

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：16101
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26282099
研究課題名(和文) 赤外線パルス・フェイズ・サーモグラフィ法による大型構造物の高効率検査手法の開発

研究課題名(英文) Development of efficient non-destructive inspection technique for large structures using pulse phase infrared thermography

研究代表者
石川 真志 (Ishikawa, Masashi)
徳島大学・大学院理工学研究部・講師

研究者番号：10635254
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は赤外線サーモグラフィを用いた大型の構造物の効率的な非破壊検査手法の開発を目標として検討を行った。実験の結果、アクティブサーモグラフィ検査時の加熱方法としてレーザー走査加熱を利用することで、10 m遠方に位置する対象物であっても内部の欠陥検出が可能であることが確認された。また、温度データへのフーリエ変換により得られる位相画像を利用することで、欠陥検出が容易となること、および高周波数の位相画像に注目して検査を行うことで検査時間の短縮が可能であることも確認された。これらの技術を組み合わせることで、高効率かつ高精度な検査の実現が期待される。

研究成果の概要(英文)：Non-contact remote non-destructive testing using infrared thermography and CO2 laser-scanning heating was examined in this study. Experimental and theoretical studies revealed that: 1) defects in a CFRP specimen located 10 m from the heat source were detected by the laser-scanning thermography method, 2) using phase images obtained by applying Fourier transformation to the thermal data was effective in improving the defect detectability, and 3) inspection time could be reduced by using phase images in high frequency range. By combining the main findings, the thermographic method could be an effective way for inspecting large structures located far from observers (such as tall bridges).

研究分野：非破壊検査

キーワード：非破壊検査 赤外線サーモグラフィ CFRP コンクリート レーザー加熱

1. 研究開始当初の背景

大型構造物を高精度かつ簡便に検査する技術の確立は、人々の安全で安心な生活の維持のために不可欠である。例えば、日々運行する大型航空機では、運行中における被雷や雹などの衝突、鳥などの動物の接触の他、整備時の工具の落下などによる損傷の可能性を有しており、現状でこれらに対する第一段階のチェック方法は、目視検査や検査員による打音検査に留まっている。また、高度経済成長期に建設された橋梁などの土木構造物についても、経年劣化等による潜在的な損傷の存在が甚大な事故へとつながる危険性があるが、その保守点検時の検査法はやはり目視・打音検査を主としており、加えて高所などに位置する対象の検査時には検査員の足場の設置も必要となることから、検査コストも問題となり、定期的・頻繁な検査の実施が困難となる。

これらの問題に対し、本研究では赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査を提案する。検査対象物をヒータ等により加熱し、加熱後の表面温度分布の変化から内部の異常の有無を評価するものであり、非接触かつ比較的広範囲を一度に検査可能であることが利点である。中でも、観察された温度データにフーリエ変換を行うことで得られる位相画像を検査に利用する手法はパルス・フェイズ・サーモグラフィ法と呼ばれ、従来の熱画像を用いた検査と比較して検査能力が向上することが知られている。一方で本手法による既存の報告では、(1) 熱源から比較的近く（数十 cm 程度）に位置する対象物への検査が一般的、(2) 低熱拡散率材料あるいは表面から深い位置に欠陥が存在するような大型の対象への検査では検査に長時間を要する、などが示されており、これらが実用に際する課題にもなっている。

2. 研究の目的

本研究では、まず上記(1)の課題の克服を目指し、対象物を遠隔加熱する機構を検討するとともに、これを利用した遠隔サーモグラフィ検査の可能性について検討を行う。遠隔からの加熱・検査が可能となることにより、高い橋梁や大型構造物の上部部材など、従来方法では検査が困難な（検査者が容易に近接することが困難な）対象への検査も容易となることが期待される。遠隔加熱を行う為の装置としては、集光機構を備えたランプヒータなども考えられたが、光の伝搬に伴う拡散減衰をより小さくし、効率的な加熱を行うことを念頭に、炭酸ガス（CO₂）レーザーによる走査加熱を試みた。加えて上記(2)の課題の解決方法を検討し、より短時間でサーモグラフィ検査実現を目指す。具体的な方法としては、従来のパルス・フェイズ・サーモグラフィ法で注目される周波数よりも高い周波数での位相画像を出力し、これを検査に用いることで、データの取得時間（つまり検査時間）の削減が可能であると考えられる。本研究ではこれらの点について、実験的および解析的な検討

を行い、その効果の有効性評価を行った。

3. 研究の方法

(1) CFRP 試験片への遠隔検査

CO₂ レーザーを用いた遠隔サーモグラフィ検査の有効性を検証するため、実験的な評価を行った。図 1 に実験の様子を示す。実験ではレーザー光源（MultiscanVS, ロフィン・バーゼルジャパン）より 10 m 離れた位置に 980×980×6 mm の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）試験片を設置し、レーザーによる遠隔走査加熱を行った。試験片は人工欠陥として矩形の平底穴を有しており、欠陥サイズは 100×100、50×50、20×20 mm の 3 種類、欠陥深さは 0.5 mm から 3.0 mm まで 0.5 mm ステップで 6 種類の条件を設定した。本試験片に対して、約 700 W/m² のエネルギー密度を持つレーザーを 570 mm/s の速度で走査し、試験片表面の加熱を行った。なお、本実験ではレーザーヘッドより 147 mm の位置に焦点を持つ集光レーザーを使用した為、10 m 距離でのレーザー径（半値幅）は約 370 mm であった。加熱中および加熱後の表面温度の様子は望遠レンズを設置した赤外線カメラ（FLIR A315）で観察した。観察時のサンプリング周波数は 7.5 Hz とした。

(2) 位相画像変換を利用した欠陥検出

レーザー走査加熱により得られた熱画像を位相画像に変換することで、従来のパルス・フェイズ・サーモグラフィ法と同様の効果が得られるか検証を行った。位相画像は上記の(1)の実験で得られた結果に対してフーリエ変換

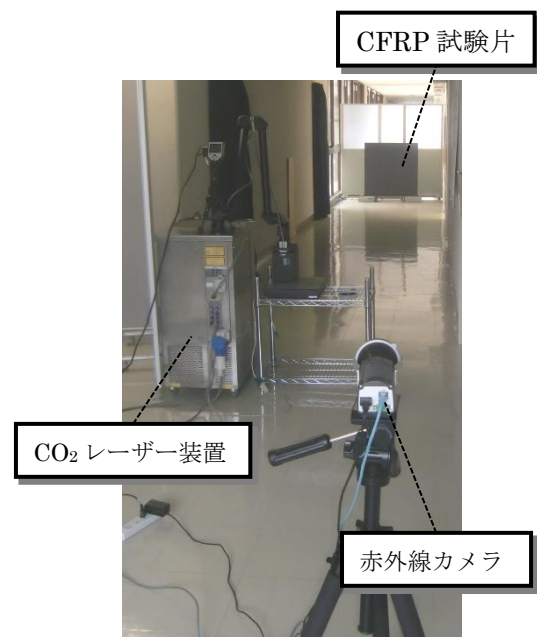


図 1 CO₂ レーザー走査装置を用いた遠隔サーモグラフィ検査の様子

を行うことで得た。従来のパルス・フェイズ・サーモグラフィは瞬間的なパルス加熱後の温度変化に対してフーリエ変換を行う。本研究においても各観察点におけるレーザー加熱後の温度変化に対してフーリエ変換を行うため、まず赤外線カメラで観察された各ピクセルでの最大温度時間（レーザーが照射された時間）を検出し、検出された最大温度時間を 0 秒とする 3 次元配列データを構築した（つまり、実際は走査加熱であるため観察点ごとに加熱時間差が存在しているが、上記の処理によりパルス加熱のように全観察点が同時に加熱された条件を再現した）。その後、得られた 3 次元配列データに時間方向のフーリエ変換を行うことで、パルス・フェイズ・サーモグラフィと同様の位相画像を得た。

(3) 高周波位相値を用いた検査時間の短縮

熱拡散率の小さな対象物の検査では、アクティブサーモグラフィにより欠陥部の温度差が観察されるまでに長時間を要し、これが検査の実用上の障害となり得る。フーリエ変換後の位相画像においても、長時間経過後に観察される温度差の影響は低周波数の位相画像に現れることが知られており、低周波数領域の情報を得るために長時間の観察データが必要となる。本研究では位相画像を利用した検査の短時間化を目指し、従来注目されている周波数よりも高周波数領域に存在する小さな位相差の検出を試みた。

4. 研究成果

(1) CFRP 試験片への遠隔検査

図 2 に走査加熱後に得られた温度画像（加熱終了 6.7 秒後）を示す。画像中破線で囲まれた領域が試験片位置を、明るく（温度が高く）表示されている箇所が検出された人工欠陥位置を示している（画像右側が 100 mm 角、左側が 50 mm 角の欠陥を示す。なお、20 mm 角の欠陥については、使用カメラの画像解像度の関係により 10 m 距離からの観察は困難であった）。また、画像中の数字は加熱面からの欠陥深さを示している。本画像より、10 m 遠方からであってもレーザー加熱の結果生じた欠陥部温度差を検出可能であることが確認できる。図 3 は 0.5, 1, 1.5 mm の各深さの 100

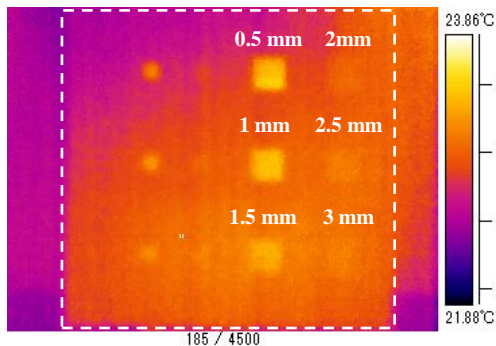


図 2 10 m 距離に位置する CFRP 試験片へのレーザー走査加熱により得られた温度画像

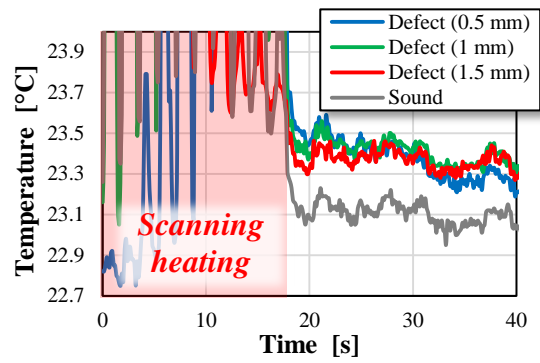


図 3 0.5、1、1.5 mm 深さの欠陥上で観察された温度の時間変化

mm 角欠陥上、および欠陥のない健全部における検査時の温度変化を示したグラフである。グラフ横軸約 18 秒までは走査加熱中の温度を、18 秒以降は加熱後の温度変化を示す。これより、各深さの欠陥部では健全部と比較して 0.2~0.4°C 程度の温度差が生じていることがわかる。いずれも大きな温度差ではないが、本実験で使用した赤外線カメラの温度分解能（70mK）以上であったことから、温度画像（図 2）においても明瞭に観察可能であったと考えられる。なお、欠陥部で生じる温度差は対象物への入熱量の変化、つまり、レーザーの出力と走査速度によって変化する。言い換えれば、入熱量が同様の検査条件であれば、対象物までの距離が変化しても同様の欠陥部温度差が生じ得る。実際に、上記の 10 m 距離での実験と同熱量となるように走査速度を変更した 3 m 距離からの CFRP 加熱実験において、上記と同程度の温度差が生じることを実験的に確認している。このことは、より遠方に対象物が位置する条件においても、検査条件の調整によっては本結果と同様な欠陥検出が可能となり得ることを意味する。

(2) 位相画像変換を利用した欠陥検出

図 4 に走査に伴う加熱時間差を補正した後にフーリエ変換を行うことで得られた位相画像（0.0037 Hz）を示す。変換前の温度画像（図 2）と比較すると、特に深さ 2 mm 以上の欠陥において、その存在がより明瞭に観察できる

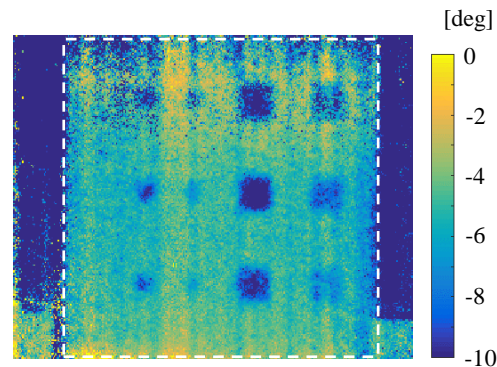


図 4 走査時間差の補正と温度データのフーリエ変換により得られた位相画像（0.0037 Hz）

ことがわかる。これは従来の近距離からのランプ加熱を利用したパルス・フェイズ・サーモグラフィ法による検査にて報告されている検出可能な欠陥深さの向上と同様の効果である。本結果より、レーザー走査加熱により得られた温度データに対してフーリエ変換を行った場合でも、従来法と同様に欠陥検出能力の向上が得られることが確認された。従って、レーザー加熱と位相変換技術を組み合わせることで、遠方に位置する対象物を高精度に検査することが可能となる。

(3) 高周波位相値を用いた検査時間の短縮

① 解析的な効果の検討

まず、一次元の熱計算により検査時間短縮効果の検討を行った。厚さ H の平行平板（密度 ρ 、比熱 c ）の表面に入熱量 Q のパルス加熱を行った際に得られる温度と時間との関係にのフーリエ変換を行った結果は以下の式で計算できる。

$$F(f) = \frac{2Q}{\rho c H} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2}{B_1^2 + 2B_1 + \mu_n^2} \frac{1}{\frac{\mu_n^2 \alpha}{H^2} + j2\pi f} \quad (1)$$

ここで f は周波数、 α は熱拡散率、 B_1 はビオ数を示す。また μ_n は以下の式で得られる。

$$\tan(\mu) = \frac{2 \frac{\mu h}{Hk}}{\left(\frac{\mu}{H}\right)^2 - \left(\frac{h}{k}\right)^2} \quad (2)$$

j は虚数単位である。式(1)より得られる実部 $R(f)$ および虚部 $I(f)$ の値より以下を計算することで位相値と周波数との関係が得られる。

$$\varphi(f) = \tan^{-1}\{I(f)/R(f)\} \quad (3)$$

CFRP の物性値を有する平板について上式を計算した結果を図5に示す。各 H の条件において、大きな位相値のピーク (P_L) が低周波数

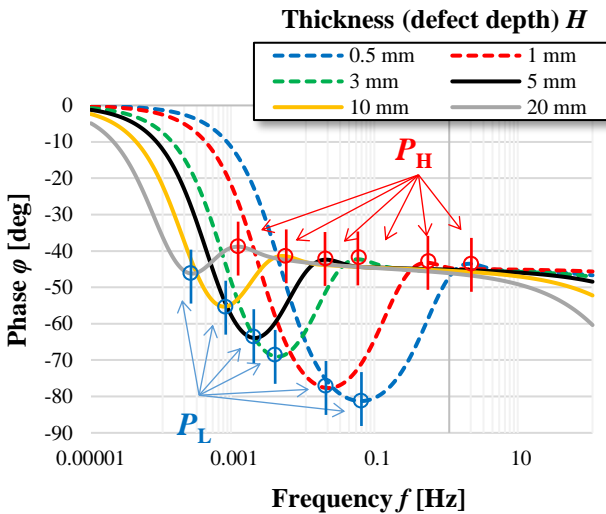


図5 一次元熱計算より得られた各厚さのCFRP平板上での位相-周波数の関係

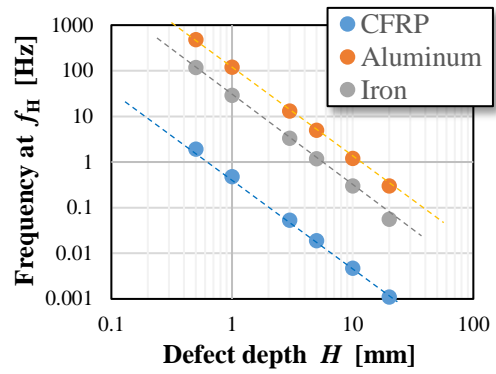


図6 3種類の材料について計算した高周波位相ピーク周波数と欠陥深さとの関係

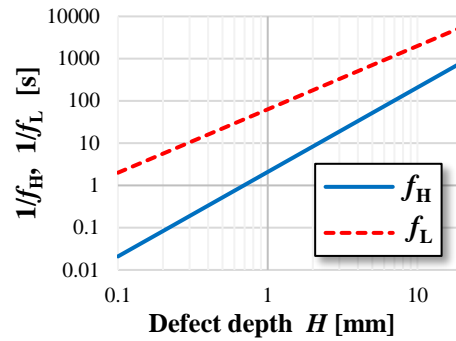


図7 f_H および f_L の検出に必要な観察時間（各周波数の逆数）と欠陥深さとの関係

領域に存在する一方、比較的高周波数領域にわずかな位相ピーク (P_H) が存在していることがわかる。図6は P_H となるときの周波数 (f_H) と H との関係を示している。同図にはCFRPのほかにアルミニウムおよび鉄の物性について同計算を行った結果も示している。本図より、 f_H は両対数グラフ上で H に対して線形的に減少していることがわかる。これらの関係を元に、近似的に f_H と H との関係を式で表すと、以下の式が得られる。

$$\ln(f_H) = \ln(\alpha) - 2 \ln(H) + 0.2 \quad (4)$$

なお、 H は平板厚さであるが、2次元的なサイズが十分に大きな欠陥の深さと仮定することができるため、上式は f_H と欠陥深さとの関係と考えることができる。図7は f_H を利用した際の検査に要する時間を推定するため、CFRPの物性について f_H の逆数（つまり、 f_H の情報を得るために必要なデータ取得時間）と H との関係を示す図である。同図には比較のため、 P_L における周波数 (f_L) の逆数と H の関係についても示している。これより、 P_H を利用することで P_L を利用した場合と比較しておよそ1桁検査時間が短縮可能であることが予想される。

② 実験的な確認

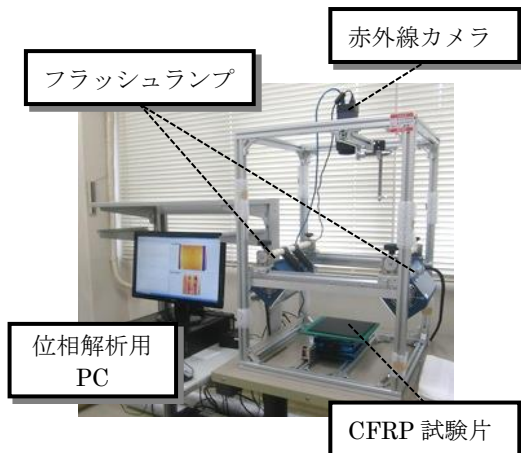


図 8 フラッシュランプによる試験の様子

上記検討の妥当性を検証するため、CFRP 試験片に対する実験を行った。本実験ではキセノンフラッシュランプによる近距離(30 cm 程度)からの加熱を行い、加熱後の温度-時間データへのフーリエ変換から位相-周波数の関係を得た。図 8 に実験の様子を示す。試験片には人工欠陥として 20×20 mm、深さ 0.5, 1, 2 mm の矩形平底穴を設けた。実験では、フラッシュランプによる加熱後の試験片表面温度変化をサンプリング周波数 60 Hz の条件で赤外線カメラにより観察し、得られた温度データにフーリエ変換を行うことで位相画像を得た。

図 9 に各深さの欠陥上での位相値と健全部上での位相値との差(欠陥部-健全部間位相差 $\Delta\phi$) と周波数との関係を示す。各深さの欠陥について、図 5 に見られたような高周波域での位相のピークが存在することがわかる。図 10 に実験より得られた位相ピークにおける周波数と式(4)より計算された値との比較を示す。なお、実験結果における位相ピーク周波数は、ピーク値付近のデータに対する 4 次近似曲線のピークにおける周波数と定義した(例として、図 9 中に深さ 2 mm のデータに対する近似曲線を破線で示す)。図 10 より、実験結果と式(4)の推定値が良く一致していることが確認できる。また、図 11 は深さ 1 mm の欠陥について、図 10 より得られる高周波位相ピーク近傍の周波数である 0.47 Hz における位相画像(欠陥部近傍の画像)を示す。

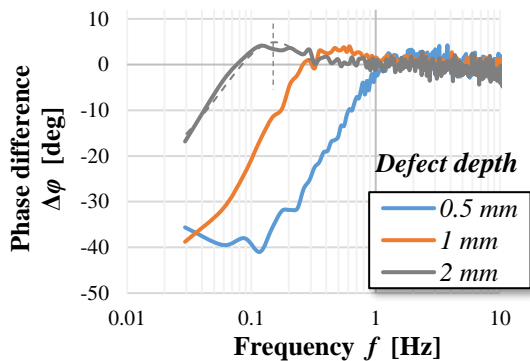


図 9 各深さの欠陥における欠陥部-健全部間位相差と周波数の関係(実験結果)

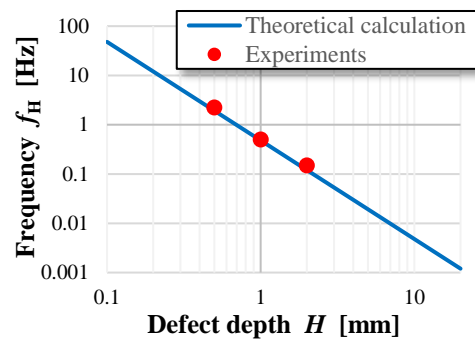


図 10 実験より得られた高周波位相ピーク周波数と理論計算結果(式(4))との比較

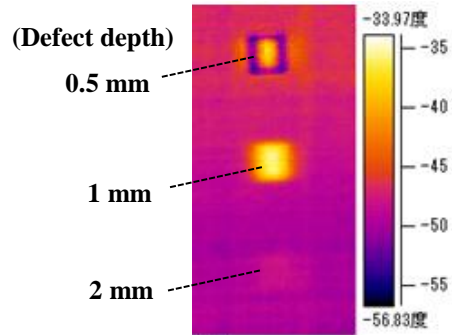


図 11 深さ 1 mm 欠陥における高周波位相ピーク周波数(0.47 Hz)における位相画像(図中の数字は欠陥深さを示す)

高周波数のピーク周波数においても欠陥部を明瞭に確認することができる。これらの結果より、上記の解析的な検討結果の妥当性、および高周波数領域の位相を検査に利用することの効果を確認することができる。

(4) 研究成果のまとめと今後の展望

上記の各成果より、レーザー加熱を利用した赤外線サーモグラフィ検査によって、①遠隔から対象物を検査可能であること、②位相画像を利用することで高精度の検査が可能であること、および③高周波数の位相画像を用いることで短時間での検査が可能であることが確認された。これらの技術を組み合わせることで、大型の構造物を効率的かつ高精度に検査可能であると考えられる。なお、これらの技術はコンクリートの試験対に対しても有効であることを確認しており、本研究で得られた成果は橋梁などの土木構造物への有効な検査手法となり得ることも期待される。

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 0 件)

[学会発表] (計 10 件)

- ① 安藤正紀、石川真志、西野秀郎、レーザー走査を用いたアクティブサーモグラフィ検査による CFRP 積層板の非破壊検査、第 8 回日本複合材料会議(JCCM-8)、

- 2017年3月16日、東京大学 本郷キャンパス (東京都文京区)
- ② 石川 真志、小山 昌志、西谷 豊、福井 涼、羽深 嘉郎、CFRP 積層板のアクティブサーモグラフィ検査における積層構成の影響、第8回日本複合材料会議(JCCM-8)、2017年3月16日、東京大学 本郷キャンパス (東京都文京区)
- ③ Masashi Ishikawa, Hideo Nishino, Masaki Ando, Hideyuki Kasano and Hiroshi Hatta, Infrared thermographic non-destructive testing using laser-scanning excitation, The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Dec. 16, 2016, Ching Mai (Thailand).
- ④ Kou Kubodera, Masashi Ishikawa, Masashi Koyama, Hiroshi Hatta and Yasuo Kogo, Improvement of defect detectability in pulse phase thermographic non-destructive inspection using data processing techniques, The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Dec. 14, 2016, Ching Mai (Thailand).
- ⑤ 石川 真志、小山 昌志、笠野 英行、小笠原 永久、山田 浩之、八田 博志、西谷 豊、福井 涼、宇都宮 真、遠隔加熱装置を利用した構造物のアクティブサーモグラフィ検査システムの開発、M&M2016 材料力学カンファレンス、2016年10月9日、神戸大学 六甲台第二キャンパス (兵庫県神戸市)
- ⑥ 石川 真志、安藤 正紀、西野 秀郎、赤外線パルス・サーモグラフィ検査におけるCFRP中の欠陥検出精度の定量化、第7回日本複合材料会議(JCCM-7)、2016年3月18日、京都府民総合交流プラザ 京都テルサ (京都府京都市)
- ⑦ 安藤 正紀、石川 真志、西野 秀郎、八田 博志、宇都宮 真、レーザー励起アクティブサーモグラフィによるCFRPの非破壊検査、第7回日本複合材料会議(JCCM-7)、2016年3月16日、京都府民総合交流プラザ 京都テルサ (京都府京都市)
- ⑧ 北村春樹、小山昌志、石川真志、八田博志、宇都宮真、小笠原永久、向後保雄、赤外線サーモグラフィ法による複合材料の欠陥検出精度の向上、第6回日本複合材料会議(JCCM-6)、2016年3月4日、東京理科大学 葛飾キャンパス (東京都葛飾区)
- ⑨ Haruki Kitamura, Masashi Ishikawa, Hiroshi Hatta and Yasuo Kogo, Improvement of detectability of defects using infrared pulse phase thermography, 11th European Conference on Non-destructive Testing (ECNDT2014), Oct. 9, 2014, Prague (Czech Republic).

- ⑩ 石川真志、八田博志、北村春樹、小笠原 永久、山田浩之、西谷豊、福井涼、笠野 英行、宇都宮真、サーモグラフィを用いた大型構造物への高効率検査技術の開発、日本非破壊検査協会 赤外線サーモグラフィ部門ミニシンポジウム、2014年9月30日、東京都立産業技術研究センター (東京都江東区)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

- ① 名称：検査装置、検査方法、検査プログラム、記憶媒体、および検査システム
 発明者：八田 博志、西谷 豊、福井 涼、宇都宮 真、石川 真志、笠野 英行、小笠原 永久、山田 浩之
 権利者：JAXA、(株)KJTD、徳島大学、日本大学
 種類：特許
 番号：特願 2017-005152
 出願年月日：2017年1月16日
 国内外の別：国内

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 真志 (ISHIKAWA, Masashi)
 徳島大学・大学院理工学研究部・講師
 研究者番号：10635254

(2) 研究分担者

笠野 英行 (KASANO, Hideyuki)
 日本大学・工学部・助教
 研究者番号：20514417

小笠原 永久 (OGASAWARA, Nagahisa)
 防衛大学校・システム工学群・教授
 研究者番号：60262408

山田 浩之 (YAMADA, Hiroyuki)
 防衛大学校・システム工学群・准教授
 研究者番号：80582907

八田 博志 (HATTA, Hiroshi)
 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・名誉教授
 研究者番号：90095638

宇都宮 真 (UTSUNOMIYA, Shin)
 国立天文台・JASMINE 検討室・研究支援員
 研究者番号：70450707