

モダン
エンジニアリング
ライブラリー

© 301

日本技術士会 監修

粉体技術

技術士 前田 勇 著



地人書館

71.2
378

モダン
エンジニアリング
ライブラリー
C301

日本技術士会 監修

粉 体 技 術

技術士 前田 勇 著



前田

勇

略歴

一九二七年 愛知に生まれる

一九五三年 東京工業大学化学工学科卒業

現在 住友機械工業(株)勤務

専攻 粉体処理技術

技術士登録 一九六三年 No. 一四〇二

モダンエンジニアリングライブラリー

C 301

粉体技術

定価 ¥ 500

© 昭和44年2月15日 初版発行



| | | |
|-----|----------|--------|
| 監修 | 社団法人 | 日本技術士会 |
| 著者 | 技術士 | 前田 勇 |
| 発行者 | 株式会社 | 地人書館 |
| | 代表者 | 上條 勇 |
| 印刷 | 株式会社 | 祥文堂印刷所 |
| 製本 | 富士製本株式会社 | |

発行所 〒 162 東京都新宿区牛込中町 15

株式会社 地人書館
 電話 (260) 7161 ~ 3
 振替 東京 1532番

序 文

粉体に関する書物は最近数多く出版され、粉体技術の向上に大いに役立っていることは、誠に喜ばしい限りである。しかしてこれら既刊の図書は理論を主体とした内容で記述されているものが多いようである。

したがって、本書では、理論的な面を極力さげ、著者が実務を通じて経験した具体例について、なるべくわかりやすく解説をこころみた、いわば粉体技術の入門書とでもいうべきものである。

また本書は、内容的には、かつて数回にわたって執筆した粉体処理技術の連続講座を中心に、これに加筆、増補を行なったものである。

粉体技術には、本書であれていない粉碎、混合、乾燥、伝熱、流動層反応など各種多方面にわたって広く、かつ深いものがある。本書からさらに進んで、粉体技術の詳細および理論を勉強される方の手引として、代表的な数種の図書、文献を巻末にかかげておいたので、必要に応じ参照されたい。

本書が、新しく粉体を取扱われる人々の一助ともなれば、粉体処理に長年従事してきた著者にとって、これにすぎる喜びはない。

1969.1

前 田 勇

42379

目次

1 粉体技術の基礎

| | |
|-----------------------------|----|
| 1.1 近代工業と粉体技術 | 1 |
| 1.2 粉体の基本問題 | 2 |
| 1.2.1 粉体の利点 | 2 |
| 1.2.2 粉体の特性 | 2 |
| 1.2.3 粉体工学から見た現象の分類 | 3 |
| 1.2.4 粉体処理にあたり調査すべき事項 | 4 |
| 1.3 粒度測定法 | 5 |
| 1.3.1 粒度測定法の種類 | 5 |
| 1.3.2 粉体の試料採取(サンプリング) | 6 |
| 1.3.3 粉体の比重測定法 | 7 |
| 1.3.4 フルイ分法 | 9 |
| 1.3.5 気体沈降法 | 11 |
| 1.3.6 液体沈降法 | 14 |
| 1.3.7 顕微鏡法 | 21 |
| 1.3.8 流体透過法(比表面積法) | 21 |
| 1.3.9 その他 | 21 |
| 1.3.10 粒度表示法 | 21 |

2 乾式分級装置

| | |
|-----------------------|----|
| 2.1 乾式分級器の種類と適用 | 25 |
| 2.1.1 自然沈降式分級器 | 25 |
| 2.1.2 慣性式分級器 | 25 |
| 2.1.3 遠心式分級器 | 26 |

| | | |
|-------|-----------------|----|
| 2.2 | 乾式遠心分級の理論と設計 | 29 |
| 2.2.1 | 分級限界粒子径の求め方 | 29 |
| 2.2.2 | 基本設計計算例 | 31 |
| 2.3 | 複式遠心型分級器の特性と設計 | 32 |
| 2.3.1 | 発達の歴史 | 32 |
| 2.3.2 | 形状の特徴 | 32 |
| 2.3.3 | 複式遠心型分級器の特性 | 33 |
| 2.4 | 応用実施例の解説 | 36 |
| 2.4.1 | フライ・アッシュ精製用分級装置 | 36 |
| 2.4.2 | 閉回路粉碎における分級装置 | 40 |
| 2.5 | 分級装置の選定 | 43 |
| 2.5.1 | 分級効率 | 43 |
| 2.5.2 | 処理能力 | 44 |
| 2.5.3 | 分級装置の選定法 | 45 |

3 粉体の輸送

| | | |
|-------|-----------------|----|
| 3.1 | 空気コンベヤ | 47 |
| 3.1.1 | 型式の分類 | 47 |
| 3.1.2 | 空気コンベヤの設計法 | 51 |
| 3.1.3 | 空気コンベヤの実装置上の問題点 | 54 |
| 3.2 | エア・スライド | 55 |
| 3.2.1 | エア・スライドの型式 | 55 |
| 3.2.2 | エア・スライドの設計上の問題点 | 56 |
| 3.2.3 | エア・スライドの実施例 | 58 |
| 3.3 | 流動揚送(エア・リフト) | 58 |
| 3.3.1 | エア・リフトの型式の特性 | 58 |
| 3.3.2 | エア・リフトの適用 | 60 |

4 集塵装置

| | | |
|-------|---------------|-----|
| 4.1 | ダスト・サンプリング | 63 |
| 4.1.1 | ダスト・サンプラー | 63 |
| 4.1.2 | 実際の測定操作 | 65 |
| 4.2 | 集塵装置の型式と特性 | 68 |
| 4.2.1 | 乾式集塵装置 | 68 |
| 4.2.2 | 湿式集塵装置 | 73 |
| 4.2.3 | 各種集塵装置の特性 | 78 |
| 4.3 | 各種集塵装置の設計 | 79 |
| 4.3.1 | サイクロン集塵器の設計 | 79 |
| 4.3.2 | ルーバー型集塵器の設計 | 86 |
| 4.3.3 | SGスクラパー | 91 |
| 4.3.4 | バグフィルター | 94 |
| 4.4 | 高温ガスの集塵 | 96 |
| 4.4.1 | はしがき | 96 |
| 4.4.2 | 流動焙焼炉の集塵 | 96 |
| 4.4.3 | 石灰焼成キルン排ガスの集塵 | 98 |
| 4.5 | 集塵装置の選定 | 100 |
| 4.5.1 | 粉塵の種類および特性 | 100 |
| 4.5.2 | 煤煙の排出基準 | 105 |
| 4.5.3 | 集塵装置選定の因子 | 105 |

5 エア・カーテン, フード, ダクトの設計

| | | |
|-------|-----------------|-----|
| 5.1 | エア・カーテンの設計 | 107 |
| 5.1.1 | 自由噴流の特性 | 107 |
| 5.1.2 | 噴流中へのガスおよび塵埃の浸透 | 109 |

| | | |
|-------|----------------|-----|
| 5.1.3 | 吹出口スロット | 110 |
| 5.2 | フードおよびダクト (配管) | 111 |
| 5.2.1 | フードの設計 | 111 |
| 5.2.2 | フードの入口の圧力損失 | 112 |
| 5.2.3 | フードの実際的设计例 | 114 |
| 5.2.4 | ダクト(配管) | 116 |

6 サイロの設計

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.1 | サイロの形状および寸法 | 119 |
| 6.1.1 | サイロの形状 | 119 |
| 6.1.2 | 経済的な主要寸法 | 121 |
| 6.2 | サイロの強度計算 | 122 |
| 6.2.1 | サイロ内の圧力分布 | 122 |
| 6.2.2 | サイロ円錐部の圧力分布 | 125 |
| 6.3 | 設計上必要な数値 | 126 |
| 6.3.1 | かさ密度 γ と空隙角 ϵ | 126 |
| 6.3.2 | かさ密度 γ , 息角 θ および摩擦角 θ | 128 |
| 6.4 | 鉄製サイロとコンクリートサイロ | 129 |
| 6.5 | サイロ設計上の注意事項 | 129 |
| 6.5.1 | 粉体の供給方法 | 129 |
| 6.5.2 | 粉体の排出方法 | 130 |
| 6.5.3 | アーチによる閉塞防止法 | 131 |

7 粉体の自動制御機器

| | | |
|-------|--------|-----|
| 7.1 | 粉面計 | 133 |
| 7.1.1 | 電気式粉面計 | 133 |
| 7.1.2 | 圧力式粉面計 | 136 |

| | |
|------------------------|-----|
| 7.2 粉体流量計 | 137 |
| 7.2.1 粉体用静電式流量計 | 137 |
| 7.2.2 粉粒体, 空気混相流の流量測定法 | 137 |
| 7.2.3 その他の制御機器について | 139 |
| 参考図書 | 140 |
| 索引 | 141 |

1 粉体技術の基礎

1.1 近代工業と粉体技術

近代工業の花形といわれる原子力工業，高分子化学工業，石油化学工業あるいはセメント工業，食品工業，窯業，鉱業，各種精錬業などあらゆる産業分野において，また最近環境衛生でやかましくなっている煙害や煤塵問題などには，粉体といわれる固体の微粒子群がつねに関係している．このように粉体はわれわれの日常身辺から，さらに生活の基盤となる各種産業にひろく密接な関係を保っている．

粉体を処理する技術すなわち粉体技術は，このように近代工業と密接な関係があるにもかかわらず，粉体に包含される本質的なむずかしさや複雑さのために，他の関係技術に比して遅れている．特にその連続的な取扱いは，近代工業の中にあって最大のネック（隘路）とさえいわれている．しかし，これらの粉体の複雑多岐な諸現象，性状を一つの学問体系，すなわち粉体工学を打ち立てようとする動きが，ここ数年来活発に行なわれるようになってきた．

本書では，できるだけ粉体工学の立場から，粉体の基本問題，粉体技術の基礎を述べ，粉体処理の単位操作および装置の具体例について解明し，総括として粉体処理プラントの実施例をあげ，これに関連する粉体技術の実際をできるだけわかりやすく取上げてみたい．

1.2 粉体の基本問題

1.2.1 粉体の利点

固体原料が、粉体として取扱われる主な理由は、

(A) 機械的な取扱いが便利

(i) 均一な混合が可能 異種成分を混合する場合には、成分粒子が細かいほど混合の均一度を高めることが可能。

(ii) 異種成分の分離が容易 選鉱、精練において原料中に有用成分と、不要成分が混在する場合には、有用成分が単体として分離されるまで細かくする必要がある。

(iii) 流動性 固体原料が細かければ、気体を吹き込んで流動化し、流体のようにして取扱うことができ、操作の連続化、自動制御などが容易になる。

(B) 比表面積がいちじるしく大きいことを利用できる 固体、気体または液体と接触して反応する場合には、その接触面積が重要な因子となり、単位重量あたりの全表面、すなわち比表面積が大きいほど反応速度が速い、化学反応、溶解、吸着光の散乱、粘度、熱的性質などに利用する。

1.2.2 粉体の特性

粉体は、生成過程、粒度、粒度分布、形状、粉体のおかれる周囲の状況などによっていちじるしくその性質が異なってくることがある。したがって、具体的な特定の条件の下においてのみ、その性質を述べることができる。そこで一般的な性質について、気体、液体、固体と比較すればつぎのようになる。

(i) 不連続性 気体、液体が完全な連続体であるのに対し、粉体は個々の独立した粒子の集合体であるために不連続性が顕著であって、ホッパーの閉塞、急流 (shooting)、溢沓 (flooding)、凝集 (Cofaculation) の突発などが生ずる。

(ii) 比表面積が大きい 反応速度が速い特長がある。またこれは吸湿、粘着、粉塵爆発などの現象を生ずる。

(iii) 粒子形状の不規則性 粉体の構成要素である粒子の形状と大きさが不規則であることが特長で、このために分散状態でも、充てん状態でもたんに重量や空隙率を指定しただけでは、変形、流動の状態、透過率、熱や電気の接触抵抗、物質移動係数などは変動しやすい。

(iv) 飛散性 粒子は終端速度以上の気流によって飛散するが、その速度はストークスの法則 (STOKES Law) によれば粒径の自乗に比例し、粒径が小さくなるほど急激に飛散しやすくなる。

(v) 摩耗性 摩耗性は、粉体の形状、粒径、粒度分布、硬度その他によるが、かならずしも統一的な法則性はないのが普通である。

(vi) 付着性 粉体は粒子が細くなるほど、付着湿分に関係なく付着性があらわれることが多い。

(vii) 流動性 粒度がある程度細かいと気体を吹き込むことにより、流動化して液体のように流動する性質がある。

(viii) 現象の変動性 粉体の不連続性と形状の不規則性のために粉体に関する現象は、いちじるしく大きな変動をもつ統計的性格を示す。

1.2.3 粉体工学から見た現象の分類

粉体の性質を現象の性格から粉体工学の立場で、系統的に分類すると次のようになる。

(A) 粉体力学現象 粉体の集合状態あるいは、分散状態において粒子相互あるいは、粒子流体間の摩擦をともなって生ずる力学的現象であって、静力学現象と動力学現象とに分けられる。

(i) 粉体静力学現象 粉体の堆積、充てん、空隙率、粉体の内部の圧力分布、安息角、内部摩擦角、塑性すべり、圧縮変形、固結強度、粉砕などの問題などがあり、これらは境界条件としての外力および粒子自身に作用する質量力、摩擦力、圧力の平衡関係によってきまるものである。

応用分野 貯槽、袋詰、粉体の成型

(ii) 粉体動力学現象 粒子の運動が主になるサイクロンや遠心沈降機内の粒子の運動、重力沈降、空気輸送、混合、小孔よりの粉体の流出などのようなものと、流体の流動が主になる汜過や固定層の透過度のようなものおよびその中間にあたる流動層やエアスライドなど。

主に粒子流体間、あるいは粒子相互間の摩擦と圧力、重力、遠心力、粘性などによる推進力との相関関係で、運動状態が決定されるものである。

(B) 粉体物理現象 粉体の界面を通じ、あるいは界面において起こる物理現象であって、粉体の伝熱、電気伝導度などの界面伝達現象、誘電分極、磁気分極、摩擦帯電などの界面誘起現象、および光、音、波、衝撃波などの界面散乱現象などがある。

応用分野 流動層の伝熱問題、焼結冶金、電気集塵器、電気式粉面計など。

(C) 粉体化学現象 粉体の表面で他物質との交渉が生じ、粉体の比表面積がとくに大きいことが役立つ現象である。

(i) 粉体気体反応 吸着、吸湿、乾燥、流動層反応、粉塵爆発など

(ii) 粉体液体反応 晶出、溶解、水硬現象など

(iii) 粉体間反応 固結、焼結、結晶生長、再結晶、固体反応など。

なお、固体触媒では粉体実質は変化しないで表面で連鎖的かつ可逆的に、固体反応を繰返しているものと考えられる。

1.2.4 粉体処理にあたり調査すべき事項

粉体を処理する場合、あいまいな既成概念からはなれ、まずは正確に調査することである。この結果にもとづき適応した装置、機械を選定もしくは設計することが大切である。調査の順序としてまず粉体の育ちと、その存在する環境を知り、次に前述の1.2.3の諸項目について逐次整理測定して知る必要がある。

(A) 粉体の生成過程

(i) 自然粉体 天然の風化、河川や波浪の摩食、火山活動などによ

って微細化された粉体。

(ii) 人工粉体 機械的操作で生成した粉体，たとえば粉碎，混合，輸送袋詰などと，化学的变化により生成した粉体たとえば，熱焼，気流乾燥，昇華，溶液からの結晶の析出，ガスの熱分解による煙霧体など。

(B) 環境条件 粉体は形状，粒径，粒度分布が同一でも，生成過程の環境条件により，非常に異なった性状を示す。

(i) 粉体生成時の条件 周囲の気体もしくは液体温度，湿度，雰囲気などを記録しておく。

(ii) 粉体の存在する環境 粉体処理がいかなる環境たとえば，常温大気中で付着性のあるもの， 100°C 以上の空気中では付着性も凝集性もない。また空素ガス中では多くの場合付着性がなくなり，分散性がよくなる。また水溶液中で凝集沈殿する粉体も，極微量の界面活性剤または解膠剤の存在の下ではよく分散する。

(C) 基本的測定事項 1.2.3で述べた，粉体の静力学，動力学の性質，物理および化学的諸性質をできるだけ調査する。その中特に基本的なものをあげると，

(i) 粒径および粒度分布，真比重，空隙率，安息角，粉体の堆積，付着性である。その他の事項は測定もなかなか困難で普通できない場合が多い。しかし上記の項目については，最小限の代表事項である。

1.3 粒度測定法

1.3.1 粒度測定法の種類

粒径および粒度分布は，粉体の動力学にも基本数値となって比較検討され，とくに重要な意味をもっている。また物理，化学現象を説明する場合も，まずこれが第一の基準数値となる。

粒度，粒径分布，表面積の測定法を大別すると表1.1のようになる。

表 1.1 粒度測定法と適用範囲¹⁾

| 方 法 | 粒径範囲 (μ) | 方 法 | 粒径範囲 (μ) |
|-------------|-------------------|-----------|-------------------|
| (1) フルイ分法 | 745 | (5) 流体透過法 | |
| (2) 気体沈降法 | | a) 液体透過法 | 1~100 |
| a) 風篩法(重力法) | 5~50 | b) 気体透過法 | 0.5~50 |
| b) 遠心力法 | 2~50 | (6) 吸着法 | 0.01~20 |
| c) 衝突法 | 0.2~10 | (7) 光透過法 | 0.05~50 |
| (3) 液体沈降法 | | (8) 光散乱法 | 0.05~1 |
| a) 重力法 | 2~50 | (9) X線法 | 0.01~10 |
| b) 遠心力法 | 0.05~10 | | |
| (4) 顕微鏡法 | | | |
| a) 光学顕微鏡 | 0.2~10 | | |
| b) 電子顕微鏡 | 0.01~5 | | |

1.3.2 粉体の試料採取 (サンプリング)

粉体のサンプリングは、粉体のおかれている状態によりそのサンプリング法も異なる。次に代表的なものについて概説する。

(i) 粉体と液体の混合状態のものでは、よく攪伴し、均一な状態にしておいてサンプリングを行なう。

(ii) 粉体と気体の混合状態のものは、とくに煙道、大気中からの粉体採取はダストサンプリングとして重要な操作に属するので、特に別項をうけ後述する。

(iii) 粉体のみのサンプリング。

大量の粉体材料から試料をとる場合、材料の上層と下層とが同じであるかどうか、表面の部分だけが風化作用で変質していないか、大粒または小粒、あるいは比重の異なる別の粒同志がかたまりをつくって、材料の内部にむらができているかなどをよく調べて、材料の山の各所部分より、各種の機械的手段をも利用して採取する。このようにしてえた比較的少量の材料から、適当量の試料をうる方法の一つとして、広く使われるも

1) 森芳郎：新化学工業叢書，12巻，粉体工学，18，(1958)

のに四分法がある。

(a) 四分法

1) 材料を上方から落下させて円錐状の山にしてから、これを一様に上からつぶして平らに広げ、円板状とする。

2) これを中心を通して十字に四分し、相対する一対の扇形をすて他の一対をとる。

3) これをあわせてふたたび円錐形の山をつくり、同様に平らにし四分し、一対をとる。

これを繰返して適当な量となるまで続けるのである。以上の操作は清潔な紙またはセルロイド板の上で行なうのが便利である。

1.3.3 粉体の比重測定法

(A) 真比重測定法 真比重測定には、普通次の2方法、すなわちルシヤテリーの比重によるものと、真空を利用した真比重測定法がある。

(a) ルシヤテリーの比重ビン これは操作が簡単であるので、よく利用されている。

図1.1はルシヤテリーの比重ビンで、真比重(ρ_s)の既知の溶液(普通蒸留水やメタノール)を入れておき、秤量した一定量の粉体 W をこの内に入れ、粉体による液体の見かけ上容積の増量分 V をビンの上部目盛で読み取れば、粉の真比重は次式のようなになる。

$$\rho_s = \frac{W}{\rho_e V}$$

比重ビンに入れた粉末は液と十分なじむようにし、また液体の比重を一定にするために比重

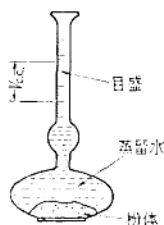


図1.1 ルシヤテリーの比重ビン

ビンを一定時間恒温槽につけておき、測定するのが普通である。

(b) 真空を利用した真比重測定法 比較的精度よく、かつ少量の粉末でもって真比重を測定するのにこの方法を用いる。図1.2は真空式真比

重測定器である。操作要領は次のとおりである。

1) 比重ビン (ピクノーター) への投入粉末量(比重ビンの約三分の一)を M 。

2) 真空吸引後に比重ビンの残った空間と、粉末の間隙に粉末によくなじみ、しかも変化を生じない比重のわかっている液体をいっぱい満す。

3) 比重ビンにフタをして恒温槽に入れ、一定温度に相当時間つけておく。

4) 内部が完全に同一温度になった頃をみはらかって、比重ビンを取り出し、外部へあふれ出た液は拭取り、その目方 R を秤量する。

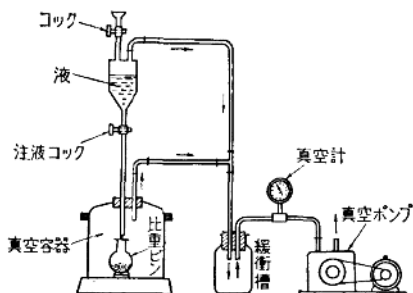


図 1.2 真空式比重測定器

操作上の注意事項

1) 秤量はすべて化学天秤で行ない、比重ビンは十分洗浄後乾燥し、粉末も乾燥したものを使用する。

2) 恒温槽は室温より、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ぐらい高い温水槽がよい。比重ビンの首まで約30minつける。

3) 真空に引くのは、粉体間隙の空気を抜いて液体と完全に置換させるため、真空度としては、数mmHg程度でよい。液体と粉末をなじみやすくするために必要に応じ界面活性剤を添加することもある。

5) 液注入はなかなかむずかしく、液自身に溶解している空気を真空に引いておくことが好ましい。この脱気がしてないと、液が真空中に入ると

5) つぎにいま使った液だけを比重ビンに入れ、前と同一温度に保ち、あふれ出た液をぬぐって後に秤量し W をうる。液の比重を ρ_0 、求める粉体の真比重を ρ_s とすれば、

$$\rho_s = \frac{\rho_0 M}{M + W - R}$$
 となる。