

# 植物性食品の加熱調理が資化性に及ぼす影響—予備的検討

## The Effect of Heat Cooking on the Assimilation of Plant-based Foods' Fermentability: a preliminary study

(2022年3月31日受理)

木野山真紀 栗原 里奈 高橋 知那  
Maki Kinoyama Rina Kurihara China Takahashi  
高松 美紅 赤木 収二  
Miku Takamatsu Shuzi Akagi

Key words : ペクチン質, 呼気中水素濃度, 資化性, 加熱調理

### 抄 録

植物性食品を加熱調理すると、細胞に遍在するペクチン質の一部は可溶化し、食品は軟化する。ペクチン質は難消化性の多糖類であり、摂取後は大腸に到達し腸内細菌叢による発酵や資化を受け、短鎖脂肪酸や $H_2$ 、 $CH_4$ ガスに代謝される。本研究では、大腸で産生された $H_2$ 、 $CH_4$ が呼気中に排出されることを利用して、生および加熱後のりんごを摂取した後の呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ 濃度を測定し、呼気中 $H_2$ 総排出量を分析することで、植物性食品の加熱調理による資化性の評価を予備的に試みた。呼気中 $H_2$ 濃度は生に比べて加熱後のりんご摂取後に低値で推移し、呼気中 $H_2$ 総排出量も加熱後で被験者全員が低値を示したことから、りんごの資化性は加熱によって低下する可能性が示唆された。

### I はじめに

ペクチン質は、野菜や果物など植物中に存在している複合多糖類である。細胞レベルでは、植物細胞の細胞壁と中葉組織（細胞間層）に偏在している。分子レベルでは、ペクチン質はガラクトン酸が $\alpha$ -1, 4結合したポリガラクトン酸が主成分であり、ポリガラクトン酸のカルボキシ基(-COOH)の一部がメチルエステル化され、メトキシ基(-OCH<sub>3</sub>)に置換されたペクチニン酸、メチルエステル化されていないものをペクチン酸と呼ぶ<sup>1)</sup>。

一般に野菜や果物といった植物性食品を中性～弱アルカリ下で加熱するとペクチニン酸が分解されて可溶化し、細胞の接着力が減少することで軟化する(β-脱離)。また、pH4以下の酸性条件でも、ペクチン質を含有する食品は加水分解により可溶化し、軟化する。われわれはこれらの現象を利用して、生のままでは硬い植物食品でも加熱調理によって食べやすくしている。また、高齢者

福祉施設や学校給食においては、衛生管理や摂食しやすさの観点から物性食品の多くは加熱調理され提供されている。

食品に含まれるペクチン質などの難消化性糖質は上部消化管で消化・吸収されずにそのまま大腸に到達する。図1に難消化性糖質代謝の特徴を示す<sup>2)</sup>。ヒトの大腸内には数百種類もの腸内細菌が常在し、未消化の炭水化物は腸内細菌叢によって発酵や資化(微生物が炭素源として利用すること)を受け、代謝産物として二酸化炭素( $CO_2$ )、水素( $H_2$ )、メタン( $CH_4$ )あるいは短鎖脂肪酸(有機酸)が産生される。産生された有機酸の95%以上は大腸壁から吸収され、特に酪酸は大腸粘膜細胞にエネルギーを供給することが知られている<sup>3,4)</sup>。発生した $H_2$ と $CH_4$ は直ちに腸粘膜から血液中に溶け込み、血液循環を介して肺胞に拡散し、その約14%が呼気中に排出される。このように、 $H_2$ と $CH_4$ は難消化性糖質の腸内細菌による発酵の過程で発生し、それらの100%が腸内発酵に由来

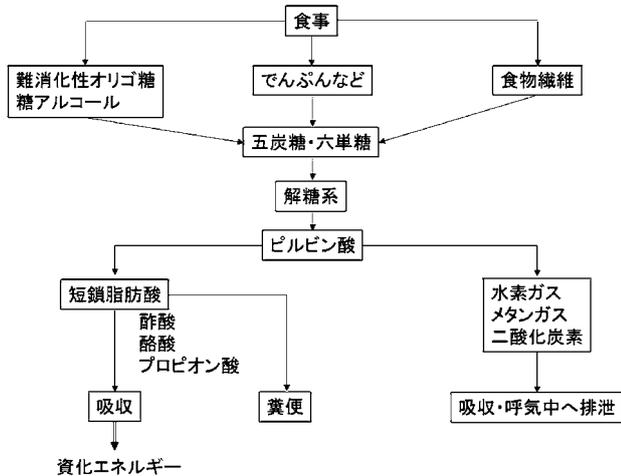


図1 難消化性糖質代謝の特徴（文献2より改変）

するとされている<sup>5)</sup>。さらに、このメカニズムを利用して、採取した呼気中の $H_2$ 、 $CH_4$ 濃度を測定することで難消化性糖質の腸内発酵の程度（資化性）や小腸通過時間の推定が可能となることが知られている<sup>6)</sup>。

植物性食品に含まれるペクチン質も、消化吸収されない難消化性の多糖類であるが、加熱調理前後の資化性の変化を呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ 濃度測定により比較検討した報告はみられない。そこで本研究では、生（加熱前）と加熱後の植物性食品を摂取後の呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ 濃度を測定し、資化性が変化するか否かを予備的に検討した。

## II 方 法

### 1. 被験者

中国学園大学現代生活学部人間栄養学科3年生女子学生3名（A, B, C）を被験者とした。いずれの被験者についても、消化器疾患等の呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ に影響を及ぼす疾患等がみられないことを予め確認した。また、全員が禁煙者であった。なお、被験者には事前に中国学園大学倫理審査委員会の承認（承認番号2-1）を得た後、説明を行い、本人の同意を得て実施した。

### 2. 実験プロトコル

呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ は食生活や排便状況の影響を受けやすいことから、実験開始1週間前より、被験者には一度に多量の発酵性食品（納豆, ヨーグルトなど）やオリゴ糖, 糖アルコールを摂取しないよう説明し、毎日の食事内容

と排便の回数と便の性状を記録させた。被験者は3名とも、指示した食生活は遵守され、便回数・性状とも問題はなく、排便異常もみられなかった。

実験前日の夕食は21時までには摂取を終了し、以後は飲水のみ可能とした。実験当日、試験食摂取前の呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ 濃度が低値であることを確認するために、被験者は試験食摂取前の早朝空腹時に30分の間隔で2回呼気採取した。2回目の呼気採取後、試験食を摂取し、健常者の小腸通過時間は150分±45分と報告されていることから<sup>7)</sup>、呼気採取時間は90分後から360分後まで30分間隔に設定した。また、実験中の空腹を避けるために、呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ 濃度に影響しないとされている白飯（レトルトパックごはん180g）<sup>6)</sup>を、各被験者に試験食摂取180分後に摂取させた。また、試験中、被験者は安静を維持し、排便があった場合はその時刻と回数を記録した。

### 3. 試験食

試験食には、生と加熱の両方の調理法で食され、かつ生でも食べやすい植物性食品として、りんご（サンふじ）を用いた。生の試験食は、皮をむいたりんごの可食部200gを量り取り、使用した。また、加熱試験食には、皮をむいたりんごの可食部200gを1cmの厚さにスライスし、水70mlを加えて全体がしんなりするまで落し蓋をして中火で加熱し、粗熱が取れたものを使用した。加熱したりんごの煮汁にはペクチンが溶けだしている可能性があるため、煮汁もすべて摂取させた。日本食品標準成分表に記されたりんごの各状態における栄養価（表1）<sup>8,9)</sup>には、皮をむいた後に加熱したりんごの成分値は記載されていない。しかし、りんご（皮つき・生）とりんご（皮つき・焼き）との間には、栄養成分の大きな違いはみられないことから、皮なしで加熱調理をした場合でも栄養成分に大きな差はないものとした。

### 4. 呼気採取方法および呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ 濃度測定

呼気採取は、腸内発酵由来の $H_2$ 、 $CH_4$ が含まれるとされる終末呼気（肺胞気）を採取することができる終末呼気サンプリングシステム（図2、呼気生化学栄養代謝研究所製）を用いた。具体的には、まず水で口すすぎして、通常呼吸を続けた後、5秒間以上息こらえし、そのままマウスピースに息を吹き込みながら、三つのバッグに分

表1. りんごの栄養成分 (可食部100gあたり)

	利用可能		食物繊維総量 (g)	有機酸 (g)	でんぷん (g)	ぶどう糖 (g)	果糖 (g)	しょ糖 (g)	ソルビトール (g)
	エネルギー (kcal)	炭水化物 (質量計) (g)							
りんご・皮なし・生	53	12.2	1.4	0.5	0.1	1.4	6	4.8	0.7
りんご・皮つき・生	56	12.7	1.9	0.4	Tr	1.6	6.3	4.7	0.5
りんご・皮つき・焼き**	57	11.4	1.7	0.4	0.1	1.4	5.8	4.2	未測定

\* でんぷん, ぶどう糖, 果糖, ガラクトース, ショ糖, 麦芽糖, 乳糖, トレハロース, 80%エタノールに可溶性のマルトデキストリンおよびマルトトリオース糖のオリゴ糖類を分析または推計しそれぞれの質量を合計した値

\*\*収載値に重量変化率67%を乗じた値

けて呼気採取を行うことで、終末呼気を採取する方法であり、最終的に厳重に気密性の保たれた状態で、アルミ製コレクションバッグに終末呼気が採取可能である。得られた終末呼気は、実験終了後直ちに(株)呼気生化学栄養代謝研究所(奈良, 日本)にて分析を依頼した。

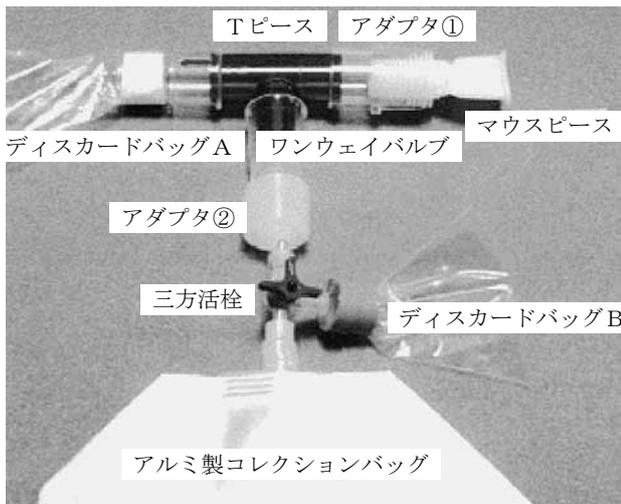


図2 終末呼気サンプリングシステム

5. 呼気中H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>総排出量

各被験者におけるH<sub>2</sub>及びCH<sub>4</sub>の総排出量については、試験食摂取後90分から360分間に排出された呼気中H<sub>2</sub>濃度およびCH<sub>4</sub>濃度を経時的にプロットし、その曲線下面積 (Area Under the Curve : AUC) を、台形法を用いて算出した。呼気中H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>総排出量は、大腸の腸内細菌叢による難消化性糖質の発酵量に比例するとされるため、資化性の指標として用いた<sup>6)</sup>。

III 結 果

1. 呼気中H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>濃度 (図3)

本実験のすべての測定時点において、被験者全員の呼気からCH<sub>4</sub>は検出されなかった。

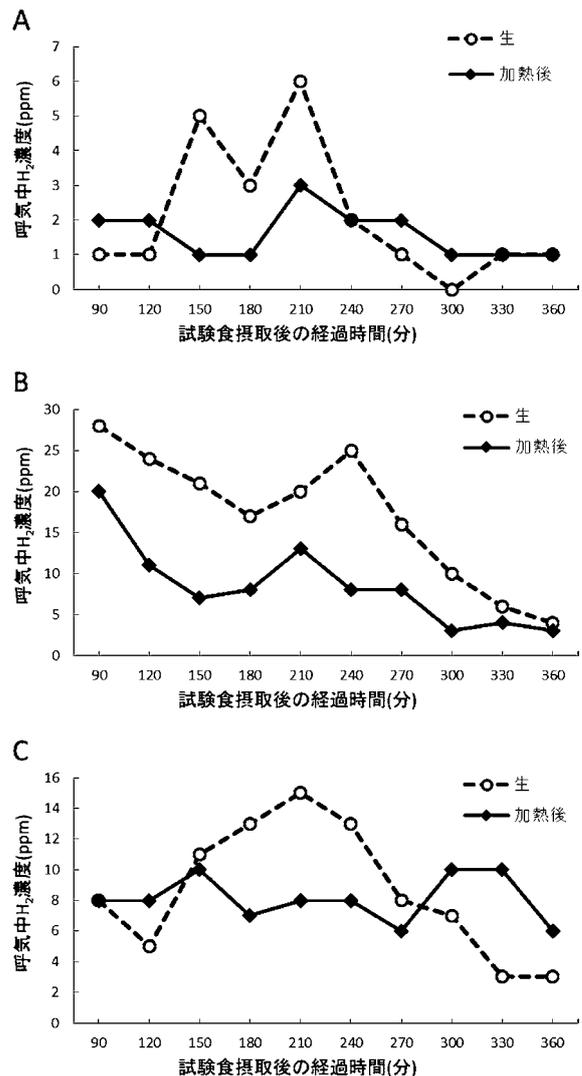


図3. 試験食摂取後の呼気中H<sub>2</sub>濃度の推移

呼気中 $H_2$ 濃度の推移は、各々の値に被験者間でばらつきはみられるものの、呼気中 $H_2$ 濃度のピークは、いずれの被験者においても、生のりんごを摂取した後のほうが、加熱りんご摂取より高かった。

被験者A, Cでは、Aにおいては生、加熱りんごいずれとも、Cにおいては生りんご摂取後のみ、摂取210分後に呼気中 $H_2$ 濃度のピークが認められた。被験者Bは試験食摂取後90分において高値を示したものの、その後、低下傾向となったが、210~240分に再度上昇し、生りんご摂取では210分後、加熱りんご摂取では240分後にピークを示した。

## 2. 呼気中 $H_2$ 総排出量(表2)

いずれの被験者においても、生りんごを摂取した方が、加熱りんご摂取より、呼気中 $H_2$ 総排出量は高かった。その差については、被験者A, Cにおいてほぼ同様な値であったのに対し、被験者Bにおいては、その他の被験者にくらべて非常に大きかった。

表2. 呼気中 $H_2$ 総排出量

被験者	呼気中 $H_2$ 総排出量 (ppm・時間)		
	生	加熱後	(前-後)
A	600	435	165
B	4650	2205	2445
C	2415	2220	195

## III 考 察

難消化性糖質を摂取すると腸内細菌により発酵・分解され、短鎖脂肪酸や $H_2$ ,  $CH_4$ が産生される。短鎖脂肪酸は腸壁に吸収された後エネルギーとして利用され、これらの一連の反応を資化と呼ぶ。産生された $H_2$ ,  $CH_4$ は、腸管粘膜から血液循環に入り呼気中に排出されることが知られている<sup>10)</sup>。したがって、難消化性糖質摂取後の呼気中の $H_2$ ,  $CH_4$ 濃度を測定することで、腸内発酵の程度(資化性)や小腸通過時間の推定が可能となると考えられる。一方、りんごを含む野菜や果物などの植物中に存在している複合多糖類であるペクチン質は、難消化性であるが、加熱により軟化する。この性質を利用して、高齢者福祉施設や学校給食においては、衛生管理や摂食しやすさの

観点から植物性食品の多くは加熱調理され提供されている。しかしながら、上記の加熱による植物性食物の変化が、資化性にいかに影響を与えるかについて、呼気中 $H_2$ ,  $CH_4$ 濃度測定により検討した報告はみられない。そこで本研究では、生(加熱前)と加熱調理したりんご摂取後における、呼気中 $H_2$ ,  $CH_4$ 濃度の推移を測定し、加熱調理の資化性に対する影響について検討を試みた。

その結果、3名の被験者全員で、加熱より生りんご摂取のほうに、高い呼気中 $H_2$ 排出量が観察されたことから、加熱調理後のりんごの方が、資化性が低くなるものと考えられた。したがって、ペクチン質を含む植物性食品に対する加熱調理は、ペクチン質を可溶化させるとともに、その資化性を低下させる可能性があると考えられた。すなわち、植物性食品を本研究におけるような加熱調理をすることは、腸内細菌叢による発酵・分解を受けにくくさせる作用がある可能性が示唆される。しかし、本研究では、りんご摂取後の血糖値の測定は行えておらず、上記の仮説を証明するためには、加熱調理により可溶化したペクチン質の消化・吸収の程度をあきらかにするために、血糖の経時的測定等の詳細な追加的検討が必要であると考えられた。

今回の検討では、全ての被験者で摂取された試験食が大腸に到達したと考えられる摂取後210~240分に向かって、呼気中 $H_2$ 濃度の上昇が認められた。これは、試験食が消化管で消化・吸収された後、大腸の腸内細菌で発酵・資化された結果を反映したものと推察される。しかしながら、被験者Bにおいては、試験食摂取後90分の呼気中 $H_2$ 濃度は、その他のいずれの測定時より高く、その後一度下降して、大腸における資化による結果の反映と考えられる摂取後約210分後まで再び上昇し、他の被験者と異なる経時変化を示した。今回測定した試験食摂取後の呼気中 $H_2$ の100%が、腸内発酵に由来するとされ、また、試験に参加した被験者は、人間栄養学科の学生であり、実験方法の意義、内容については十分理解し、検査前の注意事項についても遵守できていたと考えられる。今回の検討で、被験者Bの試験食が大腸に到達したと想定される時間より早い時点で観察されたと考えられる、呼気中 $H_2$ 濃度の高値は、摂取した試験食が大腸に到達する以前に腸内細菌による発酵を受けたためであることが、ひとつの可能性としてあげられる。人体における

腸内細菌の大半は大腸に存在するとされるが、この腸内細菌の分布のバランスが崩れ、小腸内の腸内細菌の増殖がみられる小腸菌増殖 (small intestine bacterial overgrowth: SIBO) という状態が知られ、器質性疾患のみならず消化管の機能障害とも関連があるとされる<sup>11)</sup>。SIBOは、消化管で消化・吸収されないラクトースを摂取させ、早期(摂取後90分以内)に呼気中 $H_2$ 濃度の上昇が見られることでも診断される<sup>7)</sup>。被験者Bの試験食摂取90分後の呼気 $H_2$ 濃度の高値は、被験者が軽度あるいは無症候性のSIBOであった可能性は否定できず、本研究のようなデザインで行われる検討では、被験者選定において、SIBOを示す例が存在する可能性があることに留意する必要があると考えられる。

本研究で用いたりんごの軟化するメカニズムは、ペクチン質が加水分解されることによるものであるとされる<sup>12)</sup>。また、他の植物性食品に含まれるペクチン質が加熱調理で軟化する仕組みに $\beta$ -脱離も関与することも報告されている。一方、ペクチン質の調理による変化については、pHや加熱温度によっては硬化が起こることも知られている<sup>1)</sup>。pH4で加熱すると、 $\beta$ -脱離や加水分解が起こりにくくなることにより、食物は硬化する。また、低温域(50~60°C)の加熱では細胞壁に含まれるペクチンエステラーゼが活性化され、ペクチニン酸のメチルエステル化したカルボキシ基が脱エステル化され、その後細胞内のカルシウムやマグネシウムとイオン結合して架橋構造を作ることにより、ペクチン質は不溶化し硬化すると考えられている。さらに、低温加熱により一度不溶化したペクチン質は再度高温で加熱しても軟化することはないことも知られている。このように、植物性食品に含まれるペクチン質は、食材や調理法の違いにより、その特性が様々に変化するため、異なった食材や調理法における植物性食品の資化性の変化についても、比較検討する必要があるものと考えられた。

## V 結 語

植物性食品の加熱によるペクチン質の可溶化が資化性に及ぼす影響を、りんごを用いて呼気中 $H_2$ 、 $CH_4$ 濃度を測定することで検討したところ、加熱調理後により資化性が低下する可能性が示唆された。今後は、被験者選定、

試験食摂取後の血糖値測定等に留意して、さらに被験者数を増加させるなどした、詳細な検討が必要であると考えられた。

## VI 参 考 文 献

- 1) 山崎清子, 島田キミエ, 渋川祥子, 下村道子, 市川朝子, 杉山久仁子, 米田千恵: NEW調理と理論. 「第2節 野菜・果物の調理性」, 同文書院 (2021) pp. 443-445.
- 2) 日本栄養・食糧学会監修: 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. 「第11章 消化管下部機能とルミナコイド」(海老原清・早川享志・奥恒行 編), 建帛社(2010) pp. 222.
- 3) Lefebvre P, Mosora F, Lacroix M, Luyckx A, Lopez-Habib G, Duchesne J.: Naturally labeled  $^{13}C$ -glucose. Metabolic studies in human diabetes and obesity. *Diabetes* (1975)24, 185-9.
- 4) Shreeve WW, Shoop JD, Ott DG, McInteetr BB.: Test for alcoholic cirrhosis by conversion of [ $^{14}C$ ]- or [ $^{13}C$ ]galactose to expired  $CO_2$ . *Gastroenterology* (1976)71, 98-101.
- 5) Solomons NW, Schoeller DA, Wagonfeld JB, Ott D, Rosenberg IH, Klein PD: Application of a stable isotope ( $^{13}C$ )-labeled glycocholate breath test to diagnosis of bacterial overgrowth and ileal dysfunction. *J Lab Clin Med* (1977)90, 431-9.
- 6) Kinoyama M, Nitta H, Watanabe A.: Quantitative assessment of effective energy of resistant cornstarch using  $^{13}CO_2$ ,  $H_2$ , and  $CH_4$  breath tests. *J Health Sci* (2007)53, 475-80.
- 7) F Castiglione I, G Del Vecchio Blanco, A Rispo, G Petrelli, G Amalfi, A Cozzolino, I Cuccaro, G Mazzacca.: Orocecal transit time and bacterial overgrowth in patients with Crohn's disease. *J Clin Gastroenterol* (2000)1, 63-6.

- 8) 香川明夫：食品成分表2021本表編. 女子栄養大学出版部 (2021) pp.122-126.
- 9) 香川明夫：食品成分表2021資料編. 女子栄養大学出版部 (2021) pp.353.
- 10) Bond JJ, Engel R & Levitt M.: Factors influencing pulmonary methane excretion in man. An indirect method of studying the in situ metabolism of the methane-producing colonic bacteria. J Exp Med (1971) 133, 572-588.
- 11) Marcela Kopacova, et al.: Small intestinal bacterial overgrowth syndrome. World. J Gastroenterol (2010) 16, 2978-2990.
- 12) 淵上倫子, 治部祐里, 小宮山展子, 林真倫美, 栗田寛子, 横畑直子, 松浦康: 焼きリンゴにおける多糖類の分解と組織の崩壊. 家政誌 (2009) 59, 871-879.