

## マイクロ波減圧乾燥法による食品乾燥

蓑嶋 裕典, 内山 智幸, 尾谷 賢  
清水 條資\*, 山崎 邦雄\*, 熊林 義晃\*  
清水 英樹\*, 渡辺 治\*, 近藤 和夫\*\*  
小松 友治\*\*

### Study on Vacuum Microwave Radiation — drying for Foods

Hironori MINOSHIMA, Tomoyuki UCHIYAMA, Masaru OTANI  
Jyohsuke SHIMIZU\*, Kunio YAMAZAKI\*, Yoshiaki KUMABAYASHI\*  
Hideki SHIMIZU\*, Osamu WATANABE\*, Kazuo KONDO\*\*,  
Tomoji KOMATSU\*\*

#### 抄 録

マイクロ波減圧乾燥法を用いた、食品の高品位乾燥の基礎的研究を行った。試料はじゃがいもとし、これまでにない全粒粉の製造を試みた。その結果、操作圧力 150Torr ( $2.0 \times 10^4$ Pa) 以下、マイクロ波出力 3kW/kg-DM 以下において、風味・成分とも良好な全粒粉が得られた。得られたポテト全粒粉は膨化試験、発酵試験において優位性が認められ、本乾燥法は新製品の開発等食品の高付加価値化に有効であることが確認された。また、じゃがいものマイクロ波減圧乾燥法における特性として、①通常の乾燥法同様の乾燥 3 期間が存在する、②定率乾燥速度は水の同法による蒸発速度に匹敵する速いものである、③定率乾燥期間における試料温度はその操作圧力の水の沸点にほぼ等しい、④限界含水率は操作圧力マイクロ波出力によらず約 100 DB% とほぼ一定である等の基礎的知見を得た。

#### 1. はじめに

豊かな農水畜産資源を背景に、食料品加工業は北海道の重要な基幹産業となっている。この内、乾燥食品は小麦粉、粉乳、でんぷん、マッシュポテト等の粉体食品のほか様々な製品が製造されている。しかし食生活の多様化等、消費者ニーズの変化に伴い、加工業者は高品質化・高付加価値化を求められており、乾燥食品においても差

別化した新製品の技術開発が急務となっている。

乾燥食品の製造にあたり、食品は乾燥工程において熱のおよび酵素的要因により様々な変化が生じ品質低下を起こす。これを防止するための乾燥条件は、低温下で急速に乾燥することであり<sup>1)</sup>、この目的を達成するための乾燥法として、マイクロ波減圧乾燥法が期待されている<sup>2)</sup>。本研究は、マイクロ波減圧乾燥法を用い、食品の高品位乾燥化を達成するための基礎的検討を行うことを目的とした。

本道の基幹作物の一つであるじゃがいもには、その乾燥食品としてマッシュポテト、でんぷん等が挙げられる。

\* 北海道立食品加工研究センター

\*\* 北興化工機株式会社

マッシュポテトは成分的には多くを残しているものの、風味が損失していることおよびでんぷんが $\alpha$ 化されているため食品素材としての用途が限られること、一方、市販でんぷんは $\alpha$ 化されていないものの多くの成分を損失している等の問題がある。

そこで、本研究では生のじゃがいもの風味、成分を保持し、なおかつ $\alpha$ 化されていない、じゃがいもの全粒粉としての新しい乾燥ポテトパウダーを、マイクロ波減圧乾燥法により製造することを試みた。そのための最適操作条件を検討し、更に、この新しい粉体食品素材を用いた応用検討も行った。

じゃがいもの乾燥試験に関しては熱風乾燥試験<sup>3)4)</sup>、凍結乾燥試験<sup>5)</sup>、減圧乾燥試験<sup>6)</sup>、常圧マイクロ波乾燥試験<sup>7)</sup>、減圧マイクロ波乾燥試験<sup>8)</sup>等の例が報告されている。これらは、主に乾燥速度または速度式について検討を行ったものであるが、一部これらと比較も行った。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験装置

試験に用いたマイクロ波減圧乾燥試験機は、新日本無線(株)製 NJE6607 型で、概略仕様は以下のとおりである。

型式：マイクロ波誘電加熱型バッチ式減圧乾燥試験機

マイクロ波出力：0～3.6kW 連続可変

発振周波数：2,450±50MHz

操作圧力：50～760Torr

乾燥室寸法：約 1,000Φ×1,000Hmm

計 装：重量計～ロードセル式，最大 10kg

温度計～赤外線温度計，0～300℃

その他：内部スターラーファン，ターンテーブル

### 2.2 試料

じゃがいもは北海道ニセコ'91年産男爵L品を用い、これを4℃保冷庫に保管し、適宜取り出し皮剥き後、カットして用いた。

### 2.3 試験方法

各試験の1回の試料量は1,500gと統一し、これを樹脂製ネット容器(27cm×36cm×5cmH)に均一に投入し試験を行った。また、乾燥は含水率約10%を終点とし、この間、試料重量、表面温度を連続的に記録した。

なお、試験は下記項目に関し、乾燥速度と乾燥品の品質への影響を検討した。

①試料の形状 ②操作圧力 ③マイクロ波出力

### 2.4 試料の形状による乾燥速度および品質への影響

操作圧力 50Torr，マイクロ波出力 1kW とし、次に示す各種カット形状により試験を行った。

①フレンチ 5mm：フレンチポテト風棒状，断面 5mm 角

②フレンチ 10mm：同上，断面 10mm 角

③スライス 5mm：スライス，厚さ，5mm

④キューブ 10mm：さいころ状，10mm 角

⑤ホール：丸ごと

### 2.5 操作圧力による乾燥速度および品質への影響

カット形状をフレンチ 5mm，マイクロ波出力 1kW とし、次に示す操作圧力により試験を行った。

① 50Torr( $6.7 \times 10^3$ Pa) ② 100Torr( $1.3 \times 10^4$ Pa)

③ 150Torr( $2.0 \times 10^4$ Pa) ④ 200Torr( $2.7 \times 10^4$ Pa)

⑤ 400Torr( $5.3 \times 10^4$ Pa) ⑥ 750Torr( $1.0 \times 10^5$ Pa)

### 2.6 マイクロ波出力による乾燥速度および品質への影響

カット形状をフレンチ 5mm，操作圧力を 50Torr とし、次に示すマイクロ波出力により試験を行った。

① 0.3kW ② 0.5kW ③ 0.8kW

④ 1.0kW ⑤ 2.0kW

## 3. 結果および考察

### 3.1 試料形状による影響

#### 3.1.1 乾燥速度

種々の試料形状による乾燥試験の結果から、乾燥特性曲線を図1に示した。

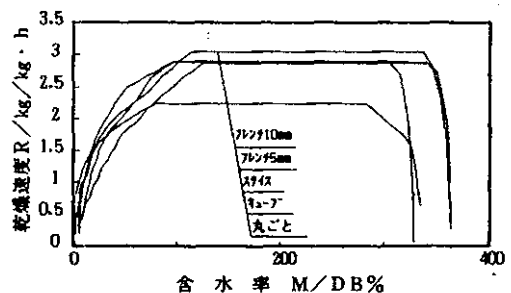


図1 乾燥特性曲線の試料形状による影響

通常の熱風による乾燥速度は、材料の表面積に比例し増加するが<sup>3)</sup>、マイクロ波乾燥法においては極端な例であるホール状を除き、本試験での試料形状による表面積の変動範囲内では、明らかな影響は認められなかった。

3.1.2 乾燥品の品質

本試験条件下では目視の範囲で、褐変は観察されなかった。しかし、フレンチ 10mm、スライスカット品、ホール品において焼けが認められ、特にホール品での焼けが顕著であり内部ほど激しかった。これは、マイクロ波加熱特有の内部加熱効果によるもので、表面は熱が逃げ易いが内部は温度が上昇し、厚みを有するものほど焼けが進むことによるものである。

3.2 操作圧力による影響

3.2.1 乾燥速度

種々の操作圧力による、乾燥特性曲線を図 2 に、また、定率乾燥期間におけるデータを表 1 に示した。

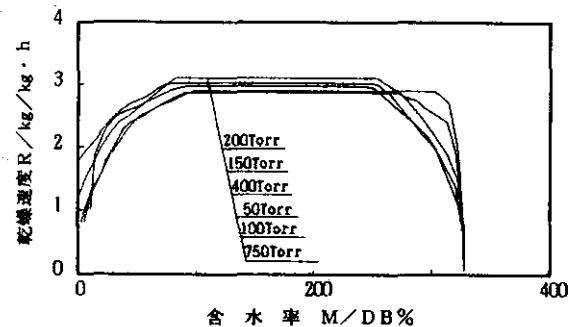


図 2 乾燥特性曲線の操作圧力による影響

表 1 定率乾燥期間における諸特性値 (操作圧力による影響)

①	②	③	④	⑤	⑥
P	T <sub>bp</sub>	T <sub>s</sub>	M <sub>c</sub>	R	E
Torr	°C	°C	DB %	kg/kg·h	%
50	38	34~37	100	2.9	64
100	52	47~51	90	2.9	67
150	60	57~60	80	3.0	69
200	67	60~64	80	3.1	71
400	83	68~76	90	3.0	67
750	100	-	80	2.8	62

P : 操作圧力, T<sub>bp</sub> : 各操作圧力における水の沸点, T<sub>s</sub> : 試料表面温度, M<sub>c</sub> : 限界含水率, R : 定率乾燥速度, E : マイクロ波エネルギー効率

図 2 および表 1 より、以下の結果が得られた。

○定率乾燥期間について

- ①定率乾燥速度は操作圧力による影響はなく、約 3kg/kg·h と同等であった。
- ②限界含水率は操作圧力による影響はなく、約 90DB% であった。
- ③試料表面温度は、その操作圧力における水の沸点に近いが数°C低いものであり、また、試料表面温度は、通常の乾燥同様ほぼ一定であった (図 4 参照)。
- ④エネルギー効率は操作圧力による影響はなく、約 70% であった。

3.2.2 乾燥品の品質

各種操作圧力による乾燥品の破断面の SEM 写真を写真 1 ~ 3 に、乾燥・粉碎品の X 線回折図を図 3 に、また試料の表面温度と含水率の関係を図 4 に示した。

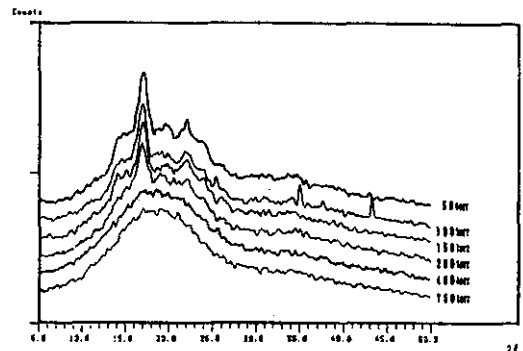


図 3 種々の操作圧力による乾燥粉碎品の X 線回折図

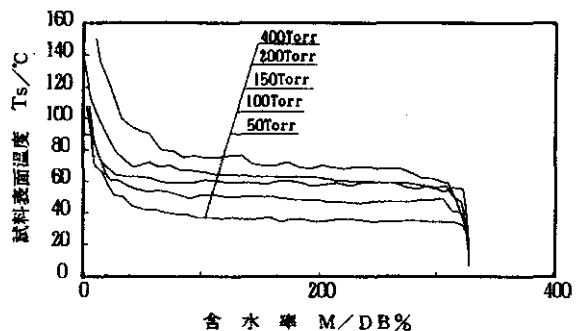


図 4 種々の操作圧力による乾燥時の試料表面温度変化

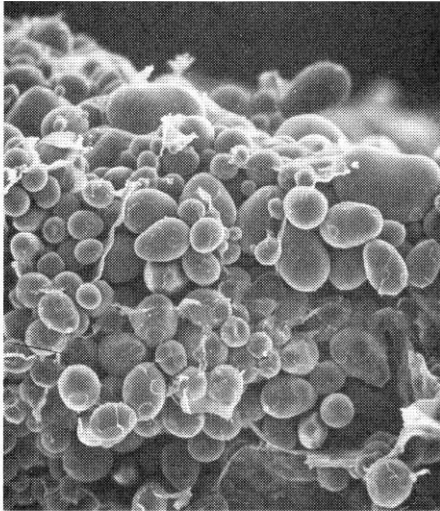


写真1 乾燥品破断面 (50 Torr)

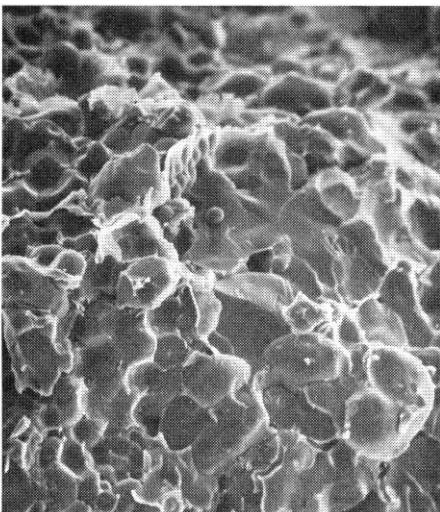


写真2 乾燥品破断面 (200 Torr)

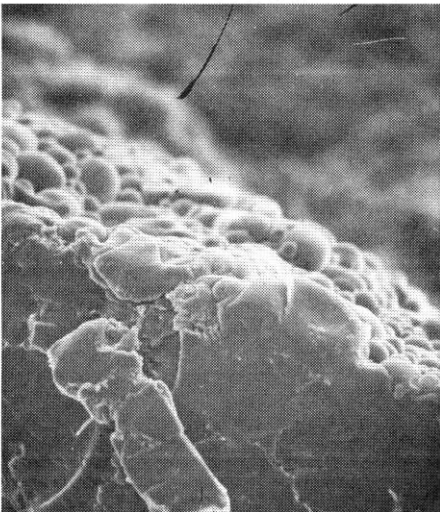


写真3 乾燥品破断面 (400 Torr)

### (1) $\alpha$ 化

写真1～3より、操作圧力50Torrにおいては、多くの球状 $\beta$ でんぷんが観察されるが、400Torrではすでにブロック化し $\alpha$ 化され、また200Torrではこれらの移行状態にあることがわかる。この移行状態は、X線回折図において顕著に認められた。

一般に $\beta$ 型でんぷん粒は、分子が無秩序に集合したのではなく微結晶構造が発達しており明瞭なX線回折像を与えるが、 $\alpha$ 型でんぷん粒は結晶性を示さなくなることが知られている<sup>9)</sup>。

図3は、それぞれのX線回折図を操作圧力が低い順に並べたものである。50Torrでは明瞭な回折図を与えているが、400Torr以上では結晶性を示さず $\alpha$ 型に変化している。この間の回折図で移行状態がわかるが、特に200～400Torrの間に変移点があると考えられる。

一方、試料表面温度の変化(図4)より、操作圧力200Torrにおける定率乾燥期間での表面温度は約60℃であり、通常のじゃがいもでんぷんの $\alpha$ 化開始温度に一致した。 $\alpha$ 化を抑えた全粒粉を製造するには、含水率の高い定率乾燥期間での品温を60℃以下とするため、操作圧力は約150Torr以下とする必要がある。

### (2) 褐変および焼け

褐変は操作圧力150Torr以上において観察された。

また、焼けは50,100Torrでわずかに認められ、150Torr以上で顕著であった。乾燥中の試料の表面温度変化(図4)は、操作圧力が高いほど温度上昇を開始する時期が早いことを示し、焼けの観察結果と一致した。

この様に、焼けの発生は試料表面温度と相関しており、この期間でマイクロ波出力をコントロールすることにより防止できると考えられる。

## 3.3 マイクロ波出力による影響

### 3.3.1 乾燥速度

種々のマイクロ波出力による乾燥特性曲線を図5に、定率乾燥期間におけるデータを表2に示した。

図5および表2より、以下の結果が得られた。

①定率乾燥速度はマイクロ波出力にほぼ比例し、水分蒸発量換算でマイクロ波出力1kWあたり、約1kg/hであった。これは、本装置による水の蒸発速度に匹敵し速いものであった。

②限界含水率は、マイクロ波出力による有意的な差はなく約100DB%であった。

- ③ 試料表面温度はマイクロ波出力の上昇に伴い、若干高くなる傾向があった。
- ④ マイクロ波エネルギー効率は、マイクロ波出力による影響は少なく、定率期間において約 70% であった。

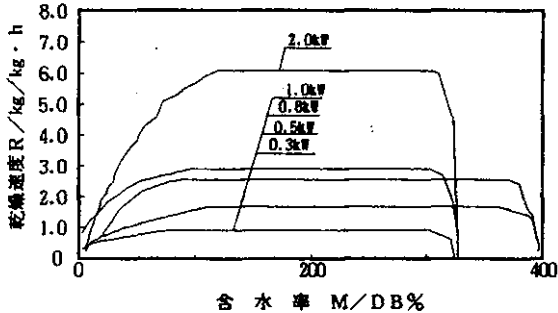


図5 乾燥特性曲線の操作圧力による影響

表2 定率乾燥期間における諸特性値 (マイクロ波出力による影響)

①	②	③	④	⑤	⑥
W kW	T <sub>s</sub> ℃	M <sub>c</sub> DB %	R kg/kg · h	R' kg/h · kW	E %
0.3	24~27	70	0.92	0.99	66
0.5	23~27	110	1.6	1.05	70
0.8	23~27	100	2.5	1.02	68
1.0	34~37	100	2.9	0.95	64
2.0	33~40	120	6.1	1.00	67

W: マイクロ波出力, T<sub>s</sub>: 試料表面温度, M<sub>c</sub>: 限界含水率, R: 定率乾燥速度, R': 水分換算蒸発速度 (マイクロ波 1 kW あたり), E: マイクロ波エネルギー効率

### 3.3.2 乾燥品の品質

乾燥・粉碎品の X 線回折はすべて明瞭な回折図を与え、α 化は観察されなかった。

焼けはマイクロ波出力が 1kW (じゃがいも乾量換算約 3kW/kg-DM) 以上となると観察されたが、これはマイクロ波出力制御により防止可能と考えられる。

褐変に対してはマイクロ波出力 0.5kW (乾量あたり約 1.5kW/kg-DM) 以下でバラツキがあるものとなった。これは、低マイクロ波出力の場合、高含水率域において低品温は保たれていても保持時間が長いことによるものと考えられる。

### 3.4 マイクロ波減圧乾燥に関するまとめ

以上の様に、じゃがいものマイクロ波減圧乾燥法において、機構的には異なるものではあるが、典型的な予熱

乾燥期間、定率乾燥期間、減率乾燥期間の 3 期間が観察された。

予熱乾燥期間は、熱伝達の機構が異なるほかは同様な意味合いのものと考えられることができる。

定率乾燥期間における諸特性は熱風乾燥の場合、操作条件による平衡関係で決定されるが、マイクロ波減圧乾燥においては

- ① 乾燥速度は水の蒸発速度同等に速く、またマイクロ波出力に比例し試料表面積には依存しない。
  - ② 試料温度はその操作圧力における水の沸点にほぼ等しい。
  - ③ じゃがいもの場合、限界含水率は操作条件によらず約 100DB% とほぼ一定である。
- ことがわかった。

一方、一般に多くの食品は定率乾燥期間が短く、野菜や果物でも限界含水率が 270~770DB% と高い<sup>1)</sup>。また、じゃがいもの場合、熱風乾燥試験<sup>4)</sup>、凍結乾燥試験<sup>5)</sup>において定率乾燥期間は認められていない。これが、通常の乾燥法で乾燥時間を要し、その結果品質低下を生じている原因である。マイクロ波減圧乾燥法は、この様に高含水率である期間を短時間に終結させる効率的な乾燥法といえる。

減率乾燥期間においては、他の乾燥法同様に試料内部での水分移動が律速と考えられるが、通常の乾燥法と比較し内部加熱効果により、本期間における乾燥速度も速い。しかし、マイクロ波乾燥の場合、この期間における温度上昇が急激であり、マイクロ波出力と試料温度を制御する必要がある。この際、赤外線温度計を用いることにより試料表面温度の測定は可能であるが、試料内部の測定は困難であり、極力試料の厚さを薄くし、表面温度制御法を用いることにより、高品質化乾燥が達成できると考えられる。

## 4. 乾燥品の食品素材としての総合的評価

マイクロ波減圧乾燥法により、生のじゃがいもの風味・成分を保持し、α 化していないポテト全粒粉の製造が可能となったが、これについて一般成分分析、諸物性試験、および応用試験を行い食品素材としての総合的評価を行った。この際、凍結乾燥品、でんぷん、マッシュポテトを対照品とした。

4.2 成分分析

成分分析結果を表3に示した。

表3 一般成分分析結果 (%)

	MW	FD	MP	PS
タンパク	6.73	6.73	6.75	0.13
脂質	0.14	0.15	0.22	0.05
糖分	79.23	77.54	79.06	90.10
繊維	1.30	2.98	1.81	-
灰分	3.10	3.10	2.60	0.22

MW：マイクロ波減圧乾燥品，FD：凍結乾燥品  
MP：マッシュポテト，PS：じゃがいもでんぷん

表3より、マイクロ波減圧乾燥品は、最も成分変化の少ない凍結乾燥品とほぼ同一の組成であり、生の原料の特徴を残した食品素材であることがわかった。

4.2 α 化度

Kainosho<sup>10)</sup>らの方法を参考に270MHzの核磁気共鳴分析装置 (JEOL 製, JNM - EX270) を用い、C<sup>13</sup>-NMRにおいて内部標準物質を dioxan とし、試料中のでんぷんの C1 ピークとの面積比を計算し、先に算出しておいた検量線からその α 化度を求めた。

その結果、α 化度は0%であることが認められた。

4.3 アミログラフ

でんぷん濃度を3.5%に調製し、BRABENDER社製 VISOGRAPH TYP.801240により、加熱によるα化過程での粘度曲線を求めた。

その結果を図6に示した。

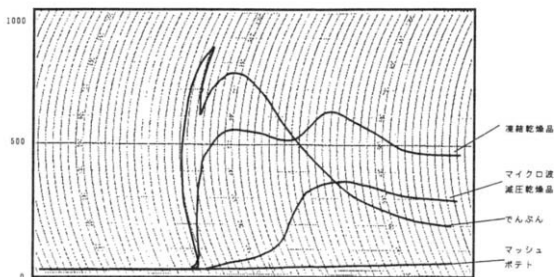


図6 アミログラフ

アミログラフより、各試料について以下の様な特徴的現象が観察された。

- ①マイクロ波減圧乾燥品：緩やかに立ち上がり、ブレークダウンは小さい。
- ②凍結乾燥品：急激に立ち上がり、その後ダブルピークを示し、ブレークダウンは小さい。
- ③でんぷん：急激に立ち上がり、ブレークダウンは大きい。
- ④マッシュポテト：α化による粘性を示さない。

でんぷんに比べ、マイクロ波減圧乾燥品、凍結乾燥品ではタンパク等を残していることが、これらの挙動の差の原因と考えられる。また、立ち上がりは懸濁液から糊状液への転移状態を、またブレークダウンは糊の安定性を表すが、これらの興味ある差異は今後の研究対象と考えられる。

4.4 発酵試験

(1) 試験方法

試料はマイクロ波減圧乾燥品、凍結乾燥品、市販でんぷん、およびマッシュポテトとした。

これらを2%溶液とし、補糖 (Brix10) および熱処理の有無について発酵試験を行った。試験は酒母 (協会1号 OC2) を各溶液に添加し、ワインタイプの醸造法で行った。

(2) 結果

マイクロ波減圧乾燥品および凍結乾燥品は熱処理を行わない場合褐変が生じ良好な発酵が得られなかったが、これは酵素も失活していない良好な乾燥法であることを裏付けている。一方、熱処理を行ったものについては、すべて発酵が認められた。アルコール度数は、補糖を行わなかった場合すべて1%以下であったのに対し、補糖を行った場合でんぷんで2.4%と低かったほかは、すべて5~5.5%となり幾分発酵時間を要するものの良好な発酵が得られた。

また、発酵後の香りは甘酒と似ており、でんぷん、マッシュポテトではでんぷん特有の香りがし、凍結乾燥品では土臭がしたのに対し、マイクロ波減圧乾燥品では淡いじゃがいもの芳香性を持つ、飲み易い発酵酒となった。

醸造試験の結果としては、原料の通年供給性などで有利な点を見いだすことができた。

## 4.5 膨化試験

### (1) 試験方法

2軸エクストルーダー（神戸製鋼所, TCO-30, L/D = 24）により、マイクロ波減圧乾燥品のスナックタイプの膨化菓子の製造を下記条件で試みた。

原料供給量：8～10kg/h, 加水量：0.8～1.0l/h

バレル温度：80, 120, 150℃

出口ダイス：2mm×2穴,

スクリー回転数：380rpm

### (2) 結果

マイクロ波減圧乾燥品による膨化製品は、在来のマッシュポテトを利用した時には不可能であった組織がしっかりし、風味ある良好なものとなった。また、運転条件により、形状の違う2種類の膨化製品が得られた（写真4, 5）。

テクスチャーや味付けなどについてはさらに検討を要するが、ポテトチップに対応した新しい膨化食品の原料として注目に値するものとなった。



写真4

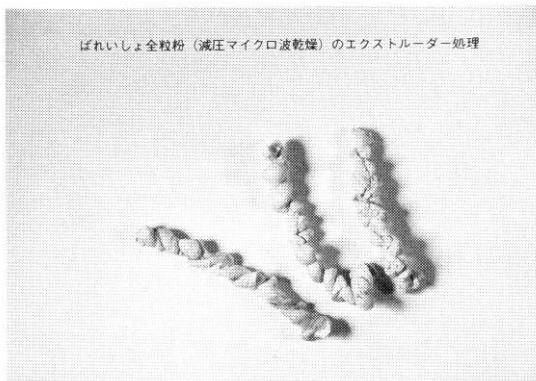


写真5

## 5. まとめ

マイクロ波減圧乾燥法を用いた、食品の高品位乾燥化の基礎的研究を行った。試料はじゃがいもと、これまでにない全粒粉の製造を試みた。その結果、

①操作圧力150Torr以下、マイクロ波出力3kW/kg-DM以下において風味、成分とも良好な全粒粉が得られた。

②本乾燥品のアミログラフは市販でんぷん、凍結乾燥品と比べ興味ある特徴的挙動を示した。

③応用試験として行った発酵試験、膨化試験から本乾燥品の優位性が認められた。

以上より、マイクロ波減圧乾燥法が新製品の開発等、食品の高付加価値化に有効であることが確認された。

一方、じゃがいものマイクロ波減圧乾燥法における特性として、

①通常の乾燥法同様の乾燥3期間が存在する。

②定率乾燥速度は水の同法による蒸発速度に匹敵する速いものである。

③定率乾燥期間における試料温度はその操作圧力の水の沸点にほぼ等しい。

④限界含水率は操作圧力、マイクロ波出力によらず約100DB%とほぼ一定である。

等の基礎的知見を得た。

## 6. 謝辞

本研究は、北海道地域人材不足対策技術開発事業における要素技術開発として行ったものである。本部会の試作開発研究を担当して頂いた、(社)北海道機械工業会、ならびに御協力頂いたクレードル食品(株)、その他関係各機関ならびに関係諸氏に対し、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 化学工学協会編;化学工学の進歩14, 食品化学工学 p82, 槇書店, (1980)
- 2) 例えば, 工藤 稔;化学装置, 33, 8, 47 (1991)
- 3) 篠原 久ら;化学工学, 19, 11, 568 (1955)
- 4) 久保田清ら;日本食品工業学会誌, 28, 9, 491(1981)

北海道立工業試験場報告 No.292 (1993)

- 5) 丸子盛久；化学工学, 31, 3, 255 (1967)
- 6) 久保田清ら；1991年化学工学年会要旨集, p155
- 7) 久保田清ら；1991年化学工学年会要旨集, p156
- 8) 久保田清ら；1991年化学工学年会要旨集, p157
- 9) 二国二郎監修；澱粉科学ハンドブック, P208～212  
朝倉書店, (1987)
- 10) M.Kainosho, K.Ajisawa: Tetrahedron Lett, 18, 1563
- 11) 唯野哲男ら；化学工学, 36, 2, 159 (1972)