

1. 粉体工学の概要

1. 1 粉粒体とは

細分化された固体粒子を**粉体**あるいは**粉粒体(powder)**という。身のまわりにはたくさんの粉体・粉粒体がある。砂、小麦粉、米、インスタントコーヒー、医薬品、花火などはいずれも固体であるが、粉体の場合はとりわけ表面の性状が重要となる。加えて粉体は、一般の固体とは異なり、流体のようにサラサラと流れやすく成形加工しやすいという性質をもつ。また、大きな比表面積を有するので、反応や溶解の速度が大きい。粉体は、固体粒子の集合体からなるので、その物理化学的性質は、個々の粒子性状によって変化する。すべての粒子が一樣に同じ寸法かつ球状であればプラント操作しやすいし、正確な物性値を用いて計算できる。しかし、実際には多かれ少なかれ寸法や形状にバラツキがある。固体が関わると途端にプラント操作が難しくなるのは、このためである。気体や液体は均一に混ぜることができるが、固体は現状のバラツキ度合いを均一にする所までしか混ざらない。計算に必要な粒子径なども平均の値を用いるので、そこからはみ出る寸法の粒子に対しては、計算値からは幾分外れることになる。ふるいである程度粒子寸法をそろえることはできるが、形状までそろえることはできない。同じ寸法でも、球状に近いものの方が流れやすく、供給・輸送しやすい。そのほか、粉体排出口での目詰まりや粉体が流れることで粒子性状が場所によって変化するなど(偏析)、粉体ならではの取り扱いの難しさがある。

粉体の定性的な定義について、次のようにまとめることができる。①細分化された固体粒子、②性質のちらばりをもつ固体粒子群、③表面特性が支配的となる固体粒子。

1. 2 粉体と粒体

粉粒体のうち、粒子の大きさが小さいものを**粉体**、大きいものを**粒体**という。区別することなく、たんに**粉体**と呼ぶことも多い。「粉」と「粒」の境界は、どこだろうか。我々の感覚からすれば、たとえば米粒は「粒」であり、小麦粉は「粉」である。何ミクロンからという厳密な境界寸法は存在しないが、粉体特有の**付着性**に着目した例として**平衡粒子径**がある。いま、一樣に球状の粉粒体を水平な台の上に山盛りに乗せる。そこにガラス板を押し当ててそっと引き上げると、ガラス板に付着する粒子もあれば、落下する粒子もある。前者が粉体、後者が粒体となる。両者がつり合うところでは、粒子の自重 W [N] と付着力 F [N] が等しくなっている。付着力は、**分子間力**、**液架橋力**、**静電気力**からなり、それぞれ分けて考える必要があるが、ここではひとまとめにして、付着力は粒子径の一乗に比例するものと仮定する。平衡粒子径 D_{eq} は、次式のように導かれる。

$$W = F \quad \cdots(1.2.1)$$

$$\left(\frac{\pi}{6}\right)\rho_p D_{eq}^3 g = k D_{eq} \quad \cdots(1.2.2)$$

$$\boxed{D_{eq} = \sqrt{\frac{6k}{\pi\rho_p g}}} \quad \cdots(1.2.3)$$

上式より、工学的には、粒子の種類や性質(ρ_p と k)によって粉と粒の境界粒径が変化することが分かる。

平衡粒子径 D_{eq} は、 $30\ \mu\text{m}$ 程度であることが知られている。なお、この値は、ファンデーションに含まれる微粉体や食品中の砂糖結晶粒など、人が感じることでできる下限の粒子径としても知られている。($30\ \mu\text{m}$ 以下に調製しないと、ザラザラとした触感が出てきて望ましくない。) そのほか、連続粉砕とふるい分けの下限である $3\ \mu\text{m}$ 以下を境に微粉体あるいは微粒子(**fine particle, fine powder**)と呼ぶこともある。

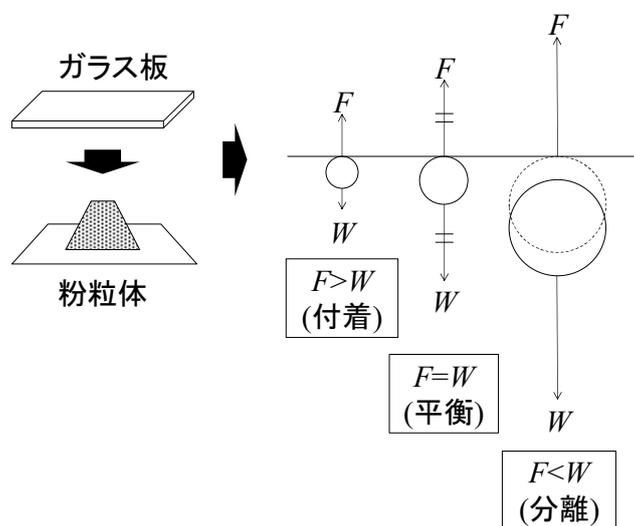


図 1.2.1 平衡粒子径の概念 [文献 1]

【計算例】平衡粒子径

粒子密度 $2.65\ \text{g/cm}^3$ の球粒子に対する平衡粒子径 D_{eq} [μm] を求めよ。ただし、粒子の付着力は粒子径の 1 乗に比例し(比例定数 $2.34 \times 10^{-5}\ \text{kg/s}^2$)、重力加速度 $9.81\ \text{m/s}^2$ とする。($30.0\ \mu\text{m}$)

$$D_{eq} = (k/\rho_p g)^{0.5} = [(2.34 \times 10^{-5}) / \{(2.65 \times 10^{-3})(9.81)\}]^{0.5} = 3.0002 \times 10^{-5}\ \text{m} \doteq \boxed{30.0\ \mu\text{m}}$$

1. 3 代表的な粉体産業

粉体プロセスが用いられている産業の例として、古くから**鉱業(mining)**や**窯業(ようぎょう, ceramics industry)**などがある。鉱業とは、鉱山で採掘された鉱石から有用な金属を取り出す産業分野である。その技術体系は、**冶金(やきん, metallurgy)**とか**金属製錬(extractive metallurgy)**と呼ばれる。化学工学的には、機械的単位操作の**固固分離(solid-solid separation)**に相当する。有用な金属が含まれる岩石を**鉱石(ore)**といい、それは、目的成分の**金属鉱物(mineral)**と不純物成分の**脈石(gangue)**の混合物でできている。採掘した鉱石を粉砕機にかけると、鉱石中の金属鉱物が濃縮されて次第に単成分化する。次に、密度差を利用した重量場や気泡付着による浮上や磁場を利用して、原料の**粗鉱(crude ore)**を高品位の**精鉱(concentrate)**と低品位の**尾鉱(びこう, tailing)**とに分離する。これを**選鉱(ore dressing)**という。その後は、乾燥と焙焼の各工程を経て固体抽出と晶析による**湿式精錬(hydrometallurgy)**、あるいは溶融による**乾式精錬(pyrometallurgy)**を行い、最終的に高純度の金属を回収する。 [文献 2-4]

窯業とは、陶磁器、セメント、ガラスなどの窯業製品(**セラミックス**ともいう)を製造する産業分野である。典型的な製法としては、砂や粘土などの天然鉱物(酸化物)を粉砕・ふるい分けして原料粉体を調製し、

これを適当な配合比で混合・混練して成形したものを焼成することで粉体を焼き固める。現在、化学的に合成した高純度酸化物や非酸化物(炭化物や窒化物など)も幅広く原料粉体として用いられるようになっている。こうした先端的な原料粉体を用いて製造された窯業製品を**ファインセラミックス(fine ceramics)**という【文献 5, 6】。陶芸も同じで、原土(鉱石)を砕いて粘土(鉱物)を取り出し、手やろくろで成形したものを窯(かま)で焼いて陶器を制作する。古代の土器づくりも、基本の工程は同じである。このように、粉体の良さには、流れやすさに加えて、成形加工のしやすさがある。(石ころの大きさだと、練って固めてができない。流れやすくもない。)

表 1.3.1 粉粒体の産業利用例【文献 7】

産業分野	関連粉体の例
鉱業・鉄鋼	鉄鉱石、石灰石、ボーキサイト、硫化鉱、酸化鉱
窯業(ようぎょう)	ケイ砂、アルミナ、マグネシア、ガラスビーズ
農業	種子、土壌、農薬、肥料
食品	米、でんぷん、小麦粉、砂糖、食塩
化粧品	タルク、マイカ、シリカ、酸化チタン
医薬品	原薬、顆粒剤、錠剤、散剤、丸剤
化学	無機薬品、有機薬品、高分子、触媒、色材
電子材料	酸化鉄、チタン酸バリウム、フェライト、金属粉
製紙・印刷	炭酸カルシウム、充填剤、パルプ、インキ
塗料	粉体塗料、顔料、トナー、マイクロカプセル
電力	フライアッシュ、ペレット
建設	骨材、砕石、砂、セメント
その他	花火(火薬)、花粉、黄砂、ウイルス

表 1.3.2 粉粒体単位操作の例【文献 8】

単位操作	方法
粉碎	固体を細分化して粒子を生成する。
晶析	反応や蒸発などにより粒子を生成する。
造粒	粒子同士を結合させて大粒径の粒子を生成する。
分級・ふるい分け	粒子径差や密度差により粒子を分離する。
集塵(しゅうじん)	さえぎりを用いて気相と粒子を分離する。
ろ過	さえぎりを用いて液相と粒子を分離する。
沈降分離	密度差により液相と粒子を分離する。
乾燥	物質移動により粉体の含水率を下げる。
固体混合・攪拌	異なる種類の乾燥粉体同士を均一にする。
混練・捏和(ねっか)	粒子に結合剤をコーティングして練り混ぜる。
成形	粒子同士を固めて形を作る。
焼結	成形したものを熱処理して焼き固める。
貯蔵	粉体を安定的に保管する。
供給	粉体を装置へ定量的に送り出す。
固体輸送	空気やコンベアを用いて粉体を運搬する。

1. 4 粉体工学の体系

粉体工学あるいは粉粒体工学(powder technology)の体系は、①粉体の物理化学的・静力学的性質を扱う「粉体物性論」、②流体中における粉体の動力学的性質を扱う「粉体運動論」、③粉碎、ふるい分け、混

合、焼結などの粉体処理を扱う「粉体単位操作論」で構成される【文献9】。粉体工学といえば、移動現象論や反応工学と並んで、化学工学に含まれる一分野という認識が強いかもしれない。しかし、三輪の「粉粒体工学」(1972年刊行)の解説【文献9】や、初期の成書であるJ.M. DallaValleの「Micromeritics(マイクロメリティクス)」(1948年刊行)の目次【文献10】からも読み取れるように、もともとは粉体物性論と粉体運動論が主軸の体系に据えられており、それ自身独立した学問であることがうかがえる。その後の発展過程で、粉体工学は、化学工学の「機械的単位操作」を取り入れるとともに、選鉱や焼結など古典的な粉体単位操作を加えて三つ目の軸である「粉体単位操作論」を確立した。したがって、従来からあった物性論と運動論が基礎編、単位操作論がそれらの応用編、という位置づけになる。

参考文献

- [1] 神保元二; 粉体の科学, 講談社ブルーバックス(1985), 1章
- [2] B.A. Wills & J.A. Finch; Mineral processing technology 8th Ed., Butterworth-Heinemann(2016), Chapter 1
- [3] 阿座上竹四, 栗倉泰弘; 金属精錬工学(金属化学入門シリーズ 3), 日本金属学会(1999), 2-4章
- [4] 文部科学省編; 高等学校用 材料製造技術, 実教出版(2005), 2章3節
- [5] 塩川二郎; 無機工業化学 第2版, 化学同人(1993), 10章
- [6] 文部科学省編; 高等学校用 セラミック工業, 実教出版(2003), 序章
- [7] 粉体工学会, 日本粉体工業技術協会編; 粉体物性図説, 日経技術図書(1985), p.6
- [8] 内藤牧男, 牧野尚美; 初歩から学ぶ粉体技術. 森北出版(2011), 1.3章
- [9] 三輪茂雄; 粉粒体工学, 朝倉書店(1972), 1章
- [10] J.M. DallaValle; Micromeritics 2nd Ed., Pitman Pub. Co.(1948)