乾燥特性とは何か？ — Short-Cut法と水分移動係数決定法 —

What's the Drying Characteristics — The Short-Cut Method and Determination of the Moisture Diffusivity —

今 駒 博 信*、岡 崎 守 男*
Hironobu IMAKOMA, Morio OKAZAKI

Key Words : Drying Characteristics, Drying, Short-Cut Method, Diffusion Process,
Moisture Diffusivity

1. はじめに

乾燥の対象となる材料は多種多様であり、したがって万能な乾燥装置は存在しないことは言うまでもない。いまたとえば粒状材料を少量乾燥するために、回分式流動層乾燥器を採用したとする。熱風は器内を下方より上方へ通過した後器外へ排出される。一方湿潤材料は最初器内に供給された後、熱風によって器内で攪拌・混合されながら乾燥していく。そこでこのときに生じる問題、すなわちなぜ回分式流動層乾燥器を採用したのか？またこの乾燥器を合理的に設計するためにはどうすればよいのか？さらにこの乾燥器を最も効率よく運転するための条件は何か？以上の問いに答えることがすなわち広義の乾燥器設計ということである。

第2番目に挙げた狭義の乾燥器設計に先だって乾燥器の選定がまず必要である。材料に対する最適乾燥器形式の選定はきわめて重要なことであり、もし形式の

選定を誤ると乾燥器そのものは合理的に設計されていても、選定の正しい形式の場合に比べて格段の能力差が生じるときがある。乾燥器形式選定の基準としては一般にまず材料の湿潤時状態と処理量・方式、次に材料特性に基礎をおくのが妥当である。具体的選定の手順は紙面の都合により成書^{1,2)}に譲るとして、本稿では選定により2～3種類に選ばれた候補を、最終的にひとつにするために必要な乾燥器の設計で最も重要な役割を担う乾燥特性について述べることにする。またこの設計に基づいて製作あるいは購入した乾燥器を、最適な条件で操作する方法については別の機会に述べたい。

2. 乾燥特性曲線

乾燥器を合理的に設計するために必要な情報を図1に示す³⁾。まず材料に関するものとしては、構造、平衡、移動物性等の一般物性と、液体保持機構、水分

平成3年11月27日受付

*京都大学工学部化学工学教室
(〒606-01京都市左京区吉田本町) TEL 075-753-5574

<著 者 紹 介>

今駒博信

昭和58年京都大学大学院工学研究科博士課程修了、現在同大学工学部化学工学科助手、工学博士
専門：乾燥工学をはじめとする多孔体内の熱・物質移動現象に関する理論的研究。

岡崎守男

昭和31年京都大学工学部卒、三菱レイヨン(株)、京大講師、助教授を経て、昭和61年から教授(化学工学科)、工学博士
専門：化学工学、乾燥工学、吸着工学、多相系移動現象に関する研究。

材料特性 — 物性(構造, 平衡, 移動)
乾燥特性(液体保持機構, 水分(液状水)移動係数)

乾燥器特性 — 受熱特性(対流, ふく射, マイクロ波)
乾燥法特性(流動層, 回転, 攪拌, 静置, 通気 etc.)

周辺技術 — 温・湿度測定, 制御

図1 乾燥器設計に必要な情報一覧³⁾

(液状水)移動係数等の乾燥現象に特有な乾燥特性が挙げられ、これらをまとめて材料特性と呼ぶことにする。次に乾燥器に関する特性として、材料の受熱法を示す受熱特性と器内の材料と熱の動きに基づく乾燥法特性が挙げられる。これらの特性とは別に温・湿度測定法や制御法等の周辺技術も重要である。

十分に湿った材料を定常条件下で熱風対流乾燥すると、一般に材料予熱期間Ⅰ、定率乾燥期間Ⅱ、減率乾燥期間Ⅲが現れる。定率期間中の材料温度はほぼ一定で、材料への流入熱量はすべて水分蒸発に費やされる。減率期間に入ると材料温度は上昇し、材料内部に温度分布を生じる。このときの乾燥速度変化を示す図2は乾燥特性曲線と呼ばれ、材料の乾燥特性を端的に示すものである。またⅡとⅢの境の含水率を限界平均含水率と呼び、この値とⅢの期間における曲線の形は材料・乾燥器両特性によって決まるものである。従来より乾燥器設計に際しては、実際にはごく限られた場合に対してのみ妥当であるにもかかわらず、材料と乾燥器形式が同じならば限界平均含水率と減率期間の特性曲線の形は不変であると近似されてきた。その理由は、材料・乾燥器特性との間に理論的根拠が乏しいにもかかわらず乾燥特性曲線がこれらの特性を定性的ながら端的に示すものとして、主としてその使い勝手の良さからきているものと考えられる。したがって従来の乾燥特性曲線は真の特性曲線ではなく、単なる平均含水率に対して描いた乾燥速度曲線とも呼ぶべきものであろう。

図3に非親水性多孔質固体材料であるアルミナ素焼平板の乾燥速度実測曲線を、図4に材料温度実測曲線を実線で示す⁴⁾。これらは熱風温度と材料厚さが異なる場合の結果である(表1参照)。ここで実験は、乾燥中に生じる材料内の温度分布を可能な限り小さくするため伝熱面積を水分蒸発面積より大きくとったので、定率乾燥期間の材料温度は熱風湿球温度より高い値を示している。図3では乾燥条件が異なれば減率速度曲

図2 従来の乾燥特性曲線²⁾

図3 アルミナ素焼平板の乾燥速度曲線⁴⁾

図4 アルミナ素焼平板の材料温度曲線⁴⁾

表1 アルミナ素焼平板の乾燥条件⁴⁾

Run No.	材料厚さ (cm)	熱風温度 (℃)	熱風湿度 ($\frac{\text{kg}-\text{水蒸気}}{\text{kg}-\text{乾き空気}}$)
1	1.1	75	0.011
2	0.4	75	0.009
3	1.1	32	0.008
4	0.4	32	0.009

線も大きく異なっており、たとえ定率乾燥速度で各曲線を正規化したとしても同様に各減率速度曲線は一致しない。

そこで吉田ら⁴⁾は、非親水性多孔質固体平板材料に対する乾燥方程式中で、液状水移動係数に含水率依存性がないとした場合の解析解を求めることによって得た乾燥速度と平均含水率の関係を、種々の依存性をもつ場合の数値解を用いて検討した結果、材料内に温度分布がなければ、いかなる乾燥条件下での減率乾燥速度をも材料種類に固有の1本の曲線でまとめる相関法を見いだした。

図5に図3, 4の結果の相関結果を示す⁴⁾。この相関では、低平均含水率域で減率速度曲線が互いに重なり1本の曲線となっていることが分る。この曲線こそ真

図5 アルミナ素焼平板の減率乾燥速度相関結果 (乾燥特性曲線)⁴⁾

の乾燥特性曲線と呼ぶにふさわしい。非親水性多孔質固体材料の乾燥機構は、定率乾燥期間では水分が液状で材料内部より乾燥表面へ流れるが、表面含水率が局所限界値になると水分蒸発面は材料内部に移動してゆき、表面近傍に乾き材料層が広がり始めることで、減率乾燥期間に移行するとして理解されている。このとき材料内の水分は蒸発面までは液状で、蒸発面で気化した水蒸気は乾き層内を拡散で移動する。したがって図5の縦軸の修正乾燥速度は蒸発面後退速度・位置、局所限界含水率、液状水移動係数の温度変化を考慮したものであり、横軸には蒸発面位置、局所限界含水率を考慮した修正平均含水率を用いている。また本図を描くにあたっては局所限界含水率=0.15とした。さてここで注意しなければならないことは、この相関法はあくまで非親水性多孔質平板材料に対してのみ適用可能なものであるということである。

図6にグルコース水溶液薄膜の等温乾燥速度曲線計算結果の相関を示す⁵⁾。計算は膜内水分移動がフィック則に従うとして拡散係数の含水率依存性を考慮して

図6 グルコース水溶液薄膜の等温乾燥速度曲線 (計算結果, 30℃)⁵⁾

おり、異なる初期含水率(初期分布なし)、初期乾燥速度の結果をまとめてある。この場合も図左方に明確な特性曲線が現れているが、この場合の相関では、前図とは異なり縦軸にフラックスパラメータと呼ばれる乾燥速度に、絶乾グルコースの密度と膜厚を乗じた変数をとって、横軸には平均含水率をとって相関している。グルコース水溶液などの均質材料と先の非親水性多孔質固体材料は異なる乾燥機構を有しているため、相関に必要なパラメータもまったく異なってくるのである。このパラメータはまた材料種類が同じでも材料形状が異なれば異なる。

図6においてたとえば初期含水率=4、初期フラックスパラメータ= $9 \times 10^{-4} \text{ kg}^2/(\text{m}^4\text{s})$ の場合、乾燥過程は破線から細実線を経て太実線に沿って図の右から左へ進行していく。破線の期間は定率乾燥に相当する期間であるが、表面水分濃度低下に伴う水蒸気圧の低下により乾燥進行とともに若干速度が減少していく、表面水分濃度が熱風湿度と平衡値と等しくなると同時に乾燥は減率期間に移行する。減率前期である細実線の期間はPenetration Period (P P) と呼ばれ、材料中心(両面乾燥の場合)の含水率が初期値を保っている場合に現れる。一方後期の太実線の期間はRegular Regime (R R) と呼ばれ、含水率が初期分布の影響を受けなくなり始めたときから乾燥終了まで続く。もし定率期間終了時に中心含水率が初期値より小さくなるような場合には、たとえば初期含水率=4、初期フラックスパラメータ= $9 \times 10^{-4} \text{ kg}^2/(\text{m}^4\text{s})$ のときのように定率期間(破線)からR R (太実線)に直接移行することになる。

図5で示した非親水性多孔質固体材料の場合も定率期間から直接R Rに移行している。一般に多孔質固体材料の乾燥の場合、均質材料とは異なり水分移動係数の値が比較的大きいので、よほど材料厚みや定率乾燥速度が大きい場合を除いては定率期間からR Rへ直接移行するとしてよい。図5, 6から分かるように、乾燥モデルと材料形状に基づいた適当なパラメータで乾燥速度を整理すれば、R Rで真の乾燥特性を表す曲線が得られる。

3. Short-Cut法

前述のようにグルコース水溶液薄膜の乾燥の場合、従来の減率乾燥期間はさらにP PとR Rに2分される、ここでR R曲線はある条件下の等温・湿乾燥実験から容易に決定できる。一方P P曲線は材料を半無限媒体と近似することで非定常拡散理論から決定できる。さらに定率期間の曲線は、境膜物質移動係数と含水率対水蒸気圧平衡関係をあらかじめ測定することで簡単に

図7 グルコース水溶液薄膜の非等温乾燥速度曲線 (計算結果, 30°C)⁶⁾

推定できよう。以上のことより、ある条件下の等温・湿乾燥速度曲線を実測するだけで、任意の条件下の等温・湿速度曲線が推定できることになる。

さらに温・湿度を変えて等温・湿速度曲線群を測定しておけば、図7で示したように温・湿度に関して擬定常と見なすことで任意の非等温・湿乾燥速度が簡便に推定可能である。ここで実線が等温速度曲線群、記号が曲線と同じ膜温の場合の擬定常を仮定した推定非等温乾燥速度、破線が非等温速度曲線計算結果である。またこの図では湿度は不変としている。

一方図5のアルミナ素焼平板のRR曲線をRun No. 1の実験結果から推定し、これを用いて他の条件下の乾燥過程を推定した結果を図3, 4中に記号で示す。非親水性多孔質固体材料は均質材料の場合と異なり、液状水移動係数の温度依存性が理論的に予測可能なため、ただ1本の実測乾燥速度曲線から他の任意の条件下の速度曲線が推定できるという特徴をもっている。

これらの方法はShort-Cut法と呼ばれており⁶⁾、乾燥速度 vs. 平均含水率の関係を与える従来の乾燥特性曲線とはほぼ同様に取り扱えるため、これに基づいて発展してきた従来の乾燥器設計法に比較的簡単に移植可能であろう。

4. 水分移動係数決定法

通常多大な労力と時間を要する水分(液状水)移動係数の含水率依存性を決定することなく、簡単な乾燥実験結果だけから乾燥器設計が可能となるShort-Cut法は、乾燥器設計の実際から見れば確かに魅力的方法であることに間違いない。しかし今後の乾燥工学発展のためには含水率(温度)依存性のデータの集積が不可欠であることは言うまでもなく、また複雑な形状の材料の乾燥過程や簡単な形状とはいえ材料内の含水率分布が問題となるような場合は数値計算によって推定する

図8 PVA水溶液系の拡散(水分移動)係数含水率依存性⁶⁾

他ない。そこで材料固有の物性とも呼べる上述の真の乾燥特性曲線から水分移動係数の含水率依存性を決定しようとしている研究もある^{5,6,7)}。

図8はPVA水溶液の拡散(水分移動)係数依存性を1本の乾燥(RR)曲線より決定した例である⁶⁾。×印がその結果であり、真の値(実線)や他の煩雑な方法(○△)と比べて遜色のない精度で決定可能であることが分る。

図9は図5で示したアルミナ素焼平板のRR曲線より液状水移動係数の含水率依存性を推定した結果である。RR曲線の得られた含水率範囲が小さいため断言はできないが、この材料の場合にも妥当な結果が得られていると考えられる。このとき吉田らは非定常拡散過程である乾燥過程の流束を定常過程の流束に基づいて推定しようと試み、流束比較法と呼ばれる方法を提案した⁷⁾。この方法によれば、RRおよびPP曲線は含水率と温度に依存する液状水移動係数と境界条件を含んだ関数で表現され、彼らはこれらを特性関数と名づけた。

表2に現在Short-Cut法とRR曲線に基づいた水分

図9 アルミナ素焼の液状水移動係数含水率依存性

表 2 Short-Cut法および水分移動係数決定法が適用可能な系

前提条件 移動係数の含水率依存性未知
熱風対流乾燥
材料内温度分布なしまたは材料温度一定
材料内物質移動にはフィック則が適用可能

材料種類 \ 形状	平板	円柱	球
均質材料	○ 5, 6)	○ 5)	○ 5)
吸着性多孔質固体材料	○ 7)	×	○ 8)
非親水性多孔質固体材料	○ 4, 9, 10)	×	×

移動係数の含水率依存性決定法が適用できる材料種類、形状を一覧にして示す。ここで拡散係数の含水率依存性を決定するにあたって、その関数形をあらかじめ与えている研究は除外することにする。

残念ながら現時点で適用可能な乾燥法は対流乾燥、形状は平板・円柱・球に限られており、さらに材料内に温度分布が生じている場合には適用できない。また材料内物質移動は見掛け上フィックの拡散則で表現され、かつ蒸発成分および材料本体が各1成分としてみなされる場合にのみ有効である。

乾燥進行とともに材料が収縮する均質材料に関する研究が現時点では最も進展しており、Short-Cut法については前述のように等温・湿乾燥速度曲線群を測定しておけばいかなる条件下での乾燥速度も推定可能である。また絶乾空気を用いた等温速度曲線群の測定より、拡散係数の含水率・温度依存性が簡便に決定できる^{5,6)}。

吸着性多孔質固体材料に関しては、その基礎式は収縮性のない均質材料と同じになるためShort-Cut法の適用は均質材料と同様容易であろうが、乾燥中材料内で表面拡散、毛管凝縮水流れ、水蒸気クヌーセン・通常拡散・粘性流れ等複数の物質移動機構が共存するため、水分移動係数は複雑な含水率・温度依存性を有してい

る。したがってそれらの決定に関しては精度の面で問題が残ろう^{7,8)}。

減率乾燥期間において蒸発面後退現象が起こる非親水性多孔質固体材料に関しては、現在平板に対してしか研究が行われていないものの、液状水移動係数の温度依存性が理論的に予測可能なため、唯一の適当な乾燥実験結果からあらゆる条件下の乾燥速度が推定可能であり、また含水率・温度依存性も決定できる^{4,9,10)}。

5. おわりに

以上材料の乾燥特性を端的にはあるが定性的にしか示しえないにもかかわらず、その利用が簡便であることから現在多用されている従来の乾燥特性曲線に替わるものとして、同じく簡便に利用可能でありかつ乾燥特性に基づいて表現される真の乾燥特性曲線(特性関数)について簡単に述べてきた。水分移動係数が既知である場合と未知である場合に関して、この特性曲線(特性関数)の利用法を以下に記す。

まず水分移動係数の含水率・温度依存性が既知の場合、平板・球等単純な形状の材料に関する乾燥器設計は特性曲線(特性関数)に基づいて容易にできよう。しかし複雑な形状を扱わなければならないときは、乾燥モデルにまでさかのぼって基礎式を数値計算により解かなければならない。一方水分移動係数が未知のときは、定常条件下で単純形状材料の乾燥実験をおこなうことで特性曲線(特性関数)が得られるので、これより移動係数の含水率・温度依存性を決定すれば後は移動係数が既知の場合と同じである。

このように特性曲線(特性関数)は大きさに言えば、ともすれば机上の空論となりがちな乾燥理論と実際の乾燥器設計の間に横たわる大きな谷の夢の架け橋とも呼べるものであるが、材料種類だけではなく材料形状によってもその表現が異なるため、今後の研究進展には多大な努力が必要である。

引用文献

- 1) 桐柴良三：“乾燥装置”，p.1, 日刊工業(1966)
- 2) 岡崎守男：“化学工学便覧(改訂第5版)”，p.663, 丸善(1988)
- 3) 今駒博信：“新しい乾燥技術の実験”，p.166, 技術情報協会(1991)
- 4) Yoshida, M., H. Imakoma and M. Okazaki : *Chem. Eng. Process.*, 30, 87(1991)
- 5) Schoeber, W. J. A. H. and H. A. C. Thijssen : *A IChE Symp. Ser.*, 73(163) 12(1977)
- 6) Sano, Y. and S. Yamamoto : *J. Chem. Eng. Japan*, 23, 331(1990)
- 7) Yoshida, M., H. Imakoma and M. Okazaki : *J. Chem. Eng. Japan*, 24, 720(1991)
- 8) Legros, M., M. Yoshida, T. Sakaguchi, H. Imakoma and M. Okazaki : *Drying Technol.*, to be published
- 9) Yoshida, M., H. Imakoma and M. Okazaki : *J. Chem. Eng. Japan*, 23, 58(1990)
- 10) Yoshida, M., H. Imakoma and M. Okazaki : *J. Chem. Eng. Japan*, 23, 502(1990)