



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

環境調和型冷延潤滑システムの開発を通じて

Development of Ecological Lubrication System in Tandem Cold-Rolling Mill

藤田昇輝

Noriki Fujita

JFE スチール (株)

スチール研究所 鋼材研究部

主任研究員 (副課長)

1 はじめに

筆者は入社以来、主に冷延鋼板の圧延・潤滑技術に関する研究開発を行ってきた。その中では実験室レベルでの基礎的な研究から実機設備での検証、更には実用化設備の工程化までというプロセス研究者としてある意味理想的な開発ステップを経験させて頂きました。本稿では、筆者が携わった冷延潤滑制御の開発事例について紹介すると共に、プロセス研究開発を振り返って感じてきたことを述べたいと思います。

近年、車体軽量化や地球環境問題の高まりを受け、冷延鋼板の高強度化、薄物化 (ゲージダウン) が着実に進行している。特に、薄物材の高速圧延では潤滑不足に伴ってチャタリング¹⁾と呼ばれる圧延機振動やヒートスクラッチ²⁾と呼ばれるワークロールと鋼板との焼付きに起因する表面欠陥が発生するため、圧延負荷の軽減だけでなく表面品質安定化のための潤滑技術が要求されるようになってきている。

今回開発した技術は、缶用鋼板等の極薄材を主な対象とする冷間タンデムミルにおいて、新しい発想の潤滑システムの構築により、薄ゲージかつ硬質材の安定高速圧延を実現することを狙いとした。その際、圧延油の循環使用による圧延油消費量の抑制により、地球環境に優しく、かつ多様なプロダクトミクスに柔軟に対応可能な潤滑システムの実現を目指したものである。

2 新ハイブリッド潤滑技術の研究開発事例

2.1 冷間タンデムミルの潤滑システム

冷間タンデムミルの潤滑システムは、図1に示すように循環給油方式 (Re-circulation system) と直接給油方式 (Direct application system) とに大別される。いずれの方式においても、潤滑剤として水中に油分が小滴となって分散したエマルションが用いられる。

循環給油方式では、低濃度 (1~3% 程度) のエマルションを循環使用することから、圧延油原単位 (単位重量の鋼板を製造する際に消費される圧延油量) が低く、かつ廃液処理の負荷が小さい点が利点となる。一方で、圧延油を循環使用する観点から、十分な界面活性剤を含有した安定なエマルションが用いられており、潤滑性能に乏しい。

直接給油方式は、高濃度 (5~15% 程度) のエマルションが鋼板に供給される。エマルションを不安定化させることで油膜形成能を向上させ、高い潤滑性が得られるのが特徴である。しかし、圧延油原単位が高く、廃液処理の負荷も大きいのが欠点である。

2.2 エマルションの潤滑メカニズム

冷間圧延に使用されるエマルションの潤滑作用は極めてユニークである。上述したように大部分が水であるため全体としては低粘度の流体であるが、ロールバイトへ導入されるのはその粘度から予測されるよりも厚い油の流体膜が形成される点である。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、図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。

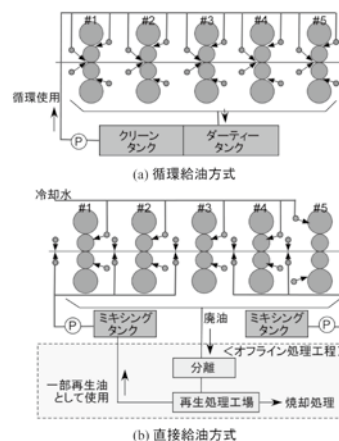


図1 冷間タンデムミルの潤滑システム

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^{3,4)}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にて用いられる潤滑方式である。一方、動的濃化はロールバイト入口のくさび域で、ロールと鋼板との隙間にエマルション中の油滴が一定の確率で捕捉（トラップ）され、ロールバイトに引き込まれるというものである^{5,6)}。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考えられている。

一方、実操業における潤滑制御の観点からは、動的濃化挙動を直接的に操作することは困難であるのに対し、プレートアウト挙動についてはエマルションの供給条件を変更することで、潤滑状態を制御できる可能性がある。そこで、鋼板にプレートアウトした油膜が冷間圧延特性に与える影響について、独自の検討を行い、冷間圧延における潤滑機構の解明と効率化に関する諸改善を行った。

2.3 エマルションの高効率プレートアウト技術

2000m/min.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、新たに図3に示す評価方法を確立した⁷⁾。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」⁸⁾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⁹⁾。

更に、適切な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、

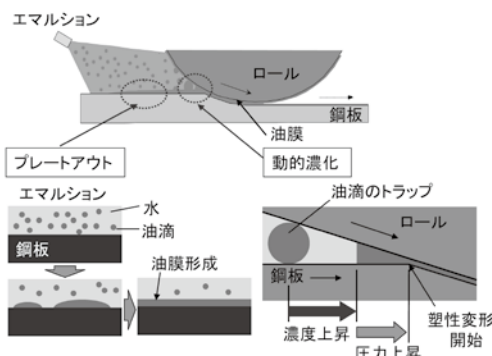


図2 エマルションの油膜形成のメカニズム

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と感じていた。

そこで、図4に示すようにプレートアウト制御装置を備えたラボ圧延機を開発し、冷間タンデム圧延のような複数の因子を伴った潤滑現象を忠実に再現することを試みた。摩擦係数制御に関する基礎的な検討¹⁰⁾を行った結果、プレートアウト現象を活用した高速圧延時の摩擦係数制御は十分可能であると共に、効果的な制御には、圧延ロールの摩耗による表面粗さの変化などを考慮する必要があることを明らかにした。さらに、実機冷間タンデムミルにテストヘッダーを設置することで効果を確認し、プレートアウトを活用した潤滑システムが高速圧延時の摩擦係数制御に有効なことを実証した¹¹⁾。

2.5 ハイブリッド潤滑システムの実用化

ハイブリッド潤滑システムの基本構成を図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、循環給油システム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、循環システムに混入してもエマルション性状が変動することはない。

開発したハイブリッド潤滑システムは、JFE スチール株式会社西日本製鉄所（福山地区）において実用化された¹²⁾。図6は、潤滑制御によりチャタリングを防止して、設備仕様であ

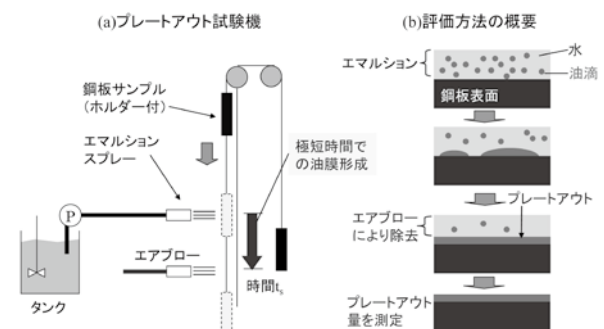


図3 極短時間でのプレートアウト評価装置の概要

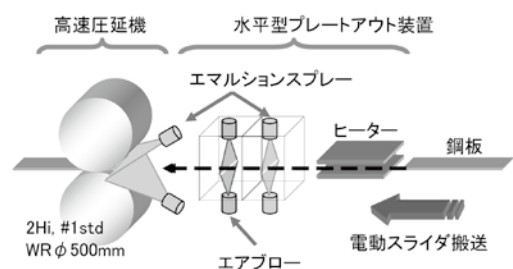


図4 プレートアウト制御ラボ圧延機

る最高速度2100mpmを安定的に達成していることを示すものである。特に、硬質材に対する最高速度の達成率は従来に比べて7倍程度向上し、生産能率の向上に寄与している。

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。

薄鋼板の薄ゲージ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冷間タンデムミルの潤滑システムを構築した。その意味で、省資源(economical)、環境調和(ecological)の観点で「エコな冷延潤滑システム」であるといえる。

③ プロセスの実機化までを通じて

冷間圧延のトライボロジー現象に限らず、鉄鋼ではこれまで膨大な知見が蓄積されており、極めて多くの影響因子が存在している。それぞれがどのような影響を与えているかを検討していく必要があるが、実験的評価手法の多くが実際の現象の一部分のみを抽出して現象を把握しようとするものである。図3で評価したような単独の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、それぞれの結果を総合的に判断して実現象の解明を進めていく必要がある。実験した多量のデータから意味のある関係を見出し、他のパラメータの影響を排除することを心がけると共に、それら総合的な結果を

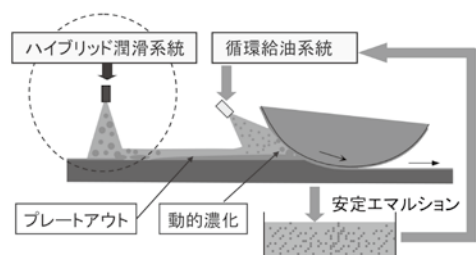


図5 ハイブリッド潤滑システムの基本構成

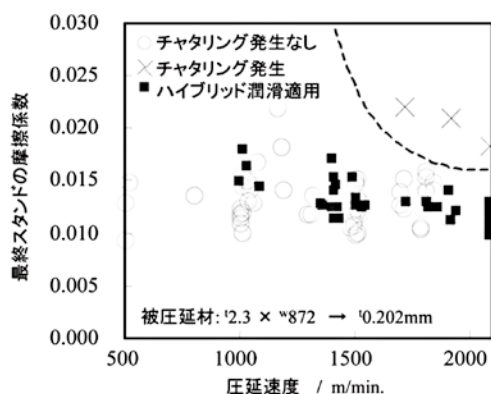


図6 潤滑制御システムの概要

いかに確信に変えていくかが研究者として苦勞することではないだろうか（振り返ってみると、このような実験も行っておくべきだったと反省すべき点も多々あるのだが）。実際の冷間圧延現象を再現するべく、足繁く工場に通い、漠然とした機能、性能、規模などについて具体化しながら、図4のような全く新しい評価手法を完成させるまでには時間を要したが、潤滑メカニズムに関する基礎的な成果をもとに、実プロセスでの実用化技術にまで発展させた達成感は何とも言いがたいものがある。この間には、機械、制御を含む工場のエンジニアとの協力が不可欠でした。また、基礎成果を元に投稿された論文が平成25年度俵論文賞を受賞し、学術的にも高い評価を受けたことは大変光栄に思っている。

冷延潤滑の開発に一区切りがつき、企業研究者として10年という節目を迎えた頃、鋼材開発の研究部に異動する機会を得た。大学時代に冶金を専攻していたため、それほど違和感はないが、これまでのプロセスエンジニアからメタラジストへと大きく環境が変化したことで大変良い刺激を受けて始めている。この刺激が研究人生にとって大きなプラスになることを祈りつつ、常に飛躍を目指した研究に突き進んで行きたいと思っている。最後にこのような情報発信の機会を与えて頂いたことに対して感謝申し上げます。

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) W. L. Roberts : Trans.ASME.88 (1966) , 103.
- 4) 間瀬俊朗, 河野輝雄, 山本秀男：28回塑加連講論, (1977) , 114.
- 5) Y.Kimura and K.Okada : Proc.JSLE Int.Tribol.Conf. (1985) , 937.
- 6) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴：トライボロジスト, 34 (1989) 12, 879.
- 7) 木村幸雄, 藤田昇輝, 三原豊：鉄と鋼, 95 (2009) 4, 340.
- 8) N.Fujita and Y.Kimura : Proc.ImechE, Part J : J.Engineering Tribology, 227 (2013) 5, 413.
- 9) 木村幸雄, 藤田昇輝, 松原行宏, 小林宏爾, 天沼陽介, 吉岡修, 曾谷保博：塑性と加工, 55 (2014) , 346.
- 10) 藤田昇輝, 木村幸雄：鉄と鋼, 97 (2011) 10, 532.
- 11) 藤田昇輝, 木村幸雄, 小林宏爾, 天沼陽介, 曾谷保博：63回塑加連講論, (2012) , 451.
- 12) 藤田昇輝, 木村幸雄, 松原行宏, 小林宏爾, 天沼陽介, 吉岡修, 曾谷保博：塑性と加工, 55 (2014) , 445.

(2014年4月8日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

横浜国立大学 名誉教授

小豆島 明

圧延トライボロジーに関連した事象について大学で40年を越える期間にわたり研究した私が、藤田氏の「環境調和型冷延潤滑システムの開発を通じて」の原稿を読み、これまで繰り返し鉄鋼会社の圧延トライボロジーに関して研究されている方々にお話している「圧延トライボロジーの研究手法」を適確に再現して研究を遂行され、すばらしい成果を挙げられていることに対して非常に喜ばしく思っております。

鉄鋼の圧延プロセスのトライボロジー研究は、自動車のトライボロジー研究とは異なり実機を用いて行うことが現在の状況においては困難なため、圧延プロセスのトライボロジー問題をシミュレートするシミュレーション方法を独自に開発することがすばらしい成果を挙げるキーとなります。

私が話している「圧延トライボロジーの研究手法」は

- (1) 問題解決のために現象を現場でよく観察する。
- (2) 得られたデータから、多くのトライボロジー因子のうち、その現象に強い相関関係がある重要因子を特定する。
- (3) シミュレートするトライボロジー問題に対し、得られた重要因子を評価できるシミュレーターを開発する。
- (4) シミュレーターで得られた重要因子のデータと実機のデー

タの間に基礎理論を介して定量的な相関関係を求める。

- (5) 得られた相関関係から実機の圧延プロセスに対して新しいトライボロジー設計を行う。

藤田氏はこの「圧延トライボロジーの研究手法」を着実に進められ、その成果に対して日本鉄鋼協会から論文賞、日本塑性加工学会から技術大賞を授与されています。あまり表には出づらい圧延プロセスの基盤的技術であるトライボロジー分野で若手研究者として非常に努力されたことと思われます。特に、トライボロジー研究を行うためには機械、化学、金属などの広範な領域に対応しなければならない環境での成果であることを強く述べておきたいと思います。

最近の若手研究者の圧延トライボロジーの研究発表を聞くに付け、問題にしているトライボロジー現象を現場でよく観察していない、その現象に適用する基礎理論の理解が乏しい、問題解決を基礎理論解析に頼りすぎて新しいシミュレーターに目が向いていないなどが目につきます。「圧延トライボロジーの研究手法」をこの機会に各鉄鋼会社において再認識していただければと思う次第です。

(株) 神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 研究首席

前田 恭志

藤田さんとは、学会等でお会いしていますが、あまりお話をさせていただいた記憶がありません。今回、コメントをということで感想を書かせていただきます。

まずは、今回の潤滑システムですが、大変ユニークな研究で実用化にも成功されて、大変感心しています。私も、圧延潤滑に関しては、工場でのいくつかの課題に関与しました。しかしながら、特にエマルジョン潤滑はまさに水物で、LAB実験と実機での現象が定量的に結びつかなくて、まさに「やってみなくては分からない。」ことだらけとの認識です。エマルジョンでの、プレートアウトを含めた油の導入メカニズムと油単独の潤滑メカニズムが複雑に影響し合っているのが問題だと想像していますが、どちらも実機でそのまま使えるような理論に至っていないと思います。今回の開発も、文面ではすっきりまとめられていますが、潤滑システム自身を変更するため、実機適用のための工場への説得や、工場に納得してもらうための沢山のデータ採取、LAB評価法のための実験技術や分析方法など、行間に隠されたご苦労を想像すると頭の下がる思いです。

圧延潤滑は、高面圧で塑性変形による新生面が形成され、

ロールと材料の界面が本当にどのようなになっているかなど誰も見たことがない世界です。圧延荷重、先進率、ロール温度、板温度など、界面のマクロな全体的な力学的性質を観察したり、圧延後の板表面、ロール表面、摩耗粉や残油などの光学的、化学的な履歴を観察したりしながら、そこで起こっている現象を想像し、理解しているというのが現状ではないでしょうか。他方、企業側として、より重要なのは、圧延潤滑をどうしたいのかと言うコンセプトです。今回の開発のように、チャタリングを防止するための潤滑制御を行うと言う考え方とそれを進めるドライビングフォースが企業に求められている機能だと思います。たとえば、スリップが起こらない極限の低摩擦圧延など、潤滑圧延でできることはまだまだあるのではないかと思います。

近年、圧延潤滑をやっている研究者は少なくなったように思いますが、まずは潤滑圧延で何をやるか、そのために圧延潤滑の何が問題（油成の調整だけでは限界？）なのか、まだまだ冷間圧延においてもやるべきことは残されていると思います。今回の開発で培ってきた多くの経験を生かし、今後も益々の御活躍を期待しています。