

マイクロ波減圧乾燥法によるバレイショの乾燥

清水條資・山崎邦雄・熊林義晃・清水英樹・渡邊 治
 衰嶋裕典*・内山智幸*・尾谷 賢*
 近藤和男**・小松友治**

Drying of Potatoes by Vacuum Microwave Radiation-drying Method

Josuke SHIMIZU, Kunio YAMAZAKI, Yoshiteru KUMABAYASHI, Hideki SHIMIZU, Osamu WATANABE
 Hironori MINOSHIMA*, Tomoyuki UCHIYAMA*, Masaru OTANI*
 Kazuo KONDO**, Tomoji KOMATSU**

We studied effective drying of cut potato using a vacuum microwave radiation-drying (VMRD) method. Some basic information obtained from this study is; 1) Three typical periods in the drying process (preheating period, constant-rate period, falling-rate period), were also found in the VMRD method. 2) The drying rate of potato in the constant-rate period was as high as the evaporation rate of water under the same condition. 3) Sample temperature at constant rate period was equal to boiling point of water under the operating pressure 4) Critical moisture content was about 100DB%, irrespective of the operating pressure and microwave power.

The VMRD method (≤ 150 Torr, ≤ 3 kW/kg-dry matter) maintained desirable flavor and component of raw potato, compared with other commonly using drying methods, e. g. draft-drying etc.. Moreover, whole potato granules prepared in the VMRD method had advantageous characteristics on fermentation and puffing. Vacuum microwave radiation-drying method is effective on development of novel, value-added products.

豊かな農水畜産資源を背景に、食品加工業は北海道の重要な基幹産業となっている。このうちで乾燥食品は、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、加工業界は高品質化・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的および酵素的要因により様々な変化を生じ品質低下を起す。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¹⁾、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²⁾。本研究は、マイクロ波減圧乾燥を用い、食品の高品位乾燥に関する基礎的な検討を行うことを目的とした。

試験材料には、本道の基幹作物の一つであるバレイショを用いた。バレイショの乾燥食品としてはマッシュポテト、でんぷん等が挙げられる。一般成分を多く残しているマッシュポテトは、風味が損失していることおよびでんぷんが α 化されているなどの理由により、食品素材としての用途が限られる。

そこで、本研究では生のバレイショの風味、成分を保持し、なおかつでんぷんが α 化されていないバレイショの全粒粉をマイクロ波減圧乾燥法を用いて製造することを試みた。最適乾燥条件の検討と、この新しい素材の利用についても応用検討を行った。

バレイショの乾燥試験に関しては、熱風乾燥試験³⁾⁴⁾、凍結乾燥試験⁵⁾、減圧乾燥試験⁶⁾、常圧マイクロ波乾燥試験⁷⁾、減圧マイクロ波乾燥試験⁸⁾等の例が報告されてい

* 北海道立工業試験場 (〒060 北海道札幌市北区北19条西11丁目)

** 北興化工機株式会社 (〒063 北海道札幌市西区発寒12条12丁目1-20)

る。これらは、主に乾燥速度または速度式について検討したものであるが、一部これらとの比較を行った。

実験方法

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 NJE 6607 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パッチ式減圧乾燥試験機

マイクロ波出力：0~3.6 kW 連続可変

発振周波数：2,450±50 MHz

操作圧力：50~760 Torr

乾燥室寸法：1000 φ×1000 Hmm

計装：重量計 ロードセル式，最大 10 Kg

温度計 赤外線温度計，0~300°C

その他：内部スターラーファン，ターンテーブル

2. 試料

バレイショは、北海道'91年産男爵L品を用い、これを4°C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。

3. 乾燥試験方法

各試験の1回の試料量は、1500 gと統一し、これを樹脂製ネット容器(27 cm×36 cm×5 cmH)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(1)試料の形状、(2)操作圧力、(3)マイクロ波出力のそれぞれに関し、乾燥速度と乾燥品の品質への影響を検討した。

(1) 試料の形状による乾燥速度および品質への影響

操作圧力 50 Torr，マイクロ波出力 1 kW 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 5 mm：フレンチポテト風棒状，断面 5 mm 角
- ② フレンチ 10 mm：同上，断面 10 mm 角
- ③ スライス 5 mm：スライス，厚さ 5 mm
- ④ キューブ 10 mm：さいころ状，10 mm 角
- ⑤ ホール：丸ごと

(2) 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 5 mm，マイクロ波出力 1 kW とし、次に示す操作圧力により試験を行った。

- ① 50 Torr ② 100 Torr ③ 150 Torr
- ④ 200 Torr ⑤ 400 Torr ⑥ 750 Torr

(3) 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 5 mm，操作圧力を 50 Torr とし、次に示すマイクロ波出力により試験を行った。

- ① 0.3 kW ② 0.5 kW ③ 0.8 kW
- ④ 1.0 kW ⑤ 2.0 kW

4. 乾燥品の食品素材としての総合評価方法

最適乾燥条件下で得たマイクロ波減圧乾燥品について、以下に示す試験を行い食品素材としての総合的評価を行った。

(1) 一般成分分析

水分は 105°C 乾燥法により、タンパク質はケルダール窒素定量法により、脂質はソックスレー抽出法により、繊維は AOAC 法により、灰分は直接灰化法によりそれぞれ分析を行い、糖質は差し引き計算により求めた。この際、凍結乾燥品、でんぷん、マッシュポテトを比較対照とした。

(2) α 化度の測定

Kainosho⁹⁾らの方法を参考に 270 MHz の核磁気共鳴分析装置(JEOL 製, JNM-EX 270)を用い、¹³C-NMR において内部標準物質を Dioxane とし、試料中でんぷんの C1 ピークとの面積比を計算し、さきに算出しておいた検量線からその α 化度を求めた。

(3) アミログラフによる粘度特性の測定

試料中でんぷん濃度を 3.5% に調製し、BRABENDER 社製 VISCO-GRAPH TYP. 801240 により、加熱による α 化過程での粘度曲線を求めた。また、比較対照として凍結乾燥品、でんぷん、マッシュポテトを試料とした。

(4) エクストルーダーによる膨化試験

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：8~10 kg/h，加水量：0.8~1.0 L/h

バレル温度：80, 120, 150°C

出口ダイ：2 mm×2 穴，スクリー回転数：380 rpm

結果および考察

1. 乾燥試験結果

(1) 試料の形状による影響

i) 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。

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³⁾、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。

ii) 乾燥品の品質

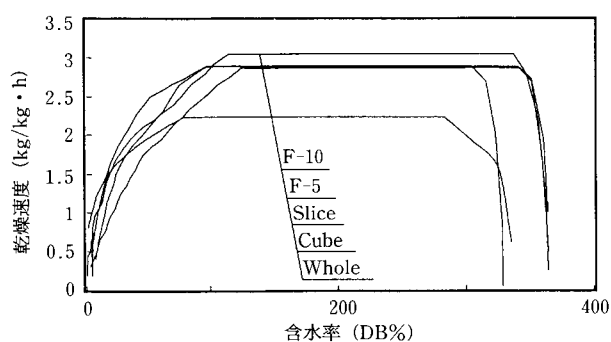


図1 試料形状の違いによる乾燥特性曲線

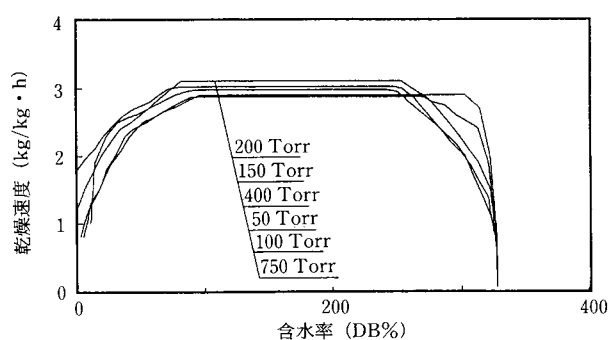


図2 操作圧力の違いによる乾燥特性曲線

表1 恒率乾燥期間における諸特性値 (操作圧力による影響)

P Torr	Tbp °C	Ts °C	Mc DB%	R kg/kg·h	E %
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，Tbp：各操作圧力における水の沸点，
Ts：試料表面温度，Mc：限界含水率，R：恒率乾燥速度，
E：マイクロ波エネルギー効率

本試験の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、試料形状の違いにより焼けが認められ、フレンチ 10 mm、スライスカット品、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、表面は逆に熱が逃げ易く、厚みを有するものほど焼け易いことによるものである。また、特に球状のものは多方面からのマイクロ波が中心部に集中し、焼けを生じ易くするものと思われる。

(2) 操作圧力による影響

i) 乾燥速度

種々の操作圧力による乾燥特性曲線を図2に示し、また、恒率乾燥期間における諸物性値を表1に示した。これらより、以下の結果が得られた。

- ① 恒率乾燥速度は操作圧力による影響はなく、約 3 kg/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 90 DB% (約 47 WB%) であった。
- ③ 恒率乾燥期間における試料表面温度は、その操作圧力における水の沸点に近く、通常の乾燥同様ほぼ一定であった。
- ④ 恒率乾燥期間におけるエネルギー効率は操作圧力による影響は少なく、約 70% であった。
- ⑤ 本試験における乾燥時間は、予熱乾燥期間では操作圧力が低いほど短く 8~25 分であり、恒率乾燥期間は約 35 分、減率乾燥期間は約 25 分であった。
- ⑥ 全体でのマイクロ波エネルギー効率は、約 50% であった。

ii) 乾燥品の品質

各種操作圧力による乾燥品の破断面の SEM 写真を図

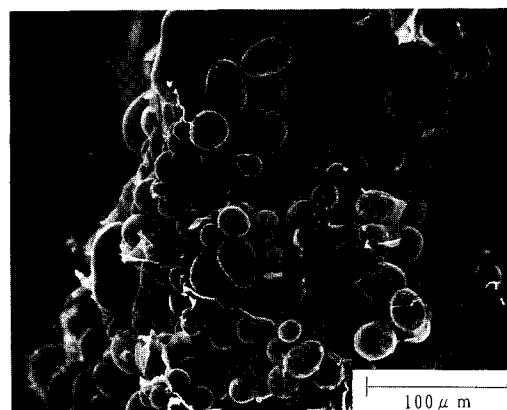


図3-a 乾燥品断面 (操作圧力 50 Torr)

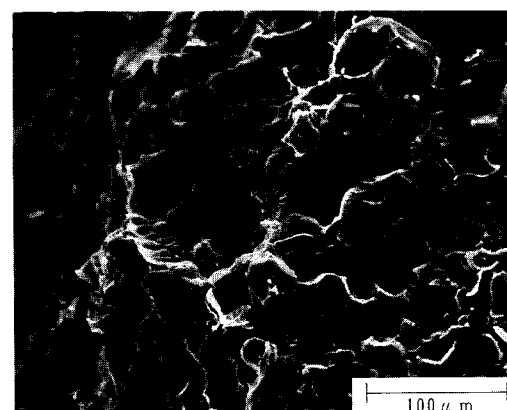


図3-b 乾燥品断面 (操作圧力 200 Torr)

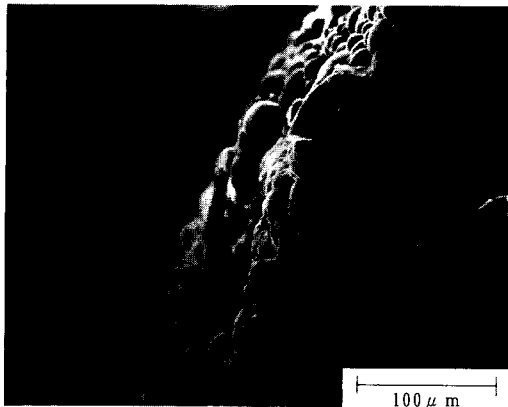


図3-c 乾燥品断面 (操作圧力 400 Torr)

3に、粉碎品のX線回折図を図4に、また、試料の表面温度と含水率の関係を図5に示した。

図3より、操作圧力 50 Torr においては、多くの球状 β 型でんぷんが観察されるが、400 Torr ではすでにブロック化し α 化され、また、200 Torr 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 β 型でんぷん粒は、分子が無秩序に集合したのではなく、部分的に微小な結晶状の構造が発達した微結晶構造で明瞭なX線回折像を与える。しかし、 α 型でんぷん粒となると、もはやX線回折による結晶性は示さなくなる¹⁰⁾。

図4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。50 Torr では明瞭な回折図を与えているが、400 Torr 以上では結晶性を示さず α 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 Torr 付近が変移点であると考えられる。

一方、試料表面温度の変化(図5)より、操作圧力 200 Torr における恒率期間での表面温度は約 60°C であり、通常のパレイショの α 化開始温度に一致した。 α 化を抑えた全粒粉を製造するには、含水率の高い恒率乾燥期間

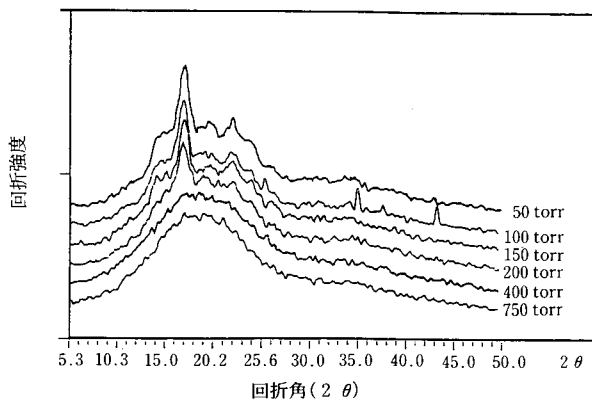


図4 操作圧力の違いによる粉碎品のX線回折図

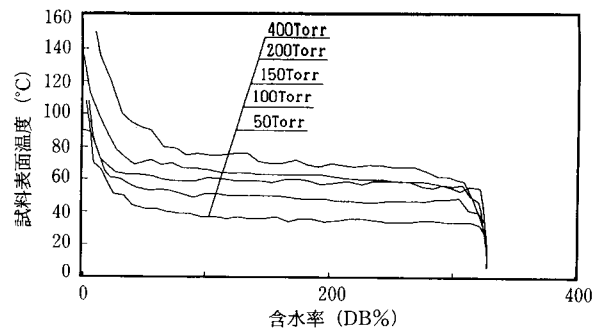


図5 操作圧力の違いによる試料表面温度変化

での品温を 60°C 以下とするため、操作圧力は約 150 Torr 以下とする必要がある。

褐変は操作圧力 150 Torr 以上において観察された。また、焼けは 50, 100 Torr でわずかに認められ、150 Torr 以上で顕著であった。乾燥中の試料の表面温度変化(図5)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。

このように、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のコントロールを行うことにより防止することができると考えられる。

(3) マイクロ波出力による影響

i) 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6に、恒率乾燥期間における諸物性値を表2に示した。これらより以下の結果が得られた。

- ① 恒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 1 kW あたり、約 1 kg/h であった。これは、本装置による自由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、マイクロ波出力の違いによる有意差はなく約 100 DB% であった。
- ③ 試料表面温度はマイクロ波出力の上昇に従い、若干

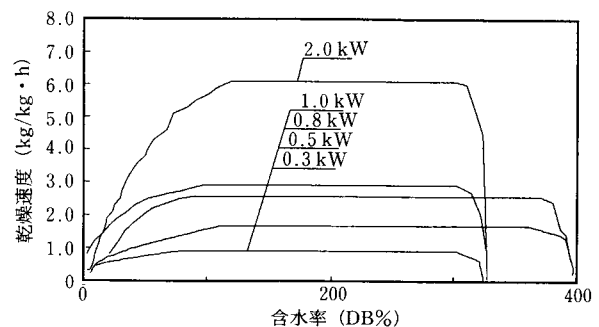


図6 マイクロ波出力の違いによる乾燥特性曲線

表2 恒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)

W kW	Ts °C	Mc 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	1.60	1.05	70
0.8	23~27	100	2.50	1.02	68
1.0	34~37	100	2.90	0.95	64
2.0	33~40	120	6.10	1.00	67

W:マイクロ波出力, Ts:試料表面温度, Mc:限界含水率, R:恒率乾燥速度, R':水分換算蒸発速度(マイクロ波1kWあたり), E:マイクロ波エネルギー効率

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、恒率乾燥期間において約70%であった。

ii) 乾燥品の品質

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(バレイショ乾量換算約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)以下で不安定な状態となった。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くなることによるものと考えられる。

(4) マイクロ波減圧乾燥に関するまとめ

以上のように、マイクロ波減圧乾燥においても、機構的には異なるものではあるが、通常の熱風乾燥と同様に典型的な予熱乾燥期間、恒率乾燥期間、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熱風乾燥と同様な意味合いのものと考えられることができる。

恒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 バレイショの場合、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。

一般に多くの食品の乾燥においては、恒率乾燥期間が

短く、野菜や果物でも限界含水率が270~770DB%と高い¹⁾。また、バレイショの場合、熱風乾燥試験⁴⁾、凍結乾燥試験⁵⁾において恒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、このよう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蒸気拡散律速と考えられる。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、試料内部温度の測定は困難であるため、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。

2. 乾燥品の食品素材としての総合的評価

(1) 一般成分分析

得られたマイクロ波減圧乾燥品の一般成分分析を、凍結乾燥品、でんぶん、マッシュポテトを対照として行った。その結果を表3に示した。

表3より、マイクロ波減圧乾燥品は、もっと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。

(2) α 化度

分析の結果、でんぶん分子が α 化状態の場合にあらわれるC1ピークは認められず、 α 化度は0%であると考えられた。

(3) アミログラム

アミログラムを図7に、各試料の諸特性値を表4に示した。

これらの結果より、各試料について以下のよう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

表3 一般成分分析結果(%)

	MW	FD	MP	PS
タンパク質	6.7	6.7	6.8	0.1
脂質	0.1	0.2	0.2	0.1
糖質	79.2	77.5	79.1	90.1
繊維質	1.3	3.0	1.8	-
灰分	3.1	3.1	2.6	0.2

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:バレイショでんぶん

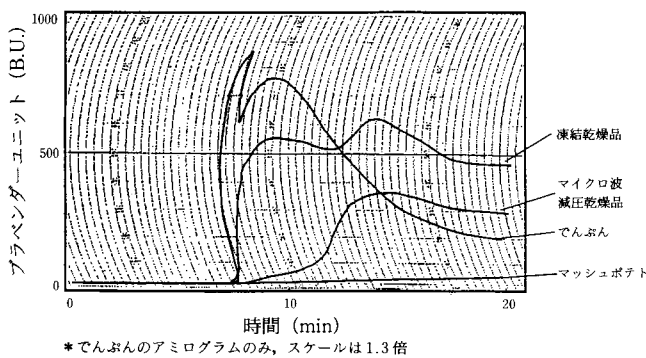


図7 アミログラフによる各試料の粘度特性曲線

表4 アミログラフによる諸特性値

	マイクロ波 減圧乾燥品	凍結乾燥品	でんぷん	マッシュ ポテト
α 化開始温度 (°C)	63.0	59.1	61.5	—
100 BU時温度 (°C)	80.7	63.9	63.0	—
最高粘度 (BU)	350.0	580.0	985.0	—
最高粘度時温度 (°C)	93.0	93.0	73.5	—
ブレイクダウン (BU)	60.0	160.0	695.0	—

BU: ブラベンダーユニット

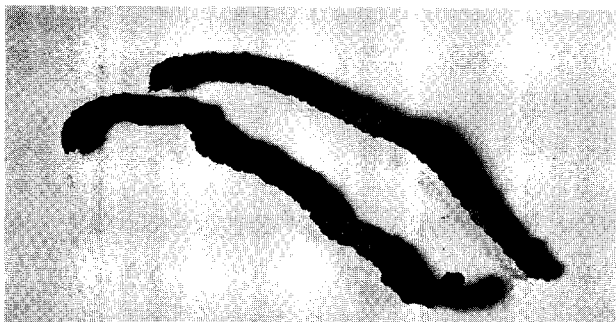


図8 エクストルーダーによる膨化品

クを示し、ブレイクダウンは小さい。

- ③ でんぷん：急激に立ち上がり，ブレイクダウンは大きい。
- 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，タンパク質など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，またブレイ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) 膨化試験

得られた膨化品を図8に示した。在来のマッシュポテトを利用したときには不可能であった組織のしっかりした，風味ある良好な製品が得られた。

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。

要 約

マイクロ波減圧乾燥法を用いた，食品の高品位化乾燥の基礎的研究を行った。試料はバレイシヨとし，これまででない全粒粉の製造を試みた。

その結果，バレイシヨ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 恒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 恒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。

また，得られた全粒粉については，

- ① 操作圧力150 Torr以下，マイクロ波出力3 kW/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 本製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 本製品の応用試験として行った発酵試験，膨化試験から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付加価値化に有効であることが確認された。

文 献

- 1) 化学工学協会編：化学工学の進歩14，食品化学工学，(棋書店)，p.82(1980)。
- 2) 工藤 稔：化学装置，**33**，47(1991)。
- 3) 篠原 久：化学工学，**19**，568(1955)。
- 4) 久保田清：日食工誌，**28**，491(1981)。
- 5) 丸子盛久：化学工学，**31**，255(1967)。
- 6) 久保田清：1991年化学工学年会要旨集，p.155(1991)。
- 7) 久保田清：1991年化学工学年会要旨集，p.156(1991)。
- 8) 久保田清：1991年化学工学年会要旨集，p.157(1991)。
- 9) M. Kainosho, K. Ajisawa: Tetrahedron Lett., **18**, 1563(1978)。
- 10) 二国二郎：澱粉科学ハンドブック，(朝倉書店)，

p.208(1987).

11) 唯野哲男：化学工学, **36**, 159(1972).