

大豆の高品質乾燥調製に関する研究

井上慶一^{*1}・大塚寛治^{*2}・村上則幸^{*1}・杉本光穂^{*3}・黎 文^{*4}

目 次

I はじめに	2	2) 試験方法	16
1. 研究の背景	2	3. 結果と考察	18
2. 大豆の乾燥調製における問題点	3	1) 試験材料の形状と体積比表面積, 空隙率	18
3. 大豆の乾燥調製に関する既往の研究成果	4	2) 通風速度と圧力損失の関係	19
4. 研究の目的	5	3) レイノルズ数と抗力係数の関係	20
II 大豆の体積, 見かけ体積, 充てん率と水分の関係	6	4) 摩擦係数と抗力係数の関係	21
1. 目的	6	4. まとめ	23
2. 大豆の比容積, 真密度, 空隙率に関する 理論的考察	6	IV 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	24
1) 水分と乾量基準の比容積, 真密度との関係	6	1. 目的	24
2) 乾物基準見かけ密度と 充てん率(空隙率)	7	2. 方法	25
3. 試験方法	8	1) 乾燥方程式について	25
1) 比容積, 見かけ体積, 充てん率と 水分の関係	8	2) 相似則からの熱, 物質移動係数の推定	25
2) 大豆の3軸寸法と水分の関係	8	3) 移動係数と総括移動係数の関係	26
4. 結果と考察	9	4) 体積比表面積と材料有効表面積, レイノルズ数, かさ密度の関係	27
1) 水分と比容積との関係	9	5) 大豆の平衡水分と材料比熱について	28
2) 水分による大豆子実粒の 3軸寸法の関係	11	6) シミュレーションモデルの数値解法	28
3) 見かけ体積について	11	7) 実験室内での大豆の堆積通風乾燥 試験方法(実験1)	29
4) 充てん率, あるいは空隙率について	12	8) 太陽熱利用循環併用静置式乾燥機での 乾燥試験(実験2)	30
5. まとめ	14	3. 結果と考察	31
III 無次元数による大豆の通風圧力損失	14	1) 試験容器での室内乾燥試験結果	31
1. 目的	14	2) ビニールハウス内静置式乾燥機での 乾燥試験のシミュレーション結果	32
2. 方法	15	3) 大豆の比表面積のパラメータ調整による 計算結果	34
1) 理論的考察	15		

平成14年9月3日受付 平成15年1月20日受理

^{*1}北海道農業研究センター

^{*2}九州沖縄農業研究センター

^{*3}北陸総合研究部

^{*4}井関農機(株)

4) 循環を併用した場合の水分変化のシミュレーション…………… 34

4. まとめ…………… 35

V 大豆の通風乾燥における通風の温・湿度について…………… 37

1. 目的…………… 37

2. 裂皮発生の原理と防止のための通風温・湿度…………… 37

3. 堆積層中の蒸れ防止条件…………… 39

4. 試験方法…………… 39

5. 結果と考察…………… 39

1) 初期水分と裂皮粒発生割合の関係…………… 39

2) 種皮の推定歪みと裂皮粒発生割合の関係…………… 39

3) 裂皮発生割合と外気に平衡する水分との関係…………… 40

4) 乾燥速度と裂皮粒発生の関係…………… 42

5) 堆積形通風乾燥における層内の蒸れと温・湿度変化…………… 42

6) 大豆乾燥用の空気線図…………… 43

7) 適切な乾燥方法の提案…………… 43

6. まとめ…………… 44

VI 摘要…………… 44

VII 今後の問題…………… 45

謝辞…………… 45

引用文献…………… 46

Summary…………… 48

I はじめに

1. 研究の背景

大豆の作付け面積(生産量)は1987年の162,700ha(287,200t)をピークに減少傾向が続き、1994年には60,900ha(98,800t)と落ち込んだが、その後国産大豆が見直され、豆腐、煮豆業界や消費者の健康食品志向などによる国産大豆需要の高まりもあって、図1のように1996年には81,800ha(147,600t)、1998年には109,100ha(158,000t)と年々急増し、2001年では143,900ha(270,600t)と1990年の作付け面積に回復してきている(平成14年大豆に関する資料、畑作振興課)。この背景には不耕起栽培やコンバイン収穫など大豆生産のための省力化技術の普及もあげられる。図2のようにコンバインの利用率は1995年で

23%であったのが、1997年では31%、2000年では52%と年々著しく増加してきている。ところが乾燥調製の省力化はそれに比較して立ち遅れており、図3のように乾燥機の利用は1997年では静置式9%、循環式3%、農協等共同乾燥施設22%に過ぎず、他は天日28%やハウス乾燥6%、利用なし45%などと手間と労力がかかっていた。平型や循環式、DS(ドライストア)などの乾燥機での年間処理量は1997年でわずかに25,239tであり、生産量の17.5%である。その後、コンバイン収穫が増えるにつれ乾燥機の利用率が増え、2000年には農協等共同乾燥施設

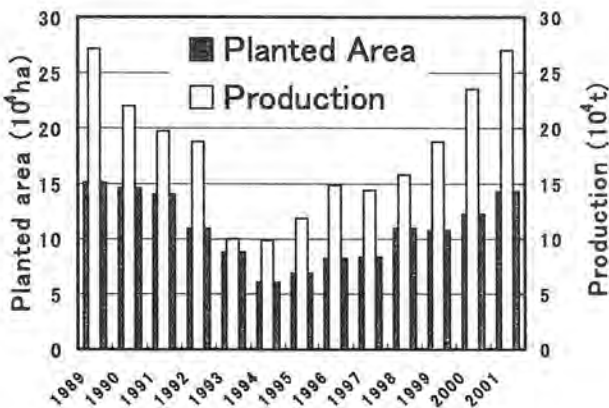


図1 大豆作付け面積と生産量の推移
Fig.1 Transition of planted area and production of soybeans

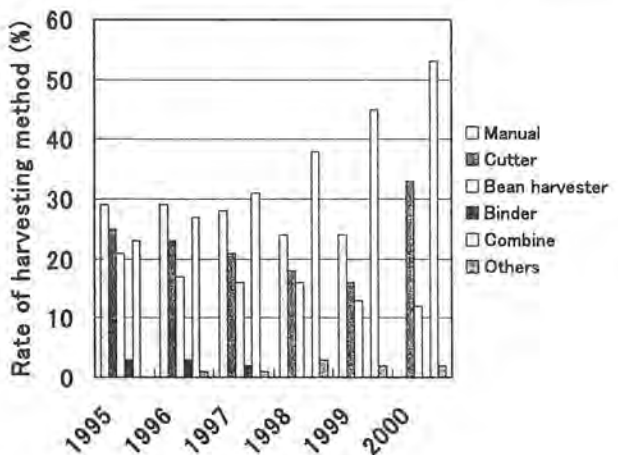


図2 大豆の収穫方法の推移
(1998年以降はバインダは合計してビーンハーベスタとして表示)
Fig.2 Transition of harvesting method of soybeans

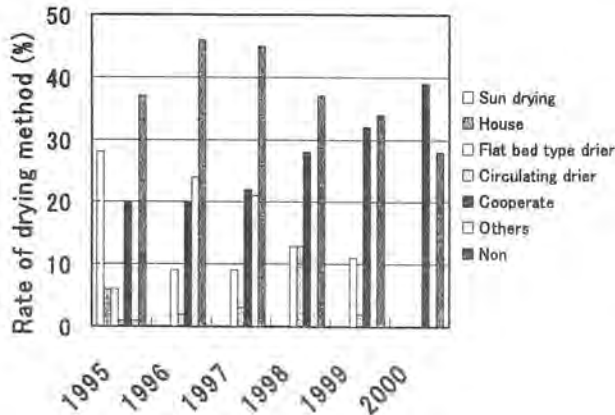


図3 大豆の乾燥方法の推移
Fig.3 Transition of drying method of soybeans

設利用が39%、静置式、その他の方法による個人乾燥が33%と増えてきている。ここで1999年に一時米麦用の循環式乾燥機を用いた乾燥が13%と増えたが、翌年は2%に低下した。これは、大豆用には適応していない米麦用循環式乾燥機利用による機械的な損傷粒の発生で敬遠されたためと思われる。日本においては、コンバイン収穫以前はバインダ等の機械で刈り取って島立てやにお積みといった圃場乾燥が行われてきたが、省力的、高能率なコンバイン収穫が広まってくると圃場で立ち枯れの状態で水分15%以下に調製することは難しく、省力的な人工乾燥が必要となってきた。また、品質面からも適期に雨に当てずに一斉収穫する必要がある。収穫時期に雨に当たるとしわ粒や裂皮粒、その他品質の低下などが極端に多くなるからである。一方、水分が高い場合の収穫は、汚粒の発生が多くなり、適期収穫が重要となる。こうしたコンバイン収穫された大豆の収穫時の損傷や汚粒等の発生や乾燥調製段階での品質低下などが大きな問題となってきている。天候不順なわが国では高水分で収穫せざるをえない状況が多く、今後コンバインの普及にともなって大量に収穫される大豆の省力的な乾燥調製技術の確立と普及が不可欠になってきている。

国産大豆は輸入大豆に比べ、食品の安全性の面だけでなく味や成分にも優れ、タンパク含量が高く、豆腐、納豆、煮豆用、味噌、醤油と今後益々需要が高まってゆくとみられる。大豆は古くから漢方薬としても用いられ、近年では血中コレステロールや中性脂肪の低下、抗酸化作用、大豆中のイソフラボンやサポニンなどの配糖体成分の抗腫瘍性などの顕著

な薬理効果なども注目されている。

また、国際的な将来の逼迫する食糧事情を考えると空气中的窒素固定による良質タンパクとしての豆類は益々重要な作物になっていくと考えられる。国際競争の中で、こうした国産大豆の品質を保って良質な大豆を省力的に乾燥調製する技術開発が求められていると言える。

2. 大豆の乾燥調製における問題点

コンバイン収穫された高水分大豆(水分20%以上)の乾燥調製では、通風条件の悪い場合は、蒸れを生じる危険性がある。通常20℃以上湿度80%を越えるとカビの発生が増えると言われており、乾燥中の大豆の通風空気の温・湿度をこの危険領域にならないように制御する必要がある。また、急速な乾燥は裂皮やしわ等を発生させる危険があるため、適正な乾燥速度の調整を必要としている。こうした乾燥条件の適確な制御のためには、大豆乾燥に関係する物性量の詳しい解析を必要とする。特に水分との関係での真密度の変化や空隙率、粒径の変化に対しては個々の事例は報告されているが3軸寸法、真密度、見かけ密度、空隙率等密接に関係する物性諸量間の関係や品種間差などわからないことが多い。また、通風乾燥を行う上での圧力損失特性についても、大豆の粒径、空隙率、風速などから計算式によって求める一般的な実験式の例も少ない。圧力損失特性は、関係する変数が多いため、汎用的に利用できる無次元数による解析が必要とされる。

堆積型の通風乾燥における大豆の乾燥経過の解析や予測を行うことにより、乾燥調製における大豆の品質低下を防ぎ、適確な乾燥調製方法を策定することが可能となる。しかし、一般に乾燥シミュレーションの場合は、設定すべきパラメータの数が多く、実際に乾燥する材料の物性を詳しく測定できないのが実状である。設定すべきパラメータの数を必要最小限にしてシミュレーションが行える簡略な方法が必要である。そのためには、乾燥物性諸量の関係を明らかにし、材料物性の簡単な測定と少ないパラメータで必要とする物性定数を計算し、簡単に精度よく水分と材料温度変化を推定できることが求められる。

大豆の人工乾燥では、量的に少ない場合、平型静置式乾燥機が利用されている。静置式乾燥の場合は大豆を循環しないので、乾燥中の機械的損傷はほと

んど生じないと考えられるが、堆積層中の風の通りの違いや、通風の入口側、出口側によって水分むらを生じ、何らかの方法で均一な水分に調整する必要がある。平型乾燥の場合も循環装置を装備して水分むらの是正や、搬入、搬出の省力化を図る必要があるが、その場合、搬送中の大豆の機械的な損傷を低減する工夫が必要になる。大豆は米や麦と違って粒が大きく、莢がなく種皮が露出しているため損傷を受けやすいためである。量的に多い場合、集団組織での共同乾燥施設でのドライストアなども、大型の半循環式平型乾燥機の一つと考えられる。循環式乾燥機を一部改良して、ドライストアと同じように利用できれば、かなり省力的で便利な乾燥調製方法となる。そのための改良方法などを明らかにする必要がある。

品質の良い大豆の乾燥調製のためには、水分に応じて適確な温・湿度の空気を通風する必要がある。循環式乾燥機を利用すると、静置式での場合のように通風条件の悪い箇所での変質のおそれはなくなるが、乾燥効率と品質の面からどのような温・湿度の空気を通風すればよいのか、はっきりとわかってはいない。乾燥による裂皮や蒸れを回避しながら乾燥速度を上げられる通風空気条件を水分との関係で明らかにする必要がある。

3. 大豆の乾燥調製に関する既往の研究成果

日本においては、従来、大豆の乾燥は圃場での自然乾燥が主であったことから、人工乾燥に関する研究成果は少ない。1953年以降では、東条ら⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾が大豆の乾燥特性について詳しく調べた報告がある。大豆の乾燥特性について初期水分や温度、湿度、風速を変えて調べ、一定の温・湿度条件では他の穀類と同じように $(M - Me) / (Mo - Me)$ (M : 水分% d.b., Mo : 初期水分, Me : 平衡水分) の値が $a \cdot \exp(-k \cdot t)$ (k : 乾燥定数) で表されることを確かめた。また、平衡水分や水分移行、通風抵抗などの特性などについても明らかにした。しかし、現象論的な考察が主体でモデルを使った数値解析や、詳しい物性値の解析までには至らなかった。その後、村田ら⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾は穀類の乾燥に関する研究において、粳や玄米、小麦、小豆などの穀類の乾燥物性値を明らかにする研究を行い、穀類の平衡水分については

Chen-Clayton の式がそれまでのHenderson の式よりも適合性が高いことや穀類の蒸発潜熱量の計算に汎用性のある熱力学のClausius - Clapeyron式を用いた計算式を提示し、穀類においては水分が低くなると蒸発潜熱は水の蒸発潜熱よりも高くなることを示した。また、大豆の乾燥特性においては、球モデルよりも無限円筒モデルで計算した水分変化の方が実測値に合うことを報告し、モデルを測定値にあてはめ、乾燥速度係数を高い精度で求めた。村田らの穀類に関する物性値の研究によって乾燥シミュレーションの数値解析が容易になったといえる。

実用的な大豆の乾燥方法の研究においては、米麦用の循環式乾燥機では破碎粒の発生が著しいことから、ハウス乾燥や静置型乾燥、あるいは回転ドラム方式が検討された。大豆の場合、雨に当たると品質の劣化が生じることから松尾⁽¹⁷⁾はビニールハウス内で丹波黒大豆を茎ごと乾かす方法が有効であることを報告している。しかし、こうした茎ごとの乾燥は、収穫、運搬、乾燥施設の容積などの面で能率が低く、コスト高になり、一部の高価な大豆に応用できる方法であり、やはり粒を乾かす方法が必要になる。長廣ら⁽²²⁾はドラム型の回転式流動層乾燥装置を試作して小麦、大豆の乾燥実験を行い、大豆の乾燥実験では22℃の低温風を使って穀温と空気温度の差を8℃以下に抑えて通風し、乾燥による裂皮粒や機械的衝撃による破碎粒の発生を抑えて均一な水分に仕上げられることを示した。大豆の乾燥調製では、乾燥による破碎粒、裂皮粒の発生を抑えることが求められる。粳の乾燥調製では循環式乾燥機でテンパリングを取り入れて水分変化に応じた通風温度の調節を行うようになって胴割れの発生を抑えられるようになった。大豆の人工乾燥では、静置式平型乾燥機が主体であったが、破碎粒、裂皮粒の発生を防ぎつつ乾燥速度を上げ、効率を上げようとする搬送時の機械的衝撃の緩和と乾燥による裂皮粒発生メカニズムを明らかにする必要がある。こうした研究は日本ではあまり行われてこなかった。育種栽培分野では、圃場での成熟期に子実の栄養成長によって種皮が押し広げられてゆき、種子の最大期から収縮し成熟する過程で裂皮が発生することが知られており、林ら⁽⁶⁾は大豆品種の種子最大期における種皮の引張り強度を調べ、種皮全体の引張り強度は表皮細胞から柔細胞層が決定していることを指摘し

たが、乾燥過程での実際の種皮に加わる応力と種皮の引張り強度の関係については明らかでなかった。裂皮に関しては、大豆の物性と外気の温・湿度条件が関係した力学的な現象であり、より詳しい数値的な解析が必要とされる。その後、大豆の生産が回復し、コンバインによる省力大量収穫が増えてくるに従い、省力的な人工乾燥技術の開発が求められてきた。その中で、大黒ら⁽²⁸⁾は、通風空気の温・湿度と裂皮粒の発生率の関係を調べ、また、大豆の種皮の裂皮限界やヤング率などの値を用いて有限要素法によって乾燥による大豆子実内の応力を計算した。さらにその応力を裂皮限界内に抑えるための通風空気の調湿乾燥法を循環式乾燥機に取り入れた。また、井上⁽¹¹⁾⁽¹²⁾らは循環式乾燥機の利用技術の開発に取り組み、搬送速度の低減や籾殻の利用、水分に応じた通風空気温度の調節法などの技術を提言した。

一方、海外の研究にみると、大豆の乾燥シミュレーションについてはNuhら⁽²⁷⁾が大豆の薄層乾燥において物質・熱移動速度を基本的な物性値から計算し、測定値と一致する結果を得た。また、逆にこのモデルから物質・熱移動モデルのパラメータを決定した。同様にWhiteら⁽³⁶⁾は、薄層乾燥モデルから初期水分と通風空気の温・湿度、通風量の関数として水分変化を予測した。さらに厚層乾燥への応用を試みている。一粒大豆子実内の物質・熱移動についてHaghighiら⁽⁵⁾は有限要素法を応用して内部の水分移動、熱拡散を数値的に解いた。

大豆子実の裂皮に関しては、Ting⁽³³⁾らは0.6mの堆積高さの乾燥ビンにおいて、50℃と60℃、通風量 $0.102\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $0.203\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ で通風を行った結果、裂皮粒の発生には初期水分と、風量、通風空気温度が影響していることを明らかにした。さらにWhiteら⁽³⁷⁾は通風温度と湿度を変えて詳しく裂皮発生率を調べた結果、初期水分と湿度が大きく影響し、温度の影響は少ないことを確かめた。Liuら⁽¹⁶⁾は大豆の種皮を精密引張試験機で引張試験を行い、その応力・緩和特性がMaxwellの粘弾性モデルでほぼ表されることを明らかにし、子実水分の上昇によって応力係数と減衰係数が共に減少することを確かめた。これによって種皮は熱水レオロジーとして単純な粘弾性物質として扱えることを明らかにした。Misraら⁽¹⁸⁾は大豆種子に対して有限要素法による数値解析を試み、乾燥による子実内の局所収縮と子

実各部に加わる応力を計算し、その応力が表面において最大となり、その応力は乾燥経過によって4時間以内に最大応力になり、それ以降減少していくことを明らかにした。これらの報告の結果を総合的に考察してみると、大豆子実の裂皮は乾燥による子実内水分勾配により、表面付近の乾燥収縮による応力の発生に原因しており、急速な乾燥では種皮の応力緩和が遅れ、種皮の裂皮限界応力に達して裂皮が発生すると考えられる。種皮の乾燥速度は、種皮の水分と温度、外気の平衡水分、風速に依存しているため、これらの条件と種皮に加わる歪み量、種皮の粘弾性の性質から、ほぼ説明されると考えられる。その結果、裂皮を抑える通風空気条件を大豆子実初期水分との関係で明らかにすることができると考えられる。

4. 研究の目的

本研究では、循環装置を備えた平型乾燥機、ドライストア、循環式乾燥機などの省力的な乾燥機における通風圧力損失や大豆の基本的乾燥物性値、乾燥過程の解析、循環式乾燥機を利用する際の乾燥調製での蒸れや裂皮の発生メカニズムとその防止条件、機械的損傷の低減技術などを明らかにし、コンバイン収穫大豆の高品質な乾燥調製技術を開発することを目的とする。そのため、大豆の乾燥に関する基本的物性値について、5品種の同一材料について測定実験を行い、3軸寸法、真密度、見かけ密度、空隙率と水分との関係や堆積層内の空気の流れを推定するのに必要な圧力損失特性を、抵抗係数や摩擦係数とレイノルズ数の無次元数の関係から明らかにし、水分や空隙率、形状の違いによっても汎用的に成立する圧力損失の実験式を策定する。以上の基本的物性値の関係に基づき、少ない基本的パラメータによる非定常条件下での循環を含む乾燥乾燥シミュレーションモデルを作成し、堆積層内の局所穀温、水分、および通風空気の温・湿度変化を計算し、精密乾燥装置や実規模の堆積通風乾燥装置や循環式乾燥機での適合性について検証する。さらに、大豆の通風乾燥において品質低下の原因となる裂皮や蒸れを回避し、最大の乾燥速度で効率的に乾燥するための通風空気条件を裂皮の発生機構の理論的解析を踏まえて明らかにし、品質の低下を防ぎながら効率的に乾燥する具体的な方法を明らかにする。

II 大豆の体積, 見かけ体積, 充てん率と水分の関係

1. 目的

通風乾燥におけるシミュレーションを行う場合, 空気中の熱・物質移動係数, 材料内の拡散係数, 平衡水分, 材料の比表面積, 空隙率, 見かけ密度などの基本的な物性を明らかにする必要がある. このうち, 空気中の熱・物質移動係数に関してはレイノルズ数による摩擦係数から j 因子を用いたアナロジー⁽⁸⁾⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾によってある決まった形状の材料についてはある程度の推定が可能であり, また平衡水分, 拡散係数については詳しく調べられており⁽²⁰⁾⁽²¹⁾そのデータが利用できる. 従って材料の真密度や比表面積, 空隙率, 見かけ密度など品種や大きさ, 形状によって異なると考えられる大豆固有の物性量について明らかにする必要がある. 特にこれらの物性量は相互に関係しているため, ある条件で調べた個々の結果だけでは実際の供試材料の乾燥シミュレーション用のデータとしては利用できない場合が多く, 物性量相互の関係や品種, 個体の差, 及び水分との関係を明らかにする必要がある. 全般的に穀物の水分による体積膨張に関する研究報告は著者の知る限り少ない. Deshpande⁽⁴⁾らは単一品種の大豆について3軸寸法や真密度, 見かけ密度, 球相当直径などを統一的に測定しているが日本の品種との違いから, 国内において従来知られている値⁽³⁹⁾とは異なっており, 利用できない. また, 密度を湿量基準で表しているため, 基本的に水分の1次式で近似するには無理が生じる. 村田ら⁽¹⁹⁾や田川ら⁽³⁰⁾は大豆(シロタエ, 音更大袖)について熱, および水分の関数として乾量基準の比容積の対数を取り, それぞれ2次式で近似した実験式を報告しているが, 品種や形状の違いによる水分膨張係数の変化については述べられていない.

この章では, 大豆の比容積や真密度, 見掛け密度など乾燥に影響する大豆固有の物性量に関して理論的考察を行い, これらを基本的な物性定数と水分の関数として表すと同時にこれらの物性量間の関係についても考察した. さらに食用として一般的な5品種の大豆の同一材料について測定し, その結果を考察の結果と比較し, 物性量の定数を求め, 明らかにした. これにより, 乾燥での物性量を少ない基本的定数で表し, 実際のシミュレーションでの測定項目

を少なくすることができるようにする.

2. 大豆の比容積, 真密度, 空隙率に関する理論的考察

1) 水分と乾量基準の比容積, 真密度との関係

材料の比容積や真密度, 見かけ密度などの物性量を水分の関数として表す場合, 乾量基準を用いて表すとそれらの間の関係が明確になるため, ここではその基準を採用する. 温度は一定温度(20℃)での値とするが熱膨張率は水分膨張率に比較して小さい⁽¹⁹⁾ので通常は無視できる. 必要であれば熱膨張係数で補正する.

水分が m (d.b. decimal) のときの乾量基準の比容積 V_m (m^3/kg) を乾物比容積 V_0 (m^3/kg) とそれ以外の水による体積 $\gamma \cdot m / \rho_w$ (ρ_w : 水の密度, γ は比容積補正のための係数) の和で表す.

$$\begin{aligned} V_m &= V_0 + \gamma \cdot m / \rho_w \\ &= V_0 \{1 + \gamma (\rho_{d0} / \rho_w) m\} \\ &= V_0 \cdot \gamma_m \end{aligned} \quad (2.1)$$

ただし, ρ_{d0} ($= 1/V_0$) は乾物真密度とし, γ_m は水分体積膨張率で以下のように定義する.

$$\gamma_m \equiv 1 + \gamma (\rho_{d0} / \rho_w) m = 1 + \gamma \cdot \gamma_s \cdot m \quad (2.2)$$

ただし, γ_s は材料の乾物比重である. 一般的に γ は, 大豆子実の組織構造の関係から水の体積膨張以下と考えられ, 1よりも若干小さいと考えられる. また, $1/V_m$ を ρ_{dm} として水分が m のときの乾物 1 kg 当たりの真密度とすると

$$\rho_{dm} \equiv 1/V_m = \rho_{d0} \cdot \gamma_m^{-1} \quad (2.3)$$

従って通常の湿量基準の真密度 ρ_m は

$$\begin{aligned} \rho_m &= (1+m) / V_m = \rho_{dm} (1+m) \\ &= \rho_{d0} (1+m) \cdot \gamma_m^{-1} \end{aligned} \quad (2.4)$$

と表せる. ただし, γ は水分の関数であり, 水分が低くなるに従い水分膨張係数は小さくなる⁽¹⁹⁾⁽³⁰⁾ので実際は実測値から一次回帰式を求めることになる. 低水分域も含めて広い水分範囲でも当てはまる比容積の関数形は $m=0$ で $V_m=V_0$, 水分がふえてくると γ は 1 に近づくと考えられるので図4のように $V_m = V_{0c} + m / \rho_w$ (V_{0c} は高水分域での回帰式の切片水分) を漸近線とする双曲線で近似するのが妥当と考えられる. そこで

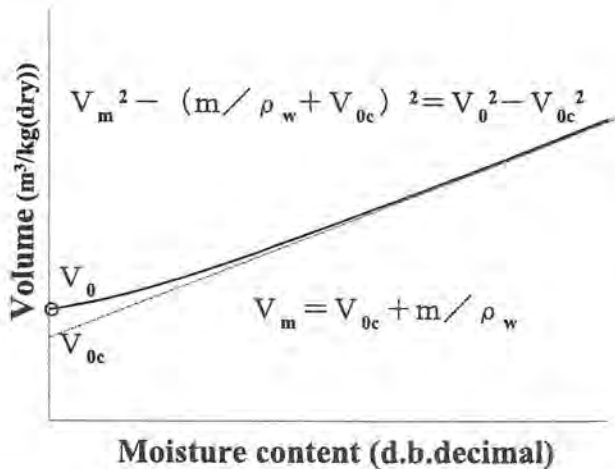


図4 大豆の真体積の双曲線近似

Fig.4 Hyperbola approximation of the volume of soybean

$$V_m^2 - (m/\rho_w + V_{0c})^2 = V_0^2 - V_{0c}^2$$

$$V_m = \{ (m/\rho_w)^2 + 2V_{0c}(m/\rho_w) + V_0^2 \}^{1/2} \quad (2.5)$$

として実測値より V_{0c} , V_0 を推定する。

以上、材料の乾量基準での比容積、真密度は、材料の乾物真密度と水分体積補正係数の定数または(2.5)式によって水分の関数として表されると推察される。

2) 乾物基準見かけ密度と充てん率 (空隙率)

水分が m のときの乾物 1 kg 当たりの見かけ体積 V'_m (m^3/kg)、乾量基準の見かけ密度を ρ'_{dm} ($= 1/V'_m$, kg/m^3)、空隙率を ε とすると

$$1 - \varepsilon = V_m/V'_m = \rho'_{dm}/\rho_{dm} \quad (2.6)$$

計量容器が十分大きければ、ある材料が充てんされ、材料が水分などによって等方的に一様に膨脹したとすると V_m と V'_m の比は一定となるので充てん率 ($1 - \varepsilon$) は理論的には一定となる。大豆の場合の水分膨脹は実際には非等方的で長軸方向に大きく膨脹するので多少ずれると考えられる。大豆の3軸の平均を a, b, c として立方体につめた n^3 粒あたりの粒子のたて、よこ、高さ方向の大豆の各軸の向く頻度がそれぞれ $1/3$ とし、各辺の堆積高さが $(a+b+c)n/3$ で表されるとすると見かけ体積は $\{(a+b+c)n/3\}^3$ で表される。1粒あたりの平均の体積は $\pi abc/6$ で表されるので真体積は $\pi n^3 abc/6$ 、したがって充てん率は

$$1 - \varepsilon = \frac{\pi abc}{6 (a+b+c)/3)^3} \quad (2.7)$$

で表される。ところが

$$(a+b+c)/3 \geq \sqrt[3]{abc} \quad (2.8)$$

の関係があるので

$$k = abc / \{(a+b+c)/3\}^3 \leq 1 \quad (2.9)$$

とすると(2.7)式は

$$1 - \varepsilon \equiv \rho'_{dm}/\rho_{dm} = \pi k/6 \quad (2.10)$$

としてこのモデルでは k (≤ 1) の係数を用いて充てん率を表すことができる。(2.10)で定義された係数 k を改めて充てん係数と定義すると、このモデルでは充てん率は $\pi/6$ よりも小さいと推定され、さらに水分の違いによって3軸の寸法の変化から k の値が変化し、すなわち、水分が増えるに従い非等方的な3軸方向の膨脹率の違いから k の値は若干小さくなると推定される。この充てん係数 k を用いると乾量基準見かけ密度 ρ'_{dm} は

$$\rho'_{dm} = (\pi k/6) \rho_{dm}$$

$$= (\pi k/6) \rho_{d0} \cdot \gamma_m^{-1} \quad (2.11)$$

と乾物真体積 ρ_{d0} と k , γ_m によって表される。 k の水分による変化が少なければ、 ρ'_{dm} は水分の減少によって γ_m に反比例して増大すると推定できる。一方、乾量基準見かけ体積 V'_m ($= 1/\rho'_{dm}$) は

$$V'_m = 1/\rho'_{dm} = (6/\pi k) V_0 \cdot \gamma_m$$

$$\cong V_0 \cdot \gamma_m \quad (2.12)$$

と γ_m に比例して増大する。従って乾燥によって見かけ体積 V'_m は初期水分 m_0 での体積 V_{m0}' に対して

$$V'_m = V_{m0}' (\gamma_m/\gamma_{m0}) \quad (2.13)$$

と γ_m に比例して減少すると予想される。このことから材料の水分が一樣と近似できる場合(例えば循環式乾燥や流動層乾燥)であれば堆積高さの変化からある程度平均水分の推定が可能と思われる。

この V'_m と通常湿度基準の見かけ密度(かさ密度) ρ' (kg/m^3) との関係を求めると

$$\rho' = (1+m)/V'_m = \rho'_{dm}(1+m) \quad (2.14)$$

と表される。ここで ρ'_{dm} に(2.11)式、 γ_m に(2.2)式を代入して ρ' を水分の関数として表すと

$$\rho' = (\pi k/6) \rho_{d0} (1+m) / (1 + \gamma \cdot \gamma_s \cdot m) \quad (2.15)$$

となり、見かけ密度 ρ' の場合、水分による変化は少ないと予想される。

3. 試験方法

1) 比容積, 見かけ体積, 充てん率と水分の関係

大豆(タチナガハ, タマホマレ, フクユタカ, スズユタカ, エンレイ)の初期水分が25~30% d.b. (20~23% w.b.)の同一材料について, それぞれ室内で乾燥しながら水分を変えて真体積と見かけ体積の変化を調べた。また, 水分が30% d.b.以上の場合を調べるため, タチナガハに加水して1日置いた後, 水分が100% d.b.以下の材料の体積変化を測定した。同一材料の測定を行うため, 真体積は図5に示す空気圧式の真体積計(DAIKI, 土壌3相メータ DIK-1120)を用いて温度が20℃前後の一定の室内において測定した。測定前には測定対象の大豆の体積に近い50cm³の較正用試験片を用いて較正を行った。また, この体積計の精度を求めるため, ガラス球(直径8 mm)38~53cm³を用いて水による液体置換法により測った真体積の値と比較した。すなわち, ガラス球の重量(W_sとする)を測定した後, 300cm³のメスフラスコに入れて水を満たし, その合計の重量を測り(W_t), 次に水で満たした重量を測り(W₀), これよりガラス球の体積 $V = (W_s + W_0 - W_t) / \rho_w$ (ρ_w :水の密度)を求める。この結果, 体積計による真体積の値は試験材料の測定範囲である43~53cm³では図6のように最大で±0.2cm³程度である。測定材料は真体積計の容器の容積の関係から見かけ体積が100cm³ほどの材料を選び測定した。見かけ体

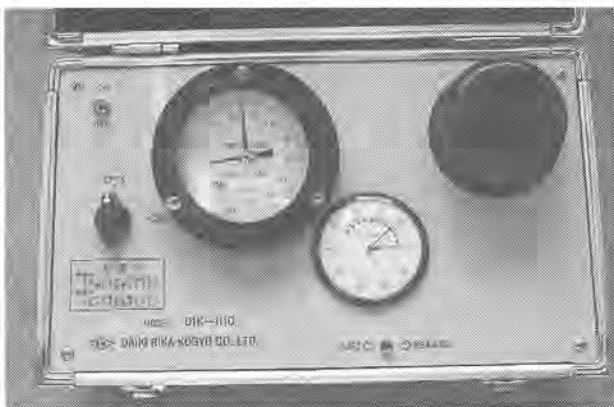


図5 大豆の真体積測定に用いた空気圧式真体積計(DAIKI, 土壌3相メータ DIK-1120)
Fig5 Volume meter for measuring the volume of soybeans (DAIKI soil 3 phase meter, DIK-1120)

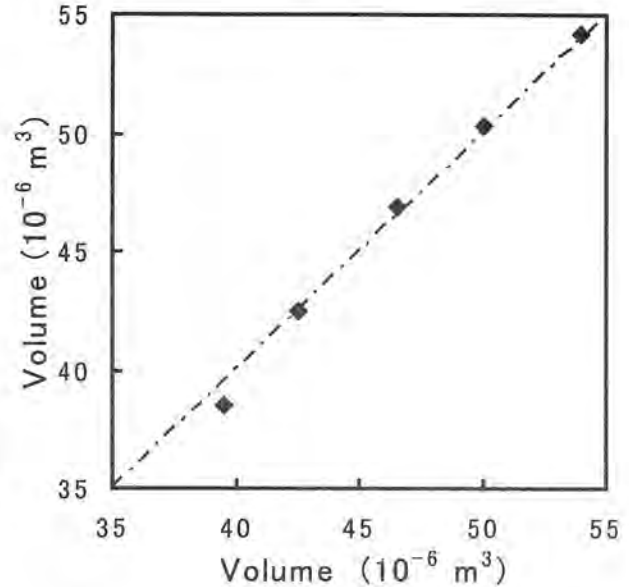


図6 大豆の真体積測定に用いた空気圧式真体積計(DAIKI)の精度
横軸は水による液体置換法で求めたガラス球の真体積

Fig.6 Accuracy of the volume meter(DAIKI DIK-1120 air pressure type)

積の測定は300cm³のメスシリンダーに上記の同一の材料をつめ込み, 5回程軽くたたいてから行った。真体積と見かけ体積の関係から, 空隙率 ϵ は $(1 - v/v')$ (v は真体積, v' は見かけ体積)より求めた。以上の測定したデータから乾量基準の比容積, 見かけ体積, 充てん率を求め, 水分との関係を調べた。水分の測定は105℃-24h法の炉乾法によって行った。

2) 大豆の3軸寸法と水分の関係

同一材料のタチナガハ50粒の粒子それぞれについて水分を0~50% d.b.の間で6段階で変えて3軸寸法をデジタルノギスを用いて測定した。これより各軸方向の水分膨張係数を求めた。大豆の3軸を a, b, c ($a > b > c$)とし, 楕円体で近似して体積を $(\pi/6)abc$ として計算から求めた1粒あたりの平均の真体積と真体積計を用いた実測値から計算した1粒あたりの真体積の値と比較し, 両者の方法による体積膨張率の比較を行った。さらに理論的考察による立方充てんでの充てん係数(2.9)式の値を各粒子について求め, 最小自乗法により, 水分の関数として表した。

4. 結果と考察

1) 水分と比容積との関係

水分 m (d.b.decimal) と大豆の乾量基準の比容積 V_m ($10^{-3} m^3/kg$) との関係を図7, 8のように水分がほぼ0~30% d.b. (0~23% w.b.) の範囲において、いずれの品種においても水分と比容積の間に強い直線関係が認められた。また、品種の違いによる傾向の違いはあまり認められず、ほぼ同じ傾向の直線関係であった。各品種における回帰直線の定数項の部分は実測による乾物比容積よりも若干小さい傾向がみられるが実測値に近い値となった。乾物比容積の測定値の不偏分散の平方根は0.026 ($10^{-3} m^3/kg$, $n=5$) 程度で、水分 m の係数は品種に

よらず、ほぼ1 ($10^{-3} m^3/kg$) に近い値となった。

それぞれの品種の回帰直線の m の係数 k_m と切片の

平均 V_0 をとって比容積 V_m ($10^{-3} m^3/kg$) を表すと

$$k_m = 0.956 \pm 0.065 \quad (10^{-3} m^3/kg) \quad (2.16)$$

$$V_0 = 0.771 \pm 0.013 \quad (10^{-3} m^3/kg) \quad (2.17)$$

$$V_m = V_0 + k_m \cdot m = 0.771 + 0.956 m \quad (2.18)$$

($r^2 \cong 0.92$, \pm は以下、5品種の測定値の不偏分散の平方根とする)であり、この式を以下の大豆の比容積に関する理論的考察による(2.1)式と比較すると

$$V_m = 1/\rho_{d0} + (\gamma/\rho_w) m \\ = V_0 \{1 + \gamma (\rho_{d0}/\rho_w) m\} \quad (2.19)$$

ただし、 ρ_w は水の密度、 $\rho_w = 1 (10^3 kg/m^3)$ 、実験材料に使用した大豆の乾物比容積 V_0 の測定値の

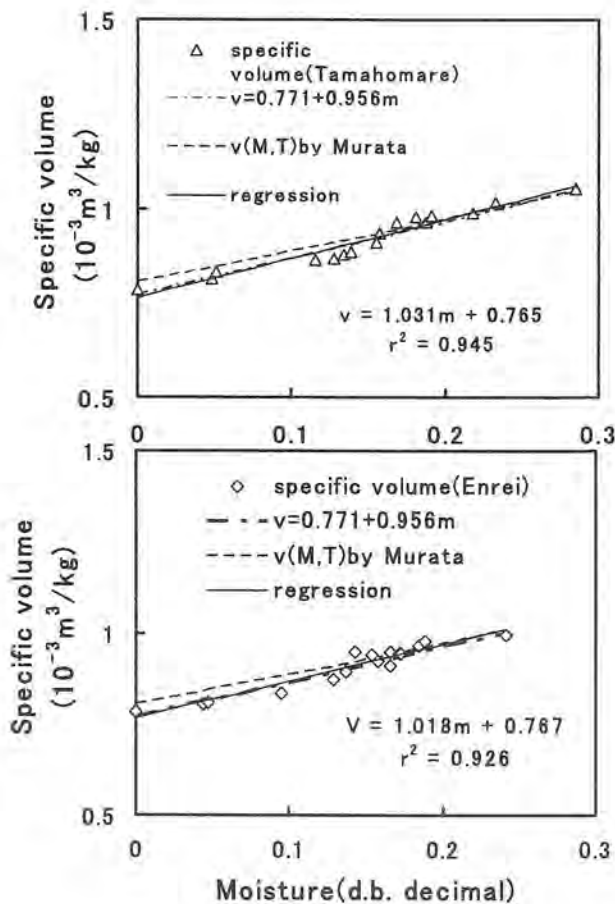


図7 大豆(タマホマレ、エンレイ)の比容積と含水比との関係、および近似式の比較
Fig.7 Relationship between specific volume v (dry base) and moisture content m (d.b. decimal) of soybeans (Tamahomare, Enrei variety) and comparison of approximate equations about specific volume Murata's eq.; $1/n(v) = (a m^2 + b m + c)t + d m^2 + e m + f$ $a=0.1500E-2$, $b=-0.8745E-3$, $c=0.6032E-3$, $d=-0.2016$, $e=0.9875$, $f=-0.2294$, $t=20(^{\circ}C)$

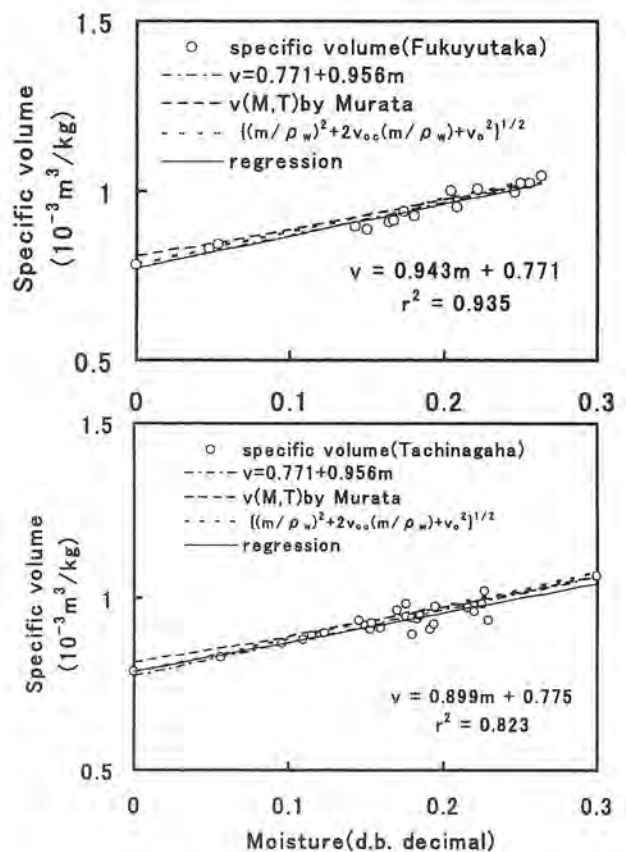


図8 大豆(フクユタカ、タチナガハ)の比容積と含水比との関係、および双曲線近似式と他の近似式の比較
Fig.8 Relationship between specific volume and moisture content of soybeans (Fukuyutaka, Tachinagaha variety) and comparison of approximate equation of hyperbola to a linear equation and Murata's eq. about specific volume Approximate hyperbolic eq.; $v_m = ((m/\rho_w)^2 + 2 v_{0c} (m/\rho_w) + v_0^2)^{1/2}$ $v_0 = 0.771 (10^{-3} m^3/kg)$, $v_{0c} = 0.746$, ρ_w (density of water) = $1.0 (10^3 kg/m^3)$

表1 大豆の乾物基準での真体積, 見かけ体積, 充てん率, 充てん係数と水分との関係 (直線回帰式) および乾物基準の真体積の各品種平均回帰式 $V_m = 0.956 m + 0.771$ の適合度検定
 Table 1 Relationship between dry base volume, dry base bulk volume, rate of volume, coefficient of volume rate κ of soybeans and moisture content (linear regression fomulas) and significance of testing hypotheses of eq.v=0.956 m +0.771 of specific volume.

variety	dry volume (10 ³ m ³ /kg)	dry density (10 ³ kg/m ³)	dry base specific volume (10 ³ m ³ /kg)	dry base bulk volume (10 ³ m ³ /kg)	rate of volume (1 - ε)	coefficient κ 6(1 - ε) / π
Fukuyutaka n=16	0.780	1.282	0.943 m + 0.771 (r ² =0.94) 0.771 (1.223 m + 1) (t=- 0.624)**	1.876 m + 1.446 (r ² =0.89) 1.446 (1.297 m + 1)	- 0.0238 m + 0.532	- 0.046 m + 1.016
Suzuyutaka n=15	0.788	1.269	0.891 m + 0.779 (r ² =0.95) 0.779 (1.144 m + 1) (t=- 3.97)	1.704 m + 1.480 (r ² =0.84) 1.480 (1.151 m + 1)	0.0021 m + 0.526	0.004 m + 1.004
Tamahomare n=16	0.783	1.277	1.031 m + 0.765 (r ² =0.95) 0.765 (1.348 m + 1) (t=3.09) *	2.269 m + 1.474 (r ² =0.88) 1.474 (1.540 m + 1)	- 0.0627 m + 0.517	- 0.120 m + 0.987
Enrei n=16	0.785	1.274	1.018 m + 0.767 (r ² =0.93) 0.767 (1.328 m + 1) (t=2.83) *	1.704 m + 1.475 (r ² =0.82) 1.475 (1.155 m + 1)	0.0767 m + 0.520	0.146 m + 0.994
Tachinagaha n=27	0.785	1.274	0.899 m + 0.775 (r ² =0.82) 0.775 (1.161 m + 1) (t=- 1.58)**	1.951 m + 1.455 (r ² =0.78) 1.455 (1.341 m + 1)	- 0.0681 m + 0.533	- 0.130 m + 1.003
average	0.784	1.275	0.956 m + 0.771	1.901 m + 1.466	- 0.0152 m + 0.526	- 0.029 m + 1.001
s	0.003	0.005	0.065 0.006	0.232 0.015	0.059 0.007	0.112 0.011
s _v	0.026	0.042				

s²; unbiased variance of varieties (n=5) S_v²; unbiased variance of dry volumes (n=5) ε; rate of space volume m; moisture content (d.b. decimal)
 t; t-distribution value of eq. 0.956 m + 0.771 of specific volume. t(n-2, 0.05)=2.16(n=15), 2.145(n=16), 2.06(n=27) t=(k_{reg}-k₀)(n-2) Σ (m-m_{ver})²
 **; 5% level of significance of testing hypotheses of eq.v=0.956 m + 0.771 of specific volume *; 1% level Σ (V_i-V_{ver}-k_{reg}(m-m_{ver}))²

平均は表1から

$$V_0 = 0.784 \pm 0.003$$

$$\rho_{d0} = 1/V_0 = 1.275 \pm 0.005 \quad (2.20)$$

と求められ, これを (2.18) の V_m の式に代入すると

$$V_m = 0.784 + \gamma \cdot m \quad (2.21)$$

となり, 実験式 (2.17) 式の第一項の定数項はほぼ 1 / ρ_{d0}, γ の値も 0.956 ± 0.065 で 1 に近い値となった。比容積を (2.18) 式で表す場合の定数項の部分は乾物の比容積より若干小さな値の比容積を用いるとより正確になると思われる。回帰直線より求めた定数項の平均値 0.771 を大豆の V₀ として V_m (10⁻³ m³/kg) を

$$V_m = V_0 + \gamma \cdot m = 0.771 + 0.965 m$$

$$(\rho_{d0} = 1/V_0 = 1.30 \pm 0.02) \quad (2.22)$$

で表し, タマホマレ, エンレイ, タチナガハ, フクユタカの場合について乾量基準の比容積で表した結果, 図7, 8の一点鎖線の直線で表され, 実測値の傾向と近似した。これはスズユタカでも同様であった。一次式近似の場合の統計的な検定を行うため, 乾物基準の比容積 v_i の分布が N (k₁ + k₂ · m_i, σ²) に従うとして各品種の (m_i, v_i) の分布の傾きが

(3.22) 式の傾きで表せるか有意水準 5% で検定した結果, フクユタカ, タチナガハでは仮説は成立した。その他の品種ではスズユタカを除き 1% の水準で成立した (表1)。この実験の測定精度の範囲では調査したスズユタカを除く 4 品種の比容積に関しては差は認められないと考えられる。ここで村田らの比容積の式⁽¹⁹⁾

$$Q_n V_m = (a m^2 + b m + c) t + d m^2 + e m + f \quad (2.23)$$

$$a = 0.150 \times 10^{-2}, b = -0.8745 \times 10^{-3}, c = 0.603 \times 10^{-3},$$

$$d = -0.2016, e = 0.9875, f = -0.2294$$

t = 20(°C) (品種: シロタエ) で表したものが図7, 8の破線であるが約 12% d.b. 以下で若干差が生じ, (2.22) 式の方が若干低い値となるがともに実測値とほぼ一致しており, 水分が 10 ~ 30% d.b. の範囲では実用上は (2.22) 式で十分とみられる。10% d.b. 以下の水分では実測値の傾向は (2.23) 式に近く, 水分膨張係数は若干低くなってくるとと思われる。(2.5) 式の双曲線近似式の係数を, (2.22) 式の v₀ = 0.771 (10⁻³ m³/kg), v_{0,c} = 0.746 としてグラフに表した結果を図8の点線で示した。12% d.b. 以下の低水分域でも実測値と

合い、乾物時と低水分を含めて適合性が高く真体積の近似式として有効であると考えられた。低水分域で真体積が直線近似式の値よりも若干高めである理由は、大豆子実の組織構造によって水分が減少しても構造が維持されているためと考えられる。

水分が25%以上での加水した大豆（タチナガハ）で同様に調べてみると図9のように水分範囲による違いはみられず、同じような傾向がみられ、比容積は以下のような回帰直線で表された。

$$V_m = 0.751 + 0.965 m \quad (r^2 \cong 1.00) \quad (2.24)$$

使用した大豆（タチナガハ）の乾物比容積は $V_0 = 0.746 \pm 0.06$ であり、ほぼ回帰直線の切片に等しく、 m の係数もほぼ(2.19)式に等しいと考えられる。この場合は $V_0 = 0.746$ とした(2.22)式の方が実測値に近く、水分の増加につれて(2.23)式による値は実測値よりも大きくなった。これに比して $V_0 = 0.771, V_{0c} = 0.746$ とした双曲線近似の(2.5)式は、図9のように高水分域でも適合し、広い水分範囲で実測値に近似し、(2.23)式よりも比容積の近似式として有効であることが確認できた。

2) 水分による大豆子実粒の3軸寸法の変化

同一材料の50粒の大豆（タチナガハ）子実粒50粒について水分による3軸寸法を同一条件で測定し、その平均の変化を最少自乗法により一次回帰直線で近似した結果

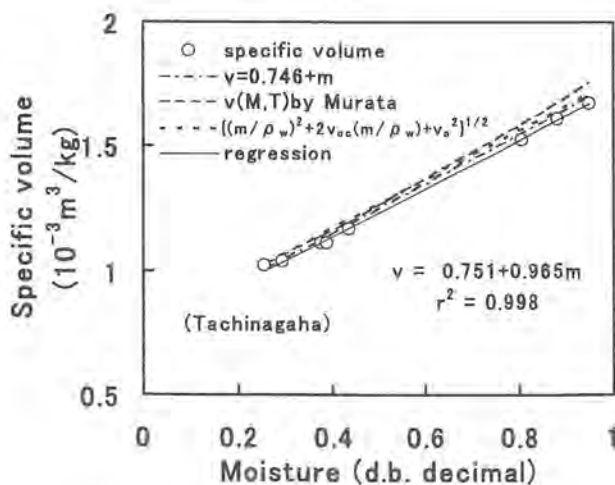


図9 吸水した大豆（タチナガハ）の比容積と含水比との関係、および近似式の比較
Fig.9 Relationship between specific volume and moisture content of water absorbed soybeans (Tachinagaha variety) and comparison of approximate equations about specific volume

$$a = 8.57 + 3.98 m = 8.57(1 + 0.464 m) \quad (r^2 \cong 0.935) \quad (2.25)$$

$$b = 7.98 + 1.77 m = 7.99(1 + 0.222 m) \quad (r^2 \cong 0.590) \quad (2.26)$$

$$c = 6.72 + 1.03 m = 6.72 (1 + 0.153 m) \quad (r^2 \cong 0.673) \quad (2.27)$$

単位； $(10^{-3} m^3)$
の回帰式が得られた(図10)。水分の係数は大黒ら⁽²⁸⁾の値よりも低めであった。これより楕円体近似で求められる体積は $V = (\pi/6) abc$ より

$$V = 0.241 (1 + 0.839 m + 0.208 m^2 + 0.016 m^3) \quad (2.28)$$

1粒ずつの体積を求めて最小自乗近似した直線回帰式 V 、および1粒あたりの平均乾物重 $0.305 (10^{-3} kg)$ で割った比容積 $v (10^{-3} m^3/kg)$ は

$$V = 0.241 (1 + 0.927 m) \quad (2.29)$$

$$v = 0.791 (1 + 0.927 m) \quad (2.30)$$

であった。一方、真体積計によるタチナガハの比容積の直線回帰式は表1のように

$$v = 0.787 (1 + 1.161 m) \quad (2.31)$$

であり、(2.30)式と実測値の分布は近似しており、3軸寸法の測定による真体積の計算値と実測値はほぼ近似した結果であると考えられる。

3) 見かけ体積について

横軸に水分 m (d.b. decimal)、縦軸に単位乾物当たりの見かけ体積 V_m' ($10^{-3} m^3/kg$) をとってフク

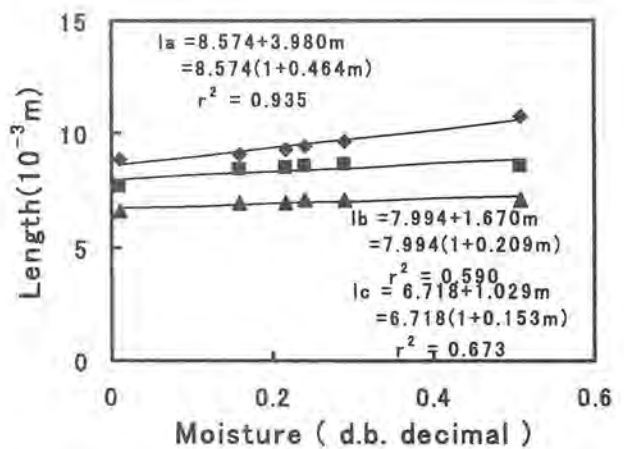


図10 大豆（タチナガハ）の3軸寸法と含水比の関係
(20°C, 50粒平均)
Fig.10 Variation of average values of three principal dimensions of soybeans (Tachinagaha, variety) with moisture content

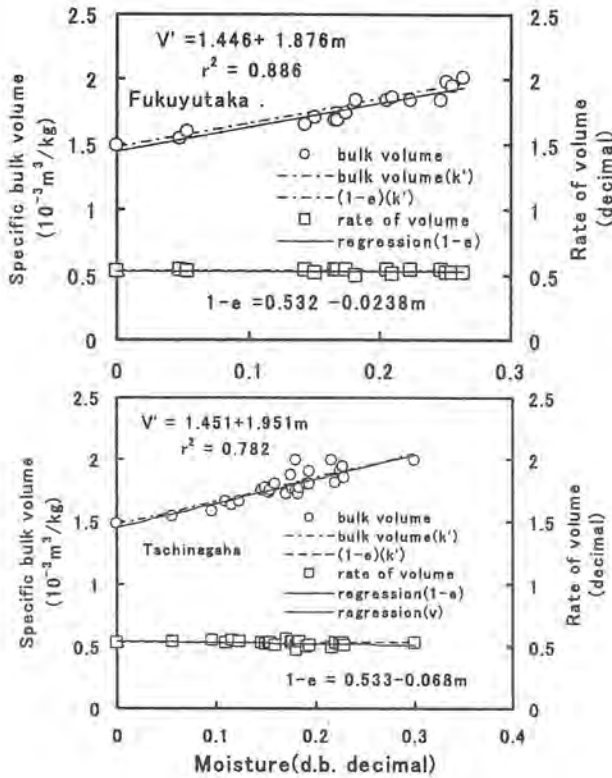


図11 大豆（フクユタカ、タチナガハ）の見かけ体積、充てん率と含水比の関係、および充てん係数 k' を用いた近似式との比較

Fig.11 Relationship between specific bulk volume v' , rate of kernel volume of soybeans (Fukuyutaka, Tachinagaha variety) $(1 - \epsilon)$ and moisture content, and comparison of approximate equations using coefficient k' of rate of kernel volume
 $v' = v / (1 - \epsilon)$ $6 v / k' \pi = 6 v_0 \gamma_m / (k' \pi)$,
 $1 - \epsilon = \pi k' / 6$, $k' = 1.00 - 0.029 m$

ユタカとタチナガハの場合をグラフにしてみると図11のように水分が0~30%d.b.の範囲においては、比容積に比較してバラツキは大きかったが水分に対して同様の一次関係がみられた。調査した5品種の大豆について最小自乗法により水分 m と V_m' の間の一次回帰を求めた結果、表1の比見かけ体積の項のように材料によって多少変動したが

$$V_m' = V_0' + a \cdot m \quad (r^2 \approx 0.78 \sim 0.89)$$

$$V_0' \approx 1.45 \sim 1.48, \quad a \approx 1.7 \sim 2.3 \quad (2.32)$$

の直線関係ではほぼ近似できた。フクユタカの場合について比容積の場合と同様、体積膨張率 γ_m' を用いて表すと表1のように

$$V_m' = V_0' \cdot \gamma_m' = 1.446 + 1.876 m$$

$$= 1.446 (1 + 1.297 m) \quad (r^2 = 0.89) \quad (2.33)$$

と表された。これを比容積 V_m と比較してみると

$$V_m = V_0 \cdot \gamma_m = 0.771 + 0.963 m$$

$$= 0.771 (1 + 1.223 m) \quad (r^2 \approx 0.94) \quad (2.34)$$

となり、 V_m と V_m' の間には空隙率 ϵ を用いて $V_m' = V_m / (1 - \epsilon)$ の関係があるので、 $m=0$ のときの $1 - \epsilon_0 = V_0 / V_0'$ を求めて比較すると

$$1 - \epsilon_0 = V_0 / V_0' = 0.771 / 1.446 = 0.533 \quad (2.35)$$

となって $1 - \epsilon_0$ に関しては、ほぼ実測値0.536に近似した値となり、 V_m' の定数項 V_0' は比容積の定数項と乾物での空隙率から表された。一方、 γ_m 、 γ_m' の項は水分による見かけ体積の係数が比容積の係数よりも大きく、水分が増加すると比容積の増加以上に見かけ体積が増加するという傾向がフクユタカ、タマホマレ、タチナガハの3品種の場合に認められた。これは大豆の場合、水分が増加すると等方的に膨張せず長軸方向に膨張するため、見かけ体積の増加率が大きくなるためと考えられる。このことに関しては次の空隙率の項で詳しく調べる。

4) 充てん率、あるいは空隙率について

各水分における真体積 V_m と見かけ体積 V_m' を測定し

$$1 - \epsilon = V_m / V_m' \quad (2.36)$$

の式によって充てん率 $1 - \epsilon$ を求めてみると図12の□印のような分布となった。これによると測定した水分が0から30%d.b.の全範囲で強い直線関係が

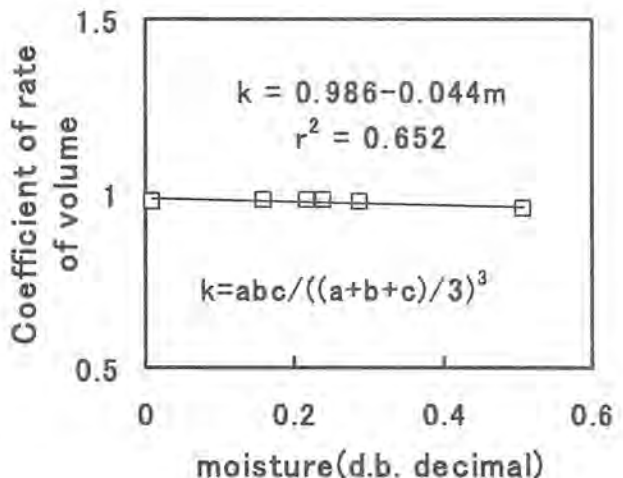


図12 大豆（タチナガハ）の3軸寸法から求めた充てん係数と含水比の関係

Fig.12 Variation of coefficient k of rate of volume calculated from three principal dimensions of soybeans (Tachinagaha variety) with moisture content $k = abc / ((a+b+c)/3)^3$

みられた。1次回帰直線によって水分と充てん率の関係を表してみると表1の(1-ε)の項のように定数項の部分はほぼ一定で0.517~0.533の範囲であった。フクユタカの場合についてみると

$$1 - \varepsilon = 0.532 - 0.0238m \quad (r^2 = 0.848) \quad (2.37)$$

これを等球の規則充てん⁽¹⁾での配位数8の正斜方充てん時の $1 - \varepsilon = \sqrt{3} \pi / 9 = 0.6046$ 、配位数6の立方充てん時の $1 - \varepsilon = \pi / 6 = 0.5236$ と比較してみると、(1-ε)の直線近似による値では

$$0.5236 < 1 - \varepsilon = 0.532 - 0.0238m < 0.6046 \quad (2.38)$$

が成立した。実際の充てんでは粒子分布を有するランダムな充てんであるが測定の結果、乾物での値は

かなり立方充てん時の充てん率に近い値を示した。このことは理論的考察での疎充てんでの立方充てんモデルを充てん率の推定に応用しうると考えられる。(2.8)式の充てん係数kを(1-ε)の実測値より最小自乗法から求めるとkはmの関数として

$$k = 1.017 - 0.0454m \quad (\text{フクユタカ}) \quad (2.39)$$

$$k' = 1.001 - 0.029m \quad (5 \text{ 品種の平均}) \quad (2.40)$$

で表された(表1, 図13)。他の品種についても充てん係数kを調べると定数項はほぼ1であり、タチナガハ、タマホマレについてもフクユタカと同様、水分mの係数は負の値を示した。スズユタカの場合はkはほとんど1で一定、エンレイの場合はm(d.b. decimal)の係数は0.146を示した。この両者の品種では水分膨張による3軸寸法の変化が他の品種に比較してより等方的であったためと考えられる。充てん率は粒子の形状と大きさの分布によると考えられるので、以上の結果は水分膨張による大豆子実の形状の変化により、乾物では粒子はほぼ球の場合の立方充てんでの値0.5236に近く、充てん係数は水分の増加につれて1より若干減少する傾向がみられる。3軸寸法a,b,cを有する大豆の充てん係数kに関しての理論的考察での式(2.9)に実測した大豆(タチナガハ)の3軸の値を代入し、一次回帰直線をとってみると図12のように

$$k'' = abc / \{(a + b + c) / 3\}^3 = 0.986 - 0.044m \quad (r^2 = 0.652) \quad (2.41)$$

と(2.37)式とほぼ一致した結果となった。真体積と見かけ体積から求めた充てん係数の実測値と(2.40)、(2.39)式を比較してみると図13(フクユタカ, タチナガハ)のように(2.38)式の方が若干回帰式に近かったがともに充てん係数の分布の傾向と近似した。他の品種でも実際の分布では同様に近似した傾向を示した。以上のことから、大豆の場合、乾物での充てん率は立方充てんでの値 $\pi / 6$ に近く、水分が増えてくると充てん率に関する考察のように3軸寸法の水分膨張による変化から充てん率が若干減ってくると考えられる。この空隙率より体積の乾物当たり見かけ体積 V_m' をkを5品種の平均である $V_0 = 0.771$ ($\gamma_s = 1 / 0.771$), $k = 1.00 - 0.029m$ として

$$V_m' = V_m / (1 - \varepsilon) = (6 / k \pi) V_m = (6 / k \pi) V_0 (1 + \gamma_s m) \quad (2.42)$$

としてタチナガハ、フクユタカの場合について見かけ体積と充てん率(1-ε)の実測値と比較してみ

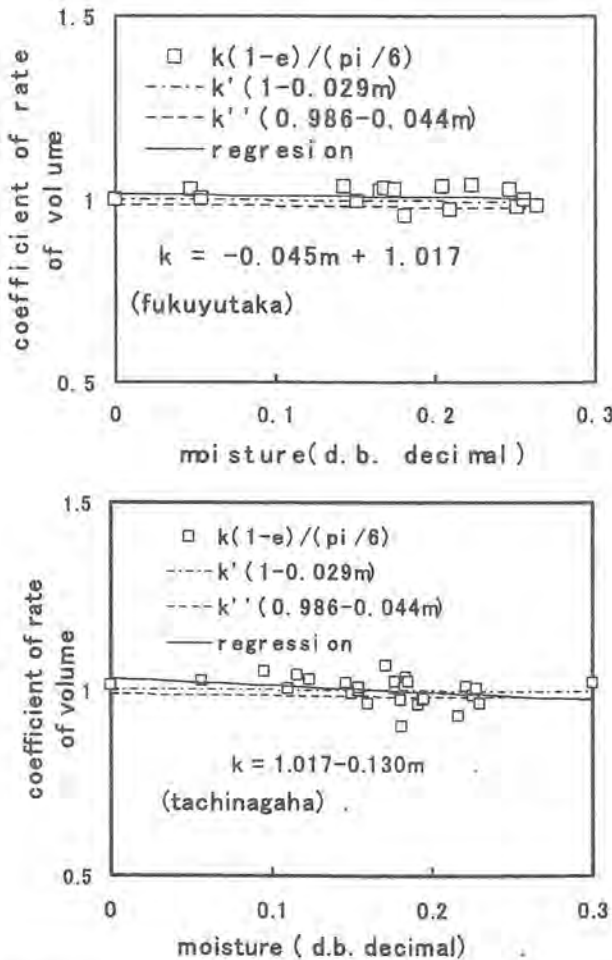


図13 大豆(フクユタカ, タチナガハ)の見かけ体積から求めた充てん係数と含水比の関係, およびその近似式

Fig.13 Variation of coefficient of rate of volume of soybeans(Tachinagaha,Fukuyutaka variety) with moisture content and comparison of approximate equations using coefficient k' k''

$$k' = 1.00 - 0.029m, \quad k'' = 0.986 - 0.044m$$

ると図11のように実測値にかなり近似する結果となった。この傾向は他の品種でも同様であった。以上より V_m' は比容積と空隙率の充てん係数 k によって水分の関数として表されると考えられる。

5. まとめ

大豆の比容積、見かけ体積、充てん率（あるいは空隙率）など大豆の基本的な物性量について理論的に考察し、それらの物性量を基本的な物性量（乾物真密度、充てん係数）と水分の関数として表した。さらに比容積に関しては水の体積増加率による直線近似式、および低水分領域での水分膨張係数の減少を考慮した双曲線近似式を新たに提案し、更に充てん率の近似式としてランダム疎充てんモデルを考え、大豆の水分膨張にともなう長軸方向への伸長を考慮した充てん係数を定義し、大豆の3軸寸法の測定から充てん率の推定を行った。以上の考察に基づき、5品種の大豆（タチナガハ、タマホマレ、フクユタカ、スズユタカ、エンレイ）についてそれぞれ同一材料を用いて各物性量を同時に測定し、水分との関係や品種間差、物性量間の関係などについて明らかにし、多くの大豆に適応できる実用的な近似式を得た。この結果、大豆を乾燥機で乾燥する場合の乾燥過程の解析や乾燥調製技術の開発にとって必要となる大豆の物性量を水分の関数として明らかにし、その際の基本的なパラメータと応用範囲の広い簡単な近似式を提供した。

1) 水分が m (d.b. decimal) における大豆の乾量基準の比容積を V_m 、および真密度を $\rho_{dm} (= 1/V_m)$ とすると

$$V_m = V_0 \cdot \gamma_m \cdot \rho_{dm} = \rho_{d0} \cdot \gamma_m$$

$$\text{ただし } \gamma_m \equiv 1 + (\gamma \cdot \rho_{d0} / \rho_w) m$$

と表された。測定の結果、比容積の不偏分散の平方

根が 0.026 ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$) 程度である場合、大豆の場合は V_0 、 ρ_{d0} は品種によらずほとんど一定で $V_0 = 0.771 \pm 0.013$ ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$)、 $\rho_{d0} (= 1/V_0) = 1.30 \pm 0.03$ (10^3 kg/m^3)、 $\gamma = 0.956$ で、水分が約 10% d.b. 以上で良好な近似となることを明らかにした。また実用上、比容積は乾物比容積と水の体積の和で表した式でほぼ近似できることを明らかにした。さらに

$$V_m = \{ (m/\rho_w)^2 + 2V_{0c} (m/\rho_w) + V_0^2 \}^{1/2}$$

$$V_0 = 0.771 \text{ (} 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}), V_{0c} = 0.746$$

とした双曲線近似の式は広い水分範囲で実測値に近似し、比容積の近似式として有効であると考えられた。

2) 乾物当たりの見かけ体積 V_m' と空隙率 ε に関して、等球の場合の立方充てんを基準として

$$1 - \varepsilon = \pi k / 6 \quad (k \text{ は充てん係数})$$

と表し、測定した結果、充てん率は乾物ではほとんど等球の立方充てんでの値に等しく $k = 1$ で、品種による形状の変化の違いによって k の水分の係数は変動したが調査した5品種の平均で

$$k = 1.00 - 0.029 m$$

と水分の増加につれて充てん率は減少する傾向がみられた。これは大豆子実の乾燥が進むにつれて球形から楕円体形に変化するためと考察され、疎充てんでの立方充てんモデルによって充てん係数を大豆の3軸の実測値から求め、実測値と比較した結果、近似した傾向を示した。この結果、乾物当たりの見かけ体積 V_m' は

$$V_m' = V_m / (1 - \varepsilon) = 6 V_m / k \pi \\ = 6 \gamma_m / (k \pi \rho_{d0})$$

と水分の関数として表され、実測値と比較した結果、良い近似となった。

III 無次元数による大豆の通風圧力損失の解析

1. 目的

通風乾燥における堆積層内の圧力降下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2～3報告されているものの⁽²⁶⁾ 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。その中で小出ら⁽¹⁴⁾ はErgunの式を用いて小麦の体積比表面積と空隙率から圧力損失を予測する実験式を報告しているが、レイノルズ数と抗力係数あるいは摩擦係数との関係についての考察が不足していると思われる。変数の多い流れに関しては流体力学分野で使

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。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摩擦に起因するが、このときの材料との間の抗力係数、あるいは摩擦係数は、流れの境界条件である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からである⁽¹⁴⁾。この係数の推定は、圧力損失の計算に必要なだけでなく、乾燥における空気中での熱・物質移動係数を推定するにも重要な無次元量である⁽¹⁵⁾。従来、圧力損失と乾燥速度は別々に計算されていたが、実際は材料の乾燥による材料の形状変化によって圧力損失が変化し、乾燥速度も変化してくるはずであり、実際の乾燥経過をシミュレーションによって再現し、推定するためにはこれらの量の関係について詳しく調べ、解析する必要がある。

この章では、水分や大きさの異なる大豆を用いて風速と圧力損失の関係を測定し、圧力損失を計算する際の材料の係数が球モデルからある程度推定できる抗力モデル⁽¹³⁾により解析を行い、抗力係数とレイノルズ数との関係を詳しく調べた。また、熱、物質移動係数の推定に用いられる摩擦係数との関係についても考察し、従来知られている値との比較を行った。

2. 方法

1) 理論的考察

堆積層内の空気の流れに関する無次元化した Navier-Stokes の方程式、連続の方程式、および境界条件は

$$D \vec{v} / D t = -g r a d p + (1/R_e) \Delta \vec{v} \quad (3.1)$$

$$d i v \vec{v} = 0$$

$$\vec{v} = 0 \quad (\text{材料表面})$$

で表される。ただし、 $\vec{x} = L \vec{x}^*$ 、 $t = (L/u) t^*$ 、 $\vec{v} = u \vec{v}^*$ 、 $p = \rho u^2 p^*$ 、 $R_e = \rho u L / \mu$ (L : 代表長さ、 u : 無限遠での空気の速度、 R_e : レイノルズ数)。この無次元式より流れは R_e のみの関数となり、 R_e が等しく境界条件である堆積層の材料の形が相似であれば流れは相似となる。圧力損失は境界全表面における応力 p_{ik} を積分することによって得られ、 p_{ik} は $p_{ik} = -p \delta_{ik} + \mu e_{ik}$ と表さ

れる⁽⁷⁾ ので両辺を ρu^2 で割って無次元化し

$$p_{ik} / \rho u^2 = -p^* \delta_{ik} + (1/R_e) e_{ik} \quad (3.2)$$

ただし、 $e_{ik} = (\partial v_i / \partial x_k) + (\partial v_k / \partial x_i)$ とすると $p_{ik} / \rho u^2$ は相似の境界に対しては R_e だけの関数となる。従って以下のように1粒当たりの抗力係数 C_D を

$$C_D = \frac{F}{(1/2) \rho u^2 A} \quad (F: \text{抗力}, A: \text{断面積}) \quad (3.3)$$

と定義して実験での圧力損失から材料ごとに C_D を R_e の関数として求めれば、相似な流れに対しての圧力損失を推定することができる。 R_e は慣性力 ($\rho D v / D t$) と粘性力 ($\mu \Delta v$) の比で表されるので R_e が大きい流れでは慣性力の影響が大きく、抗力は速度に比例し (Stokes の抵抗法則)、逆に R_e が小さい流れでは粘性力の影響が大きく、抗力は速度の2乗に比例する (Newton の抵抗法則)⁽⁷⁾。この抗力係数を用いて充てん層内の圧力損失を以下のように求める。

空隙率 ε の充てん層内の各粒子 (球相当直径を D_p とする) が無限遠での速度 u の流体から受ける力を無限流体中にある静止単粒子の受ける抗力 F の $f(\varepsilon)$ 倍とする。 $f(\varepsilon)$ は無次元数で空隙率のみの関数となることが次元解析から推定できる。 N 個の粒子の受ける抗力は $N \cdot F \cdot f(\varepsilon)$ となるので、流れの層断面積を S 、長さを L とすると圧力損失 ΔP 、および N は以下の式で表される。

$$\Delta P = N \cdot F \cdot f(\varepsilon) / S \quad (3.4)$$

$$N = S \cdot L (1 - \varepsilon) / \{(\pi/6) D_p^3\} \quad (3.5)$$

抗力 F は抗力係数 C_D の定義から、流体の運動量と粒子の断面積 $A = \pi D_p^2 / (4 \phi_c)$ を用いて

$$F = C_D (\pi D_p^2 / 4 \phi_c) \cdot (\rho u^2 / 2) \quad (3.6)$$

と表される。ただし、 ϕ_c は粒子の形状係数。 $f(\varepsilon)$ は測定により、ほぼ以下の式で表されることが知られている⁽⁴⁾。

$$f(\varepsilon) = 25 (1 - \varepsilon) / (3 \varepsilon^3) \quad (3.7)$$

従って、(3.5) ~ (3.7) 式を (3.4) 式に代入して

$$\frac{\Delta P}{L} = C_D \frac{25 (1 - \varepsilon)^2 \rho u^2}{4 \varepsilon^3 \phi_c D_p} \quad (3.8)$$

が得られる。 C_D は無次元数で R_e のみの関数となり、球の場合、Navier-Stokes 方程式に基づく C_D の漸近解は

$$C_D = \frac{24}{R_e} \left\{ 1 + \frac{3}{16R_e} - \frac{9}{160R_e^2} \left(\log R_e + \gamma + \frac{2}{3} \log 2 - \frac{323}{360} \right) + \frac{27}{640R_e^3} \log R_e + O(R_e^{-3}) \right\} \quad (3.9)$$

($\gamma = 0.57721$ は Euler の定数)

の式が求められている⁽²⁾.

$$\text{ただし, } R_e = \frac{\rho \cdot \Phi_c D_p \cdot u}{\mu} \quad (3.10)$$

(ρ : 空気の密度, μ : 粘性率, u : 空塔速度, 層内の風速を u' とすると $u = \varepsilon u'$ の関係がある)

圧力損失でのレイノルズ数の定義は文献によって異なるが以下汎用性のあるこの定義で統一する. C_D の第一項目の $24/R_e$ は層流での球の場合の抗力係数となる. R_e と圧力損失の関係を求めるため, (3.8) 式より C_D を求め, R_e を用いて u を消去すると

$$C_D R_e^2 = \frac{4 \varepsilon^3 \phi_c^3 D_p^3 \rho \cdot \Delta P}{25 (1 - \varepsilon)^2 \mu^2 L} \quad (3.11)$$

となり, R_e と右辺の項の値を実際に測定によって調べることににより, ΔP を含む無次元式と $C_D R_e^2$ の関係が求められる. (3.9) 式は数値解を求めて計算すると

$$C_D = \frac{24}{R_e} + \frac{4}{\sqrt{R_e}} + 0.4 \quad (3.12)$$

の近似式で表されるので (この式の第1項目は Stokes 近似による球の場合の層流の粘性項であり, 3項目は慣性項である), 球に近い形状の粒状の材料の C_D を R_e の関数として一般的に以下の式で表すことにする.

$$C_D = \frac{a}{R_e} + \frac{b}{\sqrt{R_e}} + c \quad (3.13)$$

実際の粒子の場合, (3.12) 式も若干変化すると予想できるので, その変化分も含めてこの粒子の抗力係数 C_D のパラメータ a, b, c を実測より推定する. 前述の考察から C_D が無次元数であるので a, b, c は形状, 材

質のみの関数となる. ちなみに (3.8) 式の C_D に $24/R_e + 0.4$ を代入すると (これは $a=24, b=0, c=0.4$ の場合で粘性項と慣性項の和に相当する) 適合度の高い圧力損失の式として知られる Ergun の式が得られる.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot u}{\varepsilon^3 \cdot \phi_c^2 \cdot D_p^2} + 2.75 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \rho \cdot u^2}{\varepsilon^3 \cdot \phi_c \cdot D_p} \quad (3.14)$$

この式の適合性についても検討してみる. (3.8) 式より C_D を求めると

$$C_D = \frac{4 \varepsilon^3 (\Delta P/L) \phi_c D_p}{25 (1 - \varepsilon)^2 \rho \cdot u^2} \quad (3.15)$$

となり, (3.13), (3.15) 式から実際に測定により (3.13) 式の係数 a, b, c を最小二乗法によって求める.

2) 試験方法

(1) 実験装置と試験方法

通風圧力損失測定のための実験装置を図14に示す. 内径20cm, 高さ35cmの円筒形の容器を荷重計を介して垂直につり下げ, 下方よりビニールダクトを介して通風量可変の送風機より送風する. 容器側面の影響と堆積層の部位別の違いの影響を避けるため, 容器中心付近の風速と圧力損失を直接測定する方法をとった. すなわち, 底面より15cmの位置と25cmの位置に容器の壁面に直径6mmの穴をあけ, 容器のほぼ中央付近に内径5mmの円管をそれぞれ垂直に一直線になるように挿入し, ピトー管, ビニール管を介して電気容量式の微差圧計 (Setra Systems Inc. Model 261, フルレンジ6227Pa, 63.5mmAq) に接続し, 10cmの間の静圧を測定する. また, 底面より20cmの位置に静圧測定用の円管と並ぶように熱線式の風速計をセットし, その場所の風速を測定した. 容器内に熱電対 (T型) と湿度センサ (TDK湿度センサ) を挿入し, 通風空気の温度, 湿度を測定した. 圧力計と風速計の出力はX-Yペンレコーダに接続し, 通風量を0~1.2m/sの範囲で変え, 定常状態を保ちながら圧力損失と通風速度との関係を調べた. この実験の関係から求めた実測値 C_D と (3.8) 式の計算値 $C_D (a, b, R_e)$ から最小二乗法により, a, b を求めた. それぞれ粒径分布の異なる大豆粒子を用いて空隙率 ε , 球相当直径 $D_p = (6V/\pi)^{1/3}$, 充て

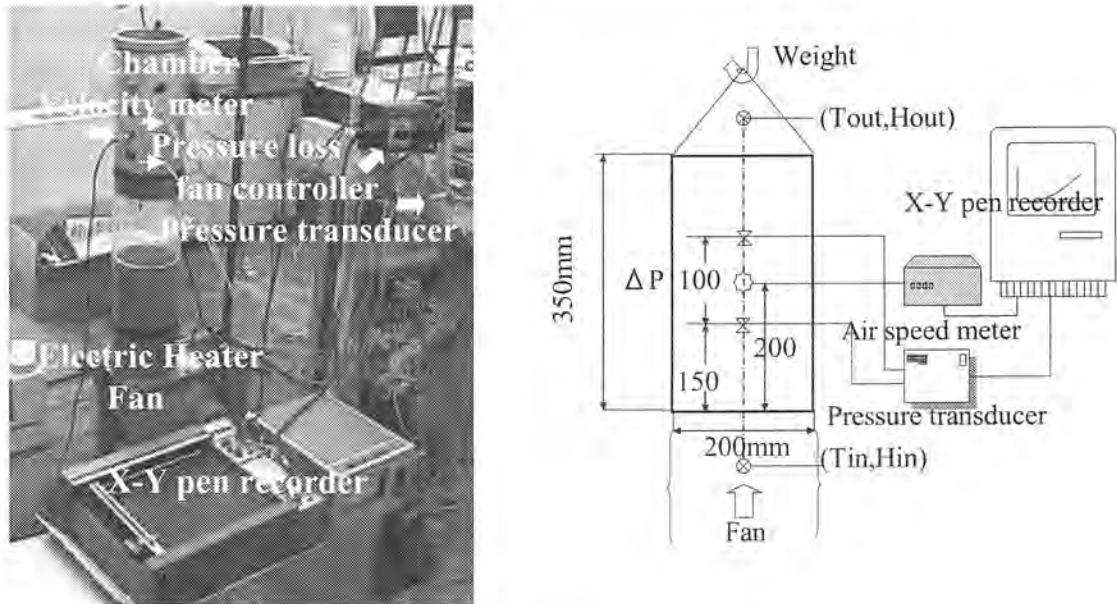


図14 通風圧力損失測定のための実験装置
Fig.14 Experimental apparatus for measuring pressure loss of materials

ん層中の風速 u ，水分を変え，(3.9) 式より C_D の変化を調べた。

(2) 試験材料

大豆用の選別機で選別した水分の異なる中粒大豆、および低水分の小粒大豆（ともにタチナガハ）を試験材料として使用した（表2）。試験材料50粒の3軸の寸法をデジタルノギスで測定し，3軸寸法より(3.18)~(3.20) 式にもとづいて1粒当たりの体積 V_p 、表面積 S_p を求め，1粒ごとの体積比表面積 a_p を算出した。ただし，この方法では体積と表面積の近似式による誤差が2重に加わるので計算で求めた S_p を乾物基準での表面積に換算し，それを空気圧式の真体積計（DAIKI, DIK-1120）により測定した体積から換算した乾物基準での体積で割って求めた体

積比表面積と比較した。またメスシリンダー（容量 300cm^3 ）により見掛け体積を測定し，これと真体積計から求めた体積から空隙率 ϵ を求めた。球相当直径 D_p と形状係数 ϕ_c 、 a_p の間には

$$a_p = \frac{S_p}{V_p} = \frac{\pi D_p^2 / \phi_c}{\pi D_p^3 / 6} = \frac{6}{\phi_c \cdot D_p} \quad (3.16)$$

の関係があるので， $\phi_c \cdot D_p = 6 / a_p$ と置き換えられる。したがって(3.8) 式は

$$\frac{\Delta P}{L} = C_D \frac{25(1 - \epsilon)^2 a_p \rho u^2}{24 \epsilon^3} \quad (3.17)$$

と表せる。また， V_p 、 S_p 、 S_p' は次の関係である。

表2 試験材料（大豆）の形状と物性値
Table2 property of experimental materials 8soybean0

Label Species	Moisture (%d.b.)	Weight (10^3kg)	Volume (10^6m^3)	3 length (10^3m)			Volume (10^6m^3)	Surface (10^3m^2)	Specific S ($10^3\text{m}^2/\text{m}^3$)	Diameter (10^3m)	Const. ϕ	Space ratio ϵ
soy.sl soybean	13.1	0.197	0.138	6.92	6.51	5.37	0.127	0.123	978	6.23	0.984	0.442
s.d. ²⁾	0.69			0.43	0.25	0.43	0.017	0.010	45		0.25	0.080
soy.ml	13.4	0.260	0.207	8.14	7.58	6.29	0.204	0.169	833	7.31	0.986	0.460
soy.mh	24.1	0.378	0.305	9.42	8.58	7.10	0.302	0.220	733	8.32	0.983	0.460

1) Approximate surface area by calculation 2) Standard deviation of 50 samples soybean (Tachinagaha)

$$V_p = (\pi/6) a b c \tag{3.18}$$

$$S_{p'} = \frac{\pi a b^2}{2\sqrt{1-b^2/a^2}} \times \sin^{-1}(\sqrt{1-b^2/a^2}) + \pi b^2/2 \tag{3.19}$$

$$S_{p''} = \frac{\pi a b^2}{2\sqrt{1-b''^2/a^2}} \times \sin^{-1}(\sqrt{1-b''^2/a^2}) + \pi b''^2/2 \tag{3.20}$$

近似式の間には次の関係が成り立つ.

$$S_{p'} < S_p < S_{p''} \tag{3.21}$$

$$a_p = S_p/V_p \tag{3.22}$$

ただし, $b' = (b+c)/2, b'' = (3b+c)/4$
 a_p に関しては水分の関数として

$$a_p = a_{p0} (1 + \gamma \cdot \gamma_s m)^{-1/3} \tag{3.23}$$

ただし, γ は真体積水分係数, γ_s は材料の比重で近似された値を用いる⁽⁹⁾. 形状係数は大豆の場合, 水分が13%w.b.以下ではほぼ一定で $\phi_c = 0.98 \sim 0.99$ 程度である. これより大豆の平均粒径より(3.16)式に代入して含水比 m (d.b.decimal) の a_p を推定でき

る. (3.17) 式の通風圧力損失に関係する材料の物性は材料の形状, 表面の材質による抗力係数の他, 体積比表面積と空隙率であるが堆積層内での圧力損失は材料のばらつきや堆積状況によって影響を受けると考えられ, この変動は抗力係数に含まれる.

3. 結果と考察

1) 試験材料の形状と体積比表面積, 空隙率

試験に用いた材料の圧力損失に関わる体積比表面積, 空隙率等は表2のとおりであった. 真体積計によって求めた1粒当たりの体積と楕円体近似で求めた体積の差は小さく, 近似式でも十分な精度が得られた. 表面積に関しては回転楕円体で近似しているため, 多少誤差が大きくなると推定されるが, (3.21) 式の関係から測定誤差の範囲は5%以内と推定される. 個体のばらつきの不偏標準偏差は測定値に対して8%程度であった. 校正した空気圧式の真体積計の測定誤差は1%以下である. 従って空隙率の測定誤差は, 見かけ体積の測定誤差の1%と合わせて2%程度と考えられる. 体積比表面積は733~978 m^{-1} (水分が高くなるにつれ値は小さくなる), 形状係数は0.98~0.99, 空隙率は0.44~0.46程度であった. 空隙率に関してはIIの $1 - \epsilon = \pi k / 6$, $k = 1.00 - 0.029 m$ (m ; d.b.decimal) の式が利用でき

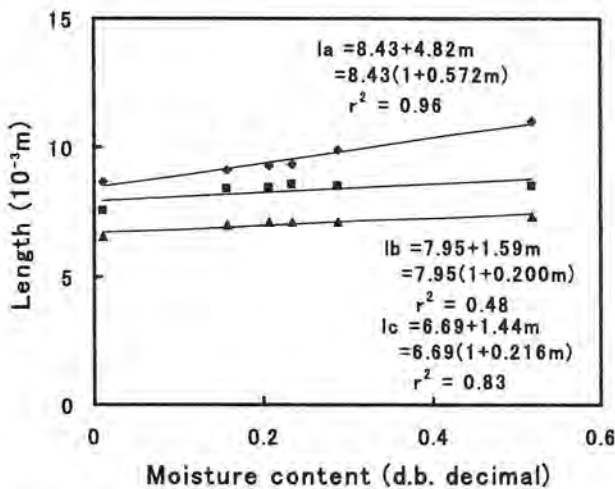


図15 大豆 (タチナガハ) の3軸寸法と水分の関係 (20°C, 20粒平均)
 Fig.15 Variation of average values of three principal dimensions of soybeans (Tachinagaha, variety) with moisture content

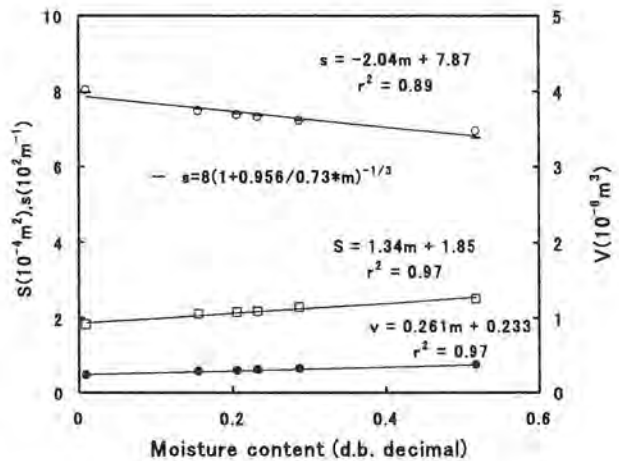


図16 大豆 (タチナガハ) の1粒あたりの体積, 表面積, 体積比表面積と水分の関係
 Fig.16 Relationship between particle volume, surface area, Specific surface area of soybean (Tachinagaha) and moisture content

る。大豆(タチナガハ) 20粒のそれぞれ同一粒について、水分を0~50%d.b.と変えて一粒当たりの重量、真体積計(空気圧式)による真体積、3軸寸法を測定した。3軸寸法より式(3.19),(3.20)を用いて一粒当たりの平均の表面積、単位乾物重量1kg当たりの比表面積、体積当たりの比表面積を計算した。水分(d.b.decimal)をX軸にとり、それぞれの値をグラフに表した結果、図15,16のようになった。いずれの数値も水分に対してほぼ直線関係で表され、一粒当たりの平均の体積 V_p 、表面積 S_p は

$$V_p = 0.261m + 0.233 \quad (10^{-6}m^3) \quad (3.24)$$

$$S_p = 1.34m + 1.85 \quad (10^{-4}m^2) \quad (3.25)$$

乾物1kg当たりの体積 V_D 、表面積 S_D は、個体ごとの変動も少なく、図17のように

$$V_D = 0.848m + 0.758 \quad (10^{-3}m^3/kg) \quad (3.26)$$

$$S_D = 4.36m + 6.01 \quad (10^{-1}m^2/kg) \quad (3.27)$$

の最小自乗法による1次の近次式で表された。体積比表面積 S は、1粒ずつの S_p/V_p 、あるいは S_D/V_D を求めて

$$S = -2.04m + 7.87 \quad (10^2m^{-1}) \quad (3.28)$$

と求められた。以上の直線回帰の近似式は、図15,16,17のようにほとんど実測値と一致した。これに対して(3.23)式で $S_0 = 7.9 (10^2m^{-1})$ 、 $\gamma = 0.956$ 、 $\gamma_s = 1.27$ として真体積の水分膨脹係数の式 $\gamma_m = 1 + \gamma_s \cdot \gamma_m$ を用いて体積比表面積 S_m を水分膨脹係数の $-1/3$ 乗で近似した式

$$S_m = S_0 \cdot \gamma_m^{-1/3} \quad (10^2m^{-1}) \quad (3.29)$$

として図16,17中に水分に対して一で表した結果、実測結果にほとんど一致した。この体積比表面積は、材料によってほとんど変化しないので、この近似式を用いて水分ごとの体積比表面積を計算することができる。

2) 通風速度と圧力損失の関係

堆積層内の通風速度を0~1 m/sまで変化させたとき圧力損失は図18のような変化をたどり、ほぼ u のべき乗関数に近い形で増加した。圧力が乱れはじめる通風速度は材料によって多少異なったが、ほぼ0.2m/s以上になると乱れが生じてきた。関数のあてはめを

$$Q_n(P) = a \cdot Q_n(u) + b \quad (3.30)$$

によって求めると P と u には $u > 0.2m/s$ の範囲ではかなり高い相関で $P = B \cdot u^a$ ($\gamma > 0.98$ 、ただし、 $B = e^b$)の関係がみられた。 a の値は材料によ

て異なったが1と2の間にあり、理論的考察のとおり圧力損失が空気の粘性率と通風速度 u との積の粘性項と空気の密度と u^2 との積の慣性項で表されると考えられる。放物線で近似した場合、soy.slの材料では図19のように $P = 176u^2 + 2668u - 6.9$ ($P; Pa/m, u; m/s$)でほぼ近似できた。ただし、この係数は材料の空隙率や大きさによって異なった。

(3.14)式のErgunの式の適合性について検討するためsoy.slの大豆の場合に表2の材料の実測した数値を与え実測値と比較した結果、傾向は似てはいるが誤差が大きく、係数を補正する必要があった。この

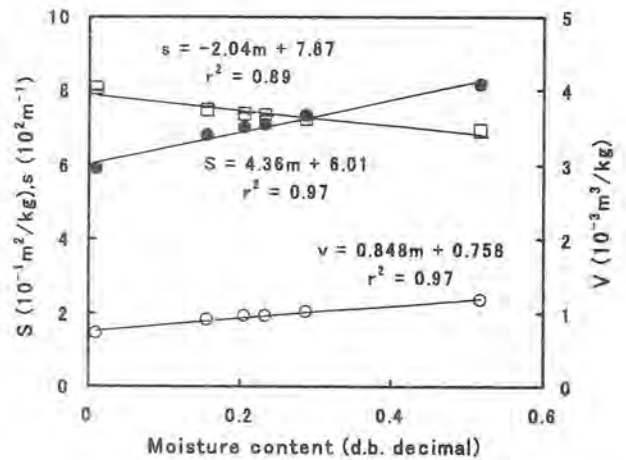


図17 大豆(タチナガハ)の乾物1kgあたりの体積 v 、表面積 S 、体積比表面積 s と水分の関係
Fig.17 Relationship between volume, surface area, specific surface area of dry mater 1kg soybean(Tachinagaha) and moisture content

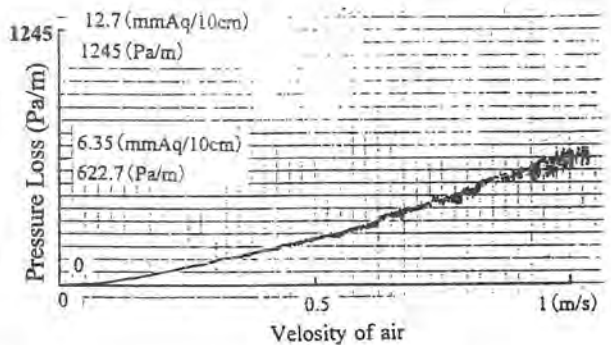


図18 大豆(タチナガハ:soy.sl)の通風圧力損失の実験データ(空隙率0.46, 体積比表面積 $833m^2/m^3$, 含水比13.4%d.b.)
Fig.18 Experimental data of pressure loss of soybean(Tachinagaha:soy.sl)

係数を2次の回帰式を用いて2.75は1.303, 150は346と補正した結果, ほぼ実測値と一致した(図19). 係数を補正することは(3.13)式の C_D の係数を $b=0$ として a, c を求めることに相当し, 次の項のように C_D の係数を Re の関数として品種ごとに求めるほうが汎用性があり精度が高くなる.

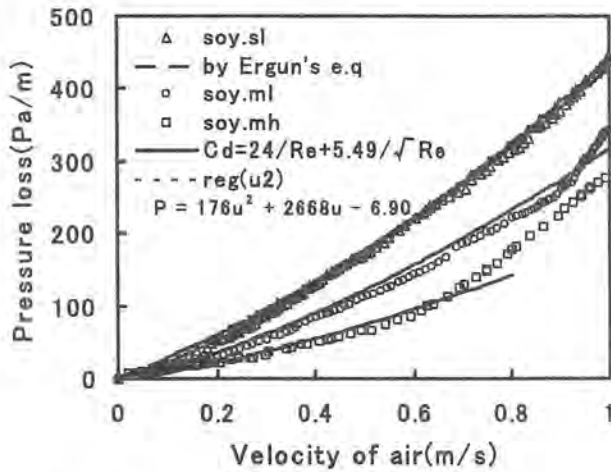


図19 大豆の通風圧力損失特性と近似式(Ergun, C_D)の比較

Fig.19 Pressure loss of soybean and comparison of approximate equations of Ergun's eq. and eq.(8) of using resistance factor C_D

$$\text{Ergun's equation } \frac{\Delta P}{L} = \frac{(1-\epsilon)^2 \cdot \mu \cdot u}{\epsilon^3 \cdot (\phi_c \cdot D_p)^2} + \frac{(1-\epsilon)^2 \cdot \rho \cdot u^2}{\epsilon^3 \cdot \phi_c \cdot D_p}$$

$$\text{eq.(3.8) } \frac{\Delta P}{L} = C_D \frac{25(1-\epsilon)^2 \rho u^2}{4\epsilon^3 \phi_c \cdot D_p}$$

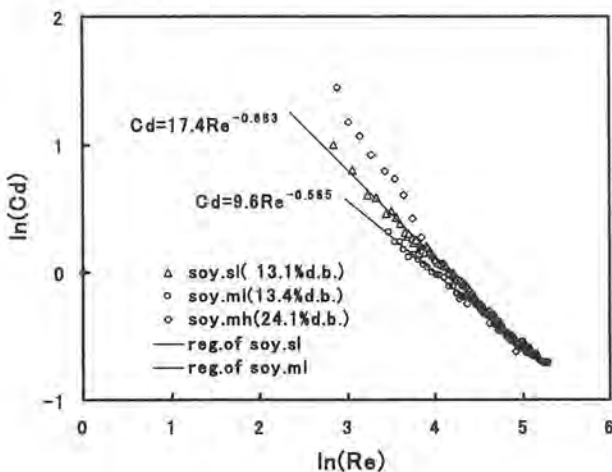


図20 対数変換による大豆の抗力係数とレイノルズ数の関係

Fig.20 Relationship between $\ln(R_e)$ and $\ln(C_D)$ of soybean

3) レイノルズ数と抗力係数の関係

(3.15)式で求めた抗力係数 C_D と(3.10)式で定義したレイノルズ数 Re のそれぞれの対数をとってグラフに表した結果, $40 < Re < 200$ の範囲では図20のような直線関係が認められた. このことから 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

$$C_D = a Re^{-b} \tag{3.31}$$

の形で表されると考えられる. 異なる材料によって C_D の傾向は若干変化したが一の材料からのサンプルではほとんど同じ傾向を示した. b の値は0.56~0.68であった. ただし, (3.15)式によって求められる C_D の値は材料の体積比表面積, 空隙率等の誤差から15%程度の誤差を含むと考えられる. 精度を上げるためには, (3.15)式の関係から特に空隙率の測定精度を上げる必要がある. 材料によって最小自乗法による C_D の係数は異なったが, グラフに表した結果では $Re < 80$ の範囲では材料によって違いが生じたが, $80 < Re < 200$ の範囲においてはほぼ同じ分布を示し, Re 数が大きくなるに従い材料間の違いは少なくなった.

Re と C_D の関係を形状係数がほぼ0.985に等しい平均粒径の異なる中粒(図中の記号soy.ml)と小粒大豆(soy.sl)で比較した結果, $Re < 80$ ではsoy.mlの方が若干低く, 近似した傾きの絶対値も0.565とsoy.slの0.683より低かった. Re と C_D は無次元数であり, 形が相似であれば大きさの次元(寸法の影響)は表れないと予想されるがレイノルズ数が低い領域では形状の影響を強く受け, より球に近く大きさの分布がより均一なsoy.mlの方が低い抗力係数の値になったと思われる.

高水分(18.5%w.b., 図中の記号はsoy.mh)と低水分(11.8%w.b., soy.ml)の平均粒径と形状係数の異なる大豆の比較では $80 < Re < 200$ の範囲では有意な差はなく, Re と C_D の関係はほぼ同じ傾向であった. $Re < 80$ の範囲では高水分の方が抗力係数が大きくなり, $80 < Re < 200$ での傾向とは異なり, マイナスの傾きが大きくなった.

以上の結果, $80 < Re < 200$ の範囲では測定した大豆では水分, 形状の違いによらず,

$$C_D = 17.4 Re^{-0.68} \quad (80 < Re < 200) \tag{3.32}$$

の近似式でほぼ表せた. $Re < 80$ ではマイナスの傾きは増加する傾向があるが材料の形状によってそれぞれ傾向が若干異なった.

更に球の場合の漸近解の近似式に基づく (3.13) 式を用いて異なる大きさの大豆、及び低水分、高水分で $C_D \sim Re$ 数の関係をとってグラフにし、 $80 < Re < 200$ の範囲で最小自乗法により 2 次回帰曲線を求めた結果、ほぼ以下の式で表すことができた。

$$C_D = \frac{26.2}{Re} + \frac{4.5}{\sqrt{Re}} + 0.03 \quad (80 < Re < 200) \quad (3.33)$$

この範囲の Re 数ではほぼ球の場合の抗力係数で表

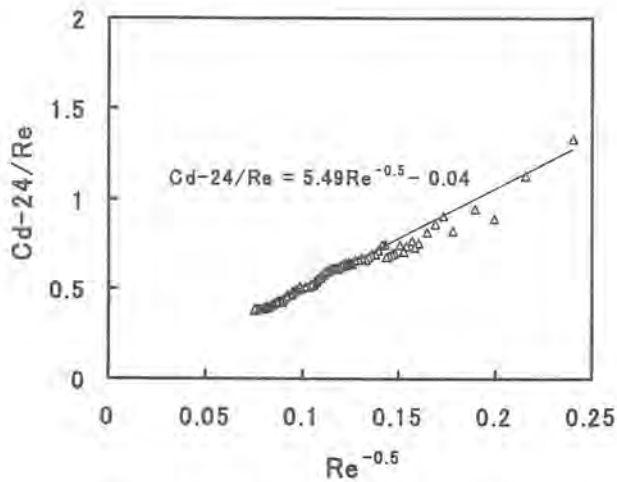


図21 大豆 (soy.sl) の抗力係数の近似式 ($C_D = 24/Re + a\sqrt{Re} + b$) への最小二乗法によるあてはめ

Fig.21 Relationship between $\sqrt{Re} \sim (C_D - 24/Re)$ and approximate equations

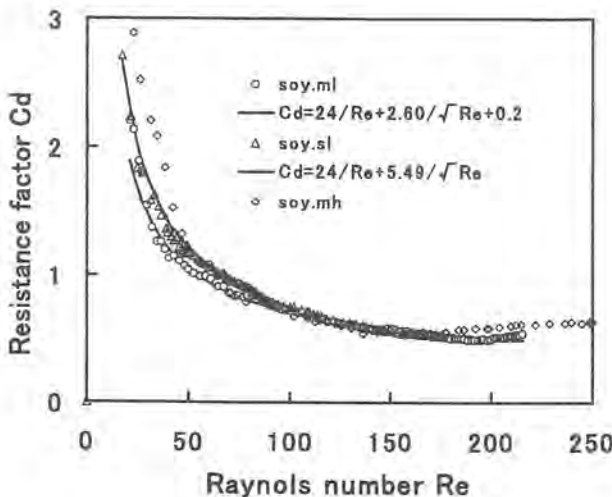


図22 大豆の抗力係数とレイノルズ数の関係

Fig.22 Relationship between resistance factor and Reynolds number of soybean

されると考えられるので ($C_D - 24/Re$) を y 軸にとり、 x 軸に \sqrt{Re} をとって最小自乗法により (3.13) 式の係数を 1 次回帰から求めた結果、図21ならびに以下の式で表された。

$$C_D - \frac{24}{Re} = \frac{5.49}{\sqrt{Re}} + 0.04 \quad (3.34)$$

(3.34) 式を用いて通風圧力損失を計算した結果、材料の違いによらず、図19の実線のように実測値とほとんど一致した。 $80 < Re < 200$ は大豆では通風速度がほぼ $0.2 \sim 1.0 \text{ m/s}$ に相当し、通常の通風乾燥に使用される通風量であり、通風圧力損失はこの C_D と材料の空隙率と体積比表面積の 2 つの物性量を用いて (3.17) 式から圧力損失を推定することができると思われる。大豆の場合の抗力係数が $80 < Re < 200$ の範囲ではほぼ (3.32)、(3.34) 式で表されることから、形状や大きさ、水分の違いによる圧力損失の違いはおもに材料の空隙率と体積比表面積の違いによるものと考えられる。

高水分の soy.mh の場合、 $Re > 180$ では C_D は上昇し、近似式とのずれは大きくなった。球、円柱および他の柱状物体での抗力係数のデータでは $Re > 500$ 付近より一定あるいは上昇することが報告されており⁽²⁹⁾、長軸方向に長い高水分大豆では上記の範囲外ではずれが生じると考えられる。 $Re < 80$ では球形からずれるに従いこの曲線より、大きくなった、形状が球よりずれ、表面が粗い場合、 C_D はそれより大きくなると考えられる。

4) 摩擦係数と抗力係数の関係

摩擦係数を定義する動水径モデルでは摩擦係数 C_f を管内の平均風速 u' 、材料表面におけるせん断応力 τ_w を用いて以下のように定義される。

$$C_f = \frac{\tau_w}{2 \rho u'^2} \quad (3.35)$$

これから圧力損失の式は材料層の空隙に仮想的な流管を想定して

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\Delta L'} &= 6 C_f \frac{(1 - \epsilon) \rho u'^2}{\epsilon^3 2 \Phi_c D_p} \\ &= C_f \frac{(1 - \epsilon) a_p \rho u'^2}{2 \epsilon^3} \end{aligned} \quad (3.36)$$

と導かれる。ただし、 $u = \varepsilon u'$ 、 $\Phi_c D_p = 6/a_p$ ($\Delta L'$; 平均流路長、 a_p は材料の体積比表面積) である。

$\gamma = \Delta L' / \Delta L$ として抗力モデルでの (3.8) 式と比較して

$$C_f = \frac{25}{12\gamma} (1 - \varepsilon) C_D \quad (3.37)$$

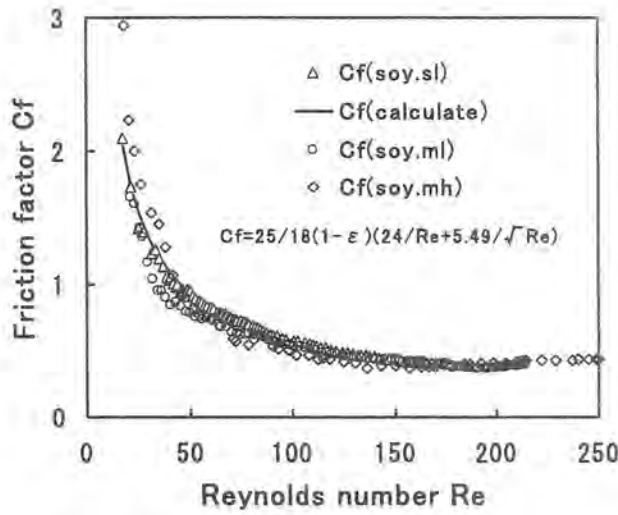


図23 大豆の摩擦係数(実測値と近似式)とレイノルズ数の関係

Fig.23 Friction factor of soybean and calculated value using friction factor Cf

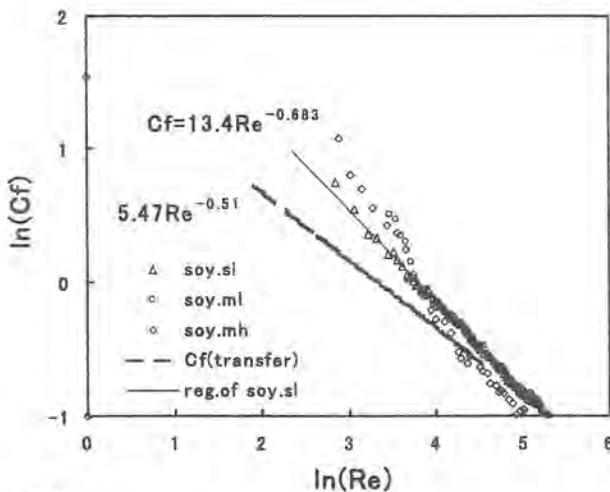


図24 対数軸上の大豆の摩擦係数(実測値と近似式)とレイノルズ数の関係、および表面蒸発速度(球)からの圧力損失係数の推定式との比較

Fig.24 Relationship between $\ln(R_e)$ and $\ln(C_f)$ of soybean and approximate equations and comparison of friction factor ($C_f = 5.47 R_e^{-0.57}$) estimated from the velocity of evaporation from the surface of a bole

の関係が求められる。報告されている文献⁽²³⁾での値 $\gamma = 1.5$ を用いて測定によって得られた C_D より C_f を求め、測定した材料の大豆の場合を図23に示した。この図をみると $Re < 80$ では材料によって若干傾向が異なり差が生じるが、 $80 < Re < 180$ では材料の違いによらずほとんど同じ傾向と分布を示している。 Re と C_f の対数をとって図24に表す。と高水分大豆(soy.mh, 19.4%w.b)で $Re > 40$ ($\ln(Re) > 3.69$) のときに若干低い傾向となったが全体として測定した材料の違いによらずほぼ同じ傾向と分布を示した。これは $(1 - \varepsilon)$ の充てん率の係数が C_D の大きな材料では小さく、また小さな材料では大きい傾向のためであるが、抗力係数は材料の代表断面積あたりの抗力として定義され、形状によって影響を受けるに反して摩擦係数は材料の表面積当たりのせん断力として定義され、 Re が同じで流路と表面の粗さの差が小さければ違いが少ないためと考えられる。全体の傾向をみると Re がほぼ40を境として対数軸上の直線近似の傾きの傾向が異なり、 $Re < 40$ ではマイナスの傾きが大きく、 $Re > 40$ では小さい値となった。これは他の工学材料で報告されている結果⁽²³⁾と同様の結果であった。

以上の結果から、調査した材料の摩擦係数は、形状、大きさ、水分によらずほぼ以下の式で表されると考えられる。

$$C_f = 13.4 R_e^{-0.68} \quad (40 < R_e < 200) \quad (3.38)$$

(3.13) 式の形で表すと図22のsoy.slの近似式で

$$C_D = \frac{24}{R_e} + \frac{5.49}{\sqrt{R_e}} \quad (80 < R_e < 200) \quad (3.39)$$

(3.37) 式に代入して

$$C_f = \frac{25}{18} (1 - \varepsilon) \left(\frac{24}{R_e} + \frac{5.49}{\sqrt{R_e}} \right) \quad (3.40)$$

この結果からJ因子を用いたChilton-Colburnの相似則⁽³⁾による熱・物質移動係数を推定する際の摩擦係数の値が推定される。(3.38) 式をプロットした結果が図24中のsoy.slの近似式を表す実線であるが測定した材料の摩擦係数の傾向をかなり近似してい

表3 大豆（タチナガハ）の最小2乗近似による抗力係数と摩擦係数
Table 3 Approximate equations of resistance and friction factor of soybean(Tachinagaha)

Label	M.C %d.b.	Resistance factor		Friction factor
		$C_d = aRe^{-b}$	$C_d = 24/Re + a/\sqrt{Re} + b$	C_f
soy.sl	13.1	$17.4Re^{-0.683}$ ($40 < Re < 180$)	$24/Re + 5.49/\sqrt{Re} - 0.04$ ($30 < Re < 180$)	$13.4 Re^{-0.683}$ ($40 < Re < 200$)
soy.ml	13.4	$9.59Re^{-0.561}$ ($40 < Re < 200$)	$24/Re + 2.60/\sqrt{Re} + 0.2$ ($35 < Re < 200$)	$25/18(1 - \epsilon)(24/Re + 5.49/\sqrt{Re})$ ($80 < Re < 200$)
soy.mh	22.7	$79.4Re^{-1.03}$ ($40 < Re < 400$)	$24/Re + 5.10/\sqrt{Re}$ ($45 < Re < 400$)	

と思われる。この摩擦係数は、従来報告されている表面がなめらかな球の場合の値⁽³⁸⁾（表面からの蒸発速度から推定された値であり、 $Re < 80$ では $5.47 Re^{-0.51}$ 、 $Re > 80$ では $2.75 Re^{-0.41}$ ）より若干大きかったが $Re > 80$ ではほぼ一致し、蒸発速度から推定される摩擦係数とは高い相関があるとみられる（図24中の破線）。大豆の場合は形状が球とは異なり、摩擦係数も球より大きいため、蒸発速度に関係する大豆の摩擦係数に近い傾向になると推定される。

以上の結果を数式で表3にまとめた。

4. まとめ

堆積通風乾燥における圧力損失を計算によって求めるため、材料の抗力係数と摩擦係数をレイノルズ数の関数として表し、通常の場合の堆積通風乾燥で用いられる $40 < Re < 200$ の範囲において大豆において一般的に成立する実験式を得た。これによって、通風圧力損失特性を材料の種類と空隙率、体積比表面積の材料固有の物性と通風速度を用いて精度よく近似できる実験式を得た。

1) 調査した材料の通風圧力損失特性から抗力係数 C_D と堆積層におけるレイノルズ数 Re の無次元数の間の関係を調べた結果、一般的に $C_D = a Re^{-b}$ の指数関係で表された。係数の a 、 b は材料の種類と形

状、水分によって若干異なったが $40 < Re < 200$ においては水分や形状、大きさの違いによらずほぼ以下の近似式で表された。

$$C_D = 17.4 Re^{-0.68} \quad (40 < Re < 200)$$

更に球の場合のNavier-Stokesの式に基づく C_D の式から大豆に適合する以下の近似式を得た。

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{5.49}{\sqrt{Re}} \quad (40 < Re < 200)$$

また、これを用いて摩擦係数を以下のように求めた。

$$C_f = \frac{25}{18} (1 - \epsilon) C_D$$

2) 以上の結果、通風圧力損失特性を抗力係数を用いて以下の式のように材料の体積比表面積、堆積層の空隙率、風速の関数として表し、実際の測定結果と比較した結果、かなり高い精度で圧力損失特性を近似することができた。

$$\frac{\Delta P}{L} = C_D \frac{25(1 - \epsilon)^2 a_D \rho u^2}{24 \epsilon^3}$$

Ⅳ 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

1. 目的

大豆の人工乾燥調製においては、乾燥による裂皮やしわが発生しやすく、的確な通風空気の調整が必要となる⁽¹⁾。高品質な乾燥調製のためには、堆積層内の水分や穀温、空気温・湿度などの状態量の推定と乾燥経過の予測による的確な乾燥制御が必要となる。しかし、制御のためにモデルを用いて乾燥経過を予測しようとする場合、設定すべき物性量のパラメータの数が多く、しかもほとんどの物性値が水分によって変化するため、実際の対象の材料の物性値を定めることが難しいのが実状である。実用的な乾燥モデルには、材料物性の簡単な測定と少ないパラメータで簡単に精度よく水分と材料温度変化を推定できることが求められる。また、大豆の他、米麦を含む多くの乾燥速度を計算する場合、通常通風量では材料中の拡散速度が気相中の移動速度よりも小さいため、境界条件を外気の平衡水分で近似し、材料中の拡散方程式に基づいて乾燥速度が計算されている。しかし、この方法では通風速度による単粒の乾燥速度の違いを表すことができず、貯留乾燥などの通風量の少ない乾燥施設での乾燥速度を精度よく計算することはできない。

一般に穀粒内の水分移動に関する拡散方程式は拡散係数をDとして

$$\frac{\partial M_d}{\partial t} = D \nabla^2 M_d \quad (4.1)$$

で表される。境界条件は穀粒表面での水分 M_{ds} と平衡する絶対湿度 H_s から外気の絶対湿度 H への水分移動量

$$-D \left. \frac{\partial M_d}{\partial n} \right|_s = kH (H_s - H) \quad (4.2)$$

の第3種の境界条件となる。気相中での移動現象は乱流拡散と考えられ、水分移動係数は熱移動の相似則などからレイノルズ数を用いた実験式によって推定する。しかし、一定温・湿度条件下での通常通風乾燥では、減率2段においては材料表面の水分はほとんど空気と平衡になっているとして表面水分を平衡水分で近似し材料の初期水分を一様として単粒の含水率変化を解くと

$$\frac{M_d - M_{de}}{M_{d0} - M_{de}} = \sum B_j \exp(-D \lambda_j^2 t) \quad (4.3)$$

のフーリエ級数解となる。 B_j 、 λ_j は材料形状によって異なる。球の場合の第1項は $B_1=6/\pi$ 、 $\lambda_1 R=\pi$ となる。

穀類においては形状を球で近似して拡散方程式を解く球モデルの方法が一般的である。穀類の乾燥において空気条件が変化する場合は、ほぼ M_e が一定とみなせる時間間隔の範囲で前の時間ステップの局所解を初期条件として、新たな M_e を用いて解析解を得る方法が提案されている⁽²⁾。しかし、大豆の場合は完全な球ではなく楕円体であることや3軸方向の拡散係数の違い、子実内の2つの子葉が合わさった構造の影響などによって級数解の係数は球モデルよりも無限円筒モデルの方が実測値に近いと村田らは報告している⁽²⁾。また、大豆の乾燥においては、急激な乾燥による裂皮を避けるために、高水分時には外気の通風のみにし、水分の低下とともに温度を上げ、湿度を下げた空気を通風するという非定常な通風温度条件が用いられる。こうした非定常条件に応用するために定常条件下での解析解を元に1粒子内の水分勾配を考慮したモデルは空気条件が変化する場合には複雑すぎて現実的な方法とは言えない。穀粒の薄層での定常条件下での水分変化から実験的に物性値を求め、水分移動係数を温度の関数として推定し、厚層の場合に応用する方法が非定常な条件下でのシミュレーションモデルとしては簡単であり、現実的であると考える。

本章では、従来のように、穀類の表面の水分を平衡水分で近似して水分変化を計算していた方法とは異なり、貯留乾燥などの通風速度が低く、気相中の律速抵抗が大きく、その大きさの程度を無視できない場合にも応用できるように境界条件を界面の水分と平衡する水蒸気濃度から外気の水蒸気濃度への乱流拡散とする第Ⅲ種の境界条件として気相中の水分移動速度を考慮した方法を採用した。また、材料中の水分移動速度を定常条件下での薄層での乾燥定数から推定し、また気相中の水分移動速度を水分・熱移動の相似則により推定し、これらの移動係数により材料の水分と温度を状態量として非定常通風条件下で

の厚層の状態変化を計算することにした。非定常な条件下での気相、固相中の水分と熱収支の乾燥方程式に基づき、各物性値とその間の関係を調べ、大豆の真密度や体積比表面積、空隙率、平衡水分、材料比熱や移動係数などの基本的な物性値を水分や温度の関数として表すことにより、厚層乾燥での水分や材料温度、通風空気の温・湿度変化を最少限のパラメータで推定できるモデルを作成した。更に室内、および屋外での異なる乾燥試験装置により大豆の乾燥試験を行い、同一のパラメータを用いてシミュレーションを行って、このモデルの適合性を検証した。

2. 方法

1) 乾燥方程式について

通風方向が一方向の様な材料の堆積通風乾燥で、堆積層中の単位容積における水分収支、熱収支を考える。材料の大豆子実の表面付近を境界層として空気中と材料内の熱と水分の移動係数を考えることにより、大豆子実の楕円体の形状を考慮せずに熱と水分の移動速度を計算することができる。大豆からの水分と熱移動の模式図を図25に示す。気相中での水分と熱の移動係数を k_H, h_g 、材料内で k_M, h_M とし、材料堆積層中の位置 z と時間 θ の関数として、一粒子の材料平均水分 M 、表面水分 M_s 、材料平均温度 T_M 、表面温度 T_s 、通風空気温度 T 、絶対湿度 H 、材料表面付近の絶対湿度 H_s とすると水分収支に関して

$$G \frac{\partial H}{\partial z} = -\rho_{dm} \frac{\partial M}{\partial \theta} = k_H \cdot a (H_s - H) = k_M \cdot a (M - M_s) \quad (4.4)$$

ここで、 M_s, H_s は実際には測定できないので、総括物質移動係数 k_{Hc}, k_{Mc} を定義して (4.4) 式の右辺3、4項を平衡水分 M_c と絶対湿度基準の平衡水分 H_c を用いて新たに以下のように表す。

$$G \frac{\partial H}{\partial z} = -\rho_{dm} \frac{\partial M}{\partial \theta} = k_{Hc} \cdot a (H_c - H) = k_{Mc} \cdot a (M - M_c) \quad (4.5)$$

熱収支に関しては

$$\begin{aligned} &\rho_{dm} \cdot C_M \frac{\partial T_M}{\partial \theta} \\ &= -G [C_H \frac{\partial T}{\partial z} + \{Lg + C_v (T - T_M)\} \frac{\partial H}{\partial z}] \quad (4.6) \\ &-G \cdot C_H \frac{\partial T}{\partial z} = h_g \cdot a (T - T_s) \\ &= h_M \cdot a (T_s - T_M) = h_c \cdot a (T - T_M) \quad (4.7) \end{aligned}$$

が成り立つ。方程式中の未知定数は $G, \rho_{dm}, a, C_M, k_H, k_M, k_{Hc}, k_{Mc}, h_g, h_c$ であるが、移動係数 k, h に関しては相互に関係しており、材料有効表面積 a や見かけ乾物密度 (かさ密度) ρ_{dm} についても材料の空隙率や乾物比真体積、体積比表面積などの基本的な物性値から類推することができる。以下、乾燥に関係する材料の物性値をこれらの基本的物性定数から導くことにより、設定すべきパラメータの数を最少限とする。

2) 相似則からの熱、物質移動係数の推定

物質移動と熱移動に関して以下の J 因子と呼ばれる無次元数を用いる。

$$J_d = \frac{S_H}{R_c \cdot S_c^{1/3}} = \frac{k_H}{G} S_c^{2/3} \quad (4.8)$$

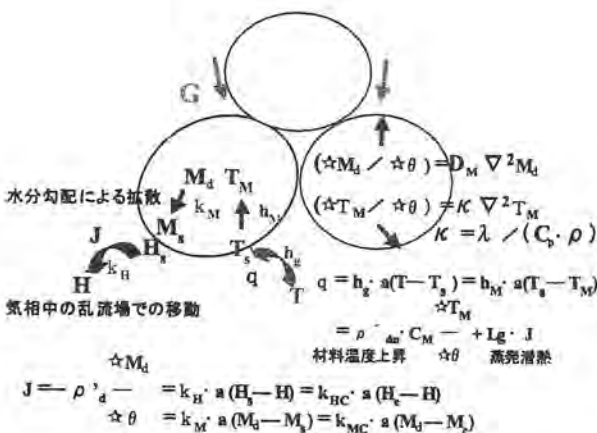


図25 大豆からの水分と熱移動の模式図

Fig.25 Schematic diagram of mass and heat transfer of soybean

$$J_H = \frac{N_u}{R_e \cdot P_r^{1/3}} = \frac{h_g}{C_H \cdot G} P_r^{2/3} \quad (4.9)$$

摩擦係数を C_f とすると Chilton-Colburn の相似則⁽¹⁵⁾ より、

$$J_H = J_D = C_f / 2 \quad (4.10)$$

の関係があるので h_g と k_H に関しては以下の関係が成り立つ。

$$\frac{h_g}{k_H} = C_H \left(\frac{S_c^{2/3}}{P_r} \right) = C_H \cdot L_e^{2/3} \quad (4.11)$$

$$k_H = G \cdot C_f \cdot S_c^{-2/3} / 2 \quad (4.12)$$

ここで C_f に関して、井上⁽¹⁰⁾ の大豆堆積層内の圧力損失の測定から求められた摩擦係数

$$C_f = 13.4 R_e^{-0.68} \quad (40 < R_e < 200) \quad (4.13)$$

の値を用いると k_H , h_g を R_e と G から計算することができる。 $S_c (= \mu_g / \rho_g D_g)$ は、空気～水蒸気相ではほぼ一定で $S_c = 0.62$ (25℃) である⁽¹³⁾。 R_e は以下の式で定義する。

$$R_e = \frac{G \cdot \phi_c \cdot D_p}{\mu_g} \quad (4.14)$$

ただし、 D_p は材料の球相当直径、 ϕ_c は形状係数である。従って大豆の摩擦係数に関係する $\phi_c \cdot D_p$ がわかると G から R_e を計算して気相中の熱と水分の移動係数が推定できる。

3) 移動係数と総括移動係数の関係

材料相での水分勾配と気相での乱流拡散による水分移動の模式図を図26に示す。材料表面の境界層では、表面水分 M_s と絶対湿度 H_s は、境界層での温度 T_s 条件下ではほぼ平衡状態にあり⁽¹⁵⁾、気相中の移動係数と材料中の拡散係数によってこの M_s , H_s を水分移動の境界条件として水分移動量を計算することができる。しかし、材料表面の水分は実際には測定できないので乾燥速度は (4.4) 式の水分基準総括物質移動係数 k_{Hc} を用いて計算する。気相中の物質移動係数 k_H 、材料中の物質移動係数 k_M と k_{Hc} 、 k_{Mc} の間には境膜での (4.4) 式の物質収支から以下の関係が成り立つ⁽¹⁵⁾。

$$k_{Mc} \cdot (M - M_e) = k_{Mc} \cdot (M - M_s + M_s - M_e) = k_M \cdot (M - M_s) \quad (4.15)$$

これより、第2, 3項の両辺を $k_{Mc} \cdot k_M \cdot (M - M_s)$

で割って

$$k_{Mc}^{-1} = k_M^{-1} \cdot \{ 1 + (M_s - M_e) / (M - M_s) \} \quad (4.16)$$

(4.4) 式より、 $M - M_s = (k_H / k_M) (H_s - H)$ の関係を代入して

$$k_{Mc}^{-1} = k_M^{-1} + \{ (H_s - H) / (M_s - M_e) \}^{-1} k_H^{-1} \quad (4.17)$$

の関係が求まる。同様に

$$k_{Hc}^{-1} = k_H^{-1} + \{ (H_e - H_s) / (M - M_s) \} k_M^{-1} \quad (4.18)$$

である。ここで、(4.17) 式の $(H_s - H) / (M_s - M_e)$ 、あるいは (4.18) 式の $(H_e - H_s) / (M - M_s)$ は $M_s \sim M_e$ 、 $M_e \sim M_s$ における水分と空気の絶対湿度間の平衡水分曲線の平均の傾き $(\partial H / \partial M)$ に相当するが、 $M_e \sim M$ におけるそれぞれの値の変化は少ないので、 $C \equiv (\partial H / \partial M)_{M \sim M_e}$ とし、 $M_e \sim M$ における水分と空気の絶対湿度間の平衡水分曲線の傾き $(\partial H / \partial M)$ が $M \sim M_e$ 区間ではほぼ一定とすると

$$k_{Mc}^{-1} = k_M^{-1} + C^{-1} k_H^{-1} \quad (4.19)$$

$$k_{Hc}^{-1} = k_H^{-1} + C k_M^{-1} \quad (4.20)$$

と表される。シミュレーションでは、計算した材料温度 T_M における M , M_e での平衡水分の絶対湿度 H_e , H を計算して C の値を求める。

以上の移動係数の関係を通風空気温度 25℃、湿度 60%、材料水分 16.7%w.b., 平衡水分 10.2%w.b., 大豆乾物体積比表面積 750m²/m³ の場合に通風速度を 0 ~ 1.0m/s の範囲で変えて k_H , k_M , k_{Mc} の値を計算した結果を図27に示した。 k_M の値は材料温度 (簡単

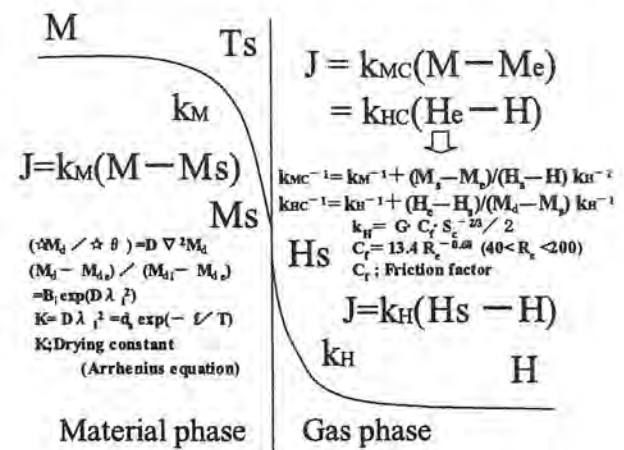


図26 材料相での水分勾配と気相での乱流拡散による水分移動の模式図
Fig.26 Schematic diagram of mass transfer in material phase and gas phase

のため、通風空気温度に等しいとする)を一定としているので定数である。 k_H は通風速度に応じて対数関数的に増加してゆくが、通風速度がおよそ 0.1m/s 以上では(4.19)式の k_M^{-1} の値が $^{\circ}\text{C}^{-1}\text{KH}^{-1}$ の値よりもオーダ的に大きいため、大豆子実内の律速が支配的となっていることがわかる。このことは、従来から穀粒の通風乾燥においては材料表面水分が通風空気の平衡水分にほぼ一致しているという実験事実と一致している。通風速度が 0.1m/s 以上においては、この差はほぼ1.7%以下である。しかし、それ以下の通風速度では k_H の値が通風速度の減少によって急速に低下するため、空気中の律速を無視できず、両者の移動係数を考慮する必要があると考えられる。

一方、大豆子実内の移動速度に関係する乾燥定数 $K(=D\lambda_i^2)$ は、拡散係数 D との関係で絶対温度 T を用いて以下のアレニウス式で表される⁽²¹⁾。

$$K=0.5914 \times 10^{-3} \text{Exp}(-661/T) [\text{s}^{-1}] \quad (4.21)$$

この K は一般に一定温・湿度条件下で十分な通風条件のもとに大豆子実の単粒層の乾燥速度から求められる。大豆子実の表面水分はほぼ平衡含水率になっていると考えられ、この条件下で K と子実内の移動係数 k_M との間には(4.4)式より、以下の関係が成立

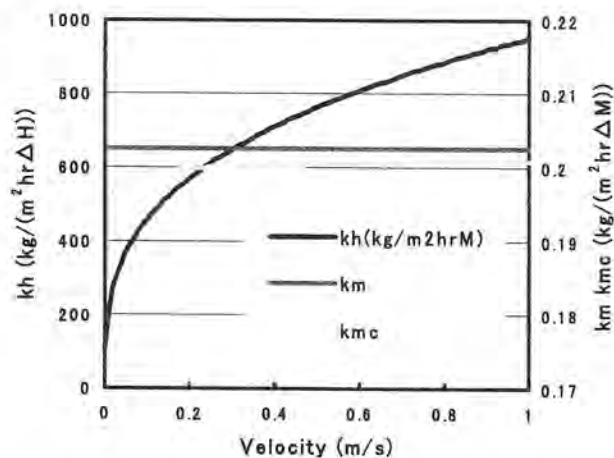


図27 通風速度に対する空気相中の絶対湿度基準水分移動係数 kh と材料内移動係数 km 、総括移動係数 kmc の関係

(通風温度 25°C 、湿度 60% 、材料水分 $16.7\%w.b.$ 、平衡水分 $10.2\%w.b.$ 、大豆乾物体積比表面積 $750\text{m}^2/\text{m}^3$)

Fig.27 Relationship between air flow velocity and the mass transfer coefficient of absolute humidity base in gas phase kh , of moisture content base in material phase km , total mass transfer coefficient kmc (Air temperature 25°C , Humidity 60% , Moisture content $16.7\%w.b.$, Equilibrium moisture content $10.2\%w.b.$, Specific surface area $750\text{m}^2/\text{m}^3$)

する。

$$k_M = K \cdot \rho_{dm}^{\prime} / a \quad (4.22)$$

ρ_{dm}^{\prime} と a は次の節において水分の関数として求められる。非定常な条件下では k_M の値には子実内の水分勾配が影響するが、急激な温・湿度変化の少ない通常の通風乾燥においても(4.21)式は十分な精度で成立するので⁽²¹⁾、厚層における子実内の移動係数 k_M も通常の温・湿度変化に対しては材料温度のみの関数として(4.22)式の関係が成立していると考えられる。従って k_M を(4.22)式によって推定することができる。これにより、(4.12)式から求めた k_H と合わせ、(4.17)、または(4.4)と(4.18)式を用いて気相中の風速の影響を考慮した乾燥速度を計算することができる。乾燥初期では、大豆表層の初期状態は外気とほとんど平衡にあり、 $H_s \cong H_e$ 、 $M_s \cong M$ に近似できる。

また、熱移動に関しても、空気中と材料内の熱移動係数を考慮することによって同様に求められる。ただし、材料中の熱移動係数については球で近似した熱拡散方程式の境界条件を $q = -\lambda_s (\partial T_s / \partial r) = -h_g (T_s - T_g)$ としてフーリエ級数解を求め、単位表面からの熱流量 q 、球平均温度 T_M 、表面温度 T_s を計算し、 $q = h_M (T_M - T_g)$ の関係式から h_M を級数の第1項目で近似した式から求める(詳しくは章末に示す)。結果の式を示すと

$$h_M = \frac{B_i \cdot \lambda_s}{R(3B_i / \nu_i^2 - 1)} \quad (4.23)$$

ただし、 B_i (ピオ数) $= h_g \cdot R / \lambda_s$ 、 $\tan(\nu_i) = \nu_i / (1 - B_i)$ 、 λ_s :大豆の熱伝導率 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]、 R :大豆の球近似の半径 [m]で $R = D_p / 2 = 3 / (\phi_c \cdot a_M)$ で求められる。これより、

$$h_c^{-1} = h_g^{-1} + h_M^{-1} \quad (4.24)$$

の関係式より、 h_c を計算する。 h_g は(4.11)~(4.13)式より計算することができる。

4) 体積比表面積と材料有効表面積、レイノルズ数、かさ密度の関係

a [m^2/m^3]は、見掛け単位体積中の蒸散に関わる材料の実表面積である。材料真体積比表面積を a_M [m^2/m^3]、材料水分が M [d.b.decimal]のときの材料乾物真密度を ρ_{dm} [kg/m^3]、空隙率を ε とし、見掛け体積当たりの材料表面積を a^{\prime} [m^2/m^3]とすると

$$a' = a_M \cdot \rho_{dM}' / \rho_{dM} = (1 - \varepsilon) a_M \quad (4.25)$$

材料間の重なりを除いた割合を λ とすると

$$a = \lambda a' = \lambda(1 - \varepsilon) a_M \quad (0 < \lambda < 1) \quad (4.26)$$

と表せる。 λ は大豆の場合、接触面積割合の推定値から0.95とする。試験で用いた大豆の a_M に関しては、水分ごとの大豆子実の3軸寸法の測定から回転楕円体で近似した表面積を求め、 M に対して1次近似した以下の式⁽⁹⁾を用いる。

$$a_M = (7.53 - 1.79M) \times 10^2 [\text{m}^{-1}] \quad (4.27)$$

$7.53 \times 10^2 [\text{m}^{-1}]$ は乾物での体積比表面積である。

以上の実測定からの実験式とは別に、乾物での体積比表面積 a_0 と水分による体積膨張率 γ_M を用いて、以下のように a_M を推定する。ここで乾物比体積 v_M 、乾物比表面積 s_M 、体積膨張率 $\gamma_M \equiv v_M / v_0$ として s_M は体積膨張の2/3乗で膨張するとして

$$s_M = s_0 \cdot \gamma_M^{2/3} \quad (4.28)$$

と近似すると

$$a_M = s_M / v_M = s_0 \cdot \gamma_M^{2/3} / (v_0 \cdot \gamma_M) \\ = a_0 \cdot \gamma_M^{-1/3} \quad (4.29)$$

と水分の関数として表せる。ただし、乾物体積比表面積 a_0 、 γ_M は大豆での測定値⁽⁹⁾から

$$a_0 = 7.53 \times 10^2 [\text{m}^{-1}] \quad (4.30)$$

$$\gamma_M = 1 + \gamma \cdot (\rho_{d0} / \rho_w) M = 1 + 1.223M \quad (4.31)$$

$$\gamma = 0.956, \quad \rho_{d0} / \rho_w = 1.30 \quad (4.32)$$

とする。大豆の大きさによって異なるのは a_0 のみで γ 、 ρ_{d0} / ρ_w はほとんど一定の値である。 ρ_{d0} は大豆の乾物真密度、 ρ_w は水の密度である。

ε に関しては、乾燥機などの堆積状態での大豆に関しての測定結果⁽⁹⁾を使用する。

$$1 - \varepsilon = v_M / v_M' = \pi k / 6 \quad (4.33)$$

$$\nu = 1.00 - 0.029M \quad (4.34)$$

(4.14)式で定義したレイノルズ数の式の $\phi_c \cdot D_p$ と a_M の間には、 $\phi_c \cdot D_p = 6 / a_M$ の関係があるので R_c は a_M を用いて以下のように表せる。

$$R_c = \frac{6G}{a_M \cdot \mu} \quad (4.35)$$

従って G 、 a_M の値から(4.12)(4.14)式により k_H 、 h が計算されることになる。

ρ_{dM}' は、 ρ_{d0} と ν 、 γ_M を用いて以下の式で表せる⁽⁹⁾。

$$\rho_{dM}' = (1 - \varepsilon) \rho_{dM} = (\pi \nu / 6) \rho_{d0} \cdot \gamma_M^{-1} \quad (4.36)$$

$\rho_{d0} = 1.30 \times 10^3 [\text{kg} / \text{m}^3]$ とする。

また、(4.22)式の k_M は(4.26)、(4.36)式を用いて以下のように表される。

$$k_M = K \cdot \rho_{dM}' / a = K \cdot \rho_{dM} / (\lambda \cdot a_M) \quad (4.37)$$

以上の物性値の式を検討すると、乾燥シミュレーションのための材料によって変動する基本物性量として真密度、空隙率、体積比表面積、体積膨張率があげられる。それぞれは水分の1次関数としてほぼ近似されるので、基本的パラメータ定数としては、乾燥定数 K の他、乾物真密度 ρ_{d0} 、乾物体積比表面積 a_0 、空隙率係数 ν 、体積膨張係数 γ であり、従来のモデルより材料形状に関する少ない定数でシミュレーションが可能になる。

5) 大豆の平衡水分と材料比熱について

大豆の平衡水分については、以下のChen-Claytonの式⁽²⁰⁾を用いた。

$$\psi = \exp[-f1 \cdot T^{g1} \cdot \exp\{-f2 \cdot T^{g2} \cdot (Me - f3)\}] \quad (4.38)$$

$$f1 = 17.147, \quad g1 = -0.26541, \quad f2 = 1.44298 \times 10^{-5}, \\ g2 = 1.58559, \quad f3 = 1.2$$

$$H_c = 0.622 \cdot \psi \cdot P(T) / (760 - \psi \cdot P(T)) \quad (4.39)$$

ただし、 ψ : 相対湿度[%], T : 絶対温度[K], Me : 平衡水分[%], $d.b.$], $f3$ は動的平衡水分(乾燥が進んでいる過程での乾燥方程式で使用される平衡水分は、静的な平衡水分よりも高い)のための補正量である。平衡水分については、品種による違いはごくわずかであるとされている⁽²⁰⁾。

大豆の材料比熱 C_M は、水分に関する1次式の近似式⁽²⁰⁾を用いる。

$$C_M = 1.637 + 0.0193 \cdot M \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (4.40)$$

蒸発潜熱 L_g は、自由水での蒸発潜熱を L として以下の式⁽²⁰⁾を用いる。

$$L_g = L \{1 + e1 \cdot \exp(e2 \cdot M)\} \quad [\text{kJ}/(\text{kg})] \quad (4.41)$$

$$e1 = 0.2162, \quad e2 = 0.06233$$

6) シミュレーションモデルの数値解法

方法は計算時間ステップを $\Delta \theta$ として、経過時刻 $\theta = i \Delta \theta$ 、堆積厚さ Q 、単位断面の堆積層を図28のように通風方向に沿って m 等分し、 j 番目の微小厚 Δz の $z = j \Delta z$ 層の穀温 $T_{Mi,j}$ と水分 $M_{i,j}$ を状態量($T_{Mi,j}, M_{i,j}$)とし、この層を通過する空気温・湿度を($T_{i,j}, H_{i,j}$)とする。堆積層入口の通風の温・湿度を($T_{i,0}, H_{i,0}$)として、(4.4)~(4.6)の離散化した微分方程式と($T_{Mi,j}, M_{i,j}$)と($T_{i,j}, H_{i,j}$)における各物性値

によって i 層の $\Delta\theta$ 後の $(T_{M_{i+1,j}}, M_{i+1,j})$, Δz 増分後の $(T_{i,j+1}, H_{i,j+1})$ を計算する. $(T_{i,0}, H_{i,0})$ は、測定時間間隔ごとの温・湿度データから時刻 $i \Delta\theta$ での値を比例配分によって計算して求める. 方程式は (T, H) , (T_M, M) に関して z, θ の偏微分方程式となっているが、それぞれは分離しているため、微分方程式の数値解法としての Runge-Kutta 法を用いて $\Delta z, \Delta\theta$ 増分後の値をそれぞれ計算し、数値解の精度を上げる. $\Delta z, \Delta\theta$ の計算ステップ間隔を小さくとれば正確になるが、計算回数が多くなる. 逆に粗くとると解は発散してしまうので適当な値をとる. 実際の計算では $\Delta z = \ell / 20, \Delta\theta = 0.01h$ を用いた. シミュレーションで設定すべき材料物性は、乾物真密度、乾物体積比表面積と空隙率、材料比熱、通風条件として初期空塔風速と堆積高さのみである. 空隙率や真密度、材料比熱については前述のように水分依存の実験式を使えるため、材料固有の設定パラメータは大豆の大きさの指標である乾物体積比表面積となる.

7) 実験室内での大豆の堆積通風乾燥試験方法 (実験 1)

図 30 のように底面の金網を付けた内径 20cm, 高さ 35cm の円筒形の硬質ビニール製の容器を最大荷

重 5 kg の荷重計 (ロードセル, 共和電業, LC-5KA) を介して垂直につり下げ, 大豆を入れて下方よりビニールダクトを介して, 通風量可変の送風機より送風する. 堆積層入口と出口, および容器内に底面 10cm の位置から 5cm 間隔で 5 点熱電対 (T 型) と湿度センサ (高分子型湿度センサ, TDK) を挿入し, 通風の温度, 湿度を測定する. 堆積層内の風速を測定するため, 校正された熱線式の風速計 (KANOMAX) を堆積層中央部分に挿入した. 重量変化, 風速, 温・湿度をコンピュータにより 10min 間隔で測定する. 重量の測定時にはコンピュータによりコントローラを介して送風機の運転を 20sec ほど停止した.

実験条件と結果は表 4 に示した. 大豆用の選別機で選別した平均水分 20% w.b. の中粒大豆 (タチナガハ) 4.42kg を試験材料として使用した. 試験材料 50 粒の 3 軸の寸法をデジタルノギスで測定し, 3 軸寸法より 1 粒当たりの体積 V_p , 表面積 S_p を求め, 1 粒ごとの体積比表面積 a_p を算出した. ただし, この方法では体積と表面積の近似式による誤差が 2 重に加わるため, 計算で求めた S_p を乾物基準での表面積に換算し, それを II に示した空気圧式の真体積計 (DAIKI, DIK-1120) により測定した体積から換

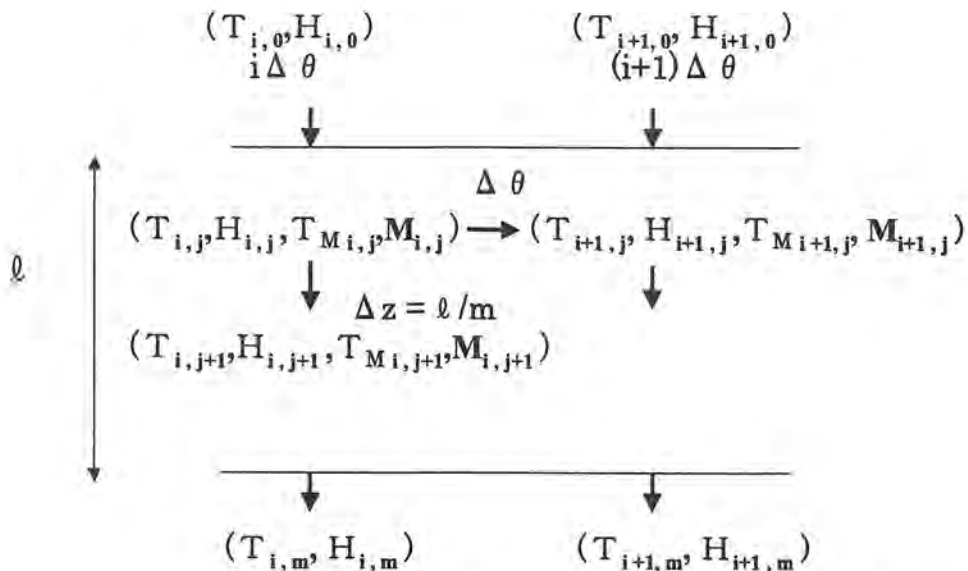


図 28 ルンゲ・クッタ法による時間 $i \Delta t$ と層内位置 $j \Delta z$ における状態量 (T_j, H_j, T_{Mj}, M_j) の計算方法

Fig.28 Schematic diagram showing the method for calculating the state (T_j, H_j, T_{Mj}, M_j) of passage of time, $i \Delta t$, and location $j \Delta z$, in the layer using Runge-Kutta's method

算した乾物基準での体積で割って体積比表面積を求め、水分の関数としての(4.29)式の計算式と比較した。

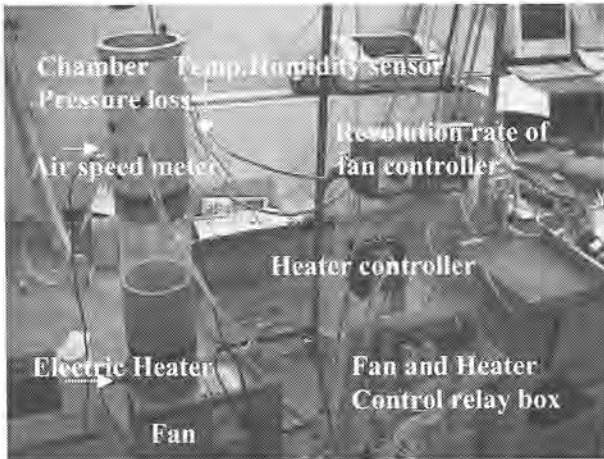


図29 乾燥試験装置 (実験1)
Fig.29 Experimental apparatus for drying (Exp.1)

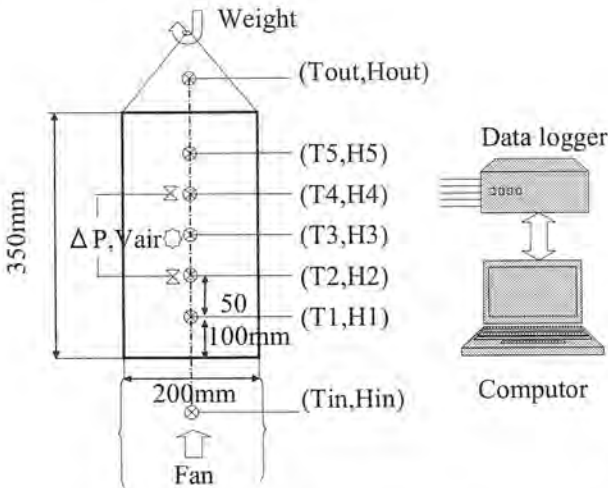


図30 乾燥試験装置概略図 (実験1)
Fig.30 Schematic diagram of experimental apparatus for drying(Exp.1)

乾燥実験開始後25hを経過した時点で、大豆の水分を5等分の層別に2点ずつ採取して、105℃-24h法にて全粒水分を測定し、乾燥終了時水分とした。初期水分の平均値と重量データから、乾燥中の平均水分を計算し、シミュレーション結果との比較を行った。シミュレーションで用いた物性量のパラメータは表5に示した。大豆の物性に関する乾物真密度、乾物見かけ密度、充てん係数、乾物体積比表面積のパラメータは、IIにおいて求められた大豆の真体積、充てん率、大豆の3軸寸法からの乾物体積比表面積から計算により求めた。実験開始前に堆積層内の水平、垂直の位置別の違いによる通風速度の違いはほとんどなくほぼ一様であることを確かめた。子実内の物質移動係数 k_M は(4.37)式によって各堆積層での材料温度、水分の計算値から K 、 ρ_{dm} 、 a_M の値を逐次計算して求めた。気相中の移動係数 k_H も(4.12)式によって質量速度 G と R_e 数より計算した摩擦係数 C_r 、および S_c 数($=\mu_g/\rho_g D_g$)より逐次計算することにした。

8) 太陽熱利用循環併用静置式乾燥機での乾燥試験 (実験2)

ビニールハウス内に、図31のような穀物用コンテナを改造した通風床面積1.84m²(=1.13×1.63m²)の堆積型のバケットエレベータ付きの吸引式通風乾燥装置(容量1t、送風機1.5kw、ベルト式排出方

表4 実験室内における大豆乾燥試験条件と結果(実験1)
Table 4 Experimental conditions and results for soybean drying in a laboratory (Exp.1)

	Weight (kg)	Moisture content (%w.b.)	Height of bulk (m)	Velocity of air (m/s)
Initial	4.423	20.0±0.9	0.35	0.159
Final	4.053	12.7±0.7	0.30	0.171

表5 乾燥シミュレーションの基本的パラメータ
Table 5 Principal parameters to simulate for drying Table 2 property of experimental materials 8soybean0

Dry density ρ_{ds} (kg/m ³)	Bulk density ρ'_{ds} (kg/m ³)	Coeff.space ratio $k=6(1-\epsilon)/\pi$	Specific surface area a_0 (m ² /m ³)	Specific heat (kJ/(kg·K))
1300	681	1-0.029M	753	1.637+0.0193 M

M;Moisture content (d.b.decimal)

式)を設置し、コンバイン収穫された初期水分 21.0 ± 1.0 [%w.b.]の大豆(タチナガハ)1160kgを用いて、平均堆積高さ0.86m、風量 0.41 [m^3/s] (風量比 0.045 [$m^3/s/100kgDM$])程度で乾燥試験を行った。通風入口と出口、堆積層内に18cm間隔で垂直方向に3点、熱電対と湿度センサを設置し、通風の温・湿度を測定した。また、乾燥機全体の重量を乾燥機の4隅の底面に設置したロードセル(共和電業, LC-500KG)にて測定し、平均水分を計算した。初

期水分を単粒式大豆水分計(電気抵抗式, 静岡製機CTR-100A)にて20粒の平均水分を測定後、入口通風空気温・湿度を境界条件として堆積層内の通風空気の温・湿度と層内の大豆の穀温, 水分変化をリアルタイムで推定した。実験に使用した材料の大豆は実験室内での試験のものとは異なり品種は同じであるが水分が約1%高いものであったが、計算に使用した物性値は、表5と同一の値を使用した。

3. 結果と考察

1) 試験容器での室内乾燥試験結果

シミュレーションで用いた通風の温・湿度と堆積層内の温・湿度変化の測定結果を図33に示す。この通風の温・湿度の入力条件を用いて堆積層内、および排出側の空気の温・湿度、および各堆積層の水分を積分して求めた平均水分の計算結果と実測値の比較は図34のとおりである。排出側の空気温度と平均水分の計算値と測定結果はほとんど一致しており、このモデルの適合性はかなり高いと思われた。排出側空気の絶対湿度の比較では、計算結果の方が 0.001 [kg/kg]程高い若干のオフセットがあるが、測定結果の傾向はほぼ近似している。平均水分の計算結果がほぼ実測値と一致していることを考慮すると、この結果は湿度センサの誤差の影響と考えられる。堆積層内部の空気温度の計算値と実測値の比較を行った結果、図35のようになった。乾燥開始後



図31 静置式乾燥試験装置(実験2)
Fig.31 Experimental stationary flat bed type air forced drier (Exp.2)

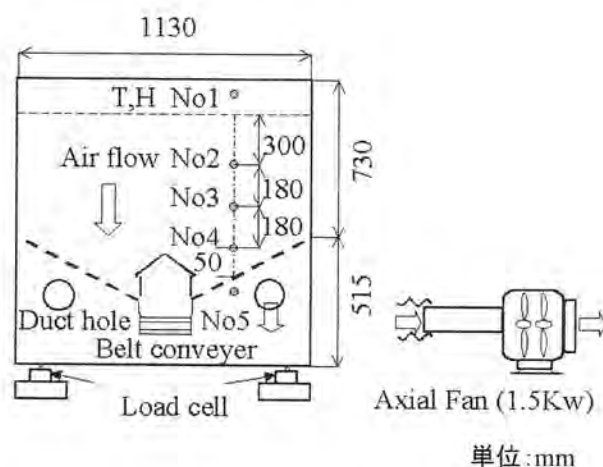


図32 静置式乾燥試験装置概略図(実験2)
Fig.32 Schematic diagram of experimental stationary flat bed type air forced drier (Exp.2)

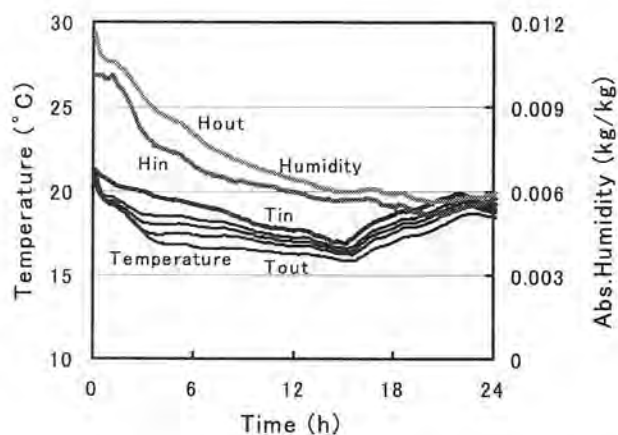


図33 堆積層入口と出口の空気温・湿度と層内の空気温度の実測値(実験1)

Fig.33 Measured values of the temperature and humidity of the air at the inlet and the outlet of layers, and the temperatures in layers (Exp.1)

約9時間までは若干計算値が実測値より高い傾向が認められたが、ほぼ各層の温度変化は実測値と近似している。入口の空気温度は堆積層を通過するに従い蒸発潜熱を奪われ、入口空気の変化に対して変化の度合いが少なくなる傾向がみられる。堆積厚が35cmと低いため、出口の空気温度は平衡温度よりも高い状態で推移している。5分割した堆積層の深さ別の水分変化を計算した結果を図36に示す。通風空気の大豆換算の平衡水分を図の下側に線で示す。通風入口側の層の水分は通風空気の平衡水分に近づ

くように変化し、逆に排出側の堆積層の水分は約5時間後以降はほぼ直線的に徐々に乾減してくる傾向がみられる。実測値の平均水分変化は、ほぼ堆積層中央の層の水分変化に一致している。この実験では、深さ別の局所水分の違いは約9時間後に最大となり、それ以降は差が減少してくるのがわかる。風量比が比較的多い場合は、この実験のように層全体の乾燥速度が上がり、時間が経過すると深さ別の乾燥速度の差が少なくなると考えられる。

2) ビニールハウス内静置式乾燥機での乾燥試験のシミュレーション結果

実験条件と結果を表6に示す。排出空気温・湿度、平均水分変化の計算値と実測値を比較した結果は、図37のとおりである。この太陽熱を利用したビニールハウス乾燥では、通風空気温度が初期においては30℃以上となり、投入した大豆の初期材料平均温度は13℃前後と温度差が大きく、排出空気温度を比較すると乾燥開始後6時間までの間では、計算値は実測値よりも最大で8℃程高い結果となった。また水分変化の比較では、実測値は2時間位経過してから平均水分が低下するのに対して、計算値はすみやかに低下し、最大で3%くらい低い値となった。排出空気の絶対湿度比較では、この6時間までの間では、最大で0.005 [kg/kg] 程、計算値は実測値よりも大きく、その分、水分変化も大きな結果となっ

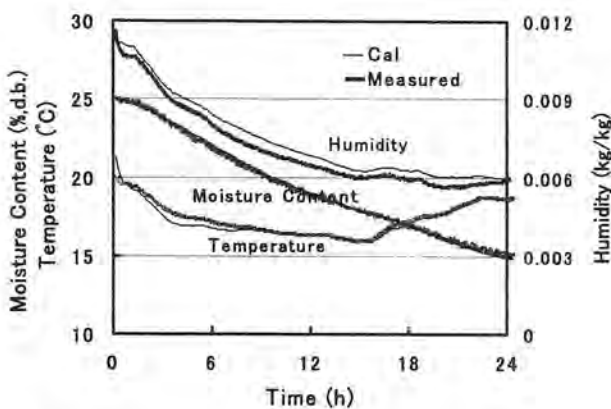


図34 堆積層排出空気温・湿度と平均水分のシミュレーションによる計算値と実測値の比較(実験1)
Fig.34 Comparison of estimated values by simulation and measured values of the temperature and humidity of the air exhausted from grain layer and average moisture content (Exp.1)

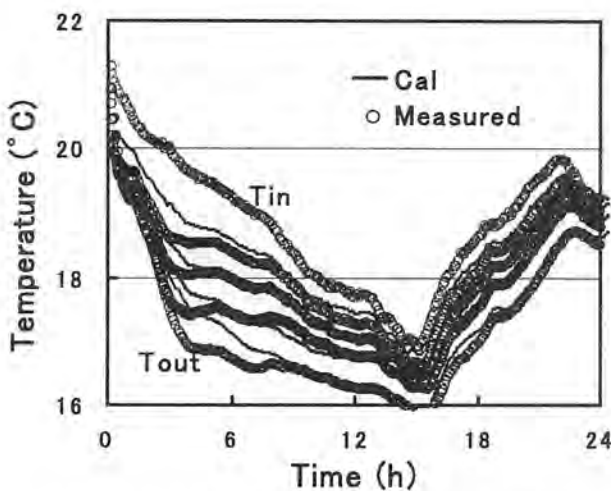


図35 堆積層内の空気温度の計算値と実測値の比較(実験1)
Fig.35 Comparison of estimated values by simulation and measured values of the temperature in grain layers(Exp.1)

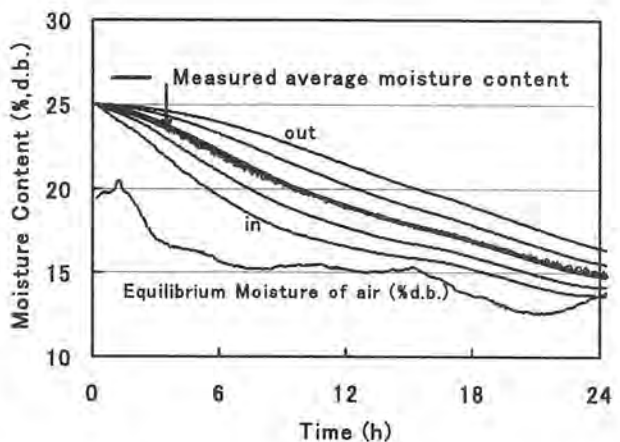


図36 堆積層の水分変化計算値(実験1)
(太線は層平均水分の測定値)
Fig.36 Calculated changes of moisture content in grain layers (Exp.1)
(Thick line indicates the measured average moisture content in grain layer)

表6 ビニールハウス内における静置式乾燥機による大豆乾燥試験条件と結果

Table 6 Experimental conditions and results for soybean drying using a stationary dryer in a vinyl green house (Exp.2)

	Weight (kg)	Moisture content (%w.b.)	Height of bed (m)	Velocity of air (m/s)	Velocity of air in bed (m/s)
Initial	1160	21.0±0.9	0.86	0.22	0.47±0.04
Final	920	11.8±0.3	0.61	0.30	0.64±0.03

た。その後は実測値よりも0.002 [kg/kg] 程高く推移した。以上のことを考察すると、初期水分が21%w.b.と高水分であり、大豆の初期の穀温も13℃前後と通風の温度に比較してかなり低く、乾燥初期においてはモデルのように減率乾燥期ではなく予熱期間であったとみられる。従って乾燥速度も低く、通風の熱量は主に大豆の穀温上昇に使われたため、実測のように排風温度が低く推移し、乾燥速度も低いという結果になったと考えられる。この実験のように材料の初期穀温が通風温度よりも低く、予熱期間の場合には、材料内の熱拡散を考慮した熱伝導項が必要であり、本法のように通風空気との熱伝達に基づいたモデルの計算値は実際とは合わないと考えられる。しかし、減率乾燥期と考えられる段階では、図37のようにかなり実測値に近い値となる。

更に実験室内での試験の場合と同様、堆積層内の水分変化を計算した結果を図38に示す。太い実線は平均水分の計算値で○印は実測値である。通風の平衡水分は下側の折線である。また、実際の水平面位置、深さ別のサンプリングした水分変化を記号別の黒点で示した。通風入口側の層では、層別水分変化の曲線群（図中Mdで示した線）の下側の線のようにすみやかに水分が低下するが、夜間は逆に表層付近で吸湿が起り、下層での乾燥が遅くなる状況がわかる。下層になるに従い表層の変化の影響が少なく直線的に徐々に乾いてくる。吸湿または乾燥が進まないときは層全体での水分が均一になる方向に向かい、通風空気の平衡水分に近づいて行くと考えられる。水分サンプリング結果と計算値の比較では、ほぼ計算結果と同じ傾向を示しているが、若干低い。サンプリングした位置は、最大で0.48mの深さで堆積厚0.7~0.86mの中間以内の層の水分であるが、堆積層内の風速は表6の風速の標準偏差が水平位置0.04m/s程あり、層位置によって風の通過量

が異なることがかなり原因していると考えられる。

以上の各層の含水率変化のシミュレーションから、

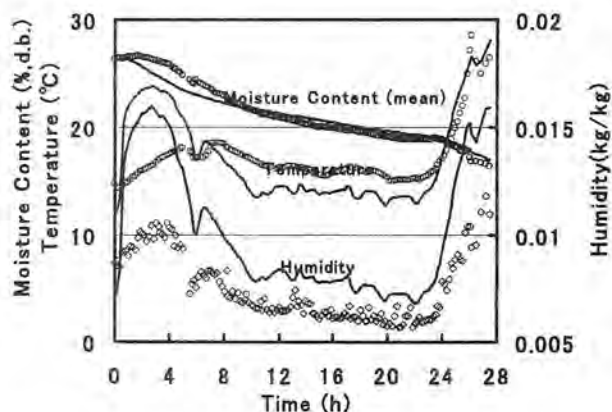


図37 堆積層排出空気温・湿度と平均水分のシミュレーションによる計算値と実測値の比較（実験2）

Fig.37 Comparison of values estimated by simulation and measured values of the temperature and humidity of air flowing out of the layers and average moisture content of layers (Exp.2)

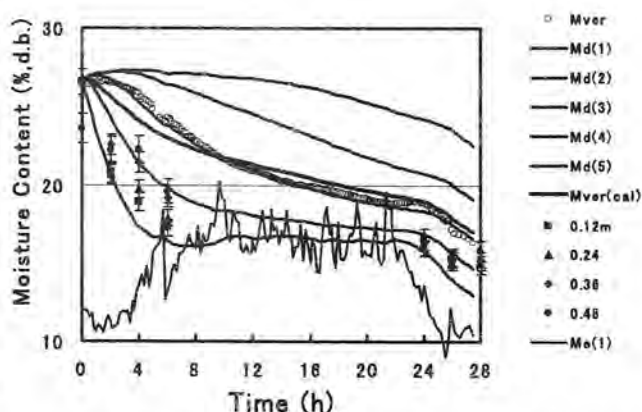


図38 堆積層の水分変化（実験2）（太線は層平均水分の計算値、○は実測値）

Fig.38 Calculated changes of moisture content in each gain layer (Exp.2) (Thick line indicates an average moisture content in grain layers in calculation and measurement)

効率的な乾燥のためには夜間の吸湿を抑える必要があり、夜間の加温と乾燥後期の仕上げ乾燥時の加温が効果的であることが確認される。

3) 大豆の比表面積のパラメータ調整による計算結果

ビニールハウス内での実験で使用した大豆の物性値パラメータは、実験室内での試験とは若干異なっているとも考えられるため、表5のパラメータ条件のうち、乾物比表面積 a_0 を $753[\text{m}^2/\text{m}^3]$ から実測した大豆の粒径から計算される800に変え、また、通風量を通風口スを考慮して0.9倍にして他は同じパラメータ条件でシミュレーションモデルにより乾燥経過を計算した結果、図39のように、平均水分変化はかなり実測値に等しくなった。排出空気温・湿度の比較でも、7時間経過以降ではかなり実測値に近くなった。他のパラメータを変化させて計算結果と実測値を比較した場合は、平均水分と排出空気温・湿度ともに近似させることが困難であったことを考慮すると、ビニールハウス内での実験で使用した材料の平均粒径は実験室内での試験より若干小さく乾物比表面積 a_0 は800に近かったのではないかと推定できる。材料の大豆によって異なる物性値パラメータとしては、材料の形状、粒径の大小による空隙率と乾物比表面積と考えられるので、この少ないパラメータの調節によって、このモデルによる計

算結果は実測値をかなり近似できると推察された。ただし、ビニールハウス内での実験のような実規模の乾燥装置による実験では、内部の通風条件は、層内の位置によって異なるので、観測された平均水分と排出空気温・湿度は、全体での平均の結果となり、詳しい解析のためには、乾燥装置内の3次元的な通風条件による有限要素解析が必要になると思われる。しかし、この研究ではそこまでの解析を目的とはしていないので、次の新たな研究での解析に譲る。

4) 循環を併用した場合の水分変化のシミュレーション

乾燥の後半、堆積層内の水分の均一化を図るために循環を行う必要がある。バケットエレベータによって循環を併用した場合の水分変化の計算方法については、各計算時間ステップでの循環量の累積が分割堆積層の堆積厚に達したときに、各堆積層の水分と材料温度の状態量をひとつ上の層の状態量に入れ替える方法で計算した。ただし、最上層の層は、最下層の層の状態量に入れ替える。

測定したバケットコンベアの大粒の平均搬送容量は $2.45\text{m}^3/\text{h}$ であり、この量が乾燥機の床面積 1.84m^2 に均一に堆積されるとして計算ステップ時間毎の堆積厚を計算し、シミュレーションを行った。計算の入力データに循環ON、OFFを示すビットを挿入し、平均水分が約19%の乾燥開始約20時間後の循環ONの入力データのときに循環を併用したシミュレーションを実行した。

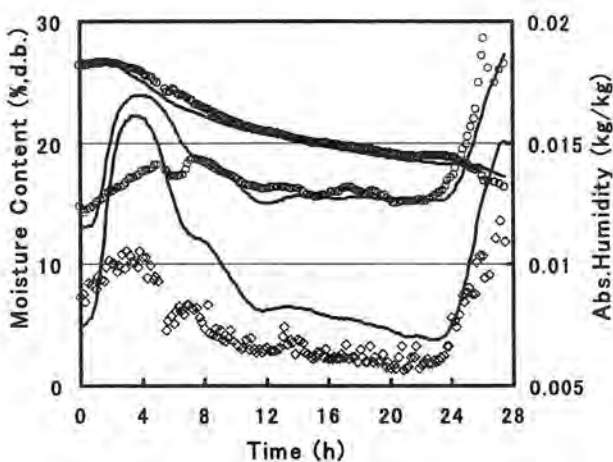


図39 更新した乾物比表面積 a_0 と風量 G による堆積層排出空気温・湿度と平均水分のシミュレーションによる計算値と実測値の比較 ($a_0=800$, 実験2)

Fig39 Comparison of values estimated by simulation and measured values of the temperature and humidity of air flowing out of the layers and average moisture content of layers using renovated parameter of $a_0=800$ (Exp.2)

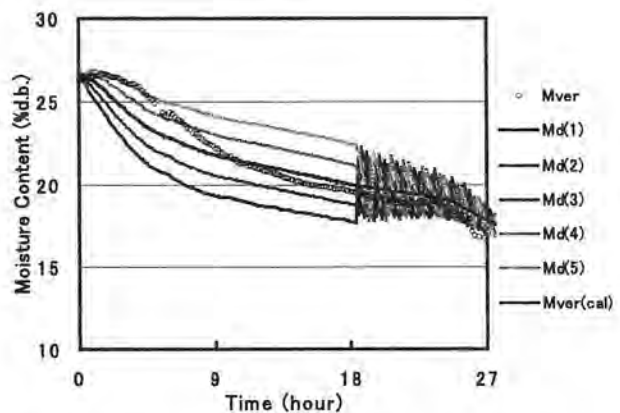


図40 乾燥後半に循環を併用した場合の堆積層の水分変化のシミュレーション

Fig40 Simulation of changes of moisture content in grain layers when using a bucket conveyor for recirculation after 20hours drying

結果は、図40のようであり、各堆積層（層位置を固定）の水分は、通風による乾燥の他、下層（図ではより上側の実線）は上層のより乾燥した大豆の移動によって水分が低下し、最上層はバケットコンベアによる最下層からの大豆の移動により水分が上昇し、順次この変化が繰り返されて次第に堆積層内の水分が均一化されていく様子がわかる。この循環によって、低湿な空気に触れる堆積層上層の大豆は徐々に下層に移動して堆積層を通過したより高湿の空気に触れるようになる。ただし、平均水分の変化については、循環を行わない場合と比較してほとんど差がなかった。循環の効果は、均一な水分に仕上げることの他、高水分時における通風不良個所の蒸れ防止、裂皮粒発生の防止のために低湿な空気に触れる時間を裂皮が生じない時間内に制限することなどと考えられる。

4. まとめ

1) 大豆の乾燥に関係する比体積、比表面積、空隙率、移動係数、平衡水分、材料比熱などの物性量と水分との関係を詳しく考察し、少ないパラメータで循環モードを含むシミュレーションが可能な大豆の非定常堆積通風乾燥モデルを作成した。

2) モデルにより大豆の乾物真密度、乾物体積比表面積、空隙率係数のパラメータと通風量、堆積厚、通風の温・湿度変化から堆積層内の空気温・湿度、材料温度、水分を推定できた。

3) 室内実験での大豆堆積厚層の平均水分や排風の温・湿度変化を実測値と比較した結果、ほぼ一致した。また、ハウス内における静置式乾燥機での大豆乾燥試験でも、室内実験での同一パラメータを用いて計算した結果、乾燥初期の数時間を除いて実測値に近かった。

4) 堆積層の深さ別の水分変化を計算した結果、入口側の層では通風空気の平衡水分に急速に近づき、夜間は吸湿があり、逆に出口側では徐々に乾燥する傾向が認められた。層全体の平均水分変化は、堆積層の中間層の水分変化にほぼ等しかった。

5) バケットコンベアによる循環を併用した場合の各堆積層の水分変化のシミュレーションを行い、水分の均一化の過程を明らかにすることができた。平均水分の変化はほとんど差がなかった。

(4.23) 式の導出方法

球の場合の熱の拡散方程式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)$$

境界条件は

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R} = -h \theta \Big|_{r=R}$$

初期条件として

$$\theta = \theta_0$$

ただし、 $h = \alpha / \lambda_s$ 、 $\kappa = \lambda_s / (C_D \rho)$ (α : 表面熱伝達率、 κ : 熱伝導度、 λ_s : 熱伝導率) である。この解は

$$\frac{\partial(r\theta)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2(r\theta)}{\partial r^2}$$

として $\Theta = r\theta$ と変換して

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2}$$

境界条件は

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R} = -(h - 1/R) \Theta \Big|_{r=R}$$

初期条件

$$\Theta_{r=0} = r\theta_0$$

の拡散方程式を解いて θ にもどすと

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\infty}{2Bi} \sum_{j=1} \frac{\{ \nu_j^2 + (Bi - 1)^2 \}^{1/2}}{\nu_j^2 + Bi(Bi - 1)} \times e^{-\nu_j^2 F_0} \frac{\sin \nu_j(r/R)}{\nu_j(r/R)}$$

ν_j は、 $\tan \nu_j = \nu_j / (1 - Bi)$ の解である。ただし F_0 (フーリエ数) = $\kappa t / R^2$ 、 Bi (ピオ数) = $hR = \alpha R / \lambda_s$ 、 $\{ \int 4\pi r^2 \theta dr \} / (4\pi R^3 / 3)$ を計算して球の平均温度 θ を求めると

$$\theta = 6Bi^2 \theta_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{e^{-\nu_j^2 F_0} / \nu_j^2}{\nu_j^2 + Bi(Bi - 1)}$$

$r = R$ とおいて表面温度 θ_s を求めると

$$\theta_s = 2Bi \theta_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{e^{-\nu_j^2 Fo}}{\nu_j^2 + Bi(Bi-1)}$$

球の単位表面から単位時間当たり放熱する熱量 q は

$$q = -\lambda_s \left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{2Bi^2 \lambda_s \theta_0}{R} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{e^{-\nu_j^2 Fo}}{\nu_j^2 + Bi(Bi-1)}$$

$q = h_s (\theta - \theta_s)$ より, $h_s = q / (\theta - \theta_s)$ によって熱移動係数 h_s を計算すると

$$h_s = \frac{\frac{2Bi^2 \theta_0 \lambda_s}{R} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{e^{-\nu_j^2 Fo}}{\nu_j^2 + Bi(Bi-1)}}{6Bi^2 \theta_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{e^{-\nu_j^2 Fo} / \nu_j^2}{\nu_j^2 + Bi(Bi-1)} - 2Bi^2 \theta_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{e^{-\nu_j^2 Fo}}{\nu_j^2 + Bi(Bi-1)}}$$

$j=1$ の項で近似すると以下の(4.23)式が求まる.

$$h_s = \frac{Bi \lambda_s}{R (3Bi / \nu_1^2 - 1)}$$

記 号

G ; 空気質量速度 [kg/(m²・hr)]

ρ_{dM} ; 材料真密度 [DMkg/m³]

ρ'_{dM} ; 材料乾物見掛け密度 [DMkg/m³]

a ; 材料有効接触面積 [m²/m³]

C_M ; 材料比熱 [kJ/(kg・K)]

C_H ; 湿り空気比熱 [kJ/(kg・K)]

C_v ; 水蒸気比熱 [kJ/(kg・K)]

L_g ; 水の蒸発潜熱 [kJ/kg]

μ_g ; 空気の粘性率 [Pa・s]

ρ_g ; 空気の密度 [kg/m³]

D_g ; 空気中の水蒸気拡散係数 [m²/s]

k_H ; 絶対湿度基準物質移動係数 [kg/(m²・hr・ΔH)]

k_{Hc} ; 絶対湿度基準総括物質移動係数

[kg/(m²・hr・ΔH)]

k_M ; 含水率基準物質移動係数 [kg/(m²・hr・ΔM)]

k_{Mc} ; 含水率基準総括物質移動係数

[kg/(m²・hr・ΔM)]

h_g ; 気相中の熱移動係数 (熱伝達率)

[kJ/(m²・hr・ΔT)]

S_H ; シャーウッド数, S_c ; シュミット数, P_r ; プラントル数

N_u ; ヌーセルト数, L_e ; ルイス数 (= S_c / P_r)

V 大豆の通風乾燥における通風の温・湿度について

1. 目的

近年、コンバインで大量収穫される高水分大豆を、高品質で効率的に乾燥調製する技術開発が強く求められている。この通風乾燥では、蒸れ（通気状態が不良で高湿度になり、発酵しやすい状態であること）により組成成分の変化を起こしたり、しわや、裂皮等で品質の劣化をきたすことがある。したがって通風の温・湿度の適応範囲は米麦と違って狭く制限される。特に本報で取り上げた裂皮は、豆腐の製造時の浸漬の際に内部の可溶性糖類が溶出することによる品質の変化や原料ロスその他、他の正常な大豆との吸水速度の違いによって蒸煮時の大豆の硬さにむらを生じるなど問題となる。図41に乾燥による裂皮粒の被害程度を示す。

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⁽⁴⁾。しかし、それらの詳しい範囲と裂皮発生機構の解明が未だなされていない。裂皮粒の発生は、乾燥中の大豆内の水分勾配により、表面付近の特に種皮の乾燥収縮により応力が発生し、その力が種皮の応力限界を越えることによって生じると考えられる。

ここでは、種皮に生ずる歪みを、材料力学的見地から理論的に検討し、歪みの発生限界を、異なる初期水分と温・湿度条件下で発生した裂皮粒割合の調査結果を用いて近似的に求め、裂皮を生じない通風の温・湿度の範囲を明らかにする。さらに、堆積通風乾燥において、裂皮粒や高水分時の蒸れを発生さ

せない温・湿度範囲を湿り空気線図上で検討し、適切な乾燥方法を提示する。乾燥過程の表皮に生じる歪みを子実内部の水分勾配を考慮せずに粒平均の水分と表皮水分でほぼ表せること、および表皮水分が急速に外気の温・湿度と平衡になることから、平均水分と大豆の外気の温・湿度に対する平衡水分でほぼ表されることを示す。これによって乾燥裂皮を生じない通風空気条件を子実内部の水分勾配や収縮などを有限要素などの複雑な方法を用いなくても大豆の平均水分との関係で簡便に示すことができることを呈示した。

2. 裂皮発生の原理と防止のための通風温・湿度

大豆種子の表皮におけるひずみの概念図を図42に示す。裂皮は乾燥にともなって、粒内部と比較して種皮の水分がより低くなることにより、収縮で引張力が増してゆき、種皮固有の引張り強さを越える時点で発生すると考えられる。乾燥初期の粒内部の水分 M (d.b.decimal) が一様と仮定し、その種皮に長さ l_0 、幅 δw のある微小面を想定する。乾物での長さを l とすると、水分 M となったときの自然長 l_0 は次式で表される。

$$l = l_0 (1 + \lambda M) \quad (5.1)$$

ここで、 λ は微小面の主応力方向に沿った線膨張係数で水分が10%d.b.~40%d.b.の範囲では一定と見なしうることを筆者らは報告している⁽⁴⁾。 M が外気の温・湿度に平衡していれば、粒内全体に水分勾配が



図41 裂皮粒（皮切れ粒・写真右）と正常粒
Fig.41 Seed-coat cracked soybeans and normal soybeans

なく、歪みは0として扱えるので、 Q_i は次式となる。

$$Q_i = Q_0 (1 + \lambda M_i) \quad (5.2)$$

乾燥が進んで、粒内部に水分勾配が生じても粒全体の大きさは粒平均の水分での大きさにほぼ等しいので種皮の微小面の水分 M_s 、粒の平均水分が M になったときの長さ Q は、粒内部の水分が一樣な M 、としたときの長さにはほぼ等しいと考えられる。従って Q は(5.1)式と同様に

$$Q = Q_0 (1 + \lambda M_v) \quad (5.3)$$

一方、微小面は、引張り力がなければ Q から水分 M_s のときの自然長 Q_s へ収縮しようとするので、

$$Q_s = Q_0 (1 + \lambda M_s) \quad (5.4)$$

実際には(5.3)式の Q に引張られているので、この間の歪み ε_s は、

$$\varepsilon_s = \frac{Q - Q_s}{Q_s} = \frac{1 + \lambda M_v}{1 + \lambda M_s} - 1 \quad (5.5)$$

以上は種皮の任意の微小面部分の主応力方向におけるものであるが、線膨張係数は楕円体粒の長軸方向に最大となるため⁹⁾、歪みはその水分収縮の大きな長軸方向の頭頂の種皮の位置で最大になると考えられる。実際に裂皮はほとんどこの部分に発生している。よって、頭頂における(5.5)式の歪みを改めて ε_s 、水分膨張係数を λ 、ヤング率を E とすると発生する応力 τ_s は次式となる。

$$\tau_s = E \varepsilon_s = E \left(\frac{1 + \lambda M_v}{1 + \lambda M_s} \right) - 1 \quad (5.6)$$

歪みは粒の長軸方向の頭頂部分の表皮で最大になり、その引張り強さ τ_s に対する裂皮の条件は

$$\tau_c < \tau_s = E \left(\frac{1 + \lambda M_v}{1 + \lambda M_s} \right) - 1 \quad (5.7)$$

ただし、以上の議論では塑性の影響は無視する。これより、裂皮を生じる M_v と M_s の関係は

$$M_s < \frac{M_v}{\gamma_c} - \left(1 - \frac{1}{\gamma_c}\right) \frac{1}{\lambda} \quad (5.8)$$

ただし、 $\gamma_c \equiv 1 + \tau_c / E = 1 + \varepsilon_c$ 、 ε_c は τ_c に相当する歪みである。通風での裂皮防止の条件は(5.7)、あるいは(5.8)式の不等号の向きを変えた式である。

乾燥進行中の粒各部の水分の差は

$$M_c \leq M_s \leq M_v \quad (5.9)$$

M_c は外気の温・湿度に平衡すると考える水分で、これに相当する歪みを ε_c とすれば

$$\varepsilon_c \equiv \frac{1 + \lambda M_c}{1 + \lambda M_c} - 1 \quad (5.10)$$

(5.9)式と本式より以下の関係が成り立つ。

$$\varepsilon_c(M_c, M_v) \geq \varepsilon_s \quad (5.11)$$

常温付近では水分のみの関数で表せるので

$$\tau_c(M_s) = E_c(M_s) \varepsilon_c(M_s) \quad (5.12)$$

裂皮を生じない条件は

$$\varepsilon_c(M_s) \geq \varepsilon_s \quad (5.13)$$

水分が低いと引張り強さが小さくなる傾向があるので、 M_c のときに想定される裂皮限界歪みを ε_{cc} とすると、

$$\varepsilon_{cc}(M_c) \leq \varepsilon_c(M_s) \quad (5.14)$$

ここで

$$\varepsilon_{cc}(M_c) \geq \varepsilon_c(M_c, M_v) \quad (5.15)$$

の条件を満たすとすると

$$\varepsilon_c \geq \varepsilon_{cc} \geq \varepsilon_c(M_c, M_v) \geq \varepsilon_s \quad (5.16)$$

裂皮発生しない条件(5.13)式を満たす。従って M_c の十分条件は

$$\varepsilon_{cc}(M_c) \geq \varepsilon_c = \frac{1 + \lambda M_v}{1 + \lambda M_c} - 1 \quad (5.17)$$

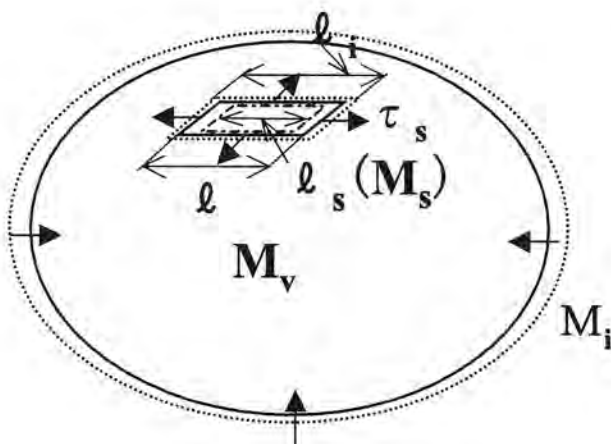


図42 大豆種子の表皮におけるひずみの概念図

Fig.42 Schematic diagram of distortion in the seed-coat of a soybean

M_c を左辺に移行して整理すると

$$M_c \geq \frac{M_v}{1 + \varepsilon_{ce}} - \left(1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_{ce}}\right) \frac{1}{\lambda} \quad (5.18)$$

ε_{ce} は M_c のときの引張り強さに相当する歪みで、常温付近では M_c に依存する関数である。塑性の影響を考慮すると裂皮限界の ε_c は実際はこれよりも大きくなるので、本式は種皮の乾燥収縮により裂皮を発生させない通風空気の十分条件といえる。

3. 堆積層中の蒸れ防止条件

通風乾燥で堆積層の排気側では、水分の高い段階で高湿の空気になり、温度が高いと蒸れの危険が高い。この温・湿度範囲については20～50℃、湿度80%以上という報告⁽¹²⁾がある。したがって、堆積層内の温・湿度がこの範囲外にあることが必要である。堆積層内の水分蒸発はほぼ断熱状態で行われるため、通風の温・湿度は湿り空気線図の等エンタルピ線にほぼ沿って温度が下がり、絶対湿度が上昇する。よって通風の相対湿度は堆積高さに応じて大豆水分へ近似的に平衡して行くとすれば⁽²¹⁾、前述の蒸れの始まる湿度とされた80%とほぼ平衡する水分18%を上回る段階では、温度20℃、湿度80%の点を通る等エンタルピ線よりも低い温・湿度の通風が必要である。逆に水分が18%を下回る段階では、平衡相対湿度が80%以下となるので、蒸れる危険は少なくなると考えられる。

4. 試験方法

温・湿度を25℃-20,40,60%, 30℃-40,60%, 35℃-20%に設定した恒温・恒湿槽内（ヤマト科学IH42H）に異なる初期水分（12.0, 16.3, 18.2, 19.0, 22.5, 26.5%, w.b.）の裂皮のない完全粒の大豆100粒（品種：タチナガハ）を金網状の皿に入れて循環通風下で単粒層乾燥を行い、乾燥後約48時間の裂皮発生割合を調査した。材料は8mmの篩いを使って選別し、粒径の大きいものを使用した。

5. 結果と考察

1) 初期水分と裂皮粒発生割合の関係

温・湿度の組合せによる条件下での初期水分と裂皮粒発生割合との関係は図43のようになった。裂皮粒発生割合は、外気の温・湿度条件が同じ場合、

初期水分が大きい程指数関数的に増加する傾向が認められた。また温度と湿度の影響に関しては、後者の方が大きな影響を受け、湿度が低くなるに従って裂皮粒の割合が増加した。5～10℃の温度上昇に関しては、裂皮粒の割合が若干増加する傾向にとどまった。

以上の結果は、前章で理論的に述べたように、種皮の乾減にともなう収縮による応力が、初期水分と温・湿度により異なり、その発生する応力歪みが大きい程、裂皮粒発生割合を増加させることを示している。すなわち、種皮の水分は外気の温・湿度に平衡するように急速に乾減する特性があるため、水分に平衡する相対湿度が低い程、また子実粒の平均水分が高い程、種皮にかかる引張り応力が大きくなり、裂皮粒の割合が増加したと考えられる。

2) 種皮の推定歪みと裂皮粒発生割合の関係

種皮に生じる歪みは、ほぼ(5.5)式のように表され、式中の種皮水分 M_c は、周囲の水蒸気の拡散係数が子実中の水分拡散係数より大きい程、通風の温・湿度に平衡する水分 M_c に近似する場合が多い⁽²¹⁾。ここでも簡単のため平衡水分 M_c で近似すると、歪みは M_c に対する(5.10)式で表され、実際よりは大きめに近似される。一方、粒内部の水分 M_i は一定温・

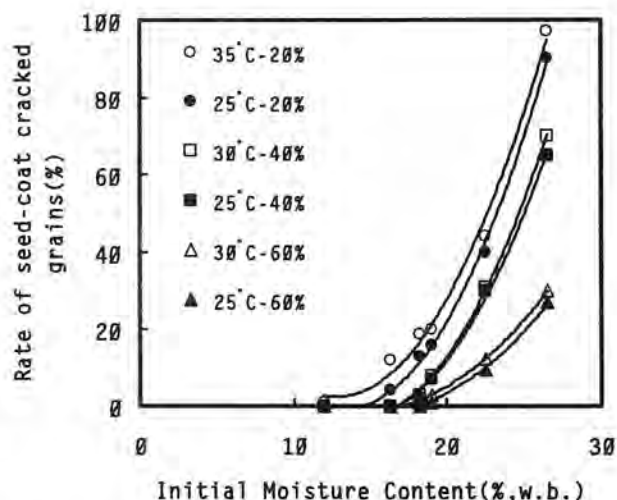


図43 異なる温・湿度を組み合わせた乾燥通風での初期水分に対する裂皮粒発生割合の関係（品種：タチナガハ）

Fig.43 Relation of the rate of seed-coat cracking to initial moisture content under air drying conditions of different temperature and humidity combinations (Variety: Tachinagaha)

湿度条件下では指数関数的に乾減経過するが、裂皮が発生する時間は実験ではほぼ1時間以内であるので、ここでは近似的に初期水分 M_0 に近似するものとする。従って、指標的な近似値ではあるが、裂皮粒発生割合の実験結果から外気の平衡水分を限定する目的は満たされると考える。以下、裂皮限界の ε_c についてはこの近似式に基づいて考案する。(5.10)式に基づき、 M_e を外気の平衡水分、 M_0 を初期水分 M_0 に近似しており、 ε_c に対する裂皮発生割合との関

係を図44に示す。式中で $\lambda = 0.006^{(9)}$ とし、 M_e はChen-Cleytonの式による村田ら⁽²⁰⁾の報告した以下の係数で求めた。

$$r.h. = \exp[-17.15 \cdot T_p^{-0.2654} \cdot \exp(-0.1443 \times 10^{-4} \cdot T_p^{1.586} \cdot M_e)] \quad (5.19)$$

$$M_e = -69300 T_p^{-1.586} \ln\{ \ln(r.h.) \cdot T_p^{0.2654} / 17.15 \} \quad (5.20)$$

歪み ε_c の増加に対して裂皮粒発生割合がほぼ直線的に増加し、また初期水分が低くなるに従い ε_c は小さくなり、裂皮粒発生割合が減少する傾向が認められた。これより裂皮粒の発生を回避する温・湿度は、平衡水分の一変数でほぼ表されると考えられる。

初期水分が高く、通風の温・湿度に平衡する水分が低ければ、生じる応力は式(5.10)により大きくなる。図44に示した種皮の近似歪みと裂皮粒発生割合の関係では、種皮固有の引張り強さ τ_c が子実粒によって異なる範囲で分布し、その τ_c 以下の種皮であった子実の累積割合が結果的に裂皮粒発生割合となって表れたものである。すなわち確率分布関数を表した結果と考え、 ε_c が正規分布をなしていると仮定すると、 $P(|\varepsilon - \mu| < \sigma) = 0.6827$ なので、 $P(\varepsilon < \mu - \sigma) = 0.1587$ 、 $P(\varepsilon < \mu) = 0.5$ となる $\mu - \sigma$ を知る必要がある。表7に裂皮粒発生割合が10%、15.9%に相当する種皮の歪み及び裂皮発生の限界歪みが正規分布すると仮定した場合の平均値 μ と偏差 σ を示す。 μ は初期水分が26.5(%w.b.)で $\mu = 0.1$ 、偏差 $\sigma = 0.012$ が算出された。大黒ら⁽²⁸⁾の報告した精密引張り試験機による破断試験で得られている μ は水分20.1% d.b.で、0.095、水分17.9% d.b.で0.085であり、本報での推定値が実際より大きめに算出されることを考慮すれば、これらの値にかなり近似している。

以上により、裂皮限界の歪みの分布関数と確率密度関数を算出して正規分布で表すと、図45のようになる。分布関数は初期水分26.5%の裂皮粒累積発生割合の傾向とよく一致しており、大豆の裂皮限界歪みは確率密度関数に近い分布を示すと推定される。

3) 裂皮発生割合と外気に平衡する水分との関係

近似歪み $\varepsilon = \mu - \sigma$ を裂皮粒発生割合15.9%と10%について求めると、表7に示す $\varepsilon_{0.159}$ と $\varepsilon_{0.1}$ のようになった。また、このときの種皮水分 M_e は(5.10)式に上記の ε をそれぞれ代入して求めた。これより、

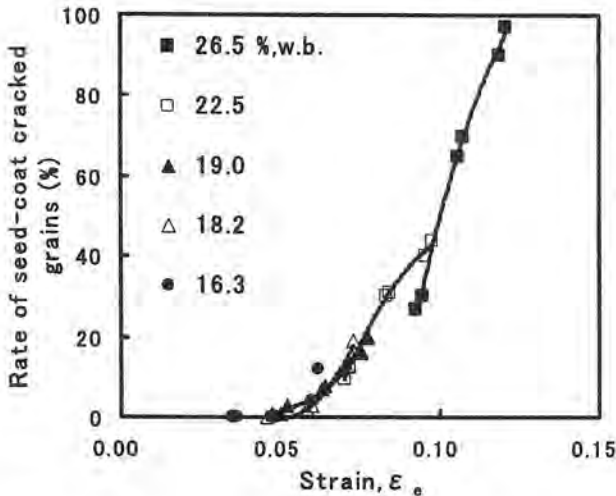


図44 種皮の近似歪み $\varepsilon = (1 + \lambda M_0) / (1 + \lambda M_e) - 1$ と裂皮粒発生割合の関係(品種: タチナガハ)
Fig.44 Relationship between approximate strain $\varepsilon = (1 + \lambda M_0) / (1 + \lambda M_e) - 1$ (Variety: Tachinagaha)

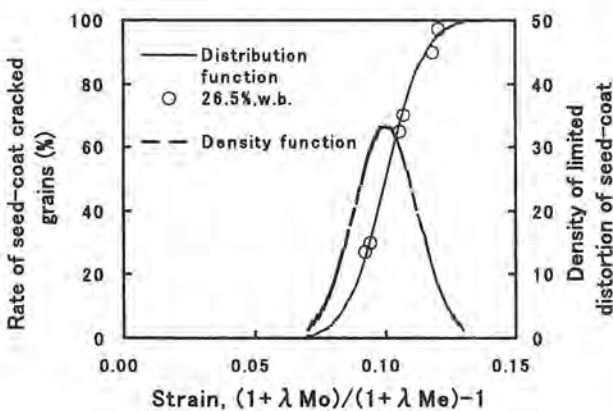


図45 裂皮粒発生割合を歪みに対して正規分布とした場合の裂皮発生の限界歪みに関する分布関数と密度関数(初期水分26.5%w.b., タチナガハ)
Fig.45 The distribution function and density function for critical distortions of seed-coat cracked grains based on the assumption that the rate of seed-coat cracked grains in proportion to distortion has a normal distribution (initial moisture content, 26.5% w.b., Tachinagaha variety)

表7 裂皮粒発生割合が10%、15.9%($P(\epsilon < \mu - \sigma)$)に相当する種皮の歪み、及び裂皮発生の限界歪みが正規分布すると仮定した場合の平均値 μ と偏差 σ (品種：タチナガハ)

Table 7 Distortion of cracked seed-coats corresponding to 10% and 15.9% of cracking rate, and mean values μ and St.dev. σ of distortions assuming that critical distortions have a normal distribution (Variety: Tachinagaha)

Moisture Content (%w.b.)	Strain ϵ (0.159)	Mean μ	St.dev σ	Strain ϵ (0.1)
18.2	0.071	—	—	0.067
19.0	0.073	—	—	0.068
22.5	0.073	—	—	0.070
26.5	0.088	0.100	0.012	0.086

($M_{s, \epsilon_{0.1}}$, $\epsilon_{0.1}$), ($M_{s, \epsilon_{0.159}}$, $\epsilon_{0.159}$)の分布は図46に示す2次曲線の式のようにになった。さらに、初期水分に対し(5.18)式の $\epsilon_{cc} = \epsilon_{0.1}$ となる M_{cc} を図47に示す。供試品種タチナガハの場合は、○印のようにになった。近似した歪みは実際よりも大きな値であるが、裂皮粒発生割合に関する通気に平衡する子実粒水分は実験から得られたものなので、この近似した歪みから逆に10%裂皮粒発生割合を与える M_{cc} の限界値が推定できる。

(5.18) 式の ϵ_{cc} として図46中の式の $\epsilon_{0.1}$ の近似式を用い、 M_v と M_{cc} の関係を図示すると、図47の $M_{cc,0.1}$ の曲線となる。ここで裂皮発生の基準を10%とした理由は、堆積形の乾燥機で裂皮発生の危険が通風の入口側の表層10~20cm付近に限られ、また裂皮が発生し始めるのは条件によって異なるものの通風後時間を経てからであり⁽²⁶⁾、それ以前に循環による攪拌とテンパリングがなされれば影響が少ないと考えたからである。裂皮粒発生が10%以下となるには、この平衡相対湿度以上となる通風を必要とする。同様に、 $\epsilon_{0.159}$ の近似式を用い、 $\epsilon_{cc} = \mu - \sigma$ となる M_{cc} と M_{cc} の関係を表す曲線は、図47中の $M_{cc, \mu - \sigma}$ の破線となる。

以上の結果の検証として、さらに別のタチナガハを用いて、裂皮粒発生割合が10%となる時に外気へ平衡する水分を初期水分に対して図示すると、(印のようにになった。 $M_{cc,0.1}$ の分布とほとんど同様の傾向が見られ、この10%限界平衡水分曲線の近似式は、タチナガハに対して一般的に成立すると考えられる。また、大黒ら⁽²⁶⁾が品粒エンレイについて温・湿度を

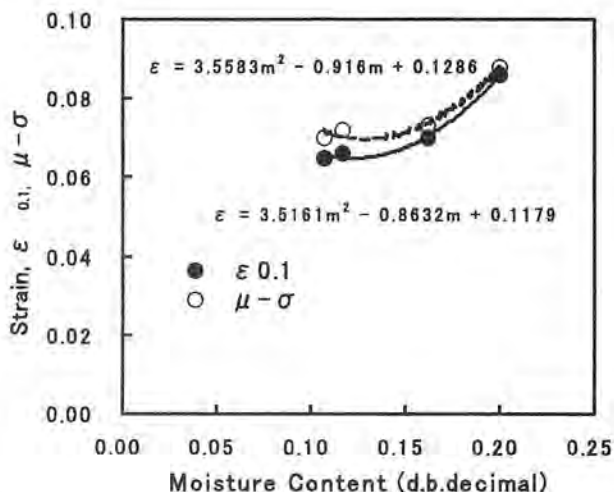


図46 裂皮粒発生割合が10%と15.9%となる種皮の限界歪みと水分の関係(品種：タチナガハ)

Fig.46 Relationship between estimated critical distortions of seed-coats for which the rate of seed-coat cracked grains will be to 10% or 15.9% and moisture content (Variety: Tachinagaha)

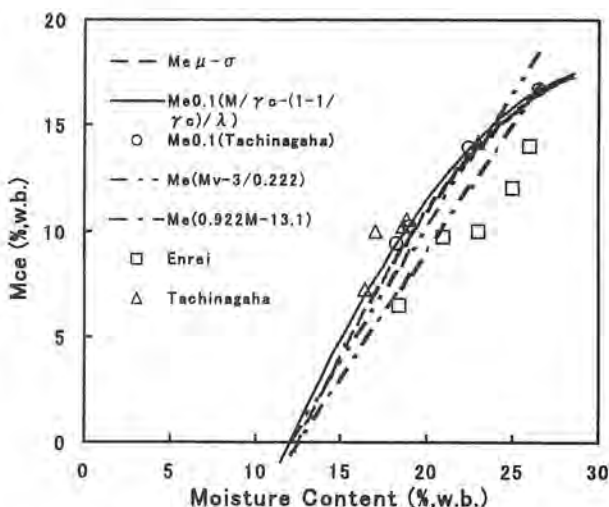


図47 単粒層乾燥で裂皮粒発生割合を10%と15.9%としたときの子実粒水分と通風平衡相対湿度との関係 (○;測定に用いたタチナガハ △;他の材料のタチナガハ □;エンレイ)

Fig.47 Relationship between the moisture content of soybeans and equilibrium relative humidity of the air passing through the mono-grain layer when the rate of seed-coat cracked grains is 10% or 15.9%

(○;experimental material of Tachinagaha,△;another material of Tachinagaha, □;Enrei)

変え乾燥実験の結果を引用して、 $M_{cc,0.1}$ を求めた結果は図中の□印のようになり、タチナガハより低い限界の平衡水分となった。エンレイは種皮の細胞数が

70~100個/100×100 μmと他の品種の80個以下と比べて多く、また周囲長が大きくなるにつれ少なくなり、細胞に伸びる余裕があることが報告されている⁽²⁵⁾。従って裂皮限界歪みが大きく、従来から知られているようにタチナガハよりは裂皮しにくいといえる。なお、粒径については理論的考察で取り入れていないが、実際には粒径が大きくなるにつれて裂皮粒の増大することが報告されている⁽⁶⁾。これは大豆の粒径が大きくなるにつれ乾物当たりの表面積が小さく内部の水分低下が少なくなり、粒全体としての平均水分の減少が少なくなる。従って粒径の減少が少ないため、水分収縮しようとする種皮の歪みがより大きくなるためと考えられる。(5.5)式の M_v の減少が少ないことで説明される。また、粒が大きくなるにつれ種皮の種皮細胞数が減少し⁽²⁵⁾、限界歪みが低下することも影響していると考えられる。

4) 乾燥速度と裂皮粒発生の関係

(5.18)式は M_c によって変動する ε_{∞} を含んでいるが、前節3で述べた結果のように、歪みは0.1以下であるため

$$M_v - M_c \leq \left(1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_{\infty}}\right) \frac{1}{\lambda} \quad (5.21)$$

に近似すると、乾燥速度の式

$$-\frac{dM_v}{dt} = K(M_v - M_c) \quad (5.22)$$

より、 $\varepsilon_{\infty} = \varepsilon_{0.159}$ で、(5.21)式の等号が成立するときの(5.22)式の乾燥速度を V_c とすると

$$V_c \equiv -\frac{dM_c}{dt} = \left(1 - \frac{1}{\gamma_c}\right) \frac{1}{\lambda} \quad (5.23)$$

(5.21)式の条件は

$$M_c \geq M_v - V_c / K \quad (5.24)$$

と乾燥速度の条件式で表される。

ここで、 K は乾燥定数 (h^{-1})で、村田ら⁽²¹⁾が示した通風下の式では

$$K = 2.119 \exp(-661/T_p) \quad (5.25)$$

ここで T_p ；材料温度 (K)

で求められる。大豆の限界乾燥速度を品種ごとに測定し、(5.24)式に基づいて M_c を求め、これに近似した T_p から(5.19)式によって空気の限界相対湿度を求めることができる。 γ_c と λ に関して、前に示し

た測定値 $\gamma_c = 1.085$ と $\lambda = 6 \times 10^{-3}$ を用いると、(5.18)式の限界応力に基づく式は

$$M_c \geq 0.922 M_v - 13.1 \quad (5.26)$$

一方、(5.23)式の限界乾燥速度からの条件式は、 $V_c = 3.0$ (%d.b./h)、 $T_p = 293$ Kのとき

$$M_c \geq M_v - 3.0 / 0.222 = M_v - 13.6 \quad (5.27)$$

この関係を図47に2本の直線で示す。(5.26)式の直線 $M_c = 0.922 M_v - 13.1$ は若干実測値よりも小さな値となる。(5.27)式の直線 $M_c = M_v - 3.0/0.222$ は理論的な限界曲線 $M_c/0.1$ に近い値となっており、乾燥速度によっても近似的に表される。他の品種を使用した文献での試験結果でも同様な傾向が認められた。図47の $M_{c,0.1}$ と $M_{c,\mu,0}$ は、乾燥速度が3% d.b./hの場合にほぼ相当しているため、大豆の水分に対してこの限度内の乾燥速度となる通風をすることによっても、裂皮の発生を10%以下に低く抑えることができる。品種、粒径、温度等によってこの限界平衡水分は若干異なるが、乾燥機で大豆乾燥に通常設定される温度範囲10~30℃ではこの乾燥速度で表される。

5) 堆積形通風乾燥における層内の蒸れと湿度変化

実際の堆積層内で乾燥中の通風の温・湿度変化を調べるため、グレンコンテナを改造した吸引式通風乾燥機を使用した。初期水分21.0 ± 1.0% w.b.、初期重量1,160kgの大豆(品種：タチナガハ)を供試し、高さ0.86mの堆積層内の入口側、出口側、および垂直方向に18cm間隔で3点の温・湿度センサを挿入して、通風の温・湿度変化を調べた。

図48中に示した折れ線(Temp-Humidity in layersの折れ線)は、乾燥の初期と中期における堆積層の入口と出口、および層内3点の各温・湿度を同時刻の測定点につき1本の折れ線として示したものである。右側の始点が入口の測定点で、左側に行くほど層の下方になる。下層になるほど若干下向きに変化する傾向も見られるが、ほぼ空気線図の等エンタルピ線に平行して温度が低下し、湿度が上がって大豆の水分と平衡に近い温・湿度の空気になっている。下方に変化するの若干熱が外部へ放熱、穀温が上昇しているためと考えられる。しかしほぼ等エンタルピ線上を移行して、水分に平衡する相対湿度へ変化して行くことができる。

6) 大豆乾燥用の空気線図

図47で求めた限界平衡水分を通風の温・湿度で表すため、湿り空気線図上に水分に平衡な相対湿度の曲線をプロットし、裂皮発生の危険域を示した(図48)。水分21%w.b.で、限界平衡水分 M_{e^*} が13.5%w.b.の場合の裂皮発生危険領域は、この平衡水分曲線より下側の領域となり、より下方へ位置するほど裂皮が発生しやすい。堆積形通風乾燥の場合は平均水分に対して限界平衡水分を求め、この温・湿度になるよう加温・調湿する。また、水分が18%以上の大豆の表面が温度20℃以上、湿度80%以上ではカビや微生物の活動が盛んになりやすい⁽¹¹⁾とされている。従って蒸れや裂皮の発生の危険が少なく、一定の通風量で最大の乾燥速度が得られる通風の温・湿度は、この線図上では蒸れ発生境界線(温度20℃、相対湿度80%を通る等エンタルピ線)と限界平衡水分が交わる点B'であり、外気を加温・調湿してこの付近の温・湿度の空気に制御できれば、品質を劣化させることなく、最高の乾燥速度が得られる。

7) 適切な乾燥方法の提案

堆積層を通過する空気が、湿り空気線図の等エンタルピ線上を移行し、大豆水分に平衡する相対湿度に近づく条件下で裂皮及び蒸れを回避するには、図48に示した裂皮危険領域よりも上側の温・湿度にあって、水分が18%以上では、蒸れ危険領域に入らないような温・湿度で通風されることである。例えば、水分が21%w.b.で乾燥機の入気口付近の温・湿度がA点に位置しているときは、限界平衡水分13.5%の裂皮限界はB点であるが、等エンタルピ線を左上方へ移行すると、平衡水分曲線を含む蒸れ危険領域に入るため、この領域に接触しないB'点が加温目標値となる。

循環式乾燥機を使用する場合には、危険領域の温・湿度と接触する時間が、裂皮を生じる時間よりはるかに短いため、通風温度が30℃以下では影響が少なくなると思われる。B'から乾燥を開始し、裂皮危険領域(限界平衡水分)の低下に応じて通風温度を高めて行けば、最高速度で乾燥が可能になる。また、入気口付近の温・湿度がA'点にあって、既

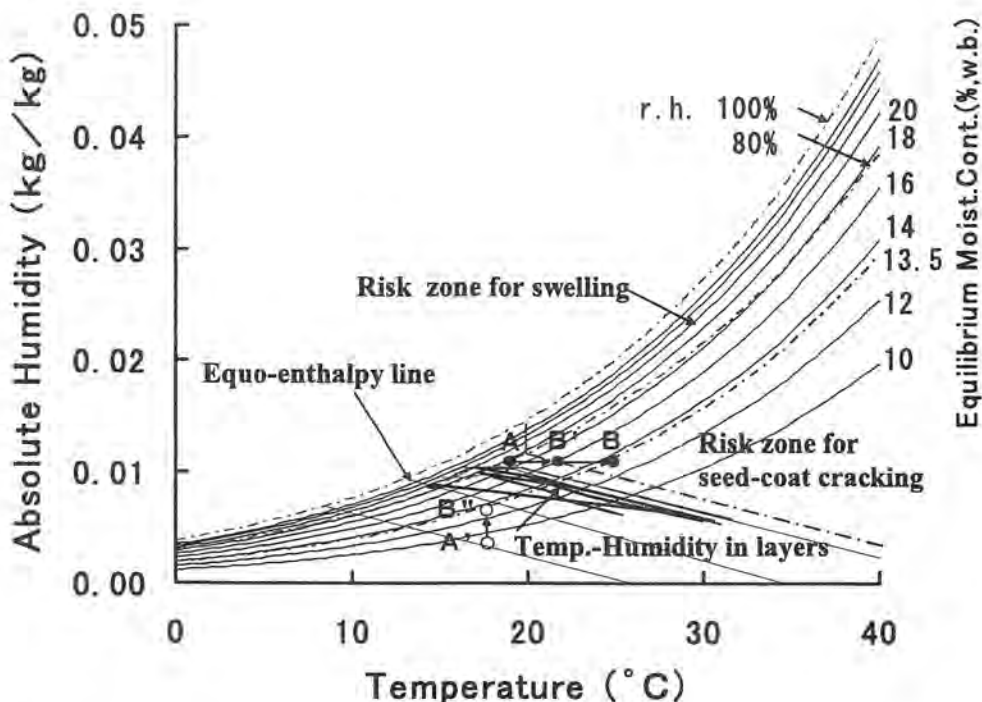


図48 湿り空気線図上に表した子実粒水分に平衡する相対湿度曲線、および蒸れと裂皮の危険領域

Fig.48 Curves of relative humidity equilibrated to moisture content of soybean seeds and risk zones for swelling and seed-coat cracking shown in a psychrometric chart

に裂皮危険領域にある場合には、気温が下がり裂皮危険領域から自然に外れる夕刻に搬入するなどの方法が考えられる。実際には循環して通風側の表層付近の大豆が20分以上低温の空気に触れるのを防いだり、間欠的に通風して裂皮や蒸れの発生を抑えながら穀温や内部の湿度の上昇を抑えるなどの方法で対処できる。水分が18%以下になると、平衡相対湿度は、ほぼ80%以下となるので、蒸れの危険も少なく、裂皮限界の平衡水分も下がり、高温・低温の通風が可能となる。

6. まとめ

大豆の乾燥過程で種皮の収縮による歪み発生の原理を論究した上で、実際の恒温・恒湿条件下で調べた裂皮粒発生割合から種皮の限界歪みの分布を近似的に推定し、裂皮の発生回避に蒸れの発生要因も含めて、水分に対応する通風の適切な温・湿度範囲を提示した。

VI 摘 要

1) 大豆の乾燥制御のためのシミュレーションモデル作成のために、大豆の比容積、見かけ体積、空隙率など乾燥に影響する大豆固有の物性量について理論的考察を行い、これらを基本的な物性量（乾物比容積、充てん係数）と水分の関数として表した。さらに調査した5品種（タチナガハ、タマホマレ、フクユタカ、スズユタカ、エンレイ）の大豆に適合する以下の近似式を得た。

$$V_m = V_o + \gamma \cdot m = 0.771 + 0.965 m \quad (0.1 < m)$$

$$V_m = (m^2 + 2 V_{oc} \cdot m + V_o^2)^{1/2} \quad (0 < m)$$

$$V_m' = V_m / (1 - \varepsilon) = 6 V_m / k \pi$$

ただし、 m (d.b. decimal), V_m ; 乾量基準の比容積 ($10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$), V_m' ; 見かけ体積, ε ; 空隙率, $V_o = 0.771 (10^{-3} \text{m}^3/\text{kg})$, $V_{oc} = 0.746$, $k = 1.00 - 0.029 m$ 以上の結果、乾燥シミュレーションに必要な物性値を少ない基本的定数で表すことができるようになった。

2) 堆積通風乾燥における圧力損失を計算によって求めるため、材料の抗力係数と摩擦係数をレイノルズ数の関数として表し、通常堆積通風乾燥で用いられる $40 < R_e < 200$ の範囲において大豆において一般的に成立する実験式を求めた。これにより大豆

1) 乾燥時の種皮の歪み ε を、子実粒の平均水分 M_v 、種皮の水分 M_s と線膨張係数 λ によって $\varepsilon = (1 + \lambda M_v) / (1 + \lambda M_s) - 1$ で表した。

2) 上記の M_s を初期水分、 M_s を外気に平衡する水分に置き換えて算出した歪みを指標として、裂皮粒発生割合との関係を調べた結果、種皮の裂皮限界の歪みは正規分布に近かった。

3) 裂皮粒発生割合が10%と15.9%となる裂皮限界の歪みを水分の関数として推定し、水分の減少につれて小さくなることを確かめた。また、限界平衡水分を求め、これに平衡する通風の温・湿度で表した。さらに、裂皮粒発生割合が10%となる限界平衡水分曲線を単粒層で乾燥速度3% d.b./hとなる直線で表示した。

4) 湿り空気線図上に水分を平衡相対湿度に変えて加え、裂皮や蒸れを回避しながら高い速度で乾減するための方法を例示した。

の通風圧力損失特性を得られた抗力係数、または摩擦係数の実験式を用いて材料の比表面積と堆積層の空隙率、風速の関数として表し、実際の測定結果と比較した結果、高い精度で圧力損失特性を近似することができた。

3) 非定常な条件下での気相中の水分移動を考慮した大豆の通風乾燥シミュレーションモデルを作成し、大豆の真密度、体積比表面積、空隙率、平衡水分、材料比熱や移動係数などの基本的な物性定数を用いて、異なる材料や乾燥試験装置において大豆堆積厚層の水分や材料温度、通風空気の温・湿度変化を精度よく推定することができた。

4) 大豆の乾燥過程で生じやすい種皮の裂皮について、外気の温・湿度と種皮における歪みとの関係を論究し、温・湿度の異なる条件下で単粒層の乾燥実験を行い、得られた裂皮粒発生割合から、裂皮発生時の歪みを近似的に推定した。これより、堆積した厚層乾燥での裂皮粒の発生が少なく、さらに蒸れを生じない通風の温・湿度条件を明らかにした。

VII 今後の課題

1) 大豆の乾燥調製のための見かけ体積、真密度、空隙率と水分の関係が明らかになったが、材料表面積に関しては、楕円体近似で表面積を計算した。より正確には、3次元スキャナーなどの光学的手法によってその表面積の実測を行う必要がある。大豆の表面から一様に水分蒸発が行われているかどうかに関しては、表面の温度分布を調べることによって、蒸発潜熱の関係から測定が可能であるが、1粒あたりの形状変化が、楕円体から球状へと一様に変化してゆくのでも表面からの蒸発もほぼ一様ではないかと推察している。

2) 静置式乾燥機やドライストアなどの堆積通風乾燥における大豆の通風圧力損失に関して、抗力係数や摩擦係数、レイノルズ数などの無次元数を使って、大豆の粒径、空隙率、水分、堆積厚等の変化に対して計算できる実験式を得たが、循環式乾燥機を含め、貯留層における通風条件は一様ではない。こうした3次元の流れに関しては、抵抗体が存在する流体有限要素解析で乾燥経過のシミュレーションとあわせて解析する必要がある。ここで得られた風速～圧力損失特性と流れ解析を組み合わせることにより、視覚的な解析が可能になると思われる。

3) 気相中の熱・物質移動速度に関する無次元数の相似則と大豆の真密度、体積比表面積、空隙率、平衡水分などの基本的物性値から、適合性の高い非定常な条件下での通風乾燥シミュレーションを作成したが、循環式乾燥機に適用する際には、2)と同様、3次元的な流れと循環を考慮したモデルの作成が必要となる。こうした視覚的なCGに関してはソフトも充実してきているので、ここでの基本的な乾燥予測手法を応用することにより、少ないパラメータで変化に対応した適合性の高いシミュレーションが可能になると思われる。

4) 本研究によって大豆の通風乾燥における水分に対しての通風空気温度・湿度範囲が明らかになった。

今後は、湿度センサや大豆用の水分計を乾燥機に取り付け、水分に応じて適切な通風空気温度・湿度制御ができるような汎用マイコン自動制御乾燥機の開発を図る必要がある(大豆水分計はその後各社で開発された)。

この研究を始めた1996年当時は、消費者の需要に押されて国産大豆の生産が伸び始めていた時で大変うれしいことであったが、その一方、そうした需要に応じて生産者をバックアップし、より高品質で省力的な乾燥調製技術を生産現場に提供していく必要性が高くなってきていた。しかし、大豆の人工乾燥調製方法についてはあまり詳しくわかっていない状況で、大豆の形状の水分変化や見かけ密度の変化、通風圧力損失、通風温度・湿度と乾燥経過、裂皮粒発生を抑える通風条件など不明なことが多かった。この研究では多くの品種について確かめたわけではないが、ここで用いた手法と物性に関する諸式は他の品種にも応用できるものであり、少ないパラメータの調整で利用できるものである。乾燥機の風量設計では、大豆の粒径から効力係数を求めて空隙率、風速の関数として圧力損失を計算する方法が正確で応用性も広い。その後、協力して頂いた静岡製機(株)は、大豆にも使える大豆水分計を取り付けた汎用乾燥機を発売し、同時に各社も発売した。通風温度の制御についてはここでの成果が参考にされている。循環式乾燥機利用で搬送速度を大豆用に低くするためにわれわれが行ったインパータによる搬送モータの制御も各社に取り入れられた。今日、稲、麦、大豆に汎用的に使える汎用乾燥機が各乾燥機メーカーからも発売され、大豆用の水分計も取り付けられてマイコン制御で大豆の乾燥調製も可能になっている。乾燥機は汎用遠赤外乾燥機として乾燥機全体としての購入が下がる中、順調に売れ行きを伸ばしている状況になっており、品質重視の乾燥調製術は今後も重要となってゆくだらうと思われる。

謝 辞

本研究は、農水省特別研究「高品質輪作」(平成3～6年)、「新用途畑作物」(平成7～10年)における大豆の高品質乾燥調製技術の開発に関する研究

において、農水省農業研究センター機械作業研究室(現在、中央農業総合研究センター作業技術部)在職中における研究成果をまとめたものである。本研

究をまとめるにあたっては、多くの人々の指導、鞭撻、協力を頂いた。

本研究のとりまとめに関して、懇切かつ的確な指導を頂いた、東京大学大学院農学生命科学研究科生物システム工学講座生物プロセス研究室瀬尾康久前教授（現、日本大学生物資源科学部）、並びに生物機械工学研究室岡本嗣男教授には終始適切なご指導、ご助言を賜りました。また、岩手大学農学部農業生産環境工学科生産加工工学講座農産工学研究室西山喜雄教授、東京大学大学院農学生命科学研究科生物システム工学講座生物プロセス研究室大下誠一助教授、および同大学、生物機械工学研究室芋生憲司助教授からは、貴重なご指摘を頂きました。心からの感謝の意を表します。また、日本大学生物資源科学科木谷 収教授には、私が学生として農学部農業工学科農業機械コースに在籍していた時から研究面の仕事でお世話になりましたが、今回の研究をまとめるに際しても適切な助言を頂きました。農業研究センター畑作機械化研究部の唐橋 需前室長（現在、鳥取大学農学部教授）には、研究遂行にあたり、貴重な

ご指導と助言を得ました。また、農業研究センター作業技術研究部の佐々木泰弘部長（現在、株式会社サタケ）には、研究報告をまとめるにあたり、懇切な校閲を受けました。さらに、農業研究センター畑作機械化研究室臨時職員藤田綾子女史には、試験や調査、分析、データの整理に際して多くの協力を頂きました。また、試験材料の大豆の提供に際しては、観音台地区、および谷和原畑圃場業務科職員の尽力と協力を頂きました。この研究には、循環式乾燥機の試作、改造など静岡精機（株）と同技術部の秀永伸作氏には多大な協力を得ました。同社の全面的な協力がなければ、循環式乾燥機を用いた大豆乾燥調製技術の開発は難しかったと思われます。ここに記して感謝の意を表します。また、北海道農業研究センター総合研究部農業機械研究室の志古田暁美、望月真理子女史には、本原稿の修正、整理に際して多くの協力を得ました。

本研究をまとめるに際しては、以上の多くの方々への援助があったことに改めて謝意を表します。

引用文献

1. 馬場宏治 (1992) : 製品特性よりみた大豆生産。農業および園芸, 67 (1), 171-178
2. Chester, W.I, Breach, D.R. (1969) : Numerical analysis of Resistance factor of Globe. J. Fluid Mech, 37-41
3. Colburn, A.D. (1933) : Analogy of Mass Transfer. Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 29, 174
4. Deshpande, S.D., S.Bal, T.P.Ojha (1993) : Physical Properties of Soybean, 56, 89-98
5. Haghighi, K, Segerlind, L.J. (1988) : Modeling simultaneous heat and mass transfer in an isotropic sphere-A finite element approach. ASAE, 31 (2), 629-637
6. 林 高見・鈴木健策・佐々木 陽・原 正紀 (1996) : 裂皮性の異なる大豆品種の種子最大期における種皮の引張り強度。東北農業研究, 49, 87-88
7. 今井 功 (1978) : 流体力学。裳華房, 275-280, 386-387.
8. 井上慶一・増田治策・吉原 徹 (1988) : 非定常乾燥過程のシミュレーションモデルについて。農業機械学会誌, 50 (1), 69-79
9. 井上慶一 (1998) : 大豆の体積見かけ体積, 充てん率と水分の関係。農業機械学会誌, 60(1), 23-32
10. 井上慶一・大塚寛治・杉本光穂・村上則幸・黎文 (1999) : 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), 81-89
11. 井上慶一・大塚寛治・杉本光穂・村上則幸・黎文 (2000) : 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
12. 井上慶一・大塚寛治・杉本光穂・村上則幸・黎文 (2001) : 循環式乾燥機を利用した大豆の乾燥調製技術 -もみ殻混合による損傷の低減-。農業機械学会誌, 63 (3), 106-113
13. 化学工学協会編 (1978) : 化学工学便覧。丸善, 141-142, 239-241
14. 小出 彰・村田 敏・内野敏剛・菅原裕二・田中史彦・K.S.P.アマラトウंगा (1996) : 小麦充て

- ん層の通風抵抗に関する研究. 農業機械学会誌, 58 (6) : 111-117.
15. 国井大蔵・古崎新太郎 (1980) : 移動速度論. 培風館, 124-130
 16. Liu, M, Haghghi, K, Stroschine, R.L. (1989) : Viscoelastic characterization of the soybean seedcoat. ASAE, 32 (3), 946-952
 17. 松尾嘉重 (1986) : ビニールハウス内で除湿機を利用した黒大豆乾燥について. 47(3), 381-384
 18. Misra, R.M, Young, J.H, Misra, R.M. (1980) : Numerical solution of simultaneous moisture diffusion and shrinkage during soybean drying. ASAE, 23 (5), 1277-1282
 19. 村田敏・田川彰男・石橋真人 (1987) : 穀物の熱および水分による体積変化. 農業機械学会誌, 49(5), 435-442
 20. 村田敏・田川彰男・榎本敏夫 (1988) : 穀物水分蒸発潜熱の計算式について. 農業機械学会誌, 50(3), 85-93
 21. 村田敏・河野俊夫・榎本俊夫 (1993) : 単層大豆の乾燥特性. 農業機械学会誌, 55 (1), 51-56
 22. 長廣仁蔵・樋口健・渡部安司 (1993) : 穀物の回転式流動層乾燥に関する研究 (第2報). 農業機械学会誌, 55(1), 43-50
 23. 日本機械学会編 (1987) : 機械工学便覧. 98 (A5) -106.
 24. 西山喜雄・細川明 (1975) : 球乾燥モデルを使った穀類間断乾燥の計算法. 農業機械学会誌, 37 (2), 209-215
 25. 農林水産省 (1993) : 裂皮粒発生 of 生理的機構の解明. 高品質畑作, 総合的開発研究平成4年度試験研究成績書. 農業研究センター, 116-117
 26. 農産物性研究グループ (1979) : 農産物の物性および測定法に関する研究. 4-5, 農業機械学会
 27. Nuh, D.N, Brinkworth, B.J. (1997) : A novel thin-layer model for crop drying. ASAE, 40(3), 659-669
 28. 大黒正道・澤村宣志・佐々木豊 (1997) : 高水分大豆の品質保持乾燥技術に関する研究. 北陸農試報, 39, 1-21
 29. Rimon, Y, Cheng, S.I (1969) : Boundary Layer theory. Phys, Fluids, 12-52
 30. 田川彰男・村松良樹・北村豊・村田敏 : 大豆の吸水特性. 農業機械学会誌, 59(2), 21-27
 31. 平春枝・平宏和・国井輝夫・藤森郁夫 (1979) : 大豆種子の乾燥処理方法とその品質について (第2報). 食総研報, 34, 13-18
 32. 平春枝・平宏和・国井輝夫・藤森郁夫 (1983) : 大豆種子の乾燥処理方法とその品質について (第4報). 食総研報, 42, 18-26
 33. Ting, K.C, White, G.M, Ross, I.J, Loewer, O.J. (1980) : Seed coat damage in deep-bed drying of soybeans. ASAE, 23(5), 1293-1296
 34. 東条衛・岡村太成 (1953) : 大豆の乾燥特性について (第1報). 農業機械学会誌, 28(4), 227-231
 35. 東条衛・岡村太成 (1954) : 大豆の乾燥特性について (第2報). 農業機械学会誌, 29(1), 13-18
 36. White, G.M, Bridges, T.C. (1981) : Loewer, O.J., Ross, I.J : Thin-layer drying model for soybeans. ASAE, 24 (6), 1643-1646
 37. White, G.M, Bridges, T.C, Loewer, O.J, Ross, I.J. (1980) : Seed Coat damage in thin-layer drying of soybeans. ASAE, 23 1, 224-227
 38. Wilke, C.R., O.A. Hougen (1945) : Heat and Mass transmission. Trans. A.I.Ch.E, 441-445
 39. 山下律也 (1987) : 穀物の物性値解説. 農業機械学会, 16-108

Study on Drying Processing Techniques for keeping the Quality of Soybeans

Keiichi Inoue^{*1}, Kanji Ootsuka^{*2}, Noriyuki Murakami^{*1}, Mitsuho Sugimoto^{*3} and Lei Bun^{*4}

Summary

The production of soybeans increases every year owing to the increase of demand for the domestic soybeans among the consumers in Japan and the rate of use of combine for harvesting soybeans increases because of a labor saving harvesting method. But, drying processing technique for the high moisture content soybeans harvested by combine has been retarded, and the degradation of soybeans and the heavy labor work in the process of drying become a problem. The efficient drying processing technique keeping the quality of soybeans harvested by combine, has been strongly required.

In the drying processing of high moisture content soybeans, there occurs the risk of swelling in soybeans when the air ventilation in the layers is not sufficient. The activity of microorganism or mold increases when the temperature of the air exceeds 80% humidity and over 20°C temperature. It is necessary to adjust the temperature and humidity of the air ventilation to be out of this dangerous zone. In the meantime, it is necessary also to control the drying rate of soybeans so as to avoid the occurrence of the seed-coat cracking or the wrinkle of soybeans. To develop the effective artificial drying method keeping the quality of soybeans, the investigation on the physical properties of soybeans relating to the drying processing and the analysis of the drying process of soybeans are indispensable. However, the study has been retarded in comparison with the study of rice or wheat.

In this study, the fundamental properties of soybeans relating to the drying and the characteristics of the pressure loss in driers such as flat bed driers equipped with the bucket conveyer or dry stores were clarified and a drying simulation model for analyzing the process of drying was developed and investigated and the mechanism of the generation of coat cracking of soybeans and the effective treatment of the ventilation air to minimize the coat cracking were cleared. Through this study, the fundamental techniques for drying soybeans harvested by combine were developed.

In the first chapter, the significance and objectives of this study were described based on an outline of soybean production and studies on soybean drying...

In the second chapter, the dependence of physical properties as specific volume, bulk volume, rate of volume on moisture content of soybeans(tachinagaha, tamahomare, fukuyutaka, suzuyutaka, enrei

Received : 20 January, 2003

^{*1}National Agricultural Research Center for Hokkaido Region

^{*2}National Agricultural Research Center for Kyushu and Okinawa Region

^{*3}Dept. of Hokuriku Farming System Research, National Agricultural Research Center

^{*4}Iseki Agricultural Engineering Co.,Ltd.

variety) was theoretically considered and determined as follows with principal properties of specific volume of dry matter V_0 , coefficient of rate of volume k of average soybeans.

$$V_m = V_0 + \gamma \cdot m = 0.771 + 0.965 m \quad (0.1 < m) \quad , \quad V_m = (m^2 + 2 V_{0c} m + V_0^2)^{1/2} \quad (0 < m)$$

$$V_m' = V_m / (1 - \varepsilon) = 6 V_m / k \pi \quad , \quad k = 1.00 - 0.029 m$$

values i.e m ; moisture content (d.b. decimal), V_m ; specific volume based on dry material ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$),

V_m' ; specific bulk volume, $1 - \varepsilon$; rate of kernel volume, $V_0 = 0.771 (10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})$, $V_{0c} = 0.7460$

Hence, physical properties of soybean for a drying simulation model were shown with principal parameters of V_0 , V_{0c} , k .

In the third chapter, the pressure loss of soybeans was examined and the data was analyzed using the non-dimensioned Navier-Stokes equations for forced air in accumulations. And resistance factors or friction factors of soybeans were expressed as the function of Reynolds number, to esteem a pressure loss in air forced layers of soybeans by calculation. We could get an experimental equation of resistance factor that was applied for generally to pressure loss of soybeans, in $40 < Re < 200$ ranges which is used with usual forced air drying. We could express characteristics of pressure loss of soybeans, as the function of space rate, ratio of surface area and velocity of air by using an experimental equations of the resistance factor or a friction factor. The characteristics of pressure loss of soybeans were able to be approximated with high accuracy.

In the fourth chapter accuracy of a simulation model for drying soybeans that takes into account moisture transport in gas and solid phases under an inconstant condition of air flow was investigated. It was found that temperature, humidity of air passing through a deep bed of soybeans and the moisture contents of accumulation layers of soybeans using different soybeans and two different types of experimental dryer were able to be estimated correctly by using values of the fundamental drying properties such as density, specific surface area, space ratio, equilibrium moisture content of soybeans, and specific heat, and mass transfer coefficients of soybeans.

In the fifth chapter, seed-coat cracking of soybeans occurs easily during the process of air drying. In order to determine the relationship between external air temperature/humidity and distortions in seed-coat cracked grains, the rates of seed-coat cracking of soybeans subjected to mono-layer drying were investigated under various air drying conditions of different temperature and humidity combinations, and the critical distortions were estimated. Based on the results, the required temperature and humidity conditions of air passing through deep bed of soybeans for minimizing coat cracking and preventing swelling due to high air temperature were clarified.