

# 分塊圧延用高圧下浸透圧延法の開発

京都工芸繊維大学 機械システム工学部門

教授 秋山雅義

(平成19年度重点研究開発助成 AF-2007003)

**キーワード**：熱間圧延、圧下浸透、ロール傾斜、円錐台型ロール、異周速圧延、せん断変形、高圧下圧延法、パス数削減

## 1. 研究の目的と背景

本研究の目的は、鉄鋼の分解圧延<sup>(1)</sup>を例に取り、高圧下浸透可能な圧延法を開発することである。分塊圧延は鋼板や矩形断面の棒鋼などの種々の鋼材の延伸圧延技術の基本となる圧延法であり、一對の円柱ロールによる最も単純な形の圧延であり(図1-(a))、加工を被圧延材内部まで浸透させることで素材内部のポロシティーや偏析を抑制しながら、結晶粒径や機械的性質などの種々の特性を被圧延材内部まで均質化し、同時に被圧延材の形状を整え、それらが次の加工工程の素材として適切な範囲に収まる様に整えることがその狙いである。特性の調整が材料横断面内で均一に行われれば問題は無いが、圧延加工はロールと被圧延材の間の接触を通じて行われるため、接触界面での摩擦が被圧延材内部への圧下浸透の度合いに影響を及ぼす。即ち、圧延に際しては被圧延材のコーナー部分に変形が集中し、中心部まで均一な圧下が浸透し難いため、少数パスの圧延を繰り返すだけでは、圧延で狙う中心部までの圧下浸透効果が十分には得られず、圧延のパス数が増加してしまうことが多い。もし圧延形態を変更することで圧下浸透効果が飛躍的に改善されるのであれば、狙いの圧下浸透効果を得るための圧延パス数を削減することが可能となる。もし圧延の素材と仕上げ寸法が変わらないのであれば、パス回数削減の波及効果として、圧延にかかるエネルギーコストが削減される。あるいは、仕上げ寸法が変わらないとすれば、狙いの圧下浸透効果を得るために必要な素材寸法を小さくすることが可能となり、その結果として圧延負荷は低減され、圧延にかかるエネルギーコスト削減が可能となる。この様に、圧下浸透効果が大きければ、工業的な効果も大きい。それが小さければパス回数削減や素材寸法縮小には繋がらない。具体的に述べれば、新しい方法による圧下浸透効果の改善代が数%程度であれば、工業的な効果は期待できない。パス回数削減や素材寸法縮小に繋がる効果を得るには、少なくとも10%以上の改善効果を期待できる技術でなければならない。

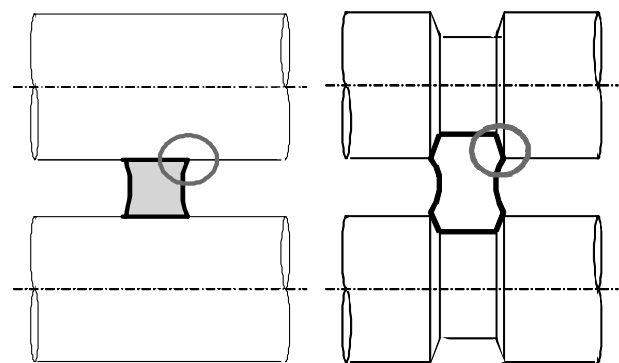
上記の通り、分塊圧延は鋼板や矩形断面の棒鋼などの種々の延伸圧延の基本となる圧延法であり、この方法で圧下浸透効果の格段の改善が図られれば、その基本的な技術は他の圧延法に展開可能である。以上が本研究の狙いとするところであるが、本研究終了後の最終目標は、内部まで均一な加工を付与する圧延法を確立して、種々の製造現場での加工技術の高度化を図ることである。例えば、素材内

部への圧下浸透効果が小さいために従来は圧延法の採用は考慮されていなかった金属加工以外の材料加工の領域へ圧延法を展開することも可能となるであろう。

ここで本研究の対象となった分塊圧延の背景を振り返って見る。分塊圧延での圧下浸透効果改善の試みとして、多パス圧延時の各パス毎の圧下配分を調整する方法が一般的である。この方法は、鋼材のコーナー部に集中してしまう変形を多パス圧延をすることで出来るだけ分散させる様に、中心までの圧下浸透を図る方法である。一方この様な局所変形を極力抑制しながらパス当たりの圧下量を大きくしようとする試みもなされており、その場合は鋼材のコーナーを巻き込んで圧延する様な形の孔型ロールが用いられて来ている(図1-(b))<sup>(2)</sup>。しかし、いずれもその効果は限定的で、その結果として、圧延回数を増やすことで狙いの圧下浸透を得る形の圧延形態が踏襲され、現在に至っている。

鉄鋼業での連続鋳造技術の発展と共に、製鋼工程の後、造塊工程と分塊圧延を経る製品は少なくなっているが、分塊圧延の技術と基本問題が、連続鋳造の後半部分以降に始まり以下の下工程で行われる種々の圧延法の基本技術と基本問題であることには変わりがない。具体例を挙げれば連続鋳造の後半部分ではセンターポロシティー等の内部欠陥を如何にして抑制するかという点に大きな注力がなされている。この問題は冷却による材料収縮と圧下浸透効果の最適な組み合わせの問題と捉えることが出来る。

本研究では過去の圧延研究に倣い、粘土での実験<sup>(3)</sup>と鋼での実験により提案技術の効果を確認し、弾塑性 FEM で圧下浸透を定量的に評価した。以下に詳細を述べる。



(a) 従来の分塊圧延法 (b) 局所変形抑制孔型の例  
図1 分塊圧延の概念図

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置の基本設計思想

装置設計の基本的な考え方は極めて単純で、一對の圧延ロールの形状を傾斜角  $\theta$  の円錐台に変え（図2）、次の様な効果を産むことを期待する。先ず、円柱ロールでは上下ロールが同じ周速で回転するために被圧延材の上下面は材料中央の水平面に関して対称な圧延加工を受けることになる。また、幅方向に関してはロール径の変化は無いので、ロール作用面と被圧延材の接触弧の形状は幅方向には同じで、2次元である。一方、円錐台のロールを用いると、ロール周速はロール軸方向に異なり、また幅方向の同じ位置で被圧延材の上下面に接触するロール周速が異なるために、被圧延材に対しては、ロール接触面からの摩擦力によって3次元的なせん断力が与えられ、これによって被圧延材内には3次元的なせん断変形が発生する。

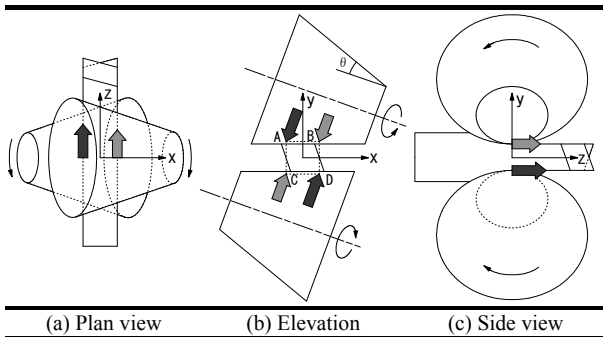


図2 装置設計の基本思想とその期待効果

この力学的境界条件の変更手段は、板圧延において上下ロールに周速差を与える異周速圧延<sup>(4)</sup>のそれと基本的には同じであるが、板圧延の場合は円柱ロールを用いるために、幅方向には周速分布が無く、変形は2次元的なものに留まる。板の異周速圧延ではせん断変形導入による圧延荷重の低減効果が確認されているが、幅方向にはせん断変形が導入されないために、荷重の低減効果は限定的である。

一方、本装置ではせん断変形が3次元的に導入され、せん断応力の総ての成分が値を持つようになるために、板の異周速圧延以上の圧延荷重低減効果が期待される。即ち、巨視的に見れば、板の異周速圧延では、幅方向の変形を支配するせん断応力成分は無視して良いが、本装置の様に円錐台型ロールを用いると、降伏条件の中の総てのせん断応力成分が値を持つ。降伏に必要なフローストレスの値は同じであるから、降伏条件の中にあるせん断応力成分のノンゼロ項が増えれば、塑性変形に必要な垂直応力成分の値が小さくなる。その結果として、円錐台ロールを用いれば、圧延反力の減少効果は更に大きくなる。

なお、本装置と構造的には同種の装置でロールに孔型を切り、線材の圧延で実用化した例<sup>(5)</sup>や管の穿孔圧延等の例<sup>(6)</sup>があるが、これらは材料に強制回転を与えるために円錐台ロールを用いたものであり、軸方向延伸圧延を対象とした本装置の基本設計思想は全く異なるものである。

### 2.2 実証実験装置の概要

実証実験は二段階に分けて行った。第一段階は粘土を用いた実験で、木製ロールの上にパテを塗りスプレーノスを吹き付けて仕上げ、粘土が粘着しない様に仕上げた（図3）。

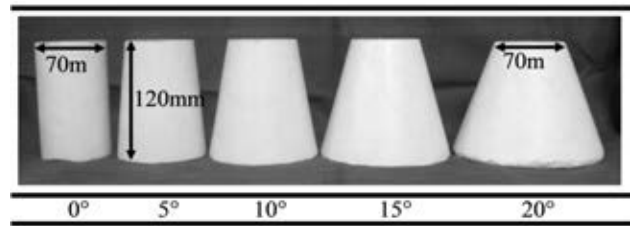


図3 製作した傾斜角20度までの木製ロール一覧

これらのロールを試作した圧延機（図4）に組み込み、圧延を行った。三軸方向の圧延荷重を測定するために、圧延機にはロードセルが装着されている（図5）。粘土で作成した素材は横断面が35mm角、長さが120mm、圧下浸透評価用に中心に $\phi 5\text{mm}$ の孔を開けている（図6）。

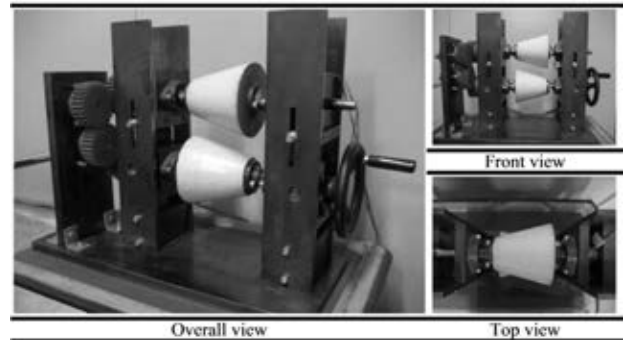


図4 製作した粘土圧延用の圧延機

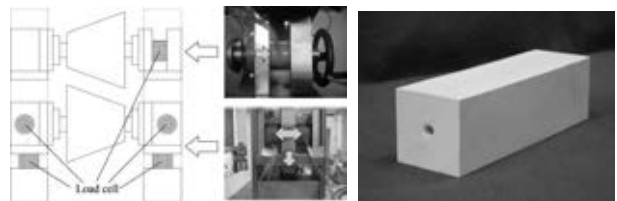


図5 ロードセル装着位置 図6 素材試験片外観

圧延材の巨視的変形は図7の方法で評価した。圧下浸透度は中心孔の変形をアスペクト比  $a/b$  で評価し、三軸方向のせん断変形は、図7に示す様に、被圧延材の横断面のずれ角  $\alpha$ 、圧延面（被圧延材上下面）先頭のずれ角  $\beta$ 、圧延側面のずれ角  $\gamma$  でそれぞれ評価した。

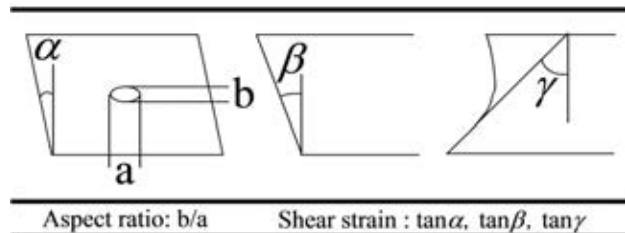


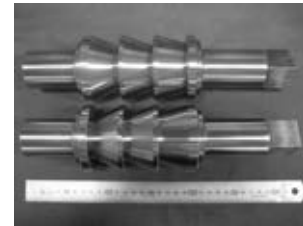
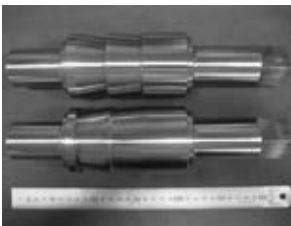
図7 圧下浸透度ならびにせん断変形の評価方法

第二段階の実験は鋼材を用いた熱間圧延実験である。用いた圧延機を図8に、試験片の外観を図9に示す。試験片はS45Cで横断面が15mm×15mm、長さが75mmで、横断面中央に片端面から軸方向中央までφ3mmの孔がある。圧延に用いたロールを図10に示す。傾斜角は0°から25°まで5°ピッチで揃え、太径部径を70mmに統一した。



図8 熱間鋼圧延用圧延機

図9 S45C 試験片



(a)低角度ロール(~10度) (b) 高角度ロール(~25度)

図10 鋼圧延用ロールの外観

熱間圧延の目的は二つあり、一つ目は粘土の圧延で得られた中央孔のアスペクト比に及ぼす傾斜角と圧下率の影響を定量的に比較し、粘土の実験の妥当性を吟味すること、二つ目は中央孔が空いていない素材後半部分で圧下浸透度を評価することである。前者の目的のためには粘土同様アスペクト比を測定すれば良い。後者の目的のためには、結晶の異常粒成長現象を用いる。図11に示す、炭素鋼や低合金鋼では、塑性加工で与える相当塑性ひずみと加熱温度が同図中に斜線で示したバンド幅内に収まると静的再結晶起因の異常粒成長が観察されるという現象<sup>(7)</sup>を利用する。即ち、素材を大気炉で1173Kに加熱後、6%、9%、12%の3つの圧下率を目標にして圧延し、大気温度まで空冷した。空冷後の試験片は、中央孔が空いている試験片前方部分の中央の横断面で切断して孔のアスペクト比を測定すると共に、試験片後方部分中央の孔の空いていない部分の横断面内の結晶粒を光学顕微鏡で観察した。観察面はバフ研磨後3%ナイトール液で腐食した。

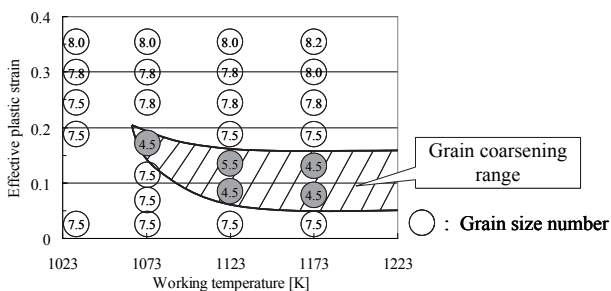


図11 圧下浸透評価に用いた異常粒成長の条件<sup>(7)</sup>

### 3. 実験結果

#### 3.1 粘土による実験結果

図12に圧下率と傾斜角が、素材横断面の形状とその中央部分の孔形状に及ぼす影響を示す。明らかに、圧下率の増加に伴い、そして傾斜角の増大に伴い、横断面のせん断変形と孔の扁平度は大きくなること判る。図13に傾斜角と圧下率が孔のアスペクト比に及ぼす影響を示す。

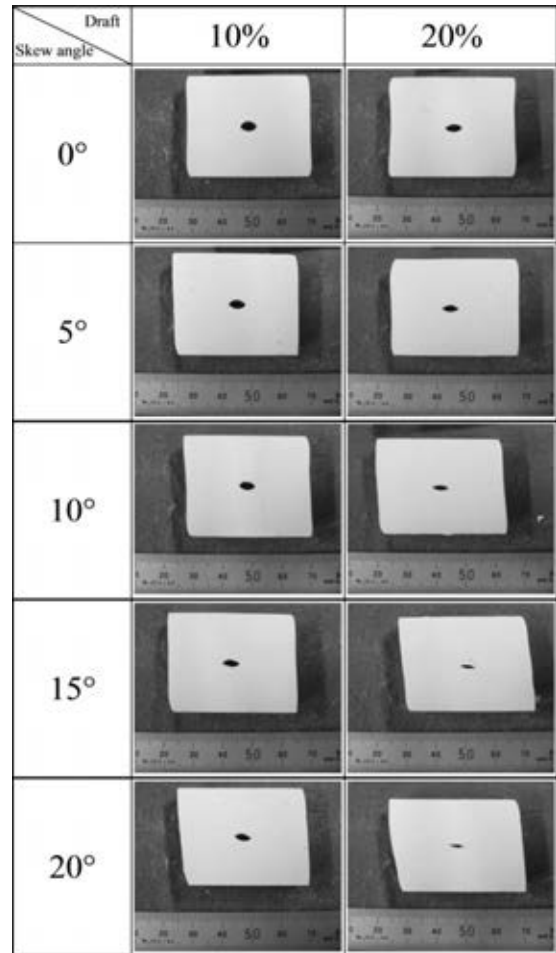


図12 材料横断面のせん断変形と孔の圧壊効果に及ぼす傾斜角と圧下率の影響

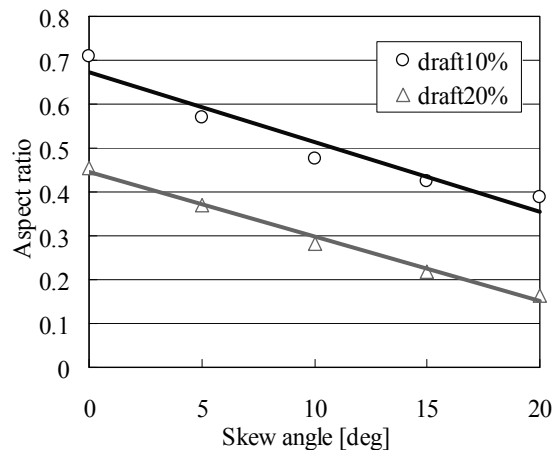


図13 傾斜角と圧下率が圧延後の孔のアスペクト比に及ぼす影響

圧下率 10% の場合について傾斜角がロール反力とロールスラスト力に及ぼす影響を図 1 4 に示す。傾斜角の増大に伴い、ロール反力は漸減するが、ロールスラスト力は漸増する。従って、実用的な圧延機設計を行う際にはロールの軸方向移動を拘束するベアリング機構が必要となる。

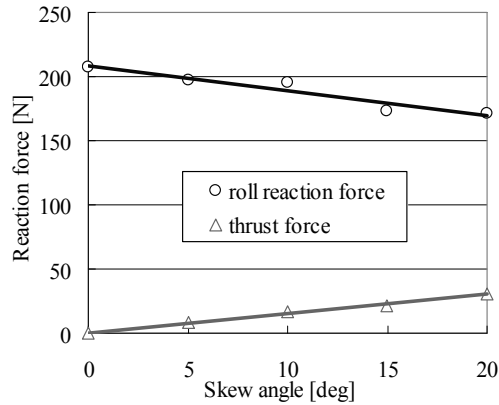


図 1 4 圧延反力とスラスト力に及ぼす傾斜角の影響

圧延端の形状に及ぼす傾斜角の影響を図 1 5 に示す。圧延面の角度  $\beta$ 、圧延側面の角度  $\gamma$  共に傾斜角の増大と共に増加することが判る。

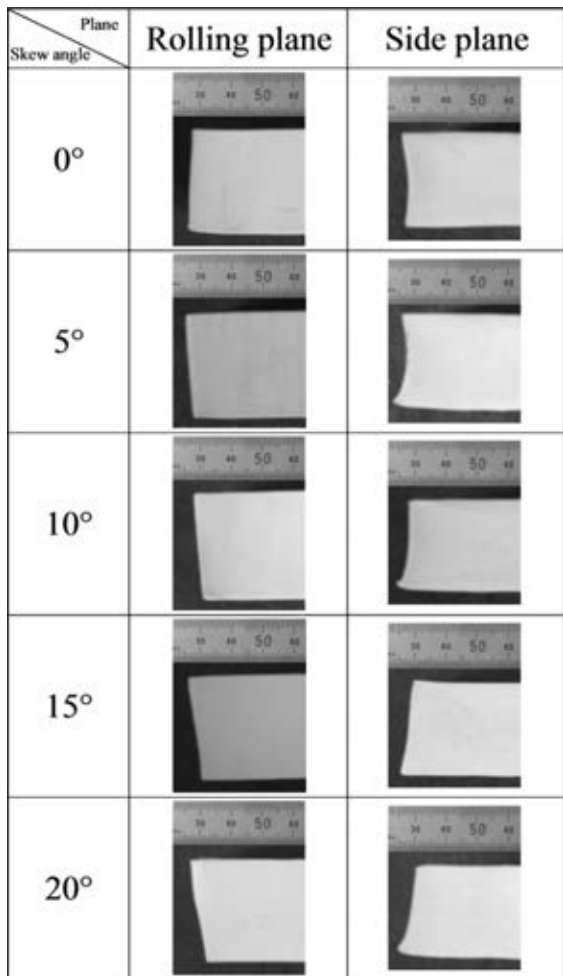


図 1 5 圧延端形状に及ぼす傾斜角の影響

図 7 で定義した端面形状を規定する 3 種類の角度  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  について、傾斜角の影響を纏めて図 1 6 に示す。なお  $\alpha$  は X-Y 平面、 $\beta$  は X-Z 平面、 $\gamma$  は Y-Z 平面で観察した角度である。なお、 $\beta$  だけが傾斜角ゼロでもゼロではないが、これは上限端共に同じ  $\beta$  を持つためである。

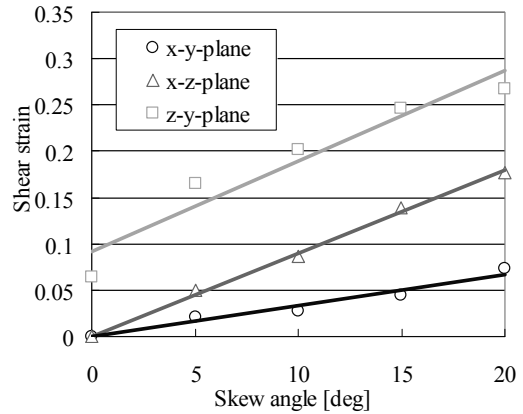


図 1 6 材料外面せん断変形に及ぼす傾斜角の影響

このような非対称変形は異周速圧延につきものであるが、分塊圧延は多パス圧延であり、後続のパスで逆の傾斜角を持たせて圧延をすればこの変形は相殺される (図 1 7)。

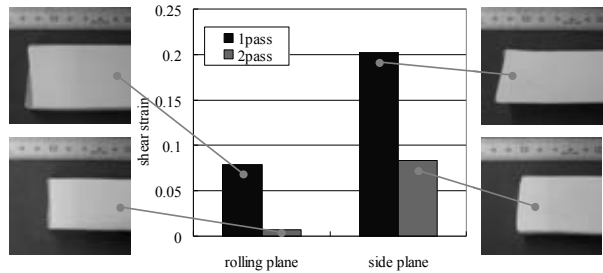


図 1 7 逆圧延による先端非対称変形の解消効果

### 3-2 熱間鋼による実験結果

横断面 15mm×15mm で  $\phi$  3mm の中心孔が熱間圧延後にどの様に変形するかを粘土の場合と同様、測定した。傾斜角 0° と 20° の例を図 1 8 に示す。粘土の場合と定性的に同じ傾向であり、傾斜角が増加するにつれ、そして圧下率が增加するにつれて、せん断変形は増大し、一方アスペクト比は減少する。すなわち鋼を使った実験でも傾斜角付与による圧下浸透効果が期待させる結果が得られた。

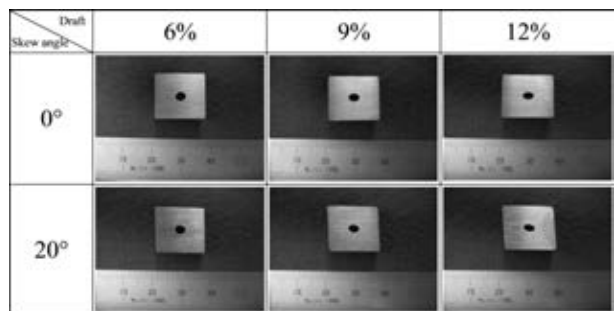


図 1 8 鋼の熱間圧延材の中心孔の変形例



圧下率と傾斜角が圧延後の孔のアスペクト比に及ぼす影響を図19に示す。傾斜角 $20^\circ$ で0.1程度のアスペクト比の減少が見られる。一方、12%の圧下率で円柱ロールと傾斜角 $20^\circ$ のロールでの圧延後の結晶粒分布を比べると図20の様になる。相当塑性ひずみは横断面内で分布し、異常粒成長による粗粒化が傾斜角 $20^\circ$ での圧延では発生しており、圧下浸透度の向上を裏付けている。

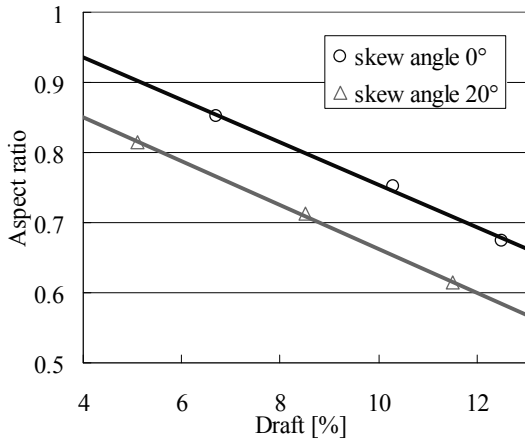


図19 孔のアスペクト比に及ぼす圧下率の影響

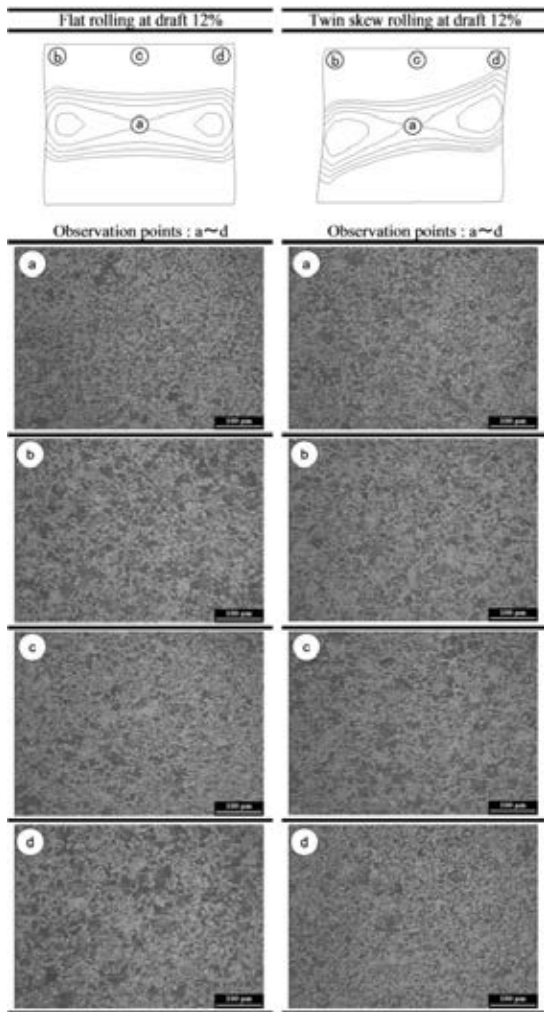


図20 異常粒成長の確認結果

#### 4. 数値解析

傾斜角を付与したロールによる熱間鋼圧延時の圧下浸透効果を確認するために弾塑性FEM解析を行った。使用したソフトウェアは”ELFEN”<sup>(8)</sup>である。図21に座標系と剛体と仮定したロールの配置を示す。

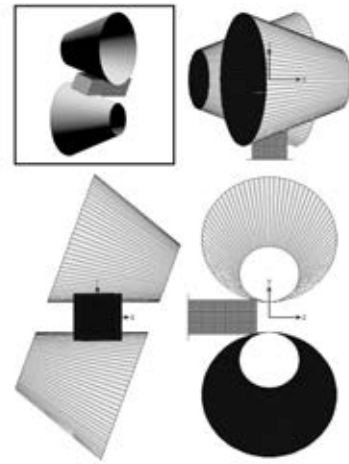


図21 弾塑性FEM解析用のロール配置

図22に解析に用いた応力-ひずみ線図を示す。これは対象材S45Cに対して $100^\circ\text{C}$ ピッチで高温域まで引張試験を行い測定した結果である。

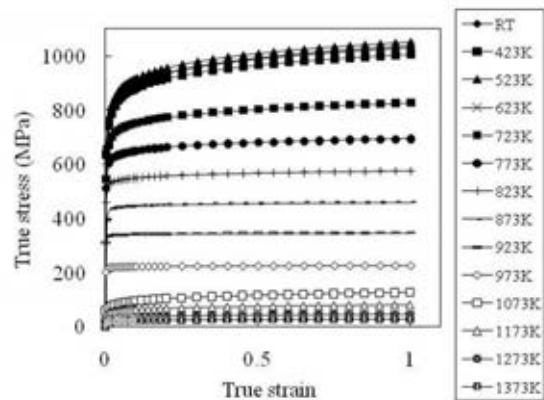


図22 S45Cの各温度域での応力-ひずみ線図

図23に試験片の幅方向中央面から幅方向側面半分の圧延後のメッシュとひずみ分布の例を示す。この結果から、横断面の幅程度の距離を軸方向に取れば、材料の変形は定常状態になっていると判断される。

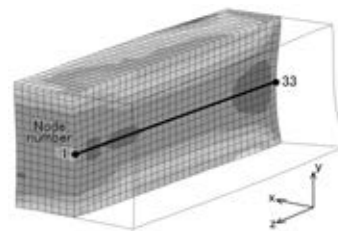


図23 熱間鋼圧延を想定した相当塑性ひずみ分布の例

解析結果の一例を図24に示す。圧下率は10%で、縦軸は横断面中心部の軸方向相当塑性ひずみの強度である。前後端の非定常部は除き、定常部では、傾斜角の増大に伴い、相当塑性ひずみの値は増大することが示されており、傾斜角付与によって中心部までの圧下浸透効果が強まることが明らかになった。

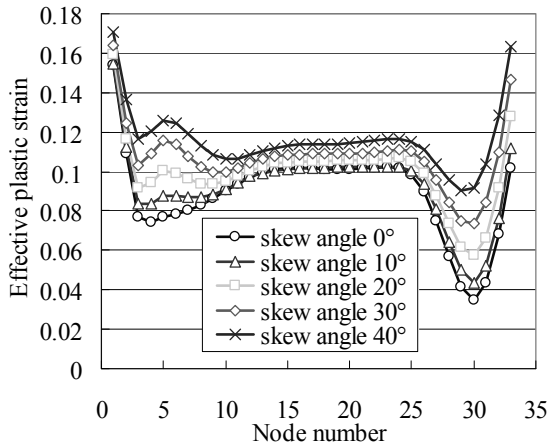


図24 断面中心上の相当塑性ひずみの軸方向分布

図25に圧延後の横断面の巨視的形狀と横断面内の相当塑性ひずみ分布に及ぼす傾斜角の影響を示す。せん断変形も相当塑性ひずみ分布も傾斜角の増大に伴い増加することが判る。傾斜角20度程度以上であれば、横断面中心部までの圧下浸透効果が顕在化することが判る。

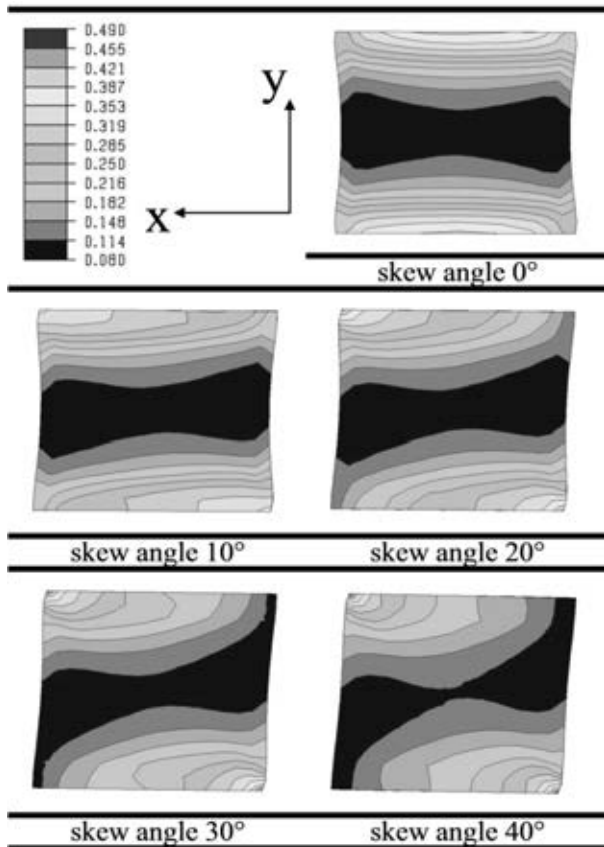


図25 傾斜角が相当塑性ひずみ分布に及ぼす影響

超巨大なロールは実用上交換不可能であるため、傾斜角とロール重量の関係を吟味した(図26)。傾斜角の増加に伴いロール重量は加速度的に増大するが、総合的に考えると傾斜角の最大値は20度程度と考えられる。

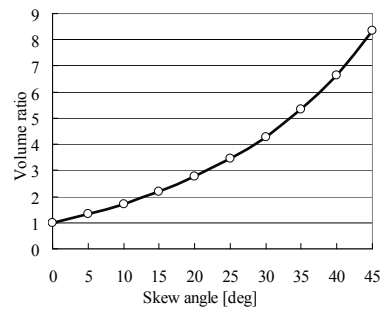


図26 細径部径固定ロール重量に及ぼす傾斜角の影響

## 5. 考察

以上の結果から傾斜角の効果および作用は明らかになったと言えるが、圧延時に用いられる部分のロール直径の大小が圧下浸透効果に及ぼす影響を定量的に評価しておくことは、傾斜角を有するロールの作用メカニズムをより明らかにするために重要である。そこで、ロール直径を傾斜ロール中央部の作用直径と同じに揃えた円筒形ロールを製作し、3章で述べた粘土を用いた圧延実験を行うことによって、傾斜角の影響とロール作用直径の影響とを分けて比較検討した<sup>[12]</sup>。

ところで、圧延では材料には圧縮変形が加えられるので、数値解析等に用いられる材料の応力-ひずみ線図は圧縮試験によって採取されるのが望ましいが、圧縮試験の試験片加工精度の問題や圧縮試験の危険性を考えた際の煩雑さ等から、圧縮試験は引張試験に比べて行われることが少なく、通常は引張試験のデータを用いて応力-ひずみ線図の原点周りの対称性を仮定した上で、この線図が流量されることが多い。この点に注目して、圧縮試験の試験片仕上げ寸法精度と危険性そして測定される応力-ひずみ線図の精度に関する吟味を行った<sup>[13]</sup>。

### 5.1 ロール作用直径の影響評価

ロール作用直径の影響吟味のために製作したロールの形状を図27に示す。15度の傾斜ロールに対比させるのは傾斜ロール中央部分と同じ直径の円筒ロールである。

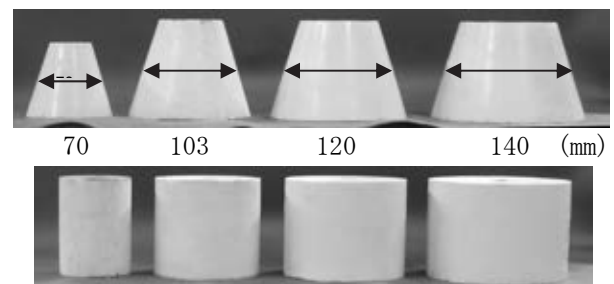


図27 作用直径を揃えて製作したロール幾何形状

圧延条件は3章で述べた場合と同じであり、粘土で作られた同寸法の孔あきビレットを作成し、これに10%と20%の圧下を加えた上でビレット断面中央の孔のアスペクト比を比較した。結果を図28に示す。同図中の0°の線が円筒ロールの圧延結果を、15°の線が傾斜角15°のロールでの圧延結果を示す。円筒ロールの場合にはロール直径の増大とともにアスペクト比が小さくなるが、その傾向は傾斜角のあるロールを採用した場合にははるかに大きいことが判る。

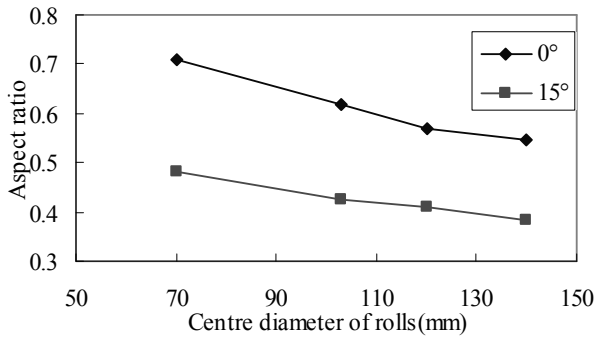


図28-a 10%圧下の場合の影響

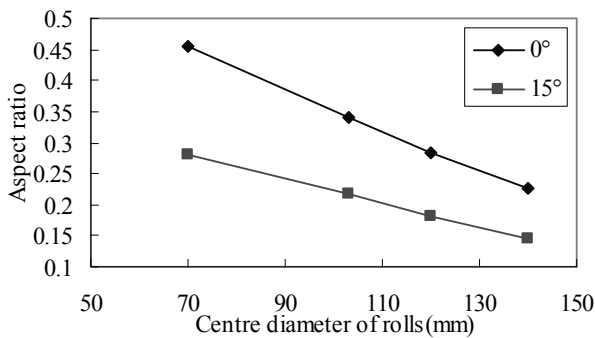


図28-b 20%圧下の場合の影響

図28 ロール作用直径が圧下浸透に及ぼす影響

以上で述べた粘土を用いた圧延に際しては、ロール表面と粘土の間の摩擦係数の大小の影響の吟味は行っていない。しかしながら、摩擦係数の大小が変形に大きく影響することは一般的に知られた事象であるので、その影響を分けて吟味しておけば、図28の結果をより冷静に評価することが出来る。粘土を用いた圧延に際しては摩擦係数を制御するためにCaCO<sub>3</sub>が用いられる。本研究でも同様にCaCO<sub>3</sub>を用いて摩擦係数を上昇させ、また冷間加工に用いられるせっけんをベースとした潤滑剤<sup>[14]</sup>を使用して摩擦係数を低下させ、比較圧延を行った。結果を図29に示す。せっけんベースの潤滑剤を用いて摩擦係数を低下させた場合は、アスペクト比の低下があまり起こらず、中心部までの圧下浸透が低下することが判る。また、CaCO<sub>3</sub>を用いて意図的に摩擦係数を上げて、アスペクト比に大きな変化は見られず、粘土の圧延時の摩擦係数は高いと推定される。以上のことから、本圧延法は熱間圧延の様に高摩擦係数の圧延において効果を発揮すると考えられる。

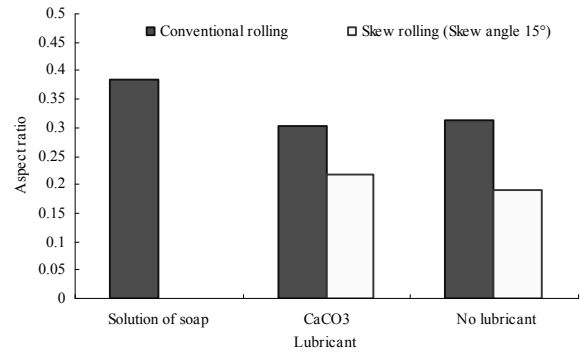


図29 潤滑の有無が圧下浸透効果に及ぼす影響

### 5.2 圧縮試験の試験片寸法精度と測定精度の吟味

圧延の数値解析前には、材料の応力-ひずみ線図を入力する必要があり、通常この線図は引張試験で採取されている。その前提には引張側と圧縮側の弾性応答特性や加工硬化特性は原点に関して点対称であるという仮定がある。しかし、対象材によっては引張側の特性と圧縮側のそれは異なることがある。圧縮特性を実測する場合には圧縮試験が行われる。一般的な圧縮試験方法としてはASTM-E9に記されたアスペクト比1.0以下の円柱試験片を用いた圧縮試験法がある。その測定精度に及ぼす試験片の幾何学的パラメータの影響に関する研究はある<sup>[15]</sup>が、幾何学的精度の端面精度の影響は明らかになってはいない。ここでは、試験片端面の傾斜度が測定精度に及ぼす影響を実験と数値解析両面から吟味し、ASTM-E9の規定中の端面傾斜度を、測定精度を落とさずに緩和出来ることを示した。

試験片の製作工程を図30に示す。試験片は紙やすりで端面を斜めに研磨し、その後図31に示す考え方によって端面傾斜度を測定した。

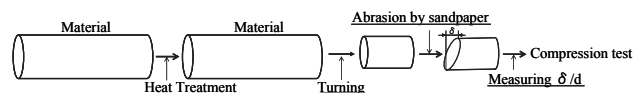


図30 圧縮試験片製作工程

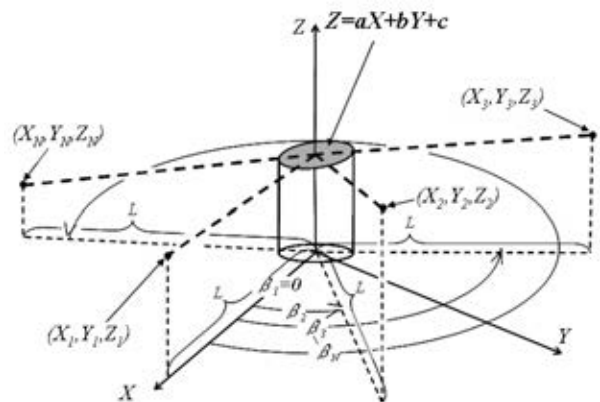


図31 圧縮試験片端面傾斜度測定の考え方

図30中の下端面は試験片の軸に垂直であると仮定する。この時、試験片上面の式は式(1)で表される。この式中の係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を  $N$  個の測定点  $(X_i, Y_i, Z_i)$  のデータを基に最小自乗法を用いて決定する。最小化される値  $S$  は式(2)で、その最小化条件は式(3)~(5)で表される。

$$Z = aX + bY + c \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^N (Z_i - aX_i - bY_i - c)^2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial c} = 0 \quad (5)$$

上面の式が決まると、端面の傾斜度は図32を参考にして、式(6), (7), (8)で決定される。ASTM-E9に規定されているのは図32中のOCとOHの比である。同図中ABは上端面と下端面の交線を示し、式(6)で、これに上端面内で直交するCHの線は式(7)で与えられる。

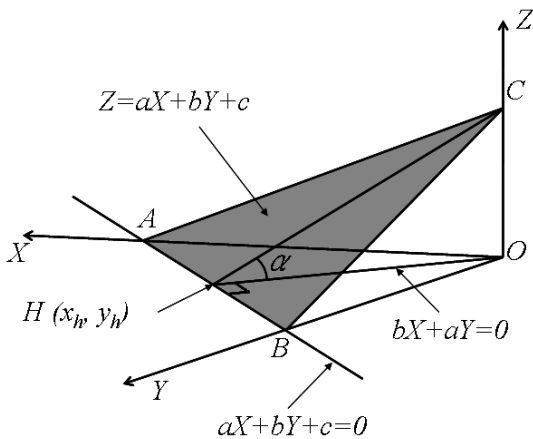


図32 圧縮試験片端面傾斜度計算の考え方

$$aX + bY + c = 0 \quad (6)$$

$$bX - aY = 0 \quad (7)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{OC}{OH} \right) \quad (8)$$

端面傾斜度測定の方法を図33に示す。ASTM-E9で規定された許容傾斜度が0.5/1000以内と極めて小さい値であるため、僅かな傾斜度の差が大きく測定される方法を考案した。試験片上部にレーザーポインターをマウントさせ、ベッド上で試験片を回転させることで、所定の長い距離を離れた場所に当たるレーザースポットの位置を測定した。この操作をN回繰り返し、測定点の位置  $(X_i, Y_i, Z_i)$  を記録し、このデータを基に上記方法で傾斜度を測定した。

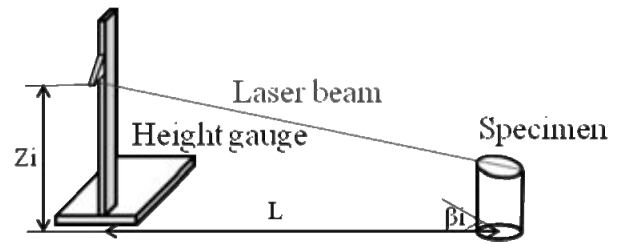


図33 圧縮試験片端面傾斜度測定方法

圧縮試験は図34に示す方法で行った。図34-aに示す焼き入れによりピッカース硬度450まで硬化させた中炭素鋼S45Cの上下圧縮工具を用い、プレス試験機により圧縮試験を行った。試験片は直径20mm長さ50mm、アスペクト比2.5の中炭素鋼S45Cで、軸方向中央部に周方向90度ピッチで4枚のひずみゲージを貼付し、軸方向ひずみを測定した。更に、試験中の試験片飛散防止の目的で、試験片と圧縮工具全体を図34-bに示す様に防護枠で覆った上で試験を行った。試験片に貼付したひずみゲージの位置を図35に示す。

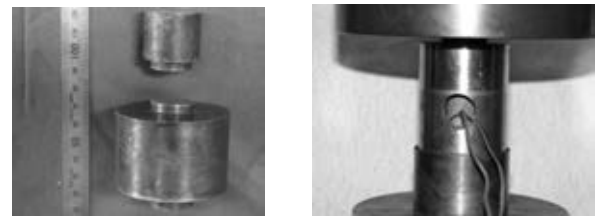


図34-a 工具 図34-b 防護枠内装着試験片  
図34 圧縮試験方法

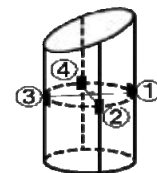


図35 圧縮試験片のひずみ測定部位の概念図

圧縮試験結果を以下に示す。図36に端面傾斜度が座屈特性に及ぼす影響を示す。端面傾斜度を6/1000以下に保てば座屈は発生しないことが判る。

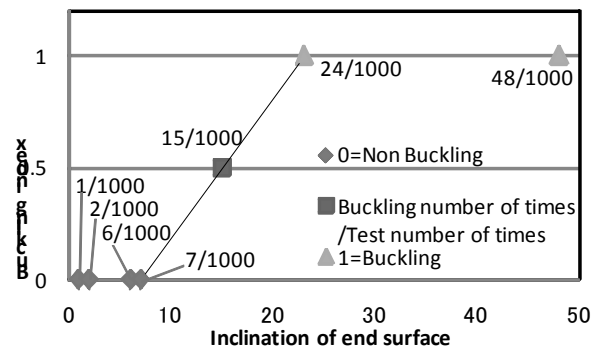


図36 圧縮試験による座屈発生限界



安定したひずみ測定が行われたと考えられる端面傾斜度が 6/1000 以下の試験片に対して、応力-ひずみ線図を描いた。図 3 7 に端面傾斜度が 6/1000 の試験片の例を示す。同図の縦軸は応力、横軸はひずみであり、4 枚のひずみゲージの信号と、圧縮荷重を試験片断面積で除した値を応力として、4 本の応力-ひずみ線図を描いてある。傾斜のついた端面の周方向位置の違いによって、同時刻のひずみの大きさが明らかに異なり、尖頭部に対応する周方向位置①の部分のひずみが大きい。

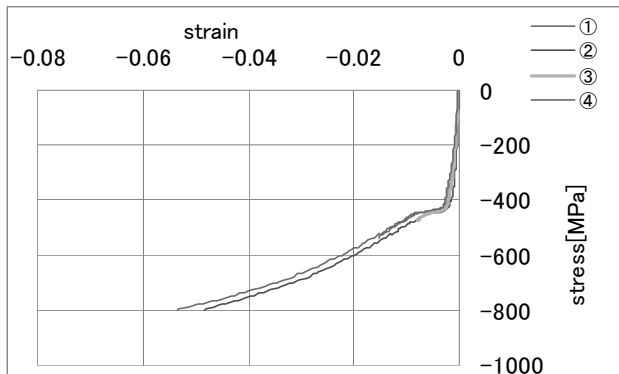


図 3 7 圧縮試験結果

ひずみの値を尖頭部①と対角にある③の平均値そしてそれらと周方向 90° 位置にある②と④の平均値更に 4 点総ての平均値をひずみとして、応力-ひずみ線図を描き直すと図 3 8 に示す様になり、3 本の応力-ひずみ線図は全くと言って良いほど一致する。このことから、周方向対向 2 点の、あるいは 4 点の平均を取れば、その値は応力-ひずみ線図を描くためのひずみの値として採用出来ることが推定される。

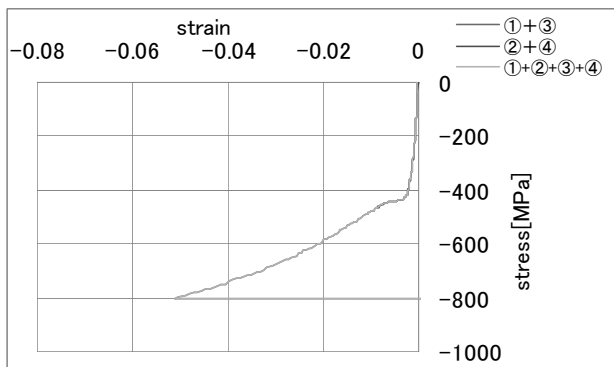


図 3 8 平均ひずみを採用した応力-ひずみ線図の比較

この推定の是非を確認する目的で、弾塑性 FEM による圧縮試験の解析を行った。用いたソフトウェアは英国 Swansea 大学で開発された ELFEN<sup>[8]</sup> である。図 3 9 に解析用のメッシュと、圧縮試験のベッドとクロスヘッド側の拘束条件の様子を示す。この拘束条件は剛体壁による圧縮であり、試験片の平均高さの 5% までの圧縮ひずみを加えた処で数値圧縮試験を終了した。

なお、クロスヘッドとベッドは実際には弾性体であるので、厳密な意味ではその仮定の基に、図 3 9 の試験片の上下に配される剛体を弾性体として解析を行うべきである。両解析の比較を行ったが、試験片中央面における応力とひずみの分布に関する結果は、ほぼ同じであったため、計算処理の簡便化のために剛体壁による圧縮条件を採用した。

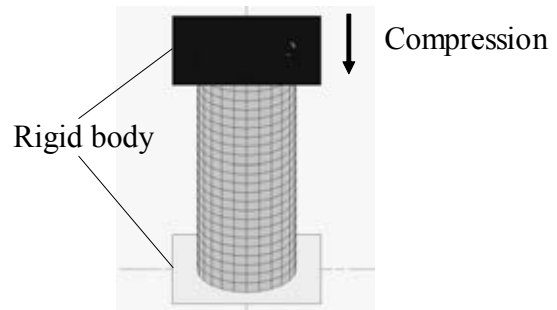


図 3 9 数値圧縮試験の概要

数値圧縮結果の例を以下に示す。図 4 0 には、弾性域と塑性域での試験片軸方向中央面での軸方向応力の分布例を、図 4 1 には、同じく軸方向ひずみの分布例を示す。弾性域では応力もひずみも際立った面内傾斜分布を示しているが、塑性域ではその傾斜の程度が緩和される傾向にあることが判る。また、弾性域での傾斜の程度は、ほぼ線形に近い傾斜を示しており、軸方向中央部での試験片外面のひずみ分布は、対向 2 点の平均や周方向 4 点の平均を取れば面内の平均ひずみに極めて近い値になるであろうことが強く予測される。塑性域での応力とひずみの分布が弾性域に比べて緩和されることは上記の通りであるが、その際の分布の様子は、定性的には弾性域のそれと同様であり、塑性域においては弾性域以上に対向 2 点あるいは周方向 4 点のひずみの平均値が面内の平均応力や平均ひずみに極めて近い近似値を与える。

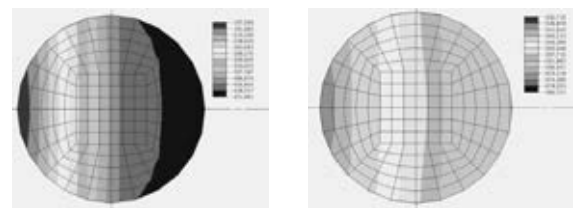


図 4 0 軸方向中央断面の軸方向の応力分布の例

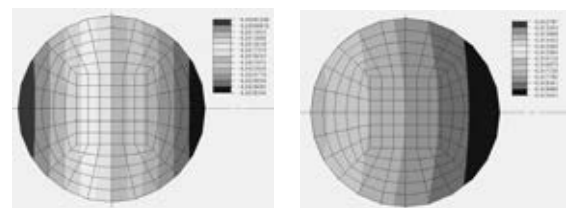


図 4 1 軸方向中央断面の軸方向のひずみ分布の例

以上の結果を基に、ひずみの平均値を比較したが、実験結果同様、対向2点の平均値と周方向4点の平均値はほとんど同一の値を与えることが判った。このひずみの値を基に応力-ひずみ線図を描き、圧縮試験での実測結果と比較した。結果を図4-2に示す。明らかに両者は一致している。また、これらの線は、FEM解析のために与えた応力-ひずみ線図とほぼ一致している。これらの結果から、圧縮試験の結果を基に図3-8で示した平均ひずみの採用は正しい応力-ひずみ線図を与える方法である、と結論付けることが許されよう。

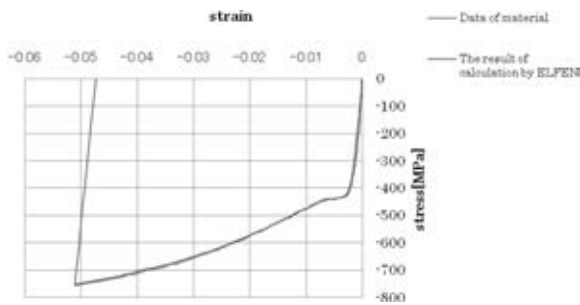


図4-2 実測の平均ひずみを用いた実験と数値圧縮試験による応力-ひずみ線図の比較

以上の検討結果から、圧延の解析に先だてて行うべき圧縮試験に供する試験片の仕上げ寸法精度は規定値より大幅に緩和可能であることが判明した。ASTM-E9の例を取れば、規格に明記されている0.5/1000という端面傾斜度の数値は、6/1000まで緩和可能である。但し圧縮ひずみの測定には、アスペクト比2.5以上の試験片を用い、軸方向中央部で周方向で最低対向2点にひずみゲージを貼付して、その信号の平均値を採用する必要がある。

## 6. 結論

分塊圧延を例に取り、一對の円柱状ロールを用いた延伸圧延を円錐台型のロールを用いて行うことで、被圧延材中心部までの圧下浸透効果が得られることが定性的、定量的に明らかになり、成果を国内外で発表<sup>(9)</sup>、<sup>(10)</sup>すると共に、特許申請<sup>(11)</sup>にも繋がった。

ロールの体積増加、換言すると重量増加を勘案すると、実用的には20°までとすべきである。ロール傾斜角の存在はスラスト力を発生させ、その値は傾斜角に伴って増加するため、圧延機設計においてはロール軸方向の荷重を受けるベアリングの設置とその強度設計が必要となる。

ロール傾斜角とロール直径の影響を分離して吟味した結果、圧下浸透には前者の影響が大きいことが判明した。

また、圧延の解析に必須である圧縮試験方法の例としてASTM-E9の検討を行った結果、試験片寸法精度を大幅に緩和可能であることが判明した。圧縮試験は煩雑と考えられているが、本検討結果を基に、今後盛んになれば、材料特性の正確な把握も可能になり、数値解析精度等の向上も期待できるため、有意義な結果を得たと考える。

## 謝辞

本研究推進を全面的に援助下さいました財団法人天田金属加工機械技術振興財団に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会, 鉄鋼製造法 加工(1), (1972), 227-255, 加工(2), (1972), 956-957, 丸善.
- 2) Association of Iron and Steel Engineers, R. E. Beynon, Roll Design and Mill Layout, Pittsburgh, (1956)
- 3) 馬場善祿, プラスティシムによる分塊圧延の研究, 塑性と加工, 5-32. (1964), 17-32.
- 4) 日本鉄鋼協会, 板圧延の理論と実際, (1984)
- 5) 福岡新五郎, ベベルロール冷間圧延による線材製造技術, 塑性と加工, 31-355, (1990), 1007-1012.
- 6) 日本鉄鋼協会, 鋼管の製造法, 林千博 著, (2000)
- 7) 根石豊, 棒鋼熱間圧延における結晶粒粗大化挙動に関する研究, 東京大学学位論文, (1999).
- 8) For "ELFEN" please refer to Rockfield Software Limited: Technium, King's Road, Prince of Wales Dock, Swansea, SAI 8PH, U.K., <http://rockfield.co.uk/elfen.htm>.
- 9) 奥田陽紀, 秋山雅義, 鋼片圧延におけるロール周速差付与による圧下浸透効果, 社団法人日本鉄鋼協会 第157回春季講演大会, 22, (2009), 434
- 10) Y. OKUDA, M. AKIYAMA, Evaluation of new rolling method ensuring high reduction near billet centre, COMPLAS X, Barcelona (2009), 448.
- 11) 特許公開番号 2010-042420, 傾斜圧延機, 奥田陽紀, 秋山雅義
- 12) T. UCHIMURA, Y. OKUDA, M. AKIYAMA, Experimental and numerical analyses on the characteristics of twin skew rolling, submitted and to be presented at COMPLAS XI, Barcelona, September 7-9, 2011
- 13) J. MIYAGAWA, S. OHBA, M. AKIYAMA, Influences of finished geometry of specimen for compression test on the stability of testing and precision of measured stress and strain, submitted and to be presented at COMPLAS XI, Barcelona, September 7-9, 2011
- 14) 大山裕史, 秋山雅義, 金属冷間加工用低環境負荷潤滑剤の開発と評価, 塑性と加工, 第52巻, 第603号 (2011-4) 474-479
- 15) 一定篤志, 秋山雅義, 円柱圧縮試験における応力とひずみの測定精度, 塑性と加工, 第52巻, 第604号 (2011-5), 558-563