

2020 年度

博士学位論文

大豆由来食物繊維の加工法による  
呼気水素への影響について

Effects of Soybean Cooking Processes on Exhaled  
Hydrogen and Colonic Fermentation

中部大学大学院

生命健康科学研究科 生命医科学専攻

奥村 直也

## 目次

抄録	1
第1章 緒言	4
第2章 対象と方法	
2 - 1. 対象	8
2 - 2. 大豆加工法	
2 - 2. 1. 煮豆	9
2 - 2. 2. 黄な粉	9
2 - 2. 3. 食品成分分析	10
2 - 3. 呼気採取試験	10
2 - 4. 糞便採取試験	11
2 - 5. 分析方法	
2 - 5. 1. 呼気採取試験	12
2 - 5. 2. 糞便採取試験	13
2 - 5. 3. 統計方法	14
第3章 結果	
3 - 1. 呼気水素濃度の動態	15

3 - 2. 大豆加工食品ならびに摂取後の糞便の性状	
3 - 2. 1. 食前・糞便中の大豆残渣物の光学顕微鏡像	15
3 - 2. 2. 食前・糞便中の粒度分布	16
3 - 2. 3. 食前・糞便中の食物繊維含有量	17
第4章 考察	
4 - 1. 呼気水素濃度の動態	18
4 - 2. 大豆加工食品ならびに摂取後の糞便の性状	
4 - 2. 1. 食前・糞便中の粒度分布	19
4 - 2. 2. 食前・糞便中の食物繊維含有量	20
第5章 結語	25
第6章 参考文献	26
謝辞	55

## 抄録

栄養素には糖質，脂質，蛋白質などの五大栄養素に加えて，第六の栄養素として食物繊維がある．食物繊維の摂取は直接的にはエネルギー産生にはほぼ関与しないが，脂質や循環器系への健康効果の他に，整腸効果や便秘改善作用などの下部消化管機能への健康効果がある．食物繊維は未消化のまま上部消化管を通過し，下部消化管内における腸内細菌の嫌気性発酵により短鎖脂肪酸等に分解，その際，水素分子をはじめとした種々の低分子のガス状化合物が生成され，その一部が呼気から放出される．呼気中の水素分子は唯一，腸内嫌気性発酵に由来する．

大豆は蛋白質や脂質などの栄養価が高く，とりわけ食物繊維を豊富に含有している．このため，大豆は食物繊維の下部消化管における腸内嫌気性発酵の研究にしばしば用いられてきた．しかし，生大豆には有害成分が含まれているため，大豆を摂取可能にするには種々の加工法がある．大豆加工に伴う食物繊維の摂取前から摂取後の腸内嫌気性発酵，さらに排泄後の糞便までの食物繊維の変動と下部消化管機能との関連を検討した先行研究はない．

本研究では，大豆の代表的な調理加工食品として煮豆と黄な粉に着目し，加工後摂取前の食物繊維，摂取後の食物通過時間，下部消化管における腸内嫌気性発酵とそれに伴う呼気水素濃度，ならびに排便後の食物繊維がどのように消化機

能の変動を引き起こすかを明らかにすることを目的とした。

被験者は健常男性 9 名。試験食として一人あたり大豆 80g を原材料とした煮豆と黄な粉を作成した。被験者は絶食 12 時間後の早朝空腹状態で煮豆または黄な粉を摂取した。摂取前から摂取後 9 時間までの 1 時間毎に終末呼気の採取し、呼気水素濃度をガスクロマトグラフ半導体センサにより計測した。さらに呼気水素濃度の変動曲線が平均的な変動を示す被験者 2 名を対象とし、試験食摂取前と摂取後における糞便の微粒子形態像、粒度分布、水溶性ならびに不溶性食物繊維含有量を対比した。

煮豆摂取後と黄な粉摂取後、3 時間前後の口 - 回盲便食物通過時間を経て、以後、呼気水素濃度は漸増し、7 時間後にはピークに達した。しかし、摂取後 7 時間以降は、呼気水素濃度は徐々に低下したが、煮豆摂取後の呼気水素濃度の低下は、黄な粉摂取後と比較し、有意に抑制された。摂取後 7~9 時間における呼気水素濃度の曲線下面積は、煮豆摂取後は黄な粉摂取後に比べ、有意に高値を示した。同一重量の大豆から加工した煮豆の水溶性食物繊維量は、黄な粉と比較し、有意に増加したにも関わらず、煮豆摂取後の糞便中水溶性食物繊維は、黄な粉摂取後と比較し有意に減少した。糞便中の未発酵物質の粒度分布をみると、煮豆摂取後では、粒子径 500 $\mu\text{m}$  未満に分布する微粒子数が多くなるのに対し、黄な粉摂取

後は粒子径 500 $\mu\text{m}$  以上に分布する微粒子数が有意に増加した。

大豆の煮豆加工は食物繊維量を増大させ、呼気水素濃度の上昇を伴う下部消化管における食物繊維の嫌気性発酵を遷延的に亢進させる。他方、黄な粉摂取は煮豆摂取と比較し、腸内嫌気性発酵を抑制し、未発酵食物繊維を残留させたまま排便させることが明らかとなった。

## 第1章 緒言

食物繊維は健康増進・疾病予防に効果があるとされ<sup>1)</sup>、五大栄養素に加えて、第六の栄養素と呼ばれている。食物繊維の摂取は2型糖尿病や心疾患、結腸癌の発生子防・改善に効果がある<sup>2)</sup>。そのため、食物繊維は生活習慣病の予防に寄与する栄養素として関心を集めている。日常的に食物繊維を多く摂取している菜食主義者では、血清コレステロール値が低く、心疾患の罹患率が低い<sup>3)</sup>。コホート研究のメタ解析によると、食物繊維摂取量が24g/日以上摂取で心筋梗塞死亡率が低下し、12g/日未満摂取で死亡率の上昇が認められた<sup>4)</sup>。したがって、食物繊維の生活習慣病予防に必要な食物繊維摂取量は24g/日以上と考えられている。しかし、1950年代には食物繊維の平均摂取量は22g/日を超えていたものの、以後、低下傾向にあり<sup>5)</sup>、2017年の日本人の平均食物繊維の摂取量は14.4g/日まで低下している<sup>6)</sup>。

食物繊維は「ヒトの消化酵素で消化されない食物中の難消化性成分の総体」<sup>7)</sup>と定義され、化学的に多くは炭水化物の多糖類である。食物繊維は上部消化管では消化吸収されないが、主に回盲便を超えた下部消化管に存在する腸内細菌叢により、分解・発酵を受ける。食物繊維には腸内細菌叢により発酵を受ける易発酵性食物繊維と発酵を受けない非発酵性食物繊維に分かれる<sup>8)</sup>。易発酵性食物繊維

維は主に水溶性のものが多く、大腸内の嫌気性細菌により分解され、水素、メタンなどのガス状低分子ならびに乳酸、短鎖脂肪酸などが生成される<sup>9)</sup>。生成された短鎖脂肪酸は肝臓や筋組織において生体内エネルギー産生に利用される。

他方、呼気中の水素分子は、食物繊維を主とした残渣物が腸内細菌叢の嫌気性発酵を唯一の起源とする<sup>10)</sup>。腸内嫌気性細菌は回盲部を超えた大腸に多く存在し、経口摂取された食物のうち食物繊維を多く含む未消化残渣物が回盲部以降の下部消化管に達すると嫌気性発酵により水素分子を生成する。腸内で生成された水素分子は速やかに呼気中に排気される<sup>10)</sup>。したがって、食物の経口摂取から呼気水素濃度上昇開始までの時間を計測することにより、食物のロー回盲部食物通過時間 (Oro-Cecal Transit Time: OCTT) の評価が可能となる<sup>11)</sup>。呼気水素濃度の変動から評価した OCTT は、Bond ら<sup>11)</sup>の報告以降、ラクツロース<sup>12)</sup>や日本食<sup>13)</sup>などの種々の試験食を例として上部消化管における食物通過時間の指標として用いられてきた。また、呼気水素濃度の変動曲線における曲線下面積 (Area Under the Curve: AUC) は腸内嫌気性発酵による水素生成量を反映する<sup>14)</sup>。呼気水素濃度の AUC は大腸内の腸内細菌叢による食物繊維の発酵総量と比例し、食物繊維の分解・発酵を示す指標となる<sup>15)</sup>。したがって、呼気水素濃度の変動をみることにより、食物の摂取開始から未消化残渣物の回盲部までの到達時間ならびに腸管内における食物繊維の分解・発酵の程度を非侵襲

的に捉えることができる。

大豆は種々の食物繊維含有食品群において、食物繊維を最も豊富に含んだ食材のひとつである<sup>16)</sup>。しかし、生の大豆には硬さやサポニン特有の苦み、n-ヘキサノールの青臭さのみならず、蛋白質の分解阻害を引き起こすトリプシンインヒビターが含まれている。大豆に含まれるトリプシンインヒビターは加熱で失活する<sup>17)</sup>。したがって、大豆は一般的には加熱加工後に食される〔図 1.〕。大豆の調理加工は含有食品成分の物理化学的な性状を変化させることが報告されている<sup>18)</sup>。また、経口摂取された大豆由来の食物繊維は大腸内に到達すると、腸内細菌叢による発酵をうけ、水素やメタンが生成される<sup>19)</sup>。呼気水素濃度は大豆由来の食物繊維摂取量に依存性がある<sup>20)</sup>。大豆由来の食物繊維の摂取に伴い呼気水素濃度が増加したとする報告が散見されるものの<sup>13, 19, 20)</sup>、大豆の加工に伴う摂取前の食物繊維含有量、摂取後の腸内嫌気性発酵とそれに伴う呼気水素濃度、排便後の糞便中食物繊維など、摂取前から排便まで一連の消化管応答を包括的に検討した報告はない。

本研究では、同一重量の大豆を用い、水以外の添加物を使用しない加工食品の代表例として、煮豆と黄な粉の二種類の試験食を作成した。両試験食の摂取後の食物通過時間と腸内嫌気性発酵を呼気水素濃度の変動から比較評価した。さら

に加工後摂取前における食物繊維含有量，摂取後における糞便残渣物中の未消化食物繊維含有量ならびに光学顕微鏡像から，大豆加工法に伴う下部消化管機能への影響を検討した。

## 第2章 対象と方法

### 2-1. 対象

健康成人男性 9 名（年齢：28.9±4.6 歳，BMI：22.2±1.0kg/m<sup>2</sup>）を対象として，大豆加工食品摂取後の呼気水素濃度の計測試験を実施した．いずれの被験者にも特記すべき疾患はなかった [表 1.]．

大豆加工食品の摂取後の糞便採取試験は，上述の呼気水素計測試験に参加した被験者のうち平均的な呼気水素濃度変化が得られ，かつ同意の得られた健常男性 2 名を対象として実施した．

臨床試験は倫理委員会の承認とインフォームドコンセントを得た上で実施した（中部大学倫理審査委員会承認番号 290078）．

### 2-2. 大豆加工法

北海道産の大粒白目大豆（とよまさり）を大豆加工の原材料として用いた．乾燥大豆の食物繊維含有量は 100g あたり 17.7g であった．日本人の 1 日あたりの平均食物繊維摂取量は 2017 年度国民健康・栄養調査報告<sup>6)</sup>より，14.4g であった．1 日あたりの食物繊維摂取量とほぼ同一にするため，本研究では，大豆摂取量を加工前の乾燥大豆重量を被験者 1 人あたり 80g とした．この大豆重量を基

準として、煮豆と黄な粉の 2 種類の大豆加工食品を作成し、本研究の試験食とした。

## 2 - 2. 1. 煮豆

煮豆の作成は標準的な方法に準じた<sup>21)</sup>。乾燥大豆 80g に対して、220mL の水を使い、室温 (25°C) にて 5 時間浸水した。次いで、圧力鍋 (T-fal Clipso Arch Timer ; Groupe SEB Japan) を用いて、85kPa, 120°C の条件下で 40 分間加圧・加熱調理した。その後、室温 (25°C) にて冷却した。

## 2 - 2. 2. 黄な粉

黄な粉の作成は、日本の家庭で作られている一般的な方法に準拠した<sup>22)</sup>。具体的には、被験者 1 名当り乾燥大豆 80g を 500W の条件下で 10 分間炒った後 (IH コンロ IHK-T38-B ; アイリスオーヤマ)、室温 (25°C) にて冷却した。これをフードミキサー (Milser IFM-800DG; Iwatani Corp, 回転数毎分約 2 万回 × 1 分間) により粉末状にした。

以上の方法による煮豆と黄な粉は実験前日に作成し、冷蔵庫 (SJ-H12Y ; SHARP Corp) で一晩冷蔵保管 (4°C) した。いずれの試験食も実験当日に冷蔵から室温 (25°C) に戻し、被験者毎に乾燥重量 80g 相当量の煮豆 (248.0g) ま

たは黄な粉（74.2g）を試験食として被験者に供した [図 2.]。

### 2 - 2. 3. 食品成分分析

試験食とした煮豆と黄な粉の食物繊維含有量（水溶性ならびに不溶性食物繊維）は、プロスキー変法の酵素－重量法<sup>23, 24)</sup>により定量した。試験食の食物繊維含有量の定量は加工工程における誤差を考慮し、煮豆と黄な粉を4回作成し、その都度、定量した。

さらに、黄な粉の粒度分布は篩別試験（mesh-size sieves：32, 100, 180, 250, 1000, 1400 $\mu$ m）により計測した（(財) 日本食品分析センター）。

### 2 - 3. 呼気採取試験

呼気水素濃度の定量的評価には、雰囲気中のガス成分の混入を軽減する目的で、肺胞気に近い終末呼気を採取し、水素濃度を計測するのが望ましい。そこで、被験者は予め安静呼吸をした上で、500mL以上の生理的死腔量を排気した後、終末呼気を呼気採取バッグ（コレクションバッグ；呼気生化学栄養代謝研究所，容量400mL）[図3.]に呼出し、室温で保管した後、可及的速やかに当日内で呼気バッグ中の呼気水濃度を分析した。

なお、被験者には、実験前日は呼気水素濃度に影響を与える食物繊維が多く含

まれている食材を避けてもらい、試験前夜の午後 8 時に統一食として白米飯と牛肉を素材とした牛丼を十分に咀嚼した上で摂取した。被験者は夜間睡眠を含む 12 時間以上の絶食後、翌朝、水のみを摂取可とした空腹状態で来研した。来研後 30 分間の安静の後、煮豆または黄な粉を 15 分かけて摂取した。煮豆や黄な粉の単独摂取では、嚥下が容易ではないため、ペットボトル水 200mL と共に摂取した。呼気採取は、摂取前 30 分、摂取終了直後から摂取後 9 時間までの 1 時間ごとに行った。試験食の摂取後、被験者は安静絶食の状態にし、自由飲み水を可とした [図 4.]。煮豆と黄な粉の摂取試験は、1 週間以上の期間をあけた無作為交叉試験とした。

#### 2 - 4. 糞便採取試験

試験食摂取後に排便された糞便中残渣物の形態学所見と食物繊維含有量を計測するため、糞便の採取は呼気採取試験実施後、自然排泄された糞便を採取した。予備試験として、試験食含有糞便が排出される時期の確認を行った。具体的には、試験食にマーカー [図 5.] (イカスミパウダー；山本産業有限会社) を混ぜ、摂取当日ならびに翌日の糞便を観察した。その結果、マーカー入り試験食の摂取後 20 時間以降にイカスミを含む糞便を認めた。そこで、煮豆または黄な粉の摂取後の糞便採取を目的として、試験食摂取の前々日の昼食から試験食摂取の翌日

排便するまでの期間を白米飯のみを摂取する食事制限を行った。食事制限として、試験食摂取の前々日の昼食以降から白米飯（サトウのごはん 300g, サトウ食品）のみを摂取した。加工大豆の摂取試験当日は、呼気採取試験と同様に、早朝空腹状態で煮豆または黄な粉を 15 分かけて摂取した。試験食摂取後 9 時間以降から、再度、白米飯のみを摂取し、この食事制限は実験日の翌日の排便まで継続した [図 6.]。加工大豆試験食の摂取後 36 時間以内で排泄された糞便を採取した。白米飯 300g には、総エネルギー441kcal, 水溶性食物繊維量 0.0g, 不溶性食物繊維量 0.9g が含有されていた。日本人の一日平均摂取エネルギー 1,897kcal<sup>6)</sup>を目標に、本試験では、白米飯の摂取は一日 4 回とした。便採取試験期間は、固形物摂取は白米飯と試験食のみで行い、自由飲水可とした。以上の糞便採取試験は 1 週間以上の期間をあけた交叉試験とした。

## 2-5. 分析方法

### 2-5. 1. 呼気水素濃度計測試験

採取保管した呼気を試験当日内にガラスシリンジ (1 mL) に採取し、ガスクロマトグラフ半導体センサ (TRIllyzer mBA - 300; (株) タイヨウ社製) [図 7.] に注入し、呼気水素濃度を測定した。検体注入後、モレキュラーシーブ封入カラムを通して、水素分子が第 1 ピークとして、その他の低分子ガス成分が以後の

ピークとして分離される。SnO<sub>2</sub>半導体センサによる水素分子ピーク半値幅面積により呼気水素濃度計測が可能である<sup>25)</sup>。

呼気水素濃度の変動曲線における曲線下面積 (Area Under the Curve: AUC) は腸内嫌気性発酵に伴う腸内水素生成量を反映する<sup>14)</sup>。本研究では、試験食摂取直前の呼気水素濃度をベースラインとし、摂取直後から摂取後 9 時間にわたる AUC を算出し、腸内嫌気性発酵レベルの評価指標として利用した<sup>26)</sup>。

他方、食物摂取後の口 - 回盲部食物通過時間 (Oro-Cecal Transit Time: OCTT) は、摂取した食物先端部分が回盲部を超えるまでの食物通過時間である。OCTT は、Read らの基準を参考に<sup>27)</sup>、呼気水素濃度が摂取直前をベースラインとし、摂取後の呼気水素濃度が 3ppm 以上連続して増加するまでの時間とした。

## 2-5. 2. 糞便採取試験

試験食摂取後の糞便量は 70~80g であった。煮豆ならびに黄な粉の残渣物が視認できる部位を的手法で攪拌した上で採取した。攪拌後の糞便は各々 4 個の薄層標本を作製し、光学顕微鏡 (倍率: 50 倍) により 1 視野あたりの粒子数をカウントした。標本中の微粒子画像 (煮豆摂取試験: 154 視野, 黄な粉摂取試験: 134 視野) の同定には、摂取前の煮豆ならびに黄な粉と大豆加工品の光学顕微鏡像<sup>28)</sup>

30)ならびに大豆摂取後のヒト糞便中残渣物<sup>28, 29)</sup>の所見を参考にした。秤量後の糞便をシャーレに移し、1週間の凍結乾燥を行った (EYELA 凍結乾燥機 FD-5N 型 ; (株) 東京理化器械)。凍結乾燥後の糞便 (20~35g) に含まれる水溶性・不溶性食物繊維量は、大豆加工品と同様に、プロスキー変法 (酵素-重量法)<sup>23, 24)</sup>により定量した。

### 2-5. 3. 統計方法

データは平均±標準誤差 (SEM) で示し、unpaired または paired t-test を用いた。さらに糞便中の粒度分布は二元配置分散分析 (ANOVA) とその後の検定として Tukey の HSD を用いて検定した。全ての検定において、有意水準を  $p < 0.05$  とした。統計解析には Excel ならびに SPSS を用いた。

## 第3章 結果

### 3-1. 呼気水素濃度の動態

煮豆ならびに黄な粉摂取直後の呼気水素濃度は2時間後までは顕著な変動を認めなかったが、試験食摂取後、OCTTは、煮豆摂取では $3.7 \pm 0.6$ 時間、黄な粉摂取では $2.3 \pm 0.5$ 時間となり、両群間には有意差を認めなかった ( $p > 0.05$ ).

[表 2.]. 摂取後 OCTT を超えた後は、呼気水素濃度は両群とも漸増し、呼気水素濃度のピーク時間は、煮豆摂取後で $7.2 \pm 0.5$ 時間、黄な粉摂取後では $6.6 \pm 0.5$ 時間となり、煮豆摂取による呼気水素濃度のピーク時間の出現が有意に遅延した ( $p < 0.05$ ). ピーク時間を迎えた後、煮豆摂取後ではいずれの試験食群においても呼気水素濃度は低下し始めた. 摂取後9時間においては、黄な粉摂取後の呼気水素濃度は $13.23 \pm 3.8 \text{ppm}$ であったのに対して、煮豆摂取後は $21.29 \pm 5.0 \text{ppm}$ となり、煮豆摂取後9時間では呼気水素濃度は有意に高かった ( $p < 0.05$ ) [図 8.]. 呼気水素濃度の AUC は煮豆摂取後では $130.4 \pm 8.0 \text{ppm} \cdot \text{h}$ 、黄な粉摂取後では $89.4 \pm 4.4 \text{ppm} \cdot \text{h}$ となり、両群間には有意差は認めなかった ( $p > 0.05$ ). しかし、ピーク時間を迎えた後の摂取後7~9時間の呼気水素濃度 AUC は、黄な粉摂取後 ( $58.6 \pm 8.0 \text{ppm} \cdot \text{h}$ ) に比べ、煮豆摂取後 ( $78.9 \pm 14.4 \text{ppm} \cdot \text{h}$ ) が有意に高かった ( $p < 0.05$ ) [図 9.].

### 3 - 2. 大豆加工食品ならびに摂取後の糞便の性状

#### 3 - 2. 1. 食前・糞便中の大豆残渣物の光学顕微鏡像

煮豆の咀嚼後の咀嚼物を薄層ガラス標本とし、光学顕微鏡像を観察したところ、胚乳・子葉の細胞が明瞭に並走し、種皮の一部も確認した [図 10.]. また、煮豆摂取後の糞便中には煮豆咀嚼後と同様に、胚乳・子葉の細胞ならびに種皮が分離しながらも存在した [図 11.].

黄な粉粒子は咀嚼しても粉碎できず、むしろ水分を含み膨潤し、粒子径は拡大した [図 10.]. 黄な粉摂取後の糞便中には黄な粉咀嚼後と同様の粒子も存在することを確認した [図 11.].

白米飯摂取後に排出した糞便は Bristol stool scale<sup>33)</sup>の Type5 の軟便であり、色は明るい黄土色程度の糞便であった。煮豆摂取後の糞便は Type3 または 4 の通常便であり、色はこげ茶色程度であった。黄な粉摂取後の糞便は Type5 の軟便であり、色は黄土色程度であった [図 12.]. 被験者の糞便はいずれも肉眼的には正常であった。

#### 3 - 2. 2. 食前・糞便中の粒度分布

黄な粉の粒度分布は 250~500 $\mu\text{m}$  の 33wt%で最頻となり，市販品の最頻粒子径 40~50 $\mu\text{m}$ <sup>34)</sup>と比べ，粗大であった [図 13.]. また，両試験食摂取後の糞便標本については，50 倍の光学顕微鏡像 1 視野あたりの粒子数は直径 100 $\mu\text{m}$  以下と 100~500 $\mu\text{m}$  において，煮豆摂取後の粒子数は黄な粉摂取後に比べ，いずれの粒子径についても有意に多かった ( $p < 0.001$ ). しかし，500 $\mu\text{m}$  以上の糞便中粒子数は煮豆摂取後が黄な粉摂取後に比べ，有意に少なかった ( $p < 0.05$ ) [図 14.].

### 3 - 2. 3. 食前・糞便中の食物繊維含有量

本研究で作成した試験食に含有する水溶性食物繊維量は，煮豆が  $3.0 \pm 0.2\text{g}$ ，黄な粉が  $2.0 \pm 0.1\text{g}$  であり，煮豆が有意に多かった ( $p < 0.05$ ). 不溶性食物繊維量については，煮豆が  $13.7 \pm 1.1\text{g}$ ，黄な粉が  $11.2 \pm 0.1\text{g}$  となり，両群間には有意差はなかった ( $p > 0.05$ ) [表 3.].

他方，両試験食摂取後の凍結乾燥糞便中に含まれる水溶性食物繊維含有比率は，煮豆摂取後が  $3.5 \pm 0.2\%$ ，黄な粉摂取後が  $5.5 \pm 0.2\%$  であり，黄な粉摂取後が有意に多かった ( $p < 0.05$ ). また，凍結乾燥糞便に対する不溶性食物繊維含有比率は，煮豆摂取後が  $18.3 \pm 1.9\%$ ，黄な粉摂取後が  $24.7 \pm 3.7\%$  となり，両群間には有意差を認めなかった ( $p > 0.05$ ) [図 15.].

## 第4章 考察

本研究では、同一重量の乾燥大豆を原材料として水以外の添加物を使わない煮豆と黄な粉を作成し、下部消化管機能に与える影響を比較検討した。両群間のOCTTには有意差が認められなかった。煮豆摂取後9時間の呼気水素濃度は黄な粉摂取後に比べ有意に高く、また、煮豆摂取後7~9時間の呼気水素濃度AUCは黄な粉摂取後に比べ、有意に高値を示した。さらに、摂取前煮豆の水溶性食物繊維量は、黄な粉に比べ有意に高値であったにもかかわらず、煮豆摂取後糞便中では黄な粉摂取後と比較して有意に低値であった。

### 4-1. 呼気水素濃度の動態

煮豆摂取後9時間の呼気水素濃度は、黄な粉摂取後と比べ有意に高値を示した。同様に、煮豆摂取後7~9時間の呼気水素濃度AUCは、黄な粉摂取後のそれと比較して有意に高かった。ヒト消化管においては水溶性食物繊維の腸内嫌気性発酵は、不溶性食物繊維のそれと比較して遷延することが報告されている<sup>35)</sup>。本研究では、黄な粉と比較し、煮豆の水溶性食物繊維含有量が有意に高かったことが、煮豆摂取後7時間以降の呼気水素濃度AUCが高くなった原因のひとつと考えられた。

煮豆と黄な粉摂取後の OCTT には有意差はないものの、黄な粉摂取後の OCTT が短縮傾向にあった。小麦ふすま摂食時においては、粗大粒子の OCTT は、微細粒子に比べ短縮することが報告されている<sup>36)</sup>。本研究で作成した黄な粉は、市販品<sup>34)</sup>と比べ、粗大であった。このため、黄な粉摂取後の OCTT が、煮豆摂取後に比べ短縮傾向にあり、食物繊維を含む食物残渣物が下部消化管に早期に到達した可能性がある。

#### 4 - 2. 大豆加工食品ならびに摂取後の糞便の性状

##### 4 - 2. 1. 食前・糞便中の粒度分布

黄な粉の市販品の粒子粒度分布は一般的に 40~50 $\mu\text{m}$  が最頻であるのに対し<sup>34)</sup>、本研究で作成した黄な粉の粒度分布は 250~500 $\mu\text{m}$  が最頻であり、粗大であった。これは作成時に黄な粉の量の損失を防止するため、電動ミキサーを使用したためと考えられた。伝統的な黄な粉の加工法は石臼を使用する。しかし、石臼を使用する加工法は加工過程で黄な粉が石臼の目に詰まり、わずかながら黄な粉の量が損失する。したがって、本研究では石臼は使用しなかった。さらに、市販品は舌触りを向上させるために、篩を使用し、大きな粒子や種皮は除去されている。しかし、本研究で作成した黄な粉は大豆全体を使用するために篩を用いなかった。これにより黄な粉の粒度分布が右にシフトしたと考えられた。

煮豆摂取後糞便の光学顕微鏡像 1 視野あたりの粒子数は、粒子径 500 $\mu\text{m}$  以下において、黄な粉摂取後に比べ、有意に多かった。他方、500 $\mu\text{m}$  以上の糞便中粒子数は黄な粉摂取後に比べ、有意に少なくなった。煮豆は圧力鍋の高温高压加工により顕著に柔らかくなっており、容易に嚙碎できた。他方、黄な粉は咀嚼しても硬く、嚙碎が困難であった。さらに黄な粉は口腔内で水分を含むことにより粒子径が膨張したことが咀嚼前後の形態像から確認できた。以上により、黄な粉は煮豆に比べ、摂取後の下部消化管内での同一体積における全表面積が小さくなり、腸内細菌が残渣物を十分に分解できず、未発酵の粗大粒子が糞便に多く排泄されたことが示唆された。

#### 4 - 2. 2. 食前・糞便中の食物繊維含有量

摂取前の煮豆に含まれる水溶性食物繊維量は、黄な粉に比べ有意に多く、不溶性食物繊維量も同様に多い傾向であった。先行研究によると、生の大豆に含まれる総食物繊維量は加熱調理により増加し<sup>37)</sup>、同様に大豆の水溶性食物繊維量はオートクレーブ処理<sup>38)</sup>により増加する。その要因として、大豆の細胞壁にはペクチン（アラビナン、I型ガラクトン）が存在し<sup>39)</sup>、煮豆作成時の圧力鍋の高温高压加工により大豆細胞壁が破壊され<sup>40)</sup>、ペクチン検出量が加算されたため、煮豆の水溶性食物繊維量は、黄な粉と比べ高値を示したと考えられた。他方、湿

熱調理した黒豆を冷蔵保管すると時間経過に伴い、レジスタントスターチの量が増加する<sup>41)</sup>。レジスタントスターチは「健常人の小腸腔内で消化・吸収されずに大腸に達するデンプンおよびデンプンの部分分解物の総称」と定義されている<sup>42)</sup>。本研究の食物繊維量の定量法で用いたプロスキー変法(酵素-重量法)はレジスタントスターチを不溶性食物繊維として定量する。しかし、本研究の煮豆作成後の冷蔵保管は一晩のみであった。このことから煮豆含有のレジスタントスターチに由来する不溶性食物繊維は、黄な粉の不溶性食物繊維量と有意な差を生むほどの変化が起きなかったと考えられた。

他方、摂取前の煮豆に含まれる水溶性ならびに不溶性食物繊維は、共に黄な粉より高かったにもかかわらず、煮豆摂取後の糞便中の水溶性ならびに不溶性食物繊維は黄な粉摂取後糞便中のそれと比べ有意に低くなった。

また、不溶性食物繊維であるセルロースは、粒子径が小さい程、腸内細菌叢により分解・発酵を受け、消化吸収率が上昇するとされている<sup>43)</sup>。本研究結果においても、糞便中の粒度分布は、煮豆摂取後に比べ、黄な粉摂取後に未発酵粒子が多いことが観察でき、同様の結果になった。さらに煮豆摂取後の7~9時間の呼気水素濃度AUCは、黄な粉摂取と比較し、高くなった。したがって、黄な粉摂取後と比較して、煮豆摂取後の腸内嫌気性発酵が遷延・亢進し、煮豆摂取後の

食物繊維の分解が促進されたことが推察された。

## 今後の展望

水素分子には酸化ストレス障害の改善作用があるとした Ohsawa らの報告<sup>44)</sup>以来、ヒト臨床応用では有効であるとの評価は必ずしも一致していないものの<sup>45, 46)</sup>、水素分子の抗酸化ストレス作用を期待した水素水飲水や水素ガス吸入法に伴う外因性水素は、種々の酸化ストレス動物モデルにおける有効であることが報告され、枚挙にいとまがない<sup>47-53)</sup>。とりわけ、Nishimura らは肝虚血性再灌流障害モデルマウスに食物繊維とレジスタントスターチを含む飼料を与え、腸内嫌気性発酵由来の水素分子（内因性水素）を増加させることにより、虚血性再灌流障害が有意に軽減されると報告している<sup>54)</sup>。さらに 2 型糖尿病の治療に用いられる二単糖分解阻害剤アルカボースの服用は内因性水素を上昇させ、心血管イベントの発症を抑制した<sup>55)</sup>。また、小規模疫学調査であるものの、長野県における 100 歳長寿者の呼気水素濃度は、他の年代と比較し有意に高かった<sup>56)</sup>。したがって、水素分子は外因性水素のみならず、腸内嫌気性発酵に伴う内因性水素の上昇による抗酸化ストレス作用の効果が期待できることを示唆している。一般的に大豆加工食品は食物繊維を豊富に含んでいる。本研究で対象とした煮豆と黄な粉の摂取は、いずれにしても、腸内嫌気性発酵に伴う内因性水素産生

を亢進させ、抗酸化ストレス作用が期待できる。大豆摂取に伴う腸内嫌気性発酵水素による直接的な健康影響評価は、調理加工法を留意した上で、今後のさらなる研究を待たなければならない。

## 本研究の限界

本研究では、呼気水素濃度を試験食摂取後 9 時間まで観察したが、呼気水素濃度が摂取直前の濃度まで下がっておらず、さらに試験食が糞便中に排出されるまで呼気水素濃度の観察時間を延長する必要であったかもしれない。しかし、排便のタイミングは個体差が大きく、また、試験食のみでは便排出が大幅に遅れる可能性が考えられたため、呼気採取試験は、摂取から 9 時間の実験プロトコルで実施した。多くの既報<sup>10-13)</sup>では、試験食摂取から 3~8 時間後のプロトコルで実施しており、試験食の排出が確認できるまで呼気水素濃度を測定していない。しかし、食物摂取に伴う腸内嫌気性発酵をより正確に評価するには、呼気水素濃度は試験食の排出まで調査する必要があると考えられる。

下部消化管における腸内細菌叢は 1000 種以上の菌種が存在すると報告され<sup>57)</sup>、腸内細菌叢の個体差は著しい<sup>58)</sup>。そのため、対象被験者の例数を大幅に増やした上での腸内細菌叢の遺伝子解析を併せて実施すると、食物繊維を含む未消化残渣物の多様性に対応した腸内嫌気性発酵の応答も異なる可能性もある。

食品加工に伴う腸内嫌気性発酵の詳細な検討は今後の研究課題として残る.

また, 本研究で得られた結果から, 大豆加工食品の健康効果の評価においては, 大豆食品の加工に伴う食物繊維以外の種々の栄養成分の変化に注意を払った上で評価しなければならないことを示唆している.

## 第5章 結語

同一重量の大豆から煮豆と黄な粉を作成すると，煮豆の食物繊維量は黄な粉より増加した．黄な粉摂取と比較し，煮豆摂取により腸内嫌気性発酵の亢進と遷延化ならびに糞便中の水溶性食物繊維量は低下した．大豆食物繊維摂取に伴う下部消化管の腸内嫌気性発酵は調理加工法に依存する．

## 第 6 章 参考文献

- 1) Anderson JW, Baird P, Davis RH, Ferreri S, Knudtson M, Koraym A, Waters V, Williams CL. Health benefits of dietary fiber. *Nutrition reviews*. 2009; 67(4):188-205.
- 2) Kaczmarczyk MM, Miller MJ, Freund GG. The health benefits of dietary fiber: beyond the usual suspects of type 2 diabetes mellitus, cardiovascular disease and colon cancer. *Metabolism*. 2012; 61(8):1058-66.
- 3) Groen JJ, Tijong KB, Koster M, Willebrands AF, Verdonck G, Pierloot M. The influence of nutrition and ways of life on blood cholesterol and the prevalence of hypertension and coronary heart disease among Trappist and Benedictine monks. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1962; 10(6):456-70.
- 4) Pereira MA, O'Reilly E, Augustsson K, Fraser GE, Goldbourt U, Heitmann BL, Hallmans G, Knekt P, Liu S, Pietinen P, Spiegelman D. Dietary fiber and risk of coronary heart disease: a pooled analysis of cohort studies. *Archives of internal medicine*. 2004; 164(4):370-6.
- 5) KOMACHI Y, MITSUHASHI Y, NAKAYAMA I, OKAZAKI K, TSUDA

- T, ICHIHASHI A, ADACHI T. Dietary fiber intake of Japanese younger generations and the recommended daily allowance. *Journal of nutritional science and vitaminology*. 1993; 39(3):263-78.
- 6) Office of Nutrition Health Service Division Health Service Bureau Ministry of Health, Labour and Welfare, Japan. The National Health and Nutrition Survey in Japan. 2017; <https://www.mhlw.go.jp/content/000681194.pdf>. Accessed December 28, 2020.
- 7) 桐山修八. 食物センイの栄養学的効果. *化学と生物*. 1980; 18(2):95-105.
- 8) Hellendoorn EW. Fermentation as the principal cause of the physiological activity of indigestible food residue. In *Topics in dietary fiber research* Springer, Boston, MA. 1978; 127-168.
- 9) Oku T, Nakamura S. Digestion, absorption, fermentation, and metabolism of functional sugar substitutes and their available energy. *Pure and Applied Chemistry*. 2002; 74(7):1253-61.
- 10) Levitt MD, Ingelfinger FJ. Hydrogen and methane production in man. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1968; 150(1):75-81.
- 11) Bond JH, Levitt MD. Investigation of small bowel transit time in man

- utilizing pulmonary hydrogen (H<sub>2</sub>) measurements. *The Journal of laboratory and clinical medicine*. 1975; 85(4):546-55.
- 12) La Brooy SJ, Male PJ, Beavis AK, Misiewicz JJ. Assessment of the reproducibility of the lactulose H<sub>2</sub> breath test as a measure of mouth to caecum transit time. *Gut*. 1983; 24(10):893-6.
- 13) Kagaya M, Iwata N, Toda Y, Nakae Y, Kondo T. Small bowel transit time and colonic fermentation in young and elderly women. *Journal of gastroenterology*. 1997; 32(4):453-6.
- 14) Calloway DH, Murphy EL. The use of expired air to measure intestinal gas formation. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1968; 150(1):82-95.
- 15) Rumessen JJ, Hamberg O, Gudmand-Høyer E. Interval sampling of end-expiratory hydrogen (H<sub>2</sub>) concentrations to quantify carbohydrate malabsorption by means of lactulose standards. *Gut*. 1990; 31(1):37-42.
- 16) Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan. 日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂), 第 2 章 日本食品標準成分表 PDF (日本語版)

[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/syokuhinseibun/1365419.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1365419.htm).

Accessed December 28, 2020

- 17) Liener IE, Kakade ML. Protease inhibitors. Toxic constituents of plant foodstuffs. 1980;2:7-1.
- 18) Han SH, Lee SW, Rhee C. Effects of cooking methods on starch hydrolysis kinetics and digestion-resistant fractions of rice and soybean. European Food Research and Technology. 2008; 227(5):1315-21.
- 19) McNamara EA, Levitt MD, Slavin JL. Breath hydrogen and methane: poor indicators of apparent digestion of soy fiber. Am J Clin Nutr 1986; 43(6): 898-902.
- 20) Suarez FL, Springfield J, Furne JK, et al. Gas production in human ingesting a soybean flour derived from beans naturally low in oligosaccharides. Am J Clin Nutr 1999; 69(1): 135-9.
- 21) 公益財団法人日本豆類協会 : 豆の基本的調理法 , <https://www.mame.or.jp/cooking/kihon/>. Accessed January 18, 2021
- 22) Iwatani Corp : ミルサー簡単レシピ , <http://www.icg.jp/recipe/millser/powder/index.html#recipe06>. Accessed January

- 18, 2021)
- 23) AOAC Official Method 991.42 'Insoluble Dietary Fiber in Foods and Food Products, Enzymatic-Gravimetric Methods, Phosphate Buffer' in Official Methods of Analysis, 16th ed. AOAC International: Arlington, VA 1995.
  - 24) AOAC Official Method 993.12 'Soluble Dietary Fiber in Foods and Food Products, Enzymatic-Gravimetric Methods, Phosphate Buffer' in Official Methods of Analysis, 16th ed. AOAC International: Arlington, VA 1995.
  - 25) Ohta K, Terai H, Kimura I, et al. Simultaneous determination of hydrogen, methane, and carbon monoxide in water by gas chromatography with a semiconductor detector. *Anal Chem* 1999; 71, 2697-9
  - 26) Solomons NW, Viteri FE, Hamilton LH. Application of a simple gas chromatographic technique for measuring breath hydrogen. *The Journal of laboratory and clinical medicine*. 1977; 90(5):856-62.
  - 27) Read NW, Al-Janabi MN, Bates TE, Holgate AM, Cann PA, Kinsman RI, McFarlane A, Brown C. Interpretation of the breath hydrogen

- profile obtained after ingesting a solid meal containing unabsorbable carbohydrate. *Gut*. 1985; 26(8):834-42.
- 28) Wang, T. Soybean: Processing. *Encyclopedia of Food Grains*. 2016; 3(2): 489-496.
- 29) Kasai N, Murata A, Inui H, et al. Enzymatic high digestion of soybean milk residue (okara). *J Agric Food Chem* 2004; 52(18): 5709-16.
- 30) Lee YJ, Yoon WB. Flow behavior and hopper design for black soybean powders by particle size. *J Food Eng* 2015; 144: 10-9.
- 31) Schmidt AD, Strasburger J. Die faeces des menschen im normalen und krankhaften zustande mit besonderer berücksichtigung der klinischen untersuchungsmethoden August Hirschwald: Berlin 1901; 1: 71-6.
- 32) Lynch R. Etude des Fèces Normales. *Argentina Médica* 1904; 48-64.
- 33) Lewis SJ, Heaton KW. Stool form scale as a useful guide to intestinal transit time. *Scandinavian journal of gastroenterology*. 1997; 32(9):920-4.
- 34) みたけ食品工業株式会社：大豆製品のご案内， [http://g-nw.co.jp/pdf/topics/soybean\\_power.pdf](http://g-nw.co.jp/pdf/topics/soybean_power.pdf). Accessed February 1, 2021
- 35) Oku T, Nakamura S. Evaluation of the relative available energy of

- several dietary fiber preparations using breath hydrogen evolution in healthy humans. *Journal of nutritional science and vitaminology*. 2014; 60(4):246-54.
- 36) Smith AN, Drummond E, Eastwood MA. The effect of coarse and fine Canadian Red Spring Wheat and French Soft Wheat bran on colonic motility in patients with diverticular disease. *The American journal of clinical nutrition*. 1981; 34(11):2460-3.
- 37) Sharma D, Gupta R, Joshi I. Nutrient analysis of raw and processed soybean and development of value added soybean noodle. *Invent J* 2014; 1: 1-5.
- 38) Li S, Chen G, Qiang S, et al. Intensifying soluble dietary fiber production and properties of soybean curd residue via autoclaving treatment. *Bioresour Technol Rep* 2019; 7: 100203.
- 39) Thibault JF, Renard CM, Guillon F. Physical and chemical analysis of dietary fibres in sugar beet and vegetables. In *Vegetables and Vegetable Products*. Springer, Berlin, Heidelberg. 1994; 23-55.
- 40) 菊地忠昭, 石井茂孝, 福島男児, 横塚保. 大豆多糖類に関する食品化学的研究 (第 1 報) 大豆細胞壁の性質とそれに対する蒸煮の及ぼす影響

について. 日本農芸化学会誌. 1971; 45(5):228-34.

- 41) Sáyago-Ayerdi SG, Tovar J, Osorio-Díaz P, Paredes-López O, Bello-Pérez LA. In vitro starch digestibility and predicted glycemic index of corn tortilla, black beans, and tortilla-bean mixture: effect of cold storage. *Agric Food Chem* 2005; 53: 1281-5.
- 42) Saura - Calixto F, Goñi I, Bravo L, Mañas E. Resistant starch in foods: modified method for dietary fiber residues. *Journal of Food Science*. 1993; 58(3):642-3.
- 43) Heller SN, Hackler LR, Rivers JM, Van Soest PJ, Roe DA, Lewis BA, Robertson J. Dietary fiber: the effect of particle size of wheat bran on colonic function in young adult men. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1980; 33(8):1734-44.
- 44) Ohsawa I, Ishikawa M, Takahashi K, Watanabe M, Nishimaki K, Yamagata K, Katsura KI, Katayama Y, Asoh S, Ohta S. Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nature medicine*. 2007; 13(6):688-94.
- 45) Ge L, Yang M, Yang NN, et al. Molecular hydrogen: a preventive and therapeutic medical gas for various diseases. *Oncotarget* 2017; 8(60):

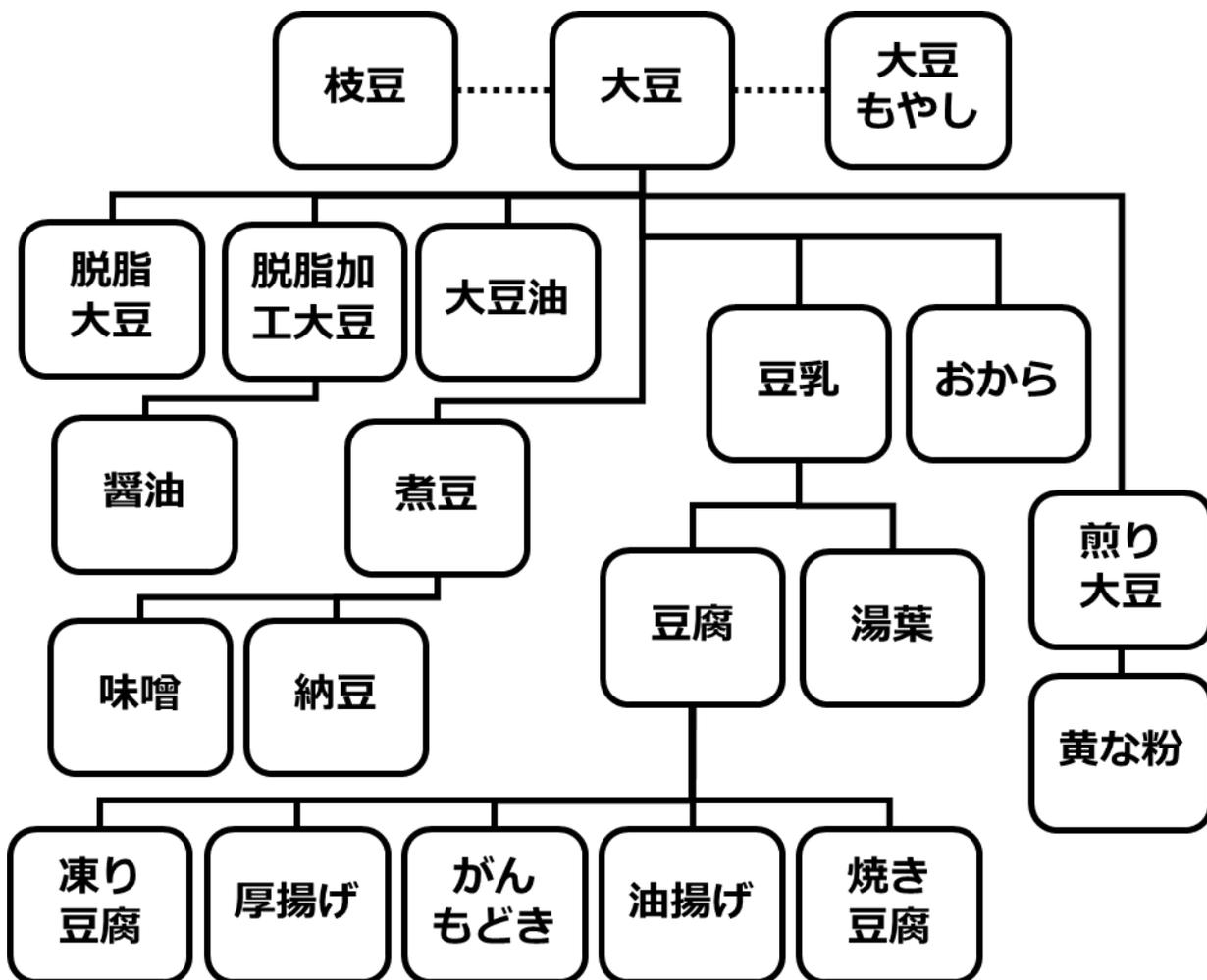
102653-73.

- 46) Ostojic SM. Molecular hydrogen: An inert gas turns clinically effective. *Ann Med* 2015; 47(4):301-4.
- 47) Nishimaki K, Asada T, Ohsawa I, et al. Effects of molecular hydrogen assessed by an animal model and a randomized clinical study on mild cognitive impairment. *Curr Alzheimer Res* 2018; 15(5): 482-92.
- 48) Sakai T, Sato B, Hara K, et al. Consumption of water containing over 3.5 mg of dissolved hydrogen could improve vascular endothelial function. *Vasc Health Risk Manag* 2014; 10:591-7.
- 49) Ono H, Nishijima Y, Ohta S, et al. Hydrogen gas inhalation treatment in acute cerebral infarction: a randomized controlled clinical study on safety and neuroprotection. *J Stroke Cerebrovasc Dis* 2017; 26(11): 2587-94.
- 50) Xia C, Liu W, Zeng D, et al. Effect of hydrogen-rich water on oxidative stress, liver function, and viral load in patients with chronic hepatitis B. *Clin Transl Sci* 2013; 6(5): 372-5.
- 51) Kang KM, Kang YN, Choi IB, et al. Effects of drinking hydrogen-rich water on the quality of life of patients treated with radiotherapy for

- liver tumors. *Med Gas Res* 2011; 1(1): 11.
- 52) Hirayama M, Ito M, Minato T, et al. Inhalation of hydrogen gas elevates urinary 8-hydroxy-2'-deoxyguanine in Parkinson's disease. *Med Gas Res* 2018; 8(4): 144-9.
- 53) Igarashi T, Ohsawa I, Kobayashi M, Umemoto Y, Arima T, Suzuki H, Igarashi T, Otsuka T, Takahashi H. Effects of hydrogen in prevention of corneal endothelial damage during phacoemulsification: A prospective randomized clinical trial. *Am J Ophthalmol.* 2019; 207: 10-7
- 54) Nishimura N, Tanabe H, Sasaki Y, et al. Pectin and high-amylose maize starch increase caecal hydrogen production and relieve hepatic ischaemia-reperfusion injury in rats. *Br J Nutr* 2012; 107(4): 485-92.
- 55) Suzuki Y, Sano M, Hayashida K, Ohsawa I, Ohta S, Fukuda K. Are the effects of  $\alpha$  - glucosidase inhibitors on cardiovascular events related to elevated levels of hydrogen gas in the gastrointestinal tract?. *Febs Letters.* 2009; 583(13):2157-9.
- 56) Aoki Y. Increased concentrations of breath hydrogen gas in Japanese centenarians. *Anti-Aging Medicine.* 2013; 10:101-5.

- 57) Qin J, Li R, Raes J, Arumugam M, Burgdorf KS, Manichanh C, Nielsen T, Pons N, Levenez F, Yamada T, Mende DR. A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing. *nature*. 2010; 464(7285):59-65.
- 58) Yatsunenkov T, Rey FE, Manary MJ, Trehan I, Dominguez-Bello MG, Contreras M, Magris M, Hidalgo G, Baldassano RN, Anokhin AP, Heath AC. Human gut microbiome viewed across age and geography. *nature*. 2012; 486(7402):222-7.

図 1. 大豆の加工食品のフローチャート

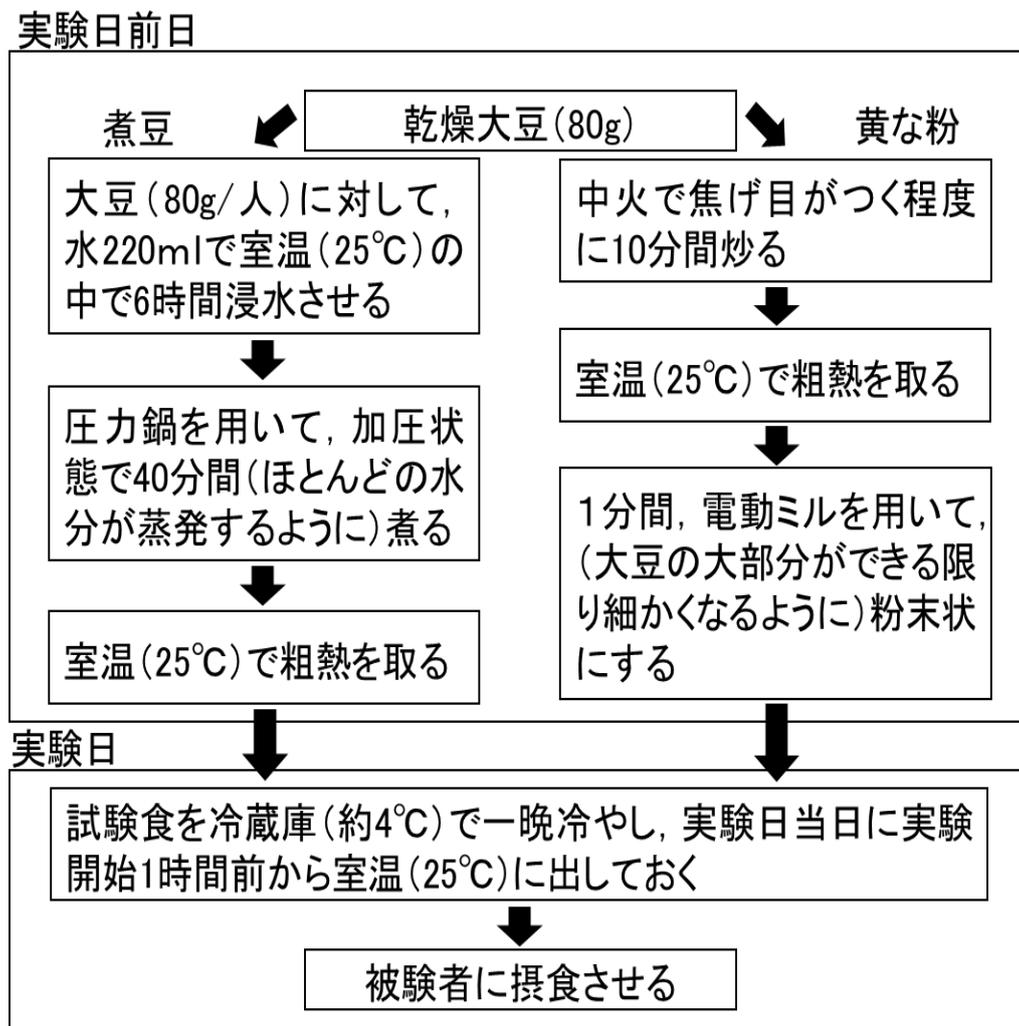


大豆の加工食品の一覧.

表 1. 被験者リスト

被験者No.	性別	年齢	身長(cm)	体重(kg)	BMI(kg/m <sup>2</sup> )
1	男性	25	171.2	69.9	23.9
2	男性	62	179.7	81.2	25.2
3	男性	39	166	64.4	23.4
4	男性	29	169	57	20.0
5	男性	20	166.1	56	20.3
6	男性	21	166.8	73	26.2
7	男性	21	170	50	17.3
8	男性	21	175.6	71	23.0
9	男性	21	173	61	20.4
	平均	28.9	170.8	64.8	22.2
	SEM	4.6	1.6	3.3	1.0

図 2. 大豆加工法プロトコル



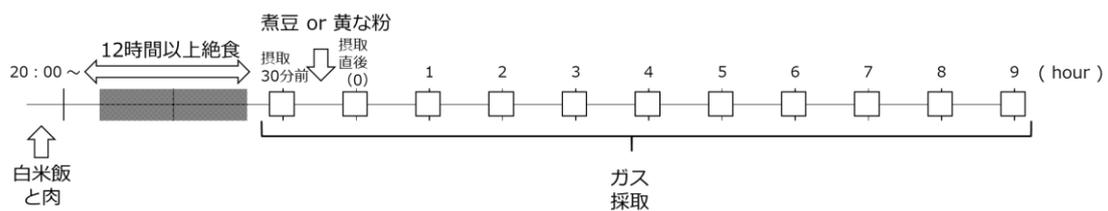
試験食の煮豆と黄な粉の調理手順ならびに保管方法.

図 3. 呼気採取バッグ



アルミパウチに三方活栓を接続した容量 400mL の呼気採取バッグ（呼気生化学栄養代謝研究所）.

図 4. 呼気採取試験プロトコル



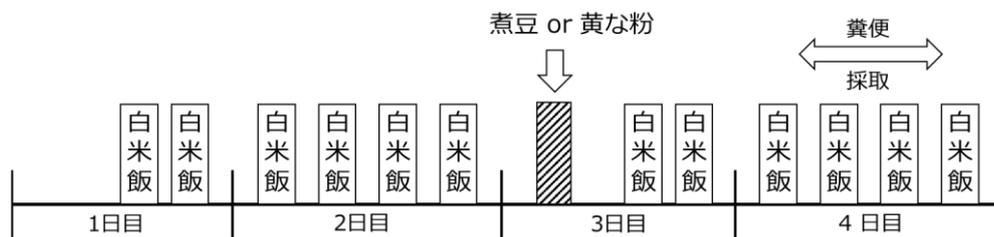
本文参照.

図 5. 糞便採取予備試験用マーカー



予備試験として、イカスミパウダー（山本産業有限公司）を用い、試験食の糞便中への排出を観察した。

図 6. 糞便採取試験プロトコル



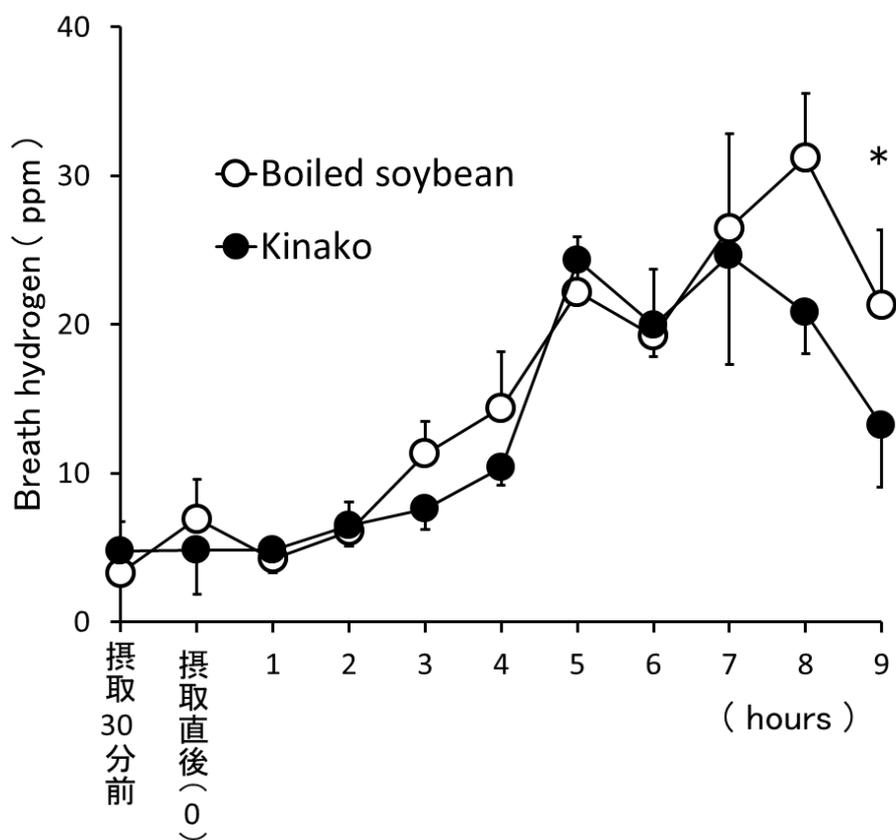
本文参照.

図 7. 呼気水素濃度測定機器



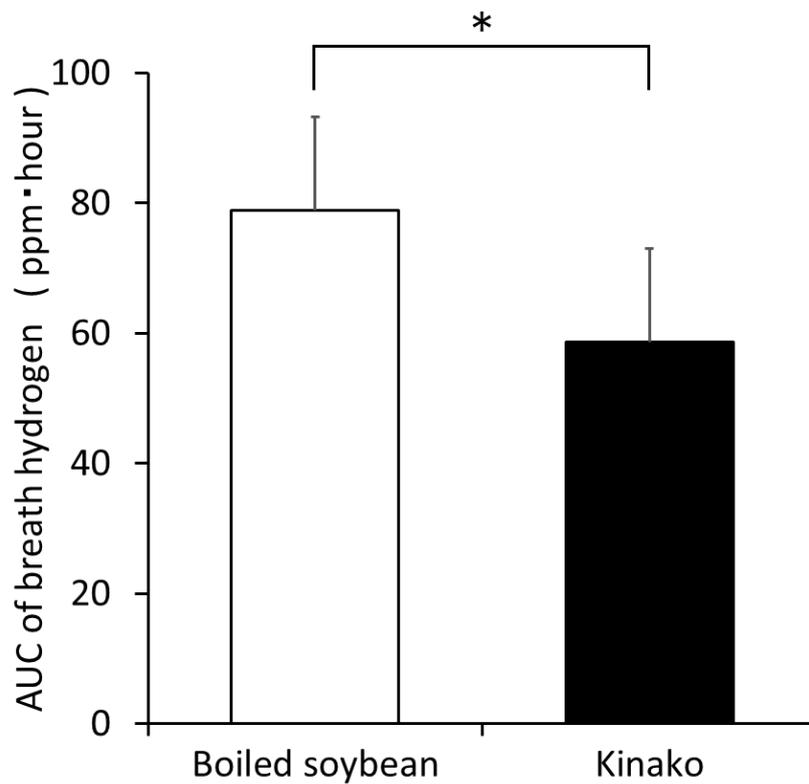
ガスクロマトグラフ半導体センサを原理としたガス分析装置（TRILyzer mBA-300, 株式会社タイヨウ社）。

図 8. 煮豆ならびに黄な粉摂取後の呼気水素濃度の変動曲線



煮豆摂取後 vs.黄な粉摂取後の摂取後 9 時間の呼気水素濃度 : \* $p < 0.05$ , paired  $t$ -test.

図 9. 煮豆ならびに黄な粉摂取後の 7~9 時間の呼気水素濃度曲線下面積 (AUC)



煮豆摂取後 vs.黄な粉摂取後の摂取後 7~9 時間の呼気水素濃度 AUC: \* $p < 0.05$ ,  
paired  $t$ -test.

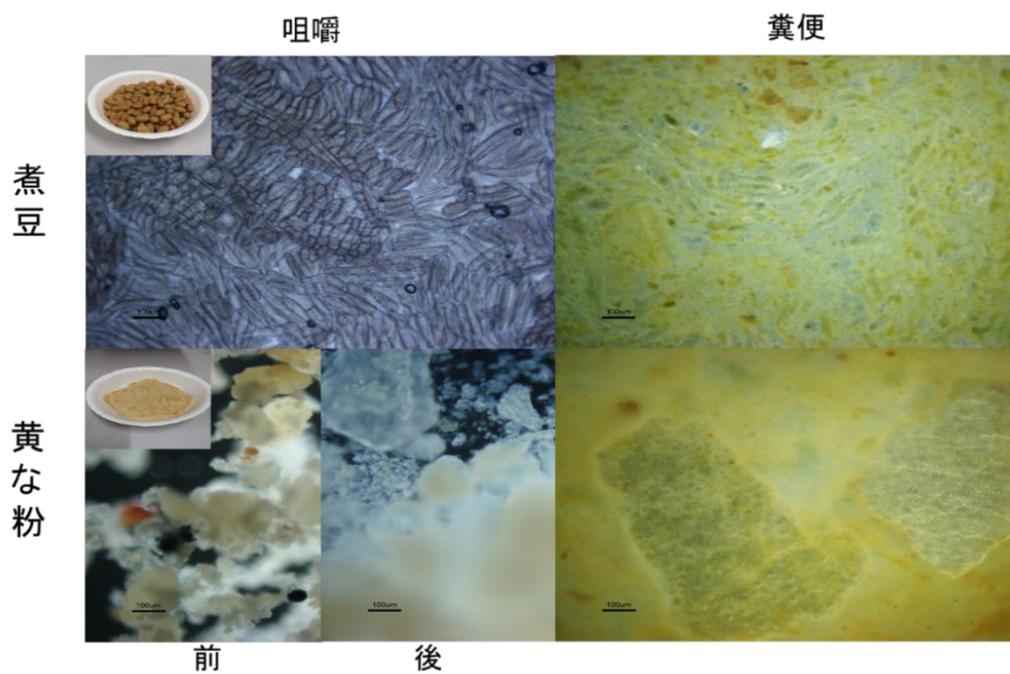
表 2. 各被験者の口・回盲部食物通過時間 (OCTT)

被験者No.	煮豆摂取後 OCTT(時間)	黄な粉摂取後 OCTT(時間)
1	3.0	2.0
2	2.0	4.0
3	2.0	1.0
4	3.0	1.0
5	4.0	3.0
6	3.0	5.0
7	8.0	1.0
8	3.0	2.0
9	5.0	2.0
平均	3.7±0.6	2.3±0.5

各被験者の OCTT (摂取直後を基準に連続して 3ppm 以上上昇した時間) : N.S,

p = 0.18, paired *t*-test.

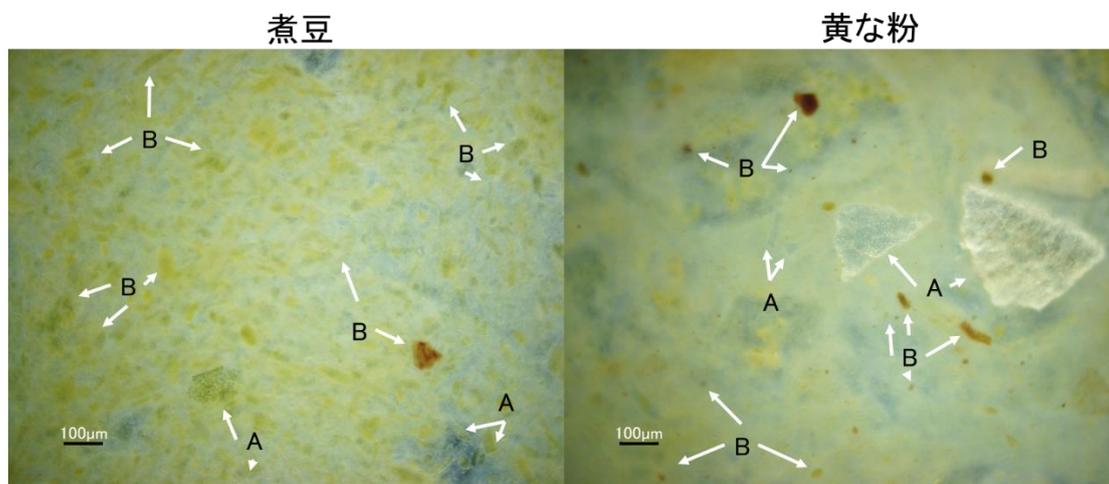
図 10. 煮豆ならびに黄な粉摂取前，摂取後の形態像



左：煮豆の咀嚼後，黄な粉の咀嚼前・後の顕微鏡画像。

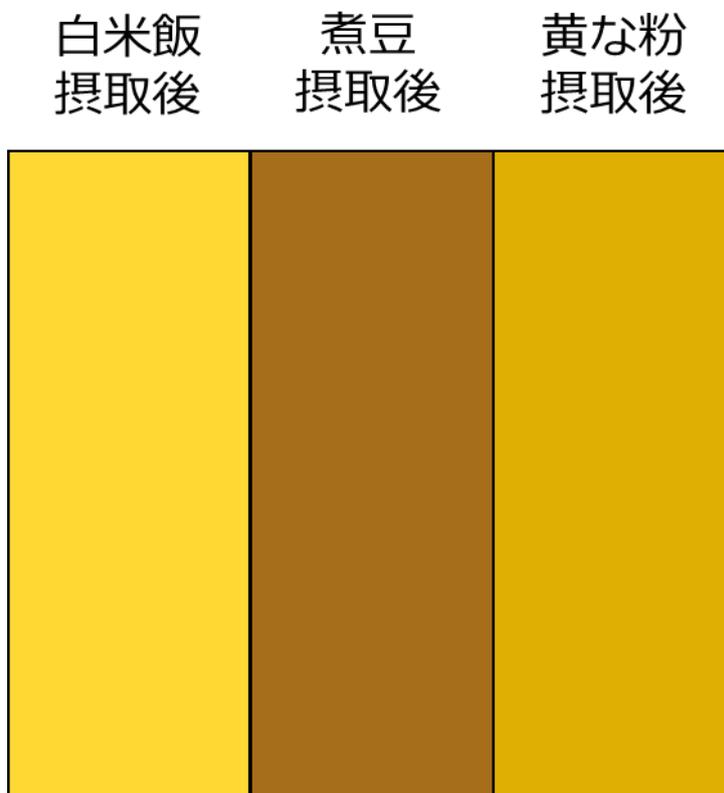
右：煮豆ならびに黄な粉摂取後の糞便中の顕微鏡画像。

図 11. 煮豆ならびに黄な粉摂取後の糞便中残渣物の光学顕微鏡像



A : 種皮, B : 胚乳・子葉

図 12. 糞便採取試験時の糞便色



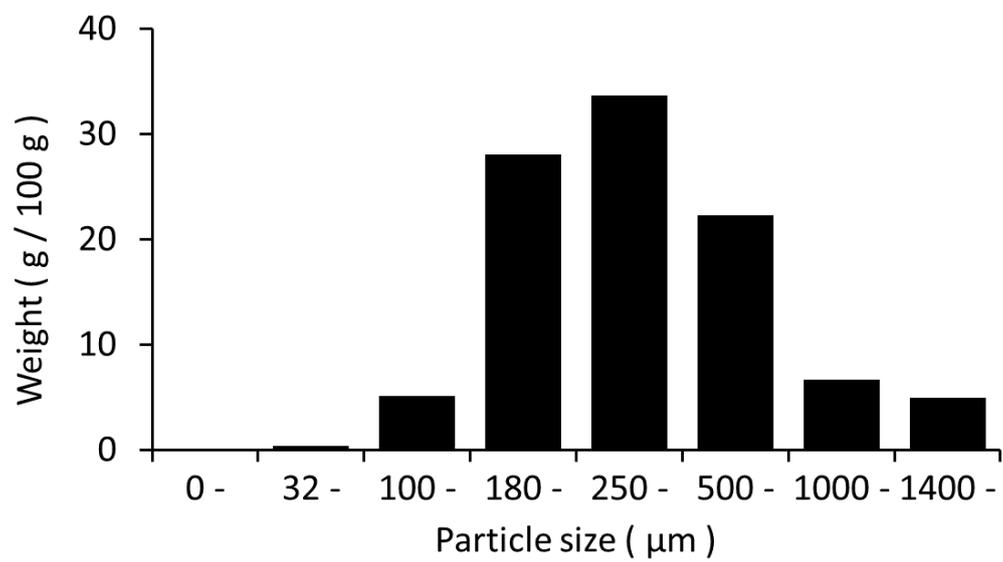
各試験食摂取後の糞便の色

白米飯摂取後 : R:255, G:216, B:51

煮豆摂取後 : R:166, G:109, B:26

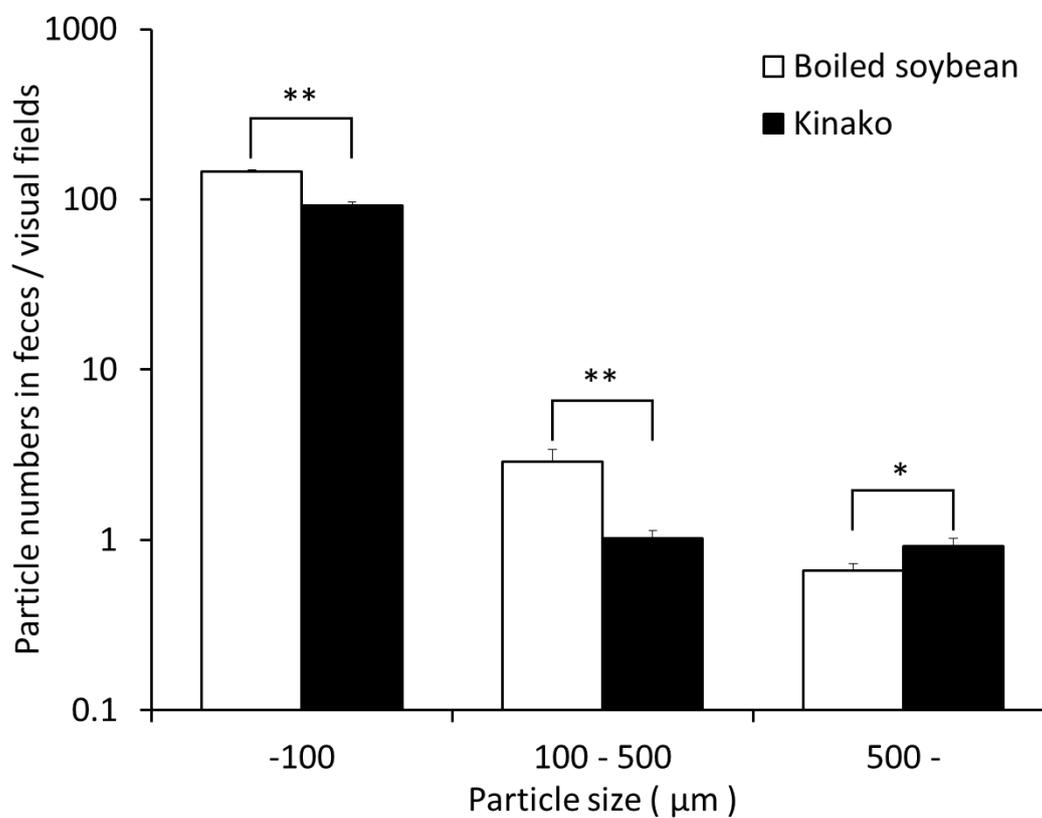
黄な粉摂取後 : R:223, G:176, B:3

図 13. 黄な粉の粒子径分布



作成した黄な粉の粒度分布.

図 14. 煮豆ならびに黄な粉摂取後の糞便中粒度分布



$p < 0.001$ , 煮豆 vs.黄な粉の糞便中粒度分布パターン：二元配置分散分析 (ANOVA) とその後の検定として, Tukey の HSD

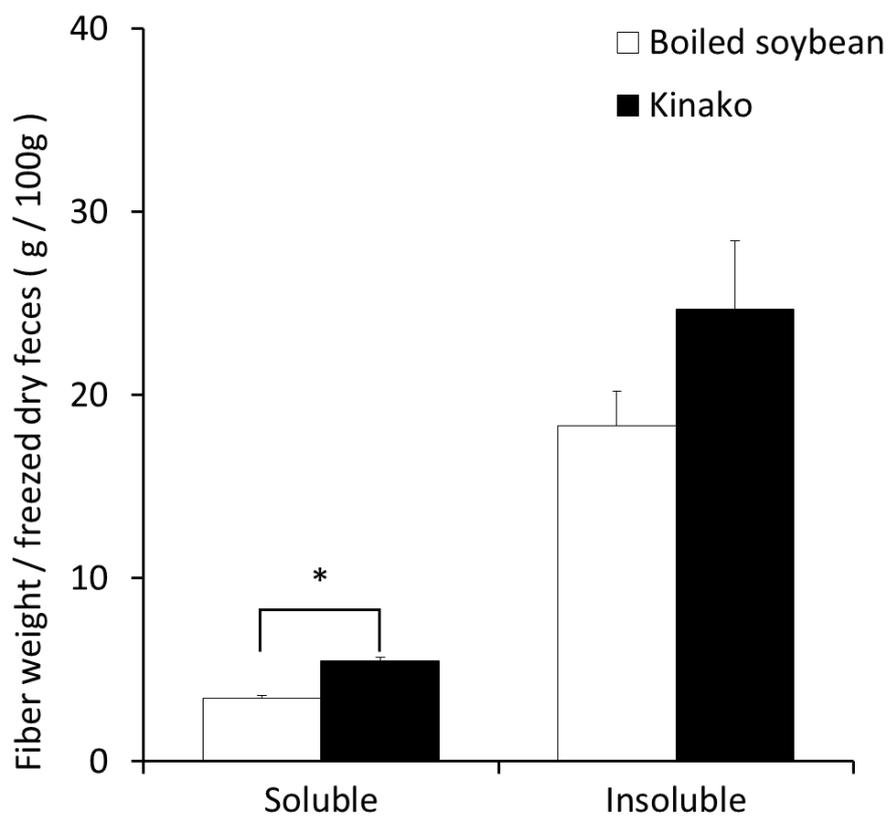
\*\* $p < 0.001$ , \* $p < 0.05$ , 煮豆 vs.黄な粉：unpaired  $t$ -test.

表 3. 煮豆ならびに黄な粉の食物繊維含有量

食品成分分析	煮豆 (g)	黄な粉 (g)
	248.0	74.2
水溶性食物繊維	3.0 ± 0.2 *	2.0 ± 0.1
不溶性食物繊維	13.7 ± 1.1	11.2 ± 0.1
総食物繊維量	16.7 ± 1.1	13.2 ± 0.2

$N=4$ ; 煮豆 vs.黄な粉の水溶性食物繊維 : \* $p < 0.05$ , paired  $t$ -test.

図 15. 煮豆ならびに黄な粉摂取後の糞便 100g あたりの食物繊維含有量



煮豆摂取後 vs.黄な粉摂取後の糞便 100g あたりの水溶性食物繊維含有量：\* $p < 0.05$ , paired  $t$  test.

## 謝辞

本研究の遂行と論文執筆にあたり，多大なご指導をいただきました中部大学大学院生命健康科学研究科 下内章人教授ならびに当初からの呼気分析研究のご指導いただきました中部大学健康増進センター 近藤孝晴特任教授に厚く御礼申し上げます。また，ご多忙な中，中部大学大学院生命健康科学研究科 馬場礼三教授ならびに田島織絵准教授には，本論文の審査をしていただきまして，深く感謝いたします。

さらに，研究を進めるうえで分析化学の視点から中部大学生命健康科学部 神野直哉博士，統計解析の視点から長浜バイオ大学 谷口健太郎助手，食品工学の視点から十文字学園女子大学 中村禎子教授，中村学園大学 田辺賢一准教授からも懇切なるご指導ならびに貴重なご意見をいただき，心より感謝申し上げます。なお，本研究の一部は中部大学特別研究費（17659207）により実施した。

2021年3月

中部大学大学院 生命健康科学研究科 生命医科学専攻

奥村 直也