

粉体の気体輸送における流動状態のモニタリング法

小林 三郎*・石垣 政裕*・稲葉 晋一*²

Monitoring Technique of Solid Flow State in Pneumatic Conveying of Powder Materials

Saburo KOBAYASHI, Masahiro ISHIGAKI and Shin-ichi INABA

Synopsis : The pneumatic conveying is a useful technique which is used to provide powder materials such as fine coals, ores or fluxes to the metallurgical furnaces. The present paper describes the monitoring technique to distinguish between the two flow regimes of solid particles; the dispersive and the sliding flows in the reverse T-type tube junction where alumina particles fall vertically and are conveyed by a horizontal nitrogen flow.

The flow regimes of the alumina particles were monitored by means of two kinds of indexes; the pressure difference fluctuation of the gas in the tube and the acoustic effect on the tube wall. For this purpose, two pressure transducers were equipped to the tube and two acceleration pick up sensors were touched directly on the outer surface of the tube.

In the range of Froud number greater than 8, the pressure index is significantly large for the dispersive flow, while small for the sliding flow. In the range of Froud number less than 8, the acoustic index is, in contrast to the above, significantly large for the sliding flow, while small for the dispersive flow. The simultaneous application of both indexes will increase the monitoring reliability.

Key words : solid gas two phase flow; flow junction; fine material; flow monitoring; dispersive flow; sliding flow; pressure fluctuation; acoustic effect.

1. 緒言

気体輸送は石炭、鉱石あるいは溶剤等の粉体原料の製錬炉への輸送にとって重要な技術である。安定した粉体の輸送は重要な課題であるが、そのためには信頼性の高い輸送状態のモニタリングが必要と思われる。

粉体の気体輸送については多くの力学的研究が既に行われている¹⁾。それによれば、粉体-気体水平管内二相流の流動状態は、粒子の流動状態によって浮遊、摺動およびプラグ流に大別され、この順に固気比は大となる。製錬炉への気体輸送には浮遊または摺動流が重要である。以下ではこの二つの流動について考える。

輸送の力学的研究とは対照的に流動状態のモニタリング技術に関する研究は極めて少ないものの、輸送管の二点間における差圧変動とその区間での流動状態とは対応関係を有することが知られている。Tsujiらは、ポリスチレン粒子の水平管輸送の場合、流動が完全な浮遊流動から摺動流へ移行するとき遷移領域でのみ差圧変動が著しく増大することを見出した²⁾。垂直管の場合も閉塞状態に近づくとき差圧変動が著しくなるとともに差圧変動のパワースペクトルが変化するとの報告がある³⁾⁴⁾。しかし、これらの知見の流動モニタリングへの適用性に関する検討は少ない。

管内部の物理量測定による流動モニタリングに対して、管外部からのモニタリングの可能性も検討の余地がある。粒子は輸送中に管壁と衝突する。このことは輸送管に伝はんする音響を測定することにより内部をモニタできる可能性を示唆する。一般に粒子が固体面に衝突するとき発生する音に関しては研究されているが⁵⁾、流動モニタリングへの適用性については未検討のようである。

粉体輸送の開始点である供給粉体と気体の合流点における流動状態はそれ以降の輸送に対する初期ないし境界条件としての重要性をもつ。本研究では上方から垂直管を経て供給される粉体が水平管内を流れる気体と合流する逆T字部に注目し、実験室規模ではあるがその部分における浮遊流動と摺動流動とを識別できる流動モニタリングへの差圧変動(内部測定)および音響(外部測定)の適用性について述べる。

2. 実験

粉体試料は非粘着性とし、実験装置は粉体の流動状態と測定量との対応を確認するのに好都合であるように設定した。設定条件としては、a)粉体流動の観察が可能であること、b)浮遊流動と摺動流動の繰り返し実現が迅速かつ容易

平成4年12月10日受付 平成5年6月4日受理 (Received on Dec. 10, 1992; Accepted on June 4, 1993)

* 東北大学素材工学研究所 (Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980)

* 2 (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

であることとした。

2・1 実験装置

粘着性の効果を少なくするため、粉体試料としては比較的粗粒のアルミナ粒子を用いた。本試料は純度98質量%、密度3.9g/cm³、平均粒径200μmの破碎粒子である。実験装置をFig. 1に示す。ポンペから供給され、質量流量計によって流量制御された窒素が、水平管の①に導入される。①の管内にはガス温度測定のため長さ約15cmのアルコール温度計を置いた。窒素流量一定の実験中においては温度は一定であり、各実験での窒素の温度は294から299Kの範囲であった。窒素はガラス管部①～⑨を流れ、ガス-粒子分離容器を経て、排出される。アルミナ粒子は回転テーブル式粉体供給機(最大誤差約5g/min, 最大相対誤差10%)から垂直ガラス管⑤を経て④で窒素の水平流に合流する。条件a)を考慮して観察部は透明ガラス管とし、また条件b)を考慮して観察部の長さは200mmとした。

粒径200μmのアルミナ単一粒子の終末速度は2.06m/sと算出されるが、初速度零で自然落下速度がたとえば2.00m/sに達するときの落下距離は0.6mと計算される。垂直ガラス管の長さは1mであるから合流点④での粒子の落下速度は終末速度に極めて近いと推定される。

内径18.8mm、長さ200mmのガラス管部③～⑥が粒子の流動状態観察部になっている。この部分の長さが短いので流動緩和時間は短く、比較的迅速に定常流動に達する。観察部以外の水平管の内径は10mmであり、観察部で粒子分離が起きてもガス線速度が大なるためここでは粒子の堆積は生じない。観察部から排出されたアルミナ粒子はガス-粒子分離容器中で分離蓄積され、通常排ガス管(内径40mm)⑩～⑪に出ることはない。この分離容器は中空の箱(容積20 l)で、ガスの低速化によりアルミナ粒子を堆積分離するものである。これは電子天秤により秤量されているので、

観察部からのキャリーオーバー(carry-over)の質量を測定できる。垂直ガラス管⑤～④を自由落下した粒子はすべて水平管部を左方向に流れる。操作因子は窒素流量(質量流量 G_g)とアルミナ粒子供給量(質量流量 G_s)とした。窒素流量は最大90Nl/min, アルミナ粒子の供給量は最大50g/minとした。固気比 $\mu (=G_s/G_g)$ は0.1から0.9, フルード数 $Fr (=u_g/(gd^{1/2}))$ は7から13までの範囲で実験を行った。ここで、 u_g は窒素の標準状態換算の線速度、 g は重力加速度、 d はガラス管観察部の内径(18.8mm)である。

実験は0.1012から0.1022MPaの範囲の大気圧下で行ったが、二つの圧力変換器 p_0 および p_1 により大気圧基準の管内圧力を測定し、二つの音響振動加速度ピックアップセンサ s_0 および s_1 で振動(音響)を測定し、流動状態の観察結果と対応させる。ピックアップセンサはガラス管の下部外壁面上に接触している。測定管内ガス圧は3kPa以下であった。

2・2 センサの特徴

管内圧力は大气圧に近いので圧力測定には定格4.9kPaの微小圧力変換器を用いた。最大応答周波数は約40Hzである。また信号増幅のための動歪測定器の最大応答周波数は5kHzである。

ピックアップセンサの加速度変化の応答周波数範囲は5Hz～10kHzである。管内流動状態が管材料自身に引き起こす(音響)振動の加速度と流動状態との対応関係を知ることが目的である。

2・3 データサンプリング

圧力およびキャリーオーバーの秤量値は頻度1Hzでパーソナルコンピュータに入力される。圧力の一個のデータは、50回測定の平均値、秤量データは1回の測定値である。二つのピックアップセンサからの出力は2チャンネルFFT(高速フーリエ変換)アナライザに入力される。実験中任意の時間にデータサンプリングとFFT解析を行った。FFT解析のため

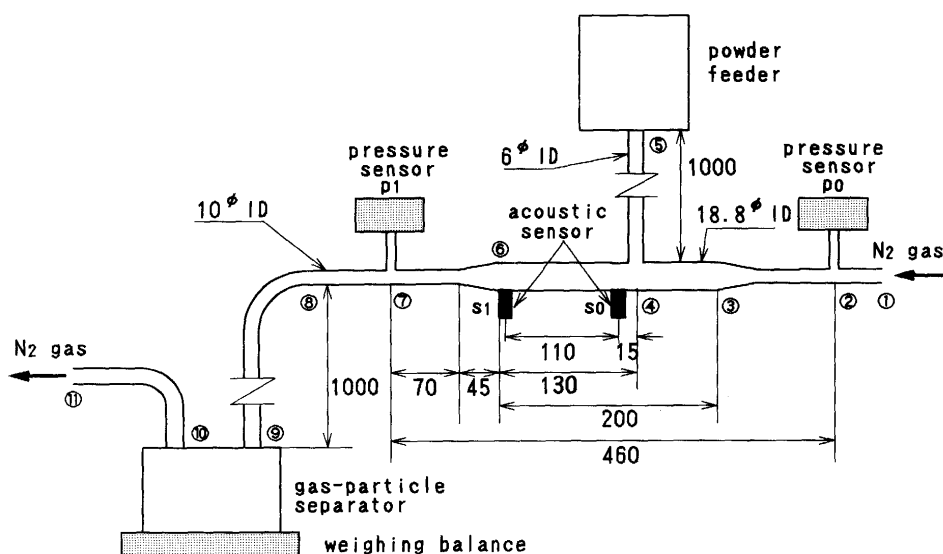


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

のデータ長は1024個である。必要とする周波数レンジによってサンプリング時間長は異なるが、本研究で常用した10 kHzレンジの場合は40msである。

3. 実験結果

3・1 アルミナ粒子の流動状態

3・1・1 流動状態の分類

本研究において観察されたアルミナ粒子の流動はFig. 2に示したように、三つのタイプに分類される。第一のタイプは浮遊流動<a>である。すなわち、上方から自然落下してきたアルミナ粒子はガラス管に衝突した後または衝突することなく、浮遊流動状態で流れる。この状態では各粒子は管内壁衝突、ジャンプを繰り返すと云われている¹⁾。第二のタイプは垂直落下粒子のガラス管への着地点の数mm後流を起点として薄い堆積層が形成消滅を繰り返す非定常堆積である。この場合、最初から浮遊状態で流れる粒子と堆積の表面から浮遊流動に移行する粒子が観察された。このタイプは浮遊流動から摺動流動への遷移流動である。

最後が第三のタイプ、定常堆積<c>である。このタイプでは三種類の堆積状態が区別できた。第一種は、粒子の流動状態はと同じであるが、堆積の形状寸法は変動するものの堆積そのものは定常的に存在する場合である。この場合は<c(1)>とする。つぎに、ガス流速が小さくなると最初から浮遊流動する粒子は極めて少なく、一旦ガラス管壁に着地後堆積層に突入する。堆積層表面からの浮遊流動あるいは堆積層の表面流が観察された。これを第二種<c(2)>とする。堆積の形状寸法は若干変動する。堆積層は厚

さ約10mmで、10mm^φ細管⑦直前まで伸びる。最後に、さらにガス流速が小さくなると堆積の右前縁は④を越えて上流側へ伸びる結果、垂直落下粒子はガラス管に直接衝突せず堆積層に着地する。堆積層の厚さは約12mmになり、一定厚さの部分長くなる。堆積の形状寸法は安定している。粒子の流れは第二種の場合と同様である。これを第三種<c(3)>とする。第三のタイプは摺動流動である。以下、<>は流動タイプを意味する。粒子堆積量は固気比の増大とともに増大する。

3・1・2 アルミナ粒子の流動状態マップ

ガス流量一定の下にアルミナ粒子の供給速度を変化させて、アルミナ粒子の流動状態を観察した。ガス流量範囲は50から90Nl/minとし、それぞれの実験でアルミナ粒子の供給速度は8から53g/minとした。

アルミナ粒子の流動状態を μ -Fr座標上にプロットすると、Fig. 3のようになる。曲線Bより上の領域(c)ではいずれの実験でも確実に流動タイプ<c>になる。この領域の<c>には<c(1)>、<c(2)>および<c(3)>が含まれる。他方、曲線Aより下の領域(a)では確実に<a>になる。つぎに両曲線の間の領域(b)は、<a>とが共存する領域になっている。フライアッシュの水平輸送の場合も併記されている。この場合は曲線Fより上の領域(c')では堆積流、下の領域(a')では非堆積流とされている¹⁾。

本実験の場合の共存領域(b)は二つの意味をもっている。第一は、の存在領域でもあることからわかるように流動様式自身の遷移領域を含むことである。この点は曲線Fとの相違点である。第二は、<a>、および<c>が共存することからわかるように、流動タイプは明確な一本の境界線で区別することが困難なことである。Tsujiらも同じガス流速で流動状態が異なる場合があることを指摘している²⁾。

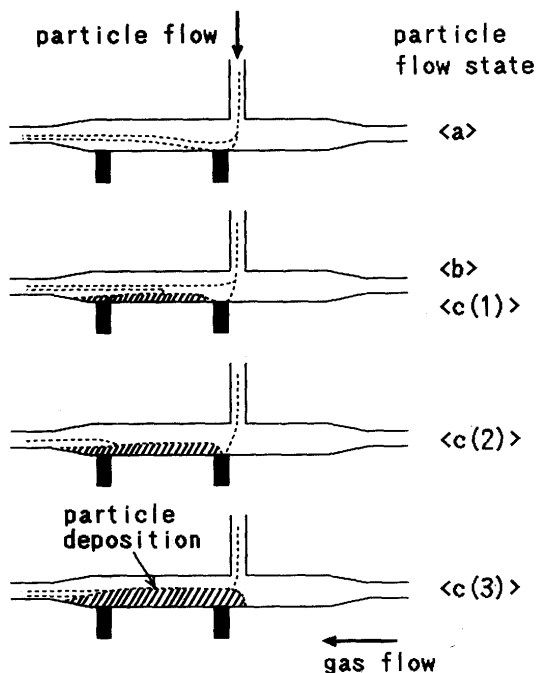


Fig. 2. Kinds of the observed particle flow states.

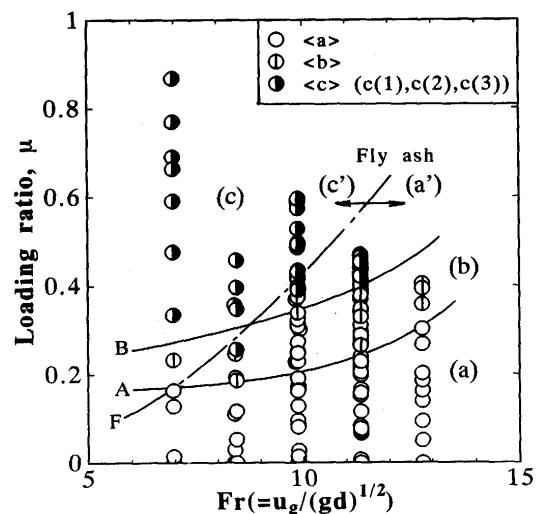


Fig. 3. Diagram of particle flow regime.
Region (a); particle flow state <a>
Region (b); particle flow state
Region (c); particle flow state <c>
Regions (a') and (c'); <a> and <c> for fly ash¹⁾

粉体供給速度の変動などが流動状態に影響を与える可能性もある。

3・2 圧力損失の変動

差圧変動指数 σ_p (以下で圧力指数と称する)を

$$\sigma_p = [\{\sum (\delta p - (\delta p)_m)^2 / n\}^{1/2} / (\delta p)_m \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta p = (p_0 - p_1) / p_0 \dots\dots\dots (2)$$

と定義する。ここで、 p_0 および p_1 はそれぞれ圧力変換器 p_0 および p_1 により測定された圧力、 n はデータ数、 $(\delta p)_m$ は無次元差圧 δp の平均値である。 σ_p は δp の標準偏差をさらに平均値で除したものである。

Fig. 4 はガス流量を一定に保持したままアルミナ粒子の供給速度を段階的に変化させた場合の無次元差圧 δp 、圧力指数 σ_p (左軸)およびアルミナ粒子の排出速度(右軸)を示す。 σ_p は30secごとに($n=30$)計算した値である。図中a, b, c1, c2およびc3は各アルミナ粒子の供給速度に対する粒子の流動状態を示す。

Fig. 4 (a) は窒素流量91.3Nl/minの場合であるが、 σ_p は<a>では大きく、では低い。<c>は見られなかった。窒素流量が81.1(Fig. 4 (b))および70.6(Fig. 4 (c))Nl/minの場合 σ_p は<a>, , <c>の順に小さくなる。Fig. 4 (b)における<c>はすべて<c(2)>(図中c2と表記), Fig. 4 (c)における<c>については最初の二つを除きすべて<c(3)>(図中c3と表記)であった。アルミナ粒子の供給速度を繰り返し変化させても σ_p 値と流動状態との対応関係は保持される。窒素流量が49.8Nl/min($Fr=6.97$)の場合は<a>とに対する σ_p が小さくかつ流動状態との対応性が不明確となり、圧力指数の有効性がなくなる。Fig. 4 (c)において*1で示した σ_p のピークはアルミナ粒子の供給を急速に零にしたときに生じたものであるが、ピークに達したのち急速に減少して<c(3)>に対する定常値に達する。流動状態が<c(1)>, <c(2)>および<c(3)>の場合ガス流量一定下ではアルミナ粒子の堆積量はアルミナ供給量の減少とともに減少する。したがってアルミナ供給量を低減するとき堆積量は力学的平衡値まで減少しなければならない。供給を瞬間的に停止するとき堆積量の急減は堆積粒子の浮遊流動によって達成されるのが観察された。上述のように浮遊流動は σ_p を増大させる。したがって σ_p のピークはアルミナ供給停止に際しての堆積の瞬間的浮遊流動のためと考えられる。

実際の輸送においては、種々の原因で固気比が変動し、それが流動状態の変化をもたらすであろう。 σ_p と固気比 μ との関係をFig. 5に示す。 σ_p は $\mu=0.1\sim 0.2$ で最大値をもち、 Fr の増大とともに、ピーク高さは増大する。 $Fr > 8$ の場合、ピークの右側約0.4以上の μ においては浮遊流動は存在せず、流動は<c(1)>, <c(2)>または<c(3)>となる。Fig. 5 (a)から明らかなように<a>との σ_p は重畳することが多く、 σ_p により両者を識別するのは困難である。以下では<a>とをまとめて浮遊流動の範疇に入れる。実際にモニタリング

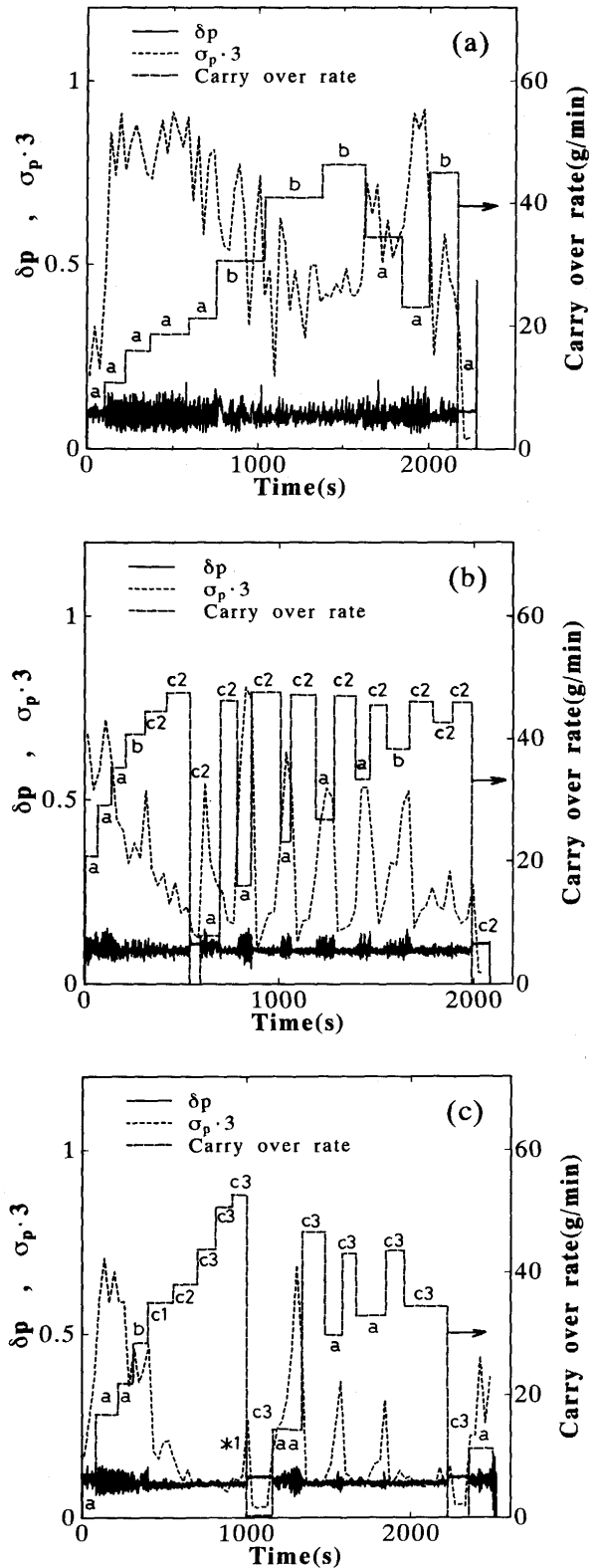


Fig. 4. Changes in σ_p and particle flow state. a, b, c1, c2 and c3 show particle flow states <a>, , <c(1)>, <c(2)> and <c(3)> respectively. (a) N_2 : 91.3Nl/min, $Fr=12.8$ (b) N_2 : 81.1Nl/min, $Fr=11.4$ (c) N_2 : 70.6Nl/min, $Fr=9.88$

が必要となる $\mu > 0.2$ においては、<c>が他のタイプと共存する領域が僅かに存在するとは云え、 σ_p 値によっては流動タイプを識別できる。Fig. 5 (b)で $Fr=6.97$ の場合、 σ_p 値

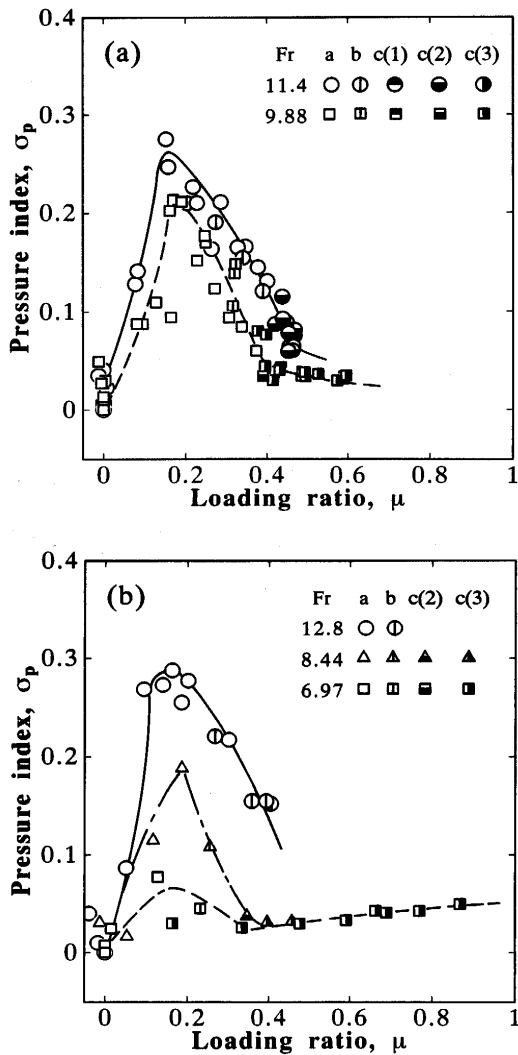


Fig. 5. Comparison of σ_p with particle flow states.

は小さくかつ μ に対する変化も小さく σ_p の有効性は失われる。

Fig. 5 (b)より、 $\mu > 0.2$ において浮遊と摺動流動との識別に σ_p が有効な Fr の下限 Fr_{cp} は6.97と8.44との間にあることがわかる。〈a〉または〈b〉と〈c〉との識別臨界 σ_p 値は Fr に依存するようで、 $11 < Fr < 12$ の場合は0.11以下、 $Fr_{cp} < Fr < 10$ の場合は0.08以下である。 Fr_{cp} の値については後述する。

σ_p 値のみ、すなわち静的な観点からすればタイプの共存領域が僅かながら見られるが、Fig. 4のような動的な観点からすれば、隣合う〈a〉または〈b〉と〈c〉は σ_p に有意の差をもたらす。したがって σ_p の動的モニタはかなり高い確度で〈a〉または〈b〉から〈c〉を識別できる。

3・3 音響センサによるモニタリング

Fig. 1に示した二つのピックアップセンサから得られる音響信号の時間データ $x(t)$, $y(t)$ のクロススペクトル $W_{xy}(f)$ は以下のように定義される。

$$W_{xy}(f) = \overline{X(f) \cdot Y^*(f)} \quad (3)$$

ここで、 $X(f)$, $Y(f)$ はそれぞれ $x(t)$, $y(t)$ のフーリエ変

換で、 $X(f)^*$ は $X(f)$ の共役複素数である。— は時間平均を意味する。 $X(f)$ について書けば

$$X(f) = \int_0^\infty x(t) \exp(-2\pi f t) dt \quad (4)$$

$W_{xy}(f)$ は二つの信号の周波数 f の成分の大きさとともに相関の大きさを示すものである。

Fig. 6にクロススペクトルの例を示す。Fig. 6で(a)と(b)を比較すると、〈c(3)〉の場合周波数 $f = 2 \sim 3\text{kHz}$ において $W_{xy}(f)$ の著しい増大が見られるが、 $f = 10\text{kHz}$ 近傍ではほとんど変化がない。〈a〉の場合Fig. 6 (a), 〈c(3)〉の場合Fig. 6 (b)のようになる。各測定点におけるパワースペクトルも同時に得られているが、両測定点のスペクトルはほぼ同じであった。したがって結果的には一点測定のパワースペクトルだけでも十分である。以下ではクロススペクトルに関して述べる。 $f = 10\text{kHz}$ 近傍のパワーを基準にしたパワー比 σ_a (音響指数)を次式のように定義する。

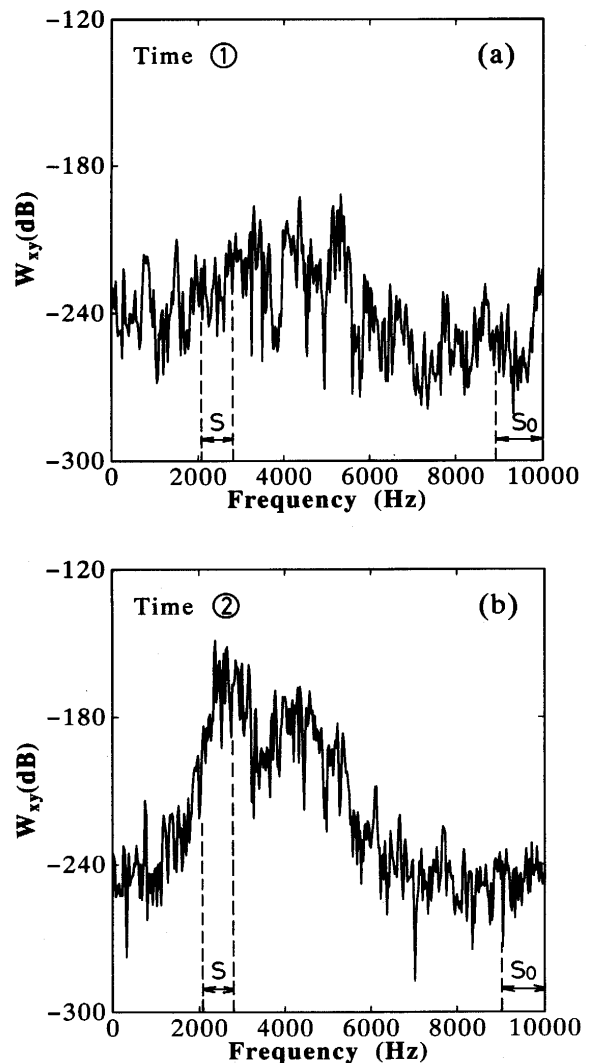


Fig. 6. Cross correlation spectra of acoustic acceleration by means of the acoustic sensors.
(a) for particle flow state 〈a〉 at time ① and
(b) for particle flow state 〈c(3)〉 at time ② in Fig.7.

$\sigma_a = S / (S_0 \alpha) \dots\dots\dots (5)$

ここで

$S = \int_{f_2}^{f_1} W_{xy}(f) df \dots\dots\dots (6)$

$S_0 = \int_{f_4}^{f_3} W_{xy}(f) df \dots\dots\dots (7)$

$\alpha = (f_1 - f_2) / (f_3 - f_4) \dots\dots\dots (8)$

ここで $f_1=2800$ $f_2=2200$ $f_3=10000$ $f_4=9000$ である。 α はSとS₀とで積分範囲の長さが異なることに対する重み付けである。

Fig. 4 (c) (Fr=9.88)に示したのと同じ実験に関する σ_a をFig. 7に示す。Fig. 6の(a)と(b)はそれぞれ①と②で示されている。Fig. 4 (c)における最初の<c (1)>および<c (2)>を除けば、<c (3)>のとき $\sigma_a > 2$ 、<a>およびのとき $\sigma_a < 1.7$ であり、 σ_a は流動タイプと対応した挙動を示す。<a>との間に σ_a の差は認められなかった。しかし、 $\sigma_a > 2$ となるのは<c (3)>の場合のみで、<c (1)>と<c (2)>の場合は $\sigma_a < 2$ であり、 σ_a による<a>およびとの識別は困難である。すなわち垂直管から落下した粒子が水平管に直接衝突するのか、または堆積層に衝突するのかによって σ_a 値が大きく異なるのである。

結論的に云えば、 σ_p が浮遊流動(<a>および)と摺動流動<c>との識別に関して有効であるのに対して、 σ_a は<c (3)>とその他の流動(<c (1)>と<c (2)>を含む)との識別に関して有効なのである。このことは σ_a と流動タイプとの相関性を示すFig. 8で一層明らかになる。

Fig. 8 (a)には、 σ_p 値による流動タイプの識別が困難になるFr=6.97の場合(Fig. 5 (b))が図示されているが、 σ_a を用いると極めて明瞭に流動タイプが識別できる。すなわち、<a>とは $\sigma_a < 2$ の範囲に分布し、他方<c>は $\sigma_a > 2.5$ の範囲に分布する。この場合<c>はすべて<c (3)>であるが、

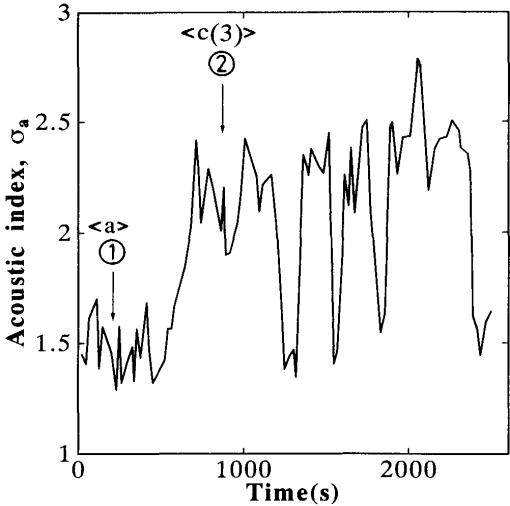


Fig. 7. Change of σ_a in the same run as that shown in Fig. 4(c).

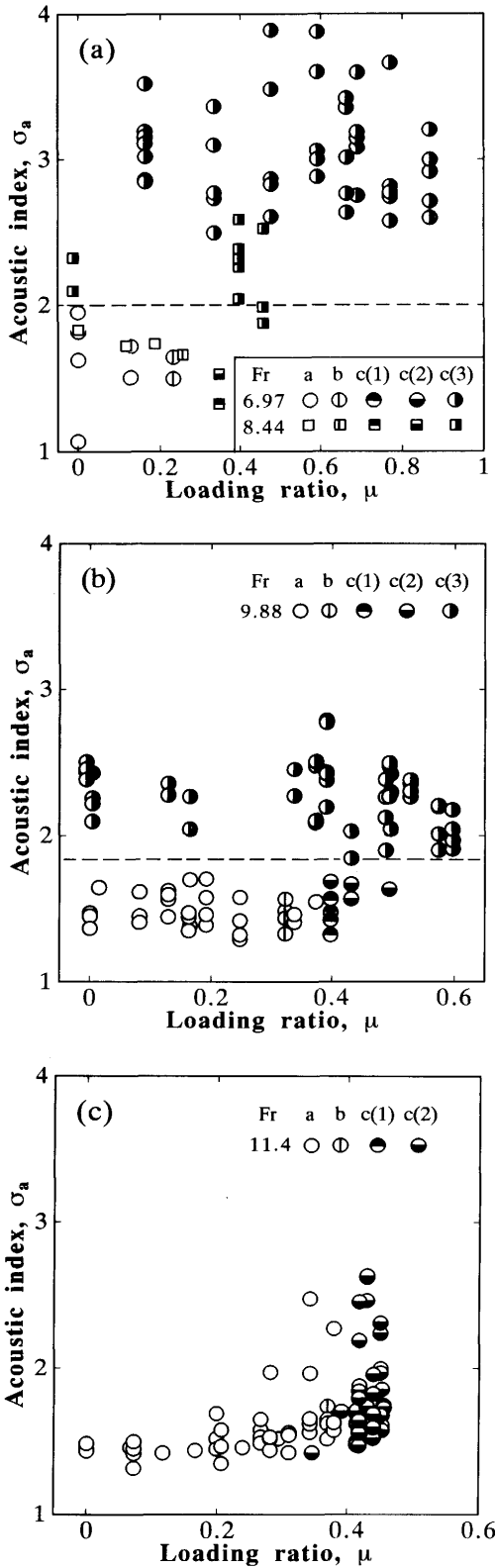


Fig. 8. Comparison of σ_a with particle flow states.

これは<c (1)>または<c (2)>となる流動条件が極めて狭く、実際に取り得る状態が<c (3)>に限られるためと考えられる。Fr=8.44の場合 $\sigma_a = 2$ を境として<c (3)>と他の流動とを識別することはできるが、 $\sigma_a < 2$ の領域に僅かながら<c (1)>と<c (2)>が<a>およびと共存する。

Fig. 8 (b)に示した $Fr=9.88$ の場合 $\sigma_a=1.8$ を境として $\langle c(3) \rangle$ とその他の流動タイプとの識別は可能である。しかし $\sigma_a < 1.8$ の領域では $\langle a \rangle$ および $\langle b \rangle$ とともに分布する $\langle c(1) \rangle$ および $\langle c(2) \rangle$ が顕著になる。 $\langle c(1) \rangle$ または $\langle c(2) \rangle$ を取り得る条件がFig. 8 (a)の場合より緩和されるためと考えられる。したがって、浮遊流動と摺動流動とを識別する有効性は図(a)の場合より低下する。つぎにFig. 8 (c)は $Fr=11.4$ の場合であるが、 $\langle c(3) \rangle$ は存在せず $\langle a \rangle$ が $\sigma_a > 2$ の範囲に拡大し流動タイプの共存する σ_a 領域は上述の場合より広い。 σ_a の有効性が完全に失われている。

$Fr=6.97$ では $\langle c \rangle$ はすべて $\langle c(3) \rangle$, $Fr=8.44$ では $\langle c \rangle$ には僅かながら $\langle c(1) \rangle$ および $\langle c(2) \rangle$ が現れる。したがって、 $\langle c \rangle$ がすべて $\langle c(3) \rangle$ となる、換言すれば浮遊流動と摺動流動とを識別するために σ_a が有効な Fr の上限 Fr_{ca} は6.97と8.44との間の値をとる。

Fr_{cp} が6.97と8.44との間にあることはすでに述べた。 Fr_{cp} と Fr_{ca} との間の定量的関係は明らかではないが、両者はかなり近い値をとると思われる。本実験装置の規模の場合近似的に $Fr_{cp}=Fr_{ca}=8$ としてよいであろう。

4. モニタ方法の特徴

実験室規模の逆T字型固気合流部における浮遊流動と摺動流動とをモニタするための有効な方法は $Fr > 8$ においては圧力指数 σ_p , $Fr < 8$ においては音響指数 σ_a であることが明らかになった。具体的数値は固気比に依存することは勿論であるが、浮遊型固気合流を主体とする場合 Fr は大きく、摺動型を主体とする場合 Fr は小さくしなければならない。したがって前者の場合摺動流動をモニタするには差圧変動法が、後者の場合浮遊流動をモニタするには音響法が適切と思われる。差圧変動法は気体-粒子間相互作用に関する局所的情報を与えるが、音響法は差圧変動法に比べ他の場所からの影響を受け易いと思われる。実際の生産装置では音響法は非常に簡便と思われるが、音源は他にも存在するのでこれらの音源の影響を避ける工夫が必要であろう。

5. 結論

(1) アルミナ粒子の気体輸送における逆T字型固気合流部での浮遊流動と摺動流動を識別するためのモニタリングとして二つの方法、すなわち差圧変動量測定法と管音響測

定法について検討した。

(2) 実験室規模の逆T字型固気合流については $Fr > 8$ においては差圧変動法が、 $Fr < 8$ においては音響法が有効であることが明らかになった。

(3) 浮遊型固気合流を主体とする場合摺動をモニタするには差圧変動法が、他方摺動型固気合流を主体とする場合浮遊流動をモニタするには音響法が適切と思われる。

(4) 両法の同時使用はモニタリングの信頼性を高めるであろう。

記 号

d : 観察部の管内径

Fr : フルード数($=u_g/(gd)^{1/2}$)

Fr_{ca} : 浮遊/摺動流動モニタに関する音響法の上限 Fr

Fr_{cp} : 浮遊/摺動流動モニタに関する差圧変動法の下限 Fr

f : 音響加速度変化の周波数

G_g, G_s : 窒素およびアルミナ粒子の質量流量

g : 重力加速度

n : 圧力測定回数

p_0, p_1 : 圧力

S, S_0 : 式(6)と(7)で定義

t : 時間

u_g : 標準状態における窒素の線速度

$W_{xy}(f)$: $x(t)$ と $y(t)$ とのクロススペクトル, 式(3)で定義

$X(f)$: $x(t)$ のフーリエ変換

$x(t)$: 音響加速度の時間データ

$Y(f)$: $y(t)$ のフーリエ変換

$y(t)$: 音響加速度の時間データ

α : 重み, 式(8)で定義

δp : 差圧, 式(2)で定義

μ : 固気比, G_s/G_g

σ_p : 差圧変動指数または圧力指数, 式(1)で定義

σ_a : 音響指数, 式(5)で定義

文 献

- 1) 森川敬信: 流体-固体二相流, (1979), p.156[日刊工業新聞社]
- 2) Y. Tsuji and Y. Morikawa: Int. J. Multiphase Flow, 8 (1982), p.329
- 3) S. Matsumoto and H. Harakawa: Int. J. Multiphase Flow, 13 (1987), p.123
- 4) S. Satija, J. B. Young and L. S. Fan: Powder Technology, 43 (1985), p.257
- 5) 日高重助, 下坂厚子, 伊東秀明, 三輪茂雄: 化学工学論文集, 16 (1990), p.1067