熱電対法による弾塑性変形中の試験片・工具 境界面の温度評価[†]

伊 達 秀 文* 鈴 木 利 夫**

Temperature Estimation of Contact Surface Between Specimen and Tool Using Thermocouple Method during Elastic-Plastic Deformation

by

Hidefumi DATE* and Toshio SUZUKI**

Since a thermocouple can be attached on a specimen, it is possible to measure the temperature of a moving point such as a surface of deforming body. The response of thermocouple is dependent on the junction volume of thermocouple because the usual thermocouple is a welded-bead type. It is considered that the response in a compression test is improved by use of a contact surface between a specimen and a tool as a thermocouple. However, since the diameter of specimen or tool is much larger than a usual thermocouple diameter, it is also important to examine the influence of heat loss on the accuracy of measurement.

This paper describes the influence of heat loss on the temperature of the contact surface during an elastic-plastic deformation. The accuracy was examined by comparing the experimental results with the numerical ones in which the heat conduction and heat transfer are taken into consideration. In the experiment a copper specimen and a stainless steel tool were used under a range of strain rate from $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ to $3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

The experimental results obtained are in good agreement with the numerical ones and also with the experimental ones obtained using a usual thermocouple. Therefore, it is clear that the temperature measurement method utilizing the contact surface as a thermocouple is an effective one.

Key words : Temperature measurement, Thermocouple method,

Copper-Stainless Steel thermocouple, Contacting surface, Plastic deformation

1 緒 言

急激な温度変化の計測には赤外線放射温度計がよく用いられるが¹⁾、塑性変形のように表面性状が変化したり、多少なりとも移動する測定点の温度を計測するには問題点も多い。一方、通常の熱電対は試験片に固定して用いられるので、移動する物体の温度計測も比較的容易に行うことができる。熱電対を利用した温度計測法は一般には2本の異種金属の接点に熱が到達したとき起電力を生じる現象を利用するので、接点の大きさがその応答性を支配すると考えられる³⁾。

したがって、従来の方法で応答性を上げるには、できるかぎり熱電対の径を細くすることはもとより、接点の大きさを極力小さくする必要がある。しかし、当然この方法では限界があり、本質的に熱電対の高い応答性を得るには⁴⁾、熱電対自身が発熱することが必要である。その1例として工具と試験片で熱電対を構成する方法が知られており⁵⁾、材料試験にもこの方法を適用して弾塑性変形中の温度変化を計測することができると考えられる。しかし、この方法では試験片や工具の径が従来の熱電対の径と比較してはるかに大きいので、その測定精度に及ばず熱損失の影響が応答性と同様に重要な問題となる⁶⁾。

そこで、本論文においては圧縮試験を対象に、上述した手法が実際の温度計測に有効であることを準静的試験、あるいは以前に示した熱損失などを含む数値解と比較することにより明らかにする。そして摩擦圧接のような高温増分域ばかりではなく、低温増分域においてもこの方法が妥当であることを示す。

2 試験片および実験方法

用いた試験片は、600°Cで1時間真空中に保持することにより焼なましされた直径18 mm、長さ18 mmの銅(C1100)円柱である。実験上テフロンシートのような摩擦を低減させる物質を試料・工具境界面に挿入することができないので、摩擦の低減を目的として熱処理前に試験片両端面を1000番の耐水研磨紙で研磨する。

圧縮工具としては、銅に対する強度が高く、また銅と熱電対を構成したときになるべく熱起電力が大きい材料であることが必要である⁸⁾。そこで、本論文ではFig. 1に示す形状をもつステンレス鋼(SUS304)工具を用いる。径30 mm、高さ15 mmの突起は、後に述べる1次元の解析条件に少しでも近づくように試験片の変形量なども考慮して決定した。また、試験片と接触する端面は実験開始前に1000番の耐水研磨紙で研磨し、摩擦の低減を

[†] 原稿受理 平成6年3月25日 Received Mar. 25, 1994

* 正 会 員 東北学院大学工学部機械工学科 〒985 多賀城市中央, Dept. of Mech. Eng., Tohoku Gakuin Univ., Chuo, Tagajo, 985

** 東北学院大学工学部機械工学科 〒985 多賀城市中央, Dept. of Mech. Eng., Tohoku Gakuin Univ., Chuo, Tagajo, 985

Fig. 1. Experimental apparatus.

はかる。

基準温度として試験片中央の温度を計測するために、検定してある直径 $50\ \mu\text{m}$ の銅・コンスタンタン熱電対をアルミニウム粘着テープを用いて貼付け、さらに伸縮テープを用いて固定する。つぎに、試料と工具の接触面の温度計測のために、まず上下ステンレス工具の電氣的安定を得る目的で $0.2\ \text{mm}$ のステンレス線を用いて短絡する。一方、工具から引出した同じ $0.2\ \text{mm}$ のステンレス線と試験片に伸縮テープで固定した $0.1\ \text{mm}$ の銅線は、中央に固定した熱電対と共に増幅器を通してレコーダーに接続する。中央の熱電対は前節でも述べたように、従来法の熱電対であるため、応答性あるいは正確な試験片温度を得るためにできるかぎり細いことが必要である。しかし、接触面温度計測はあくまで試験片と工具の接触面が問題となる。そのため、銅あるいはステンレスのリード線の太さは問題とはならないので作業性がよく、固定の容易な太さのものを用いる。このステンレスと銅線で構成される熱電対についてもあらかじめ検定を行っている。

実験は前報と同様に、試験片、工具ともにスポンジで覆い、さらに試験機全体をビニールで囲うことにより極力空気への熱伝達による熱損失を防止する。実験に用いたひずみ速度は $4.6 \times 10^{-4} \sim 3.0 \times 10^{-2}\ \text{s}^{-1}$ の範囲の6通りであり、 $3\ \text{mm}$ の変形を与える。実験は接点の安定を計るために数 MPa の初期荷重をかけ、試験片温度の安定を確認の後、試験を開始する。所定の変形量に達したならば、その荷重を保持し試験片温度が室温になるのを再び確認した後、試験を終了する。レコーダーには2点の熱電対出力のほかに変形中の荷重も同時に出力する。以後に述べる図の説明の容易さのために、試験片中央から上方に X 軸、変形前の試験片の半分の長さを h とする。

3 解 析⁶⁾

弾塑性変形を受ける圧縮試験片からの熱損失は、発生温度が小さいので、境界面を通して試験片から工具への熱伝導と試験片外周から周囲流体である空気への対流熱伝達による2種と考えられる。本来、対流熱伝達は熱伝導を起こしている棒の外表面の境界条件であると考えられる。したがって、本実験による熱の移動を解析するためには2つの熱損失を同時に考慮した軸対称問題として取扱う必要がある。

Fig. 2. Heat conduction model during deformation.

しかし、軸対称問題の解析はそれほど容易ではなく、また本論文では境界面の温度変化へ及ぼす個々の熱損失の影響の程度を明らかにすることを目的としているので、ここでは変形、熱伝導、熱伝達共に1次元問題と仮定し個々に解析を行う。解析法は以前にも述べているので以下に簡単に述べる。

3・1 非定常熱伝導方程式

Fig. 2 に示す座標系で弾塑性変形による内部発熱を伴う非定常熱伝導の基礎式は次式となる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{Q}}{\rho c} \quad (1)$$

ここで、 T : 温度、 t : 時間、 a : 熱拡散率、 c : 比熱、 ρ : 密度、そして $\dot{Q}$ は単位体積、単位時間当たりの発熱量を示す。この発熱量は弾性域、塑性域で異なり、それぞれ次式で示される。

$$\dot{Q} = \pm \alpha T \frac{d\sigma}{dt} \quad (\text{弾性域}) \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{塑性域}) \quad (3)$$

ここで、応力 σ 、ひずみ ε はそれぞれ真応力、真ひずみ、 α は線膨張係数を示す。式(2)の $\pm$ の記号は、発熱過程である圧縮試験の際には $+$ 、冷却過程である引張り試験では $-$ を用いる。本論文では工具にも、弾性変形による内部発熱を考慮した熱伝導解析を行っている。その際、試験片-工具境界面における通過熱量が等しいことを境界条件として用いる。

3・2 非定常熱伝達方程式

試験片と工具の境界面の大部分は空気に直接接触していないため、自然対流が境界面へ及ぼす影響は小さい。しかし、試験片温度が境界面の温度を左右することも事実なので、試験片外周からの自然対流による熱損失も境界面への温度を検討する際に考慮する必要がある。ただし、工具温度は境界面近傍を除いてほとんど室温と等しいので、以下の解析では工具外周からの自然対流による熱損失は無視している。

そこで、一様流中に置かれている熱発生を持つ直径 D 、長さ ℓ の試験片の外周から自然対流により熱損失を起こしている模式図が Fig. 3 である。この解析では、簡単のために断面積の変化および半径方向の温度分布は考慮していない。また、試験片は一様変形をしながら一様流中に置かれているので、試験片の温度分布は一様であると仮定される。このとき、弾塑性変形による単位時間

Fig. 3. Heat convection model with heat generation.

あたりの発熱量は次式となる。

$$\dot{Q}_i = (\pi/4) D^2 \ell \dot{Q} \quad (4)$$

また、試験片外周から放出される単位時間あたりの熱量は次式で示される。

$$\dot{Q}_o = \pi D \ell \alpha_h (T - T_a) \quad (5)$$

ここで、 α_h : 熱伝達率、 T_a : 無限遠方の温度である。したがって、式(4)、(5)で示す熱の発生、放出がある試験片の温度上昇速度は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\dot{Q}}{\rho c} - \frac{4\alpha_h}{\rho c D} (T - T_a) \quad (6)$$

ここで、 $\dot{Q}$ は熱伝導解析と同様に式(2)、(3)を用い、式(1)あるいは式(6)の数値解析には差分法を用いる。また、どちらの解析においても発熱の基礎となる試験片の応力-ひずみ関係は前報と同様、実験の範囲でひずみ速度に依存しないと仮定し、 $\sigma = k\epsilon^n$ で示される n 乗硬化則を用いる。数値解析に用いた銅の熱的および機械的定数は Table I に示す。

Table I. Material and thermal constants of copper.

a (m ² /s)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg·K)	α (K ⁻¹)	k (MPa)	n
1.17×10^{-6}	8880	386	16.5×10^{-6}	578.0	0.559

4 数 値 結 果

4・1 熱伝導を考慮した試験片温度

ひずみ速度が $10^{-3} \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ の範囲で求められた中央と境界面の温度変化を Fig. 4 に示す。ひずみ速度が 10^{-1} s^{-1} 付近までは試験片の温度上昇速度より熱損失速度が大きいため、2点間の温度差はほとんど見られない。しかし、ひずみ速度が大きくなると熱伝導の効果は試験片中央部までは及ばず、試験片内に温度こう配が生じる。さらにひずみ速度を増加させると、 $x=0.8h$ の点の温度変化から明らかなように、温度こう配の生じている領域がしだいに境界面付近に限定され、試験片の全体の80%はほぼ 10^3 s^{-1} で一様温度になる。また、ひずみ速度が約 10^4 s^{-1} になれば試験片全体が同一温度になり、熱損失速度が無視できるほどの温度上昇速度になっ

Fig. 4. Numerical maximum temperature increment plotted against strain rate at $x=0$, $x=0.8h$ and $x=h$.

Fig. 5. Effect of heat loss of convection on specimen temperature.

ていることを示している。この温度分布とひずみ速度の関係は、試験片および工具の熱伝導率あるいは試験片の機械的特性などにより変化するのは当然であるが、少なくとも本実験の範囲内では試験片内に温度こう配はほとんど生じていないと考えられる。

4・2 熱伝達を考慮した試験片温度

ひずみ速度に対する試験片温度の変化を Fig. 5 に示す。試験片周囲の空気の流速を 0.5 m/s とした状態で求めた結果であるが、ひずみ速度が 10^{-2} s^{-1} 付近から試験片温度に熱伝達による熱損失の影響は現れないことが分かる。実験においては試験片をスポンジで覆い、試験機全体をビニルで囲っていることから実際にはもっと低いひずみ速度から熱伝達の影響は無視できると考えられる。

5 実 験 結 果

5・1 温度増分へ及ぼす境界面の影響

実験の手法上、前述したように試験片・工具境界面には摩擦の低減のためにテフロンシートのような異物を挿入することができない。したがって、ステンレス工具を用いたときの試験片との接触による摩擦の影響をあらかじめ知っておくことが重要である。そこで、前報と同様に試験片中央と $x=0.5h$ の2点に、前述した $50 \mu\text{m}$ の銅-コンスタンタン熱電対を同様な手法で固定し、変形中の温度を計測する。

その結果を Fig. 6(a), (b) に示す。摩擦力は試験片の不均一変形を引起し、その結果試験片内に温度こう配を

(a) Results obtained with teflon.

(b) Results obtained without teflon.

Fig. 6. Effect of teflon on the maximum temperature increment.

発生させると考えられるが、テフロンの有無にかかわらず、工具をステンレス鋼とすることにより中央と $x = 0.5h$ 間に温度差はほとんど現われない。これは銅の熱伝導性の良さと、それと比較してのステンレス鋼の断熱性の良さを表わしていると考えられる。Fig. 6(b)の2点間の温度差がFig. 6(a)の温度差よりわずかに大きい点が摩擦による不均一変形の影響と思われるが、銅を用いての不均一変形の検討はあまり有効ではなく、今後、熱伝導率の低い材料を用いて検討することが重要である。

5・2 中央と境界面の温度上昇過程

ひずみ速度が $4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ と $3.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ における実験で求められる温度上昇過程をFig. 7(a), (b)に示す。境界面の温度を示す銅-ステンレス熱電対は単位温度当たりの熱起電力が小さいために、増幅器の増幅率を上げなければならない。その結果、中央の銅-コンスタンタン熱電対の結果と比較してノイズが多く重畳しているが、全体の変化は中央の温度変化と類似している。また、Fig. 7(b)の冷却過程において途中で線が折れているのは、その点からレコーダーの紙送りを変えたことによる結果である。いずれのひずみ速度においても中央部、境界面双方とも負荷と共に試験片温度は上昇するが、低ひずみ速度でもアルミニウム(A5052)で見られたような温度の変動は観察されず、また降伏点もアルミニウムほど明瞭ではない。

6 検 討

6・1 断熱係数へ及ぼすひずみ速度の影響

(a) $\dot{\epsilon} = 4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. (b) $\dot{\epsilon} = 3.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Fig. 7. Variation of temperature during elastic-plastic deformation.

伝熱条件を示す因子である断熱係数を以下のように定義する。

$$F = (Q_G - Q_L) / Q_G \quad (7)$$

ここで、 Q_G : 応力-ひずみ曲線から求められる塑性仕事により生じる熱量、 Q_L : 熱伝導、熱伝達により散逸する熱量である。すなわち、式(7)の分子は試験中に試験片が保持している熱量に相当する。銅もアルミニウムと同様に本実験の範囲のひずみ速度においてはひずみ速度依存性は小さいと考えられるので、式(7)における Q_G はひずみ速度に依存せず、さらに塑性仕事はすべて熱に変換されると仮定している。

そこで、最大温度から求められた断熱係数 F とひずみ速度の関係をFig. 8に示す。境界面の値がいくぶん低い、例えば $3.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度においてど

Fig. 8. Insulated factors against strain rate.

らも約0.7を示しており、テフロンシートを挿入した工具鋼によるアルミニウムの圧縮試験の結果と同様である。これはテフロンシートを挿入した工具鋼とステンレス鋼の熱伝導率が見掛け上ほぼ等しいことを示している。したがって、この程度の熱的条件であれば、実験的にはひずみ速度が 10^{-1} s^{-1} 近辺から変形はほぼ断熱過程と見なすことができる。

6・2 理論温度と実験温度の比較

ひずみ速度が $3.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ と $4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ における中央部での実験結果と数値結果の比較を Fig. 9 (a), (b) に示す。図中、実線は塑性仕事はすべて熱に変換され、さ

(a) $\dot{\epsilon} = 3.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. (b) $\dot{\epsilon} = 4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.Fig. 9. Comparison of experimental temperature increment with numerical one against strain at $x=0$. (a) $\dot{\epsilon} = 3.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. (b) $\dot{\epsilon} = 4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.Fig. 10. Comparison of experimental temperature increment with numerical one against strain at $x=h$.

らに熱損失がまったく無いとして求められた温度増分で、ここでは理論温度増分と記す。○は理論温度増分から熱伝導による熱損失を差引いた温度増分、⊖は理論温度から熱伝達による熱損失を差引いた温度増分、そして●は中央部の実験結果である。

ひずみ速度が高い Fig. 9 (a) の結果は、Fig. 5 にも示しているように熱伝達の影響をほとんど無視することができるので熱伝導による熱損失を考慮した結果が実験値とよく一致することが分かる。したがって、この図には熱伝達による熱損失を考慮した結果は書き入っていない。ひずみ速度の低い Fig. 9 (b) の結果は、実験値が熱伝導を考慮した結果よりさらに低い値を示しているが、これは熱伝達による熱損失が影響しているものと考えられる。図中、理論温度増分と熱伝達を考慮した温度増分の差を見れば、実験値と熱伝導を考慮した温度増分との差とはほぼ等しいことから上述の考えは妥当と思われる。

同様な比較を境界面について行った結果を Fig. 10 (a), (b) に示す。○は境界面の実験結果であり、他の記号は Fig. 9 と同様である。実験で求められる温度は、中央部と比較して全体的に約 0.5K ほど低下しているが、境界面においても数値解と良く一致している。つぎに、中央部と境界面における最大温度増分を、ひずみ速度に対して示した結果が Fig. 11 である。Fig. 6 に比較して中央

Fig. 11. Comparison of experimental maximum temperature increment with numerical one at $x=0$ and $x=h$ against strain rate.

と境界面の温度差は大きく現われている。これは、Fig. 4からも明らかなように温度こう配は試験片全体に生じているわけではなく、境界面に近い領域にのみ存在するためと考えられる。また数値結果と比較して2点間の温度差が大きく現れている。これは数値解析では試験片、工具ともに1次元モデルであるが、実際の工具は突起部の後部に大きな体積を持つので、工具への損失熱量がモデルより大きいためと考えられる。また、低ひずみ速度域ほど実験結果と計算結果に差が生じるのは、前述したように熱伝達の影響と考えられる。

7 結 論

試験片と工具で熱電対を構成する手法を用いて、銅試験片の弾塑性変形中の温度上昇を種々のひずみ速度の下で計測し、また熱伝導、および熱伝達による熱損失を考慮する1次元解析の結果と比較することにより以下の結

論が得られた。

従来法である2本の金属の接点を用いる熱電対を用いて、弾塑性変形中の試験片・工具接触面の温度を検証した結果、上述の方法は充分試験片・工牒接触面の温度計測に使用可能であることを明らかにした。また、熱損失を考慮した簡単な解析結果と接触面における実験結果との良い一致から、温度変化が小さい場合でもこの方法は使用可能であることを示した。

今後、実際の高ひずみ速度下の実験により、この方法の有効性を明らかにする必要があると考える。

最後に、本実験にご協力頂きました、当時学生の高橋賢氏に感謝の意を表します。

(平成6年5月25日 日本材料学会第43期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば、上田隆司, 細川 晃, 山本 明, 精密機械, **50**, 82 (1984).
- 2) 例えば、柳原直人, 斉藤 博, 中川威雄, 塑性と加工, **23**, 71 (1982).
- 3) C. D. Henning and R. Parker, Trans. ASME, J. Heat Transfer, **89**, 146 (1967).
- 4) 棚沢一郎, 西尾茂文, 河村 洋, 笠木伸秀, 吉田豊明, “温度測定法”, 79 (1985) 養賢堂.
- 5) 菊地庄作, 柳沢重夫, “切削の理論と実際”, 45 (1981) 共立出版.
- 6) 伊達秀文, 鈴木利夫, 長谷川篤志, 材料, **43**, 388 (1994).
- 7) 有年雅敏, 沖田耕三, 圓城敏男, 池内健二, 松田福久, 溶接学会論文集, **9**, 475 (1991).
- 8) 日本機械学会編, “伝熱工学試料改訂第4版”, 289 (1976) 日本機械学会.