

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860058

研究課題名(和文) 誘導加熱励起式赤外線位相解析検査法によるCFRPの非破壊検査

研究課題名(英文) Non-destructive inspection of CFRPs using phase-transformed induction heating thermography

研究代表者

石川 真志 (Ishikawa, Masashi)

東京理科大学・基礎工学部・助教

研究者番号：10635254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：赤外線サーモグラフィによるCFRPの非破壊検査手法として、誘導加熱を利用した検査方法について注目し、さらに温度変化データをフーリエ変換することにより得られる位相画像の適用について実験的、解析的な検討を行った。実験の結果、温度画像では誘導コイルの形状に起因する不均一な加熱が顕著に現れ、これが欠陥検出の妨げとなるのに対し、位相画像では適切な画像周波数の選択により不均一加熱が低減され、温度画像では検出困難であった欠陥の検出が可能となることが確認された。解析検討より、位相値は加熱時間の逆数を周期とする周期的な変動を示し、これにより周期的に不均一加熱が低減される周波数が存在することが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Non-destructive inspection of CFRPs using induction heating was studied in this study. In addition to conventional temperature images, phase images obtained by applying Fourier transform to temperature-time relation was used for defect detection. Experiments for CFRP specimens with artificial defects show that, though nonuniform heating occurred in temperature images owing to the shape of induction coil, the nonuniform heating was suppressed in the phase images at a certain frequency. Because of this suppression, the defects obscured by nonuniform heating in the temperature images were clearly detected in the phase images, resulting in improved defect detectability. Theoretical calculations revealed that the influence of nonuniform heating in the phase images periodically decreased and that the period was equal to the reciprocal of heating duration.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：非破壊検査 赤外線サーモグラフィ 複合材料 誘導加熱

1. 研究開始当初の背景

近年のCFRP (Carbon fiber reinforced plastic) の利用拡大に伴い、それらに対する簡便かつ高精度な非破壊検査技術の開発も求められている。非破壊検査手法の中でも赤外線サーモグラフィによる検査は、対象物に対して非接触での検査が可能であるとともに、比較的短時間で広範囲の面積の検査が可能であることから、構造物のメンテナンス時等に適用可能な簡便な検査方法となり得る。一般的なサーモグラフィ法は人為的、もしくは自然環境下で生じた対象物中の熱流の変化から生じる対象物表面での温度変化を観察し、欠陥部における局所的な温度異常部を検出することで欠陥の有無を判断するものであるが、サーモグラフィ法の中でもパルス・フェイズ・サーモグラフィ法と呼ばれる手法では、検査対象物表面への瞬間的なパルス加熱後に得られた温度変化をフーリエ変換することにより位相データを算出し、得られた位相データから周波数ごとの位相画像を構築する。位相画像では従来の温度画像と比較して対象物中の表面よりより深くに位置する欠陥の検出が可能となることが報告されている。しかし、CFRP を検査対象とした場合、報告されている最大の欠陥検出深さは 5 mm 程度であり、実用上の要求を考慮すると更なる検査能力の向上が求められる。さらに CFRP では一般的に面外方向の熱伝導率が小さいため、表面より加えられた熱が内部欠陥部まで到達するまでに長時間を要し、検査の長時間化も実用上の課題となる。

2. 研究の目的

上記の背景より、本研究では特に検査時間の短時間化を目指し、対象物の加熱方法として従来の対象物表面からの光加熱に代わり、誘導加熱による内部発熱の利用を試みた。CFRP は炭素繊維が導電性を示すため、内部に誘導電流が生じるとともにジュール熱が発生するため、これによる加熱が可能である。内部発熱を利用するため、従来の表面加熱による方法のように表面より内部欠陥部へ熱が到達するまでに要する時間がなくなる。このため、熱伝導に要する時間およそ半分となり、大幅な時間短縮効果が期待できる。さらに、本手法にパルス・フェイズ・サーモグラフィに用いる位相解析技術を併用することで、短時間検査と伴に高い欠陥検出能力を備えた検査手法に実現が期待できる。以上のことから、本研究ではまず誘導加熱による CFRP の加熱および欠陥検出能力の実験的な検討を行い、特に得られた温度画像とフーリエ変換後の位相画像との比較を行った。さらに、得られた実験結果に対する解析的な検討を実施し、誘導加熱を用いた本手法において位相解析を利用することの効果を検証した。

3. 研究の方法

(1) 実験的検討

① 試験片および実験装置

実験では、2種類の CFRP 試験片に対する検査を行った。一つは人工欠陥として長さ、深さの異なる平底溝を有する試験片 (平底溝試験片) であり、他方は積層間にテフロンシートを2枚重ねて挿入し、人工的に層間剥離を生じさせた試験片 (剥離試験片) である。平底溝欠陥は、溝のない面側から溝底面までの深さを 0.5~3 mm、溝長さを 5~30 mm としており、層間剥離欠陥については欠陥深さを 0.5~2 mm、欠陥サイズを 10~30 mm 角とした。試験片はいずれも PAN 系炭素繊維 (T300、東レ株式会社) で強化された一方プリプレグを [0/90]_{ns} 積層されたものである。平底溝試験片の誘導加熱にはリッツ線により作製された直径 100 mm の平コイルを使用した。試験は試験片の下方に設置したコイルに交流電源 (BP4610、エヌエフ回路設計株式会社) より 10 kHz、10.5A の電流を流し、試験片を挟んで上方に設置した赤外線カメラ (A315、FLIR) によりコイル側とは逆面の温度変化を観察する透過方式により行った。試験装置の外観を図 1 に示す。加熱時間 (コイルへの印加時間) は 480 秒間とし、加熱終了後 120 秒間の温度低下時間を含む合計 600 秒間の温度変化をサンプリング周波数 3.75 Hz にて測定した。剥離欠陥への検査も際には、上記と同様のコイルに周波数 30 kHz、15 A の交流電流を電源 (IH-1M、ナビオ株式会社) より印可した。加熱時間 5 秒間、温度低下時間 25 秒間の合計 30 秒間の温度変化をサンプリング周波数は 60 Hz にて測定した。

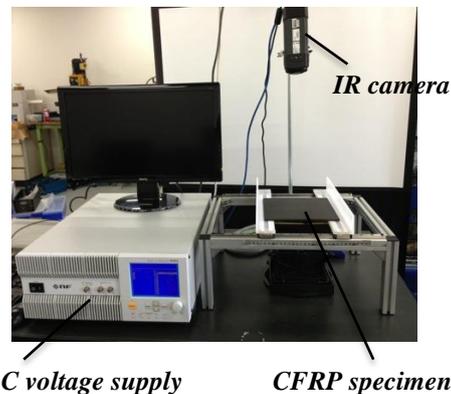


図 1 誘導加熱試験装置

② 実験結果

図 1 に各試験片に対する試験より得られた温度画像を示す。平底溝試験片では、欠陥端部において周囲よりも大きな温度上昇が生じていることが確認できる。これは、亀裂形状の欠陥端部において発生する特異電流場に起因したものであると考えられる。この特異的な温度上昇の存在により、平底溝試験片では温度画像においても一部の欠陥の検出が可能であった。一方、剥離試験片では欠陥箇所において周囲よりわずかに温度が低く

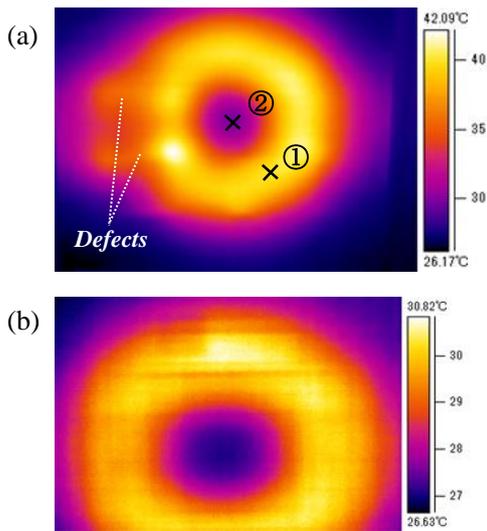


図 2 各試験片に対する実験より得られた温度画像、(a) 平底溝試験片、(b) 剥離試験片

観察されていたものの、明瞭な欠陥部の確認は困難であった。またいずれの試験片についても温度画像では使用した誘導コイルの形状に起因する不均一な加熱が生じており、これが欠陥検出を大きく妨げていることがわかる。

図 3 は平底溝試験片について、加熱中およ

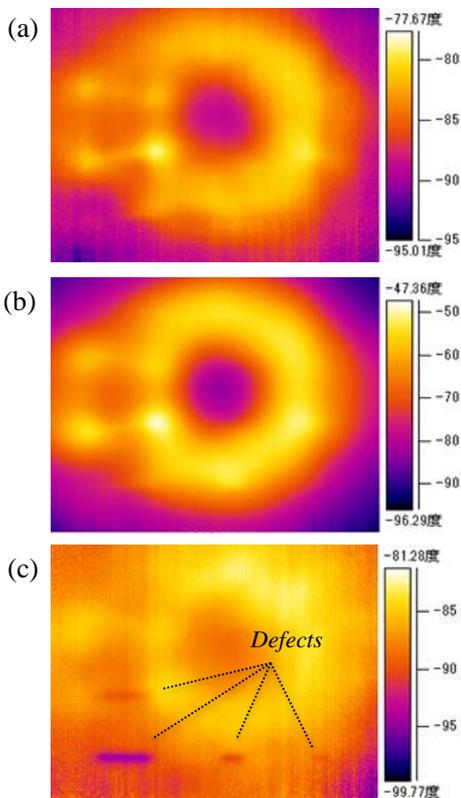


図 3 平底溝試験片への実験より得られた位相画像、(a)画像周波数 0.005 Hz、(b) 0.010Hz、(c) 0.015 Hz

び加熱後の温度低下中の全過程での温度データをフーリエ変換することで得られた位相画像を周波数別に示している。これらの結果より、加熱過程を含むデータに対して変換を行った結果では、画像周期的によってはコイル形状に起因する不均一加熱の影響が低減されることがわかる。図 4 に図 2 中に示す 2 点 (①コイル上不均一加熱部、②コイル中央部) での位相値と周波数との関係を比較する。これより、コイル上での位相値は周期的な振動を示しており、位相値が極小となる周波数付近ではコイル上の位相値とコイルのない中央部での位相値が同程度の値となることがわかる。従って、そのような周波数における位相画像を利用することで、コイルによる不均一加熱の影響を低減させることが可能である。図 3(c) はコイル上での位相値が極小となる 0.015 Hz での位相画像を示したものであるが、不均一加熱による影響の低減により温度画像にて検出が困難であった小さな欠陥の検出が可能となっている。図 5 は剥離試験片について得られた位相画像であるが、本試験片についても位相画像とすることで不均一加熱の影響が低減され、温度画像と比べて明瞭に欠陥部の検出が可能となることが確認された。

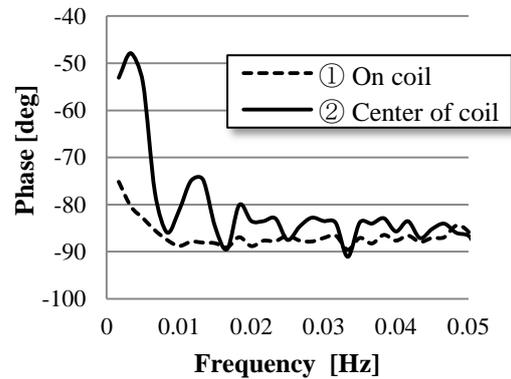


図 4 コイル上およびコイル中央における位相値と周波数との関係 (①、②は図 2 中の各点を示す)

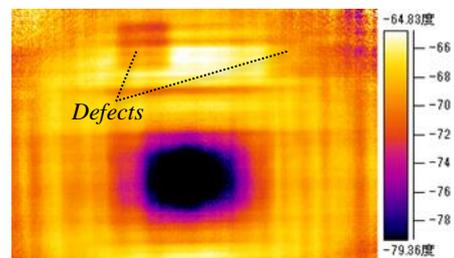


図 5 剥離試験片への実験より得られた位相画像 (画像周波数 0.133 Hz)

(2) 解析的検討

平板中の内部発熱率を Q [W/m²] とし、加熱

中の温度変化を平板の厚さ l および密度 ρ 、比熱 c から得られる線形的な温度上昇であると仮定すると、加熱中（加熱時間を t_h [s] とする）および加熱後の温度低下過程の両方を含む温度変化、およびそのフーリエ変換結果はそれぞれ以下のように得られる。

$$T(t) = \begin{cases} \frac{Qt}{\rho cl} & (0 \leq t \leq t_h) \\ 2 \frac{Qt_h}{\rho cl} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n}{(\mu_n^2 + H^2)} l + 2H \left(\sin(\mu_n l) - \frac{H}{\mu_n} \cos(\mu_n l) + \frac{H}{\mu_n} \right) \times \exp(-\alpha \mu_n^2 t) + T_a & (t \geq t_h) \end{cases} \quad (1)$$

$$F(f) = \frac{1}{4\pi^2 f^2} \left\{ (j2\pi f \left(\frac{Qt_h}{\rho cl} + T_a \right) + \frac{Q}{\rho cl}) \exp(-j2\pi f t_h) - j2\pi f T_a - \frac{Q}{\rho cl} \right\} + 2 \frac{Q}{\rho cl} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n}{(\mu_n^2 + H^2)} l + 2H \left(\sin(\mu_n l) - \frac{H}{\mu_n} \cos(\mu_n l) + \frac{H}{\mu_n} \right) \times \frac{e^{-(\alpha \mu_n^2 + j2\pi f) t_h}}{\alpha \mu_n^2 + j2\pi f} - T_a \frac{e^{-j2\pi f t_h}}{j2\pi f} \quad (2)$$

ここで、 t は時間[s]、 l は平板厚さ [m]、 α は熱拡散率 [m^2/s]、 T_a は室温 [$^{\circ}\text{C}$] であり、 H は熱伝導率を k [$\text{W}/(\text{m K})$] として $H = h/k$ で得られる。また、 μ_n は以下の式より決定される。

$$\tan \mu = \frac{2H\mu}{\left(\frac{H}{l}\right)^2 - H^2} \quad (3)$$

これより、室温 $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ 、発熱率 $Q = 1 \text{ kW}/\text{m}^2$ の条件下で板厚 $l = 5 \text{ mm}$ の CFRP 平板 ($\rho = 1536 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $c = 865 \text{ J}/(\text{kg K})$ 、 $k = 0.6 \text{ W}/(\text{m K})$) に対する実験を想定し、加熱時間 $t_h = 5 \text{ s}$ とした場合にコイル上の不均一加熱部で得られる位相値と周波数との関係を式(2)より計算した。得られた結果を図6に示す。これより、加熱中および温度低下中のいずれのデータも取得した条件での温度をフーリエ変換した場合では位相値が周期的に変動しており、

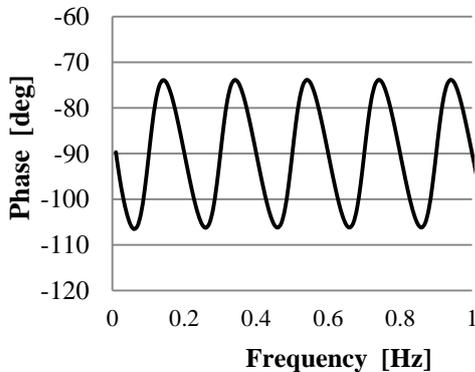


図6 解析計算より得られたコイル上不均一加熱部での位相値と周波数との関係（厚さ 5 mm の CFRP 平板に対する加熱時間 5 s の実験を想定）

その周期は加熱時間の逆数である 0.2 Hz となっていることがわかる。この位相値の変動の様子は図4に見られる実験より得られた傾向と一致するものであり、このことは位相画像では周期的に不均一加熱の影響が低減される周波数が存在すること示唆している。

4. 研究成果

誘導加熱による熱励起を利用した赤外線サーモグラフィ法による CFRP の非破壊検査を試み、特に温度データをフーリエ変換することにより得られる位相画像を利用することによる効果について、実験的および解析的な検討を行った。実験の結果、温度画像では使用する誘導コイル形状に依存する不均一な加熱が顕著に生じ、欠陥検出の妨げとなるのに対し、位相画像では加熱中および加熱終了後の温度低下中温度データをフーリエ変換することにより、得られる位相値は加熱時間の逆数の周波数周期で変動する傾向となり、これにより周期的に不均一加熱の低減とこれに伴う欠陥検出能力の向上が得られることが確認された。このことは、誘導加熱を利用したサーモグラフィ検査において位相解析を適用することの大きな利点であると言える。

上記の結果が得られた一方で、本研究の目的であった誘導加熱の利用による検査時間の短縮効果については、本検討ではその優位性を示すに至らなかった。検査時間短縮効果は特に表面から深くに位置する欠陥の検出の際の顕著となることが予想される。従って、これに関しては本研究で得られた結果を踏まえ、今後更なる検討が必要である。

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 5 件）

1 石川真志, 向後保雄, 八田博志, 羽深嘉郎, 福井涼, 位相解析誘導加熱サーモグラフィによる CFRP 中の欠陥検出, 日本非破壊検査協会平成 26 年度春季講演大会, 2014 年 6 月 4 日, アルカディア市ケ谷 (東京都)

2 Masashi Ishikawa, Yuuki Shiiya, Hiroshi Hatta, Yoshio Habuka, Shin Utsunomiya, Yasuo Kogo, Pulse phase thermographic non-destructive testing of CFRPs using induction heating, 13th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE13), Nov. 12, 2013, WINC Aichi Conference Hall, Nagoya.

3 Yuuki Shiiya, Masashi Ishikawa, Yasuo Kogo, Hiroshi Hatta, Yoshio Habuka, Non-destructive inspection of CFRPs using induction heating thermography, 19th International Conference on Composite

Materials (ICCM-19), July 31, 2013, Palais des congrès Montreal (Canada).

- 4 Masashi Ishikawa, Hiroshi Hatta, Yoshio Habuka, Shin Utsunomiya, Reduction of phase noise to enhance detectable depth of defects in CFRPs using pulse phase thermography, 19th International Conference on Composite Materials (ICCM-19), July 31, 2013, Palais des congrès Montreal (Canada).
- 5 椎谷有紀, 石川真志, 向後保雄, 八田博志, 羽深嘉郎, 宇都宮真, 誘導加熱励起サーモグラフィ法における CFRP の非破壊検査の適用, 第 4 回日本複合材料合同会議 (JCCM-4), 2013 年 3 月 8 日, 東京大学 (東京都)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 真志 (Ishikawa Masashi)
東京理科大学・基礎工学部・助教

研究者番号 : 10635254