

# 輻射加熱による牛肉の凍結乾燥特性について\*

相良泰行\*\*・亀岡孝治\*\*・細川 明\*\*

Freeze-Drying Characteristics of Beef Using Radiant Heating  
Yasuyuki SAGARA, Takaharu KAMEOKA, Akira HOSOKAWA

## 要 旨

輻射加熱方式による牛肉の凍結乾燥機構の解明と最適操作法を検討することを目的とし、二次乾燥期まで含めた牛肉の凍結乾燥特性を得るために、試料の加熱温度条件を変えて実験を行った。乾燥特性として、乾燥プロセスにおける1) 試料重量、2) 乾燥速度(計算値)、3) 試料温度、乾燥前後の試料の4) 含水率、5) 形状、6) 密度および7) 一次乾燥期における乾燥層の熱伝導率を求めた。以上の乾燥特性と同時に、操作因子として1) ヒータおよびコンデンサ温度、2) 真空チャンパ内の全圧と非凝縮性ガス分圧の経時変化を測定した。本稿ではこれらの測定結果に基づき、加熱温度条件と乾燥特性および操作因子との相互関連性について考察した。

## I 緒 言

筆者らは食品材料の凍結乾燥プロセスにおける材料と装置内の熱と物質移動に関連する諸因子<sup>1)</sup>の経時変化を測定するための凍結乾燥装置を試作し、この装置の性能について既に報告<sup>2)</sup>した。次に、凍結乾燥機構の解明と最適操作法を検討することを目的とし、加熱方式と試料表面温度条件を変えて実験を行い、二次乾燥まで含めた牛肉の乾燥特性を明らかにした<sup>3)</sup>。輻射加熱方式については、試料表面温度を45℃に設定した場合の乾燥特性について一事例を報告したが、表面温度を変えた場合の乾燥特性と操作因子の差異は不明である。また、この方式に関する他の研究者の報告も数少ない<sup>3)</sup>。

今回は、輻射加熱方式による牛肉の凍結乾燥特性を得るために、輻射加熱用ヒータを試作して前述の凍結乾燥装置内に組み込み、試料表面の加熱温度条件を変えて実験を行った。乾燥特性として、乾燥プロセスにおける1) 試料重量、2) 乾燥速度、3) 試料温度、乾燥前後の試料の4) 含水率、5) 形状、6) 密度および7) 一次乾燥期における乾燥層の熱伝導率を求めた。熱伝導率の計算には Massey と Sunderland<sup>4)</sup> が提唱したモデルを適用した。以上の乾燥特性と同時に、操作因子として1) ヒータおよびコンデンサ温度、2) 真空チャンパ内の全

圧と非凝縮性ガス分圧の経時変化を測定した。本稿ではこれらの測定結果に基づき、加熱温度条件と乾燥特性および操作因子の相互関連性について考察した。

## II 実験装置および方法

1. 凍結乾燥装置 本実験には筆者らが試作した凍結乾燥装置<sup>2)</sup>を使用した。この装置全体の構造、秤量装置とその秤量精度、温度と圧力の計測に用いた機器については文献<sup>2)</sup>に詳説したので参照されたい。

2. 加熱方式と温度条件 加熱法には円板状に整形した試料の両面温度を一定に保ちながら輻射加熱する方式を用いた。試料を水平に置いて加熱すると、試料表面とヒータ表面との空間に蒸気の流れが生じ、試料表面温度が不均一となる恐れがあるため<sup>4)5)</sup>、試料はヒータと共に垂直に配置した。食品材料の場合、試料表面の加熱温度条件は通常室温からビタミンCの破壊<sup>1)</sup>や scorch を生じない許容温度(60℃)<sup>4)</sup>の範囲に採られる。しかし、牛肉では表面に scorch の生じている状態に加工するか、既に加熱調理したものを材料とすることもあるため、当実験では scorch により牛肉表面が黒こげの状態になり始める温度条件<sup>4)</sup>を考慮し、100℃を上限とした。すなわち、Table 1 に示すように、加熱温度条件の範囲を30~100℃に採った。

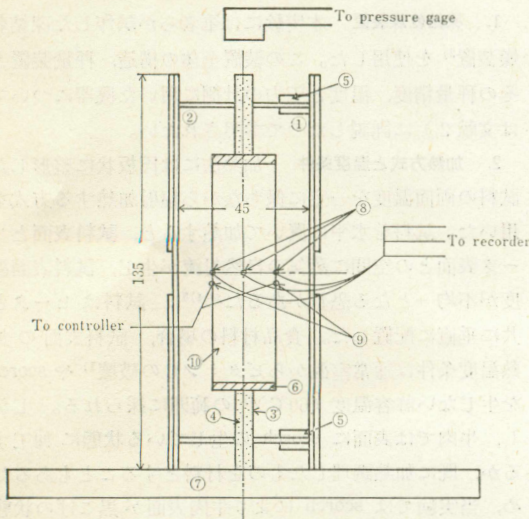
3. 輻射加熱用ヒータ 試作した輻射加熱用ヒータと試料容器の概略図を Fig. 1 に示す。試料容器 ⑥には塩化ビニール管を厚さ22.5mmに切断して使用し、その内径

\* 昭和53年農業機械学会(帯広)講演

\*\* 東京大学農学部 Faculty of Agriculture, University of Tokyo, Tokyo

は試料番号ごとに Table 2 に示した。試料容器は、グラスウール④を金網③で補強した断熱板で支持し、この板とヒータ①, ②を連結した。連結棒のネジ⑤により、試料容器の出し入れと試料-ヒータ間の距離が調節可能である。これらの装置を秤量装置<sup>2)</sup>の棚上に設置し、乾燥プロセスにおける試料重量の変化を連続記録した。

4. 温度計測とコントロール 筆者らは前報において、厚さ30mmの試料両面を輻射加熱した場合、試料内の温度分布が試料表面と昇華面間で直線的分布、凍結層は昇華面温度に等しい均一な温度になることを示した<sup>3)</sup>。当実験の試料はこれより7.5mm薄いため、温度分布が上述のパターンにより近くなるものと考えられた。従って、試料の両面と中心温度を測定すれば試料内の温度分布が得られる。このため、それぞれの個所に銅-コンスタンタン熱電対(0.2mmφ)を挿入した。また、乾燥中の試料表面温度は温度コントローラ<sup>2)</sup>(検出端C-C熱電対, 0.2mmφ)でヒータ電源を継続させて一定値に保った。設定温度条件に対する変動幅を小さくするために、ヒータ電圧および試料表面とヒータ表面間の距離を調整した。Fig. 1 に試料温度の計測とコントロールに用いた熱電対の位置を示した。ヒータとコンデンサ表面の温度測定法および試料表面の温度コントロールの精度は前報<sup>3)</sup>に加熱方式Dとして報告したものと同様である。熱電対は全て標準温度計で校正したものを使用し、その起電力はJIS規格に従って温度に換算した。



①Right heater ②Left heater ③Wire gauze ④Glass wool  
⑤Screw ⑥Sample holder ⑦Platen ⑧Thermo-couple for temperature measurement ⑨Thermo-couple for control ⑩Sample

図1 試料容器、輻射加熱用ヒータおよび温度測定個所の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of sample holder, heater and measuring points of temperatures.

5. 凍結・乾燥操作

(a)試料の準備 牛肉の試料は市販されているモモ肉(round)から切出して脂肪分を取り除き、筋繊維の方向が熱・物質移動の方向と一致するように、すなわちヒータ面に対して垂直となるように整形して試料容器に収めた。重量測定後、熱電対を挿入し、前述の断熱板を装着した。

(b)試料の凍結法 ビーカに寒剤(ドライアイス-エチルアルコール, -72°C)を入れ、このビーカの底面を試料の片面と密着させて急速凍結した。他の片面の表面温度の変化が一定(約-35°C, 所要時間 1.5hr)になった時点で凍結を終了した。

(c)乾燥操作 凍結した試料を前述のヒータ間の中心部に固定し、真空ポンプとコンデンサ用冷凍機<sup>2)</sup>を始動させた。全圧が1 Torrに到達した時点で加熱を開始した。コンデンサ表面温度は全ての実験を通じて-40°Cに設定した。乾燥操作は全ての測定値の経時変化が平衡に達した時点で終了し、乾燥試料の重量および形状を測定した。

(d)水分測定 乾燥試料から10個の試片を採取してカールフィッシャ法で滴定し、その平均値を乾燥試料の含水率とした。この値と乾燥前後の試料重量から固形分重量、水分重量および生牛肉の含水率を推算<sup>2)</sup>した。Fig. 2に水分測定に供した試片の採取個所とその大きさを示す。

6. 熱伝導率の計算法 一次乾燥期における乾燥速度(昇華面移動速度)は乾燥層の熱移動速度が律速因子となる場合が多く<sup>1)</sup>、この期間の最適操作法を検討するためには乾燥層の熱伝導率と操作因子の関係を明らかにする必要がある<sup>1)</sup>。熱伝導率は乾燥層を通る蒸気の数

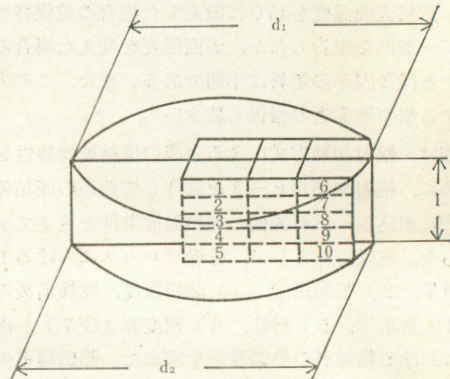


図2 カールフィッシャ水分滴定に用いた試片の番号と位置(試片のサイズ: 約15×15×4mm)

Fig. 2 Ten specimens of a beef sample for Karl Fischer titration and measuring locations of the sample. Specimen size was about 15×15×4mm. Sample dimensions are shown in Table 2.

よび流動状態に影響を受ける。熱伝導率の測定法に接触加熱（伝導加熱）法を用いた場合、加熱板により蒸気の流動状態が乱されるものと考えられる。Massey と Sunderland<sup>5)</sup> はこれらの諸点を考慮し、輻射加熱法を用いて乾燥層の熱伝導率を測定するモデル (Fig. 3) を提唱した。このモデルは次に示すような仮定を設けている。1) 凍結層と乾燥層の温度分布は直線で近似でき、準定常状態にある。2) 加えられた熱量は昇華潜熱として消費される。3) 乾燥層を通る蒸気の温度が乾燥層の温度に等しい。これらの仮定が満足されれば、熱伝導率は次式で与えられる。

$$k = \frac{[ \Delta h + \int_{\theta_f}^{\theta_s} c_p d\theta ] WR}{4A^2 \rho (m_i - m_f) (\theta_s - \theta_f)} \quad (1)$$

ただし、(1)式の W は乾燥時間の関数となるため、 $(\theta_s - \theta_f)/W$  に対し R をプロットして図式的にその曲線の傾斜を求め、 $WR/(\theta_s - \theta_f)$  の値として(1)式に代入する。当実験の加熱法と実験法は Massey らの場合<sup>5)</sup> と同様であり、上記の仮定も妥当であると考えられた。

### III 実験結果および考察

1. 乾燥プロセスの概略 乾燥プロセスにおける試料の乾燥特性と操作因子の経時変化の典型的な例 (Sample

No.15) を Fig. 4 に示した。ヒータ表面温度③④は加熱開始直後、共にほぼ同一の最高温度に達したが、その後

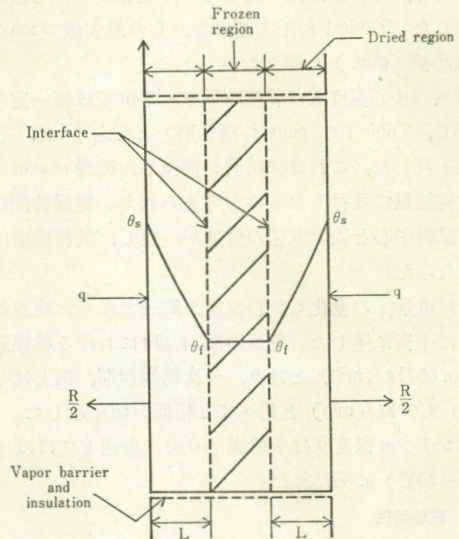


図3 熱伝導率を求めるための凍結乾燥モデル  
Fig. 3 Freeze-drying model for thermal conductivity analysis (Massey and Sunderland; 1967)

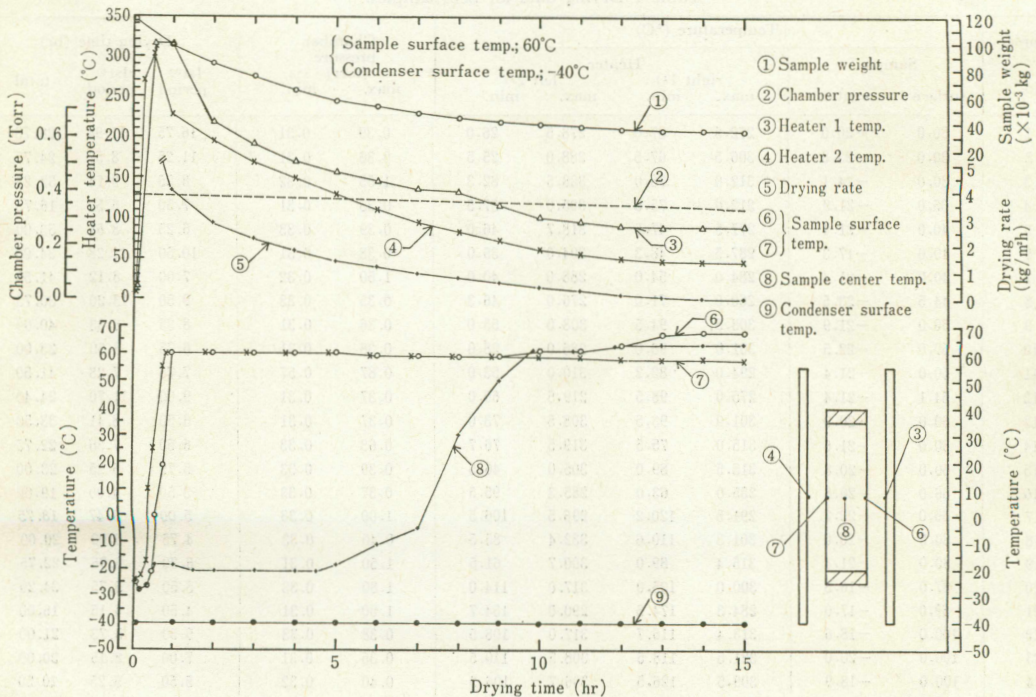


図4 輻射加熱による凍結乾燥特性 (試料番号15)  
Fig. 4 Freeze-drying characteristics of the beef sample using radiant heating (Sample No. 15).

乾燥終了点まで指数関数的に低下した。Table 1 のヒータ欄における max. が上記最高温度, min. が乾燥終了点の温度である。真空チャンパ内の全圧②は加熱開始時が最も高く, その後ほぼ一定となり, 乾燥終了点で最低値を示した。Table 1 の圧力欄にこれらの最大値 (max.) と最小値 (min.) を示した。

試料の中心温度⑧は乾燥時間1~5hrでほぼ一定(-20.8°C, Table 1 の center 欄参照)となったが, その後急上昇した。これは凍結層が消滅し, 乾燥プロセスが二次乾燥期に移行したものと考えられた。乾燥時間10hrで, 試料中心と表面⑥⑦の温度が一致し, 試料温度は均一となった。

試料重量①の変化も試料温度が均一となった時点から徐々に平衡に達した。乾燥時間14.0hrにおける乾燥速度⑤は0.057kg/(m<sup>2</sup>h)となり, 一次乾燥初期, 例えば1.0hrの3.97kg/(m<sup>2</sup>h)と比べて2桁低い値を示した。

コンデンサ温度⑨は全乾燥プロセスを通じてほぼ一定値(-40°C)に保たれた。

## 2. 乾燥特性

a) 乾燥試料の外観と品質 試料表面の加熱温度条件が60°C以下の場合, 乾燥試料の表面色は淡いピンク色を呈し, 外観はバルサ材に似ていた。60°C以上の場合,

温度条件が高い程試料表面の scorch が進み, 80°C以上になると明確な褐色を呈した。この傾向は筆者らの scorch に関する報告<sup>4)</sup>と一致した。全ての乾燥試料の風味は失われず, 復元後の肉色は生牛肉のそれに近いものと思われた。

(b)物性値と形状 Table 2 に乾燥前後の試料重量, 含水率, 密度および形状を示す。生牛肉と乾燥牛肉の含水率はそれぞれ70~76%w. b., 1~5%w. b. の範囲にあった。乾燥牛肉の密度は0.31~0.36g/cm<sup>3</sup>であった。乾燥試料は直径方向に収縮し, 筋繊維の方向に膨張する傾向にあり, 生牛肉の容積に対し0.0~8.6%の収縮を示した。この程度の収縮は実用的には問題にならない量であると考えられた。

(c)試料重量および乾燥速度 Fig. 5 に試料重量の典型的経時変化を示した。図中に加熱温度条件を考慮して抽出した試料番号を示した。試料重量はいずれも乾燥初期に急激に低下し, その度合は個体差はあるものの加熱温度(試料表面温度)が高いほど大きい傾向を示した。

重量曲線から計算して求めた乾燥速度曲線, 試料番号と加熱温度条件および一次乾燥時間をFig. 6に示した。筆者らは一次乾燥時間を求める方法として, 水分残存率

表1 牛肉試料の乾燥データ  
Table 1 Drying data for beef samples.

Sample No.	Temperature (°C)						Chamber pressure (torr)		Drying time (hr)		
	Sample		Heater						max.	min.	1st <sup>3)</sup> period
	surface	center	right 1 <sup>1)</sup> max.	min.	left 2 <sup>2)</sup> max.	min.					
1	30.0	-20.0	272.5	37.0	278.5	26.0	0.39	0.31	16.75	11.94	28.75
2	30.0	-23.8	306.5	67.5	288.0	25.5	0.36	0.31	11.25	8.57	24.75
3	30.0	-24.1	312.0	78.0	328.5	82.3	1.55	0.32	8.25	9.75	32.25
4	35.0	-21.9	312.0	75.5	305.0	57.5	0.35	0.31	7.50	6.50	16.75
5	40.0	-21.4	277.5	47.5	318.7	46.0	0.39	0.33	6.25	8.67	33.00
6	40.0	-17.3	287.5	48.3	304.0	35.0	0.38	0.31	10.50	12.28	34.00
7	40.0	-21.4	284.0	54.0	286.0	40.0	1.50	0.32	7.00	8.12	41.50
8	44.5	-23.5	260.0	71.0	276.0	46.3	0.35	0.33	9.50	13.20	30.75
9	50.0	-21.9	308.5	94.5	308.0	55.0	0.36	0.31	8.25	6.33	40.00
10	50.0	-22.5	301.0	96.0	286.0	28.0	0.38	0.31	6.75	8.50	23.00
11	50.0	-21.4	294.0	82.2	310.0	53.0	0.87	0.57	7.75	7.28	41.50
12	54.1	-21.4	275.0	98.5	219.5	60.0	0.37	0.31	9.00	11.70	24.40
13	60.0	-20.0	301.0	93.5	308.5	73.0	0.37	0.31	6.50	8.41	33.50
14	60.0	-21.6	315.0	75.5	319.5	76.7	0.63	0.33	6.50	7.36	22.75
15	60.0	-20.8	315.5	89.0	305.0	46.5	0.39	0.33	5.75	6.25	23.00
16	66.0	-20.8	255.0	63.0	285.3	95.5	0.37	0.33	3.50	4.00	19.00
17	80.0	-22.2	291.5	120.2	296.5	106.5	1.00	0.33	5.00	5.47	18.75
18	80.0	-20.0	301.3	110.6	332.4	85.5	0.40	0.33	4.75	6.00	20.00
19	80.0	-21.4	315.4	89.0	300.7	61.5	1.50	0.31	6.30	8.96	22.75
20	87.0	-16.5	300.0	125.0	317.0	114.0	1.80	0.33	5.50	5.75	24.20
21	89.0	-17.0	284.3	174.5	290.0	154.7	1.00	0.31	4.50	4.15	16.00
22	100.0	-18.6	313.4	116.7	317.0	108.5	0.38	0.33	5.50	5.73	21.00
23	100.0	-20.0	321.5	118.5	308.5	110.5	0.35	0.31	7.00	8.15	20.00
24	100.0	-18.9	309.5	126.5	306.7	106.5	0.40	0.32	5.50	5.25	20.50

1), 2) Shown in Fig. 1

3) Determined from the change in sample center temperature as shown in Fig. 4.

4) Drying time required to dry 80% of the sample water.

が20%になる乾燥時間を採る方法を提唱したが<sup>3)</sup>、当実験ではFig. 4に示されるように、試料中心温度が急上昇し始める時刻が明瞭であるため、この乾燥時間を一次乾燥時間とみなす方法も併用した。Table 1に両方法を用いて求めた一次乾燥時間を示した。いずれの試料の乾燥速度も、加熱開始直後に最高速度に達し、その値は試料表面温度が高い程大きな値を示した。その後急激に低下し、温度依存性は小さくなる傾向を示した。二次乾燥期に移行すると表面温度の高い試料ほど急激に低下した。これは、一次乾燥初期には、試料表面の水分が温度に比例して急激に昇華し、乾燥層の厚さが増すと共に昇華面へ熱供給が困難となり、乾燥速度の熱伝導率依存性が大きくなるためと考えられた。二次乾燥期の乾燥速度は真空乾燥の場合と同様に、加熱温度が高いほど試料の含水率が短時間に平衡含水率に達することを示している。

(d)平衡含水率 Fig. 7は乾燥試料表面の含水率(試

片番号3, 8を除く)を圧力と試片温度に対する平衡含水率と定義し、試片温度に対してプロットし、多項式回帰曲線<sup>7)</sup>を求めたものである。全ての試片に対する全圧の範囲は0.31~0.57 Torrであった。平衡含水率の最大値、最小値はそれぞれ、5.3%w. b., 1.2%w. b.であった。試片温度が低い場合にはデータの分布幅が大きく、高くなるにつれて約1.6%w. b.前後に収束する傾向を示した。これは乾燥速度の項で述べたように、試片温度が低い場合には、二次乾燥時間の長短により平衡含水率に差が現われるものと考えられた。

(e)熱伝導率 Table 2に一次乾燥期における乾燥層の熱伝導率を示す。昇華潜熱はDyer<sup>8)</sup>やHill<sup>9)</sup>らが凍結牛肉汁を用いて実測した値 $\Delta h=826.7\text{kcal/kg}$ を、蒸気の比熱は水蒸気の値 $c_p=0.44\text{kcal/(kg}^\circ\text{C)}$ <sup>5)</sup>を用いた。表面積Aは乾燥前後の平均値を用いた(Table 2)。またMassey<sup>5)</sup>やLusk<sup>10)</sup>が指摘したように、一次乾燥の初期

表2 生および乾燥牛肉の物理的性質  
Table 2 Physical properties of raw- and dry-beef.

Group No.	Sample No.	Weight (g)				Moisture content (%w.b.)		Density (g/cm <sup>3</sup> )		Dimension <sup>2)</sup> (cm) dry			Volume (cm <sup>3</sup> ) dry	Shrinkage (%) dry	Thermal conductivity (kcal/mh <sup>2</sup> °C) dry
		raw	dry	solid	water	raw	dry <sup>1)</sup>	raw	dry	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	l	v	v	k
I	1	113.63	34.24	33.15	80.48	70.8	3.2	1.09	0.35	7.26	7.28	2.37	98.8	6.0	0.047
	2	114.86	32.27	32.27	82.59	71.9	1.9	1.10	0.34	7.25	7.34	2.34	97.8	6.7	0.065
	6	116.83	32.26	31.42	85.41	73.1	2.6	1.12	0.34	7.20	7.25	2.34	95.7	8.6	0.051
	10	117.40	31.70	31.13	86.27	73.5	1.8	1.12	0.31	7.35	7.35	2.38	100.7	3.8	0.072
	15	117.88	33.27	32.77	85.11	72.2	1.5	1.13	0.31	7.40	7.40	2.44	104.7	0.0	0.063
	17	117.18	31.65	31.24	85.94	73.3	1.3	1.12	0.31	7.36	7.31	2.43	102.4	2.2	0.056
	19	115.04	28.13	27.59	87.45	76.0	1.9	1.10	0.28	7.32	7.27	2.43	101.2	3.4	0.038
	22	113.41	31.30	30.90	82.51	72.8	1.3	1.08	0.32	7.25	7.25	2.40	99.0	5.4	0.048
	23	116.70	29.58	29.15	87.55	75.0	1.5	1.11	0.30	7.22	7.22	2.43	99.4	5.0	0.036
	24	115.12	35.37	34.88	80.24	69.7	1.4	1.11	0.35	7.35	7.35	2.38	100.7	3.8	0.044
	Average	115.81	32.04	31.45	84.36	72.8	1.8	1.11	0.32	7.30	7.30	2.39	100.0	4.5	0.052
II	3	111.53	31.85	30.46	81.07	72.7	4.4	1.15	0.33	7.20	7.23	2.36	96.4	0.3	0.057
	5	109.08	34.00	33.30	75.78	69.5	2.1	1.13	0.36	7.25	7.25	2.32	95.5	1.3	0.054
	7	110.99	32.29	31.30	79.69	71.8	2.9	1.15	0.34	7.15	7.15	2.36	94.7	2.1	0.064
	9	111.29	30.64	29.87	81.42	73.2	2.5	1.15	0.32	7.18	7.20	2.38	96.6	0.1	0.076
	11	113.03	32.69	31.89	81.14	71.8	2.4	1.17	0.34	7.25	7.19	2.34	95.8	1.0	0.066
	13	110.18	29.18	28.73	81.45	73.9	1.6	1.14	0.31	7.18	7.20	2.32	94.0	2.0	0.054
	14	108.95	29.30	28.70	80.25	73.7	2.1	1.13	0.31	7.20	7.23	2.30	94.0	2.8	0.044
	18	110.06	29.36	28.84	81.22	73.8	1.8	1.14	0.31	7.13	7.06	2.42	95.0	1.1	0.057
	Average	110.14	31.16	30.39	79.75	72.5	2.5	1.15	0.33	7.19	7.19	2.35	95.3	1.4	0.059
III	4	113.63	32.56	31.47	82.16	72.3	3.3	1.11	0.32	7.31	7.29	2.42	101.2	0.8	0.075
	8	113.60	30.67	29.00	84.60	74.5	5.4	1.11	0.31	7.25	7.30	2.35	97.6	4.3	0.060
	12	111.78	29.74	28.82	82.96	74.2	3.0	1.10	0.32	7.28	7.20	2.28	93.8	8.0	0.036
	16	109.96	30.52	29.43	80.53	73.2	3.6	1.08	0.30	7.33	7.24	2.35	97.9	4.0	0.057
	20	112.82	32.76	32.27	80.55	71.4	1.5	1.11	0.33	7.20	7.20	2.37	96.5	5.4	0.047
	21	115.35	32.11	31.36	83.99	72.8	2.3	1.13	0.32	7.10	7.18	2.47	98.8	3.1	0.078
	Average	112.86	31.39	30.39	82.47	73.1	3.2	1.11	0.32	7.25	7.24	2.37	97.6	4.3	0.059

\* Raw sample dimension (cm) and volume (cm<sup>3</sup>)

Group No.	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	l	v
I	7.70	7.70	2.25	104.7
II	7.40	7.40	2.25	96.7
III	7.60	7.60	2.25	102.0

- 1) Average moisture content of the 10 specimens of a beef sample shown in Fig. 2.
- 2) Measuring locations are shown in Fig. 2.
- 3) Referred to initial, raw sample dimension.

には乾燥層の厚さが小さく、蒸気の移動速度Rが最高値を示して準定常状態の仮定が成立しないことや、乾燥中の試料を切断して観察した結果、試料容器から試料へ侵入する熱を完全に断熱することは不可能であり、この

ため一次乾燥後期には端効果 (edge effect) が現れて昇華面の一様後退を仮定した前述のモデルと合致しない事が確かめられた。したがって、熱伝導率は試料の表面温度が設定値に達してから、乾燥時間が一次乾燥時間の1/2になった区間のデータから計算した。

Fig. 8は試料の乾燥層温度に対する熱伝導率の値をプロットし、その回帰直線を求めたものである。図中に圧力範囲、回帰直線の式および95%信頼限界を示した。また図中の破線(a), (b)はそれぞれ  $\theta_s=30\sim60^\circ\text{C}$ ,  $\theta_s=60\sim100^\circ\text{C}$  の試料に対する回帰直線である。乾燥層温度は次式で定義した。

$$\theta = (\theta_s + \theta_f) / 2 \tag{2}$$

図中に Massey らの測定値のうち、当実験の圧力範囲に近い 0.2~1.0Torr のものを示した。これらの測定値は筆者らの測定結果の95%信頼限界内にあった。Triebes と King<sup>11)</sup> が指摘したように、熱伝導率の温度依存性は

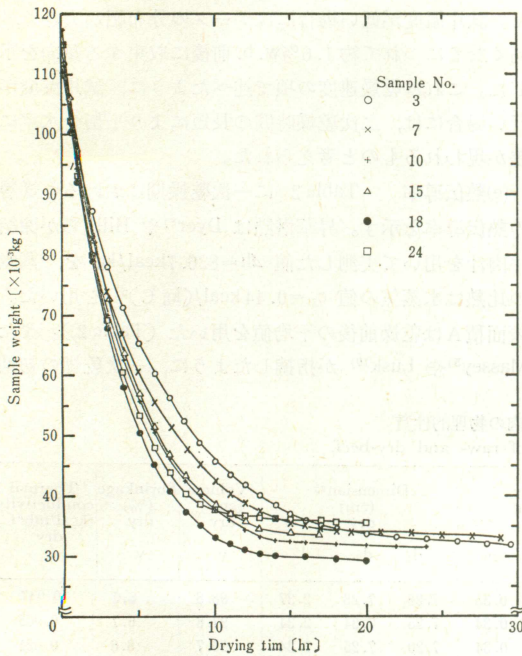


図5 試料重量の経時変化  
Fig. 5 Sample weight vs. drying time. Drying conditions and data for each sample were summarized in Table 1 and 2.

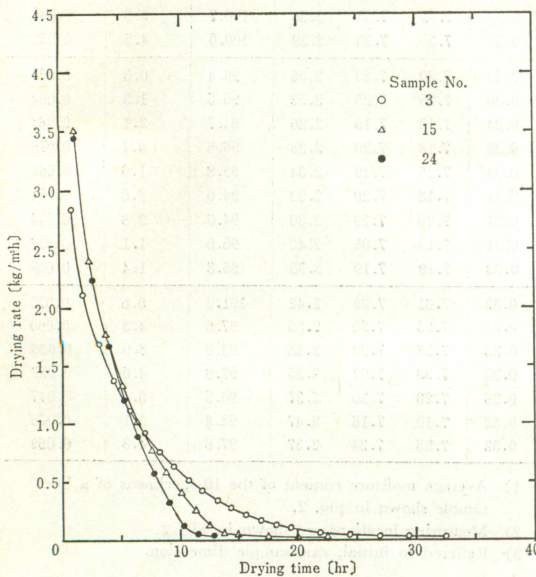


図6 乾燥速度の経時変化  
Fig. 6 Drying rate curves vs. drying time.

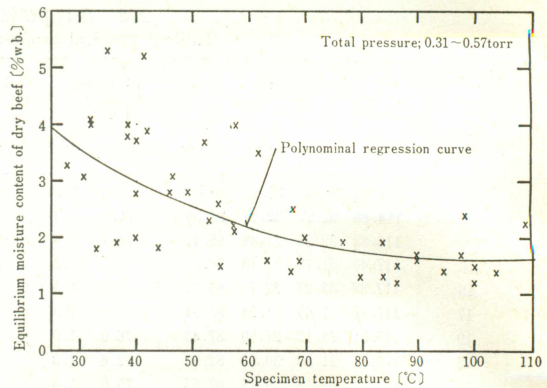


図7 乾燥牛肉の平衡含水率と試片温度の関係  
Fig. 7 Equilibrium moisture content vs. specimen temperature.

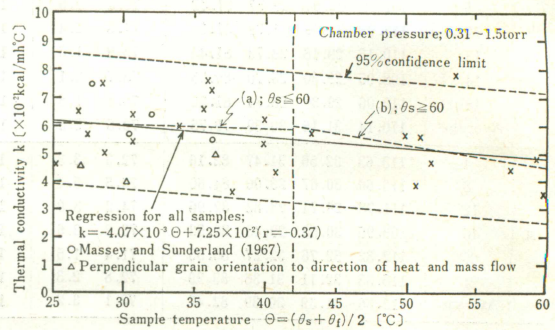


図8 一次乾燥期における乾燥層の熱伝導率と試料温度の関係  
Fig. 8 Thermal conductivities of dried region vs. sample temperatures during 1st drying period (sublimation drying period).

小さかったが、 $\theta$ が高くなると $k$ は小さくなる傾向を示した。これは直線(b)の傾斜が(a)のそれより大きいことから、 $\theta_s=60$ 以上になると試料表面に scorch が生じ、試料の変性があったためと考えられた。

筋繊維の方向が熱・物質移動の方向と垂直な3個の試料の熱伝導率を別途測定し、図中にプロットした。これらの値は回帰直線以下の領域に分布し、Sandall<sup>12)</sup>らの鶏肉の場合と同様に筋繊維の方向と熱・物質移動の方向が異なると熱伝導率は低下する傾向を示した。Harper<sup>13)14)</sup>らは乾燥牛肉を多孔質固体として取扱い、種々のガスの存在下における圧力の関数として熱伝導率を求め、0.02 Torr 以下ではガスの種類に関係なく  $k=0.032$  の一定値に近づき、これ以上の圧力では  $H_2$  ガスの場合が常に大きく 0.97 Torr で  $k=0.062$  という値を報告している。しかし、これらの値は乾燥層の圧力勾配による蒸気流の影響<sup>16)</sup>を考慮していないため、Massey や筆者らの測定値とは直接比較できないものと考えられる。Hoge<sup>15)</sup>らは牛肉の球形試料を用い、 $\theta_s=65^\circ\text{C}$ 、圧力0.3~0.9 Torr において  $k=0.020\sim 0.048$  (fig. の読取り値) を報告している。これは筆者らの値より低く、Harper らの下限値より低い値が存在する。これは、球形試料を円筒形ヒータで加熱したため、昇華面が均一に後退せず、また試料重量が本実験の約1/10であるため、実際の球形試料の一次乾燥期が計算に用いた球モデルのものとは一致しているか否か不明であり、さらに  $dh$  に純氷の値を用いていることなどに起因するものと考えられる。

以上、本稿では輻射加熱による牛肉の乾燥特性について報告した。実験結果に基づく乾燥機構の解明などは続報に述べる予定である。本報の計算には東京大学大型計算機センターの計算機と日立製作所製の統計計算プログラム・ライブラリーを使用した。ここに記して謝意を表する。

#### IV 摘 要

輻射加熱方式による牛肉の凍結乾燥特性を得るために、輻射加熱用ヒータを試作し、試料表面の加熱温度条件を変えて実験を行った。以下にこれらの条件と結果について要約する。

1. 試作した輻射加熱用ヒータと試作表面の温度条件をそれぞれ Fig. 1 と Table 1 に示した。

2. 乾燥特性として、乾燥プロセスにおける 1) 試料重量、2) 乾燥速度(計算値)、3) 試料温度、乾燥前後の試料の 4) 含水率、5) 形状、6) 密度および一次乾燥期における乾燥層の熱伝導率を求めた。乾燥プロセスの操作因子として、1) ヒータおよびコンデンサ温度、2) 真空チャンパ内の全圧と非凝縮性ガス分圧の経

時変化を測定した。熱伝導率の計算には Massey と Sunderland のモデル (Fig. 3) を適用した。試料 (Sample No. 15) の乾燥特性と操作因子の経時変化を Fig. 4 に示した。乾燥前後の試料の物性値と形状および一次乾燥期における乾燥層の熱伝導率を Table 2 に示した。試料重量と乾燥速度の経時変化を、表面温度をパラメータとしてそれぞれ Fig. 5 と Fig. 6 に示した。

3. 乾燥試料表面の含水率を圧力と試片 (Fig. 2) 温度に対する平衡含水率と定義した。全圧 0.31~0.57 Torr における平衡含水率と試片温度の関係を Fig. 7 に示した。平衡含水率の最大値と最小値はそれぞれ 5.3% w. b., 1.2% w. b. であった。試片温度が低い場合、平衡含水率は二次乾燥時間の影響を受けるものと考えられた。

4. 一次乾燥期における乾燥層の熱伝導率と乾燥層温度の関係を Fig. 8 に示した。但し、全圧の範囲は 0.31~1.5 Torr であった。試料表面温度が  $60^\circ\text{C}$  以上になると、試料表面に scorch が生じ、熱伝導率は低下する傾向を示した。筋繊維の方向と熱・物質移動の方向が垂直な試料の熱伝導率は平行な試料のものより低かった。

#### Notation

$A$  = surface area,  $\text{m}^2$

$L$  = thickness of dried region,  $\text{m}$

$R$  = total flow rate of vapor,  $\text{kg/hr}$

$W$  = total moisture loss,  $\text{kg}$

$c_{p1}$  = specific heat of vapor,  $\text{kcal}/(\text{kg}^\circ\text{C})$

$dh$  = heat of sublimation,  $\text{kcal}/\text{kg}$

$k$  = thermal conductivity,  $\text{kcal}/(\text{mh}^\circ\text{C})$

$m_i, m_f$  = initial and final moisture content, respectively,  $\text{kg-water}/\text{kg-solid}$

$\theta_s, \theta_f$  = sample surface and sublimation front temperature, respectively,  $^\circ\text{C}$

$\theta$  = dried region temperature defined by equation 2,  $^\circ\text{C}$

$\rho$  = density of dried region,  $\text{kg}/\text{m}^3$

(原稿受理昭和53年6月14日・質問期限昭和54年5月31日)

#### 参 考 文 献

- 1) 細川明, 相良泰行: 食品の凍結乾燥と問題点, 農機誌, 第37巻1号, pp.102-106 (1975)
- 2) 相良泰行, 細川明: 試作した凍結乾燥装置の特性と牛肉乾燥の一事例, 農機誌, 第38巻2号, pp.225-231 (1976)
- 3) 相良泰行, 細川明: 牛肉の凍結乾燥特性について, 農機誌, 第38巻3号, pp.395-403 (1976)
- 4) 相良泰行, 細川明: 凍結乾燥過程における牛肉表面の“SCORCH”と色の变化, 農機誌, 第39巻3号, pp.329-333 (1977)
- 5) Massey, W. M., Sunderland, E.: Measurement of Thermal Conductivity During Freeze-Drying of Beef, Food Technology, Vol. 21, No. 3A, pp.90A-94A (1976)
- 6) Cheng-Chang Ku: Computer Simulation of Heat and Mass

- Transfer During Freeze-Drying of Food Products, Ph. D Thesis, Cornell University (1974)
- 7) 日立製作所: HASP統計計算ライブラリ, プログラムマニュアル, pp171-177 (1973)
  - 8) Dyer, D. F., Carpenter, D. K., Sunderland, J. E.: Equilibrium Vapor Pressure of Frozen Bovine Muscle, *J. of Food Science*, Vol. 31, pp196-201 (1966)
  - 9) Hill, J. E., Sunderland, J. E.: Equilibrium Vapor Pressure and Latent Heat of Sublimation for Frozen Meat, *Food Technology*, Vol. 21, No. 9, pp.112-114 (1967)
  - 10) Lusk, G., Karel, M., Goldblith, S. A.: Thermal Conductivity of Some Freeze-Dried Fish, *Food Technology*, Vol. 18, No. 10, pp.1625-1628 (1964)
  - 11) Triebs, T. A., King, C. J.: Factors Influencing the Rate of Heat Conduction in Freeze Drying, *I & EC Process Design and Development*, Vol. 5, No. 4, pp.430-435 (1966)
  - 12) Sandall, O. C., King, C. J., Wilke, C. R.: Relationship Between Transport Properties and Rates of Freeze-Drying of Poultry Meat, *AIChE Journal*, Vol. 13, No. 3, pp.428-438 (1967)
  - 13) Harper, J. C.: Transport Properties of Gases in Porous Media at Reduced Pressures with Reference to Freeze-Drying, *AIChE Journal*, Vol. 8, No. 3, pp.298-302 (1962)
  - 14) Harper, J. C., El Sahrigi: Thermal Conductivities of Gas-Filled Porous Solids, *I & EC fundamentals*, Vol. 3, No. 4, pp.318-324 (1964)
  - 15) Hoge, H. J., Pilsworth, M. N.: Freeze-Drying of Beef, *J. of Food Science*, Vol. 38, pp.841-848 (1973)
  - 16) Bralsford, R.: Freeze Drying of Beef 1. Theoretical Freeze-Drying of Beef 2. A Calorimetric Method for Comparing Theoretical and Actual Drying Rate, *J. of Food Technology*, Vol. 2, pp.339-353 (1967)

### Summary

To study the drying characteristics of beef samples during freeze-drying process using a radiant heating, experiments were carried out at different sample surface temperatures with the freeze-drying apparatus reported in reference (2). The results obtained from these experiments and drying conditions were summarized as follows.

1. Schematic diagram of the radiant heating apparatus and the conditions of sample surface temperatures were shown in Fig. 1 and Table 1, respectively.

2. Experimental data were obtained in relation to the drying characteristics of the sample tested and the corresponding operating conditions during drying processes. The former consisted of the change in sample weight, calculated drying rate and sample temperatures while the latter included the heater and condenser surface temperatures as well as the total pressure in vacuum chamber. A result obtained for the sample number 15 was shown in Fig. 4. The changes in moisture contents, dimensions and densities of raw and dry samples, and the thermal conductivities of the dried region during 1st drying period (sublimation drying period) were presented in Table 2. The mathematical model (Fig. 3) proposed by Massey and Sunderland (1967) was used to measure the thermal conductivities. Typical sample weight and drying rate curves at various temperature conditions

were shown in Fig. 5 and Fig. 6, respectively.

3. The equilibrium moisture contents (E.M.C.) were defined as the moisture contents of dry samples to the chamber pressures and the specimen temperatures at the end of drying process. The plots of E.M.C. against the specimen temperatures at the total pressure 0.31-0.57 torr were shown in Fig. 7.

The maximum and minimum value of the E.M.C. were 5.3% w.b., 1.2% w.b., respectively. Rather great differences of the E.M.C. in low temperature range were attributed to the differences in the 2nd drying time.

4. Thermal conductivities of the dried region vs. the sample temperatures relationships were shown in Fig. 8. The results of this study obtained at the total pressure of 0.31-1.5 torr were consistent with that reported by Massey and Sunderland, who had reported the conductivity of 0.055-0.075 kcal/(mh°C) at 0.2 - 1.0 torr. There was no evident effect of temperature level as indicated by Triebs et al. (1966), however, the thermal conductivity had tendency to decrease with the surface temperature over 60°C. This effect was interpreted in terms of the scorching of sample surface. The thermal conductivity in a direction perpendicular to the grain was substantially less than that parallel to the grain.



## コメント

〔閲読者〕 牛肉の凍結乾燥プロセスにおける一次乾燥期、二次乾燥期の概念および輻射加熱による場合のこれら各期に影響を及ぼす要因についてご説明下さい。

〔著者の見解〕 一次乾燥期は凍結状態にある牛肉から昇華により水分を除去するプロセスであり、二次乾燥期は材料内の氷が消滅したのち結合水などの残留水分を除去するプロセスである。乾燥全プロセスには乾燥機構上、一次乾燥期の昇華乾燥機構と二次乾燥期の真空乾

機構が含まれる。

輻射加熱の場合、一次乾燥期の乾燥速度（昇華面移動速度）は材料表面の許容温度、乾燥層の熱・物質移動速度および凍結層温度により影響を受ける。これを操作因子との関連で述べると、材料表面温度はヒータ表面温度に、乾燥層の熱伝導率と透過係数はチャンバ圧力に、凍結層温度は試料表面温度とチャンバ圧力にそれぞれ影響される。二次乾燥期の乾燥速度は材料表面とチャンバ圧力に依存する。これらの相互関連性については筆者らの報告（文献1）に詳説したので参照されたい。

(556頁よりつづく)

- 32 玉ねぎのは種・移植の省力化に関する研究(予報)  
—種子粉衣によるは種精度並びに発芽苗立向上の検討—

北農試 本庄弘幸, ○富田 貢, 沢村宣志

☆特別講演

ミンガン州立大学に留学して

北海道農業試験場農業物理部 石東宣明

- 33 穀物循環による大豆の厚層乾燥  
帯畜大 ○嘉納百樹, 石橋憲一, 弘中和憲,  
岡村太成, 東条 衛

- 34 豆類(菜豆)の夾実乾燥に関する研究(第4報)  
—コンテナアンドトレーラシステム—  
十勝農試 山島由光

- 35 大豆の貯蔵における品質判定指標としてのキチンの検索

帯畜大 ○真野仁孝, 石橋憲一, 弘中和憲,  
岡村太成

- 36 自走式フォレージハーベスタのデントコーンの刈取性能

帯畜大 ○宮本啓二, 南部 悟, 松田清明  
十勝農試 村井信仁, 高橋義明

- 37 普通型梱包のハンドリング方式について(2)

北農試 ○藤岡澄行, 前岡邦彦  
新得畜試 玉木哲夫

- 38 ドライイングドラム内の材料の移動について

帯畜大 干場秀雄

- 39 成形機用原料定量供給装置に関する実験的研究

帯畜大 干場秀雄

- 40 気密スチールサイロの壁面圧力と温度

北大農 端 俊一, ○伊藤道秋  
ヤンマー農機 上村慶治

- 41 ビッグベールの貯蔵に関する研究

北農試 ○前岡邦彦, 藤岡澄行, 石東宣明

- 42 牛群取扱施設に関する考察(第2報)

北原電牧 北原慎一郎, 前嶋申次,  
○青山順一

- 43 バッテリー自動給餌車の作業性能

北農試 藤岡澄行, 小寺 栄  
高北農機 山崎克己, ○桐山正雄

- 44 家畜ふん尿のメタン菌処理施設に関する実験(予報)

帯畜大 ○高畑英彦, 小山 洋  
北斗工機 渡辺 昇, 長尾 勇

## 第30回北海道支部研究発表会開かる

農業機械学会北海道支部(岡村俊民支部長)では、下記のとおり、第30回研究発表会を開いた。

## 記

I 日時 昭和54年2月23・24日

II 会場 北大農学部大講堂

第1日目 2月23日(金)

## 研究発表

○印は講演者

- 1 チェンソーハンドルの振動解析  
北大農 ○齋藤順一, 松居勝広
  - 2 ソーチェンの切削抵抗  
北大農 ○寺尾日出男, 佐々木尚三
  - 3 平板型太陽集熱熱器の性能について  
北斗工機 渡辺 昇, 長尾 勇  
元帯畜大 ○東条 衛
  - 4 土壌の粒子径の磁気による測定  
専修大 ○新家憲司, 川西幸四郎, 小松正年
  - 5 火山灰土のコーン指数について  
帯畜大 ○大友功一, 小野哲也, 谷口哲司  
十勝農試 村井信仁
  - 6 トラクタの排熱利用について(第2報)  
専修大 ○工藤正義, 前川 司
  - 7 トラクタのけん引特性について  
中央農試 原 令幸
  - 8 ロックロップタイヤ装置トラクタの動力特性について  
帯畜大 ○大友功一, 小野哲也, 谷口哲司
  - 9 小型乗用トラクタ用安全フレームに関する研究  
北大農 松居勝広, 松見高俊, ○近江谷和彦  
畑 正義, 中西 孝
  - 10 自脱コンバインによる受傷事故の実態と諸影響  
北大農 ○高井宗宏, 岡村俊民
  - 11 大型機械北に併なう農作業安全に関する実態調査  
十勝農試 三野田正幸
- 総会 13時10分~13時50分  
☆特別講演  
ヨーロッパの農家を訪問して  
専修大学北海道短期大学 田中貞美
- 12 水稲用は種機の開発  
一構造とは種精度について一  
日 甜 ○南部哲男, 増田昭芳  
北大農 岡村俊民
  - 13 水田乗用機械化に関する研究
  - 中央農試 齋藤 亘, ○桃野 寛
  - 14 多口ホース噴頭による粒状肥料の散布特性  
酪農大 川上克己
  - 15 コンバイン排わら処理法に関する研究  
一稲わら搬送スロウに関する実験一  
北農試 本庄弘幸, ○沢村宣志, 富田 貢
  - 16 稲わら集搬機の利用について  
中央農試 桐山優光
  - 17 ビニールハウス利用による籾の乾燥について(予報)  
北農試 ○本庄弘幸, 富田 貢, 沢村宣志
  - 18 穀類の交互通風乾燥に関する研究(第1報)  
北大農 ○松田從三, 白沢 徹, 池内義則
  - 19 搗精試験方法について  
北大農 ○川村周三, 伊藤和彦, 池内義則
  - 20 研削式および摩擦式搗精法の搗精効果について  
北大農 ○川村周三, 伊藤和彦, 池内義則
  - 21 玄米および精米の白度と色あいについて  
北大農 ○伊藤和彦, 川村周三, 池内義則  
第2日目 2月24日(土)
  - 22 凍害野菜のテクスチャー変化  
帯畜大 ○弘中和憲, 石橋憲一, 岡村太成
  - 23 凍害による葉菜類のフレーバー変化  
帯畜大 ○石橋憲一, 弘中和憲, 岡村太成
  - 24 ほ場における野菜の凍害  
帯畜大 ○岡村太成, 石橋憲一, 弘中和憲,  
金子憲治
  - 25 野菜用ビニールハウスの耐雪性耐風性  
専修大 角 厚志
  - 26 ストーンピッカの性能について(第4報)  
十勝農試 村井信仁
  - 27 畑地における種床造成用機械の利用法に関する研究(第2報)  
北農試 ○岡崎紘一郎, 相馬厚司, 石厚修二  
十勝農試 道場三喜雄 村井信仁
  - 28 改良ミニコンテナ種子ばれいしょの浴光催芽試験  
十勝農試 高橋義明
  - 29 真空は種機に関する研究  
十勝農試 道場三喜雄
  - 30 そばの機械化収穫に関する研究  
北農試 ○石原修一, 岡崎紘一郎, 相馬厚司  
十勝農試 村井信仁, 三野田正幸
  - 31 テープ式玉ねぎ移植機の性能について  
中央農試 島田実幸  
(555頁へつづく)