

粉体技術者のための粉体入門講座 48

入門の予習編-1

Preparation for Lecture on Powder-1

粒子の大きさについて-1

岡山大学 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

ご存じのように、本誌を編集している日本粉体工業技術協会では各種のセミナーを開催している。その中で、粉体を学術的に扱う「粉体工学」の基礎的な内容を3回に渡って講義するのが「粉体入門セミナー」である。この「粉体入門セミナー」では系統的に基礎的な事項がわかりやすく説明されているので、全てを聴講すれば粉体工学の基礎を修得できると思われるのだが、「講義」であるので履修される方にはある程度予習が必要な気がする。その予習（というか粉体工学入門セミナー（有料）の宣伝というか）となるセミナーが粉体工業展大阪で2011年に始まり、国際粉体工業展でも開催されている。本講座では、その予習セミナーと同じ立場、すなわち、粉体入門のための予習に相当する内容を記述してみる。

なお、「粉体」というと乾いた粉（こな）のイメージが強いので、まずは気体中に粉体があることを前提にして話を進めていく。

2. 粒子の大きさについて-1

「粉体」の入門なのに、項目のタイトルがいきなり「粒子の」から始まるが、粉体は微小固体の集合体を指し、その微小固体1個を「粒子」という。この粒子、集合すると近隣粒子とくっつく性質がある。このため、いくつかの粒子がくっついた「凝集粒子（または凝集体）」を形成する。この凝集粒子と区別するため、粉体または凝集体を構成する粒子を「一次粒子」と呼ぶ。一次粒子がくっつく凝集粒子となるのだが、たくさんの粒子がくっつき、その全体の形が目視できるほど大きくなると「顆粒」と呼ばれることがある。顆粒

という言葉に入っている「粒（つぶ）」も微小な固体である。粉体または粉粒体として特別に分けずに扱われることが多いが、日本語としては「粉（こな）」は1個の形が目視で判別できないもの、「粒（つぶ）」は形が目視で判別できるものくらいの区別のようなのである。

ここまで雑に「微小」と呼んでいたが、少し定量的に粒子の大きさについて考えてみる。図-1は長さ（m）を対数軸（一目盛が一桁を表わす）で表わしたものであるが、そこに代表的な粉体の大きさの範囲を示した。「粉体」に関する本¹⁾を見るとよくある図である。先の「粉（こな）」と「粒（つぶ）」の境目は、砂と花粉の間あたりであろうか（砂粒という日本語は聞いたことがあるが、砂粉という言葉は聞かないので）。

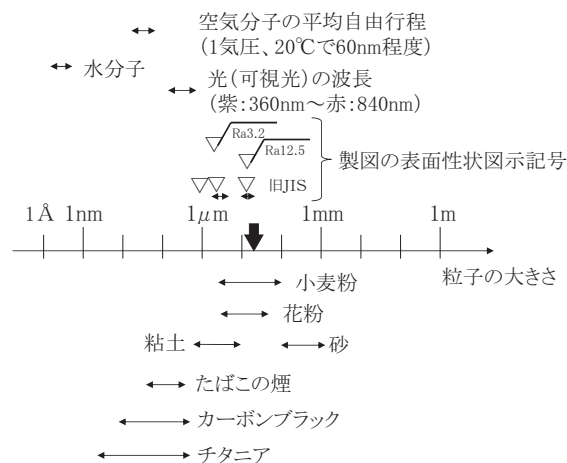


図-1 粒子の大きさとその比較

粒子の大きさにおいて、粉体工学の基礎として重要なことは、図-1の横軸の下側に示した粉同士の大きさの比較ではなく、軸の上側に示したいろいろな大きさとの比較である。まず、気体分子との関係に着目する。グラフではわかりにくいので、図-2に、たばこの煙程度の粒子（100nm = 0.1 μm）と気体分子の関係を図示してみた。気体

分子は（中学か高校生の頃にならったように）空間を飛び回っている（＝熱運動している）。空間を移動した気体分子は、近隣の分子と衝突し跳ね返り、また空間を移動して分子と衝突し跳ね返る運動を繰り返している。この運動において、近隣分子と衝突してから次に別の分子と衝突するまでに移動する距離を「自由行程」と呼び、その平均値が「平均自由行程」である。平均自由行程の長さは気体分子の熱運動で決まるので、圧力と温度に依存するが、1気圧20℃の空気で約60nm（＝0.06μm）と言われている。

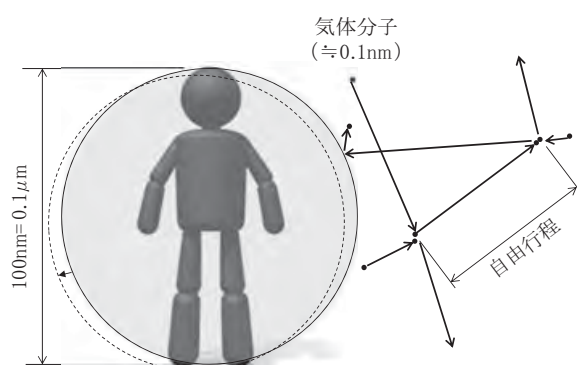


図-2 たばこ粒子の大きさになってみると

この約60nm という距離、たばこの煙の粒子と比較すると、その60%ほどの距離となる。自分（＝人）がたばこの煙の大きさになってみると、空気分子（主に N_2 と O_2 ）は、図-1 に示した水分子（ H_2O ）と同程度であるので、たばこの煙の粒子の1000分の1程度である。つまり、人（＝メートルオーダー）から見ればmmの粒子である。これが自分の身長60%（頭から腰くらいまでであろうか）の間隔で衝突を繰り返しているのが見えるはずである。通常、メートルオーダーの我々には60nm という距離は無視できるほどに小さい。また、気体分子は数え切れないほど数多く体の周りに存在し、無数の分子がほぼ同時に我々の体に衝突し続けている。このため、気体分子の衝突を我々は「圧力」という面を押す力としてしか認識しない。しかし、図-2 に示したような大きさの関係になる100nm 程度の粒子には、ほぼ同時に気体分子が衝突することは、ほとんどない。全方向からほぼ同時に気体分子が粒子に衝突すれば粒子は動かないが、1個の分子が1個の粒子に一方方向から衝突すると、気体分子の運動量に依存した大きさの力が、粒子に一方方向に働くことになる。す

ると、当然、粒子は、例えば図中で破線円で示したように移動する。この気体分子衝突の繰り返しによる粒子の運動がブラウン運動であり、ブラウン運動によりランダムに運動している粒子群の挙動をマクロに捉えると、「拡散」である。つまり、「対象とする粒子から見て、気体分子の平均自由行程が無視できなくなる」すなわち「粒子の大きさが気体分子の平均自由行程くらいの大きさになる」と、粒子の運動は「拡散」が支配的となる。このため、粒子の挙動を推定しようとする、拡散方程式¹⁾を解く必要がある。

3. 第1回めのおわりに

今回は、「粉体入門のための予習」に入る前段階のような話とした。本稿第2節の冒頭に「微小な固体」と書いたが、「小」とか「大」は相対的な関係を表す言葉である。つまり、「〇〇に比べて」大きいまたは小さいのである。粒子の挙動を理解するには、この「〇〇に比べて」をまず明確にするべきであると考えている。そこで、粒子の大きさ（というか小ささ）を考える場合、単に絶対的なサイズを考えるのではなく、「対象としている粒子を基準とした相対的な大きさが重要である」ということを示したかったので、このような話としてみた。乾式（＝気体中）での粉体操作の場合、当然、その相対的な大きさとして重要となるのが、気体分子であるが、分子そのものの大きさよりも、分子運動を特徴づける大きさである、平均自由行程が指標となる。次回も、もう少しこの話を続ける予定である。

参考文献

- 1) 例えば、日本エアロゾル学会編、高橋幹二著：「エアロゾル学の基礎」、森北出版、p. 6、p.p. 45－60（2004）



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 49

入門の予習編-2

Preparation for Lecture on Powder-2

粒子の大きさについて-2

岡山大学 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回、「対象としている粒子を基準とした相対的な大きさが重要である」ということを示すため、乾式（＝気体中）での粉体操作で重要となる、気体分子運動を特徴づける大きさ、平均自由行程と、気体分子運動によるブラウン運動の話を書いた。今回も、気体分子運動と平均自由行程から話を始める。

なお、話は前号から続いているので、前号の図も合わせて参照してお読みいただけると幸いです。

2. 粒子の大きさについて-2

前号の図-2は、静止した気体中での粒子をイメージしている。今回は、流動している気体を考える。気体分子は、近隣の分子と衝突し跳ね返り、また空間を移動して分子と衝突し跳ね返るという熱運動を繰り返している。そのようなランダムな運動をしている分子が一方方向に移動しているのが

気流である。といっても、全ての分子の熱運動の方向が揃っているわけではない。イメージは図-3に示したように、ランダム運動している無数の気体分子が入った箱が、ある方向に移動しているのが気体の流れ（＝気流）である。この箱の移動速度が気流流速 u である。この箱の中にタバコの煙の粒子が入っているとする。観測者（L）が箱の中に入って粒子を見ると、前号の話のようにブラウン運動を観測することができる。一方、箱の外で静止している観測者（O）からは、粒子は平均的には箱と同じ流速で移動しているが、よく見るとほんの少し気流の軌跡の周りで揺れながら移動しているように見える。

ここで、ブラウン運動による揺れの移動幅が気流（＝箱）の移動距離と比べて小さいとしてブラウン運動を無視すると、粒子の移動速度（＝粒子流速） v は気流の移動速度（＝気流流速） u のみに依存する。この気流による粒子の運動、言い換えると、気流流速と粒子流速の関係は、ニュートンの運動方程式^{1),2)}で表わされる。ニュートンの運動方程式とは高校の物理に出てくる $F=ma$ の

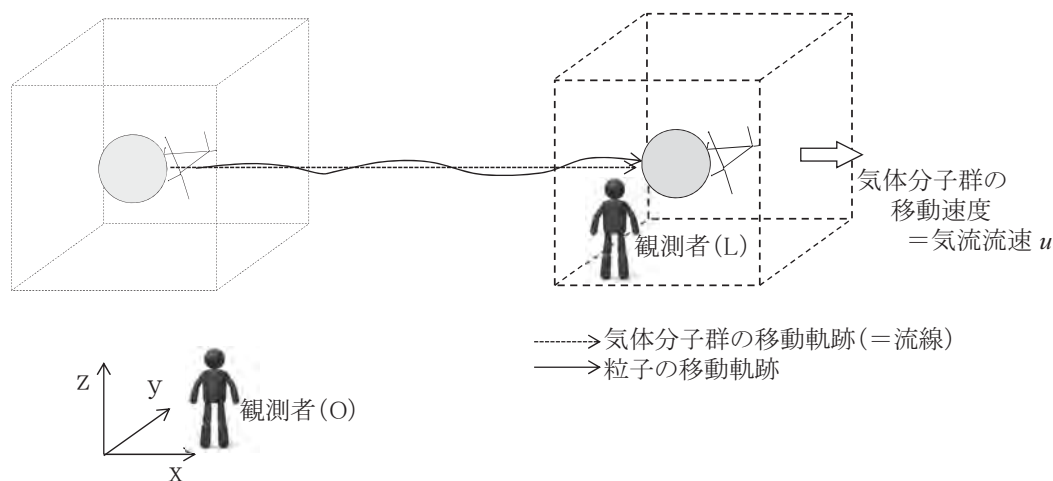


図-3 気体分子群の運動と粒子の運動

ことで、質量 m の物体の加速度 a がその物体に働く力 F で決まることを表している式である。

物体（ここでは粒子）に働く力の一つが流体抵抗力である。流体抵抗力は、流体を連続体、すなわち、隙間のない均質な塊として捉え、その塊が持つ粘性から生じる抵抗を考えている。ここで、前号の話を思い出していただきたい。メートルオーダーの人間のように、気体分子の平均自由行程の長さが無視できる程大きな物体にとっては、気体分子は数え切れないほど数多く体の周りに存在しているので、粒子の周りの気体を隙間のない均質な塊と捉えても差し支えない。しかし、対象としている粒子がタバコの煙の粒子くらいの大きさ（100nm 程度）だとすると、周りの気体分子は粒子の60%の距離で衝突を繰り返しているのが見えるので、隙間のない均質な塊として捉えられない、すなわち、連続体とは見なせなくなる。このため、流体抵抗力は連続体を仮定して推定される力よりも小さな値となる。この粒子が小さくなったことによる抵抗力の補正をする係数は、カニングガムの補正係数 C_c ¹⁾ と呼ばれる。

引用文献¹⁾の式からカニングガムの補正係数 C_c を計算した結果が図-4である。この係数を用いた抵抗力の補正では、流体抵抗力を補正係数で割る。このため、カニングガムの補正係数 C_c は粒子径が大きいと1となり、粒子径が小さいと1以上の値となるように定義されている。例えば、圧力が常圧（=1atm）の時、0.1 μm （=100nm）だと約3となる。すなわち、流体抵抗力は、連続体を仮定した時の値の3分の1となる。

ここで注目すべきは、カニングガムの補正係数 C_c が1より大きくなり始める粒子径である。常圧

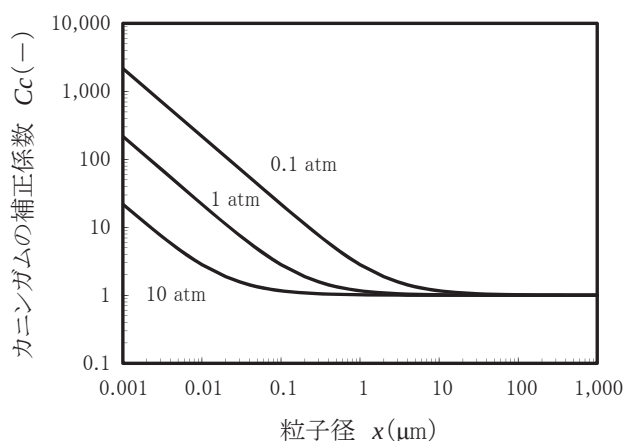


図-4 カニングガム補正係数 C_c の計算値

では1 μm 付近から1より大きくなり始める。このことは、粒子径が1 μm 以下となると、気体分子の隙間、すなわち、平均自由行程の影響が無視できなくなることを意味する。圧力が高くなると、気体分子の隙間である平均自由行程が小さくなるので、1より大きくなり始める粒子径は小さくなる。一方で、圧力が低くなると、気体分子の隙間は大きくなるので、1より大きくなり始める粒子径は大きくなる。このように、分子運動を特徴づける大きさである、平均自由行程が気体の圧力に依存するので、1 μm 付近の微小な粒子の運動は周りの気体の圧力に大きく依存する。

3. 第2回のおわりに

前回に引き続き、「対象としている粒子を基準とした相対的な大きさが重要である」ことの例として気体分子の平均自由行程との関係を説明した。前述のように、流体抵抗力を考えた場合、常圧では粒子径1 μm 近傍がひとつの境目になると考えられる。さらに、前号で述べたブラウン運動は粒子が小さいと大きくなるが、ブラウン運動の影響が無視できなくなる粒子径も常圧では粒子径1 μm 近傍である。よって、気体中の粒子の挙動は1 μm 近傍を境として変化すると考えられる。このように、指標との相対的な大きさが変わると、粒子の挙動が変わるので、粒子の取り扱い方も変わることになる。

参考文献

- 1) 日本エアロゾル学会編、高橋幹二著：“エアロゾル学の基礎”、森北出版、p.p.13-17、199-202（2004）
- 2) 日本粉体工学技術協会編：“粉体工学概論”、粉体工学情報センター、p.p. 36-39（2003）



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 50

入門の予習編－3

Preparation for Lecture on Powder-3

粒子の大きさについて－3

岡山大学 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

第1回、第2回では、入門の予習編の始めとして「対象としている粒子を基準とした相対的な大きさが重要である」ことを示すため、乾式（＝気体中）での粉体操作で重要となる気体分子、特に平均自由行程と粒子の大きさの話を記した。今回も「相対的な大きさが重要」という主旨であるが、相対する相手として、気体以外で重要となる固体壁と可視光を取り上げてみる。可視光と粒子の関係については、例えば、金属ナノ粒子の表面プラズモン現象¹⁾などがあるが、そのような材料特性に関連した話は他の専門書に譲るとして、ここでは光で見えるか見えないか、すなわち、人間が簡便な方法で観測できるかできないか、という観点で可視光との関係を取り上げる。

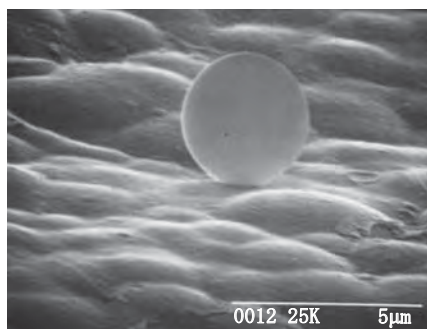
2. 粒子の大きさについて-3

これまで気体、主に空気と粒子の大きさの関係を見てきたので、説明において粒子は気体中に浮いた状態を想定していた。今回は、粉体プロセスで、より一般的にみられる状況である、粉体が物体、例えば、容器や装置、配管の壁などに接触している状態を想定してみる。まず、直感的にわかりやすいように、粉体を手に持った時を考える。乾いた砂を手に取り観察すると、その中に一粒の形が見える砂がある。第1回に書いたように、肉眼で形が見えるので砂“粒”である。砂を手から掃うと、目に見える粒はすぐに手から離れる。し

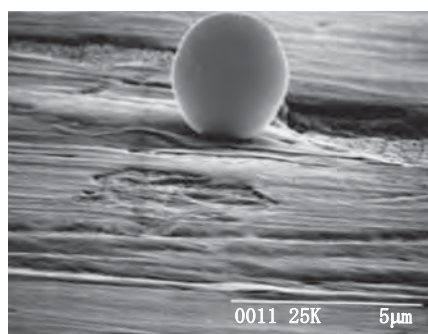
かし、手のひらは白っぽく汚れている。この汚れ、もちろん砂の粒子が手に付いているのであるが、指で触ってもザラザラしない。人がザラツキを感じることができる限界は、（人によって異なるが）だいたい20 μm と言われている（第1回 Vol. 6 No. 1 p. 86 (2014) の図-1 中の矢印↓）。指で手のひらを触っても存在を感じることはできないが、粒子は手のひらに付着している。また、肉眼の分解能、すなわち、異なる2点間を識別できる限界は約0.1 mm = 100 μm 、光学顕微鏡の分解能は約0.2 μm と言われている。このため、砂を手にとった時のように粒子が層を成していれば可視光で白っぽく見えるが、粒子が1個だけ付着している場合には肉眼では見えない。見えないし、触っても判らないが、粒子は手のひらに存在する。装置壁でも同様である。

装置に用いる鋼材にはメッキ処理を施す場合がある。メッキ処理をすると、鋼材の表面はピカピカになり、触ってもツルツルである。実際に鋼材にニッケルメッキを施した表面に3.7 μm のポリスチレン球形粒子を付着させ、走査型電子顕微鏡（SEM）で観察した画像が図-5(a)である。画像を見てわかるように、メッキした鋼材の表面は曲面の突起で構成されており、粒子はその曲面上に付着している。また、図-5(b)は、いわゆるエンジニアリング・プラスチックの一つである、ポリフェニレンスルファイド（PPS）の表面に、図-5(a)と同じ3.7 μm のポリスチレン球形粒子を付着させた写真である。PPSも手で触るとツルツルであるが、3.7 μm のポリスチレン球形粒子から見ると皺状の凹凸表面である。粒子はその

皺の曲面上に付着しており、粒子付着力を説明する参考書²⁾などで描かれている「平板と球」とは大きく異なる状況である。



(a) ニッケルメッキした鋼材



(b) ポリフェニレンスルファイド (PPS)

図-5 固体壁面上に付着した3.7μmの球形粒子

装置材料では、メッキ以外に、研磨などによる表面仕上げをする場合がある。図-1中には、製図の表面仕上げ記号も記した。仕上げ記号は古いJISでは三角記号(▽)の数で仕上げの状態を規定し、新しいJISでは▽記号に合わせて表面粗さの数値を記入する。これら仕上げの寸法として最大高さや中心線平均高さ(Ra)などが定義されているが、いずれも単位はマイクロメートル(μm)である。例えば、Ra3.2の表面仕上げは、表面の平均的な凹凸を3.2μm程度とする仕上げであり、指で触っても粗さを感じない、ツルツルの(正確にはツルツルと感じる)表面になる。しかし、その表面の凹凸は、表面仕上げをしている材料で作る装置で扱う粉体と同じような大きさである。

しかも、その凹凸が研磨によってできたとすると、研磨材粒子によって削られたものであるので、図-5に示した曲面状ではなく、鋭角な凹凸である。鋭角な凹凸上に粒子が付着した場合、粒子が凹凸の窪みに入り、複数の点で接触する場合があ

る。すると、ますます教科書や便覧に出てくる平板上の球形粒子の状態から遠ざかっていく。

3. 「粒子の大きさについて」のおわりに

初回から第3回まで、「対象としている粒子を基準とした相対的な大きさが重要である」ことを繰り返して述べてきた。それぞれの回で記述した内容は、粉体工学の教科書やハンドブックなどの参考書では緒言や序章で出てくる基本的な話である。しかし、この基本的な話である気体の平均自由行程が、粉体を気体で輸送する、気相中で分散、分級するといった、プロセス装置を考える際にはなかなか意識されない。また、プロセス装置内で粒子が付着した時には、装置壁を触るとツルツルなので、教科書にある「平板と球」のような状況を思い描く。

粉体工学で勉強する内容、特に、理論式では、その理論式を導くために系を幾何学的に単純化している場合が多い。このため、現実の系、すなわち、実装置内での状況と特に幾何学的な条件が異なり、粒子は「予想と違った挙動」をする。特に、理論式から得られる知見を利用するのであれば、理論式と同様、粒子1個の大きさになって現実の系の状況を考え、理論での仮定と、今、自分が対象にしている系がどう違うかを把握するべきである。

参考文献

- 1) M.Hosokawa, K.Nogi, M.Naito and T.Yokoyama (Ed.): "Nanoparticle Technology Handbook", Elsevier, p. 9 (2004)
- 2) H.Masuda, K.Higashitani and H.Yoshida (Ed.): "Powder Technology Handbook Third Ed.", Elsevier, p. 158 (2006)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 51

入門の予習編－4

Preparation for Lecture on Powder-4

粒子の大きさの表し方－1

岡山大学 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回までは「対象としている粒子を基準とした相対的な大きさが重要である」ことを述べてきた。その記述の中でタバコの煙を取り上げた。その際、「タバコの煙程度の粒子 ($100\text{nm}=0.1\mu\text{m}$)」という記述をした。これは「大きさのオーダーとして 100nm 程度」ということを意図していた。同じように見えるが、例えば「タバコの粒子は 100nm 」というところがおかしな表現になる。

何をおかしいと言っているのかわかりにくいと思うので、対象を変えて同様の表現をしてみると、例えば、「A大学の校舎は 20m 」となる。こう記述すると大概の人は「 20m は高さか？幅か？それとも奥行きか？」と思うはずである。つまり、先のタバコの粒子の記述は、「目に見えない程小さいとはいえタバコの粒子も3次元の物体であるので、どこかの長さが 100nm かを特定していない」ことがおかしい。

これを踏まえて、「どうやって目に見えない程小さい3次元の物体の大きさを数値で表わすか」を考えてみる。

2. 粒子の大きさの表わし方－1

校舎の例でわかるように、3次元物体の大きさを正確に表わそうと思うと3つの数値、例えば高さ、幅、奥行きの長さが必要である。長さで表わされるので、単位は m (メートル) である。仮に、粒子の高さと幅、奥行きの長さが測れたとす

ると、その粒子の大きさは(図-6)「高さ $\bigcirc\bigcirc\mu\text{m}$ 、幅 $\times\times\mu\text{m}$ 、奥行き $\triangle\triangle\mu\text{m}$ 」と表現すれば良い。

また、粒子は建物のように正面と背面、上下などではなく、ひっくり返しても、回しても良いので、高さ、幅、奥行きという方向の区別がないとすると、1つの粒子について測定された3つの数値を平均して、粒子1個の大きさのオーダーを表わす数値を求めても良いと考えられる。これは三軸平均径¹⁾と呼ばれる。三軸平均径を用いることで、1個の粒子の大きさを、3つの数値ではなく、1つの数値で表わすことができ、取り扱いが便利になる。その代わり、その1つの数値は平均的な大きさであり、例えば、細長い直方体のような高さまたは幅、奥行きのいずれかが長く、それが形の特徴になるような粒子では、その平均的な大きさが粒子の特徴を表わさないという問題が出る場合がある。

前述の話は、「仮に」3つの数値が測れた場合である。実際に長さを測るためには物体に「物差し」を当てて目盛りを読む必要がある。しかし、目に見えない程小さな粒子に当てる物差しはない

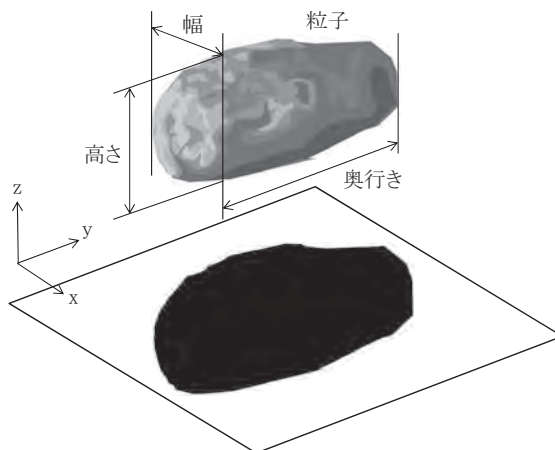


図-6 粒子と投影画像

し、仮にあったとしても目に見えないので目盛りを読めない。そこで、目に見えるように拡大する。拡大する方法は、光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡などいろいろとある。いずれの方法でも画像として、(昔は) 印画紙や電子ファイルに保存することができる。保存された画像に映った粒子では、物差しを当てて長さを測ることができる。長さを測ることができるが、画像上の粒子は2次元であり、(特殊な工夫をしない限り) 2つの長さしか測定できない。

2つの長さであるが、前述のように粒子には高さ、幅、奥行きという方向の区別がないので、ランダムに置かれた、つまり、整列させずバラバラに複数個の粒子を試料台に載せて観察すれば、2つの長さには高さ、幅、奥行きがバランスよく含まれるはずである。高さ、幅、奥行きがバランスよく含まれるのであれば、1つの粒子について2つの長さを測る必要はなく、「どこか1つの長さ」を測り、多数個の粒子それぞれで得られたその長さを平均すれば、その粒子群に含まれる粒子の平均的な大きさを表わすことができる。この「どこか1つの長さ」の決め方がいろいろと提案されており、その決め方に応じて求めた長さを定方向径(フェレー径と呼ばれる)や定方向面積等分径(マーチン径と呼ばれる)などと呼ぶ¹⁾。

ただし、「どこか1つの長さ」で粒子群の平均的な大きさを表わすことが妥当かどうかは、粒子群に含まれる粒子の形状に依存する。例えば、高さ、幅、奥行きのいずれか1つが飛びぬけて大きい、棒状の粒子では、その平均的な大きさが粒子の特徴を表わさないことが問題となる。すなわち、どこか1つの長さで粒子群の平均的な大きさを表わす方法は、高さ、幅、奥行きの3方向の長さにそれほど違いがない粒子、言い換えると、等方的形状の粒子(または形状に等方性のある粒子)には有効である。これは、最初に述べた三軸平均径でも同じである。

そこで、高さまたは幅、奥行きのいずれかが長

く、それが形の特徴になるような粒子はどうすれば良いかを考える。1つの方法は、先の「どこか1つの長さの決め方」を「最も長い場所」とすれば良い(=長軸径)。さらに、幸いにして画像から2つの数値を求めることができるので、2つの数値のうち1つは最も長い場所とし、もうひとつを最も短い場所とする(=短軸径)など、2つの数値を用いれば形の特徴を表わすことができる。

もちろん、ここで示したいいずれの場合でも「多数個の粒子を測定した結果から求めた数値の平均値で多数個の粒子の特徴を表わす」ためには、それらの粒子は互いに相似な形状であると仮定できる必要がある。

3. おわりに

粉体を扱っていると、あたりまえのように粒子の大きさを「長さの単位を持つ1つの数値」で表わしている。しかし、粒子は目に見えない程小さいとはいえ、3次元の物体であるので、その「1つの数値」をどのように求めたか、その求め方は対象としている粒子群、すなわち粉体に対して妥当であるかどうか、を考えておかないと、せっかく求めた数値が意味のないものになってしまう。この求め方の重要性を示すために、次回は、求め方が、より大きな意味を持つ粒子の大きさの定義について述べることにする。

参考文献

- 1) 粉体工学会編: “粉体工学ハンドブック”, 朝倉書店, p. 2-3 (2014)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 52

入門の予習編－5

Preparation for Lecture on Powder-5

粒子の大きさの表し方－2

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回から「どうやって目に見えない程小さい三次元の物体の大きさを数値で表わすか」についての話をしている。今回もその続きであるが、以下では測定対象とした粉体、すなわち粒子群の各粒子は互いに相似な形状であると仮定できる場合を考える。

2. 粒子の大きさの表わし方－2

まず、粒子の形状に等方性がある場合、前回述べたように、ランダムに置かれた粒子の「どこか1つの長さ」を測り、多数個の粒子それぞれで得られたその長さを平均すれば、その粒子群に含まれる粒子の平均的な大きさ（＝長さ）を表わすことができる。このようにして得られた長さは、どの方向から測っても同じ長さの物体の長さ、すなわち、「球」の直径を表していることになる。また、その長さが、前号の図-5の投影画像から得られたものであれば、平均的な長さが表すのは「円」の直径である。つまり、ランダムに置かれた粒子のどこか1箇所を測り、その平均値を求める測定は、粒子形状を球と仮定し、その直径を求めていることと同じ意味になる。このため、前号に示した。

このような回りくどい言い方をしなくても、大きさを代表する長さを「径（けい）」と呼ぶ物体は、球または円である。物体の形状を球または円で表すと、工学的にはいろいろと便利ながあ

る。便利なことの1つは、物理学の分野で得られている多くの知見を用いることができることである。高校の物理で習った運動方程式（ $F=ma$ と覚えた式）は質点（＝質量はあるが大きさのない粒子）を仮定していた。空気中で運動すると、実際には、大きさに起因した流体抵抗が働く。この流体抵抗も物理学で推定する式が与えられているが、モデル形状は球である。また、粒子に光を当てると、光の回折や散乱といった現象が起きるが、これらも球について解析が行われている。他にも、物理学で粒子状の物体を取り扱う際には、球を対象としている。

また、球や円では、直径という「長さ」の単位、すなわち、直線上の2点間の距離という一次元数値だけで、二次元の値である面積や三次元の値である体積を求めることができる。球と円の面積の公式は、小・中・高校で習っているがその時は半径で表した式であったと思うので、直径 x で表した式を表-1にまとめた。

表-1 円と球の公式

	円	球
周囲長	$\pi x \quad \cdots (1)$	
面積	$\frac{\pi}{4} x^2 \quad \cdots (2)$	$\pi x^2 \quad \cdots (3)$
体積		$\frac{\pi}{6} x^3 \quad \cdots (4)$

ここまでは「長さを測る」ことを基本としていたが、粒子形状を球と仮定し、その直径を求めるのであれば、長さを測らなくても、表-1の式から直径を求めることができる。例えば、前号の

図-5のように顕微鏡などで粒子の投影画像が得られていれば、パソコンの画像処理ソフトを用いて面積を簡単に求めることができる。面積が求まれば、表-1の式(2)より直径 x を計算することができる。このようにして求めた粒子径は円相当径(またはヘイウッド径)と呼ばれる¹⁾。また、体積を測定することができれば、式(4)より体積相当径が求められる。

ここで注意しなければならないのは、前号でも記したように「1つの長さ」で粒子群の平均的な大きさを表わすことが妥当かどうかである。画像処理や体積測定を行うと、粒子がどんな形であっても粒子径 x を求めることができる。しかし、円や球を「仮定」して求めた値であるので、その仮定と実際がかけ離れた非棒状粒子では、得られた値の使い方は限定される。棒状粒子の体積を測って球相当径 x を求めた場合、その球相当径を持つ球形粒子に働く重力や遠心力と、棒状粒子に働く重力や遠心力は、それらの力が質量(=粒子密度×粒子体積)に比例するので、等しい。しかし、球相当径から式(3)で計算した表面積や、その球の投影面積(=断面の円面積)は、棒状粒子の表面積、投影面積と異なる。このため、その球相当径を持つ球形粒子に働く流体抵抗力は、その力が粒子投影面積の関数となっているので、棒状粒子に働く流体抵抗力とは異なる。つまり、非等方的な粒子で求めた球相当径では、その径から計算される体積は正しいことは保証されているが、それ以外の値は正しいことは保証されていないので、体積以外の計算に用いることは(原則として)できない。

「1. はじめに」で述べたように、以上は測定対象とした粉体中の各粒子が互いに相似な形状であると仮定できる場合である。数学的に相似、とまではいなくても、形が似たような粒子群であればこれまでの議論は「相似と仮定する」ことで成立する。粒子群の形状が相似でない場合というのは複数の異なる種類の粉体が混合された系である

場合が多い。このような混合粉体では、種類ごとに直径を求める、または、混合物全体として平均的な直径を求めることになる。種類ごとに直径を求める時にはこれまでの議論と同じになる。混合物全体で平均的な直径を求める時には、非等方的な形状の粒子の直径を取り扱う時と同様、その値はあくまで、すべての粒子が相似形であると「仮定」して得られた値であることを認識しておく必要がある。

3. おわりに

今回は、等方的な粒子は球に近似することで、長さを測定しなくても投影画像の面積や、粒子体積から粒子径を求めることができることを記した。設計計算などに用いる理論式や経験式を使用する際にはあたりまえであるが、理論式を求めた際のモデル近似が当てはまらない系、経験式の適用範囲外では、仮に数式から値が求まったとしても、その数値は使用できない。投影面積や体積から求めた粒子径を計算に使う時も、これらと同じである。とはいっても、実際には粒子は等方的な形状ばかりではなく、また、混合物である場合も多い。このような場合には、求めた値が、近似が当てはまらない系、または、適用範囲を超えて求められたことを意識する、すなわち、その値から計算される結果には現実との誤差が大きいことを認識しておくことが重要である。

参考文献

- 1) 粉体工学会編: “粉体工学ハンドブック”、朝倉書店、pp. 2-3 (2014)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 53

入門の予習編－6

Preparation for Lecture on Powder-6

粒子の大きさの表し方－3

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回、粒子形状を球と仮定し、その直径を求めるのであれば、「長さを測る」ことをしなくても粒子の面積または体積から粒子の大きさ（＝直径）を求めることができることを示した。今回はその続きである。

2. 粒子の大きさの表わし方－3

「粒子形状を球と仮定」すると、粒子の面積または体積を測定すれば、長さを測ることなく粒子径を求めることができる。粒子の面積測定、体積測定以外にも、同様に、粒子形状を球と仮定すれば、長さを測定することなく、その直径を求める方法がある。その方法は物理学の分野で得られている多くの知見を用いる方法である。

そのひとつが粒子の運動から直径を求める方法である。単一粒子の運動は、運動方程式（高校の物理で $F = ma$ と覚えた式）で記述される。この式は、質量 m の物体に作用する力 F と物体の移動速度の変化（＝加速度 a ）の関係を表す式である。例えば、粘度 μ 、密度 ρ_l の流体（＝液体または気体）中で密度 ρ_p 、直径 x の「球形粒子」が、図-7 に示すように、流体からの抵抗力を受けながら重力（＝粒子質量 $\times$ 重力加速度 g ）により落下する運動を運動方程式で記述すると、流体抵抗

力と重力が釣り合うことにより、粒子の運動は定常、すなわち、一定速度で落下するようになることがわかる。その一定になった速度は終末沈降速度 v_t と呼ばれ、次式で表される。

$$v_t = \frac{(\rho_p - \rho_l)gx^2}{18\mu} \quad (1)$$

詳細は文献1)を参照していただきたいが、式(1)では流体からの抵抗力を表す式としてストークス(Stokes)則を仮定している。ちなみに、この流体が気体で、粒子がその気体分子の平均自由行程に近くなると、抵抗力の補正が必要となるのは第2回に記したとおりである。

式(1)中で、空気の粘度 μ 、密度 ρ_l と粒子の密度 ρ_p は物性値で測定法が確立していることに加え、文献での推定も可能であるので、測定または文献値から求めておけば、未知数は粒子の沈降速度 v_t と粒子径 x だけになり、沈降速度 v_t を測定することで粒子径 x を算出することができる、すなわち、粒子形状を「球と仮定」すれば速度を測定することで粒子の直径（ストークス径と呼ばれる）を求めることができる。

このストークス径も「仮定」して求めた値であるので、前号の円相当径や体積相当径と同様、得られた値の使い方は限定される。非球形粒子に対して求めたストークス径では、球形粒子の落下速度とその非球形粒子の落下速度が等しい、運動方程式からはもっと拡張して、流体中での外力による粒子の運動が等しいことが保証される。一方、円相当径や体積相当径のように投影面積や体積が等しいことは保証されない。これら「長さを測ることなく求めた粒子径」では「仮定して求めた値であるので、使い方が限定される」こと、すなわち、「値ごとに保証されることと、保証されないことがある」ことは、「使いたい用途に合わせて

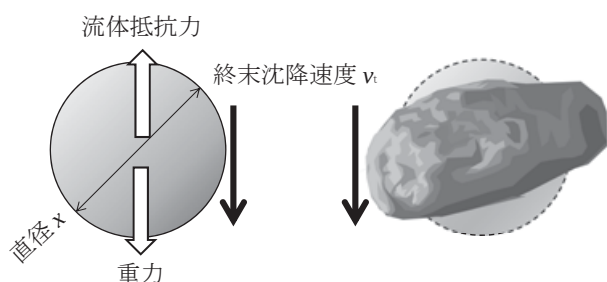


図-7 重力沈降

使用するべき粒子径（の定義）がある」ことを意味する。ここで示した粒子径だと、流体中の運動を計算したい、例えば、流体解析ソフトウェアで流れを解いて、その中で粒子の挙動を推定したい、という時には、対象とする非球形粒子のストークス径を測定する必要がある。体積を測定する装置があるからといって体積相当径を用いて流体中の挙動を推定すると棒状粒子のように球からかけ離れた粒子では、計算値と実際の挙動とのズレは大きくなる。

昨今、粒子径の測定にレーザー回折・散乱式粒子径分布測定装置が多く用いられている。この方法で測定される値も球を仮定した理論式を用いて算出された値である。粒子にレーザーを照射すると、光の回折・散乱パターンが生じる。光の回折・散乱パターンは回折理論、散乱理論から粒子径の関数として予測される¹⁾ので、回折・散乱パターンを計測することで粒子直径を求めることができる。よって、レーザー回折・散乱式粒子径分布測定装置で測定された非球形粒子の粒子径では、同じ直径の球と同じ光の回折・散乱パターンを持つことが保証される。つまり、粒子に光が当たった時の「光の挙動が同じ」ということである。

なお、レーザー回折で楕円体粒子1個を測定すると長軸径と短軸径の2つの径に起因した2種類の散乱パターンが生じるので、均一な楕円体粒子群を測定すると分布の広い粒子群と判別されることが確認されている²⁾。光回折・散乱現象に基づく装置で非球形粒子を測定する場合にはこのような点にも注意が必要である。

同じレーザーを用いた装置でも、動的光散乱法（Dynamic Light Scattering=DLS）を用いた装置では、レーザー照射により粒子の拡散現象を捉え、拡散係数を求める。この拡散係数から、ストークス・アインシュタイン式によりストークス径が算出される¹⁾。

3. おわりに

前回と今回で、球に近似することで長さを測定しなくても粒子径を求める方法をいくつか紹介した。これらの方法により1つの非球形粒子を測定して得られる粒子径は、それぞれの方法が保証する球と等価な数値、現象が異なるので、方法ごとに異なる値となる。つまり、非球形粒子の大きさ

は求める方法によって値が異なる。このため、粒子径を測定する方法は、求めた粒子径をどのように使うかで決まる。すなわち、非球形粒子の粒子径は、その値の使い方を決めないと測定できない。一方で、測定方法により測定できる粒子径の範囲も異なる。よって、測りたい非球形粒子の使い方に合致した測定方法がない場合もある。球では理論上、どの方法で測っても同じ直径が求められるので、球に「近似できる」等方的な非球形粒子では、粒子径範囲が合致する方法で「代用」しても粒子径に近い値が得られるはずである。棒状のような非等方性が強い粒子では、前号のまとめと同様、求めた値が、近似が当てはまらない系、または、適用範囲を超えて求められたことを意識する、すなわち、その値から計算される結果には現実との誤差が大きいことを認識して使用することが重要である。

一方で、数値を現象の定量的な解析など絶対値が重要となる用途ではなく、単純な大小比較にだけ用いる場合には、いずれの方法でも大きい粒子は大きな直径となるので、どの方法を用いても結果に差はない。よって、例えば、粒子径測定を品質管理として用いる場合には、粒子径範囲が合致し、かつ、測定者による値の違い、すなわち、測定スキルによる測定結果の違いがなく、同じサンプルを測定した際の繰り返し精度の高い装置が望ましい。これもまた、数値の使用用途に合致する測定方法・装置の選定指標の一つである。

引用文献

- 1) 粉体工学会編：“粉体工学ハンドブック”、朝倉書店、p.p. 6-24 (2014)
- 2) 松山達、山本英夫：“レーザー回折法における粒子形状の問題—粒子形状をめぐる若干の考察とケーススタディー”、粉体工学会誌、41、275-282 (2004)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 54

入門の予習編－7

Preparation for Lecture on Powder-7

粒子径分布の表わし方－1

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

ここまでは、「粉体入門」といいながら、1個の粒子に着目し、その大きさの話をしてきた。今回から粒子の集合体、すなわち粉体の話となる。

粉体には、特別な工夫や操作をして大きさを揃えなければ、一般にいろいろな大きさの粒子が含まれる、すなわち粉体は粒子径に分布を持つ。この粒子径分布の表し方について、以下で考えてみる。

2. 粒子径分布の表わし方－1

最近はいろいろな粒子径分布の測定装置が市販されているが、操作と結果がわかりやすい、ふるいを使った粒子径分布の測定を例として考える。

ふるいで粒子径分布を測定する際には、いろいろな目開きを持つふるいを重ねて設置する。ここでは、重ねたふるいを上から1段目、2段目…と段で呼ぶことにする。ふるいの最下段には、最も小さい目開きのふるいを通り抜けた粉体を捕集するために、受け皿を設置する。最上部の1段目に測定対象となる粉体を供給し、タッピングや電磁振動などによりふるいに運動を与え、しばらくすると、粉体は各段（＝各ふるい）の上に分かれる。分かれた粉体の質量を測定すると、例えば、表-2(a)のような測定結果（＝列「質量」の数値）が得られる。この測定結果を解析すると、粒子径分布が得られる。

粒子径分布の表し方でよく目にするのが、ヒストグラムである。表-2(a)の測定結果からヒストグラムを作成するためには、各段に分かれた粉体の質量割合を求めれば良い。質量割合は、まず、全ての段のふるいの粉体質量の総和（＝供給した測定対象粉体の質量）を求め（表-2(a)中では200.0g）、求めた総量で各段の粉体量を割ること

で求められる。表-2(a)ではパーセント（％）で表示しているが、割ったままの割合で示しても良い。得られた質量割合を縦軸にして図示すると、図-8(a)に示すヒストグラムが得られる。

ここで、ヒストグラムと一般的な棒グラフとは異なることに注意した方が良い。棒グラフは縦軸

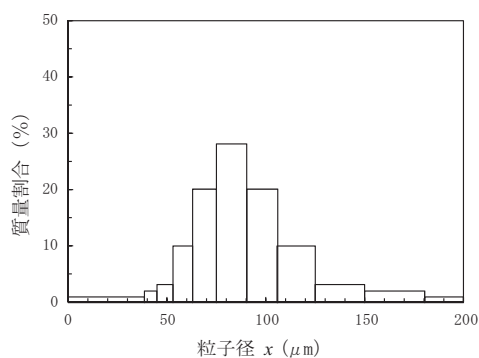
表-2 同一の粉体を組合せの異なるふるいで分布を測定した例

(a) 10段のふるいの場合

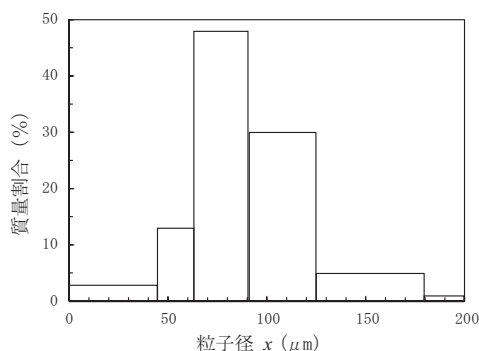
段数	ふるい目開き (μm)	粒子径 x (μm) の範囲	粉体質量 (g)	質量割合 (%)
1	180	$180 \leq x$	2.0	1.0
2	150	$150 \leq x < 180$	4.0	2.0
3	125	$125 \leq x < 150$	6.0	3.0
4	106	$106 \leq x < 125$	20.0	10.0
5	90	$90 \leq x < 106$	40.0	20.0
6	75	$75 \leq x < 90$	56.0	28.0
7	63	$63 \leq x < 75$	40.0	20.0
8	53	$53 \leq x < 63$	20.0	10.0
9	45	$45 \leq x < 53$	6.0	3.0
10	38	$38 \leq x < 45$	4.0	2.0
受け皿		$x < 38$	2.0	1.0
合計質量			200.0	

(b) 5段のふるいの場合

段数	ふるい目開き (μm)	粒子径 x (μm) の範囲	粉体質量 (g)	質量割合 (%)
①	180	$180 \leq x$	2.0	1.0
②	125	$125 \leq x < 180$	10.0	5.0
③	90	$90 \leq x < 125$	60.0	30.0
④	63	$63 \leq x < 90$	96.0	48.0
⑤	45	$45 \leq x < 63$	26.0	13.0
受け皿		$x < 45$	6.0	3.0
合計質量			200.0	



(a) 10段のふるいの場合



(b) 5段のふるいの場合

図-8 表-2のデータから描いたヒストグラム

の数値を棒の長さに置き換えて図示するグラフ形式で、横軸は、例えば、ある県の市町村ごとの人口を表す場合などで各市町村といった不連続なものでも良い。しかし、ヒストグラムは「ある区間内に存在する量」を縦軸の棒の長さに置き換えているので、横軸は連続した値でないといけない。また、縦軸の長さが「ある区間内」の量であるので、棒の幅はその「区間」を表す。

さて、ここでヒストグラムの特徴というか、問題というかをわかりやすくするために、表-2(a)の分布を持つ粉体を、別のふるいの組合せで測定した場合を考える。表-2(a)の偶数段目のふるいを使用せず、5つのふるいを使用したとする(表-2(b))。表-2(b)のふるいの段数は、表-2(a)のふるいと区別するため、丸をつけた数字①②…であらわすことにする。

表-2(b)のふるいの組合せで測定した結果からヒストグラムを描くと図-8(b)となる。図-8(a)と比較すると、同じ粉体を測定したにもかかわらず、縦軸の数値が大きくなっていることに気が付いていただきたい。表-2(a)の測定では、1段目を通り抜けた粉体のうち4gが2段目に、6gが3段目に捕集されているが、(b)の測定では2段目に相当するふるいを使用していないので、(a)の2段目と3段目の粉体が②段目に捕集される。この

ため、ヒストグラムでは、(b)の右から2本目の棒の高さが(a)の右から2本目の棒と3本目の棒の高さを合わせた高さとなる。ヒストグラムの縦軸である割合は、ある区間内の粒子量を表すので当たり前であるが、区間の大きさに依存する。

別の言い方をすると、ヒストグラムでは同一のサンプルで同一の測定方法であっても、測定者の区間の設定により分布の形状が異なることになる。この特徴は、種々のサンプルを比較する上でも問題となる。すなわち、得られた分布の形状の違いが、サンプルの違いによるものなのか、区間の設定による違いなのかがわからないことになる。そこで、区間の設定に依らない粒子径分布の表し方が必要となる。その表し方については次号で述べることにする。

3. おわりに

今回は、粒子径分布の表し方の1回目として、ふるいわけでの粒子径分布測定を例にして、ヒストグラムの説明をした。繰り返しになるが、ヒストグラムは棒の幅が表す粒子径区間での割合を棒の長さで表したグラフである。

縦軸が粒子の割合を表すグラフで、図-9のようにデータを○などのプロット点で表した図を時折見かける。縦軸が割合であれば、それを求めた区間が存在するはずなのだが、プロット点ではその区間はわからない。当然、このような図示は避けるべきである。

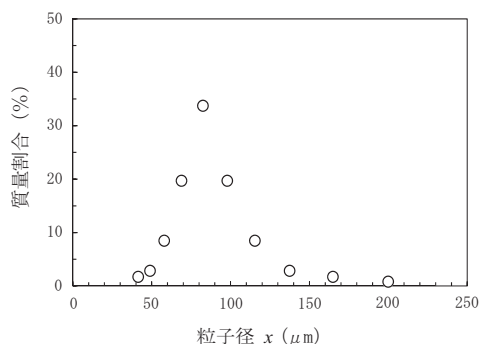


図-9 割合をプロット点で表した例

※ある区間での割合を表す図としては用いるべきでない図



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 55

入門の予習編-8

Preparation for Lecture on Powder-8

粒子径分布の表わし方-2

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回よりやっと粉体の話となった。今回も、粉体、すなわち、いろいろな大きさの粒子の集合体の粒子径分布についての話である。

前は、ある区間での割合を縦軸にとって粒子の分布を表すヒストグラムについて説明し、この図示法が区間の設定により形状が異なることを問題点として指摘した。そこで今回は、区間の設定に依存しない分布の表し方の話である。

なお、以下で「より小さい」という表現を用いている。日本語で「○○より小さい (大きい)」と書くと○○は含まれない。一方、「○○以下 (以上)」とすると、○○も含まれる。いろいろな大きさを持つ粒子群について、含まれない粒子径をなくすためには、範囲は「下限以上、上限より小さい」または「下限より大きく、上限以下」のどちらかとなる。どちらになるかは、粒子径分布の測定法に依存すると考えられるが、ここでは「下限以上、上限より小さい」とした。

2. 粒子径分布の表わし方-2

まずは前号の表-2を参照していただきたい。この表は同一の粉体を組合せの異なるふるいを使用してふるい分けした結果の例である。この結果の中で、例えば、(a) の2段目に着目する。この2段目には4g の粉体が捕集されていることが示されている。また、2段目と、その上の1段目の目開きから、この4g の粉体は150 μ m から180 μ m までの大きさの範囲にあることがわかる。一方で、この4g の粉体が150 μ m に近いものが多いのか、180 μ m に近いものが多いのかはわからない。すなわち、範囲の中にあることはわかるが、その範囲内のどこにあるのかはわからない。範囲の中にある

ことがわかっているので、この4g の粉体は150 μ m 以上であることは確かであり、また、180 μ m より小さいことも確かである。

ここで、2段目以外のふるいにも注目すると、2段目の4g だけでなく、1段目に捕集されている2g も150 μ m 以上の粉体であることは確かである。一方、3段目より下の段に捕集されている粉体 (合計すると194.0g) は150 μ m よりも小さい粉体であることも確かである。150 μ m 以上の大きな粉体の質量 (=6.0g) を全体の質量との割合で表すと3%であり、150 μ m よりも小さい粉体の質量の割合は97%である。この全体に対する割合は、ふるい分けした結果から確かな値として求めることができる。そこで、この注目したふるいの目開き以上の大きな粉体の質量割合を「オーバーサイズ」、目開きより小さな粉体の質量割合を「アンダーサイズ」と呼ぶ。当然ながら、注目したふるいの目開きにおいて、オーバーサイズとアンダーサイズを足すと、粉体全体、すなわち、100%となる。

2段目のふるいだけでなく、他のふるいについても同様に、オーバーサイズとアンダーサイズを求めると表-3となる。表-3の各ふるいの目開きは、それぞれの積算の質量割合となる粒子径に対応する。そこで、この粒子径 (=ふるいの目開き) に対して積算した質量割合をプロットした結果が図-10である。ここで、各プロット点の間にはデータがないので内挿する、すなわち、もっとも確からしい曲線でプロット点をつなぐ。このようにして求めた分布が、ふるい上積算分布 (○)、および、ふるい下積算分布 (●) である。

以上は、表-2の (a) の結果についてである。同様の計算を (b) の結果についても行い、図-10に、ふるい上積算分布を▲で、ふるい下積算分布を△で示した。(b) の結果のプロット点は、対

表-3 表-2(a)の結果からの積算割合の算出

段数	ふるい目開き (μm)	粒子径 x (μm) の範囲	粉体 質量 (g)	質量 割合 (%)	ふるい目開き 以上の粒子量 (g)	ふるい目開き 以上の粒子割合 (%)	ふるい目開き 以下の粒子量 (g)	ふるい目開き 以下の粒子割合 (%)
1	180	$180 \leq x$	2.0	1.00	2.0	1.00	198.0	99.00
2	150	$150 \leq x < 180$	4.0	2.00	6.0	3.00	194.0	97.00
3	125	$125 \leq x < 150$	6.0	3.00	12.0	6.00	188.0	94.00
4	106	$106 \leq x < 125$	20.0	10.00	32.0	16.00	168.0	84.00
5	90	$90 \leq x < 106$	40.0	20.00	72.0	36.00	128.0	64.00
6	75	$75 \leq x < 90$	56.0	28.00	128.0	64.00	72.0	36.00
7	63	$63 \leq x < 75$	40.0	20.00	168.0	84.00	32.0	16.00
8	53	$53 \leq x < 63$	20.0	10.00	188.0	94.00	12.0	6.00
9	45	$45 \leq x < 53$	6.0	3.00	194.0	97.00	6.0	3.00
10	38	$38 \leq x < 45$	4.0	2.00	198.0	99.00	2.0	1.00
受け皿		$x < 38$	2.0	1.00	—	—	—	—
合計質量			200					

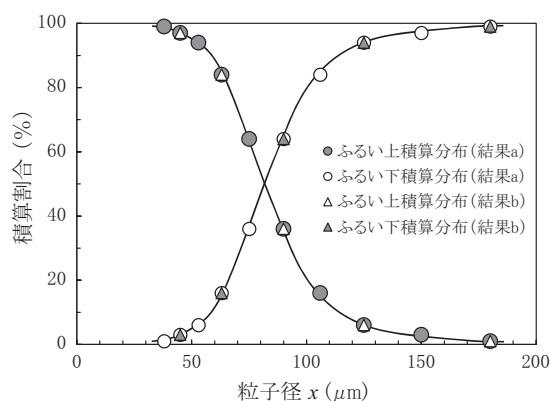


図-10 ふるい上、および、ふるい下積算分布

応するふるい目開きの (a) の結果のプロットと重なる。図だけでなく、ふるい上、ふるい下、それぞれの積算質量割合の求め方からもわかるが、ふるい上、および、ふるい下積算分布は、測定時の区間の設定に依存しない。

プロット点が重なるので同じ分布を表すが、前述のように、分布曲線はこれらプロット点を内挿して求めるので、当然のことながら、細かい測定区間で得られたプロット（今回の例では (a) の結果）の方が誤差の少ない分布を与える。

なお、ここで例を示したように、ふるいで1段目に粒子が分離されると、最大粒子径は特定できないので、100%にプロット点を置くことはできない。また、受け皿に粒子が残ると、最小粒子径が特定できないので、0%にプロット点は置けない。

3. おわりに

ある区間での割合を縦軸にとって粒子の分布を表すヒストグラムでは、区間の設定により得られる分布の形状が異なる。そのため、測定結果の中で「確かなこと」から求められる分布として、積算分布を説明した。得られた分布の形状は、ヒストグラムと随分と異なる。ヒストグラムでは、多くの粉体質量を含む測定区間の棒が長く、どの粒子径に多くの割合があるのかがわかりやすい。一方、積算分布の場合には、測定区間での割合が大きいと、ふるい下積算分布ではその区間でのプロットの増加幅が、ふるい上では減少幅が大きくなる。すなわち、曲線の変化（＝傾きの絶対値）の大きい粒子径で、粒子量が多いことになる。

積算分布は、離散的に求められた測定結果から、図-10に示したように「線」で表せる、すなわち、連続的な分布を得る最も確からしい方法であるが、その分布から粒子径ごとの粒子量の大小を読み取るにはコツが要る。次回は、この積算分布から、ヒストグラムのように粒子径ごとの粒子量の多少がわかりやすい分布である、頻度分布を求める方法について説明する。



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 56

入門の予習編－9

Preparation for Lecture on Powder-9

粒子径分布の表わし方－3

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

今回は積算分布を基にして、頻度分布を求める方法について説明する。なお、積算分布にはふるい上とふるい下があることを前回説明したが、積算分布はふるい下で表示することが標準となっているので、以降はふるい下積算分布のみを扱う。

2. 粒子径分布の表わし方－3

前回の「おわりに」に記したが、ある測定区間に含まれる粒子の割合が大きいと、ふるい下積算分布ではその区間前後でのプロットの増加幅が大きくなる。すなわち、曲線の変化（＝傾きの絶対値）の大きい粒子径で、粒子量が多いことになる。そのため、積算分布の傾きを粒子径ごとに求めれば、ヒストグラムと同じように、粒子量が多い粒子径で大きな縦軸の値を持つ分布が得られる。これが、頻度分布 $q_r(x)$ である。数式で表すと、積算分布 $Q_r(x)$ の傾き、すなわち、微分値が頻度 $q_r(x)$ であるので、

$$q_r(x) = \frac{dQ_r(x)}{dx} \quad (2)$$

となる。数式では簡単であるが、この $q_r(x)$ を定義に忠実に求めるためには、例えば、粒子径 x_1 での積算分布曲線の接線（＝図-11 中の実線）の傾きを実測する（＝図微分する）、あるいは、数値計算で測定データ間の補間計算から微分値を求める、積算分布を関数で近似し、近似した関数を微分して求めるなどをする必要があり、手間がかかる。このため、表-2 に示したように粒子径区間ごとの粒子割合が求まっている場合、その粒子径区間内の頻度の平均値を求める。すなわち、図-11 に示したように、積算分布のプロット点間

を直線（図中の破線）で結び、その傾きを粒子径区間（＝プロット点間）の平均頻度とすることが多い。実際の計算では、表-4 に表-2 の（a）結果での計算例を示したように、ある区間での質量割合を、その区間での区間幅で割ることで平均頻度が計算できる。この区間平均頻度は図-11 からわかるように、本来は曲線である積算分布を、ある区間で「直線近似」したものである。「近似」であるので、近似に伴う誤差を含む。曲線の傾き（＝接線）を、曲線上の2点間を結ぶ直線で近似しているため、この近似に伴う誤差は区間幅が大きい方が大きくなる。図-11 上では、（a）の結果と（b）の結果での近似直線（＝2本の破線）の違いが、この誤差になる。

さて、表-3 の計算により、粒子径区間ごとの平均頻度が求められたので、これを粒子径に対してプロットすると、頻度の分布を描くことができる。ここで、この各粒子径区間での平均頻度を、どのような粒子径に対してプロットするかが問題である。平均頻度は粒子径区間内での平均であるので、粒子径区間の両端の粒子径にプロットするのはおかしく、粒子径区間の真ん中をその区間を代表する区間代表径としてプロットとすることが妥当である。ここでは、積算分布の横軸を普通の

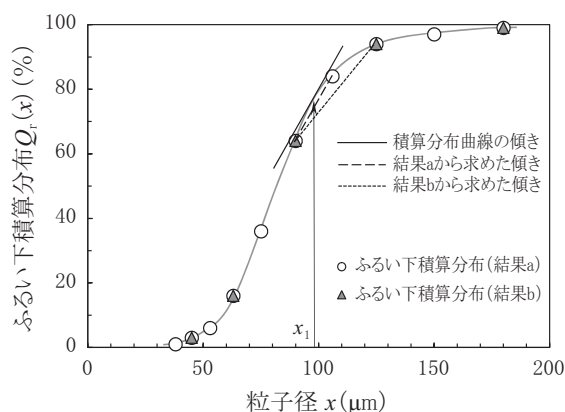


図-11 近似的な頻度分布の求め方

表-4 表-2(a)の結果からの頻度分布の算出

段数	ふるい目開き (μm)	粒子径 x (μm) の範囲	粉体 質量 (g)	質量 割合 (%)	区間代表径 (μm)	区間幅 (μm)	区間での 平均頻度 (μm^{-1})
1	180	$180 \leq x$	2.0	1.00		—	
2	150	$150 \leq x < 180$	4.0	2.00	165.0	30.00	0.0007
3	125	$125 \leq x < 150$	6.0	3.00	137.5	25.00	0.0012
4	106	$106 \leq x < 125$	20.0	10.00	115.5	19.00	0.0053
5	90	$90 \leq x < 106$	40.0	20.00	98.0	16.00	0.0125
6	75	$75 \leq x < 90$	56.0	28.00	82.5	15.00	0.0187
7	63	$63 \leq x < 75$	40.0	20.00	69.0	12.00	0.0167
8	53	$53 \leq x < 63$	20.0	10.00	58.0	10.00	0.0100
9	45	$45 \leq x < 53$	6.0	3.00	49.0	8.00	0.0038
10	38	$38 \leq x < 45$	4.0	2.00	41.5	7.00	0.0029
受け皿		$x < 38$	2.0	1.00		—	
合計質量			200				

数値軸としているので、ある段 (i 段、ふるい目開き x_i) の区間代表径を、その段のひとつ上の段 ($i-1$ 段、ふるい目開き x_{i-1}) との算術平均 ($= (x_i + x_{i-1})/2$) を区間代表径とした。

あたりまえであるが、区間代表径はふるいの目開きの大きさの間の値となる。このことは、「粒子割合の測定区間内を直線近似して求めた平均頻度をプロットする点は、積算分布でのプロット点の粒子径とは異なる」ことを意味する。

図-12 に、表-2 に示した結果 (a) と (b) から前述の平均頻度を算出する方法で求めた頻度分布を示す。図-8 に示したヒストグラムのように、粒子の割合が高い粒子径で縦軸の値が大きくなる、割合の分布がわかりやすい表示となっている。図中の曲線は結果 (a) のプロット (○) を結んだ曲線であるが、結果 (b) のプロット (▲) は若干この曲線からずれている。そのずれは、頻度の

高いプロットで大きい。これは、前述の近似誤差が測定区間幅に依存するためであると考えられる。

3. おわりに

ここでは、図-10 に示した積算分布を基に頻度分布の求め方を説明した。図-10 では、横軸を普通の数値軸とした。工業的に扱われる粉体には、 $1\mu\text{m}$ 以下の粒子から $10\mu\text{m}$ 以上のものまで 2~3 桁にわたる広い粒子径分布を持つものもあり、このため粒子径分布の横軸は粒子径の対数で示される場合が多い。積算分布の横軸を対数で表示した場合、合わせて表示する頻度分布では、表-4 の区間幅を粒子径の対数の差である対数区間幅として平均頻度を求め、区間代表径を対数の平均である幾何平均径で表した方が、積算分布の曲線変化と頻度の大小が対応する。このため、学術論文などでは、縦軸を $dQ_r(x)/d\ln x$ や $dQ_r(x)/d\log x$ で表示した分布が示されていることがある。

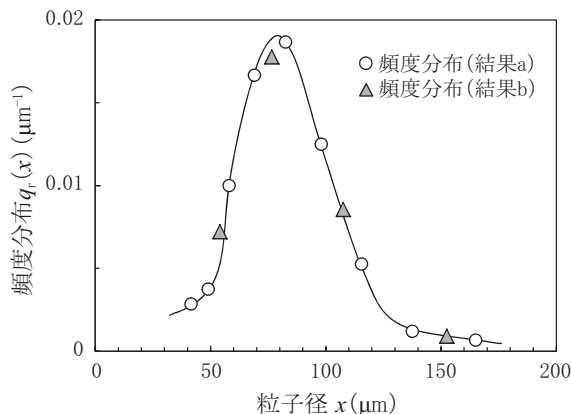


図-12 近似的な頻度分布



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 57

入門の予習編－10

Preparation for Lecture on Powder-10

粒子径分布の表わし方－4

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回、頻度分布の求め方として、特に、粒子径区間ごとの粒子割合が求まっている場合に「近似的に」頻度を求める方法を説明した。今回は、この頻度分布だけでなく、積算分布も含めて、粒子径分布に関して注意すべき点を述べたいと思う。

2. 粒子径分布の表わし方－4

まず、前回説明した頻度分布についての注意点である。頻度分布の図-12 と、同じ測定結果を異なる表示法で示した図-8(a) とを比較していただきたい。分布の値がプロット点で示されているか、棒で示されているか以外に、2点大きな違いがある。

ひとつは表示されている数値の数で、図-8(a) では11本の棒で結果が示されているのに対し、図-12でのプロット点は9点である。これは、表-4 の平均頻度の求め方からもわかるが、ふるいでの測定の場合、1段目に捕集された粉体の最大径（＝上限値）および受け皿に捕集された粉体の最小値（＝下限値）が不明であるので粒子径の区間幅が求まらない、すなわち、図-8(a) で最も粒子径の大きい区間と最も粒子径の小さい区間で頻度が求められないためであり、積算分布で100%および0%の点がプロットできないことと同じである。

もうひとつは縦軸の単位である。図-8(a) は割合を示しているのだから「%」（一般には、無次元「－」）であるのに対し、図-12は式(2) で定義される頻度であるので、「 μm^{-1} 」（一般には、「 m^{-1} 」）である。ちなみに、前回の「3. おわりに」に記したように、区間幅を粒子径の対数の差である対数区間幅として平均頻度を求めた場合には、縦軸の単位は無次元となる。

また、図-12と似ているが、「間違った表示の例」として示した図-9は、「区間の割合を示しているにも関わらず、その区間がわからない図示法になっている」ことが間違いで、このため縦軸の値が割合を表す「%」となっている。先にも書いたが、このように区間割合を表すグラフでありながら、その区間がわからない、間違った図は意外

とあちこちでみられる。プロット点が頻度分布のような形（＝割合の大きな粒子径で値が大きくなるグラフ）でありながら、縦軸が「%」や無次元「－」となったグラフは間違っている可能性が高い。

さて、本講座第7回目より粒子径分布の表し方として、ふるいでの測定結果を例にとり説明してきた。この例では質量を測定していたので、分布の縦軸となる積算の割合や、頻度の基となる粒子径区間での粒子割合は全て「質量」を基準としていた。他の方法で粒子径分布を測定した場合には、求められる粒子の割合は質量以外の場合もある。例えば、顕微鏡写真を基に画像解析で粒子径分布を測定すると、得られる粒子の割合は個数の割合となる。これら粒子割合は、粒子が球形で近似できる場合、個数割合と質量割合は表-1 に示した球の公式を使って換算することができる。

ここで、ある粒径区間 i （区間代表径 x_i ）での粒子個数を n_i 、それら n_i 個の粒子の全質量を m_i とすると、区間内の個数と質量は表-1 の式(4) を用いると次式となる。

$$m_i = n_i \frac{\pi}{6} x_i^3 \rho_p \quad (3)$$

この式から、粒子の密度 ρ_p が粒子径によらず一定すると、個数の割合 $\Delta Q_0(x_i)$ は次式となる。

$$\Delta Q_0(x_i) = \frac{n_i}{\Sigma n_i} = \frac{\frac{6}{\pi \rho_p} \frac{m_i}{x_i^3}}{\Sigma \frac{6}{\pi \rho_p} \frac{m_i}{x_i^3}} = \frac{\frac{m_i}{x_i^3}}{\Sigma \frac{m_i}{x_i^3}} \quad (4)$$

式中の Σn_i は全粒子個数を表す。式(4) からわかるように、粒子の密度 ρ_p が粒子径によらず一定だと、密度がわからなくても質量割合と個数割合とを変換することができる。

例えば、質量割合を求めた表-2(a) の結果を、式(3) を用いて個数割合に換算する場合を考える。表-2(a) の結果では最大径と最小径が得られていないので、1段目のふるいに捕集された粒子量と受け皿に捕集された粒子量を換算することができない。そこでここでは、積算分布（図-10）に示

表-5 表-2(a)の結果からの個数基準積算分布の算出

段数	ふるい目開き (μm)	粒子径 x (μm) の範囲	粉体 質量 (g)	質量 割合 (%)	区間代表径 (μm)	m_i/x_i^3 ($\text{g}/\mu\text{m}^3$)	ふるい目開き 以下の粒子量 ($\text{g}/\mu\text{m}^3$)	個数基準 積算分布 $Q_0(x)$ (%)
1	180	$180 \leq x$	2.0	1.00	(185.0)*	$3.16\text{E}-07$	$5.41\text{E}-04$	99.94
2	150	$150 \leq x < 180$	4.0	2.00	165.0	$8.90\text{E}-07$	$5.40\text{E}-04$	99.78
3	125	$125 \leq x < 150$	6.0	3.00	137.5	$2.31\text{E}-06$	$5.37\text{E}-04$	99.35
4	106	$106 \leq x < 125$	20.0	10.00	115.5	$1.30\text{E}-05$	$5.24\text{E}-04$	96.95
5	90	$90 \leq x < 106$	40.0	20.00	98.0	$4.25\text{E}-05$	$4.82\text{E}-04$	89.09
6	75	$75 \leq x < 90$	56.0	28.00	82.5	$9.97\text{E}-05$	$3.82\text{E}-04$	70.65
7	63	$63 \leq x < 75$	40.0	20.00	69.0	$1.22\text{E}-04$	$2.60\text{E}-04$	48.14
8	53	$53 \leq x < 63$	20.0	10.00	58.0	$1.03\text{E}-04$	$1.58\text{E}-04$	29.19
9	45	$45 \leq x < 53$	6.0	3.00	49.0	$5.10\text{E}-05$	$1.07\text{E}-04$	19.76
10	38	$38 \leq x < 45$	4.0	2.00	41.5	$5.60\text{E}-05$	$5.09\text{E}-05$	9.41
受け皿			$x < 38$	2.0	1.00	(34.0)*	5.09E-05	—
			合計質量	200	合計	5.41E-04		

*ここでは最大径、最小径を推定して求めた

した分布曲線から最大値を190 μm 、最小径を30 μm と推定し、それらの値を用いて、1段目のふるいに捕集された粒子量と受け皿に捕集された粒子量を換算する。実際に計算をした結果が表-5であり、この計算結果を積算分布で示した図が図-13である。質量割合から求めた積算分布（＝質量基準積算分布 $Q_3(x)$ ）よりも、個数割合から求めた積算分布（＝個数基準積算分布 $Q_0(x)$ ）の方が小さい粒子の割合が増え、曲線は図中左側に移動する。これは、例えば、1 μm の粒子と10 μm の粒子が同じ質量あったとすると、粒子が小さい（＝小分けされている）1 μm の粒子の方が個数は多くなるので当然ではある。同様に、公式を用いれば面積割合にすることもでき、面積基準積算分布はこれらの分布の間にくる。

このことは、粒子径の分布は、縦軸となる粒子割合を、個数や質量など何の割合とするかで分布の形が変わることを意味する。一般に、粒子径分布測定装置から出力される分布は質量基準、すなわち、質量割合の分布である。最近の多くの測定

装置では、測定結果を処理するソフトウェアで設定すると、個数基準などに変換することが可能である。つまり、測定者が選択をすることができる。この場合にはこれを基準としなければならない、という決まりはないが、例えば、化学反応、結晶析出で粒子を生成する場合、化学反応はモル数、つまり、原子・分子の数で考えているので、個数基準（＝個数割合）で表した方が良いように思う。一方、重力、慣性力、遠心力による粒子の運動を考える際には、これらの力は粒子質量に依存するので、質量基準（＝質量割合）で考えた方が妥当であると思われる。

3. おわりに

今回は粒子径分布に関して筆者が考える注意点を記した。前半部は分布の表示法に関する注意事項であるが、後半部は粒子径分布の使い方に関する注意である。ここでは分布という図形に関しての話であるので、後半の注意として記した、質量基準にするか個数基準にするかは何が重要かはわかりにくいですが、例えば、粒子径に分布を持つ粉体を“代表する”粒子径を決める場合には質量か個数かは大きな問題となる。次回はこの粒子径に分布を持つ粉体を“代表する”ことについて説明したい。

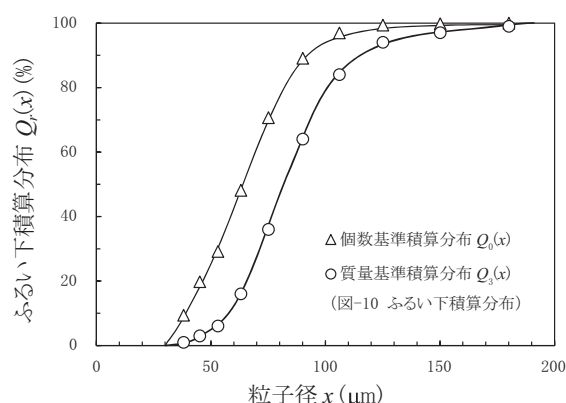


図-13 質量基準積算分布と個数基準積算分布の比較



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 58

入門の予習編－11

Preparation for Lecture on Powder-11

粉体の大きさの比較－1

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回までの4回に渡り、多数の粒子の径を測定した結果から、粒子径分布を表す方法について述べてきた。ここで説明してきた処理により、測定結果（＝数値の羅列）から粒子径分布という図が出来上がる。今回は、得られた分布の比較の方法について述べてみる。

2. 粉体の大きさの比較について

図-14 に示すように、粉体 A と粉体 B について、それぞれ質量基準の粒子径分布が得られたとする。これら分布を比較し、どちらが小さいかをどのように表現すれば良いかを考えてみる。ざっくりと文章で表すと、ふるい下積算分布は粉体 B の方が左側、すなわち、粒子径の小さい側にあり、全体としては粉体 B の方が小さいようである。頻度分布を見ると、両粉体とも1つのピークを持つ曲線となっており、そのピークとなっている粒子径は粉体 B の方が小さい。このような文章で

の表現は「定性的」であり、曖昧であるので、「定量的」な比較のため、数値で表す。すなわち、粒子径分布という図（絵といった方がわかり易いか）から数値を求めてみる。図は紙面に書かれた2次元であるので、これを1つの数値で表す、ということは、図の特徴を表す数値で「代表する」ことになる。

分布の特徴を表す代表値の取り方にはいくつかあり、中位径もその1つである。中位径とは、図-14 (a) に矢印（↓）で示したように、積算割合が50%となる粒子径である。図-14 に示した例では、粉体 A では81 μm 、粉体 B では73 μm くらいとなり、粉体 B の方が8 μm ほど小さいと言える。また、頻度分布を基に、ピークとなる粒子径、すなわち、モード径（最頻値）を用いることもできる。モード径で比較すると、粉体 A では79 μm 、粉体 B では65 μm くらいになる（図中の破線矢印）。ちなみに、中位径は、頻度分布において左右（＝大きい側と小さい側）の積分値（＝分布の面積）が等しくなる粒子径に相当し、頻度分布が左右対称形状の場合には中位径とモード径は一致する。

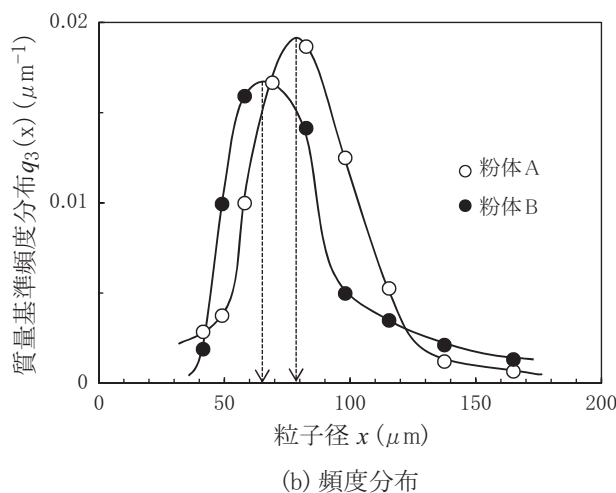
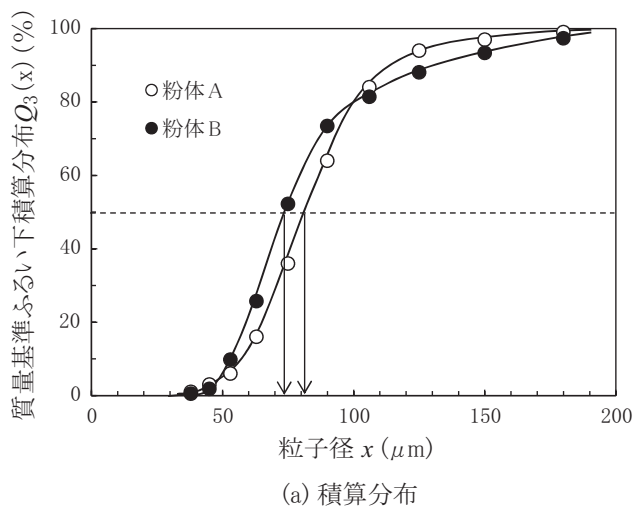


図-14 2つの粉体の粒子径分布の比較

分布の全体をざっくりと比較すると上述のような比較結果となるが、より詳細に分布の形状を見ていくと、粉体 A と粉体 B の違いは、どちらが小さいと言ええるほど単純ではないことがわかる。積算分布を見ると、積算割合80%程度以下の粒子径では粉体 B の分布が左側にあり、小さいと言えるが、80%程度以上では粉体 A が左側、すなわち小さい側にある。頻度分布で見ると、120 μ m 以上の粒子では粉体 B の方が頻度が高い。全体の傾向で言うと、粉体 B は小さい粒子径にピークを持つが、大きな粒子も粉体 A と比較して多く含まれているのに対し、粉体 A は50から130 μ m の範囲の粒子が多くなっている、すなわち、粉体 A の頻度分布は粉体 B よりも狭くなっている。このような詳細な比較を定量的に表すには、全体的に大きい、または、小さいという数値と、分布の広がりを表す数値の2つを用いる方が妥当であると考えられる。これは分布が図、すなわち2次元の図形であるので、当然と言えば当然である。分布の広がりを表す数値もいろいろと定義できるが、例えば、積算分布で75%および25%となる2つの粒子径の比などで表されることがある。

上述の中位径など粒子の平均的な大きさを代表する数値や、分布の広がりを表す数値は、2次元の図形から読み取る数値である。図形から直接読み取る方法以外に、粒子径分布を関数で近似し、関数のパラメータを用いて粒子の平均的な大きさと分布の広がりを数値で表すこともできる。例えば、粒子径分布のデータ点が対数正規分布関数¹⁾で近似できる場合、平均的な大きさは幾何平均径、分布の広がりには幾何標準偏差で定量的に表すことができる。そのほか、ローゼンラムラー分布など、粉体の粒子径分布をよく表すとされる分布関数が定義されている。その詳細については参考文献をご参照いただきたい。

関数近似をする場合も含め、ここまでの記述は粒子径の測定データから粒子径分布を求め、その分布の特徴を表す数値で粉体の大きさを比較する、という方法である。このほかに、粒子径の測定データから直接、その粉体を代表する数値を求めることも可能である。その数値が平均粒子径であり、例えば、個数平均径 D_1 は次式を用いて、 n 個の測定データから計算できる。

$$D_1 = \frac{\sum nx}{\sum n} \quad (\text{個数基準}) \quad (5)$$

個数平均径のような重みつき平均径には、粒径分布の個数基準、質量基準などと同様に、長さ平均径、面積平均径、体積平均径などがあり、それぞれに個数の測定を基にした求め方、質量の測定を基にした求め方がある。これらの定義式については成書²⁾を参照していただきたい。

3. おわりに

粒子径分布を測定する理由はいろいろあると思うが、最も多いのは、いくつかの種類の粉体の特徴を表す「値」として用いるためであると思われる。その粒子径分布は、前回までに記したように、「図形」である。図形、すなわち2次元の表現であるので、当然ながら、的確にその特徴を表すためには2つの数値が必要である。しかし、一般的には「平均径」「中位径」など1つの数値で粉体の特徴を表し、比較される場合が多いように思う。

平均径が1桁以上違う粉体を比較する場合には、頻度分布はほとんど重ならないと思われるので、1つの数値で表しても差し支えはない。また、分布の形状が相似、すなわち、分布の曲線を左右に移動させて重なるような分布であれば1つの数値で問題はない。しかし、だいたい同じくらいの粒子径範囲で、粒子径分布が異なる場合には、やはり形状、すなわち、大きさと広がり、の2つの数値で特徴を表現した方が、粉体の特徴を正確に表すことができると思われる。

参考文献

- 1) 粉体工学会編：“粉体工学ハンドブック”、朝倉書店、p.p. 3-6 (2014)
- 2) 三輪重雄著：“粉体工学通論”、日刊工業新聞社、p. 10 (1997)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

粉体技術者のための粉体入門講座 59

入門の予習編－12

Preparation for Lecture on Powder-12

粉体の大きさの比較－2

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回は、分布が図形である点に着目し、いくつかの「比較方法」という観点で、粉体の大きさの比較について述べた。今回は、粉体を扱う上で実際にありそうな粉体の大きさの比較の方法について述べてみる。また、入門予習編での粉体の大きさに関する一連の説明のおわりとして、粒子径分布測定に代表される、粉体、粒子の物性・特性について筆者が考える問題点を述べてみたい。

2. 粉体の大きさの比較について（補足）

前回の「3. おわりに」で、「最も多いのは、いくつかの種類の粉体の特徴を表す「値」として用いるためであると思われる。」と書いたが、これら異なる粉体でそれぞれの粉体の特徴を表すために粒子径分布を測定することを想定していた。このような場合のほかにも、例えば、粉砕操作後の状態、装置内の凝集状態や分散操作後の分散状態など、プロセス内での粒子の状態や粉体単位操作の結果、言い換えると、粉体挙動（の結果）を表す

ために粒子径分布を測定することがある。

例えば、粉砕操作の場合には、粉砕によりどのような粒子径分布になったのかが粒子径を測定する理由であり、粉砕結果の評価においては操作条件による分布の違いが重要となる。一方、プロセス内の粒子の凝集・分散状態を把握するための測定では、同様に操作条件による分布の違いが重要となる場合のほか、基準となる分布との違い、例えば、一次粒子径分布との違いが重要となる場合がある。いずれの場合も、「違い」が着目点となるので、初期状態や基準の分布（一次粒子径分布など）と測定したプロセス中や単位操作後の分布とが比較される。このような場合の比較でも、もちろん、前回に示したようにそれぞれの分布の代表値である中位径や平均径の変化として比較することができるが、そのほかに、操作による粒子径分布の変化を基準値からのズレとして表すことも可能である。

ここで、分散機の分散性能を評価することを目的として、分散機吐出後の粒子径分布と一次粒子径分布とを測定した場合を考える。分散性能が対象とする粉体に対して十分ではない場合、図-15

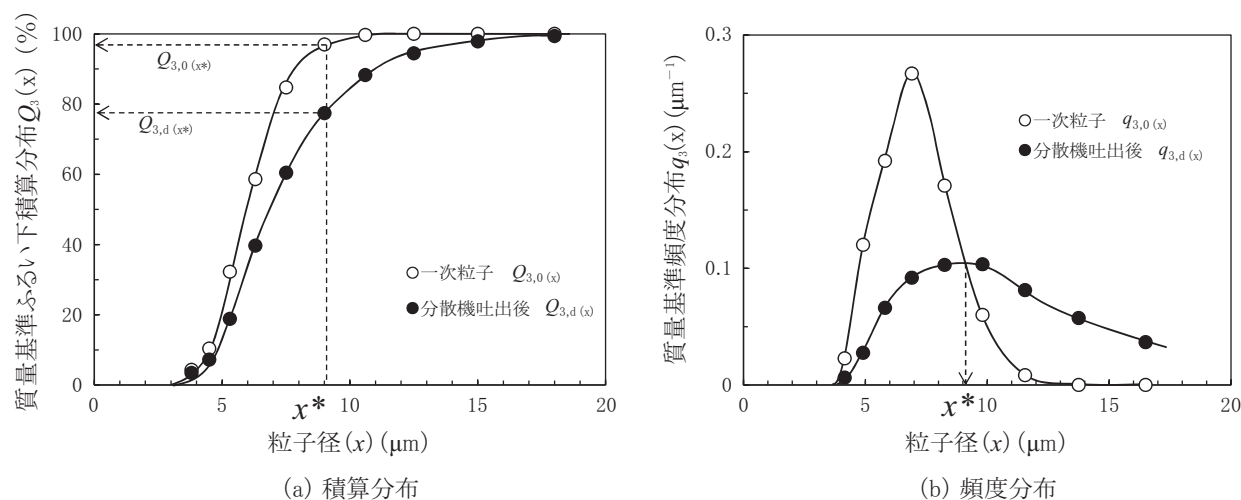


図-15 2つの分布（分散機吐出後と一次粒子）の比較例

に示したように、吐出後の積算分布は一次粒子径の分布よりも右側、すなわち、粒子径の大きい方にズレた分布となる。これを頻度分布でみるとピークが右にズレ、幅の広い分布となる。また、2つの分布の一部が重なっており、吐出された粒子の中には一次粒子にまで分散されている粒子も存在すると考えられる。当然ながら、重なっている部分の粒子の中で、特に粒子径の大きな粒子はそれよりも小さな粒子が凝集した凝集体である可能性もあるので「見かけ上」ではあるが、この重なる部分を分散している粒子とみなせば、分散している粒子割合を重なっている部分の面積として表すことができる。すなわち、2つの頻度分布の交点を x^* とすると、見かけ上分散している割合（ここでは分散度 β と称す）は次式で与えられる。

$$\beta = \int_0^{x^*} q_{3,d} dx + \int_{x^*}^{\infty} q_{3,0} dx \quad (6)$$

$$= 1 + Q_{3,d}(x^*) - Q_{3,0}(x^*)$$

実際に、このように定義をした分散度で分散状態を表すと、種々の試料粉体で行った分散実験結果から試験に使用した粉体種に依らない分散機の性能曲線を得ることができる^{1), 2)}。

3. まとめとして

例えば、粉体工学ハンドブックなど成書を見ると、粒子の特性、物性、粉体物性など、粒子やその集合体である粉体を特徴づける方法が多数記述されている。また、一昔前と比べると比較的手軽に物質の同定や、表面の観察など高度な分析が利用できるようになっている。一方で、「粉体は取り扱いが難しい」という話は相変わらずである。

取り扱いが難しい理由はいろいろとあると思うが、その1つは、「思ったように動かない（＝挙動しない）」、言い換えると、「予測した通り動かない」ためではないだろうか。予測した通りに動かないのは、もちろん粉の動きが複雑であることも理由であろうが、予測したことが間違っている、または、予測できていないからだと言えないだろうか。

例えば、これまで説明してきたように、粒子の大きさ一つとっても、予測したい事柄によって測

るべき粒子径があり、大きさに分布がある場合には取るべき粒子量割合がある。さらに、予測、すなわち、挙動推定の計算を行うのであれば、そこに用いるべき代表値がある。つまり、自分が対象とし、予測をしたい挙動の推定に適した粒子径の測定方法があり、測定結果（＝粒子径分布）の表示と粒子径に分布を持った粉体の特徴づけ方（＝代表値の取り方）がある。これらは、粉体の物性・特性を表わす際の粒子径分布測定に関しての話であるが、粉体挙動の代表値、すなわち、粉体操作の結果として粒子径分布が得られる場合もある。その時には、今回示したように、「見かけ上」でも良いので、粉体挙動を代表するような比較法を考える必要がある。

こう書くと、成書に記された知見の使い方が悪い、とだけ言っているようであるが、知見、すなわち、成書としてまとめられている内容が未だ完璧ではないと思っている。完璧ではない点の一つは、粉体ごとの違いを表すための粒子や粉体の物性・特性と、プロセス中の粉体挙動や粉体操作の結果と相關する粒子や粉体の物性・特性が区別されていないことである。区別できていないだけでなく、粉体挙動を推定できる粉体物性が特定できていない場合もある。

ということで、次回からは「（粉体操作中での）粉体挙動の予測のための粒子・粉体の基礎と、予測のための粒子・粉体特性」という観点で、粉体の基礎を考えてみることにする。

参考文献

- 1) 増田弘昭、後藤邦彰：「乾式分散機の性能評価」、粉体工学会誌、30、p.p. 703–708 (1993)
- 2) G. Calvert, M. Ghadiri, M. Dyson, P. Kippax and F. McNeil-Watson: “The flowability and aerodynamic dispersion of cohesive powders”, *Powder Technology*, 240, p.p. 88–94 (2013)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－1

粒子・粉体の特徴とその表し方－1

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. 入門の予習編を再開するにあたって

本講座は、(一社)日本粉体工業技術協会が開催している各種セミナーのうち、粉体を学術的に扱う「粉体工学」の基礎的な内容を講義する毎年6月から7月にかけて開催している「粉体入門セミナー」の受講の準備編という設定である。本誌2014年1～12月号に掲載された第1章では、粒子やその集合体を扱ううえで一番の基本となる粒子の大きさと、その表し方について紹介してきた。その中で「粒子が小さい」とはどういうことかを記述した。粒子が小さいことはその時の読者はわかっているのだが、筆者は、対象が小さくなるということは周りが相対的に大きくなる、ということを強調した。周りが相対的に大きくなる、というのは、我々人間から見ると小さくて無視できている事柄、現象が対象（＝粒子）に大きな影響を与える。この“視点を適切に設定”することが、粒子やその集合体である粉体を取り扱ううえで一番重要だと思っている。また、「粒子の大きさの表し方」（2014年7～10月号）や「粒子径分布の表し方」（2014年11～12月号）では、いずれも定義がいろいろあり、その定義によって同じ粒子、粉体を表しても異なる値となる。よって、“目的に応じて適切な表現を用いる”ことも重要となる。

第2章となる本稿では、2014年12月号の「入門予習編－12」で予告したように「(粉体操作機器中での)粉体挙動の予測のための粒子・粉体の基礎と、予測のための粒子・粉体特性」という観点で粉体の基礎を考えてみる。この粉体挙動の予測についても、前述の“視点を適切に設定”して“目的に応じて適切な表現を用いる”ことが重要であると考えている。そこで、粉体の挙動の捉え方や考え方と、予測のための適切な粒子・粉体特性を中心に記述したいと考えている。

全体として、この第2章では、

- 粒子・粉体の特徴とその表し方
- プロセス中での粒子・粉体の挙動の捉え方
- (粉体挙動を特徴づける) 付着性の考え方
- 粉体単位操作の考え方

といった事項について、記述する予定である。これらの事項のタイトルでは“表し方”や“捉え方”“考え方”といった漠然とした表現をしている。これは、前述のように本稿が「粉体入門セミナー」で勉強するための予習用という設定であり、そのため「粉体工学」の成書に書かれている内容や数式の説明はできる限り少なくし、その成書にある記述や式の意味、それら知識を使ううえでのコツなど、成書を読む時に理解する手助けになる「捉え方や考え方」を記述したい、という意図である。また、「付着性」以外は、あえて具体的な現象や操作を想定していない。これは、本稿が特定の事項の説明を目的としていないためとご理解いただきたい。もちろん、説明では、抽象的な表現だけでは意図が伝わらないと思われるので、「例示」として具体的な事柄について記述する。このような感じで書こうと思っているため、書き進めていかないと何を具体例とするか決められない、ということも具体的な現象や操作を項目として挙げられない理由ではある。

なお、特に断りがない場合には、空気中にある粒子の集合体、いわゆる乾燥粉体を想定していると思って読んでいただけると幸いである。

2. 「粉体」および「粉体工学」について

小さな固体、いわゆる粒子状物質の集合体は、一般には「粉（こな）」と呼ばれる。また、「粒（つぶ）」と呼ばれるものもある。第1章の冒頭にも書いたが、微小な固体（＝粒子）の1個の形が目視で判別できるものが「つぶ」で、判別できないものが「こな」と呼ばれているようである。例えば、

お米は「(米) 粒」であり、それを細かくすると「米粉」になる。工学分野では、両者を合わせて「粉粒体」と呼ぶ場合があり、そう題された成書がある。また、「粒」というと微小な固体1個を意味する場合があり、「粉」というとその粒の集合体のニュアンスもある。「粉体工学」には粒が入っていないので、日常的な言葉の定義からすると、目視で判別できないほど小さな粒子の集合体を主に対象とした学術分野、ということになる（あくまで、粉、粒の言葉のイメージからの定義であるが）。

ここでの「粉（こな）」という表現では、粒子は空気中にあることが前提になっているようである。しかし、粉が関係する食品や医薬品、化成品などの製造プロセスでは粒子が液体中に混入している場合もある。粉体工学では乾燥状態の粒子集合体だけでなく、湿潤状態や液中に混入した状態の粒子集合体も対象とする。空気や液など粒子の周りの物質（＝媒体）も考慮に入れ、その移動過程を取り扱う学術分野は、機械工学では「混相流」工学と呼ばれる。この混相流は、土木分野では「多相流」と呼ばれるようである。粒子群を混相（多相）の流れとして見る場合には、図書館や書店で機械工学分野、または、土木分野の棚に置かれている、これらが表題に入った成書を参考にすることができる。

混相流では、媒体を「連続相」、粒子状物質を「分散相」と呼ぶ（図-1(a)）。この「混相」という考え方を使うと、粒子状物質の集合体の一般的な呼称が整理できる（図-1(b)）。前述のように、一般に「粉体」というと「固相」が分散相となって気体中に存在している状態を指す。固体粒子が気体中に浮遊した状態になると「エアロゾル」と呼ばれる。連続相を液体にすると「スラリー」または「サスペンション」と呼ばれる。これら固体が分散相になった場合を粉体工学では“主に”対象とするが、気体が連続相で液体が分散相になった「液滴、ミスト」も「エアロゾル」と呼ばれ、粉体工学の一分野として扱われる場合がある。気体と液体の量が逆転し、気体が分散相で液体が連続相となったときが「気泡」である。また、液－液界面を形成する水と油のような系では、片方の液を粒子化することができ、「エマルション」と呼ばれる状態となる。このエマルションも粉体工学の研究報告では時折みられる。いずれも「粉体」と呼ぶと語弊があるが、粉体工学の基礎事項のひ

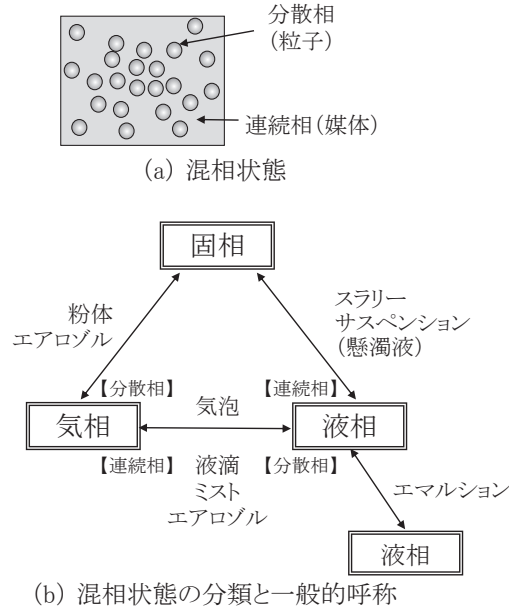


図-1 混相状態の分類と一般的呼称

とつである単一粒子の運動に関する知見は、抵抗係数など補正が必要な場合もあるが、基本的にはいずれの分散相にも適用できる。

このように粉体工学は多くの状態を対象とする。このため、学術的にどう扱うか、どう扱えば粉体に関する事項を理路整然とまとめることができるか、は難しい問題であると思われる。表-1は、粉体工学会、(一社)日本粉体工業技術協会の創始者である井伊谷鋼一先生が1964年の「化学工学」誌で提案している粉体工学の学術体系である。この体系は大学の学科構成や教育コースの科目構成も意識して提案されたものであるため、項目が「部門」「分科」とされているが、近年出版されている粉体工学に関する成書の多くも概ねこの構成

表-1 粉体工学の内容¹⁾

部 門	分 科	内 容
粉 体 工 学	粉体力学	運動、反発、摩擦、流動、圧力分布、成形など
	粉体物理	付着、充填、吸湿、光学、静電気、磁気など
	粉体化学	吸着、凝集、触媒、反応など
	粉体計測	特性（粒度、濃度など）、レベル、流量、混合度、サンプリングなど
	乾式分離	集じん(大気汚染)、分級など
	湿式分離	沈降、遠心分離、ろ過など
	粉体混合	乾式(一相)、湿式(二相)など
	粉体製造	粉碎、造粒、噴霧乾燥、粉末冶金など
	粉体輸送	流体利用、機械式など
	粉体制御	粉体プロセス制御（特に操作端の問題）および動特性
	その他	燃焼、乾燥、反応装置など

となっており、現在も一般的な粉体工学の体系と
考えてよいと思う。

この体系によると、粉体工学は、基礎としての
「粉体科学」と応用としての「粉体技術」から成
り、粉体科学は粒子や粒子群の物理と化学で構成
される。また、技術の基礎として「計測」も含ま
れている。「粉体技術」は、化学工学の「単位操
作」の考え方に従い、主として操作の目的別に分
類されている。化学工学の「単位操作」では、扱っ
ている物質に着目するのではなく、操作目的に着
目して、製造プロセス中の装置、機器、操作を分
類する。分類された各単位操作において、操作対
象物の違いは操作結果に影響を与える因子・要因
となる変数のひとつと考えられており、例えば、
液体を配管で輸送する操作では密度と粘度の違い
として表される。このため、普通は基礎的事項と
して粉体科学に入ると思われる「粒子・粉体の物
性・特性」のいくつかは、粉体技術（応用）のそ
れぞれの操作の記述において定義も含めて記述さ
れる場合がある。このように粒子や粉体の物性・
特性が、基礎としてまとめられていたり、操作因
子として記述されていたりすることが、粒子特性、
粉体特性として何を測れば良いのか、という問題
を難しくしているのではないかと筆者は考えてい

る。本稿では、そのあたりを少しでも整理できれ
ば、と考えている。

3. おわりに

今回は、久しぶりに再開した入門の予習編の1
回目であり、また、第1章となった前回の入門の
予習編が、「粉体入門講座」であるにもかかわらず、
「粒子」の話しかしていなかったもので、筆者
が考える粉体と粉体工学をあらためて紹介してみ
た。次回からは、粉体の特徴を表す数値の説明を
始めたいと思っている。

引用文献

- 1) 井伊谷鋼一：“化学工学から見た粉体工学”、化学
工学、28、p. 961-966 (1964)



ごとう くにあき

後藤 邦彰

岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1

TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085

E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

巻頭言

- ・熱・物質移動を伴う粉体単位操作
— 第53回夏期シンポジウム —
立元雄治（静岡大）

解説

- ・化学プロセス内移動現象の数値解析
岡野泰則（大阪大）他
- ・微粉炭噴流火炎に対する光学計測
林潤（京都大）他

論文

- ・ガラス繊維/フェウムドシリカ複合多
孔体の比熱容量測定
阿部陽香
（産業技術総合研究所）他

粉体工学会誌3号内容予告

第53回夏期シンポジウム特集

- ・親水性ナノ粒子断熱材の熱伝導率に及
ぼす水分の影響
大村高弘（和歌山高専）他
- ・水蒸気蓄積量で評価した粒子付着性と
流動化特性に関する研究
城野祐生（佐世保高専）他
- ・被覆粒子から固相合成したコアシェル
構造コバルトブルー顔料の色調に及ぼ
す被覆混合条件の影響
辰巳祐哉（岡山大）他

寄稿

- ・噴霧乾燥装置の技術変遷と課題
根本源太郎 他（大川原化工機）

シンポジウム報告記

- ・第53回夏期シンポジウム報告記
熱・物質移動を伴う粉体単位操作
— 基礎的研究と実操作・機器での課題 —
後藤邦彰（岡山大）

シンポジウム印象記

- ・第53回夏期シンポジウム印象記
連増文（大阪大）
山井三亀夫
（プロメテック・ソフトウェア）

第53回夏期シンポジウム発表講演一覧
（本号掲載以外）

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－1

粒子・粉体の特徴とその表し方－2

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回は「粉体」と「粉体工学」について紹介したが、今回より粒子・粉体の特徴とその表し方の具体的な話にはいる。まずは、粒子・粉体が生成するところからはじめてみる。

固体の粒子状物質ができる場合はいくつかある。ひとつは、花粉や種子など自然界で生成して、生成した段階で微小な粒子状物質になっている場合である。また、化成品製造工程などでは、化学反応により固体が生成した場合や物質の精製工程で溶解させた物質を固体として析出させる場合があり、これらの過程では原子・分子状態の物質が Build-up されて固体が生成する。原子や分子が集まって生成するため、大概、その固体は微小な粒子状である。先の花粉などの場合も Build-up による粒子生成の場合も、いずれも意図していないのに勝手に小さな固体となっている場合である。最近の粉体工学では反応で粒子が生成する過程に着目し、粒子サイズや形状など一次粒子の特徴の制御や機能付与をすることが増えており、反応により Build-up で生成した粒子を取り扱う機会はますます増えると思われる。一方、勝手に小さくなっていない固体に対して、小さく粉砕する、いわゆる Break-down で粒子を生成する場合も多い。発行年の古い粉体工学の成書では、反応や晶析での粒子の生成よりも粉砕操作に関する記述が多く、前回の表-1.1 の「粉体製造」でも「内容」の最初に挙げられている。この粉砕操作では、大きいものをわざわざ小さくするので、小さくする理由があるはずである。もちろん、小さくした方が便利とか、小さくしなければできないことがあるなど利点があることが理由であると考えられるが、ここではその理由から小さくなったことの指標、すなわち、粉体の特徴の表し方を考えてみる。

2. 粉体にする理由から考えられる特徴の指標－比表面積

大きな固体を小さなサイズに砕いていく操作が粉砕である。粉砕を、細かくなっていく固体に着目して模式的に書くと図-2.1 のように描ける。描かれているように、大きなものを小さくすると、大きい時には固体の内部にあった固体の構成物（＝原子や分子）が小さな固体の「表面」になる。このことから、粉体は新しい表面を作る操作ともいえる。新しい表面を作ると、元の粒子よりも表面が増えることが期待でき、粒子の周囲にある媒体との接触面が増える。媒体との接触面が増えると、例えば、粒子を媒体に溶かす場合、早く溶けることが期待できし、粒子が触媒の場合、反応を促進することが期待できる。

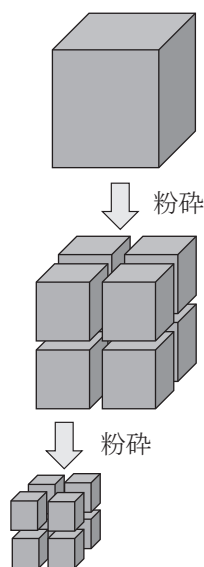


図-2.1 粉砕過程の模式図

表面が新たに作るのであるから、当然、表面積は増えると期待できる。しかし、粉体を構成する1個の粒子のみに着目すると、大きさが小さいと表面積は小さくなる。これは、立方体の例で考えるとわかりやすい。立方体は6つの表面を持つので、

全表面積は1つの面の6倍である。サイズが小さくなると、1つの面の大きさは小さくなり、全表面積も小さくなる。1個の粒子の面積はサイズを小さくすると減少するが、粒子の集合体（＝粉体）での総面積を考えると大小関係が変わってくる。集合体の持つ総面積で考える場合、量の多い集合体と少ない集合体を比べると、その量が総面積に影響するので、集合体の構成要素である粒子の特徴は現れにくい。そこで、量を揃えて、サイズの大きい粒子の集合体と小さい粒子の集合体を比較する。例えば、図-2.1に示されているように、ある立方体を8等分したとする。この8つの立方体の総体積は元の体積と同じである。この時、8等分した時の切断面に相当する面積が増加していることになり、サイズを小さくした方が同一総体積の集合体での総表面積は大きくなる。揃える量には、例に示した体積、若しくは、質量が用いられる。また、図-2の例では揃えた体積は任意の値を持つことになるが、これだと比較した時々で総表面積の値が変わるので、単位体積（＝体積を m^3 で表した場合には 1m^3 を単位体積とする）、もしくは、単位質量（＝質量を kg で表した場合には 1kg を単位質量とする）に揃えて総表面積を比較する。この単位体積、または、単位質量あたりの総表面積を「比表面積」と呼ぶ。実際の測定では、測定装置で求められる総表面積を測定に用いた試料の量（体積または質量）で割ることで、比表面積が得られる。

比表面積を用いると、粉体（＝粒子の集合体）の特徴としての表面の量を表すことができるため、例えば、粒子を構成する物質と媒体が同じ時の溶けやすさの指標とすることができる。その測定方法、測定原理などは成書をご参考いただきたい。ご参照いただく際、測定原理によって同じ粉体を測定しても得られる比表面積の値が変わることがあることにご留意いただきたい。例えば、ここでは簡単のため粒子内に孔などの空間は考えてい

いが、実際の粒子は、軽石とかスポンジのように内部に空孔、空間を持つものがある。空孔には、粒子外部とつながっている開気孔と、つながっていない閉気孔がある。開気孔を持つ粒子の場合、例えば、分子を表面に吸着させて総表面積を測定すると、その孔の表面積も総面積として測定されるが、流体を透過させて総表面積を測定する方法では孔の存在は表面の粗さとして測定値に反映するが孔の奥の表面は、一般に、測定には反映しない。どの方法で測定すれば良いのかは、その測定値をどのように使うかに依存する。前述の例のように、反応触媒粒子で反応性の評価指標にしたい場合には、孔の奥の表面も反応に関与すると思われるので、分子吸着から求めた値を用いた方が良好であろうし、一方、粉体層を作成して気体を透過させるときの流体抵抗を見積もりたい場合には、流体透過から求めた比表面積を用いるべきである。この測定原理の使い分けは、第1章の6回目「粒子の大きさの表し方-3」に述べた粒子径測定と同じである。

3. おわりに

今回より、粉体の特徴を表す数値の説明を始めてみた。特徴といってもいろいろと考えられるが、本稿が「粉体挙動の予測のための粒子・粉体の基礎と、予測のための粒子・粉体特性」という観点での記述を目指しているので、まずは粉体にする理由から考えてみた。次回も同様に、別の粉体にする理由から考えてみる。



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－1

粒子・粉体の特徴とその表し方－3

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回より、粉体にする理由から、粒子・粉体の特徴の表し方を考えている。前は「新しい表面を作る」ことに着目したが、今回は大きな固体を「別々の固体」にする、という観点から考えてみる。

2. 粉体にする理由から考えられる特徴の指標—充填率とかさ密度、体積分率

大きな固体を小さなサイズに粉碎すると、小さな粒子がたくさんできる。別の言い方をすると、大きな塊を小分けしていることになる。一般に、固体は変形する量に限りがあるし、変形量を大きくするためには大きな力が必要な場合がある。塊を小分けすると、図-3.1に模式的に示すように、小分けした小片に外力を加えて移動させることで、集合体としてみると、粉体は変形するので、塊では入らなかった容器に充填することができる。充填されると、集合体である粉体は、大まかにその容器の形になる。容器を型枠と考える

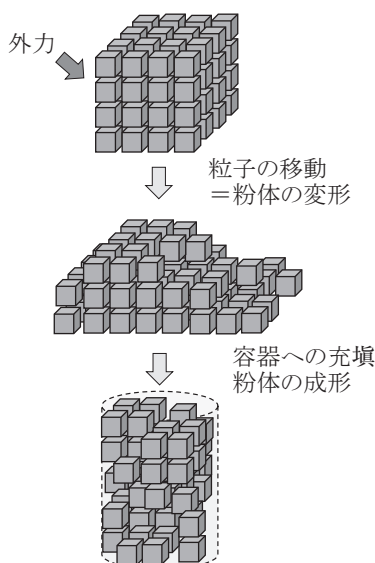


図-3.1 充填・成形過程の模式図

と、粉体という集合体を成形していることになる。このように、大きな固体を小さくすることで、粒子を流動させ、集合体として変形させることができ、必要な形状を形成することが可能となる。

粉体になると容器に充填することはできるが、粒子と粒子の間や粒子と容器壁面との間に空隙（＝隙間）ができる。容器内で、この空隙がどれだけの量になるかは粒子の大きさや形など種々の因子に依存し、充填する粉体の特徴となる。容器内での空隙の量を体積分率、すなわち、容器全容積（＝容器内部の体積）中にある容器内の全空隙体積の割合で表した数値が空隙率 ε と呼ばれる。空隙の総体積を容器容積で除したこの数値は、実際には容器内で大きい、小さいがある（＝分布がある）空隙を平均化した値とみなすことができ、容器内の任意の位置にある粒子と空隙を含む全空間の単位体積中での空隙の割合として、次式で記述される。

$$\text{空隙率 } \varepsilon = \frac{[\text{単位体積中の空隙の体積}]}{[\text{粒子を含む全空間の単位体積}]} \quad (3.1)$$

隙間に注目すると空隙率 ε になるが、充填されている粒子側に着目すると充填率 ϕ と呼ばれる。容器内にある粒子の全体積と空隙の全体積を合わせると容器の容積となるので、充填率 ϕ と空隙率 ε とを合わせると、単位体積（＝1）となる。よって、次式の関係がある。

$$\begin{aligned} \text{充填率 } \phi &= \frac{[\text{単位体積中の粒子の体積}]}{[\text{粒子を含む全空間の単位体積}]} \\ &= 1 - \varepsilon \end{aligned} \quad (3.2)$$

空隙率 ε と充填率 ϕ では容器内に入っている粉体（＝全粒子）の量を体積で表しているが、これを容器内に入っている粉体の質量、すなわち、容器に充填した粉体質量を容器容積で除した数値で表すこともできる。このように求められる数値は、

先の空隙率の話と同様、容器内で粒子が多数詰まっている部分とあまり詰まっていない部分を平均化した値とみなすことができ、容器内の任意位置にある粒子と粒子間の空隙を含む全空間の単位体積中の粉体質量を表す。この単位体積中の質量という定義は、密度と同じ定義であるが、粉体を構成する粒子の物質としての密度とは異なり、粒子間の空隙を含む密度であり「かさ（嵩）密度」と呼ばれる。一方、これと区別する意味で、粒子の物質としての密度は真密度 ρ_p と呼ばれる。

ここで、前回の混相状態を思い出すと、かさ密度、すなわち、空間の単位体積中にある粉体質量は、その単位体積内にある粒子の質量と空隙にある媒体の質量の和となることがわかる。粒子の質量は「粒子体積」×「粒子真密度 ρ_p 」で求めることができ、また、粒子間の空隙にある媒体の質量は、媒体密度 ρ_f を用いて、「媒体体積」×「媒体密度 ρ_f 」で表される。粒子と空隙を含む全空間中の粒子体積、空隙体積の割合は、それぞれ充填率と空隙率で与えられるので、かさ密度は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}\text{かさ密度} &= \phi \rho_p + \varepsilon \rho_f \\ &= \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f\end{aligned}\quad (3.3)$$

媒体として空気を考え、粒子を固体と考えると、空気の密度は我々が生活している通常的环境下ではだいたい 1kgm^3 くらいであり、一方、固体は水（密度は 10^3kg/m^3 くらい）に比べて少し軽いか、ずっと重いので、式(3.3)の右辺第二項は、第一項に比べて、ずっと小さくなる。そのため、多くの場合、かさ密度は充填率と粒子真密度の積とほぼ等しくなる。

ここで、粉体を容器に充填する操作に戻ってみる。操作として、袋に入った粉体をスコップなどですくって別の容器に充填することを考えると、容器に充填されていく際は、粉体には重力のみが作用しており、小麦粉のように粒子径の小さい粒子は一般に空隙を多く含む状態で充填される。この空隙を少なくし、より多くの質量を容器に詰めるためには容器上部から荷重を加え押す操作や、

粉体を入れた容器ごと鉛直上方に持ち上げ、落下させて衝撃を加える操作を繰り返す「タッピング」、容器を振動する台に乗せて加振するなどを操作が行われる。これら操作により、粉体を構成する粒子に重力以外の外力が作用することで、粒子が重力で充填された位置から空隙を埋める位置に移動し、充填率が増加、すなわち、かさ密度が増加する。

このようにかさ密度は、粉体の特徴だけでなく、充填操作にも依存する。しかし、操作方法、条件を規定すれば、すなわち、同じ条件で充填すれば、かさ密度の違いは充填されやすさの目安となる。この点に着目し、重力充填したときのかさ密度を「ゆるみかさ密度」、条件を規定したタッピングや加振などの操作後のかさ密度を「固めかさ密度」と呼び、それらの値自体、または、それらの比を「圧縮度」と定義して、粉体の容器内への充填しやすさの指標としている。

この「ゆるみ」かさ密度は、よく「ゆるめ」と混同される。この名称は、固まった程度を表す「緩め」「固め」ではなく、「ゆるみ状態」でのかさ密度と「固めた後」かさ密度の意味であると思われるので、使用する際にはご注意願いたい。

3. おわりに

ここでは、粉体にすると容器に充填、成形することができる、という特徴から始めて、空隙率、充填率とかさ密度を紹介した。これらのうち、充填率は対象物（＝粉体）が対象空間の体積分率を表すので、その対象空間を媒体に拡張すると、その体積分率は濃度表記に用いられる。次回は充填状態と体積分率の話を書いてみたいと思う。



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－1

粒子・粉体の特徴とその表し方－4

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回は充填率と空隙率の話をした。その「おわりに」に示したように、充填率は対象物（＝粉体）の対象空間での体積分率を表すので、その対象空間を媒体に拡張すると、濃度表記で用いられると体積分率と同じである。今回は充填状態を粒子の空間中の存在状態に拡張し、体積分率とその他の粒子濃度表記の関係の話を書いてみたい。数値間関係を議論したいので、少し式が出てくるが、我慢してお付き合い願いたい。

2. 粉体にする理由から考えられる特徴の指標——体積分率と粒子濃度表記

前回記したように、充填率 ϕ は粒子を含む容器内空間の単位体積あたりに粒子体積が占める割合を表し、一般には粒子の集合体である粉体が容器内などに充填されている場合の状態を表す指標として用いられる。ここで、その定義に着目すると、粒子を含む空間の単位体積あたりに粒子体積が占める割合というのは、空気や水などの媒体中での粒子体積分率（vol%）と同じである。そこで、粒子濃度と粒子の充填状態との関係を考えてみる。

粒子濃度は、いくつかの表記が併用されている。主として用いられる濃度表記は分野や対象に依存するが、分野によらず用いられる濃度表記が、媒体と粒子を合わせた全質量に対する粒子質量の割合で定義される、質量分率（mass%）である。同じ重さの割合で定義される濃度表記として重量分率（wt%）も用いられてきたが、SI単位の使用が推奨されており、論文などでは質量分率（mass%）に統一されつつある。

ここで、粒子の真密度を ρ_p （kg/m³）、粒子の周りに存在する媒体の密度を ρ_f （kg/m³）で表すと、質量分率 M （mass%）は体積分率 V （vol%）

を用いて次式で表される。

$$M = \frac{V\rho_p}{V\rho_p + (100 - V)\rho_f} \times 100 \quad (4.1)$$

式からもわかるように、粒子の真密度が媒体の密度と等しい場合には、質量分率と体積分率は等しくなる。また、粒子の真密度が媒体密度よりも大きくなると、質量分率 M が同じでも体積分率 V （vol%）は小さくなる。体積分率が小さくなる、といわれても粒子の状態はわかりにくい、体積分率が充填率と同じ定義であることを思い出すと、充填率が低くなる、すなわち、粒子間の空隙が広がるのが想像できる。この粒子間の空間（＝空隙）を簡単なモデルで考えてみる。

粒子を直径 x （m）の球形と仮定し、粒子の配置を最もシンプルな配置である図-4.1に示す正方配列と考える。この時の体積分率 V は、粒子を含む空間を図中に破線で示したように、ある粒子を中心として、粒子間の中間を通る面で分割した一辺の長さ l の立方体での体積分率を考えればよく、次式で表される。

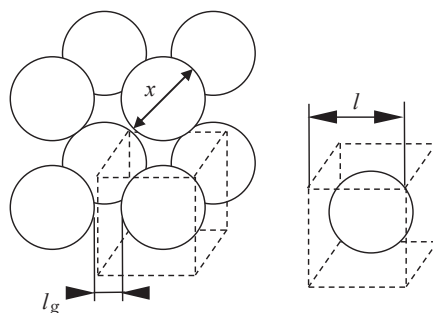


図-4.1 粒子の配置モデル

$$V = \frac{\frac{\pi}{6}x^3}{l^3} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\frac{l}{x} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6V/100}} \quad (4.3)$$

また、粒子表面と粒子表面の間の距離（＝空隙の距離） l_g は $(l-x)$ となるので、次式が得られる。

$$l_g = x \left(\frac{l}{x} - 1 \right) \quad (4.4)$$

これらの式を用いていくつかの体積分率について粒子表面間の距離を計算した結果を表-4.1に示した。体積分率 V が10vol%程度になると、粒子表面間距離は粒子1個分を下回る。粒子表面間距離が小さくなると、粒子間の接触や衝突が想定され、例えば、固体粒子が液体中に分散した系では粒子間の接触・衝突は見かけ粘度の増加という形で、系全体の特徴を表わす巨視的特性に影響を与える。

表-4.1 体積分率による粒子表面間距離の変化

体積分率 (vol%)	l/x	l_g
1	3.74	2.74x
5	2.19	1.19x
10	1.74	0.74x
20	1.37	0.37x
40	1.09	0.09x

固気系のプロセスで用いられる濃度表記に混合比（または、固気混合比、固気比） m がある。この混合比 m は次式で定義される。

$$m = \frac{\text{粉体の質量流量}}{\text{気体の質量流量}} \quad (4.5)$$

粒子の体積流量を Q_{vp} 、気体の体積流量を Q_{vf} とし、粒子が気体と同じ速度で流れるとすると、以下の関係が成立する。

$$m = \frac{Q_{vp}\rho_p}{Q_{vf}\rho_f} \quad (4.6)$$

$$V = \frac{Q_{vp}}{Q_{vp} + Q_{vf}} \times 100 = \frac{1}{1 + \rho_p/m\rho_f} \times 100 \quad (4.7)$$

気体の密度 ρ_f を 1kg/m^3 と考え、粒子に高分子を想定して粒子密度 $\rho_p = 10^3\text{kg/m}^3$ とすると、混合比 $m=100$ では、体積分率 V は約9.1%となる。先の粒子表面間距離の計算（表-4.1）と見比べると粒子表面間距離は粒子1個分程度となっていることがわかる。固気系の場合、巨視的特性として見かけ粘度が用いられることはないが、粒子同士が接触した場合にはくっ付いて離れなくなる「付着」が起こるので、粉体のプロセス内での挙動を

考える際には一次粒子の挙動だけでなく、粒子同士が付着して形成される凝集体としての挙動も考慮する必要がある。

同じ固気系の濃度表記でも、作業環境や大気環境中の粒子濃度（この場合には粉じん濃度）は、質量濃度 C_m (mg/m^3) が用いられる。一般に粒子の真密度 ρ_p は気体の密度 ρ_f よりも極めて大きいので、近似的に次式が成立する。

$$V = \frac{C_m \times 10^{-6}}{\rho_p} \times 100 \quad (4.8)$$

大気汚染防止法に基づく浮遊粒子状物質の大気環境基準として定められている粒子濃度はだいたい0.1~1のオーダーであるので、粒子密度 $\rho_p = 10^3\text{kg/m}^3$ として $C_m = 1\text{mg/m}^3$ について計算してみると、体積分率 V は $10^{-6}\%$ となる。これを式 (4.3)、(4.4) を用いて粒子表面間距離にすると $l_g = 373x$ となり、粒子間には十分な距離があることがわかる。このような状態の粒子の空気中での運動は、近隣粒子の影響を無視して、単一粒子の挙動で近似できる。

3. おわりに

今回は粒子の濃度表記に着目し、粒子の配置と濃度との関係を考えてみた。ここで示したように、濃度表記はいろいろな定義の濃度が用いられるが、充填率と同じ定義の体積分率で表すことによって、粒子の配置と関連付けて考えることができるので、粉体プロセス内での粒子挙動を考える際には粒子間の相互作用を考慮するか否かなどが直感的にわかりやすいと筆者は考えている。粉体プロセス内での粒子挙動を考える際は、体積分率を計算してみることをお勧めする。

次回からは、粒子表面間距離が近くなった場合に考慮する必要がある、粒子間相互作用の一つである「付着」について考えてみることにする。



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－1

粒子・粉体の特徴とその表し方－5

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

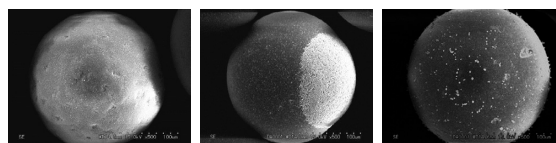
本稿の連載再開より第2章として「粒子・粉体の特徴とその表し方」について記述している。こまでは、粉体、すなわち、微小な粒子状物質の“集合体”としての特徴に着目し、比表面積、充填率、濃度の表記について概観してみた。ここで、もう一度、第2章の最初に記した、微小な固体を表わす2つの言葉「粉（こな）」と「粒（つぶ）」に戻ってみる。一つの違いは、前述したように、目視で形状が識別できるかどうかである。その他に、プロセス内の装置やハンドリングでも違いが見られる。「粉」と呼ばれるくらいに粒子径が小さくなると、粒子は周りの固体、例えば、隣接する粒子や装置の壁面にくっつくという現象が見られる。一方、「粒」は隣接する粒子にも装置壁面にもくっつかず、例えば、容器から排出させるとザラザラと流れ落ちる。すなわち、粒子がくっつく（＝付着する）ことも、粉体の特徴である。

そこで、今回からは、「粉体」と呼ばれる程度に微小な粒子状物質を扱うプロセスで問題となる粒子間相互作用の一つである「付着」について考えてみる。この「付着」であるが、「付着性」と「付着力」が混同して用いられているように思っている。例えば、「粒子径が小さくなると付着性が大きくなる」という表現をよく聞く。稀に、これを「粒子径が小さくなると付着力が大きくなる」と勘違いしている場合に遭遇する。まずは、この「付着性」と「付着力」の違いから話を始めてみる。

付着力としてはいくつかの力が考えられており、それぞれについて仮定に基づいた式が提案されている。それらの式の仮定や導出については成書をご参照いただくこととして、ここでは「付着性」を説明するうえで必要な式を紹介するだけとする。また、実際のプロセスで考慮すべき付着力は、粒子が液体中にある場合と気体中にある場合で異なる。第1章の冒頭に記したが、本稿では気体中に粉体があることを前提としているので、気体中の付着力を扱うものとする。

2. 種々の付着力とその粒子径による変化

図-5.1 は、粒子径の大きなガラスビーズと、粒子径の小さなシリカ粒子をボールミルで混合した結果を示している。バインダーなどは用いていないが、シリカ粒子の粒子径が小さい場合には、左の写真のようにシリカ粒子はガラスビーズの表面に付着し、ガラスビーズが被覆される。シリカ粒子の粒子径を大きくすると、シリカ粒子はうまくガラスビーズに付着しなくなり、真ん中の写真ではガラスビーズの一部に層状に付着しており、さらに粒子径の大きい右の写真ではシリカ粒子は単粒子としてところどころに付着する状態となる。これは2種の粒子を混合した場合であるが、「粒子径が小さいと付着する量が増える」という観察結果は、例えば粉体粒子の管内輸送や貯槽容器からの排出など多くの操作で観察される。このような観察結果を基に、「粒子径が小さくなると付着性が大きくなる」と表現されている。これを「くっついているので付着力が強いのだろう」という推察からか「粒子径が小さくなると付着力が大きくなる」と思っている方に時折遭遇する。



シリカ粒子径＝0.275μm シリカ粒子径＝ 0.735μm シリカ粒子径＝2.106μm

図-5.1 大粒子（ガラスビーズ）と小粒子（シリカ）の混合結果

粒子の付着力を書籍や文献で調べてみると、粉体の乾式操作、すなわち、気相中で働く付着力として、ファンデルワールス（van der Waals）力、液架橋、静電気力といった力についての説明と式を簡単に見つけることができる。例えば、以下のような式である^{1), 2)}。

- ・ファンデルワールス（van der Waals）力（球（直径 x_1 ）－球（直径 x_2 ）間）

$$F_v = \frac{A}{12z^2} \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} \quad (5.1)$$

A : Hamaker 定数 (J)

z : 分離距離 (m)

- 液架橋力 (等径2球での近似式)

$$F_L \cong \pi \gamma x \quad (5.2)$$

γ : 液の表面張力 (N/m)

- 静電気力 (等径2球間のクーロン力)

$$F_{ec} = \frac{\pi \sigma_1 \sigma_2}{\epsilon_0} x^2 \quad (5.3)$$

σ_1, σ_2 : 表面電荷密度 (C/m²)

ϵ_0 : 真空の誘電率 (F/m)

ここでは、力の発生メカニズムや各式中の係数、変数など詳細な説明は省略するが、式を見るときにずれの付着力も粒子径 x の関数となっていることがわかる。そこで、式中の係数、変数について、一般的に用いられる値

$$A = 1.0 \times 10^{-19} \text{J}$$

$$z = 0.4 \text{nm}$$

$$\gamma = 0.072 \text{N/m}$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 26.5 \mu\text{C/m}^2$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$$

を用いて計算した各付着力を、粒子径に対してプロットしてみた。計算結果 (図-5.2) を見るとわかるように、いずれの付着力の計算結果も右上がりの線となり、粒子径が大きくなると付着力は大きく、粒子が小さいと付着力も小さくなる。つまり、前述の「粒子径が小さいと付着力が強い」は間違いである。

しかし、実際に粉体を取り扱ってみると小さい粒子ほどくっ付き易い (別の言い方をすると、付着性が高い)。一見すると付着力の計算結果と矛盾しているようである。これは「くっ付き易い」または「付着性が高い」と判断した観測結果が、付着していたものを分離しようとした結果であることから生じる。すなわち、付着力は小さくても分離しない粒子は付着性が高い粒子である。言い換えると、「付着性」は、観測している粒子の付着力とその粒子に加わる分離させる力 (分離力と称する) の大小関係を表したものである。言葉で説明するとこのようになるが、直感的にわかりにくいので、次回もう少し詳しく説明する。

ちなみに、図-5.2 からは他にもいろいろとわかることがある。計算された各付着力を比較すると、計算範囲内において液架橋力が最も大きい。海辺で砂山を作り、トンネルを掘るときに水をかけて「適度に」湿らせるとうまくトンネルが掘れるのはこのためである。水をかけなくても、水と親和性の高い表面を持つ粒子は、高湿度環境下ではこの液架橋が形成されるので、この液架橋力が支配的な付着力となる。また、冬場は静電気が起きやすく、衣服がくっつくのを経験するが、ミクロン

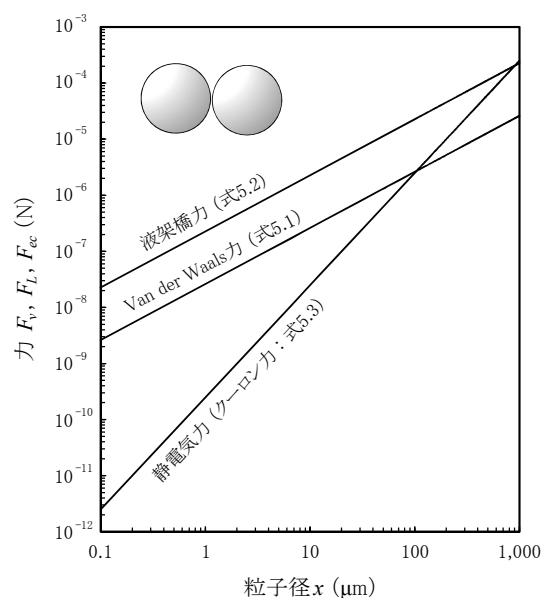


図-5.2 等径2粒子間の付着力計算結果

オーダーの粒子になると付着力に対する寄与は少ないことが図からわかる。しかし、実際のプロセスで冬場に多量の粉体が付着することが経験されるようである。これは付着量と付着力とを分けて考える必要があることを示唆する。この点については、後の節で説明したいと思う。

3. おわりに

今回は粉体の挙動に大きな影響を与えるという観点で特徴のひとつと呼べる、付着性の基となると付着力を紹介した。ここで計算例を示したように、その付着力は粒子径が小さいと小さくなる。この結果と実際の粉体操作での観測結果との関係のポイントは“付着性が高いと表現できる状況が観察される”だと考えている。次回は、この点を中心に記述する。

引用文献

- 1) 粉体工学会編：“粉体工学叢書第3巻気相中の粒子分散・分級・分離操作”、日刊工業新聞社、pp. 12-34 (2006)
- 2) 奥山喜久夫、増田弘昭、東谷公、近沢正敏、金澤孝文：“1.62粒子間相互作用”、粉体工学会誌、22、pp. 451-475 (1985)



後藤 邦彰

岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL : 086-251-8084 FAX : 086-251-8085
E-mail : gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－1

粒子・粉体の特徴とその表し方－6

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回、粉体の挙動に大きな影響を与えるという観点で特徴のひとつと呼べる、付着性の基となると付着力を紹介した。その付着力は粒子径が小さいと小さくなる。一方、実際の粉体操作では、粒子径が小さい方がくっ付き易い、すなわち、付着性が高いと表現できる状況が観察される。今回は、この付着力と付着性について考えてみる。

2. 付着力と付着性

前回、図-5.1として、粒子径の大きなガラスビーズと、粒子径の小さなシリカ粒子をボールミルで混合した結果を示した。その結果を見ると、量の多少は粒子径に依存するが、シリカ粒子はガラスビーズの表面にくっ付いている。このような状況を指して、我々は「(微)粒子が付着している」と表現する。もう少し話を簡単にするために、粒子と平板とが接触している場合を考える。仮に、図-6.1(a)のように、粒子が平板の鉛直上側で接

触している場合、我々はこれを「付着している」と表現するだろうか？ 粒子が粉と呼ばれる程度に小さくなった場合には微妙であるが、粒子の形が目視で観察できる大きさの場合には、「粒子が板に乗っている」とは表現できても、「付着している」とは決して表現しないと思う。一方、図-6.1(b)のように、粒子が平板の鉛直下方で接触しており、そのままの状態が保持されている場合には、粒子の大きさに関わらず、我々は「くっ付いている」または「付着している」と表現するであろう。また、粒子が平板の鉛直上側で接触している場合でも、初期状態が付着状態－Aであったのに、または、付着状態－Aで示されているように大きな粒子を含む粉体を取り扱っているのに、気流が存在する環境下で図-6.1(c)のように比較的小さな粒子のみが壁面上に残存している状況では（小さな粒子が）「くっ付いている」または「付着している」と表現する。

これら、付着状態－AとBまたはAとCとの違いを意識してこの状況を記述すると、鉛直下方にあれば重力が粒子を板から分離する力、すなわち、分離力として、気流存在下では流体抗力に起因する力が分離力として働いているはずなのに、粒子は板から分離せず接触したままになっているので“くっ付いている”もしくは“付着している”と表現している、となる。つまり、“分離するはずなのに、接触したままになっている”ことが「付着している」と表現されるポイントであり、観察している状況において、付着、すなわち、接触状態を保持しようとする付着力と、それと対抗して

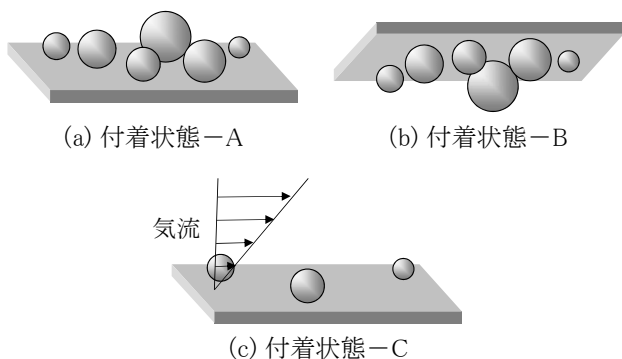


図-6.1 固体壁と粒子の付着状態例

粒子を分離しようとする分離力がそれぞれ作用していると推定していることになる。

ここで、図-6.1(b) の状況を数式で表してみる。付着力には、乾燥状態、すなわち、気体中での粒子の接触でも、液体中でも粒子間に作用する van der Waals 力 F_v を考える。今回は直径 x_1 と x_2 の球形粒子間の式を示したが、図-6.1(b) のような直径 x の球形粒子と平板間の付着力の式は、前回の式 (5.1) 中にある

$$\frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = \frac{x_1}{\frac{x_1}{x_2} + 1} \quad (6.1)$$

を、 $x_1 = x$ 、 $x_2 = \infty$ とすれば良い。すなわち、

$$F_v = \frac{A}{12z^2} x \quad (6.2)$$

となる。この付着力が粒子に対し鉛直上向きに働き、平板と付着していることになる。

一方、図-6.1(b) の状況では、粒子には重力が鉛直下向きに分離力として作用する。直径 x の球形粒子に作用する重力 F_g は次式で表される。

$$F_g = m_p g = \frac{\pi}{6} \rho_p x^3 g \quad (6.3)$$

m_p : 粒子質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s²)

ρ_p : 粒子密度 (kg/m³)

式からわかるように、van der Waals 力は粒子径の1乗に比例するのに対し、分離力として働く重力は粒子径の3乗に比例する。これらの式から得られる F_v と F_g を粒子径 x に対して両対数グラフにプロットすると、両対数グラフ上では横軸 x のべき乗部分の傾きを持つ直線となるので、図-6.2 のように F_v と F_g はそれぞれ傾き1と3の異なる直線で表され、必ずある粒子径 x_c で交差する。

仮に、はじめ粒子を図-6.1(a) のように平板の上面に乗せておき、その板をひっくり返して図-6.1(b) の状態にしたと考えると、交点 x_c よりも大きな径を持つ粒子では重力は付着力よりも大きいので分離され、交点 x_c よりも小さな径の粒子は付着力の方が大きく付着したままとなる。このように、

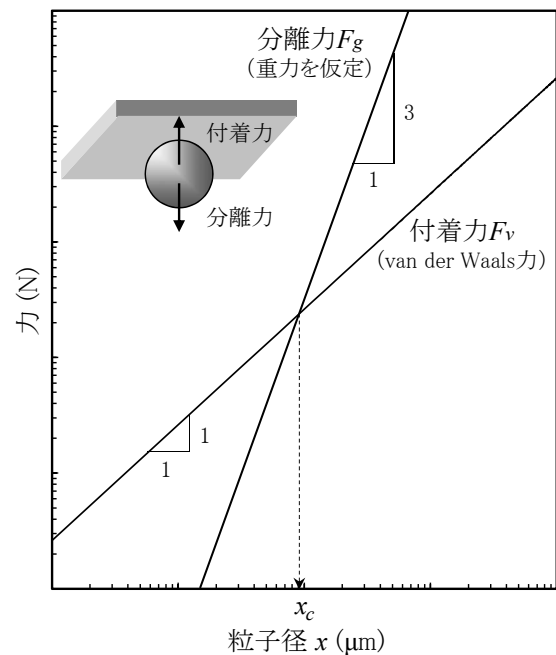


図-6.2 付着力と分離力の比較 (概念図)

観測される結果が、大きな粒子は分離され、小さな粒子はくっ付くことから、「粒子径が小さくなると付着性が高い」と表現されることとなる。

3. おわりに

今回示したように、「付着力」は文字通り粒子と他物体がくっ付く力であるが、「付着性」は、くっ付き易さ、すなわち分離力と付着力の大小関係を表したものである。この付着性は、付着力を分離力で割った相対付着力として考えることもできる。また、実プロセスや実操作で観測され、トラブルとなるのは、分離力が作用した結果であるので、付着力よりも付着性、すなわち、付着力と分離力の大小関係で考えた方が、プロセスや操作中での粒子挙動は表しやすいと考えられる。そこで今回は、この力の大小関係を、プロセス内での粒子挙動と関連させてみる。



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL : 086-251-8084 FAX : 086-251-8085
E-mail : gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

した付着力範囲を持つ粉体となる。同様に、粒子と固体壁の接触点での物理的な表面状態に依存する分離距離 z を、例えば、「表面加工」により原子・分子オーダーの凹凸を付けるなどで大きくしても、van der Waals力は低下し、粉体Aは粉体Bと記述した付着力範囲を持つ粉体となる。すると、重力を仮定した分離力との交点は先の x_c よりも左側、すなわち小さな粒子となるので、粉体Bの全範囲の粒子は付着力が分離力よりも小さくなり、固体壁から重力により分離される、すなわち、付着しなくなる。このように、「表面改質」や「コーティング」「表面加工」により付着しなくなった場合には、「付着性が低下した」と表現される。

一方、同一粒子に作用する分離力を大きくする方法は、異なる装置を用いる、または、装置操作条件を変えることに相当する。例えば、「板に付着した粉体Aを分離・除去する操作」を行うことを考え、重力と同じ方向に遠心力 F_c が粒子に作用する操作を行ったとする。

$$F_c = m_p R \omega^2 = \frac{\pi}{6} \rho_p x^3 R \omega^2 \quad (7.2)$$

(密度 ρ_p の球形粒子)

R : 回転半径 (m)

ω : 回転角速度 (rad/s)

この時、分離力Bは $F_g + F_c$ で表わされ、分離力を示す線(図中の破線)は、分離力Aから図中上方向に平行に移動する。すると交点 x_c は図中左にずれ、粉体Aの全範囲の粒子で付着力よりも分離力が大きくなり固体壁から分離される。ここで、粉体Aをすべて分離するための分離力は、遠心力を発生させる装置の回転半径 R と回転角速度 ω に依存する。回転半径 R の違いは一般に装置の大きさの違いであり、回転角速度 ω の違いは操作条件の違いとなる。

ここでは付着している粉体を分離・除去する操作を考えたが、ここで見方を変えてみる。固体壁を装置壁と考え、前述と同様の重力と遠心力の合力である分離力Bが粒子に作用する装置内での粉体Aの付着状態を観察した、とすると、この粉体Aは装置壁には付着しないことになる。すなわち、粉体Aは分離力Bが作用する装置内では「付着性は低い」粉体と判断される。これが前々回の「3. おわりに」に書いた“表現できる状況が観察される”ということである。

ここまで記述したように、付着性が高い、または低いという表現は、粒子の状態が観測された系内(=装置内や、容器内など)における付着力と分離力の大小関係の定性的表現である。この付着力と分離力の大小関係という点に着目して、「粒子径が小さいと付着性が高い」ことをもう一度考えてみる。すると、粒子径が小さいと付着性が高くなるのは、粒子径が小さくなると付着力は小さくなるが、“粒子に作用する分離力がそれよりも

さらに小さくなるため”相対的に付着力が大きくなるのが理由であると考えられる。この“粒子に作用する分離力がそれよりもさらに小さくなるため”というのは、図-7.1では分離力を表わす直線の傾きが付着力の直線の傾きよりも大きい、別のいい方をすると、分離力の粒子径依存性が、付着力の粒子径依存性よりも高いことを意味する。ここで、仮に粒子径に依存しない分離力Cを粉体Aに作用させた場合を考える。図中では交点を x_c として分離力Cの線を描いている。この分離力Cと粉体Aの付着力を比較すると、交点 x_c よりも粒子径が小さいと分離力が付着力よりも大きくなり、交点 x_c よりも粒子径が大きいと付着力が分離力よりも大きくなり、粉体A中の大きな粒子が付着した状態となる。すなわち、この系では粒子径が大きい方が付着性は高い、と表現される。この例は、我々がしばしば観測する「粒子径が小さいと付着性が高い」と表現される観測結果は、その系内で粒子に作用する分離力の粒子径依存性が、付着力の粒子径依存性よりも高いことを示唆する。仮に支配的な付着力がvan der Waals力であるとする、付着力は粒子径に比例するので、「粒子径が小さいと付着性が高い」と表現される観測結果が得られた系では、粒子径の1乗を超える関数、例えば、粒子径の2乗で表される面積や3乗で表される体積に比例する関数で与えられる分離力が作用していることを示唆する。粉体操作を考えた場合、こういった分離力が作用する場合は装置に依存するので、もし「粒子径が小さくなると付着性が高くなる」という状況が装置内で起こり、それがトラブルであるとする、作用する分離力を変える、すなわち、同一目的だけれど操作原理の異なる装置に変えると、状況が改善するかもしれない。

3. おわりに

今回、付着性と粉体操作の関係を考えてみた。そのため図-6.1を図-7.1に展開してみたが、図-6.1からは付着特性の評価方法についても考えることができる。本稿では「粒子・粉体の特徴とその表し方」について記述しているので、本来なら次回は付着特性の話に行くべきであるが、操作と絡んだ“付着量”について前々回に後述するといっている、特性の前に付着力と付着量について考えてみることにする。



ごとう くにあき
後藤 邦彰

岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－1

粒子・粉体の特徴とその表し方－8

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

今回は付着性と粉体操作の関係を考えてみた。今回は、その続きとして、粉体操作中に観測される付着粉体の量と付着性、すなわち、付着力と分離力のバランスとの関係について考えてみる。

2. 付着力と付着量

はじめに、粉体の付着状態の例を図-8.1(b)～(d)¹⁾に示す。これらの写真は、図-8.1(a)に概略図を示す、攪拌型気中分散機と呼ばれる、凝集粒子を気体中で分散（＝一次粒子の状態のエアロゾルにする）装置の内側壁面の写真で、写真中に見える楕円の部分は供給された粉体が分散され装置外に排出される吐出管入口（＝吐出口）である。図-8.1(b)で、白い縞状に映っているものが、付着した試料粉体（フライアッシュ JIS10種）である。図-8.1(c)では、この付着した粉体が装置内壁全体を覆っているため全体に白く見え、吐出口の左側には他所よりも付着量が多い場所があることがわかる。図-8.1(d)では、付着量が多い箇所が吐出口左側以外にも点在している。つまり、これらの写真を付着量でみると、(b) < (c) < (d)の順になる。

この例をもとに、付着粉体の量と、付着力と分離力のバランスとの関係を考えてみる。まず、試料粉体と装置は同じであるので、試料粒子と装置

壁との付着力は一定である。その付着力一定の下で、付着量は (b) < (c) < (d) の順で増加している結果を写真は表わすが、この装置での付着量増加には2つの場合が考えられる。ひとつは試料粉体の装置への供給流量を一定にして、インペラーの回転速度を減少させた場合で、もうひとつはインペラーの回転速度を一定にして、試料粉体の供給流量を増加させた場合である。試料粉体の供給流量を一定にしてインペラーの回転速度を減少させた場合、回転速度の減少によりインペラー上部に生じる負圧が減少し、装置への吸引空気流量が減少すると共に、装置内で気流が旋回運動する回転速度が減少する。よって、装置壁面近傍での空気流速が減少するので、気流から付着した粒子が受ける流体抗力に起因する分離力は減少する。ここで前回の図-7.1をもとに考えると、分離力が減少するので、気流により生じる分離力で分離可能な粒子径範囲は粒子径の大きい方に移行し、試料粒子中で分離可能な粒子量は減少すると考えられ、その結果、付着量が増加したと考えることができる。

一方、インペラーの回転速度を一定にして、試料粉体の供給流量を増加させた場合については、前述の回転速度を変えた場合とは異なり、吸引空気流量も気流の旋回速度も一定であるので、気流から付着した粒子が受ける流体抗力に起因する分離力は一定であると考えられる。しかし、観測結果では付着量は増加している。このことは、粉体の付着量は、前述の試料粉体の供給流量を一定にしてインペラーの回転速度を減少させた場合に図-7.1から予測したような、付着力と分離力のバランスだけでは決まらないことを示唆する。

インペラーの回転速度を一定にして、試料粉体の供給流量を増加させた場合に変化しているのは、気流中の粒子濃度である。すなわち、粒子濃度の増加により、付着量が増えていることになる。この濃度と付着量の関係を考えるには、まず、粒子が装置壁に付着する過程を考えてみる必要がある。はじめに、インペラー回転速度、試料粉体供給流量を設定し、装置を動かし始めた時、すなわち、壁面には全く粒子が付着していない状態を考える。現在考えている装置内では、供給された粉体粒子は気流中に浮遊しており、気流により装置内を旋回しながら移動し、最終的には吐出口より吐出される。この装置内で気流により移動している中で

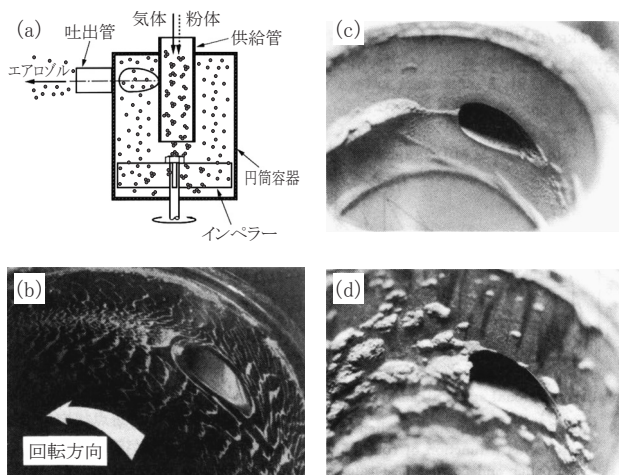


図-8.1 装置内での粒子付着の例¹⁾

装置壁に付着する、ということは、粒子が壁面に向かう方向の速度を持つことを示す。この壁面に向かう方向の粒子速度は、一般に気体分子の熱運動（＝ブラウン運動）に起因する粒子のブラウン拡散や気流の渦運動に起因する乱流拡散、曲がった流れから生じる粒子慣性力によって生じると考えられる。粒子が壁面に向かう速度を持つと、粒子と壁面が接触する可能性が生じ、接触した粒子の内、弾性反発などで反発しなかった粒子には壁面との間に付着力が作用し、壁面と接触したままの状態、すなわち付着することになる。よって、壁面には全く粒子が付着していない状態から付着をし始めた時の付着量は接触確率の増加、この例の場合、壁面に向かう速度を持つ粒子の数により増加すると考えられる。

粒子が装置壁に接触し、付着すると、付着した粒子には壁面近傍の気流から流体抗力が作用し、この抗力に起因する分離力が作用する。しかし、一般に固体壁近傍での気流流速は遅いので、付着したばかりの粒子をそのままの状態分離するほどの分離力は作用しない。そのため付着量は増加し、やがて粒子層を形成する。粒子層を形成すると、流体抗力は層全体に作用するので、層の一部を分離するに足る分離力が作用し、粒子は層の一部、すなわち、凝集体として分離される。よって、この段階になると気流中から固体壁面に付着する粒子と、粒子層から凝集体として気流中に分離・再飛散をする粒子が存在することになる。付着する粒子量が増えると、粒子層の形成は早くなり、多くの粒子が分離・再飛散されるようになるので、これら付着する粒子量と分離・再飛散する粒子量は、操作条件（インペラー回転速度、粉体供給流量）一定の下ではやがて等しくなる。この時、固体壁上の付着量は時間的に変化しなくなる、すなわち、定常状態となる。種々の操作条件下での定常状態の付着の様子が図-8.1(b)～(d)である。観察時には装置を止めているので粒子層は止まっているように見えるが、例えば、透明な配管内で付着状態を観察すると、図-8.1(b)に示すような縞状の付着層は気流の方向に移動することが報告されている²⁾。このことは、ここで考えているように、粒子の付着と分離・再飛散が同時に起こっていることを示す。

前述のような壁面に向かう方向や壁面から離される方向に粒子が移動する“量”を議論するときに便利な数値がフラックス（＝“Flux”。日本語では“流束”と呼ばれるが、流速と混同しやすいので、ここではフラックスと称す）である。フラックスは、図-8.2に概念図を示したように、単位面積（SI単位系では $1\text{m} \times 1\text{m} = 1\text{m}^2$ ）を単位時間（SI単位系では1秒）に通過する物質質量（粒子の場合、個数、質量、体積など）で定義される。このフラックスを用いて先の過程は、装置可動初期（＝壁面に付着粒子がない状態）では気流から壁面に移動する粒子フラックス（図-8.2中の灰色粒子の移動量）のみであるので粒子壁面への付着量が増加するが、ある程度付着量が増加すると分

離・再飛散により壁面から気流に向かって移動する粒子フラックス（図-8.2中の白色粒子の移動量）が増加し、やがて両者が釣り合って平衡状態となる、と記述される。

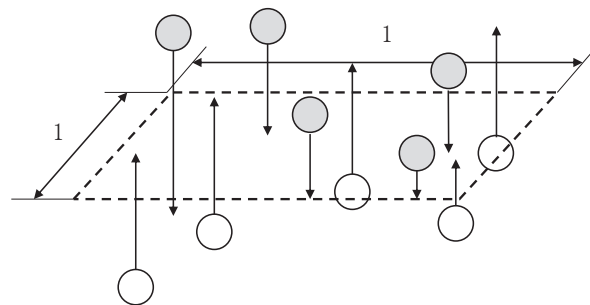


図-8.2 フラックス（＝流束）の概念図

ここで、粒子濃度と付着量の話に戻る。気流中の粒子濃度が増えると気流から壁面に移動する粒子フラックスは増加すると考えられる。すると付着量が増え、濃度増加前よりも多くの場所で粒子層からの粒子の分離・再飛散が起こる程度に付着量が達すると、気流から壁面に移動する粒子フラックスと壁面から気流に向かって移動する粒子フラックスが釣り合い新しい平衡状態となる、と考えられる。すなわち、付着量が多い状態でフラックスが釣り合うために濃度が増加すると付着量が増える。また、試料粉体の装置への供給流量を一定にして、インペラーの回転速度を減少させた場合には、気流流量の減少に伴い粒子の濃度が増加して、気流から壁面に移動する粒子フラックスが増加したことに加え、気流流速の低下により分離力が減少し、粒子の分離・再飛散が起これにくくなり、気流に向かって移動する粒子フラックスが減少したことにより、より付着量の多い状態で平衡となったと考えられる。

3. おわりに

今回は「粒子・粉体の特徴とその表し方」の話に戻り、図-6.1から考えられる付着特性の評価方法について考えてみることにする。

引用文献

- 1) 増田弘昭，川口哲司，後藤邦彰：“気中攪拌型微粒子分散機の分散性能に対する粉体供給流量およびインペラー回転数の影響”，粉体工学会誌，27，p. 515－519（1990）
- 2) 松坂修二，増田弘昭：“粒子沈着・再飛散同時現象”，粉体工学会誌，38，12，p. 866－875（2001）



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700－8530 岡山市北区津島中3－1－1
TEL：086－251－8084 FAX：086－251－8085
E-mail：gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－1

粒子・粉体の特徴とその表し方－9

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

ここまで4回ほどにわたって、粉体、すなわち、微小な粒子状物質の特徴として「付着」について考えてきた。付着は粉体を扱ううえで重要な特徴であるため、「付着性」と称される挙動を力のバランスで考えれば整理できること、装置内で見られる付着量と付着性との関係など、いくつかの側面から「付着」について記述した。今回は、本節のタイトル「粒子・粉体の特徴とその表し方」の「表し方」の話として、図-6.2 から考えられる付着力、付着特性の測定・評価方法について考えてみることにする。

2. 付着力および付着特性評価の考え方

簡単のため、図-9.1 中に示したように、単一粒子と平板との付着を考える。この粒子の付着力は、被測定粒子の粒子径を通る y 軸に平行な直線上のどこかの値を取る。被測定粒子に分離力が作用していない場合には粒子は平板に付着した状態となるが、分離力 F_g を作用させ（図中の太い実線）、その分離力を徐々に大きくしていくと、やがて粒子は板から分離される。この分離が起きる瞬間に粒子に作用している分離力は、粒子と板間の付着力とほぼ等しいと考えられる。よって、付着している状態の粒子に分離力を作用させ、分離する瞬間に粒子に作用している“分離力を見積もれば”、

付着力を求めることができる。

引用文献1)を見ると、この分離力の与え方により粒子－平板間の付着力測定法が分類されている。例えば、スプリング・バランス法として紹介されている方法では、図-9.2(a) に示すように、粒子をバネの先端に取り付けた装置を用いる。このような機構を用いる装置では、図には示していないが、バネの支持部の位置を制御し、その位置を計測する装置と、バネ先端（留置取り付け部）の位置を計測する装置を必要とする。測定では、バネの先端に取り付けた粒子を平板（試料板）に接触させた後、バネ支持部を平板から垂直方向に離していく。すると、粒子－平板間の付着力によりバネは変形する。さらにバネ支持部を離していくと、ある位置に達した時に粒子は平板から分離する。この時のバネ変形量（＝初期位置からの変位量）と用いたバネのバネ定数から、分離した時に粒子に作用していた分離力、すなわち、付着力を求めることができる。このような機構を用いて分離力を作用させる場合、粒子にバネの力が直接作用し、かつ、その力は物理法則により明確に定義でき、さらに力の方向もバネ支持部の移動方向で決まるので、粒子のバネの支持部移動方向（図の例の場合、平板に垂直な方向）に分離する際の付着力を厳密に測定できることになる。

一方、平板上に形成されるせん断流を用いて付着力を測定する方法（図-9.2(b) 気流法）も紹介されている。この方法では、一般に矩形（＝長方

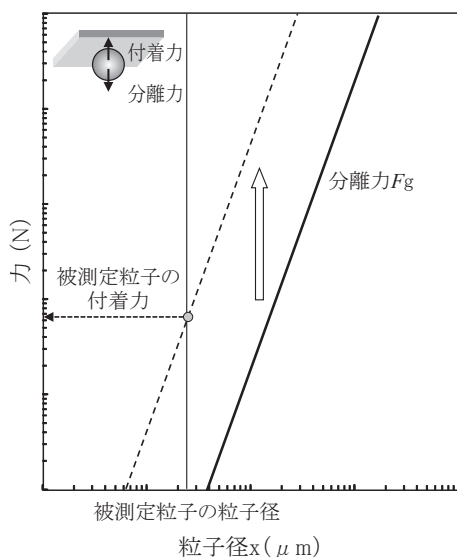


図-9.1 付着力測定概念図

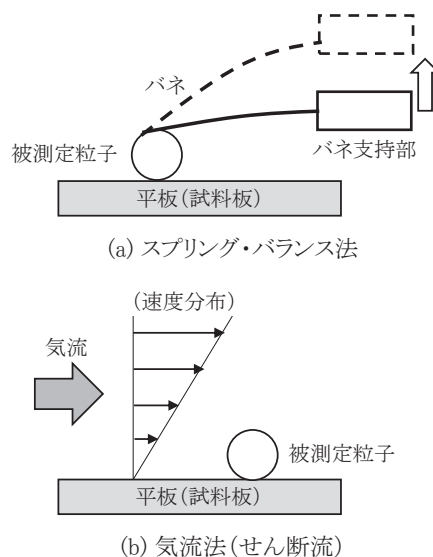


図-9.2 粒子－平板間付着力測定法

形) 断面を持つ流路が用いられ、その流路内の壁面に粒子を付着させる。流路内の気体流量を徐々に増加させると、ある流量で粒子が壁面から分離し、飛散する。分離力の計算では、壁面から粒子が分離・飛散する気体流量をもとに流体力学の知識を利用して粒子近傍の速度分布を求め、その速度分布より粒子に作用する力が計算される。気流から粒子に作用する力を算出するモデル式はいくつか提案されている²⁾ので、実際の計算ではモデルを決めて分離力を計算する、つまり、厳密に求められるのではなく、ある仮定(=モデル)をもとに“見積もる”ことになる(このことを強調するために、前述の見積もるに“”を付した)。

これらの他にも、粒子を付着させた平板を、平板に対して垂直上向きに遠心力が作用するように板を回転させる、遠心法なども文献では紹介されている。この遠心法では、付着粒子に作用する分離力は、当然、遠心力であり、式(7.2)で計算できるが、この遠心力が作用した際の分離過程には、遠心力に起因するモーメントを考慮するモデルや、遠心力と付着力の均衡を考えるモデルがあり³⁾、モデルにより計算される付着力は異なるので、測定結果は、やはり見積もった値となる。

このように記述すると厳密に付着力が求められるスプリング・バランス法が最も良いことになるが、実用という観点で考えると必ずしもそうは言えなくなる。例として、稀薄濃度の粉体を配管で空気輸送する時の管壁上への粒子付着を配管設計段階で検討するために、粒子付着力を測定する場合を考える。輸送対象粒子と配管壁間の厳密な付着力をスプリング・バランス法で求めたとすると、その値を用いて、ある操作条件、この場合、ある気流流速において配管内で粒子が付着するかどうかを判定する計算を行うことになる。この時に必要となる、気流から粒子にどれだけの分離力が作用するかを求めるモデルは、前述のようにいくつかあるので、どのモデルを用いるかで付着の有無の判定が異なることが予想される。つまり、“見積もる”という問題が、厳密な付着力を求めても設計計算などにおいて生じることになる。

この例は、厳密に付着力を求める際の問題と、厳密に求めた付着力を実プロセスに適用する際の例を示したものであるが、結局、粒子に作用する分離力を見積もるためのモデルの選択という問題は回避できないことになる。このような問題を回避するには、最初から粒子に作用する分離力をモデル化しない、という方法があると筆者は考える。例えば、先の配管内輸送の場合、必要なのは、ある気流流速で粒子が付着するかどうかの「指標」で良いので、気流により生じる分離力をもとにした付着力の指標、付着特性を壁面気流せん断応力など気流の特徴を用いて表すことも可能だと考えられる⁴⁾。ただし、このような付着特性を考えた場合、得られる値は、特性を評価した系と同一(または類似)の現象が支配因子となっている操作にしか適用できないことになる。よって、付着特性を用いる際には、対象とする操作(=目的)に応じて適切な特性、すなわち、特徴の表し方を用いることが重要となる。この点は、「粒子の大きさの表し方」(2014年7~10月号)や「粒子径分布の表し方」(2014年11~12月号)で述べている

「粒子径および粒子径分布についていずれも定義がいろいろあり、その定義によって同じ粒子、粉体を表しても異なる値となるので、“目的に応じて適切な表現を用いる”ことが重要となる」ということと同じである。

3. おわりに

途中、付着については付着量の話など少し脱線をしたが、全体としては、ここまで、粒子、および、その集合体である粉体の特徴の表し方について記述してきた。具体例は引用文献1)をご参照いただきたいが、粉体の特徴には本稿で紹介した以外に多くの特徴があり、その特徴を定量化する物性、特性、指標も多数ある。一方、本稿の読者の興味の対象であろう実粉体プロセスでの操作について考える際に重要なこととして、増田⁵⁾は操作結果と相関する粉体物性の把握を挙げており、このような粉体物性を粉体の特徴を表す物性と区別する意味で「粉体操作物性」と称している。この“粉体操作物性を把握すること”は、本稿の言い方では“目的に応じて適切な表現を用いる”となり、工学で重要な操作の予測・設計のためには、対象とする操作の結果と相関が得られる物性を選ぶ(場合によっては探す、定義する)必要があることを指している。

粉体操作物性、すなわち、対象操作の結果と相関がある物性、特性は、対象とする操作中での粉体挙動を反映した値、あるいは、その挙動の支配因子を定量化した値となるはずである。よって、粉体操作物性を把握するためには、まずは、操作内の粉体の複雑な挙動を単一の現象として適切に区分・整理することが必要であると考えられる。そこで次回より、操作内の粉体の複雑な挙動を適切に区分・整理するという観点で、粉体単位操作の考え方について記述したいと思う。

引用文献

- 1) 粉体工学会編: “粉体工学ハンドブック”, pp. 67-68, 朝倉書店(2014) ISBN 978-4-254-25267-5
- 2) C. Henry, J.P. Minier: “Progress in particle resuspension from rough surfaces by turbulent flows”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 45, p. 1-53 (2014)
- 3) 松坂修二、神村正憲、増田弘昭: “気流による粒子再飛散および遠心分離に基づく粒子一壁間付着力の解析”, 化学工学論文集, 23, 4, p. 561-568 (1997)
- 4) 増田弘昭、後藤邦彰: “乾式分散機の性能評価”, 粉体工学会誌, 30, p. 703-708 (1993)
- 5) 増田弘昭: “フィーダーの動特性とトラブル”, 粉体と工業, p. 40-48 (1982)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章-2

粉体単位操作の考え方-1

岡山大学大学院 後藤 邦彰
Kuniaki GOTOH

1. はじめに

化学工学の分野では、プロセスを“単位操作 (Unit Operation)”を組み合わせたものとして考える。この単位操作はそれぞれ、温度を高くするとか、混ぜるとか、分けるなど目的があり、単一の目的を持った操作である。簡単にいえば、化学の実験の手順書にある、加熱とか攪拌とか分離とかの各操作のことである。この単一の目的を持った操作を、化学実験の手順の通りにつなげていったものが、化学実験で得られた生成物を生産するプロセスとなる。一般には化学実験の手順通りにプロセスを組んでも生産システムとしては無駄が多いので、熱エネルギーの回収や未反応物の再利用などの操作を追加してプロセスを最適化するとところまで含めて化学工学の分野になる。

化学工学の教科書では気体と液体を扱った操作が多く、たくさんの微小な固体、すなわち、粉体を扱う単位操作は、多くの化学工学の教科書では1つの章にぎっくりとまとめられている程度である。このため、粉体操作に関する成書、すなわち、粉体工学として粉体を扱う単位操作（粉体単位操作）を紹介、説明した成書が多く出版されている。これまでと同様、ここでは各種の粉体単位操作の詳細については、それらの成書をご参考にさせていただくこととして、粉体を扱う操作、装置の考え方、特に粉体を扱うことからくる難しさについて考えてみたいと思う。

2. 粉体単位操作について考えてみる

化学プロセス全般を対象としている化学工学の教科書では、主に、液体、気体状態の物質を取り扱っている。それらを扱う操作として、流動、伝熱、蒸留、吸収、抽出、（主に液体の）混合・攪拌といった操作が挙げられている。これらを見ると、扱われている物質の移動、熱の伝播、相変化、拡散など、それぞれの操作内での物質の

（原子・分子としての）挙動、すなわち、現象が異なる。別の言い方をすると、操作の目的ごとに利用している物質の挙動、現象が異なる。これに対し、粉体単位操作は、単位操作という考え方に基づき分類していくと、同じ原理の操作や類似した対象物の挙動の操作が、操作目的が異なることから別の操作として分類されることがある。例えば、粉体をその大きさにより分ける操作を考える。大きさにより分ける操作を、図-10.1に矢印Aで示したように、対象とする粉体の粒子径分布の範囲内に分ける粒子径、いわゆるカット径を設定すると、その操作は「分級」と呼ばれる。このカット径を対象とする粒子径分布範囲よりも小さい粒子径（矢印B）に設定し、フィルターなどによりカット径以上の粒子を捕集できる装置として、分かれた粉体を対象とすると、気相中では「集じん」と呼ばれる。一方、フィルターを利用して液相で粒子を捕集すると「ろ過」と呼ばれる。また、分かれたあとの媒体を対象にした場合には「空気清浄」や「水処理」となる。

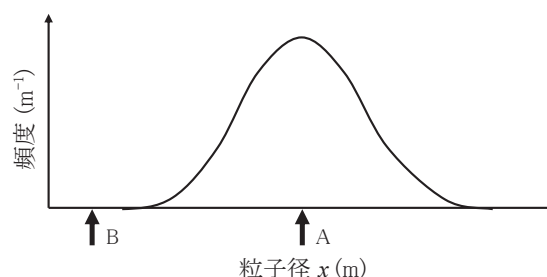


図-10.1 対象粉体の粒子径分布とカット径設定

別の例で、複数の一次粒子は付着した状態、すなわち、凝集粒子を一次粒子の状態に戻す操作、分散操作を考える。凝集粒子は一般に粒子間の付着力によりくっついているので、凝集粒子に衝撃力などの分離力を作用させる必要がある。この分離力が付着力を超えると、凝集粒子から一次粒子が分離される、すなわち、分散する。例えば、加えた衝撃力が、一次粒子の機械的強度を超えると、凝集粒子は分散するかもしれないが、一次粒子の

破壊も起きる。別の言い方をすると、凝集粒子を構成する一次粒子が壊れず、付着力を超える外力を分離力として作用させると分散操作となり、一次粒子が壊れると粉碎操作となる。よって、一次粒子の強度が高い凝集体を、その一次粒子を壊すことができない程度の性能を持つ粉碎装置に投入すると、分散装置として機能する可能性がある。このことから、分散装置と粉碎装置は粒子に外力を加えるという点では類似しており、分散操作となるか粉碎操作となるかは、加えることができる外力と対象粉体の性質で決まると考えた方が良いと考えられる。

また、凝集粒子を粒子径の異なる2つの粒子から構成されていると考え（図-10.2）、そのうちひとつの粒子の粒子径を無限大と考えると、その状況は粒子1つが平板に付着した状態と同じになる。よって、凝集粒子を分散する操作中の粒子挙動や現象は、壁面上に付着した粒子を分離する操作中の挙動、現象と類似していると考えられる（図-10.3）。

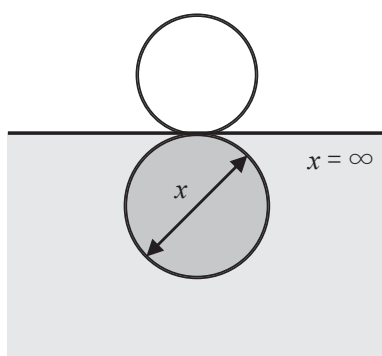
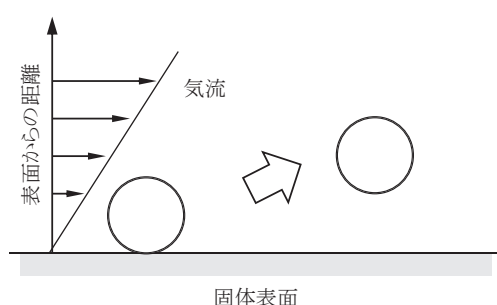
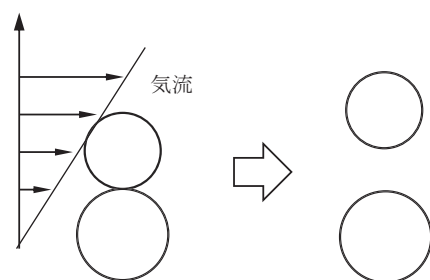


図-10.2 二粒子で構成される凝集体と平板に付着した粒子



a) 気流による粒子層からの粒子飛散の模式図



b) 気流による凝集粒子の分散の模式図

図-10.3 気流による付着粒子の飛散と分散の概念図

例えば、気流により壁面上に付着した粒子が分離する現象は、付着粒子の飛散現象（または、気流中に浮遊していた粒子が壁面に付着し、再度、浮遊する、ということで再飛散現象）と呼ばれ、低濃度粉体の配管内空気輸送の問題として検討されている。先の類似性に基づく、その飛散現象の知見は、気流により生じる分離力により凝集粒子を分散する分散操作に活用できると予想される。前号にも記しているが、実際に、気流により粒子層から粒子が飛散をし始める最低気流流速を実験的に求めることで粒子の付着特性を評価すると、気流により凝集粒子を分散させる分散装置の分散性能と相関のある値、すなわち、気流による分散のし易さを表す指標となる¹⁾。

3. おわりに

今回いくつか例示したように、粉体単位操作では操作の目的としては異なるが、粉体粒子の挙動は類似しているのがいくつかある。このことをポジティブに捉え、粉体単位操作や装置・機器では、それらをプロセスにおいて必要とされる目的を達成するための操作、装置と考えるのではなく、「粉体を必要とされる状態に変化させる」操作、装置と考えると、目的ごとに分類された成書の記述では別の章や節で記述されている知見を、自分が対象とする操作、装置に活用できる、と考えられる。

一方で、似たものが別に記述されると、粒子や、その集合体である粉体が装置内でどのように挙動しているのかがわかりにくく、そのためそれぞれの操作・装置の効率や性能に対し、粒子物性や粉体特性がどう関わってくるかがわかりにくいのではないかと考えている。そこで次回は、粒子挙動、粉体挙動をもとにして単位操作を考えてみたい。

引用文献

- 1) 増田弘昭、後藤邦彰：“乾式分散機の性能評価”、粉体工学会誌、30、p. 703-708 (1993)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章-2

粉体単位操作の考え方-2

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

前回、粉体単位操作の分類について考えてみた。単位操作を目的別で分類していくと粒子や粒子群(=粉体)の挙動による分類と一致していないところがあり、それが粉体の操作、装置の効率や性能と、粉体物性、粒子特性との関係をわかりにくくしている要因の一つではないか、ということを述べた。そこで、今回は粒子や粒子群の挙動をもとにして、単位操作を考えてみる。

2. 単位操作を粉体挙動から考える

ここでいきなり粒子集合体、すなわち、粉体として操作する単位操作を考えるとたいへんなので、前回と同じように、単一粒子の挙動として考えることのできる粒子をその大きさにより分ける操作を例として考えてみる。

簡単のために大・小の2粒子を考え、これを分けることを考える。2つのものを“分ける”ためには、それぞれの位置を変える、すなわち、初期に同じ位置にある2つのものを別の位置に動かす操作が必要となる。その動かす操作での大・小それぞれの粒子の動かし方を考えると、図-11.1(a)、別の方向に動かす(図-11.1(b))ことがまず考えられる。粒子を特定の方向に動かすためには、外力を作用させる必要がある。外力には重力や遠心力、電界中で生じるクーロン力などが利用できる。例えば、水処理に用いられるシックナーは重力を外力とし、装置目的(=清浄な媒体を得る)からカット径を媒体に含まれる最小粒子径以下に設定した装置であると考えられる。また、サイクロンは、外力方向と直交方向に粒子を移動させる、すなわち、粒子を同伴する流体運動中で遠心力を作用させる装置である、と考えることができる。これらはいずれも、粒子挙動は図-11.1(a)

と考えられる。しかし、サイクロンは粒子を含んだ気流から粒子を除く目的で用いられる場合は多く、「集じん装置」に分類されることが多い。外力とは少し異なるが、移動している物体は慣性力を持っているのでその運動方向を変えようとしたときに図-11.1(a)に示すような挙動を起こす力として利用できる。例えば、図-11.2(a)に示すように、一方向に流体(一般には気流)により移動してきた粒子を、移動方向と直交方向に曲げるような装置とすると、慣性力の大きい粒子は気流方向変化に追従できず、図中下側への移動、すなわち、気流からのズレが大きく、図中下側の粗粒側ノズルに流入する。一方、慣性力の小さい粒子は気流からのズレが小さく、図中右側の微粒側ノズルより流出するので、粒子を大きさごとに分けることができる。このように粒子をその大きさによって分ける操作は「分級」と呼ばれる。

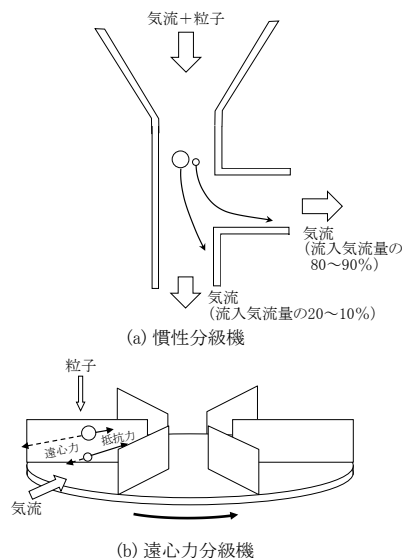


図-11.2 異なる分級機構の分級部概略図

重力や遠心力などの外力1と対向する方向に粒子を同伴する媒体を移動させると、媒体からの抵抗力が外力1と反対方向に外力2として作用し、図-11.1(b)に示す状況となる。例えば、図-11.2(a)に示すように、粒子を同伴する媒体ごと円盤により回転させ、粒子を円運動させることで遠心力を作用させ、円盤の外側から内側にむけて媒体を流すと、遠心力と流体抗力が対抗した状態になり、大きな粒子は遠心力により円盤の外側に排出

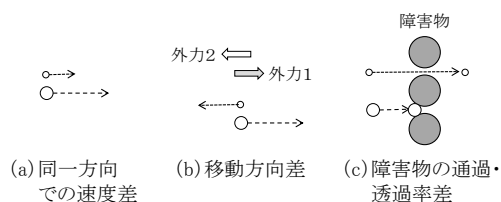


図-11.1 大小2粒子の基本的分離挙動

され、小さい粒子は媒体の流動に伴って円盤の内側に流入する。この形式の分級機が遠心分級機である。これら図-11.2(a)、(b)の形式の分級機は、いずれも外力と流体抗力の作用により決まる粒子運動の違いで大・小の粒子を分ける。このため、運動を決める粒子特性、すなわち、粒子径、粒子密度が操作の結果に影響する。ここで粒子径は流体中の運動を代表する径であるストークス径（入門予習編-6参照）など流体抵抗径を用いるべきである。

前述の外力による粒子運動の違いに基づく分級のほか、一方は通り抜け、他方は抜けない障害物を設置して、一方をその場に止め、他方のみを移動させる（図-11.1(c)）ことでも粒子を分けることができる。その障害物表面間の距離よりも大きな粒子を捕捉して障害物上に止め、より小さな粒子を透過させる形式の分級のひとつがふるい分けである。ふるい分けでは障害物物体間の距離と関連する粒子の大きさなので、ストークス径ではなく、画像処理で求められるような幾何学的長さに基づく粒子径と粒子形状が分級に関与すると考えられる。しかし、ふるい網近傍での粒子の運動は複雑で、非球形粒子の場合、幾何学的長さと形状が複雑に関与してふるい網に捕捉されるか否かが決まるので、ふるい網の目開きをもとにしたふるい径が定義されている。また、ふるい分けでは粒子と他物体が接触することになるので、付着性（入門の予習編第2章-1 粒子・粉体の特徴の表し方-6参照）も効率や性能に影響する。障害物を繊維群としたものがフィルターで、粒子を気体に同伴させ、すべての粒子を捕捉することを目的とすると集じん装置となる。また、同じ目的で媒体を液体とするとろ過となる。フィルターでは、捕集する粒子の大きさやフィルターの構造によりいくつかの捕捉機構がある。このため、粒子の拡散係数や慣性力に関連するストークス径や粒子密度のほか、付着性も操作の効率、性能に関与する。

ここで慣性分級機の例に話を戻す。図-11.3が、図-11.2(a)の分級機構をもとに分級装置とした例¹⁾である。この例では分級性能向上のためクリーンエアを導入しているため多少構造が複雑になっているが、前述の分ける操作として記述した粒子の挙動は、図中に破線の円で示した「分級部」

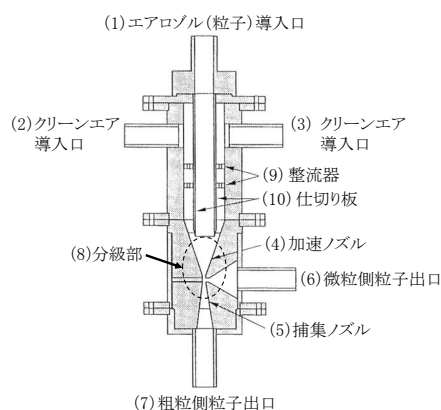


図-11.3 慣性分級装置の構造例¹⁾

での粒子挙動である。「装置」としてみると、装置への粒子導入部(1)から分級部までは、(10)仕切り板間の流路を粒子が気流に伴って移動する。その移動中に粒子はブラウン拡散や乱流拡散により凝集する可能性がある。また、仕切り板に付着し、粒子層を形成後、凝集粒子として再飛散する可能性もある。小さな粒子で構成された凝集粒子は粗粒子として捕集されるので、分級機の性能を低下させる。よって、「装置としての性能」は、分級部の分級効率だけでなく、導入部から分級部までの空気輸送の性能にも依存する。すなわち、装置としての性能を議論するためには、「分級」だけでなく「空気輸送」も考える必要がある。さらに、この装置を用いて粒子集合体、すなわち、粉体を分級する際には、分級機導入前に、粉体を気体中で一次粒子に分散する必要がある。また、分級後の粒子はフィルターなどで捕集する必要がある。これら一連の分級操作の効率、性能を、供給する粉体の粒子径分布と、フィルターに捕集された粒子の粒子径分布で評価すると、その性能には前述の分級と空気輸送の性能、効率と、分散の性能、捕集の性能も含まれることになる。

3. おわりに

今回は、粒子を分ける操作を例として、粒子挙動をもとに単位操作を考えてみた。例に挙げたサイクロンは集じん装置に分類されることがあるが、分級装置と同様、粒子径と粒子密度に性能、効率が依存する。一方、ふるい分けでは、分級操作であるが幾何学的な大きさや形状、付着性が性能、効率に関与する。このように挙動から考えてみると操作と粒子物性、特性との関連が整理できると考えている。また、目的別の分類では、その目的に関与した操作の説明が中心となり、その操作結果だけで装置性能、効率が決まるように思われるが、粒子挙動別に分類すると単体の装置の中に複数の操作(=粒子挙動)が含まれる場合があることがわかり、複数操作それぞれの性能、効率を考慮して操作結果を考える必要があることがわかる。次回は別の例として分散操作を例にとり、粉体単位操作を考えてみる。

引用文献

- 1) 増田弘昭、安木英二、川口哲司：“矩形ジェット・バーチャルインパクターの分級性能”、化学工学論文集、10、p. 561-567 (1984)



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL: 086-251-8084 FAX: 086-251-8085
E-mail: gotoh@cc.okayama-u.ac.jp

技術者のための粉体入門講座

入門の予習編 第2章－2

粉体単位操作の考え方－3

岡山大学大学院 後藤 邦彰

Kuniaki GOTOH

1. はじめに

今回は、粒子を分ける操作を例として、粒子挙動をもとに単位操作を考えてみた。その中で、分けるための基本的な粒子挙動から装置構造を考え、粉体単位操作と操作機器の関係を説明した。この考え方は、新しい装置を考案する際に便利な考え方であると思っている。一方、本稿の読者は操作機器を設計・製作するよりも、多くの場合、購入した粉体機器のユーザーで、その機器での操作結果を改善したいと考えているのではないかと想像している。そこで、今回は粉体単位操作を粉体粒子の挙動に分けていく方向で考えてみる。

2. 粉体単位操作を粉体粒子の挙動に分けてみる

今回は例として、分散操作を考えてみる。分散操作は、粒子生成後にその分散状態の安定化を目的とした「ビルドアップ法的な分散系調整」と、凝集粒子を一次粒子として分離（分散）することを目的とした「ブレイクダウン法的な分散系調整」に分けられる¹⁾が、ここではブレイクダウン法的な分散を対象として分散装置内での粒子の挙動を考えてみる。この操作では、図-12.1に示すように、凝集粒子を、それを構成する一次粒子に分離するために、外力として分離力を加える（第10巻12号「粉体単位操作の考え方－1」を参照）。加えられた分離力が付着力を超えると、凝集粒子から一次粒子は分離される。分離された直後の一次粒子は、まだ装置内であり、周辺には他の粒子が存

在するので、例えば媒体のブラウン運動や乱流の渦運動により一次粒子は移動し、近隣の粒子と接触する可能性がある。すなわち、分散装置の中で凝集する可能性がある。そのため、液体中での分散操作では、再凝集を防ぐために、液体に分散剤を添加するなどする場合が多い。この分散装置内の粒子挙動を、装置内での経時変化として表した図が図-12.2である。この図では分散状態の評価指標として個数濃度のように、大きな値が良く分散した状態を表す指標を想定している。凝集粒子が分散装置に投入されると分離力が働き、凝集粒子は分離される。このため分散状態は良くなる。この状態で理想的に分散状態を安定化させることができる。しかし、分散すると個数濃度が増加するため装置内での移動に伴う近隣粒子との衝突確率が大きくなり、再凝集が始まって、分散状態が悪化していく。すなわち、凝集粒子径が大きくなると、一般に分離力も大きくなり、再凝集した凝集粒子は分離される。このように装置内では凝集粒子の分離と分散が繰り返され、やがて分散場での平衡状態に達すると考えられる。前述のように、液体中の分散操作では分散剤の添加などにより、気体中では装置外部へ早期に排出し、外部気体と混合することで個数濃度を下げるなどして衝突確率を減少させ、平衡状態よりも良い分散状態の粒子を得ることができる。このように操作中での粒子挙動を分けると、操作の改善のためには、凝集粒子の分離に有効な分離力の作用のさ

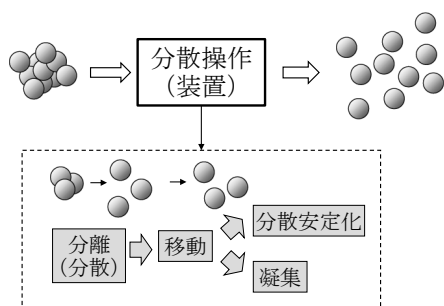


図-12.1 凝集粒子の分散操作中での粒子挙動

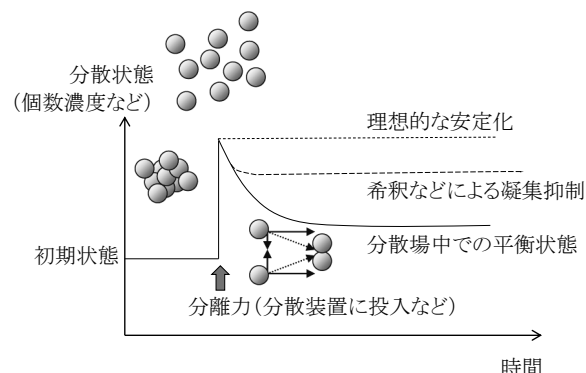


図-12.2 凝集粒子分散操作中での粒子状態の経時変化

せ方と、分離後の有効な分散安定化方法を検討する必要があることがわかる。

また、操作に関与する粒子特性、粉体物性に着目すると、分離には粒子間相互作用（この場合は付着力）の大きさと外力の作用のし易さを決める特性、物性が関与し、分散安定化には衝突確率に影響する移動のし易さを決める特性、物性（粒子拡散係数など）と近隣粒子に近接した際の粒子間相互作用（この場合は反発力）の大きさを決める特性、物性が関与すると考えられる。これらの中で、分離については「粒子・粉体の特徴とその表し方-9（10巻11号）」に記したように、付着力と分離力のそれぞれを見積って分離の可否を推定することは困難であるので、付着性を表す指標を用いることが有効であろう。このように、操作に関与する粒子特性、粉体物性や指標がある程度でも特定できると、その操作改善のための粒子設計や添加剤の選定の指標が得られると考えられる。

3. 第2章のおわりとして —粉体単位操作に対する雑感

例えば、管内の液体輸送や攪拌・混合といった液体を扱う操作の場合、教科書では液体粘度がせん断速度によらず一定の、ニュートン流体を基本として記述されている。ニュートン流体の場合、せん断速度とせん断応力の関係が簡単な一次関数で表されるので、層流の場合の管内流れなどは理論的に速度分布を求めることができる。乱流については理論的には解かれていないが、多くの実験結果があり、それをもとにした経験則が多く提案されている。また、気体も含めて、連続体を仮定した力学的解析もなされている。この連続体が仮定できることは解析としては非常に便利である。解析により得られた式を無次元化することによりスケールアップやスケールダウンにも利用できる“設計式”、すなわち、物性と代表的な長さから結果を予測できる式が提案できる。また、管内の流れのような運動量移動と、物質移動、熱移動との間にアナロジー（＝類似性）が成立することも、推定を含む設計式の確立に大きく寄与している。ニュートン流体に関してはこれらのように多くの知見、推定式、設計式があるが、例えば高分子溶液のようにせん断速度により粘度が変化する非ニュートン流体では挙動の推定が難しく、実際の装置内では、混ざっているのに混ざらない、容器の下部に高濃度液が溜まる、さらには、装置への供給、排出といった装置本来の目的達成のための操作の前段階、後段階でトラブルが起きる。この非ニュートン流体の問題は、粉体の流動問題と類似している。さらに粉体単位操作の場合、設計式自体が確立されていないものが多いので、挙動が推定通りにいかないという問題よりも、推定自体を

どうするか、が問題であるともいえる。

そこで、本稿では操作の中身（＝挙動・現象）に着目してあらためて粉体単位操作を考えてみた。「粉体単位操作の考え方-1」に記したように、単位操作という考え方を基本としている化学工学の教科書では、流動、伝熱、蒸留などの操作が挙げられており、それぞれの操作では、扱われている物質の移動、熱の伝播、相変化など操作内での物質の（原子・分子としての）挙動、すなわち、現象が異なっている。別の言い方をすると、操作の目的ごとに利用している物質の挙動、現象が異なり、だいたいの場合には、ひとつの操作に主要現象がひとつである。これに対し、粉体単位操作は、前回と今回で例示したように、ひとつの操作の中に複数の粉体粒子挙動が含まれており、このため、操作の目的としては異なるが、粉体粒子の挙動は類似している操作がいくつかある。別の言い方をすると、粉体粒子のひとつの挙動が複数の操作に関与する。このことが、目的に着目して検討される粉体単位操作の理解を難しくしている要因であると考えられる。

一方で、「粉体粒子の挙動は複数の操作に関与する」ことをポジティブに捉え、また、粉体単位操作や装置・機器を「製造プロセスにおいて必要とされる目的を達成するための操作・装置」と考えるのではなく、「必要とされる状態に粉体粒子を変化させるために“力”を作用させる操作、装置」と考えると、目的ごとに分類された成書の記述において別の章や節で記述されている知見を、自分が対象とする操作や装置機器に活用できると考えられる。すなわち、粉体操作について何かを知りたい、解決したいと思った時には、目次で対象とする操作の部分を探して粉体工学の成書の一部を読むのではなく、まずは自分が対象とする操作の中で粉体粒子に何が起きうるのかを想像したうえで、全体を通して読んでみると、その成書から有用な知見が得られる場合がある、と考えられる。粉体でお困りの方には、一部をつまみ食いするのではなく、ぜひ粉体工学全体を勉強してみたいと考えている。

引用文献

- 1) 東谷公：“水溶液中の凝集粒子の分散と付着力の工学的基礎”、粉体工学会誌、49、p. 434-447（2012）



ごとう くにあき
後藤 邦彰
岡山大学大学院 自然科学研究科
教授

〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
TEL：086-251-8084 FAX：086-251-8085
E-mail：gotoh@cc.okayama-u.ac.jp