

モールド湯面レベル制御への全周波数帯外乱抑制制御の開発・導入

Advanced Mold Level Control System for Continuous Caster

大関 隆寛 OZEKI Takahiro JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区） 制御部 銑鋼制御室 主任部員（係長）
新井 幸雄 ARAI Yukio JFE スチール IT 改革推進部長（理事）
山崎 和也 YAMAZAKI Kazuya JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区） 制御部長

要旨

丸ビレット連铸機の歩留り向上のための優先課題は、湯面変動によるビレット屑の発生抑止である。東日本製鉄所（京浜地区）5CC の湯面変動の原因は、広範囲周波数帯の外乱（ダミーバー外乱）およびシステムモデル変動の 2 点である。今回、これらの問題解決のため、湯面レベル制御の新技术法を開発、導入することで湯面変動の大幅低減を図り、歩留りを向上させることができたので報告する。

Abstract:

Mold level control system in No. 5 continuous caster in East Japan Steel Works (Keihin) has a problem about control response. Cause of control responsiveness deterioration is disturbances. Advanced mold level control system improved the control response.

1. 緒言

連铸機の溶鋼を凝固させる過程において、モールド内溶鋼湯面高さ（湯面レベル）制御は、品質確保に重要な役割を果たしている。湯面レベルが変動すると、不純物巻き込みを引き起こしビレット品質が悪化するためである。JFE スチール東日本製鉄所（京浜地区）の第 5 連続铸造機（以下 5CC という、図 1 参照）は全 6 ストランドを保有し丸ビレットを製造しているが、スラブ連铸機に比べ湯面高さの変動が大きいため、品質異常で屑となるビレットの発生割合が高い。屑の発生要因の中で湯面変動要因の割合が 55% と最も高いため、湯面変動を抑制することが、歩留り向上の最優先課題と言える。

今回、湯面変動を抑制できる湯面レベル制御の新技术法を開発、導入することで、歩留りを向上させることができたの

で報告する。

2. 湯面レベル制御の現状と課題

湯面レベル制御（図 2 参照）とは、渦流センサーで湯面レベルを検出し、それに基づき演算器（計装 DCS）でタンディッシュからの溶鋼吐出流量を計算し、その流量となるようアクチュエーター（図 2 のステッピングシリンダー）に動作指令を与えるフィードバック制御である。

5CC における主な湯面変動の原因は、外乱とシステムモデル変動の 2 つである。前者は主にダミーバー外乱が原因である（図 3）。ダミーバー外乱は、ダミーバーリンク屈曲起因で発生するもので、5CC 設備特有の湯面変動である。

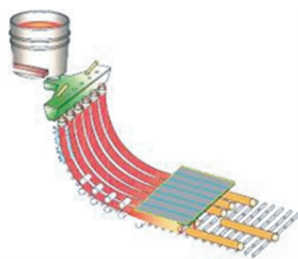


図 1 第 5 連続铸造機 (5CC)
Fig. 1 No. 5 continuous caster

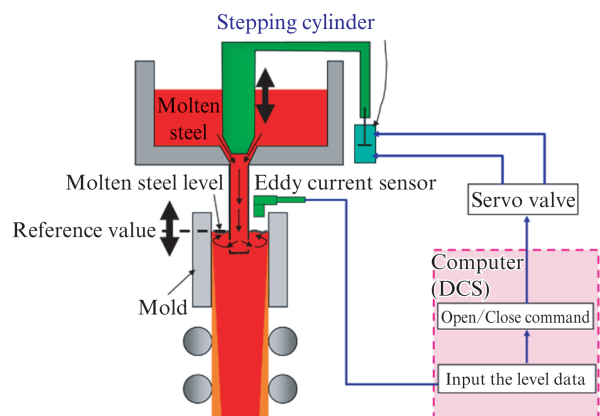
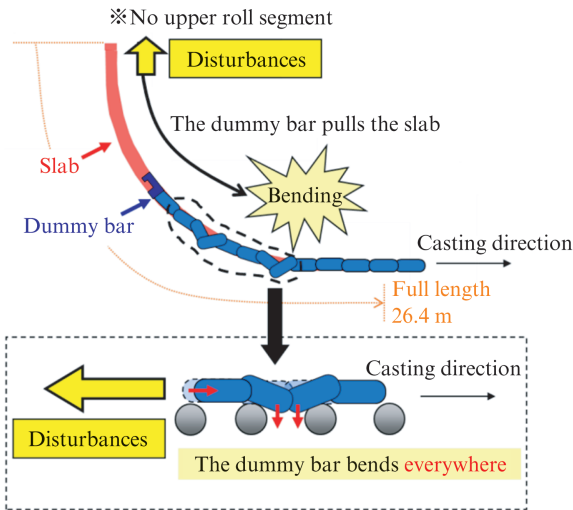
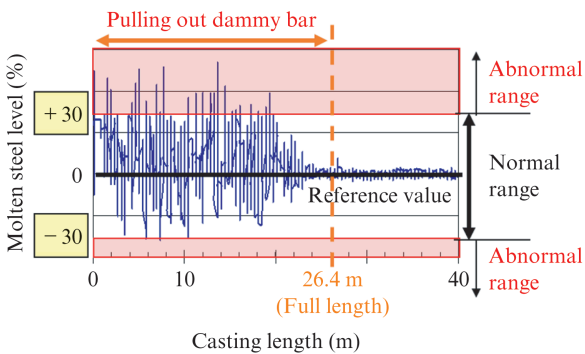


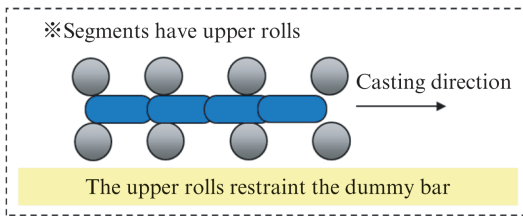
図 2 湯面レベル制御システム
Fig. 2 Mold level control system



(a) Principle of dummy bar disturbances



(b) Time series data of level control



(c) Comparison: Slab continuous caster

図3 ダミーバー外乱

Fig. 3 Dummy bar disturbances

システムモデル変動も、湯面レベル制御にストッパーを使用している、5CC 設備固有の特徴に起因している。そのため、耐火物の摩耗、ストッパーの反りなどが少しでもあると溶鋼流量特性が大きく変わってしまい、特に casting 初期の制御ゲインでは制御が不安定になり湯面変動を誘発する。このため、現状ではオペレーターが制御ゲインを手動調整して casting しているが、システムモデル変動が大きく制御ゲインの大幅な調整が必要であるため、手動調整に5分程度時間がかかり、その間は湯面変動が抑えられていない(図4)。なお、スラブ連铸機はスライディングノズル(SN)による制御であるため、システムモデル変動が小さく、このような事象は発生しない。

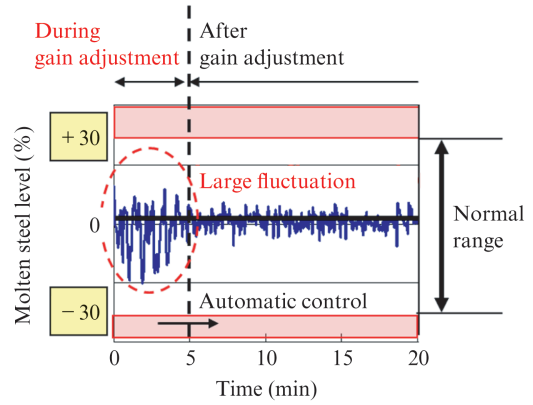


図4 ゲイン調整中の湯面レベル時系列データ

Fig. 4 Mold level data before and after gain adjustment

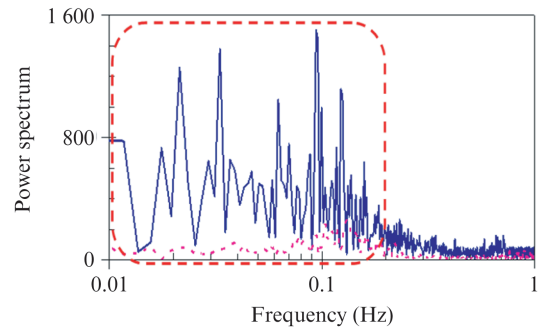


図5 周波数解析結果

Fig. 5 Frequency analysis

3. 全周波数帯外乱抑制制御の開発

3.1 周波数解析

ダミーバー外乱の周波数を解析すると、非常に広域の周波数帯に分布していることがわかった(図5参照)。これはダミーバーが多点多同期にリンク屈曲することで外乱を起こすためであり、物理的な考察と合致する。一方、外乱抑制制御の従来技術は数種類あるが、すべて局所的な周波数帯の外乱を抑制するために開発された手法であるため、5CCのダミーバー外乱のように広範囲の周波数帯におよぶものは抑制できない。そのため、広域周波数帯外乱に対応する外乱抑制制御手法を新たに開発した。

3.2 制御系設計

広域周波数帯を持つダミーバー外乱の抑制手法として、スライディングモード制御に着目した(図6参照)。スライディングモード制御とは線形制御器と外乱抑制制御器による制御である。そのうち外乱抑制制御器は、誤差情報をもとに外乱を抽出し、それに対する逆位相入力を生成し制御対象に入力することで外乱を即座に抑制する制御手法である。この手法であればダミーバー外乱のような広域周波数

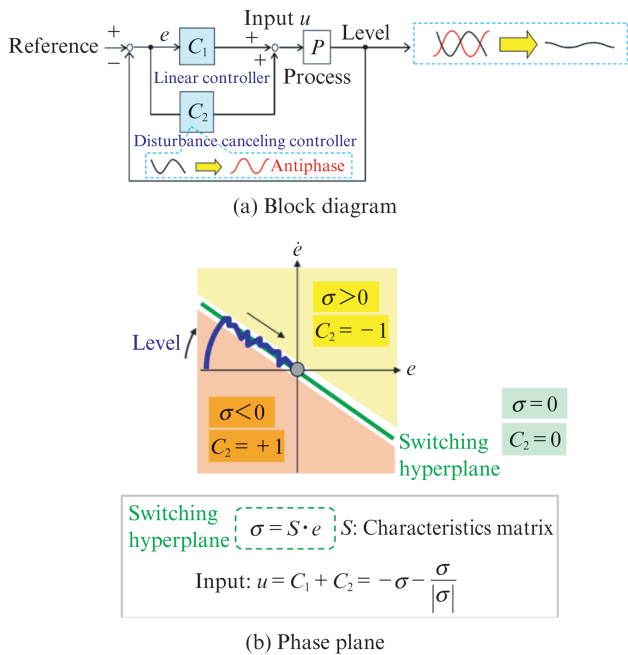
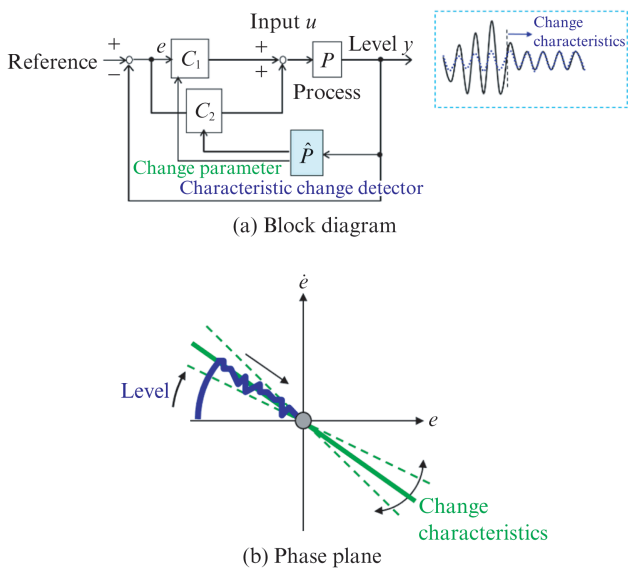


図6 スライディングモード制御

Fig. 6 Sliding mode control



〈 \hat{P} calculation contents〉

STEP1: $e_M = y - \hat{y}$

STEP2: $S(e_M) = k \cdot e_M$

STEP3: $\sigma = S(e_M) \cdot e$

k : Constant

(c) Characteristic change detector

図7 特性可変型スライディングモード制御

Fig. 7 Variable sliding mode control

外乱も抑制可能である。

しかし、スライディングモード制御ではシステムモデル変動は抑制できない。スライディングモード制御では、システムモデル変動により変化してしまった極を、希望の極に戻すことができないためである。そこで、システムモデル変動に対応すべく開発した手法が、「特性可変型スライディングモード制御」である(図7参照)¹⁻²⁾。新たに設けた特性変化検出器により、理想モデルからの出力波形変化をとらえ、理想モデルの出力に合うよう制御特性を変更するものである。これにより、ダミーバー外乱への抑制能力はそのままに、システムモデル変動による極配置修正が可能となった。

4. シミュレーション

新制御手法の応答検証にあたり、シミュレーションモデルの妥当性を検証するため、PI制御で構成された既設システムのPI制御動作をシミュレーションで再現できるか確認した(図8)。自動制御中の動作は位相・振幅ともに既設応答と合致しており、シミュレーションモデルの信頼性を確認できた。

本シミュレーションモデルを使用した、スライディングモード制御のシミュレーション結果を図9に示す。目標とした変動率±30%以下の制御を達成しており、またステップシリンダーも動作可能範囲内で制御できていることから、実機でも動作信頼性および湯面変動抑制効果が期待できる結果となった。

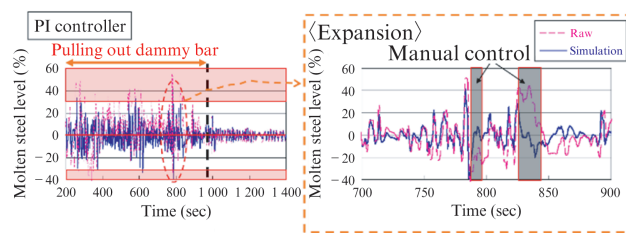


図8 モデル同定結果

Fig. 8 Result of model identification

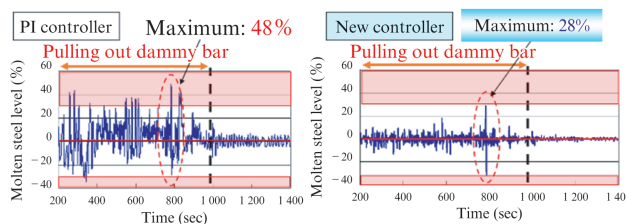


図9 シミュレーション結果

Fig. 9 Result of simulation

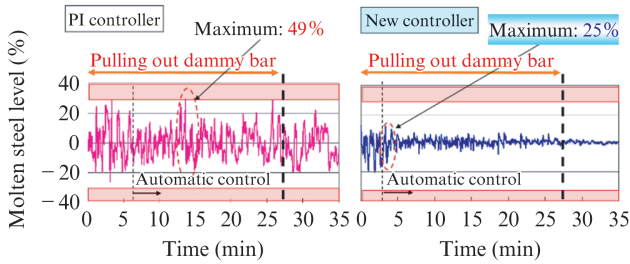


図 10 実機導入結果
Fig. 10 Result of control response

5. 実機導入結果

シミュレーション結果が良好であったため、特性可変型スライディングモード制御を実機へ導入した。実機導入結果を図 10 に示す。シミュレーションと同様に目標の変動率±30%以下での制御を達成し、変動量を約 50%削減した。

導入以降、京浜地区ピレット精整での屑発生レベルは、湯面変動量と同様に半減している (図 11)。

6. 結言

京浜地区 5CC の湯面変動低減のため、新たに特性可変型スライディングモード制御を開発、実機導入し、湯面変動を目標の変動率±30%以下に抑制、歩留りを向上させた。

本制御手法は制御対象の物理モデルが不要なため、様々なシステムへ容易に適用可能な、汎用性のある画期的な技術であると言える。

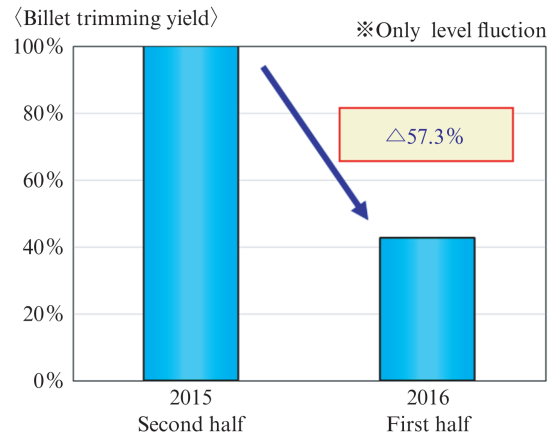


図 11 屑発生レベル改善結果
Fig. 11 Result of quality improvement

参考文献

- 1) 相馬将太郎, 金子修, 藤井隆雄. 一回の実験データに基づく制御器パラメータチューニングの新しいアプローチ—fictitious reference iterative tuning の提案. システム制御情報学会論文誌. 2004, vol. 17, no. 12, p. 528-536.
- 2) 藤井憲三, 大寶茂樹, 山本透. 石油・化学プロセスにおける PID 制御の新しい展開—「評価」と「設計」を統合するアプローチ. システム/制御/情報. 2008, vol. 52, no. 8, p. 270-277.



大関 隆寛



新井 幸雄



山崎 和也