

合成エステルをベースとした極薄鋼板用冷間圧延油の開発

岩藤 秀一*・守田 義之*・覚張 文夫*・徳永 宗康*²

Development of Synthetic Ester Based Rolling Oil for Tin Gauge Cold Rolling

Shuichi IWADOH, Yoshiyuki MORITA, Fumio GAKUHARI and Muneyasu TOKUNAGA

Synopsis : In case when a tin gauge sheet steel is rolled with higher speed than 6000fpm, the rolling oil is usually composed of natural fatty oils such like beef tallow or palm oil with good lubricity and high oil film strength. Since these oils have a high pour point, their mixture with iron fines forms a scum which is difficult to remove and accumulates around the mill housing. Furthermore, this scum must be a nuisance of poor working environment leading to high risk of fire.

This paper is concerning with design and development of synthetic ester based rolling oil suitable to tin gauge cold rolling.

Considering that the tin gauge rolling oil needs the optimal viscosity characteristics and molecular structure, a new oil was designed to have a combination of trimethylol-propane and fatty acid mainly consisting of C₁₂.

As the new oil has a lower pour point, low deterioration rate and fine lubricity, the scum accumulation is reduced and the working environment is improved without loss of high oil film strength.

Key words : tin gauge ; cold rolling ; rolling oil ; synthetic ester ; viscosity ; viscosity index ; molecular structure ; lubrication.

1. 緒言

ぶりき原板に代表される極薄冷延鋼板の圧延は、通常5ないし6スタンドのタンデムミルで行われるが、総圧下率が90%を越え、かつ最大圧延速度は1800mpm以上にも及ぶため、圧延潤滑を司る圧延油は最も重要な要素技術の一つである。従来、この種の圧延油としては、コストと潤滑性能のバランスからパーム油や牛脂などの天然油脂が用いられてきた。

しかしながら、天然油脂は流動点が高く常温で凝固状態にあり、経時劣化してさらに粘稠な鉄石鹼を生成するため、圧延機周辺にスカムとして付着して著しく作業環境を損なうだけでなく、潤滑性能の変化やエマルジョンの不安定化をきたし、ひいては作業能率や品質の低下をもたらしてきた。さらに付着した油分は火災の原因ともなり、冷間圧延機の大規模火災による長期休止に至る事例も過去に数例経験されている。

このような事態に鑑み、最近では低流動点で、かつ経時劣化の少ない合成エステルが圧延油として着目されるようになった。

合成エステルの分子構造は、アルコールと脂肪酸の化合物という点でグリセライドである天然油脂と同類であるといえるが、アルコールと脂肪酸の構造や分子量を任意に選定できるため、必要に応じた特性を選択的に与えることが

できる点に特徴がある。

そこで、従来の天然油脂系の圧延油の問題を解決すべく、①経時劣化しにくく、②堆積しにくく、かつ③潤滑性能・経済性ともに天然油脂に優るとも劣らない圧延油を合成エステルの中に求めた。本報告では、ベース油の分子構造と圧延油としての特性の関係を考察し、1800mpm以上の高速で硬質ぶりきの原板を圧延するに耐えうる合成エステルベースの圧延油の開発と、それを実機圧延機での操業に用いた結果について述べる。

2. 圧延油の種類と特性の検証

2・1 圧延油の種類と潤滑性能

Fig. 1は、圧延試験機を用いて様々な油種の粘度と圧延荷重の関係を示したものであるが、全体的な傾向として、圧延荷重は粘度と油種の影響を受けることがわかる。粘度は、ロールバイトでの油膜厚みに影響する要因であり、油種の影響については、小倉ら¹⁾の提唱する分子構造に基づく活性化体積を考慮し、粘度特性と分子構造の両面から圧延性能との関連を探る必要がある。

2・2 圧延油における粘度特性の潤滑性能に及ぼす影響

2・2・1 ロールバイト入口油膜厚の構成要因

ロールバイト入口における油膜厚の構成要因としては、入側鋼板表面へのプレートアウト量、またはロールバイト

平成7年10月6日受付 平成7年11月29日受理 (Received on Oct. 6, 1995; Accepted on Nov. 29, 1995)

* NKK京浜製鉄所 (Keihin Works, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

* 2 NKK福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation)

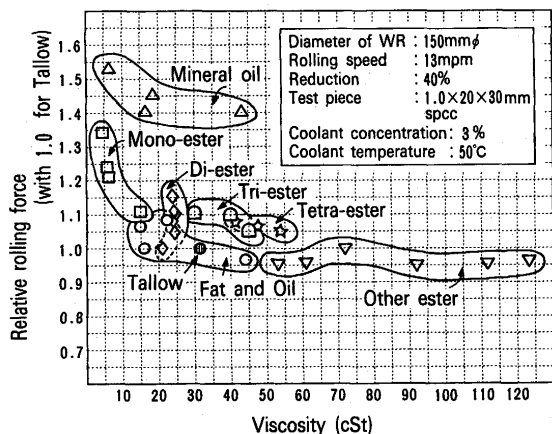


Fig. 1. Correlation between viscosity and lubricity.

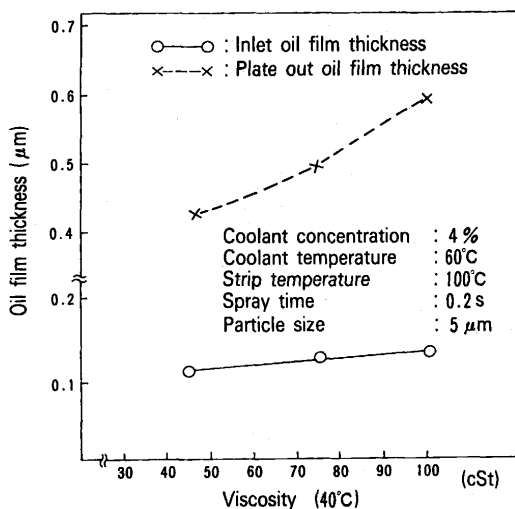


Fig. 2. The effect of viscosity of hindered ester on oil film thickness.

入口における油の導入量によって決定されると考えられる。そこで、両者の相互関係を整理するために、プレートアウトテストで得られた付着油量から算出した入側鋼板表面の平均油膜厚(入側平均油膜厚と称する)と、小豆島らが提案したスターブ潤滑によるエマルジョンの導入油量計算モデル²⁾を用いて、ロールバイト入口油膜厚計算式((1)式)から得られたロールバイト入口油膜厚を比較した結果をFig. 2に示す。(1)式の計算前提としては、ロールバイト入口近傍の油の温度を一定として、その温度に入口板温度を用いた。

$$h_1/h_2 = [1 + h_2 \{1 - \exp(-\alpha \sigma^0)\} / \alpha A] - \sqrt{[1 + h_2 \{1 - \exp(-\alpha \sigma^0)\} / \alpha A]^2 - 1} \dots \dots \dots (1)$$

$$C = C_0 \cdot d/h$$

$$A = 6\eta_0 (U_1 + U_R) R/L$$

$$h_2 = C_0 \cdot d \text{ (at } C=1)$$

$$\eta(p) = \eta_0 \exp(\alpha p)$$

ここで、C：濃度、C₀：初期濃度、d：エマルジョン粒径、h₂：圧力上昇開始位置、h₁：任意位置の油膜厚み、α：圧力粘度指数、σ⁰：材料の降伏応力、R：ロール径、L：接触弧

長、η₀：圧延油粘度、U₁：材料速度、U_R：ロール速度、P：圧力である。

粘度増加により入側平均油膜厚は増加する傾向にあるが、ロールバイト入口油膜厚に対する粘度の影響はそれより少なく、両者の値を比較するとロールバイト入口油膜厚の方が常に少ない傾向を示している。これは、一般的にはロールバイト入口のような高温、高压の条件下では、プレートアウトされた油分がロールバイトに導入される油分よりは充分に多く、潤滑条件がプレートアウト量よりも油分の粘度に支配されていることを示している。

2.2.2 潤滑性能に及ぼす粘度と粘度指数の影響

ロールバイトのような高温、高压条件下においては、油の粘度指数を無視できないことは良く知られている。上田らは、試験片上に滴下した油が圧延ロールを通過した際の油滴拡がり性と摩擦係数の関係の評価し、高压下で油滴拡がり性の優れた油ほど摩擦係数を低減させることを報告している^{3,4)}。

萬羽は、小型圧延試験機を用いて圧延油の粘度および粘度指数が圧延荷重に及ぼす影響を整理し、ロールバイトでの油膜厚さが同一であれば、粘度指数が高い方が圧延荷重低減効果が大いことを示した⁵⁾。

これらの報告例は、高温、高压となるロールバイト入口で、焼付の発生しない範囲で最小限の油膜厚さと、優れた油滴拡がり性が得られる粘度と粘度指数のバランスを与えることによって、圧延油の潤滑性能が高められることを示したものであるといえる。

2.2.3 高速圧延試験機による評価

潤滑性能に対する粘度および粘度指数の影響を、実機並のロール径および速度を有する高速圧延試験機による短冊鋼片の圧延試験で評価した結果をFig. 3に示す。この試験で同一油種の場合、低粘度/高粘度指数の油で圧延荷重が低い傾向を示すことが確認された。しかし、鉱油を20%添加したものは粘度指数が高いにもかかわらず圧延荷重が高く、粘度指数だけでなくベース油の分子構造も大きな影響力を持つことがわかる。

3. ベース油の特性に及ぼす分子構造の影響

3.1 経時劣化と流動点に及ぼす分子構造の影響

天然油脂を構成するグリセライドの場合、アルコール基のβ位炭素を中心とした6員環の構成により分解し易いことは良く知られている。そこで、β位炭素に水素を持たないネオ骨格を持つポリオール代表であるトリメチロールプロパン(Trimethylol-Propane: TMP)およびペンタエリトリトール(Penta-Erythritol: PET)をアルコール基とするヒンダードエステルと牛脂の経時劣化性を比較調査した。また、もう一つの問題点である流動性の悪さを改善するために、酸基となる脂肪酸構造の組合せについても比較検討し

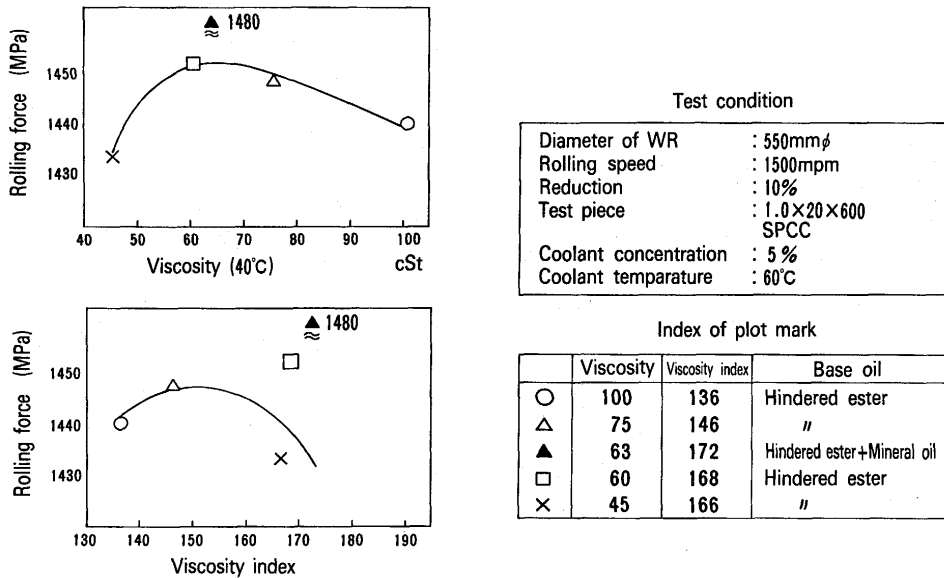


Fig. 3. Correlation between viscosity/viscosity index and rolling force.

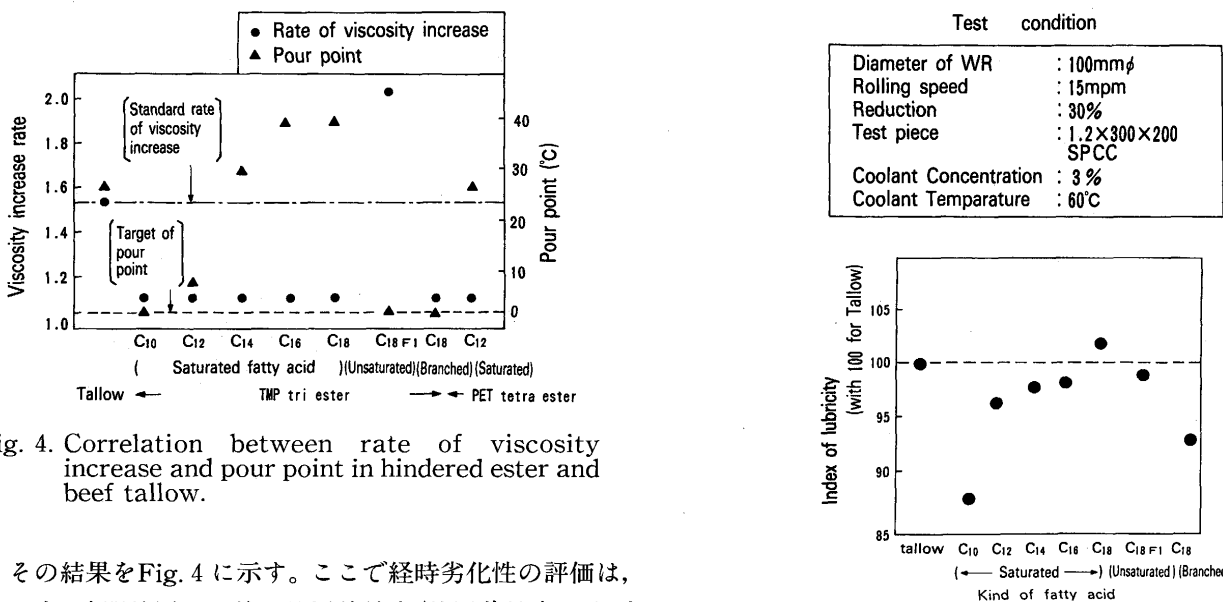


Fig. 4. Correlation between rate of viscosity increase and pour point in hindered ester and beef tallow.

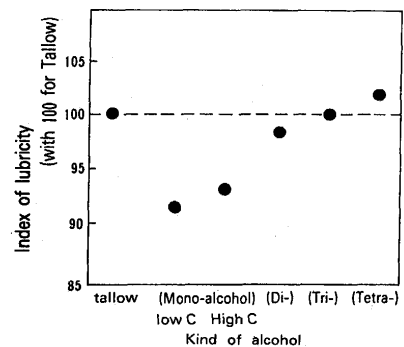
た。その結果をFig. 4に示す。ここで経時劣化性の評価は、150°Cで8時間放置した後の放置後粘度/放置前粘度の比である。加熱による粘度増加は、ヒンダードエステルの採用で大幅に抑制できるが、酸基が不飽和脂肪酸である場合はその限りでない。流動点は、分子量と脂肪酸構成の影響を強く受けるが、酸基が飽和型でC₁₀~C₁₂の場合に良好な耐経時劣化性と流動点のバランスを示すことがわかる。

3・2 粘度指数および圧延潤滑性能に及ぼす分子構造の影響

Eyringの粘性理論によれば、粘度指数、流動性共に分子構造に大きく影響されることが知られている⁶⁾。アルコール基が同じ場合には、酸基分子量が大きいほど粘度指数は増加し、流動点は上がる傾向にある。酸基の構造では、飽和>不飽和>分岐の順に粘度指数は増加し、流動点は上がる傾向を示す。

Fig. 5 a)は圧延試験機による短冊試験片の圧延で、グリセライドをベースとした場合の付加脂肪酸と潤滑性能の関係

(a) The effect of fatty acid in glyceride on lubricity



(b) The effect of alcohol type of the esters which have tallow fatty acid on lubricity

Fig. 5. Correlation between molecular structure and lubricity.

について、牛脂との比較で評価したものである。この結果から、酸基として直鎖脂肪酸のC₁₂以上、またはC_{18F1}を用いることが必要であることがわかる。以上を総合すると、酸基の選択としてはC₁₂の直鎖脂肪酸(ラウリン酸)が優れたバランスを示すといえる。

Fig. 5 b)はアルコール基の価数と潤滑性能の関係を同様な方法で比較評価したものであるが、アルコールの炭素数よりもアルコール価数の方が潤滑性能に大きく影響することがわかる。

3.3 試作油の設計

以上の検討結果に基づき、実機タンデムミル(Table 1 参照)での操業試験に供するために、3種類の試作油を合成した。各々の特性値と成分値構成の概要を、従来用いていた牛脂ベースの圧延油と比較してTable 2に示す。

試油Aは、トリメチロールプロパンに牛脂脂肪酸を付加したヒンダードエステルを複合化して高分子化したものを主体としており、低流動点でありながら粘度特性としては高粘度/低粘度指数を示す。

試油Bは、試油Aのベースである複合エステルと、トリメチロールプロパンにC₁₂ラウリン酸リッチの脂肪酸を付加したヒンダードエステルと、オクチルアルコールに牛脂脂肪酸を付加したモノエステルをブレンドすることによって、低粘度/高粘度指数と0℃以下の低流動点化を両立させたものである。

試油Cは、試油Bに用いたヒンダードエステル単体をベースとしたもので、流動点を0℃に抑えながら、試油Bと同等の粘度/粘度指数バランスを与えたものである。

Table 1. Specification of TCM in NKK Keihin Works.

Item	Specification
Form	#1~4STD:4Hi, #5STD:6Hi
Max. speed	2100mpm
Diameter of WR	±1~4STD:φ 542~630×142, #5STD:φ 405~445×142
Thickness ent/del	1.6~4.0/0.15~1.60mm
Width	600~1305mm
Coolant system	Recirculation

Table 2. Composition of rolling oil applied for on-line test.

	Ordinary oil	Test oil A	Test oil B	Test oil C
Beef tallow	○			
High viscosity ester		○	○	
Middle viscosity ester			○	○
Low viscosity ester			○	
Saponification value(mgKOH/g)	185	185	190	194
Acid value(mgKOH/g)	11	15	11	22
Viscosity (cSt at 40°C)	45	75	47	45
Viscosity index	174	146	165	166
Pour point	25	0	-2.5	0
Emulsifier(%)	3.2	4.0	3.6	3.6
Oiliness improver	4.0	5.0	4.0	5.0
Extreme-pressure additive	3.0	2.0	3.0	2.0
Oxidation inhibitor	2.0	1.0	2.0	1.2

油性向上剤と極圧添加剤のバランスは、従来油並の4球耐圧試験結果が得られるように、また乳化剤も従来油並の乳化状態が得られるように適宜調整した。

4. 実機操業における試作油の性能評価

4.1 圧延速度

前章で紹介した3種の試作油を、薄物のぶりき原板の代表品種($t \leq 0.21\text{mm}$, T4, SPB)の圧延に供し、圧延速度と高速圧延における異常現象と圧延欠陥の発生状況について、従来油の実績と比較した。

試油Aでは、中・低速領域においてチャタリングが多発し、1500mpm以上の圧延速度を達成できず、早期に試験を打ち切らざるを得なかったため、定量評価の対象から外した。一方試油Bと試油Cは、従来の牛脂と同等の圧延速度である1700mpm以上を達成することができたが、試油Bにおいて、ややヒートスクラッチが発生し易い傾向にあり、その結果として従来油や試油Cよりもやや平均速度が劣る結果となった。試油Cの場合は、チャタリング、ヒートスクラッチなどのトラブルは殆ど認められず、圧延速度の達成率は従来油と同等以上の成績を示した。Fig. 6は試験中におけるコイル別の圧延速度の分布を比較して示したものである。

4.2 圧延油原単位への影響

Fig. 7は、試験期間中の圧延機内部へのスカム堆積量、鋼板表面の付着量、および圧延油原単位を比較したものである。

圧延機内部へのスカムの堆積量は、試験期間中各々1ヶ月間にわたって圧延機内部に鋼板を吊り下げ、その表面に付着した堆積物の重量と成分を測定して調査した。堆積物の総量では、従来油>試油B>試油Cの順となっているが、付着油分は試油B、C共に従来油の半分以下となり、鉄分含有量も減少している。しかし、試油Bの場合には水分の含有量が両者に比べて著しく多いのが特徴である。

圧延された鋼板表面への油分と鉄分の付着量は、試油B、C共に従来油に比べて減少しており、特に試油Cでは半減に近い結果が得られた。

試験期間中の平均原単位は、試油Bの場合、従来油に比べて3%しか減少しなかったのに対し、試油Cでは約25%もの減少が認められた。これは短期間の試験結果であることを考慮すれば、大きな有意差であるといえる。

5. 考察

5.1 チャタリングと圧延油の粘度特性の関係

前述のように、試油Aによる圧延において多発したチャタリングについて、(1)式より計算されたロールバイト入口油膜厚と、圧延後の鋼板表面の観察により、その原因を考察した。

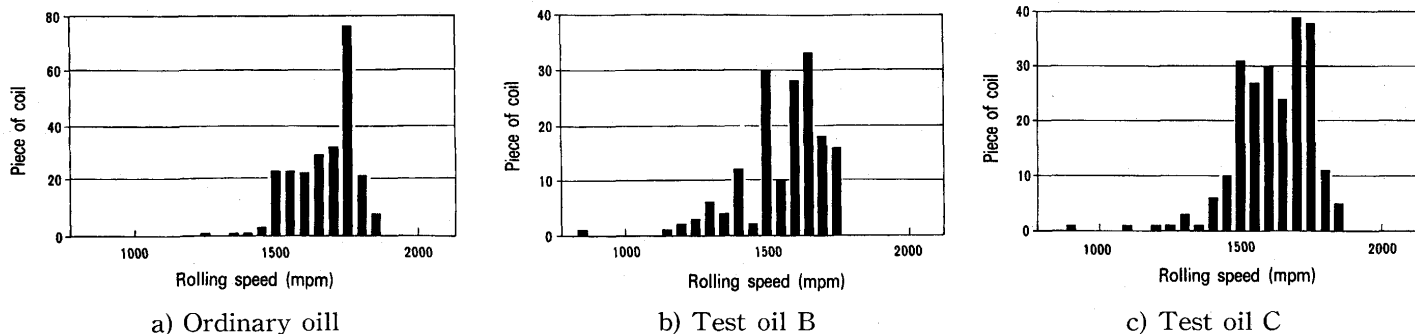


Fig. 6. Comparison of rolling speed for various rolling oils.

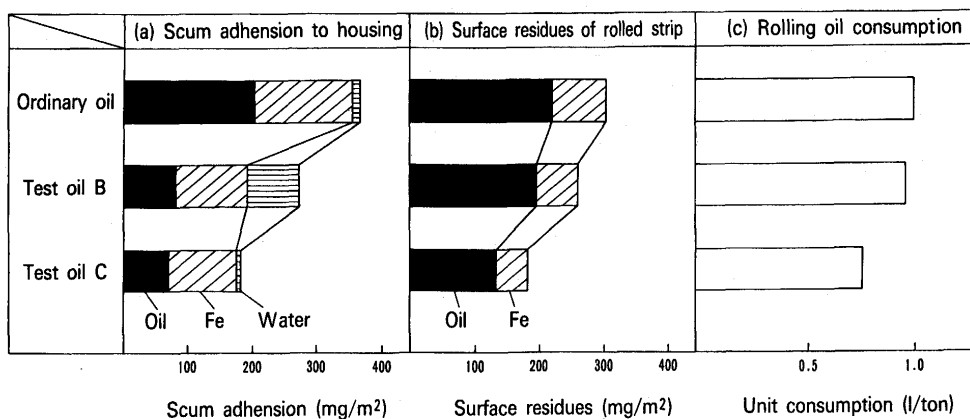


Fig. 7. Comparison of result of test.

Fig. 8は、チャタリングが発生した場合と正常な場合のロールバイト入口油膜厚の違いを実機操作データに基づいて算出し、圧延速度との関係で整理したものであるが、チャタリング発生時の油膜が正常圧延時のそれよりも厚い傾向を示している。Fig. 9は、試油Aでチャタリングが発生した時の圧延後の鋼板表面と、従来油のほぼ同速度で圧延した正常時のそれを顕微鏡観察したものである。両者の表面のオイルピットの形態には明らかな差が認められ、これをリアルタイム走査型レーザー顕微鏡(レーザーテック社製)で定量評価し、圧延速度との関係で整理すると、Fig.10の様にチャタリングの発生した鋼板表面のオイルピットは、従来油で正常な圧延がなされたものに比べて大きく、その大きさが一定値を越えるとチャタリングが発生する傾向が読み取れる。

チャタリングは、極薄鋼板の圧延における異常現象の代表であり、その原因については様々な議論があるが⁷⁾、本試験中に観察されたものについては、ロールバイト入口での油分粘度が高いために、ロールバイト内に形成される油膜厚さが増大、過剰潤滑となったことによって誘起されるものであると推定される。

5.2 ベース油の構成と圧延性能

今回の実機試験において、圧延油の基本的な性能がベース油の粘度特性によって大きく支配され、低粘度/高粘度指数を与えることで優れた高速圧延性能を引き出されること

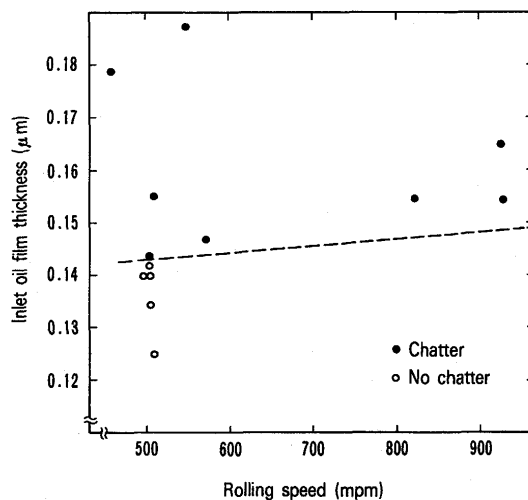
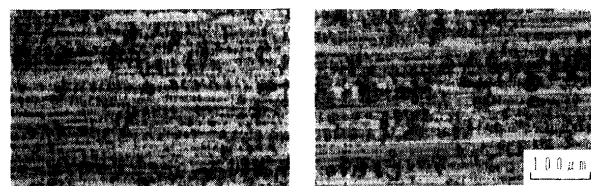


Fig. 8. Evaluation of inlet oil film thickness calculated from various rolling conditions.



a) Ordinary oil b) Test oil A

Fig. 9. Surface photographs of tin gauge steel sheet after rolling.

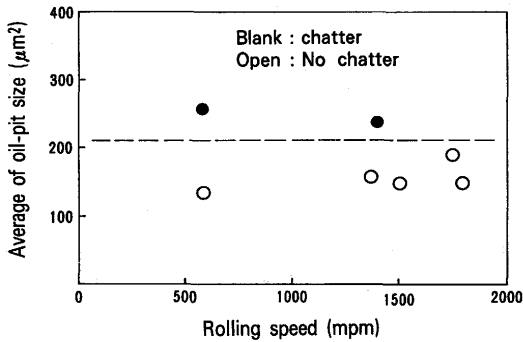


Fig. 10. Correlation between average of oil-pit size and rolling speed.

が証明された。しかし、同等の粘度特性を示すものであっても、Fig. 3 に示されたごとく異なる特性を持つ複数の油種をブレンドした場合には、個々の特性が総合性能において顕在化する傾向にある。例えば試油BとCの差において、試油Bが耐ヒートクラッチ性で劣るのは高粘度指数ながら油膜強度の低いモノエステル (Fig. 1 参照) を混合させたためであり、また油分付着量が多めとなったのも高粘度の複合エステルの影響であろうと考えられる。

したがって、ベース油の構成としては、ほぼ均一な特性で、かつ流動点/粘度/粘度指数のバランスがとれたものの中から、より経時劣化しにくい分子構造のものを選択する必要があるといえる。

5.3 添加剤の影響

圧延油の添加剤の中で、特に性能に大きく影響するのは油性向上剤と乳化剤である。油性向上剤は、高温・高圧下で油膜強度を補償するために適宜添加が必要であるが、多すぎたり効果の過剰なものを添加した場合には、過去の報告例⁸⁾にも見られるように、ロール表面の粗さ摩耗を誘起して過剰潤滑となりチャタリングやスリップの発生に至る。したがって、実際の操業の中で様子を見ながら適宜添加量の調整を行う必要がある。

乳化剤は、操業に際して構成されるエマルジョンの性格付けへの影響を通して、圧延機内への堆積物の量、および鋼板表面への付着量を左右するため、圧延性能と原単位に影響する。今回の試作油では、従来の牛脂ベース圧延油と同様に非イオン型のものに限定し、中でも高HLBのものは避けた。試油BとCで圧延機内部の堆積物の構成を比較した時、試油Bにおいて水分が多く含まれるのは、低HLB型の乳化剤をより多く配合したため、油中に水滴を巻き込んだ逆エマルジョンとなって堆積したことによるものと考えられる。

6. 結言

20世紀半ばに、タンデムミルの高速化によって、ぶりき原板の大量生産が実現されて以来、その潤滑を司る圧延油は、多くの問題を含みながらも半世紀をすぎたなお、天然油脂から離れることはなかった。近年になって、作業環境や防災の問題から逃れるために、合成エステルに代替を求めることの有効性が指摘されるようになったものの、天然油脂に匹敵する潤滑性能を持つものは出現するに到らなかった。

本研究では、圧延油の粘度特性と分子構造の関係を整理し、天然油脂の持つ優れた潤滑性能が、その粘度/粘度指数および分子構造に由来することを明らかにすると共に、アルコール基と酸基の構造と分子量を最適に選択することで、天然油脂と同等以上の潤滑性能を得ながら、低流動点化と耐経時劣化性能を両立させた合成エステルベースの圧延油が得られることを明らかにした。さらに試作油を高速のタンデムミルの実操業に供してその性能を証明した。本研究の成果に基づいて実用化された合成エステルベースの圧延油は、平成5年10月以来、NKK京浜製鉄所のタンデムミルにおいて本格的に採用され、冷延工場の積年の念願であった作業環境の改善と火災リスクの大幅な減少が達成された。

経済的観点からは、ベース油となる合成エステルの単価が牛脂より割高となるものの、消費原単位の低減によって充分補完しうる範囲である。さらに作業環境の好転による清掃頻度の減少や、火災リスクの低減、経時劣化のミニム化による操業・品質の安定化は何にも増して大きい経済効果であるといえる。

また分子構造の設計方針が明らかにされたことで、応用範囲が拡大し、今後一層の性能向上と単価低減が可能になるものと期待される。

文 献

- 1) 小倉茂稔, 関 克己, 山本 豊: 塑性と加工, 28 (1987), 314, 272.
- 2) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴: 塑性加工連合講演会, 39 (1988), 557.
- 3) 上田 亭, 吉田隆夫: 潤滑, 21 (1976), 614.
- 4) 上田 亭, 吉田隆夫: 潤滑, 21 (1976), 819.
- 5) 萬羽昭夫: 日本塑性加工学会プロセストライボロジ分科会年間報告書, (1989), 72.
- 6) 京谷 隆: トライボロジスト, 36 (1991) 5, 354.
- 7) 例えば, 古川, 鍵田, 清野, 滝本, 中里, 中川, 福永: 川崎製鉄技報, 8 (1976) 1, 60.
- 8) 岩藤秀一, 鉦本 紘, 園田 栄: 鉄と鋼, 75 (1989), 2059.
- 9) 桜井俊夫, 広中清一郎: トライボロジー, 共立出版, (1984) 1, 118.
- 10) 岩藤秀一: 第148・149回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1993), 37.