

極薄冷間圧延機における 高速圧延技術および板厚制御技術*

川崎製鉄技報
28 (1996) 2, 108-113

Technologies for High Speed Rolling and Control of Gauge in Cold Tandem Mill for Ultra-thin Gauge Strip



金子 智弘
Tomohiro Kaneko
千葉製鉄所 第1冷間
圧延部冷間圧延課 主
任部員(掛長)



増田 博昭
Hiroaki Masuda
千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室



竹澤 幸平
Kōhei Takezawa
千葉製鉄所 設備技術
部工事管理課 主任部
員(掛長)

要旨

ぶりきミルのような極薄専用冷間圧延機では、製品板厚の薄物化と板厚精度の厳格化にともない、ますます高い生産性と板厚精度が要求されている。川崎製鉄千葉製鉄所第1冷間圧延工場の第2冷間圧延機ではこれまで高プレートアウト性ダイレクト圧延油や耐摩耗性ワークロールの開発により圧延潤滑性を改善してきた。この結果、2800 m/minでの超高速冷間圧延が可能となり、生産能率が著しく向上した。また、ストリップ全長にわたる板厚精度向上を目的にバックアップロールの高速用ローラーベアリングの適用とミルモータのACモータ化を行った。この結果、板厚精度として定常圧延部で $\pm 1.0\%$ 、加減速圧延部で $\pm 1.5\%$ の精度を達成した。

Synopsis:

High productivity and gauge accuracy are required of a tandem cold rolling mill that produces ultra-thin gauge strip, such as a tin mill black plate. Until now, the authors have improved lubrication for cold rolling by developing a new direct rolling oil and a Ti-enhanced work roll having high wear resistance for No. 2 TCM of Chiba Works. As a result, it has been made possible to conduct rolling at an ultra-high speed, that is 2800 m/min, and productivity has been remarkably improved. Furthermore, in order to achieve a major increase in gauge accuracy at high rolling speed cold tandem mill the authors applied a roller bearing to back up roll for high speed rotation and replaced mill motors with high response AC motors. As a result, the gauge accuracy during rolling has been improved to $\pm 1.0\%$ at a steady rolling speed and $\pm 1.5\%$ in acceleration and deceleration.

1 緒 言

ぶりきミルのような極薄専用圧延機は高い生産性を得るために、最高圧延速度もシートゲージ用圧延機などより高速である。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抑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。

当社の主力ぶりきミルである千葉製鉄所第一冷間圧延工場の第2冷間圧延機(2 TCM)においては、種々の圧延潤滑性改善を行っており、現在では月間100 000 t以上の圧延を行うことが出来るようになった。1995年7月にはこれまで最高圧延速度が2 260 m/minであった仕様を2 813 m/min迄増速できるように設備改造を実施した。

また、近年は缶用鋼板は薄物化と、板厚精度の厳格化が進んでいる。これらのお客様から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を実施した。これにより、定常部並びに加減速部の板厚精度の向上を図った。

以下に高速圧延技術、並びに高速圧延における板厚精度向上技術について述べる。

Table 1 Specifications of No. 2 Tandem Cold Mill

Type	Fully continuous
Rolled material	6 stand tandem mill (4-Hi) Mild steel (for tin plate, TFS, GI)
Max. mill speed (m/min)	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
Application	Direct

2 設備概要

2 TCM は、1963年の稼働の圧延機であるが、1984年には完全連続圧延機に改造され、大幅な自動化、省力化が図られたとともに、先後端の板厚精度も大幅に向上した。

本圧延機の主要な設備仕様をTable 1に示す。本圧延機の特徴と

* 平成8年5月21日原稿受付

しては、平均仕上板厚 0.23 mm のふりき、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 2813 m/min の高速で連続的に圧延することが挙げられる。また、極薄の表面処理用鋼板を高速にて圧延するために、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。

3 高速圧延技術

3.1 ダイレクト圧延油の開発

3.1.1 圧延油の新乳化抑制剤の適用

2 TCM のように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。圧延油のプレートアウト性は、圧延油の乳化状態に大きく影響される。乳化状態を示す指標として乳化安定度 (Emulsion Stability Index, 以下 E. S. I.) が一般的に用いられているが、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. を 0 に近づけることが望ましい。圧延油エマルジョンの粒径は機械的攪拌や剪断によって微細化される。しかも圧延油粒子の表面は負に帯電することから粒子間に電氣的斥力が作用し、エマルジョンの乳化が安定になる。しかし、エマルジョンの乳化が安定すると圧延油のプレートアウト性を阻害することになる。従来、2 TCM では天然パーム油及びその再生油をエマルジョンにして圧延油として用いており、その E. S. I. は 0.3~0.8 と高く²⁾、また不安定であった。その結果、圧延潤滑性が変動し、生産能率に大きく影響を与えていた。

これらのことから、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。実機試験にてその乳化抑制剤の効果を確認したところ、Fig. 1 に示すように乳化抑制剤添加直後から E. S. I. はほぼ 0 となり、しかも経時的な変動もなく安定している。

3.1.2 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終わるため、E. S. I. の評価方法を 2 min 静置から 30 s 静置に変更して測定したところ、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は変化し、Fig. 2 に示すように E. S. I. が変動する。これは本来、乳化抑制剤は圧延油中の遊離脂肪酸と結びついて圧延油粒子を電氣的に中和させるが、天然パーム油中に含まれる無機の夾雑物が遊離脂肪酸と結合し、リン脂質が乳化抑制剤と結合するために乳化抑制剤の凝集効果が低下するためである。

この問題を解決するために精製パーム油をベースとした圧延油の開発を行った。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るが、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が敏感に作用するために、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。

3.1.3 新ダイレクト圧延油の効果

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ダイレクト圧延油を実機試験を実施したところ、Fig. 3 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

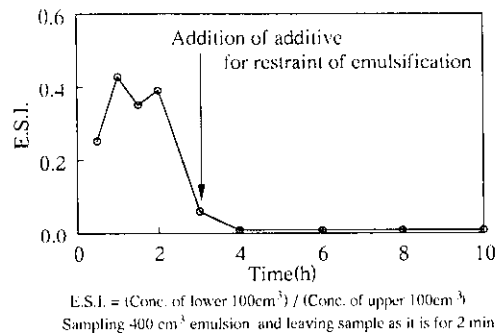


Fig. 1 Transition of E. S. I.

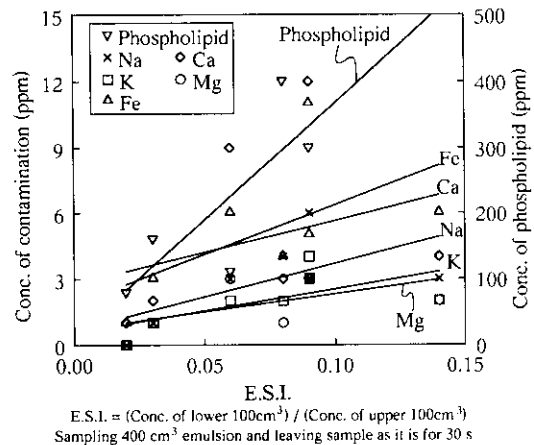


Fig. 2 Concentration of contamination by E. S. I.

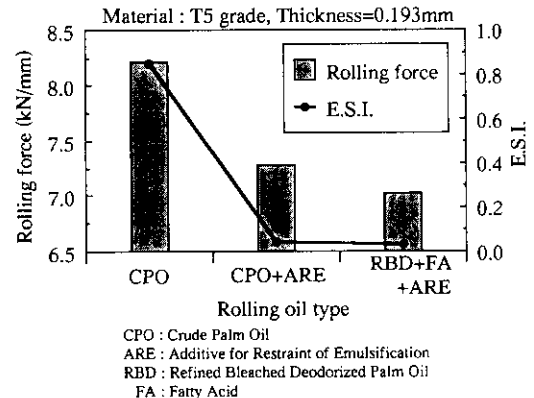


Fig. 3 Effect of improvement by rolling oil

れ圧延能率の高位安定化に大きく寄与している³⁾。

3.2 耐摩耗性ワークロールの開発

3.2.1 開発経緯

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。そのための手段として高 Cr ロール、セミハイスロールなどが用いられているが、いずれも高価格、難研削といった問題を有している。そこで高合金化による靱性及び研削性の劣化を避け、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良く析出させた耐摩耗ワークロールを検討した。炭化物の形態を考えると靱性及び研削性の観点から炭化物はできるだけ微細で均一に分布させることが重要である。炭素、窒素との親和性が大きく、凝固に際し微細な炭素化合物を

形成するTiを添加元素として検討し、ラボ試験での耐摩耗性評価においても良好な結果が得られた³⁾。

3.2.2 実圧延機への適用

(1) 研削性

耐摩耗性ロールに共通する問題として研削性が挙げられる。従来の砥石を用いて研削した場合はTi炭窒化物に起因するスクラッチが発生するが、砥石及び研削方法の改良により、ぶきミルの最終スタンドに使用可能な品質を得ることが出来ている。

(2) 耐摩耗性

Fig. 4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倍以上の圧延距離迄使用しても粗度低下はほとんど見られず、逆に粗度が自生していることがわかる³⁾。

(3) 圧延能率の向上

ワークロール研削時の初期粗度は初期摩耗の終了した後に最適な摩擦係数が得られるように設計されているため、従来のワークロールではロール組み入れ直後は圧延潤滑性に劣り圧延速度をあげることができなかった。しかしながら、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粗度にする事が出来る。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. 5に最終スタンドの圧延距離と圧延速度の推移を示す

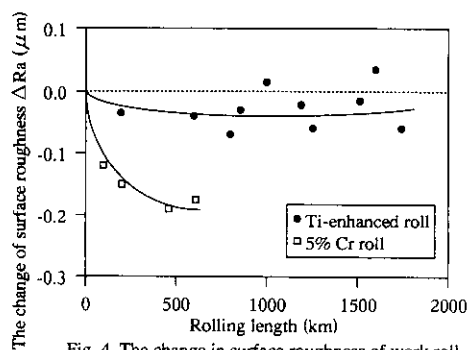


Fig. 4 The change in surface roughness of work roll at finishing stand

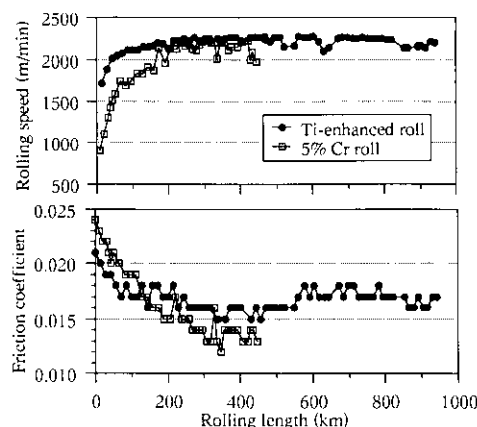


Fig. 5 The change in rolling speed and friction coefficient during rolling length

が、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。

3.3 超高速圧延時の圧延挙動

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為、摩擦係数は低下する。しかしながら、高速圧延状態においてはロールバイト入口のロール温度の上昇とともに圧延油の温度も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が予想される。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操作上、圧延速度を決定する上で重要となってくる。

しかしながら、先に述べたような圧延潤滑の向上対策の効果により2800 m/minの高速圧延が可能となった。Fig. 6に圧延速度と最終スタンドのロールバイト内の摩擦係数の関係を示す。ワークロールの圧延長さが400 kmを超えた材料では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、高圧下率材の過酷な条件下でも2000 m/min以上の領域で摩擦係数の上昇を小さく抑えることが可能となった。

3.4 高速圧延技術の確立における生産性の向上

これまで述べてきたように、プレートアウト性に優れた圧延油及び耐摩耗性ワークロールの開発による圧延潤滑改善を行った結果、Fig. 7に示すように被圧延材のゲージダウン化が進行したにもかかわらず、圧延能率を向上させることができた。このため生産量も安定して高水準を維持することができた。

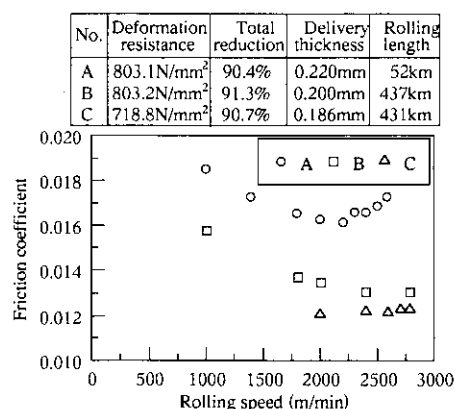


Fig. 6 Relation between rolling speed and friction coefficient

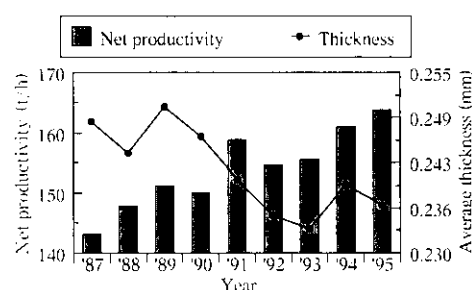


Fig. 7 Change of net productivity

4 板厚精度向上技術

4.1 板厚精度向上手段の効果予測

バックアップロールに油膜軸受を用いていた従来の出側板厚変動のFFT分析結果をFig. 8に示す。定速圧延部での板厚変動は、各スタンドバックアップロールの偏心が影響していることがわかる。これに対し、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原因である。

今回板厚変動向上手段として定速圧延部ではバックアップロール軸受の改造と主機の速度応答性（以後 ω_c とする）向上を、加減速部では主機 ω_c 向上を考え、これらの効果を圧延機のダイナミックシミュレータを用いて検討した。

まず、定速圧延部の板厚精度向上の検討においては、バックアップロール軸受を油膜軸受とした場合とローラーベアリングとした場合の2ケースで行った。油膜軸受はテーパネックであり、圧延中の受圧部と研削時の基準部が異なるため偏心量低減には限界がある。しかしローラーベアリングはストレートネックであり、圧延中の受圧部と研削時の基準部を一致させられるために偏心がきわめて少なくできる。

定速圧延部シミュレーション結果をFig. 9に示す。油膜軸受の場合、 ω_c の向上によって板厚精度は向上するが、板厚精度は $\pm 2.5\%$ が限界である。これに対し、ローラーベアリングの場合では、 $\pm 1.0\%$ 以下の板厚精度を達成できる。ローラーベアリングはロール偏心が少ないためトルク外乱を生じにくく、板厚精度はモータの応答性とは無関係に向上することがわかる。定速部の板厚精度向上には、バ

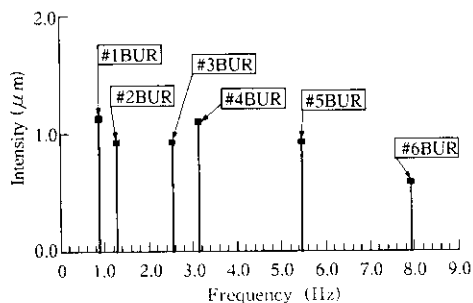


Fig. 8 FFT of delivery gauge with all stands oil film journal BUR

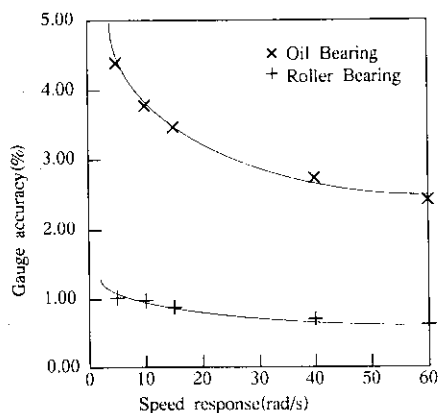


Fig. 9 Effect of gauge accuracy by speed response at uniform speed part

ックアップロール軸受のローラーベアリング化がきわめて効果が高いといえる。

次に加減速部の板厚精度向上を検討した。加減速による板厚変動のみを考慮するため、ロール偏心外乱は与えていない。速度制御系を高応答化するとトルク外乱に強い系となるため、加減速時の摩擦係数変化による速度変動を抑制し、結果として各スタンドの揃速性不良による張力変動を小さくすることができる。

シミュレーション結果をFig. 10に示す。この結果より、 $\omega_c = 40$ rad/s以上とすることにより、板厚精度は大幅に向上し、加減速部板厚精度 $\pm 1.5\%$ 以下を達成できる。加減速部の板厚精度向上には、速度制御系の高応答化が有効であるといえる。

以上の結果から、バックアップロール軸受のローラーベアリングと主機速度制御系の $\omega_c = 40$ rad/s以上の高応答化が可能なACモータを採用することにより、定速部板厚精度 $\pm 1.0\%$ 以下・加減速部板厚精度 $\pm 1.5\%$ 以下が達成可能であると推察される。

4.2 バックアップロール用ローラーベアリングの適用

4.2.1 バックアップロール軸受の設計

(1) ローラーベアリングの寿命予測

2 TCMは、最終スタンドの圧延速度が2800 m/minの高速に達するため、従来タイプの標準的なローラーベアリングを用いた場合には、極めて短寿命のバックアップロール軸受になることが想定される。ローラーベアリングの寿命は、以下の式で計算できる⁹⁾。

$$L_n = (Cr/F)^{10/3} \cdot 10^6 / (60 \cdot N) \quad \dots\dots\dots (1)$$

L_n : 軸受寿命(h)

F : 軸受ラジアル荷重(kgf)

N : 回転数(rpm)

Cr : 基本動定格荷重 $Cr = f \cdot (4 \cos \alpha)^{7/9} \cdot Z^{3/4} \cdot D^{29/27} \cdot l^{7/9}$

f : 係数

α : 呼び接触角

Z : 1列当りのころ個数

D : ころ平均径(mm)

l : ころ有効長さ(mm)

(1)式から、寿命を延ばすにはベアリングの寸法を拡大し、基本動定格荷重を大きくすることが必要である。これは軸受内外径差を拡大することであるが、ロールネック強度面を考慮して、外径と軸受幅を拡大した。ショックの強度低下については

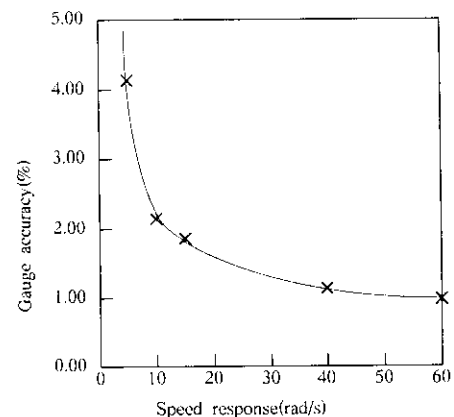


Fig. 10 Effect of gauge accuracy by speed response at speed reduction part

FEM 解析で検討し、チョック各部のサイズを決めた。

(2) シールの構造

ベアリング寿命等の性能を計算通り確保するためには、使用環境にある水準以上に保たなければならない、シール性の確保は重要である。また 2 TCM バックアップロールのシールは、シール部周速が 30 m/s に達する非常に過酷な条件下にあるため、シールと軸の材質及び潤滑を十分検討し、Fig. 11 に示すような 3 段構造に決定した。またシール材質はすべてフッ素ゴムを採用し、軸側（フィレットリング）は硬質クロムメッキを施して耐摩耗性をアップさせた。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。

(3) 潤滑システム

高速圧延機のロール軸受発熱抑制のためには、適切な軸受潤滑システムを設計する必要があるため、本バックアップロール軸受の潤滑は強制潤滑方式とした。さらに、設備信頼性を向上するため、今回新たに大容量の異物除去フィルターとベアリング異常監視装置を取り付けた。

大容量異物除去フィルターは、油清浄度向上を目的にしたもので、軸受部のシールを強化しても軸受内部からの摩耗粉発生等による潤滑油への異物侵入は免れず、それによる寿命低下を防ぐためのものである。一方ベアリング異常監視装置は、軸受温度計、潤滑油の供給圧力計と流量計を全ロール軸受に取り付けて常時監視できるようにし、設備の安定化を狙ったものである。本潤滑システムを Fig. 12 に示す。

4.2.2 ローラーベアリング化後の状況

ローラーベアリング化後の 2 TCM 出側板厚 FFT 分析結果を Fig. 13 に示す。バックアップロールの回転周波数は殆どなくなり、厚み変動の振幅はローラーベアリング化前の 1/2 に改善された。

4.3 AC モータ化による加減速部の板厚精度向上

4.3.1 ドライブシステムの改造

AC モータは DC モータと比べ、構造上整流による制約がないため $\omega_c = 40 \text{ rad/s}$ 以上を達成でき、メンテナンスフリーの点においても優れている。

モータのドライブシステムには GTO（ゲートターンオフサイリス

タ）インバータを採用した。この方式は電圧と電流の位相を独立して制御できるため電源力率 1.0 制御が可能である。また発生する高調波は周波数が一定のため、高調波補償設備も簡略にすることができる⁷⁾。加えて、インバータによる制御は負荷の運転周波数を電源周波数に依存することなく決定できるため、ミル速度の増速が可能となる。

4.3.2 高応答化への課題検討

(1) 駆動系機械設備の改造

従来の駆動系はツインドライブエレタイ方式であり、 ω_c を向上させるには、中間軸の剛性が不十分であった。そこでビニオンスタンドを更新してシングルドライブメカタイ方式とし、中間軸の剛性を高めて高速度応答に対応できる設計とした。更新前後の 2 スタンドの周波数応答特性（ボード線図）を Fig. 14 に示す。機械系剛性の向上により、機械共振周波数・反共振周波数を従来の 1.5 倍とすることが出来た。

(2) トルクリップル

GTO インバータは PWM（パルス巾変調）インバータ特有のトルクリップルが発生する。GTO インバータ採用にあたり、トルクリップルが板厚精度に与える影響が最大の懸案事項であった。

そこでトルクリップルの板厚精度に対する影響をシミュレーションした結果、モータが発生するトルクリップル量を 0.5% 以下とすることで、板厚変動量が最大となる領域でも $\pm 0.06\%$ 以下となり、実際の圧延速度条件等を考慮すれば $\pm 0.01\%$ 以下に出来ることを確認した⁸⁾。

(3) バックラッシュ

モータトルクをロールへ伝達する過程で、ビニオンスタンドやカップリングがあるため、バックラッシュが存在する。バックラッシュの影響でギアの噛み合いが外れた場合、モータトルクがロール側に伝達されない時間を生じる。この現象を考慮したシミュレータを用いて加減速時の応答、圧延時の挙動を解析した。

圧延時などの重負荷時には減速時、ギアの噛み合いが外れないためバックラッシュの影響はないが、空転などの軽負荷時には、ギアの分離または再接続によって引き起こされるバックラ

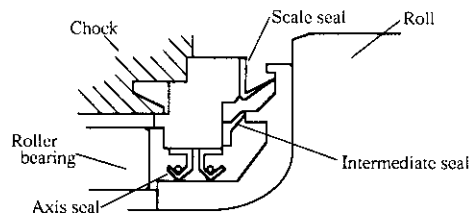


Fig. 11 Structure of seal in roller bearing BUR

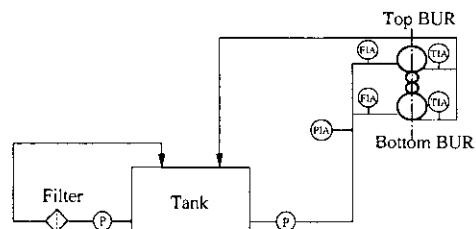


Fig. 12 Lubrication system of roller bearing BUR

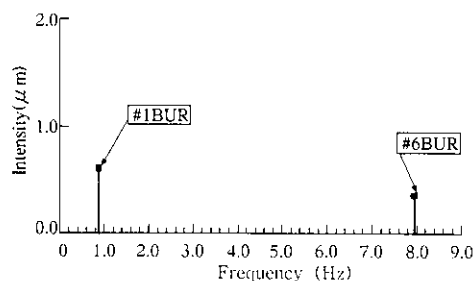


Fig. 13 FFT of delivery gauge with all stands roller bearing BUR

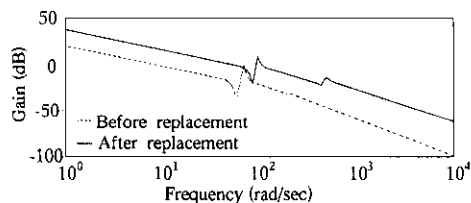


Fig. 14 Bode diagram of No. 2std speed control loop

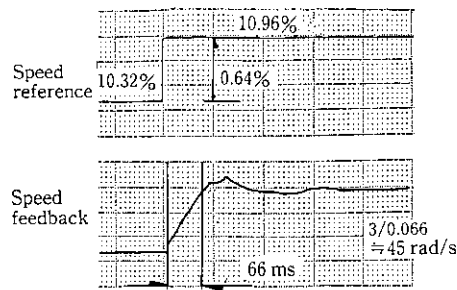


Fig. 15 Speed response of No. 2std

ッシュの影響による遅れを生じる。このため、ギアが再接続したときは、過大負荷トルクがモータにかかることが判明した。これより、過電流防止の観点からバックラッシュの許容量を算出し、設計に反映させた。また、ギア間の剛性が低いケースでは、速度応答は全体的に遅れを生じるため、オーバーシュート量を10%以下に抑えながら目標の速度応答 ($\omega_c = 45 \text{ rad/s}$) を達成できる十分なギア間剛性を確保した。

4.4 稼働後の実績

2 スタンドを例にして、 ω_c の向上を示す。従来は $\omega_c = 8 \text{ rad/s}$ であったが、更新後は Fig. 15 に示すように $\omega_c = 45 \text{ rad/s}$ を達成した。その結果各スタンド間の捕速性も1%以下に向上し、Fig. 16 に示すように板厚精度も大幅に向上した。

5 結 言

- (1) 圧延油のプレートアウト性を向上させるためにカチオン性高分子凝集剤を開発し、圧延油中の無機の夾雑物、リン脂質、遊

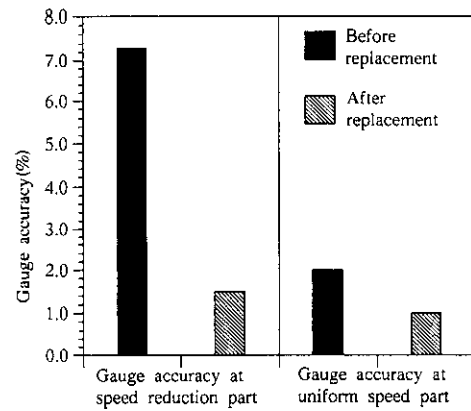


Fig. 16 Gauge accuracy at each speed part before replacement and after replacement

離脂肪酸によりその凝集力が左右されない圧延油の開発を行い、圧延潤滑性が著しく向上した。

- (2) 安価でかつ研削性に優れた Ti 添加型耐摩耗性ワークロールの開発により、常時最適なロール粗度にて圧延が可能になり、ロール処理量に関わらず最高圧延速度での操業が可能になった。
- (3) 高潤滑性圧延油、耐摩耗性ワークロールの開発により 2800 m/min での圧延においても著しい摩擦係数の上昇は見られず、2800 m/min の圧延が可能であることを確認した。
- (4) 定常圧延部の板厚精度向上にはバックアップロールのローラーベアリング化の方がミルモータの高応答化より効果が有り、 $\pm 1.0\%$ 以下の板厚精度を得ることができた。
- (5) 加減速中の板厚精度向上にはミルモータの高応答化が効果的であり、主機速度応答 $\omega_c = 45 \text{ rad/s}$ の高応答化で $\pm 1.5\%$ 以下の板厚精度を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 斎藤輝弘, 山田恭裕, 占角文雄, 竹沢幸平, 久我嘉信: 材料とプロセス, 7(1994)2, 446
- 2) 村元 祐, 八角忠明, 松本正次, 清野芳一, 下山雄二, 大西建男, 三辺達郎, 岡本昭治: 材料とプロセス, 1(1988)2, 539
- 3) 金子智弘, 山田恭裕, 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
- 4) 小林 真, 山田恭裕, 占角文雄, 植田憲治, 青木賢一: 材料とプロセス, 4(1991)2, 470
- 5) S. Shimizu, K. Aoki, M. Kobayashi, T. Saito, Y. Yamada, and F. Kosumi: *ISIJ International*, 32(1992)11, 1238
- 6) 岡本 謙, 竹沢幸平, 斎藤輝弘: 機素潤滑設計に関する問題と改善事例, No. 940-49(1994) (日本機械学会)
- 7) 長南富雄, 松竹 貢, 山品光則, 高橋潤一, 本山幸彦: 日立評論, 75(1993), 31
- 8) 増田博昭, 長南富雄: 電気学会 金属産業・産業電力電気応用合同研究会(1995), MID-95-30, IEA-95-8