

## 市販セルロース粉末およびペクチンがグルコースの *in vitro* における拡散速度に与える影響

### Influence of Commercial Cellulose Powder and Pectin on *in vitro* Glucose Diffusion Speed

加藤 陽治\*・田中 順子\*†

Yoji KATO\* and Junko TANAKA\*†

#### 論文要旨

植物性食品由来の食物繊維の大部分は細胞壁である。その主要構成多糖ペクチンとセルロースの *in vitro* におけるグルコースの拡散阻害作用に対する加熱操作の影響を、市販のペクチンおよびセルロース粉末を用いて検討した。セルロースの場合、加熱 (100°C) による影響はまったく受けなかった。しかし、ペクチンは加熱時間の増加に伴い阻害率が減少した。これは、加熱によるペクチン分子の粘性消失、すなわちペクチン分子の分子量低下が原因であることがわかった。このことから、水可溶性および水不溶性食物繊維の物理化学的性質が加熱調理操作により変わり、その生理機能にも大きな影響を与えることが示唆された。

**キーワード：**食物繊維，ペクチン，セルロース，グルコースの拡散

#### 1. 緒言

食物繊維摂取量の減少が種々の疾患（消化器疾患，糖尿病など）を引き起こすことが明らかになり，生体調節機能因子としての食物繊維の重要性が認められている<sup>1,2)</sup>。食物繊維は水可溶性食物繊維と水不溶性食物繊維の二つに大別される。それらの大部分は植物性食品のいわゆる植物細胞壁に由来するといっても過言ではない。食物繊維の生理効果の一つ耐糖性改善効果は，水可溶性食物繊維の拡散阻害作用により説明されている。

われわれは，水不溶性食物繊維の栄養効果解明の基礎知見を得るために水不溶性食物繊維の物理化学的性質の研究を進めてきた。これまでに，ダイコン，キャベツおよびタケノコの水不溶性食物繊維（細胞壁）が低分子糖を一時的に抱え込む性質を有し，*in vitro* においてグルコースの拡散速度を遅らせることを明らかにした<sup>3,4)</sup>。今回は，ニンジン，ゴボウ，ミズおよびリンゴの水不溶性食物繊維を用いて，*in vitro* におけるグルコースの拡散速度に対する影響を同様に検討した。さらに，野菜の細胞壁を構成している多糖の中で含有量の高いペクチンとセルロースが加熱操作により *in vitro* でのグルコースの拡散速度にどのように影響を与えるかについて，市販のセルロース粉末とペクチンを用いて調べたのでその結果について報告する。

\* 弘前大学教育学部家政学科教室

Department of Home Economics, Faculty of Education, Hirosaki University

† 現在 北海道洞爺高等学校（〒049-5802 北海道虻田郡洞爺村字洞爺町58-3）

## 2. 実験方法

### 1) 材料

ニンジン、ゴボウ、リンゴおよびミズは弘前市内のスーパーマーケットより購入した。おからは朝日工業株式会社（埼玉県）の今野芳宏氏から恵与されたものである。

セルロース粉末はナカライテクス(株)から、ペクチン（レモン製）とカルボキシメチルセルロース（CMC）は和光純薬工業(株)から購入した。その他の試薬は市販特級品を用いた。

### 2) 水不溶性食物繊維の調製

ニンジン、ゴボウ、リンゴおよびミズ可食部の水不溶性食物繊維の調製は前報<sup>3)</sup>に従って行った。おから水不溶性食物繊維は80%熱メタノール処理後、前報<sup>3)</sup>に従って調製した。

### 3) 水不溶性食物繊維および CMC のグルコースの拡散速度に与える影響<sup>4)</sup>

各種水不溶性食物繊維 2 g に 1.5% グルコース溶液 50 ml を加え、スターラーで攪拌して試料を均一にした後に、透析膜（Seamless Cellulose Tubing, Size: 36/32, 三光純薬株式会社）に詰め、500 ml の蒸留水に対してスターラーで攪拌しながら透析した（図 1）<sup>4)</sup>。経時的（0 分、30 分、60 分、90 分および 120 分後）に透析外液の一部を採り、そのなかのグルコース量をフェノール・硫酸法<sup>5)</sup>にて求めた。対照として 1.5% グルコース溶液（50 ml）のみのものを同様に行った。

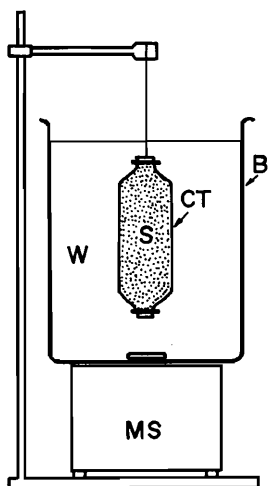


図1 食物繊維存在下におけるグルコースの拡散速度測定装置

W：蒸留水，B：ビーカー，MS：マグネチックスターラー，  
CT：セルロース透析膜，S：グルコースと食物繊維の混合物

### 4) セルロース粉末およびペクチンのグルコースの拡散速度に与える影響

市販セルロース粉末（C）および市販ペクチン（P）の混合比の異なる試料，C100（C：P=1.00 g：0 g），C75（C：P=0.75 g：0.25 g），C50（C：P=0.50 g：0.50 g），C25（C：P=0.25 g：0.75 g），および C0（C：P=0 g：1.00 g）をそれぞれ 8 点用意した。

それぞれの試料を 50 ml 容栓付き遠心管に入れ、蒸留水 25 ml を加えよく攪拌した後、100°C で 0 分、30 分、60 分および 120 分加熱し、室温まで冷却した。これにグルコースを 1.5% になるように加え、攪拌にて試料を均一にし、透析膜（Seamless Cellulose Tubing, Size: 36/32, 三光純薬株式会社）に詰め、300 ml の蒸留水に対してスターラーで攪拌しながら透析した。経時的（0 分、30 分、60 分、90 分および 120 分後）に透析外液の一部を採り、そのなかのグルコース量をフ

ェノール・硫酸法<sup>5)</sup>にて求めた。

### 5) 粘度測定

市販セルロース粉末と市販ペクチンを上述拡散速度実験と同様に計1 gとなるように混合し、蒸留水25mlを加え、100°Cで0分、30分、60分および120分加熱し、それぞれを室温まで冷却した。これにグルコースを1.5%の濃度になるように加え、よく攪拌し、遠心分離(3,000rpm, 30分)操作を行った。上清画分(熱水可溶性画分)の粘度を次の要領で測定した<sup>6)</sup>。すなわち、5 ml容メスピペットの目盛り5.0mlのところまで試料溶液を吸い上げ、目盛り3.0mlまで落下するのに要する時間を測定し、蒸留水で計測した値を1とし、その相対値で求めた。測定は室温20°Cの部屋で行った。

### 6) 水不溶性食物繊維の走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察

イオンスパッタリング装置 IB-3 型イオンコーター (エイコー・エンジニアリング製) により金蒸着し、走査型電子顕微鏡 S-2460N (日立製作所製) で観察した。加圧電圧は18kVであった。

## 3. 結果および考察

ニンジン、ゴボウ、リンゴおよびミズ可食部の水不溶性食物繊維 (図2にリンゴの水不溶性食物繊維の電子顕微鏡観察の写真を示す) の *in vitro* におけるグルコースの拡散速度におよぼす影響を調べるために、図1に示すような装置<sup>4)</sup>を用いて、グルコースの透析速度を測定した。

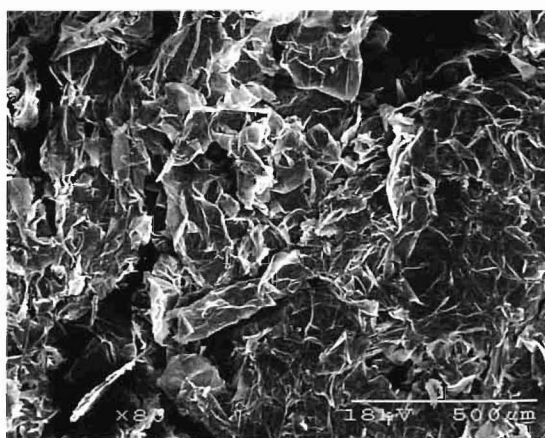


図2 リンゴ水不溶性食物繊維の走査型電子顕微鏡による観察

透析開始後120分まで、経時的に透析膜外溶液中のグルコース量を測定した結果(透析膜の外に出たグルコースの割合)をまとめたものが図3である。透析時間120分における値で比較してみると、対照のグルコースのみのものに比べて、ミズでその68%, セルロース粉末で67%, リンゴとゴボウで79%, おからで85%, ニンジンで89%となり、繊維の存在で外液のグルコースの量が少なくなっていること、しかも種類でその値に違いがみられることがわかる。すなわち、グルコースの拡散速度は繊維の存在で遅くなることが示された。また、水不溶性食物繊維との

比較に用いた水可溶性食物繊維の一つでセルロース誘導体であるカルボキシメチルセルロース (CMC) の場合は、透析開始後120分で、グルコースのみの場合の値の52%となり、かなり拡散が阻害されていることがわかる。今回のこの実験結果から、先にみられたダイコン、キャベツおよびタケノコ水不溶性食物繊維の低分子糖を一時的に抱え込み、低分子糖の拡散速度に影響を与える性質<sup>3,4)</sup>は普遍的なものと結論することができる。

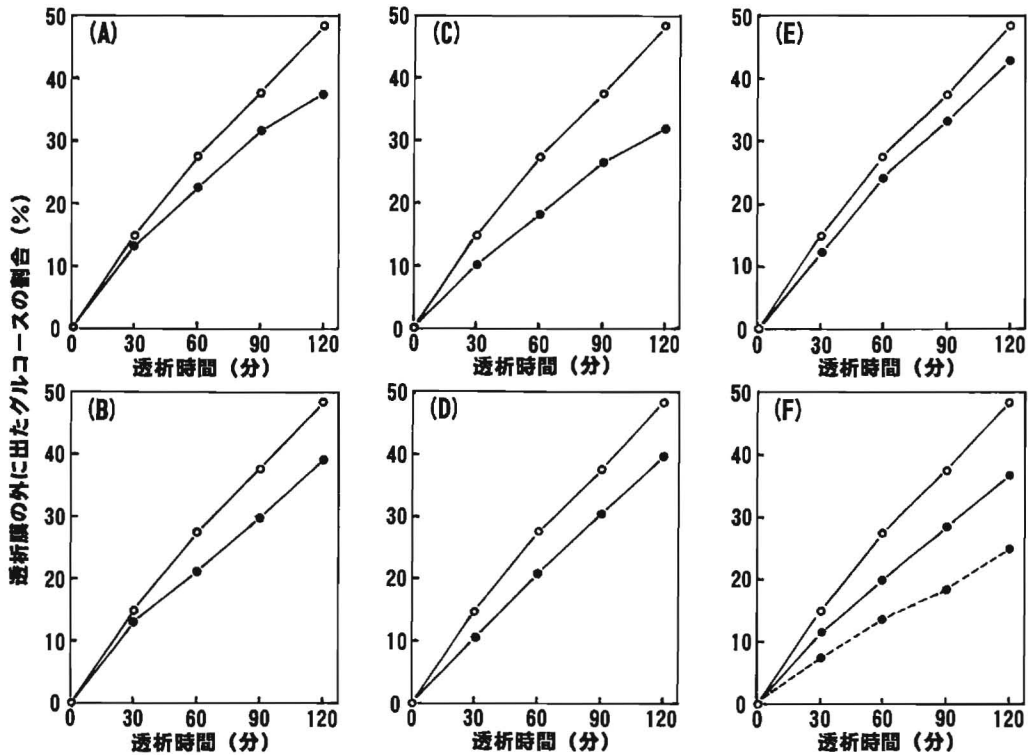


図3 各種食物繊維のグルコースの *in vitro* における拡散速度に与える影響  
(A), ゴボウ; (B), リンゴ; (C), ミズ; (D), おから; (E), ニンジン; (F), セルロースと CMC。—○—, グルコースのみの場合; —●—, グルコースに各種食物繊維を加えた場合。(F)では—●—が市販セルロースで, --●--が CMC である。

われわれが日常摂取する野菜類は生食するのみならず、加熱調理後食に供するものも多い。水不溶性食物繊維の中には加熱操作で一部可溶化するものもある。また、水可溶性食物繊維には加熱により構造変化が生ずるものもある。

これまでに筆者らは日常の食生活で摂取する機会の多い葉菜類、根菜類および果菜類の炭水化物組成を調べてきた<sup>7-9)</sup>。ペクチン様物質(可溶性および不溶性の両者)、ヘミセルロースおよびセルロースに分類したときの構成比率をまとめてみると表1のようになる。細胞壁構成多糖類の中でペクチン様物質(主にポリガラクトuronやラムノガラクトuronで他にアラビノガラクトンなどを含む)とセルロースが主要な多糖類であることがわかる。そこで、市販セルロース粉末と市販ペクチンを用いて、加熱操作がこれら多糖が持つグルコースの *in vitro* における拡散速度にどのような影響を与えるかについて検討した。

表1 主要葉菜類、根菜類及び果菜類細胞壁のペクチン様物質、ヘミセルロース及びセルロースの割合

野 菜	細胞壁多糖 (%)		
	ペクチン様物質	ヘミセルロース	セルロース
葉菜類			
キャベツ	46	11	43
ハクサイ	42	10	49
ハウレンソウ	31	17	53
チンゲンサイ	45	14	42
レタス	47	9	44
根菜類			
カブ	47	16	37
ダイコン	52	11	38
ゴボウ	47	9	44
ニンジン	54	6	39
レンコン	34	21	45
果菜類			
ナス	54	15	31
ピーマン	54	18	28
キュウリ	49	20	31
カボチャ	50	16	35
モヤシ	48	19	33

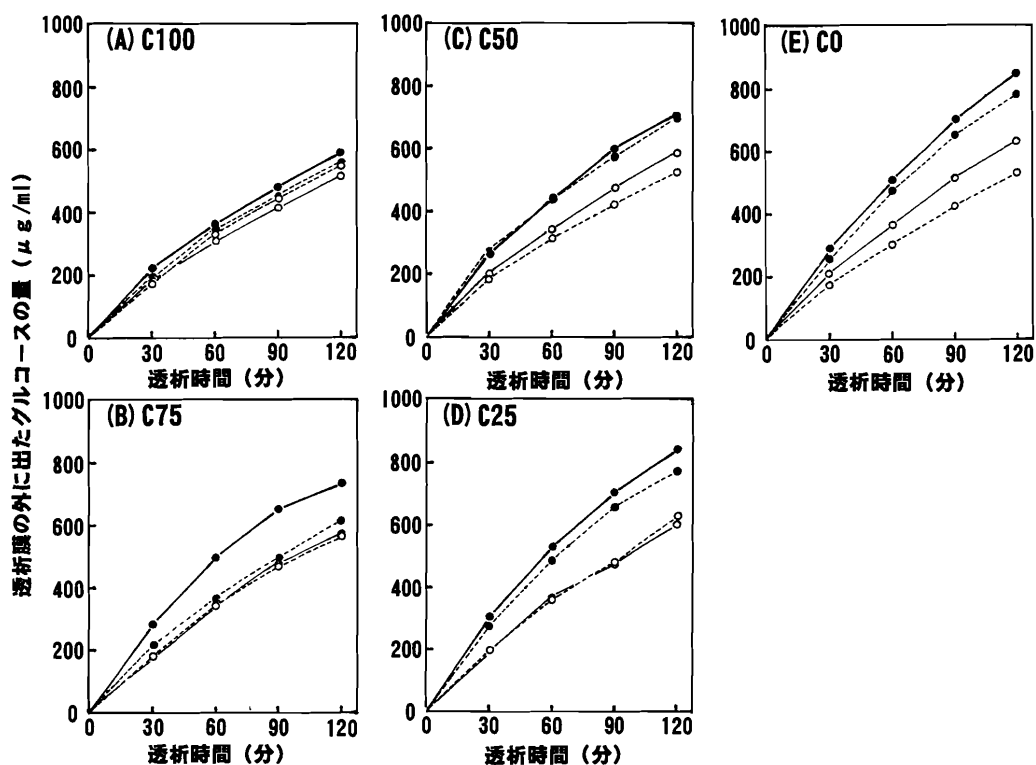
図4 グルコースの拡散に対する市販セルロースと市販ペクチンの加熱時間の影響  
--○--, 加熱0分; —○—, 加熱30分; --●--, 加熱60分; —●—, 加熱120分。

図4のAおよび図4のEはそれぞれ、セルロース粉末100%の場合(C100)およびペクチン100%の場合(C0)に加熱時間が拡散速度におよぼす影響をまとめたものである。セルロースは加熱時間が増加しても拡散速度に与える影響は加熱前(加熱0分)とほとんど変わりがなかった。一方、ペクチンの場合、加熱時間の増加とともに、透析膜外液中のグルコース量は加熱前(加熱0分)に比べ増加していることがわかる。すなわち、拡散速度阻害率が加熱時間の増加とともに減少することを示している。さらに、セルロースとペクチンが共存する場合(C75, C50及びC25)でも、同様に、加熱時間の増加にともない、拡散阻害率が減少することが示された(図4のB, CおよびD)。

つぎに、この減少が何に由来するのかを検討するために、加熱後の可溶性画分の粘度について調べた(表2)。ペクチンは加熱前には非常に粘性があるが、加熱時間の増加にともなって、それが減少していることがわかる。すなわち、これはペクチン分子の低分子化がおこっていることを示している。一般に、ペクチンのポリウロナイド鎖は、中性pHで加熱するとメチルエステル化残基の部分で切断( $\beta$ -あるいは転移脱離により)されることが知られている。また、アルカリ性のpHの下ではメチルエステル基のケン化も生じること、さらにはペクチンの加熱時のpH安定範囲は3~4.5であることも知られている<sup>10)</sup>。

食物繊維のもつ物理化学的性質の一つに拡散阻害作用がある。この性質は特に水可溶性食物繊維が著しいとされている。食物繊維の持つ生理効果の食後血糖値の上昇抑制効果は、水可溶性食物繊維の拡散阻害作用によるとされている<sup>1)</sup>。

表2 市販セルロースとペクチン混合物の加熱前後の粘度変化

加熱時間 (分)	試料				
	C100	C75	C50	C25	C0
	相対粘度				
0	1.12	1.32	2.56	6.41	20.03
30	1.09	1.32	2.24	7.12	16.65
60	1.12	1.29	1.59	1.68	2.15
120	1.12	1.29	1.21	1.68	1.32

試料C100, C75, C50, C25およびC0は、セルロースとペクチンの比がそれぞれ100:0, 75:25, 50:50, 25:75および0:100である。

食物繊維の大部分は植物性食品のいわゆる植物細胞壁に由来するといっても過言ではない。野菜を摂取する際、生食するものもあれば、加熱調理後食に供するものもある。今回の市販セルロース粉末とペクチンを使用したモデル実験の結果は、明らかに、加熱操作が植物性食品すなわち植物細胞壁の主要多糖である水可溶性および水不溶性の両ペクチンの物性を著しく変化させ、それが生理効果にも大きな影響を与える可能性を示唆している。ペクチンの起源によりグルコースの拡散に及ぼす影響が異なること、そして、必ずしも粘度と拡散抑制作用は一致しないことも報告されている<sup>11)</sup>。今後、各種野菜類由来の水不溶性食物繊維の加熱前後での、*in vitro*におけるグルコースの拡散抑制を比較することが重要であると思われる。

#### 引用文献

- 1) 印南 敏, 桐山修八編: 改訂新版食物繊維, 第一出版株式会社, 東京, (1995)
- 2) Kritchevsky, D.: Dietary fiber, *Ann. Rev. Nutr.*, 8, 301 (1988)

- 3) 加藤陽治, 秋山美香: 水不溶性食物繊維カラムによるデキストランおよびマルトデキストリンのゲル濾過クロマトグラフィー, 日本栄養・食糧学会誌, **46**, 161 (1993)
- 4) 加藤陽治: 水不溶性食物繊維のグルコースの*in vitro*における拡散速度に与える影響, 日本栄養・食糧学会誌, **46**, 351 (1993)
- 5) Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F.: Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.*, **28**, 350 (1956)
- 6) Huber, D.J. and Nevins, D.J.: Preparation and properties of a  $\beta$ -D-glucanase for the specific hydrolysis of  $\beta$ -D-glucans. *Plant Physiol.*, **60**, 300 (1977)
- 7) 加藤陽治, 松倉純子: 主要葉菜類の炭水化物組成, 弘前大学教育学部紀要, **71**, 61 (1994)
- 8) 加藤陽治: 主要根菜類の炭水化物組成, 弘前大学教育学部紀要, **74**, 37 (1995)
- 9) 加藤陽治: 主要果菜類の炭水化物組成, 弘前大学教育学部紀要, **78**, 99 (1997)
- 10) 桜井直樹, 山本良一, 加藤陽治: 植物細胞壁と多糖類, 176頁, 培風館, 東京, (1991)
- 11) Ebihara, K., Masuhara, R. and Kiriya, S.: Major determinants of plasma glucose-flattening activity of a water-soluble dietary fiber ; effects of konjac mannan on gastric emptying and intraluminal glucose-diffusion. *Nutr. Rep. Int.*, **23**, 1145 (1981)

(1999.1.7 受理)