
圧延プロセスにおける張力制御システム

Application of Tension Control System to Rolling Plant

石川 好蔵 (Kozo Ishikawa) 土井 克彦 (Katsuhiko Doi) 佃 一二三 (Hifumi Tsukuda) 岩本 周治 (Shuji Iwamoto)

要旨：

当社における鉄鋼圧延ミルラインおよびプロセスラインの張力制御システムの適用結果につき報告した。熱間圧延仕上ミルでは、ルーパー制御シミュレーション解析を行った上でルーパー制御に多変数制御理論を応用し、システムの非干渉化技術を確立した。これにより板幅精度の向上を図ることができた。冷間圧延ミルでは、機械系軸振動を抑えながら主機速度応答 60rad/s の高応答ドライブシステムを開発し、板厚精度向上が図られた。また、プロセスラインにおいては、各ロールの交流モーター速度制御および最適張力分布を確保する制御構成により品質向上、高速安定通板に大きな効果があった。

Synopsis：

The results of applying a strip tension control system to the steel rolling mill and process line in our company are herein reported. In the hot strip mill, the authors established a de-coupling control technique by applying the multi-variable control theory to the lopper control system, based on the computer simulation analysis, and thus improvement in accuracy of strip width was achieved. For the high-speed response main motor drive system in the cold tandem mill, a speed response (ω_c) of 60 rad/s was developed, while suppressing shaft vibration by interaction between mechanical and electrical control systems. The authors achieved improvement in accuracy of strip gauges. As a result of introduction of all the AC-motor drive system to each roller and construction of the tension control system which achieves optimum distribution of strip tension, it has become possible to improve production quality and realize high-speed threading without trouble.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Application of Tension Control System to Rolling Plant



石川 好蔵
Kozo Ishikawa
水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(掛長)



土井 克彦
Katsuhiko Doi
水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(課長)



佃 一二三
Hifumi Tsukuda
水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(掛長)



岩本 周治
Shuji Iwamoto
水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(掛長)

要旨

当社における鉄鋼圧延ミルラインおよびプロセスラインの張力制御システムの適用結果につき報告した。熱間圧延仕上ミルでは、ルーパー制御シミュレーション解析を行った上でルーパー制御に多変数制御理論を応用し、システムの非干渉化技術を確立した。これにより板幅精度の向上を図ることができた。冷間圧延ミルでは、機械系軸振動を抑えながら主機速度応答 60 rad/s の高応答ドライブシステムを開発し、板厚精度向上が図られた。また、プロセスラインにおいては、各ロールの交流モーター速度制御および最適張力分布を確保する制御構成により品質向上、高速安定通板に大きな効果があった。

Synopsis:

The results of applying a strip tension control system to the steel rolling mill and process line in our company are herein reported. In the hot strip mill, the authors established a de-coupling control technique by applying the multi-variable control theory to the looper control system, based on the computer simulation analysis, and thus improvement in accuracy of strip width was achieved. For the high-speed response main motor drive system in the cold tandem mill, a speed response (ω_c) of 60 rad/s was developed, while suppressing shaft vibration by interaction between mechanical and electrical control systems. The authors achieved improvement in accuracy of strip gauges. As a result of introduction of all the AC-motor drive system to each roller and construction of the tension control system which achieves optimum distribution of strip tension, it has become possible to improve production quality and realize high-speed threading without trouble.

1 まえがき

鉄鋼圧延プロセス製品の板厚、板幅などの寸法精度のより一層の向上および加工性のすぐれた材質の作り込みを通じ、需要家での歩留り向上、鋼板加工の高速化、自動化などのニーズに対応するため当社においてもさまざまな試みがなされている。この中で、本稿では各種鋼帯製造工程における圧延機間またはプロセスラインロール間での鋼帯張力制御システムについて取り上げた。このシステムにおける張力制御精度・応答は、製品寸法、形状および材質に大きな影響を及ぼし、また、安定操業を達成するための重要管理項目である。近年の新制御理論（主として現代制御理論）、エレクトロニクスデバイスとくにマイクロコンピュータおよびダイレクトデジタル制御（DDC）技術を活用した張力制御システムと本制御による成果につき以下に報告する。

2 圧延プロセスの主要張力制御

各種圧延プロセスにおける張力制御対象とその系を構成している

主要技術および張力制御によりもたらされる製品への影響を Table 1 に示す。張力制御の精度および応答は、圧延プロセスの製品の板厚、板幅および形状の制御と密接な関連を示し、また本制御が、通板性などに代表される安定操業に重要な影響を及ぼしていることが分かる。張力制御の精度および応答は、近年の制御理論の発達、ドライブエレクトロニクスの発展にともないめざましい進歩を示している。

次章から圧延プロセスにおける代表的な張力制御の内容について述べる。

3 多変数制御による熱間圧延仕上ミルのルーパー制御

薄板の熱間仕上圧延機におけるルーパー機構を Fig. 1 に示す。ルーパーは以下の 2 つの機能を持つ。

- (1) 圧延機間ストリップ張力を一定に保ち、寸法精度向上を図ること。

* 昭和61年11月13日原稿受付

Table 1 Strip tension control in steel rolling plant

Rolling plant	Controlled system	Main technique	Purpose (effect on products)
Hot rolling mill	• Looper control system in hot finishing mill • Sheet bar free tension control in hot roughing tandem mill • Looperless control system in hot finishing mill	• Modern control theory (multi-variable control theory)	• Improvement of accuracy in strip dimension • Operation without trouble • Improvement of strip shape
Cold rolling mill	• Strip tension control in cold tandem mill	• High-speed response and high-accuracy speed control in digital ACVV drive system	• Improvement of accuracy in strip gauge • Keeping off defects
Process line	• Strip tension control in helper roll at vertical type furnace • Catenary control in horizontal type furnace	• All ACVV drive system and all DDC system in strip tension control system • High-accuracy catenary control by catenary depth detection	• Keeping off meander • Keeping off heat buckle • Improvement of accuracy in strip width • Improvement of the quality of production • Stability of strip threading

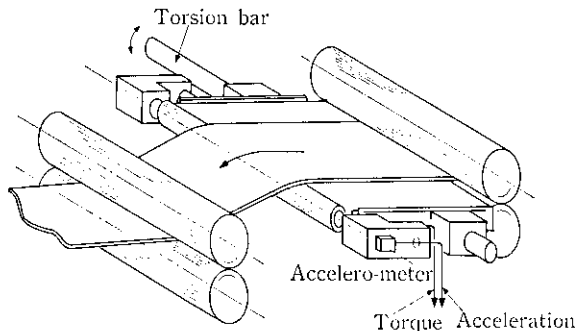


Fig. 1 Schematic diagram of looper system

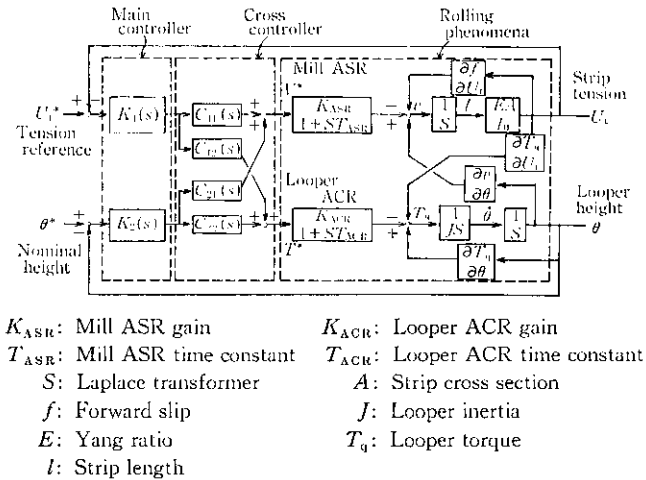
(2) 操業安定性 (通板の安定性) を確保するため、圧延機スタンド間のストアード・ストリップ長と張力を一定に保つこと。

ルーパースystemにおける制御量はルーパ高さ (θ) およびスタンド間張力 (U_i) であり、操作量はルーパ電動機トルク指令 (T^*) および前段側圧延スタンド主電動機速度指令 (V^*) である。

ルーパ高さやスタンド間張力の間には圧延現象に依存する相互作用が存在するため、従来はルーパ高さ θ のみに着目し制御を行ってきた。このため、張力に対する制御としては制御精度が悪く、製品寸法・形状向上に対する阻害要因となっていた。これを解消する手法として、多変数制御理論を応用し、システムの非干渉化を行う技術を開発した^{1,2)}。

この過程においては、熱間圧延仕上げミル7スタンドシミュレーションモデルを開発し、本モデルと実機の検証および新制御理論の効果把握を行いながら実機適用を推進した。以下に詳細を示す。

ルーパ制御系を伝達行列の形で示すと、



K_{ASR} : Mill ASR gain K_{ACR} : Looper ACR gain
 T_{ASR} : Mill ASR time constant T_{ACR} : Looper ACR time constant
 S : Laplace transformer A : Strip cross section
 f : Forward slip J : Looper inertia
 E : Yang ratio T_q : Looper torque
 l : Strip length

Fig. 2 Block diagram of looper system (multivariable controller)

$$\begin{bmatrix} U_i \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^* \\ T^* \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} V^* \\ T^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。Fig. 2 のブロック図に示すようなクロスコントローラ $C(s)$ を設置し、 $G(s)$ と $C(s)$ が対角行列となるように $C(s)$ を選定することにより式 (1) に示す $g_{12}(s)$ $g_{21}(s)$ の相互干渉項を非干渉とすることができる。すなわち、多変数制御の技術確立により、ルーパ高さやスタンド間張力の相互干渉を意識することなく制御が可能となる。本システムを水島製鉄所熱間圧延工場および千葉製鉄所の No. 2 熱間圧延工場仕上げミルのルーパ制御システムに適用し、スタンド間張力制御の精度と応答が向上し製品板幅精度のコイル内バラツキが 1.2 mm (板幅 1101~1350 mm、板厚 3.0~4.0 mm での平均値) 減少する効果をあげている。

4 交流可変速ドライブによる高応答・高精度速度制御と冷間圧延タンデムミルの張力制御

冷間圧延タンデムミルにおける板厚精度については低速通板時および加減速時に問題があった。これはスタンド間マスフロー変動が発生し、スタンド間張力変動によるゲージ (板厚) 変動が主たる要因である。このため、近年、直流モータドライブの全面デジタル制御技術の開発により揃速性の向上と低速域での速度制御精度向上により、板厚精度向上に大きな効果があった。またミルの速度変動を極力発生させない連続ミル化により寸法精度向上に歩を進めていた³⁾。しかし、より一層の板厚制御向上へむけ、高精度マスフロー AGC (自動板厚制御) の技術確立を試行中である。これを実現させるため冷間圧延タンデムミル主機駆動モータの応答性の向上が必要となった。

現状の直流モータシステムにおける問題点として、

- (1) 整流子の電流増加率制限 (di/dt 制限)
- (2) 小径ロール採用による高速化による駆動系と機械系との軸振動があり、これを解決し張力制御応答向上をめざし、冷間圧延タンデムミル主機に循環電流正弦波サイクロコンバータ式誘導電動機駆動システムを開発した⁴⁾。とくに、応答性向上にともなう電気制御系と機械軸固有振動との共振現象の発生の問題を解決するため、新制御理論を用いた MFC (Model Following Control) を導入した。これにより軸振動を抑制するとともに速

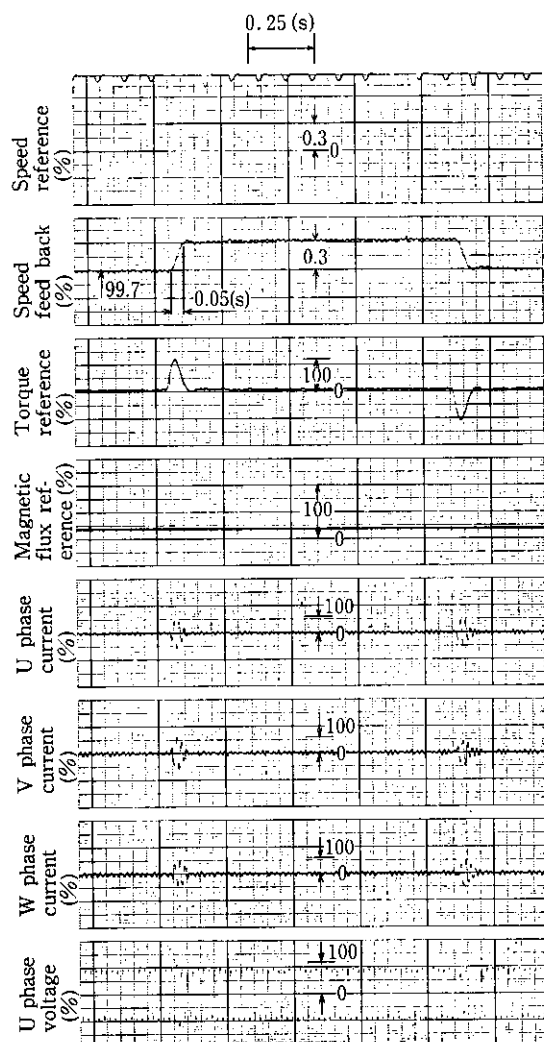


Fig. 3 Actual charts at cold tandem mill

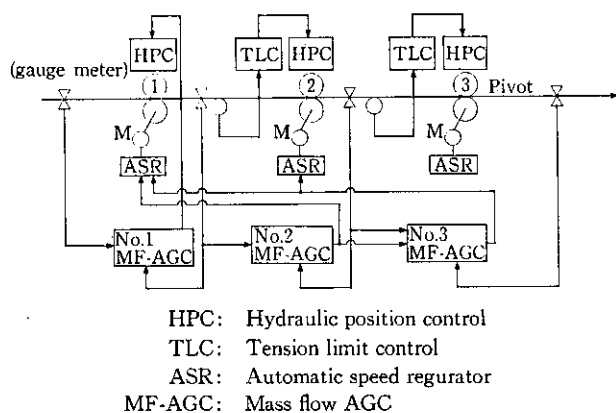


Fig. 4 Mass flow AGC system configuration

度応答 $\omega_c=60 \text{ rad/s}$ という飛躍的応答向上を果たした。

今回開発の冷間タンデムミルの速度応答測定例を Fig. 3 に示す。この高応答ドライブシステムを主要技術として Fig. 4 に示す高精度マスフロー AGC の構築が可能となった。この効果を確認するため Table 2 に示すシミュレーション条件にて主機速度応答の差異による 3 スタンド出側板厚変動率の計算を実施した。Fig. 5 に本結果を示す。従来の主機速度応答 10 rad/s に比べ 60 rad/s では板厚変動率が半減する大きな効果があり板厚精度向上が可能となった。

Table 2 Simulation conditions of cold tandem mill

Item	Contents
Strip thickness	2.3 → 0.667 mm
Strip width	1 250 mm
Line speed (last stand)	700 m/min
Disturbance of incoming strip thickness	$\Delta H_1 = \Delta H_a + \Delta H_b$ $L_m = L_{ma}, L_{mb}$
	$\{L_{ma}=30 \text{ m}, \Delta H_a=0.08 \text{ mm}\}$ $\{L_{mb}=4.5 \text{ m}, \Delta H_b=0.01 \text{ mm}\}$ H_i : No. i stand incoming strip thickness h_i : No. i stand outgoing strip thickness L_{ma} : Cycle of disturbance in case a Δh_i : Deviation of No. i stand outgoing strip thickness

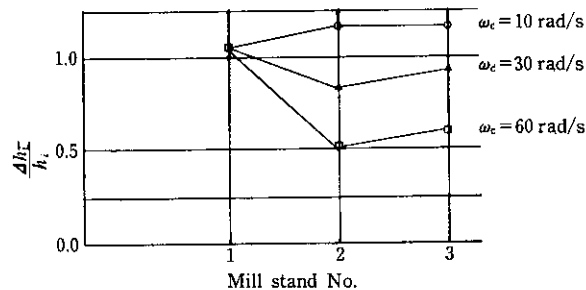


Fig. 5 Simulation result of gauge accuracy

5 プロセスラインにおける張力制御

薄鋼板の最終ラインである表面処理焼鈍炉連続化プロセスラインは、同一ライン内に多くの工程を包含し、かつ高速化して生産性を高めている。この連続した各工程プロセス間の、最適張力（とくに炉内張力）を一定に、正確に保つことが、連続ラインの操業安定と品質の作り込みに最も重要な制御項目となっている。本章では、プロセスラインにおける最新張力制御方式の例として連続焼鈍炉を取り上げる⁹⁾。水島製鉄所の連続焼鈍炉 (KM-CAL) においては、炉内最適張力制御のため炉内ロールはすべて個別交流モータのトランジスタ PWM (パルス幅変調) インバータ方式のベクトル制御 ASR (速度制御) を採用し、全ロールをデジタル速度モニタリング制御することにより正確な揃速性を確保している。

また、炉内各セクションでの鋼板最適張力分布を確保するための負荷平衡制御を全ロールに適用し、この制御ゲインを DDC マイコンが演算することにより、各セクション間の張力勾配パターンを随時調整可能としている。当制御システムにより速度変動時の張力変動を $\pm 50 \text{ kg}$ 以下に抑え高速低張力操業が可能となった。この高精度張力制御システムによりヒートバックル、蛇行防止など製品品質向上に大きな効果をあげている。

また、水平炉におけるカタナリー制御では従来から用いられている張力メーターに替り、光学式センサーによるカタナリーループ検出とマイクロコンピュータを組み合わせた高応答のカタナリー制御を開発中である。

6 むすび

圧延プロセス，とくに薄板制御プロセスにおける最新張力制御システムについて述べた。この結果は以下のとおりである。

- (1) 熱間圧延仕上ミルルーパーシステムに多変数制御理論を適用しスタンド間張力変動防止によりコイル内板幅変動の抑制が達成できた。
- (2) 冷間タンデムミル主機速度応答 60 rad/s 達成 および高精度マ

スフロー AGC の構築により板厚変動率の半減が可能である。

- (3) 連続焼鈍ラインにおいて炉内ロールの全面交流化および最適張力分布を確保する張力制御構成により高速，低張力操作が可能となった。

これらの制御は，DDC マイクロコンピュータ，ドライブエレクトロニクス，制御理論，圧延現象解析および機械解析の総合技術であり，今後より一層の制御精度および応答向上により，より良い製品をユーザーに提供していく所存である。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会編：「板圧延の理論と実際」，[日本鉄鋼協会]
- 2) 小寺嘉一，渡辺文夫：「熱間圧延機ルーパーにおける多変数制御の応用」，第22回自動制御連合講演会，(1979)，305-306
- 3) 土井克彦，佃 一二三，山本和明：「全デジタル速度制御」，鉄と鋼，68 (1982) 5，S387
- 4) Hiromi Hosoda, Shinji Tatara, Ryouichi Kurosawa, Hideo Hakata and

Katsuhiko Doi: "A New Concept High-Performance Large-Scale AC Drive System—Cross Current Type Cycloconverter FED Induction Motor with High-Performance Digital Vector Control", IEEE Trans., (1986), p. 229~234

- 5) 山本博正，島田雅雄，坂本軍司，柳島章也，下山雄二：「鋼帯連続焼鈍炉ハースロールの交流可変速制御」，川崎製鉄技報，14 (1982) 2，58