

■ 技術報告 ■

食品の振動流動層凍結乾燥について

Freeze Drying of Foods in a Vibro-fluidized Bed Freeze Dryer

鈴木 寛 一*

Kanichi Suzuki

1. 序

凍結乾燥の高速化と高エネルギー効率化を図る一方法として、振動流動層を用いた粉、粒状食品材料の凍結乾燥を試みた。現在はまだ実験装置規模の範囲を出ないが、これまでに乾燥速度では代表的な従来法である棚段静置式の数倍以上、乾燥室の熱効率ではほぼ100%の結果を得ている。さらに、材料層の温度は乾燥終点近くまで均一でしかも0℃以下の低温に保たれたまま乾燥されることから、従来法に比べて良質の製品の得られることが期待される。

本報で述べる内容は既報のもの¹⁾と重複するところもあり、研究の詳細についてはそちらを参照していただきたいが、ここではこれまで得られた実験結果をもとに、主に振動流動層凍結乾燥およびその装置の特性と応用性、問題点等について報告する。

2. 食品の凍結乾燥

食品の乾燥法としては理想的とされる凍結乾燥も、装置、操作条件および品質の各面でまだいくつかの問題点を抱えている^{2,3)}。特に凍結乾燥は、乾燥に要する直接エネルギーだけを考えてみても熱風乾燥の約2倍を必要とする上に⁴⁾、さらに時間平均の乾燥速度は他の乾燥法と較べて極めて小さい。それ故、エネルギー有効利用の点から凍結乾燥を考え、その問題点の改善を図ろうとする場合、概ね次の2面から主に検討がなされてきた。一つは、材料の予備凍結など凍結乾燥の前処理段階から乾燥製品の後処理に至るまでの一連の熱処理操作での熱効率向上と排熱利用など回収可能なエネルギーの再利用に関すること、他の一つは、乾燥速度と生産性を向上させるための理論、技術や装置を開発することである。特に後者については、乾燥時

間を現在の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ に短縮することができれば、乾燥経費の30~40%は削減できるとされることから⁵⁾、乾燥装置の生産能力を向上させようとする工夫や試みが、棚段静置式および材料攪拌式の両方式でこれまでも数多くなされてきた^{2,3,6)}。しかし、装置上の欠点や適用材料の問題、製品の品質等に関する問題なども指摘されているところどおり^{3,7)}、現在、我が国で稼働している凍結乾燥装置の大半は、汎用性の面で優れている棚段静置式(回分式)のものである⁸⁾。

一方で、今日の凍結乾燥食品に対する需要の増大は特定の性状を有する材料群の恒常的な生産を可能にする新たな条件が整いつつある。このことは装置が必ずしも大型で汎用的なものでもなく、夫々の材料の性状に適した効率の良い専用機の設置が可能となることを意味している。

振動流動層で扱える材料は後述するように粉体、粒体もしくはこれらに近い形状に細断したものなど振動による流動化が可能なものに限られる。しかし、この中には大部分の穀類や液状食品を凍結後破砕したものも含まれるから、振動流動層で凍結乾燥可能な材料の種類はかなり多いものと考えられる。特に、乾燥条件に敏感な食品材料の乾燥では、生産性を改善するという見地からばかりでなく品質の面からも乾燥条件や装置を考えなければならない。その意味でも、できる限り短時間で且つ低温で凍結乾燥できることが望ましいことは言うまでもないことである。

本研究では、上述のように乾燥速度の改善と品質の向上の2面でその実現が期待される一方法として振動流動層を用いた凍結乾燥を試みたものである。

3. 振動流動層凍結乾燥装置

振動流動層とは、充填粒子層に機械的振動を加えて粒子の混合、流動化を促進させるもので、振動と通気を併用する場合と振動だけを用いる場合がある⁹⁾。振動の効果が顕著に現れるのは最小流動化速度以下の低

* 広島大学生物生産学部食品科学講座、食品化学工学研究室・助教授

〒720 福山市緑町2-17

ガス流速領域または全く通気しない場合であり¹⁰⁾、特に適当な振動条件下では、加振するだけで材料は移動、混合し、流動化した場合と同様の効果が得られる¹¹⁾。この材料の移動、混合に通気を必要としない利点と応用性は大きい。

振動流動層の諸特性とその利用については研究も多く、総説¹²⁾に詳しく述べられているが、振動流動層を凍結乾燥に利用しようとする試みは筆者以外にはまだ行われていない。

振動だけで粒子を流動化させた場合の上下方向の粒子の移動速度は、図-1に示すように測定条件内では層内の圧力には影響を受けないようである¹³⁾。

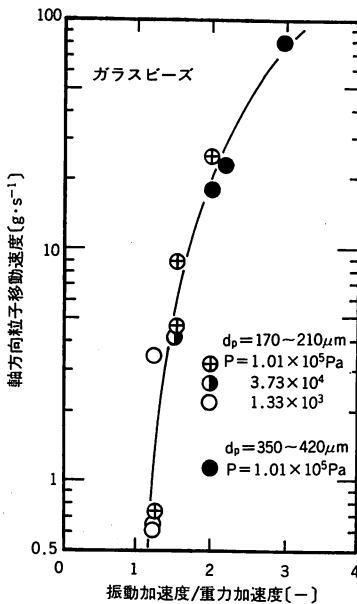


図-1 軸方向粒子移動速度測定例(加振効果のみ)

凍結乾燥装置では、伝熱方法の選択と伝熱速度が重要な問題となるが、振動流動層では層高を数センチメートル以上とすることが好ましく、凍結乾燥としては充填層高をかなり高くすることができるから、次に示す伝熱方法のいずれかまたはそれらの組み合わせが可能となる。

- ① 容器底面や側壁を加熱体とする伝導伝熱による方法
- ② 放射伝熱による方法
- ③ 粒子層の内部に加熱体を設置する伝導伝熱による方法

①の方法は装置構造が最も単純であるが、水平加熱体は垂直形加熱体と比べて伝熱係数が小さく¹⁴⁾、また外部への熱損失は避けられない。②の方法は熱面との

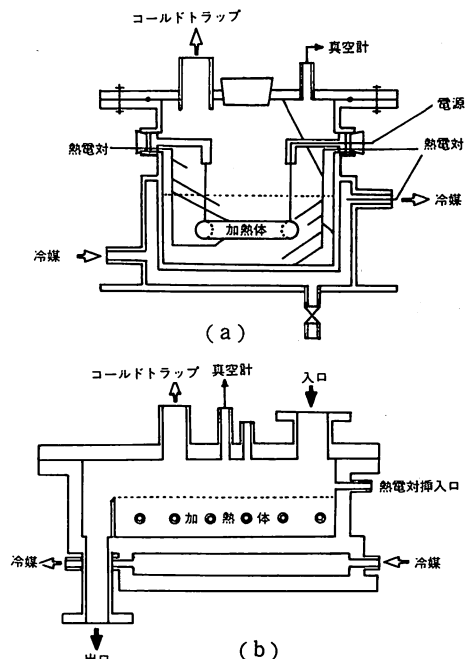
接触による伝熱の場合のように流動状態による伝熱係数への影響はないが、装置構造が複雑になること、加熱体の温度を高温にしなければならないことから熱供給方法と熱損失の両面で問題がある³⁾。③の方法は①より乾燥室の構造が複雑となるが、熱損失は最小にできる¹⁾。

4. 実験装置

用いた実験装置は既報¹⁾のものと同じで、垂直上下方向の振動を加えた。乾燥室の概略を図-2に示す。

回分実験用(a)は内径108mmのステンレス管製で、連続実験用(b)は幅60mm、長さ300mm、粒子の混合、移動状態が観察できるように透明アクリル板を用いて作製した。振動流動層凍結乾燥の基本的な特性は主に回分実験の結果を用いて検討した。材料層への伝熱は主に上述の③の方法を用いた。さらに、次に示すような目的のために、乾燥室底面または側壁の温度をジャケットで調節できるようにした。

- ① 凍結材料投入時に材料が融解しないように、乾燥室内温度を予め予想される昇華温度(0℃以下)に設定しておくため。
- ② 加熱体から供給される熱量の熱効率および加熱体表面-材料層間の伝熱係数を測定するため、乾燥室底面と側壁の温度を材料層温度と等しく保ち、材料



(a: 回分実験用, b: 連続実験用)

図-2 乾燥室概略図

層から外部へまたはその逆の熱移動を防ぐため、

- ③ 乾燥室底面等を加熱体として用いる場合の伝熱係数を測定するため、

実装置では、このようなジャケットは必ずしも必要ではないと考えられる。

加熱体は外径10mmのステンレス管内にニクロム線を組み込んだパイプヒーター状のもので、回分実験用の乾燥室には、これを輪状にしたものを用いた。必要な各点の温度は素線外径0.1mmの銅-コンスタンタン熱電対を用いて測定した。

5. 試料

実験の目的に応じて試料には各種の材料を用いた。振動条件と材料の移動、混合性との関係を検討する場合にはガラスビーズ、大豆、大根種子などを用いた。凍結乾燥の乾燥特性を検討する場合には、凍結材料の調整が容易な材料を用いた。これまで、数ミリメートル角に刻んだ人参、肉類、イオン交換樹脂球、おから、復元後細断し、さらに篩で材料径を1.4~2.4mmに揃えた高野豆腐等について実験を行った。材料の凍結には市販のフリーザー(-18~-20°C)を利用した。

6. 実験結果および考察

6.1 乾燥特性

乾燥結果の一例を図-3に示す。この例ではジャケット温度を材料層温度と等しくしてあるから、乾燥終点近くで材料層温度が上昇し始めるまでは材料層から外部への熱損失はない。乾燥室上壁温度は室温程度であり、上壁から材料層への放射伝熱量は加熱体への供給熱量の1%以下と推算される。それ故、乾燥に用いられた熱量は加熱体へ供給した熱量にほぼ等しいと考えられる。この乾燥結果で特に興味あることは、加熱体への供給熱量は全乾燥期間中一定のまま保持したにもかかわらず、材料層温度は乾燥の終点近くまで乾燥室

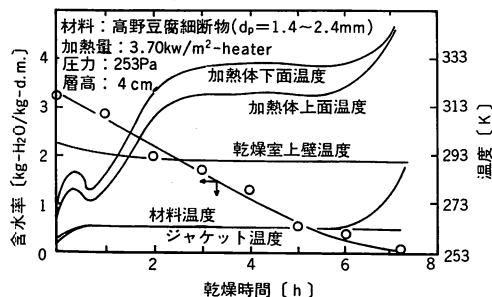


図-3 乾燥実験例 (回分式)

内圧力に対応した氷の昇華温度に近い低温に保たれ、しかも層内での温度分布はほとんど均一温度であったことである。棚静置式では乾燥の進行に伴って上昇する材料表面温度を品質面から要求される許容温度¹⁵⁾以下におさえなければならないから、一方では加熱体への供給熱量を次第に減少させつつ、他方では乾燥室の真空条件を相当に厳しくしなければならない。しかし、図に示すように振動流動層では材料温度が低温でしかも均一に保たれるから、特に凍結点の低い材料でなければ乾燥室の真空条件は棚静置式と比べてかなり緩和できるものと考えられる。このことは排気系への負荷をその分減少させることが可能であることを示している。

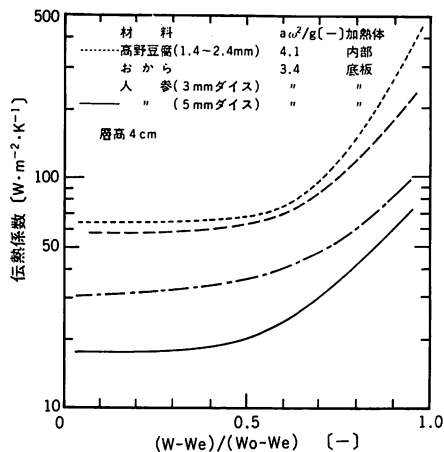
含水率の変化曲線は層全体が均一含水率で乾燥し¹⁰⁾、含水率は乾燥の終点まではほぼ時間に比例して減少したことを示している。この実験例での乾燥速度は時間平均で約 $3.5 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{h} \cdot \text{m}^2\text{-bed})$ であり、棚静置式の平均乾燥速度 $0.5 \sim 0.7 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{h} \cdot \text{m}^2\text{-bed})$ ¹⁶⁾ と比較しても相当に高い値を示しているにもかかわらず、加熱体の表面温度は60°C前後と低い。これは後述するように材料-加熱体表面間の伝熱係数の値が大きいに起因する。加熱体の温度を比較的に低く保てることは用いる熱源の範囲が広くなり、例えば排熱の利用などにも道をひらくことができるものと考えられる。

実際の装置では特に乾燥の初期以外は乾燥室壁温を低く保つ必要はない。材料層温度が乾燥期間の大半で0°C以下であれば、室温に近い乾燥室壁から材料層への熱移動が乾燥に寄与することは当然予想される。この点については次の伝熱係数の項で述べる。

以上のような諸特性は、振動流動層凍結乾燥の大きな利点でもあると言える。

6.2 材料層-加熱体表面間の伝熱係数

材料層温度が一定の期間で熱損失が無視できれば、材料層温度 T_b と加熱体表面温度 T_h との温度差で定義される材料層-加熱体表面間の伝熱係数 U は、加熱体への供給熱量を q_h として $q_h = UA(T_h - T_b)$ で表わされる。ここで A は加熱体の表面積である。図-4に層内部加熱体および底板を加熱体とした場合の U の測定例を示した。図-3の結果にもあるように、加熱体の表面温度は上面と下面で異なったので、 T_h の値としてはそれらの平均値を用いた。この表面温度が異なる原因としては、材料の流動化状態や加熱体と材料との接触時間が加熱体の上部と下部では異なるためではないかと考えられる。



a: 振幅, g: 重力加速度, W: 含水率, Wo: 初期含水率, We: 平衡含水率, ω: 角速度

図-4 材料—加熱体間伝熱係数測定例

伝熱係数は含水率の変化、即ち、粒子表面からの乾燥層の生成の程度に依存するばかりでなく、材料の性状やサイズ¹⁷⁾、流動化の状態にも依存するから、それらを考慮した伝熱係数の検討が必要となる。

乾燥室壁面からの伝熱量を推定する場合は図-4の底板のデータが参考になる。伝熱係数は材料によっても異なるが、平均値として50W/(m²·K)程度は見込めるから、外壁温度が室温のように低い場合でもこの伝熱量の寄与は無視できない値となる。

6.3 乾燥速度と乾燥室の熱効率

図-3で示す実験例と同様に、外部からの伝熱量が無視できる条件で測定した乾燥速度を図-5に示す。この結果から、加熱体を材料層の内部に設置した場合には、乾燥速度は供給熱量に比例し、熱効率もほぼ100%と考えてよいことがわかる。この実験条件では、材料温度がジャケット温度よりも高くなるとその分類損失が生じるから、図には材料温度が一定で熱損失が無視できる期間の乾燥速度と、熱損失を含む全乾燥時間の平均値を示した。

実験に使用した真空ポンプの排気能力に限界があり図で示した供給熱量以上では凍結乾燥が行えなかったが、十分な能力の排気装置とコールドトラップを用いれば、乾燥速度はさらに大きくすることが可能である。とは云え、図-5の結果の範囲内でも、従来法に比べて本法の乾燥速度がいかに大きいかかわかる。乾燥速度を大とした場合には、微粉の飛沫同伴の問題が指摘されるが³⁾、この点については操作条件および装置上の問題として考慮しなければならないであろう。

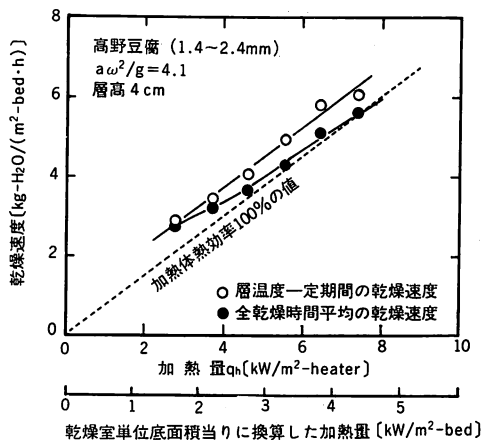


図-5 振動流動層凍結乾燥の乾燥速度測定例 (加熱体への供給熱量は全乾燥時間で不変)

6.4 振動発熱

図-5から明らかなように、熱損失がない期間での乾燥速度は、供給熱量から予想される値よりも大きくなった。その増加分は振動条件が同じならば供給熱量とは無関係にほぼ一定の値となった。このことは、供給熱量の他になんらかの熱量が層に加えられたことを意味している。そこで、この熱量と振動強度との関係を測定してみた。その結果は図-6¹⁾に示す通りで、明らかに振動強度に依存し、振動流動が起こる振動強度以上で熱量の増加分が測定された。この結果から、振動エネルギーの一部が層内で熱エネルギーに変換されたと考えるのが妥当であろう。図-6に示した結果は測定方法に問題もあり、発熱量の絶対値としては検討を要するところであるが、その量は振動流動層凍結乾燥のエネルギー収支を考える上で無視しえない値である。そこで、現在この発熱量を直接測定し、材料物性と振動条件との関係で検討を加えているが、この発熱量はほぼ理論的に推算することができるものと考えている。

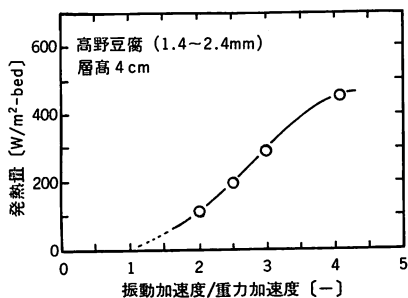


図-6 乾燥速度の増加分から推算した振動発熱量¹⁾

6.5 連続化の問題点

回分式乾燥の場合は完全混合状態を想定できるが、連続化を行う場合の最大の問題は、未乾燥物が製品に混入することであろう。垂直方向の振動を用いる振動流動層では、材料の平均滞留時間は材料の投入量によって任意に制御できるが、このことは全粒子の滞留時間を制御できることを意味してはいない。材料は上下方向にはよく混合しつつ、進行方向に対しては押し出し流れることが望ましいが、実際には図-7に示

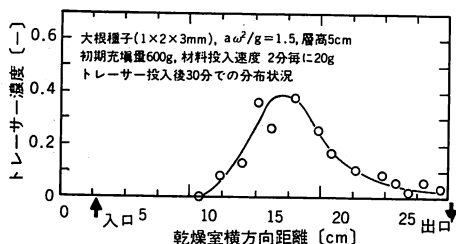


図-7 連続操作における横方向トレーサー分布の測定例

すように材料の横方向拡散混合が生じる。この実験は約2mmの大根種子を用い、その着色物をトレーサーとしたものである。平均滞留時間が60分となるように2分毎に材料を投入し、トレーサー投入後30分の横方向トレーサー分布の状態である。上下方向のトレーサーの混合は十分行われていることは確認している。トレーサーの横方向拡散は、材料の移動に伴う形で出口方向に向けて助長される。従って、単一の乾燥室では、乾燥不完全な材料が排出される危険性が高い。連続化に際してはこの問題を解決しなければならず、材料の横方向拡散係数と移動速度との関係、多室型も含めた適当な乾燥室形状の検討など今後に残された課題は多い。

7. 結 言

食品の凍結乾燥の一つの技術的可能性として、振動流動層を用いた凍結乾燥を試みた結果、乾燥特性、乾燥速度、熱効率などで多くの利点を有することが明らかとなった。その上、振動流動層凍結乾燥装置は乾燥室の構造が極めて単純である。しかし、振動を用いることから、装置の規模にはおのずと限界があるものと思われる。その意味では、生産性の高い小型装置として位置づけるのが適当と考える。

凍結乾燥装置は、主に食品の乾燥装置として発展してきているが、振動流動層凍結乾燥装置はその特質上

食品のみならず、粉粒体を扱う医薬その他化学工業においても利用の道が多いものと考えている。

提起されている課題について今後さらに検討して行かなければならない。

謝 辞

本研究の一部は、広島大学大学院生であった大西博司氏（現㈱タカキペーカリー中央研究所）および池田正昭氏（現、鹿児島県経済農業組合連合会）と共同で行った。記して深く感謝する。

引用文献

- 1) 鈴木寛一, 他3名; 加熱体を材料層内部に設置した振動流動層型凍結真空乾燥装置の特性, 日本食品工業学会誌, 31巻, 3号(1984), 153~160.
- 2) 佐原幸雄; 連続式凍結乾燥装置の開発研究, 食品工業, 16巻, 11下号(1973), 20~27.
- 3) 木村進; 乾燥食品事典(1984), 朝倉書店.
- 4) Flink, J. M.; Energy Analysis in Dehydration Processes, Food Technol., Vol. 31, No.3(1977), 77~84.
- 5) 木村進; 乾燥食品(1974), 光琳書院.
- 6) 播磨幹夫, 宮林修二; Krauss-Maffei式連続凍結真空乾燥機, 食品工業, 22巻, 12下号(1979), 73~84.
- 7) 小林正和; 凍結乾燥の連続化, 凍結及び乾燥研究会誌, 26巻(1980), 32~36.
- 8) 天野肇; 味噌の凍結乾燥とその利用, 食品工業, 22巻, 7下号(1979), 27~33.
- 9) Bratu, E. A., et al; The Structure of the Vibrofluidized Bed, Chim. Ind. Genie Chim., Vol. 104, No.13(1971), 1657~1662.
- 10) Suzuki, K., et al; Drying Characteristics of Particles in Constant Drying Rate Period in a Vibro-fluidized Bed, J. Chem. Eng. Japan, Vol. 13, No.2(1980), 117~122.
- 11) Gutman, R. G.; Vibrated Beds of Particles. Part II. Heat Transfer in and Energy Dissipation of a Vibrated Bed, Vol. 54(1976), 251~257.
- 12) Pakowski, Z., et al; Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Processes, Advanced in Drying, Vol. 3(1984), 254~299, Washington, Hemisphere Pub. Co.
- 13) 鈴木寛一, 他4名; 振動流動層における軸方向粒子移動速度, 化学工学協会第13回秋季大会研究発表講演要旨集(1979), 559.
- 14) Bukareva, M. F., et al; Investigation on Heat Transfer between Heating Surfaces and a Vibro-fluidized Bed, Int. Chem. Eng., Vol. 9, No.1(1969), 119~121.
- 15) Goldblith, S. A., et al; Freeze Drying and Advanced Food Technology(1975), London, Academic Press.
- 16) 佐原幸雄; 凍結乾燥コストの研究(I), 食品工業, 23巻, 10下号(1980), 48~56.
- 17) Strumillo, C., et al; Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds, Drying'80, Vol.1(1980), 211~226, Washington, Hemisphere Pub. Co.