

協調予測制御を用いた連続鋳造機再スタート方法

Automatic Restarting System for Continuous Caster with Utilizing Cooperated Predictive Control

常 木 明 子⁽¹⁾ 黒 川 哲 明⁽²⁾ 藤 谷 真⁽³⁾
Akiko TSUNEKI Tetsuaki KUROKAWA Makoto FUJITANI

抄 録

コモンドライブ式連続鋳造機での再スタート自動化には、溶鋼レベルの上昇を複数のモールド間で協調させる注入技術が必要条件となる。しかし測定対象の溶鋼が高温であること等から、広範囲で連続的な溶鋼レベル検出が困難であり、プロセス特性がブラックボックスでしかも大きく変化するために自動化実現が難しかった。そこでモデル予測制御の形態に、少ない離散的レベル情報からプロセスモデルを修正していく方法を付加することでこの問題の解決を試みた。

Abstract

In order to automatically restart the continuous caster of a common driving type, it is necessary to have a technique which makes the molten steel levels rise in cooperation among plural moulds. However, since the molten steel intended for measurement has a higher temperature, it has been difficult to continuously detect the molten steel levels in moulds in a wide range. Furthermore, since the process characteristic is a black box and is full of variety, it has been also difficult to realize the automatization for restarting the caster. Accordingly, to solve the abovementioned problems, a method for correcting the process model on the basis of a fewer and discrete information of the molten steel levels is added to the model-based predictive control. This method is described in this paper.

1. 緒 言

連続鋳造設備における鋳込み作業の中で、鋳造スタート及び再スタート時はオペレータ作業負荷がピークとなるため、自動化を最も必要とするものの一つである。既に各社、各所で取組まれており、自動化を実現させている。

しかし君津製鐵所第四連続鋳造機(以下、君津4CCと略す)のようなコモンドライブ構造(共通のロールで複数の鋳片を引き出す方式)の設備では、複数の鋳型間で溶鋼レベル上昇を協調させる溶鋼注入制御が更に必要となるため、自動化は立ち遅れていた。更に異鋼種連続鋳造時における再スタートともなると、同様の自動化制御技術を必要としているにもかかわらず、過酷な環境下、かつ連続的なレベル検出自体が難しい、という理由で従来技術では実現不可能であった。

そこで、多点レベルスイッチセンサを用いた離散的なレベル情報だけで再スタートを行う自動制御方法を開発した。本稿ではその概要と導入の考え方、及び実設備での適用テスト結果について述べる。

2. 再スタート自動化の課題

2.1 鋳造スタート自動化技術

連続鋳造設備では、前工程で精錬された溶鋼を取鍋からタンディッシュを介して鋳型に注いでいる。溶鋼は鋳型内で表層から凝固し、引抜かれながら中心部まで固まっていくことで、連続的に鋳片を製造している。鋳造のスタート時には、ダミーバーで底をふさいだ鋳型に溶鋼を注入し、溶鋼レベルが十分に上昇したところで引抜きを開始する。その後は鋳型に注ぐ溶鋼量と鋳片の引抜き量を一致させることで、鋳型内の溶鋼レベル位置を一定に保つ。レベルを一定に保つことが品質上、操業安定上、最重要課題であるため、定常部に対する自動化技術は早くから実施され、現在ではPID制御や様々な現代制御を用いて自動化されている。スタートの自動化については、人員合理化の観点から、最近になって多くの設備で取り組むようになり、実機化が行われている。

ところで現在の連続鋳造機は、大別すると、一対のロールで一つの鋳片を引抜くシングルドライブ式と、一対のロールで複数の鋳片を同時に引抜くコモンドライブ式とが存在する。前者は大断面のス

⁽¹⁾ 君津製鐵所 生産技術部

⁽²⁾ 君津製鐵所 生産技術部 掛長

⁽³⁾ 日鉄セミコンダクター(株) 第二製造技術部

ラブ鋳造機に、後者は小断面のブルームやピレット鋳造機に多く登用されているが、スタートの自動化を考えた場合、このドライブ方式の差異が大きく影響する。いずれのドライブ方式においても、スタート時の溶鋼注入では、引抜き開始時及びその後の溶鋼レベル管理が制御上、重要なポイントとなる。引抜き開始時のレベルやその変動によっては、品質上、操業上悪影響を与えるためである。例えば、鋳型内での冷却が悪化し、鋳片が十分な凝固をしなかったために、溶鋼が機内に漏れ出るブレークアウトと呼ばれる事故さえ引き起こしかねない。そこで溶鋼の注入制御が必要となる。

コモンドライブ式では複数の鋳片を同時に引抜く構造により、引抜く際には複数の鋳型内の溶鋼レベルが一致するよう互いにレベルを同調させ注入しなければならないという制約がつく。従ってスタート自動化技術は制約条件の少ないシングルドライブ式が先行し、各社、各所で自動化が進められていた。いずれも以下のような二つの技術がポイントとなっている。

- (1) あらかじめ決まったパターンで溶鋼を注入する方法(open loop control)
- (2) 上昇する溶鋼レベルを計測し注入量を制御する方法(closed loop control)

(1)は制御端と溶鋼注入流量との特性(以下、流量特性と略す)があまり変動しないような場合に用いられ、(2)はその流量特性の変動の補償として、上昇してくる溶鋼レベルをオンラインで計測し制御に取込むというものである。ほとんどのものは(1)と(2)を組み合わせた方式を採っている。

最近では、これらを従来以上に高精度化するよう対策を採ることでコモンドライブ式のスタート自動化にも適用され、新日本製鐵では室蘭製鐵所第三連続鋳造設備(以下、室蘭3CCと略す)でも実施されるようになった。

2.2 再スタート自動化技術開発の必要性

君津4CCの鋳込設備概要を図1に示す。タンディッシュに取り付けられたストッパーを上下に開閉することで溶鋼量を制御し、イマージョンノズルを通して鋳型へ注入される。ストッパーには電気油圧ステッピングシリンダーが接続されており、ストッパーの開閉はシリンダーで操作する。そして君津4CCの最大の特徴はコモンドライブ式のスラブ・ブルーム兼用連続鋳造機ということであり、ブルーム鋳造時は同一ロールで二つの鋳型から同時に鋳片を引出して

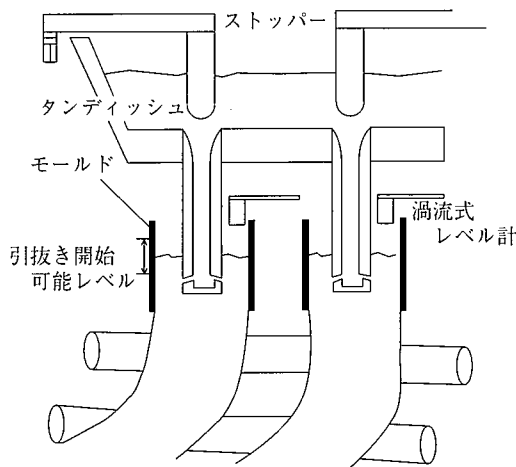


図1 君津4CC設備概要

いる。このような君津4CC設備には室蘭3CCのようなスタート自動化技術を鋳造スタートには適用することができる。しかし再スタート制御への適用には、次のような制約が出るために不可能になってしまう。

- ・流量特性のばらつきが大きい
- ・鋳型内溶鋼レベル検出が難

再スタートとは、異鋼種連続鋳造やタンディッシュの交換の際、鋳型への溶鋼注入、及び鋳片の引抜きを一度止めた状態から、再び鋳造を再開することを指している。鋳造開始時には溶鋼レベルは低下しているため、直ちに引抜きを開始することはできず、スタート作業と同様、鋳型への注入を行い、引抜き開始可能レベルまで上昇させてから引抜きを始める。実際の作業自体は鋳造スタートと変わらないものである。

しかし再スタート時でのストッパーの開度と溶鋼流量の関係、流量特性を調べたところ図2のようになり、鋳造スタートに比べて更に大きなばらつきを持つことが明らかになった。これは鋳造スタート時はストッパー周りやイマージョンノズル等の耐火物が手入れ後の状態であるのに対し、鋳造中途の再スタート時は、溶損や地金付着等により物理的形狀に既に変化が起こったためと考えられる。このばらつきでは制御端の動作をパターン化させることは難しい。

また溶鋼レベルの計測自体も再スタート時には制約を受ける。鋳造スタート制御で用いられている溶鋼レベル検出装置はγ線式か熱電対式である。γ線式は既設設備の機械的改造量が膨大でコスト高となりあきらめざるを得なかった。熱電対式は、鋳型に埋め込まれた熱電対の温度分布から溶鋼レベルを検出する方法であり、君津4CCでは既に熱電対が設置されていたため、設備上は問題なかった。しかし再スタート時には鋳造スタート時と同様な熱電対の使用ができないことが調査の結果、明らかになった。

図3(a)、(b)はそれぞれ鋳造スタート時と再スタート時の熱電対の温度上昇の様子を示しており、レベル位置の低いものから順に番号をつけている。鋳造スタートでは、レベル位置の低い熱電対から順番に温度が上昇しているが、再スタートでは熱電対の応答は鋳造スタートと比べて著しく遅くなっており、また上昇する順番が逆転する等の現象も見られる。これは再スタートの際には、鋳型銅板が既に温度が上昇しているため温度上昇率が鈍くなっていること、銅板に付着しているスラグベアと呼ばれる溶融パウダーの固着物等による不均一な伝熱等が原因と考えられる。室蘭3CCでは再スタートにおいても鋳型内の清掃を行うことで付着物の除去を行って銅板の温度低下を促し、鋳造スタートと同条件を作り出しているため、再スタートにおいても鋳造スタートと同様なレベル検出方法を採用している。しかし君津4CCでは生産性の見地から同様の作業時間を作るこ

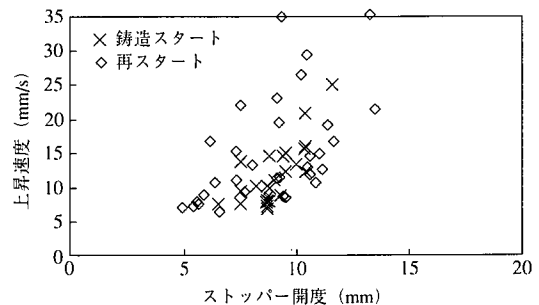


図2 流量特性のばらつき

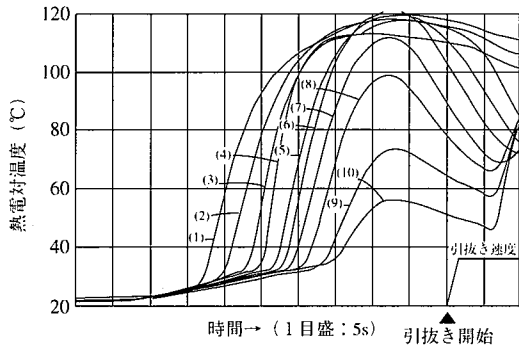


図 3 (a) 鋳造スタート時の熱電対

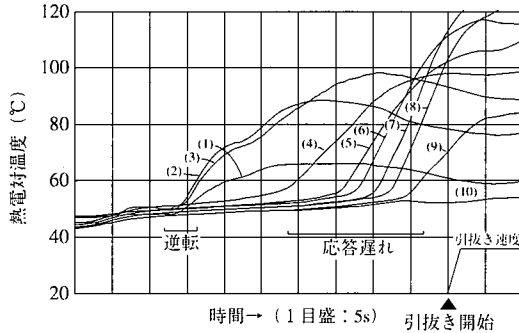


図 3 (b) 再スタート時の熱電対

とができないため、熱電対のレベル計としての使用は不可能になる。

他のレベル計の適用も検討を行ったが、適切なものが存在しない。その理由として、以下のようなことが挙げられる。

- ・悪環境下(高温、スプラッシュ、波立ち、粉塵等)での耐久性
- ・設備制約(小型化センサの要求)
- ・測定範囲(100~500mm程度)

具体的には定常状態のレベル制御によく用いられている渦流式レベル計は測定範囲が狭く、制御に必要とする範囲を計測することができない。レーザー式、超音波式なども波立ちながら上昇してくる溶鋼レベルを測定できず、接触型となれば溶鋼温度に耐えうるものがない。

そこで、安価な使い捨て方式の多点型レベルスイッチセンサを採用せざるを得なくなった。長所は、簡易な設備であり故障が少ないこと、使い捨て方式であるが安価であること、応答遅れが少ないこと、誤検出が少ないこと、等が挙げられるが、短所は何よりもレベル情報量が限定されることである。

そのため、限定されたレベル情報量で、溶鋼の注入制御を行う新たな制御方法を開発する必要性が出てきたのである。

3. 新制御方法

前述のような理由で、プロセスパラメータが時々刻々と変化するプロセスに対して、レベルスイッチ式センサで検出する数点のレベル情報のみで、複数の鋳型間でのレベル協調を行う制御方法の開発が必要となった。

3.1 開発ポイント

コモンドライブ方式連続鋳造設備での再スタート自動化を実現するには、下記の(1)~(3)の制御制約に対し、(4)の制御仕様を満足

することが必要となる。

- (1) 流量特性が不安定である系に対し、
 - (2) レベルスイッチから得られる限定された離散レベル情報に基づき、
 - (3) 操作量(君津4CCではストッパー開度)を制御し、
 - (4) 引抜き開始可能なレベルへの到達時間差を鋳型間で小さくする。
- レベルスイッチ式センサの点数を増やすことで制御精度の向上が図れるが、実際には鋳型断面積が小さい等の理由により、スイッチ点数は2~6点程度である。

このような計測上、制御上、過酷な環境下で溶鋼注入を制御し、複数のレベル上昇を協調させることが必要となった。

3.2 新制御法の考え方

(step 1) モデル予測制御

現時点での情報から、溶鋼レベルが引抜き可能レベルに到達する、つまり有限時間後の未来の偏差を小さくするよう操作量を制御したい、という観点から眺めると、これは正にモデル予測制御の考えと一致している。そこでこのモデル予測制御を案として採用することにした。

モデル予測制御は一般に、現時点 k 時刻以降に、入力 $u(k+i)$ ($i=1 \sim n_2$)を加えた場合のプラントの未来出力に対する予測値 $\hat{y}(k+n)$ ($i=1 \sim n_1$)をモデルを用いて算出し、(1)式で表される評価関数を最も小さくするよう、操作量 $u(k+i)$ ($i=1 \sim n_2$)を決定するものである。

$$J = \sum_{i=1}^{n_1} q_i \cdot (y_p(k+i) - \hat{y}(k+i))^2 + \sum_{i=1}^{n_2} r_i \cdot \Delta u^2(k+i) \quad \dots\dots (1)$$

ここで $y_p(k)$ は k 時刻での出力設定値(目標値)である。

また、図4のようにオフセットが残らぬようプラントの出力 $y(k)$ とモデル出力 $\hat{y}(k)$ の差もフィードバックする。

(step 2) モデル修正型予測制御

制御系設計の際には、予測誤差の大きさを考慮に入れなければならない。一般に予測誤差に含まれる要因としては、

- ・(不可計測)外乱
- ・モデル化誤差
- ・ノイズ

がある。この中で再スタート制御に適用した際に誤差として最も影響を及ぼすものは、モデル化誤差である。

再スタートは前述したように、流量特性が時々刻々と変化するというプロセス変動が起きる系であるため、モデル化誤差の影響は他のものが無視できるほど非常に大きくなる。通常このような大きなモデル化誤差を生む、変動のあるプロセスに対しては、制御的な不安定要素を抱えることにつながるため、モデル制御は適用しない。

ここであえて、変動の大きいプロセスにモデル予測制御を適用するため、その欠点を補った図5のようなモデル修正型予測制御方式に変形を行った。これは過去の入出力からモデル自体を修正するような機構を取り入れたもので、これによりモデル化誤差の低減化を

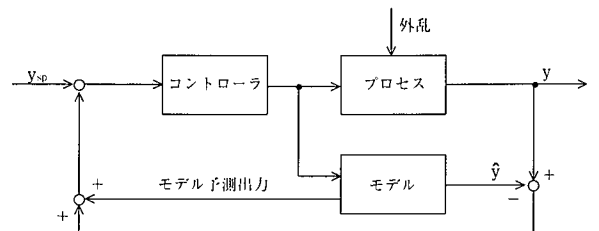


図 4 モデル予測制御

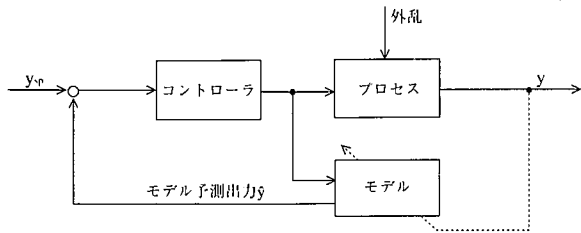


図5 モデル修正型予測制御

図った。

(step 3) 評価関数

しかしレベルスイッチによる検出点はせいぜい6点程度に限られる。複数の鋳型内溶鋼レベルが引抜き開始可能レベル(鋳型上端から100~120mm)へ到達する時間差を数秒以内に抑えるためには、(step 2)モデル修正型予測制御を用いても制御精度はまだ十分でない。そこで次に評価関数に注目した。

最終レベル到達差の最小化に制御ポイントを置くように評価関数を決定したのである。つまり、(1)式の評価関数の中での重み関数に対して、 δ 関数を用いて、

$$q_i = \delta(i - n_0 + k) \quad \dots\dots (2)$$

$$r_i = r (=const.) \quad \dots\dots (3)$$

とおくと、(1)式は次のように書き直せる。

$$J = (y_{sp}(n_0) - \hat{y}(n_0))^2 + r \cdot \sum_{i=1}^n \Delta u^2(k+i) \quad \dots\dots (4)$$

但し、 n_0 は次式を満たすものとする。

$$y_{sp}(n_0) = (\text{引抜き可能レベル}) \quad \dots\dots (5)$$

(2)式のように δ 関数を使うことで上昇途中での偏差を無視し、最終レベルでの差だけを評価として考慮したのである。操作量の変化はプラントの変動を助長する傾向があるために(4)式の第2項は残した。

(step 4) 設定値

更に設定値の持たせ方を工夫した。鋳造スタートに比べて再スタート時には溶鋼注入時間に対する制約が少ないことを利用したのである。再スタートでは、注入開始時の溶鋼レベルがばらつくことが多く、再スタートごとで同じ設定 $y_{sp}(k)$ を持つ必要はない。また前項で設定値は $y_{sp}(n_0)$ のみを決定すれば良かったので、複数の鋳型間における到達時間差のみを最小にする、という観点に立った。つまり、一つの鋳型にはあらかじめ決まった開度パターンで溶鋼注入を行い、そのレベル上昇を参照値とし、(4)式に基づき他の鋳型で制御入力を加える、という手法を採った(図6参照)。新規制御方案の特徴を整理すると以下のようになる。

- (1)モデル予測制御を変形した制御系式
- (2)オンラインでモデルを修正
- (3)最終レベルの偏差のみを評価
- (4)一つのレベル上昇を参照値として他の注入量を制御

この制御方案は、他の鋳型内レベル上昇との協調を主眼においているので、この注入制御方案を協調予測制御と呼ぶことにする。

4. 新システムと評価

4.1 設備概要と制御フロー

上記制御を実際に実施すべく、君津4CCに図7に示すようなシス

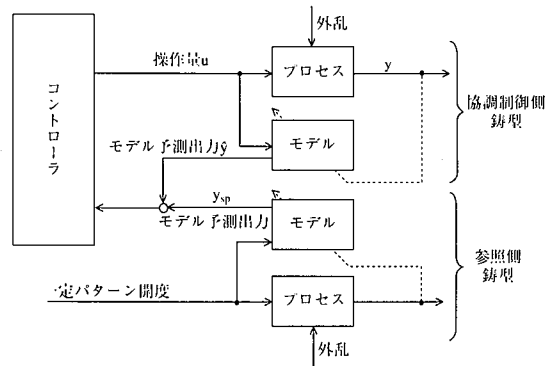


図6 協調予測制御

テムを設置し試験を行った。

制御シーケンスのフロー(図8参照)を以下に示す。

フロー

- (1)タンディッシュ重量の増加に対応して鋳型への溶鋼注入開始
- (2)全鋳型で同じパターンの開度で注入
- (3)先にレベルスイッチ検出された鋳型内レベルを参照値とする
- (4)参照側の注入は、あらかじめ決められたパターンで注入を続行
- (5)他の鋳型は、協調予測制御を用いて注入を続行
- (6)全鋳型で引抜き開始レベル到達を検知後、引抜き指令を出力
- (7)引抜き量に見合ったストッパー開度に制御
- (8)定常のレベル制御(定値制御)に切替

4.2 オンラインテスト結果

実際に協調予測制御を行った際の二つの鋳型内レベルの時間的変化を図9に示す。レベルスイッチセンサが検出した溶鋼レベルを明示しており、レベルスイッチ点は鋳型当たり4点ずつしか計測していないが、上昇していくにつれて次第にレベルが協調していく様子が分かる。

また渦流式レベル計による定常時のレベル制御にもオペレータが手動介入することなく、スムーズな移行をしている。

4.3 評価と考察

今回報告した協調予測制御を実際にテスト実施したのは計12回である。比較検討のため、以下のような別方法による制御での再スタートも行った。

- (1)あらかじめ決まった開度パターンで溶鋼を注入する方法(open loop control)
- (2)協調予測制御と同じレベルスイッチを用い、共通の設定値を使用

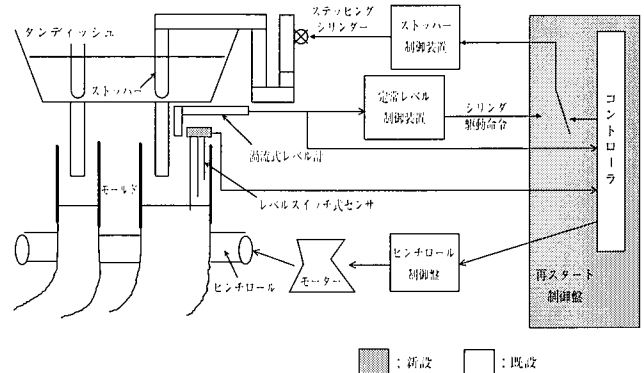


図7 システム構成

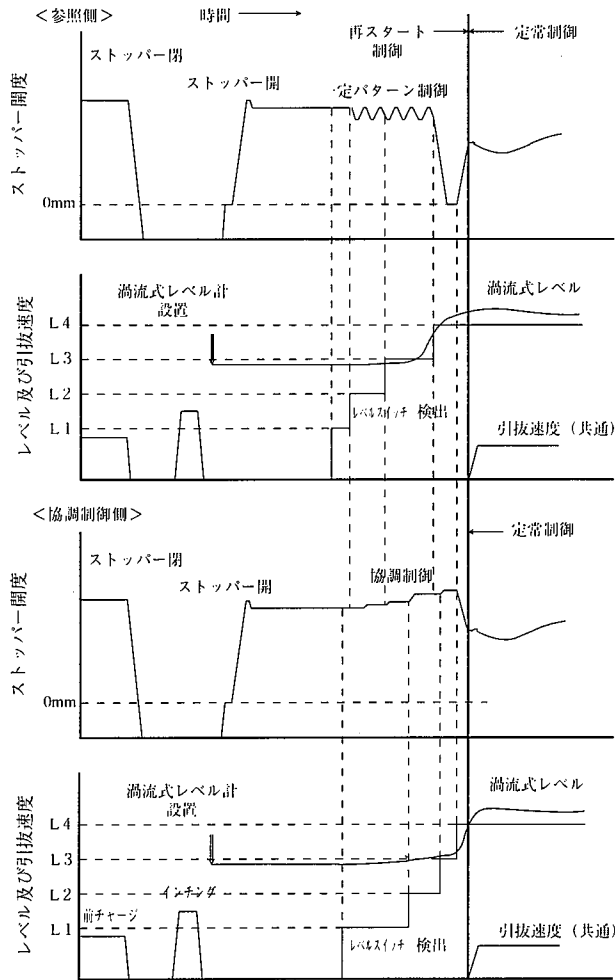


図8 自動再スタート制御フロー

した予測制御の場合(3.2でのstep 4を省き, step 3までの制御)

上記, 二つの制御方法と協調予測制御をそれぞれ実施した。但し, 協調予測制御と(2)のテストでは, すべて40mm間隔×4点で同一のレベルスイッチを用いている。

それぞれの溶鋼注入時間及び鋳型間時間差は表1のような結果と

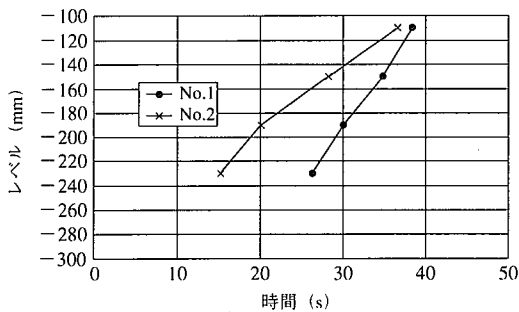


図9 制御時のレベル上昇

表1 制御精度比較

	レベル上昇時間 (s)		到達時間差 (s)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
協調予測制御	27.3	9.7	3.1	1.9
(1)パターン制御	28.9	12.1	10.7	5.1
(2)修正型モデル予測制御	28.6	6.0	4.6	4.1

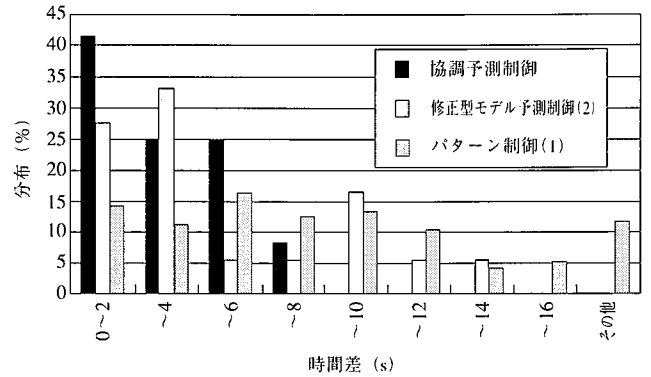


図10 制御精度比較<ヒストグラム>

なった。注入時間だけを注目すると, (2)の制御法では時間のばらつきが最も抑えられ, 設定値が毎回変動する協調予測制御の方がばらつきが大きい。しかし鋳型間における引抜き開始レベルの到達時間差を見ると, (2)も(1)のパターン制御法と比較すれば平均値もばらつきも抑えられているが, 協調予測制御と比較すればどちらも大きい。制御目的を考えれば, 協調予測制御法の精度が最良であることは明らかである。

到達時間差をヒストグラムにしたものが図10である。図から明らかのように, 溶鋼注入協調予測制御を用いた場合に二つの鋳型間の時間差が著しく小さくなっており, 制御精度は大幅に向上したことが分かる。

5. 結 言

連続鋳造設備での再スタート自動化技術の一方法を提案した。

制御量の情報が離散的かつ限定され, プラント特性が変動し, 制御する上で過酷な状況下において, 連続鋳造設備の鋳込みというプラントの特徴を, モデル予測制御の変形の手段で制御方案に盛り込み, 新しい制御法を考案した。また実設備でのオンラインテストを実施し, 制御精度の検証を行い, 良好な結果が得られた。

現在, 実操業への適用を推進しており, コスト削減及び安定操業対策の一つとして発展させていく所存である。

参考文献

- 1) 常木 ほか: 材料とプロセス, 9(5),933(1996)
- 2) Shah, Dumont: IEEE CAC Tutorial Workshop on Model-Based Predictive Control, 1993-9