

# ダイヤースクウェア圧延・スクウェアーオーバル圧延時の被圧延材の倒れの実験的・理論的検討

浅川 基男\*・宮澤 英之\*<sup>2</sup>・戸井 真\*<sup>2</sup>・片山 勇輝\*<sup>2</sup>・柳本 潤\*<sup>3</sup>

Experimental and Theoretical Investigation on Tilting in Bar and Rod Rolling Using Diamond-Square Pass and Square-Oval Pass

Motoo ASAKAWA, Hideyuki MIYAZAWA, Makoto TOI, Yuki KATAYAMA and Jun YANAGIMOTO

**Synopsis :** Metals under bar and rod rolling often exhibit tilting, due to smaller width height ratio of bar and wire rod under rolling. Design of calibers and rolling conditions to reduce tilting of stock is of industrial importance, as tilting may result in wrinkling and overfilling of rolled product, or miss rolling of bar and wire rod. Characteristics of tilting under bar rolling are investigated experimentally and analytically, aiming to clarify threshold for the occurrence of overturning and restoration resulting from tilting. Tilting of bar under rolling can be classified into two modes. Mode 1 tilting is resulting from steady-state twisting deformation in roll bite. This mode takes place even though position of entrance cross-section is constrained strongly by guide or previous stand, and this mode can be directly analyzed by steady-state FE analysis. Mode 2 tilting takes place in the bar before rolling, when constraint from guide or previous stand is relatively small. This mode can be evaluated using normalized moment acting to entrance of bar obtained by FE analysis. Steady-state FE analysis of bar under rolling is successfully applied to predict tilting of bar in Square-Diamond Pass and Square-Oval Pass. Predicted results agree well with the experimental measurements for tilting of mode 1 as well as mode 2. It can be concluded that FE analysis is helpful to the design of calibers and rolling conditions for bar rolling and rod rolling.

**Key words :** tilting; groove rolling; rigid-plastic FEM; caliber; overturning.

## 1. 緒言

棒鋼・線材圧延では、板圧延とは異なり材料厚さと幅がほぼ等しいため、正規の孔型から材料が傾斜して圧延される「倒れ」現象が発生する。被圧延材の倒れは、軽度の場合であってもしわ疵は折れ込み疵といった重大な表面疵が生じたり、形状・寸法精度を悪化させる要因となる。さらに激しい場合はミスロールを誘発し、歩留まり、稼働率の低下をもたらすに至る。このように倒れは、棒線材圧延の実生産現場において重要な問題である。

従来、棒線材圧延時の倒れの発生については、ロールに噛み込まれた直後の被圧延材と孔型の幾何学的関係から倒れを判定する大野の方法<sup>1)</sup>や、定常圧延中の被圧延材の接触領域に作用する左右のモーメントを算出し、その釣合いから復元/転倒を論じる Shternov の方法<sup>2)</sup>、Shternov の方法におけるモーメントの算出方法に修正を加え、トルクアームの長さにより、噛み込み時と定常圧延中の倒れの判定方法を示した浅川の方法<sup>3)</sup>などがあるが、いずれもが初等理論に基づく簡易解析であるため精度が十分とは言えない。また、スクウェアダイヤ圧延における倒れ現象につ

いて報告した例<sup>4)</sup>があるが、ロールの噛み込み時のみしか言及されていない。さらに、より厳密な有限要素法等による理論を利用して倒れを解析し、発生する原因やその発生限界について検討した研究は報告されていない。

本研究では、代表的な棒線材圧延方式である凸型接触方式のダイヤースクウェア圧延・凹型接触方式のスクウェアーオーバル圧延を取り上げ、圧延時の被圧延材の倒れの発生限界を、純鉛を用いたモデル圧延機での実験により明らかにする。あわせて剛塑性有限要素法による数値実験を同一条件のもとで行い、解析結果と実験結果とを比較しつつ、倒れが生じる原因を力学的に検討した結果を示す。

## 2. 解析方法ならびに実験方法

### 2.1 「倒れ」の発生する原因、形態とその評価方法

「倒れ」は、連続圧延ラインに設置された被圧延材の捻転工程や、スタンド間での被圧延材のねじれ変形の結果、Fig. 1に示す通り被圧延材が正規の角度より傾斜してロール間隙に噛み込まれる場合に発生する。この倒れの発生形態には、次の2つのモードがあると考えられる。

平成15年1月8日受付 平成15年3月18日受理 (Received on Jan. 8, 2003; Accepted on Mar. 18, 2003)

\* 早稲田大学工学部 (School of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo Shinjuku-ku Tokyo 169-8555)

\* 2 早稲田大学大学院理工学研究科 (School of Science and Engineering, Waseda University)

\* 3 東京大学生産技術研究所 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)

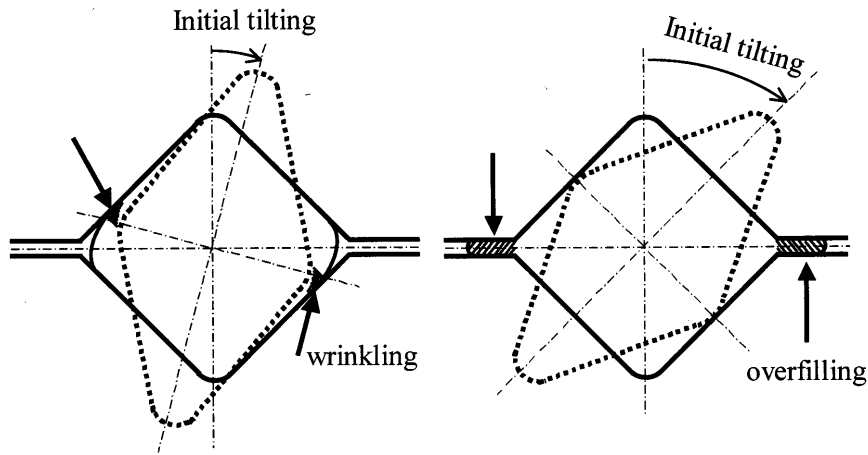


Fig. 1. Twisting of workpiece under bar and rod rolling.

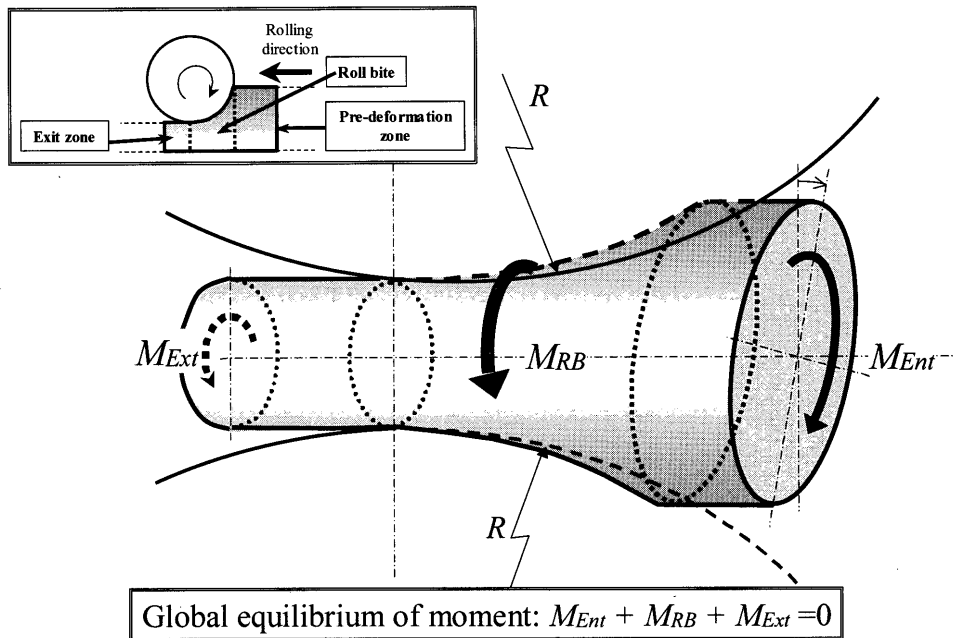


Fig. 2. Moment acting to metal under rolling.

第1のモードは、入口ガイドによる強い拘束がある場合、もしくはスタンド間距離に比較して材料断面が大きい場合のように、ロールバイト内塑性変形への入口材料の拘束が大きいときに発生する倒れである。このモードによる倒れは、ロールバイト内に発生する定常ねじり変形に起因している。すなわち、入口における被圧延材の傾斜角度が圧延中に一定に保たれているにも関わらず、ロールバイト内および近傍のねじり変形によって出口の被圧延材は転倒する。

入口にガイドが無い場合、もしくは前スタンドからの拘束が小さい場合（前スタンドとの距離が長い場合、あるいは被圧延材尾端が前スタンドを通過した後）には、第2のモード、すなわちロールバイト近傍の塑性変形域において生じるモーメントに起因した倒れが発生する。このモード2では入口側材料の傾斜角度は非定常な変化をする。すな

わち、ロール間隙に被圧延材が傾斜して噛み込まれたとしても、圧延中にロールバイト内に発生する応力場および対応するモーメントの影響により、入口側の被圧延材が復元（傾斜角度が圧延の進行とともに減少し正規の角度に戻る）するために倒れが発生しない場合と、さらに入口側被圧延材の傾斜角度が増加して入口側被圧延材が転倒し、出口での材料が倒れる場合とがある。

第1のモードの場合については、3次元定常FEM解析による変形解析によって得られたロールバイト内塑性変形形状によって、倒れの発生状況や発生限界を直接評価することができる。第2のモードの場合には、入口面において作用しているモーメントが評価の対象となる。Fig. 2に、圧延中の棒線材に作用するモーメントを示す。ロールバイト近傍の変形域に作用するモーメントは、1) ロールより作用するモーメント、2) 出口側の被圧延材より作用する

モーメント, 3) 入口側の被圧延材より作用するモーメント, の3つあり, これらはモーメントについての静的な釣り合い条件を満足する。3次元定常FEM解析により得られるこれらのモーメントのうち, 入口側の被圧延材より作用するモーメント  $M_{Ent}$  によって, 第2モードの倒れを評価する。

2.2 実験装置ならびに実験方法

Fig. 3 に示す2段圧延機を用いて実験を行った。素材は純鉛で, 倒れ実験の前に純鉛を数本圧延することで均一なロールコーティングを形成させた。Fig. 3 中に示されている通り, 圧延スタンド入口側にはガイドを設け, この圧延ガイドを用いてロール入側にて被圧延材を傾斜させた状態で圧延した。本ガイド装置は Fig. 4 に示されているように, 入側傾斜角度  $\theta_s$  を維持したままある長さまで圧延されると, 被圧延材がガイドからはずれ, 被圧延材が自由に回転できる機構となっている。すなわち本装置では, モード1とモード2の実験を連続して行うことができる。

上記の方法で実験を行い, 実験終了後, Fig. 5 に示すよ

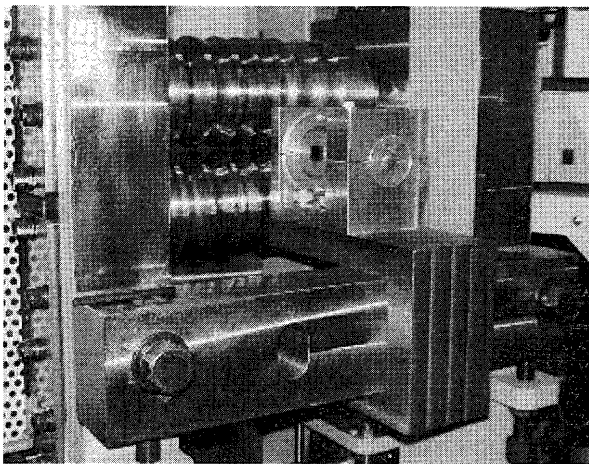


Fig. 3. Outlook of rolling mill.

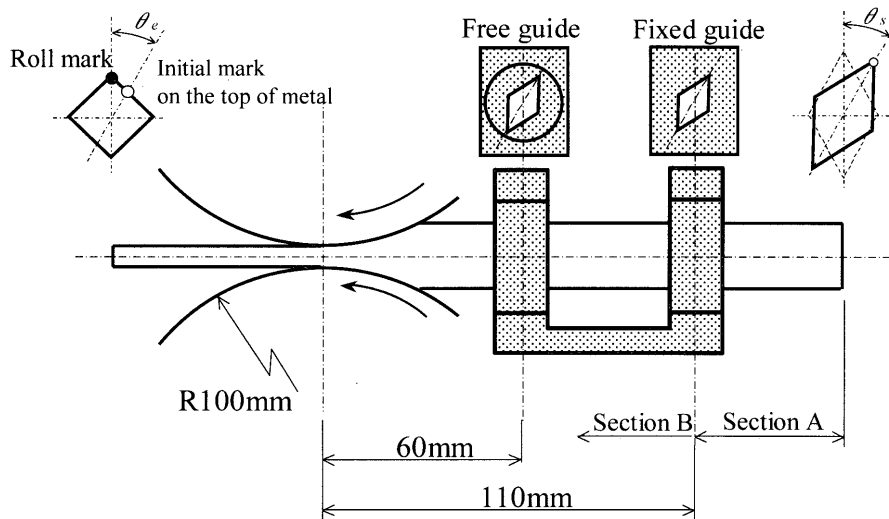


Fig. 4. Structure and position of guides for experimental caliber rolling.

うに出側傾斜角度  $\theta_e$  を被圧延材長手方向に測定する。入側傾斜角度  $\theta_s$  から出側傾斜角度  $\theta_e$  への変化から復元/転倒を判定する。出側傾斜角度  $\theta_e$  とは, 圧延前に材料頂点に記したけがき線の断面内移動角度であり, 任意の断面について, けがき線, 断面中心線, ロールマークの3点のなす角度を測定して求める。

2.3 理論解析方法

理論解析は定常3次元塑性流れを想定し, 3次元剛塑性FEMによって行った<sup>5-7)</sup>。使用した解析システム(CORMILL System)により, 圧延方向全断面を対象とした非対称圧延解析を行うことができる。Fig. 6 に示す通り, 圧延方向断面内での塑性流動が, 被圧延材中心を原点とした点対称流動になることに着目し, (1)式で表される点対称流動条件が満足されるとの境界条件のもとで, 被圧延材右側断面(1/2断面)を解析した。ここでは, 幅方向をx軸, 圧下方向をy軸, 圧延方向をz軸とする。

$$\begin{aligned} \dot{u}_x^{(i)} &= -\dot{u}_x^{(j)} & \dot{u}_y^{(i)} &= -\dot{u}_y^{(j)} & \dot{u}_z^{(i)} &= \dot{u}_z^{(j)} \\ F_x^{(i)} - F_x^{(j)} &= 0 & F_y^{(i)} - F_y^{(j)} &= 0 & F_z^{(i)} - F_z^{(j)} &= 0 \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

(1)式は, 点対称位置にある被圧延材中心線上の節点(i)と節点(j)の速度および節点力である。変形域入口での速度は, 式(2)に従うものとし, 変形域出口位置(x,y)での速度は式(2)の通り, 旋回方向の速度を許容している。

$$\begin{aligned} \text{入口面: } \dot{u}_x &= 0 & \dot{u}_y &= 0 & \dot{u}_z &= (\text{uniform}) \\ \text{出口面: } \dot{u}_x &= -r\dot{\omega} \sin \omega & \dot{u}_y &= r\dot{\omega} \cos \omega & \dot{u}_z &= (\text{uniform}) \\ \left( \begin{aligned} \dot{\omega} &= (\text{uniform, unknown}) & r &= \sqrt{x^2 + y^2} & \omega &= \tan^{-1} \frac{y}{x} \end{aligned} \right) \\ & \text{但し } \dot{\omega} \text{ は出口での回転角速度である} \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

なお, 式(1)ならびに式(2)にて表される点対称流動条件は, すでにベアクロス圧延の解析<sup>8)</sup>において適用されているが, 本報では点対称流動条件による解析を, 複雑な接

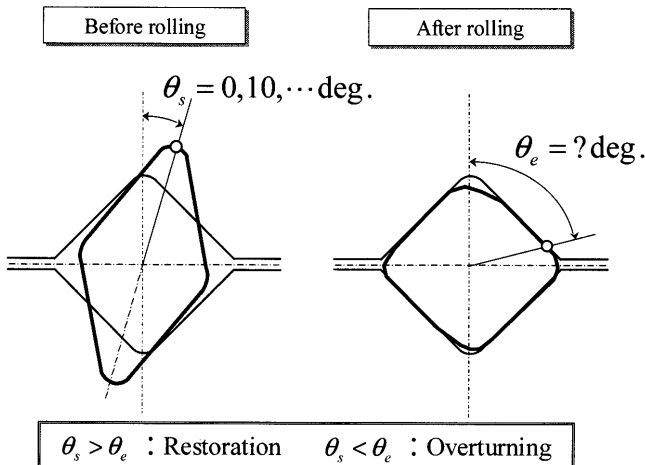


Fig. 5. Measuring point for evaluation of restoration or overturning.

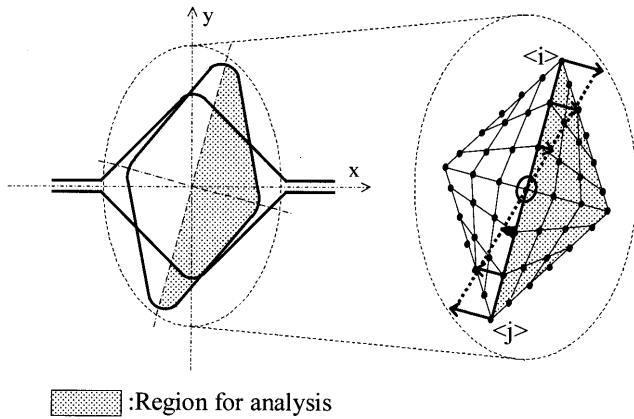


Fig. 6. Distribution of cross-sectional velocity component with twisting of workpiece.

Table 1. Condition of experiment.

Pass type	Diamond - Square Square - Oval
Roll diameter /mm	100
Rolling speed /rpm	30
Temperature	Room temperature
Material of specimen	Pure lead

触領域・複雑な3次元流動を呈する条鋼系圧延に適用している。

### 3. 倒れについての実験結果と解析結果

#### 3.1 実験条件と解析条件

Table 1 に実験条件を, Table 2 に解析条件を示す。ロール孔型形状, 寸法, 被圧延材寸法は Fig. 7 に示されている通りで, ダイヤスクウェア圧延を主としつつ, 参照のため一部スクウェアオーバル圧延を取り上げた。

#### 3.2 実験結果

Fig. 8 にダイヤモンドスクウェア圧延, Fig. 9 にスクウェアオーバル圧延の実験結果を示す。横軸は被圧延材の長手方向距離で原点は先端, 縦軸は圧延後の出側傾斜角度である。なお, Section A はガイドによる拘束のため圧延中に入口傾斜角度が保たれていたモード1領域を表し, Section B はガイドによる入口角度拘束が外れた状態で圧延されたモード2領域を表している (Fig. 4 参照)。

ダイヤモンドスクウェア圧延において入口角度が大きい  $\theta_s=30(\text{deg.})$  の場合には, ガイドによる拘束がある Section A の領域において, すでに出口で転倒している状態になっている。これは, 圧延ロールバイト内およびその近傍のね

Table 2. Condition of analysis.

Pass type	Diamond - Square Square - Oval
Roll diameter /mm	100
Rolling speed /rpm	30
Temperature /K	1273
Flow stress /MPa $\bar{\sigma} = \sigma_0 \cdot (a + b\bar{\epsilon}^n) \cdot \bar{\epsilon}^m$	Misaka's formula $\bar{\sigma} = 128.0\bar{\epsilon}^{0.21} \cdot \bar{\epsilon}^{0.13}$
Friction coefficient	0.3
Front / Back tensions $\sigma_f / \sigma_0, \sigma_b / \sigma_0$	0
Region of analysis	Right half
Mesh division width×thickness×length	$N_x \times N_y \times N_z = 5 \times 10 \times (2+10+2)$

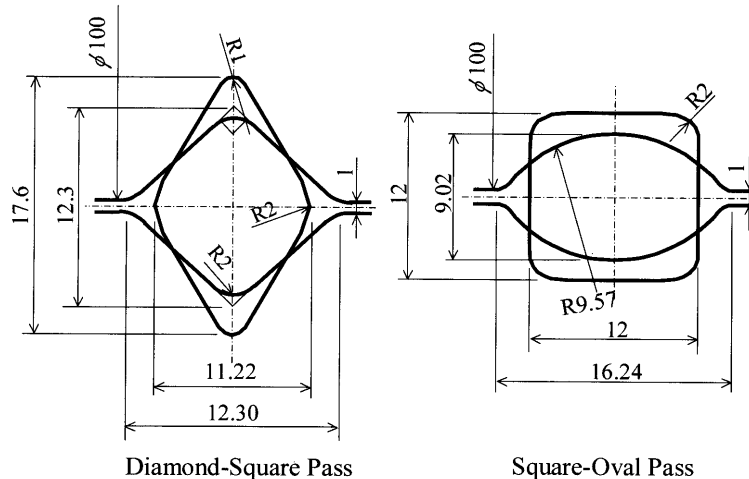


Fig. 7. Dimensions of stock and roll profile.

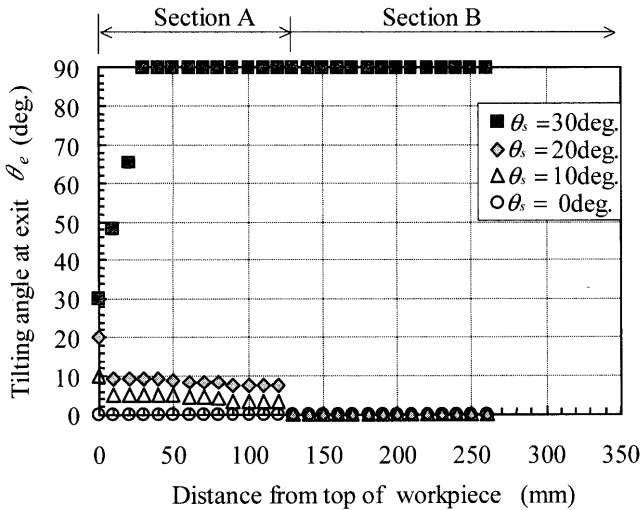


Fig. 8. Transient change in tilting angle at exit  $\theta_e$  in Diamond-Square Pass by laboratory experiment.

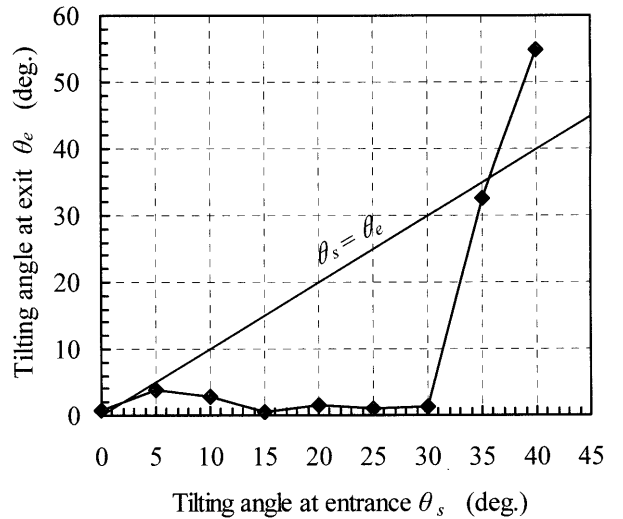


Fig. 10. Relationship between  $\theta_s$  and  $\theta_e$  in Diamond-Square Pass by FEM.

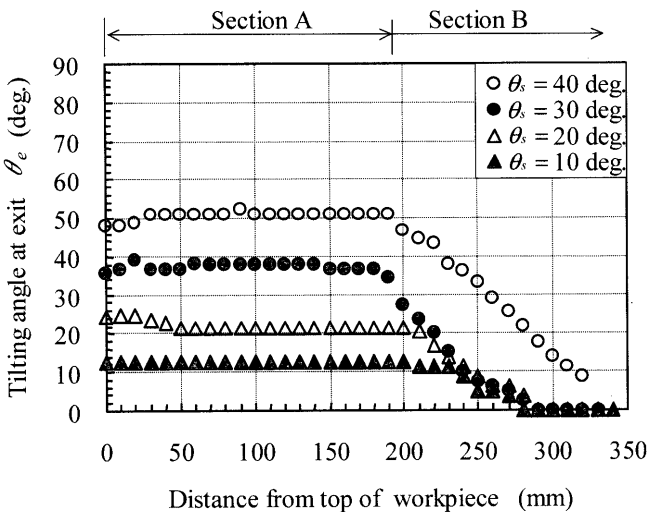


Fig. 9. Transient change in tilting angle at exit  $\theta_e$  in Square-Oval Pass by laboratory experiment.

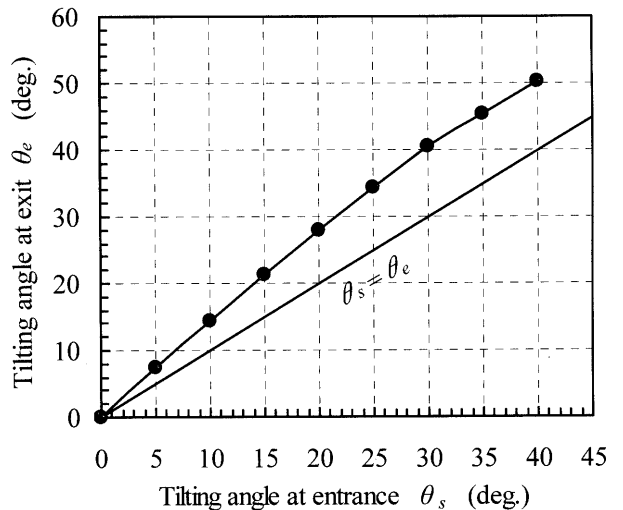


Fig. 11. Relationship between  $\theta_s$  and  $\theta_e$  in Square-Oval Pass by FEM.

じり変形によって転倒していること、すなわちモード1による転倒の発生を表している。これに対して、 $\theta_s=20(\text{deg.})$  の場合には、ガイド拘束がある領域 (Section A) で先端部がわずかに復元方向のねじり変形を受け、ガイド拘束が外れた領域 (Section B) に入ると直ちに、被圧延材は完全に復元する (モード2での復元)。同様の傾向は  $\theta_s=10(\text{deg.})$  でも見られる。以上を要するに、ダイヤモンドスクウェア圧延では、入口角度  $\theta_s$  が  $30(\text{deg.})$  を超えるとモード1により転倒し、これ以下の入口角度では被圧延材はモード1とモード2よりの組み合わせによって復元する。

スクウェア-オーバル圧延では、ガイド拘束がある領域 (Section A) ではわずかに転倒方向の変形を受け (モード1)、ガイド拘束が外れた領域 (Section B) に入ると被圧延材は徐々に復元をはじめ、最終的には完全に復元する (モード2)。

### 3.3 解析結果

Fig.10 に、解析により得られたダイヤモンドスクウェア圧延時の入口角度と出口角度の関係を、Fig.11 にスクウェア-オーバル圧延時の入口角度と出口角度の関係を示す。この解析では入口面の角度を固定しているの、ガイド拘束がある Section A の実験結果 (モード1) が、直接の比較対象となる。

ダイヤモンドスクウェア圧延において、入口角度と出口角度との間には特徴的な関係がある。すなわち、入口傾斜角度  $\theta_s=30(\text{deg.})$  以下では出口では完全に復元し、 $\theta_s=35(\text{deg.})$  以上では転倒方向のねじり変形を受ける。このことは、 $\theta_s=35(\text{deg.})$  前後を境にロールバイト内でのねじり変形が反転していることを意味している。実験では被圧延材の転倒が発生する入口角度は  $\theta_s=30(\text{deg.})$  であり、解析では実験により得られた転倒 (倒れ) の発生の限界とその状況を、

モード1については良い精度で解析できていると考えられる。

スクウェア-オーバル圧延はすべての角度において圧延後、やや転倒傾向にあるが、ダイヤ-スクウェア圧延時に見られたような、モード1による完全な転倒は観察されない。実験結果 Fig. 9 の Section A の領域に現れているように、この圧延方式ではわずかに転倒方向のねじり変形が表れているが、Fig.11 に示されている解析結果はこの現象をよく再現できている。

#### 4. 入口断面に作用するねじりモーメント

入口面にガイド拘束がある Section A (モード1) の領域では、既に述べた通り解析結果と実験結果との対応は良好であるが、ガイド拘束が外れた Section B (モード2) の領域においても、復元方向に作用しているのか、転倒方向に作用しているのかを判断する必要がある。2つの全く違う圧延方式について、モード2における被圧延材の倒れやすさ、倒れにくさを評価することも、棒線材圧延スタンドの孔形設計において重要な課題である。そこで、Section B (モード2) の領域において、被圧延材が転倒するのか復元するのかを判定するために、Fig. 2 に示すような、入口断面に作用するねじりモーメント  $M_{Ent}$  を FEM 解析の結果より算出し、これを元にした倒れ指標の導出を試みた。

まず、棒鋼・線材圧延において圧延特性を左右するパラメータを整理すると、以下のように分類できる。

- ・被圧延材/孔型形状：被圧延材横断面形状，接触領域形状，荷重分布
- ・ロール直径：接触弧長，荷重絶対値，速度分布
- ・被圧延材温度：荷重絶対値，接触領域形状
- ・前/後方張力：被圧延材横断面形状，接触領域形状，荷重絶対値

すなわち、圧延条件により変化するデータは、被圧延材横断面形状，接触領域形状，荷重分布，荷重絶対値の4つに集約することができる。これらを、FEMの解析結果より得られるデータに置換して考えると、以下のパラメータを導くことができる。

- ・荷重分布，接触領域形状：入口断面に作用するねじりモーメント
- ・被圧延材横断面形状：断面2次極モーメント
- ・荷重絶対値：被圧延材の平均変形抵抗

以上のような、荷重分布，接触領域形状，被圧延材横断面形状，荷重絶対値の影響を除去するために入口断面に作用するねじりモーメント  $M_{Ent}$  を圧延中の棒線材の変形抵抗，被圧延材横断面形状に起因する断面2次極モーメントによって除することにより、次式(3)を得た。

$$\frac{M_{Ent}}{I_z \cdot \bar{\sigma}_{ave}} \quad (\text{mm}) \dots \dots \dots (3)$$

なお、 $\bar{\sigma}_{ave}$  はロールバイト内の平均変形抵抗、 $I_z$  は入口断面2次極モーメントである。この式(3)はモード2における被圧延材単位長さあたりのねじり角度を表すものである。しかしながら、これまで述べてきたように倒れはロールバイト内におけるねじり変形により発生するため、被圧延材、孔型形状より幾何学的に得られる接触弧長を用いることでモード1の状態からモード2の状態に変化した際の倒れの挙動を表す式(4)が得られる。

$$\bar{M} = \frac{M_{Ent}}{I_z \cdot \bar{\sigma}_{ave}} \cdot L_D \dots \dots \dots (4)$$

なお  $L_D$  は最大投影接触長であり、 $\bar{M}$  は無次元モーメント(無次元量)と称することとする。この無次元モーメント  $\bar{M}$  は物理的には入口面における被圧延材への拘束がなくなった場合の倒れやすさ、倒れにくさをあらわす量であると言え、主としてモード2に対応した被圧延材の倒れを評価する指標として利用できると考えられる。

Fig.12 に、無次元モーメント  $\bar{M}$  の計算結果を示す。ダイヤ-スクウェア圧延では、初期傾斜角度  $\theta_s$  が大きくなるにつれ徐々に大きくなり、 $\theta_s=30(\text{deg.})$  を境に値が逆転し、転倒方向の無次元モーメントが入口面に作用している。 $\theta_s=10\sim 25(\text{deg.})$  の角度では、復元方向の無次元モーメントの値が大きく、これは実験において、ガイド拘束が外れモード2の領域 (Section B) に入った瞬間、直ちに被圧延材が復元していることに対応している。スクウェア-オーバル圧延では無次元モーメントの値が小さく、ダイヤ-スクウェア圧延と比較して復元/転倒しにくい孔形であることがわかる。このことは、Fig. 9 に示されている実験においても明白である。すなわち、この孔形では、ガイド拘束が外れモード2の領域 (Section B) に入った後の復元

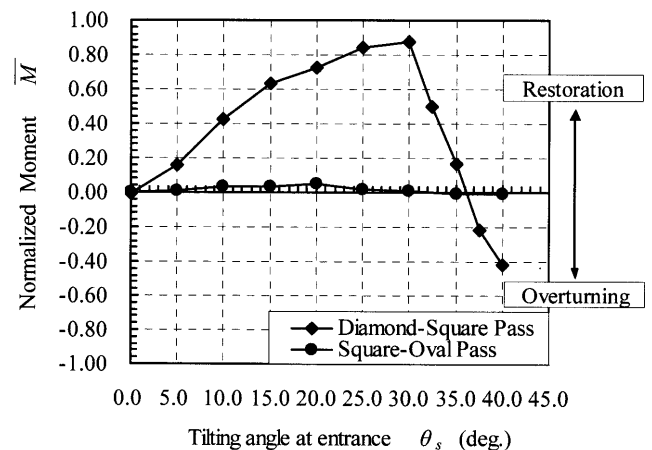


Fig. 12. Relationship between normalized moment  $\bar{M}$  acting to entrance of workpiece and initial tilting angle of workpiece  $\theta_s$ .

が、ダイヤ-スクウェア圧延と比較して遅いが、これは無次元モーメント $\bar{M}$ の値が小さいことに対応している。

## 5. 結言

本研究では、ダイヤ-スクウェア圧延、スクウェア-オーバル圧延における倒れを取り上げ、解析と実験によってその発生限界や発生状況について検討を行った。その結果以下の結論を得た。

(1) 倒れは発生形態によりガイドもしくは前スタンドから被圧延材への拘束が強い場合(モード1)に発生する倒れと前スタンドから被圧延材への拘束が弱い場合(モード2)に発生する倒れによって分類できる。

(2) 倒れは本研究で提案した3次元解析手法によって、モード1、モード2いずれについても、精度良く解析できることが、実験結果との比較により明らかとなった。モード1についてはFEM解析により得られる3次元変形形状、そしてモード2については新たに無次元モーメント $\bar{M}$ を導入することで説明することができることを実験との比較により示した。

(3) ダイヤ-スクウェア圧延はモード1、モード2のい

ずれにおいても復元/転倒の境界角度が明確であること、スクウェア-オーバル圧延はモード1では孔型内での材料流動が少なく復元しづらいこと、そしてモード2では復元しやすい圧延方式であることが実験と解析の両面から示された。

本研究では、倒れを直接3次元解析することで、その発生限界や原因を論じたが、より重要なことは、倒れの発生を抑制する孔形設計指針の確立である。この指針の確立には、本研究で提案した3次元FEM解析が有効なツールとなるものと考えられる。

## 文 献

- 1) T. Ohno: *Tetsu-to-Hagané*, **55** (1969), 1286.
- 2) M. Shternov: *Stal*, (1963) Nov., 874.
- 3) M. Asakawa: *Proc. 1970 Japanese Spring Conf. for the Technology of Plasticity*, (1970), 141.
- 4) M. Masuda and T. Kurokawa: *Proc. 31st Japanese Joint Conf. for the Technology of Plasticity*, (1980), 391.
- 5) J. Yanagimoto, M. Kiuchi, M. Nakamura and R. Kurahashi: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **32** (1991), 1000.
- 6) J. Yanagimoto: *Seisan-Kenkyu*, **43** (1991), 512.
- 7) J. Yanagimoto: *Seisan-Kenkyu*, **49** (1997), 414.
- 8) J. Yanagimoto, M. Kiuchi and Y. Nishiyama: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 254.