

赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査技術に関する研究

近藤拓郎*

A Study on Non Destructive Inspection Technology Using Infrared Thermography Takuro Kondo

本研究は、赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査(以下赤外線検査)において、測定条件や取得した温度データの簡易的な数値計算によって内部欠陥の視認性向上を検討した。その結果、熱源と測定対象の熱伝導率による影響が大きい、データ処理の方法によっては内部欠陥の視認性を改善できる可能性があることを確認した。

1. 緒言

赤外線検査は、測定物の外表面温度を測定することで表面や内部の欠陥や亀裂、剥離、密度差等を効率よく検査する方法である。放射線検査や超音波検査といった他の非破壊検査に対し、測定可能な範囲が大きいことや非接触であること、比較的自由な形状に対しても測定が可能といった特徴から建造物の外壁やトンネルの内壁調査に利用されている。一方、加工現場では、 casting製品等の金属製品に対する追加工前の簡易的な検査としての利用が求められている。しかしながら、赤外線検査では検出できる内部欠陥の深さが浅いことからこのような金属製品に対する欠陥検出としての利用は難しく検討も不十分であるのが現状である¹⁾。

そこで本研究では、簡易的な手法で欠陥検出可能な深度を改善し、金属製品へのサーモグラフィを用いた非破壊検査の利用可能性について検討した。

2. 実験方法

赤外線検査は、人為的に温度の変化を生じさせて温度変化の観察を行うアクティブサーモグラフィ法と測定対象自体の熱変化を観察して行うパッシブ法とに大別される。本実験では、測定対象自体に熱変化が殆ど無いことからアクティブサーモグラフィ法を採用した。

2・1 実験装置

図1に実験装置の概要を、表1に実験装置の仕様を示す。熱源は点滅回路によって制御し、測定サンプルに対して熱をパルス照射した。その際の測定サンプルの表面温度変化は、測定サンプルから700mmの位置に設置した高速度赤外線サーモグラフィによって測定した。取得したデータは、PCの数値解析ソフトウェアによってデータ処理を行った。図2に測定サンプルの外観とその欠陥を、表2に測定サンプルの仕様を示す。測定サンプルは、樹脂製とアルミニウム製で裏側に欠陥を模した加工を施し、表側(測定面)には黒体スプレーを塗布した。熱源は、赤外線ランプとグラフィットヒーターを使用した。表3に実験条件を示す。熱源の照射時間を300ms、非照射時間を1000msとした。また、照射の回数による影響を調べるために照射時間を200ms、非照射時間を500msと周期を短縮し長時間撮影した実験も

行った。高速度赤外線サーモグラフィの空間分解能は0.6mradである。測定サンプルと高速度赤外線サーモグラフィとの距離を約700mmに設定したことから、1画素のサイズは約420 μ mである。またサンプリング周波数は100Hzとし、測定する熱画像の解像度は256 \times 320pixelとした。

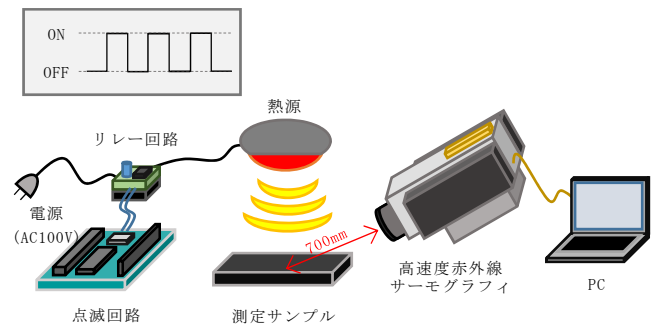
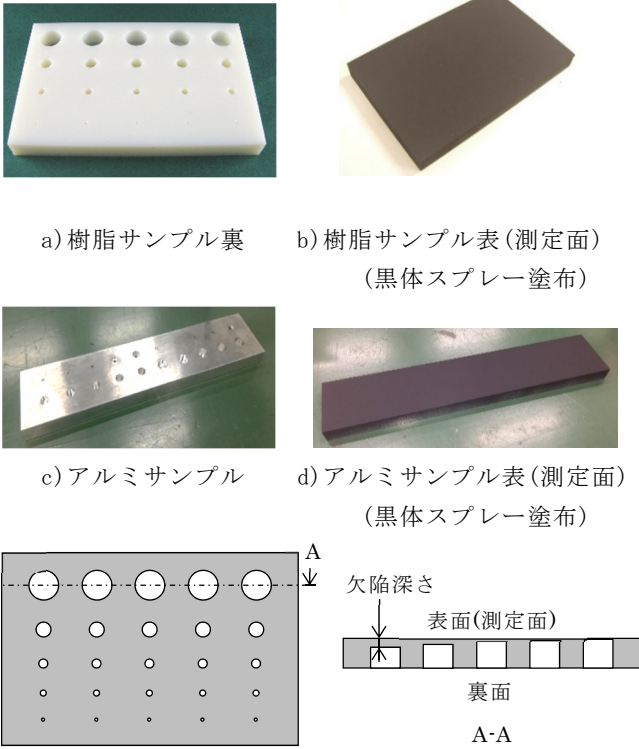


図1 実験装置の概要

表1 実験装置の仕様

名称	メーカー 品名/型式	仕様/設定
高速度赤外線 サーモグラフィ	Telops FAST-IR 2K	温度分解能:25mK
		空間分解能:0.6mrad
		サンプリング周波数:100Hz
		解像度:256 \times 320pixel
点滅回路	Arduino Uno R3	搭載マイコン:ATmega328
リレー回路	秋月電子通商 SSLキット	トライアック:TG35C フォトカップラ:TLP561J
熱源	赤外線 ランプ ^o	旭電気工業 R127E26 定格:100/110V 300W
	グラフィット ヒーター	Aladdin AEG-G13A 定格:100V 1300W
数値解析ソフトウェア	MathWorks MATLAB	Ver:R2019b

* 企業支援部加工技術グループ



e) 欠陥 (樹脂サンプル)
図 2 測定サンプルの外観と欠陥

表 2 測定サンプルの仕様

測定サンプル	樹脂サンプル 欠陥直径:1.0, 3.0, 5.0, 10.0mm 欠陥深さ:0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0mm 材質:アクリル系光硬化樹脂
	アルミニウムサンプル 欠陥直径:2.0, 3.0, 6.0, 8.0mm 欠陥深さ:1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0mm 材質:A5052

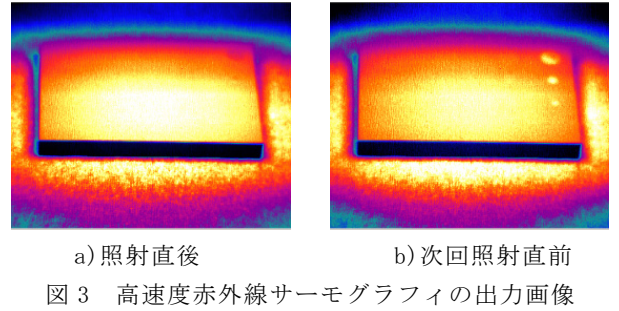
表 3 実験条件

No	熱源	サンプル	照射時間 [ms]	非照射時間 [ms]
1	赤外線ランプ	樹脂	300	1000
2		アルミ		
3	グラファイトヒーター	樹脂	200	500
4		アルミ		
5		樹脂		

2・2 データ処理

図 3 に高速度赤外線サーモグラフィで取得した熱画像を示す。それぞれ熱を照射した直後と照射直前の熱画像であるが、瞬間的な画像だけを確認しても極端に浅い欠陥でない限り欠陥は視認できない。そこで、1 枚の熱画像で欠陥が認識できるようにサーモグラフィで取得した連続的な温度データを MATLAB によって抽出し演算を行った。データの演算については演算方法の違いによる影響を調査するため、熱源照射による温度の変化のみを抽出することを目的とした減衰温度の総和と、連続的な温度変化を抽出するこ

とを目的とした連続する 2 フレーム間温度差の総和、各ピクセルの温度を積算することで温度差を強調させることを目的とした全フレーム温度の総和の 3 種類で行った。



2・2・1 減衰温度の総和

図 4 に欠陥部分の温度推移データを示す。熱源の照射時に発生した瞬間的なピーク温度と次回照射直前の温度との差を照射回数分積算し減衰温度の総和とした。照射の回数を n 、照射開始時のフレーム番号を f 、次回照射の間隔フレーム数を d として減衰温度の総和 S_A を次のように表すことが出来る。なお、 $A_{f \times k}$ は照射開始時の温度 (256×320 の行列)、 $A_{(f+d) \times k}$ は次回照射直前の温度 (256×320 の行列) である。

$$S_A = \sum_{k=1}^n (A_{f \times k} - A_{(f+d) \times k}) \quad (1)$$

但し、

$$S_A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1 \ 320} \\ a_{21} & a_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ a_{256 \ 1} & & & a_{256 \ 320} \end{vmatrix}$$

ここで

S_A : 減衰温度の総和 (256×320 の行列)

n : 熱源の照射回数

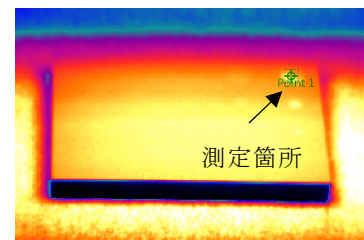
f : 照射開始時のフレーム番号

d : 照射の間隔フレーム数

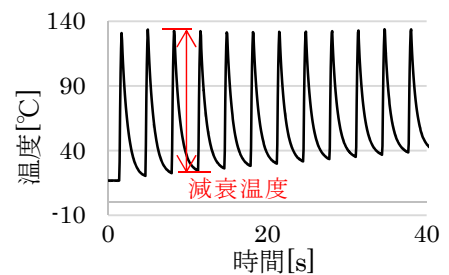
$A_{f \times k}$: 照射開始時の温度 (256×320 の行列)

$A_{(f+d) \times k}$: 次回照射直前の温度 (256×320 の行列)

a : 各ピクセル温度 [°C]



a) 温度測定箇所



b) 温度推移

図 4 欠陥部分の温度推移

2・2・2 連続する2フレーム間温度差の総和

各ピクセルにおいて、連続する2フレームの温度差を算出し加算した結果を連続する2フレーム間温度差の総和とした(以下、2フレーム間温度差の総和). 最終フレーム番号を m として2フレーム間温度差の総和 S_B は次のように表すことが出来る. なお, B_k は瞬時温度 (256×320 の行列) である.

$$S_B = \sum_{k=1}^m (\sqrt{(B_{k+1} - B_k)^2}) \quad (2)$$

ここで

S_B : フレーム間温度差の総和 (256×320 の行列)

m : 最終フレーム番号

B_k : 瞬時温度 (256×320 の行列)

2・2・3 全フレーム温度の総和

各ピクセルにおいて、全フレームの温度を積算した結果を全フレーム温度の総和とした. 最終フレーム番号を m として全フレーム温度の総和 S_C は次のように表すことが出来る.

$$S_C = \sum_{k=1}^m B_k \quad (3)$$

ここで

S_C : 全フレーム温度の総和 (256×320 の行列)

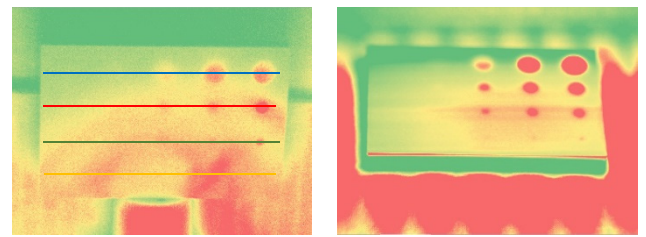
m : 最終フレーム番号

B_k : 瞬時温度 (256×320 の行列)

3. 実験結果と考察

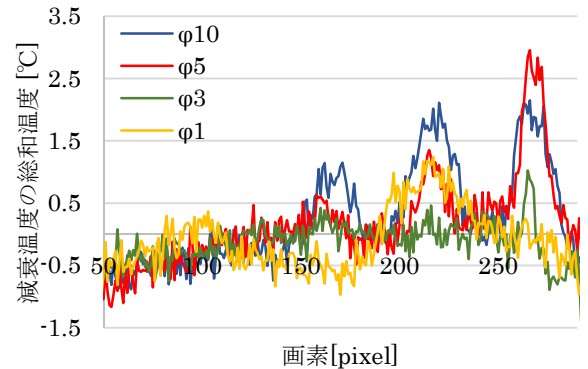
3・1 熱源の違いによる影響

図5に赤外線ランプによる照射とグラファイトヒーターによる照射とを比較した熱画像と赤外線ランプの欠陥の中心付近を通る温度分布を示す. 測定サンプルは樹脂サンプルで, データ処理の方法は減衰温度の総和, 熱源の照射時間は点灯 300ms 消灯 1000ms である. 赤外線ランプは, グラファイトヒーターと比較して視認性が低い結果であった. 赤外線ランプは, 温度分布波形から分かるようにデータ処理を行ってもノイズが多く残っており, このノイズが視認性に影響を及ぼしているものと推測される. これは, 印加する熱量が少ないことで温度変化とノイズとの差が小さくなりデータ処理の効果が十分に得られなくなったものと推測される. また, 赤外線ランプによる照射は不均一であり全体的な温度の偏りが顕著に生じた. これは, 赤外線ランプのフィラメントに似た形状が測定サンプル上に映し出されていたことからフィラメントによるものと推測される. 以上の結果から, 適切な熱源としては測定サンプルが効率的に吸収できる波長にもよるが熱量が多く均一に照射できることが重要と考えられる. しかし, 本実験において赤外線ランプによる加熱は表面温度が 36°C までの上昇であったが, グラファイトヒーターによる加熱については表面温度が瞬間的に 127°C まで上昇しており, 測定物の耐熱性について注意が必要である.



a) 赤外線ランプ

b) グラファイトヒーター

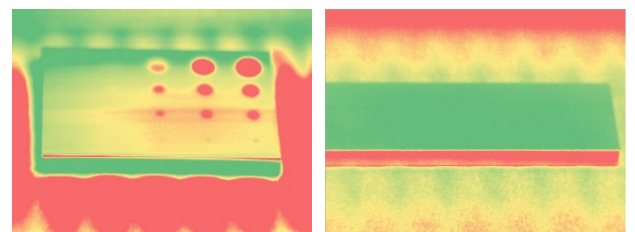


c) 赤外線ランプの欠陥中心付近温度分布

図5 赤外線ランプによる照射とグラファイトヒーターによる照射とを比較した熱画像と赤外線ランプの欠陥の中心付近を通る温度分布

3・2 測定サンプルの違いによる影響

図6に樹脂サンプルとアルミニウムサンプルの実験結果を示す. データ処理方法は減衰温度の総和であり, 熱源はグラファイトヒーター, 熱源の照射時間は点灯 300ms 消灯 1000ms である. 樹脂サンプルでは深さ 1mm までの欠陥を視認することが出来たが, アルミニウムサンプルでは最も浅い深さ 1mm の欠陥も視認できなかった. アルミニウムサンプルについては, 赤外線ランプによる照射や他のデータ処理方法, 照射時間の変更などを試したがいずれの条件でも欠陥を視認することが出来なかった. これは, 測定サンプルの熱伝導率が影響しているものと推測される. 樹脂の熱伝導率が 0.237W/mK 程度であると推測されるのに対し, アルミニウム (A5052) は 140W/mK 程度である^{2),3)}. 熱の拡散速度が極めて速いため欠陥部分と健全部分に差異が生じにくいものと考えられる.



a) 樹脂サンプル

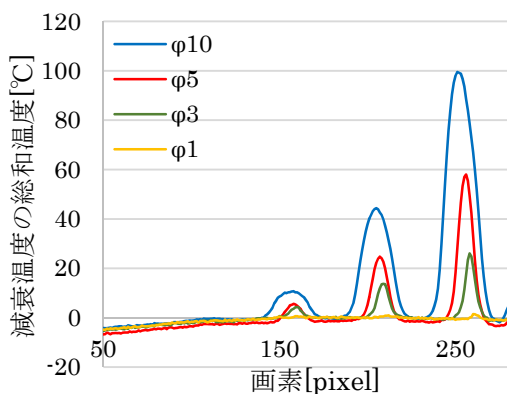
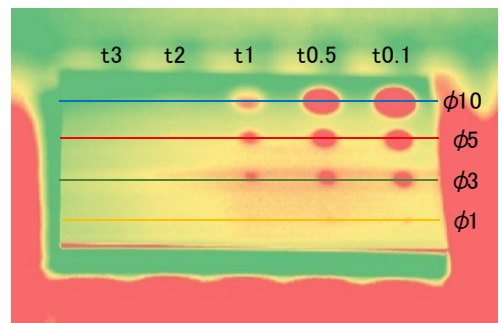
b) アルミニウムサンプル

図6 熱源の違いによる影響

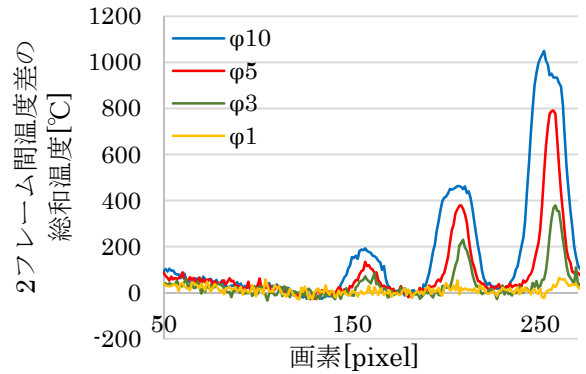
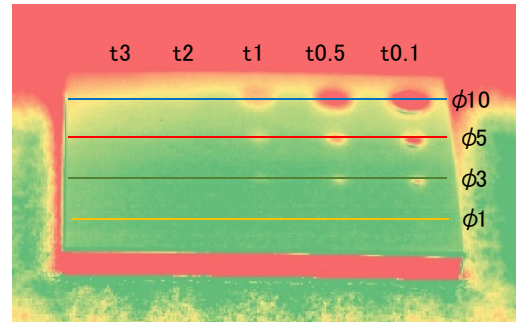
3・3 データ処理方法の影響

図7にデータの処理方法が異なる3種類の熱画像と欠陥の中心付近を通る温度分布を示す。測定サンプルは樹脂サンプルで、熱源はグラファイトヒーター、熱源の照射時間は点灯 300ms 消灯 1000ms である。3種類の熱画像を比較すると減衰温度の総和が最も欠陥を視認し易く、直径 3mm 深さ 1mm までの欠陥は比較的容易に視認可能である。一方で2フレーム間温度差の総和と全フレーム温度の総和は、直径 3mm 深さ 1mm の欠陥を視認することは難しい。3種類の温度分布を比較すると直径 3mm 深さ 1mm の欠陥のピークの大きさに差は無い。しかしながら、減衰温度の総和は他のデータ処理方法と比較して波形が滑らかでノイズが少ないことが分かる。このことから、欠陥の視認性向上には欠陥部と健全部との温度差だけでなくノイズの低減が重要であると推測される。

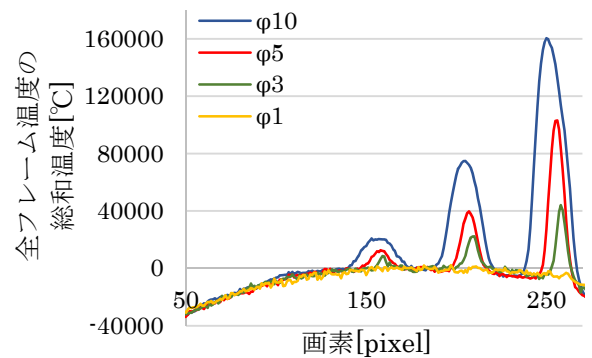
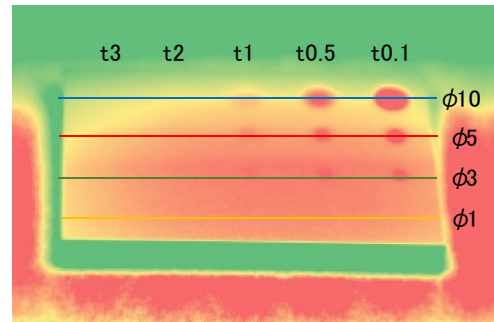
本実験において、減衰温度の総和にはノイズ低減の効果があることが確認され、直径 1mm の欠陥についても視認できる可能性があることが確認できた。このことから、簡易的な装置でもデータ処理により視認性が改善されることが確認され、樹脂部品において有効性があることが分かった。また、熱源の応答性やサンプリング周波数、測定対象の予冷等で更なる改善が期待される。



a) 減衰温度の総和



b) 連続する2フレーム間温度差の総和



c) 全フレーム温度の総和

図7 データ処理方法の違いによる影響

3・4 データの積算回数による影響

図8に熱の積算回数に応じたデータ処理結果を示す。データ処理の方法は減衰温度の総和である。熱源はグラファイトヒーター、熱源の照射時間は点灯 200ms 消灯 500ms とし 35 回の照射を行った。積算する回数を増やすことでノイズが低減され、より視認性が向上することが確認された。しかしながら、25 回を超えたあたりから視認性に变化が表れにくくなった。これは、視認性の悪い箇所は減衰温度が健全部と変わらないためと推測される。

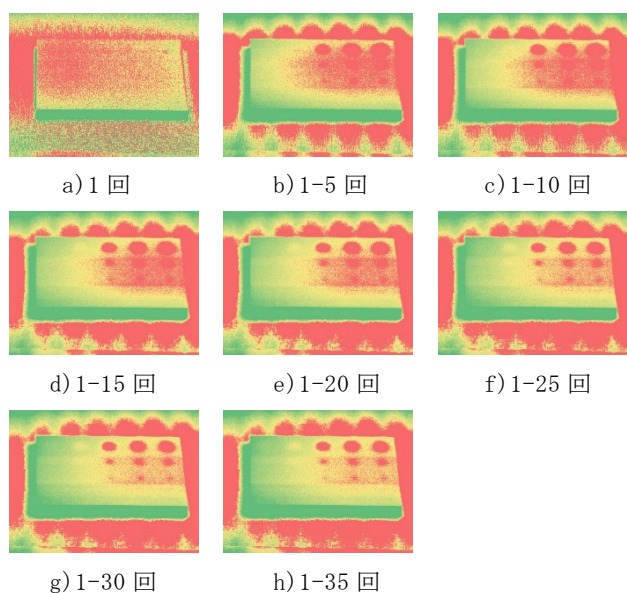


図8 データの積算回数による影響

4. 結 言

本研究では赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査において、熱源や測定サンプルの違い、データの処理方法による影響について調査した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 印加する熱量が大きい方がデータ処理時のノイズ低減効果が大きい。

- (2) 測定対象の熱伝導率は欠陥検出に大きく影響を及ぼし、熱伝導率が高いほど検出が困難になる。
- (3) 欠陥検出は、欠陥部と健全部の温度差だけでなくノイズの低減が重要である。
- (4) データ処理(減衰温度の総和)によりノイズの低減が可能であり、樹脂サンプルにおいて深さ1mm直径1mmの欠陥が視認出来る。簡易的な装置でもデータ処理により視認性が改善され、樹脂部品において有効性がある。また、熱源の応答性やサンプリング周波数、測定対象の予冷等で更なる改善が期待される。
- (5) データの積算回数はノイズ低減に効果があるが一定の積算数を超えると効果が少なくなる。

参考文献

- 1) 阪上隆英：赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査，溶接学会誌，**72**(4)，p. 251-255(2003)。
- 2) 新保寛，杉森勝，宮野靖，服部陽一，國尾武：PMMAの熱粘弾性挙動による残留応力と変形，日本機械学会論文集，**56**(524)，p. 971(1990)。
- 3) 山根 敏，田中 彬人，山本 光，金子 裕良，大嶋 健司：スイッチバック溶接のバックングレスV開先円周溶接への適用，溶接学会論文集，**25**(1)，p. 86-94(2005)。