

論 文

UDC 621.771.011 : 621.771.013 : 539.37

水平 2 段圧延のプラスチックによるシミュレーション

千々岩健児*・畑村洋太郎*・長谷川信樹*²・田辺 好之*³

Simulation of Horizontal 2-stands Rolling by Plasticine

Kenji CHIJIWA, Yotaro HATAMURA, Nobuki HASEGAWA, and Yoshiyuki TANABE

Synopsis :

Simulation of horizontal 2-stands rolling by plasticine, for compressive rolling and tensile rolling, is carried out. The following items are clarified :

(i) Deformation of side face, upper face and transverse section of workpiece and distribution of principal strain-rate and slipping velocity against rolls.

(ii) Forces and torques acting on rolls and rolling energy.

(iii) Distribution of pressure, circumferential frictional stress and axial frictional stress acting on the surfaces of rolls.

(iv) Distribution of internal stress in workpiece.

Then the above experimental results are analysed, and the following facts become clear :

(i) All the stress measurements are made with enough accuracy.

(ii) Distribution of principal strain-rate and others coincide well with the measured stress distributions.

(iii) Compressive rolling is effective to eliminate the tensile stress in the neighborhood of the surface of workpiece. Tensile rolling slightly reduces rolling energy.

1. 結 言

プラスチックの力学的な性質が高温 (1000°C 付近) の鋼のそれと相似であること、および適当な検出器と実験装置を用いれば、高温鋼のロールによる加工 (圧延や連続鋳造鋳片の引抜など) の応力解析が可能であることなどを別報¹⁾²⁾ に述べた。

本報では、上記の性質と実験方法を用いて、水平に進行する長方形断面の鋼塊を 2 対のロールで加工した場合の応力解析を目的とし、加工時にロールにかかる応力および加工材料内部に生じる応力や変形などを明らかにするものである。水平 2 段のロールによる加工はタンデム圧延や連続鋳造鋳片のピンチロール群による引き抜きなどで生じている。実際の場合には、鋼塊内部に温度分布があり、それによる変形抵抗分布があるが、本報では単純化して鋼塊内部は温度・変形抵抗とも均一なものとして取り扱う。

具体的な実験条件としては、2 段のロールの間に圧縮力が働くものと引張力が働くものの 2 つである。ロール

間に圧縮力を働かせるのは、連続鋳造鋳片の引き抜き時に表面および内部で微小なき裂が拡大するのを防止するため、ピンチロール間で圧縮力を働かせる方法をモデル化したものである。ロール間に引張力を働かせるのは、圧下力の低減のため、圧延材に引張をかけながら圧延する方法をモデル化したものである。

2. 実験の内容と方法

2.1 実験の内容

連続鋳造鋳片および圧延材をモデル化した白色プラスチックの被加工材 (以下“試料”という) を直径 200 mm のロール 2 段でロール加工 (以下適当なことばがないので“圧延”という) する。試料の寸法は、厚さ 100 mm、幅 200 mm、長さ約 800 mm である。1 段ロール (ロール間隔 85 mm) と 2 段目ロール (ロール間隔 70 mm) との回転速度比を 1.07 および 1.20 の 2 種類にとる。前者の場合には、1 段目ロールと 2 段目ロールの間に圧縮力が、後者の場合には引張力が働くような条件になっている。(以下、文章を簡単にするため、ロール間

昭和 51 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 12 月 27 日受付 (Received Dec. 27, 1979)

* 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku 113)

*² 東京大学大学院 (現: (株)小松製作所) (Graduate School, The University of Tokyo, Now Komatsu Co. Ltd.)

*³ 東京大学大学院 (現: (株)日立製作所) (Graduate School, The University of Tokyo, Now Hitachi Ltd.)

Table 1. Content of experiment of horizontal 2-stands rolling.

(i) Workpiece	Material	White plasticine
	Size	Thickness; 100 mm. Width; 200 mm, Length; 800 mm
	Temperature	Uniformly in room temperature (about 20°C)
	Lubrication	Powder of CaCO ₃ is distributed by a felt roller.
(ii) Roll	Roll	Diameters of first and second roll; both 200 mm Material; soft steel
	Roll distance	1st stand; 85 mm, 2nd stand; 70 mm
	Revolution speed	(a) in compressive rolling: 1st stand; 1.04 rpm, 2nd stand; 1.11 rpm, (revolution speed ratio; 1:1.07) (b) in tensile rolling; 1st stand; 1.04 rpm, 2nd stand; 1.25rpm, (revolution speed ratio; 1:1.20)
(iii) Measured items		Deformation; Forces acting on rolls; Distributions of stresses acting on the surfaces of rolls; Distribution of internal stress in a workpiece.

に圧縮力が働く場合を単に“圧縮圧延”といい、ロール間に引張力が働く場合を単に“引張圧延”ということにする。) 試料の温度は均一で約 20°C である。以上の条件のもとで試料の 2 段圧延を行い、試料の変形・ロールにかかる荷重とトルク・ロール表面にかかる応力分布・試料内部に生じる応力分布等を明らかにする。主な実験内容を Table 1 に示す。

このような条件で得られたシミュレーションの結果は仮に 1000°C の鋼の熱間圧延で、直径 400 mm, 圧延速度 2 m/s のものに換算するときには、応力については 1100 倍、力については 4400 倍すればよい。

2.2 実験方法²⁾

2 段圧延のモデル実験に使用した実験装置の主要部分を Fig. 1 に示す。

ロールは 2 段でいずれも直径 200 mm で、鋼製、表面あさは $S=0.5\sim 5\ \mu\text{m}$ である。ロール間隔は 1 段目 85 mm, 2 段目 70 mm である。それぞれのロールの両端は 2 方向ロードセルで支えられており、ロールの駆動

はトルクメータを介して行われる。

1 段目・2 段目とも上側ロール表面に、ロール表面にかかる応力測定のための小型圧力計および小型摩擦力計が取付けられている。また、試料内部には試料内部に生じる応力分布の測定のため内部応力計が埋め込まれている。

ガイドロールや前段のロールとの接触による潤滑ぎれを防ぎ、一定の摩擦状態でロールと接触させるために、各ロール直前にフェルト状の潤滑ロールを設け、試料表面に炭酸カルシウム粉を塗付する。

本研究で測定した項目と測定方法は次のとおりである。

(i) ロールにかかる荷重・トルク：各々のロールにかかる鉛直力と水平力を、2 方向ロードセルで、トルクをトルクメータで検出する。

(ii) ロール表面に加わる応力の分布：ロール表面の各点（ロール軸方向に中心から 20 mm おきに合計 5 点）に試料から加えられる応力（圧力、円周方向摩擦応力、軸方向摩擦応力の 3 応力）を小型圧力計および小型摩擦力計で検出した。

(iii) 試料内部に生じる応力の分布：試料内部に生じる応力は本来 3 次元的であるが、これを直接に測定することは極めて困難であるので、試料の縦断面内の 2 次元応力状態を内部応力計で検出した。内部応力計自体の位置の測定は写真撮影によった。

(iv) 試料の変形：試料上面および側面にえがいた格子模様で表面の変形を測定する。格子模様は薄いスリット板の上からラッカーを噴射して印刷した。内部の変形は着色したグリースを細穴に注入し、加工後に切り出し

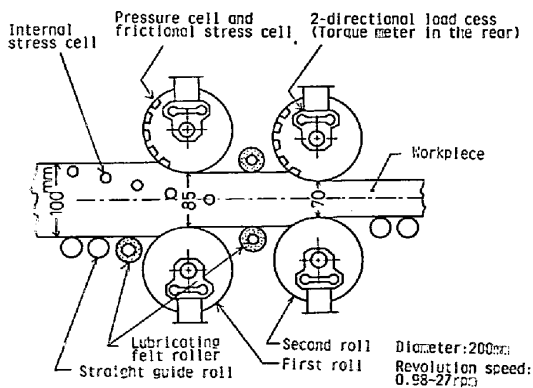


Fig. 1. Experimental method of horizontal 2-stands rolling.



Photo. 1. Deformation of side face of workpiece induced by horizontal 2-stands rolling.

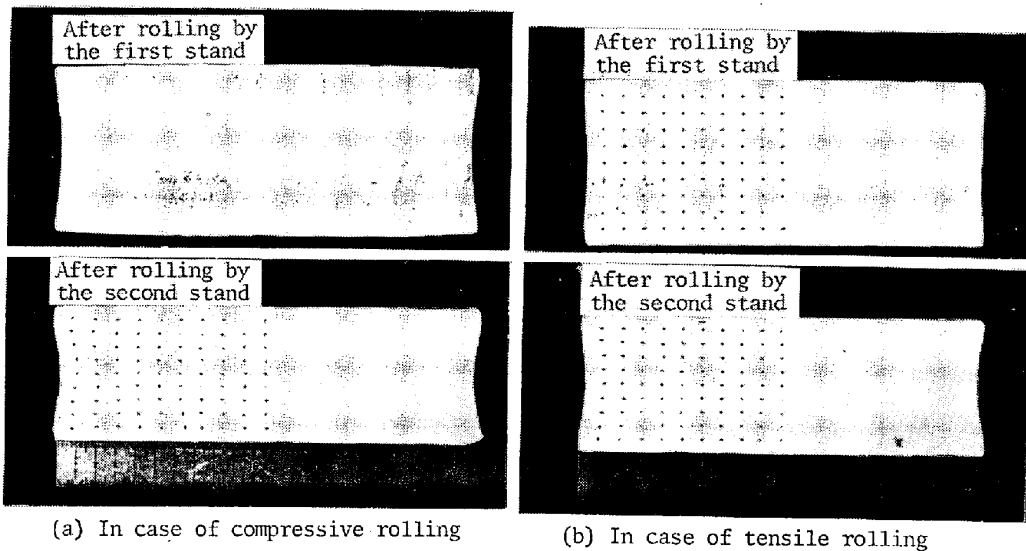


Photo. 2. Deformation of transverse section of workpiece induced by horizontal 2-stands rolling.

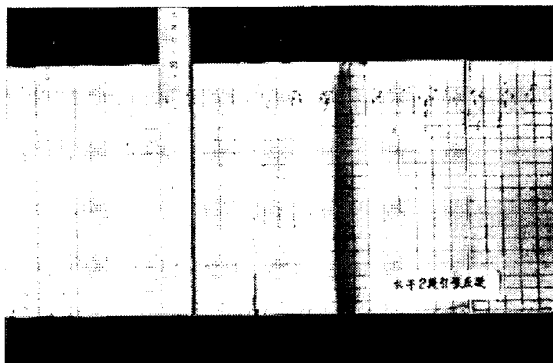


Photo. 3. Deformation of upper face of workpiece induced by horizontal 2-stands rolling. (in case of tensile rolling)

て標点の位置を測定して求めた。

なお、試料作成時の残留応力の除去と内部温度の均一化のために、試料は作成後丸1日室温(20°C)に放置してから実験に使用した。

3. 実験の結果

3.1 試料の変形

水平2段圧延によつて生じる試料側面および横断面の変形をそれぞれ Photo. 1, 2, 3 に示す。

試料側面の格子模様 (Photo. 1) は、はじめ正方形であつたものが2段のロールを通過後には、圧縮圧延、引張圧延の場合ともほぼ長方形になつており、このような板厚、板幅の比のものでも側面から見た限りでは試料の厚さ方向にほぼ一様に圧延されていることがわかる。

なお、2段目ロール通過後は両者とも約2%の厚さの増加がみられる。これはプラスチックの擬似弾性回復によるものである。

横断面 (Photo. 2) を見ると、2段目ロール通過後では、圧縮圧延・引張圧延ともほぼ一様に板厚方向に圧縮されており、側端部では多少のダブルバレルリングが起こつている。両スタンド間では、圧縮圧延のものは板の中央部でのふくらみが大きい、引張圧延ではそのようなことは起こらない。

引張圧延での試料上面に生じる変形 (Photo. 3) を見ると、はじめ正方形であつた格子模様がロールを通過するごとにほぼ長方形になつてゆくこと、幅方向に変形の差がほとんどないこと、くわしく見ると試料側端より中心部の方がわずかに遅れ気味のことなどがわかる。

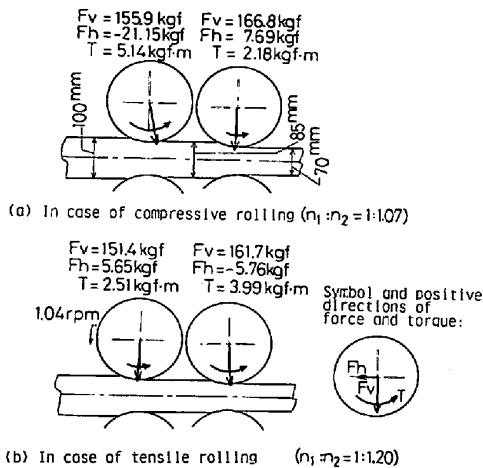


Fig. 2. Forces and torques acting on rolls in horizontal 2-stands rolling.

3.2 ロールにかかる荷重・トルク

水平 2 段圧延によつてロールにかかる荷重・トルクは前述のロードセル・トルクメータ等により検出した。本実験の条件では、生じる荷重のうち鉛直力（圧下力と同じ）はいずれも 150 kg~170 kg と大きいが、水平力は数 kg からたかだか 20 kg 程度で、鉛直力にくらべて非常に小さい。このため、既報²⁾にも述べたように、鉛直力による水平力への干渉が無視できないので、ここでは、ロールにかかる圧力分布と摩擦応力分布との積分値から求めたものを実験結果とする。これらを Fig. 2 に示す。

圧縮圧延・引張圧延ともに、鉛直力は両ロールとも 150~170 kg である。圧縮圧延では 1 段目の水平力が後方へ向き試料を後ろに押し出すのに対し、2 段目の水平力は前方へ向き試料の進行をさまたげようとしている。また引張圧延ではちょうどこの逆で、1 段目がつっぱり 2 段目が後方へ引張つている様子がよく出ている。

トルクについてみると、当然のことながら圧縮圧延の 1 段目のトルクが非常に大きく、2 段目のそれは小さくなっている。一方、引張圧延では 1 段目のトルクが小さく、2 段目のトルクが大きくなっているが、両者は圧縮の場合程違いがない。

3.3 ロール表面にかかる応力の分布

水平 2 段圧延によつてロール表面の各部にかかる応力の分布を、圧力、円周方向摩擦応力、軸方向摩擦応力の 3 つに分けて、それぞれ Fig. 3, 4, 5 に示す。なお、これらはいずれも引張圧延のものであり、圧縮圧延のものは紙面の都合上割愛した。

まずロール表面にかかる圧力の分布 (Fig. 3) を見よう。圧力分布の大略の形は圧縮圧延・引張圧延、1 段

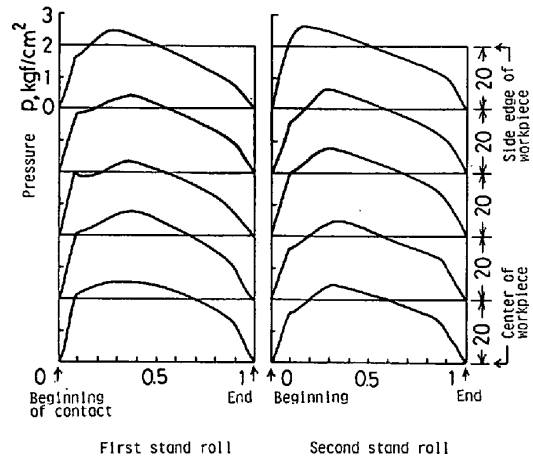


Fig. 3. Distribution of pressure acting on the surfaces of rolls. —in case of tensile rolling—

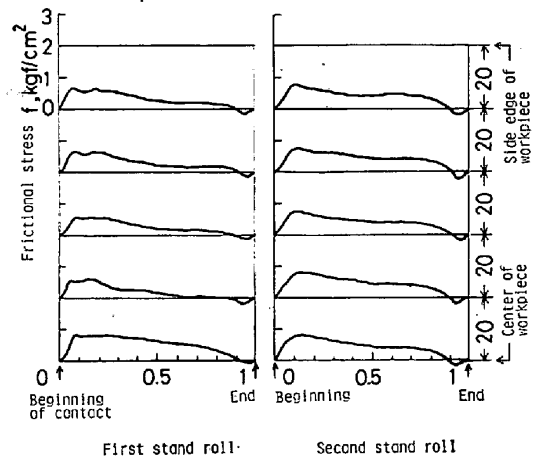


Fig. 4. Distribution of circumferential frictional stress acting on the surfaces of rolls. —in case of tensile rolling—

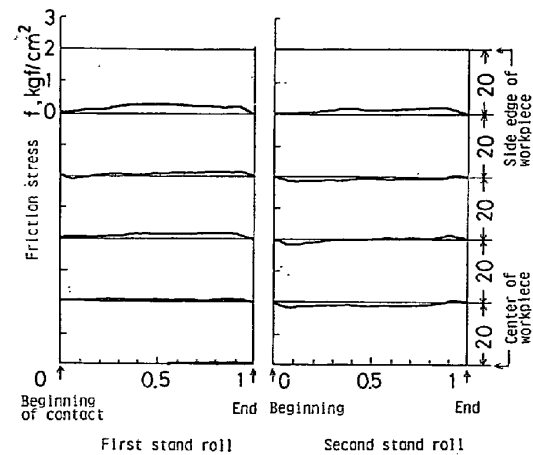


Fig. 5. Distribution of axial frictional stress acting on the surfaces of rolls. —in case of tensile rolling—

目・2 段目にかかわりなくほとんど同じ形と大きさを示しており、しかも軸方向にもほとんど変化なく同じ形と大きさを保っている。いずれの場合にも、圧力はロール表面が試料に接触したのち、急激に上昇する。接触長さの約 $1/10$ の点に変曲点またはピーニングを生じ、それ以降はゆるやかに上昇するが、接触長の約 $1/3$ の位置で最大値 (約 2.5 kgf/cm^2) をとりそれ以降はゆるやかに降下する。接触長の $8/10 \sim 9/10$ まで来ると圧力は急激に減少し、接触終了とともに零になる。このような変化をするので、圧力分布の形は変曲点が 3 つある山形を呈する。圧延条件・ロール段数・ロールの軸方向の位置等の違いにもかかわらず、このように圧力分布の形・大きさ等がほとんど同一であることは特徴的である。

次にロール表面にかかる円周方向摩擦応力の分布 (Fig. 4) を見よう。摩擦応力はロールが試料を後方に押しやるように働くときを正にとつてある。

円周方向摩擦応力分布の形は、圧縮圧延・引張圧延、1 段目・2 段目にかかわりなくほぼ同じ形をしている。すなわち、ロールが試料に接触したのち急激に上昇し、接触長の約 $1/10$ の点までくると最大値 ($0.7 \sim 1 \text{ kgf/cm}^2$) をとるとともに折れ曲がり、一転してゆるやかな減少をはじめ。この状態が長くつづき接触長の約 $8/10$ までくると、減少の度合いが激しくなるが、約 $9/10$ の位置で最小値 (マイナスの摩擦応力) をとつたのち増加に転じ、接触終了とともに零となる。摩擦応力が零となる点 (円周方向摩擦応力の向きが逆転する位置) は、接触長の $7/10 \sim 9/10$ のところである。この結果、分布の形は N 字状になる。

いずれのロールにおいても、円周方向摩擦応力の分布の形と大きさがロールの軸方向の位置にほとんどよらず同一になっていることは特徴的である。

最後に、ロール表面にかかる軸方向摩擦応力の分布 (Fig. 5) を見よう。摩擦応力は、ロールが試料の軸方向へのふくらみを阻止するように働くときを正にとつてある。軸方向摩擦応力は、いずれの場合も圧力や円周方向摩擦応力にくらべて非常に小さいが、試料の側端にゆくほど値が大きくなっている。また、1 段目ロールでは圧縮圧延・引張圧延ともほとんど正の値をとるが、2 段目ロールでは試料の内側では負、側端部で正となつている。このように、圧縮圧延でも引張圧延でも、ただ単に試料が幅広がりのみを起こそうとしロールはそれを阻止する向きに働いているようなものではないこと、特に 2 段目ロールでこのことが顕著であることは特徴的である。

以上の 3 種類の応力分布を見ると、接触長の $1/10$, $3/$

10 , $8/10 \sim 9/10$ の位置にそれぞれの変曲点があること、圧力分布に摩擦係数をかけることで摩擦応力が定まるようなものでないこと、本実験のように板幅にくらべて板厚が極めて厚い材料の圧延においても、ロールの軸方向には軸方向摩擦応力を除き、それぞれの応力分布があまり変わらないことなどが特徴である。なお、圧力計および摩擦力計の検出部の直径は接触長の約 $1/15$ 程度であり、 $1/10$ の変曲点は検出器の誤差によるものではなく、現象自体から起こるものである。

3.4 試料内部の応力分布

水平 2 段圧延によつて試料内部に生じる主応力の分布を Fig. 6 に示す。ここに示した主応力分布は、試料中央縦断面における 2 次元応力状態を求めたものである。また、図中で“棒状”のものは圧縮応力を、“矢印”のものは引張応力を示す。

主応力の分布を見ると、圧縮圧延・引張圧延、1 段目・2 段目にかかわりなく、ロールとの接触部分から最大主応力 (圧縮応力) が発生し、放射状に広がりながら中立面に達し、対向するロールへ吸い込まれるもの、前方へ伝播するもの、後方へ伝播するものなどにつらなつてゆく。また、最小主応力 (主に引張応力) は自由表面から発生し、これらの最大主応力と直交しながらロールをはさんで反対側の自由表面にぬけてゆく。最大主応力はいずれもロールとの接触部の中間より少し前方位置から発生しており、その最大値はいずれも約 3.4 kgf/cm^2 になつている。最小主応力は圧縮応力であつたり引張応力であつたりするが、ロールとの接触部のやや前方または真下のあたりでやや大きな引張応力になる部分がある。この引張応力は、前者は試料を上下にはがす向きに働くものであり、後者は試料を前後にひきちぎる向きに働くものである。その大きさは約 0.7 kgf/cm^2 になつている。

ロール直下の最大主応力の分布に着目すると、圧縮圧延の 1 段目ロールではほぼ直下に向かつてちらばつているのに対し、2 段目ロールではやや前方にかたよつてちらばつている。一方、引張圧延では 1 段目ロール・2 段目ロールともほぼ直下に向かつてちらばつている。

次に両ロールに挟まれた部分の主応力分布を見よう。圧縮圧延では、試料表面から厚さの約 $1/4$ のところまでは比較的大きな (約 0.7 kgf/cm^2) 圧延方向の圧縮応力が働いているが、それより深いところでは、多少の圧延方向の引張応力が生じている。引張圧延では試料表面付近ではほとんど応力のない状態となり、表面から厚さの $1/4$ のところでは圧延方向の引張応力が生じている。また、それより深いところでは、圧縮圧延のときと同様圧延方向の引張応力が生じている。

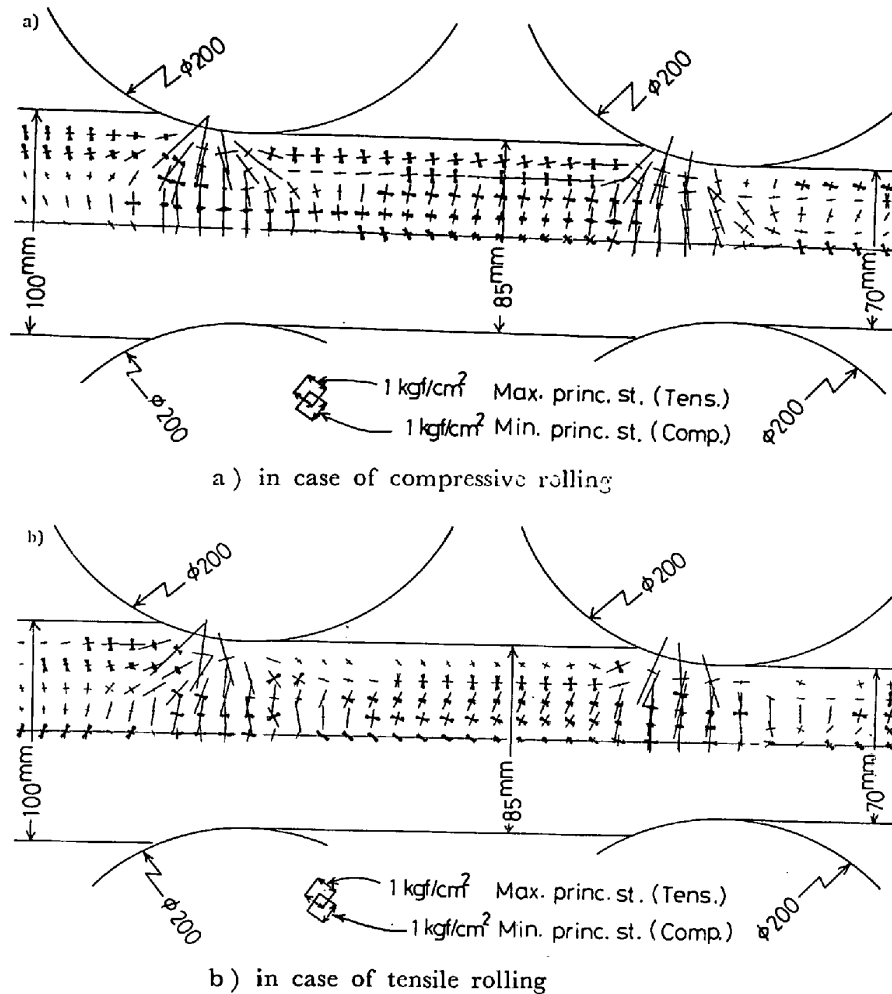


Fig. 6. Distribution of internal stress in workpiece induced by horizontal 2-stands rolling.

こうしてみると、圧縮圧延と引張圧延との差は、ごく表面付近（表面から厚さの約 1/10 の深さくらいまで）に効果をあらわし、圧縮圧延では、比較的大きな圧延方向圧縮応力を生じさせることができることがわかる。

4. 検 討

4.1 応力測定値の妥当性

3.3, 4 に示した応力測定の結果が、どの程度真の値を示しているのかについて検討を行う。

実験によつて得られたロール表面上の応力分布および試料内部の主応力分布から積分を行い、ロードセル・トルクメータによつて直接に求めた値と比較した。その結果、応力測定の結果について次のことがいえることがわかった。

(i) 圧力計および摩擦力計は信頼度が相当高い。従つてこれらによつて得られたロール表面上の圧力分布 (Fig. 3), 円周方向摩擦応力分布 (Fig. 4), 軸方向摩擦応力分布 (Fig. 5) はほぼ事実を示している。また、ロードセル、トルクメータ等によらず、応力の積分値から

求めたロールにかかる鉛直力、水平力、トルク等も相当正確な値であると考えられる。

(ii) 試料内部の主応力分布 (Fig. 6) については、内部応力計挿入による応力集中が生じているので、これによる出力から計算した値そのままでは真の応力分布になつていない。真の値は、方向は図に示したもののままであるが、大きさは応力の大きいところではほぼそのまま、小さいところでは 0.5~0.7 倍したものである。

なお、この検討でわかるとおり、プラスチックを用いれば、従来から広く行われている変形や材料内の流れの確認などの他に、相当詳細な力や応力のシミュレーションが可能である。特に本研究で取扱つたような断面寸法のもの（縦横比が 1:2 と板厚が幅にくらべて大きい）、穴型圧延、その他複雑な形状の鍛造や押出加工など理論解析が困難な塑性加工の分野で、変形のみならず力・応力のシミュレーションが可能であることは、これらの加工の研究や工程設計にプラスチックの使用が大いに有益であることを示唆している。

4.2 試料の変形と応力

試料の側面および上面にえがいた正方格子の変形や横断面に埋め込んだ標点の変位は、ただ単に試料の変形を直観的に示すだけではなく、変位とひずみの関係を用いればそれぞれの面内のひずみやひずみ速度の分布を求めることができるはずである。

試料側面の格子模様から主ひずみ速度を求めるには、1つの格子点が流線に沿って次の格子点に移動し、その際に生じる周囲の格子点との距離や方向の変化から水平・鉛直方向の縦ひずみとせん断ひずみを求め、更にそれから主ひずみの方向と大きさを求める。これを格子点の移動に要する時間で割れば、主ひずみ速度の方向と大きさが求まる。

試料の横断面の主ひずみ分布および試料上面の主ひずみ速度分布の求め方も上述の方法と同じである。

(1) 試料側面の変形と内部の応力

試料側面に生じている主ひずみ速度分布の例を Fig. 7 に示す。

主ひずみ速度の分布を見ると、引張圧延・圧縮圧延、1 段目・2 段目にかかわりなく、ロールとの接触部分から圧縮の最大主ひずみ速度が生じ、放射状に広がっている。また、この最大主ひずみ速度に直交する最小主ひずみ速度は引張で、その絶対値は圧縮のそれとほとんど同程度になつている。

以上から次のことがいえる。試料はロールによつて厚さ方向に押えつけられ、そのため厚さ方向には圧縮ひずみを生じ、また圧延方向にはのび変形を生じる。最大ひずみ速度 (圧縮) の方向は、全体としてロールが試料に与えようとする力の方向 (前方または後方) に従つて、多少のずれを生じるがあまり大きな差はない。

主ひずみ速度の分布 (Fig. 7) と主応力の分布 (Fig.

6) とを比較してみよう。前者は試料の側面、後者は試料の縦断面であり、測定位置が異なるが横断面 (Photo. 2) を見てもわかるように一応の対応を調べるには試料の縦断面内の変形は幅方向に大きなちがいが無いものと考えてもよいであろう。

ロール近傍における主ひずみ速度の分布と主応力の分布とが極めてよく似ていることがわかる。すなわち最大主ひずみ速度 (圧縮) と最大主応力 (圧縮) とは方向がほとんど一致し、またその大きさについては傾向が一致している。圧延の条件が圧縮圧延や引張圧延であるときの主応力の方向や大きさの変化と、主ひずみ速度の方向や大きさの変化とは、その傾向が全く一致する。

(2) 試料上面の変形とロール表面上の応力

はじめに、Photo. 4 の格子模様の変形から、引張圧延により試料表面に生じている主ひずみ速度分布を求めた。ロールと接触したばかりのときには試料はほぼ圧延方向にのびるが、ロールにかみ込まれてゆくにつれて試料の側方へのびる傾向がある。しかし、接触終了に近くと側方から中央部へ逆に流れ込もうとする傾向がある。なお、引張圧延の1段目ではロール中央部で接触長の後半の領域で、圧延方向、幅方向のいずれの方向にも流れていないことが特徴的である。このことは圧延による板厚の変化と考えあわせると、試料内部の流れはこの領域で、板厚方向への流れが主要になつていることを示唆している。

次に、試料表面の流れとロール表面の速度との差、すなわち相対速度の分布を調べた。Photo. 4 の格子点の移動量からロール表面の速度成分を差し引いて、試料上面とロール表面との相対速度ベクトルの分布を求めたのが Fig. 8 である。図中のベクトルは、試料表面の微小部分に対しそこで接しているロール表面の微小部分が相対的

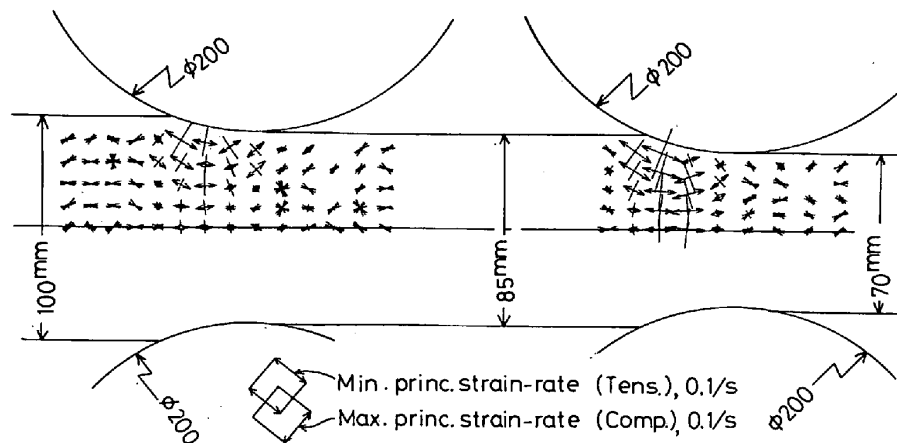


Fig. 7. Distribution of principal strain-rate on side face of workpiece induced by horizontal 2-stands rolling. —in case of tensile rolling—

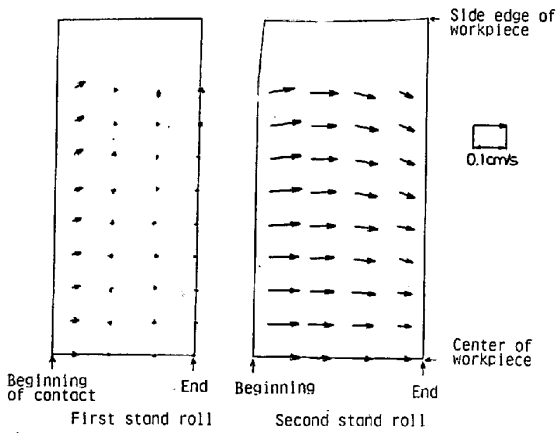


Fig. 8. Distribution of relative slipping velocity vector between the upper face of workpiece and the roll surface. —in case of tensile rolling—

にどちらに動いたことになるかを示している。

この相対速度分布を見ると、引張圧延の1段目ロールでは入口付近のみ相対速度があるが、それ以降は出口までほとんど相対速度がないこと、それに対し2段目ロールではロール全面にわたって相対速度が大きく、ロールが試料表面を後方に引きずり込みながら、側方へのひろがりやを阻止している様子がよく出ている。

ここで、相対速度分布とロール表面上の摩擦応力分布との対応を調べよう。

Fig. 4, Fig. 5 に示したロール表面にかかる円周方向および軸方向の摩擦応力の分布から、ロール表面上に働いている合摩擦応力を求め、ベクトル分布の形で示したのが Fig. 9 である。引張圧延の1段目は、接触始めの辺りでは後方へのひきずり込みが大きい、接触の後半に至り摩擦の方向が逆転し、試料の進行をひき止めようとしている。幅方向についてもこれに対応した動きが起こるので、これらのロールではあたかもベクトルの吸い込み口があるかのような分布を呈する。(図は割愛したが、圧縮圧延の2段目も全く同様の分布を呈する。) 引張圧延の2段目はロール全面にわたり試料を後方へ押し出そうとしている様子ははつきりと現れている。(圧縮圧延の1段目も全く同様である。) 幅方向の摩擦応力成分に着目してみると、圧縮、引張圧延にかかわりなく、1段目ロールはすべてまっすぐか内向きであり、特に試料側端では内向きへの摩擦が大きい。このことは1段目ロールでは圧縮、引張圧延にかかわりなく、試料中央部はほぼ圧延方向に動こうとするが、側端付近のみが側方へ動き幅広がりを起こそうとしていることを示している。一方、2段目ロールでは圧縮、引張圧延にかかわらず、ロールとの接触前半では試料側端付近のみ試料を内側へ

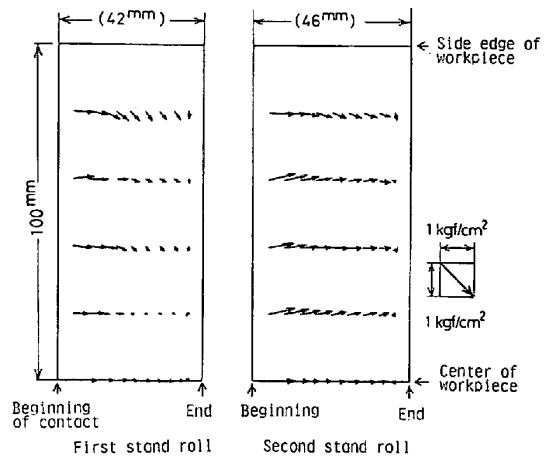


Fig. 9. Distribution of frictional stress vector on the upper face of workpiece. —in case of tensile rolling—

ひきとめようとするが、それ以外ではすべて試料を外側へ広げようとしており、接触後半に至って内側へとじ込めようとする向きに変化している。

さて、ここで Fig. 8 と Fig. 9 とを比較しよう。両者のベクトル図がきわめてよく似た形をしていることがわかる。相対速度の大きいところでは摩擦応力も大きく、それらの方向も幅方向成分の多少のちがいを除きよく一致している。以上の検討により、試料上面での相対速度の分布とロール表面での摩擦応力の分布とは、きわめてよい対応を示すことがわかる。

なお、このことから、仮にロール表面での摩擦応力の分布を知ろうとするときには、試料上面の変形を測り、それからロール表面との相対速度を求めてやれば摩擦応力の分布までほぼ求められることがわかる。

4.3 ロールにかかるトルクと仕事

圧縮圧延と引張圧延との圧延仕事を求め、両者の比較

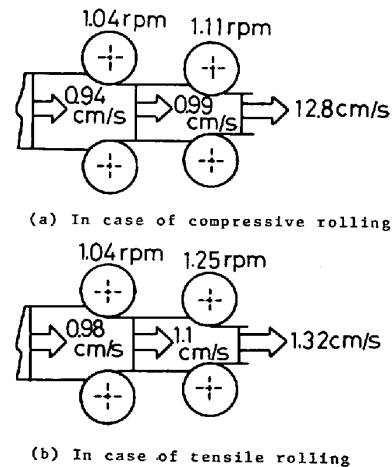
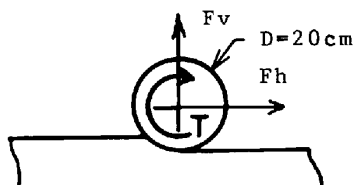


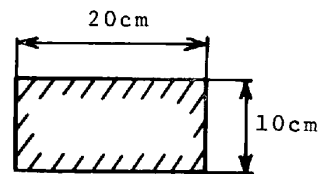
Fig. 10. Progressing speed of the workpiece in each step in horizontal 2-stands rolling.

Table 2. Force, torque and power acting on roll in horizontal 2-stands rolling.

			(a) In case of compressive rolling		(b) In case of tensile rolling	
			First stand roll (only upper roll)	Second stand roll (only upper roll)	First stand roll (only upper roll)	Second stand roll (only upper roll)
Measured values obtained by integrating the stress distributions	Vertical force, F_v	kgf	156	167	151	162
	Horizontal force, F_h	kgf	-21	8	6	-6
	Torque	kgf·m	5.14	2.18	2.51	3.99
Values established by experimental condition	Revolution speed of roll, n	rpm	1.04	1.11	1.04	1.25
	Revolution speed ratio	—	1 : 1.07		1 : 1.20	
	Distance of rolls, k	cm	8.5	7.0	8.5	7.0
Measured value	Inlet velocity of workpiece, v	cm/s	0.94	—	0.98	—
	Temperature of workpiece, T	°C	20		20	
Values calculated from the above data	Work which roll gives to workpiece per unit time, W_1, W_2	kgf·m/s	0.560	0.253	0.273	0.522
	Sum of the above values, W	kgf·m/s	0.813		0.795	
	Work which is given to unit volume of workpiece, W_1, W_2	kgf·m/m ³	2 978	1 348	1 395	2 665
	Sum of the above values, W	kgf·m/m ³	4 326		4 060	
	Work which is required to reduce the thickness of workpiece of unit volume by 1 cm, \hat{W}	kgf·m/m ³ /cm	1 442		1 353	



Positive direction of force and torque



Dimension of transverse section of workpiece at inlet position

をしよう。

トルクにロール回転数を乗ずれば、各ロールが単位時間に試料に与える仕事 that 求められる。一方、圧縮・引張圧延による試料各部の進行速度は Fig. 10 に示したとおりである。この速度を用い、試料の単位体積がなされる仕事を求めたのが Table 2 である。

この表から次のことがわかる。すなわち、圧縮圧延では1段目ロールのトルクが非常に大きく、2段目のトルクは小さい。これは当然のことではあるが、1段目ロールは試料の変形を起こさせるのに要するトルクの外に、

試料を無理に2段目ロールに押し込むためのトルクも出しているためである。2段目ロールはこの逆で、与えるべきトルクのうち1段目ロールの押し込みにより助けられた分だけトルクが減少している。引張圧延では、1段目ロールと2段目ロールの役割がちようどいれかわつた状態になつているため、1段目ロールのトルクは小さく、2段目ロールのトルクは大きくなつている。

両ロールが単位時間になす仕事で見ると、引張圧延のそれは圧縮圧延にくらべわずか2%程度しか低減していない。トルクが大きくなりつつあるのに、このようにロ

ールが与える仕事はほとんど差異がないことは興味深い。

最終的に得られた試料の単位量に与えられた仕事、すなわち単位量の試料に両ロールによつて与えられた仕事量を見ると、引張圧延のそれは圧縮圧延より約6%程少なくなつてゐる。両ロールが単位時間に与える仕事では両者は2%しか差がなかつたのにこのような差が出たのは、圧縮圧延の方が結果的に圧延速度が遅くなつてゐる(4%)ためである。

以上の検討から、同一の圧下量を得るには、圧縮圧延より引張圧延の方が仕事が少なくて済み、エネルギー的見地からは有利であることがわかる。

4.4 圧縮圧延と引張圧延の特徴

以上おこなつてきた検討をまとめると圧縮圧延、引張圧延の比較および特徴は次のとおりである。

(i) 試料の変形・ひずみ：全般的にいえば圧縮圧延と引張圧延とに大きな差はない。詳しく見ると圧縮圧延ではロール間でのふくらみが大きく、また2段目ロール通過後の幅広がり大きい。これに対し引張圧延ではロール間でのふくらみはほとんど見られず、2段目ロール通過後の幅広がりも少ない。また、上下面の平坦度がよく、板厚はほぼロール間隙の寸法に一致する。

ひずみの分布もこれに従い、いずれの圧延でも大きな差はない。

(ii) ロールにかかる荷重・トルク・仕事：圧縮圧延では1段目ロールのトルクが非常に大きい。個々のロールにかかる鉛直方向の力は圧縮圧延・引張圧延ともあまりかわらない。しかし、水平方向の力に対しては圧縮圧延と引張圧延とでは、1段目ロールと2段目ロールの力がいれかわる。同一の変形を得るのに圧縮圧延と引張圧延とでは後者の方がより少ない仕事ですむ。

(iii) ロールにかかる応力：圧力分布の形は圧縮・引張・中立²⁾の各圧延ともあまり差がなく、すべて山形である。円周方向摩擦応力の分布の形は圧縮の1段目および単段が台形形で他はすべてN字形を呈する。

(iv) 試料内部の応力：ロール直下の部分ではいずれの圧延においても板厚方向に大きな圧縮応力が働き、かつ圧延方向には多少の引張応力が生じる。両ロール間では圧縮圧延・引張圧延ともに、試料の中心部(板厚の約半分の部分)でわずかながら引張りが働く。表面から板厚の約4分の1の領域では、圧縮圧延では圧縮応力が働くが、引張圧延ではこの圧縮応力が小さくなり特に表面

付近では応力がほぼ零になる。

本実験の結果を実際の圧延や連続鑄造鑄片の引き抜きに適用してみよう。エネルギーの見地から少ない動力で所要の変形量を求めようとする熱間圧延では引張圧延が有利であり、また表面のき裂の拡大を防ぐ必要のある連続鑄造鑄片の引き抜きでは圧縮圧延が有利であることが考えられる。

なお、将来技術の1つである直接圧延では以上の検討を援用すれば、き裂増大を嫌う上部ロールでは圧縮圧延の条件を用い、冷却が進んで変形抵抗が増大し圧延動力の減少が要求される下部ロールでは引張圧延の条件を適用するのが有利であろう。

5. 結 言

プラスチックを用いて、水平2段圧縮圧延および引張圧延のシミュレーションを行い、次のことが明らかになった。

- (i) 試料の側面・上面・横断面に生じる変形
- (ii) ロールにかかる荷重(鉛直力と水平力)、トルク
- (iii) ロール表面にかかる圧力、円周方向摩擦応力、軸方向摩擦応力等の分布

- (iv) 試料内部の主応力分布

また、これらの実験結果の検討を行い、次のことがわかった。

- (i) 各種の応力測定が精度よく行われていること。
- (ii) 変形から求めた主ひずみ速度分布などが測定した応力分布とよく対応すること。
- (iii) 圧縮圧延は表面付近の引張応力の防止に効果があること。引張圧延は圧延エネルギーをわずかではあるが低減すること。

本研究を進めるにあたり、東京大学工学部木原諄二助教授に貴重な助言を戴いたこと、および東京大学工学部産業機械工学科千々岩研究室に在籍した多くの学生諸君の長年にわたる努力によつて研究が進められたこと、特に、松岡潔君(当時、大学院修士課程在学中、現在新日本製鉄勤務)の努力が大きかつたこと等を記し、感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 千々岩健児, 畑村洋太郎, 長谷川信樹: 鉄と鋼, 66 (1980) 5, p. 496
- 2) 千々岩健児, 畑村洋太郎, 鈴木徹郎: 鉄と鋼, 66 (1980) 8, p. 1104