総 説

造粒の基本の基

武林 敬

株式会社松井製作所 MATSUI wissen 研究所
(〒175-0045 東京都板橋区西台 4-7-2)

Basic Concept for Granulation

Kei H. TAKEBAYASHI

MATSUI MFG. CO., LTD. Matsui wissen
(4-7-2, Nishidai, Itabashi-ku, Tokyo 175-0045)

Abstract : Field of business in powder handling, it was not directly produced for powders. Because of powder had lots of character, ex. shapes, size distributions and characteristics etc. Therefore, we could not best use of powder's character. Then we granulated for powder and used to object. And it was very easy to handling or next process.

In this review, I tried to summarize for fluidized bed granulator.

Key words : granulation, granulating condition, measurements of granulation

1 はじめに

粉体を扱う業界において、粉体そのものの製品化を行うことは少ない。その理由として、粉体特性、粒径形状によって、本来必要とされる粉体の持ち味が十分に生かすことができないことが多いと思われる。

一般に粒子は肉眼で1個1個を容易に識別でき、かつ形状を球とするほうが取扱いやすい。そのため、最近では、「粉体の粒子設計」¹⁾「粉体の材料設計」²⁾というような新しい考え方もでてきている。この考えを基本として、粉体という目に見えない領域から、目に見える粒へ形態を変更させること、つまり造粒について考えてみる。

とくに、色材に関して、粉体を単独で商品化することは、特殊な場合（たとえば粉体塗料、化粧品のような）を除いてあまり見かけない。ただし、色材原料（顔料、プラスチックなど）では、粉体を直接取り扱っている。その場合、上述のように粉体をそのまま、扱うのではなく、目的用途に合わせた形に造粒したほうが、ハンドリングが非常に容易になる。ここでは、一般的な流動層造粒乾燥装置を中心に考え方を紹介する。

2 造粒の考え方

造粒には多くの方法が考えられている。また、同様の方法であっても、造粒装置には様々な種類がある。また、

原料についても粉体のほか、溶液、懸濁液、泥しょう、熔融液、エマルジョンなどの液体状の場合もある。当然、原料の状態および造粒目的によって適用される造粒装置は限定される。これらは原料状態、装置形式、操作方法、造粒品の種類などによって分類される。

さらに、造粒品の形態については、ただ単に粒の形状あるいは大きさばかりでなく、造粒目的に応じて粒の表面・内部の構造、成分、量、反応、溶解・蒸発、強度、その他の特性などに関連性をもっている。これらの基本となるのは、対象原料からどのような造粒品をつくるかという粒子設計思想が必要となる。しかしながら、造粒品を想定した場合、まず最初に（1）固体粒子1個からなる単一の粒であるか、またはその粒内が中空、芯成分（液体、固体）構造、結晶形、異成分複合、薄膜形成などの特殊構造かどうか？（2）各種結合様式による固体粒子の集合体かどうか、または（1）などと同様の特殊構造のような2通りに分類できる。端的に言えば、（1）は単一体に、（2）は集合体というように言い替えられる。

ただし、造粒装置・操作方式の観点からは、以上のような形態面にとらえていくと一部重複することもある。工学的な展開にはかえって不便な場合も多く、混乱を起す。この場合の方法論としては、どのような装置機械で、気・液・固（または生成）を取扱い、どのよう

な機構と操作で目的の粒形態を制御するかを考えると良い。

まず固体+(気または液体)系の2相流という場合を考えてみる。このような状態は、装置側にとって考えてみると、気流(たとえば、流動層、噴流層など)や液流(たとえば、攪拌層)、さらに2層流と機械的要素(羽根、円板、刃、円筒などの回転体)の組み合わせによる粒子群と流体の相対的な運動として現れる。そして、このような場合、それぞれ独特の粒子間結合(各種結合媒体添加、加熱など)の様式により発生する凝集粒子(たとえば、フロック、アグロメレート、複合粒子、顆粒、ペレットなど)がある。

また、分散滴(固体もしくは液体)を使用した分散合一型の挙動もとで、滴内の微粒子、溶質、モノマー、などを拘束した状態で、合成、重合、晶析、凝集などの機構により複合粒、カプセル粒、凝集粒などの造粒が行われる。以上のような操作における必要条件は、粒子が流体流動中で完全に浮遊しているという点である。それよりも粒子濃度が高く、近接粒子間の相互作用も大きい固体・気体系または固体・液体・気体系の充填構造のような場合では、いわゆる粉体流動、圧縮などの粉体レオロジーにかかわる操作が造粒に大きな役割を果たす。そのひとつとして転動、攪拌混合などの粉体流動においては、典型的な造粒操作(回転パン、回転ドラム、攪拌混合など)のように加湿(バインダー)に伴う凝集粒(顆粒・ペレット)の形態制御が行われる。この場合、転動・混合作用、加湿・乾燥などの操作条件は、生成凝集粒の形態制御性に大きく影響するため、装置・操作の形式としては転動、混合、加湿、通気、乾燥などを併用(たとえば、転動流動層など)する機械や操作上の機能化が問題となる。また、粉体圧縮では打錠、ロールプレスなどによる錠、ブリケットなどの定型の小成形物が得られており、特に医薬品等の錠剤の仕様条件は厳しい。可塑性のある粉体については押し出し、射出などの機構によって多種多様の成形物が得られている。

造粒は、各業種特有の効果をねらって行われることが多く、それと同時に学術的あるいは技術的境界領域に属する問題が極めて多く存在する。しかしながら、各種の素材を対象にして、粉体という目に見えないものから目に見える形をつくるという点では共通である。それゆえ、

多様な技術的手法を模索しながら、より適切な形態を目指すことが重要な課題であろう。

3 造粒の基礎的考え方

造粒と乾燥は表裏一体をなしている。それゆえ、造粒と乾燥の理論的根拠を知っておくと装置のハンドリング、時間、経費等の管理が容易になり便利である。造粒には一部の方法を除いてバインダーが必要である。そのため、用いる装置によって加液方法や液量は異なるが、いずれの場合も根底に造粒と乾燥理論をおいた上で操作するべきである。操作の方法によっては、造粒と乾燥の時間を速めたり、ある条件下のみで起こるトラブルを回避することも可能となる。色材(化粧品、塗料あるいはインキのような色を目的とする材料)の場合は熱や水分で変質や色むらが発生したり、メイラード反応で褐変、熱軟化するなど敏感な成分を多く使用することがある。ゆえに、造粒方法や乾燥条件の設定には十分な注意が必要である。ここでは、造粒作業にあたっての基礎理論、およびユーティリティの簡単な計算方法を紹介する。

A 固体・液体充填構造

粒子・水系の充填構造は水分の増加にしたがい、無水(Dry)→懸垂水(Pendular)→索状水Ⅰ(Funicular Ⅰ)→索状水Ⅱ(Funicular Ⅱ)→毛管水(Capillary)→スラリー(Slurry)と移行していく。Funicular ⅡとCapillary境はバサバサ領域がネバネバ領域へ移行する点で「可塑限界」(Plastic Limit)、CapillaryとSlurryの境はネバネバがドロドロになる点で「液化限界」(LL)と呼ばれる。可塑限界量は個々の物質によって異なり、造粒時のバインダー量を決定する上で重要である。これらの模式的考え方をFig. 1に示す。混合物はそれぞれの固液量(この場合は粉体・バインダー量)(PL量)の重量比で求める。たとえば、医薬品で一般的に用いられている乳糖・コーンスターチ・アビセル(バインダーの一種)(8:1:1)を造粒する場合、可塑限界量はそれぞれ0.18 ml/g, 0.67 ml/g, 1.23 ml/gであるから、この混合物のPL値は、

$$PL = \frac{8}{10} \times 0.18 + \frac{1}{10} \times 0.67 + \frac{1}{10} \times 1.23$$

$$= 0.334 \text{ (ml/g)}$$

となる。押し出し造粒や破碎装置の練合機攪拌造粒では、

Fig. 1 Packing Structure of Particle/Water.

液の総使用量が PL 量とほぼ一致する。

未知の混合物の可塑限界量を知る簡単な方法は、一定量の混合物をボウルにはかり、メスシリンダーからバインダーを少量ずつ滴下しながら手圧により練合する。手で固めると塊状となり、指でほぐすと崩れる状態まで加液する。さらに加液していくと粘土状になる。このときの臨界点をグラム当たり換算した値がこの混合物の可塑限界量である。ただし、ダイラタンシー性のある粉体はこの方法では測定しにくい。

B 造粒のメカニズム

Fig. 2 は液架橋による造粒モデルを示している。

粉と粉との間にバインダーが介在すると、図中 A の液体架橋が形成される。このとき、液体膜内に負圧吸引力と液膜の表面張力がはたらく。

これが造粒の際の「凝集」(Agglomeration)である。2個の球形粒子にはたらく負圧吸引力の強度 (F_1) および表面張力の強度 (F_2) は基本的に次式で表わされる。

$$F_1 = 6(1-\varepsilon) \frac{\alpha}{d} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{(1-\varepsilon)K}{\pi} 2.2 \frac{\alpha}{d} \quad (2)$$

$$\text{粒子凝集力} = F_1 + F_2 \quad (3)$$

K : 粒子の接触個数計数

ε : 空隙率

α : 表面張力

Fig. 2 Granule Model for Liquid Bridge.

d : 粒子径

(1) と (2) 式より以下のことが明らかである。

- (a) 造粒前の粒子 (d) は細かいほど固い造粒物となる。
- (b) 空隙率 (ε) が小さくなるような粒度分布の粉体を造粒すると、固い造粒物となる。
- (c) 転動させながら (外圧を加えながら) 造粒乾燥すると (図中 B), 大粒子間隙に小粒子が入り込み、あるいは圧密されて密度の大きい造粒物となる。

C 造粒・乾燥プロセス

造粒・乾燥操作を行なうために湿度図表の見方を知っていると便利である。流動層造粒乾燥の場合は空気とバインダーを使用するので湿度図表からの条件設定が必要となる。Fig. 3 は低温度湿度図表である。この図は、

Fig. 3 Chart of Low Temperature and Humidity.

温度と湿度の関係を示している。一般に湿度という言葉は、通常、相対湿度をいうことが多い。この図は、相対湿度と絶対湿度の関係も示している。

(1) 乾湿球計

われわれが湿度を測る手段としてよく用いるものに、乾湿球計がある。乾湿球計の基本的原理を今一度復習してみると以下になる。2本の温度計の一方の水銀球あるいはアルコール球をガーゼで包み、水で濡らしておく。と温度差が生じる。このときの t を乾球温度、 t_w を湿球温度という。Fig. 4に、この状態を示している。常に、 $t > t_w$ である。この湿球温度計では、空気が蒸気で飽和していないかぎり水は絶えず蒸発する。このとき蒸発潜熱（気化熱）が奪われるので水の温度は下がる。水の温度が下がると空気から水への伝熱（顕熱と潜熱の移動）が始まる。やがて蒸発速度と伝熱速度が動的平衡に達し、水の温度は一定となる。（実際には水の蒸発は起こっているし、空気から水への顕熱移動も起こっている。）このときの温度 t_w が初めの空気の湿球温度である。湿球温度は造粒物乾燥中の恒率乾燥速度期間における排気温度および品温（層内の製品温度）にほぼ一致している。

(2) 断熱冷却温度

つぎに、Fig. 5に示すような断熱容器内で温度 t 湿度 H からなる空気を多量の水に接触させたとする。温度差により空気から水に伝熱され空気の温度は下がる。一方、水は蒸発して湿度が増え、やがては飽和状態となつ

Fig. 4 Dry and Wet Bulb Temperature.

Fig. 5 Adiabatic Cooling.

て静的平衡に達する。このとき水と空気の温度が t_s 飽和湿度 H_s となる。この t_s のことを初めの空気の断熱冷却温度（断熱飽和温度）といい、湿度図表（Fig. 3）の右下がりの線を断熱冷却線という。この線上の空気についての断熱冷却温度は同一である。流動層造粒中の排気温度および湿度は t_s および H_s である。

(3) 湿度図表の応用

乾湿球計において、造粒物の乾燥に使用する外気がいま湿球温度で22°C、乾球温度30°Cとする。Fig. 6のように22°Cの垂線と飽和曲線との交点Qから断熱冷却線にそって右下へたどり、30°Cの垂線と交わる点Pを求める。このP点を通るこのときの相対湿度は50%である。この空気を加熱して75°Cの熱風を乾燥機内に流したとき、粒子の表面温度（湿球温度および排気温度）は、この熱風の断熱冷却線が飽和湿度の線と交わったときの温度33°Cとなる（Fig. 7）。

熱で変質する物質で誤解してはならないことは、このときの物質の温度が75°Cではなく、33°Cであるということである。

(4) 乾燥プロセス

造粒が終了すると乾燥行程に移るが、湿潤粒子の品温と水分の乾燥の過程はFig. 8のようになる。

A期間（Ⅰ：材料予熱期間）は粒子表面の水の温度が、このときの熱風の湿球温度まで上昇する期間である。先の湿度図表でみると、22°Cから33°Cになる期間である。A～B期間（Ⅱ：恒率乾燥速度期間）は乾燥速度が最も

Fig. 6 Relative Humidity.

Fig. 7 Dry Air and Product Temperature.

Fig. 8 Drying Velocity.

速く、このときの熱風の湿球温度、先の例では75°Cの断熱冷却線が飽和湿度の線と交わったときの温度33°Cを保っている。なお、造粒が別工程で行われる場合、たとえば押し出し造粒の乾燥機内ではA→A~Bと進行して行くが、流動層造粒乾燥装置ではただちにA~Bとして始まる。B~C期間(Ⅲ：減率乾燥速度期間)は品音がしだいに上昇していく期間である。温度が上昇するということは粒子の表面が水で飽和されなくなったこと、つまり、粒子表面が乾き始めたことを意味している。恒率期から減率期に移るB点は固液充填構造という観点からみると、流動層乾燥の場合、Funicular IからPendular (Fig. 1)への移行点、湿度図表では断熱冷却線が、飽和点から右下がりに移行し始める点で「限界含水率」(Critical Moisture Content)と言われる。B点から温度が徐々に上昇していきC点で乾燥は終了する。この時点は粒子内部から表面へ水分移動速度が表面の水分蒸発速度よりも遅い。このCの時点では熱風条件と粒子は平衡状態に達しておりこれ以上乾燥は進行しない。C点は「平衡含水率」である。

(5) 乾燥速度

恒率乾燥速度期間の水分蒸発速度(R_e)は次式で表される。

$$R_e = \frac{h \times (t - t_w)}{\lambda_w} = K_H (H_w - H) \quad (4)$$

R_e : 乾燥速度 [kg/m²・h]

h : 境界膜伝熱係数 [Kcal/m²・h・°C]

t : 熱風温度 [°C]

t_w : 湿球温度 [°C]

λ_w : 蒸発潜熱 [Kcal/kg]

H : 熱風湿度 [kg-H₂O/kg-Dry Air]

H_w : 飽和湿度 [kg-H₂O/kg-Dry Air]

K_H : 物質移動係数 [kg/m²・h・Δh]

乾燥速度の最も速い期間は恒率期であることから、この期間を長引かせること、すなわち限界含水率を低くすることが乾燥時間を短くする方法である。装置の面から考えれば、熱風と粒子の接触面積の大きい流動層乾燥装

Fig. 9 High-low Temperature.

Fig. 10 High-low Humidity.

置(2~3%) 限界含水率が下がるので、箱型(20%以上)の場合より乾燥時間は短縮できる。

一方、水分蒸発速度を乾燥温度からみると、高温($t-t_w$)の場合は低温の場合($t'-t'_w$)よりその温度差は大きいから乾燥速度は速い(Fig. 9)。また、同一温度でも高湿になるほど湿球温度が高くなるから、低湿($t-t_w$)は高湿($t'-t'_w$)より乾燥速度は速くなる(Fig. 10)。したがって、乾燥速度を速くする方法は高温で低湿の熱風を使うことが最も有効となる。

(6) 技術面での諸問題

乾燥装置の内壁や設置場所の外気が低温のとき、急激に熱風温度を上げると、水の蒸発量が急に多くなり、金属面で露点(Dew Point)に達して結露(水滴発生)するので注意を要する。露が生じるということは乾燥期内部の管壁付近の空気が飽和もしくは過飽和になったことを意味する。結果として、微粉が管壁に付着するので注意が必要である。操作方法としては予めウォーミングアップして管壁を暖めたり、熱風温度を徐々に上げるなどの方法が有効である。

また、バインダーを使った造粒品の乾燥で急激に温度を上げると、粒子表面にフィルム膜が形成され乾燥速度がかえって遅くなる場合がある。水分の蒸発は三次元的に毛管を伝わって表面から行われるが、フィルム形成はこれを妨げることになる。さらに、水溶性の有色成分や色素を含有する粒子は、バインダーの溶媒の蒸発にともなって表面に移動し「色むら」の原因となるので、箱型

乾燥機の場合はときどきかき混ぜる必要がある。

アルコールをバインダーとした混練物を乾燥する場合の注意も必要である。エタノールの爆発限界濃度は3.3～19% (容積率) の範囲である。この範囲内のガスは装置内で着火エネルギーにより爆発の危険にさらされる。ハード面ではアース、バグフィルター、排気ファン、モーターの選定に注意し、電気ヒーターを蒸気ヒーターにするなどの配慮も必要である。ソフト面では爆発限界濃度以下で乾燥する操作、たとえば初期乾燥でヒーターをOFFにしたり、風量を下げたりすることも有効である。流動層造粒乾燥では水-アルコールの割合、乾燥能力とスプレー量を検討し、常に爆発限界濃度以下の流動層内ガス濃度とすべきである。そのときのガス濃度はガス検知管で測定できるが、風量、給排気温度、スプレー量がわかれば容易に計算することもできる。

D ユーティリティ

流動層等の回分式乾燥機におけるユーティリティの簡略計算法を以下に述べる。これによって、一回の造粒時間や一日の作業時間及びそれに要した経費の概略をつかむことができる。

(1) 乾燥能力

乾燥能力 (kg) = [風量 (m³/min) × 空気密度 (kg/m³) × 空気比熱 (Kcal/kg・°C) × |給気温度 (°C) - 排気温度 (°C)| × 熱効率 × 時間 (分)] ÷ 蒸発潜熱 (Kcal/kg (水))

乾燥能力の計算式は流動層造粒の計算式ともなる。流動層造粒は粉体を乾燥させながら水分を蓄積させ凝集させる方法である。スプレーによる加湿と乾燥を同時に繰り返すことにより、表面張力と付着力を強くさせ造粒していく。上式の計算により、スプレーによる加湿能力が乾燥能力を上回るよう設定し、これを一定時間繰り返す。バインダーの総使用量は粉体の可塑限界前後である。造粒終了時の保有水分量を可塑限界量の20%程度にするよう乾燥能力を調節する方がよい。

(2) 蒸気代

蒸気代 (円) = [風量 × 空気密度 × 空気比熱 × (給気温度 - 排気温度) × 蒸気製造コスト × 時間] ÷ [蒸発潜熱 × 熱交換器効率]

1 kg の灯油及び重油の発熱量は10,000 Kcal/kg程度であるから、その1 kg で製造できる有効蒸気量は熱効率を0.7とすると、およそ12 kg である。

灯油や重油のkg当たりの料金を70円とすると6円/kgとなる。通常、1 kg の蒸気製造コストは6円として計算される。

(3) 電気料金

電気代 (円) = 電動機容量 (kW) × 稼働率 × 時間 (h) × 20 (円/kWh)

通常、ブロワーやコンプレッサー等の実稼働における電動機の消費電力はモーターの定格の75%としてさし

つかえない。kWh 当たりの単価は基本契約量及び冬・夏期によって異なるが、20 (円/kWh) として計算されるのが一般的である。

4 流動層の圧力損失と風量測定

空気を用いて造粒乾燥を行う装置の風量や、風速の管理は極めて重要である。造粒ではバインダーによる「濡れ」と熱風による「乾燥」のバランス、すなわち固液充填構造が決定的な要因である。乾燥は温度と風量によって定まるから、風量測定の方法と仕組みの基礎を知っておくと便利である。

ベルヌーイの法則によれば、流体の機械的エネルギーの総和、すなわち位置、運動、圧力の三つのエネルギーの総和は一定である。流れの途中で通路が狭くなれば流速が速くなり、運動エネルギーは増加する。総和が一定であるから、代わりに圧力のエネルギーは減少する。圧力のエネルギーの減少とは圧力が下がることにほかならない。造粒乾燥装置に取り付けてある静圧計の変化で空気の流れぐあいが判定できるので、圧力の基礎知識も役に立つであろう。

A 流動層の形成

金網などの分散板上に粒子を乗せ、下方より空気を送入すると粒子は浮かび上がり空気との混相流相が形成される。このときの粒子と空気はあたかも液体が沸騰しているように流動している。このような状態の層を流動層 (Fluidized bed) という。流動層に粒子を充填し、空気を送入すると、風量の増加にしたがって固定層 → 流動層 → 輸送層と変化していく。

(1) 固定層 (fixed bed)

分散板 (金網) に送られた空気は整流され、小さな気泡となって粒子の間隙を通り抜ける。空気量が少ないうちは粒子は浮かび上がり固定層としてとどまっている。しかし、空気量の増加にともない抵抗が高まり圧力は降下する。

(2) 流動化の始まり (minimum Fluidized velocity, U_{mf})

空気量がしだいに多くなると、ついにある時点で充填した粒子層の表面が「ブクブク」と動き始める。空気も小泡となって粒子表面を通過していく。このときが流動化の始まりである。このときまで圧力は直線的に降下していく。

(3) 流動層 (Fluidized bed)

ついに粒子は浮かび上がり上下運動をするようになる。空気量を多くすると浮遊する粒子も高くなる。通常、流動状態の高さは固定層の高さのおよそ2倍程度が適当である。

(4) 輸送層 (Transporting bed)

空気量をさらに多くすると、粒子の運動はますます活

発となり、ついにはバグフィルターに張り付いてしまう。バグフィルターがない場合は装置から飛び出し排気ダクトへと飛び出す。これは、空気輸送の領域である。

B 圧力損失 (Δp)

分散板 (金網) の真下と流動層の上部を管でつなぎ、U字形のガラス管 (U字管マンオメーター、後述) 内に水を封入して空気を流した場合を想定する。(Fig. 11)。まず空気が金網 (スクリーン) を通過するとき抵抗を受け、圧力が降下する。つぎに粒子層を通過するときも、粒子の重量に応じて圧力降下する。これを圧力損失といい、 Δp で表す。このふたつの圧力降下の差がU字管の水の高さの差となって現れる (差圧)。粒子を投入しない状態で測定すればスクリーンの Δp が分かり、スクリーンの Δp を差し引くか、スクリーンの真上に管をつなげば流動層の Δp を実測することができる。流動層の圧力損失の測定は仕込量やブローア的能力を決定するうえで重要である。

一方、固定層 → 流動層 → 輸送層への移行を圧力損失の変化でみると Fig. 12 のようになる。

(1) まず投入前のスクリーンの圧力損失であるが、ふつう流動層の Δp の 10% 以上が必要とされている。

Fig. 11 Measurement Model of Pressure Loss (Δp).

Fig. 12 Pressure Drop in Fluidized Bed.

スクリーンの Δp が小さすぎると空気がスクリーン全体に均一に広がらず、一部分から流れてチャネリング現象 (吹き抜け現象) を引き起こす。したがって粒子全体が浮かび上がらず正常な流動層を形成しない。

(2) 粒子を投入し空気量をしたいに多くすると (流速を大にすると)、粒子は固定層のまま浮かび上がらないが Δp だけが大きくなっていく ($A \rightarrow B$)

(3) B 点は先に述べた流動化の始まり (U_{mf}) で流動層が形成される。流動層が形成されると、いったん Δp は下がるが以後は流速を強めても Δp はほぼ一定である ($C \rightarrow D$)。通常の場合の流速は最小流動化速度 (U_{mf}) の 2~4 倍程度である。

(4) 流速をさらに大きくすると粒子の動きは激しくなり Δp も少し大きくなる ($D \rightarrow F$)。ただし、この状態は正常な運転状態ではない。G は終末速度 (U_t , terminal velocity) で、バグフィルターを付けていなければ粒子は全部吹き飛ばされてしまい輸送層となる。したがって流動層の Δp は消失する。

C 流動層の圧力損失 (Δp) と仕込量の関係

Fig. 11 の測定モデルにおいて、空転時のスクリーン (流動床) の Δp を求めれば、残りの Δp は仕込量との関係となる。流動層が形成されている間は、流速、粒径 (形)、粒度分布、塔径の大小にかかわらず圧力損失 Δp は粒子径に釣り合うほぼ一定の値であり、次式が成立する。

$$\Delta p \text{ (g/cm}^2\text{)} = \frac{W}{S} = l f (1 - \varepsilon) (\rho_p - \rho) (g/gc) \quad \dots \dots \dots (5)$$

W : 粒子量 (g)

S : スクリーンの面積 (cm^2)

$l f$: 仕込高さ (cm)

ε : 空隙率 ()

ρ_p : 粒子の密度 (g/cm^3)

ρ : 流体の密度 (g/cm^3)

g : 重力加速度 (cm/sec^2)

gc : 重力換算係数 ($\text{g}\cdot\text{cm/gf}\cdot\text{sec}^2$)

ここで、

$$l f \text{ (cm)} = \frac{V_r \text{ (仕込の容積)}}{S \text{ (面積)}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ρ は空気の重量で $1.2 \times 10^{-4} \text{ (g/cm}^3\text{)}$ と小さく $\rho_p - \rho \approx \rho_p$,

$$g(980)/gc(980) = 1$$

したがって、 $(1 - \varepsilon)(\rho_p)$ (5) はみかけ密度 [ρ_b] によく似ており次式に簡略化される。

$$\Delta p \text{ (cmH}_2\text{O)} = \frac{W}{S} = l f \text{ (cm)} \times \rho_b \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \dots \dots \dots (7)$$

D バグフィルターの圧力損失

流動層造粒乾燥装置の全ラインの圧力損失は (Δp_a),

スクリーン (Δp_s), 流動層 (Δp_f), バグフィルター (Δp_b) の総和である。バグフィルター (Δp_b) 以外は造粒乾燥中、ほぼ一定である。したがって、造粒中のトラブルの多くはバグフィルターの目詰まりに起因する場合が多い。目詰まりが起きると空気が流れなくなるので、 Δp_b は上昇し正常な流動層が形成されなくなる。一定間隔でシェーキングやパルスがバグフィルターに与えられるのはこのためである。

E 風速・風量測定

(1) U字管マンノメーター

U字形をしたガラス管に液体を封入 (封液) し、 P_1 , P_2 の圧力をかけるとHなる液中の差ができる (Fig. 13)。圧力差により液柱の高さも変化するから、この差圧を用いて風速や風量を測定することができる。これをマンノメーターという。封液は水銀、アルコール、油でもよいが、風量測定の場合はふつう水が用いられる。

(2) ピトー管

Fig. 14 はピトー管にU字管マンノメーターを接続したモデルである。いまダクトに密度 ρ の空気を流すと開口部 A には圧力 P が現れるが、流れの方向に向けた開口部 B には、

$$P' = P + \frac{U^2 \rho}{2gc} \quad (\text{kg/m}^2) \quad (8)$$

の圧力が現れる。ここで U (m/s) は、B 点の流速である。 P' を総圧、 $P' - P$ の差を動圧、 P を静圧という。普通圧力と言えば、静圧のことである。U字管マンノメーターの式は、

$$P' - P = \frac{g}{gc} (\rho' - \rho) H \quad (9)$$

ρ' : 封入した液体の比重

(8), (9) 式から

$$u = \sqrt{2gc \left[\frac{P' - P}{\rho} \right]} = \sqrt{2gH \left[\frac{\rho'}{\rho} - 1 \right]} \quad (\text{m/s})$$

Fig. 13 U Manometer.

..... (10)
 $\rho'/\rho \gg 1$ であるから、ピトー管による風速測定は次式に簡略化される。

$$u \doteq \sqrt{2g \frac{\rho'}{\rho} H} \quad (\text{m/s}) \quad (11)$$

(3) オリフィス計

中央に円孔をあけた薄板を直管の途中に挿入して流れを絞ると、その部分の流速が増し、代わりに圧力が下がる (ベルヌーイの法則) (Fig. 15)。このオリフィス板の前後の圧力差を測定し、風速や風量を求める方法がオリフィス計である。

オリフィス計による風量測定は次式により求める。

$$Q = CA_0 \sqrt{2g \frac{\rho'}{\rho} - 1} H \quad (12)$$

C : 流量係数

A_0 : オリフィス円孔

g : 重力加速度

ρ' : 封液の密度

ρ : 空気の密度

実用的には、風量 Q の時に差圧が Δh になるオリフィス板を製作しておけば、差圧が Δh_1 になったときの風量 Q_1 を求めることができる。このときの式は以下の通りである。

$$\Delta h_1 = \Delta h \times \left(\frac{Q_1}{Q} \right)^2 \quad (13)$$

したがって

$$Q_1 = \sqrt{\frac{\Delta h_1}{\Delta h}} \times Q \quad (14)$$

Fig. 14 Pitot Tube.

Fig. 15 Orifice Meter.

(4) その他

圧力を測る計器ではブルドン管圧力計が一般的であり、ほとんどの装置に使われている。

1気圧 (1 atm) を0として圧力を測定したものをゲージ圧といい、大気圧より高い圧力を正圧、低い圧力を負圧という。流動層造粒乾燥装置は通常排気側と給気側のどちらか、もしくは両方にブロアーを装備している。排気側にブロアーを装備している場合は、管体内部は負圧となり、給気側にブロアーを装備した場合は正圧となる。もちろん両側にブロアーを装備した場合は正圧にも負圧にもなる。ブルドン管圧力計には2個の接続口があり正圧も負圧測定できるようになっている。

風速を測るものに熱線風速計がある。これは風速による熱線の温度を電気抵抗変化によって検出するもので、計器から風速 (m/s) をダイレクトに読み取ることができ便利である。風速は層流の域を測る必要があるため、測定位置から前後にダクト径の5倍以上の直管部が必要である。この風速とダクト面積から風量を割り出すことができる。

直接風量を測定できる計器にロータメータ (rotameter) がある。この装置は目盛り付きのガラス円筒内に浮子 (float) または回転子 (rotor) が入っており、

浮力と自重のバランスから風量を読み取るものである。

5 おわりに

本稿では、造粒操作技術のほんの一部分に限って解説を試みた。それゆえ、読者のなかには物足りない感じをおぼえた方もおられると思われる。しかしながら、造粒操作に対する基本的な考え方については、言及できたのではないかと自負している。色材工業における造粒については他に成書があるので参照いただきたい³⁾。本稿は、高度な専門知識については触れてはいないが、実際の現場ですぐ活用できるような問題点を整理して書いたつもりである。それゆえ、現場において役に立てれば幸いである。

(受付: 1999年7月6日, 受理: 1999年7月21日)

文 献

- 1) たとえば: 製剤と粒子設計シンポジウム講演要旨集 (1984~1992) 粉体工学会主催。
- 2) 荒川, 小石, 角田, 竹内, 伊藤 編, “最新粉体の材料設計”, 1988年, テクノシステム。
- 3) (社) 日本粉体工業技術協会編, “造粒ハンドブック”, オーム社, 1993年。

日本油化学会誌本号掲載 論文要旨

[総説]

造粒の基本の基

武林 敬

株式会社松井製作所 MATSUI wissen 研究所
(〒175-0045 東京都板橋区西台4-7-2)

粉体を扱う業界において、粉体そのものの製品化を行うことは少ない。その理由として、粉体の特性、粒子形状および粒子径によって、本来必要とされる粉体なお持ち味が十分に生かしきれないことが多いためと考えられる。その場合、目的用途に合わせた形に造粒したほうが、ハンドリングあるいは後工程の操作が非常に容易となる。

ここでは、一般的な流動層造粒について解説を試みる。

(連絡者：武林 敬) Vol.48, No.9, 861 (1999)

[報文]

リポソームの巨視的状态に及ぼす

ポリエチレングリコール(PEG) 結合リン脂質の PEG 鎖長の影響

橋崎 要^{*1,*2} ・ 伊藤 智佳^{*3} ・ 酒井 秀樹^{*1,*4} ・ 横山 祥子^{*5} ・ 田口 博之^{*2}
斎藤 好廣^{*2} ・ 小川 尚武^{*2} ・ 阿部 正彦^{*1,*4}

- *1 東京理科大学理工学部(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
- *2 日本大学薬学部(〒274-8555 千葉県船橋市習志野台7-7-1)
- *3 日本油脂油化学研究所(〒210-0865 神奈川県川崎市川崎区千鳥町3-3)
- *4 東京理科大学界面科学研究所(〒162-0825 東京都新宿区神楽坂1-3)
- *5 共立薬科大学(〒105-8512 東京都港区芝公園1-5-30)

ジステアロイル-N-モノメトキシ-ポリエチレングリコール-スクシニル-フォスファチジルエタノールアミン(PEG-DSPE)、(PEG-DSPEのPEG平均分子量は1000, 2000, 3000, 5000および12000)のPEG鎖長がリポソームの巨視的状态に及ぼす影響を、リポソーム形成、粒子径、表面電位および分散性の観点から検討した。調整に用いたジパルミトイルフォスファチジルコリン(DPPC)の量は全てリポソームの形成に使われたが、長いPEG鎖をもつPEG-DSPEの場合には用いた全ての量がリポソーム形成に使われるのではなかった。リポソーム二分子膜中のPEG-DSPEの濃度は、PEG-DSPEのPEG鎖長の増加に伴い減少した。PEG-DSPEを含むリポソームの粒子径は、PEG-DSPEのPEG鎖長の増加に伴い減少した(PEG12000-DSPEを除く)。PEG12000-DSPEの場合には、DPPCリポソーム表面に吸着しているようであった。リポソームのゼータ電位の負の絶対値は、PEG-DSPEのPEG鎖長の増加に伴い減少した。PEG-DSPEを含むリポソームの分散性は、ゼータ電位の絶対値の減少にもかかわらず、少なくとも14日間は保持されていた。

(連絡者：阿部正彦) Vol.48, No.9, 871 (1999)