

ミソペーストの凍結乾燥条件と 移動物性値に関する研究

味の素(株)

東京大学

東京大学

上 西 浩 史 ・ 荒 木 徹 也 ・ 相 良 泰 行

日本冷凍空調学会論文集 Vol.16 No.3 別刷

社団法人 日本冷凍空調学会

ミソペーストの凍結乾燥条件と 移動物性値に関する研究

Study on Freeze-drying condition and Transport Properties for Miso Paste

上 西 浩 史* 荒 木 徹 也** 相 良 泰 行**
 Koji KAMINISHI Tetsuya ARAKI Yasuyuki SAGARA

*味の素(株)東海工場工務部 (510-0885 四日市市日永 1730)

Department of Engineering works, Tokai Factory, Ajinomoto Co., INC.
 (1730, Hinaga, Yokkaichi 510-0885)

**東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻 (113-8657 文京区弥生1-1-1)

Department of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural
 and Life Sciences, The University of Tokyo (1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku 113-8657)

Summary

Drying Characteristics and the transport properties have been measured for the dried layers of 9.6-28.8% miso paste undergoing freeze-drying. Optimum freeze-drying condition was investigated based on the relationship between the heating temperature and color change by scorching at the sample surface. The samples were freeze-dried at the constant surface temperatures ranging from 0 to 65°C under the usual pressure range of commercial operations. Thermal conductivities and permeabilities were determined by applying the uniformly-retreating-ice front model to the dried layer of samples undergoing freeze-drying.

The surface temperature of 28.8% miso paste was allowed to heat up to 55°C, and its drying rate was limited by the heat transfer rate across the dried layer. Optimum drying condition to produce a cup of freeze-dried miso soup was found to be about 22% in solute concentration and 55°C at surface temperature during drying.

Values of thermal conductivity were found to increase with increasing solute concentrations, while no marked effect of the solute concentration was observed on the data of permeabilities, indicating the pressure dependence under our experimental conditions.

Key words : Freeze-drying, Miso Paste, Drying Characteristics, Thermal Conductivity, Permeability

1. 緒 言

現在、凍結乾燥法はインスタントコーヒーに代表される食品産業やワクチンなどの医療分野などで幅広く応用されている。一方、凍結乾燥製品は従来の乾燥製品と比較してコスト的に割高である。通常、溶液状またはペースト状材料

を対象とする実用規模の凍結乾燥操作は材料の品質劣化を招かない加熱温度条件を経験的に決定し、その温度を採用して加熱棚温度一定の条件下で行われる。この現行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る場合が多い。このため作業員の就労

時間帯がシフトすることとなって、雇用のための費用が割高となるとともに、凍結乾燥工程のエネルギーコストも高くなっている現状にある。これらの問題に対処するためには、対象材料ごとに材料表面の最適加熱温度プログラムを設定し、乾燥時間の短縮を図る必要がある。すなわち、凍結乾燥装置の最適運転操作法を確立することが望まれている。このためには乾燥速度を予測する必要がある、そのための数理モデルも提唱されている。しかしこれらのモデルを利用するためには、材料に形成される乾燥層の移動物性値、すなわち熱伝導率と水蒸気の透過係数が不可欠な物性値となる。しかしながら、高濃度塩分材料については凍結乾燥特性や移動物性値を定量的に測定した研究例は数少ない現状にある。この理由は、これらの材料では凍結層の融解・発泡が生じやすいために、加熱温度条件を高く設定することが不可能となり、その結果乾燥に長時間を要し、マーケティングの面で不利となるためである。このように、従来より高濃度塩分材料の加熱条件は不明であり、凍結乾燥が困難であるとされてきた。

本研究の目的は、凍結乾燥が困難とされてきた高濃度塩分材料の代表としてペースト状のミソを供試材料に選び、固形分濃度および塩分濃度を調整した材料を対象にして、1)凍結乾燥が可能な濃度および加熱温度条件を明らかにし、2)材料の凍結乾燥特性および乾燥層の熱伝導率と水蒸気透過係数を測定し、3)乾燥表面材料にこげ (Scorch) 色が発現しない加熱温度条件を考慮した即席乾燥ミソ汁を製品化するための最適乾燥条件を提唱することにある。

主な使用記号

C_p	水蒸気の定圧比熱、J/(kg · K)
ΔE	色差
ΔH	氷の昇華潜熱、J/kg
K	水蒸気透過係数、 m^2/s
l	試料の厚さ、m
M	分子量、kg/mol
m	水蒸気フラックス、 kg/m^2s (Fig.1)

m	残存水分率、- (式(3), 式(4))
m	試料質量、g (Table 2)
p	水蒸気圧力、Pa
q	熱フラックス、 J/m^2s
R	気体定数、 $J/(mol \cdot K)$
T	絶対温度、K
t	時間、s
w	含水率
$X(t)$	昇華面の厚さ、m
(Greek letters)	
α	(3)式のパラメータ、-
β	(4)式のパラメータ、-
θ	試料温度、 $^{\circ}C$
λ	熱伝導率、 $(W/m \cdot K)$
ρ	密度、 kg/m^3
(Subscripts)	
f	昇華面
i	初期 (乾燥前)
s	試料表面
s	固形分 (Table 2)
w	水または水蒸気

2. 移動物性値推算モデル

Fig.1 に凍結乾燥プロセスにおける材料乾燥層の移動物性値推算モデル¹⁾を示す。食品材料の凍結乾燥の場合には、ま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)。二次乾燥期の乾燥機構は真空乾燥のそれと同様に、主に微量水分の

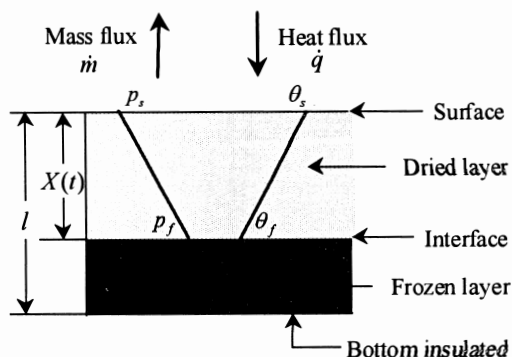


Fig.1 Freeze-drying model for transport properties analysis

脱湿プロセスであると考えられるから、凍結乾燥機構の特徴は一次乾燥期の昇華乾燥にあり、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。

このモデルでは一次乾燥期にある材料を半無限平板と仮定し、その底面は断熱され、一次元的な熱および物質移動が生じているものとする。さらに、このモデルには次に示すような仮定を設けている。すなわち、1) 乾燥は準定常状態で進行する。2) 昇華面は材料表面から均一に後退し、材料内各部の温度・圧力および昇華面の位置等の経時変化は小さい。3) 乾燥層の温度・圧力分布は直線で近似でき、凍結層の温度は均一でありその値は昇華面温度と等しい。4) 乾燥層を通じて供給された熱は全て昇華潜熱として消費される。

以上の仮定に基づき試料の乾燥層について熱および物質移動式を導入すると、熱伝導率と透過係数はそれぞれ次式で与えられる。

$$\lambda = \alpha \rho_w l^2 (\Delta H + \int_{\theta_f}^{\theta_s} c_p d\theta) \quad (1)$$

$$K = \beta \rho_w l^2 RT_f / M_w \quad (2)$$

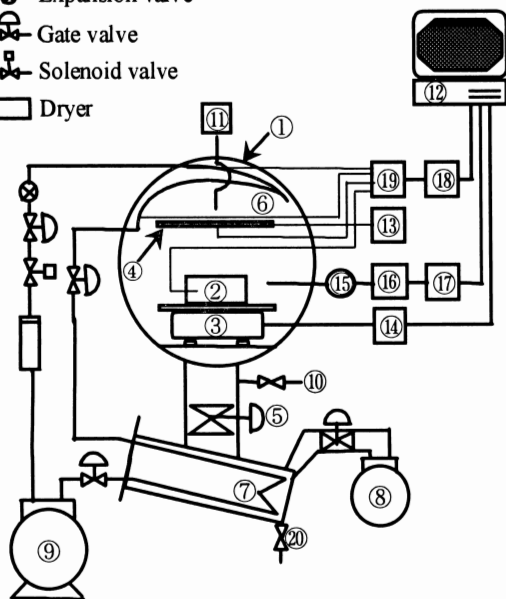
— Thermocouple (T-type)

⊗ Expansion valve

⊕ Gate valve

⊖ Solenoid valve

□ Dryer



- ① Vacuum chamber
- ② Sample with sample holder
- ③ Electronic balance
- ④ Radiant heater
- ⑤ Main valve
- ⑥ Internal condenser
- ⑦ External condenser
- ⑧ Oil rotary vacuum pump
- ⑨ Refrigerator (Condensing unit)
- ⑩ Leak valve
- ⑪ Pirani vacuum gauge
- ⑫ Computer
- ⑬ Temperature controller
- ⑭ Weight indicator
- ⑮ Diaphragm-type pressure sensor
- ⑯ Pressure indicator
- ⑰ BCD converter
- ⑱ A/D converter
- ⑲ Cold junction
- ⑳ Drain valve

Fig. 2 Schematic diagram of experimental freeze-dryer and measurement system

ここに、

$$\alpha = \frac{1-m}{(\theta_s - \theta_f)/(-dm/dt)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1-m}{(p_f - p_s)/(-dm/dt)} \quad (4)$$

ただし、これらのパラメータは材料の乾燥特性データより計算される。

3. 実験装置および方法

3.1 凍結乾燥装置および計測システム

Fig. 2 に実験用凍結乾燥装置および計測システムの概略図を示す。真空チャンバ①（共和真空製 内径 492×奥行 470mm）内のガスは主弁⑤および外部コンデンサ⑦を経て油回転真空ポンプ⑧（島津製作所製 KLS 300DL GA）により排気される。水蒸気を凝縮するための内部コンデンサ⑥および外部コンデンサの裸管表面は冷凍機⑨（三菱電機製 空冷式 1.5kW、R-22）により-45～-50℃まで冷却さ

れる。また、乾燥中の試料の状態を観察できるように、真空チャンバには厚さ 30mm の透明アクリル板製ドアが取り付けられている。

真空チャンバ内には試料質量を連続記録する電子天秤③（島津製作所製 EB-3200S）が組み込まれている。試料②は輻射加熱ヒータ④により加熱され、これの電源電圧は試料表面温度測定用の熱電対を検出端として温度コントローラ⑬（千野製作所製 DA1131-000）により PID 制御される。真空チャンバ内の全圧は金属隔膜型圧力計⑮（MKS 製 310BHS-10）とピラニ真空計⑩を用いて計測される。

試料内温度分布、ヒータおよびコンデンサ表面温度は熱電対（T-type、 $\phi=0.2\text{mm}$ ）により計測した。ここに述べた全ての計測データは A/D データコンバータ⑭（ESD 製 Green-Kit 88）を介して 2 分間隔でパソコン⑯に集録した。

3.2 供試材料

本研究では高濃度塩分食品の典型的材料として市販米ミソであるアカミソとシロミソを供試材料に選び、純水希釈により固形分濃度を 9.6~28.8% (w. b.)、塩分濃度を 2.9~8.6% (g/100g) の範囲で調製して実験に供した。

3.3 サンプルホルダ

Fig. 3 に試料用サンプルホルダの概略図を示す。サンプルホルダは内径 94mm、深さ 20mm のアクリル製容器である。試料中央部の温度を底面から 5mm 間隔で測定するために、外径 2mm のステンレス管に熱電対を挿入・固定した。また、凍結および乾燥プロセスにおける試料内の熱と物質移動の方向が一次元となるように、試料の側面と底面をそれぞれ断熱した。すなわち、試料の凍結中にはサンプルホルダの側面をグラスウールで、乾燥中にはさらに底面もスタイロフォームで断熱した。

3.4 試料の凍結法および準備

Fig. 4 に試料の凍結法を示す。ブラインとしてエチルアルコールを満たした水槽の底面に銅製の支持台を設置し、この支持台上部に冷却銅板と試料容器を置いて凍結した。水槽

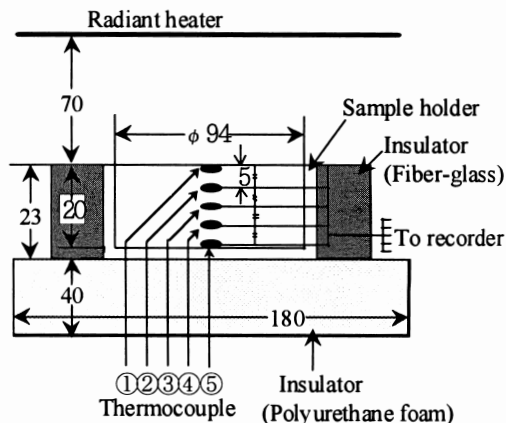


Fig. 3 Schematic diagram of sample holder for *miso* paste

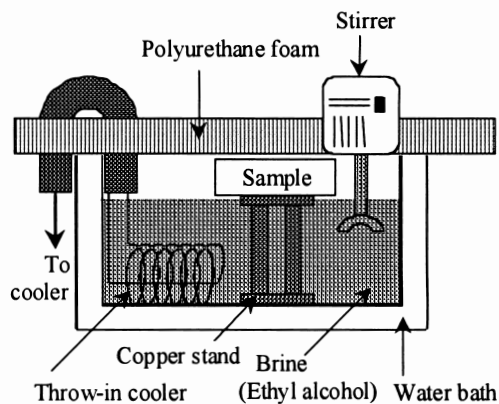


Fig. 4 Freezing apparatus

には投げ込み式クーラーを入れてエチルアルコールの温度を下げ、さらに攪拌ポンプによって常に攪拌した。ブラインの温度を低温に保つために水槽上端部をスタイロフォームで断熱し、外界からの温度の影響を防止した。試料は冷却銅板表面温度 $-30\sim-41^{\circ}\text{C}$ の条件下で凍結し、試料各部の温度がほぼ平衡に達した時点で凍結を終了した。

一般に溶液系材料では凍結後の試料は膨張し、その表面には高溶質濃度の薄膜が未凍結の状態 で形成される。この薄膜は乾燥中に発泡し試料の品質を劣化させ、あるいは水蒸気移動の抵抗となり凍結乾燥速度を著しく低下させることが指摘されている²⁾。本研究でも同様の現象が観察されたために、乾燥前に比

較のための試料 No. 1 と No. 3 を除く全ての試料の薄膜部分をナイフで除去した。

3.5 乾燥法および含水率・表面色測定

凍結を終了した試料は実用的操作で用いられる圧力条件 (20~30Pa) 下において、試料表面温度を 0~65℃の範囲で一定値に制御して乾燥し、試料重量および試料内温度分布が平衡状態に達した時点で乾燥を終了した。乾燥試料の含水率はカルフイッシャ滴定法により求め、このデータに基づき初期含水率を推算した。

また、凍結前の試料の表面色と乾燥試料の表面色および底面色を測色色差計 (日本電色工業製 Z-1001DP) を用いて測定し、得られたデータから同一試料の SCORCH による変色の程度を色差として評価した。

4. 実験結果および考察

4.1 凍結条件

長島・鈴木³⁾の研究によれば、生ミソペースト (52.8%(w. b.)) の共晶点温度は-60℃以下、濃度を 13.2%(w. b.)、26.4%(w. b.) に調製したミソ溶液では-10℃以下であることが分かっている。本研究ではこれらのデータと実用プラントで採用されている予備凍結温度-40℃を考慮し、この温度により凍結可能な固形分濃度の上限を 28.8%(w. b.) に設定した。

4.2 乾燥条件

Table 1 に各試料の乾燥条件を示す。表中の表面設定温度は、前述のモデルの項で述べた移動物性値が推算可能な準定常状態における表面の温度に相当する。ただし、乾燥中に準定常状態が存在しなかった試料 (No. 5~No. 11, No. 16, No. 18, No. 19) の移動物性値は推算不可能であった。

Table 2 に試料の質量と含水率およびこれらのデータから計算される密度をそれぞれ示す。全ての試料の凍結および乾燥プロセス前後の体積変化は無視できる程度であり、その密度はサンプルホルダの容積 138.4 (cm³) に基づき算出した。

Table 1 Concentration and drying conditions of miso paste samples

Sample No.*	Surface	
	Temperature (°C)	Drying time (hr)
1	5.0	41.8
2	25.0	33.9
3	45.0	28.5
4	45.0	27.2
5	0.0	31.3
6	20.0	23.6
7	40.0	25.2
8	35.0	22.4
9	45.0	22.0
10	55.0	20.2
11	65.0	18.9
12	47.5	19.8
13	50.0	18.8
14	53.5	18.6
15	55.0	18.2
16	56.0	23.4
17	57.5	21.0
18	45.0	23.0
19	55.0	22.5

* 1~ 4: akamiso; solute=9.6%(w. b.), salt=2.9%(g/100g)

5~11: akamiso; solute=28.8%(w. b.), salt=8.6%(g/100g)

12~17: shiromiso; solute=21.8%(w. b.), salt=6.0%(g/100g)

18~19: shiromiso; solute=28.8%(w. b.), salt=7.9%(g/100g)

4.3 試料の表面色

Table 3 に乾燥試料の表面色データをハンター表色系 (L*, a*, b*) で示す。表中のΔE はそれぞれの乾燥試料の表面色とこげが生じない試料底面色データの平均値との色差を示す。

表に示すように、濃度 21.8%(w. b.) の試料ではその表面温度 56℃付近で、濃度 28.8%(w. b.) の試料では 45~55℃の範囲内で、それぞれ試料表面にこげを発生させる表面温度の閾値が存在し、その値は固形分もしくは塩分濃度に依存するものと考えられた。すな

Table 2 Mass, moisture content, and density of *miso* paste

Sample No.	Mass (g)				Moisture content (%w.b.)		Density** (g/cm ³)		
	m _i	m _d	m _s	m _w	w _i	w _d	ρ _i	ρ _d	ρ _w
1 *	158.0	13.6	13.4	144.6	91.6	1.82	1.14	0.098	1.04
2	134.1	13.4	13.1	121.0	90.2	2.00	0.97	0.097	0.87
3 *	142.9	17.3	16.9	126.0	88.2	2.38	1.03	0.125	0.91
4	140.2	19.2	18.8	121.4	86.6	1.87	1.01	0.139	0.88
5	155.3	50.7	49.9	105.4	67.9	1.62	1.12	0.366	0.76
6	156.0	52.7	51.7	104.3	66.9	1.94	1.13	0.381	0.75
7	152.7	49.4	48.9	103.8	68.0	0.94	1.10	0.357	0.75
8	154.5	52.4	51.6	102.9	66.6	1.44	1.12	0.379	0.74
9	151.6	49.5	48.8	102.8	67.8	1.41	1.10	0.358	0.74
10	152.2	50.7	50.2	102.0	67.0	1.00	1.10	0.366	0.74
11	157.4	53.0	52.4	105.0	66.7	1.10	1.14	0.383	0.76
12	141.6	34.9	34.3	107.3	75.8	1.62	1.02	0.252	0.78
13	146.9	36.4	36.0	110.9	75.5	1.04	1.06	0.263	0.80
14	147.5	37.1	36.6	110.9	75.2	1.23	1.07	0.268	0.80
15	146.3	35.7	35.2	111.1	75.9	1.30	1.06	0.258	0.80
16	148.6	36.3	35.7	112.9	76.0	1.54	1.07	0.262	0.82
17	147.9	36.4	36.0	111.9	75.7	1.16	1.07	0.263	0.81
18	154.5	54.1	53.1	101.4	65.7	1.89	1.12	0.391	0.73
19	151.1	50.2	49.6	101.5	67.2	1.16	1.09	0.363	0.73

* without scraping

** Density was assessed from volume of the sample holder using 138.4 (cm³)Table 3 Color and color difference of dried *miso* paste

Sample No.	Surface	Concentration		Color			Color difference
	Temperature (°C)	Solute (%w.b.)	Salt (%g/100g)	L*	a*	b*	ΔE
5	0.0	28.8	8.6	63.37	7.64	34.63	10.51
6	20.0	28.8	8.6	61.56	8.43	37.10	12.96
7	40.0	28.8	8.6	62.87	8.65	36.49	11.67
8	35.0	28.8	8.6	65.71	7.72	34.02	8.27
9	45.0	28.8	8.6	67.68	7.02	33.20	6.15
10	55.0	28.8	8.6	57.34	9.07	33.83	16.62
11	65.0	28.8	8.6	60.26	9.04	36.91	14.28
12	47.5	21.8	6.0	67.87	6.21	36.72	10.14
13	50.0	21.8	6.0	71.00	4.72	36.24	13.57
14	53.5	21.8	6.0	68.94	6.06	37.85	11.32
15	55.0	21.8	6.0	68.59	5.79	36.00	10.93
16	56.0	21.8	6.0	56.42	9.78	36.38	2.38
17	57.5	21.8	6.0	61.79	9.68	37.80	3.73
18	45.0	28.8	7.9	70.28	4.38	33.18	11.83
19	55.0	28.8	7.9	54.48	11.23	37.72	11.36

わち、凍結乾燥中の試料表面温度をこれらの閾値以下に設定することにより、凍結乾燥試料の品質を左右する主要な指標である表面色の劣化を防止することが可能となるものと考えられた。

4.4 乾燥特性

4.4.1 低濃度試料

Fig. 5 に濃度 9.6%(w. b.) の試料を、試料表面温度 45℃ に設定して乾燥したときの凍結乾燥特性を示す。乾燥特性として試料質量、乾燥速度および試料内温度分布の経時変化を、操作因子として真空チャンバ内全圧、ヒータ温度およびコンデンサ表面温度の経時変化をそれぞれ示した。図中の試料内温度分布に着目すると、乾燥が進行するにつれて試料表面に近い部分から順に温度が上昇した。この温度上昇は昇華面が温度測定点を通過し、測定

部位が凍結層から乾燥層に変化したことを示している。また、凍結層の温度は-30℃付近ではほぼ一定であり、これは凍結層の融解や発泡などによる材料の品質劣化が生じることなく昇華乾燥が進行したことを示している。さらに、温度上昇開始点間の距離、例えば図中の A-B 間と C-D 間を比較すると、乾燥が進行するにつれて同一厚さ (5mm) の乾燥に要する時間が増大する傾向を示す。これは乾燥の進行に伴い、乾燥層の厚さが増大して表面からの熱供給に対する移動抵抗としての役割を果たしているためである。

また、試料質量から計算される乾燥速度は、表面温度が設定温度に到達する前にピークを示し、その後指数関数的に減少する。このような傾向はコーヒー溶液の乾燥特性と類似しており⁴⁾、ここに述べた低濃度試料は典型的な溶液系の乾燥特性を示すことが分かった。

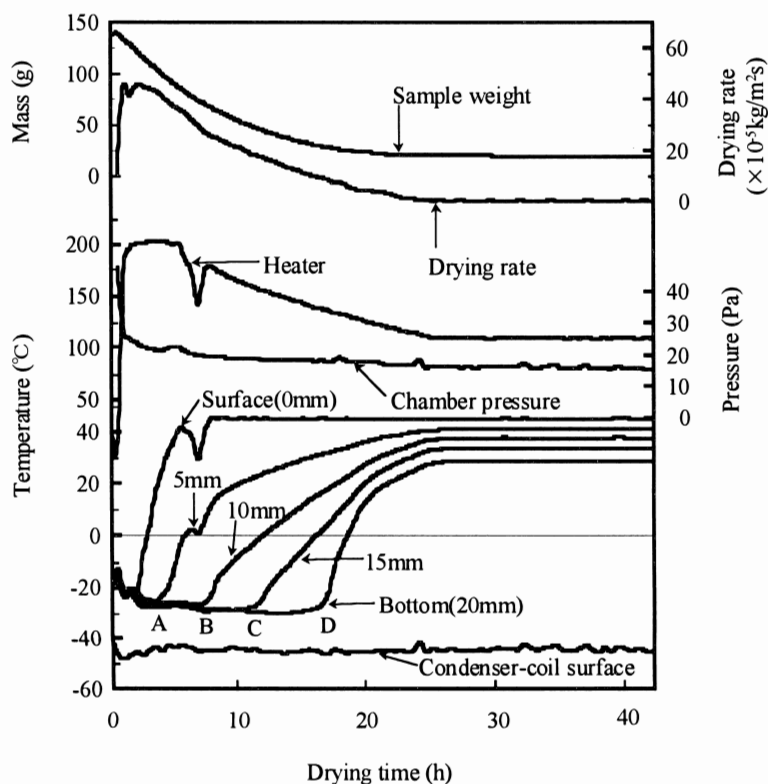


Fig. 5 Experimental data obtained during freeze-drying of 9.6% *miso* paste in 20mm thick at surface temperature 45℃

4.4.2 高濃度試料

Table 4 に固形分濃度 28.8%(w. b.)・塩分濃度 6.0% (g/100g) の試料の最適凍結乾燥条件を示す。表中には昇華乾燥の実現とオリジナルな表面色の維持を評価基準とし、それらの判定結果を○と×印で示した。この表に示すように、試料表面温度は 55℃まで設定可能であり、Fig. 5 に示すような昇華乾燥が進行したが、Scorch 色の発現による品質劣化を考慮すると、材料の品質を維持しうる最高表面温度、すなわち最適表面温度の範囲は 45℃以上 55℃未満であることが分かった。

4.4.3 凍結乾燥ミソ汁

現在市販されている即席みそ汁の固形分および塩分濃度を調査した結果、それらの値はそれぞれ 21.8%(w. b.)、6.0% (g/100g) であることが分かった。そこで凍結乾燥製品のミソ汁を想定した試料の最適表面温度を検討した結果を Table 5 に示す。この表に示すように、凍結乾燥ミソ汁の最適表面温度は Scorch 色の発現温度から判断して 55℃であることが分かった。

4.5 移動物性値

Table 6 に試料の熱伝導率と透過係数の値を示す。表中の温度と圧力は乾燥層の平均値を示す。熱伝導率および透過係数の値は固形

Table 4 Optimum drying conditions of 28.8% *miso* paste

Sample No.	Surface temperature (°C)	Sublimation dehydration	Non-Scorch
5	0.0	○	○
6	20.0	○	○
7	40.0	○	○
8	35.0	○	○
9	45.0	○	○
10	55.0	○	×
11	65.0	×	×
18	45.0	○	○
19	55.0	○	×

Table 5 Optimum drying conditions of 21.8% *miso* paste

Sample No.	Surface temperature (°C)	Sublimation dehydration	Non-Scorch
12	47.5	○	○
13	50.0	○	○
14	53.5	○	○
15	55.0	○	○
16	56.0	○	×
17	57.5	○	×

Table 6 Thermal conductivity and permeability for *miso* paste

Sample No.	Concentration		Position* (mm)	Temperature** (°C)	Pressure** (Pa)	Thermal conductivity (W/m·K)	Permeability ($\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$)
	Solute (%w. b.)	Salt (%(g/100g))					
			$X(t)$	$\bar{\theta}$	\bar{p}	λ	K
1 ***	9.6	2.9	12.2~13.3	-11.9	34.4	0.144	1.38
2	9.6	2.9	11.9~13.6	-2.7	31.2	0.119	2.10
3 ***	9.6	2.9	13.2~15.0	9.0	34.0	0.117	1.05
4	9.6	2.9	12.0~14.1	8.1	31.4	0.130	1.51
12	21.8	6.0	13.0~15.0	3.1	38.8	0.201	1.30
13	21.8	6.0	15.7~17.2	6.6	31.8	0.166	1.99
14	21.8	6.0	15.7~17.0	5.8	34.1	0.178	1.69
15	21.8	6.0	15.2~17.0	8.8	34.4	0.180	1.79
17	21.8	6.0	13.7~14.4	9.8	43.6	0.175	1.12

* Position of the sublimation front

** Average value for the dried layer

*** without scraping

分濃度 9.6% (w. b.) の試料ではそれぞれ 0.117 ~ 0.144 (W/m · K)、1.05 ~ 2.10 ($\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$) の範囲にあった。一方、濃度 21.8% (w. b.) の試料ではそれぞれ 0.166 ~ 0.201 (W/m · K)、1.12 ~ 1.99 ($\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$) の範囲にあり、このことから本実験の試料濃度範囲では熱伝導率は濃度が高いほど大きい値を示すのに対し、透過係数の濃度依存性は認められなかった。また、試料 No. 1 と No. 3 の透過係数値は試料 No. 2、No. 4 と比較して相対的に小さい値を示した。これは試料 No. 1 と No. 3 については凍結時に試料表面に形成された薄膜を切削しなかったため、水蒸気の移動抵抗が増大したことによるものと考えられた。

5. 摘要

高濃度塩分溶液系の典型的材料としてミソペーストを試料に選び、その凍結乾燥特性と乾燥層の熱伝導率および透過係数を測定した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- 1) 固形分濃度 28.8% (w. b.) ・ 塩分濃度 8.58% (g/100g) 以下の試料ではペースト状態での凍結乾燥が可能であり、その表面温度は 55°C まで設定することが可能であった。
- 2) 材料の固形分濃度が高くなるにつれて水蒸気移動抵抗が増大するものの、その乾燥速度は熱移動速度により律速されることが分かった。
- 3) 固形分および塩分濃度の異なる試料間で移動物性値を比較した結果、熱伝導率は試料濃度が高いほど大きな値を示した。また透過係数の圧力依存性が認められた。
- 4) 市販の凍結乾燥ミソ汁の濃度は固形分濃度で 22% (w. b.)、塩分濃度 6% (g/100g) であり、その最適乾燥条件は試料表面温度 55°C 以下であることが分かった。

謝 辞

本研究は味の素 (株) 食品総合研究所の支援を得て遂行されたものであることをここに記して謝意を表す。

参考文献

1. Sagara, Y., Hosokawa, A. : Proc. 3rd. Int. Drying Symposium, 487 (1982)
2. Sagara, Y. : Proc. 4th Int. Drying Symposium, 2, 443 (1984)
3. Nagashima, N., Suzuki, E. : Applied Spectroscopy Reviews, 20(1), 1 (1984)
4. Sagara, Y., Ichiba, J. : Drying Technology 12(5), 1081 (1994)
5. 荒木徹也, 相良泰行, 瀬尾康久, 大下誠一, 川越義則 : 低温生物工学会誌 43(2), 112 (1997)
6. 相良泰行, 細川明 : 農機誌 38(3), 329 (1977)
7. 相良泰行, 細川明, 都島美行 : 凍結乾燥研究会誌, 28, 30 (1981)
8. Sagara, Y. : Proc. 5th. Int. Drying Symposium 1, 413 (1986)
9. Araki, T., Sagara, Y., Tambunan, A. H. and Kamaruddin A. : Bul. Keteknikan Pertanian, 12(2), 18 (1998)
10. International Institute of Refrigeration, Refrigeration Science and Technology, 165 (1985)
11. 最新バイオセンシングシステム, R&Dプランニング社, 351 (1988)
12. Advances in Food Engineering, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 111 (1992)
13. Araki, T., Sagara, Y., Kamaruddin, A. : Proc. 11th. Int. Drying Symposium, Vol. B, 980 (1998)