高濃度固気二相流の二又分配流量制御[†]

森 山 峻*・小 林 稔**・大 石 秀 夫**

Dividing Mass Flow Rate Control of Dense Phase Solid Gas Two Phase Flow

Takashi MORIYAMA*, Minoru KOBAYASHI** and Hideo OISHI**

One of authors have developed a pulverized coal injection system into blast furnaces (KDP-1) based on 1 : n plural blow tank distributing and fluidics control method without any mechanical devices.

The authors present the efforts of the dividing mass flow rate control method based on the test of dividing control in transport pipe by fluidics control.

The pneumatic two phase flow control method is successful and is proved that the control mass model is same as above mentioned blow tank distributing mass model.

The authors predict dynamic simulation for multi phase flow is possible by four variable (pressure, gasflow rate, liquid flow rate and solid flow rate) transfer matrix and multi phase flow impedance.

Key Words: dividing flow control, solid gas two phase flow, fluidics control for solid, powder injection, PCI

1. はじめに

筆者の 1 名は高濃度固気二相流の輸送機一供給端が 1 : 1 の制御方法¹⁾、並びに高炉羽口微粉吹込 (PCI) を目標に 1 : n の場合の計測制御方法^{2), 3), 4)}を発表、その応用としての不均一分配制御¹⁰⁾、輸送管の二又分配制御¹¹⁾の特許を出願しており、又当該固気二相流の流量計測方法として、やはり PCI を対象に、筆者らならび、他より 2) ~ 7) が発表されており、本件は 11)

に關係する発表であり、分配を輸送管路中において二又分配することにより、輸送機からの輸送管本数を半減させることにより、輸送管設備費を低減させることが目的である。筆者らの PCI の数式モデルも本発表の数式モデルもいずれも静特性から誘導したものであるが、輸送機本体が容量の大きな圧力制御系であり静特性に基づく制御はそのまま、FF モデルとして実用され得た。今後動特性を多相流インピーダンスとして求めかかる輸送試験をシミュレーションし動的改善にも役立てたいと考える。

2. 本システムの前提のテストと解析

Fig. 1 に示すものは微粉炭の高炉多数羽口吹込用の試験設備の中の一流路分を示す。単一流路設備の制御システムが複数流路の吹込設備にも適用できることを実証するために、同図に示す如く、直列式の連続加圧吹込装置の下部圧力容器 (LT-2) に 5 本の上抜き切出しノズルを設け、夫々に対応する 5 流路のテスト配管と 5 ヶの圧力制御可能な加圧受槽と 5 流路の実高炉羽口への配管を設置した。同図には切出しノズルは 1 本しか表示していないが 5 本が配列されている。

Fig. 1 の数式モデルと諸元は下記の通りである。

輸送ガス流量 Q は (1) 式により与えられる。

$$Q = Q_A - k_1 G + Q_B \quad (1)$$

ここで、 Q_A は加圧流動化ガス流量、 Q_B は列出し流量制御ガス流量、 $k_1 G$ は圧力容器内の微粉炭切出し流量 G のスペースを補充する供給ガス流量を表わし、圧力容器内ならびに切出しノズル内は移動層粉粒充填密度を維持するため、 Q は設計上 Q_B の約 1.1 倍となった。

發送圧力 P_1 は (2) 式により与えられる。

$$P_1 = \Delta P_N + \Delta P_L + \Delta P_B + P_2 \quad (2)$$

$P_1 - P_2$, P_1 および切出しノズル差圧 ΔP_N は下記の通りである。

[†] 第 23 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 59・7)

* 電気化学工業 (株) 東京都千代田区有楽町 1-4-1

** デンカエンジニアリング (株) 市原市五井南海岸 6-5

* Denki Kagaku Kogyo K. K., Chiyoda-ku, Tokyo

** Denka Consultant & Engineering Co., Ltd., Ichihara

(Received June 12, 1984)

(Revised February 8, 1985)

Fig. 1 High pressure dense phase constant flow test plant

$$P_1 - P_2 = 1.5 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_1 = 3.5 \sim 6.0 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_N \approx 0 \sim 0.125 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (3)$$

$$\Delta P_N \approx k_4 G \quad (4)$$

バーナノズル差圧 ΔP_B は

$$\Delta P_B = 0.5 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (5)$$

これは一種の限界オリフィスの条件に近いと考えられるので、バーナの一次圧力は P_2 の変動の影響により乱されにくい。その結果(2)式は、(6)、(7)式のようなになる。

$$\Delta P_N + \Delta P_L = P_1 - \Delta P_B - P_2 = \text{Constant} \quad (6)$$

$$\Delta P_L = \text{Constant} - \Delta P_N \quad (7)$$

ΔP_L は(8)式により与えられる。

$$\Delta P_L = \Delta P_G + \Delta P_s$$

ΔP_G はいわゆる Fanning の式で求められる。ガス空筒速度 U_G ならびにガス比重量 γ_G は輸送管内圧力操作範囲に対し、夫々の変化の範囲が無視できるので、つぎの(9)式が導かれる。

$$\Delta P_G = k_2 \gamma_G u_G^2 = k_2 Q^2 \quad (9)$$

低濃度輸送においては(10)式が一般的である。

$$\Delta P_s = k_3 \mu Q^2 \quad (10)$$

高濃度輸送においては筆者の一人の同定¹⁾により、

$$\Delta P_s \triangleq k_3' \gamma_G \frac{\mu}{U_G} \cdot u_G^2 = k_3' \mu \gamma_G u_G \quad (11)$$

したがって、ガス空筒速度 U_G ならびにガス比重量 γ_G は輸送管内操作範囲に対し、夫々の変化の範囲は

Fig. 2 Relation between Q_B and G

無視できるので、つぎの(12)式が求められる。

$$\Delta P_s = k_3 G \quad (12)$$

$$\therefore \Delta P_L = \Delta P_G + \Delta P_s = k_2 Q^2 + k_3 G \quad (13)$$

$$\Delta P_N \ll \Delta P_s \quad (14)$$

(4)、(7)、(13)、(14)式より(15)式が導かれる。

$$G = (\text{Constant} - k_2 Q^2) / (k_3 + k_4) \\ \approx (\text{Constant} - k_2 Q^2) / k_3 \quad (15)$$

よって、 Q が減少するとき、 G は増加し、 Q が増加するとき、 G は減少する。一方 Q_B は G に対し、独

立であるので、切出し流量制御ガス流量 Q_B により、 G が制御できる。

したがって、制御方式としては、つぎの 2 ケースが考えられる。

(1) G を一定にするためには G 制御は Q_B により行われる (FB 制御)。

(2) 多流路用の場合の質量減量 dw/dt 制御は個々の流路の検出信号として使用できないので、個々の流路の微粉炭流量の検出なしに Q_B 制御のみでも個々の流路の流量制御ができる (FF 制御)。

上記の数式モデルは Fig. 1 のテスト機で多流路用にも相互干渉なく、一つのブロータンクから個々の受槽又は個々の羽口に切出され、(16) 式で Fig. 2 の如き切出し特性のテストデータプロットを再現できた。その数式表示は下記の通りである。

$$G = A Q_B^2 + B Q_B + C P_1 + D(P_1 - P_2) + E \quad (16)$$

その姿は最小二乗法により図中に実線で自動作図により記入されている。

ここで、 A, B, C, D, E は夫々正の定数である。

なお、本数式モデルは静的数式モデルでありながら閉ループ制御で再現できるのはブロータンク圧力容量を律則条件とするので、ブロータンク圧力を変えない条件においては動的に追従できたものと説明できる。

Fig. 3 Japan patent application No. 55-175583 and Japan utility model application No. 58-119612 by DENKA¹⁰⁾

Fig. 4 Japan patent application No. 56-17648 by DENKA¹¹⁾

3. 二又分配のテスト方法

前章に於ける任意の不均一分配は高炉微粉炭吹込 (PCI) の国産技術 KDP-1³⁾ として発表され^{3), 8), 9)}, 実機は実用されているが、一つのブロータンク (LT-2) から 10~20 の流路に分配し、その流路中の固気二相流を分流しようという発想があり、筆者の一人は先に Fig. 3, 4 の技術を開発し特許出願済み^{10), 11)}である。

Fig. 3 は B & W 方式³⁾ の如きブロータンクから出る固気二相流を (24) の流動層混合器より分配する場合に、あらかじめ開発された粉体流量計 (30 a, b)¹⁻⁷⁾ に基き計測し、(27 a, b) のガス供給量を操作し、前章の制御方式と同様に個々の粉体流量を制御する方法であり、Fig. 4 は流路中の高濃度固気二相流は流路内に挿入された弁で制御すると閉塞・摩耗するし、幾何学的に均一に分岐しても粉体の管内壁付着現象により均一に分配されないなどの欠点を除くために、(A) の流路に粉体流量を増加させたい時は (6B) の弁を操作し、(5) から入るガス流量を増加させることにより行い、(B) の流路の粉体流量を減少させるという方法を考案した。

これらの方法の延長上において筆者らは Fig. 5 の分配モデルを考え、Fig. 6 のテスト機を設置した。ここで LT-11 はブロータンク、LT-12, 13 は高炉羽口の夫々に見立てた受槽であり、夫々に粉体流量 dw_1/dt , dw_2/dt , dw_3/dt を測定するためのロードセル WR-1, 2, 3 が設けられ、夫々の質量流量 G の計測精度を上げる実験手段とし、3/4 BSGP 45, 230 mm を使用し、炭酸カルシウム (100~150 μ , 800 kg/m³) 400 kg を LT-11 に入れ、供給圧力 P_t (2 章の P_1) を $1.65 \sim 2.1 \times 10^5$ Pa, P_2 を大気圧の状態空気を送送ガスとしてテストを行った。

4. テスト結果の考察

Fig. 7 に示すような記録紙はテストデータ記録例であり、それらをまとめると Table 1 の通りである。 dw_1/dt を定めるよう輸送条件を圧送圧力 P_t , 供給ガス流量 Q_{b1} で決めると LT-12, 13 へ夫々 dw_2/dt ,

Fig. 5 Divided control model of two phase flow

Fig. 6 Divided control test plant

Fig. 7 A sample of test record

dw_3/dt で分配される。Test No. 2において二又分配器の LT-13 用制御ガス流量 Q_{b3} を 0 から $0.2 \text{ Nm}^3/\text{min}$ に変更することにより dw_2/dt , dw_3/dt は均等分配になり、Test No. 5 においても同様に Q_{b3} を 0 から $0.25 \text{ Nm}^3/\text{min}$ に変更することにより均等分配ができたことを示し、逆にその他のテストは不均等分配であり制御の操作方向は 2 章の結果ならびに 3 章の Fig. 3, 4 の前提と一致することがわかった。

これを理論的に説明するならば、Fig. 5 の二又分配モデルに於て、二又分配はあたかも二又分配器の位置 (圧力 P' の位置) に破線のような仮想のブロータンクを設置したとすると、その圧力容量、粉体の沈降、管路相互干渉等のないものとする、その二次側の制御モデル (P_1-P_2 間) は 2 章の P_1-P_2 間と理論的に同じになることを示すことになる。

したがって、二又分配の出入口の物質収支はガス流

Table 1 Test results

Test No.	Qt_1 Nm ³ /min	Qb_1 Nm ³ /min	dw_1/dt kg/min	μ kg/kg	Pt 10 ⁵ Pa	u_0 m/s	dw_2/dt kg/min	Qb_2 Nm ³ /min	ue_2 m/s	dw_3/dt kg/min
1)	1.13	1.00	20.7	14.3	2.1	17.0	11.1	0	25.7	12.6
2)	1.17	1.00	20.3	13.5	2.0	18.1	11.6	0	26.6	10.6
3)	1.25	1.00	18.5	11.0	2.0	19.4	9.4	0	28.5	11.2
4)	1.25	1.00	17.3	10.8	1.9	20.0	7.6	0.65	58.0	10.9
5) 84022503	1.10	1.00	12.9	9.1	1.65	19.3	6.7	0	25.0	6.7

Test No.	Qb_3 Nm ³ /min	Ue_3 m/s	Remarks
1)	0	25.7	Initial Run
2)	0.2	35.7	Equal Distrib.
3)	0	28.5	Initial Run
4)	0	28.5	Unequal Dist.
5) 84022503	0.25	36.4	Equal Distrib.

量において LT-12 側は Q_2+Q_{b2} , LT-13 側は Q_3+Q_{b3} であり $Qt_1=Q_2+Q_3$ に Q_{b3} と Q_{b3} とが加算されており, 二又の分配後の相等管長 Le' , Le'' に起因する固気二相流インピーダンス (Two phase flow Impedance) に基いて P' も決まると考えられる。

したがって混相流流路は三入力 (圧力, ガス流量, 粉体流量) 伝達マトリクスによる計算により数式モデルによる動的シミュレーション¹³⁾が可能になると考察する。

なお, Fig. 7 において dw_1/dt , dw_2/dt , dw_3/dt は定常流なのに対し, Q_{b3} がハンチングしているがゲインコントロール可能であり筆者の経験した DDC で実施しており¹⁴⁾本試験における振動による摩擦係数の低減による輸送性改善現象も本分配試験に影響しないことは振動輸送試験で確認しているので問題なしとした。

5. む す び

5.1 質量流量比 μ 14.3 kg/kg, 質量流量 1,200 kg/h の二又分配流量制御を流体力学的に行い, 1:0.88 の不均一分配された固気二相流分配系の均等分配化制御を可能とした。これは三流路以上にも適用出来る。

5.2 質量流量の 12~16% を 17~23% のガス流量追加により流体力学的に制御できた。

5.3 二又分配器の二次側のインピーダンスの計算により質量流量計による検出なしに 2 章(2)と同様に FF 制御可能と考える。

Nomenclature

μ =mass flow ratio	[kg/kg]
Q =transport gas flow rate	[Nm ³ /h]
Q_T =total gas flow rate	[Nm ³ /h]

Q_A =pressurizing and fluidizing gas flow rate [Nm³/h]

Q_B =flow rate of discharge flow rate control gas [Nm³/h]

γ_c =gas specific gravity [kgf/m³]

ρ_s =powder density in the pipe [kg/m³]

W =mass of pressure vessel with powder [kg]

G =mass flow rate of pulverized coal [kg/h]

P_1 =starting pressure [Pa]

P_2 =tuyere pressure [Pa]

ΔP_N =pressure loss in discharge nozzle [Pa]

ΔP_B =pressure loss in burner nozzle [Pa]

ΔP_L =pressure Loss in Transport pipe [Pa]

ΔP_{L1} =pressure Loss in vertical 5 m long transport pipe L_1 [Pa]

ΔP_G =pressure loss in transport pipe due to gas only [Pa]

ΔP_S =pressure Loss in tranport pipe caused by solids [Pa]

P_t =starting pressure [Pa]

P' =assumed pressure in dividing pipe [Pa]

Q_{t1} =pressurizing and fluidizing gas flow rate plus Q_{b1} [Nm³/min]

Q_{b1} =flow rate of discharge flow rate control gas from LT-11 [Nm³/min]

Q_{b2} =flow rate of discharge flow rate dw_2/dt control gas [Nm³/min]

Q_{b3} =flow rate of discharge flow rate dw_3/dt control gas [Nm³/min]

u_0 =gas space velocity in start point from LT-11 [Pa]

u_0' =gas space velocity in start point to LT-12 [Pa]

u_0'' =gas space velocity in start point to LT-13 [Pa]

u_{e2} =gas space velocity in terminal to LT-12 [Pa]

u_{e3} =gas space velocity in terminal

to LT-13

[Pa]

 Q_2 =gas flow rate from LT-11 to LT-12[Nm³/min] Q_3 =gas flow rate from LT-11 to LT-13[Nm³/min] L_e =equivalent transport pipe length

[m]

 L_e' =ditto from dividing point to LT-12 [m] L_e'' =ditto from dividing point to LT-13 [m] dw_1/dt =mass flow rate from LT-11 [kg/min] dw_2/dt =ditto to LT-12 [kg/min] dw_3/dt =ditto to LT-13 [kg/min]

参 考 文 献

- 1) 森山：高圧粉粒体気体管路輸送装置の定流量制御，第 20 回 SICE 学術講演会予稿集 No. 1707 (1981)
- 2) 川鉄：高炉微粉炭流量計の開発，鉄鋼協会 79 回計測部会 (1981)
- 3) 岩村・森山他：A New Pulverized Coal Injection System for Blast Furnaces KDP-I, Pneumatech-1,

(1982)

- 4) 佐藤・小柳他：差圧式微粉炭流量計，第 21 回 SICE 学術講演会予稿集，No. 3516 (1982)
- 5) 森山：固気二相流の計測と制御，第 25 回自動制御連合講演会前刷，No. 4019 (1982)
- 6) 小林・宮原：マイクロ波粉体流量計，第 22 回 SICE 学術講演会予稿集，No. 180 1802 (1983)
- 7) 森山・松山：高温高濃度固気二相流のための下降流計測，第 26 回自動制御連合講演会前刷，No. 4015 (1983)
- 8) 森山：固気二相流の分配吹込システムの制御および質量流量計測方法の開発，日本学術会議混相流シンポジウム (1983)
- 9) 特願 54-128675, 55-175584, 56-200349.
- 10) 特願 55-175583, 実願 58-119612.
- 11) 特願 56-17648.
- 12) 特願 59-46452.
- 13) 森山・藤井：固気二相流の設計・運転シミュレーション，第 4 回シミュレーションテクノロジーコンファレンス (1984)
- 14) 森山他：Prediction of Optimal Direct Digital Control System for Process Industries, IFAC Real Time Digital Control Applications (1983)