

## 16. 食品乾燥の基礎知識 (その2) ~食品材料の乾燥特性曲線~

相良 泰行\* Yasuyuki SAGARA

## 1. はじめに

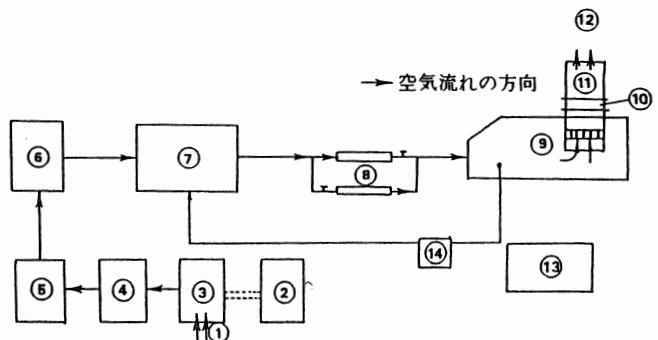
食品材料の種類とその乾燥法は多様であり、これらの乾燥特性を統一的に計測する方法は存在しない。また、すべての食品材料について、前号で説明した標準的乾燥特性曲線の3つの乾燥期間が現れるとは限らない。本稿で述べるように、穀粒の通気乾燥では減率期間のみが観測され、また、食パンの焼成 (baking) プロセスを乾燥現象とみなせば、予熱期間に始まり、恒率乾燥期間で終了する。この期間は約220~230℃のオーブン内にある食パン生地、すなわちローフの焼成終了点まで観察される。しかし、すでにクラスト層 (通常ミミと称される皮の部分) が形成されたローフ表面が水膜で覆われている状態にないことは明らかである。つまり、前号で述べた恒率乾燥の現象論的解釈は成立せず、別の解釈が必要であることがわかる。さらに、真空下で凍結状態にある材料から昇華により水分を除去する凍結乾燥プロセスでは、大気圧下における熱風乾燥とは異なる乾燥特性を示す。

このように、食品材料の乾燥特性を把握するためには、まず個々の乾燥操作を再現したモデル実験から乾燥特性を求める必要があり、次にこの特性と標準的乾燥特性曲線と比較することにより、乾燥機構の現象論的考察を進めるのが研究面でも実用面でも常道とされている。本稿では初めの通気乾燥、食パンの焼成およびコーヒー溶液の凍結乾燥を対象にした乾燥特性曲線の計測例について述べる。

## 2. 穀物の乾燥特性

## 2.1 薄層の通気乾燥特性

図1は穀物の通気乾燥特性計測システム<sup>1-3)</sup>の一例である。試料容器に至る各種の構成機器は乾燥空気(熱風)の温度・湿度・風速を一定の条件に保つために必要とされる。このような実験装置により計測した穀粒の薄層通気乾燥特性を図2に示す。ここで薄層とはその層内の温湿度分布が均一な薄い層と定義され、熱風の条件により層厚さは変化する。また、乾燥速度は穀粒の表面積を求



- |           |              |            |
|-----------|--------------|------------|
| 1. 外気取入口  | 6. ファン       | 11. ダクト    |
| 2. 冷凍機    | 7. 加熱ヒーター    | 12. 空気出口   |
| 3. 冷却器    | 8. 流量計       | 13. 電子秤    |
| 4. 予熱ヒーター | 9. プレナムチャンバー | 14. 温度制御装置 |
| 5. 加湿器    | 10. 試料容器     |            |

図1 穀物の薄層通気乾燥特性計測システム

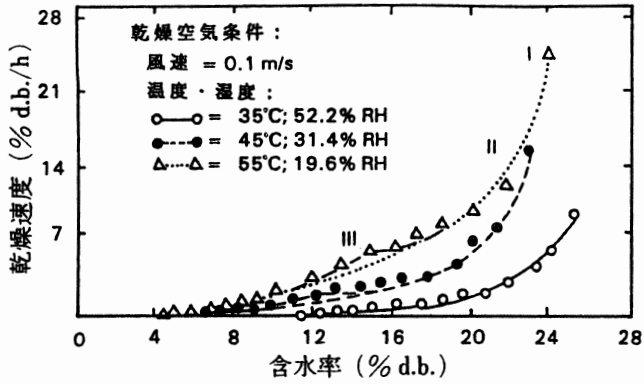
めることが困難であるために、単位時間当たりの含水率減少速度で示されている。このような薄層の乾燥特性は厚い層の温度や含水率分布の計算に用いられる。

これらの乾燥特性曲線に示されるように、穀粒薄層の乾燥特性の特徴は、恒率乾燥期間がほとんど存在しないことにある。これは乾燥の初期に材料表面が水膜で覆われていないためである。例外的に、スイートコーンや大豆を遅い速度条件で乾燥させる場合には、乾燥初期に若干の恒率乾燥期間が観測される。また、減率乾燥期間の曲線から、穀粒内部の水分移動は液状水の水分拡散によるものと考えられている。

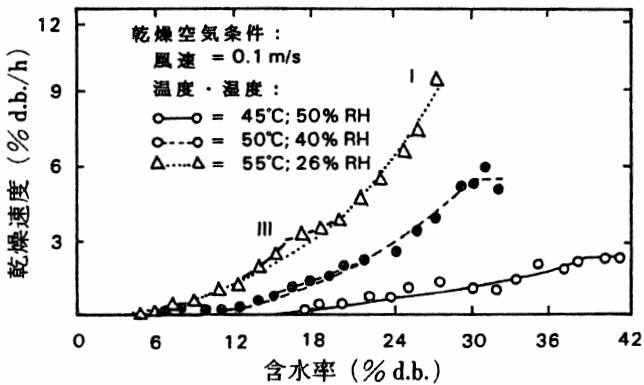
## 2.2 一粒粉の乾燥特性

図3に細川・本橋<sup>4-6)</sup>が用いた穀粒の乾燥特性計測システムを示す。本システムはガラスビームの先端に穀粒を吊り下げ、その下方から温湿度を一定に制御した乾燥空気を送って、乾燥に伴う穀粒の重量減少をカセットメータの垂直方向移動距離との校正曲線から求める方式とな

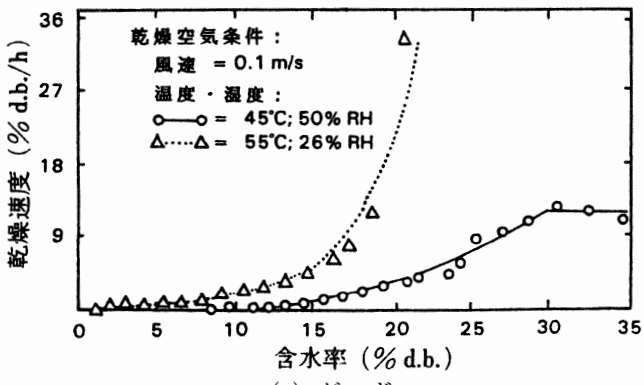
\* 東京大学 大学院農学生命科学研究科 農学国際専攻  
Dept. of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Life and Agricultural Sciences, The University of Tokyo  
原稿受理 2004年5月27日



(a) 粉



(b) スイートコーン



(c) だいでず

図2 穀物の薄層通気乾燥特性

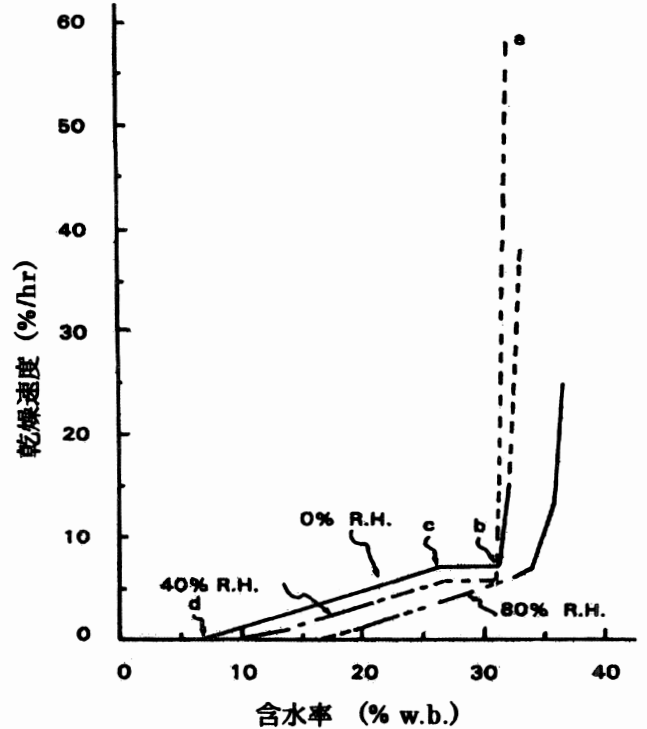


図4 一粒粉の乾燥特性曲線  
(熱風温度40℃, 相対湿度0~80%)

っている。この方法はスキムミルクなどの噴霧乾燥過程における液滴の乾燥特性計測にも用いられている方法である。本システムによる穀粒乾燥特性計測の目的は、粉堆積層の通気乾燥において、乾燥空気の流れ方向に対する穀粒の姿勢が乾燥特性に及ぼす影響を明らかにすることであった。その結果、図4に示すように、穀粒の乾燥は薄層の場合と同様に減率乾燥から開始され、穀粒の姿勢による乾燥特性の相違は観られないことが判明した。このような計測結果は粉の薄層乾燥特性を球モデルで近似し、これを積み重ねて厚層乾燥のシミュレーションを行う方法への妥当性を与えることになった。

### 3. 食パンの焼成特性

#### 3.1 焼成条件の概要

一般に食パンの焼成プロセスにおける生地の外観および内相的变化は、大まかに3段階に分けられる。すなわち、焼成開始直後における急激な生地の膨張、すなわちオープンスプリング、焼成中期におけるクラムの糊化、焼成後期におけるクラストの形成とその着色である。また、もっとも優れた品質の食パンを得るために提唱されている適正な焼成条件は、加熱温度範囲220~230℃、焼減率10%とされている。焼減率は生地の初期質量に対する焼成中の質量減少割合で、提唱されている値はクラムの構造がグルテンの凝固とデンプンの膠化により固定化するのに要する時間、すなわち生地の大きさに関係

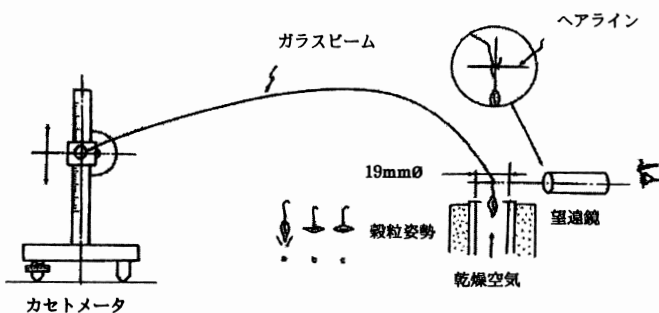


図3 一粒粉の乾燥特性計測システム

なく、適正な焼成時間を知るための指標と考えられている。しかし、加熱温度のプログラムと焼成時間は消費者の嗜好などによって異なることが知られており、上述した焼成条件は標準的焼成法の目安として認識されている。実用規模の大量生産工場ではこの条件を満足するために大型のトンネルもしくはスパイラルガスオーブンが使用され、食パン製造工程の中で設置空間を占有するとともに最もエネルギー消費の大きい工程となっている<sup>7,8)</sup>。また、焼成は生地を水分を除去するプロセスでもあるため、乾燥操作の一種と考えることができる。

### 3.2 試料の準備

食パン生地の代表的発酵法には、直捏法、液種法および中種法などがあるが<sup>9-11)</sup>、本稿で紹介する筆者らの研究では、大規模生産プラントで標準的に採用され、また比較的容易に均一な生地を作れる中種法を選択した。また、生地は標準的原料配合割合<sup>10)</sup>を用いて作成し、パン型（内径80×80×170 mm）1個につき266 gの生地を詰めた。また最終発酵が終わった時点での生地の体積はパン型の約8割を占め、焼成直前の生地の含水率は47.1% w.b.であった。

### 3.3 オーブンの温度特性

図5に筆者らが試作した焼成特性計測実験装置を示す<sup>12-15)</sup>。オーブンは前面扉以外の全内壁面に電熱ヒータを配したデッキ型オーブンであり、その壁面に設置されたヒータの容量は5.5 kW、温度設定範囲は50～300℃である。本研究では加熱温度条件が食パンの焼成特性に及ぼす影響を検討するために、オーブンの加熱温度を140～300℃の範囲で5段階に設定し、焼成温度とした。この設定温度は温度センサでオーブン内壁表面温度を検出しながら制御されるため、壁面と内部雰囲気温度との間に温度勾配が生じることが予測された。そこで、図5に示すように生地を詰めた6個のパン型をオーブン内中

央部に並べ、上記の焼成温度条件ごとに予備実験を行い、オーブン壁面温度と各パン型上面から10 mm離れた場所の雰囲気温度を測定した。その結果、各壁面中央部の温度とパン型を設置したオーブン中央部の雰囲気温度はそれぞれほぼ一定となり、雰囲気平均温度は壁面温度から予測されることがわかった<sup>13)</sup>。

### 3.4 焼成特性計測法

焼成はオーブン内中央部に1ロット当たり6個の試料を並べて行い、この内1つのパン型をオーブン上部に設置した電子天秤（秤量3.6 kg、精度±0.01 g）に吊り下げて、その質量の経時変化を測定した。このためにオーブン上部壁の中央部に内径10 mmのパイプを貫通させ、これにピアノ線を通して電子天秤の吊り下げフックを延長してパン型を吊り下げた。また、質量測定用試料と他の試料の加熱条件を等しくするために、他のパン型もL型アングルを組み合わせて製作した架台上に配置した。電子天秤の出力は、RS232Cボードを介して6秒ごとにパーソナルコンピュータに送り、焼減率を次式により計算した。

$$S = \frac{m}{m_0} \times 100 (\%)$$

ここで、 $S$  (%)は焼減率、 $m$ は水分蒸発量、および $m_0$ は初期の生地重量である。また、ほかのパン型内に図6に示すような熱電対ネットワーク網を作成し、質量測定用パン型に隣接したパン型の中央横断面に装着した。これらは素線径0.1 mmのクロメルアルメル熱電対をガラス繊維で被覆断熱したものを使用した。温度の記録にはデータレコーダを用い、測定終了後にメモリの内容をパーソナルコンピュータに転送してデータ処理を行った。また、オーブン内雰囲気温度の代表温度として、こ

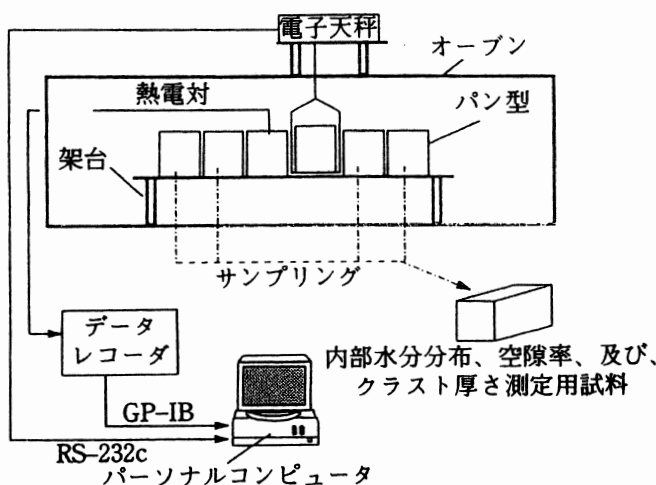
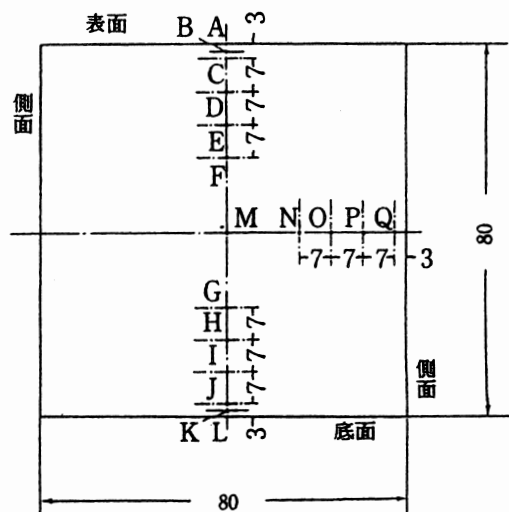


図5 食パン焼成特性計測システム



(A～Q: 熱電対番号, 単位: mm)

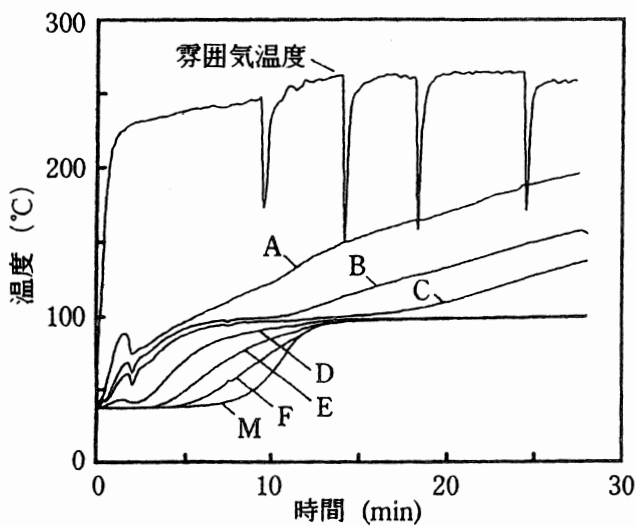
図6 ローフ断面温度分布測定用熱電対ネットワーク

のパン型の表面中央部から10mm離れた空間の温度を熱電対で測定した。そのほか残りの試料は乾燥の途中で取り出し、水分分布、空隙率およびクラスト厚さの測定に供した。

### 3.5 温度分布の経時変化

図7に標準的焼成温度220℃で焼成した場合に測定される雰囲気温度と生地内温度分布の経時変化を典型例として示す。雰囲気温度が数ヶ所急激に降下しているのは、その時点で水分分布や空隙率測定用の試料を順次取り出したためである。図中のA~Mは図6に示した試料内温度分布測定用熱電対ネットワークの温度測定点に対応している。本焼成法の条件下ではローフ断面のいずれの表面からもA~Mで示される温度分布が等しく測定されたため、ほかの測定点のデータを省略した。このことはローフに対する熱の供給が方向に依らずほぼ均一に行われたことを示している。A~Cの温度は全焼成期間を通じて徐々に上昇するが、D~Mの温度は表面に近いところから順次上昇し、いずれの場合にも約100℃に到達すると、それ以降はこの温度に維持された。このことはA~C間、すなわち、試料表面から約3mmの厚さにクラスト層が形成され、また、クラストとクラムは比較的明瞭に区別される熱的性質を持っていることを示している。

他の焼成温度条件下でも試料内温度分布は図7と同様のパターンを示すが、焼成温度が高くなるにつれて温度上昇速度は速くなる傾向を示した。特に、この傾向はクラスト層において顕著に示された。また、クラムの温度は焼成温度条件に関係なく約100℃に到達し、その後、クラム内はこの温度で均一に保たれることがわかった。これ以降、本稿ではこの温度をクラムの「平衡温度」と



(焼成温度：300℃，A~M：熱電対番号)

図7 雰囲気温度とローフ内温度分布の経時変化

称する。また、A~Dの曲線は焼成初期の段階で一時的な温度低下を示した。これは焼成の開始に伴い、パン型内空間より低い温度のパン生地が膨張し、すなわち、オープンスプリングによって熱電対と接触したためである。オープンスプリングの発生時期は焼成温度が高くなるに伴って早くなり、当実験の焼成温度条件の範囲では、焼成開始後3~4min以内に終了することがわかった。

### 3.6 水分蒸発量と水分分布

焼成プロセスにおける生地の質量減少は水分蒸発に起因するものと仮定し、図8に焼成温度条件をパラメータにして水分蒸発量の経時変化を示した。また、焼減率と焼成温度および焼成時間の関係を求めるために、図中に示した焼減率を示す直線と水分蒸発量曲線との交点から焼成時間の値を求めた。その結果、焼成時間は焼成温度に依存し、焼減率とほぼ比例関係にあることがわかった。

図9に標準的焼成温度220℃における試料内部の水分分布を、焼減率をパラメータにして示した。ほかの焼成温度でもこの図と同様な結果が測定されたので、この図は典型例として見なすことが可能である。試料表面と底

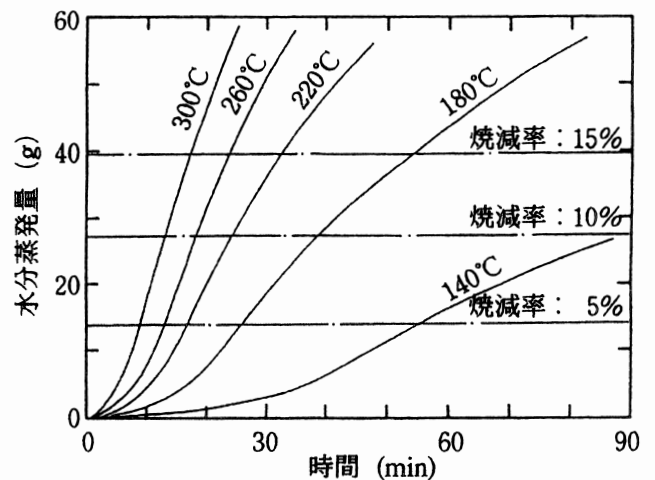


図8 焼成温度別水分蒸発量の経時変化

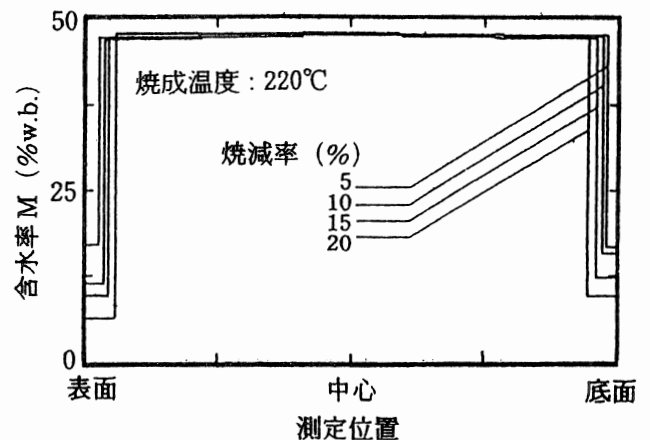


図9 ローフ断面の含水率分布の変化

面に形成されたクラスト層の含水率は焼減率の増加に伴って減少するが、クラム層では焼減率が20%に達しても初期含水率が維持されることがわかった。したがって、焼成期間中、水分の蒸発面がクラストとクラムの間に存在し、その蒸発面はクラスト層の厚さが増すとともに、生地表面から内部へ移動することが推測された。また、クラム部分の温度はほぼ100℃に維持され、クッキングが進行することがわかった。

### 3.7 焼成特性曲線

図8に示した水分蒸発量の経時変化曲線と初期含水率から生地の平均含水率に対応する乾燥速度の値を求めた。これらのデータから得られた乾燥特性曲線の焼成温度依存性を図10に示した。図中に示した焼減率0~20%の範囲に相当するプロットから、焼成はいずれの焼成温度条件下でも、予熱期間から始まり、恒率乾燥期間の途中で終結することがわかった。また、乾燥速度  $V$  と平均含水率  $M$  との関係を示す曲線の式を図中に示した。この式は図中のプロットが指数関数で近似できるものとみなし、焼成温度  $T$  と乾燥常数  $K$  ならびに恒率乾燥速度  $V_0$  の関係をそれぞれ求めて得られたものである。ただし、式中の  $M_0$  は生地の初期含水率である。

一般的に恒率乾燥では材料表面が水膜で覆われている状態にあると解釈されているが、焼成プロセスでは温度分布の経時変化から推測されたように、この期間ではすでに材料表面にクラスト層が形成されて水膜は存在しない。すなわち、標準的な恒率乾燥期間の現象とは異なる。焼成プロセスの恒率乾燥期間はクラストを介して行われる熱と水蒸気移動の逆方向のフラックスの比が一定となる期間であり、いわば“見かけ”の恒率乾燥期間である。また、このフラックスの比によって決定される恒率乾燥速度は焼成温度が高くなるにつれて速くなることが確認された。ただし、クラストの着色状態は加熱温度220℃の場合がもっとも良好と判断されることから、経験的に

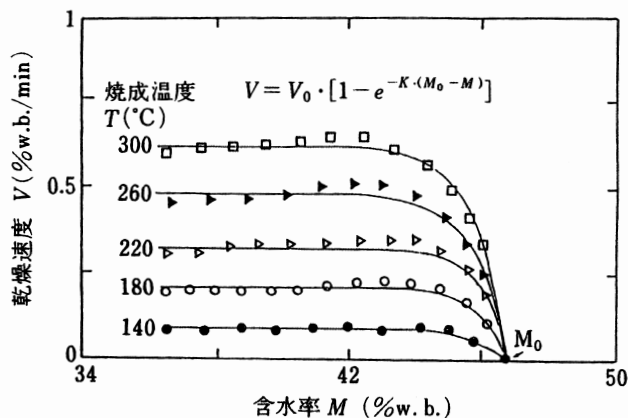


図10 食パンの乾燥（焼成）特性曲線

得られていた焼成条件は、実はクラムのクッキングの状態、クラスト厚さ、さらにその着色度合いの3者が共に品質上最も良質となる条件であることが判明している。

### 4. 凍結乾燥特性および移動物性値

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、材料内の温度・圧力・水分の分布および乾燥時間などを定量的に把握する必要がある。この乾燥法では凍結状態にある材料から氷を昇華させて水分を除去するが、食品材料の凍結乾燥の場合には、まず昇華により自由水などの大部分の水分を除去し（一次乾燥期）、続いて結合水などの残留水分を除去する（二次乾燥期）。二次乾燥期の乾燥機構は真空乾燥のそれと同様に、主に微量水分の脱湿プロセスであると考えられるから、凍結乾燥機構の特徴は一次乾燥期の昇華乾燥にあり、全乾燥過程を通じて水分が材料内を液状水の状態で移動しないことにある。

図11に食品材料の一次乾燥期における典型的な昇華面の後退状況を示す。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て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。これらの詳細な研究例については次号以降に述べるので、本稿では乾燥特性の計測法に焦点を絞って紹介する。

#### 4.1 乾燥特性計測システム

筆者らは図12に示すような被乾燥材料の乾燥特性を計測するシステムを開発した。真空チャンバ（内径492×奥行470mm）内部ガスは主弁および外部コンデンサを経て油回転真空ポンプにより排気される。水蒸気を凝縮するための真空チャンバ内部コンデンサおよび外部コンデンサの表面温度は冷凍機（空冷式1.5kW, R22）により-45℃まで冷却される。また、乾燥中の試料の

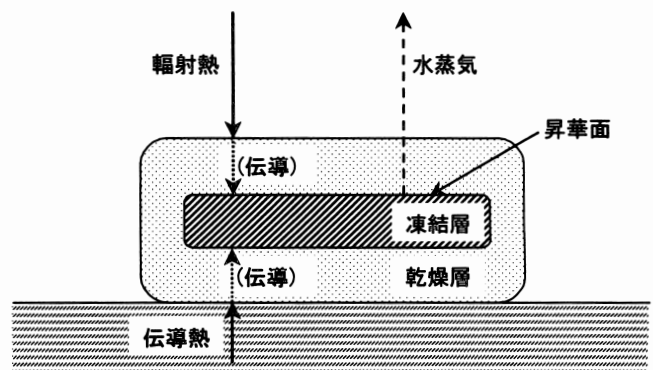
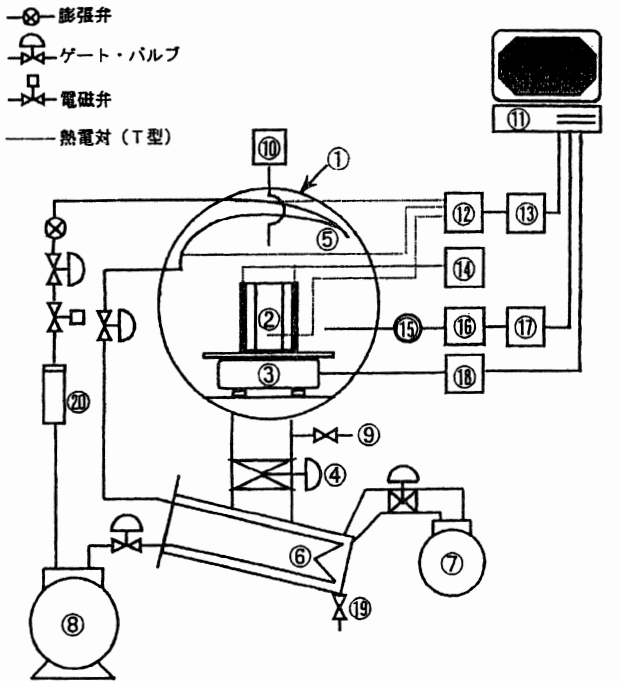


図11 食品の昇華乾燥プロセス



- ① 真空チャンバ ② 試料およびサンプルホルダ ③ 電子天秤 ④ 主弁
- ⑤ 内部コンデンサ ⑥ 外部コンデンサ ⑦ 油回転真空ポンプ
- ⑧ 冷凍機 (コンデンシング・ユニット) ⑨ リーク・バルブ
- ⑩ ピラニ真空計 ⑪ パソコン ⑫ 電子式冷接点 ⑬ A/D コンバータ
- ⑭ 温度コントローラ ⑮ 金属隔膜型圧力計 ⑯ 圧力表示器
- ⑰ BCDコンバータ ⑱ 重量表示器 ⑲ ドレイン・バルブ ⑳ ドライヤ

図12 凍結乾燥特性計測システム

状態を観察できるように、真空チャンバには厚さ30mmの透明アクリル板製ドアが取り付けられている。真空チャンバ内には試料重量を連続記録する電子天秤が組み込まれている。試料は輻射ヒータにより加熱され、これを制御する温度コントローラはデジタル指示調節計とサイリスタレギュレータで構成され、温度制御用の熱電対を検出端として試料表面温度を設定することにより、ヒータの出力電圧をPID制御する。真空チャンバ内の全圧は金属隔膜型圧力計とピラニ真空計を用いて計測する。試料内温度分布、ヒータおよびコンデンサ表面温度は熱電対(T-type,  $\phi = 0.2\text{mm}$ )により検出し、電子式冷接点およびA/Dコンバータを介してパソコンに集録する。

#### 4.2 乾燥特性

筆者らは生牛肉、コーヒー水溶液、エビのすり身、ミソペーストおよび卵スープミックスなどの食品材料を対象として、凍結乾燥特性と移動物性値を計測しているが<sup>16-22)</sup>、ここでは、図13に示すような液状および顆粒状材料用サンプルホルダを用いてコーヒー溶液の凍結乾燥特性を計測した例について述べる。このサンプルホルダはアクリル製容器であり、これを凍結・乾燥プロセスにおける試料内の熱と物質移動の方向が一次元となるように断熱した。凍結プロセスではサンプルホルダの側面

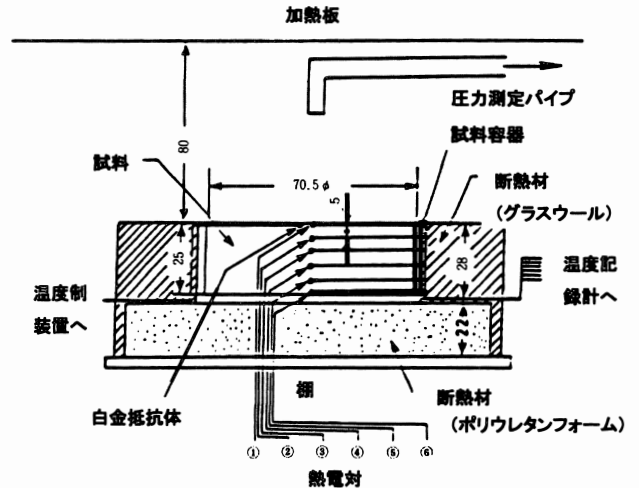


図13 液状および顆粒材料用サンプルホルダと温度測定箇所

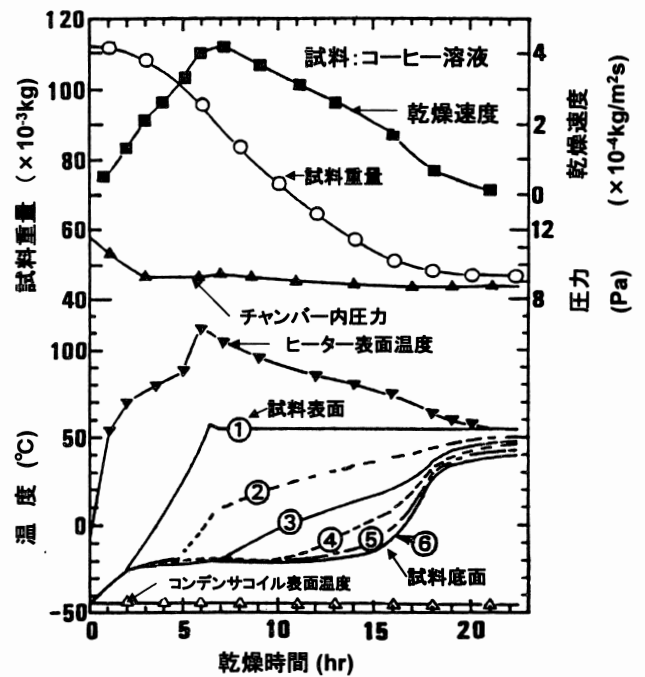


図14 コーヒー溶液の凍結乾燥特性 (濃度37%)

をグラスウールで、乾燥プロセスではさらに試料容器底面をスタイロフォームで断熱した。

図14に濃度37%、試料厚さ25mmのコーヒー溶液を表面温度45℃で一定値に制御しながら凍結乾燥した場合の乾燥特性を示す。試料重量から求めた乾燥速度は試料表面温度が設定値に達した時点で最高速度に達するが、その後は指数関数的減少を示している。試料内温度分布の経時変化を観ると、試料表面に近い温度測定点から順に急激な温度上昇を示し、これらの温度上昇開始点において昇華面が通過したことを示している。すなわち、乾燥層の厚さを予測することが可能である。また、最初

の温度上昇点から次の温度上昇点までの時間間隔が次第に大きくなっていることから、乾燥層が次第に厚くなるにつれ、乾燥層を通じて供給される熱流束に対する伝熱抵抗が大きくなっていくことがわかる。さらに、試料内温度分布を観ると、昇華面の温度がもっとも低い値を示し、また、凍結層の温度は昇華面の温度に等しい均一な分布を示す。これらの実験結果より、コーヒー溶液の乾燥速度は乾燥層の熱移動速度により律速されているものと判断される。

これとは逆にリングなどの細胞質材料や高濃度塩分溶液では、それらの乾燥速度が乾燥層の水蒸気移動速度に律速されることが報告されている<sup>20)</sup>。このように、青果物などの細胞質材料では細胞膜が乾燥層を通過する水蒸気の水蒸気移動抵抗となるため、乾燥速度は物質移動速度により律速される。そのほかの大部分の固体および溶液系材料では熱移動速度律速となる。また、溶液系材料の乾燥層は凍結方法により外部から制御可能となるため、乾燥速度を向上させるためには凍結法により形成される氷結晶構造（乾燥層の空隙構造）と移動物性値の関係を定量的に把握する必要がある。すなわち、溶液系材料では同じ濃度・空隙率でも凍結速度が速いほど細孔のサイズが小さくなるとともに、その数が増加する。また、これらの凍結法による構造変化は主に乾燥層の水蒸気透過係数に影響を及ぼす。また、コーヒー溶液では乾燥中を通じて、凍結層は $-25^{\circ}\text{C}$ 以下に維持されるが、乾燥速度が水蒸気移動速度に律速されるような材料では過剰に供給された熱量が昇華潜熱として消費されるだけでなく、凍結層を加熱するためにも使われる。このため、凍結層の温度上昇による融解と発泡を招く結果となる。したがって、このような材料の加熱条件を決定するためには、水蒸気の移動速度を正確に予測し、適正な熱供給速度を知る必要がある。

## 5. おわりに

本稿では農産物や食品の乾燥特性曲線の計測法とその特色に焦点を絞って概説した。したがって、ここで述べた事柄は、従来の研究成果の一部に過ぎない。食品の乾燥操作は家庭内から大規模生産プラントに至る様々な場所で行われ、そこで行われる操作も材料の種類と操作の目的により多種・多様である。このような乾燥操作に伴う水分の移動現象を統一的に解釈できる理論は存在せず、今後とも個々の操作に特有な移動現象を把握するための研究が望まれている。特に、食品材料を対象とした

乾燥特性の計測法に関する創意・工夫に対して、研究者・技術者の努力が期待されている。

## 文 献

- 1) 亀岡孝治：農業機械学会誌，56 (3)，57 (1994)。
- 2) 亀岡孝治：農業機械学会誌，56 (6)，33 (1994)。
- 3) 亀岡孝治：日本食品科学工学会誌，42，140 (1995)。
- 4) 細川 明，本橋罔司：農業機械学会誌，33 (1)，53 (1971)。
- 5) 細川 明，本橋罔司：農業機械学会誌，34 (4)，372 (1973)。
- 6) 細川 明，本橋罔司：農業機械学会誌，37 (3)，326 (1973)。
- 7) 松田郁生，森嶋 博，瀬尾康久，相良泰行：農業機械学会誌，52 (3)，75 (1990)。
- 8) 松田郁生，森嶋 博，瀬尾康久，相良泰行：農業機械学会誌，53 (6)，67 (1991)。
- 9) 藤山論吉：「製パンの理論と実際」，p.103，日本パン技術研究所，東京 (1981)。
- 10) 松本 博：「製パンの科学—パンはどうしてふくれるか」，p.3，日本パン技術研究所，東京 (1980)。
- 11) 越後和義：「パンの研究—文化史から製法まで」，p.67，柴田書店，東京 (1982)。
- 12) 呉 計春：東京大学博士論文，(1988)。
- 13) 呉 計春，相良泰行，瀬尾康久，森嶋 博：日本食品科学工学会誌，43 (10)，1117 (1996)。
- 14) 呉 計春，相良泰行，瀬尾康久，森嶋 博：日本食品科学工学会誌，43 (12)，1285 (1996)。
- 15) 呉 計春，相良泰行，瀬尾康久，森嶋 博：日本食品科学工学会誌，44 (1)，31 (1997)。
- 16) Y. Sagara：Drying '86，1，413 (1986)。
- 17) Frans Wenur, Y. Sagara, Kamaruddin Abdullah：Proc. of 2nd Joint Seminar on Agr. Eng. and Tech., p.164, Bogor (1989)。
- 18) Y. Sagara, Jun-ichi Ichiba：Drying Technology, 12, 1081 (1994)。
- 19) Tetsuya Araki, Y. Sagara, Armansyah H. Tambunan, Kamaruddin A.：Buletin Keteknikan Pertanian, 12 (2)，18 (1998)。
- 20) Tetsuya Araki, Y. Sagara, Kamaruddin A.：Proc. the 11th Int. Drying Sym., Halkidiki, Greece, Drying '98, B p.980 (1998)。
- 21) 上西浩史，荒木徹也，相良泰行：冷空論，16 (3)，273 (1999)。
- 22) 相良泰行：伝熱，38 (150)，3 (1999)。