

サテライトミルによる平線およびT形異形線の圧延

齋藤 好弘*・宇都宮 裕*・平田 健二*²・岡 景則*²

Rolling of Flat and T-shaped Profiled Wires by the Satellite Mill

Yoshihiro SAITO, Hiroshi UTSUNOMIYA, Kenji HIRATA and Kagenori OKA

Synopsis : The authors have developed a new type rolling mill named the satellite mill. The mill comprises one large diameter roll (central roll) and five smaller diameter rolls (satellite rolls) arranged along a circumference of the central roll. Material is passed continuously through the five gaps between the central roll and the satellite rolls and deformed into a profiled cross section. Since all rolls are driven at the same roll speed, longitudinal compressive stress is produced between stands during rolling. The elongation is greatly suppressed. The mill has been applied to the production of round-edged flat wires and two kinds of T-shaped profiled wires from round circular wires. The obtained rolling characteristics and product properties are compared with those by a conventional rolling method. It is shown that the transverse metal flow is enhanced and the filling ability to the roll groove is excellent in satellite-mill rolling. The effect is more apparent in rolling of T-shaped wire having thinner ribs. It is supposed that the satellite mill is favorable for profiled wire production.

Key words : wire rolling ; satellite mill ; caliber rolling ; profiled wire ; T-shaped wire ; deformation property.

1. 緒言

複雑な断面形状をもつ線材は異形線と呼ばれ、各種電子部品、ばね、ピストンリング、レールなどの素材として用いられる。異形線は元来、丸線から引抜き加工により成形されていたが、生産性の点から最近では圧延加工またはローラーダイス引抜き加工が多用されるようになった。これらの方法は多スタンドのミルと多数の孔型ロールを必要とするため、相当の設備費を要し、また、孔型ロールの設計開発も容易ではない。

著者らはサテライトミルと称する小型の連続圧延機を開発している¹⁾。この圧延機では材料の延伸が抑制され、横断面内のメタルフローが促進されるため、平条の圧延に適用した場合、大きな幅広がりが見られ²⁾、異形条の成形圧延に適用した場合、孔型への充満性が著しく改善される³⁾。通常の圧延では断面を所定の形に成形するために大きな断面積の減少すなわち大きな延伸を要するが、サテライトミル圧延では断面を形成するのに必要な延伸はかなり小さくなる。このため通常の圧延に比べて素材断面積とパス回数は著しく減少し、ひいては設備費、ロール原単位、エネルギー原単位の低減や生産性の向上が期待できる。

そこで本研究ではサテライトミルによって銅丸線から平線および2種類のT形異形線の成形を試み、圧延特性・製品特性を調査するとともに、通常圧延との相違についても明

らかにした。

2. 実験装置および実験方法

2・1 供試材

直径5mmの市販の電気用軟銅線(JIS C 3102)のコイルから長さ1mの試料を切り出し、引張り塑性ひずみを約1%与えて矯正し実験に供した。矯正後の試料直径は4.98mmであった。

2・2 サテライトミル

サテライトミルのロール配置をFig.1に示す。1本の中心ロール(直径350mm)の外周上に5本の衛星ロール(直径76mm)が中心角30°で等間隔に配置されている。材料は中心ロールと衛星ロールの間をガイドシューとサイドガイドによって案内されながら5段の連続圧延を受ける。また、中心ロールと各衛星ロールはそれぞれのロールに取り付けたロール直径と同じピッチ円直径をもつリングギヤによって結合されていて、全て同周速で駆動される。したがって、各衛星ロール間で材料は圧延方向の延伸を抑制される。

2・3 ロール孔型形状

平線圧延では中心ロール、衛星ロールともに平ロールを用いた。T形異形線圧延では中心ロールに平ロール、衛星ロールにはFig.2.(a)、(b)に示すような2種類の孔型ロールを用いた。すなわち(a)には幅2.5mm、側壁傾斜角85°、

平成9年1月21日受付 平成9年4月11日受理 (Received on Jan. 21, 1997; Accepted on Apr. 11, 1997)

* 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

* 2 大阪大学大学院生 (Graduate Student, Osaka University)

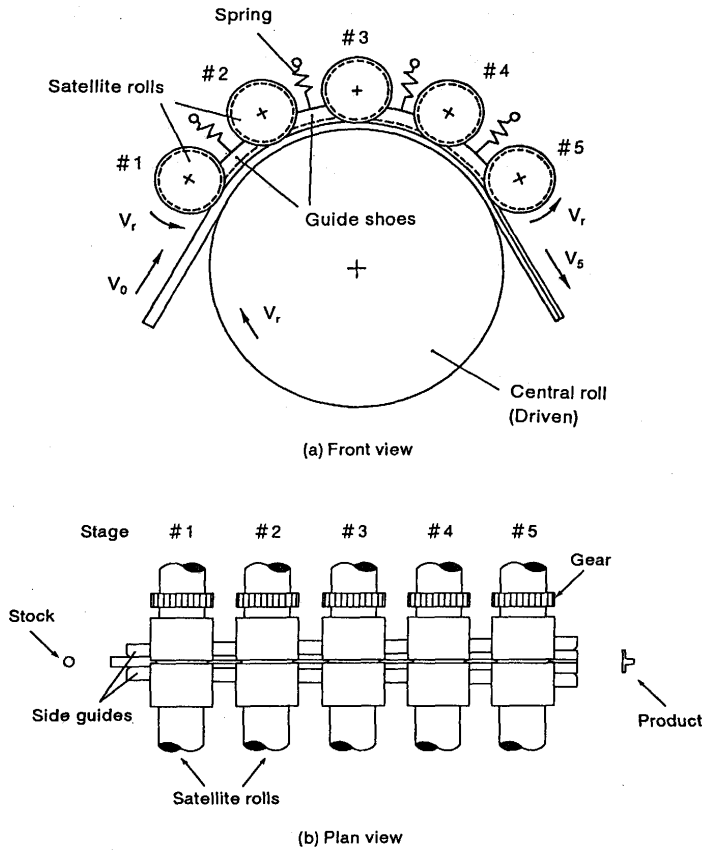


Fig. 1. Basic layout of rolls in the five-stage satellite-mill (a) Front view (b) Plan view.

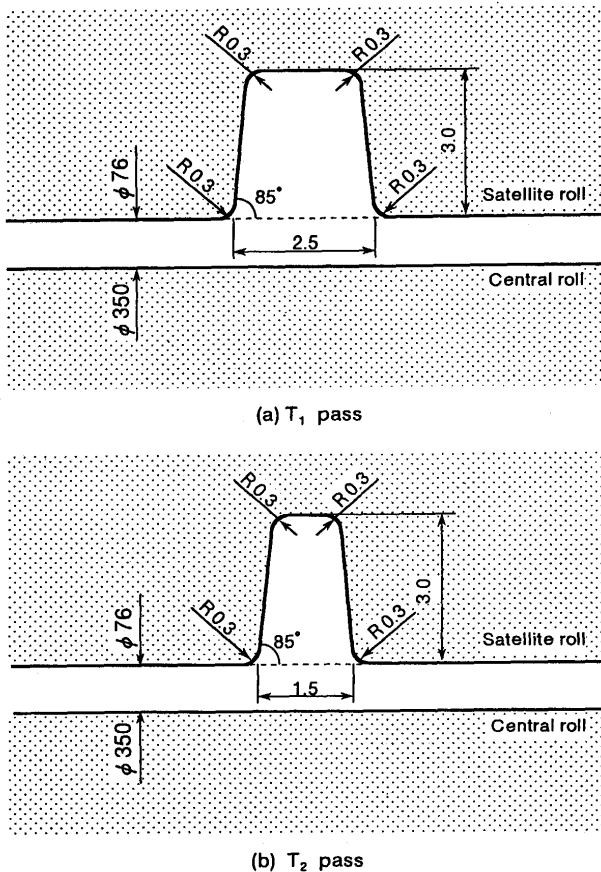


Fig. 2. Roll passes used for rolling of T-shaped profiled wire (a) T₁ pass (b) T₂ pass.

Table 1. Pass schedules used.

Total reduction	Reduction at each stage or pass				
	#1	#2	#3	#4	#5
58%	36%	10%	10%	10%	10%
67%	36%	15%	15%	15%	15%
74%	36%	20%	20%	20%	20%

(b)には幅 1.5mm, 側壁傾斜角 85°の深い台形状の溝が加工されている。5本の衛星ロールには全て同じ孔型ロールを用い、1段目から5段目にかけてロールギャップを徐々に減少させてT形異形線を成形する。以後、T形異形線の突起部を「リブ」、薄肉部を「フランジ」と称し、また、(a)、(b)の各孔型をT₁、T₂と称する。なお平線はT形異形線の突起幅が零のものであるとみなすことができる。

2・4 実験方法

潤滑剤として鋳油ベース圧延油(出光CU-50)を用いて、ロール周速 $V_r = 22\text{mm/s}$ で圧延を行った。

各段への圧下率の配分はTable 1に示すように、1段目の圧下率を噛込み条件と装置の制約(ギヤの許容間隔)を考慮して36%(ロールギャップ: 3.19mm)に固定し、2段目から5段目の圧下率は均等配分とし、それを10%、15%、20%の3段階に変化させた。この場合、全圧下率 r_t はそれぞれ58%、67%、74%、製品のフランジ部の厚さはそれぞれ2.09mm、1.64mm、1.29mmとなる。

定常圧延に達した後、圧延を中断し、各段通過後の横断面プロファイル、素材からの延伸率、同じく幅広がり率などの変形特性の推移を調べた。負荷特性として各衛星ロールの圧下力を測定した。製品特性として得られた製品の横断面内のビッカース硬さ分布を測定し、光学顕微鏡により横断面内のマクロ組織を観察した。

比較実験として、同じロールによる5パスの通常圧延実験も行った。この場合はサテライトミルの3段目のみを用いて同一のパススケジュールで圧延を繰り返して行った。この場合の通常圧延は異径同周速圧延である。

3. 実験結果および考察

3・1 変形特性

平線およびT形異形線のサテライトミル圧延(s.r.)および通常圧延(c.r.)における断面プロファイルの推移、すなわち各段(サテライトミル圧延)または各パス(通常圧延)通過後の断面プロファイル(全圧下率; $r_t = 74\%$)をFig.3に示す。また、幅広がり率の推移をFig.4に示す。通常圧延に比べてサテライトミル圧延の方が幅広がり量は大きく、リブも成形され易い。幅広がり促進効果はいずれの衛星ロールの場合も中流段で顕著である。また、衛星ロールの孔型形状について比較すると、 $T_1 < T_2 < \text{Flat}$ の順に、すなわちリブ溝が狭いほど幅広がり促進効果は大きい。これらの傾向

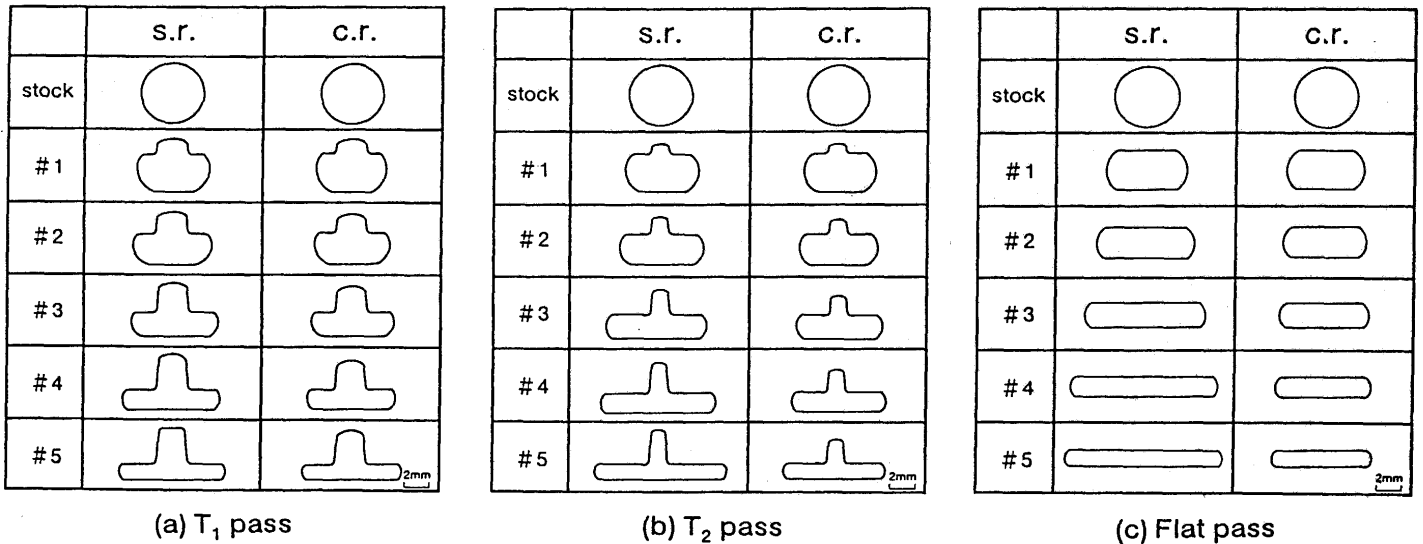


Fig. 3. Successive changes in cross section during satellite rolling (s.r.) and those during five-pass conventional rolling (c.r.) (Total reduction: $r_t = 74\%$).

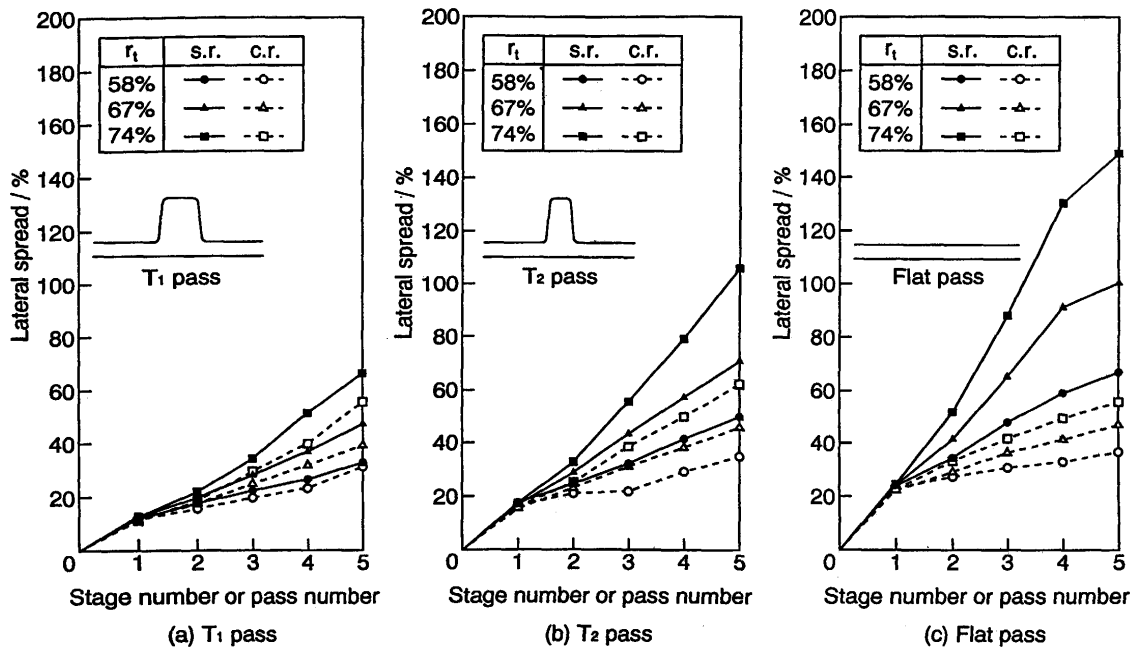


Fig. 4. Variations of lateral spread during satellite rolling (s.r.) and five-pass conventional rolling (c.r.).

は全圧下率の増加とともに顕著となる。

延伸率の推移をFig.5に示す。通常圧延では延伸率はパスとともにほぼ直線的に増加しているのに対して、サテライトミル圧延では1段目と5段目においては延伸を生じているものの、中流段(2, 3, 4段目)ではほとんど延伸は生じていないことが分かる。これは中流段では、前後方より大きな圧縮力が作用するためである。これに対して、1段目または5段目ではそれぞれ前方または後方圧縮力しか作用しないため、延伸抑制効果は小さい。中流段でのこの延伸抑制効果がフランジ部の幅広がりを促進させ、高いリブを形成させる原因である。この効果は全圧下率の増加とともに大きくなる。また、衛星ロールの孔型形状について比較すると、 $T_1 < T_2 < \text{Flat}$ の順に、すなわちリブ溝幅が狭

くなるほど延伸抑制効果は顕著である。

以上のことより、延伸抑制圧延時における排除断面積が大きいほど、サテライトミル圧延の効果は顕著となることが分かる。また、サテライトミル圧延の全延伸率は10~20%と通常圧延に比べて極めて小さく、かつ衛星ロールの孔型形状や全圧下率にあまり依存しないため、通常圧延と比較して孔型設計は容易になると考えられる。

3・2 先進特性

サテライトミル圧延における各段の先進係数の推移をFig.6に示す。ここで先進係数とは、ロール周速で無次元化した材料の出口速度である。いずれの衛星ロールを用いた場合も5段目の入口付近に中立点が存在していることが分かる。したがって、本実験におけるサテライトミル圧延で

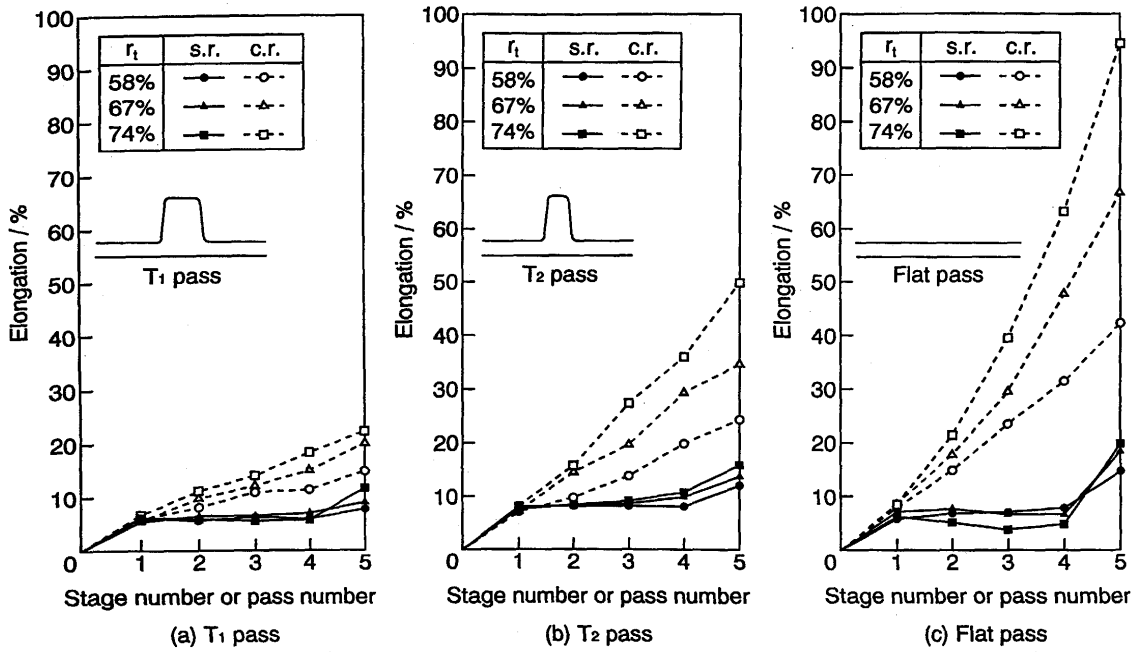


Fig. 5. Variations of elongation during satellite rolling (s.r.) and five-pass conventional rolling (c.r.).

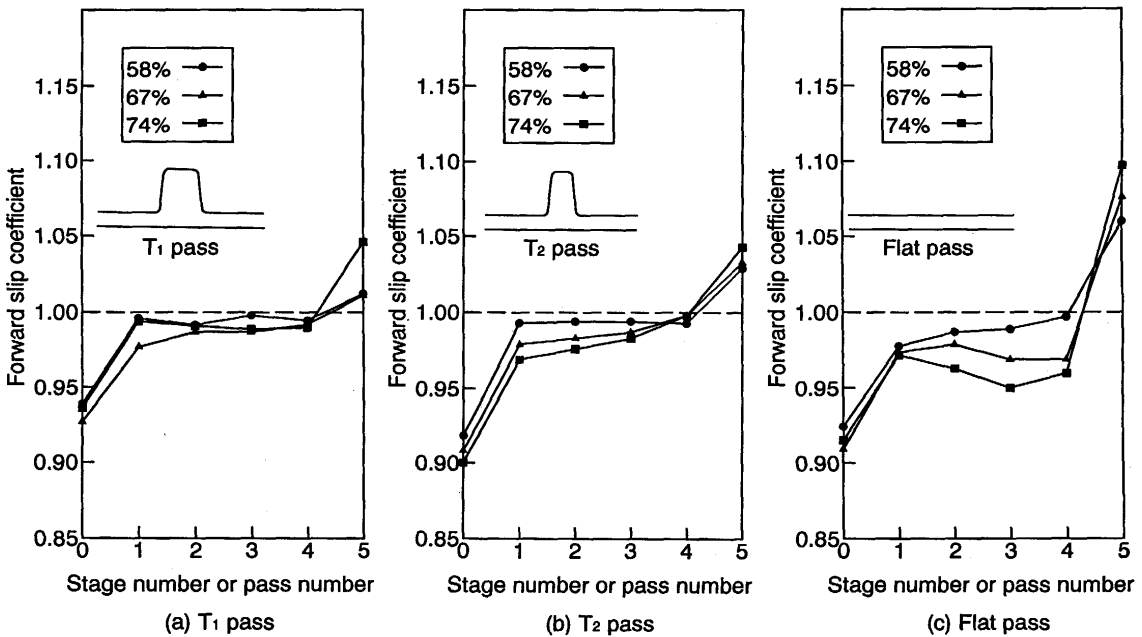


Fig. 6. Variations of forward slip coefficient during satellite rolling (s.r.).

は1段目から4段目までは後進域にあり、ロールは材料に対してスリップしている。また、この領域では先進係数は0.95~1.00のレベルでほとんど一定であるが、衛星ロールの孔型形状の影響を受け $T_1 > T_2 > \text{Flat}$ の順になっている。この傾向は、圧下率が大きいほど明瞭に現れている。これは溝ロールでは溝にメタルが流入し、溝側壁およびコーナーからの束縛によりスリップが起りにくくなったためと考えられる。

3.3 負荷特性

サテライトミル圧延における各段の衛星ロールの圧下力および通常圧延の対応する各パスの圧下力をFig.7に示

す。通常圧延においては、圧下力は圧下率の配分(Table 1)にほぼ対応しており、また、ロールの孔型形状では $\text{Flat} > T_2 > T_1$ の順に、すなわち接触面積の大きいロールほど大きい。圧延の進行とともに幅広がり加工硬化が生じるが、同時に接触長の減少も起こるため、圧下力はわずかに上昇するものの、ほぼ一定で推移している。一方、サテライトミル圧延では通常圧延よりも大きな圧下力を要しており、中立点に近い4段目または5段目で最大である。また、通常圧延との差は圧下率と衛星ロールの孔型形状の影響を受けており、圧下率が大きいほど大きく、孔型形状については $\text{Flat} > T_2 > T_1$ の順である。これはFig.4の延伸抑制効果

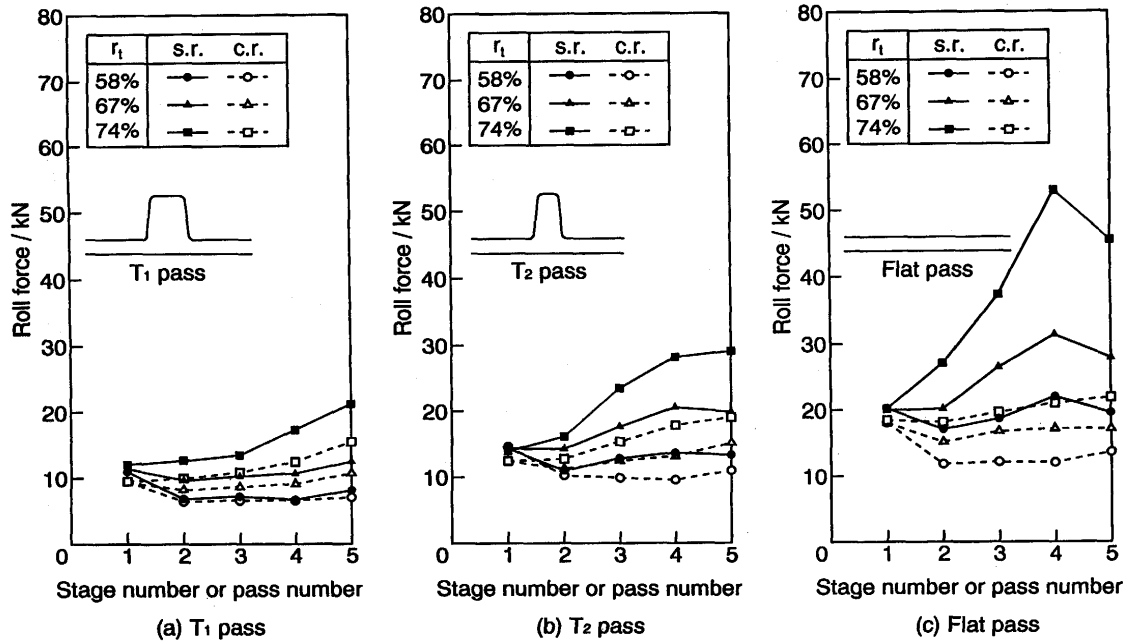


Fig. 7. Roll force on each stage in satellite rolling (s.r.) and that on each pass in five-pass conventional rolling (c.r.).

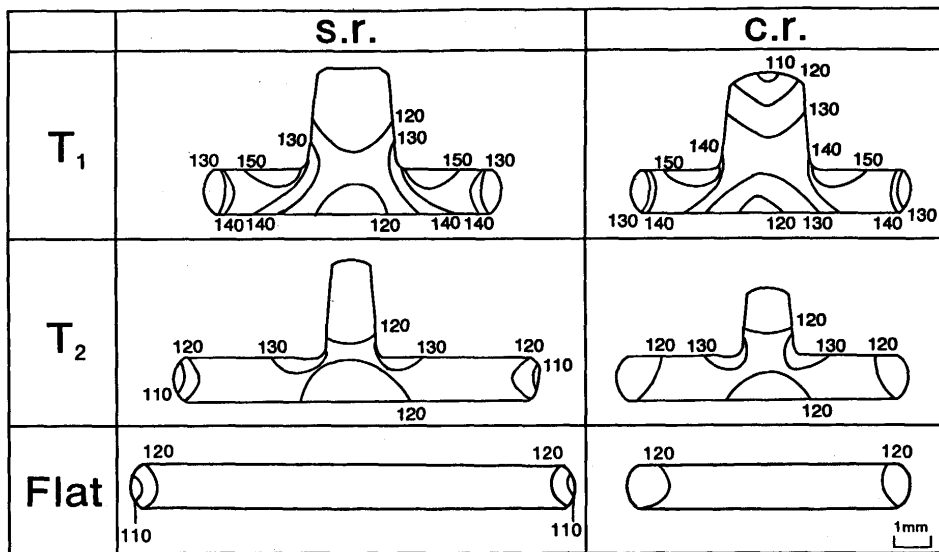


Fig. 8. Micro Vickers hardness distribution in cross sections of products by satellite rolling (s.r.) and those by five-pass conventional rolling (c.r.). (Total reduction: $r_t=74\%$).

によく対応している。これらの事実から、サテライトミル圧延における高い圧下力は延伸抑制効果による圧延圧力の上昇および幅広がり増加によって生じたものと考えられる。

3・4 製品特性

各衛星ロールによる製品の横断面内の硬さ分布(全圧下率; $r_t=74\%$)をFig.8に示す。T形異形線ではT₁、T₂ともにリブの付け根直近のフランジ部で最大となり、リブの先端部、フランジの両端部およびリブの裏側の部分が軟らかい分布を呈する。サテライトミル圧延材と通常圧延材の間には硬さのレベルに大きな違いは見られないが、フランジの両端やT₂の未充填のリブ先端部に関する限り、前者の方

が後者に比べて硬さは低い。これはサテライトミル圧延の方が延伸が少ないため、付加的ひずみの少ないフランジ両端部やリブ先端部では結果的に相当ひずみ(有効ひずみ)が少なくなったためと考えられる。つぎに、衛星ロールの孔形状で比較すると平線およびT₂に比べてT₁は全体的に硬い。これはT₁ではリブ溝へのメタルフローが大きいため大きな付加的せん断ひずみが生じたためと推測される。平線ではサテライトミル圧延材、通常圧延材ともにほぼ均一な硬さ分布となっているが、両端部についてはT₂のフランジと同様の傾向を示している。

サテライトミル圧延材(T₂)の横断面内マクロ組織写真をFig.9に示す。リブの付け根直近のフランジ部および

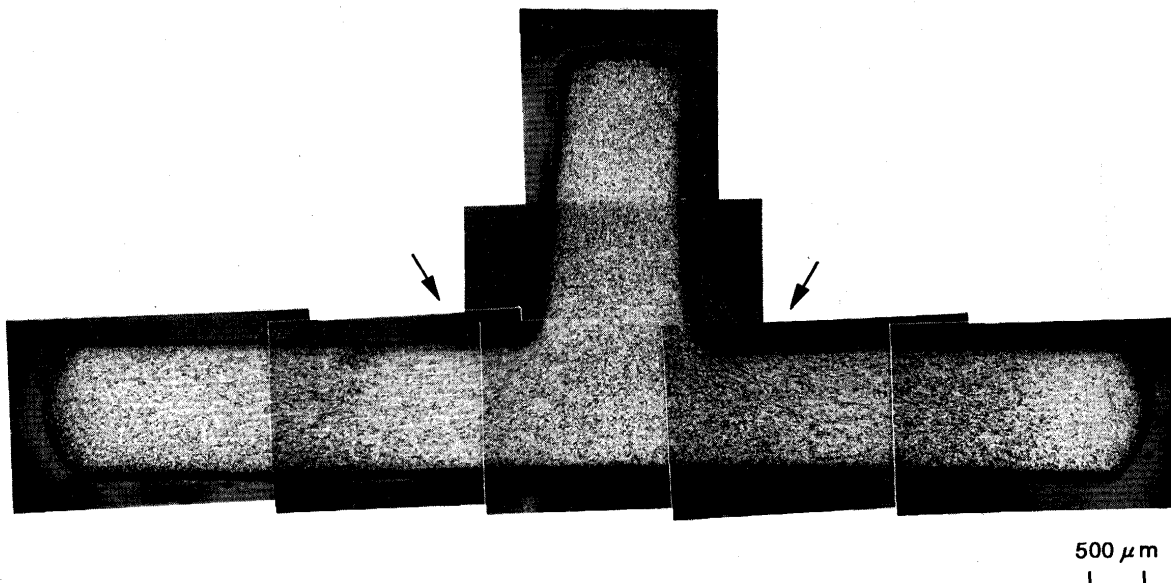


Fig. 9. Macrostructure of product by satellite rolling (s.r.) with T_2 pass. (Total reduction: $r_t=74\%$)

コーナー部にせん断変形による顕著なグレフロー(フローライン)が見られるが、リブの先端部およびフランジの両端部には見られない。このことから硬さ分布はグレフローとよく対応していることが分かる。

4. 結言

サテライトミル圧延および通常圧延により銅丸線から平線およびT形異形線を成形する場合の圧延特性、製品特性について調査した結果、以下の結論を得た。

(1)サテライトミル圧延では通常圧延に比べて延伸が著しく抑制され横断面内のメタルフローが促進されるため、フランジ幅とリブ高さは著しく大きくなる。このサテライトミルの延伸抑制効果はリブ溝の幅が狭いほど、また全圧下率が大きいほど顕著である。

(2)サテライトミル圧延での中立点は本実験の条件下では全て5段目の入口付近に存在していた。後進域(1段目～4段目)の材料速度は全圧下率および衛星ロール形状の

影響を受け、一般に延伸抑制効果が大きい場合ほど遅い。

(3)サテライトミルの各衛星ロールの圧下力は通常圧延の対応するパスのそれよりも高く、4段目または5段目で最大となる。

(4)T形異形線の横断面内の硬さのピークは常にリブの付け根直近のフランジ部に存在し、この領域には顕著なグレフローが観察される。一方、リブ先端部およびフランジの両端部にはグレフローは生じず硬さは低い。

最後に、本研究を遂行するにあたり、日本鉄鋼協会より平成7年度石原・浅田研究助成金を、また、住友電気工業(株)特殊線事業部より材料のご提供をいただいたことを付記し謝意を表します。

文 献

- 1) 宇都宮裕, 齋藤好弘: 鉄と鋼, 80 (1994), N613.
- 2) 宇都宮裕, 齋藤好弘, 森田耕成: 塑性と加工, 36 (1995), 68.
- 3) Y.Saito, H.Utsunomiya and T.Hayashi: Advanced Technology of Plasticity1993, 2 (1993), 837.