



解説

受賞技術-26

ハイブリッド潤滑による 冷間タンデムミルの高速化技術

High Speed Cold Rolling Technology by Hybrid Lubrication System

曾谷保博

Yasuhiro Sodani

JFEスチール(株)
代表取締役副社長

1 はじめに

地球環境負荷低減への対応から、自動車、電気機器および容器等の軽量化ニーズが急速に高まっている。冷間圧延技術の観点からは、①板厚を薄くするための高圧下率での圧延、②高強度化に対応した硬質材料の圧延、③生産能率、すなわち単位時間あたりの生産量を確保するための高速化が要求されている。

冷間タンデムミルに使用される潤滑剤には、加工部の摩擦を低減させながら、加工熱を除去する冷却性能が求められる。通常、油脂又は合成エステルなどの基油を水中に乳化・分散させたエマルジョンが使用され、その供給方式はFig.1に示すような循環給油方式と直接給油方式とに大別される。従来から極薄材の高速圧延に適した潤滑システムとして、直接給油方式が広く適用されているが、潤滑油の使用量が多く廃液処理など環境負荷の面で問題がある。これに対して、潤滑油を循環使用する循環給油方式では上記課題に対応できる一方で、硬質かつ極薄材の冷間圧延では、チャタリング¹⁾と

いった圧延機の異常振動やヒートスクラッチ²⁾と呼ばれる表面欠陥により、設備仕様速度よりも低い圧延速度で操業せざるを得ないケースが生じていた。

このような背景の下、JFEスチールでは世界に先駆けて薄ゲージかつ硬質材の安定高速圧延の実現を狙いとした新たな潤滑システムを開発・実用化した³⁾。潤滑油の循環使用による消費量及び廃油量の削減により、地球環境にも優しく、作業環境にも配慮しながら、高能率な圧延を実現する潤滑システムを狙いとしており、本成果は平成28年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(開発部門)を受賞している。本稿では、本技術の設計思想や成果について概説する。

2 開発技術の内容

2.1 着想点及び概要

冷間圧延におけるエマルジョンの潤滑作用は極めて複雑である。大部分が水であるため全体としては低粘度の流体であ

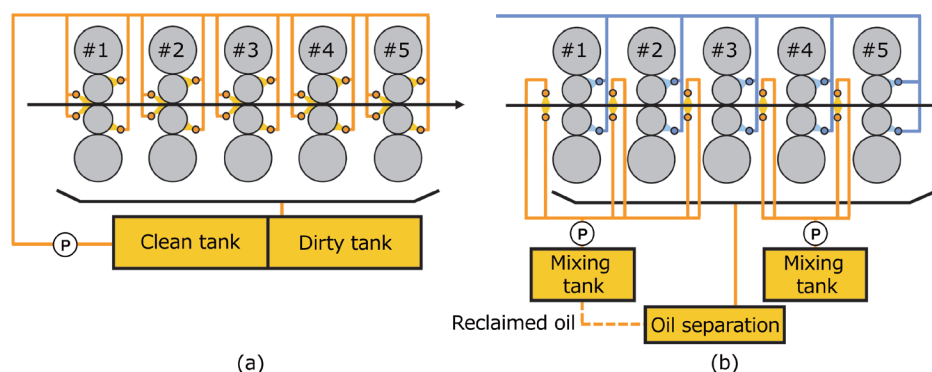


Fig.1 Coolant systems in tandem cold rolling.
(a)Recirculation system (b)Direct application system

るが、ロールバイト（圧延ロールと鋼板とのくさび領域）へはエマルション中の油分のみが選択的に導入され、油膜を形成する点である。このような挙動を説明するため、エマルションから油膜が形成される現象に関して、Fig.2に示すプレートアウトと動的濃化という二つの機構が知られている。

プレートアウトとは、エマルションが鋼板に衝突して、その油分のみが鋼板表面に付着される現象^{4,5)}であり、鋼板に直接高濃度のエマルションを供給する直接給油方式で支配的とされてきた。一方、動的濃化はロールバイト入口のくさび領域で、ロールと鋼板との隙間にエマルション中の油滴が捕捉（トラップ）され、ロールバイトに引き込まれるというもの^{6,7)}である。この動的濃化現象は循環給油方式にて支配的な役割を果たしているとされている。

1990年代の循環給油方式を対象とした開発当初は、圧延油のトラップに基づく動的濃化現象をコントロールすべく、実機でロールバイト入側の潤滑供給量を増減させてみた。しかし、高速圧延域での潤滑状態（圧延荷重や先進率）は全く変わらないのである。油滴がロールバイトにトラップされて油膜を形成している実感が湧かなかった我々は、ラボで独自の実験装置を製作し、高速域での油膜形成挙動の解明に取り組んだ。

2.2 高速圧延におけるプレートアウト形成

水と油の混合体を静置しておくと徐々に分離されるように、油膜形成は時間依存性を有していることが分かる。一方で、2000m/min.（時速120km/hr）を超える薄物材の高速圧延では、エマルションを供給してからロールバイトに到達するまでの時間が0.1秒以下になることも珍しくない。このような極短時間でのプレートアウト特性を評価した例はなく、

新たに評価方法を確立した⁸⁾。本装置により、従来は準静的な現象として認識されていたエマルションのプレートアウト挙動が、極短時間（0.1秒オーダー）であっても、明確な時間依存性を示す動的な現象であることが明らかとなった。また、プレートアウトを促進させるアプローチとして、従来から認識されていた「高濃度化」に加え、「エマルションの大粒径化」、「気水ノズルによるスプレー供給」⁹⁾を適用することで、界面活性剤を含有した安定なエマルションを用いた場合であっても、直接給油方式に匹敵するレベルの優れたプレートアウト特性を実現することが可能となった。

次は実機試験である。タンデム圧延機の機側で高濃度・大粒径エマルションを作り込み、かつ油膜形成能力を確保するために、潤滑油をロールバイトの加工部に直接スプレーするのではなく、ロールバイトからできるだけ離れた入側の位置でスプレーを行った。一見非常識とも思われる圧延方法であったが、1500, 1800, 2000m/minと速度を上げていっても、振動は発生せずスイスイと圧延できる。最初は半信半疑であった工場スタッフやオペレータも次第に笑顔へと変わっていった。

2.3 プレートアウトによる潤滑制御

必要最小限のエマルション供給による高効率なプレートアウトの実現と共に、それを活用しながら高速圧延での潤滑状態を効果的に制御する技術の確立が必要であった。一方で、冷間タンデム圧延における潤滑挙動はエマルションの特性のみならず圧延条件及び金属表面の粗さなど様々な因子が作用するものであり、プレートアウト現象単独の評価のみでは不十分である。そこで、圧延機の入側にて鋼板のプレートアウト

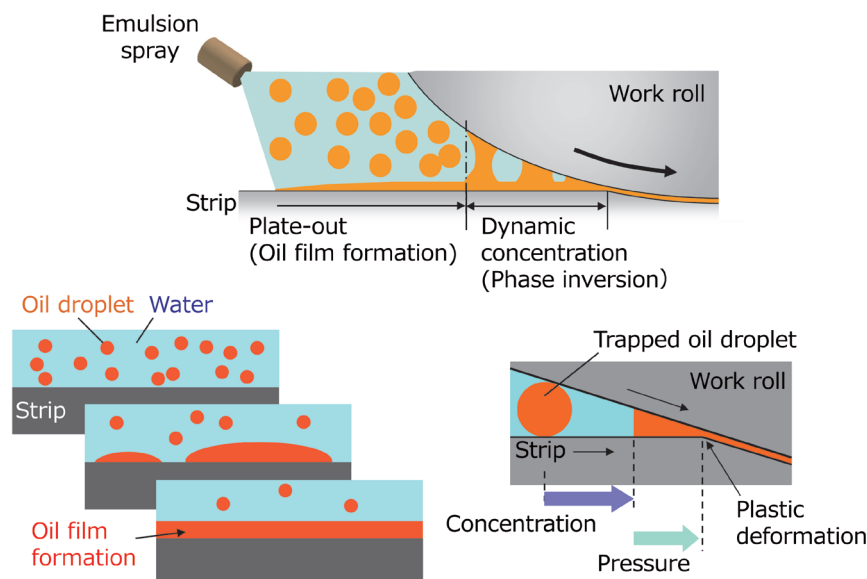


Fig.2 Oil film formation in O/W emulsion.

ト量を制御できる Fig.3 のシミュレータを製作し、プレートアウト量が圧延特性に与える影響を評価するとともに、銅板やロール表面粗さを含めた複合的な要因が作用する条件下での圧延潤滑特性を明らかにした¹⁰⁾。

加えて、高速圧延での潤滑状態を効果的に制御する技術を確立するために、実際の冷間タンデム圧延機で形成されるプレートアウト油膜の予測モデルの構築¹¹⁾を行うと共に、潤滑状態のオンライン制御による高速圧延の安定化に取り組んだ¹²⁾。多様なプロダクトミクスに応じた最適な潤滑状態を実現するためには、対象材に応じた適切な供給量が設定されることが必要である。例えば、変形抵抗が高く潤滑性が不足する材料に対しては十分なエマルションの供給を行い、軟質材等では少量供給に留める。また、ロール組替えからの圧延長によってワークロール粗度が小さくなって摩擦係数が低下するため、エマルションの供給量も抑えられる。

単純な自励振動モデル¹³⁾を用いた考察によって、圧延条件が振動の安定性に与える影響を評価した結果、スタンド間張力を介して互いに影響を及ぼしあう連続圧延状態においては、隣接スタンドにおける摩擦係数の条件によって、圧延機の振動の安定性に影響を与えうることが明らかになった。従って、隣接するスタンドでの摩擦係数を適切な範囲に制御にすることが重要であると考えられる。具体的には単独スタンドにおける摩擦係数をある一定の範囲に制御すると共に、隣接スタンドとの摩擦係数のバランスを一定に保つことで、チャタリングと呼ばれる高速圧延時の圧延機異常振動を抑制できる可能性が示唆された。

そこで、最終2スタンドにおける摩擦係数のバランスを一定に制御するためのアクチュエータとして、Fig.4 に示すようなエマルション供給のフィードバック制御によるダイナミック摩擦係数制御を試みた。高濃度・大粒径エマルションによって形成されるプレートアウト量をプロダクトミクスに応じて制御することで高速圧延域での摩擦係数を自在に制御するという思想である。エマルションのような水物を積極的

に冷間圧延の制御アクチュエータとして使用した例は極めて少ない。摩擦係数を制御目標とすることで、循環給油方式を前提としながらも、圧延時の潤滑状態を自在に制御する技術が確立された。

3 ハイブリッド潤滑の適用状況

新たに構築したハイブリッド潤滑システムの基本構成を Fig.5 に示す。低濃度で安定なエマルションを循環使用する循環給油システムをベースに、それとは別のハイブリッド潤滑システムを組み合わせた。ハイブリッド潤滑システムから供給するエマ

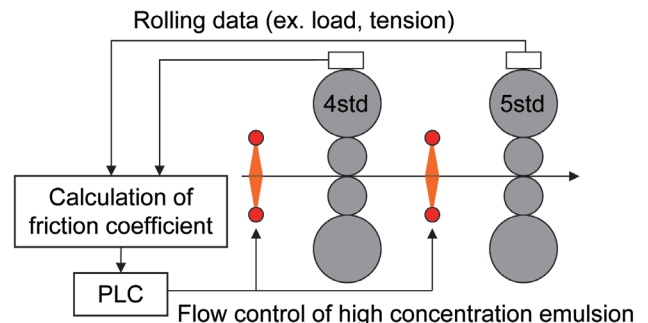


Fig.4 Schematic illustration of lubrication control actuator.

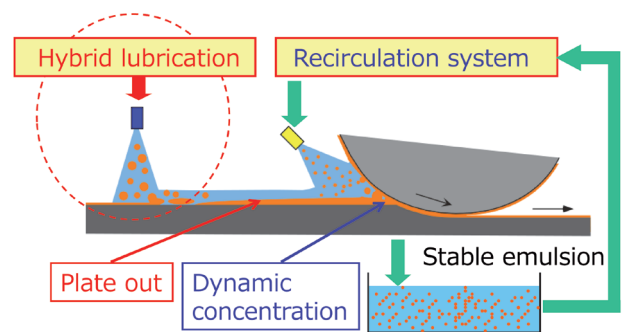


Fig.5 Concept of hybrid lubrication system.

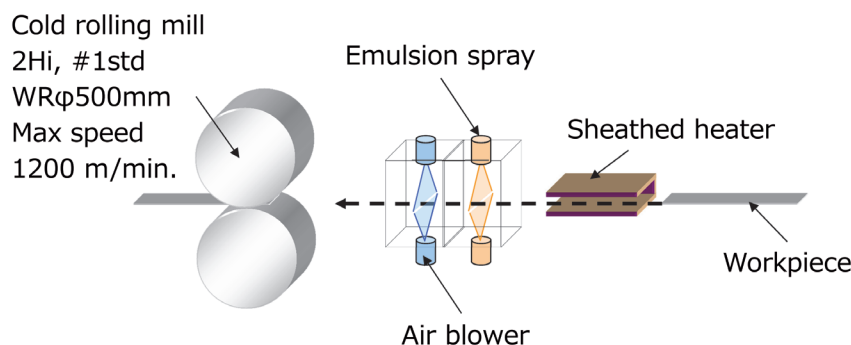


Fig.3 Schematic view of proposed plate-out simulator.

ルションは、高濃度かつ大粒径のエマルションであり、循環給油系統と同一の基油および界面活性剤を含有しているエマルションを使用するため、循環系統に混入してもエマルション性状が変動することはない。また、圧延ロールの摩耗による表面粗さの変化などを考慮した供給条件を設定することで必要最小限の油分供給量に留めた。開発したハイブリッド潤滑システムはすでに実用化され、チャタリングを防止しつつ、2000m/min.を超える高速冷間圧延を安定的に達成している。一方で、圧延油原単位については従来の循環給油方式と同レベルを維持している。これは、従来の循環給油方式において圧延油を常時補給していたのに代替して、ハイブリッド潤滑系統を通じて圧延油を循環給油系統へ補給していることに相当する。薄鋼板の極薄化と硬質化の動向に対して、圧延の高速化と圧延油原単位という、相反する特性を両立する環境調和型潤滑システムが実現された。ラボで思い描いていた願望が現実へと変わった瞬間であった。

4 おわりに

冷間圧延のトライボロジー現象に限らず、鉄鋼生産技術にはこれまで膨大な知見が蓄積されている。実際の現象の一部分のみを抽出したラボ実験だけでは実際の現象の全体を理解することはできず、実際の製造現場をよく見ることが不可欠である。すでに成熟したと言われる圧延分野においても、製造現場で五感をフルに働かせることで、挑戦すべき課題はたくさん転がっているはずである。そのひらめきの根底にあるのは原理原則の追求である。高付加価値の商品を大量かつタイムリーに生産することが鉄鋼業の役割である。これらの最終製品の多くが地球環境負荷の軽減を狙いとして進展していることを考慮すれば、その生産過程においても環境負荷を最小限に抑えつつ、かつ安定した生産技術によってこれを実現すべきである。今後も次世代を見据えた革新的なプロセス技

術開発をリードしていくとともに、このような開発が今後、数多く日本より発信できることを祈って、まとめの言葉としたい。

参考文献

- 1) 鈴木弘：機械の研究, 48 (1996) 5, 583.
- 2) 鏑田征雄, 北村邦雄, 北浜正法, 片岡健二, 中川吉左衛門, 青木茂雄, 松田修：鉄と鋼, 67 (1981) 14, 2152.
- 3) Y.Kimura, N.Fujita, Y.Matsubara, K.Kobayashi, Y.Amanuma, O.Yoshioka and Y.Sodani : J. Mater. Process. Technol., 216 (2015), 357.
- 4) W.L.Roberts : Friction and Lubrication in Metal Processing, ASME, New York, (1966), 103.
- 5) 白田昌敬, 酒井健次：トライボロジスト, 27 (1982) 8, 594.
- 6) Y.Kimura and K.Okada : Proc. JSLE Int. Tribol. Conf., (1985), 937.
- 7) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴：トライボロジスト, 34 (1989) 12, 879.
- 8) 木村幸雄, 藤田昇輝, 三原豊：鉄と鋼, 95 (2009) 4, 340.
- 9) N.Fujita and Y.Kimura : Proc. ImechE, Part J : J. Engineering Tribology, 227 (2013) 5, 413.
- 10) 藤田昇輝, 木村幸雄：鉄と鋼, 97 (2011) 10, 532.
- 11) N.Fujita, Y.Kimura, K.Kobayashi, Y.Amanuma and Y.Sodani : J. Materials Processing Technology, 219 (2015), 295.
- 12) N.Fujita, Y.Kimura, K.Kobayashi, K.Itoh, Y.Amanuma and Y.Sodani : J. Mater. Process. Technol., 229 (2016), 407.
- 13) Y.Kimura, Y.Sodani, N.Nishiura, N.Ikeuchi and Y.Mihara : ISIJ Int., 43 (2003) 1, 77.

(2019年6月25日受付)