

# 論文の内容の要旨

論文題目 高速冷間圧延における潤滑メカニズムに関する  
基礎的研究とそのプロセス開発への適用

氏名 藤田 昇輝

## 1. 序論

地球環境負荷低減への取り組みとして、自動車や缶用鋼板等の軽量化ニーズが急速に高まっており、鋼板の薄肉化及び高強度化が進展している。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の圧延、②高強度化に対応した変形抵抗の高い材料の圧延、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に圧延速度の増加、が必要となる。これらの最終製品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、かつ安定した高速圧延技術によってこれを実現する必要がある。

冷間タンデムミルの潤滑方式は、循環給油方式と直接給油方式とに大別される。いずれの方式も潤滑剤として水中に油分を分散させたエマルジョンが用いられる。循環給油方式では、低濃度（1～3%程度）のエマルジ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。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ジョンが用いられており、潤滑性能に乏しい。その際の潤滑挙動は動的濃化現象と呼ばれ、ロールと鋼板との隙間にエマルジ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。

直接給油方式では高濃度（10%前後）のエマルジョンが鋼板に供給される。エマルジ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。この高い潤滑性は、鋼板に衝突したエマルジョンの油分のみが付着するプレートアウト現象によって発現される。しかしながら、直接給油方式では圧延油原単位が高く、廃液処理の負荷も大きい。

以上のような観点から、冷間タンデムミルの潤滑システムとして、循環給油方式の優れた圧延油原単位を維持することで廃液量を低減しながら、直接給油方式に匹敵する高い潤滑性能を得る技術を確認すること、及び多様なプロダクトミクスに対応した最適な潤滑状態が得られるよう潤滑状態を自在に制御する手段を確認することで高生産性と環境負荷低減の両立に貢献できると考えられる。その際、潤滑制御の観点からは、動的濃化現象を直接的に操作することは困難であるのに対し、プレートアウト現象についてはエマルジ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。

本研究ではプレートアウト現象を最大活用することにより、ロールバイト内の接触率変化を介して潤滑状態を制御させることを着想し、高速冷間圧延状態における潤滑機構の解明と効率化に関する諸改善、及びそれらを積極的に制御した実用化に関する技術開発を行った。

## 2. 高速通板時のプレートアウト効率を高めるエマルジョン供給方法

2000m/min を超える高速圧延では、エマルジ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必要最小限の油分供給量で極大化させる手段について調査した。その結果、従来から認識されていたエマルジョンの作りこみ条件(濃度・粒径)だけではなく、その供給方法までも考慮する必要があることが知見された。具体的には、2 流体ノズルによるエマルジョンのアトマイズ供給により、鋼板含熱による水分の蒸発促進、及びに有界面活性剤による洗い流し(再乳化)効果が抑制されることで油滴のプレートアウト性が向上することが明らかとなった(Fig.1)。

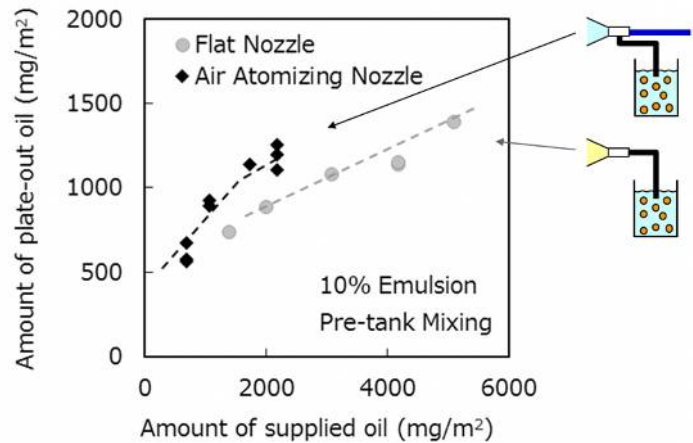


Fig.1 Influence of air atomizing on plate-out oil film.

## 3. 高速冷間圧延特性に及ぼすプレートアウト量の影響

適切なエマルジ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る。一方で、冷間タンデム圧延における潤滑挙動はエマルジ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、Fig.2 に示すようなプレートアウト制御装置を備えたラボ圧延機を新たに開発し、複数の因子を伴った潤滑現象を再現することを試みた。基礎的な検討を行った結果、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。

適切なエマルジ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る。一方で、冷間タンデム圧延における潤滑挙動はエマルジ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、Fig.2 に示すようなプレートアウト制御装置を備えたラボ圧延機を新たに開発し、複数の因子を伴った潤滑現象を再現することを試みた。基礎的な検討を行った結果、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。

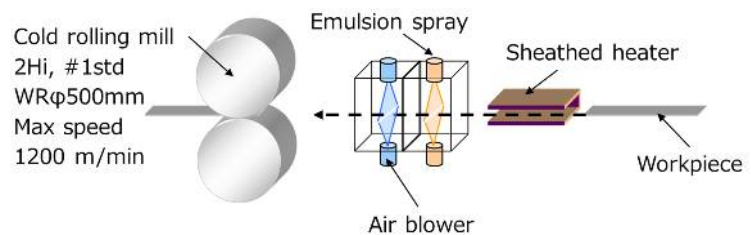


Fig.2 Schematic view of proposed plate-out simulator.

## 4. 高速圧延域におけるプレートアウト油膜量の予測

プレートアウト現象を活用した圧延潤滑状態の制御性を確認するために、実機タンデムミルを想定した鋼板付着油分予測及び実機検証実験を行った。実機タンデムミルに設置した追加潤滑システムからのスプレー供給量により、鋼板表面へのプレートアウト量が増加し、高速圧延時の摩擦係数が低下することが確認された。このような実機ラインでの実験を通じて、循環給油方式を採用する冷間タンデムミルの高速圧延条件において、プレートアウト制御により潤滑状態を制御できることを実証した。また、ラボ実験と従来の冷間圧延潤滑理論により導かれた鋼板付着油分の予測モデルは実測値と比較的良好な一致を示した(Fig.3)。これにより、種々の高速圧延状態における潤滑状態の変化を定量的に予測することが可能となった。

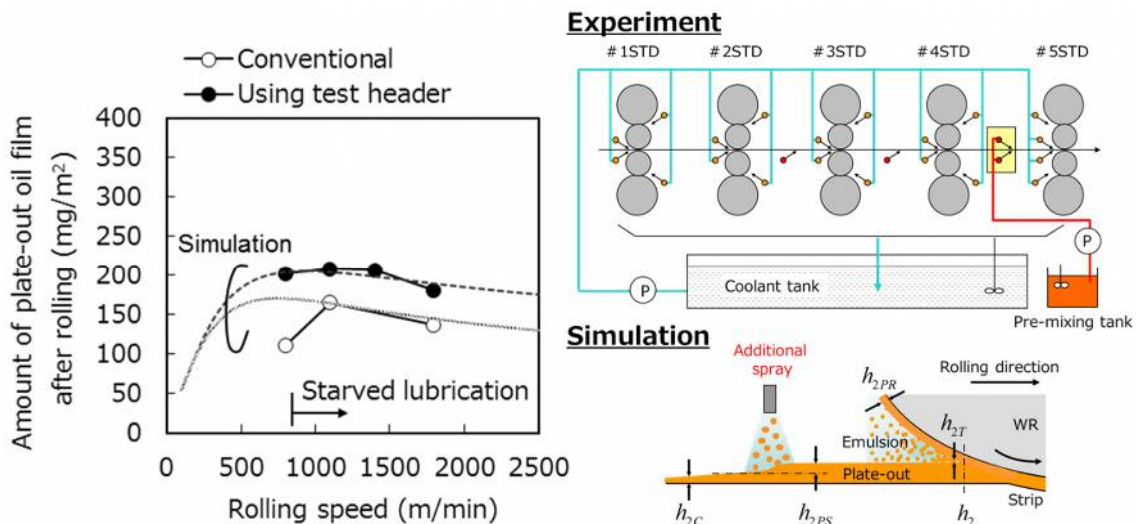


Fig.3 Comparison of plate-out oil film between simulation and measured data.

### 5. 高速圧延域におけるプレートアウト油膜の動的制御

鋼板上の付着油分量を調整するという手段が摩擦係数の制御に有効であることを活用して、高速圧延の阻害要因であるチャタリング(圧延機の異常振動)抑止の可能性を探索した。冷間タンデム圧延機全体が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であることを考慮し、2スタンド自励振動モデルを用いた考察によって、隣接スタンドにおける摩擦係数のバランスが、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。

このような観点から、高速圧延における安定圧延を実現するためには、冷間タンデムミルの後段スタンドの摩擦係数を、被圧延材の板厚・鋼種やロールの表面粗さ等に応じて所定の範囲に制御する必要性を導くことができた。その思想を実現するためのアクチュエータとして、追加潤滑系統からのエマルジョン供給量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がシミュレーションにより検証され、その制御効果が確認された(Fig.4)。従来の循環給油方式では潤滑状態を積極的に制御する手段が存在しなかったため、チャタリングの危険領域を避けることができない場合も多く、試行錯誤により安定操業条件を経験的に探す他なかった。そのような旧来常識を打ち破る点で本制御思想は画期的である。

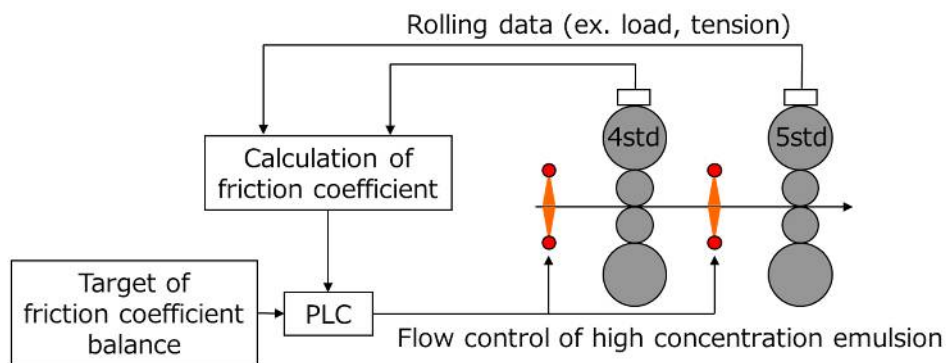


Fig.4 Schematic illustration of lubrication control actuator.

## 6. 新たなハイブリッド潤滑の実用化

前章までの知見を基に新たに具現化されたハイブリッド潤滑技術が実用化された。循環給油方式をベースとする5スタンド冷間タンデムミルにおいて、圧延速度2100m/minが安定的に実現した。薄肉のぶりき原板ではミル最高速度(2100m/min)の達成比率が従来比の約7倍まで増加し、直接給油方式による冷間タンデムミルに相当するレベルにまで到達した。一方で、循環給油方式の優れた圧延油原単位は現行を維持したままとなっており、圧延の高速化と圧延油原単位が両立された。

通常の循環給油方式での潤滑状態(軟質・厚肉材に適する)から、ハイブリッド潤滑システムを活用した直接給油方式レベルの潤滑状態(硬質・薄肉材に適する)までを自在に変更することが可能となり、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可能なシステムが構築された。

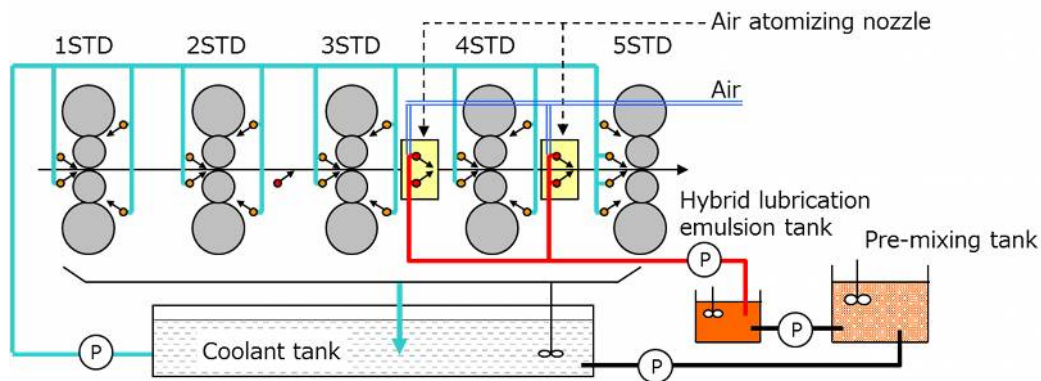


Fig.5 Schematic illustration of newly hybrid lubrication system.

## 7. 結論

通常の循環給油方式で使用される低濃度・小粒径エマルジョンによって形成されるプレートアウト量に対して、本技術による新たなハイブリッド潤滑方式によれば、高濃度・大粒径化・最適供給方式の効果により、通常の循環給油方式に対して約3倍のプレートアウト量を得ることができ、直接給油方式レベルにほぼ匹敵するレベルの油膜を形成させることが可能となった。これは、エマルジョンの循環安定性を確保するために多量の界面活性剤を含有するなど、性状の異なるエマルジョン圧延油であっても、直接給油方式に匹敵するレベルの高いプレートアウト特性を実現できる可能性を明らかにした点で意義があり、あらゆる圧延油に適用できる汎用性を有している。

従来操業では薄肉・硬質材に対して、チャタリングの発生によりミル仕様である2100m/minを達成することが困難であったが、本技術によって大幅に速度達成率が向上し、薄肉化・硬質化に対応した高速圧延を安定的に達成することが可能となった。従来のように高速圧延の実現に対して、直接給油方式を適用するというアプローチではなく、圧延油原単位に優れ、廃液処理や圧延油の再生が不要な循環給油方式を基礎とした潤滑システムによってこれを実現した点でインパクトは大きい。鋼板の硬質化・薄肉化を通じて素材の軽量化を促進すると共に、生産工程においても環境負荷軽減を指向した「エコな冷間圧延潤滑システム」が確立された。