アルミニウム角棒の冷間圧延における 圧延圧力分布について*

五 弓 勇 雄** 斎 藤 好 弘***

Isao Gokyu and Yoshihiro Saito : The Contact Pressure Distribution in Kaliber Rolling (Report 1). The contact pressure distributions in the box-pass-rolling of commercial pure aluminum square bars were measured by the contact-pin method. The data obtained were compared with those in the flat rolling. The results can be summarized as follows:

(1) The pressure distributions along the arc-of-contacts in these two kinds of rolling have a similar shape; i. e., near the entry into rollgap there is a maximum peak, the height of which is nearly twice the flow stress, while in the other region the pressure has almost the same magnitude as the flow stress.

(2) The difference between box-pass-rolling and flat-rolling is that the contact pressure observed in the box-pass-rolling is 10~20% higher than that in the flat-rolling.

(3) The shape of the elastic-plastic boundary was determined to estimate the pressure distribution according to a method proposed by MacGregor and Palme. Good agreement could not be obtained between the estimated pressure distribution and that observed in the present investigation.

(Received July 9, 1965)

I. 緒 言

圧延中の金属とロールの間に作用する圧延圧力分布は、Siebel ら⁽¹⁾によりはじめて測定されて以来、三、四の研究によってさまざまな方法で測定された。それと平行して圧延圧力分布を塑性学的に解析する方法も発展し、与えられた圧延条件に対して圧下力やトルクをかなりよい精度で推定し得るようになり、工業的に大いに貢献していることは周知のとおりである。しかしこれらの研究はすべてストリップ圧延を対象としており、孔型圧延の際の圧力分布の測定は全然研究されておらず、ただこれに近い角棒の圧延に対するこの種の研究がわずかなだけである。

最近 MacGregor ら⁽²⁾はアルミニウム、銅および軟鋼の角棒を平ロールにより冷間圧延し、その際の圧延圧力分布をピン接触法によつて測定し、ストリップ圧延の場合のそれと比較した。その結果ロール直径に対する材料の厚さの比(厚さ比)が大きく、圧下率が小さくなると圧力分布に本質的な変化が現われることを見出した。すなわちストリップ圧延のように厚さ比が小さいときには、圧力分布上にはロールと材料の間の摩擦に基づく唯一のピーク (friction hill) しか現われないのに対し、角棒の圧延のように厚さ比が大ききときには、とくに低圧下率のときに圧力分布上に二つのピークが現われる。そして彼らはこの二つのピークのうち、ロール間隙の入口に近いところに現われるピークはピーニング効果 (peening effect) によるものであり、他方ロール間隙の出口に近いところに現われるピークは材料の加工硬化によるものであると説明した。ピーニング効果とは、たとえば巾の狭い圧子で厚板を伸ばし加工するときのように、金属を局部的に塑性変形させるとき塑性変形が周囲の弾性領域により拘束され、その結果変形抵抗が増大する現象に対して用いられる。したがって塑性変形領域が工具面と自由表面のほかに弾塑性境界によつて囲まれているときには、多かれ少なかれピーニング効果が存在し工具面圧力はそれによつて上昇すると考えられている。圧延に対

** 東京大学工学部冶金学教室 (Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

*** 東京大学大学院工学系研究科 (大学院生) (Post-graduate Student, Research Division in Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

* 孔型圧延に関する研究 (第1報)

(1) E. Siebel and W. Lueg : Mitteilungen aus dem Kaiser Wilhelm Institute für Eisenforschung, Düsseldorf, 15(1933), 1; See also W. Lueg : Stahl und Eisen, 53(1933), part 1, 346.

(2) C. W. MacGregor and R. B. Palme : Journal of Basic Engineering, (1959), p. 669.

しては最初 Orowan⁽³⁾が指摘しており、圧縮理論より類推して材料の厚さに対する投影接触弧長さの比(接触比)が1より小さいとき現われると推定した。しかし MacGregor と Palme は上述の実験に基づいて、ピーニング効果はすべての圧延において常に存在するものであり、ストリップ圧延のように、接触比が大きく接触弧長さが短いときには、その効果が少ないうえ、受圧ピンが有限の大きさを持つため、測定にかかわらないだけであると指摘している。いずれにせよ角棒の圧延のように接触比が小さい圧延では、圧延圧力分布はロールと材料の間の接触面における摩擦のほか、とくにロール間隙入口の弾塑性境界面の影響を強く受けて、いわゆるピーニング効果が強く現われることは疑う余地がないようである。MacGregor らの研究では平ロールが用いられたため、材料の端面は自由表面であり相当の巾広がりが見起っている。したがって角材の圧延の際広く用いられる箱型溝ロール圧延のように巾広がりを拘束されることによる圧力分布への影響は、まだわかっていない。また彼らの用いた材料はいずれも焼鈍した材料であるため、弾性から塑性への移行すなわち降伏点が不明瞭であるうえ一般に加工硬化係数が大きい。したがってあらかじめ冷間加工された材料(加工材)のようにかなり明瞭な降伏点が存在ししかも加工硬化係数の小さい材料では、どのような圧力分布を生ずるかを調べることは、工業的のみならず塑性学的にも興味がある。

本研究では孔型圧延の基礎としてピーニング効果の存在を確かめると同時に上述の点を明らかにするため、純アルミニウム(2S)の角棒の焼鈍材と加工材を平ロールおよび箱型溝ロールにより冷間圧延し、材料の巾方向の各位置での圧延圧力分布をピン接触法⁽⁴⁾により測定した。さらにピーニング効果と密接な関係にある弾塑性境界線の形状を調べ、MacGregor, Palme の方法によりピーニング圧力を推定し、実際測定した圧力分布と比較した。

II. 実験装置および実験条件

圧延圧力分布を測定するために用いた圧延機および付属設備については、すでに詳しく報告したので、ここでは概要のみ述べることにする⁽⁴⁾。

まず公称ロール直径 100 mmφ の実験用二段圧延機が作製された。これには、(a) 圧力分布測定用ロール、(b) 全圧下力を測定するための抵抗線歪計付きロードセル、(c) トルク測定用シャフト、(d) ロール回転角度測定装置、(e) ワードレオナード式圧延速度制御装置、(f) ストレインメーター(共和電業 DM 6E 型)および(g) 記録用電磁オシログラフ(共和電業 MA 33A 型)が付属している。

圧力分布測定用ロールは直径 94 mmφ の中炭素鋼製(S 40 C)平ロールを用いた。ロール表面はエメリーペーパー

で研摩して滑面に仕上げた。このロールの内部にロール表面に垂直に直径 0.96 mmφ の高速度鋼製(SKH-2) 受圧ピン

Fig.1 Pressure measuring block (a) and its calibration-curve (b)

ンと抵抗線歪計付き圧力測定ヘッドが組込まれている。受圧ピンは直径 1.0 mmφ のよく研摩されたガイド穴に滑合している。ピンとガイド穴は実験中後述の圧延用潤滑油によつて潤滑し摩擦を最小にするように努めた。受圧ピンの端面は、ロール表面と一致するように研摩した。圧延中もピンの端面とロール表面が一致していることが望ましいけれども、実際はピンとその周囲のロール部分の弾性的特性に相違があつたため若干のずれが生じた。その程度は圧延後の材料表面に残るピンのマークの深さの測定により、高々 15 μm であり常にピンがロール表面より突出する方向であつた。この圧力分布におよぼす影響に関しては、上滝⁽⁴⁾が同じロールについて報告しており、この程度の突出では圧力分布にほとんど影響がないと考えられる。これは後に述べるように、測定した全圧下力と圧力分布の積分値を比較して再確認することができた。

圧力測定ヘッドの較正はロール内に組込まれたままの状態の外から段階的な静的荷重を加えることによつて行なわれた。これによつて得られた較正曲線を Fig. 1 に示した。荷重の負荷時と除荷時とで多少ヒステリシスを画くのはピンとガイド穴の摩擦に基づくものである。ピン軸に垂直な荷重を加えて較正することにより、ピンとガイド穴の摩擦係数を推定することができ、約 0.05 程度と推定された。したがってこれによる圧力分布測定誤差は 2~3% 以下と推定された。

箱型溝ロールは上述の平ロールに材料の巾広がりを抑える鋼製リングをはめ込んで作られた。この場合受圧ピンの位置はロール本体に固定されているけれども、リングの位置をロールの巾方向に移動させることができるので、ロールの巾方向の各位における圧延圧力分布を測定することができた。本研究で用いられた箱型溝ロールの溝形状を Fig. 2 に示した。また本報において用いられた記号を示すため角棒の圧延のスケッチを Fig. 3 に示した。

(3) E. Orowan: Iron and Steel Institute Special Report, No. 34 (1946), Section 5, p. 145.

(4) 五弓, 大久保, 上滝: 塑性と加工, 3(1962-2), 73.

圧延される材料は厚さ 10 mm, 巾 8 mm の純アルミニウム (2S) の角棒であり, 焼鈍後 50% の冷間圧延を行なつ

Fig. 2 Profile of box-shape groove (a) and transverse location of pin on the contact plane (b)
A: 0.46 mm from center
B: 1.41 mm from center
C: 2.75 mm from center

Fig. 3 Sketch of bar being rolled showing symbols used

られた。圧縮試験に当つて荷重は Olsen 型材料試験機により測定され, 歪は試験中何回か試片を取り出してその寸

Fig. 4 True stress-strain curves and hardness-strain curve for commercial pure aluminum bars rolled
H: S-S curve for cold rolled aluminum bar (50% reduction)
O: S-S curve for annealed aluminum bar (annealed at 450°C, 1 hr)
O': h-s curve for annealed aluminum bar (annealed at 450°C, 1 hr)

法を測定することにより求められた。したがって測定された歪は純粋塑性歪である。また試験片と圧子の接触面はよくすり合わされた後オレイン酸とマシン油 1:9 の混合液により十分潤滑されたので, 試片のバレルングは対数歪で約 0.5 まで認められなかつた。Fig. 4 はこのようにして求められた変形応力-歪曲線である。

圧延に際しては, 上述の 2 種類の材料はそれぞれ箱型溝ロール圧延および平圧延され, それぞれの場合に対する圧延圧力分布が測定された。すべての圧延は圧延率約 22%

Table 1 Experimental conditions.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Fig.No.	Material rolled	Roll pass	h_0 (mm)	h_1 (mm)	Δh (mm)	r %	l_d (mm)	ξ	α (degree)
5	H	Box pass	10.03	7.83	2.20	21.9	10.10	1.00	12°25'
6	O	Box pass	10.03	7.79	2.24	22.3	10.18	1.01	12°31'
7	H	Flat roll	10.04	7.84	2.20	21.9	10.10	1.01	12°25'
8	O	Flat roll	9.99	7.77	2.22	22.2	10.15	1.02	12°28'

Roll diameter	94 mm (common for all tests)
Rolling speed	14~15 cm/min
Rubricant	oleic-acid (10 wt%) + light oil

Col (2) H, O: same symbols as used in Fig. 4

Col (6) $\Delta h = h_0 - h_1$

Col (7) $r = (1 - h_1/h_0) \times 100\%$

Col (8) l_d : horizontal length of arc-of-contact

Col (9) $\xi = l_d/h_0$

た板より長手方向を一致させて切り出された。寸法精度は ± 0.02 mm に抑えられた。さらに加工硬化係数の高い焼鈍材を作るためには上述の角棒を 450°C で 1 hr 大気中で焼鈍して用いた。

圧延圧力分布を推定するために必要な変形応力-歪特性を求めるためこれらの材料の圧縮試験が行なわれた。圧縮試片は上述の角棒より直径約 8 mm ϕ の丸棒を旋盤により切り出し, 直径: 高さ比が 1:1 になるように切断して作

に固定された。また圧延中はオレイン酸の 10 wt% 軽油液で十分潤滑された。圧延速度はすべての実験において一定に保たれ 10~15 cm/min であつた。

これらの圧延条件を Table 1 にまとめて示した。各実験は同一条件で 2~3 回繰返して行なわれた。したがってすべての測定値はそれらの平均値である。圧力分布は 2~3 回の実験でよい再現性があり, その測定値の差は測定誤差の範囲内であつた。

III. 圧延圧力分布

Fig.5~8は圧力分布の測定結果である。図中には比較のため Fig.4の応力-歪曲線より Simsの方法⁽⁵⁾により計

Fig.5 Distribution of normal pressure in contact arc for rolling cold worked aluminum bar through box-pass

Experimental curve: A, traverse location 0.46 mm from center; B, traverse location 1.41 mm from center; C, traverse location 2.75 mm from center; D, yield strength curve (plane strain); E, yield strength curve (uniaxial compression). Calculated curve; F, from MacGregor and Palme. Line of roll centers, G.

Fig.6 Distribution of normal pressure in contact arc for rolling annealed aluminum bar through box-pass. Experimental curve; A, traverse location 0.46 mm from center; B, traverse location 1.41 mm from center; C, traverse location 2.75 mm from center; D, yield strength curve (plane strain); E, yield strength curve (uniaxial compression). Calculated curve; F, from MacGregor and Palme. Line of roll centers, G.

算したロール間隙内の平面歪圧縮変形応力分布および単軸圧縮変形応力分布を、それぞれ一点鎖線および二点鎖線で示した。

Simsによると平面歪圧縮に対する応力-歪曲線を単軸圧

(5) R. B. Sims: J. Iron and Steel Inst., 177 (1954), 393.

縮に対する応力-歪曲線より求めるためには、後者の応力を $2/\sqrt{3}$ 倍し、歪を $\sqrt{3}/2$ 倍すればよい。また図中には後に述べる方法により測定した弾塑性境界線の形状より MacGregor と Palme の方法⁽²⁾ によつて計算した圧力分布

Fig.7 Distribution of normal pressure in contact arc for rolling cold worked aluminum bar with flat rolls. Experimental curve; A, traverse location 0.49 mm from center; A', traverse location 0.46 mm for box-pass rolling (for comparison); C, traverse location 3.47 mm from center; D, yield strength curve (plane strain); E, yield strength curve (uniaxial compression). Calculated curve; F, from MacGregor and Palme. Line of roll centers, G.

Fig.8 Distribution of normal pressure in contact arc for rolling annealed aluminum bar with flat rolls. Experimental curve; A, traverse location 0.02 mm from center; A', traverse location 0.46 mm from center for box-pass rolling (for comparison); C, traverse location 3.58 mm from center; D, yield strength curve (plane strain); E, yield strength curve (uniaxial compression). Calculated curve; F, from MacGregor and Palme. Line of roll centers, G.

も破線で示されている。しかしあまりよい一致は見られない。

測定された圧力分布は MacGregor と Palme の結果と類似しており、いずれも圧力の最大値がロール間隙入口近く存在している。このような圧力ピークはストリップ圧延では測定されなかつたもので、接触比 (l_d/h_0) の小さい圧

延の場合に、現われるといわれているピーニングピーク (peening peak) に外ならない。

Fig.9 Area under pressure distribution curves. (Specific rolling pressure)
Curve A: for rolling cold worked aluminum bar through box-pass; curve B, for rolling cold worked aluminum bar with flat rolls; curve C, for rolling annealed aluminum bar through box-pass; curve D, for rolling annealed aluminum bar with flat rolls.

Table 2 Comparison of calculated and measured total rolling pressure.

(1) Fig.No.	(2) Material rolled	(3) Roll pass	(4) Total pressure (kg)		(5)
			Measured	Calculated	
5	H	Box pass	1380	1420	
6	O	Box pass	1000	940	
7	H	Flat roll	1270	1200	
8	O	Flat roll	840	810	

加工硬化係数の相違による影響は、ロール間隙出口近くで明らかに認められる。加工硬化係数の小さい加工材ではロール間隙出口近くにピークは存在せず、プラトーが存在するのにに対し、加工硬化係数の高い焼鈍材では明瞭なピークが現われている。そしてプラトーの高さもピークの高さも材料の端部近くを除いて、平ロールによる圧延では単軸圧縮変形応力とほぼ一致し、箱型溝ロールによる圧延では平面歪圧縮変形応力とほぼ一致している。したがって角棒(焼鈍材)の冷間圧延の圧延圧力分布に現われるといわれるダブルピークのうち、ロール間隙入口近くに現われるピークはピーニングピークであり、出口近くに現われるピークは材料の加工硬化によるピークであるという考え方を支持するものである。

つぎに、測定された圧力分布の信頼性をチェックするために、材料の巾方向での比圧下力分布すなわちロールの単位巾あたりの圧下力の分布を圧力分布曲線より計算し、Fig. 9 に示した。これよりさらに全圧下力を計算して、別にロードセルにより測定された全圧下力と比較した。その結果を Table 2 にまとめて示してある。数 % の誤差内でありよい一致がみられる。

圧延圧力または比圧下力のロール巾方向の分布は注目値する。まずピーニングピークの高さはいずれの場合も材料の中央で最も高く、端に近いほど低下しかつその低下の程度は平ロールにくらべて箱型溝ロールの方が少ない。つぎに、ロール間隙出口近くのプラトーまたはピークの高さは、加工材の場合材料の巾方向の各位置でほとんど変わらないのに対し、焼鈍材の場合には平ロールでも箱型溝ロールでも材料の端部近くで著しく上昇している。これは端部では材料の巾方向へのフローに伴う付加の変形が起つて、材料が著しく加工硬化したためと考えられる。これらの影響は比圧下力の巾方向分布にも明瞭に現われている。比圧下力分布は加工材の場合、平ロールでも箱型溝ロールでも材料の中央で最も高く、端に近づくにつれて低下する。これに反して焼鈍材の場合には材料の端部で高くなっている。これらがピーニングピークと加工硬化によるピークの巾方向変化に起因していることは明らかである。

平ロールと箱型溝ロールについて比較すると、どちらの場合も圧延圧力または比圧下力の分布の仕方は類似しているけれども、これらの大きさが異なっている。すなわち箱型溝ロールで圧延する方が平ロールで圧延するよりも 10 ~ 20 % 高い圧下力を必要とする。

IV. 弾 塑 性 境 界

金属の角棒を圧延する際、ロール間隙入口で材料は圧延方向に垂直な平面内で一様に圧縮されるのではなく、著しく不均一な変形を受けることが知られている。すなわち材料のロールに接する部分では、咬み込みとほとんど同時に塑性変形がはじまるけれども、材料の内部では中心に近いほど塑性変形が遅れてはじまる。そのため弾性領域はロール間隙の内部へ楔状に くい込んでいる。これは弾性楔 (elastic wedge) と呼ばれ、熱間分塊圧延の際には材料の側面のスケールのはがれ方を観察することにより目で見ることが出来る。

MacGregor と Palme は elastic wedge の存在する領域の圧延変形抵抗は、elastic wedge に変形を拘束されるために圧縮変形応力より高くならねばならないと考えた。それは巾の狭い圧子で金属を伸ばし加工するときの圧子面圧力が (金属の厚さ (h_x) / 圧子の巾 (w)) の値とともに圧縮変形応力より高くなつて行くことと対応していると考えた。そこである仮定のもとにロール表面を適当な巾の圧子に分解し、ロール間隙の各位置で h_x/w の値を求め、Hill⁽⁶⁾の押し込み理論を適用してピーニング圧力を計算した。この考え方によれば、ロール間隙入口面における変形抵抗は圧縮変形応力の 2.54 倍になり、それ以外の部分の変形抵抗は elastic wedge の形状より容易に求められる。ピーニング圧力と elastic wedge をこのように結びつけることは是非はともかくとして、この両者の間に密接な関係があるこ

(6) R. Hill: *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, London, England, 1950.

とは、元来ピーニング効果が弾塑性境界における境界条件に基づく現象であることを考えると容易に想像出来る。したがってピーニング効果の現われる圧延では弾塑性境界も圧力分布とともに測定し、両者の関係を明らかにすることが必要である。

1. 弾 塑 性 境 界 の 測 定 法

MacGregor と Palme は角棒を平圧延し、圧延を中止して材料を圧延機より取出して材料の側面の凹凸を斜め後方から光をあてて観察する方法を取った⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この方法は降伏点の明瞭な材料では、明瞭な弾塑性境界を与えるけれども、角棒または厚板の平圧延に対してのみ有効であるから、一般の孔型圧延の研究のためには材料の内部の弾塑性境界を直接観察できる新たな方法を開発しなければならない。

本研究では二つの新たな方法を採用し、その有効性を確かめた。

第一の方法は加工硬化係数の高い焼鈍材を圧延し、圧延を中止して材料を取出しロール間隙にあつた材料の内部の硬度分布を測定する方法である。この場合任意の断面について一組の等硬度線図が得られる。これらの等硬度線の中に正しい弾塑性境界に相当する線があるものと考えてそれを選び出すのである。

第二の方法はやはり焼鈍材を圧延して取出した後、種々の温度で再結晶させ任意の断面の再結晶マクロ組織を調べる方法である。今度はそれぞれの再結晶温度に対応した再結晶境界線が求められる。この境界線に接する再結晶領域の結晶粒は粗大であり、非再結晶領域の結晶粒は微細であるので、マクロ組織から容易に境界線を引くことができる。これらの線の中からやはり弾塑性境界に相当するものがあると考えて選び出すのである。アルミニウムの場合再結晶温度は $400^{\circ}\sim 500^{\circ}\text{C}$ の間を 5 等分して選んだ。再結晶時間はあまり長いと再結晶粒が粗大化し過ぎて好ましくないので 10~20 min が適当であつた。またマクロエッチングは王水と弗酸の混合液が最も良好であつた。

さて第一の方法または第二の方法で得られた多くの線図の中から正しい弾塑性境界線を選び出すには、つぎのような比較実験をしなければならない。もし圧延材料が角棒以外のもの、たとえば丸棒のような場合には、これと加工歴、組成などが同じく最後の断面形状のみ四角形である角棒も同時に作製し、焼鈍条件も全く同じ焼鈍材を用意しておく必要がある。まず降伏点の比較的明瞭な加工材の角棒を適当な圧延条件の下に平圧延し、MacGregor と Palme の端面観察法⁽⁷⁾⁽⁸⁾によつて正しい弾塑性境界線を求める。つぎ

に焼鈍材の角棒を全く同じ圧延条件で平圧延し、上述の二方法によつて等硬度線図または再結晶境界線図を求める。これらを比較すれば弾塑性境界に相当する硬度、あるいはそれを与える再結晶温度が決まる。

本報ではアルミニウム (2S) の加工材を平圧延端面観察法により弾塑性境界線を求め、別に焼鈍材を同じ条件で平圧延し硬度分布と再結晶マクロ組織を調べ三者の比較を行なつた。

(a)

(b)

Fig.10 Elasto-plastic boundary near entry into roll-gap for rolling cold worked aluminum bar with flat rolls.

(a) photo. of side-plane of bar showing the presence of V-shaped elastic region under a portion of the contact arc. (b) elasto-plastic boundary obtained from (a)

Fig.11 Distribution of Vicker's hardness in the vertical center-plane under a portion of the contact arc for rolling annealed aluminum bar with flat rolls.

(7) C. W. MacGregor: *The Plastic Flow of Metals*, Metals Technology, Tech. Publication No. 1036, April, (1938), 1-17.

(8) C.W. MacGregor and L.F. Coffin Jr.: *The Distribution of Strains in the Rolling Process*, Journal of Applied Mechanics, Vol. 10; Trans. ASME, 65(1943), A-13.

2. 測定結果

Fig.10は加工材の平圧延(Fig.7)に対する材料の端面写真とそれより求めた弾塑性境界線である。Fig.11は焼鈍

Photo.1 Macro-structure of recrystallization of aluminum bar ($450^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$, 20 min).

Photo.2 Macro-structure of recrystallization of aluminum bar ($475^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$, 20 min).

Photo.3 Macro-structure of recrystallization of aluminum bar ($500^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$, 20 min).

材の平圧延に対する材料の中央断面内の硬度分布をマイクロビッカース硬度計で測定し、等硬度線を求めた結果である。Fig.10と比較すると硬度26(Hv)の等硬度線が弾塑性境界に対応していることがわかる。Photo.1~3はそれぞれ450°,475°,500°Cで20min間再結晶させたときの材料

の中央断面のマクロ組織である。焼鈍温度が高いほど再結晶を起すために必要な臨界塑性歪が小さくなっていることがわかる。Fig.10の弾塑性境界線と比較すればPhoto.2の

Fig.12 Superposition of elasto-plastic boundary from photo.(a) of Fig.10 (curve A), equi-hardness curve of $Hv=26$ from Fig.11 (curve B) and recrystallization boundary from Photo.2 (curve C).

焼鈍温度475°Cの再結晶境界線が弾塑性境界線に最も近いことがわかる。Fig.12はFig.10の弾塑性境界線、Fig.11の硬度26(Hv)の等硬度線およびPhoto.2の焼鈍温度475°Cの再結晶境界線を重ねて表わしたものである。三つの曲線は大体よく一致しており、このことから前述の二つの新たな弾塑性境界の測定法が孔型圧延などの弾塑性境界を求めるための有効な手段であると考えられる。

V. 総 括

純アルミニウム(2S)の焼鈍材と圧延率50%の冷間圧延材の角棒(8mm×10mm)を箱型溝ロール(溝底ロール直径94mmφ)により冷間圧延し、その際のロール間隙の接触面内の法線接触圧力分布を受圧ピンと抵抗線歪計により測定した。そして同じ材料を同圧下率で平圧延するときの圧力分布と比較した。その結果、

(1) 圧力分布のピークは本研究の圧延条件の下では、加工材、焼鈍材を問わず、常にロール間隙入口近くに現われた。そしてその高さは平面歪圧縮変形応力の約2倍に達した。そのためロール間隙入口における変形応力の高い加工材の場合には、そのピークはとくに顕著に現われた。このピークは、MacGregorとPalmeによつて角棒の平圧延に対して、はじめて測定されたピーニングピーク(peening peak)と同じものと考えられる。ピーニングピークの高さは箱型溝ロール圧延の場合には、ロールの巾方向であまり変化しないのに対し、平圧延では、材料の端部近くでかなり低下していた。

(2) 焼鈍材のように加工硬化の著しい材料では、ロール間隙出口近くにも別の低いピークが現われた。これに対し加工材の場合には、ロール間隙出口近くに圧力のプラトーが現われた。これらのピークまたはプラトーの高さは、箱型溝ロール圧延の場合にはSimsの方法による平面歪圧縮変

形応力とほとんど一致し、平圧延の場合には単軸圧縮変形応力とほとんど一致していた。このことから、ロール間隙の出口近くにはストリップ圧延の際現われるような friction hill は現われず、この部分の圧延圧力はほとんど材料の変形応力のみであると考えられる。

(3) 比圧下力のロールの巾方向の分布は、加工材の場合には箱型溝ロール圧延、平圧延を問わず材料の中央部で最も高く、端部に近づくほど低下していた。これに対し焼鈍材のように加工硬化の著しい材料の場合には、逆に材料の端部の方が高い比圧下力を生じた。これは、材料の端部近くでは付加の変形がかなり起っており、そのため材料が著しく加工硬化したことによると考えられる。

(4) 箱型溝ロール圧延に対する圧延圧力は、平圧延のそ

れより常に約 10~20% 高く現われた。このことは、工業的には箱型溝ロール圧延は、平圧延にくらべて伸び率は優れているけれども、高い圧下力または動力を必要とすることを物語っている。また、塑性学的には箱型溝ロール圧延は大体平面歪状態に近い変形であると考えられる。

さらに、測定された圧力分布に現われたピーニング効果と密接な関係を持つと考えられる材料内部の弾塑性境界線が、新たに提案された二つの方法によつて測定され、これらの方法の有効性が確かめられた。これらの方法によつて求められた弾塑性境界線を用いて、MacGregor と Palme の方法によりピーニング圧力を計算して実際の圧力と比較した。その結果、ピーニング圧力の生ずる範囲は、彼らの方法では実際より相当狭く見積られていた。