



私の論文

／ 今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

高速冷間圧延における潤滑制御

—水と油を操る—

Lubrication Control in High Speed Cold Rolling

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（課長）

1 はじめに

昨年より新企画として始まった「私の論文」の執筆依頼を会報委員会よりいただいた。これは、鉄と鋼、ISIJ Internationalで過去に論文賞を受賞された論文に対して、本文中に書き切れなかったことや、行間を埋めるような解説、裏話等を紹介する企画である。基本的に論文執筆に用いた全ての実験/解析を書こうとすれば書ききれないのは当然であり、過去に執筆された方々の記事を拝見すると、各人の苦労された点やこれだけは言っておきたい点を垣間見ることが出来るため非常に興味深い記事であると感じた。本稿では第75回俵論文賞に選んで頂いた拙著「冷間圧延における潤滑特性に及ぼすプレートアウト量の影響」¹⁾について、この研究の着想点やプロセス実用化までの背景等を紹介させていただきたいと思う。

2 本論文の着想点及び概要

通常、冷間圧延には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を用いられるが、その潤滑作用は極めてユニークである。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、Fig.1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^{2,3)}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^{4,5)}。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。

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^{6,7)}。

しかし、冷間圧延の実操業においてロールバイトに導入される油量は、エマルションの性状やプレートアウト特性のみ

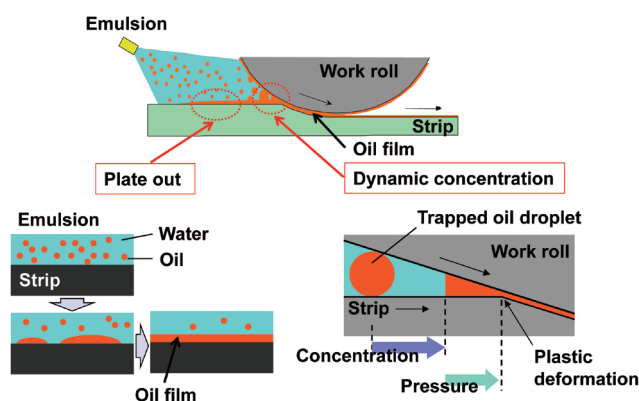


Fig.1 Oil film formation in O/W emulsion

* [今回の対象論文]

藤田昇輝, 木村幸雄:「冷間圧延における潤滑特性に及ぼすプレートアウト量の影響」, 鉄と鋼, Vol.97 (2011), No.10, pp.532-540 (第75回俵論文賞受賞)

ならず金属表面の粗さなど様々な複合因子に依存するため、プレートアウト現象単独の評価のみでは不十分である。そこで拙著論文では、圧延機の入側にて鋼板のプレートアウト量を制御できるシミュレーターを製作し、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共に、鋼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。

3 プレートアウトによる潤滑制御

当該論文ではプレートアウト現象に着目し、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、薄物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（品種構成）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。それを実現するには、必要最小限の油分供給量でプレートアウト現象を発生させ、高速圧延時の潤滑状態をコントロールすることが求められる。

実際に操業中の冷間タンデム圧延機を見たことがある方は少ないかもしれないが、熱間圧延と異なり、冷間タンデム圧延機のスタンド間はシャッターで閉じられており、実際どのように圧延がなされているかをうかがい知ることは難しい。ましてや、2000m/min.（時速120km/hr）を超える薄物材の高速圧延の状況を目で追うことは困難である。プロセス開発に限らず3現主義（現場・現物・現実）が基本にあるというものの、実機での現象が定量的に結びつかないため、正直「やってみないと分からない」というのが本音であった。それでも少しでも実際の現象を把握するべく、機械や制御部門にお願いして圧延機の定修時にタンデム圧延機内や地下オイル

セラーに立ち入ったこともあった（但し、作業服や作業靴がスカムと呼ばれる鉄石酸で汚れるため、その足で研究所の居室に入ると、カーペットが真っ黒になりよく注意を受けるのである）。当該論文で用いられている実験装置は、そのような実機での漠然とした情報とこれまで知られているトライボロジー因子を元に具現化されたものである⁸⁾。

4 実操業におけるプレートアウト油膜予測、制御

当該論文により、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ことが示されたが、こと実用化に関しては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。

一つ目にまず、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を試みた⁹⁾。ラボ実験に基づくプレートアウト量の推定、及びスターブ潤滑（ロールバイト入口が潤滑油で満たされていない状態）を考慮した導入油膜モデル¹⁰⁾を組み合わせることでタンデム圧延機に適用することで、最終スタンド出側の鋼板付着油量を推定する方法を開発した。Fig.2に示すような、実機冷間タンデム圧延機で想定される現象を細分化し、それぞれの現象をラボ実験及び解析によって導出した。プレートアウト油膜形成の時間依存性が考慮されると共に、ロールバイトクラントによって鋼板にプレートアウトした油分が洗い流される挙動が考慮された。当該モデルでは当該スタンド入側で形成される油膜だけでなく、前段スタンドにて持ち越された油膜も累積されている。

シミュレーションより推定された最終スタンド出側での鋼板付着油量の推定結果をFig.3に示す。スターブ潤滑となる高速圧延域では実測値と比較的良好な一致を示していることが明らかとなった。本モデルを用いることで、圧延速度に対す

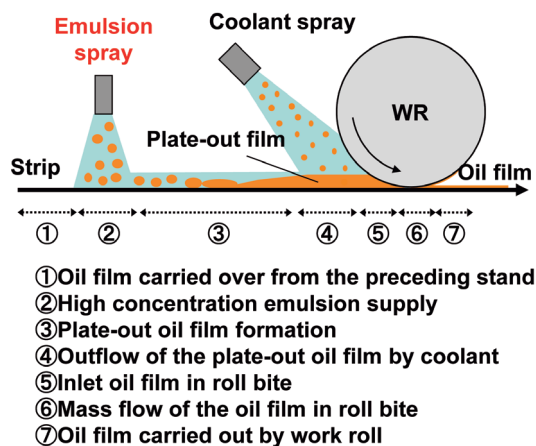


Fig.2 Contributing factors to plate-out oil film formation

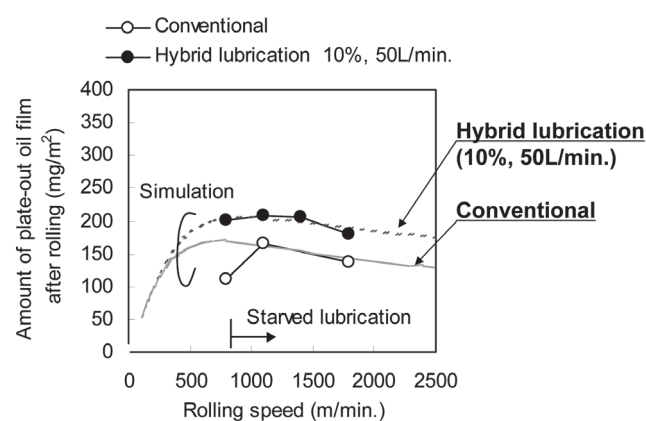


Fig.3 Comparison of plate-out oil film between simulation and measured data

る鋼板付着油量の変化が予測できると共に、さらに圧延速度を増加させた場合の潤滑状態を推定することが可能となった。

続いて、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¹¹⁾。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が厳しい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¹²⁾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。上述したプレートアウト油膜予測モデルを用い、制御信号伝達に用いられるブロック線図と格闘しながら、新しい制御アクチュエータを作り上げた。

Fig.5に連続圧延シミュレータによる検証結果を示す。エマルションの供給制御によって高速圧延域での摩擦係数を一定範囲にコントロールし、圧延機振動の発散が抑制される可能性が示された。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。

5 おわりに

筆者らが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.6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

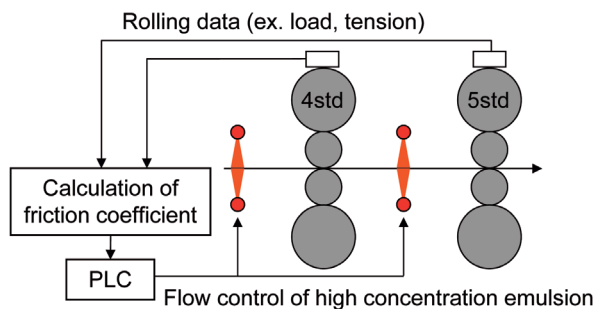


Fig.4 Schematic illustration of lubrication control actuator

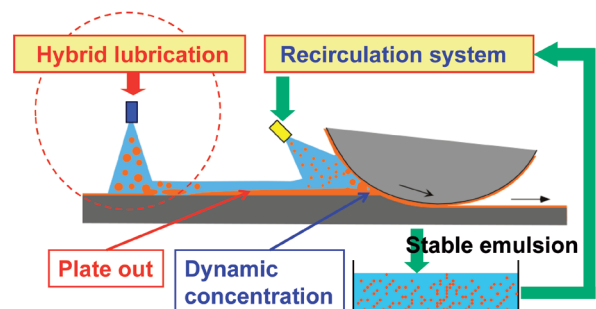


Fig.6 Concept of hybrid lubrication system

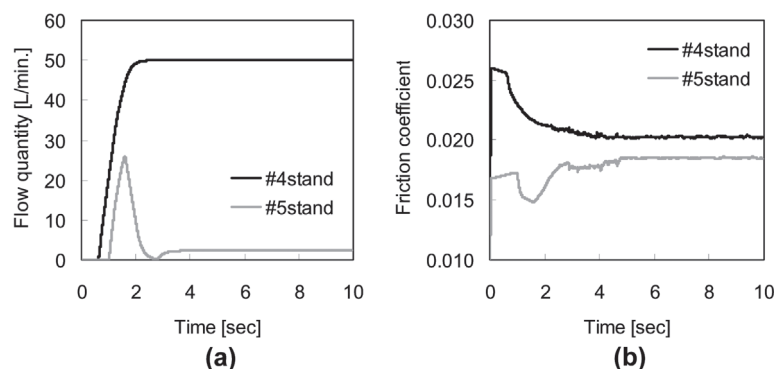


Fig.5 Feed back control results of friction coefficient by hybrid lubrication system
(a) Flow quantity of hybrid lubrication, (b) Friction coefficient

ド潤滑系統を組み合わせた。ハイブリッド潤滑系統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、拙著論文で得られ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¹³⁾。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構築された。

企業研究者の宿命か、私も現在では部署も変わり圧延潤滑の研究を離れていますが、トライボロジーの基礎検討から実用化研究までを行うために、金属のみならず、機械、制御、化学、などの広範な領域を経験したことは今も研究者の礎として活きています。一方で、すでに成熟した圧延分野においてもやるべきことは製造現場に転がっていると思います。今回の開発で培われた多くの経験/知識が若い世代に生かされ、新たな圧延研究分野が創造されることに期待したいと思います。

参考文献

- 1) 藤田昇輝, 木村幸雄: 鉄と鋼, 97 (2011) 10, 532.
- 2) W.L.Roberts: Friction and Lubrication in Metal Processing, ASME, New York, (1966), 103.
- 3) 白田昌敬, 酒井健次: トライボロジスト, (1982), 594.
- 4) Y.Kimura and K.Okada: Proc. JSLE Int. Tribol. Conf., (1985), 937.
- 5) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴: トライボロジスト, 34 (1989) 12, 879.
- 6) 木村幸雄, 藤田昇輝, 三原豊: 鉄と鋼, 95 (2009) 4, 340.
- 7) N.Fujita and Y.Kimura: Proc. ImechE, Part J: J. Engineering Tribology, 227 (2013) 5, 413.
- 8) N.Fujita and Y.Kimura: ISIJ Int., 52 (2012) 5, 850.
- 9) N.Fujita, Y.Kimura, K.Kobayashi, Y.Amanuma and Y.Sodani: J. Materials Processing Technology, 219 (2015), 295.
- 10) A.Azushima, S.Inagaki and H.Ohta: Tribol. Trans., 54 (2011), 275.
- 11) N.Fujita, Y.Kimura, K.Kobayashi, K.Itoh, Y.Amanuma and Y.Sodani: J. Materials Processing Technology, 229 (2016), 407.
- 12) Y.Kimura, Y.Sodani, N.Nishiura, N.Ikeuchi and Y.Mihara: ISIJ Int., 43 (2003) 1, 77.
- 13) Y.Kimura, N.Fujita, Y.Matsubara, K.Kobayashi, Y.Amanuma, O.Yoshioka and Y.Sodani: J. Materials Processing Technology, 216 (2015), 357.

(2016年9月21日受付)