

TRIP 型高強度鋼板のプレス成形

広島大学 工学部 第一類 (機械系)

助手 岩本 剛

(平成7年度奨励研究助成 AF-95033)

1. 研究の目的と背景

オーステナイト相 (以下 a 相) が準安定状態である鋼に、ある特定の温度域において塑性変形を加えることにより、組織中にマルテンサイト変態が発生し、高強度、高延性、高じん性を示すことがある。この変態現象をひずみ誘起マルテンサイト変態、この変態による鋼の高性能化現象を TRIP (Transformation Induced Plasticity) 現象、TRIP 現象が発生する鋼を TRIP 鋼と呼ぶ⁽¹⁾。

ひずみ誘起変態及び TRIP 鋼の変形挙動には多くの影響因子があり、文献(1)に詳細な解説がある。これらの影響因子の中でも、発生メカニズムが明らかになっていないものが多い⁽¹⁾。その中でも変形様式はひずみ誘起変態に強く影響を及ぼし、様々な変形様式が同時に発生する塑性加工過程等において、その変形挙動予測を精度良く行うには、変形様式依存性のメカニズムを明らかにすることが重要となる。

しかしながら、変形様式がひずみ誘起変態に及ぼす影響について常温における現象を明らかにするという限られた研究成果⁽²⁾⁽³⁾しか得られていない。また、引張と圧縮に限定すれば、文献(2)、(3)の結果は異なったものとなっており、これに対する結論も得られていない。さらに、変形様式依存性のメカニズムは解明されていないため、TRIP 鋼の変形挙動の変形様式依存性を表現できる構成式の提案はない。

一方近年、TRIP 現象を利用することによって TRIP 型高強度複合組織鋼板が開発が進められており、乗用車の衝撃吸収部品などのプレス部品等の塑性加工品への応用が期待されている。しかしながら、前述のように TRIP 現象に関して未解明の問題が存在するため、TRIP 現象を伴う TRIP 型高強度鋼板の複雑な変形挙動についての研究の基礎段階として、変形様式依存性も含めた TRIP 現象に関する未解決部分を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、SUS304 を対象に等温単軸引張及び圧縮試験を行い、流れ応力 - 塑性ひずみ曲線、X 線回折法から得られた巨視的な m 相体積分率 - 塑性ひずみ曲線から、変形様式とひずみ誘起変態の関係を実験的に調査し、変形様式依存性のメカニズムについて検討する。また、SEM 観察により得られた顕微鏡写真から局所的な m 相体積分率、 m 相粒子の配向及び周期性を検討し、局所的な m 相粒子の状態の変形様式依存性も併せて明らかに

する。さらに、実験結果から変形様式依存性を表現可能である変態カインティクスモデルを提案する。この結果を踏まえることにより、TRIP 型高強度鋼板のプレス成形性に関する研究に貢献できる基礎を築くことが期待できる。

2. 実験方法

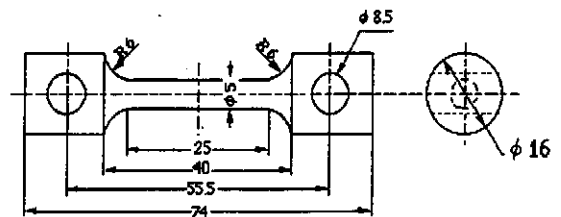
供試材として市販の SUS304 の丸棒を用いた。表 1 にその化学成分を示す。この材料を引張試験、圧縮試験の場合とも図 1 に示す形状に切削加工後、1373 [K] で 30 [min] 固溶化熱処理を施し、均一な a 相単相組織をもつ試験片を得た。圧縮試験片は、固溶化熱処理後工具接触面を 2000 番の耐水ペーパーで鏡面仕上げをした。

128 ~ 353 [K] の温度域の 5 環境温度の液体雰囲気中において、容量 250 [kN] のインストロン型試験機により実験を行い、ドライアイス、エタノール、液体窒素、マシン油を用いて所定の環境温度を得た。試験片を取付後無負荷状態で 30 分間所定の温度で保持することにより試験片内部の温度を均一にし、また試験中終始攪拌することによってこれらの液体の温度をほぼ一定に保持した。

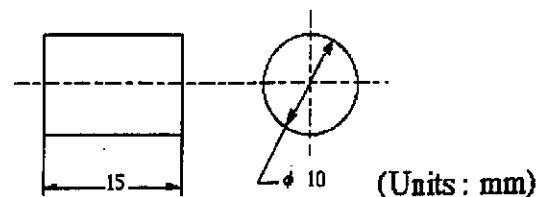
実験は主として試験機、試験装置、保温容器、加熱装置、温度測定機器を用いて行われる。試験装置の外観図を図 2

Table 1 Chemical composition of SUS304

Element	C	S _i	M _n	P	S	N _i	Cr
wt %	0.06	0.5	1.0	0.033	0.022	8.11	18.19



(a) Specimen for tension



(b) Specimen for compression

Fig. 1 Specimens

にそれぞれ (a) 引張試験, (b) 圧縮試験⁽⁴⁾の場合について示す。引張試験では、図 2 (a) の装置を試験機へ、試験片をこの装置へと固定し、保温容器を用いた液体雰囲気中でプルロッドを介して引張試験を行った。一方、圧縮試験では図 2 (b) のように、試験片を保温容器におき、ダイセット、工具を介して試験機により圧縮する。試験中にダイセットを通じて逃げる熱損失を少なくするために、ダイセットとロードセル及び工具の間にグラスウール製の断熱材を挟んだ。工具の圧縮面は鏡面仕上げを施した。また、試験片に極力一様な圧縮変形をさせるため、黒鉛或いはワセリンを塗布したテフロンシートを試験片と工具の間に挟み固体潤滑を行った。クロスヘッド変位速度を引張と圧

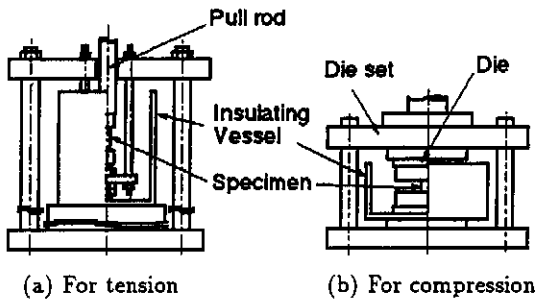


Fig. 2 Experimental apparatus for each tests

縮の場合についてそれぞれ 0.75 [mm/min], 0.45 [mm/min] 一定に保ち、公称ひずみ速度を 5×10^{-4} [s⁻¹] とした。引張試験は最高荷重点付近、圧縮試験は公称ひずみが 0.6 付近まで行った。

試験後の引張試験片は加工変質相の少ない放電加工機により平行部の中央部分 10 [mm] を切り出した。両試験の試験片は 25% 磷酸電解液、SUS304 陰極を用いて電解研磨を施し、両端を約 1 [mm] 研磨した。巨視的 m 相体積分率 f^m の定量には、比較的波長の短い MoK α 及び X 線ディフラクトメーターによる X 線回折法を採用した。集合組織の影響による特定回折強度のばらつきより生じる定量誤差を最小にするため、多重 X 線ピーク法⁽⁵⁾による直接比較法を用いた。回折面として a 相の場合、(200), (220), (311), (222) を、 m 相の場合、(200), (211), (220) を採用した。

また局所的 m 相体積分率 f^{m*} の定量には、SEM 観察によって得られた顕微鏡写真を画像処理する方法を採用した。撮影した SEM 写真をスキャナーによりパソコンに取り込んだ画像を、写真の現像等による色むらを補正した後、2 値化して輝度 0 の画素を計数することにより f^{m*} を定量化した。さらに、局所におけるマルテンサイト粒子の周期性、配向性について検討するため、Fourier 変換画像処理解析法⁽⁶⁾を用いた。この方法により配向分布関数および周波数分布関数を求めることができる⁽⁶⁾。

3. 実験結果

(1) 巨視的応力、 m 相体積分率 - 塑性ひずみ関係

図 3 に環境温度が 128, 213, 273, 298, 353 [K] における流れ応力 σ - 塑性ひずみ ϵ^p 関係を引張、圧縮試験の場合について示す。両試験結果に共通して、環境温度が低下するとともに σ が高くなっている。引張試験結果に関しては、試験終了時の塑性ひずみの値が大きいほど均一伸びが良好であるため、この図から環境温度 273~298 [K] にかけて大きな均一伸びを示しており、TRIP 現象が現れていることがわかる。引張、圧縮ともに降伏点は各環境温度においてほぼ同じ値を示しており、初期等方性を示していると考えられ、Ishikawa ら⁽⁷⁾の実験結果と対応している。しかし、変形の進行とともに両変形モードで流れ応力に差が現れ、変形誘起異方性を示している。また、低温において変形初期に引張応力に比して圧縮応力は高い値を示すが、高ひずみ域ではその関係が逆転している。一方、環境温度が高くなるにつれ引張応力に比して圧縮応力は変形中終始低い値を示している。

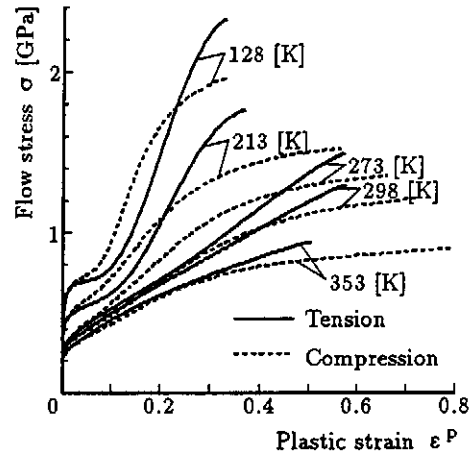


Fig. 3 Flow stress vs plastic strain

次に、巨視的 m 相体積分率 f^m の変形モード依存性を検討するため、図 4 に環境温度が、128, 213, 273, 353, 298 [K] の $f^m - \epsilon^p$ 関係を示す。この図から変形初期において引張の f^m に比して圧縮の f^m は高い値を示している。しかしながら、変形の進行とともにその関係は逆転する。これは前述の $\sigma - \epsilon^p$ 関係と同様な結果を示しており、ひずみ誘起変態の変形モード依存性が TRIP 鋼の流動曲線の変形モード依存性を支配していることがわかる。また、引張応力に比して圧縮応力が高くなる領域が現れるのは f^m の差によるものということがわかる。

(2) 局所 m 相体積分率及び m 相粒子の配向性、周期性

図 5 に環境温度 273 [K]、塑性ひずみ 0.248 の場合の SEM 組織写真の 2 値化画像を (a) 引張試験、(b) 圧縮試験の場合について示す。これらの画像は試験片断面の中心部を撮影したものである。この図において白色、黒色領域はそれぞれ a 相、 m 相を示している。このように m 相である領域が圧縮変形の場合に比して、引張変形の場合は小さく、変形モード依存性が局所的にも現れていることは明らかで

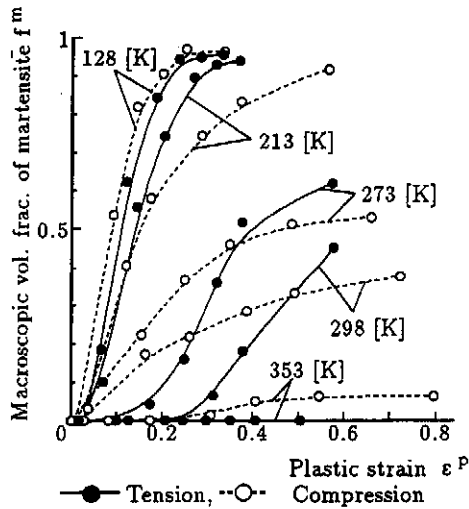


Fig. 4 Volume fraction of martensite vs plastic strain

ある。また、引張試験における組織は針状の m 相が成長途中であることが観察できる。一方圧縮試験における組織は大きな粒として m 相が存在し a 相との粒界も観察できる。図 5 から求めた f^{m*} 、X 線回折法から求めた f^m 及び両者の差を表 2 に示す。この表から巨視量と局所量の差は引張に比して圧縮の方が大きく、巨視量を平均値とするとその差はゆらぎ量と考えられ、引張に比して圧縮の方がゆらぎが大きいという結果を得る。



(a) Tensile deformation



(b) Compressive deformation

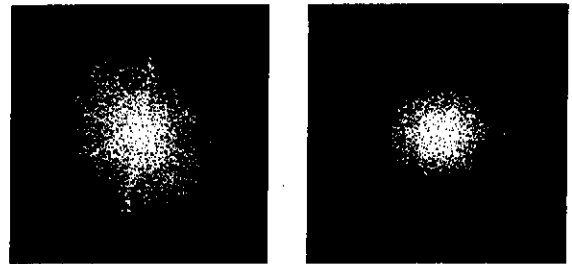
Fig. 5 Binarized images of SEM micrograph

Table 2 f^m , f^{m*} and $f^{m*} - f^m$

	f^m	f^{m*}	$f^{m*} - f^m$
Tension	0.159	0.166	0.007
Compression	0.367	0.293	-0.074

図 6 は Fourier 変換画像処理解析法⁽⁶⁾により得られた

SEM 写真の Power Spectrum Pattern (以下 PSP) の 2 値化画像を (a) 引張変形、(b) 圧縮変形の場合についてそれぞれ示す⁽¹¹⁾。一般に粒子に配向性がある場合、PSP における点の集合は楕円を形成しこの楕円の短軸方向が粒子の主配向方向となる⁽⁶⁾。この図から引張変形と圧縮変形では明らかに局所的な m 粒子の配向性が異なっていることが判る。引張変形の場合、PSP は楕円を形成し配向性が見られるが、圧縮変形の場合、楕円ではなく円に近い PSP を示しており、配向性がほとんど見られないことがわかる。

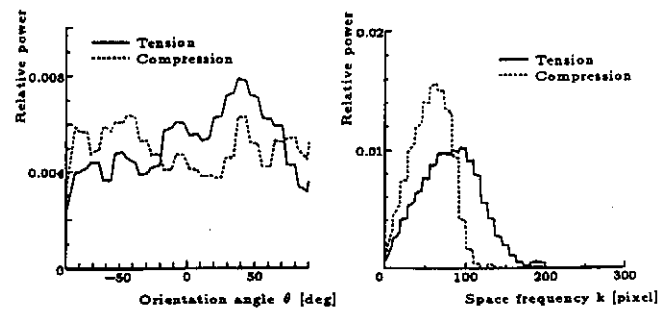


(a) Tension

(b) Compression

Fig. 6 Power spectrum patterns

図 7 に 2 値化する前の PSP を極座標解析し得られた (a) 配向分布関数、(b) 周波数分布関数を示す。これらの分布関数はピークを示し、ピークを示す配向角、周波数は多数の粒子が示す主配向角、主周波数となる。さらに、周波数分布関数の裾野の幅は周波数のばらつきを度合いを示している。この図 (a) から、引張試験結果は明確なピークを示し、圧縮試験結果からは明確なピークが見られない。引張試験結果の主配向角は図 6 (a) の結果と対応した主配向角とほぼ一致していることがわかる。一方、図 (b) から圧縮試験結果、引張試験結果で同様な形状の周波数分布関数を示しているが、ピークの高さ及び裾野の幅が異なっている。主周波数は引張の場合が圧縮の場合に比して高くなっていることがわかる。また、粒子径は周波数の逆数に比例していることから、引張試験時の粒子径は圧縮の場合の粒子径に比して小さいことが推察でき、図 5 の直接観察から得られた結果と対応している。さらに、圧縮試験結果は引張試験結果に比して周波数のばらつきが大きい。



(a) Angular distribution function

(b) Frequency distribution function

Fig. 7 Distribution functions from PSPs

m 相の状態は巨視的にも、局所においても変形様式によって異なり、応力状態に依存している。そのため、実験結果を説明できる変態カインेटクスモデルの構築は必要となり、次章において議論する。

4. 変態カインेटクスモデル

Olson と Cohen⁽⁸⁾ はひずみ誘起変態の発生機構がせん断帯の交差によるものとして、ひずみ誘起変態現象の温度依存性を表現できる変態カインेटクスモデル (以下 OC モデル) を提案し、実験結果を首尾よく表現できることを示している。また、Stringfellow ら⁽⁹⁾ は変態に及ぼす応力状態の影響を考慮し、OC モデルを一般化したモデルを、さらに、Tomita ら⁽¹⁰⁾ は Stringfellow らのモデルにひずみ速度依存性を考慮したモデル (以下 TI モデル) をそれぞれ提案している。TI モデルでは m 相体積分率の時間変化率 \dot{f}^m は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{f}^m &= (1 - f^m) A \dot{\epsilon}_a^{slip}, \quad A = n\alpha\beta(f^{sb})^{n-1}(f^{sb})^n \quad (1) \\ \alpha &= (\alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3) \left(\frac{\dot{\epsilon}_a^{slip}}{\dot{\epsilon}_y} \right)^M \\ \beta &= \frac{\eta}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \int_{-\infty}^g \exp\left\{-\frac{(g' - g_0)^2}{2\sigma_g^2}\right\} dg' \\ g &= -T + g_1 \Sigma, \quad \Sigma = \sigma_{ii}/3\bar{\sigma} \end{aligned}$$

ここで $\dot{\epsilon}_a^{slip}$ は a 相のすべりによる相当塑性ひずみ速度、 α はせん断帯の発生を規定するパラメータ、 β は核生成サイトから m 相が生成する確率を表現するパラメータ、 n は立体幾何学から求められるパラメータで 4.5 の値を取り、 f^{sb} はせん断帯の体積分率、 M はせん断帯発生に対するひずみ速度感度指数、 σ_g 、 g_0 はそれぞれ β の標準偏差、平均値、 g_1 は定数、 $\dot{\epsilon}_y$ は基準ひずみ速度、 η は幾何学定数である。

温度、ひずみ速度及び応力状態が一定のもとでは、式 (1) は積分可能となり、 m 相体積分率は次式のようになる。

$$\dot{f}^m = 1 - \exp\{\beta[1 - \exp(-\alpha\dot{\epsilon}_a^{slip})]^n\} \quad (2)$$

この式は OC モデル⁽⁸⁾ と対応している。 \dot{f}^m の変形様式依存性を明らかにするため、式 (2) で求められる \dot{f}^m を図 4 の実験結果に一致させるように式 (2) 中の α および β を決定した。図 8 に (a) $\alpha - T_0$ 及び (b) $\beta - T_0$ 関係を示す。 α 及び β 、すなわちせん断帯の交差数及び変態確率ともに変形様式に依存することがわかる。OC モデルでは、前述のようにこれら 2 つのパラメータは引張、圧縮の場合で個々に決定され、その結果実験結果と良い一致を示す。一方、Stringfellow らのモデル⁽⁹⁾ および TI モデル⁽¹⁰⁾ は応力状態に依存したマルテンサイト変態の駆動力を通じて変形様式依存性を導入している。さらに、 β は駆動力に依存するため、 β は応力状態の影響を表現することができる。しかしながら、式 (1) に示すようにパラメータ α は応力状態に依存していない。これは Stringfellow ら⁽⁹⁾ のモデル

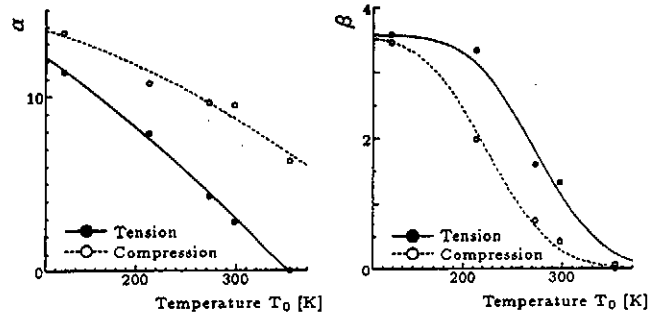


Fig. 8 (a) α vs T_0

(b) β vs T_0

および TI モデル⁽¹⁰⁾ ではひずみ誘起変態の応力状態依存性を記述するのに十分ではない。

ここでは、 α に関する実験結果をもとに TI モデル⁽¹⁰⁾ を一般化する。式 (2) で導入されたせん断帯は主として積層欠陥により構成される⁽⁸⁾。積層欠陥の発生メカニズムを考えると、原子間距離を小さくする方向に外力が作用することにより完全転位に比して部分転位の形成を促進し積層欠陥を形成し易くなる。以上のような仮定が成立する、すなわちせん断帯の形成が応力状態に依存すると仮定すれば、式 (1) 中の α に応力状態依存性を導入し、次式のように一般化することができる。

$$\alpha = (\alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 - \alpha_4 \Sigma) \left(\frac{\dot{\epsilon}_a^{slip}}{\dot{\epsilon}_y} \right)^M \quad (3)$$

ここで α_4 は新しく導入されたパラメータで、ある環境温度における式 (3) を用いて評価された α と図 8 (a) の結果とを対応させることにより求められる。単軸均一変形の場合、 $|\Sigma|$ は 1/3 の値を取る。ある環境温度において図 8 (a) から引張および圧縮における α を計測することにより α_4 が決定できる。

図 9 は (a) OC モデル⁽⁸⁾ を用いた場合、(b) TI モデル⁽¹⁰⁾ を用いた場合、(c) 式 (3) を用いた場合の $\dot{f}^m - \epsilon^p$ 関係を実験結果と合わせて示す。この場合、353 [K] における引張 ($\Sigma = 1/3$) の場合および圧縮 ($\Sigma = -1/3$) の場合の α の実験結果から α_4 は 10.23 となる。図 9 (c) に示すように計算結果と実験結果には良い一致がみられ、式 (1) および提案した (3) は \dot{f}^m を記述可能であることを確信できる。

5. おわりに

様々な環境温度において SUS304 を用いた単軸引張及び圧縮試験結果をもとに、ひずみ誘起変態の変形様式依存性が明らかになり、実験結果を表現できるモデルを提案した。その詳細は以下の通りである。

(1) 低温において変形初期では巨視的 m 相体積分率は引張に比して圧縮の方が高い値を示している。しかしながら、変形の進行とともにその関係は逆転する。これは流れ応力 - 塑性ひずみ関係と同様な結果を示しており、ひず

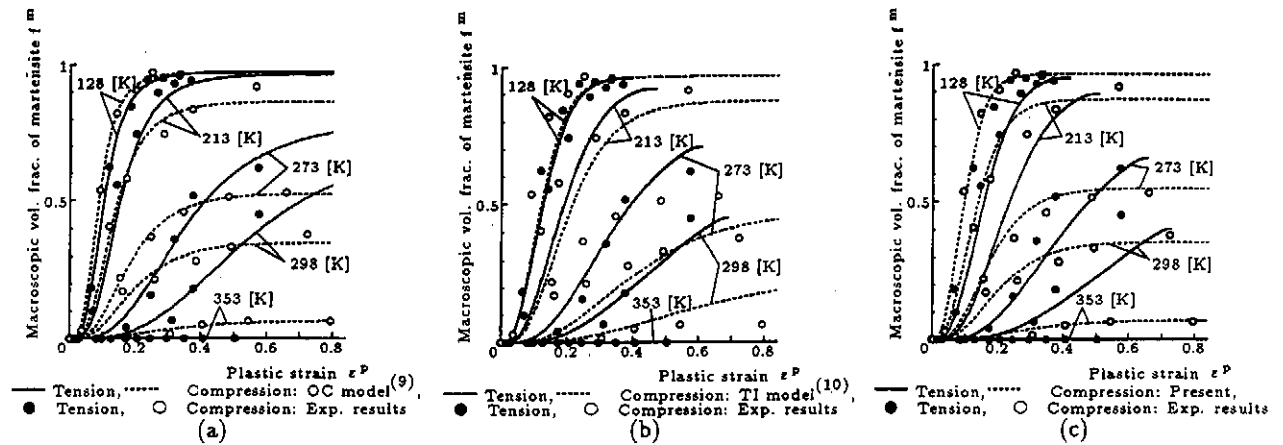


Fig. 9 Volume fraction of martensite vs plastic strain

み誘起変態の変形様式依存性が TRIP 鋼の流動曲線の変形様式依存性を支配していることがわかった。

(2) SEM 観察および Fourier 変換画像処理解析法の結果、局所における引張と圧縮のマルテンサイト粒子の形状及び配向は異なっていることがわかった。

(3) せん断帯発生に応力状態依存性を含め、Stringfellowらのモデル⁽⁹⁾ および Tomita らのモデル⁽¹⁰⁾ を一般化した変態カイネティクスモデルを提案し、その妥当性を示した。

6. 謝 辞

本研究において広島県立西部工業技術センター保有の試験装置を使用させて頂いた。また、本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の補助のもとに行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 蔦, 岩本: 塑性と加工, Vol.37, pp.492 - 497, 1996.
- (2) G. W. Powell, et al.: ASM Trans. Quart., Vol.50, pp.478, 1958.
- (3) 奥谷, 湯川, 石川, 神馬: 平成7年度塑性加工春期連合講演会講演論文集, pp.331 - 332, 1995.
- (4) J. A. R. Cortes, T. Tsuta, Y. Mitani and K. Osakada, JSME. Int. J. Ser. A, Vol. 35, pp.201, 1992.
- (5) M. J. Dickson: J. Appl. Cryst., Vol.2, pp.176 - 180, 1969.
- (6) 藤田, 梶田, 前川, 佐伯: 材料, Vol. 44, No. 498, pp. 267 - 272, 1995.
- (7) H. Ishikawa, K. Sasaki and T. Nakagawa: JSME Int. J. Ser. A, Vol. 37, No. 4, pp. 347 - 354, 1994.
- (8) G. B. Olson and M. Cohen: Metall. Trans. A., Vol. 6A, pp.791 - 795, 1975.
- (9) R. G. Stringfellow, D. M. Parks and G. B. Olson: Acta. Metall. Mater., Vol. 40, pp. 1703 - 1716, 1992.
- (10) Y. Tomita and T. Iwamoto, Int. J. Mech. Sci., Vol. 37, No. 12, pp. 1295 - 1305, 1995.
- (11) T. Iwamoto, T. Tsuta and Y. Tomita, Int. J. Mech. Sci., in press, 1997.