高温高濃度固気二相流のための下降流流量計測†

森 山 峻*・松 山 正**

Mass Flow Measurement of Gravity Flow for High Temperature Dense Phase Solid Gas Two Phase Flow

Takashi MORIYAMA* and Tadashi MATSUYAMA**

Moved bed gravity flow of solid is required for coal gasifier, metal ore direct reduction furnace, gas phase coal liquifier, etc. as energy conservation. Such a process is high pressure and or high temperature process and required for multi loop injection feeder.

The authors developed a new noise flow meter for the process based on the authors' test and the prediction.

The measuring method is an nonintrusive method using the simple lean noise sensors and sensing technique without sensing hole on the gravity flow pipe.

The conclusion of the authors' test is that noise pressure level on 8kHz by C characteristics is suitable for the mass flow control without back ground noise calibration.

Space filtering of the signal or cross correlation method of signal is more suitable for sensing technique.

The sensor and sensing technique is suitable for solid particle velocity meter of two phase transport pipe.

Key Words: sonic flow meter, solid gas two phase flow, gravity flow, high temperature solid flow high pressure solid flow, DRI, nonintrusive measuring

1. はじめに

石炭ガス化炉, 金属還元炉, 気相石炭液化炉の如き, 高圧およびまたは高温のプロセスには粉粒体の高

濃度低速輸送が要求されている。その供給方法は多流路供給となるので, 各々の流路に移動層下降流を形成させ, これを測定するための固体質量流量計の開発を計画した¹⁾。

2. テストの方法

堀内²⁾⁻⁶⁾, 日高⁷⁾らは, いずれも移動層下降流管に孔を開孔し, 騒音計を利用して, 粉粒体の音圧レベルから粒子下降流平均流速を求める方法を提案している。

これに対し, 筆者らは **Fig. 1** の如きプロセスを考え, 高圧の場合のセンサ検出孔のシール, 高温の場合の管材質と検出孔過熱防止を考へて, 無孔式計測法を立案した。しかし, 開孔式のデータの活用と, 管壁の音響インピーダンスを計算で補正することも考へ, 両者すなわち開孔式と無孔式との比較も行った。

筆者らが行った試験方法は **Fig. 2** のとおりであり, 開孔式と無孔式に対し測定機として JEIC 1015+3305 型 1 オクターブフィルタ付騒音計, 紫外線オシロ, シ

Fig. 1 Process used solid gas two phase gravity flow conveyors

† 第 26 回自動制御連合講演会で発表 (昭 58・11)

* 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 19, 1984)

(Revised December 4, 1984)

Fig. 2 Test equipment

ンクロスコープならびに騒音記録計付 VTR を用いた。

堀内の開孔式の試験結果によれば、音圧レベル $\langle P^2 \rangle^{1/2}$ は粉粒体下降流速 v_s ，騒音周波数 f に対し、

$$\langle P^2 \rangle^{1/2} = A v_s^m \quad (1)$$

$$\langle P^2 \rangle^{1/2} = C f^n, \quad n = -1.5 \quad (2)$$

なることを示している。

幸いにして、移動層下降流は粒子充填密度 ρ_s が一定であるため、下降流管内面積を A_r ，質量流量を G とすると、

$$G = \rho_s \cdot v_s \cdot A_r \quad (3)$$

となる。

3. テスト結果

Fig. 3 は筆者らの開孔式のテスト結果であり、検出孔は排出口 +500 mm，開孔径 3 mm ϕ ，粒子径 2 mm ϕ ，同長さ 2 mm L ，38 mm ϕ 内径アクリロニトリル製硬質透明管，粒子下降流速 3.9 cm/s，C 特性 1 オクターブ騒音計，音圧レベル P 100 Hz $\sim$ 10 kHz において、

$$P \propto f^{-1.5} \quad (4)$$

であり、堀内の (2) 式を再現し、

$$P \propto v_s^m, \quad m = 0.4 \sim 0.8 \quad (5)$$

なることを測定データの整理の結果確認した。

ちなみに堀内のテストでは m は下記のとおりである。

$$m = 0.5 \sim 1.0 \quad (D_i: 36, 45\phi; dp: 0.1 \sim 3.0\phi) \quad (6)$$

筆者らは無孔式をテストするに際し、暗騒音(即ち、

Fig. 3 Test data by noise sensor without hole on the gravity flow pipe

Fig. 4 Relation between A and C characteristics of noise flowmeter on each frequency band

粒子を流さない場合においても管外周囲の騒音を検出する)の影響を懸念したが、**Fig. 4** に示すとおり、騒音計が A 特性であっても C 特性であっても 1 kHz 以上では同じであり、かつ暗騒音も無視可能であり、補正不要であることがわかった。これは他の材質の管すなわち SGP, SUS 管の場合も同様であった。**Fig. 5** は流速を変えた場合で、いずれもその 1 kHz 以上において勾配が **Fig. 3** と同じすなわち (4) 式と一致することを示している。

Fig. 5 Relation between background noise and solid flow noise

Fig. 6 Relation between A and C characteristics of noise flow meter on higher frequency band

Fig. 6 のテストは本無孔式騒音式流量計が、1 および 8 kHz において、1~10 cm/s の v_s において音圧レベル P が A, C 特性とも一致し、横軸 log 目盛、縦軸 dB リニア目盛においてリニアな関係であり、当該流量計として(3)式ならびに(5)式を満足している。

なお、下降流流速 v_s の測定範囲を 20 cm/s 以下と

Fig. 7 Relation between acrylo nitrile pipe and stainless steel pipe for noise characteristics

Fig. 8 Noise characteristics of sand on each frequency band

した理由は、20 cm/s 以上に於て下降流はスラグフローすなわち断続流となり、当該プロセスの条件を満たさないからである。

Fig. 7 は下降管材質を変えた場合であり、管内粒子騒音を開孔式で測定した場合すなわち Fig. 3 と比較すると、樹脂管は 1 kHz 以上で同一傾向であるが勾配が異なり、SUS 管の場合 100 Hz 以下でも n は同じであることを示し、金属管の方が管壁音響インピーダンスが低いことも実証した。すなわち機械の五感診断用聴音棒の効果を示していると考え、高温用のセラミックチューブも後者に近いと考える。

Fig. 9 Noise Characteristics of Sand, Pellet and Glass Sphere on 8 kHz Band

Fig. 10 Assistant professor J. Hidaka's noise characteristics of glass sphere on each frequency band

Fig. 8 は 0.5~1.0mmφ 川砂の 0.5~8 kHz におけるデータであり、Fig. 6 と比較すると、前者は低周波数領域ではリアリティの上限が狭く、音圧レベルもつれていることを示し、Fig. 9 から 8 kHz において、川砂・ペレット・ガラス球を比較すると、粒度に分布のある川砂は他の二者に比較してリアリティの上限が狭く、音圧レベルもゆらぎ現象があることがわかった。

4. テスト結果から騒音流量計への適用条件

Fig. 10 は日高のテスト結果の一例⁷⁾であり、0.1~20 kHz の周波数帯域音圧レベル分布は開孔式検出方法において A, B, C の三つのピークがあり、A は粒子間衝突即ち流速 v_s 、B は粒子群衝突回数すなわち嵩密度 ρ_s 、C の破線は非定常流のスリップ現象すなわち目に見えないスラッシング現象でスラグフローと同じ管壁クーロン摩擦に基づく自励振動であると推論される。

固気二相流輸送管（垂直上昇）の中の粒子速度を粒子濃度分布の変動を利用し、流れ方向の二点に設けた静電容量センサにより検出する相関流速計はすでに発表されている¹¹⁾。

Fig. 11 Noise signal as noise flowmeter for two phase flow transport pipe by noise sense without sensing hole

Fig. 12 Space filtering for stochastic filtering based on JPA 58-198247

Fig. 13 Cross correlation method for noise signal of solid gas two phase gravity flow based on JPA 58-199190

本無孔式騒音流量計を上記固気二相流輸送管（水平）の中の粒子速度の検出に使用することは Fig. 11 に示す筆者らの実験において確認されている。すなわち、測定値はノイズレベルの高い騒音音圧レベルであるが、途中からその平均値が上にシフトしているのは、ブロータックからの固気二相流の切出しがブローアウトにより粒子平均流速を増加させていることを表わし、明らかに、当該音圧レベルは粒子間ないしは粒子と管内壁との衝突に基づく粒子の平均流速 v_s を表わしていることと考察する。

したがって、騒音の発生原因が前述の移動層下降流と Fig. 11 の気流層ないしは流動層が主体である水平輸送（あるいは垂直輸送）とは異なり、音圧レベルは粒子間衝突ではなく、粒子と管壁との衝突に起因しているので、統計的ノイズの原因は異なるがハードウェア的手法としては、流速計として Fig. 12, 13 を利用して製作可能であり、すなわち、Fig. 12 においては統計的変動がエルゴート性であると考え、時間平均を空間平均に置きかえ、Fig. 13 においては流速変動（例えば空気輸送は脈動流になる）を音圧レベルの空間的移動と考え二点間の流速分布の相関で計測（定常周期的脈動流であるから）し、11)の方法と同様に他に密度を静電容量¹¹⁾や γ 線密度計との組合せにより測ることにより、質量流量計にもなり得ると考える。

5. む す び

5.1 無孔式騒音流量計は 1 kHz 以上の高周波数領域において暗騒音補正なしに高圧高温移動層下降流の質量流量計測に使用可能である。

5.2 管壁音響インピーダンスが低ければ堀内のテスト結果も利用可能である。

5.3 粒度分布のある場合、統計的処理、空間フィルタ、相関法により、SN 比が上げられる。

5.4 上記に基づく計測データ処理遅れ時間は当該プロセスの制御目的に対して必要条件を満たす。

5.5 固気二相流輸送管粒子平均速度の計測の対象に本騒音式流量計は使用可能と考える。

Nomenclature

$\langle P^2 \rangle^{1/2}$ = R. M. S. filtered data of noise pressure-level [dB]

v_s = solid velocity [cm/s]

f = frequency of noise pressure level [Hz]

ρ_s = bulk density of moved bed gravity flow [kg/cm³]

A_r = inside area of gravity flow pipe [cm²]

G = mass flow rate of gravity flow [kg/s]

m = coefficient of equation (1)

n = coefficient of equation (2)

D_i = inside diameter of gravity flow pipe [mm]

d_p = solid particle diameter [mm]

P = noise pressure level [dB]

参 考 文 献

- 1) 森山：高温粉粒体供給の計測と制御，粉体工学，20-6，382/387 (1983)
- 2) 堀内：ゆらぎとその測定への応用，日本機械学会，77-668，769/776 (1974)
- 3) 堀内：雑音を利用した気体および粉体の流量測定，計測と制御，14-7，547/552 (1975)
- 4) 堀内：Noise Flow Meter, IMEKO V (1970)
- 5) 堀内，他：Measurement of Flow Rate of Solid Particles by Flow Noise, IMEKO VII (1976)
- 6) 堀内：日本特許 No. 911, 870 乱れによる流速および流量の測定方法（特願 42-59908）(1977)
- 7) 日高：アコースティック・エミッションによる粉体プロセス計測法，粉体と工業 (1982.9)
- 8) 森山，他：特願 58-77882，94119，185115，58-199190，59-46451
- 9) L. T. Fan, et al.: Statistical Study of the Frequency of Free Bubbling in a Shallow Gas Solid Fluidized Bed, 4th Fluidization Conference (1983.8)
- 10) 森山，他：A New Pulverized Coal Injection System for Blast Furnaces KDP-1, Pneumatech-1 (1982.5)
- 11) 川鉄：高炉微粉炭流量計の開発，日本鉄鋼協会計測部会 (1981.11)
- 12) 森山，他：固気二相流移動層下降流の流量計測，日本機械学会第 61 回通常総会 (1984.4)