

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 9 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820341

研究課題名(和文) 耐雷用シールドを利用した二段階電気抵抗変化法による複合材製旅客機の衝撃損傷検査

研究課題名(英文) Impact-damage inspection for composite aircraft employing two-step ERCM using lightning protection system

研究代表者

鈴木 良郎 (Suzuki, Yoshiro)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：40631221

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)：Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)は高比強度，高比剛性を有すが，面外方向の荷重により層間はく離のような内部損傷を生じやすく，強度低下を来す問題がある．またCFRPは顕著な電氣的異方性を有し，繊維方向はその他の方向に比べ100倍以上の導電率を持つ．これを利用してCFRP積層構造内の一部の層のみに電流を負荷して電気抵抗加熱(選択的層加熱)し，表面温度の観測によりCFRP内の層間はく離を検出する方法を提案する．CFRP製航空機表面に貼付される耐雷用金属メッシュは，電気抵抗加熱時に配線として利用できる可能性がある．

研究成果の概要(英文)：Although carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has high mechanical properties, the impact-damage resistance of laminated CFRP continues to be a weak point. An off-plate load easily causes delamination cracking. This study presents an inspection method for composite aircraft components employing the two-step ERCM using lightning protection system. By utilizing strong electrical anisotropy of CFRPs, we can heat only arbitrarily selected layer(s) in a laminated CFRP structure using resistive heating. Because the delamination crack interrupts heat conduction, we can detect the crack by monitoring temperature profile on the structure surface. The method could be used with existing airplane lightning protection systems, which consist of metal strips or mesh mounted on the aircraft surface.

研究分野：工学

キーワード：非破壊検査 繊維強化複合材料 層間はく離 衝撃損傷

1. 研究開始当初の背景

近年、重量削減を目的として、Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)の航空機や自動車への適用が拡大している。CFRP は高強度かつ高剛性の繊維と、繊維を保持する母材樹脂から成る複合材料である。

2011年に Boeing 社が CFRP 製の旅客機を世に送り出し、CFRP の検査、保守技術の早期確立が望まれるようになった。実害に繋がる損傷の精密検査は、検査時間やコストが大きく、数千~数万フライトに一度しか実施できないものもある。航空機をフライト後に毎回検査できれば、安全性が向上する上、構造の更なる軽量化を図ることができる。

CFRP 積層構造が大きな面外方向の荷重を受けると、表面がへこむように塑性変形(デント)し、層間が局所的にはく離(層間はく離)する。また場合によっては一部の繊維が破断する。圧縮強度の減少を招く層間はく離は検出すべき有害な損傷である。

航空機の毎フライト検査の実現を目標とし、電気抵抗変化法(CFRP の構成材である導電性の炭素繊維をセンサとし、損傷による電気抵抗変化を利用して検査を行う)を用いた二段階検査法が開発された(図1)。まず航空機の構造部材のような大型 CFRP 構造のデント(表面のへこみ)を短時間で検出し、その後デント周辺を詳細に検査する。

このとき CFRP 表面に貼付される耐雷用金属メッシュ(被雷時の大電流を分散させ CFRP を保護する)を、電気抵抗加熱および電気抵抗測定用の配線として兼用する(図2)。これにより重量増加を防ぎ、検査設備を容易に機体へ実装できる。

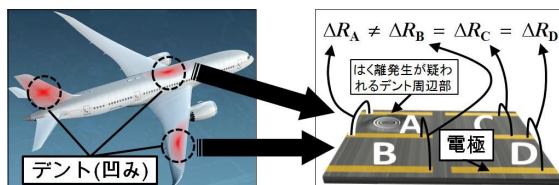


図1 航空機の短時間デント(構造表面のへこみ)検査(左)と検出したデント周辺の詳細検査(右)

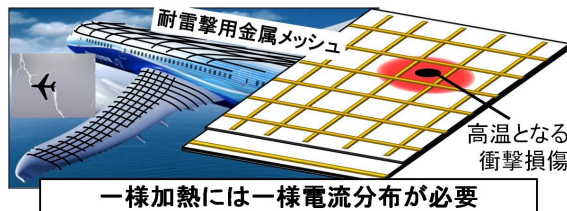


図2 耐雷用金属メッシュを利用した電気抵抗加熱による CFRP 構造の損傷検査。

本研究では、耐雷用金属を利用した CFRP 製旅客機構造の損傷検査に組み込み可能な層間はく離検出技術として、選択的層加熱法を提案し、その有効性を検証する。

CFRP 積層構造の各層は力学的だけでなく

電気的にも顕著な異方性を示す。繊維方向はその他の方向に対し非常に電気を流しやすい。これを利用して、CFRP 積層構造内の特定の層のみを電気抵抗加熱(選択的層加熱)し、表面温度の観測により CFRP 内の層間はく離を検出する方法を提案する。

抵抗加熱するために CFRP 表面に取り付ける金属製電極およびその配線は、図2のように耐雷用シールドとしても将来的に兼用できる可能性がある。

2. 研究の目的

前述したとおり、本研究の開始以前に、航空機のような大型 CFRP 構造からデントを瞬時に特定する簡易的な検査技術が確立されていた。デントの周辺には層間はく離が発生している可能性がある。しかし、層間はく離の寸法、位置、深さを同定する詳細検査技術は未確立であった。

以上のことから、本研究目的を下記のように定める。層間はく離により構造内の伝熱経路が部分的に遮断され、伝熱量が変化することを利用した検査法を提案する。CFRP 積層構造の各層を選択的に抵抗加熱しながら表面温度を計測し、層間はく離の寸法、位置、深さを推定し、その精度を実験的に検証する。また本検査にて必要となる、無損傷状態の CFRP 構造をむらなく一様加熱する技術も提案する。

3. 研究の方法

CFRP 積層構造の選択的層加熱方法と、それを用いた層間はく離検査の原理について述べる。

(1) CFRP の電気異方性と選択的層加熱法

CFRP は導電性をもつ炭素繊維と非導電性の母材樹脂から成る。長繊維かつ一方向材の CFRP では、繊維方向の導電率が著しく高く、繊維直交方向や厚さ方向に対し 100~10,000 倍以上に及ぶ場合もある。

例として図3に0度方向(水平方向)の炭素繊維を持つ層と90度方向(紙面垂直方向)の繊維を持つ層から成る CFRP 直交積層板(積層構成[90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>]<sub>S</sub>)に対し、0度方向に電圧を印加した際の電流密度分布(有限要素解析結果)を示す。負荷された電流の大部分は0度層を流れるため0度層のみが発熱する。ほとんど電流を流さない90度層の発熱は無視できる場合が多い。

この性質は多方向積層板でも同様であり、

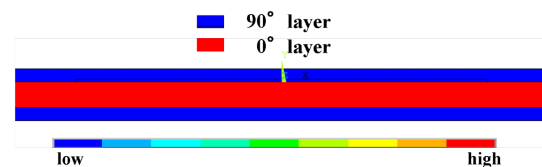


図3 水平方向(0度方向)に電位差を負荷した CFRP 直交積層板(積層構成[90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>]<sub>S</sub>)の電流密度分布(有限要素解析結果)。

この性質を利用して特定の層のみ加熱する。

## (2) 層間はく離の検出法

層間の一部がはく離すると、はく離は CFRP 構造内の熱伝導を妨げる面（熱抵抗を有する面）となる。

ここで CFRP 積層構造内の特定の層を加熱しながら表面の温度を観察することを考える。図 4 に示すように、層間はく離より表面（温度観察面）に近い層を加熱するとホットスポット（周辺の無損傷部より高温となる領域）が、遠い層を加熱するとコールドスポットが温度観察面に生じる。

したがって加熱する層を順次切り換えることでどの層間にはく離が存在するか同定できる。層間はく離は層間にのみ発生するため、図 4 の場合では第 5、6 層間にはく離が存在することがわかる。

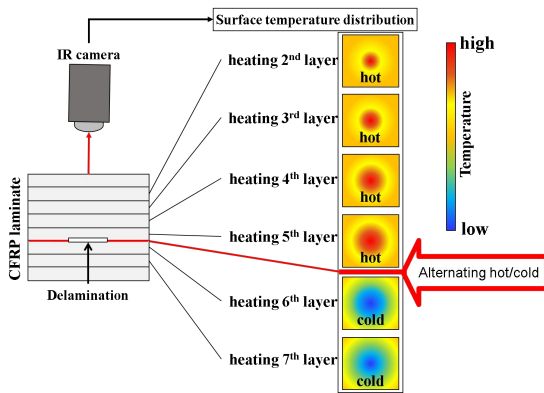


図 4 選択的層加熱を用いた CFRP 積層板内の層間はく離の検出手順。加熱層を順次切り換えることではく離を生じた層間を特定する。

表面から遠い、深い位置に生じた層間はく離ほど検出感度が低下する。検査対象が薄板構造であれば、どちらの面を検査しても層間はく離を見つけられる場合が多い。一方、厚板構造を検査する場合、両面を検査することが望ましい。しかし検査対象の形状や設置状況によっては、両面に加熱装置や温度計測装置を設置できない場合もある。このような場合、表面（温度観察面）から遠い位置に生じた層間はく離を検出可能な手法が必要となる。

提案手法は、検査対象自身を内部から発熱させることができ、また加熱用の電流を増減させることで発熱量を調整できる。その結果、構造表面を光学的手法で加熱する他の検査法に比べ、より深い（表面からより遠い）位置に生じた層間はく離を検出可能となる。

また、提案手法はロックインサーモグラフィのような周波数応答を利用した検査に応用可能である。本研究では一定電流負荷による加熱のみ扱うが、任意の電流波形を負荷して加熱することもできる。したがって様々な周波数の正弦波加熱も可能である。検査した

い深さに応じて周波数を最適化することで、層間はく離の検出感度を向上できる可能性がある。

## 4. 研究成果

### (1) 実験手順

実験に用いる CFRP 積層板を図 5 に示す。積層構成  $[90_3/0_3]_s$  の直交積層板であり、一層あたりの厚さは 0.2mm である。中央の 0 度層 3 層に銅めっき電極を作成し、0 度方向に電位差を与えて抵抗加熱した。前述したように 90 度層にはほとんど電流が流れない。

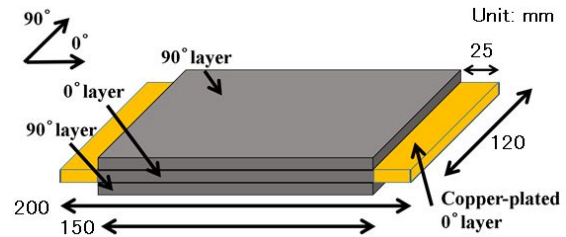


図 5 選択的層加熱の実験に用いた CFRP 積層板。中央の 0 度層のみを抵抗加熱する。

直径 14mm の球形状の圧子を準静的に CFRP に押し込み、層間はく離を発生させた。その際 CFRP の下に内径 20mm または 40mm のリング形状の支持台を設置した。大小様々な 6 つの層間はく離を付与した（図 7 および (2) 実験結果参照）。

図 6 に層間はく離検査設備の全体図を示す。CFRP から外部への熱伝導を避けるため、CFRP を支持台の上に置かず、紐で吊り下げた。CFRP 表面の温度を、赤外線カメラ (FLIR 社製赤外線サーモグラフィ T620) により観察した。CFRP にタスコジャパン社製黒体スプレー TH-1B を塗布し、表面の熱放射率を一樣 (0.94) にした。

エヌエフ回路設計ブロック社製バイポーラ電源 BP4620 を用いて、電極に 19A を負荷し、電流負荷開始直後から 60 秒間、温度を観察した。

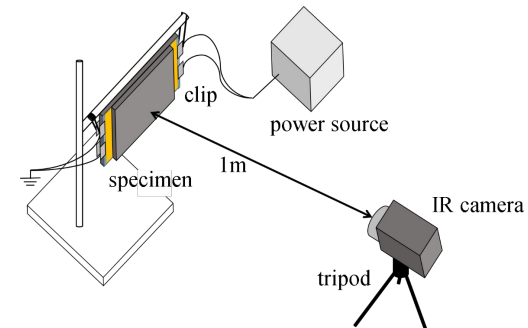


図 6 CFRP 積層板の選択的層加熱と表面温度計測実験の装置全体図。

### (2) 実験結果

CFRP を日立建機製水浸式超音波探査映像装置 AT5000 により探傷した C スキャン画像を図 7 に示す。赤い部分は層間はく離の投影

画像を指す。それぞれの荷重負荷点(D1-D6)を挟む位置に、対をなすような双葉形状の層間はく離がみられた。

図8は抵抗加熱中のCFRPの表面温度分布(Plateau equalized temperature)を示している。図7と8を見比べると、超音波画像のはく離形状を反映した温度分布が得られていることがわかる。例えば図8の加熱開始5秒後の画像から、D1~D5の位置に各層間はく離と同一形状の温度コントラストを確認できる。D6の位置では、温度コントラストを確認できず、はく離の検出は叶わなかった。

以上から、本実験条件において検出できた最小の層間はく離はD5であった。D5は長さ11mm、幅13mm、投影面積143mm<sup>2</sup>であった。面積300mm<sup>2</sup>の層間はく離がCFRP積層構造の圧縮強度の低下を招く恐れが指摘されているため、本手法は一定の検出能力を有しているといえる。

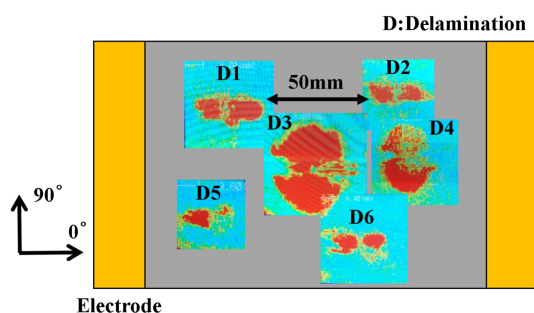


図7 CFRP積層板に付与した層間はく離超音波探傷によるC-scan画像。

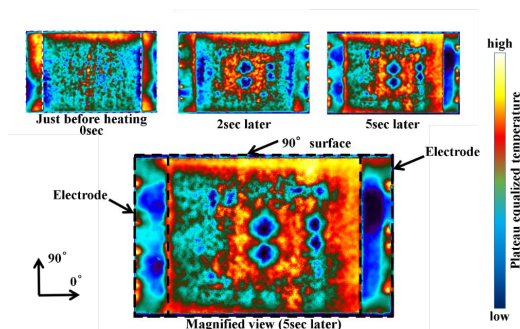


図8 抵抗加熱開始0秒、2秒、5秒後におけるCFRP積層板の表面温度分布(Plateau equalized temperature)。

図9に、無損傷部とはく離部の温度差(無損傷部の温度からD1~D6点それぞれの温度を差し引いたもの)を示す。

事前に、本加熱法により無損傷のCFRPを一様に加熱できることを確認している。無損傷材の温度の場所によるばらつき(標準偏差)が0.04であるのに対し、図9中のD1、D3、D4の温度差は十分大きく、これらのはく離は温度の時刻暦データからも明確に検出できるといえる。D2、D5は検出可能といえるが、時刻によっては無損傷部との温度差が小さく曖昧であった。図8の温度分布においても

明瞭に検出できなかったD6は、図9からも検出できなかった。

図9はD1~D5の温度差が正であり、したがって無損傷部より低温(コールドスポット)であることを示している。図4に示したコールドスポットと層間はく離が生じた深さとの関係から、はく離は加熱層(0度層)と表面(温度観察面)との間に生じたとわかる。その間に存在する0度-90度層間は第3-4層間しかないため(はく離は一般的に繊維方向の異なる層間に生じる)、はく離を生じた層間を特定することができる。

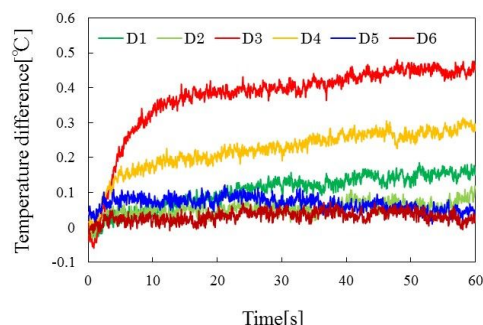


図9 抵抗加熱開始後の無損傷部と層間はく離の中心点(D1~D6)との温度差。正の温度は無損傷部より低温(コールドスポット)であることを意味する。

### (3) 成果のまとめ

耐雷用シールドを利用した複合材製旅客機の衝撃損傷検査の中核を成す技術として、選択的層加熱方法を提案し、CFRP積層板内に生じた層間はく離の検出能力を実験により検証した。得られた知見を以下に記す。

- ・ 選択的層加熱による層間はく離の検出手法を提案した
- ・ 提案した加熱手法により無損傷状態のCFRPを一様にむらなく加熱できることを確認した(無損傷材の表面温度の標準偏差0.04)
- ・ 提案手法によるCFRP直交積層板(板厚2.4mm)の層間はく離検査を実施し、表面から0.6mmの位置に生じた層間はく離(長さ11mm、幅13mm、投影面積143mm<sup>2</sup>)を検出可能であることを確認した
- ・ 層間はく離の深さ方向の位置(どの層間がはく離したか)を同定可能であることを確認した

### (4) 耐雷用シールドの配線兼用化について

本稿ではCFRPの抵抗加熱設備を航空機に実装する具体的な手法には触れなかったが、図2のように電極と抵抗加熱用電源の配線として耐雷用銅メッシュを利用できる可能性がある。

そのためには機体に張り巡らされた金属メッシュを縦線と横線に分離させ、機体に設置した全電極にアクセスできるよう工夫する必要がある。

例えば図 10 のように、縦線 4 と横線 B を選んで電源に接続すると、交差点周辺に電流を流すことができる。45 度方向に電流を負荷すれば、電流の大部分が積層板内の 45 度層内を流れ 45 度層を集中的に抵抗発熱させることができる。縦横線の交差点に挿入するバリスタスペーサは、通常時は両者を絶縁し、被雷時に大電圧を受けて良導体となる。

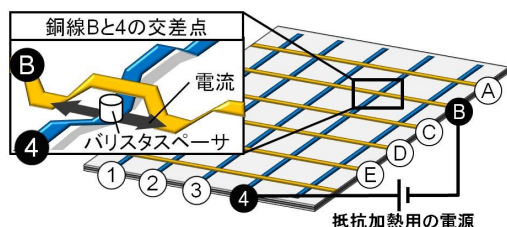


図 10 耐雷用金属シールドを電流印加の配線と利用する例。縦線と横線の交点への電流印加。

## 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 1 件)

- (1) 古賀洋一郎, 鈴木良郎, 轟章, 水谷義弘, CFRP の電気抵抗異方性を利用した選択的層加熱による層間はく離検査, 日本複合材料学会誌, 査読有り, 42 巻 5 号, 2016, ページ未定。

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) 鈴木良郎, 轟章, 水谷義弘, 選択的ジュール加熱を利用した炭素繊維複合材の簡易損傷検査, 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム, 2015 年 3 月 17 日, 沖縄県青年会館, 沖縄。
- (2) 古賀洋一郎, 鈴木良郎, 轟章, 水谷義弘, 電気抵抗加熱を利用した CFRP 内部欠陥の検出, 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム, 2015 年 3 月 17 日, 沖縄県青年会館, 沖縄。
- (3) 古賀洋一郎, 鈴木良郎, 轟章, 水谷義弘, CFRP の電気抵抗異方性を利用した選択的層加熱に基づく層間はく離検査, 日本複合材料学会第 40 回複合材料シンポジウム, 2015 年 9 月 18-19 日, 沖縄県青年会館, 沖縄。
- (4) Yoichiro Koga, Yoshiro Suzuki, Akira Todoroki, Yoshihiro Mizutani, Delamination detection based on selective-layer heating by using resistivity anisotropy of CFRP, Korea-Japan joint symposium on composite materials, Oct 29th, 2015, Chonbuk national university, Korea.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

東京工業大学, 轟, 水谷研究室, 研究室ホームページ, 耐雷用シールドを用いた FRP 製航空機の全域瞬時衝撃モニタリング, 2015 年, <http://www.ginza.mes.titech.ac.jp/research/shieldsensor.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 良郎 (SUZUKI YOSHIRO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 40631221