

# 高速冷間圧延テストミルによる鋼板表面性状の評価

## Evaluation of Surface Property of Strips Rolled by Laboratory High Speed Cold Rolling Mill

松下 哲/Tohru Matsushita・総合技術研究所 製板プロセス研究部 主任研究員

山本秀男/Hideo Yamamoto・総合技術研究所 製板プロセス研究部 主任研究員

### 要 約

近年、冷間圧延の分野で重要な課題となっている高速圧延条件下での光沢に代表される板表面性状の造り込み技術の開発を目的として、新たに高速冷間圧延テストミルを導入した。本テストミルは、実機圧延と同じトライボロジー条件を実現させるために、高速でのコイル圧延が可能な設備仕様とした。また、ステンレスを用いた圧延テストで得られた板の表面性状を実機圧延材のそれと比較評価した結果、本テストミルによれば従来のテスト装置では困難であった実機圧延状態の再現が可能であり、したがって、実機における圧延条件の変化にともなう板表面性状の変化を事前に評価できることが確認された。

### Synopsis

A new laboratory cold rolling mill has been installed in order to develop the technology for controlling strip surface properties such as brightness after rolling. One of remarkable characteristics of this mill is its high rolling speed of 1000 mpm. using coiled material. Comparison between surface properties of stainless steel rolled by this mill and those rolled by a production mill proved that production mill rolling can be simulated by this model mill much more precisely than with previous model mills. Therefore, using this mill, it is possible to predict strip surface properties which would be produced by a production mill under various rolling conditions.

## 1. 緒 言

近年、冷間圧延の分野においては、高速化、高圧下化指向にともなう圧延荷重の低減や焼付きの防止はもとより、光沢や鮮映性に代表される板表面性状の造り込みを目的としたトライボロジー関連技術が重要な課題となっている<sup>1)</sup>。なかでも、ステンレス鋼薄板は用途上、良好な板表面光沢が要求されるため、その冷間圧延は、従来からセンジミアミルに代表される小径ワークロール(以下 WR)を有する多段ミルによって低速で行われてきたが、最近では生産性の向上を目的として、新型ミルによる高速圧延や大径 WR のタンデムミルによる圧延が指向されている<sup>2)</sup>。

このような高速あるいは大径 WR による圧延においては板表面光沢の劣化を招き、ヒートスクラッチと呼ばれる焼付き疵が発生しやすくなる。このため、これらの問題を解消して良好な板表面性状を得るためのトライボロジーの観点に立脚した圧延油の開発や冷延条件の最適化技術が要求されるようになってきた<sup>3)</sup>。

このような課題に取り組むに際しては、特に実機での高速圧延領域におけるトライボロジー条件を再現できて、圧延後の板表面性状に及ぼす圧延条件の影響を定量的に明らかにすることができる潤滑性評価試験機<sup>4)</sup>が必要となるが、

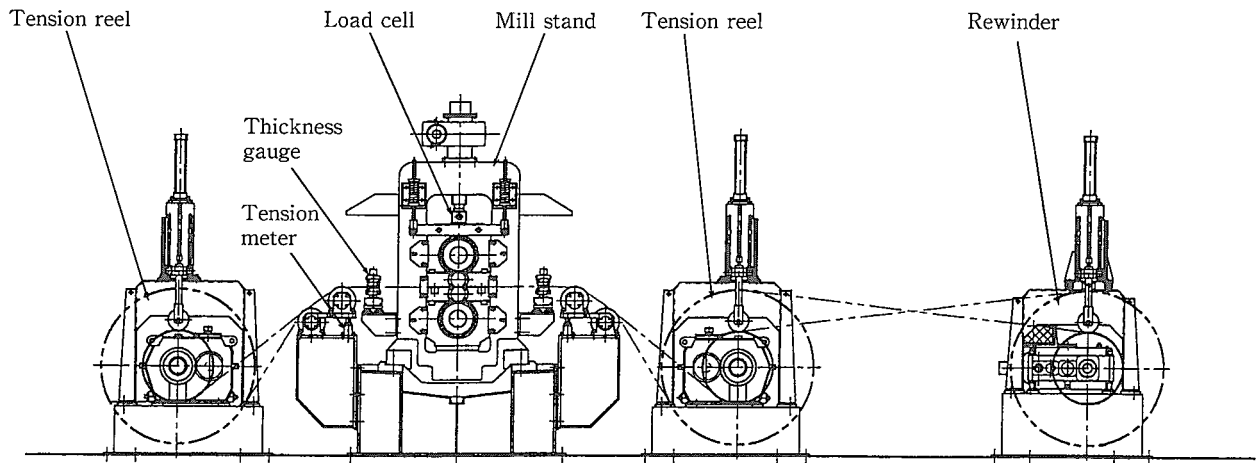
従来の基礎的潤滑試験機や低速のテストミルでこのような要求を満足することは非常に困難と判断されたため、新たに高速でコイル圧延を行える冷間圧延テストミルを総合技術研究所に導入した。

本報では、まず本テストミルの設備概要について述べ、次いで、ステンレス鋼を用いた圧延テストを例に取り、テストで得られた板の表面性状を評価することによって本テストミルによる圧延テストの有効性について実機圧延状態の再現性の観点から検討した結果を紹介する。

## 2. 高速冷間圧延テストミルの主仕様と狙い

新たに導入したテストミルの主仕様を第1表に、また概観を第1図に示す。本テストミルの設計に当たっては、前述のように実機での圧延にできるだけ近い状態を再現できることを最も重視し、以下の考え方に基づいて仕様を決定した。

圧延後の板表面性状、特に光沢はロールと材料間に導入される圧延油によって形成される油膜の厚さに大きく支配される。したがって、実機圧延におけるトライボロジー条件をテストミル圧延で再現するには、両者におけるロール



第1図 高速冷間圧延テストミルの概観

Fig.1 General arrangement of laboratory high speed cold rolling mill

第1表 高速冷間圧延テストミルの主仕様

Table 1 Specifications of laboratory high speed cold rolling mill

Item		Specification
Mill type		4 high/2 high reversing mill
Roll dimensions	4 high	WR : $\phi$ 100 mm $\times$ 200 mm $\ell$ BUR : $\phi$ 250 mm $\times$ 200 mm $\ell$
	2 high	WR : $\phi$ 350 mm $\times$ 200 mm $\ell$
Rolling speed		Max. 1 000 m/min
Screw down force		Max. 588 kN
Tension		Max. 12.7 kN
Coil (or sheet) dimensions	Coil	Width : 50~100 mm Entry thickness : Max. 2.0 mm
	Sheet	Width : Max. 100 mm Entry thickness : Max. 4.5 mm
Coolant system		Recirculation, Tank capacity : 200 $\ell$ Flow rate : Max. 80 $\ell$ /min
Measuring item		Rolling load, Rolling torque, Thickness, Tension, Peripheral speed of roll, Traveling speed of strip Strip temperature, Coolant temperature

および母材の表面性状を揃えとともに油膜厚さを等しくする必要がある。

この油膜厚さの大小を表す代表的パラメータとしては、水野によって提唱された以下の(1)式で表される油膜厚さ当量  $t_d$ <sup>5)</sup>がよく用いられるため、ここでもこれを基にミル仕様の検討を行った。

$$t_d = \eta \cdot (U_0 + U_1) / \alpha \cdot p \quad (1)$$

ここで、 $\eta$  は圧延油の粘度、 $U_0$  はロール周速、 $U_1$  は接触弧入口の材料速度、 $\alpha$  は噛み込み角、 $p$  は接触弧入口の圧力で材料の変形抵抗に等しい。

テストミル圧延における  $t_d$  の値を実機圧延のそれにできるだけ近付けることを考え、(1)式の各因子について実機とテストミルで比較検討した。ここで、実機としては、ステ

ンレス専用として当社の主力ミルである 12 段クラスターミル<sup>6)</sup>を主対象とした。

まず、ミルの基本である WR 径については、(1)式の  $\alpha$  の値に関わる点を考慮して検討を行った。WR 径を大きくすれば  $\alpha$  の値が小さくなるため、圧延速度 ( $U_0$ 、 $U_1$ ) を低く抑えられるが、ステンレスのような変形抵抗が高い材料の圧延では圧延荷重が過大となって目標とする圧下率が得られなくなることが懸念される。一方、極小径の WR では機械的強度の点で高速運転が困難である。以上のことから、本テストミルでは基本的に実機と同じ WR 径を採用した。ただし、後述するように、機械寸法の許容できる範囲内で大径の WR も使用できるよう配慮した。

なお、 $\alpha$  の値は圧下量によっても変わるから、テスト圧延材の寸法決定に当たってはこの点を考慮するとともに圧延スケジュールも工夫することとした。

$p$  は材料の変形抵抗に等しいから、実機とテストミルでそれらを同じにすることは容易である。次に  $\eta$  と圧延速度 ( $U_0$ 、 $U_1$ ) について検討した結果を以下に述べる。

(1)式をみると、 $\eta$  の大きな高粘度の圧延油を用いれば、圧延速度を大きくしなくても比較的容易に実機圧延と同じ油膜厚さ  $t_d$  を得ることができそうに考えられる。しかしながら、 $\eta$  の定量化は必ずしも容易ではない。すなわち、ここで必要となる  $\eta$  の値は、圧延中のロールバイト内における高温、高圧条件下での値であるが、現状では圧延圧力に相当するような極高圧下での値を知ることは極めて困難である。この  $\eta$  の温度・圧力依存特性は油種によって異なることを考慮すると高温・高圧下での正確な  $\eta$  が明らかでない圧延油を用いたテストでは、圧延速度を調整したところで必ずしも実機圧延におけるトライボロジー条件を正確に再現しているとは言えない。そこで、このような信頼性に欠ける要因を排除してテスト圧延における  $\eta$  の値を実機圧延におけるそれと同じにするには実機使用油と同一の圧延油をテスト油として供試することが最良の方法と考えられ

第2表 実機標準圧延条件

Table 2 Standard rolling condition on production mill

Mother coil	Pass schedule	Rolling speed
SUS 430 hot annealed and pickled 3.2 mm $\times$ 1 030 mm $\times$ Coil	3.2 mm $\rightarrow$ 0.385 mm/9 passes (20~22 % red./pass)	Max. 600 m/min

第3表 高速冷間圧延テストミルにおけるテスト圧延母材と圧延スケジュール

Table 3 Mother coil and pass schedule for rolling tests on laboratory high speed cold rolling mill

Condition	Mother coil	Pass schedule
No.1	SUS 430 cold annealed and pickled 2.0 mm $\times$ 50 mm $\times$ Coil	2.0 mm $\rightarrow$ 0.241 mm/9 passes (20~22 % red./pass)
No.2	SUS 430 hot annealed and pickled 3.2 mm $\times$ 50 mm $\times$ Coil	3.2 mm $\rightarrow$ 0.385 mm/9 passes (20~22 % red./pass)

る。以上のことから、残る圧延速度についても必然的に実機と同じか、あるいはそれにできるだけ近い値とすることが必要となる。

さて、上述のようにテスト圧延における(1)式中の各因子を実機圧延のそれらと同じ値にすれば、理論的には切板の高速圧延テストでも $t_d$ の値を実機圧延のそれと同じにすることは可能である。しかしながら、切板の圧延では圧延方向に油膜厚が変動して定常状態を得ることが非常に困難なことや、噛み込み、尻抜けによるロール損傷の発生を過去において経験しており、またロールや圧延材の温度を実機におけるそれらに近付けることも容易ではないため、前述の $\eta$ の値を実機圧延と同じにすることが困難である。

すなわち、高速圧延において定常状態を得るとともにロールと板の温度を実機圧延に近付けるにはコイルでの圧延が必要と考えられる。

以上に述べた考え方に基づいて本テストミルでは実機同様、コイルでの高速圧延が行えることを必須の条件とし、テストミルとして、これまでに例のない小径WRによる最高1 000 m/minのコイル圧延が可能な能力を具備させた。

以下に、本テストミルの設備面の特徴を述べる。

- (1)基本となる型式を4段ミルとし、前述のようにステンレス専用ミルと同じ小径WRによる圧延を可能とするとともに、テストの目的に応じてWRが比較的大径の2段ミルとしても使用できる型式とした。
- (2)多パスの圧延を効率的に行うために、リバース圧延が可能な仕様とした。
- (3)変形抵抗の高いステンレス鋼を冷延するに必要な、高圧下力、高張力を付与できる能力を具備させた。
- (4)コイル圧延は、多量のテスト材を必要とするためにテスト費用が嵩むことや、条件を細かく変更してテストを行うには不向きであることを考慮し、テストの目的に応じて切板の圧延も行える仕様とした。
- (5)圧延状況をより定量的に考察するに必要な広範なデータを得ることを目的として計測装置の充実を図った。

### 3. 高速冷間圧延テストミルによるステンレス圧延材の表面性状

本テストミルでの圧延テストによって圧延後の板表面性状を評価することの妥当性を検証するために、ステンレス鋼帯を用いて圧延テストを行い、圧延後の板表面性状およびヒートクラッチ発生状況を実機圧延におけるそれらと比較評価した結果を以下に紹介する。

#### 3-1 テスト圧延条件

圧延テストは、第2表に示す実機(12段クラスターミル)における標準的圧延条件を想定し、基本的にこれを模擬した条件で行った。

##### (1)圧延母材と圧延スケジュール

テストに供した圧延母材と圧延スケジュールを第3表に示す。条件No.1は実機圧延条件と比較して母材の寸法、表面仕様が異なるが、パス数とパス当たりの圧下率を同じにしたスケジュール、条件No.2は母材の板幅と前半パスでの張力以外を実機圧延条件と同じにしたスケジュールであり、テストの目的に応じていずれかまたは両者を採用した。

なお、条件No.2の母材厚は、ミル仕様の公称最大厚を超えるがWRが小径の場合には初期パスを低速とすることで圧延が可能である。

##### (2)圧延速度

圧延速度に関しては第4表に示すようにレベルの異なる2条件とし、テストによりいずれかを選択した。

第4表 高速冷間圧延テストミルにおけるテスト圧延速度

Table 4 Test rolling speed on laboratory high speed cold rolling mill

Pass number	1	2	3	4	5~9
Rolling speed (m/min)	A	100	100	100	100
	B	200	300	400	500

第5表 供試 WR の明細

Table 5 Condition of work roll used for rolling tests  
on laboratory high speed cold rolling mill

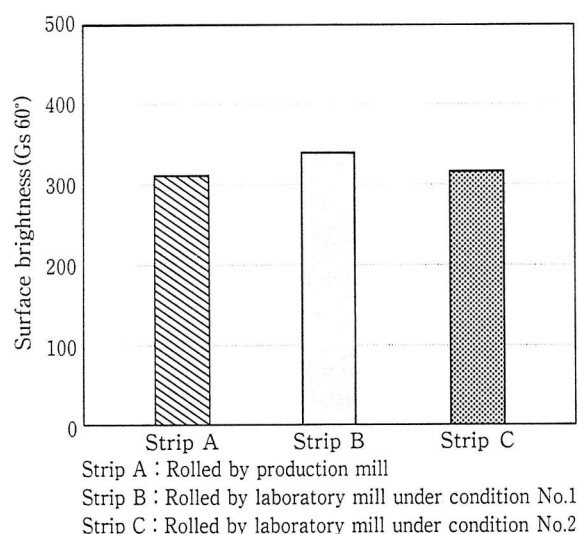
Dimension	$\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm } \ell$
Material	SUJ-2
Surface roughness	Ra $0.13 \mu\text{m}$

(3)供試 WR

テストに用いた WR の明細を第5表に示す。

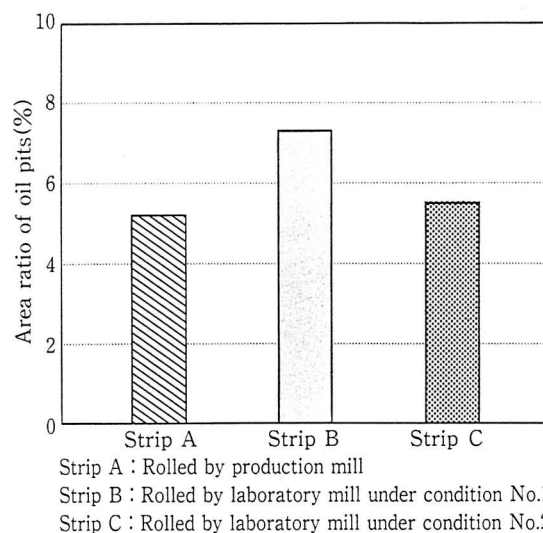
## 3-2 実機圧延材との板表面性状比較

まず、本テストミルによる圧延において実機での圧延状態の再現可否を確認するために、以下に述べる条件で圧延テストを行い、得られた板の表面性状を実機圧延材のそれと比較した。



第2図 実機およびテストミル圧延材表面の光沢度比較

Fig.2 Comparison of surface brightness of strips rolled by production mill and laboratory high speed cold rolling mill



第3図 実機およびテストミル圧延材表面のオイルピット面積率比較

Fig.3 Comparison of area ratio of oil pits on surface of strips rolled by production mill and laboratory high speed cold rolling mill

圧延テストは、圧延油として鉱油系ニート油(粘度7 cSt, @40°C)を用い、圧延母材と圧延スケジュールを第3表の No.1(2.0 t → 0.241 t 9パス)および No.2(3.2 t → 0.385 t 9パス)、また圧延速度を第4表の No.B(5パス目以降 600 m/min)とした条件で行った。

圧延後の板表面の光沢度(60°グロス値)および画像処理によるオイルピット面積率<sup>7)</sup>の測定結果を第2図、第3図に、板表面の顕微鏡観察結果を写真1に示す。ここで、光沢度は表裏各面の圧延方向と幅方向の計4点について測定し、図には4つの測定値の平均値を示した。

第2図、第3図および写真1から分かるように、本テストミルによる圧延では、WRの表面粗さと圧延速度を実機と同じ条件にすることにより、

(1)母材の板厚と表面性状が異なる場合(条件 No.1)でもパ

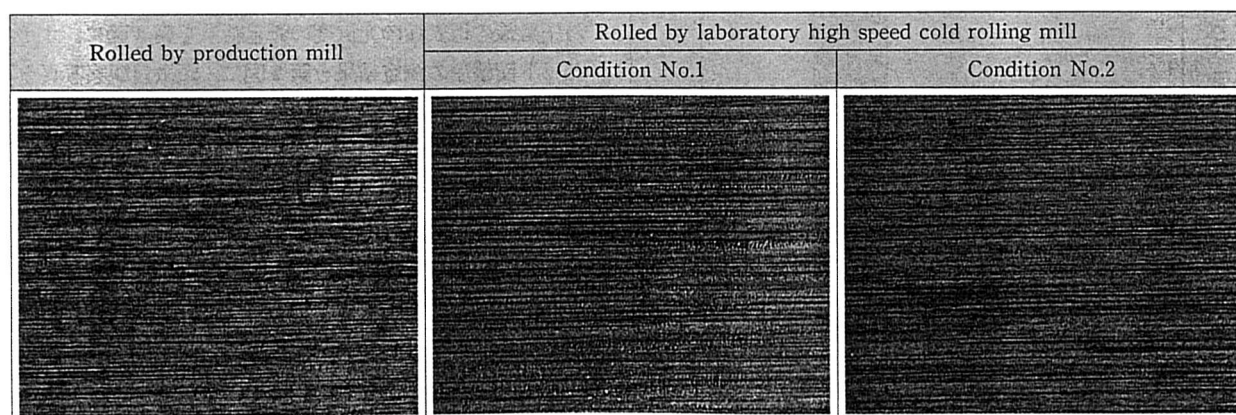
写真1 実機および高速冷間圧延テストミルによる圧延材表面の顕微鏡観察写真  
(最終パス圧延速度=600 m/min)

Photo 1 Micrographs of surface of strips rolled by production mill and laboratory high speed cold rolling mill (Rolling speed at final pass=600m/min)

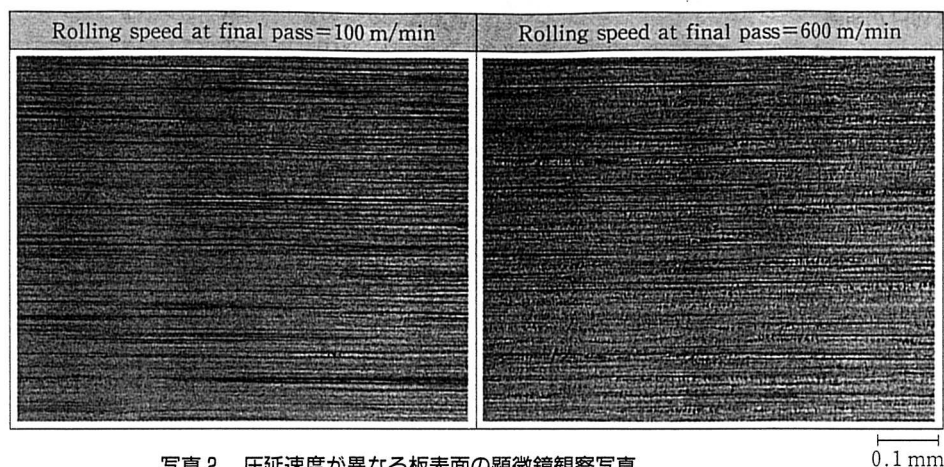
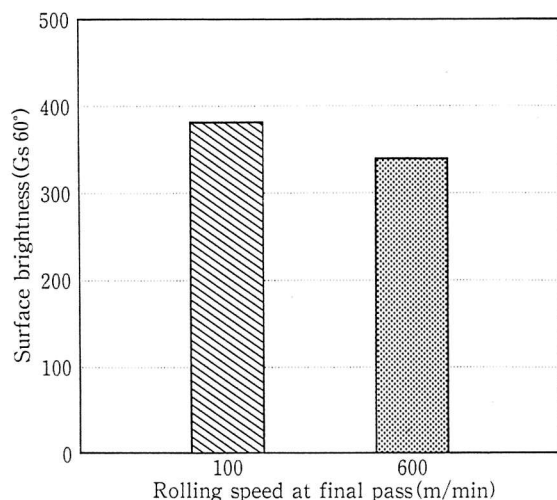


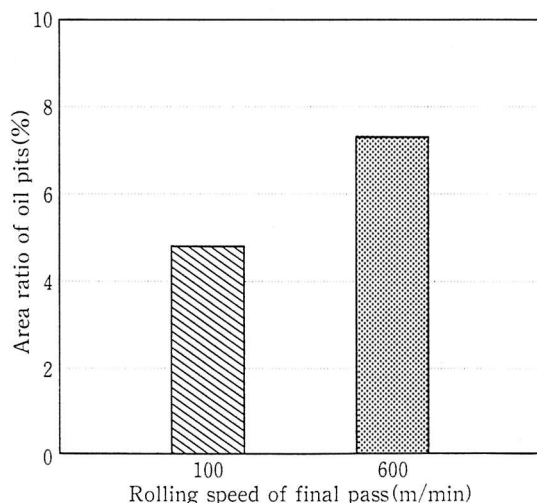
写真2 圧延速度が異なる板表面の顕微鏡観察写真

Photo 2 Micrographs of surface of strips rolled on laboratory high speed cold rolling mill at different rolling speed



第4図 板表面光沢度に及ぼす圧延速度の影響

Fig.4 Influence of rolling speed on surface brightness of strips



第5図 板表面のオイルピット面積率に及ぼす圧延速度の影響

Fig.5 Influence of rolling speed on area ratio of oil pits on surface of strips

ス数とパス当たりの圧下率が実機での圧延スケジュールと同じであれば、圧延後は実機圧延材に近い板表面状態が得られている。

(2)また、母材の板厚と表面性状が同じ場合(条件 No.2)には圧延後も実機圧延材と同じ表面性状が得られている。

以上のことから、本テストミルによれば実機圧延状態の再現が十分可能であり、したがって、本テストミルでの圧延テストによって得られる結果を基に、実機圧延で得られる板表面性状を定量的に予測できるものと考えられる。

### 3-3 板表面性状に及ぼす圧延速度の影響

前述のように、圧延後の板表面性状、特に光沢は圧延速度によって変化することが知られている<sup>8)</sup>。そこで、本テストミルにおける圧延テストによって板表面性状に及ぼす圧延速度の影響を明らかにすることが可能か否かを確認するために、第4表の No.A(全パス 100 m/min)および B(5パス目以降 600 m/min)の速度条件で圧延テストを行い、得られた板表面性状の調査を行った。圧延母材と圧延スケジュールは第3表の No.1 とし、供試油は前項同様、鉱油系ニート油を用いた。

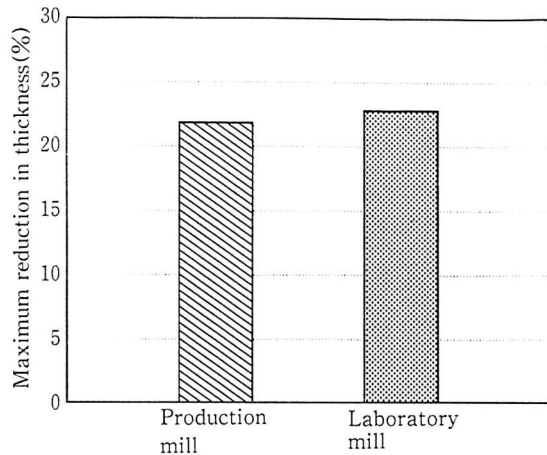
圧延後の板表面の光沢度の測定結果を第4図に、オイルピット面積率の測定結果を第5図に、顕微鏡観察写真を写真2に示す。ここで、光沢度は前述のように表裏面の圧延方向、板幅方向の4つの測定値の平均値である。

第4図、第5図から分かるように、本テストミルによる圧延テストでは、速度の増加にともなう板表面の光沢度の低下とオイルピット量の増大傾向が明らかに認められ、板表面性状に及ぼす圧延速度の影響を明らかにすることが可能であると言える。

### 3-4 ヒートスクラッチ発生限界圧下率

実機では、第2表に示した条件で圧延を行った際に、まれにはあるが速度が大きくなる第5パスにおいてヒートスクラッチが発生することがある。そこで、本テストミル





第6図 ヒートスクラッチ発生限界圧下率

Fig.6 Maximum reduction in thickness on rolling without heat-scratch

で第3表の No.2 の条件で第5パス目の圧下率を変化させた圧延テストを行い、ヒートスクラッチ発生限界圧下率を実機圧延のそれと比較した。圧延油は前項同様、鋳油系ニート油を用い、5パス目までの速度条件は第4表の No.B である。テスト結果を第6図に示す。

本テストミルによれば、実機とほぼ同じ圧下率でヒートスクラッチが発生しており、実機でのヒートスクラッチ発生限界条件の定量的な予測についても可能と考えられる。

## 4. 結 言

冷間圧延において高速化を図りながら良好な板表面性状を得る技術の開発を目的として新たに導入した高速冷間圧延テストミルの概要を紹介し、本テストミルによるステンレス鋼を用いた圧延テストで得られた板の表面性状を実機圧延材のそれと比較評価した結果について述べた。

本テストミルによれば、従来のテスト装置では困難であった実機に近い圧延状態の再現と高速圧延条件下における板表面性状の事前評価が可能であり、板表面造り込みのための高速冷延技術の開発を進める上で、本ミルが極めて有力な手段であることが確認された。

今後、本テストミルによる高速圧延テストで得られる知見を基に、ますます要求度が高まると予想される板表面の高光沢化や圧延油の高性能化に対処しながら、冷間圧延における生産性および品質の向上に寄与していく。



松下 哲 / Toru Matsushita

総合技術研究所 製板プロセス研究部  
主任研究員

(問合せ先：0299(84)3114)

## 参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会：圧延理論部会第100回記念シンポジウム、(1994)、p.211
- 2) 松下哲：第154回塑性加工シンポジウム、(1993)、p.75
- 3) 小豆島明、野呂和也、井柳好貴、出川浩樹：鉄と鋼、76(1990)、p.576
- 4) 小豆島明：鉄と鋼、74(1988)、p.696
- 5) 水野高爾：塑性と加工、7-66(1966)、p.383
- 6) 江原圭介、狩野泰脩、高橋順昭、小島寿男、出倉直樹：材料とプロセス、6(1993)、p.469
- 7) 山本秀男、芝原隆、松下哲、小山謙一：材料とプロセス、10(1997)、p.404
- 8) 小豆島明、金子徳次郎：第36回塑性加工連合講演会講演論文集、(1985)、p.33