

セルロースの摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇が ラットの消化管の形態と機能に与える影響

山中 なつみ, 小川 宣子

(岐阜女子大学家政学部)

原稿受付平成 17 年 12 月 9 日; 原稿受理平成 18 年 3 月 4 日

Influences of Increased Viscosity of Gastrointestinal Contents Due to Cellulose Intake on the Structure and Function of Digestive Organs in Rats

Natsumi YAMANAKA and Noriko OGAWA

Faculty of Home Economics, Gifu Women's University, Gifu 501-2592

Male Wistar rats were fed on a diet containing no, 11% or 13% cellulose for 4 weeks. The viscosity of the small intestinal contents of the rats fed on the diet containing 13% cellulose was 2,566 cP, which was significantly higher than the 667 cP in the control group fed on the diet with no cellulose. The respective viscosities of the cecal contents of the rats fed on the diets containing 11% and 13% cellulose were 6,098 cP and 6,345 cP, respectively, significantly higher than the 1,307 cP of the control group. The respective cecal tissue weights of the rats fed on the diets containing no, 11% and 13% cellulose were 0.74 g, 0.87 g and 0.77 g. The cecal tissue weight of the rats fed with cellulose was higher than the control value, and was positively correlated with the viscosity of the cecal contents. The concentrations of acetic, propionic and *n*-butyric acid in the cecal contents of the rats fed with cellulose were lower than the control values. It seems that the increased viscosity of the cecal contents suppressed cecal fermentation, although the increased viscosity of the small intestinal contents had no effect on the apparent digestibility of protein, lipid and carbohydrate.

(Received December 9, 2005; Accepted in revised form March 4, 2006)

Keywords: cellulose セルロース, gastrointestinal contents 消化管内容物, viscosity 粘度, gastrointestinal tissue 消化管組織, apparent digestibility みかけの消化率, cecal fermentation 盲腸内発酵.

1. 緒 言

消化吸収されない食物繊維が様々な生理機能をもたらす要因のひとつとして, 食物繊維の摂取に伴って消化管内容物の粘性や保水性などの物理的性状が変化することが考えられる. 著者らはこれまでに, 水溶性食物繊維であるアルギン酸を含むメカブの粘り (以下, メカブ粘性物質とする) を試料とし, この摂取に伴う消化管内容物の粘性の変化が消化管の機能に与える影響を検討してきた. その結果, グルコースとともにメカブ粘性物質を摂取させたラットでは血糖値の上昇が抑制されることを明らかにした (Yamanaka *et al.* 2000). メカブ粘性物質にはアルギン酸が 30% 含まれ (山中と小川 1998), さらに粘性多糖のフコイダンも

含まれると考えられることから, メカブ粘性物質の摂取によって消化管内容物の粘度が上昇し, グルコースの吸収が抑制されたと考えられた. また, メカブ粘性物質の摂取に伴う盲腸内容物の粘度上昇は腸内細菌による発酵速度を抑制することを示唆し (山中等 2002), 消化管内容物の粘性が栄養素の消化吸収や腸内発酵に影響することを明らかにした.

消化管内容物の粘度を上昇させる要因として, これまでおもに水溶性食物繊維の粘性が注目されてきた (武田と桐山 1995). しかし, 消化管内における不溶性の固形粒子の存在も, 内容物の粘度を上昇させることが考えられ (Takahashi and Sakata 2002), 不溶性食物繊維の摂取によっても消化管内容物の粘度が上

昇し、不溶性食物繊維の生理機能に関与している可能性がある。そこで不溶性食物繊維であるセルロースを摂取させたラットにおいて、消化管内容物の粘度を測定した結果、胃、小腸、盲腸内容物の粘性係数はセルロースの摂取によって高まり、不溶性食物繊維の摂取によっても消化管内容物の粘度が上昇することを明らかにした（高橋等 2003）。

一方、セルロースの摂取は消化管組織を肥大させることが知られている（奥 1995）。これは不消化物量の増加、つまり消化管内容物の嵩に依存する（奥等 1981）とされているが、詳細なメカニズムは明らかにされておらず、内容物の粘度上昇も消化管組織の形態変化に関与している可能性が考えられる。また、セルロースによる血糖値や血中脂質の上昇抑制効果は水溶性食物繊維に比べて低いとされているが（辻 1998）、不溶性食物繊維の摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇が栄養素の消化吸収に何らかの影響をもたらすことが推察される。

セルロースなどの不溶性食物繊維は、植物細胞壁の構成成分として野菜や豆類、果物などの多くの植物性食品に含まれ（綾野 1995）、水溶性食物繊維に比べて摂取量が多い（健康・栄養情報研究会 2003）。不溶性食物繊維がともに摂取する他の栄養素の消化吸収に与える影響ならびにそのメカニズムを明らかにすることは、不溶性食物繊維を含む食品と他の食品を組み合わせた献立の正確な栄養評価において不可欠であり、さらに、不溶性食物繊維を含む食品の摂取によって他の栄養素の消化吸収を調節できる可能性も考えられる。

そこで本研究では、セルロースの摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇と消化管の形態変化との関連を明らかにすることを目的として、消化管の形態変化の指標として消化管組織重量を測定し、内容物の粘度上昇ならびに嵩の増加との相関を調べた。さらに内容物の粘度上昇が消化管の機能に及ぼす影響として、タンパク質、脂質、糖質のみかけの消化率ならびに盲腸内発酵に及ぼす影響を盲腸内各種有機酸濃度から調べた。

2. 方 法

(1) 飼料組成

飼料組成は既報（高橋等 2003）と同様のコーンスターチとカゼインを主体とする精製飼料とし（Table 1）、セルロース添加量は既報（高橋等 2003）において飼料ならびに消化管内容物に粘度上昇が認められた 11%ならびに 13%（以下、11%セルロース飼料、13%セルロース飼料とする）とした。これらのセルロース添加量は、調製温度の異なるメカブ粘性物質の摂取が盲腸内発酵速度にあたえる影響を検討した実験（山中等 2002）で用いた粘性物質の粘度にあわせて設定した。すなわち、80℃で調製した粘性物質の粘度は 10℃で調製した粘性物質に比べて有意（ $p < 0.01$ ）に粘度が高く、これらは 13%ならびに 11%セルロース水懸濁液の粘度に相当する。セルロースを含まない無繊維飼料（以下、対照飼料とする）はセルロースをショ糖に置換した。各飼料は重量の 2 倍の水を添加してペースト状にし、粘度の異なる状態でラットに摂取させた。また、栄養素のみかけの消化率を求める指標として非

Table 1. Composition of control and experimental diets
(g/100 g)

	Control	11% cellulose	13% cellulose
Cellulose powder	0.0	11.0	13.0
Sucrose	13.3	2.3	0.3
α -Cornstarch	54.4	54.4	54.4
Casein	20.0	20.0	20.0
L-Cystine	0.3	0.3	0.3
Soybean oil	7.0	7.0	7.0
AIN-93G mineral mixture	3.5	3.5	3.5
AIN-93 vitamin mixture	1.0	1.0	1.0
Choline bitartrate	0.25	0.25	0.25
<i>tert</i> -Butylhydroquinone	0.0014	0.0014	0.0014
Chromium oxide	0.2	0.2	0.2

セルロースの摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇がラットの消化管の形態と機能に与える影響

吸収性の酸化クロムを用い(坂口 1998), 実験開始時よりいずれの飼料にも 0.2% 添加した。セルロースは濾紙粉末 (40~100 mesh, 東洋濾紙 (株)) を用い, L-シスチン, 重酒石酸コリン, *t*-ブチルヒドロキノン, 酸化クロムは和光純薬工業 (株) 製, その他の飼料原料はすべてオリエンタル酵母工業 (株) 製を用いた。

(2) 実験動物および飼育条件

6 週齢の Wistar 系雄ラット (日本チャールス・リバー (株)) を用い, 個別式ステンレスケージ内で, 温度 24℃, 湿度 60%, 6:00~18:00 明期, 18:00~6:00 暗期の環境で飼育を行った。実験動物用固形飼料 (マウス・ラット・ハムスター用 MF, オリエンタル酵母工業 (株)) を自由摂取させて 4 日間予備飼育を行った後, 各群の平均体重がほぼ一致するよう 3 群 (1 群 4 匹) に分け, 各群に对照飼料, 11% セルロース飼料, 13% セルロース飼料のいずれかを与え, それぞれ对照群, 11% セルロース群, 13% セルロース群とし, 4 週間飼育した。飼料は水とともに自由摂取させ, 明期から暗期に移行する 18:00 に交換した。

(3) 測定項目および方法

1) 体重ならびに飼料摂取量

体重は週 1 回, 飼料摂取量は毎日, いずれも飼料交換時の 18:00 に測定した。体重は実験開始時の初体重と 4 週間の実験終了時の終体重を, 飼料摂取量は測定値を合計して 4 週間の総摂取量を示した。

2) 消化管組織重量ならびに内容物重量

実験最終日の 20:00 に, エーテル麻酔下で開腹し, 胃, 小腸, 盲腸, 結腸を摘出した。各組織は内容物とともに重量を測定した。その後, 胃, 小腸, 盲腸の内容物を採取した。生理食塩水で内容物を組織から除去し, ろ紙で水分をふき取り, 組織重量を測定した。結腸は斜走ヒダの有る部分を近位結腸とし, その肛門側を遠位結腸として各々の組織重量を測定した。内容物洗浄前後の重量差を内容物重量とした。

3) 消化管内容物の粘度

胃, 小腸, 盲腸内容物の粘度は, TV-20 形粘度計 (TVE-20H 東機産業 (株)) を用い, 試料温度 37℃ で測定した。回転数 5 rpm (ずり速度 19.15 s^{-1}) におけるみかけの粘度を各消化管内容物の粘度として示した。

4) 盲腸内容物中の有機酸濃度

有機酸測定用の盲腸内容物は採取後直ちに冷凍保存した。測定時に解凍し, 内容物 200 mg に対して水 800 μl を加えて攪拌後, 氷冷下で一晩静置した。8,000 $\times g$ で 20 分間遠心分離し, 得られた上清 200 μl と内

部標準液 (0.1 mM クロトン酸/10 mM 水酸化ナトリウム) 200 μl を混合し, クロロホルム 200 μl を加え, 8,000 $\times g$ で 20 分間遠心分離して脂溶性物質を除去した。上清をメンブランフィルター (孔径 0.45 μm) でろ過し, 高速液体クロマトグラフィーで酢酸, プロピオン酸, *n*-酪酸の濃度を測定した。カラムは Develosil ODS-HG-5 (4.6 mm i.d. $\times$ 25 cm long, 野村化学 (株)) を用い, 逆相クロマトグラフィーにより分離した。カラム温度は 45℃ とし, 移動相は流速 1.0 ml/min で 3 mM 過塩素酸 100% から 3 mM 過塩素酸 50% : メタノール 50% に 60 分間でグラジェントし, 紫外検出器 (波長 220 nm) により検出した。標準物質として酢酸, プロピオン酸, *n*-酪酸 (いずれも和光純薬工業 (株), 特級) を用い, これらの混合溶液を同条件で分析して作成した検量線より試料中の各有機酸濃度を求めた。

一方, 精秤した盲腸内容物を 8,000 $\times g$ で 20 分間遠心分離して上清を除去した後, 105℃ で 8 時間乾燥して乾燥重量を測定した。湿重量と乾燥重量の差から内容物の水分含量を算出し, 各有機酸の濃度を内容物の水分中のモル濃度 (mM) で示した。

5) 栄養素の消化率

飼育 4 週目の 7 日間, 糞を採取し 60℃ で 24 時間通風乾燥した後, 42 mesh 以下に粉碎したものを試料とした。糞ならびに飼料を硝酸と過塩素酸で分解した後, 原子吸光光度計 (AA-6500 (株) 島津製作所) によりクロムを定量した。また, 糞と飼料のタンパク質, 脂質, 灰分, 水分を常法により定量し, 差し引きにより糖質の量を算出した。飼料と糞に含まれるタンパク質, 脂質, 糖質の量を酸化クロムに対する比率で比較し, みかけの消化率を算出した。

6) 統計処理

測定結果は 1 群 4 匹の平均値 $\pm$ 標準偏差で示した。各測定項目についてセルロースの添加量を要因とした 1 元の分散分析を行い, 要因の影響が有意な場合には分散分析の誤差分散を用いて Tukey の多重比較を行った。さらに消化管内容物の粘度, 重量ならびに組織重量については消化管の部位の違いとセルロースの添加量を要因とした 2 元の分散分析を行った。なお, 危険率が 0.05 以下のとき有意であるとみなした。統計処理にはパソコンソフト「統計解析ハンドブック for Win —基礎統計—」(共立出版株式会社) を用いた。

3. 結 果

(1) 体重ならびに飼料摂取量 (Table 2)

終体重は対照群に比べて11%セルロース群, 13%セルロース群の方が低かった。飼育期間中の体重増加量は対照群 171 g, 11%セルロース群 156 g, 13%セルロース群 160 g であり, 対照群に比べて11%セルロース群, 13%セルロース群の方が低かったが, 終体重, 体重増加量ともに各群間に有意差は認められなかった。飼料摂取量は対照群 1,836 g, 11%セルロース群 2,004 g, 13%セルロース群 2,103 g であり, 13%セルロース群は対照群に比べて有意 ($p<0.05$) に飼料摂取量が多かった。飼料摂取量 1 g あたりの体重増加量を示す飼料効率は, 13%セルロース飼料群では対照飼料群に比べて有意 ($p<0.05$) に低かった。

(2) 消化管内容物の粘度 (Table 3)

胃内容物の粘度は, 小腸, 盲腸内容物の粘度に比べて低く, 3 群間に有意差は認められなかった。小腸内容物の粘度は飼料へのセルロース添加量が高くなるにつれて増加し, 対照群の 667 cP に対し 13%セルロース群では 2,566 cP となり有意差 ($p<0.05$) が認められた。盲腸内容物の粘度は, 11%セルロース群が 6,098 cP, 13%セルロース群が 6,345 cP で, ともに対照群の 1,307 cP に比べて有意 ($p<0.05$) に高く, セルロースの摂取によって盲腸内容物の粘度が高くなることが示された。2 元分散分析の結果, 消化管の部位の違い, セルロースの添加量の影響, ならびにこれらの交互作用はいずれも有意 ($p<0.01$) であった。

(3) 消化管内容物重量 (Table 4)

胃と盲腸の内容物重量は 3 群間に有意差は認められ

Table 2. Effects of dietary cellulose on body weight gain and food intake in rats

	Dietary groups		
	Control	11% cellulose	13% cellulose
Initial body weight (g)	199±5 ^a	200±3 ^a	199±1 ^a
Final body weight (g)	370±34 ^a	355±22 ^a	359±14 ^a
Body weight gain (g/4 weeks)	171±31 ^a	156±21 ^a	160±15 ^a
Food intake (g/4 weeks)	1,836±173 ^a	2,004±119 ^{ab}	2,103±85 ^b
Food efficiency* ¹	0.093±0.010 ^b	0.077±0.007 ^{ab}	0.076±0.007 ^a

Values are means±S.D. of four rats. ^{a,b} The means in a row not sharing a common superscript differ significantly from the other dietary groups ($p<0.05$) using Tukey's multiple-comparison test. *¹Body weight gain (g)/Food intake (g).

Table 3. Effects of dietary cellulose on viscosity of gastrointestinal contents in rats (cP)

	Dietary groups		
	Control	11% cellulose	13% cellulose
Stomach	429±166 ^a	359±205 ^a	346±171 ^a
Small intestine	667±35 ^a	1,482±312 ^{ab}	2,566±974 ^b
Cecum	1,307±583 ^a	6,098±2,326 ^b	6,345±2,442 ^b

Results of two-way analysis of variance

Effect	Error probability
Intestinal segment	<0.01
Cellulose	<0.01
Interaction (segment×cellulose)	<0.01

Values are means±S.D. of four rats. ^{a,b} The means in a row not sharing a common superscript differ significantly from the other dietary groups ($p<0.05$) using Tukey's multiple-comparison test.

セルロースの摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇がラットの消化管の形態と機能に与える影響

Table 4. Effects of dietary cellulose on weight of gastrointestinal contents in rats (g)

	Dietary group		
	Control	11% cellulose	13% cellulose
Stomach	3.55±3.06 ^a	7.95±3.98 ^a	7.40±2.38 ^a
Small intestine	1.20±0.52 ^a	1.87±1.04 ^{ab}	2.67±0.23 ^b
Cecum	2.75±1.03 ^a	3.58±0.31 ^a	3.40±0.87 ^a
Colon	0.81±0.38 ^a	1.50±0.23 ^{ab}	2.02±0.83 ^b
Results of two-way analysis of variance			
	Effect	Error probability	
	Intestinal segment	<0.01	
	Cellulose	<0.01	
	Interaction (segment×cellulose)	>0.2	

Values are means±S.D. of four rats. ^{ab} The means in a row not sharing a common superscript differ significantly from the other dietary groups ($p<0.05$) using Tukey's multiple-comparison test.

Table 5. Effects of dietary cellulose on tissue weight of gastrointestinal segments in rats (g)

	Dietary group		
	Control	11% cellulose	13% cellulose
Stomach	1.29±0.07 ^a	1.37±0.18 ^a	1.38±0.09 ^a
Small intestine	5.70±0.75 ^a	5.05±0.28 ^a	5.81±1.04 ^a
Cecum	0.74±0.05 ^a	0.87±0.03 ^b	0.77±0.08 ^{ab}
Proximal colon	0.40±0.08 ^a	0.32±0.06 ^a	0.36±0.10 ^a
Distal colon	0.59±0.14 ^a	1.10±0.07 ^b	1.12±0.18 ^b
Results of two-way analysis of variance			
	Effect	Error probability	
	Intestinal segment	<0.01	
	Cellulose	>0.3	
	Interaction (segment×cellulose)	>0.05	

Values are means±S.D. of four rats. ^{ab} The means in a row not sharing a common superscript differ significantly from the other dietary groups ($p<0.05$) using Tukey's multiple-comparison test.

なかった。小腸の内容物重量は対照群 1.20 g, 11%セルロース群 1.87 g, 13%セルロース群 2.67 g, 結腸の内容物重量は対照群 0.81 g, 11%セルロース群 1.50 g, 13%セルロース群 2.02 g となり, いずれもセルロースの添加に伴い内容物重量が増加し, 対照群と 13%セルロース群の間に有意差 ($p<0.05$) が認められた。2元分散分析の結果, 消化管の部位の違い, セルロースの添加量の影響はともに有意 ($p<0.01$) であった

が, 交互作用は認められなかった。

(4) 消化管組織重量 (Table 5)

胃, 小腸ならびに近位結腸においては, セルロース摂取に伴う有意な組織重量の変化は認められなかった。盲腸組織重量は 11%セルロース群の 0.87 g と対照群の 0.74 g に有意差 ($p<0.05$) が認められた。遠位結腸の組織重量は対照群が 0.59 g であったのに対し, 11%セルロース群では 1.10 g, 13%セルロース群では

1.12 g となり、セルロースの摂取により有意 ($p < 0.01$) に増加した。2 元分散分析の結果、消化管の部位の違いによる影響は有意 ($p < 0.01$) であったが、セルロースの添加量の影響ならびに交互作用は認められなかった。

(5) 盲腸内容物中の有機酸濃度 (Table 6)

いずれの短鎖脂肪酸もセルロースの摂取によって濃度が低下した。酢酸は対照群の 84.40 mm に比べ、11%セルロース群が 66.23 mm, 13%セルロース群が 58.29 mm と有意 ($p < 0.05$) に低下した。同様に *n*-酪酸も対照群 31.21 mm, 11%セルロース群 18.97 mm, 13%セルロース群 18.48 mm で、対照群と 11%ならびに 13%セルロース群の間に有意差 ($p < 0.05$) が認められた。プロピオン酸はセルロースの摂取量に伴い対照群 16.58 mm, 11%セルロース群 10.72 mm, 13%セルロース群 5.81 mm の順に低下し、各群間に有意差 ($p < 0.05$) が認められた。

(6) 栄養素のみかけの消化率 (Table 7)

タンパク質と脂質の消化率は各群ともに約 94% と 96% でほぼ同様であった。炭水化物の消化率はセルロースの摂取によって低下し、対照群の 99.0% と 11%セルロース群の 82.3% ならびに 13%セルロース群の 81.0% の間に有意差 ($p < 0.01$) が認められた。

4. 考 察

セルロース添加飼料の摂取により、胃内容物の粘度に変化はみられなかったが、小腸と盲腸内容物の粘度は上昇した。小腸内容物の粘度は飼料へのセルロース添加量に伴って対照群, 11%セルロース群, 13%セルロース群の順に増加したのに対し、盲腸内容物の粘度は小腸内容物の粘度上昇に比べ 11%セルロース群, 13%セルロース群ともに顕著に増加した。2 元分散分析の結果、消化管の部位の違いとセルロースの添加量の交互作用は有意であり、セルロースの摂取が内容物の粘度に与える影響は、消化管の部位によって異なることが示された。

セルロース添加飼料の摂取ならびにセルロース添加量の違いによって胃内容物の粘度が変化しなかった原因として、セルロース以外の栄養素の影響が考えられた。コーンスターチ、カゼインの飼料組成は各々 54.4%, 20.0% でセルロースよりも高く、消化が不十分な胃内容物においてはこれらの高分子成分が粘度を左右した可能性が考えられる。これに対し、主な栄養素が消化吸収された後の盲腸では、セルロースの存在が内容物の粘度に大きく影響したと考えられる。小腸内容物の粘度はいずれの群においても、胃内容物の粘度と盲腸内容物の粘度の中間の値をとり、栄養素の消化吸

Table 6. Effects of dietary cellulose on cecal organic acid concentrations in rats (mm)

	Dietary group		
	Control	11% cellulose	13% cellulose
Acetic acid	84.40 ± 2.19 ^a	66.23 ± 5.81 ^b	58.29 ± 12.58 ^b
Propionic acid	16.58 ± 0.60 ^a	10.72 ± 2.18 ^b	5.81 ± 0.65 ^c
<i>n</i> -Butyric acid	31.21 ± 5.04 ^a	18.97 ± 1.82 ^b	18.48 ± 2.80 ^b

Values are means ± S.D. of four rats. ^{a,b,c} The means in a row not sharing a common superscript differ significantly from the other dietary groups ($p < 0.05$) using Tukey's multiple-comparison test.

Table 7. Effects of dietary cellulose on apparent digestibilities in rats (%)

	Dietary group		
	Control	11% cellulose	13% cellulose
Protein	94.5 ± 1.2 ^a	94.1 ± 1.5 ^a	94.6 ± 1.0 ^a
Lipid	96.6 ± 0.5 ^a	95.5 ± 0.8 ^a	95.6 ± 1.2 ^a
Carbohydrate	99.0 ± 0.1 ^a	82.3 ± 3.2 ^b	81.0 ± 4.7 ^b

Values are means ± S.D. of four rats. ^{a,b} The means in a row not sharing a common superscript differ significantly from the other dietary groups ($p < 0.05$) using Tukey's multiple-comparison test.

セルロースの摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇がラットの消化管の形態と機能に与える影響

収が進むにつれて消化管内におけるセルロースの存在が内容物の粘度に与える影響が高まっていくことが示された。しかし、小腸内容物の粘度はセルロース添加量に伴って上昇する傾向であったのに対し、盲腸内容物にはセルロース添加量の違いによる影響は認められなかった。これより、セルロースが消化管内容物の粘度に与える影響は、セルロース濃度が低い小腸では濃度依存性が高いが、盲腸のように他の栄養素が消化吸収されセルロース濃度が高まると濃度依存性が低くなることが推察された。

消化管内容物の重量は胃、小腸、盲腸、結腸のいずれにおいてもセルロースの摂取によって増加する傾向がみられたが、対照群に比べて有意な増加が認められたのは、小腸と結腸における13%セルロース群のみであった。胃内容物重量は特に対照群における個体差が大きく、また、セルロース添加量の違いによる影響は認められなかった。本実験では解剖前に絶食を行っていないため、解剖直前の飼料ならびに水分摂取量の個体差が、胃内容物重量に影響した可能性が考えられる。一方、小腸ならびに結腸の内容物量は、対照群、11%セルロース群、13%セルロース群の順に多くなる傾向がみられたのに対し、盲腸内容物量にはセルロース添加量の違いによる影響は認められなかった。小腸ならびに結腸と、その中間に位置する盲腸において、内容物量に対するセルロース摂取の影響が異なった原因については不明である。各部位における内容物中のセルロース、水分、他の固形物含量を測定し、セルロース摂取によって内容物重量が増加した原因を消化管部位ごとに明らかにする必要がある。

以上の結果より、内容物重量が内容物の嵩の変化を示すものと考え、セルロースの摂取に伴う消化管内容物の物理的性状の変化として、小腸における粘度上昇と嵩の増加、盲腸における粘度上昇、結腸における嵩の増加が明らかとなった。

消化管組織重量は、盲腸と遠位結腸においてセルロース摂取による増加が認められた。盲腸内容物の粘度あるいは内容物重量である嵩と、組織重量の相関係数は各々0.67と0.21であり、内容物の粘度と組織重量には有意($p < 0.05$)な正の相関が認められた。セルロースの摂取に伴う消化管組織の肥大は、不消化物量の増加つまり内容物の嵩に依存する(奥等 1981)と考えられているが、本研究では、セルロースの摂取に伴う盲腸組織重量の増加には、内容物の嵩の増加よりも粘度上昇がより大きな要因となっている可能性が示され

た。

遠位結腸の組織重量は11%と13%セルロース群ともに対照群に比べて有意に増加した。結腸全体の内容物重量と遠位結腸の組織重量の相関係数は0.79であり、内容物重量すなわち嵩と組織重量に有意($p < 0.01$)な正の相関が認められた。しかし、結腸内容物は流動性が小さく本研究で使用した回転粘度計で粘度を測定することはできなかったことから、嵩の増加のみが組織重量増加の要因とは断定できない。今後、流動性が小さい結腸内容物についても物性を明らかにし、形態変化との関連を検討する必要がある。

小腸においては内容物の粘度上昇ならびに嵩の増加が認められたが、組織重量には有意な変化が認められなかった。小腸組織が内容物の物理的性状変化の影響を受けなかった原因としては、小腸は盲腸や結腸に比べて内容物の滞留時間が短いことが考えられた。また、組織重量が増加した盲腸に比べ、小腸の内容物粘度は低く、11%、13%セルロース群ともに盲腸内容物の粘度の2分の1以下である。これより、内容物の粘度上昇が組織形態に影響を与えるには、ある一定以上の粘度が必要である可能性も考えられた。

飼料摂取量1g当たりの体重増加量を示す飼料効率は、セルロースの摂取により低下したが、11%ならびに13%セルロース群の飼料摂取量には消化吸収されないセルロースが含まれる。セルロース以外の栄養素の消化吸収がセルロースの摂取によって変化したのかを明らかにするため、セルロース添加割合をもとに飼料摂取量からセルロースを差し引いた部分の飼料効率を算出した結果、その平均値±標準偏差は11%セルロース群、13%セルロース群ともに 0.080 ± 0.007 g/gとなった。対照群の飼料効率 0.093 ± 0.010 g/gと比較して、有意差は認められなかった。

タンパク質、脂質のみかけの消化率は対照群と試験群の間に有意差は認められず、セルロースの摂取はこれらの消化吸収に影響していないことが示された。糖質の消化率は対照群に比べ11%ならびに13%セルロース群で有意に低下したが、摂取したセルロース自体の消化率が影響していると考えられた。そこで、摂取したセルロースは全量糞中に排泄されると仮定し、飼料へのセルロース添加割合をもとに飼料中ならびに糞中の糖質含量からセルロースを差し引いて糖質の消化率を算出すると、その平均値±標準偏差は11%セルロース群 $99.3 \pm 3.9\%$ 、13%セルロース群 $102.0 \pm 6.0\%$ となった。13%セルロース群では平均値が100%を超え

たが統計的に有意な超過ではなかった。セルロースを差し引いた糖質の消化率はいずれも対照群と差が認められず、糖質の消化吸収にもセルロースの摂取は影響しないことが示された。

水溶性食物繊維の摂取に伴う小腸内容物の粘度上昇は、食品成分や消化酵素の拡散を阻害して酵素作用を緩慢にし、さらに小腸粘膜への消化生成物の到達も遅らせることにより栄養素の消化吸収率を低下させると考えられている(池上 1993)。しかし、不溶性食物繊維であるセルロースの摂取による小腸内容物の粘度上昇は栄養素の消化吸収に影響を与えなかった。セルロースの 11, 13%水懸濁液の粘度は、水溶性食物繊維のアルギン酸ナトリウムでは各々0.3, 0.5%水溶液の粘度に相当する。これより、不溶性食物繊維による消化管内容物の粘度上昇は水溶性食物繊維に比べて程度が小さく、本実験条件では消化吸収に与える影響が認められなかったことが考えられる。さらに、水溶性食物繊維が水に溶解することに伴う粘度変化と、不溶性食物繊維が固形粒子として水に分散することに伴う粘度変化では、栄養素や消化酵素の拡散に与える影響が異なり、不溶性食物繊維に比べて水溶性の方がこれらの拡散の阻害効果が大きいことも考えられる。

一方で、各栄養素のみかけの消化率にはセルロース摂取の影響は認められなかったが、栄養素の消化吸収速度はセルロース摂取によって変化していた可能性はあると考えられる。

盲腸内容物中の有機酸濃度は、酢酸、プロピオン酸、酪酸ともにセルロースの摂取によって低下した。盲腸内容物中の有機酸濃度は、生産速度と吸収速度の兼ねあいでは決まることから、セルロースの摂取によって生産速度が低下あるいは吸収速度が上昇した可能性が示された。盲腸内容物の物理的性状の変化としては粘度上昇が認められており、粘度変化と酢酸、プロピオン酸、酪酸濃度の相関係数は各々 -0.74 , -0.76 , -0.76 であり、いずれも有意($p < 0.05$)な負の相関が認められた。内容物の粘度上昇が吸収速度を上昇させることは考えにくいことから、内容物の粘度上昇に伴う基質の拡散阻害などにより、有機酸の生産速度が低下した可能性が高いと考えられた。盲腸内容物の嵩もセルロースの摂取に伴い増加する傾向がみられたことから、難発酵性のセルロース(原 2000)が盲腸内に存在することにより発酵基質が希釈され、生産速度が低下した可能性も考えられた。しかし、内容物の嵩と各有機酸濃度との相関係数は各々 -0.37 , -0.54 ,

-0.03 と低かった。盲腸内容物の粘度と有機酸濃度には有意な負の相関が認められたのに対し、盲腸内容物の重量と有機酸濃度には相関は認められなかったことから、生産速度の低下は盲腸内容物の嵩の増加よりも粘度上昇との関連が高いことが示された。

また、大腸に発酵基質が急速に大量に流入すると、乳酸やコハク酸が生産、蓄積されて内容物の pH が著しく低下し短鎖脂肪酸の生産が抑制される場合がある(星と矢島 1998)。同様の方法で盲腸内容物中の乳酸ならびにコハク酸濃度を測定した結果、乳酸は対照群 127.15 mM, 11%セルロース群 143.25 mM, 13%セルロース群 79.09 mM, コハク酸は対照群 16.22 mM, 11%セルロース群 7.97 mM, 13%セルロース群 0.53 mMであった。いずれも個体差が大きく群間に有意差はなく、セルロース摂取の影響は認められなかった。

これらの結果から、セルロース摂取に伴う盲腸内容物の粘度上昇によって、有機酸の生産速度が低下し腸内発酵が抑制されることが示唆された。

著者らは水溶性食物繊維であるアルギン酸を含むメカブ粘性物質の摂取がラットの盲腸内細菌による発酵速度を抑制することを明らかにしている(山中等 2002)。セルロースの摂取が栄養素の消化吸収に与える影響は水溶性食物繊維と異なることが示唆されたが、他の栄養素が消化吸収された後の盲腸では、セルロースが固形粒子として水に分散することに伴う粘度上昇が、水に溶解する水溶性食物繊維と同様に盲腸内発酵を抑制することが示された。

以上の結果より、セルロースの摂取に伴う盲腸内容物の粘度上昇が盲腸組織肥大の要因となっていることが示された。小腸と盲腸内容物の粘度上昇は栄養素の消化吸収機能には影響を及ぼさなかったが、腸内発酵を抑制することが示された。これまで、水溶性食物繊維については、その摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇が栄養素の消化吸収阻害などの生理機能の主な原因と考えられてきたが、不溶性食物繊維においても消化管内容物の粘性上昇が、消化管組織の形態変化や腸内発酵抑制といった生理機能の重要な要因となっていることが示唆された。

5. 要 約

セルロースの摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇が、消化管の形態と機能に与える影響についてラットを用いた動物実験により検討した。

(1) セルロースの摂取により小腸と盲腸内容物の粘

セルロースの摂取に伴う消化管内容物の粘度上昇がラットの消化管の形態と機能に与える影響

度が上昇した。小腸内容物の粘度は飼料へのセルロース添加量に伴って対照群, 11%セルロース群, 13%セルロース群の順に増加したのに対し, 盲腸内容物の粘度は, 11%セルロース群, 13%セルロース群ともに対照群に比べて顕著に増加した。小腸と結腸においてはセルロースの摂取に伴い内容物の嵩の増加が認められた。

(2) 盲腸組織重量はセルロースの摂取によって増加し, 内容物の粘度との相関係数は 0.67 であり, 内容物重量すなわち嵩との相関係数の 0.21 に比べて高かった。セルロースの摂取に伴う盲腸組織の形態変化は, 内容物の嵩の増加よりも粘度上昇がより大きな要因となっている可能性が示された。小腸においては内容物の粘度上昇ならびに嵩の増加が認められたが, 組織重量には有意な変化が認められなかった。

(3) 飼料効率ならびに糖質, タンパク質, 脂質のみかけの消化率は, いずれの栄養素にもセルロース摂取の影響は認められなかった。小腸内容物はセルロースの摂取により粘度上昇ならびに嵩の増加が認められたが, これらの内容物の物理的性状の変化は小腸内で起こる栄養素の消化吸収には影響しなかった。

(4) 盲腸内容物中の酢酸, プロピオン酸, 酪酸濃度はセルロースの摂取によって低下し, 腸内発酵が抑制されていることが示された。盲腸内容物の粘度と各有機酸濃度には負の相関が認められ, セルロースは盲腸内容物の粘度を上昇させることにより盲腸内発酵を抑制することが示された。

以上の結果より, 不溶性食物繊維の摂取に伴う消化管内容物の粘性上昇が, 消化管組織の形態変化や腸内発酵抑制といった生理機能の重要な要因となっていることが示唆された。

本実験の遂行にあたりご指導賜りました石巻専修大学教授坂田隆先生に深謝致します。本研究の一部は, 財団法人飯島記念食品科学振興財団平成 14 年度学術

研究助成金によって行われたことを付記し, 関係者各位に深謝致します。

引用文献

- 綾野雄幸 (1995) 『食物繊維』 (印南 敏, 桐山修八編), 第一出版, 東京, 17-18
- 原 健次 (2000) 『短鎖脂肪酸の生化学と応用』, 幸書房, 東京, 25-31
- 星 清子, 矢島高二 (1998) 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
- 池上幸江 (1993) 食物繊維と消化・吸収機能, 栄養学雑誌, **51**, 251-258
- 健康・栄養情報研究会 (編) (2003) 『国民栄養の現状』, 第一出版, 東京, 68-69
- 奥 恒行 (1995) 『食物繊維』 (印南 敏, 桐山修八編), 第一出版, 東京, 83-84, 92-95
- 奥 恒行, 小西史子, 細谷憲政 (1981) ラットの生理機能に及ぼす難消化性多糖類の性状ならびに飼育期間の影響, 栄養と食糧, **34**, 437-443
- 坂口 英 (1998) 消化管内容物滞留時間の測定法, 日本食物繊維誌, **2**, 127-129
- Takahashi, T., and Sakata, T. (2002) Large Particles Increase Viscosity and Yield Stress of Pig Cecal Contents without Changing Basic Viscoelastic Properties, *J. Nutr.*, **132**, 1026-1030
- 高橋 徹, 山の中つみ, 坂田 隆, 小川宣子 (2003) 固形粒子の摂取がラット消化管内容物の粘度や消化管の組織重量に与える影響, 栄食誌, **56**, 199-205
- 武田秀敏, 桐山修八 (1995) 『食物繊維』 (印南 敏, 桐山修八編), 第一出版, 東京, 68-71
- 辻 啓介 (1998) 『食物繊維の科学』 (辻 啓介, 森 文平編), 朝倉書店, 東京, 20-22
- 山の中つみ, 稲垣明子, 坂田 隆, 小川宣子 (2002) メカブ粘性物質の摂取がラットの盲腸内発酵速度に与える影響, 家政誌, **53**, 991-999
- 山の中つみ, 小川宣子 (1998) メカブより溶出する粘性物質の理化学的特性, 日調科誌, **31**, 2-6
- Yamanaka, N., Ogawa, N., Takahashi, T., Maki, Y., and Sakata, T. (2000) Effect of the Viscous Exudate of *Mekabu* (Sporophyll of *Undaria pinnatifida*) on Glucose Absorption in Rats, *Food Sci. Technol. Res.*, **6**, 306-309