

連鑄機のモールド湯面変動制御技術

Control of Meniscus Fluctuation in Mold of Continuous Caster

新日本製鉄(株) 君津製鉄所

近藤琢巳*・黒川哲明・加藤裕一
山口福吉

1. 緒言

鉄鋼業においては、製品品質に対する顧客の要求が年々厳格化しており、連続鑄造工程では種々の製造技術の開発が行われている。製品の表面品質に大きな影響を及ぼす要因の1つとして連鑄機のモールド湯面の変動が挙げられ、従来から種々の対応がなされて来たが、その変動量を更に低下させる技術の開発は最近の連続鑄造工程における大きな課題である。

最近のモールド湯面変動制御技術としては、操作系の機械的精度向上^{1) 2) 3)}、最新の制御理論を用いた高精度制御方式の採用^{2) 4) 5) 6)}が主流となっている。そこで、モールド湯面変動抑制のために有効と思われる操作系の改善、新たな制御を連続鑄造機において適用し、その効果を定量的に確認したので報告する。

2. モールド湯面変動抑制の理論的検討

(1) モールド湯面変動の発生要因

モールド湯面制御系の概念図をFig.1に示す。

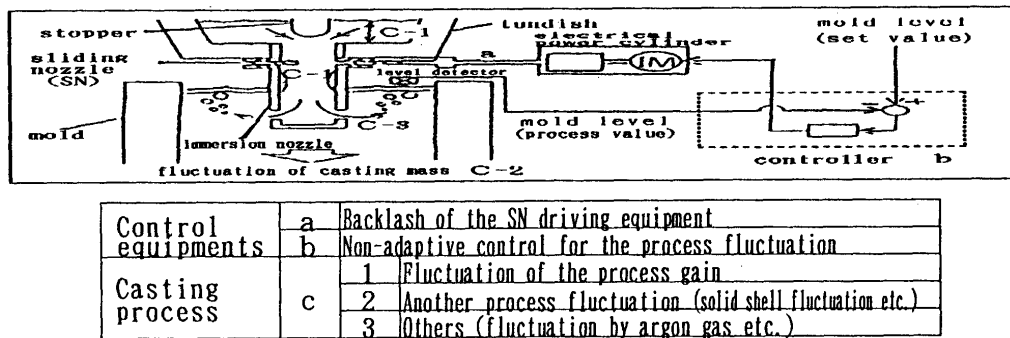


Fig.1 Schematic view of mold meniscus control system and problems on the control

Fig.1より、鑄造プロセスやモールド湯面変動制御設備自体がモールド湯面変動を発生させる要因は 1) 操作系の機械的精度 2) プロセス変動 3) プロセス外乱 の3点に大別されると考える。

(2) モールド湯面変動抑制対策の検討

前記のモールド湯面変動発生原因に対し、以下のような対策を検討した。

1) 操作系の機械的精度向上

制御操作系のガタ、動作遅れをなくし、制御系の指示に対し高精度で追従する装置の結果を検討した。Fig.2に操作系のガタ量とモールド湯面変動量の関係を示す。この検討の結果、操作系のガタ量を小さくすると湯面変動が小さくなり、その関係は(1)式で示されることが分かった。

$$\text{モールド湯面変動量} (\pm \text{mm}) = 2 \times \text{操作系ガタ量} (\text{mm}) + 3.9 \dots (1)$$

したがって、操作系を高精度化するために電気油圧ステッピングシリンダを導入して、従来の電動モーターに代えてスライダを駆動させるよう改造した。これにより、ガタ量は平均0.6mmから0.1mm以下にすることが可能である。また、同一の操作系のガタ量に対する湯面変動量のばらつきは鑄造プロセスの変動が要因と考えられ、次に述べる対策が別途必要と考えられる。

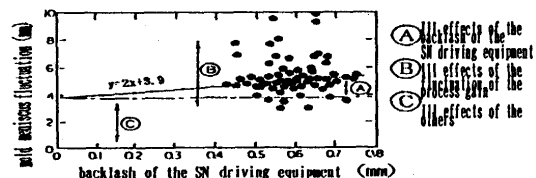


Fig.2 Relation between backlash of the SN driving equipment and mold meniscus fluctuation

2) プロセス変動対応制御

① 流量係数変化の算出

注入系ノズルの溶損、アルミナ付着を以下の「流量係数」という指標で定量化した。
単位時間当たりの溶鋼注入流量

$$\text{流量係数} = \frac{\text{スライディングノズル開度}}{\dots\dots\dots} \quad (2)$$

流量係数とモールドレベル変動との関係をFig.3に示す。この図は、モールド湯面レベル変動は流量係数に依存性を持つことを示している。これは、ノズルの溶損が大きい場合にはスライディングノズルの動作が過大となり、またノズル付着がある場合には動作が過少となりモールド湯面変動の制御精度が悪化することを示している。したがって、制御演算器がダイナミックに流量係数を計算し、それに従ってフィードバック制御の強度を変化させる適応制御を導入することが有効であると考えられる。

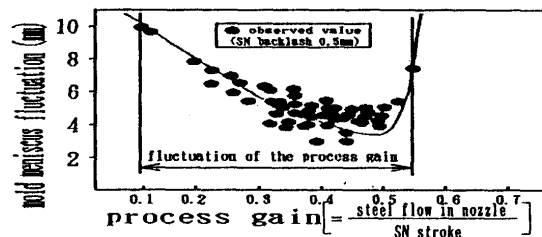


Fig. 3 Relation between process gain and mold meniscus fluctuation

流量係数に関しては以下のようなモデルを作成し、オンラインでの同定に使用した。

(3)式両辺の物理的意味は、モールド湯面レベルの変化速度に相当する。

$$\Delta Y(t) / \Delta T + v(t) = a_0 \times x(t - \tau) / A + a_1 \dots (3)$$

ΔY : サンプリグ周期内のモールド湯面変化量	ΔT : サンプリグ周期
$v(t)$: 鋳造速度	a_0 : 流量係数
τ : 遅れ時間 (後述)	A : モールド断面積
	a_1 : 補正項

すなわち、 ΔY 、 ΔT 、 $v(t)$ 、 $x(t)$ 、 A を計測し、 τ を後述の方法で推定し、逐次型最小二乗法を用いて a_0 、 a_1 を算出する。算出された a_0 に基づき制御演算器の出力を変化させる (すなわちコントローラゲインを変化させる)。

② 遅れ時間の推定

Fig.4 にスライディングノズル動作指示時からモールド湯面変動に至るまでの動作遅れ時間 (以下遅れ時間と略す) と湯面変動との関係を示す。これより、動作遅れ時間が大きいとモールド湯面変動量が大きくなることが分かる。したがって、制御演算器がダイナミックに遅れ時間を同定し、これを保障する適応制御を実施する事が有効であると考えられる。遅れ時間については以下のようなモデルを作成し、オンラインでの同定に使用した。モールド湯面レベルとスライディングノズル開度の相互相関係数 $R_{xy}(\tau)$ を(4)式のように定義する。

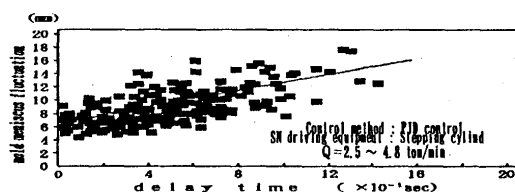


Fig. 4 Relation between delay time and mold meniscus fluctuation

$$R_{xy}(\tau) = (1/n) \sum_{k=1}^n y(k + \tau) \times \Delta x(k) \dots (4)$$

[$y(k)$: 時刻 k のモールド湯面レベル $x(k)$: 時刻 k のスライディングノズル開度]

上式は時刻 k におけるスライディングノズル開度に時刻 $k + \tau$ におけるモールド湯面レベルを乗じ、それをサンプリグ周期 n 時刻前までさかのぼって総和を求め平均化したものである。ここで τ の値を変化させ、最大の $R_{xy}(\tau)$ が得られる場合の τ を遅れ時間とする。また注入系ノズル内の気体量 (気液混合状態) は定量化ができないため上式では扱わないこととした。

3) プロセス外乱 (溶鋼の引き抜き量変動) 対応

前述の操作系高精度化や、適応制御によるプロセス変動への対応の他にモールド湯面レベル制御精度を改善するために、溶鋼の引き抜き量変動に起因する外乱への対応が重要であると考えられる。このような外乱起因の制御精度悪化は、現在のモールド湯面変動制御技術において最大の課題と言える。これに対し様々な試みがなされており、最近の報告⁴⁾

5) 6) ではオブザーバー制御の導入が有効であると言われている。本報では、これらの制御と同等な外乱の抑制が期待される H_∞ 制御理論に基づいた制御装置を検討した。

- モールド湯面レベル制御における H_∞ 制御の特徴は以下の2点である。
- ① H_∞ 制御は、外乱によって引き起こされるモールド湯面変動の周波数帯域が予想可能であれば、外乱起因湯面変動が抑制可能なように、理論的に制御装置の周波数特性を整形可能である。その概念図をFig.9に示す。すなわち、外乱によって引き起こされる湯面変動の周波数帯域の制御強度(ゲイン)を意図的に強めることができる。今回はバルジング性の外乱を対象としており、その周波数は0.01~0.1Hzの範囲である。
 - ② H_∞ 制御は、流量係数変化、遅れ時間変化に代表される製造プロセス、制御設備の変動や誤差を理論的に設計に反映可能であり、外乱に対して安定した制御(ロバスト安定性)が得られる。すなわち、変動や誤差が存在すると制御系は発散する方向にあるため、通常は制御器のゲインを低く抑えるが、低すぎると制御精度が低下する。これに対し H_∞ 制御は、プロセス・設備の変動や誤差の量から理論的にロバスト安定性が得られるゲインを周波数帯別に算出することが可能である。今回は、製造プロセス、制御設備の変動として流量係数と遅れ時間を考慮した。
- 以上の①と②の条件を連立させて、制御器を設計した。

3. 改善手段の実機適用結果

1) 操作系の高精度化の結果

Fig.5-(a)に操作系高精度化対策前、Fig.5-(b)に操作系高精度化後のモールド湯面変動量分布を示す。湯面変動量の平均値も改善されているが、特に湯面変動量10mm(全振幅)以上の比率が対策前58.3%、操作系高精度化後20.4%と大幅に向上している。

2) 適応制御によるプロセス変動(流量係数変化、遅れ時間変化)対応の結果

Fig.5-(c)に操作系高精度化+適応制御後のモールド湯面変動量分布を示す。湯面変動量の平均値はさらに改善され、また湯面変動量10mm(全振幅)以上の比率は6.8%と操作系高精度化後(Fig.5-(b))に比較しても大幅に改善されている。

3) H_∞ 制御によるプロセス外乱(溶鋼の引き抜き量変動)対応の結果

Fig.5-(d)に適応制御と H_∞ 制御を操業状況により使い分けた場合のモールド湯面変動量を示す。適応制御のみの場合(Fig.5-(c))に比較して、湯面変動量10mm(全振幅)超の比率が1.7%と改善されていることがわかる。Fig.6は適応制御では制御できなかった外乱を H_∞ 制御により抑制できることを示している。

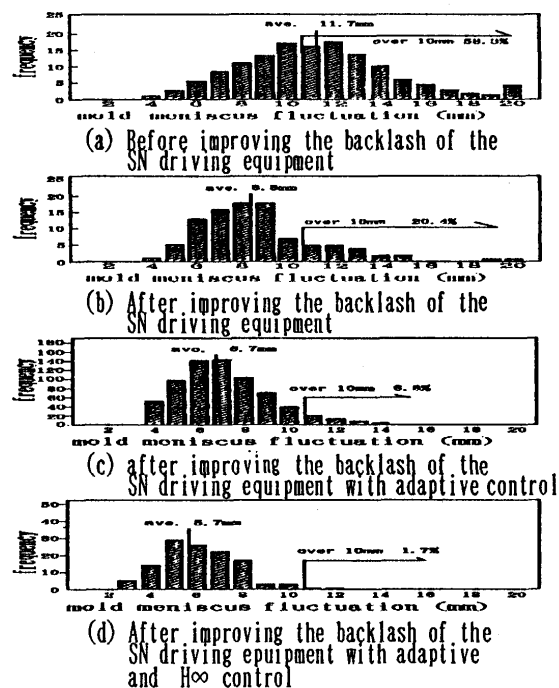


Fig.5 Distribution of the mold meniscus fluctuation.

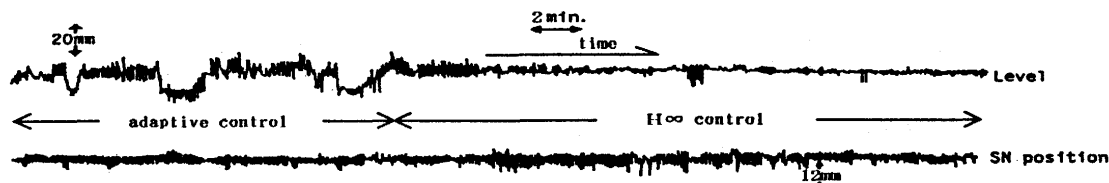


Fig.6 Comparison of adaptive control with H_∞ control (Time chart).

4. 考察

1) 操作系の高精度化について

操作系の高精度化効果は(1)式のように推定していたが、実機適用の結果、推定を大幅に上回る効果が得られた。これは、(1)式がFig.4中の測定値を回帰して得たものであり、ここでFig.4の操作系ガタ(横軸)はオフラインでの測定値であるためオンラインでの操作系ガタの変化等の影響が(1)式に含まれず過少評価となったものと考えられる。また(1)式は平均値を取り扱っていたが、実機適用結果から考えて、操作系の高精度化は大きな湯面変動を抑制する効果があると思われる。

2) 適応制御について

適応制御実施時の大きな湯面変動(例えば10mm以上)は、溶鋼の引き抜き量変動が生じる操業時に限られた。これは、今回採用した適応制御モデルがプロセス外乱を想定していないことから考えて妥当である。また、適応制御の効果は、Fig.3、Fig.4から予想した最大振幅10mm以下と考えられ、この効果はプロセス外乱が無い場合に限られる。

3) H^∞ 制御について

Table 1は適応制御における外乱の生じやすい鋼種と外乱の生じにくい鋼種の制御性比較である(ここで、外乱の生じやすい条件とは、二次冷却強度が低く、バルジングが起こりやすいことを言う)。これを、Table 2に示す H^∞ 制御における制御性と比較すると、外乱の生じやすい鋼種での制御性が大幅に改善されることがわかる。しかしまた、Table 1とTable 2を比較して、外乱の生じにくい鋼種においては H^∞ 制御の湯面変動量平均値がやや悪化している。これは、適応制御においてオンラインで流量係数変化を同定し適正な制御ゲインを用いているため、同定精度が良いと考えられる外乱の小さい場合には、 H^∞ 制御よりも制御性が良いためである。

Table1 Control performance of adaptive and H^∞ control in terms of meniscus fluctuation (P-P)

Control method Control performance	Adaptive control		H^∞ control	
	mold level fluctuation		mold level fluctuation	
	Average	rate of over 10mm	Average	rate of over 10mm
moderate cooling (large disturbance)	11.1 mm	55.5 %	7.5 mm	5.8 %
intensive cooling (small disturbance)	5.4 mm	1.7 %	7.5 mm	0 %

5. 結言

製品表面品質に大きな影響を与えるモールド湯面変動を制御するにあたり、以下に示すような知見が得られた。

- ①操作系の機械的ガタや動作遅れをなくし、制御器の指示に対し高精度で追従する装置とすることにより、ある程度のモールド湯面変動制御が可能である。
 - ②さらに、流量係数、遅れ時間をオンラインで同定する適応制御を導入することにより、①以上の制御性を発揮できる。しかし、バルジングに代表される外乱性の湯面変動を制御することは困難である。
 - ③ノズル溶損等に起因する流量係数、遅れ時間の変動を考慮に入れ、さらにバルジング性外乱を想定して外乱周期を予想し、 H^∞ 制御理論に基づいた制御器を設計して実機に導入すると、プロセス安定性を確保しつつ外乱に対し大きな制御性を発揮する。しかし、外乱の小さい操業条件では適応制御のほうが制御性が良い場合がある。
- 最後に、 H^∞ 制御の御指導を頂いた千葉大学美多教授及びそのグループに、この場を借りて深謝いたします

6. 参考文献

- 1) 中村泰樹、安井強、森井三千夫、船野三備、竹本克己、田中和雄；材料とプロセス, 8(1990), 194.
- 2) 白石愛明、山田統明、佐竹諭、笹部幸博、竹本淳一、佐保伸重；材料とプロセス, 4(1991), 310.
- 3) 加藤博、上村政治、鍋島秀雄；材料とプロセス, 4(1991), 311.
- 4) 杉沢元達、野村寛、大西正之、茨木通夫、加地孝行、新井和夫；材料とプロセス, 4(1991), 312.
- 5) 浅野一哉、加地孝行、新井和夫、鍋島裕樹、森脇三郎、田中修二；材料とプロセス, 4(1991), 332.
- 6) 高士昌樹、森脇三郎、田中修二、加地孝行、浅野一哉、新井和夫；材料とプロセス, 4(1991), 1294.