これに反して、図6において、Langmuin形の吸着等温曲線を示しているNP-5は、図7に示すように、吸着が飽和に達するまでの途中の濃度では一度凝集効果を示し、さらに高い濃度になり、吸着が飽和する状態になると、非常によい分散効果を示している。

このような活性剤の分散効果は他にも認められているが、その原因についてはまだ明らかでない。

通常、活性剤による粉体の分散は、粉体の表面を活性剤分子がおおい、これによって粉体粒子と媒質の液との間の親和性が変化するために起ると考えられている。NP-5の場合は、これによって説明できるが、この場合においても、活性剤分子による吸着層が完成される前に起る凝集現象は説明できない。また、NP-7.5のように、非常によく吸着していると思われるものに、分散効果が見られないことも十分に説明することができない。

以上のように、吸着量と分散効果が必ずしも単純に

平行しないことは、吸着が起っても粒子と液との間の親和性が増すとは限らないためであろうが、このことは、活性剤溶液の粒子に対するぬれを測定すれば明らかにされるわけであって、このためにはまずぬれの測定法が確立されなければならない。

以上、著者の乏しい実験の中で気付いた2, 3の問題点を示したが、これらについてはなんらの解決を与え得ない状態であって、皆様の御教示を得られれば幸いである。

文 献

- 1) A. C. Zettlemoyer, C. H. Schneider and J. D. Skewis, Proc. 2nd. Int. Cong. Surface Activity, DA 384 (1957)
- 2) E. W. Washburn, Phys. Rev. 17, 273 (1921)
- 3) 久野・阿部, 工化誌 61, 1445 (1958)
- 4) 久野・阿部, 工化誌 62, 1708 (1959)
- 5) W. Kling und H. Lange, Kolloid Z. 158, 150 (1958)

(411 ページから続く)

そしてパラ・ターシャリー・ブチルベンゾイックアシッドの分極性が大きく配向性のフェニル核が適度に散在している試料Ⅱが最も有効架橋点の密度が大きいことを暗示している。

文 献

- 1) 植木：防食技術, 8, 350 (1959)
- 2) A. Henglein: Makromol. Chem., 32, 226 (1959)
- 3) 祖父江・但馬・田畑：工化, 62, 1764, 1774 (1959)
- 4) W. Funke, W. Gebhard, H. Roth, K. Hamann: Makromol. Chem., 28, 17 (1958)
- 5) 植木：塗料工業, No. 21, 2 (1958)
- 6) たとえば M. F. Drumm, C. W. H. Dodge, L. E.

Nielson: Ind. Eng. Chem., 48, 76 (1956)

- 7) 植木・吉岡・牧・井上：工化, 62, 1135 (1959)
- 8) たとえば L. Mullins: J. Poly. Sci., 19, 225 (1956), A. Charlesby: Proc. Roy. Soc., 24, 495 (1957), A. Ciferri, P. J. Flory: J. Appl. Phys., 30, 1498 (1959)
- 9) 植木・前田・池田：色材, 28, 103 (1955)
植木・前田・池田：色材, 29, 164 (1956)
- 10) 植木・前田・池田：色材, 30, 140 (1957)
- 11) Joh. F. Ehlers: Koll.-Z., 163, 106 (1959)
- 12) 井上：塗料の物性, 日本ライヒホルド化学工業(株) 塗料講演会 (1957)
- 13) E. G. Bobalek: Paint & Varnish Prod., 49, 31 (1959)
- 14) 植木：未発表
- 15) 植木：日化 13 年会講演 (1960)

(423 ページから続く)

Δp	水蒸気圧差	[mmHg]
Q	伝熱量	[kcal]
t	温度	[°C]
Δt	温度差	[°C]
W	蒸発水分	[kg]
w	含水率	[—] [kg-H ₂ O/kg-dry material]

α	境膜厚	[m]
Z	装置長さ	[m]
θ	時間	[h]
添 字		
1	空気入口における状態	
2	空気出口における状態	
S	平衡表面における状態	

色材乾燥の基本的考察と乾燥装置の選定 UDC 667.6.047

A fundamental consideration and selection of the apparatus for drying of colouring stock

河 村 祐 治*

KAWAMURA Sukeharu

1. 序 言

単位操作に関する学問——従来、化学工学とか化学機械学とかいわれてきた分野の大きい部分を占めるものであり、ここでは化学工学といっておく——も近年大いに研究が進み、あらゆる化学工業の中にとり入れられ、もはや卑近なものになっている。しかしながら、実際の現象はいかなる操作をとりあげてもきわめて複雑なものであり、理論的学問的研究はその内の理想的典型的なごく限られた条件の場合についてのみ完全な解を与えることとなる。

そこで“化学工学には必ず補正係数が入る”と悪口をいわれ、名人芸的経験が先行し勝ちであるが、これは化学工学の内容にうとく、万能のように過大評価したり、逆に食わず嫌いで、いずれにしても適用を誤った結果であることが多い。また、化学工場ではとかく化学が先行し、化学工学的関心が薄く、わずかな手数によって改善される工程がなおざりにされていることが多い。いうまでもなく化学と化学工学が表裏一体となって初めて広い意味での化学工学が、そして生産体形がつくられるべき

ものであろう。

本稿では色材の製造工程中不可欠の乾燥操作をとりあげるようになったが、基本的考え方や装置についてはすでに総書や便覧も多い。本稿もその域を出ないが、あえてしたのは上に述べた観点より、ごく基本的な問題を取りあげて実際操作への適用との関連を示したいと望んだからである。単位操作入門とでもいふべき段階であるから万々承知の向はページをとばすなり、さらに具体的な技術報告を見ていただきたい。

2. 乾燥の3段階——基本的乾燥機構

典型的な場合として、厚さ一定の板状湿潤材料を温度・湿度・流量など一定条件下の気流中に置いた場合を考えてみる。この場合の材料の温度・含水率・乾燥速度などの推移を示す。いわゆる、乾燥特性曲線を図1に掲げる。

すなわち、含水率は初期は時間とともにほぼ直線的に、ついで次第にゆるやかに減少してゆく。乾燥速度というならば、初期には定速で、のちには次第にその速度が減少してゆく。温度は恒率乾燥期間中一定温度を示し、減率乾燥期に入ると次第に上昇し、ついには気流温度と同

図1・図2 典型的な乾燥特性曲線

* 東京工業大学化学工学教室
昭 35. 6. 25 受理
(昭 34. 11. 26 明治大学大学院講堂における講演)

一の温度を示すに至る。また、図2に示すように乾燥速度を含水率に対して点綴した図もよく示される。前者が作業時間に対する推移をよくあらわしているのに対して

後者は材料の乾燥特性を示すのによい。図2では乾燥過程は高含水率域より低含水率域へ、すなわち、右方より左方へ ABCD の経過をたどるわけで、ある含水率 w_c より高い領域 AB では恒率乾燥速度 $(dW/d\theta)_c$ を示す。含水率が w_c より小さくなると乾燥速度ははじめは含水率に対して直線的に減少し (BC)、ついで直線性よりはずれる区間があらわれ、ついに含水率 w_e で 0 となる (CD)。これらの各区間について、(I) 恒率乾燥期、(II) 減率乾燥第 1 期、(III) 減率乾燥第 2 期というように命名されている。また、 w_c を限界含水率、 w_e を平衡含水率と呼ぶ。

これらの乾燥各段階に対して、乾燥機構は一般につきのように考えられている。恒率乾燥期では含水率高く、材料は十分湿っており、水の蒸発はもっぱら材料表面で起っている。内部の水分が表面に達するいわゆる、水分の内部拡散について考慮する必要がなく、簡単には自由水面における蒸発に近いものと考えてよい。水分が次第に減少し、減率乾燥期になると材料内部から表面まで水分が拡散してゆく速度の方が支配的となり、さらに低水分のところでは物質内部での水分子の脱着速度が支配的となることもある。

材料内部の典型的な水分分布を図3に示す。恒率乾燥期には含水率こうばいはゆるやかで、材料内部における水分移動があまり関与せず、減率乾燥期ではこのこうばいが急で内部水分の移動に対する抵抗がものをいっていることをよく示している。これまでに示した図および説明はこれまでも断わってあるように典型的・定性的なものであって、実際の場合には材料および乾燥方法・乾燥条件によって異なるものであるから、乾燥装置の選定・設計に当たってはモデル実験によってこれらの特性をおさえておくことが勘要となる。

図3 材料内部水分分布

3. 熱風乾燥における乾燥機構と計算式

再び平板状材料をとり、これを熱風乾燥する場合について述べる。まず、簡単のため定常乾燥期について説明する。この場合はさきに述べたように乾燥を支配するのは材料表面から空气中への水分の蒸発速度である。蒸発面における水蒸気の濃度(湿度 H あるいは水蒸気分圧

p 力で示される) および温度の状況を図4に示す。湿度は材料表面でその温度 t_s に対応する H_s を示し、周囲空気湿度 H との差 ΔH に対応して材料表面より空气中へ移動してゆく。この水分蒸発に必要な熱量は空气中から与えられその速度

図4 温度・水分関係

は空気温度 t と表面温度 t_s との差 Δt による。工学的にはこの温度・湿度のこうばいを直線に近似して取り扱い、この区間を熱移動および物質移動に関するガス側境膜とよんでいる。普通この境膜厚さ α は熱・物質移動について同等と考えてよい。 α が小さくこうばいが急なほど移動しやすいことを示すわけである。熱風乾燥のような場合には蒸発に要する熱量はすべて空気より与えられる(断熱系)と考えてよいから、

$$\text{熱移動: } dQ/d\theta = -L(dW/d\theta) = h_g \cdot A \cdot (t - t_s) \quad (1)$$

$$= h_{ga} \cdot Z \cdot (t - t_s) \quad (1')$$

$$\text{物質移動: } dW/d\theta = k_g \cdot A \cdot (H_s - H) \quad (2)$$

$$= k_{ga} \cdot Z \cdot (H_s - H) \quad (2')$$

ここに A は材料表面積、 a は装置単位長さ当たりに含まれる材料表面積、 Z は装置の長さ、 $dQ/d\theta$ および $dW/d\theta$ はそれぞれ伝熱、乾燥速度である。式(1)第2項の負号は両者の移動方向が逆向きである意味である。すなわち、伝熱・乾燥速度は材料表面積および温度差・湿度差に比例する。比例定数 h_g 、 k_g は伝熱係数、物質移動係数(ガス境膜についての意味で添字 G を付す)と呼ばれ、材料表面での空気の流れの状態によつて異なり、一般に流速が速く擾乱の度が大きいほど大きくなる。

材料温度 t_s はこのような系では入口空気の状態に対応する湿球温度*を示す。空気の方は入口から出口に向つて断熱冷却線*にしたがって冷却増湿されることになる。

装置全体についての関係の概念図を図5に示す。

減率第1期については材料内の水分移動についての関係係数が求められれば(図4 H 曲線……参照、式(2)と類形)、これと気相での水分移動式(2)式を連立させて計算することとなるが、前章で述べたように乾燥速度が含水率に比例することより次式をたて、これから乾燥速度や所要時間を計算することができる。

$$\frac{dW}{d\theta} = M \frac{dw}{d\theta} = k_g \cdot A \cdot \frac{w}{w_c} \cdot (H_s - H) \quad (3)$$

* 付記 1) “湿度線図” 参照

図5 熱風乾燥における諸関係の概算

あるいは,

$$w_c \ln(w_c/w) = \frac{k_a \cdot A}{M} \cdot (H_s - H) \cdot \theta \quad (3')$$

ここで w は含水率, w_c は限界含水率, M は乾燥材料重量で, 求められた θ は限界含水率以下の減率第1期において, w_c から w までの乾燥に必要な時間である。

減率乾燥第2期あるいは他の種々な精解についての研究報告はあるが, ここでは省略する。減率第2期あるいは一般に低水分範囲の乾燥は実験により特性を確かめ, 第1期に近似させるか, 経験的な仕上乾燥時間として計算による所要時間に付加することが多い。

さて, これらの基本的な考えより, 実際の操作あるいは設計に対する考察を加えることにしよう。簡単に乾燥速度を向上させ, 処理時間を短縮させるということのみに着目することになると式 (1)~(3) の右辺の因子を大きくすればよいこととなる。

まず, 駆動力である温度差, 湿度差を大きくすること。

そのためには材料表面温度 t_s (材料により許容限度があらう。 t_s を大きくすれば必然的に H_s は大となる) を大きく, 空気温度 t , 湿度 H を小さくすることである。 t_s は空気の温度, 湿度で定まるから, けっきょく, 許せる範囲で供給空気は高温で, かつ, 低湿度のものを用いるのがよい。熱経済のため, 排出空気を再循環させることは, たとえ一部新しい空気を補充するとしてもあまりのぞましいことではない。供給空気はすべて新しい乾燥

空気を用いるのがのぞましく, 熱経済のためには熱交換器により排気の廃熱を回収することが好ましい。物質移動に直接関与するのは湿度差であるから操作の検討のためには湿度を測定し, これより論議する立前を忘れてはならない。供給空気を2段以上に加熱することは乾燥効果をあげることができる。これについての概念図を図6に示す。低温・低湿を要求される場合には, 給気をシリカゲルなどによって予備乾燥をする必要もあらう。空気乾燥器は全自動連続使用のものが市販されている。

図5で明らかのように, 装置内では場所によって温度差, 湿度差が異なり, 入口で最大で下流に向かって次第に減少する。したがって, 出口に近いほど乾燥速度は小さくなり乾燥がおくれる。計算によって所要時間を求める場合には出口条件で計算しておかぬと未乾燥部分が残る。乾燥途中に材料の位置を入れ換える (とくに上流のものと下流のものとを) ことは有効なことで, 均一に入れ換えが行なわれた場合には Δt , ΔH は出入口の平均値*をとることがで

図6 多段加熱式の概要

* 付記 2) 参照

きすみやかに乾燥を終結させることができる。

乾燥表面積 A を大きくすること。プレスケーキのような板状材料を平サラの上においた場合にはケーキの上面が有効乾燥面と考えられる。ケーキ厚さを薄くして材料単位重量当たりの（以下同様）表面積を大きくすることは有効であるが、フィルタープレスの容量、乾燥器の構造、操作の経済性などから実用上一定の限度がある。図7にみられるように同じような厚さならば平板状のもの（イ）より塊状にきって並べた方（ロ）が数倍もよく、塊状で積み上げられるような場合には平サラの底板を多孔板やスノコにして層中を流過させるようにすればさらに有効である（ハ）。

図7 通風方式

伝熱係数、物質移動係数を大きくすること。同じような流れ様式ならば流速を増加することがよい。前記のように粒塊層中を流過させる場合は、同じ空気量を平板面に沿って流す場合に比べて h_a, k_a がはるかに大きくなり有利となる。

4. 装置形式についての考察

前章では色材など泥状物によく用いられる箱形熱風乾燥器について乾燥の基本的な考え方を述べたが、乾燥方式としては他に多くの形式がとられている。乾燥器形式選定の基本として、(1) 材料取り扱い方式、(2) 通風方式、(3) 加熱方式について考えてみる。

(1) 材料取り扱い方式 i) 静置形, ii) 搬送形, iii) カキマゼ形に大別することができる。静置形は前述の箱形乾燥器にみられるようにもっぱら回分操作に限られ、装置の構造は簡単になり、小規模の場合に適するが、材料の出し入れや受けザラへの材料仕込みなどの付帯作業に手数がかり、装置内で温度・湿度分布が一様でなく場所によって乾燥速度が異なり、最もおそい所を基準にして計算するとむだ時間が多く、これをさけるためには操作途中幾度も入れ換えを行なう必要があるなどの欠点

をもつ。

連続乾燥を行なうには、タナ段の1単位、各受ザラごとに、あるいは、ケーキを直接にトロッコ、コンベアで搬送する。いわゆる、トンネル乾燥器、バンド乾燥器の形式がとられる、この場合乾燥器の各場所については常に同じ状況が現出され、定常条件となるから、図5の関係から求める乾燥の式を装置長さについて計算し、定常期や減率第1期についての所要時間や装置長さは容易に求められる。付記⁹⁾

カキマゼや捏混が可能な材料ではカキマゼによって均一に受熱面に接触させたり気流中に分散させることができ、また、ロール乾燥器のように受熱面に圧着させ、かつ、厚さを薄くすることができ、伝熱が支配するような条件下では適切な手段である。

材料搬送——カキマゼ形の特殊形として気流乾燥がある。これは小塊以下に裁断した材料を垂直乾燥管中で上昇気流に浮遊乾燥させ、乾燥物を気流に搬送させる方法で、連続で熱効率もよく興味のある方法ではあるが、使用上は種々の制約がある。

(2) 通風方式 材料に対して、i) 表面流形, ii) 通気形、材料搬送方向に対して、iii) 向流形, iv) 並流形とがとられる。粒塊状材料に対しては表面流過よりも材料層中を通気させた方が伝熱・物質移動共に有利であることは前にも触れたとおりである。材料搬送方向と通風方向が対向する向流形か、同向の並流形を用いるかは図8にもみられるように温度・湿度こうばいの大きい点を材料出口側（低水分域）にとるか入口側（高水分域）にとるかということで、これは材料特性・仕上げ条件など

図8 並流式と向流式

図9 交流と並・向流の組合せ

によって採択する。一般に乾燥末期には水分蒸発が少なくなり、材料温度が図中破線で示すように上昇する傾向があることを考慮しておく必要がある。

通気形の場合、全面に一樣に新しい給気を送ることもあるが、図9に示すようにいくつかの区間にわけて順次通風することも多い。この場合には装置全体としてはやはり向流か並流かという問題が起る。

真空（減圧）方式は多くの形式に適用できるが、蒸発速度についてはとくに高度の真空で行なう場合のほか、多くみられる数～数十 mmHg 以上の圧力での減圧域の操作では理論上はともかく実用上とくに注目することはない。むしろ、材料が熱感受性で低温で操作せねばならぬ場合、毒性蒸気の発生あるいは発生蒸気の回収などの目的に適用して妙味があり、この場合熱供給は放射か壁よりの伝導などの手段により、空気を介しての伝熱は期待できない。

(3) 加熱方式 箱形熱風乾燥器では熱供給はもっぱら材料表面を流れる空気よりの伝熱に頼った。前章でも述べたように乾燥という操作は水の蒸発という物質移動

を問題とするものであるが、蒸発させるためには熱の供給が必要で伝熱速度が乾燥速度に見合わねばならない。すなわち、熱・物質同時移動現象である。したがって伝熱問題は無視できず、実際操作でこれが支配要素となっている場合を多くみうける。

熱風よりの伝熱以外に容器壁よりの伝導、赤外線灯などによる放射伝熱方式がとられる。特殊な場合には高周波加熱も考えられる。いずれの場合でも伝熱を良くし、過熱をさけるために常に受熱面が均一にさらされることがのぞましく、通気方式やカキマゼ方式が有効となる。材料を通しての伝導加熱（たとえば、平板状材料の裏面より加熱する場合。高周波深部加熱の場合も同様）は図4の――で示す温度・水分こうばいとなり、材料の熱伝導度が十分ならば、表面硬化や減率期における材料内部の水分移動をうながすなどの点で有利である。しかし、一般に、とくに低水分材料の熱伝導度は小さいから乾燥速度の小さい末期以外では加熱面の過熱に注意を要する。

以上の概念をもとにして材料を泥状物と限って適用されうる装置形式を表1に示す。

5. 装置選定に際しての考え方

前章までで冒頭の主旨にしたがって乾燥についての化学工学的考え方を述べてきた。これによって操作の検討の一助になれば望外のことと思う次第である。これらの考え方はもちろん装置選定の基礎にもなることであるので、参考までに泥状材料にむくと思われる装置形式の一覧を付しておいた。最後に装置選定に当たっての一般的注意を記して本稿のまとめとする。

乾燥装置のみならず装置選定のすべての場合にいえることであるが、(1) 装置設備費、(2) 定常運転費、(3) 償却その他が問題となる。(1)、(2)については比較的推定ができて考えやすいが、最も適切な選定というのは企

表1 泥状ケーキに対する乾燥方式一覧

	気 流	通 気 バンド	トンネル バンド	噴 霧	溝 形 円 筒 カキマゼ	ドラム	箱 形		
							通 気	平行流	真 空
適 合 処 理 量	大	大(中)	大(中)	大	小	小	小	小	小
連 続・回 分 の 別	大 連	大 連	大 連	大 連	小 回・連	小 連	小 回	小 回	小 回
材 料 取 扱 い 方 式	空 気 搬 送	搬 送	搬 送	空 気 搬 送	カキマゼ	圧 着 搬 送	静 置	静 置	静 置
通 風 方 式 (真: 真空)	並	交(並・向)	並・向	並	(真)	(真)	交	一	真
加 熱 方 式	熱 風	熱 風 放 射	熱 風 放 射	熱 風	壁 伝 導 (熱 風)	壁 伝 導	熱 風	熱 風	伝 導
熱 効 率	良	普	普一劣	普	良	良	普	劣	劣一普
適 応 性 (乾燥効果のみに着目)	良	良	中	中	良	良	良	中	中
設 置 費 (同処理量に対し)	小	中	小	小	小	中	小	小	大

業全体の立場から論ずべきことで、新しい資本投下に際しては償却、陳腐化、資金、利潤などの立場を考慮する必要がある。

操作を中心にながめた場合の一般条件としてはつぎのような事項が考えられる。

(1) 材料条件

i) 乾燥特性, ii) 湿潤時および乾燥時の性質

乾燥操作の検討に材料の乾燥特性が不可欠であることはすでに述べたが、実際の場合これらの特性が未知であることが多い。また、乾燥特性は乾燥条件（乾燥速度・温度・圧力・材料の大きさ）によって異なった様相を示すことがあるから所要条件で試験しておくにしくはない（簡単なモデル実験で得られることが多い）。

材料の状況も泥漿から固い塊状のものまで含まれるからそれぞれに応じて装置の適応を考える必要がある。取り扱い上考慮を要するのは主として湿潤時で、供給不能や装置内の閉塞、粘着などをおこし勝ちである。乾燥物は一般に取り扱いやすくなるが、温度が上がりがちになるから温度制限や微粉化による飛散が問題となることがある。乾燥方式が製品に影響を与えることが多い。乾燥工程としては所期の乾燥度まで水分を減少させれば目的を達することになるが、製品としての主眼点となる他の色沢とか分散性がそこなわれては意味がない。たとえば、同じ条件でも真空中で操作すると好結果を得、また、捏和や圧送すると製品性状が劣化するなどのことがある。また、多くの泥状物は湿潤時水分の影響が大きく、非ニュートン流動を示すことが多いから連続供給などの手段を採用する場合注意を要する。

(2) プロセス条件

i) 前後工程, ii) 前処理, iii) 処理量, iv) 生産形式

湿潤時の性質とくに水分は前工程によってきまることが多い。また、後工程によって乾燥終了時の水分や形状がきめられる。特殊な性質賦与のため、あるいは乾燥工程のために前処理をほどこす場合がある。ともかく、水 1 kg の除去のために約 600 kcal の熱量が必要であるから遠心分離などによる水切りは熱経済であるとともに材料の取り扱いが容易になり、装置の選定の幅ができることがよくある。また、湿潤時と乾燥末期は材料性状も乾燥特性も大いに異なるから、これを2つの工程にわけてそれぞれに適応した形式をとるのも考え方と思われる。

所理量と生産形態から大量・小量と連続、回分の組合わせが考えられる。多くは大量連続、小量回分の組合わせの傾向をもつが、労務費や品質安定のため小量の場合も連続化が採用されるすう勢にある。全体としては大量でも、ロットごとに品質が異なり、相互に混合をさけな

ければならないという小量多種生産の場合にはロットの変るごとに装置の清掃などの点をとくに考慮しなければならない。いきおい小量回分ということになるのであるが、連続化に際して工夫の余地は十分ある。

(3) 工場条件

i) 熱源, ii) 空気源, iii) 労務条件, iv) その他の経済条件

熱源・空気源に制約がある場合にはこれを考慮しなければならぬことは言をまたない。労務条件は将来は労務コストは例外なく高くなるであろうが、現段階ではまだ考える余地があるようである。その他、商品の市場性や企業の経済条件を考える必要があるが、範囲を出るので標記するにとどめる。

色材関係では印刷インキのように直接油剤と捏和し、加熱真空処理による乾燥操作がとられている。これは油浸電氣機器でも熱油乾燥法として用いられているところで興味ある問題を含んでいるが、一般にいう乾燥とはいささか趣を異にし、紙数の制約もあるので省略した。また機会があれば触れることにする

文 献

- 1) 亀井三郎：“空気調湿、乾燥”化学工学叢書、共立社（やや古いが詳述されており、記述平易）
- 2) 化学工学協会編“化学工学便覧”（新版）丸善
- 3) Perry ら“Chemical Engineers' Handbook” 3rd Ed., McGraw-Hill Book Co.（両者とも乾燥編に乾燥機構、装置およびデータ記載）
- 4) R. E. Treybal：“Mass-transfer operation” (1955) McGraw-Hill Book Co.（化学工学関係の総書は内外ともに刊行が目だっている。大ていのものに物質移動ないし乾燥の章がもうけられている。中でよい例として 4）を示しておく）
- 5) “化学工学” Vol. 22, No. 5 (1958)（乾燥特集号）

参 考 付 記

(1) 湿度線図 乾燥操作の検討によく用いるから簡単に説明しておく。図 10 に示すようなもので縦軸に湿度 H （絶対湿度といわれているもので単位重量中の乾燥空気中に含まれている水分の重量比で表わす。kg-H₂O/kg-dry air.）横軸に温度をとり幾本かの右上りの曲線群が示されている。この中最も上のものは飽和湿度曲線と呼ばれるもので、その温度で空気中に含まれる水蒸気の最大値を示している。以下その値の90%、80%……の値を点綴したものである。このパラメータを飽和度と呼ぶ。任意の温度・湿度の空気はこの線図上で対応する一点で示されるわけである。飽和線より右下りに引かれた線群は断熱冷却線と呼ばれており、高温・低湿

図 10 湿度線図

の空気が断熱系で低温の水に接触する場合には、この線に沿って左上方へ冷却増湿される。(熱は水に移り、これに応じて水の蒸発が起る。) 水温はいわゆる湿球温度を示し、これは断熱冷却線が飽和線と交わる点の温度と大略考えてよい。実用される湿度図表にはそのほか湿度調整の計算に必要な飽和湿り空気と乾燥空気の比容積、エンタルピなどの関係曲線がえがかれている。通常は空気-水系のものであるが溶媒を蒸発乾燥する場合にはそれらの物質についての湿度線図を作る必要がある。

(2) 平均値 ここで取り扱う系では回分の場合も連続の場合も位置あるいは時間について温度差・湿度差などの平均値としては対数平均値を用いるのが正しい。しかし、各所の値が余り異なる場合や、概略の計算を行なう場合には、もちろん、算術平均を用いてよい。

$$\Delta_{l.m.} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2.3 \log \frac{\Delta_1}{\Delta_2}}$$

ここに $\Delta_{l.m.}$ は対数平均値、 Δ_1, Δ_2 は任意の値、たとえば、出入口における温度差など。

(3) 例として定常乾燥期をとる。装置全体および微小区間についての物質収支および物質移動の式は

$$W/\theta = M(w_1 - w_2) = \pm G(H_1 - H_2) \quad (4)$$

$$\frac{dW}{d\theta} = Mdw = \pm GdH \quad (5)$$

$$Mdw = k_g a (H_s - H) dZ \quad (6)$$

式 (5), (6) を組合わせれば

$$\int_0^Z dZ = \pm \frac{G}{k_g a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{(H_s - H)} \quad (+ \text{向流}, - \text{並流})$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{向流: } Z &= \frac{G}{k_g a} \ln \frac{(H_s - H_2)}{(H_s - H_1)} \\ \text{並流: } Z &= \frac{G}{k_g a} \ln \frac{(H_s - H_1)}{(H_s - H_2)} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに G は空気流量 (kg/hr), M は無水材料についての搬送速度 (kg/hr) (一定) である。他は式 (1)~(2) 参照。添字 1, 2 は出入口について、 S は平衡表面における状態を示す。初期水分 w_1 と仕上り水分 w_2 がきまれば式 (4) より H_2 が求まり、式 (7) より所要長さ Z が求められる。 w_2 の代りに限界水分 w_c をとって計算すれば恒率乾燥末期までの所要装置長さ Z_c が求められる。減率期の式についても式 (4)~(6) をたてて計算し、同様に減率期に対する所要長さ Z_r を求めれば、両者の和が定常・減率両期にわたる乾燥所用長さとなる。

使用記号

a	装置単位長さ当りの材料表面積	[m ² /m]
A	材料表面積	[m ²]
C_p'	空気の湿り定圧比熱	[kcal/°C kg]
G	乾燥空気流量	[kg/h]
h_g	ガス境膜伝熱係数	[kcal/m ² h °C]
H	湿度	[—] [kg-H ₂ O/kg-dry air]
ΔH	湿度差	[—]
k_g	ガス境膜物質移動係数	[kg/m ² h]
L	水の蒸発潜熱	[kcal/kg]
M	乾燥材料処理量	[kg/h]
p	水蒸気圧	[mmHg]

(416 ページへ続く)