
マンドレルミルにおける負荷特性と変形特性

Rolling Load and Material Flow in Mandrel Mill Rolling

今江 敏夫(Toshio Imae) 山本 健一(Ken-ichi Yamamoto) 佐山 泰弘(Yasuhiro Sayama) 高田 庸(Isao Takada) 篠倉 恒樹(Tsuneki Shinokura) 高橋 善生(Yoshio Takahashi)

要旨：

実機の約 1/2 サイズのモデルミルを用いてマンドレルミルにおける継目無鋼管の圧延特性を調査し、以下のことが明らかになった。(1)圧延荷重はマンドレルレバー速度に大きく影響され、バー速度がロール溝底の周速にほぼ等しいときに極大値を示す。(2)この現象からストマックの生成機構が説明できる。(3)後方張力によって圧延荷重と管材断面形状を効果的に制御できる。(4)潤滑剤塗布時のマンドレルバー温度は潤滑性能に大きく影響する。以上の結果を現場ミルに応用し、品質の向上に著しい効果を得た。

Synopsis：

Characteristics of mandrel mill rolling were investigated with a model mill. The results are summarized as follows: (1) Mandrel bar speed has a great influence on rolling force. The rolling force has a peak when the mandrel bar speed is nearly equal to peripheral roll speed. (2) This phenomenon explains the mechanism of "stomach formation" in the full float mandrel mill. (3) Rolling force and material flow are easily controlled by backward tension. (4) Temperature of the mandrel bar during lubrication has a great influence on lubricity. The above results were successfully applied to the field operation.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Rolling Load and Material Flow in Mandrel Mill Rolling



今江 敏夫
Toshio Imae
鉄鋼研究所 知多研究
部 主任研究員(掛長)



山本 健一
Ken-ichi Yamamoto
鉄鋼研究所 知多研究
部 主任研究員(掛長)



佐山 泰弘
Yasuhiro Sayama
鉄鋼研究所 知多研究
部 部長・工博



高田 庸
Isao Takada
鉄鋼研究所 知多研究
部 主任研究員(部長
補)



篠倉 恒樹
Tsuneki Shinokura
(株)富士電機総合研究
所 製造技術研究所 主
任研究員



高橋 善生
Yoshio Takahashi
石川島播磨重工業(株)
鍛圧機械事業部

要旨

実機の約 1/2 サイズのモデルミルを用いてマンドレルミルにおける継目無鋼管の圧延特性を調査し、以下のことが明らかになった。

- (1) 圧延荷重はマンドレルバー速度に大きく影響され、バー速度がロール溝底の周速にほぼ等しいときに極大値を示す。
- (2) この現象からストマックの生成機構が説明できる。
- (3) 後方張力によって圧延荷重と管材断面形状を効果的に制御できる。
- (4) 潤滑剤塗布時のマンドレルバー温度は潤滑性能に大きく影響する。

以上の結果を現場ミルに応用し、品質の向上に著しい効果を得た。

Synopsis:

Characteristics of mandrel mill rolling were investigated with a model mill. The results are summarized as follows:

- (1) Mandrel bar speed has a great influence on rolling force. The rolling force has a peak when the mandrel bar speed is nearly equal to peripheral roll speed.
- (2) This phenomenon explains the mechanism of "stomach formation" in the full float mandrel mill.
- (3) Rolling force and material flow are easily controlled by backward tension.
- (4) Temperature of the mandrel bar during lubrication has a great influence on lubricity.

The above results were successfully applied to the field operation.

1 緒 言

継目無鋼管の製造工程で使用するマンドレルミルは、素管の中にマンドレルバーを挿入して連続的に配置された穴形ロールスタンドによって管材を延伸する圧延機である。材料の中にマンドレルバーがあるため、マンドレルミル圧延は他の圧延、例えば棒鋼圧延や板圧延と比較して、以下本稿で詳細に述べるように種々の興味深い特徴を有する。マンドレルミル圧延によって寸法精度および表面性状の良好な鋼管を安定して製造するためには、ミルの特性を熟知しておくことが必要である。しかし、鋼によるマンドレルミルの熱間圧延の実験的解析は、それを調査するための実験装置が複雑で高価なことから、比較的少ない¹⁾。熱間のマンドレルミル圧延全般に関する、より詳細な研究調査を行うため、1983年にモデルミルが設置された。モデルミルを用いて、単スタンド圧延および2スタンドタンドム圧延による基本的な圧延特性の調査、ならびにマンドレルバーと材料との間の潤滑特性の調査を実施した。

以下に、これらのマンドレルミル圧延特性の調査結果および現場ミルへの適用結果について報告する。

2 モデルミル

モデルミルは実験専用機として導入された。ミルの構造を Fig. 1 に、基本仕様を Table 1 に示す。モデルミルはバー駆動装置を有する入側テーブルと5基のハウジングスタンドおよび出側テーブルにより構成されている。実験精度を向上させるため、各ロールおよびマンドレルバーの駆動にはオブザーバー制御回路を具備した全デジタル制御方式の直流電動機が採用された。各スタンドの圧延荷重、トルク、ロール回転数、スタンド間力、マンドレルバー速度、マンドレルバースラスト力、管材のフランジ部の幅(以後バルジ幅

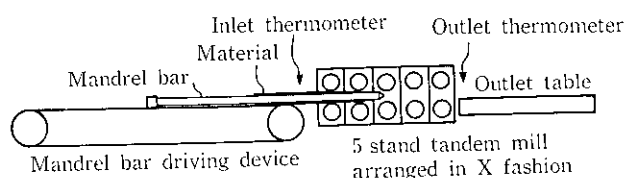


Fig. 1 Schematic view of the model mill

* 昭和61年5月10日原稿受付

Table 1 General specification of the model mill

Number of stands	5
Roll flange diameter	280 mm
Distance between stands	500 mm
Maximum outlet speed	1 m/s
Thermometer	2 sets
Bulge width gauge	2 sets
Load-cell for rolling force	2 sets/stand
Load-cell for inter-stand force	2 sets/stand
Load-cell for bar thrust force	1 set
Torque-meter	2 sets/stand

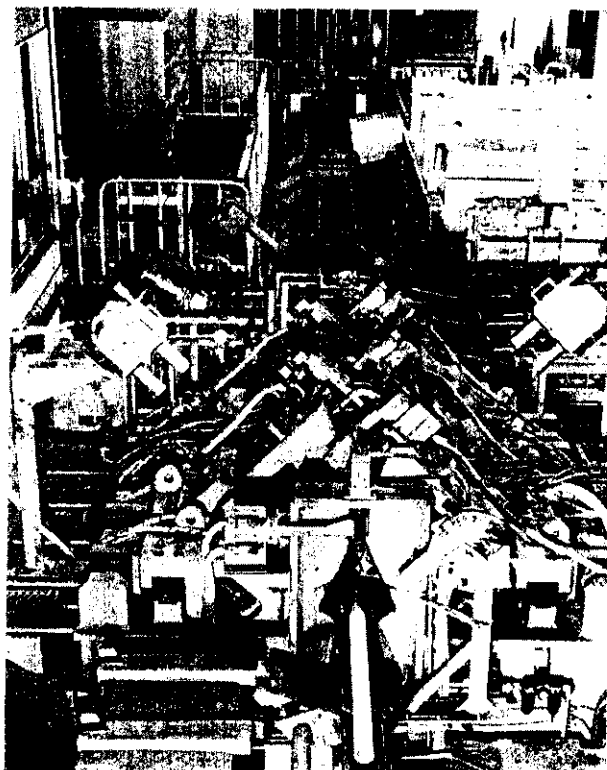


Photo 1 Appearance of model mill

という), 材料温度などを測定する各種の高精度センサーが導入された。ミルの運転とデータ収集は完全にコンピュータ化されている。モデルミルの外観を Photo 1 に示す。

3 単スタンドおよび2スタンドタンデム圧延実験^{2,3)}

マンドレルミルは普通6ないし8基のタンデムスタンドより構成されており, しかも素管の中にマンドレルバーを挿入して圧延するので, その総合的な圧延特性は複雑である。マンドレルミル圧延の基本的な特性を調査するため, 比較的単純な単スタンドおよび2スタンドタンデム圧延実験を実施した。

3.1 実験条件

Table 2 に実験条件を示す。単スタンド圧延実験は第2スタンドで, 2スタンドタンデム圧延実験は第1および第2スタンドで実施した。実験精度を向上させるため, 素管として, 寸法精度の良い普通鋼電縫鋼管を選んだ。素管を電気抵抗炉を用い窒素ガス雰囲気中

Table 2 Experimental conditions

		Single stand rolling (2nd stand)	Two stand rolling (1st and 2nd stand)
Material		89.1 mm ^φ × 9.0 mm ^t × 1 500 mm ^l	
Mandrel bar		66.0 mm ^φ × 10 m	
Lubricant		Mixture of graphite and water	
Heating temperature in hearth furnace		1 220°C	
Rolling temperature at the pass entry		1 050°C	
Rolling temperature at the pass exit		950°C	
Pass reduction at caliber bottom	1st	—	38.4%
	2nd	43.5 and 32.8%	43.5%
Peripheral roll speed at caliber bottom	1st	—	385–550 mm/s
	2nd	674 mm/s	674 mm/s
Mandrel bar speed		400 — 1 000 mm/s	300 mm/s

で 1 220°C に加熱した。マンドレルバーは潤滑性能をできるだけ高めるように, 十分予備圧延を行って表面に良好な酸化皮膜が形成されたものを選び, 約 100°C に加熱した後, 黒鉛と水を混合した潤滑剤をスプレー塗布した。

3.2 実験結果

3.2.1 単スタンド圧延実験結果

Fig. 2 に単スタンド圧延実験の模式図を示す。この実験ではロール溝底の周速 V_r を固定し, マンドレルバー速度 V_b のみを変化させた。ロール溝底における圧下率は 43.5% と 32.8% の2水準である。圧延荷重, 圧延トルクおよびバースラスト力とマンドレルバー速度比 V_b/V_r との関係をそれぞれ, Fig. 3, 4 および 5 に示す。圧延荷重はバー速度に大きく影響され, バー速度がロール溝底の周速にはほぼ等しいとき極大値を示す。圧延トルクおよびバースラスト力はバー速度の増加と共に減少するが, バー速度がロール周速より十分に速いか遅い場合には一定値を示す。Fig. 6 にロール周速と出側の材料速度の等しい点すなわちロール出側中立点の位置とマンドレルバー速度比との関係を示す。圧下率の変化は中立点の位置にほとんど影響しない。Fig. 7 にスタンド出側バルジ幅とマンドレルバー速度比との関係を示す。単スタンド圧延においては, バー速度はバルジ幅にほとんど影響を与えない。

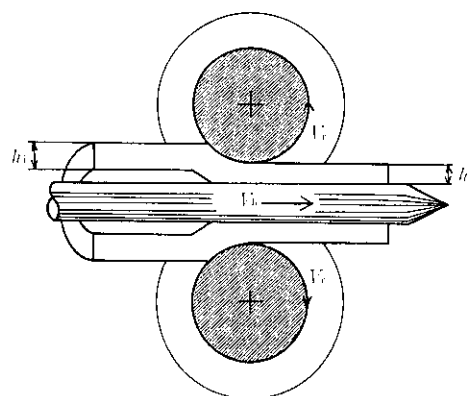


Fig. 2 Schematic view of single stand rolling

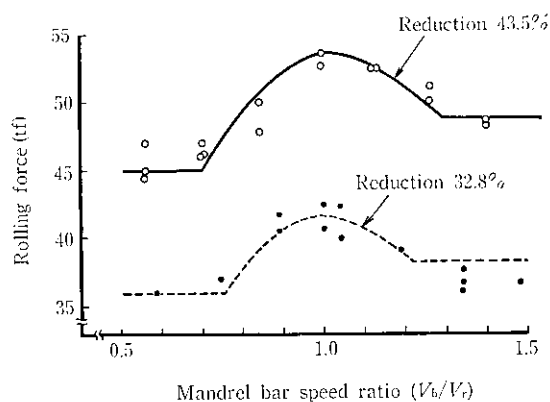


Fig. 3 Effect of the mandrel bar speed on the rolling force

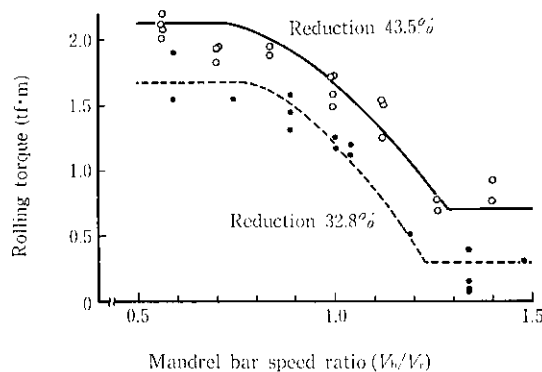


Fig. 4 Effect of the mandrel bar speed on the rolling torque

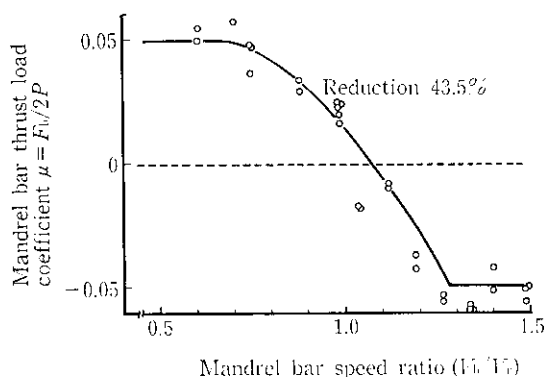


Fig. 5 Effect of the mandrel bar speed on the mandrel bar thrust load

3.2.2 2スタンドタンデム圧延実験結果

Fig. 8 に2スタンドタンデム圧延実験の模式図を示す。この実験では第2スタンドのロール速度とマンドレルバー速度を固定し、第1スタンドのロール速度のみを変化させた。このロール速度変化にともなう各スタンドの圧延荷重とスタンド間張力の変化を Fig. 9 に示す。この場合のスタンド間張力は材料とバーの両者にかかる力の和である。第1スタンドのロール速度の低下にともない、スタンド間張力はほぼ直線的に増加する。このとき、第2スタンドの圧延荷重は顕著に減少するが、第1スタンドの圧延荷重減少量は比較的小さい。このことから、圧延荷重に及ぼす後方張力の影響は前方張力のそれよりも大きいといえる。

各スタンド出側のバルジ幅とフランジ部の減肉率をそれぞれ、Fig. 10 および 11 に示す。第1スタンドのロール周速の低下にと

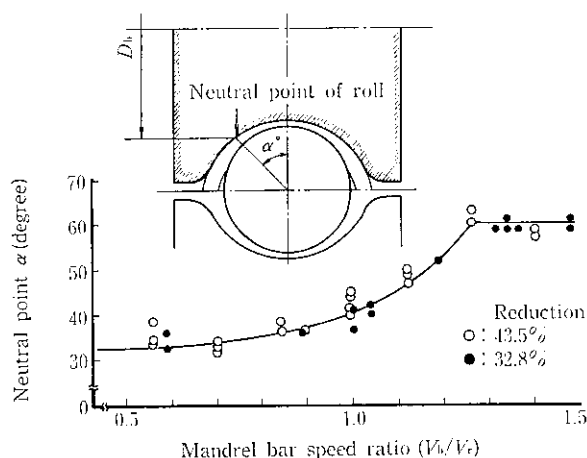


Fig. 6 Effect of the mandrel bar speed on the neutral point

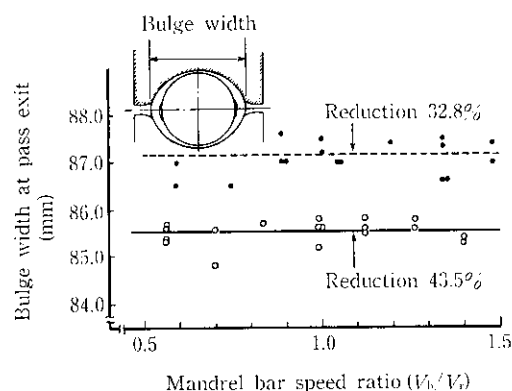


Fig. 7 Effect of the mandrel bar speed on the bulge width at pass exit

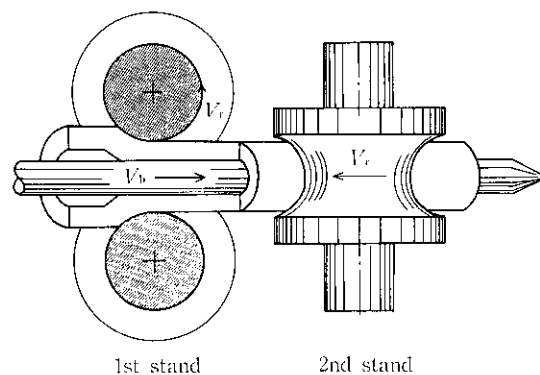


Fig. 8 Schematic view of two-stand tandem rolling

もない、第2スタンド出側のバルジ幅とフランジ部の肉厚は顕著に減少するが、第1スタンド出側のバルジ幅とフランジ部の肉厚の減少量は比較的小さい。Fig. 12 に各スタンド出側の材料の断面形状の例を示す。条件(A)では第1スタンドのロールは標準速度で運転されている。それに対し、条件(B)では第1スタンドのロールは標準速度より30%遅い速度で運転されている。第1スタンドのロール速度の低下にともない、第2スタンド出側断面形状は顕著に変化するが、第1スタンド出側断面形状の変化は比較的小さい。このことから、断面形状は前方張力よりも後方張力に大きく影響されることがわかる。

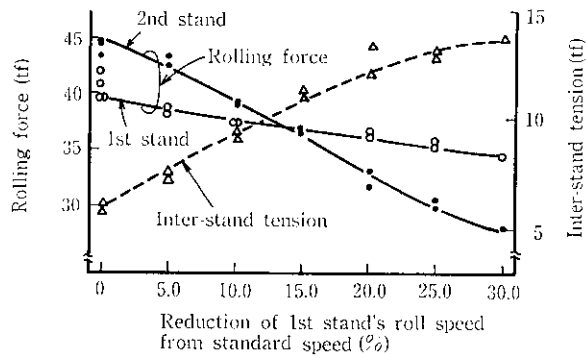


Fig. 9 Effect of roll speed of 1st stand on rolling force and inter-stand tension

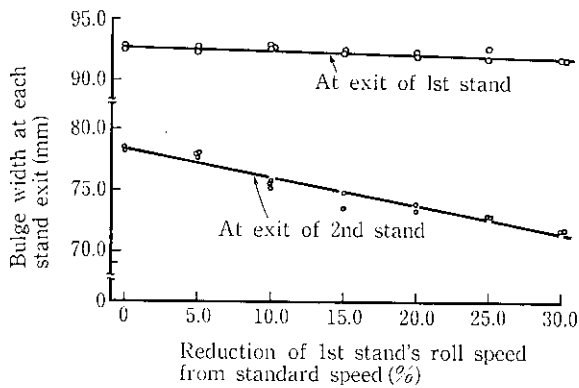


Fig. 10 Relation of the bulge width at the pass exit to the roll speed reduction of 1st stand

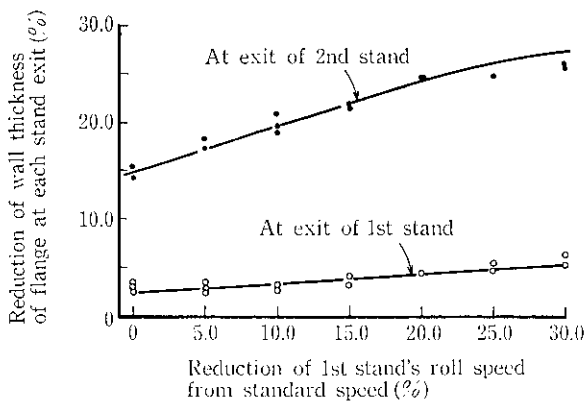
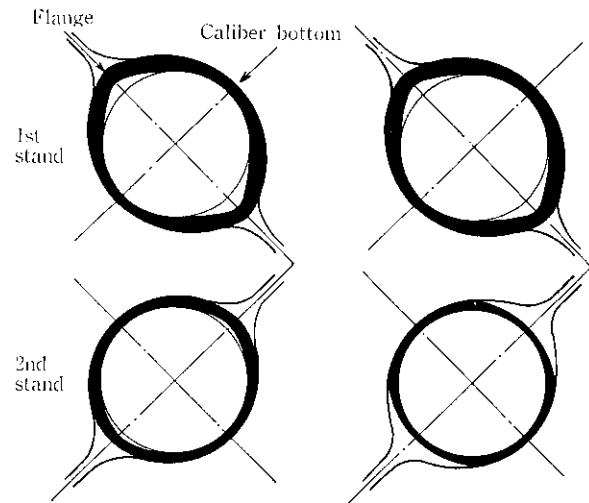


Fig. 11 Relation of the wall thickness reduction at flange to the roll speed reduction of 1st stand



(A) 1st stand's rolls are driven at standard speed (B) 1st stand's rolls are driven at speed 30%-reduced from standard

Fig. 12 Material cross sections at each stand exit

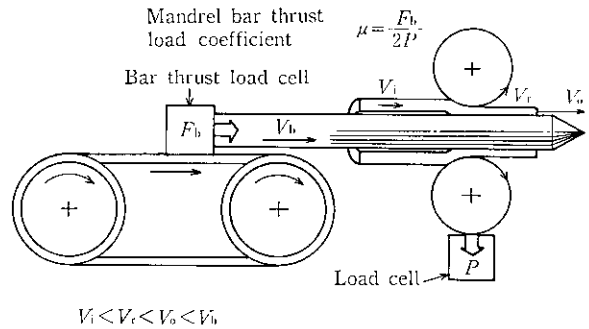


Fig. 13 Measuring method of frictional coefficient between material and mandrel bar

Table 3 Experimental rolling conditions

Material	Plain carbon steel
Mandrel bar	5%Cr—1%Mo steel
Lubricant	Mixture of graphite and water
Rolling temperature	1 050°C at the pass entry
Reduction	21.4% at caliber bottom
Peripheral roll speed	480 mm/s at caliber bottom
Mandrel bar speed	626 mm/s
Material speed	About 450 mm/s at pass entry About 565 mm/s at pass exit

4 マンドレルバーの潤滑⁴⁾

マンドレルミル圧延において、マンドレルバーと材料間の潤滑特性は操業の安定と管材の品質に大きく影響する。潤滑剤として一般に黒鉛系潤滑剤が使用されており、その塗布量と塗布条件が潤滑性能に大きな影響を及ぼすことは操業経験上よく知られている。この潤滑条件が潤滑性能に及ぼす影響を調査するため、単スタンド圧延実験を実施した。

4.1 実験方法

第2章で紹介したモデルミルを用いて材料とマンドレルバー間の

摩擦係数を測定する方法を Fig. 13 に示す。ただし、管材の圧延であるので、測定された値は真の摩擦係数とは若干異なる。この実験では、マンドレルバーの運転速度 V_0 を出側材料速度 V_e よりも速く設定しているため、マンドレルバーと材料間の摩擦力の方向は圧下部で一定でありスリッピング状態と考えられる。圧延条件を Table 3 に、潤滑剤塗布条件を Table 4 に示す。8水準の実験条件を設定した。実験条件1から実験条件4では潤滑剤の塗布量を、実験条件5から実験条件8では、塗布量以外の塗布条件を変化させた。実験条件1, 2, 3, 4における潤滑剤固形成分の塗布量はそれぞれ、10, 20, 30, 60 g/m² である。実験条件5, 6, 7, 8におけ

Table 4 Applying conditions of lubricant

No. of experimental conditions	1	2	3	4	5	6	7	8
Subjects								
Quantity of dry lubricant (g/m ²)	10	20	30	60	60	60	60	60
Mandrel bar temperature in lubrication (°C)	90	90	90	90	90	15	15	15
Mandrel bar temperature just before inserting to hot-low bloom (°C)	90	90	90	90	15	15	15	15
Appearance of lubricated bar surface*	D	D	D	D	D	D	W	W
Mandrel bar history**	U	U	U	U	U	U	U	N

* D: dry, W: wet

** U: After used more than 100 time

N: After newly machined

る潤滑剤固形成分の塗布量はすべて 60 g/m² である。実験条件 1 から 4 までは、マンドレルバーが熱いうちに (約 90°C) 潤滑剤を塗布し、直ちに圧延に使用した。実験条件 5 では、マンドレルバーが熱いうちに潤滑剤を塗布し、その後室温 (15°C) にて 24 時間放置して十分冷却した後、圧延に使用した。実験条件 6 では、室温のマンドレルバーに潤滑剤を塗布し、その後、室温にて 24 時間放置して潤滑剤が乾いた後、圧延に使用した。実験条件 7 では、室温のマンドレルバーに潤滑剤を塗布し、その直後に濡れたままで圧延に使用した。実験条件 8 では、改削したままの酸化皮膜のない室温のマンドレルバーに潤滑剤を塗布し、その直後に濡れたままで圧延に使用した。

4.2 実験結果

摩擦係数に及ぼす潤滑剤固形成分の塗布量の影響を Fig. 14 に示す。単スタンド圧延で良好な潤滑性能を得るためには、少なくとも 30 g/m² 以上の潤滑剤固形成分の塗布量が必要である。摩擦係数に及ぼす潤滑剤塗布条件の影響を Fig. 15 に示す。実験条件 4 から 7 までの結果から、潤滑性能を支配する主な因子は潤滑時のマンドレルバー温度であることがわかる。従来より、一般に冷えたマンドレルバーを用いると潤滑性能が劣るので、圧延に使用するべきではないと信じられてきた。しかし、マンドレルバーが熱いうちに潤滑剤を塗布しておけば、たとえそれが冷えた後でも、十分な潤滑性能を得

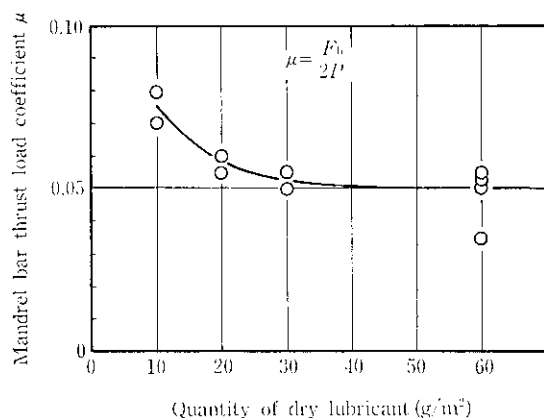


Fig. 14 Effect of the coated lubricant quantity on frictional coefficient between material and mandrel bar

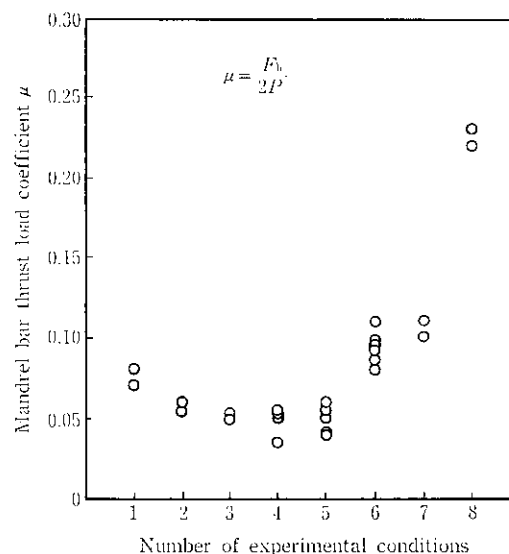


Fig. 15 Effect of lubricant coating conditions on frictional coefficient between material and mandrel bar

ることができる。実験条件 6 と実験条件 7 の結果の比較から、潤滑剤が乾いているか濡れているかは、潤滑性能に影響を与えないことがわかる。実験条件 8 の結果は圧延時にマンドレルバー表面に形成された酸化皮膜が潤滑に重要な役割を果たしていることを示している。

5 タンデム圧延実験と現場ミル操業への応用

マンドレルミルにはリテインドバー方式とフルフロートバー方式とがある。リテインドバー方式のミルでは、ミル入側に設置されたバーリストレイナーにより、圧延中のマンドレルバー速度を一定に制御できるが、バーリストレイナーの無いフルフロートバー方式のミルでは管材先端が次スタンドにかみこむ時、あるいは管材後端が前スタンドを抜ける時にバーは増速する。フルフロートバー方式のマンドレルミルにおいては圧延後の管材の長手方向に特徴的な偏肉パターン (以後ストマックという) が生成する。ストマック生成の原因がマンドレルバーの速度変化にあることは現象論的に知られているが、その生成のメカニズムは完全には解明されていない。ストマック生成の原理を明らかにするため、フルフロートとリテインド両方式で 5 スタンドタンデム圧延実験を実施した。両方式での各スタンドの圧延荷重とバー速度の時間変化を Fig. 16 に示す。フルフロート方式の場合、バーの増速にともなって第 1 スタンドの荷重は減少し、下流の第 3、第 4 スタンドの圧延荷重は上昇する。この現象は Fig. 3 に示した単スタンド圧延実験結果から説明できる。Fig. 3 に示すように圧延荷重はマンドレルバー速度とロール溝底周速がほぼ等しいとき最大となる。マンドレルバーの速度は圧延の進行にともなって増加し、一方、ロール周速は下流スタンドに行くほど速く設定されているので、マンドレルバー速度と材料速度の等しくなる点、即ち中立点は圧延当初は第 1 スタンドに存在するが、圧延の進行にともない下流のスタンドに順次移動していく。したがって、圧延荷重は上流スタンドでは圧延の前半で、下流スタンドでは圧延の後半で最大となる。圧延荷重の変動はミル剛性を介してロール間隔の変動となり、とくに下流スタンドでのロール間隔の変動はそのまま仕上げ管材の長手方向肉厚変動となる。同様の現象は現場ミルでも観測される。Fig. 17 に現場の 8 スタンドフルフロート方式マンドレルミルで観測された各スタンド圧延荷重の変化の例を示

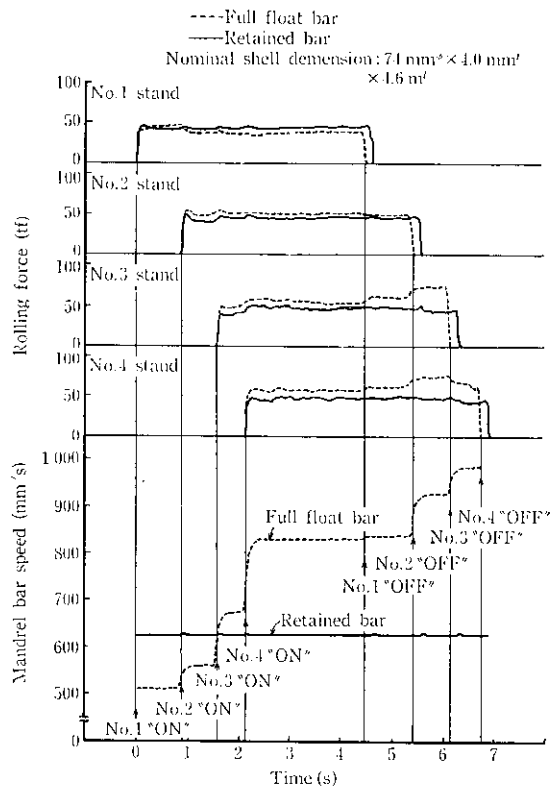


Fig. 16 Comparison between rolling characteristics in full float bar and retained bar operations in model mill

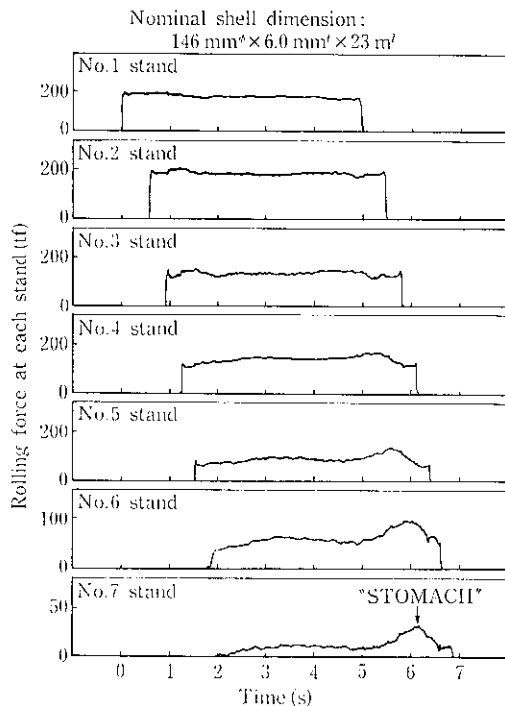


Fig. 17 Rolling force at each stand under constant rolling speed (roll speed control "OFF")

す。管材後端が上流スタンドを抜けると、マンドレルバーが増速し、肉厚を仕上げる第5、第6スタンドの圧延荷重が上昇する。その時、仕上げスタンドに後方張力がかかるようにロール回転数を制御すると、Fig. 18に示すように、圧延荷重の上昇を解消することができる。ロール回転数制御を実施すると、ストマックは減少し、

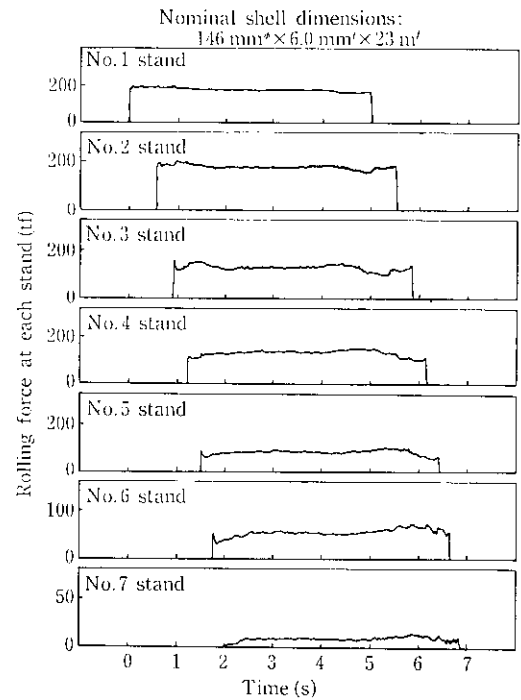


Fig. 18 Rolling force at each stand under dynamic control of rolling speed (roll speed control "ON")

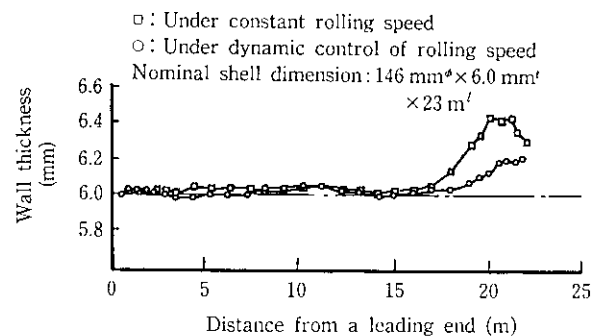


Fig. 19 Change in wall thickness of tube in longitudinal direction

Fig. 19に示すように、圧延後の管材の長手方向肉厚分布は均一化される。

6 考 察

マンドレルミル圧延において、マンドレルバー速度と圧延荷重の間に、Fig. 3に示すような関係が観察された。この現象の発生機構について考察する。Fig. 20はマンドレルミル圧延におけるロール溝底部の圧延方向断面を単純化したモデルである。フラットロールとバーによる、幅方向変形のない2次元異速板圧延モデルを想定し、Von Karman流の初等理論³⁾を適用して、長手方向面圧分布を計算する。計算するにあたって、ロールと材料間の摩擦係数は0.5、バーと材料間の摩擦係数は0.05と仮定した。マンドレルバー速度が入側材料速度と出側材料速度の中間的な値をとる場合には、ロールと材料の中立点、およびバーと材料の中立点がロールバイトアングル内に存在し、Fig. 21に示すようにフリクションヒルが2つ存在する面圧分布が得られる。それに対し、マンドレルバー速度が入側材料速度より遅いか出側材料速度より速い場合には、バーと材料

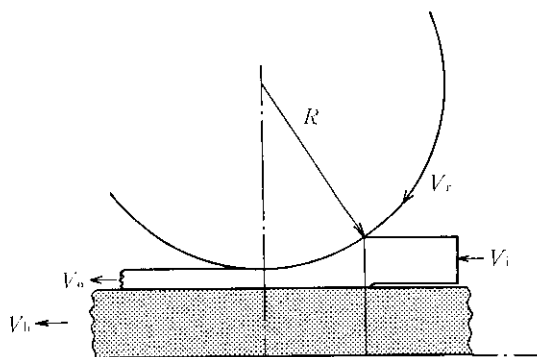


Fig. 20 Simplified model for a mandrel mill rolling

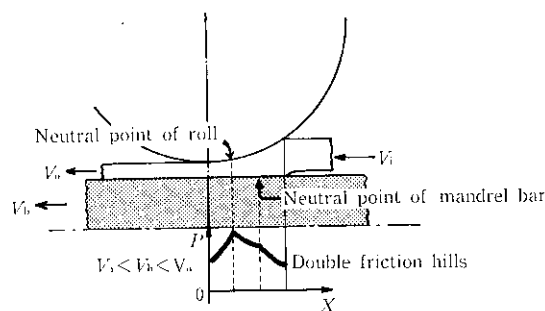


Fig. 21 Distribution of the rolling pressure when the mandrel bar speed is between inlet and outlet material speeds

の中立点は存在せず、ロールと材料の中立点のみがロールバイトアングル内に存在し、Fig. 22 に示すようにフリクションヒルがひとつよりなる面圧分布が得られる。前者の場合に比べ後者の場合、ロールバイトアングル内の材料に対するロール側摩擦力の方向とバー側摩擦力の方向が異なる剪断変形領域がより多く現れるので、圧延荷重は低くなる。マンドレルミル圧延においては、圧下率が円周方向に均一ではないので、管材の延伸率から平均圧下率を求め、板圧延モデルに置き換える。板圧延モデルに置き換えて計算した結果をFig. 23 に示す。計算値と実験値は比較的良く一致する。

7 結 言

モデルミルを用いて難目無鋼管のマンドレルミル圧延の基本特性を調査した。主な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 圧延荷重はマンドレルバー速度に大きく影響され、バー速度がロール溝底の周速にほぼ等しいとき極大値を示す。スタンド

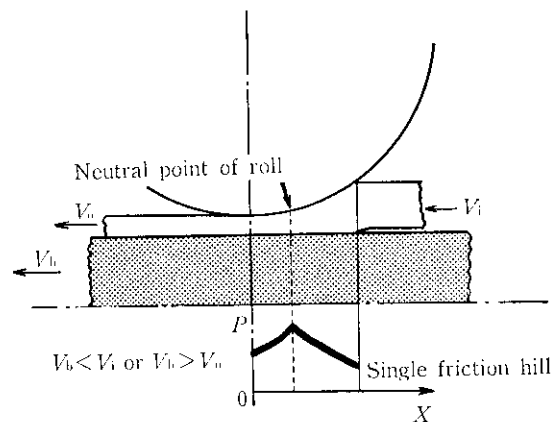


Fig. 22 Distribution of the rolling pressure when the mandrel bar speed is faster than outlet material speed or slower than inlet material speed

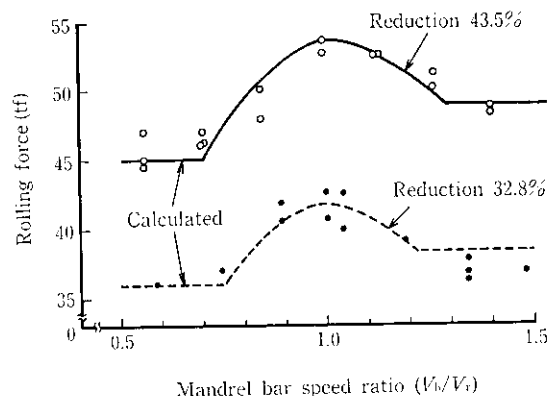


Fig. 23 Calculated rolling force by simplified theoretical model

間力に変動しない場合、管材のフランジ部の幅（バルジ幅）はマンドレルバー速度の影響をほとんど受けない。

- (2) 圧延荷重および断面形状は前方張力より後方張力に大きく影響される。
- (3) マンドレルバーの潤滑に水分散性黒鉛系潤滑剤を使用する場合、潤滑性能は潤滑剤塗布時のマンドレルバー温度により大きな影響を受け、圧延時のそれにはあまり影響されない。
- (4) フルフロートマンドレルミル圧延においても、適当なロール回転数制御により、管材の長手方向肉厚分布を、かなり均一化することができる。

参 考 文 献

- 1) 内田 秀, 増田 一郎, 渡辺和夫, 川並高雄, 大江茂範: 昭和58年塑性加工春季講演会論文集, (1983), 321
- 2) 今江敏夫, 山本健一, 関 剛, 高橋善生, 篠倉恒樹, 阿武英文: 昭和59年塑性加工春季講演会論文集, (1984), 545
- 3) T. Imae, K. Yamamoto, Y. Sayama, Y. Takahashi and T. Shinokura: "Roll Load and Material Flow During Rolling on a Mandrel Mill", 9th Conference on Advances in the Production of Tubes,

- Bars and Shapes, ASM, Cincinnati (USA), April (1985)
- 4) T. Imae, K. Yamamoto, T. Seki, H. Kato, T. Shinokura and H. Meguro: "Fundamental Characteristics of Mandrel Mill Rolling and Its Application to Practical Mill Operation", The Third International Conference on Steel Rolling, ISIJ, Tokyo (Japan), September (1985)
- 5) T. H. Von Karman: "Beitrag zur Theorie des Walzvorgangs", Z. ang. Math. u. Mech., 5 (1925), 139