

UDC 621.746.047 : 621.771.011.016.2 : 539.4.014.11

論文

プラスチックによる圧延および連続鋳造鋳片の 応力シミュレーションの方法*

千々岩健児**・畑村洋太郎**・鈴木 徹郎***

Experimental Method of Stress Simulation of Rolling and Continuously Cast Slab by Plasticine

Kenji CHIJUWA, Yotaro HATAMURA, and Tetsuro SUZUKI

Synopsis:

A new experimental method for stress analysis of a steel slab in hot rolling or continuously cast slab by plasticine is developed. When plasticine is used for simulation of steel in high temperature, it is thought that not only the simulation of deformation, which has been made conventionally, but also the simulation of stress and force is capable. First, many kinds of stress detectors —miniature pressure cell, miniature frictional stress cell, and internal stress cell— are developed with success. Then an apparatus of simulation with 2 stand rolls equipped with above detectors is made, and it is possible to measure the following items:

- (i) Distribution of stresses (pressure, circular frictional stress and axial frictional stress) on the surface of a roll.
- (ii) Distribution of internal stress (direction and magnitude of principal stress) in a workpiece.
- (iii) Deformation of workpiece and load or torque acting on a roll.

Finally an experiment of rolling by single stand is made as an example. Deformation, load and torque, distributions of many kinds of stresses are clarified and the precision of the experimental method is confirmed.

1. 緒 言

塑性加工による変形や、内部の塑性流動などを調べるのに広く用いられているプラスチックは、その応力—ひずみの関係、降伏条件、応力のひずみ速度依存性等が高温（約 1000°C 近辺）の鋼のそれらと相似であり、モデル加工具とモデル材料との摩擦条件を適当に選べば、変形のみならず応力分布や変形に要する力などをも、シミュレートすることが可能なはずであることを別報¹⁾で述べた。

本報では、プラスチックの上述の性質を利用して熱間圧延や連続鋳造鋳片の引抜時に、ロール表面に生じる圧力や摩擦応力等の分布および、加工材料内に生じる応力分布等の応力シミュレーションの方法について述べる。

2. 各種の小形応力検出器

2.1 小形応力検出器について

プラスチックによつて応力シミュレーションを行うには、加工具たるロールと加工材料との接点の応力状態および加工材料内部の応力状態を検出する必要がある。前者は、ロール半径方向の圧力・円周方向の摩擦応力・軸方向の摩擦応力の3つから成立っており、これらを検出するには、圧力計および摩擦力計が必要である。また後者を検出するには、加工材料内部の応力を直接に検出する内部応力計が必要である。以上3つの検出器のうち、圧力計については、既に、いくつかの市販品があり、シミュレーション実験に利用された例もある²⁾が、いずれも受圧部分の直径が大きかったり、液圧用のものの採用

* 昭和 51 年 4 月 本会講演大会にて発表 昭和 54 年 8 月 3 日 受付 (Received Aug. 3, 1979)

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

*** 東京大学大学院 (現: 住友軽金属工業(株)) (Graduate School, The University of Tokyo, Now Sumitomo Light Metal Industries, Ltd.)

のために十分な性能をもっていなかったりしている。また、摩擦力計・内部応力計は、筆者らが土および粉粒体用に開発したもの³⁾の他は見当たらないようである。

そこで、筆者らは、既に土および粉粒体用に開発した圧力計・摩擦力計・土中セルを原型として、プラスチックのモデル実験用の各種応力検出器を開発した。これらはいずれも感受部分が小さく（直径 3 mm）、ロール表面各部の応力分布や、加工材料内部の主応力分布等を検出するのに適したものである。

2.2 小形圧力計

ロール表面に働く圧力（ロール半径方向の応力）の検出に用いる小形圧力計の構造を Fig. 1 に示す。ロール表面の曲率と同一の曲率をもった圧力計キャップの一部が受圧部になっている。受圧柱（直径 3 mm）に働いた圧力はボールを介して受圧板に伝わり、その中心部の変位量が更にボールを介して検出板に伝わる。検出板裏面にはひずみゲージが貼付けられており、受圧部に加わった圧力に応じた電気抵抗の変化が生じる。

この圧力計の性能の例を Fig. 2 に示す。直線性・非履歴性とも良く、十分な性能を持っていることがわかる。

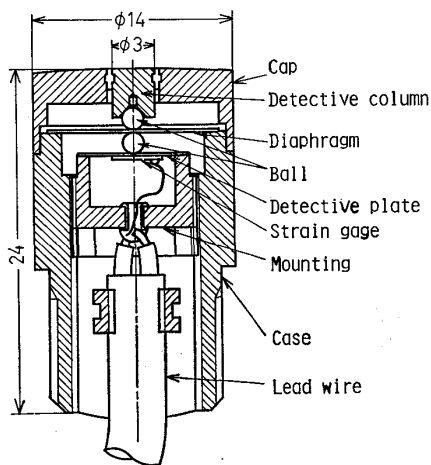


Fig. 1. Structure of miniature pressure cell.

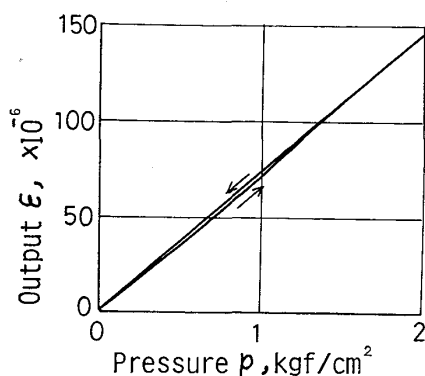


Fig. 2. Performance of miniature pressure cell.

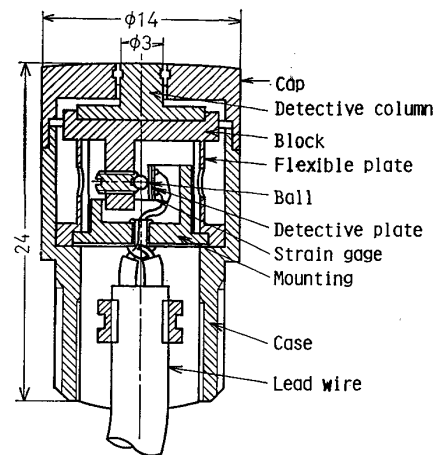


Fig. 3. Structure of miniature frictional stress cell.

る。

2.3 小形摩擦力計

ロール表面に働く、円周方向または軸方向のせん断応力（これらをそれぞれの方向の摩擦応力と呼ぶことにする）の検出に用いる小形摩擦力計の構造を Fig. 3 に示す。ロール表面の曲率と同一の曲率をもった摩擦力計ヘッド部の一部が感受部となっている。受圧柱（直径 3 mm）に働いた摩擦応力は、直立する 2 枚の平行平板構造をもったたわみ板で支えられており、受圧板は受圧柱を通じて伝わった摩擦応力が平行平板のバネ力とつりあうところまで変位する。この変位量が頂部より下がった伝達柱についているボールを介して検出板に伝わり、検出板裏面に貼り付けてあるひずみゲージの電気抵抗の変化に変換される。なお検知される摩擦応力の方向は、平行平板の向きによつて定まり、平行平板構造の性質から、直交する方向の摩擦応力には、実際上わずかな干渉しか受けない。従つて、平行平板の方向が 2 種類のものを別々に作り、一方を軸方向用、他方を円周方向用とする。

この摩擦力計の性能の例を Fig. 4 に示す。直線性、非履歴性ともよく、十分な性能をもっていることがわかる。

2.4 内部応力計

圧延材や連続鋳造鋳片などに相当する加工材の内部応力の検出に用いる内部応力計の構造を Fig. 5 に示す。直径 6 mm の丸棒中に 120° ごとく方向を向いた 3 個の圧力計が埋込んであり、また丸棒の根元には傾斜計 1 個が取り付けられている。圧力検出部の受圧柱は、直径 3 mm であり、平行平板構造をもった検出ブロックによつて支えられている。検出板裏面にはひずみゲージが貼り付けられており、圧力が検出される。傾斜計は、2.3 に

述べた摩擦力計の検出ブロック上部に錘のついた構造になっている。この部分は内部応力計が加工材内部に埋め込まれたときにも、外部に出たままになっている。

圧力検出部および傾斜検出部の性能の例を Fig. 6 に

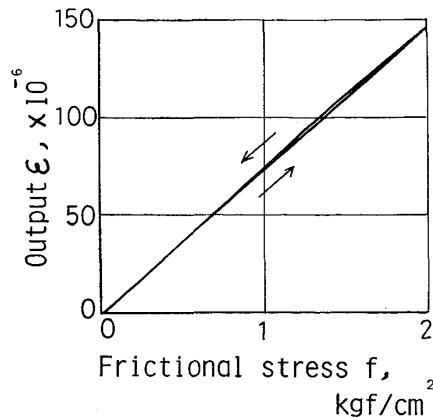


Fig. 4. Performance of miniature frictional stress cell.

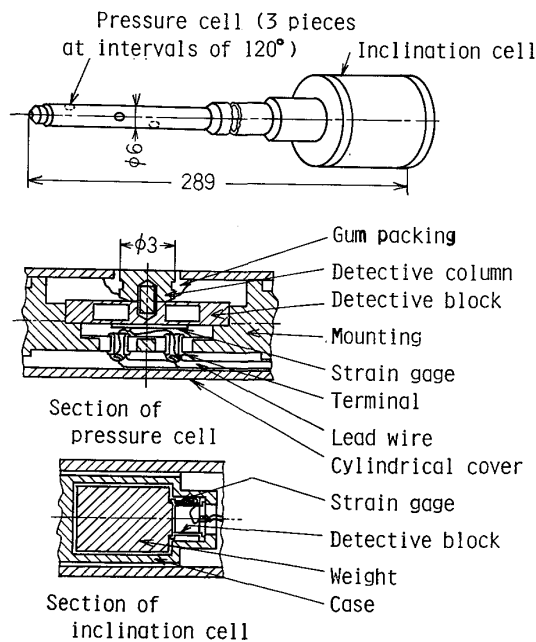
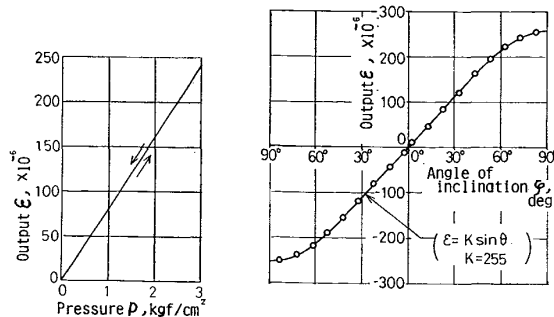


Fig. 5. Structure of internal stress cell.



(a) Performance of pressure cell

(b) Performance of inclination cell

Fig. 6. Performance of internal stress cell.

示す。それぞれ、直線性（または正弦性）・非履歴性がよく、十分な性能をもっていることがわかる。

加工材料内部に生じる応力は、3方向の圧力 p_a , p_b , p_r および内部応力計自体の回転角 φ として検出される。これら4つの出力から、簡単な計算により、主応力の大きさ σ_1 , σ_2 および主応力の水平面となす角 ω が求められる³⁾。

この内部応力計は、ロール軸と直交する平面内の2次元応力状態を測定するものである。加工材内部の応力状態は一般的にはつねに3次元であるが、ロールによる板圧延の加工を近似的に考察する場合には、2次元応力状態で考えても差し支えないものとして、このような内部応力計を製作した。

圧力検出部・傾斜検出部の個々の性能は前述のように十分なものであるが、内部応力計全体として、プラスチシン内部の応力を正しく検出しているかどうかを確認する必要がある。

まず、あらかじめ応力状態が分かっているところへ、内部応力計を埋め込み、正しく方向と大きさを検出しているかを確認めたのが Fig. 7 である。上下をグリースで潤滑したプラスチシンに、内部応力計を水平軸まわりの種々の向きで埋め込み、上下荷重を加え、平均圧力（約 1 kgf/cm^2 程度）と内部応力計出力から計算した最大最小主応力が表示してある。この図から、内部応力計はプラスチシン内部の主応力の大きさと方向とをほぼ正しく検出していることがわかる。

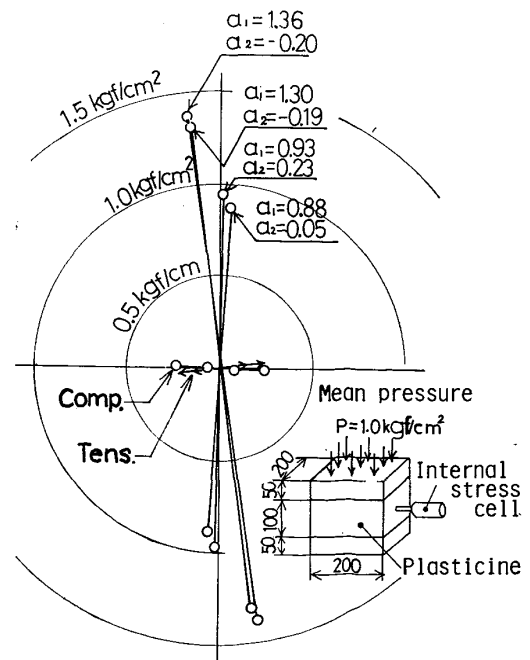


Fig. 7. Directional accuracy of internal stress cell.

プラスチック内部に生じている応力がある程度以下の場合、プラスチックの見かけの剛性と、内部応力計の見かけの剛性ととの差による応力集中が生じ、異常に高い応力であるかのように検出してしまう。最小主応力はほぼ零の状態、最大主応力の大きさと、検出される見かけの主応力との関係を調べたのが Fig. 8 である。最大主応力が 0.1 kgf/cm^2 程度だと応力集中が激しく、真の値の約 2.3 倍の値を検出してしまうが、 1.0 kgf/cm^2 程度だと、約 1.1 倍程度になり、そのまま真の値とみなしても差し支えない程度になることがわかる。

3. 圧延および連続鋳造引抜部の モデル実験の方法

3.1 シミュレーション装置

プラスチックを用いた圧延および連続鋳造鋳片の引抜のモデル実験装置の概要を Fig. 9 に、装置の全景を

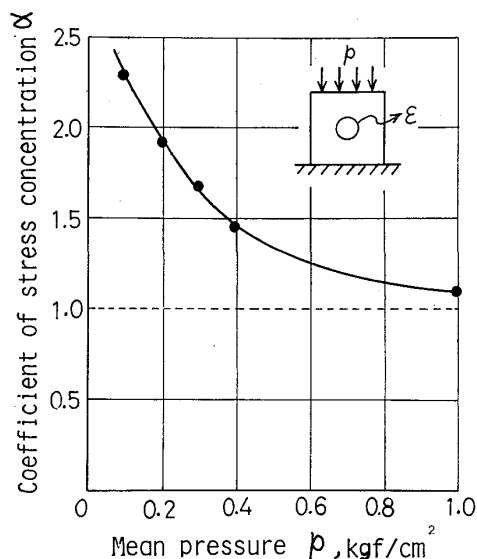


Fig. 8. Stress concentration induced by insertion of internal stress cell.

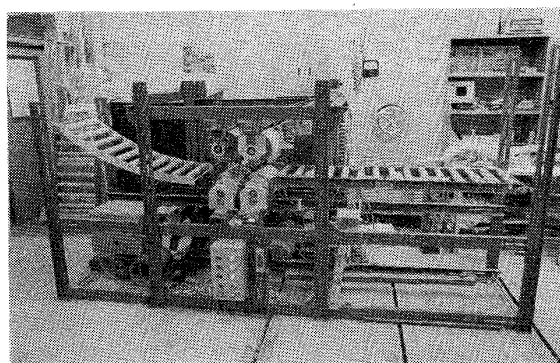


Photo. 1. General view of the equipment of simulation.

Photo. 1 に示す。

圧延ロールまたは連続鋳造引抜部のピンチロールに対応するロールは 2 対あり、それぞれのロールは 2 方向ロードセルに支えられ、トルクメータを介して、チェーンによる減速・伝達装置を通じ、電動モータで駆動される。ロールはいずれも同寸法で、直径 200 mm、長さ 320 mm であり、軟鋼製である。それぞれのロールの回転速度は、チェーン減速機のスプロケットを交換することで、所定の回転速度 ($0.98 \sim 27 \text{ rpm}$) にすることができる。それ故、2 対のロール間で加工材に圧縮を加えたり、引張を加えたりすること、及び湾曲形加工材の曲げ戻しが可能である。もちろん単段で用いることもできる。上下のロール間隔は $0 \sim 100 \text{ mm}$ であり、ロードセル取付部の隙間ブロックの厚さで調節を行う。ロール入口までのガイドロールは、圧延及び連続鋳造鋳片の引き抜きに応じて水平と湾曲の両方が用意されている。それぞれのロールの直前に炭酸カルシウム粉を塗付するための潤滑ロールが取り付けられている。

このシミュレーション装置を用いて測定される項目は、次のとおりである。(i) ロールにかかる荷重・トルク、(ii) ロール表面にかかる応力の分布、(iii) 加工材内

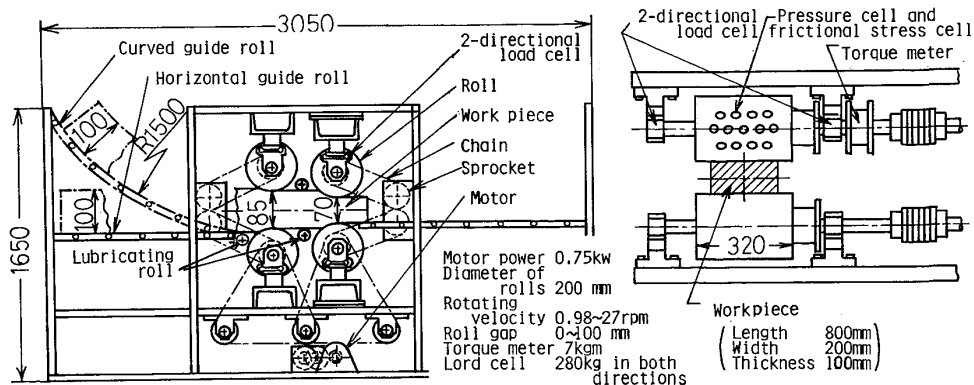


Fig. 9. Experimental equipment of simulation of rolling and continuous casting by plasticine.

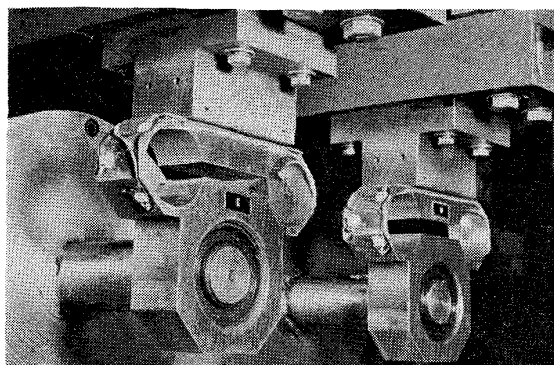


Photo. 2. 2-directional load cell.

部に生じる応力の分布, (iv)加工材の変形.

以上の検出方法のうち, (i)~(iii)の力・トルク・応力等の検出はすべてひずみゲージによるものであり, 検出器—ひずみ増幅器—電磁オシログラフと接続して測定を行っている.

3.2 荷重・トルクの測定

本研究のために, 新たに, 2方向の荷重を同時に測定する, 軸受付きのロードセルを製作した. その外形を Photo. 2 に示す. 基本構造は, 切削動力計に広く用いられているメガネ型ロードセル (“8角形リング”, “弾性環”ともいう⁴⁾) と同じである. この2方向ロードセルは直線性・非履歴性とも良好であるが, 方向分離性能が悪く, 誤差が最大 3° である. 従って水平方向の力が小さいときには, 鉛直方向の力の干渉をうけるので, 正しい値を測定することはできない. このような場合, ロールにかかる水平力を求めるには, 後述のように摩擦力計・圧力計の積分値を用いるとよい.

3.3 応力の測定

ロール表面に埋め込んだ小形圧力計・摩擦力計でロール表面に加わる応力の分布を測定した. これらの応力検出器のロールへの取付状況を Photo. 3 に示す. ロール表面と同一の曲率をもった検出器頂部 (直径 14mm) および受圧部 (直径 3mm) がロール表面の形状と同一になつていことが分かる.

加工材内部に, 内部応力計を埋め込んで, 加工材内部に生じる応力の分布を測定した. 圧力検出部が加工材内部の所定位置に来るようにセットし, 傾斜検出部は加工材の外部に出ている. 内部応力計を加工材へ埋め込むには, 加工材の所定位置に溝を切り, 圧力検出部が所定の位置に来るように置いてから, プラスチシンを少しずつ押しつけて, 埋め戻す. 丸1日放置してプラスチシン内部の局所的な残留応力を除去してから, モデル実験を行う.

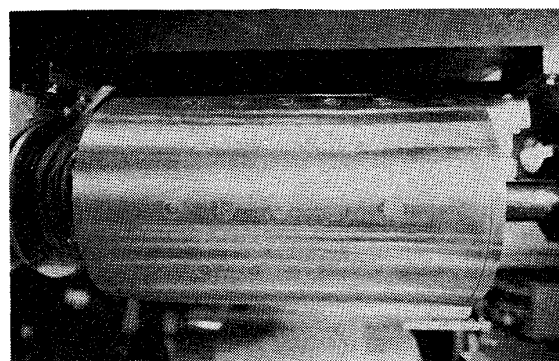


Photo. 3. Situation of fitting of pressure cells and frictional stress cells on the roll.

3.4 変形の測定

加工材の上面・側面に描いた格子模様で表面の変形を測定する. 内部の変形は黒色に着色したグリースを, 加工材成形中または成形後に細穴に注入し, 加工後に所要の断面を細いピアノ線を用いて切り出し, 標点の位置を測定することで求めた.

3.5 試料の取り扱いなど

プラスチックをモデル材料として, 圧延や連続鋳造鋳片の引き抜きなどの応力シミュレーションを行う場合には, 変形のみを調べる場合に比べ, より厳しい取り扱いが必要である. 温度

にした。

プラスチックの力学的性質が上述の要素の他、多くの要素によつて左右されるので、加工材料の変形能を各々の実験ごとに確かめておくことが望ましい。その具体的な方法としては、成形した試料の一部を切出し、加工実験と同時に一軸圧縮試験を行い、応力-ひずみの関係を求める。このようにして得たデータから、変形能を基準にして標準状態に換算しなおせば、各種応力の測定値の比較が容易に行える。

4. 単段圧延のシミュレーションの例

4.1 単段圧延

2, 3 に述べた応力検出器および実験装置を用いたシミュレーションの例として、単段圧延のシミュレーションを取り上げよう。加工材（以下“試料”という）の寸法は、厚さ 100 mm、幅 200 mm、長さ約 800 mm であり、表面の潤滑は炭酸カルシウム粉で行った。試料は成形後丸 1 日以上室温（約 20°C）で放置したものであり、実験時の室温および試料の温度は約 20°C である。この試料を単段のロールで圧延する。ロール間隔は 85 mm であり、圧延速度は 1 cm/s とした。このような条件のもとでシミュレーションを行い、圧延によつて生じる試料の変形・ロール表面の応力分布・試料内部の応力分布・ロールにかかる圧下力およびトルク等を測定した。

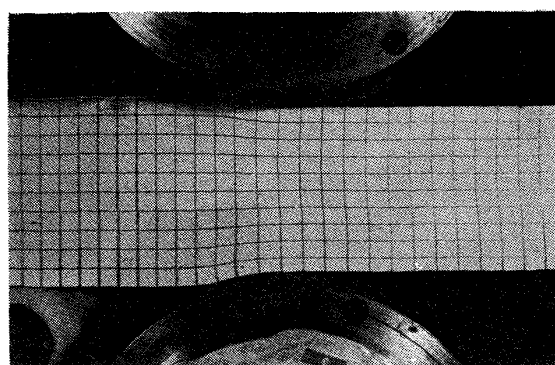
この応力シミュレーションは、1000°C 程度の鋼の熱間圧延のシミュレーションを行うためのものであり、実物のロール直径が 400 mm（長さの相似比 $l^*=2$ ）、圧延速度が 2 m/s（時間の相似比 $t^*=1/200$ ）、のものに対応させて考えると、応力の相似比 $\sigma^*=1/102$ 、力の相似比 $F^*=4410$ となる。いいかえれば、このシミュレーションで得た応力を 1/102 倍し、力を 4410 倍すれば、実物の圧延時の応力や力が推定できることになる¹⁾。

4.2 試料の変形

単段圧延によつて生じる試料の変形を Photo. 4 に示す。Photo. 4-(a) は試料側面に描いた一辺 1 cm の正方格子がロールによつて圧延され、長方格子に変化している様子を表している。Photo. 4-(b) は、試料横断面の縦・横 1 cm の格子点に注入した着色グリース標点の変形後の写真である。

4.3 ロール表面にかかる応力の分布

ロール表面にかかる応力分布の測定例のうち、まずロール表面中央部にかかる圧力と摩擦応力の分布の例を Fig. 10 に示す。試料に接触するとともに圧力が上がり始め、急激に上昇しピーニング現象を起こしたのち、なだらかな山型になり、ゆるやかに下降して終端に至る。



(a) Deformation of side face

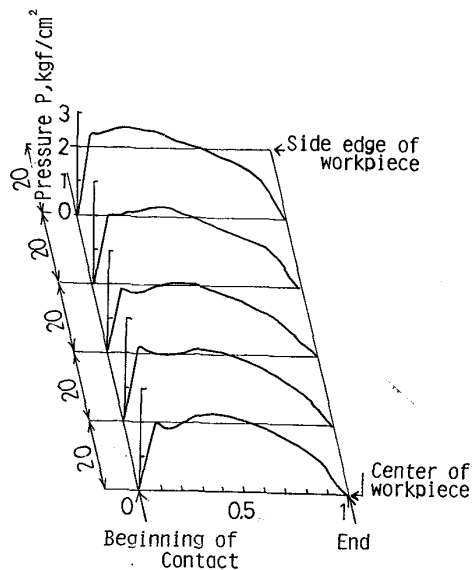


Fig. 11. Distribution of pressure acting on the surface of roll.

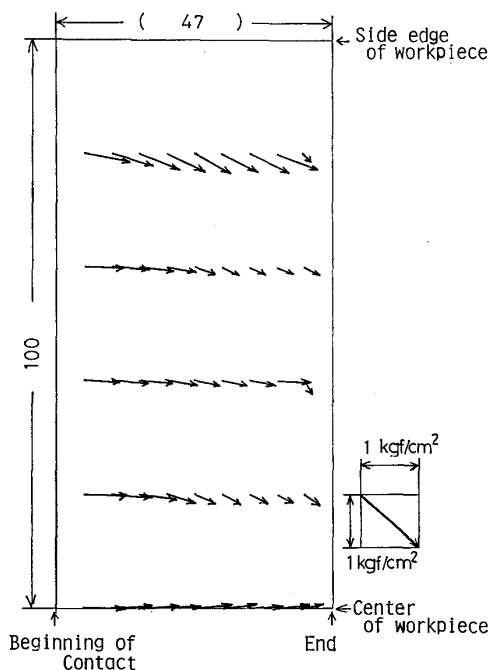


Fig. 12. Distribution of frictional stress acting on the surface of workpiece.

は、ロールに接触しているプラスチックのすべり速度が、摩擦実験のそれに比べてはるかに小さいことが原因であると思われる。

ロール表面にかかる圧力分布を Fig. 11 に示す。ロール中央部から、圧延材の側端付近までの5つの縦断面の圧力分布が描いてある。この例では、中央部から側端までほとんど同じ形と大きさになっている。この試料のような縦横比 (1:2) の断面のロール加工でも、圧力分布が軸方向に一樣であることは特徴的なことである。

試料表面にかかる摩擦応力の分布を Fig. 12 に示す。ロール各々が試料に与えている合摩擦応力を、ベクトルの形で表示している。このベクトルの方向は、試料がロールから受けている微小部分での力 (正しくは応力) の方向を示す訳であるから、試料の微小部分がロールと接触しながら相対的にすべる方向の逆方向にはほぼ一致しているものと考えられる。このように考えると、この例では、試料はロール表面に接触したことで、ロールの軸方向に広がろうとしていること、この例では、全面にわたって、試料はロールにひきずられながら進み、ロールより先進する部分がないことがわかる。

以上、Fig. 10~12 の3つの応力分布図と、4.2 で述べた試料の側面での変形や、横断面の変形とは、よくつじつまが合っている。

4.4 試料内部の応力分布

試料内部の応力分布を知るために、2.4 に述べた内部応力計を試料の中立面から高さ約 1.0 cm おきに 5 個を、前後約 10.0 cm ごとにずらして埋め込んだ。圧力検出部は、2 番目の圧力検出部 (p_p 用) がちょうどロール中央部にくるようにセットし、3 個の圧力検出部で、ほぼ試料中央部の縦断面内の 2 次元応力状態が測定できるようにした。

3 個の圧力検出部および 1 個の傾斜検出部の測定波形の例を Fig. 13 に示す。

内部応力計の出力から、2.4 に述べた計算を行ない、写真で各内部応力計の位置を求め、最大主応力・最小主応力の方向と大きさをベクトルの形で表示したのが、Fig. 14 である。圧縮応力は単に“棒状”で示し、引張応力は“矢印”で示してある。この図から、圧延によって生じる試料内部の主応力分布について、次のことがわかる。(i) 主応力の分布は、最大主応力 (圧縮) がすべてロール表面から発し、放射状に広がりながら進行方向へ伝わるもの、後部へ伝わるもの、中立面と直交し、収れんして反対側へ吸収されるもの、などになり、また、

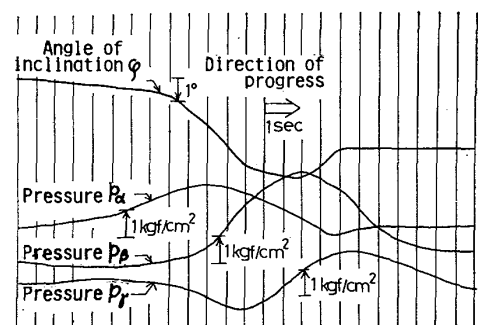


Fig. 13. Example of the measured data by internal stress cell.

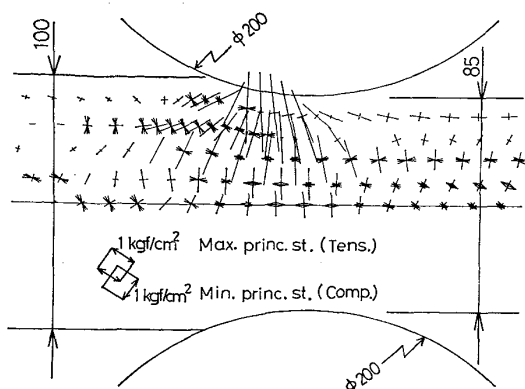


Fig. 14. Distribution of internal stress in workpiece induced by single stand rolling.

最小主応力は上記の最大主応力と直交し、多くは試料の自由表面から発し、他の自由表面までつながっている。(ii)最大主応力(圧縮)の大きさは、ロール近傍が最も大きく、これから遠のくにつれて減少する。最小主応力は多くは圧縮であるが、ロール直下の中央部で比較的大きな引張りになつている。

5. 検 討

5.1 応力測定の精度について

各種応力検出器・荷重やトルクの検出器の単体としての性能が十分良好であることは既に述べたとおりであるが、これらを組み合わせて使用したとき、果たして各々のデータが矛盾なく同一の値を示すのかが問題となる。これらが一致している場合には、本研究で得たデータは少なくともプラスチックを加工材料としたときの、ロール加工の応力解析値としては、すべて真の値を与えていると考えても差し支えないであろう。そこで、4に示した圧延のシミュレーションの例につき、応力測定精度について検討する。

まず、2方向ロードセルについて考える。測定された鉛直力は水平力よりはるかに大きいので、後者による前者への干渉は考えなくてよく、鉛直力の出力は真の値そのものを表していると考えられる。ちなみに、下ロールにかかる鉛直力は上ロールのそれに比べ、試料の自重分だけ大きく出ており、上述の考え方の正しいことがわかる。これに対し、方向分離性能を考えると、水平力の出力は鉛直力の干渉を大きく受けた値になつているので、真の値を示しているとは考えにくい。

従つて、以下の各種応力検出器の出力の検討は、2方向ロードセルによつて測定された鉛直力およびトルクメータ出力を基準にして行う。

各種の応力計によつて測定された応力の積分値と、ロ

ードセル・トルクメータによつて測定された値との比較を Table 1 に示す。この表から次のことがわかる。

(i)上ロールの圧延トルクについて、AとBとがよく一致することから、ロール表面に取り付けた摩擦力計はよく真の値を検出していることがわかる。(ii)上ロールにかかる力のうち、鉛直力についてAとBとがよく一致することから、ロール表面に取り付けた圧力計はよく真の値を検出していることがわかる。また、感受部が小さく分解能が高いため、Fig. 10 に示すように、圧力のピーニング現象までとらえることができる。(iii)上ロールにかかる力のうち、鉛直力につき、AとC₁、C₂とを比較すると、C₁、C₂ともにAより大きくなつている。特にC₂は大きい。これらの比率はC₁が1.26倍、C₂が1.39倍である。この原因は、内部応力計挿入による応力集中である。C₁の積分路a-bでの最大主応力の大きさが3~0.5 kgf/cm²程度であり、C₂の積分路b-c-d-aの最大主応力の大きさが1.3~0.5 kgf/cm²程度であるので、図8の内部応力計の挿入による応力集中のデータと比較すると、上述のくい違いが理解できる。なお、水平方向の力については、前述の圧力計・摩擦力計の出力の正しさから、これらの応力の積分値を基準に考える。C₁、C₂はともにBより大きい。これは最小主応力の値が圧縮・引張のいずれの場合も極めて小さいため、内部応力計の挿入による影響が著しいためと考えられる。

以上の検討により小型圧力計・小型摩擦力計・内部応力計等の各種応力検出器で、ほぼ真の応力を検出できることがわかつた。

5.2 実験方法について

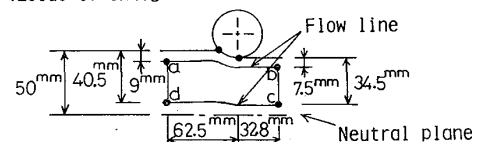
シミュレーション実験で実物に生じている現象を推定しようとする場合に、シミュレーションの本質から次の3点が問題である。

- (i) モデル実験自体を正確に行うこと
- (ii) モデル実験において正しい観測が行われること
- (iii) モデル実験の支配的パラメータと実物の現象を

Table 1. Comparison between the integrated values of stresses and the values measured by load cell or torque meter.

Symbol	Kind of measurement or calculation	Rolling torque of the upper roll	Force acting on the upper roll		Force acting on the lower roll	
			Vertical force	Horizontal force	Vertical force	Horizontal force
		kgf·m	kgf	kgf	kgf	kgf
A	Value measured by 2-directional load cells	—	152	−10.9	168	18.2
	Value measured by torque meter	3.9	—	—	—	—
B	Integration of the outputs of pressure cells and frictional stress cells	3.9	143.7	5.5	—	—
C ₁	Integration of the outputs of internal stress cells along the locus of a-b	—	191.5	22.9	—	—
C ₂	Integration of the outputs of internal stress cells along the locus b-c-d-a	—	210.6	48.1	—	—

(Locus of integration)



時間のたつたものを使用する。

(b) 均質なモデル材料を作る……なるべく薄片の積層を行う。各積層ごとに空気を完全に除く。潤滑剤などの異物の混入を防ぐ。成形による残留応力を除くため、室温で最低1日は放置する。

(c) モデル材の温度分布を均一にすること……一定の温度の場所に、丸一日以上放置する。

(d) 実験ごとの変形能のばらつきを防ぐこと……成形後、実験までの時間を揃える。実験のとき、試料の温度を直接に測つておく。

(ii) モデル実験の支配的パラメータが実物のそれと相似になるようにするには、実験条件の選定と、実験のやり方とにつき、次の注意が必要である。

(a) モデル材料の温度・ひずみ・ひずみ速度の範囲を適切に選ぶこと……温度のわずかな差で変形能が大きく異なるので、温度の管理をきびしくする。加工によって生じたひずみが少ない(3%程度まで)と、疑似弾性回復現象により、残留した見かけのひずみが小さくなるので、この効果を考慮に入れる。

(b) 実験のやり方に注意すべきこと……一般的な注意の他に3.5に述べた点が重要であるが、特に摩擦状態を揃えることには注意する必要がある。

なお、以上の注意点を満たすべく実験を行うが、その実験を確実なものにするため、変形能を確認するための

一軸圧縮試験、およびモデル

本研究の方法によれば、圧延や連続鋳造などのロールによる加工のシミュレーションが可能となるが、その特徴は次のとおりである。

- (i) ロールにかかる 3 方向の応力をすべて明らかにできること。
- (ii) 加工材内部の主応力分布が明らかになること。
- (iii) 以上により、3 次元的な応力状態および力学量がほぼ明らかにできること。

また、本方法の具体的な適用の例としては、(i) 圧下率の小さいロール加工、(ii) 非対称圧延、(iii) ロール間に引張りまたは圧縮を加えた圧延または引き抜き、(iv) 連続鋳造引抜部での曲げ戻し、(v) 内部に温度分布を与え変形抵抗の分布がある加工材の圧延または引き抜き、などが考えられる。

6. 結 論

プラスチックを用いて、圧延および連続鋳造鋳片引き抜きの応力解析の方法につき研究を行った結果、次のことが明らかになった。

- (i) 新たに開発した小形圧力計・小形摩擦力計・内部応力計等の応力検出器は十分な性能を持っていること。
- (ii) これらの検出器を用いた実験装置により、圧延

および連続鋳造鋳片の引き抜きによつて生じる力学的諸量のシミュレーション実験が可能なること。

- (iii) モデル実験の例として、単段ロールによるプラスチックの圧延を行い、ロールにかかる応力（圧力および 2 方向の摩擦応力）の分布・試料内部の主応力分布・ロールにかかる力・トルク等を明らかにした。

本研究を進めるにあたり、東京大学工学部木原諒二助教授に貴重な助言をいただいたこと、実験装置はすべて東京大学工学部機械工学科実験所の方々の製作になること、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努力により研究が進められたこと等を記し、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) たとえば，五弓勇雄，細井信彦，加藤理生：第 20 回塑性加工連合講演会 (1969)，p. 5，および中島浩衛，渡辺和夫：第 21 回塑性加工連合講演会 (1970)，p. 195 など
- 3) 千々岩健児，畑村洋太郎：日本機械学会誌，74 (1971) 631, p. 923
- 4) 畑村洋太郎：日本機械学会誌，77 (1974) 668, p. 777
- 5) 日本塑性加工学会：日本の塑性加工 (1975)