

眞 空 乾 燥



真空技術講座 8

真空乾燥

太田勇夫
益子正教
木村進著
大塚寿次

日刊工業新聞社
1965.12.23

序 文

食品の真空凍結乾燥は、魔術的な保存性と再現性を、食品にあたえるものとして、近年華やかに報道され、一部の凍結乾燥食品は店頭にかざられている。現在真空凍結乾燥食品の製造工場は米国に 11 カ所、カナダに数カ所、ヨーロッパその他に 25 カ所くらいで、1963 年の米国の産量は約 5,000 ton であったが、1970 年には 40 カ所の工場で 115,000 ton の生産量になると予想されている。食品工業全体の巨大さを思えば、なお微少な仕事と考えられるが予想された生長率は注目に値しよう。

しかしながら、真空凍結乾燥の人類への貢献は、医療のための生物的物质の保存、および生物体の反応自体の研究の方法を提供したことが最も大きいと思われる。凍結乾燥された血清 (Serum) と 血漿 (Plasma) が、第 2 次大戦以降、数え切れない人命を救ったことはよく知られている。生物的なものは乾燥過程が常温で、ゆっくり行なわれるときには、水分の蒸発にともなって水溶性塩類の移動がおり、濃厚な塩溶液が細胞内部にも作用をおよぼすので、乾燥は冷凍状態で行なわれる必要があり、また同じような理由から凍結速度が重大な因子であることが知られている。

乾燥は、おそらく原始時代から知られていた現象であろうから、厳密な乾燥のために真空技術を応用することは、きわめてわかりやすいことである。電力ケーブル、変圧器などの電気機械から、トランジスタに至るまで、厳格な電気絶縁を要するものは、ほとんどすべて真空乾燥によって乾燥される。また家庭用の電気冷蔵庫用コンプレッサから、液体ヘリウム発生装置に至るまでの低温装置では、水分（や凝縮性ガス）の固化による機械的障害を避けるために真空乾燥が応用されている。その他化学工学的操作における応用も大きい。

本書の読者は、真空乾燥や真空凍結乾燥という一見、古めかしい問題が、実は、複雑で多様な新しい対象物を取扱うもので、近い将来に、新しい科学的知識と技術（機器）の開発とを要請しているものであることに気付かれることと思う。

昭和 39 年 9 月

林 主 税

真空技術講座編集委員会

編集委員長	東京芝浦電気	浅尾 庄一郎
編集幹事	東京大学	富永 五郎
編集委員	電気試験所	石井 博
"	日本酸素	中川 洋
"	日本真空技術	林 主税

執筆者略歴

太田 勇夫 昭和17年東京大学理学部物理学科卒業。東京大学助手を経て、現在共和真空工業株式会社社長。

勤務先所在地：東京都台東区北清島2-21

益子 正教 昭和13年東京大学理学部物理学科卒業。陸軍氣象部、東京大学講師、計数研究所研究員を経て、現在共和真空工業株式会社企画部長。

勤務先所在地：埼玉県川口市原町220

木村 進 昭和21年九州大学農学部農芸化学科卒業。直ちに農林省食糧研究所入所。現在園芸食品部研究室長。農学博士。

勤務先所在地：東京都江東区深川西園4

大塚 寿次 昭和24年東京工業大学機械工学科卒業。株式会社齒田製作所技術部を経て、現在日本真空技術株式会社生産事業部装置技術部長。

勤務先所在地：神奈川県横浜市南区井土ヶ谷下町

目 次

1. 真空乾燥と凍結乾燥の理論

1.1 緒 論	1
1.2 熱・質量交換	2
1.2.1 一定断面の体積中の水分の移動	2
1.2.2 外部熱・質量交換	8
1.3 真 空 乾 燥	12
1.3.1 真空乾燥の特徴	12
1.3.2 2毛管モデル	15
1.3.3 周期的真空乾燥	21
1.3.4 温度勾配による水分移動	23
1.4 凍結乾燥の原理	26
1.4.1 凍 結	29
1.4.2 昇 華	40
1.4.3 残 留 水 分	56
1.4.4 水蒸気の凝縮	59
1.5 乾 燥 機	66
1.6 熱 供 給	72
1.7 誘電加熱による凍結乾燥	75
1.8 乾燥過程の自動化	78

2. 食品の凍結乾燥および真空乾燥

2.1 緒 論	83
2.1.1 食品の乾燥の意義	83
2.1.2 食品の凍結乾燥、真空乾燥	87
2.2 乾 燥 装 置	88
2.2.1 食品の乾燥装置の主要部分	88

2.2.2	その他特殊乾燥装置	96
2.2.3	乾燥装置の規模および連続化	99
2.3	乾燥工程	101
2.3.1	乾燥工程の概略	101
2.3.2	前 処 理	104
2.3.3	凍 結	107
2.3.4	乾 燥	110
2.3.5	乾燥後の取扱い	119
2.4	乾燥製品の品質	120
2.4.1	凍結乾燥食品の特徴	120
2.4.2	凍結乾燥食品の物理的性質	121
2.4.3	凍結乾燥食品の栄養価	121
2.4.4	凍結乾燥食品の官能検査	124
2.5	乾燥製品の貯蔵	126
2.5.1	乾燥食品の吸湿と品質との関係	126
2.5.2	乾燥食品の脂肪または脂溶性分の酸化による変質	137
2.5.3	乾燥食品貯蔵中の蛋白質の変化	142
2.5.4	乾燥食品貯蔵中の微生物	144
2.5.5	乾燥食品の貯蔵条件	148
2.5.6	乾燥製品の包装	148
2.6	凍結乾燥食品の経済性	155
2.6.1	凍結乾燥食品製造に必要な設備	156
2.6.2	企業的に成立する凍結乾燥装置の規模とその価格	156
2.6.3	凍結乾燥の乾燥経費	157
2.6.4	凍結乾燥食品の価格	159
2.6.5	食品の凍結乾燥の世界における現状および将来	160

3. 生物学的材料の乾燥

3.1	緒 論	169
3.2	生物材料の若干の性質とその測定法	171
3.3	凍結および凍結乾燥に用いられる保護媒質	176
3.3.1	血液、血漿、血清および血清蛋白フラクション	178
3.3.2	ジェラチン、ジェラトース、寒天	178

3.3.3 脱脂乳	179
3.3.4 他のコロイドを含む保護媒質	179
3.3.5 溶解性物質	179
3.4 冷却と凍結に対する微生物の抵抗性	182
3.5 細菌, ウィルスの凍結乾燥	187
3.6 血漿, 血清および血清製品の乾燥	191
3.7 組織の乾燥	194
3.8 終りに	195

4. 電気絶縁材料の真空乾燥

4.1 電気絶縁材料の真空乾燥の意義	197
4.1.1 誘電体損失と水分の影響	199
4.1.2 絶縁抵抗と水分の影響	199
4.1.3 機械的性質と水分の影響	200
4.1.4 真空含浸	202
4.2 紙の真空乾燥	202
4.2.1 紙の真空乾燥についての物理化学的考察	203
4.2.2 乾燥の方法	209
4.3 絶縁油の脱気乾燥	212
4.3.1 変圧器用絶縁油の性質	212
4.3.2 油中における溶解ガスおよび水分の影響	215
4.3.3 脱気装置	216
4.3.4 脱気装置の構造および機能	217
4.4 変圧器の真空乾燥	221
4.5 コンデンサーの真空乾燥	225
4.5.1 コンデンサーの4大特性と真空乾燥	225
4.5.2 真空乾燥の方法	227
4.5.3 コンデンサーの含浸	230
4.5.4 装置の実例	230
4.6 ケーブルの真空乾燥	234
4.6.1 絶縁紙の含有水分と電気的諸特性	235

4.6.2 ケーブル乾燥のための加熱	236
4.6.3 真空排気系の選択	237
4.6.4 含有水分の工業的測定法	238
4.6.5 ケーブル乾燥装置の実例	240
4.6.6 ケーブル含浸油の含有水分と電気特性	242
4.7 その他電気機器および材料の真空乾燥	242
4.7.1 真空含浸装置の型式	243
4.7.2 真空乾燥含浸の応用	245

5. その他の真空乾燥

5.1 粉体粒体の真空乾燥	247
5.1.1 粉粒体の乾燥	247
5.1.2 粉粒体の性質と現象	247
5.1.3 粉粒体材料に用いられる真空乾燥装置	248
5.1.4 真空攪拌乾燥機	252
5.1.5 真空箱型乾燥機 (棚段式)	256
5.2 電気冷蔵庫部品の真空乾燥	257
5.2.1 In-line 真空乾燥装置	258
5.3 真空コンクリートおよび真空土練機	261
5.3.1 真空コンクリート	261
5.3.2 真空コンクリートの施工の一例	262
5.3.3 真空コンクリートの性質	263
5.3.4 真空コンクリートの利点	265
5.3.5 減圧軽量コンクリート	265
5.3.6 真空土練機	267
索引	269

1. 真空乾燥と凍結乾燥の理論

1.1 緒 論

乾燥は吸収された物質（水分など）を除去する熱的な過程で、それに伴っていろいろな性質が変化する。性質の変化にはいろいろあるが、乾燥の目的となるのは、構造機械的熱的な性質の改善（煉瓦、木材、絶縁材料）、体積当りの発熱量と燃焼温度の増大、保存、貯蔵（生物材料、食品）、生化学的性質の改善（穀類）などである。

乾燥はきわめて広く行なわれている工程で、乾燥の寄与しない生産部門はないといってもよい。このために膨大なエネルギーが消費されているから、熱その他のエネルギーの消費量を極小にし、乾燥速度を速めるためには大きな努力が払われている。こうして熱、質量移動の研究は乾燥の学問の中で大きな部分を占める。しかし乾燥に伴う非可逆的な物理機械的、コロイド物理的あるいは生化学的な変化は乾燥の目的を構成するものだから、乾燥技術の進歩は材料のテクノロジカルな性質の研究の上で多くが達成された。こうして輻射、高周波の利用、各種方法の複合あるいは周期的方法などが開発された。特に熱的に不安定な物質では低温で乾燥することが必要であって、このため真空乾燥法あるいは凍結乾燥法が出現するにいたった。電気絶縁材料や微生物その他の生物材料がこの方法で乾燥される。特に最近数年の間に広く産業界の期待と注目を集めているのは食品の凍結乾燥である。

このようにして、乾燥の理論は2つの科学分科、熱・質量交換とコロイド的な毛管細孔性物体と水分との結合形態に関する学問とをその基礎としている。乾燥の学問の最近の研究方法はきわめて多岐にわたっていると同時に、真空乾燥と凍結乾燥との理論はまだ十分解明されていないといつてよいであろう。これらの多岐な分野を総合して、統一的で鮮明なパースペクティブを与えることは将来に待つこととして、考えられる理論的・実験的要因を数え上げておきたい。

1.2 熱・質量交換

1.2.1 一定断面の体積中の水分の移動

乾燥の過程では、水分その他の溶媒蒸気が材料の中を移動し、表面から除去される。この蒸気の移動は流体力学的な流れであることも、拡散であることもある。いずれにしても、一定温度の下における蒸気移動は次の形に表わすことができる。

$$Q' = -f\lambda' \frac{dp}{dl} \quad (1.1)$$

この式は熱の流れ $Q = -f\lambda \frac{dt}{dl}$ との類比を明らかにする。

Q' は移動する水分の量、 f は移動が起こる断面積、 λ' は移動速度（移動が分子流、層流あるいは乱流、また拡散であるかによって形が異なる。熱伝導率に対比すれば質量伝導度といってよいだろう）、 dp/dl は全圧または分圧の勾配である。以下では主として断面 f

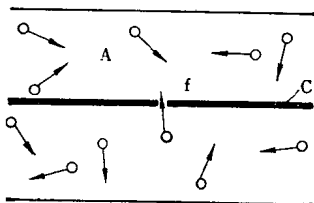


図 1.1 厚さのない小孔を通る分子流

が一定な場合を考える。

まず分子流の場合を取ってみる。図 1.1 で容積 A, B は平均自由行路より小さな直径の孔（断面 f ）を持つ薄い壁 C で区画されているとする。そうすれば容積 A から、容積 B に次のような気体量が移動する。

$$Q'_A = f \sqrt{\frac{M_A}{2\pi}} \frac{p_A}{\sqrt{RT_A}}$$

R : 気体常数, T_A : 温度 °K, M_A : A にある気体の分子量, p_A : その圧力。

同様に B から A では

$$Q'_B = f \sqrt{\frac{M_B}{2\pi}} \frac{p_B}{\sqrt{RT_B}}$$

もしも両容積を区画する壁 C の厚さ l が無視できない時はこれと異なる（孔壁が完全に滑らかなら l に依存しないはずであるが）。孔は円で直径 d とすると

$$Q'_A = f \frac{4}{3} \frac{d}{l} \sqrt{\frac{M_A}{2\pi}} \frac{p_A}{\sqrt{RT_A}}$$

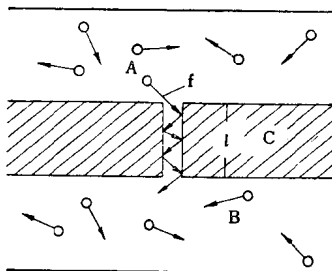


図 1.2 厚さのある小孔を通る分子流

$$Q'_B = f \frac{4}{3} \frac{d}{l} \sqrt{\frac{M_B}{2\pi}} \frac{p_B}{\sqrt{RT_B}}$$

(ここの数値係数は孔の形で変わる。たとえば一辺 d の正方形とすれば $4/3$ の代りに 1.41 となる)。もしも両容積に同じ気体があるとすれば、 A から B に移る気体の実際の量は上式の差になる。

$$Q' = Q'_A - Q'_B = f \frac{4}{3} d \sqrt{\frac{M}{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{R}} \frac{\frac{p_A}{\sqrt{T_A}} - \frac{p_B}{\sqrt{T_B}}}{l}$$

最後の因子を微分形に書けば

$$Q' = -f \frac{4}{3} d \sqrt{\frac{1}{2\pi R}} \frac{d}{dl} \frac{P}{\sqrt{T}} \quad (1.2)$$

となる。等温過程なら

$$Q' = -f \frac{4}{3} d \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \frac{dp}{dl} \quad (1.3)$$

となって、(1.1) 式の形になる。すなわち

$$Q' = -f \lambda'_{\text{mol}} \frac{dp}{dl} \quad (1.4)$$

$$\lambda'_{\text{mol}} = \frac{4}{3} d \sqrt{\frac{g}{2\pi R}} \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (1.5)$$

もしも孔の直径 d が気体分子の平均自由行路に比して大きければ、普通の流体力学的な流れになる。層流の場合には Hagen-Poiseur の式

$$Q' = -f \frac{d^2 r}{32 \eta} \frac{dp}{dl} \quad (1.6)$$

であらわされる (r は密度, η は粘性である)。したがって

$$\lambda'_{\text{lam}} = \frac{d^2 r}{32 \eta} \quad (1.7)$$

孔を流れる流れが乱流となるときは、上式中の数係数は Reynolds 数に依存するものになる (これらの場合は液体の流れでも成立つ)。

実際の乾燥では、乾燥材料の周囲を取巻いているのは空気および水蒸気の混合気体で、この混合気体の中に水蒸気が拡散して行く。

これを考えるために、次のような簡単な模型を考察することにする。断面積 f の開いた管の中に水 (または氷) があって、空気 (空気と水蒸気との混合気体) に囲まれている。水は蒸発し、空気中へ拡散して行く。空気は一定の速度で流れているとすれば、この水の蒸発は定常的と考えてよいであろう。過程は等温的であるとすると。

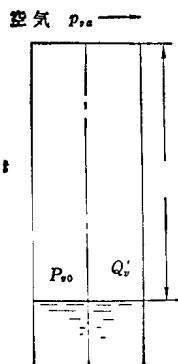


図 1-3 空気中への水蒸気拡散

このような過程では管内には空気の流れはないはずである。水蒸気の流れの速度を v としよう。

拡散では全圧力 p は一定である。

$$p_a + p_v = p$$

ここに p_a , p_v はそれぞれ空気および水蒸気の分圧である。したがって管内における分圧の変化は

$$-\frac{dp_v}{dl} = \frac{dp_a}{dl}$$

となる。Stefan の考えによれば、この空気と水蒸気との混合気体の分子間相互作用によって、分子間の相対速度、今の場合は水蒸気の速度 v 、および γ_a/M_a , γ_v/M_v (γ , M は密度、分子量) に比例する抵抗の力を生ずる。すなわち

$$-\frac{dp_v}{dl} = \frac{dp_a}{dl} = C_{av} \frac{\gamma_a \gamma_v}{M_a M_v} v \quad (1.8)$$

となる。 C_{av} はこの 2 種の気体の性質に依存する定数である。

定常となった拡散過程における管内の水蒸気の流量 Q'_v は

$$Q'_v = f v \gamma_a v = \text{const}$$

である。(1.8) 式から v を求めて、上式に代入すれば、

$$Q'_v = -f \frac{M_v M_a}{C_{av} T_a} \frac{dp_v}{dl}$$

となる。 $\gamma_a = p_a M_a / RT$ を代入すれば

$$Q'_v = -f \frac{M_v}{RT} \frac{(RT)^2}{C_{va} p_a} \frac{dp_v}{dl}$$

あるいは $p_a = p - p_v$ だから

$$Q'_v = -f \frac{M_v}{RT} \frac{(RT)^2}{C_{va} p} \frac{p}{p - p_v} \frac{dp_v}{dl} \quad (1.9)$$

となる。ここに $(RT)^2 / C_{va} p$ は空気への水蒸気の拡散係数 δ である。したがって結局

$$Q'_v = -f \frac{M_v \delta}{RT} \frac{p}{p - p_v} \frac{dp_v}{dl} = -f \lambda'_{vap} \frac{dp_v}{dl} \quad (1.10)$$

となる。この式は普通の拡散の式とは $p/p - p_v$ なる因子の存在が異なっている。

ところで、被乾燥物体は毛管の集合と考えられるから、(1.10) 式は乾燥のさいの水蒸気輸送の基本式と考えてよいであろう。

液体の沸騰点に近い温度で蒸発が起こるときは、蒸発面付近の蒸気圧は実際上混合気体

の全圧に等しい。 $p_v = p$ なる場合には蒸発係数 λ'_{vap} は無限になるが、このとき水蒸気の輸送は分子間力の内的抵抗に打ちかつ分圧勾配によって起こるのではなく、外抵抗（壁での摩擦）に打ちかつ全圧の勾配によって起こることになるはずであろう。

管の開孔端が水面上 l の所にある場合を考えれば、水面には温度 T における飽和圧力 p_{v0} が生ずる。空気流中の水蒸気分圧を p_{va} とする。(1.10) 式は

$$Q'_v = f \frac{M_v \delta}{R} p \frac{d}{dl} \ln(p - p_v)$$

と書けるから、積分形にして、次の式が得られる。

$$Q'_v = f \frac{M_v \delta}{RT} p \frac{1}{l} \ln \frac{p - p_{va}}{p - p_{v0}} \quad (1.11)$$

いま平均の水蒸気分圧 p_{vm} を次式で定義する。

$$p - p_{vm} = \frac{p_{v0} - p_{va}}{\ln \frac{p - p_{va}}{p - p_{v0}}} \quad (1.12)$$

もしも $p_{v0}, p_{va} \ll p$ であるか $p_{va} \approx p_{v0}$ であれば、級数展開の第1項だけに止めて

$$p_{vm} = \frac{p_{v0} + p_{va}}{2}$$

となる。(1.12) 式の p_{vm} はしばしば対数平均と呼ばれる。このように定義された平均分圧を用いれば (1.12) 式は次のように書かれる。

$$Q'_v = \frac{f}{l} \frac{M_v \delta}{RT} \frac{p}{p - p_{vm}} (p_{v0} - p_{va}) \quad (1.13)$$

Schirmer¹⁾ の研究によれば、20~90°C の温度範囲で、水蒸気と空気との混合気体の拡散係数は次式であらわされる。

$$\delta = 0.0803 \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} (\text{m}^2/\text{h})$$

ただし p_0 は1気圧である。

図 1.4 a, b, c に $p = 1, 0.1, 0.01$ atm における $Q'_v l / f$ の比 p_{v0}/p , p_{va}/p_{v0} に対する関係を示す。

全圧を一定とすれば、 p_{v0}/p なる比から、

1) Krischer, O. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer, 1963, s. 175

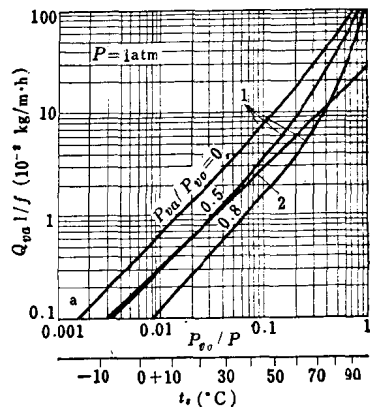


図 1.4 (a) 拡散の速さ

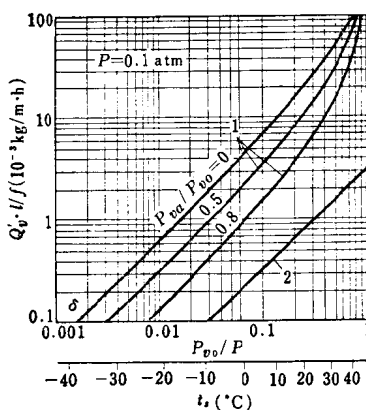


図 1-4 (b) 拡散の速さ

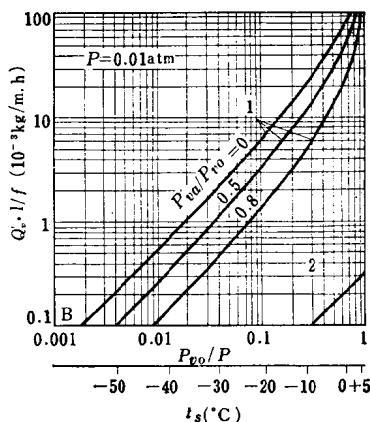


図 1-4 (c) 拡散の速さ

一義的に温度が定まるので、横軸の下に温度を示しておいた。

図の中の曲線 2 は、大気圧下の分子の自由平均行路とコンパラブルな細孔（直径 $= 6 \times 10^{-6}$ cm）から effusion を起こす場合の蒸発量を示した。

図から、与えられた (f, l, p, p_{va}) 条件の下で蒸気の移動速度が急激に増す温度がどんなものであるかがわかる。また空気中の蒸気分圧 p_{va} の低下が、高温では、低温におけるほどいちじるしい影響を及ぼさないことが知れる。たとえば $p = 1 \text{ atm}$ で、 $Q_v' l / f = 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{h}$ を得ようとするとき、周囲の蒸気分圧 p_{va} が 0 のとき（たとえば吸湿剤を使っているとき）、 12°C の温度でよいが、空気の相対湿度が 80% ($p_{va}/p_{vo} = 0.8$) の時は 38°C にならねばならない。これに対して $Q_v' l / f = 100 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{h}$ を得ようとする時は、 $p_{va} = 0$ では 90°C 、 $p_{va}/p_{vo} = 0.8$ では 97°C となる。どのグラフでも温度が高くなると、曲線はたがいに近づくのである。すなわち比較的湿度の高い空気でも、少し温度を上げれば、乾いた空気の時と同じ蒸発速度が得られるのである。

以上の議論は蒸発面が材料表面から内部へ後返するような乾燥条件に関するものである（このような条件については後述する）。

グラフから周囲の圧力 p の影響がはっきりわかる。 p を小さくすることは、すなわち真空乾燥だが、真空度を適当に選定すると、一定温度の下で、相当広い範囲に蒸発速度を変化させることができる。

グラフの曲線 1 と 2 を比較すると、次のようにいえることができる。

1. 温度を上げれば、effusion による蒸発速度は高くなるが、拡散による蒸気移動のよ

うに急速でない。

2. 周囲の空気の圧力を下げても, effusion による水蒸気移動を加速することはできない。これに反して拡散による蒸発量は顕著に増大する。

以上のモデルはきわめて簡単なものであった。実際の系に近づけるためには次のような補正が考えられる。

a) 乾燥材料の面積 F 中, 細孔断面の占める総面積 f_p であるとする。もしも細孔の分布が一様であるとすれば, 材料の厚さを l として, 材料の全体積 $F l$ 中, 細孔の空隙体積 $f_p l$ となるから, $f_p l / F l = f_p / F$ は空隙率 Ψ を示す。この逆数 $1/\Psi = \mu_F = F / f_p$ は, 材料表面積を基準として考えた時の拡散抵抗の増大の度合を示す (拡散でなく, effusion としても, 流れとしても同様な議論ができる)。

b) 水蒸気の輸送通路 l_p はジグザグであって, 材料の厚さ l より大きい。 $l_p / l = \mu_l$ は材料の厚さを基準とした時の, 拡散抵抗の増大を示す。

なお, 蒸気の運動が流れである場合には, 断面の形も考慮せねばならない。

水蒸気の輸送量を(1.10)式の第2形で書けば, すなわち $Q' = -f \lambda' \frac{dp}{dl}$ と書けば, これは effusion でも, 流れでも同じである (λ' の形が変わるだけである)。材料の表面積 F , 厚さ l を基準として考えれば, 上記の因子を導入して

$$Q' = \frac{F}{\mu_F} \lambda' \frac{dp}{\mu_l dl} \quad (1.14)$$

となる。したがって

$$\mu = \mu_F \mu_l \quad (1.15)$$

なる積は, 材料の構造を特性づける構造因子である。構造因子 μ を導入すれば

表 1.1

	比 重 kg/M ³	Ψ	$\mu_F = \frac{1}{\Psi}$	μ	$\mu_l = \mu \Psi$
麩	400	0.725	1.38	1.6	1.16
粉 ミ ル ク	570	0.61	1.63	2.5	1.5
"	790	0.454	2.2	3.0	1.4
	750	0.482	2.15	3.3	1.6
脱 脂 粉 ミ ル ク	135	0.907	1.1	1.7	1.6
乾 燥 野 菜	295	0.80	1.25	2.6	2.1
卵 の 粉 末	305	0.79	1.27	2.4	1.9
"	450	0.69	1.45	3.7	2.6
小 麦 粉	725	0.5	2.0	6.8	3.4
チ ョ コ レ ー ト 粉 末	980	0.322	3.1	15.2	4.9

$$Q' = F \frac{\lambda'}{\mu} \frac{dp}{dl} \quad (1.16)$$

となる。この μ は実験的に定めることができる。材料の空隙率 Ψ を測定すれば、細孔のジグザグな度合 μ_l が、(1.15) 式により

$$\mu_l = \mu \Psi \quad (1.17)$$

で求まる。

表 1.1 はミュンヘン食品加工輸送研究所における研究結果である¹⁾。

1.2.2 外部熱・質量交換

湿った材料の乾燥過程では、液体または固体の水が、相変換の熱を吸収して水蒸気に変化し、この水蒸気は物体の表面から除去されて行く。すなわち物体の内部に熱と水分の移動があり、物体と周囲との間にも熱および水分の交換がある。この内部と外部との熱質量交換の共働で乾燥の動態がきまってくる。まず物体表面における模様を調べる。

熱交換の強度 q は周囲の気体温度 t_c と物体表面の温度 t_s の差 Δt に比例する。

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_c - t_s \\ q &= \alpha(t_c - t_s) \end{aligned} \quad (1.18)$$

この熱交換係数 α は周囲気体の性質条件や熱流強度によって異なる。このような変化を調べるのには、無次元数を使うのが便利である。いまの場合は

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_c} \quad (1.19)$$

l : 物体の特性長さ

λ_c : 周囲気体の熱伝導度

で定義される Nusselt 数が使われる。

湿材料からの液体蒸発の強度 q' は材料表面上の水蒸気分圧 p_s と周囲気体中の水蒸気分圧 p_c との差 Δp に比例する。

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_s - p_c \\ q' &= \alpha'(p_s - p_c) \end{aligned} \quad (1.20)$$

この質量交換係数 α' についても、 α におけると類似な無次元数を導入する。

$$Nu' = \frac{\alpha' l}{\lambda_c'} \quad (1.21)$$

ただし、 λ_c' は周囲気体における拡散係数である。 λ_c' の値は前に示した。湿った空気の熱

1) Krischer, O. *ibid.* s.185

伝導度 λ は、相対湿度を φ として

$$\lambda = \lambda_0 + 0.0041 \varphi \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \quad (1.22)$$

λ_0 : 乾燥空気熱伝導度

でだいたい表わすことができる。 N_u' は Stanton 数と呼ばれるものであるが、熱の場合とのアナロジーを強調して拡散 Nusselt 数とも呼ばれる。

N_u , N_u' については多くの研究がある。強制対流で水蒸気が物体表面から運び去られる場合には Reynolds 数に注目されることが多い。物性、空気乾燥球温度差その他も考慮に入れられる。

N_u , N_u' の実験的測定では、温度分布、分圧分布の測定が良い結果を与える。

図 1.5 には N. F. Dokuchaev が羅紗の乾燥において求めた分布曲線を示した。図からわかるように、物体表面付近では、温度分布も水蒸気分圧分布も線型である、その後でなめ

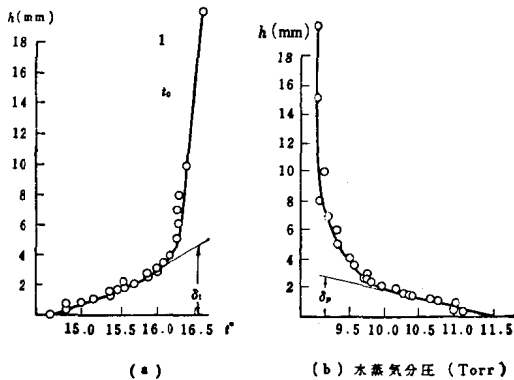


図 1.5 表面上の温度、圧力分布および境界層

らかに曲がって、周囲大気の温度、分圧に漸近する。線型部分を延長するとき、大気値に到達する位置までを境界層(厚さ δ)と呼ぶことにする。図では、温度分布の境界層厚 $\delta_t = 3.7\text{mm}$ 、分圧分布の境界層厚 $\delta_p = 3.0\text{mm}$ となっている。 δ_t , δ_p を使えば

$$q = \lambda_c \frac{\Delta t}{\delta_t}, \quad q' = \lambda_c' \frac{\Delta p}{\delta_p} \quad (1.23)$$

と書かれるはずだから

$$N_u = \frac{l}{\delta_t}, \quad N_u' = \frac{l}{\delta_p} \quad (1.24)$$

乾燥過程における蒸発強度が小さい場合には、乾燥は恒率乾燥期と減率乾燥期とがあ