

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760089

研究課題名(和文) 炭素繊維強化熱可塑性プラスチック融着作業中のリアルタイム融着不良部検査法

研究課題名(英文) In-situ nondestructive inspection for detecting weld-defect during welding process of CFRTP

研究代表者

水谷 義弘(MIZUTANI, YOSHIHIRO)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40337879

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：熱可塑性CFRPの融着装置に埋め込み可能な渦電流検査シートを開発した。検査シートは励磁コイルと複数の検出コイルからなり、励磁コイルに電圧を印加することで試験片を加熱する。融着不良が存在すると、その箇所の温度分布が変化する。一方、材料の導電率は温度によって変化するから、融着不良が存在すると導電率の分布が生じる。この導電率の変化を検出コイルで検出することで、融着不良の有無を判定するとともに、発生箇所を特定できる。融着不良を模擬した試験片に対して開発した手法を適用した結果、十分な精度で不良部を検出できることが分かった。また、熱可塑性CFRPの導電性を利用した自己抵抗融着法を開発した。

研究成果の概要(英文)：A eddy current inspection sheet which can be embedded in a welding equipment for carbon fiber reinforced thermoplastics (CFRTP) was developed. The sheet consists of an exciting coil and several number of detection coils. Specimens are heated by applying voltage to the exciting coil. When weld defect is present, the temperature around the defect is changed from sound area. Since electrical conductivity is changed with temperature, electrical conductivity at around the defect is also changed from that of sound area. By measuring distribution of electrical conductivity of inspection area, weld defect can be detected. Feasibility of the developed system was examined by using a CFRTP specimen with artificial weld defect. The result shows the developed system can be used for detecting weld defect with sufficient accuracy. Self-resistance welding method which utilizes the conductivity of the CFRP was also developed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：非破壊検査 複合材料 熱可塑性CFRP 融着・溶着 渦電流試験 融着不良

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics, CFRTP) は、これまで一般に使用されてきた熱硬化性プラスチックを用いた繊維強化プラスチックと比較して高い靱性とリサイクル性を有すること、また、融着 (溶着) が可能であることから、航空業界および自動車業界でその適用範囲が拡がりつつある。しかし、CFRTP の融着法と融着後の非破壊検査法は確立した技術とはなっていない。例えば CFRTP 融着後の非破壊検査として一般に超音波探傷法が適用されるが、接触媒質 (水、油、グリセリン) を介して超音波を CFRTP 内に入射する必要があるため、手間がかかる。より簡便でかつ融着システムに組み込んで融着工程内で行えるような非破壊検査法の開発が望まれている。このような検査法の候補として接触媒質を要しない非破壊検査法として、渦電流探傷法がある。渦電流探傷法では渦電流を遮る方向の損傷が検出可能であるが、融着工程で発生する損傷は一般に渦電流と平行に発生するため検出ができない。

一方、融着法については、誘導融着、超音波融着、抵抗融着など、様々な手法があるが、どれも融着界面に抵抗体を挿入したり、大がかりな融着装置を用いたりする必要があり、より簡便な融着方法の開発が求められている。

2. 研究の目的

上述したような背景を鑑み、融着システムに組み込みが可能でかつ、融着工程内で行えるような非破壊検査システムを構築することを研究の第一の目的とした。また、研究年度の途中から、融着法そのものについても研究を実施することとし、従来法よりも簡便な融着方法を開発することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究では非破壊検査と融着に関する研究を並行して実施した。

「非破壊検査法の開発」では渦電流探傷試験を応用した検査法を開発することとした。渦電流探傷試験では導体 (被試験体) の表面に交流電流を印加したコイルを置き、導体の表面近傍に渦電流を発生させる。検査対象の CFRTP は導体ではあるが、金属材料と違い電気的異方性を有する。このような電気的異方性を有する試験体において渦電流の発生状況を評価可能な解析式は存在せず、本研究でははじめに渦電流分布を計算可能な数値式を導出し、解析解を求めた。また、有限要素法を用いて求めた数近解と比較して、導出した数値式が正しいことを示した。

1. の背景で述べたとおり、一般の渦電流探傷試験では、渦電流と平行に発生する損傷の検出はできない。損傷を有する CFRTP を片面から加熱すると、損傷は熱の移動を妨げるため、CFRTP 内で温度分布が生じること、渦電

流法により温度分布が測定可能なことに着目し、電磁誘導で CFRTP を加熱した後に CFRTP に生じる温度分布を渦電流試験で測定する方法 (図 1) を考案した。このような方法を可能とするために、電磁誘導加熱する加熱コイルと、CFRTP 内部の温度を測定する複数の検出コイルで構成される検査シートを製作した。この検査シートはフィルム状であり、融着装置に埋め込み可能である。

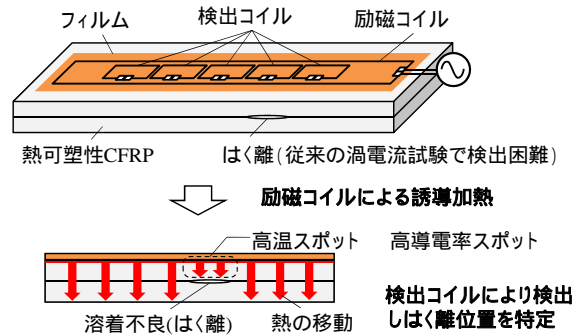


図 1 融着損傷の検出アルゴリズム

「融着方法の開発」では、CFRTP が導体であること、接合したい 2 枚の CFRTP を重ねあわせて一方の CFRTP から他方の CFRTP への電気経路を考えた時、接合界面における電気抵抗が最も大きくなることに着目し、CFRTP 自身に電流を印加し、接合界面で発生するジュール発熱によって融着する方法 (自己抵抗融着法) を開発した (図 2)。

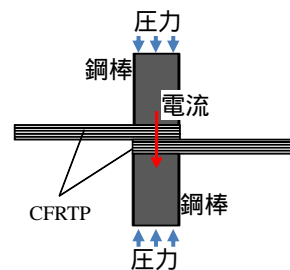


図 2 自己抵抗融着法の概要

4. 研究成果

「非破壊検査法の開発」では、はじめに 3. で述べた数値式 (本研究で導出) を用いて、図 1 に示した渦電流試験における最適な試験条件を決定した。図 1 中の検出コイルのうち、外側の 2 つを除いたコイル A~C を有する検査シートを製作 (図 3) し、融着不良が存在しない健全な CFRTP と、B の位置に融着不良 (はく離) を導入した CFRTP を準備して、融着損傷の検出試験を実施した。図 4 は横軸に加熱後の時間、縦軸に検出コイルのインピーダンス変化率を示したものであるが、融着損傷がある場合 (図 B) には不良箇所の検出コイルのインピーダンスが変化しており、提案手法により損傷の検出が可能であることを示せた。

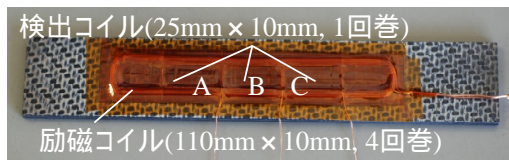
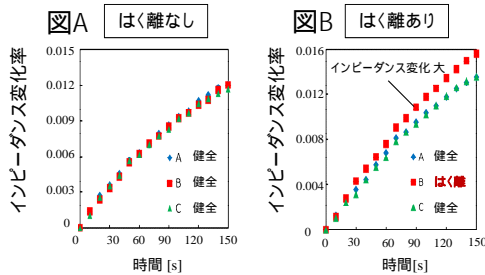


図3 検査シートをCFRTP上に設置した例



誘導加熱中、はく離部のインピーダンス変化のみ大きい

図4 誘導加熱中のインピーダンス変化

「融着方法の開発」では、図2に示したような方法で融着試験を実施した。図3に開発した自己抵抗融着を実施している最中に赤外線サーモグラフィを用いて側面から温度分布を測定した結果を示す。図から、融着したい2つのCFRTP板の界面が優先的に加熱されており、予想した通りの結果となった。

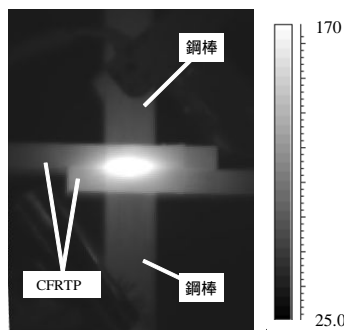


図5 自己抵抗融着中における温度分布

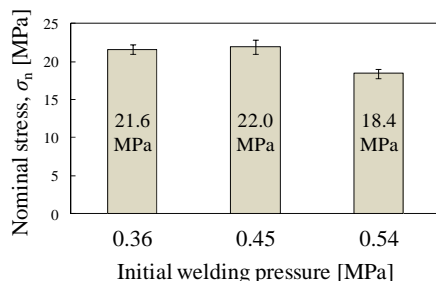


図6 融着継手の引張せん断強さ試験結果

次に、提案手法で融着した継手の強度評価として、引張せん断強さ (Tensile Lap-shear Strength: LSS) 試験を JIS K 6850 に従って行った。融着中の加圧力を 0.36, 0.45, 0.54MPa と変化させ、それぞれ 3 本づつ試験

を実施したが、加圧力を 0.45MPa にした際に最も高い引張せん断強さ 22MPa が得られた。この値は現在一般に行われている抵抗融着による継手の継手強度 (約 20-25MPa) と同等であることが分かり、一般に行われている融着方法より簡便な提案手法で、従来法と同程度の強度の融着が可能であることを示した。

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2件)

水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎, 渦電流試験による温度検知を用いた熱可塑性 CFRP 溶着不良の検出, 日本機械学会論文集, 査読有, 80-812, pp. (2014)

DOI:10.1299/transjsme.2014smm0084

河越正羽, 水谷義弘, 轟章, 松崎亮介, 安岡哲夫, 熱可塑性 CFRP の導電性を利用した自己抵抗融着に関する研究, 日本機械学会論文集, 査読有, 79-801, pp.555-562 (2013)

〔学会発表〕(計14件)

K. Mizukami, Y. Mizutani, A. Todoroki, and Y. Suzuki, "Detection of delamination in thermoplastic CFRP weld parts using eddy current testing and induction heating", 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, 6-10 October 2014 (accepted)

水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎, CFRP 積層板中の誘導電流分布解析解の導出, 第5回日本複合材料会議 JCCM-5, 2A-01, 京都府, 2014年3月4-6日

水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎, 導電率の温度特性を利用した渦電流試験による熱可塑性 CFRP 融着不良の検出, 日本非破壊検査協会秋季講演大会, 広島県, 2013年11月26-27日

水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎, 導電率の温度特性を利用した渦電流試験による熱可塑性 CFRP 融着部の検査, 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス 2013, OS604, 岐阜県, 2013年10月12-14日

水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎, 渦電流試験による表面温度測定を用いた熱可塑性 CFRP 融着部のはく離欠陥検出, 第38回複合材料シンポジウム, A1-4-2, 鹿児島県, 2013年9月24, 26日

水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎, 誘導加熱と渦電流試験を用いた熱可塑性 CFRP 融着部の不良検出, 日本実験力学学会年次大会, A066, 秋田県, 2013年8月20-22日

K. Mizukami, Y. Mizutani, A. Todoroki, and Y. Suzuki, "In-situ inspection of thermoplastic CFRP welded zones using

eddy current thermo-sensing”, Laser Processing for CFRP and Composite Materials, LPCC1-3, Yokohama, Japan, 23 April 2013

水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 渦電流を用いた熱可塑性 CFRP の融着部の健全性モニタリング, 第 4 回日本複合材料合同会議 JCCM-4, 2C-07, 東京都, 2013 年 3 月 7-9 日

水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎, 非接触渦電流温度測定による熱可塑性 CFRP 融着部の健全性評価, 日本実験力学会分科会合同ワークショップ, No.12-2, pp.8-10, 新潟県, 2012 年 12 月 7-8 日

河越正羽, 水谷義弘, 轟章, 炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料の導電性を利用した自己抵抗融着に関する基礎研究, 日本複合材料合同会議 JCOM-41/JSCM2012, 京都, 2012 年 3 月 7-9 日

河越正羽, 水谷義弘, 轟章, CF/PEI および CF/PPS のジュール発熱を利用した融着に関する基礎的研究, 日本材料学会 第 15 回破壊力学シンポジウム, 沖縄, 2011 年 11 月 24-26 日

M.Kawagoe, Y. Mizutani, A. Todoroki, A fundamental study on electric resistance welding of CF/PEI, JISSE 12th, SAMPE, 東京, 2011 年 11 月 9-11 日

M.Kawagoe, Y. Mizutani, A. Todoroki, R.Matsuzaki, A basic study on the way of welding of CFRTP joint using Joule heat of CFRTP, ATEM ' 11 JSME-MMD, 神戸, 2011 年 9 月 19-21 日

河越正羽, 水谷義弘, 轟章, 松崎亮介, CFRTP 継手の電気抵抗を利用した融着法に関する研究, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, 福岡, 2011 年 7 月 15-18 日

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: CFRTP 材の融着方法

発明者: 水谷義弘, 轟章, 河越正羽, 村田将之

権利者: 東京工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-55730

出願年月日: 2011 年 3 月 14 日

国内外の別: 国内

名称: 複合材料検査装置と方法

発明者: 水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎, 荒川敬弘

権利者: 東京工業大学, IHI 検査計測

種類: 特許

番号: 特願 2013-184139

出願年月日: 2013 年 9 月 5 日

国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水谷 義弘 (MIZUTANI, Yoshihiro)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 40337879

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: