

造粒 — 基礎知識

肥料造粒の目的は、肥料成分の調整、作物の種類や生育ステージに合わせる必要な栄養分の供給、機械施肥の対応、各成分の分離防止、施肥時粉じんの飛散防止、肥料性能の改善と効果の延長、保管時の吸湿や重圧による固結の防止などである。特に粉末状の肥料に比べて、作物の栄養要求に合わせて、窒素、りん酸、加里成分を混合して 1 つの化成肥料粒子にすれば、施肥回数を減らすことができるだけでなく、施肥の機械化、肥料効果を最大化にするには非常に有効である。

化成肥料の生産には、原料粉粒体を顆粒にする造粒工程が最も重要な工程である。造粒時に水や液体の添加有無により、乾式造粒法と湿式造粒法に大別される。また、造粒に使用する設備と手法により、湿式造粒法は転動造粒法（パン造粒法、ロータリーキルン造粒法）、攪拌造粒法（ドラム造粒法）、ペレット法（押し出し造粒法）、噴霧造粒法、噴霧流動床法等があり、乾式造粒法はブリケット法（圧縮造粒法）、プリル法（熔融造粒法）などがある。本章は、造粒に関わる基礎知識を述べ、各造粒法の詳細は次章から順次紹介する。

一、造粒に使うパラメーター

1. 粒度

粒度は、粒子の大きさを数値で表したものである。単一粒子の粒度、粒子集団の平均粒度と粒度分布がある。

1-1. 粒子の単一粒度

球状粒子にとって、粒度はその直径である。しかし、肥料の場合は、原料はもちろんのこと、プリル法と噴霧造粒法、噴霧流動床法の一部を除き、造粒した粒子が丸い球状を呈することが稀である。球状に近い粒子の場合は、当該粒子の異なる方向からサイズを計測し、平均にしてその粒度を得るが、不規則の形を呈する粒子では、体積または表面積から粒度を求めることができる。

例えば、粒子の表面積から粒度を求める場合は、当該粒子の表面積を S_p として、粒度 ds は

$$ds = \sqrt{\frac{S_p}{\pi}}$$

また、粒子の体積から粒度を求める場合は、当該粒子の体積を V_p として、粒度 ds は

$$ds = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}}$$

である。

造粒工程には、製品粒子の単一粒度は造粒設備の操作条件設定によく用いられる。

1-2. 粒子集団の平均粒度

粒度がバラバラの粒子から構成される粒子集団の粒度を表示するものである。平均粒度は算数平均（各粒子の粒径の和から粒子数で割ったもの）、幾何平均（各粒子の粒径の積からその粒子数の根）、調和平均（各粒子の粒径逆数の平均の逆数）、面積平均（各粒子の面積の和から粒子数で割ったもの）、体積平均（各粒子の体積の和から粒子数で割ったもの）、ザウタ平均（各粒子の体積の和から表面積の和で割ったもの）がある。例えば、 n 個粒子を有する粒子集団にそれぞれの粒子粒径 a 、面積 A 、体積 V として、その粒子集団平均粒度の計算式が表 1 に示す。造粒工程では、作業条件設定に原料粉粒体の粒子集団の平均粒度を知る必要がある。この場合は算数平均と幾何平均がよく使われる。

表 1 よく使われる平均粒度の計算法

平均粒度	基準	計算法	計算式
算数平均（相加平均）(d_{AM})	粒径	算数	$\frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n}$
幾何平均（相乗平均）(d_{GM})	粒径	幾何	$\sqrt[n]{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}$
調和平均（ d_{HM} ）	粒径	調和	$\frac{n}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \cdots + \frac{1}{a_n}}$
面積平均（ d_{SM} ）	面積	算数	$\frac{A_1 + A_2 + \cdots + A_n}{n}$
体積平均（ d_{VM} ）	体積	算数	$\frac{V_1 + V_2 + \cdots + V_n}{n}$
ザウタ平均(d_p)	体積・面積	算数	$\frac{V_1 + V_2 + \cdots + V_n}{A_1 + A_2 + \cdots + A_n}$

1-3. 粒度分布

粒子集団は多数の粒子の集まりであるが、それを構成する個々の粒子は、大きさが異なっていることが多い。粒度分布とは、粒子集団のすべての粒子を一定の粒度基準範囲に従って分級し、各粒度範囲にある粒子の数量、表面積、体積または重量が粒子集団に占める比率と累積値の分布関数である。粒度分布関数（ f_n ）、表面積分布関数（ f_s ）、体積分布関数（ f_v ）がよく使われる。

粒度分布は、一般には目開きの異なるいくつかの篩を用いて、その目開きを通過する割合を測定し、積算（累積）重量百分率で表す。粒子集団にとって、平均粒度のほか、粒度の異なる粒子の比率、組成状況いわゆる粒度分布を把握することも重要である。また、造粒工程の微妙な条件変化により、造粒した粒子はすべて同じ形、同じ粒度になるとは限らない。品質管理のため、製品粒子集団の粒度分布を求める必要もある。

2. 嵩密度と真密度

嵩密度は粉粒体が自然状態で堆積した際の見かけ密度である。その計測方法は一定の手

順で粉粒体を所定体積の容器に自由落下して自然に詰める状態で、その重さを量り、重さを容器の体積で割ることで得られる。

真密度は物質の真実状態の密度。粉粒体を融かすか強い圧力を加えて粒子間の隙間や内部の空洞を完全に消して一体化にしてから標準温度に於いてその単位体積の具有質量である。

嵩密度と真密度とも g/cm^3 または kg/m^3 で示す。

3. 空間率

空間率とは一次粒子（原料粉粒体）または二次粒子（造粒した粒子）の各粒子の間に存在している隙間の体積と全体積との比率を指す。顆粒内部の空洞を含まない。

$$\text{空間率} = (1 - \text{嵩密度} / \text{真密度}) \times 100 (\%)$$

空間率は粉粒体の流動性を表すパラメーターの一つである。空間率が高いほど、粉粒体の粒子間に隙間が多く、流動性が良くなる。

4. 圧縮度

粉粒体が圧力を受けて固める際に粒子の隙間と粒子の空洞が縮小して、体積が小さくなり、嵩密度が高くなる現象はよく見られる。固めた時の嵩密度と自然状態の嵩密度の差を圧縮度という。

$$\text{圧縮度} = (\text{固め嵩密度} - \text{緩め嵩密度}) / \text{固め嵩密度} \times 100 (\%)$$

粉粒体の圧縮度とその分類、流動性とは一定の関係が見られる。表 2 にはそれらの関係を示す。

表 2. 粉粒体の圧縮度とその流動性との関係

圧縮度 (%)	粉粒体の分類	流動性
5～15	自由流動顆粒	極めてよい
12～18	自由流動粉状顆粒	よい
18～22	流動粉状顆粒	普通
22～28	流動可能の粉末	良くない、不安定
28～33	流動性を有する粘性粉末	良くない
33～38	粘性粉末	非常に良くない
>38	非常に粘度の高い粉末	ほとんど流動しない

圧縮度は、粉粒体のハンドリング（取り扱い）において、サイロやホッパーからの排出不良や空気輸送の際に閉塞などのトラブルに大きく影響する。

5. 安息角、崩壊角、差角

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。粒度、含有水分、粒の形状などが影響する。粒子が小さいほど安息角が大きくなる傾向がある。また、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。

粉粒体層を、安息角の状態からショック（振動やハンマリング）で崩したときの角度を崩壊角と呼ぶ。

また、安息角と崩壊角の差は差角と呼ぶ。差角は、噴流性を判定する 1 指標になっている。

$$\text{差角} = \text{安息角} - \text{崩壊角} (^{\circ})$$

6. 表面特性

一次粒子の表面特性の中に造粒に影響を与える主要要素は、粒子の表面形状、表面空洞率と表面の親水性、粘着力である。

表面形状は粒子間の接触表面積を支配する。概して、粒度が小さく、適切な粒度分布を有するほど接触表面積が大きくなり、乾式造粒と湿式造粒ともに造粒時に粒状化しやすく、造粒した二次粒子の強度も高くなる。

表面空洞率は粒子の吸水性に影響する。概して、表面空洞率の高い粒子は吸水性も高く、湿式造粒の場合は粒状化しやすくなる。

粒子表面の親水性は粒子の濡らしに影響する。親水性の高い表面を有する粒子は水に濡らしやすく、表面から内部への毛細管水の移動も早く、湿式造粒の場合は造粒しやすい。

粒子表面の粘着力は粒子の集合化に影響する。粘着力の高い粒子は、造粒時に粒状化しやすいが、保管時に固結現象が発生しやすい。

二、 造粒にかかわる作用力とその計算

造粒とは多数の粉粒体が外力により固まり、粒状化する過程である。その粒状化にする過程にはいくつかの作用力に関わる。主に下記 5 つの作用力が働く。

1. 固体粒子間の引力

① **ファンデルワールス力（分子間力）**： 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。そのポテンシャルエネルギーは距離の 6 乗に反比例する。すなわち力の到達距離は短く且つ非常に弱い。この凝集力によって粒子間に形成される結合を、ファンデルワールス結合と言う。

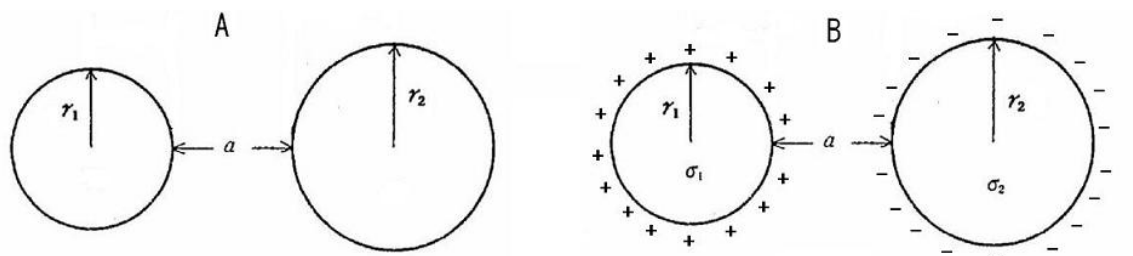
② **静電力**： 粉粒体の粉碎、輸送、供給、混合等の操作中に粒子が摩擦等により荷電することはよく見られる現象である。静電力は荷電粒子間に電荷による反発し、または引き合う力である。粒子間の静電力はその荷電量に大きく左右される。

二つの電荷を帯びた粒子（荷電粒子）間に働く静電力の大きさは、二つ粒子の電荷の積に比例し、粒子間距離の二乗に反比例する。同符号の電荷の間には斥力、異なる符号の電

荷の間には引力が働く。

③ **磁力**： 磁石や電流が発生する磁場により、磁石や電流が流れている導体同士、あるいはそれらと強磁性体の間に発生する力である。同種の磁極の間には斥力、異種の磁極では引力が働く。但し、肥料粒子は鉄等強磁性体物質の含有量が少ないため、磁力の影響を無視することができる。

ファンデルワールス力と静電力のモデルおよび計算式は図 1 に示す。なお、磁力を含む上記 3 種類の固体粒子間引力は作用距離が非常に短いため、その作用力が微弱である。ただし、粉粒体の粒度が $50\mu\text{m}$ 未満の微細粒子では、粉粒体の凝集現象が粒子間の引力により引き起こされる場合が多い。また、乾式造粒では、ファンデルワールス力が重要な役割を果たす。



ファンデルワールス力
$$F = \frac{Hr_1r_2}{6(r_1+r_2)a^2}$$

静電力
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{4\pi r_1^2\sigma_1 \times 4\pi r_2^2\sigma_2}{(a+r_1+r_2)^2}$$

図 1. ファンデルワールス力 (A) と静電力 (B) の理論モデルと作用力計算式

r_1 、 r_2 ：粒子の半径、 σ_1 、 σ_2 ：粒子の表面電荷密度、 a ：粒子間の距離、 ϵ_0 ：真空誘電率

2. 流動性のある液体が生じる液架橋力

一次粒子（原料粉粒体）間に流動性のある液体が存在する場合は、液体から界面張力と毛細管力を生じ、一次粒子がその界面張力と毛細管力により発生した液架橋（液体架橋）により互いに引付けられる。そのメカニズムは、固体粒子の間に液体で形成された液架橋の気液界面の内側と外側では圧力が異なり、気側の圧力が大気圧に等しい場合は、液側の圧力が表面張力の関係で大気圧より低い負圧の状態である。この負圧が粒子間の結合力を誘発する。負圧理論値の計算式は

$$P_L = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

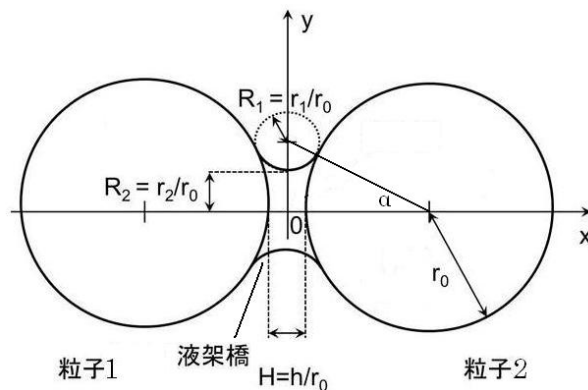
P_L ：負圧、 σ ：液体の表面張力、 r_1 ：液面の曲率半径、 r_2 ： r_1 と直角方向の曲率半径

液架橋による粒子間結合力をもっとも単純な系として、互いに接した同一球状粒子間に液体が凝縮し、断面はくさび形で液面が半径 R_1 の凹面と半径 R_2 の凸面のリング状液架橋が形成された場合（図 2）は、その液架橋による結合力は下記の計算式で表される。

$$F = \pi R_2 \phi \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

また、幾何学的関係から次の計算式が得られる。

$$F = \frac{2\pi r_0 \phi}{1 + \tan \alpha / 2}$$



- r_0 : 粒子の半径
- r_1 : 液面の曲率半径
- r_2 : r_1 と直角方向の曲率半径
- R_1 : 液架橋凹面の半径
- R_2 : 液架橋凸面の半径
- α : 液架橋凹面中心と粒子中心との角度

図 2. 液架橋のモデル

流動性液体による固体粒子間に液架橋の形成および液架橋による粒子の結合過程が次の3段階に進む。まず、少量の液体が粒子表面の接触点にそれぞれカテナイド曲面を形成したが、互いに繋がっていない。粒子間の液体量が増えることにつれ、粒子表面に生じたカテナイド曲面が次第に拡大し、空気を囲むように網状に連結していく。この時点では界面張力が働き始める。液体量が増え、粒子間の隙間を充満した場合は、粒子は液体から形成された液架橋により連結される。液体の界面張力により、固体相と液体相の二つの相が接している界面の表面積を減少させようとする力が粒子を引付けて大きな丸い粒子になるように働く。

また、粒子の結合により粒子間の隙間が狭くなることにつれ、毛細管力も作用して、粒子間の結合をさらに強くする。

従って、造粒の際に流動性のある液体を添加する場合は、一次粒子間の液架橋による結合力が主に液体の界面張力と毛細管力に依存する。液体の添加量が造粒効率、造粒後の二次粒子の硬度をもある程度影響を及ぼす。液体の添加量は飽和度で表示する。

飽和度 (S) = 液体の占めた体積 (V_L) / 一次粒子集団の隙間体積 (V_T) X 100%
 湿式造粒法は主にこの液架橋力で粒子間の結合を行う。

3. 流動性のない液体が生じる粘着力

流動性のない液体とは、粘度が高く、流動性のほとんどない液体および固体粒子の表面に付着している少量の流動性のない薄い液体層のことを指す。粘度の高い液体は自身がノリの役割を果たし、その粘着力により一次粒子を結合させる。また、一次粒子表面に付着

している少量の液体は粒子表面の凸凹を埋めて、粒子間の接触面積を増大させ、粒子間の距離を縮めることにより粒子間の引力を強化する。でん粉、PVA のような粘度の高い物質を造粒促進剤とする場合はこのような粘着力が働く。

4. 粒子間に形成された固架橋構造

液架橋は一次粒子を結合させることに有効であるが、結合した二次粒子の形状維持には不十分である。一次粒子の間に固架橋構造が形成されることにより、粒子同士を強固に結合させることは造粒成功の鍵である。固架橋構造の形成メカニズムは下記の 4 つに大分される。

- ① 一次粒子間に液体から形成された液架橋はその溶媒が蒸発した後、溶解された塩類が結晶として析出し、粒子同士を繋げる。
- ② 高粘度の液体が乾燥により形成した固化性物質が一次粒子同士を繋げる。
- ③ 加熱熔融により一次粒子の一部が溶けて、冷却後溶けた部分が再び凝固して、粒子同士を繋げる。
- ④ 造粒工程に発生した化学反応で生成した化合物が結晶となって、粒子同士を繋げる。

固架橋構造は造粒した二次粒子の形態を維持するにはもっとも重要な役割を果たす。湿式造粒法は、①、②、④、乾式造粒法は、③、④の固架橋で造粒した二次粒子の結合を保つ。

5. 粒子同士の嵌め込み

これは、不規則粒子は攪拌や圧縮により互いに嵌め込み、結合する現象である。粒子同士の嵌め込みにより形成された結合強度が嵌め込み部位の摩擦力とファンデルワールス力、一次粒子の表面粘着力に依存する。なお、ブリケット造粒やペレット造粒を除き、他の造粒法では粒子間の結合に及ぼす影響が少ない。

液架橋、固架橋、粒子同士の嵌め込みによる粒子の結合モデルは図 3 に示す。

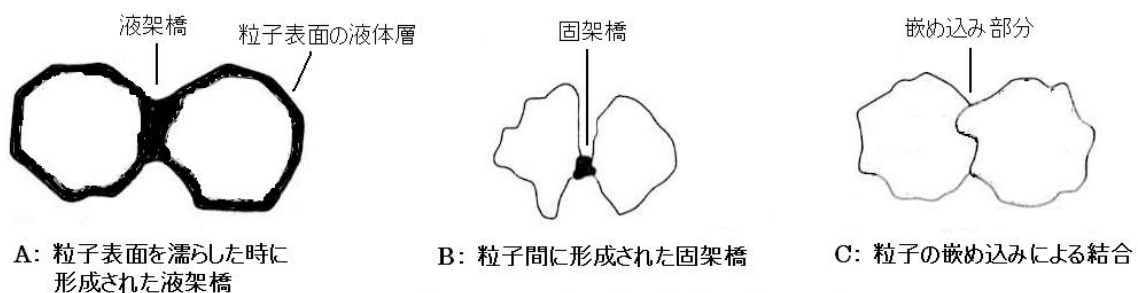


図 3. 液架橋、固架橋、嵌め込みによる粒子の結合

三、 固架橋構造の形成メカニズム

粒子の間に固架橋構造の形成が粒子の結合と形状の維持に最も重要なファクターである。

1. 湿式造粒による固架橋構造の形成

湿式造粒とは一次粒子に流動性の高い液体を添加して、転動または攪拌、圧縮により所要サイズの粒子を造粒し、乾燥を経て製品にする造粒方法である。湿式造粒のカギは液架橋の形成と液架橋から固架橋に転換することである。

1-1. 液架橋の形成を影響する因子

液架橋の形成を影響する因子は、液体の表面張力、固体粒子に対する液体の飽和度である。

① **液体の表面張力：** 固体粒子に液体を入れると、液体が粒子の表面を沿って広がり、表面を濡らす。一部が毛細管作用で粒子表面の穴から内部へ浸透する。液体の広がり速度と浸透力は主に液体の表面張力、固体粒子の表面張力および固体粒子と液体の間に存在する界面張力により制御される。一次粒子の種類が一定の場合は、概して、液体の表面張力が小さいほど、固体と液体の接触面に存在する界面張力が小さくなる。また、固体と液体の接触面に存在する界面張力が固体の表面張力より小さいほど液体の濡らす速度と浸透速度が速くなる。

② **液体の飽和度：** 液体の飽和度、すなわち液体が一次粒子間の隙間（空間率）に占める率は粒子表面の濡らした状態と液架橋の形成を支配し、粒子の結合速度および二次粒子の粒度分布に影響を及ぼす。通常、液体の飽和度が 40%未満の場合は一次粒子間に液架橋を形成せず、粒子の結合現象が起きない。液体の飽和度が 45～55%に上昇した場合は、一部粒子間に液架橋を形成し、結合力が生じたが、その分布が不均一で、生成した二次粒子のバラツキが大きく、粒度分布が広い。液体の飽和度が 60%を超えた場合は、一次粒子の表面がほぼ濡らされ、液架橋が生じた結合力が粒子に均一に作用し、造粒した二次粒子の粒度が揃う。

湿式造粒には水および水を溶媒とする液体は最も使われる液体である。造粒時、液体が粒子の表面を濡らし、液架橋を形成したことにより、粒子が液架橋の結合力により互いに結合し、成長して最終的に大きな粒子を形成する。水または水を主成分とする液体を使って、真密度 1～6g/cm³ の粒子の転動造粒実験結果により、必要な液体量 (S) について下記の経験式が得られた。

一次粒子の平均粒度が 30 μm 未満の場合は、

$$S = \frac{1}{1+1.85(\rho_m + \rho_L)}$$

一次粒子の平均粒度が 30 μm を超えた場合は、

$$S = \frac{1}{1+2.17\left(\frac{\rho_m}{\rho_L}\right)}$$

S：造粒時に必要な液体の比率（液体量／原料粒子量 X 100%）

ρ_m ：粉粒体の真密度、 ρ_L ：液体の密度

なお、造粒に必要な液体量は、原料一次粒子の嵩密度、空間率および乾燥と湿潤状態で

の振動充填圧縮度により予測することができる。

1-2. 液架橋と固架橋の形成

固体粒子に液体を入れると、液体が粒子との接触により生じた界面張力が粒子の表面張力より小さい場合は、液体が粒子間に広がり、浸透していき、粒子と粒子が液体により繋がり、液架橋が形成される。液架橋力により一次粒子が結合して、大きな粒子を形成する。

造粒した二次粒子が乾燥により液架橋の溶媒が蒸発してしまうと、残った固体分が固架橋として一次粒子を繋げる。固架橋の存在により造粒乾燥後の二次粒子がその形状を維持することができる。なお、固架橋の牢固度が造粒後の二次粒子強度を支配する。

液架橋から固架橋への転換メカニズムは次の3つである。

- ① **一次粒子の構成成分の再結晶：** 液体の存在により一次粒子の一部可溶性成分が溶解し、液架橋の組成を構成する。乾燥により溶媒の蒸発に伴い、可溶性成分が結晶として析出し、固架橋を形成する。過りん酸石灰、りん安、尿素などを原料とする場合は、水だけを使ってもうまく造粒できるのは、この可溶性成分の再結晶によることである。
- ② **液体中の溶質の結晶：** 造粒に使う液体に溶けてある溶質が溶媒の蒸発により結晶として析出し、固架橋を形成する。例えば、廃糖蜜、リクニンスルホン酸塩、PVA 等の溶液を使う場合は、乾燥により析出された溶質結晶が固架橋を形成する。
- ③ **粘着物質の固化：** 造粒に流動性のない液体を使う場合は、その液体がノリの役割を果たし、粘着力により粒子を結合させる。粒子間の結合は上述の液架橋構造と異なるが、同じく液体の粘着力による繋がりである。乾燥により液体の溶媒が蒸発して、残った固形物が粒子の固架橋を形成する。でん粉を造粒促進剤とする場合はこのようなメカニズムで固架橋を形成する。

2. 乾式造粒による固架橋構造の形成

乾式造粒は水や液体を使わず、原料粉粒体を造粒する方法である。よく使われる手法は、加熱による熔融焼結、化学反応、圧力を加えることによる圧縮変形である。乾式造粒は液架橋を経由せず、固架橋を形成することが可能である。乾式造粒による固架橋の形成メカニズムは次の2つである。

- ① **熔融した成分の固化：** 加熱により、一次粒子表面の一部または一次粒子構成成分の一部が熔融し、粒子間を充満する。冷却により熔融した成分が再び固化して、固架橋を形成する。
- ② **低融点物質の固化：** 低融点の物質を混ぜた原料粉粒体が圧力等により低融点物質が液化し、粒子間を充満する。圧力の解放と冷却により、低融点物質が再び固化して固架橋を形成する。

3. 粒子の結合強度

造粒工程の品質評価の一つ指標は、造粒後の二次粒子の強度である。二次粒子の強度が足りない場合は、保管、輸送途中で粉々となり、施肥に支障が出る。造粒工程に形成した固架橋の強度が二次粒子の強度を支配する。

通常、造粒後の二次肥料粒子の強度は圧壊強度で示す。すなわち、粒子に圧力を与え、破壊まで必要な圧力を測り、粒子の圧壊強度(通常 kgf/cm^2 で表示する)を算出する。我が国では肥料粒子の強度測定には木屋式硬度計が多用される。

3-1. 固架橋構造の二次粒子強度

造粒後の二次粒子の極限圧壊強度は固架橋の強度に依存する。すなわち、一次粒子間に形成された固架橋が断裂しない限り、形成した粒子が崩壊しない。固架橋を形成する連結材料(物質)がすべての一次粒子の接触部位に均一に存在し、一次粒子の空間に強度 i_B の固架橋を均一に形成した理想的な状態に仮定して、二次粒子の極限圧壊強度 i_{tB} は下記の式で表すことができる。

$$i_{tB} = \frac{M_B}{M_P} \times \frac{\rho_P}{\rho_B} (1 - \varepsilon) i_B = \Phi_B \varepsilon i_B$$

M_B : 固架橋物質の質量、 M_P : 一次粒子の質量、 ρ_B : 固架橋物質の密度、 ρ_P : 一次粒子の密度、 ε : 一次粒子の空間率、 $(1 - \varepsilon)$: 固架橋物質の体積、 i_B : 固架橋物質の引張り強度、 Φ_B : 一次粒子の空間を埋めた比率

しかし、二次粒子の破壊は固架橋の断裂によるものだけではなく、一次粒子の崩壊もありえる。また、一次粒子の均一分布やすべての固架橋が均一な強度を持つことが不可能である。実際の経験では二次粒子の圧壊強度は一次粒子の連結点に生じた粘着力に支配する。Rumpf 氏は一次粒子が単一粒度の球状粒子と仮定する場合に、二次粒子の圧壊強度 i_t 理論値について下記の式を提示した。

$$i_t = \frac{1 - \varepsilon}{\pi} K \frac{F}{d_p}$$

ε : 一次粒子の空間率、 K : 係数、 d_p : 一次粒子の粒度、 F : 粘着力

一次粒子が非球状粒子について、造粒した二次粒子の圧壊強度 i_t 理論値は下記の式で計算することができる。

$$i_t = (1 - \varepsilon) K \frac{F}{d_p}$$

3-2. 無架橋構造の二次粒子強度

ブリケット造粒など乾式造粒法には一次粒子間に固架橋構造を形成せず、粒子がファンデルワールス力と嵌め込み部位の摩擦力で結合させるケースがある。これは無架橋構造と呼ばれる。

無架橋構造による結合している二次粒子の圧壊強度は主にファンデルワールス力と摩擦力に支配する。一次粒子が形状均一の球状粒子の場合は、ファンデルワールス力の結合に

よる二次粒子の圧壊強度が

$$i = 4.2 \times 10^{-15} \frac{d}{a^2}$$

d : 一次粒子の直径、 a : 粒子間の距離

また、粒子間の距離を空洞率 ε で代える場合は、ファンデルワールス力の結合による崩壊強度が

$$it = 3.7 \times 10^{-15} \frac{1-\varepsilon}{a^2 d \varepsilon}$$

上記の計算式から造粒後一次粒子の空間率が低いほど二次粒子の圧壊強度が高くなる。

また、嵌め込み部位の摩擦力 F は

$$F = \mu N \quad \mu: \text{摩擦係数、} N: \text{垂直抗力}$$

で計算できるため、一次粒子の互いに嵌め込み面積が広いほど、摩擦係数が高くなり、二次粒子の圧壊強度が高くなる。

4. 一次粒子の粘着力

一次粒子は転動や振動により自然に大きな粒子に成長することもある。これは一次粒子の表面特性、特に粒子表面の粘性力によるものである。この粘性力により粒子が自然に結集して、二次粒子を形成する。集合体の結成と結成後の安定性は、集合体とその一番外側に付着している粒子の動的粘着・離脱行動によるものである。すなわち、集合体と一番外側の粒子との間に生じる粒子間の粘着力 F_j と一番外側粒子の重さ F_g が集合体の安定性を支配する。

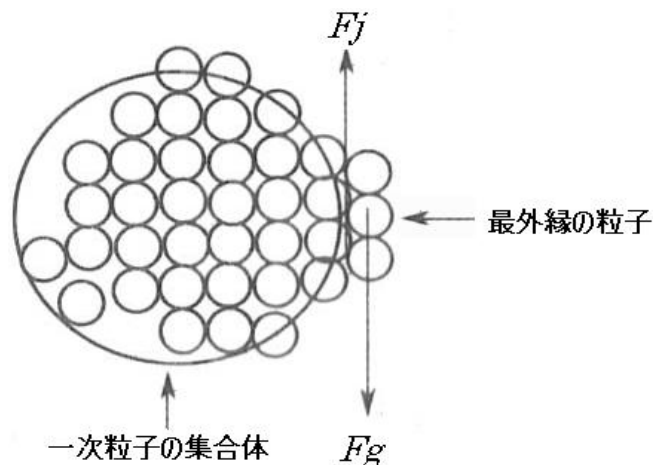


図 4. 一次粒子の粘着力と重さが粒子集合体への影響

図 4 に示すように、集合体と一番外側の粒子との間に生じる粒子間の粘着力 F_j は、

$$F_j = CA$$

C : 一次粒子の単位面積粘性力、単位 Pa、 A : 粘着面積、単位 m^2

また、球状粒子の場合、粒子の重さ F_g は、

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_m g \frac{A(1-\varepsilon_a)}{\frac{\pi}{4} d_p} = \frac{2}{3} (1-\varepsilon_a) \rho_m g d_p A$$

d_p : 粒子直径、 ρ_m : 粒子密度、 ε_a : 集合体の空間率 $= 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}$ 、 ρ_a : 集合体の密

度

$F_j > F_g$ の場合は、一次粒子が集合体に付着する。

$F_j < F_g$ の場合は、外側の一次粒子が集合体から離脱する。

$F_j = F_g$ の場合は、集合体外側の一次粒子の吸着と離脱が動的な平衡状態となる。

以上の式から、一次粒子の単位面積粘着力 C が一定の場合は、粒子の粒度が細かいほど、表面面積が大きくなり、集合体を形成しやすくなる。また、粒子の重さが軽くなる場合には、集合体を形成しやすくなる。これは二次粒子にも適用する。造粒後の化成肥料が仮性固結現象を発生する主な原因である。