

96

単純せん断による断熱せん断帯の発生と成長

理化学研究所

栗山慎鋒

New Mexico Institute of Mining and Technology

Marc Andre Meyers

<塑性と加工(日本塑性加工学会誌) 第30巻 第342号(1989-7) 別刷>

論 文

単純せん断による断熱せん断帯の発生と成長*

栗 山 慎 鋒**・マーク アンドレ マイヤーズ***

Generation and Formation of Adiabatic Shear Band
Produced by Simple Shearing

Shinhou KURIYAMA and Marc Andre MEYERS

An adiabatic shear band produced by simple shearing in a rectangular body with a notch is analyzed numerically by the finite element method (FEM), using a stress-strain curve for the adiabatic condition, which has an instability region owing to thermal softening. Generation and formation of the shear band are investigated for mild and high-strength steels. Strain softening appears at the notch-tip owing to stress concentration and penetrates into the materials owing to thermal softening. Propagation of strain softening area may be regarded as a kind of notch penetration, because decrease of deformation strength in the softening area induces further stress concentration at the tip of softening area and produces more plastic deformation to induce thermal softening. The softening area makes a narrow strip-zone deeply along the depth of notch, which is defined as adiabatic shear band. The width of shear band is less than a half of notch width.

Key words: basic theory, ferrous metal, adiabatic shear band, finite element method, plastic instability, simple shearing, strain softening, thermal softening.

1. 緒 言

固体が高速で衝突したり、または爆発衝撃を受けたりすると、固体中にせん断帯が発生する。せん断帯は塑性変形の局所集中化によって生じるが、固体を高速で塑性変形させると、熱は固体中に蓄積され温度が上昇する。その結果、材料強度は低下し軟化を示す。この熱軟化を主原因として生じるせん断帯を特に断熱せん断帯と名づける。せん断帯中の材料は熱で軟化する上に、き裂や空孔も形成されるので、破壊がこのせん断帯に沿って生じると推定され、近年高速破壊そして固体の粉碎の前触れ現象として注目されている。

断熱せん断帯を金属組織から考察することは多くの研究者によってなされてきたが、いまだ十分には解明されていない。一般にせん断帶には塑性変形だけによって生じる「変形せん断帯 (deformation shear band)」と相変態も生じる「変態せん断帯 (transformation shear

band)」とに分類される¹⁾。せん断帯には白色化、硬化、そして結晶粒の微細化等の現象が生じるが、どのせん断帯にどの現象が生じるかはいまだ解明されておらず、材質と変形速度に依存すると考えられる。しかしどちらの場合も、せん断帯中の変形量は非常に大きく、変位量から推定すると溶融している可能性もある。そこで著者らは、せん断帯の形成理由が最も簡単と考えられる前者の塑性変形による「変形せん断帯」を取り上げ、せん断帯の発生・成長・伝播を力学面から考察する。

断熱せん断帯は、熱軟化による力学的な不安定化によって生じると Zener らが最初に指摘し²⁾、Recht が断熱状態の応力-ひずみ線図の傾斜がゼロになる条件と、その条件下のひずみ値を断熱せん断帯の発生条件に取り入れた³⁾。近年 Clifton は線形摂動法を用いて、熱軟化による塑性不安定現象を解析した^{4),5)}。その後、幾人かの研究者がこれらの方法を発展させている^{1),5),6)}。

現在はせん断帯の形成に関し、数値解析法による検討が始まっている。特に Olson らは差分表示の HEMP コードを用いて⁷⁾、Lindholm らは弾塑性有限要素法 EPIC-2 コードを用いて解析した⁸⁾。その結果、塑性変形が急激に、かつ局的に増大する所が存在し、その位置にせん断帯が発生するであろうと推測した。

* 原稿受付 昭和 63 年 1 月 5 日

** 理化学研究所素形材工学研究室 〒351-01 埼玉県和光市
広沢 2-1

*** Associate Professor, Department of Metallurgical and
Materials Engineering, New Mexico Institute of Mining
and Technology, Socorro, NM 87801, U.S.A.

わが国においては、高速切削における断熱せん断帯の考察が竹山によって⁹、高速ねじり試験における熱軟化ひずみ集中現象の研究が工藤らによって¹⁰、高速度せん断におけるせん断帯の形成と急冷によるマルテンサイト組織の確認が中川によってなされた¹¹。また断熱せん断帯と断っていいが、空孔成長によるせん断帯の発生条件¹²、塑性変形に基づく発生熱による剪断帯中の材料の軟化¹³、そして自由表面上の初期形状不整から発達するせん断帯の成長¹⁴が研究されている。

そこで著者らは、断熱状態の応力-ひずみ線図は熱軟化によって傾斜が負の塑性不安定領域を持つと仮定し、弾塑性有限要素法を用いて、ノッチ付直方体の単純せん断変形を解析した。その結果、せん断帯は応力集中によりノッチ先端にまず形成され、その後直方体内部に進行する。せん断帯先端近傍の応力およびひずみ分布、いかえると熱軟化による応力の減少と変形の増大、およびせん断帯の幅が得られ、それらに対する材料特性の影響を解明した。

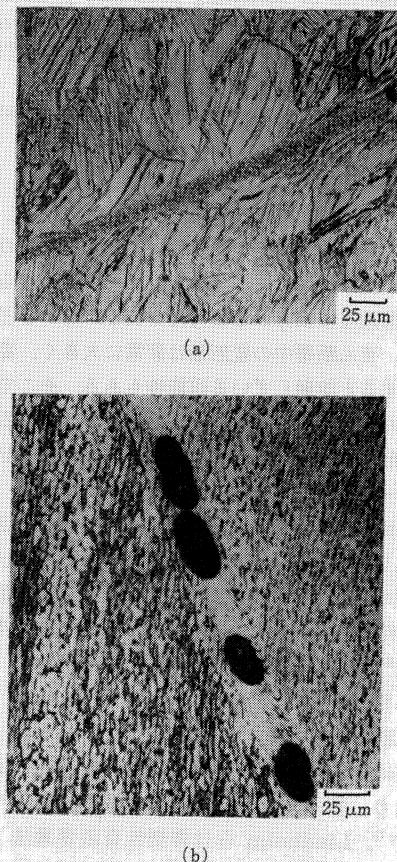


Fig. 1 Adiabatic shear band (a) in titanium and voids (b) in Ti-6%Al-4%V.

2. 断熱せん断帯と力学モデル

2・1 断熱せん断帯

断熱せん断帯は高速衝撃のときに生じることが多く、著者の1名によって得られた実験結果をFig. 1に示す¹⁵。標的固体中に生じたせん断帯の幅は狭く、TiとTi-6% Al-4% Vの場合1~8 μm程度で(Fig. 1(a)参照)、AISI 1040鋼の場合1~3 μmで、最大せん断応力方向に伝播している。鋼鉄(1.2% C, 0.2% Mn)の弾丸内に生じたせん断帯の幅は比較的広く1~100 μm程度もあり、伝播方向は定まっていない。またTi-6% Al-4% V材にできたせん断帯中には、空孔が生成されている(Fig. 1(b)参照)。

金属材料の流動応力は、ひずみおよびひずみ速度が増大すると一般に硬化し増大する。一方塑性変形によって熱が発生し、材料は軟化する。この熱軟化がひずみまたはひずみ速度による硬化よりも大きくなると、材料は力学的不安定を示す。これをほぼ断熱状態の高ひずみ速度における応力-ひずみ線図(Fig. 2の実線)で考察する。ひずみが小さい範囲では傾斜が正でひずみ硬化を示す力学的安定域を、ひずみが大きい範囲では傾斜が負で、ひずみ軟化を示す力学的不安定域を示す。傾斜が正から負に移る傾斜ゼロの所を本文では遷移点と名づけ、その点

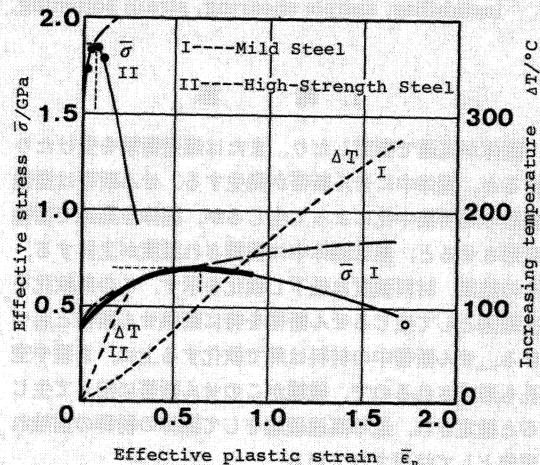


Fig. 2 Effective stress-strain curves for mild steel I and high-strength steel II. Full lines (—) indicate adiabatic stress-strain curves of Eq. (1) at high-strain-rate. Dashed lines (---) represent monotonic work-hardening curves of Eq. (2). Solid line (—) ● and ○ are experimental data cited from Olson et al.⁷. Dotted lines (---) show increasing temperature calculated along the full lines of adiabatic curves.

のひずみ値および応力値をそれぞれ遷移点ひずみそして最大応力と呼ぶ。

高ひずみ速度におけるひずみ軟化現象は熱軟化のほかに、準臨界せん断微視クラックの発生によって生じることもある⁷⁾。ひずみ硬化域からひずみ軟化域への遷移点ひずみは、高張力鋼の場合せん断ひずみ 0.112 で非常に小さく、微視クラックの発生によって生じると想像される。一方、軟鋼の場合せん断ひずみ 1.11 で比較的大きく、熱軟化によって生じると想像される。本論文では、軟化は何によって生じるかは問わないで、高ひずみ速度の応力-ひずみ線図は、断熱状態に近づくと軟化を示すという力学的不安定条件から断熱せん断帯を考察する。

2・2 力学単純化モデル

断熱せん断帯の生成と伝播は高速変形下の現象で、波動伝播で扱う過渡現象問題であろう。これを単純化せん断体成長時の非定常問題として解析しても、材料力学特性のひずみ速度依存性と、塑性変形による熱発生と、その熱の伝導と熱による軟化を考慮する必要がある。また、運動方程式を導く際、せん断帯内部の材料の慣性項は一般には省略できない。これら全部を考慮することは、あまりにも複雑であり、著者らは多くの仮定を設けて解析ができるだけ簡単化した。

断熱せん断帯はせん断応力によって生成そして加速されると考えられ、また衝突面の端またはその近傍から内部に深く伝播している場合が多い。そこで Fig. 3 に示すノッチ付長方形の単純せん断変形で考察する。上端 CD には接線方向に一様な変位量 d を、下端 C'D' には同一量の変位量を逆方向に与え、長方形をせん断変形させる。ノッチは衝突面近傍にある自由表面上の初期形状不整による凹部か、衝撃物体の端部によって作られた表面傷（クラック）に相当すると考え、せん断帯を応力集中によってノッチ先端に生成させ、固体内部に伝播させる。

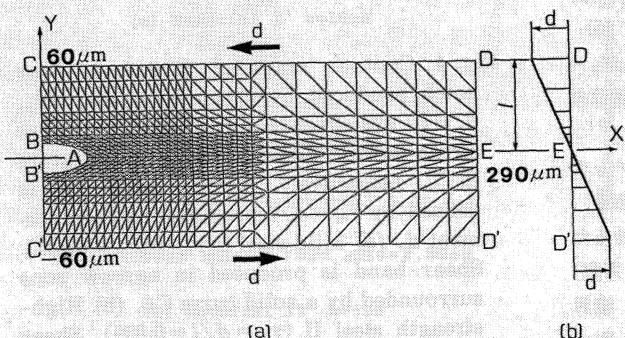


Fig. 3 Mesh division used for simple shear deformation.
(a) Elliptical notch in a rectangular body. (b) Boundary displacements imposed along boundary DED'.

境界 CD に与える接線方向変位量は、衝突によって生じるものであるから、実際は一様でなく、C から D の方向に弾性波速度で伝播し、応力波が境界 CD と C'D' 間を往復する。これを波動伝播で解析することは非常に複雑である。またせん断帯が破局的な高速で伝播する最終段階ではなく、せん断帯の発生と成長の初期段階を考察する。そう仮定すれば、運動方程式に含まれる慣性項の影響は小さいと考えられ、慣性項を省略した平衡方程式を用いて考察できる。

材料力学特性には、高ひずみ速度における断熱状態の応力-ひずみ線図を用いる。高ひずみ速度下の材料特性を使用することにより、材料のひずみ速度依存性は考慮される。また、断熱状態の材料特性を使用することにより、塑性変形による熱の発生、そして、その熱による材料の軟化は応力-ひずみ線図に陰として含まれ考慮される。しかし熱の伝導による温度降下は全く考慮されない。

2・3 断熱状態の応力-ひずみ線図

高ひずみ速度下における、断熱状態の応力-ひずみ線図を、Fig. 2 に示した⁷⁾。これは Lindholm らによって得られたせん断応力-せん断塑性ひずみ線図を⁸⁾、相当応力 ($\bar{\sigma} = \sqrt{3}\tau$) と相当塑性ひずみ ($\bar{\varepsilon}_p = \gamma_p/\sqrt{3}$) の関係を用いて再整理した相当応力-相当塑性ひずみ線図で、ひずみ硬化と遷移点とひずみ軟化の 3 領域を持つ。断熱状態の応力-ひずみ線図は、

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0(1+\alpha\bar{\varepsilon}_p)\exp(-\beta\bar{\varepsilon}_p) \quad (1)$$

と表される。 $\bar{\sigma}$ は相当応力で、 $\bar{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみで、以下の材料特性値はひずみ速度が、 $\dot{\gamma}=10^3/\text{s}$ の場合の値である。軟鋼の場合、降伏点相当応力は $\bar{\sigma}_0=379.3 \text{ MPa}$ 、係数は $\alpha=4.43$ 、 $\beta=1.16$ 、遷移点相当塑性ひずみは $\bar{\varepsilon}_{p1}=0.64$ 、そのときの最大相当応力は $\bar{\sigma}_{\max}=692.4 \text{ MPa}$ である。この材料を材料特性 I と表記する。高張力鋼 (HY-TUF) の場合、降伏点相当応力は $\bar{\sigma}_0=1558.3 \text{ MPa}$ 、係数は $\alpha=13.6$ 、 $\beta=7.24$ 、遷移点相当塑性ひずみは $\bar{\varepsilon}_{p1}=0.065$ 、最大相当応力は $\bar{\sigma}_{\max}=1869 \text{ MPa}$ である。この材料を材料特性 II と表記する。材料特性 I、II を Fig. 2 に実線で示す。

傾斜ゼロの遷移点およびその後のひずみ軟化の材料力学特性が、せん断帯の形成と成長にどのような影響を与えるかを調べるために、ひずみ軟化を示さない n 乗則加工硬化型材料特性の場合も解析し、断熱型材料特性の場合の解と比較した。 n 乗則加工硬化型材料特性は、熱伝導によって降下した等温状態の応力-ひずみ線図とも考えられる。

$$\bar{\sigma} = C(\bar{\varepsilon}_p + \delta)^n \quad (2)$$

で表す。軟鋼の場合 $C=768 \text{ MPa}$ 、 $\delta=0.0303$ 、

$n = 0.202$ で、高張力鋼の場合 $C = 2240 \text{ MPa}$, $\delta = 0.005$, $n = 0.0649$ で、Fig. 2 に破線で示す。

2・4 塑性変形による発生熱

外力のなした仕事の 95% 程度が塑性変形による熱に変換されると一般に考えられている。固体の温度上昇は断熱状態と仮定した場合、式(1)を用いて、

$$\begin{aligned} \Delta T &= k \int \bar{\sigma} d \bar{\varepsilon}_p / (\rho_0 C_p J) \\ &= \frac{k}{\rho_0 C_p J} \left[\frac{\alpha + \beta}{\beta} - \left(\frac{\alpha + \beta}{\beta} + \alpha \bar{\varepsilon}_p \right) \exp(-\beta \bar{\varepsilon}_p) \right] \frac{\bar{\sigma}_0}{\beta} \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。 ΔT は上昇温度で $^{\circ}\text{C}$, ρ_0 は密度で 7.86 g/cm^3 , C は比熱で $0.106 \text{ cal/g} \cdot \text{deg}$, J は熱の仕事当量で 4.186 J/cal , k は塑性仕事の熱変換率で 0.95 とする。材料特性 I と II における上昇温度を Fig. 2 に点線で示す。

3. 数値解析

ノッチ付直方体中に生じるせん断帯の生成と成長を弾塑性有限要素法で数値解析する。直方体の材料は等方性と考え、von Mises の降伏条件と Prandtl-Reuss の増分理論に従うと仮定する¹⁶⁾。変形は境界に変位量を与える二次元平面ひずみ問題として扱い、微小変形理論で解析する^{17), 18)}。分割した要素は三角形で、変位関数には線形内挿多項式を用いる。材料の力学特性には式(1)と(2)の構成方程式を用い、Swedlow が開発した弾塑性有限要素法のプログラムを修正して用いた^{6), 19), 20)}。ヤング係数とポアソン比は、鉄系材料を想定して、 $E = 2.067 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.28$ の値を用いた。加工硬化係数 H にはひずみ軟化の場合も、

$$H = (\bar{\sigma} - \bar{\sigma}^*) / (\bar{\varepsilon}_p - \bar{\varepsilon}_p^*) \quad (4)$$

で定義する。 $\bar{\sigma}^*$ と $\bar{\varepsilon}_p^*$ は計算中に得られる値で、構成方程式 $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon}_p)$ から必ず少しあれる。 $\bar{\sigma}$ と $\bar{\varepsilon}_p$ は構成方程式 $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon}_p)$ を満足する値で、両者の間には、

$$\bar{\varepsilon}_p = \bar{\varepsilon}_p^* + \Delta \bar{\varepsilon}_p \quad (5)$$

の関係がある。 $\Delta \bar{\varepsilon}_p$ は微小増分塑性ひずみ量で、 $\Delta \bar{\varepsilon}_p = 0.001$ 程度のひずみ量である。各節点の変位増分量はガウス消去法で求める。

ノッチ付長方形の要素分割を Fig. 3 に示す。ノッチは幅が $20 \mu\text{m}$ で、深さが $30 \mu\text{m}$ の半だ円形である。境界 CD と C'D' には単純せん断変形を起こせるため、方向は異なるが同一量の一様な接線方向(X 方向)変位量が与えられる。Y 方向には移動しない。境界 DD' には長方形が X 方向に無限に存在するよう、Fig. 3 (b) に示すような線形に変化する変位量を X 方向に与える。Y 方向には移動しない。境界 CC' は自由表面で、境界 BAB' は表面クラックに相当すると考え、拘

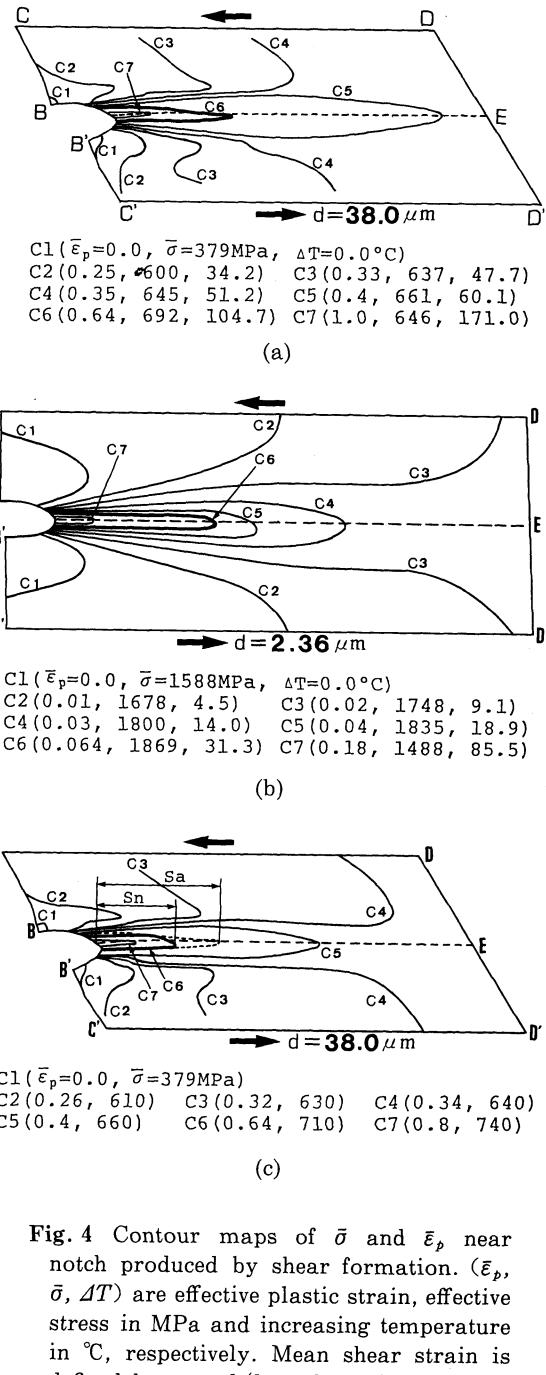


Fig. 4 Contour maps of $\bar{\sigma}$ and $\bar{\varepsilon}_p$ near notch produced by shear formation. ($\bar{\varepsilon}_p$, $\bar{\sigma}$, ΔT) are effective plastic strain, effective stress in MPa and increasing temperature in $^{\circ}\text{C}$, respectively. Mean shear strain is defined by $\gamma_m = d/l$ produced by displacement d . (a) Mild steel I ($\gamma_m = d/l = 0.633$). Shear band is produced in narrow zone surrounded by a solid curve C6. (b) High-strength steel II ($\gamma_m = d/l = 0.039$). Shear band is shown by a solid curve C6. (c) Monotonic work-hardening curve I ($\gamma_m = d/l = 0.633$). Dotted line shows propagation of the shear band in case (a).

束条件なしとする。長方形寸法は幅 $120 \mu\text{m} \times$ 長さ $290 \mu\text{m}$ で、要素総数は 1282、節点総数は 695 である。なお Fig. 3 のノッチ付長方形の形状は軸 AE に関し対称であるが、せん断変形させると軸対称性を失うので、長方形全体を要素分割する必要がある。

4. 解析結果と考察

断熱状態の軟鋼の材料特性 I の場合と、高張力鋼の材料特性 II の場合と、軟鋼でひずみ軟化を示さない n 乗則加工硬化型の場合の、長方形のせん断変形を Fig. 4 (a), (b), (c) に示す。同図には、それぞれ接線方向変位量が $d=38.0 \mu\text{m}$ ($\gamma_m=0.633$), $d=2.36 \mu\text{m}$ ($\gamma_m=0.039$), $d=38.0 \mu\text{m}$ ($\gamma_m=0.633$) の時の、等相当応力および等相当塑性ひずみ線図が示されており、Fig. 4 (a) と (b) には上昇温度も記載されている。 d に付記された γ_m は境界 DED' 上の平均せん断ひずみ量で、 $\gamma_m=d/l$ で定義する。ただし l は接線方向変位 d を与える位置とノッチとの距離 DE (Fig. 3 (a)) である。

ノッチ先端から内部まで奥深く、ノッチの深さ方向の限られた狭い領域に変形が集中して生じる。他の領域では変形は比較的小さく、2自由表面で構成されるノッチ入口の角部 B では、変形は極端に小さく塑性変形ゼロの領域も存在する。ノッチから相当離れた内部 DD' 近傍では、境界 DED' 上の強制的に与えた変位条件によって一様なせん断変形を受ける。

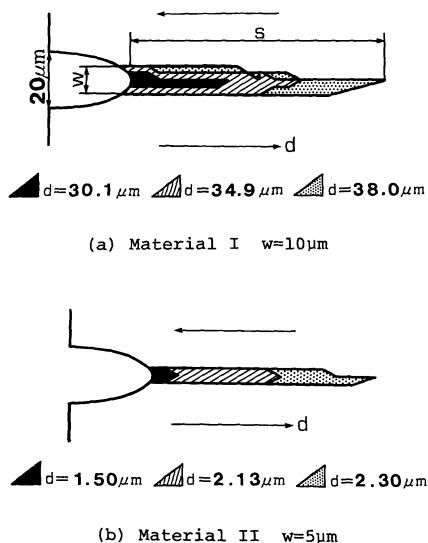


Fig. 5 Progression of the instability area $\bar{\varepsilon}_{pi}$ and width of the shear band w is shown on undeformed rectangular body with the increment of displacement d .

4・1 材料特性 I

材料特性 I の軟鋼について考察する。Fig. 4 (a) 中の太実線で記載されている曲線は、相当応力が $\bar{\sigma}=692 \text{ MPa}$ で、相当塑性ひずみが $\bar{\varepsilon}_p=0.64$ の等応力等ひずみ曲線で、遷移点に相当する。この曲線で囲まれた狭い領域の外では、塑性変形が増加するにつれ相当応力も増加するが、逆にその狭い領域の内では、変形が遷移点ひずみを超えるので、塑性変形が増加しても相当応力は減少する。著者らはこの応力の減少する狭い領域をせん断帶と定義する。せん断帶の内部の温度上昇は 100°C 以上で、ノッチ先端では $\bar{\varepsilon}_p=1.16$ にもなるので、最高 198°C に達する。

せん断帶と定義する塑性不安定域の進行図を Fig. 5 (a) に、変形前の初期形状上に記述する。これは接線方向変位量 d を増加させていったとき、遷移点ひずみ $\bar{\varepsilon}_{pi}$ に達した要素の分布図で、せん断帶の進行を示している。変位量 d が $30.1 \mu\text{m}$ ($\gamma_m=0.502$) のとき、せん断帶の幅は $w=5 \mu\text{m}$ で深さは $s=35 \mu\text{m}$ である。変位量 d をさらに増加させると、せん断帶の幅も深さも増加する。変位量が $d=38.0 \mu\text{m}$ ($\gamma_m=0.633$) にな

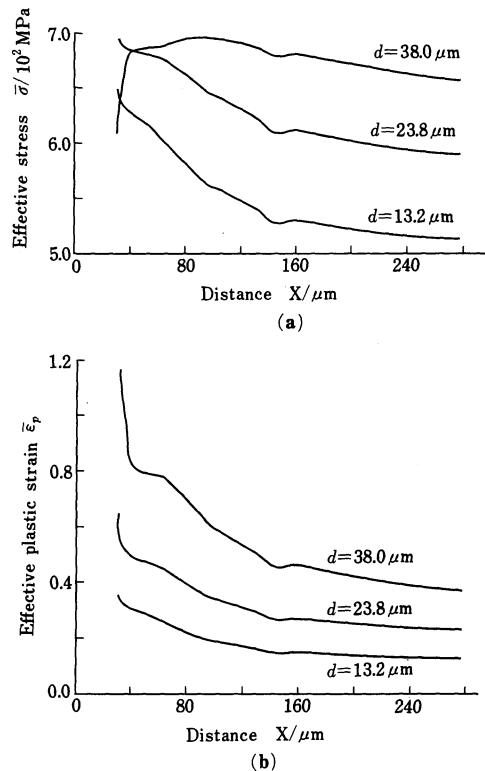


Fig. 6 Distributions of (a) stress $\bar{\sigma}$ and (b) plastic strain $\bar{\varepsilon}_p$ for mild steel I along the shear band at $Y=0$ in Fig. 3 (a).

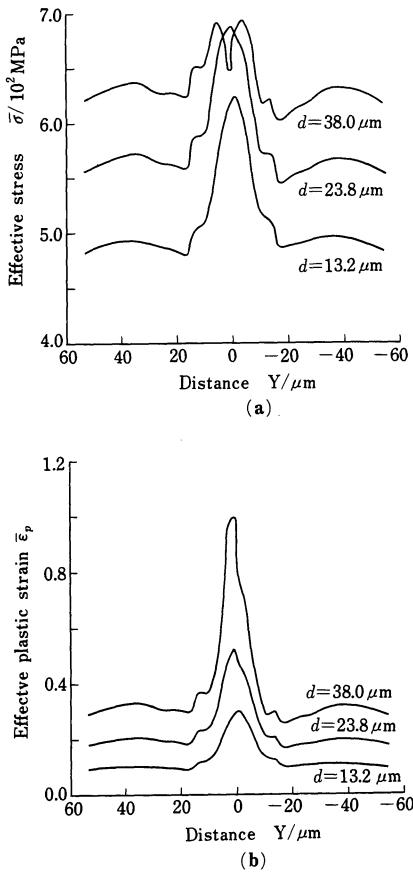


Fig. 7 Distributions of (a) stress $\bar{\sigma}$ and (b) plastic strain $\bar{\epsilon}_p$ for mild steel I across the shear band at $X = 52.0 \mu\text{m}$ in Fig. 3 (a).

ると、幅は $w = 10 \mu\text{m}$ ではほぼ一定になり、深さは $s = 90 \mu\text{m}$ にも達する。

せん断帯に沿う方向の相当応力および相当塑性ひずみ分布を Fig. 6 に、せん断帯を横切る方向の分布を Fig. 7 に示す。Fig. 6 を考察するに、塑性変形はノッチ軸方向に奥深く分布している。接線方向変位量 d が増加するにつれ、応力と塑性ひずみは増大する。変位量 d が $23.8 \mu\text{m}$ ($\gamma_m = 0.397$) に達すると、ノッチ先端の一要素のみが遷移点に達し、さらに増加させると、その近傍の要素がつぎつぎと遷移点に達し、塑性不安定域に入る。その結果、Fig. 7 (b) に示すように、ノッチ先端近傍では塑性ひずみは急激に増大するが、Fig. 7 (a) に示すように応力は逆に減少する。Fig. 7 はノッチ先端から $52 \mu\text{m}$ の所の、せん断帯を横切る方向の分布図である。変位量 d が $23.8 \mu\text{m}$ までの場合は、応力も塑性ひずみもともに増大するが、 d が $23.8 \mu\text{m}$ を超すと、ノッチ先端の要素がつぎつぎと遷移点に達し、塑性不安

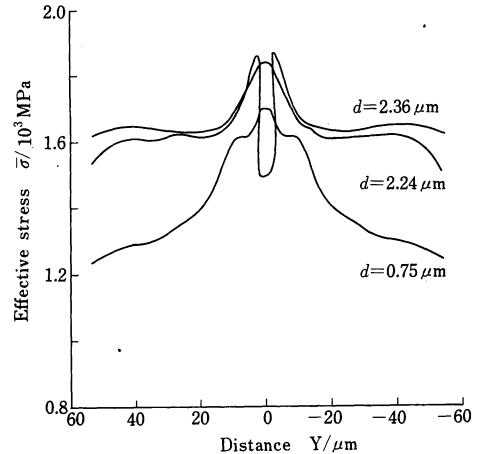


Fig. 8 Distributions of stress $\bar{\sigma}$ for high-strength steel II across the shear band at $X = 52.0 \mu\text{m}$ in Fig. 3 (a).

定域に入る。その結果、Fig. 7 (b) に示すように塑性ひずみは急激に増大し、パルス状の分布を形成するが、応力は Fig. 7 (a) に示すように減少して、応力の谷を形成する。これがせん断帯内部のひずみ軟化を示している。

4・2 材料特性 II

材料特性 II の高張力鋼について考察する。接線方向変位量が $d = 2.36 \mu\text{m}$ ($\gamma_m = 0.039$) のときの、応力と塑性ひずみと温度分布を Fig. 4 (b) に示す。応力または塑性ひずみの分布は、Fig. 4 (a) に示す材料特性 I の場合と同様で、変形はノッチ先端から奥深く、非常に狭い限られた領域に集中しており、太実線に囲まれた帶状の狭い領域がせん断帯に相当する。接線方向変位量 d を増大させたときの、塑性不安定域の進行を Fig. 5 (b) に示す。接線方向変位量 d を増加させても、せん断帯の幅はほぼ一定で $5 \mu\text{m}$ 程度と考えられる。せん断帯を横切る方向の応力の分布を Fig. 8 に示す。材料特性 I における Fig. 7 (a) と同様、せん断帯内部では応力が減少し軟化している。

生成されるせん断帯の幅を材料特性から検討すると、高張力鋼の材料特性 II の方が、軟鋼の材料特性 I の場合よりも狭い。これを Fig. 2 の応力-ひずみ線図で考察すると、遷移点近傍の応力値があまり変化せず、なだらかに変化する材料特性の方がせん断帯の幅は広い。

4・3 せん断帯の進行

材料特性を軟鋼に想定して、ひずみ軟化を示さない n 乗則加工硬化型(2)式で接線方向変位量が $d = 38.0 \mu\text{m}$ ($\gamma_m = 0.633$) のときの解析結果を Fig. 4 (c) に示す。太実線で示されている等塑性ひずみ線図は、相当塑性ひ

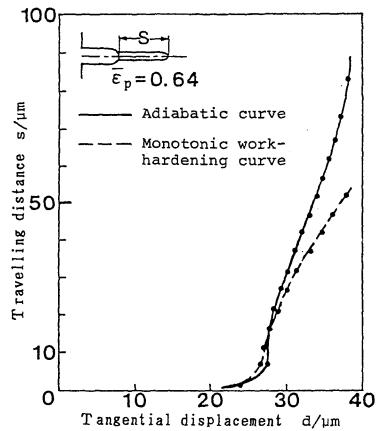


Fig. 9 Comparison of length of shear band between adiabatic stress-strain curve I and monotonic work-hardening one.

ずみ $\bar{\epsilon}_p$ が 0.64 で、相当応力 $\bar{\sigma}$ が 710 MPa である。この値は断熱型材料特性 I の遷移点の値にはほぼ一致する値である。この曲線に囲まれた領域内部では、Fig. 4 (a) とは逆に塑性変形が増加するにつれ応力も増加し、加工硬化を示す。

Fig. 4 (a) に示されたせん断帯に相当する太実線を Fig. 4 (c) に破線で示す。材料特性を断熱型に仮定したときのせん断帯の深さは、破線から $S_a = 90 \mu\text{m}$ で、 n 乗則加工硬化型に仮定したときの等塑性ひずみ曲線 ($\bar{\epsilon}_p = 0.64$) の最深距離は、太実線から $S_n = 55 \mu\text{m}$ となる。塑性変形は n 乗則加工硬化型よりも断熱型の方が、内部により深く侵入している。これは破線で示されたせん断帯内では塑性変形が増大しても外力を支える応力は減少するので、一種のノッチ侵入と考えられ、この侵入によってさらに内部の変形が進行すると考えられる。

接線方向変位量 d を変化させたときの、塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p (= 0.64)$ の最深到達距離 S_n と S_a の比較を Fig. 9 に示す。接線方向変位量が $d = 21 \mu\text{m}$ ($\gamma_m = 0.35$) になると、ノッチ先端に塑性不安定域が発生する。さらに変位量 d を増加させると、材料特性に関係なく、到達距離 S は増大する。すなわち、せん断変形が初期段階の場合、材料特性に関係なくほぼ同じ速度で進行することを示している。接線方向変位量 d が $28 \mu\text{m}$ ($\gamma_m = 0.467$) 以上になると、材料特性が n 乗則加工硬化型の場合、Fig. 9 の点線のように上に凸の形で増大する。それに比べ、断熱型材料特性の場合、実線で示すように上に凹の形で増大し、断熱せん断帯の方が急激に増大する。すなわち、せん断帯の方が n 乗則加工硬化型材料特性の塑性ひずみ進行よりも速く伝播することを示しており、両者の差はますます増大し、最終段階ではせん断

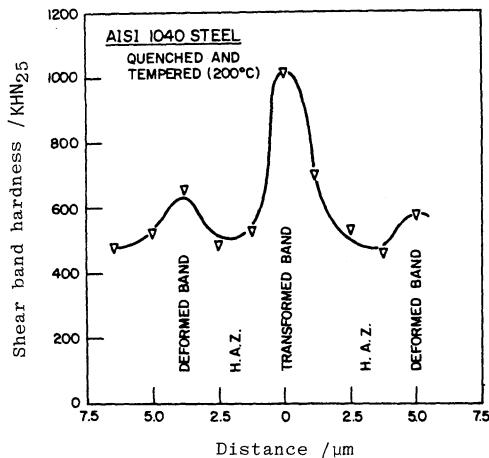


Fig. 10 Profile of the microhardness across a transformed shear band in AISI 1040 quenched and tempered at 200°C²¹. KHN₂₅ shows hardness obtained by using a Knoop indenter with a 25 gram load, and transversal axis shows distance from a center of shear band in μm.

帶は破局的な速度で伝播するであろうと推測される。

4・4 せん断帯の熱軟化

せん断帯内部では解析結果 Fig. 7 (a) と Fig. 8 が示すように、応力が減少し、ひずみ軟化を示す応力の谷が形成される。研究者が熱軟化によってせん断帯内部では応力が減少するであろうと考えてきた。その考え方を力学面から具体的に示した解析結果で、せん断帯の特性を顕著に表している。Rogers と Shastry によって得られた実験結果を Fig. 10 に示す²¹。これはせん断帯を横切る方向の硬さ分布で、AISI 1040 鋼における相変態を伴うせん断帯の実験結果である。せん断帯中央に非常に硬い領域があり、マルテンサイトの相変態が生じたのであろう。その両側に変形せん断帯が存在し、少し硬さの増す領域がある。硬さ分布図は外輪山を伴う火山のような形をしている。これはまず塑性変形によるせん断帯が Fig. 7 (a) や Fig. 8 に示すように形成され、せん断帯中央部は熱軟化し、ひずみ硬化による外輪山が残留する。つぎにさらに変形が進行すると、塑性変形による発生熱が増大し、高温になって相変態を起こす、その結果中央部の硬度が増大すると説明できる。

5. 結 言

断熱状態の応力-ひずみ線図は、熱軟化によって傾斜が負の力学的不安定を示すと仮定し、ノッチ付直方体の単純せん断変形を弾塑性有限要素法を用いて解析し、断

熱せん断帯の発生と成長を考察した。解析ができるだけ簡単化するため、材料特性には断熱状態に近い高ひずみ速度下の応力-ひずみ線図を用い、材料のひずみ速度効果と熱発生と熱軟化は考慮されるが、熱伝導は考慮されず、また慣性項を省略した釣合方程式から考察した。以上の仮定のもとでせん断帯の発生・成長・伝播に関する重要な結論が得られた。

(1) 材料特性が断熱型の場合、ノッチ先端近傍にひずみが増加しても応力は硬化せず軟化する領域が現れる。このひずみ軟化領域を断熱せん断帯と定義する。ひずみ軟化領域（せん断帯）の応力値は変形するにつれ減少し、せん断帯先端近傍の要素はつぎつぎと軟化域に入る。しかしせん断帯前方の先端からかなり離れた要素はさらに加工硬化し、変形を続行させる外力と釣合う。ひずみ軟化領域の増大は応力値から考察すると、一種のノッチの侵入に相当し、これによってせん断帯は成長する。

(2) 断熱型材料特性で得られたせん断変形の等塑性ひずみ線図を n 乗則加工硬化型の場合と比較すると、遷移点ひずみ ε_p の到達する最深距離は、断熱型の方が固体内部により深く侵入しており、せん断帯は高速で伝播することを示している。

(3) せん断帯の幅は材料特性に影響を受ける。ノッチ幅が $20 \mu\text{m}$ に相当する半だ円形ノッチ形状の場合、せん断帯の幅は高張力鋼の場合 $5 \mu\text{m}$ 、軟鋼の場合 $10 \mu\text{m}$ で、ノッチ幅の半分以下である。

また有限要素法は、材料特性がひずみ硬化の場合だけでなく、ひずみ軟化の場合の解析にも利用できることが確認された。

終りに当り、この研究はニューメキシコ工科大学（米国）で成した仕事を、帰国後再開発させたものである。

米国滞在中、有益なる討論をいただいた Mr. H.A. Grebe と Dr. Han-ryong Pak (NMIMT) に、帰国後有益なる助言をいただいた中川威雄博士と宮内邦雄博士（理化学研究所）に厚くお礼申し上げます。また FEM プログラムの使用を許可してくださった Dr. J.L. Swedlow に、そして研究を助けてくださった高井 都（埼玉工大）と山本英史（芝浦工大）と那須俊明（日大）に感謝いたします。

参考文献

- 1) Rogers, H.C.: *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **9** (1979), 283.
- 2) Zener, C. & Hollomon, J.H.: *J. Appl. Physics*, **15** (1944), 22.
- 3) Recht, R.F.: *Trans. ASME J. Appl. Mechanics*, **86** (1964), 189.
- 4) Clifton, R.J.: Material Response to Ultra-High Loading Rates, NRC Rpt. NMAB-356 (1978).
- 5) Clifton, R.J., Duffy, J., Hartly, K.A. & Shawki, T.G.: *Scripta Metallurgica*, **18-5** (1984), 443.
- 6) Kuriyama, S. & Meyers, M.A.: *Mettall. Trans.*, **A**, **17** (1986), 443.
- 7) Olson, G.B., Mescall, J.F. & Azrin, M.: *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*, ed. by M.A. Meyers and L.E. Murr, (1981), 221, Plenum Press, New York.
- 8) Lindholm, U.S. & Johnson, G.R.: *Material Behavior under High Stress and Ultrahigh Loading Rates*, ed. by J. Mescall and V. Weiss, (1983), 61, Plenum Press, New York.
- 9) 竹内秀彦: 精密機械, **22-8** (1956), 24.
- 10) 工藤英明・坪内昌生・山崎 隆: 機論(第3部), **35-277** (1969), 1957.
- 11) 中川威雄: 生産研究, **27-7** (1975), 319.
- 12) Yamamoto, H.: *Int. J. Frac.*, **14-4** (1978), 347.
- 13) Wada, M., Nakamura, T. & Kinoshita, N.: *Phil. Mag. A*, **38-2** (1978), 167.
- 14) 北川 浩・松下尚史: 機論 A, **51-469** (1985), 2216.
- 15) Grebe, H.A., Pak, H-r. & Meyers, M.A.: *Mettall. Trans.*, **A**, **16** (1985), 761.
- 16) Johnson, W. & Mellor, P.B.: *Plasticity for Mechanical Engineers*, (1974), 56, 培風館.
- 17) 山田嘉昭: マトリックス法の応用, (1972), 149, 東京大学出版会.
- 18) Kuriyama, S., Hayashi, H. & Yoshida, K.: Proc. 4th Internat. Conf. Production Engineering, (1980, Tokyo), 38.
- 19) Swedlow, J.L.: *Computers and Structures*, **3** (1973), 879.
- 20) Kuriyama, S. & Meyers, M.A.: *Macro-Micro-Mechanics of High Velocity Deformation and Fracture (IUTAM)*, ed. by K. Kawata and J. Shioiri, (1985), 203, Springer-Verlag, Berlin.
- 21) Rogers, H.C. & Shastry, C.V.: *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*, ed. by M.A. Meyers and L.E. Murr, (1981), 285, Plenum Press, New York.