

# 赤外線法による内部欠陥測定に関する研究\*<sup>1</sup>

## Study on Measurement of Internal Defects by Infrared Thermography

臂 安彦 Y. HIJI 貴治雅博 M. KIJI 山田和明 K. YAMADA 楼 黎明 L. LOU

Authors have developed a nondestructive measurement method for internal defects using an optical excited thermography. In order to find optimal measurement conditions, experiments have been carried out under different light irradiation cycles and times. Furthermore, authors have proposed a method for quantitatively estimating the size of internal defects by differential processing of the phase difference distribution of surface temperature change. From the experimental results, it has been found that there exists an optimal irradiation cycles and times, and that these depend on tested material. Also, it has been recognized that internal defect size can be quantitatively estimated from differential processing of the phase difference distribution of surface temperature change, that estimation accuracy is related to the thermal conductivity of materials and materials with lower thermal conductivity show higher estimation accuracy.

**Key Words:** internal defect, nondestructive test, infrared ray, optical excited thermography

### 1. はじめに

従来、内部欠陥の非破壊測定法として超音波探傷法、磁粉探傷法などがよく用いられているが、広範囲の測定には多大の労力と時間を要することから、近年、非接触・短時間で広範囲の測定が可能な光励起サーモグラフィ法が注目されている。光励起サーモグラフィ法の内部欠陥測定に関する研究には、測定条件による内部欠陥の深さ方向の検出能力を検討したものや内部欠陥の検出可否のみを簡単に検討したものが多く、内部欠陥の位置や寸法の定量的な推定手法に関する報告は少なかった<sup>1)</sup>。

本報では、光励起サーモグラフィ法を用いて、複数の光照射周期や光照射時間の下で試験片の内部欠陥を測定し、最適な測定条件において得られた試験片表面温度変化の位相差分布を用いて、試験片内部欠陥幅の定量的な推定を試みたので報告する。

### 2. 実験方法

図1に測定システムの概略図を示す。実験に使用した赤外線サーモグラフィはCedip Silver 480Mである。

実験は、試験片表面を外部光源（ハロゲンランプ）により周期的に加熱し、赤外線サーモグラフィで温度映像を撮影することにより行った。このとき、外部光源の制御用信号（矩形波）を参照信号として、温度映像と同時に記録する。試験片の表面温度は外部光源と同周期で変動するが、試験片に内部欠陥が存在すれば、表面温度変化の位相が変化する。試験片表面の各位置での温度変化データに参照信号と同周期の正弦波を残差の和が最も小さくなるように一致させ、参照信号と同期した正弦波との位相差を比較することで温度変化の位相差分布を算出した。また、同時に試験片表面各位置の温度変化データに一致させた正弦波の振幅から温度変化量分布を算出し、温度変化の位相差分布と比較した。

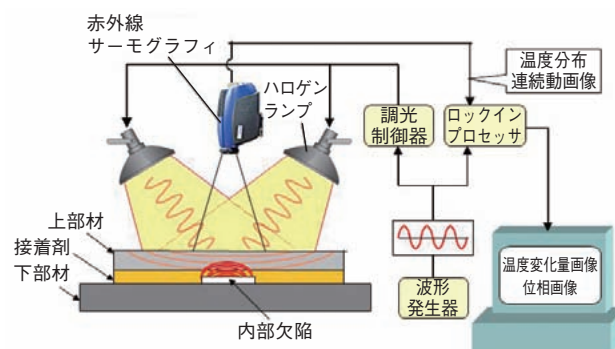


図1 測定システム概略図  
Schematic of measurement system

\* 1 本論文は、2010年度日本非破壊検査協会 秋季大会講演概要集 (520106) を基に作成した。

試験片の内部欠陥は、下部材表面に幅の異なる3種類のテフロンテープを介在させた状態で上部材を接着することで作製した。また、上部材には、熱伝導率の異なるNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>BおよびS15Cを用いた。表1、2に測定条件と試験片の仕様をそれぞれ示す。図2に試験片の内部欠陥の様子を示す。実験では、試験片に放射率0.94の黒体塗料をスプレーし、光照射周期を3~40秒までの1秒ごと、光照射時間を1, 3, 5秒、積算周期を10周期分、赤外線サーモグラフィのフレームレートを300Hzとして、それぞれの条件で内部欠陥を測定した。

表1 測定条件  
Measurement conditions

|            |                   |
|------------|-------------------|
| 赤外線サーモグラフィ | Cedip Silver 480M |
| 外部光源       | ハロゲンランプ 500W × 2  |
| 光源制御方法     | ON・OFF 制御         |
| 光照射周期      | 3~40s (1s ごと)     |
| 光照射時間      | 1, 3, 5s          |
| 積算周期数      | 10 周期             |
| フレームレート    | 300Hz             |

表2 試験片の仕様  
Specification of test piece

|         |  |
|---------|--|
| 上部材材質   | Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B, S15C                           |
| 上部材寸法   | 8 × 64 × 2mm   |
| 上部材熱伝導率 | Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B = 7W/(m·K),<br>S15C = 52W/(m·K) |
| 内部欠陥幅   | 20, 10, 5mm  |
| 備考      | 放射率 0.94 の黒体をスプレー塗布  |

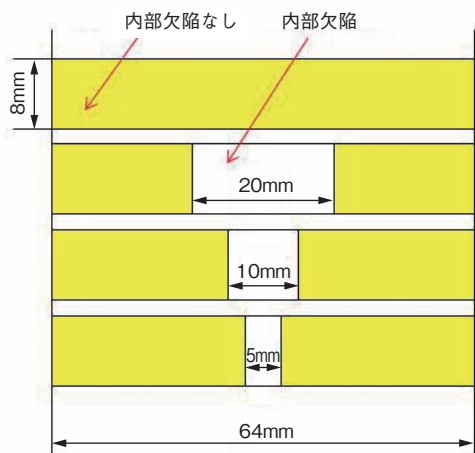


図2 試験片の内部欠陥  
Internal defects of test piece

### 3. 実験結果および考察

Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 製試験片、S15C 製試験片それぞれの場合について、図3、4に温度変化量分布を、図5、6に温度変化の位相差分布を、図7、8に試験片中央長手方向の温度変化の位相差分布を示す。図3~8は内部欠陥における位相差変化が最も強調された測定条件におけるものであり、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 製試験片では、光照射周期 15 秒、光照射時間 5 秒、S15C 製試験片では、光照射時間 12 秒、光照射時間 5 秒の条件であった。図3、4に示す温度変化量分布では内部欠陥を検出できないが、図5、6に示す温度変化の位相差分布では内部欠陥が検出できることが分かる。Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 製試験片と S15C 製試験片の温度変化の位相差分布を比較すると、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 製試験片の方が、内部欠陥部における位相変化が大きい。これは Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 製試験片の熱伝導率が S15C 製試験片よりも小さいため、内部欠陥で遮断された熱の拡散が小さくなり、内部欠陥部における位相変化が強調されたと考えられる。また、図7、8より内部欠陥幅と位相差分布の山の幅には相関があるものの、熱拡散の影響で実際の内部欠陥幅より位相分布幅が大きくなっていることが分かった。さらに、温度変化の位相差分布から内部欠陥幅を推定したが、内部欠陥部と内部欠陥なし部の境界付近の位相差分布には熱拡散の影響と考えられる勾配があるため、内部欠陥幅の定量的推定は困難であった。この傾向は試験片の材質にかかわらず、すべての測定条件においても同様であった。

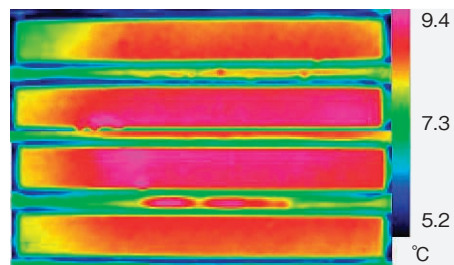


図3 温度変化量分布 (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)  
Distribution of temperature variation (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)

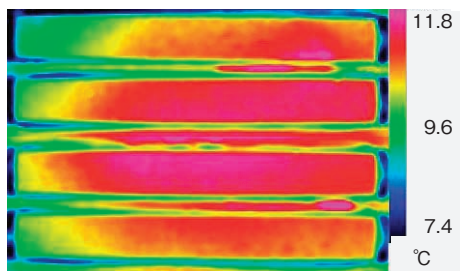


図4 温度変化量分布 (S15C)  
Distribution of temperature variation (S15C)

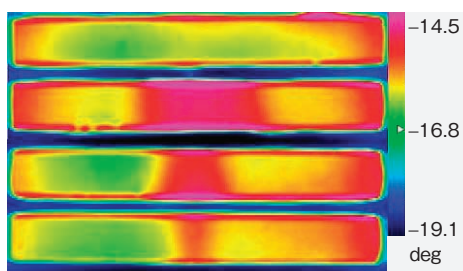


図5 温度変化の位相差分布 (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)  
Phase difference distribution of temperature variation (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)

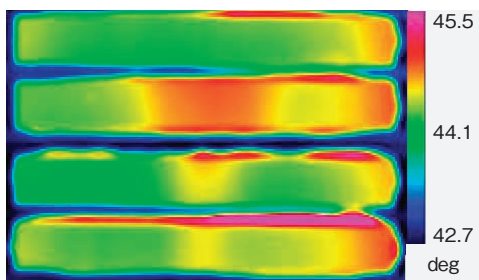


図6 温度変化の位相差分布 (S15C)  
Phase difference distribution of temperature variation (S15C)

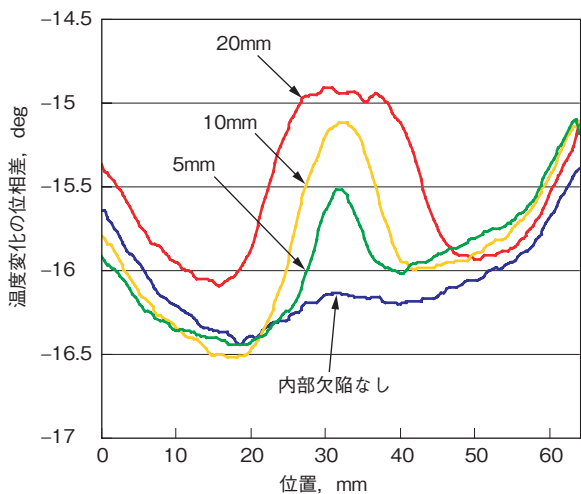


図7 温度変化の位相差分布 (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)  
Phase difference distribution of temperature variation (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)

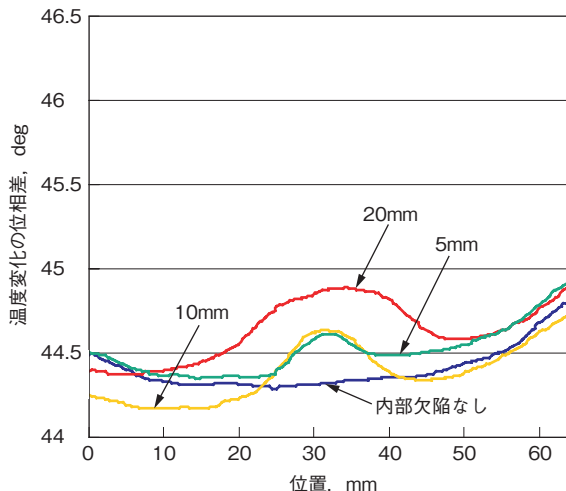


図8 温度変化の位相差分布 (S15C)  
Phase difference distribution of temperature variation (S15C)

#### 4. 微分処理による内部欠陥幅の推定

位相差分布から内部欠陥幅を推定するため、次のデータ処理を試みた。まず、各内部欠陥幅の位相差分布(図7)から、内部欠陥なしの位相差分布をそれぞれ差し引き、内部欠陥以外の要因で発生する位相差変化を取り除いた(図9)。さらに、位相差分布の隣接する2点に対し、微分処理を施し、微分値が極値をとる位置の距離を内部欠陥幅と推定した(図10)。図11にNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>BおよびS15C製試験片において、内部欠陥幅の推定値と実際の幅を比較した結果を示す。図11より、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>BおよびS15C製試験片の両者において、内部欠陥幅の推定値は実際の幅に近いことが分かる。さらに、S15CよりNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B製試験片の方が、実際の幅に近い値を示し、内部欠陥幅が小さいときは両者の差がより顕著になることが分かる。これは、熱伝導率の小さいNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bの方が、内部欠陥で遮断された熱の拡散が少ないことに起因するものと考えられる。

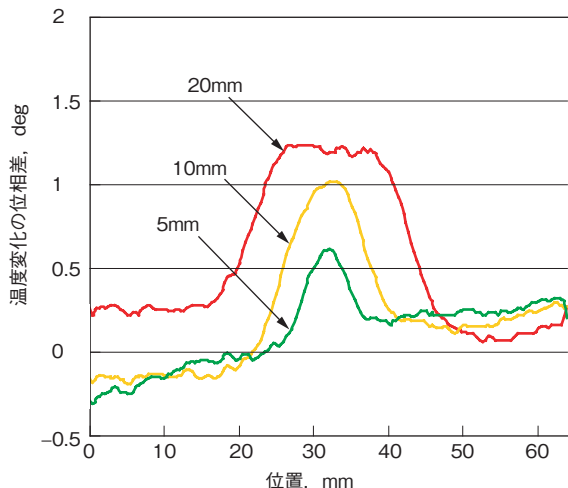


図9 位相差分布 データ処理後 (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)  
Phase difference distribution after data processing (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)

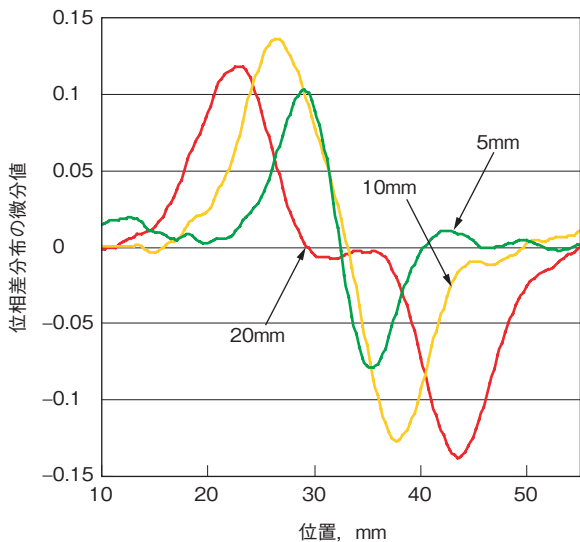


図10 位相差微分値分布 (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)  
Distribution of phase difference differential value (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)

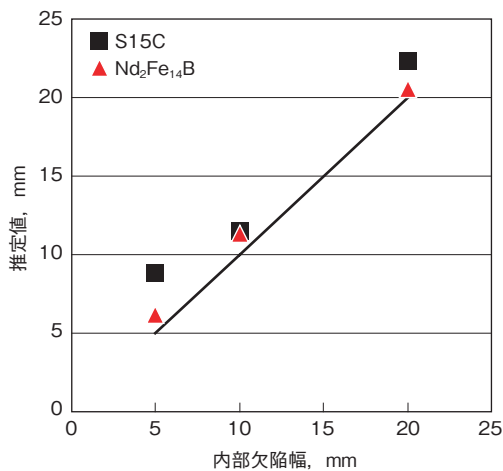


図11 内部欠陥幅の推定値  
Estimates of internal defect sizes

## 5. おわりに

光励起サーモグラフィ法を用いて、複数の光照射周期と光照射時間の下で、試験片の内部欠陥を測定した。その結果、試験片表面の温度変化量の分布ではなく、温度変化の位相差分布により、内部欠陥の測定が可能であること、試験片表面温度変化の位相差が最も大きくなる最適な光照射周期および光照射時間が存在し、それは試験片の材質により異なることが分かった。また、温度変化の位相差分布に微分処理を施すことにより、試験片の内部欠陥寸法の定量的推定が可能であり、熱伝導率の低い材料の方がより高精度に内部欠陥寸法を定量的に推定できることが分かった。

## 参考文献

- 1) 寺田博之, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィによる設備診断・非破壊評価ハンドブック, 社団法人日本非破壊検査協会(2007).

## 筆者



臂 安彦\*  
Y. HIJI



貴治雅博\*  
M. KIJI



山田和明\*  
K. YAMADA



楼 黎明\*  
L. LOU

\* 研究開発本部 研究開発センター FP 研究部