

耐焼付き性に優れた高速圧延対応型 エマルジョン冷間圧延油

小豆島 明*・佐野 二郎*²・八木 隆浩*

Emulsion Type Rolling Oil with High Performance for Friction Pickup in High Speed Cold Rolling

Akira AZUSHIMA, Jiro SANO and Takahiro YAGI

Synopsis : The prevention of friction pickup, which occurs under the condition in high rolling reduction and/or high speed, is required to improve productivity in cold steel rolling. In order to prevent the friction pickup at high speed cold rolling, new rolling oils of emulsion type are developed in this paper. The emulsions consist of a synthetic ester with a viscosity of 100 cSt, emulsifier and additive. In the experiments, the emulsion concentration is changed, and two emulsifiers and several additives are used. The effects of emulsion concentration, emulsifier, extreme-pressure agent and new additive on friction pickup are investigated. For the evaluation of friction pickup, the sliding-rolling simulation testing machine is used. The experimental results obtained are as follows.

- (1) When the emulsion concentration and the emulsion particle size increased, the limit reduction of friction pickup increased.
- (2) When the extreme-pressure agent of P system or inactive S system was added, the limit reduction of friction pickup did not increase.
- (3) When new additives of Ca sulfonate and extreme-pressure agent of active S system were used, the limit reduction of friction pickup increased largely.

Key words: cold rolling; emulsion; friction pickup; coefficient of friction; steel; additives.

1. 緒言

近年、鉄鋼業の多くの圧延ラインにおいてはその最大生産能力で圧延が行われていないのが現状である。今後もその傾向が続き、板製品をいかに効率良く製造するかという問題を解決しなければならない。それを解決するための一つの方法として圧延ラインの集約化を行い、生産効率を高める方法が考えられる。そのようなラインの集約化後、さらに生産効率を高めるためには、現状よりも圧延速度を上げるプロセス開発を行うことが最も有効的な方法となろう。しかし、この開発に際し圧延速度の上昇によりロールと材料界面において焼付きが発生し、圧延速度が制限されることが予想される。

また、将来の環境対策としてリサーキュレーション方式による潤滑方法を用いて高速化することの対策を考えなければならない。現在、鋼板の冷間圧延のリサーキュレーション方式では2000 m/min以上の圧延速度で焼付きが発生し、更なる高速化が困難となっている。筆者の一人はロール材質の研究を行いロール表面の炭化物面積を増加させ、その間隔を小さく制御することによって優れた耐焼付き性を示すロールを開発した¹⁻³⁾。その開発したロールを用いた場合実験室レベルではあるが、リサーキュレーション方式の牛脂エマルジョンを用いて2500 m/minを超える圧延が

可能であることを示している²⁾。一方、圧延油の面からも筆者の一人のこれまでの研究により、リサーキュレーション方式において高速圧延を可能とするためには摩擦係数を低くすることが有効であり、けん化価の高いエステルが最も有効な基油であることを示している⁴⁾。具体的には300 cStの高い粘度をもつエステル系基油をリサーキュレーション方式で用いることにより、2500 m/minを越える圧延が可能となることを示している。しかし、実機においては、そのような高粘度であるエステルを用いると乳化バランスが崩れるために循環使用が困難になることが予想される。

そのため、本研究では実機において循環使用が可能な粘度100 cStのエステル系基油を用いて、高速圧延を可能とすることを目的とし、焼付き発生に及ぼすエマルジョン濃度、界面活性剤および添加剤の影響について調べ、リサーキュレーション方式の圧延油を用いた冷間圧延における高速化の可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 潤滑性評価試験機の実験装置および評価方法

実験にはFig. 1に示す潤滑性評価試験機⁵⁾を用いた。以下に実験手順を説明する。メインスタンドである①の圧延機

平成15年8月29日受付 平成15年12月9日受理 (Received on Aug. 29, 2003; Accepted on Dec. 9, 2003)

* 横浜国立大学工学研究院 (Graduate School of Engineering, Yokohama National University)

*² 大同化学工業(株) 技術研究所 (Research Laboratory, Daido Chemical Industry Co., Ltd., 1021 Nukatabekitamachi Yamatokouriyama 639-1037)

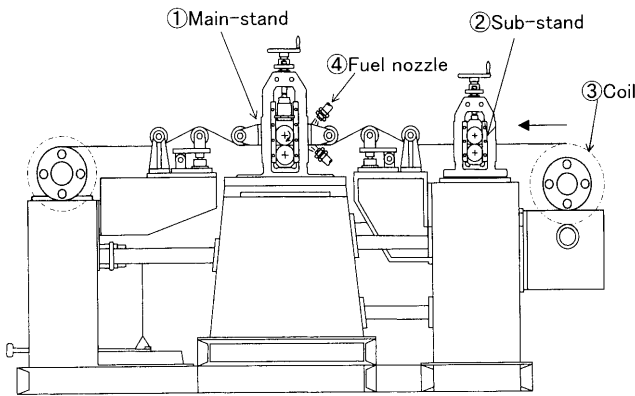


Fig. 1. Side view of simulation testing machine.

の上・下ロールを研磨，脱脂後十分に脱脂した試験コイル③をセットする。メインスタンド①およびサブスタンド②について圧延機の压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メインスタンドの上ロールおよびサブスタンドの上・下ロールを回転させる。サブスタンドのロール速度は減速機によりメインスタンドのロール速度の1/10に設定している。また，メインスタンド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，試験コイルはほぼサブスタンドのロール速度で移動し，メインスタンドの上ロールはその約10倍の速度で回転することになる。評価する圧延油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④にて給油循環使用した。試験距離は試験コイルで80cm，その間で圧延荷重およびロールのトルクを測定した。

つづいて，評価圧延油における潤滑性評価のための摩擦係数 μ は

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

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

評価圧延油の耐焼付き性を評価するため，メインロール速度を一定にし，焼付きが発生するまで压下率を段階的に上げた。焼付き発生の有無は試験コイルおよびロールの表面を目視観察して判別した。

2.2 実験条件

メインロールの直径は $\phi 76$ mmであり，その材料はSUI-2で，ロールは各実験ごとにエメリ紙で研磨し，表面粗さをRa 0.05 μ mに管理した。上ロールの速度は一定の143 m/minとした。試験コイルは板厚0.4mm，板幅15mmの低炭素アルミキルド鋼を用いた。その表面粗さはRa 0.02 μ mであった。

耐焼付き性に及ぼすエマルジョン濃度の影響を調べる実験においては，評価圧延油として，基油に40°Cで100cSt

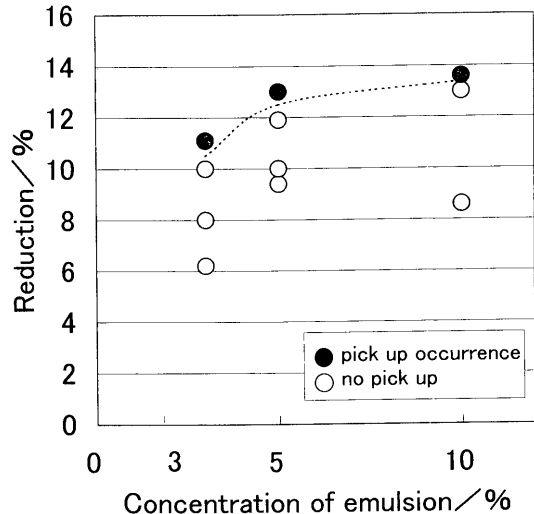


Fig. 2. Relationship between limit reduction of friction pickup and concentration of emulsion.

の合成エステル，界面活性剤に非イオンエーテル型でHLB=7.9の界面活性剤Aを用いた。その界面活性剤Aを基油に対して5%添加した。実験においては純水で調整した4Lのエマルジョン潤滑油を40°Cに保温し，ホームミキサーにて6000rpmで攪拌した。エマルジョン濃度は3, 5および10%とし，すべり圧延時に圧延入り側のメインロールと圧延材の間にポンプに接続されたフラットノズルを用いて噴射，循環使用した。その流量は1L/minとした。

次に，界面活性剤の影響を調べる実験においては，同一の合成エステルとHLB=5.7の界面活性剤Bを用いた。界面活性剤Bは界面活性剤Aの場合と同様に基油に対して5%添加し，エマルジョン濃度は5%とした。つづいて，添加剤の影響を調べる実験においては界面活性剤Aを5%添加した同一の合成エステルに現在使用されているS系活性，S系不活性およびP系の3種類の極圧添加剤を3%添加した。その際のエマルジョン濃度も5%とした。さらに，新しい添加剤としてCaスルフォネートおよびS系活性極圧添加剤を用意した。具体的には，Caスルフォネートを20%添加したもの，Caスルフォネート20%とS系活性極圧添加剤5%添加したものの耐焼付き性を調べた。比較のためにS系活性極圧添加剤のみ5%添加したものについても調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 エマルジョン濃度の影響

Fig. 2に界面活性剤Aを用いた合成エステルのエマルジョンの各エマルジョン濃度3, 5および10%における焼付き限界压下率を示す。○はその条件において焼付きが発生しなかったことを示し，●は焼付きが発生したことを示す。焼付きが発生した压下率と焼付きが発生しなかった直前の压下率の間を焼付き限界压下率とした。Fig. 2より焼付き

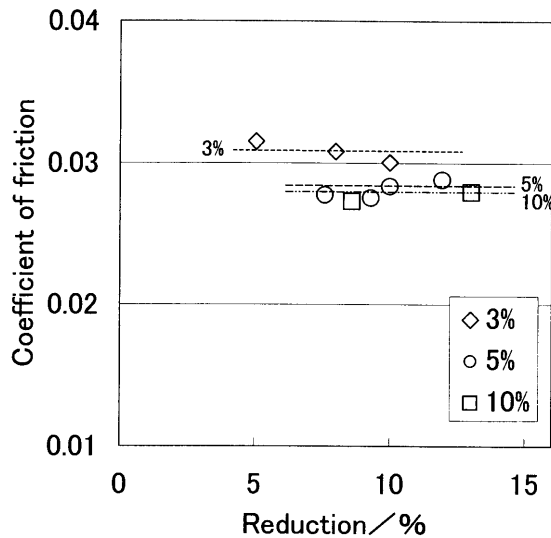


Fig. 3. Relationship between coefficient of friction and concentration of emulsion.

限界圧下率はエマルジョン濃度3%では10.5%, 5%では12.5%および10%では13.5%である。この結果からエマルジョン濃度が3%から5%に増加すると焼付き限界圧下率が上昇し、5%から10%にかけてはゆるやかに上昇することを示している。

Fig. 3にFig. 2と同じ条件の合成エステルエマルジョンの各エマルジョン濃度における摩擦係数と圧下率の関係を示す。得られた摩擦係数は、いずれのエマルジョン濃度においても圧下率に関係なくほぼ一定であり、その値はエマルジョン濃度3%では0.031、5%では0.028および10%では0.027であった。これらの結果からエマルジョン濃度の増加に伴って摩擦係数が減少し、焼付き限界圧下率が上昇したことを示している。このようなエマルジョン濃度が増加するに伴い摩擦係数が減少した原因は、エマルジョン濃度の増加に伴い、ロールと材料界面へ導入される油量が増加したことによるものと考えられる⁶⁾。

一般に焼付きは界面温度の影響を受け、界面温度と焼付きの発生に相関性があることが認められている⁷⁾。そこで、焼付き限界圧下率を界面温度上昇から検討するために筆者の一人⁸⁾が提案している次式を用いて摩擦熱による接触弧界面の平均界面温度上昇 ΔT_m を算出した。

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

ここで、 L は接触弧長の1/2、 p_m は平均面圧、 ΔV はロールと圧延材の平均相対速度、 K_s および K_r は圧延材およびロールの熱伝導率、 κ_r はロールの温度伝導率である。

各エマルジョン濃度における平均界面温度上昇の計算結果をFig. 4に示す。Fig. 4より、いずれのエマルジョン濃度においても、焼付き発生時の平均界面温度上昇がほぼ52°Cと同じである結果が得られた。このことから用いた合成エ

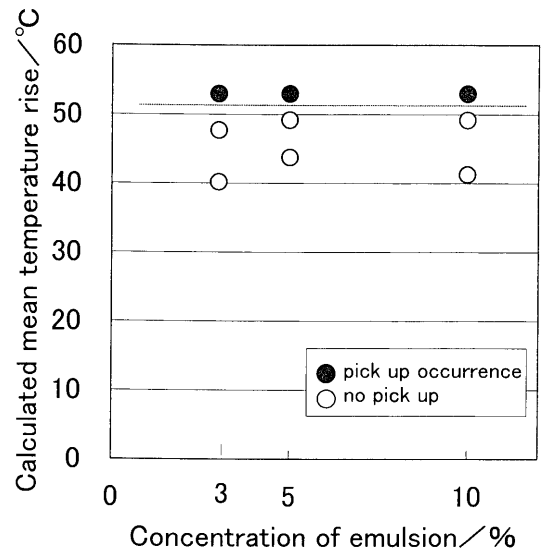


Fig. 4. Relationship between calculated mean temperature rise and concentration of emulsion.

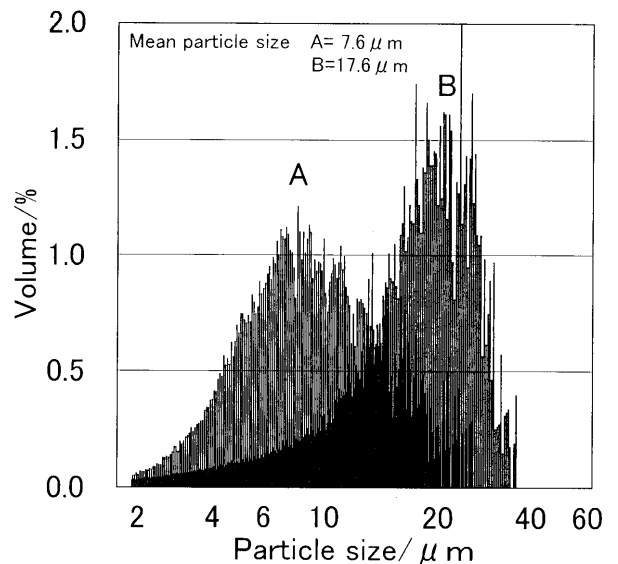


Fig. 5. Distribution of particle size of emulsions with emulsifier A and B.

ステルは、エマルジョン濃度に関係なく、平均界面温度上昇52°Cで焼付きを示している。

3・2 界面活性剤の影響

乳化をルーズにさせ粒径を大きくするため、界面活性剤B (HLB=5.7)により乳化させた合成エステル濃度5%のエマルジョンを用いて実験を行った。Fig. 5に界面活性剤AおよびBを用いたエステル濃度5%エマルジョンのそれぞれのコールターカウンターで測定した粒径分布を示す。界面活性剤Aを用いたエマルジョンの平均粒径は7.6 μ mであるのに対し、界面活性剤Bを用いたエマルジョンの平均粒径は17.6 μ mとなり、約2倍以上の大きい粒径を示した。

次に、界面活性剤AおよびBを用いたエマルジョン濃度5%における焼付き限界圧下率をFig. 6に示す。Fig. 6より

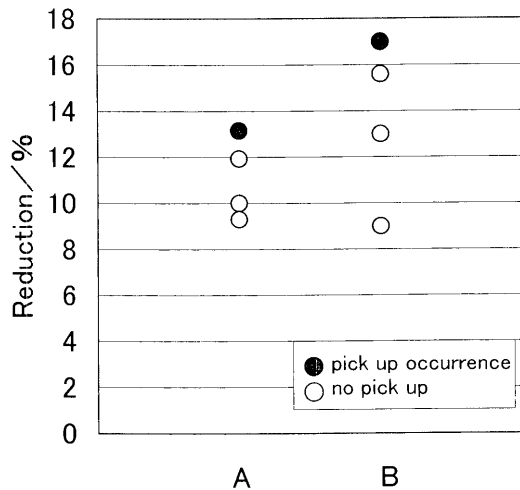


Fig. 6. Effect of emulsifier on limit reduction of friction pickup.

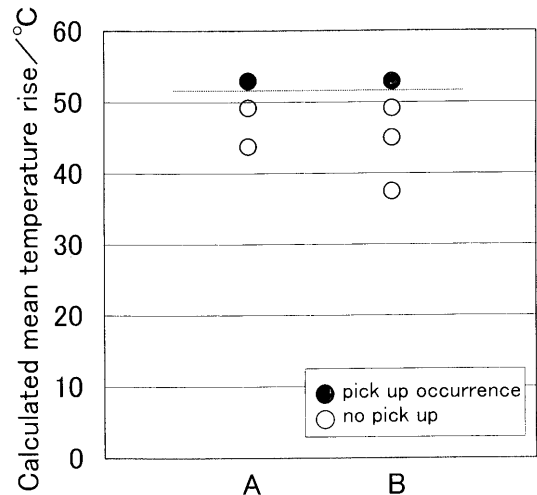


Fig. 8. Effect of emulsifier on calculated mean temperature rise.

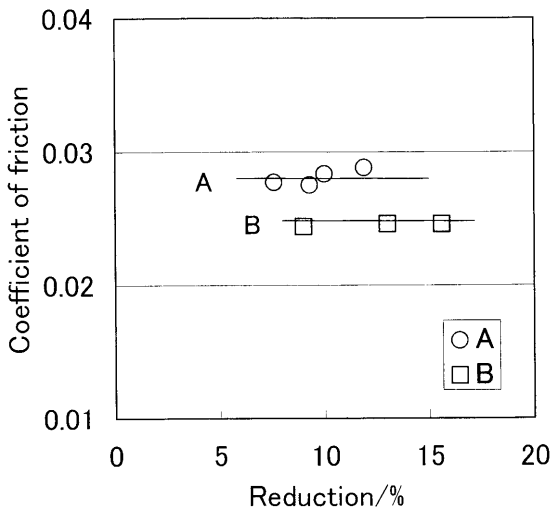


Fig. 7. Effect of emulsifier on coefficient of friction.

焼付き限界圧下率は界面活性剤Aを用いたエマルジョンの12.5%に比べ、界面活性剤Bを用いたエマルジョンは16.5%であり、粒径を大きくすることで焼付き限界圧下率が上昇することを示している。

Fig. 7に界面活性剤AおよびBを用いたエステル濃度5%エマルジョンの摩擦係数と圧下率の関係を示す。界面活性剤Aを用いたエマルジョンの摩擦係数の値0.028に比べ、界面活性剤Bを用いたエマルジョンの摩擦係数は0.024となった。このように粒径を大きくすることにより摩擦係数が減少したのは、粒径を大きくすることによりロールと材料界面に導入される油量が増加したことによるものと考えられる⁶⁾。

つづいて、界面活性剤による焼付き限界圧下率の差を平均界面温度上昇から検討した。(2)式を用いて、界面活性剤AおよびBを用いたエマルジョンにおける平均界面温度上昇の計算結果をFig. 8に示す。Fig. 8より、界面活性剤AおよびBを用いたエマルジョンはともに平均界面温度上昇

がほぼ52°Cで焼付きを発生することを示している。

これらの結果から焼付きが発生する界面温度上昇はエマルジョン濃度、界面活性剤に関係なく、基油の合成エステルの特性に依存するものと考えられる。

そこで、合成エステルに極圧添加剤を添加することにより焼付き発生時の界面温度を上昇させ、焼付き限界圧下率を増加させることを試みた。

3.3 極圧添加剤の影響

冷間圧延油では耐焼付き性上昇のために境界潤滑において強固な反応膜を形成する極圧添加剤が用いられている。より高速圧延を可能とするリサーキュレーション方式の圧延油を設計する上で極圧添加剤の添加が必要である。現在、実機において添加効果が確認されているS系活性、S系不活性およびP系の3種類の極圧添加剤を添加した圧延油の耐焼付き性に及ぼす影響を調べた。その圧延油は、基油の合成エステルに対し、界面活性剤Aを5%とそれぞれの極圧添加剤を3%添加した。実験におけるエマルジョン濃度は5%とした。

Fig. 9に極圧添加剤の耐焼付き性に及ぼす影響を示す。焼付き限界圧下率はS系活性極圧添加剤では13.0%、S系不活性極圧添加剤では12.5%、P系極圧添加剤では12.5%であった。いずれの極圧添加剤においても添加剤無しの12.5%とほぼ同じかわずかに高いかであった。

Fig. 10に各種極圧添加剤における摩擦係数と圧下率の関係を示す。各種極圧添加剤とも摩擦係数は圧下率に関係なく、ほぼ一定であった。しかし、その値はS系活性極圧添加剤において0.028、S系不活性極圧添加剤において0.030、P系極圧添加剤において0.034であり、添加剤無しの0.028と比べるとS系活性極圧添加剤では同等、S系不活性極圧添加剤およびP系極圧添加剤では高い結果が得られた。

次に各種極圧添加剤を添加したエマルジョンの平均界面温度上昇の計算結果をFig. 11に示す。焼付き発生時の平均界

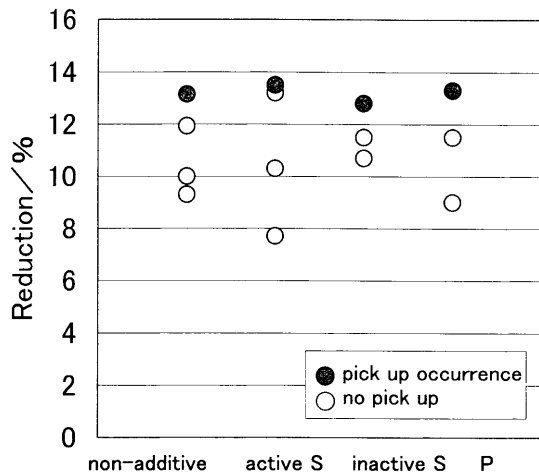


Fig. 9. Effect of extreme-pressure agent on limit reduction of friction pickup.

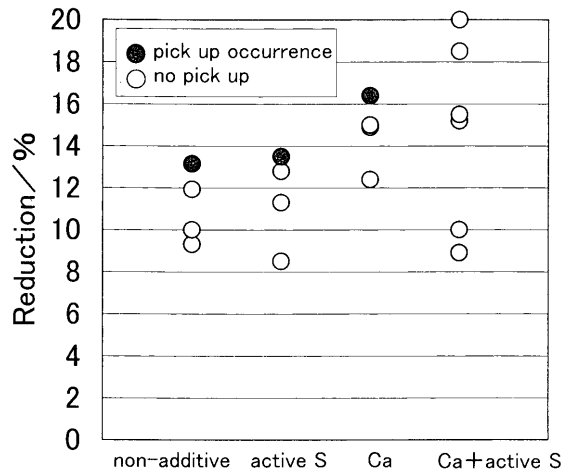


Fig. 12. Effect of new additive on limit reduction of friction pickup.

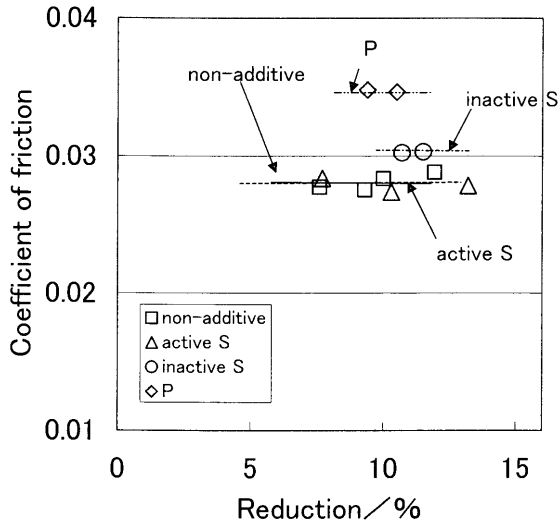


Fig. 10. Effect of extreme-pressure agent on coefficient of friction.

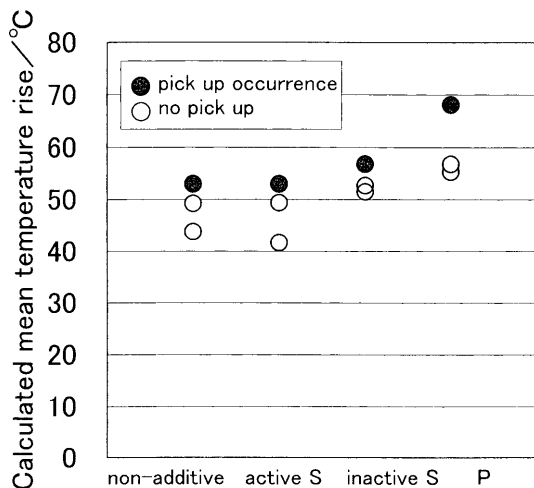


Fig. 11. Effect of extreme-pressure agent on calculated mean temperature rise.

面温度上昇はS系活性極圧添加剤では53°C, S系不活性極圧添加剤では55°C, P系極圧添加剤では62°Cと添加剤無しの場合の平均界面温度上昇52°Cと比べると、極圧添加剤を添加することにより高い温度で焼付くことを示している。このように極圧添加剤を添加することにより焼付き発生時の平均界面温度上昇が高くなることを示しているが、Fig.10より摩擦係数が添加剤無しと比べ高くなるので、焼付き限界圧下率が上昇しなかったものと考えられる。

3・4 新たな添加剤

実機で効果があるとされたS系活性、S系不活性およびP系の極圧添加剤を添加した合成エステルエマルジョンではその効果はほとんど得られなかったため、新たな添加剤を試した。その添加剤は非常に厳しい加工条件であるステンレス鋼のブラッキングやしごき加工あるいは切削加工の分野において効果のあるCaスルフォネートおよびS系活性極圧添加剤である^{9,10)}。

新しい圧延油は同一の合成エステルに界面活性剤Aを5%添加し、Caスルフォネートを20%添加したものおよびCaスルフォネート20%とS系活性極圧添加剤5%添加したものの2種類である。比較のためにS系極圧添加剤を5%添加したものを用意した。それぞれエマルジョン濃度は5%とした。

Fig.12に3種類のエマルジョンの焼付き限界圧下率を示す。焼付き限界圧下率はS系活性極圧添加剤のみでは13.0%、Caスルフォネートのみでは16.0%であったが、CaスルフォネートとS系極圧添加剤を併用して添加したエマルジョンでは圧下率20%でも焼付きが発生しなかった。

Fig.13に3種類のエマルジョンの摩擦係数を示す。各エマルジョンの摩擦係数は圧下率に関係なくほぼ一定であり、S系活性極圧添加剤では0.028、Caスルフォネートでは0.025およびS系活性とCaスルフォネートを併用させて添加したエマルジョンでは0.024であった。この結果より、Caスルフォネートの添加が摩擦係数を軽減させる作用が

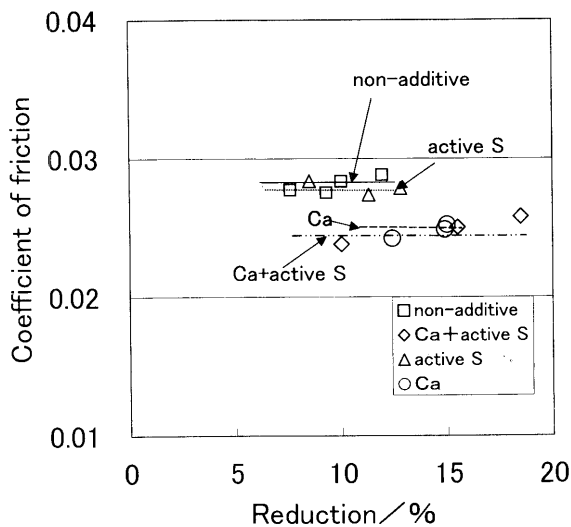


Fig. 13. Effect of new additive on coefficient of friction.

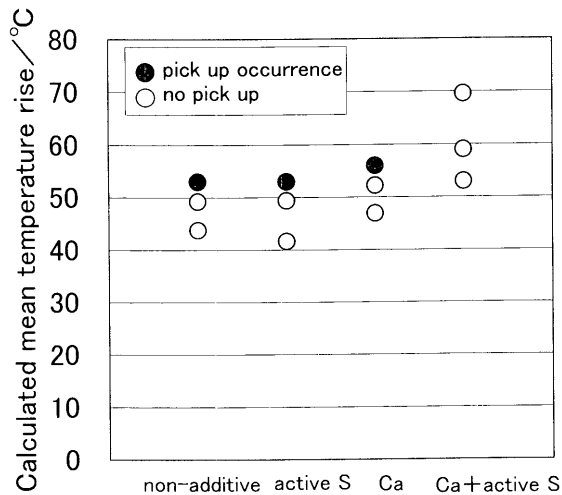


Fig. 14. Effect of new additive on calculated mean temperature rise.

あることを示している。

3種類のエマルジョンの平均界面温度上昇を Fig.14に示す。焼付き発生の平均界面温度上昇は、S系活性極圧添加剤では52°CおよびCaスルフォネートを添加したエマルジョンでは54°Cであった。一方、さらにS系活性極圧添加剤とCaスルフォネートを併用して添加したエマルジョンでは70°Cでも焼付かない結果が得られた。以上の結果から著者の一人が以前の高潤滑性冷延ロールの開発において得られた同じ評価試験機での評価結果を参考にとると圧

下率20%で焼付きは発生せず、焼付き発生平均界面温度上昇 ΔT_m が70°Cに達する場合には実機での圧延速度が3000 m/minに達することを示している^{1,2)}。以上のことから合成エステルにCaスルフォネートとS系極圧添加剤を併用して添加したエマルジョンを用いると3000 m/minに達するような高速圧延が可能になることを示すことができた。

4. 結論

実機において循環使用が可能な基油粘度100 cStのエステル系基油を用いて高速圧延を可能とすることを目的とし、焼付き発生に及ぼすエマルジョン濃度、界面活性剤および添加剤の影響について調べ、以下のことがわかった。

(1) エマルジョン濃度が増加すると焼付き発生の平均界面温度上昇は同じであっても、摩擦係数が減少することにより焼付き限界圧下率が上昇した。

(2) 乳化をルーズにさせ、エマルジョン粒径を大きくすると焼付き発生の平均界面温度上昇は同じであっても、摩擦係数が減少することにより焼付き限界圧下率が上昇した。

(3) S系不活性、P系極圧添加剤を添加すると焼付き発生の平均界面温度上昇は上昇するが、摩擦係数が増加するために焼付き限界圧下率に関してほとんど効果は得られなかった。

(4) CaスルフォネートとS系活性極圧添加剤を併用させて添加すると焼付き発生の平均界面温度上昇の上昇および摩擦係数の減少することにより焼付き限界圧下率が上昇した。

文 献

- 1) A.Azushima, Y.Jimbo and T.Kaneda: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 64.
- 2) A.Azushima and Y.Jimbo: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 1150.
- 3) A.Azushima and Y.Jimbo: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 359.
- 4) A.Azushima, T.Hirasawa and J.Sano: *Proc. 2002 Japanese Spring Conf. Technol. Plast.*, (2002), 405.
- 5) A.Azushima: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 696.
- 6) A.Azushima, K.Noro and Y.Iyanagi: *Tribologist*, **34** (1989), 879.
- 7) J.F.Archard: *Wear*, **2** (1958/59), 483.
- 8) A.Azushima: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **29** (1988), 492.
- 9) S.Kimura: 196th JSTP Symposium (Textbook), JSTP, Tokyo, (2000), 53.
- 10) T.Wakabayashi, H.Yokota, M.Okajima and S.Ogura: *Tribologist*, **39** (1994), 784.