

超微細粒鋼創製プロセスのための トライボロジー条件とその評価

小豆島 明*・薛 衛東*²・吉田 良明*³

Tribological Condition and Evaluation for Creation Process of Ultra-fine Grained Steels

Akira AZUSHIMA, WeiDong XUE and Yoshiaki YOSHIDA

Synopsis : Recently, hot rolling with a severely high reduction was developed to make the ultra fine grained steels. The high reduction in the hot rolling caused some troubles such as increase of the rolling load, occurrence of friction pick up and so on. To solve these problems, new lubricants with high coefficient of friction at biting and low coefficient of friction during hot rolling must be developed. The lubricants cannot be estimated using the two-disks testing machine or the pin-on-disk testing machine. So, a testing machine to simulate hot rolling in the laboratory has been developed by the author et al. The performance of the simulator is evaluated at a hot rolling temperature of 800°C using SPHC strip with a width of 22 mm and a thickness of 9 mm, SKD61 roll with a diameter of 100 mm and a width of 60 mm and new lubricants. Results from experiment to measure the coefficient of friction decided the lubricity of the lubricants in hot rolling with a severely high reduction can be evaluated.

Key words : hot rolling; coefficient of friction; lubricant; testing machine; ultra fine grained steel.

1. 緒言

超微細粒鋼板を熱延プロセスにおいて創製するためには、比較的低温で大圧下圧延を行う必要がある。そのような熱延プロセスを行うと圧延荷重が非常に高くなり、100 MNを超えると考えられ、現有の熱延ラインでは圧延機の荷重限界を超えることになる^{1,2)}。そのため、現有の熱延ラインを用いて超微細粒鋼を創製するために、潤滑性の優れた圧延油を用いて圧延荷重を低減しなければならない。まず、大圧下圧延を可能とするためにはかみ込み条件を満足しなければならないので、かみ込み時に高い摩擦係数を保証しなければならない。一方、通板時に現有のタンデム圧延工程の各スタンドの圧延荷重を増加することがない程度の低い摩擦係数（後半のスタンドにおいて摩擦係数は0.15程度³⁾）を保証するトライボロジー条件を満足しなければならない。

本研究においては、超微細粒鋼を創製しうるかみ込み時は摩擦係数が高く、通板時に低くなるトライボロジー条件を検討し、そのトライボロジー条件を評価するための試験方法を提案する。そして、その評価結果についても報告する。

2. 超微細粒鋼創製のためのトライボロジー条件

大圧下圧延を可能とするためには、かみ込み時に摩擦係数が高く、通板中に摩擦係数を低くすることが必要である。これまでの方法から考えられるものとしては、無潤滑でかみ込みを行った後、圧延油を施す方法があるが、大圧下で無潤滑のかみ込み圧延を行うと焼付きを発生する可能性があるため、耐焼付き性の観点からかみ込み時に潤滑を施す必要がある。この理由から、Fig. 1に示すように一つの圧延油で高摩擦係数(0.2~0.3)のかみ込みを可能とし、その後の通板中に低摩擦係数(0.15程度)になるようなトライボロジー条件を満足することが望ましい。

この二つの相反する特性を同時に備えたトライボロジー条件を満足する圧延油の開発は、Fig. 2(a)に示すように高温の圧延材が低温のロールに接触するかみ込み時に摩擦係数は高く、さらにFig. 2(b)に示すようにかみ込み後の通板中にロールの界面温度の上昇、それに伴う潤滑油の変化およびロール表面の反応膜の生成などにより摩擦係数が低くなる特性を有することによって成し遂げられる可能性がある。この条件を満足させる圧延油の特性については、Fig. 3に示すように、低温度域で摩擦係数が高く、高温度域で

平成 18 年 10 月 2 日 受付 平成 19 年 1 月 11 日 受理 (Received on Oct. 2, 2006; Accepted on Jan. 11, 2007)

* 横浜国立大学大学院工学研究院・環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術研究体 (Yokohama National University, Environment-Conscious Ultrafine-Grained Steel Consortium of JRCM (The Japan Research and Development Center of Metals), 79-5 Tokiwadai Hadogaya-ku Yokohama 240-8501)

* 2 環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術研究体・横浜国立大学大学院工学研究院 (Environment-Conscious Ultrafine-Grained Steel Consortium of JRCM (The Japan Research and Development Center of Metals), Yokohama National University)

* 3 横浜国立大学大学院工学府 (Yokohama National University)

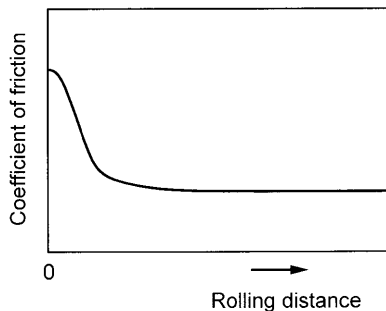


Fig. 1. Relationship between coefficient of friction and rolling distance for process of creating ultra-fine grained steels.

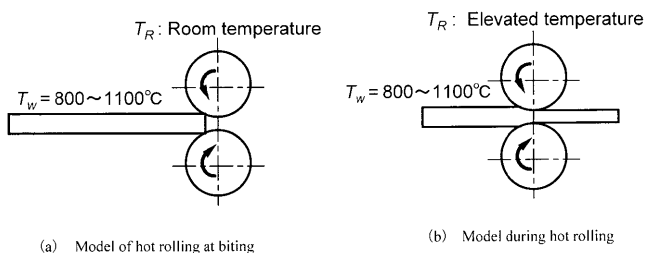


Fig. 2. Model for hot rolling with high reduction and low separating force.

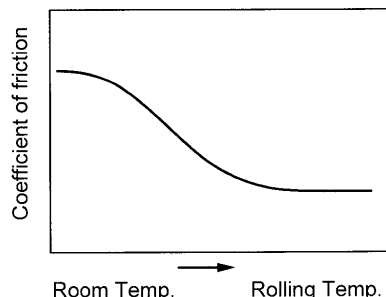


Fig. 3. Relationship between coefficient of friction and temperature for process of creating ultra-fine grained steels.

摩擦係数が低くなることで、一つの圧延油を用いて大圧下圧延を可能とする設計指針として考えることができる。この熱間圧延油を使用して圧延した場合、Fig. 1に示すようにかみ込み時に摩擦係数は高く、通板中に摩擦係数が低くなるのが予想される。

熱間圧延におけるトライボロジー特性の評価試験機として、熱間潤滑剤試験機⁴⁾、熱間圧延摩耗試験機⁵⁾、熱間転動摩耗試験機⁶⁾、チムケン試験機^{7,8)}及びSRV試験機⁹⁾などが使われているが、これらの試験機でFig. 1に示すような摩擦係数の経時変化を捉えるのは困難である。そのため、大圧下圧延を可能とする熱間圧延の摩擦係数の経時変化を評価できる熱間圧延潤滑性評価試験機の開発およびその評価方法の確立が必要である。

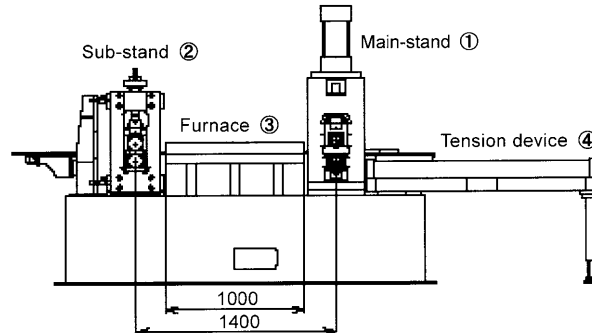


Fig. 4. Schematic representation of testing machine to simulate hot rolling.

Table 1. Specification of testing machine to simulate hot rolling.

Velocity of main roll	U	\leq	207 m/min
Ratio of velocity	r_v		6.3~24
Velocity of sub roll	v	\leq	8~32 m/min
Rolling load	P	\leq	200 kN
Rolling torque	G	\leq	800 Nm
Temperature of furnace	T_f	\leq	1100 °C
Forward tension	T_f	\leq	3.5 kN

3. 熱間圧延潤滑性評価試験機

著者の一人が以前に開発した試験機^{10,11)}を参考して開発された熱間圧延潤滑性評価試験機は、Fig. 4に示すように主スタンド①、サブスタンド②、加熱炉③および出口側張力付加装置④より構成されている。この試験機的主要仕様はTable 1に示す。主スタンドの上ロールおよびサブスタンドの上ロールと下ロールは37kWのDCモータより駆動される。主スタンドの上ロール速度とサブスタンドの上・下ロール速度の比率は、無段変速機によって調整され、6.3~24の間に変化できる。主スタンドの上ロール速度は207m/minまで連続的に変化できる。主スタンドの油圧シリンダーにより負荷される圧延荷重の最大値は200kNで、圧延トルクの許容値は800Nmである。加熱炉としては、加熱長さ960mmの赤外線イメージ加熱炉を使用し、その中には赤外線ランプを上・下24本ずつ合計48本配置し、その定格は200V、48kWである。加熱温度は、デジタル調節計ES100Pによって制御され、1100°Cまで設定することができる。炉内には雰囲気ガスであるアルゴンガスを導入し、加熱された試験片の表面の酸化を制御することができる。出口側張力はエアシリンダにより負荷され、その最大値は3.5kNである。トルクメータにより検出された圧延トルク、ロードセルにより検出された圧延荷重および同時に算出された摩擦係数の結果は、試験温度、主ロール速度および試験片の送り速度の試験条件とともにコンピューターに記録される。

4. 評価方法

大圧下熱間圧延を可能とするかみ込み時に摩擦係数が高く、その後通板中に摩擦係数が低下するような摩擦係数の経時変化を評価するための評価方法を Fig. 5(a), (b), (c) に示す。Fig. 5(a) に示すように、主スタンドとサブスタンドのロールの間に試験片をセットし、つづいてサブスタンドのロールが試験片を圧下し、試験片の移動速度を制御してすべり圧延を可能とする。それと同時に、試験片先端に出口側張力装置のチャック部を取り付け、すべり圧延時に前方張力を付加することにより試験片が真つぐ移動させるようにする。つづいて、赤外線イメージ加熱炉により試験片を所定温度まで上昇させ、一定時間保持させた後、前方張力を付加させながら、サブスタンドを圧延することにより、Fig. 5(b) の状態まで試験片を移動させる。この時点でロールの直下の試験片は炉中で所定温度に到達した部分が移動してきている。

Fig. 5(b) の状態まで試験片を移動した後、主スタンドの上ロールの表面に圧延油をスプレーし、主スタンドの上ロールを所定の圧下量ですべり圧延できるまで圧下させる。そのとき、試験片は一定の速度 V で移動しており、上ロールには速度 U ですべり状態になっている。また下ロールは従動状態で回転している。主スタンドの上ロールを圧下した後、Fig. 5(c) に示すように、一定の圧下量で一定距離にすべり圧延される。すべり圧延中、主スタンドの圧延荷重 P 、上ロールのトルク G が測定され、摩擦係数 μ は、

$$\mu = \frac{G}{PR}$$

より求められる。ここで、 R は主スタンドの上ロールの半径である。

Fig. 1 に示すようなかみ込み時以降の摩擦係数の経時変化を測定するために、Fig. 5(c) の状態で主スタンドの上ロールが試験片に接触してからの圧延荷重と圧延トルクを 1 ms のサンプリングタイムで測定した。その結果、主スタンドの上ロールが試験片に接触した後の数回転の摩擦係数変化を測定することが可能となり、その摩擦係数の経時変化から大圧下圧延ができるかどうかの評価が可能となる。

5. 潤滑性評価試験

5.1 試験条件と試験結果の再現性

試験ロールと試験片として、Table 2 に示すようにロール材質が SKD61 で、直径 100 mm、幅 60 mm のロールおよび試験片材質が SPHC で、幅 22 mm、厚さ 9 mm、長さ 2750 mm の試験片を使用した。試験する前に、ロールの表面は No. 400 のエメリ研磨紙で研磨し、ヘキサソで清浄した。ロールの表面粗さは $0.15 \mu\text{m Ra}$ 程度に管理した。圧延

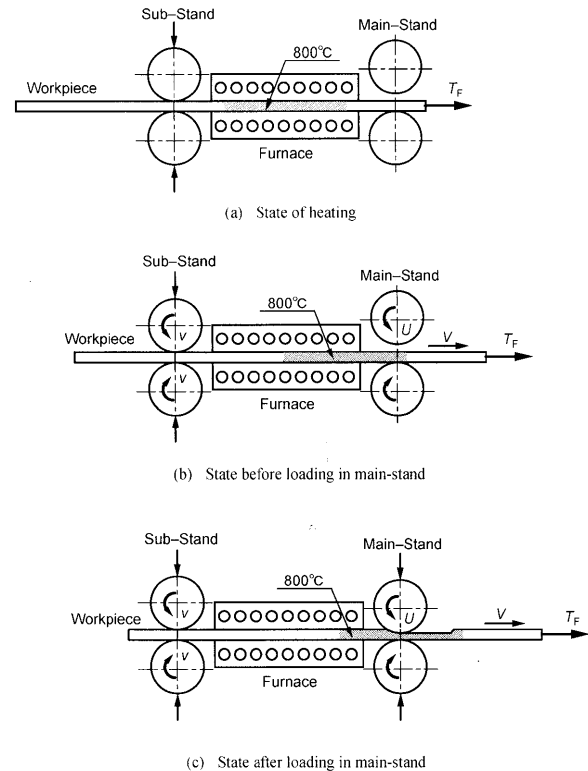


Fig. 5. Testing method for simulation.

Table 2. Rolls and workpiece.

	Rolls	Workpiece
Materials	SKD61	SPHC
Dimensions	$\phi 100\text{mm} \times 60\text{mm}$	$22\text{mm} \times 9\text{mm}$

Table 3. Testing conditions.

Velocity of main roll	U	30~100 m/min
Ratio of velocity	r_v	20
Velocity of sub roll	v	1.5~5 m/min
Temperature of furnace	T_f	800 °C
Forward tension	T_F	0.9 kN
Rolling reduction of thickness	Δt_s	0.13~0.57 mm

する試験片の表面もヘキサソで清浄した。試験条件として、Table 3 に示すように、主ロール速度 U を 30~100 m/min、サブロール速度 v を 1.5~5 m/min に変化させ、主ロール速度とサブロール速度の比率 r_v を 20 と一定にし、加熱炉の設定温度 T_f を 800 °C とし、出口側張力 T_F を 0.9 kN と一定にし、圧下量 Δt_s を 0.13~0.57 mm に変化させ、すべり圧延を行った。評価圧延油として、なたね油と開発中の 2 種類のコロイド系潤滑剤^{7,8)}を使用した。2 種類のコロイド系潤滑剤の組成を Table 4 に示す。

Fig. 6 に主ロール速度 30 m/min、サブロール速度 1.5 m/min、圧下量 0.13 mm のすべり圧延条件で、なたね油を濃度 3% のエマルジョンで供給した場合の摩擦係数の経時変化を 4 回測定した結果を示す。図の横軸に圧延距離 L 、

Table 4. Composition of colloidal lubricants.

Lubricant	A	B
Wool grease	5%	2%
Metallic soap	10%	10%
Additive agent	17.5%	15%
Water	67.5%	73%

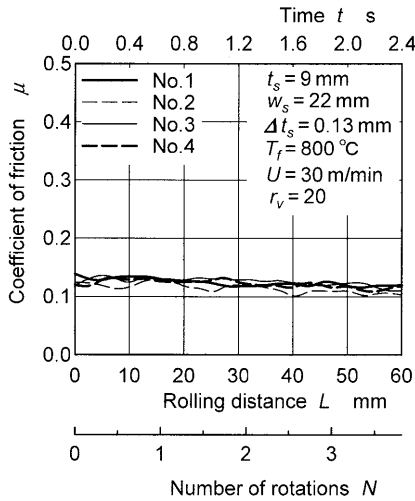


Fig. 6. Reproducibility of measured coefficient of friction.

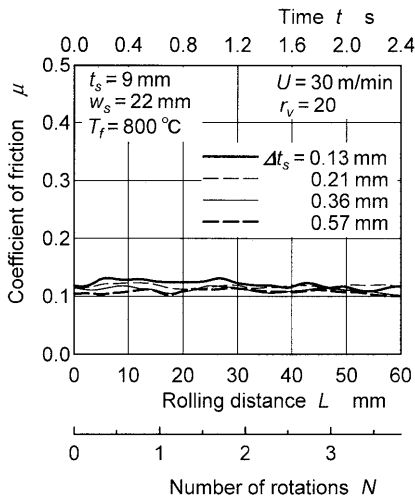


Fig. 7. Relationships between coefficient of friction and rolling distance at several rolling reduction using colza oil.

圧延時間 t および主ロールの回転数 N を合わせて示す。Fig. 6より、摩擦係数は4回の測定結果がよく一致し、測定結果の再現性を確認することができた。このことより、提案した評価方法は、熱間圧延における摩擦係数の経時変化を測定することによって、大圧下圧延が可能かどうかの評価をすることができると考えられる。

5・2 なたね油の潤滑性評価

Fig. 7に圧下量を0.13から0.57 mmまでの範囲に変化させたときの摩擦係数の経時変化を示す。他のすべり圧延条件はFig. 6と同一である。Fig. 7より、なたね油の摩擦係数は

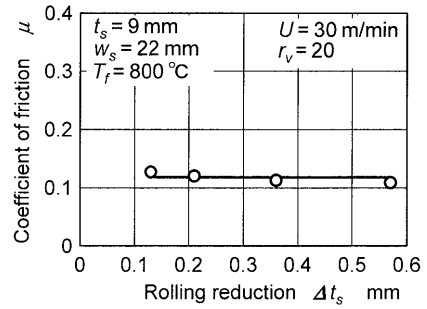


Fig. 8. Relationship between coefficient of friction and rolling reduction.

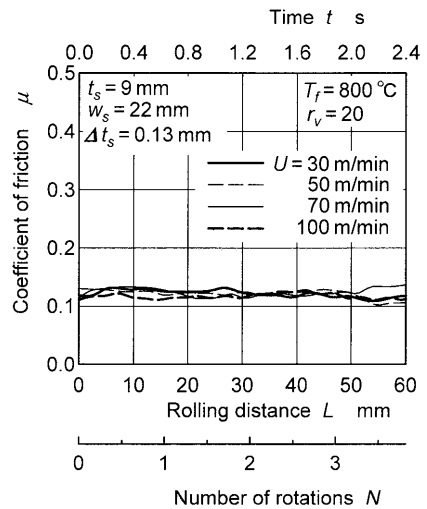


Fig. 9. Relationships between coefficient of friction and rolling distance at several velocities of main roll using colza oil.

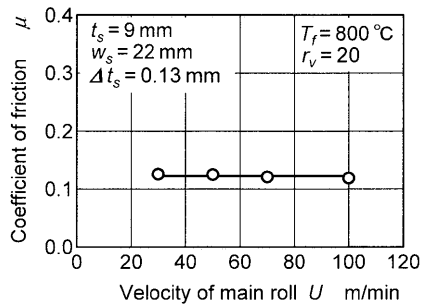


Fig. 10. Relationship between coefficient of friction and velocity of main roll.

は圧下量にはかかわらず同様な経時変化を示し、かみ込み時からほぼ一定の値になることを示している。

次に、Fig. 8にFig. 7の摩擦係数の平均値と圧下量との関係を示す。平均摩擦係数は圧延距離が0から60 mmの間の摩擦係数を平均した値である。平均摩擦係数は圧下量にはかかわらずほぼ一定の値を示している。

Fig. 9に主ロール速度を30 m/minから100 m/minまでの範囲に変化させたときの摩擦係数の経時変化を示す。他のすべり圧延条件はFig. 6と同一である。Fig. 9より、なたね油の摩擦係数は主ロール速度にもかかわらず同様な経時変化

を示し、かみ込み時からほぼ一定の値になることを示している。Fig.10にFig.9の摩擦係数の平均値と主ロール速度との関係を示す。平均摩擦係数は主ロール速度にもかかわらずほぼ一定の値を示している。

これらのことから、なたね油は熱間圧延油として圧延荷重を低減する潤滑効果をもっているが、かみ込み時に摩擦係数が高くないため、大圧下圧延油として使うのは困難であることが理解できる。そのため、大圧下圧延油を開発する必要がある、コロイド系潤滑剤などの圧延油の開発が進められている^{7,8)}。

これらのコロイド系潤滑剤を、開発された熱間圧延潤滑性評価試験機を用いて評価するためには、Fig.1に示すようなかみ込み時に摩擦係数が高く、通板時に摩擦係数が低くなる圧延油の摩擦係数を評価する試験条件が次のように決められる。冷間圧延油のすべり圧延潤滑性評価における摩擦係数の評価方法¹⁰⁾と同じく、Fig.8の圧下量の範囲内において一定の圧下量で圧延材料のロール接触時間を実機の接触時間と一致するようにロール速度とすべり率を決定し、800°Cの圧延材料をすべり圧延を行う。

5.3 コロイド系潤滑剤の潤滑性評価

現在、超微細粒鋼創製のために開発中のコロイド系潤滑剤の評価結果を示す。評価するコロイド系潤滑剤AとBはTable4に示す金属せっけん、水ガラス、添加剤などの組成からなり、それらの潤滑剤のFig.3に対応する摩擦係数の温度依存性は熱間チムケン試験機による試験から、Fig.11に示す結果が得られている⁸⁾。この摩擦係数の結果はFig.3で示したと同様に、試験温度の上昇とともに摩擦係数は減少しており、潤滑剤Bのほうが潤滑剤Aに比べて低い温度で摩擦係数が低下することを示している。これらの潤滑剤は、コロイド系潤滑剤に含まれた固体潤滑剤である金属せっけんが低温域で高摩擦係数を示し、高温域によりその金属せっけんが液状になり低摩擦係数を示すことが報告されている⁸⁾。

Fig.12に主ロール速度を30m/min、圧下量を0.13mmにしたときのすべり圧延を行った2種類のコロイド系潤滑剤AとBの摩擦係数の測定結果をなたね油の測定結果と比較して示す。他のすべり圧延条件はFig.6と同一である。Fig.12より、コロイド系潤滑剤の摩擦係数の経時変化はなたね油の測定結果と異なり、かみ込み時に0.26~0.28の高い値を示し、潤滑剤の組成によって、主ロールが0.3~2回転程度回った後、0.08~0.15の低い値になることがわかる。これは、コロイド系潤滑剤に含まれた固体潤滑剤である金属せっけんがかみ込み時の低温域で高摩擦係数を示し、かみ込み後ロールと材料の界面温度の上昇によりその金属せっけんが液状になり低摩擦係数を示すことが考えられる。このコロイド系潤滑剤は、超微細粒鋼創製のためのトライボロジー条件を満足させること、またステンレス用圧延油と同等の良好な耐焼付き性をもつ⁸⁾ことにより、大圧

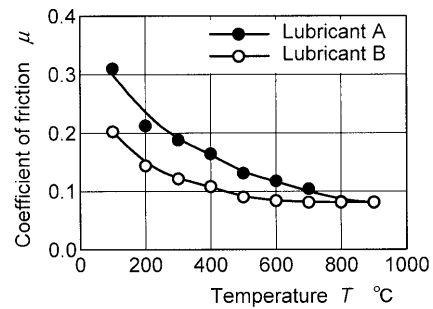


Fig. 11. Relationships between coefficient of friction and temperature for colloidal lubricants⁸⁾.

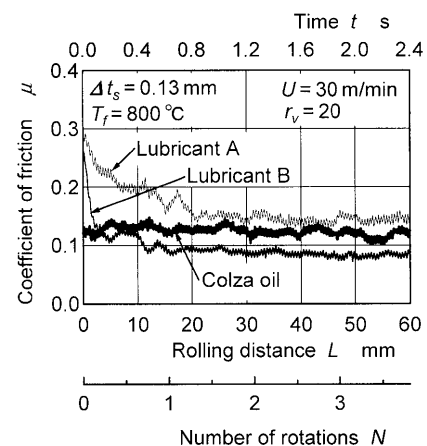


Fig. 12. Relationships between coefficient of friction and rolling distance for colloidal lubricants.

下圧延を可能とする圧延油として可能性があると考えられる。

6. 結言

本研究において得られた結果は次のとおりである。

- (1) 超微細粒鋼を創製しうるためのトライボロジー条件を検討し、そのトライボロジー条件を評価するための試験機を開発し、この評価試験機による評価方法を考案した。
- (2) 考案した評価方法を用いて、なたね油のかみ込み時以降の摩擦係数を測定し、その再現性を確認した。
- (3) コロイド系潤滑剤の摩擦係数は、かみ込み時に0.26~0.28の高い値を示し、潤滑剤の組成によって、主ロールが0.3~2回転程度回った後、0.08~0.15の低い値になった。一例として開発中のコロイド系潤滑剤は超微細粒鋼創製のための大圧下圧延を可能とする圧延油として可能性のあることがわかった。

おわりに、試験油を提供いただいた大同化学工業(株)に謝意を表すとともに、本研究は財団法人金属系材料研究開発センター(JRCM)が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの業務委託により実施する「環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術研究体」の研究成果であることを

記し、謝辞を表します。

文 献

- 1) K.Nagai: *Q. J. Jpn. Weld. Soc.*, **21** (2003), 142.
- 2) M.Kiuchi: *JRCM News*, **195** (2003), 2.
- 3) M.Etou, S.Fukushima, T.Sasaki, M.Wakita, K.Kawano and T.Shibahara: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 371.
- 4) T.Mase: *J. Jpn. Soc. Lubr. Eng.*, **24** (1979), 144.
- 5) J.Kihara, K.Doya, K.Nakamura, T.Yoshihara and Y.Sano: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 782.
- 6) T.Inoue, H.Yamamoto, M.Ataka, H.Takahashi, Y.Nishiyama and R.Kurahashi: *J. JSTP*, **43** (2002), 411.
- 7) J.Ikeda and S.Inagaki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1222.
- 8) J.Ikeda and S.Inagaki: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 397.
- 9) A.Azushima, W.D.Xue and K.Aoki: *J. Jpn. Soc. Lubr. Eng.*, **51** (2006), 532.
- 10) A.Azushima: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 696.
- 11) K.Aoki, T.Sato and A.Azushima: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 466.