局部加熱によるき裂の定量的非破壊評価*

坂 真 澄^{*1}, 松 本 正 典^{*2}

NDE of a Crack by Local Heating with Laser Beam

Masumi SAKA and Masanori MATSUMOTO

A method was investigated for nondestructive evaluation of 2-D crack or slit depth by measurement of temperature difference between two points on the material surface in non contact. In the first, experiment was performed on the specimens of 304 stainless steel with a slit. Local temperature field around the crack or slit was formed by heating small area near the crack or slit with Nd: YAG laser beam, and temperature at a point was measured by infrared thermography. The slit depth was evaluated exactly by comparing experimental results with numerical analysis of non-steady heat conduction problem. Next similar experiment was carried out to evaluate the fatigue crack depth. However it was difficult to evaluate crack depth, because formed temperature field hardly changed either existence of the crack or not. So the effect of crack opening displacement on the temperature field was examined. It is shown that evaluating crack depth is possible by the present method, provided that load is applied to open the crack.

Key Words: Nondestructive Inspection, Numerical Analysis, Crack Opening Displacement, Thermal NDE, Crack Depth

1. 緒 言

種々の構造物の健全性評価に破壊力学を適用する際、き裂の定量的非破壊評価が不可欠である。近年の赤外線センサの著しい進歩に伴い、温度計測の精度・空間分解能および計測速度などに優れた高性能の赤外線画像装置が開発されており、温度や熱流束などの物理量を用いた熱的非破壊評価手法に関する研究が注目されてきている。同手法においては、非接触による広範囲の領域を対象とした検査への応用や非導電性材料への適用などが期待されている。

例えば、Banks ら⁽¹⁾ は、裏面に腐食部を有する材料をレーザや赤外線ランプで加熱したときの赤外線画像装置による温度分布計測に基づき、腐食部形状の最適化手法による評価を行っている。Spicer ら⁽²⁾ は、はく離欠陥を有する被検査物の表面全体をレーザにより一様加熱し、表面温度の時間変化を計測することにより母材とコーティングの境界における接合の評価を行っている。

またき裂の熱的非破壊評価に関しては、通電加熱による材料表面上のき裂長さの評価⁽³⁾や通風加熱・高周波加熱によるき裂の検出⁽⁴⁾など、赤外線画像装置を用いた材料表面上の温度分布の特異部や不連続部の検出によるき裂の検知に関する先駆的な報告がある。

一方、Saka ら⁽⁵⁾ は、熱的手法ではないが、き裂深さの非破壊評価手法として、き裂の近傍に電位差計測端子および電流入出力端子を配置した近接端子を用いる直流電位差法に基づく手法を提案し、き裂から離れて電流の入出力を行う従来法に比べ感度良くき裂深さの評価が行えることを示した。電位場と温度場の類似性より、同手法の応用による熱的手法によるき裂深さの非接触評価の可能性が考えられる。

以上を踏まえ、本報では被検査物上のき裂近傍で局部加熱を行い、これをまたいだ2点間の温度差の測定に基づく、熱的手法によるき裂深さの定量的な非破壊評価について検証を行う。まずはじめに材料の一例としてステンレス鋼を用い、二次元スリットを対象とした実験を行い、スリット深さの評価を試みる。次に同様の方法によるき裂深さの評価について検証する。き裂を対象とした場合、スリットを対象とした場合は異なり、き裂面同士の影響を考慮する必要がある。そこで、応力負荷によるき裂開口効果が温度分布

* 原稿受付 1998 年 3 月 26 日。

^{*1} 正員、東北大学大学院工学研究科(〒980 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01)。

^{*2} 東北大学大学院。

に与える影響を検証し、適当な応力を負荷しき裂を開口することにより、熱的手法によるき裂深さの評価が可能となることを示す。

2. 解 析

図1に示すように材料表面上に存在する二次元垂直き裂あるいはスリットの深さを、熱的手法により評価する問題を考える。図1のように材料表面上に原点をもつ直交座標系 (x, y, z) を導入する。図1は問題の対称性より解析対象とした y 方向の $1/2$ なる領域を表している。原点を中心とした直径 D の円形領域 S にレーザビームの照射を行った場合、集中熱流束 q による局部加熱に起因する材料表面上の温度分布に注目する。

図1において、 L_1 はモデルの半長、 W および H はそれぞれモデルの幅および厚さである。き裂あるいはスリットは深さ a および有限幅 b を有し、原点から X の距離に位置するものとする。また b が十分に小さく、温度分布に対し影響を与えないとみなせる場合をき裂を対象としたモデルと考える。

本解析は非定常熱伝導問題の三次元有限要素法により行う。なお有限要素法解析には汎用有限要素法解析システム‘ABAQUS ver 5.6’を用いた。

基礎方程式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ここで θ は温度、 λ は熱伝導率、 ρ は密度、 c は比熱を表す。初期温度 θ_0 からの温度変化を T で表せば

$$T = \theta - \theta_0 \quad (2)$$

さらに温度伝導率 $\kappa = \lambda / \rho c$ 、代表長さ l を導入し、無次元時間 $\tilde{t}$ を

$$\tilde{t} = \frac{\kappa l}{l^2} \quad (3)$$

Fig. 1 Geometry of the analytical model

で、また無次元座標 $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ をそれぞれ

$$\tilde{x} = \frac{x}{l}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{l}, \quad \tilde{z} = \frac{z}{l} \quad (4)$$

で表す。 θ_0 を一定とし、 κ は後述する実験の条件下において温度によらず一定とみなすと、式(1)は式(2)～(4)を用いて次式のように変形できる。

$$\frac{\partial T}{\partial \tilde{t}} = \frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{y}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{z}^2} \quad (5)$$

以後の議論において、代表長さを $l = 1 \text{ mm}$ とする。

境界条件については、加熱領域 S では熱流束一定の境界条件とした。すなわち

$$\frac{\partial T}{\partial \tilde{z}} = -\frac{ql}{\lambda} \quad \text{at} \quad \tilde{z} \geq 0 \quad (6)$$

なお D については後述する実験条件より $D = 1 \text{ mm}$ とした。また後述する実験における温度変化においては熱伝導のみが支配的であると考え、 S 以外の表面には次式で表される断熱条件を仮定した。

$$\frac{\partial T}{\partial \tilde{n}} = 0 \quad (7)$$

ここで $\tilde{n}$ は表面における法線方向の無次元座標を表す。式(5)の解析結果は前記の仮定を満たす条件下では、無次元時間にのみ支配され、異なる熱物性値を有するあらゆる材料を評価対象として考慮することができる。

本解析では図1の解析領域を $L_1 = 20 \text{ mm}$, $W = 20 \text{ mm}$, $H = 20 \text{ mm}$ とした。非定常有限要素法解析における計算時間およびメモリの増大を考慮し、有限領域を有するモデルに対する解析結果を、領域端における温度変化が十分に小さい時間領域においては、解析モデルの温度変化は領域端の影響を受けないとみなし、その時間領域において十分に半無限体モデルに対する解析結果であるものとできる。き裂あるいはスリットが存在しない場合、すなわち $a = 0 \text{ mm}$ の場合に対する数値解析の結果より、 $\tilde{t} \leq 40$ の時間領域においては、領域端すなわち $x = 20 \text{ mm}$ における温度変化が、加熱中心の温度変化に対し十分に小さいことからこの解析領域を半無限体モデルとみなすものとする。半無限体モデルを用いた解析結果はこれより大きな領域を有する試験片を用いた実験結果の評価に適用するものとする。また後述する実験に用いた厚さ 5 mm なる試験片を対象に評価を行うにあたっては、 $H = 5 \text{ mm}$ として有限板モデルを想定した数値解析を行い、その結果を用いた。

次にき裂幅あるいはスリット幅、すなわち b の解析結果への影響を考える。き裂深さの評価を行うにあたり、 b の影響を受けないことが求められる。すなわちき裂を対象とした数値解析の場合、温度分布が b の影

響を受けないよう、 b を十分に小さくする必要がある。そこで $a=5\text{ mm}$ 、 $X=5\text{ mm}$ なる場合を想定し、 b を 0.2 から 0.0002 mm の範囲で変化させて数値解析を行った。

図2に一例として $\bar{t}=19.6$ なる場合における材料表面上の x 軸上、 $x=4\text{ mm}$ から 5 mm における温度変化分布の解析結果を示す。ここで $T_{a,x}$ は深さ a のき裂あるいはスリットを有するモデルにおける x 軸上の点 $(x, 0, 0)$ の温度変化を表すものとする。図2より b が 0.0002 mm なる場合の解析結果と 0.002 mm なる場合の解析結果を比較すれば、違いは非常に小さく無視することができる。これより b が 0.0002 mm なる場合の解析結果では b の影響を無視できるといえる。以後、 $b=0.0002\text{ mm}$ なる場合の解析結果をき裂に対する数値解として用いるものとする。また b が 0.0002 mm より十分に大きな幅を有する場合、すなわちスリットを評価の対象とした場合は、解析モデルの b を実在のスリット幅と等しくする必要がある。後述する実験に使用した b が 0.4 mm なる二次元スリットを有する試験片の評価を行うにあたっては、 $b=0.4\text{ mm}$ として数値解析を行い、その結果を用いた。

さらに材料表面上の温度変化の分布に注目して、き裂が存在する場合と存在しない場合の比較を行う。き裂を対象として $b=0.0002\text{ mm}$ 、 $X=5\text{ mm}$ なる場合を想定し、 a を 0 から 10 mm の範囲で変化させて、半無限体モデルに対する解析結果とみなせる $\bar{t} \leq 40$ なる時間領域において数値解析を行った。

図3に、材料表面上の x 軸上の温度変化分布の一例として、 $a=0.5\text{ mm}$ 、 $\bar{t}=19.6$ なる場合の解析結果を示す。図3は、材料表面上における温度変化へのき裂の影響が、き裂開口部の加熱側で温度上昇として、また反対側で温度降下として現れることを示しており、き裂開口部に近づくほど顕著になることがわかる。またき裂面での断熱を仮定することにより、き裂が存在

する $x=5\text{ mm}$ の位置で温度変化が不連続となることを示している。

以後、き裂あるいはスリットをまたぎ、その中心から等しい距離 X' なる2点間の温度変化の差、すなわち $\Delta T_{a,X \pm X'}$ に着目する。き裂およびスリット深さの評価パラメータとして $\Delta T_{a,X \pm X'} - \Delta T_{0,X \pm X'}$ を導入することも考えられるが、後述の実験において、境界条件として用いるレーザ照射による熱流束は、レーザ出力および材料表面における吸収効率によって影響される未知なる定数であるため、 $\Delta T_{a,X \pm X'} - \Delta T_{0,X \pm X'}$ の大小によってき裂あるいはスリット深さを直接評価することはできない。そこでき裂あるいはスリットが存在しないときの2点間の温度変化の差で無次元化し、 $\Delta T_{a,X \pm X'} / \Delta T_{0,X \pm X'}$ をき裂およびスリット深さの評価パラメータとする。なお、初期温度が一定であることを仮定していることから、 $\Delta T_{a,X \pm X'}$ は式(2)より

$$\Delta T_{a,X \pm X'} = T_{a,X-X'} - T_{a,X+X'} = \theta_{a,X-X'} - \theta_{a,X+X'} \quad \dots\dots\dots (8)$$

であり、2点間の温度差に等しい。ここで θ の添字は $T_{a,x}$ の添字と同様である。

3. 実験方法

3・1 試験片 ワイヤカットにより導入した幅 0.4 mm の二次元スリットを有する試験片(スリット付試験片)を3本(A-I、A-II、A-III)用意した。各試験片の寸法およびスリット深さを表1に示す。

また疲労き裂付試験片として試験片Bを用意した。

Table 1 Specimens with slit

Specimen	A-I	A-II	A-III
Length mm	250	250	250
Width mm	100	100	40
Thickness mm	50	50	40
Slit depth mm	5	3	2

Fig. 2 Effect of the crack or slit width on temperature ($a=5\text{ mm}$, $X=5\text{ mm}$, $\bar{t}=19.6$)

Fig. 3 Distribution of the variation of temperature on the surface ($a=0.5\text{ mm}$, $\bar{t}=19.6$)

試験片 B は図 4 に示すように長さ 200 mm, 板厚 40 mm, 板幅 40 mm を有する。同試験片に幅 3 mm, 深さ 3 mm を有する V 切欠きを導入後, スパン 180 mm の三点曲げにより最大荷重 51.0 kN, 応力比 0.05, 周波数 5 Hz の条件にて疲労き裂を導入し, 図 4 の上部の厚さ 5 mm の斜線部を切除した。この状態で温度分布の計測を試みた後, 応力負荷によるき裂開口効果がき裂面での熱伝導特性に与える影響を調べる目的で, 負荷を容易にするため, さらに図 4 の下部斜線部を切除し, 最終的な板厚が 5 mm なる図の帯状の白い部分を試験片とし, 計測に供した。さらに計測終了後, 試験片を破断し, き裂深さを測定した。

なおいずれの試験片もオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 304) 製であり, 熱物性値を表 2 に示す。

3・2 スリット付試験片に対する実験 実験方法の概略を図 5 に示す。試験片表面上の直径 $D=1$ mm なる領域 S に, Nd: YAG レーザによるレーザ照射を行い, 熱流束 q を供給し試験片を加熱した。加熱領域の中心は試験片の幅方向の中心に配置した。スリットのない表面の温度分布を測定する場合は, 加熱中心から長さ方向の 20 mm 以内の範囲に, スリットおよび試験片端が存在しない位置において加熱した。スリットの影響による温度分布の変化を測定する場合は, 加熱中心から $X=5$ mm なる位置にスリットを配置し, 加熱した。なおスリットおよび 3・3 節で対象とする疲労き裂は, それらの近傍の加熱により得られる熱画像を観察することで, 検出が可能であり, それらの位置および向きは既知である。

材料表面上の温度は赤外線画像装置を用いて測定し

Table 2 Thermal properties of 304 stainless steel

Density	$7.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Thermal conductivity	$15.9 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Specific heat	$0.511 \times 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

Fig. 4 Specimen B

た。表 3 に実験に用いた赤外線画像装置の仕様を示す。同装置は最大 10 点まで点状領域の温度の時間計測が可能であり, 加熱中心から x 軸上の $x=0, 2, 3, 4, 6, 7$ mm なる点の温度計測を行った。各点の温度を $1/60$ s ごとに記録し, レーザ照射により $x=0$ mm なる点における $1/60$ s 間の急激な温度上昇が現れる直前の時刻を時間の原点とした。またそのときの各点の温度の平均値を試験片の初期温度とした。各時間の温度は, 赤外線画像装置の測定ノイズによる影響をなくするため, 前後 5 点の時間における温度の平均値を採用した。

なお実験による温度計測に際し, 図 5 に示すように, 試験片表面に市販のツヤなし黒色スプレーによるコーティング処理を行った。同処理は, 温度計測を行う材料表面上の放射率を黒体と同一とみなし, またレーザの吸収効率を向上させる目的で行った。コーティング層の厚さは, 試験片の熱伝導に対する影響が無視できる厚さとした。

3・3 疲労き裂付試験片に対する実験 疲労き裂を対象とした場合, き裂面同士の接触の影響, すなわち熱伝導によりき裂面を通過する熱流束が存在するため, き裂面に断熱の境界条件を仮定し評価を行うことは, き裂深さを実際の値より小さく評価することにつながり危険である。そこでき裂開口効果によりき裂面同士の接触の影響を除き, 断熱境界条件を仮定するため, 試験片 B に対し四点曲げによる応力負荷の条件下で 3・2 節と同様の実験を行った。なお温度の計測点と

Table 3 Main specifications of the infrared thermography

Temperature range	273~773K
Sensitivity	0.2K
Picture resolution	256×256
Frame time	1/60sec
Field of view	$14^\circ \times 9^\circ$

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

して、3・2節に示した加熱中心から x 軸上の $x=0, 2, 3, 4, 6, 7$ mm なる点に加え、さらにき裂近傍の点における温度に注目し、 $x=4.5, 5.5$ mm なる点の温度も計測した。

4. 実験結果および考察

4・1 スリット付試験片に対する結果および考察

A-I, A-II, A-III なる各試験片について、 $\bar{t}=19.6$ すなわち加熱後 $t=5.0$ s なる時刻における加熱中心から x 軸方向の温度変化分布の実験結果と解析結果の比較を図6～8に示す。各図において、スリットが存在する場合およびスリットが存在しない場合の実験値は、それぞれ同一のレーザ出力によって得られた実験結果である。なお実験値として、同一の加熱条件からなる4回の試行における平均値を用いた。また実験における境界条件の熱流束は未知であり、解析結果と実験結果を直接比較することはできない。そこでスリットが存在しない場合について、温度変化の実験結果と解析結果が合うようにし、これにより解析に用いた熱流束を決定した。スリットが存在する場合の解析結果は、このようにして決定した熱流束を用いて得られた結果である。図6～8において、スリットが存在する場合およびスリットが存在しない場合ともに、温度変化分布の実験結果と解析結果はよい一致を示してい

る。このことは、 $\Delta T_{a, X \pm X'} / \Delta T_{0, X \pm X'}$ によれば、スリットが存在する場合と存在しない場合において同一の加熱条件であれば、熱流束の測定が不必要であることを表している。さらに半無限体の解析モデルの使用が妥当であり、またスリット面に断熱境界条件を課することが適切であったことを表している。

図9に、スリット中心すなわち $X=5$ mm より x 軸方向に $X'=1$ mm なる2点間の温度差を用いた場合の $\Delta T_{a, X \pm X'} / \Delta T_{0, X \pm X'}$ の実験結果と解析結果の比較を示す。ここで $\bar{t}=19.6$ すなわち $t=5.0$ s である。各試験片に対し、レーザ出力を変化させそれぞれ2回の評価を行った。図9より求めたスリット深さの評価結果を表4に示す。 $\Delta T_{a, X \pm X'} / \Delta T_{0, X \pm X'}$ の実験結果と解析結果はよい一致を示しており、同パラメータを用い

Table 4 Evaluated slit depths and the actual slit depths

Specimen	Actual slit depth mm	Evaluated slit depth mm
A-I	5.0	4.9
		5.2
A-II	3.0	3.1
		2.9
A-III	2.0	2.4
		2.0

Fig. 6 Experimental results in comparison with finite element analysis for specimen A-I

Fig. 8 Experimental results in comparison with finite element analysis for specimen A-III

Fig. 7 Experimental results in comparison with finite element analysis for specimen A-II

Fig. 9 Comparison of experimental values of the parameter for evaluating slit depths with finite element analysis

ることにより、スリット深さの評価を良好に行うことが可能であるといえる。

以上より、スリット深さの評価を行うにあたり $\Delta T_{a, X \pm X'}/\Delta T_{0, X \pm X'}$ が有効であることが示された。

4・2 疲労き裂付試験片に対する結果および考察

試験片 B について疲労き裂を導入後、図 4 の上部斜線部を切除し計測を試みた。き裂の検知については、温度分布の不連続部の検出により可能であったが、き裂深さの評価は、き裂が存在する場合と存在しない場合におけるき裂をまたいだ 2 点間の温度差の違い、すなわち $\Delta T_{a, 5 \pm 1} - \Delta T_{0, 5 \pm 1}$ および $\Delta T_{a, 5 \pm 0.5} - \Delta T_{0, 5 \pm 0.5}$ がほぼ 0.1 K と温度計測装置の表示分解能と等しく、 $\Delta T_{a, X \pm X'}/\Delta T_{0, X \pm X'} \approx 1$ であった。このことは、き裂が閉じている場合、き裂面同士の接触による熱伝導の影響が大きく、き裂面での境界条件を断熱とは仮定できないことを示しており、この値を用いてき裂深さの評価を行うことはできない。

そこで四点曲げによる応力負荷を行い、き裂開口効果がき裂面における熱伝導へ与える影響を検証した。負荷を容易にするため試験片 B の板厚を最終的に 5 mm とした。厚さを 5 mm にした後の試験片 B においては、切削の影響によるものと思われるが無負荷状態で 25~30 μm のき裂肩部の開口が観察された。

Fig. 10 Effect of the crack mouth opening displacement on the parameter for evaluating crack depth

Fig. 11 Comparison of experimental value of the parameter for evaluating crack depth with finite element analysis ($X'=1$ mm)

四点曲げによる応力負荷条件下における、 $\bar{t}=19.6$, $X'=1, 0.5$ mm なる場合の $\Delta T_{a, X \pm X'}/\Delta T_{0, X \pm X'}$ の実験結果を図 10 に示す。ここで図 10 の横軸は、応力負荷による肩部でのき裂開口変位である⁽⁶⁾。

図 10 より、無負荷状態でも $\Delta T_{a, X \pm X'}/\Delta T_{0, X \pm X'}$ の値が 1 より大きな値を示しているが、これは無負荷状態におけるき裂の開口の影響と考えられる。また図 10 より、適当な応力負荷によるき裂開口に伴い $\Delta T_{a, X \pm X'}/\Delta T_{0, X \pm X'}$ の値が収束する様子が読取れる。

収束した値と解析結果の比較を図 11, 12 にそれぞれ示す。また図 11, 12 より求めたき裂深さの評価結果、および試験片 B を破断し破面上で計測したき裂深さを比較して表 5 に示す。き裂深さが適切に評価されていることから、応力負荷によりき裂を開口させた場合、き裂面同士の接触の影響が除かれ、4・1 節と同様にき裂面に断熱の境界条件を課した方法のき裂深さの評価への適用が可能となることが示された。

5. 結 言

本研究は疲労き裂を対象として、被検査物に対しレーザ照射による局部加熱を行うことにより生じる温度分布を赤外線画像装置により測定することに基づくき裂深さの定量的非破壊評価について検証をしたものである。その結果、スリットを対象とした場合、き裂面に断熱の境界条件を課することにより十分な精度でスリット深さの評価を行うことができた。

Table 5 Evaluated crack depth and actual crack depth observed on the fractured surface

Specimen	Actual crack depth	Evaluated crack depth
	mm	mm
B	1.6	1.5 ($X'=1.0$ mm)
		1.4 ($X'=0.5$ mm)

Fig. 12 Comparison of experimental value of the parameter for evaluating crack depth with finite element analysis ($X'=0.5$ mm)

一方で、疲労き裂すなわち閉じたき裂に対しては、き裂面同士の接触による熱伝導の影響が大きく、き裂深さの評価を行うことは困難であった。しかしながら、応力を負荷しき裂を開口させることによりき裂面の境界条件を断熱とみなすことができ、き裂深さの評価への適用が可能となることを示した。

最後に、終始懇切丁寧なご指導をいただいた東北大学、阿部博之総長に深く感謝の意を表する。また本研究における実験の一部は東北大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリーを利用して行われたことを記す。

文 献

- (1) Banks, H. T., ほか 2 名, Boundary Estimation Problems Arising in Thermal Tomography, *Inverse Problems*, **6**-6(1990), 897-921.
- (2) Spicer, J. W. M., ほか 3 名, Measurement of Coating Physical Properties and Detection of Coating Disbonds by Time-Resolved Infrared Radiometry, *J. Nondestruct. Evaluat.*, **8**-2(1989), 107-120.
- (3) 阪上隆英・小倉敬二, ジュール熱による瞬時加熱温度場のサーモグラフィ計測に基づく非破壊欠陥計測, 機論, **58**-555, A(1992), 2224-2231.
- (4) 白鳥正樹・ほか 2 名, 赤外線映像装置によるき裂の検知と画像処理, 機論, **58**-556, A(1992), 2274-2279.
- (5) Saka, M., ほか 2 名, NDE of a Crack by Using Closely Coupled Probes for DCPD Technique, *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technol.*, **118**-2(1996), 198-202.
- (6) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, (1976), 218, 培風館.
- (1) Banks, H. T., ほか 2 名, Boundary Estimation Prob-