

アクティブサーモグラフィ法を用いた材料欠陥の非破壊検出 Non-destructive Testing of Material Flaw with Active Thermography

見山 克己* 吉田 協* 一戸 善弘** 櫻庭 洋平*** 田中 大之***

Katsumi MIYAMA, Kanou YOSHIDA, Yoshihiro ICHINOHE, Yohei SAKURABA,
and Hiroyuki TANAKA

Abstract

Combination of heterogeneous materials is an essential technique for performance improvement in many fields. For example, in case of a turbine blade, it is often protected with thermal barrier coating to enhance heat resistance and high temperature corrosion resistance. But sometimes planer voids or delamination may exist at the interface between the coating and the base material or in the coating itself. In order to detect these flaws, thermography measurement is a promising method because it has less material restriction; the flaws can be identified as difference of temperature distribution or transitional response. In this paper, we report that the different size of voids, which were less than 0.1 mm, could be identified by active-thermography.

1. 緒言

めっき・溶射・拡散被膜等のコーティングは材料の高機能化に有効な手段であり、近年では、ガスタービン等への超耐熱コーティングの実用化が進みつつある。コーティングの品質保証の観点から被膜自体や基材界面における非破壊欠陥検出技術が必要とされるが、複雑形状素材における被膜欠陥を効率よく正確に検査できる非破壊検査技術はまだ確立されていない。例えば、剥離状欠陥に対しては超音波探傷が一般に有効であるが、液体媒質を介して探傷子を被検査物に接触させる必要があるため、タービンブレードなど複雑形状の部材を検査する場合、全面を手作業で検査する必要があり非現実的である。複雑形状の部材に対して、手作業によらず欠陥を可視化する技術として X 線 CT が広く用いられ始めている。しかしながら、鉄鋼材料では X 線の吸収減衰が大きいこと、被検査物の大きさに制限があること、また据付型の装置であるため、建築構造物等を検査対象とした場合は適用することができない。一方、赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査は、欠陥部と健全部における熱的物性の差異さえ存在すれば理論的には欠陥検出が可能である⁽¹⁾。特に、外部熱源を用いて欠陥部と健全部の温度応答差を検出するアクティブサーモグラフィ法は、熱源を

適切に選択すれば複雑形状製品への適用や現場での検査が可能と期待される^(2,3)。本研究では、多関節ロボットと組み合わせ可能なファイバーレーザを加熱源にし、サーモグラフィと組み合わせて加熱冷却時の過渡応答を解析することで、材料の内在欠陥を任意の位置で検出し定量的に可視化することを試みた。

2. 実験方法

2.1 測定装置と試料

人工欠陥を導入した試料に対してファイバーレーザを欠陥部に照射し、その部位における最高到達温度および温度の過渡的応答について高精度赤外線サーモグラフィカメラを用いて測定した。熱源レーザには、レーザ波長 1070nm のファイバーレーザを用い、多関節ロボットにて位置制御を行った。実験装置の概要を Fig. 1 に示す。レーザ照射による被検査物表面の損傷を防ぐため、適切な照射条件について予備実験を行い、測定時のレーザ出力は 50W、照射時間を 0.5s とした。サーモグラフィカメラは FLIR 製 Silver480M を使用し、フレームレートは毎秒 3600 フレームとした。なお、被検査物全面を同時に加熱する目的で、ハロゲンヒータによりパルス加熱実験もあわせて行った。

* 北海道科学大学寒地先端材料研究所/機械工学科

** 北海道科学大学寒地先端材料研究所/電気電子工学科

*** 北海道立総合研究機構

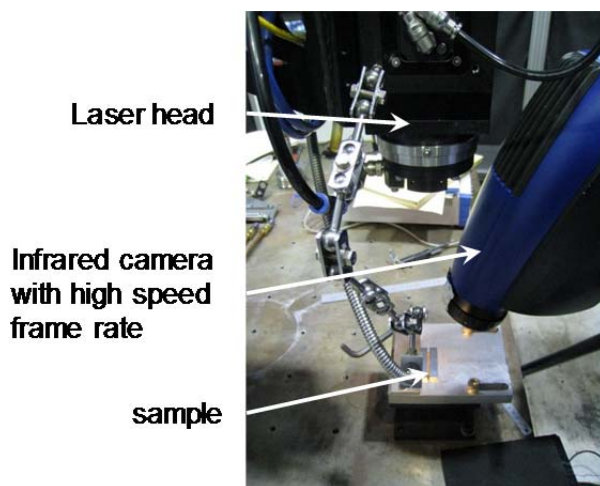


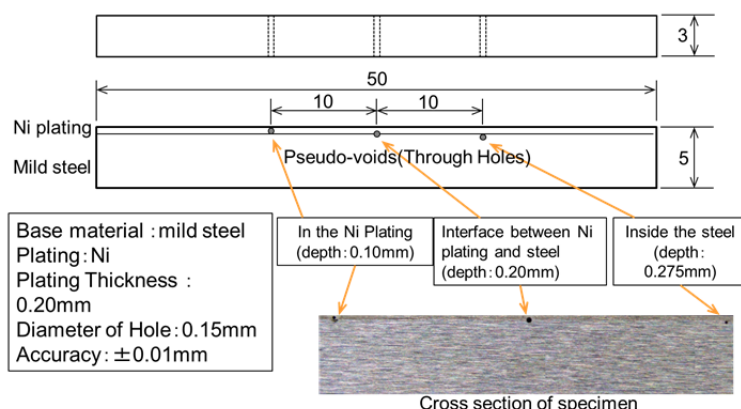
Fig.1. Measurement equipment.

測定実験用に、人工欠陥を内在させた試料を準備した。同一サイズの欠陥を異なる深さに配置した測定試料（Type I）と、同一深さで欠陥直径を変化させた測定試料（Type II）の2種類を準備した。いずれも基材は軟鋼を用い、Fig. 2(a)に示す Type I では、5mm 厚の板材に電解ニッケルめっきを約 0.2mm の厚みで施し表面コーティングとした。その後 3mm 幅、50mm 長のサイズに切断し、試料側面から $\phi 0.15\text{mm}$ のドリルビットを用いて、被膜中、被膜/基材界面、被膜直下の基材中にそれぞれ貫通孔を形成して疑似欠陥とした。Fig. 2(b)の Type II では、加熱方向の欠陥投影面積を変化させて欠陥サイズ同定の可能性を探るため、直径を 0.050mm, 0.070mm, 0.100mm, 0.150mm と変化した有底孔を機械加工で形成した。また欠陥体積の影響を確認するため、有底孔は軟鋼

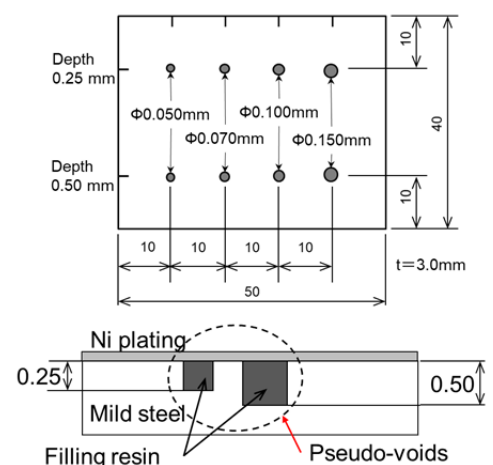
板上面から深さ 0.25mm および 0.50mm の2種類、計 8 箇所の有底孔を形成した。表面被膜は Type I 同様ニッケルめっきとした。なお有底孔にめっきが析出するのを防ぐ目的で、有底孔加工後、液状熱硬化性エポキシ樹脂をスクリーン印刷にて充填した。この樹脂を熱硬化後、表面を研削により整面した上で全面にニッケルめっきを施した。有底孔を充填したエポキシ樹脂上にもめっきを析出させるため、無電解ニッケルめっきを用い、めっき厚みのねらい値は $20\mu\text{m}$ とした。なお、めっき浴には還元剤としてリン酸塩を含むので、析出めっき被膜は共析したリンを 8%程度含む Ni-P 合金である。なおいずれの試料も、赤外線測定安定化のため、市販の黒体化処理スプレーを用いて測定面を黒体化処理した。

2.2 熱解析

測定実験に先立ち、被測定物を外部加熱にした際の熱応答挙動を推定するため、熱解析を行った。解析モデルは前述の測定試料に基づいた形状とサイズとし、レーザ加熱に相当する熱を入力し、欠陥部およびその周囲の熱変化挙動を計算により求めた。これにより、実際の非破壊検査の際に欠陥予測手法として熱解析が有効であるか検討するとともに、本研究で用いた人工欠陥試料設計に際して、欠陥サイズや位置の参考とした。解析ソフトウェアは ADINA8.3 を用い、二次元の非定常熱伝導解析とした。用いた物性値を Table. 1 に示す。なお、Type I における電解ニッケルめっきと Type II における無電解ニッケルめっきの物性値は計算の便宜上同一とした。



(a) Type I



(b) Type II

Fig.2. Measurement samples.

Table 1. Heat physical properties.

Material	Density (kg/m ³)	Specific Heat (kJ/kg · K)	Thermal Conductivity (W/m · K)
Nickel plating	8900	0.447	90.5
Mild steel	7860	0.473	51.6
Epoxy resin	1700	0.980	0.542

3. 結果と考察

3.1 欠陥深さの同定

Type I 試験片を用い、レーザによる局部加熱を行った際の試験片表面温度を赤外線サーモグラフィにて計測した。レーザ照射条件は2・1節記載の条件にて、試験片表面でのビームスポット径 1.5mm とした。このときのエネルギー密度は 14.2J/mm² である。健全部分と各貫通孔位置にレーザを照射し、サーモグラフィで各々の温度変化を計測して各点でのピーク温度を抽出した。レーザ照射は 3mm 幅短手方向中心位置とした。サーモグラフィによる測定はレーザ照射 3 秒前に開始し、試料表面温度が常温まで十分低下する時間連続測定を行った。各貫通孔位置のピーク温度と深さ方向の貫通孔位置との関係について、実測結果とシミュレーション結果を Fig. 3 に示す。なお、ここでの欠陥深さは、試料表面から貫通孔内壁までの最短距離とした。欠陥が表面に近い位置にあるほど測定された温度は高くなることが確かめられた。この結果より、欠陥体積が同程度であれば、欠陥深さ位置に依存して変化する表面温度から深さ位置を同定できる可能性が示された。欠陥部は空隙であるため母材である軟鋼に比して熱伝

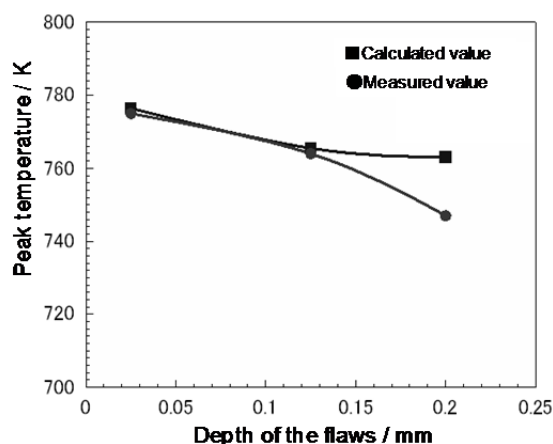


Fig.3. Surface temperature dependence on flaw depth.

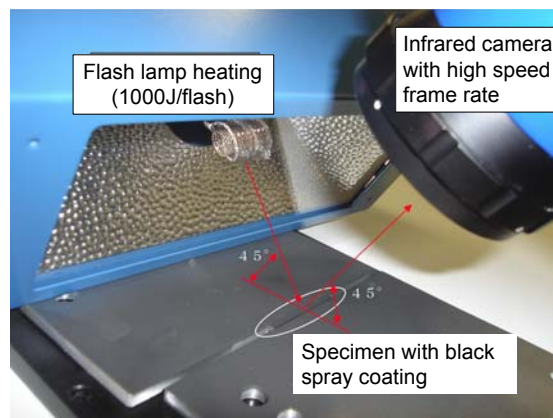


Fig. 4. Measurement with flash lamp.

導率が低く、熱拡散障壁となるので欠陥部直上の温度は周囲の健全部に比べて高くなる。これらが浅い位置にあるほど温度の高い領域が表面に近くなるため、表面温度が高くなったものと考えられる。Fig. 3 には熱解析により求めた表面温度予測値もあわせて示した。貫通孔位置が表面から約 0.15mm まで両者はほぼ一致しており、温度差から欠陥深さを予測する手段としての熱解析の有用性が確かめられた。一方、被膜よりも母材側に貫通孔が位置する 0.20mm では計算値と実測値に差が認められた。深さ位置 0.15mm 以下では、最表面の熱伝達とニッケルめっき内の熱拡散挙動のみ考慮すれば良いのに対し、深さ 0.20mm ではめっき/軟鋼界面の熱伝達および軟鋼内の熱拡散挙動も表面温度に影響を与えたものと思われる。このことが解析と実測の差に影響した可能性が考えられるため、解析条件の再検討が必要と考えている。

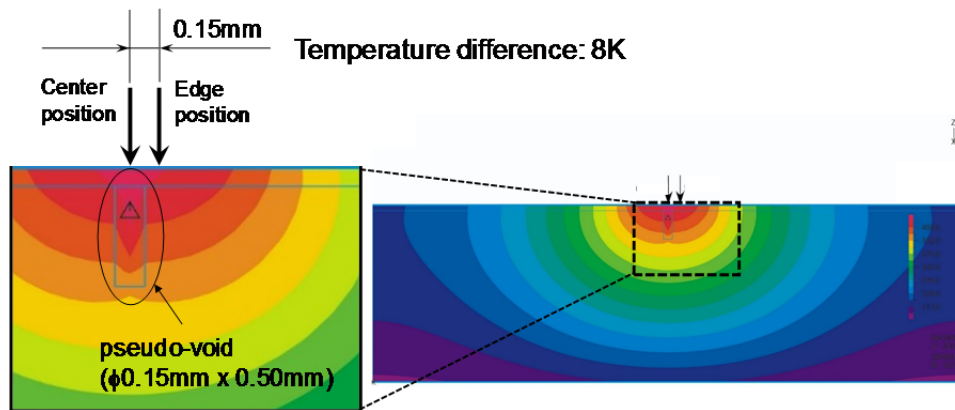


Fig. 6. Temperature contour diagram around a pseudo-void immediate after heating (heating: 0.5 s, cooling: 0.1 s).

あわせて、欠陥位置が未知の試料に対して、全体加熱により位置同定を行うことを試みた。測定装置と試料配置の概要をFig. 4に示す。加熱はフラッシュランプを用い、光軸が試料測定面に対して45°の角度となるようにランプをセットした。サーモグラフィ赤外線カメラはランプと対称位置に、同じく45°の角度でセットした。加熱条件は1000J/フラッシュのパルス加熱とした。得られた測定データには、外乱要因に起因するノイズが含まれていると判断されたため、ノイズ除去のため同一パルス周波数の参照信号を用いたロックインアンプ処理を行い、温度分布を可視化した結果をFig. 5に示す。図中赤色で示された部分は周囲より温度が高く計測された部分である。深さ0.15mmまでの貫通孔は赤く表示

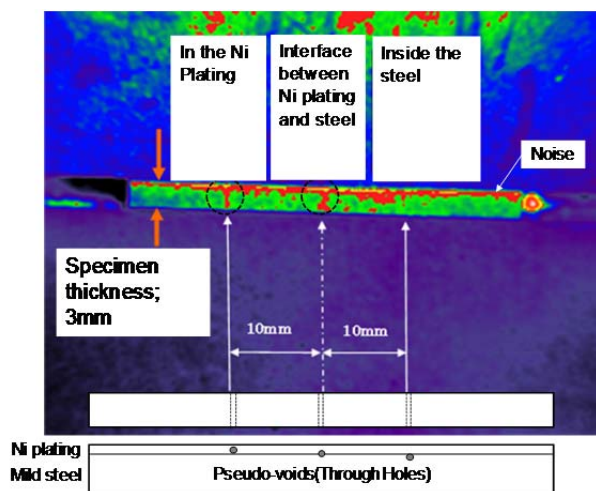


Fig. 5. Surface temperature distribution of flash lamp heating with lock-in amp treatment.

されており、温度差により位置同定できることが確かめられた。一方深さ0.20mmでは温度差を明瞭に観察することはできなかった。以上の結果より、表面から0.15mm程度までの領域において、熱測定により欠陥の位置及び深さの検出が可能であることが見出された。

3.2 欠陥サイズの同定

3-2-1 Type II 試験片の熱解析

Type II 試験片に相当する解析モデルを作成し、レーザ加熱に相当する50W、φ1.5mmの熱入力を欠陥直上の試料表面に与えた。φ0.15mmの欠陥部に対して0.5s加熱、0.1s冷却後の断面方向における温度分布をFig. 6に示す。表面に与えられた熱は放射状に内部へ拡散する。欠陥中心から0.15mm離れた箇所の試料表面と欠陥中心の表面温度の差は8Kと計算された。この結果は、レーザ加熱の際の温度差により欠陥位置の検出が可能であることを示している。しかしながら、実際の測定では試料表面からの

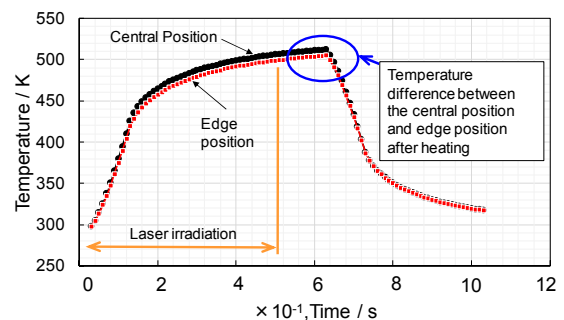


Fig. 7. Simulation result of temperature change behavior.

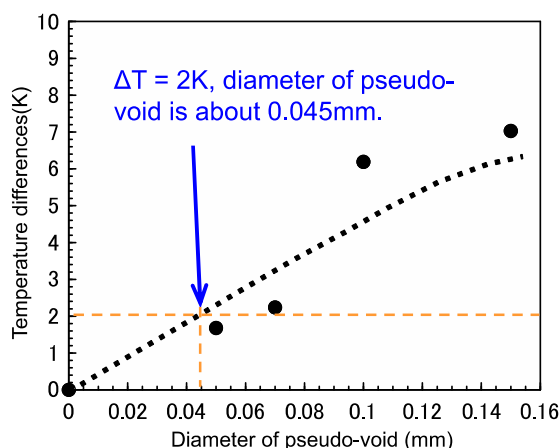


Fig. 8. Relationship between diameter of pseudo-void and temperature difference

レーザ反射により、照射パルス時間内における測定はノイズを含む不安定な状態となる。解析結果から温度応答曲線を作成した結果を Fig. 7 に示す。レーザ照射終了から試料表面温度の温度低下が始まるまでに 0.1s 程度のわずかな遅れが生じることがわかった。この時間帯においても欠陥中心部と周囲の温度差は維持されており、この温度差を抽出して欠陥同定を試みることにした。欠陥中心部と周囲の温度差について、欠陥直径との関係を Fig. 8 に示す。実際の赤外線測定では外的要因によるノイズの影響が想定されるので、現実的な測定精度を±1K と仮定すると、温度差が 2K あれば欠陥を同定できることになる。点線で示した近似曲線から、温度差 2K に相当するのは欠陥径 0.045mm であるので、0.05mm 以上の大きさを持つ欠陥であれば検出可能と予測した。この結果から、Type II 試験片の最小人工欠陥はφ0.050mm とした。

3-2-2 Type II 試験片の熱測定

Type II 試験片を用い、欠陥配置箇所へレーザ照射を行い、表面の温度変化を赤外線サーモグラフィにて測定した。この場合の照射条件は、熱解析と予備実験の結果からレーザ出力を 100W とした。照射時間とビーム径は前節と同様、それぞれ 0.5s、φ1.5mm とした。このときのエネルギー密度は 28.4J/mm² である。前述の通り、レーザ照射直後の試料表面温度を抽出し、欠陥サイズに対して整理した結果を Fig. 9 に示す。欠陥面積 0 で示した健全部に比べ、欠陥内在部の温度上昇が大きく、欠陥直径 0.10mm まではサイズに依存して温度上昇量が大きくなることが確認できた。欠陥部にはエポキシ樹脂が充填

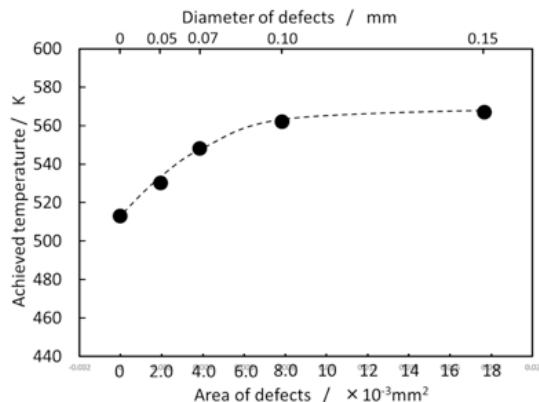


Fig. 9. Temperature dependence on flaw size

されており、軟鋼に比べて熱伝導率が低い。このため、欠陥は表面から基材内部への熱抵抗として作用するため、欠陥サイズに依存して熱抵抗が増大する。これにより、表面の温度上昇量が大きくなったものと推測される。

Type II 試験片試験片を用いて、欠陥位置の同定を行う測定を試みた。まず、上記測定で用いたレーザパルスを多関節ロボットで位置制御しながら試験片全面にスキャンしながら赤外線カメラで温度測定を行った。スキャンピッチは照射径と同じ 0.15mm とした。得られた測定結果から温度分布を画像化した。欠陥位置を特定できる温度差を確認することはできなかった。本研究で用いたレーザビームは中心のエネルギーが最も高いガウシアン分布のレーザビームである。前述の欠陥サイズ依存性の測定のようにビーム中心部を欠陥に照射した場合は意図した熱量が欠陥部に与えられるので、温度応答挙動の差から欠陥を認識できたものと思われる。一方試料全体をスキャンした場合には必ずしも欠

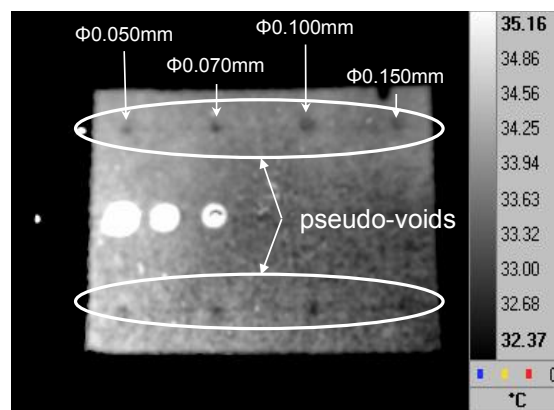


Fig. 10. Temperature distribution after hot-plate heating

陥部にビーム中心部が照射されるとは限らず、入射された熱量に面内分ばらつきが生じていたものと考えられる。レーザスキャンにより欠陥の位置同定を行う場合には、ビーム内のエネルギー分布を均一とする手法（レーザホモジナイザー等）の適用が必要と考えている。この結果を受けて、試験片全体を均一加熱した後の冷却挙動を測定することにより、欠陥位置の検出を試みた。加熱にはホットプレートを用い、試料表面温度は接触式表面温度計にて測定した。試料温度が 423K になった時点で直ちに常温の測定台へ移動させ、表面温度の変化を赤外線サーモグラフィで測定した。冷却中の温度分布の一例を Fig. 10 に示す。この図は温度分布を白黒の階調で示した。8 箇所すべての疑似欠陥が暗い色調の点で示されている。このことから、欠陥部の表面においては健全部に比べ低い温度が計測されることがわかった。加熱は試料下面をホットプレートに接触させて行ったので、疑似欠陥としたエポキシ樹脂充填有底孔が下方からの熱拡散に対して障壁となり、試料表面温度に差が生じていたものと思われる。このため、冷却過程において健全部より低い温度が欠陥部から検出されたと考えられる。また最小 $\phi 0.050\text{mm}$ の欠陥も温度差により検出できることが確認できた。なお、Type II 試験片では同一径に対して深さ 0.25mm と 0.5mm の 2 種類の欠陥を作り込んだが、測定されたデータからは有意差は認められなかった。この範囲の欠陥厚みにおいては、欠陥体積よりも欠陥投影面積が温度応答変化に対して支配的であるものと思われる。本研究で用いた人工欠陥よりも薄い剥離状欠陥の厚み依存性については、人工欠陥を内在する測定試料の製作方法を含めてさらなる検討が必要である。なお、試料中心に白く表示されている箇所が 3 点ほど認められるが、レーザのダミー照射により表面状態が変質し、赤外線放射率が変化した部分である。

4. 結論

欠陥導入試料に対して、外部加熱した際の温度変化挙動について赤外線サーモグラフィを用いて測定した結果、下記の知見が得られた。

- 1) 加熱後の温度変化量は欠陥の深さ位置に依存して変化した。このことから、欠陥の深さ方向位置を同定する可能性が示された。本研究での測定は 0.2mm 深さまでとしたが、この範囲であれば欠陥の深さ位置を推定できることがわか

った。

- 2) サイズの異なる欠陥を導入した試料を測定したところ、加熱後の温度変化量は欠陥投影面積に依存して増大した。この結果より、サーモグラフィ測定により欠陥サイズを同定する可能性が示された。また、最小で $\phi 0.050\text{mm}$ の微小欠陥を検出できることが確認できた。
- 3) 欠陥の位置検出には、試料全体加熱により健全部との温度応答挙動の差を抽出することが有効であることがわかった。加熱源としては、ランプヒータやホットプレートなど汎用の熱源が利用可能である。

レーザスキャンにより欠陥の位置同定が可能となれば、レーザ加熱により位置検出と深さや大きさの同定が可能となるのでより望ましい。また、異なるサイズと深さの欠陥が混在した場合、測定された温度応答挙動の違いがサイズ起因・深さ起因いずれによるものか切り分ける手法・システムを開発することが必要となる。これらが今後の課題である。

参考文献

- (1) 坂上隆英, “複合材料の非破壊検査への赤外線サーモグラフィの適用”, 非破壊検査, Vol. 66, No. 7, pp. 303-308 (2017).
- (2) Katsumi Miyama, Hiroyuki Tanaka, Yohei Sakuraba, Hideo Hoshina, Hideaki Aiyama, Tomoaki Nimura; “The application of thermo-graphic measurement to defect detection beneath a nano-micro scale surface finishing film”, JSNDI Fall Conference International Session (2015).
- (3) Katsumi Miyama, Hiroyuki Tanaka, Yohei Sakuraba, Koji Fujimoto, “Fabrication of Pseudo-Void Samples with Additive Manufacturing and Flaw Detection by Active-Thermography”, The Sixth Japan-US NDT Symposium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World (2018).