパルス電流を印加した際の表面温度の履歴を図 4(a)および図 4 (b)に示す。最大電流 10 kA での I-V 挙動は線形であり、最大表面温度は約 170 °C であった。また図 4 (a) に示すように、汎用有限要素法ソフトウェア COMSOL による温度解析結果と、実験結果は良い一致を示した。これに対して最大電流 20 kA の場合は I-V 挙動は非線形となり、図 4(b)に示すように表面温度は 300 °C 以上となった。また実験によって得られた温度履歴は、解析結果 ($Q_{py} = 0 \text{ J/kg}$ の結果) と比較して 100 ~ 200°C 程度低い結果であった。これは試験中の温度上昇によるマトリクス樹脂の熱分解が表面温度に影響したためである[6]。樹脂の熱分解に伴う吸熱 (Q) を考慮することによって、図 4 (b) に示すように、実験結果と解析

結果 ($Q_{py} = -2.163 \times 10^7 \text{ J/kg}$) が概ね良い一致を示すことが確認された。

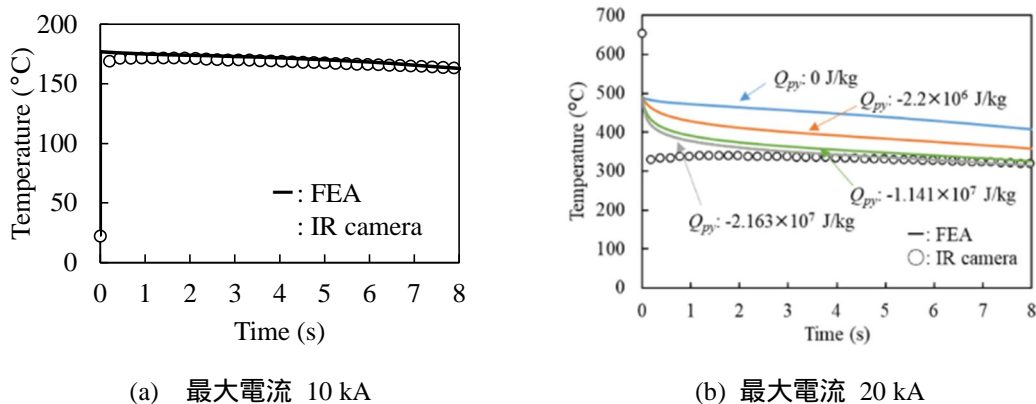


図4 インパルス電流の直接印加による CFRP 面内の電氣的・熱的応答評価

CFRP 厚さ方向 (面外) へのインパルス電流印可試験結果と考察

実験結果の一例を図 5(a)に示す。層間樹脂層を持つ航空機用 CFRP (T800/3900-2B) では、I-V 特性に非線形性が認められ、インパルス電流 (電圧) の印加に伴う導電率上昇が確認された。この挙動は不可逆であり、電流印可後の導電率も上昇していることがわかった。一方、層間樹脂層を持たない汎用 CFRP (T800/2592) ではインパルス高電流印加前後での導電率の変化はほとんど認められなかった。本実験結果は、図 5(b)に示すような層間破壊じん性を向上させるために適用されている層間樹脂層が、CFRP のインパルス電流負荷後の導電率の上昇に影響している可能性を示唆している。層間における樹脂層の局所的な絶縁破壊が影響しているものと考えられるが、詳細なメカニズム解明については今後の課題である。

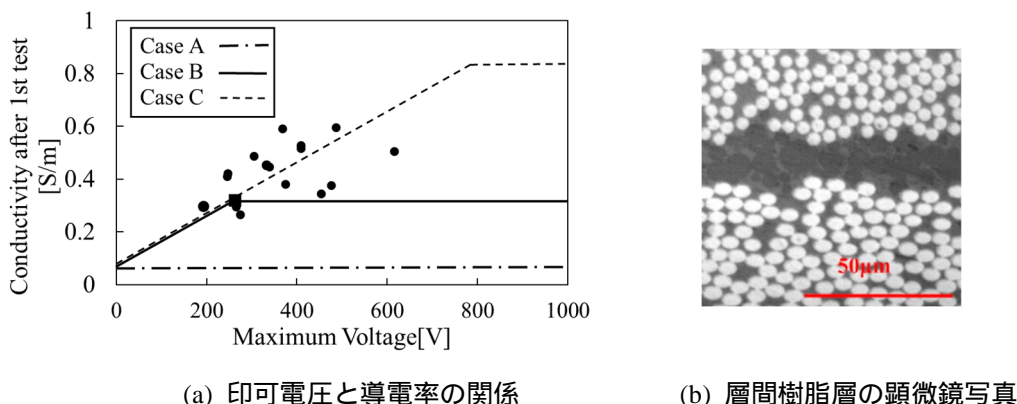


図5 インパルス電流の直接印加による CFRP 厚さ方向の I-V 特性 (T800/3900-2B)

(2) CFRP の模擬雷撃試験における背面変位分布評価と動的荷重の推定結果

Hirano らが実施した衝撃波伝播の観察結果 (図 6(a)) を基に[7]、雷撃時に発生する衝撃波分布の実験式を適用した[8]。また模擬雷撃試験によって取得された LSP を適用した CFRP 試験片の背面変位の時間・空間分布データを評価対象として[5]、衝撃波モデルの各定数をパラメトリックに変化させて、入力荷重に対する変位応答の順解析を実施した。更に順解析によって推測された荷重条件と、解析結果と実験結果の背面変位を比較し、衝撃波の時間変化と圧力分布を推定した。

推定された動的荷重の一例を図 6(b)に示す。荷重レベルは相対的に小さく、CFRP 積層板に大きな損傷を与えるレベルではないことが示唆された。今後、推定された荷重値の妥当性をより詳細に検証するとともに、より精度に優れた荷重同定方法についても検討を進める予定である。

(3) 非線形 I-V 特性とアークルート進展を考慮した熱・電気連成解析結果

アークエントリによる模擬雷撃試験を対象として、熱・電気連成解析による雷撃損傷シミュレーションを行った。解析対象は、航空機用 CFRP (T800/3900-2B、東レ) 積層構成 [-45/90/45/0]2s、積層板寸法 $150 \times 150 \times 3 \text{ mm}$ とした。供試体表面の中央に実験から得られた模擬雷電流波形データをもとに設定した最大電流 20 kA のインパルス電流を適用した。模擬雷撃試験 (アークエントリ試験) の高速度撮影の実験結果に基づき、電流印加形状 (アークルート) は円形と仮定し、アークルートの時間発展とそれに伴う電流密度の変化を解析に反映した。

解析によって得られたインパルス電流印可後の 1 層目の CFRP の熱分解反応率を図 7(a) (b)に

示す。ここで図 7(a)は導電率を電圧に依存せず一定とした場合、図 7(b)は実験で得られた非線形 I-V 特性 (図 5(a)の Case C) を適用した場合の計算結果である。赤色の部分はマトリクス樹脂が 100% 熱分解したことを意味しており、熱分解反応率が数% を超えると層間はく離の発生が確認されている。また図 7(c)は、同等の実験条件で評価された模擬雷撃後の超音波探傷結果である。この結果から、CFRP 厚さ方向における非線形の I-V 特性を考慮することにより、より良い精度で損傷領域の推定が可能となることが確認された。

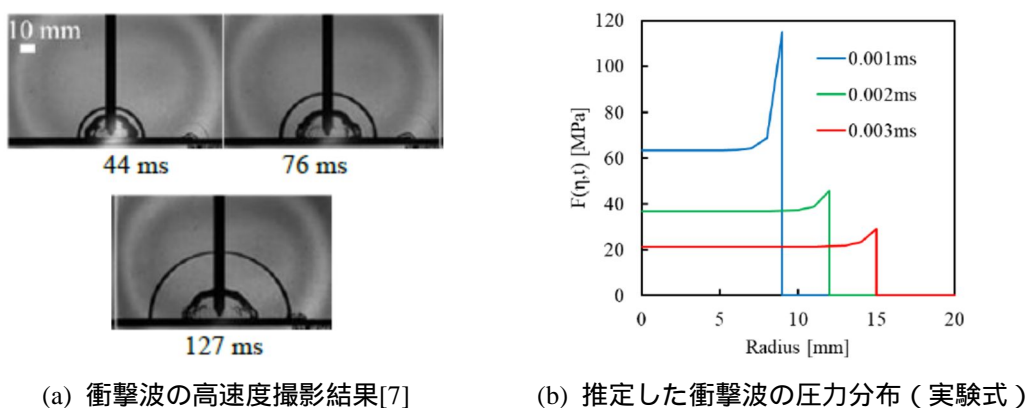


図 6 CFRP の背面変位分布評価と動的荷重の推定

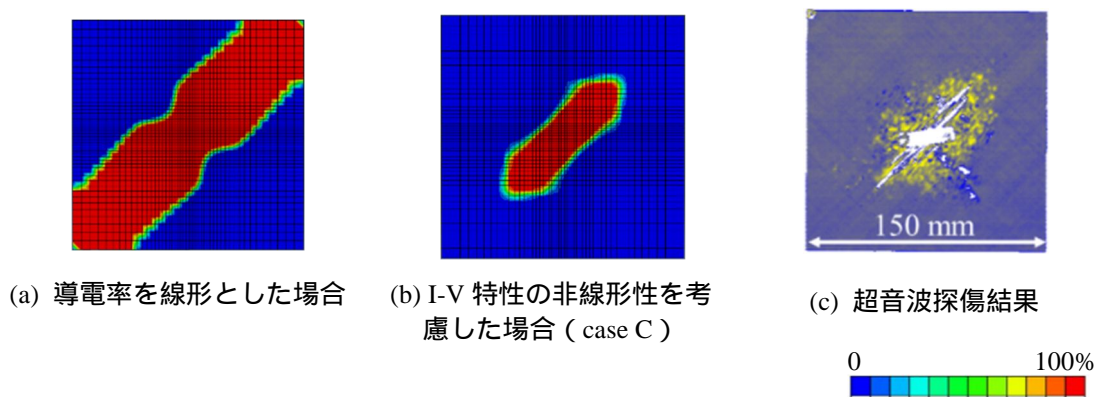


図 7 非線形 I-V 特性とアークルート進展を考慮した熱・電気連成解析 (最大電流 20kA、熱分解反応率のコンター図)

(4) まとめ

航空機用 CFRP における雷撃損傷メカニズムの解明を目指して、インパルス電流を直接印加した CFRP の電撃損傷現象の解明とモデル化、模擬雷撃試験における CFRP への電気的・力学的荷重の実験による同定と検証、熱・電気・力学連成による雷撃損傷のマルチフィジックス数値解析手法について検討した。CFRP 厚さ方向の非線形 I-V 特性と電撃印可点におけるアークルートの時間発展を考慮した熱・電気連成による雷撃損傷解析モデルを構築し、実験結果により合致した解析結果が得られることが確認された。

一方で、層間樹脂層を有する CFRP において非線形 I-V 特性が発現するメカニズムの解明や、アークルート進展のメカニズム解明、背面変位からの動的荷重推定の精度向上および妥当性検証などについては今後、更に検討することが必要であると考えられる。

参考文献

1. Chemartin, et al., J Aerosp Lab (2012) 1-15.
2. Hirano, et al., Composites Part A 41 (2010) 1461-1470.
3. Ogasawara, et al., Composites Part A 41 (2010) 973-981.
4. Kamiyama, et al., Composite Structure 196 (2018) 55-62.
5. Hirano, et al., Proc. of International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE) 2019.
6. Pott, J. Spacecraft and Rockets, 32 (1995), 200-.
7. Hirano, et al., Proc. of International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE) 2017.
8. Karch, et al., Proc. of International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE) 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shintaro Kamiyama, Yoshiyasu Hirano, Takao Okada, Koji Sawaki, Takeo Sonehara, Toshio Ogasawara	4. 巻 230
2. 論文標題 Damage behavior of CFRP subjected to simulated lightning current under air, reduced-pressure air, and N2 environments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 111519
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruct.2019.111519	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 神山晋太郎、平野義鎮、岡田孝雄、 曾根原健夫、小笠原俊夫
2. 発表標題 模擬雷電流の通電による一方向CFRPの温度応答
3. 学会等名 日本複合材料学会 第45回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 猪股壮志, 小笠原俊夫, 平野義鎮, 神山晋太郎
2. 発表標題 航空機用構造材料の雷撃による動的荷重の同定
3. 学会等名 日本機械学会 第28回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神山晋太郎, 平野義鎮, 岡田孝雄, 曾根原健夫, 小笠原 俊夫
2. 発表標題 高電圧インパルス電流印加による一方向CFRPのジュール発熱応答
3. 学会等名 日本複合材料学会/日本材料学会 第12回日本複合材料会議 (JCCM-12)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shintaro Kamiyama, Yoshiyasu Hirano, Takao Okada, Koji Sawaki, Takeo Sonehara, and Toshio Ogasawara
2. 発表標題 EXPERIMENTAL STUDY OF LIGHTNING DIRECT EFFECTS ON CFRP UNDER ATMOSPHERIC PRESSURE AIR AND REDUCED PRESSURE AIR
3. 学会等名 ICCM22 (The 22nd International Conference on Composites Materials) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神山 晋太郎、平野 義鎮、岡田 孝雄、
2. 発表標題 模擬雷電流の通電による一方向CFRPの温度応答
3. 学会等名 日本複合材料学会 第43回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Kamiyama , Yoshiyasu Hirano, Takao Okada, Takeo Sonehara, Toshio Ogasawara
2. 発表標題 UNDERSTANDING LIGHTNING DAMAGE BEHAVIOR OF CFRP BY APPLYING LIGHTNING CURRENT
3. 学会等名 ICOLSE 2019 (International Conference on Lightning& Static Electricity) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro KAMIYAMA, Yoshiyasu HIRANO, Takao OKADA, Takeo SONEHARA, Toshio OGASAWARA
2. 発表標題 Joule Heating Behavior of CFRP Laminates Exposed to Lightning Current Under Conduction Testing
3. 学会等名 The 12th Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Kamiyama, Yoshiyasu Hirano, Takao Okada, Takeo Sonehara, Toshio Ogasawara
2. 発表標題 Temperature response of CFRP exposed to simulated lightning current
3. 学会等名 ICACC2020 (44rd International Conferenceand Expo on Advanced Ceramics and Composites) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五十嵐明彦, 神山晋太郎, 小笠原俊夫, 平野義鎮, 岡田孝雄
2. 発表標題 CFRP 積層板の圧縮強度に及ぼす雷撃損傷の影響
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第60回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤拓実, 藤澤優, 平野義鎮, 神山晋太郎, 岡田孝雄, 曾根原健夫, 小笠原俊夫
2. 発表標題 インパルス電流下におけるCFRP I-V特性の雷撃損傷に与える影響
3. 学会等名 日本複合材料学会 第46回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi SATO, Yu FUJISAWA, Toshio Ogasawara, Yoshiyasu Hirano, Takao Okada, Shintaro Kamiyama, Takeo Sonehara
2. 発表標題 Effect of I-V Characteristics under Impulse Current on the Lightning Strike Damage of CFRP Laminates
3. 学会等名 ICACC2022 (46th International Conferenceand Expo on Advanced Ceramics and Composites) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤澤 優, 小笠原 俊夫, 佐藤拓実, 平野 義鎮, 神山 晋太郎
2. 発表標題 インパルス高電流下におけるCFRPのI-V特性と雷撃損傷解析への応用
3. 学会等名 日本機械学会 関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022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	平野 義鎮 (Hirano Yoshiyasu) (90425786)	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 (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
---------	---------