

多方向加工によるひずみ分布の数値解析

井上 忠信*・鳥塚 史郎*・長井 寿*

Numerical Analysis of Plastic Strain Distribution through Multi-directional Deformation

Tadanobu INOUE, Shiro TORIZUKA and Kotobu NAGAI

Synopsis : The plastic strain in a specimen introduced by compression with a pair of anvils is evaluated using a three-dimensional dynamic finite element analysis. The stress-strain relations depending on strain rate and temperature are used in the analysis. The contact condition between the anvil and the specimen is determined from the experimental result from an identically deformed screw set in the specimen. The plastic strain introduced by uni-directional compression is compared with that by bi-directional compression non-simultaneously given from different directions. The bi-directional deformation is proposed as a method to introduce large plastic strain widely in the specimen. The bi-directional deformation can be developed as a technique to obtain ultra-fine grain steels for thick plates.

Key words : FE-analysis; three-dimensional plastic deformation; equivalent plastic strain; multi-directional deformation.

1. 緒言

鉄鋼材料の結晶粒微細化は、高強度化、高靱性化、高疲労強度化など、材料の機械的性質を向上させることが期待できるため、従来から多くの研究がなされている¹⁻⁹⁾。鋼の結晶粒を微細にする技術として、制御圧延・制御冷却技術をはじめ、繰返し重ね圧延による方法、溝ロール圧延による方法、繰返しせん断変形加工などがある。また、Sakaiら¹⁰⁾やMatsuoら¹¹⁾はロール圧延時の鋼板表層部に生じる大せん断ひずみの影響によって相当塑性ひずみが増加し、これによって組織が微細になることを論じている。これらいずれの技術も大きなひずみを材料内に導入することに共通点があり、従来“成形”を目的としていた塑性加工が“組織創製”において役割を果たすことが明らかになってきた^{12,13)}。材料内に大ひずみを導入するには、必然的に大圧下が要求されることにより、これまで微細組織が得られた鋼材の多くは板厚や線径が薄く、細い場合に限定されている。しかし、実際に構造材料での組織微細化が重視されているのは厚肉材や大断面形状の鋼材であり、微細化域を広範囲化させる技術が求められている¹⁴⁾。

厚肉材での微細組織創製が難しいのは、板厚を確保した塑性加工の制限の中で大きなひずみを広範囲な領域に導入することである。著者らは、これまで0.1から4に至る広範な圧縮ひずみ ϵ に対する結晶粒径の変化についての検討を行ってきた^{13,15-17)}。その結果、限られた加工熱処理条件ではあるが、あるひずみ ϵ_{crit} 以上になると粒径は変化しないことがわかった。よって、 ϵ_{crit} 以上のひずみを材料の全領域に分布させることができれば、均一な微細組織を得ることが可能となる。

さて、加工によって材料内に導入されるひずみは、工具形状と材料の幾何的關係、工具と材料の摩擦特性、材料の公称変形速度そして材料の持つ加工硬化特性に依存する。これにより、材料内の変形は単純な均一圧縮変形ではなく、ひずみは不均一に分布する。この不均一性から、塑性加工によって材料内に導入されたひずみを評価する場合には、外形変化から算出される圧縮方向のひずみではなく、圧縮方向と直角な2方向のひずみやせん断ひずみを含んだ、加工履歴に依存したスカラー量である相当塑性ひずみ¹⁸⁾ (以後、塑性ひずみと呼ぶ) を用いた評価が必要となる。

本論文では、三次元動的有限要素法を用いた数値シミュレーションにより、加工によって材料内に導入される塑性ひずみの挙動を解析した。まず、材料の加工硬化特性を利用することにより、塑性ひずみが加工された領域の広範囲に広がる様子を示す。そして、その結果から考え出された多方向非同時加工を提案し、その手法で導入された塑性ひずみとその拡がりを、従来の1方向加工の場合と比較する。結果として、提案する加工法は低負荷で板厚を確保しつつ大塑性ひずみを材料内の広範囲に分布させることができることを明らかにする。

2. 加工硬化特性を用いた均一塑性ひずみ導入法

金属材料をはじめとする多くの物体は、塑性変形の進行とともに塑性すべりによる抵抗が増大する現象、すなわち加工硬化特性を有する。よって、一度引張りあるいは圧縮加工されたことによって、ひずみが導入された材料は、加

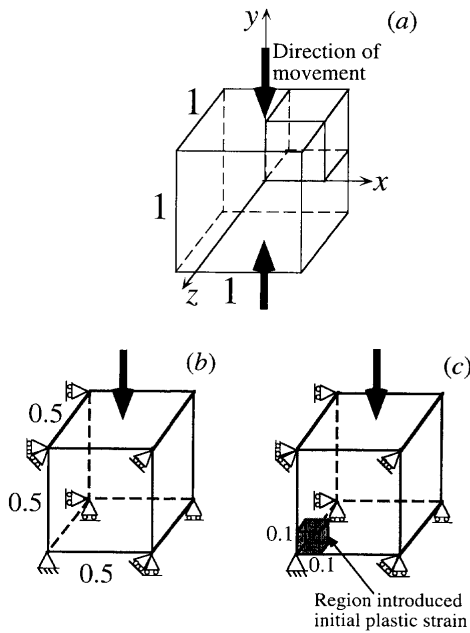


Fig. 1. (a) Investigated model, (b) model of an initial equivalent plastic strain $\epsilon_{eq(0)}=0$ and (c) model introduced $\epsilon_{eq(0)}$.

工されていない材料に比べ、同じ変形量を与える場合に大きな力が必要となる。すなわち、同じ材料であっても一度加工された材料は、そうでない材料に比べて相対的に硬くなっている。また、自由鍛造では型と材料の摩擦特性や型からの冷却作用により、材料の中間部より型に接している両端部の方が変形に対する抵抗が大きいので、中間部が外方に大きく膨らむ形となる。これは、材料は変形抵抗の小さい領域に多く変形する特性を持つためである¹⁹⁾。これらの特性を利用することにより、大きな塑性ひずみを広範囲に分布させることが可能となる。

この考えを数値解析で検証した結果について紹介する。いま、Fig. 1で示したような長さ1の立方柱を剛体でy軸方向に圧縮した場合を考える。Fig. 1 (a)で色付けされた領域を三次元の有限要素に分割し、無応力・無ひずみ状態の場合(Fig. 1 (b)), 立方柱の中心に初期塑性ひずみ $\epsilon_{eq(0)}$ を持つ長さ0.2の立方体がある場合(Fig. 1 (c))の2通りに対して、圧縮率50%加工したときの材料内での塑性ひずみの分布を汎用有限要素解析コード ABAQUS²⁰⁾によって解析した。材料と剛体間は、摩擦係数 $\mu=0.3$ のCoulomb条件²¹⁾を用いた。また、立方柱はひずみ速度に依存しない次式の材料特性を持っていると仮定した。

$$\sigma = 300e^n \dots \dots \dots (1)$$

上式における加工硬化指数 n は、一般に高強度(硬い)な材料ほど、また低温であるほど小さいが、ここでは $n=0, 0.1, 0.3$ の3通りを考えた。

Fig. 2は、 $n=0.3$ のときの加工後の試験片中心近傍のマテリアルフローメッシュと塑性ひずみの分布を示す。材料と剛体の接触部は、滑らないため不均一なひずみが材料内

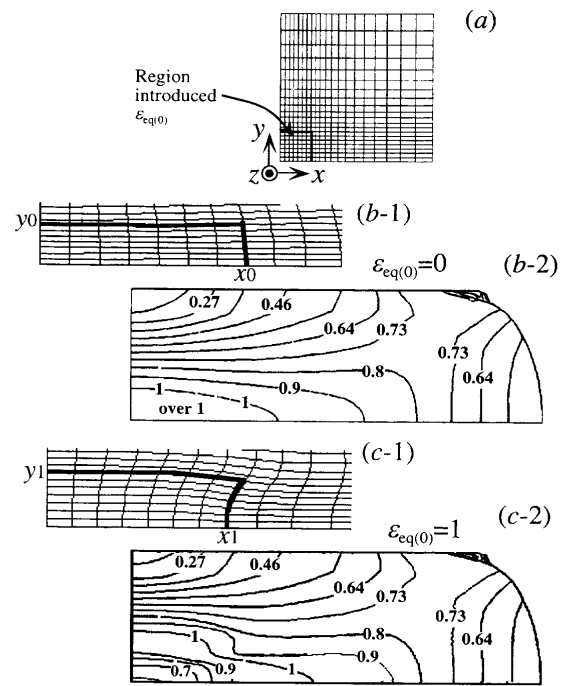


Fig. 2. (a) Finite element mesh before compression. (b-1) Material flow meshes near the region introduced $\epsilon_{eq(0)}$ and (b-2) contour of an equivalent plastic strain ϵ_{eq} introduced by its compression in case of initial equivalent plastic strain $\epsilon_{eq(0)}=0$. (c-1) Material flow meshes and (c-2) contour in case introduced $\epsilon_{eq(0)}=1$. A specimen is compressed by 50% and a work hardening parameter n of the material is 0.3.

に導入され、中央部が膨らんだ形状となる。Fig. 2 (b-1)と(c-1)のフローメッシュの比較から、初期塑性ひずみ $\epsilon_{eq(0)}$ が導入された場合とそうでない場合では、その領域(太線で囲まれた部分)における変形が異なっている様子がわかる。 x 方向への材料の流れを見ると $x_0 > x_1$ であり、 y 方向の場合 $y_0 > y_1$ となっており、これは $\epsilon_{eq(0)}$ が導入された領域での変形が周辺に比べ拘束されていることを表している。Fig. 2 (b-2), (c-2)から、 $\epsilon_{eq(0)}$ が導入された領域では加工によって導入される塑性ひずみは $\epsilon_{eq(0)}=0$ のときに比べ小さいが、その領域周辺では大きくなっているように見える。これを明らかにするため、 $z=0$ における x 方向および y 方向(圧縮方向)の加工によって導入された塑性ひずみの分布をFig. 3 (a)および(b)に示した。実線は初期塑性ひずみ $\epsilon_{eq(0)}=0$ の場合であり、摩擦の影響により、材料の中心で塑性ひずみはいちばん大きくなっているのがわかる。そして、その値は n が小さいほど大きくなる。破線および点線は $\epsilon_{eq(0)}=1$ および 3 の場合であり、初期塑性ひずみ $\epsilon_{eq(0)}$ が導入されていた領域における塑性ひずみは、 $\epsilon_{eq(0)}=0$ のときのそれに比べ小さくなっている。逆に、 $\epsilon_{eq(0)}$ が導入されていた領域周辺では塑性ひずみは大きくなっている。特に、本条件下においてこの傾向は加工方向に対して顕著である(Fig. 3 (b))。これは、 $\epsilon_{eq(0)}$ が導入されていた領域は他の領域に比べて相対的に硬いことにより変形が抑制され、その領域周辺に変形が広がったことを意味する。すなわち、対

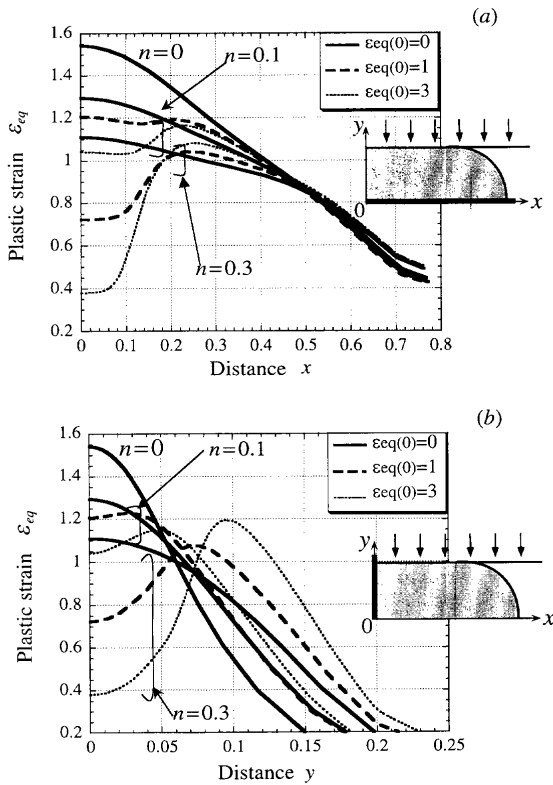


Fig. 3. Variations of the equivalent plastic strain introduced by 50% compression with the distance from the center in (a) the x -direction and (b) the y -direction, on the $z=0$ plane.

象物体の中にあらかじめ塑性ひずみを導入しておくことができれば、塑性ひずみを効率よく広範囲の領域に分布させることができる。なお、 $n=0$ の場合初期塑性ひずみを導入していても加工によって得られる塑性ひずみの大きさ、分布に変化はない。

3. 多方向加工の提案とその解析方法

2章の結果は、あらかじめ塑性ひずみが材料内に存在することは、加工後の材料内における塑性ひずみの均一化に重要であることを示唆している。そして、この特性は材料の加工硬化特性を利用することにより実現され、 n 値が大きいくほど顕著になる。

ここでは、上述した特性を考慮して鋼の未再結晶領域での加工に対して具現化した一例を示し、材料内の広範囲な領域に大塑性ひずみが導入できることを明示する。

3.1 加工方法

板厚を確保しつつ、大きな塑性ひずみを広範囲に分布させる方法として、多方向非同時加工を提案する。異なる方向から非同時に加工することにより、1方向に限った材料の流出を防ぐことができ、数回の繰り返し加工が可能となる。これにより板厚を確保しつつ累積圧下率を増すことができる。さらに、非同時に加工することにより1パス目で材料内に塑性ひずみの分布を形成させることができる。これにより、1パス目で導入された塑性ひずみが大きな領域

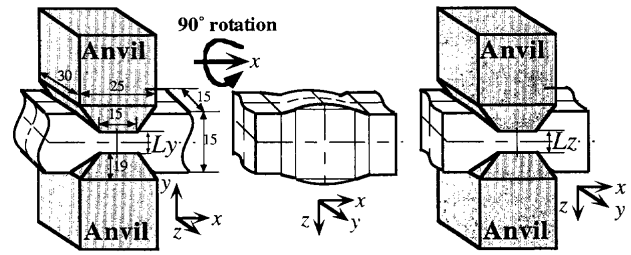


Fig. 4. Schematic illustration of multi-directional compression.

では2パス目による塑性ひずみの増加は小さく、その領域周辺ではひずみの増加は大きくなり、結局、広範囲の領域に大塑性ひずみの分布が導入される。

Fig. 4はアンビルを用いた多方向加工の模式図例である。まず、 y, z 方向に一对のアンビルを配置し、 y 方向に a mm 圧縮 (1パス) 後、直ちにアンビルを離し、 z 方向に配置したアンビルで b mm 圧縮 (2パス) する。今後、この加工法を2パス2方向加工と呼び、 $L_y: (15-a) \rightarrow L_z: (15-b)$ として表示する。ここで、 L_y, L_z はFig. 4に示したように y, z 方向にそれぞれ加工した後のアンビル間の距離すなわち加工方向の試験片厚を示す。また、2パス目の加工方向の影響を検討するため、 $L_y: (15-a)$ 後に y 方向から 45° 異なる方向から c mm 圧縮 (2パス、以後 $L_y: (15-a) \rightarrow L_{y_{45^\circ}}: (21.2-c)$ として表示) した場合も行う。ここで、21.2は15 mm角の試験片の $y-z$ 平面における対角長さである。また、ここで扱われるすべての解析に対して、加工中のアンビルの速度はひずみ速度1/sとして制御されるものとする。試験片の大きさは、 $15 \times 15 \times 100$ mmとし、 x 方向は自由拘束状態とする。アンビルは加工部長さ15 mmを有し、その形状はFig. 4に示した通りである。

3.2 解析方法

加工によって材料内に導入される塑性ひずみは、加工中のアンビルのひずみ速度、加工温度、試験片とアンビルの幾何形状とそれらの間の接触条件に依存する。よって、信頼性の高い解析値を得るためにはこれらの条件を考慮した、適切な数値解析技術を用いる必要がある。そこで、解析はABAQUS/Explicitによって、実測に基づいた温度とひずみ速度に依存した応力-ひずみ関係を用いた陽解法による三次元動的有限要素法を適用した。解析は、多方向からの加工を考慮し1/1モデルで行った。使用したメッシュ分割をFig. 5に示す。

3.2.1 材料の応力-ひずみ関係

供試材は、0.16C-0.4Si-1.43Mn-0.01P-0.004S-0.003N (mass%)のSM490鋼を対象とした。供試材の材料特性として、ひずみ速度0.1, 1, 10/sに対して、円柱圧縮試験から測定し、バレルングを考慮した応力-ひずみ関係を用いた。ただし、 $\epsilon \geq 0.4$ のひずみに対しては $\epsilon < 0.4$ までの実測結果を用いてHollomonの式 $\sigma = ae^n$ に基づいて外挿した²²⁾。温度1023K, 1073Kにおける応力-ひずみ曲線をFig. 6に示す。

3.2.2 摩擦係数の決定

本解析では、アンビルと試験片間の摩擦特性として Coulomb 条件を用いる。第2章でも示したように、型と試験片間の摩擦条件は、試験片内に不均一なひずみをもたらす。そして、その不均一性は摩擦係数 μ に強く依存する。一般的には、無潤滑やカーボン、ガラス潤滑などを用いた場合に $0.1 \leq \mu \leq 0.4$ ^{15,23)} の範囲内における摩擦係数が解析で用いられている。ここでは、数値解析で得られた圧縮方向のひずみの分布を実験結果と比較することにより μ を決定する。

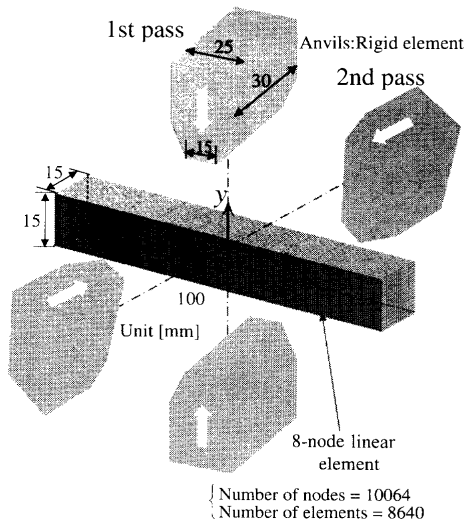


Fig. 5. The finite element mesh used.

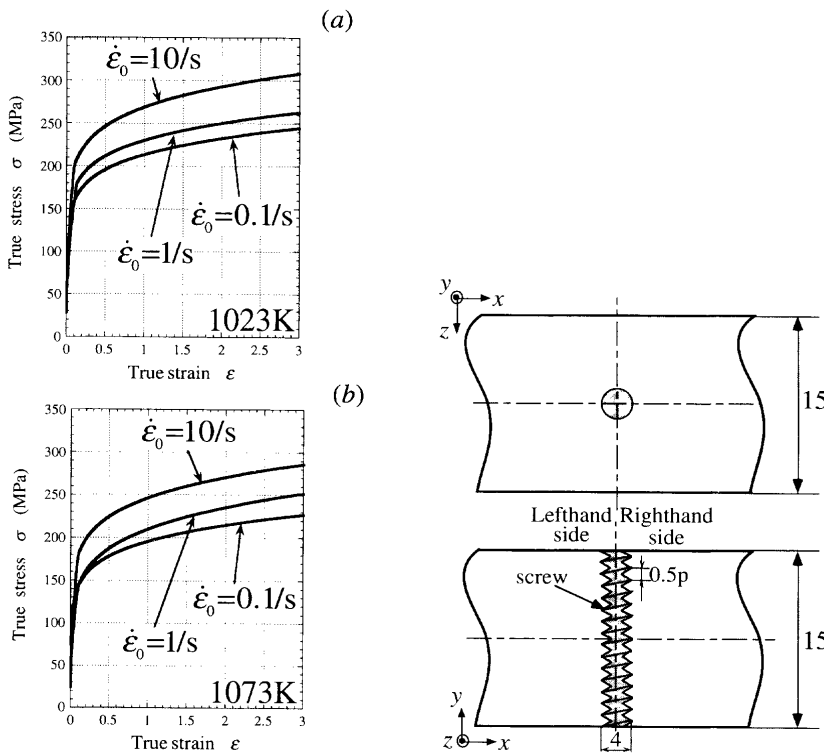


Fig. 6. Stress-strain relations with strain rates of 0.1, 1 and 10/s at (a) 1023K and (b) 1073K.

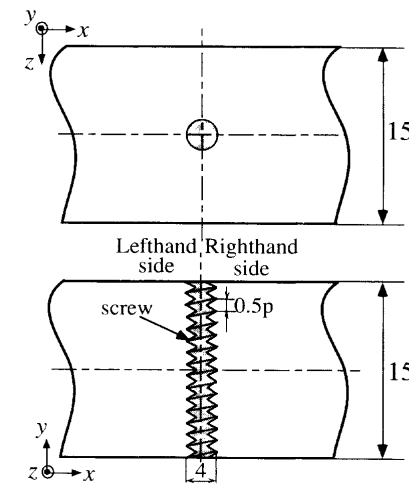


Fig. 7. A specimen with a screw embedded in the center.

実験では、Fig. 7で示したように供試材に対して、アンビルの圧縮方向 (y 方向) に同一材のネジ (直径4mm, 0.5ピッチ) を埋め込み、温度1023K、ひずみ速度1/sで58%圧縮 (L_y : 6.3 mm) したときの圧縮前後のネジ山の距離の変化から、 y 方向のひずみを算出した。加工は、開発した多方向圧縮型加工熱処理シミュレータ²⁴⁾で行った。なお、アンビルと試験片間はカーボン潤滑を用いた。Fig. 8は、58%圧縮後のネジ部の断面写真であり、中心部に向かうほどネジ山の間隔が狭くなり、ひずみ ϵ_{yy} が大きくなっているのがわかる。Fig. 9は、圧縮前後のネジ山の距離の変化から求めたひずみと $\mu=0, 0.1, 0.15, 0.3$ のCoulomb条件に対して有限要素解析で得られたひずみの関係を示す。解析では、Fig. 6 (a)に示した応力-ひずみ関係を用いた。この結果から、 $\mu=0.15$ の場合に得られたひずみの解析結果と実験結果が一致していることがわかる。これは、75%圧縮 (L_y : 3.75 mm) した場合にも同様な結果を示した。今後、数値解析では摩擦特性として摩擦係数 $\mu=0.15$ のCoulomb条件を用いる。

4. 結果と考察

4.1 2方向加工の有用性

(a) 塑性ひずみ分布

温度1073K、ひずみ速度1/sで、1パス1方向加工 (L_y : 3.75) した場合、加工幅 ($-7.5 \leq x \leq 7.5$ mm) 内における加工後

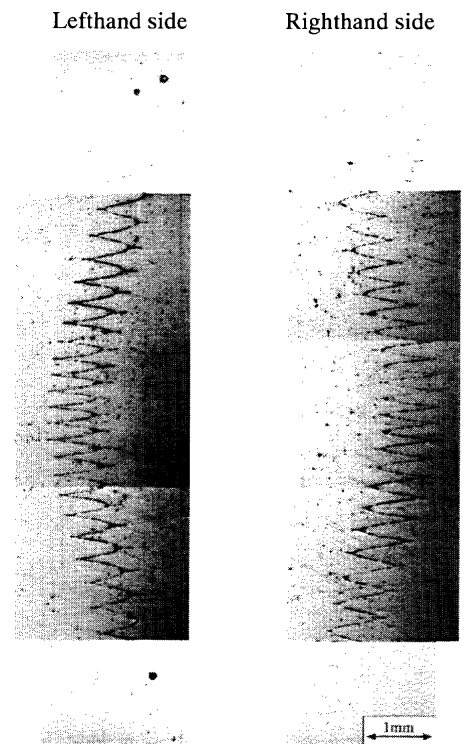


Fig. 8. A cross section of the 58% compressed specimen in which a piece of screw was embedded before the deformation.

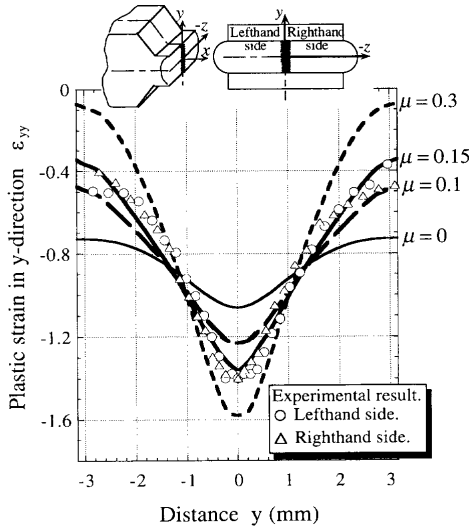


Fig. 9. Comparison of true strain in the y -direction obtained from the FE-analysis with friction coefficients and experimental measurement after a 58% compression at 1023K and strain rate 1/s.

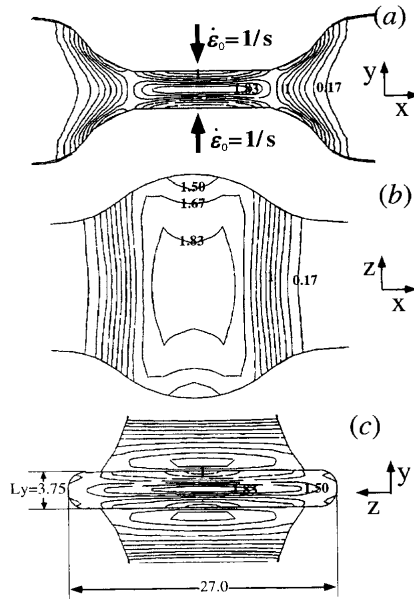


Fig. 10. Contours of the equivalent plastic strain on (a) the x - y plane, (b) the x - z plane and (c) the z - y plane in the specimen compressed to L_y : 3.75 mm in uni-direction at 1073K and strain rate 1/s.

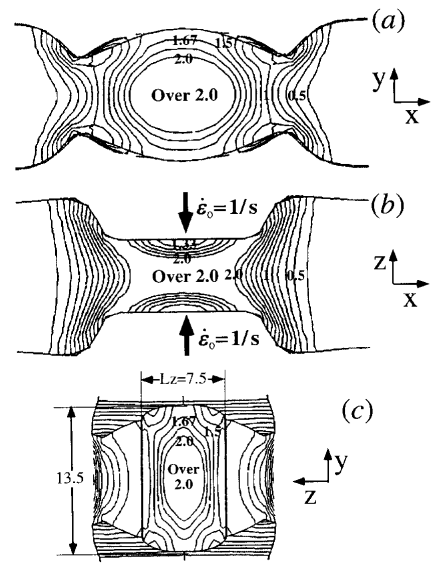


Fig. 11. Contours of the equivalent plastic strain on (a) the x - y plane, (b) the x - z plane and (c) the z - y plane in the specimen compressed to L_y : 7.5 \rightarrow L_z : 7.5 mm in bi-direction at 1073K and strain rate 1/s.

の体積 V は、加工前の体積 V_0 の約 40% (= 体積率 V/V_0) となり、残りの 60% は x 方向にフローする。同条件下で、2パス 2 方向加工 (L_y : 7.5 \rightarrow L_z : 7.5) した場合、体積率 V/V_0 は約 43% となり、 L_y : 3.75 の場合とほぼ同等な体積が加工幅内に残る。

Fig. 10, 11 は、 L_y : 3.75, L_y : 7.5 \rightarrow L_z : 7.5 したときの x - y , x - z , z - y 断面上における塑性ひずみの分布を変形図上に示す。Fig. 10 (c), 11 (c) から、 $x=0$ 断面上での縦横比が異なっているが、面積がほとんど一致していることがわかる。Fig. 10 から、塑性ひずみは試験片中心を最大としているのがわかり、加工方向である y 方向に対して範囲 $0.7 \leq \epsilon_{eq} \leq 2.0$ の中で分布を持つ。その他の x, z 方向に対して、アンビル幅 (x 方向に対して 15 mm, z 方向に対して 30 mm) のおおよそ $2/3$ の領域において、ひずみは比較的均一である。また、加工幅 ($-7.5 \leq x \leq 7.5$ mm) 内において材料に導入された塑性ひずみの平均は 1.424 である。Fig. 11 から、2 方向加工を行うことにより、2 パス目の加工方向における試験片厚 L_z が L_y : 3.75 の 2 倍ありながらも広範囲な領域に極めて大きな塑性ひずみが導入されているのがわかる。塑性ひずみは、2 パス目における加工方向である z 方向に対して範囲 $1.2 \leq \epsilon_{eq} \leq 2.7$ の中で分布を持つ。このとき、加工幅内における平均塑性ひずみは 1.717 である。すなわち、加工後の体積がほぼ同じでありながら、2 方向加工は 1 方向加工に比べ、板厚を確保しつつ材料内にひずみを導入する点で有用であることがわかる。なお、本解析における加工後の試験片形状 (加工部の形状と x 方向への伸び) は多方向圧縮型加工熱処理シミュレータ²⁴⁾を用いた加工後の形状と一

致している。

Fig. 12 は 1 パス 1 方向加工 (L_y : 9.75, L_y : 7.5, L_y : 3.75), 2 パス 2 方向加工 (L_y : 7.5 \rightarrow L_z : 7.5) に対する x, y, z 方向の塑性ひずみ分布である。この図から、1 方向加工では、加工量が増加するにつれ塑性ひずみは大きくなるが、加工方向の板厚が薄くなりその方向に急激な分布を持つ (Fig. 12 (b))。ただし、それ以外の方向には比較的均一である。2 方向加工の場合、2 パス目により材料は y 方向に拡がり、中心および両端での塑性ひずみは L_y : 7.5 に比べそれぞれ 2.4 倍、5.8 倍となっている (Fig. 12 (b))。両端での増加が大きいのは、1 パス目で接触によって拘束されていた領域が 2 パス目で自由拘束になったためと思われる。ただし、2 パス目の加工方向である z 方向の両端の塑性ひずみは材料がアンビルと接触することにより、1 パス目に比べ 1.5 倍の増加に留まる (Fig. 12 (c))。また、1 パス目で y 方向に急激なひずみ分布が導入されても、2 パス目によってその方向にあった急激さは緩和され、逆に 1 パス目で z 方向に比較的均一なひずみ分布が導入されても、2 パス目によってその方向に急激な分布が導入される。これにより、 y, z 方向の分布は同じような分布の形、大きさとなっているのが Fig. 12 (b), (c) からわかる。すなわち、両方向から非同時に加工することで、両方向の分布を同じ大きさ、形にすることが可能である。これも 1 方向加工にはない 2 方向加工の特徴と言える。ただし、本加工条件では 1 パス目のバレルリングの影響 (Fig. 10 (b) のようにドラムのように膨らみ、 L_y : 7.5 の場合 z 方向厚の最大値が 21.2 mm となる) によって 2 パス目の方が実質加工量が大きいので、2 パス目である z 方向にお

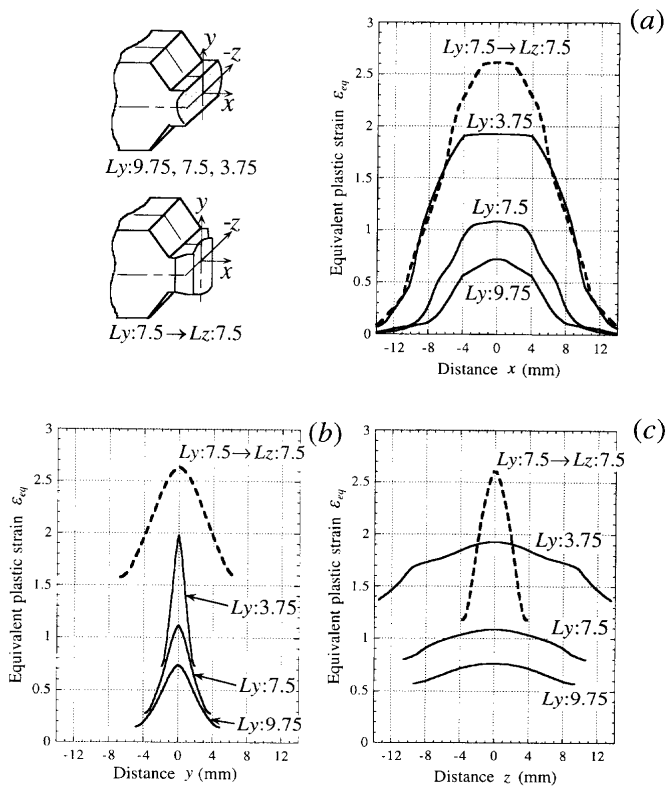


Fig. 12. Distributions of the equivalent plastic strain against (a) the x -direction, (b) the y -direction and (c) the z -direction after uni- and bi-directional compression.

るひずみの大小差が大きくなっている。

(b) 加工硬化特性の効果

2方向からの非同時加工によって、材料内に導入されるひずみが材料の持つ加工硬化特性に対してどの程度影響を受けたかについて検討を行う。

Fig.13 (a), (b)は、 $L_y: 7.5$, $L_y: 7.5 \rightarrow L_z: 7.5$ における試験片中心近傍における試験片の1/4の領域を示した変形図である。Fig.13 (b)上に示された値は、1パス目から2パス目の塑性ひずみの増加した量を示す。このとき、2パス目の加工によって材料は流れるが、Fig.13 (a)上に示した●▲■の各点は2パス目の加工によって移動したFig.13 (b)上の各点に対応している。Fig.13 (b)からわかるように、2パス目における塑性ひずみの最大値は中心ではないことがわかる。Fig.13 (c)は、 $L_y: 7.5$ で材料内に導入された応力、ひずみを一度ゼロ（無応力・無ひずみ状態）にし、 $L_z: 7.5$ したときに導入される塑性ひずみ値を変形図とともに示したものである。この図から、塑性ひずみの最大値は中心で生じていることがわかる。そして、Fig.13 (b), (c)を比較すると、太字で示した試験片中心近傍と2パス目の加工方向である z 方向において、無ひずみ状態から加工した方が大きくなっており、中心から離れた領域では1パス目であらかじめひずみが導入されている方が大きくなっている。これは、2章で示した材料の加工硬化による影響である。すなわち、1パス目で大きなひずみが導入された試験片中心部は、周

辺に比べ相対的に硬くなったことで2パス目の際には変形が抑制され、周辺に変形が広がったと言える。特に、加工方向でこの影響が大きいのは、Fig.3 (b)で示した結果と一致する。なお、Fig.13 (b), (c)からひずみの差はそれほど大きくはないが、これは本研究で用いた材料の n 値に大きく依存する。もし、 n 値が大きな材料を用いれば、ひずみに大きな差が生じることは、2章の結果から容易に理解できる。
(c) アンビルへの反力

加工中のアンビルへの負荷（反力）の予測は、加工熱処理シミュレータの設計において必要な情報の一つである。ここで提案した2方向非同時加工が、従来の1方向加工に比べ、過剰な負荷が要求されるのであれば、有用な加工法とは言えない。Fig.14は、1パス1方向加工($L_y: 3.75$)、2パス2方向加工($L_y: 7.5 \rightarrow L_z: 7.5$)における加工中のアンビルへの反力を示す。この図から $L_y: 3.75$ では加工量とともに反力も大きくなる（最大約13 ton必要となる）のがわかる。一方、2方向加工では接触領域を変化させることにより、反力の増加を低減化することができている。特に、2方向加工ではFig.11で示した変形状態となるため1パス目に比べ2パス目の接触領域が小さいので、反力の最大値は2パス目の方が低くなっている。

以上から、2方向加工は1方向加工に比べ加工熱処理シミュレータへの負荷を大きくすることなく材料の広範囲な領域に板厚を確保しつつ大塑性ひずみを分布させる手段として極めて有効である。

4.2 2パス目における加工方向の影響

これまでは、 y 方向に加工後、 z 方向から加工が行われた。しかし、2パス目における加工方向が異なることでせん断ひずみが有効に働き、塑性ひずみが加工領域全体に広がることも考えられる。ここでは、2パス目の加工方向の影響を検討するため、Fig.15に示したように y 方向に a mm圧縮後、 y 方向から 45° の方向に b mm圧縮($L_y: (15-a) \rightarrow Ly_{45^\circ}: (21.2-b)$)した場合の解析結果を検討する。

Fig.16は、 $L_y: 7.5 \rightarrow Ly_{45^\circ}: 5.3$ したときの z - y 断面上における塑性ひずみ分布を示したものである。これ迄の加工法と同様に塑性ひずみの最大値は試験片中心に生じるが（この場合 $\epsilon_{eq(max)} = 2.084$ ）、 $L_y: 7.5 \rightarrow L_z: 7.5$ での加工(Fig.11 (c))ほど大きな塑性ひずみが広範囲に分布していない。実質的な加工量の相違はあるが、 $L_y: 7.5 \rightarrow Ly_{45^\circ}: 5.3$ のときの平均塑性ひずみ $\epsilon_{eq(ave.)}$ は1.248であり、この値は $L_y: 7.5 \rightarrow L_z: 3.75$ のときの $\epsilon_{eq(ave.)} = 2.470$ 、 $L_y: 7.5 \rightarrow L_z: 7.5$ の $\epsilon_{eq(ave.)} = 1.717$ に比べかなり小さい。これは、材料表面の拘束条件の影響と考えられる。2パス目を z 方向から加工する場合と y 方向から 45° の方向から加工する場合では、加工中における変形状態が異なる。 $L_y \rightarrow Ly_{45^\circ}$ の場合、2パス目の加工初期ではせん断ひずみをともなうが圧縮ひずみを効率的に導入することができない。Fig.17 (a)および(b)は、アンビルの移動量に対する最大塑性ひずみ $\epsilon_{eq(max)}$ の変化と加工中のアンビル

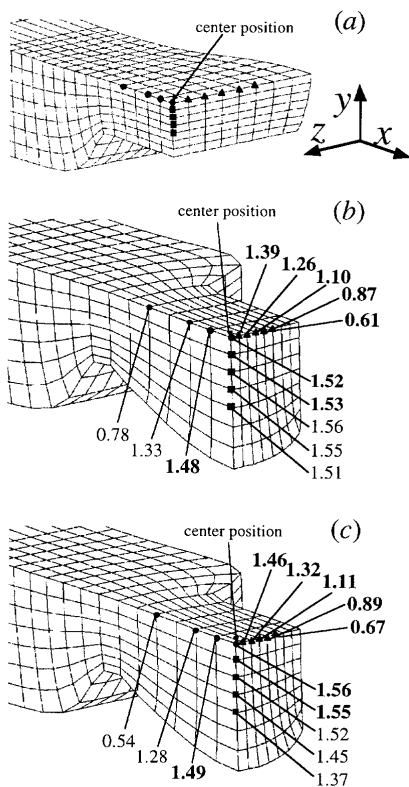


Fig. 13. (a) Deformed meshes to $L_y: 7.5$ mm (1st pass). (b) Deformed meshes with increment amount of equivalent plastic strain for the 1st pass at some sites in a specimen compressed to $L_z: 7.5$ mm after the 1st pass. (c) Deformed meshes with an amount of equivalent plastic strain at some sites in a specimen compressed to $L_z: 7.5$ mm after stresses and strains were set to zero, while the shape was maintained after the 1st pass.

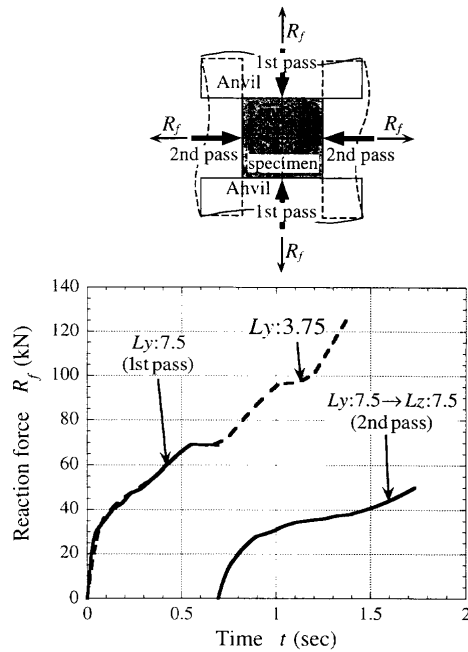


Fig. 14. Variations of reaction force against deformation time in uni-directional compression to $L_y: 3.75$ mm and in bi-directional compression to $L_y: 7.5 \rightarrow L_z: 7.5$ mm at 1073K and strain rate $1/s$.

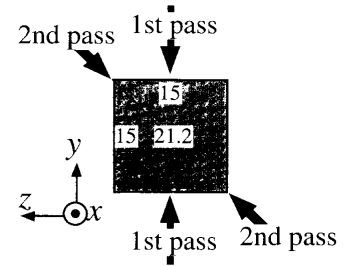


Fig. 15. Compressive directions on each pass.

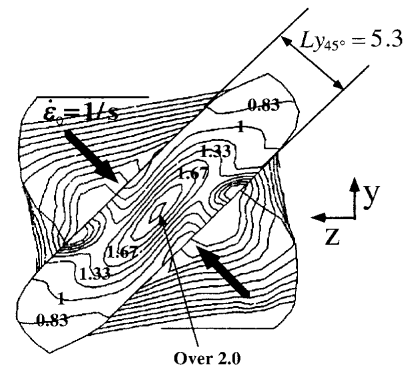


Fig. 16. Contour of the equivalent plastic strain on the z - y plane in the specimen compressed to $L_y: 7.5 \rightarrow L_{y45}: 5.3$ mm in bi-direction at 1073K and strain rate $1/s$.

への反力をそれぞれ示したものである。Fig.17 (a)から、 $L_y \rightarrow L_{y45}$ 加工の場合には $a=4$ mm までほとんどひずみの増加がみられない。しかし、移動量が大きくなると $L_y \rightarrow L_y$ 加工のように単純圧縮ひずみの導入と接触領域の拡大により、 $L_y \rightarrow L_{y45}$ 加工の場合 $L_y \rightarrow L_y$ 加工よりもひずみの増加が大きいのがわかる。そして、ひずみの増加が大きくなる $a=5$ mm を越えたあたりで反力も大きくなる。

この結果から、2パス目の加工によってはひずみを効率よく導入できない場合もあることに注意する必要がある。そして、大塑性ひずみを材料内の広範囲に効率よく導入するためには、2パス目の加工を1パス目の方向と 90° 異なる方向に与えることが最も適していると言える。

Table 1は、1方向加工($L_y: 9.75$, $L_y: 7.5$, $L_y: 3.75$), 2方向非同時加工($L_y: 7.5 \rightarrow L_z: 7.5$, $L_y: 7.5 \rightarrow L_{y45}: 5.3$)に対する最大塑性ひずみと加工された領域中におけるあるひずみ以上の体

積率そしてアンビルへの最大反力を示したものである。この結果からも2方向非同時加工の場合、低負荷で板厚を確保しつつ加工された領域中の広い範囲に大きな塑性ひずみが導入されているのがわかる。そして大塑性ひずみの導入は、材料の持つ加工硬化と累積加工量増大の2つの効果によってもたらされる。

提案した2方向非同時加工の優位点としては以下にまとめられる。

1. 大きな塑性ひずみの導入。
2. 低負荷。
3. 板厚の確保。
4. 繰り返し加工が可能。

5. 結言

本論文では、微細組織創製に必要である大塑性ひずみを、いかにして効率良く材料中の広範囲に形成させることができるかを三次元陽解法動的有限要素解析を用いて定量的に検討した。解析では、材料特性として温度、ひずみ速度に依存した実測に基づいた応力-ひずみ曲線を用いた。また、アンビルと材料の摩擦特性として、加工前後のネジのピッチの変化から算出したひずみの実験結果と比較し、摩擦係数0.15のCoulomb条件を採用した。大塑性ひずみを効果的

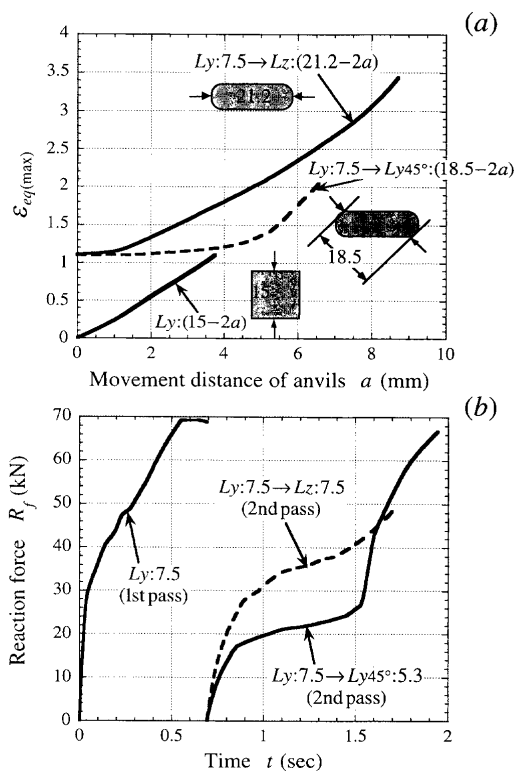


Fig. 17. (a) Variations of a maximum value of the equivalent plastic strain against movement distance of anvils and (b) relation between reaction force and deformation time in specimen compressed to $Ly: 7.5 \rightarrow Lz: 3.75$ mm and $Ly: 7.5 \rightarrow Ly_{45}: 5.3$ mm in bi-direction at 1023K and strain rate 1/s.

Table 1. The maximum equivalent plastic strain ϵ_{eqmax} , the average strain ϵ_{eqave} in the deformed volume, the maximum reaction force R_{fmax} to the anvils in both uni-directional compression and bi-directional compression.

	thickness (mm)	equivalent plastic strain ϵ_{eq}							maximum reaction force (kN)		
		ϵ_{max}	volume after deformation	volume fraction (%)				average			
				over 0.3	over 0.8	over 1.0	over 1.5	over 2.0		1 pass	2 pass
$Ly: 9.75$	9.75	0.74	2522	80.2	3.3	0.2	0.0	0.0	0.45	43	
$Ly: 7.5$	7.50	1.12	2298	99.2	40.4	6.6	0.0	0.0	0.72	69	
$Ly: 3.75$	3.75	1.98	1332	100.0	99.6	93.5	41.9	0.1	1.42	128	
$Ly: 7.5 \rightarrow Lz: 7.5$	5.30	2.08	1552	100.0	90.7	73.2	23.6	2.4	0.72	1.25	69-67
$Ly: 7.5 \rightarrow Ly45: 5.3$	7.50	2.64	1442	100.0	100.0	98.8	67.9	24.0	0.72	1.72	69-50

に導入できる加工方法として、材料の持つ加工硬化特性を利用し、材料とアンピルの接触領域を変化させることができる多方向非同時加工を提案した。多方向からの非同時加工によって、これ迄のような1方向加工の場合に加工量とともに板厚が薄くなる問題を解決した。また、加工時における材料の表面上の拘束領域を変化させることで材料の加工硬化特性を十二分に利用することができ、さらに加工の際のアンピルへの反力も抑えることができる。そして、大塑性ひずみが材料内の広範囲に導入されることを解析結果から明らかにした。

本加工法は、塑性加工の限られた範囲の中でこれ迄のような1方向加工では得ることができない極めて大きな相当塑性ひずみを得ることができ、さらに板厚を確保しつつ加

工した領域の広範囲に粒径が一定となる ϵ_{crit} 以上のひずみを分布させることができる。これにより、結晶粒微細化創製技術に対して、これ迄多くの研究に共通していた1パス大圧下というアプローチではなく、多方向加工を用いた多パス小圧下によるアプローチでの探求が可能となる。その意味で、本論文は今後の厚肉材に対する微細創製技術に対して重要な提案と定量的な結果を示したと言える。そのために、まずはこの数値解析結果を実験的に検証できる加工熱処理シミュレータの開発が急務となる。そして、解析結果が実験的に確認されれば、均一な微細組織鋼を得ることができるはずであり、引張強さ、シャルピー試験の吸収エネルギー等の機械的性質を測定することが可能となる。そのためには、回復・再結晶によるひずみの解放が生じないように1パス後直ちに加工方向が異なる2パス目の加工が可能であり、材料の温度均一性が保証されており、そしてアンピルの加工速度が制御された新しいシミュレータの開発が必要となる。

文 献

- 1) Ultrafine Grain Metals, ed. by J.J.Burke *et al.*, Syracuse University Press, New York, (1970).
- 2) S.Torizuka, O.Umezawa, K.Nagai, K.Tsuzaki, S.Genda and Y.Kogo: Proc. Int. Conf. on Solid-Solid Phase Transformations '99 (JIMIC-3), ed. by M.Koiwa *et al.*, JIM, Sendai, (1999), 1533.
- 3) K.Tsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **11** (1999), 1013.
- 4) 牧 正志: 第161・162回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (1999), 1.
- 5) T.Hayashi, S.Torizuka, T.Mitsui, K.Tsuzaki and K.Nagai: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 385.
- 6) 小指軍夫著: 制御圧延・制御冷却, 日本鉄鋼協会監修, 地人書館, 東京, (1997).
- 7) 藤岡政昭, 阿部義男, 荻原行人: 第2回スーパーメタルシンポジウム, 金属系材料研究開発センター, 次世代金属・複合材料研究開発協会, 東京, (1999), 125.
- 8) Y.Saito, N.Tsuji, S.Tanigawa and H.Utsunomiya: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 560.
- 9) A.Azushima, K.Aoki, Y.Asada and Y.Kimura: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 450.
- 10) T.Sakai, Y.Saito and K.Kato: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **28** (1988), 1036.
- 11) S.Matsuoka, K.Sakata, O.Furukimi and T.Obara: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 471.
- 12) K.Nagai: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **4** (1999), 741.
- 13) 鳥塚史郎: 高機能鉄鋼製品のための材料・プロセス技術, 創形創質工学部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1999), 21.
- 14) C.Ouchi: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 1010.
- 15) T.Inoue, S.Torizuka, K.Nagai and T.Ohashi: Symp. on Mathematical Modeling in Metal Processing and Manufacturing in COM2000, ed. by P.Martin *et al.*, The Metallurgical Society, Ottawa, (2000). (CD-ROM)
- 16) S.Genda, Y.Kogo, S.Torizuka, T.Inoue and K.Nagai: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 1361.
- 17) S.Genda, Y.Kogo, S.Torizuka and K.Nagai: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 19.
- 18) 国尾 武: 固体力学の基礎, 培風館, 東京, (1996), 221.
- 19) 前田禎三: 塑性加工, 誠文堂新光社, 東京, (1972), 20.
- 20) ABAQUS/Explicit ver.5.8 User's manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Tokyo, (1998).
- 21) 曾田範宗: 摩擦と潤滑, 岩波書店, 東京, (1957), 46.
- 22) Y.Tomoda: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **4** (1999), 536.
- 23) T.Okuda, M.Yamada and T.Yamada: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **38** (1997), 77.