

# 冷間圧延の潤滑性におよぼすロール材質の影響

小豆島 明\*・神保 安広\*<sup>2</sup>・金田 敏明\*<sup>3</sup>

Effect of Roll Materials on Lubricity in Cold Rolling

Akira AZUSHIMA, Yasuhiro JINBO and Toshiaki KANEDA

**Synopsis :** The effect of rolls made of various tool steels on the lubrication characteristics are examined by rolling annealed low carbon steels by means of the simulation testing machine developed by one of the authors. The lubricity is evaluated by measuring the coefficient of friction for each test and the anti-seizure property of rolls is evaluated by the observation of surfaces of rolled workpieces and rolls which are rolled under various conditions of rolling speed and reduction in thickness. The experimental results on the anti-seizure property are discussed based on the calculation of temperature at the interface between roll and workpiece and based on the observation of appearance of friction pick up on surface of rolls. The conclusion obtained are as follows; (1) The difference of coefficient of friction among roll materials is small. (2) Anti-seizure property depends on the carbide content of roll material and it can be quantitatively evaluated by the calculated interfacial temperature. (3) Carbides on roll surface are effective for friction pick up.

**Key words :** cold rolling; lubrication; roll materials; lubricity; anti-seizure property; coefficient of friction; friction pick up; interfacial temperature.

## 1. 緒言

冷間圧延において、圧延用ロールおよび潤滑剤の潤滑性・耐焼付き性が優れていることは圧延操業を安定して行なうための要件の一つである。さらに最近では圧延条件の高圧化、高速化の傾向にあり、それらの性能向上に対する要求はますます増大している。しかしながら、ロール自身の潤滑性・耐焼付き性におよぼす影響に関する研究例は少なく、その材質面からみた潤滑性への影響は明らかにされていない。

また、圧延用ロール以外の塑性加工工具の分野では、工具寿命を延ばすことを目的に数多くの表面改質技術が研究され、CVD, PVD, TRDプロセスによるチタンまたはバナジウムに代表される炭化物あるいは窒化物の被覆材などの良好な潤滑性をも兼備した工具材が開発されている<sup>1)2)3)</sup>。しかし、圧延用ロールへの応用を想定した場合、クロムメッキロール以外のものについては、製造の難度および高コストなどの問題から実用化はきわめて困難であって、圧延現場の要求を満足できていないのが実状である。

以上のことから、実用的なロール材の範ちゅうにおいても、圧延現場における苛酷な圧延条件を再現したもとの、潤滑性および耐焼付き性に及ぼすロールの材質の影響を検討することはきわめて重要であろう。

そこで本研究では、ロール材として低Cr鋼、ダイス鋼、

ハイス鋼など、実用に供されている鋼材質を用い、冷間圧延における潤滑性（この尺度として摩擦係数を用いる）および耐焼付き性について、著者の一人が開発した潤滑性評価試験機<sup>4)</sup>により評価した。この試験機では広範な圧延速度および圧下率条件において、圧延材とロールの相対すべり速度を実機並に大きくするために中立点を出側から外したすべり圧延が可能であり、実際の冷間圧延機に対応した苛酷な圧延を再現できることが確認されている<sup>5)</sup>。この評価試験機を用いて広範囲の圧延速度、圧下率の変化に対応する各ロールの摩擦係数と焼付き限界を求めた。つづいて、得られた実験データから算出した界面温度<sup>6)</sup>を導入して各ロールの耐焼付き性を定量的に評価するとともに、ロールの焼付き部の状態をX線マイクロアナライザー（EPMA）により分析して、焼付き現象とロール材質の関係について考察したので報告する。

## 2. 実験方法

### 2・1 実験装置と評価方法

実験にはFig. 1に示す潤滑性評価試験機を用いた。以下に実験手順および評価方法を説明する。

①の圧延機の上ロールとして評価ロールをセットし、研磨・脱脂する。十分に脱脂した試験コイル③をセットする。

平成6年7月7日受付 平成6年10月14日受理 (Received on July 7, 1994; Accepted on Oct. 14, 1994)

\* 横浜国立大学工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University)

\* 2 関東特殊製鋼(株)研究開発部 (Research and Development Department, Kanto Special Steel Works, Ltd., 1-3-1 Tsujido-Kandai, Fujisawa, 251)

\* 3 横浜国立大学工学部 (現: エーガイ(株)) (Faculty of Engineering, Yokohama National University, now Eisai, Ltd.)

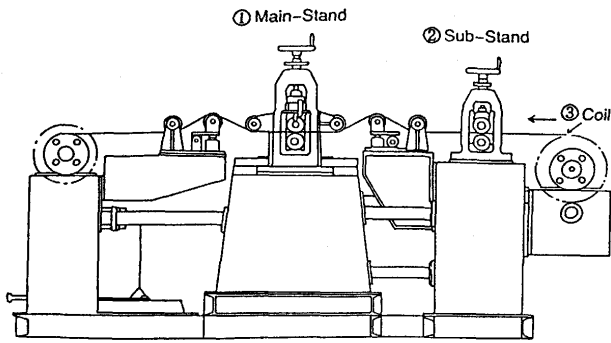


Fig. 1. Side view of the simulation testing machine.

①および②の圧延機の圧下スクリューでロールをコイル材料に押し込む。つづいてモータを所定の回転数で回転させておき、電磁クラッチを入れることにより①の圧延機の上ロールおよび②の上・下ロールを回転させる。②の圧延機のロール速度は減速機により①のロール速度の1/10に設定している。また、①の圧延機の下ロールは下部ジョイントを取り外してあるので従動状態となる。この結果、試験コイルはほぼ②の圧延機のロール速度で移動し、①の圧延機の上ロールはその約10倍の速度で回転することになる。潤滑剤はエマルジョンで上・下ロールと試験コイルの間にフラットノズルにて給油、循環使用した。

試験距離は試験コイルで80cm、評価ロールで約8mであり、その間で圧延荷重および評価ロールのトルクを測定した。

潤滑性の評価のための摩擦係数は

$$\mu = G / (P \cdot R) \quad \dots \dots \dots (1)$$

を用いて求めた。ここで、Pは圧延荷重、Gはロールトルク、Rはロール半径である。

耐焼付き性を評価するため、同一のロール速度条件にて焼付きが発生するまで圧下率を段階的に増加させて実験した。焼付き発生の有無は試験コイルおよび評価ロールの表面を目視観察して判別した。

## 2・2 実験条件

評価ロールの直径はφ76mmであり、その材料として軸受鋼 (SUJ 2)、冷間ダイス鋼 (SKD11)、Mo系ハイス鋼 (SKH51) のJIS工具鋼、および実機の冷間圧延で広く使用されている5%クロム鋼 (5Cr) とセミハイス鋼 (S-HSS) の5種類を用いた。これらのロールの成分組成および硬さ、表面粗さの条件をTable 1およびTable 2に示す。それぞれのロールは各圧延ごとにエメリ紙で研磨して、Table 2に示すように表面粗さを各ロールで同程度の条件に管理して使用した。

試験コイルには板厚0.4mm、板幅15mmの低炭素アルミキルド鋼の焼なまし調質材を用いた。コイル表面はブライト仕上げ (表面粗さ0.15μmRa) である。

潤滑剤として牛脂5 vol%のエマルジョンを50°Cに保温し使用した。流量は1l/minとした。

Table 1. Chemical composition of evaluated rolls.

Material	Chemical composition (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
SUJ2	1.01	0.23	0.45	0.020	0.006	1.45	—	—	—
SKD11	1.45	0.28	0.41	0.025	0.005	11.80	0.88	0.42	—
SKH51	0.85	0.35	0.35	0.025	0.005	4.10	4.90	1.90	5.95
5Cr	0.85	0.27	0.37	0.013	0.001	4.98	0.45	—	—
S-HSS	1.00	0.92	0.49	0.011	0.003	5.30	3.10	1.15	—

Table 2. Hardness and surface roughness of evaluated rolls.

Material	Hardness (HRC)	Surface roughness	Ra (μm)
SUJ2	65.0		0.053
SKD11	64.8		0.050
SKH51	64.7		0.046
5Cr	64.4		0.050
S-HSS	65.1		0.040

また、評価ロールの速度は24、72および143m/minの3条件とした。

## 3. 実験結果

### 3・1 摩擦係数

ロール速度24、72、143m/minの条件における圧下率と各ロールの摩擦係数の関係をFig. 2、Fig. 3およびFig. 4に示す。ここで○、△、□、●、▲印はそれぞれSUJ 2、SKD11、SKH51、5Cr、S-HSSロールを示す。全てのロール材質とも、同一圧延条件における摩擦係数のばらつきは±0.002~0.003程度であり、摩擦係数の再現性は良い。

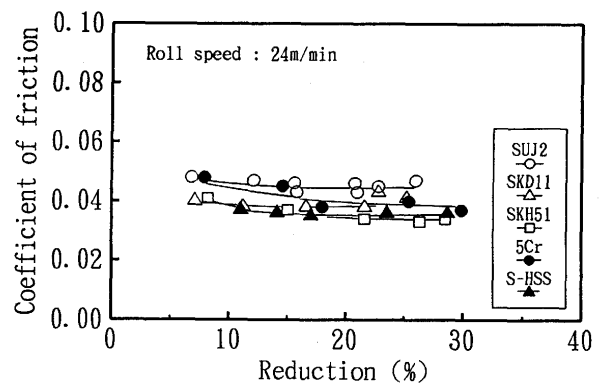


Fig. 2. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness at a roll speed of 24m/min.

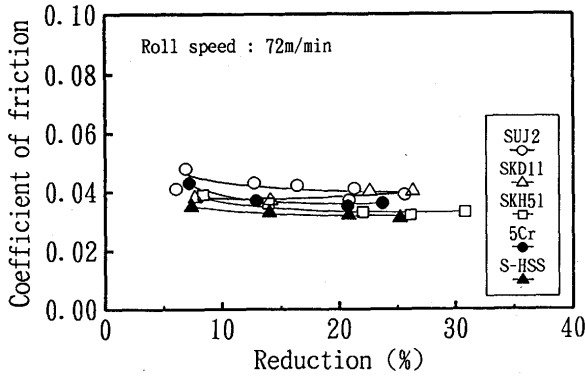


Fig. 3. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness at a roll speed of 72m/min.

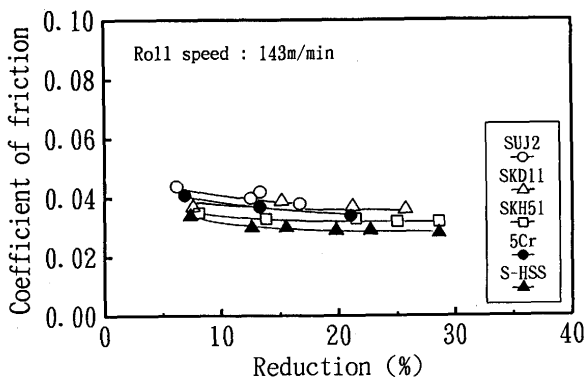


Fig. 4. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness at a roll speed of 143m/min.

各ロールにおける摩擦係数の圧下率依存性は小さく、圧下率に対する摩擦係数の変化量は、いずれの速度条件でも0.005以下であった。

ロール速度と摩擦係数の関係を論じるため、SUJ2ロールの結果を代表例として、ロール速度をパラメータとした摩擦係数と圧下率の関係図をFig. 5に示す。ロール速度の増加とともに摩擦係数は減少する傾向にあるが、24m/min条件と143m/min条件の摩擦係数の差はいずれの圧下率においても0.01未満であり、速度依存性は小さい。その他のロール

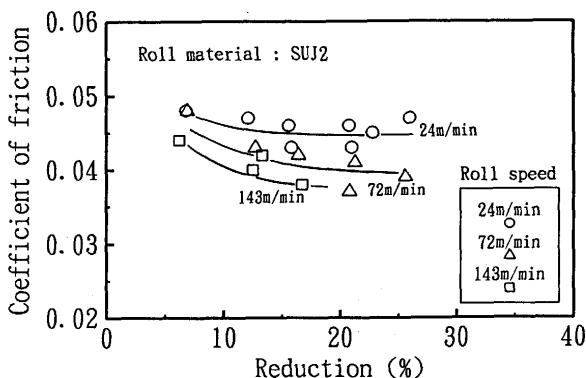


Fig. 5. Coefficient of friction for reduction at three levels of roll speed of the SUJ2 roll.

でも同様の結果が得られた。

また、Fig. 2～Fig.4の結果より、ロール材質による顕著な影響は認められず、全てのロールの摩擦係数はいずれの速度条件でも±0.005の範囲内にあり、0.04前後の値を示した。

### 3・2焼付き限界

Fig. 6はSUJ2ロールの焼付き限界を示したものである。○はその条件において焼付きを起こさなかったことを示し、●は焼付きを起こしたことを示す。そこで、これらの中間の圧下率条件(図中に破線で示す)を焼付き限界として評価した。その他のロールについても同じ方法で評価して限界圧下率をまとめた結果をFig. 7に示す。各ロールとも高速条件ほど限界圧下率が低く、焼付きしやすい結果を示した。

ロール材質の影響については、ロール速度72m/minおよび143m/minの結果で明らかな有意差が認められ、高速条件ほど材質の違いによって限界圧下率に大きな差が生じた。ロール速度143m/minの場合、SUJ2、5Crロールの限界圧下率は20%程度であるのに対し、SKD11、SKH51、S-HSSロールのそれは約30%で耐焼付き性に優れた結果を示した。

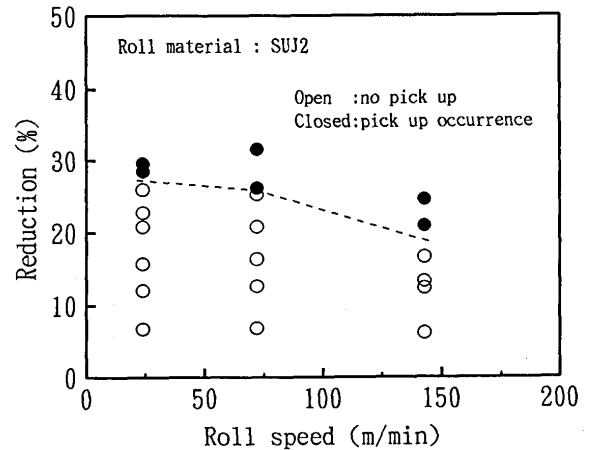


Fig. 6. Limit conditions of friction pick up of the SUJ2 roll.

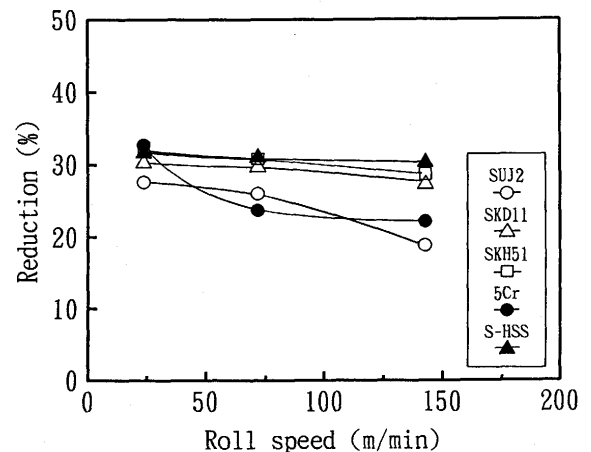


Fig. 7. Limitation line of the occurrence of friction pick up.

なお、ロール速度24m/min条件での限界圧下率は30%前後であり、各ロールで大きな差を生じなかった。

#### 4. 考察

摩擦係数はロールの表面粗さ条件に影響を受ける（粗さ大ほど摩擦係数は大）ことが報告されている<sup>7)8)</sup>。Fig. 2～Fig. 4に示した摩擦係数の範囲内において、表面粗さの比較的小さい（Table 2）S-HSSロールおよびSKH51ロールが低めの値を示したことは粗さの影響を反映した結果と考えられる。

そこで、この確認のため、S-HSSロールを一水準粗いエメリ紙で研磨して表面粗さを条件を約0.07 $\mu$ mRaに変更し、同様の圧延実験を行なった。ロール速度24m/minおよび143m/minにおける摩擦係数の結果を表面粗さ条件0.04 $\mu$ mRaの結果（Fig. 2, Fig. 4）と対比してFig. 8に示す。いずれの速度条件でも表面粗さの大きい方が0.01程度高い摩擦係数を示し、これまでの知見を裏付ける結果が得られた。さらに、この結果をその他のロールにも適用し、表面粗さに対して摩擦係数が線形に変化すると仮定して、各ロールの表面粗さ条件を統一した場合の摩擦係数を推測すると、全てのロールの摩擦係数の差はほぼ再現性の範囲内の値となり、実験で使用した範囲の圧延用ロールにおいてはロール材質の影響はほとんどないことがわかる。

一方、耐焼付き性についてはロール材質の影響が認められ、SUJ 2, 5Crロールに比較してSKD11, SKH51およびS-HSSロールは耐焼付き性に優れることが判明した。

焼付きは界面温度の影響を受け、圧延条件に対応した界面温度の上昇と焼付きの発生に相関性があることが認められている<sup>9)10)</sup>。そこで、Fig. 7の焼付き限界線上の実験条件である摩擦係数、圧下率、速度の各値およびTable 3に示すロールおよび圧延材の物性値を用い、著者の一人が提案している次式のすべり圧延における摩擦熱による接触弧内の平均界面温度上昇 $T_m$ <sup>6)</sup>を算出し、各ロールの結果を比較することによって、耐焼付き性におよぼすロール材質の影響

Table 3. Material properties.

Material		Thermal conductivity (W/m·K)	Thermal diffusivity $10^{-6}(m^2/s)$
Rolls	SUJ2	39.5	10.5
	SKD11	27.6	7.5
	SKH51	21.3	5.5
	5Cr	39.5	10.5
	S-HSS	28.0	8.1
Work piece		58.6	15.6

を考察した。

$$T_m = \frac{4 L \cdot \mu \cdot P_m \cdot \Delta V}{4.24K_s + 3.76K_r (\Delta V \cdot L / k_r)^{1/2}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、Lは接触弧長の1/2、 $P_m$ は平均面圧であり、いずれも圧下率の増加にともなって増大する。 $\Delta V$ はロールと圧延材の平均相対速度である。また、 $K_s$ および $K_r$ は圧延材およびロールの熱伝導率、 $k_r$ はロールの温度伝導率である。(2)式より求めた各ロールの平均界面温度上昇 $T_m$ の結果をFig. 9に示す。ロール速度24m/minの条件では焼付き限界における温度上昇は約25°Cでロール材質の影響が認められないのに対し、72, 143m/minの条件では温度上昇がより大きく、かつロール材により異なった限界温度を示した。143m/minにおけるSKD11, SKH51ロールの温度上昇は約70°C、S-HSSロールは58°C、SUJ 2, 5Crロールは50°C程度である。ロール速度条件により限界温度が異なることは低速と高速の条件で焼付きの形態が異なることに起因している<sup>9)</sup>。143m/minの高速条件での焼付きは実機で見られる焼付き（フリクションピックアップ、ヒートストリークなどと呼ばれる）に酷似している<sup>9)</sup>ので、この速度条件における結果から耐焼付き性を評価することが現実的と考えられる。

さらに、ロール材質により耐焼付き性が異なる原因については、ロールの炭化物が焼付きの成長を抑える作用をもち、各ロールにおける炭化物の量的関係が耐焼付き性の優

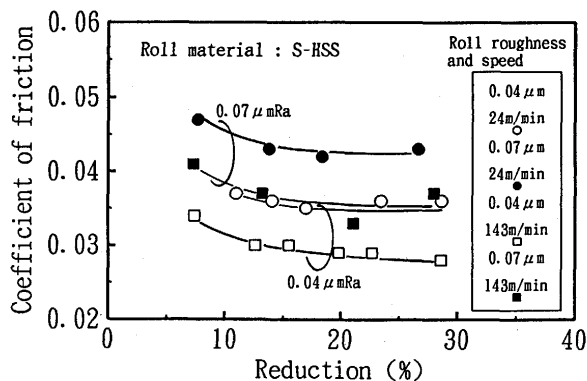


Fig. 8. Effect of surface roughness of roll on coefficient of friction.

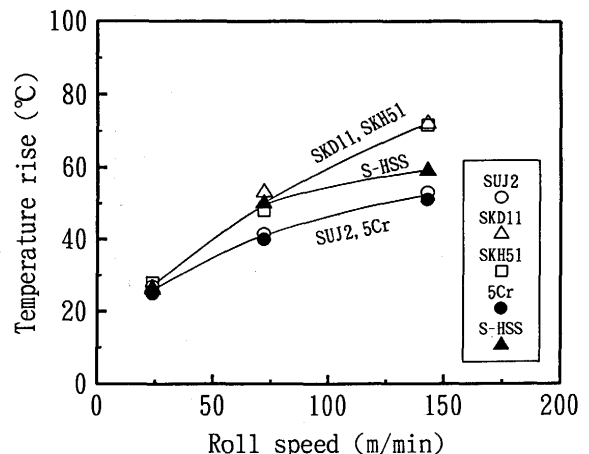


Fig. 9. Mean temperature rise calculated from Eqn. (2) for roll speed.

劣に反映されているのではないかと考えられる。

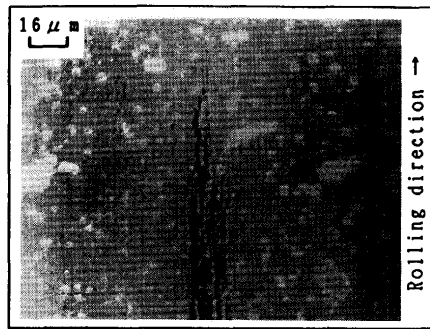
そこで各ロールについて、凝固中に晶出した炭化物の量を調査した。その結果をTable 4に示す。ロールより試験片を切り出し、圧延面に平行な面を顕微鏡観察して炭化物の面積率を求めた。なお、炭化物の種類は各ロールの成分組成よりTable 4のごとくなる。炭化物量はSUJ2, 5Crロールで1%未満, S-HSSロールで4%, SKH51, SKD11ロール

Table 4. Carbide type and content of evaluated rolls.

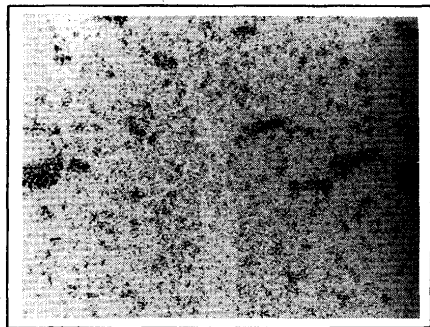
Material	Carbide type	Carbide content (area%)
SUJ2	M <sub>3</sub> C	<1
SKD11	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	10.7
SKH51	M <sub>6</sub> C+MC	9.5
5Cr	M <sub>3</sub> C	<1
S-HSS	M <sub>6</sub> C+MC	4.4

は10%程度であり、各ロールの炭化物量と耐焼付き性の順位が符合する結果が得られた。

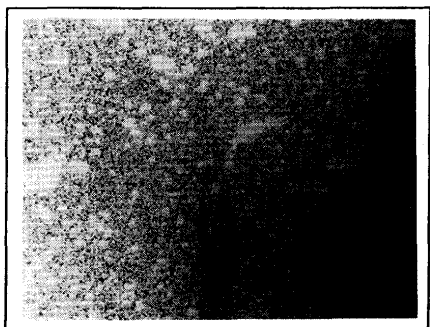
つづいて、炭化物が焼付きに影響していることを確認するため、ロールの焼付き面をX線マイクロアナライザー(EPMA)を用いて分析した。SKD11ロールの焼付き始点部および終点部の分析結果をFig.10およびFig.11に示す。(a)は吸収電子像であり、白く見える部分がFe, Cr系の炭化物、黒色部分は焼付いた圧延材である。(b)および(c)はFe, Crの面分析結果であり、白い部分で成分濃度が高い。Fig.10の始点部では炭化物以外の基地組織から焼付きが開始している様子が観察され、焼付き発生の特別な起点は認められない。一方、Fig.11の終点部では炭化物の部分で焼付きが停止している状況が明らかである。その他のロールについても調査したところ、焼付き終点部で炭化物による同様の焼付き停止状況が観察された。



(a) SC(Sample Current) image



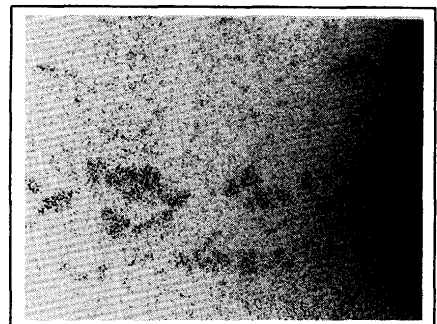
(b) Fe analysis



(c) Cr analysis



(a) SC image



(b) Fe analysis



(c) Cr analysis

Fig. 10. Appearance of the beginning of friction pick up on the surface of the SKD11 roll.

Fig. 11. Appearance of the end of friction pick up on the surface of the SKD11 roll.

次に、Fig. 9 の各ロールの焼付き限界温度の結果をもとにして、実機の冷間圧延におけるロール材質の影響について予想することを試みた。評価方法として、著者の一人が提案している焼付きの評価システム<sup>11)</sup>を用いた。

実機における平均界面温度上昇は(2)式を導出する過程で圧延材速度の平均値がロール速度 $V_r$ に等しいと仮定して導出した(3)式<sup>11)</sup>を用いて求めることができる。

$$T_m = \frac{1.06L \cdot \mu \cdot P_m \cdot \Delta V}{(V_r \cdot L)^{1/2} (K_s/k_s^{1/2} + K_r/k_r^{1/2})} \dots \dots \dots (3)$$

実機の冷間圧延のデータとして、低炭素リムド鋼、牛脂系エマルジョンの5スタンドのタンデムミルの実績<sup>12)</sup>を用いた。ワークロール径、板厚、圧下率、面圧、圧延速度およびヒートストリークの発生有無をTable 5に示す。さらに同表には、ワークロール材を汎用の5%クロム鋼、摩擦係数を0.04と仮定して(3)式を用いて求めた平均界面温度上昇 $T_m$ を添記する。ヒートストリークの発生したNo. 4スタンドで温度上昇が最も高く、焼付き発生が界面温度に支配されることが理解できる。

次に、No. 4スタンドにおける温度上昇65°Cを焼付き限界での値として、ロール材をSKD11, SKH51材およびS-HSS材に代替した場合のロール速度を逆算することによって、これらのロールの耐焼付き性を評価する。ここで、これらのロールの限界温度はFig. 9のロール速度143m/min条件における5Crロールとの温度差より設定する。すなわち、SKD11, SKH51ロールの温度上昇は70°C, S-HSSロールでは58°Cであり、5Crロールでは50°Cであるので、その差20°Cおよび8°CをNo. 4スタンドの5Crロール想定限界温度65°Cに加算してSKD11, SKH51ロールでは85°C, S-HSSロ

ールでは73°Cとする。表面粗さが同条件の場合、摩擦係数は各ロールで大差ないと評価したので0.04の一定値とおく。

この方法により(3)式から逆算したSKD11, SKH51, S-HSSロールのNo. 4スタンドにおける限界圧延速度はそれぞれ1830, 1680, 1320m/minとなる。SKD11, SKH51ロールでは最終スタンドで500m/min以上の高速化が可能であり、生産性の大幅な向上が期待できることが理解できた。

## 5. 結言

ロール材として低Cr鋼、ダイス鋼、ハイス鋼などの鋼材質を用い、普通鋼の冷間圧延における潤滑性・耐焼付き性におよぼすロール材質の影響について検討した。

潤滑性の尺度として摩擦係数を評価し、耐焼付き性については焼付き限界における圧下率ならびに実験データをもとに算出した界面温度により評価した。さらに、ロールの焼付き部を分析して、焼付き現象とロール材質の関係について考察するとともに、各ロール材を実機に適用した場合の焼付き限界について推察し、次の結論を得た。

(1) 表面粗さを統一した条件では、摩擦係数は各ロール材で大きな差を生じない。

(2) ロールの炭化物は焼付きの成長を停止させる作用があり、比較的少量に炭化物を含有するダイス、ハイス鋼は耐焼付き性に優れた性能を示した。さらに、これらのロール材を実機に適用した場合の効果として、最終スタンドでの限界圧延速度を向上できる可能性を示唆できた。

## 文 献

- 1) 河合 望, 堂田邦明, 安田彰男: 日本機械学会論文集(C編), 50 (1984), p.1664
- 2) 後藤善弘, 若杉昇八: 塑性と加工, 30 (1989), p.246
- 3) 新井 透: 塑性と加工, 31 (1990), p.1169
- 4) 小豆島明: 鉄と鋼, 74 (1988), p.696
- 5) 小豆島明, 喜多良彦, 志磨貴司, 三橋 勝: 鉄と鋼, 74 (1988), p.1978
- 6) 小豆島明: 塑性と加工, 29 (1988), p.492
- 7) 堂田邦明, 鶴飼直行, 土屋能成, 新井 透: 第40回塑性加工連合講演会, 講演論文集, (1989), p.231
- 8) 鎚田征雄, 北村邦雄, 北浜正法, 片岡健二, 中川吉左衛門: 昭和55年度塑性加工春季講演会, 講演論文集, (1980), p.165
- 9) 田村裕保, 細野弘夫, 戸口一男, 小林義弘: 昭和54年度塑性加工春季講演会, 講演論文集, (1979), p.387
- 10) 広瀬敏光, 飯野光明, 藤原辰夫, 金森英夫, 衣松余香, 原 重雄, 中村真三: 第30回塑性加工連合講演会, 講演論文集, (1979), p.77
- 11) 小豆島明, 喜多良彦: 鉄と鋼, 76 (1990), p.1270
- 12) 木村好次, 岡田和三: 潤滑, 29 (1984), p.809

Table 5. Pass schedule of low carbon steel in actual mill and mean temperature rise calculated from Eqn. (3).

STD	Roll diameter (mm)	Exit thickness (mm)	Reduction (%)	Mean pressure (MPa)	Rolling speed (m/min)	Heat streak	Mean temperature rise (°C)
No.1	534	1.55	32.6	628	280	no occurrence	31.2
No.2	515	0.97	37.6	438	483	no occurrence	30.0
No.3	518	0.63	34.6	492	739	no occurrence	34.6
No.4	568	0.37	41.8	593	1270	occurrence	65.4
No.5	566	0.27	26.6	864	1730	no occurrence	63.9