



日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-14

世界最高速冷間圧延技術の開発

Development of the World's Fastest Cold Rolling Technology

濱上和久
Kazuhisa Hamagami

JFE スチール (株) 常務執行役員
東日本製鉄所 副所長

1 緒言

ぶりき原板を圧延する極薄材専用冷間圧延機は高い生産性を確保するために、シートゲージ用冷間圧延機に比べて最高圧延速度は高速仕様に設計されている。しかしながら、圧延潤滑や冷却の問題による表面欠陥の発生を防止するために、その最高圧延速度に達することのできない場合がある。

JFE スチール (株) のぶりきミルである東日本製鉄所千葉地区 第一冷延工場の第2冷間圧延機 (以下2TCM と略す) においては、種々の高速圧延技術の開発を行ってきており、1995年7月にはこれまで最高圧延速度が $2,260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ であった仕様を $2,813 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ まで増速できるように設備改造を実施し、世界最高速での圧延を可能にした。

また、近年の缶用鋼板は薄ゲージ化に伴い、長手方向及び板幅方向の総合板厚精度の厳格化が進んでいる。これらのお客様の要求に応えるべく、1993年7月に全スタンドのバックアップロールにローラーベアリングを適用し、1995年7月にはミルモータの高応答化とエッジドロップ制御の導入を実施した。これにより定常部並びに加減速部の長手方向の板厚精度を向上させるとともに板幅方向の板厚精度の向上を図った。

また2TCMでは、これらの圧延技術を活用し、出側板厚 0.15 mm 未満の極薄ゲージ材についても、高精度かつ高速冷間圧延を行うことが可能となった。

以下に極薄ゲージ材における高速・高精度圧延技術およびその効果について述べる。

2 設備概要

2TCMは、1963年の稼働の圧延機であるが、1984年に完全連続圧延機に改造され、先後端の板厚精度が飛躍的に向上した。あわせて大幅な自動化、省力化も図られた。

本圧延機の主要な設備仕様をTable1に示す。本圧延機の特徴としては、平均仕上板厚 0.24 mm のぶりき、ティンフリースチール、亜鉛めっき鋼板等の表面処理鋼板用原板を $2,813 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ の速度で連続的に圧延する事が挙げられる。また、極薄ゲージの表面処理用鋼板を高速にて圧延を行うために、圧延油の供給システムはダイレクト方式を採用している。

Table 1 Specifications of No.2 Tandem Cold Mill

Type	Fully continuous 6 stand tandem mill (4-Hi) Mild steel (for tin plate, TFS, GI)
Rolled material	
Max. mill speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	2,813
Delivery thickness (mm)	0.1~1.0
Strip width (mm)	508~1,295
Work Roll diameter (mm)	495~610
Backup Roll diameter (mm)	1,270~1,427
Lubricant application	Direct

3 板厚精度の向上

3.1 長手方向の板厚精度向上

バックアップロールに油膜軸受を用いていた従来の圧延機の出側板厚変動は各スタンドのバックアップロールの偏芯の影響を大きく受ける。これに加えて、加減速部の板厚変動は摩擦係数変化と揃速性不良によって発生する速度変動及び張力変動が主な要因となる。そこでコイル長手方向板厚精度を向上させるために、バックアップロールの軸受を油膜軸受からローラーベアリングに改造するとともに、ミルモータをDCモータからACモータに更新し、その速度応答性を従来の $8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ から $45 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ に向上させた。

バックアップロールにローラーベアリングを適用する事に

より、バックアップロールの偏芯はほとんどなくなり一定速圧延部の板厚変動は半減し、主機の速度応答性を向上させる事により、各スタンド間の揃速性も1%以下に抑える事が可能となった¹⁾。この結果、Fig.1に示すように板厚精度は加減速圧延部では2.0%以下、定常圧延部では1.0%以下を達成した。

3.2 板幅方向の板厚精度向上

2TCMにおいて幅方向板厚制御を行うため、1995年7月にエッジドロップ制御設備の導入を行っている²⁾。設備の構成は、No.1スタンド片テーパワークロールシフトミルと最終スタンド出側に設置したエッジドロップ計及びエッジドロップ制御システムからなる。エッジドロップ計の設置場所としてはアクチュエータであるNo.1スタンド出側に設置する事が制御応答性の観点で好ましいが、圧延後の板厚精度を保証するために最終スタンド出側に設置した。

シフト位置のセットアップ方法は、圧延後に必要なプロフィールを得るために、No.2～6スタンド圧延時に生成するエッジドロップ量をもとにNo.1スタンド出側において必要なプロフィールを算出し、ホットコイルのプロフィール情報から必要なNo.1スタンドのロールギャップを求め、ワークロールのシフト位置を演算し設定する。このエッジドロップ制御設定計算モデル式を構築したことにより、Fig.2に示すようにワークロールシフト位置の設定計算結果とフィードバック制御により修正されたシフト位置との誤差は±12 mmに抑えられている。この誤差はシフト位置が板厚偏差に与えるの影響係数より換算すると板厚偏差で±1.5 μmに相当し、十分な設定精度が得られている。

更に鋼板全長における品質保証体制を確立するための手段として、Fig.3に示すコイル全長全幅方向の板厚の測定を可

能とするエッジドロップ計を設置した。この装置は板幅680 mmから1,300 mmの広範囲にわたり、1.4 mmピッチで板幅方向の厚みを同時に測定することができるため、全長のフィードバック制御が可能となっている。全長にわたるエッジドロップのフィードバック制御システムを導入した結果、Fig.4に示すように板幅方向板厚精度が製品板端位置で5%以下を達成することが可能となった。

4 極薄材高速圧延技術の開発

4.1 高速圧延技術

ぶきミルのような極薄材を圧延する圧延機においては高い生産性を要求される。しかし、圧延潤滑や冷却の問題で最高圧延速度に達することができない場合がある。高速圧延を可能にするために開発した技術をFig.5に示す。高速圧延を

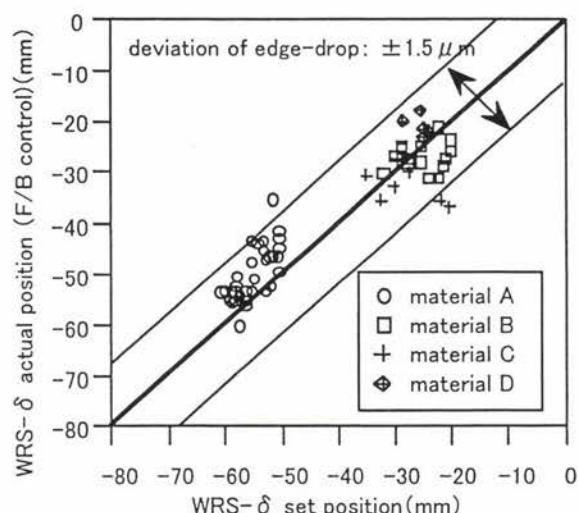


Fig.2 Accuracy of edge-drop control

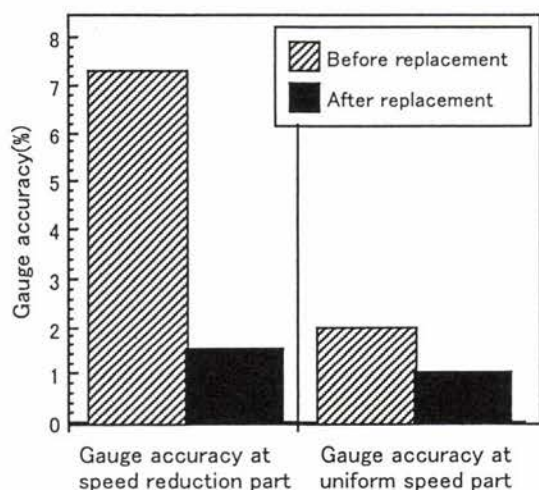


Fig.1 Gauge accuracy at each speed part before replacement and after replacement

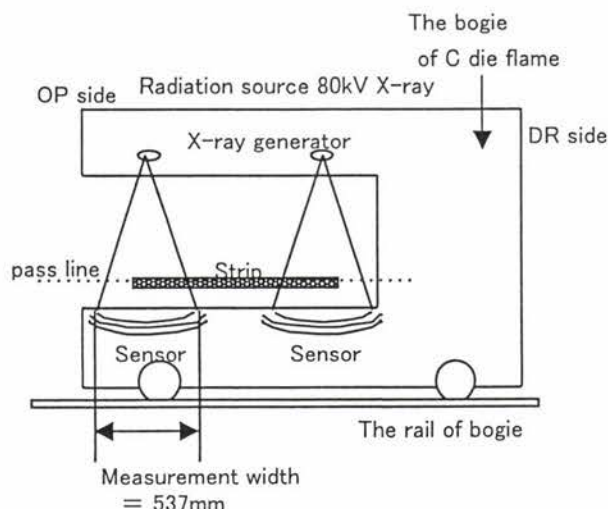


Fig.3 Outline of Body Profile Sensor

可能にするためには圧延潤滑冷却能力を高める事はもちろんのこと、それによって得られた最適なロールバイト内の摩擦係数とワークロールのプロフィールをいかに長時間安定的に維持していくかが重要である。また、高速圧延により発生する機械的な負荷に対しての配慮も必要であり、特に長時間高速圧延を継続していく事によるベアリングの焼損防止技術は不可欠である。

これらの課題を解決するために耐摩耗性ワークロールの開発、高潤滑性圧延油の開発、高効率冷却技術と高速形状制御システムの開発、ベアリング焼損防止技術を確立した。以下では個々の技術について述べる。

4.2 耐摩耗性ワークロールの開発

冷間圧延機においては圧延能率向上、コスト削減の観点から耐摩耗性に優れたワークロールが必要とされている。そこ

で安価で研削性が良好でかつ耐摩耗性を向上させるために微量元素添加により硬質炭化物を効率よく析出させたTi添加型ワークロールを開発した³⁾。

Fig.6に5%CrロールとTi添加型ロールにおける実機使用時の粗度変化の比較を示す。従来の5%Crロールにおいては顕著な初期摩耗が見られるが、Ti添加型ロールの場合は初期摩耗が非常に少ない。しかも従来のロールの2倍以上の圧延距離まで使用しても粗度低下はほとんど見られない。この特徴を生かし、Ti添加型ロールは初期摩耗が少ないために研削時の初期粗度を、圧延に最適な摩擦係数を得られる低粗度にすることができる。しかも長時間の粗度維持性を持つため、ロール交換頻度を減少させることができるとともに、最適摩擦係数での圧延操作が常時可能となった。Fig.7に最終スクンドの圧延距離と圧延速度の推移を示す。Ti添加型ロールを用いることによりロール組み替え直後からほぼ最高圧延速度での操作が可能である。しかもロール寿命が延びた

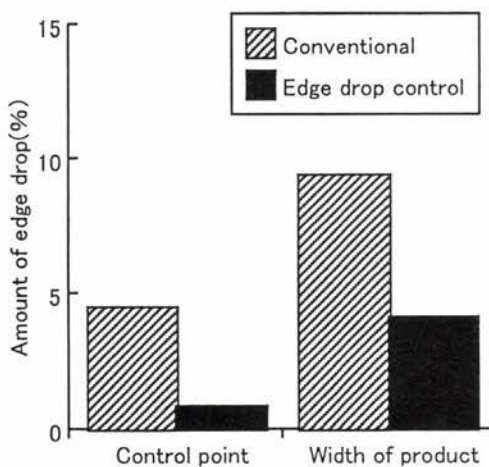


Fig.4 Edge-drop at each width direction

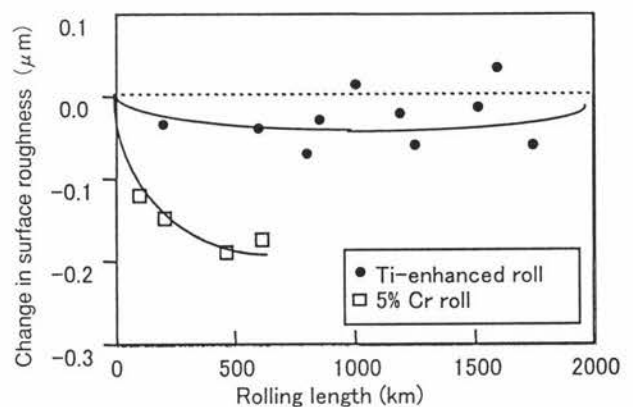


Fig.6 The change in surface roughness of work roll at finishing stand

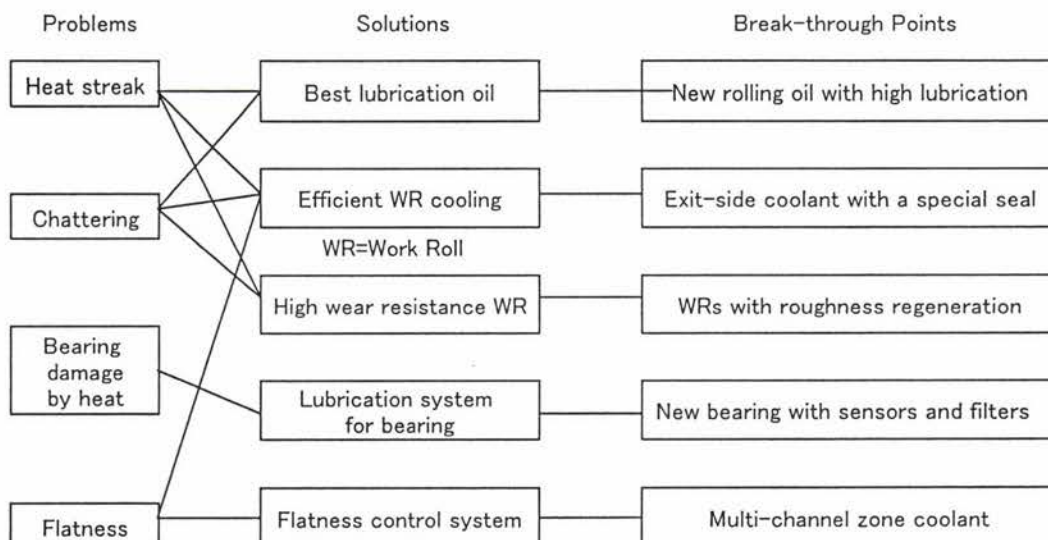


Fig.5 Technical map on 2,800m·min⁻¹ cold rolling

ため最高圧延速度で圧延する時間の占める割合が増加し飛躍的に圧延能率が向上した。

4.3 高潤滑性圧延油の開発

4.3.1 新乳化抑制剤の開発

圧延油の供給をダイレクト方式で行っている冷間圧延機では、圧延油を効率良く鋼板にプレートアウトさせることが高圧延潤滑性を得る上で非常に重要である。プレートアウト性を向上させるためには乳化を抑制し、E.S.I. (Emulsion Stability Index : 乳化安定性を示す指標で、0に近いほど乳化が抑制されてプレートアウト性が向上する。) を0に近づけることが望ましい。

以上のことから、Fig.8に示す様に負に帯電し微細化したエマルジョン粒子の電荷を中和することにより凝集を促進することが可能であると考え、乳化抑制剤としてカチオン性高分子凝集剤を用いることにした。乳化抑制剤使用後はE.S.I. はほぼ0となり経時的な変動もなく圧延潤滑性は安定した⁴⁾。

4.3.2 圧延油基油の検討

乳化抑制剤によりE.S.I.は大幅に低下し、潤滑性も安定させることができたが、更にE.S.I.を安定的に低下させ、より高い潤滑性を得るために基油の検討も行った。実際の圧延油の鋼板に対するプレートアウトは瞬間的に行われるため、E.S.I.測定時の静置時間を30秒に短縮して測定すると圧延油中に含まれる無機の夾雑物やリン脂質の量によって乳化抑制剤の効果が変化し、E.S.I.は変動する。この問題を解決するために従来の天然パーム油から精製パーム油をベースとした

圧延油の開発を行った⁵⁾。乳化抑制剤の効果を引き出すためには遊離脂肪酸が必須であり、油性向上のためにも脂肪酸の添加が有効である。無機の夾雑物やリン脂質を排除したベース油を使用した場合、乳化抑制剤の添加量や不純物のわずかな変動によりE.S.I.が変動する。このため、これらの変動に対し影響を受けず、かつ凝集力の高い脂肪酸の組成及び添加量の選定を行った。

4.3.3 高潤滑性圧延油の効果

このようにして乳化抑制剤と基油及び脂肪酸の選定により開発した圧延油を用いて実機での圧延試験を実施したところ、Fig.9に示すように圧延潤滑性の改善が得られた。現在、本圧延油は工程的に使用され圧延能率の高位安定化に大きく寄与している。

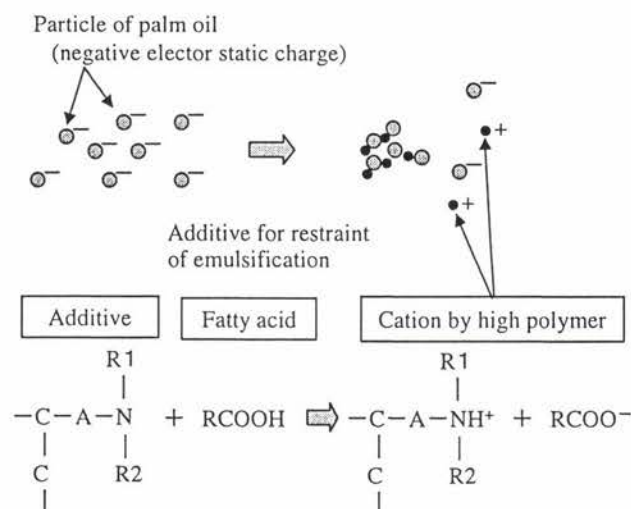


Fig.8 Mechanism of restraint emulsification

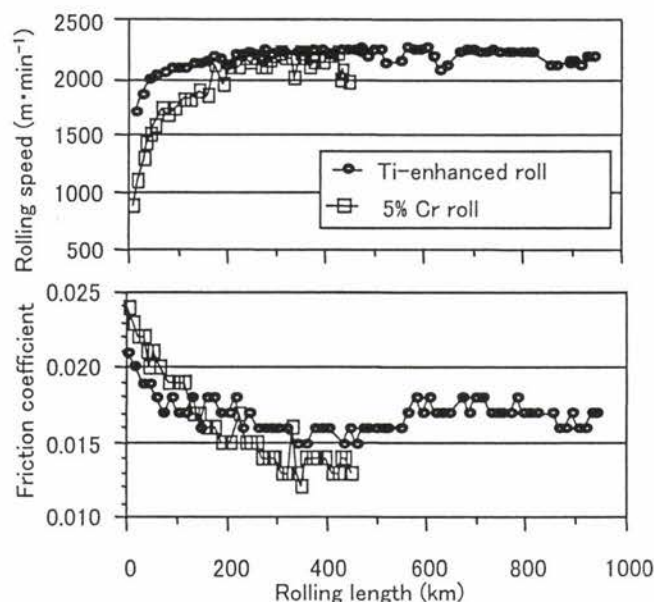


Fig.7 The change in rolling speed and friction coefficient during rolling length

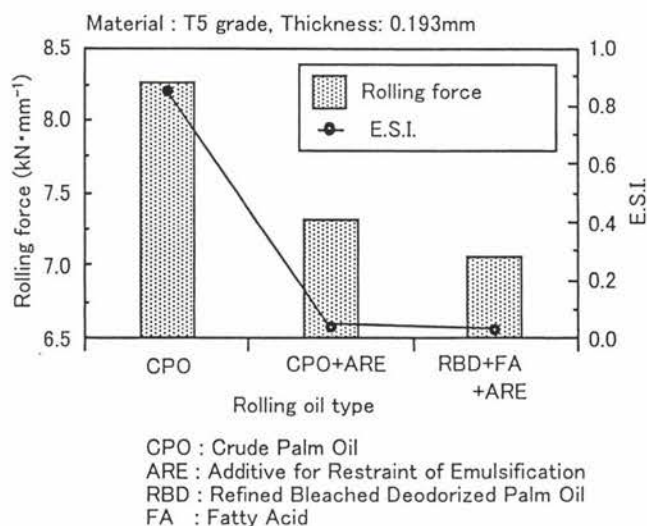


Fig.9 Effect of improvement by rolling oil

4.4 高効率冷却技術と高速形状制御システムの開発

4.4.1 最終スタンドの出側クーラント化

ワークロールの冷却は最もロールの温度が上昇するロールバイトの出側から行うことが冷却効率上最も好ましい。しかしながら、最終スタンド出側からの冷却は水切りの問題があるため、最終スタンドは入側からクーラントをスプレーしていた。このため最終スタンドのサーマルクラウンは $65\ \mu\text{m}$ と非常に大きな値となっており、中伸び制御に対して非常に不利であった。これらの問題を解決するために最終スタンドに非接触式水切りシール装置を開発し、出側クーラント化を可能にした⁶⁾。この開発に伴い、ロールバレル方向に流量コントロールできるゾーンクーラント方式を採用した。この結果、長時間高速圧延を継続しても安定した形状を得ることが可能となった⁷⁾。

4.4.2 入出クーラントの流量最適化

先に述べたようにワークロール冷却に対しては出側クーラントが有効であるが、鋼板冷却効果としては入側クーラントが有利である。入側クーラントにはワークロールの冷却効果だけでなくロールバイト入口の鋼板の冷却効果がある。ロールバイト入口の鋼板温度を下げることでヒートストリークや板面汚れを防止することが可能である。

従って、鋼板冷却のための最適な入側クーラント流量とワークロール冷却のための最適な出側クーラント流量を設定することが非常に重要である。これらのロールと鋼板冷却を効率よく行うために入側クーラントと出側クーラントの流量を独立して制御できるようにした。この効果により、長時間の高速圧延下においても安定した形状と板面清浄性を両立する事が可能となった。

4.5 高速操業時のベアリング焼損防止技術

4.5.1 バックアップロールベアリングの焼損防止

板厚精度を向上させるためにバックアップロールの軸受をローラーベアリングに変更した。その軸受寿命は使用条件により大きく影響され、特に高速化された場合、使用条件はより厳しいものとなる。そこで、軸受の信頼性を向上させるために設備状態の監視強化や潤滑油の清浄化を実施した⁸⁾。

高速化に伴いバックアップロール用シールについても耐摩耗性が重要となる。シールはスケールシール、中間シール、軸シールの3段構造とし、確実なシールが行えるようにした。

またシール材質はフッ素ゴムを採用し、軸側のフィレットリングには硬質クロムメッキを施して耐摩耗性を向上させた。今回の改造によりシール寿命は従来に比べ4倍強長寿命化された。

Fig.10にバックアップロール用軸受潤滑システムの系統図を示す。軸受は強制潤滑方式とし、給油量を保証するために軸受毎に流量計を設置した。また、潤滑油の戻り温度も軸受毎に測定する事により、異常発熱の有無をオンラインでモニタリングするシステムとした。

一方、軸受部のシールを強化しても完全に軸受内部への水や異物の混入は防止できない。また、軸受内部からの摩耗粉発生等により混入する異物が悪影響を及ぼす可能性もある。そこで、異物除去フィルターや水分除去フィルターを設置し、潤滑油の清浄化を図った。軸受は改造以来、フレーキングもなく安定的に使用されている。

4.5.2 その他のロールのベアリング焼損防止

バックアップロールと同様に、ワークロールやミル内およびミル出側補助ロールのベアリングの焼損対策を実施した。ワークロールについては高PVグリースの適用とシールの改善を行った。また、ミル内及びミル出側の補助ロールのベアリングについてはオイルエアー軸受給油方式の採用と軸受温度監視システムを導入し、チョックの焼損防止を図っている。

5 $2800\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ での冷間圧延時の挙動

一般に圧延速度が増加した場合、ロールバイト入口の圧延油は楔効果でバイト内に引き込まれやすくなるため、摩擦係数は低下する。しかしながら、更に高速圧延状態になるとロールバイト入口の圧延油温度が上昇するために圧延油の粘度が下がり、バイト内への圧延油の流入が減少し摩擦係数が逆に上がる傾向となる。したがって、高速圧延時におけるロールバイト内の摩擦係数挙動は圧延操業上、圧延速度を決定する上で重要となってくる。

Fig.11に圧延速度と最終スタンドのロールバイト内摩擦

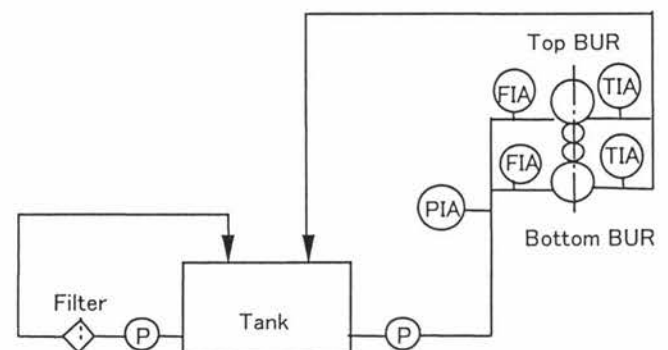


Fig.10 Lubrication system of roller bearing BUR

係数の関係を示す。ワークロールの圧延長さが400kmを超えた場合、ロール粗度が低下しているために摩擦係数の上昇は見られない。また、ワークロール粗度の高い時期に、変形抵抗の高い、高圧下率材の圧延を行うと $2,000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上の領域では摩擦係数の上昇が見られるものの、これまでの種々の対策により、摩擦係数の上昇は実作業上問題の無いレベルに抑えられている。

6 高速圧延技術の極薄材への適用

以上述べた改善に基づき、更に薄物化していく状況を鑑み、極薄材における潤滑、冷却の諸条件の最適化を行った結果、Fig.12に示すように圧延後板厚0.15mm未満の被圧延材料について、その生産量は高速化改造後5年間で飛躍的に向上させることができた。特に、2000年1月には、出側板厚0.13mmを中心とした極薄材において、1999年下期と比較し3倍以上の生産性を達成することができた。

No.	Deformation resistance	Total reduction	Delivery thickness	Rolling length
A	803.1MPa	90.4%	0.220mm	52km
B	803.2MPa	91.3%	0.200mm	437km
C	718.8MPa	90.7%	0.186mm	431km

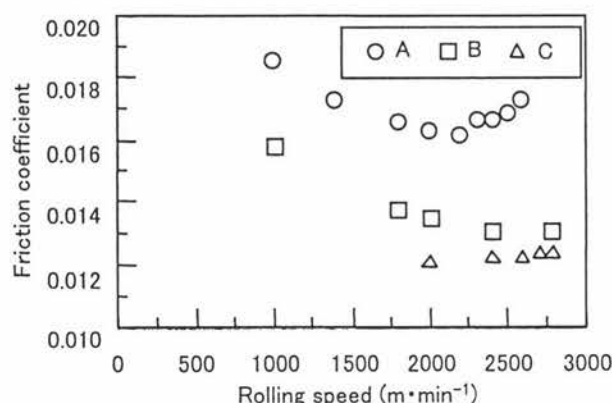


Fig.11 Relation between rolling speed and friction coefficient

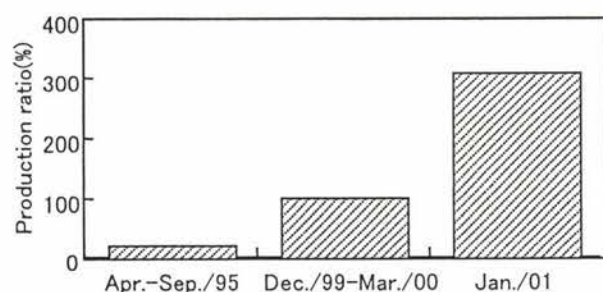
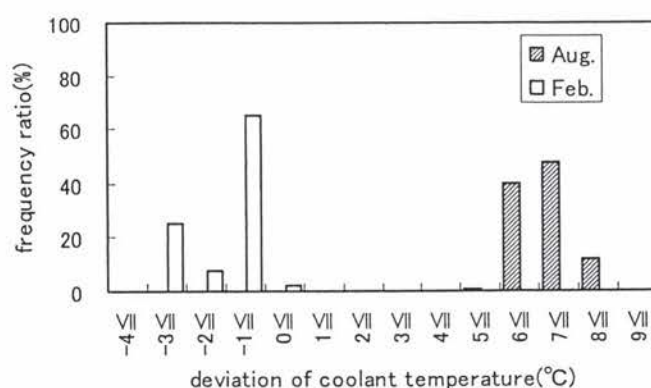


Fig.12 Production ratio ($t < 0.15\text{mm}$)

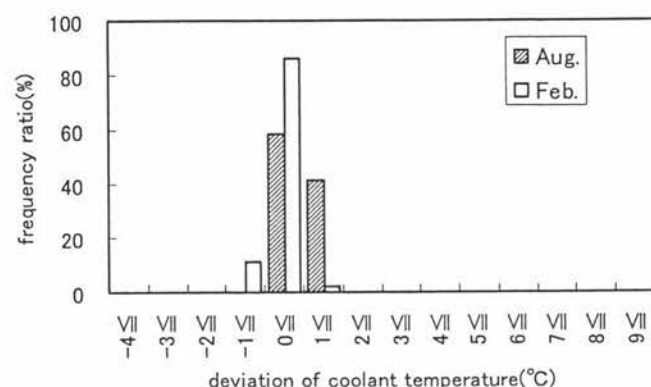
高速圧延操業の安定化に向けて

このように、被圧延材の板厚が極薄化していく市場環境を背景に技術開発を行ってきた。現在においても高速圧延操業を更に安定させるための技術開発に取り組んでおり、その一例を紹介する。ロールと銅板の冷却を効率良く行うことが重要であることは、これまでに述べた通りであるが、冷却水の温度が上昇するとその流量を温度上昇に応じて増加させる必要があるが、設備仕様上の限界がある。そのため夏場のように水温が上昇する季節には、高速圧延中のロールサーマルクラウンを適正な状態にするため、冷却水の温度制御が必要とされていた。2003年9月の冷却水処理設備の移転を機に、冷却能力の増強のための設備更新を行った。その結果、Fig.13に示すように更新後には、夏冬を問わず安定した温度の冷却水を供給することが可能となり、より安定した高速圧延作業が実現している。

今後も更なる高速、品質、安定操業を満足する圧延技術の確立、向上に向けて取り組んでゆく所存である。



(a) before replacement



(b) after replacement

Fig.13 Deviation of coolant temperature

参考文献

- 1) 金子智弘, 増田博昭, 竹澤幸平: 川崎製鉄技報, 28 (1996) 2, 108-113.
- 2) S. Ogimoto, T. Kaneko, T. Saito, T. Fukaya, J. Tateno and K. Kenmochi: South East Asia Iron and Steel Institute, (1999), 34-41.
- 3) S. Shimizu, K. Aoki, M. Kobayashi, T. Saito, Y. Yamada and F. Kosumi: ISIJ Int., 32 (1992) 11, 1238.
- 4) 村元裕, 八角忠明, 松本正次, 清野芳一, 下山雄二, 大西建夫, 三辺達郎, 岡本昭治: 材料とプロセス, 1 (1988) 2, 539.
- 5) 金子智弘, 山田泰裕, 松本正次, 辺見隆, 成毛孝好, 田中健一: 材料とプロセス, 8 (1995) 5, 1230.
- 6) 松本正次, 村元裕, 北村秀樹, 齊藤輝弘, 豊永正一: 材料とプロセス, 5 (1992), 1613.
- 7) 齊藤輝弘, 大西建夫, 小松富夫, 三吉貞行, 北村秀樹, 北浜正法: 川崎製鉄技報, 22 (1990) 1, 19-23.
- 8) 瀧本高史, 川島浩治, 岡本謙, 齊藤輝弘, 金子智弘: 塑性と加工, 457 (1992) 2, 93-98.

(2005年10月20日受付)