

# 加熱方法の違いによるさつまいもの食物繊維の腸内発酵性に及ぼす影響

## Effects of Different Heating Methods on the Intestinal Fermentability of Dietary Fiber in Sweet Potatoes

池田 倫子, 山中 なつみ\*  
Noriko IKEDA, Natsumi YAMANAKA

**要旨:** 凍結乾燥や粉碎を施さないさつまいもから抽出した食物繊維を用いて, 加熱ならびに加熱方法の違いが食物繊維の腸内発酵性に及ぼす影響を, ラットの盲腸内容物を用いたバッチ培養法によって検討した. さつまいもの総食物繊維を基質とした培養液の pH と全糖量の変化ならびに短鎖脂肪酸濃度を測定した結果, さつまいもの総食物繊維は, セルロースよりも高い発酵性を示したが, さつまいもの加熱および加熱方法の違いによる腸内発酵性の差は認められなかった. 本研究は, 食物繊維の抽出で一般的に用いられる凍結乾燥や粉碎, 熱乾燥といった機械的な処理を行わず, 摂取する状態に近い条件を採用したことで, 実際の食生活に近づけた状況を再現できたものと考えられた.

**Abstract:** We studied the effects of heating and different heating methods on intestinal fermentability of dietary fibers extracted from sweet potato that had not undergone freeze-drying or grinding processes, by the batch culture method using cecal contents of rats. As a result of measurement for changes in the pH, total sugar content levels and concentrations of short-chain fatty acids in culture solutions with the total dietary fibers of sweet potato as a substrate, it demonstrated that the fermentability of the total dietary fibers of sweet potato was higher than that of cellulose. While no difference in intestinal fermentability was observed regardless of whether sweet potato was heated or not or what method was used for heating. In this study, condition close to the actual eating could be reproduced by method without mechanical treatment such as freeze drying, pulverization, and thermal drying commonly used in the extraction of dietary fiber.

**キーワード:** さつまいも, 食物繊維, 加熱調理, 腸内発酵性, バッチ培養

**Keywords:** sweet potato, dietary fiber, cooking, intestinal fermentability, batch culture

### 【緒言】

今日の食生活において, 健康維持・増進の観点から食物繊維を多く摂取することが求められており, 日本人の食事摂取基準(2020年版)においても成人男性21 g以上, 成人女性18 g以上の食物繊維の摂取が目標量として掲げられている<sup>1)</sup>. このような背景の中, 食物繊維を強化した食品や精製された食物繊維が商品化され, 身近な小売店でも広く販売されるようになった. これらを用いて容易に食物繊維の摂取量を増やすことはできるが, 継続的摂取をするには安価ではなく, 安全性に懸念を抱く人も少なくない.

豆類やいも類などの植物性食品は食物繊維の供給源として優れた食品であるが, 加熱によって食物繊維の量が増えることが明らかとなっている. Hughesら<sup>2)</sup>は, 加圧加熱したインゲン豆は生に比べて不溶性食物繊維(insoluble dietary fiber, 以下IDFとする)量が増加することを確認している. また, 津久井ら<sup>3)</sup>の報告では, 蒸し加熱したさつまいも, じゃがいも, 里芋および長芋は, 生に比べて総食物繊維(total dietary fiber, 以下TDFとする)量が増加することを確認している. これらのことから, 加熱方法を適切に選択することで安全で手軽に食物繊維の摂取量を増やすことができる可能性がある.

\* 名古屋女子大学 健康科学部 健康栄養学科

食物繊維の定量を目的とした研究の多くは、食品の個体差や部位の違いによる影響を少なくするため、試料の前処理として凍結乾燥や粉碎を施し、試料を均質化している。しかし、これらの前処理によって食物繊維の量や性質が変化し、摂取する状態からかい離している可能性が考えられた。そこで、著者らは凍結乾燥や粉碎を施さない試料を用いて、摂取する状態に近い食物繊維の量や物理的性質における加熱調理の影響を検証した。その結果、さつまいもの食物繊維は、蒸し加熱することによって IDF 量やレジスタントスターチ (resistant starch, 以下 RS とする) 量が増加し、IDF の保水性や吸着性が低下することが認められた<sup>4)</sup>。食物繊維の量や物理的性質の変化は生理作用と深く関わりを持ち、これらの変化は腸内発酵性にも影響を及ぼす可能性が考えられた。食物繊維が腸内細菌により分解されて産生される短鎖脂肪酸は、大腸でエネルギーに利用されたり、肝臓で糖新生に用いられったり、発がん物質の生成を抑制したりする<sup>5)</sup>などの作用をもたらす有益な成分である。一方、RS は腸内発酵性が高いことが確認されている<sup>6)</sup>。RS には4タイプあり、細胞壁などにより物理的に消化酵素が作用できない RS1、でんぷん自体が酵素作用を受けにくい構造をもつ RS2、糊化でんぷんの老化が原因で消化性が低下した RS3、化学的処理によりでんぷん分子間に架橋形成させた RS4 に大別される<sup>7)</sup>。Cummings ら<sup>8)</sup> はじゃがいもの粉末 (RS2) や老化したグルテンフリーの小麦粉 (RS3) などの RS を添加したビスケットをヒトに摂取させ、糞便の短鎖脂肪酸含量を確認した結果、RS 未摂取群に比べて腸内発酵が高まることを確認している。既報<sup>4)</sup>において、さつまいもを蒸し加熱することで RS は増加することが認められたことから、加熱調理によって食物繊維の発酵性も変化し、食物繊維の生理作用に影響する可能性が考えられた。

そこで、本研究ではさつまいもの加熱ならびに加熱方法の違いが食物繊維の腸内発酵性に及ぼす影響を調べるため、未加熱ならびに蒸し加熱、電子レンジ加熱したさつまいもから抽出した TDF について、ラットの盲腸内容物を用いたバッチ培養法<sup>9)</sup>によって pH、全糖量の変化、短鎖脂肪酸濃度を測定し腸内発酵性を検討した。

## 【方法】

### 1. 試料の調製

さつまいもは、徳島県産のなると金時 (平成29年度収穫) を用いた。加熱条件は既報<sup>4)</sup>と同様に、蒸し加熱12分間と電子レンジ加熱500W 60秒間とした。さつまいも

は輪切り (厚さ2 cm) にし、円形クッキー型 (直径4 cm 円形) でくり抜いた。加熱後、放射状に8等分した1つを乳鉢で磨砕し、2 g を TDF の抽出に用いた。さつまいもから TDF を抽出する際は Prosky 法<sup>10)</sup>に従って行った。Prosky 法は七訂日本食品成分表の定量に採用されており<sup>11)</sup>、食物繊維の定量に広く用いられている方法であるが、試料の均質化のため前処理として凍結乾燥や粉碎を施している。しかし、一般の調理で凍結乾燥や粉碎は行わないため、本研究では試料を乳鉢で磨砕して用いた。TDF 抽出の際は、ろ過助剤のセライトを用いずろ過し、得られた TDF は乾熱による変性を防ぐため、デシケーター内で乾燥させた。未加熱のさつまいもから抽出した TDF を未加熱 TDF、蒸し加熱あるいは電子レンジ加熱したさつまいもから抽出した TDF をそれぞれ蒸し加熱 TDF、電子レンジ加熱 TDF とした。

## 2. バッチ培養

### (1) ラット盲腸内容物の採取

ラットの盲腸は袋状で内容物が滞留し、腸内発酵が盛んな部位であり<sup>12)</sup>、内容物の採取もしやすいことから発酵性の実験に用いられる<sup>9)</sup>。本研究でもラットの盲腸内容物を利用して菌体懸濁液を調製した。

リタイヤラット (Wistar 雄) 14匹を標準飼料で2週間飼育した。腹腔内にソムノペンチルを投与 (0.2 ml/100 g B. W.) して開腹し、盲腸内容物を採取した。採取した盲腸内容物に5倍容の重炭酸緩衝液 (pH7.0) を加え、4重のガーゼでろ過したろ液を菌体懸濁液とした。菌体懸濁液は密閉容器に入れ、ヘッドスペースを炭酸ガスで置換して保存した。

なお、本動物実験は「名古屋女子大学動物実験委員会」の承認 (受付番号29-2) ならびに「実験動物の飼育及び保管等に関する基準 (平成14年5月環境省告示第37号、最終改正平成25年環境告示第84号)」に即して実施した。

### (2) 基質溶液の調製

さつまいもの個体差を考慮し、8本のさつまいもを用いて、方法1の操作を14回行った。従って、それぞれ約28 g のさつまいもから TDF を抽出し、未加熱 TDF は0.62 g、蒸し加熱 TDF は1.04 g、電子レンジ加熱 TDF は0.95 g 得られた。抽出した TDF に、それぞれ2%濃度になるよう重炭酸緩衝液を加え、ヘッドスペースを炭酸ガスで置換した後、攪拌、溶解した。腸内細菌に利用されやすいグルコースと代表的な IDF であるセルロースを対照として同様に基質溶液を調製し、ブランクとして重炭酸

緩衝液を用いた。

(3) 培養方法

pH 測定と短鎖脂肪酸濃度測定の場合はマイクロチューブに基質溶液50  $\mu$ l と菌体懸濁液50  $\mu$ l を入れ、全糖量測定の場合は基質溶液500  $\mu$ l と菌体懸濁液500  $\mu$ l を入れ、それぞれヘッドスペースを炭酸ガスで置換し、タッチミキサーで攪拌した。マイクロチューブ上部に穴を開け、37°Cの恒温水槽内でそれぞれの時間培養した後、氷水で冷却し発酵を止めた。

(4) 培養液 pH の測定

腸内細菌によって発酵が進むと短鎖脂肪酸が産生されることによって培養液の pH が低下するため、発酵の指標として培養1, 2, 7, 18時間後の pH の測定を行った。それぞれの培養液を遠心分離 (KUBOTA3700, KUBOTA AF-2724A, 10,000 rpm, 10分) し、上清の pH を pH メーター (LAQUA twin HORIBA Advanced Techno) で測定した。

(5) 培養液中全糖量の測定

腸内細菌によって発酵が進むと培養液中の糖質が分解されて減少するため、発酵の指標として培養前と18時間後の培養液全体の全糖量を測定した。試験管に培養液10  $\mu$ l と蒸留水990  $\mu$ l を入れ、100倍希釈し、そこに5%フェノール溶液を500  $\mu$ l 加え、ドラフト内で硫酸2.5 ml を滴下し、タッチミキサーで攪拌した。室温で10分間反応させ、25°Cの恒温水槽内で10分冷却した後、分光光度計490 nm で測定した。グルコースを標準物質として検量線を作成し、全糖量を算出した。

(6) 短鎖脂肪酸濃度の測定

腸内細菌によって発酵が進むと短鎖脂肪酸が産生されるため、発酵の指標として培養18時間後の短鎖脂肪酸濃度を測定した。それぞれの培養液を遠心分離 (10,000

rpm, 10分) し、上清40  $\mu$ l に超純水240  $\mu$ l, 内部標準溶液 (0.1 mM クロトン酸/10 mM 水酸化ナトリウム) 40  $\mu$ l, クロロホルム320  $\mu$ l を加えてタッチミキサーで混合し、遠心分離 (10,000  $\times$  g, 20分) を行って脂溶性物質を除去し、上清をメンブレンフィルター (ADVANTEC DISMIC-13CP) でろ過した。高速液体クロマトグラフィ (Shimadzu LC-20AD, カラム ODS-HG-5 4.6 mm  $\times$  2.5 mm NOMURA CHEMICAL CO.,LTD) を用いて、カラム温度は40°C, 移動相は10分間3 mM 過塩素酸100% (流速0.5 ml/min) とした後、3 mM 過塩素酸50%, メタノール50%からメタノール100%になるよう50分間グラジエントした (流速1.0 ml/min)。検出器は吸光度検出器 (Shimadzu SPD-20AV, 波長220 nm) を用いた。酢酸, プロピオン酸, 酪酸の各標準物質 (いずれも和光特級) を同様に分析し、作成した検量線から各短鎖脂肪酸の濃度を算出した。

(7) 統計処理

得られたデータの有意差の検定は、一元配置分散分析を行い、Tukey 法による多重比較検定で行った。統計処理にはエクセル統計 ver.10を用い、危険率が0.05以下のとき有意であるとみなした。

【結果】

1.pH の変化

培養1, 2, 7, 18時間後の培養液の pH を測定した結果を表1に示した。培養1時間では未加熱 TDF を基質とした場合が7.58 $\pm$ 0.09, 蒸し加熱 TDF の場合が7.60 $\pm$ 0.02, 電子レンジ加熱 TDF の場合が7.59 $\pm$ 0.08でこれらの間に有意差はなく、セルロースの8.24 $\pm$ 0.20やブランクの8.16 $\pm$ 0.14に比べて有意 (p<0.05) に低かった。グルコースの場合は7.79 $\pm$ 0.07でブランクに対して有意差はなく、培養1時間においてさつまいもの TDF を基質とした場合の方が、グルコースの場合よりも pH が低い傾向がみられた。培養2時間後と7時間後では、さつまいも

表1 各培養時間における培養液の pH

	未加熱 TDF	蒸し加熱 TDF	電子レンジ加熱 TDF	グルコース	セルロース	ブランク
1時間後	7.58 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	7.60 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	7.59 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	7.79 $\pm$ 0.07 <sup>ab</sup>	8.24 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>	8.16 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>
2時間後	7.44 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	7.48 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	7.49 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	7.60 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	8.11 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	8.01 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>
7時間後	7.52 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	7.61 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	7.53 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	7.38 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>	8.22 $\pm$ 0.19 <sup>a</sup>	7.98 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>
18時間後	7.62 $\pm$ 0.17 <sup>b</sup>	7.73 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	7.69 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	7.24 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	8.62 $\pm$ 0.40 <sup>a</sup>	8.64 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>

mean  $\pm$  SD, n=4

有意差の検定は多重比較検定の Tukey 法で行った。

異なるアルファベットは、各培養時間において基質間に有意差 (p<0.05) があることを示す。

の TDF ならびにグルコースを基質とした場合のいずれもがブランクに比べて有意 ( $p < 0.05$ ) に低かった。培養 18 時間後では、未加熱 TDF を基質とした場合は  $7.62 \pm 0.17$ 、蒸し加熱 TDF の場合は  $7.73 \pm 0.25$ 、電子レンジ加熱 TDF の場合は  $7.69 \pm 0.14$  であり、ブランクの  $8.64 \pm 0.11$  に比べていずれも有意 ( $p < 0.05$ ) に低かった。また、グルコースを基質とした場合は  $7.24 \pm 0.06$  であり、他の基質に比べて最も低かった ( $p < 0.05$ )。一方、セルロースはいずれの培養時間においてもブランクとの差は認められなかった。

これらの結果より、未加熱、蒸し加熱、電子レンジ加熱 TDF はグルコースに比べて培養時間の早い段階で pH が下がり、セルロースよりも pH が有意 ( $p < 0.05$ ) に低下することが示された。しかし、いずれの培養時間においても未加熱、蒸し加熱、電子レンジ加熱 TDF の pH に有意差は認められず、培養液の pH の変化においてさつまいもの加熱ならびに加熱方法の違いによる影響はみられなかった。

## 2. 全糖量の変化

全糖量の変化は、18 時間培養後の全糖量を培養前の全糖量で除したものを全糖量残存率として図 1 に示した。未加熱 TDF を基質とした場合は  $19.73 \pm 4.17\%$ 、蒸し加熱 TDF の場合は  $23.03 \pm 4.24\%$ 、電子レンジ加熱 TDF の場合は  $23.32 \pm 1.32\%$  といずれも 2 割程度であった。これらの間に有意差は認められず、全糖量残存率においてさつまいもの加熱ならびに加熱方法の違いによる影響はみられなかった。また、グルコースの場合の全糖量残存率は  $17.58 \pm 5.43\%$  でさつまいもの TDF に比べてやや低い。これらの間に有意差は認められず、さつまいもの TDF はグルコースと同等に腸内細菌によって糖質の分解が進んだことが示された。一方、セルロースの場合は  $88.63 \pm 8.06\%$  と全糖量残存率が高く、グルコースやさつまいもの TDF に比べて腸内細菌によるセルロースの分解は進まなかった。

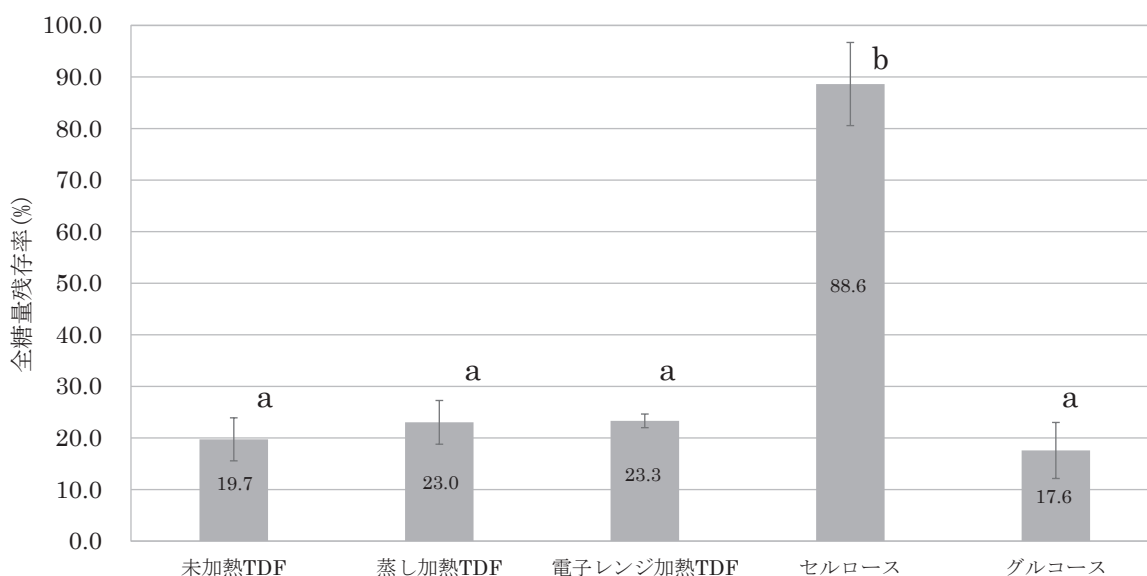


図1 培養18時間後における全糖量残存率

mean  $\pm$  SD, n=5

有意差の検定は多重比較検定の Tukey 法で行った。

異なるアルファベットは基質間に有意差 ( $p < 0.05$ ) があることを示す。

表2 培養18時間後における短鎖脂肪酸濃度

	未加熱 TDF	蒸し加熱 TDF	電子レンジ加熱 TDF	セルロース	グルコース	ブランク
酢酸	$11.83 \pm 1.83^a$	$12.03 \pm 2.15^a$	$12.60 \pm 2.72^a$	$5.78 \pm 0.37^b$	$12.90 \pm 2.14^a$	$6.57 \pm 0.53^b$
プロピオン酸	$5.10 \pm 1.07^b$	$5.06 \pm 0.54^b$	$5.41 \pm 1.14^b$	$1.49 \pm 0.35^c$	$8.29 \pm 1.41^a$	$1.58 \pm 0.27^c$
酪酸	$12.00 \pm 4.78^b$	$10.62 \pm 3.16^b$	$10.13 \pm 1.99^b$	$4.81 \pm 0.65^c$	$20.18 \pm 5.81^a$	$5.09 \pm 0.81^c$
合計	$28.92 \pm 6.95^b$	$27.70 \pm 5.33^b$	$28.14 \pm 5.32^b$	$12.08 \pm 0.30^c$	$41.36 \pm 5.62^a$	$13.24 \pm 1.09^c$

mean  $\pm$  SD, n=5

有意差の検定は多重比較検定の Tukey 法で行った。

異なるアルファベットは、各短鎖脂肪酸濃度あるいはその合計において基質間に有意差 ( $p < 0.05$ ) があることを示す。

### 3. 短鎖脂肪酸濃度

培養液の短鎖脂肪酸濃度の測定結果を表2に示した。酢酸濃度は、未加熱 TDF を基質とした場合が $11.83 \pm 1.83$  mM, 蒸し加熱 TDF の場合が $12.03 \pm 2.15$  mM, 電子レンジ加熱 TDF の場合が $12.60 \pm 2.72$  mM であり、これらの間に有意差は認められなかったが、セルロースの $5.78 \pm 0.37$  mM よりも有意 ( $p < 0.05$ ) に高い濃度であった。また、グルコースを基質とした場合の酢酸濃度は $12.90 \pm 2.14$  mM でさつまいもの TDF の場合と同程度であった。プロピオン酸濃度は、未加熱 TDF, 蒸し加熱 TDF, 電子レンジ加熱 TDF の間に差は認められなかったが、セルロースの $1.49 \pm 0.35$  mM よりも高く、グルコースの $8.29 \pm 1.41$  mM には及ばなかった。酪酸濃度においても未加熱 TDF, 蒸し加熱 TDF, 電子レンジ加熱 TDF の間に差は認められなかった。一方、グルコースを基質とした場合の酪酸濃度は $20.18 \pm 5.81$  mM でさつまいもの TDF の場合の約2倍、セルロースの場合の4倍以上であった。短鎖脂肪酸濃度の合計はグルコースの場合が最も高く、次いでさつまいもの TDF であり、セルロースは最も発酵が進まなかった。

#### 【考察】

さつまいもを食する際は衛生面や食味をよくする目的で加熱調理を行うことが一般的である。そこで、さつまいもの加熱や加熱方法の違いが食物繊維における腸内発酵性に及ぼす影響を調べた。実生活で摂取する状態に条件を近づけるため、凍結乾燥や粉碎を施さない試料から抽出した食物繊維を基質として、ラットの盲腸内容物を利用したバッチ培養により発酵性を比較した。培養液の pH と全糖量の変化、短鎖脂肪酸濃度を測定した結果、さつまいもの食物繊維の腸内発酵性に加熱ならびに加熱方法による違いは認められなかった。

既報<sup>4)</sup>の結果より、未加熱のさつまいもに含まれている IDF 量は $1.09$  g/100 g, 水溶性食物繊維 (soluble dietary fiber, 以下 SDF とする) 量は $1.08$  g/100 g であり、蒸し加熱したさつまいもの IDF 量は生のさつまいも100 g あたりに換算して $2.10$  g/100 g, SDF 量は $0.93$  g/100 g, 電子レンジ加熱したさつまいもの IDF 量は生のさつまいも100 g あたり換算して $1.29$  g/100 g, SDF 量は $1.01$  g/100 g であることが確認されている。従って、さつまいもの TDF には IDF が多く含まれていると言えるが、本研究結果において、代表的な IDF であるセルロースよりも発酵性が高いことが認められた。星ら<sup>13)</sup>の報告ではセルロースパウダーはラットの大腸で発酵しにくい

と示されており、本研究でも同様の傾向であった。IDF の中でもセルロースは発酵性が低く、一方でさつまいもにはセルロース以外の IDF や SDF が含まれているため、セルロースよりも高い発酵性がみられたと考えられた。

また、既報<sup>4)</sup>の結果から、さつまいもを蒸し加熱することで IDF として定量される RS が、未加熱や電子レンジ加熱した場合に比べて増加することが確認されている。従って、蒸し加熱 TDF における IDF と SDF の構成比率は、未加熱や電子レンジ加熱 TDF に比べて IDF の割合が高いと推察された。食物繊維の中でも SDF は IDF に比べて高い発酵性を示す<sup>14)</sup>ことが明らかとなっているが、本研究結果では蒸し加熱 TDF と未加熱や電子レンジ加熱 TDF には同等の発酵性があると示された。このことから RS が発酵を受けやすい基質であり、さつまいもを蒸し加熱することで増加した RS は SDF と同等の発酵性を有すると考えられた。Kawakami ら<sup>15)</sup>は、未加熱や異なる加熱方法で得られたじゃがいもパウダーをラットに与えて発酵性を評価しているが、蒸し加熱して得られたじゃがいもパウダーはドラム乾燥させたよりも RS 含量が高く、短鎖脂肪酸の産生量も高かったと報告しており、じゃがいもにおいても RS が発酵を受けやすいことが示されている。しかし、蒸し加熱により形成された RS が発酵を受けやすい基質であることをより明確にするためには、SDF のみを抽出して同様のバッチ培養試験をし、TDF 中の SDF の発酵性を検証する必要があると考えられた。

未加熱、蒸し加熱あるいは電子レンジ加熱したさつまいもの食物繊維の腸内発酵性を、同濃度の TDF で比較した結果、発酵性に差がなかった。従って、同量のさつまいもで比較した場合には、TDF 量の増加する蒸し加熱したさつまいもは未加熱や電子レンジ加熱したさつまいもよりも短鎖脂肪酸産生量が多くなる可能性が考えられた。

グルコースは最も発酵が進んだが、培養1時間の培養液の pH はブランクとの間に有意差はなかったのに対して、さつまいもの TDF を基質とした場合はブランクよりも有意に低下した。Hoshi らは<sup>16)</sup>スクロースや難う蝕性の二糖類であるキシロシルフルクトシドを与えたラットの盲腸内容物の有機酸と盲腸の pH を測定しているが、前者は酢酸やプロピオン酸が多く産生されたのに対し、後者はコハク酸を多く産生し前者よりも pH が低下したことを報告している。このことから、さつまいもの TDF は単糖であるグルコースと同様に発酵が進むことが示されたが、グルコースとは産生された有機酸の種類

が異なるため、培養の早い段階でグルコースよりも pH が低下した可能性が考えられた。

一般的に腸内発酵によって産生される短鎖脂肪酸のモル比は、酢酸、プロピオン酸、酪酸が約60:25:15とされているが<sup>5)</sup>、本研究結果の培養液の酪酸濃度は、いずれの基質の場合でも酢酸と同程度あるいはそれ以上であり、プロピオン酸の2倍以上であった。RSの種類によっては酪酸を多く産生するものがあるが<sup>17)</sup>、本研究においてはRS含有量が多い蒸し加熱したさつまいものTDFの場合と、未加熱や電子レンジ加熱したさつまいものTDFの場合で酪酸濃度に差はみられず、RSの存在が酪酸濃度の高い要因とは考えにくかった。Kikuchiら<sup>9)</sup>は、ラットの盲腸内容物を用いたバッチ培養試験において短鎖脂肪酸濃度をガスクロマトグラフィーを用いて測定しているが、グルコースを基質とした際の短鎖脂肪酸産生量は酢酸が43.2  $\mu\text{mol/culture}$ 、プロピオン酸が17.4  $\mu\text{mol/culture}$ 、酪酸が31.8  $\mu\text{mol/culture}$  であり、酪酸が多く産生された結果となっている。腸内発酵では腸内細菌や基質の種類によって産生される有機酸組成は変化するため<sup>18)</sup>、ラットの盲腸内容物を用いたバッチ培養条件下では、グルコースから酪酸が多く産生される傾向がある可能性が考えられた。また、短鎖脂肪酸は上皮細胞で消費されたり、体内へ取り込まれたりする<sup>19)</sup>。短鎖脂肪酸の中でも酪酸は大腸上皮細胞で他のエネルギー源よりも優先的に消費されるため<sup>20)</sup>、生体内実験ではすぐに吸収される酪酸が、バッチ培養の環境では培養液中に残存しており、そのため酪酸濃度が高かった可能性も考えられたが原因の特定には至らなかった。さらにHPLCによる短鎖脂肪酸濃度の測定においては、標準物質の保持時間と一致することから各脂肪酸のピークを同定したが、培養液中の成分の分離が不十分で酪酸と判断したピークに他の成分が重なって検出された可能性が考えられた。HPLCによる酪酸の定量条件については今後さらに検証する必要がある。

生体内における腸内発酵は、基質が大腸内へ流入する速度によっても産生量に変化する<sup>13)</sup>。バッチ培養法の測定結果は、生体実験における測定結果と直接比較することはできないが、基質と腸内細菌を直接反応させるため他の成分や作用の影響を受けず、それぞれの基質における発酵性の特徴を比較することが可能であり、経時的変化を細かく調べることもできる方法として有効であった。また、ラットの生体を用いた動物実験の多くは4~7匹を1つの群として用いるため多くの動物が必要となる。本研究はバッチ培養法を用いたことで動物の使用数を

抑えて実験を行ったことは適切であったと考えられた。バッチ培養法を用いた研究の中でも、本研究は一般的に行われている食物繊維の抽出方法において凍結乾燥や粉碎、熱乾燥といった機械的な処理を行わず摂取する状態に近い条件に配慮して行ったことで実際の食生活をより反映した結果であると考えられた。

#### 【引用文献】

- 1) 厚生労働省, 日本人の食事摂取基準(2020年版)  
[https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage\\_08517.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_08517.html), (2020.9.5検索)
- 2) Joe S. Hughes, Barry G. Swanson, Soluble and insoluble dietary fiber in cooked common bean (*Phaseolus Vulgaris*) seeds, *Food microstructure*, **8**, 15-21(1989).
- 3) 津久井重紀夫, 鈴木敦子, 小口悦子, 永山スミ, いも類の食物繊維量の加熱調理による変化, 日本家政学会誌, **45**, 1029-1034(1994).
- 4) 池田倫子, 山の中なつみ, 小川宣子, 加熱方法の違いがさつまいもの食物繊維量と物理的性質に及ぼす影響, 日本家政学会誌, **71**, 719-726(2020).
- 5) 奥恒行, 食物繊維の生理作用, 印南敏, 桐山修八編, 食物繊維, 第一出版株式会社, 95-98(1995).
- 6) 早川享志, ルミナコイドとしてのレジスタントスターチの機能, 海老原清・早川享志・奥恒行責任編集, ルミナコイド研究のフロンティア—食物繊維・オリゴ糖・レジスタントスターチの最新研究動向—, 建帛社, 233-243(2010).
- 7) 早川享志, 食物繊維の種類と化学, 日本食物繊維会編集委員会編, 食物繊維基礎と応用, 第一出版, 51-52(2002).
- 8) J H Cummings, E R Beatty, S M Kingman, S A Bingham, H N Englyst, Digestion and physiological properties of resistant starch in the human large bowel, *British Journal of nutrition*, **75**, 733-747(1996).
- 9) Kikuchi H, Sakata T, Qualitative and quantitative estimation of soluble indigestible polysaccharides as substrate for hindgut fermentation by mini-scale batch culture, *J. nutr. sci. vitaminol*, **38**, 287-296(1992).
- 10) L Prosky, N-G Asp, I Furda, J W Devries, T F Schweizer, B F Harland Determination of total fiber in foods and food products collaborative study, *J. asso. Off. Anal. Chem*, **68**, 677-679(1985).
- 11) 文部科学省, 日本食品標準成分表2015年度版(七訂)

- 分析マニュアル (2016). [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/syokuhinseibun/1368931.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1368931.htm), (2020.9.5検索)
- 12) 坂口英, 栄養研究における盲腸切除ラットの有用性, 日本食物繊維研究会誌, **7**, 1-12(2003).
  - 13) 星清子, 矢島高二, 大腸内細菌の代謝と代謝産物の作用, 日本食物繊維誌, **2**, 1-14(1998).
  - 14) 辻啓介, 食物繊維と疾病, 辻啓介, 森文平編, 食物繊維の科学, 12-15(1997).
  - 15) Kawakami S, K.-H. Han, Araki T, Ohba K, Wakabayashi T, Shimada K, Fukushima M, Potato powders prepared by successive cooking-process depending on resistant starch content affect the intestinal fermentation in rats, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, **81**, 359-364(2017).
  - 16) Hoshi S, Sakata T, Mikuni K, Hashimoto H, Kimura S, Galactosylsucrose and xylosylfructoside alter digestive tract size and concentrations of cecal organic acids in rats fed diets containing cholesterol and cholic acid, *J. Nutr.* **124**, 52-60(1994).
  - 17) R K Le Leu , Y Hu, G P Young, Effects of resistant starch and nonstarch polysaccharides on colonic luminal environment and genotoxin-induced apoptosis in the rat, *Carcinogenesis*, **23**, 713-719(2002).
  - 18) 渡部絢子, 腸内糖代謝と腸内細菌, 腸内細菌学雑誌, **19**, 169-177(2005).
  - 19) J H Cummings, E W Pomare, W J Branch, C P Naylor, G T Macfarlane, Short chain fatty acids in human large intestine, portal, hepatic and venous blood, *Gut*, **28**, 1221-1227(1987).
  - 20) 原博, プレバイオティクスから大腸で産生される短鎖脂肪酸の生理効果, 腸内細菌学雑誌, **16**, 35-42(2002).