赤外線放射温度計による表面欠陥の検出*

岡本 芳三^{*1}, 神永 文人^{*1}, 刑部 真弘^{*1}
大岡 紀一^{*2}, 小川 和彦^{*3}, 金谷 邦雄^{*2}

Surface Crack Detection by Infrared Radiometer

Yoshizo OKAMOTO, Fumito KAMINAGA, Masahiro OSAKABE,
Kiichi OHOKA, Kazuhiko OGAWA, and Kunio KANAYA

Surface cracks can be detected by using an infrared radiation sensor. In the present study, a surface crack detection method by using the infrared radiometer was applied to a test plate with artificial cracks. The cracks could be detected with the higher equivalent radiation temperature at the crack than that of the flat surface. The minimum crack, 40 μm in width and 10 μm in depth, could be detected by using the present infrared radiation sensor.

Key Words: Materials Surface Crack, Non-destructive Test, Remote-sensing, Cavity Radiation, Slit Crack, Pinhole

1. 緒 言

物体表面より放出される赤外線放射エネルギーを非接触でとらえ、二次元のサーモ像として表示する。いわゆる赤外線リモートセンシング技術は、医学、気象、土木などの分野で広く利用されている⁽¹⁾。一方、工業材料表面に発生するピンホール、割れや傷などの欠陥を検出する方法としては、浸透法、磁粉探傷法、X線透過、超音波などの実用化された手法が、非破壊検査法として適用されている。さらに現在、原子力や高温プラント等におけるように、人間が近づきにくい機器や構造物などの表面に発生または存在する表面欠陥を非接触または遠隔で検出する非破壊検査法として、新たなリモートセンシング技術の開発が積極的に進められている。このような点に着目し、著者らは表面に存在する欠陥より放出される放射エネルギーを赤外線センサで検出し、周辺表面に比べて欠陥部での放射温度の増分が欠陥画像の検出に有効であることを報告した⁽²⁾。

本報では、表面欠陥として線（く形断面）状の割れ、V形の傷および円柱状ピンホールを対象として、赤外線センサによるサーモ像を求め、欠陥の検出を行った。試料温度を増加し、放射熱流束を増やすことにより、欠陥の映像の鮮明化と検出感度を向上させるのに有効であることを明らかにした。

記 号

a : 射出率
 b : 欠陥の幅
 d : 欠陥の直径
 h : 欠陥の深さ
 J : 放射熱流束
 T : 温度

図 1 実験装置概略

* 昭和 63 年 5 月 31 日 第 7 回「センサーの基礎と応用」シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和 63 年 10 月 3 日。

^{*1} 正員、茨城大学工学部(〒316 日立市中成沢町 4-12-1)。

^{*2} 正員、日本原子力研究所(〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町)。

^{*3} 学生員、茨城大学工学部。

T' : 等価放射温度

ρ : 反射率

添 字

s : 表面(平面)

c : 欠陥

b : 黒体

2. 試験装置と方法

図1は、実験装置の概念図を示す。人工欠陥付きの試験片を、電気加熱板に取付け、距離 L 離れた赤外線放射温度計によって、試験片の温度分布をCRT上に表示する。試験片の材質は、ステンレス、黄銅、アルミニウムおよびグラファイトである。また、V形およびピンホールの人工欠陥を、フライスまたは放電加工により、平滑面上に取付けた。試験片の温度は、試験片の側面より埋め込まれた熱電対により計測した。試料表面には基準となる黒体面(b)が黒色ペンキで取付けられている。

本研究に用いた赤外線温度計では、液体窒素により冷却されたHg-Cd-Teセンサを用いている。赤外線温度計の主な仕様は、以下である。

検出波長帯: 8~13 μm

計測温度範囲: -50~1 200 $^{\circ}\text{C}$

計測誤差: 0.1~70 $^{\circ}\text{C}$

焦点距離: 15 cm~ ∞

また、得られる放射温度は、試料面上の一辺 b_m の四角形の面積平均として表示される。 b_m は、検出器からの距離 15 cm の試料において、0.5 mm である。

実験は、試料を加熱および非加熱の条件で行った。定常状態において、欠陥中心の放射温度 T'_c 、欠陥周辺表面の放射温度 T'_s 、および黒色ペンキを塗った表面の放射温度 T'_b を、赤外線放射温度計によって、計測した。

試料表面(s)、欠陥(c)および試料表面の基準となる

黒体面(b)より低温の黒体とみなせる赤外センサに入射される検出波長範囲(8~13 μm)の放射熱流束 J_s , J_c , J_b は、近似的に式(1), (2), (3)で表される。

$$J_s = \sigma \epsilon_s T_w^4 + \sigma \rho_s T_a^4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$J_c = \sigma \epsilon_c T_w^4 + \sigma \rho_c T_a^4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$J_b = \sigma \epsilon_b T_w^4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 T_w , T_a は試料および試料をとりまく周辺の温度、 ϵ , ρ は試料各部の放射率および反射率、 σ は常数である。ここで、式(1)~(3)において、灰色近似により、 $\rho = 1 - \epsilon$ とすると、赤外線温度計の画像上の(s), (c), (b)の温度 T'_b , T'_s , T'_c はそれぞれ式(4), (5), (6)で表される。

$$J_s = \sigma \epsilon_s T_w^4 + \sigma (1 - \epsilon_s) T_a^4 \\ = \sigma a_s T_w^4 = \sigma T_s'^4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$J_c = \sigma \epsilon_c T_w^4 + \sigma (1 - \epsilon_c) T_a^4 \\ = \sigma a_c T_w^4 = \sigma T_c'^4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$J_b = \sigma \epsilon_b T_w^4 = \sigma T_b'^4 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで a は試料各部の反射を考慮にいれた放射率、 T' は見かけの放射温度を示す。いま、式(4), (5)で、 $T_w = T_a$ である場合を考えると、 $a_s = a_c = 1$ であり、欠陥部と表面での放射温度差がなくなり、欠陥の検出ができなくなることを示している。 $T_w \gg T_a$ では、反射の影響が小さくなり、 a_s と a_c の差が検出できる。

計測した T'_s と a_s は、表面の汚れ、酸化の程度および表面粗さ等によって影響される。使用した材料の T'_s と a_s の標準偏差の一例を以下に示す。

ステンレス: $T'_s = 34.5 \pm 2.4$

$$a_s = 0.69 \pm 0.02$$

黄銅: $T'_s = 35.2 \pm 1.8$

$$a_s = 0.53 \pm 0.1$$

アルミニウム: $T'_s = 36.6 \pm 0.9$

$$a_s = 0.26 \pm 0.004$$

図2 ステンレス鋼試験片のサーモ像

図3 h/b をパラメータとしたときの ΔT_w と $\Delta T_c'$ の関係

グラファイト: $T_s' = 32.0 \pm 0.3$

$$a_s = 0.92 \pm 0.004$$

このような、バラツキを避けるため従来法では、表面を黒色ペンキで塗っていたが、欠陥がペイント膜によって、覆われてしまうために、適切な方法とは言えない⁽³⁾。本研究では、表面の放射温度 T_s' は、欠陥の周囲の平均温度より求め、欠陥における最大温度を T_c' とした。

3. 実験結果

3.1 線状欠陥の特性 ステンレス鋼、黄銅の試験片の表面に、長さ 10 mm、幅 5~0.15 mm、深さ 4~0.3 mm の線状欠陥を取付けた。

図 2 は、ステンレス試料の線状欠陥部の放射温度画像を示す。下および左側の各図は、写真のカーソル線上の欠陥の温度分布を示したものである。欠陥断面内の温度分布は、中心部で最大値をもつ山形の温度分布をもっていることがわかる。上下の水平方向の白い帯状の部分は、放射の基準となる黒色ペンキを塗布した黒体部分を示している。

図 3 は欠陥の深さと幅の比 h/b をパラメータとして、室温と黄銅試験片との温度差 ($\Delta T_w = T_w - T_a$) と欠陥とその周囲との温度差 ($\Delta T_c' = T_c' - T_s'$) の関係を示したものである。 h/b の値が大きいくほど、 $\Delta T_c'$ は増加する。すなわち、欠陥のサーモ像は、試験片を加熱することによって、鮮明になることを示している。

図 4 は、 ΔT_w をパラメータとして、 h/b と $\Delta T_c'$ の関係を示したものである。 ΔT_w および h/b が大きいほ

図 4 ΔT_w をパラメータとしたときの $\Delta T_c'$ と h/b の関係

ど、 $\Delta T_c'$ が増加する。 $\Delta T_w = 10^\circ\text{C}$ における計測データのばらつきは、反射の影響によると考えられる。 ΔT_w が 20°C になると、そのばらつきは小さくなった。

図 5 は、 ΔT_w をパラメータとして、 a_c と h/b の関係を表したものである。 h/b の増加とともに、 a_c は大きくなり、1.0 に近づく。

線状欠陥の内部表面の射度が、一様であると考えられるとき、空洞放射率 ϵ_c は⁽⁴⁾,

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s + b(1 - \epsilon_s)/(2h + b)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

図 5 に示した一点鎖線は、式 (5) と式 (7) を使って得られた計算結果である。実験および計算とも、 h/b が大きくなるにつれ、 a_c が増大していることがわかる。すなわち、放射温度計の検出波長 ($8 \sim 13 \mu\text{m}$) に比べて、比較的大きなサイズの欠陥では、欠陥部での放射温度の増分は、空洞放射効果によると考えられる。

図 6 は、グラファイトの場合に ΔT_w をパラメータ

図 5 ΔT_w をパラメータとしたときの a_c と h/b の関係

図 6 ΔT_w をパラメータとしたときの $\Delta T_c'$ と b の関係

図7 アルミニウム試験片のサーモ像

図8 h/b をパラメータとしたときの ΔT_w と ΔT_c の関係

として欠陥の幅 b と ΔT_c の関係を表したものである。 a_c は、試料面が周囲温度に比べて高いときには、1.0を越えることはない。したがって、グラファイトの a_s が0.98と黒体に近いことから、欠陥を検出することは、難しい。しかし、 ΔT_w を大きくすることによって、0.3 mm 幅の欠陥を検出することが可能であった。

X線および超音波を使って、検出できる最小の欠陥幅は、0.1~0.3 mm⁽²⁾であることから、本研究の赤外線放射温度計による方法は、欠陥検出のために有用な方法であると考えられる。

3.2 V形線状欠陥 3.1節より小さい線状欠陥を検出することが、可能かどうか検討するために、最小40 μ m 幅で10 μ m 深さのV形の傷をアルミニウム試験片の上に製作した。図7に示したのは、試験片の放射温度像である。赤外線温度計の検出波長程度の深さをもつ欠陥においても、周囲表面に比べたときの欠陥での温度増加が、得られた像に見られた。図8は、 h/b をパラメータとした時の、 ΔT_w と ΔT_c の関係である。 ΔT_w と h/b が大きいほど、大きな ΔT_c が得られている。図9は、 ΔT_w をパラメータとして、 a_c と

図9 ΔT_w をパラメータとしたときの a_c と h/b の関係 図10 ピンホールの直径 d をパラメータとしたときの ΔT_w と ΔT_c の関係

h/b の関係を表したものである。 a_c の値は、 h/b の値とともに緩やかに増加する。

3.3 ピンホールの特性 人工的なピンホールを黄銅表面に作った。図10に示したのは、ピンホールの直径をパラメータとして、 ΔT_w と ΔT_c の関係を表したものである。 ΔT_c の値は、線状欠陥の場合に比べて、比較的小さい。 ΔT_w を大きくすれば、直径0.5 mmの欠陥の検出が可能であった。

4. 結 論

(1) 赤外線放射計を用いて、線状、V形およびピンホールの表面欠陥を検出することができた。検出は、表面に比べたときの欠陥部での高い放射温度による。

(2) 試料を加熱することにより、放射温度差 ΔT_c が増加し、より鮮明な欠陥像を得た。

(3) 最小の欠陥として、幅40 μ m、深さ10 μ mの欠陥が赤外線放射計によって検出可能であった。

本研究は、東京大学原子力工学施設の共同利用研究

の一貫として実施したものである。研究室を始め、関係各位のご協力を謝し結びとする次第である。

文 献

- (1) 日本写真計測学会編, 遠赤外線リモートセンシング技術,

(1986), XV, 鹿島出版会.

- (2) 岡本・ほか4名, 非破壊検査協会年会予稿集, (1988-2), III-II.
(3) 宮崎・ほか2名, 非破壊検査, 30-8 (1977), 546.
(4) 甲藤, 伝熱概論, (1979), 385, 養賢堂.