

大豆乾燥調製マニュアル 改訂版

一般社団法人全国農業改良普及支援協会

目次

I 荷受け・乾燥施設	1
1 乾燥の基礎知識	1
1) 被害粒発生機構	1
2) 乾燥条件と被害粒発生割合及びその品種間差	3
2 乾燥処理と品質	5
1) 被害粒と吸水率及び固形分溶出率の関係	5
2) 乾燥温度と大豆加工適性	5
3) 乾燥方法と大豆加工適性及び豆腐・納豆の品質	5
3 大豆乾燥設備の形式と特徴	8
1) 循環式乾燥機を採用した例	8
2) 貯留乾燥ビン（角ビン）を採用した例	8
4 荷受設備	9
1) 搬入形態と容器	9
2) 荷受ホッパーの形状と配置	10
(1) 各方式の特徴	10
(2) 荷受ホッパー格子上での夾雑物の除去	11
(3) 荷受けホッパーの容量選定	11
3) 荷受計量器	11
(1) ホッパースケール	11
(2) ピットスケール	12
4) 荷受能力・系列の決定について	12
5 大豆用自主検査装置	12
1) 半自動型自主検査装置	12
2) 全自動型自主検査装置	12
6 水分計	13
1) 高周波容量式水分計	13
2) 大豆用単粒水分計	13
3) 荷受計量器への水分計の取付	13
4) 荷受け原料の水分布	14
7 原料の一時貯留設備	15
1) 一時貯留設備の必要性	15
2) 一時貯留設備の選定	15
3) 一時貯留設備の容量	15

8	乾燥設備	16
1)	静置式乾燥機	16
2)	ドライストア（角ビン、丸ビン）	16
(1)	基本構造	16
(2)	ドライストア（角ビン、丸ビン）の特徴	19
(3)	角ビンの送風量推定方法について	19
(4)	送風空気の加温に必要な灯油燃焼量について	20
3)	循環式乾燥機	21
(1)	角形循環式乾燥機	21
(2)	丸形循環式乾燥機	23
(3)	循環式乾燥機の容量選定	23
(4)	循環式乾燥機の特徴	23
4)	ラック式乾燥機	24
(1)	概要	24
(2)	ラック式乾燥機の特徴	24
5)	乾燥設備の選定	25
9	乾燥ビンにおける堆積高さとう風比	25
1)	風量比の算定方法	25
2)	堆積高さとう風抵抗（圧力損失）	26
3)	通風抵抗のグラフ	27
4)	裂皮防止のための薄層における限界乾燥速度	28
5)	平均乾燥速度の推定	29
6)	乾燥むらの是正について	30
7)	おわりに	30
10	乾燥施設利用上の留意事項	35
1)	収獲作業と原料集荷	35
2)	荷受け	35
3)	乾燥	35
4)	乾燥後の貯留	35
II	調製施設	36
1	調製の目的	36
2	風力選別機（粗選機）	36
1)	原理	36
2)	風力選別機の種類と特徴	37
(1)	吹上げ式風力選別機	37
(2)	吸引式風力選別機	37

(3) 密閉式風力選別機	37
3 比重選別機	40
1) 原理	40
2) 比重選別機の種類と特徴	41
(1) 左右2方向比重選別機（石取機型）	41
(2) 三角型比重選別機（前後、左右方向選別）	41
(3) 長方形型比重選別機（前後、左右方向繰り返し選別）	41
4 形状選別機（転選機）	44
1) 原理	44
2) 転選機の種類と特徴	44
(1) スパイラルシュート方式	44
(2) ベルトコンベア方式	44
5 粒径選別機	47
1) 原理	47
2) 粒径選別機の種類と特徴	47
(1) 回転式選別機（回転ふるい）	47
(2) 前後傾斜揺動式	47
(3) 水平振動式	47
6 色彩選別機	49
1) 原理	49
2) 色彩選別機の種類と特徴	49
7 転選機と粒径選別機の複合機	50
8 調製ライン	52
9 選別機利用上の留意点	52
1) 風力選別機	52
2) 比重選別機	52
3) 形状選別機	52
4) 粒径選別機	52
5) 色彩選別機	53
10 大豆クリーナー	53
1) 大豆クリーナー概要	53
2) 乾式クリーナー	53
(1) S式大豆クリーナー	53

(2) H 式大豆クリーナー	54
(3) NS 式大豆クリーナー	54
3) 湿式クリーナー	55
(1) N 式大豆クリーナー	55
(2) Sa 式大豆クリーナー	56
4) 大豆の汚粒指標	56
5) 大豆クリーナーの使用上の留意事項	57
11 磁力選別	57
12 出荷設備	58
1) 計量機の種類	58
2) 個袋詰め計量機	59
3) 全自動計量包装機	60
4) 全自動計量結束機	61
5) フレコン計量機	62
13 施設稼働上の留意事項	62
1) 品質事故防止と施設の点検・整備	62
2) 他の作物と共用する場合の留意点	62

I 荷受け・乾燥施設

1. 乾燥の基礎知識

収穫直後の農産物は水分が高く、非常に変質しやすいため、すみやかに水分を除去し、貯蔵性を向上させるとともに品質を維持する乾燥技術は非常に重要である。乾燥とは、一般に常温、または加熱された空気を堆積した農産物中に送り込み、農産物内の水分を蒸発させ、出てきた水蒸気を排除することをいう。しかし、あまり急激な乾燥は、かえって品質を低下させ、大豆の場合には、外観品質とともに、豆腐加工適性や蒸煮特性が低下するため、基礎的な理論をよく理解し、効率的な乾燥をこころがけなければならない。以下、乾燥に起因する被害粒の発生を中心に、大豆乾燥の基礎理論を説明するが、裂皮粒もしわ粒も栽培期間中に発生するものもあるので、誤解のないようにしたい。たとえば、栽培期間中に発生する裂皮は、大豆種子の大粒化、種皮と子葉の生育のアンバランス、種皮の形態や物理的強度がその原因と考えられている。また、栽培期間中に発生するしわ粒は、成熟期の高温や天候による急激な吸湿や乾燥に起因するとされている。

1) 被害粒発生機構

大豆は、米麦の子実と比較して、[1] 殻がついていない、[2] 粒が大きい、という物理的な特徴がある。このため、乾燥に関しては、[1] 大豆表面から外気中に水分が移動しやすい、[2] 大豆の内部では中心部の水分が表面へ移動しにくい、という特徴があり、これが被害粒を発生しやすい要因となり、大豆の乾燥を難しくしている。



写真 1-1-1 大豆乾燥に起因して発生する被害粒

高水分大豆の乾燥に起因して発生する被害粒は、主に裂皮粒としわ粒であり、裂皮粒は乾燥開始後 30 分から 1 時間で発生するが、しわ粒は乾燥終了後 2～3 日後に徐々に発生する。このことから、その被害粒は、以下に示すような発生経緯をたどると考えられている。つまり、

- ① 乾燥前は、粒内の水分分布は高水分ではあるが、均一である。
- ② 乾燥が始まると、粒表面からの水分移動が大きくなり、表面近くの水分が低く、粒中心部の水分が高い状態になる。
- ③ 大豆表面の水分が低くなると、その部分の大豆はほぼ水分に比例して収縮しようとするが、粒中心部の水分は高い状態にあるので、自由に収縮できず、粒表面（表皮）に引張応力が発生する。
- ④ 乾燥開始後 30 分～1 時間でその引張応力は最大値を示し、表皮の引張破壊限界を超えたときに「裂皮」が生じる。
- ⑤ 乾燥が終了すると、大豆の中心部から粒表面に向かって水分移動が起こる。乾燥初期に引張応力を受け、破壊しないまでも変形を起こした表皮は、水分が高くなり、逆に圧縮応力を受け「しわ」が発生する。

以上のように、裂皮粒もしわ粒もその発生要因は乾燥初期の粒内部と粒表面との間の水分勾配がその原因である。乾燥中の水分勾配と表皮に発生する応力の推移は図 1-1-2 のようになる。図 1-1-2 は、初期水分 19.7% の高水分大豆を絶対湿度のほぼ等しい送風温湿度条件 (a) 35℃ - 20% と (b) 25℃ - 60% で乾燥した時の大豆 1 粒内の水分勾

配と大豆表皮に働く水分応力を計算し、比較したものである。35℃ - 20%の乾燥条件での平衡水分（材料を温度・湿度の一定な空气中に長時間放置し、ある一定の水分に落ち着いたとき、その水分を平衡水分といい、とくに乾燥過程で平衡に達するとき、これを動的平衡水分という。ここでいう平衡水分とは動的平衡水分のことである）は5.4%と低く、乾燥開始1時間で、粒表皮の水分はすぐにほぼ平衡水分に達し、粒中心部との水分勾配は約15%になる。その結果、水分勾配に起因して大豆表皮に発生する応力は、表皮の引張破壊限界9MPaを上回るため皮が切れ、被害粒発生割合は97%に達する。それに対し、25℃ - 60%では、平衡水分が9.6%と高く、乾燥速度は遅くなるが水分勾配は10%と低く抑えられるため、表皮の引張破壊限界を上回ることがなく、被害粒はほとんど発生しない。以上のように、大豆の乾燥では、乾燥初期に表皮に大きな応力が作用し、被害粒が発生しやすくなるので、とくに、乾燥初期の送風温度を低く抑えて、送風湿度を比較的高く維持する等、ゆっくりとした乾燥に留意しなければならない。しかし、送風温度を抑えることにより、乾燥速度が低下してしまうので処理量が低くなり、乾燥施設の効率的な運営に支障をきたす可能性も示唆される。この問題を解決するために、送風温度を高くした状態で送風空気を加湿する調湿乾燥や、大豆の水分変化に応じて送風温湿度を適正に制御する方法が、現在、研究されている。

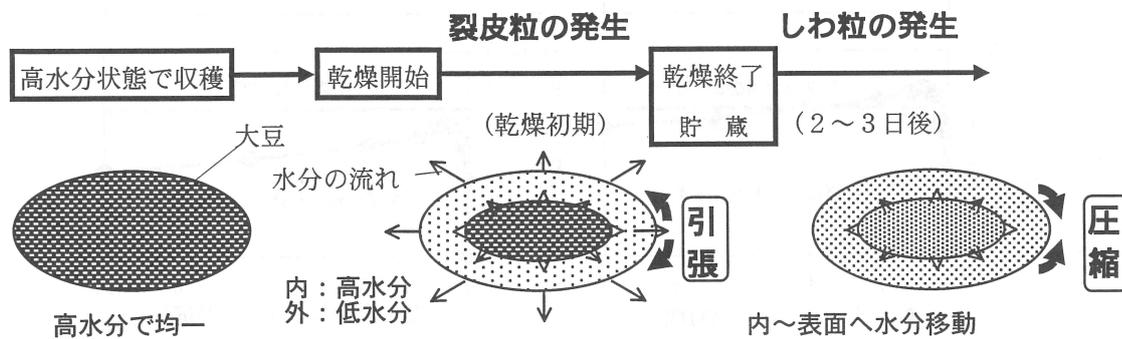


図 1-1-1 大豆乾燥における被害粒発生機構（大黒ら，2000，農機学会誌，62（3），140-148）

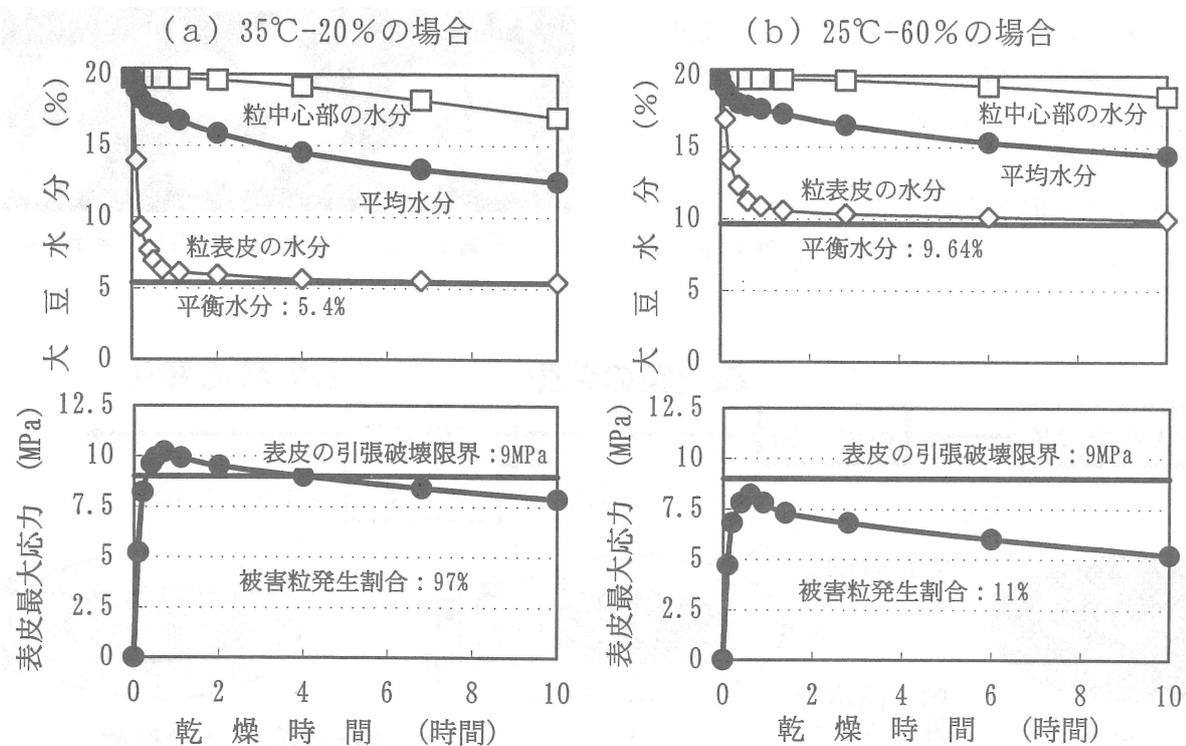


図 1-1-2 大豆乾燥時の粒内水分勾配と表皮に発生する応力（品種：エンレイ）

2) 乾燥条件と被害粒発生割合及びその品種間差

裂皮粒やしわ粒の発生割合は品種間に大きな差があることが知られている。表 1-1-1 は薄層状態（穀粒が堆積しておらず、堆積層が1～2粒程度の状態）で初期水分約20%の大豆5品種について乾燥試験を行い、被害粒発生割合を比較した結果である。また、図 1-1-3 は同様に5品種について、いろいろな初期水分での薄層乾燥試験結果をまとめて、被害粒が10%以内に抑えられる送風温度、送風湿度を示したものである。供試5品種の中で被害粒が発生しやすい順はエンレイ>タチナガハ>ワセシロゲ>フクシロメ>スズユタカであり、最も被害粒の発生が少ないスズユタカはエンレイやタチナガハの約3分の1の発生割合である。乾燥に起因して発生する被害粒の種類にも品種間で大きな差があり、とくにタチナガハは他の品種と比較して、裂皮粒よりもしわ粒が発生しやすい傾向がある。一般に、粒径が大きい品種ほど被害粒の発生が多くなるが、この原因は、上述したように粒径の大きな品種は粒の中心部の水分が低下しにくく、乾燥中の水分勾配が粒径の小さな品種より大きくなり、大きな応力が表皮に働くことによる。そのほか、表皮の強度や水分による膨張係数に品種間差があり、これらの要素も被害粒の発生に大きく影響しており、品種を変えて乾燥を行う場合は注意が必要である。

堆積通風乾燥の場合、送風空気が堆積層を通過するに従い、大豆粒内から蒸発した水分により送風湿度が上がるため、堆積層への送風空気の入気部分で乾燥速度が速く、被害粒の発生も起こりやすい。表 1-1-1、図 1-1-3 は薄層状態での結果であり、通常の堆積通風乾燥では薄層乾燥より被害粒の発生は少なくなるが、堆積層への入気部分ではこのような被害粒発生割合になる可能性がある。一般に大豆の乾燥では、送風温度を低く抑えるように指導され

表 1-1-1 大豆乾燥における送風温度条件と被害粒発生の関係（大豆初期水分：19～20%）

送風温度 ℃	送風湿度 %	エンレイ		タチナガハ		ワセシロゲ		フクシロメ		スズユタカ	
		しわ	裂皮	しわ	裂皮	しわ	裂皮	しわ	裂皮	しわ	裂皮
25	20	0.0	97.0	2.7	47.7	—	—	—	—	—	—
	40	1.2	41.7	0.3	9.2	0.0	5.0	—	—	0.0	0.0
	60	6.1	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	0.0	0.0
30	20	0.3	93.4	5.1	27.6	0.0	43.2	—	—	0.0	28.1
	40	3.6	16.2	16.8	1.6	0.0	5.4	0.0	1.4	0.0	0.8
	60	0.6	0.0	0.5	0.5	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
35	20	0.0	97.8	3.9	59.6	0.0	45.2	0.2	49.0	0.0	19.4
	40	6.9	19.6	15.9	1.7	0.0	10.2	0.0	0.6	0.0	0.2
	60	0.0	0.5	2.1	0.5	0.0	0.0	0.2	1.2	0.0	0.0
40	20	0.0	98.0	2.8	83.0	0.0	59.6	—	—	0.0	16.9
	40	1.4	46.1	8.5	5.7	0.0	11.4	—	—	0.0	2.0
	60	2.5	14.1	0.5	1.3	1.1	1.2	—	—	0.0	0.0

ているが、表 1-1-1 に示すように、被害粒発生割合は送風温度より送風湿度の影響を大きく受ける。さらに、地域や収穫時期、乾燥の時間帯によって外気の温湿度条件が大きく異なるので、大豆乾燥に適する送風温度の上限を一概に決定することはできない。図 1-1-3 の結果から、薄層乾燥での被害粒発生割合 10% 以下を大豆乾燥における送風温湿度条件の適正化を図る基準とすると、初期水分が 18% の場合には、乾燥初期の送風湿度が 40% を下回らないように送風温度を調節することにより、品種によらず被害粒の発生をほぼ抑えることができると考えられる。同様に初期水分が 20% の場合、乾燥初期の送風湿度 60% を下限として乾燥すべきである。また、以上の送風湿度で乾燥するためにどのレベルまで加温できるかを知るためには、湿り空気線図を用いて、外気の温湿度状態から、加温した場合の送風湿度を推定する必要がある。

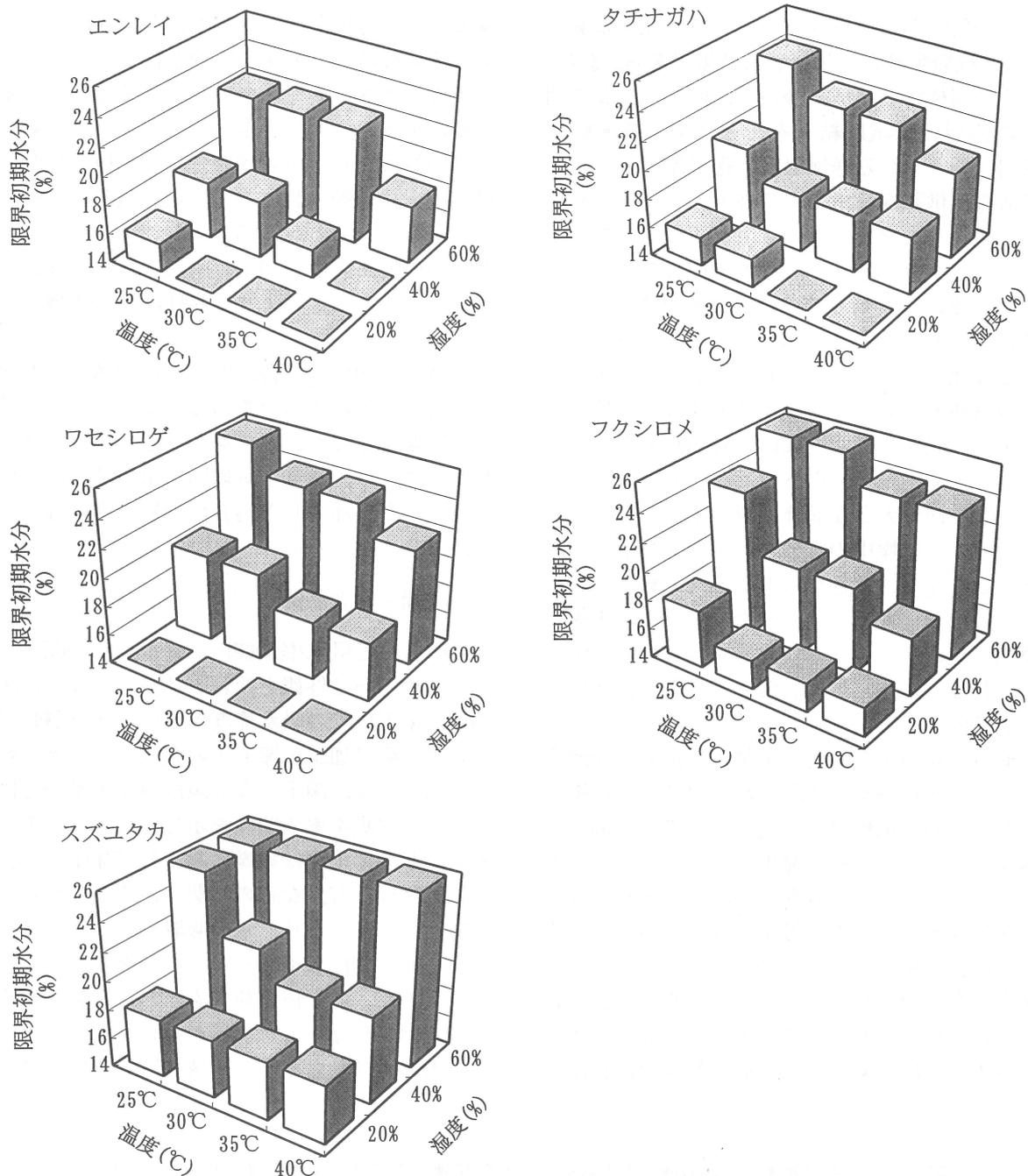


図 1-1-3 薄層乾燥において被害粒を 10% 以内に抑えるための送風温湿度条件と限界初期水分 (供試品種：エンレイ、タチナガハ、ワセシロメ、フクシロメ、スズユタカ)

2. 乾燥処理と品質

1) 被害粒と吸水率及び固形分溶出率の関係

裂皮やしわは外観を損ねるばかりでなく、[1] 加工時の浸漬工程での吸水速度の不均一、[2] 原料の損失、[3] 排水汚染等加工・流通上の問題になるとされている。図 1-2-1、図 1-2-2 は裂皮粒発生割合と固形分溶出率及び吸水率の関係を示したものである。吸水率や固形分溶出率は乾燥に起因して発生した裂皮粒の発生割合と有意な正の相関があることから、表皮が切れたことにより、水の吸収が速くなり、大豆の成分も外に流出しやすくなったことが容易に想像できる。また、同じ被害粒でもしわ粒と吸水率等との間には相関がないことが確かめられている。

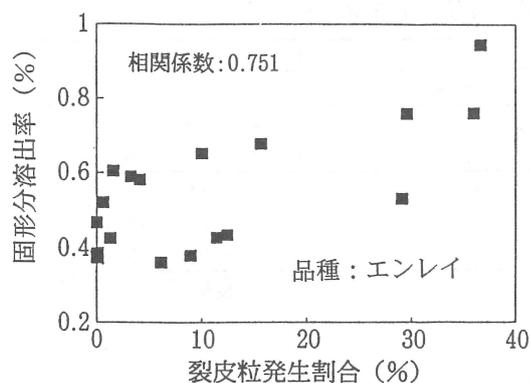


図 1-2-1 裂皮粒発生割合と固形分溶出率の関係

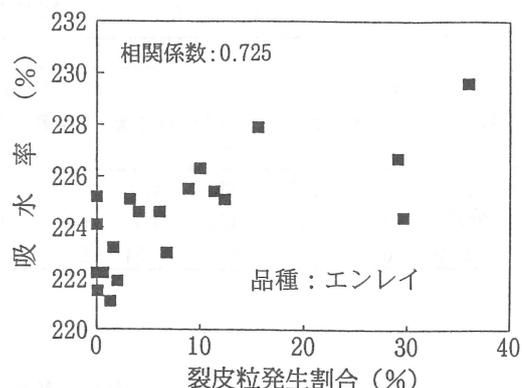


図 1-2-2 裂皮粒発生割合と吸水率の関係

吸水率の変動により、浸漬後圧力釜で蒸煮する味噌加工や納豆加工では、蒸煮大豆の硬さにむらが生じ、一定の品質が得られなくなる可能性がある。また、大豆中の窒素化合物や炭水化物が溶出すると、原料のロスとなることから、乾燥時の被害粒の発生を抑制することが、大豆加工の品質維持のために非常に重要である。

2) 乾燥温度と大豆加工適性

乾燥温度や乾燥方法と大豆加工品質の関係は、昭和 50 年代前半に食品総合研究所で詳しく検討されており、その結果を中心にここで述べる（日作記 46 (1) 67-74, 48 (2) 291-302, 食品総合研究所研究報告 34 号 13-28, 38 号 23-32)。表 1-2-1 は、堆積通風乾燥における乾燥温度と大豆加工適性の関係を示したものである。被害粒の発生は、乾燥温度が高くなるに従って増加し、送風温度 40℃では、無加温、20℃、30℃に比べて有意な差が認められる。しかし、その結果は、タンパク質抽出率、豆乳の pH、蒸煮大豆重量増加率、蒸煮大豆の水分含量、蒸煮大豆の色調に影響せず、有意差が生じてない。とくに豆乳の pH に変化がないことから 40℃程度の乾燥温度では大豆の成分組成までには影響が及ばないと考えられる。また、乾燥温度 40℃では被害粒とはいってもほとんどがしわ粒であり、前述のように、破碎や裂皮など吸水率やタンパク質や固形分の流出にほとんど影響がなく、蒸煮豆の煮くずれも少なかったためと思われる。蒸煮後 30 分大豆は 30℃、40℃乾燥で他の試験区より軟らかく仕上がるという結果がでているが、これは大きな問題とはならず、むしろ好ましい結果になることもある。以上のように、裂皮等の被害粒の発生がなければ、乾燥温度 40℃でも加工適性上の大きな欠点にはならないと考えられる。しかし、この結果は、乾燥後あまり貯蔵期間をおかずに試験した結果であり、米の乾燥のように、乾燥温度の影響が長期貯蔵後の品質に大きく表れてくる可能性もある。これらの点については今後の研究を待たなければならない。

3) 乾燥方法と大豆加工適性及び豆腐・納豆の品質

表 1-2-1 は自然乾燥と、静置式乾燥機を用いた 30℃乾燥、循環式乾燥機を用いた 30℃乾燥について、大豆の加工適性を比較した結果である。循環型乾燥では、穀粒循環時に発生する裂皮、破碎が増加し、1) の結果同様、吸水率や固形分流出率が増加する。また、循環型乾燥では裂皮や破碎により発芽率は大きく低下している。しかし、タンパク質抽出率、豆乳の pH、蒸煮大豆重量増加率、蒸煮大豆の色調は試験区間で有意な差が表れていない。

表 1-2-2 は工場規模での豆腐製造試験結果である。豆乳のタンパク質収率及び固形物収率が自然乾燥で高い傾向が認められる。また、静置型乾燥、循環型乾燥の離水率が自然乾燥と比較して低く、豆腐が硬くなる傾向があるが、別途行った官能評価の結果からは、乾燥試料間に著しい差異は認められなかった。表 1-2-3 は工場規模での納豆製造試験結果である。静置型乾燥、循環型乾燥では吸水率・蒸煮大豆の水分含量が高く、蒸煮大豆や納豆が軟らかくなり、窒素溶解率・窒素分解率・アンモニア態窒素が増加する傾向がある。裂皮や破碎の多い循環型乾燥では、浸漬中剥離や蒸煮中煮くずれが生じ、その結果、納豆の外観・色・総合評価が低下している（表 1-2-4）。

このように、乾燥方法の影響として最も重大な問題は、循環式乾燥機で問題とされるような裂皮粒や破碎粒の多発であり、とくに、納豆や煮豆のような蒸煮大豆の形がそのまま製品の品質として評価される加工品では、これらの被害粒が発生しないように乾燥方法に注意しなければならない。

表 1-2-1 大豆の乾燥方法と加工適正の変化（品種：トヨスズ）

試験区名	初期水分 %	正常粒 %	しわ粒 %	裂皮粒他 %	吸水率 %	発芽率 %	浸漬液中 固形分 %	
自然乾燥	17.3	72.4	27.4	0.2	121	85	0.4	
静置型乾燥	18	74.8	18.1	6.8	127	91	1.3	
循環型乾燥	22.4	19.4	7.8	72.8	132	10	3	
試験区名	タンパク質 抽出率 %	蒸煮大豆 重量 増加率倍	蒸煮大 豆水分 含量 %	蒸煮大豆の硬さ		蒸煮大豆の色調		
				蒸煮直後 g	30分後 g	Y %	x	y
自然乾燥	91.6	2.18	59.1	300	460	36.7	0.383	0.371
静置型乾燥	92.2	2.18	59.5	290	340	36.9	0.384	0.372
循環型乾燥	92	2.2	60.8	250	329	37.8	0.383	0.371

注) 静置型乾燥とは、静置式乾燥機を用いた送風温度 30℃での乾燥方法。硬さは上皿天秤の上で大豆粒を押しつぶしたときに表示された重さで表記。

循環型乾燥とは、循環式乾燥機を用いた送風温度 30℃での乾燥方法。（食総研 平ら 1979 年）

表 1-2-2 大豆の乾燥方法と豆腐製造試験（品種：トヨスズ）

試験区名	原料大豆使用量 kg	吸水率 %	生産量 L	豆乳				
				タンパク質含量 %	タンパク質含量 %	固形物濃度 %	固形物収率 %	pH
自然乾燥	60	100	395	4.2	73.9	8.6	64.5	6.64
静置型乾燥	60	117	320	4.8	66.2	9.65	57.8	6.7
循環型乾燥	60	127	340	4.54	66.5	8.55	54.7	6.67
試験区名	豆腐						Y %	y
	離水率		かたさ g/cm ²	pH	色調			
	30分後 %	60分後 %						
自然乾燥	4.1	6.7	62	5.84	69.6	0.341		
静置型乾燥	3	4.6	87	5.86	70.5	0.342		
循環型乾燥	3.7	6	86	5.8	70.6	0.34		

（食総研 平ら 1979年）

表 1-2-3 大豆の乾燥方法と納豆製造試験（品種：トヨスズ）

試験区名	吸水率%	蒸煮大豆				
		水分 %	重量増加率 倍	かたさ g		
自然乾燥	116	55.4	1.93	496		
静置型乾燥	127	57.4	1.96	370		
循環型乾燥	139	60.4	2	210		
試験区名	納豆					
	水分 %	pH	かたさ g	窒素溶解率 %	窒素分解率 %	アンモニア態窒素 mg %
自然乾燥	63.1	7.9	1116	55.1	4.8	87.3
静置型乾燥	63.8	8	1094	69	8.3	157.4
循環型乾燥	64.9	7.92	826	61.1	6.1	161.7

（食総研 平ら 1979年）

表 1-2-4 大豆の乾燥温度と納豆の官能評価

項目	評価
外観	自然乾燥＞静置型乾燥＝循環型乾燥
香り	自然乾燥＝静置型乾燥＝循環型乾燥
色	自然乾燥＝静置型乾燥＞循環型乾燥
粘り	自然乾燥＝静置型乾燥＝循環型乾燥
旨味	自然乾燥＝静置型乾燥＝循環型乾燥
苦味	自然乾燥＝静置型乾燥＝循環型乾燥
アンモニア臭	自然乾燥＝静置型乾燥＝循環型乾燥
総合評価	自然乾燥＞静置型乾燥＞循環型乾燥

(食総研 平ら 1979 年)

3. 大豆乾燥設備の形式と特徴

機械設備には、設備を構成する機械個々の特徴とは別にシステムとしての特徴がある。大豆子実がどのような工程で乾燥されるか、また、角ビンや循環式乾燥機などがどのように使用されるかなどについて、いくつかの代表的な大豆乾燥工程の概要を簡単なフローと図で説明するとともに特徴をあげる。

1) 循環式乾燥機を採用した例

乾燥設備に循環式乾燥機を採用した設備である。乾燥機の容量、基数は1日あたりの計画処理量に合わせて設定されるため、乾燥機の容量を超えての乾燥は出来ない。そのため、計画処理量を超えないように、適切な収穫計画の立案とその確実な実行が求められる。この方式では、荷受設備、調製設備、出荷設備も1日の計画処理量に合わせて設定されるため、工程のどこにも原料や製品の滞留はなく、荷受けした分は、全量出荷することとなる(図 1-3-1)。

2) 貯留乾燥ビン(角ビン)を採用した例

乾燥設備に貯留乾燥ビンを採用した設備である。ビン数、送風量は、計画処理量に合わせて設定されるが、貯留ビン、乾燥ビンの稼働数配分が状況にあわせて変えることができる。そのため、荷受量の変動にも比較的対応しやすい施設といえる。また、貯留乾燥ビンを通熱することで米麦カントリーエレベーターに準じた長期貯蔵機能も付加できる。(図 1-3-2)。

以上、大豆子実の乾燥設備について、2つの代表的形式を上げて説明した。どの形式の施設を採用するかは、基本的には荷受期間と1日の荷受量およびその変動量などによって決定される。ただし、設備全体として運用操作面および費用の上からも利用しやすい施設とするためには、乾燥設備だけではなく、調製設備の能力とコスト、また、必要作業者の人数など総合的に検討する必要がある。

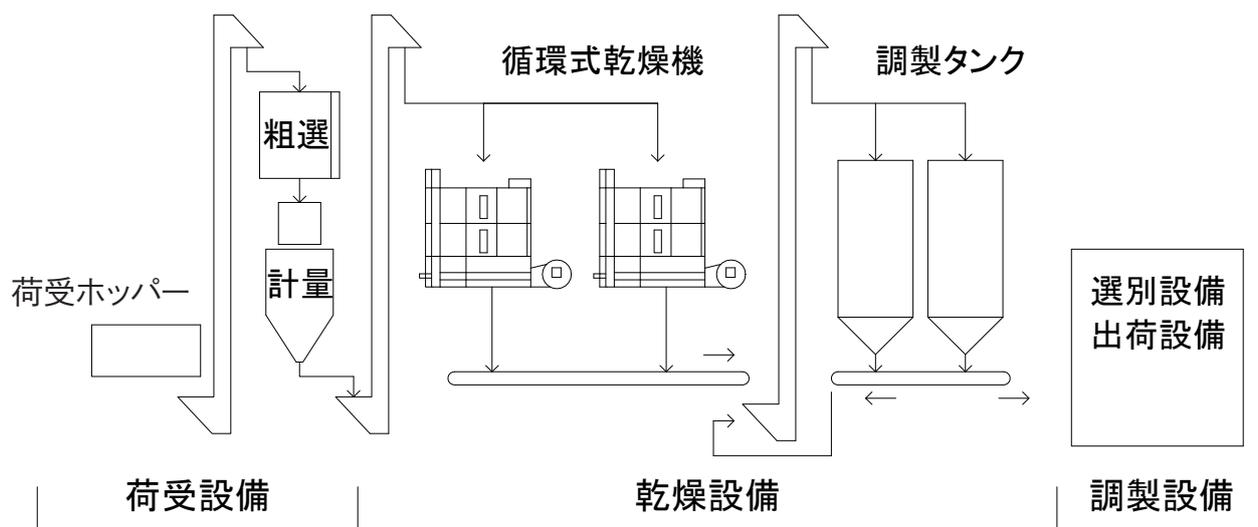
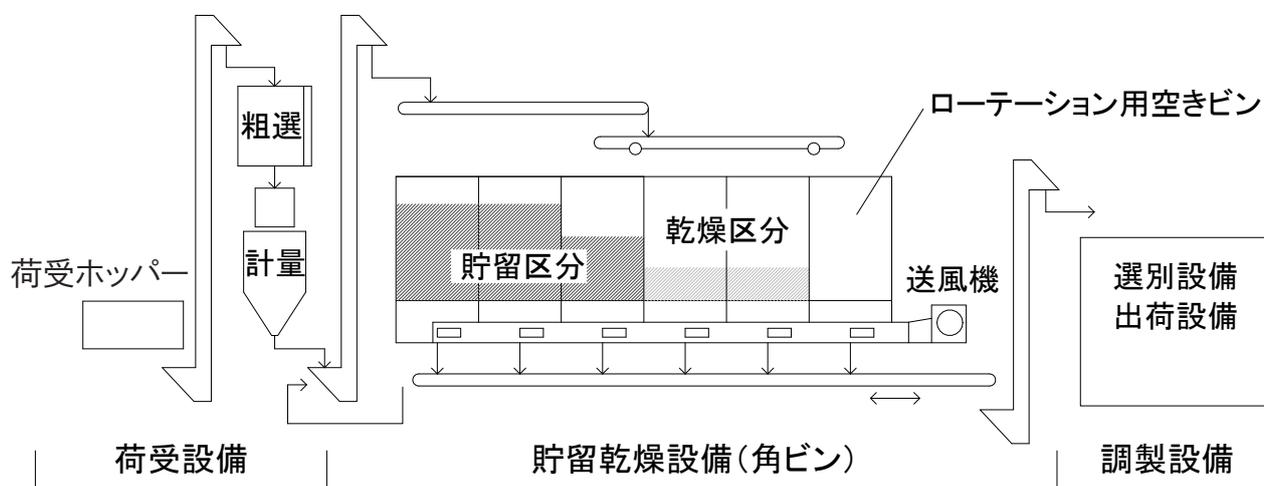


図 1-3-1 循環式乾燥設備フローシート



注記 本図はシンプルな例。実施時は規模等により異なる。

図 1-3-2 貯留乾燥設備 (角ビン) フローシート

4. 荷受設備

1) 搬入形態と容器

施設への搬入形態は、生産規模や収穫機等の諸条件により 30kg 程度の袋詰め、1t 程度のフレコンあるいはハードコンテナによる搬入が予想される。荷受けが混雑している場合は、荷受け待ちの間に小袋からコンテナに移し替えることも行われる。大規模な場合は、トラックばら積み搬入もある。30kg 袋は農家の個別調達もあるがフレコンやハードコンテナは乾燥施設運営側の貸し出しとなることが多い。ハードコンテナの例を写真 1-4-1。写真 1-4-2 に示すタイプはメッシュ籠の内側にシートを取り付けた簡単な物で、回転フォークリフトで傾けて荷下ろしする。これは価格が安い。写真 1-4-1 に示すタイプはフォークリフトで荷受けホッパーの上に運びレバー操作で底を開いて落とす。これらのコンテナは送風機を取り付けて通風することができるようになっている。大豆の収穫は晩秋から初冬が多く、季節的には荷受けの待ち時間で変質する可能性は低いと思われる。しかし、荷受け変動対応として原料大豆の一時貯留に利用するなど、大豆子実が高水分にもかかわらず、何らかの理由で乾燥までの待ち時間が長い場合は通風が必要になることもある。その他、収穫した穀物運搬用の入れ物については、様々なものが農業資材メーカーから発売されており、大豆での利用も検討できる。なお、ハードコンテナ、メッシュコンテナとも折たた

んで保管できる。トラックばら積みの荷下ろしは、油圧リフトや電動ウインチでトラックを傾斜させる方法がある。ダンプトラックを利用できれば作業性は良い。

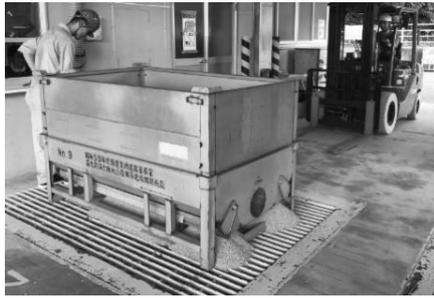


写真 1-4-1 ハードコンテナの荷受の様子



写真 1-4-2 メッシュコンテナの荷受の様子

2) 荷受ホッパーの形状と配置

荷受ホッパーは、原料を施設に受け入れる入り口である。形状は通常逆四角錐で、格子状の面を荷受場の床面と同一、あるいは夾雑物などの混入防止のために床面よりやや上げて設置し、下部はピット内におさめられる。荷受けした原料は、通常、高所にある後工程の機械投入口まで昇降機で持ち上げられることが多い。その昇降機と荷受けホッパーとの接続は図 1-4-1 に示すように、(a) の直接続と (b) の設備配置やホッパー数等の都合で間にコンベアを介在させる方法がある。(c) はピット施工を少なくできるサークルフィーダー内蔵の浅型荷受けホッパーである。

(1) 各方式の特徴

(a) は、リターン方式の荷受け場に用いられる。リターン方式とは、原料大豆を運ぶトラックがバックをして荷受ホッパーに近寄り荷を下ろすものである。このタイプは、通常は 1 荷受系列 1～2 ホッパーであり、(b) に比べてピット工事も少ないことから設備費用が安い。小規模な施設はこのタイプを選択することが多い。しかし、荷受系列が多い大規模施設にも採用されることもある。

(b) は、主に通り抜け方式荷受け場に用いられる。通り抜け方式とは、原料を運ぶトラックが前進のまま荷受ホッパーの上を通り抜けて停止し、荷受ホッパーに荷下ろしするものである。バックの必要が無いのでトラックの運転が楽であり、効率的に荷下ろしできる。さらに効率を上げるため、1 荷受系列に 2 ホッパー設置し、交互に荷下ろしできるようにする場合もある。しかし、ピット工事費用が高むほか、ホッパーの上をトラックが通るため丈夫に作る必要があり高価になり易い。また、通り抜ける際にタイヤに付いた泥や石がホッパー内に混入する恐れがある。大型の設備によく採用される。

(c) は、(a) と同じリターン方式荷受け場に用いられるが、ピット工事の費用がさらに少ない低コスト方式である。この方式のホッパーはピットを浅くすることで工期を短縮しコストを抑えることを目的としたもので、ホッパー途中で平らな部分を作ることでホッパー高さを低くしてある。そのため、通常のホッパーのように自然流下では全ては排出できず、平らな部分に回転する羽根を取付けて排出する仕組みである。通常のホッパーと同様に最初は自然流下で排出口から排出するが、自然流下で排出できなくなったらセンサーで検知し羽根を回転し強制排出する。

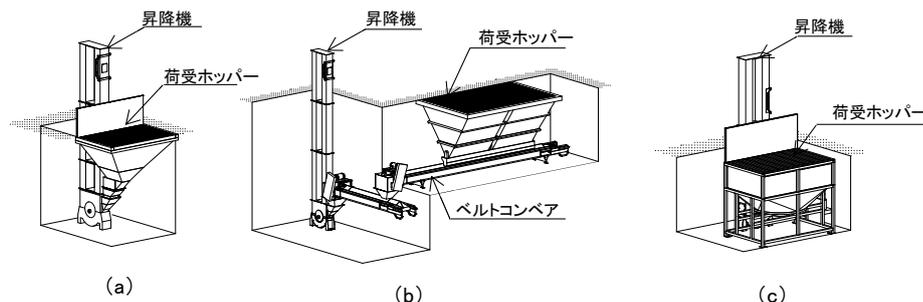


図 1-4-1 各種荷受けホッパー

(2) 荷受ホッパー格子上で夾雑物の除去

収穫作業の状況によっては、夾雑物の分離が不十分で莢や茎切れが大量に混入した原料が持ちこまれることがあり、荷受昇降機での詰まり（ブリッジなど）や粗選機の選別機能に障害が発生する等、施設の荷受工程での不具合につながることもある。このような場合には、荷受けホッパーの格子の上にさらに網を設け、夾雑物が設備へ混入するのを防ぐことも行われる。網上に残された夾雑物は人手で取り除くことになる。

(3) 荷受けホッパーの容量選定

荷受けホッパーの容量選定は、搬入される原料の一荷口の大きさによって決めることが多い。すなわち、通常、一荷口を収容できる容量を選定することで、搬入車両からの荷下ろしを短時間とすることができ、効率的な荷受けになるほか、搬入車両も次の作業に向かうことができる。一荷口の大きさより小さいホッパーの場合、続くコンベアや昇降機がホッパー内部を一定程度空けるまで荷下ろしを待つことになる。

3) 荷受計量器

(1) ホッパースケール

穀物乾燥設備で通常使用されている計量器の構造・外観例を図1-4-2に示す。外観を図1-4-3に示す。これらの計量器は、汎用性が高く米麦大豆に使用できることが多い。計量器の操作や制御は専用で作られたコンピュータで行われ、質量データのほかに内蔵されたセンサーで測定した水分データも記録できる。さらに、あらかじめ登録されたマスターデータより検索または選択することで原料持ち込み者の名前や情報が簡単に計量器に入力される。これらの情報と計測結果は荷受け伝票に印字されるほかオンライン事務処理あるいはオフライン処理用にUSBメモリに記録することなどが可能となっている。オートサンプラーで採取されたサンプルは自主検査と生産者への歩留まり見本提示などに用いられる。機種選定にあたっては、毎時荷受量に対応できるよう適切な能力を持つものにする。

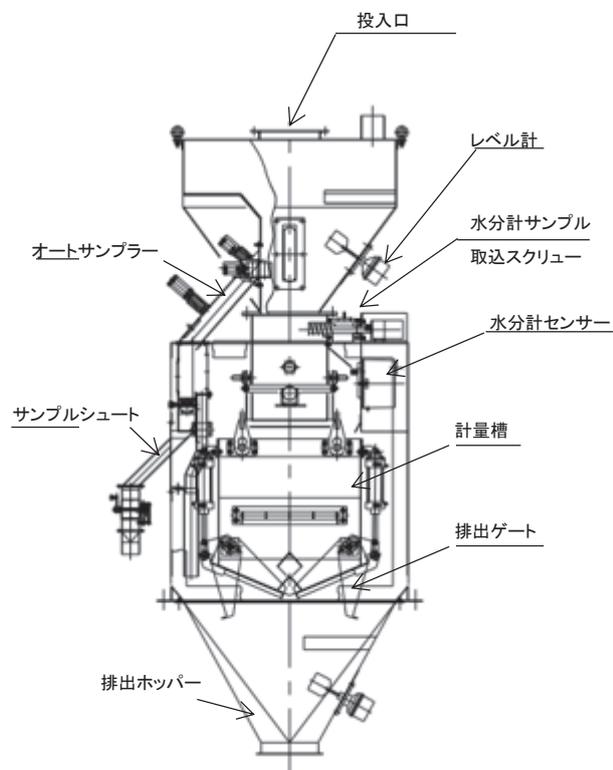


図1-4-2 ホッパースケール構造図

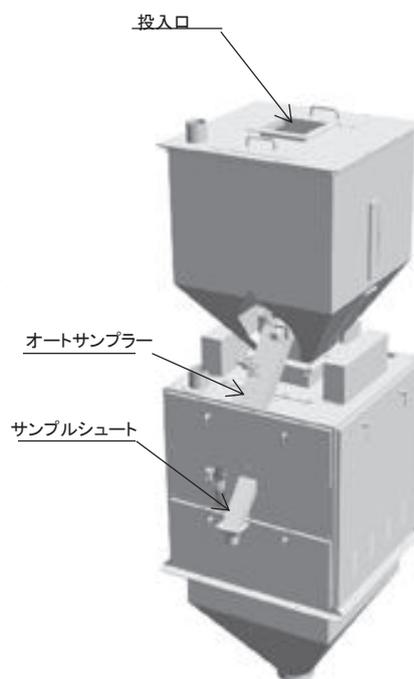


図1-4-3 ホッパースケール外観図

(2) ピットスケール

ピットスケールとは、荷受ホッパー自体を計量装置とし、ホッパーの質量を投入した原料ごとに計量できるようにしたもので、ホッパーに直接原料を投入する事により原料の質量のみを正確に計測するものである。選別前に計量するので原料大豆中の夾雑物を無視できない場合は問題になる。しかし、荷受ホッパーと計量器が複合化されて機器費用が下がるほか空間利用効率上がる等、低コスト設備と言える。ピットスケールを図 1-44 に示す。

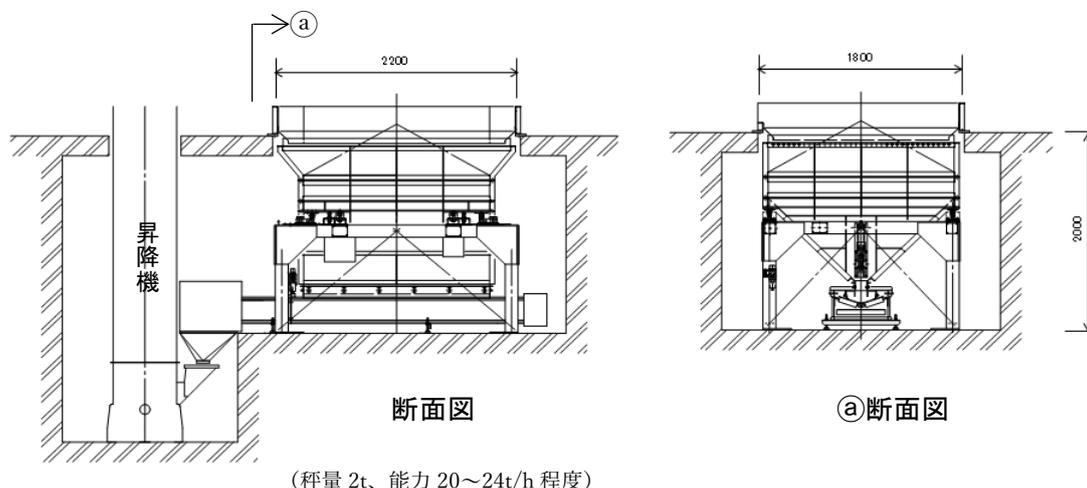


図 1-44 ピットスケール

4) 荷受能力・系列の決定について

荷受け設備の能力は、1日荷受量を荷受設備稼働時間で除した値に作業効率を加味して決定される。必要荷受能力を1系列で処理できない場合は2系列として、必要荷受能力を2分割した同一能力の設備を2系列設置する。

$$\text{必要荷受能力 } t/h = \frac{\{ (1 \text{日荷受量 } t) \div (\text{荷受設備の1日の稼働時間 } h) \}}{(\text{作業効率})}$$

5. 大豆用自主検査装置

大豆用自主検査装置は、大豆乾燥施設で個人毎に持ち込まれた大豆の個人毎の大粒・中粒・小粒の持ち分を決定するために使用する。装置は、屑取りを行う転選機、大きさを分ける選別機、重さを計測する計量機から構成され、個人毎にサンプルを装置に入れると自動的に大粒・中粒・小粒・屑粒・夾雑物を選別し、その割合をコンピュータが計算し、スムーズかつ高精度に持ち分の決定を行えるものである。機種には半自動型と全自動型があり、以下に解説する

1) 半自動型自主検査装置

半自動型とは、選別行程と計量行程の作業を別々に行うタイプの装置であるが、コンパクトな機構で粗選、転選、粒径選別の装置で構成される。少ない量でのサンプル検査でも大粒、中粒、小粒、屑粒、夾雑物を能率よく、高い精度で選別できる。機械能力は、サンプル1件最大 300g で 20 件/時間程度である。

2) 全自動型自主検査装置

全自動型とは、サンプルを投入すると計量機、転選機（傾斜型コンベア方式）、回転式選別機2台により、大粒、中粒、小粒、屑粒、夾雑物の選別作業が自動的に行われ、選別結果は付帯コンピュータに保存し、自動的に選別結

果のわかる伝票が発行される。サンプルシール機もつけることができるので、サンプルの管理・保存も容易である。機械能力は、サンプル1件最大300gで20～25件/時間程度である。

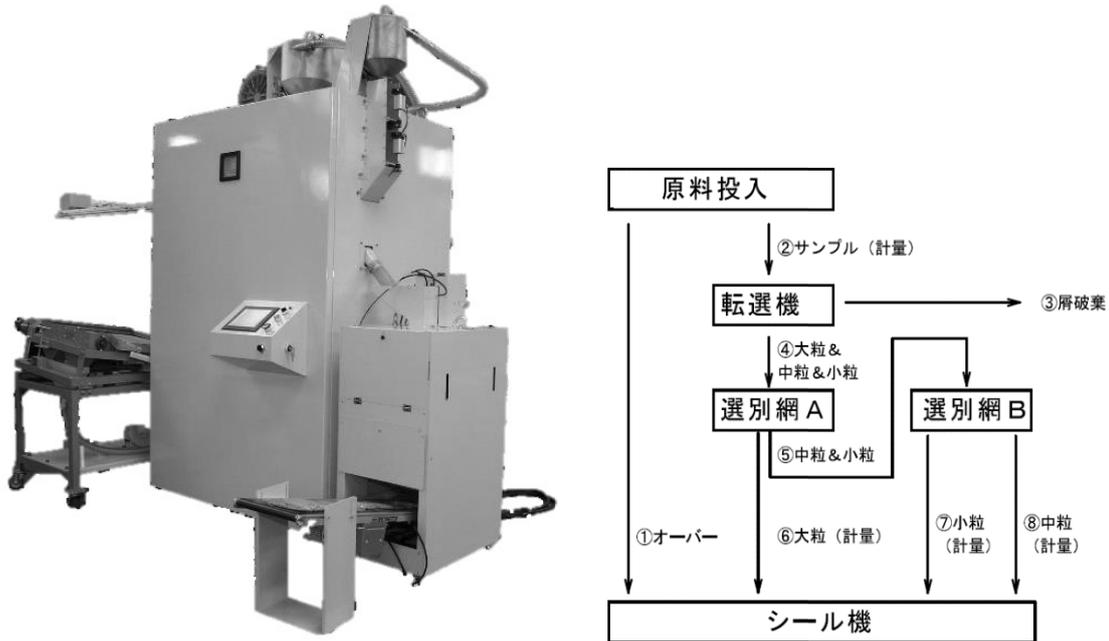


図 1-5-1 全自動型自主検査装置の外観および構成（提供：讚光工業株式会社）

6. 水分計

水分計はその後の乾燥工程や個人の持ち分決定に大きく関与する。水分計は定期的に点検を行い、その精度を維持するように努める必要がある。

1) 高周波容量式水分計

高周波容量式水分計は、穀粒の水分によって誘電率が変化するので、その変化を高周波容量の変化に置換して測定する水分計である。写真 1-6-1 は、大豆用高周波容量式水分計の例である。高周波容量式水分計は、非破壊で測定できるので、使いやすい反面、かさ密度により値が変わるので、測定する大豆の容量が一定になるように、付属の容器を用いて慎重に水分計内に試料を投入することが重要である。

2) 大豆用単粒水分計

単粒水分計は電気抵抗式水分計の一種で、試料水分の増加に従い、試料の電気抵抗が減少することを利用したものである。電気抵抗式水分計には、穀粒と電極間の接触抵抗値を安定させるために粉碎した試料を電極間に入れ一定圧力で加圧して測定するものと、平板やロールで電極間の試料を圧碎して直流抵抗値を測定するものがある。単粒水分計は、回転速度差を持つロール電極に試料を一粒ずつ送り込み、圧碎しながら電極にはさまれた穀粒の電気抵抗を測定する方式である。かつては、平均水分、各粒の水分、偏差、測定粒数、度数分布を出力できる大豆用単粒水分計としても市販されていたが、現在では関連機器へ組み込まれて利用されている。ホッパースケール内に組み込み、荷受計量と同時に測定できるものもある（写真 1-6-2）。

3) 荷受計量器への水分計の取付

荷受計量器に高周波容量式水分計や単粒水分計を取付けることで、計量と合わせて大豆の水分測定が可能となり、測定された水分データはデータ取量装置とオンライン化することで効率的な施設運用が可能となる。

4) 荷受け原料の水分分布

コンバイン収穫の普及に伴って、フレコンバッグやトラックにバラ積みされて、乾燥施設に一度に大量に搬入されるようになっている。荷受け後は、水分計により水分測定され、水分値に合わせて乾燥されるが、搬入される大豆の栽培や収穫時の条件などによって、水分値に大きなばらつきがでる場合がある。簡易水分計で21.1%表示されたものであっても、16.1%～27.5%まで分布する事例もある。場合によっては、機械乾燥による過乾燥が心配される状況のものもある。収穫前の立毛条件での水分測定が重要であり、さらに汚粒防止のためには茎水分にも留意し、適切なコンバイン収穫作業を実施することが重要である。



写真 1-6-1 高周波容量式水分計の外観（提供：株式会社ケツト科学研究所）

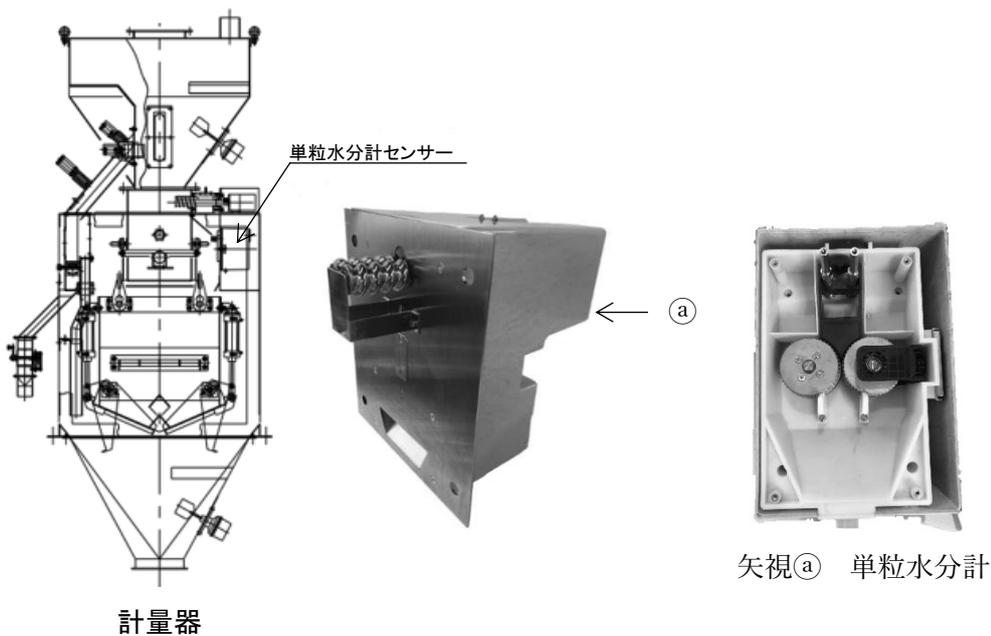


写真 1-6-2 単粒水分計センサー（提供：讃光工業株式会社）

7. 原料の一時貯留設備

1) 一時貯留設備の必要性

毎日の荷受量に変動があり、荷受量より乾燥調製出荷量が少ない場合は、未処理大豆原料が施設内に残ることになる。この場合は、生原料の一時貯留設備の設置を検討する。また、収穫を早く終了したいとか収穫適期が短いなどの理由で短時間に大量の原料が搬入される場合も生原料の一時貯留設備が必要になる。乾燥設備能力を入荷量に合わせることで原料受け入れ早期終了が可能であるが、通常、乾燥機設備の方が原料タンク設備より高価となるためタンクを導入することが多い。また、原料タンク付設により乾燥調製の作業量にムラが少なくなる。例えば、雨天で荷受がなくても原料タンクから引き出せば乾燥と調製作業ができる。ここまで、生原料の一時貯留について述べたが、一般的に一時貯留タンクは、各設備間の能力のアンバランス対応や各工程間を材料がスムーズに流れ設備の稼働効率を上げることに使用される。したがって、乾燥設備と選別設備の間や粒選別と色彩選別の間などにも付設されることがある。タンクは付設された工程によって、原料タンクや一時貯留タンク、調製タンクなどの呼び方となる。

2) 一時貯留設備の選定

後に述べる角ビンや丸ビンは原料の一時貯留と乾燥機能を合わせ持つので採用例が多い。これらの方式のほかに建物内部あるいは屋外にタンクを設置することでも対応可能である。タンクの形状は四角型、丸型いずれも製作されている。図1-7-1に小型の屋外平床丸型ビンの例を示す。未乾燥の生原料の一時貯留を実施する場合に配慮すべき事項として、貯留期間中の原料の変質防止と貯留容器内の結露防止がある。すなわち、原料が高水分の場合は変質防止のための通風装置が必要である。また、容器内部への結露が懸念される場合は、屋根及び壁体を断熱構造にするなどの配慮が必要になる。

3) 一時貯留設備の容量

生原料の一時貯留設備の容量は、荷受期間中の荷受量と乾燥量との差を累積計算してその最大量を収容できるように決定する。乾燥済み材料の貯留タンク容量は、稼働期間中の乾燥工程と調製工程の処理量差の累積量を計算して決定する。ただし、累積量は言わば各設備の処理能力間のアンバランス量であるから、設備能力の選定により変化する。設備コスト低減や作業効率の向上をねらいとして各設備能力の選定を行い、最適の貯留タンク容量を決定する。

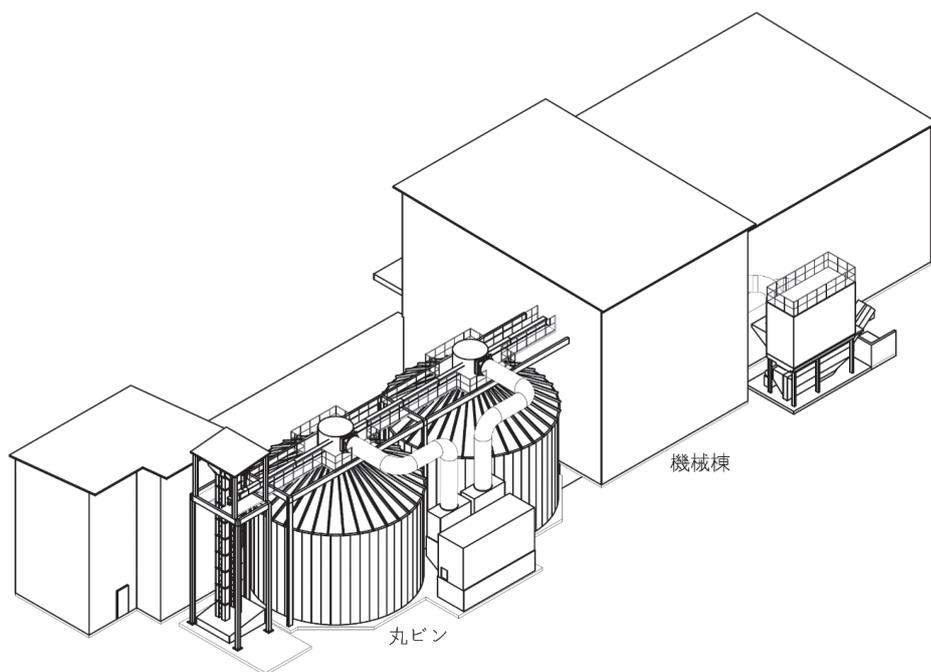


図 1-7-1 小型屋外平床丸型ビン

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 (3.3m²) タイプと 2 坪 (6.6m²) タイプがある。

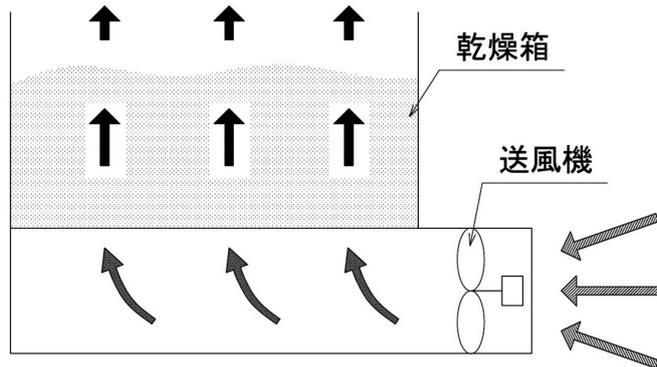


図 1-8-1 平型静置乾燥概念図

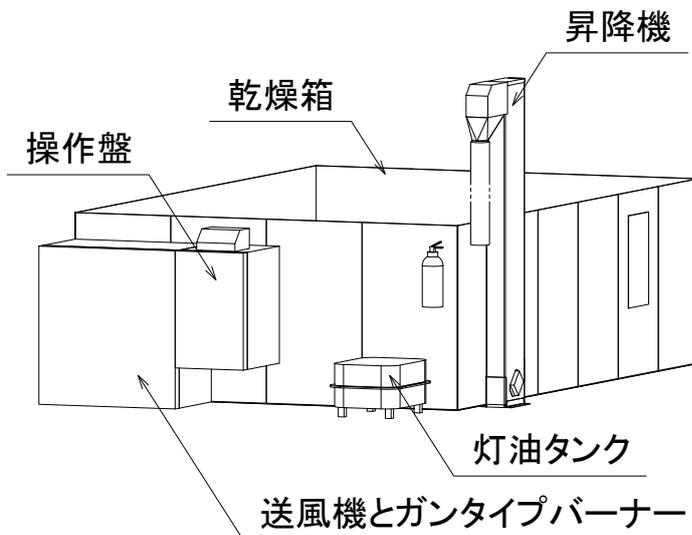


図 1-8-2 平型静置乾燥機の例

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、角ビンを目指す、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、容器構造上では強制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

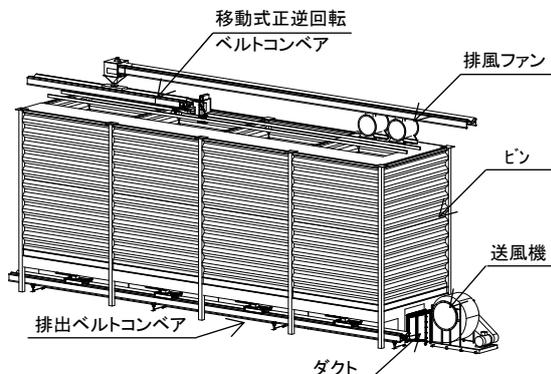


図 1-8-3 角ビン全体図

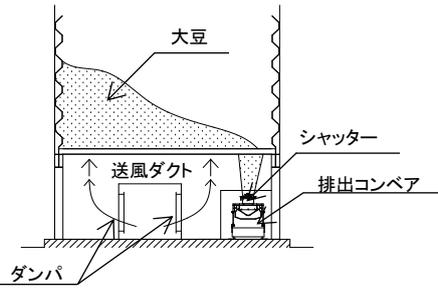


図 1-8-4 角ビン側面図

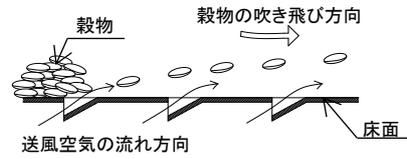


図 1-8-5 エアスイープ概念図

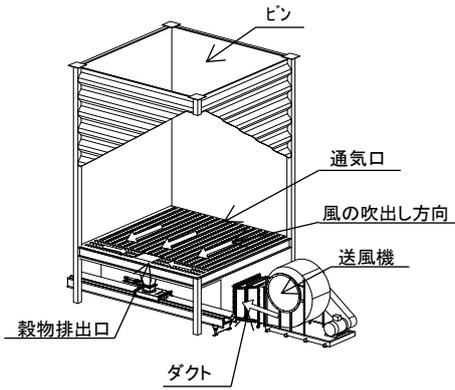


図 1-8-6 角ビン エアスイープ床



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)

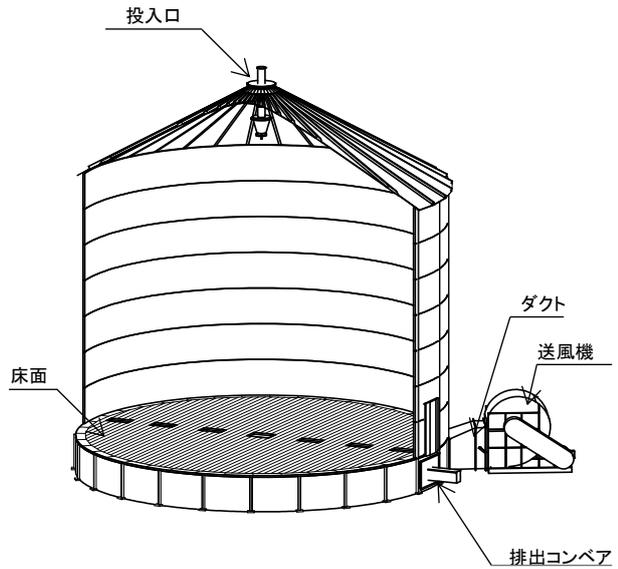


図 1-8-7 丸ビン基本構造図

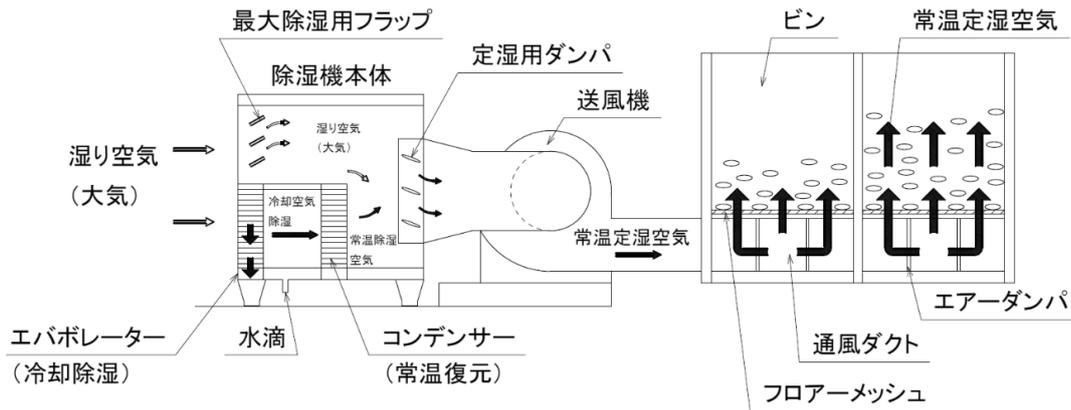


図 1-8-8 除湿機概念図

(2) ドライストア (角ビン、丸ビン) の特徴

- ① 汎用性が高いので小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、多数の角ビン原料貯留用、乾燥用、貯蔵用などに使い分けことができ、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事ができる。)
- 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。通気量を増や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 m³/s

ρ_a ：空気の密度 kg/m³

s：空気の比熱 kJ/kg・℃

Δt ：上昇温度 ℃

q：灯油の発熱量 kJ/kg

例として、

$$Q=20\text{m}^3/\text{sec} \quad \rho_a=1.2\text{kg}/\text{m}^3 \quad s=1.046\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{C} \quad \Delta t=10\text{C} \quad q=46000\text{kJ}/\text{kg}$$

とすると、

$$W=19.6\text{kg}/\text{h}$$

となる。すなわち、風量毎秒 20m³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良い関係を良く調べ、問題を起こさないようにしなければならない。

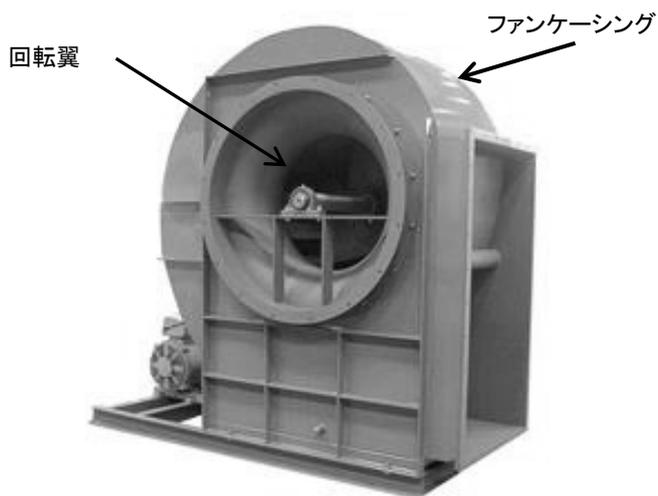


写真 1-8-3 リミットロードファン

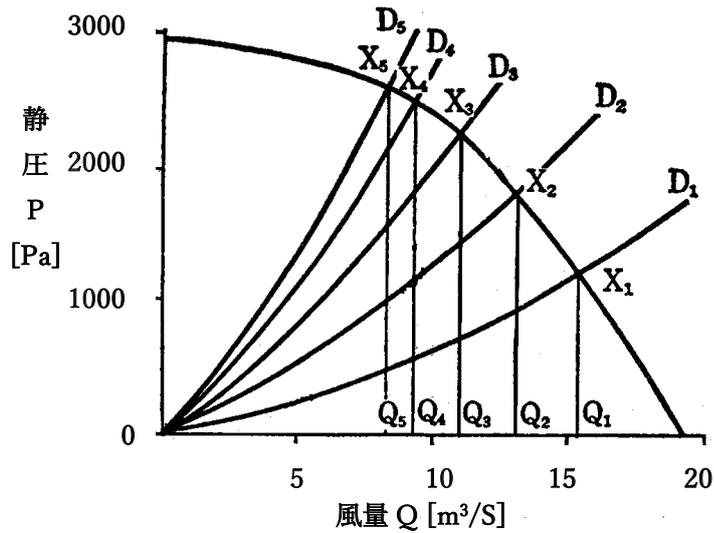


図 1-8-9 発生風量を求める図
 (「DS の手引き (JA 全農)」 p71 より抜粋、一部改変)

$$Q1 \neq Q2 \neq Q3 \neq Q4 \neq Q5$$

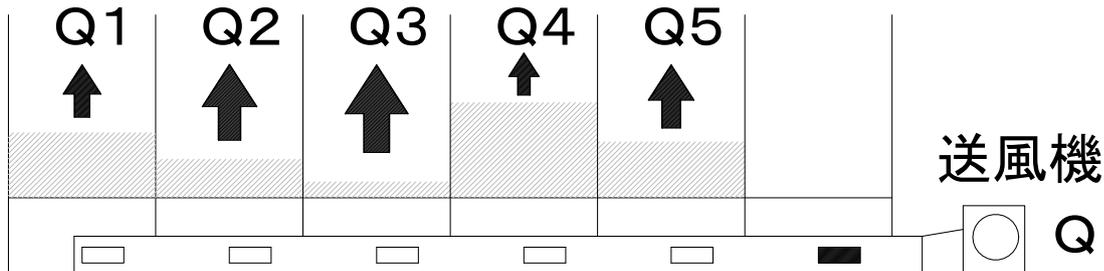


図 1-8-10 堆積高さが不均一なときの通風量概念

$$Q1 = Q2 = Q3 = Q4 = Q5$$

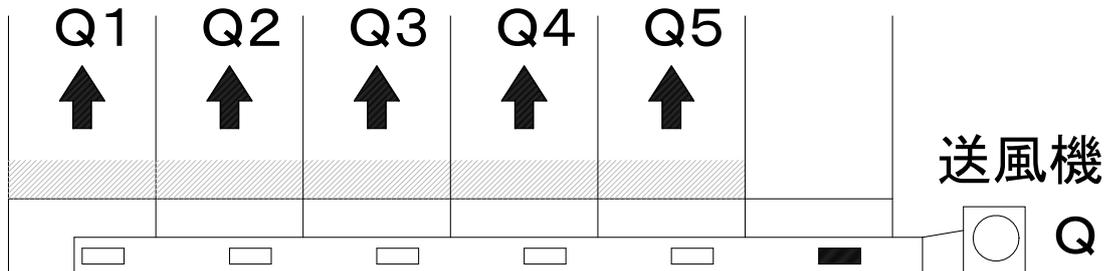


図 1-8-11 堆積高さが均一な時の通風量概念

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。通風空気のと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。

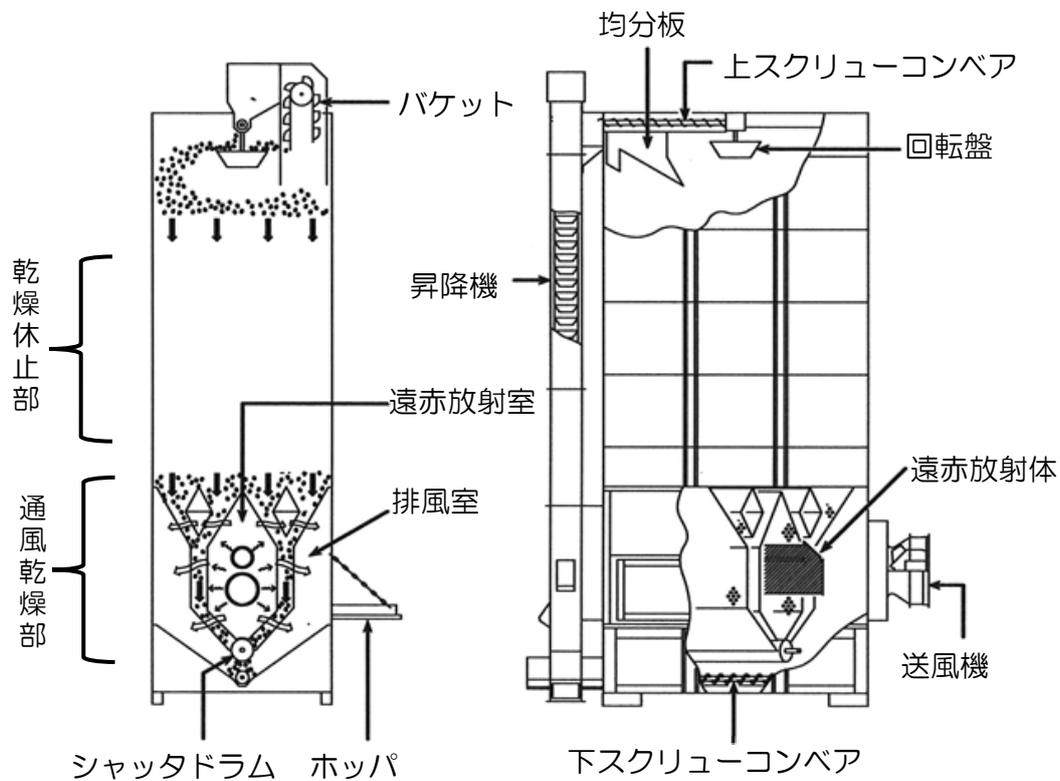


図 1-8-12 循環式乾燥機の基本構造



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幅広い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。

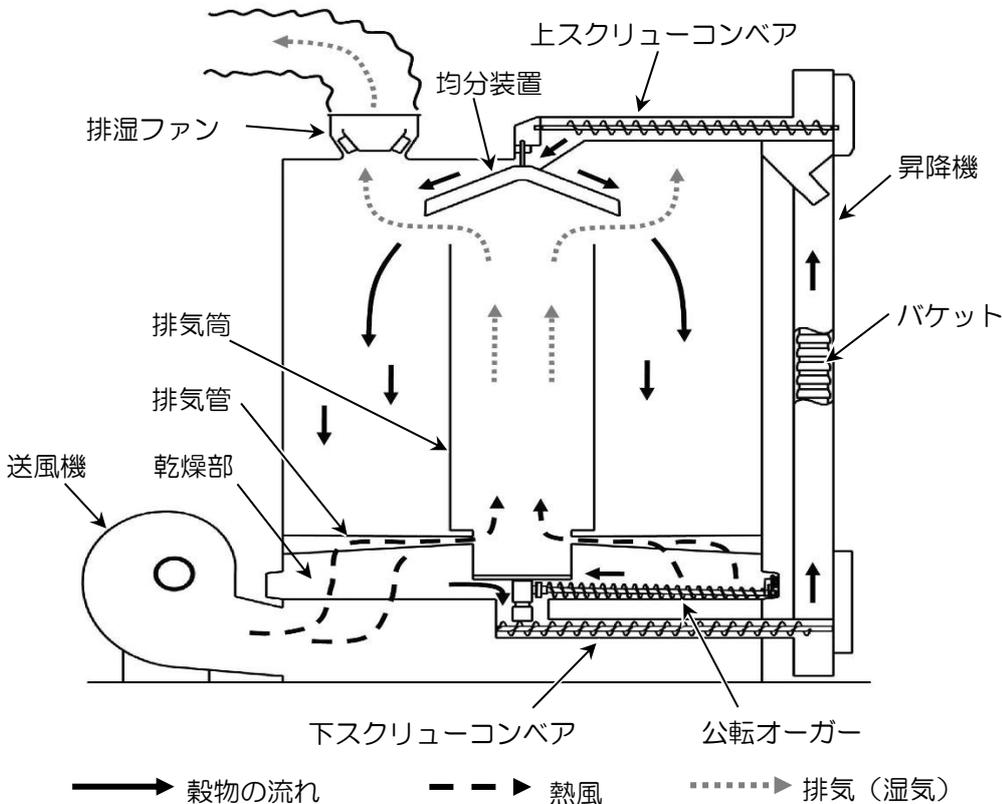


図 1-8-13 丸形循環式乾燥機の構造



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る。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 (粳、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。

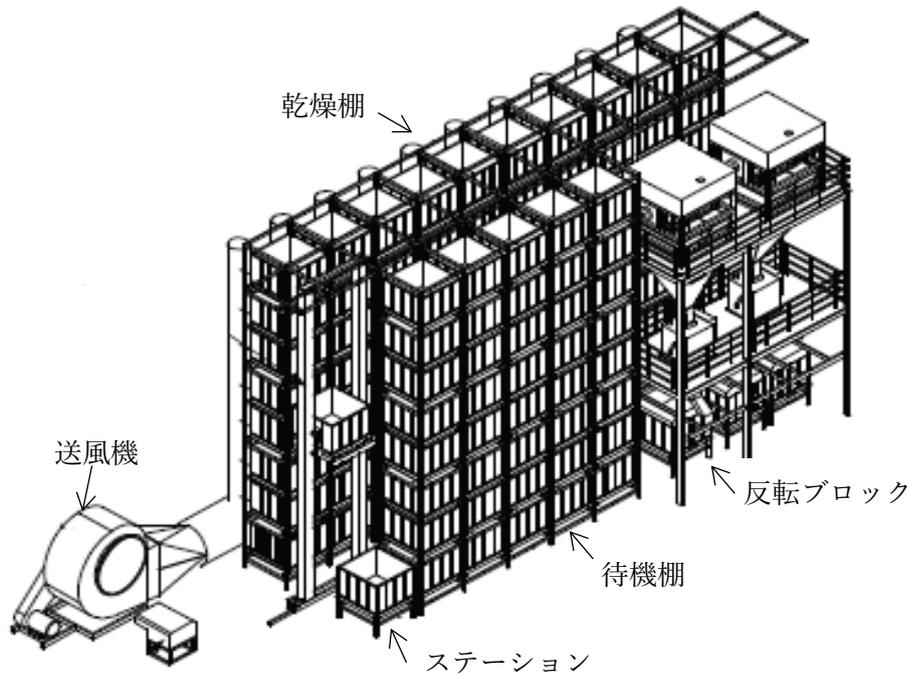


図 1-8-14 ラック式乾燥設備

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ー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、 $0.05 \sim 0.20 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{t}$ 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 $0.25 \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{t}$ 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 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 $0.2 \sim 0.3 \text{ m/s}$ 程度の風速が確保できれば、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 V_m' 、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 D_w は

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

通風量 Q は、 $Q = S \cdot u$ 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。

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

$$\varepsilon = 0.38 \sim 0.48$$

具体的な例として、 $u' = 0.2 \text{ m/s}$ 、 $h = 1 \text{ m}$ 、 $\varepsilon = 0.44$ 、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

$$0.2 \times 0.44 \times \{0.771 + 0.956 \cdot 18 / (100 - 18)\} / (1 - 0.44) = 0.154 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot \text{t} \quad (5)$$

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

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

となるので、子実周囲の風速は

$$u' = u / \varepsilon = 0.324 \text{ m/s}$$

となり、 $u' > 0.2 \text{ m/s}$ 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 V_m' は

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

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数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 a_p 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_{air} 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 S_p 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 Re 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 $40 < Re < 200$ 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 $C_D = a Re^{-b}$ 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 $60 \sim 200$ 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 $\phi_c D_p$ 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_{p0} 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。 $a_p = 700, 750, 850 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $\varepsilon = 0.38 \sim 0.50$ ($a_p = 700$) と変え、 $\rho_m = 1.20 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $\mu = 2.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 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、体積比表面積 a_p を、(7) 式により空隙率 ε を求めると

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

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

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

$$P = 130 \times 1.2 = 156 \text{ Pa}$$

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、スクリュウ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。

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

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。

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

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

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

と表すと、乾燥速度 $dM/d\theta = -2\% \text{ d.b./h}$ 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。

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

Me は平衡水分の式として以下の Chen-Clayton の式を用いる。

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

大豆の場合、係数の値は次の値を用いる。

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

$$f3 = 1.0 \text{ (動的平衡水分のための補正量)}$$

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

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

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 °C、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 °C 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 °C 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と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 (t_{in} , h_{in}) (t_{out} , h_{out})、 $\Delta H = h_{out} - h_{in}$ とすると入口と出口での空気中の水分の物質収支から、

$$G \Delta H = - \rho'_d \cdot \Delta z \frac{\partial \bar{M}}{\partial \theta} \quad (11)$$

の関係が成り立つ。ただし G は質量速度 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 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、 ΔH を求めると層全体の平均の乾燥速度 $\partial \bar{M} / \partial \theta$ は

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial \theta} = - \frac{G \Delta H}{\rho'_d \cdot \Delta z} \quad (12)$$

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

$$\Delta H = (H_e - H_{in}) \{ 1 - \exp(-Khc \cdot a \cdot \Delta z / G) \} \quad (13)$$

従って

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

と計算される。ただし、 H_e は (t_{in} , \bar{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

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

$$Cf = 13.4 Re^{-0.683} \quad (16)$$

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 $Sc \approx 0.62$ (25 °C) である。 a は単位見かけ体積当たりの材料表面積で

$a = (1 - \varepsilon) \cdot a_p$ 、 $\rho'_d = 1 / V'_m = (1 - \varepsilon) / V_m$ 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 $i = Ch \cdot t + (rw + Cw \cdot t) H$ 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 ΔH に通風量を乗じて、 $G \cdot \Delta H$ 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 °C 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 $C_D = 17.4 R_e^{-0.683} \cong \frac{24}{R_e} + \frac{5.49}{\sqrt{R_e}}$ (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 $\rho_{d0}/\rho_w \cong 1.30$

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

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

大豆の乾物比見かけ体積 V'_m と空隙率 ϵ に関しては

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

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

大豆の乾物真体積 V_m は

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

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 °C	20 °C	30 °C
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 °C	20 °C	30 °C
	1.9689×10^{-5}	2.0235×10^{-5}	2.0773×10^{-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/m³)

Φ_c ; 大豆の形状係数(0.98 ~ 0.99)

D_p ; 大豆の球相当直径(m) ($D_p \cong (6V_p/\pi)^{-1/3}$ 、 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术、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术、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

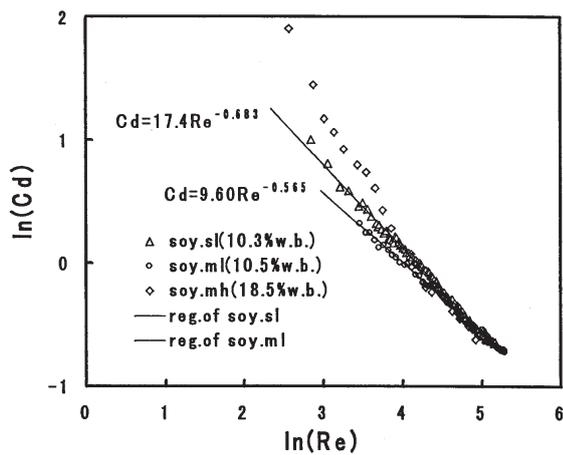


図 1-9-1 対数変換によるレイノルズ数と抗力係数の関係

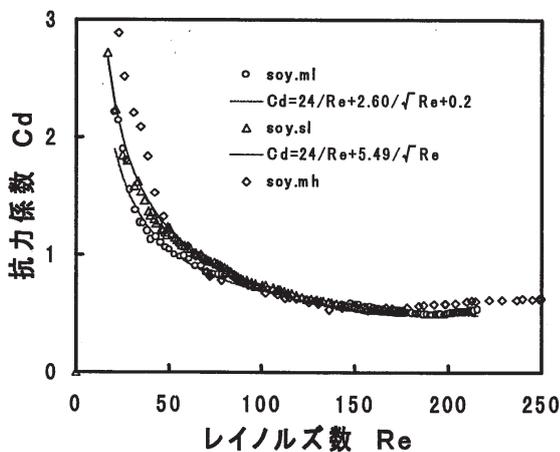
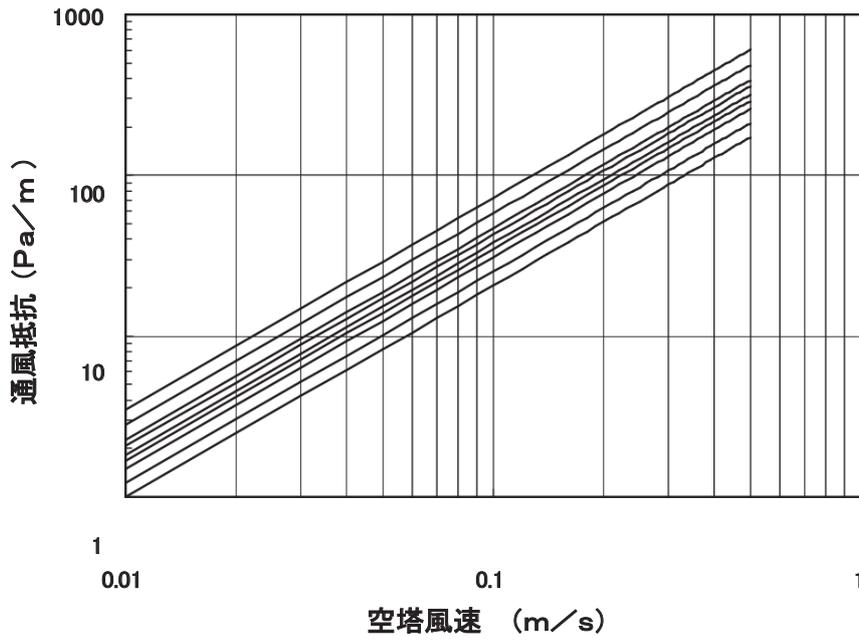


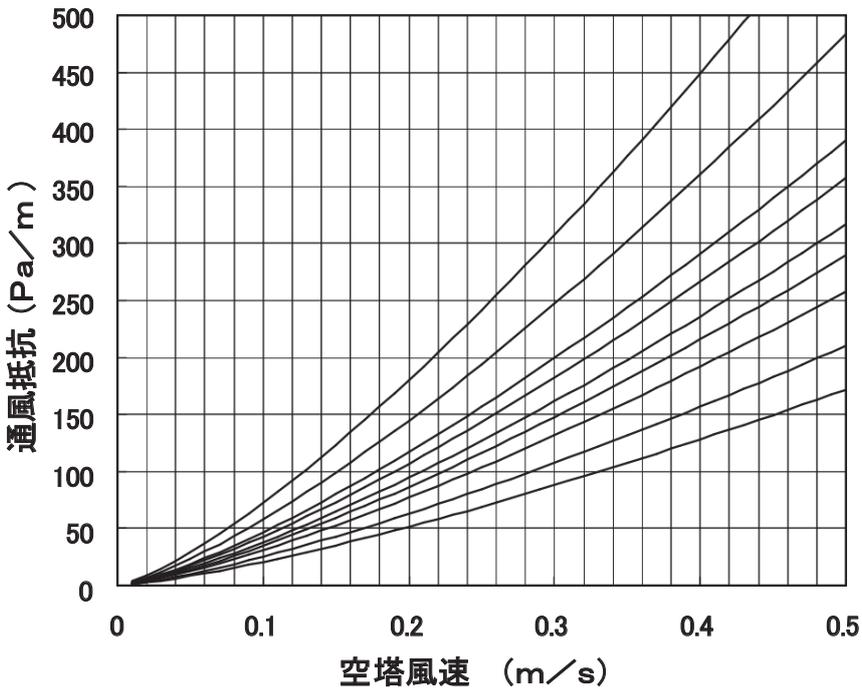
図 1-9-2 レイノルズ数と抗力係数の関係



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

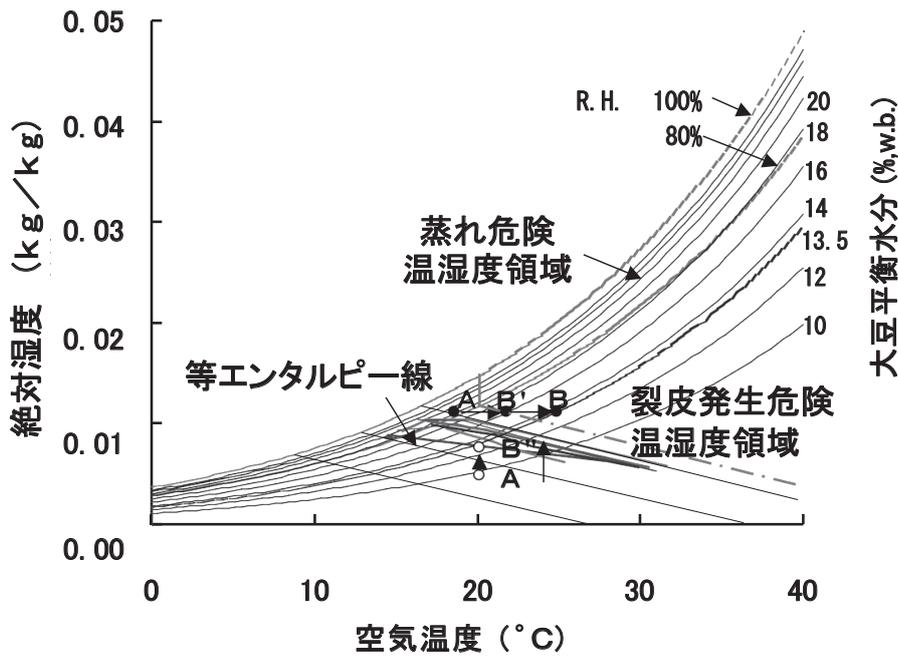
図 1-9-3 対数軸上での大豆の通風抵抗



各グラフの条件
(上から順に以下の通り)

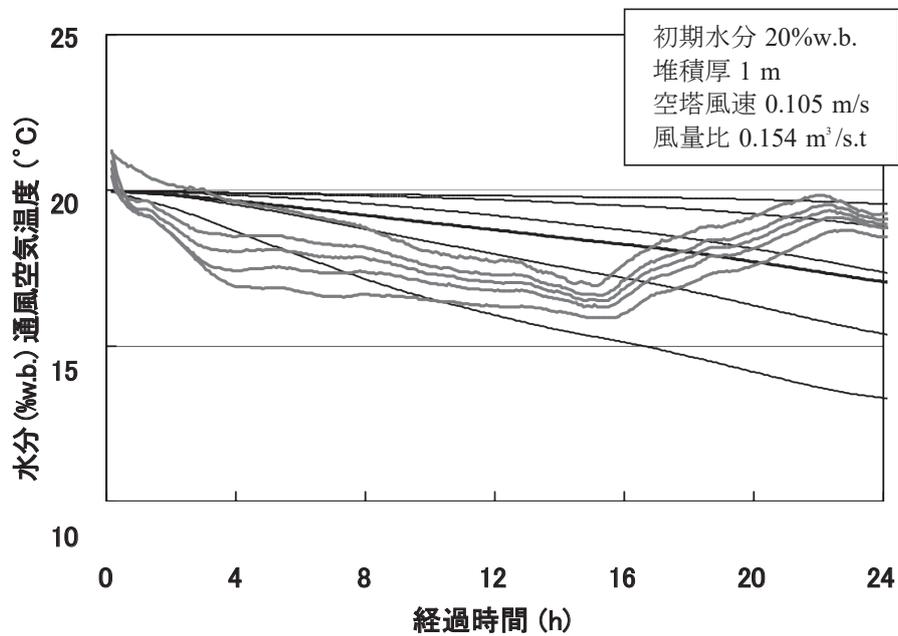
空隙率 ε	大豆の体積 比表面積 a_p (m^2/m^3)
0.38	700
0.40	700
0.42	700
0.46	850
0.44	700
0.46	750
0.46	700
0.48	700
0.50	700

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のためもと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く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とし気味に乾燥する。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回ゆっくり確実にを行う。
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。

II 調製施設

1. 調製の目的

調製の目的は、収穫された大豆子実を市場性のある製品にすることである。図 2-1-1 に基本的な大豆調製のフローを示す。

広義には収穫後の脱粒、荷受け、粗選、乾燥、精選、品質向上、粒径選、検査、計量、包装、保管の全てを含むが、狭義では、粗選、精選、品質向上、粒径選となる。つまり、大豆子実以外のもの、あるいは製品とならない大豆子実を除去する作業で、具体的には、風力選別機による風力選、比重選別機による比重選、形状選別機による形状選、粒径選別機による粒径選、色彩選別機による色彩選である。

良好な調整を行うためには、各調製装置の原理と技術的な基礎と性能、また、組合わせ方、運転能力、さらに大豆子実に関する知識を持つことが重要で、加工者の技量によっては、多少欠点のある収穫物を荷受けした際でも十分な調製が行われ、良好な製品とすることができる。

次にそれぞれの選別機の原理、種類、特徴、使用方法等を記す。

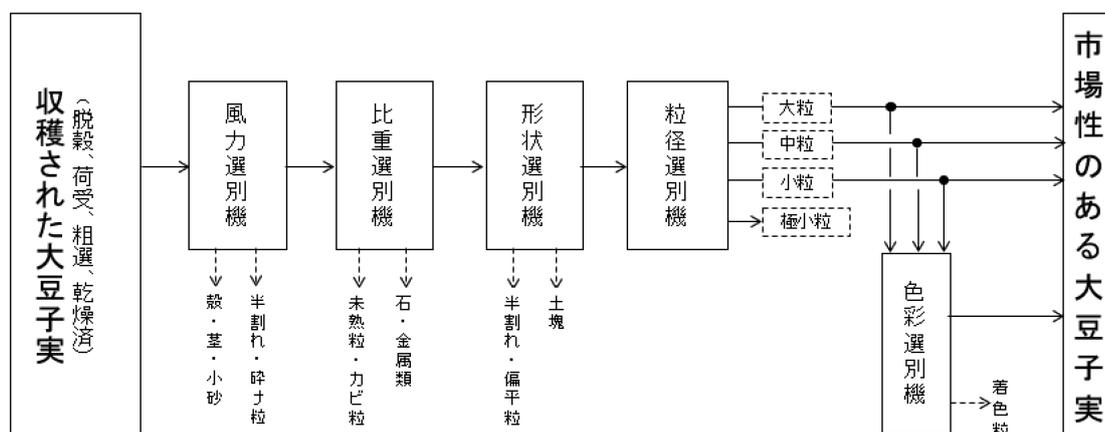


図 2-1-1 大豆調製のフロー

2. 風力選別機 (粗選機)

1) 原理

全ての選別機は、目的とする製品になり得るものと、除去しなければならないものとの間の性質 (特に物理的) の違いを、選別に利用するように設計されている。風力選別機では、選別物それぞれの固有の終末速度 (終速度、終端速度、終末沈降速度) の違いを効果的に利用している。ある物体が空气中を自由落下するとき、重力加速度による落下速度の加速が空気抵抗とつり合い、一定の速度である「終末速度」に達する。その速度と同じ風速で下方から吹き上げれば、その物体は空气中に浮遊するので「浮遊速度」ともいえる。したがって以後は「浮遊速度」ということにする。図 2-2-1 のように、垂直な筒の下方から送風機で風を送り物体を上方から投入し、その風速より浮遊速度が大きいものは下方へ、小さいものは上方へと移動することで分離ができる。この送風機の送る風速を、回転数あるいはダンパーで調整することにより、浮遊速度が違う 2 種類以上のものの選別ができる。浮遊速度は実験でも求められるが、流体力学の数式により求められる。その数式の中の係数には、形状、比重、容積、表面状態 (ざらつき)、内部形状 (空洞)、前面状態、全体寸法が要因として含まれる。例えば、同じ形状・容積でも、比重が違えば浮遊速度は違うのである。また、逆に同じ比重のものでも、その形状が違えば浮遊速度は違う。大豆子実

の浮遊速度は、整粒で11～12m/sec、半割では6～7m/secであるので、風速10m/secで同比重でも分離選別できる。

2) 風力選別機の種類と特徴

風力選別機には、吹上げ式・吸引式・密閉式の3種類あり、それぞれのおおまかな機構及び特徴は次のとおりである。

(1) 吹上げ式風力選別機

風力選別機の原理に一番近く下部に吹上げ送風機があり、筒（以後はコラムという）内はプラス圧になっていて風の流れは下方から上方である。そのコラムの途中から、できるだけ垂直方向の運動エネルギーがゼロになるように選別するものを投入する。

図2-2-2のように、送風機は風の脈流が少ない多翼扇（シロッコファン）で両吸込型である。選別物の投入は振動フィーダーで水平方向にされ、重い製品は中網上を滑り排出され、軽いものは拡散室で風と分離され落下捕集される。

図2-2-3は特に乾燥後の粗選機として考えられた機種で、製品の排出は図2-2-2とほぼ同じであるが、軽量物は拡散室で分離され捕集されるが、それぞれの持つ浮遊速度の違いを効果的に利用し、有価物（売れるもの）と無価物（捨てるもの）に選別している。

図2-2-4は、荷受け時の粗選機として考えられた機種で、風力選別機の大型化と重量物の粒選機構があり、重くて大きい夾雑物の除去も行っている。大豆荷受け用としては最適である。

(2) 吸引式風力選別機

図2-2-5のように、サイクロン上部に吸上げ排風機があり、下部はロッカーバルブでエアロックされている。サイクロンとつながっているコラムはマイナス圧になり、風の流れは下方から上方である。選別物の投入方法は、吹上げ式と同様であるが、重量物の排出はコラム下部から落下し中網などはない。軽量物は、サイクロンで風と分離されロッカーバルブを介して排出される。同じコラム断面積で同じ風速を設定する場合は、吹上げ式風力選別機の2倍以上の動力が必要となる。

これは、コラム内への風の吸引は下部以外からもあり、またサイクロン内の圧力損失が大きいからである。軽量物をサイクロン捕集するので埃がでない。

(3) 密閉式風力選別機

図2-2-6のように送風機の吸引と排気がつながっていてその途中がコラムとなり、そこに投入された選別物のうち重量物はそのまま落下し、軽量物は拡散室で風と分離しロッカーバルブ又はスクリーコンベアーを介して排出される。製品はロッカーバルブ又はウエイトダンパーを介して排出される。

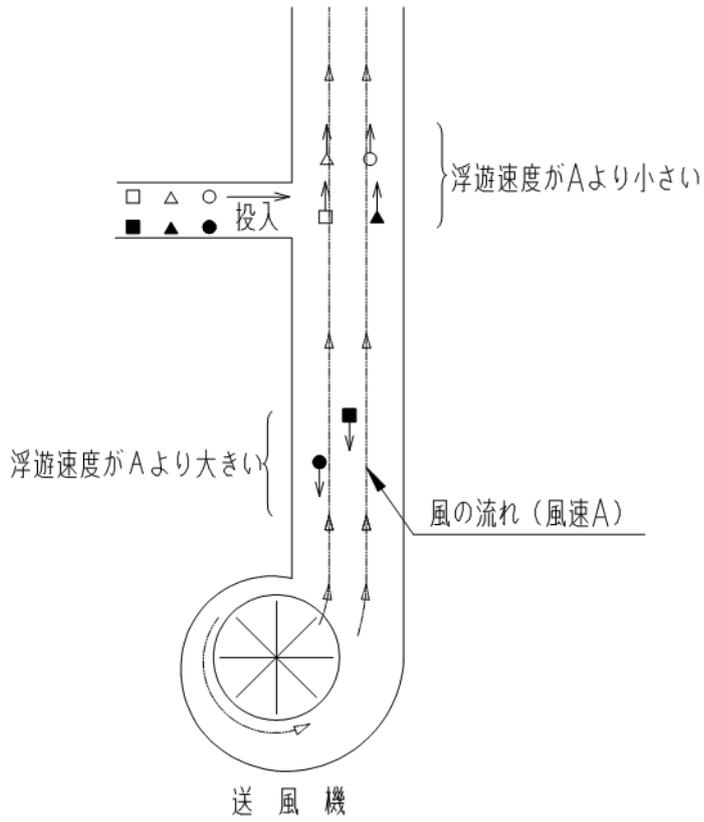


図 2-2-1 風力選別原理

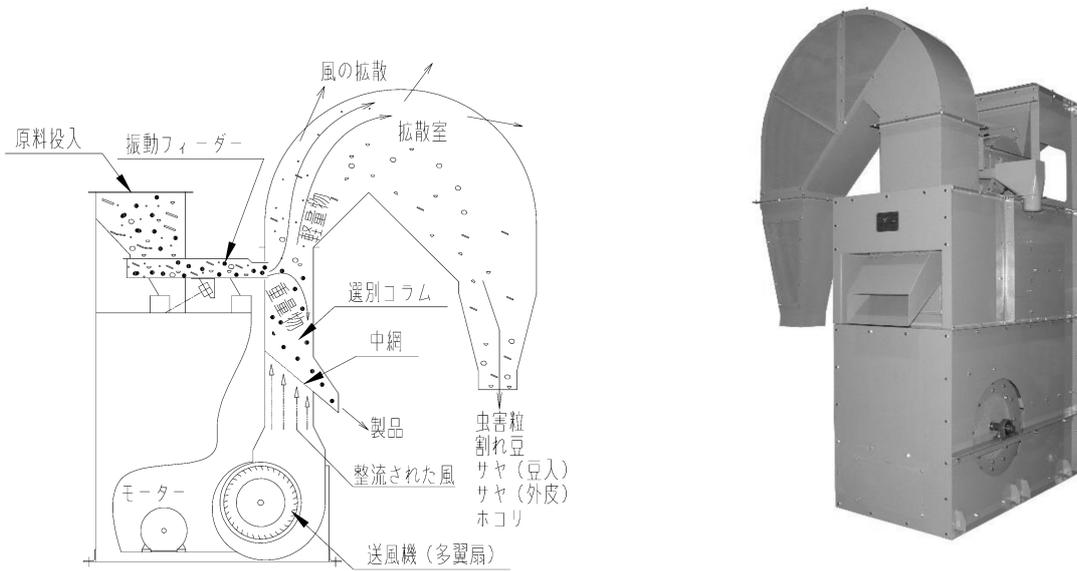


図 2-2-2 吹上式風力選別機 (提供：株式会社原島電機工業)

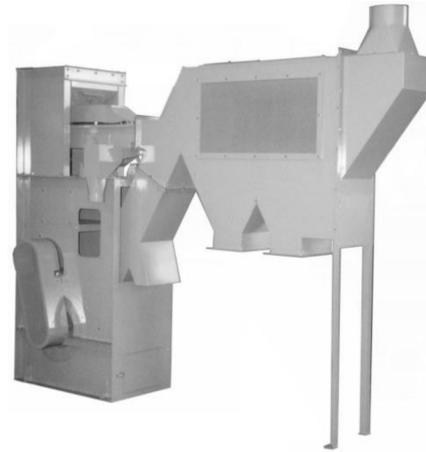
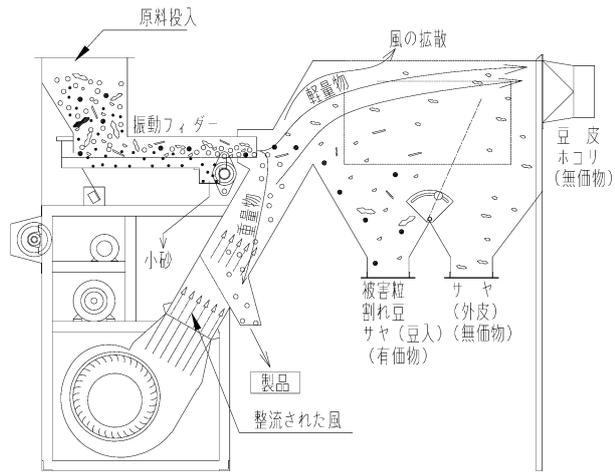


図 2-2-3 乾燥大豆用選別機 (提供：株式会社原島電機工業)

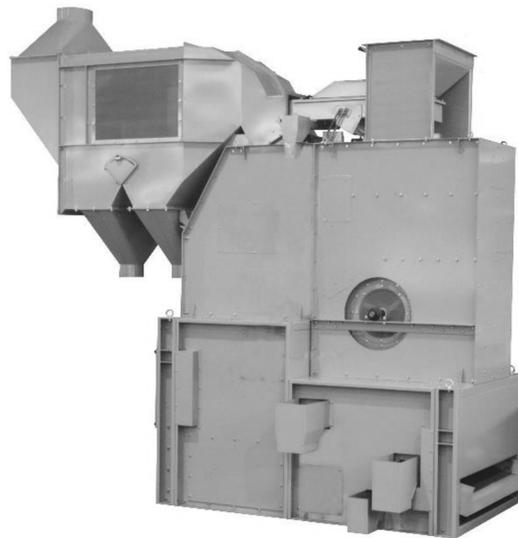
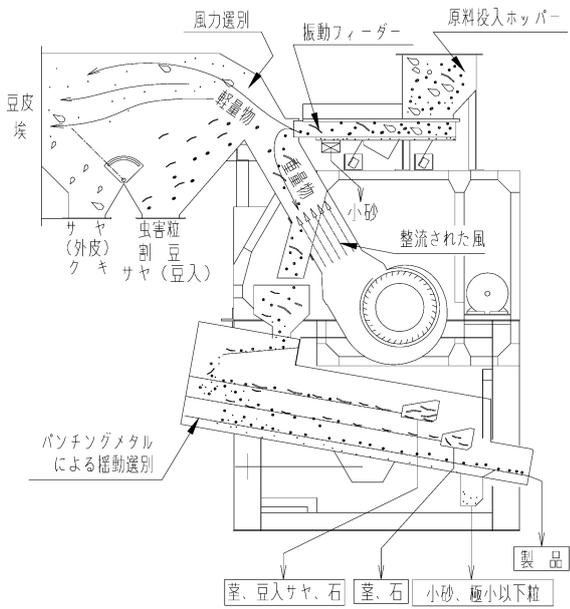


図 2-2-4 荷受用粗選機 (提供：株式会社原島電機工業)

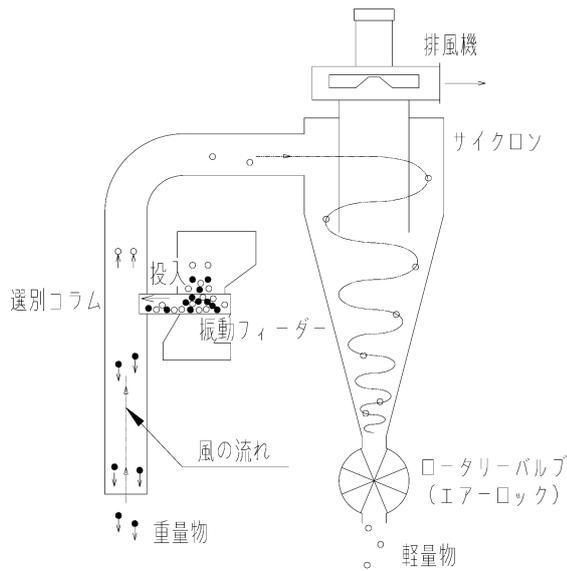


図 2-2-5 吸引型風力選別機（提供：株式会社原島電機工業）

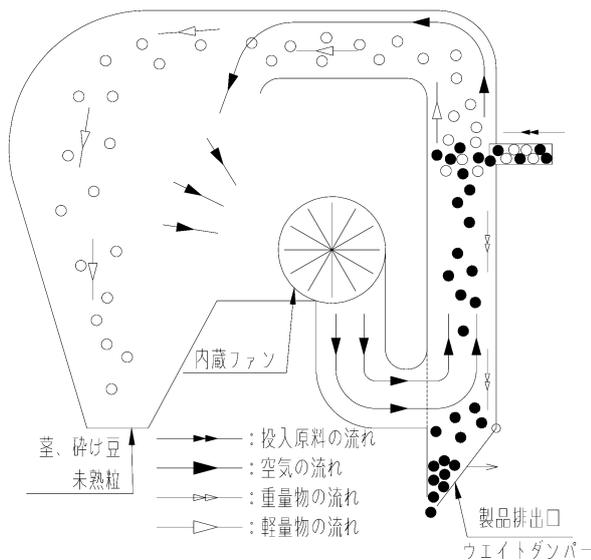


図 2-2-6 密閉式風力選別機（提供：株式会社原島電機工業）

3. 比重選別機

1) 原理

比重選別機とは、比重液の代わりに風力を利用する機械である。一般に比重選別は、種子粉等の塩水選でよく行われているので理解できるであろう。比重液（塩水）の比重は水に対する食塩の量で定め、その比重より大きい比重のよい種子は沈み小さい比重の未熟粒は浮かぶ。沈んだ種子粉のみを苗床に播種している。

しかし、この比重選別は水につけてしまうので播種直前にしか出来ず大量に行って保管しておくことができない。そこで乾式比重選別機が考えられた。

風力選別機の原理（II-2）でも説明したように、それぞれの物体には固有の「浮遊速度」があるので、たとえば

あるスクリーン（網のようなもの）上に下方から、多種類の物体の浮遊速度の中間の風速を設定すれば、浮遊速度が大きい方（重い方）は下方に、小さい方（軽い方）が上方に層を形成する。このことを図 2-3-1 で説明する。

図 2-3-1 で示すように、下方に送風機があり、ダンパー又は風車の回転数で風速が設定でき、整流格子をとおして特殊なスクリーンを張ったデッキ上に風がでる機構を作る。A では、ダンパーが全閉又は風車の回転が遅い為、スクリーン上に風の流れがないので、選別物体は混在のままである。B は、ダンパーの開度又は風車の回転数が適正に設定され「浮遊速度」に近い最適な風速設定をしたので、選別物体は下方から重い順に積層する。C はダンパーを開き過ぎ又は風車の回転数が速すぎる為、風速が速すぎて積層が乱れかつ軽いものは飛散してしまう。

すなわち、B のように適切な風速を設定することで比重差による選別ができる。ただし、風力選別機の原理（II-2）でも説明したが「浮遊速度」の決定係数（要因）は数多くあり、比重のみで定まらないので、大豆子実の比重選別機は見掛け比重の選別となる。そのことを図 2-3-2 の典型的なモデルで説明する。

A は大きさが均一で比重が異なる 2 種類のを、図 2-3-2 の機構に投入した場合に下方に重い比重のもの、上方に軽い比重のものが積層する。B は比重は同じだが大きさが不均一なもの場合は、下方に大きいもの、上方に小さいものが比重差ではなく、大小の差で積層してしまう。C は大きさが不均一で比重が大小の 2 種類のものの場合で、下方から比重が大で形が大きいもの、比重の大小と大きさの順の混在、比重が小で小さいものに積層する。

このように比重差とももの大小による重さとが選別の効果として作用するので、真比重の選別とはならない。もちろん風のあたる面積の大小等も影響する。しかし実際の選別作業において、そのことを理解して比重選別機を操作調整すれば、比重選別能力を十分に発揮できる。

例えば、前処理として粒度選別を行って、粒度分布の範囲を狭めてから比重選別を行うとか、風力選別で表面積の大きくて薄い軽いものを除去してから行うとよいのである。

2) 比重選別機の種類と特徴

(1) 左右 2 方向比重選別機（石取機型）

図 2-3-3 のように、図 2-3-2 の機構を発展させ、デッキを傾斜させかつ振動させる。このことにより積層した下層部の重比重物は振動により、傾斜上方（右）に移動し、上層部の軽比重物は風の流れが摩擦を少なくするので、傾斜下方（左）へ移動する。

この層を乱さないように排出させれば連続的な比重選別ができる。このことが、実際の比重選別機の原型で、一番シンプルな機種である。この機種は主として、穀物中の石、金属等の重比重物の除去に使用され、もちろんその逆に、穀物中の殻付子実や、風選で除去できない比較的重い茎等の軽比重物の除去にも使用される。

(2) 三角型比重選別機（前後、左右方向選別）

図 2-3-4 のように、デッキの形状が三角形に近い。選別物は後方左から投入し、各作用域が重なり合わず拡散しながら積層、選別されていく。従って、より比重差の近接したものの選別が可能であり、中間に排出されるものを投入口に戻すことにより、2 種類に選別する。

世界的に見て、一番広く使用されている機種で、メーカーも多い。特にヨーロッパ、アメリカ等で多用されている。

麦の調製に使用され、デッキ面積に比較し処理能力が大きい。しかし我が国では、特別な用途の機械を除いて、鉱工業用に使用されることが多い。農業（種子を含めて）には、次に説明するより選別精度の高い機種が圧倒的に多い。

(3) 長方形型比重選別機（前後、左右方向繰り返し選別）

図 2-3-5 のように、三角形型比重選別機の三角の頂点を切断し、重比重物の広がって行く方向を堰き止めた形となっている。また前後方向に延長して選別物のデッキ上の滞留時間を長くさせ、積層して下部に沈んだものが右へ、上部に浮かんだものが左へ、の動作を連続して繰り返させてより精度良く選別させる機構となっている。すなわち三角型の発展型なのである。

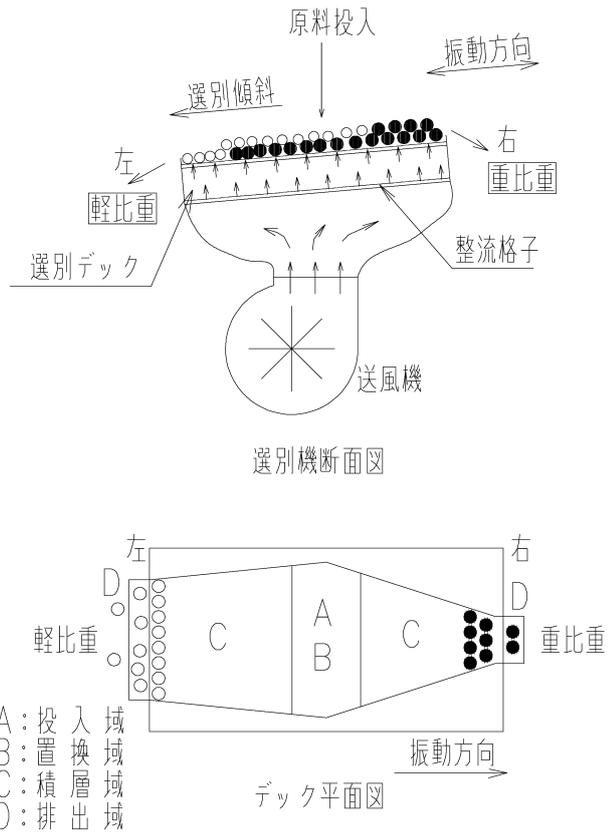
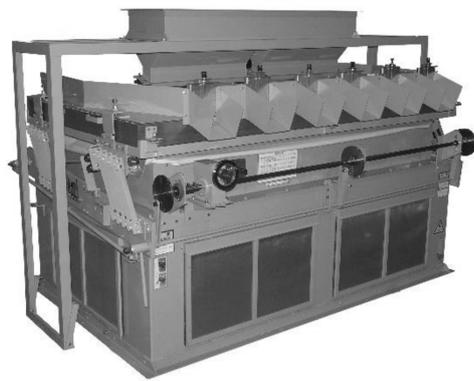


図 2-3-3 左右2方向比重選別機 (提供：株式会社原島電機工業)

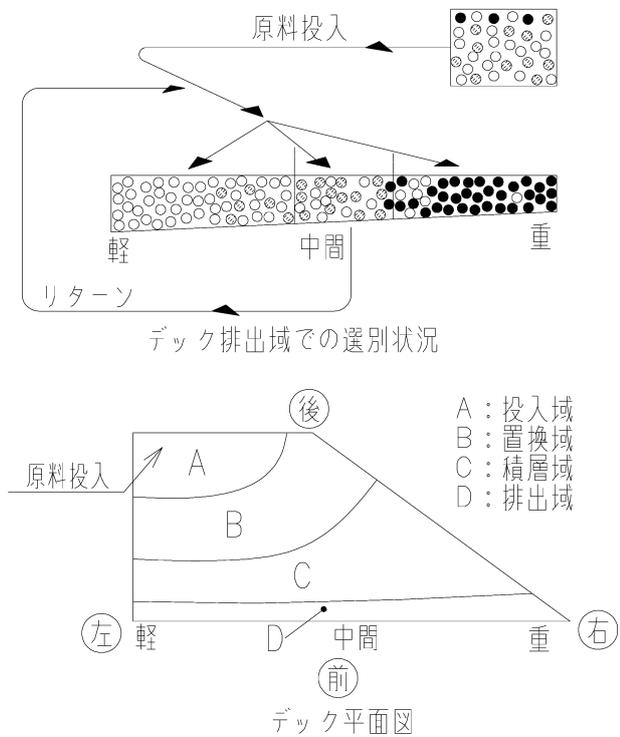
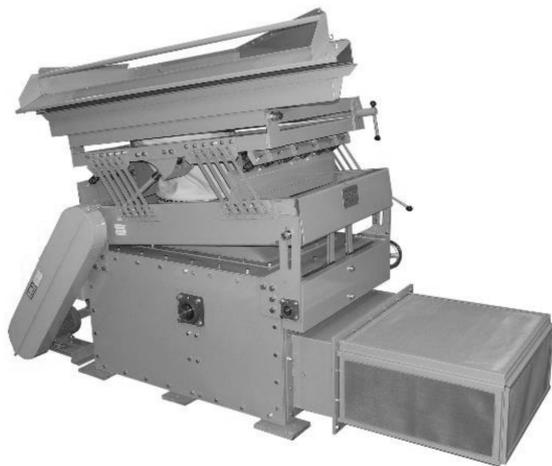


図 2-3-4 三角形型比重選別機 (提供：株式会社原島電機工業)

転がらずベルトコンベアに搬送されて上方に行く。傾斜角度とベルト速度を調整することで、任意に形状を選別できる。

しかし、投入位置周辺では、ベルトに搬送されてゆく転がりの悪いものと、転がりの良いものの進行方向が正反対のためにぶつかり合うものが出てくる。このため、整粒が、半割れ粒に転がりを止められて傾斜上方（左）に搬送されたり、逆に半割れ粒が転がりの良い整粒にはじき飛ばされて傾斜下方（右）に行ったりする。このぶつかり合う確率を低くするためには、投入量を少なくせざるを得ない。初期の転選機はこの方式であったが、現在はその欠点を改良した次に説明する機種が使用されている。

②前後・左右方向選別方式

図 2-43 のように、右後方から大豆子実を投入し、後方から前方への傾斜により整粒を転がし、かつ右から左方向へ回転しているベルトで転がりの悪い粒を搬送する。転がりの中位のものは、前方へ転がりながら左方へ搬送されるので中間粒として取り出せる。整粒、中間粒、不整粒と扇状に広がって分離されるので、ぶつかり合いが少なく良好な選別ができ、かつ処理能力も大きい。

一段で処理能力が不足の場合は、図 2-44 のように多段に積み重ねて増大し、必要処理能力を確保する（多段転選機）。また中間粒は最下段に再投入し、ベルト角度、ベルト速度の設定を変更して、再選別し歩留まりを向上させることもできる。

新施設は、この方式が主流を占めている。

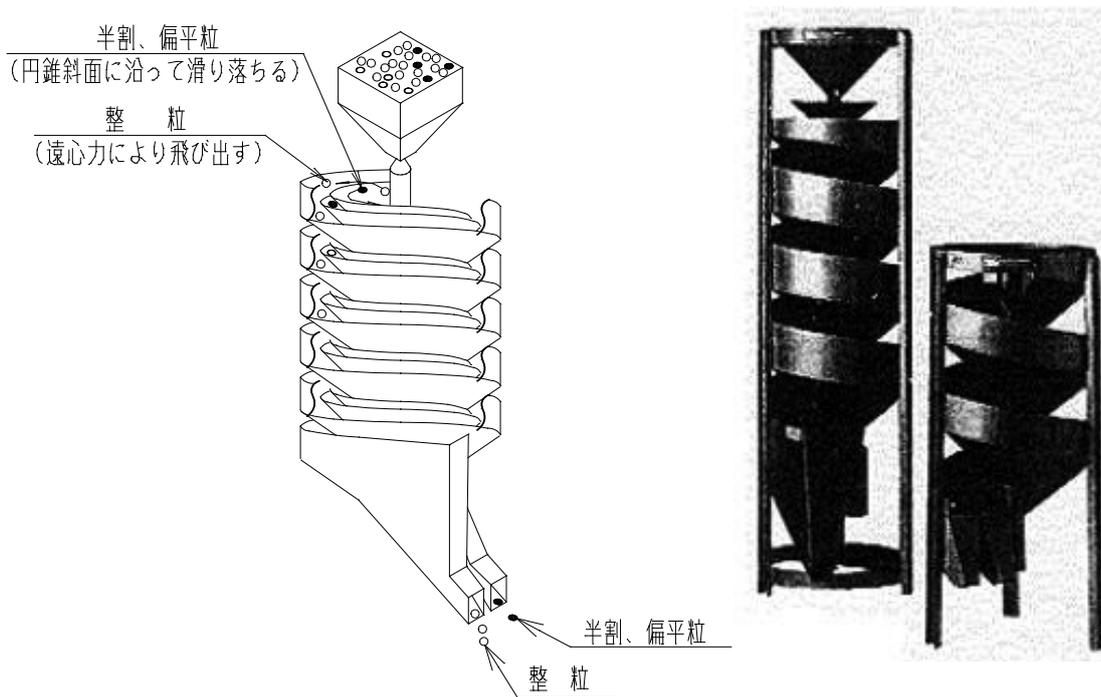


図 2-41 スパイラルシュート方式（提供：株式会社原島電機工業）

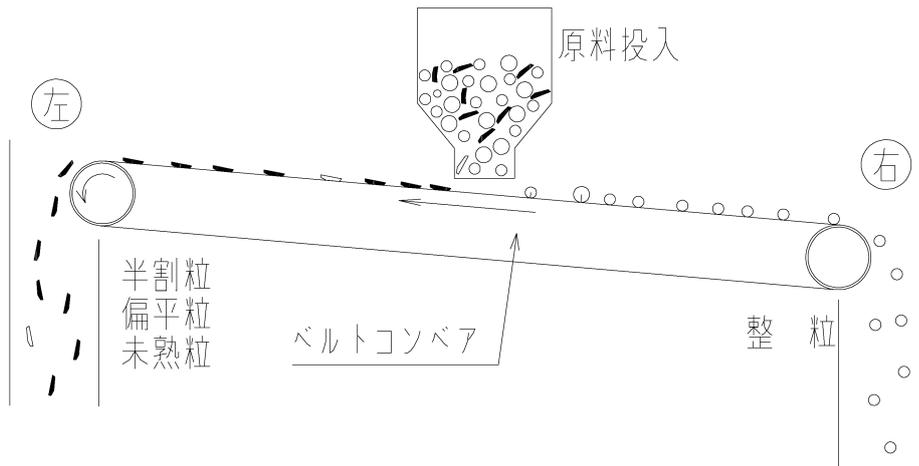


図 2-4-2 左右二方向選別方式（提供：株式会社原島電機工業）

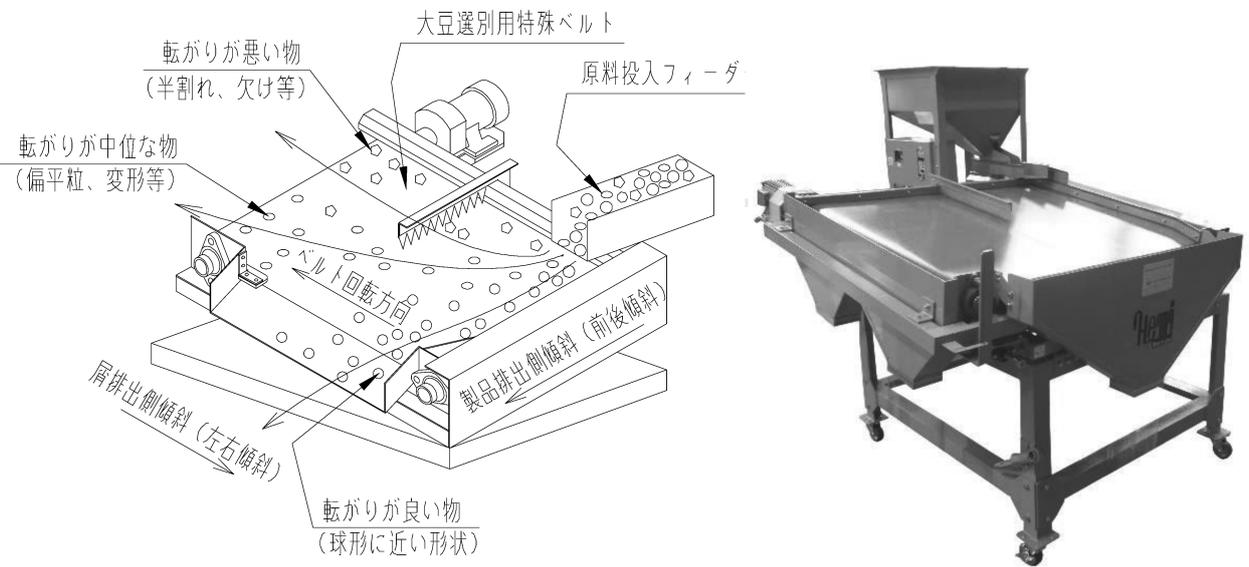


図 2-4-3 前後・左右方向選別方式（提供：株式会社原島電機工業）

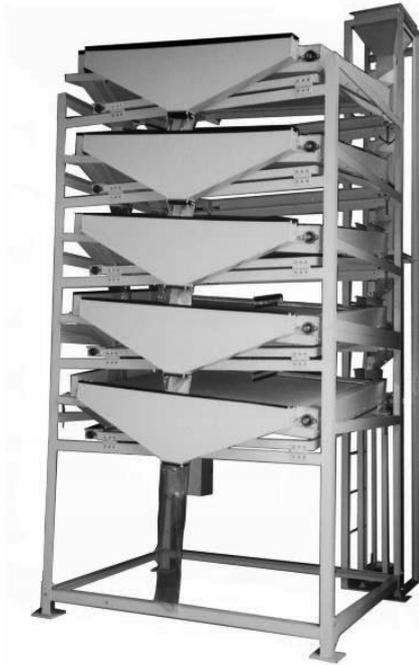
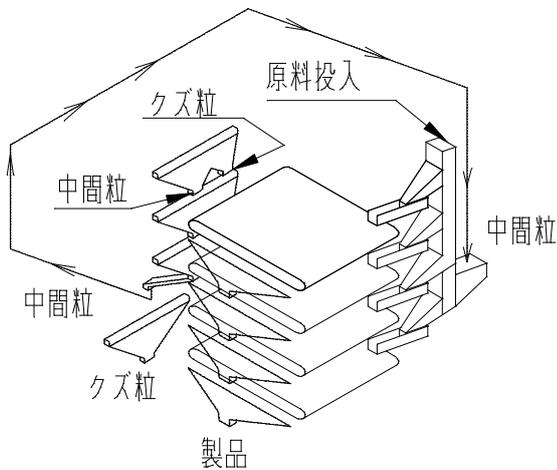


図 2-4-4 多段転選機（提供：株式会社原島電機工業）

5. 粒径選別機

1) 原理

大豆子実の粒径選別は、金属板に円形の穴をあけたパンチングメタルのふるいを通過するものと、しないもので分けることである。目開きは、農産物検査法における農産物規格規定に準じて、 ϕ 8.5mm、7.9mm（大粒大豆）、7.3mm（中粒大豆）、5.5mm（小粒大豆）、4.9mm（極小粒大豆）とするのが一般的である。このパンチングメタルのふるいを揺動させて、粒径選別を行う。

2) 粒径選別機の種類と特徴

(1) 回転式選別機（回転ふるい）

図 2-5-1、図 2-5-2 のように、円筒状、角筒状の丸目ふるいに傾斜をつけて回転させ、大豆子実を内部に投入し、穴より小さい大豆を外に出すことで、粒径選別をする装置である。ふるいの回転数と傾斜を変えて選別精度、処理能力を調整する。目詰まり防止のため、ゴム板や棒状ブラシ、ローラー等を筒の外表面をこするように配置し、穴に引っかかっている大豆子実を内側に押し戻す工夫がなされている。

(2) 前後傾斜揺動式

図 2-5-3 のように、平板のスクリーンを前後に傾斜させ、前後の水平方向に揺動させることで、投入した大豆子実を前下方に移動させながら、穴径より小さいものを落ささせて粒径選別をしている。主として揺動数を変えて調整するが、傾斜角度も可変できる機種もある。選別対象に、上下運動が与えられないので、小粒が下に沈む現象（パコーション）が発生しにくいので、選別品の層厚を厚くできない。スクリーン上を薄く速く通過させる選別方式である。

タッピングボールと呼ばれる良く弾むボールをスクリーン下面に入れ、揺動によってボールを飛び跳ねさせてスクリーンに当てて、ふるい穴に引っかかっている大豆子実を上面にはじきとばすことで、目詰まり防止を行っている。

(3) 水平振動式

図 2-5-4 のように、平板のスクリーンを水平にし、前後及び上下に振動させ、大豆子実を飛び跳ねさせながら前

方へ移動し穴径より小さい大豆を落下させて粒径選別する。振動数を変えて調整するが、バリダイヤ方式（機械式）とインバーター方式（電気式）とがある。

選別時に上下運動が与えられるので、小粒が下に沈み易く（パーコレーション）、層厚を厚くしても良く、かつまた各スクリーンを多段に積み重ねる方式を取っても、十分選別精度が保持できる。

機構も簡単で、一台で大・中・小・極小と4種類に選別ができ、ランニングコストも安い。目詰まり防止は前後傾斜揺動式と同様にタッピングボール方式である。新設設備はこの方式が主流を占めている。

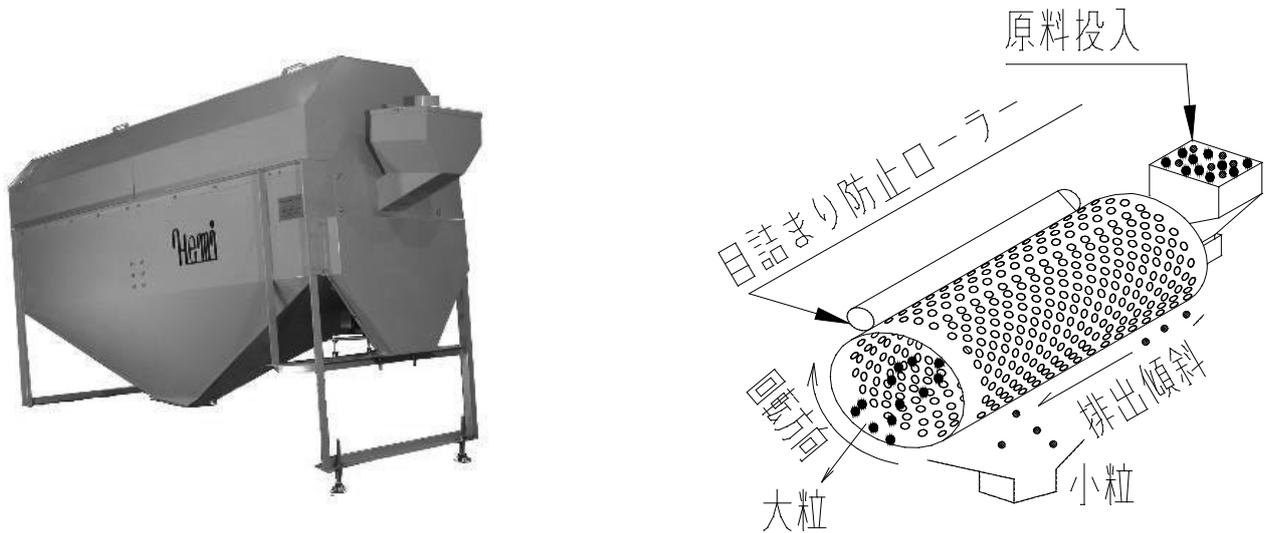


図 2-5-1 回転式選別機（円筒ふるい）（提供：株式会社原島電機工業）

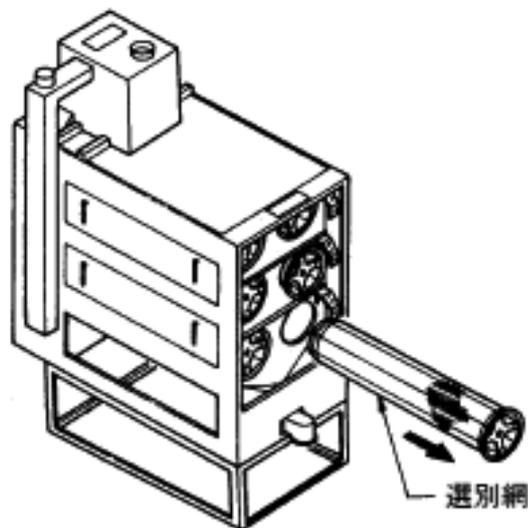


図 2-5-2 回転式選別機（六角筒ふるい）

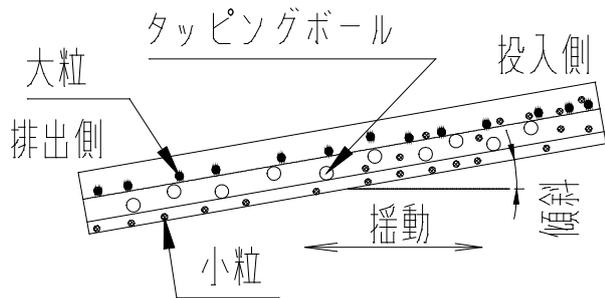


図 2-5-3 前後傾斜揺動式 (提供：株式会社原島電機工業)

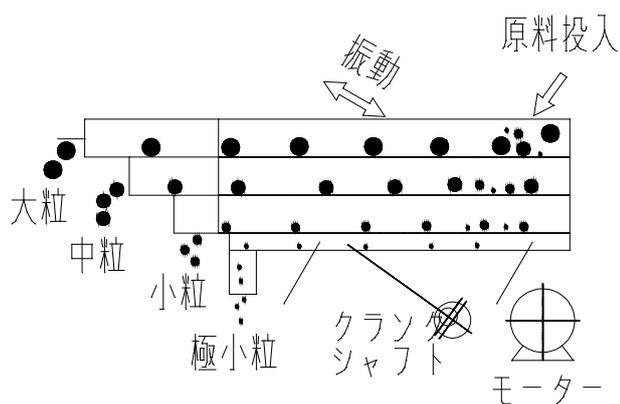


図 2-5-4 水平振動式 (提供：株式会社原島電機工業)

6. 色彩選別機

1) 原理

色彩選別機の原理を図 2-6-1 に示す。大豆子実は、振動フィーダからシュートまたはベルトコンベアに供給され、光学部へ供給される。光学部では大豆に向けて、光を照射し、カメラにて検査する。カメラから送られた信号を画像処理し、良品として定めた範囲から外れたものを不良品として判定する。フルカラーカメラでは、良品と色の違うものを、近赤外線 (NIR) カメラを有したモデルでは、同色の異物や透明のガラスなどを識別することができる。不良品として判定されたものは、圧縮空気の噴射により除去される。色彩選別機は、不規則かつ短時間に多量に流れてくる原料を高速で検査し、不良品を選別除去する装置である。

2) 色彩選別機の種類と特徴

大豆子実用の色彩選別機は、光学部への供給方式によって、主にシュート式とベルト式の 2 種類に分けられる。一般的にシュート式は、コンパクトで処理能力が高く、ベルト式は供給が安定しており、選別精度が高い。センサー

は、フルカラーカメラが主流となっており、明暗の違いだけではなく、色の違いを識別できるため茶豆や紫斑粒などの不良品に対して、それぞれ個別に不良品判定レベルを調整することが可能になっている。また、カメラから送られた信号を高速で画像処理することで、対象物の大きさや長さ、円形度など形状の違いに基づいて、不良品を識別する形状認識機能を備えた機種もある。NIR（近赤外線）カメラを備えた機種では、成分の違いにより大豆子実と同色の異物や透明のガラスなどを識別する。不良品が検出されると、電磁弁を駆動させて圧縮空気を噴射することで、不良品を除去する。噴射時間を調整することで、確実に不良品を検出、除去しながら、不良品除去のための圧縮空気の巻き添えで誤って除去される良品を減らして、歩留りを高めることが求められる。

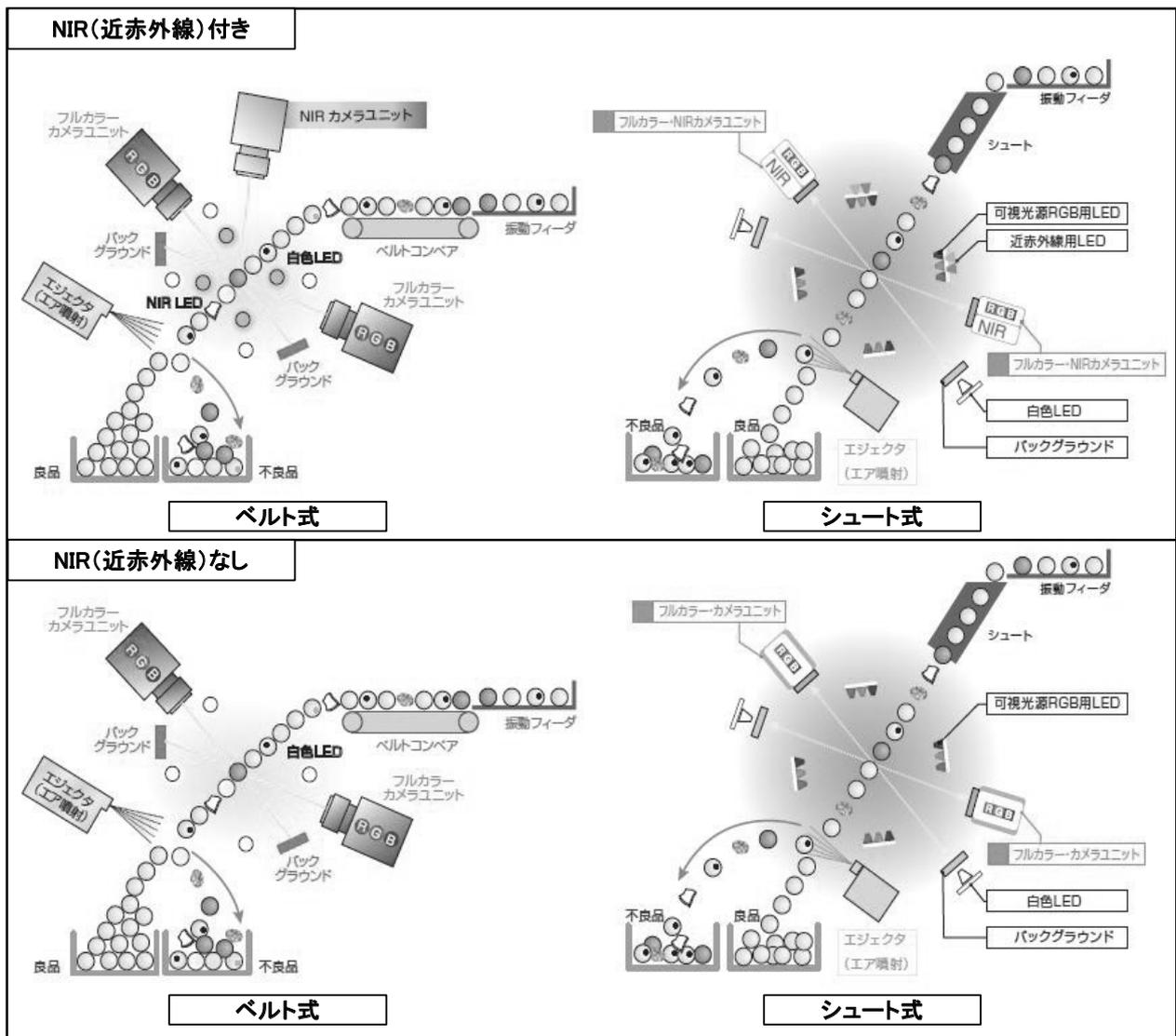


図 2-6-1 色彩選別機の原理

7. 転選機と粒径選別機の複合機

現在では、形状選別機と粒径選別機の複合機も使用されている。図 2-7-1 のように上部から大豆を投入し、第一段階でベルトコンベア方式の形状選別を行い、半割れ粒、扁平粒、未熟粒を取り除く。第二段階で円筒ふるい回転式の粒径選別を行う。円筒ふるいはパンチングメタルに 2 種類の目開きの丸穴を設けて、大粒、中粒、小粒の選別を行う。

■ 機械の構造と大豆の流れ

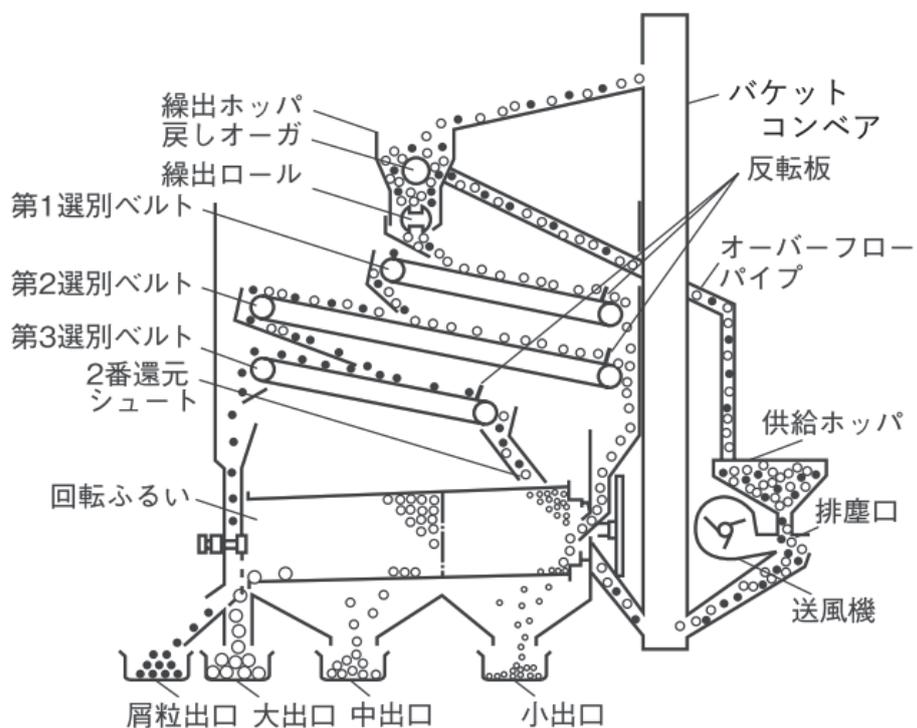


図 2-7-1 転選機と粒径選別機の複合機



写真 2-7-1 複合機の外観

の低下には、スクリーンの目詰まりも大きく影響するので、目詰まりさせないように、タッピングボールなどの目詰まり防止機構の点検が重要である。また目詰まりしたスクリーンは、はずして掃除する。極小粒も有価物であるので保管すること。

5) 色彩選別機

色彩選別機の役割は、汚粒、紫斑粒、褐斑粒、カビ粒などの着色粒が発生した場合のみである。したがって、通常は荷受した大豆子実の全量が選別対象となることはない。また、他の機械に比較して高価ということもあり、色彩選別機の処理能力は、施設の処理能力より小さいものを導入することが多い。フロー図にもあるように、色彩選別ラインはバイパスになっていて、処理量が過大となった場合は、夜間運転などで時間を延長することで対応している。機械の機構上、除去物の中に整粒の混入は避けられず、利用すると歩留が低下するため、着色粒の発生程度に応じて、適切に使用を検討する。

10. 大豆クリーナー

1) 大豆クリーナー概要

コンバインによる収穫作業を行うとき、汚粒が発生しないように細心の注意を払う必要があるが、収穫時期や天候等の都合によってやむなく汚粒が発生することもある。農林水産省の調査によれば、汚粒は大豆子実の検査で規格外に格付けされる主な原因の一つとなっている。このような場合、発生した汚粒に対しては、商品価値や検査等級のアップを考えるとなんらかのクリーニング処理が必要となる場合がある。

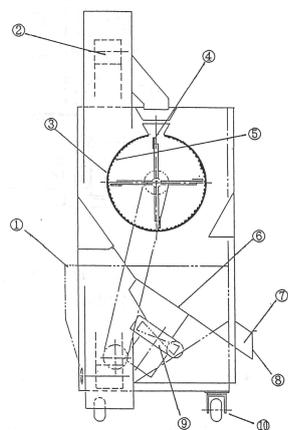
平成3年度の生研機構の汎用コンバイン利用農家の汚粒発生後の処置を見ると、アンケート回答数の約半数がなんらかの大豆クリーニングを実施している。但し、クリーニングを適正に行わないと、たとえクリーニングをしても商品価値が上がらないこともあるので注意が必要である。

大豆子実のクリーニングを行う大豆クリーナーには、乾式クリーナーと湿式クリーナー、あるいは乾式と湿式を併用したものがあ。市販されている大豆クリーナーの概要は次のとおりである。

2) 乾式クリーナー

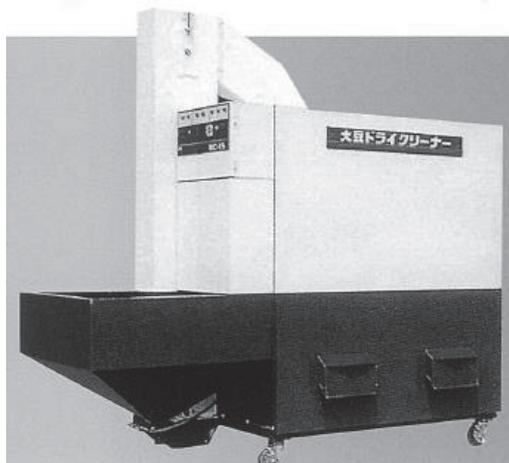
(1) S式大豆クリーナー

本機は、図2-10-1に示すように、円筒（ドラム）型のクリーニング部内において、ドラム内面に張り付けた研布とドラム内部で回転する羽根による研磨方式の乾式クリーナーである。なお、このクリーナーは、「張込み－クリーニング－排出」の作業サイクルを自動的に繰り返す、連続バッチ処理方式である。1回の投入量が80kg程度、処理量は1時間当たり300～480kgである（カタログ値）。



- ①供給ホツバ ②バケツエレベータ ③ドラム
- ④羽根 ⑤研布 ⑥流穀板
- ⑦製品口 ⑧シャツタ ⑨プロア
- ⑩キャスタ

図2-10-1 S式クリーナー



株式会社齋藤製作所カタログ (MC-45T) より抜粋

(2) H式大豆クリーナー

本機は、図2-10-2の<縦型研磨機の原理>に示すように、原料が回転ドラムと固定スクリーンの間を上方から下方へ通過する際に、回転ドラムに取り付けた研布（綿布）に接触する事により大豆子実表面を磨くクリーナーである。磨きの程度は原料排出口の開閉量と回転ドラムの回転数により調整する。本機は、連続排出が可能で磨きの程度にもよるが最大で2 t / h程度の処理が可能である。その他研磨には綿布を使用しており、布切れや糸くず等が原料と一緒に排出される為、通常、布・割れ取フレイと吸引コラム（風力選別）を組合せた設備が必要となる。なお、大豆子実に染み付いた汚れは除去出来ない。

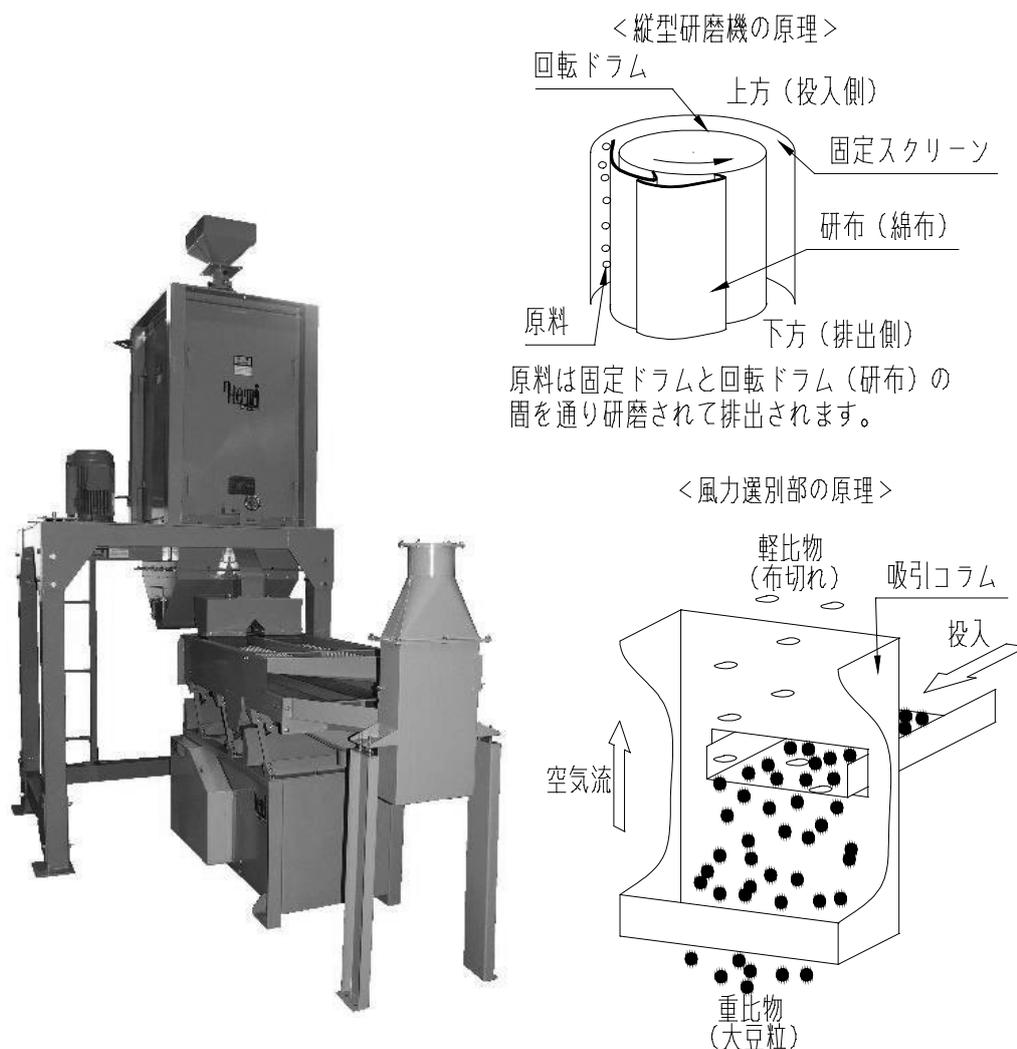


図2-10-2 H式大豆クリーナー（提供：株式会社原島電機工業）

(3) NS式大豆クリーナー

本機は、乾いた粉殻を研磨剤として利用する乾式タイプで、連続式であるためラインに配置して利用できる。通常は風力選別機と比重選別機の間、転選機がある場合はその前に配置する。粒径選別の後に配置する方法もある。粉殻と大豆は上部ホッパーから投入され、円筒状のケーシング内部で傾斜羽の回転により、混合、研磨される。その後、混合物は粉殻と大豆にふるい分けされ、研磨された大豆子実を得る。粉殻1 m³で、4 t程度大豆の研磨を行うことができる。

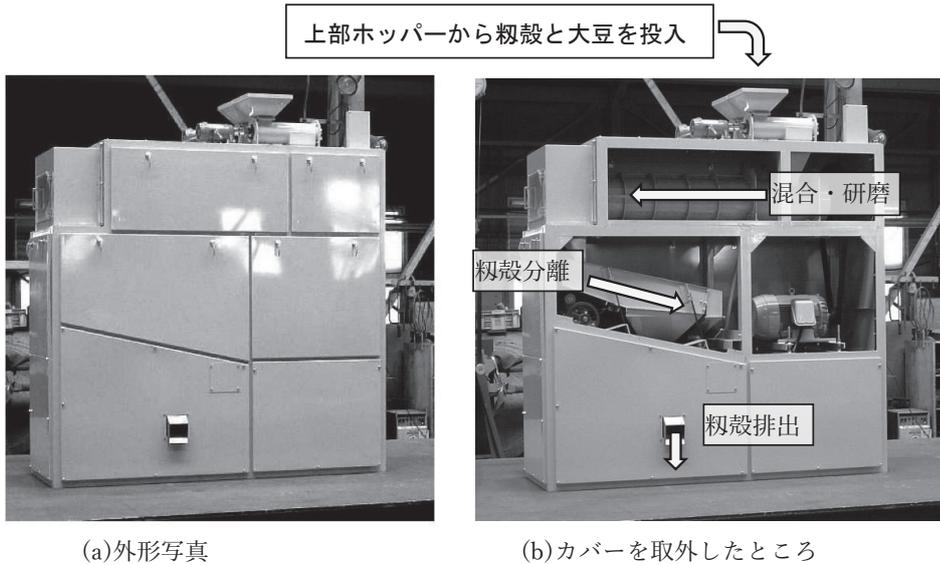


図 2-10-3 NS 式大豆クリーナー (提供：日本車輛製造株式会社)

3) 湿式クリーナー

(1) N 式大豆クリーナー

本機は、図 2-10-4 に示すように傾斜したポリッシングボックスの下側より大豆子実と少量の水を含ませたコーンコブ (とうもろこしの芯を乾燥後、粉碎し、一定のメッシュのスクリーンを通過したもの) を入れ、攪拌パドルで攪拌し、大豆子実をクリーニングしながら傾斜上方に搬送する。その後、ポリッシングボックスの下方に位置するスクリーンに流れ込み、大豆子実とコーンコブは分離され、大豆子実は製品出口へ、コーンコブはポリッシングボックスへ還元され、新たな大豆子実のクリーニングに利用される方式の連続供給型の湿式大豆クリーナーである。このクリーナーの処理能力については、処理量が 1 時間当たり 600 ~ 1000kg 程度、コーンコブ 30kg で 3.5 ~ 4.5t の大豆子実が処理でき、その場合の加水量はコーンコブ 20kg 当たり 6 ~ 8L 程度である。

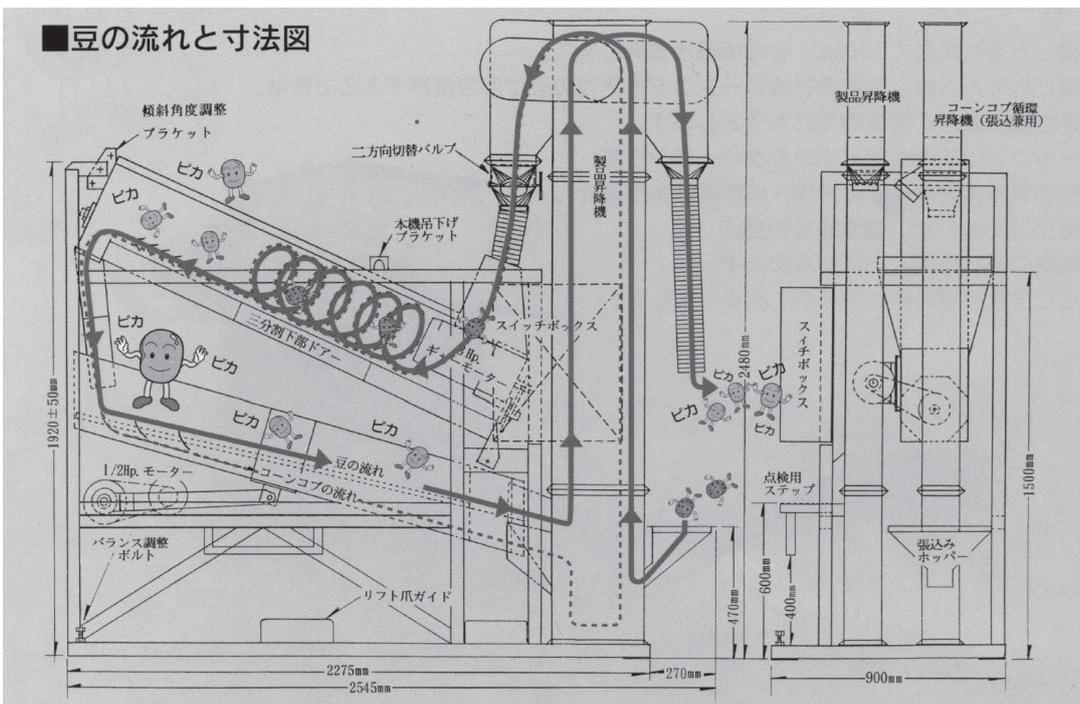


図 2-10-4 N 式大豆クリーナーの構造 (日本ニューホランド株式会社カタログより抜粋)

(2) Sa式大豆クリーナー

本機は、図2-10-5に示すように、横型かつ円型のクリーナー部において、研磨剤と汚粒大豆を混合攪拌し大豆子実の汚れを除去した後、粒径差により研磨剤と精品大豆を分離する連続供給型の湿式大豆クリーナーである。研磨剤には食物由来のタピオカを使用しており、安心・安全な汚れ除去が可能となっている。

クリーニング工程は2工程に分かれており、第1工程では原料に付着した砂や埃を取り除き、第2工程では微量の水を添加し、原料に固着した汚泥を取り除く。選別機により分離された研磨剤は、専用の乾燥機に運ばれ、熱風により最適な水分まで乾燥することで再利用が可能となっている。

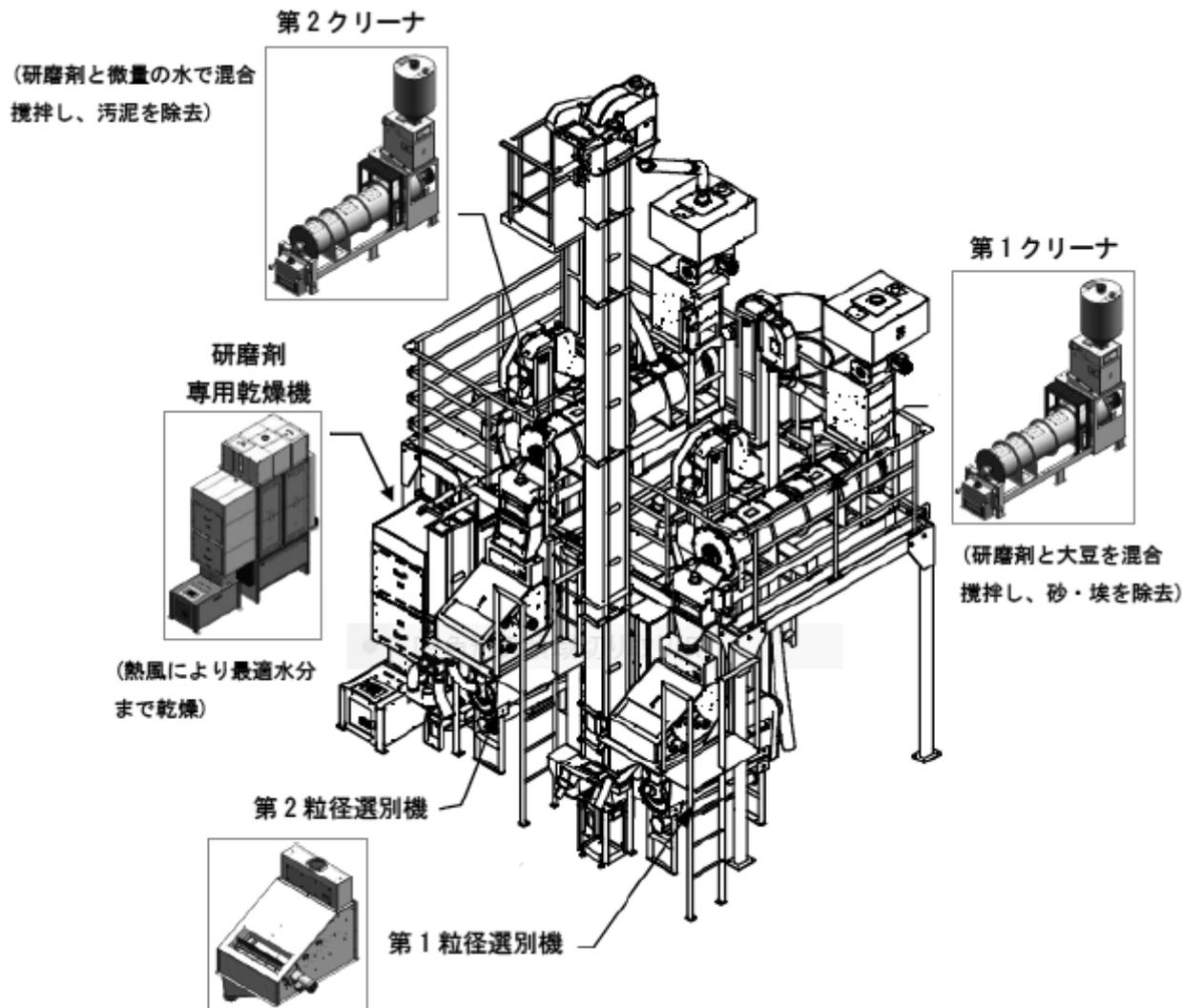


図 2-10-5 Sa 式大豆クリーナー (提供：株式会社サタケ)

4) 大豆の汚粒指標

大豆クリーナーの性能を評価するためには、大豆の汚粒の指標が必要である。ここでは、生研機構（現 農研機構）市川らが作成した汚粒の指標及び表示法を紹介する。写真 2-10-1 に汚粒の指標を示す。

汚粒発生割合：収穫した大豆子実のうち、汚れた粒はどのくらいの割合であるかを示す指標で、0～100%の範囲で示される。

$$\text{汚粒発生割合 (D1)} = (N1+N2+N3+N4) \times 100 / (N0+N1+N2+N3+N4)$$

* Nx：汚粒指標 x の粒数

汚染度：収穫した大豆子実のうち、汚れた大豆子実を取り出して、汚れの程度がどのくらいであるかを示す指標

で1～4の範囲で示される。

$$\text{汚染度 (D2)} = (1 \times N1 + 2 \times N2 + 3 \times N3 + 4 \times N4) / (N1 + N2 + N3 + N4)$$

* N_x : 汚粒指標 x の粒数

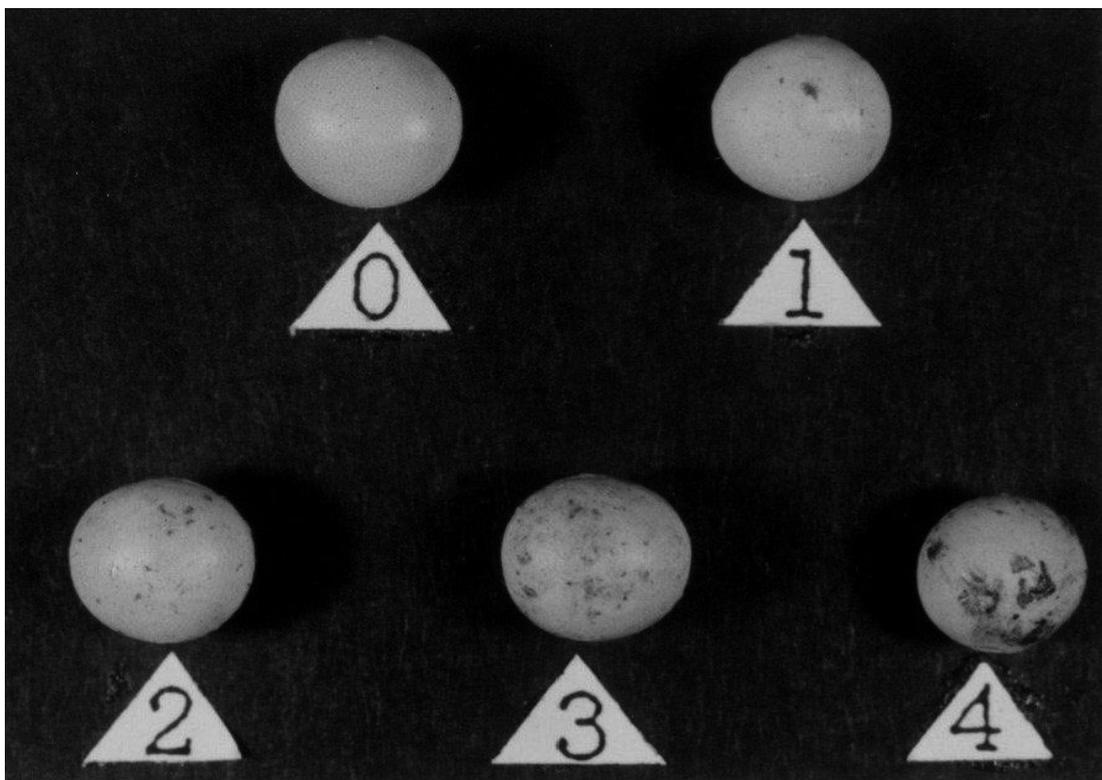


写真 2-10-1 汚粒の指標

5) 大豆クリーナーの使用上の留意事項

- (1) 大豆クリーナーは、仕上げ乾燥を行い、大豆選別機で選別した後の大豆子実についてクリーニング処理を行う装置であることを認識し、体系を組む必要がある。
- (2) 大豆クリーナーは汚れた粒の「クリーニング」という非常手段であり、大豆子実自体の品質向上手段ではないことから、必ずしもクリーニングによって等級が上がるとはいえないことを念頭におき、作業を行うことが必要である。
- (3) 湿式の連続式クリーナーの場合、クリーニング効果を高めるため過度にクリーニング処理を繰り返すと、大豆子実の条件によっては皮切れ粒やしわ粒が発生することがあるので適切な処理回数になるように留意する必要がある。
- (4) 乾式のバッチ式クリーナーの場合、汚れの程度に応じて処理時間を設定しているが、クリーニング効果を高めるため過度に処理時間を長くすると、大豆子実の条件によっては皮切れ粒や破碎粒が発生することもあるので適切な処理時間になるように留意する必要がある。

11. 磁力選別

比重選別機でも除去の難しい異物である石や土塊について、鉄が含まれることを利用して選別する装置である。製品と異物の鉄分差を利用するため、磁力が強いほうが選別に有利である。例えば、写真 2-11-1 の装置では 1.7 テスラ (17000 ガウス) のネオジム永久磁石を採用している。

選別原理 (図 2-11-1) に示すように、原料はベルトコンベア上に安定的に供給され、コンベア端において、鉄分

が少ない大豆子実はマグネットプーリーの影響を受けずに遠くまで飛び、非磁性体の製品口から排出されるが、鉄分の多い石・土塊はコンベア端のマグネットプーリーに引き付けられて手前側に巻き込まれるように磁性体出口に落下する仕組みである。

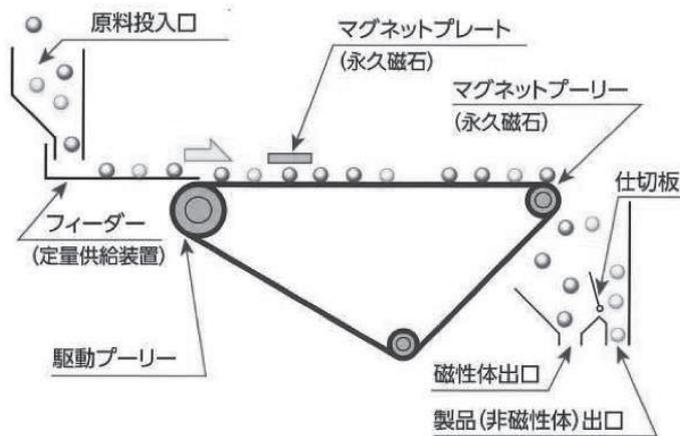


図 2-11-1 選別原理 (提供：株式会社安西製作所)

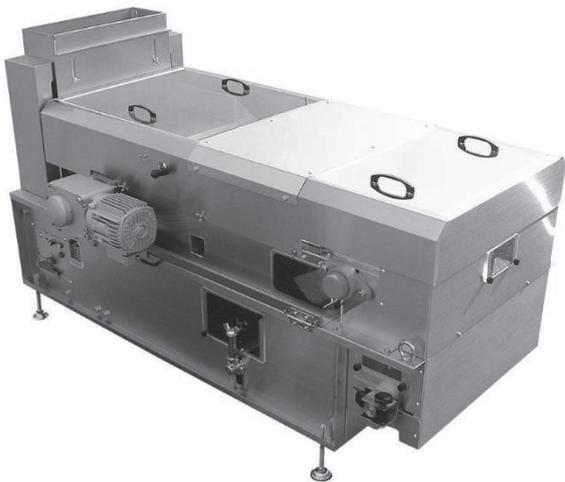


写真 2-11-1 磁力選別機外観 (提供：株式会社安西製作所)

12. 出荷設備

出荷用設備とは、施設内調製設備で選別調製された大豆を計量・袋詰めする設備である。袋詰めには、計量機を使用し、紙袋及びフレキシブルコンテナ（以下、フレコン袋）に大豆をいれる。紙袋については、ミシン及び紐で袋とじする2タイプがある。

最近では、設備のコストはかかるものの、労働負荷低減、人手不足対応のため、紙袋よりフレコン、紙袋でも自動化されたものが好まれる傾向がある。

1) 計量機の種類

出荷設備としての計量器には、以下の4種類がある。①～③は紙袋、④はフレコン用の機械である。以降、それぞれ説明する。紙袋での取扱では、おおむね1袋30kg、フレコンでは1袋900kgが標準である。

- ① 個袋詰め計量機
- ② 全自動計量包装機

- ③全自動計量結束機
- ④フレコン計量機

2) 個袋詰め計量機 (図 2-12-1)

個袋詰めは、計量ホッパーにロードセルを配置した計量機で、①大投入②小投入③定量の3工程で行われる。まず、「大投入」で、供給ゲートを全開させ、計量ホッパーに高速供給し、次に「小投入」として、供給ゲートを半開として、供給速度を抑え、定量値に近づける。定量が供給されたら、「定量」として供給ゲートを全閉させ、計量が終了する。計量機には、サンプリング機能を有したものなど数多くの機種がある。計量→充填後、別置きのみシン (図 2-12-2) にて袋口閉じを行う。計量機から袋口閉じまで紙袋の取り回しを手作業で行うため、労働負荷が高い。

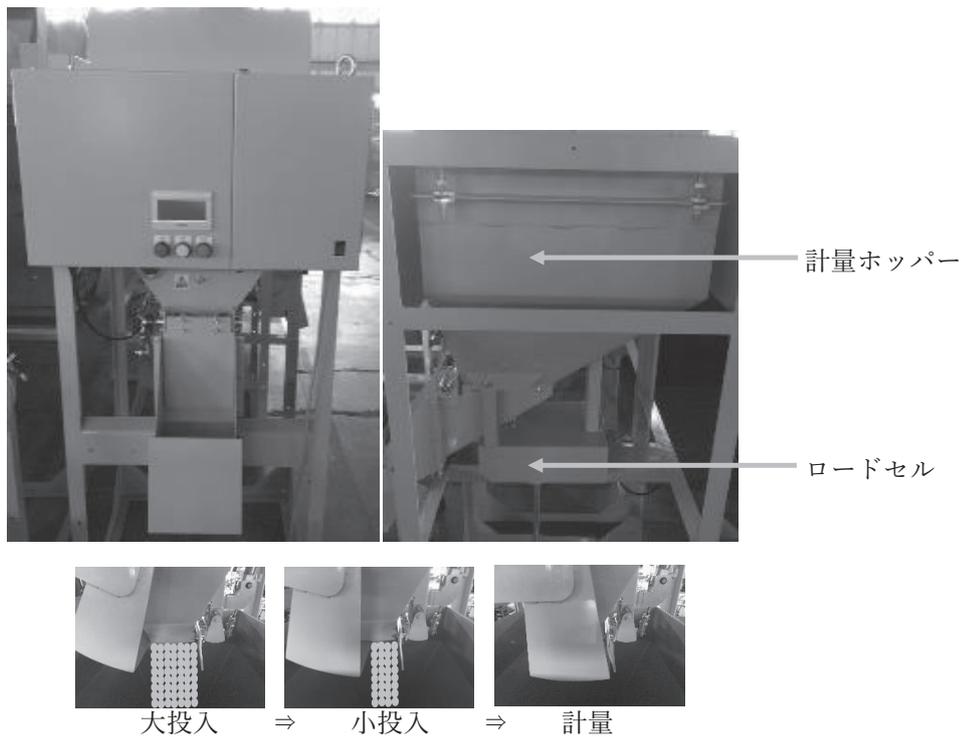


図 2-12-1 個袋詰め計量機 (左：正面、右：右側面、下：計量工程)



図 2-12-2 袋口マシン (提供：ニューロング株式会社)

3) 全自動計量包装機 (図 2-12-3)

計量・充填・袋口ミシン工程を自動化したものであり、袋転倒装置、金属検出機、パレタイザーと組合せた施設がある。

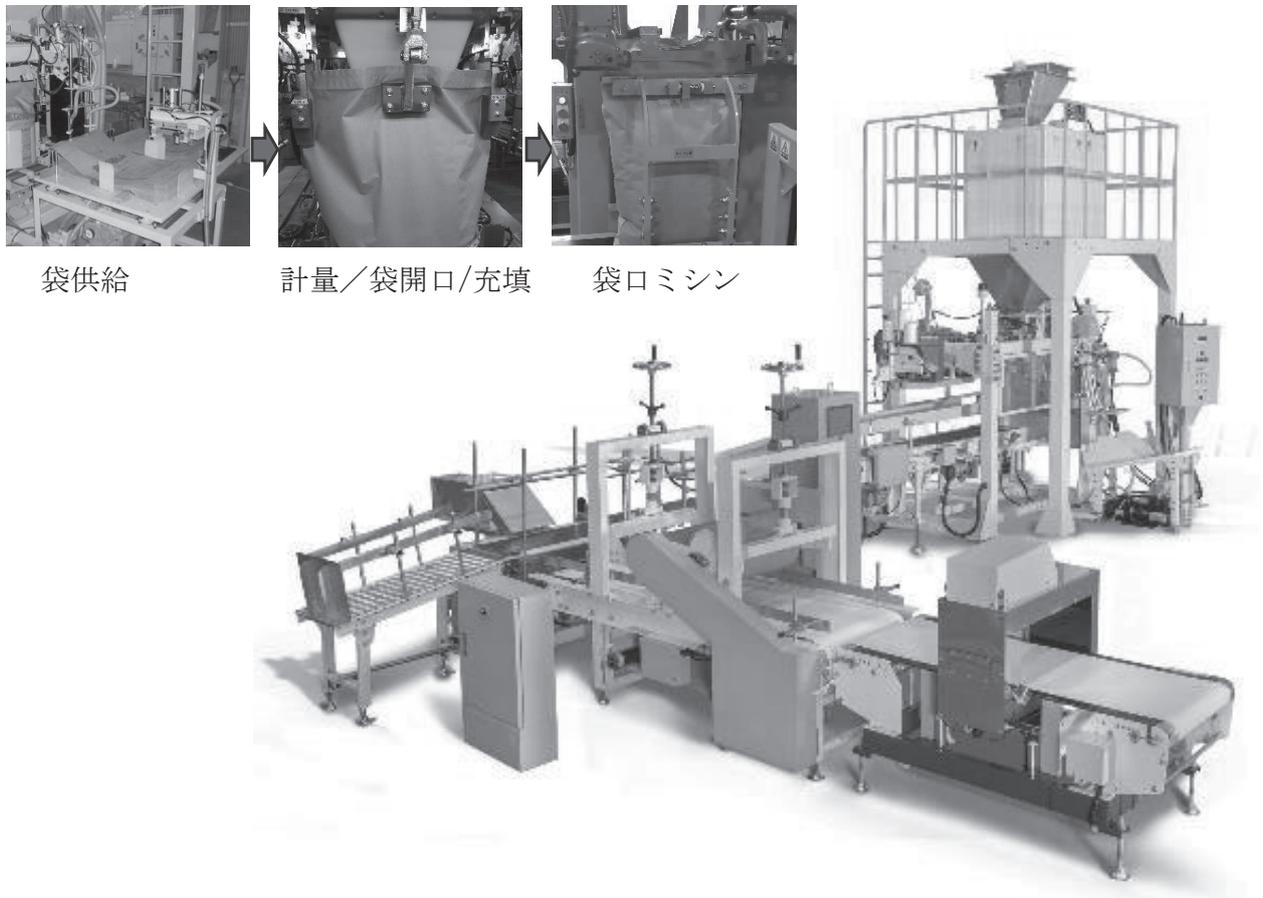
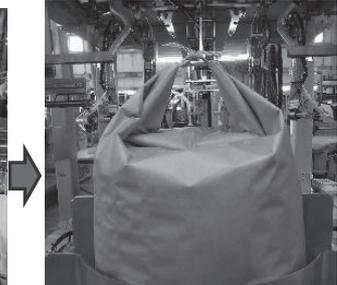
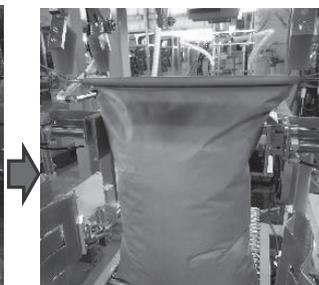
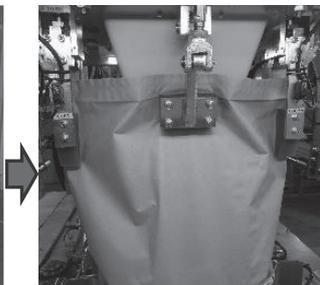
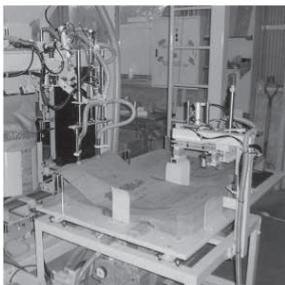
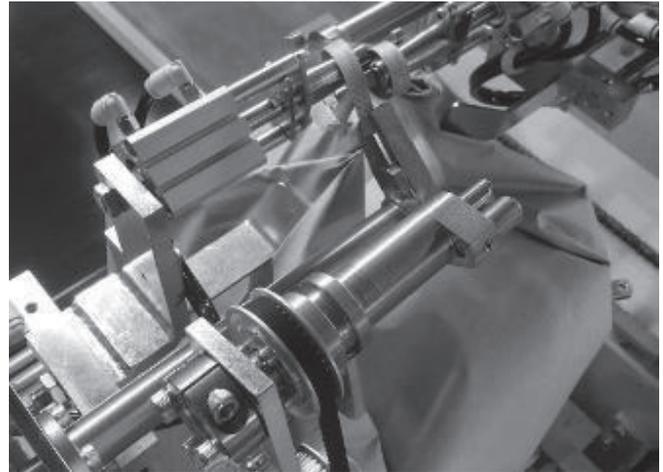
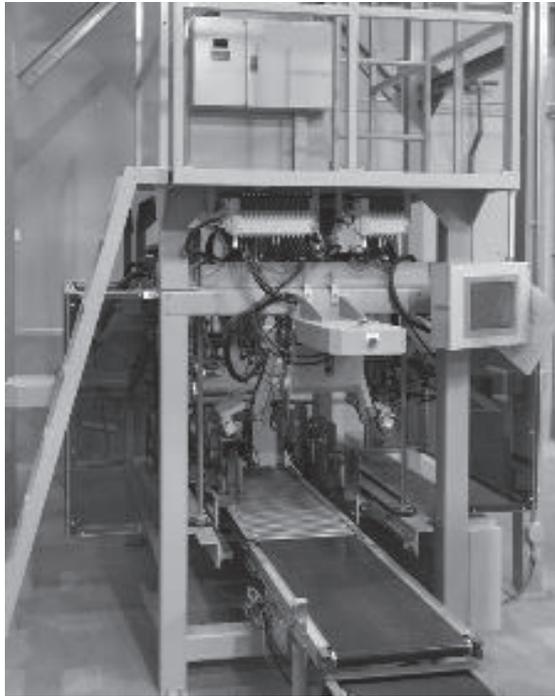


図 2-12-3 全自動計量包装機

(左上：計量～包装工程、右下：装置全体)

4) 全自動計量結束機 (図 2-12-4)

計量・充填・紐結束工程を自動化したものであり、袋転倒装置、金属検出機、パレタイザーと組合せた施設がある。図は計量・充填・紐結束工程からなる装置例である。



袋供給

計量／袋開口／充填

袋口折込み

結束

図 2-12-4 全自動計量結束機

(左：全体写真、右：結束装置部分、下：計量～結束工程)

5) フレコン計量機 (図 2-12-5)

手作業による荷役が重労働となっていること、また、出荷先で解袋後の紙袋の一部が廃棄されることが、廃棄物処理および省資源の観点から課題となっており、物流の安定的な確保、流通経費の抑制および環境負荷の低減をはかることを目的に、フレコン袋による流通が拡大しつつある。

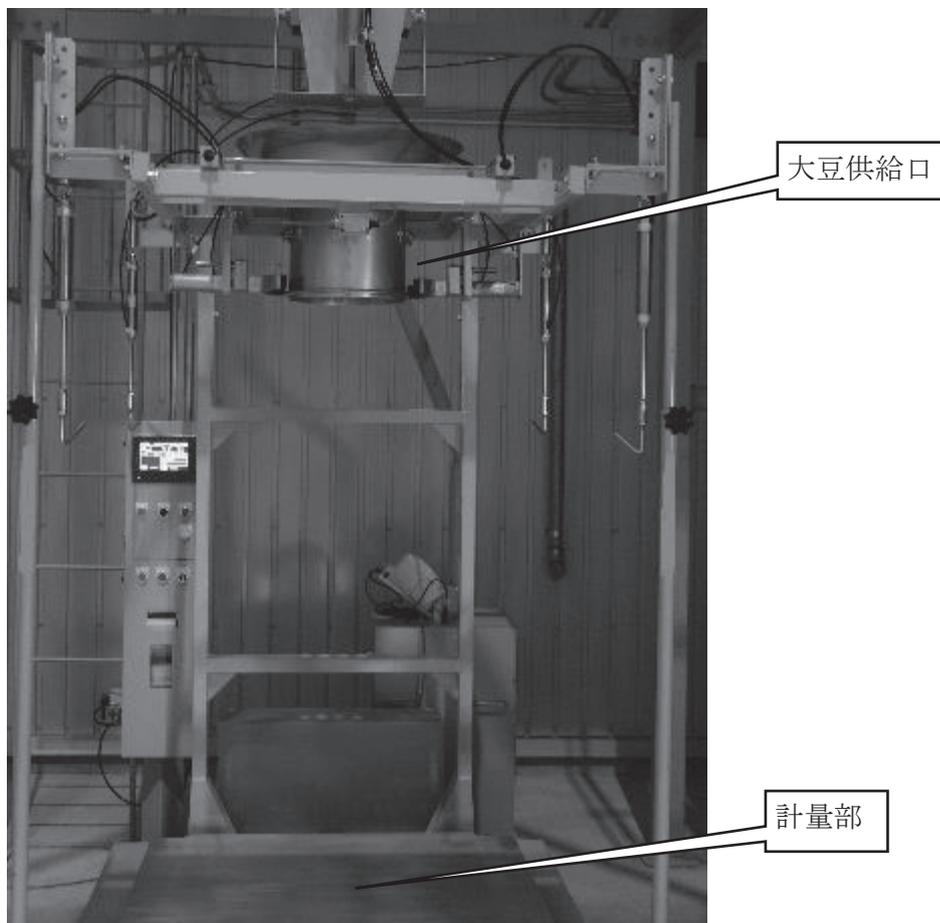


図 2-12-5 フレコン計量機

13. 施設稼働上の留意事項

1) 品質事故防止と施設の点検・整備

各作業段階において、事故原因の発生を未然に防止することが必要であることから、常に施設の適正な稼働に心がける。

施設稼働前には、穀温計・水分計の点検および補正を必ず行う。

施設の清掃を十分行う。

2) 他の作物と共用する場合の留意点

ライスセンター・カントリーエレベーター内に大豆用機器を設置した場合、米麦での稼働時に塵埃が降りかかる。大豆調製終了後点検と防塵対策（シートで覆う等）が必要である。

既設の空きスペースに設置すると、通路部分が狭くなり通行時に機械装置に触れることが多くなり危険である。安全対策をするとともに、関係者以外の立入禁止も検討する。

大豆と他作物での稼働切り替え時、異種穀粒が混じらないよう十分な清掃を行い、特に籾乾燥前は籾殻を流す、次に飯米を受ける等対策を徹底する。

大豆の割れ防止用に取り付ける部品類（荷受ホッパーの莢雑物防止網等）があれば、その着脱を的確に行う。

大豆荷受時は破碎・割れ粒発生防止から、昇降機の回転数を 20 ～ 30m /分に落として使用する。各部点検し確実に調整するとともに、稼動中の点検もおろそかにしてはならない。

荷受用自動水分計の測定レンジ、乾燥機の温度設定切り替え、張り込み量設定等各機器に大豆用・米用・麦用の設定基準があれば切り替える。

「大豆乾燥調製マニュアル」(改訂版)

本書は、平成12年度に発刊した旧「大豆乾燥調製マニュアル」を、下記の執筆者により改訂したものです。

執筆者	担当
金井 源太 (国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター)	全体監修 I-8-1)、I-8-5)、I-10 II-10、II-13
株式会社サタケ (https://www.satake-japan.co.jp/) 	I-3~6、I-8-2)、I-8-4) II-1~6、II-8、II-9
株式会社山本製作所 (https://www.yamamoto-ss.co.jp/) 	I-7、I-8-3) II-7
近江度量衡株式会社 (https://www.omiscale.co.jp/) 	II-12

ご協力
株式会社安西製作所 オリオン機械株式会社 株式会社ケツト科学研究所 株式会社齋藤製作所 讃光工業株式会社 日本車輛製造株式会社 日本ニューホランド株式会社 ニューロング株式会社 株式会社原島電機工業 ヤンマーグリーンシステム株式会社

旧「大豆乾燥調製マニュアル」(平成12年度発刊)執筆者一覧(所属名は当時)

監修

大黒 正道 (農林水産省北陸農業試験場)

伊藤 浩 (栃木県農務部普及教育課)

星 信幸 (宮城県古川農業試験場)

執筆者

大黒 正道 (前出)

井上 慶一 (農林水産省北海道農業試験場)

桃野 寛 (北海道立十勝農業試験場)

星 信幸 (前出)

杉山 隆夫 (生物系特定産業技術研究推進機構)

渡辺 孟彦 (全国農業協同組合連合会)

藤原 秀昭 (全国農業協同組合連合会)

原島 昌人 (株式会社原島電機工業)

田中 秀康 (近江度量衡株式会社)

大山 栄司 (株式会社山本製作所)

謝辞：監修に際して、上記の企業の担当者の方々、また、旧執筆者の方々をはじめ、原 圭祐 様 (地方独立行政法人北海道立総合研究機構)、土方 亨 様 (全国農業協同組合連合会)、星 信幸 様 (全国農業協同組合連合会) には、お忙しい中、快くご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。(金井源太)

令和5年度豆類振興事業
(大豆新技術等普及展開事業)

大豆乾燥調製マニュアル 改訂版

2024年2月発行

一般社団法人 全国農業改良普及支援協会

〒107-0052 東京都台東区上野 3-1-2

TEL : 03-5817-4992

