

技術報告

OG 炉圧制御への最適制御理論の適用

井上 敏夫*・福本 武也*²・川合 成治*³

吉井 賢太*・立花 勲*

An Application of the Optimal Control Theory to the OG Pressure Control System

Toshio INOUE, Takeya FUKUMOTO, Shigeharu KAWAI,
Kenta YOSHII and Tsuyoshi TACHIBANA

Synopsis:

In the OG pressure control system equipped by only PI controller, there existed the problem that was very slow to respond to violent process fluctuations. The optimal control method was applied to improve this problem. Instead of installing another new sensing device, the existing sensing facilities were used and modification was made on the process variables which were measured by them. The higher controllability was achieved by means of the compensation of the delay time of the PI controller by identifying the process characteristics using higher differential equations.

In this paper, the new control system achieved by the method mentioned above is described. It is clearly indicated that the new method is very helpful in obtaining a high rate of LDG recovery.

1. 緒 言

代表的製鋼法である純酸素吹転炉法では、吹錬過程で溶銑の脱炭反応および不純物の酸化反応により、CO ガスを主成分とした大量の吹錬生成ガス（以下 LDG という）を発生する。この LDG の処理方法は、ガスを燃焼させる廃熱ボイラ方式から、最近では排ガス未燃焼回収法の一つである OG (Oxygen Converter Gas Recovery) 方式へと移行している。OG とは転炉炉口からの空気の流入を抑制し、LDG を未燃焼のまま冷却・回収する方式である。

この OG 設備によるガスエネルギー回収量は年産 600 万 t の転炉工場では約 12×10^{11} kcal/y にも達する。したがって、このガスエネルギーを回収し有効に利用すれば、製鉄所における購入燃料の低減が図れる。ガス回収量の向上を図るには炉内圧力（以下 P_0 という）の制御をきめ細かく行うことが必要である。

従来は PI 制御により PA ダンパの開閉を行い P_0 の制御を実施してきたが、吹錬条件の変化や副原料投入等の外乱に対し、十分な追従が得られない問題点があった。筆者らはこの改善策として最適制御理論を用いた制

御方式を採用し、制御性の向上・ガス回収の向上をはかった。

本報では、その制御方式、制御システム構成の概要および実操業データについて報告する。

2. OG プロセスの概要

OG 設備と P_0 制御の概要を Fig. 1 に示す。ランスより供給される吹錬用の酸素は、転炉内で溶銑中の C, Si, P, S 等鋼にとっては不純物な元素を酸化・除去する。この反応で炉内より発生した LDG は高温かつ多量のダストを含んでいるため、フード部で冷却し、さらに一次集塵器 (1 DC)、二次集塵器 (2 DC) にて集塵・冷却して、誘引送風機 (IDF)、回収弁を経てガスホルダに回収される。可燃性ガスを大量に回収するため、制御装置には各種の条件が必要で、その制約条件が満たされないときは装置保護の立場から発生ガスは煙突より燃焼放散させる。

さて、 P_0 制御の方法は炉口の圧力 P_0 をスカート上部付近で検出し、圧力調節計によつて 2 DC ダンパを操作することにより実施している。操業は P_0 が大気圧 P_a に等しくなるように行われ、 $P_0 > P_a$ となれば LDG が

昭和 58 年 11 月 14 日受付 (Received Nov. 14, 1983)

* (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., 1 Kanazawa-cho Kakogawa 675-01)

*² 富士電機製造(株)東京工場 (Tokyo Factory, Fuji Electric Co., Ltd.)

*³ 富士ファコム制御(株)第 1 システム開発システム研究課 (First Systems Development Dept. Systems Research Section Fujifacom Co.)

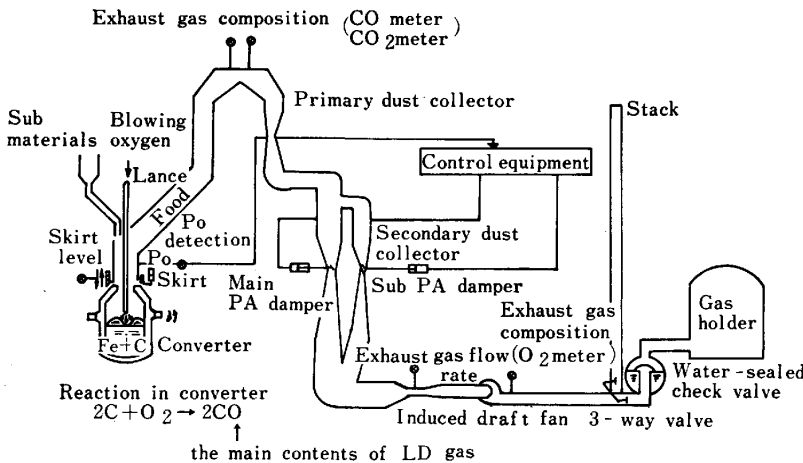


Fig. 1. An outline of OG process and P_0 control.

外部に噴出されて回収量が低下する。逆に $P_0 < P_a$ となれば炉口から空気を吸い込み CO ガスが燃焼して CO_2 ガスとなり、ガスカロリーが低下する。このため、 P_0 制御は追従性の良い制御が要求される。

3. PI 制御の問題点

従来の P_0 制御はアナログ調節計による PI 制御で行われてきたが、次のような問題点があつた。

転炉プロセスでは

- (1) 炉口とスカートの間隔が変化する
- (2) 副原料の投入量、投入時期および投入方法が異なる
- (3) 吹錬 O_2 流量やランス高さ制御が変わる
- (4) スロッピングの有無
- (5) IDF サクシジョンダンパによる排ガス流量制御等があり、これが P_0 制御系の外乱となりプロセスゲインが変化する。このプロセスゲインの変化の要因としては、(1) 項の炉口とスカートの間隔が変化することが最も大きい。スカート高さとはプロセスゲインの変動量の関係を各種実験により定量的に把握した。その結果を Fig. 2 に示す。図によればスカート高さが 450 mm の時と 200 mm の時では、ゲインが 0.15 から 0.6 に変化していることがわかる。したがつて、PI 調節計のゲインも炉口の開孔面積に適応させるのが望ましい。しかし、炉口の開孔面積は炉口への地金の付着により操業中でも変化し、それを定量的に計測することは困難である。従来は開孔面積が最も小さい時に安定した制御ができるように調節計のゲインを低く設定していた。それゆえに、PI 制御では応答速度を速くできない制御性の悪い設備であつた。また、副原料投入時等に発生ガスが急激に変化した時には、炉口よりのガスの吹き出しを防止するためにオペレータの P_0 設定値変更の操作が必要と

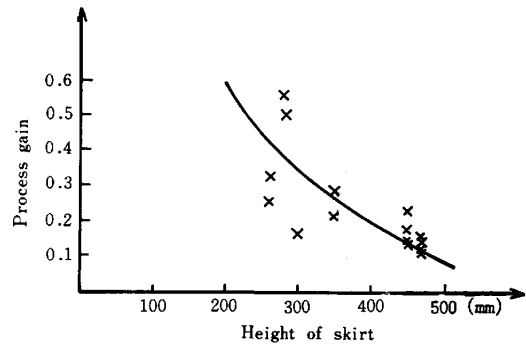


Fig. 2. Relation between process gain and height of skirt.

なつていた。

筆者らはこの PI 制御の問題点の解決を図るために、最適制御理論を用いた計装システムを導入した。

4. 最適制御の導入

4.1 最適制御の考え方

最適制御理論を実プロセスに適用する方法として、従来の PI 制御ループを取り除いて新しく最適制御を導入する方法と、PI 制御ループをそのまま残した状態で最適制御を付加する方法がある。筆者らは後者を採用し、システム設計はプロセスの計測点を増設することなく、 P_0 計測のみで実施した。

本制御システムの基本的な考え方を Fig. 3 のブロック線図に従つて説明する。

親ダンパ、子ダンパの動特性を無駄時間 + 1 次遅れ、配管内の圧力伝播特性を 1 次遅れで近似し、これらを合わせたものすなわち図中の一点鎖線の枠内の部分を OG のプロセスモデルと考える。このプロセスに対し従来の PI 制御による P_0 制御を行う。そして、OG プロセスと PI 制御ループを合わせたブロックすなわち図中の破線の枠内の部分を新しいプロセスとみなし、このプロセ

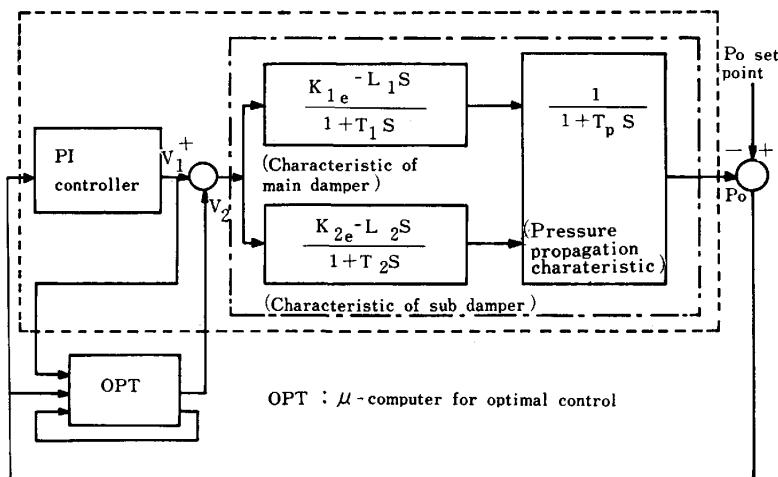


Fig. 3. Block diagram of P_0 control system using optimal control.

スに最適制御を適用する。すなわち、PI 制御で生じた制御偏差に対し、最適制御はこの制御偏差をさらに小さくするにはたらく。

4.2 プロセス特性の同定

最適制御式の係数を求めるにはプロセス特性の同定を行わねばならない。Fig. 3 における親ダンパと子ダンパの伝達関数において、 T_1 と T_2 、 L_1 と L_2 はそれぞれ近似するため $T_1=T_2=T_M$ 、 $L_1=L_2=L$ と考え、 $K_1+K_2=K_P$ とおくとその合成伝達関数は $K_P e^{-LS} / (1+T_M S)$ となる。したがって配管部の伝達関数は $1 / (1+T_P S)$ であるからプロセスの総合伝達関数 $F(S)$ は

$$F(S) = \frac{K_P e^{-LS}}{1+T_M S} \cdot \frac{1}{1+T_P S} \dots\dots\dots (1)$$

となる。

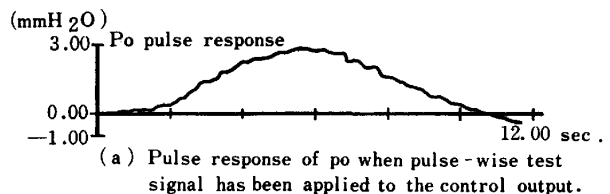
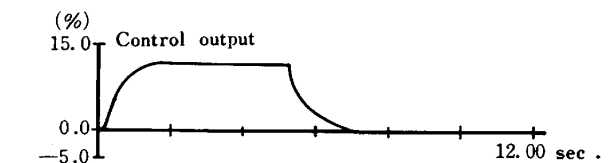
プロセス特性の同定は実作業中に制御器出力にパルス状の試験信号を印加し、その応答波形を解析することにより行う。OG 設備の場合はすでに述べたように外乱が多発するため、制御系の同定にはこれらの外乱の影響を受けにくい特性面積法¹⁾を用いた。すなわち、Fig. 4-(a) に示す系のパルス応答波形を測定し、これを図の合成によつてステップ応答に変換し、Fig. 4-(b) を得る。この応答波形により囲まれる S_0 、 S_1 、 S_2 とプロセスパラメータ K_P 、 T_M 、 T_P 、 L の関係を求めると次のようになる。

いま、ステップ関数を $U(S) = A/S$ とすれば、系の出力 $P_0(S)$ は

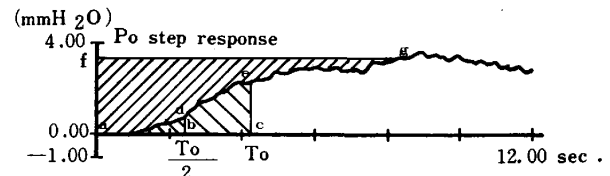
$$P_0(S) = \frac{K_P e^{-LS}}{1+T_M S} \cdot \frac{1}{1+T_P S} \cdot \frac{A}{S} \dots\dots\dots (2)$$

となる。上式を変形して

$$P_0(S) = K_P A e^{-LS} \left\{ \frac{1}{S} + \frac{T_M}{T_P - T_M} \cdot \frac{1}{S + 1/T_M} + \frac{T_P}{T_M - T_P} \cdot \frac{1}{S + 1/T_P} \right\} \dots\dots\dots (3)$$



(a) Pulse response of p_0 when pulse-wise test signal has been applied to the control output.



S_0 : Area surrounded by a, f, g
 S_1 : Area surrounded by a, c, e
 S_2 : Area surrounded by a, b, d

(b) Results of the step response converted from pulse response.

Fig. 4. Identification by characteristic area method.

を得る。

ここで上式のむだ時間要素 e^{-LS} を除いた式について逆変換すると、

$$\hat{P}_0(t) = K_P A \left\{ 1 + \frac{T_M}{T_P - T_M} e^{-1/T_M \cdot t} + \frac{T_P}{T_M - T_P} e^{-1/T_P \cdot t} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となる。特性面積法により Fig. 4-(b) の図中の面積 S_0 、 S_1 、 S_2 および遅れ時間定数 T_0 は次のようになる。

$$S_0 = A \cdot K_P (T_M + T_P + L) \dots\dots\dots (5)$$

$$S_1 = \int_0^{T_0} P_0(t) dt \dots\dots\dots (6)$$

$$S_2 = \int_0^{1/2 \cdot T_0} P_0(t) dt \dots\dots\dots (7)$$

$$T_0 = T_M + T_P + L \dots\dots\dots (8)$$

式(6), (7)をむだ時間 L を考慮して積分すると

$$S_1 = \int_0^{T_0} P_0(t) dt = \int_0^{T_0-L} P_0(t+L) dt$$

$$= \int_0^{T_0-L} \hat{P}_0(t) dt \dots\dots\dots (9)$$

$$S_2 = \int_0^{1/2 \cdot T_0} P_0(t) dt = \int_0^{1/2 \cdot T_0-L} P_0(t+L) dt$$

$$= \int_0^{1/2 \cdot T_0-L} \hat{P}_0(t) dt \dots\dots\dots (10)$$

を得る. K_P は印加信号波形と応答波形の高さの比より求め, プロセス特性 T_M, T_P, L は図より面積 S_0, S_1, S_2 を求めれば, 式(5), (9), (10)により計算される.

筆者らは $K_P=0.286, T_P=2.6, T_M=0.7, L=1.0$ と同定した.

4.3 最適制御の定式化

Fig. 3 のブロック線図を離散型のモデル式で表すと次のようになる. ここで $P_0(k), V_1(k), V_2(k)$ はそれぞれ炉圧 P_0 , PI 制御器および最適制御器の時刻 k における値である.

[プロセス部]

$$P_0(k+1) = P_0(k) + \Delta P_0(k+1) \dots\dots\dots (11)$$

(1)式をパルス伝達で表すと

$$H(Z) = \frac{Z-1}{Z} \left[\frac{F(S)}{S} \right] [Z] = \frac{B_1 Z + B_2}{Z^2 - A_1 Z - A_2} \cdot Z^{-L}$$

となる.

$$\Delta P_0(Z) = F(Z) \{ \Delta V_1(Z) + \Delta V_2(Z) \} \text{ より}$$

$$\Delta P_0(k+1) = A_1 \Delta P_0(k) + A_2 \Delta P_0(k-1) + B_1 \Delta V_1(k-l) + B_2 \Delta V_1(k-l-1) + B_1 \Delta V_2(k-l) + B_2 \Delta V_2(k-l-1) \dots\dots\dots (12)$$

ここで A_1, A_2, B_1, B_2 は次式で求める.

$$A_1 = \alpha + \beta, A_2 = -\alpha\beta \quad (\alpha = e^{-\tau/T_M}, \beta = e^{-\tau/T_P})$$

$$B_1 = K_P \{ (1-\beta)/T_M - (1-\alpha)/T_P \},$$

$$B_2 = K_P \{ (1-\beta)/T_P - (1-\alpha)/T_M \} / (1/T_M - 1/T_P)$$

ただし

Δ : 時間差分, τ : サンプル間隔, $l = \tau/L$

[PI 制御部]

$$\Delta V_1(k) = -K_c [\Delta P_0(k) + \tau/T_I \{ P_0(k) - P_{0 \text{ set}} \}] \dots\dots\dots (13)$$

ただし

K_c : 比例ゲイン, T_I : 積分時定数, $P_{0 \text{ set}}$: 設定値

これに対して制御偏差の大きさを考慮した次の評価関数を考える.

$$J_1 = \sum_{i=1}^I \{ (P_0(k+i) - P_{0 \text{ set}})^2 + r \Delta V_2^2(k+i-1) \}$$

$$\dots\dots\dots (14)$$

ただし, r は重みで正定数である.

この評価関数を最小にする $\Delta V_2(k)$ をレギュレータ問題として求めると次式が得られる.

$$\Delta V_2(k) = -G \cdot Z(k) \dots\dots\dots (15)$$

ここで G は離散型リカッタの方程式²⁾を解いて得られる最適フィードバック・ゲインであり, $Z(k)$ は状態ベクトルで

$$Z^T(k) = [P_0(k) - P_{0 \text{ set}}, \Delta P_0(k), \Delta P_0(k-1), \Delta V_1(k-1), \dots, \Delta V_1(k-l-1), \Delta V_2(k-1), \Delta V_2(k-2) \dots, \Delta V_2(k-l-2)] \dots\dots\dots (16)$$

である.

4.4 制御パラメータの決定

制御パラメータは評価関数の重み r を段階的に変えて, その妥当性をシミュレーション結果から判断して決定させる. 本システムはその基準として, プロセス・ゲイン K_P が3倍変化しても不安定にならないような r を採用する.

上記のような思想で設計したシステムの妥当性を確認するために Fig. 3 のブロック線図に基づいたシミュレーションプログラムを作成し, PI 制御のみのそれと比較を行った. プロセスの外乱としては鉄鉱石投入時の発生ガス量の変動を Fig. 5-(a) に示すようにランプ状の変化をするものと仮定した. PI 制御による P_0 制御と PI + 最適制御による P_0 制御のシミュレーション結果を Fig. 5-(b) に示す. 図より, 両者の制御偏差を比較すると, PI 制御の場合は最大 2.2 mmH₂O, 最適制御を付加した場合は最大 1.1 mmH₂O となっていることがわかる. したがって, 最適制御を導入することにより制御偏差が PI 制御の 50% 程度の大きさに改善されることが期待できる.

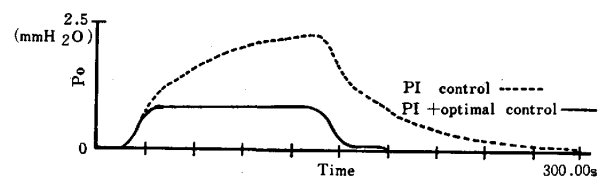
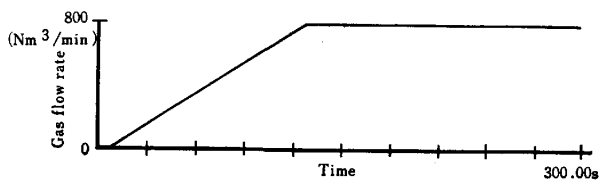


Fig. 5. Result of P_0 control simulation.

4.5 制御装置の概要

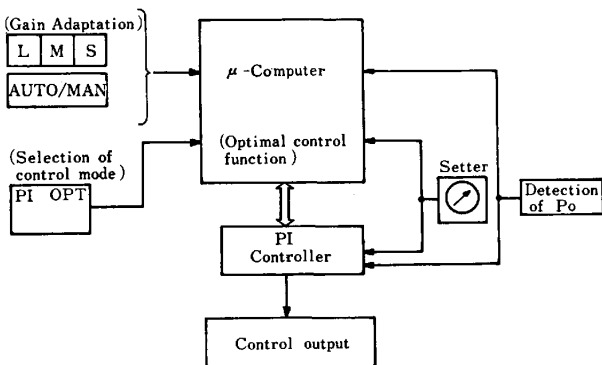
4.1 に述べた考え方から制御装置の機能を次のようにした。

(1) PI 制御ループに最適制御を付加し、それぞれをシングルループコントローラとマイクロコンピュータにて実行する。

(2) 制御モードには「PI 制御」と「PI +最適制御」の二つのモードがあり、オペレータによりいずれの方式にも自由に切り換えられる。また、切り換えは双方向とも無干渉（バンプレス）に行われる。

(3) 最適制御用マイクロコンピュータの故障時には自動的にシングルループコントローラ単独の「PI 制御」モードに切り換わる。

(4) ハンチングの自動検出機能を付加し、PI 制御ゲインを自動的に変更してハンチングを防止する適応制御



PI : PI control
OPT : μ-computer for optimal control

Fig. 6. Configuration of control system.

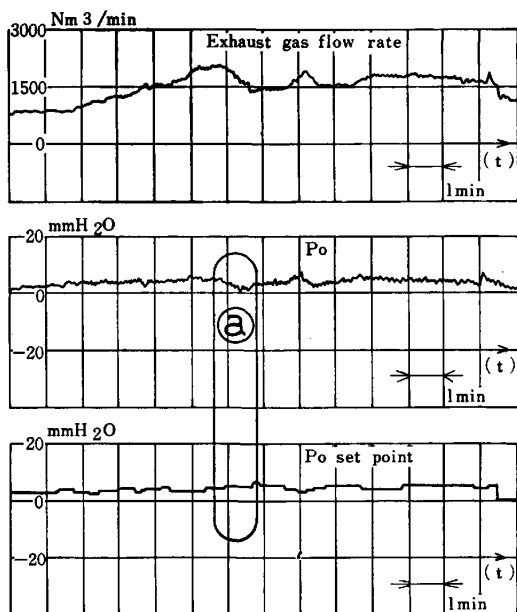


Fig. 7. Application result of PI control method.

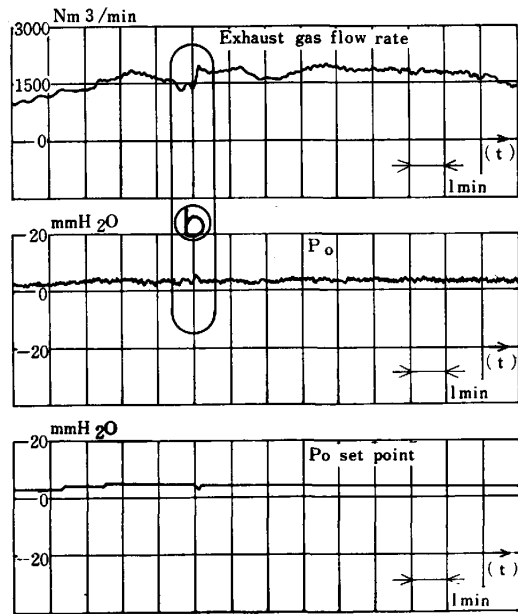


Fig. 8. Application result of optimal control method.

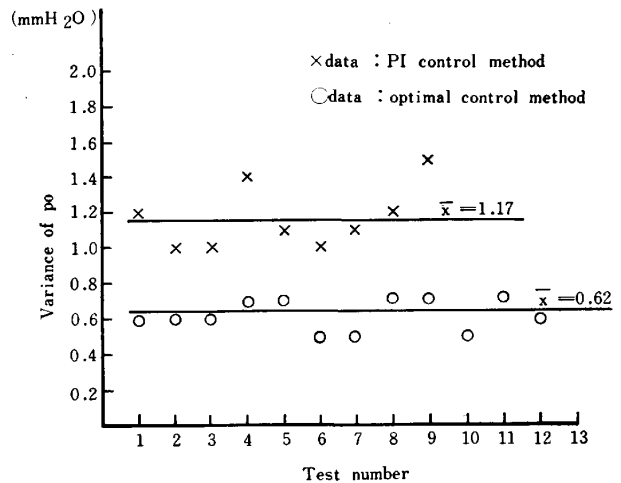


Fig. 9. Variance of P_0 by PI control method and optimal control method.

御を採用する。

上記の機能を満足させる本制御システムの構成をFig. 6 に示す。

5. 導入の効果

Fig. 7 と Fig. 8 に従来の PI 制御と本制御システムによる実操業への適用結果を示す。Fig. 7 の PI 制御では、排ガス流量の変動に対してオペレータが頻繁に P_0 設定値を変更している。また、@部では P_0 設定値に対して P_0 の追従が特に悪い。一方、Fig. 8 の本制御システムでは、 P_0 設定値の変更はほとんど行われずに操業されている。@部の急激なガス流量の変動に対して

Table 1. Comparison of calculated gas recovery ratio between PI control method and optimal control method.

Item	Control method	PI control (method)	Optimal control (method)
Generated CO gas volume (Nm ³)		18823	18823
CO concentration of recovery gas (%)		70.0 (Supposition)	72.1
Po set point (mmHg)		Atmospherical pressure -2.4	Atmospherical pressure -1.2
Inflow air volume (Nm ³)		3852	2273
Combustion CO gas volume (Nm ³)		1618	1144
CO gas volume of blowout and diffusion (Nm ³)		1206	1206
Recovery gas volume (Nm ³)		16000 (Supposition)	16473
Recovery ratio (%)		85.0 (Supposition)	87.5

も、 P_0 は良く追従している。そこで、PI 制御と本制御システムの制御性を定量的に比較する意味で、1 チャージ平均の P_0 設定値に対する P_0 の分散値をプロットした図を Fig. 9 に示す。その結果、図に示すように制御偏差の 2 乗平均は PI 制御に比べて本制御システムが約半分となり、シミュレーション結果と一致する。これを

用いて CO ガス回収率の向上分を試算すると Table 1 のようになり、2.5% の回収率向上が期待できる。実操業における PI 制御のそれと本制御システムのそれを比べると、約 2.2% の回収率向上であった。これを回収ガス原単位に換算すると 2.34 Nm³/T-S となる。

6. 結 言

最適制御の導入により、OG 設備の P_0 制御は従来の PI 制御の計測点でもつて、制御システムが改善され制御性が向上した。また、各種外乱に対しても本制御システムは良く追従し、オペレータによる P_0 設定値の変更が不要となった。その結果、当初の目標であった CO ガス回収率の向上も得られた。今後は、さらに CO ガス回収の向上およびオペレータの省力を目標とする OG 操業の完全自動化の一貫として、排ガス成分・流量の計測値を利用した P_0 の自動設定機能を付加する計画を進めている。

文 献

- 1) 西川禎一, 三宮信夫, 板倉秀清, 林部秀治, 太田徳二, 今泉吉弘: 応答面積法を用いた PID オートチューニングの方式, 第 22 回日本自動制御学術講演会予稿集 (1978), p. 127
- 2) 成田誠之助: デジタルシステム制御—理論・応用— (1980) [昭晃堂]