

# U形およびH形異形線のサテライトミル圧延における 圧延条件の影響

宇都宮 裕\*・斎藤 好弘\*・松澤 永晴\*<sup>2</sup>・河本 達也\*<sup>3</sup>

Influence of Rolling Parameters on Satellite-mill Rolling Characteristics of U- and H-shaped Wires

Hiroshi UTSUNOMIYA, Yoshihiro SAITO, Hisaharu MATSUZAWA and Tatsuya KAWAMOTO

**Synopsis** : The authors developed a compact continuous mill named satellite mill. In the satellite-mill rolling, longitudinal compressive stress decreases the elongation significantly and promotes transverse metal flow, so that this mill can produce more complex profiled wires efficiently than conventional mill. In this study, the influence of pass schedules is studied in rolling of U-shaped and H-shaped wires. In addition, the effect of roll surface roughness is studied, with two central rolls, which have different roughness on the groove. The obtained main results are as follows,

- 1) In U-shaped wire rolling, the elongation decreases with increase in the reduction at the first stage. In H-shaped wire, the influence of pass schedule on elongation is not obvious.
- 2) The rolling characteristics are sensitive to the surface roughness of the groove. Smooth surface finish of the groove increases the elongation and decreases the rolling force considerably.
- 3) The hardness in cross section of products with smoother roll is lower and more uniform than that with rougher roll.

**Key words**: wire rolling; satellite mill; caliber rolling; profiled wire; U-shaped wire; H-shaped wire; pass schedule; roll roughness.

## 1. 緒言

異形線は各種電子部品、ばね、ピストンリングなどの素材として用いられる。その製造法は主として素材丸線からのユニバーサルミルによる圧延およびローラーダイスやタークスヘッドによる引抜き加工であり、十数パスの加工を必要とする。

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<sup>1-6)</sup>。この圧延機は材料の延伸が抑制され、断面内のメタルフローが促進されることを特徴とする。すなわちサテライトミル圧延では、断面を成形するのに必要な延伸は通常の圧延に比べてかなり小さく、加工手順を簡略化することや複雑な断面形状の異形材を成形することが可能である。

前報までに、サテライトミルを平線、T形、U形およびH形異形線の成形に適用した場合、通常圧延に比べて大きな幅広がりや著しく高いリブが得られ、優れた断面形状をもった製品が得られることを明らかにしている<sup>1-6)</sup>。しかしながら、これまでの報告ではサテライトミル圧延における圧延条件の影響は必ずしも十分には検討されておらず、パススケジュールの最適化等によってさらなる成形性の向上が期待できる。そこで本報では、U形およびH形異形線

の圧延においてパススケジュールの影響を調査した。ところで、閉式孔型を用いるサテライトミル圧延では、材料は中心ロールの溝にはまりこんでいるため中心ロールに強く拘束される。したがって、その圧延特性は中心ロールと被加工材の間の摩擦状態に強く依存するものと考えられる。そこで本報では、孔型側面の表面仕上げの異なる二本の中心ロールを用意し、中心ロールの表面仕上げの影響についても調査した。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 供試材

まず直径5mmの市販の電気用軟銅線(JIS C3102)のコイルから長さ1mの試料を切出し、引張塑性ひずみを約1%与えることにより矯正した。矯正後の試料径は4.97mmであった。次にその試料をロール径100mmの平ロールで1パス圧延して、厚さ3.24mm、全幅5.9mmの平線形状のプリフォームに成形した。これはプリフォームの幅を後述の孔型の幅と一致させ、圧延中の蛇行を防止するためである。

### 2.2 サテライトミル

実験に供した圧延機は前報<sup>5)</sup>と同一であるので本論文で

平成11年4月6日受付 平成11年6月9日受理 (Received on Apr. 6, 1999; Accepted on June 9, 1999)

\* 大阪大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565-0871)

\* 2 大阪大学大学院生 (現: NKK 総合材料技術研究所) (Graduate Student, Osaka University, now Materials and Processing Research Center, NKK Corp.)

\* 3 大阪大学大学院生 (現: 山陽特殊製鋼(株) 技術管理部) (Graduate Student, Osaka University, now Technical Administration Department, Sanyo Special Steel Co., Ltd.)

は概略のみを記す。サテライトミルでは、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）が等間隔に配置されている（Fig. 1）。材料は中心ロールと衛星ロールの間をガイドシューによって案内されながら5段の連続圧延を受ける。中心ロールと各衛星ロールを同じロール周速で駆動することにより材料の圧延方向の延伸が抑制される。

### 2・3 ロール孔型形状

前報と同様にU形用およびH形用の2本の溝を加工した中心ロールと突起を加工した衛星ロールの間で閉式孔型を構成した。孔型の詳細図をFig. 2に示す。1段目は突起で幅全体を圧下し、2段目から5段目までの4段の孔型はそれぞれ同一の孔型形状とし、ロールギャップを下流ほど減

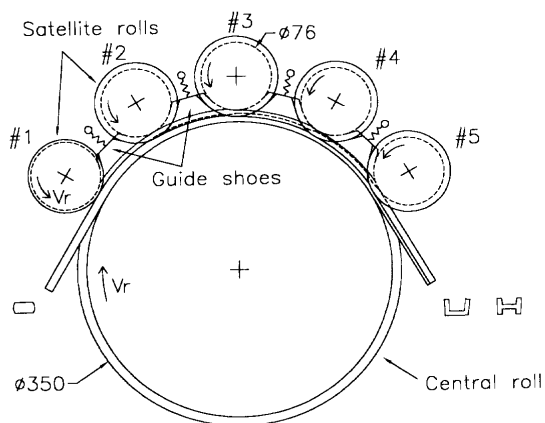


Fig. 1. Diagrammatic representation of the satellite mill.

少するように設定することにより中央部の板厚を減少させ所望の異形線に成形した。以降、U形およびH形断面の中央部を「ウェブ」、両端の部分を「リップ（フランジ）」と称することにする。またH形のリップについては上部リップホールで成形されるリップをトップリップ、下部で成形されるリップをボトムリップと称する。また中心ロールは、溝側面をグラインダー仕上げ（G/0.8S）したものとさらにその後ラップ仕上げ（L/0.4S）したものと二種類を用いた。なおそれぞれの表面粗さプロフィールをFig. 3に示す。衛星ロールの表面仕上げ（G/0.8S）は変化させなかった。以降、グラインダー仕上げの中心ロールを用いる場合を「dull pass」、同様にラップ仕上げの中心ロールを用いる場合を「bright pass」と称する。

### 2・4 圧延方法

各段の圧下率を各段におけるウェブ部（薄肉部）の板厚減少率で定義する。各段の圧下率の分布すなわちパススケジュールをFig. 4に示す。本報ではPS1~PS3の3種類のパススケジュールを用いた。各パススケジュールは2段目から4段目の中流段の各段圧下率を20%とし、1段目の圧下率をPS1, PS2, PS3の順に0%, 5%, 10%と増加させた。5段目の圧下率は、製品のウェブ厚さが1.33mmすなわち全圧下率59%となるように変化させた。すなわち1段目の圧下率が大きいほど5段目の圧下率は小さくなる。ロール周速は1.3 m/minとし、潤滑には鉱油ベース圧延油（出光 CU-50）を用いた。

定常圧延に達した後、圧延を中断して噛み止め材を採取

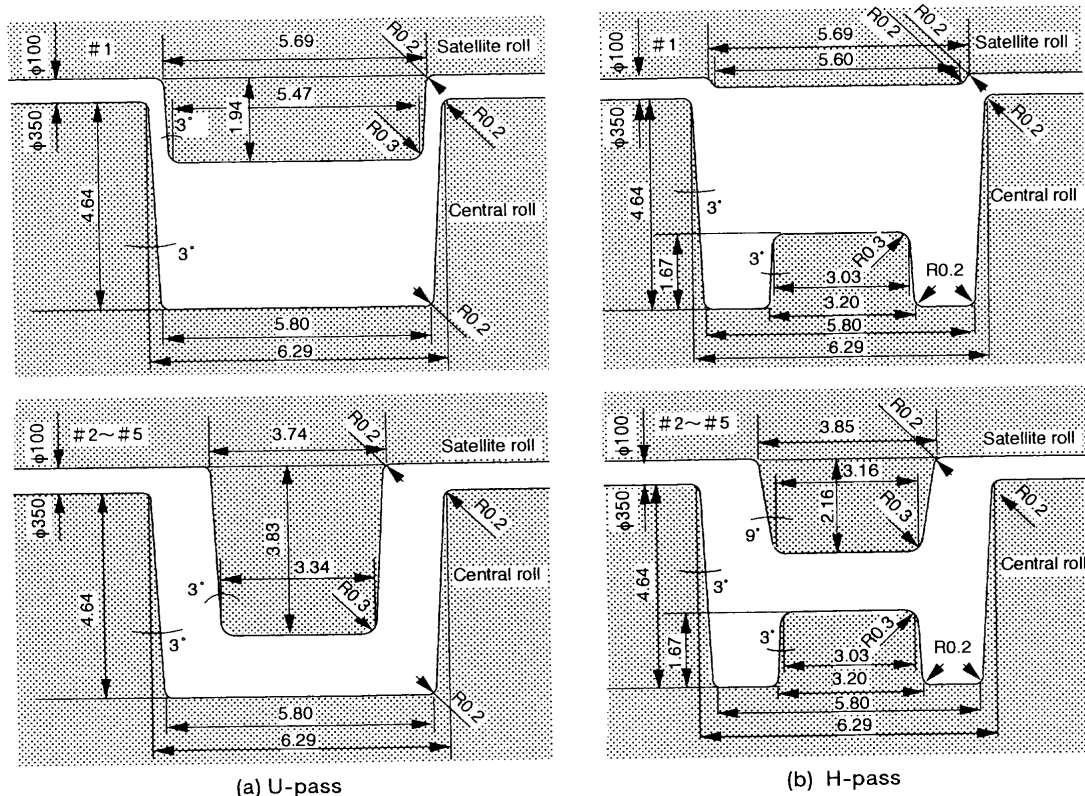


Fig. 2. Roll passes used.

し、各段通過後の横断面プロフィールを測定した。また各段通過後の延伸率、材料速度、各衛星ロールの圧下力を測定した。加えて製品特性として横断面内のマイクロビッカース硬さの分布を測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 変形特性

各パススケジュールでサテライトミル圧延した製品の断

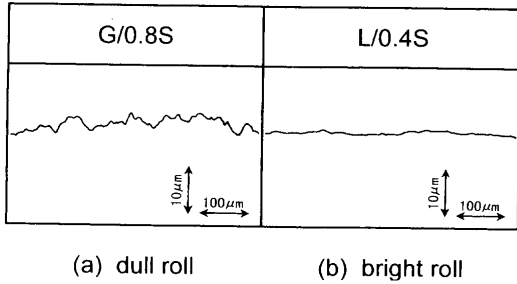


Fig. 3. Roughness profiles of central roll groove wall.

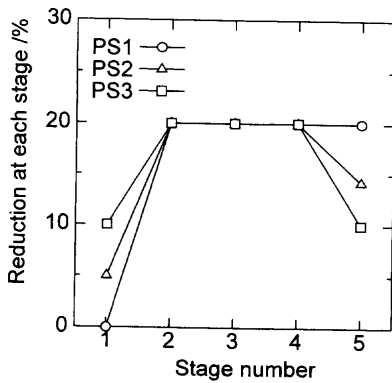


Fig. 4. Pass schedules employed.

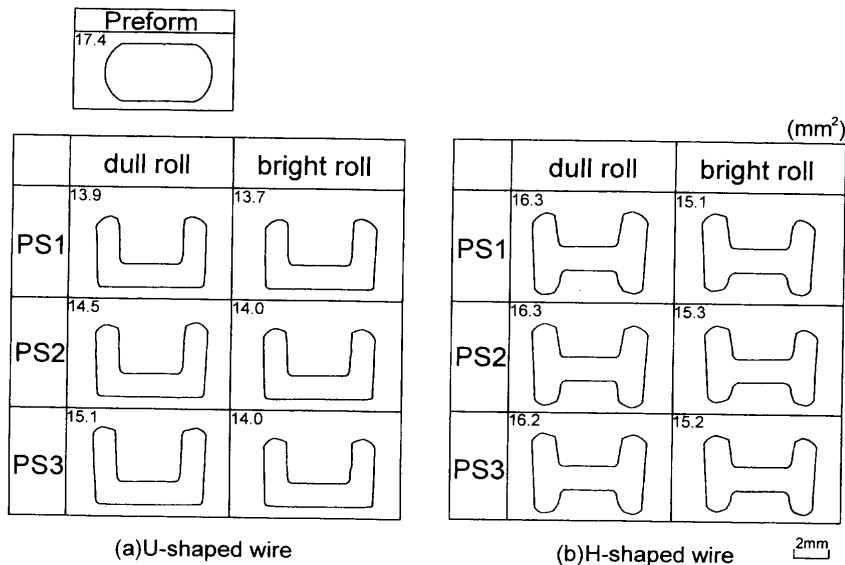


Fig. 5. Cross sections of preform and products U-shaped and H-shaped wires. (a) U-shaped (b) H-shaped

面プロフィールを Fig. 5 に示す。各断面プロフィールの断面積を左上の数字 (mm<sup>2</sup>) に示した。まずパススケジュールの影響を見ると、U形では dull pass, bright pass とともに1段目の圧下率が大きいほど製品の断面積は大きい。すなわち PS3 で製品の断面積は最も大きく PS1 で最も小さい。この傾向は bright pass よりも dull pass の方が顕著である。H形に関しては、どの条件でも一般の孔型圧延の場合と同様に、デッドホールで成形されるボトムリブよりもリブホールで成形されるトップリブの方が高くなっている。dull pass, bright pass とともにパススケジュールの影響はあまり見られず、断面積はほぼ同じである。次に中心ロールの表面仕上げの影響を見ると、U形、H形ともにどのパススケジュールでも dull pass の製品の方が断面積は大きい。

各段通過後のリブ高さウェブ厚さの推移を Fig. 6 に定量的に示す。なおH形についてはリブ高さ  $h_r$  とトップリブ高さ  $h_t$  とボトムリブ高さ  $h_b$  の和で評価している。図中の  $h_r$  はリブ高さの推移を表し、 $h_w$  はウェブ厚さの推移を表す。ウェブが圧下されるのに従ってリブが形成されている。U形に関して、dull pass では1段目の圧下率が大きいほどリブ高さは高く、製品のリブ高さも高くなる。bright pass では上流段で dull pass と同様の傾向が見られるものの下流段ではパススケジュールによる差は小さくなり、製品のリブ高さはほぼ同じである。H形に関しては、リブ高さに及ぼすパススケジュールの影響はあまり見られない。U形、H形ともに dull pass の方が bright pass よりもリブは高い。

各段通過後のプリフォーム材からの延伸率の推移を Fig. 7 に示す。U形に関して、dull pass では中流段の3, 4段目では延伸を全く生じない。それに加えて PS3 では2段目でも延伸を生じず、また5段目の延伸率も小さいため、その結果全延伸は大きく抑制されている。一方、bright pass では3段目での延伸は dull pass と同様に抑制されているが、

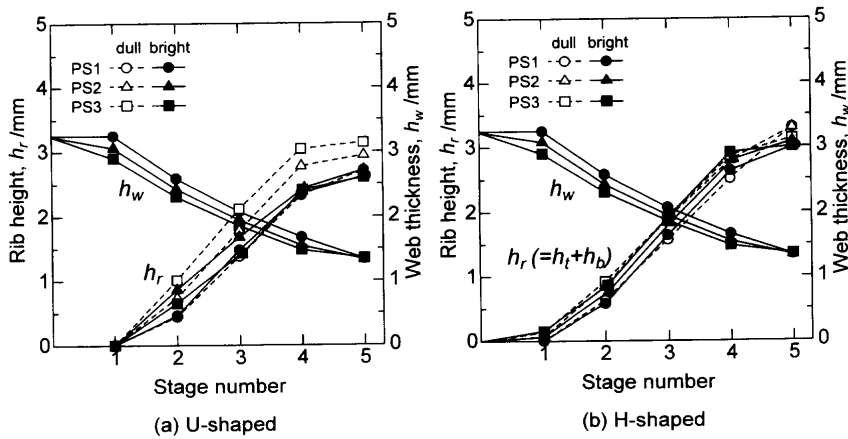


Fig. 6. Variations of rib height and web thickness during satellite-mill rolling. (a) U-shaped (b) H-shaped

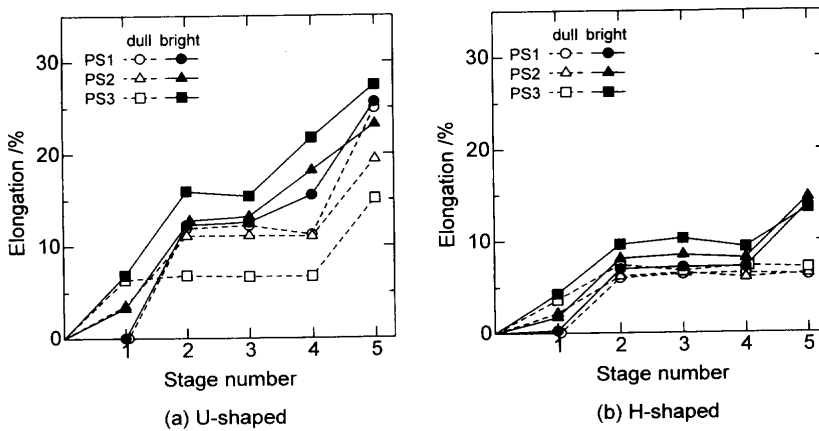


Fig. 7. Variations of elongation during satellite-mill rolling. (a) U-shaped (b) H-shaped

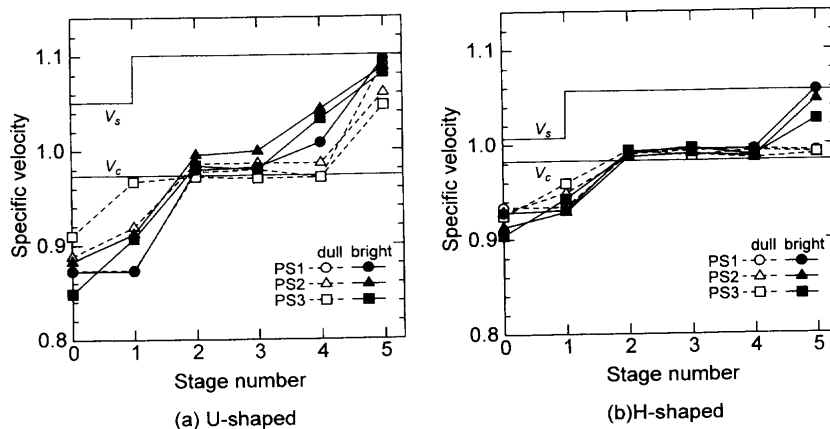


Fig. 8. Variations of velocity, i.e. (material velocity)/(roll speed at pitch line) during satellite-mill rolling. ( $V_s$ : Roll speed at top of satellite roll projection,  $V_c$ : Roll speed at bottom of central roll groove)

dull passに比べて2段目の延伸が大きく、しかも4段目でも延伸を生じており、5段目での延伸率の増加は小さい。H形に関してはパススケジュールによる影響はほとんど見られない。dull passではパススケジュールによって1段目の延伸率に差は見られるが、2段目以降は各パススケジュールではほぼ同じ延伸率となり3段目以降は延伸を生じない。bright passでは1段目ではdull passと同様の傾向を示

す。2段目以降は1段目の圧下率が高いほど延伸率は大きくなるが、その後3、4段目は延伸を生じない。しかし5段目で延伸を生じるため、dull passよりも全延伸率は大きくなっている。

### 3・2 先進特性

圧延中の速度比（材料の速度/ロール周速）の推移をFig. 8に示す。図中の $V_s$ と $V_c$ はそれぞれ衛星ロールの

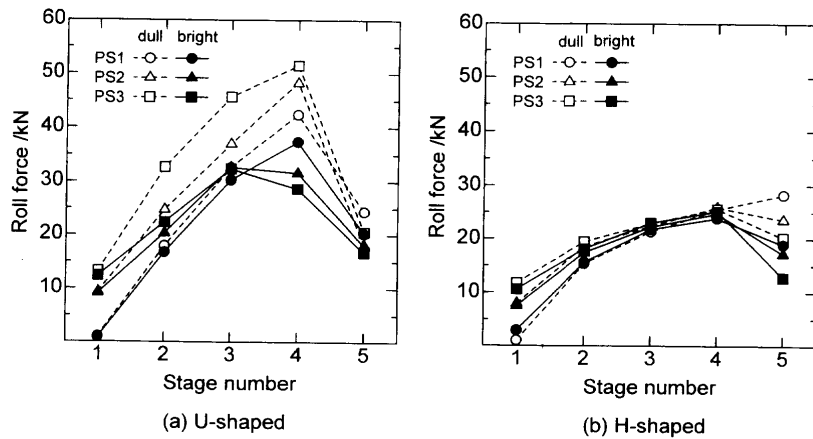


Fig. 9(a). Roll force on each stage in satellite-mill rolling. (a) U-shaped (b) H-shaped

ロール周速と中心ロールのロール周速を示している。まずU形の場合、dull pass, bright passともにどのパススケジュールでも、延伸を生じない段では材料の速度は中心ロール溝底の速度とほとんど同じ速度となっている。なお5段目では速度が増加するが、衛星ロールの突起先端の速度より遅い速度で圧延されている。bright passでは4段目から中心ロール溝底の速度より速くなるため、dull passに比べて中心ロールの速度とほぼ同じ速度である領域が短くなっている。特にdull passでは、PS1, PS2は2段目から中心ロール溝底の速度とほぼ同じ速度であるのに対してPS3は1段目から中心ロール溝底の速度とほぼ同じ速度であり、中心ロール溝底の速度とほぼ同じ速度である領域が長くなっている。一方、H形の場合、パススケジュールの影響はあまり見られない。またdull pass, bright passともに材料の速度は2段目以降で中心ロール溝底の速度と同じ速度になり、その後は速度に変化がなく、U形と同様に衛星ロールの突起先端の速度より遅い速度で圧延されている。bright passでは5段目でも速度が増加する。

3・3 負荷特性

各段における衛星ロールの圧延荷重の分布をFig. 9に示す。まずU形ではdull pass, bright passともに1段目の圧下率が大きいパススケジュールほど1段目の圧延荷重は当然増加し、逆に5段目の圧延荷重は減少する。dull passの場合4段目に急峻なピークを持つフリクションヒルを示す。bright passの場合、dull passに比べて各段での圧延荷重は中流段の2~4段目でかなり低下し、平滑な分布となる。特にこの傾向は4段目で顕著である。H形の場合はU形ほど顕著には見られないものの、dull passに比べてbright passでは1~4段目の荷重は若干減少し、5段目では大きく減少している。

3・4 製品特性

各パススケジュールで圧延した製品の横断面内のピッカース硬さの分布をFig. 10に示す。bright passに関してはPS2のみ示す。なお素材の硬さ分布はHV70~80で均一であ

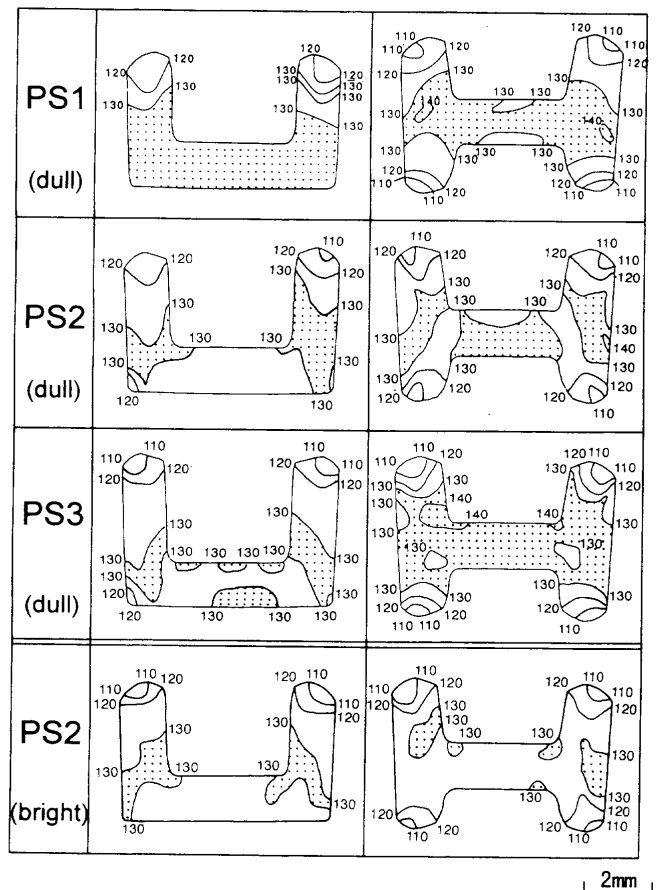


Fig. 10. Hardness (HV) distribution in cross sections of products.

あった。U形、H形ともに、どのパススケジュールの製品もウェブとリップの付け根付近からリップ外側面にかけて、「ハ」の字状に最も硬さの高い領域 (HV130以上) がある。またリップ先端に近づくにつれて硬さは低くなり (HV110以下)、分布は不均一である。また1段目の圧下率が小さいパススケジュールほど、横断面の硬さ分布は均一になる傾向がある。bright passではdull passの場合と分布の仕方は非常によく似ているが、硬さのレベルは全体として若干

下がりやや均一な分布となる。

#### 4. 考察

サテライトミル圧延におけるパススケジュールの影響は、H形に比べてU形で顕著に見られる。またU形の場合、1段目の圧下率の大きいPS3で最も高いリブが成形されており、その傾向は特に中心ロールの表面が粗い場合に顕著である。これはこの場合に延伸抑制効果が大きいことを意味している。どのパススケジュールにおいても中流段で延伸が生じていないことから、全延伸を抑制するためには2段目、5段目の延伸を抑制することが重要である。材料は中心ロールからの拘束が大きくなり中心ロールの溝底速度と同じ速度になると延伸を生じないため、PS3では1段目の圧下率を大きくすることでその拘束される領域が長くなったためと考えられる。一方H形の場合、もともと中心ロールのデッドホールにリブが形成されることにより、材料の長手方向の流れがより強く拘束されるため、パススケジュールの影響が少ないと考えられる。

中心ロールの表面仕上げの影響を見ると中心ロールの表面粗さを滑らかにすると粗い場合に比べて、長手方向の拘束が弱くなり製品の断面積やリブ高さは減少する。これは表面粗さを小さくすると摩擦係数が減少する結果、各段間で生じる長手方向の圧縮力が小さくなり、上述の拘束される領域が短くなるためである。しかしその結果、圧延荷重は著しく減少し、ロールや圧延機への負担は軽減される。閉式の孔型圧延では圧延荷重の増大はロールの折損につながるため、負荷の軽減は重要である。サテライトミル圧延では長手方向に圧縮力が作用するため、圧延荷重は通常の孔型圧延の圧延荷重よりかなり大きい<sup>4,5)</sup>。そのため孔型設計の際には表面粗さの影響も考慮する必要がある。

製品特性では1段目の圧下率が小さいほど、横断面の硬さ分布は均一になる傾向がある。これは1段目の圧下率が小さいパススケジュールでは、全延伸率が大きくなり長手

方向のひずみが大きくなるため、横断面内の相当ひずみの分布が均一になったと考えられる。中心ロールの表面が滑らかな場合に横断面の硬さ分布が均一になる傾向があるのもこれと同じく、全延伸率が大きい理由による。

#### 5. 結言

U形およびH形異形線をサテライトミルで成形する場合の圧延特性に及ぼすパススケジュールおよびロール表面仕上げの影響を検討した結果、次の知見を得た。

(1) U形異形線では長手方向の拘束の少ない1段目と5段目の圧下率を小さくする台形圧下率配分にすることにより全延伸は抑制される。H形ではU形に比べて延伸は小さく、パススケジュールの影響は小さい。

(2) 中心ロールの孔型側面の表面仕上げを滑らかにすると粗い場合に比べて延伸がやや増加し、製品の断面積やリブ高さは減少する。しかし圧延荷重は著しく減少し、ロールや圧延機への負担は軽減される。

(3) 製品断面内の硬さ分布は、ロール表面が滑らかになると粗い場合と比べて分布の傾向はほぼ同じであるが硬さのレベルは若干下がりやや均一になる。また1段目の圧下率が小さいパススケジュールで圧延した場合もその分布はやや均一になる。

#### 文 献

- 1) H.Utsunomiya and Y.Saito: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), N613.
- 2) H.Utsunomiya, Y.Saito and K.Morita: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 68.
- 3) H.Utsunomiya, Y.Saito, T.Hayashi and T.Sakai: *J. Mater. Eng. Performance*, **6** (1997), 319.
- 4) Y.Saito, H.Utsunomiya, K.Hirata and K.Oka: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 431.
- 5) T.Kawamoto, H.Utsunomiya and Y.Saito: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 273.
- 6) H.Utsunomiya, Y.Saito, T.Kawamoto and H.Matsuzawa: *J. Mater. Process. Technol.*, **80-81** (1998), 345.