

連続鋳造機湯面レベルのH 制御

村上 晃*・西田吉晴*・三木尚司**・中尾 勝***・松浦 徹****

*技術開発本部・生産技術研究所 **加古川製鉄所・制御部 ***加古川製鉄所・製鋼部 ****神鋼メックス株

Level Control of Continuous Casting Machine using H Control Theory

Akira Murakami・Yoshiharu Nishida・Takashi Miki・Masaru Nakao・Toru Matsuura

H control theory was applied to the level-control of a continuous casting machine . This kind of level-control has two major problems : parameter variations, and disturbance-pattern variations . In order to solve these problems, a table made of multiple H controllers was constructed . By switching one H controller to another effectively, adaptability as well as robustness was achieved . This method was applied to an actual casting machine and the results showed a 40% decrease in level error .

まえがき = スラブ連続鋳造機は、転炉で精錬された溶鋼を連続的に鋳造し、圧延素材となる鋼片（スラブ）を製造する設備である。

鋳型内溶鋼の表面（湯面）の高さ（レベル）が大きく変動すると、鋳型に接している凝固途中の鋼に湯面上に浮かぶパウダと呼ばれる潤滑剤が巻き込まれる。その結果、鋼片表面に欠陥やきずを生じ、圧延された板材の品質や歩留まりに大きな影響を与える。

近年の品質向上の要求にともない、湯面レベル制御の高精度化が望まれているが、外乱の周波数・振幅が変化するという問題やロバスト性（実際の制御対象が設計時に想定したモデルと隔たっている、制御性能が大きく劣化しない性質）の確保の問題がある。

そこで、周波数領域での仕様を反映でき、ロバスト安定性を保証できるH 制御¹⁾を適用した²⁾。

1 連続鋳造機

1.1 モデル

対象とした連続鋳造機は加古川4号連続機第1ストランドである（第1図）。

レベル制御系は、レベル計である渦流センサ、ステッピングシリンダ、スライドバルブからなっている。

ステッピングシリンダと渦流センサはそれぞれ、 T 、 T' の一次遅れと、 L 、 L' のむだ時間からなるとしてモデル化した。むだ時間は2次のパデ近似をもちいて有限次元化した。スライドバルブは流量係数 K_f （スライドバルブの変位に対する溶鋼の単位時間当たりの流入量）とし、鋳型は鋳型断面積 A の逆数を係数とする積分器とした。したがって、連続鋳造機の湯面レベル制御系のモデル $P(s)$ は次のように表される。

$$P(s) = \frac{1}{Ts+1} \frac{1 - \frac{1}{2}Ls + \frac{1}{12}L^2s^2}{1 + \frac{1}{2}Ls + \frac{1}{12}L^2s^2} K_f \frac{1}{As} \frac{1}{Ts'+1} \frac{1 - \frac{1}{2}L's + \frac{1}{12}L'^2s^2}{1 + \frac{1}{2}L's + \frac{1}{12}L'^2s^2} \dots (1)$$

各パラメータの値を以下に示す。

$$T = 0.2s, L = 0.1s, T' = 0.3s, L' = 0.12s$$

$$K_f / A = 0.6 \sim 2.1$$

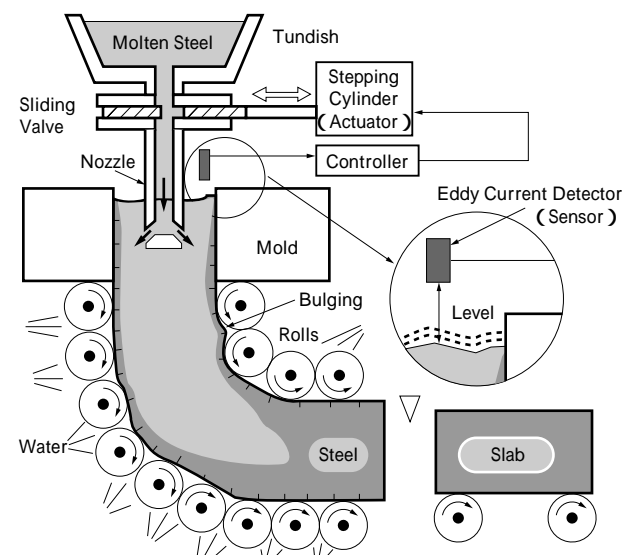
なお、ステッピングシリンダの特性は、ステッピングシリンダ目標変位を入力とし、実際の位置を出力とするステップ応答から、渦流センサの特性はカタログ値から決定した。また、 K_f/A の値は、タンディッシュ内の溶鋼重量 W 、鋳型幅 l 、鋳造速度 V_c に依存するが、溶鋼を完全流体とみなして鋳造機の物理モデルを作成することによって計算した。なお、現実の鋳造機と物理モデルの間には誤差（不確かさ）が存在するが、実際の作業時のデータをもちいてシミュレーションをおこなうことで物理モデルの精度を向上し、また、誤差分を評価した。シミュレータは、Simulink (The Math Works, Inc.) をもちいた。

1.2 外乱

高温の流体や弾性体を扱うプロセスであるため広い周波数にわたって外乱が存在するが、作業時の湯面レベルデータの周波数解析により、次の2種類の外乱が大きいことが確認された。

1.2.1 バルジング外乱

バルジングとは、凝固した薄い鋼の部分が、ロールの支持がない部分で、外側に膨らむ現象である。このバ



第1図 連続鋳造機
Fig. 1 Continuous casting machine

ルジングが周期的に発生し、結果として湯面全体を上下させると推測されている。この外乱の周期は0.13Hz以下であり、〔ロール間隔/鑄造速度〕の値と一致することが確認された。鑄造速度の高速化にともない、この外乱の周波数が高くなり、かつ、振幅が大きくなってきたため、この外乱の印加時には制御ゲインを高くし、外乱抑制を図ることが必要となった。

1.2.2 波立ち外乱

鑄型内には、鑄型の長辺を半波長とする鑄型内溶鋼の1次モード表面波の定常波が存在することが確認された。周波数は0.7Hz以上であった。レベル計は鑄型の中心からずれたところに取付けられているため、1次モードは検出可能であるが、流量調整により制御することはできない。したがって、スピルオーバを避けるため制御帯域は波立ち外乱の周波数未満とすることとなる。

2 H コントローラ的设计

一般化制御対象を第2図のように構成する。 w は外乱、 u は操作量、 z は制御量、 y は湯面レベルである。 $K(s)$ 、 $P(s)$ はそれぞれコントローラ、制御対象であり、 $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ は重み関数である。

次のH 制御問題を解く。

$$\left\| \frac{W_1(s)X(s)}{W_2(s)K(s)} \right\| < 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$X(s) = (1 + P(s)K(s))^{-1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$K(s) = K(s)X(1 + P(s)K(s))^{-1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

W_1 を周波数領域で指定することで外乱抑制性を、 W_2 を指定することでロバスト安定性と外乱に対する操作量の応答を設定できる。

$K_f/A = 1.3$ のときの設計例を示す。重み関数は次のように決定した。

$$W_1(s) = \frac{0.72(s + 6.28 \times 10^{-2})}{s(s + 6.28 \times 10^{-6})} \quad \dots\dots\dots (5)$$

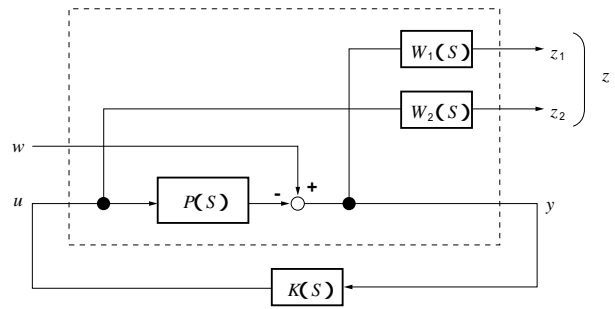
$$W_2(s) = \frac{3.0(s + 1.20)^5}{(s + 2.40)^5} \quad \dots\dots\dots (6)$$

第3図に W_1 、 W_2 のゲイン線図を示す。まず、ゲイン線図上で W_2 を制御対象の不確かさ(第3図の)を覆うように設定すれば、ロバスト安定性が確保されることが知られている。そこで、 W_2 が高周波域で を覆うように設定した。このとき、アクチュエータとセンサの時定数とむだ時間に±20%の不確かさがあるものと評価した。さらに、スピルオーバを避けるために、波立ち外乱の周波数で0dBを超えさせることにした。

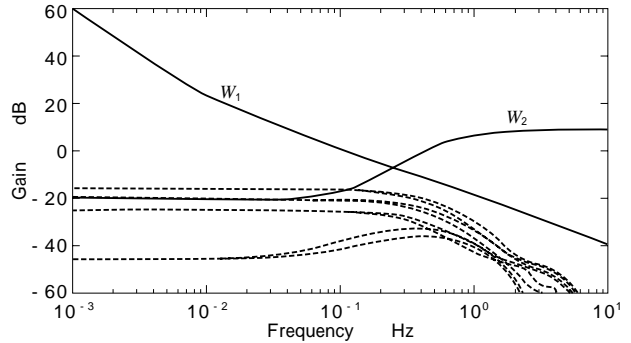
W_1 は収束計算で可能な限り大きくし、パルジング外乱の周波数で0dBを超えさせる。また、定常偏差を0に近づけるため、 W_1 には近似積分を含める。

MATLAB(The Math Works,Inc.)をもちい、Glover-Doyleの解法³⁾によりコントローラをえた。なお、このとき、制御対象は原点に極をもつため、解法的前提条件を満たさないが、重み関数に積分器を含ませる方法⁴⁾をもちいて前提条件を満足させた。

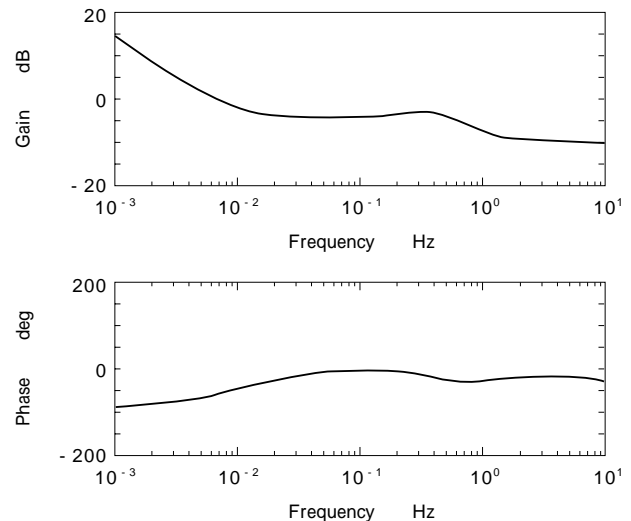
コントローラは次のようにえられた。



第2図 一般化制御対象
Fig. 2 Generalized plant



第3図 重み関数のゲイン線図
Fig. 3 Gain diagram of weighting functions



第4図 H コントローラのボード線図
Fig. 4 Bode diagram of H controller

$$K(s) = 1.35 \times 10^2 \frac{\prod_{n=1}^{12} (s + z_n)}{\prod_{n=1}^{12} (s + p_n)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\{z_n\} = \{-5.68 \times 10^{-2}, -1, -1, -2.39, -2.40 \pm 7.93 \times 10^{-3}j, -2.41 \pm 4.91 \times 10^{-3}j, -3.33, -5.0, -1.36 \times 10^{-1} \pm 7.87j\}$$

$$\{p_n\} = \{-6.28 \times 10^{-6}, -1, -1, -1.25 \pm 1.62j, -1.82 \pm 4.46 \times 10^{-1}j, -1.82, -3.37, -4.74, -1.37 \times 10^1 \pm 7.90j, -4.04\}$$

コントローラのボード線図を第4図に示す。PI コントローラに似た形となっている。

3 適応系の構成

制御対象のゲイン K_f/A の値は、1.1 節で述べたよう

に3倍以上変化するため、 K_f/A に対して適応的な制御系を構成する必要がある。そこで、 K_f/A を0.6~2.1まで0.1ごとの区間に区切り、合計16点の動作点を考え、各動作点近傍でHコントローラを設計し、実装が容易で応答が速いゲインスケジューリング⁵⁾によりHコントローラを切り換えることとした。

また、1.2節では述べなかったが、鋼種の違いなどの原因により周波数0.2~0.5Hzの散発的な外乱が発生し、操作量・レベル変動ともに増大するという問題があった。この場合には、一時的にコントローラのゲインを下げる必要がある。そこで、2章で設計したハイゲイン型コントローラ(Hと表記)のほかに、ミドルゲイン型(Mと表記)とローゲイン型(Lと表記)の2種類のゲインの低いコントローラを2章と同様の方法で設計した。散発的な外乱の検出は、湯面レベル変動にFFT(高速フーリエ変換)を施すことによって検出し、上記周波数の外乱の振幅がある値を超えるとコントローラをローゲイン側に切り換え、ある値以下ならばハイゲイン側に切り換えることとした。切り換えしきい値はステッピングシリンダの速度リミッタを考慮し、上限をオフライン計算で求めておき、現場でのチューニングで決定した。

結果として、第5図に示すようなHコントローラのテーブルを作成しておき、第6図に示すブロック図に示すように制御中に切り換えることとした。

4 実験

4.1 コントローラの実装

サンプリング周期100msで双一次変換により離散化した。また、速度型⁶⁾に変換した。このため、Hコントローラの切り換えだけでなく、従来のPID制御や手動制御との切り換えもパンプレスに可能となった。

また、制御上の他の補償として、H制御のフィードバックのほかに、前述の物理モデルに基づき、溶鋼重量の変化・鋳型幅の変更・鋳造速度の変更による既知外乱のフィードフォワード補償をおこなう。また、ステッピングシリンダの機械的ながたの補償もおこなっている。

さらに、ステッピングシリンダの変位の動作範囲の制限に関して、リセットwindアップ防止機能や目標湯面レベル変更機能も付加し、工程の自動化に役立っている。

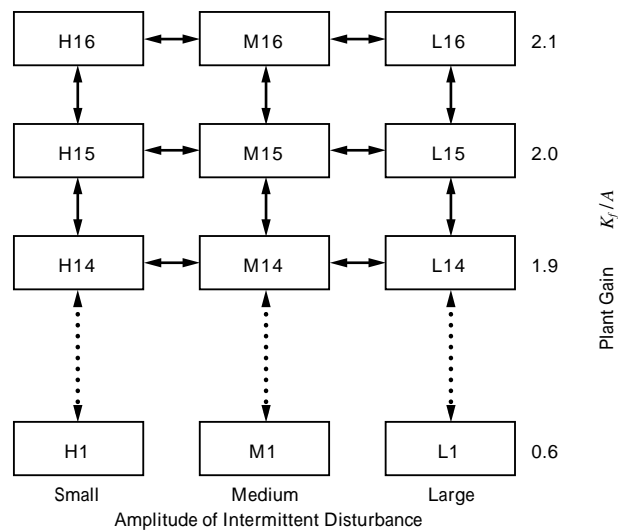
制御装置としてパソコン(NEC FC9801B)をもちい、FFTボード(CANOPUS FLASH-16)をスロットに実装した。

第7図に、制御装置の表示画面を示す。レベル偏差や操作量のほか、現在選択されているコントローラの種類と番号、切り換え条件、フィードフォワード量などが表示される。

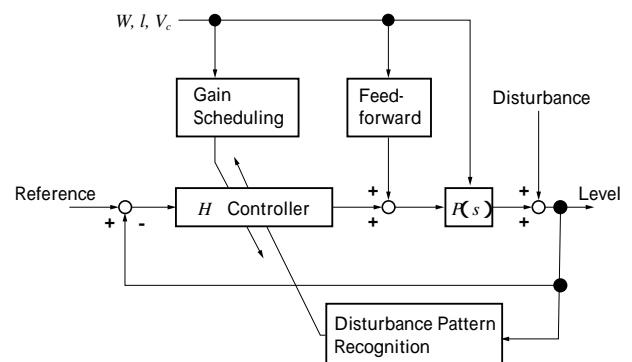
なお、パラメータの変更やHコントローラの入れ換えも可能となっている。

4.2 実験結果

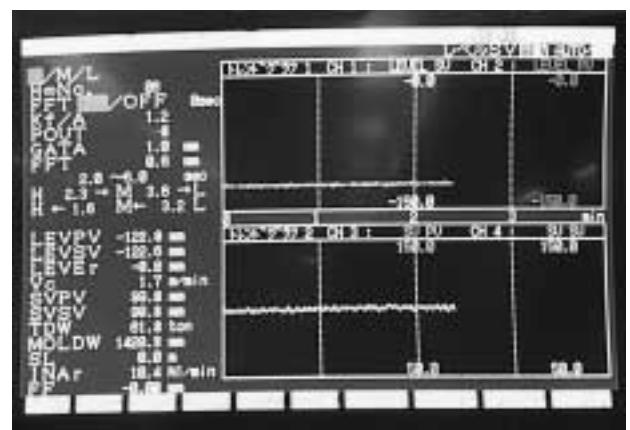
第8図に、従来のPID制御からH制御に切り換えたときの結果を示す。とくに低周波成分が抑制され、レベル変動が減少していることがわかる。



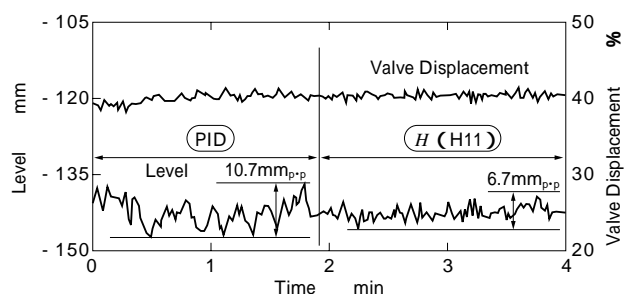
第5図 Hコントローラテーブル
Fig. 5 Table of H controllers



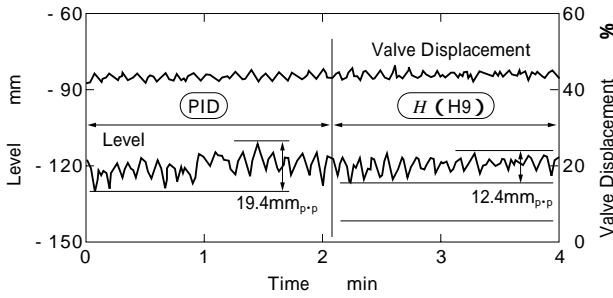
第6図 制御系のブロック図
Fig. 6 Block diagram of control system



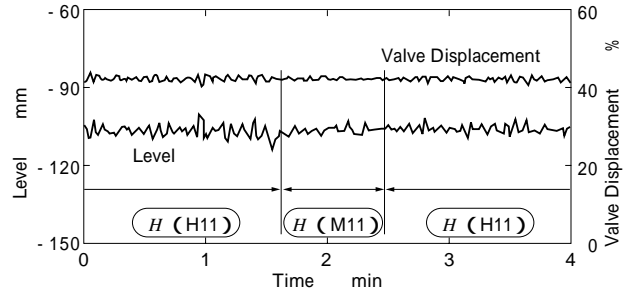
第7図 制御装置の画面例
Fig. 7 Display image of controller



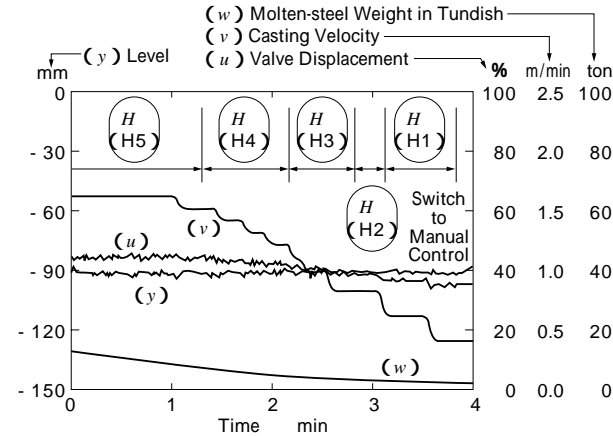
第8図 実験結果1
Fig. 8 Experimental result 1



第9図 実験結果2
Fig. 9 Experimental result 2



第11図 実験結果4
Fig. 11 Experimental result 4



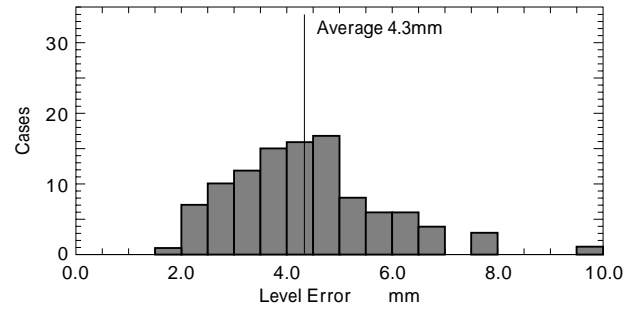
第10図 実験結果3
Fig. 10 Experimental result 3

第9図に、パルジング外乱発生時のPID制御とH制御の比較を示す。鑄造速度2.2m/mの高速鑄造中に、周期約7.5sのパルジング外乱が加わっており、制御上難しい場合であるが、主に低周波成分が抑制されレベル変動の振幅が減少している。

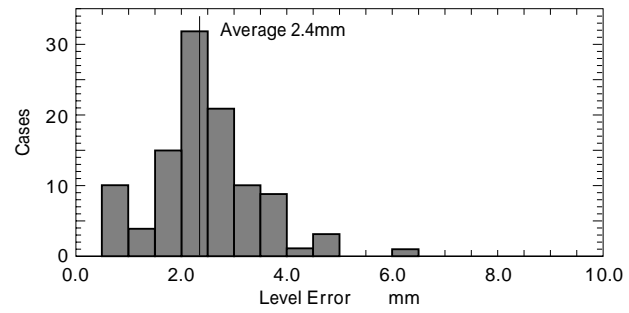
第10図は、鑄造速度を減少させていく鑄造終了直前の実験結果を示す。このとき、制御対象のゲインが減少していくのに応じて、Hコントローラが順次切り換わっていく。つねに適切なHコントローラで制御しているため、鑄造条件が変化しても、安定かつ高精度に制御できていることがわかる。また、鑄造速度変更などに対するフィードフォワードの効果も確認でき、非常時の緊急停止のように鑄造速度を急減させるときにも対応可能となっている。

第11図は、中間周波数外乱によるレベル変動が一時的に大きくなった場合に、H M Hとコントローラが切り換わった例である。

第12図に、従来のPID制御とH制御のレベル変動の比較を示す。データは、合計106個あり、二つの制御を切り換えた前後のそれぞれ1分間のレベル変動の値を示す。レベル変動の平均が4.3mmから2.4mmへと、40%減少した。



(a) Level error under PID control



(b) Level error under H control

第12図 実験結果のヒストグラム

Fig. 12 Histograms of results

むすび=制御対象のゲインと外乱パターンによって複数のHコントローラを切り換える手法をもちいて、連続鑄造機の鑄型内湯面レベル変動の低減を図った。従来のPID制御とくらべて、レベル変動を平均で40%抑制することに成功した。本システムは、現在も継続して稼働している。

参考文献

- 1) B A Francis : A Course in H Control Theory, (1987), Springer-Verlag .
- 2) 松浦 徹ほか：電気学会研究会資料，金属産業研究会，Vol. MID-95-1 (1995)，p.1 .
- 3) K. Glover et al. : Systems and Control Letters ,Vol.11 (1988) , p.167 .
- 4) 原 辰次：SICE 基礎講習会・H 制御入門 - テキスト，(1991) , p.63 ,SICE .
- 5) K. J. Astrom et al. : Adaptive Control (1995) , p.390 Addison-Wesley .
- 6) 須田信英：PID 制御，(1992) , p.49 朝倉書店 .