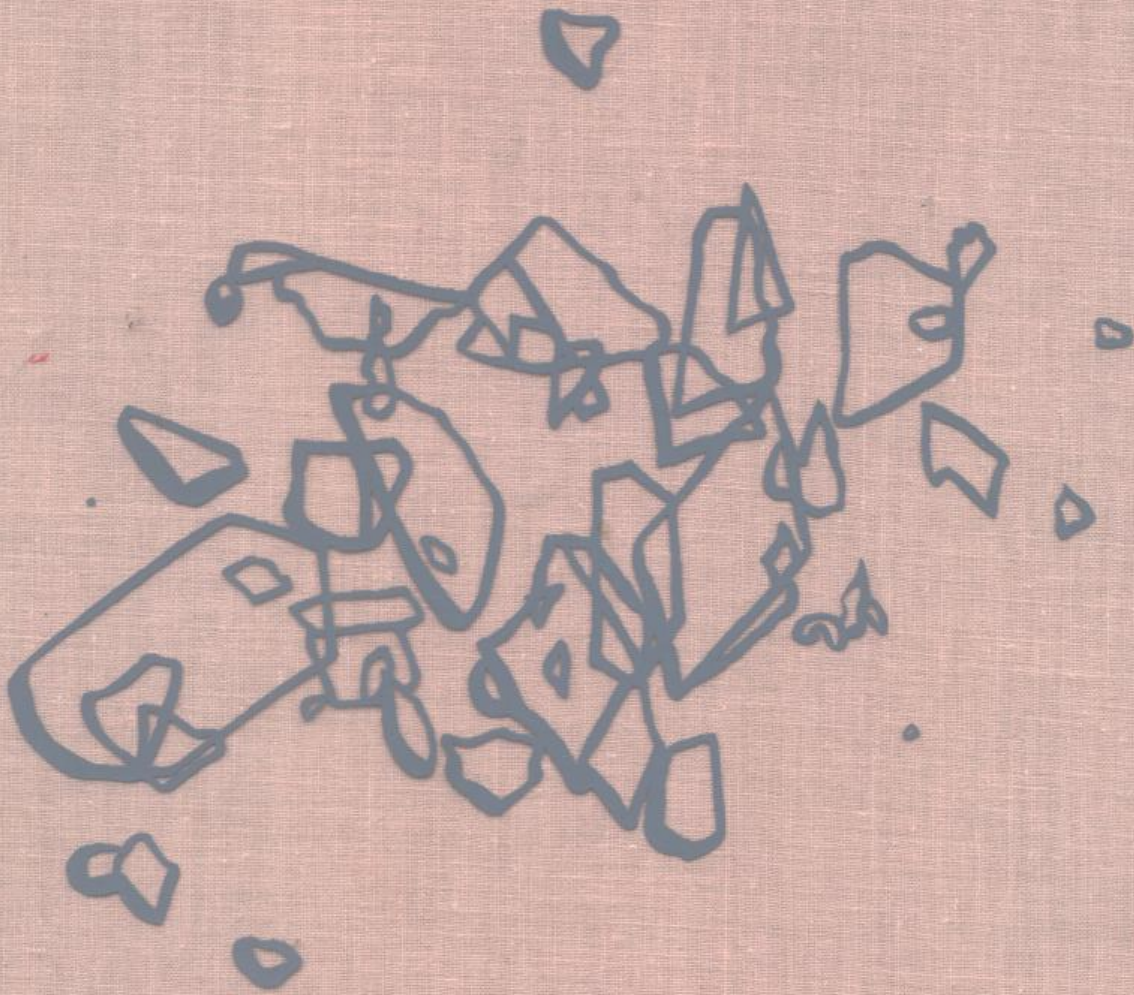


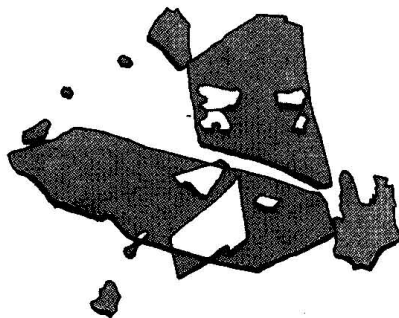
# 粉体物性図説





7/20/75  
133

# 粉体物性図説



粉体工学研究会 / 編  
日本粉体工業協会 / 編

粉体物性図説  
¥ 17,000

昭和50年5月1日  
第一版1刷発行

検 印 を 廃 止	せ に よ り	と の 申 合 わ	編 集 委 員 会
-----------------------	------------------	-----------------------	-----------------------

粉体工学研究会 編  
日本粉体工業協会

株式会社  
産業技術センター 刊

〒101 東京都千代田区神田駿河台3-5  
TEL (03) 295-5461

---

印刷 凸版印刷株式会社  
© 1975

東京工業大学教授

早川 宗八郎

生産工業が資源・公害の問題で反省期に入り、またエネルギー工業が石油一辺倒の時代から転換を迫られている昨今の情勢の中でも、工業の各分野に地下水のように浸透している粉体工学に対する要請は、ますます多様に、またますますレベルの高いものになりつつあります。

近年の粉体工学各分野での諸問題の基調には、扱う粉体の粒径が超微粒子の範囲まで広がったことと、粉体の材質が生命物質から超硬材料まで広い領域を対象とすること、があると思います。この二つの基調音が、粉体工学の基本操作として、従来からの粒度測定に加えて、粉体物性測定的重要性をうたい上げているように感ぜられます。粉体物性測定への関心には二種類あります。(1)粉体物性自体あるいはその測定法に興味があり、それを研究の対象とするもの、(2)粉体を扱っているがために否応なしに粉体物性についての資料を得ておかねばならないもの、であります。

さて私自身のことを申せば、まったく上記の(1)に属するので(2)に対してはほとんど配慮外になってしまうことが多く、つまるところ“まったく不親切な”か“あまり役に立たない”存在になってしまいがちです。そこで、(2)の立場にある人のために粉体物性測定について解説するとしたらどうしたらよいのか？反省をこめた自問自答のすえ、つぎのような注意がいくぶんか意味をもつであろうということになりました。

(i) 各種測定法の適用条件と評価を明らかにする。(ii) とくに簡便な方法で、なるべく広範に用いるものを提唱し指示する。(iii) 測定装置と操作の具体的説明(図を多く用い、できれば市販のものを紹介する)。(iv) 広範な種類の粉体に対する測定例と解析結果の紹介。

本書はまさにこの条件に適合したものであるといえましょう。編集委員の方々は、粉体工学の中でも基礎よりといえる分野で精力的に活躍されている第一人者ぞろいであり、かつ実際の工業内の問題に身近に接して指導されている方々です。粉体工学はその国の工業に立脚した固有の性格をもつものであって、現実の工業から離れては意味をもちません。その枠の中で、粉体物性はどう測定され、いかなる結果が得られているかが重要なのです。もちろん外国にも本書に類する書籍は見あたりません。編集には多大の労苦が伴ったことと推察いたしますが、それによって本書の広く高い有益性が得られたものと思います。

粉体にかかわるすべての研究者・技術者にきわめて適切な指導書・参考書となることを信じ、本書を推せんいたします。

通産省工業技術院製品科学研究所

研究企画官

牧 廣

プラスチックの主原料は、いうまでもなく合成樹脂（正しくは合成高分子化合物）であるが、合成樹脂だけを成形するよりも、むしろ充填剤、顔料、安定剤等々の副資材と混ぜて成形する方が一般的であり、したがって副資材は極めて重要な材料であるにもかかわらず、合成樹脂ほどには研究されていなかった。

その理由は、まだプラスチックの歴史が浅く、合成樹脂だけで手一杯であることのほかに、副資材の種類が極めて多く、とくに無機系副資材については、高分子化学者には専門的になじみがないこともあろう。したがって単純な物性ぐらいの知識でとまっていたように思う。

さきに粉粒体プロセス技術集成が刊行された時、そこで粉体の工学という思想が提起されたのを知って、非常な感銘を受けた。

プラスチック副資材には、粉粒体のものが非常に多い。それだけでなく、考えてみれば、合成樹脂自体も、たとえばポリ塩化ビニールなどのように粉粒体のものがある。しかしわれわれは、これらの物質について、その化学的側面しかみていなかったようである。すなわちこれら極めて多種類の物質を、個々に異質なものとしてみるだけであって、粉粒体という共通の基盤があることに思いおよばなかったように思う。

この提起は筆者にとっては、かつて膠質化学を始めて学んだ時以来の感銘であり、眼からうろこがとれたように思った。

このたびさらにつづけて、粉体物性図説が刊行されるということである。粉体特性の具体的な測定技術が詳述されていて、われわれ素人にもすぐに実験できることは非常にありがたいことであるが、何といても最大の魅力は、350ページにのぼる広範な粉体の図版であろう。

それぞれの物質ごとに、顕微鏡写真が示されていることは楽しいだけでなく、理解を深めることができる。また化学的一般特性のほかに、粉体特性が示されていて非常に便利である。

これだけのものを編集し、出版されるにはさぞご苦労が多かったことだろうと、心から敬意を表するとともに、プラスチック関係だけでなく、多くの分野の方々のご利用をおすすめしたいものである。

## 序

粉体は固体であって固体ではない。もちろん気体や液体のような連続体でもない。その個性ある特性のゆえに魅力をもっている。その大きさや形状をはじめとするもろもろの粉体の物性は、単に数値として示すだけでは物足りないのみならず不十分である。できることならばその色合いや肌ざわりをも含めて、物理化学的特質を一覧できる図表を、日常しばしば身近に見聞する各種粉体についてまとめることは、われわれ粉体仲間の一つの念願であった。10数年前に出版された“粉体の物性と工学”の最後の座談会記事の中ですでにその希望がのべられている。はじめは顕微鏡写真と代表的粒度だけでもまとめられていればとおもっていたが、かなりくわしい物性までのせられているので、それだけ執筆もめんどうになり、また編集も大変であったこととおもう。

1967年に海外の粉体図鑑としてW. C. McCromeとJ. G. Dellyの編集によるThe Particle Atlas の第1版がコロラドの国立大気研究センター(NCAR)のJ. P. Lodge博士の序文で1973年には第2版が同じセンターのR. D. Cadle博士の序文で出版されている。

しかしながら、内容的には主として固体化学的な立場で、個々の粒子を詳細に観察した“Particle Atlas”粒子図鑑であり、それら粒子の集合体である粉体の特性についてはまったく触れていない。

これに対して本図説は、あくまで“粉体”としての取扱いに重点をおき、我国の現時点における代表的粉粒体について、粒子形状、粒度分布、比表面積、かさ密度、流動性など、粉体の取扱いに必要な特性をできるだけ含めるようにつとめ、各方面の許す限りの協力を得て、そのデータの完備につとめられたものである。

粉体のいわゆる人相書であり、顔写真付き手配書、ともいえる本図説は、執筆者や編集委員、いわば粉体に魅せられて、とりこになったこれらの方々あつての成果であるといつて過言ではなからう。今後さらに多くの粉末を補足して、粉体事典として完成されてゆくとともに、多くの粉体マニアをつくり出してゆくことを願うものである。

粉体を研究する学徒や技術者の参考となるのみならず、専門外の方々がたまたま相遇した粉末粒子の姿をみたいときにも、また家庭の主婦が食品や生活用品の粉末粒子を知りたいときにも本書が役に立つことを期待している。ながめるだけでもたのしい図鑑として、手で握れるもの、粉体の第一印象を与える本として多くの方々のお役に立つものであると信ずる。

粉体工学研究会会長

日本粉体工業協会会長

大山 義年

## 編集にあたって

私たちの周囲にはきわめて多くの粉体がある。日常生活で身近かな、幾つかの食品、医薬品、化粧品、また穀類やそれらを育てる土や砂のようにはっきりと粉粒体とわかるものだけでなく、ほとんどすべての工業材料がその工程中で、たとえば原料として、製品として、中間体として、また廃棄物として粉体状態をとっている。それにもかかわらず粉体の取扱いに関する工学や技術には他の材料形態には見られない多くの問題点があるが、その原因は粉体に特有の性質——粉体物性の複雑性にあるといえよう。したがって、粉体の特性についての一般的な知識をもつことがこの分野にたずさわる研究者や技術者にとってきわめて重要な問題である。

本書は各方面の代表的な粉体の粒子形状、粒度、流動性その他の粉体特性に関してそれぞれの材料の専門家であるメーカー・ユーザーの技術者や学者の方々が執筆されたデータを主体としたものである。

I編では総論として粉体物性の考え方を簡単に述べ、II編は粉体の研究に必要な測定技術を実用的な手順を主として多くの図や写真によって平易に解説した。III編の資料編は、360種の粉体を主な用途別に分類した12の分野にわけてまとめている。編集にあたって用語その他の表示法はできるだけ統一するように努めたが、業界の慣習や規格もあるので試料によっては執筆者の表示に従っている。また、III編ではあまり細かい分類は避け、同じ執筆者による資料ができるだけ集中するようにしたが、同一粉体が多くの分野で使用されている例も少なくないので、試料名別、用途別などの索引を設けて検索の便を計った。資料編の後に、各試料の粉体特性の試験に関するJISの抜粋を付した。

重要な粉体で集録できなかったものも多いし、また粉体特性についても必ずしも詳細なデータが記されていない試料もあるが、むしろ、それが現状であることを認識していただきたいと思う。

以上のような点を含めて必ずしも満足できるものではないが、このような形で粉体材料をまとめた成書は世界でも最初のものであろうし、粉体に関心を持たれる方々に充分参考になるものと信じている。そして、これを足掛りに何年かの後に一層充実した内容のものを世に出すことができると念願している。

最後に、貴重な多くのデータをまとめてご執筆下さった方々と、出版について終始熱心にご協力いただいた(株)産業技術センターの諸氏に深く感謝する。

昭和50年3月

粉体物性図説 編集委員会

# 粉体物性図説

編集委員長 井伊谷 鋼 一 京都大学教授  
副委員長 荒 川 正 文 京都大学化学研究所  
編集委員 青 木 隆 一 横浜国立大学教授  
井 上 外志雄 東京大学助教授  
大 塚 昭 信 名城大学教授  
三 輪 茂 雄 同志社大学教授  
山 下 憲 一 工業技術院機械技術研究所



# 推せんのことば

京都大学教授

功刀 雅長

2056/35  
(2k568/35)

私たちの周囲を眺めてみると、きわめて多くの種々の粉体があり、日常生活において身近かな多種多様の粉体が食料品、医薬品、化粧品などにみられるし、また構成粒子の大きさもきわめて広範囲で、煤煙のようなコロイド的の微細な大きさのものから砂粒などのように数mmに至るまで範囲は広く、その限界を明確に指示することはむずかしい。

固体が微細化されて粉体の状態になると、塊状のものに比べて、物理的および化学的の諸性質はいちじるしく違ってくる。この粉体にみられる特有の諸性質は、粉体の作製条件、粒径の範囲などによっても異なり、このような現象は学問的にきわめて興味があるばかりでなく、応用面においても重要な問題であり、粉体化学の分野はいわゆる境界領域の学問として、最近注目されている。

金属工業、無機薬品工業、電気化学工業、肥料工業、窯業、高分子工業、食料品工業などの工業の広い分野にわたって、各工業の操作、現象および製品などが粉体ときわめて関係の深いことは周知の通りであり、粉体の学問がいかに広い背景をもっているかがうかがわれると思う。

粉体の物理的性質としては、粒子の大きさ、形態、比重、粉体の集合組織、粉体焼結体の力学的性質、粉体層の光学的性質、圧粉体の熱膨脹、熱伝導度、熱拡散率などの問題があり、また物理的・化学的性質としては、粉体の表面エネルギー、吸着、濡れ、熱分解、化学反応、焼結などが重要な問題であるが、これらの性質を究明するためには、粉体特性の測定操作あるいは測定技術が当然必要となっている。

本書においては、測定技術の重要性に着目し、まずはじめに測定技術として、試料の採取・縮分法、粒子形状の観察、粒子の密度測定、粒度測定、比表面積と細孔分布との測定、粉体の種々の物理化学的性質の測定などについて記述し、次の篇では、本書の特徴である図および写真を数多く活用して粉体特性を解説しており、重ねて述べるが、この図解の部分に大半の頁をさいていることが特徴である。従って理論的な議論は他書にゆずっていることはいうまでもない。

このように、粉体特性をできるだけわかりやすく解説した著書である粉体物性図説が編集、刊行されることは、誠に喜ばしいことであり、上記のような種々の工業の発展ならびに粉体化学の発達のために貢献するところが大きいと思う次第である。

# — 目 次 —

## I. 総 論

### 粉体物性総論

1. 粉体物性とは	1
2. 微粒子の性質	4
2.1 微粒子の特長	4
2.2 表面の性質	4
2.2.1 固体の表面エネルギー	4
2.2.2 固体の化学結合と表面エネルギー	5
2.2.3 固体の表面構造	8
2.3 粒子の化学的性質	10
2.4 粒子表面の官能基	11
2.5 吸着	11
3. 粉体の特性	13
3.1 粉体现象と基礎的性質	13
3.2 粒子径について	14
3.3 粒子間相互作用力	14
3.4 粒子の充填状態	15
3.5 粒子の表面特性	15
4. 粉体の共通特性と基礎的性質の関係	16
5. 粉体粒子の形と大きさ	16
5.1 粒子の形は何でできるか	16
5.1.1 粉碎生成物	17
5.1.2 化学反応により生成した粒子	18
5.1.3 二次粒子の形成	20
5.2 粒子の大きさはどうしてきまるか	20

## II. 測定技術編

1. 試料のとり方	23
1.1 はしがき	23
1.2 縮分比あるいは分割比	23
1.3 流れの過程からのサンプリング	23
1.4 容器からの採取	24
1.5 円錐四分法(cone and quartering)	24
1.6 積層交互ショベル法	25
1.7 二分器(riffler)	27
1.8 回転分割器(spinning riffler)	27
1.9 カーベーターの左右相殺法	28
1.10 流れ切断法	29
1.11 粉じんの縮分、捕集	29
1.11.1 気体中の微粒子の捕集方法	29
1) 浮遊微粒子数の少ない環境における微粒子の捕集方法	30

2) 一般作業環境における浮遊微粒子の捕集方法	31
3) 高濃度な粉じんの捕集方法	31
1.11.2 液体中の微粒子の捕集方法	32
1) 測定用器具	32
2) 準備	33
3) 微粒子の採取	33
4) 分析	33
1.11.3 物体の表面に付着した微粒子の捕集方法	33
1) 測定用器具	33
2) 採取場所	33
3) 微粒子の採取	33
2. 粒子の密度測定	35
2.1 はしがき	35
2.2 粒子密度の定義	35
2.3 液浸法(liquid immersion method)	36
2.3.1 比重びん法	36
2.3.2 ピクノメータ法	37
2.3.3 懸ちよう法(浮力法)	37
2.4 気体容積法	38
2.4.1 エアーヘリウム・ピクノメーター	38
2.4.2 ベックマンの空気比較式比重計	40
3. 粒子形状の観察	41
3.1 まえがき	41
3.2 顕微鏡の基礎	41
3.2.1 分解能と倍率	41
3.2.2 焦点深度	44
3.3 光学顕微鏡	45
3.3.1 原理	45
3.3.2 構造	46
3.3.3 拡大鏡	49
3.3.4 実体顕微鏡	51
3.3.5 偏光顕微鏡	51
3.3.6 位相差顕微鏡	53
3.3.7 光学顕微鏡の使い方	53
3.3.8 顕微鏡写真のとり方	56
3.3.9 検鏡試料の作り方	58
3.4 電子顕微鏡	62
3.4.1 原理と構造	62
3.4.2 電子顕微鏡検鏡試料の作り方	66
1) 試料の支持法	66
2) 粉体試料の分散法	68
3) シャドウイング法	69
4) カーボンレプリカ法	70

5) レプリカ法	71	6.1.1 全細孔容積の測定	115
6) 超薄切片法	74	1) 液浸法	115
7) 立体写真の撮影	76	2) 水銀-ヘリウム法	116
8) 電子顕微鏡による観察の注意事項	76	3) 気体吸着法	116
3.5 走査形電子顕微鏡	77	6.1.2 細孔分布	116
3.5.1 原理と構造	77	1) 水銀圧入法	116
3.5.2 走査形電子顕微鏡試料の作り方	79	2) 気体吸着法	117
3.6 あとがき	80	6.2 むれ	120
<b>4. 粒度とその測定</b>	<b>81</b>	6.2.1 理論	120
4.1 まえがき	81	1) 拡張ぬれ	120
4.2 粒度の表現	81	2) 浸漬ぬれ	120
4.2.1 粒子の形状と大きさの表わし方	81	3) 付着ぬれ	120
4.2.2 粒度分布	82	6.2.2 粉体のぬれの測定	121
4.2.3 平均粒子径	84	1) 液滴法	121
4.3 粒度測定法	86	2) 毛管法	122
4.3.1 粒度測定の種類	86	3) 液相分散法	122
4.3.2 作数法	86	6.3 浸漬熱	123
1) 顕微鏡法	86	6.3.1 理論	123
2) カルターカウンター(coulter counter)	90	1) 浸漬熱とは	123
4.3.3 ふるい分け法	90	2) 気体の吸着熱と浸漬熱	124
4.3.4 沈降法	93	3) 浸漬熱等温線	124
1) 沈降法の装置	94	6.3.2 測定法	126
2) 沈降法の試料分散法	95	1) 浸漬熱測定法	126
4.3.5 遠心法	95	2) 吸着熱測定法	127
4.3.6 慣性力法	96	<b>7. 力学的特性とその測定</b>	<b>129</b>
4.4 あとがき	97	7.1 粉体層の限界釣合状態	129
<b>5. 比表面積とその測定</b>	<b>99</b>	7.2 摩擦特性の測定	130
5.1 比表面積の定義および粒子径との関係	99	7.2.1 三軸圧縮法	130
5.2 表面積の測定	100	7.2.2 直接剪断法	130
5.2.1 気体吸着法(BET法)	100	1) Jenike セル	131
1) 原理	100	2) 定容積剪断法	132
2) 測定法	102	3) 環状セル(リングセル)	134
5.2.2 気体吸着法(Harkins-Juraの相対法)	107	7.2.3 壁面摩擦の測定	134
5.2.3 液相吸着法	108	7.2.4 安息角	136
1) 概説	108	1) 注入法	136
2) 測定法	109	2) 排出法	137
5.2.4 浸漬熱法(Harkins-Juraの絶対法)	110	3) 傾斜法	138
1) 原理	110	7.2.5 静摩擦と動摩擦との関係	139
2) 測定法	111	7.3 付着・凝集性の測定	140
5.2.5 透過法	111	7.3.1 付着力の測定	140
1) 原理	111	7.3.2 付着・凝集強度の測定	141
2) 透過法の装置と方法	113	7.4 流動性の表現および測定	143
3) 透過法の問題点	113	7.4.1 重力流動	143
<b>6. 物理化学的性質</b>	<b>115</b>	7.4.2 機械的強制流動	143
6.1 細孔構造	115	7.4.3 充填性	143

7.4.4	流動化の際の流動性	146
7.4.5	総合的表示法	147
1)	流動性指数	148
2)	噴流性指数	148
3)	Carr 法に対する評価	151

### III. 物性編

1.	金属とその原料	153
2.	窯業原料・粘土	193
3.	電気・磁気材料	233
4.	充填剤・顔料・塗料	255
5.	高分子	331
6.	製紙	355
7.	食品	369
8.	医薬品・化粧品・農薬	387
9.	工業薬品・雑貨	435
10.	建材・エネルギー	476
11.	粉じん・廃棄物	493
12.	標準粉体	509
13.	立体顕微鏡写真	531

### IV. 関連資料・検索

関連 JIS 規格(試験法)抜粋	539
測定機器メーカーリスト	567
物質名索引	575
用途別索引	581
物性別索引	591
用語索引	600
執筆者名索引	604

# 粉体物性総論

## 1. 粉体物性とは

物性論とは物質の性質を原子論的な取扱いで考える方法である。すなわち、物質を構成する原子の性質、その配位構造、欠陥、他原子の存在などが物質にどのように関係するかをしらべ、材料のバルクの性質をミクロな構造との相関から基本的に考えてゆく学問分野である。このような考え方を粉体に持込むと、粉体を構成する粒子の性質、粒子間の相互作用力、充填構造などが粉体のバルクの性質にどのように関連するかを追求するのが、粉体の物性論的な取扱いということになる。個々の粒子の物性論はいわゆる微粒子物性論として固体化学の一つの分野として発展している。とにかく、粉体を構成する基本単位——粒子の性質から粉体の挙動を考えるのが粉体の物性工学ということにしよう。

一般に材料の物性工学において一つの体系をつくり、整理するには次のような順序で考えてゆくことが多い。粉体についてもそれに従うことにしよう。すなわち

- 1) 物質が定義された状態をとるための条件を知る。
- 2) その状態の標準的な構造を知る。
- 3) その構造の物性を知る。
- 4) その構造に対する外部条件、外力の効果を知る。
- 5) その他の特殊問題、物質特性との関連など。

1) のために粉体を定義しなければならないが、まず一般的に粉体——“粉”といわれる材料に共通した特性を整理してみよう。表1は粉体に関する産業の主なものを、材料とそこで行なわれている主要プロセスについてまとめたものである。粉体は大部分が原料および中間体として存在し、最終製品が粉体のものは食品、医薬品の一部を除いてほとんどない。しかしプロセス内での粉体状態はほとんどすべての工業に存在し、それに対する単位操作は粉碎、分級、混合、成形（造

粒）などが多く、これを連絡するために貯蔵、輸送が必ず含まれることになる。これらの材料は最初から“粉”の形をとっているものもあるが、むしろ化学反応や粉碎などによって都合のよい粉体をつくり、その粉体としての特性を利用して製品にする過程が多い。すなわち、粉体という材料形態には処理操作に都合がよい次のような共通した特性があり、そのため材料を積極的に粉体にするのである。すなわち

- a, 物性が等方的(isotropic)である。
- b, 流動性がある。
- c, 流動限界付近での流動性の変化が大きい。
- d, 類似物質間の混合が容易である。
- e, 媒質中での離合集散は一応可逆的である。
- f, 塑性、加工性がある。
- g, バルクの固体より化学的に活性である。

などである。そして固体がこれらの共通特性を満足するための条件は

- 〔I〕 固体の微粒子であること。
- 〔II〕 それがきわめて多数集合していること。
- 〔III〕 粒子間に適当な相互作用が働いていること。

の3点にしばられる。ここで適当というのはあいまいな表現であるが、これが大きいのは成形体や焼結体などであり、無視できるのが粉じんやエアロゾルである。ともに粉体の一つの限界状態には違いないが、いわゆる“粉”というのは人が軽く触れる程度の力で流動、変形する位の相互作用力が働いているとしよう。

これらをまとめて、ここでは粉体を次のように定義しよう。

「粉体とは多数の固体粒子の集合体で、粒子間に適度の相互作用力が働いている状態である。」

粉体をこのように定義すると、粉体の基礎特性を考えるに



表1 粉体の関係する産業と主な粉体材料およびその処理プロセスの例

産業別	業種別	粉体関係度	関連する粉体の粒度																																															
			原料								プロセス																																							
			nm	μm	mm	cm	nm	μm	mm	cm																																								
資源	1 農林, 水産	○	土壌				種子				肥料				農業																																			
	2 石炭	○									石炭				炭塵																																			
	3 鉱業	○	原鉱				浮選				粉鉱				塊鉱																																			
加工産業	4 食品	○	穀物				輸入塩				原糖				小麦粉など				デンプン				化学調味料				粉乳				砂糖																			
	5 繊維	○									脱消剤				糊材				染料, 顔料				フェルト				セリックス																							
	6 紙, パルプ	○	木材チップ				パルプ				のこくず				塗炭材				充填剤				ペーパ				バインダ				サイジング剤																			
	7 ゴム, 高分子	○	カーバイト								ポリマー(乳濁)				補強充填剤				ポリマー(粘濁)				充填剤				顔料				イオウ																			
	8 顔料, 充填剤	○	原料鉱石				原料薬品				有機顔料				無機顔料				炭物粉砕物				カーボンブラック, コロイダルシリカ																											
	9 化学工業	○	岩塩				鉱石				石灰石				塩類結晶				焼成りん肥				有機薬品				触媒																							
	10 窯業	○	粘土				黒鉛				金属酸化物				マグネシア				陶石				石灰石				アルミナ				環土				造粒粘土				セラミック				セメントクリンカー				塔塵アルミナ			
	11 鉄鋼	○	粉鉱				塊鉱				石灰石				粉塵				鉄石ペレット				粉鉱																											
	12 非鉄金属	○	精鉱				ボーキサイト				高融点金属粉				アルミナ				焼鉛粉																															
	集積産業	13 金属製品, 機械	○	高融点金属粉				金属カーバイト粉				粉塵				耐熱減摩材				減摩材				研削材				研削材				ショット砂																		
		14 電気機器	○	黒鉛				シリカ, アルミナ				金属酸化物(電池)				蛍光材料				タングステン, モリブデン粉				粒状カーボン																										
		15 電子材料, 磁性体	○	酸化チタン				炭酸バリウム				酸化鉄				金属粉				粘土				チタン酸バリウム				フェライト				導電塗料				フェライトコア				LSパッケージ										
16 塗料		○	着色顔料				増粘剤				体質顔料				高分子粉体				マイクロカプセル																															
17 医薬品, 化粧品		○	亜鉛華				活性炭アルミナ				タルク				化粧品				主薬				錠剤				顆粒				錠剤粉砕物																			
18 雑貨		○	薬品				高分子ペレット				洗剤				マツチ, 大葉																																			
都市形成	19 建設, 建材	○	セメント				充填剤, 顔料				土				原石				砕石				人造骨材				吹付材																							
	20 電力, ガス	○									フライアッシュ				粉炭																																			
	21 原子力	○																																																
	22 粉塵, 廃棄物	○																																																
	23 標準粉体	○																																																

III-11 参照

III-12 参照

範囲		主な粉体処理操作	
製品			
nm	μm	mm	cm
粉物 木材チップ		貯—輸	
精製炭		砕—分—輸	
精鉱 粘土鉱物		砕—分—浮—輸	
小麦粉 化学調味料 粉乳 砂糖、塩 抹茶		貯—砕—分—混 溶—晶—混	
		混、集	
		混、浮、集	
高分子ハロゲン 高分子粉材		混、浮	
着色顔料 印刷インキ 補強性充填剤 充填剤		砕—分—混、晶—浮—乾	
各種無機薬品 各種有機薬品 肥料		砕—溶—晶—浮—乾	
セメント 研磨材		砕—分—混—形—乾—焼	
		砕—分—混—粒—乾	
金属粉		砕—分—混—粒	
		混—形—砕、混—形—焼、集	
		混—形、混—形—焼、散—塗	
		混—形—焼、浮—乾—焼、混	
粉体原料 マイクロカプセル トナー		混—散、混—形—砕—分	
錠剤 散剤 ハミダキ 白粉 顆粒 洗剤		混—形—砕—分—混—粒—形	
		沈—浮—乾—混	
		砕—分—混—形—砕—分	
		砕—分、集	
		砕—混—形	
		分—砕	

晶 折  
溶 解  
混 合  
混 選  
浮 選  
分 級  
分 砕  
輸 送  
貯 蔵  
乾 燥  
集 塵  
形 成  
形 粒  
粒 散  
散 布  
塗 布  
焼 成  
浮 過  
沈 澱

は個々の微粒子の性質、すなわち、微細化されたために巨視的な固体とは変った微粒子特性と、それが多数集合したときに示される集合体特性の両面をあわせて見てゆかねばならない。まず、微粒子特性について考えられる問題をとりあげよう。

## 2. 微粒子の性質

### 2.1 微粒子特性と表面

粒子が小さくなると表面積と体積の比が大きくなって表面のいろいろの性質が無視できなくなるが、それが粉体の特性とかなり重要な関係がある。表面とはある相——気相でも、液相でも、固相でもよいが——の連続構造がとぎれた面であると定義される。一般には、一つの相がとぎれてその先には何もないということはないから表面は別の相との境界面、界面(interface)である。

普通には、表面に存在する原子の数は固体を構成している全原子数にくらべて無視できる程度でしかなく、その作用は全く問題にされない。たとえば、一辺10cmの立方体の鉄塊の表面に並ぶ原子の数は全体の1億分の1に過ぎないが、一辺1nmになるとその割合は1000分の1である。単位量の固体が、微粒子に分割されるということは同じ重さあたりの粒子数が

ふえることである。食塩1gについて、大きさ、個数、比表面積などを計算すると表2のようになり、一辺10nmの立方体では比表面積が280m<sup>2</sup>、すなわち約47万倍にもなる。しかも表面は内部にくらべてはるかに活性であり、いろいろの他物質との反応はそれらと接している界面からおこるから比表面積が大きければそれだけ反応は速くなり、物質の見かけの性質がかなり変化する。

### 2.2 表面の性質

#### 2.2.1 固体の表面エネルギー

液体でも固体でも、その中の原子は周囲の原子と相互に作用しあっているが、表面の原子は内から引かれるだけで外からの作用は受けていない。だから、その表面積を広げようとすると内部への引力——凝集力に抗して表面にある原子の数を増すための仕事が必要である。これが表面張力(表面自由エネルギー)である。

固体はその大部分が本質的に結晶としての性質をもち原子が規則正しく配列して、たとえば図1の単純立方格子のような規則構造を形成する。この図で内部の原子は前後、上下、左右に6個の隣接原子をもっているが、表面の原子では隣接原

表2 食塩結晶の粒子径と表面エネルギー、稜エネルギー (NaCl 1gについて)

稜の長さ (cm)	個数	全表面積 (cm <sup>2</sup> )	全稜の長さ (cm)	表面エネルギー (erg/g)	稜エネルギー (erg/cm)
0.77	1	3.6	9.3	1080	2.8×10 <sup>-5</sup>
1×10 <sup>-1</sup>	4.6×10 <sup>2</sup>	2.8×10	5.5×10 <sup>2</sup>	8.4×10 <sup>3</sup>	1.7×10 <sup>-3</sup>
1×10 <sup>-2</sup>	4.6×10 <sup>5</sup>	2.8×10 <sup>2</sup>	5.5×10 <sup>4</sup>	8.4×10 <sup>4</sup>	1.7×10 <sup>-1</sup>
1×10 <sup>-3</sup>	4.6×10 <sup>8</sup>	2.8×10 <sup>3</sup>	5.5×10 <sup>6</sup>	8.4×10 <sup>5</sup>	1.7×10 <sup>1</sup>
1×10 <sup>-4</sup>	4.6×10 <sup>11</sup>	2.8×10 <sup>4</sup>	5.5×10 <sup>8</sup>	8.4×10 <sup>6</sup>	1.7×10 <sup>3</sup>
1×10 <sup>-6</sup>	4.6×10 <sup>17</sup>	2.8×10 <sup>6</sup>	5.5×10 <sup>12</sup>	8.4×10 <sup>8</sup>	1.7×10 <sup>7</sup>

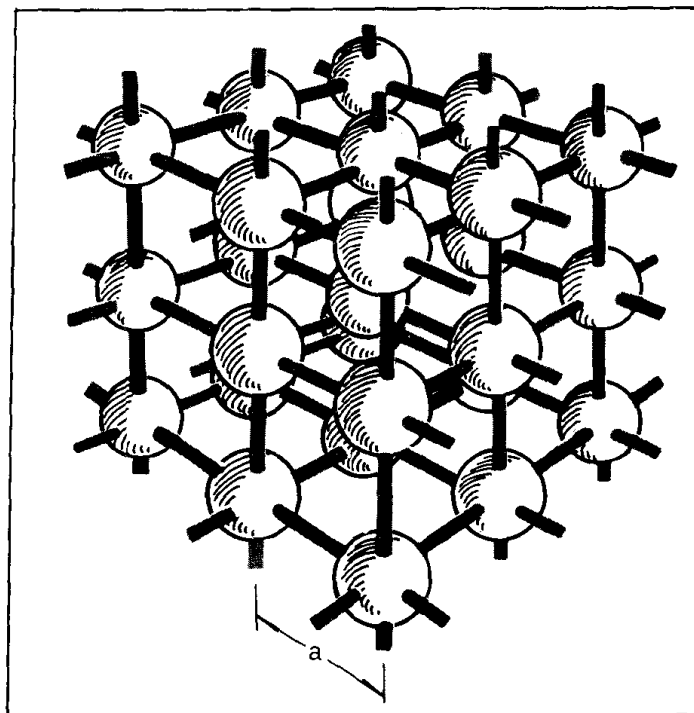


図1 単純立方格子構造

子の数—配位数は5個であり、稜にある原子では配位数はさらに少なく4個、角では3個になる。稜や角が表面よりさらに活性なのは表2に示した通りである。なお、図1の球で示してあるのは原子とは限らない。大きな分子でも構わない。図2はBHCの結晶構造で、6個ずつのカーボン原子（図中の色丸）と塩素（白丸）による亀の甲形分子が図のような配置で規則的に並ぶ単斜晶系結晶である。

いま、隣接原子間の相互作用力、すなわち結合エネルギーを $E$ としよう。配位数を $k$ 、結晶全体を形成している原子数を $N$ とすると、結晶が十分に大きく表面にある原子の数が無視できるなら全体の結合エネルギー $H$ は

$$H = \frac{EkN}{2} \quad (1)$$

である。2で除すのは結合は2個の原子間で生じるからである。この結晶を二つに割ると表面が増し表面エネルギーも増す。隣接原子間の距離を $a$ とすると、単位表面積、すなわち結晶の単位格子の1区劃の表面あたりの結合エネルギー $\gamma$ は

$$\gamma = \frac{E}{2a} = \frac{H}{kNa} \quad (2)$$

である。この $\gamma$ が固体の表面自由エネルギーであり表面張力にはかならない。 $H$ は固体の凝集エネルギーであるから固体の表面自由エネルギーも本質的には原子や分子の間に作用する凝集力—化学結合力である。したがって固体の表面現象はその物質の化学結合の様式によって変るからここで少し詳しく触れておこう。

### 2.2.2 固体の化学結合と表面エネルギー

固体の化学結合の主なものはイオン結合、共有結合、金属結合およびvan der Waals結合であり原子間またはイオン間

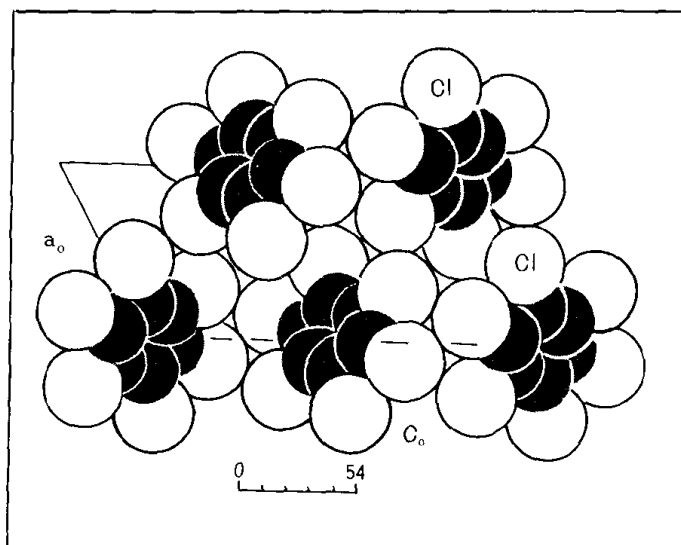


図2 BHCの結晶構造

に働く力によって生じる。2個の原子が無限の彼方に離れているとその間に働く力はゼロであり相互作用のエネルギー—ポテンシャルエネルギー $V$ もゼロである。しかし、2個の原子が互いに近づいてくるとその間に引力と斥力が現われ、全ポテンシャルはこの二つの力の和である。

$$V = -\frac{\alpha}{r^n} + \frac{\beta}{r^m} \quad (3)$$

$r$ は原子間距離、 $\alpha$ 、 $\beta$ はそれぞれ引力と斥力をあらわす定数、 $m$ 、 $n$ は小さな整数で、これらは系に特有の値である。たとえば、引力がvan der Waals力であれば $n$ は6とおいてよい。このようにポテンシャルエネルギーは2個の原子の間隔、原子間距離によって変化し、その関係は図3のようになっている。原子間距離が小さくなるとそれぞれの原子の周囲の電子雲が重なり斥力が働く。引力と斥力がつりあったとき