

## 食品材料を対象とした熱的操作

## Thermal Operations for Food Materials

相良 泰行 (東京大学、大学院農学生命科学研究科、農学国際専攻)  
Yasuyuki SAGARA (The University of Tokyo)

## 1. 食品加工と伝熱操作の現状

食品の流通・貯蔵・加工・調理などのプロセスには加熱や冷却を伴う多様な熱的操作が含まれる。代表的操作としては穀物の乾燥・貯蔵、青果物の予冷(pre-cooling)・冷蔵・低温輸送および食品加工における加熱・冷却・乾燥・殺菌・濃縮・冷凍などが挙げられる。これらの操作を行う機械装置・設備の設計や合理的操作法検討するためには、対象とする材料に生ずる熱的現象のメカニズムを解明する必要がある。また、農産物や食品は熱的操作に伴って、物理的・化学的に、さらに生理学的にも変化し易い。このため、これらの材料を対象とする機械装置の設計や操作法は最終製品の品質維持または向上を第一の目的として経験的に決定されてきた。これは従来、食品流通や加工の大部分が家内工業的規模で行われ、優れた品質をめざした操作法も小規模の機械類で試行錯誤的に簡単に探ることができたためである。さらに近年になって、消費者と流通・加工業者の分離が進み、大量生産のために機械設備の大型化とプラント化が進展してきて、これらの操作には小規模生産時代に得られた経験的操作法を再現する方法が探られているためである。

一方、我が国の食品加工業は大部分の原料を輸入に依存しており、その結果最終製品の価格に占める原料コストの割合が極めて高いという宿命がある。例えば、白米の価格に占める原料費の割合は約90%と言われ、籾の乾燥・精米などに要する加工費の割合を極めて低くせざるを得ない現状にある。さらに、化石燃料価格の変動に対処して、生産から消費に至る食品の流通・加工プロセスの省エネルギーを促進して、製品価格を維持する事が死活問題となっている。

このような背景から、食品工業界では、機械の設計・操作法を再検討する必要に迫られており、熱的操作では伝熱現象の解明に基づく合理的改善、

もしくは新技術の導入が強く望まれている。しかし、この「伝熱現象の解明」は工業材料を対象とする場合に比べ、解析法、物性値、研究成果のいずれをとっても業界の要望を満たすほどには整っていない現状にある。この理由として、食品材料は一般に不定形で、多成分を含み、さらに複雑な幾何学的内部構造を有する不均質混合系として存在するために、その物性値を測定・推算する事が困難であることが挙げられる。次に、生物・食品材料は熱操作に伴い物理・化学的に変化し易く、その変化のメカニズムを把握するために、工業分野で提唱されてきた解析法などを適用しても、得られた結果に大きな誤差が含まれる場合が多く、これらの解析法を実用の現場で安心して利用できないなどの事由が挙げられる。

しかし、近年に至り、単一細胞から出発し、生体・食品の組織という「複雑系」を対象にした伝熱現象の解明に迫る研究が機械工学、化学工学、食品工学などの分野の研究者により精力的に進められており、その研究成果も徐々にではあるが、食品製造の現場にも導入されつつある。

本稿では、インスタントコーヒーの製造プロセスを例に採り、その熱処理プロセスの特色と最新の研究課題を概観すると共に、ブロッコリの形態計測、凍結乾燥法における凍結速度-材料構造-移動物性値の関連性など、食品材料に特有な伝熱問題の一端を紹介する。

## 2. インスタントコーヒー製造プロセス

図1にインスタントコーヒー製造プロセスと各工程に関連する研究開発の主要課題を示す。また、製造工程は熱的操作と機械的操作に分けて示している。

## 1)原料と配合

原料は主にブラジル、インドネシアおよびコロンビアなどの国々から輸入されている。日本に輸

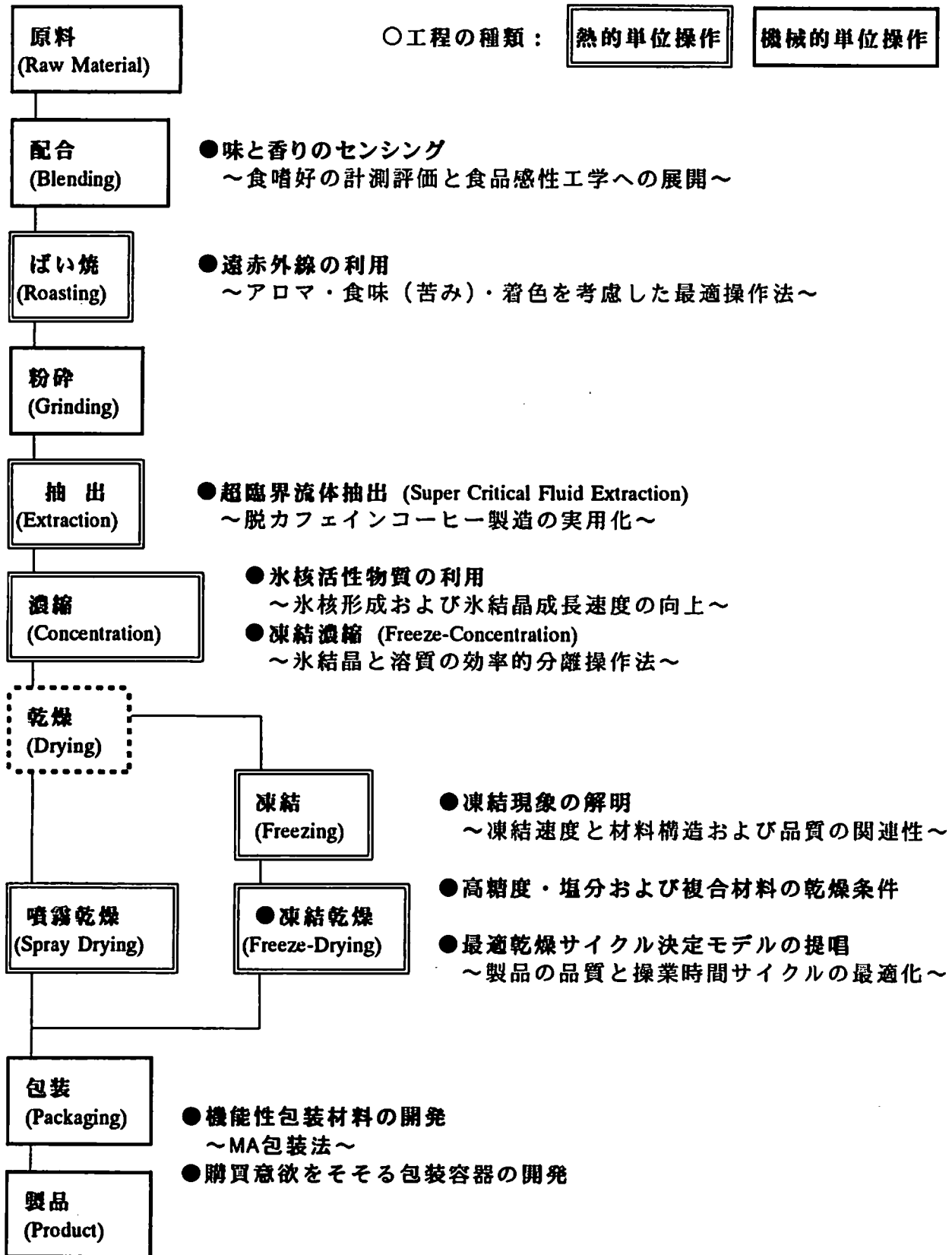


図1 インスタントコーヒーの製造プロセスと研究開発の課題

入される豆は現地にて果肉を除去した後に乾燥・選別した生豆で、その表面色は淡いレモン色を呈している。これらの生豆は製品別に製造会社独自の配合割合で配合される。配合は乾燥製品の特徴を創出してその品質を一定に維持し、さらに、その品質を消費者の嗜好と合致させることが販売戦略上の重要課題である。この操作は従来から訓練されたブレンダーの主観によってなされてきた。しかし、このような品質設計やプロダクトマネージメントに関わる操作は客観的かつ数値化された情報に基づいて行うことが要望され、そこでは、製造プロセス各段階の品質評価が可能で多機能食味計の開発が望まれている。

## 2) ばい焼・抽出

ばい焼はコーヒー豆に褐色の色彩と芳醇なアロマを発生させる加熱操作であり、ばい焼の程度により「浅炒り」「深炒り」などが行われている。この操作には通常加熱テーブル上に堆積した豆を攪拌しながら加熱する方法が採られている。このような加熱操作の伝熱効率を向上させて省エネルギーを達成するためには、熱源に遠赤外線を利用するなどの方法が有効と考えられる。ばい焼を終えた材料は機械的に粉碎される。粉碎後の材料粒子のサイズは次の抽出工程の抽出効率・成分、すなわち歩留まりと味を決定する重要なファクターである。通常、インスタントコーヒーの抽出には、その抽出歩留まりを高めるために、缶入りレギュラーコーヒーの粒子より小さいサイズに粉碎したものが用いられている。

抽出工程では抽出タンク内に堆積した粒子状材料の上面に熱湯と蒸気を吹き込むことにより固形分濃度で約10%の抽出液が得られる。ここでも、熱湯や加熱蒸気の温度が抽出液の品質を制御する主要因となる。この工程に超臨界状態にある炭酸ガスを用いてカフェイン成分のみを選択的に抽出する方法、すなわち、超臨界流体抽出法が導入され、カフェインレスコーヒー製造の核心技術となっており、また、超臨界流体抽出法の数少ない実用化の例でもある。

## 3) 濃縮

抽出工程で得られるコーヒー溶液をそのまま乾燥させるためには膨大な熱エネルギーを必要とする。そこで、乾燥工程の前に抽出液を濃縮し、エネルギーコストを削減する操作が行われている。そこでは、低コストエネルギーで材料の品質的変性を

極力抑制しする低温度の操作が必要とされる。このため、フレッシュジュースなどの濃縮には減圧濃縮法が採られてきた。この方法は蒸発タンク内の溶液上部空間を減圧することにより水の沸点を降下させ、溶液を低温度に保ちながら水分蒸発を促進させて残留溶液濃度を高める方法である。しかし、この方法により残留溶液の熱的変性を完全に抑制する温度低減効果を得ることは困難であり、また、減圧と蒸発水分の補足に要するエネルギーコストも比較的高いことが問題視されてきた。特に、アロマの保持が最優先されるべきコーヒー溶液の濃縮では、水分蒸発に伴うアロマ成分の消失が50%以上にもなることが指摘され、この方法に代わる新技術の開発が切実な課題となっていた。

これらの問題点を改善する方法として「凍結濃縮法」が実用化され、コーヒー製造工程に導入されている。この方法はコーヒー抽出液を $-3 \sim -7^{\circ}\text{C}$ の低温度に保ち、攪拌しながら溶液中に氷の結晶を析出させ、この氷結晶を分離することにより溶液の濃縮を達成する方法である。この方法により溶液は40%前後まで濃縮され、この溶液が1次の工程で乾燥・粉末化される。

## 4) 乾燥

コーヒー濃縮液の乾燥には噴霧乾燥法 (spray drying) と凍結乾燥法 (freeze-drying) が用いられている。噴霧乾燥法はスキムミルクの粉末化など、多方面で利用されている方法であり、この方法により得られるコーヒー粉末は球状微粒子となる。第二次大戦後に、国内で最初に販売されたインスタントコーヒーは噴霧乾燥法により製造された。しかし、この方法ではアロマの散逸と味の熱変成を防止する事が困難であり、このような問題点を克服する理想的乾燥法として凍結乾燥法が導入された。凍結乾燥プロセスは凍結工程と乾燥工程に分けられ、凍結工程では濃縮した厚さ約15mmのコーヒー溶液を $-40^{\circ}\text{C}$ のトンネルフリーザーで凍結し、これを機械的に破碎・分級して凍結粒子のサイズを揃えている。乾燥工程では、凍結粒子を平板トレー上に厚さ約15mmの堆積層とし、これを凍結乾燥装置内に搬入して乾燥する。従って、この方法により得られる顆粒状粒子の形状は凍結粉碎後に形成されたものである。

現在、凍結乾燥法は各種飲料の溶液系材料、主に即席麺の具として利用される細断された食肉や青果物、さらに、卵や海草を含む各種の即席スー

ブ類の製造に利用されている。しかし、高濃度の糖分や塩分を含む材料や大型の細胞質材料の乾燥には採用されていない。この原因はこれらの材料を対象とした乾燥条件が不明で、技術的に克服すべき多くの課題が残され、実用的な乾燥サイクルの設計が困難となっているためである。このような問題点を解決するためには、材料の構造変化に着目しながら乾燥プロセスにおける熱および物質移動のメカニズムを明らかにするための基礎的研究と、これらの研究に基づく実用装置の設計と最適操作に関する応用的研究・開発が必要とされる。本稿の後半部分ではこれらに関する筆者らの研究成果の一端を紹介する。

### 5) 包装

凍結乾燥製品は一般に多孔質となり、水分を吸収し易い性質を持っている。この性質は水を短時間に吸収して元の状態に復元する、インスタント食品が基本的に具備すべき重要な特性である。しかし、他方では貯蔵中に吸湿・酸化して腐敗や変性を引き起こし易く、衝撃に対しても弱い性質を持っていることになる。このために、乾燥製品の包装にはアルミフイルやガラス容器が多用され、さらに機械的衝撃に強い外装材が必要となる。また、酸化防止のために包装袋内部に窒素ガスを封入するなど、いわゆる MA (Modified Atmosphere) 包装法などが採用される。また、消費者の購買意欲をそそる各種包装法の開発も重要な検討課題となっている。

これまで述べてきたように、我々の身近で便利に利用している食品の製造工程には多様な熱的操作が含まれており、これらの操作の合理化のために伝熱現象の定量的把握や先端技術を導入を実現するための努力がなされている。

## 3. ブロッコリの形態計測

### 1) 計測の必要性

筆者らは「マイクロスライサ画像処理システム」を開発し、ブロッコリの表面積と体積を計測した。測定対象にブロッコリを選んだ主な理由はブロッコリの鮮度保持のための冷却機構の解明に必要であることなどである。すなわち、空気や水を冷却媒体とする場合の伝熱表面積や減圧下で水分を蒸発させて、その潜熱を材料から奪うことにより冷却する真空冷却のメカニズム解明には、水分の有

効蒸発表面積などの値が必要である。

### 2) マイクロスライサ画像処理システム

(1) システムの構成 マイクロスライサ画像処理システムの構成を図2に示す。本システムはマイクロスライサ部を含む①断面像作成装置、露出した二次元断面像を CCD カラーカメラで取り込む②断面画像取込装置、取り込んだ原画像をレーザーディスクに収録する③画像記録装置、記録した原画像の情報に基づきボリューム・レンダリング法により三次元画像を再構築したり、実際には切断していない任意の試料断面画像を再構成して表示するなど、画像情報処理を行うワークステーションとしての機能を有する④三次元画像構築装置、マイクロコンピュータにより上記装置①のスライスと③の記録タイミングを同期させるための信号を発生する⑤信号発生器および②で撮像中の画像や③に収録された原画像、さらに④で得られた再構築画像を観察者に表示するための⑥モニターで構成される。

(2) スライサ部の機能 本システムの特徴は図3に示すマイクロスライサ部における切削・撮像方式にある。断面像は試料の大きさにより CCD カメラとこれに接続したレンズを組み合わせて撮像する。試料はステップモータで駆動する一軸ステージで間欠的に押し上げ、その上端をマイクローム用ナイフで連続的に切削する。切削用ナイフは回転数90rpm で回転するスピンドル上端部に装着したナイフホルダの先端部分に取り付けられ、また、スピンドルは DC モータとタイミングベルトにより駆動する機構となっている。この機構による試料の最小切削厚さは0.1 $\mu$ m である。

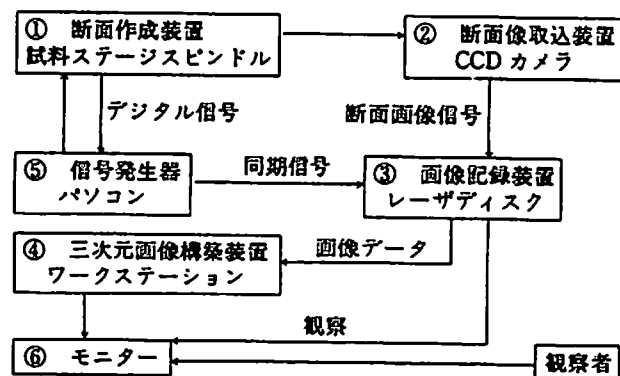


図2 マイクロスライサ画像処理システム

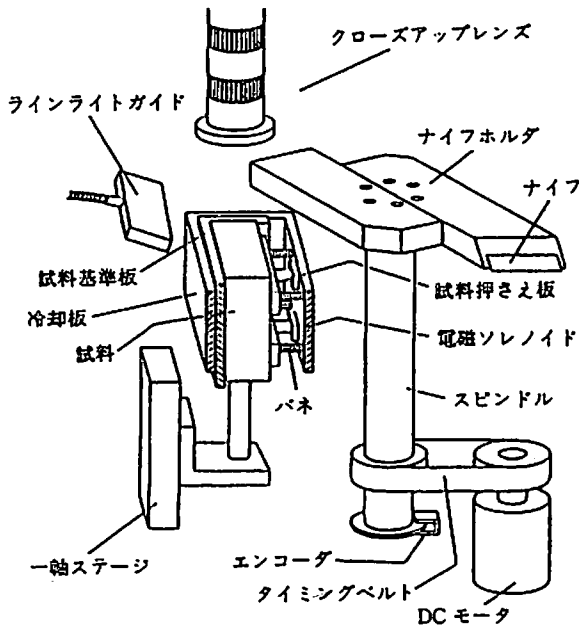


図3 スライサ部の構成

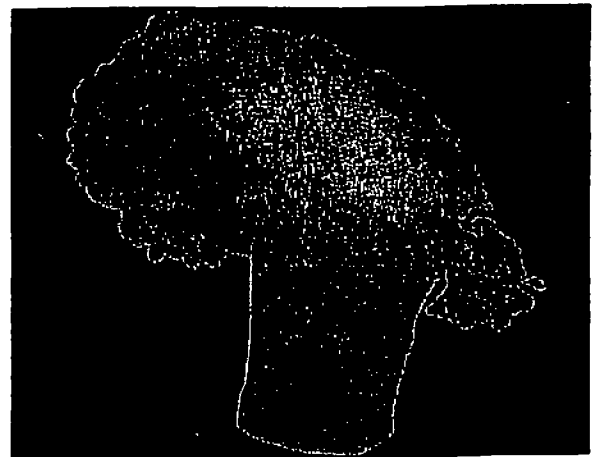


写真1 任意の断面で切断した3次元像

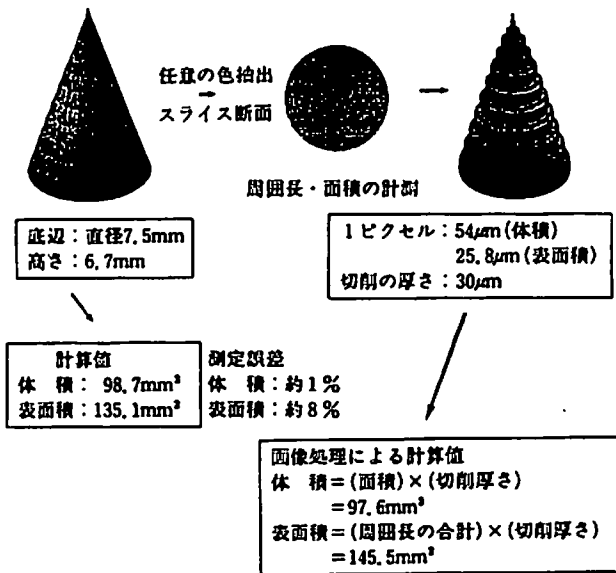


図4 表面積と体積の計測法

(3)画像処理法 レーザビデオディスクレコーダに記録したアナログ画像データはビデオ入力ボードを介してワークステーションに送られてデジタルデータに変換される。その後、光磁気ディスクに記録され、これが画像処理に供される。画像処理により円錐試料の表面積と体積を求める手順を図4に概念図として示した。この図に示すように、両者は切削厚さにそれぞれ断面画像の周囲長と面積を乗じることにより求められる。

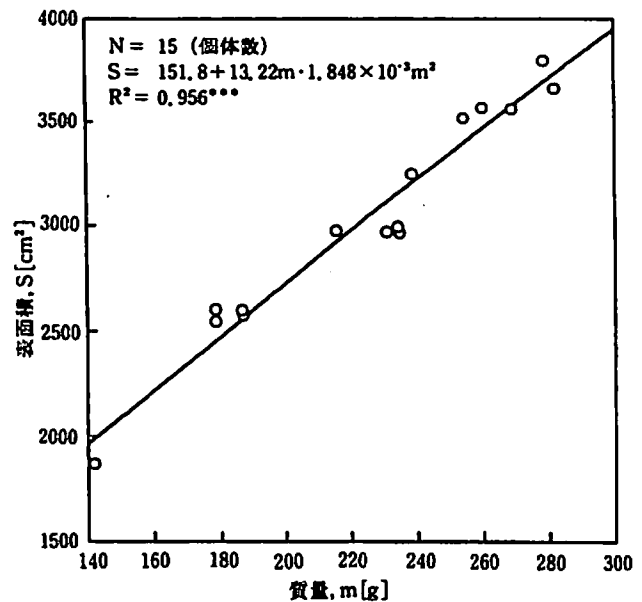


図5 固体質量と表面積の関係

### 3)計測結果

ワークステーション上でボリュームレンダリング法によりブロッコリーの3次元画像再構築し、これを任意の切断面で切断した画像の例を写真1に示す。また、ブロッコリーの質量に対する表面積のデータをプロットして図5に示した。このように、市販されているブロッコリーの質量範囲において、その表面積、比表面積及び体積を求めることが可能となった。

### 4)真空冷却効果の検討

このようにして得られたブロッコリーの表面積お

よび汎用型の画像処理装置を用いて計測したレタスとニンジン表面積に基づき、真空冷却効果を比較した。その結果、従来「真空冷却速度は青果物の比表面積に依存する」といわれてきた定説を覆し、「青果物の中には比表面積よりも水分蒸発抵抗に依存する度合いが大きいものが存在する」ことを立証することとなった。

#### 4. 凍結乾燥における移動物性値の計測

##### 1) 移動物性値推算モデル

食品材料を対象とした凍結乾燥装置の最適な運転操作法を確立し、乾燥時間を短縮して生産コストを下げるためには、乾燥プロセスにおける乾燥速度を定量的に把握する必要がある。乾燥速度は乾燥層の熱および物質移動速度に律速されるので、両移動速度を正確に計算し乾燥速度を予測するためには乾燥層の移動物性値、特に熱伝導率と水蒸気の透過係数が不可欠な物性値となる。筆者は乾燥中の計測データからこれらの移動物性値を推算するためのモデルを提唱している。

図6に凍結乾燥プロセスにおける材料乾燥層の移動物性値推算モデルを示す。このモデルでは材料を半無限平板と仮定し、その底面は断熱され、一次元的な熱および物質移動が生じているものとする。また材料の両面から輻射加熱する場合には、断熱底面を試料の中心と見なすことによりモデルの適用が可能である。さらに、このモデルには次に示すような仮定を設けている。(1)昇華面は材料表面から均一に後退する。(2)乾燥は準定常状態で

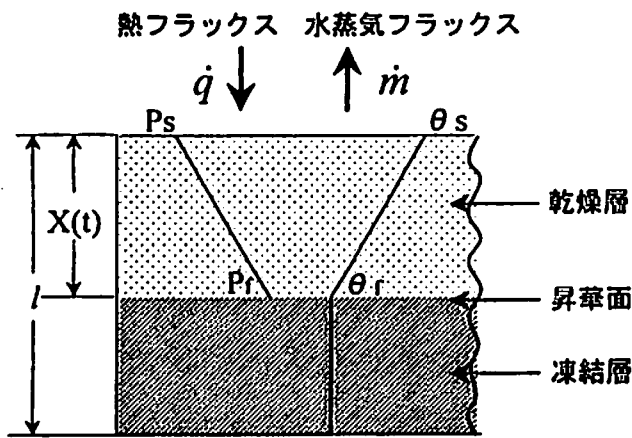


図6 熱伝導率と透過係数の推算モデル

進行し、材料内各部の温度・圧力および昇華面の位置の経時変化は小さい。(3)乾燥層の温度・圧力分布は直線で近似でき、凍結層の温度は均一でこれを昇華面の温度とみなすことができる。(4)乾燥層を通じて供給された熱は全て昇華潜熱として消費される。以上の仮定をもとに試料についての熱および物質移動速度式を導入すると、熱伝導率と透過係数の計算式が得られる。

##### 2) 移動物性値の測定例

このようにして得られたコーヒー溶液の熱伝導率を乾燥層の空隙率に対してプロットしたデータを図7に示す。ここで空隙率は商業用インスタントコーヒーの比容積の値を用いて推算した値である。図に示すように熱伝導率と空隙率との間の回帰式は高い相関を示し、溶液系での熱伝導率は溶質濃度により決まる材料乾燥層の空隙率に依存することが明らかとなった。同様にして透過係数と空隙率との関係を図8に示す。図中の温度および圧力は乾燥層の平均温度および平均圧力を示す。透過係数は溶質濃度、すなわち乾燥層の空隙率にまず依存し、次に乾燥層の温度と圧力に依存することになった。また、図中の  $K_{max}$  および  $K_{min}$  はそれ

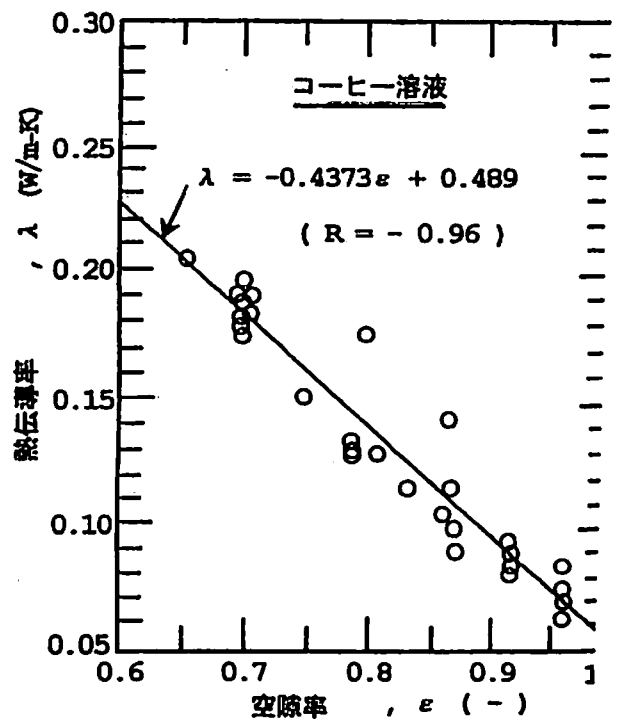


図7 乾燥コーヒーの空隙率と熱伝導率

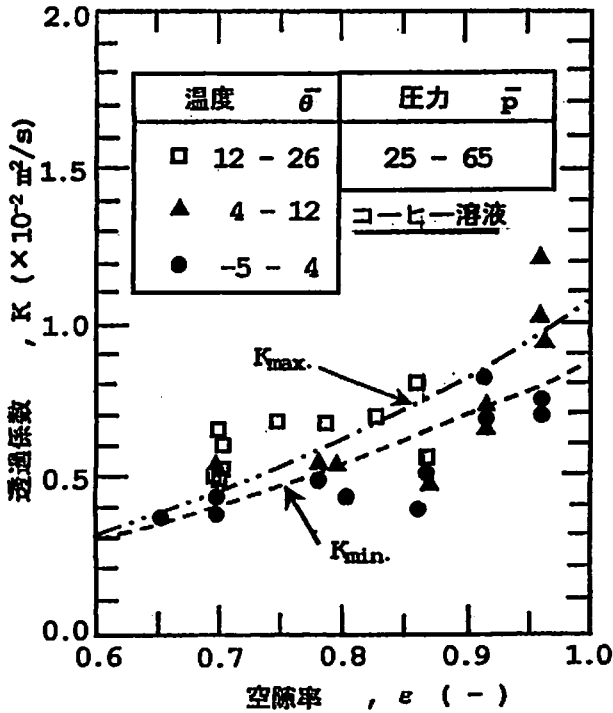


図8 乾燥コーヒーの空隙率と透過係数

それ25Pa、65Paの圧力条件下で空隙率を変数として得られた分子衝突理論に基づく理論曲線を示す。

図に示すようにコーヒー溶液の透過係数値と理論曲線との間に良好な一致がみられている。また溶液系材料ではでは同じ濃度・空隙率でも凍結速度が速いほど乾燥層に形成される細孔のサイズが小さくなると共に、その数が増加することが知られている。またこれらの構造変化は主に乾燥層の透過係数に影響を及ぼすことが明らかとなったために、乾燥材料を均一な半径を持つ毛細管束とみなした乾燥層モデルの幾何学的構造パラメータから透過係数を予測するための数理モデルを提唱している。これらのデータは乾燥層を通じて供給される熱移動速度と水蒸気の移動速度速度を定量的に把握し、最終的には乾燥速度を予測し、また、試料表面の加熱温度プログラムを決定するのに不可欠な物性値となっている。

5. おわりに

本稿で述べた真空冷却法や凍結乾燥法は既に実用化されている技術であるが、生産の現場ではこ

れらの操作は必ずしも定量的かつ合理的なものではなく、未だに勘と経験に頼っている場合が多い。特に、凍結乾燥操作は小型のパイロットプラントによる試行錯誤的実験の結果に基づき検討された操作法が実用規模の装置にスケールアップされている。このために、異なる対象材料を同一プラントで乾燥する場合には、再度、同様の手順を踏まねなければならず、これに要する労力と費用が膨大となっている。この方法に代わる方法として、筆者らは電算機による凍結乾燥プロセスのシミュレーションの構築を提案し、このモデルに不可欠な物性値として、乾燥層の熱伝導率と透過係数の自動計測システムを提案している。さらに、これらの物性値を乾燥層の幾何学的構造を表現した数理モデルから推算する方法を提唱している。このように、既に実用化されている技術も本章で述べたような基礎的研究により大幅な合理化が達成される場合が多く、食品生産現場の技術者、装置メーカーおよび大学などに所属する研究者相互の協力関係の確立が望まれている。

参考文献

- 1) 都 甲洙・相良泰行他(1997). マイクロスライサ画像処理システムによるブロッコリーの表面積および体積の計測、農業施設 28(1):21-291
- 2) H. A. C. Thijssen(1975). Freeze Concentration of Liquid Foods, Freeze Drying and Advanced Technology (Ed; S. A. Goldblith et al.) p.482, Academic Press
- 3) J. Ichiba, Y. Sagara (1994). Measurement of Transport Properties for the Dried Layer of Coffee Solution Undergoing Freeze Drying, Drying Technology (12)5: pp. 1081-1103
- 4) Y. Sagara (1985). Automatic Measurement of Transport Properties During Freeze Drying of Food, Fundamentals and Applications of Freeze-Drying to Biological Materials, Drugs and Foodstuffs p.165, Int. Institute of Refrigeration
- 5) 相良泰行 (1983). 食品材料の凍結乾燥特性計測システム, 最新バイオセンシングシステム, pp. 351-364 R&D プランニング社
- 6) 荒木徹也・相良泰行他(1997). 細胞質材料の凍結乾燥特性と移動物性値の計測、低温生物工学会誌 43(2):112-117