

## 食品の凍結乾燥と問題点

細川 明\*・相良 泰行\*

## I 凍結乾燥の意義と現状

食品を乾燥する本来の目的はその食品の貯蔵および輸送性を高めることにある。また従来の乾燥技術では、食品は乾燥すると乾燥前とは異なる食品になってしまうのが大方であった。しかし、近年、乾燥食品には簡単な調理により短時間に乾燥前の状態に復元すること、すなわち形状・味・風味 (flavor) ・色・栄養価 およびテクスチャ (texture) などの化学的・物理的屬性を維持することが要望されるようになってきた。

凍結乾燥法は原理的にはこれらの条件を満足する理想に近い乾燥技術である。この方法を食品に適用する試みは、1930年代にアメリカの Flosdorf らによって開始され、第二次世界大戦中は、アメリカとドイツで軍事目的のために経済性を無視して研究開発が進められた。これらの研究成果を基礎にアメリカでは、1960年代に民間で工業化され、1966年の生産量は乾燥重量で人口1人当たり226.8gに達している<sup>1)</sup>。

我が国では、1960年に最初の食品凍結乾燥工場が設立され、1973年には工場数11に達し、これら業界の総水分除去能力は概算 30t/day、乾燥前の材料重量で13,500t/year、人口1人当たり135gの生産量となっている。また工場の%は近年のインスタント食品の消費の急増に対応するために、1970年以後に設置されたものである<sup>2)</sup>。今後とも、凍結乾燥法は付加価値の高い高級調理食品や大量消費が見込まれるインスタント食品原料の乾燥に広く利用されてゆくものと予想される。

凍結乾燥法はその研究の当初、在来の熱風乾燥法などに代る理想的な方法であると考えられたが、実際には原理的に可能と考えられた理想的条件を実現するには技術的困難が多く、実用化の域に達した食品の種類も必ずしも豊富ではない。例えば、我が国の凍結乾燥食品の消費形態を目的別に要約すると次のようになる。

- 1) 生のままで乾燥し復元して利用するもの (ネギ・トロロ・ノリ・薬味など)
- 2) 風味の大切な液状・ペースト状材料の粉末化 (コーヒー・紅茶・緑茶; ミソ・ショウユなどの調味料お

び香辛料; 製果原料用果実ジュースなど)

- 3) 凍結乾燥食品の添加による調理食品の品質向上 (インスタント・ラーメン類の具; お茶漬の中の漬菜・カツオブレーク・ウメボン・ナマショウガ・シソ; 吸い物の中のマツタケ, 調理済カレーなど)

製品の価格面でも在来の乾燥法にくらべ2~3倍となっている。これは乾燥時間が長く生産コストが高くなっていることと、製品の品質を維持するために必然的に工場、包装・貯蔵室の環境条件、包装材料と方法などに細心の考慮を払う必要があり、このための設備コストがかさむためである。

これらの理由から、現在では凍結乾燥法は在来の乾燥法に全面的に取って代るものではなく、それらと競合しながら徐々にその適用範囲を拡大してゆくものと思われる。また食品に生ずる物理的変性を積極的に活用するなど、乾燥法の特徴を生かした食品の開発手段として利用する試みも現れている。

いずれにせよ、食品工業の分野にあるて、質・量共に今後の急速な発展が期待され、それが技術的な問題の解決に負うところの大きな分野であるといえる。

## II 凍結乾燥の原理と特徴

凍結乾燥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プロセスである。Fig. 1に純水の三重点 (絶対圧力 4.579 Torr, 温度 0.0098°C<sup>3)</sup>) 付近の状態図を示す。昇華現象は図中の  $Q_1$  から  $Q_2$  へのプロセスで示され、固相から気相への相変換は三重点以下の圧力条件のもとで、昇華潜熱を供給することにより起る。食品材料の場合には先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)。二次乾燥期の機構は真空乾燥のそれと同様であるから、凍結乾燥機構の特徴は一次乾燥期の昇華乾燥 (sublimation dehydration) 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。

Fig. 2に a) 液状材料, b) 固形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。b) の場合には、容器底部から伝導、表面から輻射によって供給された熱がそれぞれ凍結層、乾燥層を通り、昇華面で潜熱と

\* 東京大学農学部農業工学科

して消費される。昇華面で発生した水熱気は乾燥層を経てコンデンサ面(図中には示されていない)で凝結する。b)の場合には、熱が両面から供給され、乾燥層が凍結層を取巻くよりに発達する。またこの過程で、a) b)共に乾燥層では残留水分の乾燥も進み、所望の含水率が得られた時点で乾燥が終了する。

このようにして得られる凍結乾燥食品の一般的特徴とその得失は次のようである。

- 1) 従来の乾燥法にくらべ、食品は終始低温で処理されるため、熱的変性が少ない。
- 2) 絶乾状態まで乾燥されるため、バクテリアや酵素の活性が停止し、適当な包装方法を用いることにより、長期貯蔵による変質が少く、軽量で常温輸送が可能となる。
- 3) 形態の変化が少ない(固形材料)
- 4) 乾燥による表面硬化(case hardening)が無く、組織が多孔質となるため復元性が高い。

これらの特徴は対象とした全ての食品材料に対して得られるとは限らない。イチゴ・セルリ・マグロでは、化学的変質は無いが、テクスチャなどの破壊が極端に生ずる。また多孔質で復元性の高いことは調理や加工処理の時間を短縮する点では有利であるが、包装・輸送・貯蔵

の面からは機械的衝撃・振動で簡単に崩れやすく、吸湿や酸化による変質が速いなどの難点がある。

### III 凍結乾燥工程の問題点

食品材料の凍結乾燥工程は前処理、凍結、乾燥および包装工程に大別される。本稿では、前処理から包装までの全工程を総称する場合は「凍結乾燥」、工程中の「凍結」に続く狭義の凍結乾燥工程は単に「乾燥」と略称して区別する。

一般の食品加工工程と同様に、凍結乾燥工程の特徴は「品質の面で許容される範囲の操作であり、個々の工程は前の工程の影響を受け、後の工程に影響を及ぼす」ことである。従って全工程にわたって問題点を検討し、改善する必要があるが、筆者らは優れた品質の乾燥製品を創り出すことが先決であり、この意味で主工程で、乾燥装置が直接関与する凍結および乾燥工程について、その基礎的問題点を考察する。

1. 凍結工程 凍結工程における操作の諸条件は乾燥製品の構造に影響を及ぼす。さらに、この構造の物理的性質は乾燥過程の熱と物質移動を支配する度合いが大きく、乾燥速度の律速因子となる場合が多いことが知られている。固形材料の場合には、この構造がテクスチャを決定する因子となる。ここでは、固形材料を例にとり、材料内の氷の生成と品質の面から操作上の問題点を検討する。

一般に食品を急速凍結すると、その組織内部に形成される氷結晶は小さくなり、逆に緩慢凍結すると大きくなり、かつ組織は機械的に破壊される<sup>4)</sup>。

松田<sup>5)6)</sup>は、凍結乾燥したスケソウダラの組織は急速凍結した方が緻密で、緩慢凍結したものはスポンジ化すると報告している。Rapatz と Luyet<sup>7)</sup>らによれば、牛肉を凍結すると、氷結晶が繊維組織の縦方向に氷の核(ice-spear)を造りながら生長し、氷柱(ice-column)の生長速度は横方向の約20倍であり、Luyet<sup>8)</sup>は氷結晶の存在を識別できないような凍結速度が存在すると予測している。

他方、松田<sup>9)</sup>はトコロテンを液体窒素で瞬間的に凍結すると、材料表面に著しい突起と亀裂が生じて全体的に変形し、凍結が均一に進まないことを観察している。Hamre と Stadelman も<sup>10)</sup>鶏肉について同様の結果を報告しており、急速凍結にも品質維持の面から限度があると思われる。

氷結晶の構造は材料の貯蔵中に

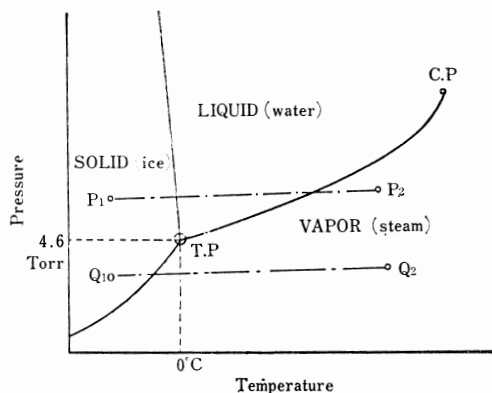


Fig. 1 Phase diagram for pure water

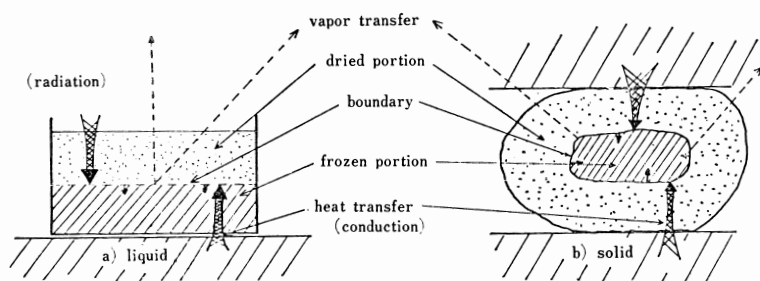


Fig. 2 Regression of ice phase boundary during freeze drying.

も変化し、一般には大きくなるのが知られている。松田<sup>11)</sup>、<sup>12)</sup>、<sup>13)</sup>は、凍結方法及び貯蔵温度がトコロテンおよびスケソウダラの品質におよぼす影響について調べ、スケソウダラについては凍結方法より貯蔵温度の影響が大きく、 $-25^{\circ}\text{C}$ 以下の貯蔵温度では品質に著しい変化は観られないが、これ以上の温度になるとテクスチャが急激に劣化すると報告している。Haugh<sup>14)</sup>は、この現象について、凍結により生成された氷の核が貯蔵中に質量が等しく直径のより大きな氷結晶へ再形成され、また細胞内結晶の外部への移動、すなわち氷結晶の配置転換が生ずるためと推論しているが、その機構は解明されていない。

このように品質を維持する目的から、凍結速度は材料に亀裂や破砕を生じない範囲で、できるだけ速い方がよいといえる。しかし前述のように乾燥工程からくる制限も加味しなければならず、凍結条件はこれらの諸条件を総合的に検討して決定されねばならない。このために、凍結条件による材料組織内の氷の生成と貯蔵中の変化の機構、これによって影響を受ける乾燥層の構造とテクスチャおよび移動現象に関する物性値などの基礎的資料を得るための研究が望まれる。

2. 乾燥工程 この工程の問題点は品質を損うことなく乾燥速度を向上させることにある。乾燥速度は真空下における材料内および装置内の熱と物質移動速度に支配される。昇華乾燥の速度は相変化を伴う熱と物質の同時移動問題として、熱工学的立場から種々の解析が試みられてきた。しかし、これらの大部分は工業材料を対象としたものであり、食品材料を対象とした場合、二次乾燥期まで含めた全体の機構は未だ完全に説明されていない。

乾燥速度に関連する因子として、材料の物理的性質、供給熱量と方法および圧力操作などが考えられる。これらの個々の因子に関する個別的研究は数多いが、その成果は実際の操作に有効に利用されるまでに至っていない<sup>15)</sup>。これは、乾燥速度に関する諸因子の相互関連性を体系化して実際の操作に結びつける努力が欠如していたためと考えられる。筆者らはこれらの個々の成果を基礎にして全ての因子の相互関連性を移動現象の立場から整理して体系化し、最適な運転操作を得るための基礎的研究を意図するものであるが、ここでは乾燥速度の律速因子を整理し、食品材料に特有な乾燥条件として特に考慮しなければならない問題点について考察する。

#### a) 乾燥速度の律速因子

一次乾燥期における乾燥速度の律速因子を考察するために、Fig. 3に示すようなモデルを考える。Fig. 2(a)のように乾燥層が凍結層の片側に形成される場合には、

このモデルがそのまま実際の乾燥過程を表現し、b)のように乾燥層が凍結層の両側に形成される場合には、底面が断熱されていると考えることにより、このモデルが材料の片側だけを表現していると想定する。したがってFig. 3に示されるモデルにより両者の乾燥過程を普遍的に取扱うことができる。

#### 1) 熱移動の律速因子

熱が材料の表面および底面から供給される場合、それぞれの熱流速を  $q_1$  および  $q_{II}$  とする。 $q_1$  の律速因子は表面温度  $\theta_s$  と乾燥層熱伝導率  $\lambda_I$ 、 $q_{II}$  のそれは底面温度  $\theta_b$  と凍結層熱伝導率  $\lambda_{II}$ 、両者に共通な因子は昇華面温度  $\theta_f$  である。このうち  $\theta_s$  と  $\theta_b$  はそれぞれ食品の品質を維持するための許容温度  $\tau_I$ 、 $\tau_{II}$  以下に制限される。このような制限下において  $q_1$ 、 $q_{II}$  は  $\lambda_I$ 、 $\lambda_{II}$  および  $\theta_f$  により律速される。 $\theta_f$  は通常  $\theta_b$  および  $\lambda_{II}$  により決定される。しかし食品材料では凍結層の温度分布が均一になり、 $\theta_b = \theta_f$  となる場合が多い(例えば16)。したがって、 $\theta_f$  も  $\tau_{II}$  により間接的に制限されることになる。 $\tau_I$ 、 $\tau_{II}$  が固定されれば、 $q_1$  の律速因子は  $\lambda_I$  になるが、乾燥層は通常多孔質構造となり  $\lambda_I$  の値は小さく、牛肉の場合には  $\lambda_I = 0.03 \text{ kcal}/(\text{mh}^{\circ}\text{C})$  であり、これは良好な断熱材の熱伝導率に相当する。 $q_{II}$  は  $\theta_b \leq \tau_{II}$  の関係により制限されるため、 $\tau_{II}$  の条件に依存すると考えて妥当である。

底面が断熱されている場合には、 $q_1$  のみが熱供給の手段であり、大部分の固形材料の昇華乾燥速度は熱供給により律速される場合が多い。

#### 2) 物質移動の律速因子

物質流速の律速因子は次のように分類される (Fig. 3参照)。

$w_1$ : 昇華速度

$w_2$ : 乾燥層の蒸気移動速度

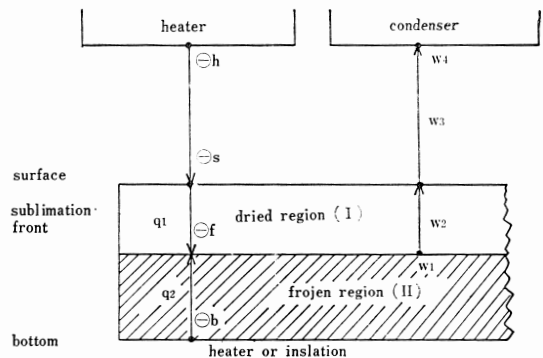


Fig. 3 Food model for analysis of heat and mass transfer during sublimation dehydration.

$w_3$ : 装置内空間の蒸気移動速度

$w_4$ : コンデンサ面の蒸気凝結速度

全体の流速は  $w_1 \sim w_4$  のなかの最小速度の因子により律速される。 $w_1$  は主に昇華潜熱の供給速度,  $w_2$  は乾燥層の通過抵抗,  $w_3$  と  $w_4$  は圧力, コンデンサ表面温度など装置能力に依存する。

従来, 昇華乾燥機構は熱移動に支配されると仮定され, 物質移動の律速因子や蒸気の流動状態などは簡略化もしくは無視されて解析されている。しかし, 元来凍結乾燥機構は熱と物質移動のダイナミック・バランスのうえに成立するものであり, このような取扱いは片手落ちをまぬがれない。また現実には装置の設計・操作は, 物質移動に関する定量的資料が無いために, 試行錯誤による経験に拠って行なわれているのが実状である。例えば, 真空系内のコンデンサの設計に関する基礎資料は皆無であり, 装置の設計上「真空下における着霜現象」の研究は今後の重要課題である。

b) 乾燥層・凍結層の許容温度  $\tau_I, \tau_{II}$

$\tau_I$  は材料表面の温度上昇による表面のこげ (scorch), 栄養素, 味, 風味およびビタミンの破壊を生じないなどの品質に関する諸条件を総合的に判断して決定されるべきであるが, 実際にはビタミンCの破壊を生じない60°C以下の温度が1つの目安となっている<sup>17)</sup>。

$\tau_{II}$  は品質維持の面に限れば, 原則として共晶点以下の低い温度に保つことが望ましいが, 乾燥速度を高めるためには逆に高い温度に保つ必要がある。この両方の相反する条件を満たすために,  $\tau_{II}$  には製品の商品価値を失わない許容温度の範囲で, できるだけ高い温度条件を採る必要がある。元来, 固形材料の組織内に含まれる結合水 (bound-water) を完全に氷結させることは不可能であるとも言われており, また自由水 (free-water) でさえも完全に氷結した状態に保つためには, 相当の低温を必要とし, 例えば牛肉の場合には約-30°C以下となる<sup>18)</sup>。他方, Neuman<sup>17)</sup> らによれば 140ml のミルクを  $\theta_s = 80^\circ\text{C}$  に保ち,  $\theta_b = -25^\circ\text{C}$  と  $-180^\circ\text{C}$  で乾燥した場合,  $\theta_b$  間の 8°C の温度差が乾燥時間に3倍の差をひき起し, 底面加熱の影響が極めて大きいことを示している。

筆者らは  $\tau_{II}$  に共晶点を用いることは経済的に不可能であり, 個々の食品の凍結点から共晶点に至るまでの氷結率と乾燥過程の圧力および材料に融解・発泡が生ずる温度の関係を定量的に検討して決定されるべきであると考えている。 $\tau_I, \tau_{II}$  の条件は今後厳しい乾燥条件が要求されてくるに伴い, 最初に検討を要する問題であり, 品質と操作条件の観点から組織的研究が望まれる。

c) 凍結条件と乾燥速度

Table. 1 Drying time (hr) for shrimp (Lusk, 1965)

Platen temperature (°C)	Chamber pressure (Torr)	Temperature of freezing medium °C	
		-17.8	-195.5
121.1-51.6	0.1	8.0	*
79.4	0.1	8.0	9.5
79.4-51.6	0.1	8.5	11.5
51.6	0.09	10.5	14.0
79.4	0.08	8.0	*
79.4	1.50	8.0	*

一般に凍結速度が速いと乾燥速度は遅くなる。逆の場合には, 材料内に大きな氷結晶が生成され, 乾燥層の空隙率大きくなって蒸気の通過抵抗が小さくなり乾燥速度は速くなることが知られている。しかし, 氷結晶が大きすぎて組織に機械的損傷を与えると, 昇華面へ熱を伝える媒体としての機能, すなわち  $\lambda_1$  の低下を招き品質も劣化する。

Lusk<sup>19)</sup>によれば, -17.8°Cの空気を用いて凍結したエビ (shrimp) の乾燥時間は 8.0hr であり, 液体窒素 (-195.5°C) に浸漬して凍結したものは 9.5hr を要する。彼等の実験結果を加熱板温度, 圧力条件と共に Table. 1 に示す。Hamre はダイス状に整形した鶏肉を液体窒素スプレー法, エアー・ブラスト (-29°C) 法および平板接触凍結法 (-15°C) で凍結した場合の乾燥時間の差は後者の2つの方法間では認められず約8時間であったが, 液体窒素スプレー法では約9時間を要したと報告している。また Wang<sup>20)</sup>らによれば, 緩慢凍結した牛肉の復元後の品質は, 液体窒素で急速凍結したものとほとんど変わらない。また筆者らの観察によれば, 凍結時の熱流の方向と氷結晶の成長方向とが一致しており, 氷結晶が昇華後乾燥層の蒸気の通路を構成するものと思われる。

復元後の品質の許容範囲内で材料を緩慢凍結し, 牛肉などでは筋繊維の方向と熱・物質流の方向が一致するように整形し, 凍結・乾燥すれば乾燥時間の短縮に有利であると考えられる。いずれにせよ, 凍結操作と凍結層・乾燥層の移動現象に関する物性値との関係が明らかにされねばならない。

d) 溶質濃度

固形材料内に含まれる水溶液の溶質濃度は通常操作不可能な量であるのに対し, 液状材料の濃度は操作可能な量である。したがって, 固形材料の場合には固体の組織の構造が移動現象を支配し, 液状材料の場合には濃度の関与する度合いが大きいと考えられる。一般には液状材料に関して, 濃度の増加は乾燥層の  $\lambda_1$  を大きくするが, 蒸気の通過抵抗は大きくなるため  $w_2$  は小さくなり, 熱の過剰供給による凍結層の発泡をひき起す危険性が増すとされている。

Monzini<sup>21)</sup> らによれば、オレンジの濃縮ジュースパウダ (42°Bx) の平均生成量は 354g/(m<sup>2</sup>h)、天然ジュース

では 48g/(m<sup>2</sup>h) であり、濃縮ジュースの方が約7倍多い。また天然ジュースは乾燥の初期段階で比較的高い

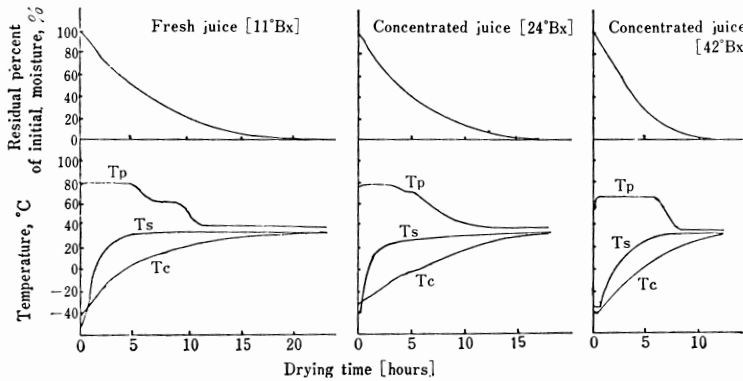


Fig. 4 Effect of concentration of orange juice on drying time (Tp : platen, Ts : surface, Tc : center) (Monzini, 1969).

乾燥速度を示すが、時間の経過と共に濃縮ジュースより低下する。乾燥時間は天然ジュース、濃縮ジュース (24°Bx) および (42°Bx) がそれぞれ 23, 18 および 12hr である (Fig. 4 参照)。Fig. 5 に Sharon<sup>22)</sup> らの報告した トマト・ジュースの放射加熱による乾燥特性を示す。放射加熱板の温度を試料表面温度が 60°C を超えない範囲で最高 140°C まで上昇させている。試料厚さは 8 mm、平均乾燥速度は 0.85kg-water/(m<sup>2</sup>h)、乾燥時間は 9 hr

である。Table. 2 に濃度、材料厚さ、乾燥サイクル、平均乾燥速度、製品生成速度および熱供給法について整理されたものを示す。この表では全乾燥時間の平均乾燥速度が表示されているので、昇華乾燥期の速度と濃度の関係は明確ではないが、同じ 8 mm 厚さの材料で 28°Bx, 22°Bx の乾燥サイクルと平均乾燥速度を比較すると、いずれも 22°Bx の方が有利である。Foda<sup>23)</sup> らは、オレンジとグアバ (guava) ジュースの乾燥速度が、濃度が高くなるにつれて低下する傾向にあると報告している。

溶質濃度に関する報告は数少く、引用した報告の凍結条件、乾燥速度の定義などが不統一であり、また相反する結果も報告されている。このように依然として、溶質濃度と乾燥速度の関係は不明である。この問題の1つの解決法として、先ず濃度と凍結条件が乾燥層の構造と物性値に及ぼす影響を定量的に明らかにし、次にこれらのデータを基に乾燥過程のシミュレーションから最適条件を求める方法が考えられる。

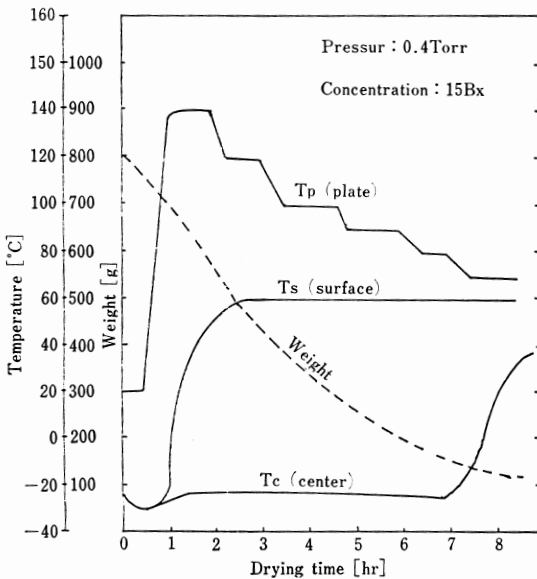


Fig. 5 Typical freeze-drying cycle for tomato juice (Sharon, 1969).

Table. 2 Effect of concentration and slab thickness on drying time of tomato juice (Sharon, 1969).

Concentration °Bx	Slab thickness mm	Drying cycle hr	Ave. drying rate kg-water/m. hr	Production rate kg-product/m. hr
a) Drying through one face of slab				
28	8	20	0.30	0.13
22	10	11	0.77	0.24
22	9	9	0.85	0.26
22	8	7.5	0.91	0.28
22	5	5	0.85	0.26
15	8	9	0.85	0.15
6	6	8	0.77	0.06
b) Drying through both sides of slab				
22	15	8.5	1.50	0.47
22	10	5	1.70	0.53
22	5	3	1.40	0.44

## e) 圧力操作

従来、乾燥過程の圧力制御は積極的には行なわれておらず、装置内空間は乾燥の初期から終期まで連続的に排気され、この過程の全圧変化は1~0.001Torrの範囲にあるのが普通であった。しかし、乾燥の進行段階に応じて圧力を制御することは乾燥速度の向上、含水率の管理の面で有利であり、最適操作法を考える必要がある。

全圧を構成する分圧は非凝縮性の空気と凝縮性の水蒸気の分圧に大別される。空気は真空ポンプ、水蒸気はコンデンサに凝結させて排気される。したがって、圧力操作には、全圧とともに分圧操作が含まれる。圧力が関係する操作上の問題は次の2点に整理される。

## 1) 一次乾燥期の最適圧力操作

## 2) 乾燥終了点の決定

1)については、前節a)で述べたように、乾燥速度が $\lambda_1$ と乾燥層の透過係数 $K$ に負うところが大きく、この両者が圧力により変化することがHarper<sup>24)</sup>らの牛肉、リンゴおよびモモに関する実験で明らかにされており、いずれも圧力が高いほど $K$ は大きくなり有利である。また昇華面で発生した水蒸気の駆動力は昇華面と気相中の水蒸気の蒸気圧差である。このため昇華面の温度を高く、気相中の蒸気圧を低く保つ必要がある。

昇華面温度に関して、片山ら<sup>25)</sup>は水を含んだ標準砂充填層の昇華面温度が乾燥層厚さが増すと気相圧力とは無関係となり、単に乾燥層と凍結層の二相熱伝導問題となると考えて解析し、実験結果を説明している。しかし、この仮定が食品材料に対して普遍的に適用できるかどうかは不明であり、さらにFig. 2のb)に示されるように乾燥層を通じてのみ熱が供給される場合には、凍結層および昇華面の温度は単に熱伝導だけでなく、昇華面の蒸気圧、全圧および昇華による顕熱降下を無視できない場合もあると考えられ、実験的検証が必要である。

このように、一次乾燥期の圧力操作は凍結層と昇華面の温度、乾燥層の熱伝導率と透過係数および全体的な物質移動速度と関連があり、これらの関係を解明すると共に、品質の面から与えられた熱的操作の制限下で、乾燥速度を最高に保つための圧力操作法を開発する必要がある。

乾燥は材料水分が所望の含水率に達した時点で終了するのが望ましいが、現在のところ、含水率を検出する方法が無く、乾燥終了点は乾燥時間やチャンバ全圧から経験的に決定されている。乾燥終了点の決定は乾燥サイクルを完成させるうえで、解決しなければならない重要な問題点の1つである。

乾燥終了点の含水率は低いほど良いというものではなく、復水後の品質や経済的条件を検討して最適含水率を

決めなければならない。したがって、二次乾燥期の操作上の目的は材料内水分分布が均一な状態で最適含水率をできるだけ短時間で得ることである。このために熱供給法と圧力操作法の最適化が必要となる。特にこの期間の圧力は、材料温度が $\tau_1$ に制限されるために、実質的な制御量となる。

この期間の全圧は材料より発生した水蒸気分圧に漏洩空気分圧を加えたものであり、これらの圧力の制御には材料の含水率を直接検知もしくは予測して行う方法が考えられる。直接検知の方法はプロセス・コントロールの立場からは理想的であるが、技術的に困難な点が多く、生産規模の装置でこの方法が実用化された例は無いようである。予測の方法を採るためには、材料の含水率と温度、圧力および乾燥時間の関数関係が明らかにされる必要がある。これらのデータが得られれば、例えばコンピュータの導入により、含水率の予測、乾燥終了点の決定と同時に、熱供給や圧力操作の自動制御も可能となる。ミニ・コンピュータの価格が低下している現在、1台のミニ・コンピュータにより、数基の乾燥装置の全乾燥過程を自動的制御する方式が考えられる。このためには、この方式のソフト・ウェアに資するための基礎的データが要求されるものと思われる。

## 参 考 文 献

- 1) 木村進;食品の凍結乾燥, 真空, 第6巻12号 pp.470~484 (昭和38年)
- 2) 仙波晋;植物性食品の凍結乾燥, 冷凍, 第48巻 550号 pp.111~117 (昭和48年)
- 3) Sears, F.W.; Thermodynamics, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY INC. p.92 (1969)
- 4) Spicer, A.; Freeze-Drying of Food in Europe, personal information
- 5) 松田由美子;真空凍結乾燥スケトウダラの品質に及ぼす凍結速度の影響, 日本水産学会誌, 第35巻11号 pp.1110~1115 (1969)
- 6) 松田由美子;スケトウダラの凍結による貯蔵, 日本水産学会誌, 第35巻9号 pp.891~896 (1969)
- 7) Rapatz, G., Luyet, B.; On the Mechanism of Ice Formation and Propagation in Muscle, *Biodynamica* Vol.8 pp.121~144 (1959)
- 8) Luyet, B.J.; Effect of Freeze-Drying Rates on the structure of Freeze-Dried Materials and on the Mechanism of Rehydration, *Freeze-Drying of Foods, Nat'l Acad. Sci.* pp.1~13 (1962)
- 9) 松田由美子;凍結速度による真空凍結乾燥トコロテンの特性の違いについて, 日本水産学会誌, 第34巻9号 pp.836~840 (1968)
- 10) Hamre, M.L., Standelman, W.J.; The Effect of Freezing Method of Diced Chicken Meat on Color, Handling Qualities, and Rate of Freeze-Drying, Paper presented at 2nd. Int. Cong. of Food Sci, and Technol., Warsaw, Poland, August (1966)
- 11) 松田由美子;トコロテンの凍結による貯蔵, 日本水産学会誌, 第31巻11号 pp.1026~1030 (1968)
- 12) 松田由美子;スケトウダラの凍結による貯蔵, 日本水産学会誌, 第35巻9号 pp.891~896 (1969)

- 13) 松田由美子; トコロテンの真空凍結乾燥による風味と腰の保持, 日本水産学会誌, 第34巻9号 pp.841~846 (1968)
- 14) Haugh, C.G., Huber, C.S., Stadelman, W.J., Peart, R.M.; Engineering Implications of Freeze-Drying Research on Meat, Trans. of ASAE Vol.11 No.6 pp.877~880 (1968)
- 15) 小林正和; 液材料の凍結乾燥の理論的, 実験的分析と最適サイクルの研究, 冷凍, 第46巻524号 pp.15~42 (1971)
- 16) Hatcher, J.D., Lyons, D.W., Sunderland, J.E.; An Experimental Study of Moisture and Temperature Distributions during Freeze-Drying, J. of Food Sci. Vol 36 pp.33~35 (1971)
- 17) 大田勇夫; 化学技術と食品工業, 化学工学社 pp.163~167(1971)
- 18) 加藤舜郎, 石渡憲治; 食品冷凍法, 恒星社厚生閣 pp.118~126 (昭和34年)
- 19) Lusk, G., Karel, M., Goldblith, S.A.; Effect of Some Processing Parameters on the Rate of Freeze-Drying of Shrimp, Food Tech. Vol.19 pp.620~622 (1965)
- 20) Wang, H; A Historical and Histochemical Study of Beef Dehydration (Part IV) Characteristics of Muscle Tissue Dehydrated by Freeze-Drying Technique, Food Research, Vol.19 pp.543~556 (1954)
- 21) Monzini, A., Maltini, E.; Studies on the Freeze-Drying of Frozen Concentrated Orange Juice, Recent Development in Freeze-Drying, I.I.R. Commission X pp.123~130 (1969)
- 22) Sharon, Z., Bark, Z.; Freeze-Drying of Tomato Juice and Concentrate Studies on Heat and Mass Transfer, Recent Development in Freeze-Drying, I. I.R. Commission X pp.115~122 (1969)
- 23) Foda, Y.H., Hamed, M.G.E., Add-Allah, M.A.; Preservation of Orange and Guava Juices by Freeze-Drying, Food Tech. Vol.24 No.12 pp.74~80 (1970)
- 24) Harper, J.C.; Transport Properties of Gases in Porous Media at Reduced Pressures with Reference to Freeze-Drying, A.I. Ch.E. Journal, Vol 8 No.3. pp.298~302 (1962)
- 25) 片山功藏, 林勇二郎; 真空凍結乾燥に関する研究, 日本機械学会論文集, 第37巻299号 pp.1387~1395 (1971)

## 本 会 記 事

### 農業機械学会関東支部昭和50年度講演会 ・総会ならびに見学会開催迫る

農業機械学会関東支部(細川 明支部長)では, 次のとおり昭和50年度講演会・総会ならびに見学会を開催する。

#### 記

I. 期 日 昭和50年10月7日(火), 8日(水)

II. 会 場 宇都宮大学農学部特別講義室

III. 日 程

第1日目(10月7日)講演会および総会

1) 講演会 10:00~12:00, 14:00~16:00

2) 総 会 13:00~14:00

3) 懇親会 16:30~18:00 (於学内食堂)

なお, 懇親会費は1,000円, 当日受付で徴収する。

第2日目(10月8日)見学会

久保田鉄工宇都宮工場, 水産庁水産研究所他

なお, 見学代(昼食代含む)は1,000円, 会場受付

で徴収する。

V 講演発表について

1) 講演要旨原稿は9月2日までに必着のこと。

2) 原稿用紙は所定のものがあるので, 請求すること。

3) 講演時間は約15分, 講演に要する図表, スライドは会場受付に提出のこと。

V. 参加申込み

1) 申込先: 〒320 宇都宮市峰町 350・宇都宮大学農学部農業機械研究室・TEL0286(33)1371

2) 申込み切: 所定の参加申込み書に所定事項を記入し8月10日までに送付すること。

VI. 会場までの交通

国鉄宇都宮駅前, 宮の橋バス停留所より, 国鉄バス, 東武バス, 東野バス(東町行を除く)いずれのバスにても可, 宇都宮大学前下車(所要時間, 約10分)

本誌第37巻第1号(第132号)102~108頁掲載資料「食品の凍結乾燥と問題点・細川 明, 相良泰行」中, 誤りがありましたので, 下記の通り訂正し, お詫びします。

記

		誤	正
1.	P 103 左欄下6行	多量孔質	多孔質
2.	P 104 右欄上11行	温度 $q_s$	温度 $\theta_b$
3.	P 104 右欄 fig. 3		図参照
4.	P 105 左欄下12行	-180°C	-17°C
5.	P 107 右欄上10行	直接換算	直接検知

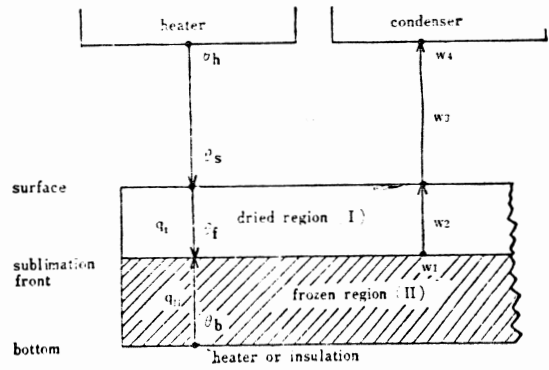


Fig. 3 Food model for analysis of heat and mass transfer during sublimation dehydration.