

ハイブリッド潤滑による缶用鋼板の高速冷間圧延技術

Hybrid-Lubrication System in Tandem Cold Rolling Mills for High-Speed Rolling of Thin Gauge Can Steel

木村 幸雄 KIMURA Yukio JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
藤田 昇輝 FUJITA Noriki JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員 (課長)
小林 宏爾 KOBAYASHI Koji JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 錫鍍金部 主任部員 (副課長)

要旨

薄鋼板の硬質化・薄ゲージ化に対するニーズの高まりと共に、冷間タンデムミルにおいては高速・高能率な圧延の実現、廃液等の環境負荷の軽減、硬質材から軟質材までの多品種生産への柔軟な対応が求められている。従来は極薄材の高速圧延用の潤滑システムとして、直接給油方式が適しているとされていたが、廃液処理など環境負荷の面で問題があった。これに対して、圧延油を循環使用する循環給油方式をベースに、高速圧延においても優れた潤滑性能を発揮しながら、多様なプロダクトミクスに対応して、柔軟に潤滑状態を制御するシステムを開発した。

Abstract:

Production of steel strips is shifting to thinner gauges and higher strength materials with the aim of reducing the weight of can steel products. In cold rolling processes, it requires more efficient production by high-speed rolling. Also, a flexible production system is necessary for adapting to rapid market changes, as well as reducing waste lubricants from the viewpoint of environmental preservation. In this situation, JFE steel has developed a new hybrid-lubrication system for cold rolling. The system is based on a lubricant recirculation system combined with a system for flexible lubrication control. It successfully enabled an intelligent lubrication control and achieved stable high-speed rolling, while maintaining an oil consumption rate equal to that of conventional recirculation systems.

1. はじめに

飲料缶等に用いられる缶用鋼板への軽量化ニーズの高まりに伴って、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。しかし、硬質な極薄材の冷間圧延では、チャタリング¹⁾やヒートスクラッチ²⁾と呼ばれる欠陥により、設備仕様とされる最高速度よりも低い圧延速度で操業せざるを得ない点が課題となる。

このような背景のもと、JFE スチールでは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した。特に、圧延油の循環使用による消費量および廃油量の削減により、地球環境に優しく、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の構築を目指した。また、多様なプロダクトミクスに対応して対象材ごとに最適な潤滑状態を実現する潤滑自在制御技術を世界に先駆けて開発した³⁾。

本報では、開発技術の概要について、そのコンセプト並びに関連する基礎的な研究成果を中心に述べる。

2. 冷間タンデムミルの潤滑システム

2.1 従来の潤滑システム

JFE スチールでは極薄材を圧延するための冷間タンデムミルを、西日本製鉄所 (福山地区) および東日本製鉄所 (千葉地区) に各 1 基保有しており、各々の特徴を活かした缶用鋼板素材を生産している。福山地区のミルは、5 スタンド式のタンデム圧延機であり、1971 年にコイルを接続しながら圧延するという完全連続式冷間圧延機を世界に先駆けて実現した⁴⁾。一方、千葉地区のミルは 6 スタンド式であり、1995 年に駆動系の増強により最高速度を 2 800 m/min. に高速化した後は、現在も世界最高速を誇る圧延機として知られている⁵⁾。

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ため、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 O/W エマルジョン (Oil-in-water emulsion) が使用される。その供給方式は、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、福山地区の冷間タンデムミルは前者を、千葉地区では後者を採用している。

循環給油方式では、図 1 (a) に示すように、低濃度 (1~

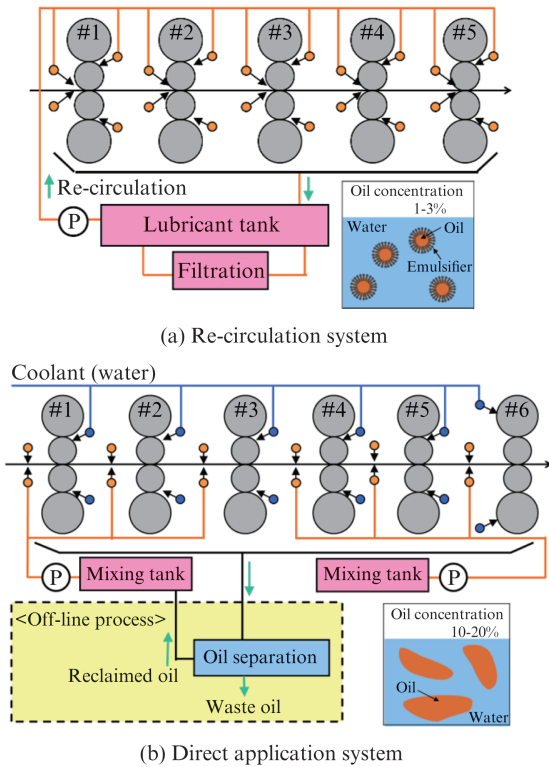


図1 冷間タンデムミルの潤滑システム

Fig. 1 Lubrication systems in tandem cold rolling mills

3%程度)で安定なエマルジョンを潤滑と冷却のために循環使用する。そのため、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という利点がある。このシステムに使用するエマルジョンは、劣化しにくいエステル系合成潤滑油を主体とした基油と、水中で所定の粒径で油分を安定的に分散させる界面活性剤を含有する。

一方、直接給油方式では、図1(b)に示すように、界面活性剤を含有しないエマルジョンを高濃度(10~20%)で供給する。エマルジョンを不安定化することで油膜形成能力を向上させ、高い潤滑性が得られるのが特徴である。そのため極薄材を製造する国内の冷間タンデムミルの多くは、直接給油方式を採用している。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 ハイブリッド潤滑システム

新たな潤滑システムの開発においては、直接給油方式と循環給油方式の両者の長を兼ね備えた潤滑システム(ハイブリッド潤滑システム)を目指した。その狙いを表1に、潤滑システムの基本的な構成を図2に示す。

本システムは、圧延油原単位に優れた循環給油方式をベースとして、ハイブリッド潤滑システムを組み合わせたものであり、潤滑性能を直接給油方式のレベルまで向上させることができる³⁾。その特徴は以下のとおりである。

表1 新たなハイブリッド潤滑システムの狙い³⁾

Table1 Objective of the new lubrication system³⁾

Lubrication system	Direct application (D/A)	Re-circulation (R/C)	Hybrid lubrication
Base oil	Natural fats and oils	Synthetic esters	Synthetic esters
Concentration	10-20%	1-3%	1-3%
Emulsification	Unstable	Stable	(Re-circulation) Stable
Reuse	Off-line treatment	Circulation use	Circulation use
Lubricity	○	△	→ ○
Oil consumption	×	○	○
Environmental adaptability	×	○	○

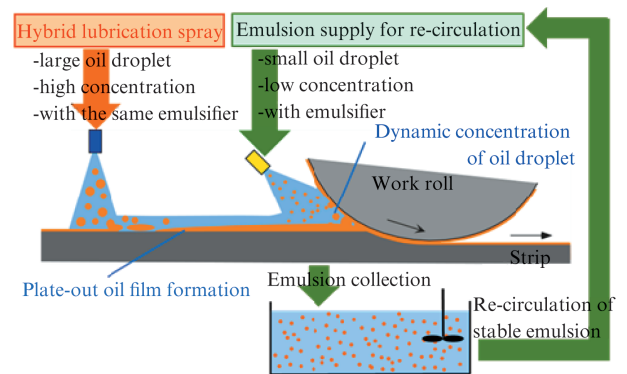


図2 ハイブリッド潤滑システムの構成³⁾

Fig. 2 Configuration of hybrid lubrication system³⁾

(1) エマルジョンの高効率な油膜形成⁶⁾

ハイブリッド潤滑システムから供給するエマルジョンは、循環システムに混入しても、エマルジョンの安定性を維持できるように、循環システムと同一の基油及び界面活性剤を含有する。そのため、水中では安定な油滴となって油水分離しにくい状態にあるものの、エマルジョン粒径と濃度を適切に制御することにより、鋼板表面に供給された際の油膜形成能力を通常よりも3倍以上向上させた。これにより、直接給油方式に匹敵する潤滑性を確保でき、高速圧延の実現と優れた圧延油原単位との両立が可能となった。

(2) 潤滑状態の自在制御⁷⁾

ハイブリッド潤滑システムからのエマルジョン供給量を変更することで、圧延材や圧延条件が変化しても最適な潤滑状態を維持できる。また、圧延中の摩擦状態を常時モニタリングしながら、潤滑状態を制御する摩擦係数ダイナミック制御システムを実現した。これにより、狭レンジの潤滑制御が可能となり、安定的な高速圧延を実現した。

3. エマルジョンの高効率油膜形成技術

3.1 プレートアウトによる油膜形成

冷間圧延におけるO/Wエマルジョンの潤滑作用にはユニークな性質が知られている。スプレー等により供給するのはエマルジョンであり大部分が水であるが、ロールバイト内

では水分が排除された油のみの膜が形成される点である⁸⁾。

エマルジョンからの油膜形成機構については、プレートアウト (Plate-out) と動的濃化 (Dynamic concentration) によるものが知られている。プレートアウトは、エマルジョンが鋼板に衝突して、油分のみが鋼板表面に付着し、水分が排除される現象である⁹⁾。一方、動的濃化はロールバイト入口の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補足され、ロールバイトに引き込まれる過程で、圧縮性の低い水分が排除され油分が濃化する現象である^{10,11)}。

図2の潤滑システムでは、循環給油システムから供給されるエマルジョンは主として動的濃化による油膜形成に寄与し、ハイブリッド潤滑システムからはプレートアウトを主体とした油膜形成が行われる。本技術では、これらの組み合わせによってロールバイトでの潤滑効果を向上させ、両者のバランスを変えることで潤滑状態を自在に制御するという考え方を採用した。

3.2 プレートアウト特性の基礎検討

ハイブリッド潤滑システムから供給するエマルジョンは界面活性剤を含有する点で直接給油方式と異なる。界面活性剤は、水中で油滴の凝集を防止する作用があるため、油分が水から分離する現象であるプレートアウトとは相反する性質を有する。そこで、界面活性剤を含有するエマルジョンの油膜形成を促進させる観点から基礎的な研究を行った。

その際、ハイブリッド潤滑システムでエマルジョンを供給してから鋼板がロールバイトに到達するまでの時間は、高速圧延においては0.1秒以下と極短時間であるため、このような条件下でのプレートアウト特性を評価する装置を新たに考案した¹²⁾。

極短時間でのプレートアウト特性については、既報^{12,13)}で詳述しているが、従来は準静的な現象として評価されていたプレートアウト挙動が、明確な時間依存性を示す動的な現象であることを明らかにした。これにより、高速圧延時の油膜形成挙動を定量的に把握することが可能になった¹⁴⁾。

3.3 高効率な油膜形成技術の開発

循環給油方式に用いられるエマルジョンとして、精製植物油とエステル系合成潤滑油を基油として、ノニオン系界面活性剤を含有する圧延油のプレートアウト特性を評価した。実験では、エマルジョン濃度を変更するとともに、タンク内の攪拌動力の調整により粒径を変化させた。実験では、エマルジョン供給から0.077秒後の付着油量をプレートアウト量とし、結果を図3に示す⁶⁾。

図からは、エマルジョンの高濃度化によってプレートアウト量が増加するだけでなく、粒径を大きくすることによる効果も大きく、高濃度かつ大粒径エマルジョンにより、極めて高いプレートアウト特性を示すことが分かる。これにより、界面活性剤を含有し、本来安定なエマルジョンであっても、

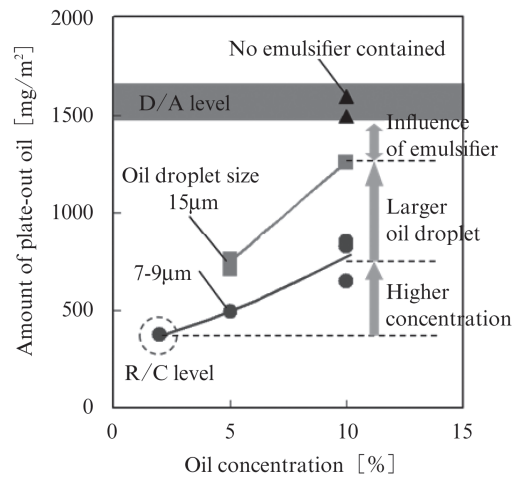


図3 プレートアウトに及ぼす濃度と粒径の影響⁶⁾

Fig. 3 Influence of emulsion concentration and oil droplet size on the amount of plate-out oil⁶⁾

直接給油方式に匹敵するレベルのプレートアウト特性を実現できることが明らかとなった。

図2のシステムにおいては、ハイブリッド潤滑システムから粒径と濃度を調整したエマルジョンを供給することで、少ない供給量であっても大幅な潤滑性の向上が可能となった。さらに、実用化にあたっては、高効率、安定的なプレートアウトを実現するためのスプレー供給への2流体ノズルの適用¹⁵⁾、エマルジョンの大粒径制御技術⁶⁾などの開発を行った。

4. 潤滑制御によるチャタリングの防止

極薄・硬質材の高速圧延を阻害するチャタリング現象について、その発生メカニズムに関する考察に基づいた潤滑制御による防止策の考え方について述べる。

4.1 チャタリング発生メカニズムの考察

4.1.1 単純な振動モデルを用いた考察

チャタリングは板厚変動を伴う圧延機の異常振動であり、圧延機の縦振動に起因し、圧延機の固有振動数である150~250 Hzで発生することが知られている¹⁾。従来から、チャタリングは潤滑状態と関係することが経験的に知られていた。しかし、ロールの振動により潤滑油の導入量が変動することが不安定化の要因となるといった考え方が示されているものの¹⁶⁾、その原因を明確に説明する理論はなかった。これに対して、著者らは必ずしも潤滑状態の変動を前提としなくても、特定の潤滑状態にあることで振動状態が不安定化するという考え方に基づいた理論モデルを提案しており¹⁷⁾、その概要を以下に述べる。

図4は圧延機を単純化したモデルである。圧延ロールを代表する質量 m 、ロールギャップの定常状態からの変化を表す変位 y 、圧延機の縦剛性 k_M とすると、運動方程式は、

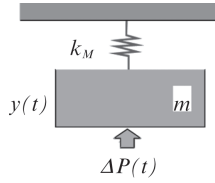


図4 単純化した圧延機の振動モデル

Fig. 4 Simplified rolling mill vibration model

$$m\ddot{y}(t) + k_M y(t) = \Delta P(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される．ここで、圧延荷重の応答 ΔP は、減衰効果（減衰係数 c_p ）を伴うことを想定し、かつ変位（ロールギャップ）に対する微小な時間遅れ（ T_d ）が存在すると仮定すると、

$$\begin{aligned} \Delta P &= -c_p \dot{y}(t) - k_p y(t - T_d) \\ &\approx -k_p y(t) - (c_p - k_p T_d) \dot{y}(t) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

とすることができる．ただし、 k_p はロールギャップ変化に対する荷重応答を線形化した際の影響係数である．式 (2) を用いると、式 (1) の運動方程式は以下で表される．

$$m\ddot{y}(t) + (c_p - k_p T_d) \dot{y}(t) + (k_M + k_p) y(t) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

本式は、左辺第2項の係数が負の値となることで自励振動が生じることを示唆している．圧延現象の観点からは、ロールバイトでの減衰効果 c_p が小さく、ロールギャップ変化に対する荷重変化 k_p が大きく、かつ荷重応答の時間遅れ T_d が大きいことで振動が不安定化することを示している．

4.1.2 ロールバイトにおける減衰効果

ところで、ロールバイトにおける減衰効果とは、ロールギャップの動的な変化に対して、それを抑制するような荷重応答が生じることを指す．

例えば、図5に示すロールバイトの模式図のように、微小時間 Δt の間にロールギャップ S が狭くなる状態を想定する．このとき、時刻 t でロールバイト直下にある材料が Δt の間に十分遠方まで離れば定常圧延状態とみなせるが、

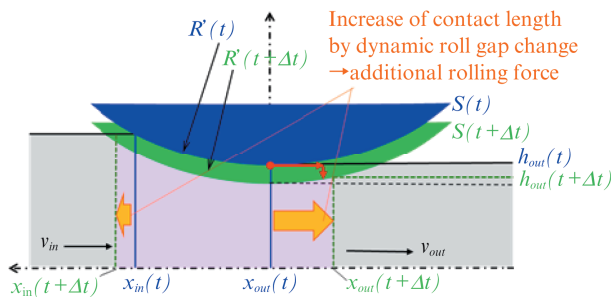


図5 ロールバイトにおける減衰効果を説明する模式図

Fig. 5 Schematic view of roll gap to describe dynamic change and damping effect of roll bite

ロールギャップの変動が速い場合には、接触弧長 ($x_{in} \sim x_{out}$) が増加することによって、定常状態よりも大きな圧延荷重が発生する．この付加的な圧延荷重は、ロールギャップの変動を抑制する方向に働くことから、ロールバイトにおける減衰効果と解釈することができる．

ロールバイトにおける減衰効果は、非常定圧延理論¹⁸⁾を用いて定量化が可能であるが³⁾、ロールバイト出側の接触弧長の変化に着目すると、近似的には以下のように表すことができる¹⁹⁾．

$$c_p = k_f R' / v_{out} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 v_{out} 、 k_f 、 R' はそれぞれ圧延速度、鋼板の変形抵抗、偏平ロール半径を表す．式(4)からは、圧延速度の増加に伴って、ロールの振動を抑制する減衰効果が低下し、振動が不安定化しやすいことが理解できる．

連続圧延においては、ロールギャップが動的に変化すると、入出側の張力も変動する．張力変動は圧延荷重に影響を与えるため、ロールギャップの開閉と圧延荷重の増減のタイミングには時間的なズレが生じる．これが、式 (3) の左辺第2項が負となる原因となる．ただし、その挙動は複雑なため、図6に示す単純化したモデルを例に説明する．

ここでロールギャップ S の変動に対して、入側張力 Δt_b が変化する状況を想定する．そのときの荷重応答 ΔP は圧延機の縦剛性 K および材料の塑性係数 M を用いて以下で表される．

$$\Delta P = \frac{K}{K+M} \left(\frac{\partial P}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial P}{\partial t_b} \Delta t_b \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

これにより、張力の変動 Δt_b が分かれば、ロールギャップ ΔS に対する荷重応答 ΔP の遅れ T_d を求めることができる．

図6はロールギャップ S が狭くなる状態を示すものであ

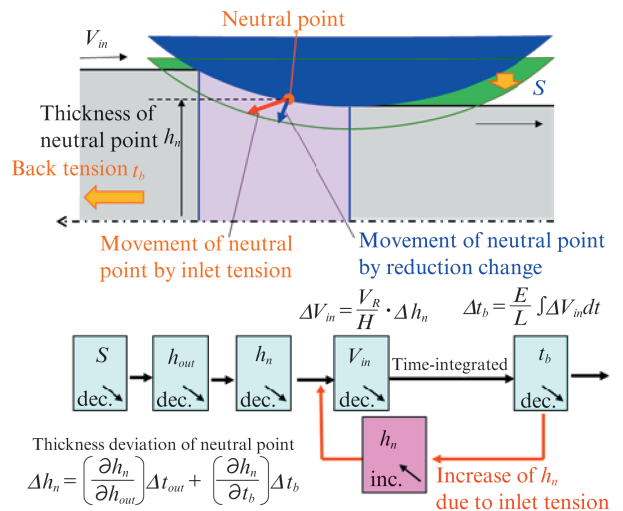


図6 ロールギャップ変動に対する張力の応答

Fig. 6 Inlet tension response by roll gap change

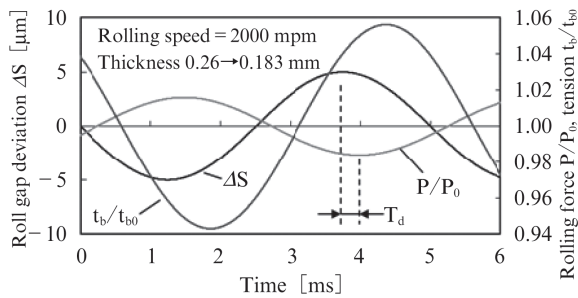


図7 ロールギャップ変動に対する荷重応答¹⁹⁾

Fig. 7 Calculation result of rolling force by cyclic roll gap change¹⁹⁾

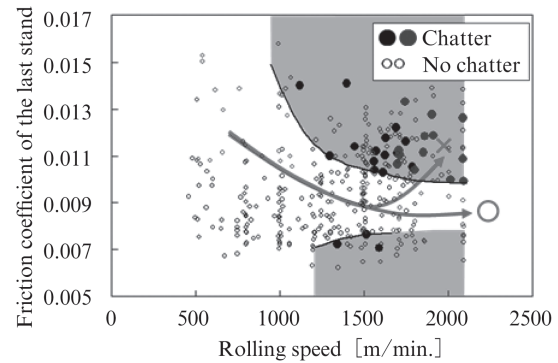


図8 高速圧延におけるチャタリング発生傾向³⁾

Fig. 8 Chatter conditions in tandem cold rolling³⁾

り、圧下率の増加により中立点板厚 h_n (ロール周速と鋼板速度が一致する位置での板厚) が低下することで、入側の材料速度 V_{in} も体積一定則により低下する。入側張力変動 Δt_b は、速度変化 ΔV_{in} を時間積分して得られるスタンド間の弾性ひずみと対応するため、周期的なロールギャップの変動 ΔS に対する張力の応答には 90° の位相遅れが想定される。

しかし、初等圧延理論から明らかなように、圧下率変化による中立点位置の変化だけでなく、入側張力によっても中立点位置が変化して、張力による入側速度 V_{in} の変化が生じる。この張力による中立点の変化は、圧下率による入側速度の低下を相殺する作用があり、結果的にロールギャップ変動 ΔS に対する入側張力 Δt_b の応答は、 90° の遅れではなく、一次遅れの特性を示すことになる。

図7はロールギャップの周期的な変動に対する入側張力および圧延荷重の計算例を示したものである¹⁹⁾。ロールギャップには周波数 200 Hz で微小な変動を与えており、これに対して入側張力の応答に時間遅れが発生していることが分かる。

このように、ロールギャップの動的な変動に対する張力の応答は、張力による中立点位置の変化を伴う一次遅れ特性を示し、摩擦係数(潤滑状態)は中立点位置の変化のしやすさを通じて、式(3)に示した荷重応答の時間遅れ T_d に影響を与えていると考えられる。

4.1.4 高速圧延における潤滑制御の必要性

以上の考察に基づいて、式(3)の運動方程式に再び着目すると、高速圧延ではロールバイトにおける減衰効果 c_p が低下し、極薄・硬質材の圧延ではロールギャップに対する荷重変化 (k_p) が大きいいため、自励振動が発生しやすい条件となる。一方、荷重応答の時間遅れ T_d は、スタンド間張力の変動の影響を受け、張力による中立点位置の変動と潤滑条件とが関連付けられて、振動の安定性に影響を与えることになる。

ただし、実際の冷間タンデムミルの張力変動は、スタンド間の相互作用により複雑に影響しあうため、上述のような単純化したモデルでは定量的な予測は困難である。そのため

既報¹⁶⁾では、連続圧延の動特性解析により、圧延機の振動安定性に及ぼす摩擦係数の影響を検討している。その結果は、図8に示す実機での現象と同様であり³⁾、圧延速度の増加と共に振動が不安定化すること、潤滑状態の変動よりも特定の潤滑条件にあることが振動の安定性を決定づけること、が確認された。

4.2 プレートアウトを活用した潤滑制御

本報の潤滑システムでは、ハイブリッド潤滑システムからの油膜形成(プレートアウト)を利用して、ロールバイトでの潤滑状態(摩擦係数)を制御するものであるが、入側での付着油量と界面の潤滑状態とは、必ずしも単純な関係ではない。

例えば、圧延機入側でプレートアウト油膜のすべてがロールバイトに導入されるのではなく、ロールと鋼板間における流体力学的な作用によって、導入油量が制限される。また、ロールバイトに一定の油量が導入されても、ロールと鋼板の粗さや界面温度、圧延油の境界潤滑特性などによって潤滑特性も変化するという課題がある。

そこで、著者らは実験圧延機の入側にプレートアウトによる油膜厚を制御できる装置を考案し、高速圧延時の摩擦係数に及ぼすプレートアウトの影響を系統的に評価し²⁰⁾、ロールバイトにおける潤滑状態を制御するために必要なプレートアウト油膜の条件を明らかにして、実機の制御条件に反映させた。

図9は、本技術における潤滑制御システムの構成を示したものである。硬質な極薄材の高速圧延において潤滑条件が厳しい後段スタンドにハイブリッド潤滑システムを設置し、高濃度・大粒径エマルジョンを少量供給するシステムとなっている。ハイブリッド潤滑システムからの供給量は、目標とする摩擦係数に対して、鋼種や板厚などの条件を考慮して決定される。また、圧延速度の変化に対応してプリセット制御により供給量を変更される。さらに、圧延中の摩擦係数をオンラインで逆算しながら、摩擦係数が所定の範囲となるように、ハイブリッド潤滑システムからの供給量を変更する潤滑状態の

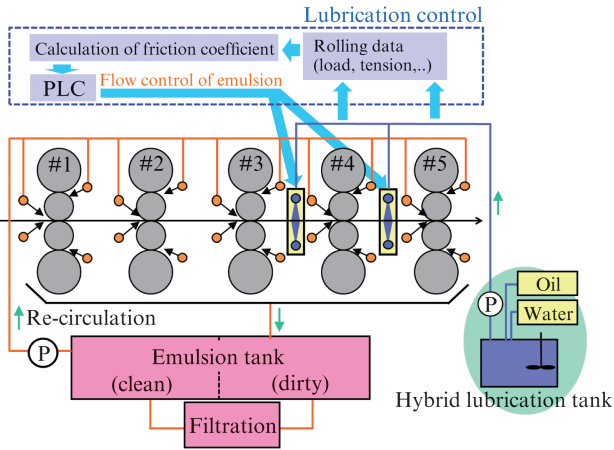


図9 冷間タンデムミルのハイブリッド潤滑システム

Fig. 9 Hybrid lubrication system for tandem cold rolling mill

ダイナミック制御を行うシステムを構築した²¹⁾。

5. おわりに

缶用鋼板などの薄ゲージ・硬質材の安定高速圧延を狙いとした冷間タンデムミルの新たなハイブリッド潤滑システムを開発した。エマルジョンの循環給油方式をベースとして、圧延油消費量および廃油量の抑制を維持しながら、高能率化のための高速圧延を実現する潤滑システムであり、多様なプロダクトミクスに対応して対象材ごとに最適な潤滑状態を実現する潤滑自在制御技術を可能にした。

本報では、開発技術の基本的なコンセプトと、実用化技術の基礎となる研究成果を中心として記載した。本技術の実用化の成果や潤滑制御の具体的な効果については、既にいくつかの論文として公表されているので、詳細は参考文献3), 13), 21)などを参照されたい。

本開発を通じて実現した技術は、今後強まることが予想される潤滑油の3R (Reduce, Reuse, Recycle) による環境負荷軽減の動向にも対応したものであり、今後も資源循環型社会に寄与する技術の開発を進めていく。

参考文献

- 1) 鈴木弘, 板圧延におけるチャター現象. 機械の研究. 1996, vol. 48, no. 5, p. 583-588.
- 2) 鎌田征雄, 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. 薄鋼板の冷間圧延におけるヒートストロークの発生機構. 鉄と鋼. 1981, vol. 67, no. 14, p. 2152-2161.
- 3) 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. ハイブリッド潤滑による冷間タンデムミルの高速圧延技術の開発. 塑性と加工. 2013, vol. 54, no. 635, p. 1028-1032.
- 4) 鎌田正誠, 鍛本紘, 岩藤秀一, 後藤桂三, 千場石根, 石田雅之. 完全連続式冷間タンデム圧延技術の開発. 日本鋼管技報. 1984, no. 105, p. 15-28.

- 5) 金子智弘, 齊藤輝弘, 川島浩治, 竹澤幸平, 長南富雄, 岡本謙. 高速冷間圧延技術の開発 (川鉄千葉2 TCM の2800 mpm 冷間圧延技術). 材料とプロセス. 2000, vol. 13, no. 2, p. 318-321.
- 6) 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. エマルジョン圧延油の高効率プレートアウト技術—ハイブリッド潤滑による冷間タンデムミルの高速圧延技術第1報—. 塑性と加工. 2014, vol. 55, no. 639, p. 346-350.
- 7) 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. 冷間圧延における潤滑状態の制御技術—ハイブリッド潤滑による冷間タンデムミルの高速圧延技術第2報—. 塑性と加工. 2014, vol. 55, no. 640, p. 445-450.
- 8) 曾谷保博監修. トコトンやさしい圧延の本. 日刊工業新聞社, 2015, p. 114-115.
- 9) Roberts, W. L. Friction and Lubrication in Metal Processing. Trans. ASME, New York, 1966, p. 103.
- 10) Kimura, Y.; Okada, K. Elastohydrodynamic lubrication with oil in water emulsions. Proc. JSLE Int. Tribol. Conf., 1985, p. 937-942.
- 11) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴. 冷間圧延におけるエマルジョン潤滑に関する研究 (第1報 エマルジョン潤滑における圧延後の表面性状と導入油量). トライボロジスト, 1989, vol. 34, no. 12, p. 879-886.
- 12) 木村幸雄, 藤田昇輝, 三原豊. 冷間圧延用 O/W エマルジョンの短時間プレートアウト特性. 鉄と鋼. 2009, vol. 95, no. 4, p. 340-346.
- 13) Kimura, Y.; Fujita, N.; Matsubara, Y.; Kobayashi, K.; Amanuma, Y.; Yoshioka, O.; Sodani, Y. High-speed rolling by hybrid-lubrication system in tandem cold rolling mills. Journal of Materials Processing Technology. 2015, vol. 216, p. 357-368.
- 14) Fujita, N.; Kimura, Y.; Kobayashi, K.; Amanuma, Y.; Sodani, Y. Estimation model of plate-out oil film in high-speed tandem cold rolling. Journal of Materials Processing Technology. 2015, vol. 219, p. 295-302.
- 15) Fujita, N.; Kimura, Y. Plate-out efficiency related to oil-in-water emulsions supply conditions on cold rolling strip. Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology. 2012, vol. 227, no. 5, p. 413-422.
- 16) 古川九州男, 鎌田征雄, 清野芳一, 滝本高史, 中里嘉夫, 中川吉左衛門, 福永一朗. 極薄鋼板の冷間圧延における「チャタリング」現象の解析. 川崎製鉄技報. 1976, vol. 8, no. 1, p. 60-79.
- 17) Kimura, Y.; Sodani, Y.; Nishiura, N.; Ikeuchi, N.; Mihara, Y. Analysis of chatter in tandem cold rolling mills. ISIJ International. 2003, vol. 43, no. 1, p. 77-84.
- 18) Pawelski, O.; Rasp, W.; Friedewald, K. Application of the theory of rolling to rolling in the case of mill vibrations. Steel Research. 1986, vol. 57, no. 8, p. 373-376.
- 19) 木村幸雄, 藤田昇輝, 西浦伸夫, 友常茂宏, 曾谷保博. 冷間圧延の高速安定化のための潤滑制御技術 (ハイブリッド潤滑による冷間タンデムミルの高速圧延技術 第1報). 平成24年度塑性加工春季講演会(小松). 2012, p. 157-158.
- 20) 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. 2011, vol. 98, no. 10, p. 532-540.
- 21) Fujita, N.; Kimura, Y.; Kobayashi, K.; Itoh, K.; Amanuma, Y.; Sodani, Y. Dynamic control of lubrication characteristics in high speed tandem cold rolling. Journal of Materials Processing Technology. 2016, vol. 229, p. 407-416.



木村 幸雄



藤田 昇輝



小林 宏爾