

## 乾式造粒 — ブリケット造粒法

ブリケット造粒法 (Briquetting granulation) は、ダイキャビティ (鋳型) に原料粉粒体を投入して高い圧力を加え、粉粒体を圧縮して固めて粒状にする方法である。圧縮造粒法ともいう。水などの造粒液体を使わないため、乾式造粒に属する。

ブリケット造粒は最初に石炭粉の有効利用と脱硫効果をもたらすため、石炭粉に石灰粉などを混ぜて、圧力で固めて粒状の豆炭にすることが発端である。その後、鉄鉱石粉、プラスチック、顔料、金属屑の造粒に広がり、乾燥不要の造粒法として肥料造粒に応用されたのは 20 世紀 60 年代以降である。

現在、ブリケット造粒はほとんど 2 軸ロール型造粒機を使い、相対に回転する 2 本のロールの間に造粒原料を投入し、粒状に圧縮成型する。1 台当たりの造粒能力が小さいが、原料ホッパー、篩、ベルトコンベア等を共用して 6~8 台の単位でセットを組み、大量生産もできるようになった。

ブリケット造粒の基本は圧力による圧縮成形である。投入した造粒原料はロールに設けてあるダイキャビティに嵌めこみ、高い圧力により粉粒体に塑性変形と脆性破壊を起こさせ、緻密化して分子間力、原子拡散または化学結合の作用で微粒子を牢固に結合させる。造粒した粒子がダイキャビティから脱型して下へ落ち、回転する破砕ブレードで一部繋がっている粒子をバラバラにしてから篩網を通す。造粒した粒子が篩分け機に送り、規格値に合う粒子が出荷するが、篩下の粉粒体を原料ホッパーに戻して再び造粒に供する。ブリケット造粒基本原理は図 1 に示す。

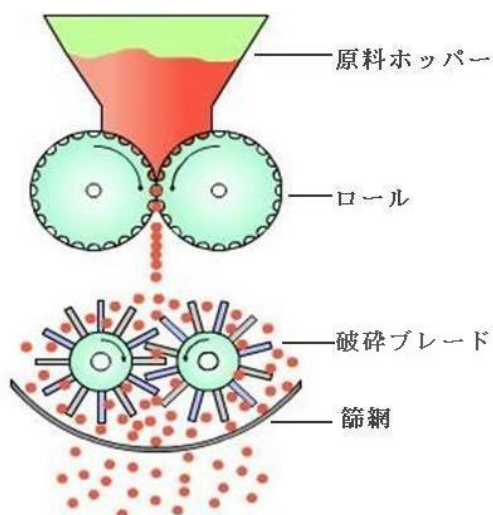


図 1. ブリケット造粒の基本原理

ブリケット造粒は乾式造粒に属し、前の節で紹介された湿式造粒の転動造粒、押出造粒、攪拌造粒、流動層造粒等と比べ、下記のような特徴がある。

① 原料粉粒体はロールからの圧力により粒状物に成形されたため、造粒促進材の添加が不

要で、製品の純度と有効成分含有量が原料と同じである。

- ② 造粒過程に水や造粒液体の添加がなく、乾燥が不要で、生産工程の短縮と生産コストの削減に役立つ。
- ③ 粒径がロールのダイキャビティのサイズに支配される。造粒した粒子の粒径がほぼ同じで、粒度分布が非常に狭い。また、粒子の硬度が高く、嵩比重も重い。
- ④ 原料の適用範囲が広く、湿式造粒では配合できない原料も使用できる。また、粒子硬度もロールの圧力を変えることで調整することができる。
- ⑤ 造粒機本体が小さく、据付に必要な面積が小さくて済む。操作が簡単で、故障が少なく、メンテナンスが容易である。
- ⑥ ダイキャビティを利用するため、ダイキャビティのサイズが小さいと、成形が困難で、成形した粒子もダイキャビティから脱型しにくいいため、3mm 以下粒子の造粒が非常に困難である。粒子サイズが 15mm 以上の大粒子の造粒に最適である。

## 一、ブリケット造粒のメカニズム

### 1. ブリケット造粒原理

ブリケット造粒は造粒原料を 2 本の相対に回転するロールに投入し、ロール回転の圧力によりロールにある多数のダイキャビティに嵌め込み、粒子に成形される。その造粒は次のように行う。

まず、投入された造粒原料は流動性があり、ロールの表面に沿って流動するが、ある地点に到着して、造粒原料がロール表面での移動ができなくなる。この地点は噛み込みポイントと呼ばれる。造粒原料が噛み込みポイントから 2 本ロールの圧力を受けて圧縮される。その圧力は 2 本ロール表面にあるダイキャビティの接近につれて高くなる。造粒原料が圧力によりロール表面にあるダイキャビティに嵌め込み、圧縮される。ロールの回転により、ダイキャビティ間の距離が次第に広がり、成形された粒子がロール表面から下へ落下する。

造粒された粒子の内部結合力は主に分子間のファンデルワールス力である。ファンデルワールス力は電荷を持たない中性の原子、分子間などで働く凝集力の総称。その作用力の大きさは、

$$F = \frac{Hr_1 r_2}{6(r_1+r_2)a^2}$$

F：ファンデルワールス力、 $r_1$ 、 $r_2$ ：粒子の半径、 $a$ ：粒子間の距離、

上記の式からファンデルワールス力は粒子の粒径に比例して、粒子間距離の二乗に反比例することが明らかになる。すなわちその力の有効作用距離は短く且つ非常に弱い。従って、強い圧力で造粒原料の粉粒体を至近距離に圧縮してはじめて、ファンデルワールス力が成形された粒子の形態を維持できるようになる。また、圧縮された粉粒体間の摩擦力も粒子の形態維持に役立つ。

## 2. 造粒過程における造粒原料の挙動

ブリケット造粒過程は単純に圧力を受けた造粒原料の密度変化の過程である。図 2 に示すように造粒原料がロールの回転に沿って圧縮される過程が次の 3 つ区域に分けられる。

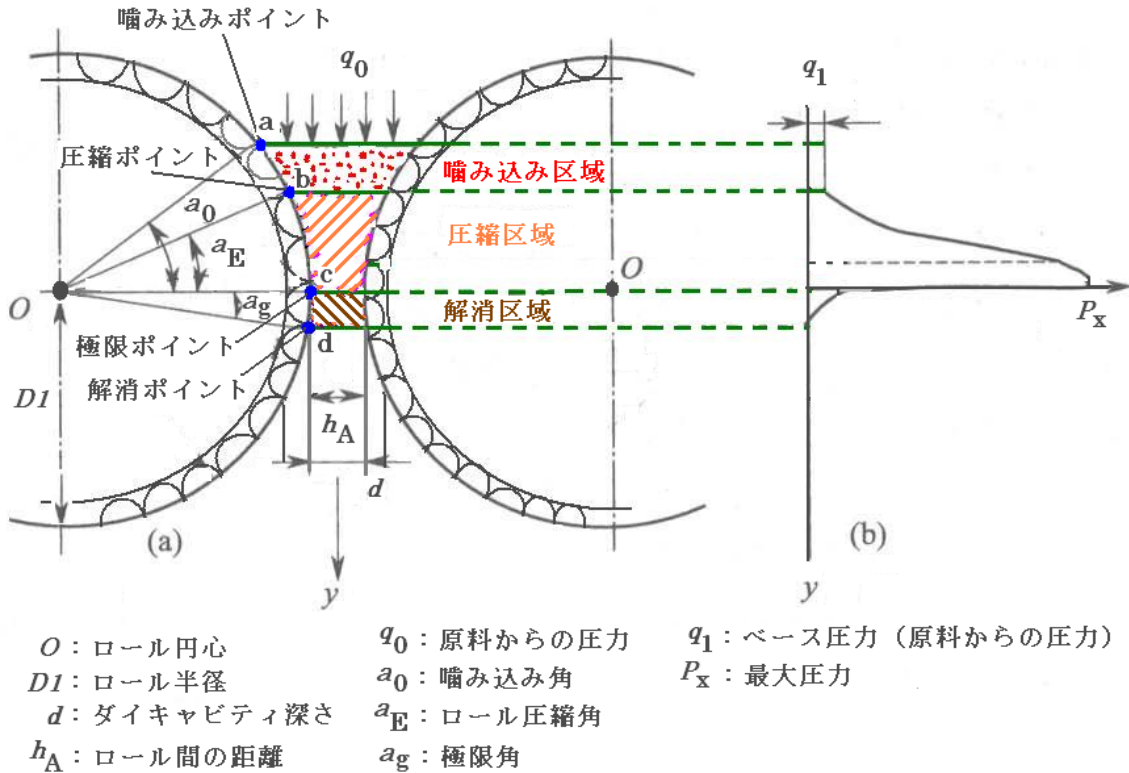


図 2. ロール回転に伴う造粒過程と圧力の変化

### 2-1. 噛み込み区域

ロール表面に流動する造粒原料が噛み込みポイント  $a$  に到着してからその流動性が失い、ロールに挟み込まれる。 $a$  に対応する角度  $a_0$  が噛み込み角、圧縮ポイント  $b$  に対応する角度  $a_E$  がロール圧縮角、円心  $O$  と形成される  $aOb$  区域が噛み込み区域と呼ばれる。この区域に造粒原料がロールからの圧力を受け、粉粒体は整列または集合し始めて、空洞率がある程度減るが、粒子の塑性変形と脆性破砕がまだ起きていない。

### 2-2. 圧縮区域

造粒原料がロール圧縮角に対応する圧縮ポイント  $b$  に到達してから圧縮され始める。ロールの回転により 2 本ロールの隙間が次第に狭くなり、造粒原料に与える圧力も次第に高くなる。造粒原料が圧縮され、内部空洞率がさらに減少する。2 本ロールの隙間が一番狭い  $c$  点に到着する時点では、造粒原料に与える圧力が一番高い。従って、 $c$  が極限ポイントと呼ばれる。 $c$  と圧縮ポイント  $b$ 、円心  $O$  と形成される  $bOc$  区域が圧縮区域と呼ばれる。この区域に於いて、造粒原料が圧力を耐えなくなり、弾性変形 → 塑性変形 → 脆性破

砕の順で変形と破壊が起きる。靱性材料が塑性変形にして、物性の脆い材料が脆性破壊にしてしまう。弾性変形では外部からの圧力が消えたら元の形態に戻されるが、塑性変形と脆性破壊では圧力が消えても元の形態に戻られない。塑性変形と脆性破壊の概略は図 3 に示す。

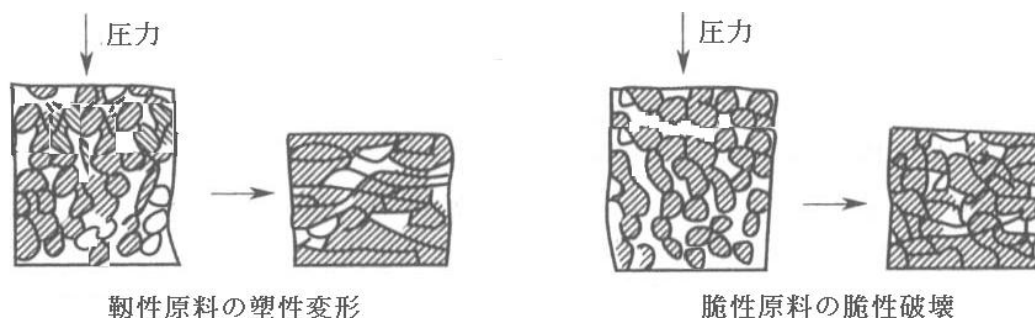


図 3. 造粒原料の塑性変形と脆性破壊

### 2-3. 回復区域

ロールがさらに回転し、極限ポイント  $c$  を越えてから 2 本ロールの隙間が次第に広げて、圧力も順次釈放され、 $d$  点を超えた時点では、圧力が完全に解消される。 $d$  点は回復ポイント、それに対応する角度  $a_g$  が回復角、円心  $O$  と形成される  $cOd$  区域が回復区域と呼ばれる。成形された粒子が圧力の釈放に伴い、弾性回復が起き、粒径が若干膨らむが、分子間力及び内部摩擦力の作用で、元のばらばら状態に戻れない。なお、粒子の弾性回復によりダイキャビティの内壁から離れる。

### 2-4. 離脱区域

ロールが回復ポイント  $d$  を超えた時点では、ダイキャビティが開いて、成形された粒子が重力により飛び出して、下へ落ちる。従って、 $d$  を超えた区域が離脱区域と呼ばれる。

造粒原料への圧力はロールの相対回転による発生するもので、その大きさは 2 本ロールの回転によるその表面距離の変化、ダイキャビティの形状と容積、造粒物の物性と投入量により異なる。ロールの回転により、造粒物に与える圧力の変化曲線は図 2 (b) に示す通りである。

## 3. ダイキャビティに於ける造粒原料の挙動

造粒原料がロールのダイキャビティに充填と圧力を受ける過程は図 4 に示す。2 本のロールにそれぞれダイキャビティがあり、向い合う位置にあるが、ロールが円柱形であるため、両方のダイキャビティがぴったり向かい合うことができない。ロールの回転によりダイキャビティが次第に接近して、下部が一番接近している際に、上部が開いた状態となる (A)。造粒原料がこの時点にダイキャビティに充填される。ロールの回転に沿って、ダイキャビティの上部が次第に閉めされ、充填されている造粒原料が圧力を受けて、圧縮され始めた

(B)。ダイキャビティの中央部の距離が一番近くなった地点になった際に造粒原料が受けた圧力が最大で、粒状物に成形される (C)。ダイキャビティの上部が一番接近している地点では、逆に下部が離れて、圧力が次第に緩くなり、成形された粒子がダイキャビティの下部から次第に離れる (D)。2 本ロールのダイキャビティが完全に開いて、互いに下へ向く状態となった時、成形された粒子がダイキャビティから離脱して、下へ落下する (E)。

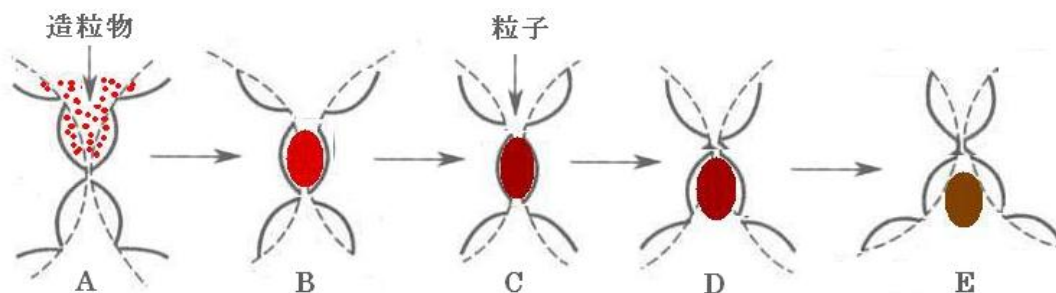


図 4. ロールの回転により造粒物がダイキャビティに於ける動き

B の地点でダイキャビティが閉じ始めた際に、一部の造粒物質がダイキャビティ内壁からの圧力により上へ押し出される可能性がある。それを防ぐために、次の 2 つ方法が採用される。

- ① 図 5 の (b) に示すようにダイキャビティの円弧度を調整して、下部を緩やかに、上部をきつくして、造粒物質の上への移動を阻害する。
- ② 造粒原料のホッパーにスクリーフィーダを設置して、原料に圧力を加え、ダイキャビティ上部からの押出す力を打消す。

但し、肥料造粒の場合は、ダイキャビティサイズが小さく、上への押出す力が小さいこと、製造設備のコスト削減とメンテナンスの簡便さが要請されることを考慮して、ホッパーにスクリーフィーダを取付けないこともある。

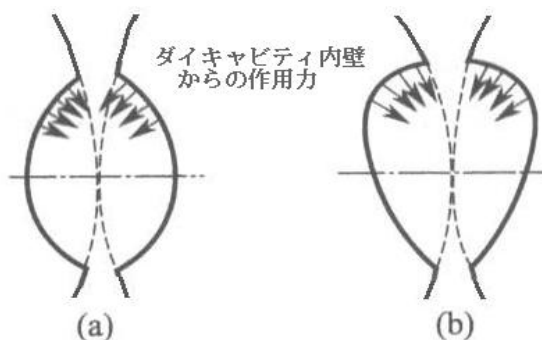


図 5. ダイキャビティの円弧度と圧力方向との関係

#### 4. 造粒原料の圧縮率

造粒原料がロールの回転に沿って、ロール表面を移動する。噛み込みポイント a を通し

た後、流動性が失い、ロールからの圧力を受け、圧縮されるようになる。圧縮開始から圧力が最大で造粒物の体積が最小となった時、ダイキャビティにある形成された粒子の重さが原料粉粒体の時と変わらないが、密度だけが高くなる。従って、造粒原料の体積と密度の積が形成された粒子の体積と密度の積と同じである。

$$V_1\rho_{m1} = V_2\rho_{m2}$$

$V_1$  : 圧縮前の造粒原料体積 ( $m^3$ )、 $V_2$  : 造粒後粒子の体積 ( $m^3$ )、 $\rho_{m1}$  : 圧縮前の造粒原料嵩密度 ( $kg/m^3$ )、 $\rho_{m2}$  : 造粒後粒子の嵩密度 ( $kg/m^3$ )

実験では、ロールからの圧力 $\sigma_1$ と造粒原料がその圧力に反発する抵抗力 $\sigma_2$ が圧縮前後の嵩密度との間に次の指数関係がある。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left( \frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}} \right)^K$$

$K$  : 造粒原料の圧縮性係数

上の式を  $y$  に対して微分すれば、噛み込み区域に入った後の造粒原料が受けた圧力の勾配 (gradient) は、

$$\frac{d\sigma}{dy} = f\left(\sigma, \alpha, \frac{h_A}{D}, K\right)$$

である。

$h_A$  : 2本ロール間の最小距離、 $\sigma$  : ロールの圧力から造粒原料の抵抗力を引いた圧縮力  $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ 、 $K$  : 圧縮性係数

通常、造粒原料の圧縮率が 1.2~1.5 である。すなわち、造粒原料がブリケット造粒後、その体積が約 20~30% 圧縮され、元体積の 70~80% となる。しかし、流動性が悪く圧縮性係数の大きい造粒原料では、ブリケット造粒後、元体積の 40~50% しかない場合もある。

## 5. 形成された粒子の脱型条件

ブリケットで形成された粒子がダイキャビティから順調に離脱できるか否かは生産効率には非常に重要な問題である。極限ポイントを超え、ダイキャビティが開いてロールからの圧力が次第に解消され、粒子も内部からの反発力により弾性回復し、ダイキャビティ内壁に圧力を与える。その反作用力としてダイキャビティ内壁から粒子を押し出す力が発生し、脱型の原動力となる。一方、形成された粒子とダイキャビティ内壁との摩擦力が粒子の脱型を妨害する。粒子が順調に脱型できるか否かはこの2つ力のバランスにより決められる。

肥料のブリケット造粒には楕円状 (扁円状) のダイキャビティがよく使われる。その形状が図 6 に示すように表面形状が円形であるが、水平面の半径に比べ、垂直の半径が小さく、皿のような形を呈する。粒子の脱型は半球状ダイキャビティを例に説明する。

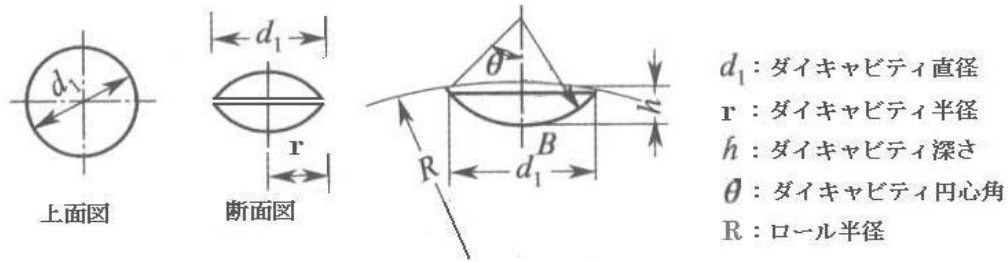


図 6. 楕円状ダイキャビティ

ダイキャビティが開いた時、成形された粒子が自身の弾性回復によりダイキャビティの内壁表面に押す力が発生する。ニュートン力学の第 3 法則によりダイキャビティも粒子に同等の押出す反作用力  $dN_1$  を与える。

$$dN_1 = F_1 dA$$

$F_1$  : 粒子がダイキャビティ内壁への作用力、造粒原料の物性により異なる、 $dA$  : ダイキャビティの内壁面積

ダイキャビティの内壁面積  $dA$  は次の式から算出できる。

$$dA = F_1 r d\alpha r_1 d\beta = r^2 F_1 \sin\alpha d\alpha d\beta$$

$dN_1$  をロールの表面に対する水平分力と垂直分力に分解する。ダイキャビティの平面形状が左右対称と仮定すれば、水平分力の合力が打消され、0 となる。 $Z$  軸の垂直分力  $dZ_1$  は、

$$dZ_1 = dN_1 \cos\alpha$$

ダイキャビティからの垂直分力の合計値  $Z_1$  は、

$$Z_1 = \iint_D dZ_1 = \iint_D r^2 F_1 \sin\alpha \cos\alpha d\alpha d\beta = \pi r^2 F_1 \sin^2\theta$$

一方、ダイキャビティ表面と粒子との単位面積摩擦力を  $f dN_1$  として、 $Z$  軸の  $f dN_1$  垂直分力は、

$$dZ'_1 = f dN_1 \sin\alpha$$

$Z$  軸に於けるダイキャビティ表面と粒子との摩擦力の合力  $Z'_1$  は、

$$Z'_1 = \iint_D dZ'_1 = 2\pi f r^2 F_1 \left( \frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right)$$

粒子がダイキャビティから脱型する条件は  $Z_1 > Z'_1$  であるため、

$$\pi r^2 F_1 \sin^2\theta > 2\pi f r^2 F_1 \left( \frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right)$$

である。両側を整理して、次の脱型条件が得られる。

$$\frac{\sin 2\theta}{0 - \frac{\sin 2\theta}{2}} > f$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \text{ の場合、 } \frac{\sin 2\theta}{0 - \frac{\sin 2\theta}{2}} = \frac{2}{\pi} = 0.64$$

従って、半球状ダイキャビティに対して、脱型を大きく影響する要素はその半球の円心角 $\theta$ である。 $\theta$ の角度を減少すれば、ダイキャビティから粒子への押出力が大きくなり、粒子の脱型が容易になる。実際の生産現場でも、ダイキャビティの深さが浅いほど脱型しやすくなることが用知られている。

ロールの半径が決定されている場合は、ロールにあるダイキャビティの最大深さ  $h$  は次の式で計算することができる。

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} + r(1 - \cos\theta)$$

R : ロール半径、  $\theta$  : 半球の円心角

脱型はダイキャビティの半球円心角 $\theta$ 以外に、ダイキャビティの内壁と粒子との摩擦係数  $f$  にも関係する。 $f$  を影響する要因はダイキャビティの内壁表面の粗さ、ロール表面の材質、造粒原料の物性と水分率などである。

また、ダイキャビティに充填している造粒原料の量も脱型に影響する。ダイキャビティに嵌め込んだ造粒原料が不足する場合は、成形された粒子の圧縮が不十分で、ロールの回転でダイキャビティが離脱区域に入っても、粒子自身の弾性反発力が不足で、ダイキャビティ内壁から離れないこともある。従って、常に 2 本ロールの間に造粒原料を連続的均一に投入することが非常に重要である。

## 二、 ブリケット造粒機の構造

ブリケット造粒機は原料ホッパー、2本のロール、繋がっている成形粒子を砕く攪拌ブレード、篩網、モータと減速機等から構成される。原料ホッパーにスクリーフィーダを設置する機種もある。付属設備は原料と製品を運ぶベルトコンベア、成形した粒子を分級する篩分け機等である。ブリケット造粒機の構造概略と写真は図 6 に示す。

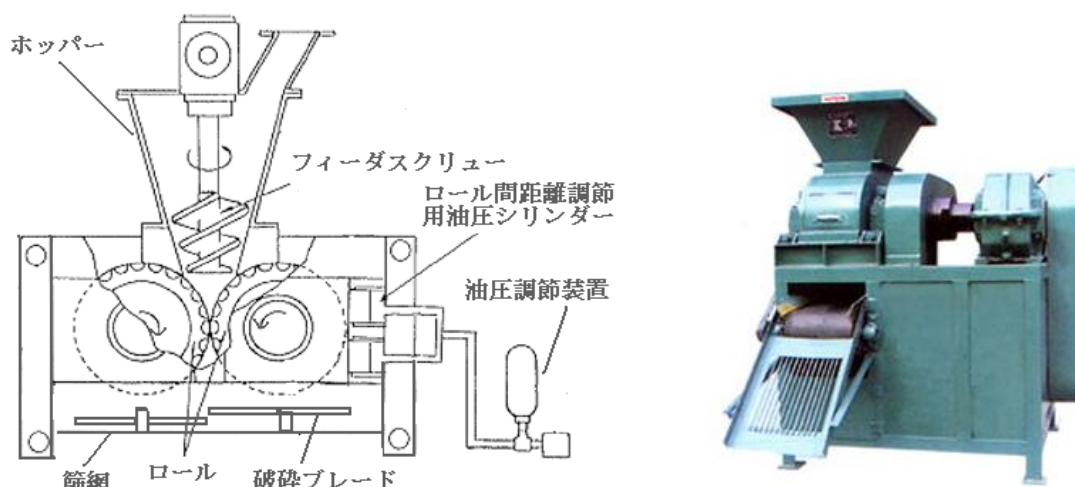


図 6. ブリケット造粒機の構造概略と実物写真

ブリケット造粒に最も重要な部品はロールである。他の部品は汎用品で、ロールだけが造粒目的、造粒原料、成形粒子の粒径により、単独に設計しなければならない。

### 1. ロールの構造

ロールの構造は、一体成型ものと内軸に外筒スリーブを取付ける分離式のものに分けられる。一体成型のロールは製造しやすいが、廉価の鋼材では摩耗しやすく、耐摩耗の高硬度合金では製造コストが高く、用途が制限される。一方、分離式のロールは、内軸が普通の鋼材、外筒スリーブは高硬度、耐摩耗、耐腐蝕性の合金等の材料を使い、焼き嵌めなどの手法で結合させるもので、コストとメンテナンスの点では有利であるため、広く使用される。

ロール表面にあるダイキャビティは、その形状が造粒目的、成形と脱型の易さなどを考慮して決定する。特にダイキャビティ形が造粒原料種類と造粒目的により異なる。よく使われるダイキャビティの形は図7に示す。

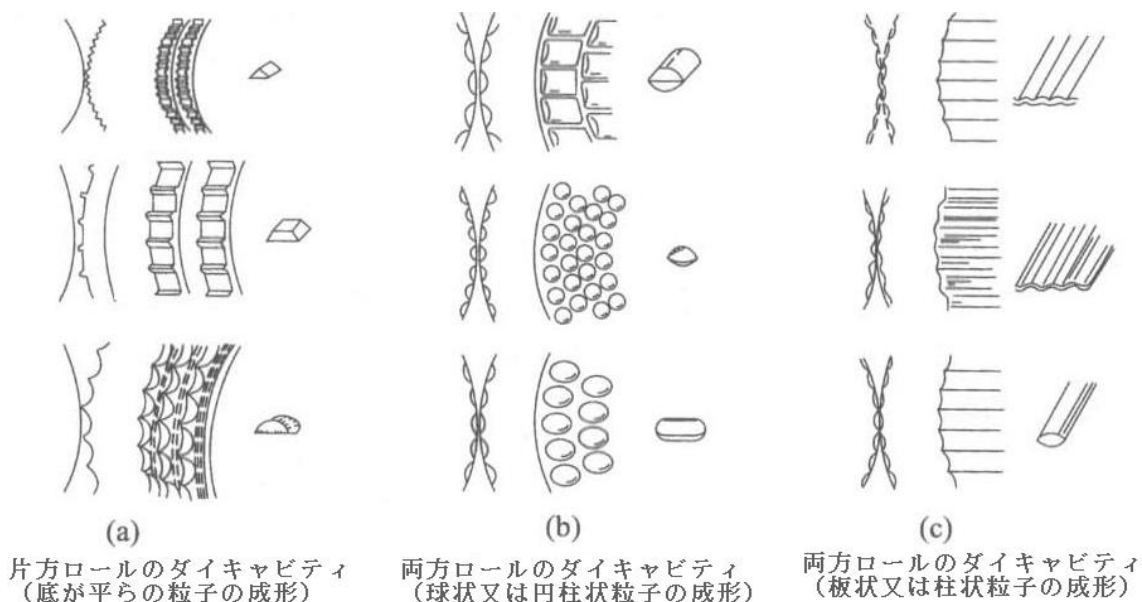


図7. 各種のダイキャビティの形と成形される粒子の形

一方、ダイキャビティサイズは所要粒子のサイズと密度、重量により決定する。肥料では施用の観点から球状粒子が歓迎される。また、ダイキャビティの加工、成形された粒子の脱型を考えて、半球形のダイキャビティがよく使われる。但し、完全半球形のダイキャビティが脱型しにくいいため、通常、図5に示すようにダイキャビティは完全な半球状ではなく、その深さ  $h$  を半径  $r$  より小さくして、穴の円心角  $\theta$  を小さくする楕円形（扁円形）にすれば、脱型に問題がない。

ロール表面を有効利用し、成形された粒子のバリを減らすため、図8に示すようにダイキャビティはロール表面に正三角形に配置される。この配置では、ロールの表面利用係数  $\phi$  は最大となる。その計算式は、

$$\phi = \frac{\frac{\pi d_1}{4}}{d_1 \sin 60^\circ} = 0.91$$

$d_1$  : ダイキャビティ表面の円直径

すなわち、ロール表面にダイキャビティを正三角形に配置すれば、ロール表面積の 91% がダイキャビティに占められる。

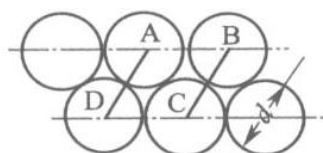


図 8. ロール表面に於けるダイキャビティの正三角形配置

実際のロールとダイキャビティの実物写真は図 9、10 に示す。



図 9. 種々ブリケット造粒機のロールとダイキャビティ写真  
(主に豆炭や金属回収屑、焼却灰の造粒に使う)

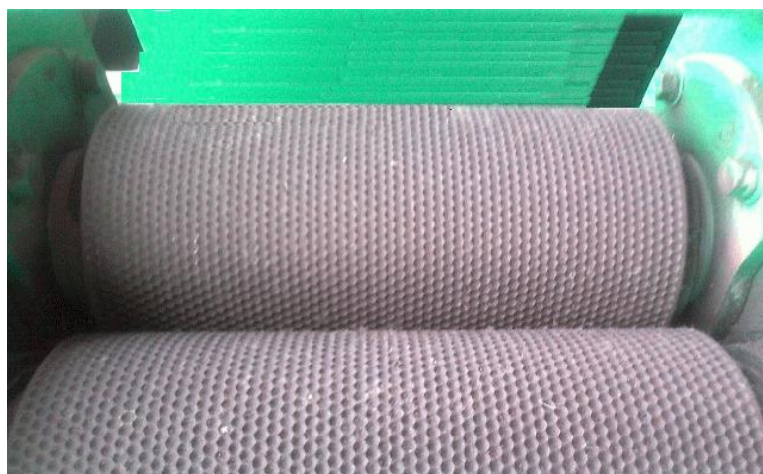


図 10. 肥料造粒用ロールとダイキャビティ写真

## 2. ロールの設計パラメーター

ブリケット造粒機の最重要な部品はロールである。ロールの良否は造粒効率、成形された粒子の品質に密接に関係する。ロールの設計は下記のパラメーターを念頭に行う。

### 2-1. 最大成形圧力

ブリケット造粒の成形圧力は粒子品質と造粒効率に大きな影響を及ぼすため、ロールを設計する際にまず、その最大圧力を求めるべきである。成形圧力がロール直径、有効のロ

ール長さ、ロール間の距離、回転数に制御される。成形圧力の計算は実験データで計算モデルを導出して求める方法と J. R. Johanson 氏が提示した計算式で求める方法の二つある。通常、厳しい要求ではない場合は Johanson 公式で求めることが多い。

Johanson 公式は直径が同じの 2 軸ロールを有する造粒機の最大成形圧力  $P_b$  を求めるものである。

$$P_b = mP_0 \frac{1-\sin\delta}{1+\sin\delta} \left( \frac{1-\varepsilon}{d+s} (D(1-\cos\alpha) \cos\alpha + d + s \cos\alpha) \right)^K$$

$P_b$ : 最大成形圧力 (MPa)、 $P_0$ : 原料投与圧力 (MPa)、 $\delta$ : 原料のせん断抵抗角 ( $^\circ$ )、 $\alpha$ : 噛み込み角 (原料流動性質  $\delta$ 、 $k$ 、原料の滑り摩擦角  $\phi'$  に関する)、 $K$ : 原料圧縮性係数、 $D$ : ロール直径 (cm)、 $s$ : 2 軸ロール間の距離 (cm)、 $d$ : ロール間の距離がゼロとする際に球状粒子の短径 (cm)、 $\varepsilon$ : 造粒原料の散逸係数 (操作状態、ロールの表面および摩擦状態に関連する)、 $m$ : 圧力比係数

この計算式から、ロールの最大成形圧力は噛み込み角と関連する造粒原料の流動性質と圧縮可能係数、ロールの諸パラメーター (直径、ロール間距離、ダイキャビティの深さ) および造粒原料の散逸係数と密接に関連していることが明らかにされた。実験結果では、これら要因とロールの最大成形圧力との関係は図 11、図 12、図 13 に示す。

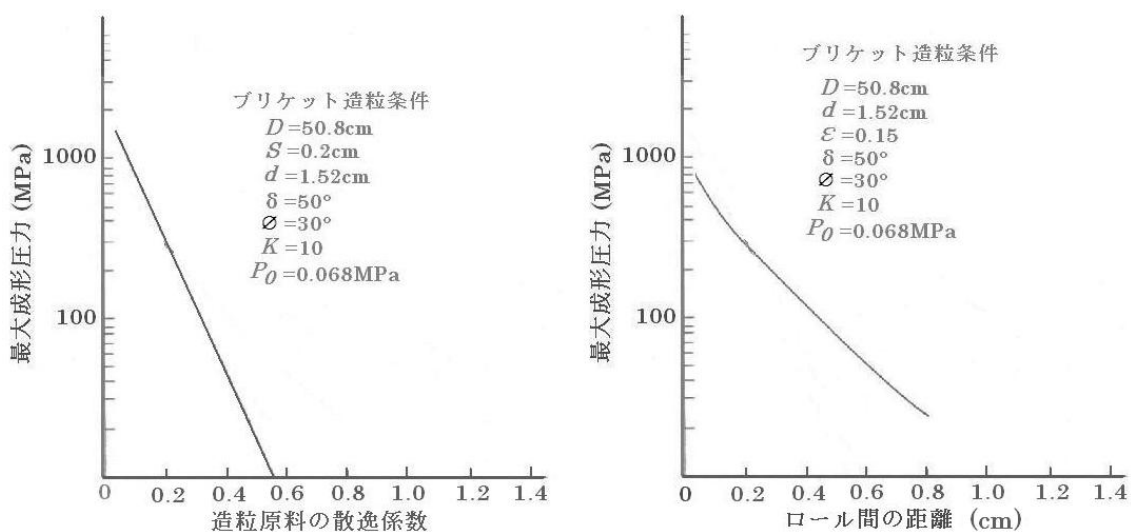


図 11. 造粒原料の散逸係数およびロール間の距離と最大成形圧力との関係

図 11 に示すように造粒原料の散逸係数が最大成形圧力を影響する最も重要な要因である。散逸係数とは 2 本ロールの間に投入した造粒原料が圧縮されないままロール間を素通りして下へ落ちた造粒原料の%であり、造粒原料の流動性、2 本ロールの隙間 (距離) により変化する。散逸係数が高いほど、最大成形圧力が低くなり、ある時点で造粒原料がすべてロール間から漏洩して、ロールからの圧力がゼロになる。

ロール間の距離が造粒原料の散逸と密接な関係があるため、ロール間の距離が広いほど圧力が低くなる。

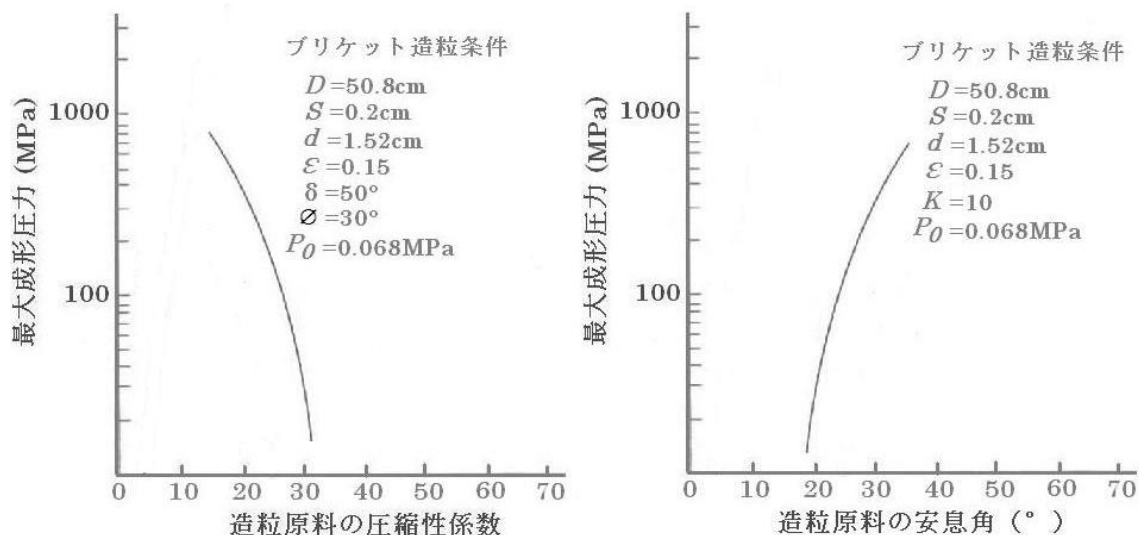


図 12. 造粒原料の圧縮性係数および安息角と最大成形圧力との関係

一方、造粒原料の流動性は原料粉粒体の平均粒径、粒径分布、水分率等に影響され、安息角を計測してその流動性を推測することができる。安息角とは、一定の高さから粉粒体を落下させて、自発的に崩れることなく安定を保つ時に、形成する粉粒体の山の斜面と水平面とのなす角度を安息角と呼ぶ。粒子の大きさと粒子の角の丸みや形状により決まる。流動性の良い粉粒体ほど安息角が小さく、逆に粉体流動性の良くない粉粒体の場合には、安息角が大きくなる。

図 12 に示すように、一定条件に於いて造粒原料の安息角が大きいくほど最大成形圧力も高くなる。これは流動性の良くない造粒原料がその散逸係数が小さいためである。

造粒原料の嵩密度も成形圧力に関係する。嵩密度の低い造粒原料は、圧縮性が高く、ロールの圧力に対する抵抗力が低く、最大成形圧力も低くなる。嵩密度の高い造粒原料は、圧縮されにくいので、ロールからの成形圧力が当然高くなる。圧縮性係数と最大成形圧力との関係は図 12 に示す通りである。

原料を変えた場合は、最大成形圧力が変化する可能性があり、事前にテストを行う必要がある。

せん断抵抗とは外力に対する造粒原料の内部摩擦であり、その大きさがせん断抵抗角で表す。図 13 に示すように、造粒原料のせん断抵抗角が大きくなると、最大成形圧力も高くなるが、一定値を超えた場合、最大成形圧力が逆に下がる。一方、ダイキャビティが深いほど最大成形圧力が下がる。これは、ダイキャビティの直径が一定の場合、深いほど充填された造粒原料の量が多くなり、圧縮性が悪くなるためである。

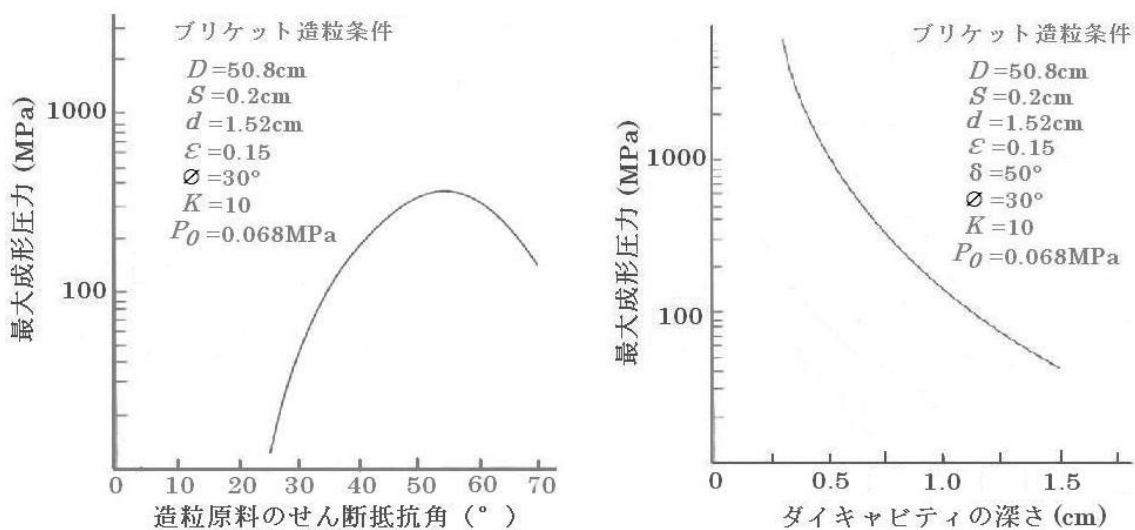


図 13. 造粒原料のせん断抵抗角およびダイキャビティの深さと最大成形圧力との関係

造粒原料の投与圧力はロールのベース圧力に相当するものであるほか（図 2 を参照）、投与圧力が高いほど、造粒原料がロール表面に投入された際にすでに一定程度に圧縮され、ダイキャビティに充填された造粒原料も多くなり、その圧縮性係数が小さくなる。図 14 に示すように投与圧力を高くすれば、最大成形圧力も応分に高くなる。しかし、原料投与圧力を高めるためにスクリーフィーダ等を設置するなどの措置が必要となり、費用対効果の面では適切な手法ではない。通常、肥料のブリケット造粒では、高い圧力を必要せず、造粒原料の投入を重力による投与が普通で、投与圧力を考慮する必要がない。

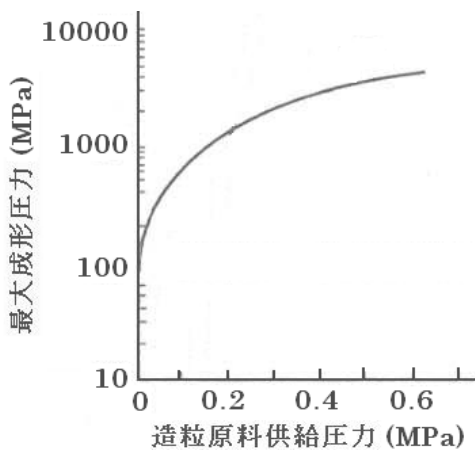


図 14. 造粒原料投与圧力と最大成形圧力との関係

## 2-2. ダイキャビティの形状とサイズ

ダイキャビティの形状とサイズが造粒原料の成形と成形後の脱型に密接に関連する。また、ロールの直径にも関係する。ダイキャビティ設計の要素は次の 3 つの条件で決定する。

- ① 粒子の状態と脱型の易さ： 肥料では機械施肥の観点から球状粒子が求められるため、

自然にダイキャビティの形状が半球状となる。ただ、完全な半球状のダイキャビティは成形後の粒子が脱型しにくいいため、半球深さ  $h$  が半径  $r$  より短く、円心角  $\theta$  の小さい楕円状にすべきである。

② 所要粒子の粒径： 粒子粒径が決定された場合は、ダイキャビティのサイズをそれと同じかやや小さくする必要がある。成形された粒子は圧力が解消された途端、内部からの反発力によりやや膨張し、その膨張率が約 2~5% である。従って、成形された粒子の粒径がダイキャビティより 0.1~0.3mm 大きくなる。また、成形された粒子にバリがあり、それを念頭にダイキャビティのサイズを決定すべきである。

③ ロールの直径： ダイキャビティのサイズが一定の場合は、ロール直径が小さいほど、ロール表面にあるダイキャビティが上下に伸びる。圧縮ポイントを超え、成形圧力が次第に高くなると、ダイキャビティに嵌った造粒原料が圧力により上方へ押し出される恐れがある。酷い場合は、成形できない場合もある。それを避けるため、ロール直径 (D) / ダイキャビティ直径 (d) > 50、できれば > 75 にすべきである。

### 2-3. ロールの直径

ロール直径は最大成形圧力を強く影響する。これは一定回転数の場合に於いてロール直径が大きいほど、その表面の円弧が平らになり、造粒原料との接触面が広く、圧力を施す範囲が広くなり、時間も長くなる。但し、ロール直径が大きいほど、それを回転する必要なエネルギーも多くなり、装置の体積も大きくなる。石炭粉や鉄鉱石粉のブリケット造粒に使う大きな装置では問題がないが、肥料のブリケット造粒では設備コスト、据付面積と生産効率等を考えて、一般的にロール直径が 30~100cm に限定されることが多い。

ロールの直径は下記の式から計算できる。

$$D = \frac{d+s \left( \frac{Pd}{mP_0} - \frac{1+\sin\delta}{1-\sin\delta} \right) \frac{1}{K} - d - s \cos\alpha}{(1-\cos\alpha)\cos\alpha}$$

$m$  : 圧力係数、  $d$  : 成形した粒子の平均厚さ (cm)、  $s$  : 2 本ロール間の隙間 (cm)、  
 $\varepsilon$  : 造粒原料の散逸係数、  $P_b$  : 成形圧力 (MPa)、  $P_0$  : 原料投与圧力 (MPa)、  $\alpha$  : 噛み込み角、  
 $\delta$  : せん断抵抗角、  $K$  : 造粒原料の圧縮係数

上記の式を利用してロール直径を計算する結果は最小直径である。単位時間当たりの予定造粒数量をベースにして、ダイキャビティサイズ、ロール長さ、ロール回転数も含めて総合的に考えてロール直径を決定すべきである。なお、計算する前に、噛み込み角  $\alpha$ 、圧力比係数  $m$ 、ロール間の距離  $s$ 、造粒原料の散逸係数  $\varepsilon$  を事前に確定すべきである。以下は、これらのパラメーターの確定方法を紹介する。

① 噛み込み角  $\alpha$  : 噛み込み角は造粒原料の物性、特に流動性に関連する。概して、造粒原料の圧縮性が高いほど、噛み込み角が小さくなる。図 15 は造粒原料の圧縮性係数と噛み込み角との関係を示す。造粒原料のせん断抵抗角、安息角、圧縮係数を測定して、それに

対応する噛み込み角も図 15 から確定することができる。

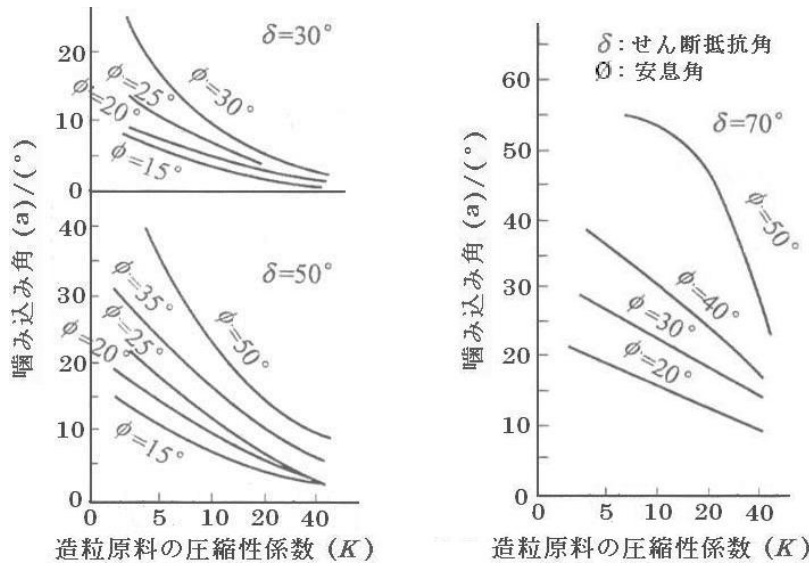


図 15. 異なるせん断抵抗角と安息角の造粒原料の圧縮性係数と噛み込み角との関係

② 圧力比係数  $m$  : 圧力比係数は、造粒原料が原料投与圧力  $P_0$  から最大圧力  $P_b$  に達するまでの圧力上昇比例と上昇速度を表す係数である。圧力比係数は造粒原料の流動性、特に噛み込み角に関連する。図 16 は噛み込み角と圧力比係数との関係を示す。

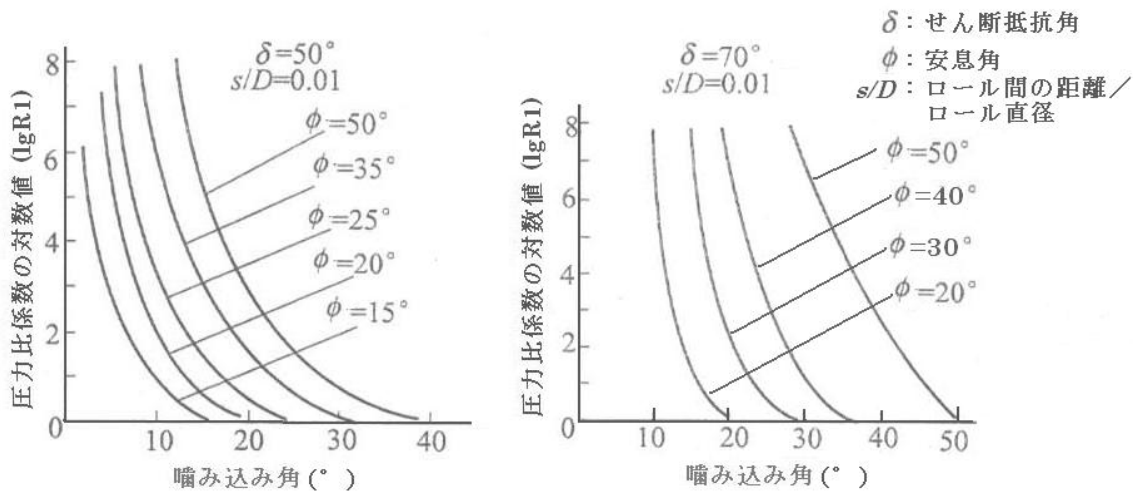


図 16. 噛み込み角と圧力比係数との関係

また、圧力比係数も  $s/D$  比 (2 本ロール間の距離/ロール直径) に影響される。但し、 $s/D$  比が 0.01~0.02 の間にはその影響がほぼ無視できる。

③ ロール間距離  $s$  : 2 本ロール間の距離は主に成形圧力に関連する。ロール間の距離が小さいほど、成形圧力が大きくなるが、ロール回転に必要なトルクも大きくなる。電気消

費量、ロール摩耗等を考えて、造粒原料の物性、造粒目的、ダイキャビティサイズに合わせて適宜の距離を設定すべきである。通常、肥料造粒の場合は、ロール間の距離は0.3~1mmに設定することが多い。概して、成形に必要な圧力が低く、ダイキャビティサイズが大きい場合は、ロール間の距離が広く設定することができる。

④ 造粒原料の散逸係数 $\epsilon$ : ロールに投入された造粒原料はすべて粒子に成形されたのではなく、一部がダイキャビティに充填せず、ロール間やロール両側から散逸される。この散逸量がロールの成形圧力に影響を及ぼす。概して、散逸量が多いほど、成形圧力が低下する。散逸量は散逸係数 $\epsilon$ で表す。散逸係数は造粒原料の流動性、ロール間の距離により変化するが、通常の場合は、0.05~0.25 (散逸量が投入原料の5~25%)を設定することが多い。なお、長期間使用によりロールの摩耗および変形が散逸係数の増大をもたらすことに注意すべきである。

⑤ 造粒原料の投与圧力  $P_0$ : 造粒原料の投与圧力はロールの成形圧力のベースとなるもので、投与圧力が高いほど、投入された造粒原料がロールの表面にすでに圧縮され、ダイキャビティに充填される量が多くなり、成形圧力も高くなる。造粒原料の投入は自身の重量による重力投与とスクリーフィーダや電磁フィーダの強制投与に分けられる。重力投与に比べ、強制投与はその投与圧力が高くなる。上記のロール直径を求める計算式と図14に示すように成形圧力を確定した場合は、投与圧力を高めれば、ロール直径を小さくして、造粒機全体のサイズを小さくすることができる。

#### 2-4. ロールの周速度

ロールの周速度とはロール表面の見かけ速度であり、ダイキャビティに充填された造粒原料に対する圧縮時間を支配する。

$$\text{周速度 (m/s)} = D \times \pi \times \text{rpm} \div 100 \div 60$$

$D$ : ロール直径 (cm)、 rpm: ロール回転数 (r/min)

通常、ロール直径が一定の場合、周速度が遅いほど、ダイキャビティに充填された造粒原料に対する圧縮時間が長くなり、造粒原料の塑性変形と断裂破壊が進んで、成形された粒子の密度が高くなり、崩壊しにくくなる。

各ダイキャビティに対する圧縮時間は次の式で計算する。

$$t = \frac{L}{D \pi \text{rpm}} \times 60$$

$t$ : ダイキャビティに対する圧縮時間 (s)、  $L$ : ロール周方向のダイキャビティ長さ (cm、半球状ダイキャビティの場合は直径)、  $D$ : ロール直径 (cm)

ダイキャビティの圧縮時間を確保するため、ロールの周速度を1m/s以下に制限すべきである。

## 2-5. ロールの半径方向推力

半径方向推力とは、造粒原料が圧縮力に反発してロールの半径方向に対する外側への推力である。半径方向推力が高くなると、ロール間、特にロール中央部分が変形して、距離が開き、最大成形圧力が下がり、造粒した粒子の強度と品質を劣る。半径方向推力によるロールの変形を最小限に抑えるために、ロール直径を太く、ロール長さを短くして、ロールの材質を強度の高い鋼材を使う等で対応する。

ロールの半径方向推力は次の式で計算する。

$$P = P_b \frac{BD}{2} \left( i + \frac{L}{D} \right)$$

$P$ : 半径推力 (MPa)、 $P_b$ : 成形圧力 (MPa)、 $B$ : ロール長さ (cm)、 $D$ : ロール直径 (cm)、 $L$ : ロール周方向のダイキャビティ長さ (cm)、 $i$ : ロール係数

ロール係数  $i$  は造粒原料の圧縮性係数  $K$  およびダイキャビティサイズ、ロール間の距離とロール直径 ( $(d+s)/D$ ) と関係している。図 17 にはこれらの関係を示す。圧縮性係数  $K$  と  $(d+s)/D$  が判明すれば、図 17 から対応のロール係数  $i$  を調べることができる。

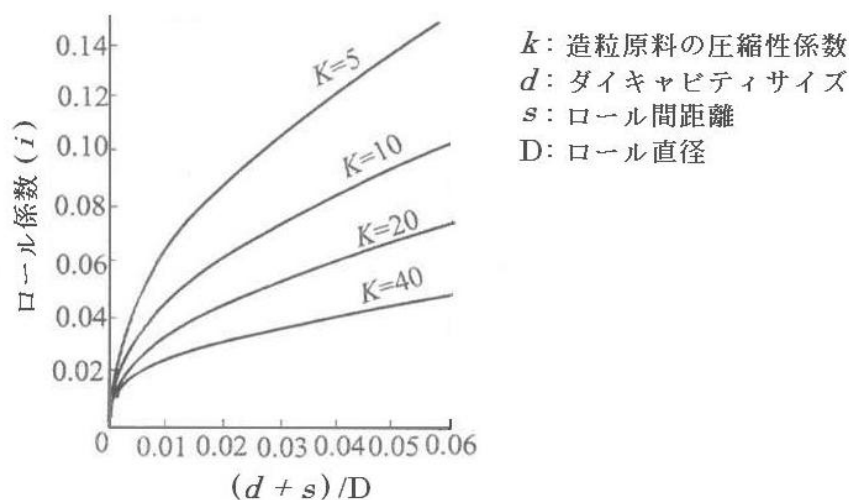


図 17. 異なる造粒原料の圧縮性係数に於けるロール係数  $i$  と  $(d+s)/D$  との関係

## 2-6. ロール長さ

ロール直径を確定してから、要求される単位時間の造粒量をベースにロール長さを確定する。ロール長さが長いほど、ダイキャビティの数が増え、時間当たりの生産量が増えるが、半径方向推力が増え、ロールが変形しやすくなる。また、ロール両端のダイキャビティに造粒原料の均一投入が困難で、一部のダイキャビティが原料充填の不足により、造粒できないまたは造粒した粒子が脱型しない現象が発生し、生産効率が低下することもある。

また、モーターの出力が一定の場合は、ロール長さが短いほど成形圧力が高くなる。

通常、ロール長さ  $B$  がロール直径  $D$  より小さく、 $B:D$  比が  $1:1.0\sim 3.0$  に設計することが多い。但し、肥料造粒には特に高い圧力が必要する場合を除き、大体  $1:1.0\sim 1.5$  にす

る。造粒量を増やすには、造粒機のロール直径と長さを無理に大きくする必要がなく、数台造粒機を1セットに組む手法は作業やメンテナンスにも有利である。

## 2-7. ロールを回転させる必要なモーター出力

ロール直径、長さ、成形圧力が決定された場合は、ロールを回転させるに必要なモーター出力は次の式で計算する。

$$E = 2.508 \times 10^{-3} P_b B D^2 T N$$

$E$  : モーター出力 (kW)、 $P_b$  : 成形圧力 (MPa)、 $B$  : ロール幅 (cm)、 $D$  : ロール直径 (cm)、 $T$  : トルク係数、 $N$  : ロール回転数 (rpm)

トルク  $T$  は造粒原料の圧縮性係数  $K$  と  $(d+s)/D$  と関係している。図 18 にはこれらの関係を示す。圧縮性係数  $K$  と  $(d+s)/D$  が判明すれば、図 18 から対応のトルク係数  $T$  を調べることができる。

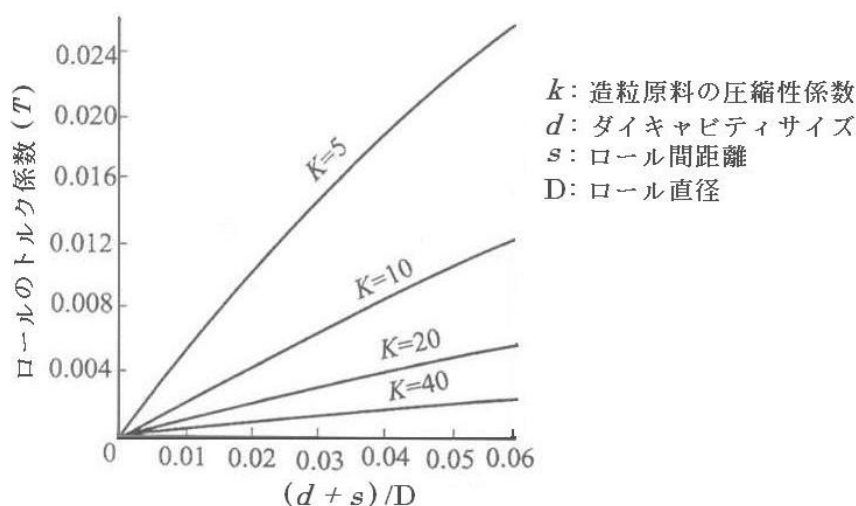


図 18. 異なる造粒原料の圧縮性係数に於けるトルク係数と  $(d+s)/D$  との関係

あるメーカーのブリケット造粒機カタログから抜粋したものを表 1 に纏める。

表 1. 肥料用ブリケット造粒機

型番	DZJ-15	DZJ-22	DZJ-30	DZJ-45
造粒した粒子サイズ (mm)	3.2~8.0 (ダイキャビティサイズを選択)			
モーター出力 (kW)	15	22	30	45
生産能力 (トン/時間)	1~1.5	2~2.5	3~3.5	4~4.5
粒子成形率 (%)	>85	>85	>85	>85
粒子硬度 (N)	6~20	6~20	6~20	6~20

## 三、ブリケット造粒の操作

ブリケット造粒機の操作が簡単であるため、下記の事項を注意すれば、ほぼ問題なく造粒することができる。

### 1. ロール間の距離調整

2 本ロール間の距離は主に造粒原料の散逸係数と成形圧力に関連する。ロール間の距離が小さいほど、噛み込み角が大きくなり、成形圧力も大きくなるが、ロール回転に必要なトルクも大きくなる。ロール回転に要するエネルギー消費量、ロール摩耗等を考えて、造粒原料の物性、造粒目的、ダイキャビティサイズに合わせて適宜の距離を設定すべきである。表 2 は化学肥料のブリケット造粒に必要な成形圧力を示す。

表 2. 化学肥料のブリケット造粒に必要な成形圧力

造粒原料	必要な成形圧力 (kN/cm <sup>2</sup> )
尿素を主成分とする高窒素化成肥料	20～40 (200～400MPa)
塩化加里	20～50 (200～500MPa)
普通化成肥料	30～80 (300～800MPa)
硫安	90～100 (900～1000MPa)
硝酸石灰	60 (600MPa)
炭酸アンモニウム (炭安)	20 (200MPa)

通常、肥料造粒の場合は、ロール間の距離は 0.3～1mm に設定することが多い。概して、成形に必要な圧力が低く、ダイキャビティサイズが大きい場合は、ロール間の距離が広く設定することができる。一方、石炭粉や鉄鉱石粉のブリケット造粒では、原料粒子の粒度が大きく、ダイキャビティサイズも大きい (3～7cm) ため、ロール間の距離を 1～10mm に設定することが多い。

### 2. ダイキャビティの対合調整

両ロールにあるダイキャビティが必ずぴったりに合わせてなければならない。ずれる場合は、造粒した粒子の形状と品質に影響するだけでなく、造粒効率が低下し、ロールの摩耗が増え、定額以上の負荷を与え、ひどい場合はモーターを焼損することもある。

### 3. ロール回転速度の設定

ロール回転速度はロールの周速度を制御し、ダイキャビティに与える圧縮時間を通して、造粒原料の粒子成形率、成形された粒子の品質、特に硬度に影響を及ぼす。他のパラメーターを固定して、ロール回転数だけを変えた実験結果を表 3 に示す。

ロール回転数は造粒原料物性、ロール直径、ダイキャビティサイズ等を考慮し、粒子成形率の目標を 85～90% に設定する。また、造粒途中で粒子の成形率が急激に下落し、造粒した粒子が粉化しやすい現象が発見した場合は、ロール回転速度を再調整する必要がある。

表 3. ロール回転数がブリケット造粒率と造粒した粒子の硬度への影響

ロール回転数(rpm)	粒子成形率(%)	粒子硬度(N)
20	90	9
25	92~95	10
30	90	9
40	35	8.6
50	25	8.4
60	20	8.1
87	15	<7

#### 4. 起動と停止

必ず造粒原料を投入しない状態で起動する。ロールに造粒原料が溜まる状態で起動する場合は、始動に必要なトルクが大きく、モーターに過大な負荷を与え、焼損する恐れがある。通常、起動後、2分間空運転して、異音や異常振動がないことを確認してから造粒原料を投入する。

停止がその逆である。まず、造粒原料の投入を停止してから約 2 分間空運転して、造粒した粒子を排出してからモーターを停止する。

#### 4. 造粒原料水分の調整

ブリケット造粒は乾式造粒に属し、粒子の内部結合力は主に分子間のファンデルワールス力と微粒子間摩擦力である。造粒原料の物性により、造粒した粒子はファンデルワールス力と摩擦力だけの結合力が不十分で、粉化しやすい場合もある。特に造粒原料が非常に乾燥している時にこの現象が起きやすい。粒子の硬度を高める手法として、少量の水を添加することが有効である。

その手法は、造粒原料を造粒機に投入する直前に少量の水分を霧状にして造粒原料に噴霧し、表面をやや湿潤させる。圧力で成形される際に水分が液架橋を形成して、脱型した粒子が成形熱で水分が蒸発し、固架橋に変化して強固な粒子を形成することができる。

経験では、造粒原料の水分率が 2~5%が最適で、それ以上高くなると、脱型が困難で、造粒した粒子が固結する恐れもある。

### 四、ブリケット造粒によく発生する問題とその解決方法

#### 1. ダイキャビティの位置ずれ

現象： 造粒作業の時間経過に伴い、2本ロールのダイキャビティ位置が次第にずれる。

原因： ① ダイキャビティ位置調整用のボルトが緩めている。

② スリーブと内軸の結合が緩い。

解決方法：① ダイキャビティ位置を調整してから、ボルトをしっかり締める。  
② スリーブまたは内軸を交換する。

## 2. 成形不良

現象： 造粒原料が成形できず、そのまま下へ落ちるまたは成形した粒子が扁平状を呈し、互いに繋がり、粒状にならない。

原因： ① 原料供給不足、ダイキャビティへの充填量が足りない。  
② ロール間の距離が大きすぎる。  
③ ロールが摩耗または変形して、ロール間の距離は両端が狭いが、中央部が広くなっている。

解決方法：① 十分な原料を供給する。  
② ロール間の距離を適宜に調整する。  
③ 摩耗したロールのスリーブまたは変形した内軸を交換する。スリーブの両端を研磨して、まっすぐにする。

## 3. 脱型できない

現象： 成形した粒子がダイキャビティから脱型できない。

原因： ① 造粒原料の水分含有量が高すぎる。  
② 成形圧力が足りない。成形した粒子の弾性回復力が不足。  
③ 新品ロールのダイキャビティ内壁が粗い。

解決方法：① 造粒原料の水分を調整し、原料を乾燥してから使う。  
② ロール間の距離を縮めて、成形圧力を高める。  
③ ダイキャビティの内壁を研磨し、その平滑度を高める。