

食品の乾燥（3）

—真空凍結乾燥と噴霧乾燥の特徴と問題点—

林 弘 通*

粉乳やインスタントコーヒなど日常よく使用されている食品は主として凍結乾燥と噴霧乾燥により製造されている。今回はこの二つの乾燥法に絞って、その技術的問題について解説する。

1. 真空凍結乾燥法

1. 原理と特徴

真空凍結乾燥は前回述べたように熱変性し易い食品を対象としており、溶液を凍結している間に乾燥させるので物質の化学変化はほとんど起らない。食品をまず凍らせ、氷にしてから昇華によって乾燥させる（図1）。し

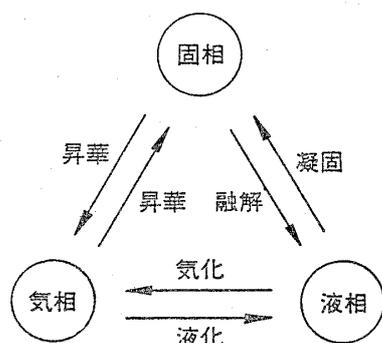


図1. 物質の3相の関係

たがって凍結乾燥のメリットとしては、①物質の物理、化学的变化が少ない、②原形のまま乾燥可能、③乾燥粉末の水への還元性が良い、などである。この工程は大きく四つの要素に分けられる。

1.1 予備凍結

被乾燥物はバルクに入れて乾燥室内の棚板 (tray) に仕込む。室内の扉をしめ、棚板を冷却、凍結する。

食品は共晶混合物を造るので、その混合物の共晶点以

下まで冷却する必要がある。食品の共晶点は、その塩分、糖分など含有量が多い場合、非常に低くなるので試料は -30°C 以下まで冷却しなければならない。また凍結された試料の結晶構造をそろえ、乾燥後の形状を良くするため、その試料に合う最も適切な凍結プロセスを（例、緩慢凍結、再結晶方式など）考える必要がある。

1.2 コールドトラップ冷却

これは凍結試料より発生した水蒸気を冷却面で熱を奪い氷として集める所である。したがって一種の cryo-pump（冷却によりガス、蒸気を捕集するポンプ）となり、低温（ $-50^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ ）で広い冷却面積が必要である。また、発生蒸気は高真空における稀薄な流体であるから、その冷却面は、形状、配列共に効率良い配置が必要である。そして冷却面上に氷を均一に附着させ真空ポンプに負荷をかけないようにしなければならない。

1.3 真空排気

真空ポンプは乾燥室内、コールドトラップ内（図2）などの残留空気の排気を主として行う。この他装置の漏洩、放出ガス、トラップで捕えられない蒸気なども排気しなければならない。しかしこの排気量はそれほど大きなものではない。逆に乾燥速度を早めるために空気の導入や真空ポンプの on, off により、高い圧力（悪い真空度）に制御することがある。

1.4 乾燥

水分の昇華には、大きな昇華熱（ $2,805\text{ kJ/kg}$ ）が必要であり、昇華が始まると直ちに試料の温度は急速に低下する。このため、一定の昇華を続けるために、試料を強制的に加熱しなければならない、凍結乾燥でありながら、加熱システムが必要となる。試料の加熱は融解がおこらないよう、試料の共晶点以下に保ちながら最も早い乾燥速度が得られるような最適温度に制御しなければなら

* 東京農業大学生物産業学部

食品の乾燥(3)

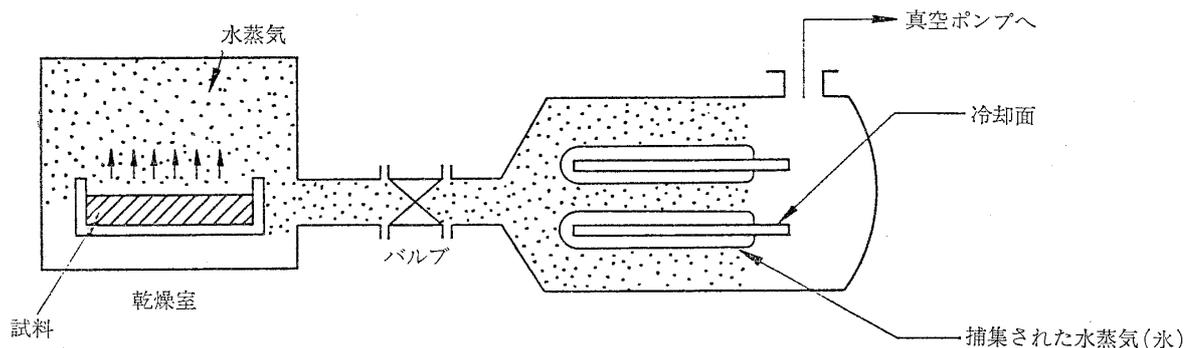


図 2. コールドトラップ概略図

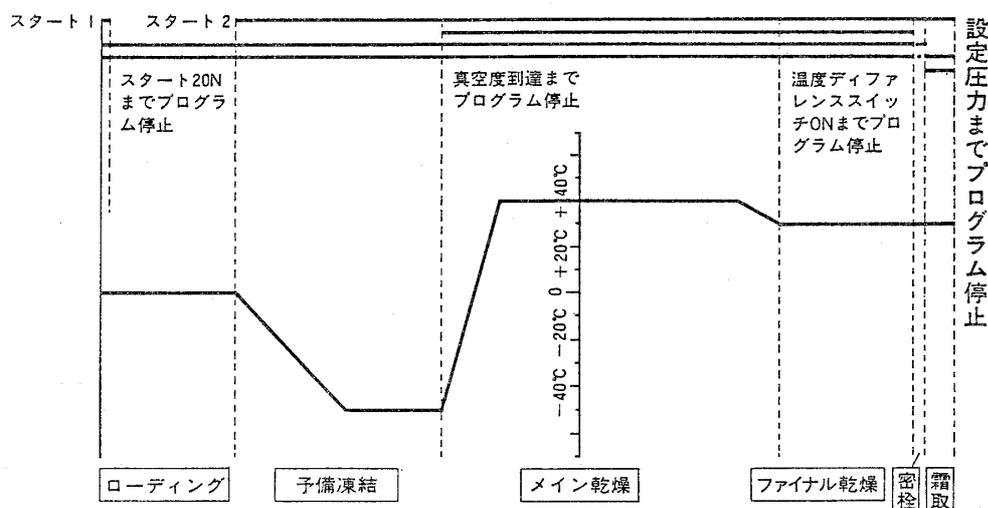


図 3. 真空凍結乾燥機のプログラム制御

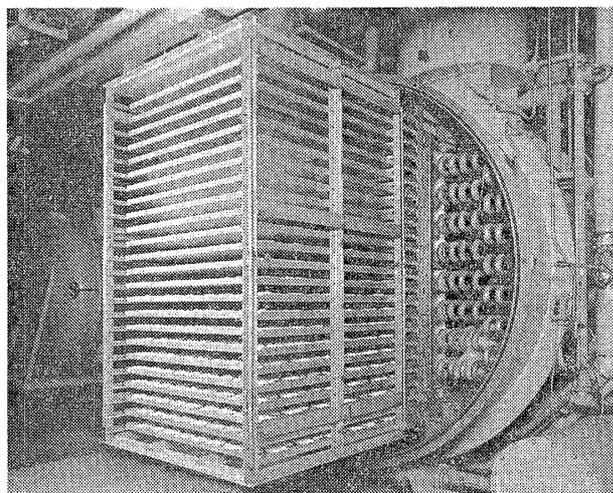


図 4. 真空凍結乾燥装置内部 (共和真空(株)提供)

い。最適な加熱方式と加熱温度の選択は乾燥工程の key point である。プログラム制御による全自動運転の一例を図3に示す。

図4にその装置内部、図5にその製造工程図を示す。

2. 凍結乾燥の物理的特徴

凍結乾燥は気相と固相の平衡系における水蒸気と熱の移動現象である。脱水中の被乾燥物中の水分分布は、理想的には昇華面の前後で凍結層の初期水分 (m_0) から乾燥層の平衡水分 (m_f) へ不連続的に変化する (図6)。実際の系では昇華面の乾燥層側近傍に水分の遷移領域が存在する (図7)。

凍結乾燥では水蒸気流と熱流が同時に発生するので、乾燥速度はこれらの流れの抵抗により影響される。いま供給された熱がすべて昇華に使用されるとすると、これらの流れの関係は次式で表わされる。

$$\Delta H_s = q/g \quad \dots(1)$$

ここで ΔH_s : 昇華潜熱, q : 熱流速度
 g : 水蒸気流速度

熱流と水蒸気流は図8に示すようにおおよそ3種類に分けられる。すなわち、

- (a) 熱流と水蒸気流が共に乾燥層を通り、流れの方向は逆となる。
- (b) 熱流は凍結層を、水蒸気流は乾燥層を通り流れ。

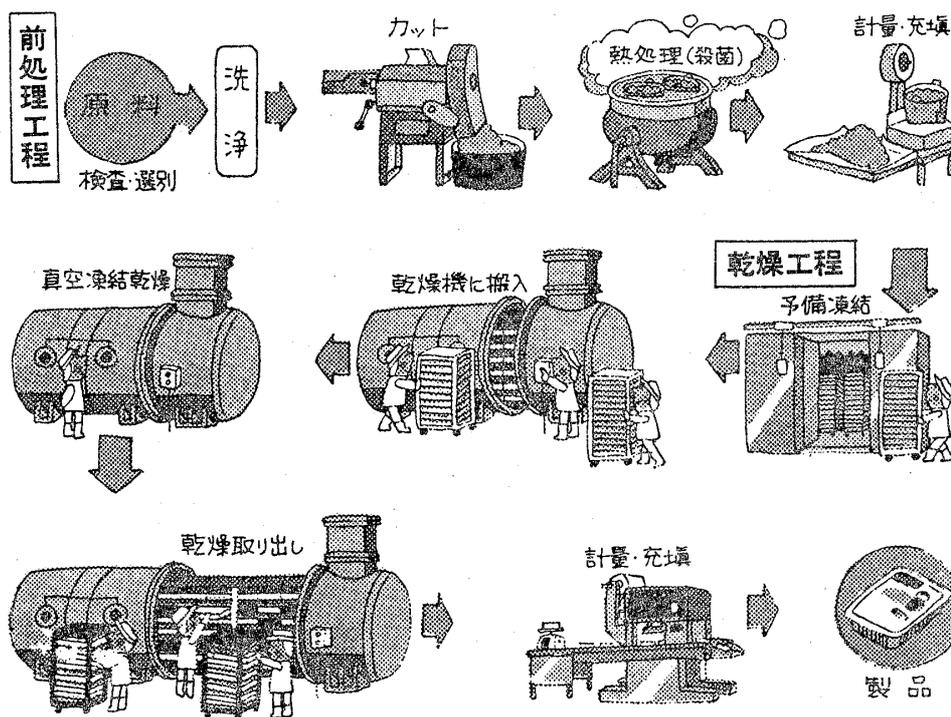


図 5. 真空凍結乾燥工程図

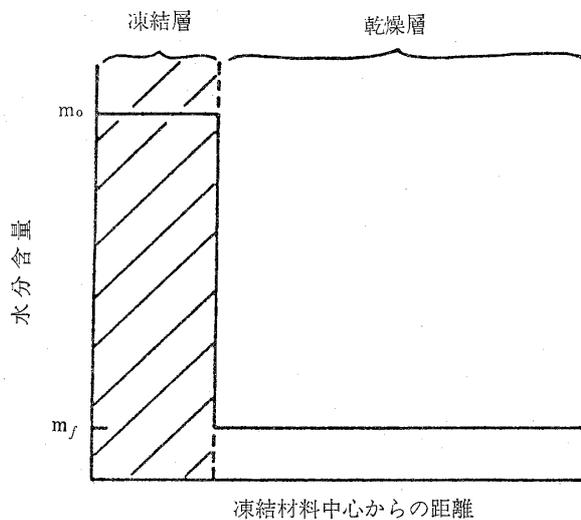


図 6. 凍結乾燥中の水分勾配 (理想状態)

の方向は同一である。

(c) 誘電加熱により水自体を直接加熱し、水蒸気流は乾燥層を通る。

乾燥層の断熱性は食品の場合、非常に大きく、コルクや発泡スチロールと同程度である(表1)。そのため乾燥層表面の温度に比べて凍結層の温度はかなり低くなる。乾燥層の表面温度は熱変性を避けるため通常 30~40°C 以下に保つ。その場合、凍結層の温度は -20~-30°C 迄下る。

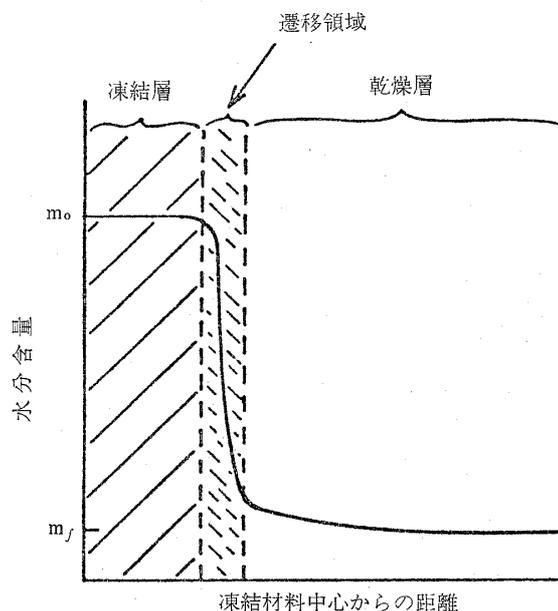


図 7. 凍結乾燥中の水分勾配 (実際の状態)

乾燥時間は、温度や圧力以外に被乾燥物の構造や方向性にも左右される。例えば七面鳥の肉の場合、方向によって 2.5 倍にも変化する¹⁾ 氷晶の形も無視できない。凍結変性が無視できれば、緩慢凍結により粗大氷晶とした方が乾燥時間が短くなるからである²⁾。

食品の乾燥(3)

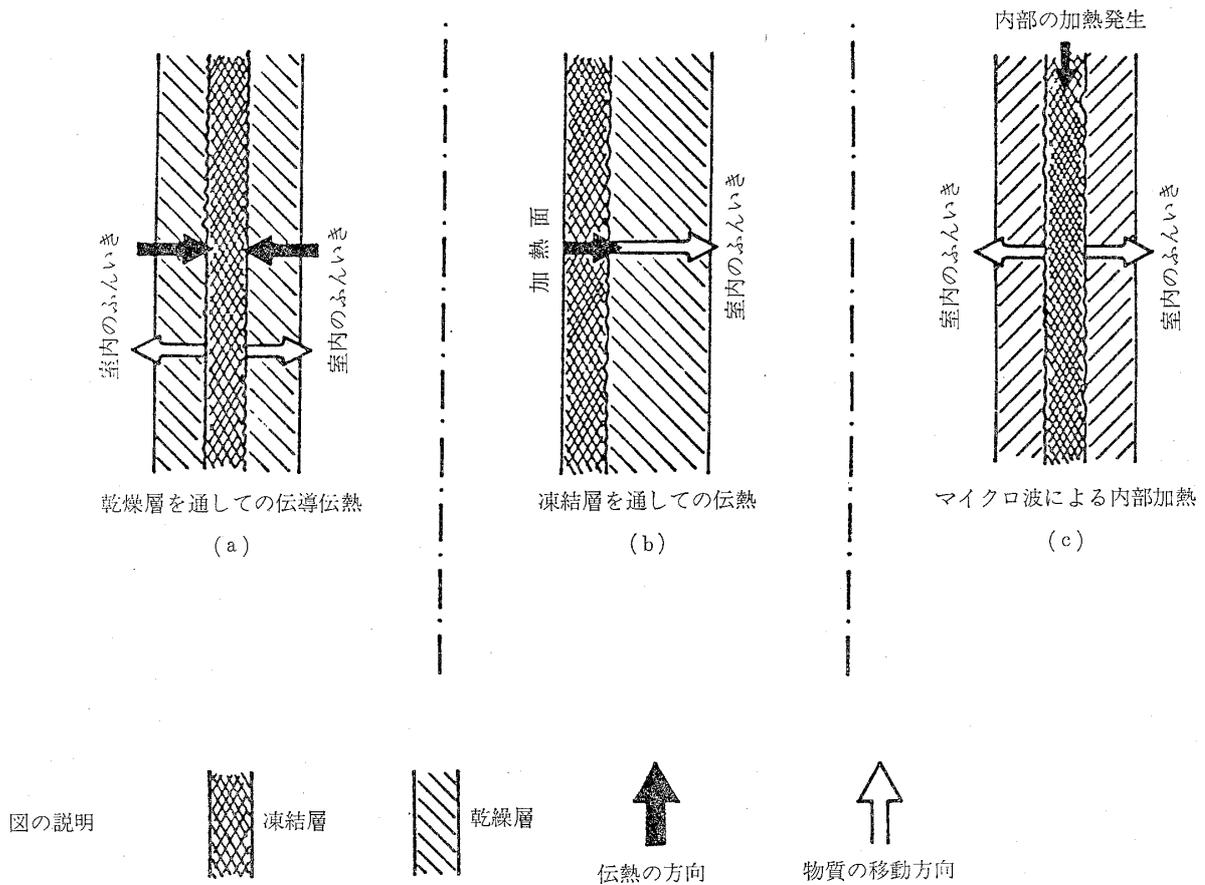


図 8. 凍結乾燥時における各種伝熱型式

表 1. 各種気体中における凍結乾燥食品の水蒸気透過能

食品材料	圧力 (Torr)	透過能 (kg/Torr·m·hr)×10 ³	
		空気または窒素ガス	ヘリウム
牛肉	1.6	6.9	—
七面鳥肉	0.1	7.6	7.3
	1.0	6.9	4.8
	10.0	2.5	1.0
	100.0	0.37	0.12
	760.0	0.05	0.015
コーヒ (10%固形) ^a	0.15	0.03	—
ゼラチン (2.6%固形) ^a	0.21	0.003	—
コーヒ (20%固形) ^a	0.93	0.015	—

a 凍結乾燥前の固形量

3. 凍結条件と乾燥速度

凍結速度が遅いと粗大氷晶の成長により、被乾燥物の組織のマクロ的な変形のみならず、ミクロ的には蛋白質の高次構造にも変化を与えることになる。これらの変形変性はテクスチャーに大きな影響を与え、官能評価を極めて悪くする。例えばソフトでなめらかな舌ざわりを特徴とするカッテージチーズ (脂肪率の高いもの) のテクスチャーは緩慢凍結により著しく阻害され、ボンボンと

したミーリー (舌に感ずる粉ばい状態) となる。一方、急速凍結した場合、テクスチャーの変化は明らかに少なくなる³⁾。しかし、急速凍結にも注意すべき諸点がある。例えば膨圧によるクラッキングの発生であり、甚だしい場合には粉碎状態により仕上りの外観を損うことがある。最も注意しなければならないのは非晶質の形成である。急速凍結が好ましいといっても、液相のまま過冷

表 2. 再結晶温度^{4,6)}

食品名	再結晶温度 (°C)
デキストラン	-10
フラクトース	-48
ゼラチン	-11
グルコース	-41
ラフィノース	-27
砂糖	-32
いちご	-32~-20
オレンジジュース	-43~-18
りんごジュース	-43~-23
グレープジュース (muscat)	-45~-27
レモンジュース	-22~-19
ピーチジュース	-21~-18
アブリコットジュース	-29~-22

表 3. 氷上の水蒸気圧と温度との関係

温度			温度		
deg. C.	mmHg (Torr)	Pa	deg. C.	mmHg (Torr)	Pa
0	4.579	610.5	-34	0.1873	25.0
-2	3.880	517.3	-36	0.1507	20.1
-4	3.280	437.3	-40	0.0966	12.9
-6	2.765	368.6	-44	0.0609	8.1
-8	2.326	310.1	-48	0.0378	5.0
-10	1.950	260.0	-52	0.02300	3.1
-12	1.632	217.6	-56	0.01380	1.8
-14	1.361	181.5	-60	0.00808	1.08
-16	1.132	150.9	-64	0.00464	0.69
-18	0.939	125.2	-68	0.00261	0.35
-20	0.776	103.5	-72	0.00143	0.19
-22	0.640	85.3	-76	0.00077	0.10
-24	0.526	70.1	-80	0.00040	0.05
-26	0.430	57.3	-84	0.00020	0.03
-28	0.351	46.8	-88	0.00010	0.013
-30	0.2859	38.1	-92	0.000048	0.0064
-32	0.2318	30.9	-96	0.000022	0.0029
			-98	0.000015	0.0020

却し、そのまま固化した非晶質は昇華脱水ではなく、蒸発脱水となる。そのため溶質が移動し、変形、変質へとつながる。さらに脱水時間も著しく長くなる。固形分の高い食品、特に水溶液の融点の低い果糖、ブドウ糖を多量に含む果汁、果肉等はこの傾向が大きい。非晶質を結晶化するには、冷却後、一度融点以上迄昇温し、再度冷却するのが一方法としてあげられる(表2)。食品の融点は固形分が多いこともあって一般にかなり低温である。融点を下げる物質としては強電解質や糖類などである。通常の凍結乾燥機は0.1mmHg程度の真空度で運転さ

れることが多い。これよりも高真空にすることは真空ポンプのランニングコストが高くなるためである。この程度の真空度における氷の平衡温度は約 -40°C である(表3)(図9)。したがって -40°C 以下の融点をもつ食品は高付加価値のものを除いて凍結乾燥に適しない。その理由は超低温トラップ(真空度の高いポンプが必要)と長時間の乾燥が必要となりランニングコストが高くなるためである。特に2価の強電解質や果糖、ブドウ糖などの単糖類を多く含む食品は一般に融点が極めて低い。

たとえばオレンジジュースの場合、季節、品種、産地等により、糖の割合が異なり、 -43°C ~ -18°C の幅をもつ。日本のみかん(例愛媛産)は全固形分中で蔗糖53.7%、ブドウ糖12.5%、果糖10.9%で、その融点は -34°C である。このみかん果汁の場合、 $-34.7\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ で完全な昇華脱水、 $-32.3\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ では部分的な蒸発脱水、 $-27.5\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ では発泡して完全な真空濃縮状態となった。

4. 復水性

食品の凍結乾燥が理想的に行われれば、その食品を復水させた時、その色、形、テクスチャーなどのすべてが脱水前に短時間で戻ることになる。たとえば、全脂粉乳であれば冷水ですぐ溶けるとか、乾燥野菜であればパリパリした弾力性、果汁粉であれば新鮮な香りと味である。復水性は一定温度の水に一定時間浸して再吸収された水と脱水された水の比をとることにより表すことができる。すなわち、これは凍結乾燥による変性の簡単な指標にな

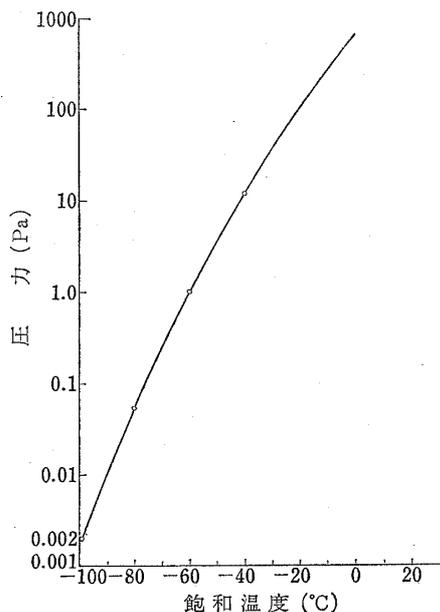


図 9. 水、氷の飽和温度と飽和蒸気圧の関係

食品の乾燥(3)

る。野菜等、復水に比較的時間を要するものに適用できる。またこの指標は凍結乾燥法の改良にも利用できる。

例えばニンジンの凍結乾燥に当たっては、0.2MNaCl処理で復水速度が54.7%増加することが見出されている⁵⁾(図10)。脱脂粉乳に関しては凍結法および加熱法の工夫により冷水でもよく溶けるものが得られている。

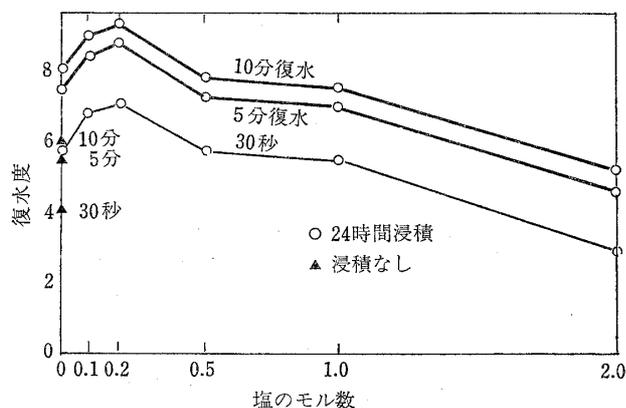


図10. 1cm角に細切した凍結乾燥人参の復水能

5. 脱水コスト

商業的に成り立つためには薬品等の付加価値の高いものに限定される。凍結乾燥による食品群は高真空領域で製造されているものが多い。したがってポンプの到達真空度、排気能力、コールドトラップなどの関係からランニングコストが高くなる。食品に適用させるためには、脱水コストを下げる必要がある。このコストはほぼ脱水速度に比例する。いかに効率よく昇華面に過不足なく熱を供給し、かつ昇華、脱水(トラップ表面での氷晶形成)するかという問題や凍結方法、被乾燥物の形状などについてはさらに検討されるべき問題である。

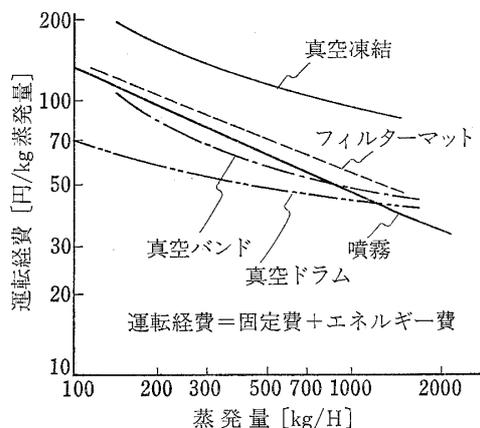


図11. 各乾燥器の乾燥経費

凍結乾燥機はインスタントコーヒー製造以外は殆んど回分式であり、乾燥コストに影響するのはその乾燥能力である。データとしては少し古いだが、各種乾燥機の乾燥経費の比較を表4、5⁷⁾、図11に示す。

II. 噴霧乾燥法

1. 噴霧乾燥機の構成

噴霧乾燥は、前回述べたように液状の原料を微粒化、熱風と接触、乾燥させ、一挙に粉粒体製品を得る方法である。このように原液を微粒化することにより、重量当たりの表面積を著しく大きくし、乾燥速度を高めることができる。図12⁸⁾に従いがい、具体的な構成を示す。

1. 噴霧乾燥室 (spray drying chamber)
2. 熱風発生装置 (heater)
3. 原液の供給装置 (feed tank, pump arrangement)
4. 原液微粒化装置 (atomizer for raw liquid)
5. 製品回収装置 (cyclone)

表4. 各種乾燥器の乾燥経費比較 (円/kg蒸発量)⁷⁾

機種	固定費	エネルギー費	合計	エネルギー費比率	乾燥コスト比
噴霧	26 円/kg	38 円/kg	64 円/kg	59%	1
フィルターマット	36	37	73	51	1.1
真空バンド	95	52	147	35	2.3
真空ドラム	90	34	124	27	1.9
凍結乾燥	270	63	333	19	5.2

表5. 濃縮液の乾燥経費比較 (円/kg蒸発量)⁷⁾

機種	固定費	エネルギー費	合計	エネルギー費比率	乾燥コスト比
真空バンド	38 円/kg	21 円/kg	59 円/kg	35%	0.91
真空ドラム	32	16	48	33	0.75
凍結乾燥	88	28	116	24	1.8

6. 気流搬送系(pneumatic transport system cyclone)

7. 熱風の分配器 (hot air distributor)

食品用噴霧乾燥機はその能力を次第に増し、現在では水分蒸発量 5000 kg/hr 程度の巨大なものも出現している。能力の巨大化と共に大流量の噴霧ノズルも開発

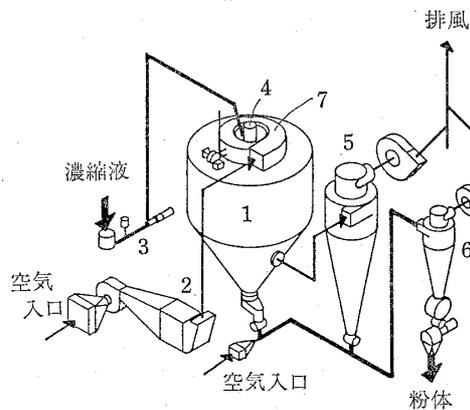


図 12. 円錐状乾燥室をもった普通の噴霧乾燥機⁸⁾ (1 段乾燥)

されてきている。また種々の高粘性液体食品の微粒化の問題、また流動層乾燥機との併用による乾燥効率の向上や造粒などの問題が重要となってきている。

2. 大流量用微粒化装置

噴霧乾燥用微粒化装置としては回転円板と高圧ノズルによる方法がある。前者による遠心力噴霧では食品用として最高流量 8000~9000 l/hr のものが開発されている。一方、後者は処理液の増加に対し 10~12 ケにおよぶマルチプルノズルが採用されてきた。この方式では多数のノズルから微粒化された液滴群の衝突や干渉により粒子径が大きくなり、熱風との均一な混合による水分蒸発が困難になる場合がある。また多数のノズルの場合、洗浄など保守管理の面で問題が多い。単一ノズルであると熱風吹込口へ挿入が可能である。その結果、温度差を大きくとり、水分蒸発速度を高めることが可能となる。このような利点から大口径、大流量単一ノズルの開発を行い、オリフィス径 10 mm、流量 10000 l/hr、液滴径 10~200 μm (平均径 110 μm) のノズルを開発した。将来は 16000 l/hr まで 1 ケのノズルで微粒化できるものとする。このノズルは図 13 に示すようなジメンションで L/d_e を 0.3 より 0.125 にすることにより、ノズルオリフィスにおける液の軸方向速度の減少と切線方向速度の増加により、噴霧角度を 114° まで広くし、液を薄膜にし微粒化することが可能となった^{9,10)}。図 14 にノズルパラメータ $\left(\frac{S_i}{d_e d_i} \sqrt{\frac{d_i}{d_e}}\right)$ と噴霧角との関係を示す。図 15 に L/d_e が 0.125 を 0.3~1.5

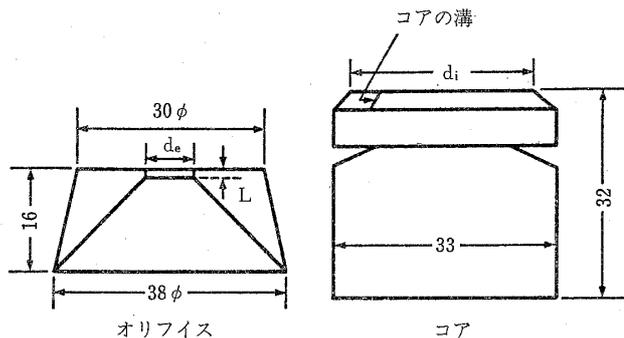


図 13. 大口径ノズルのオリフィスとコア

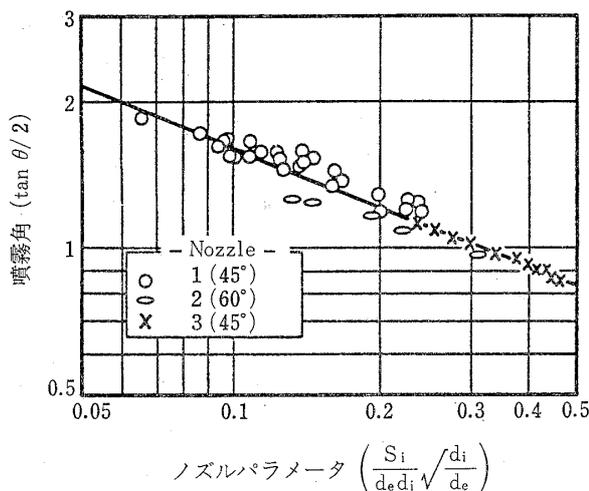


図 14. 大口径ノズルの噴霧角とノズルパラメータとの関係

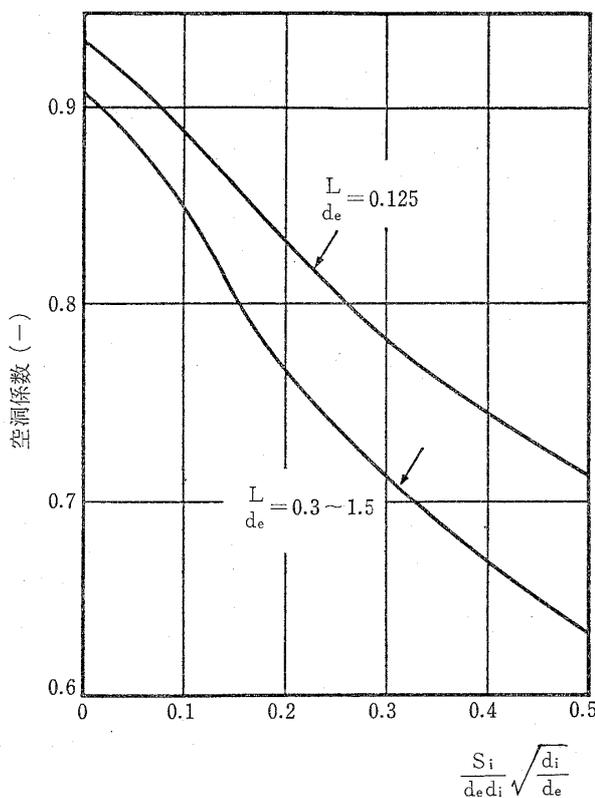


図 15. ノズルパラメータとノズルの空洞係数

食品の乾燥(3)

表 6. 商業用ノズルと開発した大口径ノズルの流量特性の比較

ノズル型式	オリフィス径 mm	ノズル圧力 kg/cm ²	流量 l/hr	噴霧角
Delavan, SDX (USA)	3.99	210	4590	65
Spraying System (USA)	(B20) 4.09	210	3700	69
	(B21) 4.09	210	1210	109
大口径ノズル (雪印)	10.00	150	5510	114

の場合のノズルパラメータと空洞係数を示す。L/de が小さい場合、いずれも空洞係数が大きい。特にオリフィス径が大きい場合に空洞係数が大きい。この意味はオリフィスから噴出する状態はより薄膜になり微粒され易くなるものと考えられる。したがって大流量ノズルを開発する場合には L/de の値が重要な因子となる。表 6 に商業用ノズルと大口径ノズルの流量特性の比較を示している。

大口径ノズルは Delavan 社ノズルと比べ、流量が多いにも拘らず噴霧角が非常に広い。一方、Spraying System 社ノズルの B21 と比較すると噴霧角はやや同じで広角になるが、流量がきわめて多い。このように大口径ノズルはオリフィス径が大きいにも拘らず噴霧角を広くとれるのは、L/de 比の最適化によるものである。つまり空洞係数を大きくとり薄膜状で微粒化できるようにしたためである。

大口径単一ノズルから液を微粒化した場合の、液滴の

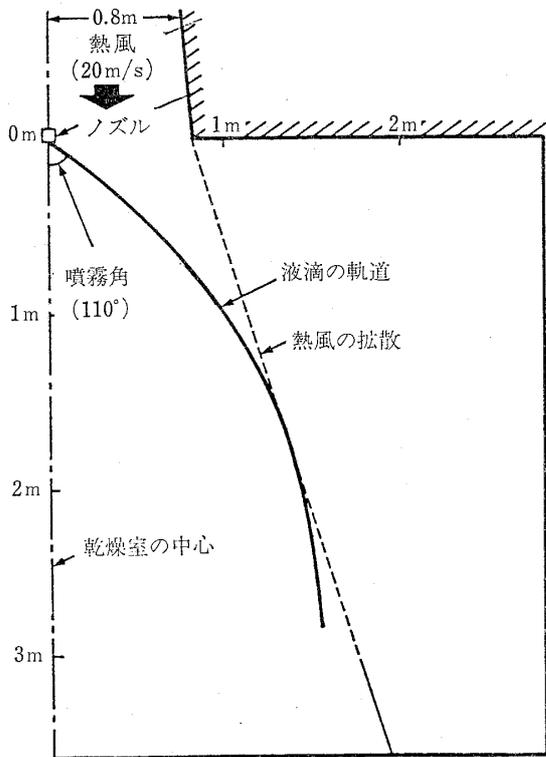


図 16. 乾燥室における微粒化液滴と熱風との関係

飛翔軌道と乾燥室頂部の熱風ダクトからの熱風の分散状況をモデル化したものを図 16 に示す。この図から熱の束 (heat bundle) が液滴の飛翔軌道を包みこむような形にすると乾燥速度が早くなる。このような場合、噴霧

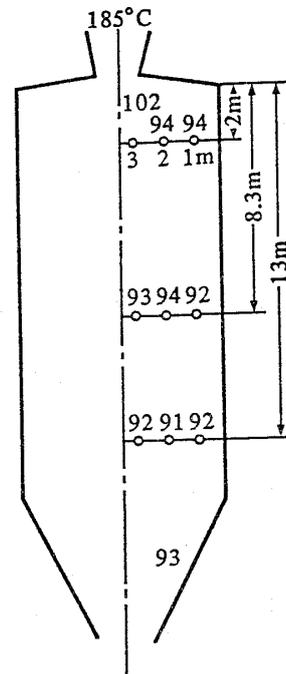


図 17. 噴霧乾燥室内の温度分布¹¹⁾

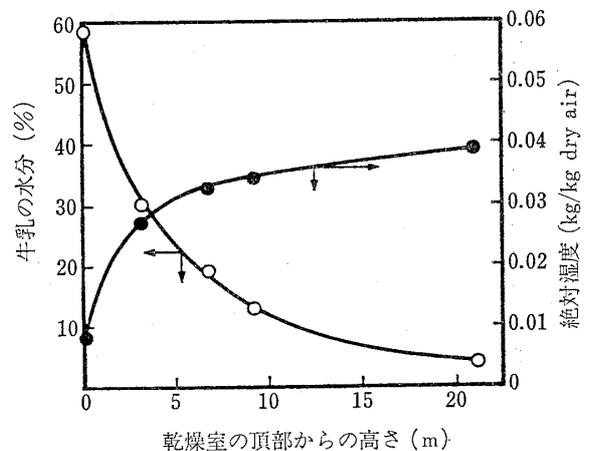


図 18. 乾燥室頂部よりの牛乳中の水分の減少と空気増湿の関係¹¹⁾

乾燥塔内の温度分布は図17のごとくである。また乾燥室内に微粒化した液(牛乳)の乾燥過程と水分を吸収して空気の絶対湿度が増加していく状態を図18に示す。

3. 高粘性の微粒化

糖, 蛋白含量の多い液体食品は濃縮などによって固形分が多くなると急激に粘度が上昇する。図19, 図20に魚肉(すり身: スケトウ)と脱脂乳のそれぞれの固形分と粘度の関係を示す。すり身は固形分3%で10,000mPa·sという高粘性になり, 微粒化が困難となる。このよう

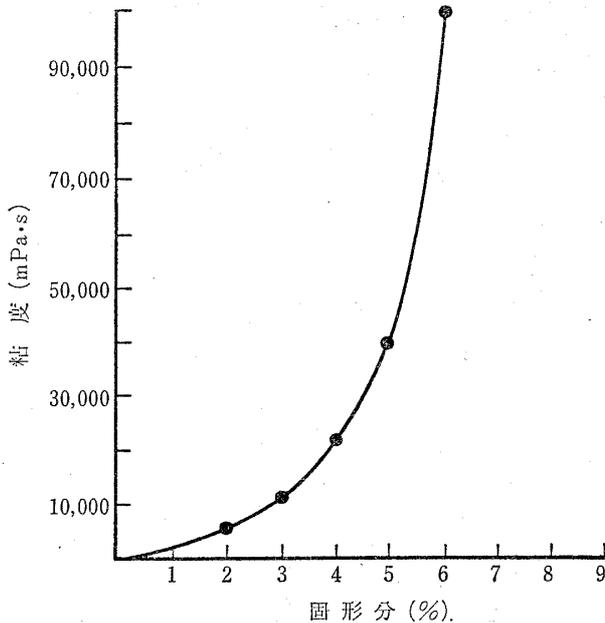


図19. すけとうたらの固形分と粘度の関係¹²⁾

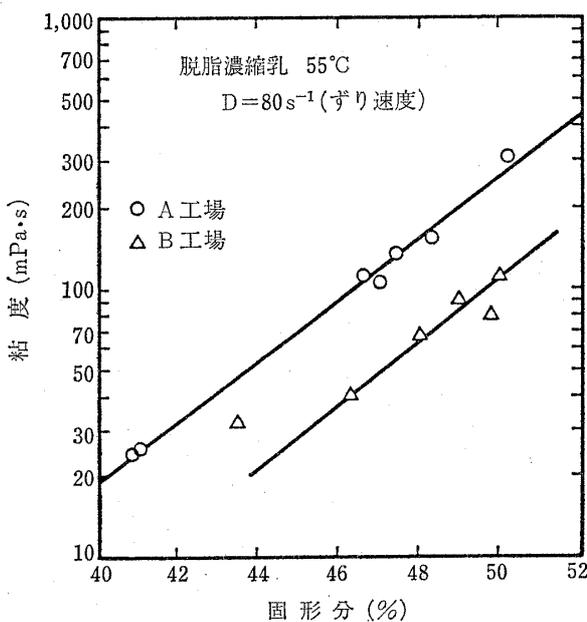


図20. 脱脂濃縮乳の固形分と粘度の関係¹³⁾

な高粘性では噴霧乾燥ができない。一方, 牛乳では固形分の増加と共に指数函数的に粘度が増加し, 約50%固形分で微粒化が困難となる, つまり, 噴霧乾燥では供給液の粘度が律速条件になる。これによって供給液の最高固形率が決められることになる。一般に食品の粘度(特に蛋白質含量の多いもの)は殺菌条件(加熱温度, 保持時間)によって影響をうけるので微生物の死滅条件を考慮に入れて, できる限り粘度が上昇しない処理法を検討すべきである。

4. 流動層乾燥法との併用

最近の食品の乾燥工程では一つの乾燥機で最終水分まで乾燥するのではなく, 2種類の乾燥機を併用し, それぞれの乾燥機の長所を生かしてその効率と製品々質を高める, いわゆる組合せ方式が多くなっている。たとえば噴霧乾燥機+流動層乾燥機(図21)またはフィルターマット乾燥機のようなものである。一般に乾燥には恒率と減率第1段と第2段といわれる乾燥期がある。恒率乾燥期においては被乾燥物の水分含量が多いために蒸発潜熱によって品温は上昇しないが, 減率乾燥期に入ると乾燥速度が急激に低下するばかりでなく品温の上昇が見られる。たとえば牛乳の噴霧乾燥では減率第1段が固形率35%付近から, 第2段が固形率約80%からといわれる。

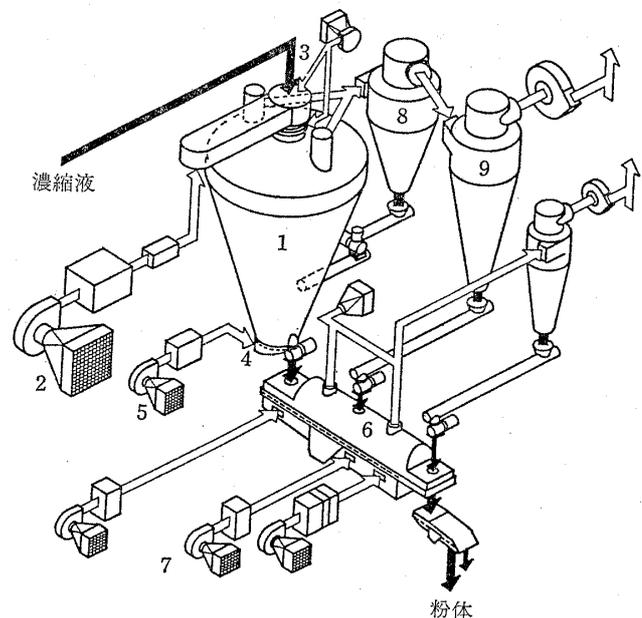


図21. 流動層内蔵噴霧乾燥(3段乾燥)⁸⁾

1. 乾燥室
2. 主熱風
3. ノズル
4. 流動層
5. (4)に入る乾燥空気
6. 振動流動層
7. (6)に入る乾燥冷却空気
8. 微粒子を捕集するサイクロン
9. 2次サイクロン

食品の乾燥(3)

噴霧乾燥では20~30secで熱風を乾燥室内から排出させ、水分を約3%まで低下させる。したがって排風温度は90~95°C(脱脂乳乾燥の場合)の高温になる。

一方、流動層乾燥機は比較的水分含量の少ない粉粒体を100°C以下の低温とmin単位の時間で乾燥する手法である。したがって最終水分含量は乾燥時間の調節によって容易に制御できる。噴霧乾燥機に流動層乾燥機を併用すれば排風温度を90°Cより70°Cに、製品温度もこの温度に対応して低下させることができる。このように製品品質の向上や噴霧乾燥室容積の減少が可能となるばかりでなく、粉体粒子の造粒や冷却などの工程が組み込めて、さらなる品質向上もできることになる。

まとめ

3回にわたり食品の乾燥について解説したが、以下に総括して述べる。

食品の乾燥は食品の保存法として最も古い歴史をもつものである。人類の生活の知恵として太陽熱の利用からはじまり、長い歴史を経て今日のような人工的に優れた乾燥技術が確立されたといえよう。最近の科学技術の進歩とともに乾燥技術の発展は著しい。特に食品の乾燥に主として用いられてきた流動層、噴霧、真空、真空凍結などの乾燥機の性能向上には目を見はるものがある。

食品乾燥の基本は、その材料の物理性、化学、微生物学的性質に適合した乾燥機の選択と、選択した乾燥機の工学的性能(熱的、機械的性能)が優れていることである。さらに良質の乾燥食品(色調をはじめとする化学的成分の変化がなく、芳香成分の逸散がない、溶解性が良いなどの性質)を生産できることである。

かような観点より、最近では各乾燥機の長所を生かした乾燥機の組合せ、つまり噴霧乾燥と流動層乾燥の併用、真空乾燥とマイクロ波、高温熱風と低周波の併用などによって乾燥速度の促進や品質の改善などがなされている。

1960年代に開発された噴霧乾燥機には、ビルス(Birs)の無加熱低湿(30°C相対湿度3%以下)による方法と、パデュ大学の高湿空気(400°C)による塔容積を限り無く小さくしようとする両極端の方法が出現した。前者は巨大な乾燥塔と膨大な空気量が必要でイニシャルおよびランニングコストが通常の噴霧乾燥に比べかなり高くなり、その割に品質を差別化できなかった。後者は乾燥後の粒子径が10 μ m位の微少粒子となり溶解性がきわめて悪い。前者は約10年、後者は2,3年で話題性と市場性が失われていった。このように品質と経済性の上で問題となる食品用乾燥機は、永続性のないことを歴史が証明している。

真空凍結乾燥法は1950年代に欧米で1960年代に日本

で食品工業で用いられるようになった。それから約30年を経て、日本では、この方法による乾燥食品の売上げが約1000億円(うちインスタントコーヒー約400億円)までになっている。この方法は他の乾燥法より乾燥コストが2~4倍と高いにもかかわらず、品質が極めて優れ芳香成分を尊重するコーヒー、インスタント食品用の具などに専用されている。装置自身の性能改善には色々な新しい技術の試みがなされたが、結局、真空凍結乾燥本来のユニットオペレーションの改善にとどまっていた、1950年代からの革新技術は出現していない。

今後、食品材料の芳香成分の逸散防止や各成分の熱変性、物性など乾燥機構との関係で基礎的に研究する必要がある。このような研究により新しい性能の良い食品用乾燥システムの確立と、機能性の優れた食品の開発が行われるものと考えられる。

文 献

- 1) Karel, M.: *Theory Determination and Control of Physical Properties of Food Materials*, 221-250, D Reidel Pub. Co, Holland, (1975)
- 2) King, C.J. et al.: *Food Technol.*, 22, 1302, (1968)
- 3) 堀 友繁: 私信 (1980)
- 4) Reg, L.: *Advances in Freeze Drying*, Hermann Paris, (1966)
- 5) Curry, C.J. et al.: *J. Food Science*, 41, 176-179 (1976)
- 6) MacKenzie: *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 125 (Part 2), 522 (1965)
- 7) 橋 孝六: 最近の乾燥装置テキスト, 日刊工業新聞社 (1980) 6月
- 8) Hansen, R.: *Evaporation, Membrane Filtration and Spray Drying*, North European Dairy Journal (1985)
- 9) 竹田誠一, 林 弘通: 大口径ノズルによる噴霧乾燥実験, 雪印乳業研究所報告 (1974)
- 10) Hayashi, H., Takeda, S.: *Spray Drying Characteristics by a Centrifugal Pressure Nozzle*, *Drying Technology*, 4 (3), (1986)
- 11) 林 弘通: 食品乾燥の歴史と発展, 雪印乳業研究所報告, 85号 (1987)
- 12) 仁木 弘: 噴霧乾燥法による鮮肉活性魚肉粉末の製造開発に関する研究, 雪印乳業研究所報告, 82号 (1986)
- 13) 和田恒雄, 林 弘通: 高粘度食品の濃縮乾燥に関する研究, 雪印乳業研究所報告 (1975)