

# 食品乾燥の基礎知識（その1） ～標準的乾燥特性曲線～

東京大学

相 良 泰 行

冷凍 2004年6月号 別刷

社団法人 日 本 冷 凍 空 調 学 会

## 15. 食品乾燥の基礎知識 (その1) ~標準的乾燥特性曲線~

相良 泰行\* Yasuyuki SAGARA

## 1. はじめに

農産物や食品を乾燥する本来の目的は、対象とする材料の貯蔵性を高めることにある。穀物・鯉節・ふりかけ・干魚などは、乾燥により長期貯蔵が可能となった食品の典型例である。これに対し、カップラーメン、インスタントコーヒーやスープ類およびスキムミルクなどは、貯蔵性のほかに調理の簡便性を向上させたもので、多忙な我々の日常生活に欠かせない食品となっている。これらの食品材料を対象とした乾燥操作の特色は、乾燥製品の品質維持または向上を最優先させながら、乾燥効率を高める操作法を採ることにある。また、乾燥装置の設計・操作に当たり、最初に必要な情報は対象材料の乾燥特性であり、これを把握するために多様な計測法が用いられてきた。本稿では食品乾燥に必要な基礎知識、特に標準的乾燥特性曲線について乾燥メカニズムの観点から概説する。

## 2. 乾燥現象解明の現状

食品工場の加工ラインには各種の単位操作 (unit operation) が含まれ、これらは選別・粉碎など、熱の移動を伴わない機械的単位操作 (mechanical unit operation) と焼成 (baking)、乾燥 (drying)、濃縮 (concentration)、蒸留 (distillation) など、熱移動を伴う熱的単位操作 (thermal unit operation) に分けられる。これらの熱的操作を行う機械装置・設備の設計や合理的操作法を検討するためには、対象とする材料内の水分移動現象や材料そのものの物性値を知る必要がある。他方、レストランや家庭内における調理のプロセスには多様な加熱操作が含まれている。そこで対象とする食品素材、使用する機器や設備、調理の目的と方法などは多種・多様であり、これらを組み合わせた加熱操作の伝熱機構やこれに伴う水分移動の動態を現象論的に解明することはきわめて困難である。

したがって、乾燥食品の大規模生産であっても、小規模な調理であっても、加熱による材料内の水分移動のメ

カニズムを統一的に解明した理論・解析は存在しない。このため、農産加工、食品工学、化学工学、家政学などの分野では、個々の熱的操作に伴う水分移動現象に関する研究が進められている。そこでは主に、比較的均一な構造と性質を持ち、さらに加熱プロセスにおける物理化学的变化が無視できるような材料を対象とし、また、操作の面でも単純化が可能な現象に関する計測・解析が行われている。

一見複雑にみえる調理加熱や乾燥現象も、そのプロセスに支配的な現象を抽出して単純化し、これに物理化学や移動現象論 (transport phenomena)<sup>1)</sup> などの手法を適用することにより、これらの解明が進められてきた。このためには、主たる現象を把握するための計測法を開発し、現象を数量化・単純化するためのモデリングと解析手法、さらに、これらを再統合して当初の複雑な現象を理論的に再現するためのシステム化手法などが必要である。

次節以降では、各種の熱的単位操作の中でも、特に、材料からの水分の除去を主目的とする乾燥操作を例に取り、水分移動に関する基礎的事項を概説する。

## 3. 乾燥操作の概要

乾燥操作の身近な例として洗濯物の天日乾燥が挙げられる。そこでは、太陽からの熱放射エネルギーが大気を暖め、この大気と直達日射により、水分を含んだ繊維組織が加熱される。この加えられた熱量の一部は水分の蒸発潜熱としても消費される。蒸発した水分は空気の流れによって運び去られる。このように水分を含む個体に熱エネルギーを与えて水分を効率的に蒸発分離する操作が乾燥操作である。移動現象論的には「水の相変換を伴う熱と物質の同時移動現象」と定義されよう。また、水分に限らず、アルコールのような有機溶剤を分離・除去する操作も乾燥操作の範疇に入るが、基本的には水分の蒸

\* 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4月27日

発分離と同様な取り扱いが可能であり、さらに現実には水分を除去する操作が大部分を占めるので、本稿では水分の蒸発分離を目的とする乾燥操作に話題を限定する。

先に述べた洗濯物の乾燥のように、天日乾燥は材料に熱を伝える手段としてもっとも手軽であり、現在でも農林水産物や原料単価の安い物を取り扱う分野の乾燥法として用いられている。しかし、近代工業技術が発達し、大量かつ連続的な生産が行われるようになると、天日などの自然乾燥に必要な所要時間、労働力、膨大な敷地や空間などは経済的に不利となってきた。乾燥装置はこれらの問題点を解消し、必要数量の原料を安全かつ経済的に乾燥し、均一な品質の製品を市場に提供するために考案された機械設備である。

乾燥装置の設計に当たり、まず考えなければならないことは、材料の搬送方式および材料と加熱媒体（乾燥空気）との接触方式である。乾燥装置は前者に関して、バッチ式や連続式、後者に関してはトンネル、通気、回転、気流、流動層、ドラム、噴霧などの方式に分類される。また、加熱による変質が問題となるような材料に対しては、材料を減圧下において水の蒸発温度を下げ、低温乾燥を行う真空乾燥や、凍結した材料内水分を昇華により除去する凍結乾燥方式が用いられる。これらの乾燥装置に関しては化学工学分野の成書<sup>17-19)</sup>を参照されたい。

## 4. 材料内水分の性質

### 4.1 含水率

農産物や食品材料内の水分量を表わす方法としては、通常、材料の全質量に対する水の質量分率、すなわち濃度で表示することが多い。このように定義される含水率を「湿量基準含水率」または単に「水分」と称し、その単位を「% w. b.」と表記する。しかしながら、乾燥プロセスでは材料の全質量が変化するため、この質量分率を乾燥の諸計算に用いることは不便である。そこで、乾燥プロセスで変化しない量、すなわち、材料内の水分を除いた無水材料（個体成分）の質量を基準にして、これ

に対する水分の質量割合を「含水率」と定義して使用するが多い。特に、前者と区別するために「乾量基準含水率 (% d. b.)」と表記する。ここで、単位のパーセント (%) に付記される (w. b.) と (d. b.) は、それぞれ湿量基準 (wet basis) および乾量基準 (dry basis) を区別するために用いられている。

水分含有量の値は、水分または濃度表示では1以上にならないが、乾量基準含水率表示では0 (ゼロ) から無限大に近い値を採り得る。このため、含水率の高い材料を対象とする場合には、無水材料100 kgに対する水分質量分率 [kg-H<sub>2</sub>O/100 kg-solid] で表示する場合もある。

いずれにせよ、水分含有量の定義は研究分野により異なるため、文献などを参照する場合には、まず、そこで用いられている含水率の定義に注意する必要がある。

### 4.2 水分の存在状態と移動機構

食品材料の乾燥プロセスにおける水分移動の特性を解明するためには、材料内の水分の保有状態とその移動機構を知る必要がある。通常、食品は不均一多成分系として存在するため、その構成成分である水の存在状態も多様であり、その解明が研究の対象となっている現状にある。そこで、材料内の水の保有状態とこれに対する主な水分の移動機構を分類して表1<sup>1)</sup>に示した。

付着水は材料表面に界面張力により付着している水分であり、この水の示す蒸気圧はその飽和水蒸気圧に等しい。付着水は乾燥空気により、または真空下で蒸発により除去される。多孔質個体の細孔や個体粒子充填層などの微細間隙において、水は毛管吸引力により保有されている。この保有力は、間隙を毛細管と見なした場合の半径が小さいほど大きくなる。このため、乾燥プロセスでは水の保有力が小さい、すなわち、半径の大きい細孔から順に水分の移動が進行する。この水分移動機構についてはKrischer<sup>3)</sup>、桐栄・岡崎らが提唱したモデル<sup>4,5)</sup>に関する研究に詳述されている。

蛋白質、顔料、粘土などのような微粒子が凝集して形成される比較的均質な材料では、水はオスモティック吸引

表1 材料内水分の存在状態と移動機構の分類

水の種類	水の示す蒸気圧	水の保有力	水分の移動機構
付着水	$P = P_w$	界面張力	外部への蒸発
毛管水	$P = P_w (> 10^3 \text{Å})$ $P = P_w (< 10^3 \text{Å})$ Kelvinの式	毛管吸引力 $P_c$	索状水 水の移動 ( $P_c$ の勾配) 懸吊水 蒸気の移動 ( $P$ の勾配, 全圧勾配)
オスモティック水	$P = P_w$ (懸濁液) (高分子溶液) $P < P_w$ (低分子溶液)	オスモティック吸引力 $P_0$  浸透圧 $\pi$	水の移動 ( $P_0, \pi$ の勾配) 収縮量 = 蒸発水量
吸着水または結合水	$P < P_w$ BET式	吸着力 $P_a$ 結合力	蒸気の移動 ( $P$ の勾配, 全圧勾配) 水の移動 (表面拡散)

注)  $P$  = 水の示す蒸気圧,  $P_w$  = 水の飽和蒸気圧

力により保有される。この吸引力は荷電した微粒子表面間の電気的な相互反発力により発生する。このような材料中の水分移動は主に拡散現象とみなされ、有効拡散係数を用いて解析されている(例えば6-7)。

低含水率の材料内では水分子が固体表面に分子層として吸着されている。このような状態は水を含む砂の充填層などのように、高含水率で湿潤な材料の乾燥末期においても存在し、水分子は水蒸気として拡散移動するか、固体表面に吸着したまま表面拡散するものと考えられている。そのメカニズムについては毛管水やオスモティック水の移動を取り扱った研究に比べて数少ない現状にあるが、表面拡散機構のホッピング・モデル<sup>8)</sup>の提唱にみられるように、今後の進展が期待されている。

これまでに述べた水の分類は、主に工業材料を対象にした乾燥機構の研究に基づく分類であり、炭水化物、蛋白質、脂質などで組織化されている多様な食品中の水の存在状態とその挙動については、冷凍、水分活性などの研究分野で物理化学的視点に立った研究が進められている<sup>9-13)</sup>。これらの中で、近年、NMR(核磁気共鳴)を食品の水の性質と挙動の解明に適用した研究が著しく進歩しており<sup>14-16)</sup>、その成果が期待されている。

### 4.3 平衡含水率

凍結乾燥したインスタントコーヒーは顆粒状の多孔質固体粒子となり、その含水率は乾燥条件によって異なるが、真空下で粒子堆積層の表面温度を20～45℃に保って乾燥すると、含水率2～4%の乾燥製品が得られる<sup>20)</sup>。このような絶乾状態にある材料を一定の温度・湿度の空气中に長時間放置しておく、材料は空气中の水分を吸着・吸収して平衡状態に達する。この状態にある材料の含水率は外気条件に対応して、材料に特有な一定の値を示し、この値を平衡含水率と呼ぶ。

一定温湿度の空気を用いる乾燥プロセスでは、材料の乾燥が進行して、その含水率が平衡含水率となると、空気の水分除去能力が限界に達したことになり、乾燥の継続が不可能となる。したがって、通常、乾燥操作も終了する。このように、一般的には乾燥材料の最終含水率は平衡含水率となっている場合が多く、逆に乾燥に用いる空気の温湿度条件に対する被乾燥材料の平衡含水率の値を知ることは、最終製品の含水率の予測や乾燥操作の終了点を決定する上で便利となる。たとえば、ある被乾燥材料の初期含水率から平衡含水率を差し引いた値を「自由含水率」と呼び、これは乾燥によって無水材料1kg当たりに除去できる水分量に相当する。

図1は温度25℃の空気の相対湿度に対する各種材料の平衡含水率曲線を示す<sup>21)</sup>。これらの曲線は一般的に吸着平衡曲線と呼ばれている。この図に示されるように、鉱物に由来するグラスウールやカオリンの平衡含水率は

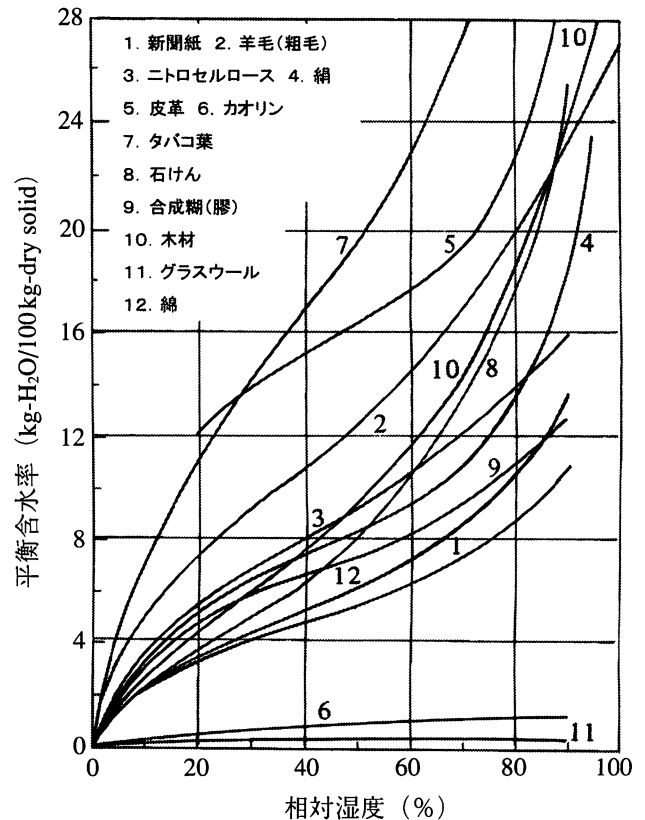
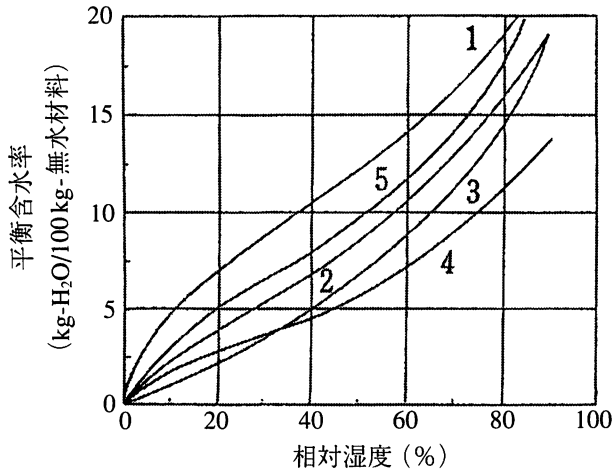


図1 各種材料の平衡含水率曲線(温度: 298 K)

他の材料に比べて極端に低い値を示す。グラスウールは断熱材として使用されている。通常、断熱材の性能はその水分含量の増加により劣化するので、相対湿度の全域に渡って低い平衡含水率が維持されるグラスウールは、理想的な断熱材といえる。他方、タバコの葉や皮革は比較的高い値を示し、またウールの値は絹や綿よりも高く、冬着の素材として用いられている。逆にさらさらした感触の絹は湿度の低い夏場の服飾素材として用いられている。

すべての材料について、平衡含水率曲線は相対湿度に対してS字型曲線となるが、その傾斜は水分吸収能力を示している。綿や新聞紙の傾斜は比較的小さいので、綿は下着素材として常用され、また、新聞紙は雨天における印字のにじみ防止に有用である。

図2にいくつかの食品の平衡含水率曲線を示す。この図の縦軸スケールに示されるように、一般に食品材料の平衡含水率は工業材料として利用される無機質材料に比べて高いことが知られている<sup>17-18)</sup>。このため、食品を相対湿度の高い場所で保蔵すると、水分の吸着により細菌やカビの発生・繁殖が活発となり、品質の劣化や損傷を招きやすい。一般に食品の平衡含水率が10%以上になると、微生物由来の品質劣化を招きやすいといわれている。したがって、乾燥食品の包装方法には、その流通・保蔵に当たって工業製品以上に配慮しなければならない



- 1. マカロニ, 2. 小麦粉, 3. 食パン,
- 4. クラッカー, 5. 卵アルブミン

図2 食品の平衡含水率曲線

い。また、食品の中では炭水化物や蛋白質の含量が増すと、平衡含水率が高くなり、逆に脂質が増えると低下する傾向にある。この図に示されたクラッカーの平衡含水率は他の食品に比べて低い値を示し、高相対湿度の環境下でも硬さが維持され、オードブルの受け皿としても利用できる特性が品質設計の肝要な要因となっている。

4.4 平衡含水率の測定法

平衡含水率の測定法の中でもっとも簡便な方法として飽和塩を用いる、いわゆる静的方法と称されている測定法がある。その一例として、試料容器用にデシケータを用いた米粉、米粉ガラ、玄米の平衡含水率測定法を図3

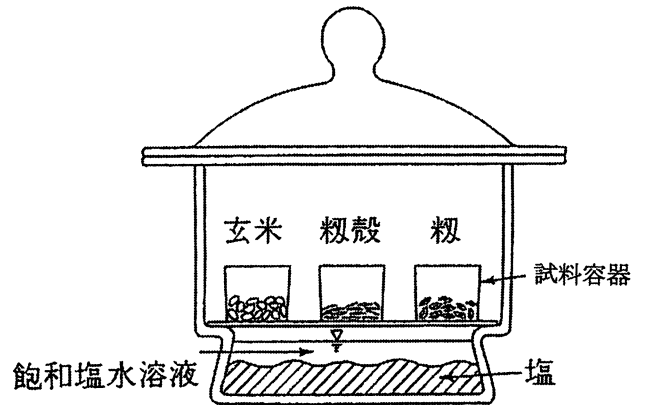
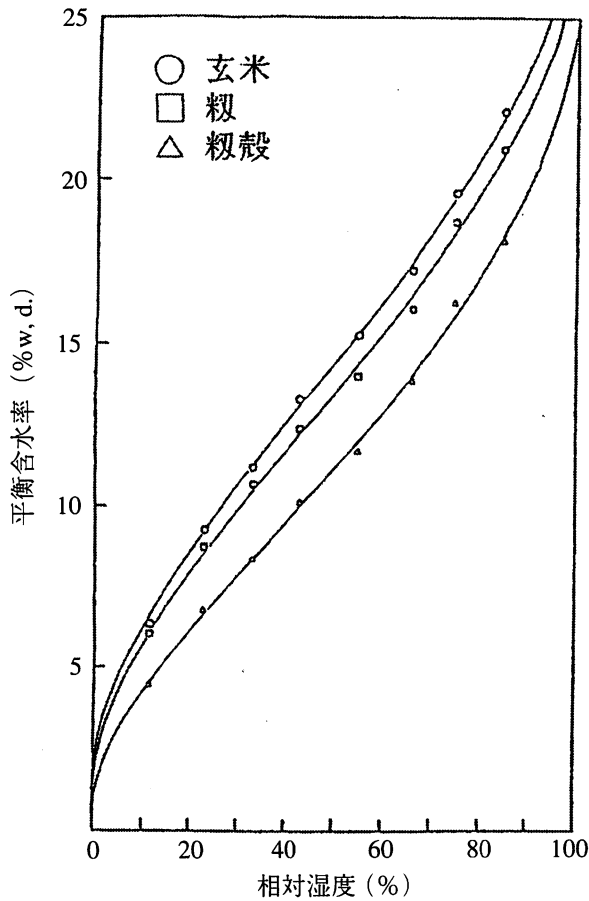


図3 飽和塩による平衡含水率の測定<sup>22)</sup>

に示す<sup>22)</sup>。この図に示すように、一定の温度条件下に置かれたデシケータ内空間の相対湿度は、デシケータ底部に含まれる各種の塩の飽和溶液により一定に保たれる。デシケータ内に放置した試料質量の経時変化を測定し、その変化が平衡状態に達した時点で、炉乾法などにより材料の含水率を測定することにより、平衡含水率の値が得られる。表2に測定に用いた飽和塩の種類と得られる相対湿度および試料の平衡含水率の値を示す。図4はこのようにして得られた温度20℃における吸着平衡曲線である。この曲線は得られた平衡含水率のプロットに、図中に示すDubinin-Astakhov式<sup>23)</sup>を当てはめて得られたものである。食品に適した吸着平衡式や理論的取り扱いについては、たとえば亀岡らの論文<sup>24-26)</sup>を参照されたい。

表2 飽和塩の種類、相対湿度および平衡含水率のデータ

温度		飽和塩の種類								
		LiCl	CH <sub>3</sub> COOK	MgCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaNO <sub>2</sub>	NaCl	KCl	
20℃		R. H.	11.3 %	22.8 %	33.0 %	43.3 %	54.6 %	66.0 %	75.5 %	85.0 %
	米粉	M. C. (% d. b.)	6.12	8.79	10.67	12.40	14.01	16.09	18.73	20.95
	玄米	M. C. (% d. b.)	6.37	9.29	11.20	13.29	15.33	17.25	19.62	22.12
	米粉殻	M. C. (% d. b.)	4.48	6.83	8.39	10.10	11.71	13.82	16.29	18.12
30℃		R. H.	11.2 %	21.6 %	32.6 %	43.2 %	51.3 %	63.0 %	75.5 %	83.6 %
	米粉	M. C. (% d. b.)	—	7.75	9.56	11.41	12.68	14.64	16.88	18.88
	玄米	M. C. (% d. b.)	—	8.39	10.30	12.04	13.57	15.65	17.84	19.86
	米粉殻	M. C. (% d. b.)	—	5.98	7.35	8.95	10.31	12.19	14.58	16.13
39℃		R. H.	11.2 %	20.4 %	31.6 %	43.1 %	48.3 %	60.0 %	75.5 %	82.0 %
	米粉	M. C. (% d. b.)	5.05	7.08	8.73	10.52	11.41	13.25	15.86	17.77
	玄米	M. C. (% d. b.)	5.37	7.59	9.24	11.31	12.31	14.21	17.06	18.93
	米粉殻	M. C. (% d. b.)	3.67	5.28	6.55	8.15	9.04	10.45	13.23	14.70



(Dubinin-Astakhov 式近似)

$$M = M_0 \exp \left\{ - \left( \frac{A}{E} \right)^{0.65} \right\}$$

$$A = -RH \ln H$$

図4 玄米, 粳, 粳殻の平衡含水率と近似式 (20℃)

## 5. 材料の乾燥特性

### 5.1 湿潤材料の定常乾燥

一般的な乾燥プロセスの基礎的概念を理解するために、材料表面が水膜で覆われている程十分に湿潤している材料を、一定の乾燥条件下で定常的に乾燥する場合について述べる。このような湿潤材料の乾燥現象は本稿のはじめに述べたように、次に示すような段階を経て進行する。

- 1) 伝導・対流・放射による材料の加熱
- 2) 材料内の熱エネルギーの移動
- 3) 材料に含まれる水分の移動・蒸発と水蒸気の拡散
- 4) 材料表面からの水蒸気拡散と除去

材料の乾燥特性は加熱方式と材料の厚さによって変化するため、これの計測は、新しく開発または使用する乾燥装置の加熱方式を用いて、想定される乾燥条件の幅広い範囲で実測される。得られた乾燥特性は最適な乾燥操作法や装置のスケールアップを検討するのに不可欠であ

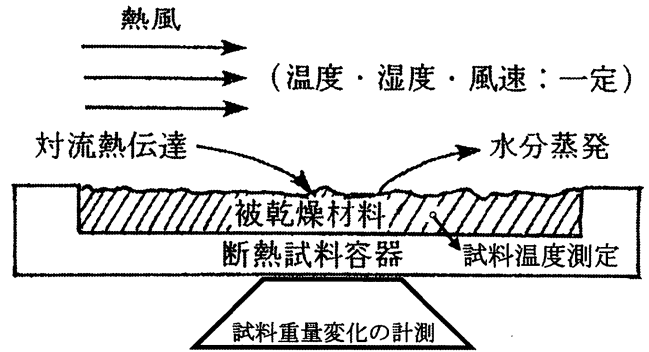


図5 湿潤材料の定常乾燥特性計測法

る。

ここでは、湿潤材料の乾燥特性を把握するための実験方法として、図5に示すように、断熱試料容器内に入れた薄い層状の材料を温度、湿度および風速が一定で大量の熱風流れの中に置いて材料表面から乾燥し、材料温度と質量の経時変化を測定する場合を考える。乾燥プロセスにおける被乾燥材料の質量減少データから自由含水率を求め、材料中心温度とともに乾燥時間に対してプロットすると、図6の(a)に示されるような計測曲線が得られる。これらの曲線からわかるように、乾燥プロセスは以下に示す3期間に大別される。すなわち、

- I：予熱期間
- II：定率（または恒率）乾燥期間
- III：減率乾燥期間

である。これらの各期間に進行する乾燥現象の特徴を把握するために、通常、次に述べる乾燥特性曲線が求められる。

### 5.2 乾燥特性曲線

図6(b)に示すように、乾燥特性曲線 (characteristic drying curve) は材料の自由含水率に対する乾燥速度の変化を示す曲線である。この曲線は各種材料の乾燥特性を把握・検討するためのいわば標準的な「スケール」として一般に認識されているため、この曲線が記載されていない乾燥関係の論文などは無価値と評価されるほど重要である。このため、特に新材料・方式の乾燥の研究では、最初に計測すべき事項となっており、これを計測するために、乾燥方法に応じた種々の実験装置が考案・工夫されている。

乾燥速度は乾燥空気と材料の接触方式<sup>17-19)</sup>により異なる。図5に示すように材料表面積が計算できるような場合には、図6(b)の縦軸に示す定義が用いられる。すなわち、図(a)の自由含水率曲線から単位表面積・時間当たりの水分蒸発量として計算される。これらの図を参照しながら、各期間の乾燥現象の特徴を以下に述べる。

(I) 予熱期間：通常、被乾燥材料の温度は熱風温度より低いため、乾燥開始直後に材料温度が上昇し、これ

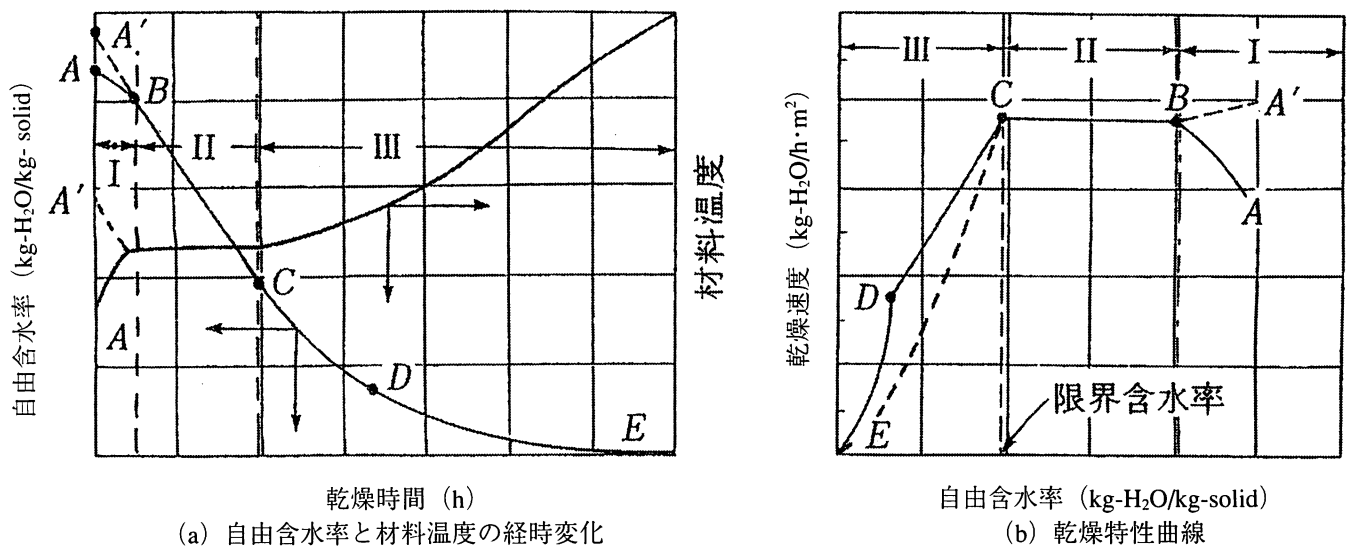


図6 乾燥実験曲線と乾燥特性曲線

に伴い乾燥速度も急激に速くなる(曲線AB)。しかし、高温の水蒸気などで処理された直後の材料のように、材料温度が熱風温度より高い場合には曲線A'B'のように変化する。この期間の乾燥速度は材料表面の付着水蒸発速度の温度依存性により律速される。

(II) 定率乾燥期間：材料の予熱期間が終了すると、材料の表面が水膜で覆われている限り、材料温度は熱風の条件に平衡となる温度に到達して一定の温度に維持される。また、曲線BCに示されるように含水率は乾燥時間に比例して減少するので、乾燥速度も一定、すなわち定率乾燥の状態となる。材料への熱の流入は熱風からの対流熱伝達によって行われ、流入熱量のすべてが材料表面の水分蒸発潜熱として消費される。また、熱風以外に熱の供給がない場合には、材料温度は近似的に熱風の湿球温度となる。したがって、定率乾燥速度は材料の種類によらず、大部分が熱風の条件に依存する。このような乾燥の挙動は、少なくとも材料表面の水分蒸発速度に相当する速度で材料内から水分が補給され、材料全表面が水膜で覆われている限り継続する。

(III) 減率乾燥期間：材料内部からの水の移動速度が材料表面の水分蒸発速度より小さくなって、材料表面の水膜形成に必要な水の供給が不十分となると、材料全表面に渡って水膜を保持することが困難となる。このため局部的に材料が熱風に対して露出する。さらに、水分の蒸発面も材料内部に後退し始める。材料表面が部分的に乾燥した状態になると、流入熱量は水分蒸発潜熱だけでなく、固体部分の顕熱としても消費されるため、材料温度が上昇するとともに、曲線CEで示されるように乾燥速度も徐々に減少する。さらに乾燥が進行して材料の含水率が平衡含水率に到達した時点で乾燥が終了する。

このように乾燥速度の減少により特徴づけられる区間が減率乾燥期間であり、定率から減率乾燥速度への移行点における含水率を「限界含水率」と定義している。減率乾燥速度は材料内部の熱と水分の移動速度に律速される場合が多く、材料外部の熱風条件よりも材料の形態・成分・物性値などに依存する度合いが大きい。また、この期間の乾燥速度は破線CEのように単調減少する場合もあれば、曲線C-D-Eに示すように明らかな変化点Dを示す場合もあり、材料の種類によって曲線の形状は異なる。前者は液状水の拡散理論で説明され<sup>2)</sup>、多くの食品材料で観測される。後者は比較的大きな細孔を有する多孔質個体や粉粒層の乾燥で現れる。後者の減率期間は便宜的に減率第1段(CD区間)および減率第2段(DE区間)に分類される。

多孔質個体材料の減率第1段の乾燥速度が曲線CDのようにほぼ直線的に変化する場合には、材料内の索状水(funicular water)<sup>18)</sup>が毛管力に依存して材料表面に移動しているものと解釈されている。減率第2段の水分移動機構は蒸発面の材料内部への降下、細孔空間内の水分子の拡散や表面拡散、さらに懸吊水<sup>18)</sup>(pendular water)の蒸発などの現象によるものと考えられている。これらの現象は材料内で複合的に生じている場合が多く、モデリングによる乾燥速度の推算を試みた研究もあるが、現象の詳細な把握は今後の課題として残されている<sup>27)</sup>。

これまで述べたように、乾燥特性曲線には、乾燥の3期間とそれぞれの乾燥速度、限界含水率、平衡含水率、自由含水率などのデータが含まれるので、各種材料の乾燥特性を把握し、また、乾燥時間を求める上で欠かせない情報源となっている。(以下次号に続く)

## 文 献

- 1) Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. : "Transport Phenomena", John Wiley & Sons (1960).
- 2) 岡崎守男 : 「化学工学概論」(水科篤郎, 桐栄良三編), 第4章3.4節, 産業図書 (1979).
- 3) Krischer, O. : "Die Wissenschaftlichen Grundlagen des Trocknungs Technik", Springs Verlag (1963).
- 4) Toei R. and Okazaki M. : J. Eng. Phys : 19, 1123 (1970).
- 5) Toei, R. : "Advances in Drying" vol.2 (A.S. Mujum-dar). Hemisphere (1973).
- 6) Chandrasekaran, S.K. and King, C.J. : AIChE Journal : 18, 513 (1972).
- 7) 若林嘉一郎他 : 化学工学論文集 : 3, 189 (1977).
- 8) Okazaki, M., Tamon, H., Toei, R : AIChE journal : 27, 262 (1981).
- 9) DuckWorth, R.B. : "Water Relations of Foods", Academic Press (1975).
- 10) Franks, F. (村瀬・片桐訳) : 「低温の生物物理と生化学」北海道大学図書刊行会 (1985).
- 11) Troller, J.A. and Christian, J.H.B. (平田・林訳) : 「食品の水分活性」, 学会出版センター (1978).
- 12) 日本水産学会編 : 「食品の水—水分活性と水の挙動」, 恒星社厚生閣 (1973).
- 13) Okamura, T. : Research Bulletin of Obihiro Zoo-technical University, Series I, 8, 89 (1973).
- 14) Belton, P.S., Delgadillo, I., Gil, A.M., Webb, G.A. : "Magnetic Resonance in Food Science", The Royal Society of Chemistry (1995).
- 15) Nagashima, N., Suzuki, E. : Applied Spectroscopy Reviews : 20, 1 (1984).
- 16) Simatos, D. and Multon, J.L. : "Properties of Water in Foods", Martinus Nijhoff Publishers (1985).
- 17) 桐栄良三 : 「乾燥装置」, 日刊工業新聞社 (1967).
- 18) 国井大蔵 : 「熱的単位操作 (下)」 344, 丸善 (1978).
- 19) McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P. : "Unit Operations of Chemical Engineering" 707, McGraw-Hill (1985).
- 20) Sagara, Y. and Ichiba, J. : Drying Technology : 12 1081 (1994).
- 21) National Research Council : "International Critical Tables" Vol. II, McGraw-Hill (1929).
- 22) 亀岡孝治 : 東京大学博士論文 (1984).
- 23) Dubinin, M.M. and Astakhov : Adv. Chem. Ser. : 102 69, (1971).
- 24) 亀岡孝治 : 農業機械学会誌, 56, 3, 57 (1994).
- 25) 亀岡孝治 : 農業機械学会誌, 56, 6, 33 (1994).
- 26) 亀岡孝治 : 食科工誌, 42, 140 (1995).
- 27) 桐栄良三 : 「乾燥操作の基礎理論」 18 (1994).