

# 冷間圧延用ロールの潤滑特性におよぼす炭化物諸性質の影響

小豆島 明\*・神保 安広\*<sup>2</sup>

Effect of Carbide Properties on Lubrication Characteristics of Roll in Cold Sheet Rolling

Akira AZUSHIMA and Yasuhiro JIMBO

**Synopsis :** The effect of rolls made of iron-chromium-carbon alloys and high speed steels on the lubrication characteristics are examined by rolling annealed low carbon steel sheets. Coefficients of friction for reduction in thickness and limit reductions of friction pick up are measured using the simulation testing machine of sliding-rolling type. The relation between the experimental results on the limit reductions on the one hand and carbide type, carbide area and carbide morphology of roll materials on the other is discussed. The conclusion obtained are as follows; (1) The difference of coefficient of friction among roll materials is small in case that surface roughness of roll is constant. (2) The limit reduction of friction pick up has a strong correlation with the carbide mean spacing of roll materials. (3) Controlling the carbide spacing small is effective for prevention of friction pick up.

**Key words :** cold sheet rolling; lubrication; roll materials; carbide properties; coefficient of friction; friction pick up.

## 1. 緒言

鋼板の冷間圧延の分野では、生産性向上を目的に従来にもまして強圧下、高速条件で操業される場合が増加しており、これに付随して発生する焼付きを解消し、良好な潤滑状態を維持して安定した圧延操業を実現することが命題となっている。このためには冷間圧延における潤滑性および耐焼付き性について、潤滑剤とは別に圧延用ロールの視点から、その材質面の影響を明らかにすることが必要である。

そこで、前報<sup>1)</sup>ではロール材に低クロム鋼、ダイス鋼、ハイス鋼などの実圧延で使用されている材質を用い、冷間圧延における潤滑性および耐焼付き性のデータを収集した。その結果として、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、炭化物を多量に含むロール材ほど優れた耐焼付き性を示すことが明らかになった。

本研究では、さらにその研究結果を進め、耐焼付き性におよぼす炭化物量の定量的な影響および炭化物の種別の影響を調べるために、 $M_7C_3$ 型炭化物の面積率を1~26%の間で段階的に変更した7種類およびMC型と $M_6C$ 型炭化物のトータル面積率がそれぞれ異なる4種類のロール材を試験に供した。実験には前報と同様に潤滑性評価試験機<sup>2)</sup>を使用し、すべり圧延条件で試験して各ロールの摩擦係数および焼付き限界を求め、炭化物の種別、面積率および分布形態と焼付き限界の関係について評価した。さらに、得られた知見

に基づいて、実機への適用を踏まえた耐焼付き性に優れた圧延用ロールの可能性について提案したので報告する。

## 2. 実験方法

実験にはFig. 1に示す潤滑性評価試験機を用い、圧延機①の上ロールである評価ロールと圧延材③の速度比を約10としたすべり圧延条件で試験した。実験手順および評価方法は前報と同様であり、圧延材の試験距離80cmの間で計測した圧延荷重と評価ロールのトルクから摩擦係数を求めた。焼付き発生の有無は圧延材および評価ロールの表面を目視観察して判別した。

評価ロールの直径はφ76mmであり、その材料として、C

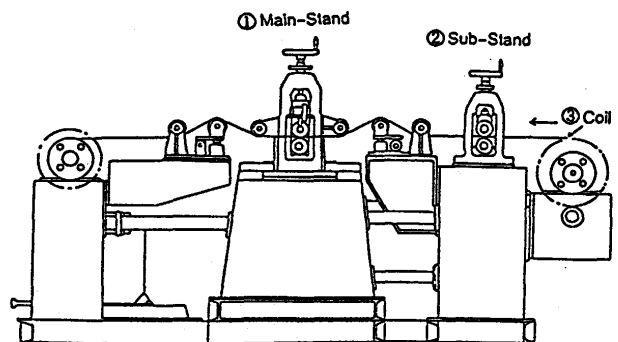


Fig. 1. Side view of the simulation testing machine.

平成7年8月7日受付 平成7年9月25日受理 (Received on Aug. 7, 1995; Accepted on Sep. 25, 1995)

\* 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)

量とCr量を調整する<sup>3)</sup>ことにより $M_7C_3$ 型の炭化物を面積%で1~26%分散させた高炭素・高クロム系の7種(DS-A~DS-G)およびMC型と $M_6C$ 型の炭化物を含み、炭化物量がそれぞれ異なるハイス系の4種(HS-A~HS-D)を用いた。これらのロールの化学組成をTable 1に、ロール表面のマイクロ組織、炭化物量および炭化物の分布形態を表わす尺度として用いた炭化物間隔をFig. 2に示す。ここで、炭化物間隔とはロール表面に分散している炭化物粒の粒間間隔を示す。炭化物量および炭化物間隔の測定にはロール材と同一の素材から切り出した試験片を用い、研磨・腐食して炭化物を識別できるように試料調整した後、画像解析装置を用いて測定した。炭化物量は $2\text{ mm}^2$ 範囲内で観察された全ての炭化物の面積を測定し、その面積率で表示した。一方、炭化物間隔は圧延方向に平行な1 mm長さの線を100本引き、線上の個々の粒間間隔を求め、その平均値で評価した。高炭素・高クロム系ロールの炭化物は $M_7C_3$ の共晶炭化物であり<sup>4)</sup>、マイクロ組織で見られるように炭化物量の増加とともに

網状に発達して粗大化する<sup>3)</sup>。一方、ハイス系ロールはMCと $M_6C$ の共晶炭化物が混在した組織である<sup>5)</sup>。また、各ロールはTable 2に示すように約HRC65の硬さに焼入れ・焼もどし処理後、 $0.05\mu\text{mRa}$ の表面粗さに調整して圧延に供した。

圧延材には板厚0.4mm、板幅15mmの低炭素アルミキル

Table 1. Chemical composition of evaluated rolls.

| Symbol | Chemical composition (wt%) |      |      |       |       |       |      |      |      |       |
|--------|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
|        | C                          | Si   | Mn   | P     | S     | Cr    | Mo   | V    | Co   | W     |
| DS-A   | 0.93                       | 0.42 | 0.34 | 0.002 | 0.002 | 7.86  | 0.89 | 0.45 | —    | —     |
| DS-B   | 1.03                       | 0.45 | 0.34 | 0.002 | 0.002 | 8.92  | 0.88 | 0.45 | —    | —     |
| DS-C   | 1.25                       | 0.50 | 0.37 | 0.007 | 0.006 | 10.06 | 0.97 | 0.48 | —    | —     |
| DS-D   | 1.51                       | 0.45 | 0.35 | 0.002 | 0.002 | 12.46 | 0.88 | 0.46 | —    | —     |
| DS-E   | 1.86                       | 0.52 | 0.38 | 0.011 | 0.006 | 14.90 | 0.95 | 0.48 | —    | —     |
| DS-F   | 2.16                       | 0.52 | 0.39 | 0.012 | 0.006 | 17.15 | 0.95 | 0.48 | —    | —     |
| DS-G   | 2.43                       | 0.52 | 0.40 | 0.015 | 0.007 | 19.73 | 0.98 | 0.48 | —    | —     |
| HS-A   | 1.00                       | 0.92 | 0.49 | 0.011 | 0.003 | 5.30  | 3.10 | 1.15 | —    | —     |
| HS-B   | 1.10                       | 0.30 | 0.30 | 0.010 | 0.005 | 3.75  | 9.50 | 1.15 | 8.00 | 1.50  |
| HS-C   | 0.84                       | 0.27 | 0.32 | 0.010 | 0.011 | 3.96  | 0.66 | 2.00 | —    | 18.30 |
| HS-D   | 1.57                       | 0.31 | 0.42 | 0.013 | 0.009 | 4.56  | 0.56 | 4.97 | 5.10 | 13.32 |

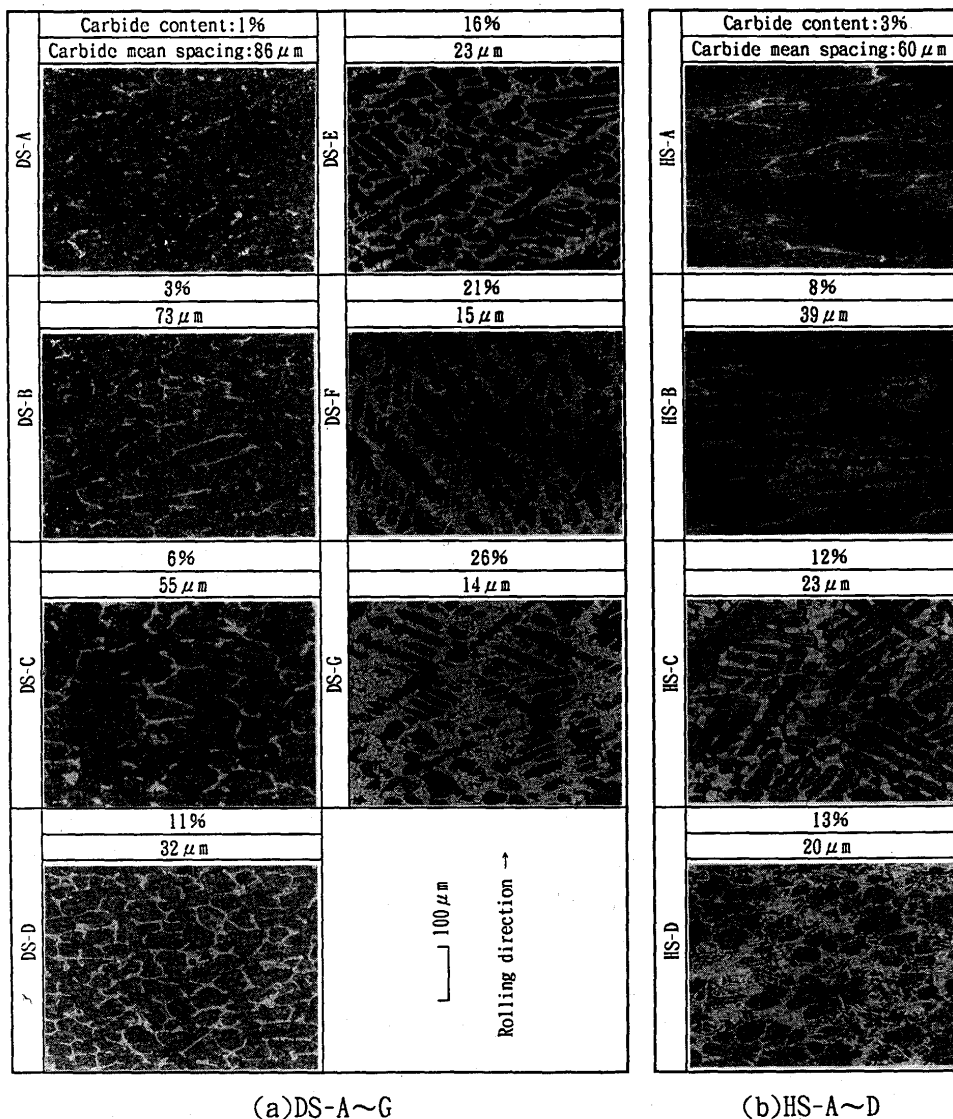








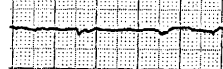





Fig. 2. Microstructures and carbide properties of evaluated rolls.

Table 2. Hardness and surface roughness of evaluated rolls.

| Symbol | Hardness (HRC) | Surface roughness  | Ra ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------|----------------|---|----------------------|
| DS-A   | 64.3           |                    | 0.045                |
| DS-B   | 64.4           |                    | 0.054                |
| DS-C   | 65.0           |                    | 0.050                |
| DS-D   | 64.8           |                    | 0.052                |
| DS-E   | 65.0           |                    | 0.055                |
| DS-F   | 64.9           |                    | 0.055                |
| DS-G   | 64.4           |                    | 0.050                |
| HS-A   | 65.1           |                   | 0.043                |
| HS-B   | 65.8           |                  | 0.053                |
| HS-C   | 64.4           |                  | 0.053                |
| HS-D   | 66.0           |                  | 0.048                |

ド鋼の焼なまし調質材を用いた。圧延材表面は粗さ0.15  $\mu\text{mRa}$ のブライト仕上げである。潤滑剤として牛脂5 vol%のエマルジョンを50°Cに保温し、循環して使用した。流量は1 l/minした。また、評価ロールの速度は143m/minの条件とした。

### 3. 実験結果

#### 3・1 摩擦係数

ロール速度143m/minの条件における各ロールの摩擦係数と圧下率の関係をFig. 3およびFig. 4に示す。Fig. 3は $M_7C_3$ 型炭化物を1～26%含むDS-A～DS-Gロールの結果を示し、Fig. 4はMC型と $M_6C$ 型の炭化物を含むHS-A～HS-Dロールの結果を示す。全てのロール材質とも同程度の圧下率条件における摩擦係数のばらつきは $\pm 0.002 \sim 0.003$ であり、摩擦係数の再現性は良好であった。

各ロールの摩擦係数は低圧下率でわずかに高く、0.03～0.04の範囲にあり、圧下率に対する摩擦係数の変化量は0.01以下であった。

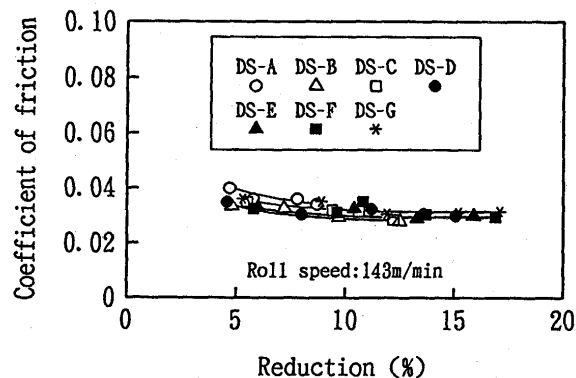


Fig. 3. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness of DS-A～DS-G rolls.

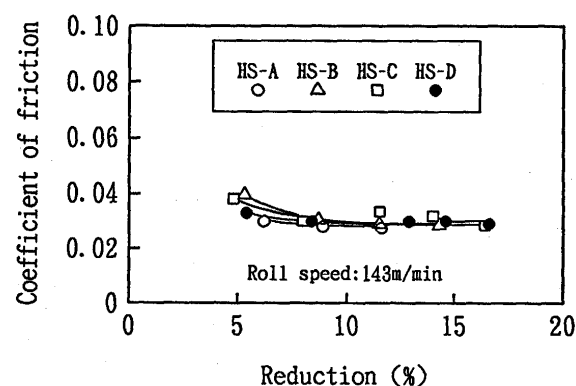


Fig. 4. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness of HS-A～HS-D rolls.

また、全てのロールの摩擦係数は $\pm 0.005$ の範囲内にあり、ロールの炭化物量および炭化物の種別の違いによる差は小さかった。

#### 3・2 焼付き限界

ロール速度143m/minの条件において、各ロールの焼付き限界と炭化物量の関係をFig. 5およびFig. 6に示す。それぞれ、 $M_7C_3$ 型炭化物を含むDS-A～DS-GロールおよびMC型と $M_6C$ 型の炭化物を含むHS-A～HS-Dロールの結果を示す。ここで○はその圧下率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。

Fig. 5の $M_7C_3$ 型炭化物を含むロールでは、炭化物量11%のDS-Dロールまで限界圧下率は炭化物量にほぼ比例して増加した。しかし、さらに多量の炭化物を含むDS-E～DS-Gロールでは限界圧下率の上昇が緩やかとなった。とくに炭化物量が20%を越えるDS-FロールとDS-Gロールの限界圧下率には有意差が認められなかった。

一方、Fig. 6のMC型と $M_6C$ 型の炭化物を含むロールでは、炭化物量3～13%の範囲において限界圧下率は炭化物量の増加とともに上昇し、 $M_7C_3$ 型のロールと同様な結果が得ら

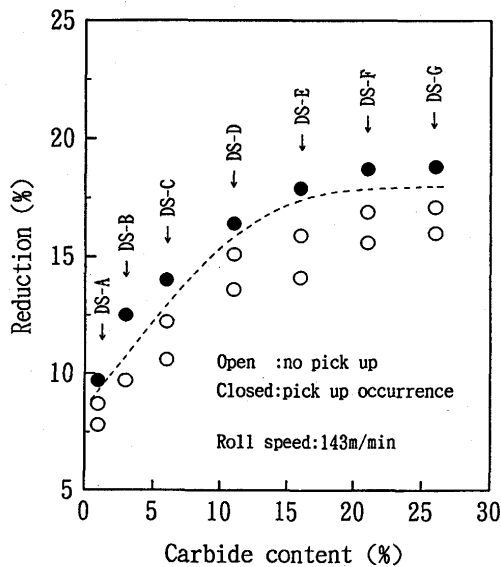


Fig. 5. Limit reductions of friction pick up for carbide content of DS-A~DS-G rolls.

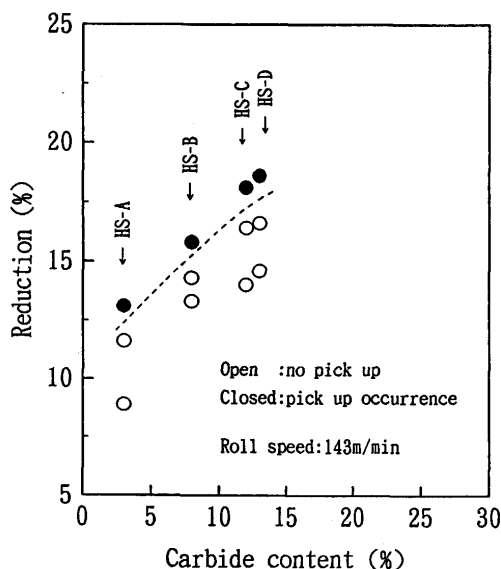


Fig. 6. Limit reductions of friction pick up for carbide content of HS-A~HS-D rolls.

れた。さらに、両図を比較すると、炭化物量がほぼ同じ条件での限界圧下率は $M_7C_3$ 型のロールの結果よりもMC型と $M_6C$ 型のロールの方が約1%高い値を示した。

#### 4. 考察

全てのロールの表面粗さを約 $0.05\mu mRa$ に統一して実験した結果、得られた摩擦係数にロールの炭化物量および炭化物の種別の違いによる大きな差は認められず、摩擦係数は炭化物の性質にはほとんど影響されないことがわかった。前報において、ロールの表面粗さが一定の条件では、ダイス鋼、ハイス鋼などの一般的工具鋼から成るロールの摩擦係数には大きな差は生じないことが判明している。今回の

実験結果はこのことが高炭素・高クロム系および高合金組成のハイス系などのロール材においても成立することを示したものと理解できる。

一方、耐焼付き性におよぼす炭化物量の定量的な影響について、 $M_7C_3$ 型炭化物を含む高炭素・高クロム系ロールの実験結果から、炭化物量が10%程度までは、焼付き限界圧下率は炭化物量にほぼ比例して増加することがわかった。しかし、10%を越える範囲では炭化物量の増加に対する限界圧下率の上昇が緩やかになり、炭化物の作用効果が飽和している傾向が認められた。実験で使用した $M_7C_3$ 型炭化物を含むロール材の成分範囲において、炭化物量はC量およびCr量にほぼ比例して増加するが、その分布形態については炭化物量が10%を越える条件で網状の共晶炭化物が発達して炭化物の粗大化が顕著になることが報告されている<sup>3)</sup>。このことから、ロールの耐焼付き性に対して、炭化物量のほかに炭化物の分布形態が関与しているのではないかと考えられる。そこで $M_7C_3$ 型炭化物を含むロールについて、炭化物の分布形態を表わすパラメータである炭化物間隔 (Fig. 2 参照) を用いて焼付き限界を整理することを試みた。焼付き限界の整理の前に、これらのロールの炭化物に関する性質を理解するため、炭化物量および炭化物間隔と炭化物形成元素のC量の関係を明らかにする。Fig. 7 に示すように、炭化物量はC量にほぼ比例して増加するのに対して、炭化物間隔はC量が約1.5%を越える範囲で飽和の傾向を示し、この範囲内における炭化物の粗大化を反映した結果が得られた。次に、炭化物間隔を用いて、前述の各ロールにおける焼付き限界 (Fig. 5) を整理し直した結果をFig. 8 に示す。これより、炭化物量の異なる全てのロールについて、限界圧下率と炭化物間隔はほぼ線形の関係にあり、炭化物の分布形態がロール材の耐焼付き性を決定する因子の一つであることが判明した。

次に、炭化物種別の異なるMC型と $M_6C$ 型のロールの焼付き限界についても、同様に炭化物間隔を用いて整理し、 $M_7C_3$ 型ロールの結果と比較してみる。Fig. 9 に示すように、MC型と $M_6C$ 型のロールの焼付き限界は $M_7C_3$ 型ロールと同様に炭化物間隔と相関することがわかり、しかも、 $M_7C_3$ 型ロールの限界線と一致することが判明した。炭化物間隔を用いて整理すれば炭化物の種別にはほとんど影響されずに各ロールの耐焼付き性をうまく評価できることが明らかになった。

以上から、耐焼付き性に優れたロール材の要点は炭化物を多量に含有させ、かつ、炭化物間隔をできるだけ小さくさせることであると結論できる。しかし、ロールの製造法として一般に用いられている溶製法では、冷却速度の大きさに限界があり、この条件から凝固組織が決定してしまう<sup>6)</sup>ため、炭化物量の増加は個々の炭化物自体を粗大化させる<sup>3)5)</sup>結果となって炭化物間隔を小さく制御することはできない。一方、粉末製ロール<sup>7)</sup>では同一材質の溶製ロールに比較して

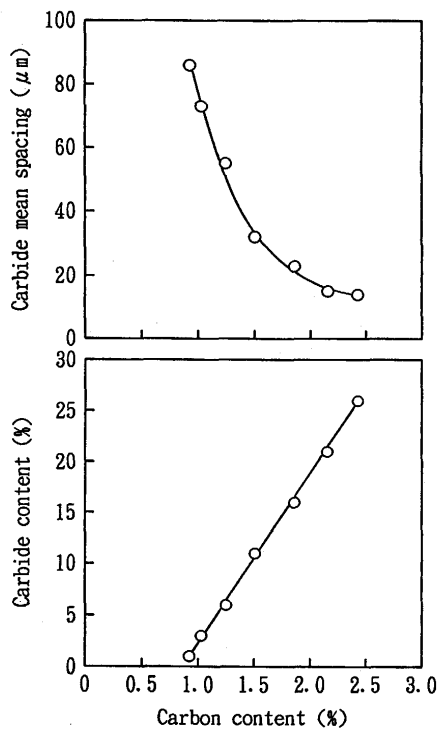


Fig. 7. Relationship between properties of  $M_7C_3$  carbide and carbon content.

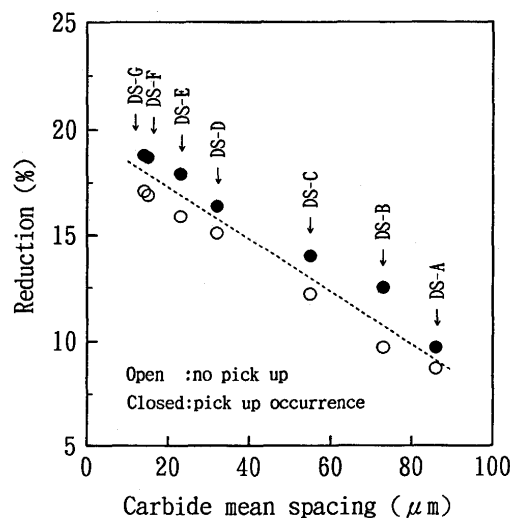


Fig. 8. Limit reductions for carbide mean spacing of DS-A~DS-G rolls.

均一・微細な炭化物が得られるので個々の炭化物の粒間間隔を小さく制御することができる。そこで、Table 1 に示したHS-Bロールと同じ材質の粉末製ロールを新たに作成し、同様の圧延実験を行なって耐焼付き性を評価する。この粉末製ロールの炭化物量および炭化物の種別は溶製のHS-Bロールと同じであるが、前述のロールと同様な方法で測定した炭化物間隔は $11\mu\text{m}$ であり、溶製ロールの $1/3$ 以下である (Fig.10参照)。実験結果による溶製ロールの限界圧下率は約15%であるのに対し、新たに作成した粉末製ロールでは18%に達した。Fig.11に両ロールの焼付き限界の比較をわ

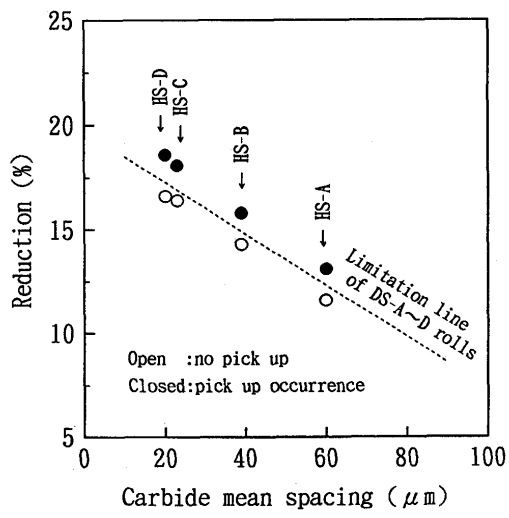


Fig. 9. Limit reductions for carbide mean spacing of HS-A~HS-D rolls.

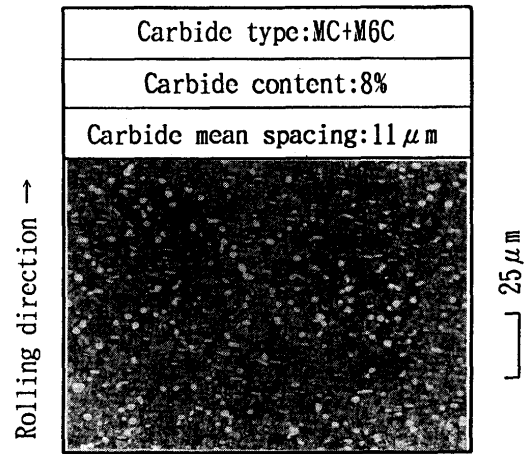


Fig. 10. Microstructure and carbide properties of P/M roll.

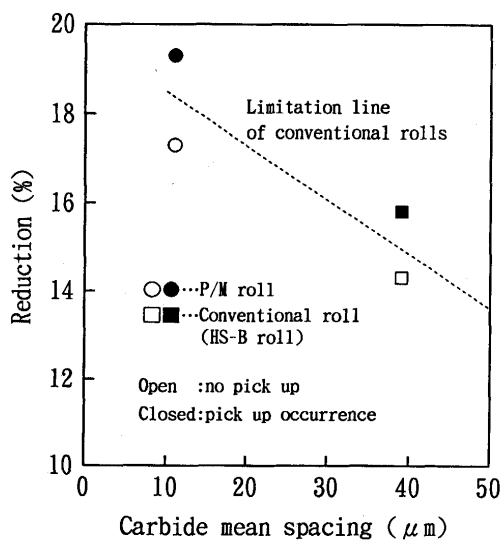


Fig. 11. Comparison between limit reductions of P/M roll and conventional roll.

かりやすく示す。粉末製ロールの限界圧下率18%は図中に破線で示した全ての溶製ロールの実験結果による焼付き限界の線上にあり、ロール材の耐焼付き性が炭化物間隔と非常によく相関することが改めて理解できた。

さらに、このロールを実機の冷間圧延に適用した場合の効果として焼付き限界における圧延速度について前報と同様な手法<sup>8)</sup>を用いて推察する。実機のデータには前報のTable 5に示した普通鋼の5スタンドのタンデムミルの圧延実績を引用し、汎用の5%クロム鋼ロールと比較した粉末ロールの性能を評価した。なお、粉末ロールの熱伝導率および温度伝導率にはそれぞれ $28.0\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、 $8.1\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ を用いた。実験で得られた粉末ロールの限界圧下率18%は平均界面温度上昇に換算すると $75^\circ\text{C}$ となり、前報で求めた5%クロム鋼ロールの $50^\circ\text{C}$ に比較して $25^\circ\text{C}$ 高い。この温度差をもとに焼付きが発生した実機のNo. 4スタンドにおける粉末ロールの限界圧延速度を逆算すると $2020\text{m/min}$ に達し、 $1270\text{m/min}$ の5%クロム鋼ロールよりも $750\text{m/min}$ 高い速度が得られた。現在、極薄の冷延鋼板の圧延速度は焼付きの問題から最終スタンドで $2000\text{m/min}$ 程度に制限されているが、このロールを適用すれば $3000\text{m/min}$ に近い高速圧延が実現できる可能性があり、生産性の大幅な向上が期待できる。

## 5. 結言

炭化物の面積率および種別を変更した計11種のロール材を用い、普通鋼の冷間圧延における潤滑性および耐焼付き

性におよぼすロール材質の影響について系統的に検討した。

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により評価を行なって、次の結論を得た。

(1) 表面粗さを統一した条件では、摩擦係数はロール材質にはほとんど影響されない。

(2) 耐焼付き性は炭化物の分布形態を表わす尺度として用いた炭化物粒間平均間隔と非常によく相関する。炭化物間隔を小さく制御することが耐焼付き性の向上に有効である。

(3) 均一・微細な炭化物を有する粉末製ロール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大幅に向上できる可能性を示唆した。

## 文 献

- 1) 小豆島 明, 神保安広, 金田敏明: 鉄と鋼, **81** (1995), p.64
- 2) 小豆島 明: 鉄と鋼, **74** (1988), p.696
- 3) F.Martray and R.Usseglio-Nanot: Factors Affecting the Structure of Chromium and Chromium-Molybdenum White Irons, (1975), p.10 [Climax Molybdenum S. A.]
- 4) R.S.Jackson: Journal of The Iron and Steel Institute, **208** (1970), p.163
- 5) G.A.Roberts, J.C.Hamaker and A.R.Johnson: Tool Steels, (1962), p.604 [American Society for Metals]
- 6) A Guide to the Solidification of Steels, (1977), p.11 [Jernkontoret]
- 7) 出谷保富, 梅田孝一, 日野昇一, 林 康代: 鉄と鋼, **72** (1986), p.S1599
- 8) 小豆島 明, 喜多良彦: 鉄と鋼, **76** (1990), p.1270