

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14881

研究課題名(和文)CFRP雷損傷における衝撃波の影響解明と解析手法の検討

研究課題名(英文)An experimental and numerical study on CFRP lightning damage considering shockwave effect

研究代表者

平野 義鎮(Hirano, Yoshiyasu)

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：90425786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：航空機CFRP構造の雷撃損傷は構造安全性に係る重要課題であるが、未だ雷撃損傷の詳細なメカニズムの解明と、複雑に連成する様々な物理現象を評価可能な数値解析モデルは確立されていない。本研究では、雷撃時の衝撃波がCFRPの雷撃損傷挙動に与える影響に着目した。衝撃波の伝播挙動の可視化による観察により、衝撃波の伝播速度が材料の導電率と相関を有する事を示した。また、DICによる雷撃時の供試体の変位測定より、損傷が生じる場合に周波数変化を伴う振動波形となることを示した。一連の結果から、衝撃波のみでは供試体の破壊は生じず、衝撃波はジュール発熱等の要因によって発生した損傷の進展に寄与していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまでに詳細に議論されてこなかった、CFRPの雷撃損傷における衝撃波の影響が明らかとなった。この成果により、これまで未解明であった詳細な損傷メカニズムの理解が進むことが期待される。その結果、航空機CFRP構造における被雷対策技術の高度化とともに、耐雷損傷性を有する新規材料の開発においても大きく貢献できるものと考えられる。更にこれらは将来的に被雷時の航空機の修理コストの大幅削減や定時運航に貢献するとともに、旅客のより安全な航空機による移動へと繋がる。

研究成果の概要(英文)：This research experimentally examines the effect of acoustic shock wave associated with lightning current on damage behavior of CFRP laminate. Schlieren photography is adopted to visualize the acoustic shock wave propagation. The visualization results show the material difference affect the shockwave propagation speed. The influence of shockwave on material deformation and damage behavior was studied by applying Digital Image Correlation (DIC) analysis. To investigate the damage effect on dynamic response of CFRP specimen, laminate without LSP protection and with protection were examined. The NDI results shows large delamination occurred near lightning attached surface in the specimen without LSP though no damage was detected in with LSP specimen. The internal lightning damage of CFRP laminate could be grew by material bending deformation caused by the shockwave propagation. However, the shockwave itself wouldn't initiate the lightning damage of CFRP laminate.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料 雷撃損傷 航空機 可視化 DIC

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機主要構造への CFRP の適用拡大に伴い、比金属材料で電氣的、熱的特性に劣る CFRP 構造への被雷対策技術の高度化が益々重要となってきた。現行の航空機では構造表面に金属製の耐雷メッシュを適用するなど、設計上の工夫によってこれらの問題を解決しているが、機体重量の増加やコスト増加の一因となっている。

直接雷による CFRP 構造の損傷は、プラズマ放電や大気・材料の絶縁破壊、電磁気力、衝撃波、熱の輻射、力学的損傷など複数の物理現象が複雑に絡み合った現象¹⁾であり、その詳細な損傷メカニズムは十分に解明されているとは言い難い。そのため、CFRP の雷損傷の詳細メカニズムの理解と、数値解析手法による損傷挙動予測手法の確立による、航空機 CFRP 構造の安全性および信頼性の向上、開発コストの低減が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では CFRP の雷撃損傷に影響を与える複数の物理検証のうち、衝撃波の影響について検討を行う。可視化手法と、DIC(画像相関)法を応用することで、その影響を定量化し、衝撃波が CFRP の雷損傷に対して与える影響を明らかにする事を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 雷撃試験時の衝撃波挙動の解明

インパルス電流試験装置を用いた模擬雷撃試験を行い、発生する衝撃波の伝播挙動を明らかにする。具体的には、大気中の密度分布を可視化する手法のひとつであるシャドウグラフ法を用い、雷電流によって発生する衝撃波の伝播挙動を超高速度カメラ(最高撮影速度 1000 万コマ/秒)により観察する。実験方法の概要として、図 1 a) に計測装置のレイアウト概要を、b) に供試体設置状況を示した。

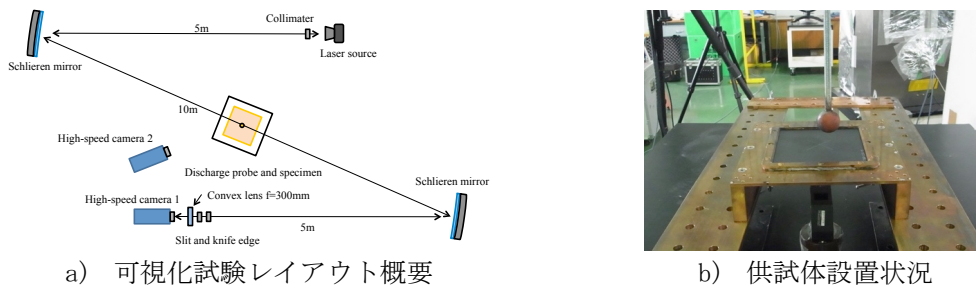


図 1 衝撃波可視化計測試験セットアップ状況

(2) 衝撃波による供試材料の変形挙動の取得

雷撃付与時の材料変形形状を、高速度カメラを用いた 3 次元デジタル画像相関法(DIC)法により計測する。本研究では、供試体の雷撃付与を行う反対側に複数台の高速度カメラ(最高撮影速度 100 万コマ/秒)を設置してステレオ撮影を行う。図 2 a) に試験時の供試体および高速度カメラの設置状況を、図 2 b) に供試体と電極の設置状況を示す。

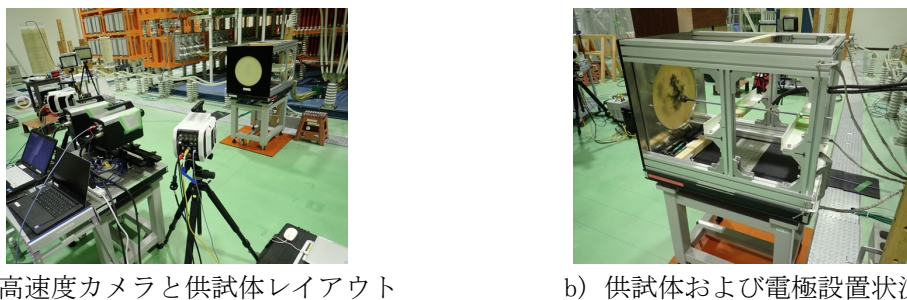


図 2 DIC 計測試験セットアップ状況

4. 研究成果

(1) 雷撃試験時の衝撃波挙動の解明

供試材は航空機グレードとして開発された一方向炭素繊維プリプレグ T800SC/3900-2B(東レ)による積層板とした。積層構成は擬似等方性の $[45/0/-45/90]_3s$ とし、平均板厚は約 4.6mm である。比較のため Cu メッシュによる LSP(Lightning Strike Protection)を表面に適用したもの、および AL 合金板(A5052, $t=1.0\text{mm}$)を用意した。供試体寸法は $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ である。

雷電流は、インパルス電流発生装置(ICG: Impulse Current Generator, Haefely Test 社製)を用いて発生させた。雷撃電流を模擬するインパルス波形は、航空機開発試験のために SAE-APR5412B として定められた雷試験規格波形のうち帰還雷撃波形を定めた Component A 波形を参

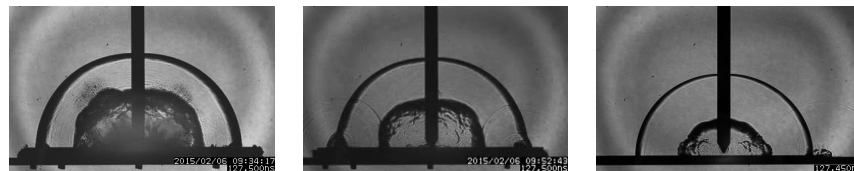
表 1 供試条件一覧

S/N	Material	LSP	Electrode	Gap [mm]	Peak current [kA]	T1 [μs]	T2 [μs]	Action Integral [kJ/Ohm]	Integrity [mV]
A-1	T800/3900-2B	NA	Conical	2	20.068	14.733	73.125	20.759	17.2
A-2	T800/3900-2B	NA	Insulation sphere	25	19.726	15.76	75.19	20.476	352
A-3	T800/3900-2B	NA	Insulation sphere	75	19.511	16.372	76.378	20.318	464
B-1	T800/3900-2B	Applied	Conical	2	20.625	14.56	71.964	21.565	48.4
B-2	T800/3900-2B	Applied	Insulation sphere	25	20.254	15.483	73.588	21.096	210
B-3	T800/3900-2B	Applied	Insulation sphere	75	20.059	15.928	74.615	20.9	400
C-1	A5052	-	Conical	2	20.694	14.585	71.706	21.598	31
C-2	A5052	-	Insulation sphere	25	19.826	15.76	75.19	20.476	352
C-3	A5052	-	Insulation sphere	75	19.511	16.372	76.378	20.318	464

考にして定めた。規格で定められた波高値は200kAであるが、ここでは最大電流値を10%(20kA)に修正した波形を用いた。供試条件を表1にまとめる。T₁は波頭頂、T₂は波尾長、Action Integralは供試電流の比エネルギーを示す。また、電極の違いを検討する目的で突針電極と絶縁電極の2種を供試している。

① 突針電極における各材料における衝撃波伝播挙動

図3に突針電極を用いた場合の衝撃波伝播挙動の違いを比較する。どの材料においても着雷直後から半球形の衝撃波が発生し、時間の経過とともに伝播していく様子が確認された。また衝撃波面の内側には、高温のガス化した樹脂の領域が半楕円球状に膨張していく様子が観察される。衝撃波の伝播速度に着目すると、CFRP(条件A-1)では500m/s、耐雷メッシュ保護CFRP(条件B-1)では475m/s、アルミ合金(条件C-1)では430m/sと伝播速度の違いが確認された。

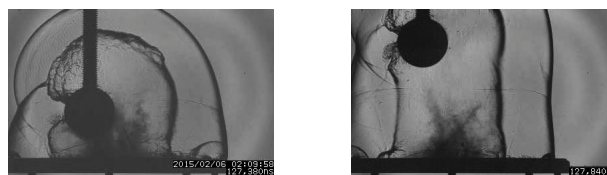


a) CFRP (A-1) b) CFRP+LSP (B-1) c) AL (C-1)
図3 突針電極における供試材料の比較 (t=144us)

② 電極条件の影響

図4に絶縁電極で供試した場合のCFRPの供試結果である、条件A-2(絶縁球電極 距離1インチ)、A-3(絶縁球電極 距離3インチ)の可視化結果を示す。突針電極の結果(図3)と異なり、衝撃波の伝播挙動が大きく異なった。衝撃波はインシエーションワイヤ全体から発生し、絶縁球の無い部分では概ねワイヤと平行に進展していく様子が確認できる。

条件B-2とB-3における供試体表面近傍の衝撃波の面内方向の伝播速度を比較すると、それぞれ520m/sと490m/sであり、電極間隔が衝撃波伝播速度に影響を与えることが示された。



a) 1インチ (A-2) b) 3インチ (A-3)
図4 絶縁電極の距離による比較 (t=144us)

③ 損傷への影響

図5にCFRPの外部損傷の様子と超音波探傷によって取得した内部損傷の様子を示す。ここでは損傷が確認されたLSP無しCFRPのa) 突針電極、b) 絶縁電極(1”), c) 絶縁電極(3”)を示す。LSP保護CFRPについては、どの条件においても明確な内部損傷は確認されなかった。表面の繊維直交方向に進展する損傷はA-1、A-2、A-3の順に長く明瞭になる一方、内部損傷は逆にA-1、A-2、A-3の順に小さくなっている。この要因が衝撃波速度の違いによるものだと仮定すると、曲げ変形で生じる剥離は雷撃付与面の反対側により大きく発生すると考えられる。実際には剥離損傷は雷撃付与面近傍のみに発生している。加えて、同程度の衝撃波が発生していたLSP保護CFRP供試体においていずれの条件でも内部損傷が生じなかった事から、少なくとも剥離損傷の開始要因は衝撃波による圧力ではないと考えられる。表面の損傷と内部損傷の関係から、衝撃波よりむしろ電流の通り道であるアークルートの挙動の違いが損傷状態に影響を及ぼした可能性が高いことが示唆された。

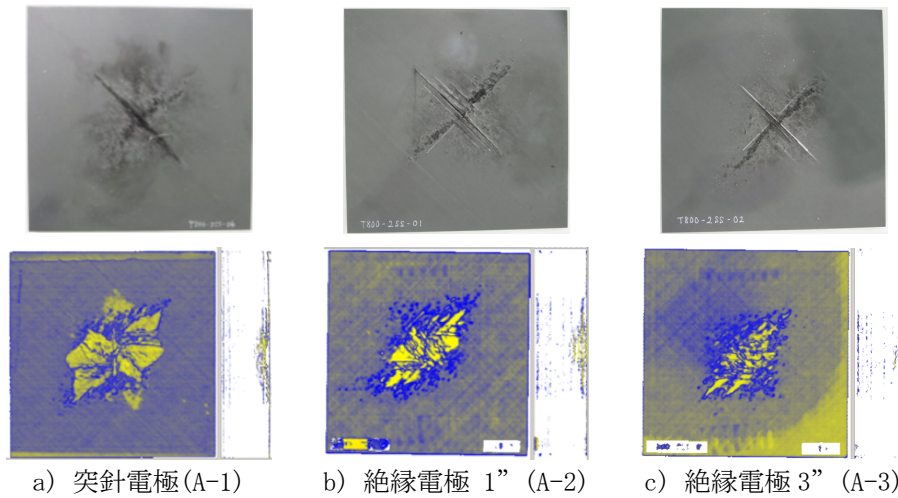


図5 外部および内部損傷の比較

表2 供試条件一覧

S/N	Material	Thickness [mm]	Peak Current [kA]	AI [A^2s]	Electrode type
AL2.0-100kA-N	A2024-T3	2.0	-98.4	520000	Needle
AL2.0-100kA-D	A2024-T3	2.0	-96.8	520000	Jet Diverter
QI4s-100kA-D	CFRP	4.7	-92.8	480000	Jet Diverter
QI3sM-100kA-D	CFRP	3.5	-96.8	520000	Jet Diverter

(2) 衝撃波による供試材料の変形挙動の取得

①材料および試験条件

供試材は航空機グレード CFRP プリプレグ IMS60/133(帝人)から作成した。積層構成は擬似等方性の $[45/0/-45/90]_{3s}$ および $[45/0/-45/90]_{4s}$ とし、平均板厚はそれぞれ約 3.5mm, 4.6mm である。比較のため LSP で表面を保護したもの、および AL 合金板 (A2024, $t=1.8\text{mm}$) を用意した。供試体寸法は $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ である。試験治具への固定のため、供試体中心から直径 400 mm の円周上に等間隔に径 8 mm の円孔を 12 箇所穿孔した。

雷電流の付与にはインパルス電流発生装置(音羽電機)を用い、模擬雷撃波形をアークエンタリによって供試体に与えることによって試験を実施した。試験条件を表2に示す。供試する雷電流 SAE-ARP5412B に規定される Component A 波形の最大電流値を 100kA としたものをを用いた。

DIC 計測には、2組の高速カメラを用いた。用いた高速カメラは、HPV-X2(島津制作所) 2台、Veo710(Phantom) 2台の計4台である。それぞれの撮影速度は、33,333fps と 10,000fps とした。またそれぞれのカメラの画像解像度は $400 \times 240\text{pixel}$ と $832 \times 800\text{pixel}$ である。供試体は直径 360mm の円形窓を持つ治具に M8 のボルトで固定されており、窓の内側が評価領域となる。DIC 解析のため、供試体の雷撃付与面と反対側の表面にはランダムなスペckルパターンを白色塗料によって作成した。DIC 解析には市販の DIC ソフトウェア DaVis (LaVision) を用いた。

②DIC 解析結果

図6に、LSP 無し CFRP 供試体 a) と、LSP 有り CFRP 供試体 b) において DIC 計測によって計測された、雷撃付与面と反対側の供試体中心部での変位履歴を示す。どちらの供試体に関しても、正弦波状の振動波形を示しているが、LSP 無し CFRP に関しては、1 サイクル目の変位のピークにおいて波形の急峻な変化が見られた。振動の周波数は、時間の経過とともに変化を示した。

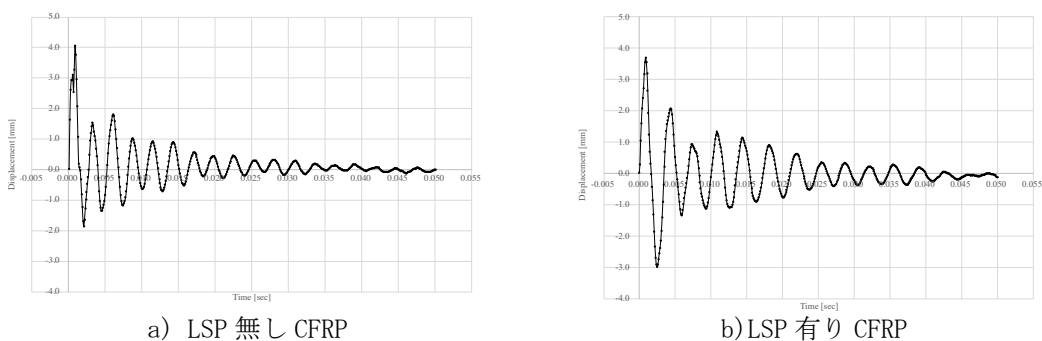


図6 DIC 計測による供試体中心部の変位履歴, (100kA, 絶縁電極 1")

1 サイクル目の周波数は 416.7Hz であり, 2-9 サイクル目までの平均周波数は 362.3Hz である. 最初の数サイクルにおいて振動の中心がわずかに正の変位方向にシフトする様子が観察されたが, およそ 0.05 秒後には収束している.

他方 LSP 保護 CFRP の場合, 時間に対する明確な周波数の変化は確認できなかった. 1 サイクル目の周波数は 285.7Hz であり, 1-9 サイクル目までの平均周波数は 289.88Hz である. LSP 無し CFRP と同様, 現象初期にわずかな振動中心のシフトが観察されるが, およそ 0.05 秒後には収束している.

④ 損傷への影響

雷撃試験後の供試体表面の損傷の様子を図 7 に, 試験後に実施した超音波探傷の結果を図 8 にそれぞれ示す. LSP 無し CFRP 供試体(図 7 a))の場合, 供試体中央から表面層の繊維方向進展する炭素繊維破断や, その直交方向に進展する樹脂の蒸発による損傷が見られる. また, 超音波探傷結果からは螺旋状の大きな離損傷が雷撃付与側表面層を中心に発生している様子が確かめられる(図 8 a)). 他方, LSP 有り CFRP (図 7 b))では表面の金属メッシュが蒸発した損傷が目視で確認できるものの, CFRP 積層板そのものの損傷は確認できない. また超音波探傷結果(図 8 b))からも, LSP 適用の場合は内部損傷が発生していないことが確認でき, 表面に配した金属メッシュによって効果的に雷撃損傷が防がれていることが示された.

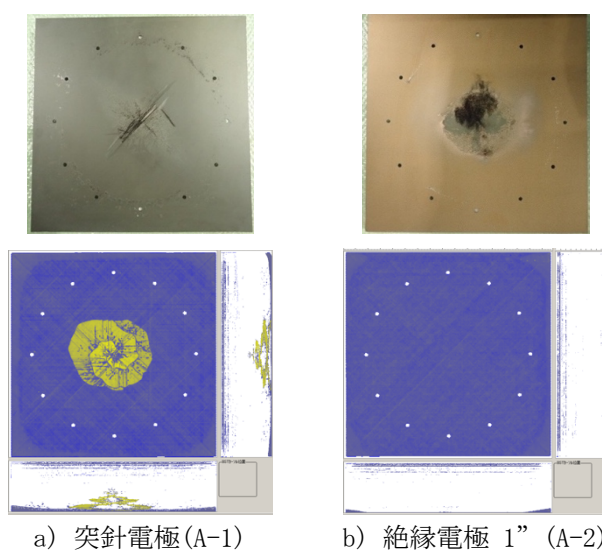


図 7 外部および内部損傷の比較

本研究で用いた供試体は LSP の適用, 不適用で板厚の違いがあるものの, 雷撃波形の供試条件は同一である. 雷電流付与直後観察された供試体の振動は, 印加時の衝撃波の影響によるものと考えられ, 両方で類似の振幅を持った振動が起きているが, LSP 適用の供試体は無損傷であり, LSP 非適用の供試体では, 大きな内部はく離が発生した. LSP 非適用の供試体では 1 サイクル目の大きな振幅から 2 サイクル目にかけて大きな減衰が発生しており, ここで損傷の発生に伴うエネルギー消費があったものと考えられる.

以上の結果, および前項で示した衝撃波の可視化試験の結果から, CFRP の雷損傷の開始要因は衝撃波ではないと結論付けられる. CFRP 雷損傷のメカニズムとしては, 過去の研究において検討されていた通り, 雷電流がプラズマ化する事によって生じる高温や大電流によるジュール発熱等によって損傷が開始され, 層間で急激に膨張する樹脂によって剥離損傷が進展するものと考えられる^{2,3)}. 衝撃波による圧力は, 雷撃損傷が発生した CFRP に作用することで曲げ変形および振動を起こし, これが損傷の更なる進展に寄与しているものと考えられる.

<引用文献>

- 1) L. Chemartin, et.al., Journal AerospaceLab, 5, 1-15, 2012
- 2) Yoshiyasu Hirano, Shingo Katsumata, Yutaka Iwahori, Akira Todoroki, “Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate”, Composites Part A, 41(10), 1461-1470, 2010
- 3) Toshio Ogasawara, Yoshiyasu Hirano, Akinori Yoshimura, “Coupled thermal–electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current”, Composites Part A, 41(8), 973-981, 2010

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Kamiyama Shintaro, Hirano Yoshiyasu, Okada Takao, Sawaki Koji, Sonehara Takeo, Ogasawara Toshio	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 ~ 111519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/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 -

1. 著者名 Kamiyama Shintaro, Hirano Yoshiyasu, Ogasawara Toshio	4. 巻 196
2. 論文標題 Delamination analysis of CFRP laminates exposed to lightning strike considering cooling process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 55 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.003	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 -

1. 著者名 Kamiyama Shintaro, Hirano Yoshiyasu, Okada Takao, Ogasawara Toshio	4. 巻 161
2. 論文標題 Lightning strike damage behavior of carbon fiber reinforced epoxy, bismaleimide, and polyetheretherketone composites	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Composites Science and Technology	6. 最初と最後の頁 107 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.009	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10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Yoshiyasu Hirano, Takeo Sonehara, Nobuyuki Tokuoka, Yuichiro Hamate
2. 発表標題 Application of visualization technique to lightning current test on composite
3. 学会等名 2017 International Conference on Lightning and Static Electricity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiyasu Hirano, Takeo Sonehara, Nobuyuki Tokuoka
2. 発表標題 INFLUENCE OF SHOCKWAVE ON LIGHTNING DAMAGE OF CFRP LAMINATE
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Kamiyama, Yoshiyasu Hirano, Takao Okada, Koji Sawaki, Takeo Sonehara, 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 The 22nd International Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiyasu Hirano, Takeo Sonehara, Nobuyuki Tokuoka
2. 発表標題 AN EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF SHOCKWAVE ON COMPOSITE LIGHTNING DAMAGE
3. 学会等名 International Conference on Lightning and Static Electricity 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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 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 平野義鎮・曽根原健夫，徳岡信行
2. 発表標題 アークエントリーする雷電流に伴う衝撃波のCFRP の動的応答に与える影響検討
3. 学会等名 第43回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神山晋太郎，平野義鎮，岡田孝雄，曽根原健夫，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 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 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 44th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Kamiyama, Yoshiyasu Hirano, Toshio Ogasawara
2. 発表標題 Experimental and Analytical Studies on Damage Behavior of CFRP Laminates Exposed to Simulated Lightning Current Considering Pyrolysis Reaction
3. 学会等名 2017 International Conference on Lightning and Static Electricity (国際学会)
4. 発表年 2017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