

# 極低温高速塑性加工に関する研究

京都大学大学院工学研究科

助手 小川 欽也

(平成10年度研究開発助成 AF-98016)

キーワード：断熱せん断帯，衝撃変形，低温加工

はじめに

金属等の塑性加工において、エネルギーの高効率化を達成するには、変形域を希望する領域内にできる限り局所化する必要があるが、これは同時に、塑性加工の微細化を実現することに繋がる。強度の温度依存性が大きい極低温域では塑性変形に伴う発熱が高強度の金属材料に局所的な加工軟化を引き起こし、断熱せん断帯に代表される局所変形をもたらすが、通常、変形帯内での大きな塑性変形による発熱が周辺に及び、そこでの加工軟化が引き起こされるため、周辺領域においても変形が生じる。しかしながら、熱伝導が顕著には生じない時間内での変形である高速変形においては、局所変形帯内での大変形のみを破壊や破断を伴わないで実現できる可能性があり、生産性にも優れた塑性加工法として極めて有望である。そこで、本研究では局所微細加工能ならびにエネルギーの高効率化の観点から、塑性加工の最も基本的な過程としてせん断加工を取り上げ、局所変形を積極的に利用した極低温高速塑性加工法の可能性を探る。

## 1. 断熱せん断帯の形成

### 1.1 基礎式

一般に金属材料のせん断応力  $\tau$  はひずみ  $\gamma$ 、ひずみ速度  $\dot{\gamma}$ 、温度  $T$  の関数として次のように表せる。

$$\tau = \tau(\gamma, \dot{\gamma}, T) \quad (1)$$

従って、加工硬化率は次式で表される。

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = \left(\frac{\partial\tau}{\partial\gamma}\right)_{\dot{\gamma}, T} + \left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\gamma, T} \frac{d\dot{\gamma}}{d\gamma} + \left(\frac{\partial\tau}{\partial T}\right)_{\gamma, \dot{\gamma}} \frac{dT}{d\gamma} \quad (2)$$

ここで、 $\left(\frac{\partial\tau}{\partial\gamma}\right)_{\dot{\gamma}, T}$  は等温、等ひずみ速度で

の応力-ひずみ曲線の勾配であり、

$\left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\gamma, T}$  と  $\left(\frac{\partial\tau}{\partial T}\right)_{\gamma, \dot{\gamma}}$  は、一定温度での応力

のひずみ速度効果と、一定ひずみ速度での応力の温度による変化(thermal softening)をそれぞれ表している。

Recht<sup>1)</sup> はカタストロフィックなせん断ひずみの局所化は  $d\tau/d\gamma = 0$  のときに生じるとしており、これは、Culver<sup>2)</sup>、Lindholm<sup>3)</sup>ら、Bai<sup>4)</sup> などによっても用いられている。すなわち、一定ひずみ速度での変形、あるいは、応力のひずみ速度依存性がない場合には、(2)式はつぎのようになる。

$$\left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\gamma, T} + \left(\frac{\partial\tau}{\partial T}\right)_{\gamma, \dot{\gamma}} \frac{dT}{d\gamma} = 0 \quad (3)$$

塑性変形によってなされた仕事が熱に変換することによって生じる温度変化  $\Delta T$  はつぎのように表せる。

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c_v} \int_0^\gamma \tau d\gamma \quad (4)$$

ここに、 $\rho$  と  $c_v$  は密度と比熱であり、 $\beta$  は通常 0.9 程度の定数と考えられる。

断熱的な状態では、(3)、(4)式より次式が得られる。

$$\left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\gamma, T} + \frac{\beta\tau}{\rho c_v} \left(\frac{\partial\tau}{\partial T}\right)_{\gamma, \dot{\gamma}} = 0 \quad (5)$$

ひずみ硬化を表す第1項は正で、軟化を表

す第2項  $(\partial\tau/\partial T)_{\gamma, \dot{\gamma}}$  は負である。従って、加工

硬化率が大きい場合には変形の局所化は起こりにくい、加工硬化率が小さい場合にはそれが顕著になることが予測できる。また、応力の温度依存性が大きい場合や、高応力の場合にも、変形の不安定(変形の局所化)が生じやすいことが分かる。

このような変形の不安定が生じて、変形が局的に進行しはじめると、そこでの温度上昇が

激しくなるため、ますます変形が集中し、いわゆるせん断帯を形成することになる。

(5)式では一様変形部分での発熱によって断熱的に変形が局所化し始める条件を示したが、Argon<sup>5)</sup>は、熱伝導を考慮に入れて、せん断帯の形成過程での温度上昇を次のように表した。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\beta\tau\dot{\gamma}}{\rho c_v} \cdot \frac{\rho c_v}{k} \cdot \frac{w^2\dot{\gamma}}{\gamma} = \left( \frac{\beta\tau\dot{\gamma} w^2}{k\gamma} \right) \dot{\gamma} \quad (6)$$

ここで、 $w$ はせん断帯の幅、 $k$ は熱伝導率である。

いま、塑性ひずみ速度が Arrhenius(アーレニウス)型の次式で表されるとする。

$$\dot{\gamma}_p = \dot{\gamma}_0 \exp\left(-\frac{\Delta H(\tau)}{RT}\right) \quad (7)$$

ここに、 $\dot{\gamma}_0$ は定数、 $\Delta H$ は活性化エネルギー、 $R$ はガス定数である。(7)式より

$$\left(\frac{\partial\tau}{\partial T}\right)_{\dot{\gamma}} = -\frac{\Delta H(\tau)}{RT^2} \left(\frac{\partial\tau}{\partial \ln\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T} \quad (8)$$

$$\Delta H(\tau) = RT(\ln\dot{\gamma}_0 - \ln\dot{\gamma}_p) \quad (9)$$

が得られる。従って、(5)式は

$$\left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T} - \frac{\Delta H(\tau)}{RT^2} \left(\frac{\beta\tau}{\rho c_v}\right) \left(\frac{\partial\tau}{\partial \ln\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T} = 0 \quad (10)$$

と表される。

また、(6)式より

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{d\dot{\gamma}} \left(\frac{d\dot{\gamma}}{dt}\right) = \dot{\gamma} \frac{dT}{d\dot{\gamma}} \quad (11)$$

であることを利用すると、熱伝導の効果も考慮した(6)式を用いた場合の(3)式は次のようになる。

$$\left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T} - \frac{\Delta H}{RT^2} \cdot \frac{\beta\tau\dot{\gamma}_p w^2}{k\gamma_p} \left(\frac{\partial\tau}{\partial \ln\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T} = 0 \quad (12)$$

したがって、このような断熱せん断帯が形成される過程を含めて、応力とひずみ関係は(11)、(12)式の場合について、次のように与えられる。

$$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T} - \frac{\Delta H(\tau)}{RT^2} \left(\frac{\beta\tau}{\rho c_v}\right) \left(\frac{\partial\tau}{\partial \ln\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T}$$

(13)

$$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T} - \frac{\Delta H}{RT^2} \cdot \frac{\beta\tau\dot{\gamma}_p w^2}{k\gamma_p} \left(\frac{\partial\tau}{\partial \ln\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T}$$

$$= \left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T} - \frac{\Delta H(\tau)}{RT^2} \left(\frac{\beta\tau}{\rho c_v}\right) \beta' \left(\frac{\partial\tau}{\partial \ln\dot{\gamma}}\right)_{\dot{\gamma}, T}$$

(14)

$$\text{ここに、} \beta' = \left(\frac{\rho c_v \dot{\gamma} w^2}{k\gamma}\right) \text{である。}$$

$\beta'$ が1に比べて小さい場合には、熱伝導の効果を検討することが必要であるが、それ以外では、断熱条件が成立しているとして(13)式を用いて応力ひずみ関係を論じることができる。

## 1.2. 数値シミュレーション

図1に示すせん断試験を想定し、せん断応力—せん断ひずみ関係を求める。 $\beta$ —チタン合金の応力—ひずみ関係は温度およびひずみ速度の履歴には依存せず、温度およびひずみ速度に依存する応力の熱的成分 $\sigma^*$ は温度—ひずみ速度パラメータ $\xi = RT(\ln\dot{\epsilon}_0 - \ln\dot{\epsilon})$ のみの、また、温度およびひずみ速度に依存しない応力の非熱的成分 $\sigma_\mu$ はひずみのみの関数としてそれぞれ次のように表せる<sup>6,7)</sup>。

$$\sigma^* = \sigma_0 \left(1 - \left(\frac{\xi}{\xi_0}\right)^p\right)^q \quad (15)$$

$$\sigma_\mu = C_0 + C_1 \epsilon^m \quad (16)$$

ここに、 $\xi = RT(29 - \ln\dot{\epsilon})$ 、であり、 $\xi_0 (= 15000R)$ は $\sigma^* = 0$ となる $\xi$ の値である。また、 $C_0 = 650\text{MPa}$ 、 $C_1 = 700\text{MPa}$ 、 $m = 1$ 、

$$p = 1/0.7, \quad q = 0.5 \quad \text{である。}$$

図2には、先に得られた圧縮試験結果<sup>7)</sup>を用いて、せん断ひずみ速度 $10^4\text{s}^{-1}$ の場合について求めた応力—ひずみ関係と、変形中の温度変化をそれぞれ実線と鎖線で示した。ここに、 $\tau = \sigma/\sqrt{3}$ 、 $\gamma = \sqrt{3}\epsilon$ として、せん断応力、せん断ひずみを換算した。

加工硬化率が低く、かつ温度依存性が大きいチタン合金では、ここに見られるように、室温近辺の温度域での衝撃変形においても変形中の加工軟化が見られ、断熱せん断帯の形成が容易であることが分かる。したがって、低温での衝

撃変形では顕著なせん断帯の形成が予測されるが、低温での脆化によって亀裂が発生する虞があるため、実験的な検証が必要となる。

## 2 せん断変形試験

### 2.1 試験法および試験片

せん断試験は図1に示す二面せん断試験であり、準静的試験ではせん断試験治具をオートグラフに設置し、 $0.5\text{mms}^{-1}$ から $20\text{mms}^{-1}$ の速度でせん断を行った。衝撃せん断試験には、図3に示すスプリットホプキンソン棒型衝撃試験装置を用い、 $1\text{ms}^{-1}$ から $2\text{ms}^{-1}$ の速度でせん断を行った。せん断治具のクリアランス $d$ は $0.1\text{mm}$ であり、せん断ひずみ速度はそれぞれ、 $8.3 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ から $3.3\text{s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^4\text{s}^{-1}$ から $2 \times 10^4\text{s}^{-1}$ であった。

スプリット・ホプキンソン棒型衝撃試験法<sup>8)</sup>の原理は次の通りである。図3に示すように、同材質、同径の丸棒である打撃棒(Striker)、入力棒(Input bar)、出力棒(Output bar)が同軸上に並べられ、入力棒と出力棒との間に試験片が設置される。高压空気を用いて発射された打撃棒が時刻 $t=0$ で入力棒に衝突すると、打撃棒、入力棒にはそれぞれ衝撃持続時間 $T_1$ の応力波 $\sigma_I$ が縦弾性波速度 $C_0$ で伝播する。

図3中には縦弾性波の伝播の様子を $X-t$ 面で示す。入力棒中を伝わった入射応力波 $\sigma_I$ は、試験片の左端面に到達すると、一部が試験片に伝わり、残りが反射応力波 $\sigma_R$ として入力棒を左方へ伝播する。試験片に伝えられた応力波は塑性変形を起こしながら試験片の右端に到達し、一部は出力棒に透過応力波 $\sigma_T$ として伝えられ、残りは試験片中に反射される。この応力波は試験片の左端に達すると再び、一部が反射し、残りが入力棒へ伝えられる。

このとき、入力棒の右端での粒子速度 $V_1$ は、次式で与えられる。

$$V_1 = (\sigma_I - \sigma_R) / \rho C_0 \quad (17)$$

また、出力棒の左端での粒子速度 $V_2$ は同様に、

$$V_2 = \sigma_T / \rho C_0 \quad (18)$$

となる。これより、試験片の平均的なひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は次のように表せる。

$$\dot{\epsilon} = (V_1 - V_2) / L_0 = (\sigma_I - \sigma_R - \sigma_T) / \rho C_0 L_0 \quad (19)$$

ここに、 $L_0$ は試験片の長さである。したがって、

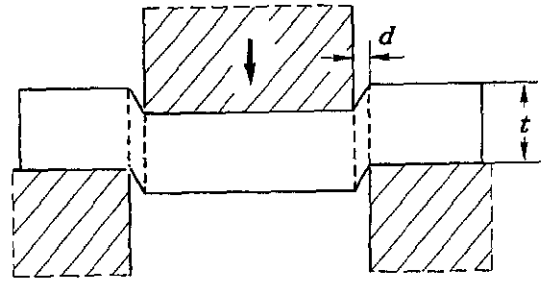


図1 二面せん断試験治具および試験片

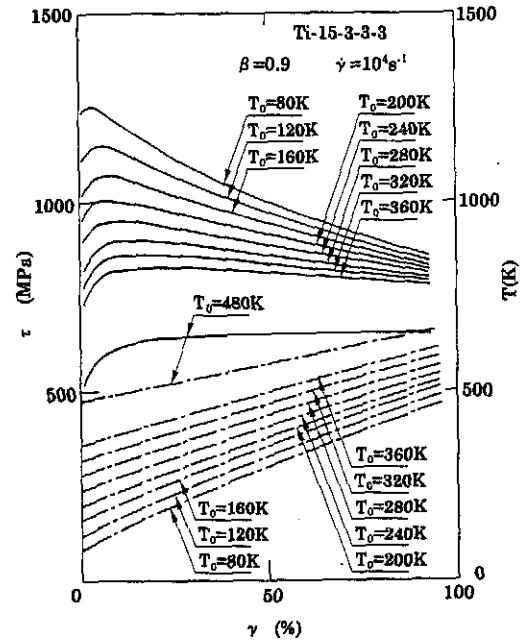


図2 衝撃せん断試験でのせん断応力-ひずみと温度変化(数値解析)  $T_0$ :初期温度

ひずみは次のように表せる。

$$\epsilon = \int \dot{\epsilon} dt = \int \frac{1}{\rho C_0 L_0} (\sigma_I - \sigma_R - \sigma_T) dt \quad (20)$$

(20)

試験片の入射側、透過側での応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ はそれぞれ、次のように与えられる。

$$\sigma_1 = (\sigma_I + \sigma_R) A_0 / A_T \quad \sigma_2 = \sigma_T A_0 / A_T \quad (21)$$

(21)

ここに、 $A_0$ 、 $A_T$ はそれぞれ応力棒と試験片の断面積である。したがって、試験片の応力としては、これらの平均値を用いて、

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1}{2} (\sigma_I + \sigma_R + \sigma_T) A_0 / A_T \quad (22)$$

(22)

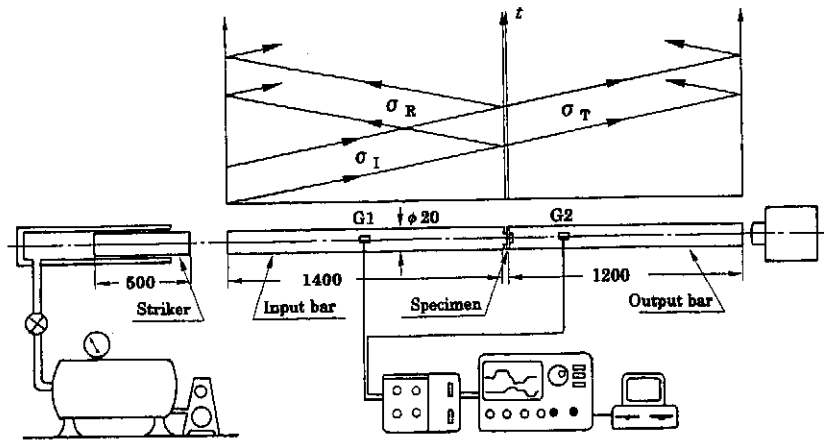


図3 スプリット・ホプキンソン棒型衝撃せん断試験装置 G1,G2:ひずみゲージ

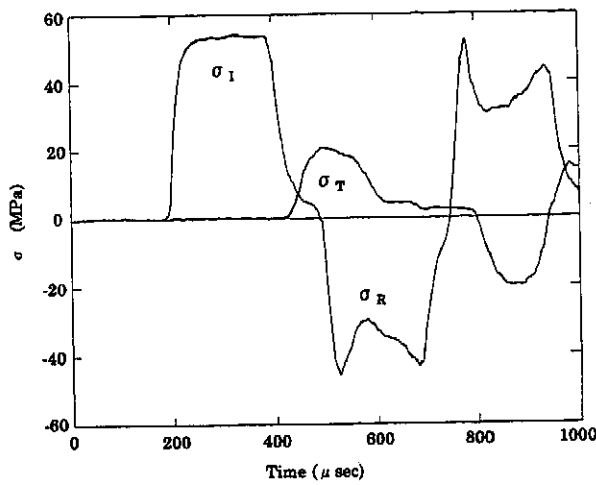


図4 入射, 反射, 透過応力波形

と与えられる。

試験片の両側での応力が等しい場合には、試験片のひずみ速度、ひずみ、応力は入射応力波と透過応力波のみによって表すことができる。

図1に示したせん断試験の場合には、せん断ひずみ速度、せん断ひずみ、せん断応力は、

$$\dot{\gamma} = 2(\sigma_I - \sigma_T) / \rho C_0 d$$

$$\gamma = \int \frac{2}{\rho C_0 d} (\sigma_I - \sigma_T) dt \quad (23)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \sigma_T (A_0 / Dt) \quad \text{と与えられる。}$$

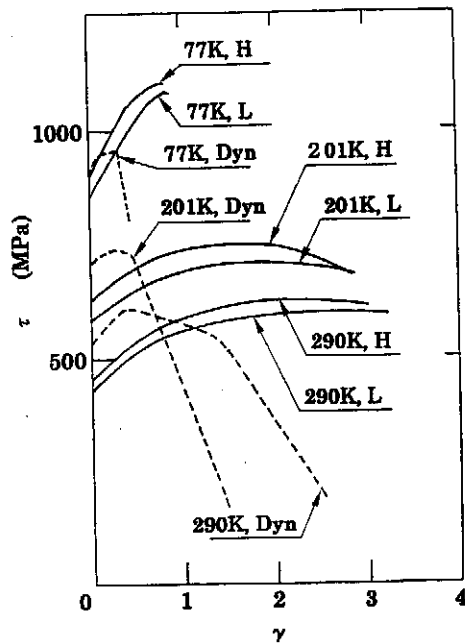
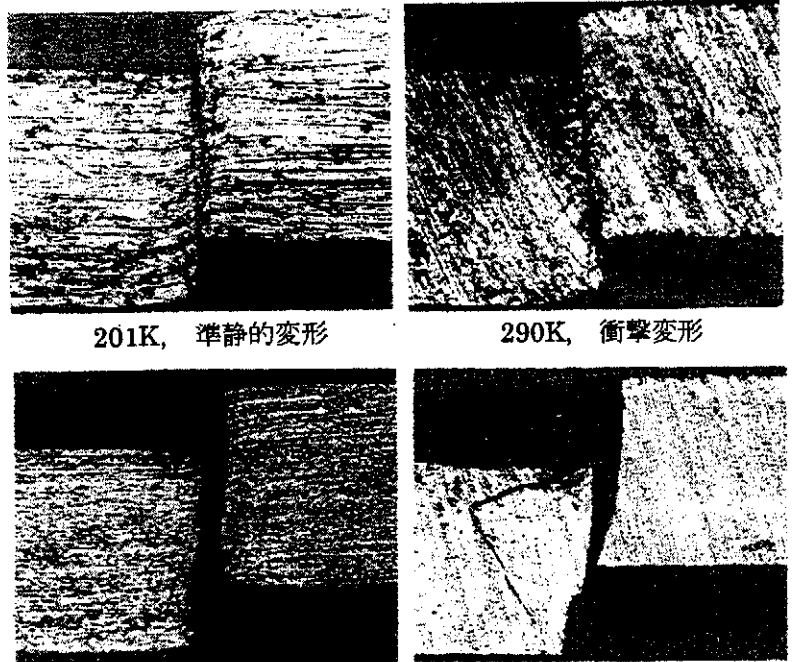


図5 チタン合金のせん断応力-ひずみ関係



77K, 準静的変形

77K, 衝撃変形

図6 せん断試験後の変形状況(チタン合金)

$D$ は試験片の幅,  $t$ は試験片の厚さである。

用いた試験片は厚さ 1.3mm のチタン合金板 (Ti-15-3-3-3), 厚さ 1mm の 230MPa 級低炭素鋼板および 450MPa 級鋼板である。

## 2.2 試験結果

図 4 には衝撃変形中の入射波  $\sigma_I$ , 反射波  $\sigma_R$ , 透過波  $\sigma_T$  の例を示す。持続時間約  $200\mu s$  のほぼ矩形上の入射応力波が負荷されていることが

わかる。

図 5 には準静的および衝撃変形で得られたチタン合金のせん断応力-せん断ひずみ関係を各温度について示す。ここに, L と H はそれぞれひずみ速度が  $8.3 \times 10^{-2} s^{-1}$  と  $3.3 s^{-1}$  の場合を示す。室温(290K)の衝撃変形においても顕著な加工軟化現象が見られ, せん断帯の形成されていることが推定できるが, 低温においては亀裂の発生によって, せん断途中で破壊が生じる。

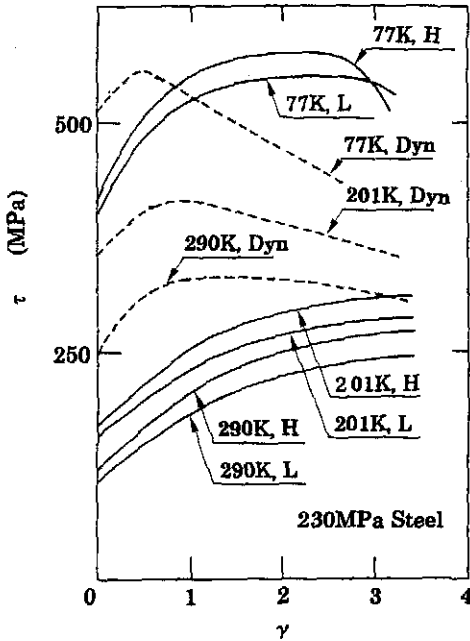


図 7 230MPa 級鋼のせん断応力-ひずみ関係

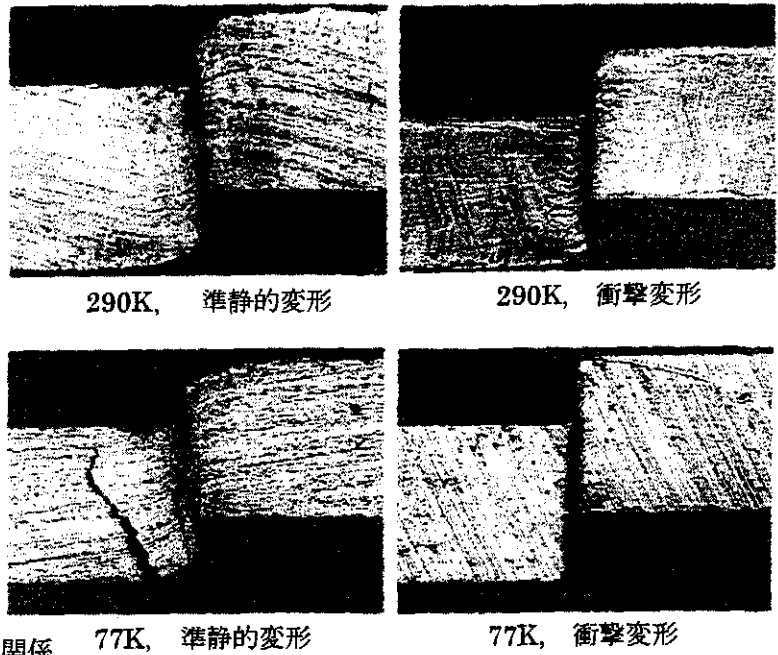


図 9 せん断試験後の変形状況(230MPa 級鋼)

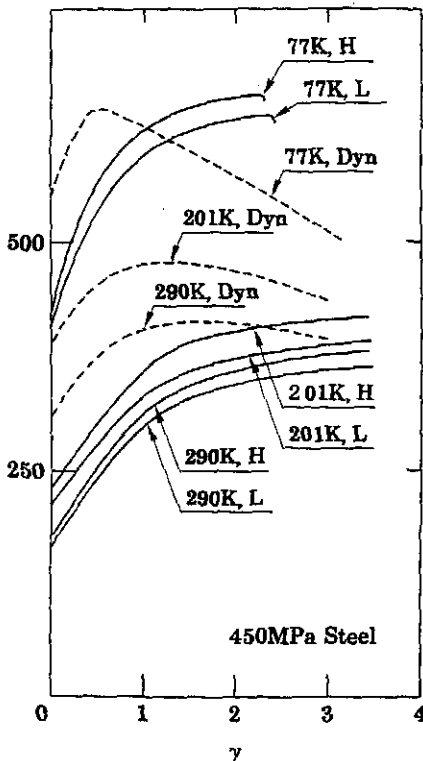


図 8 450MPa 級鋼のせん断応力-ひずみ関係

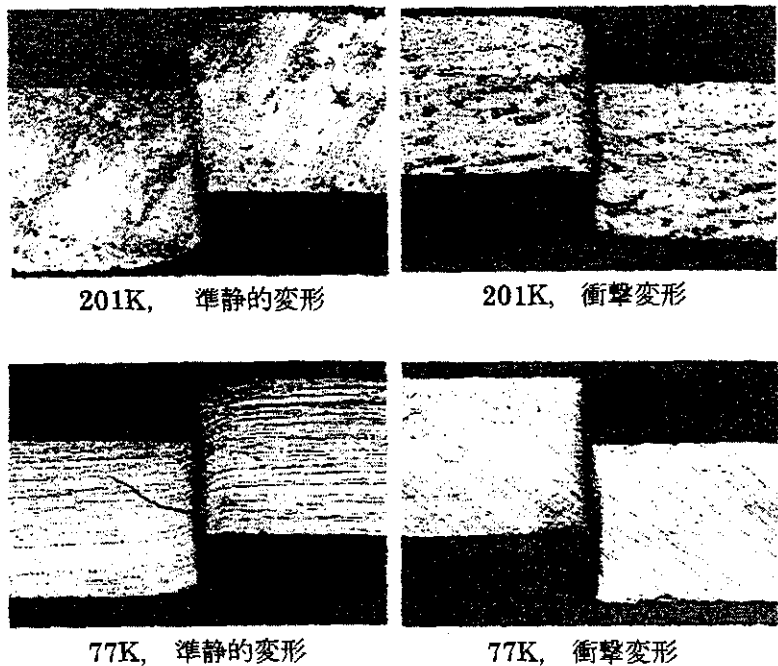


図 10 せん断試験後の変形状況(450MPa 級鋼)

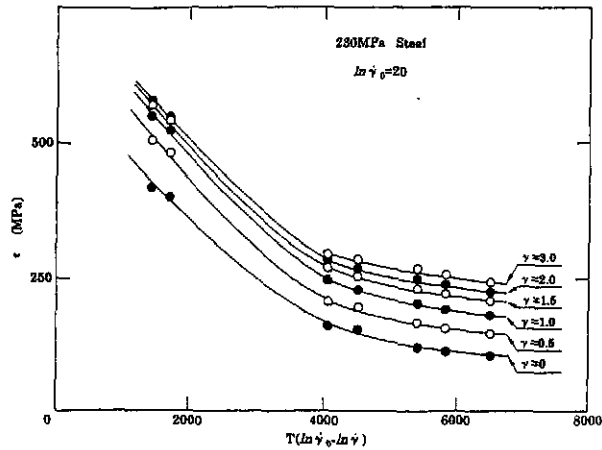


図 11 各ひずみでのせん断応力と温度ひずみ速度パラメータの関係 (230MPa 級鋼)

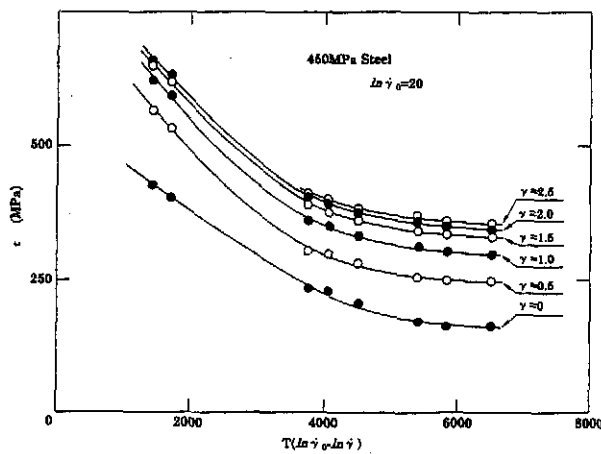


図 12 各ひずみでのせん断応力と温度ひずみ速度パラメータの関係 (450MPa 級鋼)

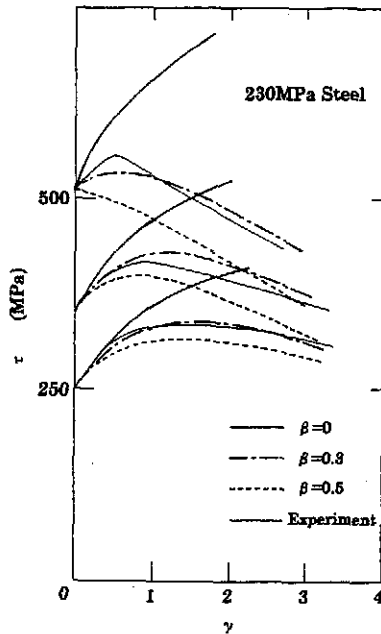


図 13 予測される衝撃せん断応力・ひずみ関係と実験結果(230MPa 級鋼)

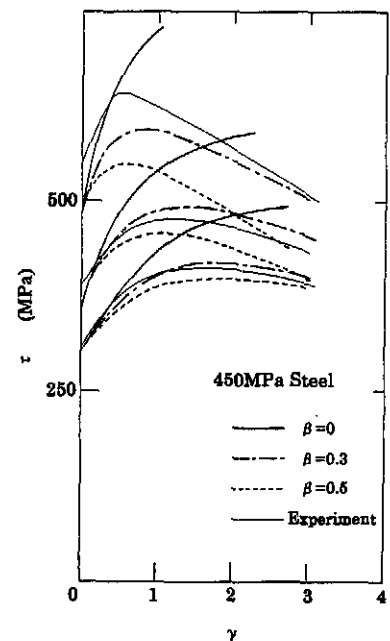


図 14 予測される衝撃せん断応力・ひずみ関係と実験結果(450MPa 級鋼)

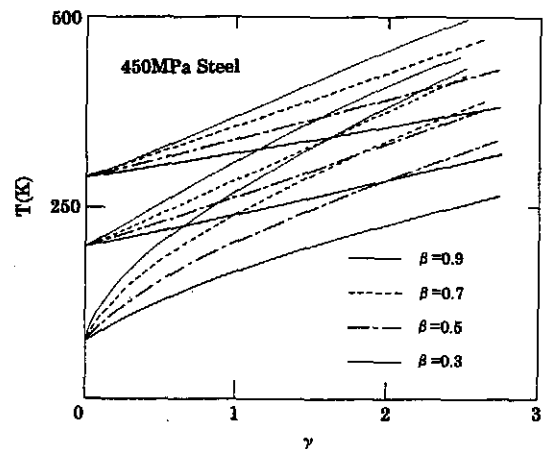


図 15 予測される衝撃変形中の温度変化(450MPa 級鋼)

特に、低温(77Kおよび201K)での衝撃変形においては、低いせん断ひずみにおいて亀裂が発生するため、応力-ひずみ関係において、急激な応力の低下が見られる。

図6には、せん断変形を受けた試験片の変形状況を示す。室温での低速変形では亀裂の発生が見られないが、せん断変形域の周辺に変形が及び、いわゆるだれが顕著に見られる。温度の低下によってもこのだれの程度は殆ど変化せず、低温でのせん断加工についての報告<sup>9)</sup>とほぼ同様な傾向が見られる。

一方、衝撃せん断加工の場合、室温においてもだれが顕著に減少しており、変形の局所化が衝撃変形では促進され、良好な切断加工が行えることが分かる。しかし、低温での衝撃せん断

加工では、亀裂が発生し、せん断領域以外での切断が生じるため、良好な切断が行えない。すなわち、チタン合金の場合には、低温での衝撃せん断加工は困難であることが分かる。

次に、加工硬化率がより大きい鋼について実験結果を示す。

図 7,8 には準静的および衝撃変形で得られた 230MPa 鋼と 450MPa 鋼のせん断応力-せん断ひずみ関係を各温度について示す。準静的変形の場合にはいずれの温度においても加工軟化は見られないが、衝撃変形の場合には加工軟化が見られ、特に低温においてはそれが著しい。

図 6 には、せん断変形を受けた試験片の変形状況を示す。室温での低速変形では亀裂の発生

#### 2.4 衝撃せん断応力-ひずみ関係

図 7,8 に示した衝撃変形中の加工軟化現象が断熱的に形成されるせん断帯によるものであるとすると、観測された挙動を予測することができるはずである。そこで、まず、それぞれの材料について、変形が熱活性化過程に支配されているとして構成式を導き、それに基づいて、衝撃変形中のせん断応力-せん断ひずみ関係を予測してみる。

各ひずみでの応力と温度ひずみ速度パラメータ  $\dot{\gamma}$  との関係種々の  $\ln \dot{\gamma}_0$  の値について描くと、図 11,12 に示すように  $\ln \dot{\gamma}_0 = 20$  の場合に滑らかな曲線が得られた。したがって、(13)式を用いて、衝撃変形中のせん断応力-せん断ひずみ関係を描くことができる。

図 13,14 には、種々の  $\beta$  の場合について予測されたせん断応力-せん断ひずみ関係と実験的に得られた関係を示した。ここに、 $\beta = 0$  は衝撃変形中に温度変化が生じない、いわゆる等温変形の場合である。実験結果は  $\beta = 0.3$  の場合に予測される結果とほぼ一致している。

多くの金属材料では、塑性仕事の熱への変換率  $\beta$  が 0.9 程度であると考えられているが、ここで得た値は非常に低い。 $\beta$  は今の場合 1 に比べて十分大きいから、熱伝導の影響はないと考えられるが、せん断加工時に働く摩擦力によってせん断応力が過大に評価され、結果的に発熱量を過大に評価している可能性は否定できない。いずれにしても、衝撃変形時の  $\beta$  の測定例は少なく、今後検討すべき課題である。

図 15 には、450MPa 鋼の衝撃変形中に予測される温度変化を示した。数百度に至る温度変化の生じることがわかる。

## まとめ

変形が熱活性化過程に支配され、塑性変形仕事直ちに熱に変換されると仮定すると、衝撃変形時の応力-ひずみ関係および変形中の温度変化を求めることができ、加工軟化が発生する温度、ひずみ速度を推定することができ、これより、断熱せん断帯の発生を予測できることを示した。これに基づき、三種の金属材料のせん断加工を行い、断熱せん断帯の発生を利用した高効率な低温衝撃加工法の開発について検討を行った。得られた結果は次の通りである。

- (1) 加工硬化率の低いチタン合金の場合、室温以上の温度においても断熱せん断帯の発生を利用した良好なせん断加工が行えるが、低温においては、亀裂が発生するため、衝撃せん断加工の有効性は認められなかった。
- (2) 加工硬化率の大きい低強度鋼と高強度鋼のいずれの場合にも、低温での断熱せん断帯の発生を利用した衝撃せん断加工は極めて有効で、亀裂の発生を伴わない良好なせん断加工が実現できることがわかった。

## 文献

- (1)Recht R.F.:Journ. Appl. Mech. Trans. ASME(E), (1964), 31, 161.
- (2)Culver R.S.: "Metallurgical Effects at High Strain Rates", Rhode R.W. et al. eds., Plenum Press., N.Y. (1973), 519.
- (3)Lindholm U.S., Nagy A., Johnson G.R. and Hoegfeldt J.M. (1980), Journ. Engng. Mat. Tech. Trans. ASME(H), 376.
- (4)Bai Y.: "Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals", Meyers M.A. and Murr L.E. eds., Plenum Press., N.Y. Chap.17, 277.
- (5) Argon, A.S.: "The Inhomogeneity of Plastic Deformation", ASM, Metal Park, Ohio, (1973), 161.
- (6)小川欽也,小林秀敏,吉田邦裕,杉山文子:材料,43巻,486号,(1994),304.
- (7)小川欽也:材料,44巻,501号,(1995),739.
- (8)H.Kolsky:Proc.Phys.Soc.B.62,(1949),676.
- (9)浅尾宏,寺林隆夫,小林勝:塑性と加工,30巻,345号,(1989),1625.