

近年、鉄鋼業では電炉法による薄板生産、エンドレス圧延に代表される熱延・冷延工程でのプロセスの連続化、寸法・品質の高精度化など、製品製造プロセスの高度化・多様化が続いている。当社はこれらプロセスの変化や品質への要望に対し、加熱、圧延、冷却などのプロセスをモデル化することによりプロセスの挙動を正確に把握し、これを制御につなげることが重要との考えに基づき、多くのプロセス制御機能を開発している。またプラントの最適化を目的に、従来の古典制御理論に加え現代制御理論や知的制御技術の実機適用も進めている。

Production processes in metal industries have recently become more sophisticated and complex, such as strip production using scrap and continuous rolling of hot and cold strip. To meet these requirements, it has become more important to analyze the dynamics of processes like heating, rolling and cooling by modeling, and to utilize the results in process control.

In addition to the classic control theory, we have applied modern control theory and advanced intelligent control techniques to control real production, so as to optimize plant operation and control.

1 まえがき

近年の鉄鋼業の大きなトピックの一つとして電炉 HOT (Hot Strip Mill) の急激な増加がある。電炉 HOT は電気炉一連続製造設備一圧延ラインの連続一貫プロセスであり、従来の高炉 HOT とは異なった特質をもつ。当社はコイルボックスを備えた東京製鉄(株)ホットストリップミル、トンネル炉および HTT (Heated Transfer Table) を備えた NS/BHP 社ホットストリップミルなど、いろいろな形態の電炉 HOT に対するプロセス制御技術を開発している。

一方高炉 HOT では、板厚 1 mm 以下の薄板熱延鋼板生産、歩留りおよび操業性の向上をねらったエンドレス圧延⁽¹⁾が注目されている。エンドレス圧延は当社が電気品・制御システムを納入した川崎製鉄(株)で 1996 年に実用化された。その後も各鉄鋼メーカーで実用化が検討されており、プロセス制御についても種々の技術課題を克服するため開発を進めている。

プロセス制御の手法については、計算機・PLC (Programmable Logic Controller) の高性能化および汎(はん)用制御解析ソフトウェアの普及により、従来の古典制御理論に加え現代制御理論の適用が容易となり、 H_{∞} (H-infinity) 制御、ILQ (Inverse Linear Quadratic) 制御などの実機適用を進めている。

圧延機の設定計算およびそれに用いる数学モデルについては、三次元解析手法を用いた理論的な現象解析と EWS (Engineering Work Station) や PC (Personal Computer) による大量かつ高速な実機データ採取と解析を効果的に結合し、

より高精度化を進めている。

これらについて当社の技術および取り組みを紹介する。

2 HOT のプロセス制御

図 1 に高炉 HOT のライン構成例および当社が取り組んでいるプロセス制御項目を示す。このラインは川崎製鉄(株)千葉製鉄所の新熱間薄板圧延設備であり、エンドレス圧延を実現するためにクレードルロールが 3 基のシートバーコイラ、ウェルダおよびストリップシャーが備えられている。

ウェルダでの確実な接合と接合点でのパススケジュールの変更を安定に行うために、プロセス制御技術としてはミルペーシング、加熱炉燃焼制御および仕上圧延機における走間板厚変更制御が特に重要となる。

一方電炉 HOT の特徴的なプロセス制御としてトンネル炉の設定・制御機能があるが、粗圧延機からダウンコイラまでは高炉 HOT と同じ機能が基本的に適用できる。

以下に主なプロセス制御機能について述べる。

2.1 ミルペーシング

ミルペーシングは加熱炉からスラブを抽出する時刻あるいは抽出タイミングを決定する機能である。

スラブ 1 本ごとに圧延するいわゆるバッチ圧延では、圧延工程上のネックとなる設備の運転状態から次材の抽出タイミングを決定するなどの簡単な手法も採用できる。しかしエンドレス圧延では、接合が確実に行えかつライン上での滞留時間を最小にする後行材の加熱炉抽出時刻を決定する必要があり、圧延時間の正確な予測が不可欠である。圧

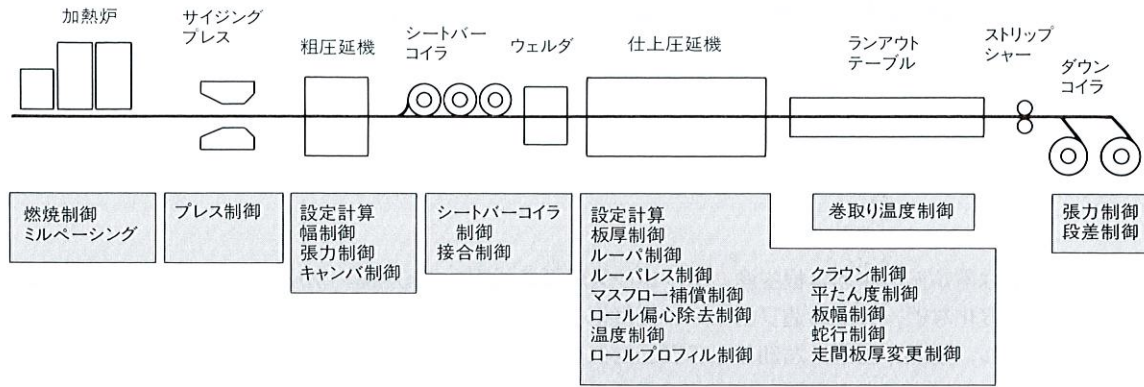


図1. HOTの主なプロセス制御項目 当社が開発し、実機に適用している主なプロセス制御項目であり、品質および生産性の向上と操業の安定化に寄与している。

Process control items in hot strip mill

延時間予測の代表的な手法として、圧延ラインを構成する圧延機、テーブル、センサなどの設備と圧延材の動きを模擬するシミュレータが用いられる。この手法のポイントは操業方法や設備の変更に対する柔軟性である。従来はとすると操業方法（運転方案）と設備情報が密着したシミュレータとなり、柔軟性に欠けるミルペーシングシステムとなっていた。

当社はこの課題に対しオブジェクト指向的な考えを導入したミルペーシングシステムを開発した。図2にこの方式の構成を示す。圧延ラインは圧延時間の計算に必要なテーブル、圧延機、センサなどを記述するオブジェクトの集合とし、各オブジェクトはその設備固有の動作の模擬と状態情報の保持を行う。運転方案では各設備の速度設定、すなわち設備の動きを定義しており、動作条件とシーケンス情報で構成されている。また圧延材はサイズ、圧延スケジュールなど圧延材ごとの情報、コントローラは各設備の状態と運転方案を用いて各設備へ動作指令を与える。

このシステムは操業方法や設備の変更に対応でき、

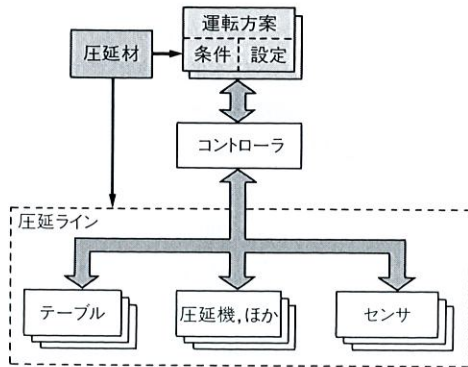


図2. 圧延時間計算用シミュレータ オブジェクト指向的な考えを応用したことにより、操業方法や設備の変更に柔軟に対応できる。

Constitution of simulator for calculating rolling time

しかも従来に比べ大幅な計算時間の短縮が可能である。

2.2 加熱炉燃焼制御

加熱炉でスラブを高温に加熱するための消費エネルギーは膨大であり、加熱炉の省エネルギーは重要な課題である。特にエンドレス圧延時は、指定された抽出時刻までにスラブを目標温度に確実に加熱する、精度の高い燃焼制御技術が要求されている。当社は加熱炉燃焼制御の開発に早くから取り組み、HOTや棒鋼圧延機の加熱炉に適用してきた。

ここでは、スラブの最適な昇温曲線（スラブの加熱炉内位置とスラブ温度との関係を表す曲線）を作成するシミュレータについて述べる⁽²⁾。

このシミュレータはスラブ温度計算モデル、消費する燃料流量を求める炉内熱バランスモデル、昇温曲線最適化計算の三つの計算機能で構成される。

スラブ温度計算モデルでは、スラブを支えているスキッドと接触している部分、および接触していない部分のスラブ温度を計算しており、スキッドによる温度低下量がある値以下に抑制する昇温曲線を求めることができる。

昇温曲線最適化計算は省エネルギーを目的に(1)式に示す評価関数 J を設定し、種々の制約条件を満足させる昇温曲線を線形計画法により求めている。

$$J = \sum_{i=1}^m F_i \rightarrow \min. \quad (1)$$

F_i : 炉帯 No. i の燃料流量

m : 炉帯数

図3は線形計画法による昇温曲線の計算例であり、オペレータ操業と比べ約6%の省エネルギーとなる結果を得ている。現在、このシミュレータの技術をベースにトンネル炉の設定制御システムの開発も進めている。

2.3 仕上圧延機の設定計算

圧延材先端部の板厚と温度が目標値になるよう各スタン

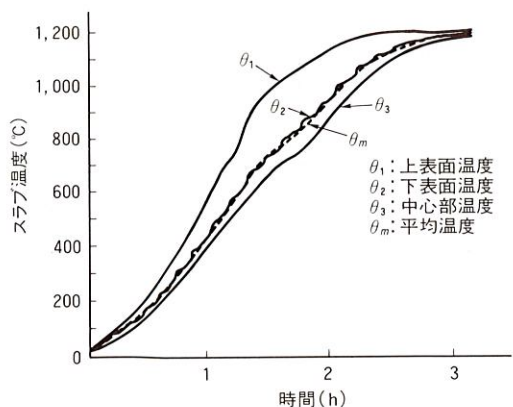


図3. スラブ昇温曲線 線形計画法の適用により、省エネルギーを実現する最適なスラブ昇温曲線が得られる。

Example of slab heat pattern

下のロール開度やロール速度設定値を決定することが設定計算の主な役割であった。しかし、厳しい品質要求に対応するため、圧延材の長手方向全長にわたる温度、圧延荷重、速度設定値などの予測、ダイナミック制御に対するパラメータの設定、走間板厚変更に対する各種設定値の計算など、多くの機能が設定計算に付加されつつある。特に板クラウンや板平坦度および操業の安定性を考慮した各スタンドの負荷配分、すなわちパススケジュールの決定は設定計算の重要な機能の一つである。

当社は各スタンドの出側板厚をキーとする方法ではなく、圧延荷重の配分に基づくパススケジュール計算法を開発し多くのプラントに適用している⁽³⁾。

仕上圧延機各スタンドの荷重比 γ_i を(2)式で定義する。

$$\gamma_i = \frac{P_i}{P_{\max.}} \quad (2)$$

$$P_{\max.} = \max.[P_1, P_2, \dots, P_n] \quad (3)$$

ここで、 P は圧延荷重、添字 i および n はそれぞれスタンド No. と最終スタンド No. である。

(2)式で与えられる荷重比を実現する各スタンドの出側板厚を決定する。この方式の特長として次の三つがある。

- (1) 板クラウンに直接関係する圧延荷重をパラメータとしているため、クラウン設定との親和性が良い。
- (2) 荷重比がオペレータの感覚と合い、オペレータによるパススケジュールの変更が容易である。
- (3) ダミースタンド圧延のパススケジュール計算が容易である。

2.4 走間板厚変更制御

エンドレス圧延では、接合部でのパススケジュールの変更と同一バー内での板厚変更が行われる。当社は同一バー内での走間板厚変更制御を84年に新日本製鉄(株)広畑製鉄所熱間仕上圧延機で開発し、ホットストリップミルにお

ける走間板厚変更制御の技術力を蓄積してきた。

接合部でのパススケジュールの変更では、オフゲージ量を短くすることはむろんのこと、板破断を防止するため接合部にかかる張力の制御方法や張力変化量を小さくする後行材のパススケジュール決定方法など、新たな機能を付加している。

走間板厚変更制御は板厚 1.0 mm 以下の薄板を製造する場合に有効な技術であり、電炉 HOT への適用も検討している。

2.5 ルーバ制御

ルーバの安定化は操業の安定性と品質制御上非常に重要である。当社はルーバ制御に対し非干渉制御や LQ (Linear Quadratic) 制御を適用しルーバの安定化を図ってきた⁽²⁾。その後もルーバ制御性能をさらに向上するため、 H_∞ 制御理論および ILQ 制御理論を適用し良好な結果を得ている^{(5),(6)}。特に ILQ 制御は、次の特長があり、実機への適用が容易である。図4に従来の PI (比例、積分) 制御と ILQ 制御の比較データを示す。

- (1) 極配置を指定することで、閉ループ系の応答を指定できる。
- (2) 制御ゲインは制御対象モデルの変数と指定応答変数を含んだ数式で表現できる。
- (3) ゲイン計算に特別なツールを必要としない。

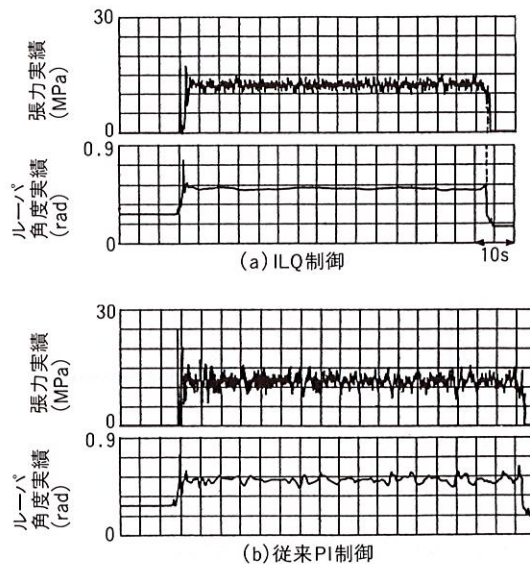


図4. ルーバ ILQ 制御の適用結果 従来型 PI 制御に比べ ILQ 制御では、ルーバ角度および張力の変動が 1/3 以下に低減している。

On-line results of looper ILQ control method

3 タンDEM コールドミルの板厚・張力多変数制御

タンDEM コールドミルと酸洗ラインあるいは焼鈍ライン

との連続化の普及は目覚ましく、完全連続式タンデムミルは今や一般的な設備の視がある。このため今後の課題は、完全連続式タンデムミルにおける生産性および品質向上である。特に冷間圧延機の特長である加減速による圧延特性の大幅な変化は、オフゲージ量増加の原因であるとともに、場合によっては板破断を誘発し生産性を阻害する。

当社は圧延速度ごとに最適な圧延状態、すなわちスタンド間張力も含め各スタンドの負荷バランスの最適値があるとの考えから、閉ループ制御でこの実現を試みた。具体的にはILQ制御理論を適用した全スタンド板厚・張力多変数制御の適用である。制御量はスタンド出側板厚と後方張力、操作量はロール開度、No.1スタンド入り側ブライドルロールのトルクおよびロール速度である。全スタンドに多変数制御を適用したことで、圧延状態の変化にロール開度とロ

ール速度がバランス良く操作される。また閉ループ系であるため、制御量である各スタンド出側板厚と後方張力目標値を圧延速度に応じて変更することで容易に最適な負荷バランスを実現できる。

このシステムは東洋鋼板(株)下松工場の完全連続式タンデムコールドミルに適用され、板厚精度の向上と板破断率の低減に寄与している⁽⁷⁾。

図5に従来の板厚制御とこのシステムとを比較した圧延データを示す。

4 あとがき

HOTとタンデムコールドミルのプロセス制御を中心に紹介した。

当社はこれまでの実績に基づく技術に加え、市場のニーズにより多様化する製鉄のプロセス制御を、今後も各ユーザ、機械メーカーと協力して開発していく所存である。

文献

- (1) 今江敏夫, 他: 千葉製鉄所第3熱延工場における高品質製品製造技術, 川崎製鉄技報, 28, 4, pp.21-25 (1996)
- (2) 江連久, 他: 加熱炉のスラブ最適昇温曲線作成シミュレータの開発, 電気学会論文誌D, 116, 12, pp.1220-1229 (1996)
- (3) 告野昌史, 他: 荷重比配分に基づくオンラインパススケジュール計算の実用化, 塑性加工, 37, 430, pp.1207-1212 (1996)
- (4) 関口邦男, 他: 熱間圧延機のルーバ最適多変数制御, 電気学会論文誌C, 108, 1, pp.31-38 (1988)
- (5) 今成宏幸, 他: ホットストリップミル仕上げ圧延機のルーバH ∞ 制御システムの開発, 電気学会論文誌D, 116, 7, pp.777-784 (1996)
- (6) 今成宏幸, 他: ホットストリップミルルーバへのILQ制御の適用, 電気学会金属産業研究会資料, pp.17-26 (1995)
- (7) 関義郎, 他: ILQ理論に基づくタンデム冷間圧延機多変数板厚張力制御の開発, 電気学会金属産業研究会資料, pp.23-28 (1997)

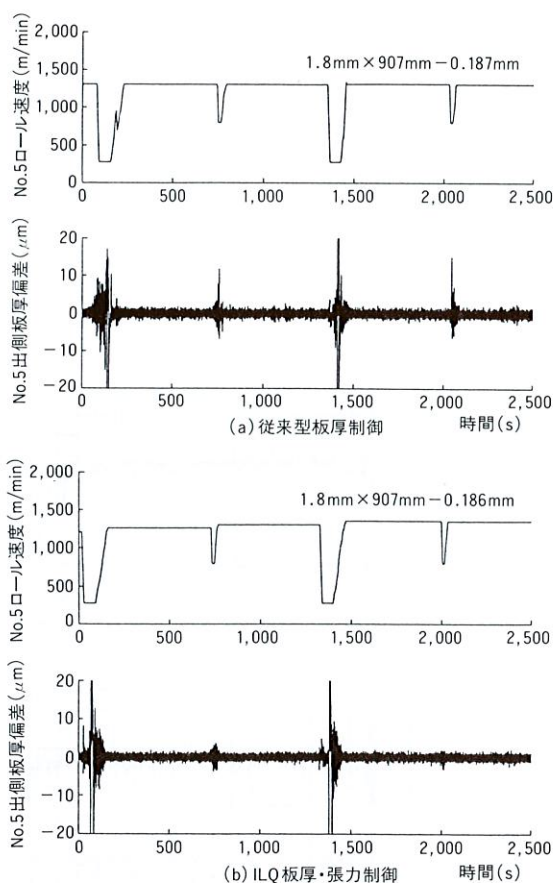


図5. 従来型板厚制御とILQ板厚・張力制御との比較 ILQ板厚・張力制御の適用で、溶接点近傍も含め板厚精度が改善され、板破断率も30%以上低減できた。

Comparison between conventional gauge control and ILQ multivariable control



和田 哲 Satoshi Wada

電機システム事業部 重工システム技術部部长。
鉄・非鉄圧延設備電気品のシステムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。
Industrial Automation Systems Div.



関口 邦男 Kunio Sekiguchi

重電技術研究所 システム技術開発部主幹。
圧延プロセス制御システムの開発に従事。電気学会、塑性加工学会、日本鉄鋼協会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.