

研究内容および研究成果の概要（セルロース被覆米による血糖コントロールの試み）

高橋 徹、鈴木英勝、神田知子、丸山智美

1. はじめに

現在、日本では糖尿病患者が増加しており、社会問題になっている。厚生労働省は、生活習慣病の予防を緊急課題の一つとしており、健康日本 21 の中間評価（2005 年）では「糖尿病が強く疑われる人」と「糖尿病の可能性を否定できない人」の合計が約 1620 万人に達し、5 年前に比べて約 250 万人も増加している。このような現状の背景には食生活の欧米化による摂取エネルギーの増加、消費エネルギーの低下などがあり、予防が困難な社会環境にある。現在のところ糖尿病患者の治療は、薬物および食事療法による血糖値コントロールが一般的であるが、摂取エネルギーを制限すると、食事に満足感が得られないことから、実際には食餌療法の効果は必ずしも十分に得られていないと数多く報告されている。したがって、食に対して満足感を充足しながら血糖値をコントロールできる食品が、糖尿病予防の観点から緊急に求められている。

これまでの研究で、微結晶セルロースに耐糖能改善作用があることを明らかにしてきた (Takahashi et al. 2005, Takahashi 2009)。さらに、セルロースの機能を米に付加した「セルロース被覆米」を技術的に改良し、昨年特許を申請した (高橋徹ら 特開 2008-73026)。セルロース被覆米は、食事満足度を減少させることなく、糖尿病の予防や治療できる可能性が高い。実際に食味に関しては官能試験において良好な結果を得ている。本研究では、セルロース被覆米の機能性をヒト試験で明らかにして、セルロース被覆米の実用性を評価することが目的である。

2. 方法

2-1. セルロース被覆米

セルロース被覆米は、結晶セルロース (Ceolus ST-02、旭化成ケミカルズ株式会社) を米重量に対して 5% (含量では 4.7%、表 1) を無洗米 (富山産コシヒカリ、幸南食糧株式会社) の表面に付着させた加工米であり、日進ドルチェ株式会社で作成した。被覆に用いたコーティング剤は、難消化性デキストリン (ファイバーソル 2、松谷化学株式会社) が主成分である (Table 1)。また、難消化性デキストリン主成分のコーティング剤のみで被覆した無洗米 (難消化性デキストリン米) と、セルロース 5% を炊飯時に添加したセルロース添加米、無添加の無洗米 (コントロール米) も調整した (Table 1)。

Table 1. 米の成分組成 (g/100 g)

| | セルロース被覆米 | 難消化性デキストリン米 | セルロース添加米 | コントロール米 |
|-----------------------------|----------|-------------|----------|---------|
| 結晶セルロース (ST-02, アサヒ化成) | 4.7 | - | 4.7 | - |
| 難消化性デキストリン (Fibersol 2) | 5.1 | 5.1 | - | - |
| ビタミン E (α -50) | 0.0074 | 0.0074 | - | - |
| メチルセルロース (SM-200, 信越化学) | 0.0073 | 0.0073 | - | - |
| モノステアリン酸スクロース (S-290, 三菱化学) | 0.0035 | 0.0035 | - | - |
| モノステアリン酸スクロース (S-770, 三 | 0.0033 | 0.0033 | - | - |

2-2. 飯の調節

2-2-1 保水力測定

セルロースを添加した場合、セルロースが吸水した結果、水が足りなくなって飯が堅くなる。飯の堅さは血糖変動に影響を与えるため（高橋 未発表）、飯自体の堅さ一致させるため、セルロースの保水量分を増加させて加水して炊飯した。セルロースの保水力は透析膜法で測定した（Stephen & Cummings, 1979）。透析膜法は、透析膜の中に試料を入れて透析液に浸して吸水を測定する方法である。透析液は、塩化カルシウム 0.22198g、塩化ナトリウム 5.844g、炭酸水素カリウム 3.0036g、炭酸水素ナトリウム 0.8401g を蒸留水 1 L で溶解した。その後、塩酸で pH6.8 に調整した。浸透圧測定直前に、細菌の繁殖を抑えるために液にチメロサル 0.01g (1 mol) を透析液に溶解した。

長さ約 5 cm ビスキングチューブ (VISKING^R dialysis tubing, 20/32) にセルロース (セオラス ST-02、旭化成ケミカルズ株式会社) を入れて、ビスキングチューブの両端をプラスチックチューブ鉗子でとめ、100 mL ビーカーに透析液を 100 mL 入れ、インキュベーター内で 24 時間 37°C で静置して試料に吸水させた。24 時間後、透析液にポリエチレングリコール 4000 (分子量 2700~3500) を 4.2g (42 g/L) 溶解し、ビスキングチューブをこの透析液に浸して 37°C で 24 時間静置させた。試料が吸水した水の重量を測定して、セルロースの保水力を求めた。なお、ポリエチレングリコール 4000 は、消化管管腔内の浸透圧に近づけるために用いた (Stephen & Cummings 1979)。

2-2-2. 炊飯時における加水量

セルロースの保水力測定によりセルロース 1 g の保水力は 1.60 mL 水/g 米 となった。この数値から、米 400 g を炊飯する場合の加水量を下記の数式①で求めた。

セルロース添加米 (あるいはセルロース添加米) の加水量:

$$\begin{aligned} (\text{米}400\text{ gに対する加水}) : 600\text{ ml} + (\text{セルロース}20\text{ gの保水量}) : 32\text{ g} & (20 \times 1.60\text{ ml/g}) \\ = 632\text{ ml} & \text{数式①} \end{aligned}$$

2-2-3. 炊飯方法

米の炊飯方法については、セルロースの保水力から求めた定量の水を加え30分間浸漬後、炊飯器 (National SR-ULH10) を用いて炊飯し、炊飯が終了したら電源を切り10分間蒸らして行った。

2-2-3. 米のデンプン含量

血糖値測定時に摂取する飯のデンプン量を統一させるため、飯全重量から水分、たんぱく質、食物繊維、灰分重量の値からデンプン含量を求めた。米の脂質は非常に含量が低く無視できるため (AOAC 1995)、考慮しないものとした。水分は常圧加熱乾燥法 (AOAC 1995) で、たんぱく質はケルダール法 (AOAC 1995) で、食物繊維はプロスキー変法 (AOAC 1995) で、灰分は直接灰化法 (AOAC 1995) によって定量した。4 種の米を炊飯後に凍

結乾燥機 (TAIYO VD-400) で一晚凍結乾燥させた後、粉碎機 (Vita-mix corp OSAKA CHEMICALCO., LTD) で粉状にして分析に用いる試料として分析した (Table 2)。

Table 2. 飯 (炊飯した米) の成分分析 (g/100g)

| | 難消化性デキス | | | |
|----------|----------|------|----------|---------|
| | セルロース被覆米 | トリン米 | セルロース添加米 | コントロール米 |
| 水分 | 62.7 | 61.9 | 62.2 | 60.5 |
| 灰分 | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 0.14 |
| 粗タンパク | 2.24 | 2.86 | 2.10 | 3.00 |
| 非水溶性食物繊維 | 5.03 | 0.61 | 4.21 | 0.66 |
| 水溶性食物繊維 | 1.29 | 3.20 | 0.101 | 0.420 |
| デンプン | 26.6 | 26.3 | 26.3 | 28.6 |

2-6. 食後血糖の測定

ヒト介入試験であるため、美作大学設置の生命倫理委員会での認可取得と対象者 12 名に対して書面でインフォームドコンセントを得た。被験者は前日 18 時以降絶食し当日の朝は絶食・絶水してもらった。4 種類を設定し、被験者には異なる 4 種の米を 1 日に 1 種類食べてもらい、週に 1 度採血を行い、4 週間にわたって行った。一人あたりの飯摂取量はデンプン量で 50g とし、有効桁数を 2 桁に設定したところ、セルロース被覆米とセルロース添加米で 190 g、難消化性デキストリン米で 180 g、コントロール米で 160 g となった。一口あたりの摂取量を 10g とし、咀嚼回数は 35 回、咀嚼速度は 0.7 秒/ 1 回で飲み込みのタイミングもメトロノームに合わせて一致させた。また、被験者には質問票を配布し、体調や前日の活動量や晩御飯の時間・量などから、一人絶食の条件が充分でない者がいた。参加を途中で断念した者一人を合わせて、2 名の被験者をデータから外し、10 名で分析を行った。飯摂取後、0 分 (摂取前)、30 分、45 分、60 分、90 分、120 分、180 分に採血した。採血した血液は、血漿を作成して、血糖をグルコース C-II (wako) を用いて測定した。

2-4. 咀嚼物の粘度の測定

胃内容物の物性が血糖に影響を与えるため (Jenkins et al 1978, Edwards 1987, Johansen 1993, Takahashi et al 2005)、胃に到達する程度に咀嚼した飯の物性を測定した。飯の咀嚼速度は 0.7 秒/ 1 回で 37 回、すなわち血糖測定と同条件で被験者が咀嚼した飯を 1L 採取し、米粒が入った状態での咀嚼物の粘度を測定した。粘度計は自作の粘度計で、数十 mm 程度の粒子を含んだ流体の粘度の測定が可能である (Takahashi and Sakata 2002)。

2-5. 官能評価

血糖測定の最終日に被験者 10 名にコントロール米、難消化性デキストリン米、セル

ロース被覆米、セルロース添加米の4種類の嗜好調査を行った。嗜好調査項目は外観、硬さ、食べやすさ、水分、残存感、味、毎日食べられるか、総合評価の8項目で行った。

3. 結果

3-1. 血糖値測定

血糖については、4種の米の間で違いが認められた ($p < 0.05$ フリードマン検定)。フリードマン専用の多重比較 (Siegel & Castellan 1988) の結果、血糖は高い順にコントロール米 = 難消化性デキストリン米 > セルロース被覆米 > セルロース添加米となった (Fig. 1)。

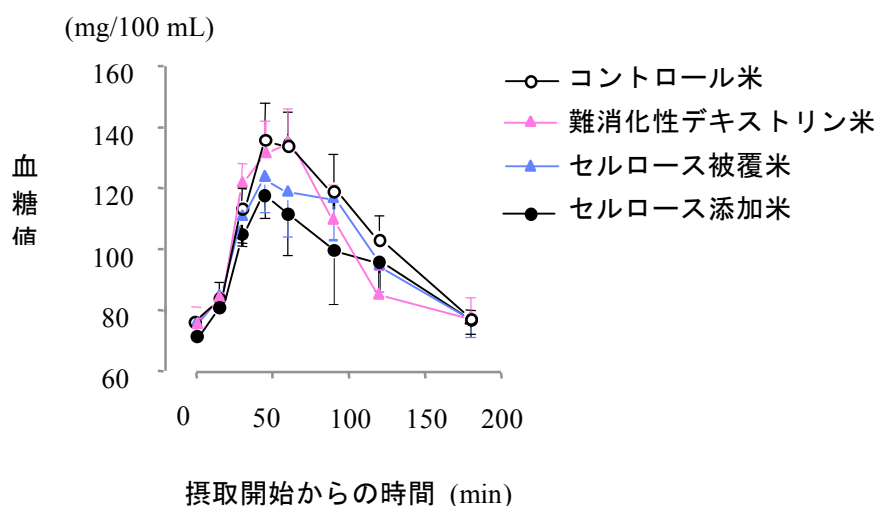


Fig. 1. セルロース添加が血糖変動に与える影響

3-2. 咀嚼物の粘度

咀嚼物の粘度については、ずり速度を共分散因子とし、米の種類を要因として共分散分析を行った。その結果、米の種類が異なると咀嚼物の粘度が異なることが明らかになった ($p < 0.04$)。多重比較の結果、セルロース添加米はコントロール米よりも高い値が認められた ($p < 0.05$ Tukey multiple comparison、Fig. 2)。

(Pa · s)

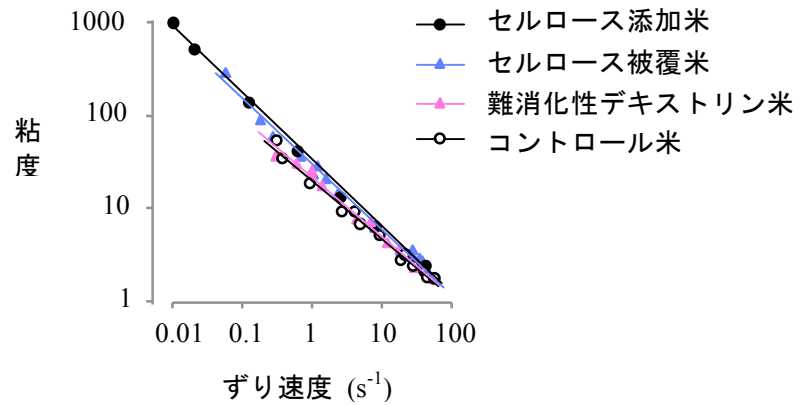


Fig. 2. セルローズ添加が咀嚼物の粘度に与える影響

3-3. 官能評価

官能試験の結果、米の「総合評価」はコントロール米よりもセルローズ添加米およびセルローズ添加米の方低い値が認められた ($p < 0.05$, Tukey multiple comparison)。

4. 考察

セルローズ添加米とセルローズ被覆米共に、コントロール米よりも食後血糖が低いことが認められた ($p < 0.05$)。一方で難消化性デキストリン米はコントロール米と血糖については有意差が認めなかった。難消化性デキストリンは血糖が高めのヒトに対して血糖変動を緩やかにする働きがある。本試験では被験者に健常者を用いた。健常者では、セルローズ 4.7 g/100g の影響は難消化性デキストリン 5.1 g/100g よりも大きいと考えられる。

咀嚼物の粘度は、セルローズ添加米でコントロール米よりも高い値が認められた ($p < 0.05$)。咀嚼物は燕下される直前の咀嚼状態を設定した。そのため、胃内容物の物性に近いと考えられる。胃内容物の粘度が高い場合、胃からの排出速度が抑えられて、食後血糖が緩やかになる (Jenkins et al 1978, Edwards 1987)。セルローズ添加米やセルローズ被覆米に見られる血糖上昇緩和作用は、セルローズによって咀嚼物粘度上昇を引き起こし、胃内容物の粘度も上昇して、胃排出を緩やかにし、血糖上昇率を抑制した可能性が考えられる。

また、セルローズは小腸においてもグルコース吸収速度を遅くし、食後血糖を緩やかにする (Takahashi et al. 2005)。セルローズ添加米やセルローズ被覆米中のセルローズの血糖上昇緩和作用は胃および小腸で効果があった可能性がある。

セルローズ添加米やセルローズ被覆米の間には血糖変動においても咀嚼物の粘度においても差は認められなかった。セルローズ被覆米は、米一粒一粒をコーティング加工することによって、コストが掛かる。しかし、炊飯時には無洗米と変わらず、手間が掛からない利点がある。一方、セルローズ添加米は、炊飯時にセルローズを添加する作業

が必要になるが、食品添加用のセルロースの値段が非常に安いことから、経済的であるという利点がある。今後は、経済的な面と利便性との両方のバランスについても検討する必要がある。

4種の米の官能試験の結果、セルロース添加米およびセルロース被覆米がコントロール米よりも総合評価が低かった ($p < 0.05$)。セルロース粉末のざらざらした舌触りが、低い評価をもたらしたと考えた。セルロース被覆米は、糖尿病予防を念頭に置いて作製している。そのため、健常者に日常的に食してもらうことが必要であり、美味しさは重要な要因である。この結果を受けて、今後は美味しい加工米を目指して改良を続けていく必要がある。

引用文献

AOAC (1995) Official Methods of Analysis (16th edn). Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA. Stephen A. M. and Cummings J. H. (1979) Water-holding by dietary fiber *in vitro* and its relationship to fecal output in man. *Gut*: 20, 722–729.

Edwards C. A., Blackburn N. A., Craigen L. D., Davison P., Tomlin J., Sugden K., Johnson I. T. and Read N. W. (1987) Viscosity of food gums determined *in vitro* related to their hypoglycemic actions. *Am J Clin Nut*: 46, 72–77.

Jenkins D. J., Wolever T. M., Leeds A. R., Gassull M. A., Haisman P., Dilawari J., Goff D. V., Metz G. L. and Alberti K. G. (1978) Dietary fibres, fibre analogues and glucose tolerance: importance of viscosity. *Br Med J*: 1(6124), 1392–1394.

Johansen H. N. (1993) Dietary fibre from oats: Physico-chemical properties and physiological function in the stomach and small intestine of pigs. PhD Thesis, The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen.

Siegel S. and Castellan, N. J. Jr. (1988) Nonparametric statistics for the behavioral sciences, 2nd ed. McGraw-hill Book Company.

Takahashi T. (2009) Cellulose. In: Cho S. (ed) The Handbook of fiber Ingredients: Health benefits, Food Applications, and Analysis. CRC press Boca Raton, FL.

Takahashi T. and Sakata T (2005) Insoluble dietary fibers: the major modulator for the viscosity and flow behavior of digesta. *Foods & Food ingredients J. jpn.* 210: 944–953.

Takahashi T., Karita S., Ogawa N., Goto M. (2005) Crystalline cellulose reduces plasma glucose concentration and stimulates water absorption by increasing the digesta viscosity in rats. *J Nutr*: 135, 2405–2410.

高橋徹, 丸山智美, 神田知子, 船越宣博, 新田見好美 (2006) 不溶性結晶セルロース添加米及びその製造方法. 特許申請, 特開 2008-73026