８．乾燥設備

１）静置式乾燥機

平型静置式乾燥機は極めてベーシックな乾燥機であり、小規模な乾燥施設で利用されている。図 1-8-1 に示すように、パンチングメタルなど穴が開いた床板の上に大豆を入れ、板の下に送風し、大豆子実に通風を行うことで乾燥する。通風空気は基本的には灯油バーナーで加熱され、熱風乾燥される。通風後の排気が行われる上面をシートで覆い、排気を回収して、再循環させ、エネルギーの有効活用と乾燥速度の適正化を狙った乾燥機もある。図 1-8-2 に市販されている灯油バーナータイプの平型静置乾燥機の外観を示す。構造が単純で、汎用性に優れるため、枝付き大豆の乾燥も可能である。乾燥床面積によって１坪（3.3m^2）タイプと２坪（6.6m^2）タイプがある。

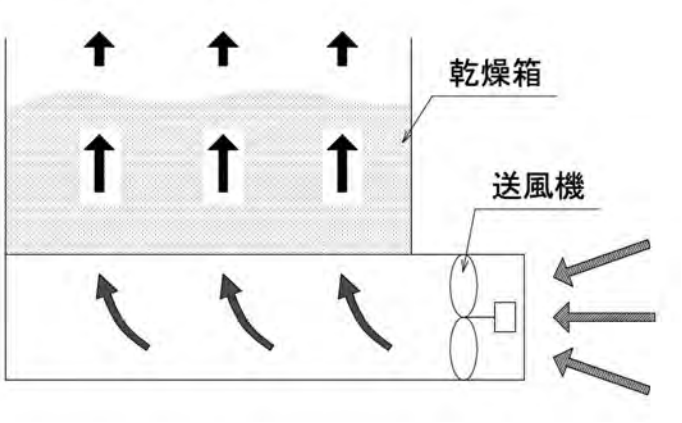


図 1-8-1　平型静置乾燥概念図

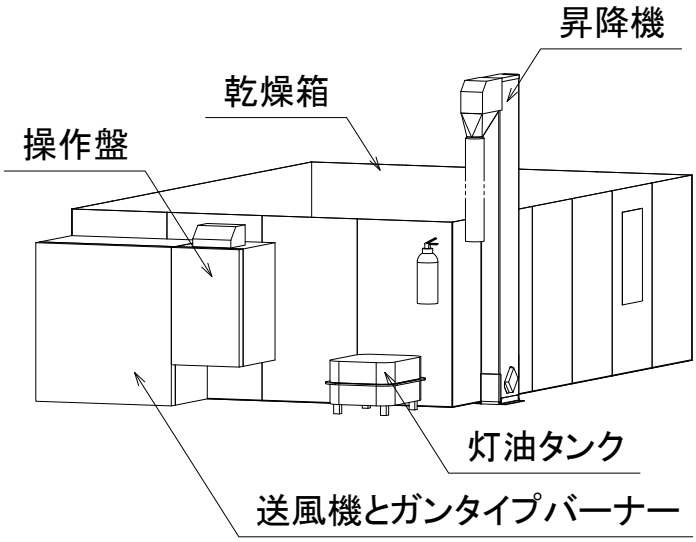


図 1-8-2　平型静置乾燥機の例

２）ドライストア（角ビン、丸ビン）

(1) 基本構造

ドライストアという場合、通常、角ビンを指すが、丸ビンにもドライストア機能がある。はじめに角ビンについて説明する。角ビンの基本的構造は、平型静置乾燥機を大型にして多数連立したものと考えてよい。写真 1-8-1 に断熱施工なしの角ビン部分の外観、図 1-8-3 に角ビンの全体図を示す。

角ビンへの投入では、大豆子実の損傷を極力少なくするため、移動式やトリッパー付きのベルトコンベアが採用されることが多い。籾や麦の搬送によく採用されているチェーンコンベア（細長い箱の中をチェーンに取り付けた

板で穀物を引きずるように運ぶコンベア）は損傷の懸念から敬遠されて来たが、改良によって利用できるものもある。高い所から投入する場合、落下時の衝撃を緩和するためスパイラルシュート（螺旋状の滑り台）や折り返し式の緩衝シュート、穴あきシュートなどを取り付けることがある。各ビンへの送風は、送風機から一連のビンの床下に貫通配置した送風ダクトを通して分配、送風される。また、各ビンへの送風量は送風ダクトのダンパーの開閉を空気圧あるいは電動装置などで操作して調整する。図 1-8-4 にビン側面模式図を示す。

ビンの床から上方への一方向送風で生じる上下層の乾燥ムラはビン間のローテーション（1 ビンの大豆子実全量を別の空ビンにコンベアラインを使用して移し替えること）で解消する。平床であるから重力落下では全量排出されないため、残った大豆子実の排出は、エアスイープと言って、送風機の風力で行う。角ビンの通風床は空気の吹き出し方向を排出口方向に向けてあり大豆子実は排出口に向かって吹き飛ばされる（図 1-8-5, 1-8-6 参照）。

エアスイープに必要な風量は乾燥のための風量よりかなり多いため、エアスイープ作業と乾燥作業が同時に行われる可能性にも留意して、送風機の能力を決定する必要がある。しかし、省エネルギーあるいは送風機の小型化の観点から、必ずしも同時作業に必要な風量としない場合もある。つまり、荷受水分が低いと見通せる施設など、乾燥期間中を通しての運用上、乾燥能力を下げても問題ないと見通せる施設では、他のビンの送風ダンパーを絞ってエアスイープをするビンに集中して送風し、乾燥を一部休止するか通気量を減じる運用を行うこととして送風能力を決定する場合もある。なお、エアスイープ時には大豆子実が吹き飛び側壁に衝突することがあるので衝撃破損防止のため側壁にクッション材を取り付ける場合もあったが、クッション材自体が大豆子実の衝撃により剥がれ異物となるケースも見受けられたので現在ではほとんど取り付けることはない。

次に、丸ビンの基本構造を図 1-8-7 に示す。堆積通気乾燥という点では容器（ビン）が角か丸かの違いであるが、容器構造上では強度的に角ビンより大容量化しやすい（150 ～ 350t）などの特性がある。このことから、容量 50 トン程度の角ビンが多数連立設置されるのに対し、丸ビンは大容量ビンの少数設置となる傾向がある。利用面では、薄積み堆積乾燥より一時通気貯留など厚積み利用が多くなる。

通風空気は、灯油ヒーターによる加温や除湿装置によって調整される。乾減率は、平型乾燥機と同様に堆積高さや大気の温度湿度に左右される面があるが、送風ダンパーの開度調整による風量調整やバーナーの温度調整などにより調整できる。その際、通風空気の温度や湿度の状態および風量については、割れやしわ、裂皮などの品質劣化が生じないようにしなければならない。

ドライストアに用いられることが多い灯油ヒーターの例を写真 1-8-2 に示す。また、除湿機の構造例を図 1-8-8 に示す。地域によっては大豆の乾燥を大気の絶対湿度が低い晩秋から初冬にかけて実施することが多いので、除湿機の仕様についてはメーカーや専門家と協議が必要である。

写真 1-8-1　角ビン外観

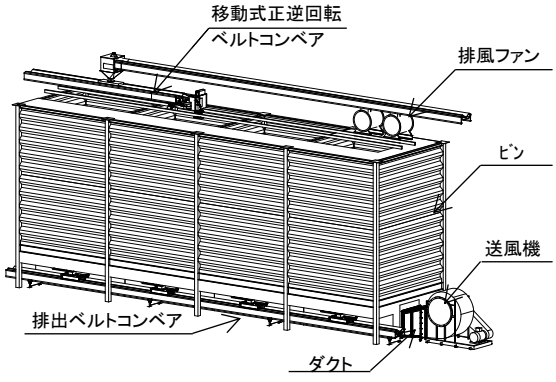


図 1-8-3　角ビン全体図

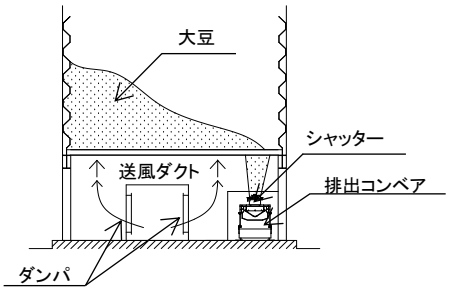


図 1-8-4　角ビン側面図

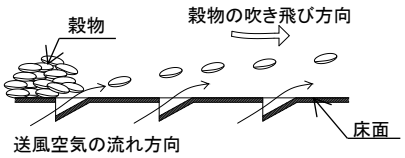


図 1-8-5　エアスイープ概念図

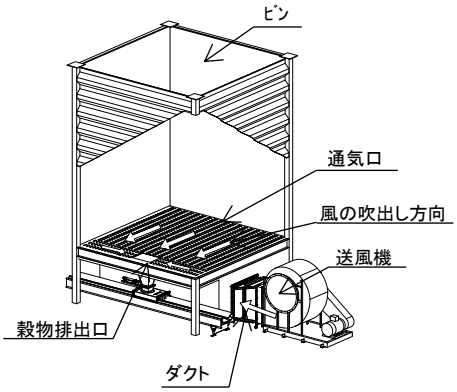


図 1-8-6　角ビン　エアスイープ床

写真 1-8-2　灯油ヒーターの例
（提供：オリオン機械株式会社）

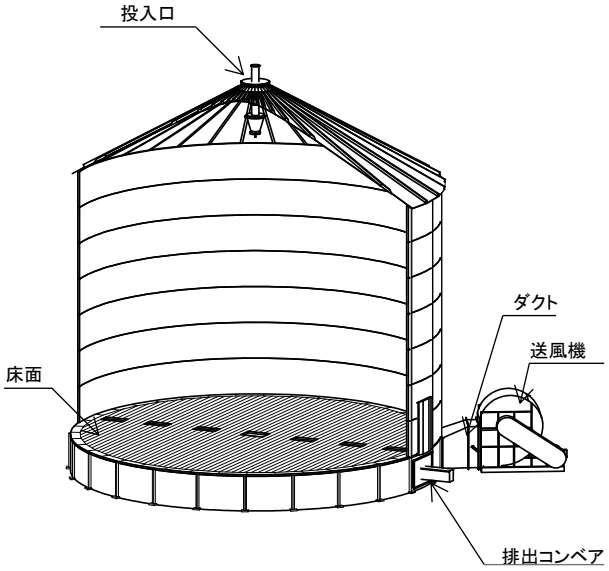


図 1-8-7　丸ビン基本構造図

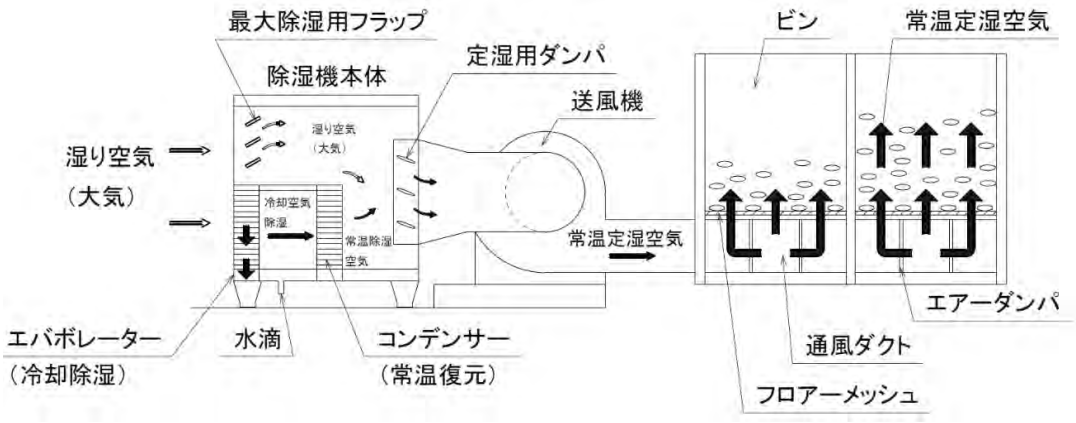


図 1-8-8　除湿機の概念図

(2) ドライストア（角ビン、丸ビン）の特徴

① 汎用性が高いので籾麦大豆など多様な乾燥物に対応できる。
② 容量が大きいので大量の貯蔵ができる。
③ 堆積物全体に通風できるので生原料を一時貯留することができる。
④ 堆積量が多い場合は乾燥に比較的長時間を要することがある。
⑤ 薄積みすれば早く乾燥することもできるので、多数の角ビンを原料貯留用、乾燥用、貯蔵用などに使い分けることができ、柔軟な運用ができる。
⑥ ビン床下から上方への一方通気の場合は、垂直方向に水分ムラが発生する。また、ビン内に均平に積み上げることができない場合は、水平方向にムラになる。ローテーションなどの是正操作が必要である。
⑦ 乾燥後の長期貯蔵も可能である。(断熱施工によりカントリーエレベーターの貯蔵仕様にすることができる。)
⑧ 構造が簡単で基本的には床面のみなので残留の掃除が簡単である。但し、大規模になるとビン数も増えるので面積が広くなるため、労力がかかる

(3) 角ビンの送風量推定方法について

堆積通風乾燥は、穀物乾燥の基礎的部分であり、角ビンだけではなく平型静置乾燥機、太陽熱利用型、ラック式あるいは丸ビンといずれの設備にも共通している。ここでは、計画した送風機で所定の堆積高さに対して要求される送風量が得られるのかどうか推定する方法について説明する。

図 1-8-9 に、穀物の通気抵抗特性図と送風機の性能特性図を重ねたものを示す。穀物の堆積高さが 1m から 5m まで 1m 毎の 5 段階について 5 本の曲線が描かれており、堆積高さが高いほど空気抵抗が大きいこと、同一堆積高さの場合は、通風量を増やすほど空気抵抗が大きくなることが読み取れる。通気量を増すためには高い圧力が必要であるとも表現できる。写真 1-8-3 に角ビンに使用されるリミットロードファンと呼ばれるタイプの送風機の外観を示す。図 1-8-9 にあるのは、このような送風機の性能特性図であるが、縦軸は吐出圧力、横軸は吐出風量であり、吐出圧力が低いほど吐出風量が多いことが分かる。送風機の性能特性曲線と穀物の通気特性曲線の交点（X1、X2、・・・）から、各堆積高さに対してこの送風機が送風できる送風量（Q1、Q2・・・）を読み取れる。これは、単純な例であり送風量の求め方の概念を示したものである。実際には、ダクトの通気抵抗やビン屋根の排気部からの排気抵抗、あるいは排気送風機がある場合はそのことも考慮する必要がある。

さらに、1 台の送風機で多数のビンに送風して乾燥する場合は、各々のビンの大豆子実堆積高さがバラバラであると通気抵抗もバラバラになるから複雑さが増し、施設担当者は各ビンの送風量を推定しにくくなる（図 1-8-10)。送風量の推定が大きく外れると送風量不足によって予定の乾減率が得られないことになる。さらに、こういう状態

を長期間継続させれば大豆子実の変質を招くことになる。1 台の送風機で多数のビンに送風して乾燥する場合は、どのビンにもできるだけ一様に大豆を堆積させることが大切である（図 1-8-11）。1 ビン毎に送風機を取り付けた施設の場合は他のビンの影響がないので、各ビンの堆積高さがバラバラでも通風量の把握は単純にできる。いずれにしても、通風量は、適正な乾燥および通気貯留の最も重要な要素である。積み高さによって通風量がどのように変化するのか、導入した設備の説明書の熟読が必要である。

(4) 送風空気の加温に必要な灯油燃焼量について

大気温度に加温をして送風する場合、加温に必要な灯油の燃焼量を求める式を示しておく。

$W = (3600 \times Q \times \rho a \times s \times \Delta t) \div q$

W：灯油の毎時燃焼量　kg /h

Q：風量　m^3/s

ρ a：空気の密度　kg/m^3

s：空気の比熱　kJ/kg・℃

Δ t：上昇温度　℃

q：灯油の発熱量　k J/kg

例として、

Q=20m^3/sec　　ρ a=1.2kg/m^3　　s=1.046kJ/kg℃　　△ t=10℃　　q=46000kJ/kg

とすると、

W=19.6kg/h

となる。すなわち、風量毎秒 20m^3 の空気の温度を 10℃上昇させるためには、毎時約 19.6kg の灯油を燃焼するヒーターが必要である。加温量（上昇温度）の設定は、送風空気の温度湿度と大豆の裂皮やしわの発生程度の関係を良く調べ、問題を起こさないようにしなければならない。

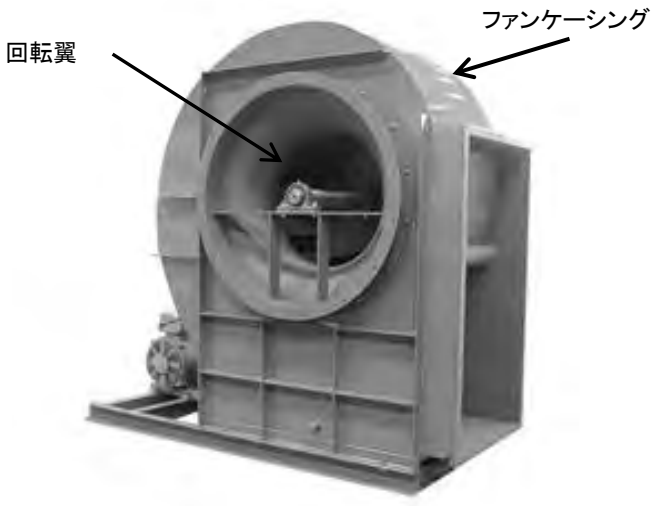


写真 1-8-3　リミットロードファン

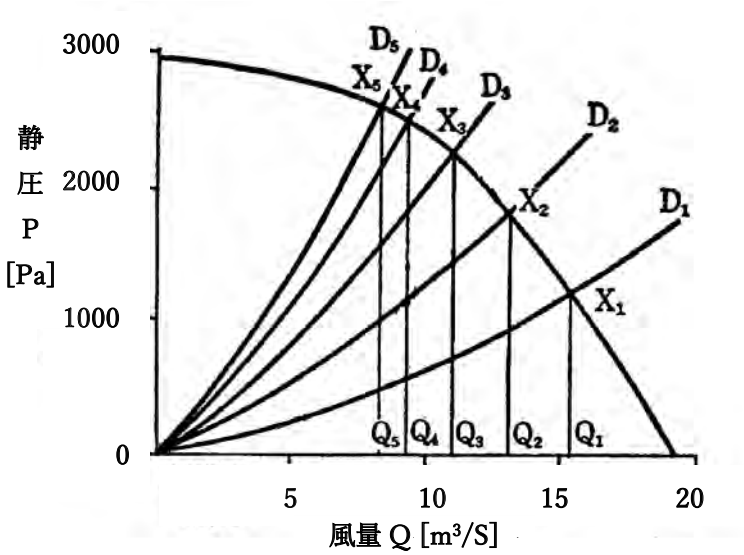


図 1-8-9　発生風量を求める図

（「DS の手引き（JA 全農）」p71 より抜粋、一部改変）

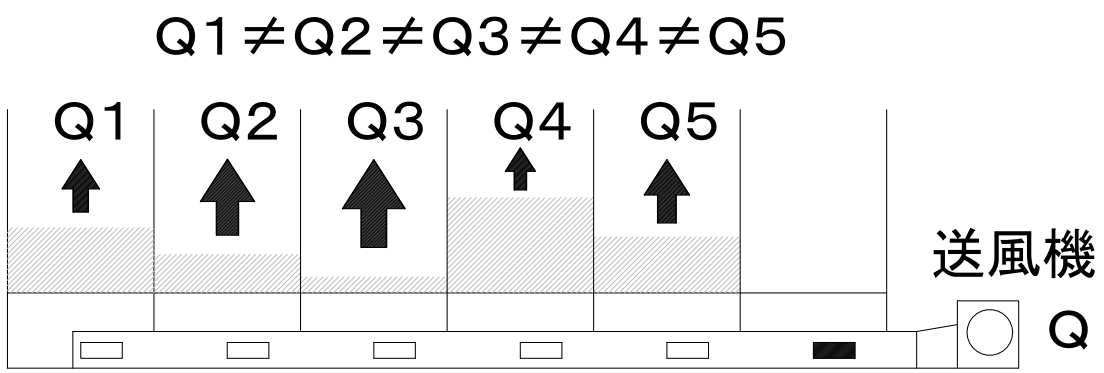


図 1-8-10　堆積高さが不均一なときの通風量概念

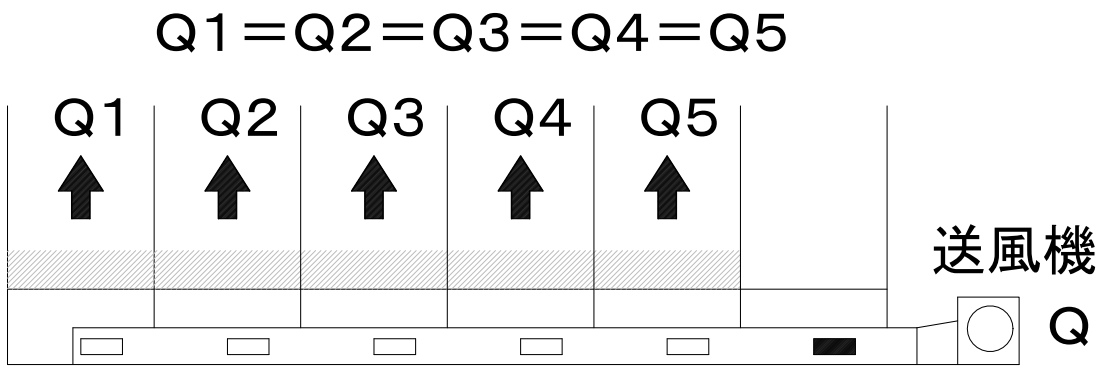


図 1-8-11　堆積高さが均一な時の通風量概念

3）循環式乾燥機

(1) 角形循環式乾燥機

このタイプの乾燥機の基本構造は、図 1-8-12 に示すように通風乾燥部と乾燥休止部（テンパリング部）を縦に配置し一体構造としている。重力落下により上方の乾燥休止部から乾燥部を所定速度で通過し、横コンベアと昇降機によって再び乾燥休止部に戻る循環を繰り返す。このタイプは通常、米麦用乾燥機として多く使用されているが、

汎用乾燥機として大豆子実も対象とした乾燥機も市販されている。粒のサイズや強度が異なるため循環中のスクリューコンベアによる機械的損傷や昇降機の投げ出し衝撃などが懸念されていたが、現在では乾燥部やコンベア、昇降機などに改良が施され、対策がなされている。角形汎用循環式乾燥機の外観を写真 1-8-4 に示す。通風空気の温度や循環速度などはコンピューター制御される。米麦と大豆では、適切な乾燥条件はかなり異なるが、コントロールパネルから穀物を選択することで適切な乾燥条件に設定できる。

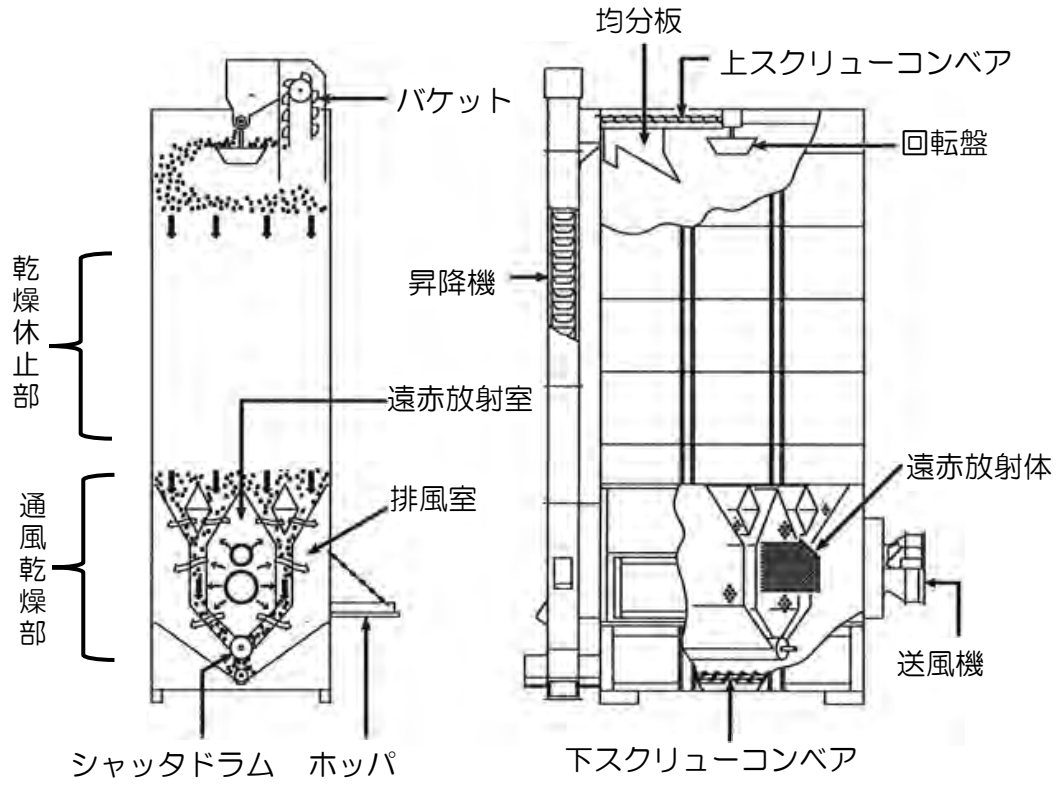


図 1-8-12　循環式乾燥機の基本構造

写真 1-8-4　角形汎用循環式乾燥機

(2) 丸形循環式乾燥機

このタイプも米麦の乾燥に多く用いられているが、大豆乾燥にも用いられる。写真 1-8-5 に外観を、図 1-8-13 に構造を示す。ベースとなるのは丸形の平形静置乾燥箱とも言うべきもので、乾燥ムラ解消のため通風床上の乾燥が先行する部分の穀物をオーガーでかき寄せ横コンベアと昇降機で上部に移送し、これを繰り返す。大豆乾燥時は自動的に間欠循環をして子実の割れやしわ粒の発生を極力抑制している。通風空気の温度は、灯油を燃料とする加温装置をコンピューター制御することによって調整される。基本形状は堆積通風乾燥であるから薄積みから厚積みまでに広範囲の容量に対応して乾燥ができる。

(3) 循環式乾燥機の容量選定

乾燥設備の工程の作り方により循環式乾燥機の用法は二つある。一つは生原料を乾燥機で受けそのまま乾燥してしまう方法、もう一つは貯留ビンから移送した材料を乾燥する方法である。生原料を受ける運用では、一日の荷受量を投入できるだけの容量を持つ必要がある。一日の荷受量を乾燥機一台の容量で除すれば必要台数が算出される。貯留ビンから材料を受ける場合は、一日の仕上乾燥計画を達成できる容量とする。一時貯留の項で説明したが、各設備間能力のバランスとコスト低減のため設備全体の能力について検討が必要で、乾燥機容量決定もこれに沿って行う。

(4) 循環式乾燥機の特徴

① 自動的に乾燥制御されるので省力的である。
② 概ね一定した乾減率を期待できるので乾燥計画を立て易い。
③ 残粒の掃除が簡単にできるように配慮されている。
④ 夾雑物が多い場合は詰まりなどにより不具合を起こす可能性がある。粗選機で夾雑物を除去した原料を投入する。
⑤ 貯蔵目的では使用しないが、短期間の一時貯留はできる。

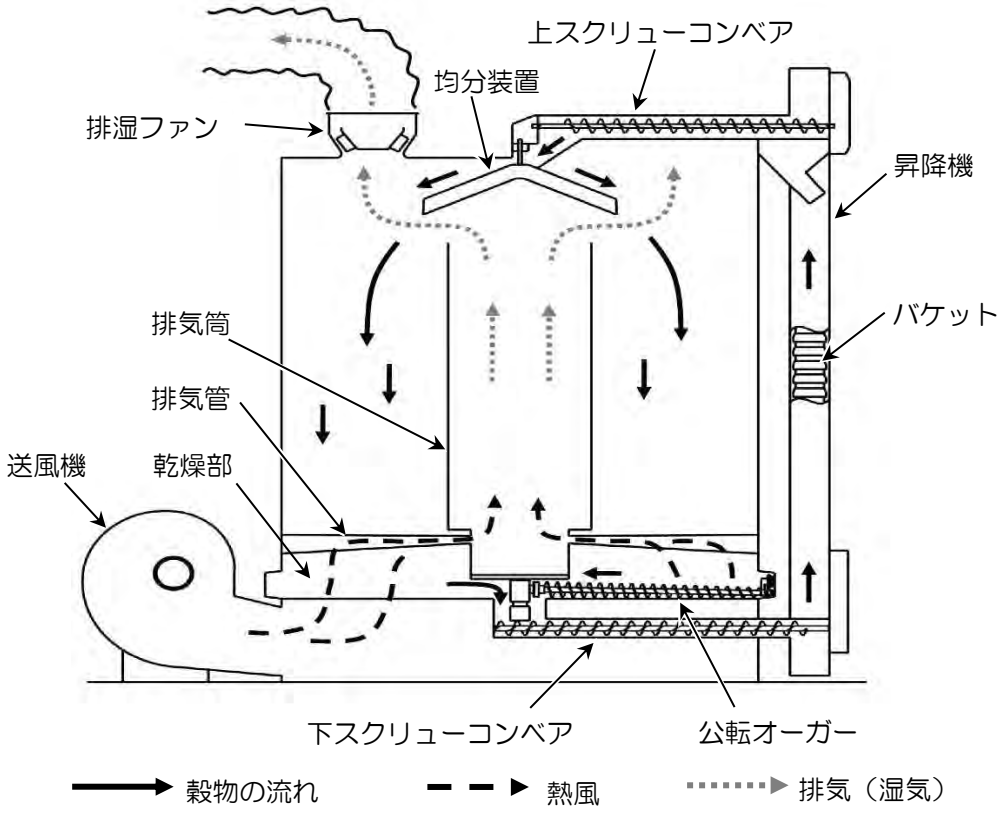


図 1-8-13　丸形循環式乾燥機の構造

写真 1-8-5　丸形循環式乾燥機

4）ラック式乾燥機

(1) 概要

ラック式乾燥設備の基本構造を図 1-8-14 に示す。ここでのラック（rack）は棚を意味する。穀物に限らず多種多様なものを乾燥するため開発され汎用性が高い。基本的構造は四角の平型乾燥箱の棚を利用して立体的に配置したものと考えてよい。乾燥箱を平面的に配置したドライストアに対しラック式乾燥機は立体的に配置してある。ただし、一箱の容量は１トン程度とドライストアよりかなり少ない。そのかわり箱の数を多くできるので多くの品種や品質仕分け対応などが小ロットで可能になる。ラックに乾燥箱を出し入れするためスタッカーと呼ばれる運搬機が設けられており、コンピューター制御によって自動倉庫機能を与えられている。すなわち、どこの棚に何が何時入ってどういう状態かなど、コンピューターによって管理され乾燥も自動的に行われる。乾燥中に生じる水分ムラも反転で解消できるようになっている。乾燥物に送る空気は作物の品目、性状にあわせて加温乾燥あるいは除湿乾燥の選択ができる。

図 1-8-14 で送風機とダクトが付設されている部分が乾燥ステージである。乾燥済みのものは貯留ステージに移動される。乾燥と貯留ステージの数量や割合は、大豆の処理量や乾燥時間および貯留期間の長短（期中出荷の量）などの条件によって決められる。

(2) ラック式乾燥機の特徴

① 基本が平型乾燥箱であるから莢付きの豆も乾燥できる。
② 作物にあわせて加温乾燥や除湿乾燥など最適な乾燥を選択できる。
③ 乾燥箱が比較的小型であるため多分類小ロットの乾燥物に対応できる。
④ 自動倉庫機能を持たせることにより物流設備機能も兼ねることができる。
⑤ 低温倉庫内に設置することも可能である。
⑥ 収穫時期の異なる作物（籾、麦、大豆のほか玉ねぎ、ジャガイモ、にんにく、そばなど）についても兼用施設として計画できる。
⑦ 必要な自動化により省力化できる。

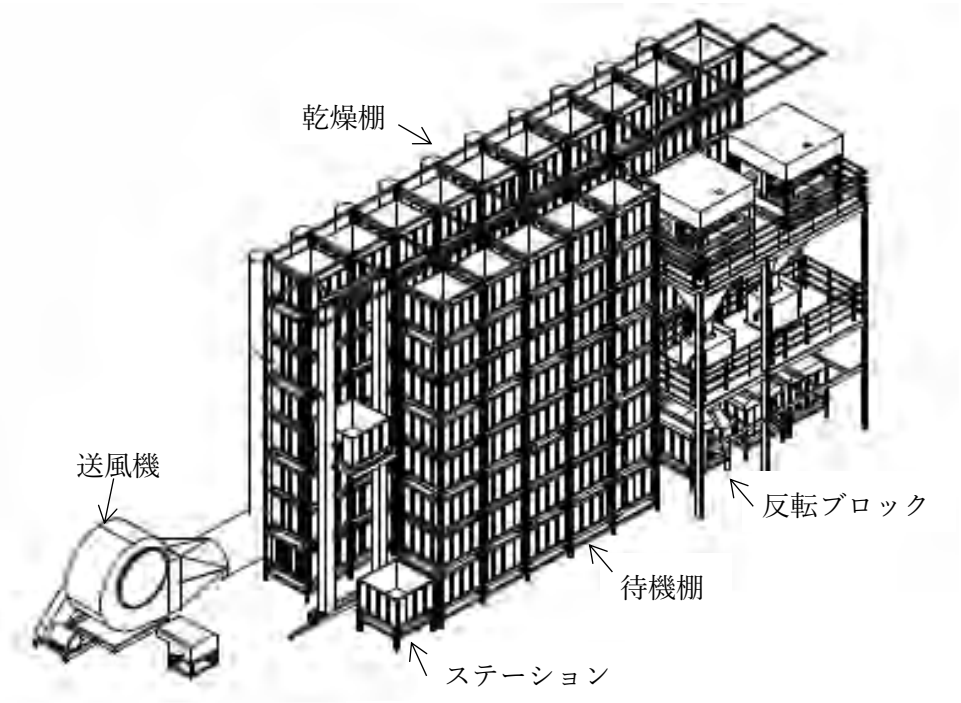


図 1-8-14　ラック式乾燥設備

5）乾燥設備の選定

ここまで、各種乾燥設備の構造と特徴について説明した。乾燥設備の選定にあたっては、利用条件（要求仕様）を満たすことは必要であるが、過剰な能力（オーバースペック）の設備も避けるべきで、適切な能力とコスト（初期コストのほかにも運転コスト、メンテナンス性）とするべきである。また、乾燥機は、その特性に合わせて適切な条件の範囲内で利用することで、所定の能力や使い易さを発揮するものであり、乾燥機の特性に合わない条件での無理な運用が見込まれる選定は避けるべきである。さらに、調製設備も含めた設備全体で、各装置の処理速度のバランスなどを検討して、適切な選定をする必要がある。

9．乾燥ビンにおける堆積高さと風量比

1）風量比の算定方法

ライスセンターやカントリエレベーターに併設される貯留乾燥施設の貯留ビンのタイプには、角ビンと呼ばれる直方体形状のものと丸ビンと呼ばれる円柱状のものがあるが、基本的には循環装置と均分器を備えた平形の静置式乾燥機の構造をしており、床下の通風路からすのこを介して穀類に通風される。穀類の貯留乾燥では風量比は、0.05 ～ 0.20m^3/s･t 程度とされているが、高水分大豆の場合は、貯留ビンの堆積厚の高い個所や風路から離れた通風性の悪い箇所では水分が 18% 以上のときには蒸れの危険もあるため、風量比は 0.25 ～ 0.3m^3/s･t 程度を目安としたい。子実周囲の空気は、通風量が少ないと子実の水分と平衡になる湿度に近づいてくるため、大豆の場合 18% 以上では湿度が 80% 以上となり、周囲の空気温度が 20 ℃ 以上の場合には菌の繁殖が盛んになり蒸れの危険が高くなるためである。風量比よりも堆積した大豆子実周囲の風速が実際には基本的な指標であり、堆積した大豆子実周囲の風速が 0.2 ～ 0.3m/s 程度の風速が確保されれば、貯留を兼ねて安全に乾かすことができる。具体的な計算方法は以下のとおりである。

堆積した子実の周囲の風速を u′、空塔速度（通風量を通風面積で割った値）u、空隙率を ε、大豆の乾物比体積 V_m（乾物 1 kg 当たりの真体積）、乾物見掛け比体積 Vm′、貯留ビンの床面積 S、堆積高さを h とすると

$$V_m' = V_m / (1 - \varepsilon) \quad (1)$$

の関係があるので、堆積した大豆の乾物量 Dw は

$$D_w = \frac{S \cdot h}{V_m'} = \frac{(1 - \varepsilon) S \cdot h}{V_m} \quad (2)$$

通風量Qは、Q =S･u と表されるので風量比 q は

$$q = \frac{Q}{D_w} = \frac{u \cdot V_m}{(1 - \varepsilon) h} \quad (3)$$

となる。これより、乾燥層内の風速を設定して風量比を決定する。大豆の場合、乾物比体積は、品種によらずほぼ以下の水分の１次式で表される。

$$V_m = 0.771 + 0.956 \cdot m / (100 - m) \quad (10^{-3}\ m^3/kg) \quad (4)$$

$$\varepsilon = 0.38 \sim 0.48$$

具体的な例として、u′ = 0.2 m/s、h = 1 m、 ε = 0.44、水分 18 %w.b. とする。u と u′の間には

$$u = \varepsilon \cdot u'$$

の関係があるので風量比は (5)

$$0.2 \times 0.44 \times \{0.771 + 0.956 \cdot 18 / (100 - 18)\} / (1 - 0.44) = 0.154\ m^3/s.t$$

と求められる。通常設定される風量比 0.25 m^3 /s･t とすると空塔風速は

$$0.25 \times (1 - 0.44) / 0.981 = 0.143\ m/s$$

となるので、子実周囲の風速は

$$u' = u / \varepsilon = 0.324\ m/s$$

となり、u′ > 0.2 m/s が満たされる。

空隙率の測定は、見かけ体積を測定することによって（4）式の V_m を用いて推定することができる。いま、水分m％のときの１ kg 当たりの見かけ体積を V′（10^{-3} m^3）としよう。乾物見掛け比体積 Vm′は

$$Vm' = V' / (1 - m / 100)$$

であるので空隙率 ε は

$$\varepsilon = 1 - V_m / V_m' = 1 - \{0.771 + 0.956 \cdot m / (100 - m)\} (1 - m / 100) / V'$$

と求めることができる。この方法は、次の通風抵抗を求めるときの空隙率の計算にも用いることができる。

２）堆積高さと通風抵抗（圧力損失）

通風乾燥における堆積層の通風抵抗は、乾燥経過の予測やシミュレーションの他、送風機の容量計算や乾燥機内部の空気の流れの状況を推定するための重要な特性であるが、農産物に関しては、材料ごとに測定した実験式は報告されているものの理論的な解析とそれに基づく実験式が少ないため、材料の形状変化に対応し、他の材料の圧力損失の推定に応用できる実験式は少ない状況にある。大豆の通風抵抗に関しては、材料ごとに測定した実験式やグラフデータが報告されているが、子実水分や粒径、空隙率が異なる場合の通風抵抗を算出する一般的な方法は明らかではない。

多くの物性量が関係する流れに関しては、流体工学分野で使われている抗力係数、あるいは摩擦係数とレイノルズ数などの無次元量を使って解析する必要があり、応用性も広い。無次元数を使うメリットは、さまざまな条件が変わった場合にも、物理的な変数の影響を受けずに普遍的に成立する実験式が得られるためである。流れの通風抵抗においては、抗力係数とレイノルズ数の２つの無次元数がそれに当たる。通風における圧力損失は、材料間の空隙を流れる空気の材料表面との抵抗と空気の粘性摩擦に起因するが、このときの材料がうける空気からの抵抗力を粒子の断面積で除した係数である抗力係数は、堆積層の材料の形状と材質によって決まるレイノルズ数のみの関数として表される。従ってレイノルズ数に対する抗力係数の傾向を求めておけば、異なる条件での圧力損失を計算す

ることができる。ここでもこうした無次元数を使った実験式を用いて圧力損失を求めることにする。計算が多少面倒になるが、通風抵抗には多くの変数が関係しており、しかもその影響も大きいので、こうした無次元数を使って求める方法が信頼性もあり、一番応用が効く方法である。

レイノルズ数とは、流れの速さの指標となる無次元数で、大豆の平均粒径から推定される大豆子実の単位体積当たりの表面積 ap と単位通風面積当たりの通風量（空塔速度） u、および空気の密度 ρ_{ari} と粘性率 μ を用いて項末の（3）式のように計算される。大豆は、乾物ではほぼ球に近いので球相当直径 D_p（１粒当たりの体積を球の体積 $\pi D_p^3 / 6$ で表したときの直径）と形状係数 ϕ_c（球相当直径 D_p を用いた球での表面積 πD_p^2 を１粒当たりの表面積 Sp で除した係数）を 0.986 とおいて乾物での a_{p0} を計算し、水分m %w.b. での a_p を項末の（4）式により計算する。通風抵抗は空隙率の影響を強く受けるが、空隙率は粒径の分布や材料の形状（楕円体の形）によって若干変わるが大きさの影響はほとんどないと考えられる。ここでは報告されている項末の（7）式を用いて空隙率を推定する。

実際に項末の圧力損失の式で定義された抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e のそれぞれの対数をとってグラフに表すと、通常の通風乾燥域の $40 < R_e < 200$ の範囲では図 1-9-1 のように粒径や空隙率によらずほぼ一定の直線関係が認められ、C_D は品種によらず通常の通風乾燥の通風範囲では一般的に $C_D = a R_e^{-b}$ で表されることがわかる。大豆の通風抵抗の実験では $C_D = 17.4 Re^{-0.683}$、$C_D = 24 / Re + 5.49 / \sqrt{Re}$ が報告されており、この結果を用いて大豆の粒径と空隙率、風速、空気密度と大豆の形状と、風速から定義される無次元数であるレイノルズ数を用いた抗力係数により項末の（1）～（8）式に従って通風抵抗を計算することができる。

図 1-9-2 は横軸に項末の（3）式で定義された Re 数、縦軸に（1）式で定義された形状係数を用いてグラフにしたものであるが、レイノルズ数が通常の通風乾燥で用いられる 60 ～ 200 の範囲では、大豆の粒径や水分によらず、ほぼ $C_D = 24 / Re + 5.49 / \sqrt{Re}$ で表されることがわかる。レイノルズ数 Re の計算には大豆の平均粒径と形状係数を知る必要があるが、この $\phi_c Dp$ は大豆の体積比表面積 a_p と $\phi_c D_p = 6 / a_p$ の関係があるため、Re 数の計算は項末の（3）式の後半の式で得られる a_p を用いて計算することができる。乾物での a_{po} を用いて水分の関数として（4）式のように与えられる。空隙率の計算は、項末の（7）式を用いる。空隙率の水分による変化は少ないので定数として与えてもよい。

３）通風抵抗のグラフ

項末の式を用いて計算によって貯留ビンにおける通風抵抗を空塔風速を与えることによって計算できる。a_p = 700、750、850 m^2/m^3 、$\varepsilon = 0.38 \sim 0.50$（$a_p = 700$）と変え、$\rho_m = 1.20$ kg/m^3、$\mu = 2.0 \times 10^{-5}$ Pa·s として空塔風速を横軸にとって表した結果が図 1-9-3、1-9-4 である。空塔風速に対して指数関数的に圧力損失が大きくなる。また、空隙率が大きく、大豆の粒径が大きいほど圧力損失が大きくなる。通風抵抗は流れが一方向の場合には堆積厚に比例するので、このグラフから求められた圧力損失に堆積厚をかけて通風抵抗を簡便に推定することができる。

具体的な例を挙げると例えば水分 17 %の大豆の平均粒径 8mm の大豆の堆積高さが 1.2m、空塔風速が 0.35m/s の場合の圧力損失を求めてみよう。項末の（5）式により形状係数を 0.983 として体積比表面積 a_p を、（7）式により空隙率 ε を求めると

$a_p = 6 / (0.983 \times 0.008) = 763\ m^{-1}$

$\varepsilon = 1 - \pi \times \{1.0 - 0.029 \times 17 / (100 - 17)\} / 6 = 0.48$

図 1-9-4 の 0.35m/s の通風抵抗を求めると約 130Pa/m が求められる。従って堆積高さ 1.2m での通風抵抗 P は

$P = 130 \times 1.2 = 156$ Pa

と求められる。大豆の単位乾物当たりの真体積は、大豆の品種の違いによらず、ほぼ項末の（8）式で求められるので単位乾物当たりの見かけ体積から（6）式により空隙率を求めるとより正確となる。

実際の貯留ビンでは、ビン内の堆積厚が同じでないと通風抵抗が同じになるように堆積厚の低い個所に主に空気が流れるようになってしまい、乾燥むらを生じてしまう。送風機が一つで複数のビン内の穀物を乾燥する場合にも堆積厚の低いビンにより多くの空気が通風されてしまう。この対策としては、乾燥ビンそれぞれに送風機をつけてそれぞれ独立に通風できるようにするか、各乾燥ビンの堆積厚を一定に揃えることである。複数の乾燥ビンどうしの高さも同じ高さに揃える。

4）裂皮防止のための薄層における限界乾燥速度

大豆の乾燥においては機械的な損傷粒の発生や熱による品質の変化、汚粒、乾燥によるしわ、裂皮粒の発生が問題となる。このうち損傷粒を抑えるためには、スクリュー軸等の搬送装置を柔らかい素材やブラシ等に変えたり、コンベアやベルトコンベア等の利用、あるいはモミガラ等緩衝材の混入等の方法によりある程度改善される。熱による品質の低下に関しては、30 ℃以下の空気を通風すれば問題はないとされている。裂皮防止には、高水分時に通風の温度を 30 ℃以下に、また湿度を高く設定しなければならないことが知られているが、どのくらいの温度と湿度に設定すればいいのか詳しいことは知られていない。以下では、温・湿度条件をさまざまに変えた大豆の裂皮試験で得られた結果から、大豆の水分に応じてどのような温・湿度の空気を通風すればよいのかを具体的に示す。温度よりも湿度が大きく影響している。

裂皮粒の発生を抑えるためには、急激な乾燥を抑える必要がある。この乾燥速度の指標は、投入大豆の初期水分によって若干異なるが、局所的な薄層での上限の乾燥速度は２%d.b./h とされる。乾燥槽全体の平均の乾燥速度はこれよりも低くなる。一般に局所的な薄層での乾燥速度は、水分を M%d.b. として以下の式で表される。

$$\frac{dM}{d\theta} = -K(T)\cdot(M - Me) \qquad (6)$$

ここで K（T）は乾燥定数といわれるもので、ある一定以上の送風量であればほぼ空気温度の関数になる。大豆では以下のような実験式が得られている。

$K(t) = 2.119 \exp(-661 / T)$　　(h^{-1})

Me は平衡水分といわれ、外気の温・湿度と平衡になる大豆の水分である。式を変形して

$$Me = M + \frac{1}{K}\frac{dM}{d\theta} \qquad (7)$$

と表すと、乾燥速度 $dM/d\theta = -2\%$ d.b./h としたときの Me が水分 M と K（T）で表される。裂皮を抑えるためには、通風入口側の表層の水分に対して、この限界の Me 以上の温･湿度の空気を通風する必要がある。K（T）は、20 °～ 30 ℃においての変化は 0.222 ～ 0.239（h^{-1}）程度であるから、25 ℃の値 0.231 を一定として限界の Me が M に対して以下のように求められる。

$$Me^* = M - 2.0 / 0.231 = M - 8.67 \qquad (8)$$

Me は平衡水分の式として以下の Chen-Clayton の式を用いる。

$$\psi = \exp[-f1\cdot T^{g1}\cdot\exp\{-f2\cdot T^{g2}\cdot(Me - f3)\}] \qquad (9)$$

大豆の場合、係数の値は次の値を用いる。

f1 = 17.147、g1 = − 0.26541、$f2 = 1.44298 \times 10^{-5}$、g2 = 1.58559

f3 =1.0（動的平衡水分のための補正量）

ただし、ψ ; 相対湿度（%）　　T ; 絶対温度（K）　　Me ; 平衡水分（%,d.b.）

Me について解くと

$$Me = -1/(f2\cdot T^{g2})\cdot\ln\{-\ln(\psi)/(f1\cdot T^{g1})\} + f3 \qquad (10)$$

通風空気の温・湿度で Me を計算し、Me* と比較して大きければ、加温可能だが、逆に小さければ温度を下げるなどの方法で裂皮粒の発生を抑えるなどの処置を取る必要がある。目安としては水分が 18 %以上の場合は、加温

せず常温通風を行い、外気の Me がかなり Me^* より低い場合は、ゆっくり循環しながら乾燥するなどの方法で対処する。

以上の通風空気温度の調整方法を図 1-9-5 の大豆乾燥調製用の空気線図を用いて説明する。横軸を空気温度、縦軸を絶対湿度にとり、この空気線図上に大豆の平衡水分曲線と等エンタルピ線を記入してある。いま大豆の水分を 19.5%w.b. としよう。乾量基準では 24.2%d.b. でこのとき裂皮を起こさない通風空気の限界の平衡水分は本文の（8）式より 24.2 − 8.67 = 15.5 で湿量基準で表すとほぼ 13.5% w.b. となる。従ってこれよりも下側の領域の湿度の空気は、裂皮の発生の危険があることになる。この平衡水分曲線は、ほぼ相対湿度 50% の線に等しいため、湿度は 50% 以上の空気を送る必要がある。いま外気の温度が 18 ℃、湿度 80% 付近のＡ点であったとすると蒸れを考慮しなければこの点を水平に移動して 13.5%w.b. の平衡水分曲線とぶつかるＢ点まで加温できることになる。しかし、堆積層を通過する空気は水蒸気を吸収しながらほぼ等エンタルピ線に沿って左斜め方向に上昇し、大豆の水分に近い平衡水分曲線とぶつかる温・湿度の空気となる。その点は、温度 20 ℃ 以上、湿度 80% 以上となる蒸れ発生の危険領域となるため、実際には平衡点が 20 ℃ 以下となるＢ' 点まで加温できる。水分が 18% 以下となると平衡点も 18% 以下となり、蒸れの危険はなくなるので限界の平衡曲線にぶつかる点まで加温できる。一方、はじめの外気の状態がこの例の場合のように 10% の平衡水分曲線上にあるＡ点にあるときは、このまま 1 時間以上通風すると裂皮の危険が増してくる。この場合はゆっくりと循環させながら裂皮の発生を防ぐ必要がある。

５）平均乾燥速度の推定

乾燥速度を予測するのは、通風量の設定や乾燥経過の把握のために必要であるが、通風量や堆積高さ、材料の物性値などが複雑に関係しているために、簡単にわかる方法がないのが現状である。堆積通風乾燥での乾燥経過をするには、一般的には堆積層を分割し、それぞれの薄層状態での乾燥方程式の数値解析によって求めるが、必要とする物性値の数が多く、簡単に予測を行うためには不向きである。近似的な計算のためには以下の方法がある。

材料の単位乾物当たりの見かけ密度 ρ'_d とし、堆積層の通風入口、出口の空気の温・湿度を（tin、hin）（tout、hout）、△ H = hout − hin とすると入口と出口での空気中の水分の物質収支から、

$$G \triangle H = -\rho'_d \cdot \triangle z \frac{\partial \overline{M}}{\partial \theta} \tag{11}$$

の関係が成り立つ。ただし G は質量速度（$kg/m^2 \cdot s$）で単位通風面積当たりの通風乾燥空気量で、空塔風速 u とは、$G = \rho_{air} \cdot u$ の関係がある。堆積の層の入り口と出口の空気の温・湿度を測定し、△ H を求めると層全体の平均の乾燥速度 $\partial \overline{M} / \partial \theta$ は

$$\frac{\partial \overline{M}}{\partial \theta} = -\frac{G \triangle H}{\rho'_d \cdot \triangle z} \tag{12}$$

として計算される。堆積層の水分が一様で$\overline{M}$と仮定すると積分して△ H が

$$\triangle H = (He - Hin)\{1 - \exp(-Khc \cdot a \cdot \triangle z / G)\} \tag{13}$$

従って

$$\frac{\partial \overline{M}}{\partial \theta} = -\frac{G}{\rho'_d \cdot \triangle z}\{1 - \exp(-Khc \cdot a \cdot \triangle z / G)\} \tag{14}$$

と計算される。ただし、He は（tin、$\overline{M}$）と平衡になる絶対空気湿度、Khc は絶対湿度基準の総活物質移動係数であるが、ほぼ絶対湿度基準の物質移動係数 Kh で近似でき

$$Kh = (1/2)\, Cf \cdot G \cdot Sc^{-2/3} \tag{15}$$

$$Cf = 13.4\, Re^{-0.683} \tag{16}$$

によってほぼ計算することができる。Cf は材料の摩擦係数、Re はレイノルズ数、Sc はシュミット数と言われる無次元の数値で空気～水蒸気系では Sc ≒ 0.62（25 ℃）である。a は単位見かけ体積当たりの材料表面積で

$a = (1 - \varepsilon) \cdot ap$、$\rho'_d = 1 / V_m' = (1 - \varepsilon) / V_m$ の関係があり、それぞれ項末の（4)、(8）式を用いて計算することができる。

この他、空気線図を用いて蒸発水分量を推定する方法がある。堆積層を通過する空気は、材料から蒸発した水分を吸収すると同時に、蒸発に要する熱（蒸発潜熱）が奪われる。材料温度が一定で断熱状態で結露もないとすると、湿り空気の熱量と蒸発潜熱分の水蒸気のエネルギーの和（エンタルピ i = Ch*t+（rw+Cw*t）H Ch；乾燥空気比熱、Cw；水蒸気比熱 rw；蒸発潜熱）はほぼ一定に保たれ、堆積層を通過する空気は、通風量が少なく、堆積厚が一定以上では材料の水分と平衡する温・湿度の平衡状態に近づく。従って図 1-9-5 の空気線図上で通風空気の温・湿度から空気のエンタルピを計算し、その等エンタルピ線と、大豆の平衡水分曲線（大豆の平均水分）の交点が排出空気の温・湿度状態の近似値となる。実際には、材料温度は通風空気温度に近づき、多少の結露も生じるため、等エンタルピ線より若干下側の線をたどり、平衡水分までには至らないが、近似的な計算には十分である。この絶対湿度上昇分△ H に通風量を乗じて、G △ H とするとこの分が単位通風面積当たりに蒸発した総水分量となる。

図 1-9-6 に初期水分 20%w.b.、堆積厚 1 m、空塔風速 0.105 m/s、通風空気温度が 17 ℃ 近辺（図 6 中の下側の曲線）での堆積通風乾燥時の堆積層内の水分変化を乾燥シミュレーションモデルによって推定したグラフを載せた。上側の曲線群は堆積層を 5 等分した各層の水分変化を示し、中間の太線は平均の水分変化である。下側の曲線群は堆積層内の空気温度で上の曲線は入口の通風空気温度を示している。通風量が少ないと通風入口の堆積層付近で空気は平衡してしまい、内部の乾燥はあまり進まず、遅れて乾燥してくる様子が分かる。

6）乾燥むらの是正について

堆積通風乾燥では送風側と排風側では、層内の空気の温・湿度が異なるため乾燥速度が異なり、水分の違いが生じる。堆積層にほぼ均一に通風が行われれば、図 1-9-6 のように通風口からの高さに応じて乾燥速度が劣り、床からの高さが同じ層の水分はほぼ等しくなる。循環をした場合としない場合での層全体の平均乾燥速度の差は循環中の乾燥を除いては両者とも排出空気の温・湿度が平衡水分に近づくため少ないが、この位置別の水分むらの是正と蒸れ予防、裂皮防止のために行う。目標仕上げ水分を 13% としたとき、水分むらの是正のための循環は、平均水分がほぼ 16% 以下になった仕上げ乾燥時に行えばほぼ均一な水分に仕上がる。

また床から同じ高さの層であって場所によって風の通りが異なるため、水分むらを生じる。乾燥が進むと粒径が小さくなり、項末の（1）式のように通風抵抗が減少し、堆積高さも減少し、通風量が増大する。従って風の通る箇所は増々風が通りやすくなり、水平の位置別の水分むらが増大する。これを解消するためには、間欠的な循環が必要になり、貯留ビンには循環装置が装備されている。しかし床面付近の大豆を均一に排出することは一般的に難しいため、場所ごとに流量が異なり、若干の水分むらの原因となる。このためには貯留ビンの均一排出機構を工夫する必要がある。貯留ビン内にしきりを設けてそれぞれのブロックで排出したり、床面を V 字形にしてカバーで重量を支えながらそれぞれの溝からベルトコンベアにて排出するなどである。間欠的に循環する場合、30 分に 5 分位の割合で循環するのが目安になる。

7）おわりに

乾燥調製、通風抵抗に関しては、いろいろな条件が関係しており、どうしてもそれらの条件を入れた実験式のパラメータの数が多くなり、計算式は複雑にならざるを得ない。大豆は、種子が大きく、種皮も粒のわりには薄いので米麦と違って温度や湿度、衝撃の影響を受けやすく、取り扱いには注意を要する。

ここで示した乾燥調製の方法や通風抵抗の算出方法は、大豆の高品質乾燥調製を行うために必要とされる大豆の水分に応じた温・湿度調製とさまざまな大豆の粒径に対応できる通風抵抗の算出方法である。

抗力係数C_D を用いた圧力損失の計算式

$$\frac{\Delta P}{\Delta h} = C_D \frac{25(1-\epsilon)^2 \rho_{air} u^3}{4\epsilon^3 \Phi_c D_p} = C_D \frac{25 a_p (1-\epsilon)^2 \rho_m u^3}{24\epsilon^3} \quad (1)$$

大豆の抗力係数 $C_D = 17.4 R_e^{-0.683} \fallingdotseq \frac{24}{R_e} + \frac{5.49}{\sqrt{R_e}}$ (2)

レイノルズ数 $R_e = \frac{\rho_{air} \Phi_c D_p u}{\mu} = \frac{6\rho_{air} u}{\mu a_p}$ (3)

大豆の体積比表面積 $a_p = \frac{6}{\Phi_c D_p} = a_{p0}\left(1 + 0.956 \frac{\rho_{d0}}{\rho_w} \frac{m}{100-m}\right)^{-1/3}$ (4)

大豆の乾物比重 $\rho_{d0}/\rho_w \fallingdotseq 1.30$

乾物の平均粒径を$7.3 \times 10^{-3} m$ 、形状係数を0.986 とすると乾物の体積比表面積

$$a_{p0} = \frac{6}{\Phi_c D_{p0}} \fallingdotseq \frac{6}{0.986 \cdot 7.3 \times 10^{-3}} = 834 (m^{-1}) \quad (5)$$

大豆の乾物比見かけ体積V_m'と空隙率 ε に関しては

$$V_m' = V_m/(1-\epsilon) \quad (6)$$

$$1 - \epsilon = \pi k/6 \qquad k \fallingdotseq 1.0 - 0.029 m/(100-m) \quad (7)$$

大豆の乾物真体積V_mは

$$V_m = 0.771 + 0.956 m/(100-m) \qquad (10^{-3} m^3/kg) \quad (8)$$

空気の密度ρ_{air}と粘性率μは空気温・湿度によって変化するので以下の表から推定する。

湿り空気密度 ρ air

相対湿度 %	10 ℃	20 ℃	30 ℃
60%	1.23562	1.19039	1.14610
70%	1.23505	1.18935	1.14427

(kg/m^3)

空気の粘性率 μ

10 ℃	20 ℃	30 ℃
1.9689 $\times 10^{-5}$	2.0235 $\times 10^{-5}$	2.0773 $\times 10^{-5}$

(kg/m^3)

記号

ΔP；圧力損失(Pa)

C_D；抗力係数

ε ；空隙率

ρ_{air}；空気密度(kg/m^3)

Φ_c；大豆の形状係数(0.98 ～ 0.99)

D_p；大豆の球相当直径(m)（$D_p \equiv (6V_p/\pi)^{-1/3}$、$V_p$； 1 粒当たりの平均体積)

u ；空塔速度(m/s)

参考文献

1）生物生産機械ハンドブック、農業機械学会、p794、p803、1996

2）井上慶一：大豆の体積、見かけ体積、充てん率と水分の関係、農機誌、60（1）:23-32、1998

3）山下律也：穀物の物性値解説、農業機械学会、p104、1992

4）井上慶一、大塚寛治、杉本光穂、村上則幸、黎文：無次元数による穀類の通風圧力損失の解析（第1報）－大豆の通風圧力損失－、農業機械学会誌、61（1）：P81 ～ 89、1999

5）米麦用循環式乾燥機を利用したモミガラ混合大豆乾燥調製法、農業研究センター、関東東海農業の新技術、P72 ～ 77、1997

6）大豆の高品質乾燥制御法、農業研究センター、関東東海農業の新技術、P319 ～ 324、1995

7）村田 敏、河野俊夫、榎本俊夫：単層大豆の乾燥特性、農機誌、55（1）、51-56、1993

8）井上慶一、大豆の高品質乾燥調製に関する研究、中央農研研究報告3号（2003.3）

9）井上慶一，大塚寛治，杉本光穂，村上則幸，黎文:大豆の通風乾燥における通風の温･湿度について（第1報），－裂皮発生の理論と実証および蒸れの発生－，農業機械学会誌，62(3)：60 － 67，2000.5

10）井上慶一，村上則幸，大塚寛治，杉本光穂，黎文，宮浦寿美:基本的乾燥物性定数による大豆の乾燥シミュレーションモデル，農業機械学会誌 62（6），98 － 107，2000.11

11）大豆裂皮防止加温温度算出ソフト，農研機構，機構 -K02，2005/4/13 登録，
https://www.naro.go.jp/collab/program/patent_category/patent_cate020/006881.html

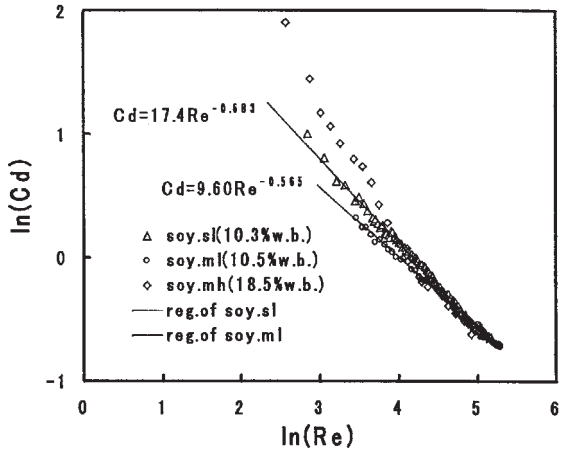


図 1-9-1　対数変換によるレイノルズ数と抗力係数の関係

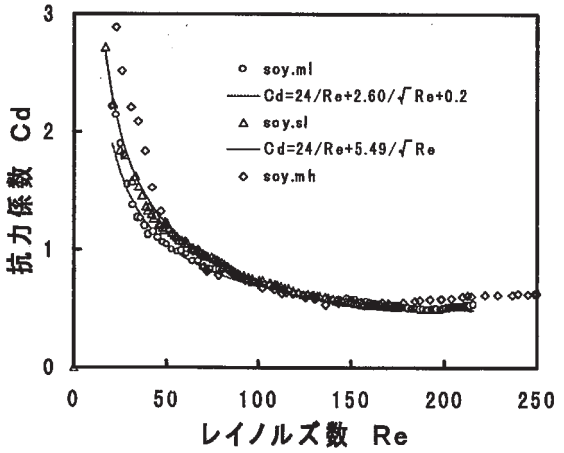
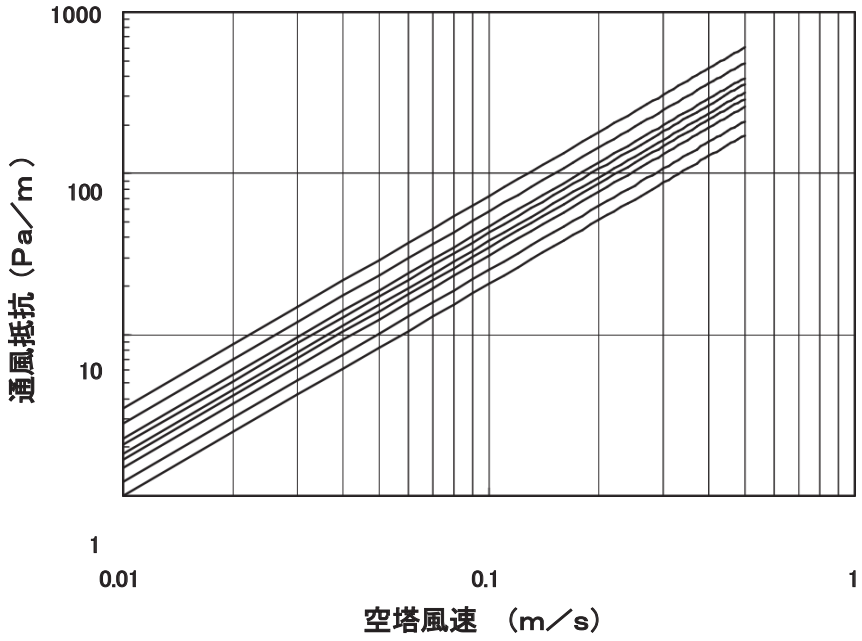


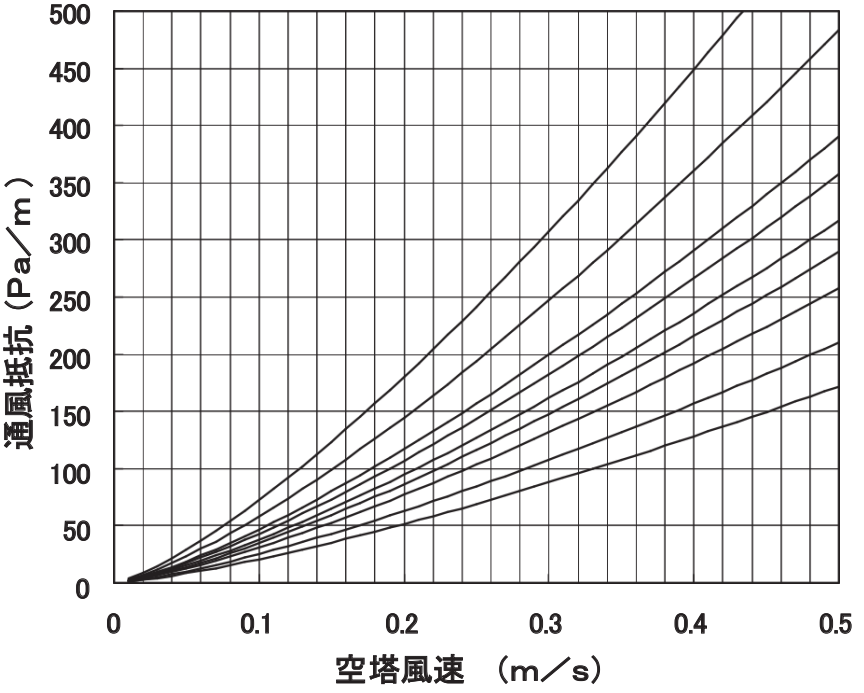
図 1-9-2　レイノルズ数と抗力係数の関係



各グラフの条件
（上から順に以下の通り）

空隙率 ε	大豆の体積比表面積 a_p (m^2/m^3)
0.38	700
0.40	700
0.42	700
0.46	850
0.44	700
0.46	750
0.46	700
0.48	700
0.50	700

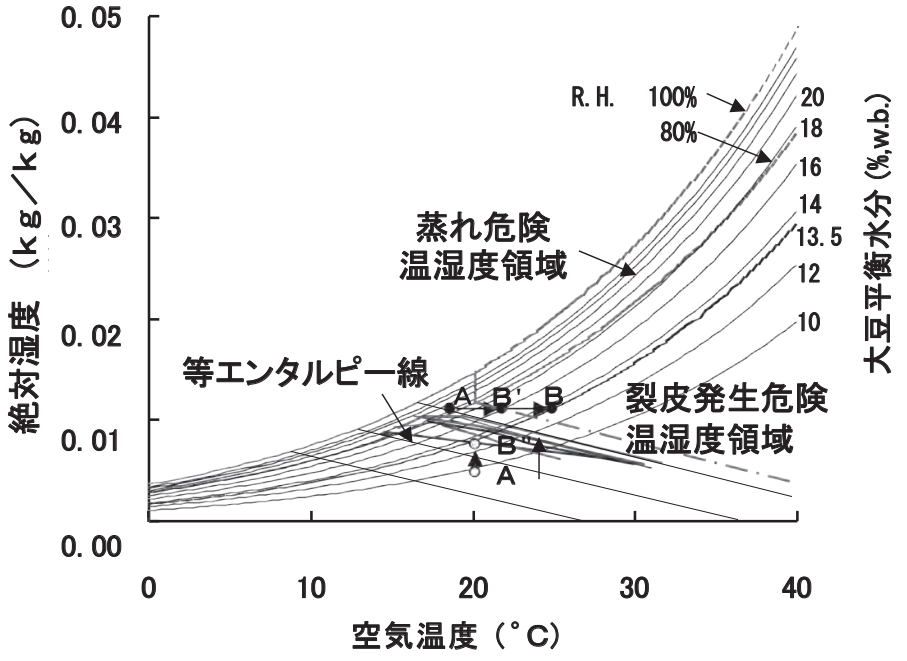
図 1-9-3　対数軸上での大豆の通風抵抗



各グラフの条件
（上から順に以下の通り）

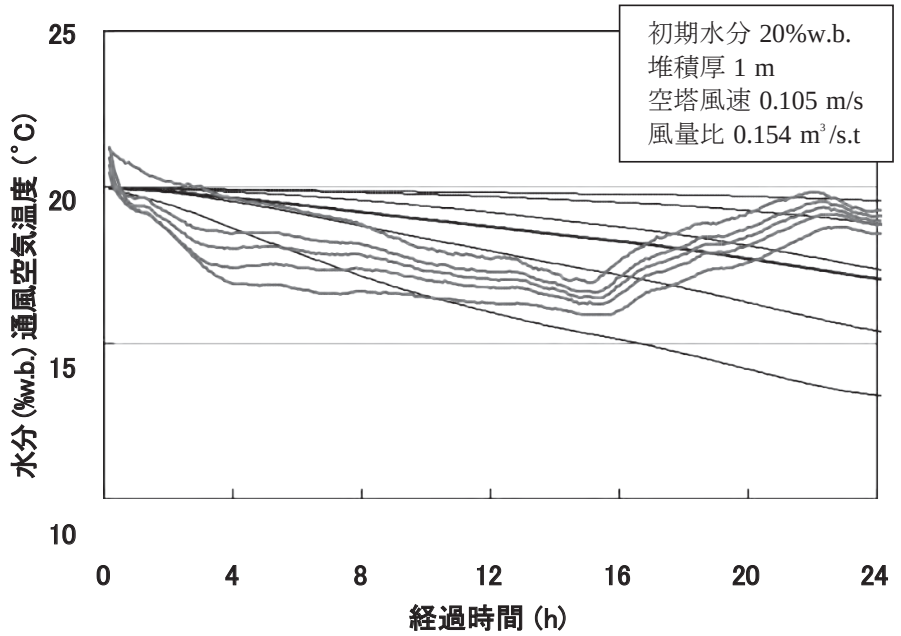
空隙率 ε	大豆の体積比表面積 a_p (m^2/m^3)
0.38	700
0.40	700
0.42	700
0.46	850
0.44	700
0.46	750
0.46	700
0.48	700
0.50	700

図 1-9-4　大豆の通風抵抗



図は大豆の水分が19.5%w.b.のときの裂皮限界となる空気の温・湿度を大豆の平衡水分が13.5%w.b.のときのもので、この曲線より上側の温・湿度の空気を通風する必要があることを示す。

図 1-9-5　空気線図上（温度－絶対湿度グラフ）の大豆の平衡水分曲線と裂皮と蒸れ防止の温・湿度範囲



曲線群は堆積層の上層から下層にかけての５分割した各層の水分変化を示している。太線は平均水分。下側の曲線群は通風側（上側）の通風空気温度と堆積層内の空気温度を示している。

図 1-9-6　堆積通風乾燥での堆積層の水分と空気温度のシミュレーション結果

10. 乾燥施設利用上の留意事項

1）収穫作業と原料集荷

(1) あらかじめ圃場で大豆（莢は除く）の水分を測定し、18%以下であることを確認して、収穫作業に入る。またその時被害粒・汚粒の程度も確認しておき、被害が大きい圃場は搬入時に連絡する。

(2) 収穫作業の共同化を図ったり、圃場集荷を行うなど、ロットを大きくしたり、フレコン袋搬入を計画する。

(3) 低水分収穫といえども、収穫粒には水分のばらつきもあるので、1日の施設処理能力を超えないよう、あらかじめ定められた荷受計画に合わせて収穫作業を実施する。

(4) 2品種以上が同時に収穫適期になった場合には、1日又は2日おきに品種を変えて交互に収穫し、搬入する。（1日1品種荷受け）

2）荷受け

(1) 荷受原料の水分を測定し、18%を境に分別し、別々の乾燥機又はD・Sビン等で乾燥する。また、程度のひどい汚粒・被害粒の多いロット等も分別乾燥する。

(2) 異常気象の時には、登熟不良により特に水分格差が大きいので、注意する。また、霧・雨・早霜等により、圃場が乾燥していない時など汚粒が発生しやすいので、注意する。

(3) やむを得ず乾燥能力以上の荷受けをした場合や水分18%以上の粒が多い場合は、循環式乾燥機に入りきれなかったり、乾燥速度が遅くなったりするので、翌日以降の荷受け計画を見直すことが必要である。

(4) 原料貯留を行う場合は通風装置のある容器で行う。

(5) 荷受大豆の平均水分が設計値（18%）どおりであっても、圃場によってはバラツキが大きい。また設計値以上の水分で受けざるを得ない場合もある。大豆の乾燥はしわ粒発生防止にのためもともと低水分荷受けであり、さらに乾減率は低い。このため水分むらが大きいと解消はかなり難しい。荷受時の水分の把握、乾燥時のこまめな水分測定によりローテーションを適宜実施するなど留意が必要である。

3）乾燥

(1) 循環式乾燥機等加温乾燥の場合は、熱風温度を30℃以下とし、平均水分が18%を超えるロットは更に熱風温度を落し気味に乾燥する。乾燥終了時は常温循環を行い、調整タンクへ投入する。

(2) 適切な乾燥機の運転に必要な量の原料で乾燥機が満たされるまでの間は、循環は行わないで通風のみ行う。

(3) 端量乾燥の場合は、熱風温度を低くし、循環速度をおさえ、乾減率が0.3%/h程度となるよう運転する。

(4) 丸型循環式乾燥機の場合は、間欠循環が可能であるので、乾燥機操作マニュアルに従って適切に設定する。

(5) ドライストアで乾燥する場合は、ビンごとに体積高さが異なると、ビン間にムラが生ずるので、ビンごとの通風量の調節等により、均一風量となるようにする。

(6) 原料は乾燥を効率よく行うため、ローテーション用のビンを除き、極力全ビンに投入する。

(7) 過度のローテーションは剥皮粒・割粒を増加させるので、1日1回ゆっくり確実に行う。
送風温度は、晴天時には常温通風（無加温）とし、雨天・夜間は常温＋5℃程度を目安に運転する。

(8) 乾燥作業中の穀温及び水分の推移は、少なくとも1時間に1回程度測定し、常に把握する。

4）乾燥後の貯留

(1) 穀温20℃以下、平均水分13%であることを確認し、一時貯留ビン（またはタンク）に堆積する。

(2) 一時貯留が長期に渡る場合は、水分の戻りに留意し、期中に水分測定とローテーションを実施する。（過度のローテーションは剥皮粒・割粒を増加させるので、期中1～2回程度とする。）

(3) 一時貯留施設容量が少ない場合は、出荷の停滞が施設全体の荷受け・乾燥作業に影響をおよぼさないように留意する。