赤外線映像法による塑性変形評価に関する研究*

(第 1 報, 熱画像に及ぼす表面荒れの影響)

坂 本 英 俊^{*1}, 石 健^{*2}Evaluation of Plastic Deformation by Thermography Method
(1st Report, Effect of Surface Roughness on Thermal Images)Hidetoshi SAKAMOTO^{*3} and Jian SHI^{*3} Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

Infrared thermography (TVS) is a device for conducting thermal radiation pattern from an object into a visible image. We paid attention to heat generation by plastic deformation and discussed the possibility of applying this device to detecting local plastic deformation by thermal video system. In measuring surface temperature distribution by this device, the emissivity is a very important factor of measuring the surface temperature distribution and largely depend upon the surface roughness. In this study, the relation between the emissivity and surface roughness was examined and we discussed the thermal image processing technique of the thermal image obtained by TVS.

Key Words: Thermal Image, Surface Roughness, Infrared Thermal Video, Non-Contact Measurement, Plastic Deformation, Emissivity

1. 結 言

赤外線映像装置は, 物体から放射される赤外放射エネルギーを, 2次元温度分布として非接触で一度に広範囲・高速かつ連続的に取り込める特徴を有している。そのため, さまざまな産業分野において, 物体表面から放出される赤外放射エネルギーを連続的にとらえ, それらの背景にある物理学的現象を効果的に評価する試みがなされている^{1)~3)}。

著者らは, これまで赤外線映像法 (以下サーモグラフィー法と呼ぶ) を用いて, 塑性変形状態の可視化について検討を行い, 残留応力等の内部応力分布を有する部材の変形中に観察される表面温度分布は, 応力分布の違いによる変形状態を良く反映していることを示した^{4)~6)}。

サーモグラフィー法による間接的な物体表面温度の測定においては, その測定指示温度は物体の表面状態に大きく影響を受けることが知られており, 表面温度分布を正確に測定するためには, 表面状態の影響を定量的に評価する必要がある。本報では, その表面状態の変化として, 塑性変形進行時に観察される表面荒れに着目し, 部材表面の熱画像分布に及ぼす表面粗さの影響を明らかにした。第二報において, 塑性変形と変形に伴う熱画像の関係を考察する。第三報で解析シ

ミュレーションと実験結果の比較検討を行い, サーモグラフィー法による塑性変形の巨視的評価手法の有効性を議論する。

2. 実 験

2. 1 供試材 供試材として厚さ 3mm の SUS304 ステンレス鋼板 (平均結晶粒径 $20\mu\text{m}$) を用いた。使用した試験片の寸法形状を図 1 に示す。試験片はすべて長手方向が圧延直角方向になるよう採取した。図 1 の A 部詳細に示すように, 試験片中央に応力集中部として, ワイヤ放電加工により人工き裂を設けた。試験片はすべて機械加工後真空焼鈍を行った。

Fig. 1 Geometry and dimensions of specimen

* 原稿受付 2002 年 2 月 21 日。

^{*1} 正員, 熊本大学工学部 (☎ 860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)。^{*2} 正員, 熊本大学大学院自然科学研究科。

E-mail: sakamoto@mech.kumamoto-u.ac.jp

2. 2 基礎試験 サーモグラフィー法により真の温度を知ろうとする場合は、常に放射率補正を行う必要がある。放射率とは温度 T の物体から放射されるエネルギーの温度 T の黒体から放射されるエネルギーに対する割合である。図2に示すように、放射率 ϵ とサーモグラフィーの検出器出力の間に次のような関係が成り立つ。

T : Object temperature T_a : Background Temp.

$W(T)$: Infrared energy of black body at T

$V(T, T_a)$: Output of detector ϵ : Emissivity

Fig. 2 Calibration method of emissivity

$V(T, T_a)$ と ϵ の関係を(1)式に示す。

$$V(T, T_a) = \epsilon W(T) + (1 - \epsilon) W(T_a) \quad \dots (1)$$

金属では、一般に反射率が大きいため背景からの放射の影響を大きく受け、サーモグラフィー法を用いる際には、表面状態と放射率の関係を適切に決定することが必要となる。

そこで、部材の塑性変形に伴って発生する表面状態の変化が、放射率の値に与える影響を明らかにするために、まず、実際の塑性変形の際に生じる部材表面の変化を調べた。単軸引張り試験により、図1に示す中央き裂試験片において塑性変形開始点

(No.1) からき裂発生直前 (No.5) に至るまでの時間をほぼ5等分した変形途中試験片 (以後段階試験片と呼ぶ) を作製し (図3)、き裂端近傍の表面粗さ測定を行った。引張り試験前の段階試験片の表面は、エミリー研磨紙#1500で均一粗さに仕上げられた。図4に引張り試験で得られた段階試験片の写真を示す。次に規定表面粗さ試験片を用いて、放射率と表面粗さの定量的な関係を明らかにした。規定の表面粗さの仕上げにはエミリー研磨紙 (#80, #120, #240, #600, #1000, #1500) を用い、6種類の異なる均一表面粗さ試験片を作製し、表面粗さと放射率の関係を測定した。ここで使用している放射率とは、表面粗さ、測定温度域、周囲の雰囲気なども含めた条件で測定された実効放射率を意味する。表面粗さ測定にはレーザー表面形状測定顕微鏡 (KEYENCE

VF7500) を用いた。規定粗さ測定には中央き裂の無い図1に示す形状の試験片を用いた。

表面粗さ (R_a) は、試験片中心部の $4\text{mm} \times 2\text{mm}$ の領域を 1mm 間隔で15カ所、測定長さは各点当たり $300\mu\text{m}$ とした。同じ測定ポイントを5回測定し、その平均粗さを規定表面粗さとした。

Fig.3 Stress-time curve and measuring positions of surface roughness

変形前 No.1 No.2 No.3 No.4 No.5 破断後

Fig.4 Specimens of measuring the surface roughness

Fig.5 Measuring points of surface roughness

段階試験片の表面粗さは、き裂先端から 1mm 前方の長方形領域 (7mm×8mm) を 1mm 間隔で 72 点測定した。測定は測定ポイントの前後 20 μm の範囲を 5 回測定し、平均値をその点における表面粗さとした。図 5 の○印は測定位置を示す。

2. 3 放射率測定 放射率は、サーモグラフィー法による温度測定において重要な因子であり、被測定物に対する放射率を正確に把握する必要がある。そこで、前節の表面粗さ測定試験に使用した 6 種類の規定表面粗さ試験片を用い、放射率と表面粗さの関係を定量的に調べた。

本実験で用いた測定構成図を図 6 に示す。測定に使用したサーモグラフィー装置の仕様を表 1 に示す。測定原理としては、試験片上部を発熱装置を有するチャックに装着し、下部を水 (22°C~23°C) を入れた容器の中に入れることにより被測定物に温度勾配をもたせ、その表面温度をサーモグラフィー (TVS-8200, (株) 日本アビオニクス) とスポット溶接した熱電対 (CC) を用いて測定した。熱電対は図示のように試験片上下方向に 3 点配置した。両者の測定温度から得られたサーモグラフィー、熱電対の温度勾配の差が最小になるよう放射率の設定値を変化させ、熱電対の温度勾配とほぼ一致した時の放射率をその表面粗さにおける放射率とした。温度勾配を一致させることにより、変形前熱画像分布を基準として、塑性変形時のひずみエネルギー上昇による温度上昇が測定できる。測定は周囲の反射等の影響を除くために図の破線で示す試験片およびサーモカメラ部を外光遮蔽状態で実施した

Fig.6 Relation between emissivity and surface roughness

塑性変形熱測定試験

塑性変形熱測定試験には島津製オートグラフ (AG-

25TB) を用いた。図 1 に示す中央き裂試験片に、一定変位速度 25mm/min を負荷した。塑性変形時に生じる試験片表面温度はサーモグラフィーと熱電対を用いて連続的に測定した。

Table 1 Specification of TVS-8200

Measurement temperature range	-40~320°C
Resolution of temperature	0.4%(full scale) 0.05°C(minimum)
Number of scanning frame	60 frames/sec
Display elements	76,800 pixels
Detector	In-Sb
Detecting wave range	4~4.6 μm

熱電対はサーモグラフィー測定面の裏面にスポット溶接した。測定位置を図 7 に示す。サーモグラフィー測定面は塑性変形による面粗さの温度測定値に与える影響を調べるためにエミリー研磨紙 # 80 で均一粗さに仕上げた。

Fig.7 Welding positions of thermocouple

3. 熱画像処理

基礎試験及び塑性変形熱測定試験におけるサーモグラフィーにより測定された熱画像は、すべてフレームメモリーにリアルタイムで記録された。測定された熱画像データの原画像の一例を図 8 に示す。この画像には試験片表面の温度分布とともに、試験片右上を中心にサーモグラフィーの赤外線カメラの内部反射によるフレアーや試験片下方からの反射も検出されている。そのため、測定された原画像そのものは、適切な温度分布を表示しているとは言えない。そこで、図 9 に示すように検出目的画像と基準画像の差分操作を行うことにより、外乱および雑音を除去し、温度の差分画像 (温度上昇分布画像) を

作成した。したがって、ここで述べる温度分布は、すべて室温を基準とした上昇温度分布を意味する。

Fig.8 Example of original thermal image

Fig.9 Thermal image processing

規定表面粗さと試験片の測定結果を図 10 に示す。研磨紙の番号が大きくなるにつれて試験片表面は滑らかになり、算術平均粗さ R_a は指数関数的に小さくなる。以下表面粗さはすべて算術平均粗さで整理を行った。

Fig.10. Surface roughness of specimen polished by Emery Paper

次に引張り負荷を受けた試験片の表面粗さ測定結果を図 11 に示す。No.1 から No.5 までの各変形段階におけるき裂端近傍の表面粗さを 3 次元グラフで整理したものである。変形による表面荒れをみると、主せん断方向にひずみが集中し、引張り変形が進行するにつれてその方向の表面粗さが大きくなる。さらに

(a) No.1

(b) No.2

(c) No.3

(d) No.4

(e) No.5

Fig.11 Distribution of surface roughness

変形が進むとき裂先端近傍の応力集中部に広がり、破断伸び限度を超えるとき裂の進展が始まる。

表面荒れと塑性進展方向の関係についてはFEM解析結果と比較した。図12にFEMによるひずみ分布(No.4の変形段階に対応)の一例を示す。解析における変形は図13に示す裂先端の1mm内側で測定されたCODの挙動と比較することによりその妥当性をチェックした。解析によるひずみ分布の進展挙動と表面荒れの進展状況が定性的に一致することから、塑性変形の進展に伴い表面荒れが発生していることがわかる。しかしながら、今回の実験では時系列的段階における離散的な点の情報に基づいた平均的な面粗さの測定であるので、この情報のみでは塑性ひずみの大きさと直接関係づけることは困難である。

個々のグラフについてみると、まず裂先端45°方向に狭い範囲で表面荒れが認められ、次の段階では表面粗さの変化の範囲は3mm×6mmに広がり表面粗さも増加している。塑性変形が進むと荒れの範囲は大きくなり、最大値も増加するが、測定範囲内における粗さの最大値/最小値の割合は減少する。

Fig.12 Equivalent plastic strain distribution

Fig.13 COD of 1mm distance from crack tip

また、変形に伴う裂近傍の表面粗さの時間的変化を図14に整理した。測定箇所は図5のき裂先端前方1mm (Ch.1), Ch.1上部5mmの位置 (Ch.2)である。図11の3次元グラフから観察されるように、塑性変形が小さな領域では両者の表面粗さの差は認めら

れないが、変形の進行にともないき裂先端前方の表面粗さの増加割合が大きくなる。表面粗さの変化は、いずれの測定点においても変形が進むにつれて増加する傾向を示す。図中の一点鎖線は規定粗さ試験片#80 エミリー研磨紙仕上げ試験片の表面粗さを示している。この線の意味については塑性発熱測定試験結果との関連で述べる。

Fig.14 Change of surface roughness around crack tip under deformation

次に表面粗さに対する放射率の変化について述べる。

図15は規定表面粗さ試験片を用いて、その表面粗さに対する放射率を測定したものである。#80, #120, #240, #600と表面粗さが小さくなるにつれて放射率は減少しているが、#1000, #1500では逆に上昇する結果が得られた。金属の平滑面において放射率は極端に小さくなることが知られており、平滑面における放射率は通常0.01~0.1程度である⁷⁾。すなわちサーモグラフィーが感知した被測定物の表面の放射エネルギーは感知した値の中の1%~10%で、残りはすべて外乱反射成分等の雑音成分となる。鏡面に近い状態では、測定エネルギーとしてこの反射成分が感知され、見かけ上の放射率が上昇したものと考えられる。

Fig.15 Calibration system of the emissivity

そのため実際の放射率が小さな被測定物の場合、大部分が外乱反射等の雑音で占められ、測定表示値は信頼性のないものとなる。このことは表面が滑らかで放射率が大きな被測定物に対しては、サーモグラフィー法による表面温度測定は不適であることを意味する。

最後に塑性変形熱測定試験結果について述べる。前述の表面粗さと放射率の関係および変形中の表面粗さ測定結果より、表面温度測定において、被測定物の表面の放射率が低い場合は、測定精度に問題があること、また塑性変形中に表面粗さが大きく変化し、その表面粗さの変化に放射率が依存することが認められた。

そこで塑性変形試験片表面をあらかじめ均一に荒らすことにより、(1)放射率を可能な限り大きくする、(2)被測定物の変形中に放射率(表面粗さ)の変動を押さえることが出来ると考え、その効果について検討した。

温度測定試験を行う前に、表面粗さをあらかじめ荒らした基準試験片の表面粗さの変化について測定結果を図15(a),(b)に示す。(a)は変形前の表面粗さ形状、(b)は図3のNo.3の変形段階における表面粗さ状態である。この図と図11(c)を比較により、あらかじめ表面を荒らすことが表面粗さの変動を押さえる有効な手法であることがわかる。

Fig.16 Change of surface roughness

Fig.17 Relation between temperature rise and deformation time around crack tip

上記の結果から、試験片表面はすべてエミリー紙 #80 で研磨した。試験片表面におけるサーモグラフィの放射率は図 15 より $\varepsilon=0.48$ (測定中一定) とした。表面温度は図 7 に示す 4 点を熱電対およびサーモグラフィを用いて測定した。図 17(a)~(d) にそれぞれの位置における温度上昇と変位時間の関係を示す。き裂先端 1mm の Ch.1 の位置の温度上昇図 (図 17(a)) に着目すると、温度は引張り開始直後、弾性変形における熱弾性効果により一旦下降し、その後、塑性変形発熱のため上昇に転じる。変形時間図 13 秒を経過する付近まで熱電対とサーモグラフィの測定値は一致しているが、その後サーモグラフィの測定温度は熱電対の測定温度より高くなる。その差は変形時間に伴って増加する傾向にあり、き裂の進展が始まると両者とも急上昇を示す。図(b)の Ch.2 の位置においても同様な傾向を示し、この測定位置では約 16 秒後にサーモグラフィの測定温度は熱電対のそれを上回る。図 17(a)(b)における両者の分離する時間は、図 14 における #80 の表面粗さを超える時間と対応している。

このことから、き裂先端近傍で変形が進み、初期設定の表面粗さの範囲を超過すると実効放射率の値が大きくなっていることが推測される。そのため、サーモグラフィの測定温度は、実際の温度より高くなっている。き裂先端近傍より離れた図(c)(d)は、図 11 の粗さ測定結果からも類推されるように、表面粗さが初期設定値 (#80 表面粗さ) を越えないため、両者とも良い一致を示している。

このことは、金属材料に対する塑性変形熱測定にサーモグラフィ法を適用する場合、その被測定面をあらかじめ荒らしておく、実効放射率も高くなり、また塑性変形による表面荒れの影響も抑止出来るため高精度の温度分布測定が可能であることを示している。

また、表面粗さと実効放射率の関係をあらかじめ把握していれば、得られた補正式を用いて、塑性変形による発熱分布が精度良く計測できることが推察される。

4. 結 論

赤外線映像法を用いた金属材料の塑性変形時の表面熱画像測定におよぼす表面粗さの影響を明らかにした。以下に得られた知見を要約する。

(1) 放射率は被測定物の表面粗さにほぼ比例して大きくなるが、面粗さが小さい場合は放射率の増加により見かけ上の放射率が上昇し、赤外線映像法での表面温度測定には不適である。

(2) 塑性変形の進行とともに表面粗さが増加し、それにともない放射率も上昇するため、赤外線映像法による測定値は塑性変形の大きな領域では実際より高くなる傾向を持つ。

(3) あらかじめ表面を荒らしておくと、被測定面は高放射率となり、また変形により生じる表面粗さの変化による放射率の変化も抑えることができるため、精度の良い温度測定が可能となる。

文 献

- (1) 白鳥ほか 3 名, 機論 A, 55-511, (1989), 538-542.
- (2) 景山, 塚本, 日本造船学会誌, 728, (1990), 113-119.
- (3) Osakada, K., et al., Proc. 4th Int. Conf. on Technology of Plasticity, (1993), 257-262.
- (4) Sakamoto H. et. al., Proc. AEPA'92, (1992), 943-948.
- (5) 小田, 坂本他, 機論 C, 60-578, (1994), 3546-3551.
- (6) 坂本ほか 3 名, 機論 A, 62-600, (1996), 1840-1845.
- (7) 真鍋, 赤外線技術 5, pp. 68-82, 1984.