



Title	サテライトミルの開発と高機能材料への応用
Author(s)	宇都宮, 裕
Citation	大阪大学, 1993, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3065899
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

サテライトミルの開発と 高機能材料への応用

1993年

宇都宮 裕

サテライトミルの開発と 高性能材料への応用

1993年

宇都宮 裕

目 次

第1章 緒 論	1
参考文献	3
第2章 サテライトミルの試作と異形断面条の試験圧延	
2・1 サテライトミル圧延の原理	5
2・2 試作機	7
2・3 実験方法	7
2・4 実験結果	9
2・4・1 条の形状	9
2・4・2 変形特性	11
2・4・3 負荷特性	11
2・5 考 察	13
2・6 結 言	14
参考文献	14
第3章 平条の平圧延	
3・1 緒 言	15
3・2 試作機	15
3・3 実験方法	15
3・3・1 圧延機の弾性変形特性	15
3・3・2 平条の平圧延実験	17
3・4 実験結果	17
3・4・1 圧延機の弾性変形特性	17
3・4・2 平条の平圧延実験	19
3・5 考 察	24

3・5・1 圧延機の弾性変形特性	24
3・5・2 平条の平圧延実験	26
3・6 結 言	27
参考文献	28

第4章 凹型衛星ロール法による平条の拡幅圧延

4・1 緒 言	29
4・2 実験方法	29
4・2・1 供試材	29
4・2・2 実験装置	29
4・2・3 実験方法	31
4・3 実験結果	32
4・3・1 圧延材の性状	32
4・3・2 変形特性	33
4・3・3 先進特性	33
4・3・4 負荷特性	36
4・3・5 製品の硬さ分布	36
4・4 考 察	36
4・5 結 言	39
参考文献	39

第5章 凸型衛星ロール法による平条の拡幅圧延

5・1 緒 言	40
5・2 装置および実験方法	40
5・2・1 供試材	40
5・2・2 実験方法	40
5・3 実験結果および考察	42
5・3・1 平条の性状	42

5・3・2	変形特性	42
5・3・3	先進特性	45
5・3・4	負荷特性	45
5・3・5	硬さ分布	48
5・4	凹型衛星ロール法と凸型衛星ロール法の比較	48
5・5	結 言	50

第6章 サテライトミル圧延材の集合組織

6・1	緒 言	51
6・2	装置および実験方法	51
6・2・1	供試材	51
6・2・2	圧延方法	51
6・2・3	集合組織の測定	52
6・3	実験結果および考察	52
6・3・1	幅広がり率	52
6・3・2	軸密度分布	52
6・3・3	幅広がりひずみが大きい場合の圧延集合組織	55
6・4	結 言	59
	参考文献	60

第7章 孔型中心ロール法による異形断面条の圧延

7・1	緒 言	61
7・2	実験方法	62
7・3	実験結果	64
7・3・1	座屈波の発生と加工限界	64
7・3・2	変形特性	65
7・3・3	先進特性	70
7・3・4	負荷特性	70

7・4 考 察	73
7・5 結 言	74
参考文献	75

第8章 孔型衛星ロール法による異形断面条の圧延

8・1 緒 言	76
8・2 実験方法	76
8・3 実験結果および考察	78
8・3・1 条の形状と表面性状	78
8・3・2 変形特性	78
8・3・3 先進特性	82
8・3・4 負荷特性	82
8・4 孔型中心ロール法と孔型衛星ロール法の比較	83
8・5 結 言	85

第9章 孔型衛星ロール法による高板厚比異形断面条の圧延

9・1 緒 言	86
9・2 装置および実験方法	86
9・3 実験結果および考察	88
9・3・1 変形特性	88
9・3・2 先進特性	91
9・3・3 負荷特性	91
9・3・4 硬さ分布	92
9・3・5 マクロ組織	93
9・4 結 言	93
参考文献	93

第10章 孔型衛星ロール法による広幅高板厚比異形断面条の圧延

10・1	緒 言	94
10・2	装置および実験方法	94
10・3	実験結果	96
10・3・1	素材最適寸法	96
10・3・2	変形特性	97
10・3・3	先進特性	99
10・3・4	負荷特性	100
10・3・5	製品品質	100
10・4	考 察	103
10・5	結 言	104

第11章 一般化平面ひずみモデルによる異形断面条圧延の解析

11・1	緒 言	105
11・2	解析方法	105
11・3	解析結果および考察	107
11・4	結 言	107
	参考文献	108

第12章 Y系酸化物シース材の平線圧延

12・1	緒 言	109
12・2	実験方法	110
12・3	実験結果	111
12・3・1	変形特性	111
12・3・2	酸化物粉末の見かけ密度	113
12・3・3	負荷特性	113
12・4	考 察	116
12・5	結 言	117
	参考文献	117

第13章 Bi系酸化物超伝導体の線材化への応用

13・1 緒言	119
13・2 実験方法	119
13・2・1 供試材	119
13・2・2 実験装置	120
13・2・3 圧延および焼成条件	120
13・2・4 臨界電流密度と配向度の測定	120
13・3 実験結果	122
13・3・1 変形特性	122
13・3・2 組織	122
13・3・3 超伝導線材の特性	123
13・4 考察	126
13・5 結言	127
参考文献	127
 第14章 総括	 128
 本研究に関する公表論文	 131
 謝辞	 132

1. 緒 論

圧延加工は、連続加工法のため生産性に優れていること、材料とロールの相対速度が小さいため摩擦損失が少ないこと、鍛錬効果が期待できることなどの利点を有することから大量生産を目的とした素材加工法の主プロセスとして発達してきた。しかしながら、近年工業技術の高度化により材料の高機能化が要求され、それに対応する新しい圧延プロセスが種々提案されている¹⁾。

これらの新圧延法を大別すると、(a)複合材料の加工、(b)難加工性材料の加工、(c)材質改善、(d)異形成形技術に分類することができる。(a)複合材料の加工としては、クラッド材²⁾や樹脂複合材料³⁾の製造を目的として、非対称圧延^{4,5)}や真空圧延^{6,7)}が開発されている。また最近ではセラミックスの様な非塑性材料の被覆材の加工法⁸⁾が検討されている。(b)難加工性材料の加工法としては恒温圧延⁹⁾、粉末圧延¹⁰⁾などが提案されている。(c)材質改善としては制御圧延に代表される加工熱処理法が代表例である。(d)異形成形としては外法一定H形鋼の開発¹¹⁻¹³⁾、板幅方向に板厚段差を有する異形断面条^{14,15)}の製造などがあげられる。

本論文ではサテライトミルを用いた新圧延法について検討を行う。サテライトミルとは直径が胴長より大きい一本の作業ロール(中心ロール)とその外周上に配置された複数の小径作業ロール(衛星ロール)が組み合わされており、中心ロールと衛星ロールの間で連続圧延が実現される圧延機の総称である。この圧延機は一台で数スタンドの連続圧延機に相当するコンパクトミルであるが、各圧下点では中心ロールを共有するため一方のロール周速は必然的に一定となること、材料は中心ロールに巻き付くこと、したがって材料の片面のみが開放されていることなどの点が通常の圧延機とは異なっている。この種の圧延機は従来より提案されており、例えば荒木¹⁶⁾は異形断面条の製造への適用を提案し、吉原ら¹⁷⁾および益居¹⁸⁾は少スタンドで大圧下圧延が可能で、材料の温度降下も少ないことからホットストリップミルへの適用を提案している。この様なミルで圧延を安定に行うためには各圧下点間で材料のたるみを生じないように大きな前方張力を付加し各衛星ロールを従動とするか、下流段の衛星ロールほど高速とする必要がある。

本研究では各衛星ロールはリングギヤによって中心ロールと同周速で駆動し、各衛星ロール間にはガイドシューおよびサイドガイドが備え付けた新形式のサテライトミルを用いた。ガイドシューは条が隣接する衛星ロール間に張り出さないように案内するとともに座屈波の発生を抑制する。そのため各ロールが同一の周速で駆動されることに起因して長手方向に圧縮力が発生し、延伸が抑制され、横断面内のメタルフローが促進される。

張力の付加は圧延機への負荷を減少させたり、長手方向の板厚を制御する目的でこれまでに広く研究が行われてきた。しかしながら、逆に圧延中に長手方向の圧縮力を付加する圧延方法についてはほとんど研究がなされておらず、通常圧延法では適用が困難である高機能材料の加工が行える可能性を有している。

そこで高機能材料の加工プロセスとして条の拡幅圧延、異形断面条の圧延、銀シース法による酸化物超伝導体の線材化プロセスを取り上げ、これらのプロセスへのサテライトミルの適用について検討した。

本論文の各章の概要は以下の通りである。

第2章では本研究で用いたサテライトミルの原理について説明した。さらに試作機を製作し、異形断面条の試験圧延を行い、この圧延機では全ロールが同周速で駆動されることに起因して材料内に大きな圧延方向の圧縮力が発生し、横断面内のメタルフローが促進されることを明らかにした。

第3章では圧延機の弾性変形特性を調査するとともに平条の平圧延に適用し、圧延特性を明らかにした。

第4章および第5章では、サテライトミルにより平条の拡幅圧延を行う方法として凹型衛星ロール法ならびに凸型衛星ロール法を提案し、圧延特性ならびに製品特性を調査するとともに両方法の比較検討を行った。さらに第6章では圧延材の集合組織に及ぼすサテライトミル圧延の影響を明らかにした。

第7章～第9章ではサテライトミルを用いて素材平条よりT形異形断面条を製造する方法として孔型中心ロール法ならびに孔型衛星ロール法を提案し、圧延特性ならびに製品特性を調査するとともに両方法の比較検討を行った。第9章、第10

章では高板厚比および広幅のT形異形断面条を製造可能な孔型を提案し、圧延特性ならびに製品特性を明らかにした。さらに第1.1章では一般化平面ひずみモデルを用いた剛塑性有限要素法による解析を行い、圧延中の変形を明らかにした。

第1.2章では金属シース法による酸化物超伝導体の線材化プロセスにサテライトミル圧延を適用する基礎として、イットリウム系酸化物粉末をアルミニウムでシースした線材の通常圧延機による平線圧延時の圧延特性、酸化物の見かけ密度、コアとシースの界面の形状に及ぼす圧延条件の影響を明らかにした。

第1.3章では銀シース法によるビスマス系酸化物高温超伝導材料の線材化プロセスにサテライトミル圧延を適用し、変形特性ならびに製品の超伝導特性に及ぼすサテライトミル圧延の影響を明らかにした。

第1.4章では得られた結果を総括した。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：128回塑加シンポジキスト，(1990)。
- 2) 川並高雄：塑性と加工，**32**—360 (1991)，27。
- 3) 江嶋瑞男：塑性と加工，**32**—360 (1991)，34。
- 4) 塩崎宏行：日本鉄鋼協会 第92・93回西山記念技術講座，(1983)。
- 5) 中村雅勇：鉄と鋼，**75**—2 (1989)，205。
- 6) 松本紘美：128回塑加シンポジキスト，(1990)，21。
- 7) 西条謹二・吉田一雄・平松裕更：41回塑加連講論，(1990)，211。
- 8) 木原諄二・相澤龍彦・陳 湘明・市毛健一：塑性と加工，**32**—368 (1991)，1129。
- 9) 堀端眞彦・大内清行・P.J.ボルト・佐野利男：平2春塑加講論，(1990)，319。
- 10) 師岡利政・湯浅英二・周 俊宏：軽金属，**37**—3，(1987)，199。
- 11) 林 宏之・鍵田征雄・朝生一夫・瀬戸恒雄・三浦啓徳・藤本洋二：平2春塑加講論，(1990)，289。
- 12) 生田和重・西野胤治・青柳幸四郎・戸次健二・川並高雄：40回塑加連講論，

(1989), 389.

13) 鹿野 裕・草場芳昭・藤本邦治・的場弘行: 塑性と加工, **33**-381 (1992),

1208.

14) 福田 弘: 塑性と加工, **32**-363(1991), 452.

15) 大場 誠・阿部 元・石田和雄: 伸銅技術誌, **29**(1990), 95.

16) 荒木甚一郎: 実用新案公報, 昭54-22747.

17) 吉原征四朗・東山博吉: 公開特許公報, 昭55-48405.

18) 益居 健: 公開特許公報, 昭59-199104.

2. サテライトミルの試作と異形断面条の試験圧延

2・1 サテライトミル圧延の原理

本節では異形断面条を圧延する場合を例にとり、サテライトミル圧延の原理を説明する。図2.1はサテライトミルの構造の概略である。直径が胴長より大きい1本の作業ロール（「中心ロール」と称する）と、その外周上に等間隔に配置された複数の小径作業ロール（「衛星ロール」と称する）が組み合わされており、中心ロールと衛星ロールの間に連続圧延が実現される構造になっている。各圧延部を上流側から「1段目」、「2段目」、・・・と称し、 n 本の衛星ロールを用いる圧延を「 n 段サテライトミル圧延」と呼ぶ。したがって図2.1は5段サテライトミル圧延の場合を示している。各ロールは異周速または従動（アイドラー）とすることも可能であるが、本研究では同一のロール周速 V_r で駆動する。この機構を実現するため各衛星ロールは直接電動機により駆動される中心ロールとリングギヤによって結合されている。なおサテライトミル圧延において必ずしも全ロールの周速を一致させる必要はないが、装置が簡略になることおよび最も拘束の大きい条件であるためサテライトミル圧延の効果が最も顕著に現れると考えられることから本研究では同周速とした。

圧延方法は異形断面条の段差を成形するための孔型を衛星ロールに設けるか、中心ロールに設けるかによって「孔型衛星ロール法」、「孔型中心ロール法」に区別することができるが、本章では孔型衛星ロール法を用いた。なお、孔型中心ロール法については第7章で説明する。この方法では衛星ロールの突起の幅 b は上流から下流に向かって徐々に増加している。したがって、中心ロールと衛星ロールの突起部の間隙 h を一定または上流から下流に向かって若干減少するようにセットし、上流から平条を噛み込ませると、平条は各圧下部で幅の一部が次々と圧下されて薄肉部の幅が広げられ、異形断面条に成形される。

このような圧延を安定に行うために、サテライトミルにはガイドシューおよびサイドガイドが各衛星ロール間に備えられている。ガイドシューは条が衛星ロールの間に張り出さないように案内するとともに、成形途中の条の特に薄肉部での座屈波

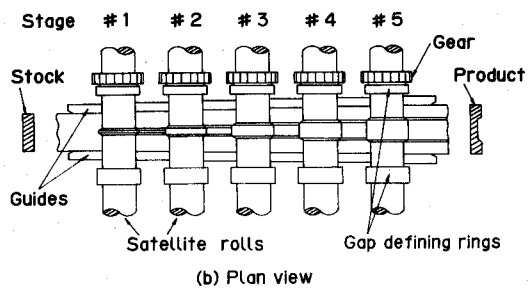
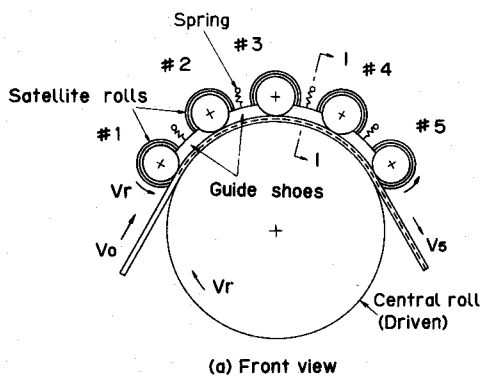


図2.1 5段サテライトミル圧延のロール配置

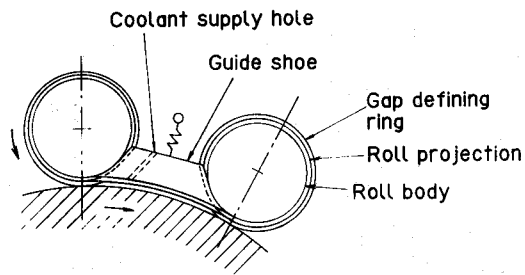


図2.2 ガイドシューの詳細図

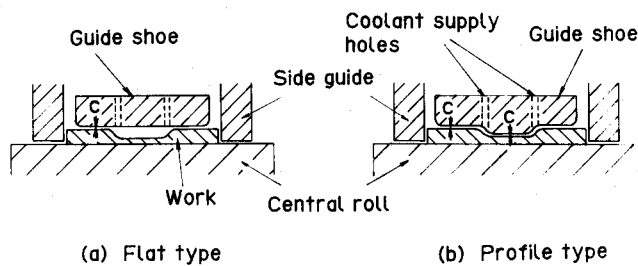


図2.3 ガイドシューの断面図

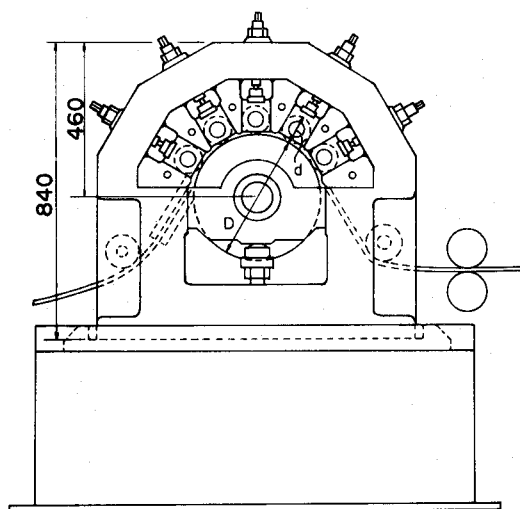


図2.4 試作5段サテライトミルの正面図

($D=350\text{mm}$, $d=70\text{mm}$)

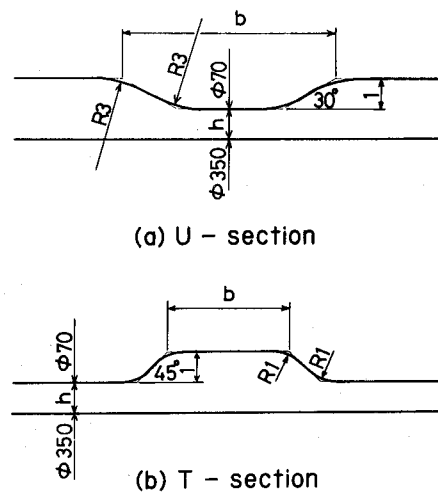


図2.5 用いたロール孔型

の発生を抑制する（図2.2）。図2.3にガイドシュウの横断面図を示す。ガイドシュウは底面（材料側の面）の形状によって平形と総形の2つのタイプに分けられる。また圧延中、ガイドシュウは安定に支持され、かつ底面と中心ロールの外周面との間のギャップは適正值に維持される必要がある。そのためにガイドシュウは隣接する2つの衛星ロールによって支持する構造とした（図2.2）。

2・2 試作機

図2.4に試作した5段サテライトミルの正面図の概略を示す。中心ロールの直径 $D=350\text{mm}$ ，衛星ロールの直径 $d=70\text{mm}$ である。また衛星ロール間の中心ロールに関する角度間隔は 30° とした。各衛星ロールはそれぞれ別々のチョックによって支持され、中心ロールの半径方向に昇降することができる。中心ロールは 1.5kW のバイエルサイクロ式可変速電動機により駆動した。各ロールに作用するロール分離力（圧下力）を計測するため、中心ロール用には 400kN ，衛星ロール用には 100kN のロードセルを取り付けた。また潤滑油はノズルにより各ロールとガイドシュウに十分に供給される構造とした（図2.2）。

2・3 実験方法

実験は代表的な異形断面条であるU形（凹形）およびT形（凸形）の5段サテライトミル圧延について行った。用いたロール孔型を図2.5に、パススケジュールを表2.1に示す。孔型側面の傾斜角ならびにコーナー部の曲率半径は予期される表面欠陥を考慮して設計した。供試材として市販の純アルミニウム（JIS A1050P）のO材（焼鈍材）およびH24材（1/2硬化材）のコイルから切り出した厚さ 1.96mm ，幅 40mm の平条を用いた。表2.2に圧延引張法¹⁾で求めた機械的性質を示す。ただし加工硬化指数 n は次式で定義した。

$$\sigma_{0.2} = K \bar{\varepsilon}^n = K (2/\sqrt{3} |\ln(1-r)|)^n \quad (2.1)$$

ただし、 $\sigma_{0.2}$ ：0.2%耐力， $\bar{\varepsilon}$ ：相当ひずみ， r ：圧下率

ガイドシュウは#1－#2間は平形，他は総形を用いた。また、比較のため全段

表2.1 パススケジュール

Stage	b /mm		h/mm	c/mm
	U-section	T-section		
#1	5	35	1.20	0.69
#2	9	31	1.15	
#3	13	27	1.10	0.64
#4	17	23	1.05	0.58
#5	21	19	1.00	0.53

表2.2 用いたアルミニウム平条の機械的性質 (JIS A1050P)

Temper grade	Proof stress /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%	n-value ($0.03 < \bar{\varepsilon} < 1.45$)
0	37	76	47	0.23
H24	119	121	24	0.08

間に平形を用いた実験も行った。ガイドシューと条の間のクリアランス c は基準ロール間隙 $h=1.0\text{mm}$ のとき $c=0.5\text{mm}$ となるように設計した。したがってロール間隙が基準値から変化すると c も変化するが、当ミルの場合隣接する衛星ロールの圧下方向が 30° 傾いているのでクリアランスの変化量 Δc とロール間隙の変化量 Δh は近似的に次の関係となる。

$$\Delta c = 1.09 \Delta h \quad (2.2)$$

表2.1にこの関係より求めた c の計算値を示した。潤滑剤には市販の鉱油ベースの圧延油（出光 CU-50）を用いた。潤滑油の動粘性係数は 313K で $7.4\text{cm}^2/\text{s}$ である。なお前方ならびに後方張力はいずれも付加しなかった。ロールギャップを設定してから条を通板させ、周速 $V_r=25\text{mm/s}$ で定常圧延に達した後、圧延を中断して衛星ロールを引き上げ、圧延途中の条を取り出し、各段における延伸、幅広がり、横断面形状、板の先進係数を測定した。幅広がり率、延伸率は次式で定義した。

$$\text{幅広がり率} = (B_i/B_o) - 1 \quad (i=1, 2, 3, 4, 5) \quad (2.3)$$

$$\text{延伸率} = (l_i/l_o) - 1 = \lambda_i - 1 \quad (i=1, 2, 3, 4, 5) \quad (2.4)$$

ただし, B_i : i 段目通過後の板幅, B_o : 圧延前の板幅

l_i : i 段目通過後の板幅中央表面の長手方向の標点間距離,

l_o : 圧延前の標点間距離

λ_i : i 段目通過後の延伸係数

また, 先進係数は 5 段目衛星ロールのロールマークにより, 次式で計算した.

$$\text{先進係数} = (V_i/V_r) = (L/\pi d)(\lambda_i/\lambda_5) \quad (i=0, 1, 2, 3, 4, 5) \quad (2.5)$$

ただし, V_i : i 段目通過後の材料速度

L : 板表面に転写されたロールマークの間隔

d : 衛星ロールの直径

したがって先進係数が 1 を超える段に中立点が存在することになり, その段を「中立段」と称する. さらに横断面形状としてポイントマイクロメータによる板幅方向の板厚分布を測定した.

なお比較のためサテライトミル圧延と同じ孔型, 同じパススケジュールを用いた通常圧延法である 2 high の 5 パス孔型圧延 (通常圧延) の実験を行った. その場合には, サテライトミルの 3 段目のみを使用して, 各孔型衛星ロールを 1 パス毎に順次組換えて圧延を 5 パス繰り返した. 他の圧延条件はサテライトミル圧延の場合と同じとした. すなわち 5 パス孔型圧延は各段間の長手方向の圧縮力が作用しない点がサテライトミル圧延と異なっている.

2・4 実験結果

2・4・1 条の形状

図 2.6 に圧延途中で噛み止めしたサンプル (H24 材) の外観を示す. 圧延中の条は中心ロールに沿って湾曲しているため, これをわずかに引っ張って平面に展開したものである. ガイドシューとして平形を用いた場合には, 3 段目通過後に T 形,

U形ともに薄肉部に座屈波が生じ、5段目通過後にT形では消滅したがU形では欠陥として残存した。これに対して総形を用いた場合は、T形では成形中の波の発生はなくなり、U形でもわずかに痕跡が残る程度に改善された。

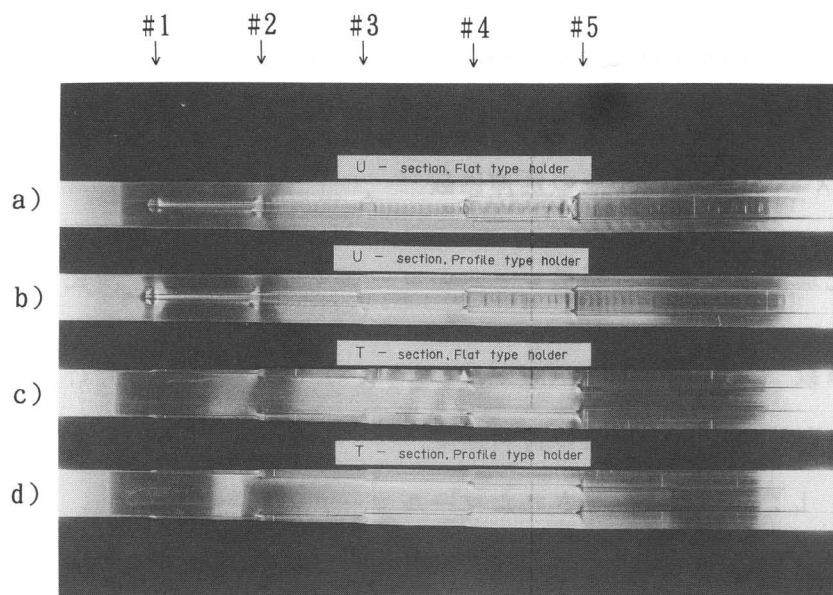


図2.6 噛み止めサンプル (A1050P-H24) の外観

- a) 平形ガイドシュー, U形
- b) 総形ガイドシュー, U形
- c) 平形ガイドシュー, T形
- d) 総形ガイドシュー, T形

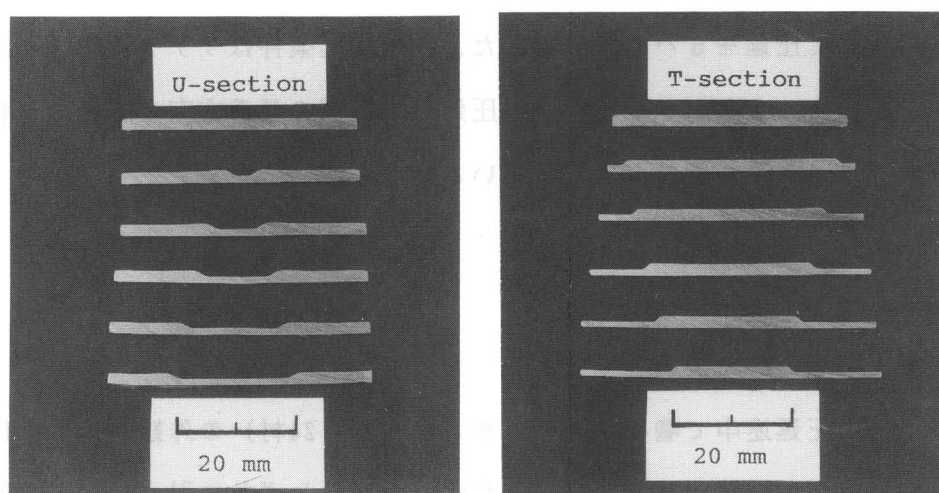


図2.7 素材及び5段サテライトミル圧延の各段通過後の断面

蛇行や横曲がりについては、T形は安定でサイドガイドを必要としないが、U形は不安定でパスラインから逸脱し易く、正確なサイドガイドの設定が不可欠であった。

図2.7は素条および圧延途中の各段通過後の横断面の形状（O材）の写真である。成形中は厚肉部と薄肉部の境界付近の厚肉部側に若干の盛り上がりによる増肉と、境界から最も離れた厚肉部に若干の減肉が生じたが、ほぼロールの形状に近い横断面が得られた。

2・4・2 変形特性

図2.8はU形ならびにT形異形断面条のサテライトミル圧延および通常圧延における条の延伸率の推移を比較したものである。縦軸に延伸率を、横軸はサテライトミル圧延の場合は段の番号を、通常圧延の場合はパスの回数をとって示した。通常圧延ではU形で1段目、T形で2段目まではほとんど延伸を生じないが、その後急激に延伸が起こるのに対し、サテライトミル圧延ではU形で2段目、T形で3段目まではほとんど延伸を生じていない。すなわちサテライトミル圧延では延伸が著しく抑制され、特にU形における抑制効果が大きく5段目通過後の延伸率は5パス孔型圧延の約半分である。

幅広がりの推移を同様に図2.9に示す。延伸の抑制に対応して、U形で2段目から、T形で3段目から通常圧延に比べて大きな幅広がりを生じている。

図2.10はサテライトミル圧延における条の板幅方向の板厚分布の推移を通常圧延におけるそれと比較したものである。また図2.11は特に板幅中央と板端での板厚の推移をみたものである。通常圧延材では非圧延部（厚肉部）すなわちU形の板端部およびT形の板幅中央部に顕著な減肉を生じるのに対し、サテライトミル圧延材ではU形の減肉は半減し、T形では減肉を生じていない。したがってサテライトミル圧延によって成形された異形断面条の横断面形状は通常圧延のそれに比べて優れている。

2・4・3 負荷特性

図2.12はサテライトミル圧延における各衛星ロールの圧下力を通常圧延の対応するパスのそれと比較したものである。サテライトミル圧延では2，3，4段目の圧

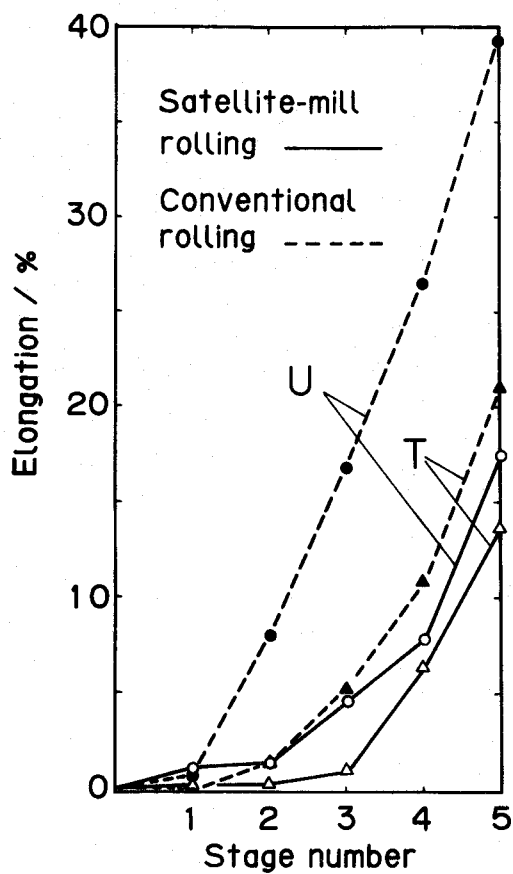


図2.8 延伸率の推移 (A1050P-0)

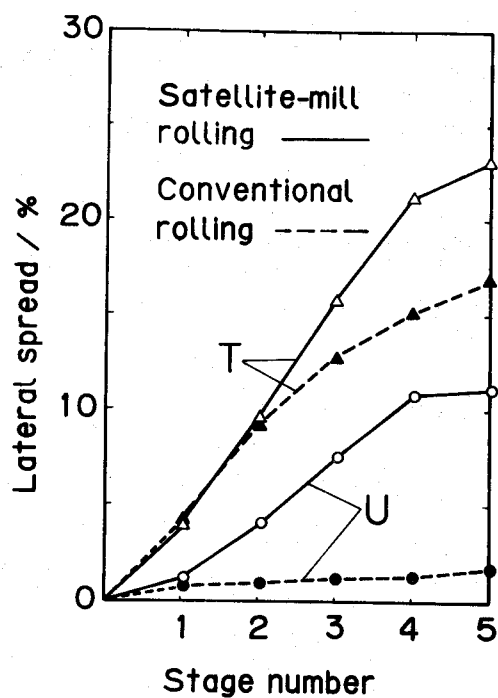


図2.9 幅広がり率の推移 (A1050P-0)

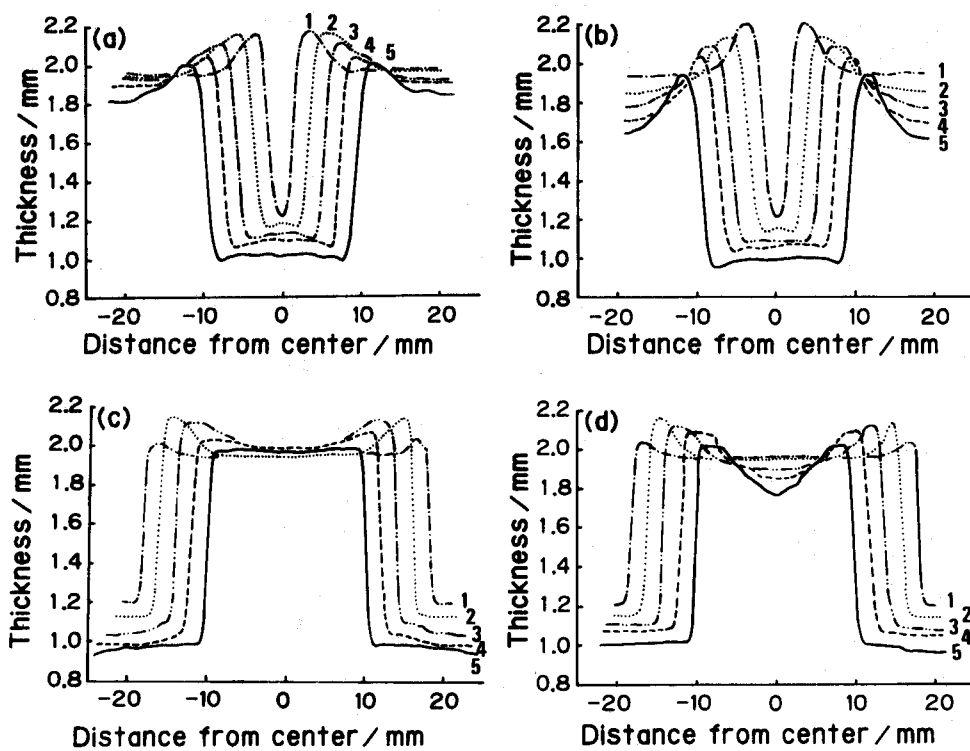


図2.10 断面プロファイルの変化 (A1050P-0)

(a) U形サテライトミル圧延

(b) U形通常圧延

(c) T形サテライトミル圧延

(d) T形通常圧延

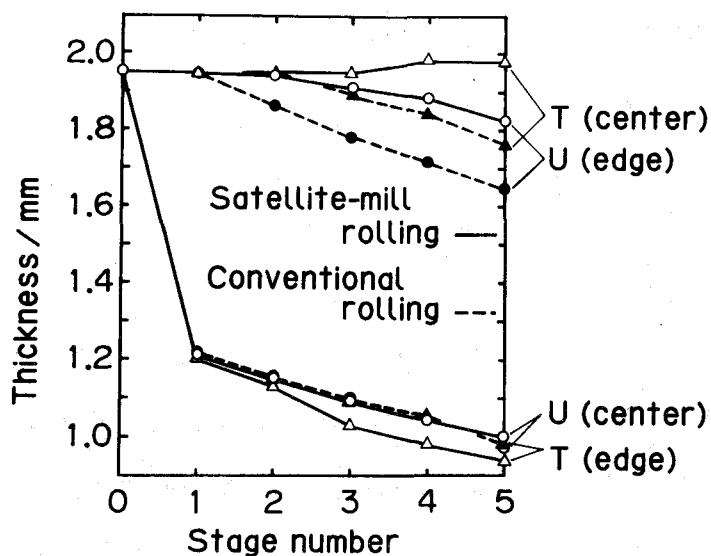


図2.11 板厚の変化 (A1050P-0)

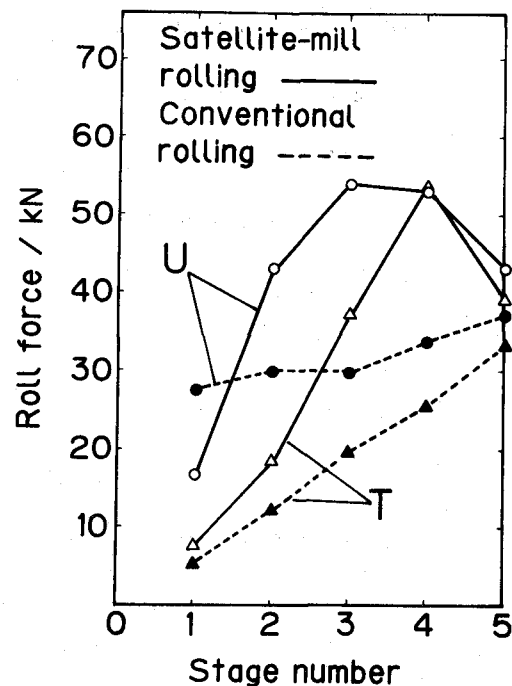


図2.12 衛星ロールの圧下力の分布
(A1050P-0)

下力は通常圧延の 1.5 ～ 2 倍である．材料の先進係数の測定より，ロール周速と材料速度が一致する中立点はT形では4段目に，U形では5段目に存在していた．したがって，T形では中立点を含む段（中立段）で圧下力は最高になったが，U形では圧下力最大の段（3段目）と中立段は一致しなかった．図2.8，図2.9と比較すると，一般に通常圧延に比べて延伸が抑制され幅広がりが促進される段で圧下力が増加することがわかる．

2・5 考 察

上記の実験結果は，通常圧延と比較してサテライトミル圧延では各段，特に中間の各段において，延伸が著しく抑制され，幅広がりが促進され，圧下力が増加することを示している．この現象は，各段間において発生し，下流の中立段で最大値となる長手方向の圧縮力を仮定することによって説明できる．このことは各ロールが同周速で駆動されることに起因している．その圧縮力は板幅方向のメタルフローを促進し，平条から異形断面条への成形に有効であることが明らかとなった．しかし

ながら，その圧縮力はフリクションヒルを高めるので圧下力を増加させ，また薄肉部における座屈波の発生原因ともなる．座屈波は異形断面条を圧延する場合，通常圧延法においても，溝部の局所的な延伸が他の部分の延伸よりも大きくなることによって発生するが，長手方向の圧縮応力は溝部の局所的な圧縮応力を高めるため，さらに座屈を助長する．これらの問題はクリアランスの小さい総形ガイドシュューを採用することによって一部分は解決されるものと思われる．

2・6 結 言

5段サテライトミルの試作機を製作し，アルミニウム平条からU形およびT形異形断面条を1パスで成形する試験圧延を行った．その結果，この圧延法では材料内に大きな長手方向の圧縮応力を発生し，その圧縮応力が材料の板幅方向のメタルフローを促進するため，通常の連続圧延法に比べて，断面形状の良好な異形断面条の効率的な製造が可能であることが明らかとなった．

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会圧延理論部会編：板圧延の理論と実際，1987，日本鉄鋼協会，174.

3. 平条の平圧延

3・1 緒 言

前章（第2章）では新形式のサテライトミルの第1号機を試作し，アルミニウム平条から異形断面条の製造を試み，このミルでは各段間で長手方向の圧縮力が発生し，異形断面条の成形圧延に有効であることを明らかにした．同時にこのミルでは座屈波を抑制するガイドシュウの設定精度を確保するために高いミル剛性が必要であることも明らかになった．

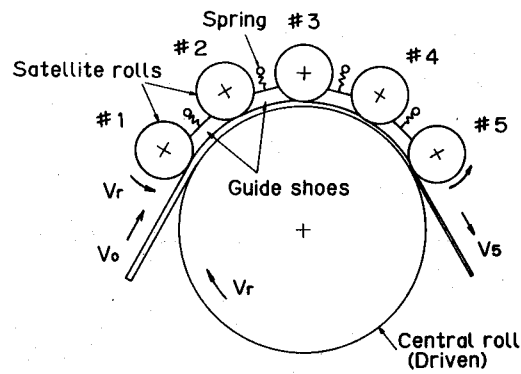
そこでこれらの結果を踏まえ，ミルのハウジングの剛性，ガイドシュウなどに改良を加えた第2号機を試作し，これを用いてサテライトミル圧延の圧延特性を解明することとした．本章ではこの2号機により，ミルの設定精度と直接関係するミルの弾性変形特性ならびに最も基本的な平ロールによる平条のサテライトミル圧延の圧延特性について調べた．

3・2 試作機

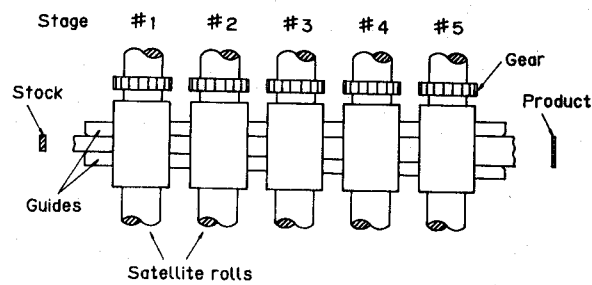
図3.1に試作したサテライトミルのロール，ガイドシュウ，サイドガイドの配置を示す．ロールは全て平ロールである．試作2号機の正面図を図3.2に，平面図を図3.3に示す．中心ロール（直径 350mm，胴長 96mm）と衛星ロール（直径 76mm）はロールチョックとともにアーチ形の一体型ミルハウジングに収められている．ハウジングのアーチ部の最小断面は 200mm×90mm である．中心ロールは，2.2kW のバイエルサイクロ式可変速電動機により駆動される．各ロールには圧下力を計測するため中心ロール用には容量 600kN，衛星ロール用にはそれぞれ容量 100kN のロードセルを取り付け，また中心ロールの駆動軸には容量 10kN・m のトルクメータと回転速度計を取り付けた．また潤滑油はノズルにより各ロールに十分に供給される構造とした．

3・3 実験方法

3・3・1 圧延機の弾性変形特性



(a) Front view



(b) Plan view

図3.1 5 段サテライトミルのロール配置

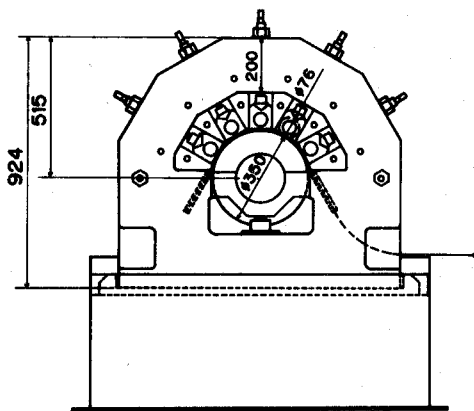


図3.2 5 段サテライトミルの
試作機の正面図

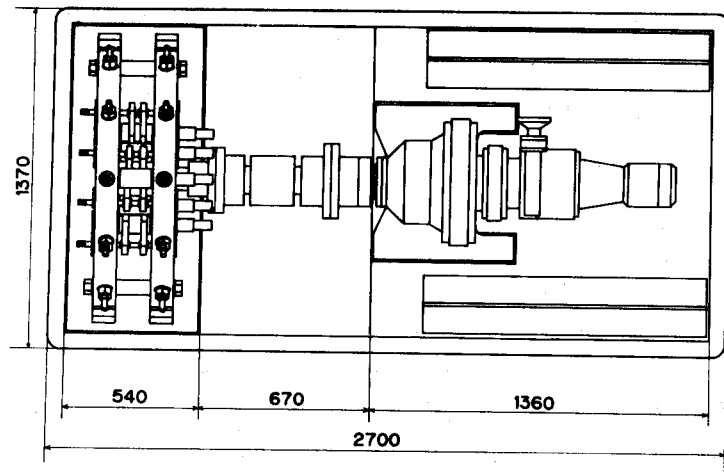


図3.3 5 段サテライトミルの試作機の平面図

試作したサテライトミルの弾性変形特性を締め込み法¹⁾によって測定した。ロールギャップ内に試料がない状態（キスロール状態）で5 段とも均等に予荷重 30kN がかかるように各衛星ロールの圧下スクリュウを締め込み、その状態から、任意の

1つの衛星ロールの圧下スクリューをさらに締め込んだときの各衛星ロールの分離力（圧下力）の変化を測定した。

3・3・2 平条の平圧延実験

供試材としては市販の純アルミニウム板（JIS A1050P）のO材（焼鈍材）およびH24材（1/2硬化材）のコイルをスリットした平条を用いた。条の寸法は板厚 h が 1.95mm，板幅 W が 9.9mm および 19.9mm の2種類とした。実験は2つのシリーズについて行った。第1の実験シリーズとして、各段における圧下率 r を 15% 一定として成形段数を1～5段と変化させた実験をO材を用いて行った。比較のため、サテライトミルの第1段目のみを用いて圧下率 $r=15\%$ で5回圧延を繰り返す1段5パス圧延（通常圧延）の実験も行った。また、第2の実験シリーズとして5段サテライトミル圧延について、各段圧下率 r を 5, 10, 15%（全圧下率 $r_t=23, 41, 56\%$ ）と変化させた実験をO材とH24材を用いて行った。

潤滑剤には鉱油ベース圧延油を用い、ロール周速 $V_r=22.0\text{mm/s}$ で実験を行った。なお前方ならびに後方張力はいずれも付加しなかった。

圧延機の弾性変形特性を考慮して、各段通過後の板厚が所定の圧下率となるようにロールギャップを設定した。サイドガイドの間隔は圧延時の幅広がり considering、広すぎて板に蛇行を生じたり、狭すぎて板がサイドガイドに接触することがないように適正な値に設定した。

定常圧延に達した後、圧延を中断して圧延途中の条を取り出し、各段通過後の材料の形状、幅広がり率、延伸率、先進係数などを測定した。

3・4 実験結果

3・4・1 圧延機の弾性変形特性

前述のような締め込み実験の結果、各段のロール分離力の間に相互作用が存在した。一例として1段目の衛星ロールを締め込んだ場合の各衛星ロールの分離力の変化を図3.4に示す。この場合、2, 3段目の分離力は減少し、4, 5段目の分離力は逆に増加した。他の段を締め込んだ場合も同様で、近接する衛星ロールの分離力は減少し、離れた衛星ロールの分離力は増加した。これらの結果より、 i 段目のロ

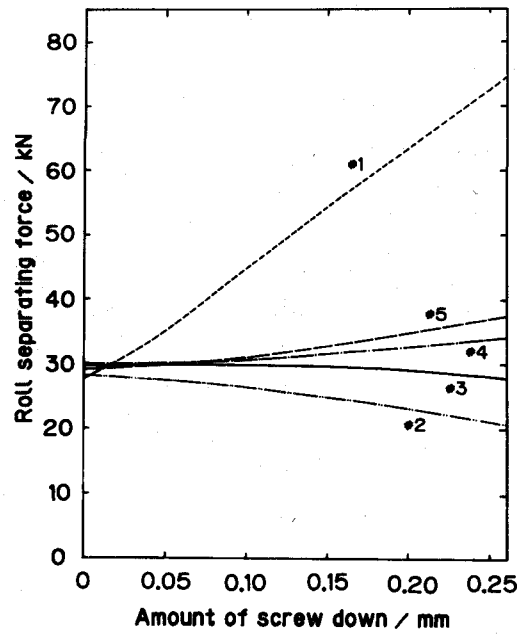


図3.4 予荷重30kNで1段目を締め込んだときの
各衛星ロールの弾性応答

ール分離力増分 ΔP_i (kN) と j 段目の締め込み量 ΔS_j (mm) の関係は近似的に次の線形関係で表すことができた。

$$\Delta P_i = K_{ij} \Delta S_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, 5) \quad (3.1)$$

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} 202 & -24.5 & -5.95 & 10.9 & 26.1 \\ -29.1 & 199 & -20.3 & -3.08 & 13.0 \\ -5.17 & -18.4 & 196 & -19.1 & -2.45 \\ 13.0 & -2.98 & -13.7 & 198 & -21.5 \\ 30.8 & 7.53 & -4.27 & -26.6 & 203 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

K_{ij} は試作したサテライトミルのミル剛性を表すマトリクスであり、各段のミル剛性係数を意味する対角成分 K_{ii} が最も大きくそれぞれの段において 約200kN/mm であった。ただし K_{ii} はミルの入口および出口から遠いほど若干小さくなる傾向がある。対角成分の近傍の成分は K_{ii} に比べて1桁小さい負の値で、対角線から離れるにつれて負から正の値に変化している。これはある段の分離力が増加すると、

近接する段の分離力は若干減少し，遠く離れた段の分離力は，若干増加することに対応している．

3・4・2 平条の平圧延実験

(1) 条の形状

図3.5と図3.6にそれぞれ第1の実験シリーズと第2の実験シリーズにおける素材板幅 $W_0=10\text{mm}$ の噛み止めした試料の外観を示す．圧延中の条は，中心ロールに沿って湾曲しているが，写真はその曲がりを除いて平面上に展開したものである．噛み止め時の衛星ロールの位置を矢印で示してある．図3.5よりサテライトミル圧延では成形段数が多いほど大きな幅広がりを生じているが，成形段数が3段以上では衛星ロール間にさざ波が生じ，その急峻度は段数の増加とともに増加することがわ

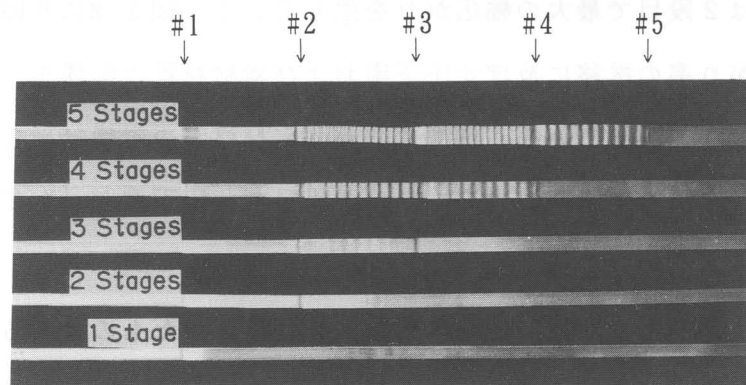


図3.5 サテライトミル圧延噛み止め材の外観

(A1050P-0, $w_0=10\text{mm}$)

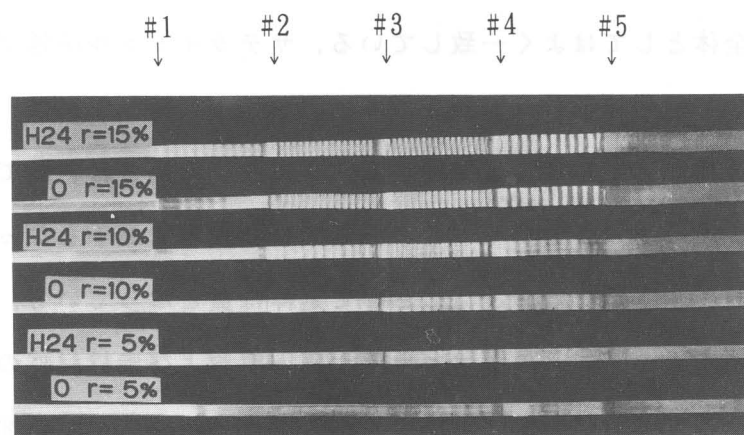


図3.6 5段サテライトミル圧延噛み止め材の外観

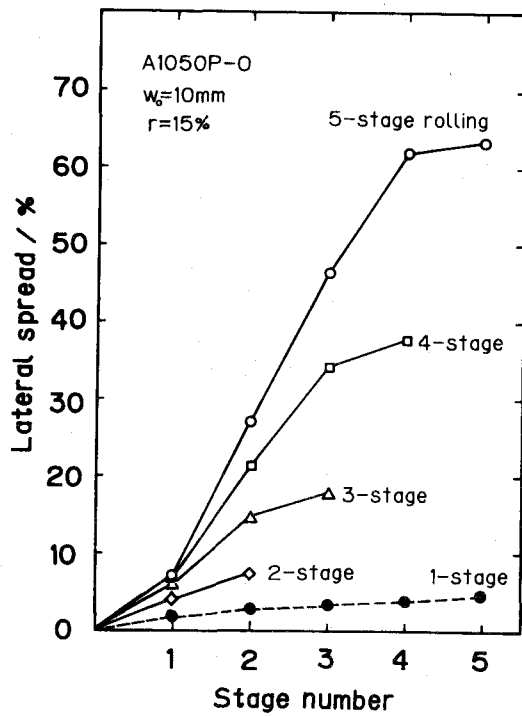
(A1050P, $w_0=10\text{mm}$)

かる。ただし、このさざ波は最終段通過後にはほとんど消滅している。図3.6より5段サテライトミル圧延では圧下率の増加とともに幅広がりが増加しているが、衛星ロール間に生じるさざ波の急峻度も圧下率の増加とともに増加することがわかる。O材とH24材の差はあまり明瞭ではないが、O材の方がH24材よりさざ波の急峻度はやや小さいことがわかる。

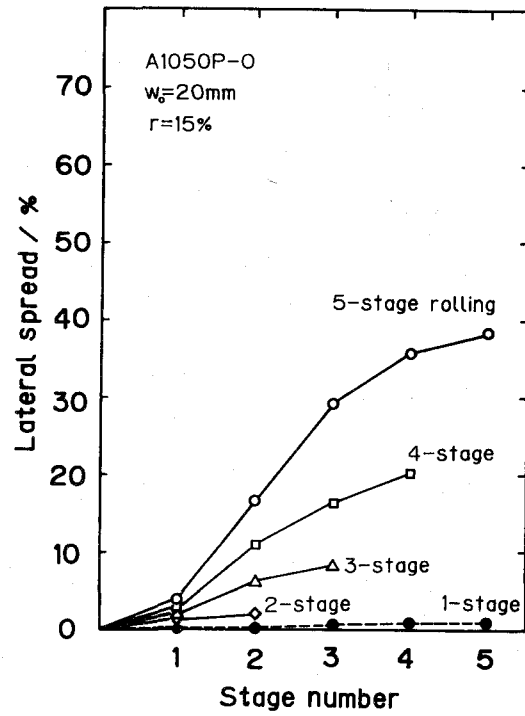
(2) 変形特性

図3.7に幅広がり率の推移に及ぼす成形段数の影響を示す。サテライトミル圧延では、通常圧延（破線の1段多パス圧延）と比較して極めて大きな幅広がりを生じているが、幅広がり率は素材板幅が狭いほど、成形段数が多いほど大きいことがわかる。また曲線の傾きは各段での幅広がり率に対応するが、3段以上のサテライトミル圧延では2段目で最大の幅広がりを生じている。図3.8に5段サテライトミル圧延の幅広がり率の推移に及ぼす圧下率および素材材質の影響を示す。幅広がり率は圧下率の増加とともに著しく増加するが、素材材質の影響はほとんど見られない。また曲線の傾きより圧下率が15%では2段目で、圧下率が5%では3段目で最大の幅広がりを生じている。

図3.9は延伸率の推移に及ぼす成形段数の影響を見たものである。ここで図中の実験点は延伸率の実測値を示し、折線は図3.7の幅広がり率から体積一定条件によって計算した値を示している。実測値は試料表面に標した標点の水平距離から求めているため、さざ波が発生する中流の段では計算値に比べてわずかに小さな値となっているが全体としてはよく一致している。サテライトミル圧延では通常圧延（破線）と比較して延伸は著しく抑制されているが、その抑制効果は、成形段数の増加とともに顕著になっていることがわかる。また曲線の傾きは各段での延伸に対応しているが、3段以上のサテライトミル圧延では2段目で最小となっている。特に5段サテライトミル圧延では2段目において延伸は負となっている。図3.10に5段サテライトミル圧延の延伸率の推移に及ぼす圧下率および素材材質の影響を示す。圧下率が増加するほど、延伸率は増加するが、図3.8の幅広がり率の推移と対応して、延伸の抑制効果は圧下率が5%では3段目で、15%では2段目で最大となっている。



(a) $w_0 = 10\text{mm}$



(b) $w_0 = 20\text{mm}$

図3.7 サテライトミル圧延中の幅広がりの推移

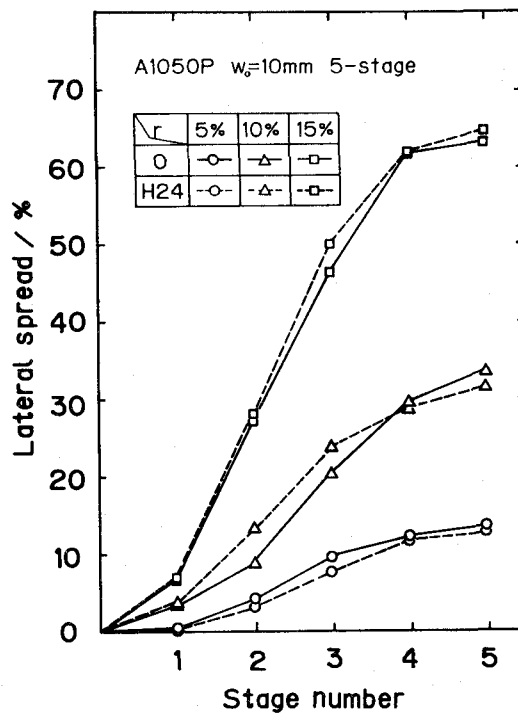


図3.8 5段サテライトミル圧延の幅広がりの推移に
 及ぼす圧下率，調質度の影響

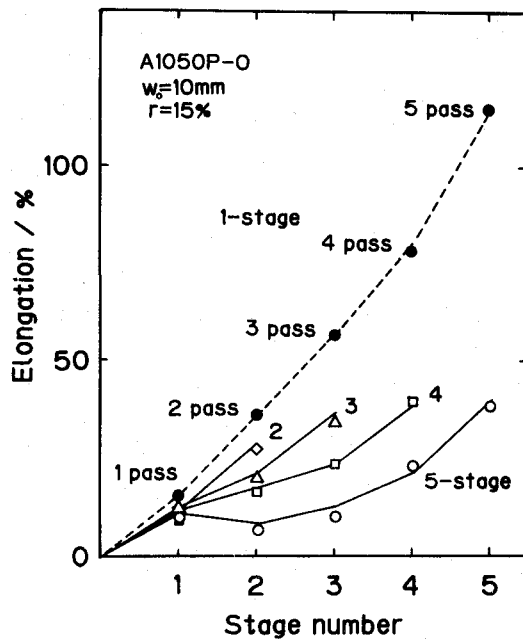


図3.9 サテライトミル圧延中の
延伸率の推移

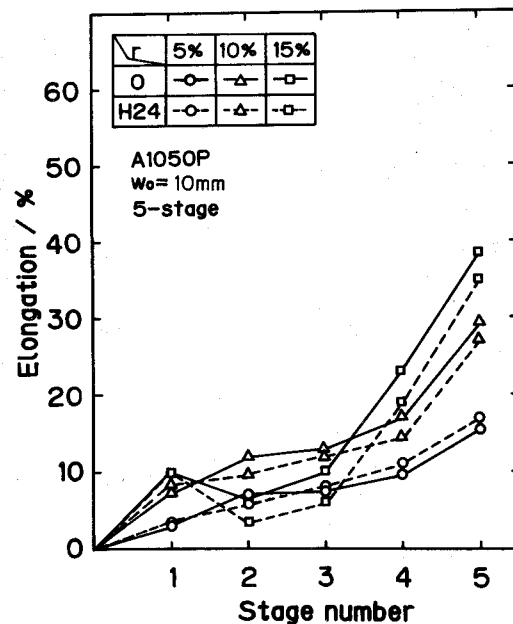


図3.10 5段サテライトミル圧延の延伸率の
推移に及ぼす圧下率，調質度の影響

(3) 先進特性

図3.11に先進係数の推移に及ぼす成形段数の影響を示す。サテライトミル圧延では成形段数の増加とともに，材料の入口速度は減少し，最終段の出口速度は増加する。また，この条件では成形段数によらず先進係数が1の点すなわち中立点は最終段に存在し，最終段以外の段は後進域すなわち材料速度がロール速度に比べて小さく，中立点のない圧延を行っていることがわかる。図3.12に5段サテライトミル圧延の先進係数の推移に及ぼす圧下率および素材材質の影響を示す。圧下率が増加するほど材料の入口速度は減少し，出口速度は増加する。また中立点は5段目の入口付近に存在しており，圧下率によって中立点の位置はあまり変化しないことがわかる。

(4) 負荷特性

図3.13に衛星ロールの圧下力の分布に及ぼす成形段数の影響を示す。衛星ロールの圧下力は，ミルの入口および出口から離れるほど大きく，最終段の1段上流側の段で最高値に達し，全体として1つのフリクションヒル状の分布を示している。そ

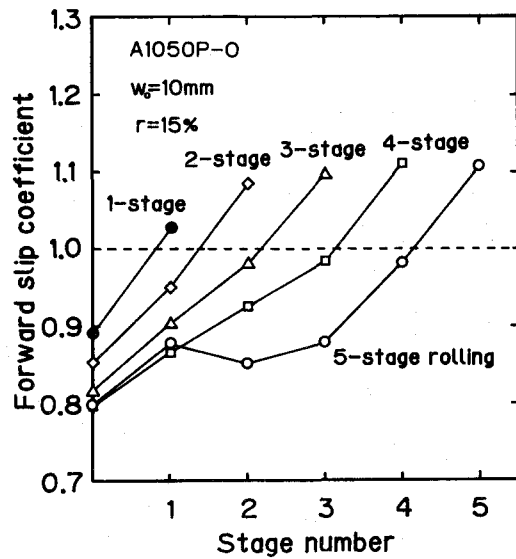


図3.11 サテライトミル圧延中の先進係数の推移

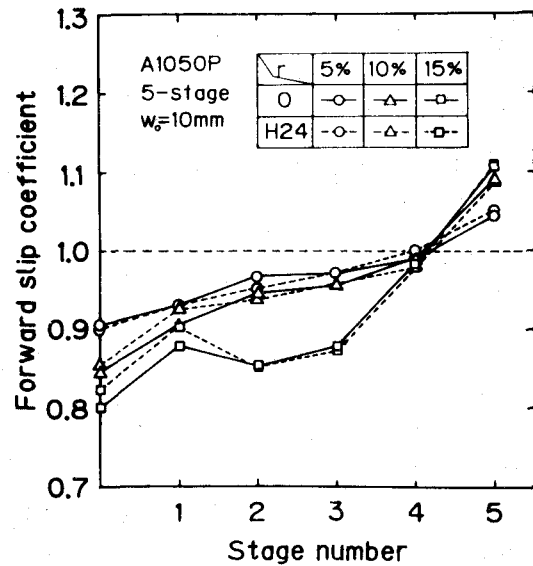


図3.12 5段サテライトミル圧延の先進係数の推移に及ぼす圧下率，調質度の影響

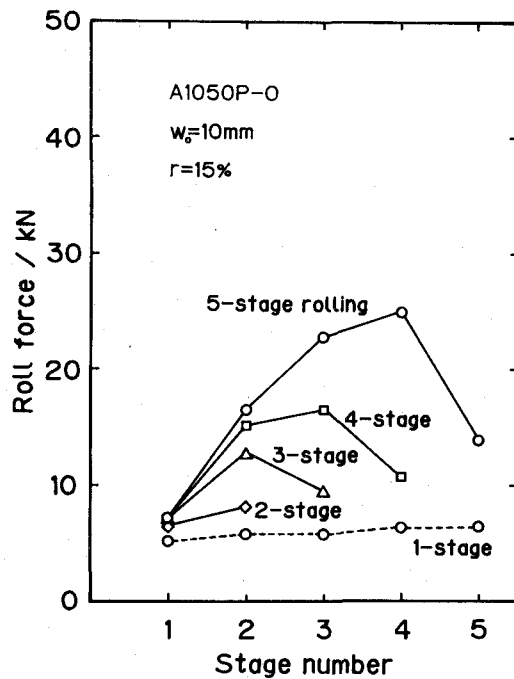


図3.13 サテライトミル圧延の各衛星ロールの圧下力

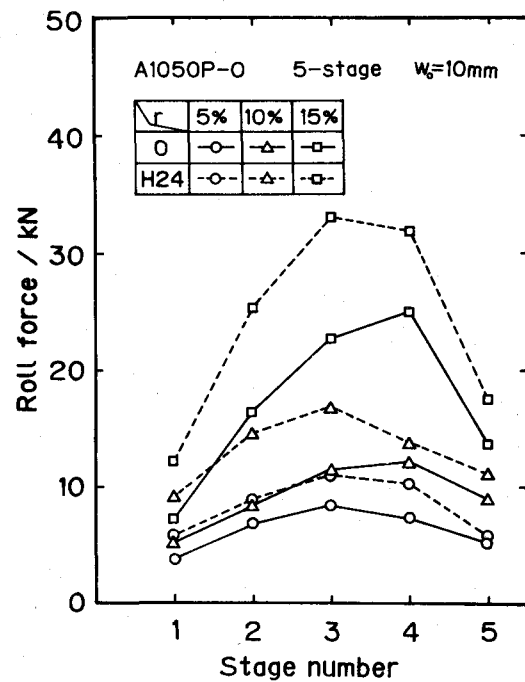


図3.14 5段サテライトミル圧延の各衛星ロールの圧下力に及ぼす圧下率，調質度の影響

の最大の圧下力は、成形段数が多いほど高くなっている。図3.14は5段サテライトミル圧延における衛星ロールの圧下力の分布に及ぼす圧下率および素材材質の影響を見たものである。圧下力は圧下率の増加とともに増加している。素材材質の影響については、H24材の方がO材に比べて衛星ロールの圧下力は大きい。また、H24材はO材より圧下力のピーク位置が、やや上流側にシフトしている。

図3.15に素材の単位幅あたりで表した衛星ロールの圧下力の和に及ぼす成形段数および素材板幅の影響を示す。ここで比較のため示した通常圧延の値はそれぞれのパス回数までの各パスの圧下力の和である。通常圧延の場合、圧下力の和はパス回数の増加とともにほぼ直線的に増加するが、サテライトミル圧延では、成形段数とともに非線形的に急激に増加することがわかる。また素材板幅の影響はあまりないが、成形段数が多いときは板幅が大きいほど大きい。図3.16は5段サテライトミル圧延の素材単位幅あたりで表した衛星ロールの圧下力の和に及ぼす圧下率、素材板幅、素材材質の影響を見たものである。単位幅あたりの圧下力の和は圧下率の増加とともに急激に増加し、H24材の方がO材より高い値を示す。また圧下率の大きい場合は素材板幅が大きいほど大きくなる傾向がある。

図3.17に素材の単位幅あたりで表した中心ロールトルクに及ぼす成形段数および素材板幅の影響を示す。ここでも通常圧延の値はそれぞれのパス回数までの各パスのトルクの和を示した。また、図3.18に5段サテライトミル圧延での素材単位幅あたりの中心ロールトルクに及ぼす圧下率、素材板幅、素材材質の影響を示す。単位幅あたりの中心ロールトルクは単位幅あたりの圧下力の和と同様の傾向を示しているが、中心ロールトルクの方が成形段数、圧下率、素材板幅に対する依存度が大きい。

3・5 考 察

3・5・1 圧延機の弾性変形特性

実験の結果、各段の分離力の間に式(3.1)で表される様な特性があることがわかった。すなわち式(3.2)のミル剛性マトリクスは各段のミル剛性係数に対応する対角成分の他に、各段間の相互作用に対応する非対角成分があることがわかったが、その原因は次の様に考えることができる。ある段に圧下力が作用すると、ミルハウ

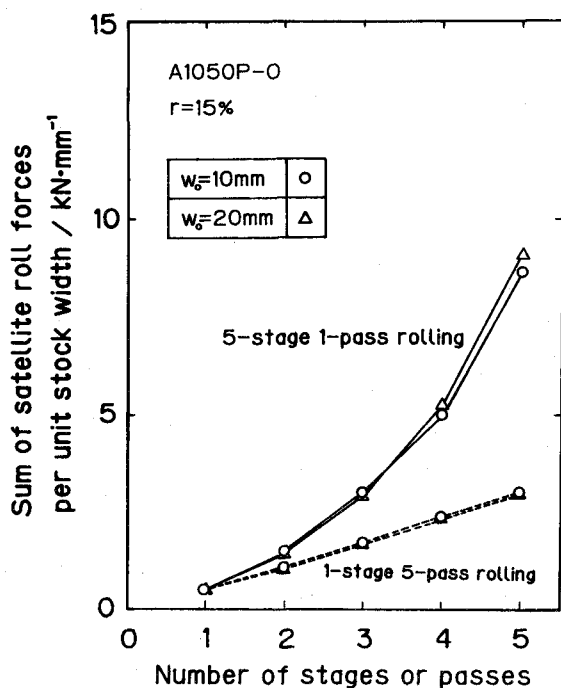


図3.15 サテライトミル圧延における素材単位幅当たりの全衛星ロール荷重に及ぼす成形段数の影響

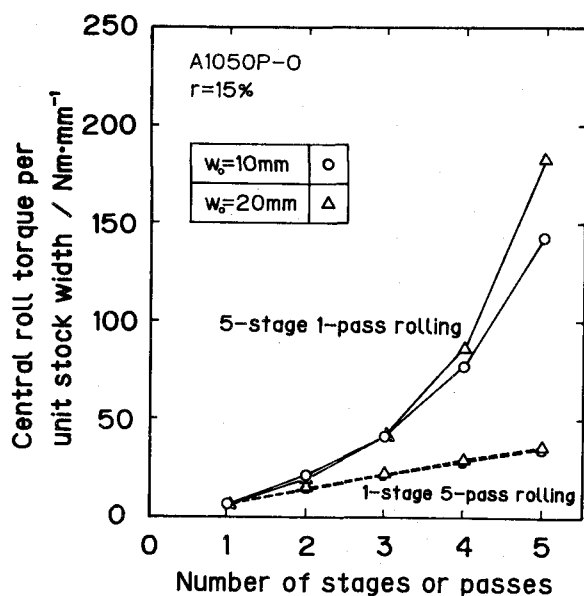


図3.17 サテライトミル圧延における素材単位幅あたりの中心ロールトルクに及ぼす成形段数の影響

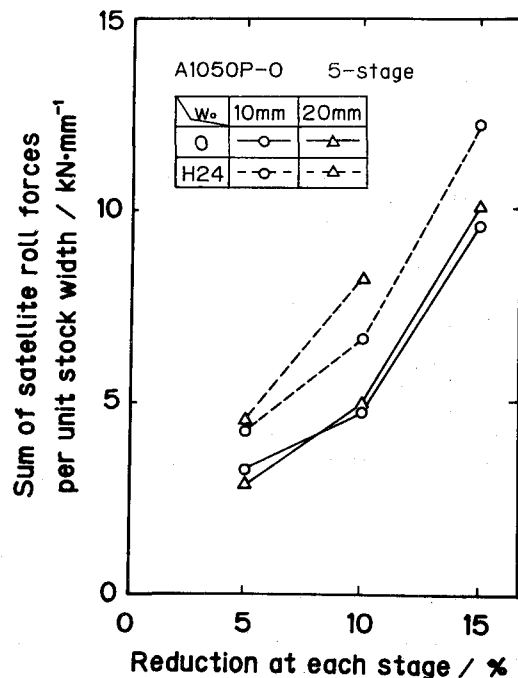


図3.16 5段サテライトミル圧延における素材単位幅当たりの全衛星ロール荷重に及ぼす圧下率、調質度の影響

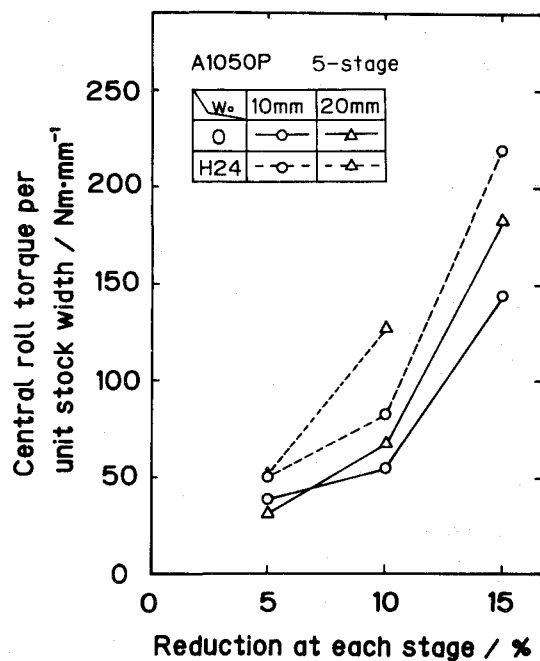


図3.18 5段サテライトミル圧延における素材単位幅あたりの中心ロールトルクに及ぼす圧下率、調質度の影響

ジングにたわみ変形が生じるが、その変形は近隣の段のロールギャップが増加し、離れた段のロールギャップが減少するように生ずる。また各段のミル剛性係数 K_{ii} はいずれも 200kN/mm 付近の値となっているが、段によって若干の差がみられ、入口および出口から離れるほどミル剛性係数が小さくなっているのは、本ミルの様なアーチ型のハウジングでは、中央部で最もたわみ変形が大きいと考えられる。

3・5・2 平条の平圧延実験

平条の平圧延の結果から、サテライトミル圧延では通常圧延と比較して、延伸が抑制され、幅広がりや圧下力は増加することがわかった。またその効果は成形段数が多いほど、圧下率が大きいほど顕著であることが明らかとなった。これらの現象は以下の原因で生じたと考えられる。サテライトミル圧延では各ロールが同周速で駆動されるために材料の速度とロール周速が一致する中立点が1つの段のみに存在し、その中立点に向かう方向の摩擦力がロールから材料に働いて、各段間には長手方向の圧縮力が生じ、その圧縮力が各段での延伸を抑制し、結果的に幅広がりを増加させる。これらの効果は当然、成形段数が多いほど、また各段圧下率が大きくなるほど顕著となる。また最大の幅広がりを生じる段は、高圧下率では2段目、低圧下率では3段目であったが、この原因は次のように説明できる。すなわち各段における幅広がりには前方圧縮力のみが作用する入口段、および後方圧縮力のみが作用する出口段で最も小さく、前後方圧縮力がともに作用する中流の段で大きくなると考えられるが、さらに幅広がりには前後方圧縮力の大きさ以外に材料のアスペクト比（板幅／板厚）に依存し、アスペクト比が大きくなるほど幅広がりが生じにくくなるので、上流から下流に向かってアスペクト比が急激に増加する高圧下率圧延では、アスペクト比が緩やかに増加する低圧下率圧延よりも上流側で幅広がりが生じ易い。

各衛星ロールの圧下力はフリクションヒル状の分布となることおよびその最大圧下力が成形段数と圧下率の増加とともに増加することは、中立点に向かって各段の前後方圧縮力が増加することおよびその圧縮力は成形段数と圧下率の増加とともに増加することによって説明できる。またH24材に比べてO材の方が圧下力のピーク位置が下流側にくるのはO材の加工硬化が大きいことによって説明できる。

中心ロールトルクと衛星ロールの圧下力の和が成形段数、圧下率に対して類似の

変化を示したのは、トルクの原因となる塑性仕事と摩擦仕事が圧下力の増加に対してほぼ比例して生じたためと考えられる。すなわちサテライトミル圧延における摩擦仕事は、

- (1) ロールバイト内の材料とロールの間の摩擦仕事
- (2) ガイドシュー底面と材料の間の摩擦仕事
- (3) 衛星ロール間における中心ロールと材料の間の摩擦仕事
- (4) 衛星ロールとガイドシューの間の摩擦仕事

の4つからなるが、いずれも各衛星ロールの圧下力と同様に前後方圧縮力にほぼ比例して生ずると考えられるからである。

最後に板の形状については前後方圧縮力の大きい衛星ロール間でさざ波が生じたが、このさざ波は製品の表面品質を下げ、欠陥を発生させる原因になるのでその急峻度のある許容値以下に抑える必要がある。このさざ波の原因は材料とガイドシュー底面の間に多かれ少なかれクリアランスが存在するため、大きな前後方圧縮力によってロールバイトの入口および出口で塑性座屈が生ずるためである。この圧縮力は成形段数、圧下率とともに増加するが、材料のアスペクト比にも依存し、アスペクト比が大きい材料では図3.7よりも明らかなように幅広がりが生じにくいいため大きな長手方向の圧縮力が発生すると考えられる。したがってアスペクト比が大きい材料では座屈が発生し易く、大きな幅広がりを得ることは困難となる。

このさざ波の発生を抑制するためには、材料とガイドシューの底面の間のクリアランスを小さくする必要がある。そのためにはハウジングの高剛性化が必要である。また、最終段以外の各衛星ロールに孔型ロールを用いて、材料の幅方向へのメタルフローを促進させる方法も有効と考えられるが、第4章および第5章で検討する。

3・6 結 言

サテライトミルの弾性変形特性とアルミニウム平条の平圧延の圧延特性について調査し、以下の結論を得た。

- (1) 締め込み法によって求めたサテライトミルの弾性変形は、ミルハウジングのたわみ変形のため、締め込み段に近接する段のロール分離力が減少し、離れた段のロ

ール分離力が増加する特性を有する。

(2) サテライトミル圧延では、材料内に大きな長手方向圧縮力が発生するため、同一の条件の通常の連続圧延法に比べて延伸が抑制され、極めて大きな幅広がりが生じるが、衛星ロール間に塑性座屈によるさざ波を生じ易い。この効果は成形段数、圧下率、素材板幅が増加するほど長手方向圧縮力が増加するため顕著である。

(3) サテライトミル圧延では最終段に近い下流段に中立点が存在するため、衛星ロールの圧下力はその付近にピークを持つフリクションヒル状の分布を呈する。衛星ロールの圧下力の和および中心ロールトルクは、長手方向圧縮力と関連して成形段数、圧下率、素材板幅の増加とともに急激に増加する。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会圧延理論部会編：板圧延の理論と実際，1987，日本鉄鋼協会，

223.

4. 凹型衛星ロール法による平条の拡幅圧延

4・1 緒言

材料の幅を小数の寸法に集約することはコストダウンの上で非常に有利であるが、小数のサイズから製品の寸法構成に造り分ける幅変更技術の確立が要求される。

例えば厚板に対する幅変更技術としては、エッジャーミルやサイドプレスによる幅圧下や凸形ロールを用いるキャメルクラウンロール法による拡幅などが行われている¹⁾。一方、薄板に対しては幅方向に斜行する形状のダイスによる鍛造法²⁾、孔型ロールを用いて板幅方向に波形状を形成し、圧延^{3,4)}や鍛造^{5,6)}により波を幅方向に押し広げる方法などが提案されている。また条に対しては、長手方向の一部分ずつを順に幅方向に圧延するクロス圧延機^{7,8)}が実用化されているが、生産性の点で問題があると思われる。

第3章において平条の平圧延にサテライトミル圧延を適用した結果、通常圧延と比べて大きな幅広がりが見られることが明らかになった。そこで本章では衛星ロールに溝を加工した孔型ロールを使用して部分圧下の効果により、さらに大きな幅広がりを生じさせることのできる「凹型衛星ロール法」を新たに考案し、アルミニウム条を用いて圧延実験を行いその可能性について検討した。

4・2 実験方法

4・2・1 供試材

供試材として市販の純アルミニウム焼鈍材 (A1050P-0) のコイルをスリットした平条を用いた。条の寸法は厚さ h 。および板幅 w 。がそれぞれ $h_0 = 1.95\text{mm}$, $w_0 = 19.9\text{mm}$ と $h_0 = 2.02\text{mm}$, $w_0 = 29.9\text{mm}$ の2種類とした。

4・2・2 実験装置

図4.1に実験に用いた凹型衛星ロール法の5段サテライトミルのロール、ガイドシュー、サイドガイドの配置を示す。1～4段目の衛星ロールにはそれぞれ異なる形状の溝が加工された孔型ロールを、5段目の衛星ロールには平ロールを用い、平の中心ロールとの間で5段の孔型系列を構成する。図4.2に各孔型衛星ロールの仕

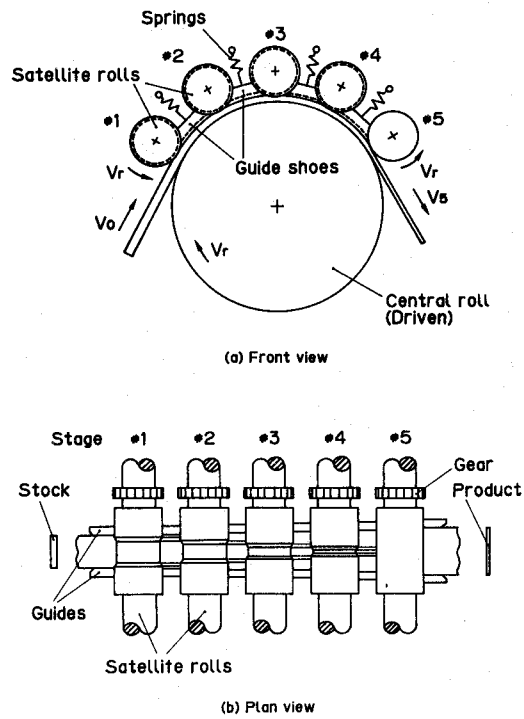


図4.1 5段サテライトミル圧延におけるロール配置（凹型衛星ロール法）

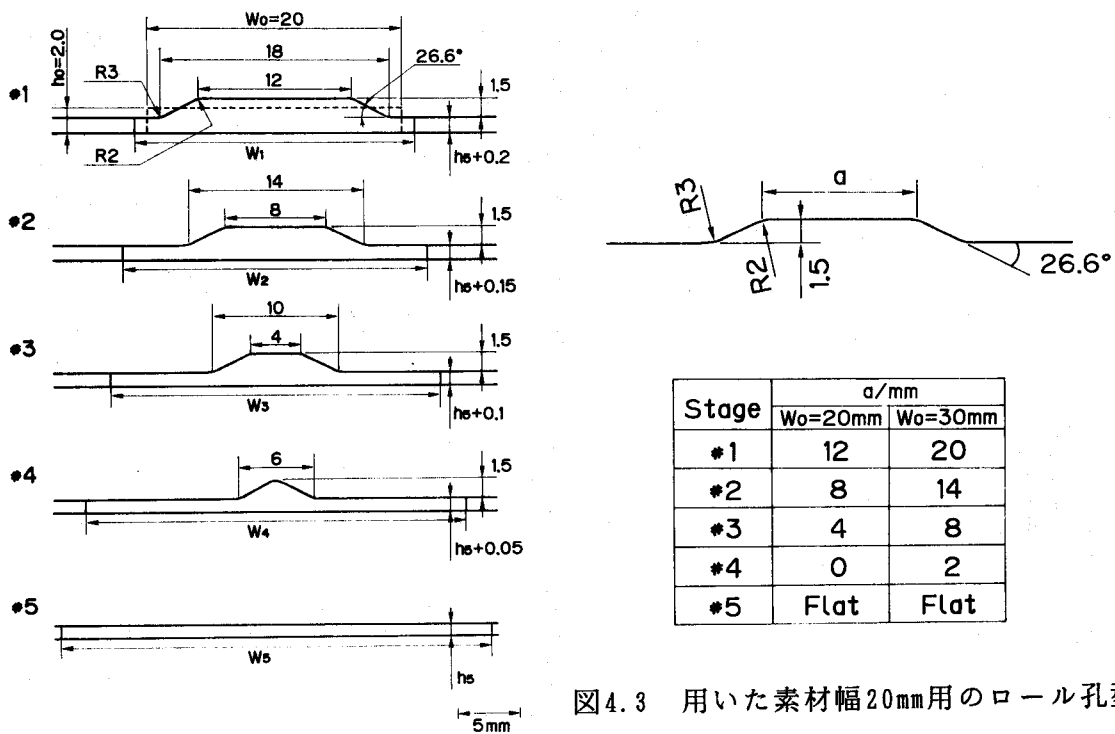


図4.3 用いた素材幅20mm用のロール孔型

図4.2 用いた孔型衛星ロールの仕様

様を、図 4.3 に素材板幅 $w_0 = 20\text{mm}$ 用の各段の孔型形状を示す。1～4 段目の衛星ロールにはそれぞれ深さ 1.5mm、傾斜角 26.6° の台形溝が加工されており、衛星ロールの溝幅は上流から下流に向かって素材幅 20mm の場合 4mm ずつ、素材幅 30mm の場合 6mm ずつ均等に減少している。孔型の角部と隅部には予期される表面欠陥を考慮して R3 と R2 の丸みが加工されている。素条はまず 1 段目で圧延され、中央に厚肉部（ウェブ部）を両端に薄肉部（フランジ部）が形成される。さらに後続の段において材料は徐々に板の両端から薄肉部の幅が広げられ、最終段の平ロールで平条に成形される。圧下量の各段への配分の仕方は、2～5 段目の各段において両端の薄肉部を 0.05mm ずつ圧下する均等圧下量配分とした。すなわち薄肉部の全圧下率（以下単に全圧下率）が r_t の場合の i 段目通過後の薄肉部板厚 h_i は次のように表される。

$$h_i = h_0(1 - r_t) + 0.05(5 - i) \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (4.1)$$

また比較のため通常の異径同周速圧延である 5 パス孔型圧延および 1 パス平圧延を行った。5 パス孔型圧延ではサテライトミルの 3 段目のみを使用してサテライトミル圧延と同一のパススケジュールで 1 パス毎に孔型衛星ロールを交換し、5 パスに分けて圧延を行った。1 パス平圧延では同じ位置に平衛星ロールを配置して 1 パスで圧延を行った。

4・2・3 実験方法

潤滑剤としては鉱油ベース圧延油を用い、ロール周速 $V_r = 22.0\text{mm/s}$ で通板した。なお前方ならびに後方張力はいずれも付加しなかった。定常圧延に達した後、圧延を中断して圧延途中の条を取り出し、各段通過後の延伸率、幅広がり率、断面プロフィール、先進係数などを測定した。各特性値の定義ならびに測定方法は第 2 章と同様である。また圧延中は各段の圧下力および中心ロール駆動軸のトルク G を測定した。さらに素材単位体積を圧延するのに要するエネルギーである比エネルギー S を次式で求めた。

$$S = \frac{G \omega}{w_0 h_0 V_0} = \frac{2G}{w_0 h_0 D} \frac{V_r}{V_0} \quad (4.2)$$

ただし、 ω ：中心ロールの角速度

V_0 ：入側の材料速度

また圧延材の横断面の板厚中心における板幅方向ビッカース硬さHV(25/25)の分布を測定した。

4・3 実験結果

4・3・1 圧延材の性状

図4.4に素材板幅 20mm，全圧下率 48% の5段サテライトミル圧延，5パス孔型圧延の5パス目，1パス平圧延の噛み止めサンプルの外観写真を示す。圧延中の条は中心ロールに沿って湾曲しているため平面に展開してある。5パス孔型圧延材では板の両端部に肌荒れと縁割れが生じた。5段サテライトミル圧延では座屈や表面欠陥のない幅の広い板が得られた。

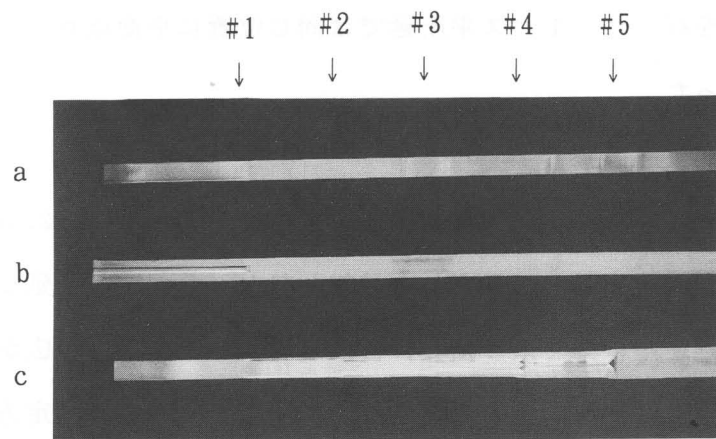


図4.4 噛み止め材の外観 ($w_0 = 20\text{mm}$)

(a) 1パス平圧延

(b) 5パス孔型圧延の5パス目

(c) 5段サテライトミル圧延

4・3・2 変形特性

5 段サテライトミル圧延，5 パス孔型圧延，1 パス平圧延における幅広がり率に及ぼす素材板幅，全圧下率の影響を図 4.5 に示す．1 パス平圧延では高圧下率でもほとんど幅広がりを生じないが，孔型を用いた 5 パス孔型圧延，5 段サテライトミル圧延では幅広がり率が圧下率の増加とともに増加する．サテライトミル圧延は 5 パス孔型圧延に比べて幅広がりが非常に大きく，その差は全圧下率の増加にともなう増加している．図 4.6 は素材板幅 20mm の場合の 5 段サテライトミル圧延と 5 パス孔型圧延の幅広がり率の推移をそれぞれ各段，各パス毎に示したものである．一点破線で示した 5 パス孔型圧延では上流のパスで幅広がりが増加し，3 パス目以降では変化は少ないのに対して，実線で示した 5 段サテライトミル圧延では下流段で幅広がりが増加する．

各圧延方法における延伸率に及ぼす全圧下率の影響を図 4.7 に示す．1 パス平圧延ではほとんど幅広がりを生じないため圧下率の増加とともに延伸率が増加する．5 パス孔型圧延の場合，延伸率は 1 パス平圧延より若干小さいが，圧下率の増加にともなう増加が顕著である．サテライトミル圧延では他の方法に比べて延伸は著しく抑制されており，圧下率の影響は小さい．したがってサテライトミル圧延の延伸抑制効果は圧下率が高いほど顕著であることがわかる．延伸率の推移を図 4.8 に示す．5 パス孔型圧延では圧延の進行とともに延伸率が著しく増加するが，サテライトミル圧延では上流段において延伸の抑制効果が大きいことがわかる．

全圧下率 48% で圧延した試料の各段または各パス通過後の横断面を図 4.9 に示す．さらに図 4.10 は素材板幅 20mm の場合について各段または各パス毎の横断面プロフィールの推移を重ねて示したものである．ただし板厚の変化を誇張するために，板厚方向を板幅方向の 5 倍に拡大して示してある．5 段サテライトミル圧延と 5 パス孔型圧延の圧延中の横断面を比較すると条の中央付近を圧下する 3，4，5 段目で，サテライトミル圧延では孔型への流入と幅広がりが顕著に生じることがわかる．

4・3・3 先進特性

図 4.11 に各圧延方法の最終段の先進率に及ぼす全圧下率の影響を示す．先進率は 1 パス平圧延，5 パス孔型圧延，5 段サテライトミル圧延の順に大きい．また先進

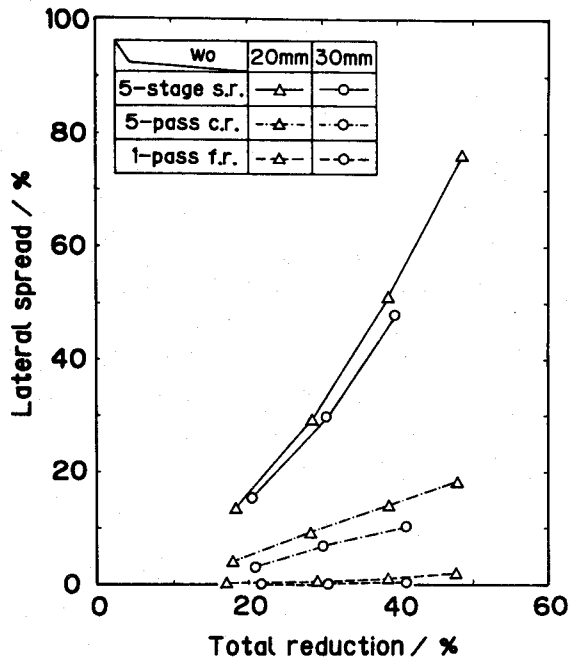


図4.5 各圧延方法における幅広がり率に及ぼす全圧下率の影響

s. r. : サテライトミル圧延

c. r. : 孔型圧延

f. r. : 平圧延

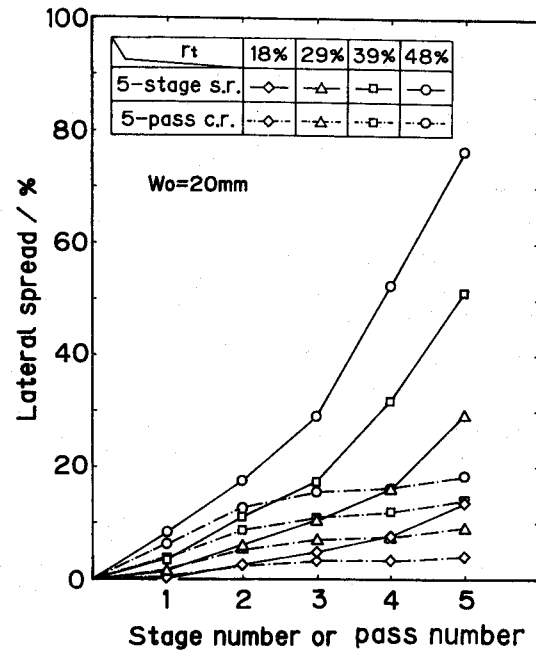


図4.6 5段サテライトミル圧延と5パス孔型圧延の幅広がり率の推移に及ぼす圧下率の影響 ($w_0 = 20\text{mm}$)

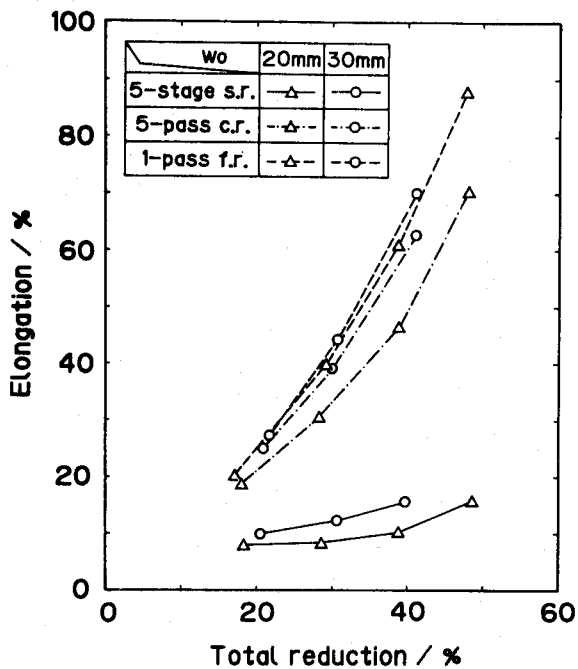


図4.7 各圧延方法における延伸率に及ぼす全圧下率の影響

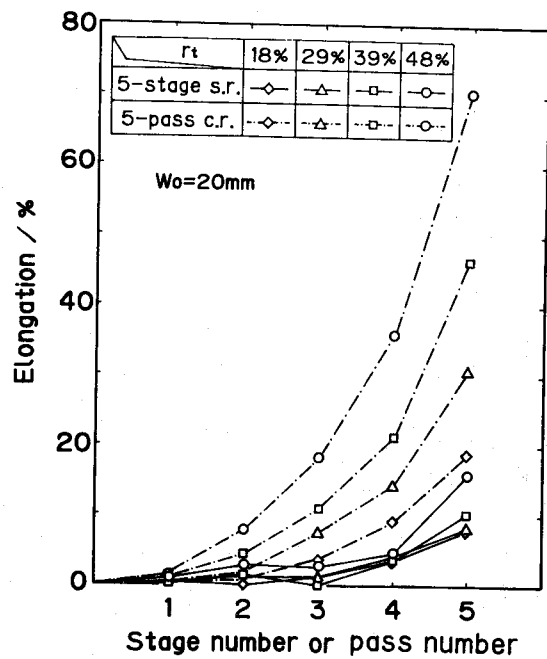
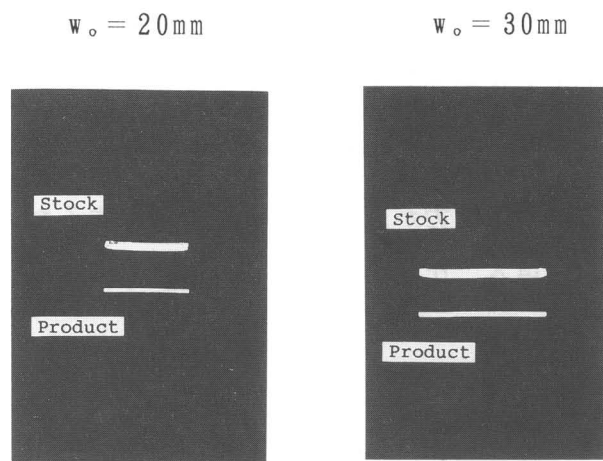
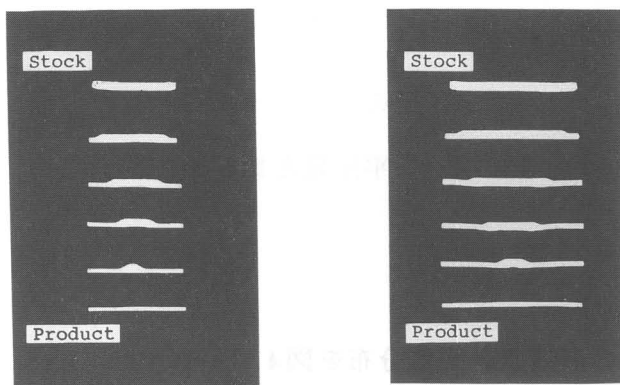


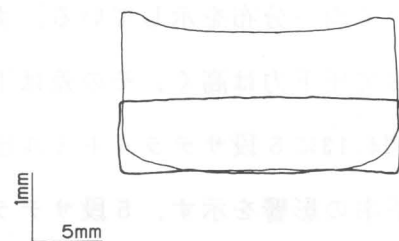
図4.8 5段サテライトミル圧延と5パス孔型圧延の延伸率の推移に及ぼす圧下率の影響 ($w_0 = 20\text{mm}$)



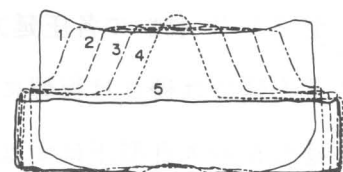
(a) 1パス平圧延



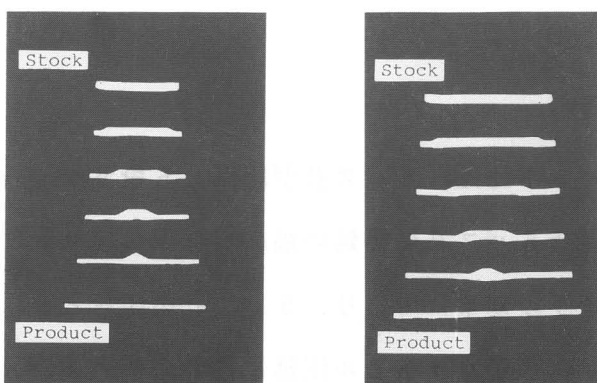
(b) 5パス孔型圧延



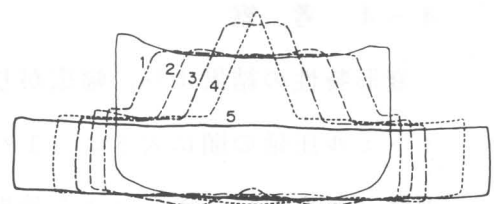
(a) 1パス平圧延



(b) 5パス孔型圧延



(c) 5段サテライトミル圧延



(c) 5段サテライトミル圧延

図4.9 横断面の推移 ($r_t = 48\%$)

図4.10 横断面の推移

($w_o = 20\text{mm}$, $r_t = 48\%$)

率に対する圧下率の影響は1パス平圧延ではあまりないが、5パス孔型圧延、5段サテライトミル圧延では全圧下率の増加とともに増加する。また5段サテライトミル圧延では素材板幅への依存性も大きいことがわかる。これはサテライトミル圧延において各衛星ロール間に発生する長手方向の圧縮力が圧下率とともに増加するためと考えられる。また中立点は板幅 20mm の場合、圧下率 18, 29, 39% では4段目に圧下率 48% では5段目に存在した。

4・3・4 負荷特性

図4.12に素材板幅 20mm での5段サテライトミル圧延および5パス孔型圧延における圧下力の分布を示す。今回採用したパススケジュールでは圧下力は下流段ほど高い不均一分布を示している。また5段サテライトミル圧延では5パス孔型圧延に比べて圧下力は高く、その差は下流段ほど大きい。

図4.13に5段サテライトミル圧延および1パス平圧延の比エネルギーに及ぼす全圧下率の影響を示す。5段サテライトミル圧延は1パス平圧延と比較して約3倍の比エネルギーを必要とすることがわかる。

4・3・5 製品の硬さ分布

全圧下率 48% の各圧延方法の圧延材の板幅方向硬さ分布を図4.14に示す。1パス平圧延では硬さは板幅にわたってほぼ均一な分布であるが、5段サテライトミル圧延と5パス孔型圧延では板幅中央にピークを持つ山型分布を呈する。またそのピークは前者の方が高い。

4・4 考 察

変形特性の結果より、幅広がり率は1パス平圧延、5パス孔型圧延、5段サテライトミル圧延の順に大きい。1パス平圧延と5パス孔型圧延の幅広がり率の差は孔型ロールを用いることによる効果（部分圧下の効果）であり、5パス孔型圧延と5段サテライトミル圧延の幅広がり率の差は、サテライトミル圧延による延伸の抑制効果であると考えられる。サテライトミル圧延における延伸の抑制効果はサテライトミルでは各衛星ロールが同周速で駆動されることに起因して生じる各衛星ロール間の長手方向圧縮力によって説明することができる。また図4.3より幅広

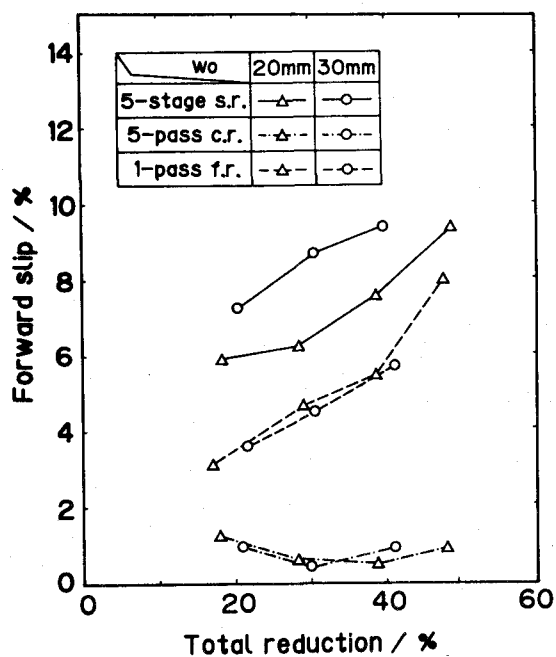


図4.11 各圧延方法における先進率に及ぼす全圧下率の影響

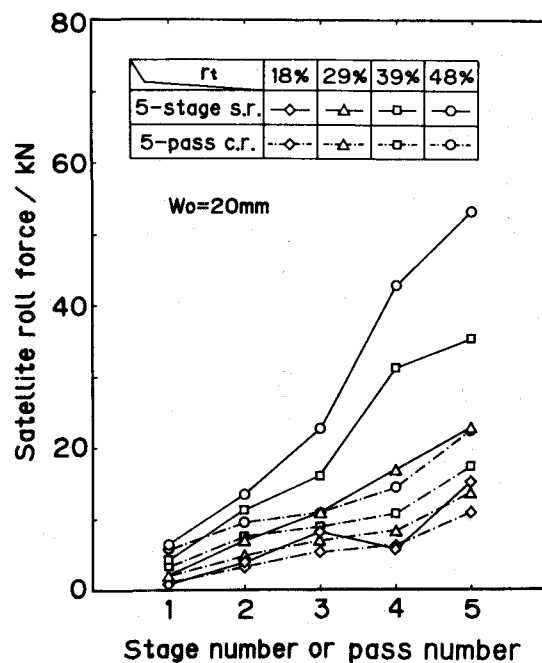


図4.12 5段サテライトミル圧延と5パス孔型圧延の圧下力分布に及ぼす圧下率の影響 ($w_o=20\text{mm}$)

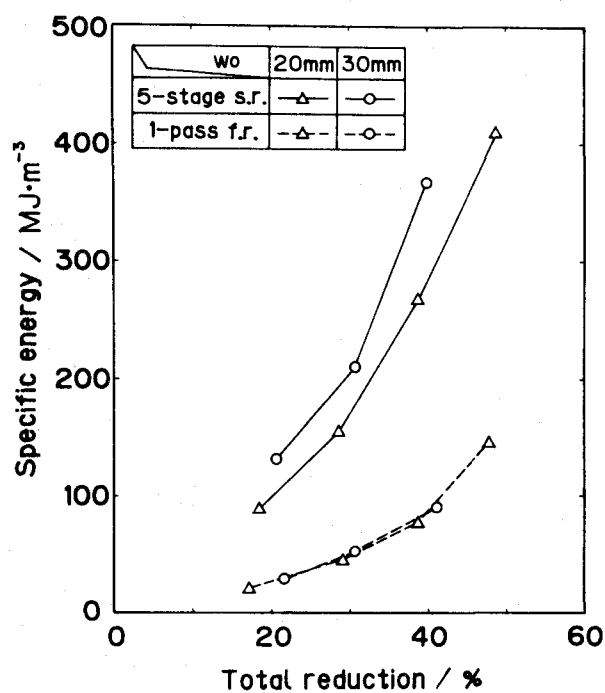
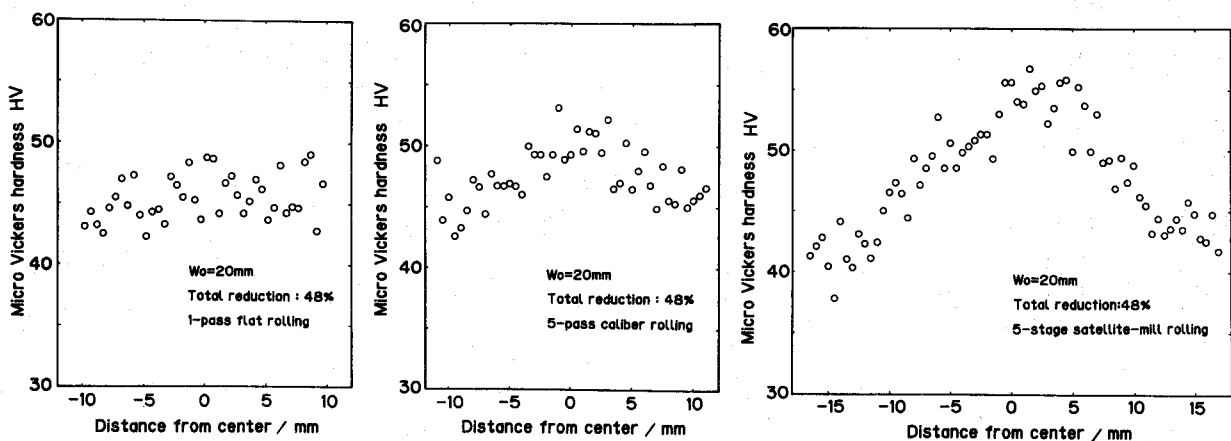


図4.13 5段サテライトミル圧延と1パス平圧延の比エネルギーに及ぼす圧下率の影響



(a) 1パス平圧延

(b) 5パス孔型圧延

(c) 5段サテライトミル圧延

図4.14 圧延材の板幅方向のビッカース硬さの分布

がり率に及ぼす効果は孔型を用いる効果よりもサテライトミル圧延の効果の方が大きい。これは延伸率に及ぼす効果にも対応しており、5パス孔型圧延では1パス平圧延と同様に延伸率は压下率の増加とともに増加するが、サテライトミル圧延では延伸率に対する压下率の影響は小さい（図4.7）。

幅広がり率、延伸率、断面プロファイルの推移からサテライトミル圧延では5パス孔型圧延と比べて上流段で延伸が抑制され、下流段で幅広がり促進されることがわかる。これはサテライトミル圧延では上流の段で孔型へのメタルフローが大きく、その結果生じた厚いウェブ部を下流段で压下するため下流段では板端方向のメタルフローが増加したと考えることができる。

負荷特性の結果より、サテライトミル圧延の压下力は5パス孔型圧延に比べて大きい。これは各段間の長手方向の圧縮力による圧延圧力の増加と幅広がりによる接触面積の増加のためと考えられる。またサテライトミル圧延の比エネルギーは1パス平圧延の約3倍の高い値となったが、これは横断面内の大きなメタルフローとその結果生じた厚いウェブ部の压下による塑性仕事の増加ならびにロール、材料、ガイドシュー間の摩擦仕事の原因であると考えられる。

最後にサテライトミル圧延材の板幅方向の硬さ分布は板幅中央が高い山形の分布

となったが、これは盛り上がりが生じた中央部を下流段で圧延した結果、横断面内に著しく不均等な塑性ひずみの分布が生じたことを意味している。この不均一分布を減少させるためには加工後の熱処理やパススケジュールの最適化の検討が必要である。

4・5 結 言

凹型の衛星ロールを用いたサテライトミル圧延により拡幅圧延を行う方法（凹型衛星ロール法）を提案し、アルミニウム平条を用いて圧延特性を調べ、同一パススケジュールの通常圧延である5パス孔型圧延および1パス平圧延と比較検討して次の結論を得た。

- (1) 5段サテライトミル圧延は、5パス孔型圧延あるいは1パス平圧延に比べて延伸は著しく抑制され、材料の幅広がり非常に大きい。
- (2) 5段サテライトミル圧延は、1パス平圧延の約3倍の圧延エネルギーを要する。
- (3) 5段サテライトミル圧延材の板幅方向の硬さ分布は、板幅中央に高いピークをもつ山形の分布となる。

参考文献

- 1) 水田篤男：日本鉄鋼協会第92,93回西山記念技術講座，(1983)，62.
- 2) 本城 恒：公開特許公報，昭63-188404.
- 3) 神居詮正・山本長四朗・寺門良二：特許公報，昭50-1463.
- 4) 松本紘美：公開特許公報，昭58-184002.
- 5) 高町恭行・山田健二・小川 茂・阿高松男：41回塑加連講論，(1990)，117.
- 6) 高町恭行・山田健二・小川 茂・阿高松男：43回塑加連講論，(1992)，703.
- 7) 吉田桂一郎：鉄と鋼，72-10(1986)，1637.
- 8) 清水保雄・清野次郎・佐藤元太郎・宮地克嘉・市川武司・大野茂久：軽金属，38-11(1988)，717.

5. 凸型衛星ロール法による平条の拡幅圧延

5・1 緒 言

第4章では，凹型に加工された衛星ロールを用いた平条の拡幅圧延法である凹型衛星ロール法を提案し，サテライトミル圧延では通常の圧延方法と比べて極めて大きな幅広がりが生じることを明らかにした．しかしながら用いたロール形状の場合，衛星ロールの圧下力が下流段ほど高い不均一分布となること，圧延材の硬さの板幅方向の分布は板幅中央が高い山形となることなどの問題点があった．

そこで，本章では平条の拡幅圧延法として新たに凸型に加工された衛星ロールを用いる「凸型衛星ロール法」を考案し，アルミニウム平条を用いて圧延実験を行い圧延特性を明らかにするとともに，凹型衛星ロール法との比較，検討を行った．

5・2 装置および実験方法

5・2・1 供試材

供試材として市販のアルミニウム焼鈍板(A1050P-0)をスリットした平条を用いた．寸法は，厚さ $h_0=1.90\text{mm}$ ，板幅 $w_0=20.0\text{mm}$ である．

5・2・2 実験方法

図5.1は実験に用いた凸型衛星ロール法の5段サテライトミルのロール，ガイドシュー，サイドガイドの配置を示す．それぞれ異なる形状の突起が加工された1～4段目の孔型衛星ロールと5段目の平衛星ロール，平の中心ロールによって5段の孔型系列が構成されている．凸型衛星ロール法で用いた衛星ロール孔型を図5.2に示す．1～4段目の衛星ロールには高さ 1.5mm ，側面傾斜角 11.3° の突起が加工されており，その幅は1段毎に均等に 5mm ずつ増加している．この孔型部分に左右対称に平条をサイドガイドを用いて送り込み，板の中央から徐々に薄肉部（ウェブ部）の幅を広げて行き，最終段で平条に成形する．圧下量の各段への配分の仕方は2～5段目の各段において両端の薄肉部を 0.05mm ずつ圧下する均等圧下量配分とした．したがって，薄肉部の全圧下率（以下全圧下率と称する）が r_t の場合の i 段目通過後の薄肉部板厚 h_i は次のようになる．

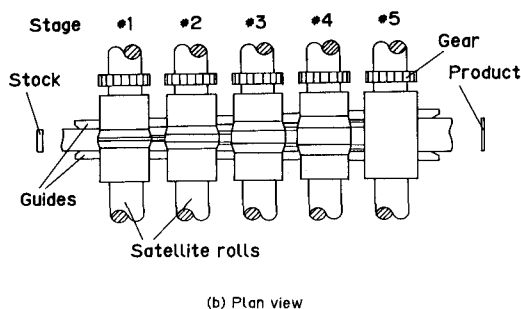
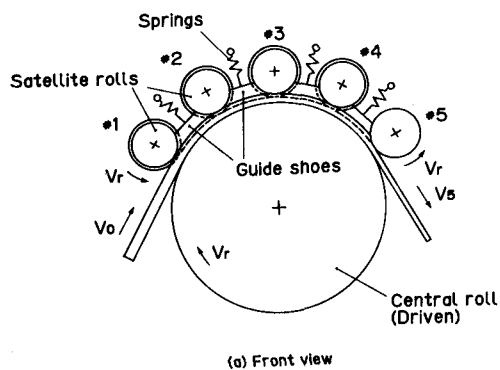


図5.1 5段サテライトミル圧延における
ロール配置（凸型衛星ロール法）

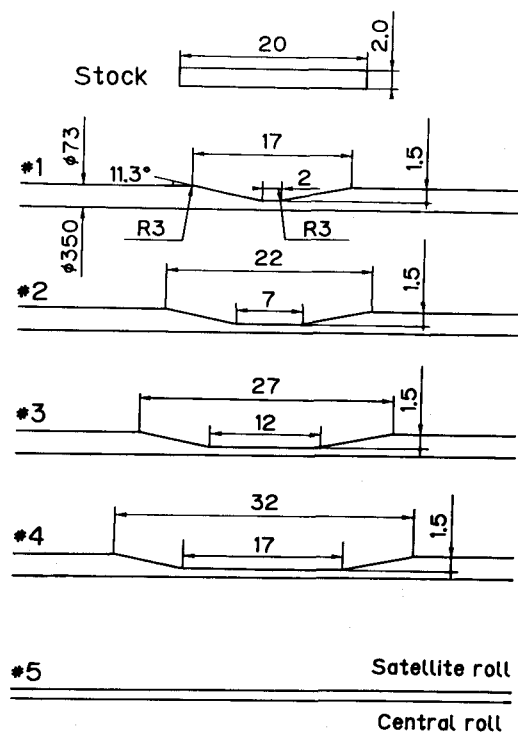


図5.2 凸型衛星ロール法における
衛星ロール孔型

$$h_i = h_o(1 - r_t) + 0.05(5 - i) \quad (5.1)$$

また比較のため通常の異径同周速圧延である5パス孔型圧延および1パス平圧延を行った。5パス孔型圧延ではサテライトミルの3段目のみを使用してサテライトミル圧延と同一の孔型衛星ロールを用いて1パス毎に孔型衛星ロールを交換し、5パスに分けて圧延を行った。1パス平圧延では同じ位置に平衛星ロールを配置して1パスで圧延を行った。

なお、潤滑剤としては非鉄用鋳油ベース圧延油を用いて、ロール周速 $V_r = 22.0$ mm/s で圧延を行った。

さらに、圧延材について大気中で 673K , 2.1ks の焼鈍処理を行い、焼鈍材と圧延材について板幅方向のビッカース硬さ HV(25/25) の分布を測定した。

5・3 実験結果および考察

5・3・1 平条の性状

図5.3に各圧延方法における全圧下率 $r_t = 50\%$ の場合の噛み止めサンプルの外観写真を示す。5段サテライトミル圧延では、3，4段目通過後にわずかに座屈波が生じたが最終段通過後には座屈波が消え、表面欠陥のない幅の広い良好な製品が得られた。

5・3・2 変形特性

各圧延方法の幅広がり率に及ぼす全圧下率の影響を図5.4に示す。孔型を用いた5パス孔型圧延では、部分圧下の効果のため平圧延に比べて大きな幅広がりが生じている。さらに5段サテライトミル圧延では各衛星ロール間で長手方向の圧縮力が作用するため、5パス孔型圧延に比べて約2倍の幅広がりを生じている。図5.5は5段サテライトミル圧延と5パス孔型圧延の幅広がり率の推移を各段または各パス毎に示したものである。5パス孔型圧延では上流のパスで幅広がりが少なく、下流段で増加している。これは板の中心を圧下する場合は、幅方向の拘束が大きいいため、端部を圧下する場合に比べて幅広がりが少ないことを意味している。5段サテライ

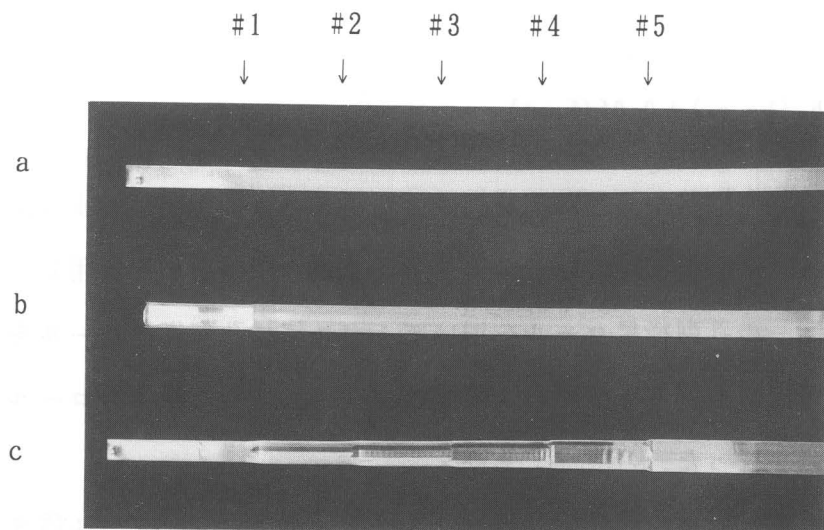


図5.3 噛み止めサンプルの外観 ($r_t = 50\%$)

(a) 1パス平圧延

(b) 5パス孔型圧延の5パス目

(c) 5段サテライトミル圧延

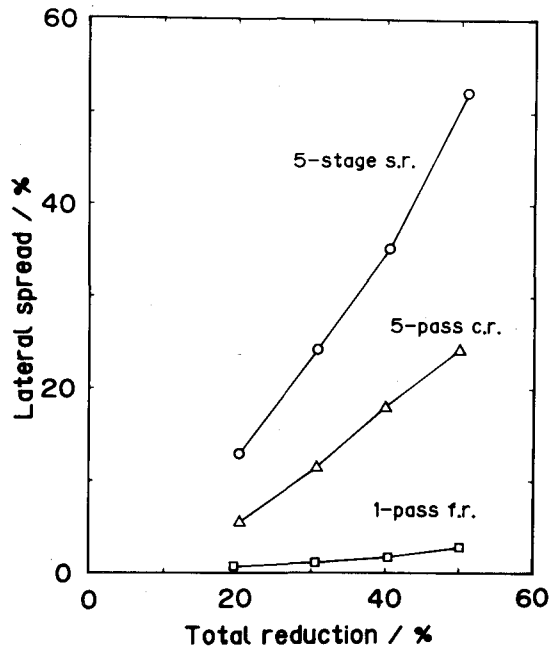


図5.4 各圧延方法における幅広がり率に及ぼす全圧下率の影響

s.r.: サテライトミル圧延

c.r.: 孔型圧延

f.r.: 平圧延

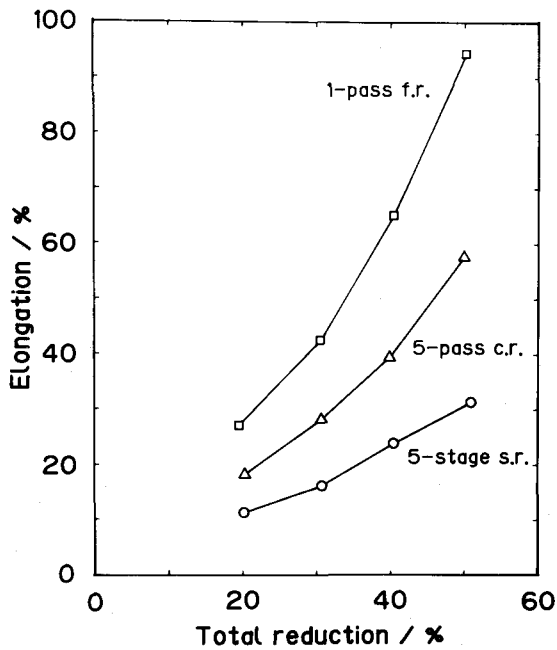


図5.6 各圧延方法における延伸率に及ぼす全圧下率の影響

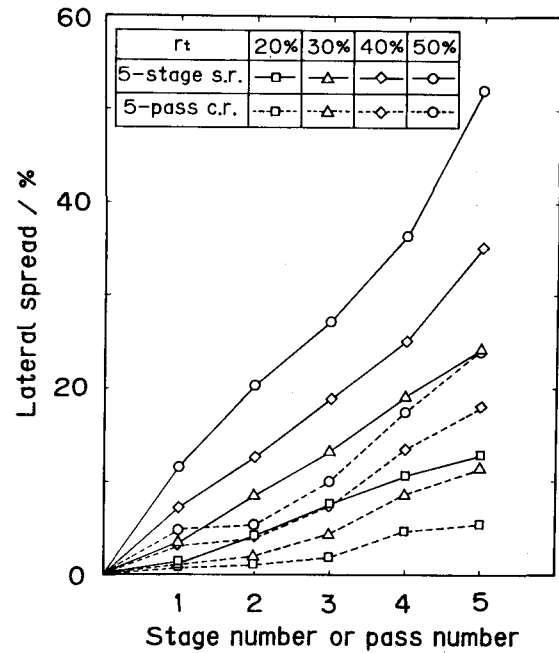


図5.5 5段サテライトミル圧延と5パス孔型圧延の幅広がり率の推移に及ぼす全圧下率の影響

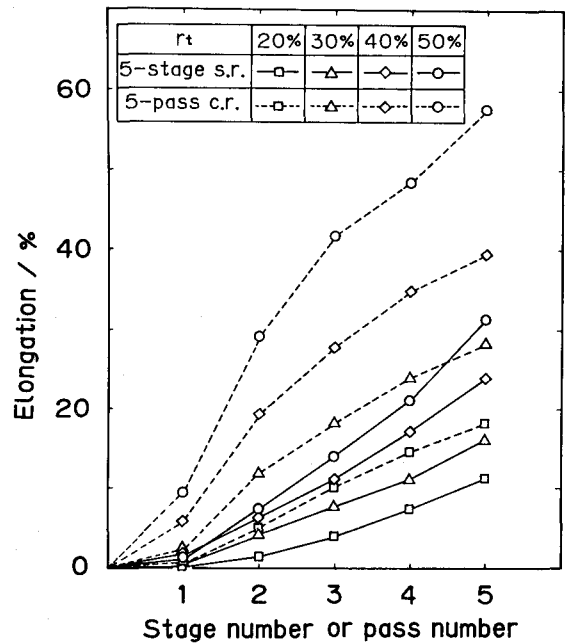
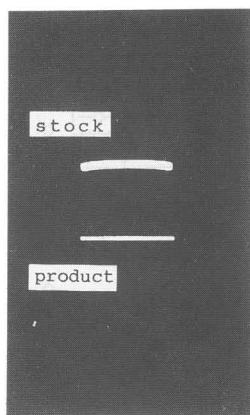
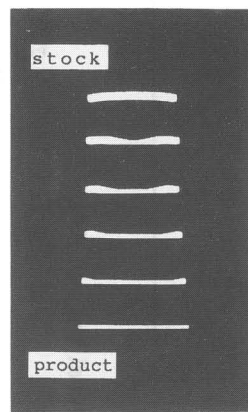


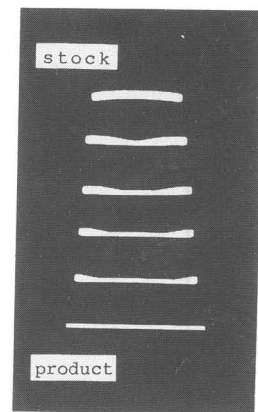
図5.7 5段サテライトミル圧延と5パス孔型圧延の延伸率の推移に及ぼす全圧下率の影響



(a) 1 パス平圧延

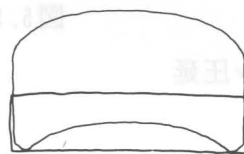


(b) 5 パス孔型圧延

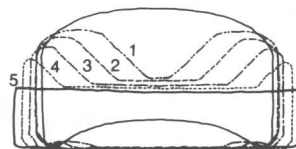


(c) 5 段サテライトミル圧延

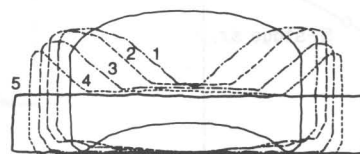
図5.8 横断面の推移 ($r_t = 50\%$)



(a) 1 パス平圧延



(b) 5 パス孔型圧延



(c) 5 段サテライトミル圧延



図5.9 各圧延方法における横断面プロファイルの変化 ($r_t = 50\%$)

トミル圧延では、長手方向の圧縮応力のため上流段でも幅広がりが大きくほぼ直線的な推移を示している。

図5.6に各圧延方法における延伸率に及ぼす全圧下率の影響を示す。図5.4の幅広がりに対応して5段サテライトミル圧延では、他の圧延方法に比べて延伸が著しく抑制され、その傾向は全圧下率が高いほど著しい。図5.7は延伸率の推移を見たものである。5段サテライトミル圧延では、5パス孔型圧延と比較して上流段で、すなわち板幅の中心付近を圧下する場合、延伸の抑制効果が大きいことがわかる。

図5.8に各圧延方法における $r_t = 50\%$ の場合の素条および各段または各パス通過後の横断面を示す。また、図5.9に素条および各段または各パス通過後の断面プロフィールの推移を重ねて示す。ただし板厚の変化を誇張するために、板厚方向を板幅方向の5倍に拡大してある。素条はスリットした材料を用いたため両端部に若干かえりとだれが生じている。5段サテライトミル圧延では、他の圧延方法に比べて板幅方向へのメタルフローが大きく、両端の厚肉部の減肉（板厚減少）が少なく、大きな幅広がりが生じていることがわかる。

5・3・3 先進特性

各圧延方法の最終段通過後の先進率に及ぼす全圧下率の影響を図5.10に示す。5段サテライトミル圧延では5パス孔型圧延に比べて先進率の全圧下率依存性が大きい。これはサテライトミル圧延において各衛星ロール間に発生する長手方向の圧縮力が圧下率とともに増加するためと考えられる。図5.11に5段サテライトミル圧延における先進係数の推移を示す。中立点は最終段の入口付近に存在している。また全圧下率の増加とともに最終段通過後の先進率は増加し、入口速度は減少し、中立点は下流側へ移動することがわかる。

5・3・4 負荷特性

図5.12に5段サテライトミル圧延および5パス孔型圧延における圧下力の分布を示す。5パス孔型圧延では各パスともほぼ均等な圧下力であるが、5段サテライトミル圧延では中流段の圧下力が高いフリクションヒル状の分布を示している。全圧下率 $r_t = 50\%$ の場合に最終段の圧下力が上昇しているのは、4段目迄に形成される両端の厚肉部が大きくロール接触面積が大きいためと考えられる。

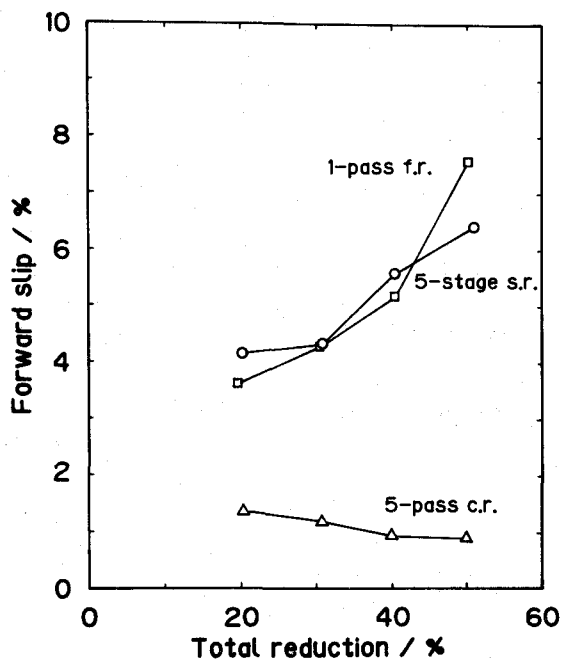


図5.10 各圧延方法における先進率に及ぼす全圧下率の影響

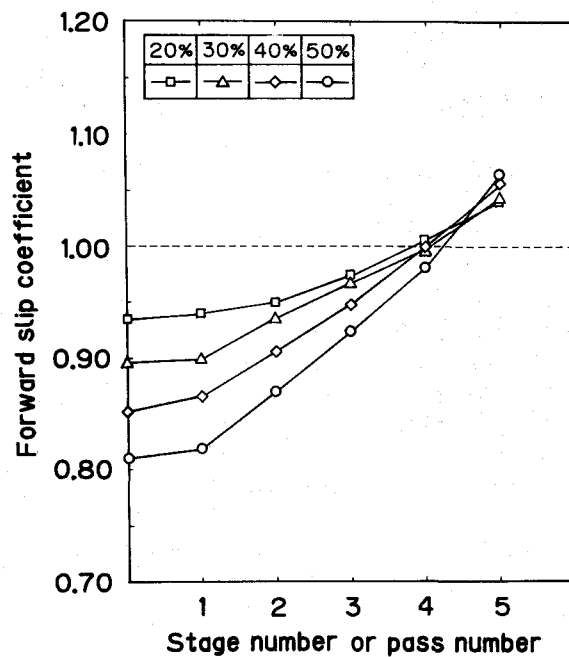


図5.11 5段サテライトミル圧延の先進係数の推移

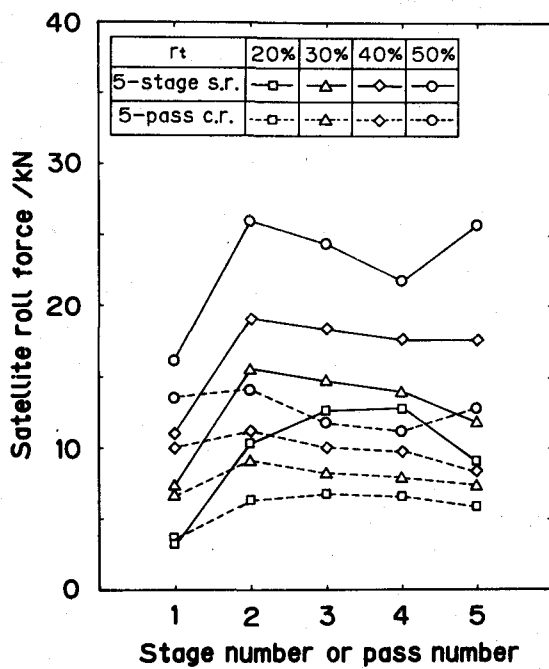


図5.12 5段サテライトミル圧延と5パス孔型圧延の圧下力分布に及ぼす全圧下率の影響

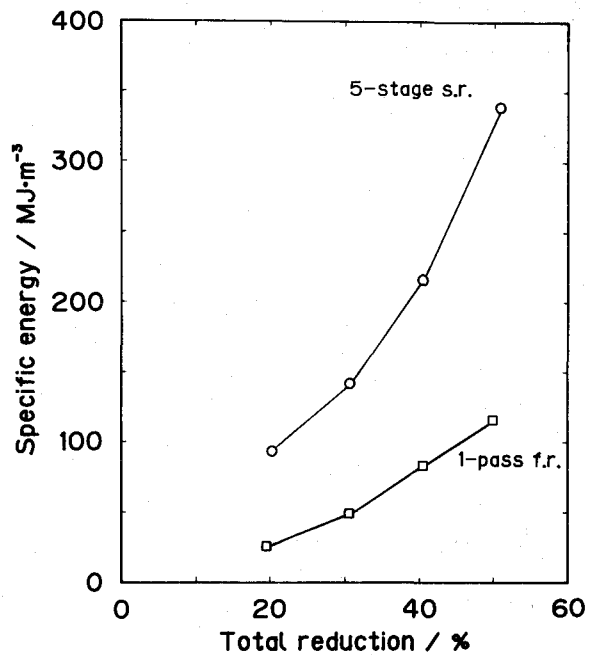
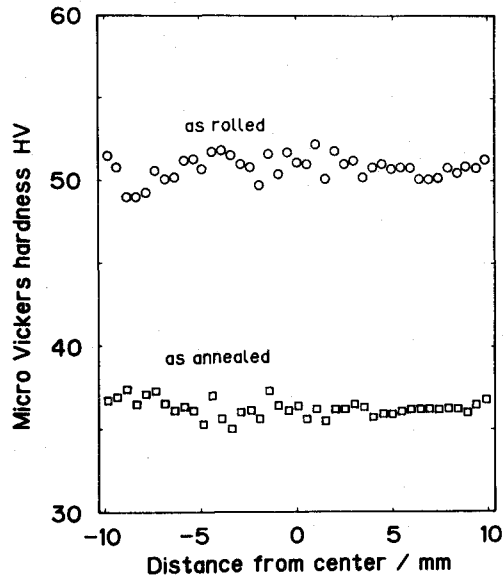
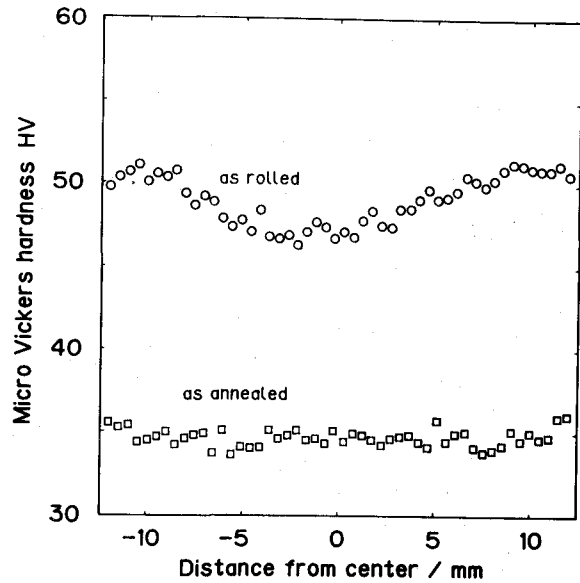


図5.13 各圧延方法の圧延の比エネルギーに及ぼす全圧下率の影響

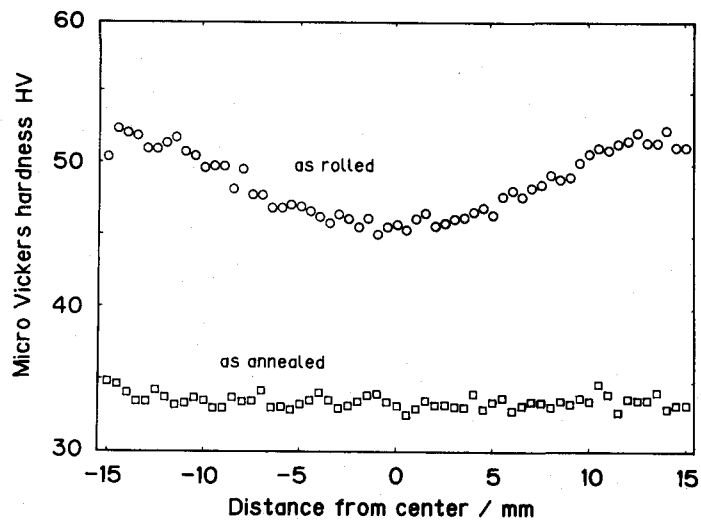
図5.13に各圧延方法の比エネルギーに及ぼす全圧下率の影響を示す。5段サテライトミル圧延は1パス平圧延の約3倍の比エネルギーを要することがわかる。これは孔型圧延による塑性仕事の増加およびロール・材料・ガイドシュー間の摩擦仕事の主たる原因であると考えられる。



(a) 1パス平圧延



(b) 5パス孔型圧延



(c) 5段サテライトミル圧延

図5.14 圧延材および焼鈍材の板幅方向のビッカース硬さ分布($r_t=50\%$)

5・3・5 硬さ分布

図5.14に各圧延方法の $r_t=50\%$ 圧延材およびその焼鈍材 (673K, 2.1ks) の板幅方向硬さ分布を示す。孔型ロールを用いた5パス孔型圧延および5段サテライトミル圧延の圧延材では、下流段で圧下した板の両端部にピークをもつ谷型の分布となり、その不均一性は後者の方が大きい。焼鈍材ではいずれの圧延方法においても幅方向に均一な分布となっている。

5・4 凹型衛星ロール法と凸型衛星ロール法の比較

図5.15に $r_t=50\%$ の場合について、凸型衛星ロール法および凹型衛星ロール法の5段サテライトミル圧延における各段の幅広がり率の推移を示す。また延伸率の推移を同様に図5.16に示す。孔型衛星ロールによるサテライトミル圧延の幅広がり率は平衡星ロールによるサテライトミル圧延 (図3.7) のそれに比べて大きい。最終段通過後の幅広がり率は凸型衛星ロール法が凹型衛星ロール法のその約70%であり、拡幅の効果は凹型衛星ロール法の方が優れていることがわかる。また凸型衛星ロール法では上流段で、凹型衛星ロール法では下流段で大きな幅広がりが生じることから、サテライトミル圧延の効果は板の中央部を下流段で圧下する場合に大きいことがわかる。一般に板幅の中央部を圧下する場合は幅方向の拘束が大きいため、両端を圧延する場合に比べて幅広がりを生じにくい。またサテライトミル圧延においては中立点が下流段に存在するため下流段では長手方向の圧縮力が大きく、通常の圧延法に比べて横断面内のメタルフローが促進される。したがってサテライトミル圧延の効果は、下流段で板の中央部を圧下する場合に大きく現れると考えることができる。

凹型衛星ロール法サテライトミル圧延の50%圧延材およびその焼鈍材 (673K, 2.1ks) の板幅方向硬さ分布を図5.17に示す。凹型衛星ロール法の場合、圧延材、焼鈍材ともに板幅中央部にピークをもつ山型の分布となっている。図5.14の凸型衛星ロール法の場合と同様に圧延材の硬さ分布は、一般に下流段で圧下された部分の方が上流段で圧下された部分より大きな塑性ひずみを生じ易いことがわかる。また焼鈍材の硬さ分布は、圧延時の塑性ひずみが著しく不均一な凹型衛星ロール法では

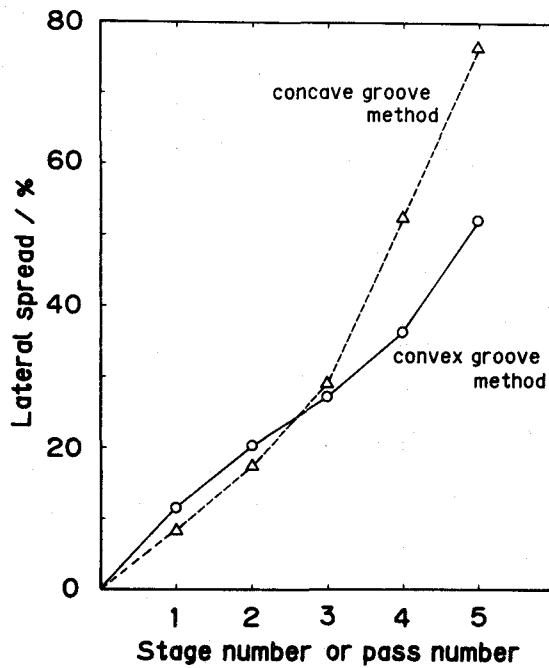


図5.15 幅広がり率の推移 ($r_t = 50\%$)

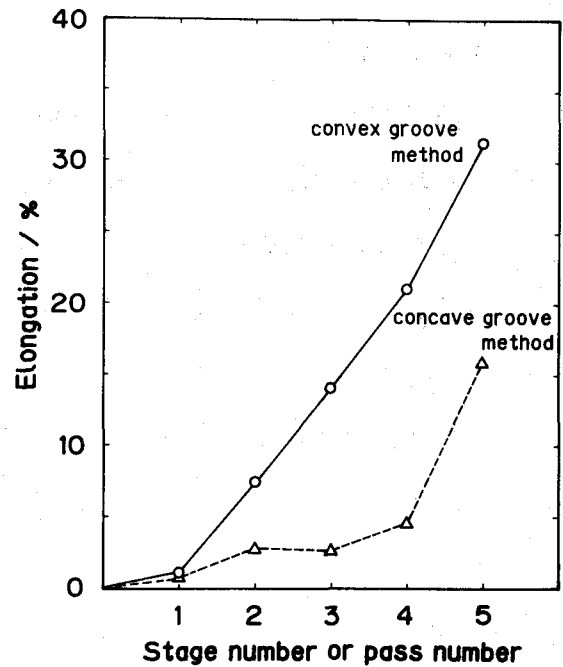


図5.16 延伸率の推移 ($r_t = 50\%$)

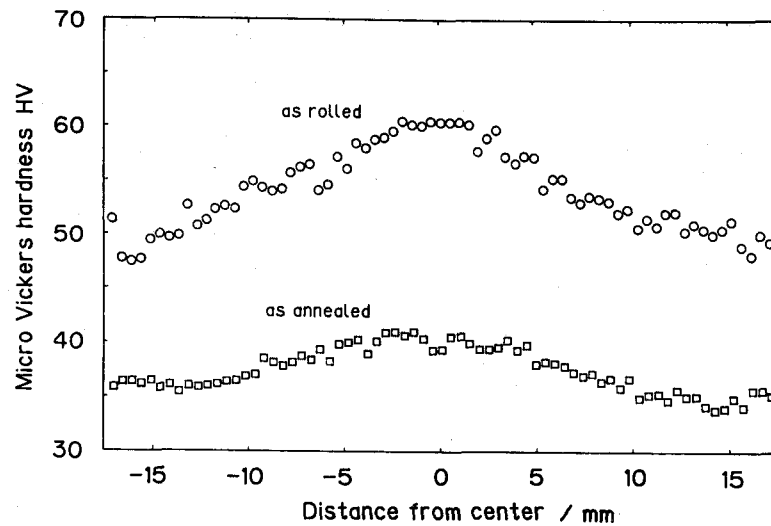


図5.17 凹型衛星ロール法5段サテライト

ミル圧延材および焼鈍材の板幅方

向のビッカース硬さ分布 ($r_t = 50\%$)

焼鈍組織が均一とならないのに対し、塑性ひずみの不均一性が小さい凸型衛星ロール法ではほとんど均一な焼鈍組織となることを示している。

これらの結果より、凸型衛星ロール法では凹型衛星ロール法に比べて、拡幅の効果は小さいが、製品の幅方向の均一性は優れていることがわかる。

5・5 結 言

凸型の衛星ロールを用いる拡幅圧延法（凸型衛星ロール法）を提案し，その圧延特性および製品特性を明らかにするとともに同一パススケジュールの通常の孔型圧延法である5パス孔型圧延ならびに1パス平圧延との比較を行った．さらに凹型衛星ロール法との比較検討を行い次の知見を得た．

- (1) 凸型衛星ロール法の5段サテライトミル圧延では，5パス孔型圧延あるいは1パス平圧延に比べて延伸が抑制され，顕著な幅広がりが生じる．
- (2) 凸型衛星ロール法の5段サテライトミル圧延では，1パス平圧延の約3倍の圧延エネルギーを要する．
- (3) 5段サテライトミル圧延の場合，凸型衛星ロール法は凹型衛星ロール法に比べて幅広がり若干小さい．
- (4) 圧延材の硬さ分布は，凹型衛星ロール法では板幅中央にピークをもつ山型の分布を示すのに対し，凸型衛星ロール法では両端にピークをもつ谷型の分布を示す．
焼鈍材の硬さ分布は，凹型衛星ロール法では山型の分布を示すのに対し，凸型衛星ロール法では一様な分布を示す．したがって凸型衛星ロール法は凹型衛星ロール法に比べて製品の幅方向の均一性という点で優れている．

6. サテライトミル圧延材の集合組織

6・1 緒言

サテライトミル圧延では材料内に長手方向の圧縮力が発生するため通常の圧延方法に比べて延伸が抑制され、横断面内のメタルフローが促進される。このことを利用する平条の拡幅圧延の方法として、第4章および第5章でそれぞれ凹型衛星ロール法、凸型衛星ロール法をそれぞれ提案し、通常の圧延方法と比べて極めて大きな幅広がりが見られることを明らかにした。したがってサテライトミルによる拡幅圧延によって得られた板は従来の圧延集合組織とは異なる集合組織、異方性を有する可能性がある。

これまでにFCC金属に長手方向と幅方向の圧延を交互に繰り返す交差圧延を施した場合、 $\langle 110 \rangle // ND$ の繊維集合組織となることが明らかにされている¹⁻³⁾。また通常圧延材にクロス圧延を付加することにより、焼鈍再結晶後の塑性異方性が減少することが報告されている⁴⁾。また非対称圧延材については異周速圧延材の集合組織は通常圧延材とほぼ同じであることが明らかにされているが⁵⁾、異径圧延材の集合組織はほとんど研究がなされていない。

本章ではアルミニウム平条を用いて板幅方向のひずみ分布が比較的均一な凸型衛星ロール法の圧延材の集合組織を調べ、サテライトミル圧延と同じパススケジュールの通常の多パス圧延（異径5パス孔型圧延）、サテライトミルと同じ直径の異径平ロールによる1パス圧延（異径平圧延）ならびに同径平ロールによる1パス圧延（同径平圧延）によって得られた板の圧延集合組織を比較することにより、集合組織に及ぼすサテライトミルによる拡幅圧延の影響について調べた。

6・2 装置および実験方法

6・2・1 供試材

供試材として市販の純アルミニウム焼鈍板（A1050P-0）のコイルをスリットした板厚 1.93mm、板幅 20.0mm の平条を用いた。

6・2・2 圧延方法

サテライトミル圧延としては第5章で提案した凸型衛星ロール法を用いた。圧延方法、孔型、パススケジュールは第5章と同一である。

また比較のため、サテライトミルの3段目の位置に各衛星ロールをパススケジュールに従って次々とセットし、5パスで圧延する異径5パス孔型圧延、同じ位置に最終段の平ロールをセットして1パスで圧延する異径平圧延およびロール径100, 530mmの2種類の通常圧延機を用いて1パスで圧延を行う同径平圧延を行った。いずれも全圧下率は50%一定とし、潤滑剤は市販の非鉄用鋳油ベース圧延油を用いた。

6・2・3 集合組織の測定

圧延集合組織としては、Cu-K α 特性X線の圧延面に平行な低指数面(hkl)からの回折X線の相対強度による<hkl>/ND軸密度の板厚方向の変化および板の表面、表面直下(板厚の10%)、板厚中心での{111}極点図を測定した。軸密度は無方向性標準試料を用いて規格化した。

6・3 実験結果および考察

6・3・1 幅広がり率

表6.1に実験した各圧延方法における圧下率50%での幅広がり率 e_b と延伸率 e_L を示す。また圧延の際の幅広がりひずみと延伸ひずみの割合を見るため次式で表されるひずみ比も示した。

$$\text{ひずみ比} = \ln(1+e_b) / \ln(1+e_L) \quad (6.1)$$

これより5段サテライトミル圧延では $e_b > e_L$ ではあるがひずみ比が一軸圧縮変形(ひずみ比=1)に近いこと、平圧延は平面ひずみ変形(ひずみ比=0)に近く、5パス孔型圧延はこれらの中間であることがわかる。

6・3・2 軸密度分布

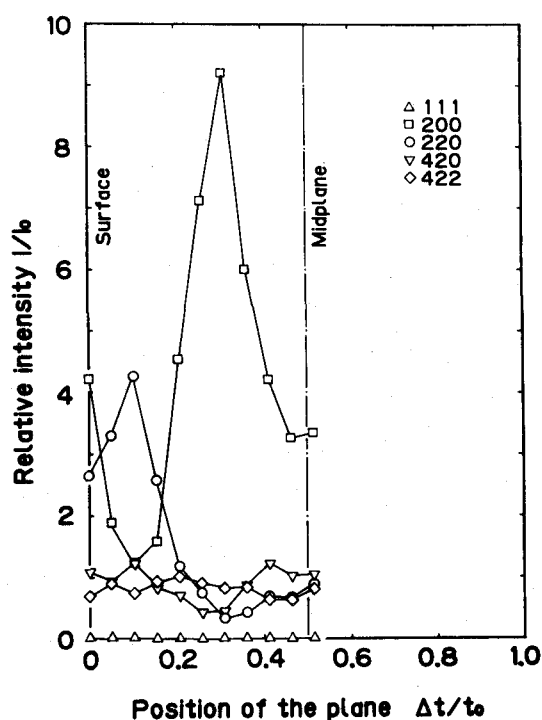
図6.1に素材平条および各種圧延材の板厚方向の<hkl>/ND軸密度分布を示す。素材平条図(a)はすでに異方性を有し、しかもその異方性は板厚方向に不均一である。すなわち<100>/ND軸密度は板表面と表面からの相対深さ(深さ/板厚)0.3

付近にピークを有し、 $\langle 110 \rangle // ND$ は相対深さ 0.1 付近にピークを有している。

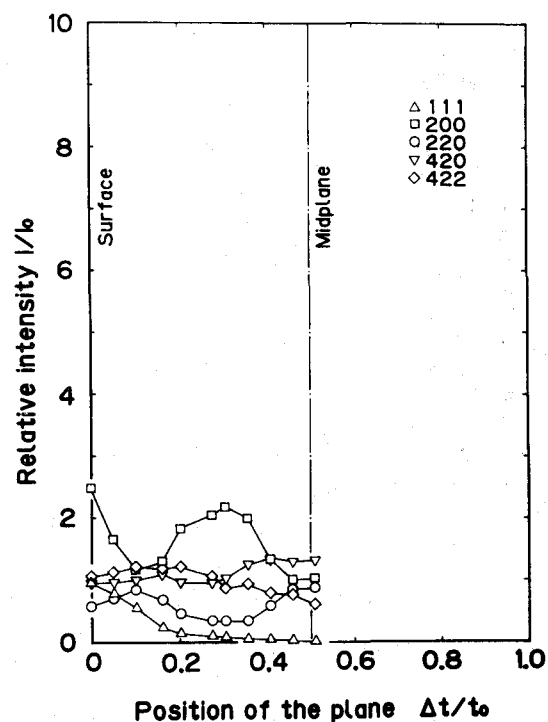
同径平圧延材図(b)、(c)では、いずれも 50% の圧延により集積度が低下するが、特に再結晶集合組織成分である $\langle 100 \rangle // ND$ の減少が顕著である。またロール径の影響が見られ、ロール径 530mm の圧延材では板厚全体にわたって、 $\langle 110 \rangle // ND$ がわずかに増加するが、ロール径 100mm の圧延材では板表面付近（表面より相対深さが

表6.1 各圧延方法の幅広がり率と延伸率（圧下率 50%）

	ロール径 / mm	幅広がり率 $e_b / \%$	延伸率 $e_L / \%$	ひずみ 比
5段サライミル圧延	76/350	50	33	1.42
5ハス孔型圧延	76/350	23	63	0.42
異径平圧延	76/350	4	92	0.06
同径平圧延	100	2	96	0.03
	530	7	87	0.11

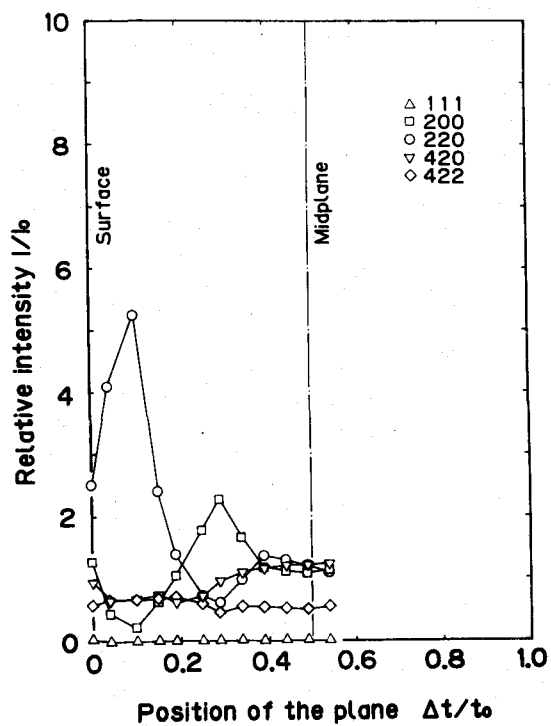


(a) 素材平条

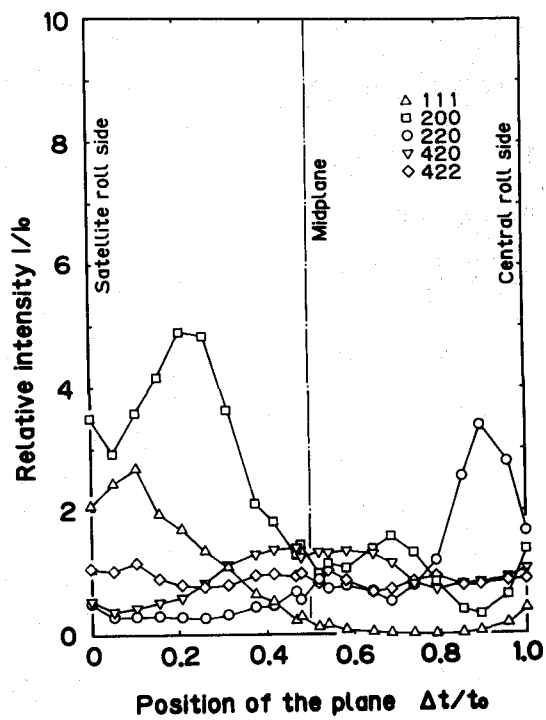


(b) 同径圧延材(φ100)

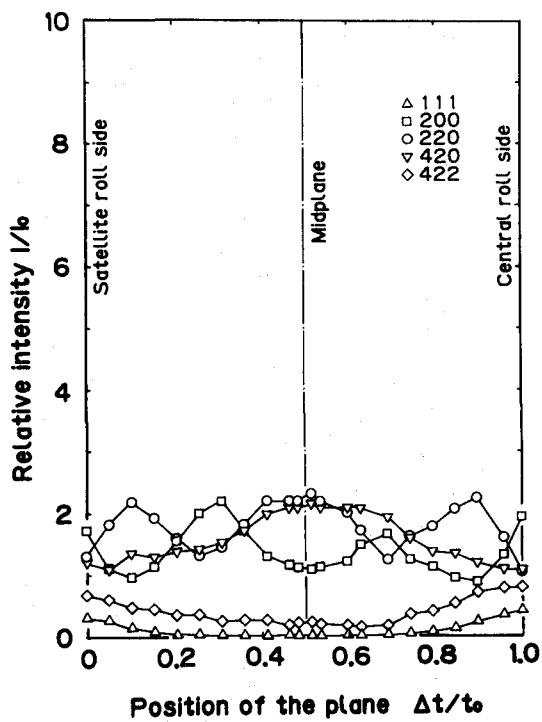
図6.1 素材平条および各種圧延材の軸密度分布



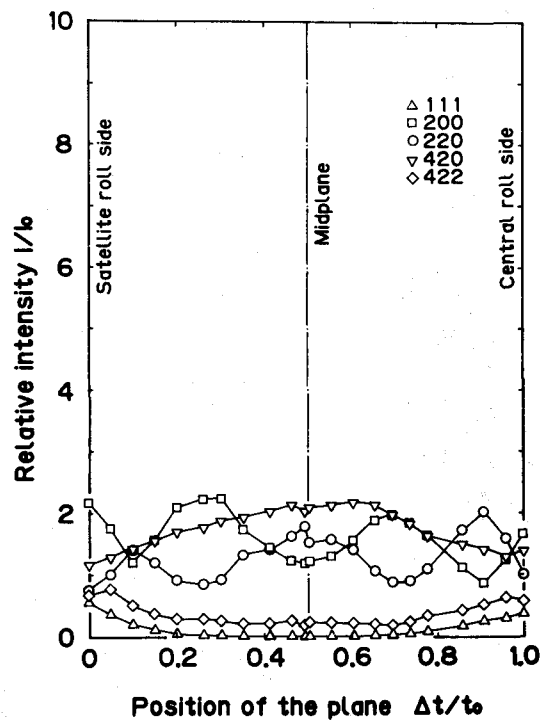
(c) 同径圧延材 (φ 530)



(d) 異径圧延材



(e) 5 パス孔型圧延



(f) 5 段サテライトミル圧延

図6.1 素材平条および各種圧延材の軸密度分布

0.3 付近まで)において $\langle 110 \rangle // ND$ が大幅に減少し、素材平条および大径ロール圧延材にはほとんど存在しなかったせん断集合組織成分である $\langle 111 \rangle // ND$ が表面付近で増加している。

異径平圧延材図(d)は板厚中心に関して非対称な軸密度分布を示し、小径ロール側では中心から表面に向かって $\langle 111 \rangle // ND$ が増加し、大径ロール側では表面付近で $\langle 110 \rangle // ND$ が発達している。すなわち小径ロール側の軸密度分布は小径ロールの同径平圧延材の軸密度分布に、大径ロール側の軸密度分布は大径ロールの同径平圧延材のそれにほぼ一致している。

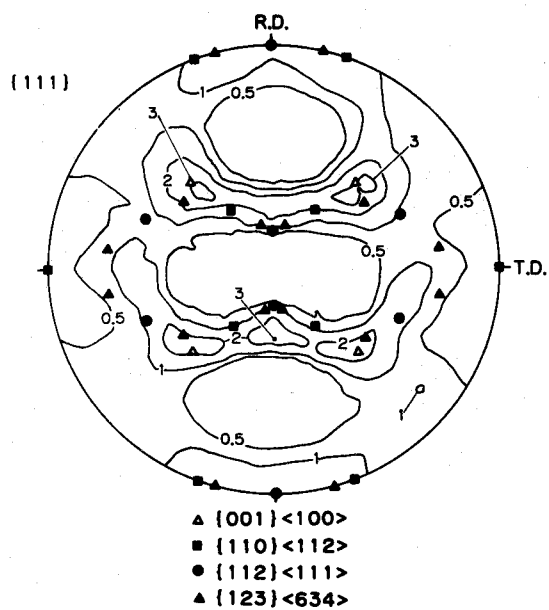
5パス孔型圧延材図(e)と5段サテライトミル圧延材図(f)では、平圧延材と同様に50%の圧延により集積度が低下している。またこの2種類の圧延材の軸密度分布にはほとんど差がなく変形過程が板厚中心に関して非対称であるにもかかわらず、ほぼ対称的な軸密度分布を示す。いずれも板厚全体にわたって $\langle 100 \rangle // ND$ 、 $\langle 110 \rangle // ND$ 、 $\langle 210 \rangle // ND$ が1～2の範囲で分布しており、 $\langle 111 \rangle // ND$ 、 $\langle 211 \rangle // ND$ 成分は板厚全体にわたって少ないが表面付近では板厚中心部に比べてやや増加している。

6・3・3 幅広がりひずみが大きい場合の圧延集合組織

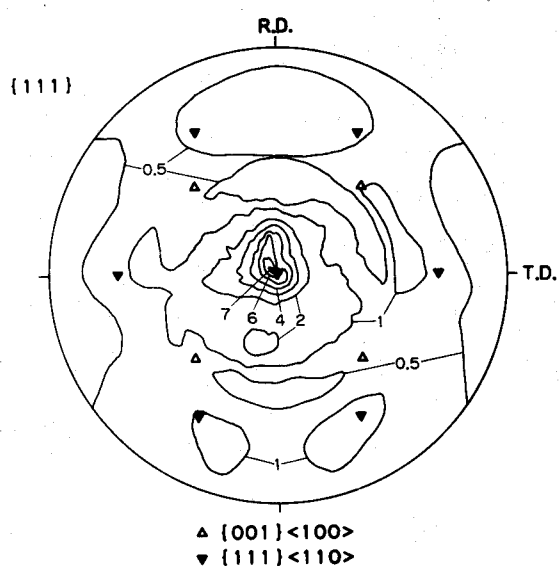
素材平条、同径平圧延材($\phi 100$)および幅広がりひずみが大きい5パス孔型圧延材、5段サテライトミル圧延材の板表面、相対深さ0.1、板厚中心部の{111}極点図をそれぞれ図6.2～図6.4に示す。素材平条では表面と板厚中心で再結晶集合組織である{001} $\langle 100 \rangle$ が、相対深さ0.1では{110} $\langle 001 \rangle$ が優先方位となるほか、どの深さにおいても{110} $\langle 112 \rangle$ 、{112} $\langle 111 \rangle$ 、{123} $\langle 634 \rangle$ で表される圧延集合組織が残留している。

同径平圧延材($\phi 100$)は、表面では素条に存在した{001} $\langle 100 \rangle$ 方位がほとんど消滅し、{111}が現れてそれがND軸まわりに回転している。これは1パスで圧下するため他の圧延方法に比べてせん断変形が大きいことによると考えられる。また表面直下および板厚中心では圧延集合組織が発達している。

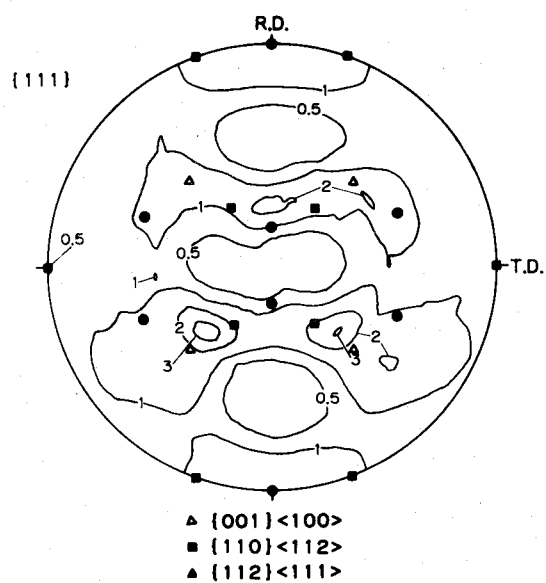
5パス孔型圧延材の表面では{001} $\langle 100 \rangle$ 成分が著しく減少しかつTD軸に関して非対称な集合組織となっている。相対深さ0.1では{110} $\langle 001 \rangle$ から{110} $\langle 112 \rangle$ に分布する $\langle 110 \rangle // ND$ 方位および{112} $\langle 111 \rangle$ が主成分となり、板厚中心では{001} $\langle 100 \rangle$



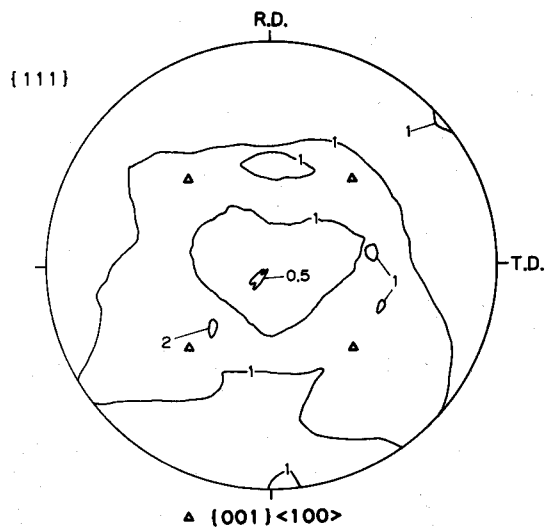
(a) 素材平条



(b) 同径平圧延材

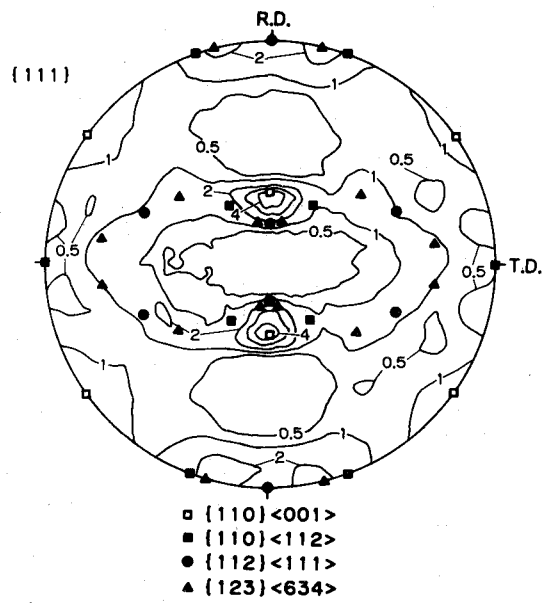


(c) 5パス孔型圧延

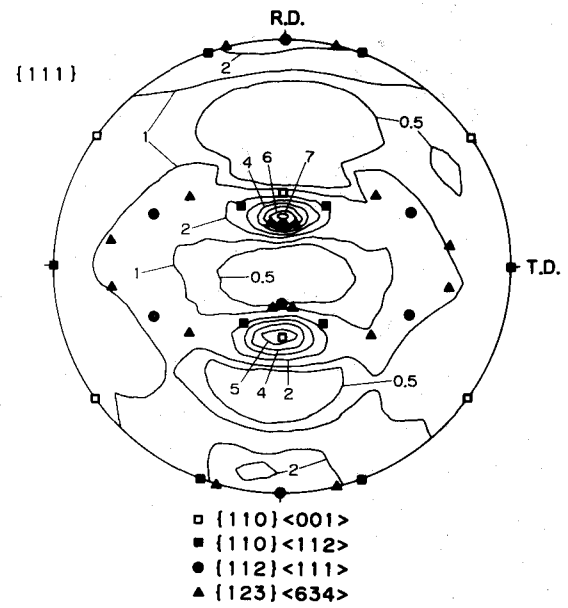


(d) 5段サテライトミル圧延材

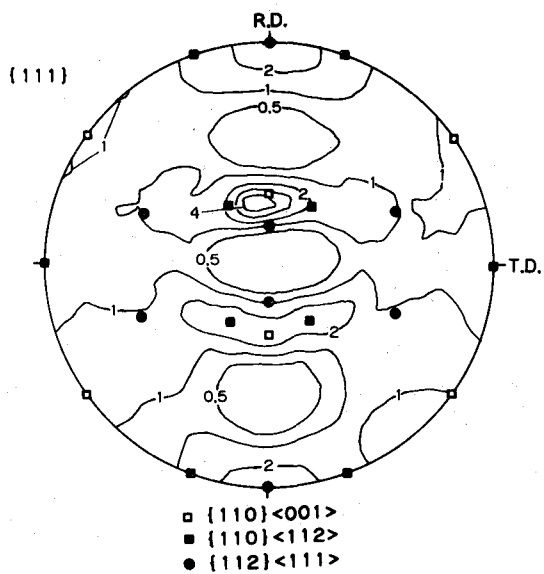
図6.2 表面における {111} 極点図



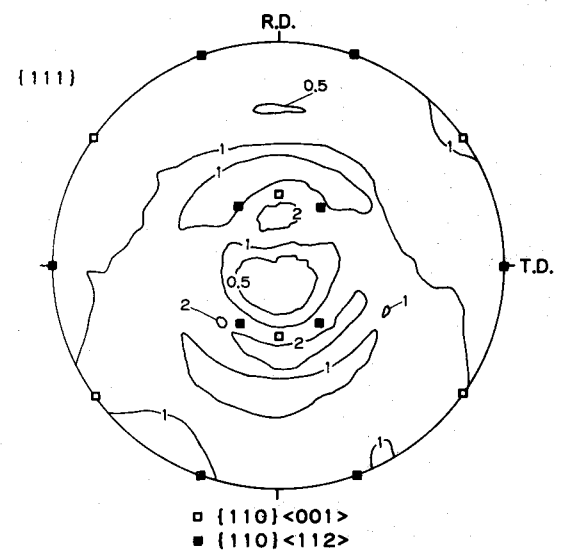
(a) 素材平条



(b) 同径平圧延材

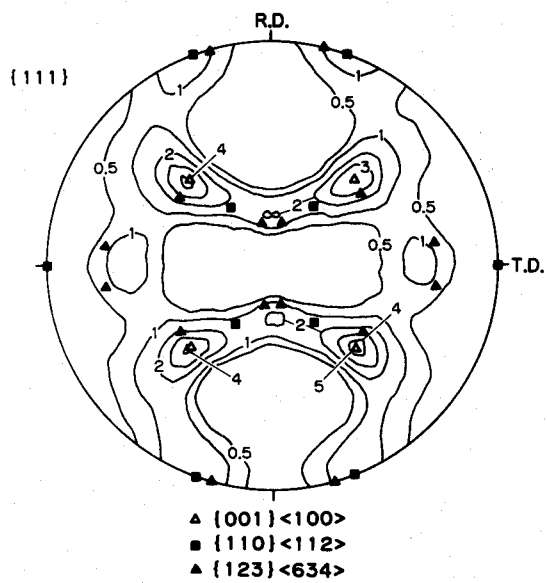


(c) 5パス孔型圧延

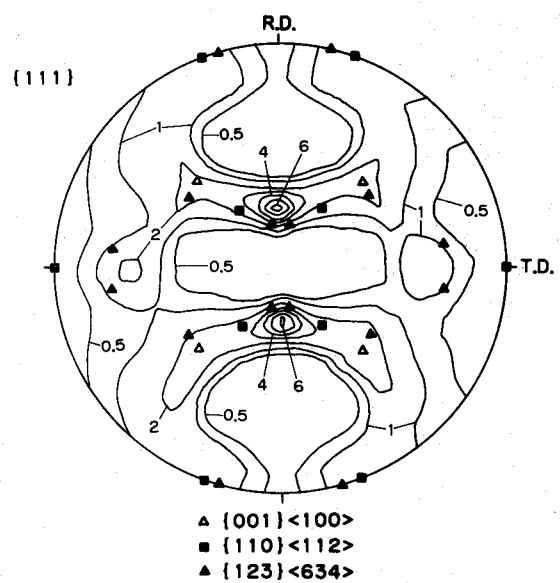


(d) 5段サテライトミル圧延材

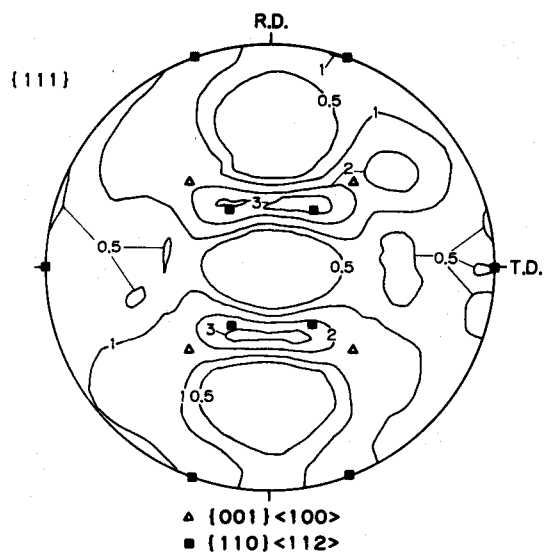
図6.3 相対深さ0.1における {111} 極点図



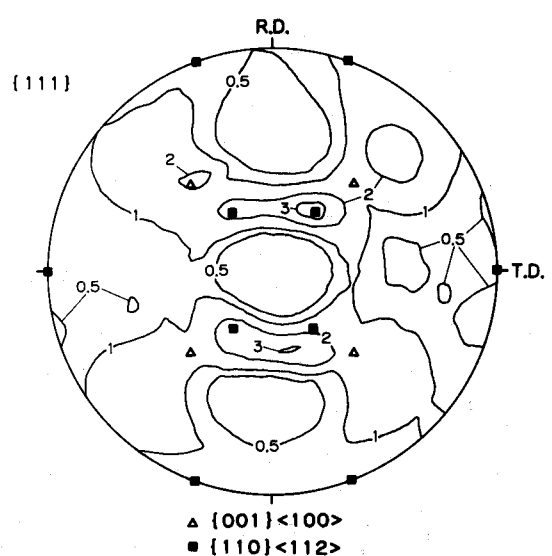
(a) 素材平条



(b) 同径平圧延材



(c) 5パス孔型圧延



(d) 5段サテライトミル圧延材

図6.4 中心における {111} 極点図

が減少し、 $\{110\}\langle 112\rangle$ 成分が主成分となっている。

5 段サテライトミル圧延材では表面の集合組織が $\{001\}\langle 100\rangle$ の痕跡を残すのみでほぼ消滅している。相対深さが 0.1 では 5 パス孔型圧延材において $\{110\}\langle 001\rangle$ から $\{110\}\langle 112\rangle$ にかけて分布している $\langle 110\rangle//ND$ 成分が ND 軸に関してほぼ完全に対称になり、繊維集合組織となっている。これは表 6.1 に示したように 5 段サテライトミル圧延はひずみ比が 1.4 と単純圧縮変形に近いことから一軸圧縮集合組織が形成されていることを示している。板厚中心では 5 パス孔型圧延とほぼ同じ集合組織である。

以上のようにアルミニウムの幅広がりひずみの大きい圧延では $\langle 110\rangle//ND$ を中心とする集合組織が発達し、ひずみ比が 1 に近いと面内異方性が小さくなる。本実験では圧下率が 50% であるため、これらの結果が最終安定方位を示しているわけではないが、幅広がりひずみの大きな圧延方法で大圧下をかければ、面内異方性が減少し、より集積度の高い $\langle 110\rangle//ND$ の繊維集合組織を持つ板が得られることが予想される。

6・4 結 言

5 段サテライトミル圧延、5 パス孔型圧延、異径平圧延、同径平圧延による純アルミニウムの圧延集合組織を調べ、次の結果を得た。

(1) 素条として用いた市販の純アルミニウム条は、板厚方向に不均一な集合組織を有しているが、この集合組織は 50% の冷間圧延ではいずれの圧延方式でも圧延により集合組織の集積度が減少する。

(2) 異径平圧延材では、小径ロール側の軸密度分布が小径ロールの同径平圧延材のそれに、大径ロール側の軸密度分布が大径ロールの同径平圧延材のそれにほぼ一致し、大径ロール側では $\langle 110\rangle//ND$ 、小径ロール側では $\langle 111\rangle//ND$ が高い。

(3) 5 段サテライトミル圧延材ではひずみ比（幅広がりひずみ／延伸ひずみ）が 1 に近いことに対応して、圧延により $\langle 110\rangle//ND$ 繊維集合組織すなわち一軸圧縮集合組織が形成される。5 パス孔型圧延材では集合組織は、サテライトミル圧延材と平圧延材の中間的挙動を示す。

参考文献

- 1) C. S. Barrett and L. H. Levenson: Trans. AIME., **137**(1940), 112.
- 2) A. Merlini, P. A. Back: Acta Metallurgica, **1**(1950), 598.
- 3) 堀内繁雄・大久保忠恒・五弓勇雄: 金会誌, **6-29**(1965), 596.
- 4) 清水保雄・清野次郎・佐藤元太郎・宮地克嘉・市川武司・大野茂久: 軽金属, **38-11**(1988), 717.
- 5) 上城太一・新谷定彦・福富洋志: 塑性と加工, **25-280**(1984), 375.

7. 孔型中心ロール法によるT形異形断面条の圧延

7・1 緒 言

最近パワートランジスタのリードフレームやコネクタなどのエレクトロニクス材料として板厚が板幅方向にステップ状に変化する異形断面条（または異形条）が用いられている。異形断面条の材質は主として銅合金であり、その板厚比（厚肉部板厚／薄肉部板厚）は3程度のものが多い。異形断面条の使用は電子機器の組立工程の簡略化のみならず、製品の軽量化を図れるので、その需要は最近急激に増加している³⁾。

異形断面条は従来、切削あるいは複数の板を溶接することより製造されていたが¹⁾、これらの方法は歩留まり、生産性、寸法精度等に問題があり、現在ではほとんどが平条からの塑性加工により成形されるようになった。その製造法は主としてV—ミル圧延法²⁻⁴⁾と呼ばれる特殊圧延法である。この方法では製品形状に対応した固定したV形ダイスに平条を往復する平ロールで押しつけることにより断続的に成形が行われる。また別の方法として上ロールの円周方向にV形の孔型を加工したピルガーミルを用いて断続的に成形を行う方法も用いられている⁵⁾。これらの方法は多数回の加工動作を必要とし、機械1台あたりの生産性が著しく低いという欠点がある。

そこで最近より生産性の高い成形法を求めて種々の圧延法が考案あるいは検討されている。阿部ら⁶⁻⁸⁾は孔型ロールと平ロールを交互に配置した連続圧延機によって薄肉部の拡幅を行う方法を提案しており、本村ら⁹⁻¹²⁾は二本のV形ロールと一本の平ロールからなる三方ロールミルによる圧延法を提案している。また斎藤ら¹³⁾は溶湯直接圧延法により異形断面条を溶湯から直接製造する方法を、富澤ら¹⁴⁻¹⁵⁾はシングルプラネタリミルの外周上に設置された円弧状のダイスに遊星ロールを用いて押しつける方法をそれぞれ提案している。

圧延法で異形断面条を製造する場合、薄肉部の過剰伸びによる座屈波を防止する為に薄肉部から厚肉部へのメタルフローが必要である。しかしながら薄板の圧延の場合、材料のアスペクト比（板幅／板厚）が大きいため、このような三次元変形を

発生させるには、部分圧下を繰り返さねばならず、多数回の圧延が必要となる。多数回の圧延は、多スタンドの圧延機および多数の孔型ロールを必要とするため、異形断面条の様な多品種の生産は極めて困難である。

そこで異形断面条の製造プロセスへのサテライトミルの適用について検討する。このミルでは各段間に長手方向の圧縮力が生じるため横断面内のメタルフローが促進され、異形断面条の効率的な成形の可能性を有すると考えられる。第2章ではサテライトミルを考案試作し、アルミニウム平条よりT形（凸形）ならびにU形（凹形）の異形断面条を試験圧延し、通常圧延に比べて材料の孔型への充満性が優れていることを確認した。第2章では各衛星ロールに異なった幅の溝または突起を加工した孔型ロールを用い、中心ロールに平ロールを用いる方法（孔型衛星ロール法）を用いた。本章では孔型衛星ロール法とは逆に、中心ロールに製品断面形状と同じ形状の孔型を加工して成形ダイスの役割をさせ、全て平ロールの衛星ロールを用いて材料を中心ロールに押しつける役割をさせる方法（孔型中心ロール法）を考案し、銅合金にくらべて変形抵抗が小さく、変形挙動が類似しているアルミニウム平条をモデル材料に用いてT形異形断面条を成形する実験を行い、その可能性について検討した。

7・2 実験方法

図7.1に孔型中心ロール法の5段サテライトミルのロール、ガイドシュアの配置を示す。孔型中心ロール法では、中心ロールには製品の横断面形状に対応する溝を加工した孔型ロールを、各衛星ロールには全て平ロールを用いて孔型を構成する。この孔型部分に左右対称に条を送り込み、各圧下点の溝部で厚肉部（ウェブ部）を成形する。したがって孔型衛星ロール法では各圧下点で厚肉部の一部分ずつが圧下されて、薄肉部の幅が広げられるのに対して、孔型中心ロール法では全ての段において薄肉部全体が圧下される点が異なっている。

本研究ではT形異形断面条を成形するため、図7.2に示すように中心ロールに深さ 1.00mm、幅 20.0mm のシャープな長方形の溝を加工し、各圧下点の溝部でT形異形断面条の厚肉部（ウェブ部）を、溝の外の両側の部分で薄肉部（フランジ部）を

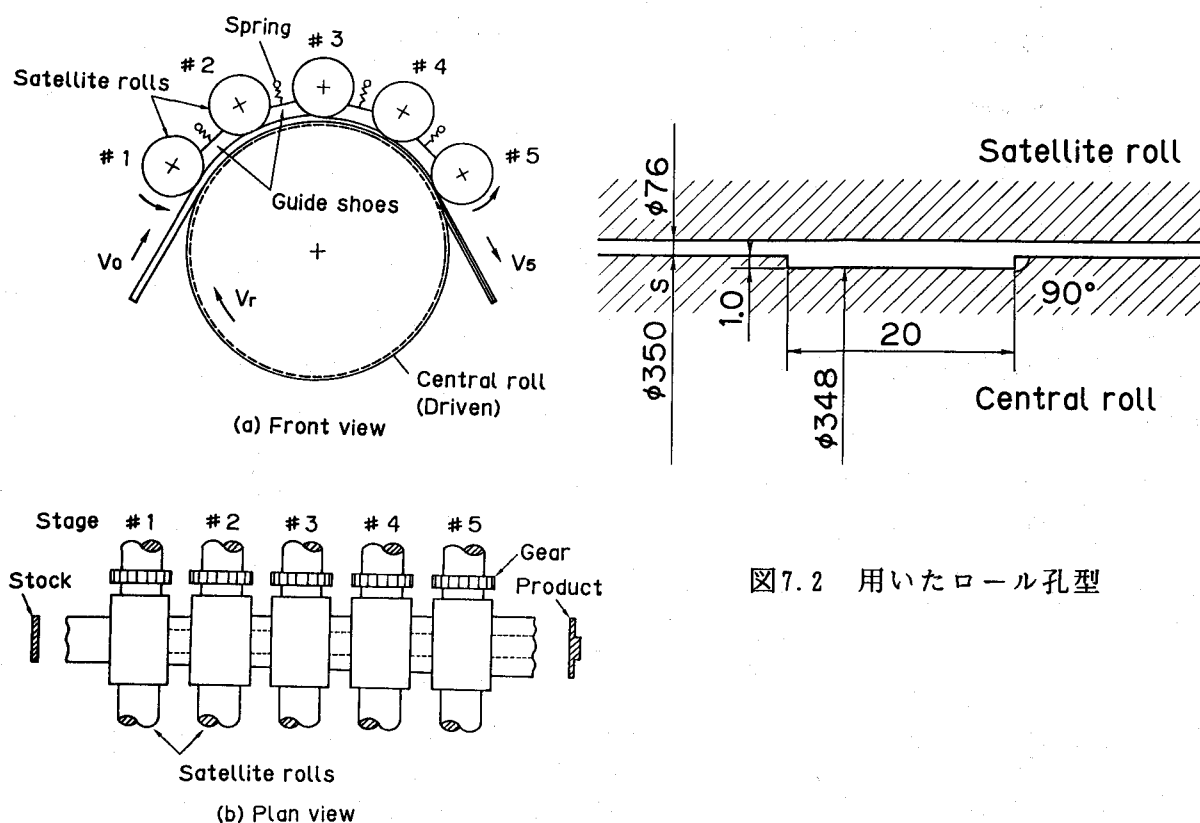


図7.2 用いたロール孔型

図7.1 5段サテライトミル圧延におけるロール配置（孔型中心ロール法）

成形する．なお実験には第3章で示した2号機を使用した．

フランジ部のロールギャップ s により圧下率を制御する．本方法では素材から製品までの圧下率（全圧下率） r_t に対して，各段の圧下率の配分は種々考えられるが，本研究では各段における圧下率を同一とした．したがって n 段サテライトミル圧延の場合， i 段目通過後の板厚 h_i ，全圧下率 r_t と各段圧下率 r は次の関係となる．

$$h_i = h_0(1-r)^i \quad (7.1)$$

$$1-r_t = (1-r)^n \quad (7.2)$$

供試材として市販の純アルミニウム焼鈍板(JIS A1050P-0)のコイルをスリットした平条を用いた．その寸法は，厚さ $h_0=2.03\text{mm}$ ，板幅 $w_0=39.9\text{mm}$ と $h_0=1.95\text{mm}$ ，

$w_0 = 29.9\text{mm}$ の 2 種類とした。潤滑剤には市販の非鉄用鋳油ベース圧延油を用い、ロール周速 $V_r = 22.0\text{mm/s}$ で圧延を行った。なお、前・後方張力はいずれも付加しなかった。

各段通過後のフランジ部の板厚が所定の圧下率となるようにロールギャップを設定して圧延し、定常圧延に達した後圧延を中断して圧延途中の条を取り出し、各段通過後の材料の形状、幅広がり率、延伸率、ウェブ部中央の板厚減少率、先進係数などを測定した。ここでフランジ部の幅広がり率は次式で定義した。

$$\text{フランジ部の幅広がり率} = (w_i - b) / (w_0 - b) - 1 \quad (7.3)$$

ただし、 w_i : i 段目通過後の板幅

b : 中心ロールの溝幅 ($= 20.0\text{mm}$)

他の特性値の定義ならびに測定方法は第 2 章と同様である。さらに製品横断面の外形状 (断面プロファイル) を工具顕微鏡で測定した。

7・3 実験結果

7・3・1 座屈波の発生と加工限界

図 7.3 に素材板幅 40mm の平条の 5 段サテライトミル圧延の噛み止めサンプルの外観写真を示す。ただし、圧延途中の条は中心ロールに沿って湾曲しているので、これをわずかに引っ張って平面上に展開したものである。各段圧下率 $r = 12.5\%$ (全圧下率 $r_t = 48\%$) の場合は平坦に圧延されるが、 $r = 15\%$ ($r_t = 55\%$) では製品のフランジ部にわずかに座屈波が発生していることがわかる。他の成形段数においても圧下率が高い場合フランジ部に座屈波が発生した。座屈波は素材板幅が 40mm の場合、1～2 段成形では 1 段目通過後に、3～5 段成形では 2 段目通過後に発生した。図 7.4 は縦軸に各段の圧下率を、横軸に成形段数を取り、各条件における座屈波の発生の有無を示したものである。図中の破線はそれぞれ全圧下率 $r_t = 48\%$ および 55% の等圧下率曲線である。これより座屈波は素材板幅および成形段数の影響は少なく、全圧下率 50% 付近で発生することがわかる。この圧下率は材料が溝に充填する圧下率に相当している。

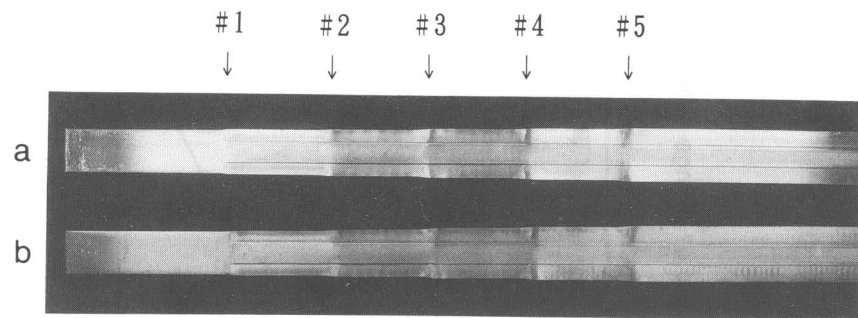


図7.3 5段サテライトミル圧延の噛み止め材の外観

(a: $r_t = 48\%$, b: $r_t = 55\%$, $w_0 = 40\text{mm}$)

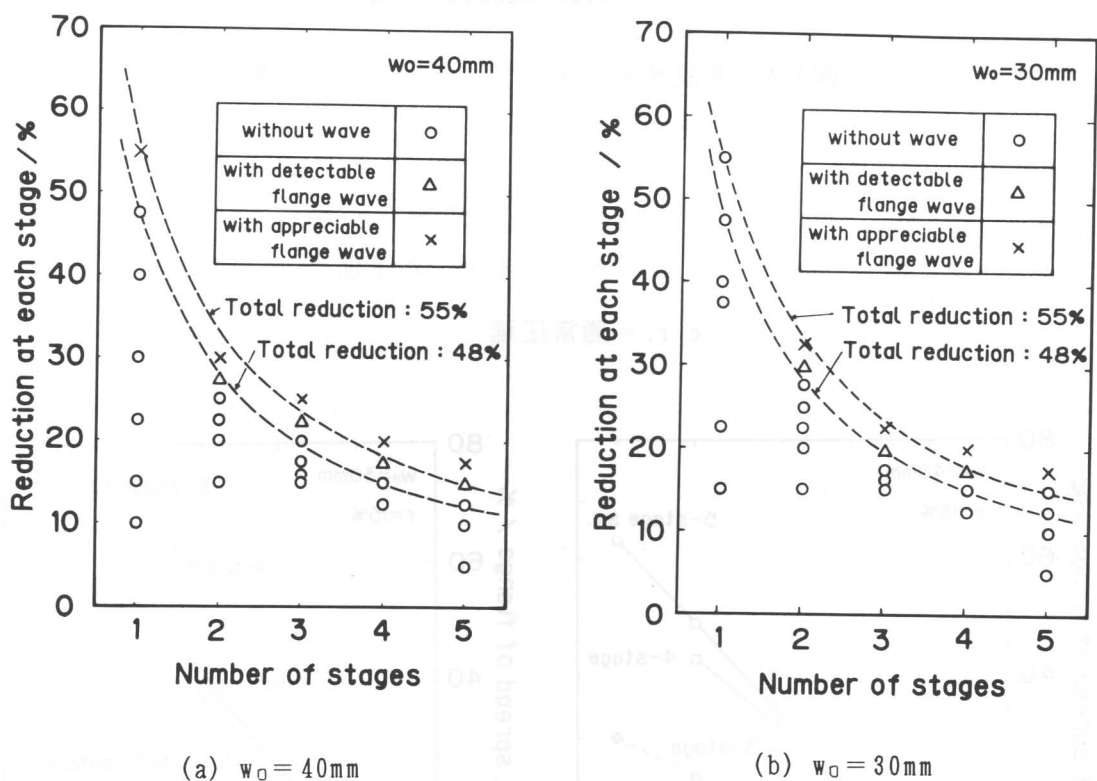


図7.4 加工限界を示す各段圧下率と成形段数の関係

7・3・2 変形特性

図7.5に5段サテライトミル圧延(s. r.)と1段1パス圧延(c. r.)のフランジ部の幅広がり率に及ぼす素材板幅と全圧下率の影響を示す。サテライトミル圧延の幅広がり率は素材板幅が狭いほど圧下率が高いほど大きくなるが、1段1パス圧延と比較した場合の幅広がり促進効果は素材板幅が広いほど顕著となることがわかる。図

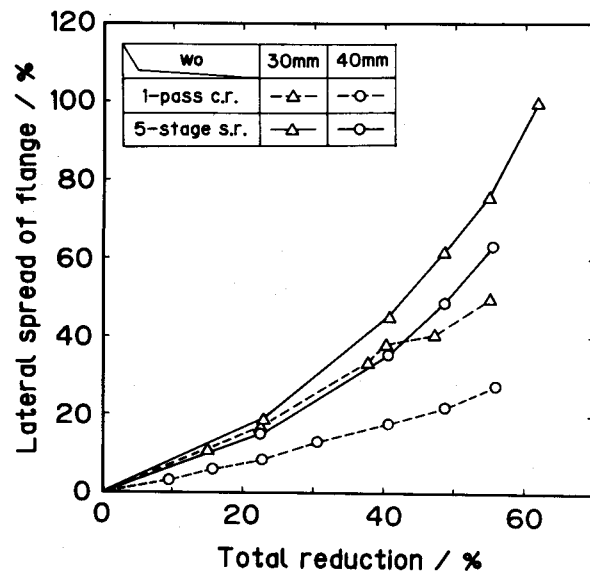
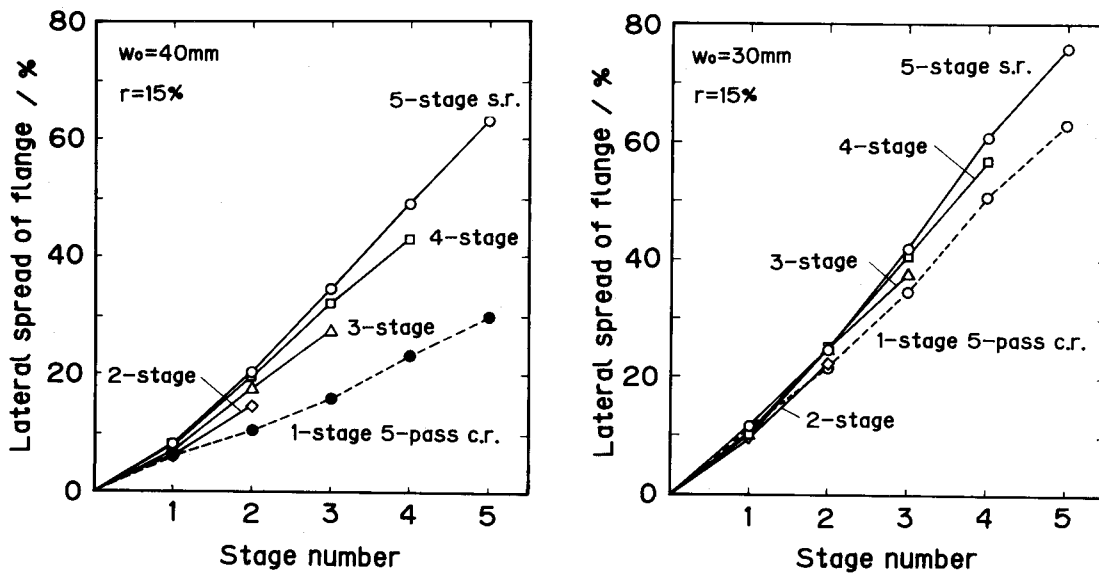


図7.5 5段サテライトミル圧延と1パス通常圧延の幅広がり率に及ぼす素材板幅および全圧下率の影響

s. r. = サテライトミル圧延

c. r. = 通常圧延



(a) $w_0 = 40\text{mm}$

(b) $w_0 = 30\text{mm}$

図7.6 サテライトミル圧延中の幅広がり率の推移に及ぼす成形段数の影響

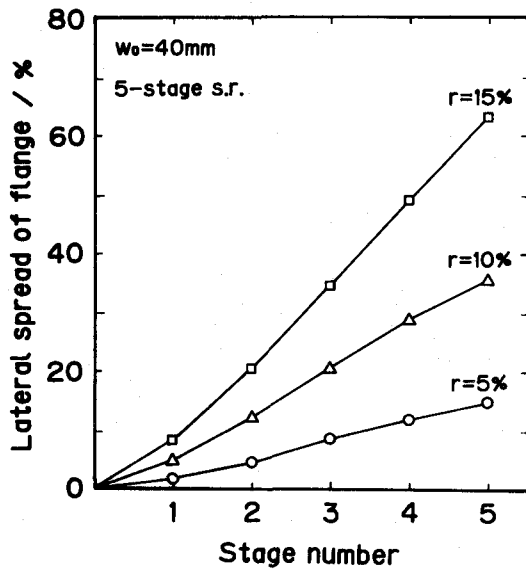


図7.7 5段サテライトミル圧延の幅広がり率の推移に及ぼす圧下率の影響

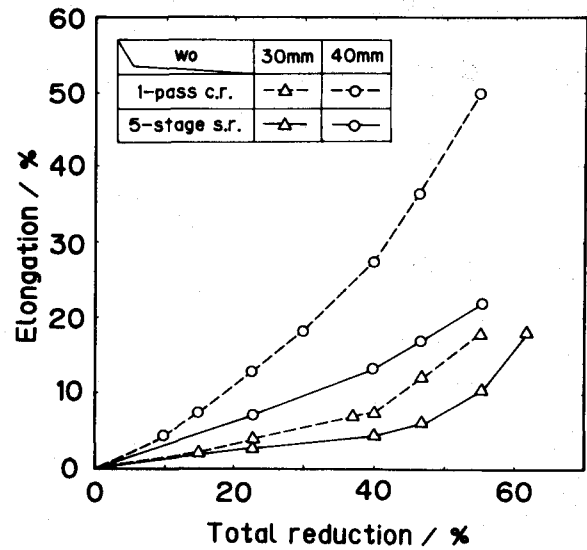


図7.8 5段サテライトミル圧延と1パス通常圧延の延伸率に及ぼす素材板幅および全圧下率の影響

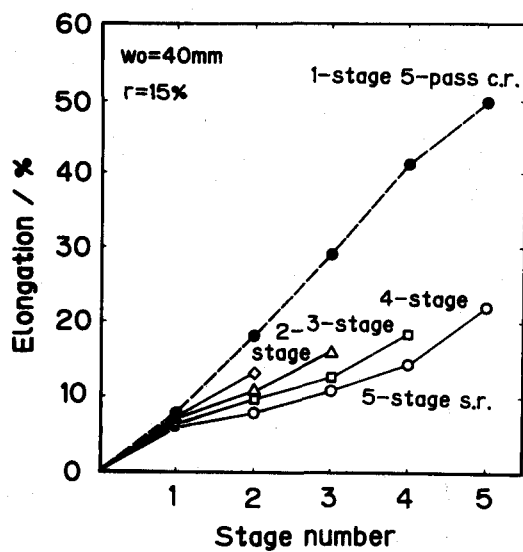


図7.9 サテライトミル圧延中の延伸率の推移に及ぼす成形段数の影響

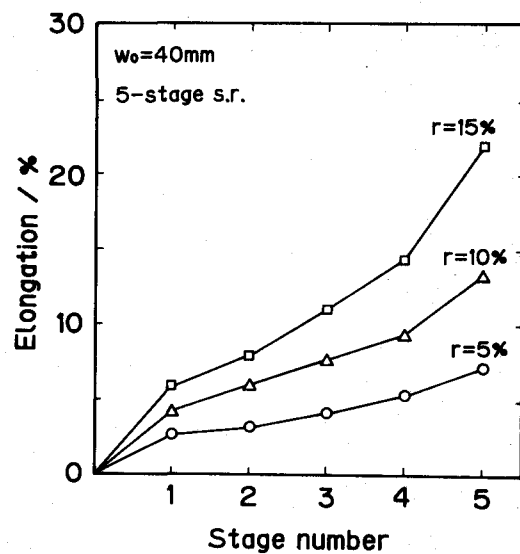


図7.10 5段サテライトミル圧延の延伸率の推移に及ぼす圧下率の影響

7.6は横軸に衛星ロールの番号をとり、各段通過後のフランジの幅広がり率の推移を各段圧下率 r を 15% 一定として成形段数を変化させて見たものである。サテライトミル圧延は図中に破線で示した $r=15\%$ の 1 段 5 パス圧延と比較して幅広がりが大きく、その効果は成形段数が多いほど、素材板幅が広いほど大きいことがわかる。図7.7は 5 段サテライトミル圧延についてフランジ部の幅広がり率の推移に及ぼす圧下率の影響を見たものである。フランジ部の幅広がり率は段の番号とともにほぼ直線的に増加している。

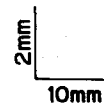
図7.8に 5 段サテライトミル圧延と 1 段 1 パス圧延の延伸率に及ぼす素材板幅、全圧下率の影響を示す。5 段サテライトミル圧延の延伸率は 1 段 1 パス圧延の約半分に抑制されている。延伸の抑制効果は素材板幅が広いほど全圧下率が高くなるほど顕著となることがわかる。また全圧下率 r_t が 50% 以上では延伸率の圧下率に対する依存性が上昇していることがわかる。各段圧下率 r を 15% 一定として成形段数を変化させた場合の延伸率の推移を図7.9に示す。成形段数が多いほど延伸の抑制効果は大きく、成形段数が 3 段以上の場合、延伸の抑制効果は中流の段で大きいことがわかる。図7.10は 5 段サテライトミル圧延の延伸率の推移に及ぼす圧下率の影響を見たものである。中流の段における延伸の抑制効果は圧下率が高いほど顕著である。

5 段サテライトミル圧延と 1 段 1 パス圧延の製品の横断面プロフィールを図7.11に、5 段サテライトミル圧延 ($w_0=40\text{mm}$, $r_t=55\%$) の横断面プロフィールの推移を図7.12に示す。ただしこれらの図では板厚の変化を誇張するために、板厚方向を板幅方向の 5 倍に拡大して示してある。 $r_t=55\%$ の場合 5 段サテライトミル圧延材は素材板幅 30mm の場合にはほぼ孔型に充満しているが、素材板幅 40mm の場合は突起部の裏側にひけ（欠肉）が残留している。1 段 1 パス圧延材と比較すると、5 段サテライトミル圧延材の方がウェブ部の孔型溝部への充満性が格段に優れコーナー部がシャープで側面の傾斜角も大きい。またサテライトミル圧延ではウェブ部の突起部の板厚減少（減肉）が少ないが、突起部の裏側にひけが生ずる傾向が見られる。このひけは素材板幅が広いほど大きい、全圧下率の増加とともに小さくなる。さらにサテライトミル圧延材の横断面は突起部側（中心ロール側）に反りを生じる傾向が

Sheet width : 40mm

Total reduction	One-pass conventional rolling	Five-stage satellite-mill rolling
23%		
40%		
48%		
55%		

(a) $w_o = 40\text{mm}$



Sheet width : 30mm

Total reduction	One-pass conventional rolling	Five-stage satellite-mill rolling
23%		
40%		
48%		
55%		

(b) $w_o = 30\text{mm}$

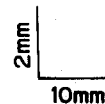


図7.11 5段サテライトミル圧延と1パス通常圧延の製品横断面プロフィールに及ぼす全圧下率の影響

あり，反りの程度は1段1パス圧延では圧下率が高いほど大きい，サテライトミル圧延では逆に圧下率が高いほど小さくなる。

5段サテライトミル圧延と1段1パス圧延におけるウェブ中央部の板厚減少率に及ぼす全圧下率の影響を図7.13に示す。素材板幅 30mm の場合両者の差はあまりな

いが、素材板幅 40mm の場合 1 段 1 パス圧延に比べてサテライトミル圧延材では板厚減少が少ない。また全圧下率が 50 % 以上では厚肉部も圧延されるため板厚減少が増加している。図7.14は各段圧下率を15 %一定としてウェブ中央部の板厚減少率の推移に及ぼす成形段数の影響を見たものである。図7.9に示した延伸率の推移と類似の推移を示しており、中流の段において板厚減少の抑制効果が大きいことがわかる。また図7.15は5 段サテライトミル圧延についてウェブ中央部の板厚減少率の推移に及ぼす圧下率の影響を見たものである。ウェブ中央部の板厚減少は圧下率の増加とともに増加するが、中流の段における抑制効果は延伸率の推移（図7.10）と同様に圧下率とともに顕著となることがわかる。

7・3・3 先進特性

図7.16に各段圧下率を 15 % 一定として先進係数の推移に及ぼす成形段数の影響を示す。成形段数が多いほど材料の入口速度は減少し、出口速度は増加する。先進係数が 1 となる点すなわち中立点はこの条件下ではいずれも最終段に存在している。5 段サテライトミル圧延の先進係数の推移に及ぼす圧下率の影響を図7.17に示す。圧下率の増加にともなって材料の入口速度は減少し、出口速度は増加し、また中立点の位置は出口側に移動することがわかる。すなわち定性的には通常の圧延の傾向と一致している。

7・3・4 負荷特性

図7.18に各段圧下率が 15 % の場合の各衛星ロールの圧下力の分布に及ぼす成形段数の影響を示す。成形段数が多いほど各段の圧下力、特に中流段における圧下力が増加する。また圧下力のピークは 4 段成形までは最終段に、5 段成形では 4 段目に存在している。図7.19は 5 段サテライトミル圧延の圧下力分布に及ぼす圧下率の影響を見たものである。圧下力分布は 4 段目で最高値となるフリクションヒル状の分布を示している。圧下力は圧下率の増加とともに増加するが、下流段でその影響が大きい。

図7.20に 5 段サテライトミル圧延と 1 段 1 パス圧延の中心ロールトルクに及ぼす全圧下率の影響を示す。サテライトミル圧延の圧延トルクは、1 段 1 パス圧延の約 1.5 倍であることがわかる。

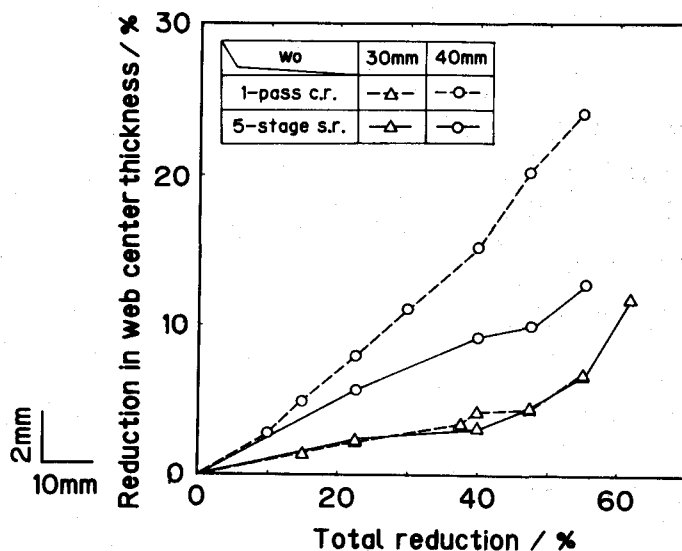
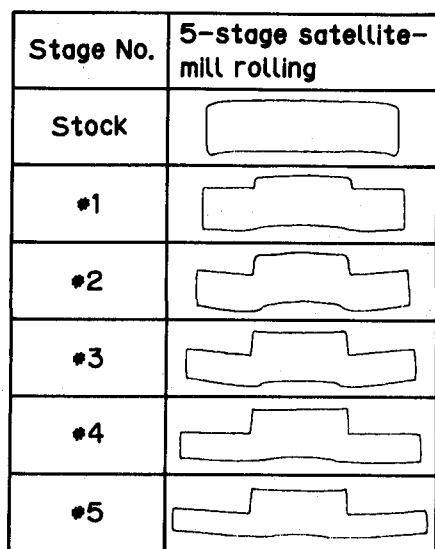


図7.12 5段サテライトミル圧延の横断面 図7.13 5段サテライトミル圧延と1パス通常圧延のウェブ中央部の板厚減少率に及ぼす素材板幅および全圧下率の影響

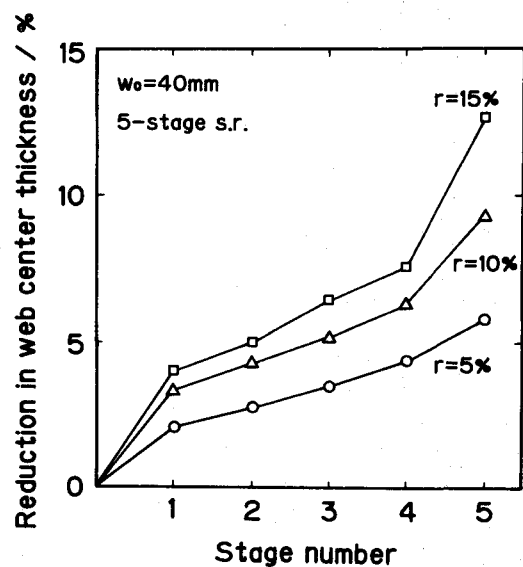
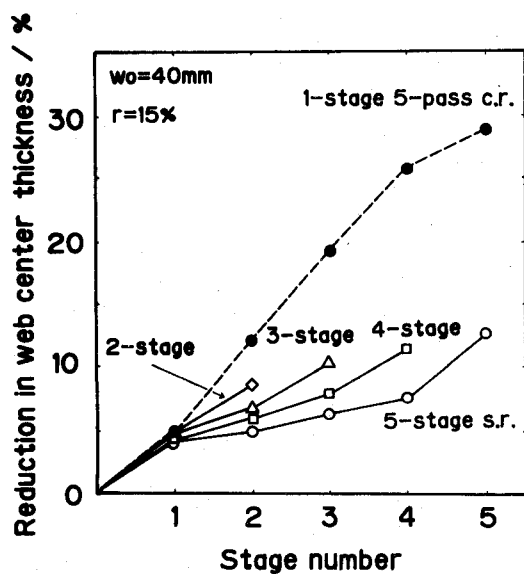


図7.14 ウェブ中央部の板厚減少率の推移に及ぼす成形段数の影響 図7.15 ウェブ中央部の板厚減少率の推移に及ぼす圧下率の影響

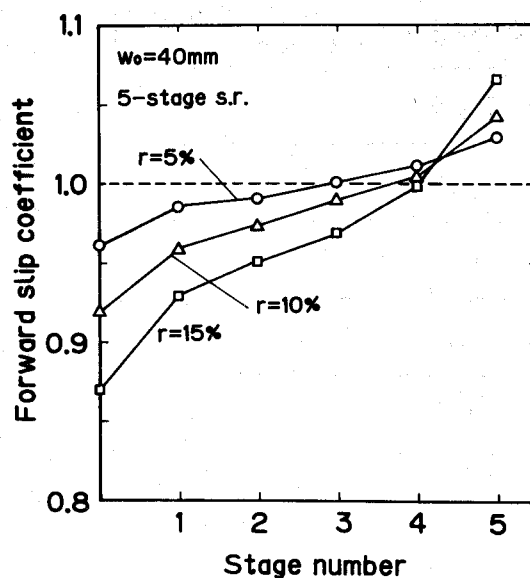
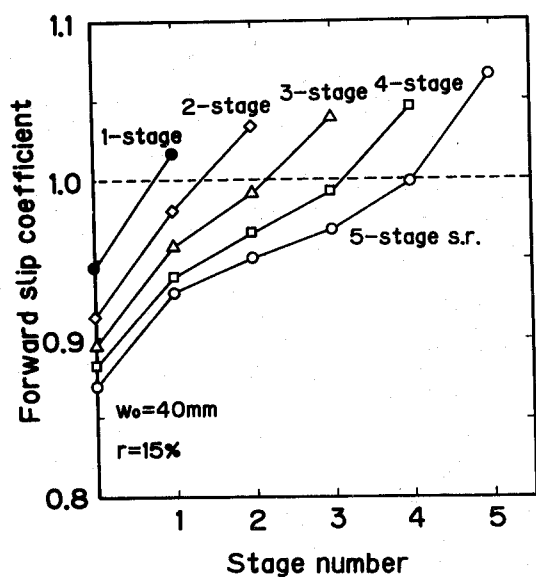


図7.16 サテライトミル圧延中の先進係数 図7.17 5段サテライトミル圧延中の先進係数の推移に及ぼす圧下率の影響

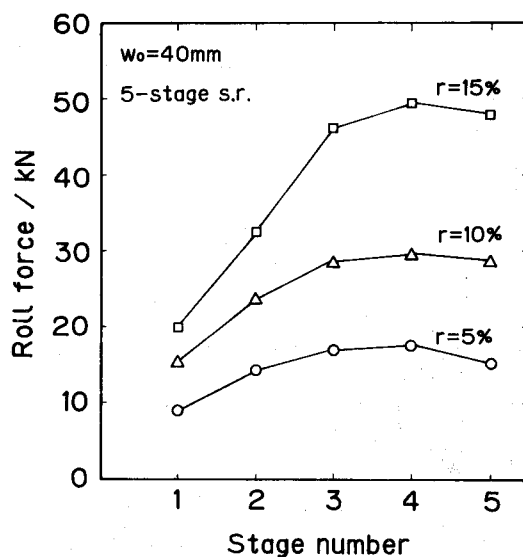
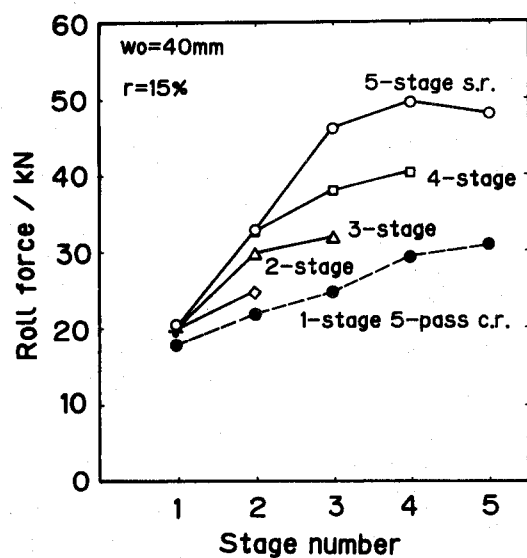


図7.18 サテライトミル圧延の衛星ロール 図7.19 5段サテライトミル圧延の衛星ロール荷重分布に及ぼす圧下率の影響

7・4 考 察

実験の結果、サテライトミル圧延では通常圧延（1段圧延）と比べて延伸が抑制され幅広がり率が促進され孔型への充満性に優れるが、その反面で圧延エネルギーは大きいことが明らかとなった。またその効果は成形段数および圧下率が大きくなるほど顕著である。これらの原因は次の様に考えることができる。サテライトミル圧延では各ロールが同周速で駆動されるために材料の速度とロール周速が一致する中立点が1つの段のみに存在している。材料には中立点に向かう方向の摩擦力がロールから働くため、長手方向の圧縮力が生じ延伸が抑制され横断面内のメタルフローが促進される。これらの効果は当然成形段数が多いほど、また圧下率が大きくなるほど大きい。また中流の段では入口および出口段に比べて延伸率およびウェブ中央部の板厚減少率は抑制され、圧下力は増加した。この理由は入口および出口段ではそれぞれ前方圧縮力または後方圧縮力のいずれかしか作用しないため、上述の効果が中流の段に比べて小さいためと考えられる。幅広がり率は第3章で示した平条の平圧延では中流の段において促進されたが、本研究では圧延の進行とともにほぼ直線的に増加した。このことから中流の段で生じる圧縮力は、幅端部へのメタルフローよりも孔型へのメタルフローを増加させることがわかる。

ウェブ中央部における板厚減少率と延伸率の推移はよく対応することから、ウェブ中央部の板厚減少は延伸の増加に起因していることが推測される。それゆえに任意の横断面形状を有する異形断面条を効率的に成形するためには長手方向の圧縮力によって延伸を抑制し横断面内のメタルフローを促進することが有効であると考えられる。

製品の横断面については素材板幅 30mm の場合はほぼ完全に孔型へ充満した形状であったが、素材板幅 40mm の場合は孔型への充満は完全ではなく、ウェブの突起部の裏側にひけが残留した。また約 50% 以上の圧下率では成形段数によらずフランジ部に座屈波が発生した。これらの理由は次のように考えられる。変形中の横断面内のメタルフローは孔型の溝方向と板端方向の2方向に生じるが、孔型中心ロール法では各段において薄肉部全体を圧下するため板幅方向へのメタルフローが生じにくく、この傾向は圧下率が大きくなるほどアスペクト比（板幅／板厚）が増加す

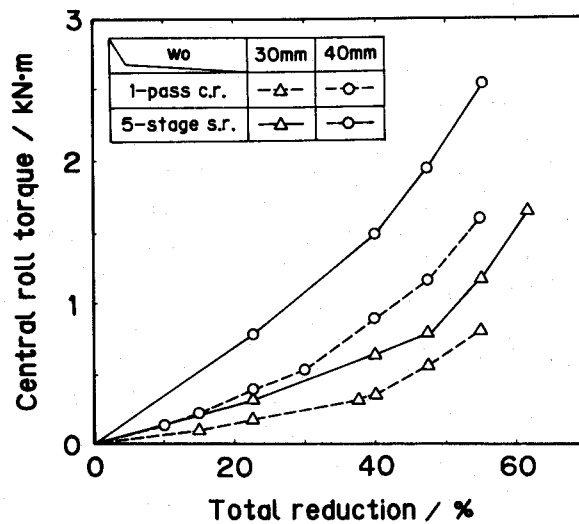


図7.20 5段サテライトミル圧延と1パス通常圧延の中心ロールトルクに及ぼす
素材板幅および全圧下率の影響

るため顕著となる。圧下率 50 % 付近では、溝部が材料でほぼ充満されるためさらに溝方向へのメタルフローも減少し、フランジ部はウェブ部に対して過剰伸びとなり座屈が生じると考えられる。

7・5 結 言

孔型中心ロール法を提案し、アルミニウム平条からT形異形断面条を成形する場合の圧延特性を調べ、次の結論を得た。

- (1) 全圧下率が大きくなるとフランジ部（薄肉部）に座屈波が発生する。この限界圧下率は、溝が充満する圧下率に相当する約 50 % であった。
- (2) サテライトミル圧延では、同一の条件の通常孔型圧延に比べて延伸が著しく抑制され、ウェブ部（厚肉部）での板厚減少が少なく、孔型への充満性が優れているため断面形状の良好な異形断面条が製造可能である。
- (3) サテライトミル圧延の圧延トルクは同じ全圧下率の通常圧延に比べて大きく、5段サテライトミル圧延の場合約 1.5 倍であった。

参考文献

- 1) G.Tembe: Engineering Materials and Design, 1972, 13.
- 2) 福田 弘: 鉄と鋼, 66-5(1980), 110.
- 3) 福田 弘: 121回塑加シンポジキスト(1989), 47.
- 4) 福田 弘: 塑性と加工, 32-363(1991), 452.
- 5) 内野昌信・青木正延・和田克利: 公開特許公報, 昭63-260603.
- 6) 阿部 元・萩原 登・石田和雄・古市勝久・富田博之・松井 透:
日立電線, 5-12(1985), 53.
- 7) 大場 誠・阿部 元・石田和雄: 伸銅技術誌, 29(1990), 95.
- 8) 松井 透・石田和雄・大場 誠・上野和也・杉野昭雄: 日立電線, 11-1
(1992), 103.
- 9) 本村 貢・堀端眞彦・井上靖彦: 39回塑加連講論, (1988), 623.
- 10) 本村 貢・井上靖彦: 平元春塑加講論, (1989), 631.
- 11) 本村 貢・堀端眞彦・松本裕幸: 41回塑加連講論, (1990), 623.
- 12) 堀端眞彦・本村 貢: 128回塑加シンポジキスト, (1990), 69.
- 13) 斎藤好弘・足立和泰・宮本丈二・越智孝二郎: 平2春塑加講論, (1990),
367.
- 14) 富澤 敦・益居 健・田村詔男・山本一男: 材料とプロセス, 5-2(1992),
580.
- 15) 富澤 敦・益居 健・田村詔男・山本一男: 43回塑加連講論, (1992), 713.

8. 孔型衛星ロール法による T 形異形断面条の圧延

8・1 緒 言

第2章では，平条より1パスで異形断面条を圧延できるコンパクトミルであるサテライトミルを考案試作し，孔型衛星ロール圧延法によってT形ならびにU形の異形断面条を試験圧延を行った．その結果，圧延中に各段間で圧縮力が作用するため横断面内のメタルフローが促進され，異形断面条の製造に適していることを明らかにした．さらに，前章（第7章）では孔型中心ロール法を提案し，その場合の圧延特性を明らかにした．

本章では孔型衛星ロール法によりT形異形断面条を製造する場合についてさらに詳しく圧延特性を調査するとともに，通常圧延法ならびに孔型中心ロール法との比較検討を行った．

8・2 実験方法

図8.1に孔型衛星ロール法5段サテライトミルのロール・ガイドシュー・サイドガイドの配置を示す．ガイドシューとしては総形ガイドシューを用いる．使用した衛星ロール孔型を図8.2に示す．#1～#4の衛星ロールには深さ1.5mm，側面の傾斜角26.6°（勾配1/2）の台形状の溝が加工されていて，その幅は1段毎に4mmずつ減少している．被加工材は1段目で，中央部に厚肉部（ウェブ部）が，両端部に薄肉部が形成される．2段目以降の各段では厚肉部の幅が狭められるとともに薄肉部の幅が広げられる．最終段（#5）には溝幅20mm，深さ1.0mmの直角溝が加工されていて，T形異形断面条に成形される．#2～#5の各段において板厚方向には0.05mmずつ圧下される．したがってフランジ部（薄肉部）の全圧下率 r_t の場合の i 段目通過後板厚 h_i は次式で表される．

$$h_i = h_0(1 - r_t) + 0.05(5 - i) \quad (8.1)$$

供試材は市販の純アルミニウム焼鈍板(A1050P-0)をスリットした平条である．その寸法は厚さ $h_0 = 2.03\text{mm}$ ，板幅 $w_0 = 39.9\text{mm}$ である．鉱油ベース圧延油を用いて

$V_r = 22.0 \text{ mm/s}$ の低速で圧延を行った。前・後方張力はいずれも付加しなかった。

また、比較のため1パス孔型圧延ならびに5パス孔型圧延を行った。

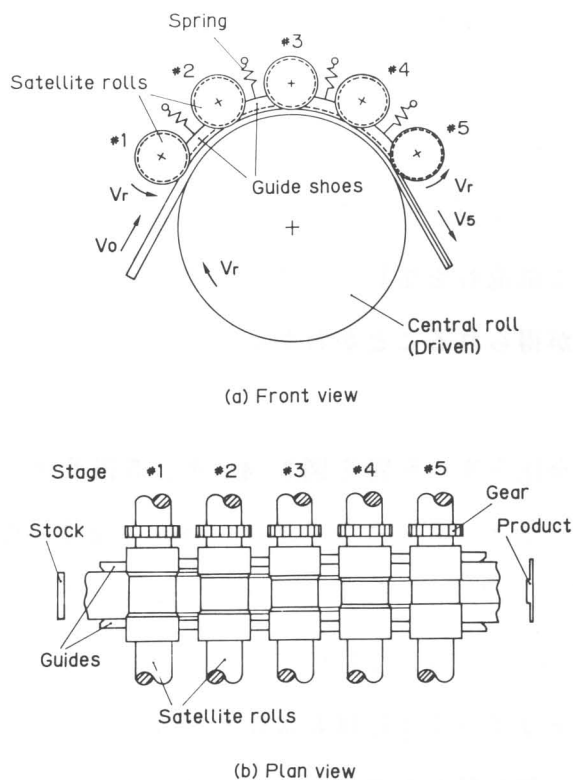


図8.1 5段サテライトミル圧延における
ロール配置（孔型衛星ロール法）

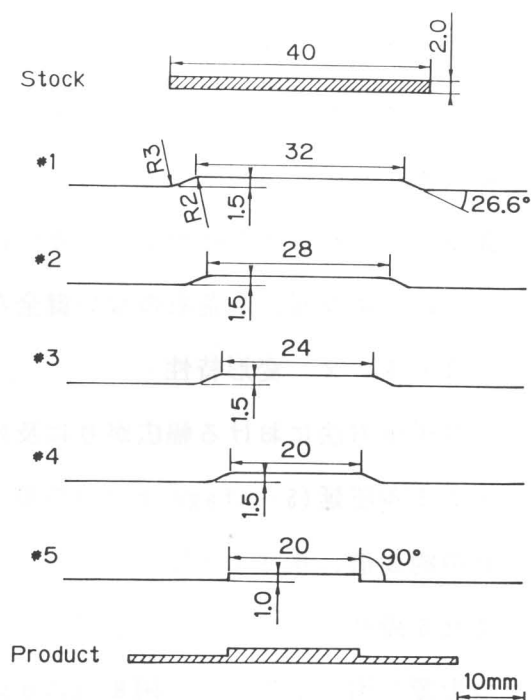


図8.2 用いた衛星ロールの孔型

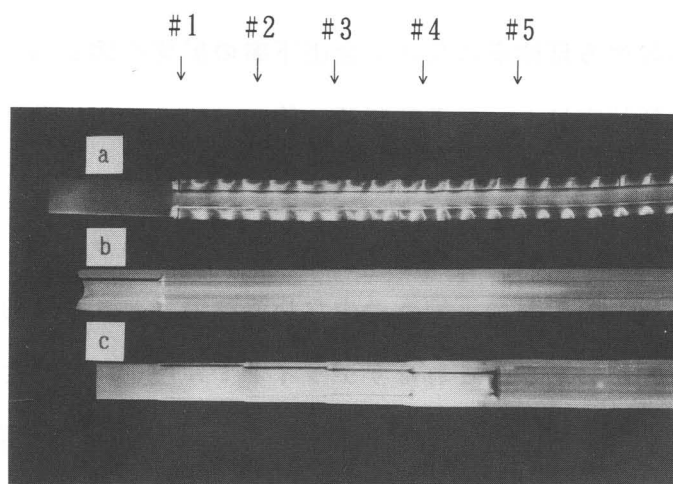


図8.3 噛み止め材のサンプル外観 ($r_t = 55\%$)

a: 1パス孔型圧延

b: 5パス孔型圧延の5パス目

c: 5段サテライトミル圧延

8・3 実験結果および考察

8・3・1 条の形状と表面性状

図8.3に全圧下率 $r_t = 55\%$ の各圧延方法の噛み止めサンプルの外観写真を示す(5パス孔型圧延は5パス目)。ただし噛み止め材は中心ロールに沿って湾曲しているので平面に展開して示してある。この場合、1パス孔型圧延材のみフランジ部に大きな座屈波が発生している。また1パス孔型圧延、5パス孔型圧延ではウェブ部中央部がロールと接触せず、その部分で肌荒れを生じている。5段サテライトミル圧延では座屈、肌荒れのない健全な板が得られることがわかる。

8・3・2 変形特性

各圧延方法における幅広がり及び全圧下率の影響を図8.4示す。5段サテライトミル圧延(5-stage s.r.)の幅広がり量は1パス孔型圧延(1-pass c.r.)のその約2倍、5パス孔型圧延(5-pass c.r.)のその約1.5倍に促進されている。また5段サテライトミル圧延では全圧下率50%以上で幅広がりに対する全圧下率の影響が増加している。図8.5は5段サテライトミル圧延および5パス孔型圧延における幅広がりの変移を各段または各パス毎に見たものである。5段サテライトミル圧延では5パス孔型圧延と比較して特に下流段において幅広がりが顕著であることがわかる。

各圧延方法における延伸率及び全圧下率の影響を図8.6に示す。5段サテライトミル圧延の延伸率は1パス孔型圧延の約 $1/3$ 、5パス孔型圧延の約 $1/2$ にまで抑制されている。図8.7は延伸率の変移を見たものである。5パス孔型圧延では1パスごとに延伸率は増加するのに対して、5段サテライトミル圧延では4段目までに生じる延伸はわずかで、拘束の少ない最終段(#5)において大部分の延伸を生じていることがわかる。これはサテライトミル圧延においては各衛星ロール間に長手方向の圧縮力が生じるが、最終段では後方圧縮力しか作用しないことに加えて孔型へほぼ充満するためであると考えられる。

図8.8は各圧延方法の製品断面プロフィールを比較したものである。なお断面は矯正しておらず、板厚の変化を誇張するために板厚方向を板幅方向の5倍に拡大してある。1パス孔型圧延材は圧下率が低い場合は形状がよいが、圧下率の増加とともに

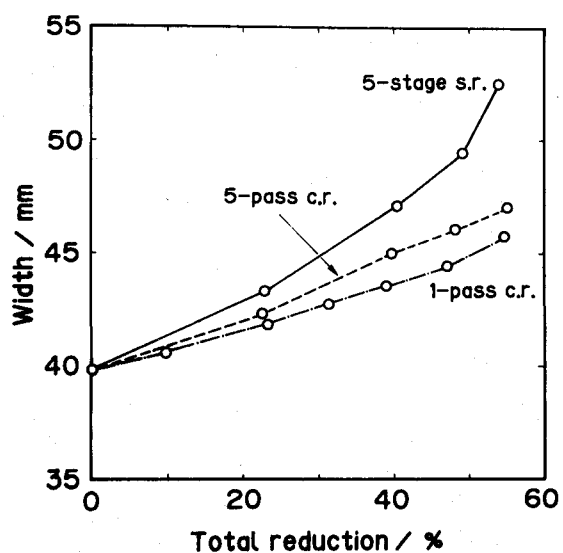


図8.4 各圧延方法における幅広がり及び全圧下率の影響

s. r. = サテライトミル圧延

c. r. = 通常圧延

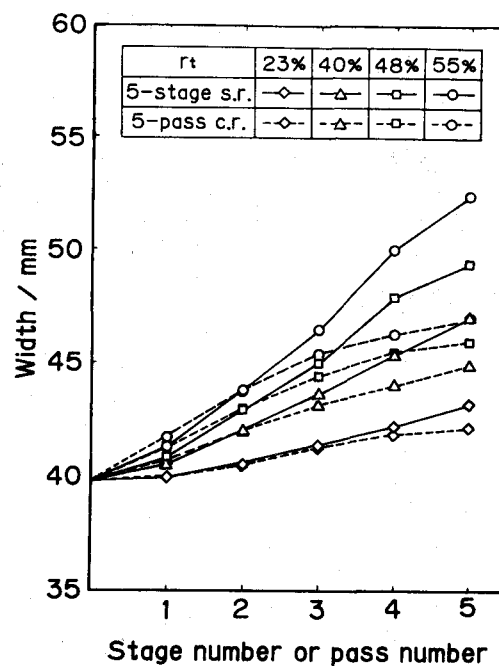


図8.5 5段サテライトミル圧延および5パス孔型圧延の幅広がり推移

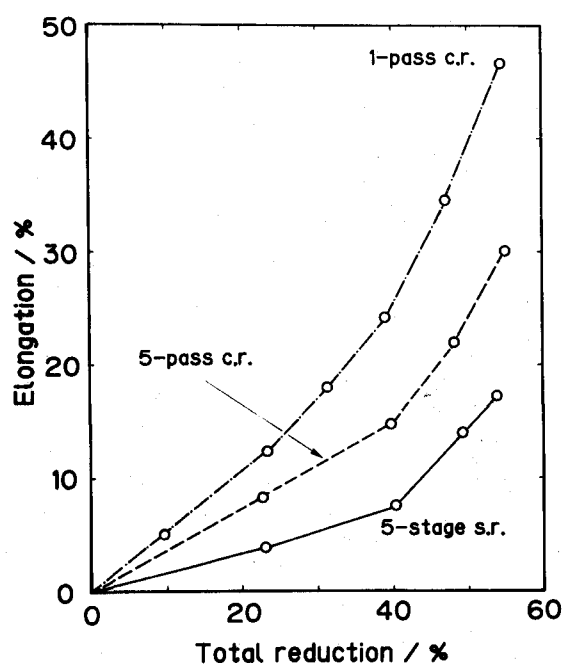


図8.6 各圧延方法における延伸率に及ぼす全圧下率の影響

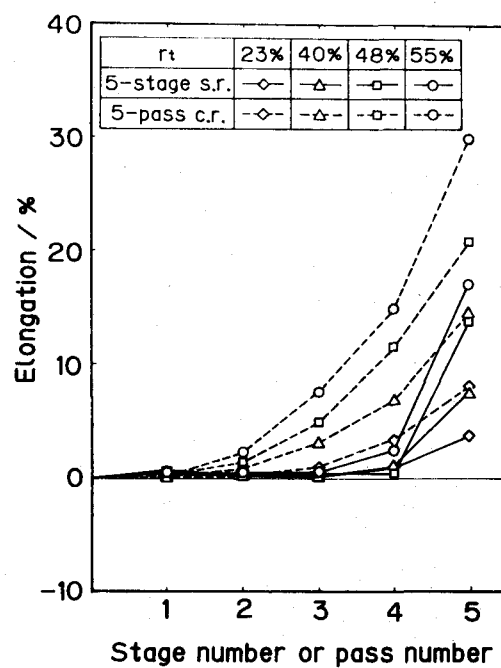


図8.7 5段サテライトミル圧延および5パス孔型圧延の延伸率の推移

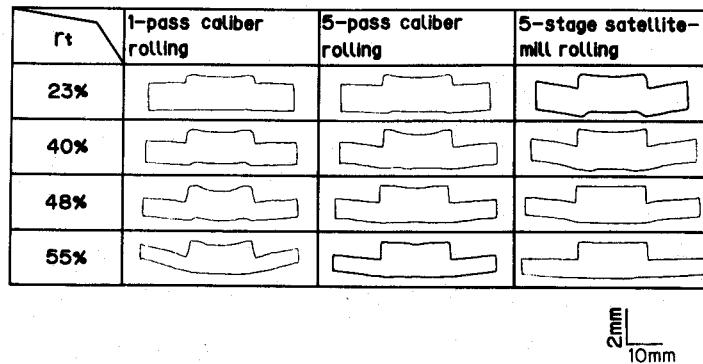


図8.8 各圧延方法における製品の横断面プロフィールに及ぼす全圧下率の影響

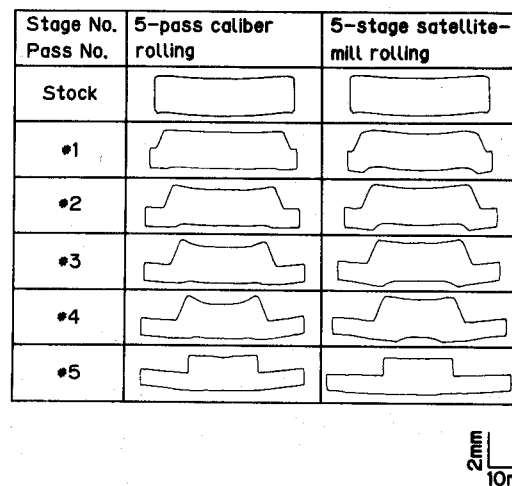


図8.9 5 段サテライトミル圧延および5 パス

孔型圧延の横断面プロフィールの推移

にウェブ部での減肉や反りが大きくなり、段差部の側面も欠肉により傾斜している。5 パス孔型圧延材では1 パス孔型圧延材に比べて形状はよいが、全圧下率 55% でもウェブ部の中央部に欠肉が生じている。5 段サテライトミル圧延材では、全圧下率が低い場合は、形状がよくないが全圧下率が 55% の場合は、欠肉も反りもまったくない良好な形状となることがわかる。図8.9は、全圧下率 55% の5 パス孔型圧延および5 段サテライトミル圧延の圧延途中の断面プロフィールの変化を各パスまたは各段毎に見たものである。5 段サテライトミル圧延は、特に中流の段において孔型への充満性にすぐれ、ウェブ部の中央部の減肉が少なく良好な断面プロフィールとなることがわかる。

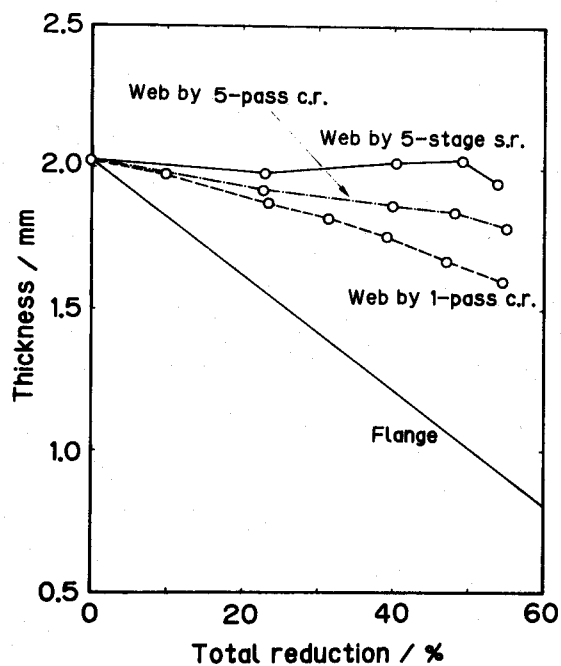


図8.10 各圧延方法における板厚減少に
及ぼす全圧下率の影響

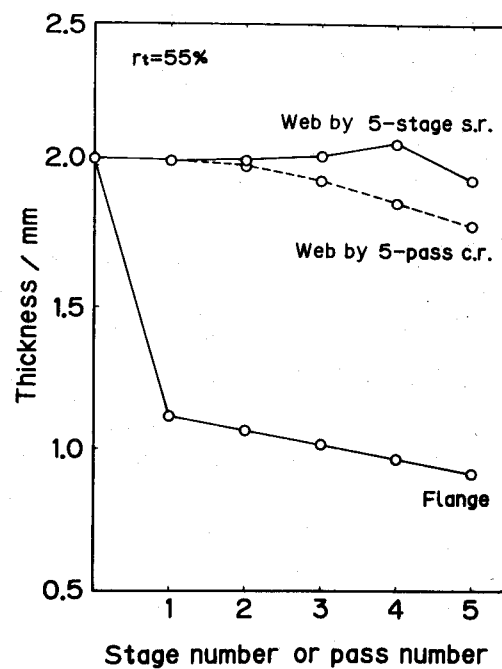


図8.11 5段サテライトミル圧延および
5パス孔型圧延の板厚の推移

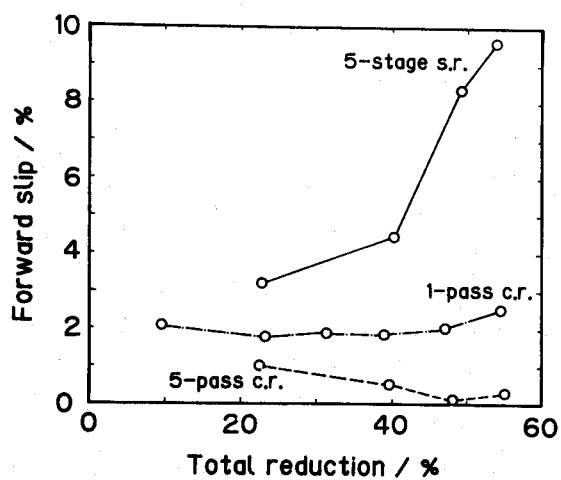


図8.12 各圧延方法における先進率に
及ぼす全圧下率の影響

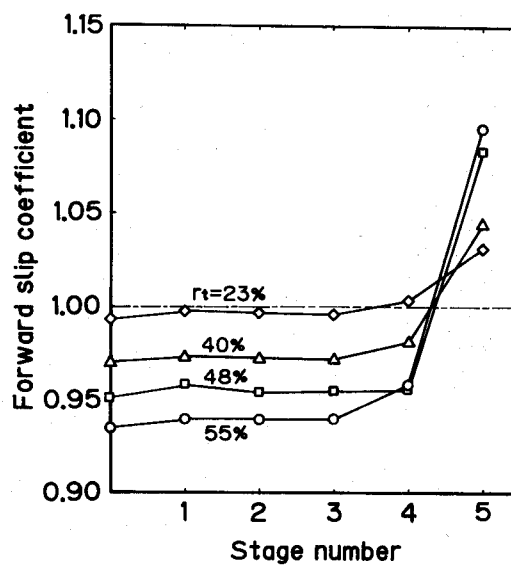


図8.13 5段サテライトミル圧延中の
先進係数の推移

各圧延方法のウェブ部中央部の板厚に及ぼす全圧下率の影響を図8.10に示す。5段サテライトミル圧延では他の圧延方法に比べて板厚減少（減肉）が著しく抑制されている。また、1パス孔型圧延ならびに5パス孔型圧延では圧下率の増加とともに減肉は大きくなるのに対して5段サテライトミル圧延では全圧下率30%以上ではわずかに板厚増加（増肉）が生じている。全圧下率48%以上では材料は孔型に完全に充満しウェブ部が圧延され板厚が減少している。また図8.11は全圧下率 $r_t = 55\%$ についてウェブ中央部の板厚変化を見たものである。5パス孔型圧延では圧延の進行とともに板厚が減少しているのに対して、5段サテライトミルでは2段目から板厚が増加に転じ、4段目で孔型へ充満し5段目ではウェブ部とフランジ部が同時に圧延されていることがわかる。

8・3・3 先進特性

各圧延方法におけるミルの出口または最終パスでの先進率に及ぼす全圧下率の影響を図8.12に示す。先進率は5パス孔型圧延で最も小さく、5段サテライトミル圧延で最も大きい。また5段サテライトミル圧延では圧下率とともに急激に増加しており、圧下率とともに長手方向の圧縮力が増加し、5段目の後方圧縮力が増加するためであると考えられる。図8.13に5段サテライトミル圧延における先進係数の推移を示す。中立点は全圧下率 $r_t = 23\%$ のとき4段目に、40%以上では5段目に存在している。先進係数は4段目まではほぼ一定であり出口側が自由な5段目で急増することがわかる。

8・3・4 負荷特性

図8.14に5段サテライトミルおよび5パス孔型圧延の各段または各パスの衛星ロールの圧下力の分布を示す。今回実験を行ったパススケジュールではどちらの方法においても下流ほど圧下力は増加している。これは下流側ほど接触面積が増加し、材料は加工硬化し、フランジ部による幅方向の拘束が大きくなるためである。また、5段サテライトミル圧延の4、5段目の圧下力は全圧下率55%では5パス孔型圧延の約2倍に達しており、これは各段間で生じる圧延方向圧縮力によって圧延圧力が増加するためである。

5段サテライトミル圧延および1パス孔型圧延での比エネルギーに及ぼす全圧下

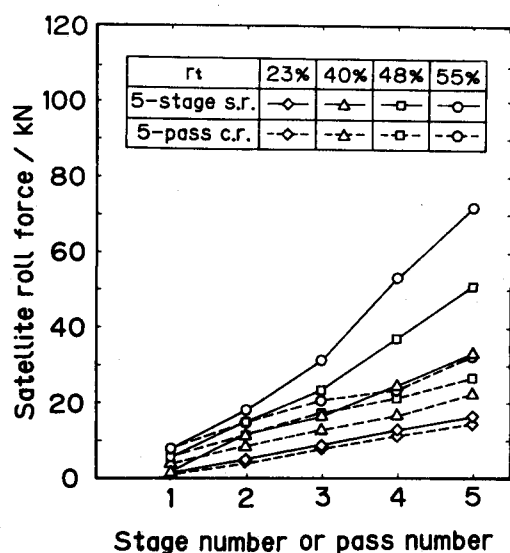


図8.14 5段サテライトミル圧延および
5パス孔型圧延の衛星ロールの
圧下力分布

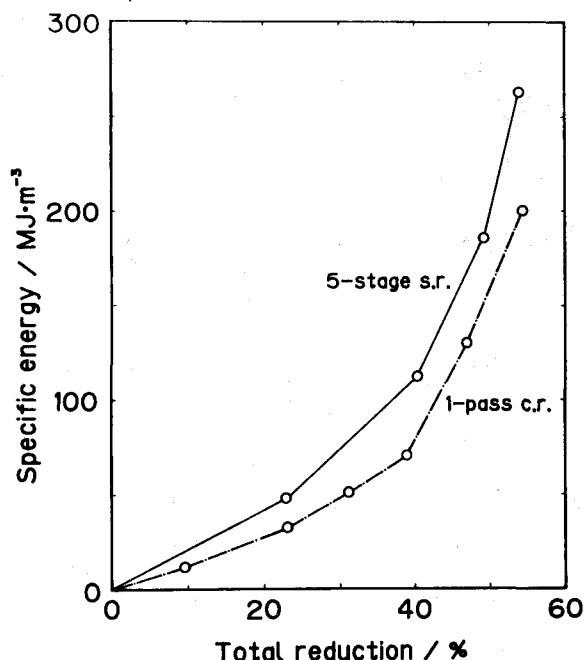


図8.15 比エネルギーに及ぼす
全圧下率の影響

率の影響を図8.15に示す。比エネルギーは5段サテライトミル圧延、1パス孔型圧延とも同様な傾向を示しているが、5段サテライトミル圧延の方が約30%大きい。この差は5段サテライトミル圧延における幅方向への大きなメタルフローに基づく塑性仕事の増加およびロール・材料・ガイドシュー間での摩擦仕事の増加によるものと考えられる。

8・4 孔型中心ロール法と孔型衛星ロール法の比較

前章（第7章）で示した孔型中心ロール法および本章で示した孔型衛星ロール法の5段サテライトミル圧延における幅広がり及び全圧下率の影響を図8.16に示す。幅広がりについては、両方法とも同様の傾向を示している。図8.17は同様に延伸率に及ぼす圧下率の影響を見たものである。孔型衛星ロール法の方が孔型中心ロール法に比べて延伸の抑制効果が大きいことがわかる。幅広がりにはあまり差がないことから、この差は孔型への充満性が孔型衛星ロール法の方が優れていることを意味しており、製品の横断面プロフィール（図7.11および図8.8）とも対応している。この理由は孔型衛星ロール法では板端から徐々に圧下幅が広げられるのに対し、孔型

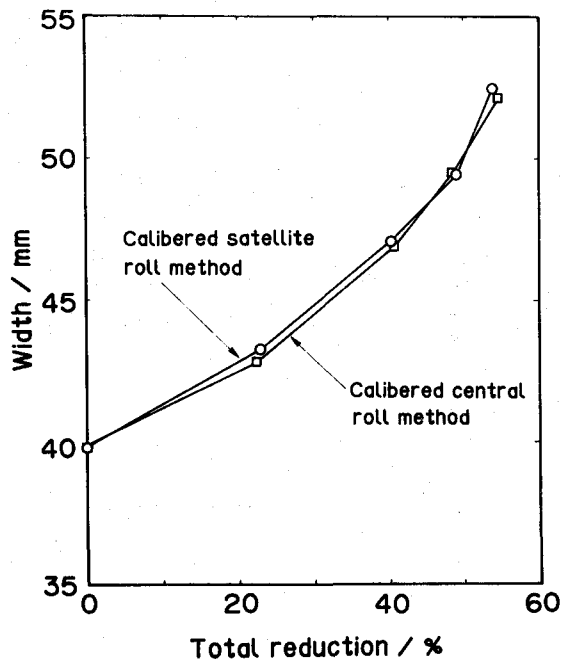


図8.16 幅広がり及ぼす
全圧下率の影響

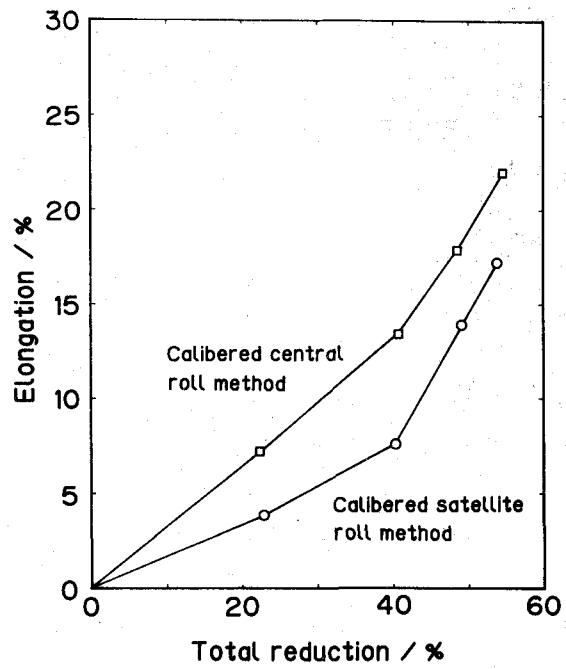


図8.17 延伸率に及ぼす
全圧下率の影響

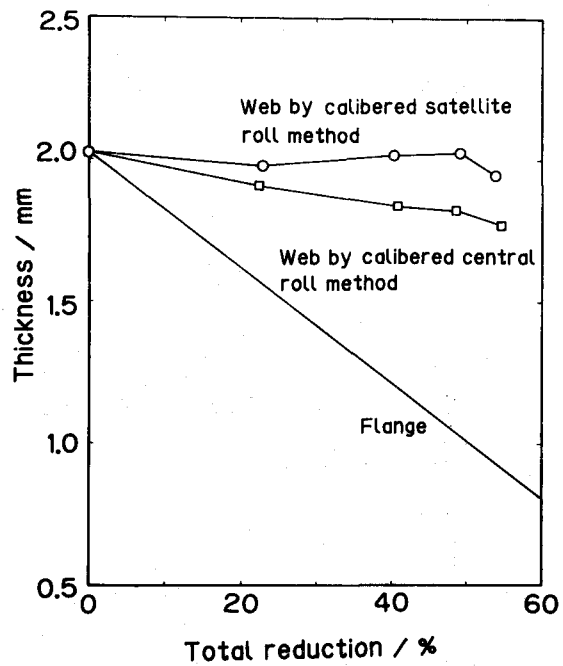


図8.18 板厚減少に及ぼす
全圧下率の影響

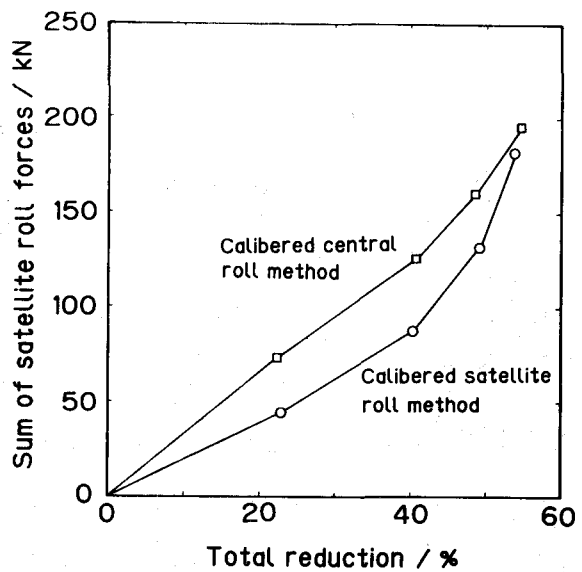


図8.19 衛星ロールの圧下力の和に
及ぼす全圧下率の影響

中心ロール法では製品の薄肉部全体がロールに接触しているため、横断面内のメタルフローが生じにくいためと考えられる。図8.18にウェブ部中央部の板厚の変化に及ぼす影響を示す。孔型衛星ロール法の方が板厚の減少が少ない。また孔型中心ロール法では圧下率とともに板厚の減少量は増加するが、孔型衛星ロール法ではわずかに板厚の増加を生じることがわかる。

図8.19は衛星ロールの圧下力の和を比較したものである。圧下力は孔型中心ロール法の方が大きく、これは圧延中ロールとの接触箇所が同じであるので接触面積が大きいと考えられる。

以上のことから、孔型中心ロール法では孔型衛星ロール法に比べて、横断面内のメタルフローは少なく、圧下力は高いことがわかる。しかしながら孔型中心ロール法では衛星ロールとガイドシューは製品の断面形状ごとに交換する必要がなく、また材料の突起部が中心ロールの孔型内にはまり込むので材料が蛇行しにくいなどの利点がある。したがって孔型中心ロール法に比べてアスペクト比や板厚比の小さい異形断面条の多品種の製造などに適しているものと考えられる。

8・5 結 言

孔型衛星ロール法を提案し、アルミニウム平条からT形異形断面条を成形する場合の圧延特性を調べ、孔型中心ロール法との比較検討を行い、以下の知見を得た。

(1) 5段サテライトミル圧延は同じ孔型を用いた通常の5パス孔型圧延に比べて、延伸が約1/2に抑制され、フランジ部の反りやウェブ部の減肉が少なく、孔型への充満性が極めて優れている。

(2) 5段サテライトミル圧延では4段目までは材料はほとんど延伸を生じない。また中立点は通常最終段に存在する。

(3) 5段サテライトミル圧延の4段、5段目の衛星ロール荷重は、全圧下率55%の場合、5パス孔型圧延の約2倍に達する。

(4) サテライトミル圧延の比エネルギーは1パス孔型圧延に比べて約30%大きい。

(5) 孔型衛星ロール法は孔型中心ロール法に比べて孔型への充満性に優れ、圧下力は小さい。

9. 孔型衛星ロール法による高板厚比異形断面条の圧延

9・1 緒 言

前章（第8章）では各衛星ロールに凹型ロールを用いた孔型衛星ロール法によって板厚 2mm、板幅 40mm のアルミニウム平条より板厚比（厚肉部板厚／薄肉部板厚）が最高約 2.2 の T 形異形断面条を製造し、その際の圧延特性について報告した。しかしながら、実用上は板厚比 3 程度の銅合金の異形断面条の需要が大きい。

そこで本章では板厚比が 3 程度の銅の T 形異形断面条の製造の可能性について検討した。製造方法は前報と同様の孔型衛星ロール法とし、素材平条の幅は銅の高い変形抵抗を考慮して 1/2 にスケールダウンし、各衛星ロールへの圧下力の均等配分と欠陥の防止を考慮した新しい孔型を設計した。この新しい孔型を用いて圧延実験を行ったところ、満足すべき結果が得られた。

9・2 装置および実験方法

図 9.1 に実験に用いた孔型衛星ロール法 5 段サテライトミルのロール・ガイドシュー・サイドガイドの配置を示す。新しく設計した衛星ロール孔型を図 9.2 に、孔型の仕様を図 9.3 に示す。前章では溝の減少幅、溝深さ、側面の傾斜角を一定としたが、本章では高板厚比の異形断面条を製造することを念頭におき、各衛星ロールにはそれぞれ異なった形状の台形溝が加工した。すなわち下流段ほど溝幅、溝深さが減少させ、側面の傾斜角 θ を増加させた。孔型の隅と角には疵の発生を防止するための適当な丸みをつけた。各衛星ロールの圧下力が均等になるように各段における排除断面積は下流段ほど減少する孔型とした。この孔型では素材平条の板厚が 2mm の場合、フランジ部の全圧下率 r_t が 65% で板厚比 3、側面傾斜角 80° の T 形異形断面条が成形される。

供試材として板厚 $h_0 = 1.99\text{mm}$ 、板幅 $w_0 = 19.9\text{mm}$ の市販の無酸素銅 1/4H 材の平条を用いた。圧延引張法および圧延で与えられた材料の硬さ試験によって求めた加工硬化特性を図 9.4 に示す。フランジ部（薄肉部）の全圧下率 r_t を 50, 60, 65% と変え、圧下配分は #2 ～ #5 の各段において板厚方向には 0.03mm ずつ

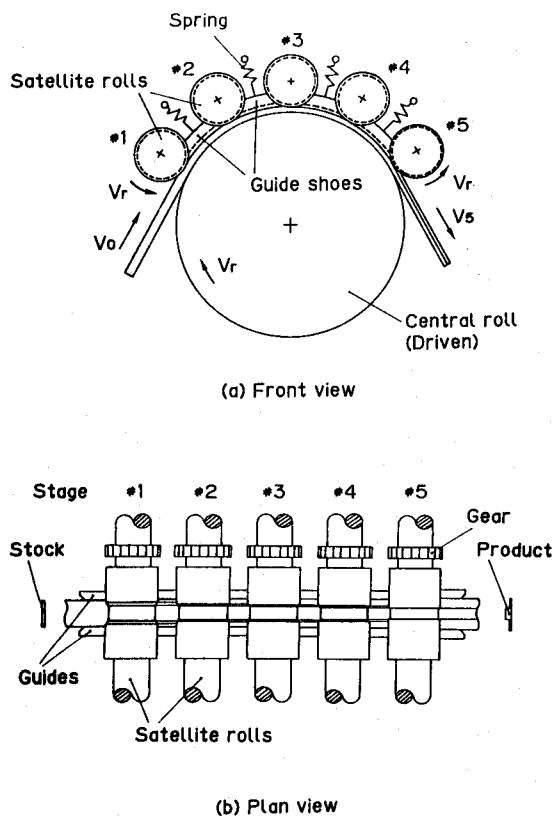


図9.1 5段サテライトミル圧延における
ロール配置（孔型衛星ロール法）

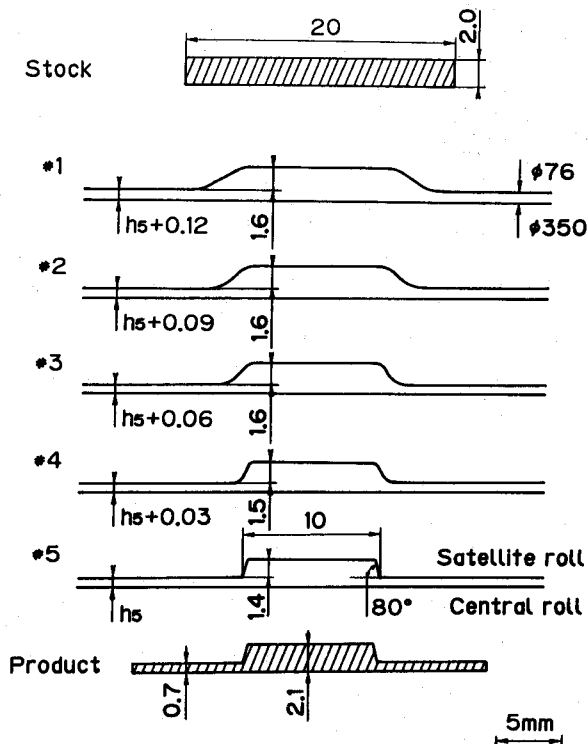
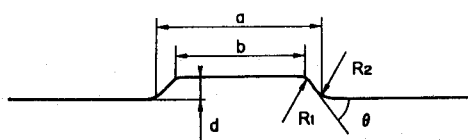


図9.2 用いたロール孔型



Stage	a/mm	b/mm	d/mm	θ/deg.	R1/mm	R2/mm
#1	16.93	11.39	1.6	30.0	2.0	3.0
#2	13.88	10.39	1.6	42.5	2.0	3.0
#3	12.13	9.89	1.6	55.0	1.0	2.0
#4	10.88	9.64	1.5	67.5	0.5	1.0
#5	10.00	9.51	1.4	80.0	0.2	0.2

図9.3 用いた衛星ロールの孔型の仕様

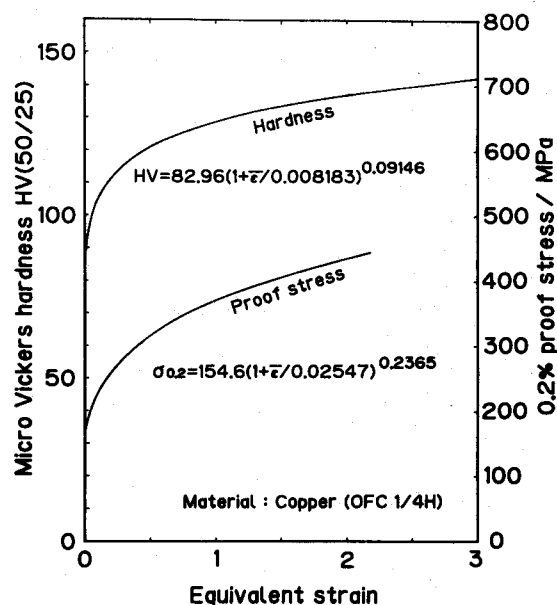


図9.4 供試材の加工硬化特性

圧下することとした。したがって i 段目通過後の板厚 h_i は次式で表される。

$$h_i = h_0(1 - r_t) + 0.03(5 - i) \quad (9.1)$$

潤滑剤としては非鉄用鋳油ベース圧延油を用いて、ロール周速 $V_r = 22.0 \text{ mm/s}$ で行った。なお、前・後方張力はいずれも付加しなかった。 $r_t = 65\%$ の場合については比較のため5パス孔型圧延を行った。

各段通過後の横断面内のビッカース硬さの分布を測定した。測定には新たに開発した硬さ分布測定システム¹⁾を用いた。さらに製品の横断面のマクロ組織を観察した。

9・3 実験結果および考察

9・3・1 変形特性

5段サテライトミル圧延(s.r.)および5パス孔型圧延(c.r.)の各段または各パスの板幅の推移を図9.5に、延伸率の推移を図9.6に示す。延伸率は5パス孔型圧延では圧延の進行とともに増加するのに対して、5段サテライトミル圧延では2～4段で延伸が著しく抑制される。幅広がりには上流段ほど大きい傾向がある。また5パス孔型圧延と比較すると上流段では5パス孔型圧延の方が幅広がりが大きく、下流段では逆に5段サテライトミル圧延の方が大きい。これは5段サテライトミル圧延では各段間で生じる長手方向の圧縮力が作用するため、孔型への充満性が優れているため、上流段では幅方向よりも孔型方向へのメタルフローが大きいと考えられる。

同様にウェブ中央部の板厚の推移を図9.7に示す。ウェブ中央部板厚は5パス孔型圧延では、圧延の進行とともに減少するのに対して、5段サテライトミル圧延では1段目で若干の減肉を生じるものの2段目以降は増肉に転じている。ただし $r_t = 65\%$ では最終段でウェブ部はロールに接触するため圧延されて減肉を生じている。

素材および $r_t = 65\%$ の場合の各段、各パス通過後の断面写真を図9.8に、拡大断面プロフィール(右半分)を図9.9に示す。5段サテライトミル圧延は孔型へのメタルフローが大きいと上流段(#2, #3)でウェブ部の中心ロール側に明瞭なひ

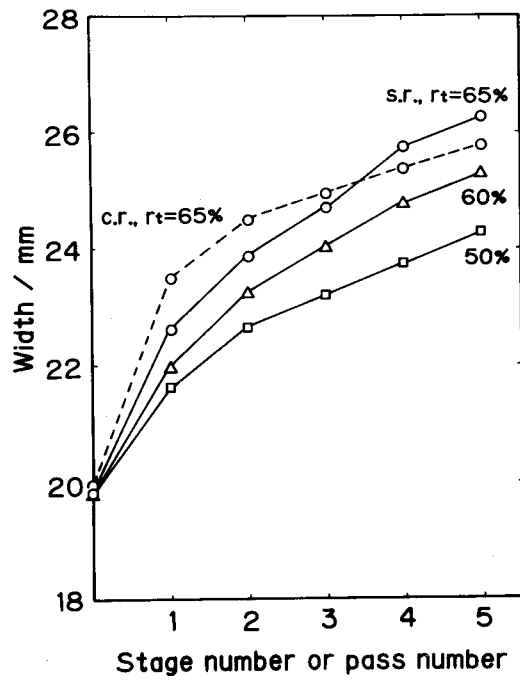


図9.5 幅広がりの推移

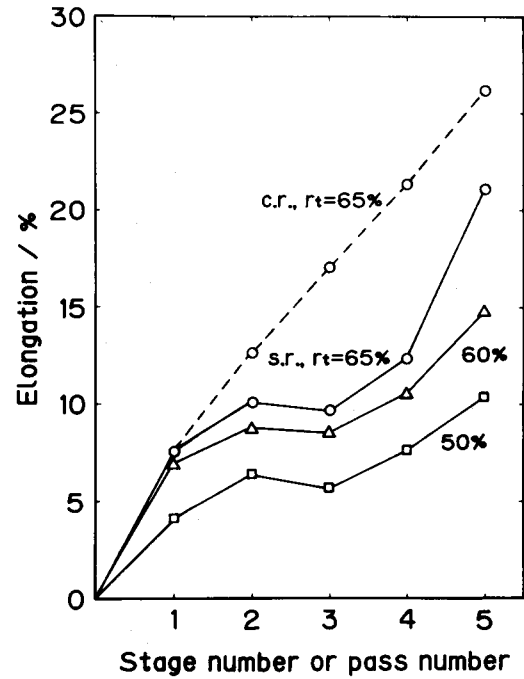


図9.6 延伸率の推移

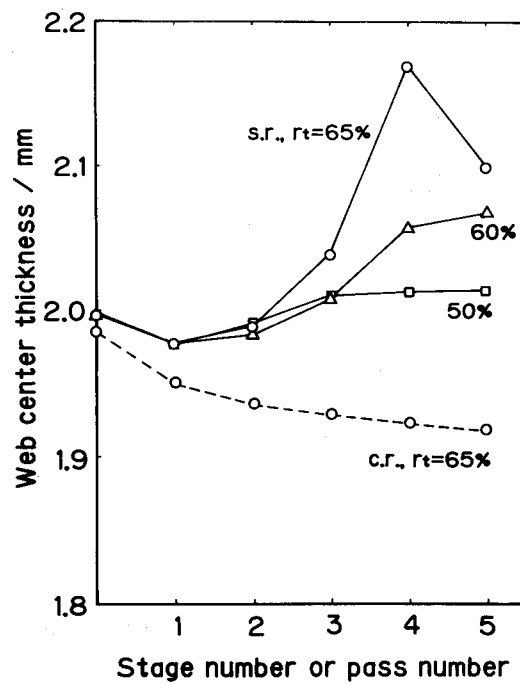
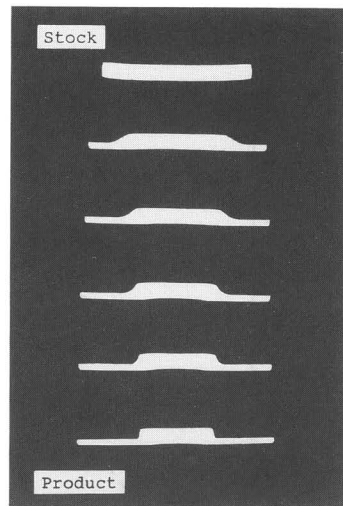
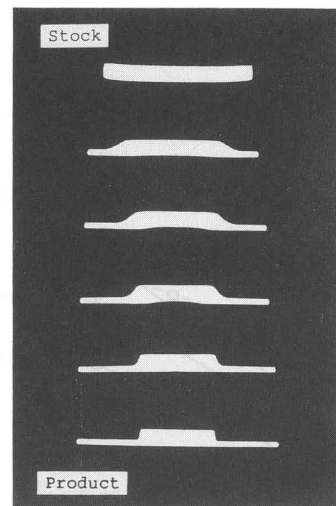


図9.7 ウェブ中央部の板厚の推移

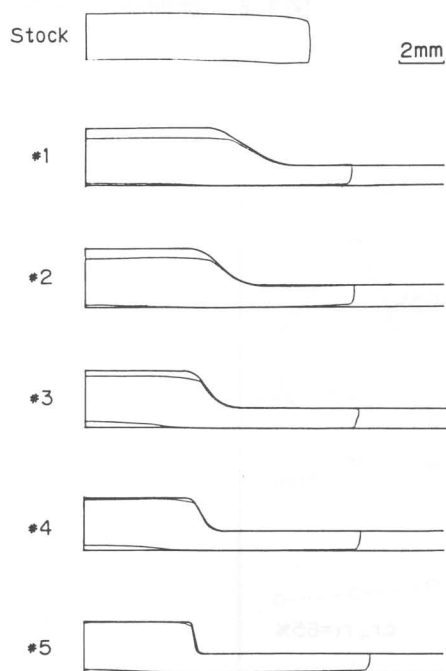


(a) 5 パス孔型圧延

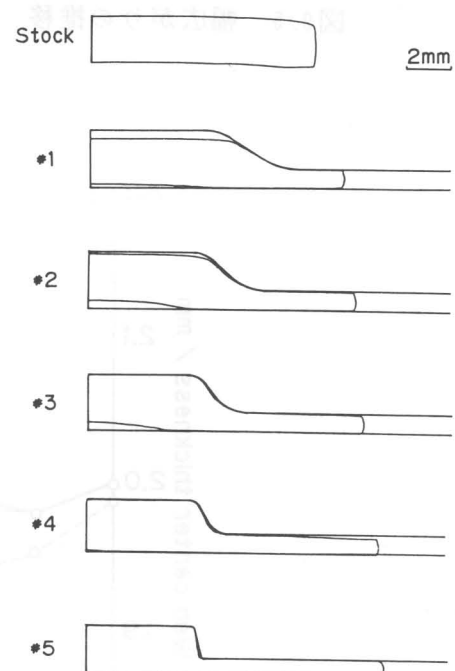


(b) 5 段サテライトミル圧延

図9.8 横断面の推移 ($r_t = 65\%$)



(a) 5 パス孔型圧延



(b) 5 段サテライトミル圧延

図9.9 横断面プロフィルの推移 (右半分, $r_t = 65\%$)

けを生じており、また衛星ロール側では孔型隅部への充満性がよく、5 段目通過後は孔型に完全に充満している。一方、5 パス孔型圧延では孔型への充満性が悪く、5 パス目通過後も孔型隅部およびウェブ部の中心ロール側に欠肉を生じていることがわかる。

9・3・2 先進特性

5 段サテライトミル圧延中の先進係数の推移を図9.10に示す。中立点は $r_t = 65\%$ の時のみ5 段目に、他の場合は4 段目に存在していることがわかる。また圧下率の増加とともに5 段目の先進係数は増加し、中立点は出口側に移動している。

9・3・3 負荷特性

5 段サテライトミル圧延の衛星ロールの圧下力分布を図9.11に示す。衛星ロールの圧下力は前章（第8章）の孔型では下流段ほど大きくなる顕著な不均一分布であったが、今回の新孔型ではほぼ均等な分布に改善された。また5 パス孔型圧延の圧下力は4 パス目で最小となるのに対し、5 段サテライトミル圧延の圧下力は4 段目で最高となるフリクションヒル状の分布を示している。これは5 段サテライトミル圧延では各衛星ロール間で圧縮力が生じるため圧延圧力が増加するためである。

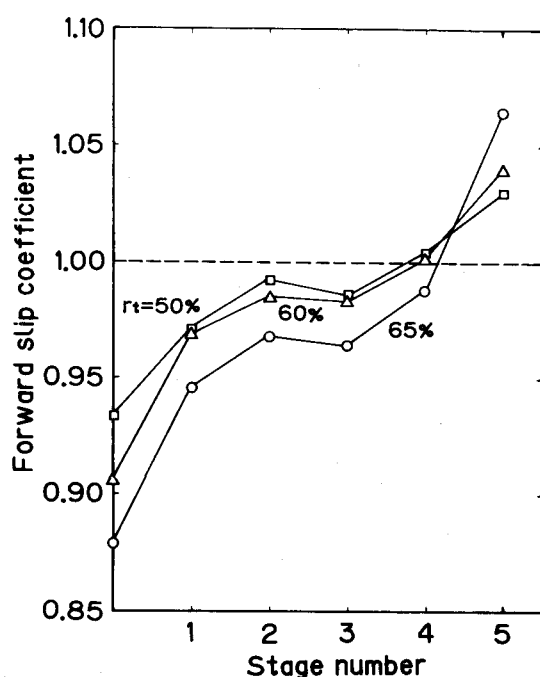


図9.10 先進係数の推移

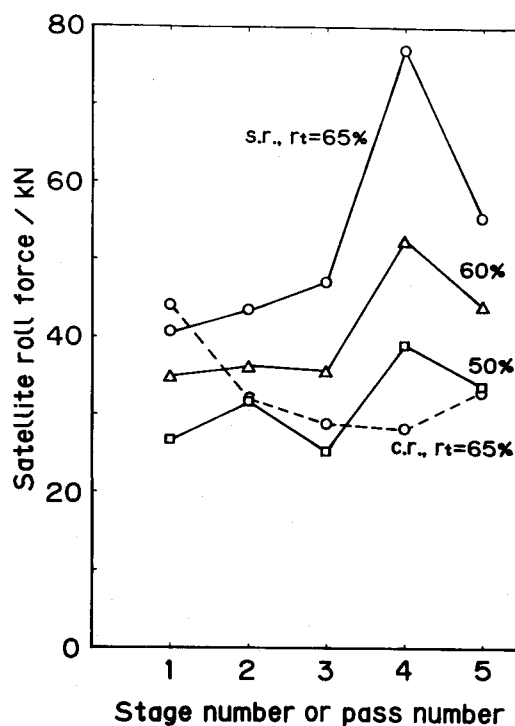


図9.11 衛星ロール圧下力の分布

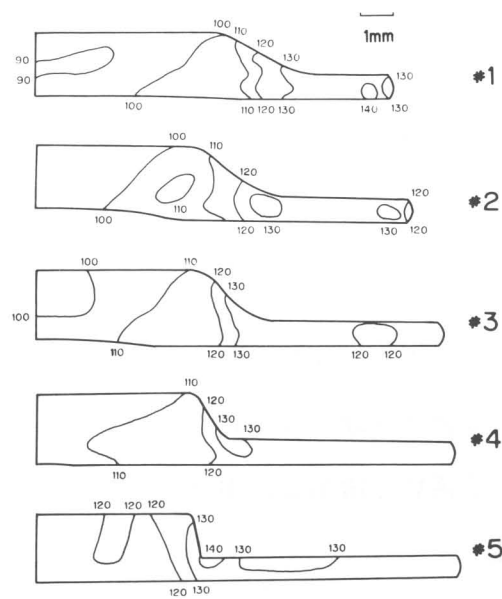


図9.12 硬さ分布の推移（右半分， $r_t = 65\%$ ）

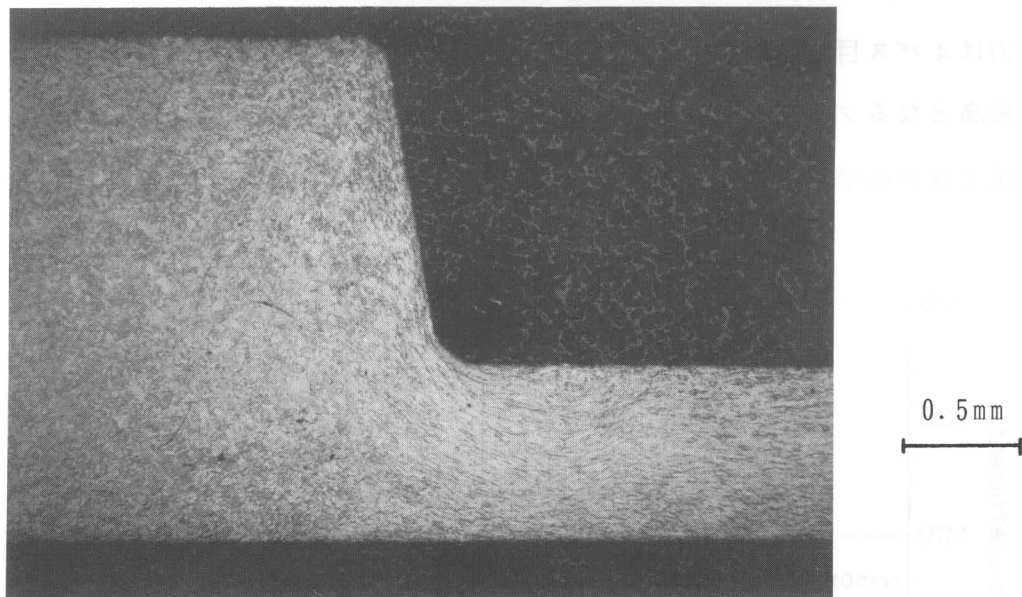


図9.13 製品段差部のマクロ組織

9・3・4 硬さ分布

$r_t = 65\%$ の5段サテライトミル圧延における横断面（右半分）内の硬さ分布の推移を図9.12に示す．横断面内の硬さ分布はウェブ部，フランジ部ではそれぞれほぼ一様であり，ウェブ部も硬化している．段差部の近傍では急激な硬さの変化が存在し，段差部とフランジ部との境界の隅部付近に硬さのピークが存在する．

9・3・5 マクロ組織

段差部のメタルフローを観察したマクロ組織を図9.13に示す。段差部直近のフランジ部には最終段でメタルが押し込まれており，そのために大きな変形を受け顕著なグレनフローが観察される。この位置と硬さのピークの位置（図9.12）はよく一致している。またこの部分ではメタルが押し込まれるため表面欠陥が発生し易く孔型設計上特に注意する必要があると考えられる。

9・4 結 言

サテライトミルにより高板厚比のT形異形断面条を成形圧延するための新たな孔型を考案し，これを用いて厚さ 2mm，幅 20mm の銅平条よりフランジ部厚 0.7mm，ウェブ部厚 2.1mm（板厚比3），板幅 26.3mm のT形異形断面条を製造し，以下の知見を得た。

(1) 新しい孔型を用いたサテライトミル圧延は同じ孔型の5パス孔型圧延に比べて2～4段目で延伸が抑制され，ウェブ部の増肉が生じやすく孔型への充満性が優れている。

(2) 新しい孔型では材料の横断面内硬さ分布はウェブ部，フランジ部でそれぞれほぼ一様である。段差部近傍では急激な硬さの変化が存在し，段差部とフランジ部との境界の隅部付近に硬さのピークが存在する。この部分には顕著なグレンフローが観察される。

参考文献

- 1) 宇都宮 裕：日本塑性加工学会関西支部 第2回塑性加工講習会テキスト，1992，36.

10. 孔型衛星ロール法による広幅高板厚比異形断面条の圧延

10・1 緒言

前章（第9章）では各衛星ロールに凹型ロールを用いた孔型衛星ロール法によって板厚 2mm、板幅 20mm の銅平条より板厚比（厚肉部板厚／薄肉部板厚）が約 3 の銅の T 形異形断面条を製造可能な孔型を開発し、その際の圧延特性について報告した。しかしながら、実用上はパワートランジスタ用として板厚比が 3 程度で板幅が 50mm 以上の異形断面条の需要が大きい。

そこで前章で提案した孔型を改良し、さらに横断面内のメタルフローを促進し、圧下力を低減することによって、板厚比が 3 以上、板幅が 50mm 以上の T 形異形断面条を製造できる新しい孔型を開発し、アルミニウム平条によるモデル圧延によって新圧延法における圧延特性と製品特性を調べた。

10・2 装置および実験方法

図10.1に実験に用いたサテライトミルのロール配置および T 形異形断面条の製造原理を示す。新しく設計した衛星ロール孔型を図10.2に、その孔型の仕様を図10.3に示す。各衛星ロールには製品の薄肉部（フランジ部）を成形する左右一対の突起が加工されていて、下流に行くほど突起の幅が広がっている。左右の突起の間の溝で製品の厚肉部（ウェブ部）が成形されるが、下流に行くほど溝の幅と深さは減少し、溝側面の傾斜角 θ_2 は増加し、最終段で溝幅 20mm、深さ 1.4mm、傾斜角 80° となっている。突起の外側面の傾斜角 θ_1 は一定（ 30° ）とした。孔型の隅と角には欠陥の発生を防止するための適当な丸みをつけた。材料は1段目で2本の溝が加工され、下流段に行くにしたがって溝幅が広げられ、最終段で板の両端に残った厚肉部が圧下されて T 形の断面に成形される。この孔型を用いて板厚 2.1mm 以上の素材平条を図10.2に示したパススケジュールで圧延すれば板厚比 3 の T 形異形断面条が成形される。

供試材として板厚 2.46mm の市販の純アルミニウム焼鈍板 (A1050P-0) を板幅 36, 38, 40mm にスリットしたコイルを用いた。供試材の加工硬化特性を図10.4に示す。

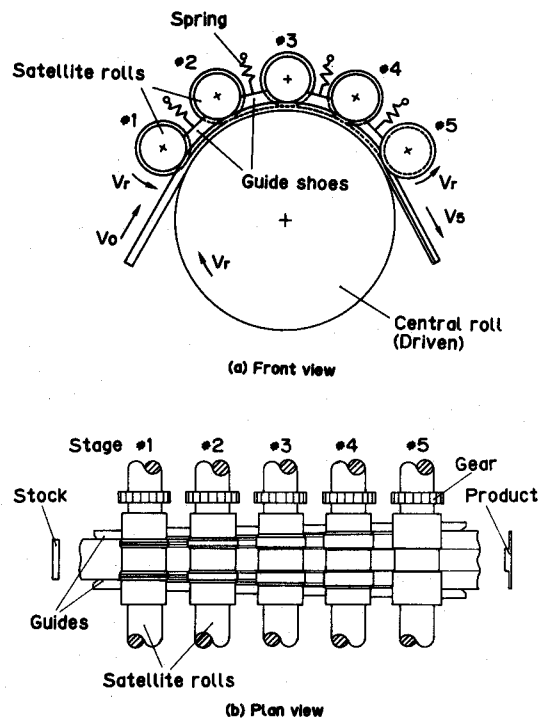


図10.1 5段サテライトミル圧延における
ロール配置

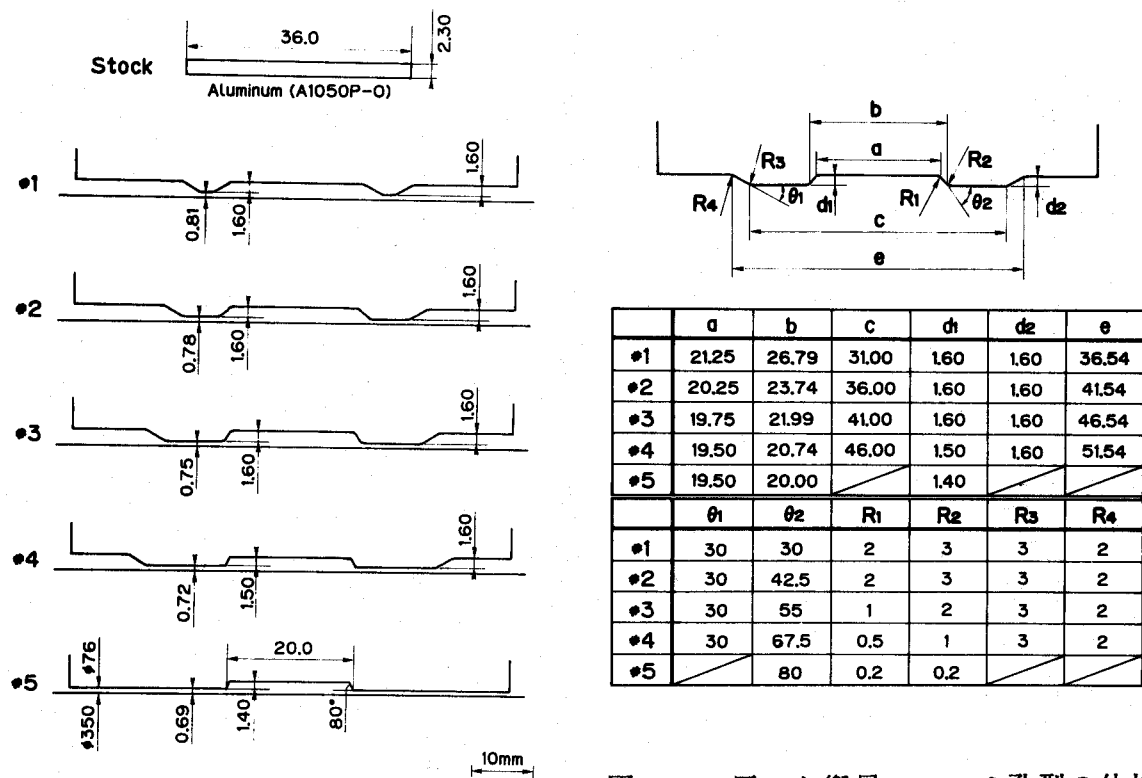
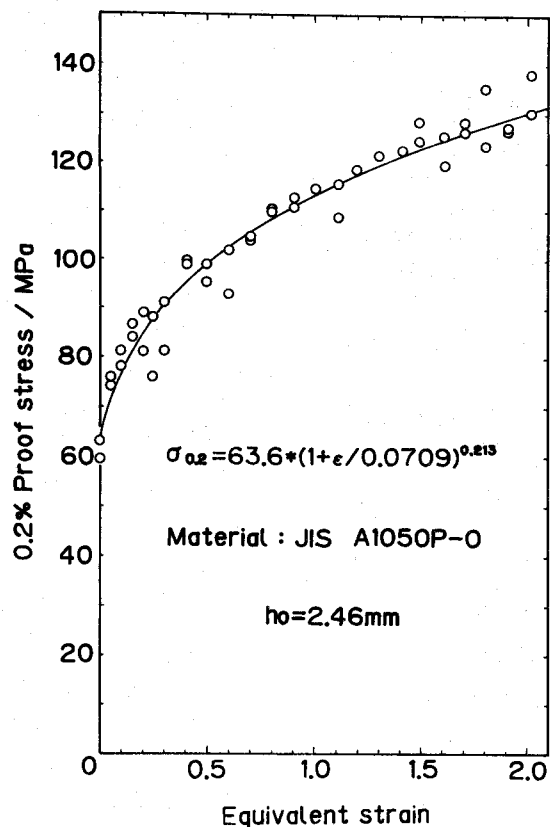
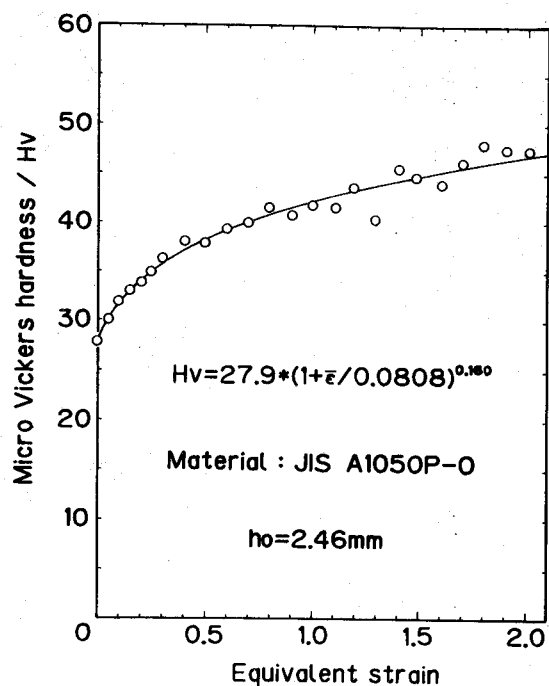


図10.2 用いたロール孔型

図10.3 用いた衛星ロールの孔型の仕様



(a) 0.2%耐力－相当ひずみ曲線



(b) ビッカース硬さ－相当ひずみ曲線

図10.4 供試材の加工硬化特性

供試材をロール径 100mm の同径平圧延によって板厚 2.2, 2.3, 2.4, 2.45mm に予成形して用いた。パススケジュールは図10.2のように#2～#5の各段での薄肉部の圧下量を 0.03mm 一定として、フランジ部の平条からの全圧下率 r_t を 55, 60, 65, 70, 75% と変化させた。潤滑剤として非鉄用鋳油ベース圧延油を用いて、ロール周速 $V_r = 22.0\text{mm/s}$ で実験を行った。定常圧延に達した後、噛み止めを行った。なお比較のため5パス孔型圧延を行った。

10・3 実験結果

10・3・1 素材最適寸法

図10.3の孔型に対して最適な素材寸法を決定するために、フランジ部の全圧下率 r_t を 70% 一定として、素材平条の板厚、板幅を変えて成形実験を行った。その結果、板厚 2.3mm、板幅 36mm のとき最も良好な製品が得られた。板厚が 2.2mm で

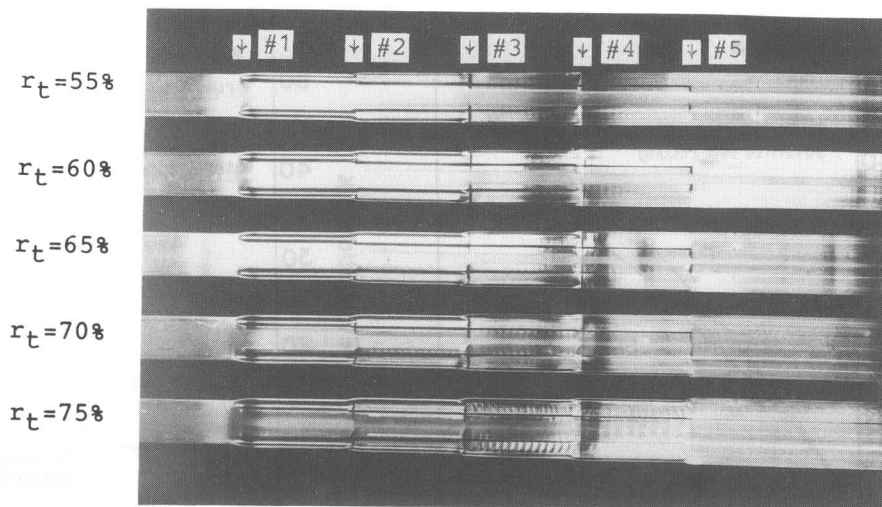


図10.5 5段サテライトミル圧延の噛み止めサンプル

はウェブ中央部が孔型に充填せず，2.4mm以上ではウェブ部に周期的なすり疵が生じた．また板幅38mm以上ではフランジ部両端部に周期的な座屈マークが生じた．そこで以下に寸法2.3×36mmの素条に対する実験結果を示す．

寸法2.3×36mmの素条の噛み止めサンプルの外観写真を図10.5に示す．全圧下率 r_t が60%以下ではウェブ中央部が未充填，75%以上では中流の段で薄肉部に座屈波が発生し，製品のフランジ部に周期的な模様が残留した．よって最適な圧下率は70%であると考えられる．

10・3・2 変形特性

5段サテライトミル圧延および5パス孔型圧延の各段または各パス毎の延伸率の推移を図10.6に，幅広がり率の推移を図10.7に示す．延伸率は5パス孔型圧延では圧延の進行とともに増加するのに対して，5段サテライトミル圧延では1～3段で特に延伸が抑制されている．幅広がり率は5段サテライトミル圧延の方が大きい，上流段での差は少なく最終段で差が広がっている．これはサテライトミル圧延では上流段で孔型へのメタルフローが，下流段で幅方向へのメタルフローが生じ易いことを意味している．

同様にウェブ中央部の板厚の推移を図10.8に示す．ウェブ中央部板厚は5パス孔型圧延では，圧延の進行とともに減少するのに対して，5段サテライトミル圧延では1，2段目で若干の減肉を生じるものの板厚はほとんど変化せず，3段目に増肉

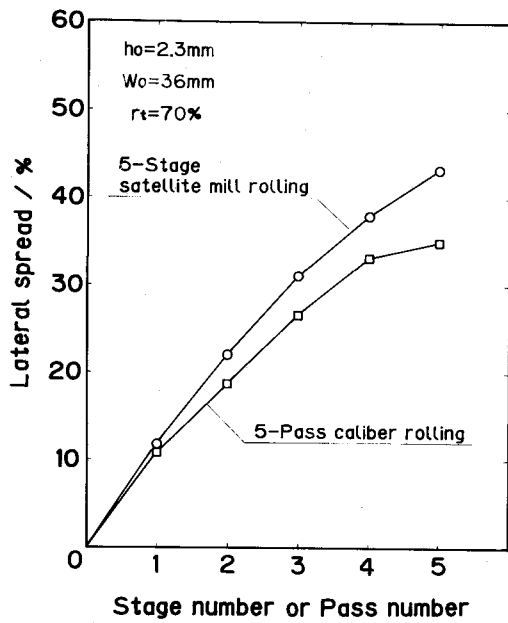


図10.6 幅広がりの推移 ($r_t = 70\%$)

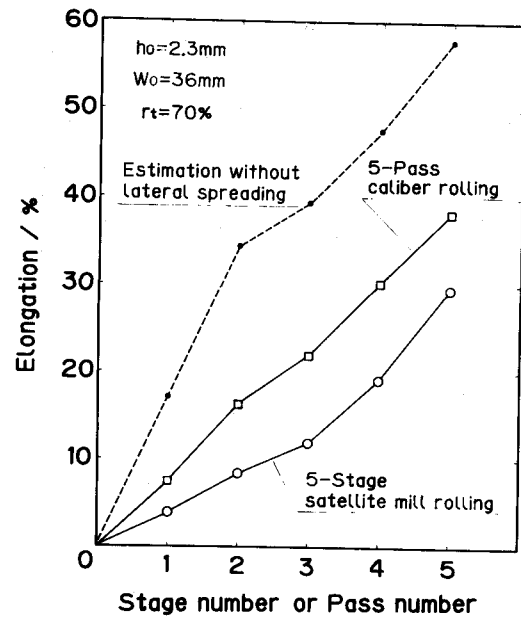


図10.7 延伸率の推移 ($r_t = 70\%$)

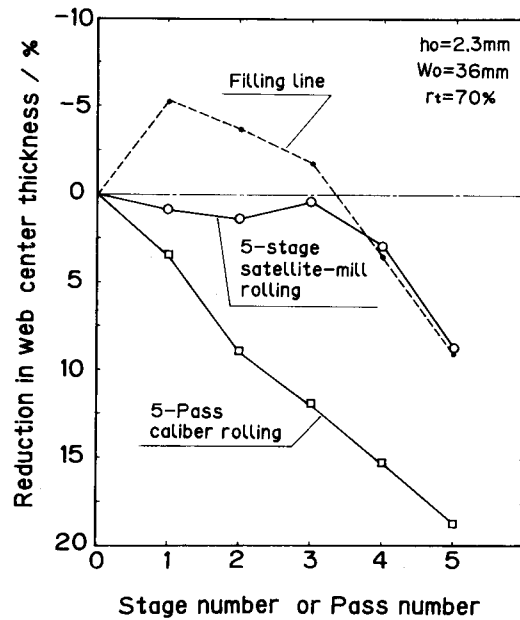


図10.8 ウェブ中央部の板厚減少率
の推移 ($r_t = 70\%$)

に転じて4段目に孔型に充満し、5段目では孔型によって圧下されている。

素材および $r_t = 70\%$ の場合の各段、各パス通過後の断面写真を図10.9に、製品の拡大断面プロフィール（半分）を図10.10に示す。5段サテライトミル圧延は孔型へのメタルフローが大きいいため孔型隅部への充満性が良く、5段目通過後は孔型に

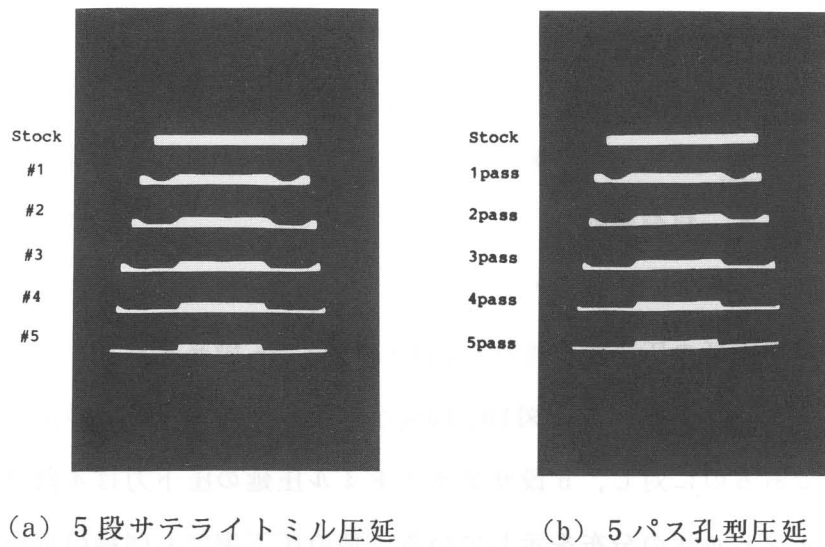
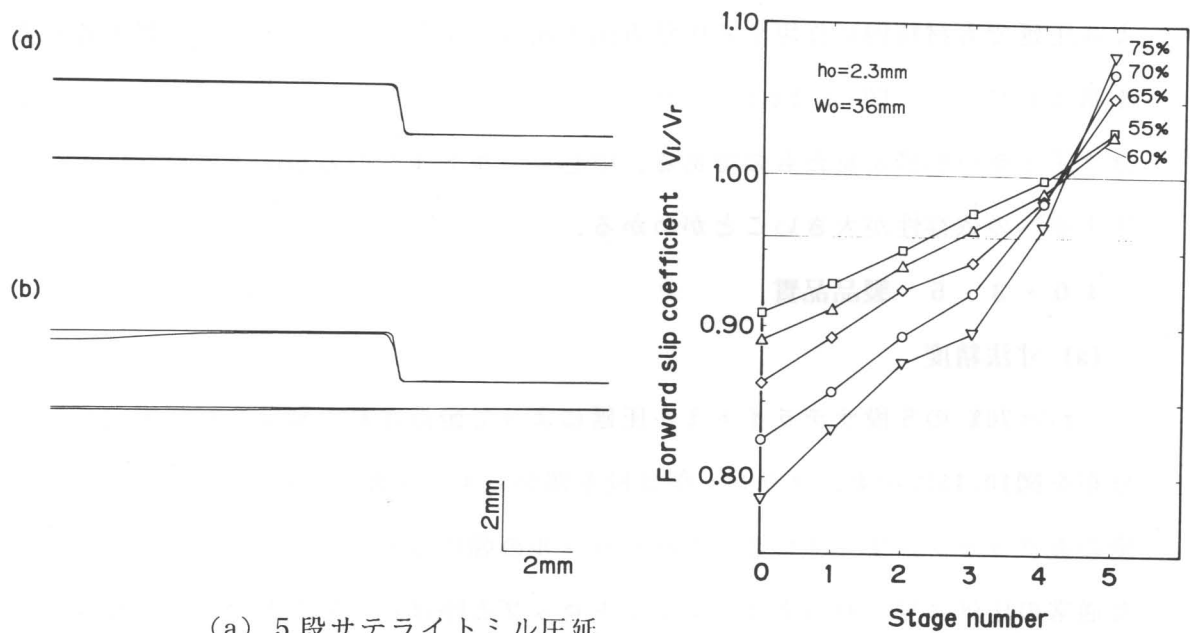


図10.9 横断面の推移 ($r_t=70\%$)



(a) 5 段サテライトミル圧延
(b) 5 パス孔型圧延
図10.10 製品の横断面プロフィール
(中央部右側, $r_t=70\%$)

図10.11 5 段サテライトミル圧延
における先進係数の推移

完全に充填している．一方，5 パス孔型圧延では孔型への充填性が悪く，5 パス目通過後も孔型隅部およびウェブ部の中心ロール側に欠肉を生じていることがわかる．

10・3・3 先進特性

5 段サテライトミル圧延の先進係数の推移を図10.11に示す．薄肉部の中立点は $r_t=55\sim75\%$ の全ての条件で5 段目に存在していることがわかる．図中の一点鎖線

はウェブ突起部表面の平均ロール周速を示す。突起部表面のロール周速を基準にした中立点は $r_t = 55, 60\%$ では3段目, $r_t = 65 \sim 75\%$ では4段目に存在し, 一般に圧下率が高いほど下流側に移動していることがわかる。

10・3・4 負荷特性

全圧下率 $r_t = 70\%$ の5段サテライトミル圧延の各衛星ロールの圧下力分布および5パス孔型圧延の圧下力の推移を図10.12に, 5段サテライトミル圧延の各衛星ロールにかかる圧下力分布を図10.13に示す。5パス孔型圧延の圧下力は各パスでほぼ均等であるのに対し, 5段サテライトミル圧延の圧下力は4段目で最高となるフリクションヒル状の分布を示している。他の圧下率でも同様の分布となるが, 圧下力が最高となる段と中立点の存在する段はおおむね一致する。これはサテライトミル圧延でも材料内に作用する圧延方向圧縮応力が中立点に向かって上昇することを暗示している。図10.14は中心ロールトルクおよび衛星ロールの圧下力の和に及ぼす圧下率の影響を見たものである。中心ロールトルクの方が圧下力の和に比べて圧下率への依存性が大きいことがわかる。

10・3・5 製品品質

(a) 寸法精度

$r_t = 70\%$ の5段サテライトミル圧延によって製造された製品の板幅方向の板厚分布を図10.15に示す。フランジ部は段差部からエッジ部にかけて 0.02mm , 3% 程度の板クラウンが生じている。これはロールの弾性変形によるものと思われる。また通常の圧延に見られるようなエッジドロップと呼ばれる幅端部での急激な板厚の減少は生じていない。これは4段目までに形成されたエッジ部の突起を最終段で圧下するためと考えられる。ウェブ部は中央部が $5\mu\text{m}$, 0.2% 程度薄くなっている。

(b) 硬さ分布

$r_t = 70\%$ で5段サテライトミル圧延した製品の横断面内の硬さ分布を図10.16に示す。硬さは段差部直近のフランジ部に最も高いピークがあり, エッジ部にもピークが存在している。またウェブ部の中央部が最も低く, フランジ部中央もやや低い値となっている。

(c) マクロ組織

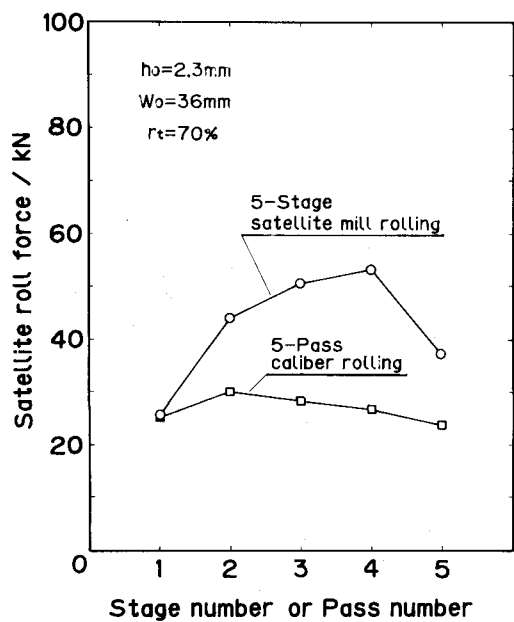


図10.12 衛星ロール圧下力の分布

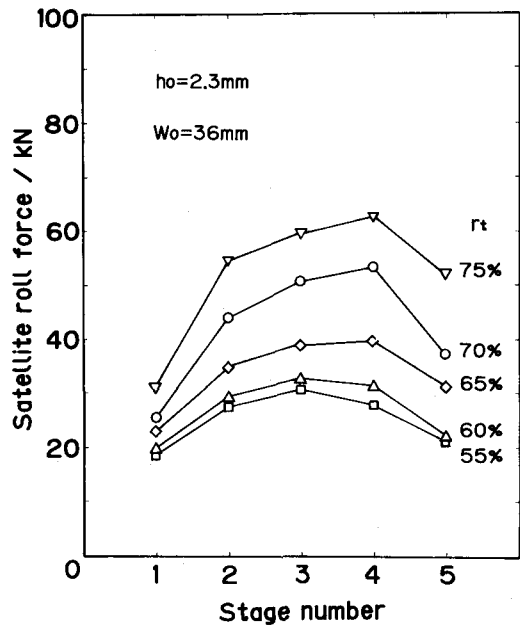


図10.13 5 段サテライトミル圧延の
衛星ロール圧下力の分布

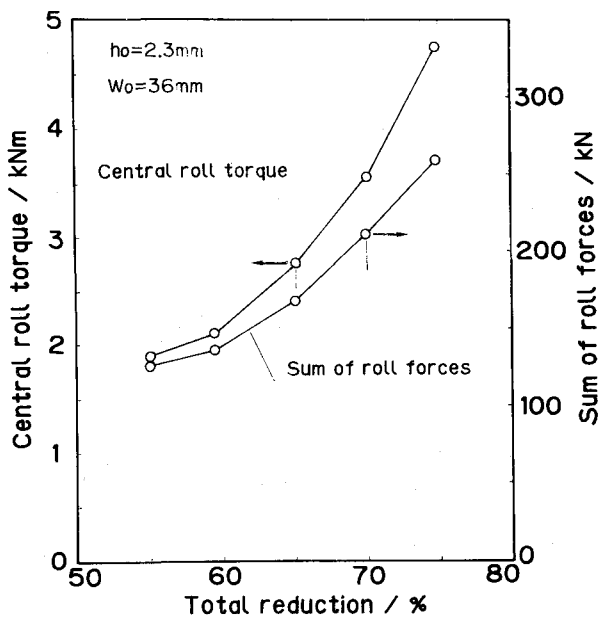


図10.14 中心ロールトルクおよび衛星ロールの
圧下力の和に及ぼす圧下率の影響

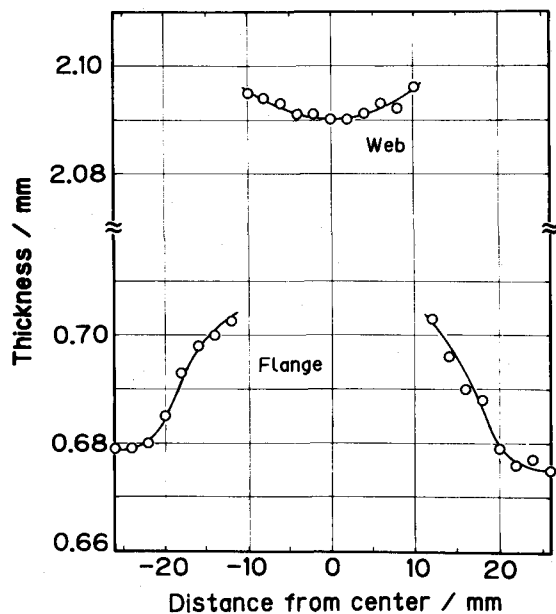


図10.15 板厚分布

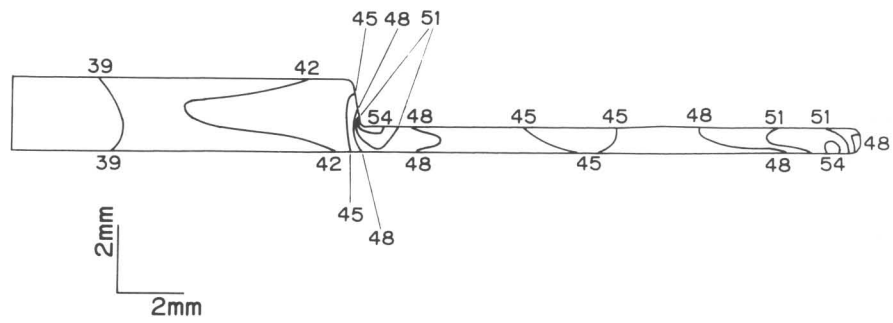


図10.16 製品の横断面内硬さ分布（右半分， $r_t = 70\%$ ）

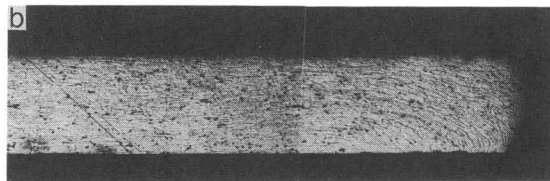
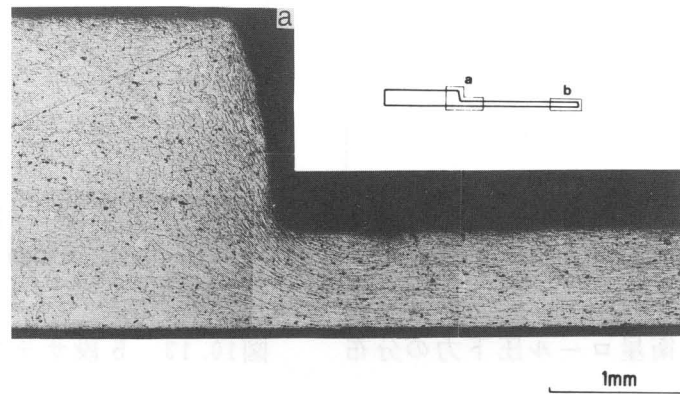


図10.17 段差部とエッジ部のマクロ組織

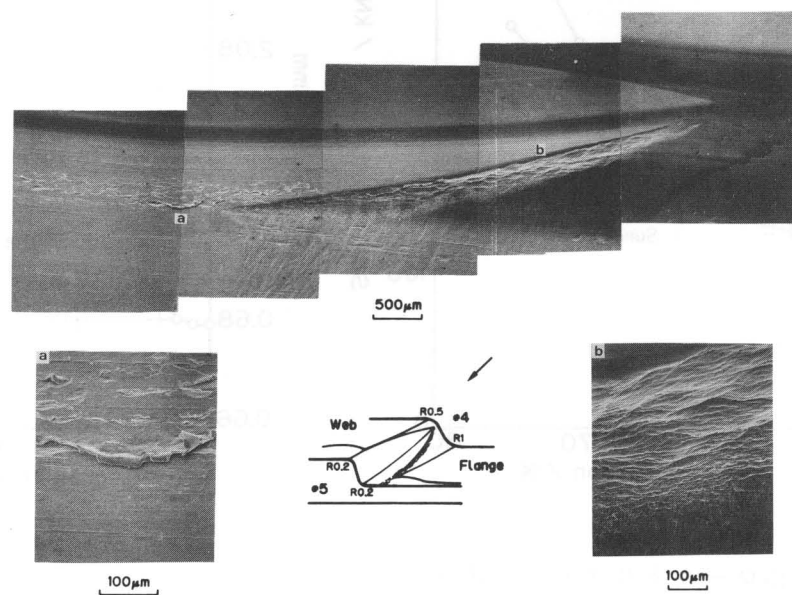


図10.18 ロールバイト表面のSEM写真

段差部とエッジ部のメタルフローを観察したマクロ組織を図10.17に示す。段差部直近のフランジ部は最終段でメタルが押し込まれておりそのために大きな変形を受け顕著なグレンフローが観察される。エッジ部では4段目までに形成された突起を最終段で圧下しているため顕著なグレンフローが生じている。これらのグレンフローの著しい位置と図10.16の硬さのピーク位置は良く一致している。

(d) 表面欠陥

図10.13-aの段差部直近のフランジ部表面にわずかながらかぶり疵が生じている。そこでこの部分の最終段のロールバイト内での表面をSEM観察した結果を図10.18に示す。4段目で成形された傾斜部が5段目で成形される際に自由表面に著しい肌荒れを生じ、ロールバイト出口付近でかぶり疵となっていることがわかる。

10・4 考 察

実験の結果、新たに提案した孔型を用いたサテライトミル圧延により板幅 52mm, フランジ部板厚 0.7mm で板厚比が 3 を超え、寸法精度が高いT形異形断面条の製造できることが明らかとなった。これは前章までに提案した孔型衛星ロール法では薄肉部全体を圧下するのに対し、本方法では左右の両突起部で圧下するため、部分圧下の効果が大いこと、および両端部の厚肉部はロールと接触しないため幅方向の拘束が少ないことによって横断面内のメタルフローが増加したためと考えられる。さらに本方法では圧下力も低く、比較的一様な分布となったが(図10.13), これは材料は各段の孔型の左右の突起部で圧下されるので、ロールと材料の接触面積が従来法に比べて小さいためと考えられる。以上のことから新たに提案した孔型は、変形特性および負荷特性の両面において従来の孔型よりも優れていることがわかる。

横断面内の硬さは下流段で圧下された部分、すなわち段差部直近のフランジ部およびエッジ部にピークを有する不均一分布を呈した。このピーク部付近には顕著なグレンフローが観察され、局所的に変形が集中し硬化したと思われる。したがって横断面内の硬さ分布が望ましくない場合には焼鈍が必要である。また段差部直近のフランジ部表面にわずかながらかぶり疵が発生した。この欠陥は本成形法の問題点であるが、原因が自由表面の肌荒れにあるので、孔型形状特に4段目の改良、素材

の結晶粒の微細化などの対策によって解決できると思われる。

10・5 結 言

孔型衛星ロール法サテライトミル圧延により板幅 52mm , フランジ部板厚 0.7mm で板厚比が 3 を超える健全な T 形異形断面条を製造可能な孔型を提案した。得られた知見は次の通りである。

(1) 同一条件の通常の孔型圧延法と比較してサテライトミル圧延では材料の延伸が抑制される。その結果、厚肉部での減肉が少なく孔型への充満性が極めて良い。ただし衛星ロールには 1 ～ 2 倍の圧下力が加わる。

(2) 断面内の大きなリダクションの加わる領域（段差部とエッジ部）には座屈波、周期的な模様やすり疵が発生しやすい。また段差部近くのフランジ部には自由表面の肌荒れによるかぶり疵が発生しやすい。

(3) 製品のフランジ部には 3 % 程度の板クラウンが生じるが、エッジドロップは生じない。

(4) 製品断面内の硬さ分布は下流段で圧下された部分、すなわち薄肉部の両端部にピークが存在する。これらの部分には顕著なグレनフローが観察される。

11. 一般化平面ひずみモデルによる異形断面条圧延の解析

11.1 緒言

孔型圧延では顕著な三次元変形を示すため解析が困難であり、これまでは実験的な検討が数多くなされてきた¹⁾。最近では計算機の発達にともなって三次元剛塑性有限要素法^{2,3)}やエネルギー法⁴⁾による解析が可能となり、変形シミュレーションが行われているが、異形断面条の圧延を対象とする場合、ロール形状および変形が複雑であり、精度の良い解析を行うためには多数の要素分割が必要とされ、プリ・ポスト処理、計算時間、記憶容量などの点で現時点では適用が困難であると考えられる。

そこで圧延前に圧延方向に垂直であった横断面は圧延中垂直を保つことを仮定し、その断面に対して二次元の剛塑性有限要素法を適用し解析を行う。このような擬二次元的な解析方法はこれまでに種々提案されている。例えば岡田ら⁵⁾は一般化平面ひずみ変形を拡張した解析方法を、辛ら⁶⁾は一般化平面ひずみ変形とエネルギー法を組み合わせた変形モード法を、木内ら⁷⁾は横断面内のメタルフローを一般化平面ひずみモデルで解析し、長手方向の平衡条件をスラブ法で満足させる複合数値解析法をそれぞれ提案している。

本章では実験によって得られた延伸を与えて、圧延方向に垂直な断面に対して圧延面内のせん断ひずみを考慮した拡張一般化平面ひずみ圧縮モデルを適用し、T形異形断面条のサテライトミル圧延のメタルフローの解析を行った。

11.2 解析方法

一方向にひずみを生じない変形は平面ひずみ変形であるが、それを一般化して一方向(z方向)のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ が一定である変形は一般化平面ひずみ変形とよばれる。さらに $\dot{\gamma}_{xz}$, $\dot{\gamma}_{yz}$ をそれぞれ、次のように近似して考慮する変形は拡張一般化平面ひずみ変形とよばれる⁸⁾。

$$\gamma_{xz} = u/d, \quad \gamma_{yz} = v/d \quad (11.1)$$

ただし, u : x 方向の速度成分, v : y 方向の速度成分

d : 接触長さ

解析にあたっては, サテライトミル圧延における変形を図11.1に示すような圧延面内のせん断ひずみ γ_{xz} を考慮した拡張一般化平面ひずみ変形での圧縮変形におきかえ, 次の汎関数を最小化することにより速度場を求める. 解析にはペナルティ法に基づく剛塑性有限要素シミュレータ"NASKA"⁹⁾を用いた.

$$\Phi = \int_V \int_0^{\dot{\bar{\epsilon}}} \bar{\sigma} d\dot{\bar{\epsilon}} dV + \int_{S_f} mk \Delta v dS + K \int \dot{\bar{\epsilon}}^2 - F_z w \quad (11.1)$$

ただし $\bar{\sigma}$ は相当応力, $\bar{\epsilon}$ は相当ひずみ, V は体積, m はせん断摩擦係数, k はせん断降伏応力, K はペナルティ定数, S_f は摩擦力の作用する表面, F_z は圧延方向の力, w は圧延方向の速度成分である. 圧延引張法によって求めた無酸素銅の構成式(図9.4)を用い, 図9.2および図9.3の孔型形状について解析した. 各段内を30~40 ステップに分割し, 変形の対称性から右半分について解析を行うこととし, 断面内を数百の要素に分割した. 解析にあたっては各段における長手方向ひずみとして実験値(図9.6)を与え, また各段の変形中の長手方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ は一定であると仮定した. 工具-材料間のせん断摩擦係数は $m=0.1$ とし, $r_t=65\%$ の場

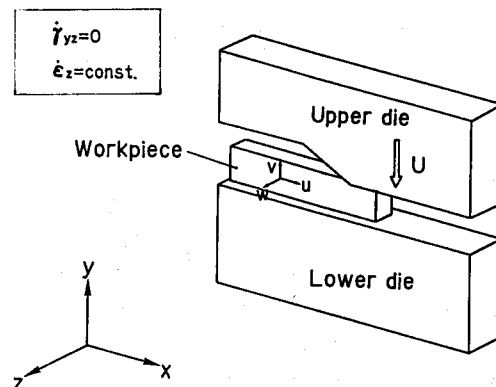


図11.1 拡張一般化平面ひずみ圧縮モデル

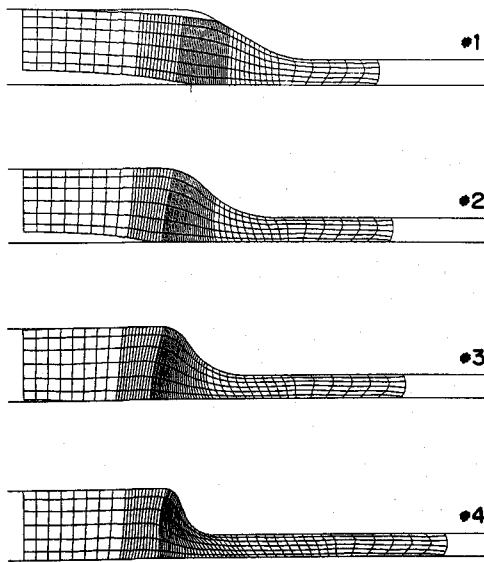


図11.2 格子の変形図（計算）

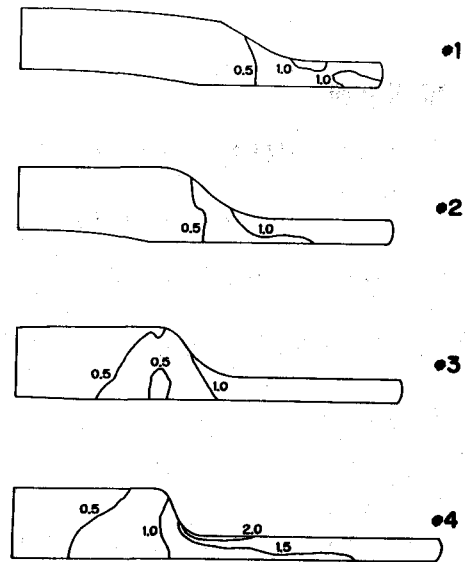


図11.3 相当ひずみの分布（計算）

合について計算を行ったが、5段目では要素が壊れた（凹形状となった）ので4段目までで計算を打ち切った。

11・3 解析結果および考察

得られた格子の変形図を図11.2に示す。横断面のプロフィールは実験結果（図9.9 b））とほぼ一致しているが、若干計算の方が孔型への充満が早い。格子の変形から特に下流段での傾斜段差部付近にせん断ひずみが集中していることがわかる。得られた相当ひずみ分布図を図11.3に示す。4段目通過後のウェブ、フランジ部は段差部付近を除いてそれぞれほぼ一様な分布であるが、段差部では相当ひずみは急激に変化しており、段差部とフランジとの境界の隅部付近に相当ひずみのピークが存在している。計算によって得られた相当ひずみ分布は実測した5段サテライトミル圧延の横断面内の硬さ分布（図9.12）とかなり対応していることがわかる。

11・4 結 言

サテライトミル圧延の横断面内のメタルフローは圧延面内のせん断ひずみを考慮

した拡張一般化平面ひずみモデルでかなり近似できる。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：棒線・形・管圧延，1991，コロナ社。
- 2) 森謙一郎・小坂田宏造：機論A，56-525（1990），268。
- 3) 柳本 潤・木内 学・柴田一良：43回塑加連講論，（1992），199。
- 4) 小森和武・加藤和典：塑性と加工，31-350（1990），357。
- 5) 岡田達夫・小坂田宏造・森謙一郎・古元秀昭：機論A，56-528（1990），173。
- 6) 辛 平・木原諄二・相澤龍彦：塑性と加工，32-361（1991），228。
- 7) 木内 学・柳本 潤：塑性と加工，30-336（1989），19。
- 8) 山田将之・山田建夫・小坂田宏造・岡田達夫：40回塑加連講論，（1989），385。
- 9) 豊島史郎・津田 統・森賀幹夫・前田恭志・松下富春：39回塑加連講論，（1988），347。

12. Y系酸化物シース材の平線圧延

12・1 緒 言

銀シース法による酸化物高温超伝導体の線材化プロセスに、丸線を平ロールで圧延してテープ状に成形する平線圧延（図12.1）が用いられている¹⁾。中実材の平線圧延についてはこれまでに多くの研究がなされている²⁾。しかしながら銀シース酸化物超伝導線材のように非塑性材料を金属で被覆した複合材料については、わずかに線材圧延³⁾やスウェーjing⁴⁾において変形挙動が報告されているのみで、平線圧延時の変形特性は明らかにされていない。

また、超伝導体の臨界電流密度 J_c を改善するためには、酸化物を圧密化すること、ペロブスカイト構造の底面と圧延面を平行に配向させること、圧延によって生じるシースとコア酸化物の界面の不均一性を減少させることなどが重要であると言われている^{5,6)}。したがって高い臨界電流密度 J_c を有する超伝導線材を製造するためには、相対密度・配向度・界面の不均一度と圧延条件の関係を明確にする必要がある。

そこで本章では、酸化物超伝導体の線材化プロセスにサテライトミル圧延を適用するのに先だって、 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 粉末をアルミニウムで被覆した複合材料をモデル材料に用いて、平線圧延時の圧延特性、酸化物の見かけ密度、シース材である金属とコア材である粉末の界面状態に及ぼす圧延条件の影響を調べた。

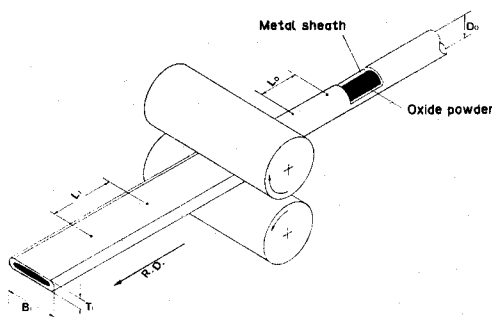


図12.1 酸化物シース材の平線圧延

表12.1 供試材の寸法とコアの見かけ密度，機械的性質

	外 径 D _o /mm	コア直径 D _i /mm	コアの見かけ 密度 ρ /g・cm ⁻³	0.2%耐力 /MPa	引張強さ /MPa	伸び /%
アルミニウム 被覆YBCO材	3.1	1.9	3.82	90	99	4.2
	4.0	2.3	3.79	73	89	4.4
	5.0	3.1	3.95	74	89	4.5
アルミニウム 中実材	3.0	—	—	39	77	55
	4.0	—	—	37	75	52
	5.0	—	—	35	75	55
(銀被覆YBCO材)	5.2	3.1	4.42	148	184	5.3

12・2 実験方法

市販の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 組成の混合粉を外径 12mm，内径 8mm のアルミニウム管に充填した後，引抜き加工によって縮径を行い供試材とした．また比較のためアルミニウム焼鈍材の中実線を用いた実験も行った．供試材の寸法，コアの見かけ密度および引張試験によって求めた機械的性質を表12.1に示す．

圧延はロール径 100mm の二段圧延機を使用し，ロール周速 167mm/s で行った．潤滑剤としては鉱油ベース圧延油を用いた．なお前・後方張力は付加しなかった．

パススケジュールは，パス回数の影響を調べるため，1パス圧下率 $r=30\%$ の5パス圧延（全圧下率 $R=83\%$ ）と1パス圧下率 $r=10\%$ の15パス圧延（全圧下率 $R=79\%$ ）の2種類とした．ここで全圧下率 R は次式で定義した．

$$R = 1 - (T/D_o) \quad (12.1)$$

ただし， D_o : 素線径， T : 板厚

各パスごとに幅広がり率，延伸率を測定した．

$$\text{幅広がり率} = (B/D_o) - 1 \quad (12.2)$$

$$\text{延伸率} = (L/L_o) - 1 \quad (12.3)$$

ただし、 B : 板幅

L_0 : 圧延前の標点間距離

L : 圧延後の標点間距離

また圧延材の横断面および板幅中央部の縦断面を観察した。さらにアルキメデス法によって酸化物の見かけ密度を測定し、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ の理論密度を 6.39g/cm^3 として相対密度を求めた。

12・3 実験結果

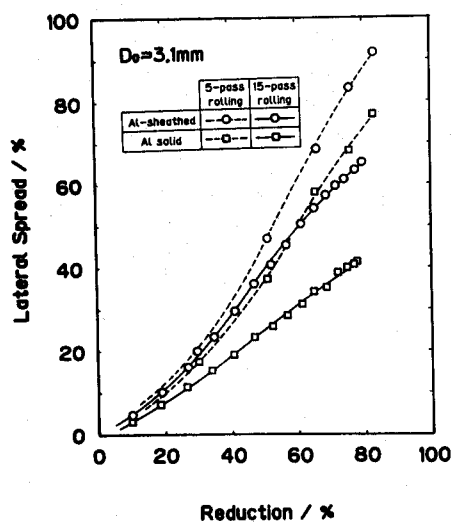
12・3・1 変形特性

図12.2に幅広がり率の推移を示す。幅広がり率は他の条件が同じであれば複合材（○印）の方が中実材（□印）より常に大きく、その差は同じ全圧下率に対するパス回数が多いほど大きいことが明らかである。しかし、幅広がり率の全圧下率に対する推移、同じ全圧下率に対する幅広がり率に及ぼすパス回数と素線径の影響は複合材と中実材で良く似た傾向を示す。すなわち同じ全圧下率に対するパス回数が少ないほど、また素線径が小さいほど幅広がり率の大きいこと、さらに幅広がり率に及ぼすパススケジュールの影響は素線径の大きいほど大きいことは複合材でも明瞭である。

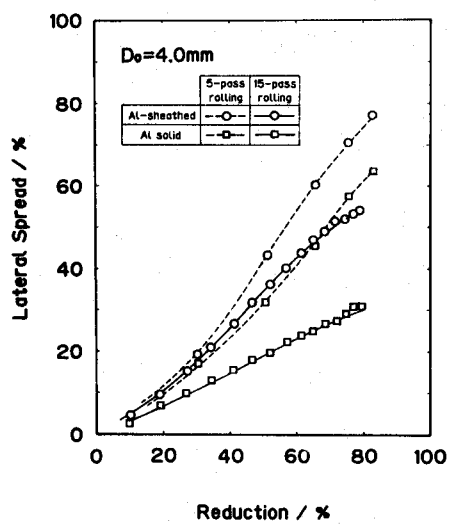
図12.3に延伸率の推移を示す。延伸率は幅広がり率と逆の関係となっており、複合材の方が中実材より常に小さく、また同じ全圧下率に対する延伸率はパス回数が少ないほど、素線径が小さいほど小さい。

図12.4に素線径 3.1 mm の複合材の横断面形状の変化を示す。圧延の進行とともに、外形は丸線からテープ状に成形されるが、コアの形状は圧延の進行とともにまゆ形から中央がややくびれた紡錘形へと変化しており、多パスで圧延するほどシースとコアの界面は滑らかで、コアの厚みも幅方向により均一になっている。

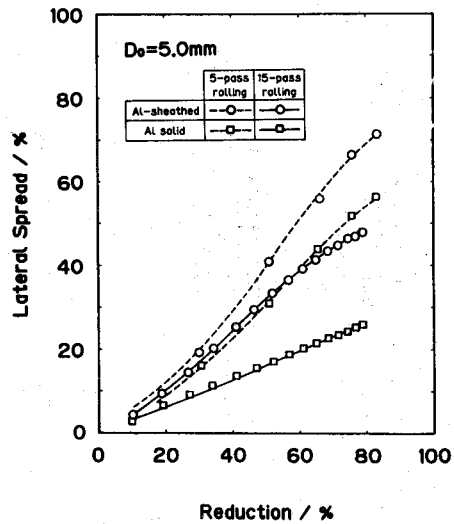
図12.5に素線径 3.1 mm の複合材の5パス圧延と15パス圧延の縦断面写真を示す。パス回数によらず全圧下率 60% 程度まではシースとコアの界面はほぼ平坦であるが、5パス圧延では4パス後（ $R=76\%$ ）の界面に周期的な波立ちが発生し、5パス後（ $R=83\%$ ）には波の振幅がかなり大きくなってコアの厚みが長手方向に大きく変



(a) $D_0 = 3.1\text{mm}$

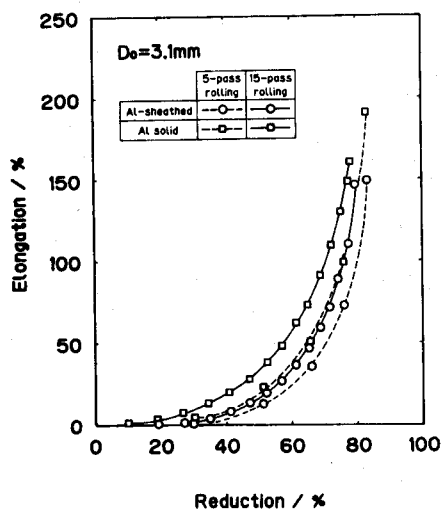


(b) $D_0 = 4.0\text{mm}$

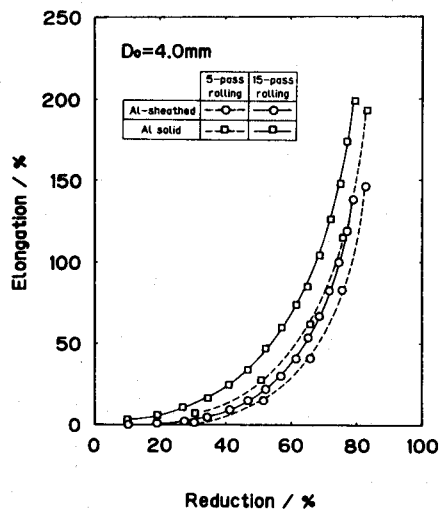


(c) $D_0 = 5.0\text{mm}$

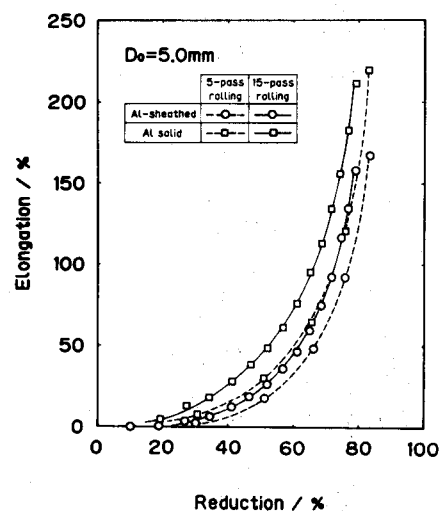
図12.2 幅広がり率の推移



(a) $D_0 = 3.1\text{mm}$



(b) $D_0 = 4.0\text{mm}$



(c) $D_0 = 5.0\text{mm}$

図12.3 延伸率の推移

5-pass rolling ($r=30\%$)		15-pass rolling ($r=10\%$)	
Stock			Stock
1st pass $R=30\%$			3rd pass $R=27\%$
2nd pass $R=51\%$			6th pass $R=47\%$
3rd pass $R=66\%$			9th pass $R=61\%$
4th pass $R=76\%$			12th pass $R=72\%$
5th pass $R=83\%$			15th pass $R=79\%$



図12.4 横断面プロファイルの推移 ($D_0 = 3.1\text{mm}$)

動しているのが観察される。一方、15パス圧延では、15パス後 ($R=79\%$) の試料の界面にわずかな波立ちが発生しているが、その振幅は5パス圧延のそれに比べ著しく小さい。図12.6に各パススケジュールの最終パス後の縦断面形状に及ぼす素線径の影響を示す。波立ちの振幅は素線径にはあまり依存しないが、素線径が大きいほど若干振幅が大きい傾向がある。

12.3.2 酸化物粉末の見かけ密度

図12.7に複合材のコア酸化物の見かけ密度の変化を示す。全圧下率 50% 程度まではパススケジュールに無関係に密度は増加する。全圧下率が 50% 以上では、5パス圧延では密度が上昇するのに対し、15パス圧延はあまり上昇しない。また素線径が大きいほどパススケジュールの影響は大きい。以上の結果は幅広がりが多い条件で酸化物粉末がより圧密化されることを示している。

12.3.3 負荷特性

5パス圧延における圧下力の推移を図12.8に示す。圧下力は複合材の方が中実材より約 1.5 倍ほど高くなっている。また圧延の進行にともなう圧下力の増加は複合材の方が中実材より顕著である。これは幅広がりとの推移と対応しているがその差

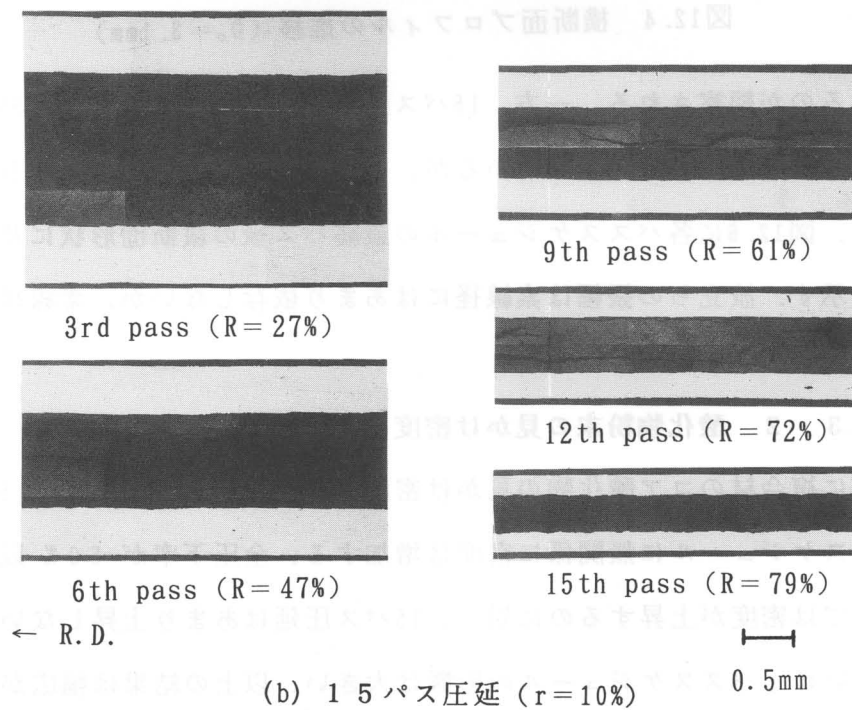
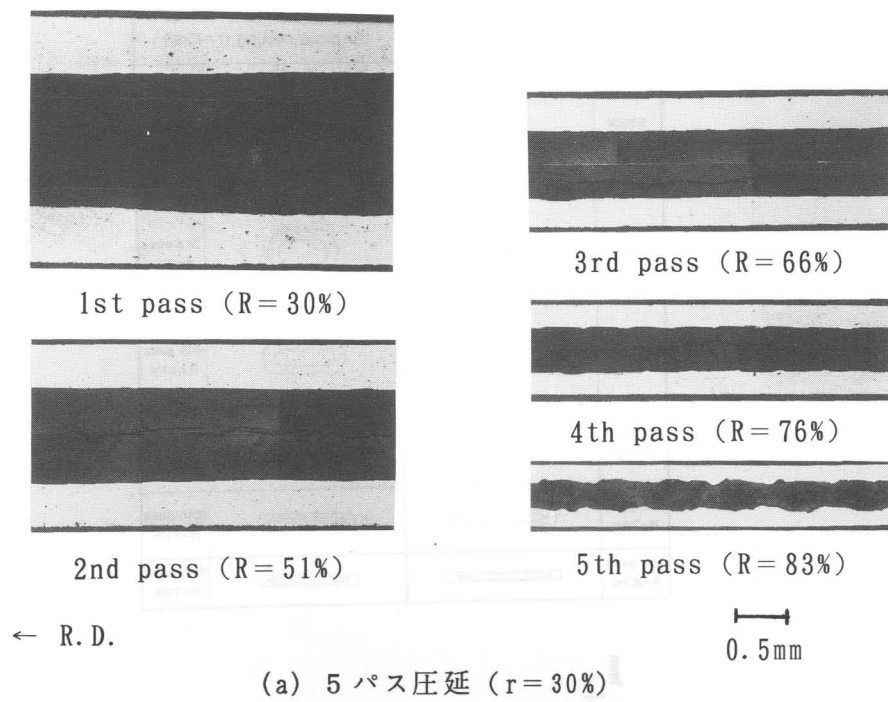


図12.5 縦断面の推移 ($D_0 = 3.1\text{mm}$)

は幅広がりの差より大きい。この原因はコアの圧密化による変形抵抗の増加がシー
スの加工硬化より著しいためと考えられる。

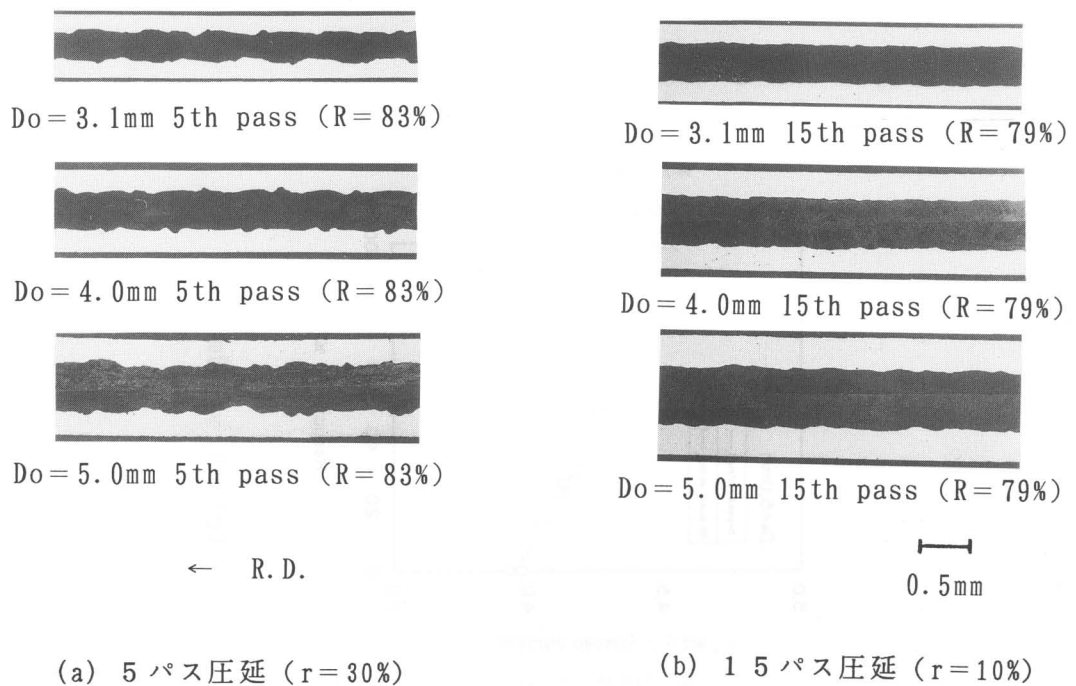


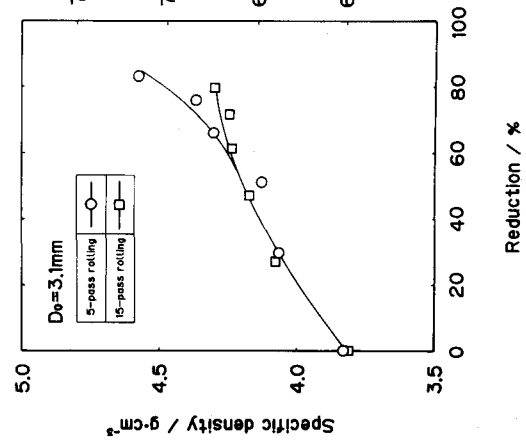
図12.6 縦断面の形状に及ぼす素線径の影響

12.4 考察

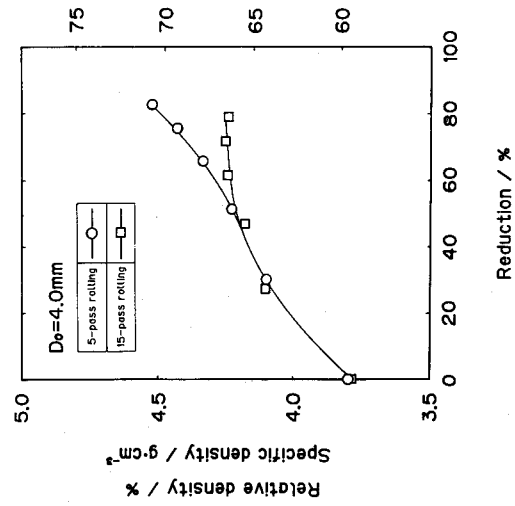
実験の結果、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ をアルミニウムで被覆した複合材の平線圧延における変形特性は、ロール径比（ロール径／素線径）が大きいほど、同じ全圧下率に対するパス回数が少ないほど、幅広がり大きく延伸は小さく、中実材の変形特性と定性的には一致する。また複合材は中実材に比べて幅広がり大きく、延伸は小さいことがわかる。これは複合材の場合、コアが酸化物粉末であるため圧縮性を有し、また引張応力には耐えられないため、シース部の幅方向への張り出し変形に対する拘束が小さいためと考えられる。

複合材におけるコア部とシース部の界面の不均一性は、パス回数が多いほど大きく、また素線径が大きいほど若干大きい。この原因は金属同志の複合材における界面の不均一について指摘されているように^{7,8)}、コア部とシース部の変形抵抗が異なることによって生じる界面不安定が原因であると考えられる。したがって、この不均一を減少させるためには、大径ロールによる圧延、パス回数の増加、中間焼鈍による延性の増加、コアの面積率の最適化などが有効であると考えられる。

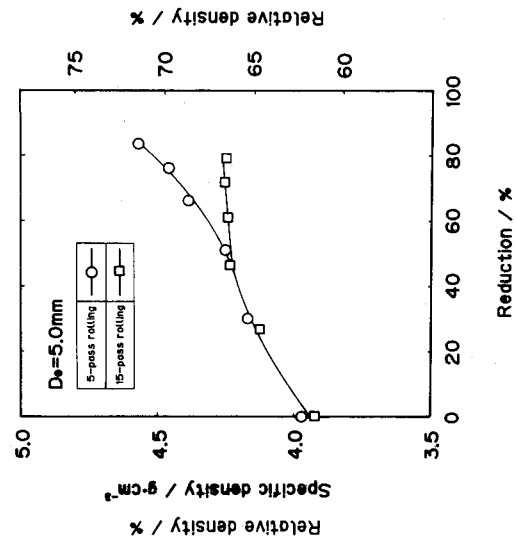
コアの相対密度は、パス回数が少ないほど上昇し、また素線径が大きいほどパス



(a) $D_0 = 3.1\text{mm}$



(b) $D_0 = 4.0\text{mm}$



(c) $D_0 = 5.0\text{mm}$

図12.7 コア酸化物の見かけ密度の推移

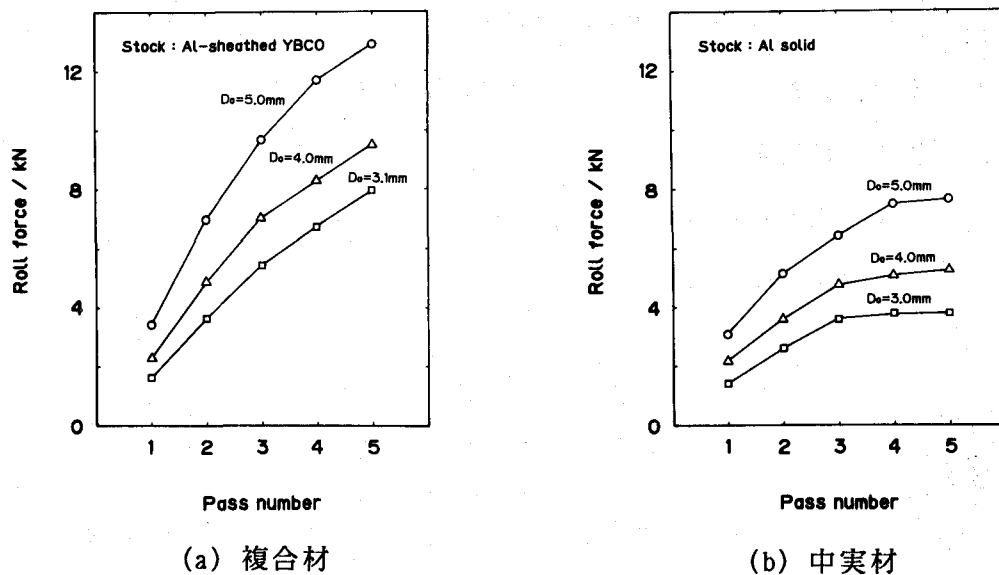


図12.8 5パス圧延 ($r=30\%$) の圧下力の推移

回数の影響が顕著であった。すなわち幅広がりの大きい条件ほど酸化物粉末が圧密化された。これは幅広がりが多い条件では、コア部に作用する静水圧応力が大きいから、圧密化されることを意味している。したがってコアの圧密化を図るには、大径ロール圧延、パス回数の減少が有効であると考えられる。

以上のことから超伝導線材の特性に及ぼすパス回数の影響は、パス回数が多いほど界面の不均一が減少するが、コアの相対密度は減少することがわかる。したがって最も良い特性が得られる最適パス回数が存在することがわかる。またロール径比を大きくすることは、界面の不均一の減少、コアの圧密化の両方に効果があると考えられる。

また超伝導特性を改善するためには、界面の不均一の減少、コアの圧密化に加えて、コア部の配向度の上昇および粒界の弱結合部の減少を図る必要があり、これらの特性と圧延条件の関係を明らかにすることが今後必要であると考えられる。

12.5 結 言

酸化物超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ をアルミニウムで被覆した複合線材の平線圧延を行い、その際の圧延特性、酸化物の見かけ密度、シースとコアの界面の形状を調べ、次の知見を得た。

- (1) 複合材は，中実材と比べて幅広がりが大きく，延伸は小さい．また，複合材の幅広がり率は，素線径が小さいほど，パス回数が少ないほど大きい．
- (2) 酸化物粉末は圧延の際の幅広がり大きい条件でより圧密化される．
- (3) 全圧下率が多い場合，シースとコアの界面に波立ちが生じる．この波立ちの振幅は，同じ全圧下率に対しパス回数が多いほど小さい．

参考文献

- 1) 日方 威・向井英人・上山宗譜・増田孝人・佐藤謙一：金属会報，
29-9(1990)， 729.
- 2) 五弓勇雄編：金属塑性加工の進歩，(1978)， 240， コロナ社.
- 3) 木原諄二・相澤龍彦・陳湘 明・市毛健一：塑性と加工， 32-368(1991)，
1129.
- 4) 長 恒之・江里口正・横手達夫・荒巻正俊・小野寺龍太：塑性と加工，
33-380(1992)， 1051.
- 5) 清藤雅宏・石上祐治：塑性と加工， 32-370(1991)， 1327.
- 6) 宇野直樹：138回塑加シンポジキスト，(1991)， 53.
- 7) 志村宗昭・田中英八郎：金属会報， 14-9(1975)， 707.
- 8) 小野寺龍太・外本和幸：金属会報， 26-11(1987)， 1028.

1 3 . B i 系酸化物超伝導体の線材化への応用

1 3 ・ 1 緒 言

酸化物高温超伝導線材の実用化にはその長尺材の線材化技術の確立が不可欠で現在までに様々な技術が開発されている。このような線材化技術のうち実用化の可能性が最も高いものは超伝導粉末を銀管に充填したのち、従来の金属系超伝導材料と同様に引抜き、圧延、プレス等の塑性加工により線材化する方法であると考えられる¹⁾。しかしながら、現在までのところ薄膜や単結晶の材料に比べてバルク材では臨界電流密度 J_c が低く、実用とされる値に達していない。これらの理由としては通常の引抜き、圧延による線材化法では、(a) 材料の圧密化が不十分であること、(b) 結晶配向が不十分であること、(c) 酸化物とシース材の界面が不均一であること、(d) 結晶粒間に弱結合部が存在すること、などであることが指摘されている。そこでこれらの原因を減少させ J_c を改善する方法として異周速圧延²⁾、延伸を抑制した圧延³⁾、クロス圧延などの特殊な圧延法が検討されている⁴⁾。

サテライトミル圧延では圧延中に材料に大きな長手方向圧縮力が生じるとともに延伸が著しく抑制される。そこで、このサテライトミルによる延伸抑制圧延をビスマス系超伝導材料の線材化に適用した。ビスマス系材料は塑性加工によってペロブスカイト構造の底面が J_c に有利な圧延面に平行な方位に配向し易く、さらに粒界の弱結合部が少ないため本法に適すると考えられるためである。変形特性、組織、超伝導特性に及ぼす影響を調べ、通常の圧延法の場合と比較した。

1 3 ・ 2 実験方法

1 3 ・ 2 ・ 1 供試材

市販の $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.90}\text{Ca}_{2.05}\text{Cu}_{3.05}\text{O}_x$ の組成の酸化物 (2223相) 混合粉末を外径 12mm、内径 8mm の銀管に充填した後、外径 5.2mm の丸線に線引きした。このときコアの直径は 2.6mm、見かけ密度は $4.7\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ であった。さらに、ロール径 100mm の二段圧延機で3パス圧延し、板厚 2.0mm の平線に予成形したものを試料とした。このとき、コアの見かけ密度は $5.0\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ であった。

13・2・2 実験装置

第3章で提案した平ロールによるサテライトミル圧延を行った。比較のためサテライトミルの3段目のみを用いた異径同周速圧延および直径100mmロールの二段圧延機による同径同周速圧延を行った。

13・2・3 圧延および焼成条件

板厚2mmの予成形材を上記3種類の圧延方法（サテライトミル圧延，異径圧延，同径圧延）で中間圧延し，板厚0.97mmのテープ状線材に加工した。各圧延法でのパススケジュールを表13.1に示す。さらに直径100mmロールにより10パスの仕上げ圧延を行い，板厚0.2mmのテープ状線材に加工した。

中間圧延後と仕上げ圧延後の線材から長さ40mmの試料を採取して表13.2に示す条件で焼成を行い，超伝導特性を測定した。

13・2・4 臨界電流密度と配向度の測定

四端子法で電気抵抗を測定し，77K，0Tにおいて $1\mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧を生じる電流を臨界電流 I_c とした。臨界電流密度 J_c は， I_c をコア部の断面積で除して求めた。また，Cu K α 特性X線を用いてX線回折強度を測定し，式(13.1)で定義される配向

表 13.1 中間圧延のパススケジュール

サテライトミル圧延	(5, 8, 8, 8, 5%) $\rightarrow$ (5, 8, 5%) $\rightarrow$ (5, 8, 5%)
異径圧延	5 $\rightarrow$ 8 $\rightarrow$ 8 $\rightarrow$ 8 $\rightarrow$ 5 $\rightarrow$ 5 $\rightarrow$ 8 $\rightarrow$ 5 $\rightarrow$ 5 $\rightarrow$ 8 $\rightarrow$ 5%
同径圧延	30% $\rightarrow$ 17% $\rightarrow$ 17%

表 13.2 熱処理条件

第1回熱処理 (855℃ $\times$ 50h 大気中)	$\rightarrow$	プレス 50t	$\rightarrow$	第2回熱処理 (840℃ $\times$ 50h 大気中)
--	---------------	------------	---------------	--

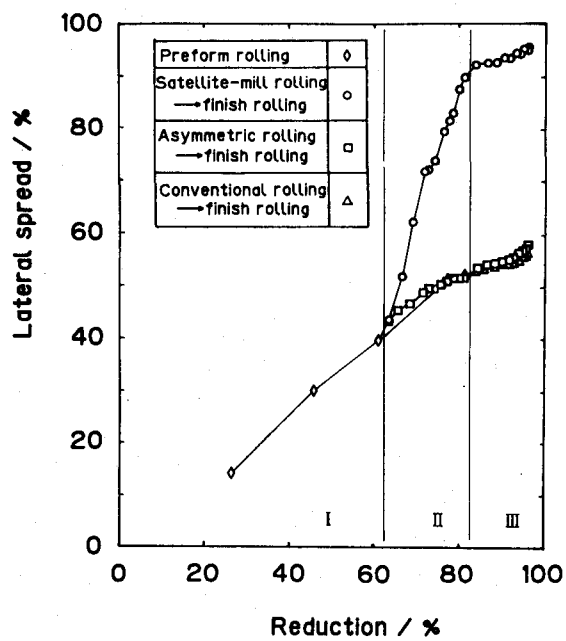


図13.1 幅広がり率の推移

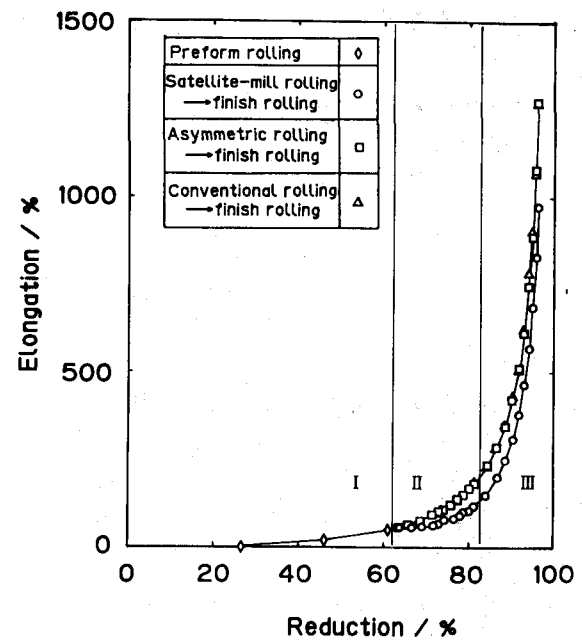
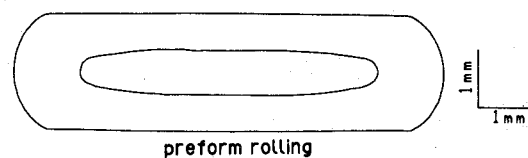


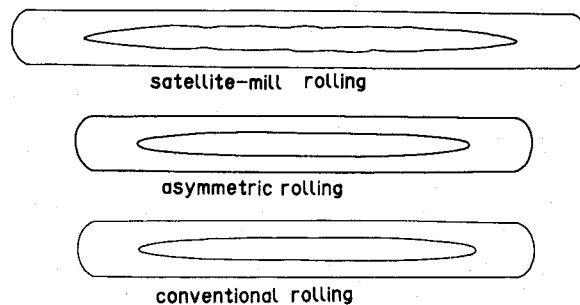
図13.2 延伸率の推移

(I: 予成形, II: 中間圧延, III: 仕上げ圧延)

(a) 予成形後



(b) 中間圧延後



(c) 仕上げ圧延後

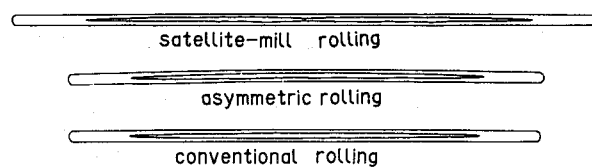


図13.3 圧延材の横断面プロフィール

度F値を求めた。F値は無方向性試料の場合は零、完全にC軸配向のとき1となる。

$$F = (P_1 - P_0) / (1 - P_0) \quad (13.1)$$

$$P = \Sigma I_{00L} / \Sigma I_{HKL}$$

ただし I_{HKL} : (HKL)の回折強度

P_1 : 試料のP値, P_0 : 無方向性試料のP値

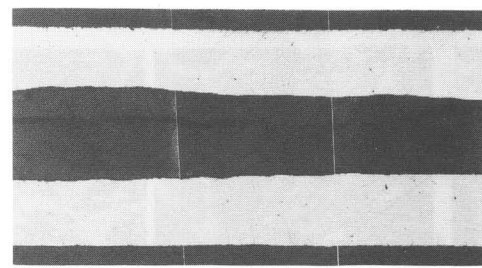
13・3 実験結果および考察

13・3・1 変形特性

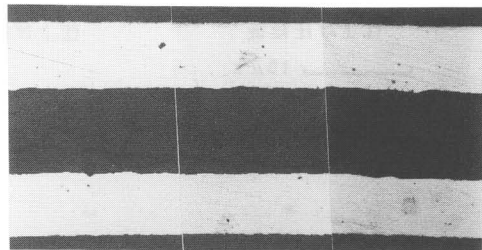
図13.1に丸線からの全圧下率に対する幅広がり率, 図13.2に延伸率の推移を示す。中間圧延の方法による差が顕著にみられ, サテライトミル圧延では, 異径圧延, 同径圧延に比べて幅広がり著しく大きく, これに対応して延伸が抑制されている。異径圧延と同径圧延では幅広がり, 延伸ともほとんど差を生じないことがわかる。圧延材の横断面プロフィールを図13.3に示す。コアの形状はすべて紡錘形になっており, 板厚が薄くなるとコアの両端がシャープに尖り, 板幅中央部がややくびれる傾向にある。また, 中間圧延後は, サテライトミル圧延材のコアとシースの界面に波立ちが生じている。仕上げ圧延後は, 全ての圧延材で界面に波立ちが生じている。中間圧延後と仕上げ圧延後の縦断面の写真を図13.4, 図13.5に示す。サテライトミルによる中間圧延材の界面には周期の長いうねりが生じている。仕上げ圧延後は, 全ての試料に波立ちが発生し, コアの厚みが不規則に変動している。特にサテライトミル圧延材の変動が著しい。

13・3・2 組織

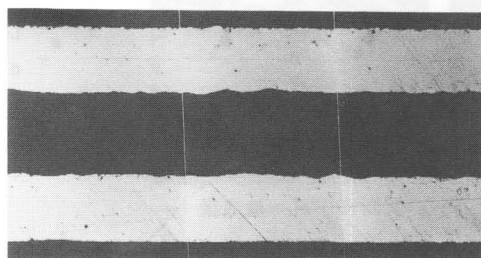
圧延後および焼成後の線材の縦断面に沿うコアの組織をそれぞれ図13.6, 図13.7に示す。いずれもコアの曲げ破面をSEMで観察したものである。図13.6より圧延によって酸化物粉末が破砕され固化されていること, 中間圧延での圧延方法による差がほとんど見られないことがわかる。図13.7より, 焼成によって薄片状の結晶が圧延面にはほぼ平行に配列することがわかる。中間圧延後と仕上げ圧延後では結晶の厚さにはほとんど差がないが, 結晶の長さは仕上げ圧延後の方が著しく長い。また結晶の形状に対する中間圧延の方法はほとんど影響を及ぼさないことがわかる。



(a) Satellite-mill rolling

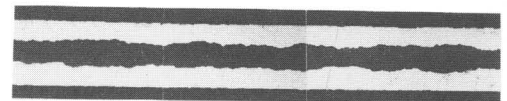


(b) Asymmetric rolling

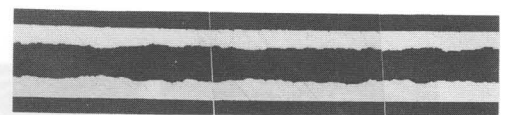


(c) Conventional rolling

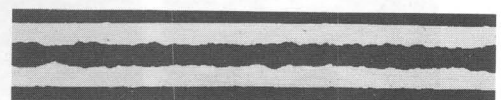
0.5mm
← R.D.



(a) Satellite-mill rolling



(b) Asymmetric rolling



(c) Conventional rolling

0.5mm
← R.D.

図13.4 中間圧延後縦断面写真

図13.5 仕上げ圧延後縦断面写真

13.3.3 超伝導線材の特性

表13.3に中間圧延後の線材コア部の見かけ密度，F 値および中間圧延後焼成した線材の密度，F 値，臨界電流密度 J_c を示す．表13.4には同じく仕上げ圧延後およびその後焼成した線材の諸特性を示す．サテライトミルによる中間圧延後の見かけ密度が他に比べて高いのは，圧延中の高い静水圧により圧密化が促進されたものと考えられる．しかし，中間圧延材，仕上げ圧延材とも圧延後の密度と焼成後の密度との間には明瞭な対応関係はない．中間圧延後のF 値は，同径圧延材が最も高く，サテライトミル圧延，異径圧延の順に低くなるが焼成後は異径圧延，同径圧延が高くなり，サテライトミル圧延材はそれらに比べるとやや低いF 値を示す．ただし，

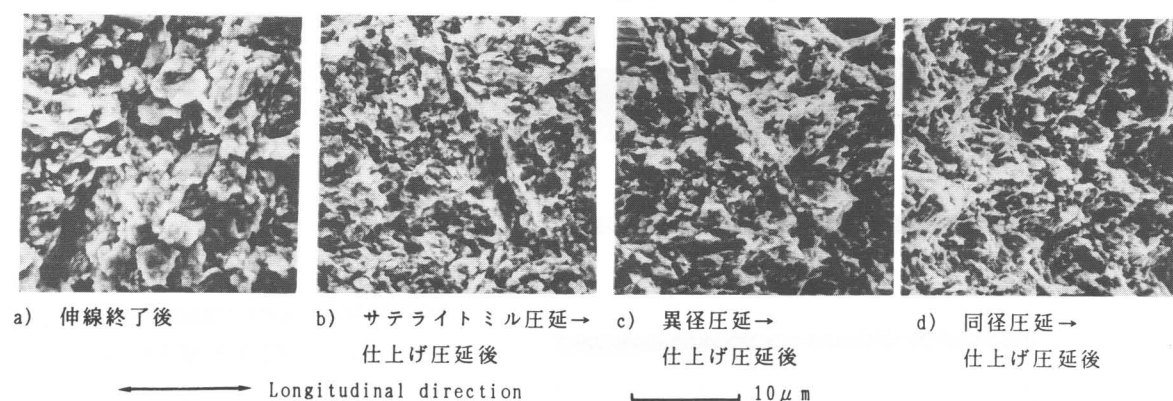


図13.6 伸線および圧延後のコア縦断面に沿う曲げ破面のSEM写真

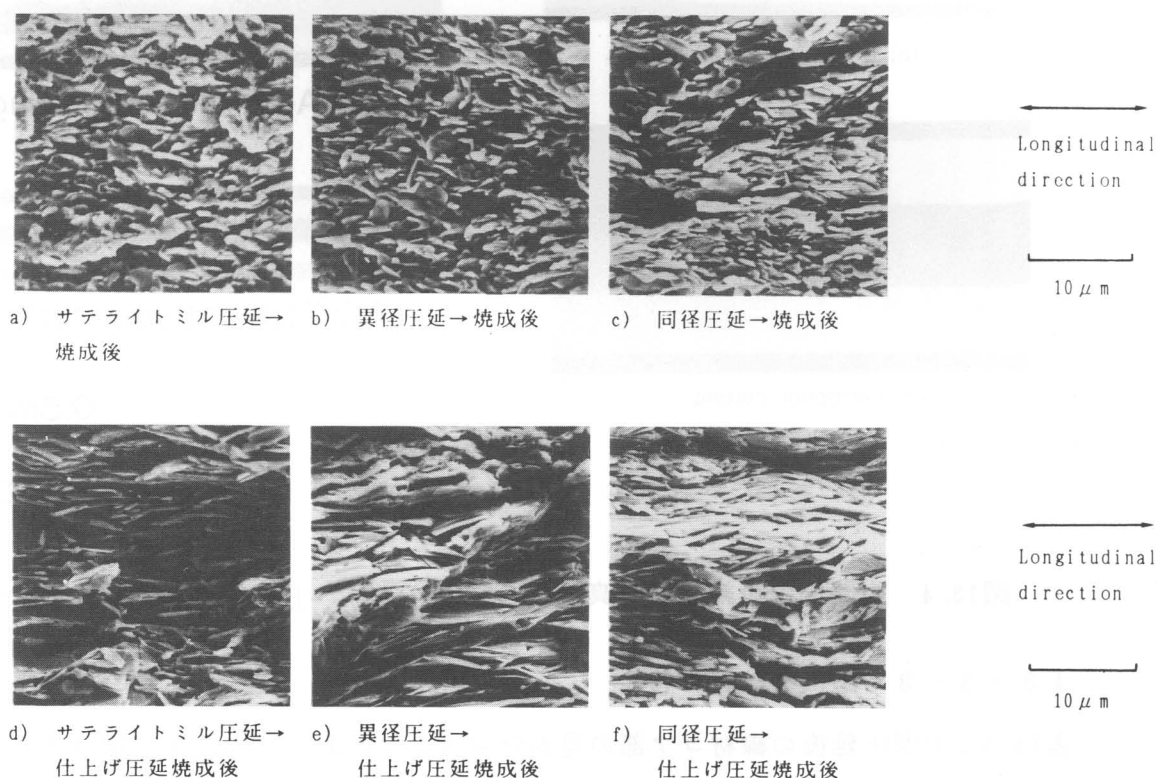


図13.7 焼成後のコア縦断面に沿う曲げ破面のSEM写真

いずれも圧延後に比べるとF値は大幅に上昇している。仕上げ圧延後のF値は、サテライトミル圧延材が他の2つに比べてやや低いが、いずれの試料も焼成後はF値が上昇するとともに、圧延方法による差がほとんどなくなる。

中間圧延材のJ。はほぼ配向度に対応し、サテライトミル圧延材が最も低く、異径圧延材が最も高い。仕上げ圧延材ではいずれの圧延方法でもF値に大差がないの

表13.3 超伝導線材の特性（中間圧延材，中間圧延後焼成材）

	圧延材のコア部 見かけ密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	圧延材の F 値	焼成材のコア部 見かけ密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	焼成材の F 値	臨界電流 /A	臨界電流密度 / $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	J c
サテライトミル 圧延	5.4	0.60	5.5	0.73	10.8	600	
異径同周速 圧延	4.9	0.48	5.9	0.81	39.4	2700	
同径同周速 圧延	5.1	0.63	5.4	0.81	24.3	1900	

表13.4 超伝導線材の特性（仕上げ圧延材，仕上げ圧延後焼成材）

	圧延材のコア部 見かけ密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	圧延材の F 値	焼成材のコア部 見かけ密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	焼成材の F 値	臨界電流 /A	臨界電流密度 / $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	J c
サテライトミル 圧延	4.3	0.41	5.0	0.91	4.54	1200	
異径同周速 圧延	4.4	0.53	4.2	0.90	2.61	890	
同径同周速 圧延	5.3	0.53	3.8	0.90	2.77	930	

にもかかわらずサテライトミルの J_c が高くなっている。また、異径圧延材、同径圧延材では中間圧延後焼成材に比べて仕上げ圧延焼成材の方が F 値が高いにもかかわらず J_c は低くなっていることがわかる。

13・4 考 察

実験の結果、サテライトミル圧延では通常圧延に比べて、幅広がりが増進され、延伸が抑制され、超伝導体の見かけ密度は上昇するが、その反面コアとシース界面の不均一が増加することが明らかとなった。これは全ロールが同周速で駆動されることに起因して各衛星ロールに長手方向圧縮力が作用することによって説明できる。すなわちこの圧縮力は横断面内のメタルフローすなわち幅広がりをも促進する。またこの圧縮力によって静水圧が増加するためコアの圧密化に寄与する。しかしながら界面の不均一性は塑性不安定に起因しているため、圧縮力が付加されると界面の不均一性が増加すると考えることができる。

本実験の範囲では、配向度と J_c が必ずしも対応していない。この原因としてはシースとコアの界面の不均一によりコアの断面積が長手方向に変動することによる J_c の見かけ上の低下あるいは圧延方法による結晶粒間の結合性の違いなどが考えられる。

仕上げ圧延材の J_c はサテライトミル圧延材が最も高いことから、酸化物超伝導線材の特性向上にサテライトミルによる延伸抑制圧延が有効であることは明らかであり、今後パス回数を増加させるなどの方法によって界面の不均一性を減少させることによって最適化を図る予定である。

また圧延材の見かけ密度と焼成材の見かけ密度の間にも対応関係が見られなかった。その理由の一部は試料の体積が小さい場合は見かけ密度の測定誤差が大きいことおよび焼成時に酸化物粉末がガスを発生するためにシースにふくれ (Blowing⁵⁾) が発生し見かけ密度が低下するためであると考えられる。今後ふくれの発生機構を明らかにし、その低減方法を開発することも必要であると考えられる。

13・4 結 言

銀シース法によるビスマス系超伝導体の線材化プロセスにサテライトミル圧延を適用し、同一条件の通常圧延法である異径同周速圧延および同径同周速圧延と比較し、以下の知見を得た。

- (1) サテライトミル圧延は通常圧延に比べて延伸が抑制されるため、幅広がりが大きく、コアの見かけ密度が上昇するが、コアとシースの界面は波立ちを生じ易い。
- (2) サテライトミル圧延材は通常圧延材と比較して結晶の配向性に顕著な差を示さなかった。
- (3) サテライトミル圧延後仕上げ圧延を行った材料の臨界電流密度は通常圧延材に比べて高い値を示した。
- (4) 同径同周速圧延材と異径同周速圧延材の特性に有意差はなかった。

参考文献

- 1) 日方 威・向井英人・上山宗譜・増田孝人・佐藤謙一：金属会報，
29-9 (1990)，729.
- 2) 木村敏郎・鈴木元一・武下拓夫：42回塑加連講論，(1991)，397.
- 3) 清藤雅宏・石上祐治：塑性と加工，32-370 (1991)，1327.
- 4) 長村光造・呉 詳秀：粉体粉末冶金，38-2 (1991)，97.
- 5) R. Flukiger, T. Graf, M. Decroux, C. Groth and Y. Yamada:
IEEE Trans. Magnetics, 27-2 (1991)，1258.

14. 総括

長手方向に圧縮力を発生させることのできるコンパクトミルであるサテライトミルを種々の高機能材料の圧延プロセス，すなわち異形断面条の製造，平条の拡幅圧延，超伝導体の線材化に適用し，圧延特性，製品特性を明らかにした。

第2章では本研究で用いたサテライトミルの原理について説明した。さらに試作機を製作し，異形断面条の試験圧延を行った。その結果，この圧延機では全ロールが同周速で駆動されることに起因して材料内に大きな圧延方向の圧縮力が発生し，横断面内のメタルフローが促進されることが明らかとなった。

第3章では圧延機の弾性変形特性を調べるとともに，平条の平圧延にサテライトミル圧延を適用した。主な結果を以下に示す。

(1) 締め込み法によって求めたサテライトミルの試作機の弾性変形は，ミルハウジングのたわみ変形のために締め込み段に近接する段のロール分離力が減少し，離れた段のロール分離力が増加する特性を有する。

(2) サテライトミル圧延では材料内に大きな長手方向圧縮力が発生するため，同一の条件の通常の連続圧延法に比べて延伸が抑制され，極めて大きな幅広がりが生じるが，衛星ロール間に塑性座屈によるさざ波を生じ易い。この効果は成形段数，圧下率，素材板幅が増加するほど長手方向圧縮力が増加するため顕著である。

(3) サテライトミル圧延では最終段に近い下流段に中立点が存在するため，衛星ロールの圧下力はその付近にピークを持つフリクションヒル状の分布を呈する。衛星ロールの圧下力の和および中心ロールトルクは，長手方向圧縮力と関連して成形段数，圧下率，素材板幅の増加とともに急激に増加する。

第4章～第6章では，孔型衛星ロールを用いたサテライトミル圧延により，平条の拡幅圧延を行う方法として凹型衛星ロール法ならびに凸型衛星ロール法を提案し，圧延特性，製品特性を明らかにした。また圧延材の集合組織に及ぼすサテライトミル圧延の影響を調査した。主な結果を以下に示す。

(1) 孔型衛星ロールを用いたサテライトミル圧延では部分圧下の効果のため平衡衛星ロールを用いたサテライトミル圧延に比べて大きな幅広がりが見られる。特に下流段で板幅中央部を圧下する凹型衛星ロール法では上流段で板幅中央部を圧下する凸型衛星ロール法に比べて幅広がりが多い。

(2) 孔型衛星ロール法による圧延材は板幅方向に硬さの分布を有する。下流段で圧下された部分、すなわち凹型衛星ロール法では板幅中央が、凸型衛星ロール法では両端が硬化する。ただしその分布は凸型衛星ロール法の方が均一である。

(3) 5 段サテライトミル圧延材ではひずみ比（幅広がりひずみ／延伸ひずみ）が 1 に近いことに対応して一軸圧縮集合組織が形成される。5 パス孔型圧延材では集合組織は、サテライトミル圧延材と平圧延材の中間的挙動を示す。

第 7 章～第 11 章ではサテライトミルを用いて平条より異形断面条を製造する方法として孔型中心ロール法ならびに孔型衛星ロール法を提案した。第 10 章では孔型衛星ロール法の孔型形状に改良を加え、板幅 52mm，フランジ部の板厚 0.7mm で板厚比が 3 を超える健全な T 形異形断面条を製造可能な孔型を開発した。また第 11 章では一般化平面ひずみモデルを用いた剛塑性有限要素法による解析を行った。主な結果を以下に示す。

(1) 同一条件の通常の孔型圧延法と比較してサテライトミル圧延では材料の延伸が抑制される。その結果横断面内のメタルフローが促進され、厚肉部での板厚減少が少なく孔型への充満性が極めて良い。ただし衛星ロールの圧下力は大きい。

(2) 各段で板幅方向の一部分を圧下する孔型衛星ロール法では部分圧下の効果のため孔型中心ロール法に比べて孔型への充満性に優れ、圧下力も小さい。

(3) 第 10 章で提案した孔型を用いた場合製品断面内の硬さ分布は、下流段で圧下された部分、すなわち薄肉部の両端部にピークが存在する。これらの部分には顕著なグレनフローが観察される。

(4) サテライトミル圧延の横断面内のメタルフローは拡張一般化平面ひずみモデルでかなり近似できる。

第 12 章ではリットリウム系酸化物粉末をアルミニウムでシースした線材の平線

圧延を行い、圧延特性、見かけ密度、界面の形状におよぼす圧延条件の影響を明らかにした。主な結果を以下に示す。

- (1) 複合材は中実材と比べて幅広がりが大きく、延伸は小さい。また複合材の幅広がり率は、素線径が小さいほど、パス回数が少ないほど大きい。
- (2) 酸化物粉末は圧延の際の幅広がり大きい条件でより圧密化される。
- (3) 全圧下率が多い場合、シースとコアの界面に波立ちが生じる。この波立ちの振幅は、同じ全圧下率に対しパス回数が多いほど小さい。

第13章では銀シース法によるビスマス系酸化物超伝導粉末の線材化プロセスにサテライトミルを適用し、その際の圧延特性ならびに得られた材料の特性を調べ、同一の条件における通常圧延のそれらとの比較を行い、次の結果を得た。

- (1) サテライトミル圧延材は通常圧延材に比べて延伸が抑制されるため、幅広がり大きく、コアの見かけ密度が上昇するが、コアとシースの界面は波立ちを生じ易い。
- (3) サテライトミル圧延後仕上げ圧延を行った材料の臨界電流密度は通常圧延材に比べて高い値を示す。

以上の様に本研究では、長手方向に圧縮応力を作用させることのできるサテライトミルを種々の高機能材料の圧延プロセスに適用し、横断面内のメタルフローが促進されるため、異形断面の成形、面内異方性の低減、酸化物超伝導体の圧密化に有効であることなどを明らかにした。従来の圧延プロセスでは、負荷の低減や蛇行の防止の点から前後方張力を付加してきたのに対して、本研究では逆に圧縮力を作用させることによって高機能材料の高生産性の加工が可能であることを明らかにしたもので工業的にも重要な意味を有しており圧延技術発展の一助となれば幸いである。

本研究に関する公表論文

- (1) Deformation and Force Characteristics in Rolling of Profiled Metal Sheet on the Satellite Mill
Advanced Technology of Plasticity 1990, vol.2, p.741-747.
- (2) サテライトミルの試作と異形断面条の試験圧延
ーサテライトミル圧延の研究 Iー
塑性と加工, 33-376 (1992), p.567-572.
- (3) サテライトミルによる平条の圧延
ーサテライトミル圧延の研究 IIー
塑性と加工, 34-394 (1993), p.93-99.
- (4) 孔型中心ロール法によるT形異形断面条の圧延
ーサテライトミル圧延の研究 IIIー
塑性と加工, 投稿中.
- (5) Development of Satellite Mill and Trial Rolling of Profiled Metal Strip
Journal of Materials Engineering and Performance (JMEP), 掲載予定.
- (6) Rolling of T-shaped Profiled Metal Strip by the Satellite Mill
4th Int. Conf. on Technology of Plasticity (1993), 発表予定.
- (7) 凹型衛星ロール法による平条の拡幅圧延
ーサテライトミル圧延の研究 IVー
塑性と加工, 投稿準備中.

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始御懇切な御指導ならびに御鞭撻を頂きました大阪大学工学部教授 斎藤好弘先生に心から感謝致します。また、本論文を御査読頂き有益な御教示を賜りました大阪大学工学部教授 山根壽己先生、永井 宏先生、大中逸雄先生に深く感謝致します。

折りにふれて御助言を頂いた大阪大学名誉教授、大阪電気通信大学教授 加藤健三先生ならびに研究の遂行の上で適切なる御指導を頂いた大阪大学講師 左海哲夫先生に感謝致します。

大東製作所(株)の武内省三氏、同和鉱業(株)の笠島武文氏、同和金属工業(株)の後藤悌二氏および渡辺俊成氏（現在：日本冶金工業(株)）には装置の開発の上でご協力を頂きました。また日本大学生産工学部講師の山田 正先生、(株)神戸製鋼所機械研究所の森賀幹夫氏、住友電気工業(株)大阪研究所の佐藤謙一氏および日方 威氏には本研究の一部を協力して頂きました。広島大学工学部助手の岡田達夫先生、同和鉱業(株)中央研究所の風呂正博氏には有益なご助言を頂きました。

さらに本研究の一部に御協力頂いた林 孝雄氏（現在：日産自動車(株)）、森田耕成氏、松尾 武氏をはじめとする斎藤研究室の卒業生および研究室の方々にも御礼申し上げます。