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***・松浦 徹***・中尾 勝***

Level Control of a Continuous Casting Machine via H^∞ Control Theory*Akira MURAKAMI**, Yoshiharu NISHIDA**, Takashi MIKI***, Toru MATSUURA***
and Masaru NAKAO***

In this paper, we apply H^∞ control theory to the level-control of a continuous casting machine. The level-control has two major problems of parameter variations and disturbance-pattern variations. In order to cope with these problems, we make up a table which consists of multiple H^∞ controllers. By switching one H^∞ controller to another properly, adaptability as well as robustness is achieved. This method has been applied to an actual machine and the results show a 40% decrease in level error.

1. はじめに

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、鋼片表面に欠陥やキズを生じ、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おり、 H^∞ 制御の適用¹⁾等が進んでいる。しかし、湯面レベル制御系には、制御対象の特性変化が大きいという問題や外乱が多いという問題がある²⁾。しかし、これらの問題を考慮した H^∞ 制御の実用的な適用例は少ない。

制御対象の特性変化が大きい場合には、 H^∞ 制御においても制御が保守的になる問題³⁾が指摘されている。さらに、異なる周波数の外乱が混在するプロセスでは、外

乱パターンに応じた適応が必要とされる⁴⁾。

そこで、複数の H^∞ コントローラをあらかじめ求めておき、制御対象の特性変化と外乱パターンに応じて切り換える手法により解決を図った。各コントローラは制御対象の小さい特性変化に対してのみ安定性を確保すればよいので、制御が不必要に保守的にならない。また、外乱の周波数が特定されている場合、 H^∞ 制御の周波数整形の容易さが利用できる。

上記の制御則を実機に適用し、レベル変動を減少させた。本報告では、2. で、制御対象となる連続鋳造機について述べる。3. で H^∞ コントローラのテーブルを作成し、4. で切り換え則について述べる。5. で、実機適用結果を示す。

2. 連続鋳造機

2.1 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 (Fig. 1)。タンディッシュと呼ばれる大きな容器に貯えられた溶鋼は、ノズルを通して鋳型に注入される。ノズルの途中にはスライドバルブと呼ばれる流量調節器があり、鋳型に注入する溶鋼の流量が調整される。鋳型は水冷された銅板で覆われており、溶鋼は鋳型に接した周辺部から凝固していく。同時に、凝固途中の鋼は鋳型下部にある数十のロールにより引き抜かれていく。引き抜きの過程で霧状の水によりさらに冷却され内部まで完全に凝固した後、適切な長さに切断されスラブ

* 原稿受付 1997 年 1 月 29 日

** (株)神戸製鋼所 技術開発本部 Technical Development Group, Kobe Steel Ltd.; 1-5-5, Takatsukadai, Nishi ward, Kobe city, Hyogo 651-22, JAPAN

*** (株)神戸製鋼所 加古川製鋼所 Kakogawa Works, Kobe Steel Ltd.; 1 Kanazawa-cho, Kakogawa city, Hyogo 675-01, JAPAN

Key Words: continuous casting machine, level control, H^∞ control, gain scheduling, disturbance pattern.

Fig. 1 Continuous casting machine

が完成する。

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' のむだ時間と、 L 、 L' の一次遅れからなるとしてモデル化した。むだ時間は2次のパデー近似を用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、連続鋳造機のモデルは次のように表される。

$$P(s) = \frac{1}{Ts+1} \frac{1 - \frac{1}{2}Ls + \frac{1}{12}L^2s^2}{1 + \frac{1}{2}Ls + \frac{1}{12}L^2s^2} K_f \frac{1}{As} \frac{1}{T's+1} \frac{1 - \frac{1}{2}L's + \frac{1}{12}L'^2s^2}{1 + \frac{1}{2}L's + \frac{1}{12}L'^2s^2} \quad (1)$$

各パラメータの値を以下に示す。

$$\begin{aligned} T &= 0.2[s] \\ L &= 0.1[s] \\ T' &= 0.3[s] \\ L' &= 0.12[s] \\ K_f/A &= 0.6 \sim 2.1 \end{aligned}$$

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。

つぎに、[流量係数/鋳型断面積]である K_f/A の決定法について述べる。流量を調整するスライドバルブは、中央に円形の穴があいた耐熱銅3枚が重なった構造となっている。上下の2枚は固定されているが、中央の1枚がステッピングシリンダにより駆動され、上下の板との穴の重なる面積が変化することで、溶鋼の流量を調整している。

K_f/A 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。溶鋼重量は鋳造が進むとともに減少し、鋳型幅は生産されるスラブ形状に応じて鋳造途中に自動的に変更される。鋳造速度は、自動または手動で、鋳造開始時には加速、終了時には減速、異常時には急減速される。

いま、鋳型内湯面からタンディッシュ内湯面までの高さを h 、スライドバルブでの溶鋼の流速を V_v 、バルブ開口面積を A_v 、バルブの変位を x_v とおく。

タンディッシュの形状から、 h は W の関数である。バルブやノズルでの圧力損失を0とし、トリチェリの定理より、

$$V_v = \sqrt{2gh(W)} \quad (2)$$

となる。

鋳型断面積 A は鋳型幅 l の関数である。流量保存則よりバルブの開口部の面積は次式となる。

$$A_v = \frac{V_c}{V_v} A(l) \quad (3)$$

バルブの形状は既知なので、バルブの変位とその変位での面積変化率が得られる。

$$x_v = x_v(A_v) \quad (4)$$

$$\frac{dA_v}{dx_v} = \frac{dA_v}{dx_v}(x_v) \quad (5)$$

(2), (5) 式より、次式を得る。

$$\frac{K_f}{A} = \frac{1}{A} V_v \frac{dA_v}{dx_v} \quad (6)$$

(6) 式に、鋳造の条件、 $W=0 \sim 80[t]$ 、 $l=0.65 \sim 1.8[m]$ 、 $V_c=0.0 \sim 2.2[m/min]$ を代入することにより、 $K_f/A=0.0 \sim 2.1$ を得た。ここで、 $W \approx 0$ 、 $V_c \approx 0$ のときは、通常手動で鋳造されるので、この範囲を除き、 $K_f/A=0.6 \sim 2.1$ と決めた。 $W=50[t]$ のときの一例を Fig. 2 に示す。

なお、流量係数 K_f は、ノズル詰まり等の他の要因でも変動するが、これはゲインの低下とみなした。

Fig. 2 Flow coefficient/Mold area ($W=50[t]$)

2.2 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3種類の外乱が大きいことが確認された。なお、基本的に定値制御であるレベル制御系のレベル変動要因として、制御系の不安定化が原因のハンチングや、非線形要素が原因の自励振動も考えられるが、開ループ状態においてもレベル変動が確認されたので、外乱と断定した。3種類の外乱の周波数が近いことが特徴である。

2.2.1 バルジング外乱

周波数：0.13[Hz] 以下

バルジングとは、凝固した薄い鋼の部分が、ロールの支持が無い部分で、外側に膨らむ現象である。このバ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、[ロール間隔/鋳造速度]の値と一致することが確認された。鋳造速度の高速化に伴い、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。

2.2.2 中間周波数外乱

周波数：0.2～0.5[Hz] 前後

この外乱は、前述のバルジング外乱と後述の波立ち外乱の中間にあるので、中間周波数外乱と呼ぶこととする。発生頻度は少ないものの、周波数が比較的高く振幅が大きい。発生原因は特定できなかった。

後述(3.2)するように、対象とするレベル制御系では、制御ゲインを大きくするほど、この外乱は増幅され、また、操作量も大きくなる。このため、2.2.1とは逆に、中間周波数外乱が加わったときは、制御ゲインを低くする必要がある。

2.2.3 波立ち外乱

周波数：0.7[Hz] 以上

この外乱は、Fig. 3に示すように鋳型の長辺を半波長とする鋳型内溶鋼の1次モード表面波の定常波であることが確認された。レベル計は鋳型の中心からずれたところに一つ取り付けられている。流量調整により制御できるのは、湯面全体の上下変動のみであるため、1次のモードの表面波は不可制御である。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。

Fig. 3 Surface wave

2.3 外乱パターン

つぎに、3種類の外乱の発生状況を調べた。結果をFig. 4に示す。発生パターンは大別して3種類あった。

Fig. 4 Disturbance patterns

パターンaは、波立ち外乱のみが加わっている状態であり、鋳造時間全体の75%を占めた。パターンbは、バルジング外乱と波立ち外乱が存在する状態で、20%を占めた。パターンcでは、中間周波数外乱と波立ち外乱が印加しており、残りの5%を占めた。

3. H^∞ コントローラテーブル

3.1 制御系設計方針

制御対象のゲインが大きく変化し、外乱パターンも変化するため、二つの変化に対してコントローラを切り換える適応的な制御系を構成することとした。各コントローラは周波数領域での仕様を反映でき、また、ロバスト安定性を保証できる H^∞ 制御を用いることとした。

制御対象のゲイン K_f/A の変化に対しては、 K_f/A の値をオンラインで (6) 式から計算し、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。

つぎに、外乱パターンの変化に対しては、中間周波数外乱の大きさに応じて H^∞ コントローラを切り換える。具体的には、外乱パターン a と b に対しては、ハイゲインのコントローラ (H) を設計し、外乱抑制帯域を広げる。外乱パターン c に関しては、逆にゲインを高くしないコントローラを設計し、中間周波数外乱の過大な増幅を避ける。ゲインを高くしないコントローラは、中間周波数外乱の大きさに応じてミドルゲイン (M) とローゲイン (L) の 2 種類設計する。

従来の PID コントローラでは、外乱パターンの変化を考慮しておらず、わずか 5% を占める外乱パターン c に対して設計されており、鋳造機の性能を十分に引き出しているとは言えない状況と考えられた。

3.2 ハイゲイン型コントローラの設計

一般化制御対象を Fig. 5 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。次の H^∞ 制御問題を解く。

$$\left\| \frac{W_1(s)S(s)}{W_2(s)R(s)} \right\|_\infty < 1 \quad (7)$$

$$S(s) = (1 + P(s)K(s))^{-1} \quad (8)$$

Fig. 5 Generalized plant

$$R(s) = K(s)(1 + P(s)K(s))^{-1} \quad (9)$$

このとき、

$$y(s) = S(s)w(s) \quad (10)$$

$$u(s) = R(s)w(s) \quad (11)$$

(10), (11) 式より、感度関数 S を整形することにより外乱抑制性が、 R を整形することによりロバスト安定性と、外乱に対する操作量の周波数領域での応答が設定できる。

いま、 $K_f/A = 0.6 \sim 2.1$ の範囲を 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する。制御対象の特性変化を狭い範囲の中で考えればよいので制御性が保守的になるのを避けることができる。

$K_f/A = 1.3$ のときの設計例を示す。 $K_f/A = 1.2 \sim 1.3$ の区間に対して、 $K_f/A = 1.3$ をノミナルプラントとする。この区間の K_f/A は 1.3 より小さいので、 K_f/A の変化に対しては安定側となるため、 H^∞ コントローラの設計時は K_f/A の変化は考慮しない。

重み関数は次のように決定した。

$$W_1(s) = \frac{0.72(s + 6.28 \times 10^{-2})}{s(s + 6.28 \times 10^{-6})} \quad (12)$$

$$W_2(s) = \frac{3.0(s + 1.20)^5}{(s + 2.40)^5} \quad (13)$$

Fig. 6 に W_1, W_2 のゲイン線図を示す。まず、ロバスト安定性を確保するために、 W_2 は制御対象の加法的な不確かさ Δ を高周波域で覆うように設定する。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 $\pm 20\%$ の不確かさがあるものと評価している。さらに、スプilloーバを避けるために、波立ち外乱の周波数で 0[dB] を越えさせる。

Fig. 6 Gain diagram of weighting functions

Fig. 7 Three types of H^∞ controllers Fig. 8 S - R plots

W_1 は収束計算で可能な限り大きくしてある。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) を用い、Glover-Doyle の解法⁶⁾によりコントローラを得た。なお、このとき、制御対象は原点に極を持つため、解法の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⁷⁾を用いて前提条件を満足させた⁸⁾。

13次のコントローラが次のように得られた。

$$K(s) = 1.35 \times 10^2 \frac{\prod_{n=1}^{12} (s + z_n)}{\prod_{n=1}^{13} (s + p_n)} \quad (14)$$

コントローラのボード線図を Fig. 7 左に、 S と R のゲイン線図を Fig. 8 中央左に示す (H8 はハイゲイン型の8番を示す)。バルジング外乱を抑制するコントローラとなっており、外乱パターン a と b の 95% の範囲をカバーできる。

zeros	poles
-5.68×10^{-2}	-6.28×10^{-6}
-1.00	-1.00
-1.00	-1.00
-2.39	-1.25 $\pm 1.62j$
-2.40 $\pm 7.93 \times 10^{-3}j$	-1.82 $\pm 4.46 \times 10^{-1}j$
-2.41 $\pm 4.91 \times 10^{-3}j$	-1.82
-3.33	-3.37
-5.00	-4.74
$-1.36 \times 10^1 \pm 7.87j$	$-1.37 \times 10^1 \pm 7.90j$
	-4.04

しかし、同時に、パターンcの中間周波数外乱に対してはレベル変動、操作量ともに大きくなることがわかる。最悪の場合、アクチュエータの速度リミッタにより飽和し、レベル制御が不安定化することも考えられる。

3.3 ミドルゲイン型コントローラ的设计

中間周波数外乱の増幅を避けるコントローラを設計する。ハイゲイン型に比べて、 W_2 をそのままに、 W_1 を小さく設定することにより、制御帯域は狭くなるが、中間周波数外乱の過度の増幅を防ぐことが可能となる。

W_1 を次のように決めた。

$$W_1(s) = \frac{0.77(s + 2.17 \times 10^{-1})^2}{s(s + 6.28 \times 10^{-6})} \quad (15)$$

コントローラは次式のように得られた。

$$K(s) = 8.64 \frac{\prod_{n=1}^{12} (s + z_n)}{\prod_{n=1}^{13} (s + p_n)} \quad (16)$$

zeros	poles
-1.01×10^{-1}	-6.28×10^{-6}
-1.00 $\pm 2.66 \times 10^{-8}j$	-1.00
-2.39 $\pm 3.77 \times 10^{-3}j$	-1.00
-2.40 $\pm 6.07 \times 10^{-3}j$	-1.90 $\pm 2.39j$
-2.41	-1.92
-3.33	-1.98 $\pm 4.23 \times 10^{-1}j$
-5.00	-3.66 $\pm 3.41 \times 10^{-1}j$
-1.36 $\pm 7.87j$	$-1.39 \times 10^1 \pm 8.05j$
	-4.06×10^1

コントローラのボード線図をFig. 7中央に、 S と R のゲイン線図をFig. 8中央に示す(M8はミドルゲイン型の8番を示す)。 S のピークがハイゲイン型より下がったことより、中間周波数外乱の増幅率が減少したことがわかる。さらに、 R も小さくなっており、操作量が小さくなったことがわかる。

3.4 ローゲイン型コントローラ的设计

中間周波数外乱の増幅率の低減を優先し、制御帯域をさらに狭くしたコントローラを設計する。ミドルゲイン型に比べて、 W_1 、 W_2 ともに小さく設定する。 W_1 、 W_2 を次のように決めた。

$$W_1(s) = \frac{0.77(s + 1.65 \times 10^{-1})^2}{s(s + 6.28 \times 10^{-6})} \quad (17)$$

$$W_2(s) = \frac{3.0(s + 0.40)^5}{(s + 0.80)^5} \quad (18)$$

コントローラは次式となった。

$$K(s) = 7.51 \frac{\prod_{n=1}^{12} (s + z_n)}{\prod_{n=1}^{13} (s + p_n)} \quad (19)$$

zeros	poles
-7.71×10^{-2}	-6.28×10^{-6}
$-7.96 \times 10^{-1} \pm 2.58 \times 10^{-3}j$	-6.46×10^{-1}
$-8.01 \times 10^{-1} \pm 4.16 \times 10^{-3}j$	$-6.64 \times 10^{-1} \pm 1.27 \times 10^{-1}j$
-8.04×10^{-1}	$-8.17 \times 10^{-1} \pm 4.19 \times 10^{-1}j$
-1.00 $\pm 1.76 \times 10^{-5}j$	-1.00
-3.33	-1.00
-5.00	-3.97 $\pm 2.34j$
-1.36 $\pm 7.87j$	$-1.39 \times 10^1 \pm 8.08j$
	-3.53×10^1

コントローラのボード線図をFig. 7右に、 S と R のゲイン線図をFig. 8中央右に示す(L8はローゲイン型の8番を示す)。中間周波数外乱に対するレベル変動と操作量がさらに小さくなったことがわかる。

3.5 テーブルの作成

K_f/A の値を0.6から2.1まで0.1ごとに、3.2から3.4と同様にしてコントローラを設計し、 H^∞ コントローラのテーブルを作成する。結果として、合計48個の H^∞ コントローラからなるテーブルが得られた。Fig. 8に S と R のゲイン線図のテーブルを示す。

なお、従来使用していたPIDコントローラはFig. 8中央のミドルゲイン型(M)とはほぼ同じ特性を持っていた。ハイゲイン型(H)を使用すると、外乱を抑制する帯域が拡大することがわかる。

4. 切り換え則

Fig. 9に構成する制御系のブロック図を示す。

このとき、外乱パターンの検出は、簡単のため外乱ではなくレベルで代用する。しきい値がレベル変動の振幅

Fig. 9 Block diagram of the control system

Fig. 10 Switching logic

なので直感的にわかりやすく調整しやすい。

具体的には、Fig. 10 (a) に示すように、過去の一定時間のレベル変動のFFTにより中間周波数外乱振幅 err を検出する。なお、コントローラの種類 (H, M, L) が切り換わったときは、切り換え後のデータのみを利用して検出を行う。これにより、頻繁に切り換えが起こりレベルが不安定化するのを避ける。

たとえば、M コントローラが選ばれているとして、検出されたレベル偏差 err がしきい値 $err_m_to_h$ 以下ならば H 側に切り換え、しきい値 $err_m_to_l$ 以上ならば L 側に切り換える。

なお、レベル変動振幅のしきい値には、アクチュエータの速度リミットによる制限がある。正弦波の外乱が加わっていると、外乱の角周波数を ω_0 とする。また、速度リミットを $\dot{u}_{max}$ とする。

このとき、(10), (11) 式より、レベル偏差が次の値を超えると飽和する。

$$err = \frac{S(j\omega_0)\dot{u}_{max}}{R(j\omega_0)\omega_0} \quad (20)$$

$S(j\omega)$ と $R(j\omega)$ は既知なので (不確かさが問題となる高周波域を除く)、中間周波数外乱帯域の ω について (20) 式を計算しておき、その最小値をローゲイン側に切り換えるしきい値の上限とする。

逆に、ハイゲイン側に切り換える場合は、レベル変動が [ハイゲイン側の $S(j\omega)$ / 現在の $S(j\omega)$] に比例して増幅される。そこで、ローゲインに切り換えるしきい値に [現在の $S(j\omega)$ / ハイゲイン側の $S(j\omega)$] を乗じた値を、ハイゲイン側に切り換えるときのしきい値の上限とする。これにより、アクチュエータの速度リミットによる飽和を避けることが可能となる。なお、以上の値はオフラインで計算しておき、これらの値を超えない範囲で、現場で調整を行うこととした。

5. 実験

5.1 コントローラの実装

5.1.1 H^∞ コントローラの離散化

レベル制御系の制御帯域は 1[Hz] より小さいことから、サンプリング周期をその 1/10 の $T=100[\text{ms}]$ とし、設計

したコントローラを双一次変換 $s = (2/T)(1-z^{-1})/(1+z^{-1})$ により離散化した。

さらに、ステッピングシリンダの入力部は、速度型⁹⁾ のアルゴリズムに対応しているため、位置型のアルゴリズムを速度型に変換して実装した。このため、 H^∞ コントローラの切り換えはバンプレスに行われ、リセットワインドアップの対策も容易となる。さらに、従来の PID 制御や手動制御との切り換えもバンプレスに行えることとなった。

5.1.2 中間周波数外乱の検出と切り換え

FFT に要する時間は、周波数分解能と適応の速さの兼ね合いから 51.2[s] とした。

チューニングの結果、しきい値は、 $err_h_to_m = 1.5[\text{mm}]$, $err_m_to_l = 2.3[\text{mm}]$, $err_m_to_h = 0.8[\text{mm}]$, $err_l_to_m = 2.1[\text{mm}]$, と設定した。

5.1.3 他の補償

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、(4) 式に基づき、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に対してフィードフォワード補償を行う。また、ステッピングシリンダの機械的なガタの補償も行っている。

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、リセットワインドアップ防止機能を付加した。また、目標湯面レベル変更機能も付加し、工程の自動化に役立てている。

5.1.4 ハードウェア

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

Fig. 11 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。

5.2 実験結果

Fig. 12 は、従来使用していた PID 制御と H^∞ 制御の比較を示す。 H^∞ 制御では、特に低周波成分が抑制され、

Fig. 11 Screen of the controlling computer

Fig. 12 Experimental result 1

レベル変動が減少していることがわかる。

Fig. 13 は、パルジング外乱発生時のPID制御と H^∞ 制御の比較を示す。 casting速度2.2[m]の高速 casting中に、周期約7.5[s]のパルジング外乱が印加しており、制御上難しい場合であるが、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。

Fig. 13 Experimental result 2

Fig. 14 は、 casting速度を減少させていく casting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。常に適切な H^∞ コントローラで制御しているた

Fig. 14 Experimental result 3

め、 casting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、フィードフォワードの効果も確認できる。非常時の緊急停止のように casting速度を急減させるときにも対応可能となっている。

Fig. 15 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、 $H \rightarrow M \rightarrow H$ とコントローラが切り換わった例である。

Fig. 15 Experimental result 4

Fig. 16 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4.3[mm]から2.4[mm]へと、40%減少した。

6. おわりに

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用いて、連続 casting機の鋳型内湯面レベル変動の低減を図り、平均で40%抑制することに成功した。本システムは、試運転の後、1995年より常時稼働している。

Fig. 16 Histograms of the results

参考文献

- 1) 黒川, 加藤, 近藤, 美多, 三平, 劉: 連続鋳造機モールドレベル制御への H^∞ 制御理論適用; ロバスト制御研究会第2回研究発表会, pp. 109–114 (1991)
- 2) 古田, 富田: 先端制御技術の動向報告; 計測と制御, Vol. 29, No. 10, pp. 953–958 (1990)
- 3) 前川, 藤田, 安田, 山下, 小川, 箕輪: 電気油圧式振動台への H^2 制御の適用; 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 58, No. 555, pp. 3253–3258 (1992)
- 4) 吉田, 米田, 川合: 転炉排ガス回収制御; 計測と制御, Vol. 27, No. 4, pp. 341–347 (1988)
- 5) K. J. Åström and B. Wittenmark: *Adaptive Control*, Addison-Wesley, pp. 390–418 (1995)
- 6) K. Glover and J. Doyle: State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H^∞ -norm bound and relations to risk sensitivity; *Systems and Control Letters*, Vol. 11, pp. 167–172 (1988)
- 7) 原: H^∞ 制御によるサーボ系の設計; SICE 基礎講習会— H^∞ 制御入門—テキスト, SICE, pp. 63–85 (1991)
- 8) 村上, 西田, 三木, 松浦, 中尾: 連続鋳造機の湯面レベル制御への H^∞ 制御の適用; 第36回自動制御連合講演会, pp. 195–196 (1993)
- 9) 須田: PID 制御, システム制御情報ライブラリー6, 朝倉書店 (1992)