

湿式造粒 — 転動造粒法

転動造粒法は、パンまたはドラム等を造粒容器として、水または造粒促進材の液体を使って原料粉粒体を所要サイズの粒子に造粒する方法で、湿式造粒法に属する。その生産工程は、低速回転するパンまたはドラムのような造粒容器に原料粉粒体を連続に投入して、水または造粒促進材の水溶液を霧状にして吹き付け、粒子が造粒容器の回転に沿って転動しながら別の粒子に衝突し、結合して大きくなり、最終に所要サイズの粒子に成長する。

転動造粒法の特徴は粒子が転動しながら成長していくため、できた粒子が球状または球状に近い形を有し、表面が滑らかで、湿潤状態では粒子の強度が高くないが、乾燥を通して形成した固架橋の結晶状態により硬度の高い粒子を得ることもできる。また、粒子の粒度を制御しやすく、生産効率が高い。我が国では、化成肥料の生産には転動造粒法が主流である。

一、転動造粒法の原理

転動造粒には液架橋力の働きが非常に重要な役割を果たす。造粒過程において、液体の添加量が非常に少ない場合は、粒子の表面が完全に濡れず、粒子の間に空気が連続相で、液体が分散相を呈し、ごく一部粒子間に液架橋を形成したが、互いに繋がっていない。この状態に於いて、液架橋の気-液面の界面張力が一次粒子間に与える結合力が弱く、粒子が結合と崩壊が繰り返し、大きな粒子が形成しにくい。液体量が適宜の場合は、粒子の表面が完全に濡れて、一次粒子間の空気の大部分が液体に取って代わり、空気が分散相、液体が連続相となり、至るところに液架橋ができ、空気を囲むように網状に連結している。この時点では液架橋の界面張力と毛細管負圧が一次粒子を強力に結合させる。液体量が過量になった場合は、粒子間の隙間が完全に液体に充満され、空気が全部追い出され、粒子間の液架橋が消滅してしまい、気-液面の界面張力が無くなり、液体の表面張力だけを残し、粒子間の結合が崩壊して全体がスラリー状態となる。従って、転動造粒には液体添加量が非常に重要な要因で、液体量が過不足とも造粒に支障をきたす。

1. 粒子の形成と成長過程

転動造粒に於ける原料粉粒体の一次粒子から製品粒子への成長過程は次の 3 段階に分けられる。まず、一次粒子が数個または数 10 個が結合して核を形成する段階、次いで、核を中心にほかの粒子または核と衝突して、付着しながら成長して大きくなる段階、最後に大きくなった球状粒子はさらに転動して摩擦力と粒子自身の重力を受け、内部が緻密に、表面が滑らかになる整形段階を経て、完成して製品となる。その概略は図 1 に示す。

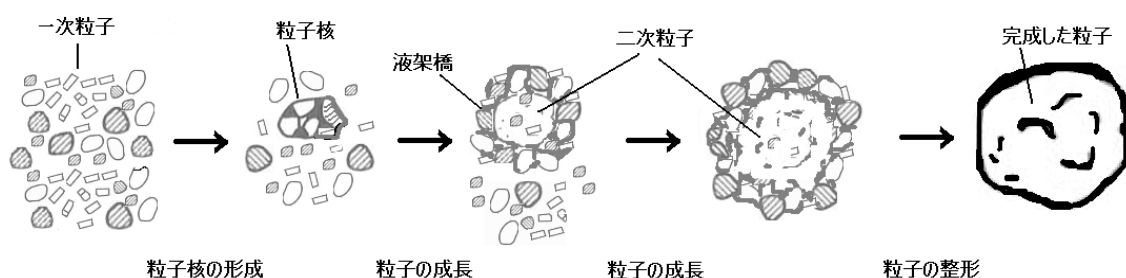


図 1. 転動造粒に於ける粒子の形成過程略図

1-1. 粒子核の形成

原料粉粒体に水またはその他の液体の添加により、表面が濡らされ、液架橋が形成された。液架橋の固-液面の界面張力により粒子が互いに近寄り、小さな球状の核を形成する段階である。この段階には、一次粒子の表面がすでに薄い液体層に覆われているが、毛細管水が各粒子の接触部位にしか存在しない。粒子間の隙間がほとんど空気で充満されている。この状態では、粒子間の距離があまり縮んでいなくて、緩やかな結合である。

球状の核の形成は主に機械的外力が一次粒子に作用して、粒子間の接触点を増やし、液架橋の数を増加させる。また、顆粒の接触部位を強化し、細い毛細管を形成させることにより粒子表面に存在する液体を毛細管水に変化させ、毛細管力の負圧を大きくさせる。従って、造粒容器の回転により、一次粒子が重力、遠心力と摩擦力の影響を受け、絶えずに回転と擦り揉みを繰り返され、多数の球状核を形成する。

この段階では、水や液体による一次粒子表面の湿潤状態が決め手である。

1-2. 粒子の成長

球状粒子の成長に必要な要素は、粒子の表面に適宜な水分があり、湿潤状態を呈し、その水分量が分子結合水の極限含有量にほぼ同程度であること、相対的に乾燥している粉粒体が存在していることである。

前段階に形成された球状核が造粒設備に絶えずに転動して、次第に圧縮され、緻密になる。この過程に於いて、粒子核内部の隙間に存在している毛細管水が粒子核の表面に追いつき出され、表面に液体層を形成し、湿潤状態を呈する。表面が湿潤した状態の粒子が転動しながらほかの相対的に乾燥している粒子（一次粒子およびほかの粒子核）と接触して、それらを表面に粘着する。この過程を繰り返すことにより、核を中心に粘着してきた一次粒子が年輪のように層状に重ねて、粒子全体が大きくなる。

粒子の成長速度は粒子表面の湿潤状態、粘着してきた一次粒子などとの摩擦力、転動運動の圧縮力で決める。

粒子表面の湿潤が不足すると、一次粒子や小さな粒子核を粘着することができず、成長が止まる。この場合は、粒子表面に霧化した液体を追加して、湿潤度を上げることが必要である。

粒子と付着している一次粒子などの摩擦力が小さい場合は、折角粘着した粒子が再び離れていく。摩擦力が大きすぎる場合は、界面張力と重力による圧縮に対する抵抗が高く、内部の圧縮がうまく行かず、嵩比重が軽く、強度の低い粒子となる。一次粒子の種類、粒度、表面形状が摩擦力に影響する。この場合は造粒促進材の添加でその影響を軽減することができる。

転動運動の圧縮力とは粒子が回転する際に受けた重力と遠心力、摩擦力の総合作用である。その働きにより粒子が次第に圧縮され、内部空間が減少し、全体が緻密になる。造粒設備の大型化、造粒設備の回転速度、造粒容器の傾斜角度の調整により粒子の転動範囲を大きくすることにより回転運動の圧縮力を増強することができる。

この段階では、粒子表面の湿潤状態と造粒設備の機械的作用力が重要である。

1-3. 粒子の整粒

所要の粒度に成長した粒子はその強度をさらに高め、表面も滑らかにして製品にする段階である。

この段階に於いて、大きくなった粒子が回転と擦り揉みの機械作用により、粒子内部の顆粒が互いに接触面積が最大になるように前後左右に位置をずらして密接となり、緻密度がさらに上がる。この微調整の結果、個々の顆粒表面を覆う薄い液体層が互いに接触して多数の顆粒を覆う共同の液体層になり、囲まれた顆粒らが分子間力、粘着力と毛細管力の負圧、液体層の表面張力で一つの粒子となる。

この段階では、水や液体の添加が不要で、粒子が転動して内部を圧縮し緻密になる過程に追い出された余分の水分がまだ十分に湿潤されていない層に吸収され、全体の水分が均一となる。なお、粒子内部に吸収されず、表面から沁み出された水分はそのまま放置したら、造粒した粒子に粘結現象が発生するだけではなく、粒子の強度を下げる悪影響も避けられない。従って、余分の水分は湿度の低い小さな粒子等に吸収される必要がある。

この段階では、機械作用力が決定的な要因である。

2. 転動造粒に影響する要素

転動造粒の生産効率、造粒した粒子の強度、粒度分布に影響する要素は主に下記の 5 つである。

2-1. 原料粉粒体の粒度と粒度分布

原料一次粒子の粒度が小さく、比表面積（単位質量あたりの表面積または単位体積あたりの表面積）が大きいほど、粒子間の空間率が小さくなり、粒子間に液架橋として存在する固－液体の界面張力が大きくなる。従って、一次粒子の粒度が小さいほど造粒した粒子の強度が高くなる。

強度の高い粒子を得るために、

- ① 一次粒子の粒度ができるだけ小さく、比表面積が大きいほどよい。固－液体の界面張力

が高くなり、粒子を結合させる作用力が強くなる。

② 一次粒子の形が不規則で、粒度分布が広いほどよい。これは二次粒子が形成する際に結合した一次粒子の隙間に小さな粒子が入り込むことにより空洞の少ない粒子ができるほか、転動によりさらに圧縮され、緻密になることには有利である。

2-2. 造粒促進材の添加

原料粉粒体の種類、表面特性により水だけを使っても造粒効率が悪いまたは造粒した粒子の強度が低い場合がある。これに対応するには造粒促進材の添加が有効である。

造粒促進材の役割は次の3つに大別される。

① 一次粒子の表面に粘着性のある膜を形成し、周辺粒子との接触と粘着を強化する。また、造粒促進材が形成した液架橋は強い界面張力を有し、粒子間の結合を促進する。この場合に於ける造粒促進材の使用法は水に溶解してから液体状として添加する。

② 形成した粒子核の隙間を埋めることにより、粒子の緻密度を上げる。この場合に於ける造粒促進材は粉末状で添加・混合する場合が多い。

③ 乾燥した後、造粒促進材同士または原料粒子との間に固架橋を形成し、造粒した粒子の強度を増強する。この場合は造粒促進材の種類と特性により粉末状で添加するものと水に溶解してから添加するものに分ける。

造粒促進材の添加量は使用目的により異なる。上記①、③の目的に使用する場合は一次粒子の比表面積と造粒促進材の種類・希釈濃度により決める。上記②の目的に使用する場合は、粒子空洞率の25～35%に相当する量を添加する。但し、造粒後の粒子肥料成分保証値と原料コストを考慮して、添加量が最小限にすべきである。

2-3. 原料粉粒体の凝集状態

表面が凸凹の多い不規則状の一次粒子が結合してきた二次粒子は大体内部空洞が多く、その空間に液体を充満して自由水が多く存在する構造となる。回転量が足りない場合は最終的には水分率が高く、嵩密度が低く、強度の低い粒子となる。

原料粉粒体の性質を変えない場合は、造粒前に粉粒体の形状を改良することにより、粉粒体の凝集状態を改善し、造粒品質を高めることができる。よく使う手法は、原料粉粒体を混合する際に予め一定の水を添加して加湿し、混合機で攪拌混合することにより適当のせん断力、摩擦力を与え、粒子表面の凸凹部位を溶解または削ることにより球状にして粒子間の接触面積を増加させる。また、粒子表面に予め薄い液体層を形成し、一部の粒子成分が溶出して強力な液架橋を形成する。特にパン造粒装置を使用する場合は、この手法で予備処理した粉粒体が粒子核の形成が速く、粒子の成長速度と強度も上がるなど効果がはっきり表れる。

2-4. 水分の添加量

水分は粒子間の液架橋を形成する最重要なファクターである。水の添加速度と添加量が適宜の場合は、造粒効率が上がり、できた粒子の強度、表面状態等の品質も良くなる。但し、原料粉粒体の種類、造粒設備の種類等により最適な添加量が異なるため、予備実験で確認すべきである。

2-5. 造粒設備の種類と回転数

転動造粒は造粒設備の回転により原料粉粒体を粒子にする方法であるため、造粒設備の種類、特に造粒パン（容器）の形状とサイズが造粒効率、造粒した粒子の品質に大きく影響を及ぼす。概して、造粒容器の直径が大きいほど、造粒効率高く、できた粒子の強度が高く、表面が滑らかである。また、造粒設備の回転数も重要である。回転が遅い場合は、粒子が造粒容器の下部に堆積して、上げられる地点が低く下へ転がる距離が短く転動不足となる。回転数が高すぎると逆に粒子の転動が追い付かず、遠心力で弾けて崩壊してしまう場合もある。

二、 パン造粒

肥料業界によく使う転動造粒の設備は、造粒容器の形によりパン造粒機とドラム造粒機の 2 つに分けられる。ほかに振動造粒機（水平振動パン造粒機、振動攪拌造粒機等）も転動造粒に属するが、化成肥料の造粒にほとんど使われていないため、最後に簡単に紹介する。

パン造粒機（Rotary Pan Granulator）は、傾斜して回転するパン（皿）に原料粉粒体を転動させ、適宜の水または造粒促進材の液体を与え、転動造粒を行う機械である。その特徴は次に記する。

- ① 構造がシンプルで、操作が簡単、メンテナンスも容易である。特にパン内の造粒状態を直接見られるので、操作の変更と調節が迅速・簡単にできる。
- ② 分級作用がある。遠心力の作用により、形成した粒子がその粒度の増大に伴いパン内に於ける転動軌道が次第に小さくなり、所要粒度に達したら自動的にパンの縁から排出される。製品の粒度が比較的均一である。
- ③ 製品粒子の強度が高く、品質がよい。粒子が転動しながら次第に大きくなるため、密度が大きく、表面が滑らかで、粉化しにくい。
- ④ 本体の価格が安く、必要な据付面積が小さい。ドラム造粒機に比べ、同様の生産能力では、パン造粒機本体の価格が 2/3、据付面積が約半分である。

短所は、パンは開放式なので、粉じんの多い原料および造粒時に化学反応が起き、有害な気体を放出するものの造粒には向けない。

1. パン造粒機の構造

パン造粒機はパン（皿）、モーター、減速機、回転軸、パン傾斜角調整装置、アーム、スプレー、スクレーパーなどで構成される。モーターからの動力は回転軸を通してパンを回

す。減速機は回転数を制御する。傾斜角調整装置はパンの傾斜角度を調整する。パンの上部に設置されているアームはスプレーとスクレーバーを装着して、造粒用水や液体はスプレーで原料粉粒体に添加し、スクレーバーはパンの底と縁に付着している原料を掻き落とす。その構造概略は図 2、実物写真は図 3 に示す。

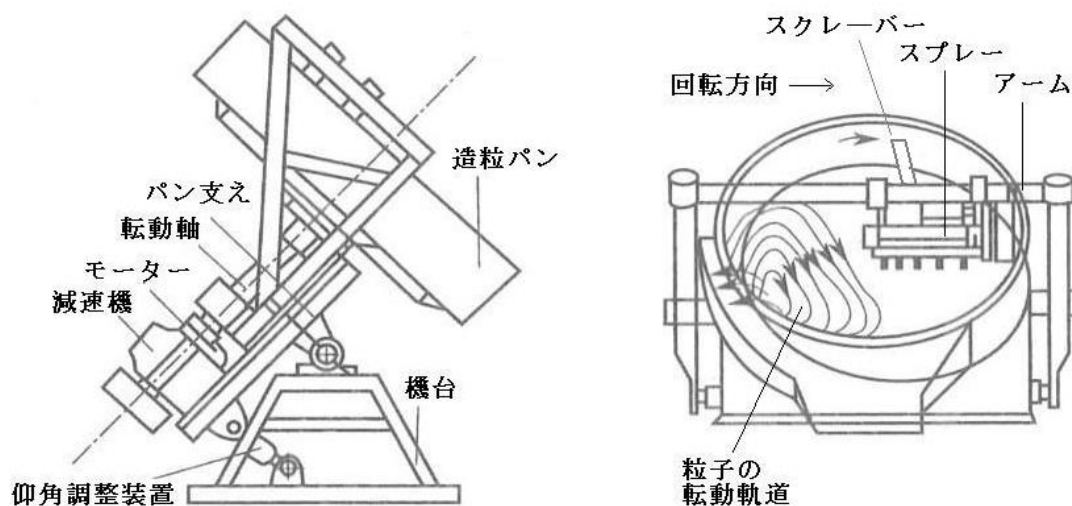


図 2. パン造粒機の構造概略図



図 3. パン造粒機写真

パンの形状は単純な円盤状のことが多いが、原料および造粒要求によりほかの形状のものもある。図 4 は工業上によく使うパン造粒機のパン形状を示す。

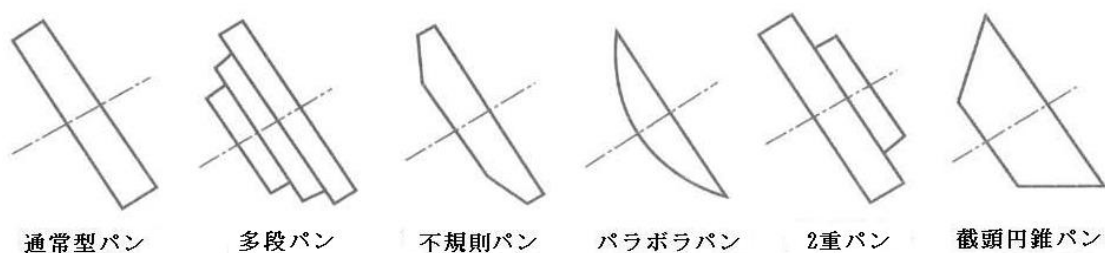


図 4. パン造粒機の各種パンの形状

2. パン造粒の粒子形成過程

パン造粒機での粒子形成過程は、下記の 3 つの段階に分けられる。

2-1. 粒子核の形成

パンに原料粉粒体を投入して、スプレーから吹き付けた液体と接触し、粒子表面を湿潤させ、粒子間に不連続の液架橋を形成することにより、粒子を凝集させる。形成した粗めの粒子凝集体がパンの回転により転動し、次第に圧縮され、球状に近い一定強度のある核を形成する。液体がパンの決まった区域にスプレーされるため、核もその区域にしか形成しない。この段階に形成した核の数は将来完成した粒子の数とほぼ同じである。また、核の強度は成長した粒子の安定性にも関連する。強度の高い核から成長した粒子の強度も高く、大きな粒子に成長できる。

2-2. 粒子の成長

形成した核は表面に液体の膜があるため、ほかの小さな粒子と接触する際にその粘着力で小さな粒子を付着させる。また、粒子間に隙間が存在して一定の可塑性を有する。粒子の転動により、表面に吸着した小粒子が再整列して、粒子間の液体が沁み出し、表面張力により全体が一つの粒子にする。また、転動による摩擦力と重力、ほかの粒子との衝突力により、粒子が次第に圧縮され、緻密になり、外形も球状になっていく。この過程を繰り返して、粒子が次第に大きく成長する。粒子の成長段階には液体の追加が必要である。

2-3. 粒子の整形と完成

粒子が所定の粒度に大きく成長すると、粒子間の液体量が理論飽和値の 85～90%に達し、過剰の液体が粒子の表面から粒子の内部に浸透して、表面の毛細管力を増大させ、粒子の内部結合がさらに強くなる。この段階には液体の供給が完全に止められたため、粒子の表面には液体膜が薄くなり、小さな粒子を付着する力が失い、粒子の成長が止まった。但し、粒子の転動が続いているため、さらに圧縮され、緻密になり、外形も摩擦により滑らかな球状になる。最終にパンの縁から排出され、次の乾燥工程に運ばれる。

3. 造粒品質に影響を及ぼす要因

パン造粒には造粒後の粒度、硬度、生産量、生産効率に影響する要因は下記の通りである。

3-1. パンの直径

パンの直径は生産量と造粒後の粒子硬度に影響する。特に生産量を支配する最も重要な要素である。パンの直径が大きいほど、単位時間の生産量が多くなる。また、直径が大きいほど、粒子の転動距離が長く、落下する際の重力も大きくなるため、粒子の圧縮力が強く、緻密になる。但し、設備製造と据付、設備の運転、生産の経済性からパンの直径を 6m 以下に抑えることが多い。

3-2. パンの縁の高さ

パンの縁の高さは粒子のパンに於ける滞留時間を影響する。パン造粒で形成した粒子が転動する際にパンとの摩擦により分級作用が発生し、小さな粒子がパンの底に沈み、大きな粒子が上に浮かび、所定粒度になった時点でパンの縁から排出される。

縁が高いほど粒子の滞留時間が長く、成長した粒子の粒度が大きくなる。但し、縁が高くなると、単位時間の生産量が落ちて、形成した大きな粒子の重量が自身の結合力を超え、転動する途中で再び崩壊することもあり、生産効率が悪くなる。

通常、パンの縁の高さがパンの直径に比例する。よく使う計算式は $H=0.20D$ である。H はパンの高さ、D はパンの直径である。なお、粒子の粒度を抑え、強度の高い粒子を造粒したいなど特殊の用途では、2重パン、截頭円錐型パンなどを使う。粒度の大きい粒子を造粒したい場合は、多段パン、円錐パンを使う。

3-3. パンの傾斜角

パンの傾斜角は粒子の転動を影響する。傾斜角が不足の場合は、パンが回転しても原料粉粒体が転動しないで、パンの表面に粘着したまま、粒子核の形成と成長ができない。従って、パンの傾斜角が造粒前に湿潤した原料粉粒体の安息角より大きくなる必要がある。ただし、パンの傾斜角が急になると、粒子の転落速度が速くなり、粒子の結合力を超えた場合は崩壊する。また、傾斜角が限界値を超えた場合は粒子がパンの回転に沿って上昇できなくて、底に堆積したままで成長できない。通常、パンの傾斜角が $35\sim 55^\circ$ 、特に $40\sim 50^\circ$ がよく使われる。なお、条件が許す限り、最適な傾斜角を予備試験で決定した方がよい。

3-4. パンの回転速度

原料粉粒体と形成した粒子がパンの回転により引き揚げられ、ある程度上昇したら重力により転がり落ち、同時に遠心力の影響を受けてパンの外縁に投げられる。この転動運動により粒子が互いに衝突と接触、表面の液体層の粘着力と表面張力により粘結と圧縮され、粒子が次第に成長する。従って、パンの回転速度が粒子の形成と成長を大きく影響する。回転速度が遅すぎる場合は、粒子が引き揚げられる高度が短く、転動距離が足りなく、粒子の形成と成長が遅い。逆に回転速度が速すぎる場合は、粒子がまだ整形できないまま遠心力によりパンの外に投げられる。通常、原料粉粒体の種類によりパンの最適回転速度が異なる。その決定は次節に詳細に述べる。

3-5. 液体の量

パンにスプレーされた液体が造粒に必要な液架橋を形成し、粒子核の凝集と粒子の成長に必要不可欠である。従って、液体のスプレー量が過不足とも粒子の形成と成長を影響する。また、噴射された液体の分布が均一になるほど球状粒子の形成と成長が均一になる。

従って、液体のスプレー幅は原料粉粒体の投入幅と同一で、圧力も一定で、均一に粉粒体に触れることが重要である。注意すべきところは、スプレーされた液体はパンの底表面には直接に接触しない。液体がパンの底表面に落ちる場合は、そこにある粉粒体が過湿となり、パンの表面に粘着する現象が起き、造粒に支障が来す。

造粒に必要な液体量は下記の計算式で概算することができる。

$$X = \frac{1}{\frac{1+(1+\varepsilon) \rho_m}{\varepsilon \rho_L}}$$

x : 液体の量 (質量)、 ε : 固めた原料粉粒体の空間率、 ρ_m : 原料粉粒体の真密度、
 ρ_L : 液体密度

化成肥料のデータではないが、表 1 には幾つかの原料から造粒に必要な水分量を示す。

表 1. 各種の原料を造粒するに当たって必要な水分量

原料種類	原料の平均粒度 (メッシュ)	造粒後の粒子水分含有率 (%)
炭酸カルシウム	200	29.5～32.1
消石灰	325	25.7～26.6
石炭粉	48	20.8～22.1
石炭燃焼灰	150	24.9～25.8
石炭燃焼灰+汚泥混合物	150	25.7～27.1

スプレーされた液体の量を精密に制御するため、自動水分コントロール装置を使う。通常、パンの粒子層に金属棒のセンサーを挿入して、それと粒子と接触し、パン本体との間に一つの電気回路を形成する。粒子の水分率により電気回路の抵抗が変化し、その抵抗値の変動を増幅して、スプレーの電磁弁開閉を制御する。

3-6. 原料粉粒体の投入と液体のスプレー位置

造粒する粒子の転動運動を妨害しないため、原料粉粒体の投入と液体のスプレー位置は粒子の転動軌道区域を離れる。通常、パンが時計回しの場合には、原料はパンの右上方から投入され、液体はパンの右側中部から原料の上にスプレーされる。

3-7. スクレーパーの位置

パンの底と縁に粘着している原料を掻き落とすために、パンの上方にスクレーパーを装着するところが多い。スクレーパーの長さが大体 $0.15R$ で (R : パンの半径)、粒子の転動軌道区域を離れて、パンの垂直中心線と $15\sim 25^\circ$ の傾斜角度で設置する。

4. パンの回転速度の計算

パン造粒機は回転する傾斜状の円盤 (パン) に粒子が規則的な転動運動を行い、次第に

大きく成長して、最後にパンの外縁から排出される。パンに於ける粒子が受ける作用力を解析して、パンの回転速度を決め、粒子を最適な運動軌道に乗せることが造粒品質、生産効率の向上に非常に重要である。

4-1. 粒子の受ける作用力の解析

図5に示すように回転するパンに於ける粒子Aが遠心力 F_c 、重力 G 、パンの縁からの抵抗力 F 、摩擦力 F_r の作用を受けている。また、重力 G は直下へ落下する分力 G_2 とパンの回転により縁に沿って下へ落下する分力 G'_2 に分解して、摩擦力 F_r も重力分力 G_2 を妨害する F_{r1} と重力分力 G'_2 を阻害する F_{r2} に分解することができる。

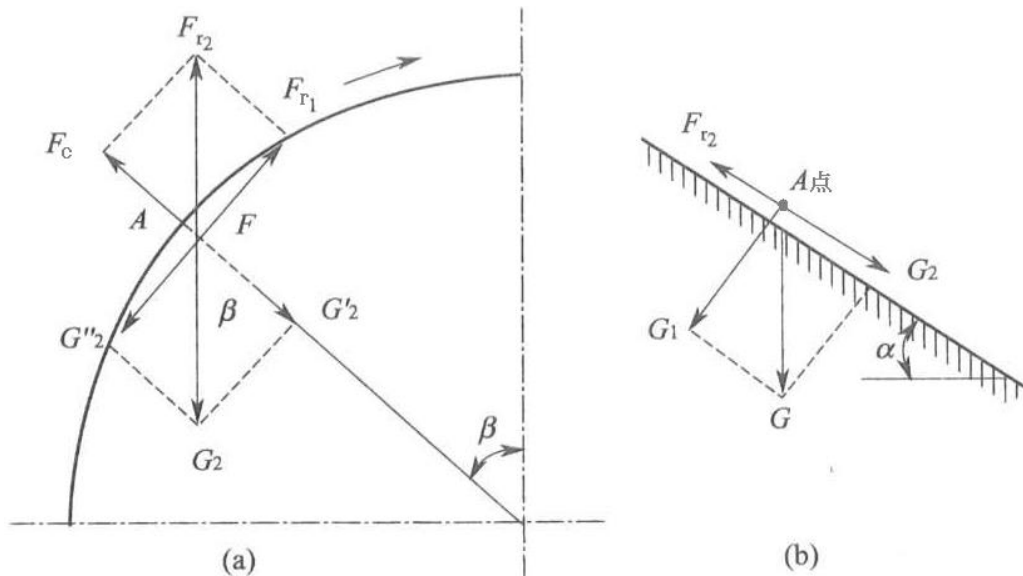


図5. 回転するパンに於ける粒子への作用力

すべての作用力が互いに平衡する際に、粒子AがA点に上昇する。この際に下記の力関係が成立する。

$$G'_2 = Fr_1$$

$$F + G'_2 = Fc + Fr_2 \cos \beta$$

粒子がA点より超えた瞬間、重力 G が摩擦力 F_r を超え、粒子Aが下へ転がり落ちる瞬間に F がゼロとなり、

$$G'_2 = Fc + Fr_2 \cos \beta$$

$$\text{または} \quad mg \sin \alpha \cos \beta = m \frac{u_t^2}{R} + mg \cos \alpha (f \cos \beta)$$

$$\text{省略して} \quad \frac{RN^2}{900} = (\sin \alpha - f \cos \alpha) \cos \beta$$

$$\text{書き換えると、} \quad \cos \beta = \frac{RN^2}{900} \times \frac{1}{\sin \alpha - f \cos \alpha}$$

$$u_t : \text{パンの角速度、} u_t = \frac{\pi RN}{30} \text{、m/s}$$

R : パンの半径、m

f : 粒子とパンの摩擦係数、 $f = \tan \rho_s$

α : パンの傾斜角

β : 粒子の離脱角

N : パンの回転数、 r/min

ρ_s : 粒子とパンの底面の摩擦角

パンの底に落ちた際に重力 G が消え、遠心力 F_c により粒子がパンの縁へ移動し、摩擦力 F_r の作用を受け、パンの回転により上へ持ち上げる。この場合、粒子の上昇高度は粒子の離脱角 β に支配する。

上の式から、パンの直径、回転数、傾斜角が一定の場合は、粒度（粒子の直径 d ）の異なる粒子がその離脱角も異なる。これは粒子の粒度によりその摩擦係数が異なることに由来するものである。例えば粒子 A_1 の直径 d_1 が粒子 A_2 の直径 d_2 より大きいと仮定すれば、その粒子とパンの底面との摩擦角 ρ_s が

$$\rho_{s1} < \rho_{s2}$$

摩擦係数 $f = \tan \rho_s$ であるため、 $f_1 < f_2$ となり、上記の式に代入して、 $\cos \beta_1 < \cos \beta_2$ 、 $\beta_1 > \beta_2$ となる。

従って、粒子の粒度が大きいほどその離脱角が大きくなり、粒子の上昇高度が低くなる。転動成長の過程に粒子がその粒度により落ちる高度が異なり、分級される。その転動の軌道曲線は図 6 に示す。

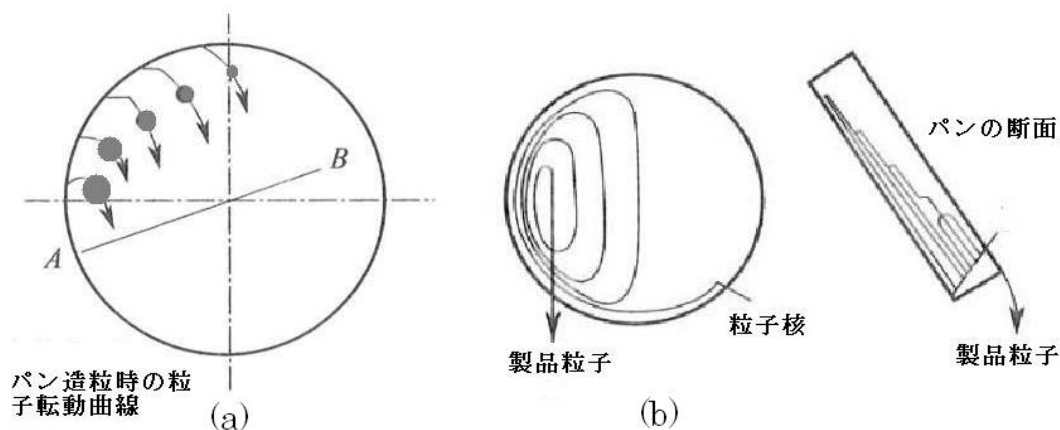


図 6. パン造粒時に粒度の異なる粒子の転動軌道 (a) と粒子の成長に伴う転動軌道の変化 (b)

図 6 の (a) に示すように、小さい粒子がパンの高い地点に到着してから離脱し、転落して早くパンの底に転がり落ちる。粒径の増大に伴い、粒子がパンの左縁に沿って上昇し到着した地点が次第に低下し、放物下降線も次第にパンの左側に偏る。パンに於けるその粒子の転動軌道はらせん状を呈する (b)。

粒子集団から見ると、小さな粒子がパンの中間線をやや超えて転がり落ちて、先にパン

の中間線付近の底に到着し、ついで中程度の粒子がパンの中間線の左側から転がり落ち、中間線左側の底に到着し、小さな粒子の上に堆積する。大きな粒子がパンの左縁中間の水平線を超えたところから転がり落ちて、中程度の粒子の上に堆積する。従って、パンの左側に粒度の小さい粒子が下に、中程度の粒子が中間に、大きな粒子が上部に層に分けて分級され、所定粒度に達した粒子が層の最上部からパンの左縁を超えて排出される。

一方、転動造粒に於ける粒子の成長は粒子がパンの底面に沿って転がり落ちる途中、小さな粒子に衝突して、それらの粒子を粘着する過程である。単位時間に粒子の転がり落ちる回数が多いほど粒子の成長速度が速くなる。従って造粒効率がパンの回転速度に比例する。しかし、パンの回転速度が速くなるにつれて、遠心力も増大し、粒子が遠心力の作用を受け、パンの縁に押し付けられ、離脱して転がり落ちることを妨げる。また、回転速度が限界値を超えた場合は、粒子が遠心力によりパン外へ投げられる。回転速度を増加するにはパンの傾斜角も同時に増加させる必要がある。ただし、傾斜角の増加により、粒子の転がり落ちる速度も速くなり、パンの底やほかの粒子に衝突する力も増し、粒子の結合力を超えた場合は粒子が崩壊する。

4-2. パンの傾斜度とパンの直径との関係

パンの傾斜角がパンの直径と一定の相関関係があり、パンの直径の増大に伴い、傾斜度が小さくなる。これは粒子が斜面に転動する距離がパンの直径の増大により長くなり、加速度を受けパンの底に到達した瞬間速度が速くなる。その速度に由来する衝撃力を軽減し、粒子の崩壊を防ぐため、パンの傾斜角を小さくして、加速度を抑える必要がある。

パンの傾斜度 α とパンの直径 D との関係は図 5 (b) に示すように粒子が重力分力 G_2 の作用を受け、パンの斜面に沿って転がり落ちる。その転動を妨げる力は摩擦分力 F_{r2} である。転動距離が L (転動距離 L の最大値はパンの直径 D に相当する) の場合は、粒子に対する各作用力の働きは

$$A = mg (\sin \alpha - f \cos \alpha) L$$

この働きが全部粒子の運動エネルギーに転換される場合に粒子の運動エネルギー増加量が

$$\frac{1}{2} m u_t^2 - \frac{1}{2} m u_{t,0}^2 = mg (\sin \alpha - f \cos \alpha) L$$

転動開始の初期速度が 0 と仮定して、 $u_{t,0} = 0$ である場合は粒子の運動エネルギー増加量が各作用力の働きに相当する。

$$\frac{1}{2} m u_t^2 = mg (\sin \alpha - f \cos \alpha) L$$

粒子が距離 L (パンの直径 D) を転がり落ちて、その終点に到着する瞬間にその速度が最大に達する。

$$u_t = \sqrt{2gD (\sin \alpha - f \cos \alpha)}$$

m : 粒子の質量 ; ut : 粒子の落下速度 ; α : パンの傾斜角

もし、原料粉粒体が同じで、直径 D_1 のパンを使って造粒試験で得た粒子の強度（密度）が最大となるパンの傾斜角が α_1 であると判明した場合は、実生産に使う直径 D_2 のパンの最適傾斜角 α_2 は下記の式で計算できる。

$$D_1 (\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1) = D_2 (\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2)$$

また、原料粉粒体がすべてパンの中間垂直線の頂点に到達してから転がり落ちるいわゆる理想な転動軌道を仮定する場合には、粒子の脱角 β が 0° となり、パンの傾斜角 α が下記の式で計算できる。

$$\frac{RN^2}{900} = (\sin \alpha - f \cos \alpha) \cos \beta$$

ただし、原料粉粒体は各粒子の粒度が異なり、一定の粒度分布があり、上記の理想な転動軌道が実際に存在しない。実際はパンの傾斜角が計算値より小さくなる。

4-3. パンの回転速度の計算

パンの回転速度が粒子の転動を支配するため、その速度の設定が非常に重要である。通常、パンの回転速度は造粒に使う原料粉粒体の臨界回転数により確定される。臨界回転数とは、パンに載せてあるすべての原料粉粒体がパンの回転に伴って回転するが、回転の遠心力によりパンから投げ出さない最大回転速度である。

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \sqrt{\sin \alpha}$$

N_c : 臨界回転数、r/min ; D : パンの直径、m ; α : パンの傾斜角

経験則では、パンの実際回転数 N は臨界回転数 N_c の 0.5~0.8 に相当する。なお、パンの回転数が遅いほど造粒した粒子の平均粒度が小さくなる。表 2 は小型実験用パン造粒機を使ってパンの回転数と造粒した粒子の粒度分布との関係を表す実験結果である。

表 2. パンの回転数が粒子の粒度分布に及ぼす影響

		パンの回転数 (r/min)			
		20	24	28	32
粒子の粒度 分布範囲 (%)	>6.35mm	34	30	33	50
	3.175~6.35mm	50	52	53	38
	1.59~3.175mm	11	14	12	10
	<1.59mm	5	4	2	2
平均粒度 d_p /mm		4.88	4.78	4.94	5.25

また、造粒時に最適な粒子形成率を得るにはパンの回転数と直径、傾斜角度の関係は次の経験式で計算することもできる。

$$N = \frac{38.5}{\sqrt{D}} \sqrt{(1 - \cos \alpha)}$$

N : パンの回転数、r/min ; α : パンの傾斜角度 ; D : パンの直径、m

この経験式は、造粒原料の比重、パンの形、造粒促進材の有無により係数の数値が若干変動する。最適値は実験で確認する必要がある。

5. パン造粒機の規格とパラメーター

パン造粒機は図 2 に示すように、機台、造粒パン（皿）、駆動装置（モーター、減速機、動力転動軸等）、パンの傾斜角調整装置、アーム（スプレー、スクレーパーを装着する）、原料フィーダ等から構成される。パンの傾斜角は 35～55°、パンの回転数は 10～30/min に調節することができる。

メーカーのパンフレットから規格とパラメーターを摘要して表 3 と表 4 に纏める。

表 3. パン造粒機の規格とパラメーター (1)

規格値	単位	パラメーター						
パン直径	mm	1600	2000	2200	2500	2800	3200	3500
パン高さ	mm	300	350	360	360	450	550	600
回転速度	r/min	19~22	16~18	12~16	12~14	13~13.5	13	12
傾斜角	°	45~60	45~60	40~60	40~55	40~55	45~55	40~60
パン面積	m ²	2.01	3.14	3.80	4.91	6.15	8.04	10.17
生産能力	t/h	0.4~1.5	0.6~2.5	0.7~3.0	1.0~4.0	1.2~5.0	1.5~6.5	2.0~8.0
モーター 定格出力	kw	4.0	5.5	7.5	11.0	13.5	15	18.5

表 4. パン造粒機の規格とパラメーター (2)

パンの直径 (m)	最大生産能力 (t/h)	パンの傾斜角 (°)	パンの回転数 (r/min)	パンの高さ (mm)
1.0	1	35~55	19/25/29.2	250
1.6	3	35~55	19	300
2.0	6	35~55	15.1	400
2.2	8	35~55	14.26	500
2.5	10	35~55	11.81	500
2.8	16	35~55	11.14	600, 640
3.2	20	35~55	9.06	650
3.5	22	35~55	9.0	650
4.2	33	35~55	7.0	450, 950

6. 特殊な形のパン

特殊な用途に応じて、下記のような特殊な形のパンもある。ただし、肥料分野では特殊な形のパンがあまり使われていない。

6-1. 多段パン

多段パンは図 7 に示すように直径の異なる 3 段階の形を呈し、内段が小さく、中間段、外段の順で大きくなる。原料粉粒体が内側の段に投入され、小さな粒子に形成してから中間の段に移動して、さらに大きく成長してから外側の段に移動して、最終的に大きな粒子になる。多段パンは粒度 10mm 以上の大きな粒子を造粒するときに使われる。

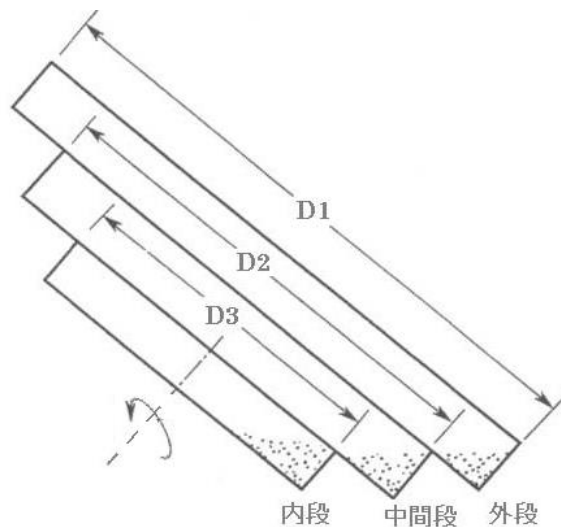


図 7. 多段パン

6-2. 2重パン

2重パンは図 8 に示すように直径が小さく縁が高い内層パンと直径が大きく縁が低い外層パンから構成される。2重パンは主に密度が低く、変形しやすい粒子の造粒に使われる。原料粉粒体が内パンに投入され、所定サイズに造粒されてから外パンに排出される。粒子は外パンでさらに転動して球状化にして緻密度を上げる。2重パンを使って造粒した粒子は球状度が高く、内部が緻密、表面が滑らかで、品質が非常に良い。

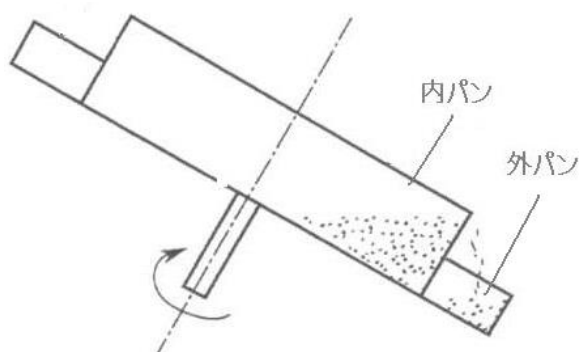


図 8. 2重パン

6-3. 截頭円錐パン

截頭円錐パンは図 9 に示すように茶碗状の円錐型を呈し、普通のパンより縁が高いため、造粒した粒子がパンに転動滞留時間が長く、分級効果も高いため、粒子の粒度が均一で、球状度が高く、内部が緻密で、表面も滑らかである。

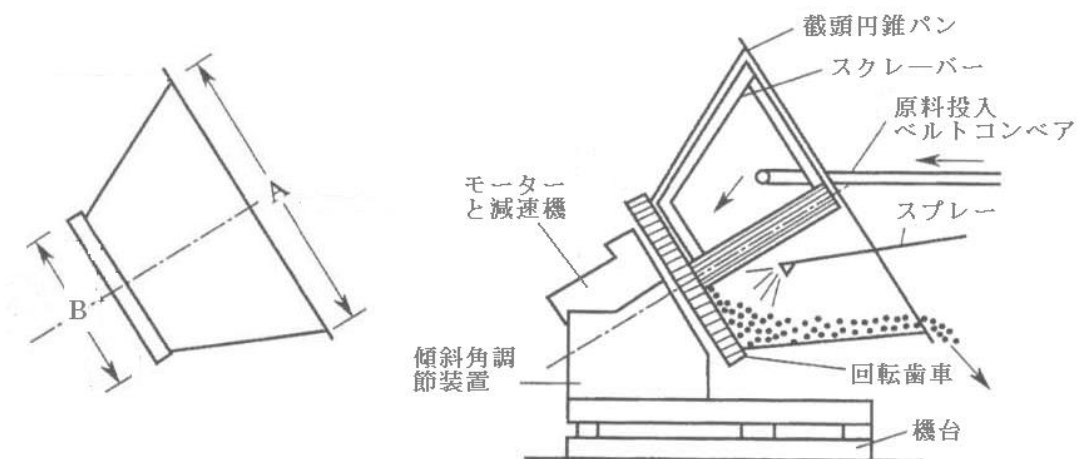


図 9. 截頭円錐パン

6-4. 円錐パン

円錐パンは図 10 に示すように截頭円錐パンから変形したもので、パンの縁をさらに高くして、円錐筒の形を呈する。粒子はパンに転動滞留時間がさらに長くなり、分級効果が高く、大きな粒子の造粒に適する。

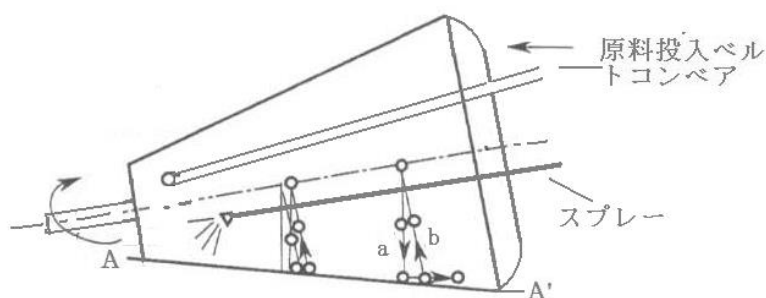


図 10. 円錐パン

三、 ドラム造粒

ドラム造粒機 (Drum Granulator) は、傾斜配置された円筒形の回転ドラムとモーター、減速機などから構成される。ドラムを回転させながら、ドラムの上端から原料粉粒体および水または造粒促進材の液体を投入し、転動させて造粒する。ドラム内では原料粉粒体が粒子核の形成、粒子の成長と整形・完成の段階を経てドラムの下端から排出される。パン造粒と大きく異なる点では、ドラム造粒は造粒した粒子の大きさに対して分級作用がなく、投入した原料から造粒した粒子がすべて排出され、造粒した粒子がほぼ正規分布に近い粒度構成になりやすい。

パン造粒機に比べ、設備の価格が高く、据付に必要な面積が広く、造粒工程中に粒子の状況が見られず、分級作用がなく、粒度不合格品が多く、戻り造粒が必要なため、現在、造粒機を新規導入する場合にはパン造粒機を優先的に選択することが多い。

ドラム造粒機の構造概略は図 11、写真は図 12 に示す。

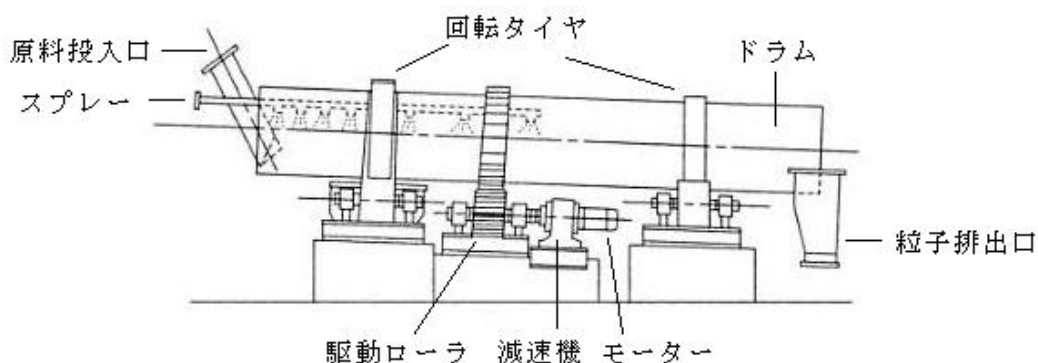


図 11. ドラム造粒機



図 12. ドラム造粒機写真

生産効率を上げるために、ドラム造粒機の後端に乾燥設備を取付けて造粒した粒子を同時に乾燥することも可能である。

1. ドラム造粒機の構造

1-1. ドラム

ドラムは造粒の容器である。鋼板から作った円筒状のもので、内部には粘着性の高い原料を筒壁に付着することを防ぐため、ゴムシートで内貼りされることが多い。ドラムの長さや直径は造粒原料と造粒した粒子の品質要求により異なるが、その計算は次節に述べる。

ドラムの外周に回転用駆動歯車、位置安定を保つ回転タイヤを装着する。

1-2. モーターと減速機、駆動ローラ

モーターはドラムの回転に使う動力を提供するものである。モーターからの出力は減速機で減速して、駆動ローラを回し、回転歯車を通してドラムを回転させる。

1-3. ドラム傾斜角調整装置

ドラムが傾斜に配置するため、その傾斜角度を調整する装置である。小型のドラム造粒機は手動で調整することが多いが、大型ドラム造粒機は電動調整装置を用いる。

1-4. 原料投入口

通常、ホッパーを投入口に取り付けて、ベルトコンベアから輸送してきた造粒原料は一旦ホッパーに貯めて、フィーダでドラムに投入される。

1-5. 粒子排出口

ドラムの下側に粒子排出口を取付けて、造粒した粒子を受け取り、乾燥設備または篩分け機に送る。

2. ドラム造粒機各パラメーターの計算

パン造粒機と違って、ドラム造粒機を用いて造粒する際にドラム内部に於ける粒子の動きが見られず、作業しながら機械を調整することが容易ではない。造粒原料が限定される場合は、そのパラメーターを事前に計算して、調整することが望ましい。

2-1. ドラムの長さや直径

ドラムは造粒の容器である。その長さ、直径は粒子の成粒率、生産効率を支配する。ドラムの長さは原料湿潤部 (L_y)、粒子形成部 (L_k)、形成した粒子を安定して緻密度を上げる粒子整形部 (L_c) および原料投入部 (B_k) それぞれの長さの合計である。もし、乾燥装置を取り付ける場合は、乾燥部 (D_y) の長さを含まなければならない。

$$L = B_k + L_y + L_k + L_c$$

原料投入部 (B_k) は造粒しないため、その長さは原料投入フィーダの位置と関連し、大体 0.5~2m である。

原料湿潤部 (L_y) は投入された原料粉粒体がスプレーされた液体に濡れて、粒子表面に液体層を形成する部位である。原料が全く吸水せず、液体がすべて粒子の表面に液体層を形成すると仮定して、単位時間に単位原料の流れにスプレーされた液体の量は濡れ速度 I ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$) と呼ばれる。

$$I = \frac{PB}{AL\tau_y} = \frac{QB}{L_y Li}$$

τ_y : 濡れ時間 (min); P_B : スプレー液体量 (kg); Q_B : 造粒工程の液体必要量 (kg/min); A_L : 原料の表面積 (m^2); L_y : 原料湿潤部の長さ (m); L_i : ドラム内粒子が 1 回転の移動距離 (m)

造粒工程の液体必要量 Q_B は原料の水分率 (w_k) と造粒した粒子の水分率 (w_h)、原料の重量 (Q_m) から算出することができる。

$$Q_B = \frac{w_k - w_h}{1 - w_k} Q_m$$

液体必要量 Q_B が判明されれば、原料湿潤部の長さ (L_y) は下記の式から計算できる。

$$L_y = \frac{w_k - w_h}{(1 - w_k) I L_i} Q_m$$

粒子形成部の長さ (L_k) は粒子のドラム内移動速度から計算できる。粒子がドラムの水平軸線に沿って移動速度は

$$u = \frac{L_i}{\tau_x}$$

u : 粒子移動速度; L_i : ドラム内 1 回転の水平移動距離; τ_x : 回転所要時間

粒子がドラム内 1 回転の水平移動距離 L_i は直角三角形 ABC から算出できる。図 13 に示すように AB 辺が粒子回転の投影垂直線であり、 $AB = D \sin(\gamma/2)$ 、粒子の水平移動距離は

$$L_i = D \sin(\gamma/2) \tan \gamma$$

λ : ドラム内に粒子の転動角 ; γ : 粒子のらせん転動角

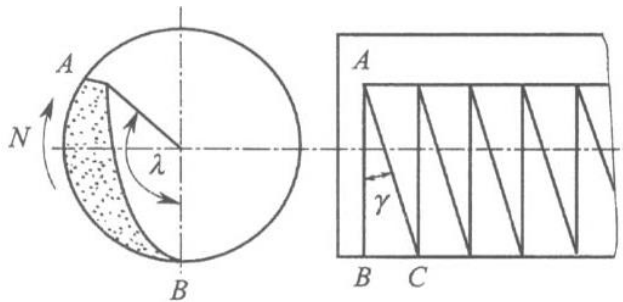


図 13. ドラム内に於ける粒子の転動曲線

粒子の形成に必要な回転数が判明されれば、粒子形成部の長さ (L_k) は下記の式から計算できる。

$$L_k = n L_i$$

n : 粒子形成に必要な回転数

形成した粒子の整形部の長さ (L_c) は造粒機の単位重量原料の造粒エネルギー消費量が造粒過程のモデルから算出した最適エネルギー消費量と同じであることから推算できる。

ドラム単位長さ (1m) にかかる原料の造粒所要エネルギーはドラムの回転に必要なエネルギーに相当する。

$$E = Mn \tau$$

E : ドラム長さ 1m の回転に必要なエネルギー ; M : 粒子の流れ回転に生成した抵抗力 ;

n : ドラム回転数 ; τ : 粒子の 1m 移動に必要な時間

粒子の流れ回転に生成した抵抗力 (M) は

$$M = qH$$

q : 単位長さ (1m) のドラム負荷 ; H : ドラム回転中心から粒子の重力作用線との垂直距離

ドラム単位長さの回転エネルギー E が判明されれば、粒子の整形部長さ (L_c) は下記の式で計算する。

$$L_c = \frac{E}{RE} = \frac{4Qme}{R\pi D^2 H n \psi}$$

Q_m : 原料重量 ; e : 1kg 原料造粒に必要なエネルギー ; R : 係数 ; D : ドラム直径 ; H : ドラム回転中心から粒子の重力作用線との垂直距離 ; n : ドラム回転数 ; ψ : ドラム内の原料充填率

上記の通り B_k 、 L_y 、 L_k 、 L_c を判明すれば、ドラムの長さがそれらの長さの合計値である。

一方、ドラムの直径は必要な生産量から計算することができる。単位時間生産量は単位時間に投入した原料重量 Q_m と同じであるため、その生産に必要なドラム直径が下記の式で計算することができる。

$$Q_m = A_F u$$

A_F ：ドラム内の粒子の流れ断面の面積； u ：粒子の水平移動速度

ドラム内粒子の流れ断面面積 A_F はドラムの原料充填率 ψ から算出する。

$$A_F = \frac{\pi D^2}{4} \psi$$

ドラムの直径は $D = \sqrt{\frac{4A_F}{\pi\psi}}$ である。

2-2. 実際のドラム造粒機パラメーター

表5はあるメーカーのパンフレットに記載される尿素を原料とするNPK化成肥料および有機化成肥料の造粒に使うドラム造粒機のパラメーターである。

表5. 尿素を原料とするNPK化成、有機化成造粒用ドラム造粒機のパラメーター

項目	パラメーター設計値		
	尿素 NPK 化成	有機化成	NPK 化成
ドラムサイズ (mm)	L6000 x D1600	L8000 x D2000	L8000 x D2400
容積 (m ³)	12.05	25.12	36.17
原料充填率 (%)	20	20	20
ドラム傾斜角 (°)	2～2.5	2～2.5	2～2.5
ドラム回転数 (r/min)	10～15	10～15	8～12
モーター出力 (kW)	11	18.5	30
生産量 (t/h)	5～8	10～15	20～25

3. 特殊用途のドラム造粒機

化成肥料造粒以外にりん安肥料（DAP、MAP）造粒用のドラム式スラリー塗布乾燥造粒機、アンモニア化成反応装置を有するドラム式スラリー塗布乾燥造粒機など特殊用途のドラム造粒機がある。これらの造粒機の特徴は熱風乾燥装置と篩分け装置を付いて、規格未満の小粒子は戻り粉としてドラムに戻され、粒子核として利用される。粒子の成長は転動付着ではなく、主に圧縮空気から吹込んだスラリーを戻り粉の小粒子に付着して、転動しながら形を揃え、乾燥することである。図14、15はりん安造粒用のドラム造粒機構造を示す。

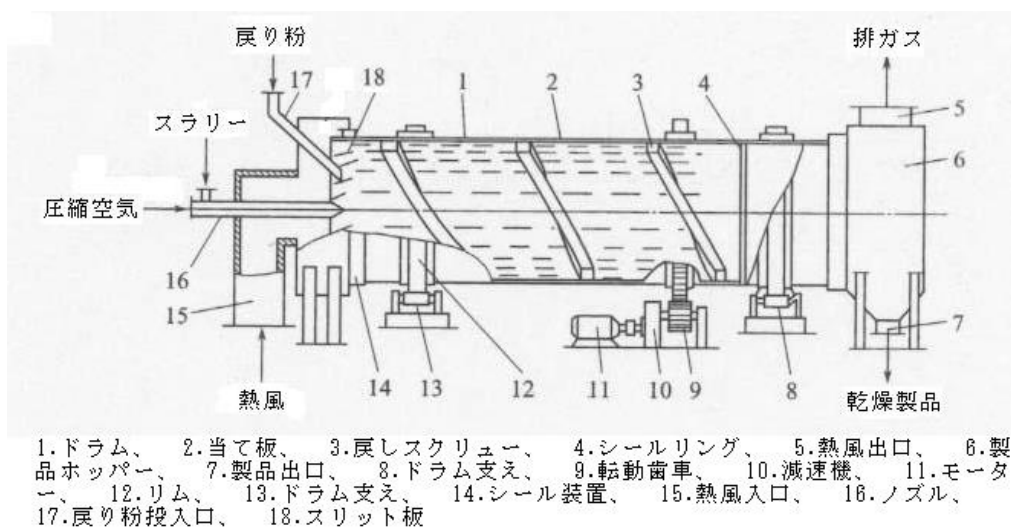


図 14. MAP 用ドラム式スラリー塗布造粒乾燥機の構造図

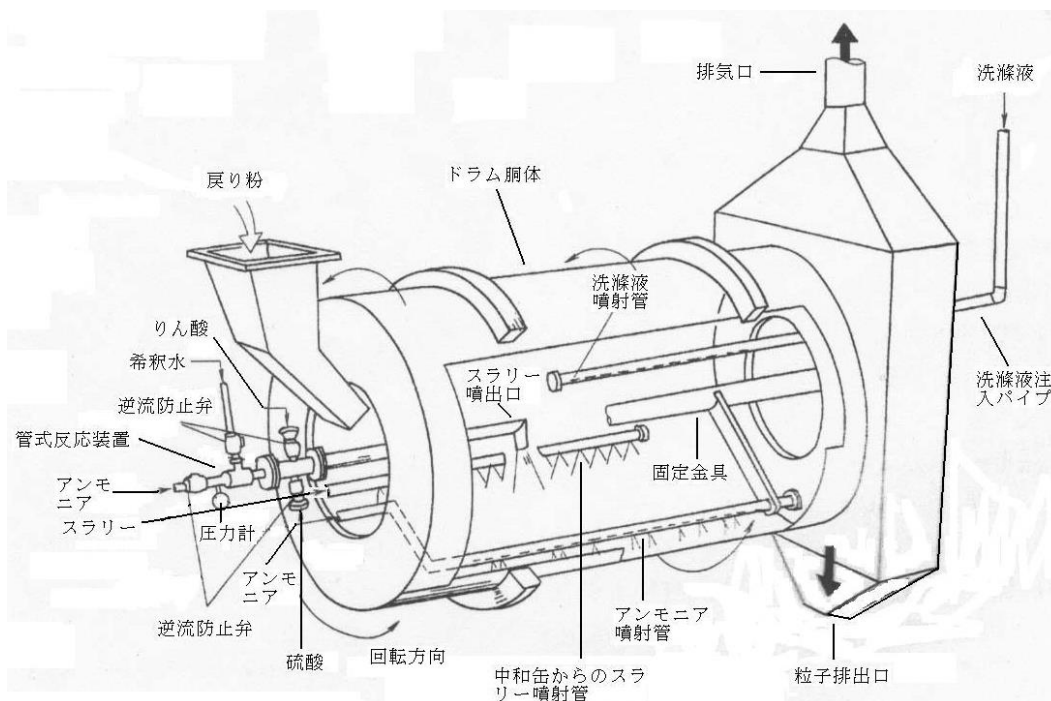


図 15. DAP 用アンモニア化成反応装置付ドラム式スラリー塗布造粒乾燥機の構造図

これらの特殊なドラム造粒機の詳細は本 HP の肥料製造学「りん酸系肥料」編、「りん酸一安」および「りん酸二安」をご覧ください。

四、 振動造粒

振動造粒は振動モーターを使って、造粒容器の偏心回転により不均衡な遠心力を発生し、原料粉粒体とその不均衡な遠心力の作用を受け、造粒容器に転動して、互いに衝突しながら結合し、核の形成、粒子の成長を経て所要サイズの粒子を造粒する手法である。造粒した粒子の強度と形など品質がよいが、設備が小さく、生産効率が低いため、化成肥料の生

産にほとんど使われていない。

振動造粒機はその構造と造粒容器の形により、水平振動パン造粒機、振動攪拌造粒機、振動床造粒機等到大別される。

1. 水平振動パン造粒機

水平振動パン造粒機は 4 脚の支えバネの上に水平に構える造粒用の円形パン（皿）とパンの下に装着する振動モーターから構成される。振動モーターがパンを円に描くように振動する。予め液体で湿潤した原料粉粒体をパンの円心に投入して、振動によりパンの中に 3 次元に転動しながら円心を離れ、パンの縁へ移動する。成長した粒子がパンの縁から排出される。その原理は図 16、造粒機の構造概要は図 17 に示す。

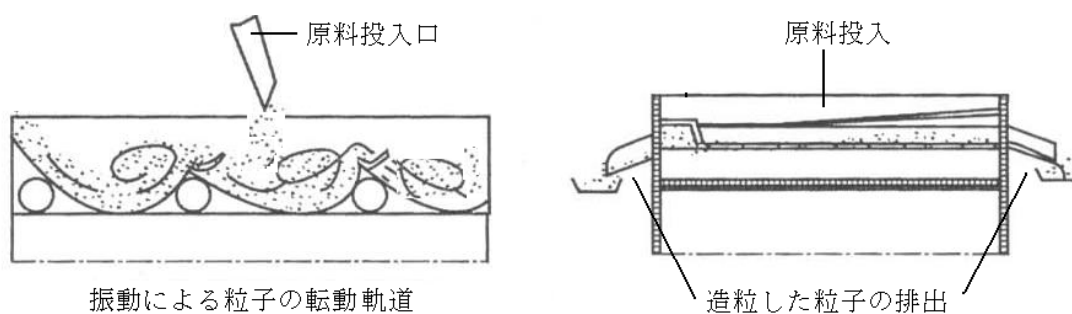


図 16. 水平振動パン造粒の原理

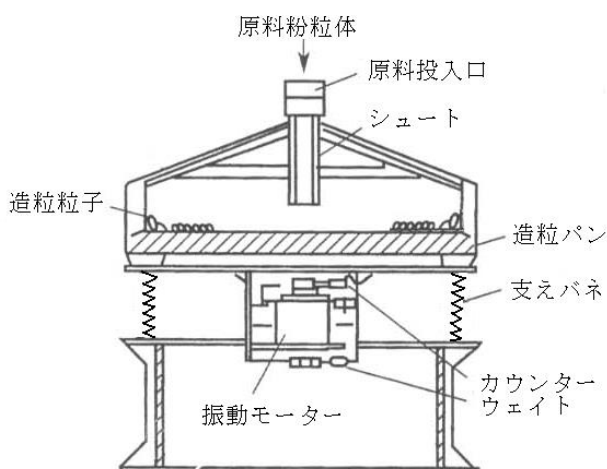


図 17. 水平振動パン造粒機の構造概略図

水平振動パン造粒機の特徴は分級作用があるため、造粒した粒子の粒度が揃って、ほぼ完全な球状を呈する。消耗エネルギーも少ない。欠点は生産能力が小さい。医薬品の造粒によく使われる。

2. 振動攪拌造粒機

振動攪拌造粒機は傾斜配置する円筒状のドラム内に攪拌スクリューを設置して、別のモーターで攪拌スクリューを回転する。4 脚のバネがドラムを支え、ドラムの下に振動モーターを装着して、振動させる構造となる。ドラム内の攪拌スクリューが回転するが、ドラム

自体は回転しない。

予め液体で湿潤した原料粉粒体をドラムの片側から投入して、振動を受けながら攪拌スクリューの回転で 3 次元に転動し、ドラム内を通過しながら粒子核の形成、成長と整形を行い、もう一方の片側から排出される。ドラム内に設置される仕切り板は粒子の滞留時間を調整して、粒子の粒度を制御する。

振動攪拌造粒機の構造概略は図 18 に示す。

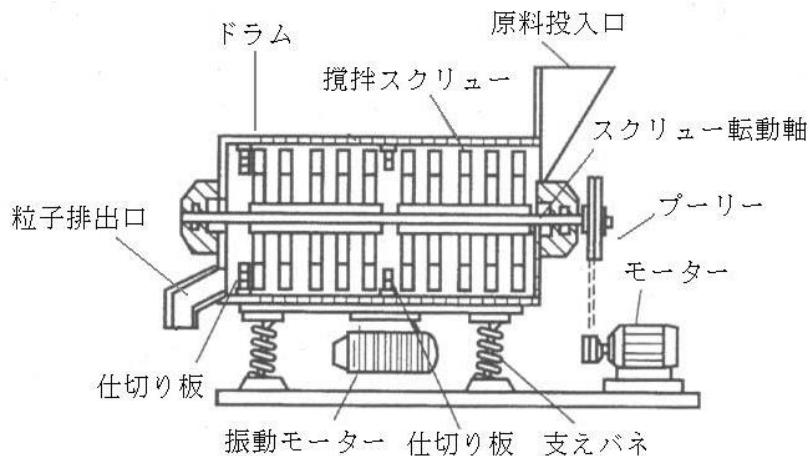


図 18. 振動攪拌造粒機の構造概略図

振動攪拌造粒機の特徴は分級作用があり、造粒した粒度の粒度が揃って、生産能力がやや大きい。欠点は消耗エネルギーが多い。

3. 振動床造粒機

振動床造粒機は円筒状または長方形の造粒容器が 4 脚以上の支えバネの上に設置される。造粒容器が回転しないが、振動モーターにより前後左右に振動する。造粒容器の中間やや下に振動床を設置して、その形がノコギリの歯のように階段となる。階段の下降段が短く陰しく、上昇段が長くゆるやかな形をする。振動床の後部に熱風を噴出す熱風穴を開いて、そこから熱風を噴出し、造粒した粒子を乾燥させる。

予め液体で湿潤した原料粉粒体が造粒容器の片側から投入して、振動により振動床に前後左右に転動しながら前方へ進む。粒子核の形成、成長を遂げ、熱風で乾燥され、排出される。

振動床造粒機の構造概略は図 18 に示す。

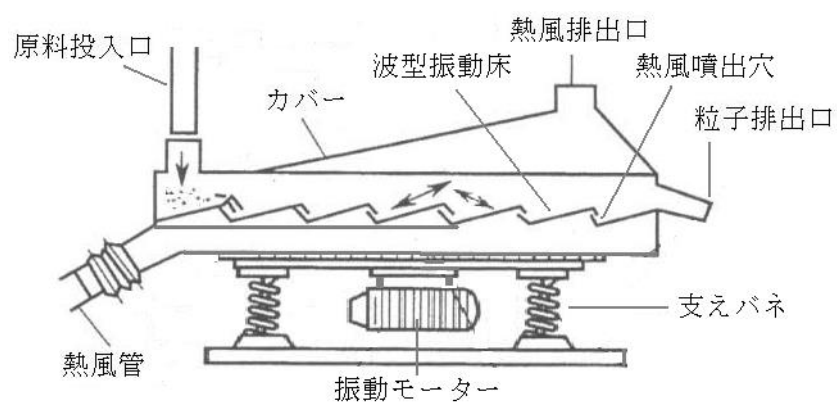


図 18. 振動床造粒機の構造概略図

振動床造粒機の特徴は分級作用があり、造粒した粒度の粒度が揃って、乾燥設備が付いているため、別途乾燥する必要がない。生産能力が大きい。欠点は消耗エネルギーがやや多い。