

純チタン薄板の圧延技術

福田正人*・井端治廣**・樽本慎一**・澤田 護**

*鉄鋼カンパニー・チタン技術部 **加古川製鉄所・薄板部

Commercially Pure Titanium Strip Cold Rolling Technology

Masahito Fukuda・Haruhiro Iyata・Shinichi Tarumoto・Mamoru Sawada

Higher constrained yield strength and galling susceptibility are typical characteristics of commercial cold rolled pure titanium strip. Lubricants with high saponification value are effective in reducing the rolling pressure and to prevent galling. The optimized selection of lubricant and rolling conditions and sophisticated 6-high rolling equipment have enabled cold rolling of commercially pure titanium strip with much higher production efficiency. The combination of these technologies have also made it possible to produce wide thin foil, 0.1mm thick and 800mm wide .

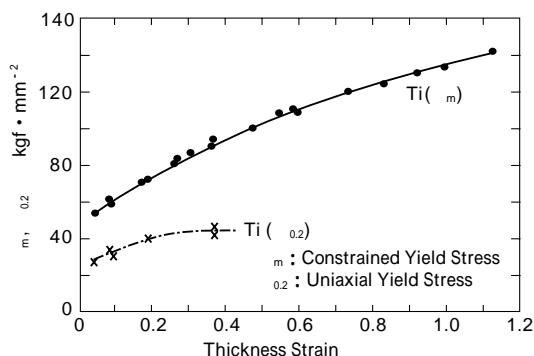
まえばき = わが国のチタン産業は量的に言えば純チタン薄板の世界であるといっても過言ではなく、世界に冠たる鉄鋼あるいはステンレス鋼の生産技術および設備の存在を抜きには語れない。しかし活性で稠密六方晶構造を有することによる純チタン固有の特性を考慮した適切な条件の設定なくして高品質の薄板製造が困難であることはいうまでもない。

純チタン薄板の冷間圧延は通常ステンレス鋼用の小径多段クラスターミル(センジミアミル)によりおこなわれているが、当社では極薄あるいはハイカーボン鋼用の6段リバース式コンビネーションミルでおこなっている。この設備の特徴は、ワークロール径が150~400mmと大きく、それゆえに圧延速度を1000m/min程度まで速くできるという特殊材圧延用としてはきわめて生産性が高いことにある。この類例のない「大径ロールによる純チタン薄板の製造技術」を実用化するためには純チタンの冷間圧延および摩擦・潤滑特性の把握が必要不可欠であった。本稿ではこれらの特性を詳述するとともに、箔圧延までも可能にした最新技術について報告する。

1. 純チタン薄板の冷間圧延特性

1.1 冷間圧延変形抵抗

JIS 2 種純チタン板をもちいて熱間圧延と同等の固着摩擦状態で冷間圧延をおこない、そのときの圧延荷重から熱間圧延理論式を使って逆算した変形抵抗を第1図



第1図 純チタンの冷間圧延変形抵抗 (JIS 2 種)

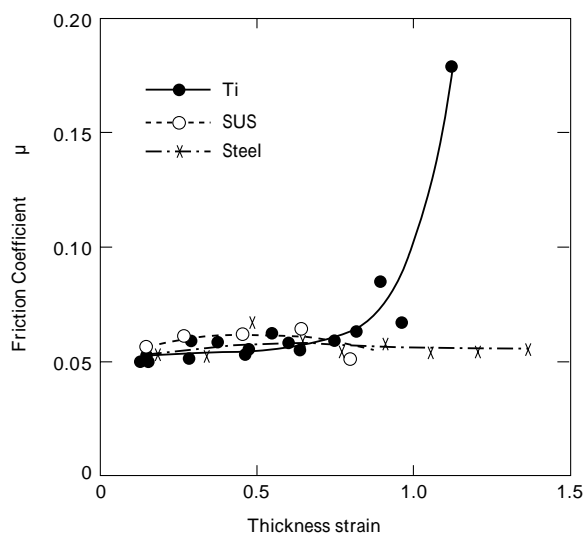
Fig. 1 Constrained yield stress of commercially pure titanium (JIS class 2)

に示す。

平面歪み変形である冷間圧延において、その変形抵抗(拘束変形抵抗)は単軸変形抵抗の2倍近くに達するとともにその値は高炭素鋼なみであることがわかる。これは純チタンの高いr値(圧延直角方向で通常 $r=3\sim5$)が示すように大きな塑性異方性を有するためである。鋼板の冷間圧延においては通常変形抵抗の50%近くの張力を付与するが純チタンにおいては上述の特性のために圧延中の板破断防止の観点から張力は圧延変形抵抗の20%以下にせざるをえない。これがチタン圧延においては鉄鋼材料と異質の挙動を示す原因であり、ひいては操業の困難さの一因にもなっている¹⁾。

1.2 摩擦特性

鉱油+牛脂(組成約1:1 粘度45cSt(38)), 酸価9mgKOH/g, ケン化価80mgKOH/g)を潤滑油にもちいてJIS 2 種純チタン板, ステンレス(SUS347)および軟鋼(キャップドリムド鋼)を1パスあたり15%の圧下率で冷間圧延したときの摩擦係数の変化を第2図に示す。摩擦係数はロールに印をつけて測定された先進率からBland&Fordの関係式²⁾をもちいて求めた。

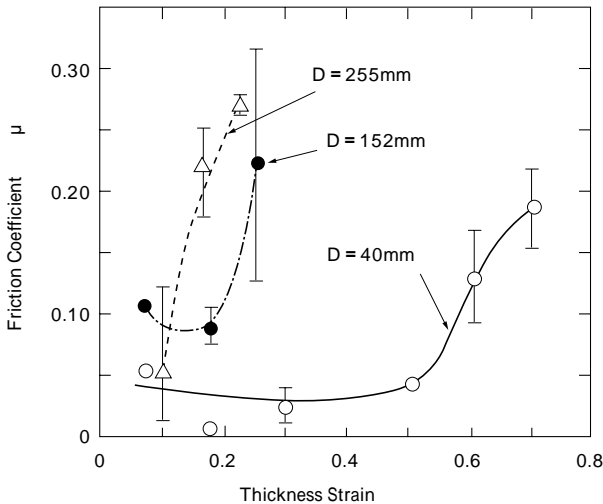


第2図 純チタン, ステンレス鋼, 軟鋼の冷間圧延における摩擦状態

Fig. 2 Frictional condition during cold rolling of C. P. titanium, stainless steel and mild steel



写真1 純チタン圧延後のロール表面状態
Photo 1 Roll surface appearance after cold rolling C. P. titanium



第3図 純チタン圧延時の摩擦状態に及ぼすロール径(D)の影響
Fig. 3 Effect of work roll diameter(D) on frictional condition of cold rolling C. P. titanium

ステンレスおよび軟鋼では圧延の進行にかかわらず摩擦係数は0.05~0.06と一定であるが純チタンでは板厚歪みが0.7(圧下率で50%)以上の領域において急増が認められる。このときロール表面は写真1に示すようにチタンでコーティングされた、いわゆる焼付き(凝着)状態になっている。摩擦係数の急増は圧延荷重の急増を、すなわち圧延状態の不安定化をもたらす。

鉱油(粘度8.5cSt(38)), 酸価0.24mgKOH/g, ケン化価3.4mgKOH/g)をもちいて, JIS 2種純チタン板を1パスあたり10%の圧下率で冷間圧延したときの摩擦係数のロール径依存性を第3図に示す。圧延進行にともな

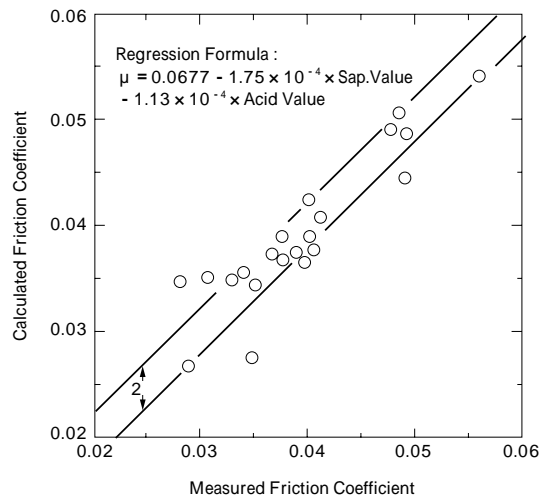
う摩擦係数の増加はロール径が大きいほどいちじるしいことがわかる。

したがって大径ロールで純チタンの冷間圧延をおこなう場合は高い変形抵抗を考慮するだけでなく、摩擦係数の急増を引き起こさないような潤滑条件(潤滑油, 圧延条件)を選ぶことが重要になる。

1.3 焼付き防止に有効な潤滑油の特性

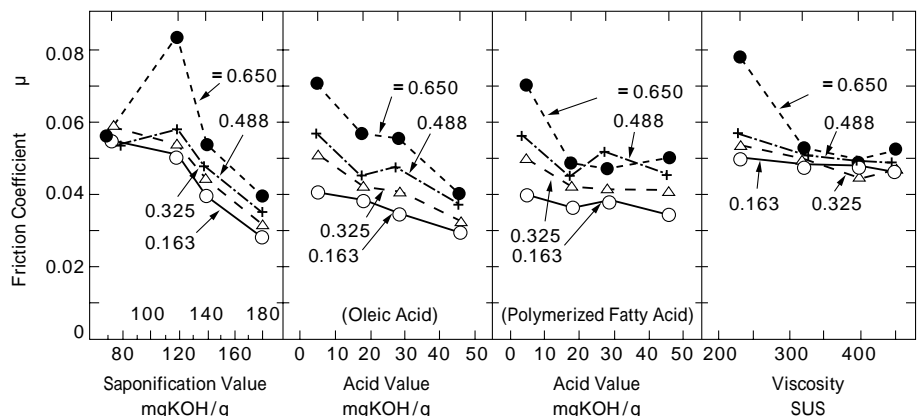
焼付き防止あるいは潤滑性向上のためには適切な潤滑剤を選ぶことが重要であり, チタンに対してはハロゲン化合物の有効性が報告されている³⁾。しかしハロゲンは一般に腐食性がいちじるしく人体にも有害である。そこで実用的な潤滑剤の選択基準として鋼板の冷間圧延にも適用できるという観点から, 合成エステルと鉱油の配合比率を変えると同時に添加剤を加えて, ケン化価, 酸価および粘度の値を調整しこれらの影響を調べた。なお酸価についてはオレイン酸により調整したものとポリメライズド脂肪酸により調整したものを準備した。評価は, JIS 2種純チタン板を15%/パスで4パスの冷間圧延を実施し各パスにおける先進率から求めた摩擦係数でおこなった。第4図に結果を示す。ケン化価およびオレイン酸により調整した酸価が高いほど摩擦係数は低く, ロールへの焼付きもわずかであった。

潤滑剤の各種特性値と摩擦係数の関係を多重回帰分析すると第5図に示す関係がえられる。純チタンの冷間圧延における摩擦状態(摩擦係数)はケン化価および酸価



第5図 潤滑剤特性と摩擦係数の関係
Fig. 5 Relation between lubricant properties and frictional condition during cold rolling C. P. titanium

第4図 純チタン圧延時の摩擦状態に及ぼす潤滑剤特性の影響
Fig. 4 Effect of lubricant properties on frictional condition of cold rolling C. P. titanium



と強い相関が認められる。それぞれの調整可能範囲（ケン化価 70～235 酸価 2.5～46）を考慮すればケン化価の影響がもっとも大きいと考えられる。ケン化価が高い場合に摩擦係数が低下するのは、潤滑剤中に含まれるカルボキシル基および遊離酸が多いほど効果的であることを意味し、圧延中に純チタン表面と何らかの反応をしていると考えられる。この点に関しては化学的反応の観点から検討する必要があると思われる。

1.4 好潤滑状態における表面品質の特徴

ケン化価の高い潤滑剤を使用することで純チタンの冷間圧延において摩擦係数の急増をきたすことなく圧延できることがわかったが、いっぽうで写真2に示すようなオイルピット肌となることが判明した。オイルピットはロールバイト中に潤滑剤が封じ込められて被圧延材に凹み状の表面欠陥として現れるものである。

オイルピットが形成される流体潤滑状態では自由表面と考えられる肌荒れが生じ結晶粒との関連が深いことは良く知られている⁴⁾。そこで素材結晶粒径の異なる3種類のJIS2種純チタン板を牛脂ベースの高ケン化価油（ケン化価 185 酸価 26 粘度 70cSt）をもちいて5%/パスで総圧下率50%まで冷間圧延したときの表面状況を写真3に示す。必ずしも結晶粒の大きさと是对応しているわけではないが素材結晶粒径が小さいほどオイルピットも小さくなるのがわかる。

このほか、素材強度レベル、素材表面状況、圧下率、ロール径および圧延速度の影響について調査した結果、オイルピット深さは主として素材結晶粒径とワークロール径に依存し次式の関係で一義的に決定されることを見出した^{5)~8)}。

$$d_{max} = 0.287X^{0.329} Y^{0.437}$$

ここで d_{max} : 最大オイルピット深さ μm
 X : 素材結晶粒径 μm
 Y : ワークロール径 mm

このことは使用するロール径に応じて素材結晶粒径を調節することにより外観上あるいは実用上支障のない表面肌をえることが可能となることを意味している。

2. 冷間リバースミルによる純チタンストリップの圧延技術

2.1 基本仕様

前章で純チタンの冷間圧延における特徴として、変形抵抗が高いこと、焼付きによる摩擦係数の急増が起こり易いこと、焼付き防止にはケン化価の高い圧延油が有効であること、いっぽう、高ケン化価油をもちいると焼付きは防止できるもののオイルピット肌になりやすいが、素材結晶粒径とワークロール径を適切に選ぶことによりオイルピット深さを制御できること、などを明らかにした。

これらの知見を考慮して設置した6段冷間リバースミルの主仕様を第1表に示す。本設備では鋼板および軟質チタン用の大径ロール(UC-1)と高強度チタン用で小径ロール(UC-2)の2種類のロール配置を可能とさせている。

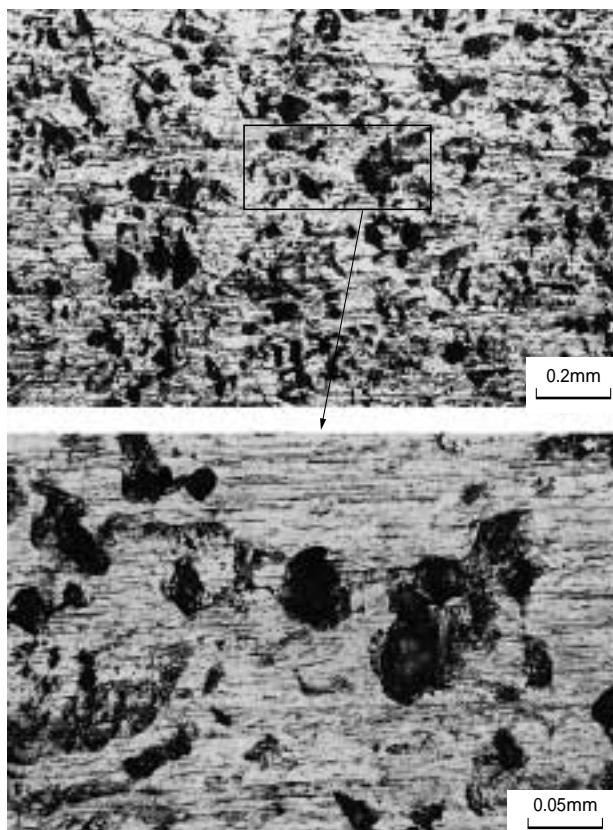


写真2 好潤滑状態で圧延したときの板表面状況
 Photo 2 Surface appearance of C. P. titanium after cold rolling under excellent lubricity

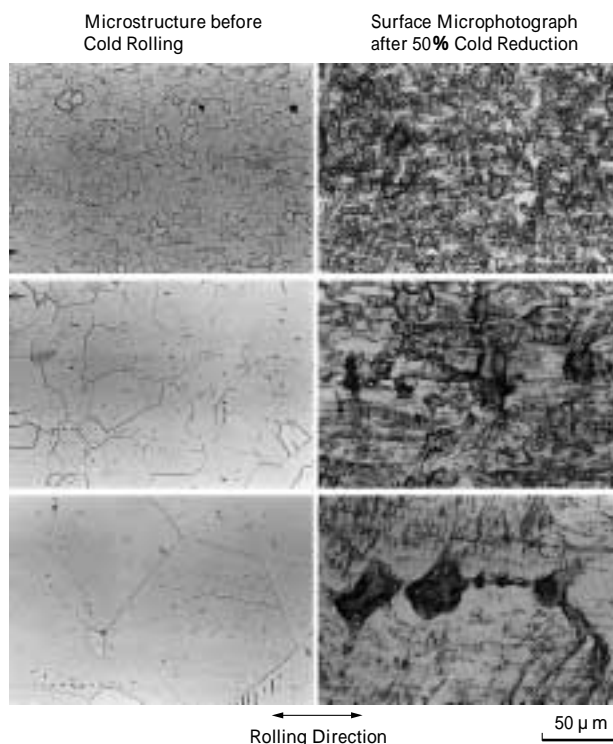


写真3 素材結晶粒径とオイルピットの関係
 Photo 3 Relationship between grain size and hydrodynamic pocket

2.2 形状制御特性と最適パススケジュール

このような比較的ワークロール径の大きなコンビネーションミルで純チタンを圧延すると片耳波、コータ伸び、中伸びなどの形状不良が鋼板よりも発生しやすい現象がしばしば認められた。そこで当該ミルにおける純チタン

第1表 リバースミルの主仕様

Table 1 Specifications of reverse cold rolling mill (RCM)

	UC-1	UC-w2
Roll Arrangement (Upper Half)		
Work Roll Diameter mm	440	165
Entry & Delivery Tension ton force	max. 30 or 11	max. 30 or 11
Line Speed m/min	max. 1 400	max. 450
Driving Roll	Work Roll	Intermediate Roll
Material		
Entry Thickness mm	1.6 ~ 5.0	1.0 ~ 4.5
Delivery Thickness mm	0.1 ~ 2.3	0.1 ~ 2.3
Width mm	600 ~ 1 400	600 ~ 1 400
Weight ton	max. 50	max. 50
Lubricant		
Saponification Value mgKOH/g		175.0
Acid Value mgKOH/g		20.0
Viscosity at 38 cSt		98.2
Density at 60 g/cm ³		0.905
Emulsion Concn. %		2 ~ 4
Automatic Gauge Control (AGC)		Feed Forward AGC Monitoring Thickness AGC Monitoring Rolling Load AGC Tension Monitor AGC Compensating Acceleration AGC Roll Eccentricity AGC
Shape Control (Divided Roller Type Shape Meter)		Intermediate Roll Shifting Intermediate Roll Bending Work Roll Bending Zone-coolant Control

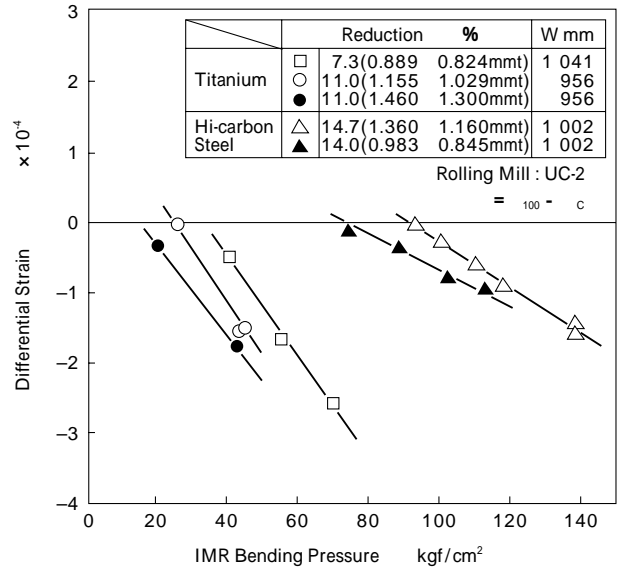
の形状制御特性を調査した⁹⁾。JIS 2種純チタンと高炭素鋼に対して、中間ロールのベンディング圧力を変えて板形状（ここでは板幅中央部と板端 100mm の位置の伸び歪みの差）の変化との関係を調査した結果、第6図の関係をえた。

ワークロールプロフィールを変化させるロールベンディング圧力が板形状に及ぼす影響は鋼板よりも純チタンに対するほうが大きい。いい換えれば、純チタンではわずかなロールプロフィールの変化でも形状が敏感に変化する。第6図における直線の勾配（ロールベンディング圧力の変化に対する形状変化の度合い）は材料によって異なっている。アルミニウムに対しても同様の実験をおこない、ヤング率で整理した結果を第7図に示す。低ヤング率の材料ほどロールプロフィールの変化に対して敏感に形状が変化することがわかる。したがって、チタンのように形状制御の難しい材料を圧延する場合は、ロールプ

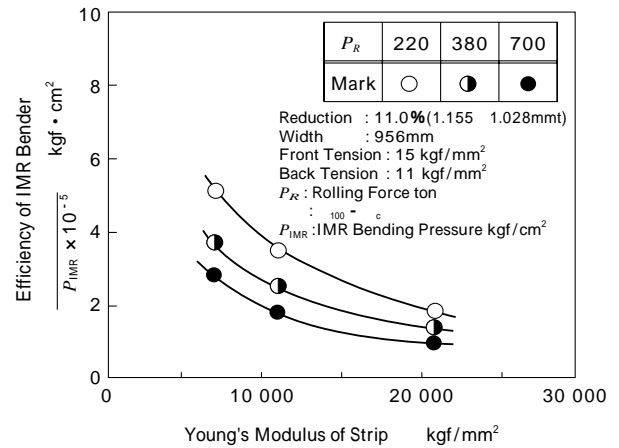
第2表 リバースミルにおける純チタン冷間圧延のパススケジュール

Table 2 Pass schedule of cold rolling for C. P. titanium of JIS class-1
Roll arrangement: UC-1, 3.3t x 1 038w mm

Pass No.	Delivery Thickness mm	Thickness Reduction %	Rolling Force ton	Front Tension kgf/mm ²	Back Tension kgf/mm ²	UC- mm		WR Bending kgf/mm ²	IMR Bending kgf/mm ²	Flatness of Strip Steepness %
						Upper	Lower			
1	2.928	11.3	890	6.5	2.5	57	57	125	70	Center Wave 1.0
2	2.502	14.6	850	8.0	7.0	57	57	100	70	
3	2.140	14.5	830	11.0	9.0	57	57	110	70	Center Wave 1.3
4	1.835	14.3	880	10.0	9.0	57	57	100	70	
5	1.577	14.1	870	11.5	10.0	57	57	100	70	Center Wave 1.5
6	1.385	13.9	930	11.0	9.0	57	57	100	70	
7	1.173	13.6	870	11.5	10.5	57	57	100	60	Center Wave 1.07
8	1.016	13.4	890	11.0	9.0	57	57	100	70	
9	0.884	13.1	860	10.0	10.0	57	57	100	60	Center Wave 1.8
10	0.771	12.8	890	11.5	9.5	57	57	100	50	
11	0.675	12.4	820	11.5	11.5	46	66	90	50	Center Wave 1.4
12	0.594	12.0	870	11.5	9.5	46	66	100	50	
13	0.530	10.8	800	11.5	11.0	46	46	120	40	Center Wave 1.0



第6図 圧延形状に及ぼすロールベンディング圧力の影響
Fig. 6 Influence of IMR bending pressure on flatness of C. P. titanium and steel IMR: Intermediate roll



第7図 ロールベンディング圧力の形状影響係数に及ぼすヤング率と圧延荷重の影響
Fig. 7 Influence of Young's Modulus and rolling pressure on efficiency of IMR bending pressure

ロフィルの変化が少なくなるような圧延条件を選ぶことが重要となる。

上記の観点から選択した操業条件(パススケジュール)の一例を第2表に示す。その特徴は、パス内およびパス間で極力ロールプロフィールが変化しないように、さらに圧延荷重がほぼ一定になるように設定していることにあ

第3表 リバースミルにおける極薄純チタン箔冷間圧延のパススケジュール

Table 3 Pass schedule of cold rolling for C. P. titanium foil of JIS class-1

Roll arrangement : UC-2, 0.513t × 800w mm

Pass No.	Delivery Thickness mm	Thickness Reduction %	Rolling Force ton	Front Tension kgf/mm ²	Back Tension kgf/mm ²	WR Bending kgf/mm ²	IMR Bending kgf/mm ²	Flatness of Strip Steepness %
1	0.457	10.9	120	5.0	8.0	50	50
2	0.384	16.0	145	12.0	14.0	70	60	
3	0.323	12.7	161	12.0	14.0	85	75	Edge Wave 1.8
4	0.275	14.9	176	14.0	16.0	85	75	
5	0.236	14.2	205	14.0	16.0	85	75	Edge Wave 1.8
6	0.205	13.1	211	14.0	16.0	85	75	
7	0.180	12.2	197	14.0	16.0	80	70	Edge Wave 1.5
8	0.159	11.7	228	14.0	16.0	80	70	
9	0.143	10.1	221	14.0	16.0	75	65	Edge Wave 1.6
10	0.129	9.8	225	14.0	16.0	75	65	
11	0.118	8.5	211	13.0	15.0	75	65	Edge Wave 1.6
12	0.108	8.5	264	13.0	15.0	75	65	
13	0.101	6.5	226	13.0	15.0	70	60	Edge Wave 1.2

る。また、ケン化価の高い圧延油を使っているとはいえ過度に強圧下すると、焼付き、すなわち摩擦係数の増加がおこり圧延が不安定になりやすいので、1パスあたりの圧下率は約15%以下にとどめている。

2.3 極薄ストリップの圧延

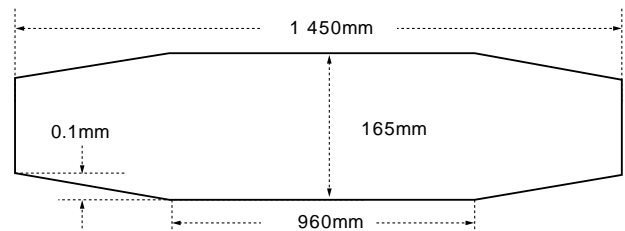
チタン材料の主たる市場は長い間、航空機、化学、熱交換器などであったが、近年のいちじるしい伸長にともなう様々な分野からのニーズが生じつつある。その一つに箔の分野があげられる。

冷間リバースミルのチタンに対する当初仕様はヤング率の低い材料ということもあって板厚0.3mm以上であった。しかし「より薄く」という顧客要請に応えるべく厚さ0.1mmの広幅箔圧延の可能性について検討した。

鋼板においては0.1mm台の圧延は比較的容易であったが、ヤング率の低い純チタンではキスロール（被圧延材のない領域におけるワークロールどうしの接触）による圧延限界に早期に達してしまうため、0.3mmまでの圧延条件を延長するには限界があった。そこで第8図に示すようなチャンファ加工が施されたワークロールを準備した。前節と同様の考えかたでパススケジュールの設定をおこない、第3表に示すように後半パスにおいてほぼ荷重一定の圧延を実施することで0.1mmまでの圧延を可能にした。

なお圧延中の縦しわ防止のため弱耳波ぎみの圧延としたが、しわ押さえ防止用のデフレクタロールなどを付与することによりさらに安定した圧延が可能になると考えられる。

むすび = 純チタン薄板の冷間圧延特性および大径ワークロールを有するコンビネーションミル（冷間リバースミ



第8図 0.1mm 極薄純チタン箔圧延用ワークロール

Fig. 8 Work roll profile for cold rolling titanium foil with 0.1 mm thickness

ル)による冷間圧延技術について述べた。ステンレス用小径センジミルによる冷間圧延が一般的なチタン業界のなかで、その品質および生産性の高さから一つの新しい方向性を示したと考えられる。また、従来、チタン分野においては狭幅の箔ミルの世界であった厚さ0.1mmのストリップ圧延をも可能にしたことは、この製品分野を「箔ミルの世界からコールドストリップミルの世界」に移行させたものであり少なからぬ意味のあることと思われる。今後ともわが国チタン産業の強みである純チタン薄板の発展に寄与できるよう努力していきたい。

参考文献

- 1) 福田正人ほか：塑性と加工，Vol.24, No.264 (1983) p.59.
- 2) Ford H. et al. : J. Iron & Steel Inst., Vol.168 (1951) p.57.
- 3) R. J. Wilcox et al. : J. Inst. Met., Vol.88 (1959/60) p.200.
- 4) 時沢 貢：日本金属学会誌，Vol.37, No.1 (1973) p.19.
- 5) 福田正人ほか：昭58 春塾加講論，(1983) p.385.
- 6) 福田正人ほか：昭58 秋塾加講論，(1983) p.185.
- 7) 福田正人ほか：昭59 春塾加講論，(1984) p.489.
- 8) 福田正人ほか：公開特許，昭55-69174号.
- 9) 井端治廣ほか：材料とプロセス，Vol.1, No.5(1988) p.1540.