

## 混合

化成肥料の生産には、数種類の肥料原料を所定の比率で機械で混ぜ合い、均一な混合状態とする工程は混合工程と呼ばれる。原料の混合が均一になるか否かは、次工程の造粒工程だけでなく、化成肥料の製品品質と肥料効果に影響を及ぼす重要な工程である。また、BB 肥料を生産する場合には、混合が最も重要な工程である。

### 一、混合原理

混合とは、外部からの作用力で、2 つ以上の粉状または粒状の原料を完全に混ぜ合っ、均一にすることである。外力による粉粒状ものを混合させるメカニズムは主に次の三つである。

#### 1. 移動（対流）混合

原料は攪拌機の翼等の回転により大量の粒子が一ヶ所からほかの場所へ移動し、循環流動しながら混合していく。大量粒子の広範囲、高速混合に適する。

#### 2. 分散（拡散）混合

振動や衝突により近隣の粒子が互いに位置を変更して、次第に外へ拡散していき、最終的に混ざり合う。混合範囲は限定され、混合速度がやや遅い。

#### 3. せん断混合

粒子の集合体が圧迫やせん断作用で粒子がバラバラになる際に互いに滑りまたは衝突が起き、局部に混ざり合う状態になる。混合範囲が狭く、混合速度が遅い。

### 二、混合設備

混合に使用する機械は混合機という。混合機は、混合する粉粒体が入った容器（混合室）の回転有無により、容器固定型と容器回転型に大別される。容器固定型混合機は、粉粒体が入った容器本体が回転せず、内部に設置されている攪拌ブレードまたは気流、重力等の作用力により粉粒体を混合させる。一方、容器回転型混合機は、粉粒体が入った容器本体を回転させることにより粉粒体が混合する。

また、外部力の施す方法は、翼などの回転を利用して粒子を攪拌・混合する機械攪拌型、容器の回転、振動により原料粒子を攪拌・混合する回転分散型、空気等の気流を利用して粒子を振動や衝突により散らばり、互いに混ざり合う流動攪拌型、粒子自身の重力落下と分岐板、分岐管等の分割と集合により粒子が分散・混合する無攪拌型に分けられる。

以下は、混合機の種類とその作用メカニズムを述べる。

#### 1. 容器固定型混合機

粉粒体が入った容器（混合室）本体は回転せず、機械等の攪拌力で粉粒体を混合させる混合機である。その攪拌力の種類により、攪拌ブレードの回転による混合機、気流の流動による混合機、重力を利用する粉粒体の落下流動による混合機に分けられる。

### 1-1. 攪拌ブレードの回転による攪拌混合機

容器には攪拌用のブレードを付いている回転軸が設置され、回転軸を中心にそのブレードが回転し、攪拌力で粉粒体を混合させる。攪拌ブレードの形態により、リボン形、スクリー形、パドル形の 3 種類がある。また、回転軸の設置方向により、縦型と横型の 2 種類がある。それぞれの構造概略は図 1 に示す。

**A. リボン形ブレード攪拌混合機：** ブレードがリボン状の幅の狭い羽根で、回転軸にらせん状に巻かれて、回転軸との間に隙間を有することが特徴である。投入した粉粒体が回転するリボンブレードによる循環移動、せん断を繰り返すことで、分散混合を行う。回転軸の設置方向により、縦型と横型に分けられる。通常の小～中型粉粒体混合機によく見られる。

**B. スクリー形ブレード攪拌混合機：** ブレードは幅の広い板状で、回転軸にらせん状に巻かれて、回転軸との間に隙間がない。投入した粉粒体が回転するスクリーブレードによる移動、せん断を繰り返すことで、分散混合を行う。回転軸の設置方向により、縦型と横型に分けられる。ブレードと回転軸との間に隙間がないため、分散・混合能力が劣るが、移動能力が優れたため、粉粒体を輸送するスクリーコンベアに多用される。

**C. パドル形ブレード攪拌混合機：** 縦に設置される回転軸の先端に 2～6 枚のスクリー（翼）を装着して、回転するスクリーにより分散混合を行う。攪拌作用がブレードの装着している回転軸先端に限られ、粉粒体では混合効率が劣るが、製造コストが安く、メンテナンスが簡単で、家庭用の小型混合機には利用される。一方、パドル形ブレード攪拌混合機は回転の抵抗力が低く、攪拌力が強いため、液体の攪拌混合にはよく使われる。

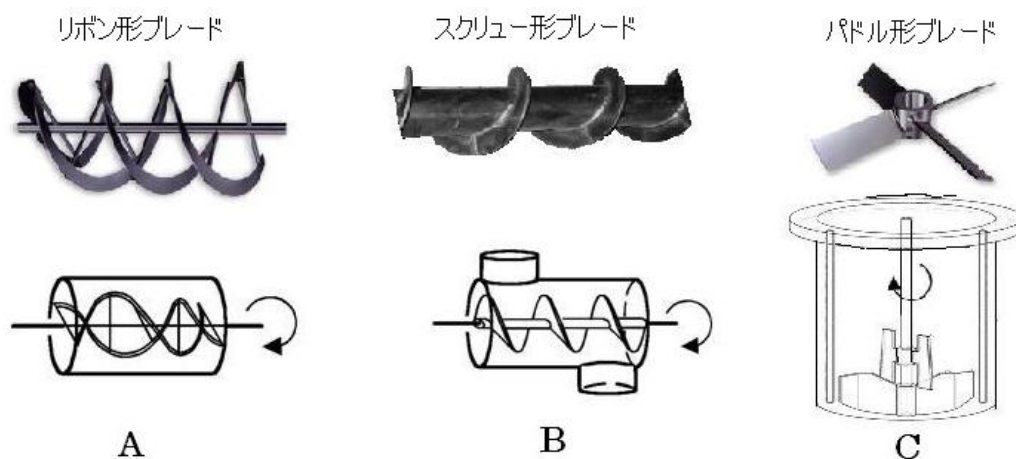


図 1. 攪拌ブレード回転式混合機の概略図

### 1-2. エアの流動による攪拌混合機

ホッパー、タンクにエア装置を装着して、粉粒体が気流により流動化され、分散混合す

る。回転部分がないため、金属摩耗によるコンタミの心配がない。

エアの導入方式とホッパー、タンクに気流を制御する多孔板設置の有無により、下記の3種類がある。

**D.** ホッパー、タンクの下部に多孔板を設置し、エアが多孔板を通してホッパー、タンクに導入される。バルブを調整することにより区画ごとにエアの強度を変え、粉体を流動化して混合する。

特徴は、混合室の容積は  $10\sim 10000\text{m}^3$ 、大型化が可能である。エアの発生はブロワだけでも可能で、高価なコンプレッサーを省くことができる場合がある。導入したエアの流速が弱く、粒体混合には不適、粉体の混合に限られる。

**E.** ホッパーに多孔板がなく、下部にコーン型エア導入口がある。圧縮空気がコーンの下部から間歇に噴出し、粉粒体を吹き上げるにより、流動化して混合させる。

特徴は、導入したエアの流速が速いため、粒体混合にもできる。エアが間歇に吹き込むため、エネルギー消費量が少ない。コンプレッサーが必要で、混合室容積は  $1\sim 100\text{m}^3$ 、大型化が難しい。

**F.** ホッパーに多孔板がなく、中央に1本のパイプを設置する。圧縮空気がホッパーの底部から導入され、粉粒体を巻き上げてパイプを通してホッパーの上部へ運ぶ。粉粒体がエアによる運搬と重力の自然落下で、ホッパー中央と周辺部で対流して次第に混合する。

特徴は、導入したエアの流速が速いため、粒体混合にもできる。コンプレッサーが必要で、混合室容積は  $10\sim 600\text{m}^3$ 、大型化も可能である。

上記3種類エア混合装置のエア導入方式と構造の概略は図2に示す。

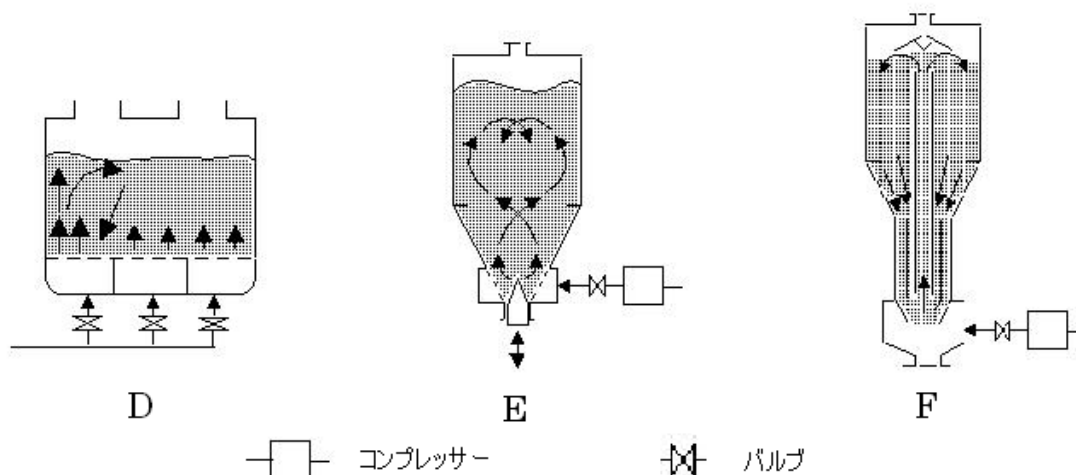


図2. エアを使用する混合装置の概略図

### 1-3. 重力を利用する混合機（重力ブレンダー）

混合塔（ブレンダーサイロ）の上部に数室の貯槽に区切られて。それぞれの貯槽には 1～5ヶ所の排出パイプを設けている。また、混合室の中部には落下した粉粒体を当てて、分散流下させる円錐状のバッフルコーンが設けられている。バケットエレベーター等により混合塔に上げられた粉粒体はそれぞれの貯槽に蓄え、配合比率に従って排出パイプから落下させ、途中でバッフルコーンに当たって分散流下し、混合する。BB 肥料の生産によく使われる。

特徴は、落下重力による混合であるため、設備が簡単で、エネルギー消費量が少ない。欠点、一定の高度が必要で、設置面積が大きく、均一の混合が難しい。粉体の混合には粉じん対策が必要である。その特徴から肥料の加工では BB 肥料の混合だけに使用される。

重力を利用する混合機（重力ブレンダー）の構造概略は図 3 に示す。

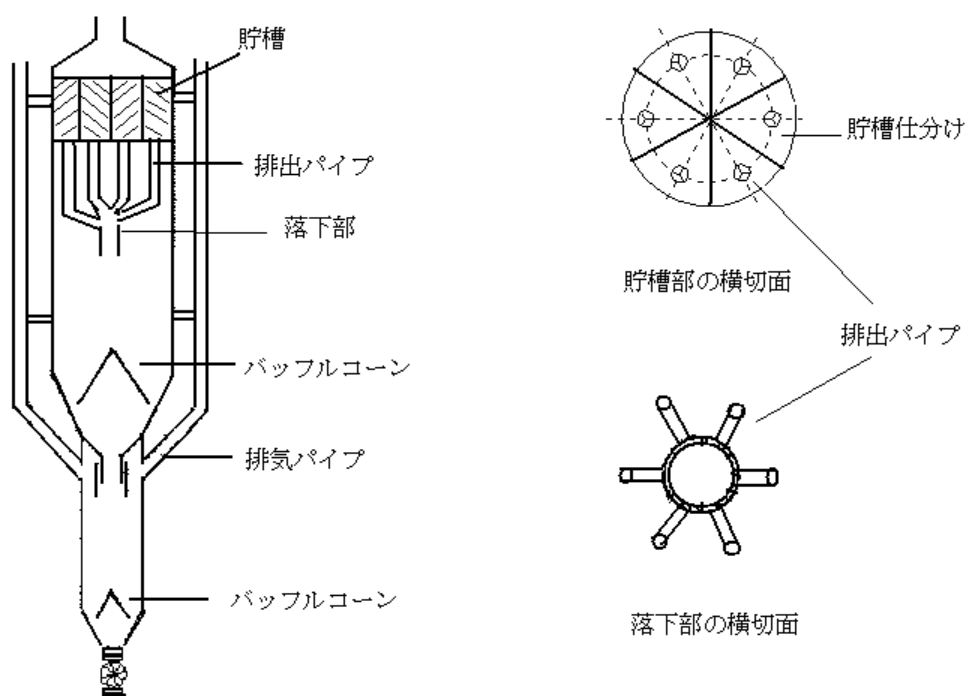


図 3. 重力ブレンダー構造概略図

## 2. 容器回転型混合機

容器回転型混合機は、モーター等を使って、混合する粉粒体が入った容器本体を回転させ、粉粒体が容器の回転に沿って上昇・落下を繰り返すことにより分散混合する。容器の回転による混合であるため、設備の大型化が難しい。

主な容器回転型混合機の外形構造と回転方式は図 4 に示す。

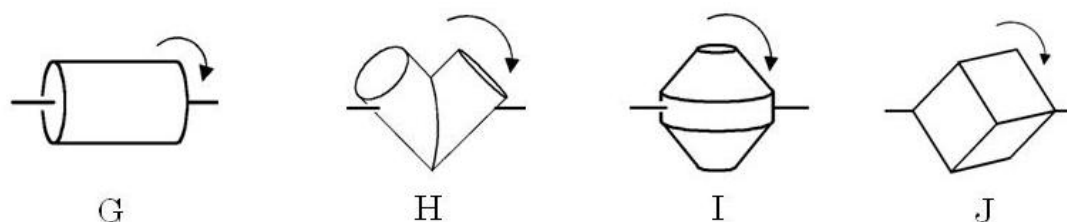


図 4. 容器回転型混合機の外形構造概略図

**G. 円筒型混合機：** 一番簡単な構造を有する混合機である。容器が円筒型で、水平または傾斜に置き、内部にある粉粒体が回転により上昇と落下を繰り返し、次第に分散混合する。代表的なものはドラム式混合機である。混合作用を強化するため、円筒内にスパイラル羽根のような固定ブレードを装着することが多い。大量に混合処理するには適している。

**H. V 型混合機 (V コン)：** 二つの円筒容器を V 型に組み合わせ、その重心に回転軸を設ける。V 型容器の回転により入っている粉粒体はその重力と遠心力で 2 ヶ所から 1 ヶ所に集まり、また 2 ヶ所に分かれるという動作の中で集合と分離が繰り返されて、三次元的な衝突交流とたたみ込み作用で分散混合が行われ、短時間で均一に混合される。最適装入率は全容積の 40%前後とされる。混合室の容量が制限されているため、少量、迅速処理に適している。

**I. ダブルコーン型混合機：** 二つの円錐間に短い円筒部を設け、容器の中心軸を回転軸とする。容器に入った粉粒体が回転による遠心力の持ち上げと円錐に沿った自重すべりの作用で上昇・落下を繰り返しながら混合する。V 型混合機に比べ、混合作業に少々時間がかかるが、きわめて良好な混合度を得ることができる。また、回転直径が小さいため、大容量化が可能である。粉粒体の運動空間を確保する為、最適装入率は全容積の 40～50%とする。内部に角度調整のできるバッフルプレートを設けることで、混合効率の向上と仕込容量の増加や原料排出時のブリッジ防止などの機能を追加できる。

**J. 立方体型混合機：** 正立方体の対角線を回転軸とするもので、V 型やダブルコーン型の混合機構と異なり、容器の形により中に入った粉粒体が三次元的な折りたたみに加えて若干のせん断、圧縮作用も受けて、集合と分散が繰り返し、混合される。容器回転型の中に所要混合時間が最も短いと言われる。なお、その変形として六角体や八角体の容器を有する立方体型混合機もある。

### 3. 混合状態の確認

混合機の性能を評価するパラメーターとして、①混合速度（混合にかかる時間）、②最終混合度（混合後の状態）、③エネルギー消費量である。この 3 つの指標は互いに関連して、

混合機が一定の場合は、混合速度はエネルギー消費量との間に負の相関関係、最終混合度との間には正の相関関係を有する。即ち、混合速度が速いと、所要の混合時間が短く、エネルギー消費量が減るが、最終混合度がよくなる可能性がある。最終混合度については、理想的な完全混合状態に近づけるほど良いとされている。

粉粒体の理想的な完全混合状態は、粒子の接触している周辺に同じ種類の粒子がなく、すべて別種類の粒子に囲まれる状態である。しかし、現実には完全理想的な混合状態に到達することが不可能で、その代わりに統計的な完全混合状態を混合機の性能と混合度を評価する。統計的な完全混合状態とは、各成分粒子の分布は何の規則性もなく、確率的にランダムな状態として存在する。一例として、A、B、Cの3種類粒子を50%、30%、20%の比率で混合する場合は、理想的な完全混合状態と統計的な完全混合状態の違いは図5を参考してください。

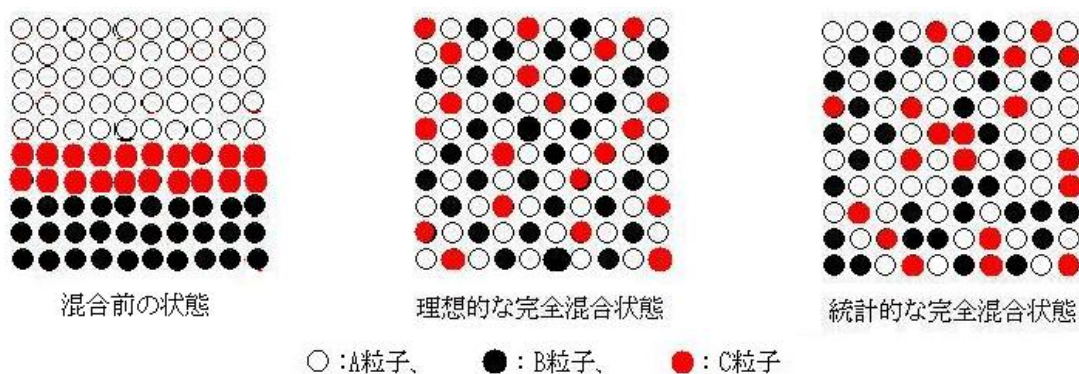


図5. 理想的な完全混合状態と統計的な完全混合状態の違い

混合状態は、その均一性と化学組成の正確性を持って評価する。サンプルの点数、サンプリング場所を注意しつつ、サンプルの化学成分分析値が各組成粉粒体の化学成分計算値に近づくほど混合状態が良い。

### 三、肥料加工によく使われる混合設備

肥料の性質と特徴により、肥料加工にはリボン形ブレード混合機、ドラム式混合機、ダブルコーン型混合機、円盤式ブレード攪拌混合機、重力ブレンダーがよく使われる。また、生産方式によりバッチ式と連続式に分けられる。

#### 1. リボン式混合機

混合室内にらせん状に巻かれているリボン形ブレードを有する混合機である。投入した粉粒体が回転するリボンブレードにより循環、せん断を繰り返すため、分散混合を行う。

リボン式混合機は、リボンブレードの本数、混合室の形により下記の数種類がよく使われる。

##### 1-1. 円錐型リボン式混合機

円錐型リボン式混合機は、混合室が逆円錐形を呈する混合機である。混合室の中央に 1 本の回転軸を備え、その回転軸には混合室の内壁に沿うようにらせん状に巻かれたリボンブレードが取り付けられている。リボンブレードは、アプリケーションによって、シングルまたはダブルリボンを選択できる。投入された原料粉粒体は回転するリボンブレードにより混合室の内壁面に沿って上昇し、リボンブレードの最上部まで上昇すると混合室の中央部へ戻され、重力により下へ沈降する。大量に掻き上げと落下による循環作用およびリボンブレード先端部でのせん断作用により効果的に混合される。一定時間混合後、排出口から混合された原料を排出する。バッチ式混合機である。

円錐型リボン式混合機の構造概略と実物は図 6 に示す。

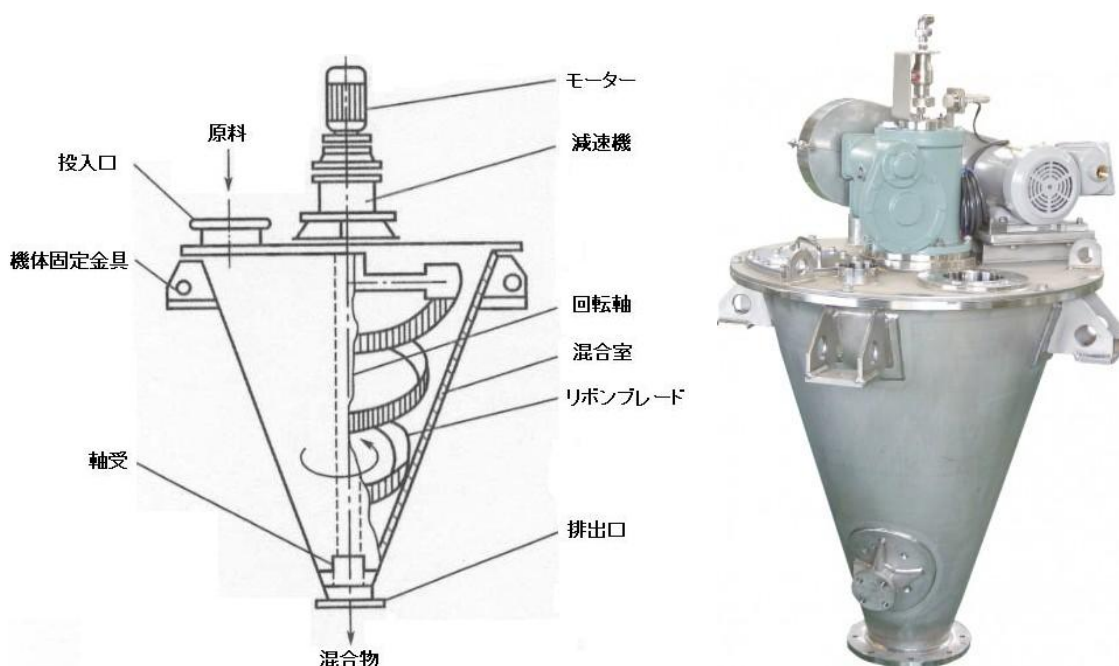


図 6. 円錐型リボン式混合機

### 1-2. 円錐型ダブルリボン式混合機

円錐型ダブルリボン式混合機は、逆円錐形の混合室に V 字型の回転軸を設置し、その回転軸にらせん状のリボンブレードが巻かれている。リボンブレードが V 字型回転軸に沿って自転しながら、V 字型軸も混合室の中心を公転する。投入された原料粉粒体はまずリボンブレードの自転により、ブレード近傍の粉粒体が上昇運動し、ブレードから離れた部分では下降運動をする。同時に V 字型軸も回転して 2 本のリボンブレードが内壁面に沿って公転することにより粉粒体全体を大きく移動させる。原料粉粒体はリボンブレードの自転と公転による大量に掻き上げと落下による循環作用、リボンブレード先端部でのせん断作用が行われ、効率的に迅速に混合される。一定時間混合後、排出口から混合された原料を排出する。バッチ式混合機である。

円錐型ダブルリボン式混合機の構造概略は図 7 に示す。

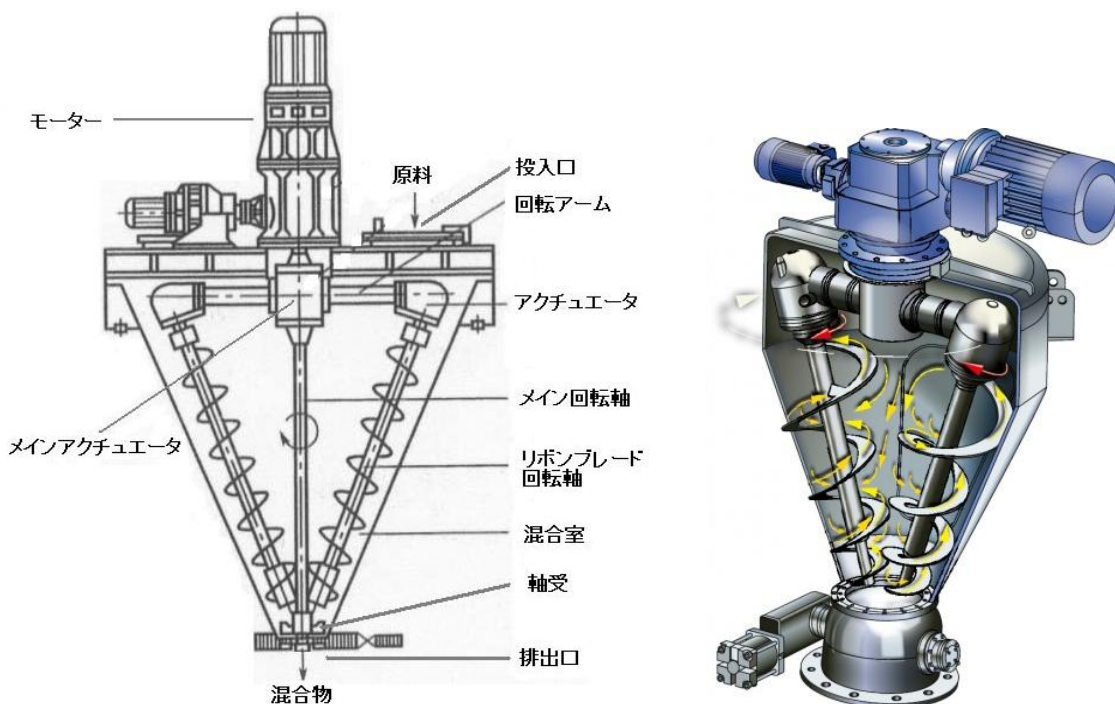


図 7. 円錐型ダブルリボン式混合機

円錐型リボン式混合機の特徴は構造が非常に簡単で、消費電力が少なく、運転とメンテナンスを行いやすい。混合室が密閉される状態で、混合時の粉じんや騒音が抑えられ、安全性も兼ね備えている。欠点は、バッチ式で、生産能力が低い。少量生産の場合に適する。ラボ用 5L 超小型機種から実生産用の 6,000L の大型機種がある。

### 1-3. 横型リボン式混合機

横型リボン式混合機は、蓋を有する U 型構造の混合室に 1 本の回転軸（2 本の場合もある）を設け、その回転軸に 2 本のらせん状リボンブレードが交代に巻かれている。リボンブレードは 1 本が粉粒体を外側方向へ、もう 1 本が中央方向へと互いに逆方向に移動させる。投入された粉粒体が外・内リボンブレードの回転により移動され、交流、循環、せん断、分散を繰り返す、効果的に混合される。バッチ式と連続式がある。

横型リボン式混合機のリボンブレード構造は図 8、混合機の概略は図 9 に示す。

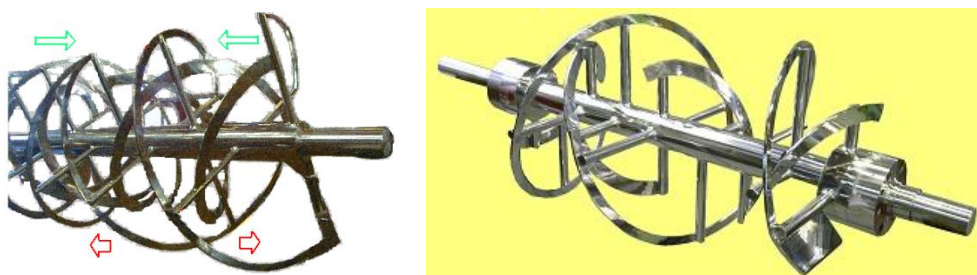


図 8. 横型リボン式混合機のリボン形ブレード構造



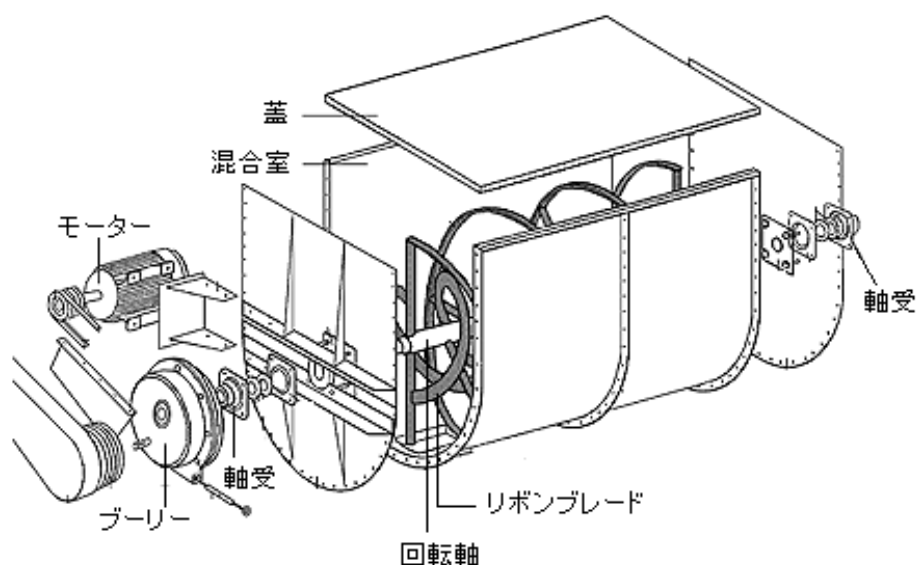


図 9. 横型リボン式混合機の概略図

円錐型リボン式混合機に比べ、横型リボン式混合機は構造がシンプルで、生産能力が高いが、混合後の均一度がやや劣り、消費電力もやや多い。

## 2. ダブルコーン型混合機

混合室は二つの円錐間に短い円筒部を設けるような形で、混合室の中心軸を回転軸とする。モーターが転動機構を通して混合室を回転させる。混合室に投入された原料粉粒体が回転による遠心力の持ち上げと円錐に沿った自重すべりの作用で上昇・落下を繰り返しながら混合する。きわめて良好な混合度を得ることができる。混合室内部に角度調整のできるバッフルプレートを設けることで、混合効率の向上と原料排出時のブリッジ防止などの機能を追加できる。バッチ式混合機である。

ダブルコーン型混合機の実物写真は図 10 に示す。



図 10. ダブルコーン型混合機

### 3. ドラム式混合機

ドラム式混合機は円筒状の混合室（ドラム）、回転リング、台座、モーター、転動機構、投入口、排出口等から構成される。混合効率をあげるため、ドラムの内部にはスパイラル羽根のような攪拌ブレードを装着することが多い。モーターが転動機構（ブリーを使うことが多いが、変速機を使用することもある）を通してドラムを回転させる。投入された原料粒体がドラムの回転により上昇・落下を繰り返し、次第に分散混合する。

ドラムの設置方向は水平のほか、一定角度を設け、ドラムを傾斜させることも可能である。構造が非常にシンプルで、生産能力が高く、消費電力が少ない。ただし、混合後の均一度がやや劣る。バッチ式混合機である。

アメリカやオーストラリアではドラム式混合機をトラックに設置し、移動式の小型 BB 肥料混合装置として、農地に出かけて BB 肥料を混合後即施用のために多用される。

ドラム式混合機の構造は図 11、実物写真は図 12 に示す。

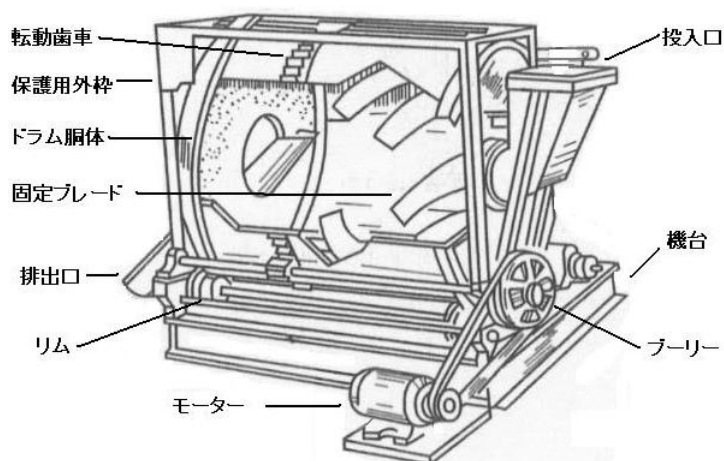


図 11. ドラム式混合機の構造図



図 12. ドラム式混合機

### 4. 連続 V 型混合機

一定の傾斜度を有する円筒状の混合室が山折と谷折を連続にして、数個の V 型混合室を繋いだ形をする容器回転型混合機である。混合室の回転により投入された粉粒体は遠心力の持ち上げと重力落下を繰り返しながら、三次元的な衝突交流とたたみ込み作用で分散混合が行われる。混合効率を上げるため、内部に角度調整のできるバッフルプレートを設けることもある。構造が非常にシンプルで、生産能力が高く、消費電力が少ない。最終混合度は原料投入方式、混合室の山折・谷折回数、傾斜度により異なるが、他の混合機より劣る。連続式混合機である。

連続 V 型混合機の概略は図 13 に示す。

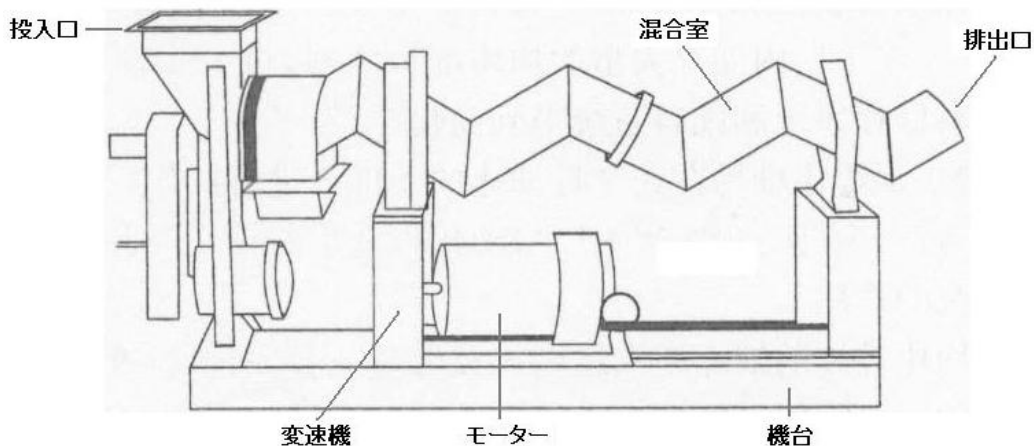


図 13. 連続 V 型混合機

### 5. 円盤式ブレード攪拌混合機

円盤状の混合室に 2 重の回転板状ブレードが設置され、モーターで高速回転する。蓋に設けた投入口は固定板状ブレードにより 2~3 ヶ所に分割される。投入された粉粒体はまず、下段の回転ブレードにより周辺へ飛ばされる。一部の粉粒体が上段の回転ブレードに当り、進行方向を変えるが、残りの粉粒体が混合室の内壁にぶつかり、下へ滑り落ちる。混合室の底に堆積してきた粉粒体が再び掻き上げて、再度分散される。混合室の片側に開口する排出口から混合した混合物が排出される。連続式混合機である。

最終混合度がよく、生産能力が高いが、消費電力が多い。また、ブレードなど金属部品の摩耗によりコンタミが生じやすい。化成肥料の生産にはよく使われる。

円盤式ブレード攪拌混合機の概略は図 14 に示す。

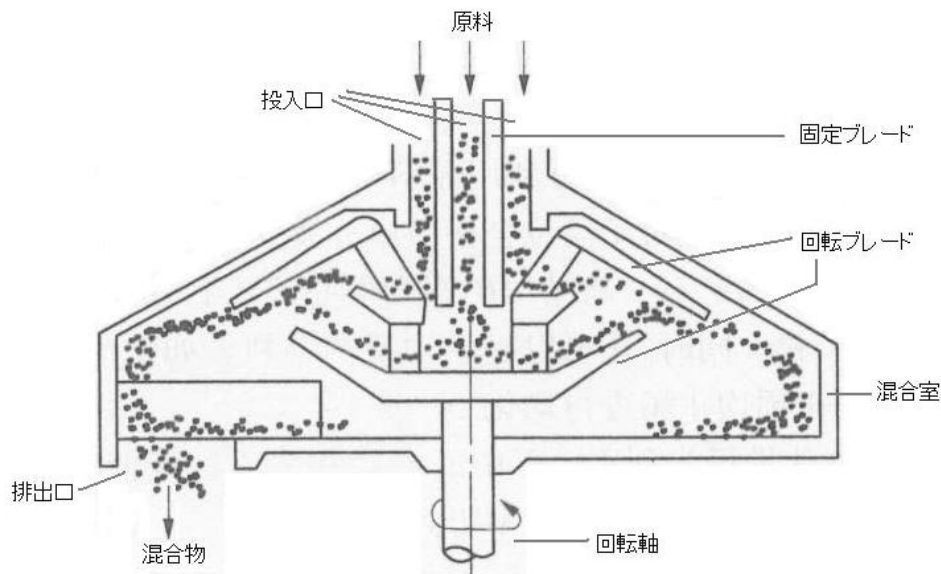


図 14. 円盤式ブレード攪拌混合機の概略図

BB 肥料の生産に使う重力ブレンダーとドラム混合機、液体肥料の生産に使うパドル式混合機等は化成肥料の生産にほとんど使われていないため、後の BB 肥料や液体肥料に関する章節に述べることにする。