

アーカイブ

「粉体科学への手引き」

岩瀬 慶三

粉体および粉末冶金 13 (1966) 157-165.

「粉体科学への手引き」に寄せて

物質・材料研究機構

目 義雄 (出版・編集委員会委員)

本協会は1960年4月に文科省の認可を得て「社団法人粉末冶金技術協会」として発足し、事務所を1965年10月に現在の生産開発科学研究所内に移した際に、「社団法人粉体粉末冶金技術協会」と改名された。この経緯については、本会設立者である岩瀬慶三先生の強い主張によることが本会20年史において当時の高田副会長の記事にある。設立の当時から見て粉末冶金が主流でありその重要性は言うに及ばないが、粉末の分野にも将来の発展が大きく期待されると共に粉末の分野の研究は粉末冶金分野にも大きく寄与するとして、岩瀬先生は、会誌の名前は最初から“粉体および粉末冶金”とされ、協会名も“粉体・粉末冶金協会”と名付けることを主張され、1965年にこれが支持され改名された。

以上の予備知識を基に本総説を見ると如何に高い見識を持って粉体を科学として捉え、粉末冶金を発展させようとしているかが伺える。当時の特筆すべき事項として、1962年に丸善から「粉体 理論と応用」が出版された。これは、粉体の基礎物性、調整方法、工業への応用について世界で初めて体系的にまとめられたハンドブックである。本総説では、このハンドブックを基に粉体科学の鳥瞰を行い、粉体の基礎およびその応用とも、非常に広範に渡っていることを示した。このうち粉体基礎について、粉体粒子の特性、および集合状態を分類し、その体系化を試みている。今から見ても非常に示唆に富む体系化であり、この分類をどの程度修正、あるいは今後の研究課題として行くか、粉体粉末冶金の今後の進展のための手引きとして役立て頂ければ幸いである。

「粉体科学への手引き」に寄せて

京都大学 大学院理学研究科 化学教室 金相学研究室

吉村一良（出版・編集委員会委員）

出版・編集委員会企画の「粉体および粉末冶金」誌の“アーカイブス”の第二弾として、岩瀬慶三先生の総説が推薦された（目先生、松原先生のご推薦）。

当粉体粉末冶金協会は、岩瀬先生によって創設されたこと、岩瀬先生は京大・金相学研究室（金相研）の第三代教授（初代：近重真澄教授，第二代：宇野傳三教授，第四代：可知佑次教授，第五代：小菅皓二教授，第六代：私）であったことなどについて前号で書かせて頂いた。今回は、京大・金相研と東北大・金属材料研究所（金研）の関係について、これを機にもう少し書かせて頂きたいと思う。

岩瀬慶三先生は金相から東北大・金研に移られ、高名なる本多光太郎先生に師事し、その後は本田先生が、金属学の物理的側面を、岩瀬先生は化学的側面を担われた。その後、研究面などでの確執等があり、岩瀬先生は京大・金相研が専務となられるが、お二人は盟友と言った関係であったとのことである（鈴木謙爾先生談）。私ことではあるが、私は金相研の出身ではなく、京大・工学部金属加工学科（現・物理工学系材料工学科（専攻）、現・中村裕之教授の研究室、中村裕之教授は私の5年後輩）の卒業である。学生時代の我が恩師、中村陽二先生（京大名誉教授、故人、中村裕之教授と親戚関係は無いとのこと）は東北大・金研のご出身で本多光太郎先生の研究室の最後の学生であった。つまり、私は本多光太郎先生の孫弟子ということになり、しかも岩瀬慶三先生の三代後の金相研教授を務めていることになる。何か因縁のようなものを感じてしまう。松原先生が実行委員長を務められ、2016年11月に東北大・青葉山キャンパスで開催された粉体粉末冶金秋季大会の折りに、東北大学金属材料研究所所長室を訪れた。現所長の高梨弘毅教授（東大・物性研究所・安岡研のご出身）と私は院生時代からの旧友である。私が博士過程の時、物性研の安岡研に修行のため滞在した際には、高梨所長と私は同学年なので、机を並べてともに勉強し研究したものである。高梨所長が、「君は本多先生と浅からぬ縁があるのだから、本多先生の像と一緒に写真撮ろう」というので、金研所長室にある本多先生の像を挟んで撮ったのが右の写真である。

余談ばかりになってしまったが、今回の岩瀬慶三先生の総説「粉体科学への手引き」は、今読み返してみても大変優れていて視点も面白く、かつ壮大な総説となっていて、今にも通じるような内容であることに驚かされる。当協会の名前が、なぜ「粉末冶金」ではなく、「粉体および粉末冶金」となったのかが、よく分かる（目先生談）内容と言える。



東北大学金属材料研究所所長室にて、高梨弘毅所長（右）と筆者（左）：本多光太郎先生像を挟んで（2016年11月）。

総 説

粉体科学への手引き

岩 瀬 慶 三*

目 次

- I 粉体科学の鳥瞰
- II 粉体とは
- III 粉体の特性
 - (1) はしがき
 - (2) 粉体粒子特性
 - (i) 粉体的特性
 - (A) 粉体的特性としての状態
 - (a) 本質的な粉体的特性状態
 - (b) 二次的な粉体的特性状態
 - (c) 状態的性質
 - (B) 粉体的特性としての挙動現象および性質
 - (a) 安定化現象
 - (a₁) 無条件下 (時間無限大)
 - (a₂) 外部条件下
 - (b) 安定化以外の挙動現象と
 - (c) 諸性質
 - (ii) 材料的特性
 - (3) 集合粉体特性
 - (i) 集団特性
 - (A) 粒子の接近と接触
 - (B) 不均一性
 - (C) 充填
 - (ii) 集合状態の分類
 - 附 分類表メモ
 - (4) 非集合状態の粉体 (省略)
- IV 結び

I 粉体科学の鳥瞰

粉末状の工業製品は少なくないが、この方面の学問技術を担当する粉体科学は境界領域にあるから、学界の注目を引くようになったのは、比較的近年のことである。

これまでの研究は産業的な要求に基づくものが多く、純学術的なものは多くはないが、なかなか高度の研究成果が得られている。しかしこれらの純学術的研究も局部的で、全体を眺めれば、粉体科学の開発は、国際的にも、まだまだこれからというところである。

このような環境の中にあって数年前わが国の学者によって

「粉体 理論と応用」

という好参考書が出版されたことは特筆に値するといわ

ねばならぬ。これによって現代における粉体科学の鳥瞰ができるようになったからである。その主な目次は次のとおり¹⁾。

第1表 「粉体 理論と応用」 の目次

	頁
I 編 粉体粒子の生成理論	3
1. 固体粉碎の理論	
2. 結晶核生成の理論	
3. 結晶成長の理論	
4. 液相の沈殿反応による粒子の生成	
5. 固体塩の分解反応による粒子の生成	
II 編 粉体の粒子径測定法	73
1. 粉体粒子統計	
2. 幾何学的粒子径測定法	
3. 有効粒子径測定法	
4. 表面積径測定法	
5. 電磁波散乱法	
III 編 粉体の物理的性質	199
1. 粒子の物理的性質	
2. 粉体の集合組織	
3. 機械的および音響学的性質	
4. 光学的性質	
5. 電磁氣的性質	
6. 熱的性質	
IV 編 粉体の物理化学的性質	309
1. 固体の表面エネルギー	
2. 吸着	
3. 濡れ	
4. 粉体の化学反応	
5. 焼結	
6. 粉体圧縮における力学的考察	
V 編 粉体の工学	425
1. 粉碎設備	
2. 分級	
3. 粉体の混合	
4. 粉体の圧縮	
5. 流動及輸送	
6. 集塵	
VI 編 粉体の衛生工学	581
1. 粉体による健康障害	
2. 空气中浮游粉体の測定法	
3. 粉塵の抑制と制禦	
VII 編 粉体を扱う工業	635~890
1. 粉末冶金による機械部品	
2. 高融点金属	

* 本会々長，東北大学名誉教授，生産開発科学研究所理事

158

岩 瀬 慶 三

3. 超硬合金
4. 電磁気材料 (フェライト)
5. 原子力材料
6. 窯業材料
7. 顔料
8. 充填材
9. 製紙用粉材
10. 研磨材
11. 粉体食品
12. 化粧品
13. 医薬品
14. 農業粉剤

この目次を見ると、粉体科学の分野がかなり広範でしかも、各応用部門の間に産業的には非常な隔りがあることがわかる。したがってこれらに、それぞれの拠点を提供しなければならない、粉体科学基礎部門の肩の荷は大変に重い。

前にも触れたように、粉体科学は境界領域にあるため、開拓の初期には塊状の固体の知識その他を借用するほかはないが、結局は、粉体独自の分野を作り上げねばならぬ。

最近の研究は、この独自のものへと指向しており、立派な成果が挙がりつつあると同時に、学者の間に協力の態勢ができつつある。本協会が粉末冶金部門から、広く一般粉体を対象とする学会に成長したのも、その一つの現われである。本協会としては、粉体科学のレコンストラクションに役立ちたいものと考えている。

粉体科学を体系づけることは、なかなかむずかしいが、いまの段階でもっとも大切なことは次の二点ではあるまいか。その一つは

- 甲 粉体科学 と
乙 関連科学

の間にはっきりけじめをつけること、いま一つは甲の粉体科学を

- 甲の一 粉体独自の科学
甲の二 粉体に関する科学

に区分整理することである。いうまでもなく粉体科学の本命は甲の一である。

粉体科学の開発には当然他分野の科学の力を借りなければならない。たとえば粉体粒子の生成および成長に関して一つの研究をしようとすれば、すでに引用の参考書に紹介されてあるように、たくさんの貴重な事柄がすでに知られているから、まずこれらを知っておかねばならぬ。これらは特に粉体粒子を対象としたものではなく、一般的に説かれてある。したがってこれがここにいるところの関連科学である。これを十分にマスターした上で、次にはそれを自分のテーマに、どのような形で導入すればよいかを考える順序となる。このように関連科学の導入の仕方を検討するとき粉体科学の門に近づくことになる。粉体粒子の場合には成長が抑制される条件が存在

することになるから、この条件を探求することにすれば、ここで初めて粉体科学の門をくぐって中に入ることになる。このほかにも門のくぐり方はいくとおりもあり得るが、とにかく門をくぐらねば粉体科学の領域ではない。どのように苦心して門の前まで来ても、それは関連科学の修業であって、粉体科学をやっていることではない。

粉体科学の開発に当たって導入される関連科学は、ケースバイケースにいろいろの専門分野であるから、粉体科学の開発という仕事は、なかなか骨の折れる仕事である。一般に境界領域として開発の遅れている科学分野とは、この種のものである。

上述のようなけじめをつけて粉体科学を開発すれば、その成果は必ず関連科学にもよいはね返りを与えるはずで、かくなってこそ粉体科学が一つの科学分野として仲間入りすることができる。借りて来るばかりでお返しができない間はまだ一人前ではない。

このようなことはわかり切ったことであるが、今日の段階において再認識の必要があるように思われる。

次に甲の一、二について例示しよう。

一つの物質について、それが正立方体をしているときの粒度と表面Eの関係は、その物質のバルクの状態での表面Eの値を持ってくれば、直ちにグラフができる。これが甲の二の粉体に関する科学である。ところが固体の結晶不整にはいろいろの理由が挙げられるが、それはともかくとして、固体はその粒度が粉体程度に小さくなれば、この結晶不整がはなはだしくなることが知られており、かような場合の表面Eはバルクの場合とは異なることが推定されるが、これを算出することはそうたやすいことではない。しかしながら粉体科学として表面Eを云々するには、この点に触れなければ本筋とはいえない。たとえ大まかな仮定をおくとしても、とにかくこの点について追求していくとき初めて甲の一の粉体独自の科学と取り組んでいることになるのである、and so on.

以上の事柄は、粉体科学としてはまず甲の一から始め、そこで終わることなく、甲の二に進むための甲の一であることを忘れないということに外ならない。

粉体独自の科学は後述の

- 粉体粒子の粉体的特性 と
集合粉体の集団特性

のいずれかまたは両者が主役を演じているところの粉体的性格の濃厚な科学を指す。

II 粉体とは

近頃は粉体という言葉がよく使われているが、まだ公認された定義というものはない。さきに引用した参考書も、この定義には触れていない。本協会においても、先年座談会を開いた際²⁾、この問題も取り上げたが、意見

はまともらなかった。

長い間粉末という表現を用いてきたが、一向に差しつかえがあるようには思われぬ。粉末をシャレて粉体と言っているくらいに思っている、という発言もあった。粉末の末の字は、末梢とか泡沫とかを連想させるから、そういう解釈もあり得るわけであろう。

粉末状の微粒子が気体液体を媒体としているとき、媒体と一体になって興味ある現象を示すことが少なくない。だから両者を引くくめた系を粉体と見てはどうか、という意見も出た。

また、そういう場合などに、固体の概念で律することのできない挙動を粒子がする。現象によってこの場合の粒子の大きさに違いがある。なにかこのような現象を律する熱力学の法則のようなものがあればよいが、という意味の発言も出たりした。

歴史的な背景から「粉体」はつぎのように解される。

昭和19年に学術振興会において、粉末冶金に関する委員会³⁾設置準備の際、阪大物理教室の有志を中心とする「粉体物性研究隣組」のあることがわかり、代表の方々も委員に選ばれた。これが粉体という表現が公式に認識された始まりのようである。この隣組ではこの言葉をつぎの意味に使っていたように思われる。

粉末状の固体は粒度が小さいほど、 g 当たりの表面積は大きくなるが、超微小な固体では、表面積を考慮に入れるだけでは固体の概念で解釈することのできない物性がある。この点を一般に認識させるには、塊状の固体と区別する名称が好ましいが、粉末という表現には既成概念があるから感心しない。そこで「特殊の状態にある微細な粉末状の固体」の意味を端的に表現するものとして粉体としたものようである。粉体の体は固体の体である。

この隣組の場合、粒度の限界がどの辺におかれたかはつまびらかでないが、最近の粉体粒子物性の研究における粒度の例はミクロン以下の場合が多い。

つぎに昭和22年に本協会誌の前身であるところの学術誌が創刊されたが、その母体は京大理、工学部有志、前記学振メンバー中の有志その他による「粉体及び粉末冶金刊行会」⁴⁾で、ここでは前述の研究隣組の影響を受けて「粉体」という表現を採用したように思われる。当時としては幾分かシャレた意味がないとはいえない。

つぎに昭和26年頃に京大化学研究所に「粉体化学」という一つの研究部門(学部における講座に相当するもの)が置かれ、その後他の研究機関にもこの部門が置かれたりしている。これはおそらく、粉体物性のうち化学者の分担する部門を指すものようである。

つぎに28年頃、名大工学部ならびに名工試の化学工学関係の方々の肝いりで「粉体工学研究会」⁵⁾が発足した。メンバーは名古屋に限らず全国的で、業界関係者が多く、

粉碎分級粒度測定その他の化学工学方面で業績を挙げ今日に及んでいる。

「水は方円の器に従い、云々」のたとえにもあるように、液体は容器内にピッタリとおさまるものであるが、粉末もまた同様に挙動するもので、充填作業はこれを利用している。また、気体液体を媒体として粉末を輸送する場合、固体の概念を一時たな上げして、流体に準ずるものと見ても近似的には差しつかえない。かような場合の粉末を一般の固体と区別して「粉体」と呼んでいるものようで、これが粉体工学の粉体のように思われる。この意味では粉体は固体と流体との中間的な存在で、粉体の体は物体の体の意である。

なお、ガラスは過冷状態にある液体であって固体ではないから、ガラスの粉末は粉体ではない。しかし軟化温度以下はるかの低温度では、ガラス粉末の挙動は粉体と違わない。したがってガラス粉末は「準粉体」である。粉体の挙動を追求する場合、ガラス粉末を試料とすることがあるが、温度の限界に注意せねばならぬ。

以上のような歴史的な背景から粉体という言葉には

粉体物性的な意味と

粉体工学的な意味

とがあって、いずれも

特殊状態または特殊環境にありと見られる粉末状の固体

を意味していることがわかる。また粉体の体は固体の体の意であるから、単数複数にこだわらず、いずれの場合にも使い得る表現であると解釈される。したがって粉体は粉末の代替語でもなく、またシャレた意味でもない。

以上の見解からは

粉体一個の物性を 粉体粒子物性

粉体集合物の物性を 集合粉体物性

両者を引くくめて 粉体物性

としてはどうかと思われる。以下ではこの見解によることとした。

なお、今日粉体として取り扱われている粉末状の固体の大きさにはかなりの幅があるが、大きさを限定するのは時期尚早のように思われる。

Ⅲ 粉体の特性

(1) はしがき

これまで使い古されてきた「粉末」という術語からは「 g 当たりの表面積が大きく、カサ高で、飛散しやすく、活性に富んでいる」

ことがすぐに浮かんでくるのであるが、粉体という表現からは果たして何が浮かんでくるであろうか。新しい術語には、より高度の常識となるものがほしいものである。その涵養に役立つものが

「粉体の特性に関する知識とそのゼネラルロー」

であるように考えられる。ここに

「特性とは特徴的な状態と、これに起因する性質挙動現象の一切を引くくめて指すことにする」

したがってこれは粉体独自のすべてに関する事柄にはかならない。

粉体独自の特性は

粉体の特性 $\left\{ \begin{array}{l} \text{粉体粒子特性 (III-1(2))} \\ \text{集合粉体特性 (III-1(3))} \end{array} \right.$

に分けられる。集合粉体特性のみにない手である個々の粉体粒子の特性に関しては、粒子の生成および形態、磁性、相転移等々の方面に貴重な成果が得られているが、なお追求されるべき多くの問題を残している。集合粉体のほうは、たくさんの研究成果が、それぞれの方面において多大の貢献をしているにもかかわらず、粉体粒子特性ほどにはスキップしていないように感じられる。これは問題が複雑であるだけにむずかしいからであることはわかるが、I に述べた甲の粉体科学と乙の関連科学とのけじめや、独自の粉体科学分野と、その他の粉体に関する粉体科学の分野とが、区分整理されていないことも大きな原因ではあるまいか。

特性の究明やゼネラルローの探求は、他の学問分野においてもむずかしい仕事であって、最初から完璧を期すのは常道ではない。その好例は、理論化学の分野における、アクチビチーの概念の効果とその変遷である。

なお、粉体としては集合状態とはいえない状態の粉体、たとえば分散状態にあるもの他がある。これらには上述の集合粉体特性はほとんど関係ないが、粉体粒子特性は無視することができない。かような状態の粉体をここでは非集合状態の粉体として、集合粉体と区別することとする。

(2) 粉体粒子特性

(i) 粉体的特性

粉体粒子特性は粉体科学の基本となる最も重要なもので、粉体粒子の粉体的特性と粉体粒子の材料的特性とによって決まるものである。すなわち

粉体粒子特性 $\left\{ \begin{array}{l} \text{(i) 粉体的特性} \\ \text{(ii) 材料的特性} \end{array} \right.$

ここに粉体粒子の粉体的特性とは

「粒度が小さくなればなるほど発揮されるもの」を指し、本質的と二次的のものに分けられる。

粉体的特性 $\left\{ \begin{array}{l} \text{(a) 本質的な粉体的特性} \\ \text{(b) 二次的な粉体的特性} \end{array} \right.$

材料的特性については後に触れることにする。

(A) 粉体的特性としての状態

粉体粒子の粉体的特性の始まりは「状態」で、この様相と性質挙動現象との対応を求めることが、粉体的特性

の追求である。以下これらについて想定していくこととする。

なお、集合粉体の研究では、粉体粒子物性で取り扱っている粒度よりは、はるかに粒度の大きいものまでも、その対象としている。したがって上記の粉体粒子の粉体的特性も、そのような粒度の大きい集合粉体では、果たすべき役割または発揮される程度は小さいこともある。そのかわりに集合粉体には後に述べるように、集団特性というものがある。

(a) 本質的な粉体的特性状態

粉体粒子の粒度が小さくなればなるほど発揮される状態としては

- (イ) 8 当たりの表面積表面 E が大きくなっていること
- (ロ) 結晶格子の構造欠陥が多くなっていること
- (ハ) (軽いこと, 小さいこと)
- (ニ) その他

が挙げられる。これらは粉体粒子に特有な本質的なもので(イ)は表面状態、(ロ)は内部状態、(ハ)は全体的関係である。粒度が小さくなれば、表面と内部とを分離することがむずかしくなるから(ニ)にその他の項が添えてある。(ハ)に軽いこと、小さいことを挙げたのは、非集合状態の粉体に関係が深いからにすぎないが、(イ)(ロ)とも関連がある。

前述のように、粉体科学の基本を粉体粒子特性にありとすれば、ここに挙げた(イ)~(ニ)に関する綿密な定量的知識こそは、きわめて大切な基本の中の基本で、これに対する把握の程度いかに独自の粉体科学の水準を決めることになる。

(b) 二次的な粉体的特性状態

(a)の本質的な特性状態は明らかにそれ自体において不安定な状態であるから、より安定化しようとする傾向を持ち、反応性が大きく活性に富んでいる。これが二次的的特性状態につながることになる。

われわれが試料を手にするときには、その材質と生成の方法およびその後の処理が、すでに与えられているのである。したがって、粒子の表面が

吸湿層 吸着層 反応生成物皮膜

などによっておおわれていることがある。この傾向は粒度が小さいほど強いのであるから、二次的ではあるが見のがせない。このほか物理的状态も処理次第では変化する。そのうち粒度が小さいほど顕著なものがあればこの二次的的特性状態のうちに含まれるであろう。

(c) 状態的性質

ここに状態的性質という項を設けたのは便宜上のことであって、状態に直結する性格とでもいべきもので、挙動や現象以前の状態的な性質を指している。(a)(b)の特性状態から、粉体粒子は不安定であることが窺なせられ、安定化の挙動現象を起こしやすいものである。これを取り

こしやすいといえは性質となり、起こりやすいといえは状態となる。

粒度が小さいほど、この安定化の起こる状態的性質が強いから、粉体粒子の粉体的特性として最も重要である。これを強調するためにここに(c)を設けて注意を喚起したにすぎない。

(b) 粉体的特性としての挙動現象および性質

前述(a)(b)の特性状態の記述が定性的であるから、これと挙動現象および性質との間に対応を求めることは、より一層ばくぜんとならざるを得ないがいまはやむを得ない。

(a) 安定化現象

上述のように粉体粒子が小さいほど安定化の傾向が強いから、相手があれば相手と反応し(この反応は安定化が姿を変えて起こっていることになるから、以下これを変わり型安定化ということにする)、相手がなければ自分ひとりで安定化することになる。相手とは外部条件を意味する。

(a₁) 無条件下(時間無限大)

不安定な状態にあるものは、無限大の時間では安定化すると想定することができる。これが無条件下の安定化現象で、これには

(i) 粒子表面状態の安定化(表面積表面Eの減少)

(ii) 粒子内部の安定化(格子欠陥の緩和と再配列)とが

蒸発現象と拡散現象とによって実現する。

(a₂) 外部条件下

外部条件としては

熱の供給 他物質の存在 外力その他の作用がある。このような条件下では条件次第の変型安定化現象を起こすことになる。これらについては第2表右端記入例のとおりである。

ここでは興味ある現象として凝集について一言する。他物質として同種の粉体粒子が接触しているとすれば、凝集(コロイド化学の凝集ではない)が起こる。この凝集は粒子間の機械的付着以上の現象があるように思われるが、明らかでない。熱が同時に働けば明らかに粒子の結合が起こる。

凝集のほか他物質存在下では、表面化学反応、固相反応、吸着、吸湿、濡れ、などの現象が起こることが考えられる。これらはいずれも変型安定化現象である。

(b) 安定化以外の挙動現象と

(c) 諸性質

(i)(A) (a)の本質的な粉体的特性状態の項において状態(i)として軽いことと、小さいこととを挙げ、これが分散状態その他の非集合状態の粉体に関係の深いことを述べたが、これは浮遊現象や沈降現象等を指している。これ

らの解析に当たっては同項の(i)、すなわち表面状態にまでさかのぼることが必要となる。

諸性質については、ここで概括することはむずかしいから省略する。

なお、(2)-(i)の結びとして一言しておきたい。

粉体粒子はそれが一個として問題となることは、粉体粒子物性などのほかにはあまりないが、集合粉体や非集合状態の粉体の性格のにない手であるから、これに関する研究は現在以上にさかんになることが望まれる。集合、非集合状態の粉体は産業的に多くの問題をかかえているから、直ちにこれらを試料として研究することが多いが、これはやむを得ないとしても、難関にぶつかったときには、粉体粒子特性の追求にまでさかのぼることが適切であることをここで強調したい。

なお、第2表において、(B)と(A)の(b)とに*がつけてあるのは、(B)の右側の記載が一部分当てはまることを意味しており、これらのほかにも、二次的な粉体的特性としての状態から推定され得る挙動現象および性質もあり得るが省略してある。

(ii) 材料的特性

前述のように、粉体粒子特性は粉体科学の基本であるから、(これは非集合状態の粉体にも通ずることである)その特性の実体を決めるところの粉体粒子の材料的特性は、これまた非常に大切な基本事項である。

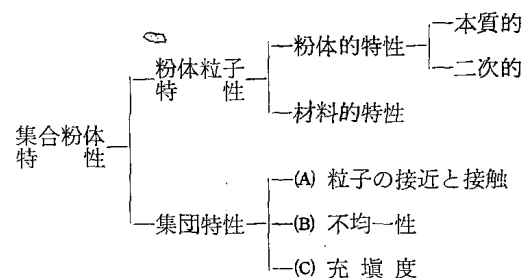
この材料的特性の研究としては、粒子の生成および状態に関するものが大切で、粉体粒子特性や集合粉体特性の研究者達が希望する性格を有する粉体粒子をいつでも供給できるところまでいきたいものである。

(3) 集合粉体特性

(i) 集団特性

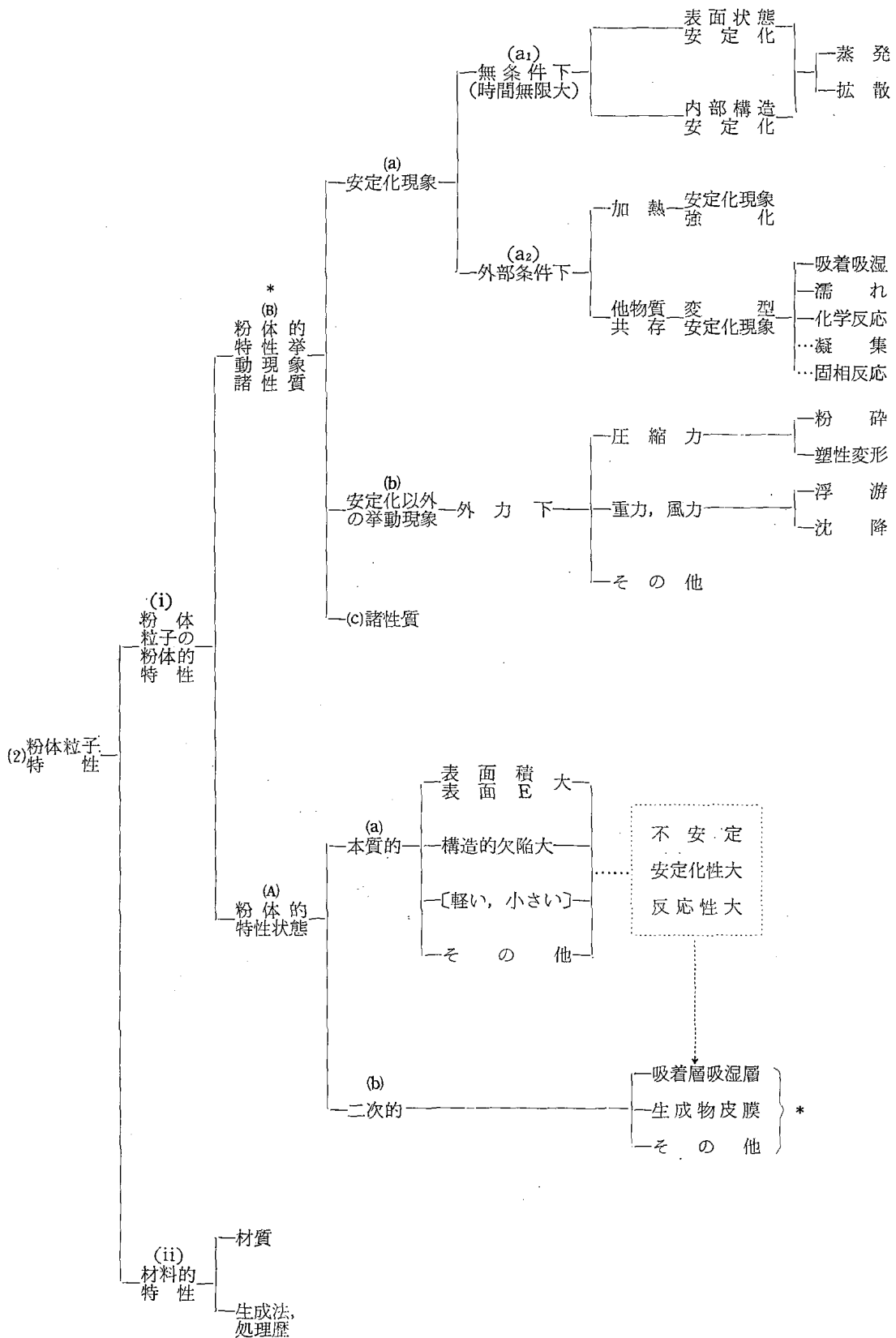
集合粉体の特性は、そのにない手である個々の粉体粒子の特性に依存するが、それらを単にサムアップしただけでは出てこない。粉体粒子が集団を作っていることを計算に入れる必要がある。その入れ方を決めるものが集団特性関係である。個々の粉体粒子の特性を集団特性で積分すれば、集合粉体特性が出てくるとも表現することができる。

すなわち集合粉体特性の構成はつぎのごとくなる



集団の特性は一般物体についても考え得ることで、たとえば粉体の円錐形堆積状態もボタ山も、一つの集団特

第 2 表 粉体粒子の特性



性の現われである。それゆえに粉体の集団特性は、

「粉体粒子が集団を構成することによって、かもし出されるところの粉体的な特性」

でなければならぬ。これは粉体粒子単独の場合には存在しなかったものであり、すべての集合粉体に共通のものであるべきで、つぎの三項が代表的のものと思われる。

- (A) 集団中の粉体粒子には「接近」「接触」という相互関係が生じている。
- (B) 集団から「不均一性」を除くことができない。
- (C) 「充填度」という状態変数が介入している。

上記三項のほかにも、それぞれの集合状態に応じた特有のものがあり得る。たとえば、湿潤状態の集合粉体には、乾燥状態のものに見られない通性がある。しかしこれらは外部条件に関するものとして、それぞれの場合に考慮されるべきで、ここにいう代表的な集団特性のうちには入らない。

上記の集団特性によって積分を行なう場合、積分条件を決めるものは集合の状態である。これによって集団特性の発揮のされ方、したがってその影響が違ってくるからである。もちろん環境すなわち外部条件も考慮されるべきことはいままでない。

上記の三項のうち(B)は、粒度の粗い粉体の場合にも成立するから、粉体的性格の強いのは(A)と(C)とである。

(A)の粉体粒子の接近接触の強弱は(C)の側から見れば、充填度の高低になるが、(A)は個々の粉体粒子を対象とするものであり、(C)はそれらを塗りつぶして集団を対象としているのであるから、扱い方が違っている。

(A) 粉体粒子の接近と接触

集団特性(A)は粉体粒子特性に及ぼす影響がもっとも大きい。ことに静止状態の集合粉体においてしかりである。また湿潤状態では、この(A)が強く影響することが多い。集合粉体で湿気の影響に十分注意することが大切なのはこのためである。

(A)に関して前述の積分条件に関係すると思われる点をつぎに少し例示する。(2)-(i)-(B)に述べたように、不安定状態にある粉体粒子は、安定化のプロセスとして蒸発、拡散が考えられるが、これらの現象は(A)によって当然影響を受ける。

- (i) 粉体粒子の接近は蒸気の拡散を妨げるから、粒子の蒸発現象は妨害を受ける。
- (ii) 粉体粒子の接触は自由な表面積の減少を来すから、これまた蒸発を妨害する。
- (iii) 粉体粒子の接触は粒子間の凝集を起しやすいく。この凝集は乾燥状態では無限大の時間を必要とするが、湿潤状態では水分が仲立ちとなり乾燥されるに従って凝集していく。粒度が小さいほどこの速度は大きい。この凝集は表面活性剤によって食

いとめられることがあるから、表面状態によるものであるが、通説としてはこれを表面の粘着力に帰せしめることになっているが、固体に対して粘着力という表現ですませるのはどうかと思われる。凝集の際は著しい収縮を伴うものであり、これと加熱焼結の際の収縮（についてもまだ満足する説明はできていないが）とは共通するものがあり、別々の現象として追求するのみではないもののように思われる。

- (iv) 圧縮力下では粒子の移動によって接近接触が強化されるほか、材料的特性次第では、摩擦による発熱、粉碎、塑性変形等が起こるから、粒子状態も変化を受ける。
- (v) 圧縮成形の場合、金属粉では塑性変形によることとなるが、一般粉体の場合、圧縮が粒子間の凝集現象を強制する場合に成形するとみれば、わかりやすくなるが、この意味からも集団特性(A)の接近接触に関する掘り下げが大切である。

(B) 不均一性

集合粉体の不均一性のうちには粒度分布その他集合粉体自体に関するものと、たとえば加圧力の浸透性などのような二次的のものがあるが、とにかく、集合粉体に不均一性はつきものであるから、集合粉体特性の追求に当たって、これに関する事項を積分条件に取り入れるという意味は、得られた結果がこの不均一性に原因するものを含んでいることがあり得る点を認識して、得られた実験結果の演繹に当たって、できるだけこの影響を具体的に把握し、それを小ならしめる方法を講じたり、消去する道を選んだりすることが必要であることを意味している。

集合粉体物性の追求に当たって、再現性が得られないことをよく耳にするのであるが、これはどこに不均一性が現われているかの把握が困難なこと、またはこの不均一性を消去する試みの検討不足を意味しているもののように考えられる。

(C) 充 填

集合粉体中の粉体粒子の接近接触は実際に観測することは困難な場合が多いが、充填度ならば実測が容易である点にこの特性の重要さがある。粉体粒子の個々を塗りつぶしているところにもこの特性の特徴がある。さきに述べた凝集の際の収縮現象のごときも、この(C)と(A)との両方から突っ込んでいくのも一法のように考えられる。

以上の三項目が集団特性の代表的のものであるが、このほかにも、それぞれの場合にも「集団を作っているがためにかもし出される特性」が生じていることがあり得るから、それらをも十分に検討して上記三項目に加える必要がある。

集合粉体の特性を集団特性中心に追求するやり方は、

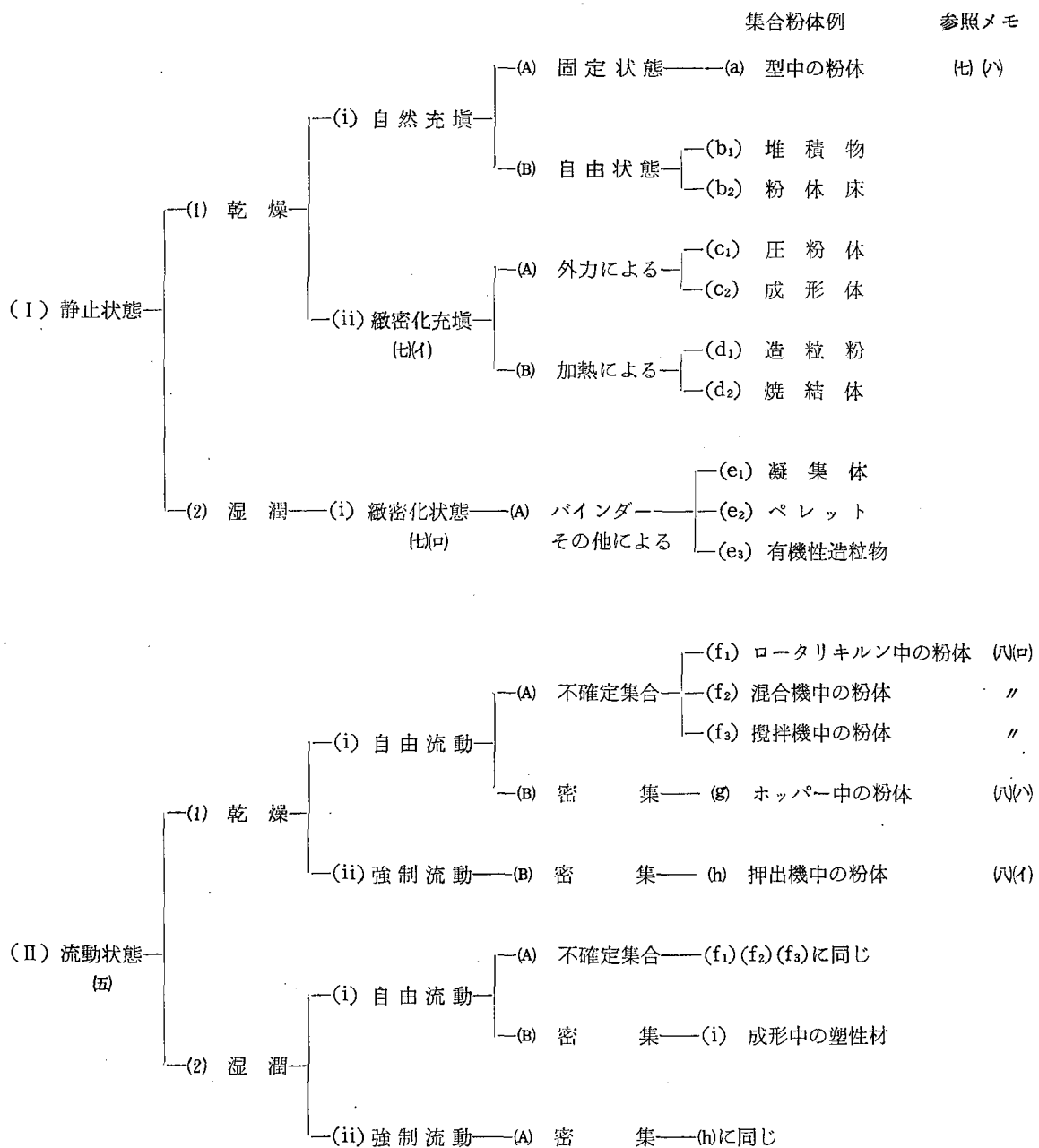
たとえば諸性質についても、
 主として粒子間の接近度に依存する性質
 // 接触度 //
 // 接近度接触度 //
 充填度に依存する性質
 等に区別することによって整理され、わかりやすくなる。
 (ii) 集合粉体の分類
 集合粉体特性の追求には上述のように、集団特性がどのように発揮され、どのように影響するであろうかとい

うことを重視しなければならないから、集合状態を分類したほうが便利である。第3表はその一つの試みである。この表の作成ならびに表中の記載について若干のメモをつぎに付記しておく。

付 分類表メモ

(一) 静止の場合は、この分類Iに属する集合粉体が、その後外部条件下で起こすであろう挙動現象を対象に、流動の場合は、この分類IIに属する集合粉体が、現に流動しつつあるときの挙動現象を対象にした。

第 3 表 集 合 状 態 の 分 類



* 表中(一)(b)(c), (i)(b)(c)……は分類表メモ参照

- (二) 集団特性発揮の影響がほとんどないと見られるものは非集合状態の粉体として除外した。
- (三) 外部条件も考慮した。
- 四 静止と流動とに大別したのは、後者はその原動力の影響が大きく、粉体的性格が少ない場合が多いからである。しかも熱その他の条件下ではがぜん粉体的性格が顕著になるという特徴がある。
- (四) 混乱をさけるため、ここでは個々の粒子の位置移動が連続的集団的で外見上液体の流動に類似する場合を流動とし、粒子内部の変形を含ませないことにした。
- (五) 静止、流動とも、乾湿によっても区分した。
- (五) 静止の場合
- (イ) 自然充填(タップしたものを含む)と緻密化充填とを区別したのは、後者はすでに外部条件下で強く変化しているからである。
- (ロ) 水その他のバインダーによる緻密化状態は(イ)の緻密化充填とは、内容的に著しい相違がある。
- (ハ) 固定状態とはたとえば型の中の粉体のように、外部条件下でも、集合粉体としての変形が自由でない場合を指している。
- (六) 流動の場合
- (イ) 強制流動とは容器壁等によって、集合状態としては静止のときの自然充填程度の密集状態が保たれ、流動の方向が限定されているものを指す。したがってIの例(a)が圧縮されるときはこの強制の極端な場合ということになる。
- (ロ) 不確定集合とは、集合状態の粗密が流動によって一定しない場合を指す。
- (ハ) ホッパー内の粉体は流動状態にある集合粉体であるが、ホッパーを離れた粉体は集合状態ではない。
- (4) 非集合状態の粉体(省略)

さきに述べたように、集団特性の発揮のされ方、影響の有無によって、集合粉体と非集合状態の粉体とを区別したのであるが、両者の限界は必ずしも截然としているものではない。たとえば、

- (一) 泥しょうでは、粒子の占める容積率がかなり大きい

から一種の集合状態であるが、媒体の影響が大きいため、集団特性の働きかける余地が少ないから、一応非集合状態の中に入れることにしたが、媒体がたとえば乾燥によって減少するに従って、媒体としての影響は少なくなり、湿潤程度に減少すれば、媒体は凝集の仲立ちをするように役目が変わってくる。この辺にすれば集合粉体として取り扱ったほうがわかりやすい。

- (二) 管の中を粉体を送られつつある場合、粉体に作用する力の大小、管径一杯に粉体がつまっているかどうかの点その他で、集合粉体として取り扱われる場合と非集合状態とみなされる場合とがある。これに乾湿の相違が加わってくる。このような問題に対しては限界にこだわらないほうがよい。

非集合状態の粉体としては、コロイド化学で取り扱われているもののほか、第1表V、VIの粉体の工学編、粉体の衛生工学編で取り扱われている状況下の粉体がある。これらの粉体では粉体粒子特性はほとんど失われていないが、外的条件の影響力が大きい場合が少なくないから、Iに述べた甲の二の粉体に関する科学と見るべきものが比較的多い。やはり基本的には区分整理すれば便利と考えられる。

IV 結 び

以上現在の粉体科学の鳥瞰を行なって、この学問分野が基礎応用両部門とも、非常に広範にわたっていることを示し、このうちの基礎部門についてその体系づけの試案を示したのであるが、非集合状態の粉体にまでは及ぶことができなかったのは遺憾である。また試案そのものも今後検討を重ねねばならない点が多い。

註

- 1) 丸善発行(1963), 1~890.
- 2) 粉体および粉末冶金 11 (1964), 205~210, 252~259.
- 3) 岩瀬, 粉体および粉末冶金 7 (1960), 19~26.
- 4) 粉体及び粉末冶金 1 (1947-9月), No. 1.
- 5) 井伊谷, 粉体および粉末冶金 11 (1964), 316.
- 6) 粉体および粉末冶金 11 (1964), 253.