

令和元年6月26日現在

機関番号：54101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14564

研究課題名（和文）渦電流法による立体形状の熱可塑性CFRPの損傷修復および非破壊検査技術の開発

研究課題名（英文）Development of nondestructive inspection and damage repair technologies for CFRTF of three-dimensional shape using the eddy-current method

研究代表者

板谷 年也 (TOSHIYA, ITAYA)

鈴鹿工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：00650425

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、電磁気現象を利用した非破壊検査法の研究を進展させ、立体形状のCFRTP（熱可塑性炭素繊維強化プラスチック）の損傷修復及び非破壊試験法を確立することを目的とした。CFRTPの溶融に適したコイル形状を選択するために、有限要素法ソフトウェアを使用して、様々なコイルによって誘導される渦電流密度と温度分布を解析した。方形コイルによる誘導加熱でCFRTPの表面を融点温度まで上昇させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来の金属材料にはなかったCFRPのような新素材の損傷修復やその強度評価の課題を渦電流法による融着および非破壊検査技術で解決を試みた。国内での非破壊検査の市場規模は、機器の販売に検査サービス市場を加えて、2000億から3000億円といわれている。今後、航空機や自動車に利用が急拡大する新素材であるCFRPの安全性の確保およびリユースによる低炭素社会実現に大いに寄与できると考える。

研究成果の概要（英文）：This study aims to establish a damage repairing and nondestructive testing method that can be applied to CFRTP of three-dimensional shape by developing conventional studies of the nondestructive inspection method using an electromagnetic phenomenon. We analyzed the eddy-current density and temperature distribution induced by various coils in CFRTP using the finite element method software to select the shape of the coil that is suitable for melting CFRTP. As a result, we succeeded in raising surface of CFRTP sheet to melting point temperature by induction heating with rectangular coil.

研究分野：非破壊検査

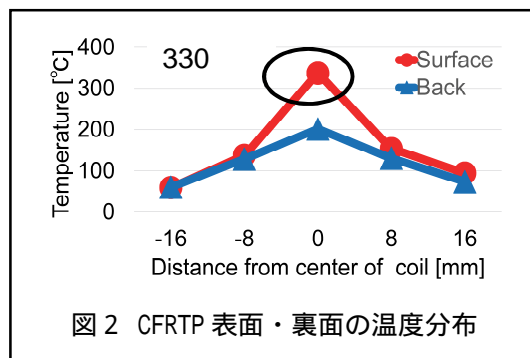
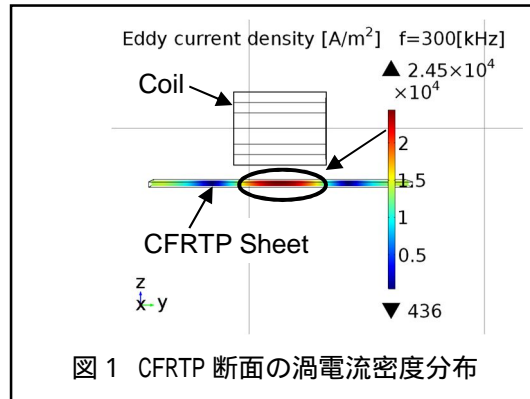
キーワード：非破壊検査 熱可塑性CFRP 誘導加熱 渦電流探傷法 損傷修復

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、航空機や自動車などの構造部材、コンクリート構造物の補強材に使用されている。現在、炭素繊維を熱硬化性のエポキシ樹脂で固めた熱硬化性の CFRP が主流であるが、これをポリアミドやポリプロピレンなどの熱可塑性樹脂に変えた CFRT も成形時間の短縮やリサイクル可能な点から徐々に普及しつつある。CFRTP は、耐久性や軽量化の観点から機械接合ではなく融着接合が多く用いられており、その融着部の損傷修復や強度評価が重要な課題である。また合わせて、複合材特有の立体形状品の層間剥離や異物などの内在する欠陥を効率的に発見することが期待される。すなわち、CFRP のような新素材の損傷修復および検査に関して、従来の金属材料にはなかった解決すべき技術的課題がある。

申請者は、渦電流法を利用した非破壊検査の従来の研究で、導電性材料の内部まで欠陥検出が可能な縦置きコイル系 (Itaya et al. NDT & E Int. 2011) および任意形状コイルの渦電流分布 (Itaya et al. PIER M 2016) の知見を得ており、渦電流法による CFRTP の損傷修復および非破壊検査技術に着目し、予備的な研究に取り組んできた。厚さ 0.6mm 平板状の CFRTP を対象として、提案する方形コイルによる有限要素解析を行い、コイル巻線直下で渦電流密度および熱発生率が高いことを明らかにした。そして、縦置き方形コイルを接続した汎用の高周波電源を用いて CFRTP の誘導加熱実験を行い、表面および裏面の温度分布を調査した。コイル周波数 300kHz、コイル電流 5A に設定し、300 以上に加熱することで、コイル巻線直下の CFRTP 表面の溶融を実体顕微鏡で確認した。合わせて、厚さ 0.6mm 平板状の CFRTP を 2 枚重ね小型熱プレス機を用いて 210、2ton で融着も確認した。以上のことより、申請者は、立体形状に合わせて多種多様な形状のコイルを製作し、最適な周波数でマッチングさせることで、コイル巻線直下で融着に十分な加熱温度と欠陥検出のための渦電流を生み出せるのではないかとという着想に至った。



### 2. 研究の目的

本研究は、渦電流法による立体形状の炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) の損傷修復および非破壊検査技術を開発することを目的とする。近年、立体形状の CFRTP の成形技術の開発が報告されている。そのため、安全性確保の観点から立体形状品の損傷修復ニーズが高まっており、また合わせて非破壊検査技術の要望も高い。CFRTP は、耐久性や軽量化の観点から融着接合が多く用いられており、その融着部の損傷修復や強度評価が重要な課題である。加えて、複合材特有の層間剥離や異物など内在する欠陥を効率的に発見することが期待されている。上記課題を解決するため、渦電流法に着目し、立体形状に合わせてコイルをマッチングさせ、立体形状の CFRTP まで適用可能な損傷修復および非破壊検査法を確立することを目指す。

### 3. 研究の方法

立体形状の CFRTP の損傷修復および非破壊検査を開発するために、高周波励磁コイルと CFRTP の有限要素解析の結果から、立体形状に合わせて多種多様な形状のコイルを製作し、誘導加熱による CFRTP の融着実験とその融着部に対して非破壊・破壊評価を行う。立体形状の熱可塑性 CFRP (以下、CFRTP) として、全電動式射出成形機 (東芝機械社 EC100SX -2A) を用いて CFRTP シートと CFRTP ペレットとのハイブリッド成形によってハット型の CFRTP を製作する。研究の進め方として、

#### (1) 立体形状の CFRTP と高周波励磁コイルによる渦電流の相互作用の有限要素解析

有限要素法ソフトウェア (COMSOL Multiphysics 5.2a) を用いて、CFRTP の渦電流の変化と温度分布を解明する。CFRTP の設計は、3次元 CAD (SOLIDWORKS 2015 x64 Edition) を用いる。はじめに、COMSOL Multiphysics の CAD インポートモジュールで CAD データを取り込み、有限要素モデルを作成する。CFRTP シートと CFRTP ペレットの物性値は、キセノンフラッシュアナライザーを用いて熱拡散率を測定し熱伝導率を求める。そして、比抵抗・ホール測定システムを用いて、抵抗値を測定し導電率を求める。以上より、有限要素法による動磁場解析および伝熱解析を行う。

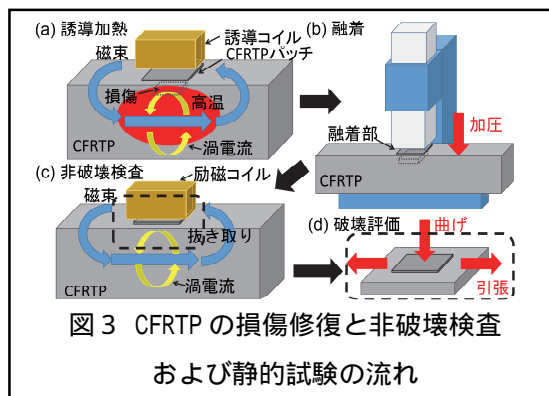
#### (2) 提案する誘導加熱コイルによる CFRTP の誘導加熱実験

汎用の高周波電源 (ナビオ株式会社 HRT-5K2 5kW クラス) を用いて立体形状に合わせてコイル

形状およびインダクタンスをマッチングさせる。立体形状の誘導加熱コイルは、耐熱性を考慮し、ガラス繊維材を切削加工し、ポリアミド導線を巻いて製作する。誘導加熱コイルによって熱可塑性 CFRP を加熱し、K 型熱電対を取り付けたデータロガー（グラフィック株式会社 midi LOGGER GL900）で表面および裏面温度を測定する。

### (3) 融着部の渦電流法による非破壊検査と抜き取り破壊評価

図 3 に CFRTP の損傷修復と非破壊検査および破壊評価の流れを示す。上記(2)の(a)誘導加熱による溶融部分を(b)小型プレス機(卓上型ニュートンプレス NT-100H)によって融着する。(c)融着部の渦電流法による非破壊検査は、発振器からパイボラ電源(テクシオ社 PBA20-12)を通して、コイルを励磁し、CFRTP に生み出される渦電流の変化をロックインアンプ(NF 社 LI5640)に接続した検出コイルの電圧変化として検出する。(d)CFRTP 用ジグソーにより当該部分を短冊状に切り取り、静的試験(株式会社島津製作所 精密万能試験機オートグラフ AG-Xplus 50kN)を行う。



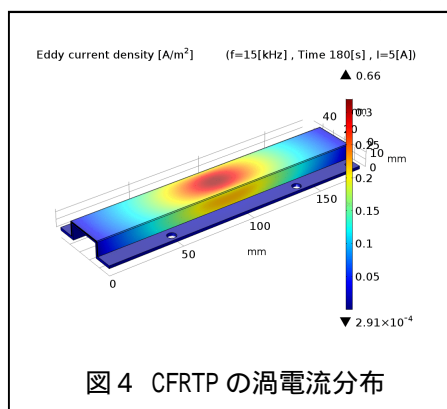
### (4) 改良した渦電流法による損傷修復および非破壊検査法の性能の検討

渦電流を利用した損傷修復および非破壊検査を確立するため、改良した渦電流法による誘導加熱および非破壊検査の測定性能を検証する。具体的に、渦電流を利用した損傷修復の性能について、誘導加熱による融着とその融着部の引張・曲げ強度の関係は十分に明らかにされていないため、試験結果から得られた情報を比較することで検討する。渦電流を利用した非破壊検査について、欠陥検出の分解能は、CFRTP 板表面から深さ 2mm の位置で、厚さ 50  $\mu\text{m}$ 、幅 20mm の層間剥離まで報告されている。本研究では、多種多様なコイル形状を用いて立体形状の CFRTP においても同様の欠陥検出分解能を探索する。

## 4. 研究成果

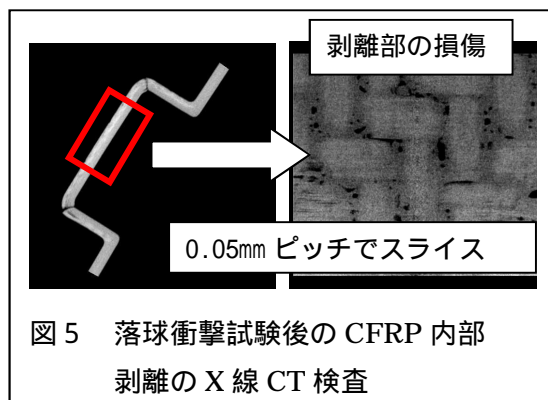
本研究は、熱可塑性 CFRP の渦電流法による損傷修復技術とその強度評価の基盤となる研究を行った。研究期間内には以下のことを明らかにした。

(1) 提案するコイルによる CFRTP の有限要素解析を行い、コイル形状および印加電流を変えた場合の CFRTP に発生する渦電流分布および温度分布を明らかにした。コイル巻線直下で、渦電流密度および温度が高いことが分かった(図 4)。



(2) 提案する誘導加熱コイルを用いて、CFRTP の誘導加熱実験を行った。コの字および方形コイルを電磁誘導加熱装置と接続し、CFRTP の表面と裏面に K 型熱電対を取り付けデータロガーで温度を測定した。有限要素解析と同様に、ハット CFRTP の温度分布は誘導加熱コイルの巻線部分に沿って温度が上昇することが分かった。しかしながら、電磁誘導加熱装置とコイルのインピーダンスマッチングの問題があり、コの字コイルの場合、CFRTP の表面を溶融温度まで加熱することが出来なかった。一方、縦置きの方角コイルを用いた場合、CFRTP の表面において溶融温度まで加熱することに成功した。

(3) 落球試験方法を用いて様々な衝撃エネルギーを負荷し、損傷を付与した立体形状の CFRTP の表面および内部の状態を明らかにした。3 種類の衝撃試験用鋼球を立体形状の CFRTP の中央上部 25cm、50cm、75cm、100cm の高さからそれぞれ落下させて衝撃エネルギーを負荷し、それによって付与された繊維損傷による CFRTP の表面および内部の状態を、X線 CT によって明らかにした。自由落下のエネルギーが 10.2J の場合、CFRTP 内部の 0.02mm の層間剥離を X 線 CT 検査で確認できた(図 5)。



(4) 損傷を付与した立体形状の CFRTP を汎用の高周波電源に接続した提案するコイルを用いて誘導加熱し、CFRTP の温度特性を明らかにした。ハット型に合わせた方形コイルによって CFRTP を加熱し、K 型熱電対を取り付けたデータロガーで表面および裏面の温度を測定した。コイルの巻線直下で CFRTP の樹脂溶融温度 (260 )を確認した。

(5) 上記(4)の加熱部分を卓上型ニュートンプレスによって融着し、最適な加圧力を調査した。CFRTP を融点まで加熱し、加圧力を 10MPa、20MPa、30MPa、40MPa と変化させ、融着時間を 30 秒に設定した結果、40MPa では、CFRTP が破損してしまった。30MPa 以下が最適であることがわかった。

(6) 上記(5)の融着部に対し、精密万能試験機オートグラフを用いて引張試験を行い、損傷修復による強度を定量的に明らかにした。ジグソーにより CFRP 試験片を加工し(JIS K 7164 タイプ 3 試験片)、取り付け静的試験を行った。ハイブリッド成形用樹脂と連続繊維熱可塑性材料の製品データシート値をもとに評価した結果、健全な試験片と比較して、強度が低下してしまった(図 6)。

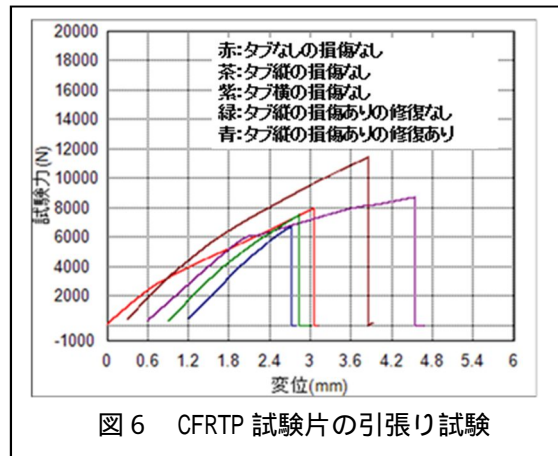


図 6 CFRTP 試験片の引張り試験

当初予期していなかった問題について、渦電流法による非破壊検査は、コイル形状の改良および計測ソフトウェアによるデータ取得を行なったが、欠陥検出分解能が不十分であった。そのため、ロボットによるスキャニングと機械学習を取り入れる試みを検討している。CFRTP の融着による強度低下は、誘導加熱による融着部の溶融が不十分であったためと考える。そのため、誘導加熱装置とコイルとのインピーダンスマッチングを再検討し、加熱時間を検討する必要がある。超耐熱マグネットワイヤーを用いて、加熱時間を柔軟にし、樹脂の結晶化も考慮する予定である。加えて、プレス機による最適な加圧力を調査する予定である。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

清水僚太、田中亨弥、板谷年也、誘導加熱コイルによるハット型 CFRTP の伝熱解析、計測自動制御学会 教育工学論文集、査読有、40 巻、2017、68-70

〔学会発表〕(計 4 件)

田中亨弥、清水僚太、板谷年也、誘導加熱コイルによるハット型 CFRTP の温度特性に関する研究 電気学会全国大会講演論文集、2018

田中亨弥、板谷年也、機械学習技術を用いた複合材の非破壊検査ロボットシステムの開発 磁粉・浸透・目視部門、電磁気応用部門、漏れ試験部門合同シンポジウム 第 21 回 表面探傷シンポジウム講演論文集、2018

Kyoya Tanaka, Ryota Shimizu, Toshiya Itaya, Development of nondestructive inspection and damage repair technologies for CFRTP of three-dimensional shape using the eddy-current method, The Sixth Japan-US NDT Symposium Emerging NDE Capabilities for a Safer World, 2018

Kyoya TANAKA, Ryota SHIMIZU, Toshiya ITAYA, Ikuo IHARA, Study on damage repair and strength evaluation for CFRTP of three-dimensional shape, 国際会議 3rd STI-Gigaku2018, 2018

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.suzuka-ct.ac.jp/uploads/2015/04/read00650425.pdf>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。