

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 12 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14143

研究課題名(和文)自動接着補修のための渦電流を用いたCFRP積層構造の同定

研究課題名(英文) Identification of CFRP Laminate Structure by utilizing Eddy Current aiming for Automation of Adhesive Repair

研究代表者

高木 敏行 (TAKAGI, Toshiyuki)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：20197065

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を用いた航空機などの大型構造体のスカーフ接着補修を自動化することを目的とした、渦電流を利用したスカーフ研削面におけるCFRP積層構造の非破壊評価手法の開発を行った。接着補修において重要となるスカーフ研削面における繊維配向の同定と各ラミネート層のパッチ形状の抽出を、相互誘導差動型プローブを用いた渦電流試験法を応用する技術を開発した。本手法により、修理工の経験と技術に依ることなく接着補修が行われるようになることで、複合材料を構造体とする大型構造物の補修がより安価かつ容易になることが期待される。

研究成果の概要(英文)：This study has developed a nondestructive evaluation method of the laminate structure of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) on the scarfed surface by utilizing eddy current, aiming for an automation of the scarf adhesive repair for huge structures such as aircraft composed of CFRP. The technique able to automatically characterize the fiber orientation and to extrude the shape of the patch of respective laminate layer on the scarfed surface, which is important in scarf repair, was developed by utilizing Eddy current testing with a mutual induction differential type probe. Since the adhesive repair is performed not depending on the advanced skill and experience of professional repairmen with this technique, it is expected that the repair of huge structures composed of composite materials could be more reasonable and easier.

研究分野：電磁非破壊評価

キーワード：渦電流試験 炭素繊維強化プラスチック スカーフ接着補修 保全 自動化 非破壊検査 繊維配向  
電磁場数値解析

### 1. 研究開始当初の背景

航空機の一次構造材などに使用される炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の積層板は、一方向炭素繊維ラミネートを、様々な繊維配向角度になるよう積層し、硬化させることで成形される。ここにバードストライクや雹などにより外部から力が加わると層間剥離などの内部欠陥が生じる。このような内部欠陥は構造体の機械的強度を低下させるので、超音波探傷法などの非破壊検査で発見し、早い段階で補修を行うことになる。

航空機の場合、重要な欠陥の補修にはスカーフ接着補修を実施することが推奨されている(引用)。しかしながら、スカーフ接着補修には修理工の高度な技術と熟練が要求される。そのため、複合材料製の航空機が多数運行されるようになった現在でも、補修が必要になれば、それが可能である数少ない整備場まで機体を運搬する必要がある。そのため複合材料製の航空機の維持と整備にかかるコストが高価となり、機体のサービスタムも減少するという課題がある。

スカーフ接着補修は、(1)超音波探傷法による内部欠陥の検出、(2)欠陥部を中心とするスカーフ研削、(3)スカーフ研削部のプリプレグパッチ形状の抽出と切り出し、(4)接着フィルムとパッチの適用、(5)硬化と超音波探傷法による確認、という5段階の工程によって実施される。このうち(2)と(3)の工程で修理工の高度な技術が必要となる。この(2)と(3)の工程を自動化することが可能になれば、スカーフ接着修理を汎用化させ、複合材料製の大型構造物の保全がより安価になる。

### 2. 研究の目的

本研究では、工程(3)のスカーフ研削部のプリプレグパッチ形状の抽出と切り出しを自動化するための技術として、スカーフ研削面の繊維配向の同定を非破壊的に行う手法、およびスカーフ面上において隣接する層の境界位置を同定する手法を開発することを目的とする。これらを同時に行う手法として、相互誘導差動型プローブを用いた渦電流試験法(ECT)による評価手法を提案し、実験及び数値解析によりその有効性と、スカーフ修理の自動化への適用性を評価する。

### 3. 研究の方法

#### (1) スカーフ研削試験片

一方向プリプレグ(TR380G250S、三菱レイヨン)を $[(45_2/0_2/-45_2/90_2)_3]_s$ の積層パターンで48枚積層してプリフォームを作り、オートクレーブを用いて0.5 MPa、130°Cで2時間加熱し、樹脂を硬化させた。得られた積層体を220 x 110 x 11t (mm)の寸法になるように成形し、水平面から1.9°の角度で研削してスカーフ研削面を形成した。この試験片を擬似等方スカーフ試験片と呼称する。

#### (2) 渦電流試験装置

渦電流信号強度からCFRP中の炭素繊維の

配向を検出できることは、Heuerらによって報告されている(引用)。また、本研究の過程では、2ヶ以上の検出コイルを用いる差動型プローブを用いることで、繊維配向を精度良く検出できることを示している(成果雑誌論文)。これを踏まえ、本研究では、励磁コイルの内側に2ヶの検出コイルが並ぶ相互誘導差動方式のプローブを用いて、渦電流試験を行うこととした。図1に、渦電流試験装置の概略図を示す。励磁コイルと検出コイルの巻数はそれぞれ185と340、内径は4 mmと0.77 mm、外径は4.5 mmと2 mm、高さはいずれも2.3 mmとした。

関数発生器を用いて印加電圧 $5V_{p-p}$ 、10 MHzの正弦波交流を励磁コイルに与え、2ヶの検出コイルから得られる信号の差動信号を、差動アンプを通して増幅し、関数発生器の信号を参照信号としてロックインアンプでさらに増幅し、これをデータとして取り込んだ。

プローブの先端をスカーフ試験片の研削面に接触させリフトオフを0 mmとし、スキャンピッチを0.1 mmとして2次元平面で走査した。この時、原点を表面から11層目である0°層と10層目である45°層の境界とし、ここから表面層の方向(x方向)に向かって60 mm、その垂直方向(y方向)に15 mm走査した(図2)。また、2ヶの検出コイルはx方向(0°方向)に水平になるように配置された。得られたCスキャン画像に2次元空間フーリエ変換を用いた画像処理を行い、特定の角度の繊維配向の抽出を行った。

x方向にプローブをスキャンすると、異なる繊維配向の繊維層の境界を横切る時、渦電流信号の差動振幅にピーク値が現れる。このピーク値から実際の境界位置を同定することが可能になれば、渦電流試験によってプリプレグ形状の抽出が可能となる。差動信号の振幅のピーク値が現れる位置と境界位置の解析を、辺要素有限要素法による電磁場数値解析を用いて行った。ソルバとして市販の解析ソフト(PHOTO-EDDY jω、(株)フォトン)を用い、解析モデルは図3に示すとおり異なる繊維方向を有する2層が並んでいるものとし、この表面を差動型プローブが走査するときの渦電流信号の差動振幅を得た。差動型プローブは境界面に対して垂直方向に走査するものとし、2ヶの検出コイルは走査方向に平行に並ぶものとした。なお、CFRPの電気伝導率は、実際の試験片を測定して得たテンソル値を採用した。

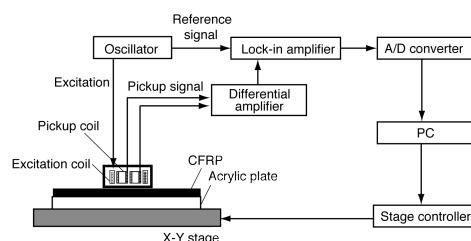


図1 渦電流試験装置の概略図

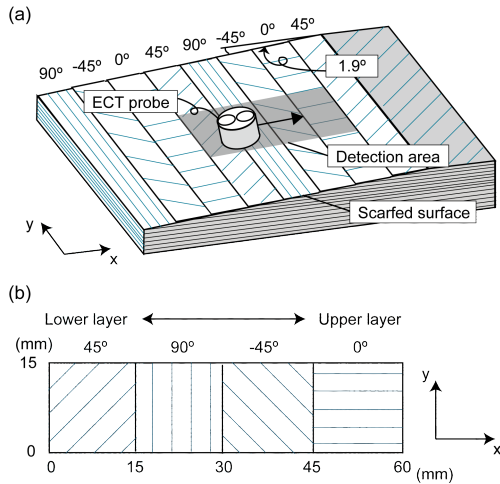


図2 (a) 擬似等方スカーフ試験片とECT 走査領域、(b) ECT 走査領域の繊維配向角度

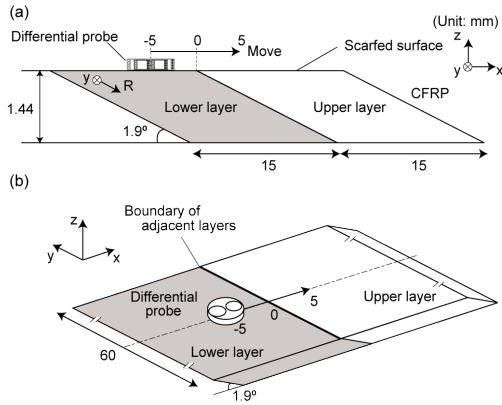


図3 数値解析モデル：差動型プローブを用いたスカーフ斜面における渦電流信号走査の (a)断面図と(b)斜視図

#### 4. 研究成果

45°層の領域から0°層の領域にかけて渦電流試験を行って得られた渦電流信号強度(V)のコンター図を図4に示す。45°層、90°層、-45°層の繊維配向は確認できるが、0°層を示す信号は確認できなかった。これは、2ケの検出コイルが繊維配向方向に水平に配置されているため、それぞれのコイルインピーダンスの差が小さいためである。また、45°層と90°層の境界、90°層と-45°層の境界の位置も、渦電流信号からある程度検出可能であることが示唆された。

繊維配向が確認できた45°層(x = 0 ~ 15 mm)、90°層(x = 15 ~ 30 mm)、-45°層(x = 30 ~ 45 mm)の画像について、2次元空間フーリエ変換を用いた画像処理を行い、特定の角度の繊維配向の抽出を行った。図5(a)に45°層の走査領域の、図5(b)に90°層の、図5(c)に-45°層のCスキャン画像を示す。45°層と90°層については、表面の繊維配向がよく抽出されたことが分かる。一方、-45°層については、1層下部にある90°層の影響が大きく、表面の-45°の配向の情報うまく抽出されないことがわかる。このことより、表面

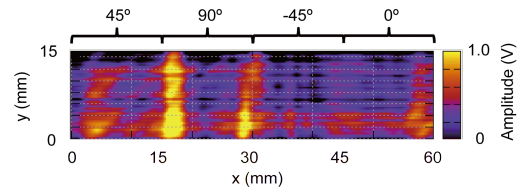


図4 スカーフ研削面における渦電流信号強度(V)のコンター図。励磁電流の周波数は10 MHz

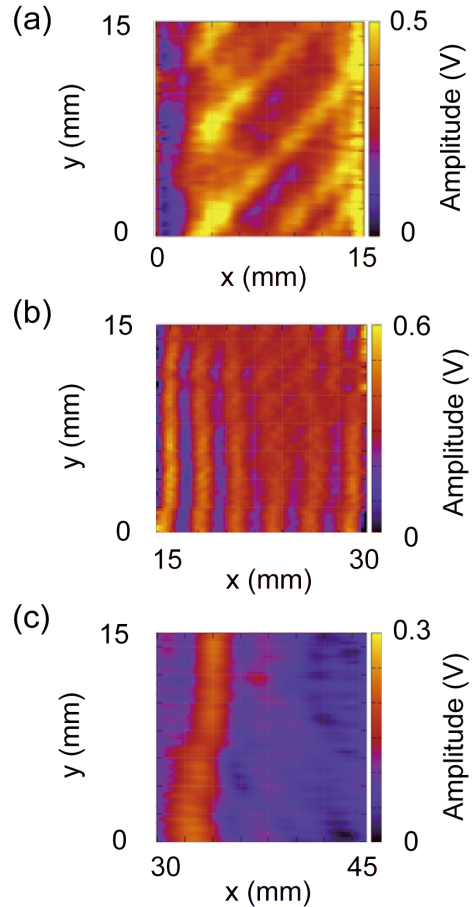


図5 2次元フーリエ変換による画像処理を施したスカーフ研削面における渦電流信号強度のコンター図: (a)45°層、(b)90°層、(c)-45°層

の繊維配向のみを抽出し、同定するためには、下部にある繊維配向の影響を取り除く工夫が必要になると考えられる。

以上より、2ケの検出コイルを用いる相互誘導差動方式の渦電流試験を用いることで、スカーフ研削面の繊維配向を同定できる可能性が示唆された。しかしながら、対象の層の繊維配向と検出コイルが平行に配置された場合の対処法や、下部にある繊維配向の影響を取り除く方法を考案する必要がある。

図6に、隣接する層の境界近傍のスカーフ斜面に対して差動型プローブを走査した場合に得られる渦電流信号の差動振幅の測定値と辺要素有限要素法による解析値を示す。差動振幅は、表面に見える境界の位置から数mm上層側にずれた場所でピーク値を示すこ

とが分かった。この差動振幅のピーク値は辺要素有限要素法による数値解析において再現された。実験と解析の結果が一致することから、数値解析の結果を用いることで境界の位置特定が可能であることが示された。

差動型プローブを用いた渦電流試験によってスカーフ研削斜面の繊維配向を同定することが可能であることが示された。また、境界近傍における渦電流の差動振幅のピーク値の位置から、数値解析と比較することで境界の位置特定が可能であることが示された。以上の結果より、渦電流試験はスカーフ修理の自動化への適用可能性を有することが示された。

<引用文献>

MIL-HDBK-17-3F, Chapter 8, 2002, 39-52  
 H. Heuer, et al., Review on quality assurance along the CFRP value chain - Non-destructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques, Composites Part B-Engineering 77, (2015) 494-501.

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)

Ryoichi Urayama, Hiroyuki Kosukegawa, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Identifying the Orientation of Carbon Fibers in Carbon-Fiber-Reinforced Plastic by Eddy Current Testing with a Differential Probe, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 41 (2016) 18-25.

[学会発表](計 17 件)

吉川裕貴, 小助川博之, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 渦電流試験法を用いた CFRP の表面近傍及び深部の炭素繊維配向の同定, 東北支部第 52 期総会・講演会, 2017 年 3 月 14 日, 東北大学工学部青葉記念会館(宮城県仙台市)

加藤凌, 小助川博之, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 渦電流信号強度の増幅を目指した磁性ナノ粒子含有 CFRP の開発と繊維断裂の検出性評価, 東北支部第 52 期総会・講演会, 2017 年 3 月 14 日, 東北大学工学部青葉記念会館(宮城県仙台市)

木曾雄太, 小助川博之, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 渦電流探傷法による CFRP のスカーフ斜面における繊維配向の同定, 東北学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月 8 日, 東北学院大学多賀城キャンパス(宮城県多賀城市)

小助川博之, 加藤凌, 吉川裕貴, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 渦電流探傷法を

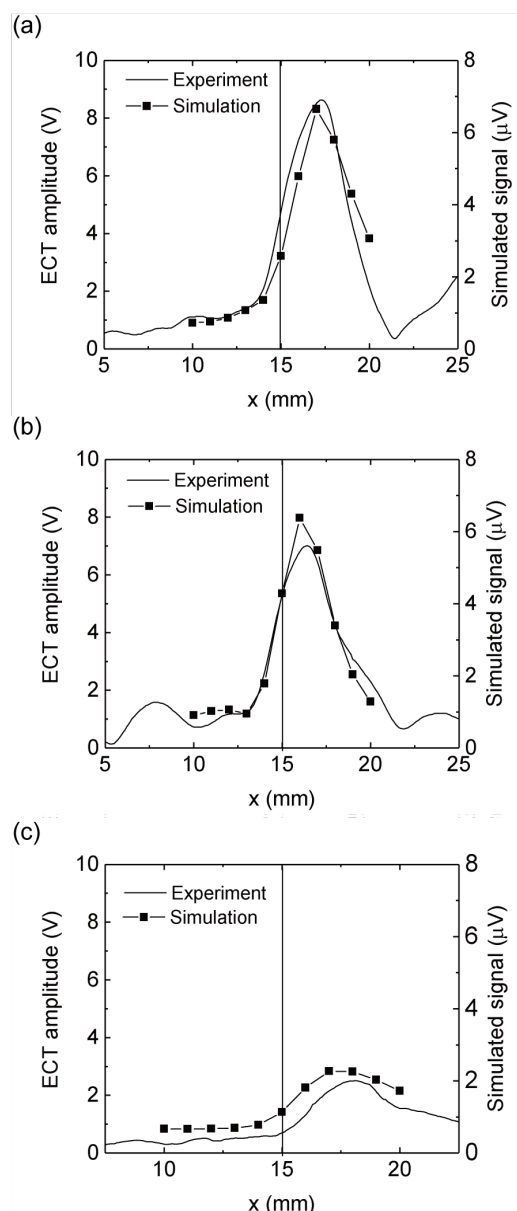


図 6 隣接する層の境界近傍におけるスカーフ斜面の 1 次元走査による ECT 信号振幅のプロファイル。中央の実線(x = 15 mm)が表面における層間の境界位置。(a)[45°/90°]、(b)[90°/-45°]、(c)[-45°/0°]

用いた炭素繊維強化プラスチックの欠陥検出, 第 25 回 MAGDA コンファレンス in 桐生, 2016 年 11 月 24 日, 桐生市市民文化会館(群馬県桐生市)

Yuki YOSHIKAWA, Hiroyuki KOSUKEGAWA, Ryoichi URAYAMA, Tetsuya UCHIMOTO, Toshiyuki TAKAGI, Detectability of Eddy Current Testing for Fiber Orientation of Cross-ply CFRP with Differential Type Probe, 2016 International Conference on Maintenance Science and Technology, 2016 年 11 月 3 日, Shenzhen (CHINA)

小助川博之, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 成形加工プロセスにおける電磁現象を利用した炭素繊維強化プラスチックの非

破壊評価, プラスチック成形加工学会第24回秋季大会 成形加工シンポジウム'16, 2016年10月27日, 仙台国際センター(宮城県仙台市)

Yuki Yoshikawa, Hiroyuki Kosukegawa, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Characterization of Carbon Fibers Orientation in CFRP by Eddy Current Testing with Differential Type Probe, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, 2016年10月11日, Sendai (JAPAN)

Ryo Kato, Hiroyuki Kosukegawa, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Development of ferromagnetic nanoparticulate-filled CFRP for amplification of eddy current signals, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, 2016年10月11日, Sendai (JAPAN)

Hiroyuki Kosukegawa, Yuki Yoshikawa, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Assessment of eddy current signal in CFRP for detection of fiber orientation, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, 2016年10月10日, Sendai (JAPAN)

吉川裕貴, 小助川博之, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 渦電流試験法を用いたCFRPの表面近傍における炭素繊維の配向検出, 保安検査部門・新素材に関する非破壊試験部門合同ミニシンポジウム, 2016年7月7日, KGU 関内メディアセンター(神奈川県横浜市)

Hiroyuki Kosukegawa, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Non-destructive assessment of fiber alignment in CFRP using eddy current testing with differential type probe, 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016年6月15日, Munich (GERMANY)

加藤凌, 小助川博之, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 電磁的特性に注目したCFRPの渦電流信号強度の計測と評価, 第28回電磁力関連のダイナミクス, 2016年5月18日, 慶應義塾大学日吉キャンパス協生館(神奈川県横浜市)

吉川裕貴, 小助川博之, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 相互誘導差動型プローブを用いた渦電流探傷試験によるCFRPの繊維配向の検出性評価, 新素材に関する非破壊試験部門ミニシンポジウム, 2015年11月4日, 秋田市第一会館本館(秋田県秋田市)

高木敏行, 小助川博之, 内一哲哉, 浦山良一, CFRPの電磁現象を用いた非破壊評価, 新素材に関する非破壊試験部門ミニシンポジウム, 2015年11月4日, 秋田市第一会館本館(秋田県秋田市)

Ryo KATO, Hiroyuki KOSUKEGAWA, Ryoichi URAYAMA, Tetsuya UCHIMOTO, Toshiyuki

TAKAGI, Amplification of Eddy Current Signals of CFRP by Adding Ferromagnetic Nanoparticles and its Numerical Simulation by Modified Vector Potential Method, Twelfth International Conference on Flow Dynamics, 2015年10月28日, Sendai (JAPAN)

Yuki Yoshikawa, Hiroyuki Kosukegawa, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Evaluation of Orientation of Carbon Fibers in CFRP by Eddy Current Testing with Differential Type Probe, Twelfth International Conference on Flow Dynamics, 2015年10月28日, Sendai (JAPAN)

Ryoichi Urayama, Hiroyuki Kosukegawa, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Non-destructive defect diagnosis of carbon fiber-reinforced plastic by eddy current testing with differential type probe, The 20th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, 2015年9月21日, Sendai (JAPAN)

〔図書〕(計 2 件)

高木敏行, 小助川博之, 東北大学流体科学研究所, 東北大学流体科学研究所報告第27巻, 2016, 11-28

高木敏行, 小助川博之, S&T出版株式会社, CFRP/CFRTP 成形・加工・接合技術, 2016, 180-191

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: プローブ、及びそれを用いた導電性繊維強化型積層体のスカーフ面の積層形状同定方法

発明者: 高木敏行、小助川博之

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: 特許願 2017-169027 号

出願年月日: 平成29年9月1日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 敏行 (TAKAGI, Toshiyuki)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号: 20197065

(2) 研究分担者

内一 哲哉 (UCHIMOTO, Tetsuya)

東北大学・流体科学研究所・准教授  
研究者番号： 70313038

三木 寛之 (MIKI, Hiroyuki)  
東北大学・学際科学フロンティア研究所・  
准教授  
研究者番号： 80325943

小助川 博之 (KOSUKEGAWA, Hiroyuki)  
東北大学・流体科学研究所・助教  
研究者番号： 00709157