

2. 冷凍食品の加工技術

2.3 凍結乾燥の技術動向

Technological Trends in Freeze-drying

キーワード：凍結乾燥，技術開発動向，生産設備，基礎的研究，応用的開発研究

Freeze-drying, Technological trends and development, Plant and equipment, Fundamental researches, Practical applications

荒木 徹也* Tetsuya ARAKI

上西 浩史* Koji KAMINISHI

1. はじめに

凍結乾燥法は19世紀にその基本原理が発見されてから今日に至るまで急速に発展し、食品や医薬品を始めとした多岐の分野で利用されるようになった。本乾燥法の最大の利点は、乾燥前後で乾燥材料の形状、品質などが良好に保持され、乾燥製品が多孔質構造となっていることで湯戻しなどの簡単な操作によって迅速に乾燥前の状態に還元させることが可能な点にある。この利点は食に対して高品質化・簡便化を追求する消費者ニーズと合致しているため、凍結乾燥法は理想的な乾燥法として今後もその適用範囲が拡大するものと見込まれる。

しかしながら、本乾燥法は他の乾燥法と比較してエネルギーコストおよび設備投資コストが高み、結果として製品価格が割高となってしまうため、他の乾燥法に全面的に取って代わるまでには至っていない。さらに、適用範囲の拡大に際しては、高濃度塩分・糖分食材などの凍結乾燥プロセスで生じるコラプス現象など各対象材料特有の課題も解決しなければならない。こうした技術的課題を克服するには、物理化学的見地から凍結乾燥プロセス中に材料内部で生じる現象を解明する基礎研究的アプローチと、実用装置の設計および凍結乾燥の最適操作に関する応用研究的アプローチが挙げられ、現在、主に後者に関して実用生産設備規模での技術開発が精力的に行われている。

本稿ではまず、食品材料を対象とする凍結乾燥操作について説明し、次に、その実用例としてインスタントコーヒーの製造プロセスについて工程に含まれる周辺技術・装置とともに概説し、最後に、近年の凍結乾燥の技術開発に関する動向について紹介する。

2. 食品材料を対象とする凍結乾燥操作

凍結乾燥は種々の材料を氷点以下の温度で凍結させ、その状態のまま昇華によって乾燥させる方法と定義され

る¹⁾。昇華による乾燥を進行させるには、材料内部の既乾燥層と凍結層の境界面（以下、昇華面）における水蒸気分圧を水の三重点以下に保持しながら昇華潜熱を供給しなければならない。また、単位時間における水蒸気の許容発生量、すなわち最大乾燥速度は材料の移動物性値と、材料表面と昇華面の間における温度、若しくは水蒸気分圧勾配により決定される。つまり、凍結乾燥プロセスは材料の昇華面に供給される熱の移動、あるいは昇華面から発生した水蒸気の移動により律速されることになる。ここで、水の昇華量に相当する潜熱量に対して過度の熱供給がなされると、材料の凍結層は融解し、結果として乾燥が昇華ではなく、液状水の蒸発により進行する。

昇華面で発生した水蒸気は材料外部に移動させた後、速やかに除去する必要があるため、一般に水蒸気を冷却器表面で捕集・凝結させるコールドトラップ方式が採用されている。ここで材料表面から冷却器表面までの水蒸気が移動する間に水蒸気以外の気体分子が介在し、これが水蒸気移動の抵抗となるため、この移動抵抗を真空排気操作により除去する手法が多用されている。このため、一般に凍結乾燥と言うと、真空状態下での操作を指すものと考えられているが、本手法は厳密には「真空凍結乾燥」と称し、凍結乾燥法の一形態に過ぎない。また、Meryman²⁾やKingら³⁾が指摘するとおり、真空排気は凍結乾燥に必須の操作ではなく、材料を凍結状態のまま昇華面の水蒸気分圧を三重点以下に維持し、かつ材料表面と昇華面の間の水蒸気分圧勾配を確保することが可能であれば、昇華乾燥は起こり得る。近年ではこの発想に着目し、真空状態とする代わりに、材料の凍結点以下の温度に設定した除湿空気を乾燥室に流入し、大気圧条件下で昇華乾燥させる「常圧凍結乾燥」が開発されている。詳細については後述するが、本手法は真空排気装置を要

* 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 Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo
原稿受理 2005年7月28日

さない省エネルギー・省設備な乾燥法であり、凍結乾燥の発展に貢献し得る手法として今後の進展が注目される。

なお、本稿では特に文中に示した場合を除き、凍結乾燥は「真空凍結乾燥」を示すものとする。

3. インスタントコーヒー製造プロセスと研究開発の課題^{4,5)}

3.1 原料と配合

インスタントコーヒー製造プロセスの工程編成の典型例と現在進展している各工程に関連する先端技術の研究課題を図1に示す。各工程は熱的単位操作と機械的単位操作に大別される。まず、諸外国から調達された輸入生豆は製品別に製造会社独自の配合割合で配合される。配合は乾燥製品の特色を創出してその品質を一定に維持し、さらに、その品質を消費者の嗜好と合致させることが販売戦略上の重要課題である。この操作は従来から訓

練されたブレンダーの主観によってなされてきた。しかし、このような品質設計やプロダクトマネジメントに関わる操作は客観的かつ数量化された情報に基づいて行うことが要望されている。このため、生豆の成分分析などから最終製品の「香味」に関する評価指数を予測する技術とともに、得られた予測結果から消費者の嗜好を満足させる品質を提供できる配合条件を検討する手法の開発が期待される⁵⁾。

3.2 焙焼・抽出

焙焼はコーヒー独特のアロマを発生させる加熱操作であり、その程度により「浅炒り」「深炒り」などに分類されている。この操作には通常加熱テーブル上に堆積した豆を攪拌しながら加熱する方法が採られている。このような加熱操作の伝熱効率を向上させて省エネルギーを達成するためには、熱源に遠赤外線を利用するなどの方法が有効と考えられる。焙焼を終えた材料は機械的に粉碎される。粉碎後の材料粒子のサイズは次の抽出工程の抽出効率・成分、すなわち歩留まりと香味を決定する重要なファクターである。通常、インスタントコーヒーの抽出には、その抽出歩留まりを高めるために、粉碎したレギュラーコーヒーの粒子より小さいサイズのものが用いられている。

抽出工程では抽出タンク内に堆積した粒子状材料の上面に熱湯と水蒸気を吹き込むことにより固形分濃度で約10%の抽出液が得られる。ここでも、熱湯や加熱蒸気の温度が抽出液の品質を制御する主要因となる。この工程に超臨界状態にある炭酸ガスを用いてカフェイン成分のみを選択的に抽出する方法、すなわち、超臨界流体抽出法が導入され、カフェインレスコーヒー製造の核心技術となっている。

3.3 濃縮

抽出工程後に得られるコーヒー溶液をそのまま乾燥させるためには膨大な熱エネルギーを必要とする。そこで、乾燥工程の前に抽出液を濃縮し、エネルギーコストを削減する操作が行われている。ここでは、材料の品質的変性を極力抑制する低温度の操作が必要とされるため、その有効手段として現在「凍結濃縮法」が実用化され、コーヒー製造工程に導入されている。この方法は図2および図3に示すような晶析装置と洗浄塔を用いて、コーヒー抽出液を-3~-7℃の低温度に保ち、攪拌しながら溶液中に氷の結晶を析出させ、この氷結晶を洗浄塔で分離することにより溶液の濃縮を達成する方法である。この凍結濃縮法によりコーヒー溶液は溶質濃度40%前後まで濃縮され、その後乾燥・粉末化される。

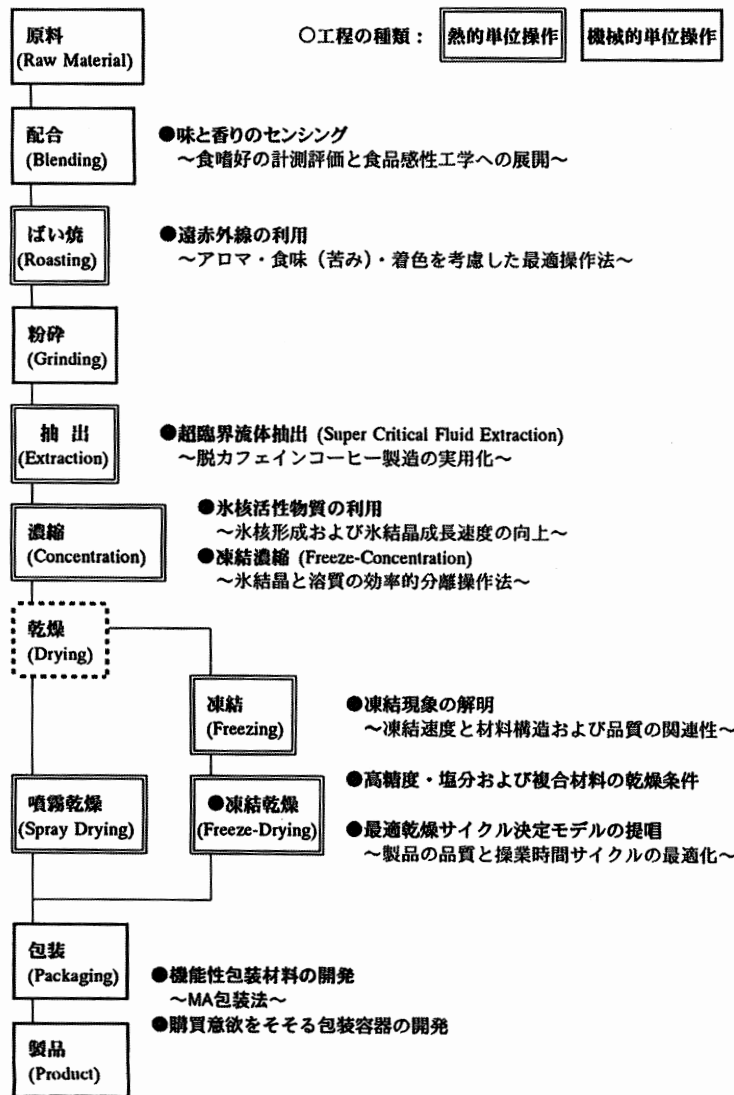


図1 インスタントコーヒーの製造プロセスと技術開発の課題

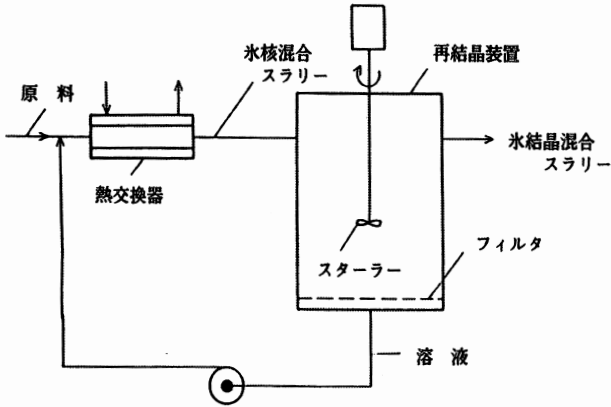


図2 液状材料濃縮用晶析装置

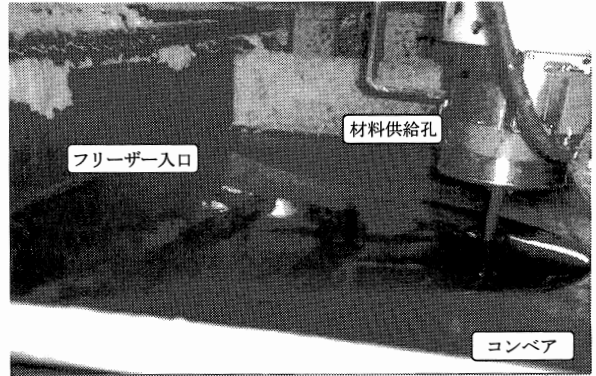


図4 予備冷却したコーヒー濃縮液のトンネルフリーザーへの供給 (冷却空気温度: -40℃)
(GEA/Atlas社提供)

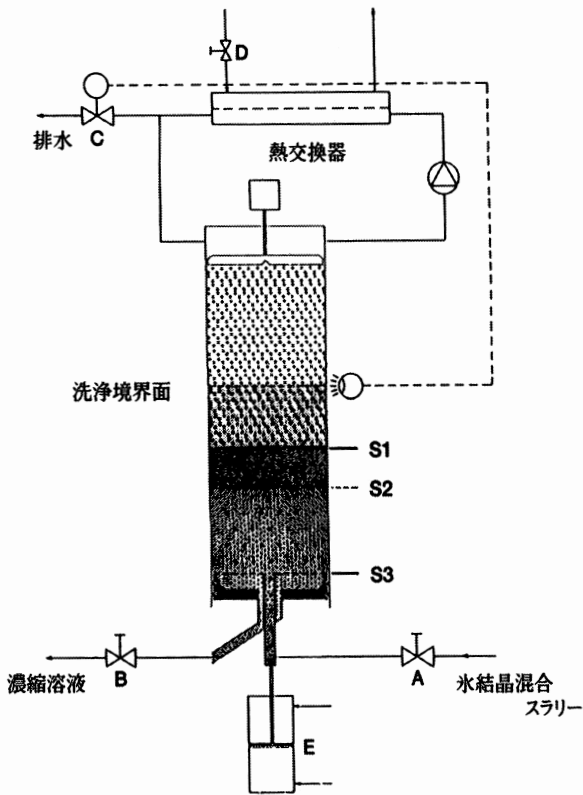


図3 液状材料濃縮用洗浄塔



図5 トンネルフリーザー内部 (2系列コンベア内蔵型)
(GEA/Atlas社提供)

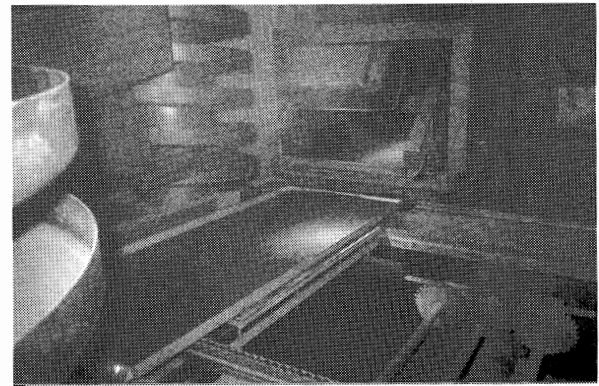


図6 凍結顆粒状コーヒーのトレイ充填
(GEA/Atlas社提供)

3.4 乾燥・包装

コーヒー濃縮液の乾燥に凍結乾燥法 (freeze-drying) が用いられている最大の理由は、同じくインスタントコーヒー製造用の乾燥法として知られている噴霧乾燥 (spray-drying) に比べてアロマの散逸と香味の熱的変性に対する抑止効果が高い点である。凍結乾燥プロセスは凍結工程と乾燥工程に分けられ、凍結工程ではスラリー状に予備凍結した濃縮液をトンネルフリーザー入口の金属製平板状コンベア上に供給し (図4)、フリーザー内部温度 -40℃ の条件下で厚さ約 15mm のコーヒー溶液を凍結する (図5)。フリーザー出口端では凍結材料を機械

的に荒破碎し、さらに微粉碎・分級して顆粒状となった粒子のサイズを揃えている。乾燥工程では、凍結粒子を平板トレイ上に厚さ約 15mm の堆積層とし (図6)、これを凍結乾燥装置内のラック式過熱棚上 (図7) に搬入して乾燥する。したがって、乾燥後に得られる顆粒状粒子の形状は凍結粉碎後に形成されたものである。

凍結乾燥製品は多孔質構造となり、吸水性に富む性質を有している。この性質は水を短時間に吸収して元の状

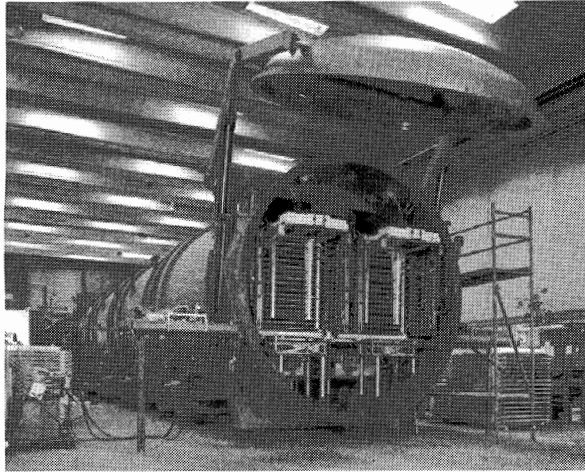


図7 連続式凍結乾燥機チャンバー内のラック式乾燥棚 (GEA/Atlas社提供)

態に復元する, いわゆるインスタント食品が基本的に具備すべき重要な特性である. しかし, 他方では貯蔵中に吸湿・酸化して腐敗や変性を引き起こしやすく, 衝撃に対しても弱い性質を持っていることにもなる. このために, 乾燥製品の包装にはアルミ箔やガラス容器が多用され, さらに機械的衝撃に強い外装材が必要となる. また, 酸化防止のために包装袋内部に窒素ガスを封入するなど, いわゆるMA (Modified Atmosphere) 包装法などが採用されている. また, 消費者の購買意欲を喚起しうる各種包装容器のデザインも重要な検討課題となっている.

4. 凍結乾燥の技術革新

4.1 凍結乾燥の新規開発技術

凍結乾燥法は前述のように, 高品質の製品を提供する反面, 設備投資およびエネルギー消費の面で他の乾燥法より高コストな乾燥法である. したがって, 食品乾燥の分野で本乾燥法がシェアを拡大していくためには, 熱効率の改善, 乾燥時間の短縮, 真空度の見直し, コールドトラップの能力改善および熱エネルギー回収方法などを検討して, 省エネルギー・省機器化を推進してコスト低減を図ることが不可欠である. このため, 近年, 凍結乾燥における省エネルギー技術の開発研究が精力的に取り組まれてきており, 加熱システム, コールドトラップおよび冷凍機の改良設計や運転制御方式の改善が既に実用生産規模で行われている⁶⁾.

一方, 学術領域でも伝熱効率改善などに関する新技術を提案する研究事例が学術論文などで公表されている. 具体例としてマイクロ波加熱法⁷⁾, シリカゲルなどの乾燥剤の代替使用によるコールドトラップ稼働時間の短縮⁸⁾ および前述した常圧凍結乾燥⁹⁾ などが挙げられ, これらの技術は早期実用化が望まれる. 特に, 常圧凍結乾燥法

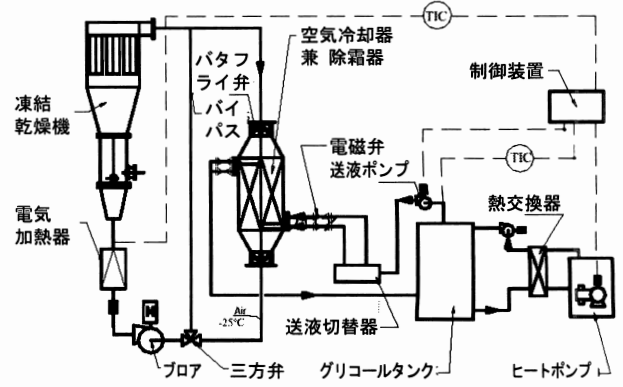


図8 常圧密閉式凍結乾燥装置

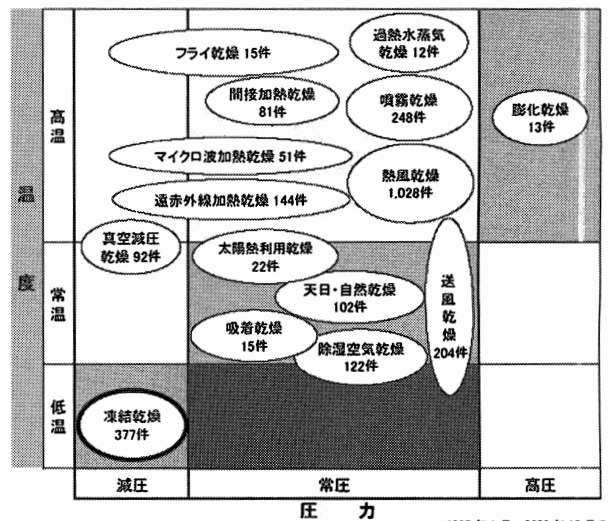


図9 食品乾燥加工技術の技術概念図と特許出願件数

は図8に示す通り真空ポンプを要さず, 設備費・運転費ともに大幅な削減が見込まれるとともに, 熱源としてヒートポンプを組み合わせることで, さらなる省エネルギー化を図ることができる. また, 近年の研究報告¹⁰⁻¹²⁾によると, 常圧凍結乾燥した製品は真空凍結乾燥品とほぼ同様の品質が得られるため, 今後の新たな凍結乾燥法として発展していくことが期待される.

上記事例に代表される技術革新の結果は図9に示すように, 1992~2002年までの食品材料を対象とする凍結乾燥技術に関する特許出願が377件と熱風乾燥に次いで出願件数が多く, その成果を物語っている¹³⁾. 著者らも近年, 大学・食品企業・乾燥機メーカー3者の共同研究として開発した「凍結乾燥を用いた即席卵スープの製造方法」を特許出願しており, 次項で紹介する.

4.2 凍結乾燥を用いた即席卵スープの製造方法^{4,5,14)}

著者らの研究により卵スープの乾燥サイクルを改善し, 乾燥時間の短縮に成功した例を図10に示す. 従来,

加工メーカーでは棚温度一定の条件下で乾燥を行っていたが、この方式では乾燥工程に20hr以上を必要とし、これに乾燥前後の処理工程に要する時間を加えると24hr以上を必要としていた。このため、作業員の就労時間帯がシフトする事態となって雇用のためのコストが割高となり、またエネルギーコストが嵩む原因となっていた。

筆者らはK社の依頼により、最適加熱条件を探り、乾燥開始直後のできるだけ早期に材料表面温度を「品質設計温度」まで上昇させ、その後、その温度を維持する方式を提案した。その結果、17hr以内の乾燥サイクルが達成され、全工程の所要時間も24hr以内となった。品質設計温度は「最終製品の品質許容範囲における材料表面最高温度条件」に相当し、卵スープの場合には、乾燥過程で表面に生ずるSCORCH色（焦げ色）が最大の要因となった。また、この加熱プログラムを実用機で達成するために、乾燥機メーカーと乾燥機設計に関する検討を行い、乾燥サイクルのスケールアップを実現した。

上述の乾燥サイクルの短縮法に加え、さらなる乾燥時間の短縮を図るために、図11に示すような凸状加熱棚とこれに密着する材料用トレーを開発した。平板加熱棚上に設置したトレーを介する加熱方式では、昇華乾燥の後期に図(a)に示されるような凍結部が残留し、この凍結部

を取り巻くように形成される多孔質乾燥層が伝熱抵抗となって、乾燥速度、すなわち昇華面の移動速度が次第に遅くなる。そこで、図(b)に示すように、あらかじめ乾燥後期に形成される凍結部の形状に合わせた凸状加熱棚を用いることにより伝熱促進を図り、乾燥時間の短縮を達成した。

4.3 凍結乾燥サイクルの最適化

凍結乾燥サイクルの最適化は、凍結乾燥食品の省コスト化を推進する上で検討すべき課題である。しかしながら、実際の生産設備の運転条件は対象材料ごとに予備実験を行い、経験的要素を加味して決定されているため、各操作パラメータ設定条件の変化に対応して凍結乾燥特性データを収集しなければならず、これに伴う労務時間の増加が製品コストの上昇につながっている。

こうした問題の解決には、対象材料の移動物性値、すなわち乾燥層の熱伝導率および水蒸気透過係数に基づいて凍結乾燥プロセスの熱・物質移動現象をシミュレーションして材料の乾燥挙動を予測するソフトウェアの開発が重要となってくる。ただし、その予測精度は対象材料の移動物性値に依存し、この値は凍結工程中に形成される氷結晶構造により決定されるため、対象材料の凍結条件-氷結晶構造-移動物性値の相互関連性に関する基礎的情報を整備する必要がある。一方、製造条件から凍結乾燥食品の品質を予測することも必要とされており、著者らが提言する「感性品質評価モデル」¹⁵⁾を用いて、凍結乾燥条件と乾燥製品の品質に対する官能試験スコアとの間の相関についても定量的に把握すべきである。現在、凍結条件と氷結晶構造の関係¹⁶⁾、あるいは凍結乾燥条件と乾燥製品の品質との関係¹⁷⁾など、個別的な相互関連性については徐々に解明されてきている。

最終的に、これらの成果を有機的に統合すれば、凍結乾燥条件と材料を指定することにより凍結乾燥プロセスに係るエネルギーコストと乾燥製品の品質を予測し、最適サイクルの検討を精度良く検討することが可能となろう。

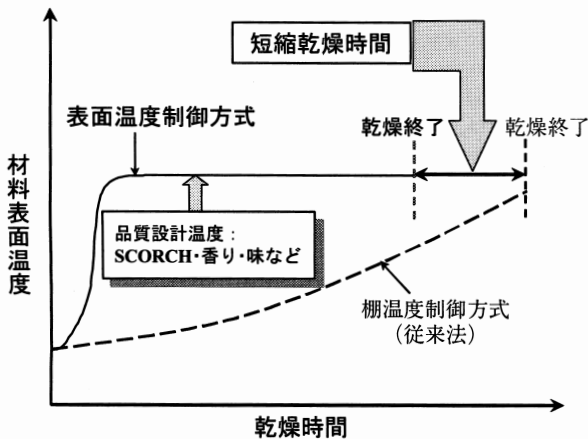


図10 表面温度制御方式による乾燥時間の短縮

5. おわりに

以上に述べてきたように、凍結乾燥技術に関する技術課題に関して克服されたものはあるが、本乾燥法が抱える問題の多くは依然としての未解決のままである。しかし、冒頭に述べたように、凍結乾燥法は食に対して高品質化・簡便化を追求する現代人のニーズを満たす品質を提供し得る理想的な乾燥法であるため、今後その需要はますます増大していく傾向にあると考えられる。こうした要求に対応すべく、本稿で紹介した技術開発動向が凍結乾燥法を始めとする食品工学分野における基礎的研究の推進とその成果の実用展開を図る上での端緒となって、本乾燥法がさらなる発展を遂げることを切に期待する。

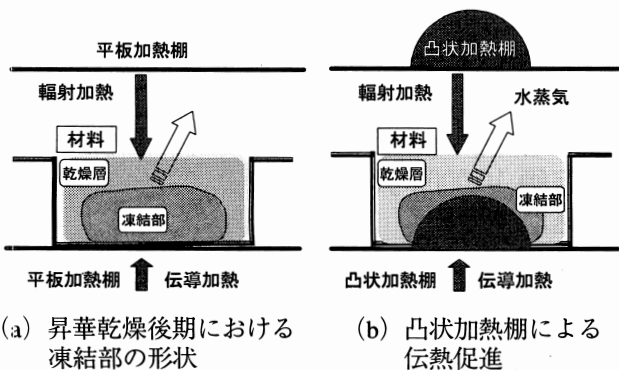


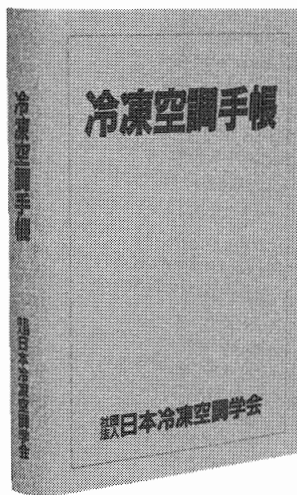
図11 凸状加熱棚による昇華乾燥後期凍結部への伝熱促進

文 献

- 1) 古田武：「食品工学基礎講座」，6巻（矢野俊正，桐栄良三編），pp.244-245，光琳，東京（1989）。
- 2) Merymann, H. T. : Science, 130, 628 (1959).
- 3) King, C. J., Clark, J. P. : U.S.Patent 3, 453, 741 (1969).
- 4) 上西浩史，相良泰行：冷凍，79 (925)，37 (2004)。
- 5) 技術情報協会：「凍結乾燥技術」，pp.1-12，東京（2001）。
- 6) 砂間良二：New Food Industry, 40 (1), 17 (1998)。
- 7) Rosenberg, U., and Bögl, W. : Food Tech., 41 (6), 85 (1987)。
- 8) Bell, G. A. and Mellor, J. D. : Food Australia, 42 (5), 226 (1990)。
- 9) Wolff, E., and Gilbert, H. : Drying Tech., 8 (2), 405 (1990)。
- 10) Odilio, A. F. : Drying Tech., 20 (8), 1541 (2002)。
- 11) Odilio, A. F., Pablo, G. P., Trygve, M. E., I. Strommen : Proc. 14th IDS2004 (Sao Paulo, Brazil, Aug.2004), Vol.C, pp.1521-1528, IDS, Brazil (2004)。
- 12) P. D. Matteo, G. Donsi, G. Ferrari : J. Food Eng., 59, 267 (2003)。
- 13) <http://www.ryutu.ncipi.go.jp/chart/H16/ippan15/frame.htm>
- 14) 相良泰行：低温生物工学会誌，48 (1)，31 (2002)。
- 15) 相良泰行：「食品感性工学」，朝倉書店，東京（1999）。
- 16) 上野茂昭，都甲洙，相良泰行，工藤謙一，樋口敏郎：冷空論，19 (4)，375 (2002)。
- 17) 上西浩史，後藤恵理，渡邊武俊，今吉有理子，岩渕久克，相良泰行：冷講論，B-213，静岡（2004）。

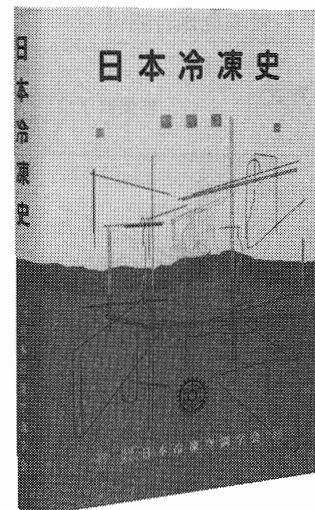
Summary

A typical manufacturing process of instant coffee has been explained to represent the current technologies in freeze-drying of food products. Both academic and industrial challenges were overviewed in this process, especially in preliminary freezing and freeze-drying as well as quality design of freeze-dried products based on the relationship between their physicochemical properties and sensory evaluation scores. Moreover, a novel method has been developed to reduce energy cost in producing freeze-dried products, and to satisfy food preferences of modern consumers. For further developments in freeze-drying, consumer-oriented perspectives would be more significant, and then fundamental researches and practical applications should be increasingly encouraged to investigate the unsolved issues in freeze-drying.



冷凍空調手帳

平成10年2月
A6版・482ページ
定価 3,900円(会員価 3,500円)
送料 310円



日本冷凍史

平成10年9月
B5版・387P 年表25P
定価 10,000円(会員価 9,000円)
送料 450円

160-0008 東京都新宿区三栄町8番地 三栄ビル
(社)日本冷凍空調学会 TEL03-3359-5231 FAX03-3359-5233