

Formation and propagation of Adiabatic Shear Band due to Simple Shear Deformation, by S. Kuriyama and H.A. Meyers, Proceeding of Spring Conf. Japan Soc. Tech. Plasticity, Nagoya, 289 (1985, in Japanese).

単純剪断による断熱剪断帯の発生と伝播について

校正 栗山慎鋒

M.A. Meyers

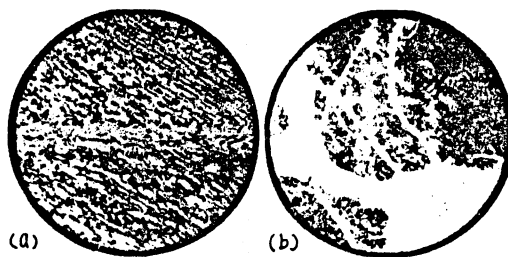
(理化学研究所)

(ニューメキシコ工科大学)

243

1. まえがき 固体が高速で衝突すると、断熱剪断帯が発生する。変形はこの剪断帯に局所的に集中し、最終的には破壊がこの剪断帯に沿って生じることが知られるようになった。断熱剪断帯の変形組織と金属学的に調べると、塑性変形だけで生じている場合と、相変態で生じている場合とがあるが、双方とも剪断帯内の変形は非常に大きく、変位量から推定すると、剪断帯内では溶融している可能性がある¹⁾。著者らはこの断熱剪断帯の発生と伝播を、力学面から考察する。断熱剪断帯は塑性変形に基づく材料特性の熱軟化によって生じると Zener²⁾ が最初に指摘し、Recht³⁾ は断熱状態の応力-ひずみ線図の塑性不安定条件から、Clifton⁴⁾ は摂動法を用いて、剪断帯の発生条件を考察した。また Olson⁵⁾ は差分表示式の HEMP コードを用いて、Lindholm⁶⁾ は有限要素法 EPIC-2 コードを用いて、剪断帯の形成と伝播とを数値解析したが、剪断帯先端近傍の応力やひずみ等の分布を解析するには到っていない。そこで著者らは、熱軟化による塑性不安定領域と有る応力-ひずみ線図(断熱状態)が存在すると仮定し、弾塑性有限要素法を用いて、剪断帯の伝播及び剪断帯先端近傍の応力とひずみの分布を解析する。

2. 断熱剪断帯 剪断帯は通常、単純引張り、単純剪断又は圧縮力が掛る剪断変形の場合に生じるが、伝播は主として剪断力によって生じると考えられている。著者の内の一人が得た剪断帯の実験結果を図1に示す。図(a)は Ti-6% Al-4% V の標的固体に生じた剪断帯で、剪断帯の幅は狭く 1~3 μ m 程度で、最大剪断応力方向に伝播している。それに引き替え、図(b)は鋼鉄の弾丸内に生じた剪断帯で、剪断帯の幅は比較的広く 1~100 μ m 程度もあり、伝播方向は定まっていない。金属材料の流動応力は、ひずみ及びひずみ速度が増加するにつれ硬化又は増大する。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、ひずみ又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。即ち、高いひずみ速度における応力-ひずみ線図は図2の如く、傾斜が正のひずみ硬化を示す力学的安定領域と、傾斜が負のひずみ軟化を示す塑性不安定領域とをもつ。



ひずみ硬化、遷移点、ひずみ軟化の3 図1 断熱剪断帯(a) Ti-6Al-4V (b) STEEL

領域を示す断熱状態の応力-ひずみ線図⁹⁾は

$$\tau = \tau_0 (1 + \alpha \delta_p) \exp(-\beta \delta_p) \quad (1)$$

で表示できる。高張力鋼(HY-TUF)で、ひずみ速度が $10^2/s$ の場合、係数 α 、 β は $\alpha = 7.85$ 、 $\beta = 4.18$ 、降伏剪断応力は $\tau_0 = 917 \text{ MPa}$ 、遷移剪断塑性ひずみは $\delta_{pi} = 0.112$ 、最大剪断応力は $\tau_{max} = 1079 \text{ MPa}$ となる。式(1)と相当応力 $\bar{\sigma}$ 、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ で表示すると、

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 (1 + \alpha' \bar{\epsilon}_p) \exp(-\beta' \bar{\epsilon}_p) \quad (2)$$

となり、 $\bar{\sigma}_0 = 1588.3 \text{ MPa}$ 、 $\alpha' = 13.6$ 、 $\beta' = 7.24$ 、 $\bar{\epsilon}_{pi} = 0.0646$ 、 $\bar{\sigma}_{max} = 1868.9 \text{ MPa}$ である。傾斜ゼロの遷移点及びその後のひずみ軟化の材料特性が、剪断帯の形成と伝播にどの様な影響を与えるかと調べる為、ひずみ軟化を示さない加工硬化形材料特性を

$$\bar{\sigma} = 2240 (\bar{\epsilon}_p + 0.005)^{0.0649} \quad (3)$$

に仮定する。図2に点線で示す。

3. 数値解析

剪断帯の成形と初期の伝播状況

図3 FEM用要素分割図

と有限要素法で解析する為、形状に関して、図3に示すノッチ付矩形体の単純剪断変形を解析する。剪断帯は主として剪断力よって生じると考えられるので、剪断変形と選び、固体の自由表面の凹から応力集中によって、剪断帯が発生すると考え、ノッチ付矩形体を扱う。固体は衝撃を受けると、応力波が伝播し、加速度による慣性項が生じる。本報では、固体の全粒子は速度は異なるとしても、一定の速度で移動すると仮定し、

つり合い状態を想定する。また、塑性変形によって生じる熱は伝導しないと仮定する。その代り、固体の全要素の動的挙動は、断熱状態の高ひずみ速度における応力-ひずみ線図に沿って増大すると仮定する。

解析には弾塑性有限要素法を用いる^{7,9)}。固体の力学的特性はMisesの降伏条件と

Prandtl-Reussの増分理論に従うと仮定し、固体の変形挙動は境界に変位量を与える平面ひずみ状態とする。要素の形状は三角形で、線形内挿多項式は一次式である。要素の剛性マトリックスは

$$[K] = \Delta [T]^T [B] [D] [B] [T] \quad (4)$$

で、 Δ は要素の面積、 $[B][T]$ はひずみ-変位マトリックスである。 $[D]$ は材料特性マトリックスで、弾性変形の場合 α と0とし、弾塑性変形の場合 α と1と

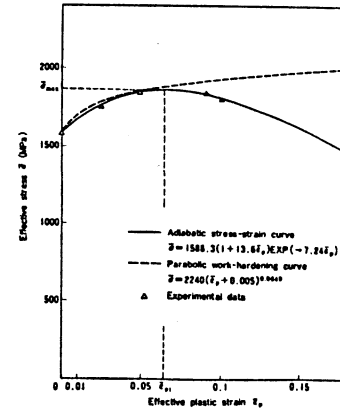


図2 応力-ひずみ線図

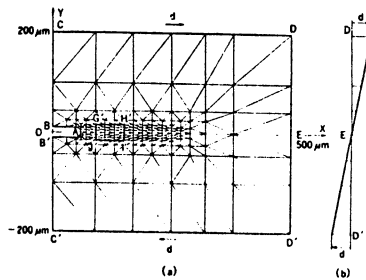


図3 FEM用要素分割図

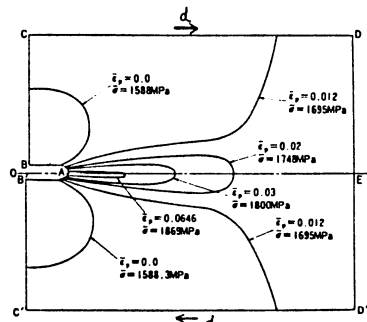


図4 剪断変形 $d = 6.87 \mu\text{m}$

すれば

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} - \alpha \frac{2G}{S_0} \begin{bmatrix} \sigma_x' & \sigma_x' \sigma_y' & \sigma_x' \tau_{xy}' \\ \sigma_y' & \sigma_y'^2 & \sigma_y' \tau_{xy}' \\ \tau_{xy}' & \sigma_y' \tau_{xy}' & \tau_{xy}'^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

と表わされ、 $S_0 = \frac{2\bar{\sigma}^2 H}{9G} + \frac{2\bar{\sigma}^2}{3}$ である。Eはヤング係数で $E = 2.067 \times 10^5 \text{ MPa}$ 、Gは剪断弾性係数、 ν はポアソン比で $\nu = 0.28$ 、 σ_x' と σ_y' は偏差応力である。加工硬化係数(加工軟化も含む)Hは $H = (\bar{\sigma} - \bar{\sigma}^*) / (\bar{\epsilon}_p - \bar{\epsilon}_p^*)$ で定義する。但し、 $\bar{\sigma}^*$ と $\bar{\epsilon}_p^*$ は計算過程で得られる値で、 $\bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}_p$ は構成方程式(2)又は(3)を満たす値で、 $\bar{\epsilon}_p = \bar{\epsilon}_p^* + \Delta \bar{\epsilon}_p$ ($\Delta \bar{\epsilon}_p = 0.001$ 程度の入力値)の関係がある。式(4)の剛性マトリックスを各要素毎に作成し、構造全体の剛性マトリックスを組み立てた後、ガウス消去法で各節点の変位増分を求めらる。

ノッチ付矩形体の形状 ($400\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$)、要素分割(318要素, 176節点)及び境界条件を図3(a)に示す。ノッチの幅 $B B'$ は $20\mu\text{m}$ で、深さ BA は $60\mu\text{m}$ 、ノッチ先端の形状Aは半径 $10\mu\text{m}$ の半円である。境界 $C B B' C'$ は自由表面で、境界 $C D$ と $C' D'$ には剪断方向の変位 d が与えられる。この変位によって固体は単純剪断変形を起す。半無限長の矩形体を想定して、境界 $D E D'$ に図(b)に示す変位をX方向に与える。なお境界 $C D E D' C'$ におけるY方向の境界条件は固定である。

4. 解析結果 剪断方向の変位 d が $6.87\mu\text{m}$ の場合の、矩形体の変形及び相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ の分布を図4に示す。変形はノッチ近傍とノッチの深さ方向に深く分布し、他の領域では比較的小さい。そこでノッチ近傍の応力とひずみの分布を図5に再掲載する。材料特性はひずみ軟化を示す式(2)に従う固体の場合で、図中の実太線は遷移点に相当する等塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_{pl}$ 線図である。実太線内部では塑性ひずみは増大するが、応力は減少し、ひずみ軟化現象を示している。断熱剪断帯と考えられる。剪断帯先端の応力とひずみの分布を詳細に検討する為、図3(a)に示す領域 $G' H' E' J'$ を分割要素数がさらに8倍になるように細かく再分割する。図3(a)で得られた線素 $G' H' E' J'$ 上の変位と同じ変

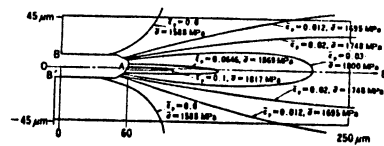


図5 剪断帯 $\bar{\epsilon}_{pl} = 0.0646$

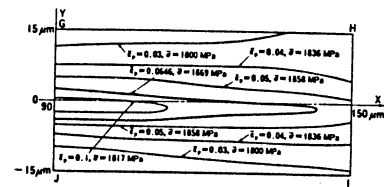


図6 剪断帯先端近傍

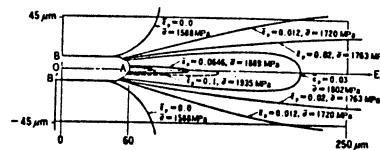


図7 塑性変形の進行 $\epsilon_p = 0.0646$

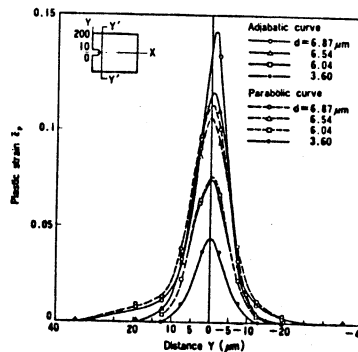


図8 塑性ひずみ分布

位置と境界 G H I J に与えて再解析する。この解析結果と図6に示す。剪断帯先端の応力とひずみの分布が示されるとともに、剪断帯の幅は $7\mu\text{m}$ と推定される。材料特性がひずみ軟化を示さない式(3)に従う材料の場合、ノッチ近傍の変形の分布を図7に示す。剪断方向変位が $d = 6.87\mu\text{m}$ の場合で、実太線内部でも応力は加工硬化によって増大する。点線は上述したひずみ軟化によって生じた剪断帯の伝播を示す。剪断方向変位 d が増大する時の、ノッチ先端 Y-Y' 断面における塑性ひずみ分布の変化を図8に示す。塑性変形はノッチ幅とほぼ等しい範囲に集中している。熱軟化を示す材料中の塑性ひずみは、 d が $6\mu\text{m}$ 以上になると、加工硬化形材料の場合に比べ、急激に増大する。剪断帯の到達位置の変化を図9に示す。 d が $6.0\mu\text{m}$ を越すと、剪断帯の到達距離が急激に増大し、高速で伝播することが推測できる。

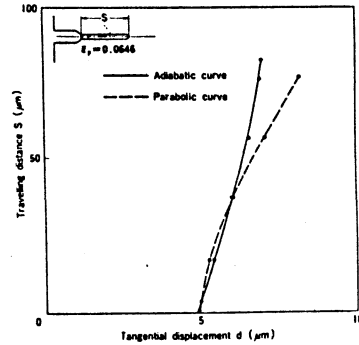


図9 剪断帯及び変形の進行

5. 結論 材料特性とひずみ軟化を示す断熱状態の応力-ひずみ線図とひずみ硬化だけを示す加工硬化形に仮定して、弾塑性有限要素法でノッチ付矩形体の変形を解析した。材料特性に関係なく、ノッチ先端近傍とノッチ深さ方向の領域だけに、非常に大きい塑性変形が生じる。材料特性が断熱状態の応力-ひずみ線図の場合、ノッチ先端近傍では塑性ひずみは増大するが、応力は逆に減少し、塑性不安定領域が存在した。これが断熱剪断帯に相当すると考えられる。剪断帯は剪断変形が初期の時、材料特性の軟化、硬化に関係なく、同じ速度で進行する。しかし、剪断方向の変位がある値(本報の場合、 $d = 6\mu\text{m}$)を越すと、ひずみ軟化によって生じる剪断帯は、加工硬化形材料における塑性進行速度よりも、急激に速く伝播する。剪断帯の伝播は遷移点の塑性不安定によって生じるから、剪断帯内で金属が溶融するかどうかは、剪断帯の発生及び伝播には関係なく、結果として剪断帯伝播後の塑性ひずみ量によって生じる。ノッチ幅が $20\mu\text{m}$ の場合、剪断帯幅は $7\mu\text{m}$ と推定される。

参考文献 1). H.C. Rogers, Ann. Rev. Mater. Sci., 283(1979). 2). C. Zener et al., J. Appl. Phys. 15, 22(1944). 3). R.F. Recht, Trans. ASME 86, 189(1964). 4). R.J. Clifton et al., Scripta Metallurgica 18, 443(1984). 5). G.B. Olson et al., Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals, edited by M.A. Meyers and L.E. Murr (Plenum Press, New York, 1981), p221. 6). U.S. Lindholm et al., J. Engin. Mater. Tech. 102, 376(1980). 7). J.L. Swedlow, Computers and Structures 3, 879(1973). 8). S. Kuriyama et al., Proc. 4th Inter. Conf. Prod. Eng. (Tokyo, 1980), p.38. 9). W. Johnson et al., Plasticity for Mechanical Engineers (D. Van Nostrand Company, 1962).