

き裂を有する弾/粘塑性材の変形評価*

坂本 英俊^{*1}, 小田 勇^{*1}, 土井 猛志^{*2}
広瀬 統^{*3}, 山本 光治^{*4}

Evaluation of Deformation in Elasto/viscoplastic Body with Crack

Hidetoshi SAKAMOTO, Isamu ODA, Takeshi DOI,
Osamu HIROSE and Mitsuharu YAMAMOTO

Some materials used to fabricate machines and structures have a strain rate dependence in their stress-strain characteristics at room temperature. In such materials, the deformation and strength depend on the loading velocity. We propose a noncontact evaluation technique using infrared thermography of macroscopic plastic deformation. To detect the heat generated during plastic deformation, an infrared thermal video system (TVS 2100) was employed. The relationship between the plastic deformation and temperature rise of the specimen surface was determined by analytical simulation of elasto/viscoplastic FE analysis coupled with transient heat conduction analysis. The experimental and numerical results are in good agreement, and the effect of the loading rate and the applicability of this evaluation technique by infrared thermography was demonstrated.

Key Words: Experimental Analysis, Numerical Analysis, Plasticity, Infrared Thermal Video, Strain Rate, Transient Heat Conduction, Plastic Deformation, Noncontact Evaluation, FEM

1. 緒 言

機械構造部材の中で、応力-ひずみ関係が負荷速度に依存するような材料では、負荷速度の違いにより、破壊形態が異なる。それらの破壊機構は、塑性域の大きさや広がり方、およびひずみ集中に大きく支配されていることが知られており、塑性域の大きさ・き裂進展の様子のみならず、ひずみ集中の程度について測定することは、変形機構、破壊機構を解明する上で重要なものとなっている。

塑性域を測定する方法としては、これまでに、ひずみゲージ、Fry 試薬、応力塗料、光弾性皮膜、モアレ縞、リューダース線による方法などが用いられているが、これらの方法では、極く局部的なひずみしか得られない、表面処理が面倒である、温度・湿度等の環境条件や薬品処理に大きく支配される等の問題点があり、近年の機械の大型化、構造物の形状の複雑化に伴い、これらの従来法を用いて測定することがかなり困難になっている。

そこで、著者らは、最近、非破壊検査・き裂解析手法として注目を浴びている赤外線リモートセンシング技術^{1)~4)}

を用いて、部材が変形する際に発生する塑性変形熱に着目した、簡便で広範囲に部材の塑性変形挙動を可視化できる評価手法の検討を行ってきた。そして、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^{5) 6)}。

本研究では、き裂を有する弾/粘塑性材の異なる負荷速度における変形挙動をマクロ的に評価するために、塑性域の測定・評価手法としてサーモグラフィ法を用い、変形時の部材表面の温度分布の変化を測定した。さらに、非定常熱伝導解析と組み合わせた弾/粘塑性解析により、実験結果のシミュレーションを行い、解析的見地から赤外線映像法に基づく塑性変形評価システムについて検討を行った。

2. 実 験

2.1 供試材 供試材には、板厚3mmのSUS304ステンレス鋼板を用いた。その材料特性を表1に示す。

供試材のひずみ速度依存性を調べるために、4種類の引張速度 ($V=0.5, 5, 50, 500$ mm/min) で引張試験を島津製オートグラフ (AG-25T) を用いて行った。ここで得られた種々の引張速度における応力-ひずみ曲線を図1の破線で示す。図から、塑性域に入ると、負荷速度が上昇するにつれて応力も上昇する傾向がみられ、供試材のSUS304はひず

* 1993年10月2日 第71期全国大会講演会において講演、原稿受付 1995年11月28日。

^{*1} 正員、熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)。

^{*2} 正員、熊本大学大学院。

^{*3} 東京エレクトロン(株) (〒869-11 熊本県菊池郡菊陽町津久礼2655)。

^{*4} 熊本大学工学部。

み速度依存性を有する材料であることがわかる。

Table 1 Material properties

Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	elongation (%)	young's modulus (GPa)	poisson's ratio
281	728	63.9	205	0.3

heat conductivity λ (W/m \cdot K)	density ρ (kg/m 3)	specific heat c (kJ/kg \cdot K)	Joule's equivalent J (N mm/cal)
16.3	7.82×10^3	0.502	4.19×10^3

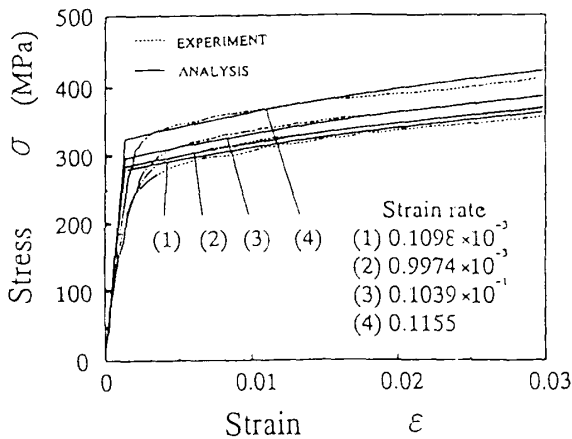


Fig.1 Stress- strain curves

2. 2 測定システム 供試材の引張変形に伴う応力集中部の塑性変形発熱分布測定には、日本アビオニクス社製TVS-2100(Thermal Video System)を使用した。

本装置は、(1)短い測定時間で、熱画像をリアルタイム(30 Frame/sec)に取り込み記録できる、(2)測定装置がコンパクトで計測および移動が容易である、(3)非接触で、広範囲な領域が測定できる、などの特長を有している。その仕様を表2に示す。

また、サーモグラフィ法による測定システムを図2に示す。負荷装置としてオートグラフを使用し、荷重負荷時より破断まで連続して、変形中の部材表面温度の変化を測定した。熱画像データはVTRに連続的に記録するとともにサーモグラフィ・コントローラを通してフロッピーディスクにも記録した。記録された熱画像はオフラインで日本アビオニクス社製高速カラー画像・解析装置(SPPICA)で2値化処理を行った後、パーソナルコンピュータを用いて画像処理を行った。図中の破線部分は、熱画像への試験片表面の反射やカメラヘッドの内面反射の影響を除くため、ライトシールド状態として実験を行った。

2. 3 基礎実験 サーモグラフィ法では、変形

の際、物体が放出する赤外線輻射エネルギーを赤外線センサーにより検知して、物体表面温度の計測を行う。そのため、測定される物体の表面温度は測定対象物表面の放射率 ϵ に大きく左右される。そこで、本実験の熱画像測定に先立ち、試験片表面の放射率 ϵ について検定を行った。

Table 2 Specification of TVS-2100

Range of measurement temperature	-40 ~ 950 $^{\circ}$ C
Resolution of temperature	0.1 $^{\circ}$ C
Scanning lines	100 lines
Resolution of horizontal pixels	256 dots/line
Numbers of frame	30 frame/sec
Detector	In- Sb
Cooling of detector	Argon gas cooling system

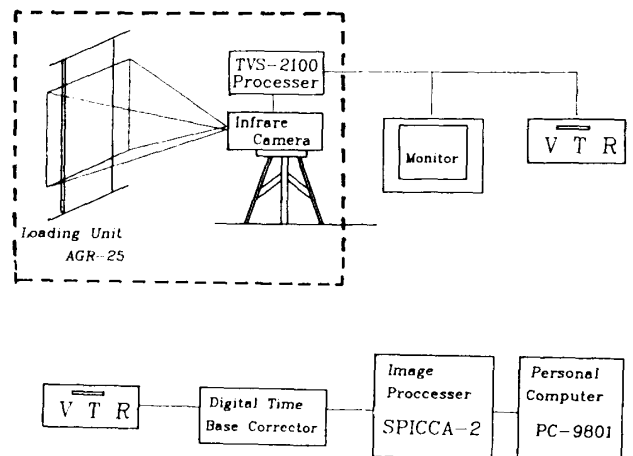


Fig.2 Measurement system

サーモグラフィによる温度観測点位置と、同じ場所に熱電対を取り付け、連続加熱時のサーモグラフィ測温結果と熱電対の測温結果を、データロガー(DRF-1・テック製)を用いて、連続的に記録した。測定されたサーモグラフィと熱電対による温度上昇値の対応関係を図3に示す。図より、放射率 ϵ を大きく設定すると、サーモグラフィにより測定される表面温度上昇の割合は熱電対で測定されるそれと比較して小さく、逆に ϵ を小さく設定すると大きくなる。そこで、本研究では、サーモグラフィと熱電対の温度上昇率が1対1の対応関係となる $\epsilon=0.25$ を、SUS304の放射率として採用した。

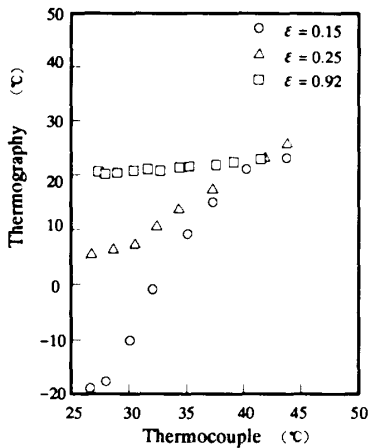


Fig.3 Relation between temperature obtained by thermography and thermocouple

2.4 塑性変形熱画像測定試験 試験片の形状・寸法を図4に示す。図に示すように、試験片中央部に応力集中部として、ワイヤカット放電加工により予き裂加工後、所定の長さまで疲労試験機（島津サーボパルサEHF-10）を用いて、片振り引張りにより疲労き裂を導入した。また、変形中のき裂線上のひずみ分布を測定するため、き裂線上に2軸ひずみゲージを図5に示すように貼付した。

負荷装置として、材料試験に用いたオートグラフを使用した。異なる負荷速度における発熱分布の相違をみるために、2種類の負荷速度（クロスヘッドスピード 15、50 mm/min）で引張試験を行い、サーモグラフィおよび熱電対による変形中の試験片表面温度、ひずみゲージのよるき裂線上のひずみの変化を連続的に測定・記録した。

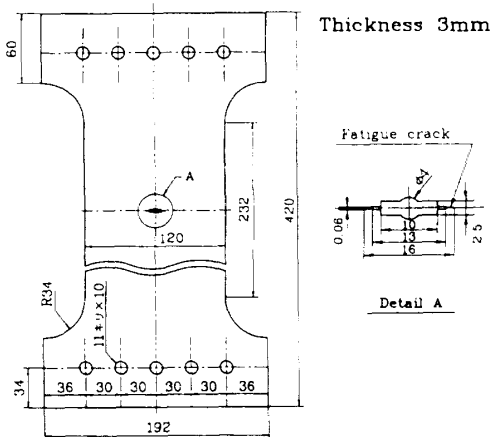


Fig.4 Geometry and dimensions of specimen

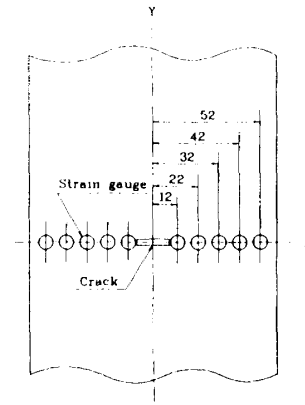


Fig.5 Location of strain gauges pasted

熱画像測定結果を図6、図7に示す。これらの図は、負荷速度 $V=15\text{mm/min}$ 、 50mm/min で、試験片末端変位量6mmおよび12mmの時に測定された試験片表面温度分布をそれぞれ示す。図より、塑性域の広がりに伴い試験片表面温度が上昇している様子がわかる。クロスヘッドスピード 50mm/min の場合、変位が大きくなるにつれて応力集中部であるき裂先端周辺に高温域が形成され、 15mm/min の場合には塑性変形により生じた熱は試験片全体に広がり、ピーク温度は 50mm/min に比べ低くなっているのが観察される。

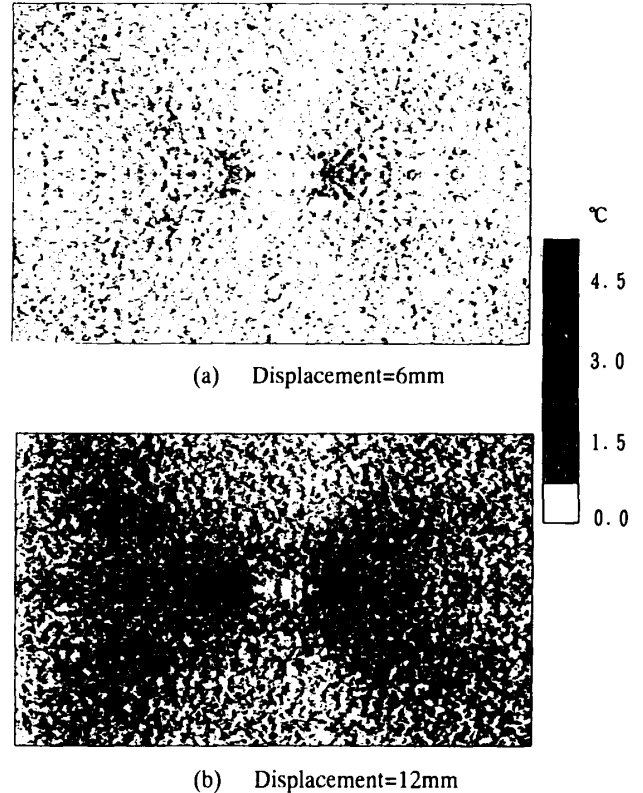


Fig.6 Distribution of temperature measured by thermography ($V=15\text{mm/min}$)

3. 解 析

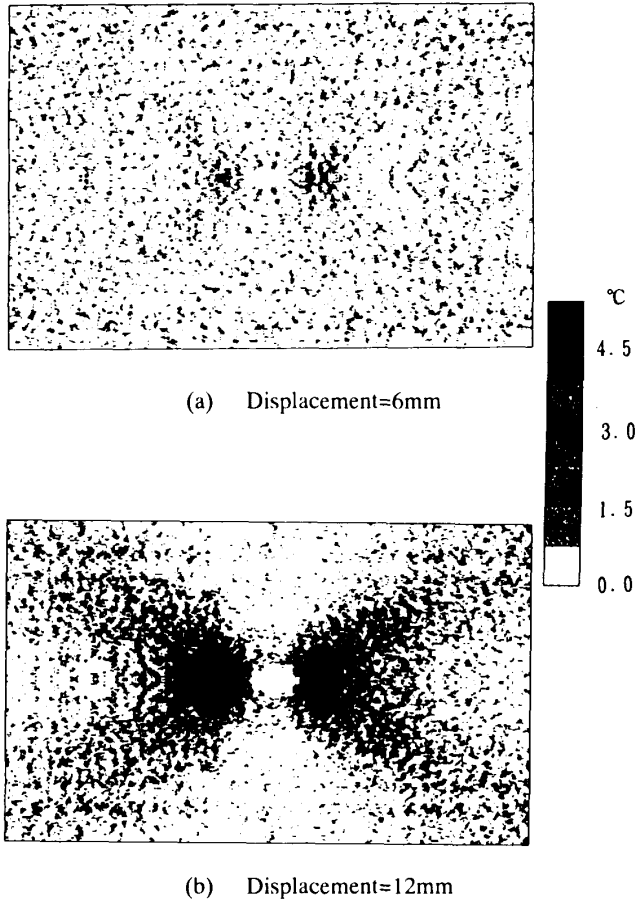


Fig.7 Distribution of temperature measured by thermography (V=50mm/min)

次に、実験で得られた変形に伴うき裂線上のひずみ分布の変化を図8に示す。変形が小さい領域では、引張速度によるひずみ分布の差は認められないが、変形が進むにつれ、速度効果により引張速度の小さい方が高い方に比べひずみが大きくなる傾向を示す。図中の応力比は本実験の試験片の最小断面に働く平均応力と単軸引張試験片で得られた準静的降伏応力の比を表す。

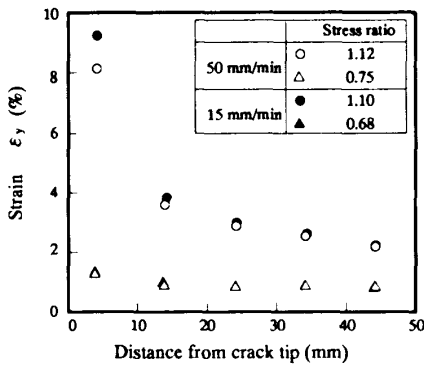


Fig.8 Distribution of strain around crack tip

3.1 解析手法 本研究では、塑性変形発熱による試験片表面の温度分布のFEMシミュレーションを実施し、サーモグラフィ法により測定される変形中の表面温度分布によるマクロな変形評価の妥当性について検討した。

解析では実験に用いた材料の負荷速度依存性と塑性変形により発生する熱エネルギーの熱伝導を考慮し、変形解析においては、構成関係にPerzynaの粘塑性理論式(1)⁷⁾を適用し、熱伝導解析は変形解析で得られた変形エネルギー増分による発熱に基づいた非定常熱伝導解析を行った。解析は2次元の弾/粘塑性変形・熱伝導問題とし、フローチャートを図9に示す。温度解析においては、第一近似として塑性変形エネルギーはすべて熱エネルギーに変換されると仮定し、また、試験片側面はすべて断熱であると仮定した。

$$\dot{\epsilon}^{VP} = \gamma \left(\Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \left(\Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) \right) &= 0 & \text{if } F < 0 \\ \left(\Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) \right) &= \left(\frac{F}{F_0} \right)^\alpha & \text{if } F \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 γ は粘性係数、 $F/F_0 = (\sigma - \sigma^*) / \sigma^*$ 、 F は降伏関数、 F_0 は F を無次元するための定数、 σ^* は準静的な応力ひずみ関係より得られる降伏応力、 α は材料固有の係数である。

微小時間 Δt において、粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{VP}$ が一定であると仮定すると粘塑性ひずみ増分は $\Delta \epsilon^{VP}$ は次のように計算できる。

$$\Delta \epsilon^{VP} = \dot{\epsilon}^{VP} \cdot \Delta t \quad (3)$$

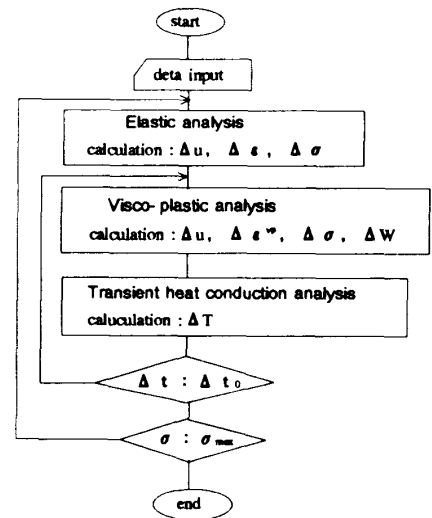


Fig.9 Flow chart of analysis

次に、この粘塑性ひずみ増分による仕事がすべて熱エネルギーに変換されると仮定し、塑性発熱および Δt 間における熱伝導を計算し、試験片表面温度分布を求める。粘塑性計算の時間増分 Δt は解の安定条件を与える次の式を用いて求めた¹⁾。

$$\Delta t < \frac{4(1+\nu) F_0}{3\gamma E} \frac{1}{\phi} \quad (4)$$

ここで、 E 、 ν は縦弾性係数、ポアソン比である。

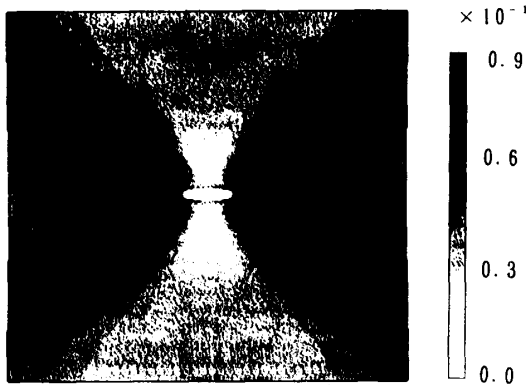
また、非定常熱伝導方程式の時間に関する離散化には、Crank-Nicolson差分式を用いた。

3. 2 解析結果および考察 解析定数として、表1の値と図1の破線で示す実験値より算出された $\gamma=923$ 、 $\alpha=8.0$ を用いた。単軸引張のシミュレーション結果を図1の実線で示す。図より、実験カーブが良くシミュレーションされている様子がわかる。

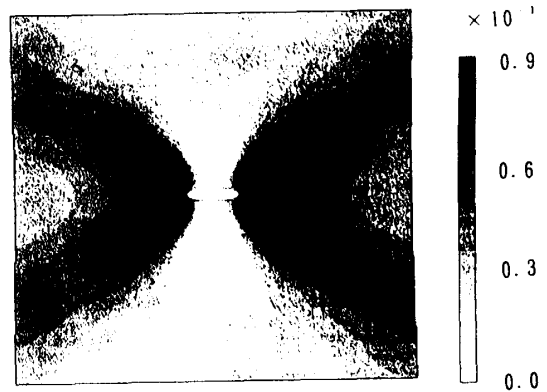
塑性変形シミュレーションには、2.4節の塑性変形熱測定の際に実験で得られた荷重-時間曲線を指数関数式で近似した負荷曲線を使用し、変形および変形に伴う試験片表面の温度分布計算を行った。

実験の図6(b)、図7(b)に対応する解析によって得られた相当塑性ひずみ分布を図10に示す。実験で得られた図8のひずみ分布同様、き裂先端近傍にひずみが集中している。同じ変位においてひずみ分布を比較すると、引張速度が遅い(a)の場合はき裂先端のみならず部材全体にわたり、高いひずみ領域の占める割合が大きく、逆に引張速度が速い(b)の場合は、ひずみ速度の上昇により、き裂先端のひずみ集中が著しく、周辺の変形は小さくなっている。

次に、これらの変形解析より得られた変形エネルギーに基づき計算した試験片表面の温度分布を図11、図12に示す。これらの図は、実験における図6、図7に対応したシミュレーション結果であり、(a)が引張速度15mm/min、(b)が引張速度50mm/minの場合をそれぞれ示す。



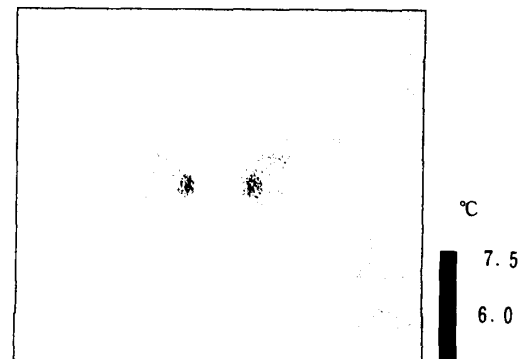
(a) V = 15 mm/min



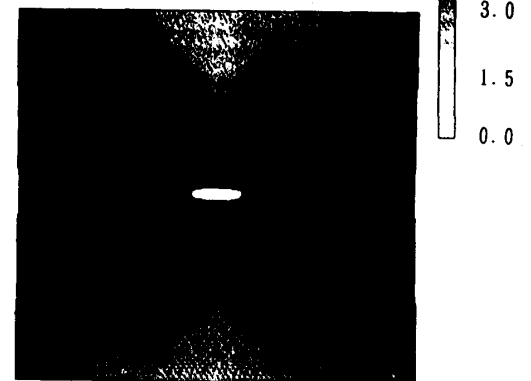
(b) V = 50 mm/min

Fig.10 Distribution of equivalent plastic strain (Displacement=12mm)

(a)においては、変形が進むにつれて部材全体に温度上昇がみられるのに対し、(b)の場合は、き裂先端付近に集中して温度上昇が見られる。これは、図10(a)に示した相当塑性ひずみひずみ分布の広がりともよい対応を示している。また、この解析熱画像とサーモグラフィーによる熱画像を比較すると、温度上昇の絶対値は解析値が多少大きくなっているが、温度分布形状はよい一致がみられる。



(a) Displacement = 6 mm



(b) Displacement = 12 mm

Fig.11 Temperature distribution by analysis (V=15mm/min)

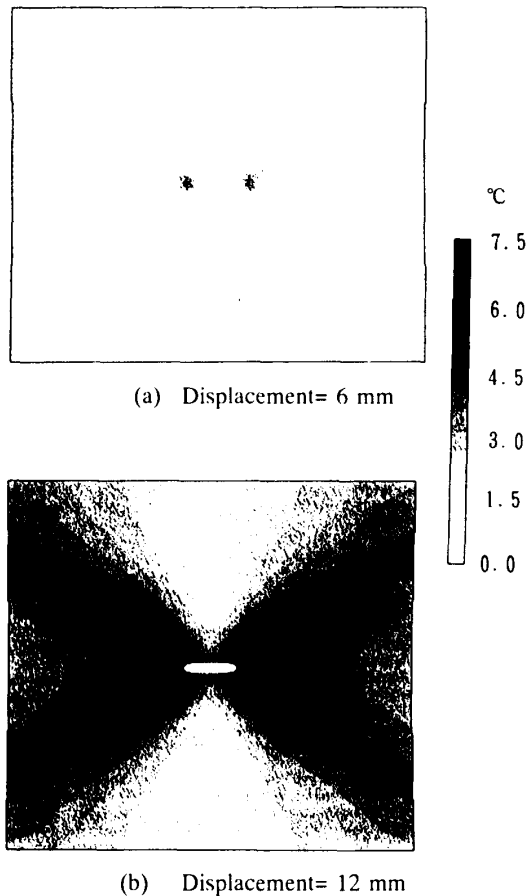


Fig.12 Temperature distribution by analysis
($V=50\text{mm/min}$)

このシミュレーション結果は、同じ変位に達するまでの時間的な差による熱の広がりも含んでいることから、単純に塑性変形と対応させることはできないが、速度効果・熱伝導を考慮した解析を行うことにより、測定された熱画像から、変形状態の評価が可能である。

4. 結 論

部材が塑性変形する際に発生する熱エネルギーに着目し、変形時の弾/粘塑性材料の表面の温度変化をサーモグラフ

ィーを用いて測定し、非接触でかつ広域な変形挙動評価手法としてのサーモグラフィー法の妥当性を検討した。内部塑性変形挙動と観測された変形時の温度分布の対応関係を検討するために、変形速度および熱伝導を含めたFEMシミュレーション解析を行った。以下に得られた知見を要約する。

(1) き裂先端近傍の塑性ひずみ分布は引張速度に影響を受け、引張速度が低い方が大きなひずみを生ずる。

(2) 塑性域の広がりに伴い、試験片表面温度が上昇し、引張速度が早い場合、変位が大きくなるにつれて応力集中部であるき裂先端周辺に高温域が形成される。遅い場合には、塑性変形により生じた熱は、変形に要する時間が長い試験片全体に広がり、き裂近傍のひずみが大きいにも関わらず、ピーク温度は前者に比べ低くなる。

(3) 解析により得られた試験片表面の温度分布とサーモグラフィーで測定された温度分布は、解析値が、(a) 塑性エネルギーがすべて熱エネルギーに変換される、(b) 試験片端および表面は断熱、を仮定しているため、多少高めの値となるが、傾向的に良い一致を示す。

(4) 速度効果を含めた変形・温度解析により、温度分布を介して、サーモグラフィーで得られた熱画像から巨視的に塑性変形が評価できる。

参 考 文 献

- 1) 白鳥ほか3名, 機論A, 55-511, (1989), 538-542.
- 2) 白鳥, 機械の研究, 42-1(1990), 45-51.
- 3) 影山, 塚本, 日本造船学会誌, 728(1990), 113-119.
- 4) Osakada, K., et al. Proc. 4th Int. Conf. on Technology of Plasticity, (1993), 257-262
- 5) SAKAMOTO H., et al., Proc. AEPA'92, (1993), 943-948.
- 6) 坂本ほか3名, 機構論, No. 938-1(1993), 43-46.
- 7) Perzyna, P. Advanced in Applied Mechanics, 9(1966) 243-377, Academic Press.
- 8) Zienkiewicz, O. C., et al., Nuclear Engineering & Design, 28-2(1974), 278-288.