

平成 27 年度学位論文

食物繊維共存下での米飯摂取後の血糖応答に関する研究

昭和女子大学

生活機構研究科

生活機構学専攻

不破 眞 佐 子

目 次

序論	1
第1章 炊飯時に添加した寒天が米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響	11
1.1. 緒言	11
1.2. 実験材料および方法	11
1.2.1. 試料	11
1.2.2. 力学特性の測定方法	11
1.2.3. 熱特性の測定方法	12
1.2.4. 官能評価の測定方法	12
1.2.5. 血糖値の測定およびグリセミックインデックスの算出方法	12
1.2.6. 統計処理	13
1.3. 実験結果	13
1.3.1. 力学特性	13
1.3.2. 熱特性	15
1.3.3. 官能評価	15
1.3.4. 血糖値およびグリセミックインデックス	23
1.4. 考察	23
1.5. 要約	28
第2章 グルコマンナンおよび「しらたき」が米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響	29
2.1. 緒言	29
2.2. 実験材料および方法	29
2.2.1. 試料	29
2.2.2. 血糖値の測定およびグリセミックインデックスの算出方法	30
2.2.3. グルコース放出量の測定方法	30
2.2.4. 組織観察	32
2.2.5. テクスチャー特性の測定方法	32

2.2.6. 熱特性の測定方法	32
2.2.7. 官能評価の測定方法	32
2.2.8. 統計処理	34
2.3. 実験結果	34
2.3.1. 血糖値	34
2.3.1.1. グルコマンナン添加米飯	34
2.3.1.2. しらたき混合米飯	34
2.3.2. グリセミックインデックス	37
2.3.3. グルコース放出量	37
2.3.4. 組織観察および炊飯による重量変化	37
2.3.5. テクスチャー特性	42
2.3.6. 熱特性	42
2.3.7. 官能評価	46
2.4. 考察	46
2.5. 要約	50
第3章 形態の異なる κ -カラギーナンが米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響	52
3.1. 緒言	52
3.2. 実験材料および方法	52
3.2.1. 試料	52
3.2.2. 組織観察	53
3.2.3. テクスチャー特性の測定方法	53
3.2.4. ゲル食塊の状態観察	53
3.2.5. 熱特性の測定方法	53
3.2.6. 血糖値の測定およびグリセミックインデックスの算出方法	53
3.2.7. グルコース放出量の測定方法	54
3.2.8. 官能評価の測定方法	54
3.2.9. 統計処理	54

3.3. 実験結果	55
3.3.1. 組織観察	55
3.3.2. テクスチャー特性	55
3.3.3. ゲル食塊の状態	55
3.3.4. 熱特性	61
3.3.5. 血糖値	61
3.3.5.1. κ -カラギーナン添加米飯	61
3.3.5.2. κ -カラギーナンゲル混合米飯	65
3.3.5.3. CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲル混合米飯	65
3.3.6. グリセミックインデックス	66
3.3.7. グルコース放出量	66
3.3.8. 官能評価	69
3.4. 考察	69
3.5. 要約	74
 第4章 キサンタンガムが米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響	 77
4.1. 緒言	77
4.2. 実験材料および方法	77
4.2.1. 試料	77
4.2.2. 血糖値の測定およびグリセミックインデックスの算出方法	78
4.2.3. グルコース放出量の測定方法	78
4.2.4. テクスチャー特性の測定方法	78
4.2.5. 米飯粒の形状観察	79
4.2.6. 官能評価の測定方法	79
4.2.7. 統計処理	79
4.3. 実験結果	79
4.3.1. キサンタンガム添加米飯	79
4.3.1.1 血糖値、グリセミックインデックスおよびグルコース放出量	79

4.3.1.2. テクスチャー特性	81
4.3.1.3. 炊飯による米飯粒の長さおよび重量変化	81
4.3.1.4. 官能評価	86
4.3.2. キサンタンガムゾル混合米飯	86
4.3.3. キサンタンガムゾル摂取時期の血糖値への影響	89
4.4. 考察	89
4.5. 要約	93
 第5章 グアーガムが米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響	 95
5.1. 緒言	95
5.2. 実験材料および方法	95
5.2.1. 試料	95
5.2.2. 血糖値の測定およびグリセミックインデックスの算出方法	96
5.2.3. グルコース放出量の測定方法	96
5.2.4. テクスチャー特性の測定方法	96
5.2.5. 米飯粒の形状観察	96
5.2.6. 官能評価の測定方法	97
5.2.7. 動的粘弾性の測定方法	97
5.2.8. 統計処理	97
5.3. 実験結果	97
5.3.1. グアーガム添加米飯	97
5.3.1.1. 血糖値、グリセミックインデックスおよびグルコース放出量	97
5.3.1.2. テクスチャー特性	99
5.3.1.3. 炊飯による米飯粒の長さおよび重量変化	99
5.3.1.4. 官能評価	99
5.3.2. グアーガムゾル混合米飯	104
5.3.3. グアーガムゾル摂取時期の血糖値への影響	106
5.4. 考察	106
5.5. 要約	112

第6章 食物繊維の種類による米飯摂取後の血糖応答の相違	113
6.1. 緒言	113
6.2. 結果および考察	113
第7章 結語	119
参考文献	123
謝辞	131

In this paper, the effect of dietary fiber on the glycemic response after ingestion of cooked rice was examined. Agar to form a gel, glucomannan (GM) to gel by heating after the alkali treatment, κ -carrageenan (κ -CG) gelling in cation also alone, xanthan gum (XG) and guar gum (GG) to form a sol, were used as a dietary fiber. The various types of dietary fiber were cooked with raw rice (hereafter: rice cooked with dietary fiber) or mixed with cooked rice as a gel or sol (hereafter: cooked rice mixed dietary fiber). As an indicator of the glycemic response, a blood sugar response curve, the glycemic index (GI) in vivo, and the glucose release rate (GR) in vitro were used. Furthermore, to elucidate the cause of the influence of dietary fiber on the glycemic response, textural properties and thermal properties of these foods were measured.

In Chapter 1, the effects of agar were examined. The increase in the blood sugar level after ingestion of rice cooked with agar (agar-supplemented cooked rice) was slow to rise as compared to unsupplemented cooked rice (standard rice), and a decreased maximum blood sugar level was observed. GI decreased at $\geq 1.7\%$ of rice cooked with agar. Thermal characteristics according to the heating and cooling DSC curve and textural properties of cooked rice grains indicated suppression of rice gelatinization.

In Chapter 2, the influence of GM was examined. The blood sugar level after cooked rice with GM, at $\geq 2.0\%$ of rice cooked with GM, 30 minutes after ingestion, the blood sugar level dropped as compared to the standard rice. GI decreased at $\geq 1.0\%$ of rice cooked with GM, whereas GR decreased at all proportions. The shape of rice grains, mechanical characteristics, and thermal properties indicated suppression of rice gelatinization by GM. When shirataki made from GM was mixed with cooked rice, at 2.0% of added shirataki, 30 minutes after ingestion, the blood sugar level and GI decreased in comparison with the standard rice, indicating that the influence on the blood sugar level was weak.

In Chapter 3, the effects of κ -CG was examined. After ingestion of κ -CG-supplemented rice, at $\geq 1.0\%$ of added κ -CG, the glycemic response and GI decreased as compared to the standard rice, and GR decreased at all proportions. The shape of rice grains and mechanical characteristics were suggestive of suppression of rice gelatinization. After ingestion of rice mixed with a CaCl_2 -without κ -CG gel, at $\geq 1.0\%$ of the added dietary fiber, the

glycemic response and GI decreased in comparison with that in the standard rice, and GR decreased for the 1.6% mixture. GI and GR of the rice mixed with the CaCl_2 -without κ -CG gel were almost identical to those of the standard rice. The reason for the difference in the above-mentioned types of rice is the weak bond that causes the CaCl_2 -without κ -CG gel to dissolve at the body temperature or lower.

In Chapter 4, on the basis of the results from Chapter 3, the effects of sol-forming XG were examined. At $\geq 1.0\%$ of added XG, the glycemic response to ingestion of XG-supplemented cooked rice decreased compared with that in the standard rice, whereas GI decreased at all proportions and GR decreased at 2.5%. On cooked rice grains, the filamentous or filmy XG was observed between the rice grains. At all proportions of an XG sol, after ingestion of rice mixed with the XG sol, the glycemic response, GI, and GR decreased as compared to the standard rice. If the XG sol was consumed 10 minutes before or after the ingestion of cooked rice, GI was not significantly different from the control values (standard rice).

In Chapter 5, the influence of GG was examined. After ingestion of GG-supplemented rice, the glycemic response and GR decreased in comparison with the standard rice, and GI decreased at $\geq 1.0\%$ of added GG. The shapes and weight of the rice gains and mechanical characteristics indicated suppression of rice gelatinization by GG. The glycemic response to ingestion of rice mixed with a GG sol at all proportions decreased as compared to the standard rice. GI decreased with the 0.5% and 1.0% mixture, and GR decreased at all proportions.

In Chapter 6, a cross-sectional comparison of the glycemic responses to ingestion of cooked rice for all types of dietary fiber used in this study versus the standard cooked rice was conducted. The suppression on the blood sugar level after ingestion of cooked rice was shown at low concentration of κ -CG-supplemented rice as compared to the other types. As for the rice mixed with dietary fiber, in comparison with cooked rice mixed with the other dietary fibers, the suppression on the blood sugar level was shown by cooked rice mixed with XG and GG at low concentration.

According to these results, the influence of dietary fiber on the glycemic response to ingestion of cooked rice is shown at high concentration in the presence of a gel that does not dissolve at the body temperature, somewhat

at low concentration for a gel with weak bonding that dissolves at the body temperature. In the case of gelatinization of rice and the presence of a sol, the influence of XG on the glycemic response to ingestion of cooked rice was shown at lower concentration. In other words, the strong suppressive effect of dietary fiber on the blood sugar level after ingestion of cooked rice can be attained by covering cooked rice with a sol prior to consumption. The strength of this effect is tightly linked to the robustness of sol structure and dependent on the structure of the dietary fiber and its physical characteristics.

序論

日本では国民健康・栄養調査が実施されているが、その中で 20 歳以上の糖尿病が強く疑われる者と糖尿病の可能性が否定できない者の数は、1997 年に 1370 万人、2002 年に 1620 万人、2007 年に 2210 万人、そして 2012 年で 2050 万人と報告されており、極めて多い数で推移している¹⁻⁴⁾。高血糖の状態が継続すると、主に糖尿病性神経障害、糖尿病性網膜症、糖尿病性血管障害や糖尿病性腎症等の合併症を引き起こすことが知られており、その他にも体内のあらゆるところで障害が発症することが知られている⁵⁾。

糖尿病は、1 型糖尿病と 2 型糖尿病の 2 種類に大きく分類される。1 型糖尿病は、自己免疫機序などにより膵臓中の β 細胞が破壊されて、絶対的インスリン欠乏により発症する。2 型糖尿病は、インスリン分泌低下が主因となってインスリンの相対的不足により発症するものと、インスリンの抵抗性が主因となってインスリンの相対的不足により発症するものがある⁶⁾。糖尿病患者の中で 2 型糖尿病患者の占める割合は極めて高く、2 型糖尿病の発症を食い止めることは、現代社会が抱える課題ともいえる。

2 型糖尿病の誘発要因の一つとして、糖質や脂質を多く含む高エネルギー食の摂取と運動不足が挙げられる。日本糖尿病学会では、糖尿病に対する食事療法の指針の一つとして、食物繊維の摂取量を増加させるよう推奨しており⁷⁻⁹⁾、食物繊維の摂取量と糖尿病の発症に関する報告^{10,11)}もなされている。日本人の食事摂取基準（2015 年版）¹²⁾における成人の食物繊維の 1 日の摂取目標量は、17～20g 以上とされているが、2013 年の国民健康・栄養調査の結果¹³⁾では、14.2g と報告されており、摂取量も不足している。

食物繊維の定義は、米国穀物科学協会（American Association of Cereal Chemist）では「食物繊維とは植物の可食部であるか類似の炭水化物で、ヒトの小腸で消化吸収されにくく、大腸で完全にあるいは部分的に発酵を受けるものである。食物繊維には多糖類、オリゴ糖、リグニン、および関連する植物性物質が含まれる。食物繊維は便通改善、血中コレステロールおよび血糖を低下させるなど、生理的に有益な効果を促進する。」としている。一方、米国健康局食品栄養課（Food and Nutrition Board of the US Institute of Health）では「食物繊維とは、植物に固有で処理をされていない非消化性の炭水化物およびリグニンである。添加される繊維とはヒトにとって有益な生理効果を持ち、分離された非消化性の炭水化物である。全繊維とは食物繊維と添加された繊維との総和である。」と定義している。また、各国によっても異なる定義がなされているが、食物繊維は、ヒトの消化酵素で分解吸収されないか、消化吸収され難く、ヒトにとって有益な生理作用を発現する植物成分である

としている点では共通している。

水溶性食物繊維と糖の吸収に関する報告¹⁴⁾では、糖の吸収は次の機序により影響を受けると述べられている。「食物繊維の吸水作用による膨潤が満腹感を上昇させる」、「食物繊維が高粘度であることにより、食物成分の拡散速度と消化吸収を遅延させる」、「食物繊維により小腸の運動性と収縮能を変化させる」、「食物繊維へ食物成分を吸着させる」などである¹⁵⁻²⁶⁾。

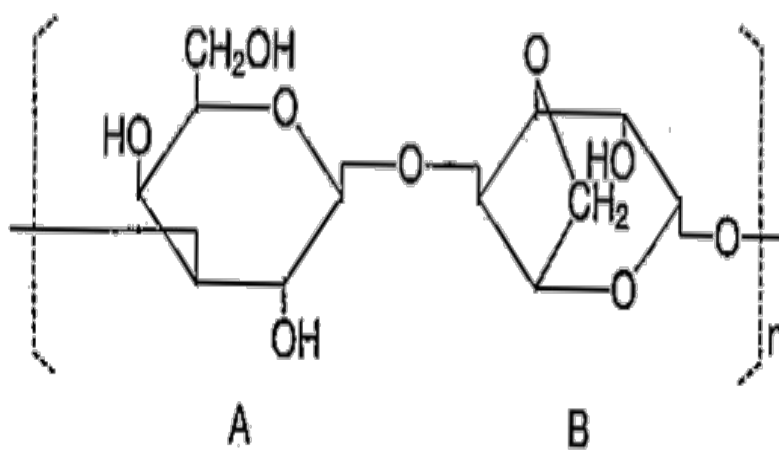
これらのことから、食物繊維を利用して、食後血糖値の上昇を抑制することは極めて有効であると考えられる。しかし、食物繊維には寒天、グルコマンナン、キサンタンガムやグアーガムなど様々な種類があり、その構造も異なる。

寒天はテングサ属、オゴノリ属などの紅藻類の細胞間に存在する高分子多糖類であり、熱水に溶解し、冷却すると粘度を増し、熱可逆性ゲルを形成する²⁷⁾。寒天は約 70%のアガロースと約 30%のアガロペクチンからなる。アガロースは、 β -D-ガラクトースと 3,6-アンヒドロ- α -L-ガラクトースが β -1,4 結合し、鎖状に α -1,3 結合した構造をもつ中性多糖類である (Fig.1.1.)²⁸⁾。アガロースは強いゲル化力を持ち、寒天のゲルの強度に強く関わる。アガロペクチンは側鎖基として硫酸基、グルコン酸やピルビン酸などを有するため、ゲル化力はアガロースより劣る。

グルコマンナンは、こんにゃくの原料として利用されている高分子多糖類であり、グルコースとマンノースが β -1,4 結合により連なった網目構造を有する (Fig.1.2.)²⁹⁻³¹⁾。ヒトの消化酵素ではほとんど分解されないため、高い分子量を維持した状態で胃や小腸を通過し、大腸に到達するといわれているが、一方では、腸内細菌によって分解を受け、ヒトにおいては 90%以上の利用率があると述べられた報告もある³²⁾。

カラギーナンは紅藻類の細胞間に存在する高分子多糖類で、スギノリやツノマタなどから得られる。カラギーナンは置換基の位置や数、アンヒドロ糖の有無によって、 κ 、 λ 、 ι 、 μ 、 θ 、 ν 、 ξ 、 π 型の 8 種類がある。この中で主に利用されているのは、 κ 、 λ 、 ι 型の 3 種類である³³⁾。カラギーナンの基本構造は β -D-ガラクトースと 3,6-アンドロヒドロ-D ガラクトースで寒天とほとんど同じであるが、寒天ではアンヒドロガラクトースが L 型であるのに対し、カラギーナンでは D 型である (Fig.1.3.)³⁴⁾。 κ 型は 2 分子に 1 個の割合で硫酸基を有し、 ι 型は 2 分子に 2 個、 λ 型は 2 分子に 3 個の割合で硫酸基を有する³⁵⁾。 κ -カラギーナンの硫酸基由来のマイナス電荷は、カルシウムイオンとイオン結合を形成するため、カルシウムイオンの共存により、ゲルの熱安定性は高まる³⁶⁾。

キサンタンガムは *Xanthomonas campestris* が好氣的に炭水化物を発酵し



A : D-galactose

B : 3,6-Anhydro-L-galactose

Fig. 1.1. Molecular structure of agar ²⁸⁾

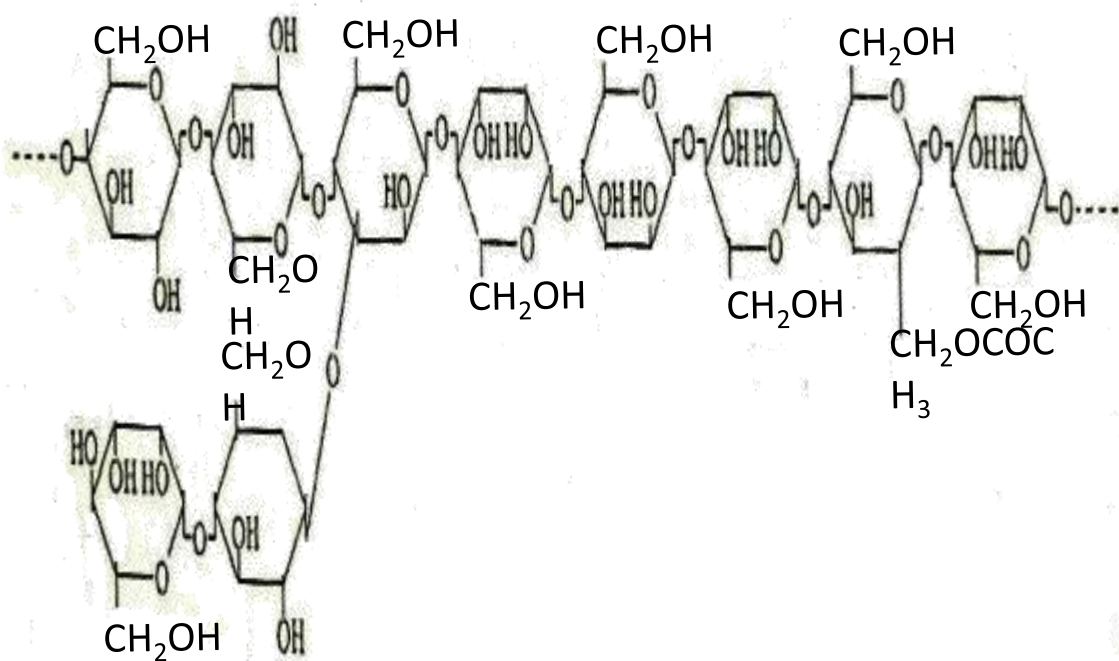


Fig. 1.2. Molecular structure of glucomannan ²⁹⁾

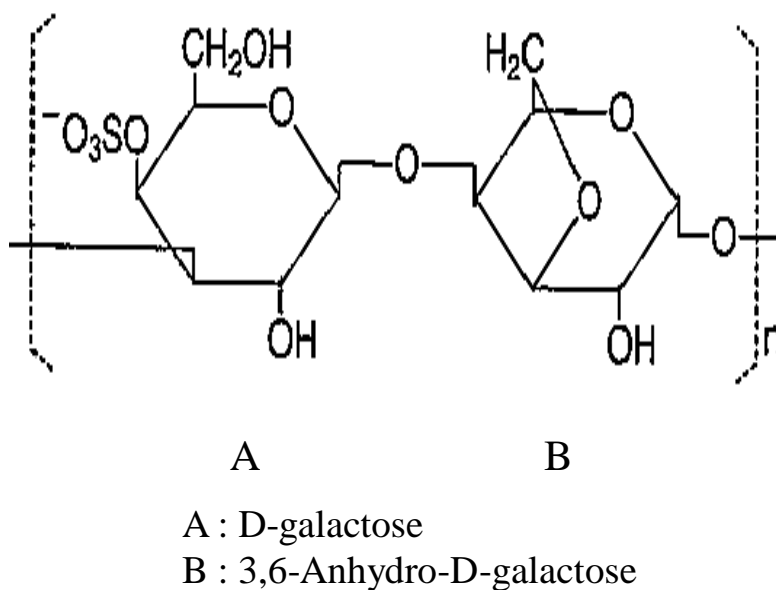


Fig. 1.3. Molecular structure of κ -carrageenan ³⁴⁾

て生じる代謝産物で、主鎖は β -1,4 結合したグルコースからなり、側鎖はマンノース 2 分子とグルクロン酸よりなる。側鎖は主鎖のグルコース残基 1 つおきに存在する (Fig.1.4.)³⁷⁻³⁹⁾。主鎖に対する側鎖の割合が大きく、その側鎖はカルボキシル基とピルビン酸が含まれるため、分子は水中でマイナスに帯電する^{40,41)}。水和させた溶液が静置状態にあるときはゲルに似た弱いネットワークを形成することから、物理的安定性に優れる。得られた溶液は強いシュドプラスチック粘性を示し、低攪拌状態では高い粘性を示すが、攪拌速度が増加するとネットワークが破壊され粘度は急激に減少する⁴²⁾。

グアーガムはマメ科植物のグアープラント *Cyamopsis tetragonolobus* 種子の胚乳から得られる多糖類で、D-マンノースから成る主鎖に、マンノース 2 分子に α -1,6 グルコシド結合した D-ガラクトースの側鎖を有する (Fig.1.5.)⁴³⁻⁴⁵⁾。中性のモノマーのみで構成され、イオン基は存在しないが、冷水可溶で、水に溶かすと高い粘性を示す粘稠な溶液となる。これは主鎖のマンノースに非常に多くのガラクトース基が分岐して結合しているためであるとされている。

米飯は伝統的に日本人が主食として利用し、日本の食生活では欠かせないものであるが、主成分をでんぷんとしているため (Fig.1.6.)⁴⁶⁾、食後の血糖値を上昇させる食品の一つでもある。しかし、これまでに米飯摂取後の血糖値に及ぼす食物繊維の影響を検討した報告は少なく⁴⁷⁾、特に、食物繊維として寒天、グルコマンナン、カラギーナン、キサンタンガムやグアーガムなどを同一条件で用いて、食物繊維の物理的性質から米飯摂取後の血糖値への影響とその要因を検討した報告は皆無である。

これらのことを踏まえ、本研究では、食物繊維の物理的性質が日本人の主食である米飯摂取後の血糖値にどのような影響を及ぼすのか検討した。具体的には、食物繊維である寒天、グルコマンナン、 κ -カラギーナン、キサンタンガムやグアーガムを試料とし、米飯摂取後の血糖値に及ぼすこれら食物繊維添加の影響を、血糖応答、グリセミックインデックスおよび体外消化過程におけるグルコース放出量などを主な手法として検討した。また、共存する食物繊維の形態や摂取する時期の相違についても検討し、併せて官能評価を行い、利用性に対しても検討した。本研究において得られた結果は、日本人の主食である米飯摂取後の血糖値をコントロールする際に役立ち、健康的な食生活に有効活用できる可能性を示唆するものであると考えられる。

以下に章に従って本論文の構成を説明する。

本論文は 7 章から構成されている。

第 1 章では、食物繊維として寒天を用い、米飯摂取後の血糖値に及ぼす影

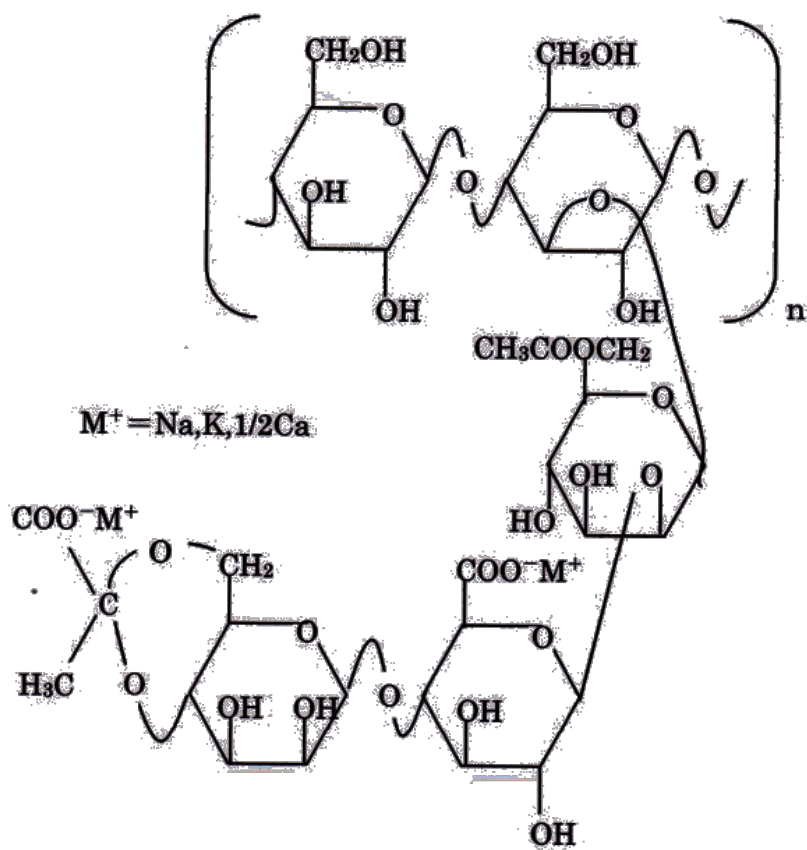


Fig. 1.4. Molecular structure of xanthan gum ^{38,39)}

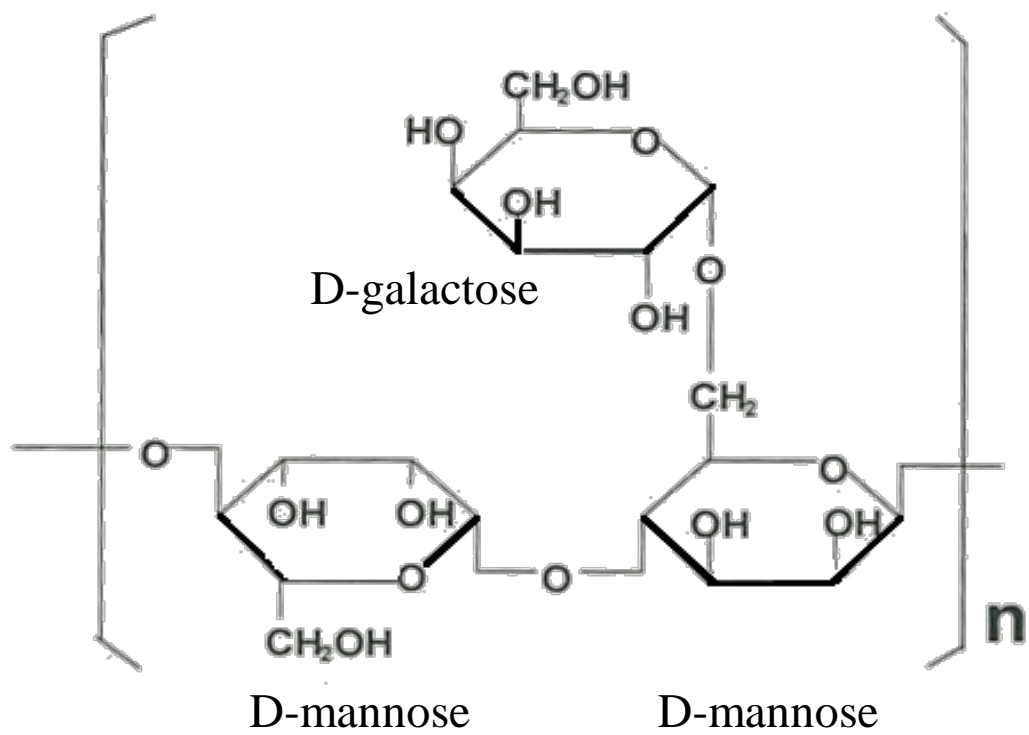


Fig. 1.5. Molecular structure of guar gum ⁴⁴⁾

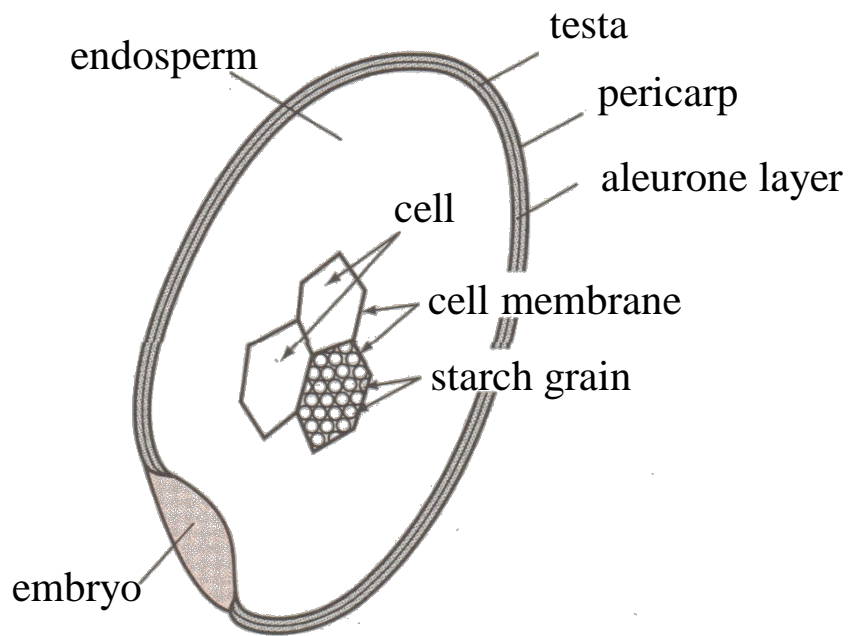


Fig. 1.6. Image of rice grain ⁴⁶⁾

響とその要因を明らかにするために、炊飯時に 0～2.5%の寒天を添加した米飯を試料として、血糖応答およびグリセミックインデックス、超高感度示走査熱量分析計 micro-DSC による熱特性値、テクスチュロメーターによる破断特性を測定し、主観による官能特性を評価し、検討した。

第 2 章では、寒天と構造の異なるグルコマンナンを用い、米にグルコマンナンを添加して炊飯したグルコマンナン添加米飯摂取後の血糖応答、グリセミックインデックスおよび *in vitro* 系でのグルコース放出量を測定し、米飯摂取後の血糖値に及ぼす影響について検討した。さらに、血糖値上昇抑制の要因を探索するために、米飯粒内部の組織を観察し、テクスチャー特性値や熱特性値を測定し、グルコマンナンが米飯の糊化へ与える影響についても検討した。加えて、グルコマンナンの加工品であるしらたきと米飯を混合して同時に摂取した場合についても、血糖応答、グリセミックインデックスおよび *in vitro* 系でのグルコース放出量の測定結果より検討した。

第 3 章では、寒天およびグルコマンナンと同様にゲル化する κ -カラギーナンを食物繊維試料として用い、第 1 章および第 2 章と同様に κ -カラギーナンと共に炊飯した米飯および塩化カルシウム添加あるいは塩化カルシウム無添加 κ -カラギーナゲルを混合した米飯の摂取後の血糖値が、米飯単独摂取後の血糖値と比較してどのように変化するのか検討した。

第 4 章では、第 3 章において体内で一部融解してゾル状となる κ -カラギーナゲルと米飯を混合した場合の血糖値上昇の抑制効果が極めて高かったことから、本章ではゾルを形成するキサンタンガムを用い、キサンタンガムと共に炊飯した米飯およびキサンタンガムゾルを混合した米飯の摂取後の血糖値が、米飯単独摂取後の血糖値と比較してどのように変化するのか検討し、血糖値上昇抑制の要因についても検討した。

第 5 章では、第 4 章と同様にゾルを形成するグアーガムを用い、グアーガムと共に炊飯した米飯およびグアーガムゾルを混合した米飯の摂取後の血糖値が米飯単独摂取後の血糖値と比較してどのように変化するのか検討し、血糖値上昇抑制の要因および官能評価による利用性についても検討した。

第 6 章では、本研究でとりあげた 1.0%濃度の全食物繊維の血糖応答に対する影響の大きさの程度について、総合的に検討し、その血糖値上昇に対する抑制効果の要因について考察した。さらに、官能評価の結果を元に、利用性を検討した。

第 7 章では、各章を総括し、結論とした。

第 1 章 炊飯時に添加した寒天が米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響

1.1. 緒言

生活習慣病の一つである肥満の予防や糖尿病における食事療法として食後血糖値のコントロールが行われている。食品の血糖応答性に対する評価法の一つとしてグリセミックインデックス(GI)の科学的評価が積み重ねられ、その有効性が実証されると共に GI を糖質食品の特性表示に応用することに対する世界的な議論が高まってきている⁴⁸⁻⁵¹⁾。日本で主食とされてきた米飯は、高いグリセミックインデックス食品であり、食事におけるグリセミックインデックスに占める米飯の割合は 58.5%と報告されている⁵²⁾。

食後の血糖値上昇を抑制する食物繊維については、多くの報告がなされているが、その中で寒天による血糖値上昇の抑制については、いくつかの報告がなされている^{22,53-57)}。Maeda ら⁵⁸⁾は、食事前に食物繊維量 4.5g 含量の寒天ゲル 180g を摂取すると、糖質負荷時のインスリン面積が減少し、インスリン感受性が高まり、総コレステロール値が減少することを報告している。しかし、この方法では食事前にかなり多量の寒天を摂取することが必要である。

本章では、Maeda ら⁵⁸⁾の方法に比較して、少量の寒天を米に添加して炊飯した寒天添加米飯の摂取後の血糖値を測定し、米飯の熱特性ならびに嗜好特性の結果とあわせて、食後の血糖値上昇の抑制効果について検討した。

1.2. 実験材料および方法

1.2.1. 試料

米は新潟県産水稻精白米「こしいぶき」(搗精歩留まり 89.7%、水分量 14.0%、タンパク質 5.8%、アミロース 15.7%)を用いた⁵⁹⁾。寒天は三栄源 F.F.I 社製 (Lot: 060227) の平均粒径 10 μ m の粉末寒天を用いた。

米 180g を超純水で洗米後、米重量の 1.4 倍の超純水を加え、室温(25 \pm 3 $^{\circ}$ C)で吸水率が安定する 1 時間の浸漬の後、電気炊飯器(Panasonic 社製、SR-CJ05)により炊飯した。以下、これを基準米飯とする。

寒天は、米 180g に対して、0.6、0.8、1.0、1.1、1.7、2.2、2.5%となるように添加した。寒天の添加方法は、米を 1 時間超純水に浸漬後、寒天を添加して炊飯した浸漬後加熱前寒天添加米飯と、浸漬前に所定量の寒天を添加して 1 時間浸漬後炊飯した浸漬前寒天添加米飯の 2 種類とした。

1.2.2. 力学特性の測定方法

米飯粒 3 粒が重ならないように三角形の形に試料台に並べ、クリープメータ（山電社製 33005 型）を用いて、直径 30mm のアクリル樹脂製の円柱型プランジャーにより、1.0mm/sec で試料の高さの 80%まで等速圧縮して、圧縮応力および圧縮エネルギーを求めた。試料は、25℃の恒温器に 20 分間放置して測定用とした。圧縮応力は歪－応力曲線の頂点から求めた力を試料とプランジャーの接触面積で除して応力として求めた。圧縮エネルギーは歪－応力曲線、ベースラインならびに歪－応力曲線の頂点からベースラインにおろした垂線に囲まれた面積から求めた。

1.2.3. 熱特性の測定方法

サンプルケース（ハステロイ C 製）に米粒 5 粒と超純水を入れて総重量を 800mg とし、レファレンスとして超純水 800mg を用いた。寒天の添加量は 800mg に対して、0.25%および 1.5%とした。超高感度示差走査熱量計 micro-DSC（セタラム社製 フランス）を用いて、25.0℃から 110.0℃まで 0.3℃/min で昇温し、110.0℃で 10 分間保持した後、再び 0.3℃/min で降温して昇降温 DSC 曲線を得た。エンタルピーは試料総重量に対して求めた。

1.2.4. 官能評価の測定方法

食糧庁の食味試験実施要領に従い、パネルは視覚、味覚、臭覚が一般的な 20～22 歳の女子学生 20 名とした。官能評価の測定実施に関しては、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、官能評価の方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。

評価は基準米飯と試料米飯を同時に提示し、基準米飯に対する相対評価とした。試料米飯は 0.8、1.7、2.5%寒天添加米飯とし、評価項目は外観、香り、味、粘り、硬さ、総合の 6 項目とした。日本穀物検定協会の食味評価法に基づいて、7 段階で実施した⁶⁰⁾。外観、香り、味、総合評価では、基準米飯に比べ良い～不良、粘りでは強い～弱い、硬さでは硬い～軟らかいとし、1 口目の試食で明確な違いがあると確信されるものを「かなり；±3」、ある程度の違いがわかるものは「少し；±2」、1 口目の試食でははっきりせず 2 口目で違いがわかるものは「わずか；±1」、2 口目でも判断に迷うものは基準米飯と「同じ；0」とした。

1.2.5. 血糖値の測定方法およびグリセミックインデックスの算出方法

被験者は糖尿病と診断されていない健常な 20～22 歳の女子学生 12 名とし

た。血糖値測定の実施は、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、血糖値の測定方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。

試料として、グルコース、基準米飯、0.8%寒天添加米飯、1.7%寒天添加米飯および 2.5%寒天添加米飯を用いた。試験食に含まれる糖質を 50g とし、水と合わせて 250g になるように試料米飯を調整した。

試験食の試験は、前回の検査より最低 3 日以上経過していることとし、生理期間中は未実施とした。検査前日は、急激な運動を避け、試験開始前 12 時間は、水または白湯以外の食品の摂取を禁止し、試験開始の 4 時間前からは水の摂取も禁止した。試験食の摂取方法は、10 分間にすべて摂取させるようにし、被験者らは、米飯と水を交互に時間内に摂取した。摂取後は 120 分後の血糖値測定が終了するまで安静な状態を維持させた。試験食摂取前 0 分および摂取後 15、30、45、60、90、120 分に血糖値を測定し、食後血糖値変化を比較した。血糖値の測定は、小型血糖測定器グルテストエース R（三和化学社製）を使用し、各被験者本人に測定させた。採血は、被験者の指頭より、採血用穿刺補助器具オートランセット II（三和化学社製）を用いた。穿刺針を装着するための穿刺補助器具オートランセット II（三和化学社製）は各個人別とした。グルコース溶液および基準米飯の測定は、各被験者 1 回で行なった。これまでに当研究室および学内の他研究室で実施された生のデータを参照し、血糖値曲線のパターンが同様であることを確認した。

グリセミックインデックスの算出は、FAO/WHO の方法に基づき、血糖値曲線下面積を算出し、グルコース溶液を摂取した場合の血糖値曲線の下面積を 100 とし、それぞれ試験食のグリセミックインデックス値（以下、GI とする）を求めた。

1.2.6. 統計処理

統計処理には Excel2003、SPSS14.0J を用い、2 元配置分散分析後、Tukey の方法により有意差の検定を行い、有意水準 5% で判定した。

1.3. 実験結果

1.3.1. 力学特性

米粒を 1 時間超純水に浸漬後、寒天を添加して炊飯した米飯と、寒天とともに米粒を 1 時間超純水に浸漬後炊飯した米飯の力学特性を Fig.2.1. に示す。浸漬前寒天添加米飯の圧縮応力は 0.6、1.0、1.1、2.5% 添加で基準米飯より

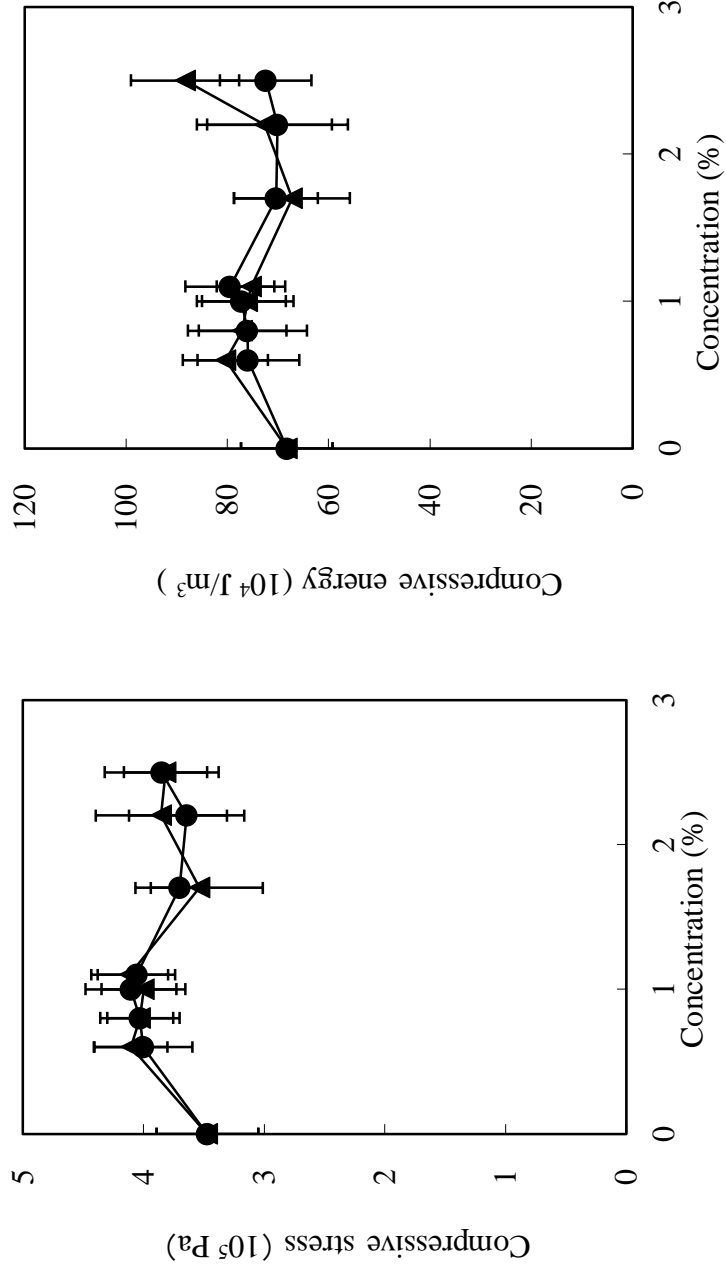


Fig.2.1.1. Physical properties of cooked rice with agar.

- ; Cooked rice that added agar after soaking for 1 hour
 - ▲ ; Cooked rice that added agar immediately before heating
- Each value represents the mean \pm SD.

も有意に増加した。浸漬後加熱前寒天添加米飯では、0.6、1.0、1.1、2.2、2.5%寒天添加で基準米飯よりも有意に増加した。圧縮エネルギーについて、浸漬後加熱前 2.5%寒天添加米飯は、基準米飯と比較し有意に増加したが、他の浸漬後加熱前寒天添加米飯および浸漬前寒天添加米飯において有意差の認められるものはなかった。

1.3.2. 熱特性

Fig.2.2.に、代表として 1.5%寒天単独、寒天無添加米粒と 1.5%寒天添加米粒の昇温 DSC 曲線を示す。

寒天単独では 79℃付近にブロードな吸熱ピークが観察された。寒天無添加米粒では 77℃、94℃および 101℃付近に位置する吸熱ピークが観察され、3段階で熱的变化が生じていた。

寒天無添加米粒の昇温 DSC 曲線において、最も低温側に位置する吸熱ピークの頂点の温度（以後ピーク温度とする）あるいは中間に位置する吸熱ピークのピーク温度は、0.25%寒天の添加では変化しなかった（Table 2.1.）。しかし、1.5%の寒天を添加すると中央に位置する吸熱ピークは高温側にシフトした。最も高温側の吸熱ピークのピーク温度は、0.25%あるいは 1.5%の寒天の添加により高温側へシフトした。また、寒天無添加米粒で観察された最も低温側ピークの 65℃付近の小さなショルダーは、0.25%あるいは 1.5%の寒天添加においては消失した。

昇温 DSC 曲線における最も低温側あるいは中央に位置する吸熱ピークのエンタルピーは、寒天濃度が増加すると増加したが、最も高温側の吸熱ピークのエンタルピーは寒天の添加により減少した（Table 2.2.）。

Fig.2.3.に、代表として 1.5%寒天単独、寒天無添加米粒と 1.5%寒天添加米粒の降温 DSC 曲線を示す。寒天添加米粒の高温側の発熱ピークは寒天無添加米粒よりもやや高温側へシフトした（Table 2.3.）。高温側のエンタルピーは寒天の添加濃度が増加すると低下した（Table 2.4.）。

1.3.3. 官能評価

基準米飯を評価基準とした時の、0.8、1.7%および 2.5%寒天添加米飯の官能評価の結果を Fig.2.4.に示す。評価項目の外観、香り、味、粘り、硬さ、総合評価において、寒天濃度についての主効果はすべて有意であった。

官能評価項目の外観は、基準米飯と比較し、全ての寒天添加米飯で有意差が認められ、寒天を添加すると外観が有意に劣ると評価された。0.8%寒天添加米飯と 1.5%あるいは 1.7%寒天添加米飯間では有意差が認められたが、

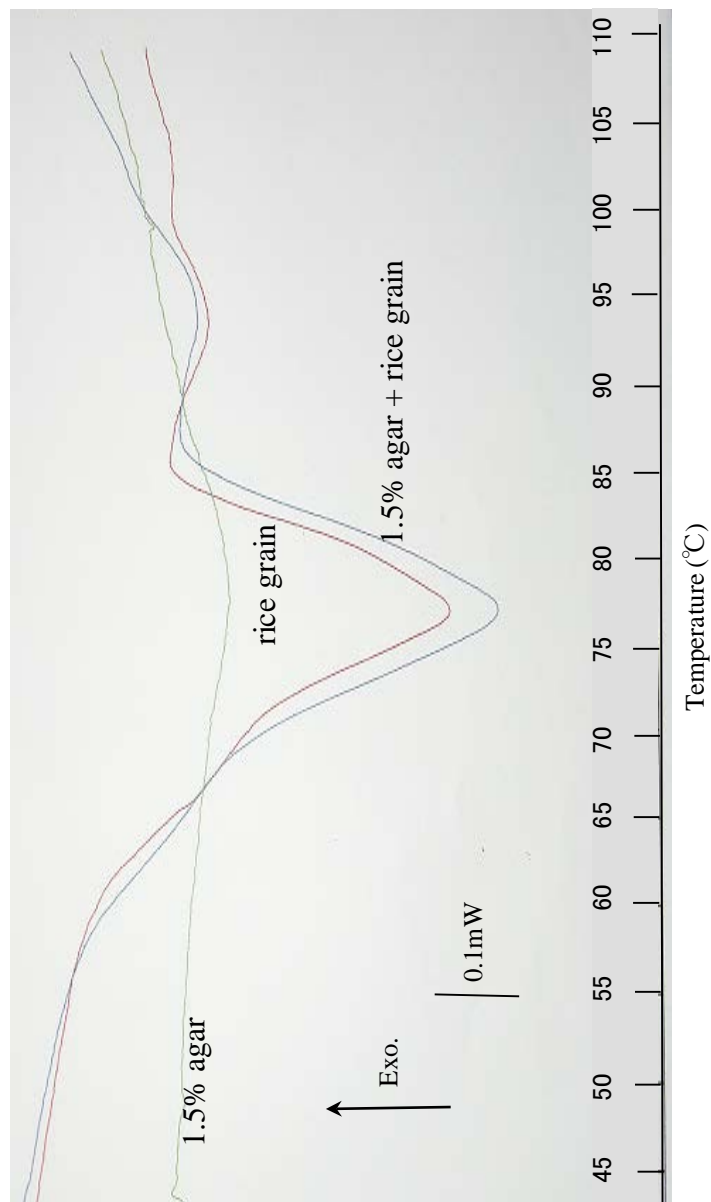


Fig.2.2.2. Heating DSC curves of rice grain with 1.5% agar.

Temperature was raised from 25.0°C to 110.0°C at 0.3°C/min.

Table 2.1. Peak temperature of endothermic peak of heating DSC curve.

	Peak 1 (°C)	Peak 2 (°C)	Peak 3 (°C)
Rice grain	77.2	94.0	100.9
0.25% agar	78.8		
Rice + 0.25% agar	77.2	93.9	102.2
1.50% agar	78.9		
Rice + 1.50% agar	77.5	94.8	102.1

Peak 1: peak of the lowest temperature

Peak 2: peak of the middle temperature

Peak 3: peak of the highest temperature

Table 2.2. Enthalpy of endothermic peak of heating DSC curve.

	Peak 1 (J/g)	Peak 2 (J/g)	Peak 3 (J/g)
Rice grain	12.18	2.44	0.50
Rice + 0.25% agar	12.84	2.55	0.37
Rice + 1.50% agar	12.62	3.23	0.38

Peak 1: peak of the lowest temperature
Peak 2: peak of the middle temperature
Peak 3: peak of the highest temperature

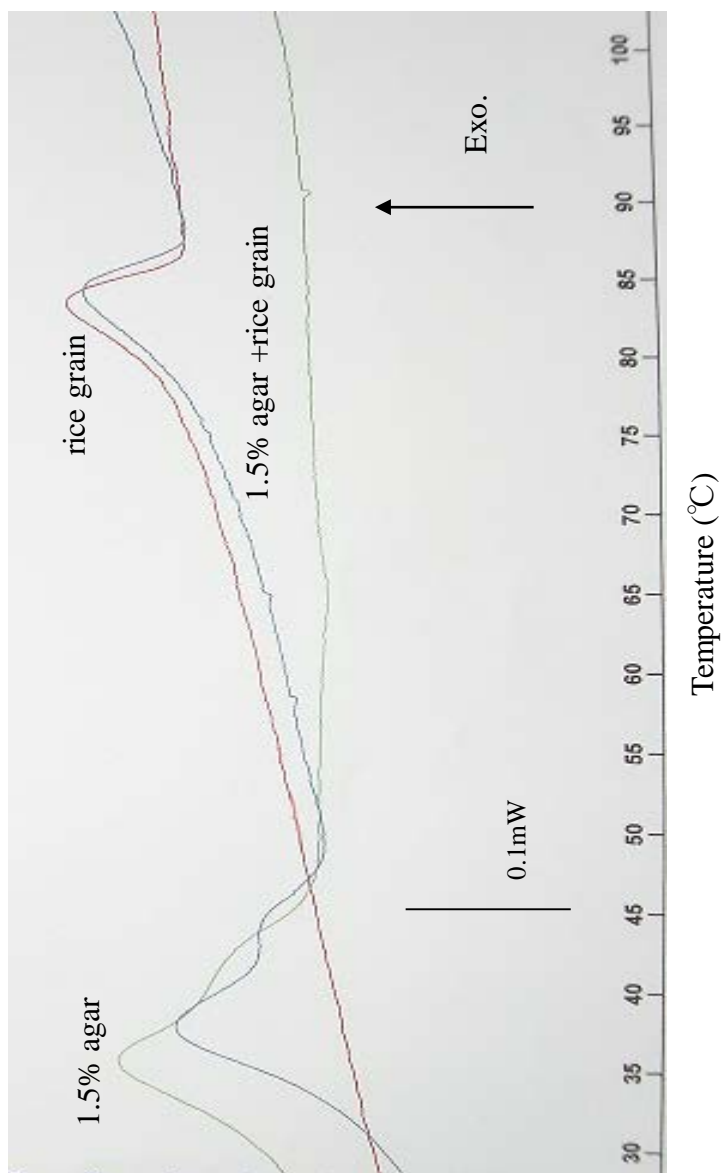


Fig.2.3. Cooling DSC curves of rice grain with 1.5% agar.

Temperature was reduced from 110.0°C to 25.0°C at 0.3°C/min.

Table 2.3. Peak temperature of endothermic peak of cooling DSC curve.

	Peak 1 (°C)	Peak 2 (°C)
Rice grain		83.8
0.25% agar	33.9	
Rice + 0.25% agar	37.0	85.0
1.50% agar	35.4	
Rice + 1.50% agar	37.3	85.3

Peak 1: peak of the lowest temperature

Peak 2: peak of the highest temperature

Table 2.4. Enthalpy of endothermic peak of cooling DSC curve.

	Peak 1 (J/g)	Peak 2 (J/g)
Rice grain		1.15
0.25% agar	0.24	
Rice + 0.25% agar	0.30	1.09
1.50% agar	2.28	0.97
Rice + 1.50% agar	2.41	

Peak 1: peak of the lowest temperature

Peak 2: peak of the highest temperature

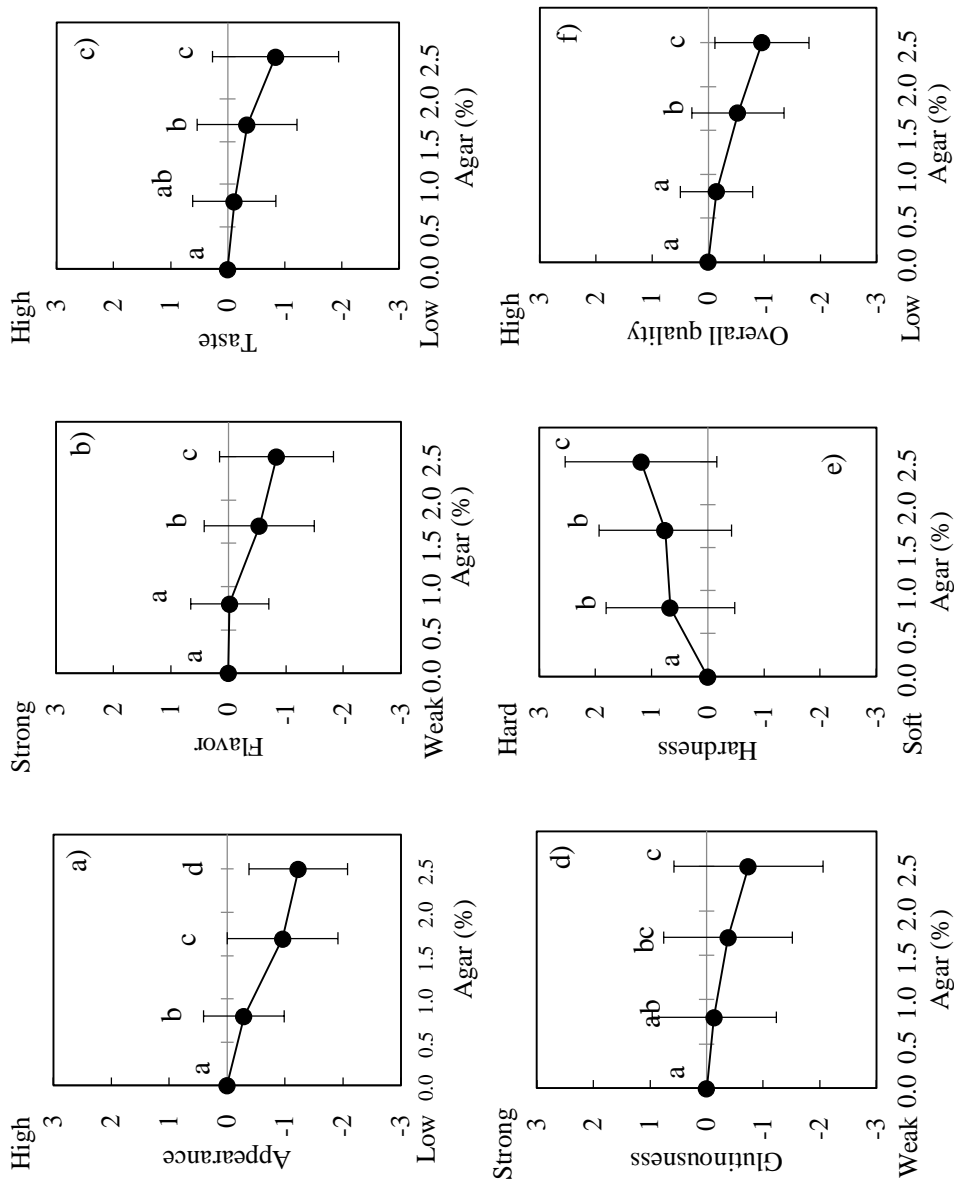


Fig.2.4. Sensory evaluation of rice cooked with agar.

a) Appearance, b) Flavor, c) Taste, d) Glutinousness, e) Hardness, f) Overall quality

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

1.7%と 2.5%寒天添加米飯間では有意差が認められなかった。

官能評価項目の硬さは、基準米飯と比較すると全ての試料で有意差が認められた。0.8%寒天添加米飯と 2.5%寒天添加米飯との間、1.7%寒天添加米飯と 2.5%寒天添加との間で有意差が認められ、2.5%寒天添加米飯は 0.8%あるいは 1.7%寒天添加米飯よりも有意に硬いと判断された。しかし、官能評価項目の硬さと機器測定より求められた力学特性の硬さとの間には、相関関係が認められなかった。

官能評価項目の香り、味、粘りおよび総合評価は、0.8%寒天添加米飯では基準米飯と有意差が認められなかったが、1.7%および 2.5%寒天添加米飯では基準米飯との間に有意差が認められた。また、各濃度の寒天添加米飯の間では有意差が認められ、寒天濃度が高くなると香りや味は抑制され、総合評価は低下すると判断された。

1.3.4. 血糖値およびグリセミックインデックス

12 名の被験者による基準米飯および寒天添加米飯摂取後の 120 分間の血糖値の変化を Fig.2.5.に示した。0.8、1.7%および 2.5%寒天添加米飯摂取後の最大血糖値は基準米飯と比較して低く、寒天の添加濃度が高くなるに従い低下した。一方、摂取後の血糖値の時間的变化においては、基準米飯および 0.8%寒天添加米飯では 30 分後で血糖値は最大値を示したが、1.7%ならびに 2.5%寒天添加米飯では摂取後 30 分と 45 分では同程度であり、低い値を示した。

Fig.2.6.にグルコースを 100 とした場合のグリセミックインデックス(GI)を示した。GI は基準米飯で最大値を示したが、0.8%寒天添加米飯との間では有意差が認められなかった。しかし、基準米飯と 1.7%および 2.5%寒天添加米飯との間では有意差が認められた。

1.4. 考察

米粒に寒天を添加して炊飯した寒天添加米飯の摂取後の血糖値を測定し、米飯の熱特性ならびに嗜好特性の結果とあわせて、血糖値上昇の抑制効果を検討した。

圧縮応力について、浸漬前寒天添加米飯では 0.6%、1.0%、1.1%、2.5%寒天添加で基準米飯よりも有意に増加し、浸漬後加熱前寒天添加米飯では、0.6%、1.0%、1.1%、2.2%、2.5%寒天添加で基準米飯よりも有意に増加した (Fig.2.1.)。圧縮エネルギーについて、浸漬後加熱前 2.5%寒天添加米飯は、基準米飯と比較し有意に増加したが、他の浸漬後加熱前寒天添加米飯および

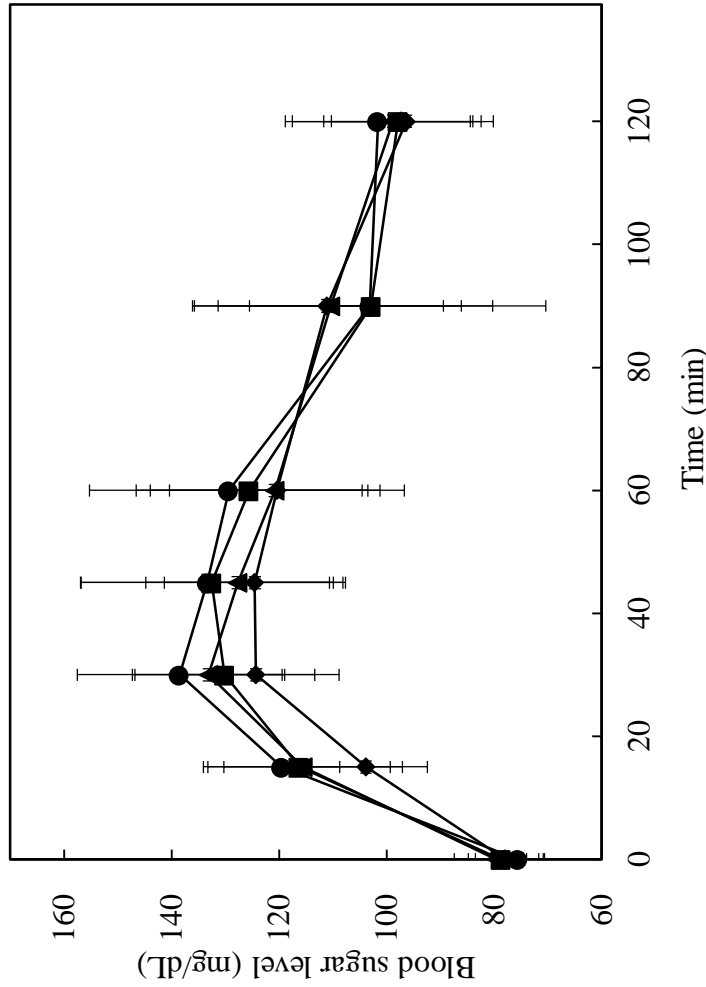


Fig.2.5. Blood sugar response curve after consuming rice cooked with agar.

●; Cooked rice alone, ▲; Rice cooked with 0.8% agar, ■; Rice cooked with 1.7% agar, ◆; Rice cooked with 2.5% agar

Cooked rice : (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (30, 45 and 60 min > 90 and 120 min)

0.8% Agar-added rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (30 and 45 min > 120 min)

1.7% Agar-added rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (30 and 45 min > 90 and 120 min), (60 min > 120 min)

2.5% Agar-added rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (30, 45 and 60 min > 120 min)

n=12

Each value represents the mean \pm SD.

Differences were significant at $p < 0.05$

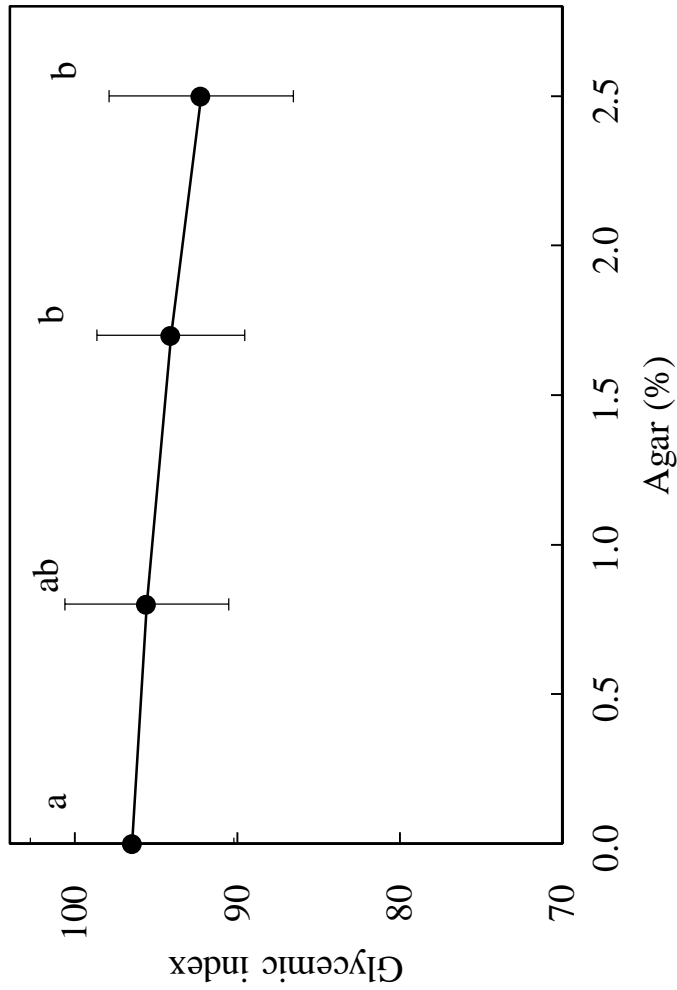


Fig.2.6. Glycemic index after consuming rice cooked with agar.

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

浸漬前寒天添加米飯において有意差の認められるものはなかった。

また、データとしては示していないが、両条件の寒天添加米飯について、10mm/s で 2 回等速圧縮して求めたバランス度（付着性／（第 1 ピークのエネルギー））は、浸漬前 0.8%寒天添加米飯で高くなったが、他では有意差が認められなかった。この結果から、通常の米飯でおいしさの指標として利用されているバランス度は、寒天添加米飯においては適用できないと考えられた。

以上のことから、浸漬後加熱前寒天添加炊飯と浸漬前寒天添加米飯を基準米飯と比較すると、大きな相違は認められなかったことから、以後の研究においては、浸漬後加熱前寒天添加米飯を用いることとした。

寒天を添加した米飯粒の熱特性について検討した。寒天単独では 79℃付近にブロードな吸熱ピークが観察された。これは、寒天を構成しているアガロースあるいはアガロペクチンが膨潤溶解して、ランダムコイルへと構造転移するためと考えられる。

寒天無添加米粒では 77℃、94℃および 101℃付近に位置する吸熱ピークが観察され、3 段階で熱的变化が生じていた。Hayakawa ら⁶¹⁾および Eliasson ら⁶²⁾の報告から 3 段階の熱的变化における低温側の吸熱ピークはアミロペクチンの熱的变化に相当し、中央に位置する吸熱ピークはアミロースと脂質の複合体⁶²⁾の熱的变化に由来するものであると考えられる。

寒天無添加米粒の昇温 DSC 曲線において、最も低温側に位置する吸熱ピークの頂点の温度（以下、ピーク温度とする）あるいは中間に位置する吸熱ピークのピーク温度は、0.25%寒天の添加では変化しなかった（Table 2.1.）。しかし、1.5%の寒天を添加すると中央に位置する吸熱ピークは高温側にシフトした。最も高温側の吸熱ピークのピーク温度は、0.25%あるいは 1.5%の寒天の添加により高温側へシフトした。また、寒天無添加米粒で観察された最も低温側ピークの 65℃付近の小さなショルダーは、0.25%あるいは 1.5%の寒天添加においては消失した。

昇温 DSC 曲線における最も低温側あるいは中央に位置する吸熱ピークのエンタルピーは、寒天濃度が増加すると増加したが、最も高温側の吸熱ピークのエンタルピーは寒天の添加により減少した（Table 2.2.）。寒天添加米粒の昇温 DSC 曲線においては、寒天無添加米粒で観察された最も低温側あるいは中央に位置する吸熱ピークが、寒天の吸熱ピークと重なりあってピークを形成していると考えられる。そのため、寒天を添加することによって生じた米粒自体の熱的变化に由来するピーク温度あるいはエンタルピーの変化が、寒天に由来する熱的变化によって影響を受け、DSC 曲線上では明確に

捕らえることができなかったのではないかと考えられる。しかし、最も高温側の吸熱ピークにおいては、寒天の熱的变化の影響を受けず、寒天の添加による米粒独自の熱的变化を捕らえていると推察される。これらの結果から判断すると、寒天を添加すると米粒の熱的变化は抑制されるのではないかと考えられた。

寒天無添加米粒および 1.5%寒天添加米粒の降温 DSC 曲線における、最も高温のピークは冷却されることにより形成されたアミロースの再配列に由来して生じる発熱ピークである^{63,64)}。このことは、老化の初期の段階でアミロースが主に作用し、アミロペクチンよりも速く再結晶化することを示しており、先行研究と一致した^{63,64)}。

寒天添加米粒の高温側の発熱ピークは寒天無添加米粒よりもやや高温側へシフトした (Table 2.3.)。高温側のエンタルピーは寒天の添加濃度が増加すると低下した (Table 2.4.)。降温 DSC 曲線で観察される再配列はアミロースやアミロペクチンの水和や膨潤の程度によっても変化し、水和や膨潤の程度が低い場合には再配列は高い温度で生じ、その程度は小さくなる。本実験で得られた結果は、寒天の添加により米粒のアミロースの再配列が高い温度で生じやすくなっていること、再配列の程度は低くなっていることを示唆していた。

官能評価項目の外観は、基準米飯と比較し、全ての寒天添加米飯で有意差が認められ、寒天を添加すると外観が有意に劣ると評価された。官能評価項目の硬さは、基準米飯と比較すると全ての試料で有意差が認められた。0.8%寒天添加米飯と 2.5%寒天添加米飯との間、1.7%寒天添加米飯と 2.5%寒天添加との間で有意差が認められ、2.5%寒天添加米飯は 0.8%あるいは 1.7%寒天添加米飯よりも有意に硬いと判断された。しかし、官能評価項目の硬さと機器測定より求められた力学特性の硬さとの間には、相関関係が認められなかった。Moritaka ら⁶⁵⁾が Scheffe の単純格子計画法を用いて実施したミルクゼリーの報告においても、主観的な評価により求められた硬さの等高線の間隔は、機器測定により求められた硬さの等高線の間隔よりも狭く得られていた。本実験によっても、主観的測定の結果では基準米飯と有意差が認められた 0.8%あるいは 1.7%寒天添加米飯において、客観的評価では有意差が認められなかったことから、被験者は米飯の硬さを機器よりも鋭敏に識別したと考えられる。

官能評価項目の香り、味、粘りおよび総合評価は、0.8%寒天添加米飯では基準米飯と有意差が認められなかったが、1.7%および 2.5%寒天添加米飯では基準米飯との間に有意差が認められた。また、各濃度の寒天添加米飯の間

では有意差が認められ、寒天濃度が高くなると香りや味は抑制され、総合評価は低下すると判断された。この総合評価の結果と前述の力学特性で求めたバランス度との間には、相関関係は認められなかったことから、寒天添加米飯では美味しさの指標としてバランス度は用いることができないと考えられる。Flammang ら⁵⁵⁾は高い粘性を有する食物繊維は、食品の美味しさを低減させると述べている。本研究においても、寒天と共に米粒を炊飯すると、米飯の美味しさを構成する因子である味、香り、つやなどを低減させる結果が得られ、高濃度の寒天の添加は米飯の嗜好性を低減させると考えられる。

高濃度の寒天を添加により、米飯の嗜好性は高評価を得られなかったが、寒天添加米飯摂取後の血糖応答について検討した。全ての寒天添加米飯摂取後の最大血糖値は基準米飯と比較して低く、寒天の添加濃度が高くなるに従い低下した (Fig.2.5.)。一方、摂取後の血糖値の時間的变化においては、基準米飯および 0.8%寒天添加米飯では 30 分後で血糖値は最大値を示したが、1.7%ならびに 2.5%寒天添加米飯では摂取後 30 分と 45 分では同程度であり、低い値を示した。GI について、基準米飯で最大値を示し、0.8%寒天添加米飯との間では有意差が認められなかった。しかし、基準米飯と 1.7%および 2.5%寒天添加米飯との間では有意差が認められ、米飯摂取後 120 分間の血糖値上昇量の総量は高濃度寒天添加米飯では低下することが確認された。

以上の結果より、寒天添加米飯摂取後の血糖値上昇抑制効果は、寒天が米粒の熱的变化を抑制したことが影響したのではないかと考えられる。

1.5. 要約

米飯摂取後の血糖値上昇抑制を目的として、炊飯時に 0~2.5%の寒天を添加した効果について、嗜好特性、熱特性ならびに血糖値を測定して検討した。

高い濃度の寒天を添加した米飯においては、味、香り、外観は悪いと評価され、硬さは硬いと評価された。降温 DSC 曲線における最も高温側の発熱ピークは、寒天添加により高温側へシフトし、エンタルピーは小さくなった。米飯摂取後 120 分間の血糖応答曲線において、寒天の添加により、血糖値は緩慢に増加し、最大血糖値は低下した。グリセミックインデックスは、基準米飯で最も大きく、寒天濃度が増加すると減少した。

第2章 グルコマンナンおよび「しらたき」が米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響

2.1. 緒言

グルコマンナンは、グルコースとマンノースが β -1,4結合によって連なった構造をもつ。(Fig.1.2.)³⁰⁾。ヒトの消化酵素ではほとんど分解されないため、高い分子量を維持した状態で胃や小腸を通過し、大腸に到達するといわれているが⁶⁶⁾、一方では、腸内細菌によって分解を受け、ヒトにおいては90%以上の利用率があると述べられた報告もある³²⁾。グルコマンナンにアルカリを加えて加熱すると、アセチル基が離脱し、水素結合による三次元網目構造が形成されてゲルとなる。これを応用した加工食品が、こんにやくやしらたきである³¹⁾。

本章では、寒天と同様に、米にグルコマンナンを添加して炊飯したグルコマンナン添加米飯の摂取後の血糖応答および *in vitro* 系でのグルコースの放出量を測定し、さらに、血糖値上昇抑制の要因を探るために、米飯粒内部の組織観察、テクスチャー特性値、熱特性値を測定し、その利用性を検討するために官能評価を実施した。また、しらたきと米飯を混合して同時に摂取した場合についても検討した。

2.2. 実験材料および方法

2.2.1. 試料

米は第1章と同様に、新潟県産水稻精白米「こしいぶき」⁵⁹⁾を用いた。グルコマンナンは三栄源 F.F.I 社製の粉末グルコマンナンを用い、しらたきは、関越物産社製（食物繊維 2.2%、凝固剤：水酸化カルシウム）を用いた。

米 180g を純水で洗米後、米重量の 1.4 倍の脱イオン水を加え、室温 ($25 \pm 3^\circ\text{C}$) で吸水率が安定する 1 時間の浸漬の後、電気炊飯器 (Panasonic 社製、SR-CL05P) により炊飯した。以下、これを基準米飯とする。

グルコマンナン添加米飯（以下、GM 添加米飯とする）は、基準米飯と同様に、1 時間浸漬後、炊飯直前に、米重量に対して 0.6、1.0、2.0、3.0、4.0% グルコマンナンを添加して炊飯した。グルコマンナンは、室温で一晩膨潤しておいたものを添加した。炊飯後の蒸らし時間は 30 分間とした。組織観察、テクスチャー特性、官能評価に用いた試料は、常に一定状態の米飯粒を得るために、電気炊飯器の釜の中心部分から採取した米飯粒とした。炊き上がり増加率は、炊飯後の米飯の重量を測定し、米 180g で割った値とした。

しらたき混合米飯（以下、ST 混合米飯とする）は、基準米飯に GM 添加米飯と同程度のグルコマンナン濃度となるよう試験直前に基準米飯としらたきを混

合し調製した。なお、しらたきは 6mm 穴径ディスクを装着したミートグラインダー（BOSCH 社製、MUM4435JP）を 2 回通過させた後、基準米飯と均一に混合した。なお、ミートグラインダーを通過させたしらたきの粒度分布を、 0.01cm^2 間隔に分類し、食片総数 (N_T) に対する各サイズ数 (n_s) の割合 (%) で Fig.3.1. に示した。

2.2.2. 血糖値の測定およびグリセミックインデックスの算出方法

被験者は、通常の日常生活を営み、これまでに糖尿病と診断されたことのない健常な女子学生（20～36 歳）13 名とした。試験参加への同意後に測定した被験者の空腹時血糖は、平均 81.91 ± 6.99 (72～95 mg/dL) であり、いずれも試験開始時において糖尿病診断基準により正常型と診断される範囲であった。血糖値測定の実施は、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、血糖値の測定方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。

試験食は、基準米飯、0.6、1.0、2.0、3.0、4.0%GM 添加米飯、および 0.6、1.0、2.0、3.0、4.0%ST 混合米飯を用いた。本研究では炊飯時にグルコマンナンを添加する場合および炊飯米にグルコマンナンを含むしらたきを混合する場合の食後血糖値上昇への影響を検討するため、日本 Glycemic Index 研究会の「GI 研究のための統一プロトコール」⁶⁷⁾で使用を推奨されている包装米飯ではなく、炊飯を伴う米飯を基準米飯とし、さらに糖質 50g 摂取の基準として 50g/100mL のグルコース溶液を用いた。各試験食に含まれる米飯の糖質は 50g とし、摂取時に飲む水との総重量は 250g に調整した。

血糖値測定およびグリセミックインデックス値 (GI) の算出方法は、第 1 章と同様の方法で行った。

2.2.3. グルコース放出量の測定方法

グルコース放出量の測定は、ヒトによる個人差や体調変化等の測定誤差要因を取り除き、侵襲性のない、咀嚼と消化・吸収をモデル化した食後血糖応答評価を予測した評価方法である^{68,69)}。口腔内の咀嚼・消化過程を *in vitro* で再現するために熊井・中西ら⁷⁰⁻⁷²⁾が報告したグルコースリリース測定を用いた。咀嚼シミュレーションには、6mm 穴径ディスクを装着したミートグラインダー（BOSCH 社製、MUM4435JP）を用いた。試料として、基準米飯、0.6、1.0、2.0、3.0、4.0%GM 添加米飯および 2.0、4.0%ST 混合米飯を用いて測定した。パンクレアチンとインベルターゼを添加し、37℃、20 分間振とう後、グルコース量を

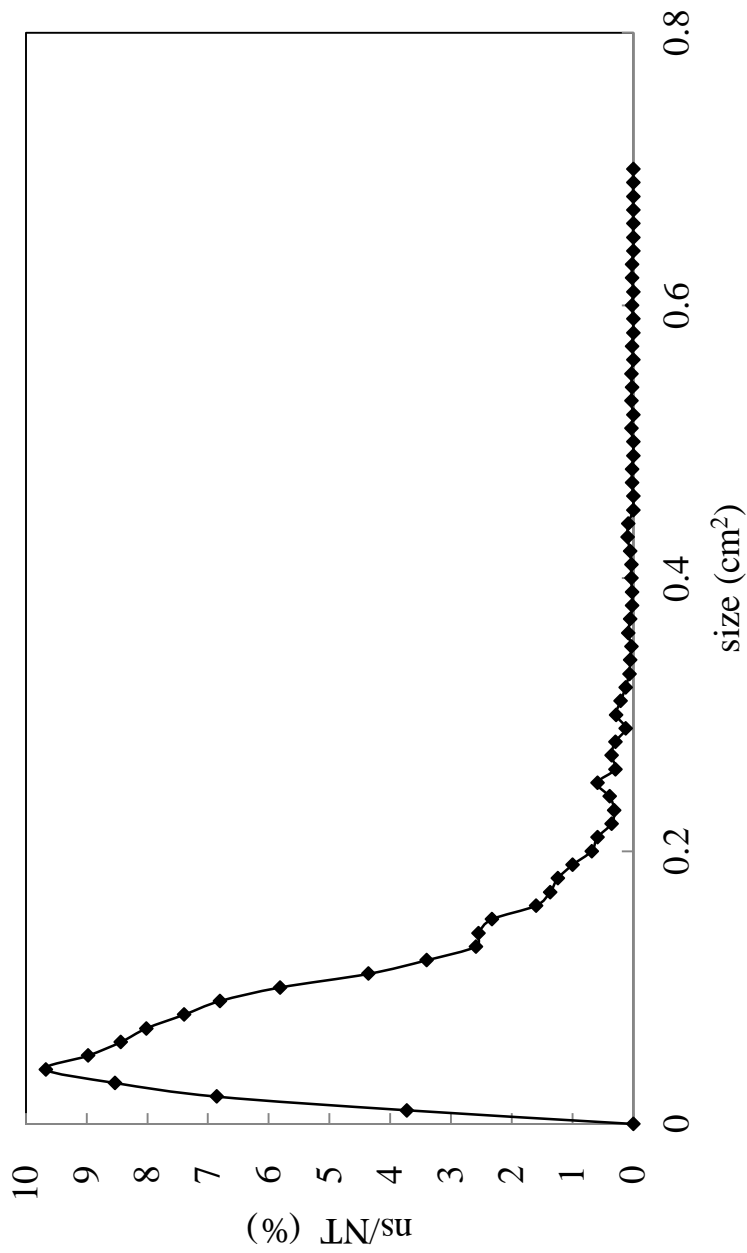


Fig. 3.1. The size distribution of konjac noodles which passed two times of meat grinders.

測定した。

2.2.4. 組織観察

実体顕微鏡（オリンパス社製 SZ401）を用い、基準米飯、1.0、2.0、3.0、4.0%GM 添加米飯粒を試料とし、米飯粒表面及び横断面を 6.7 倍で観察した。

2.2.5. テクスチャー特性の測定方法

クリープメータ（RE-33005、山電社製）を用いて、1 個の米飯粒を試料台に置き、25℃で直径 20mm のアクリル樹脂製円形型プランジャーによりテクスチャー特性値を測定した。圧縮速度 0.5mm/sec で試料の高さの 80%まで 2 回等速圧縮した。1 回目圧縮後、2 回目圧縮までの戻り距離は 5mm で行なった。

得られたテクスチャー曲線より、山電自動解析装置テクスチャー解析ソフトウェア（Ver.2.0A）を用いて、硬さおよび付着性を算出した。硬さはテクスチャー曲線の第 1 ピークの頂点を米飯粒とプランジャーの接触面積で除して求めた。なお、米飯粒とプランジャーの接触面積は、米飯粒を測定する状態で胚芽部が左右方向となるよう、平らな面を試料台に接するように置き、圧縮前の米飯粒の背側と腹側を通り、試料台と平行方向の断面を最大面積とした。上記の方法により、米飯粒 30 粒の面積を測定し、その平均値を接触面積とした。なお、米飯粒は圧縮により接触面積が変化するため、求めた応力は真の応力ではなく、公称応力で硬さを表した。測定中に試料台から試料が浮き上がるのを防ぐため、米飯粒は試料台に両面テープで固定した。付着性は第 1 ピーク後のベースラインとベースラインより下方のテクスチャー曲線で囲まれた面積より求めた。同一試料につき、試料を変えて 30 回繰り返し測定した。基準米飯と 4.0%GM 添加米飯の代表的なテクスチャー曲線を Fig.3.2.に示した。

2.2.6. 熱特性の測定方法

サンプルケース（ハステロイ C 製）に米粒 5 粒と脱イオン水で 800mg とし、800mg の脱イオン水を対照として、超高感度示差走査熱量計 Micro-DSC-III（Setaram 社製、フランス）を用いて測定した。グルコマンナン濃度は 800mg に対して 0、0.5、1.0、2.0%とした。25℃から 110℃まで、0.3℃/min で昇温し、110℃で 10 分間保持した後、0.3℃/min で 25℃まで降温して、昇降温 DSC 曲線を得た。エンタルピーは試料総重量に対して求めた。

2.2.7. 官能評価の測定方法

測定方法は、第 1 章と同様の方法で行った。パネルは視覚、味覚、臭覚が一

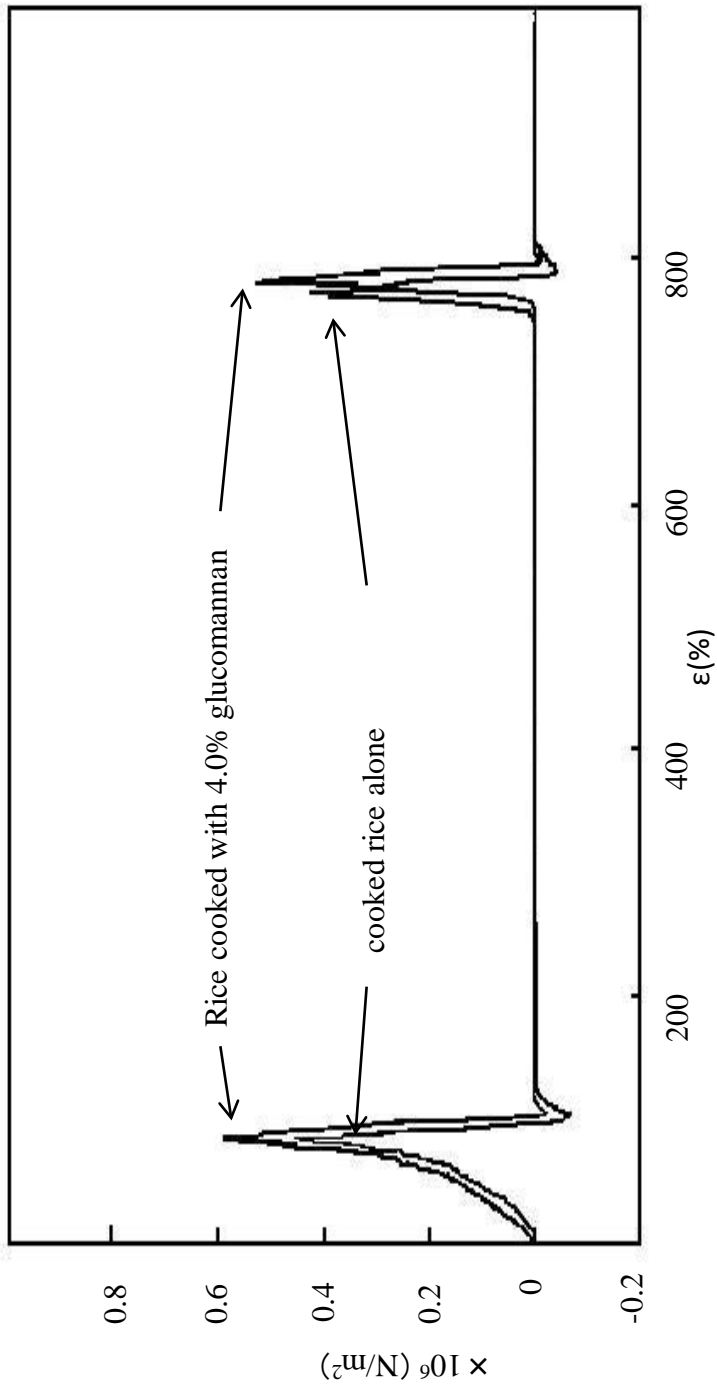


Fig.3.2. Typical stress-accumulative strain curves of a single cooked rice and a single rice cooked with glucomannan.

一般的な 20～36 歳の女子学生 13 名とし、官能評価の実施に関しては、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、官能評価の方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。試料は、基準米飯に対して 0.6、1.0、2.0、3.0、4.0%GM 添加米飯とした。

2.2.8. 統計処理

統計処理は SPSS16.0J を用いた。テクスチャー特性、官能評価、グルコース放出量およびグリセミックインデックスは一元分散分析後、血糖値は二元配置分散分析後、Tukey の方法で検定し、有意水準 5%とした。

2.3. 実験結果

2.3.1. 血糖値

2.3.1.1. グルコマンナン添加米飯

基準米飯および GM 添加米飯摂取後の 120 分間の血糖値の変化を Fig.3.3.に示す。同一試料における各測定時間の血糖値と、同一測定時間における各試料濃度の血糖値は有意であった。試験食摂取後 15 分の血糖値は、全ての米飯間で有意な差は認められなかった。しかし、試験食摂取後 30 分では、基準米飯よりも 2.0%以上の GM 添加米飯で有意に低くなり、摂取後 30 分までの血糖曲線の上昇は 2.0%以上の GM 添加米飯では、基準米飯と比較して緩慢となった。試験食摂取後 120 分の血糖値においては、1.0、2.0%GM 添加米飯は、基準米飯よりも有意に低下した。一方、基準米飯摂取後の血糖値は、摂取前 0 分から 30 分後までは有意に上昇し、30 分以降は有意に急激に減少した。GM 添加米飯においては、摂取後 15 分の血糖値は摂取前より有意に上昇したが、摂取後 15～120 分間の 6 回の測定において、15 分と 30 分のように連続した 2 回の測定間では有意な差は認められなかった。しかし、他では認められ、GM 添加米飯摂取 30 分後または 45 分後に血糖値はピークを示した後、緩やかに有意な低下を示した。

2.3.1.2. しらたき混合米飯

基準米飯および ST 混合米飯摂取後の 120 分間の血糖値変化を Fig.3.4.に示す。同一試料における各測定時間の血糖値と、同一測定時間における各試料濃度の血糖値は有意であった。試験食摂取 15 分後の血糖値は、基準米飯と ST 混合米飯間に有意差は見られなかった。しかし、摂取 30 分後において、2.0%ST 混合米飯のみの血糖値は、基準米飯よりも有意に低値を示し、摂取後 30 分までの

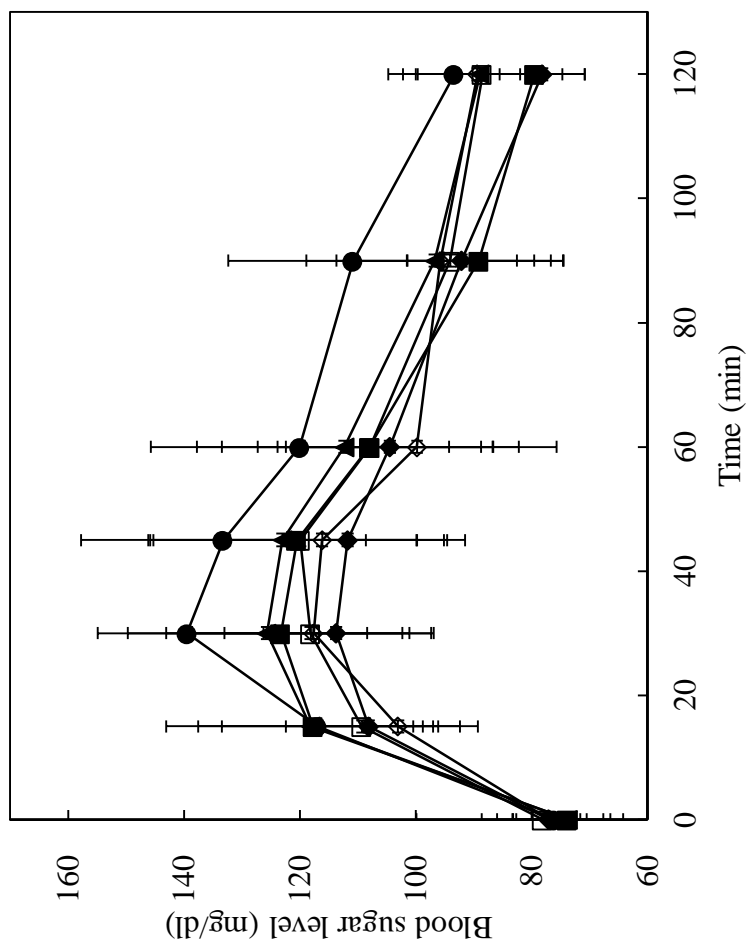


Fig.3.3. Blood sugar response curve after consuming rice cooked with glucomannan (GM-added rice).

●; 0% GM (cooked rice alone), ▲; 0.6% GM-added rice, ■; 1.0% GM-added rice,
 ◆; 2.0% GM-added rice, □; 3.0% GM-added rice, ◇; 4.0% GM-added rice,
 0% GM : 0 min < 15 min < 30 min, 90 min > 120 min
 0.6, 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 %GM-added rice : 0 min < 15 min
 30 min : 0% GM > 2.0, 3.0 and 4.0% GM-added rice
 120 min : 0% GM > 1.0 and 2.0% GM-added rice

n=13. Each value represents the mean \pm SD. Differences were significant at $p < 0.05$

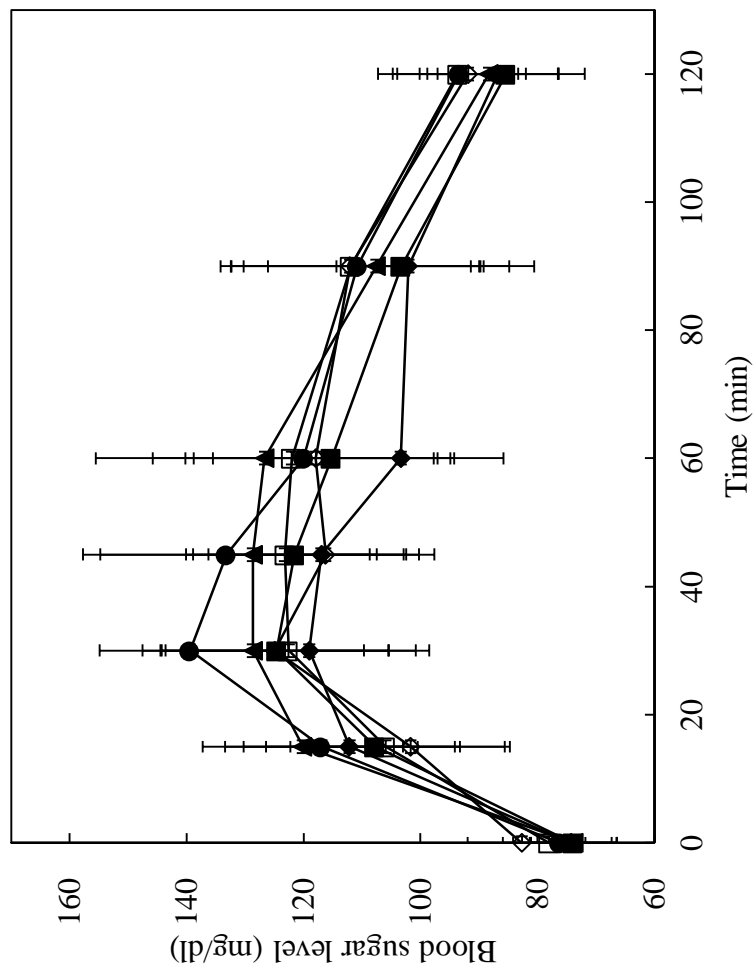


Fig. 3.4. Blood sugar response curve after consuming cooked rice mixed konjac noodles (ST-mixed rice).

●; 0% GM (cooked rice alone), ▲; 0.6% ST-mixed rice, ■; 1.0% ST-mixed rice,
 ◆; 2.0% ST-mixed rice, □; 3.0% ST-mixed rice, ◇; 4.0% ST-mixed rice,

0% GM : 0 min < 15 min < 30 min, 90 min > 120 min

0.6, 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 % ST-mixed rice : 0 min < 15 min

30 min : 0 % GM > 2% ST-mixed rice

n=13. Each value represents the mean \pm SD. Differences were significant at $p < 0.05$

血糖曲線上昇は、2.0%ST 混合米飯では、基準米飯と比較して緩慢となった。ST 混合米飯摂取後の血糖値は、摂取後 15～120 分間の 6 回の測定において、15 分と 30 分のように連続した 2 回の測定値間では有意な差は認められなかったが、他では認められた。したがって ST 混合米飯摂取 30 分後または 45 分後に血糖値はピークを示した後、時間の経過とともに有意に低下した。

2.3.2. グリセミックインデックス

Fig.3.5.にグルコースを 100 とした場合の GI を示す。基準米飯と 0.6%GM 添加米飯間には有意差が認められなかったが、1.0%以上の GM 添加米飯では有意に低下した。しかし、1.0～4.0%グルコマンナン濃度間には有意差は認められなかった。

ST 混合米飯では、基準米飯と比較し、2.0%ST 混合米飯は有意に低下したが、それ以外の ST 混合米飯と基準米飯の間には有意差が認められなかった。

2.3.3. グルコース放出量

基準米飯と GM 添加米飯を試料とした時の、パンクレアチンおよびインベルターゼ反応時間が 20 分間のグルコース放出量を Fig.3.6a.に示す。基準米飯と比較してすべての GM 添加米飯のグルコース放出量は有意に低下した。しかし、濃度の異なる GM 添加米飯間には、有意差は認められなかった。

ST 混合米飯のパンクレアチンおよびインベルターゼの反応時間が 20 分間のグルコース放出量を Fig.3.6b.に示す。基準米飯と全ての ST 混合米飯間にグルコース放出量の有意差は見られず、GM 添加米飯のグルコース放出量の結果とは異なった。

2.3.4. 組織観察および炊飯による重量変化

GM 添加米飯摂取後の GI あるいは *in vitro* 系におけるグルコース放出量の低下の要因を検討するために、米飯の組織観察を行なった。実体顕微鏡による米飯粒表面の写真を Fig.3.7.に示す。米飯粒表面の色は基準米飯では透明度が高かったが、グルコマンナンを添加すると透明度が低下し、4.0%では米飯中心部に白濁部分が観察された。また、GM 添加米飯粒の表面には、基準米飯粒では認められないグルコマンナンと考えられる付着物が見られた。

米飯横断面 (Fig.3.8.) の観察において、基準米飯粒では均一な状態であったが、グルコマンナンの濃度が上昇するに従い、中心部に不透明な白濁部分が観察された。透明度が高い場合には、光は屈折せずに直進する。しかし、構造が異なる部分では光は屈折し、白濁して観察される。GM 添加米飯粒の表面ある

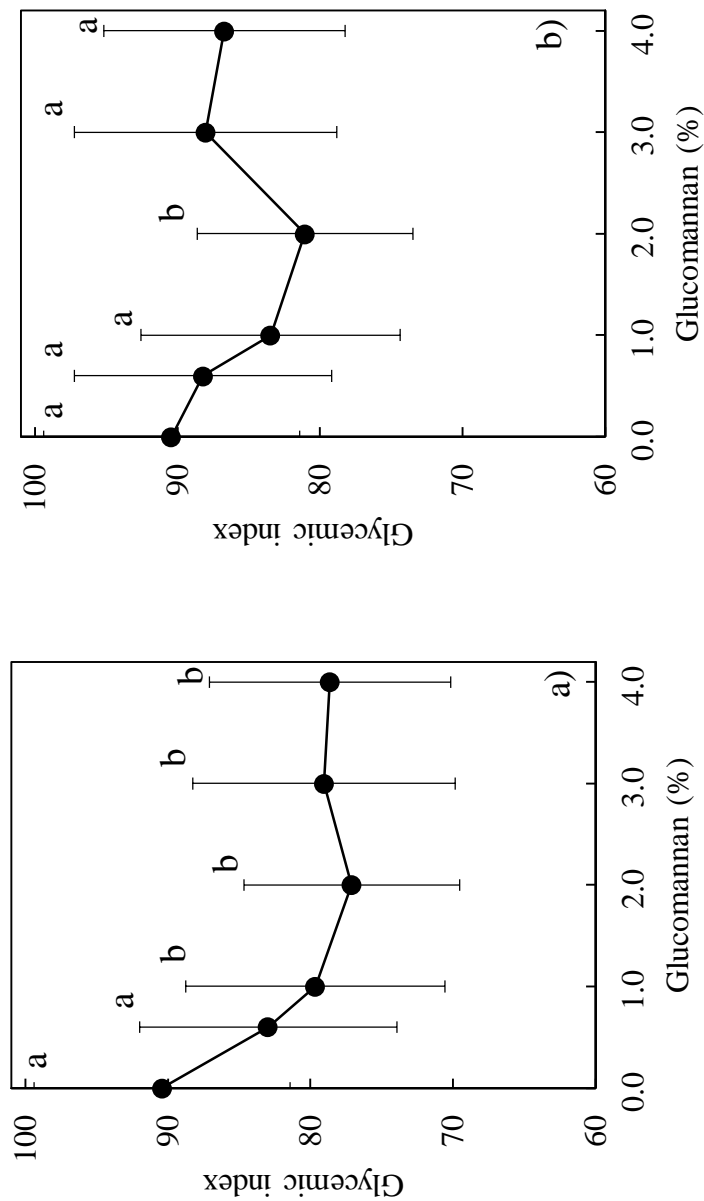


Fig.3.5 Glycemic index after consuming rice cooked with glucomannan, cooked rice mixed konjac noodles.

a): Rice cooked with glucomannan (GM-added rice)

b): Cooked rice mixed konjac noodles (ST-mixed rice)

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

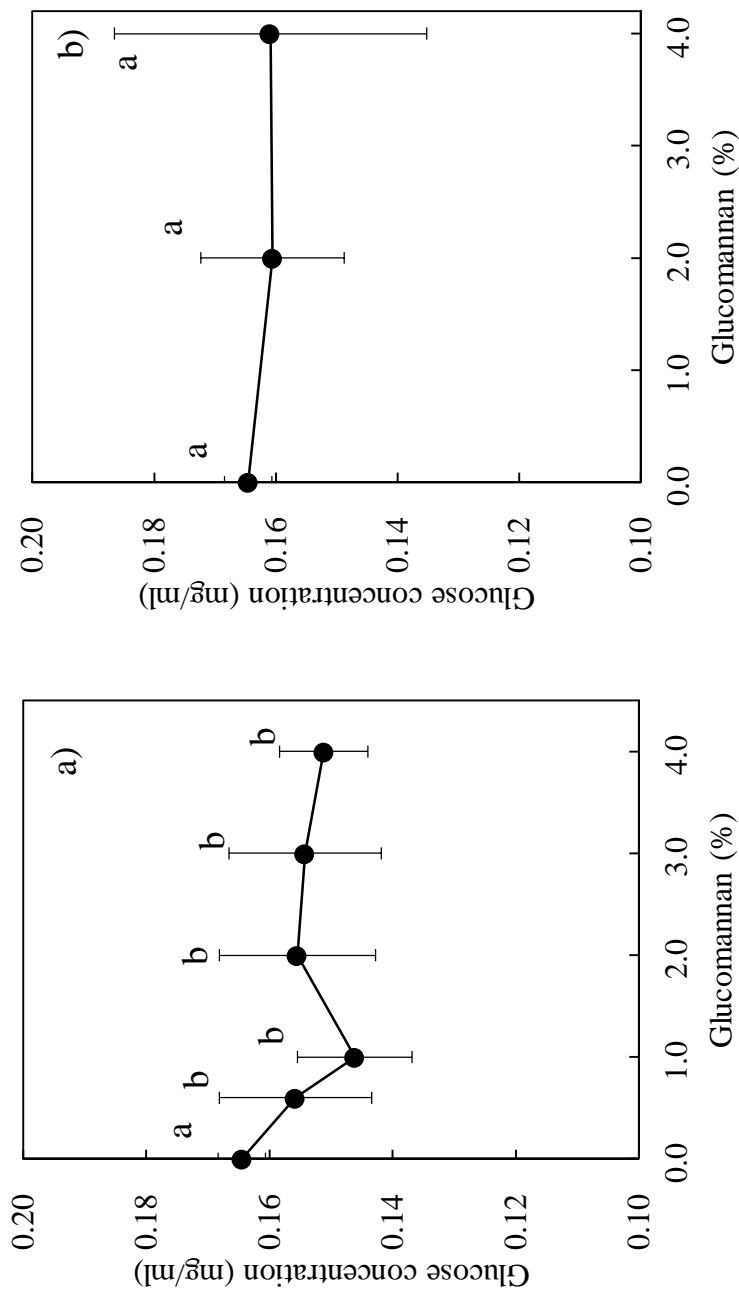


Fig.3.6. Glucose concentration of released from rice cooked with glucomannan and cooked rice mixed konjac noodles during in vitro digestive process.

a): Rice cooked with glucomannan (GM-added rice)

b): Cooked rice mixed konjac noodles (ST-mixed rice)

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

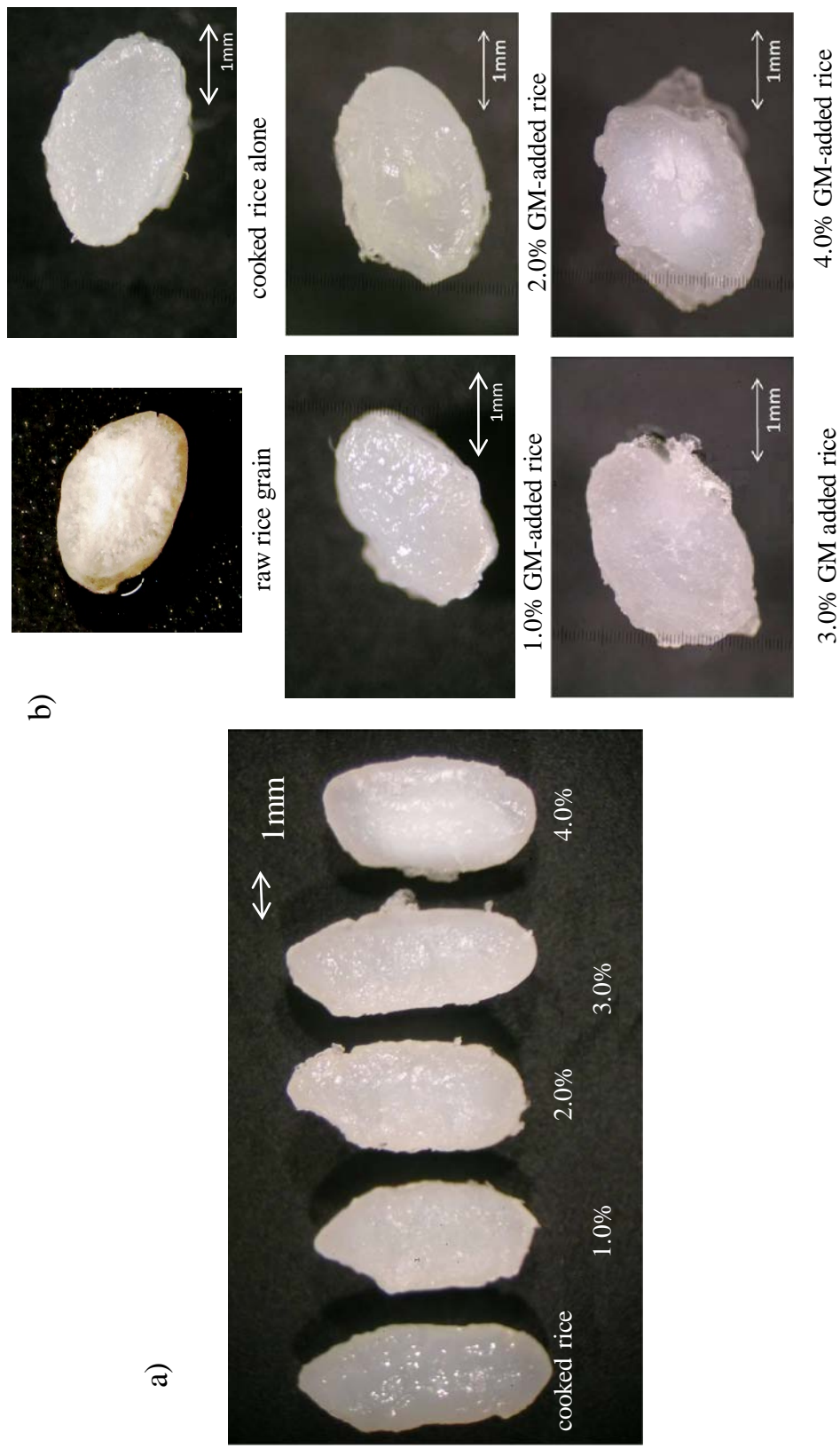


Fig. 3.7. The substance micrographs of rice grain cooked with glucomannan (GM-added rice).

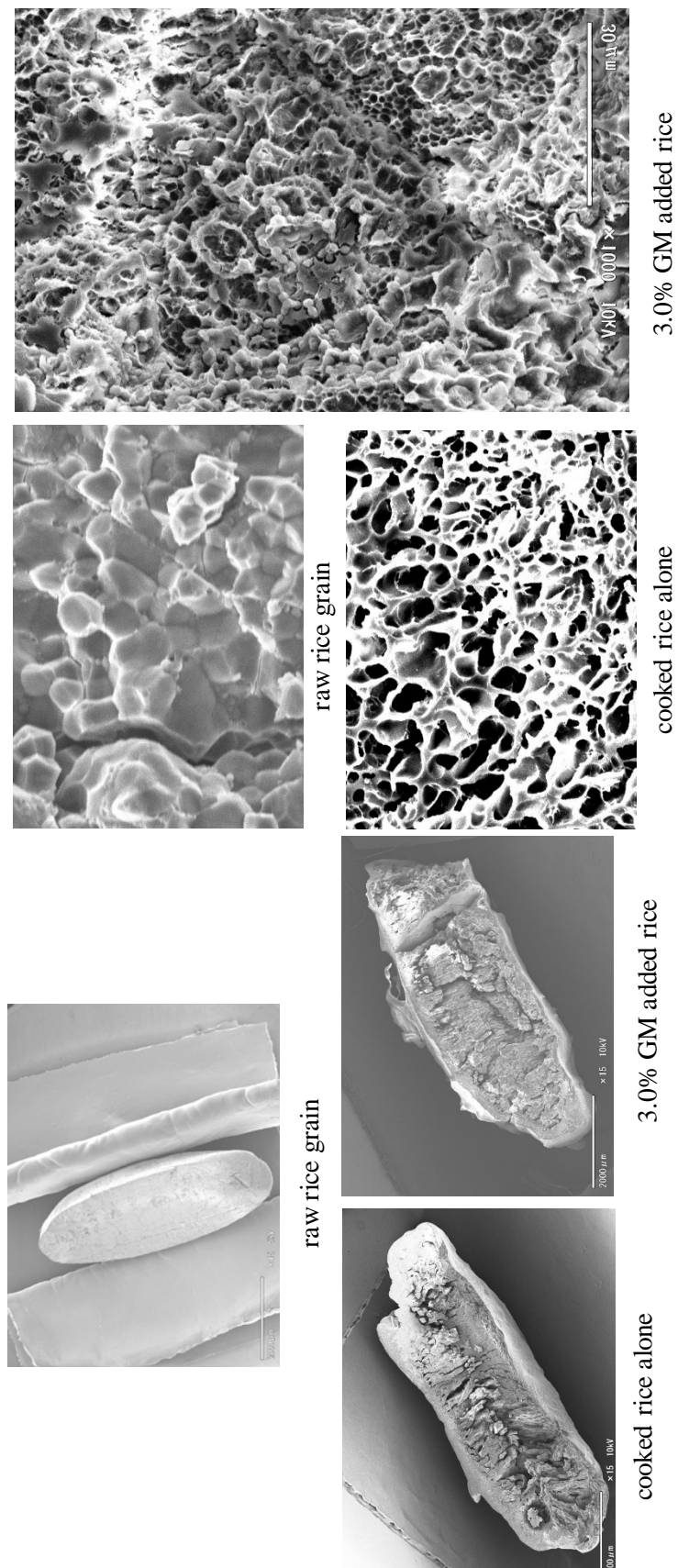


Fig. 3.8. Scanning electron micrographs of the cross-section rice grain cooked with glucomannan (GM-added rice).

いは横断面に白濁部分が観察されたのは、基準米飯粒とは異なった構造が GM 添加米飯粒内部に存在することを示していると考えられる。

Table 3.1.に米の炊飯による重量変化を示す。炊き上がり重量は、基準米飯よりも全ての GM 添加米飯の有意に増加したが、グルコマンナンの濃度間で有意な差は認められなかった。

2.3.5. テクスチャー特性

GM 添加米飯粒について、組織観察を行なったのと同様の目的で、炊飯後の米飯粒のテクスチャー特性について検討した。試料の硬さおよび付着性を Fig.3.9.に示す。硬さは、全ての GM 添加米飯粒は基準米飯粒よりも、有意に増加したが、異なるグルコマンナン濃度における硬さの相違は見られなかった (Fig.3.9a.)。

付着性は、基準米飯粒に比較して1.0%以上のGM添加で急激に低下したが、1.0%以上のGM添加米飯粒間には有意差は認められなかった。また、基準米飯粒と0.6%GM添加米飯粒間には、有意差は認められなかった (Fig.3.9b.)。

2.3.6. 熱特性

組織観察あるいはテクスチャー特性と同様の目的で熱特性について測定した。試料の昇温DSC曲線をFig.3.10.に示す。グルコマンナン単独では、高温側に吸水のためと考えられるわずかな吸熱が認められた。

GM無添加米粒では、77℃、93℃付近に吸熱ピークが観察された。森高ら⁷³⁾は米粒の熱的变化における低温側の吸熱ピークはアミロペクチンの熱的变化に相当し、高温側の吸熱ピークはアミロースと脂質の複合体の熱的变化に由来すると考えられることを報告している。本実験においても、低温側のピークはアミロペクチン、高温側のピークはアミロースと脂質の複合体の熱的变化に相当すると考えられる。

アミロペクチンの熱的变化に相当する吸熱ピークは、GM無添加米飯においては64℃付近にショルダーが認められたが、GM添加米粒においては、グルコマンナンの添加濃度が増加するに従い小さくなった。アミロースと脂質の複合体の熱的变化に由来する吸熱ピークは、GM添加米粒においてはやや高温側にシフトした。

昇温DSC曲線における低温側の吸熱ピークのエンタルピーは、1.0、2.0%GM添加米粒においては、GM無添加米粒よりも大きかった。しかし、この温度帯におけるグルコマンナンの吸熱ピークのエンタルピーを差し引いても、GM添加米粒の吸熱ピークのエンタルピーがGM無添加米粒より大きかった。このこ

Table 3.1. Weight ratio of rice cooked with glucomannan to raw rice.

Sample	Weight ratio (%)
0% cooked rice	217 ± 0.8 ^a
0.6% rice cooked with glucomannan	233 ± 1.3 ^b
1.0% rice cooked with glucomannan	235 ± 1.3 ^b
2.0% rice cooked with glucomannan	235 ± 1.5 ^b
3.0% rice cooked with glucomannan	236 ± 1.8 ^b
4.0% rice cooked with glucomannan	236 ± 1.6 ^b

Each value represents the mean ± SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

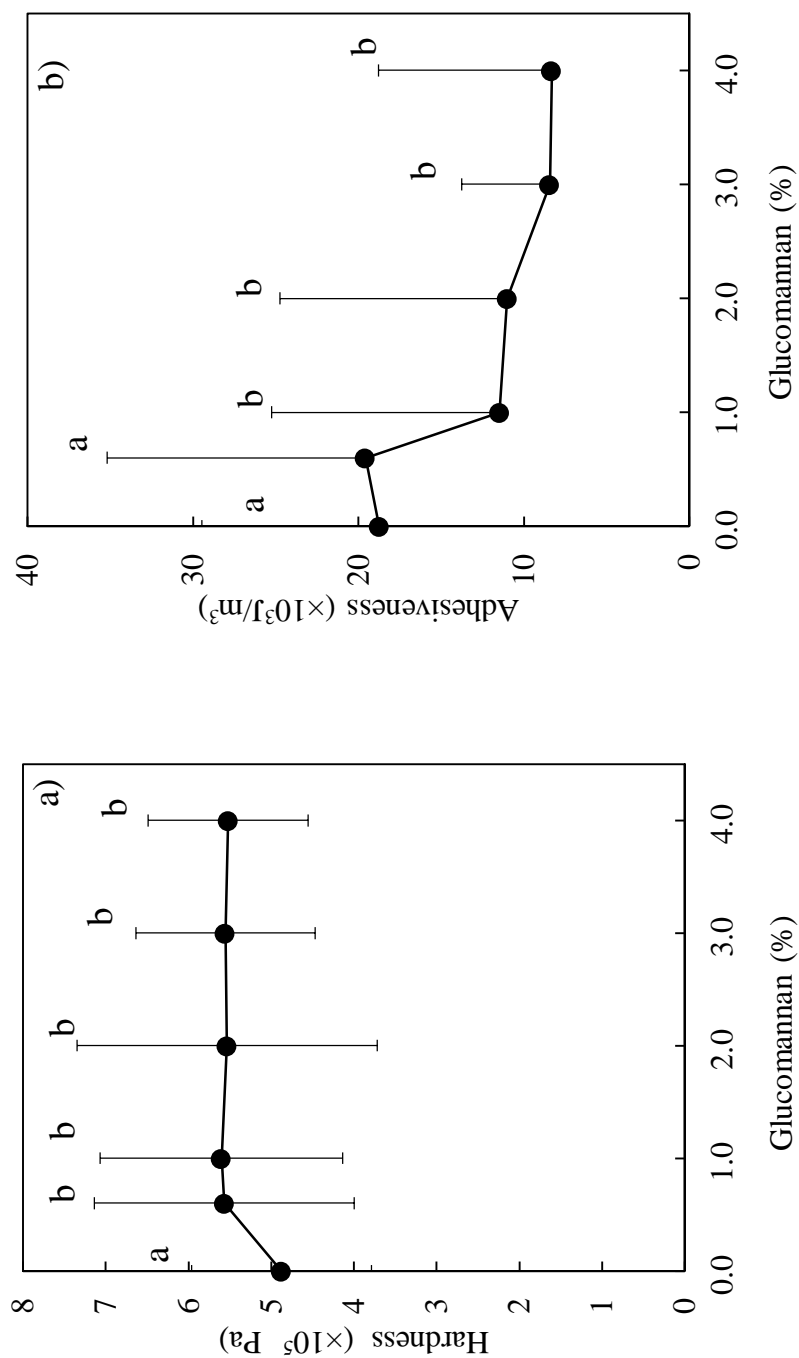


Fig.3.9. Texture properties of rice grain cooked with glucomannan.

a) Hardness, b) Adhesiveness

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

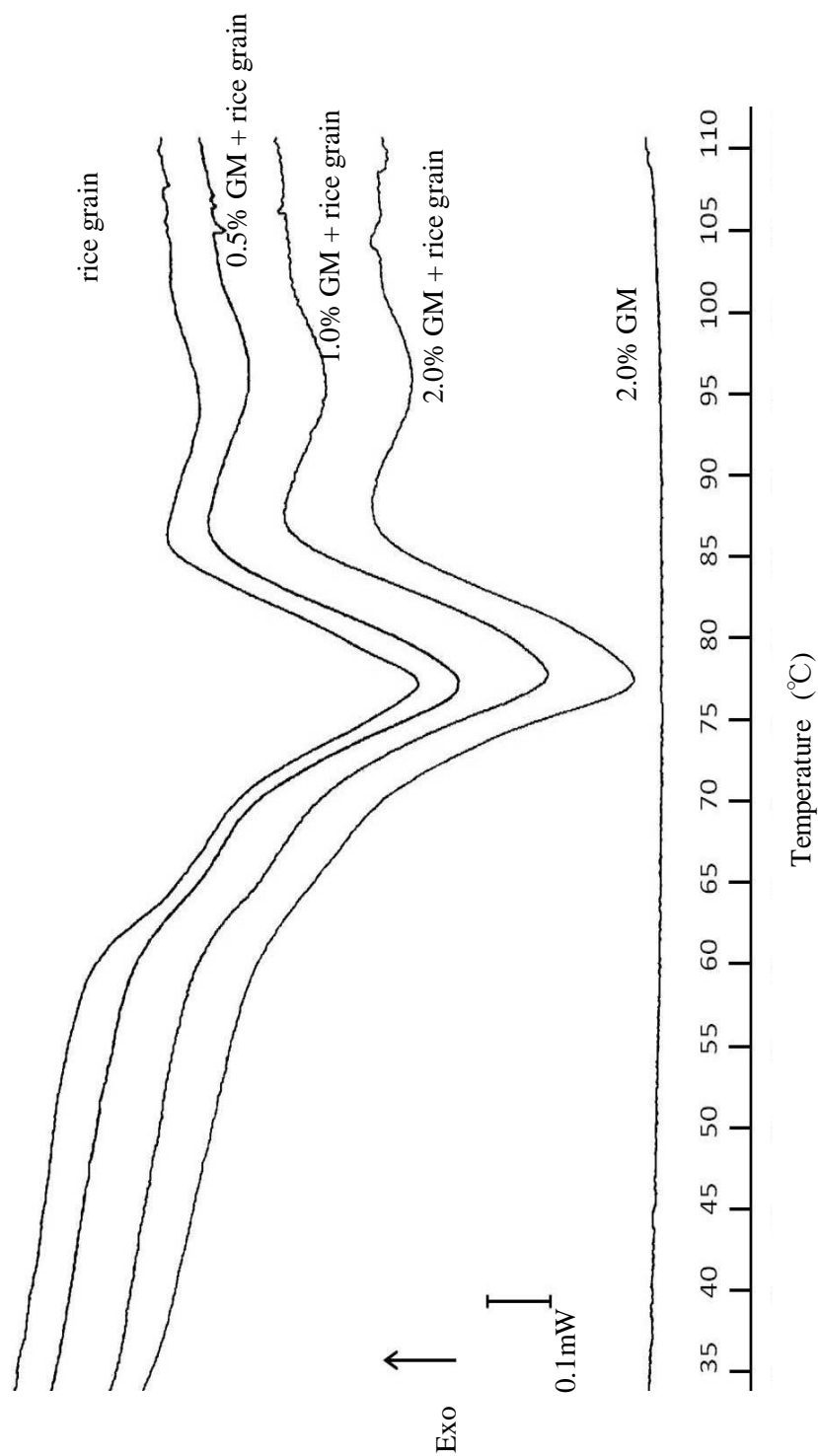


Fig.3.10 Heating DSC curves of rice grain, glucomannan (GM), and rice grain with glucomannan (GM).

Temperature was raised from 25.0°C to 110.0°C at 0.3°C/min

とから、アミロペクチンの水和、膨潤に要するエンタルピーがグルコマンナンの存在により、より多く必要となったためであろうと推察される。

試料の降温DSC曲線をFig.3.11.に示す。グルコマンナン単独での発熱ピークは見られなかった。GM無添加米粒では85℃付近に発熱ピークが観察された。一方、GM添加米粒の発熱ピークは84℃付近に見られ、グルコマンナンの添加によりエンタルピーは減少した。

2.3.7. 官能評価

グルコマンナンの利用性を検討するために行なった官能評価結果を Fig.3.12.に示す。外観について、基準米飯と比較し全ての GM 添加米飯は有意に劣ると評価された。0.6%と 1.0%以上の GM 添加米飯間、1.0%と 2.0%以上 GM 添加米飯間には有意差が認められた。

香りについて、基準米飯と比較し全ての GM 添加米飯は、有意に劣ると評価された。1.0～3.0%GM 添加米飯間では、有意差が認められなかったが、1.0%および 2.0%GM 添加米飯よりも 4.0%GM 添加米飯では、さらに有意に低いと評価された。

味について、基準米飯と比較し全ての GM 添加米飯は、有意に劣ると評価された。0.6%と 1.0%以上 GM 添加米飯間、1.0%と 2.0%以上 GM 添加米飯間に有意な味の低下が認められ、2.0%以上 GM 添加米飯間では、有意差が認められなかった。

粘りについて、基準米飯と比較し全ての GM 添加米飯は有意に低下すると評価された。0.6%と 1.0%以上 GM 添加米飯間に有意な低下が認められた。

硬さについて、基準米飯と比較し全ての GM 添加米飯は有意に増加すると評価された。0.6%と 1.0%以上 GM 添加米飯間、1.0%と 2.0%以上 GM 添加米飯間に有意な増加が見られたが、2.0%～4.0%間には有意差が認められなかった。総合評価について、基準米飯と比較し全ての GM 添加米飯は有意に劣るとされた。0.6%と 1.0%以上 GM 添加米飯間、1.0%と 2.0%以上 GM 添加米飯間に有意な差が認められた。

2.4. 考察

本研究はグルコマンナンが米飯摂取後の血糖値上昇に及ぼす影響について検討した。GM 添加米飯において、血糖値は、基準米飯と比較し米飯摂取 30 分後に 2.0%以上 GM 添加米飯で有意に低下した (Fig.3.3.)。グリセミックインデックスおよび *in vitro* におけるグルコース放出量では、全ての GM 添加米飯において基準米飯に比較し有意に低値を示した (Fig.3.5., 3.6a.)。GM 添加米飯

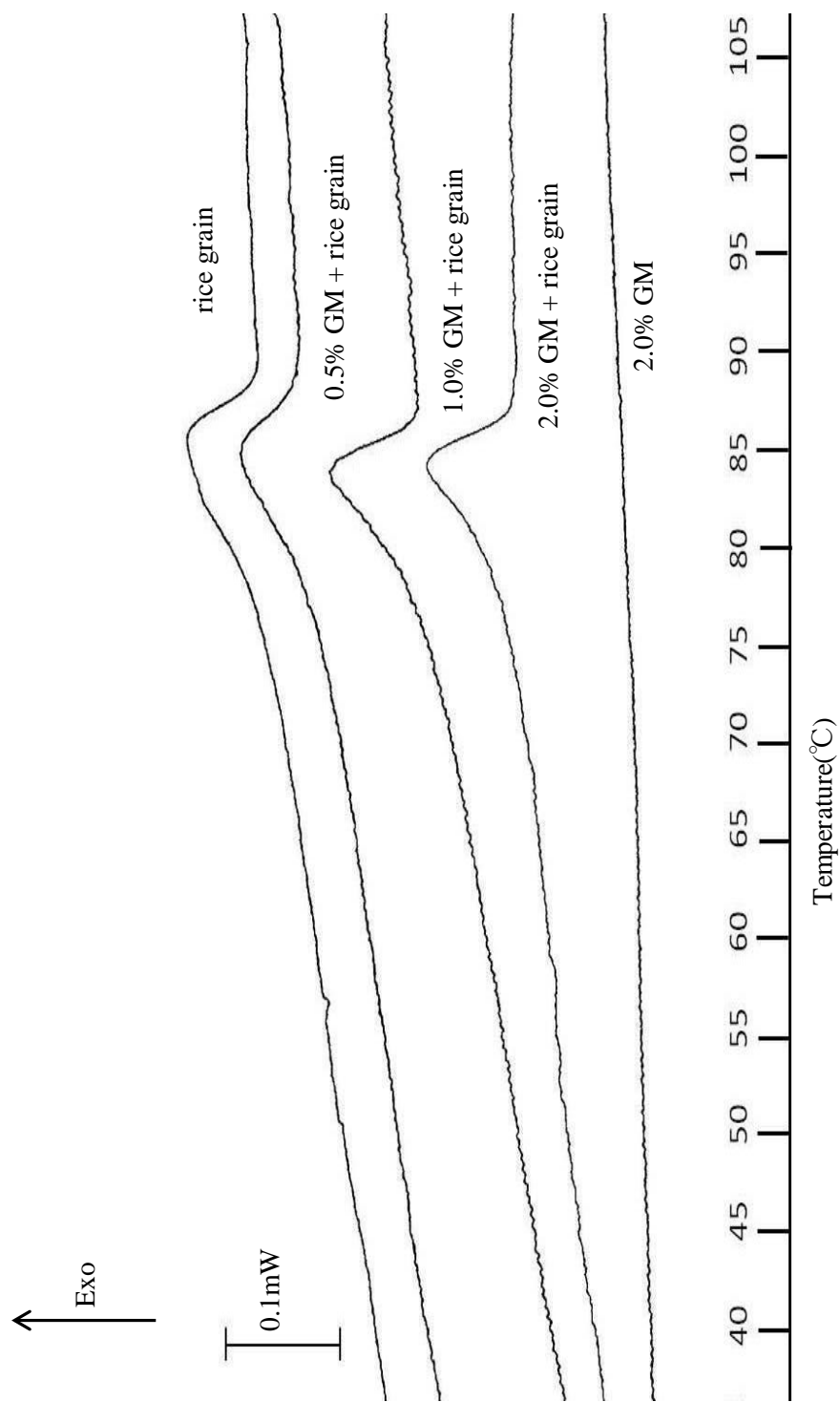


Fig.3.11 Cooling DSC curves of rice grain , glucomannan (GM), and rice grain with glucomannan (GM).

Temperature was reduced from 110.0°C to 25.0°C at 0.3°C/min

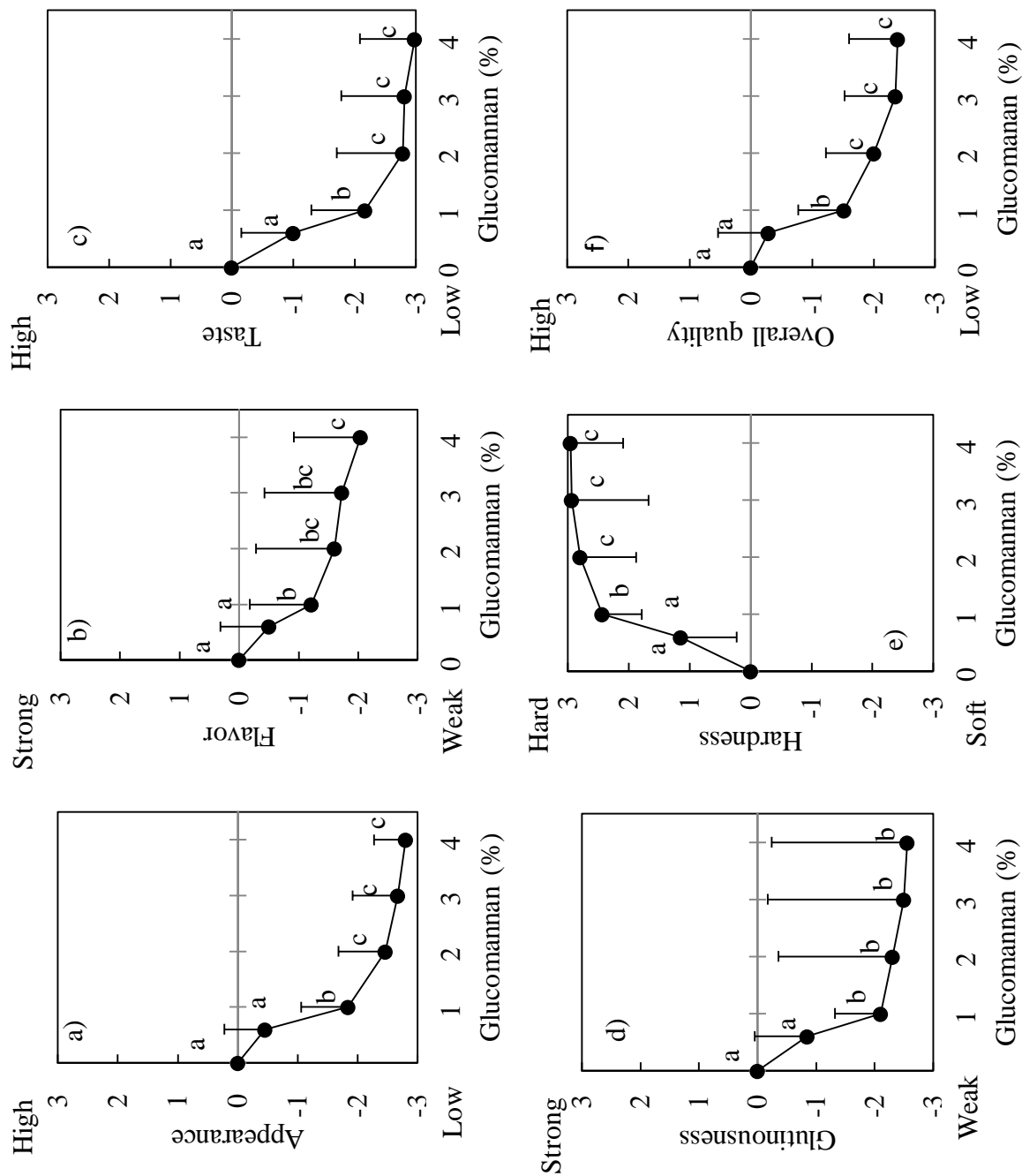


Fig.3.12 Sensory evaluation of rice cooked with glucomannan.

a) Appearance, b) Flavor, c) Taste, d) Glutinousness, e) Hardness, f) Overall quality

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

におけるグリセミックインデックスおよび *in vitro* におけるグルコース放出量の低下の原因を究明するために実施した顕微鏡の組織観察においては、米飯粒中心部において白濁部分が認められ (Fig.3.7.,3.8.)、また、機器測定においては硬さが増加した (Fig.3.9a.)。

降温 DSC 曲線 (Fig.3.11.) においては、グルコマンナンの添加によりエンタルピーは減少した。この結果の原因は、アミロースの再配列が抑制されたためではなく、昇温時のアミロースおよびアミロペクチンの熱的变化が抑制されていたことによるためではないかと考えられた。さらに、生米の重量に対する炊き上がりの米飯重量の増加率は、グルコマンナンを添加することにより有意に増加した (Table 3.1.)。このことは、炊飯中に水分の蒸発が抑制されたことを示し、炊飯中に水の対流が妨げられ、炊飯における米粒でんぷんの水和膨潤が抑制されたことが推察される。以上のことより、GM 添加米飯摂取後の血糖値上昇を抑制した要因の一つは、グルコマンナンが、米粒の糊化を抑制したことではないかと考えられる。

一方、GM 添加米飯と同濃度のグルコマンナンを含む ST 混合米飯において、血糖値は基準米飯と比較して米飯摂取 30 分後では、2.0%ST 混合米飯 (Fig.3.4.) のみで有意に低下した。グリセミックインデックスにおいても、2.0%ST 混合米飯のみで、基準米飯に比べて有意に低下し、他の ST 混合米飯では基準米飯との間で有意差が認められなかった。In vitro におけるグルコース放出量は、測定した 2.0%および 4.0%ST 混合米飯では基準米飯との間に有意差は認められなかった (Fig.3.6b.)。これらの結果は、グルコマンナン濃度をほぼ同一とした GM 添加米飯の結果とは異なった。

食物繊維はヒトの消化酵素では分解されないと定義されているが、グルコマンナンについてはヒトの腸内において分解能をもつ腸内細菌が存在することが報告されている³²⁾。ヒト腸内細菌の一種である *Aerobacter mannanolyticus* は、TCA サイクルを有し、クエン酸や酢酸、リンゴ酸などを炭素源とする代謝機構をもち、マンナーゼを生成している。腸内においてマンナーゼはグルコマンナンをグルコースとマンノースに分解し、生成糖の一部は *A. mannanolyticus* により代謝され、*A. mannanolyticus* はさらに増殖し、多量のマンナーゼを生成する。その結果、グルコマンナンの分解が促進され、消化率が上昇すると推察されている^{74,75)}。これらの報告から、本研究に参加した被験者の中にもヒトの腸内細菌である *A. mannanolyticus* のマンナーゼ活性の高い者がいた可能性が考えられる。2.0%ST 混合米飯では、しらたきと米飯が共存することにより、血糖値上昇が抑制された。しかし、3.0%以上の ST 混合米飯では摂取するしらたき量がさらに増加したため、マンナーゼによるしらたき

の分解量が多くなり、グリセミックインデックスが上昇したのではないかと推察される。被験者ごとのデータは示していないが、13 名中 4 名のグリセミックインデックスは、2.0%ST 混合米飯よりも 3.0%以上 ST 混合米飯において上昇していた。さらに、14 名の被験者を追加して実験を行なった結果、14 名中 4 名においても 3.0%、4.0%ST 混合米飯においてグリセミックインデックスは増加した。2.0%ST 混合米飯においては、グルコマンナンによる血糖値上昇の遅延作用が、*A. mannanolyticus* のマンナーゼによるグルコマンナンの分解よりも上回ったため、血糖値抑制が測定されたのではないかと考えられる。しかしながら、本研究においては、血糖値変化のみを測定し、インクレチン分泌量やインスリン分泌量については測定しなかったため、これらを含め、今後、更なる検討が必要であると考えられる。

Cummings ら⁷⁶⁾や Holt ら⁷⁷⁾は、食物繊維を食事と共に摂取することにより血糖値が低下するのは、食物の胃内の停滞時間の延長によるものと報告し、この要因による血糖値の低下については、数多くの報告がされている^{78,79)}。また、土井ら⁸⁰⁾はグルコマンナンが食後の血糖値上昇に抑制効果があるのは、グルコマンナンの粘度が糖質の吸収を障害するのではなく、吸収の遅延によるものとも報告している。本研究において、GM 添加米飯および ST 混合米飯摂取後の血糖値上昇抑制においても、グルコマンナンによる胃内の停滞時間の延長やそれに伴う腸内での吸収の遅延がその原因であると考えられる。

以上のことより、GM 添加米飯においては、炊飯時のグルコマンナン添加が米飯粒の熱的变化により糊化を抑制したことが顕微鏡観察およびテクスチャー特性値より確認され、消化管内でのグルコースの放出を抑制することが示唆された。ST 混合米飯では、グルコマンナンによる米飯の胃内の停滞時間が延長するが、腸内細菌によるマンナーゼがグルコマンナンを分解することによる血糖値上昇が共に生じた可能性も考えられる。しかし、グルコマンナンによる胃内の食塊の停滞時間の延長および、腸内細菌のマンナーゼによるグルコマンナンの分解については、本研究では確認できなかった。これらの点については、今後、検討する必要があると考えられる。官能評価においては、全ての GM 添加米飯において、GM の濃度が増加すると、外観、香り、味は低い評価となり、粘りは弱くなり、硬さは増加すると評価された (Fig.3.12.)。これらのことからグルコマンナンの炊飯時の添加量は 1.0%添加が実用的ではないかと考えられた。

2.5. 要約

米飯摂取後の血糖値上昇抑制を目的として、米飯炊飯時にグルコマンナンを

添加した効果と、米飯にしらたきを混合して摂取した効果について検討した。

グルコマンナン添加米飯においては、グリセミックインデックスおよびグルコース放出量は、1.0%以上グルコマンナン添加米飯では有意に低下し、しらたき混合米飯では 2.0%しらたき混合米飯のみで有意な低下を示した。グルコマンナンを添加した米飯においては、米飯粒の内部に白濁部分が見られ、機器測定 hardness は、1.0%以上グルコマンナン添加により有意に増加した。

これらのことから、炊飯時にグルコマンナンが米粒の糊化を抑制することと、グルコマンナンによる胃内の停滞時間の延長により血糖値上昇の抑制が示唆されたこと、それらと共に、腸内細菌によるマンナーゼがグルコマンナンを分解することによる血糖値上昇も生じた可能性が考えられる。また、炊飯時のグルコマンナンの添加量は 1.0%程度の添加が良いと考えられた。

第3章 形態の異なる κ -カラギーナンが米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響

3.1. 緒言

食物繊維には様々な構造をもつものがあるが、カラギーナンについての血糖値への影響に対して報告された例は少ない⁸¹⁻⁸³⁾。カラギーナンは寒天と同様に紅藻類から得られる高分子多糖類である。カラギーナンの基本構造は寒天とほぼ同じであるが、アンヒドロガラクトースが寒天ではL型であるのに対してD型である。 κ -カラギーナンは2分子に1個の割合で硫酸基を有する。この硫酸基由来のマイナス電荷は、二価のカチオンとイオン結合し、その結果ゲルの熱安定性は高まる³⁵⁾。

本章では、寒天およびグルコマンナンと同様にゲル化する κ -カラギーナンを用い、 κ -カラギーナンと共に炊飯した米飯、塩化カルシウム添加あるいは塩化カルシウム無添加 κ -カラギーナングルを混合した米飯を摂取した後の血糖応答が、米飯単独摂取後の血糖応答とどのように異なるのか検討した。

3.2. 実験材料および方法

3.2.1. 試料

米は第1、2章と同様に、新潟県産水稻精白米「こしいぶき」⁵⁹⁾を用いた。 κ -カラギーナンは三栄源 F.F.I 社製 (Lot:020129) を用い、塩化カルシウム (CaCl_2) は和光純薬工業株式会社製 (食品添加物) を用いた。

κ -カラギーナングルの κ -カラギーナン濃度は2.0%とし、室温で一晩膨潤後、70℃で30分間加熱し、さらに90℃で30分間加熱溶解した。溶解後、型に流し、室温で60分間放置後、7℃で24時間恒温器中に静置した。 κ -カラギーナングルの大きさは、1辺5mmの立方体となるように切断した。なお、 CaCl_2 添加 κ -カラギーナングルの CaCl_2 濃度は0.2%とし、 κ -カラギーナングルと同様に加熱溶解後、 CaCl_2 を添加し、1辺5mmの立方体とした。

米180gを純水で洗米後、米重量の1.4倍の脱イオン水を加え、室温(25±3℃)で吸水率が安定する1時間の浸漬の後、電気炊飯器(Panasonic社製、SR-CL05P)により炊飯した。以下、これを基準米飯とする。

κ -カラギーナン添加米飯(以下、CP添加米飯とする)は、基準米飯と同様に、1時間浸漬後、炊飯直前に、米重量に対して0.5、1.0、1.6% κ -カラギーナンを添加して炊飯した。 κ -カラギーナンは、室温で一晩膨潤しておいたものを添加した。炊飯後の蒸らし時間は30分間とした。組織観察、テク

スチャー特性、官能評価に用いた試料は、常に一定状態の米飯粒を得るために、電気炊飯器の釜の中心部分から採取した米飯粒とした。

κ -カラギーナンゲル混合米飯（以下、CG 混合米飯とする）および CaCl_2 を含む κ -カラギーナンゲル混合米飯（以下、CG- CaCl_2 混合米飯とする）は、基準米飯に CP 添加米飯と同程度の κ -カラギーナン濃度となるよう試験直前に基準米飯と κ -カラギーナンゲルあるいは CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルを混合し調製した。

3.2.2. 組織観察

実体顕微鏡（オリンパス社製 SZ401）を用い、基準米飯粒、0.5、1.0、1.6% CP 添加米飯粒を試料とし、米飯粒の形状を 6.7 倍で観察した。走査型電子顕微鏡（JEOL 社製 JSM-5310JV）による組織観察は、基準米飯粒および 3 種の CP 添加米飯粒を凍結乾燥後、米飯粒のまま、あるいはカミソリで横に切断し、イオンスパッタ（JEOL 社製 JFC1100）により金を蒸着した試料について、15 倍あるいは 35 倍で観察した。

3.2.3. テクスチャー特性の測定方法

テクスチャー特性の測定は、第 2 章と同様の方法で行った。試料は、基準米飯粒、0.5、1.0、1.6% CP 添加米飯粒とした。

3.2.4. ゲル食塊の状態観察

CG 混合米飯および CG- CaCl_2 混合米飯に用いた κ -カラギーナンゲルあるいは CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルを試料とし、6g を口に含み、20 回、30 回、50 回咀嚼後に、口腔内よりすべてのゲル食塊を回収し写真撮影を行なった。

3.2.5. ゲルの熱特性の測定方法

サンプルケース（ハステロイ C 製）に κ -カラギーナンゲルあるいは CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲル 800mg を入れ、超高感度示差走査熱量計 Micro-DSC-III（Setaram 社製、フランス）を用いて、昇降温 DSC 曲線を測定した。なお、対照として、同量の脱イオン水を用いた。測定は、100℃から 5℃まで 0.5℃/min で降温し、5℃で 10 分間保持した後、100℃まで 0.5℃/min で昇温した。エンタルピーは試料総重量に対して求めた。

3.2.6. 血糖値の測定およびグリセミックインデックスの算出方法

被験者は、通常の日常生活を営み、これまでに糖尿病と診断されたことのない健常な女子学生（20～38 歳）13 名とした。試験参加への同意後に測定した被験者の空腹時血糖は、平均 $75.2 \pm 7.0 \text{ mg/dL}$ であり、いずれも試験開始時において糖尿病診断基準により正常型と診断される範囲であった。血糖値測定の実施に関しては、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、血糖値の測定方法、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。

試験食は、基準米飯、0.5、1.0、1.6%CP 添加米飯、CG 混合米飯、および 0.5、1.0、1.6、2.5%CG- CaCl_2 混合米飯を用いた。本各試験食に含まれる米飯の糖質量は 50g とし、摂取時に飲む水との総重量は 250g とした。また、CG 混合米飯あるいは CG- CaCl_2 混合米飯を試験食とする場合には、米飯と摂取時に飲む水および κ -カラギーナンゲルあるいは CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルとの 3 種試料の総重量は 250g とした。試験食の摂取方法は、被験者らは米飯と水を交互に時間内に摂取し、1 口の分量はおよそ 10g 程度とし、1 口の咀嚼を 30 回とした。

血糖値測定およびグリセミックインデックス値 (GI) の算出方法は、第 1、2 章と同様の方法で行った。

3.2.7. グルコース放出量の測定方法

グルコース放出量の測定は、第 2 章と同様の方法で行った。試料は、基準米飯、CP 添加米飯、CG 混合米飯および CG- CaCl_2 混合米飯とし、血糖値測定と同様のものを用いて測定した。パンクレアチンとインペルターゼを添加し、37℃、20 分間振とう後のグルコース量を測定した。

3.2.8. 官能評価の測定方法

測定方法は、第 1、2 章と同様の方法で行った。パネルは視覚、味覚、臭覚が一般的な 20～38 歳の女子学生 13 名とし、官能評価の実施に関しては、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、官能評価の方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。試料は、基準米飯に対して 0.5、1.0、1.6%CP 添加米飯とした。

3.2.9. 統計処理

統計処理は SPSS Statistics 21 を用いた。血糖値、GI およびグルコース放

出量は二元配置分散分析後、Tukeyの方法で多重比較を行い、テクスチャー特性および官能評価は一元分散分析後、Tukeyの方法で検定した。有意水準は5%とした。

3.3. 実験結果

3.3.1. 組織観察

実体顕微鏡による米飯粒表面の代表的なものを Fig.4.1.に示す。基準米飯粒では、炊飯により米飯粒の長さが伸長したが、CP 添加米飯粒では米飯粒の長さが短かった。

走査型電子顕微鏡による米飯粒の表面および横断面の代表的な観察結果を Fig.4.2.および Fig.4.3.に示す。基準米飯粒の表面は亀裂のない均一な状態であったが、 κ -カラギーナンを添加して炊飯すると、表面には亀裂が生じた (Fig.4.2b~d.)。横断面において、基準米飯においては、米飯粒全体に均一なでんぷん糊化の組織が見られた。0.5%および 1.0% κ -カラギーナン添加米飯粒では、堅く詰まった組織が観察された。1.6% κ -カラギーナン添加米飯粒では、大きな空洞と不均一な組織が観察された (Fig.4.3d.)。

3.3.2. テクスチャー特性

CP 添加米飯粒の硬さおよび付着性を Fig.4.4.に示す。全ての CP 添加米飯粒の硬さは、基準米飯粒の硬さよりも有意に増加したが、1.0~1.6% CP 添加米飯粒間には有意差は見られなかった (Fig.4.4a.)。

付着性は、基準米飯粒と比較してすべての CP 添加米飯粒で有意に低下した。1.0%CP 添加米飯粒の付着性は、0.5% CP 添加米飯粒よりも有意に低下したが、1.0%CP 添加米飯粒と 1.6%CP 添加米飯粒の間には有意差は見られなかった (Fig.4.4b.)。

3.3.3. ゲル食塊の状態

κ -カラギーナングルあるいは CaCl_2 添加 κ -カラギーナングルが米飯との混合による食塊の形成にどのような影響を及ぼすのか検討するために、 κ -カラギーナングルと CaCl_2 添加 κ -カラギーナングルの咀嚼後の食塊を Fig.4.5.に示す。 κ -カラギーナングルにおいては、20 回咀嚼では、ゲルは元の形を保っているものと砕かれたものが混在し、破壊されたゲルの形状は丸みを帯びていた (Fig.4.5b.)。30 回咀嚼では、破壊片は 20 回咀嚼と比較して細くなり、融解した状態が観察された (Fig.4.5c.)。さらに、50 回咀嚼では食塊を形成している破壊片は小さくなり、融解が進行した状態であった

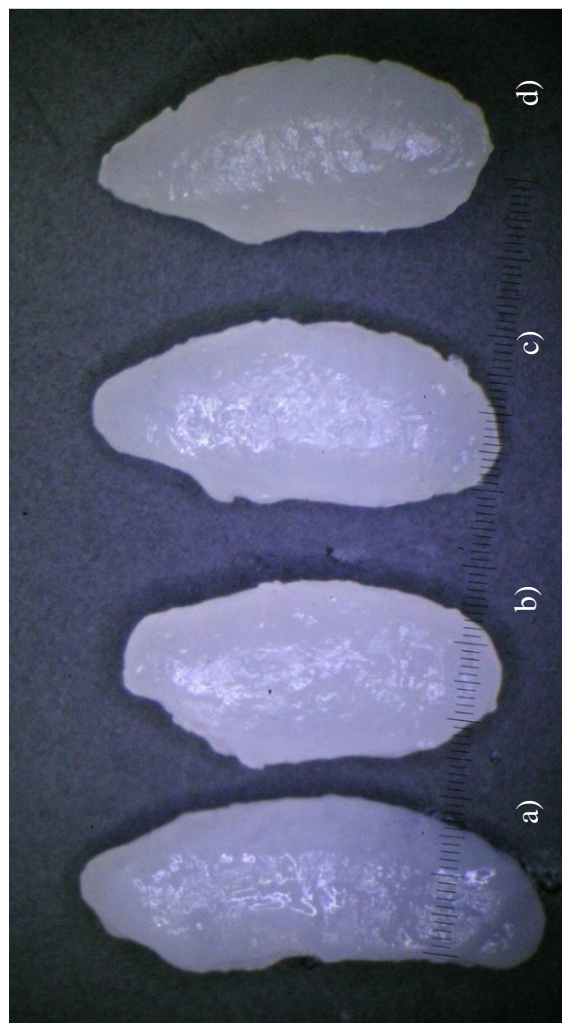


Fig. 4.1. Micrographs of the surface of rice cooked with κ -carrageenan.
Concentration of κ -carrageenan : a) 0%, b) 0.5%, c) 1.0%, and d) 1.6%

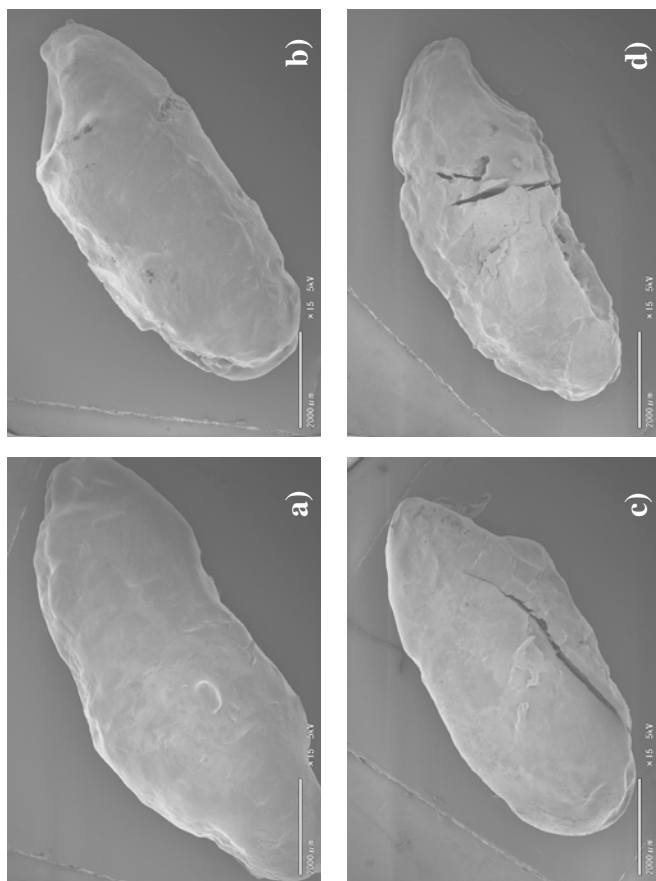


Fig. 4.2. Scanning electron micrographs (SEM) of rice cooked with κ -carrageenan. Concentration of κ -carrageenan : a) 0%, b) 0.5%, c) 1.0%, and d) 1.6%

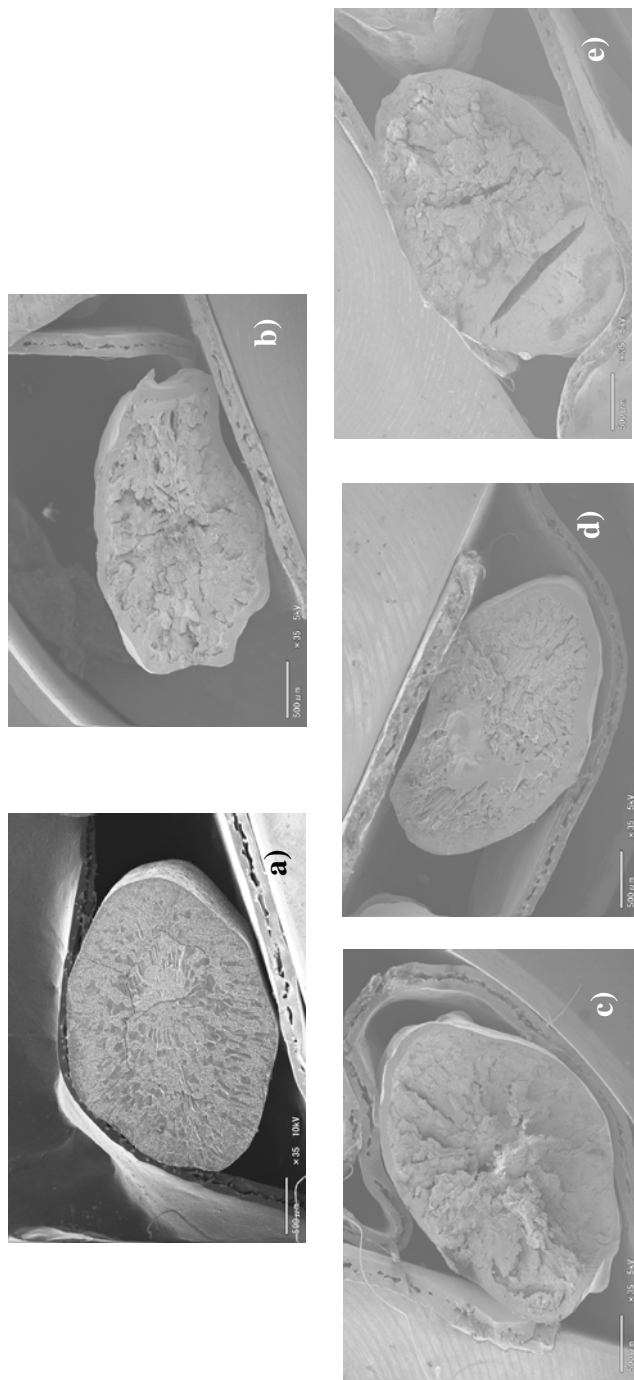


Fig. 4.3. Scanning electron micrographs (SEM) of rice cooked with κ -carrageenan.

a) raw rice grain,

Concentration of κ -carrageenan : b) 0%, c) 0.5%, d) 1.0%, and e) 1.6%

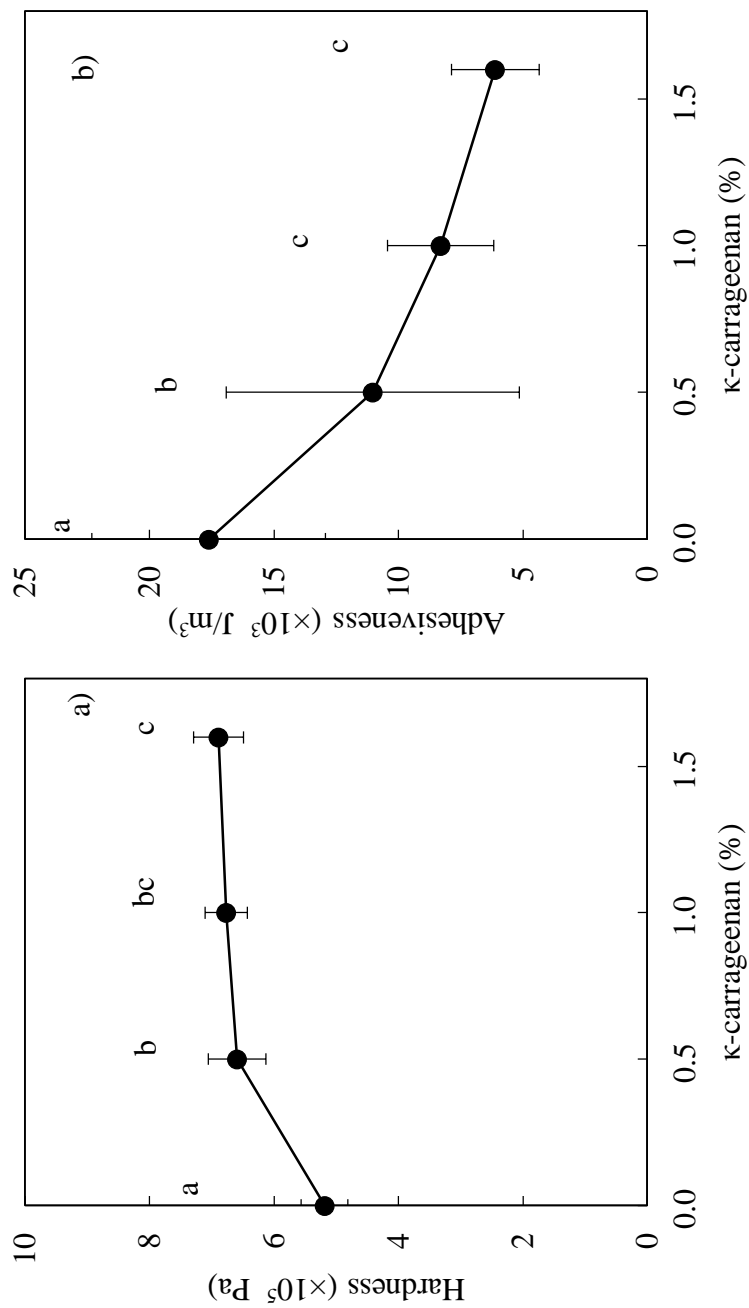


Fig. 4.4. Texture properties of rice cooked with κ -carrageenan.

a) Hardness, b) Adhesiveness

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

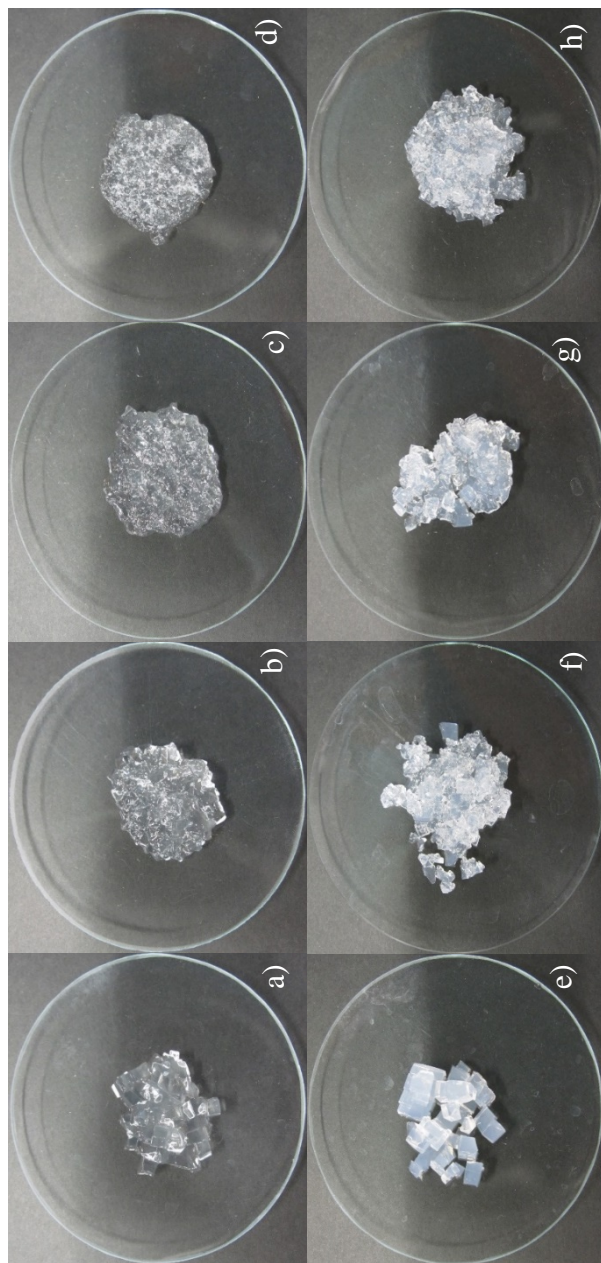


Fig.4.5. Image of the κ -carrageenan gel with and without CaCl_2 after chewing.

κ -carrageenan gel : a) 0 chewing cycle, b) 20 chewing cycles, c) 30 chewing cycles, d) 50 chewing cycles
 κ -carrageenan gel with CaCl_2 : e) 0 chewing cycle, f) 20 chewing cycles, g) 30 chewing cycles, h) 50 chewing cycles

(Fig.4.5d.)。

CaCl₂ 添加 κ -カラギーナンゲルにおいては、20 回咀嚼では荒く砕かれた破壊片が観察され (Fig.4.5f.)、30 回咀嚼では細かい破壊片が増加した (Fig.4.5g.)。50 回咀嚼では、20 回および 30 回咀嚼で形成された破壊片よりさらに細かく破壊された破壊片によって食塊が形成されていたが、 κ -カラギーナンゲルとは異なり、破壊片の融解は認められなかった (Fig.4.5h.)。

3.3.4. 熱特性

Fig.4.5.で κ -カラギーナンゲルの食塊において融解が認められたので、 κ -カラギーナンゲルと CaCl₂ 添加 κ -カラギーナンゲルの咀嚼による融解の有無を確認するために、昇降温 DSC 曲線を測定した。昇温測定における吸熱ピーク温度は、 κ -カラギーナンゲルにおいては 29.4℃および 40.5℃に測定されたが、40.5℃のピークは、左肩にショルダーのあるブロードなピークであった。CaCl₂ 添加 κ -カラギーナンゲルにおける昇温測定の吸熱ピーク温度は、52.3℃および 58.1℃に測定され、両ゲルの融解温度は大きく異なった (Fig.4.6.)。これらの結果は κ -カラギーナンゲルでは咀嚼中に融解が見られ、CaCl₂ 添加 κ -カラギーナンゲルでは融解が見られなかった Fig.4.5.の結果を支持するものであった。なお、降温測定における発熱ピーク温度は、 κ -カラギーナンゲルにおいては 29.1℃に、CaCl₂ 添加 κ -カラギーナンゲルにおいては 33.2℃に測定され、融解温度の高いゲルではゲル化温度も高いことが認められた (Fig.4.7.)。

3.3.5. 血糖値

3.3.5.1. κ -カラギーナン添加米飯

基準米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前である 0 分と比較して、摂取後 15 分では有意に上昇し、その後さらに摂取後 30 分で摂取後 15 分よりも有意に上昇した (Fig.4.8a.)。なお、摂取後 30 分の血糖値が有意に上昇したのは、基準米飯のみであった。摂取後 30～60 分の血糖値間には、有意差が見られなかった。摂取後 90 分および 120 分の血糖値は、摂取後 60 分と比べて有意に低下した。

0.5%CP 添加米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と比較して、摂取後 15 分で有意に上昇したが、摂取後 15～60 分の血糖値間に有意差はなかった。摂取後 90 分および 120 分の血糖値は、摂取後 30 分および 45 分の血糖値よりも有意に低下した。1.0%CP 添加米飯における血糖値は、摂取前 0 分より摂取後 15 分では有意に上昇し、摂取後 15～120 分の血糖値間には有意差が

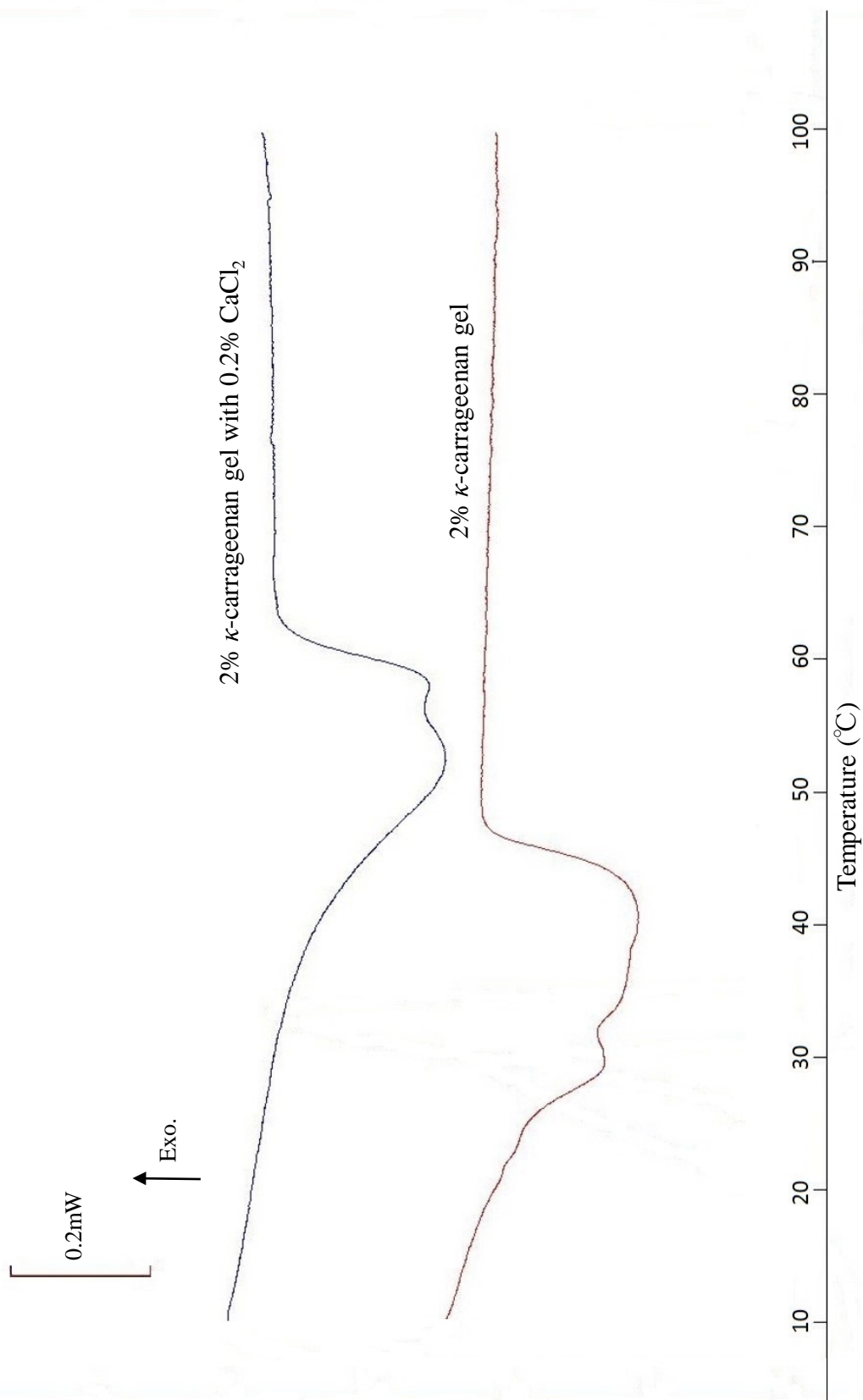


Fig. 4.6. Heating differential scanning calorimetry (DSC) curves of κ -carrageenan gel with and without CaCl_2 .
Temperature was raised from 5.0°C to 100.0°C at 0.5°C/min

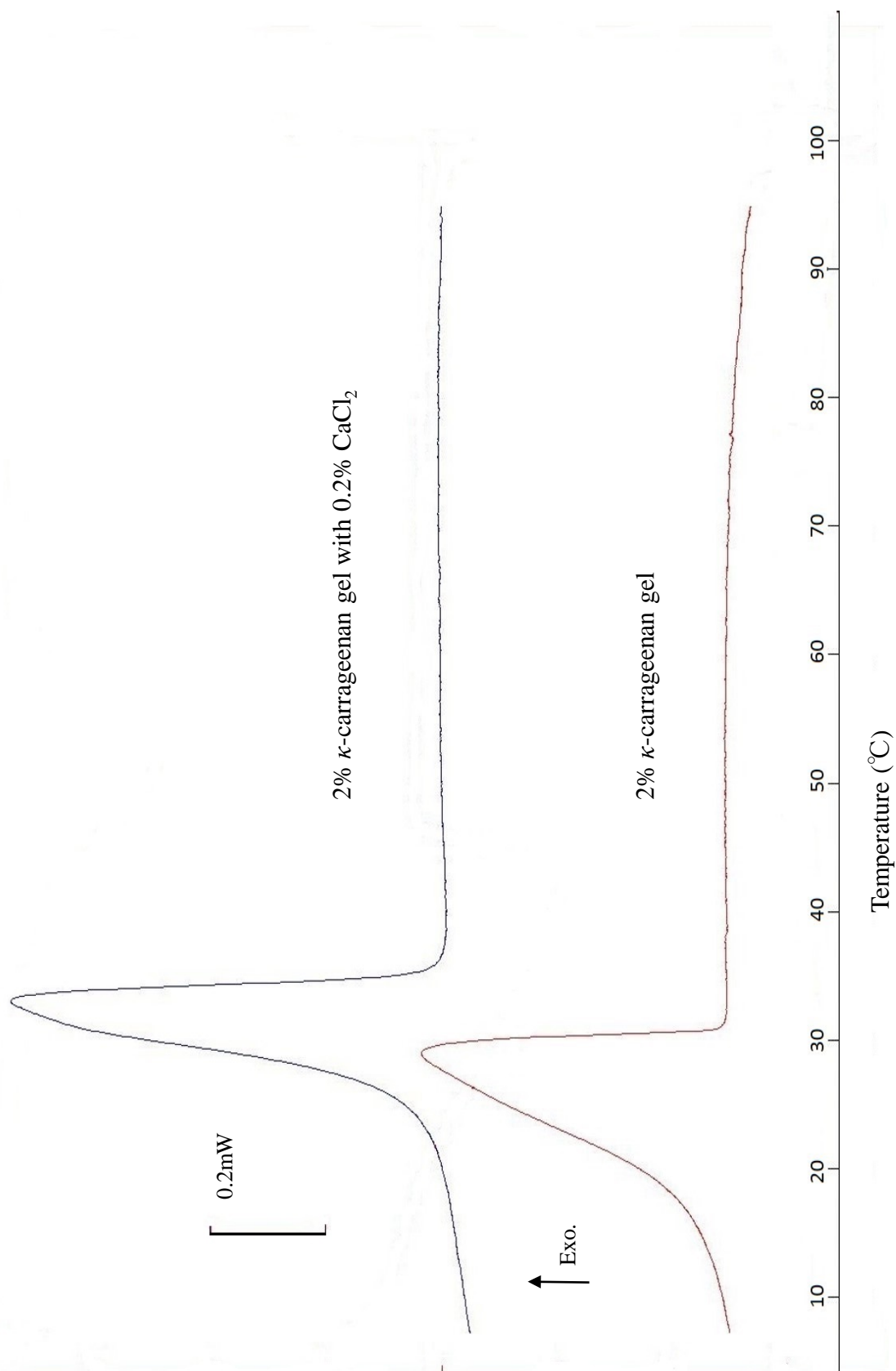


Fig. 4.7. Cooling DSC curves of κ -carrageenan gel with and without CaCl_2 .

Temperature was reduced from 100.0 $^{\circ}\text{C}$ to 5.0 $^{\circ}\text{C}$ at 0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$

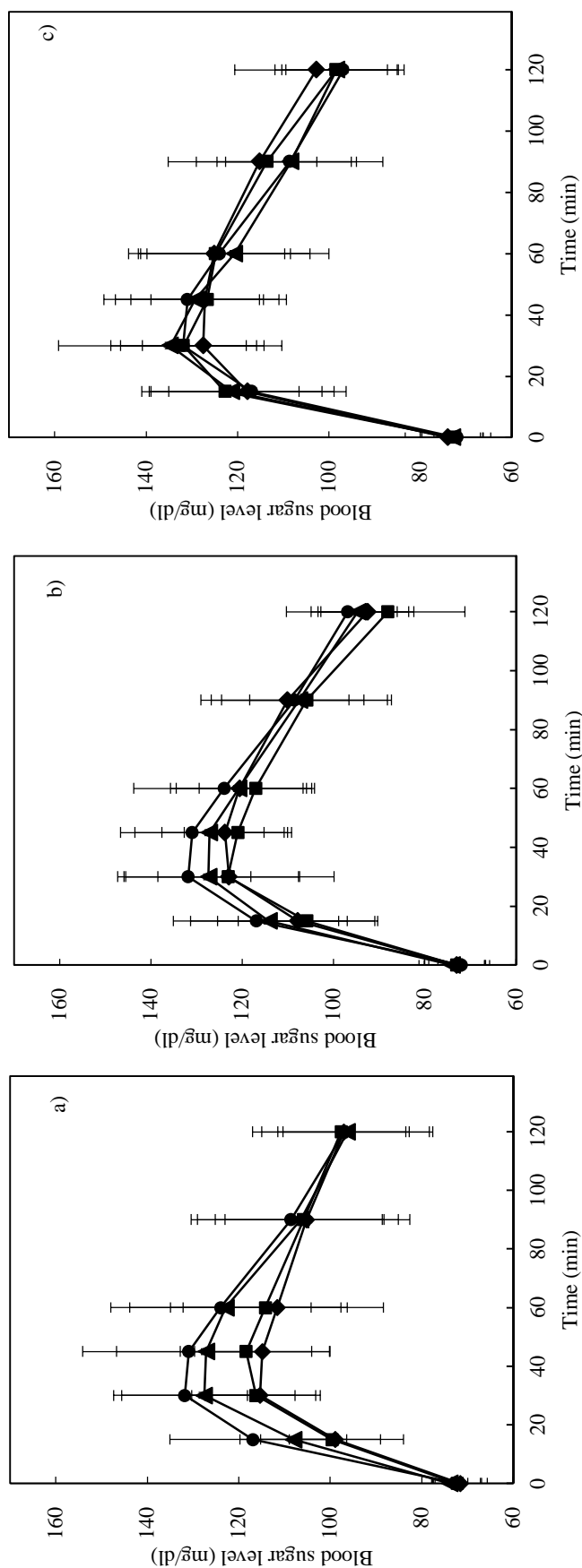


Fig. 4.8. Blood sugar response curve after consuming rice cooked with κ -carrageenan and cooked rice mixed with κ -carrageenan gel after cooking.

●; 0% κ -carrageenan, ▲; 0.5% κ -carrageenan, ■; 1.0% κ -carrageenan, ◆; 1.6% κ -carrageenan

a) Rice cooked with κ -carrageenan (CP-added rice)

0% : 0 min < 15 min < 30 min, 60 min > 90 min
 0.5%, 1.0% and 1.6% CP-added rice : 0 min < 15 min
 15, 30 min, : 0% > 1.0% and 1.6% CP-added rice

b) Cooked rice mixed κ -carrageenan gel (CG-mixed rice)

0% : 0 min < 15 min < 30 min, 60 min > 90 min
 0.5%, 1.0% and 1.6% CG-mixed rice : 0 min < 15 min

c) Cooked rice mixed κ -carrageenan gel with CaCl_2 (CG- CaCl_2 -mixed rice)

0% : 0 min < 15 min < 30 min, 60 min > 90 min
 0.5%, 1.0% and 1.6% CG- CaCl_2 -mixed rice : 0 min < 15 min

n=13. Each value represents the mean \pm SD. Differences were significant at $p < 0.05$

見られなかった。一方、摂取後 120 分の血糖値は、45 分の血糖値に比べて有意に低下した。1.6%CP 添加米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と比較し、摂取後 15 分で有意に上昇し、15 分以降においては、血糖値間に有意差は見られなかった。

各測定時間においては、摂取後 15 分および 30 分では、1.0%以上の CP 添加米飯摂取被験者の血糖値は、基準米飯よりも有意に低かった。また、摂取後 45 分においては、1.6%CP 添加米飯摂取被験者の血糖値は基準米飯摂取被験者の血糖値よりも有意に低く得られた。しかし、摂取後 60 分以降の血糖値については、すべての CP 添加米飯摂取被験者の血糖値と基準米飯摂取被験者の血糖値の間に有意な差は見られなかった。

3.3.5.2. κ -カラギーナンゲル混合米飯

CG 混合米飯摂取後の 120 分間の血糖値変化を Fig.4.8b.に示す。なお、基準米飯摂取被験者の血糖値を参考として示した。すべての濃度の CG 混合米飯において、摂取前 0 分の血糖値と比較して、摂取後 15 分の血糖値は有意に上昇した。

0.5%CG 混合米飯摂取被験者の血糖値は、摂取後 15～60 分までの間には有意差は見られなかった。この結果は、摂取後 30 分の血糖値が摂取後 15 分の血糖値よりも有意に上昇した基準米飯とは異なった。摂取後 90 分および 120 分の血糖値は、30 分と比較して有意に低下した。

1.0% CG 混合米飯および 1.6% CG 混合米飯摂取被験者の血糖値は、摂取後 15～90 分までの間には有意差は見られなかった。1.0%および 1.6%CG 混合米飯摂取後 120 分の血糖値は、摂取後 30～60 分と比べて有意に低下したが、摂取後 90 分の血糖値とは有意差が見られなかった。この結果は、摂取後 90 分の血糖値が摂取後 60 分の血糖値よりも有意に低下した基準米飯とは異なった。

基準米飯および各 CG 混合米飯摂取後の同一測定時間における被験者の血糖値は、いずれの時間においても有意差は見られなかった。

3.3.5.3. CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲル混合米飯

CG- CaCl_2 混合米飯摂取後の血糖値変化を Fig.4.8c.に示す。なお、基準米飯の血糖値を参考として示した。すべての CG- CaCl_2 混合米飯摂取被験者において、摂取前 0 分に比べ、摂取後 15 分の血糖値は有意に上昇した。0.5%CG- CaCl_2 混合米飯摂取被験者における血糖値は、摂取後 15～60 分までの各血糖値間には有意な差が見られず、摂取後 90 分および 120 分の血糖

値は、30 分の血糖値と比較して有意に低下した。

1.0% および 1.6%CG-CaCl₂ 混合米飯の摂取後 15～90 分においては、血糖値に有意な変化はなかった。0.5%および 1.0% CG-CaCl₂ 混合米飯摂取後 120 分の血糖値は、摂取後 15～60 分よりも有意に低値となったが、1.6% CG-CaCl₂ 混合米飯摂取被験者の血糖値においては、摂取後 30～60 分のみで 120 分と有意差が見られた。1.6%CG-CaCl₂ 混合米飯摂取被験者における血糖値は、摂取後 15～90 分で有意な差は見られなかった。摂取後 120 分の血糖値は、摂取後 30～60 分よりも有意に低値となった。これらの結果は、CG-CaCl₂ 混合米飯摂取後に上昇した血糖値は、時間の経過と共に緩慢に低下することを示唆していた。

基準米飯に対して各 CG-CaCl₂ 混合米飯摂取後の同一測定時間における被験者の血糖値は、いずれの測定時間においても有意差は見られなかった。

3.3.6. グリセミックインデックス

Fig.4.9.にグルコースを 100 とした場合の GI を示す。CP 添加米飯摂取被験者の GI は、基準米飯と比較して 1.0%および 1.6%CP 添加米飯で有意に低下したが、1.0%と 1.6%CP 添加米飯間では有意差は見られなかった (Fig.4.9a.)。

CG 混合米飯摂取被験者の GI については、1.0%以上の CG 混合米飯は基準米飯より有意に低下したが、0.5～1.6%CG 混合米飯の GI 間で有意な差は見られなかった (Fig.4.9b.)。

CG-CaCl₂ 混合米飯摂取被験者の GI においては、すべての試料間で有意差が見られなかった (Fig.4.9c.)。

3.3.7. グルコース放出量

基準米飯と CP 添加米飯、CG 混合米飯および CG-CaCl₂ 混合米飯の体外消化過程におけるグルコース放出量を Fig.4.10.に示す。0.5%以上の CP 添加米飯のグルコース放出量は、基準米飯のグルコース放出量よりも有意に低下したが、κ-カラギーナンの添加濃度による差は見られなかった (Fig.4.10a.)。

CG 混合米飯におけるグルコース放出量は、基準米飯と比べて 1.6%CG 混合米飯において有意に低下したが、κ-カラギーナンの混合割合による差は見られなかった (Fig.4.10b.)。なお、CP 添加米飯と CG 混合米飯摂取被験者における GI とグルコース放出量については、有意な低下が見られた κ-カラギーナンの濃度は異なったが、GI およびグルコース放出量が低下するという現象においては一致していた。

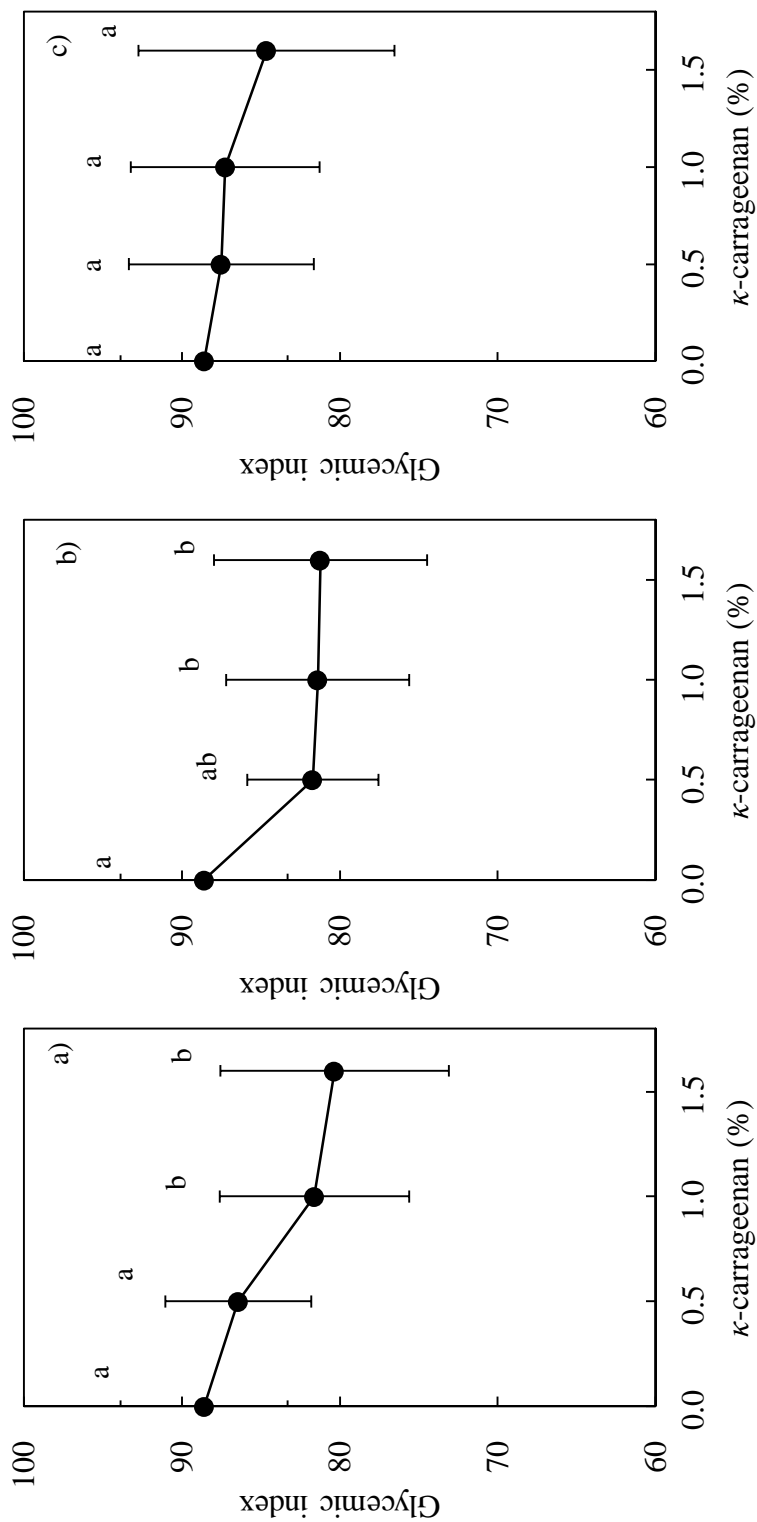


Fig. 4.9. Glycemic index after consuming rice cooked with κ -carrageenan and cooked rice mixed with κ -carrageenan gel.

- a) Rice cooked with κ -carrageenan (CP-added rice)
- b) Cooked rice mixed κ -carrageenan gel (CG-mixed rice)
- c) Cooked rice mixed κ -carrageenan gel with CaCl_2 (CG- CaCl_2 -mixed rice)

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

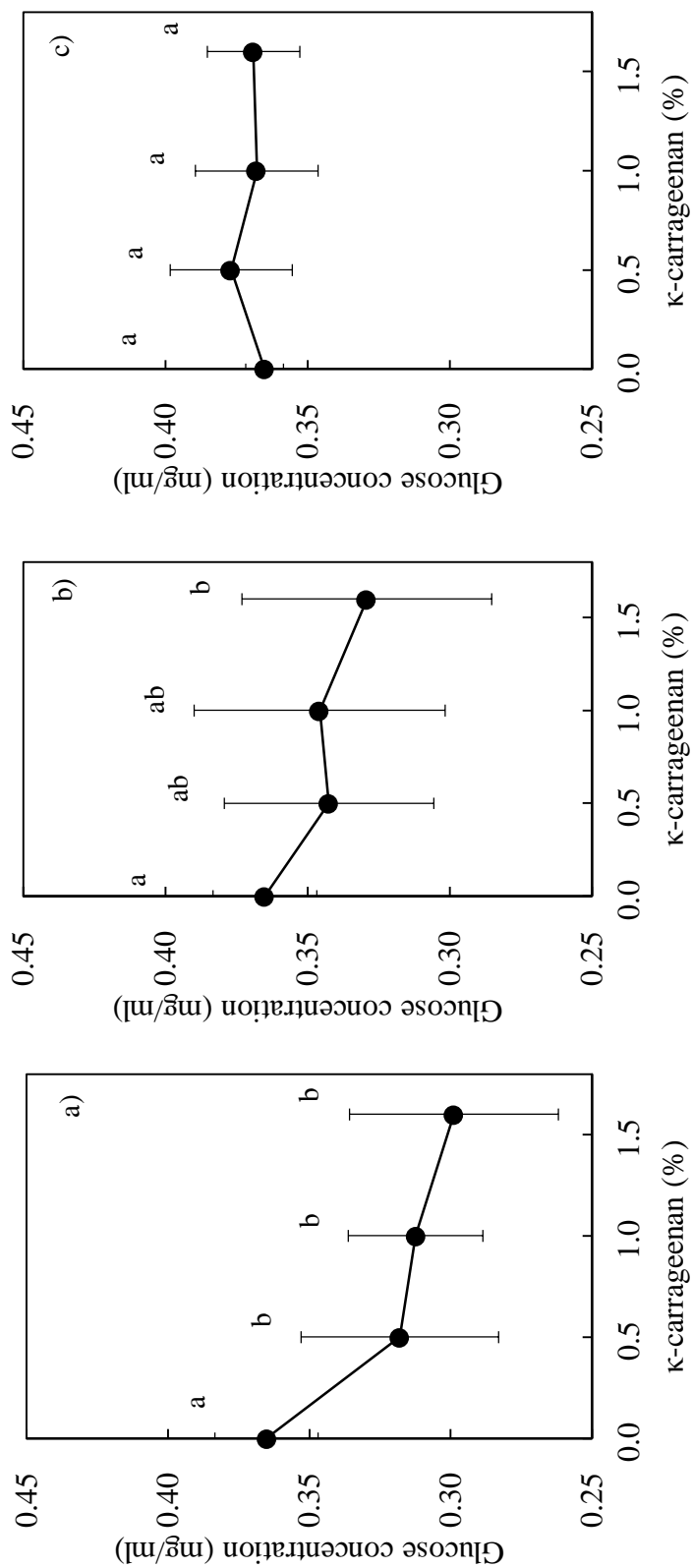


Fig. 4.10. Glucose concentration released from rice cooked with κ -carrageenan and cooked rice mixed with κ -carrageenan gel during in vitro digestive process.

- a) Rice cooked with κ -carrageenan (CP-added rice)
- b) Cooked rice mixed κ -carrageenan gel (CG-mixed rice)
- c) Cooked rice mixed κ -carrageenan gel contained CaCl_2 (CG- CaCl_2 -mixed rice)

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

CG-CaCl₂ 混合米飯におけるグルコース放出量は、すべての試料間に有意差が見られなかった (Fig.4.10c.)。この結果は、CG-CaCl₂ 混合米飯摂取被験者における GI の結果と同じであった。

3.3.8. 官能評価

κ-カラギーナンを炊飯時に添加した場合の米飯に対する κ-カラギーナンの影響を検討するために行なった官能評価の結果を Fig.4.11. に示す。外観について、基準米飯と比較し全ての CP 添加米飯は有意に劣ると評価されたが、κ-カラギーナンの添加濃度による有意差は認められなかった (Fig.4.11a.)。

香り、味、総合評価について、基準米飯と比較し全ての CP 添加米飯は、有意に劣ると評価された。0.5%と 1.0%CP 添加米飯間では、有意差が認められなかったが、1.6%CP 添加米飯では、0.5%および 1.0%CP 添加米飯よりも有意に低いと評価された (Fig.4.11b.、4.11c.、4.11f.)。

粘りは、基準米飯と比較して 0.5%および 1.0%CP 添加米飯では有意に低下すると評価され、1.6%CP 添加米飯では、さらに有意に低下すると評価された (Fig.4.11d.)。

硬さについては、κ-カラギーナンを添加すると、有意に増すと評価されたが、κ-カラギーナンの濃度が増加しても有意差は認められなかった (Fig.4.11e.)。

3.4. 考察

本研究では κ-カラギーナンが異なる状態で米飯と共に摂取された場合について、κ-カラギーナンが米飯摂取後の血糖値に及ぼす影響について検討した。

CP 添加米飯摂取後の血糖値は、1.0%以上の CP 添加米飯において、摂取後 15 分および 30 分で基準米飯より有意に低く、摂取後 45 分では、1.6%CP 添加米飯摂取被験者の血糖値が基準米飯より低かった。GI については、1.0%以上の CP 添加米飯摂取被験者の GI は基準米飯摂取被験者の GI と比較して有意に低下し、グルコース放出量については、0.5%以上の CP 添加米飯で基準米飯と比較して有意に低下した (Fig.4.8a., 4.9a., 4.10a.)。これらの結果は、1.0%以上の κ-カラギーナン添加による炊飯で、CP 添加米飯摂取後の血糖値の上昇が抑制することを示唆していた。

CP 添加米飯の血糖値上昇抑制の原因を究明するために行った米飯粒の形状およびテクスチャー分析において、κ-カラギーナンの影響は以下の点で

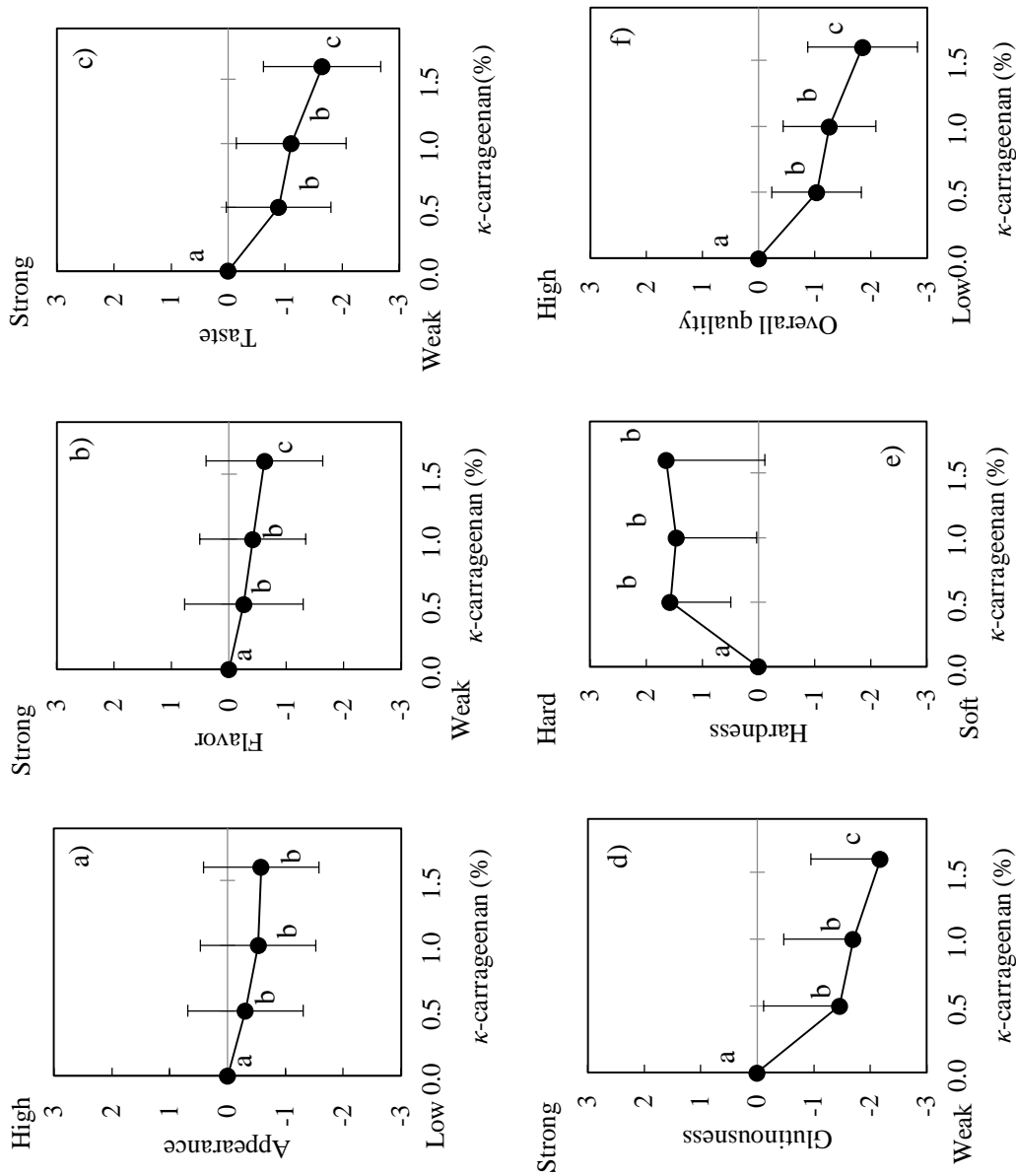


Fig. 4.11. Sensory evaluation of rice cooked with κ -carrageenan.

a) Appearance, b) Flavor, c) Taste, d) Hardness, e) Glutinousness, f) Overall quality

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

見られた。Fig.4.1.においては、CP 添加米飯の米粒の長さは基準米飯よりも短く観察された。Fig.4.2c.、4.2d.からは、 κ -カラギーナンの濃度が上昇するに従い、CP 添加米飯粒の表面に生じた亀裂が明確になり、Fig.4.3d からは、CP 添加米飯粒の横断面において中心部に不均一な空洞が観察された。さらに、 κ -カラギーナンの添加により、CP 添加米飯粒の客観測定によるテクスチャーの硬さは高く (Fig.4.4a.)、CP 添加米飯の主観評価によるテクスチャーの硬さも高かった (Fig.4.11e.)。また、CP 添加米飯粒の客観測定による付着性および主観評価による粘りも、基準米飯より有意に低下したことから、米飯粒表面の状態にも κ -カラギーナンは影響を与えたと考えられる (Fig.4.4b., 4.11d.)。

これらのことから、炊飯時に κ -カラギーナンが共存すると、米粒の吸水は抑制されて不均一となり、さらに炊飯過程における米粒でんぷんの水和膨潤が抑制されるために、でんぷんの糊化が抑制され、血糖値の上昇が抑制されたと考えられる。

凝固させた κ -カラギーナンゲルを基準米飯と混合摂取した場合には、いずれの κ -カラギーナンゲル混合濃度においても米飯摂取後 15～60 分の血糖値間には有意差は見られず、30 分まで有意に血糖値が上昇した基準米飯と比較して、血糖値の上昇には抑制が見られた。また、1.0%以上の CG 混合米飯摂取被験者の GI において基準米飯摂取被験者の GI よりも有意に低下し、グルコース放出量では 1.6%CG 混合米飯において基準米飯よりも有意に低下した (Fig.4.8b., 4.9b., 4.10b.)。

κ -カラギーナンゲルの吸熱 DSC 曲線のピーク温度は、29.4℃および 40.5℃に見られた (Fig.4.6.)。ヒトの口腔内の温度は 32℃前後と測定され、咀嚼中に κ -カラギーナンゲルの一部は融解すると考えられる。 κ -カラギーナンゲルの咀嚼中の融解は、Fig.4.5b.～d.において観察された。Jenkins ら²¹⁾は、消化管内で食物繊維が形成する粘性ゲルが、共に摂取した炭水化物をゲル内に取り込むことにより、血糖値上昇が抑制されることを報告している。また、Dumelod ら⁸³⁾は、ゾル状の λ -カラギーナンと炭水化物を同時に摂取した際に、 λ -カラギーナンゾルが糖質または腸の吸収細胞をカバーすることにより、糖の吸収を阻害する可能性を報告している。これらのことから、CG 混合米飯においては、 κ -カラギーナンゲルが体内で一部融解してゾル状となり、そのゾル状部分が共存する米粒を構造内に取り込み、消化酵素の米粒への作用を阻害し、吸収を阻害したために、GI およびグルコース放出量が低下したのではないかと考えられる。

以上のことより、 κ -カラギーナンを炊飯直前に添加した CP 添加米飯摂取

後の血糖値上昇の抑制は、炊飯過程のでんぷんの糊化が抑制されたことによる影響が大きく、一方、 κ -カラギーナンゲルと基準米飯を混合した CG 混合米飯摂取後の血糖値上昇の抑制は、口腔内あるいは消化管内において κ -カラギーナンゲルが融解することにより、消化酵素の米粒への作用を阻害し、さらに吸収を阻害したことが一因ではないかと考えられた。

CG- CaCl_2 混合米飯においては、Fig.4.8c. より米飯摂取後の血糖値は増加後に低下しにくいことが示唆された。しかし、すべての CG- CaCl_2 混合米飯摂取被験者の GI と基準米飯摂取被験者の GI との間に有意差は見られなかった (Fig.4.9c.)。グルコース放出量についても、CG- CaCl_2 混合米飯と基準米飯との間に同様に有意差は見られなかった (Fig.4.10c.)。

κ -カラギーナンの主成分はガラクトタンであり、D 型アンヒドロガラクトース 2 分子に 1 個の割合で硫酸基を有する。二価のカチオンである Ca イオンや Mg イオンが共存すると、硫酸基と金属イオンの間でイオン結合が形成されるために、分子の結合エネルギーが高くなると報告されている⁸⁴⁾。 CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルの吸熱曲線のピーク温度は 52.3°C および 58.1°C に見られた (Fig.4.6.)。口腔内の温度は 32°C 前後であり、ヒトの核心部の温度は約 37°C であると報告されている⁸⁵⁾。 CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルの咀嚼後の食塊で、融解現象は Fig.4.5e.~h. において認められなかった。これらのことから、融解する κ -カラギーナンゲルとは異なり、口腔内および消化管内において融解しない CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルでは、米飯摂取後の血糖値への影響が極めて小さかったために、GI およびグルコース放出量に有意な差として表れなかったと考えられる (Fig.4.9c., 4.10c.)。

第 2 章においてグルコマンナン共存下における米飯摂取時の血糖値への影響を述べた。そこで κ -カラギーナンとの差異を検討するため、Fig.4.12. に κ -カラギーナンとグルコマンナンについての基準米飯の GI と各試料の GI との比を示す。

基準米飯と比較して、炊飯時に食物繊維を添加した場合は、 κ -カラギーナンおよびグルコマンナン共に、1.0%以上の添加で有意に低下した。しかし、ゲルを混合した場合は、基準米飯と比較して 1.0%の添加で、CG 混合米飯においては有意に低下したが、CG- CaCl_2 混合米飯およびしらたき混合米飯においては有意に変化しなかった。しかし、しらたき混合米飯では、2.0%の混合で基準米飯よりも GI は有意に低下した。一方、CG- CaCl_2 混合米飯では、2.5%においても GI に有意な差は見られなかった。咀嚼前のしらたきの破壊片サイズの分布は 0.04cm^2 前後で最も多かった⁸⁶⁾。CG- CaCl_2 混合米飯に用いた咀嚼前の CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルの破壊片の大きさは 0.25cm^2

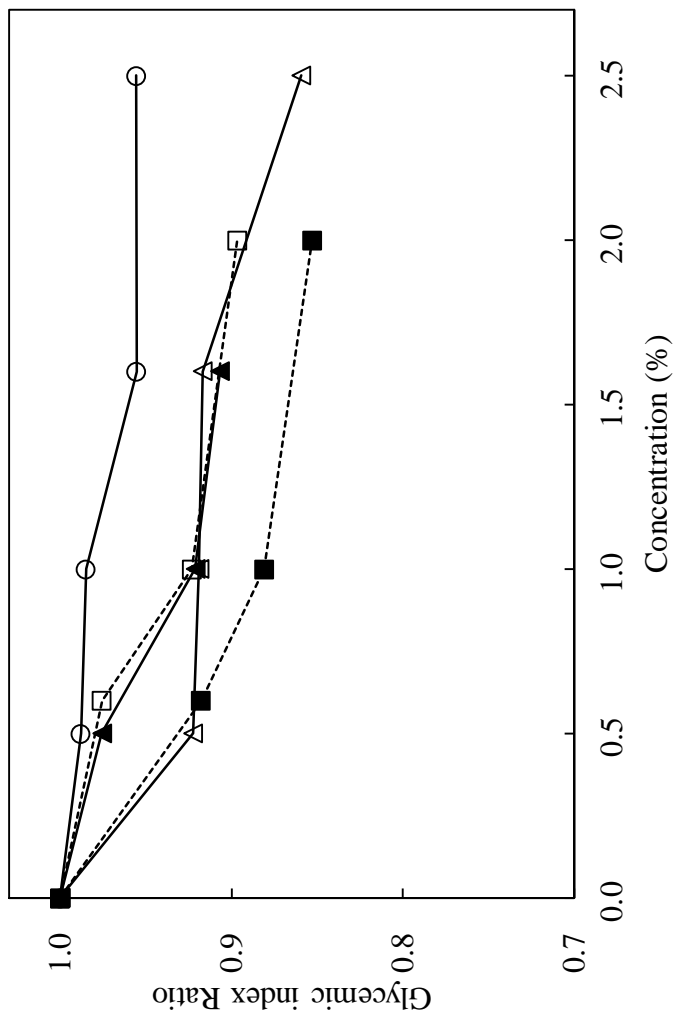


Fig. 4.12. Glycemic index ratio of rice cooked with glucomannan or κ -carrageenan and cooked rice mixed with konjac noodles or κ -carrageenan gel with and without CaCl_2 .

- ▲ ; Rice cooked with κ -carrageenan (CP-added rice) ; (0% and 0.5% CP-added rice > 1.0% and 1.6% CP-added rice)
 - △ ; Cooked rice mixed κ -carrageenan gel (CG-mixed rice) ; (0% > 1.0%, 1.6% and 2.5% CG-mixed rice)
 - ; Cooked rice mixed κ -carrageenan gel with CaCl_2 (CG- CaCl_2 -mixed rice) ; No significantly
 - ; Rice cooked with glucomannan (GM-added rice) ; (0% and 0.6% GM-added rice > 1.0% and 2.0% GM-added rice)
 - ; Cooked rice mixed konjac noodles (ST-mixed rice) ; (0%, 0.6% and 1.0% ST-mixed rice > 2.0% ST-mixed rice)
- Differences were significant at $p < 0.05$

であった。北出ら⁸⁷⁾は、寒天ゲルの咀嚼において、3.5mm 立方体ゲルは咀嚼の影響を受けにくいと報告している。血糖値測定時に摂取した CG-CaCl₂ 混合米飯およびしらたき混合米飯の 30 回咀嚼後の食塊を Fig.4.13 に示す。CG-CaCl₂ 混合米飯の破壊片は、つぶれることなく細かく切断され、食塊はまとまりにくい状態であった。一方、しらたき混合米飯の破壊片は、切断されるよりも潰されて平らになり、しらたきが米粒間に入り込み、まとまりのある食塊であった。これらのことから、CG-CaCl₂ 混合米飯では、米粒がしらたき混合米飯よりも、消化酵素の作用を受けやすかったために CG-CaCl₂ 混合米飯において、GI およびグルコースリリース量の低下が見られなかったのではないかと推定される。

食物繊維の差異による血糖値上昇の抑制および GI の低下については、CP 添加米飯およびグルコマンナン添加米飯で効果的であり、特にグルコマンナン添加米飯においては最も効果が高かった。そこで、CP 添加米飯とグルコマンナン添加米飯の利用性を検討するために、官能評価について比較した。1.0%CP 添加米飯の官能評価においては、外観、香りおよび味は、CP 添加米飯よりもグルコマンナン添加米飯の方が低く評価された。米飯のおいしさに対して重要なテクスチャーとされる硬さは、CP 添加米飯よりもグルコマンナン添加米飯の方が高いと評価された。これは、グルコマンナンの膨潤に必要な水分が κ -カラギーナンよりも多かったため、炊飯過程におけるでんぷんの水和膨潤に用いることのできる水分量が少なくなり、糊化が十分になれなかったため、CP 添加米飯よりもグルコマンナン添加米飯で嗜好性が低下したのではないかと考えられる。これらのことから、実用性の面から考えると、血糖値上昇抑制を目的とした炊飯時での食物繊維の添加については、 κ -カラギーナンの方がグルコマンナンより有用性は高いと考えられた。

3.5. 要約

米飯摂取後の血糖値上昇抑制を目的として、米飯炊飯時に κ -カラギーナンを添加した場合と、米飯に κ -カラギーナングルあるいは CaCl₂ 添加 κ -カラギーナングルを混合して摂取した場合について、単独で炊飯した米飯（基準米飯）と比較して検討した。

κ -カラギーナン添加米飯摂取被験者における血糖値は、摂取後 15 分および 30 分では、1.0%以上で基準米飯摂取被験者の血糖値よりも有意に低く、摂取後 45 分においては、1.6%で基準米飯摂取被験者の血糖値よりも有意に低かった。基準米飯摂取被験者の GI と比べて 1.0%以上 κ -カラギーナン添加米飯摂取被験者の GI で、グルコース放出量は 0.5%以上 κ -カラギーナン

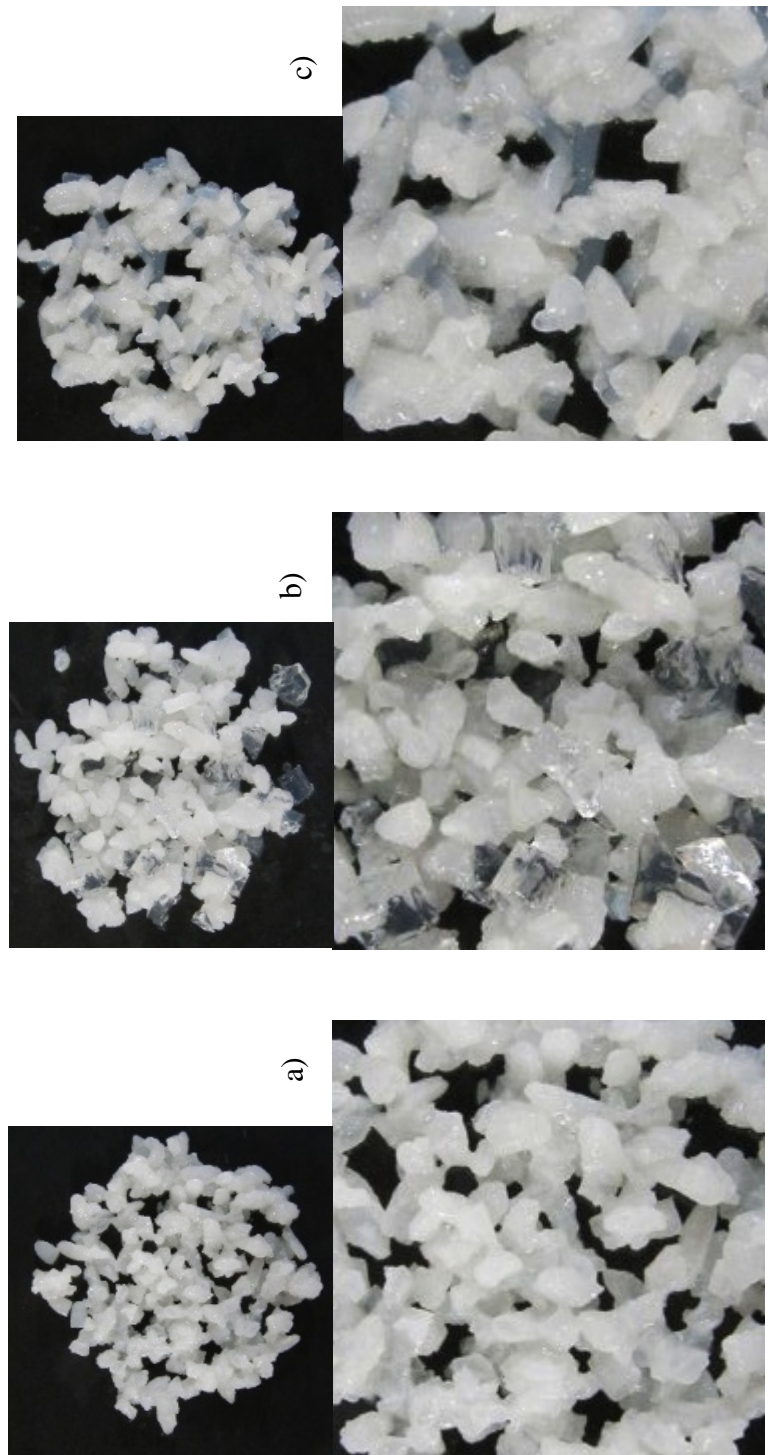


Fig.4.13. Image of cooked rice and gel fragments after 30 chewing cycles.

- a) ; Cooked rice alone
- b) ; Cooked rice mixed κ -carrageenan gel with CaCl_2 (CG- CaCl_2 -mixed rice)
- c) ; Cooked rice mixed konjac noodles (ST-mixed rice)

添加米飯で有意に低下した。 κ -カラギーナンゲル混合米飯摂取被験者の各測定時間における血糖値は、各試料間において有意な差は見られなかったが、基準米飯と比較して GI は 1.0% 以上、グルコース放出量は 1.6% において有意に低下した。 CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲル混合米飯摂取被験者の GI およびグルコース放出量に基準米飯と比較して有意差は見られなかった。 κ -カラギーナン添加米飯においては、客観測定および主観評価のテクスチャーの硬さは、0.5% 以上の κ -カラギーナン添加により有意に増加した。これらのことから、 κ -カラギーナンによる血糖上昇抑制については、 κ -カラギーナン添加米飯で最も効果が高く、次いで κ -カラギーナンゲル混合米飯であり、 CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲル混合米飯では測定の範囲でその効果は認められなかった。

第 4 章 キサンタンガムが米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響

4.1. 緒言

第 3 章において、CaCl₂ 無添加 κ -カラギーナンゲルを米飯と混合した場合に、CaCl₂ 添加 κ -カラギーナンゲル混合米飯よりも、摂取後の血糖値上昇に対する抑制効果が高いことが判明した。その原因として、 κ -カラギーナンゲルが体温で一部融解してゾル化することが考えられた。その結果を受け、本章では、ゾルを形成する食物繊維をとりあげることとした。キサンタンガムは、誤嚥防止のためのとろみ剤として頻度高く用いられている増粘多糖類である。キサンタンガムは、グルコース 2 分子、マンノース 2 分子とグルクロン酸の繰り返し単位からなり、長い側鎖基をもつ構造であり。血糖値上昇の抑制効果についてはいくつかの報告がなされている^{21,23,24,88-91)}。

本章では、キサンタンガムと共に炊飯した米飯およびキサンタンガムゾルを混合した米飯の摂取後の血糖値が、米飯単独摂取後の血糖値と比較してどのように異なるのか検討した。さらに、キサンタンガムゾルを摂取する時期の違いにおける血糖値上昇の抑制効果についても検討した。

4.2. 実験材料および方法

4.2.1. 試料

米は第 1～3 章と同様の、新潟県産水稻精白米「こしいぶき」⁵⁹⁾ を用いた。キサンタンガムは三栄源 F.F.I 社製 (Lot.130730-01) を用いた。

キサンタンガムゾルのキサンタンガム濃度は 2.0%とし、室温で脱イオン水をマグネチックスターラーで攪拌しながらキサンタンガムを徐々に分散させ、一晩放置後、98℃で 60 分間加熱攪拌して試料とした。

米 180g を純水で洗米後、米重量の 1.4 倍の脱イオン水を加え、室温 (25±3℃) で吸水率が安定する 1 時間の浸漬の後、電気炊飯器 (Panasonic 社製、SR-CL05P) により炊飯した。以下、これを基準米飯とする。

キサンタンガム添加米飯 (以下、XGP 添加米飯とする) は、基準米飯と同様に、1 時間浸漬後、炊飯直前に、米重量に対して 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5% キサンタンガムを添加して炊飯した。キサンタンガムは、室温で一晩膨潤しておいたものを添加した。炊飯後の蒸らし時間は 30 分間とした。組織観察、テクスチャー特性、官能評価に用いた試料は、常に一定状態の米飯粒を得るために、電気炊飯器の釜の中心部分から採取した米飯粒とした。炊き上がり増加率は、炊飯後の米飯の重量を測定し、米 180g で割った値とした。

キサントランガムゾル混合米飯（以下、XGS 混合米飯とする）は、基準米飯に XGP 添加米飯と同程度のキサントランガム濃度となるよう試験直前に基準米飯とキサントランガムゾルを混合し調製した。

4.2.2. 血糖値の測定方法およびグリセミックインデックスの算出方法

被験者は、通常の日常生活を営み、これまでに糖尿病と診断されたことのない健常な女子学生（19～39 歳）11 名とした。試験参加への同意後に測定した被験者の空腹時血糖は、平均 $78.3 \pm 6.1 \text{ mg/dL}$ であり、いずれも試験開始時において糖尿病診断基準により正常型と診断される範囲であった。血糖値測定の実施に関しては、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、血糖値の測定方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。

試験食は、基準米飯、0.5、1.0、1.5% XGP 添加米飯、および 0.5、1.0、2.5% XGS 混合米飯を用いた。各試験食に含まれる米飯の糖質量は 50g とし、摂取時に飲む水との総重量は 250g とした。また、XGS 混合米飯を試験食とする場合には、米飯と摂取時に飲む水およびキサントランゾルの 3 種試料の総重量は 250g とした。試験食の摂取方法は、被験者らは米飯と水を交互に時間内に摂取し、1 口の分量はおよそ 10g 程度とし、1 口の咀嚼を 30 回とした。なお、キサントランガムゾル摂取の時期の違いによる血糖値の測定における試験食の摂取は、基準米飯摂取開始より 10 分前にキサントランガムゾルを摂取する場合（以下、米飯摂取前 XGS とする）、基準米飯と同時にキサントランガムゾルを摂取する場合（以下、XGS 混合米飯とする）、基準米飯摂取後より 10 分後にキサントランガムゾルを摂取する場合（以下、米飯摂取後 XGS とする）とした。

血糖値測定およびグリセミックインデックス値（GI）の算出方法は、第 1～3 章と同様の方法で行った。

4.2.3. グルコース放出量の測定方法

グルコース放出量の測定は、第 2、3 章と同様の方法で行った。試料は、基準米飯、XGP 添加米飯、XGS 混合米飯とし、血糖値測定と同様のものを用いて測定した。パンクレアチンとインベルターゼを添加し、37℃、20 分間振とう後のグルコース量を測定した。

4.2.4. テクスチャー特性の測定方法

テクスチャー特性の測定は、第 2、3 章と同様の方法で行った。試料は、基

準米飯および 5 種類のキサンタンガム濃度の XGP 添加米飯を用いた。

4.2.5. 米飯粒の形状観察

基準米飯粒、0.5、1.0、1.5% XGP 添加米飯粒の長軸および短軸方向の最大の長さを測定した。また、炊飯直後の米飯の状態を写真撮影した。

4.2.6. 官能評価の測定方法

官能評価の測定方法は、第 1～3 章と同様の方法で行った。パネルは視覚、味覚、臭覚が一般的な 20～22 歳の女子学生 20 名とした。官能評価の実施に関しては、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、官能評価の方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。試料は、基準米飯に対して 0.5、1.0、1.5、2.0% XGP 添加米飯とした。

4.2.7. 統計処理

統計処理は、第 3 章と同様の方法で行った。

4.3. 実験結果

4.3.1. キサンタンガム添加米飯

4.3.1.1. 血糖値、グリセミックインデックスおよびグルコース放出量

Fig.5.1a.に基準米飯と XGP 添加米飯摂取被験者の血糖値を示す。基準米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前である 0 分と比較して、摂取後 15 分では有意に上昇し、さらに摂取後 30 分で摂取後 15 分よりも有意に上昇した。摂取後 30 分と 45 分の血糖値間および摂取後 45 分と 60 分の血糖値間には、有意差が見られなかったが、摂取後 30 分よりも 60 分の血糖値は有意に低下した。摂取後 60 分と比べて摂取後 90 分の血糖値は有意に低下し、摂取後 120 分の血糖値は、摂取前 0 分よりも有意に高かった。

0.5%および 1.0%XGP 添加米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と比較して摂取後 15 分で有意に上昇したが、0.5%XGP 添加米飯では摂取後 15～60 分の血糖値間で、1.0%XGP 添加米飯では摂取後 15～90 分の血糖値間で有意差は見られなかった。0.5%XGP 添加米飯摂取後 90 分の血糖値は摂取後 30 分よりも有意に低下し、摂取後 120 分の血糖値は、摂取後 15～60 分の血糖値よりも有意に低下したが、摂取前 0 分の血糖値とは有意な差が見られなかった。1.0%XGP 添加米飯摂取被験者の摂取後 120 分の血糖値は、摂取後 60 分の血糖値に比べて有意に低下したが、摂取前 0 分よりも有意に高かった。1.5%XGP

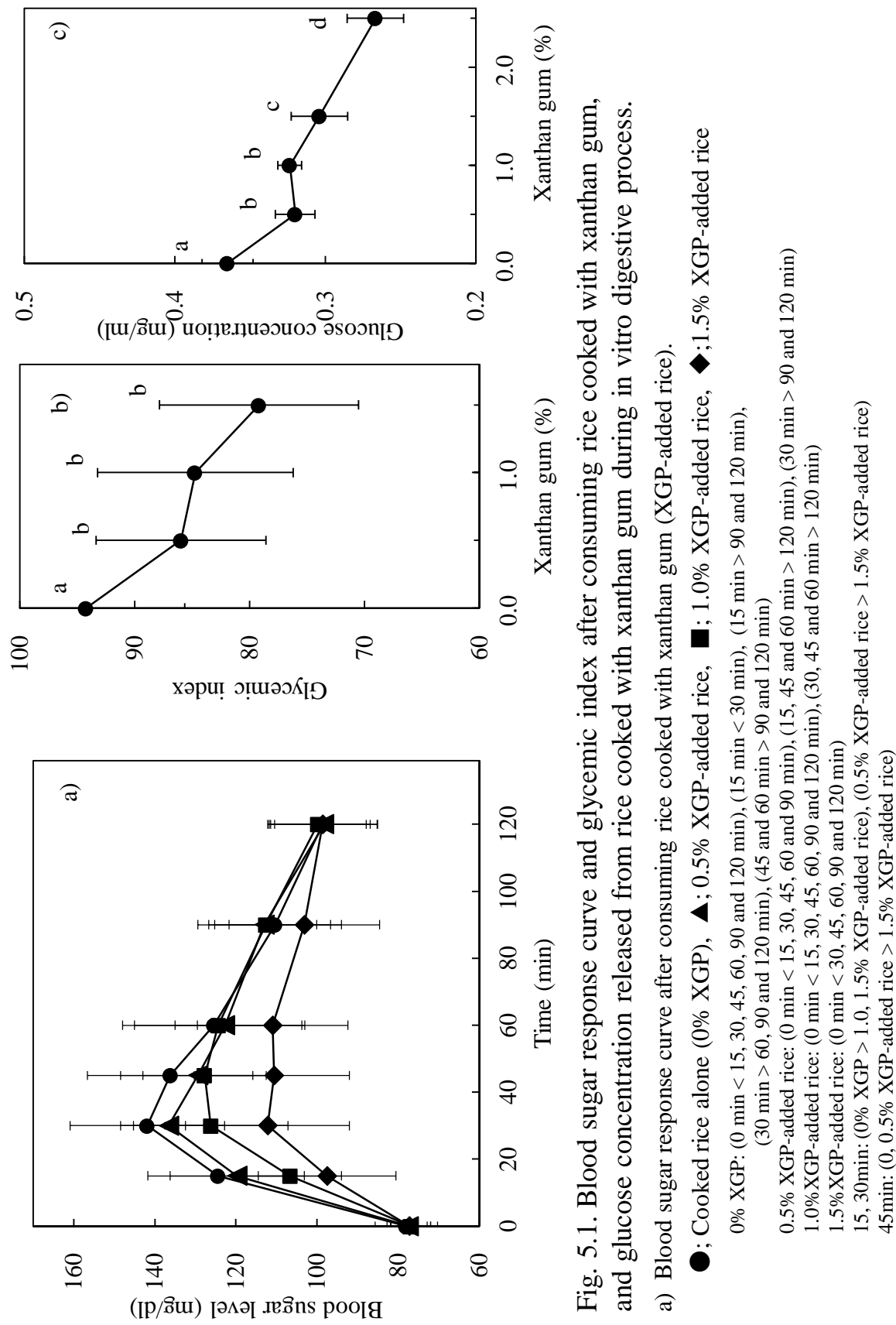


Fig. 5.1. Blood sugar response curve and glycemic index after consuming rice cooked with xanthan gum, and glucose concentration released from rice cooked with xanthan gum during in vitro digestive process.

a) Blood sugar response curve after consuming rice cooked with xanthan gum (XGP-added rice).

●; Cooked rice alone (0% XGP), ▲; 0.5% XGP-added rice, ■; 1.0% XGP-added rice, ◆; 1.5% XGP-added rice

0% XGP: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30 min), (15 min > 90 and 120 min), (30 min > 60, 90 and 120 min), (45 and 60 min > 90 and 120 min)

0.5% XGP-added rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (15, 45 and 60 min > 120 min), (30 min > 90 and 120 min)

1.0% XGP-added rice: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (30, 45 and 60 min > 120 min)

1.5% XGP-added rice: (0 min < 30, 45, 60, 90 and 120 min)

15, 30min: (0% XGP > 1.0, 1.5% XGP-added rice), (0.5% XGP-added rice > 1.5% XGP-added rice)

45min: (0, 0.5% XGP-added rice > 1.5% XGP-added rice)

b) Glycemic index after consuming rice cooked with xanthan gum (XGP-added rice).

c) Concentration of glucose released from rice cooked with xanthan gum (XGP-added rice).

n=11. Each value represents the mean \pm SD. Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

添加米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と比較し、摂取後 30 分で有意に上昇し、摂取後 30 分以降において、血糖値間に有意差は見られなかった。摂取後 120 分の血糖値は摂取前 0 分よりも有意に高かった。

各測定時間においては、摂取後 15 分および 30 分では、1.0%以上の XGP 添加米飯摂取被験者の血糖値は、基準米飯よりも有意に低かった。また、摂取後 45 分においては、1.5%XGP 添加米飯摂取被験者の血糖値は、基準米飯摂取被験者の血糖値よりも有意に低く得られた。しかし、摂取後 60 分以降の血糖値と基準米飯摂取被験者の血糖値間に有意な差は見られなかった。

Fig.5.1b.に XGP 添加米飯摂取被験者の GI を示す。XGP 添加米飯摂取被験者の GI は、基準米飯と比較して全ての XGP 添加米飯で有意に低下したが、キサンタンガムの濃度間で有意な差は見られなかった。グルコース放出量は、基準米飯よりも 0.5%以上の XGP 添加米飯で有意に低下した (Fig.5.1c.)。

4.3.1.2. テクスチャー特性

XGP 添加米飯粒の硬さおよび付着性を Fig.5.2.に示す。0.5%XGP 添加米飯粒の硬さは、基準米飯粒よりも有意に増加し、1.0%XGP 添加米飯粒と基準米飯粒間に有意な硬さの差は認められず、1.5%以上の XGP 添加米飯粒においては、濃度依存的に基準米飯粒よりも有意に低下した (Fig.5.2a.)。付着性は、0.5%XGP 添加米飯粒では基準米飯粒よりも有意に増加したが、基準米飯粒と 1.0%および 1.5%XGP 添加米飯粒間には有意な差は認められず、2.5%XGP 添加米飯粒では基準米飯粒よりも有意に低下した (Fig.5.2b.)。

4.3.1.3. 炊飯による米飯粒の長さおよび重量変化

XGP 添加米飯粒の Fig.5.3.に米飯粒の長軸および短軸方向の長さを示す。基準米飯粒では、炊飯により米飯粒の長軸方向に伸長したが、全ての XGP 添加米飯粒では米飯粒の長軸方向への伸びが有意に低くなった。短軸方向の長さにおいては、基準米飯粒よりも 1.0%以上の XGP 添加米飯粒で有意に長くなった。炊飯直後の米飯の状態を Fig.5.4.に示す。米飯の表面には、キサンタンガムの添加濃度が増加すると、キサンタンガムの薄い膜が観察され、米飯粒と米飯粒の間に線状あるいは綿状のキサンタンガムが観察された。

Table 5.1.に米の炊飯による重量変化を示す。炊き上がり重量は、基準米飯よりも全ての XGP 添加米飯の有意に増加し、0.5%XGP 添加米飯よりも 1.0%XGP 添加米飯では有意に増加したが 1.0%と 1.5%XGP 添加米飯間に有意な差は認められなかった。

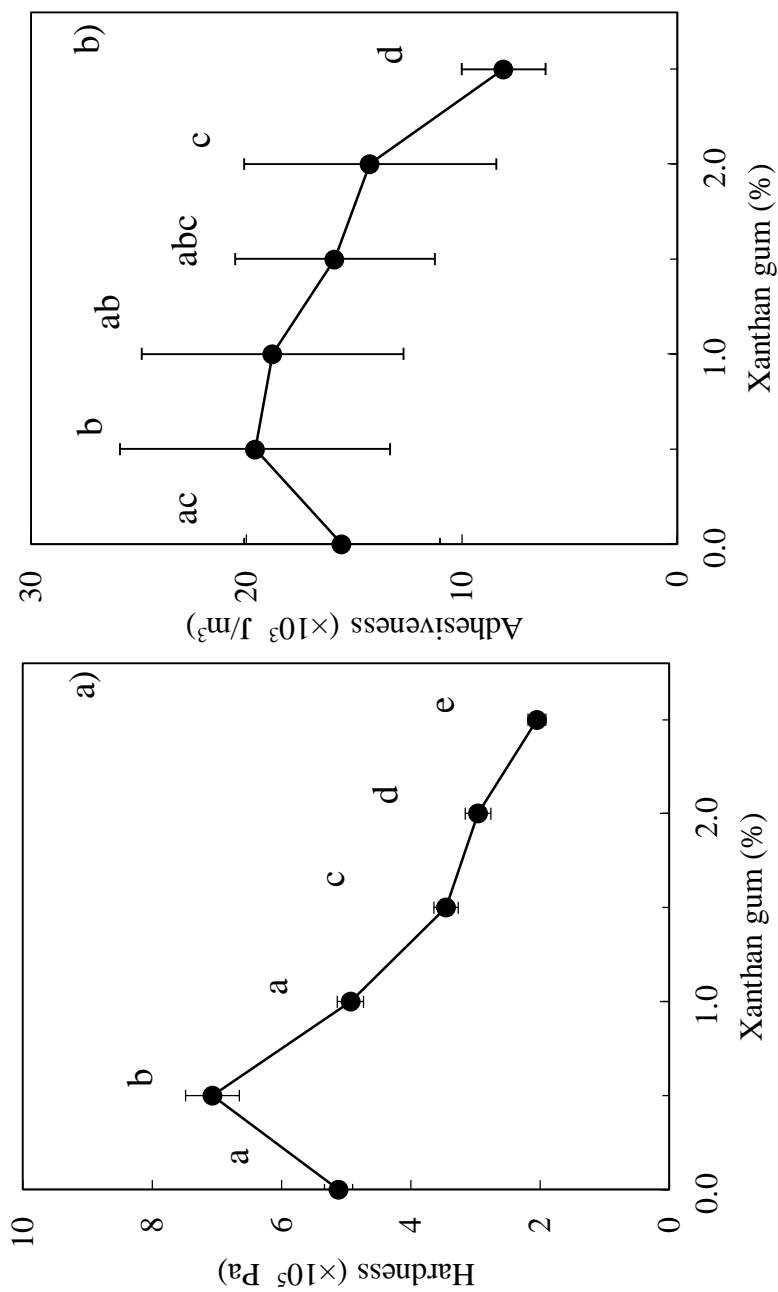


Fig. 5.2. Texture properties of cooked rice with xanthan gum (XGP-added rice).

a) Hardness, b) Adhesiveness

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

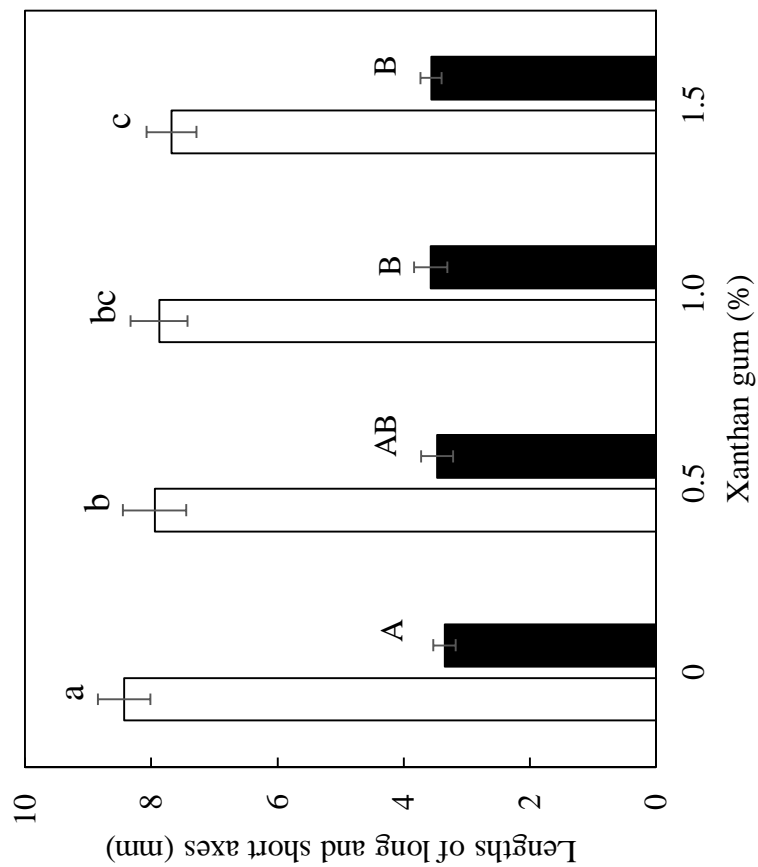


Fig. 5.3. Lengths of long and short axes of rice grain cooked with xanthan gum (XGP-added rice).

□; Long axis, ■; Short axis

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.



Fig. 5.4. Photographs of rice cooked with xanthan gum.
Concentration of xanthan gum : a) 0%, b) 0.5%, c) 1.0%, and d) 1.5%

Table 5.1. Weight ratio of rice cooked with xanthan gum to raw rice.

Sample	Weight ratio (%)
0% cooked rice	217 \pm 0.7 ^a
0.5% rice cooked with xanthan gum	222 \pm 0.6 ^b
1.0% rice cooked with xanthan gum	234 \pm 0.6 ^c
1.5% rice cooked with xanthan gum	235 \pm 0.5 ^c

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

4.3.1.4. 官能評価

キサントタンガムを炊飯時に添加した場合の米飯について、官能評価の結果を Fig.5.5. に示す。Fig.5.5a.において、基準米飯と比較して、0.5%および 1.0%XGP 添加米飯の外観の評価は、キサントタンガムの添加濃度が増すと段階的に有意に低下したが、1.0%以上の XGP 添加米飯間における有意差は認められなかった。香りについて、基準米飯と比較して、1.5%以上の XGP 添加米飯は有意に弱いと評価されたが、1.0～2.0%XGP 添加米飯間の有意差は認められなかった (Fig.5.5b.)。味について、基準米飯と 0.5% XGP 添加米飯間、0.5%と 1.0%XGP 添加米飯間、1.0%と 2.0%XGP 添加米飯間の評価は、キサントタンガムの添加濃度が高い米飯の方が有意に弱いと評価された (Fig.5.5c.)。粘りについて、基準米飯と比較して 1.5%以上の XGP 添加米飯は有意に弱いと評価されたが、0.5%～2.0%XGP 添加米飯間の有意差は認められなかった (Fig.5.5d.)。硬さは、基準米飯と全ての XGP 添加米飯との間で有意差は認められなかった (Fig.5.5e.)。総合評価について、基準米飯と比較して 0.5%XGP 添加米飯では有意に劣ると評価され、1.0%および 1.5%XGP 添加米飯ではさらに段階的に有意に低下したが、1.5%と 2.0%XGP 添加米飯間では有意差は認められなかった (Fig.5.5f.)。

4.3.2. キサントタンガムゾル混合米飯

Fig.5.6a.に XGS 混合米飯摂取後の血糖値変化を示す。0.5%XGS 混合米飯および 1.0%XGS 混合米飯において、摂取前 0 分の血糖値と比較して、摂取後 15 分の血糖値は有意に上昇した。0.5%および 1.0%XGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は、摂取後 15～90 分までの間には有意差は見られなかった。この結果は、摂取後 30 分の血糖値が摂取後 15 分の血糖値よりも有意に上昇した基準米飯とは異なった。0.5%XGS 混合米飯摂取後 120 分の被験者の血糖値は、摂取後 30 分と比較して有意に低下したが、摂取前 0 分とは有意差は認められなかった。1.0%XGS 混合米飯摂取後 120 分の被験者の血糖値は、摂取後 30～45 分と比べて有意に低下したが、摂取後 60 分および摂取前 0 分との有意な差は見られなかった。2.5%XGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と摂取後 15 分との間に有意差は認められず、摂取前 0 分よりも摂取後 30 分で有意に上昇し、摂取後 30～60 分間で有意差は見られなかった。摂取後 120 分の血糖値は摂取前 0 分と有意な差は見られなかった。

各測定時間においては、摂取後 15～60 分においては、基準米飯と比較して全ての XGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は低下したが、XGS 混合濃度間に有意な差は見られなかった。

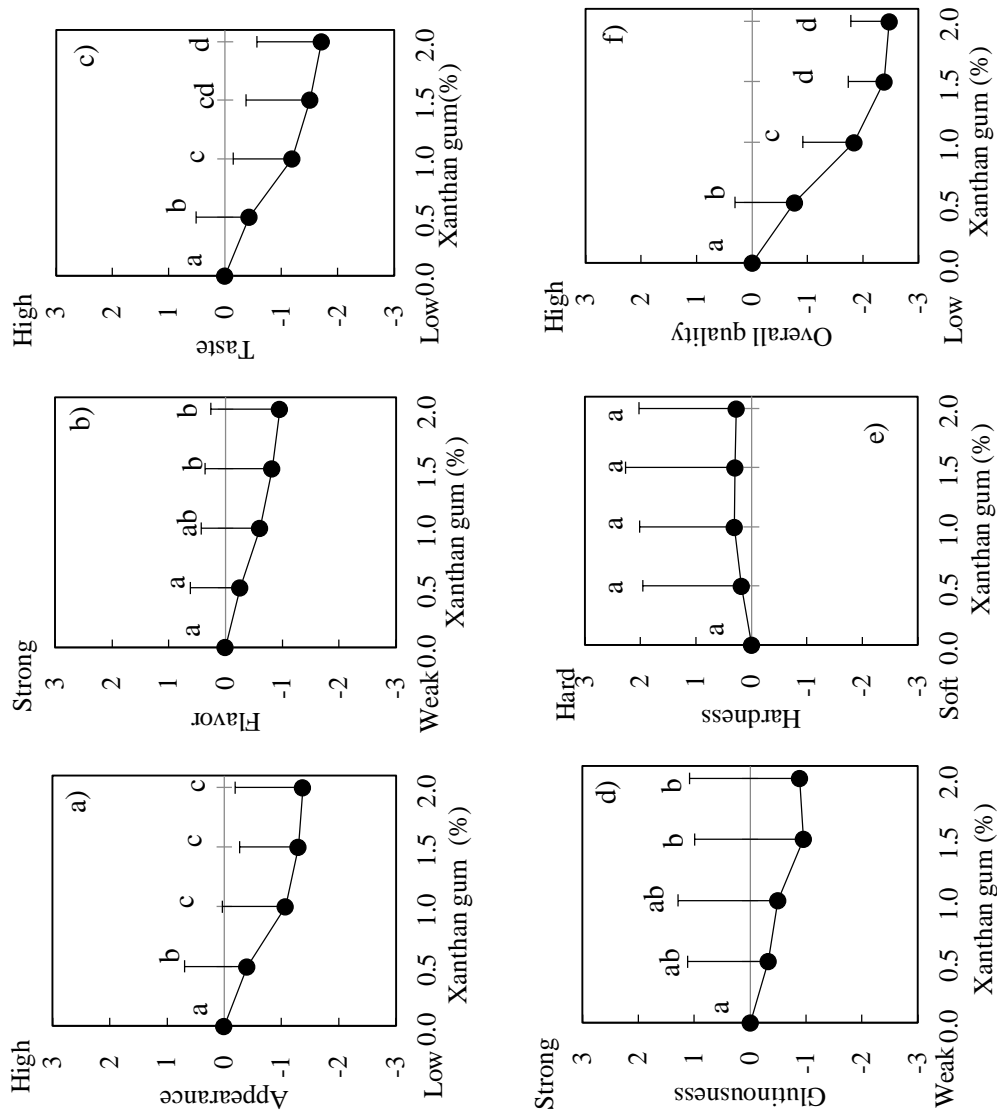


Fig.5.5. Sensory evaluation of rice cooked with xanthan gum.

a) Appearance, b) Flavor, c) Taste, d) Glutinousness, e) Hardness, f) Overall quality

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

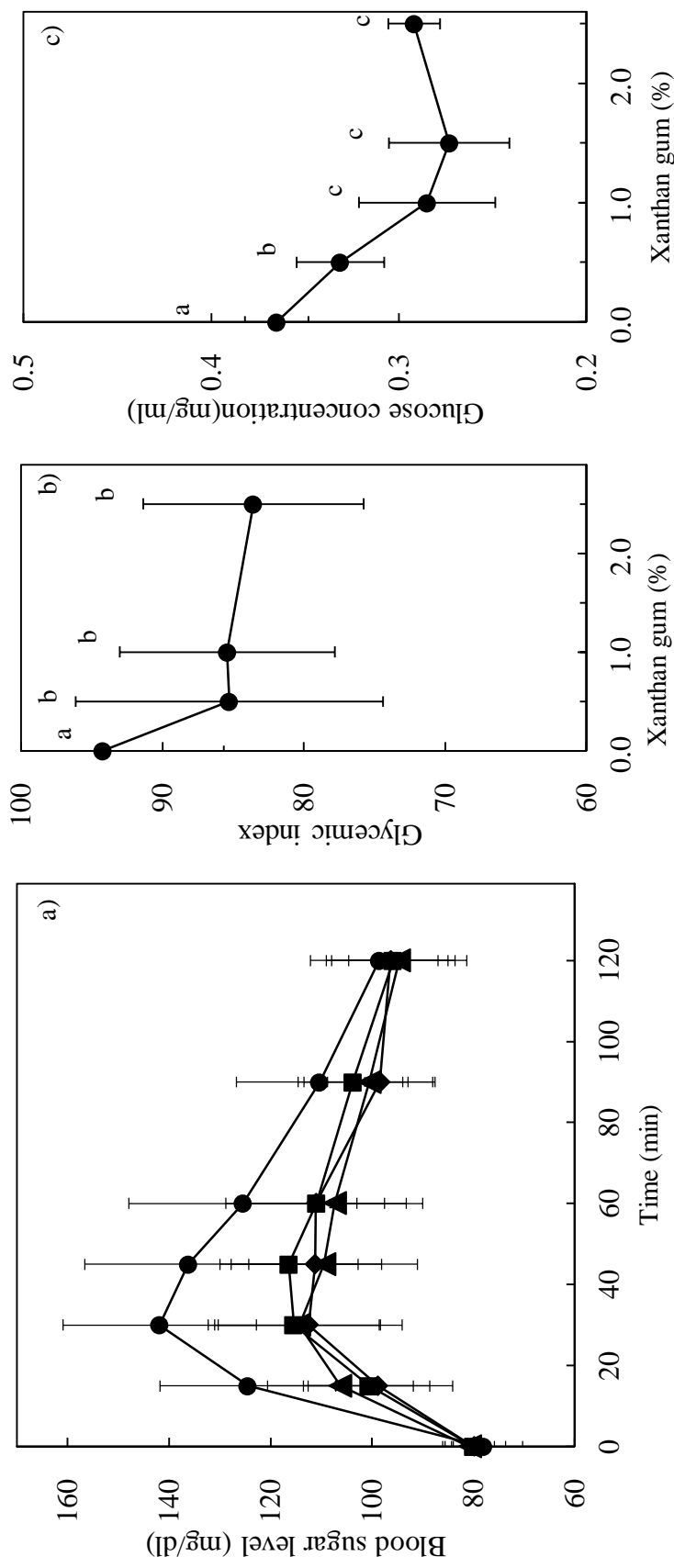


Fig. 5.6. Blood sugar response curve and glycemic index after consuming cooked rice mixed xanthan gum sol, and glucose concentration released from cooked rice mixed xanthan gum sol during in vitro digestive process.

a) Blood sugar response curve after consuming cooked rice mixed xanthan gum sol (XGS-mixed rice).

●; Cooked rice alone (0% XGS), ▲; 0.5% XGS-mixed rice, ■; 1.0% XGS-mixed rice, ◆; 2.5% XGS-mixed rice

0% XGS: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30 min), (15 min > 90 and 120 min), (30 min > 90 and 120 min)

0.5% XGS-mixed rice: (0 min < 15, 30, 45 and 60 min), (30 min > 90 and 120 min)

1.0% XGS-mixed rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (30 and 45 min > 120 min)

2.5% XGS-mixed rice: (0 min < 30, 45 and 60 min)

15, 30, 45 and 60 min: (0% XGS > 0.5, 1.0 and 2.5% XGS-mixed rice)

b) Glycemic index after consuming cooked rice mixed xanthan gum sol (XGS-mixed rice).

c) Concentration of glucose released from cooked rice mixed xanthan gum sol (XGS-mixed rice).

n=11. Each value represents the mean \pm SD. Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

XGS 混合米飯摂取被験者の GI は、基準米飯と比較して、全ての XGS 混合米飯で有意に低下したが、キサンタンガムの濃度間で有意な差は見られなかった (Fig.5.6b.)。

Fig.5.6c.に基準米飯と XGS 混合米飯の体外消化過程におけるグルコース放出量を示す。基準米飯よりも 0.5%XGS 混合米飯からのグルコース放出量は有意に低下し、1.0%XGS 混合米飯では更に有意に低下したが、1.0%~2.5%XGS 混合米飯間においては有意な差が認められなかった。

4.3.3. キサンタンガムゾル摂取時期の血糖値への影響

前項において、キサンタンガムと米飯を同時に摂取することにより、血糖値上昇の抑制効果が見られた。そこで、米飯を摂取する前後でキサンタンガムゾルを摂取した場合の血糖値について検討した。

Fig.5.7a.に米飯摂取前 XGS および米飯摂取後 XGS 摂取被験者の血糖値を示す。参考として、基準米飯および XGS 混合米飯についても示す。米飯摂取後 15 分において、基準米飯よりも米飯摂取前 XGS および XGS 混合米飯 被験者の血糖値は有意に低下したが、米飯摂取前 XGS と XGS 混合米飯 の血糖値間に有意差は認められなかった。摂取後 30 分において、基準米飯と比較して XGS 混合米飯の血糖値は有意に低下したが、基準米飯と米飯摂取前 XGS および米飯摂取後 XGS との間の血糖値に有意差は認められなかった。摂取後 45 分、60 分において、基準米飯よりも XGS 混合米飯 の血糖値は有意に低下し、XGS 混合米飯 の血糖値は、米飯摂取前 XGS よりも有意に低かった。摂取後 90 分以降の全ての血糖値間に有意差は認められなかった。

Fig.5.7b.に米飯摂取前 XGS、米飯摂取後 XGS 摂取被験者の GI を示す。参考として基準米飯および XGS 混合米飯の GI も示した。XGS 混合米飯の GI は、基準米飯の GI より有意に低下したが、基準米飯と米飯摂取前 XGS および米飯摂取後 XGS 間に有意差は認められなかった。

4.4.考察

キサンタンガムゾルの添加条件および摂取時期の違いが、米飯摂取後の血糖値に及ぼす影響を検討した。

キサンタンガム添加米飯摂取被験者の血糖値は、基準米飯よりも 1.0%以上のキサンタンガム添加により、摂取後 15 分および 30 分で有意に低かった。摂取後 45 分では 1.5%XGP 添加米飯において有意に低かった (Fig.5.1a.)。また、GI およびグルコース放出量では、全ての XGP 添加米飯で基準米飯よりも有意に低下した (Fig.5.1b., 5.1c.)。このように、全ての測定方法でキサンタンガム

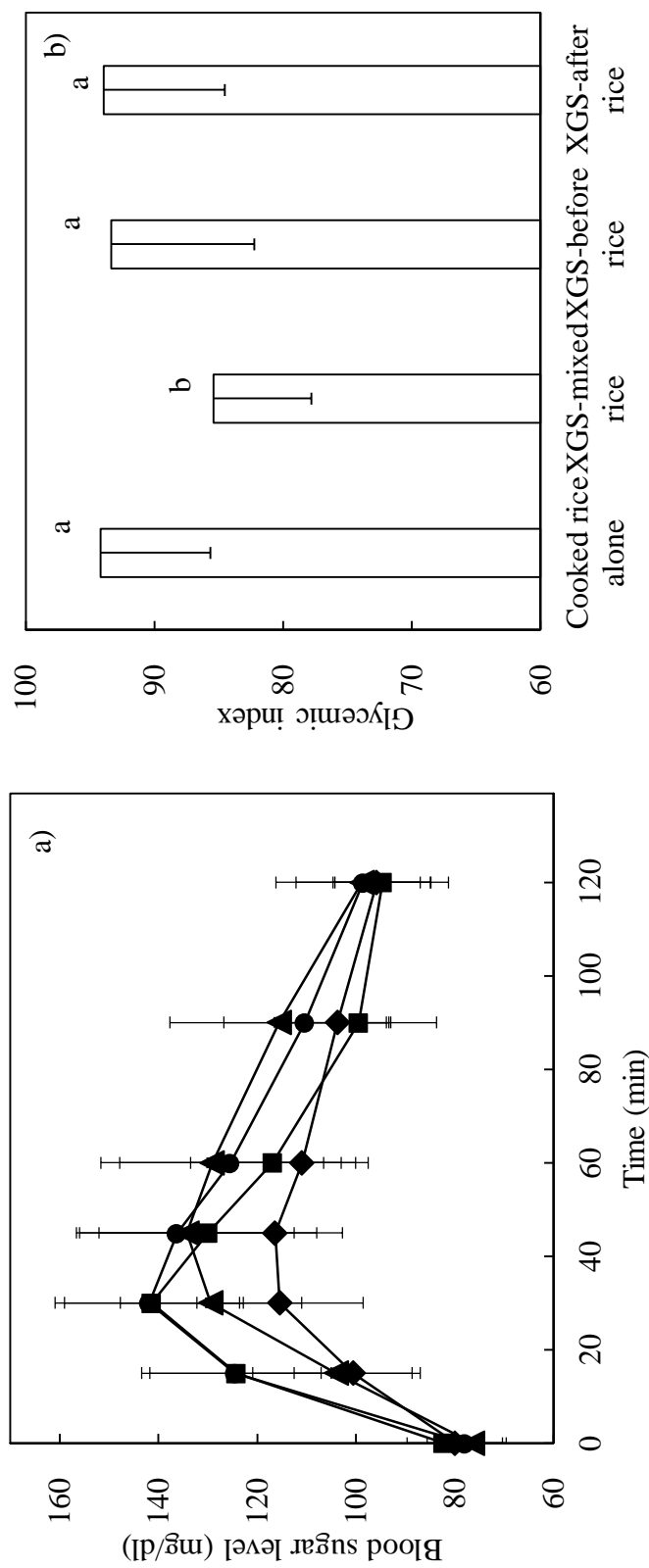


Fig. 5.7. Blood sugar response curve and glycemic index after consuming XGS-mixed rice, XGS-before rice and XGS-after rice and XGS-after rice.

a) Blood sugar response curve after consuming XGS-mixed rice, XGS-before rice and XGS-after rice

●; Cooked rice alone (0% XGS), ▲; XGS-before rice, ■; XGS-after rice, ◆; XGS-mixed rice

0% XGS: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30 min), (15 min > 90 and 120 min),

(30 min > 60, 90 and 120 min), (45 and 60 min > 90 and 120 min)

XGS-before rice: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30, 45 and 60 min),

(30 min > 120 min), (45 min > 90 and 120 min), (60 min > 120 min)

XGS-after rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 min), (15 min > 90 and 120 min),

(30 min > 60, 90 and 120 min), (45 min > 90 and 120 min), (60 min > 120 min)

XGS-mixed rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (30 and 45 min > 120 min)

15 min: (0% XGS, XGS-after rice > XGS-mixed rice, XGS-before rice)

30 min: (0% XGS, XGS-after rice > XGS-mixed rice)

45 and 60 min: (0% XGS, XGS-before rice > XGS-mixed rice)

b) Glycemic index after consuming XGS-mixed rice, XGS-before rice and XGS-after rice

n=11. Each value represents the mean \pm SD. Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

添加による米飯摂取後の被験者の血糖値の上昇抑制が確認された。XGP 添加米飯粒の長軸方向の長さは、基準米飯粒の長軸方向の長さよりも 0.5%以上の XGP 添加米飯粒では有意に短くなった (Fig.5.3.)。この結果より、キサンタンガムを添加して炊飯すると、炊飯中の米粒の吸水は、キサンタンガムを添加しない場合に比較して抑制されるのではないかと考えられる。米粒の吸水量の不足が原因となり、糊化の抑制が基準米飯よりも悪くなったのではないかと推察される。

一方、テクスチャーの硬さは、基準米飯粒よりも 0.5%XGP 添加米飯粒で有意に増加したが、1.0%XGP 添加米飯粒と基準米飯粒間に有意な硬さの差は認められず、1.5%以上の XGP 添加米飯粒においては、硬さは反対に濃度依存的に基準米飯よりも有意に低下した (Fig.5.2a.)。XGP 添加米飯の主観評価において、キサンタンガムの濃度には関係なく、硬さは基準米飯と全ての XGP 添加米飯との間では有意差は認められなかった (Fig.5.5e.)。一方、XGP 添加米飯粒の周囲にはキサンタンガムゾルが付着し (Fig.5.4.)、また、短軸方向の長さは長くなった (Fig.5.3.)。キサンタンガムの添加濃度が上昇すると、米飯粒の糊化の抑制は強くなると考えられるが、同時に米飯粒の周囲に付着するキサンタンガムゾルの付着量も増加する (Fig.5.3.,5.4.)。そのため、米飯粒のテクスチャーの硬さは、米飯粒の物理的性質と共にキサンタンガムゾルの物理的性質も反映された値となる。さらに、キサンタンガムの添加量が増加すると、米飯粒の表面に付着しているキサンタンガムゾルのテクスチャーの硬さに対する寄与率は大きくなる。1.0%XGP 添加米飯粒ではキサンタンガムの添加による硬さの増加と減少が、互いに相殺されて基準米飯との有意差は認められなかったと推察される。さらに、キサンタンガム添加濃度が 1.0%より増加すると、テクスチャーの硬さは、糊化の抑制によると考えられる硬さの増加量よりも、ゾル化したキサンタンガムによる硬さに対する寄与率が上回り、硬さは低下したのではないかと考えられる。従って、米飯のキサンタンガムの添加による糊化の抑制に対して、テクスチャーの硬さが必ずしも硬くならない (Fig.5.2a.) のは矛盾するものではないと考えられる。

テクスチャーの付着性は、基準米飯よりも 0.5%XGP 添加米飯粒では上昇したが、1.0%および 1.5%XGP 添加米飯粒と基準米飯粒との間には有意差はなく、2.0%および 2.5%XGP 添加米飯粒では基準米飯粒よりも有意に低下した (Fig.5.2b.)。この付着性の変化の原因は、米飯粒の表面に付着したキサンタンガムゾルによるものであると考えられる。一方、炊飯直後の米飯は、キサンタンガムの濃度が高くなると米飯はほぐれ難くなり、米飯の表面にキサンタンガムの薄い膜が観察され、米飯粒と米飯粒の間に線状あるいは綿状のキサンタ

ンガムが観察された (Fig.5.4.)。これは炊飯過程においてキサンタンガムが米粒をゾル構造の中に取り込むために生じたものと考えられる。しかし、付着性は米飯粒を一粒ずつ測定したため、米飯粒間のゾル構造が壊されたと推察される。さらに、生米の重量に対する炊き上がりの米飯重量の増加率は、キサンタンガムを添加することにより有意に増加した (Table 5.1.)。図には示していないが、キサンタンガムゾルのみかけの粘性率は 80℃において水と比較して格段に高かった。そのため、炊飯中の水の対流が悪くなり、炊飯過程において水の蒸発量が減少し、米飯の炊き上がり重量が増加したと考えられる。このことも、キサンタンガムを添加した米粒の付着性が低下した原因の一つと推測される。

官能評価においては、米飯粒の表面に付着しているキサンタンガムゾルの量および糊化の抑制が、米飯の評価に影響を与え、主観評価における外観、香り、味、総合評価項目において、評価が低下したと推察される。前章までのグルコマンナンや κ -カラギーナンを炊飯時に添加した場合には、米飯粒にこれらの水溶性食物繊維が付着することよりも、米でんぷんの糊化の抑制によることの方が、血糖値の上昇の抑制の主な原因と考えられた。しかし、XGP 添加米飯においては、米飯粒の短軸方向の長さが長くなり (Fig.5.3.)、生米の重量に対する炊き上がりの米飯重量が増加した (Table 5.1.)。Fig.5.4.では、米飯表面にキサンタンガムの薄い膜が観察された。これらの結果から、米飯粒にキサンタンガムが付着していたと推察される。このことから、キサンタンガムを炊飯時に添加した場合には、米でんぷんの糊化の抑制に加え、キサンタンガムの付着という現象が加わり、さらなる血糖値の上昇が抑制されたと推察された。

XGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は、摂取後 15～60 分においては、基準米飯と比較して全ての XGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は低下し、XGP 添加米飯よりも食後の急激な血糖値の上昇は抑制された (Fig.5.6a.)。また、摂取後 120 分の血糖値は、摂取前 0 分との間に有意差は認められなかった。一方、基準米飯では摂取前 0 分よりも有意に高く、結果は異なった。このことは、キサンタンガムゾルの共存により、血糖値が低下しやすかったことを示唆している。さらに、各測定時間における XGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は、XGS 混合濃度間に有意差が見られなかった。また XGS 混合米飯摂取による GI は、全ての XGS 混合米飯で基準米飯よりも有意に低下し (Fig.5.6b.)、グルコース放出量は、0.5%以上の XGS 混合米飯で基準米飯よりも有意に低下した (Fig.5.6c.)。本研究において、キサンタンガムと米飯の摂取量は、キサンタンガムを炊飯時に添加する方法と、摂取時に同時にゾル状態で米飯と共に摂取する方法では同じであった。しかし、米飯摂取後の血糖値の上昇抑制に相違があり、キサンタ

ンガムを添加して炊飯するよりも、摂取時にキサンタンガムをゾル状態で米飯と共に摂取する方法の方が、血糖値の上昇抑制の効果は高く得られた。このことは、前章の κ -カラギーナンゲルと米飯を混合して摂取した場合に、ゲルよりもゲルが一部融解してゾル状となった場合の方が血糖値の上昇を抑制した結果と同様であると考えられる。Sasaki ら^{92,93)}は、水溶性高分子多糖類を添加した澱粉の消化性の低下について報告し、キサンタンガムは、みかけの粘度が高く、グルコースの拡散が強く抑制させるため、消化性を顕著に低下させることを報告している。また Fabek ら⁹⁴⁾は、消化管モデルの実験により、キサンタンガムのゾル構造が、消化酵素の共存および消化過程における低 pH などの環境においても維持されると報告しており、これらのキサンタンガムの性質が食後の血糖値の反応を調節できている原因の一つではないかと述べている。一方、XGS 混合米飯において、キサンタンガムの濃度依存性による食後の血糖値上昇の抑制は観察されなかった (Fig.5.6a., 5.6b.)。この理由は、XGS 混合米飯において、0.5%のキサンタンガム量であっても、十分にキサンタンガムが米粒を取り込むことができたための結果ではないかと推察される。この理由により、たとえキサンタンガムの濃度が増加したとしても、血糖値の抑制が増加しないのではないかと考えられる。

キサンタンガムゾルを摂取する時期を米飯摂取の前後とした場合にも、同時摂取と同様の効果があるか検討した。米飯を摂取する前後でキサンタンガムゾルを摂取した場合の血糖値は、摂取後 15 分において、基準米飯よりも米飯摂取前にキサンタンガムゾルを摂取した被験者の血糖値は有意に低下した。しかし、他の測定時間において、基準米飯と米飯摂取前 XGS との間、基準米飯と米飯摂取後 XGS との間の血糖値に有意差は認められなかった (Fig.5.7a.)。GI においても、基準米飯と米飯摂取前 XGS および米飯摂取後 XGS 間に有意差は認められなかった (Fig.5.7b.)。これらのことは、キサンタンガムが米飯摂取後の血糖値の上昇を効果的に抑制するためには、米飯とゾル状態のキサンタンガムを同時に摂取することが有効であることを示していた。

以上の結果から、血糖値の上昇を抑制するためには、キサンタンガムのゾル構造内に米飯粒を分散させ、米飯粒をキサンタンガムゾルで包み込むことが、最も重要であると考えられた。

4.5. 要約

キサンタンガムゾルの添加および摂取条件が、米飯摂取後の血糖値に及ぼす影響について検討した。

キサンタンガム添加米飯摂取被験者の血糖値は、1.0%以上のキサンタンガ

ム添加により、摂取後 15 分と 30 分で基準米飯よりも有意に低く、摂取後 45 分では 1.5%キサントランガム添加米飯のみで有意に低かった。また、キサントランガム添加米飯摂取による GI は、全てのキサントランガム添加米飯で基準米飯よりも有意に低下し、グルコース放出量は、2.5%キサントランガム添加米飯で有意に低下した。キサントランガムゾル混合米飯では、摂取被験者の血糖値は、摂取後 15～60 分で全てのキサントランガムゾル混合米飯において基準米飯より低かった。キサントランガムゾル混合米飯摂取による GI は、全てのキサントランガムゾル混合米飯で基準米飯よりも有意に低下し、グルコース放出量は、基準米飯よりも 0.5%以上キサントランガムゾル混合により有意に低下した。キサントランガムゾルは米飯摂取の前後に 10 分ずらして摂取するよりも、米飯と混合して同時に摂取する方が、血糖値の上昇抑制には有効であった。以上の結果から、米飯摂取後の血糖値上昇の抑制には、米飯粒をキサントランガムゾルで包み込んで摂取する方法が最も有効であることが判明した。

第 5 章 グアーガムが米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響

5.1. 緒言

グアーガムは、キサンタンガムと同様にゾルを形成する食物繊維であり、グアー豆(*Cyamopsis tetragonolobus*)の種子の胚乳から得られる高分子多糖類である。グアーガムは、 β -1,4 結合した D-マンノースを主鎖とし、マンノース 2 分子に α -1,6 グルコシド結合した D-ガラクトース 1 分子を側鎖にもっており、マンノースとガラクトースの構成比率は 2:1 である^{44,45)}。グアーガムについても、血糖値上昇の抑制効果に関する報告はいくつかなされている^{15,95-99)}。

本章ではグアーガムと共に炊飯した米飯およびグアーガムゾルを混合した米飯の摂取後の血糖値が、米飯単独摂取後の血糖値と比較してどのように異なるのか検討した。

5.2. 実験材料および方法

5.2.1. 試料

米は第 1～4 章と同様の、新潟県産水稻精白米「こしいぶき」⁵⁹⁾を用いた。グアーガムは三栄源 F.F.I 社製 (Lot. 120601-01)、キサンタンガムは三栄源 F.F.I 社製 (Lot.130730-01) を用いた。

グアーガムゾルのグアーガム濃度は 2.0%とし、室温で脱イオン水をマグネチックスターラーで攪拌しながらグアーガムを徐々に分散させ、一晩放置後、98℃で 60 分間加熱攪拌して試料とした。

米 180g を純水で洗米後、米重量の 1.4 倍の脱イオン水を加え、室温(25±3℃)で吸水率が安定する 1 時間の浸漬の後、電気炊飯器(Panasonic 社製、SR-CL05P)により炊飯した。以下、これを基準米飯とする。

グアーガム添加米飯(以下、GGP 添加米飯とする)は、基準米飯と同様に、1 時間浸漬後、炊飯直前に、米重量に対して 0.5、1.0、1.5、2.0%グアーガムを添加して炊飯した。グアーガムは、室温で一晩膨潤しておいたものを添加した。炊飯後の蒸らし時間は 30 分間とした。組織観察、テクスチャー特性、官能評価に用いた試料は、常に一定状態の米飯粒を得るために、電気炊飯器の釜の中心部分から採取した米飯粒とした。炊き上がり増加率は、炊飯後の米飯の重量を測定し、米 180g で割った値とした。

グアーガムゾル混合米飯(以下、GGS 混合米飯とする)は、基準米飯に GGP 添加米飯と同程度のグアーガム濃度となるよう試験直前に基準米飯とグアーガムゾルを混合し調製した。

5.2.2. 血糖値の測定方法およびグリセミックインデックスの算出方法

被験者は、通常の日常生活を営み、これまでに糖尿病と診断されたことのない健常な女子学生（19～39 歳）13 名とした。試験参加への同意後に測定した被験者の空腹時血糖は、平均 $78.4 \pm 7.7 \text{mg/dL}$ であり、いずれも試験開始時において糖尿病診断基準により正常型と診断される範囲であった。血糖値測定の実施に関しては、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、血糖値の測定方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。

試験食は、基準米飯、0.5、1.0、1.5%GGP 添加米飯、および 0.5、1.0、2.5%GGS 混合米飯を用いた。各試験食に含まれる米飯の糖質量は 50g とし、摂取時に飲む水との総重量は 250g とした。また、GGS 混合米飯を試験食とする場合には、米飯と摂取時に飲む水およびグアーガムゾルの 3 種試料の総重量は 250g とした。試験食の摂取方法は、被験者らは米飯と水を交互に時間内に摂取し、1 口の分量はおよそ 10g 程度とし、1 口の咀嚼を 30 回とした。グアーガムゾル摂取の時期の違いによる血糖値の測定における試験食の摂取は、基準米飯摂取開始より 10 分前にグアーガムゾルを摂取する場合（以下、米飯摂取前 GGS とする）、基準米飯と同時にグアーガムゾルを摂取する場合（以下、GGS 混合米飯とする）、基準米飯摂取後より 10 分後にグアーガムゾルを摂取する場合（以下、米飯摂取後 GGS とする）とした。

血糖値測定およびグリセミックインデックス値（GI）の算出方法は、第 1～4 章と同様の方法で行った。

5.2.3. グルコース放出量の測定方法

グルコース放出量の測定は、第 2～4 章と同様の方法で行った。試料は、基準米飯、GGP 添加米飯、GGS 混合米飯とし、血糖値測定と同様のものを用いて測定した。パンクレアチンとインベルターゼを添加し、37℃、20 分間振とう後のグルコース量を測定した。

5.2.4. テクスチャー特性の測定方法

テクスチャー特性の測定は、第 2～4 章と同様の方法で行った。試料は、基準米飯および 4 種類のグアーガム濃度の GGP 添加米飯とした。

5.2.5. 米飯粒の形状観察

基準米飯粒 0.5、1.0、1.5%GGP 添加米飯粒の長軸方向の最大の長さを電子

ノギスにより測定した。

5.2.6. 官能評価の測定方法

官能評価の測定方法は、第 1～4 章と同様の方法で行った。パネルは視覚、味覚、臭覚が一般的な 20～22 歳の女子学生 20 名とした。官能評価の実施に関しては、昭和女子大学倫理委員会の承認を受けて実施した。また、本試験の参加者には、試験の主旨、試験サンプルの安全性、官能評価の方法に関し、十分に説明し、ヘルシンキ宣言の主旨に従い本人の文書による同意を得て実施した。試料は、基準米飯に対して 0.5、1.0、1.5、2.0% GGP 添加米飯とした。また、混合米飯における官能評価測定における試料は、基準米飯に対して 0.5、1.0、2.5%GGS 混合米飯および XGS 混合米飯とした。

5.2.7. 動的粘弾性の測定方法

動的粘弾性は、Physica MCR300 (Anton Paar 社製) により、外径 25mm のコーンプレート治具を用いて、温度 37℃、ギャップ 0.049mm により測定した。測定歪範囲は 0.01～1000%であり、周波数は 1Hz とした。試料は、1.0、2.0、4.0%濃度のグアーガムゾルおよびキサントガムゾルを用いた。

5.2.8. 統計処理

統計処理は、第 3、4 章と同様の方法で行った。

5.3. 実験結果

5.3.1. グアーガム添加米飯

5.3.1.1. 血糖値、グリセミックインデックスおよびグルコース放出量

Fig.6.1a.に基準米飯と GGP 添加米飯摂取被験者の血糖値を示す。なお、前章までの食物繊維と比較できるように GGP 添加濃度は 0.5%、1.0%および 1.5%とした。基準米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前である 0 分と比較して、摂取後 15 分では有意に上昇し、さらに摂取後 30 分で摂取後 15 分よりも有意に上昇した。摂取後 30 分と 45 分の血糖値間および摂取後 45 分と 60 分の血糖値間には、有意差が見られなかった。摂取後 60 分と比べて摂取後 90 分の血糖値は有意に低下し、摂取後 120 分の血糖値は、摂取前 0 分よりも有意に高かった。

全ての GGP 添加米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と比較して摂取後 15 分では有意に上昇し、さらに摂取後 30 分で摂取後 15 分よりも有意に上昇した。0.5%GGP 添加米飯摂取被験者の摂取後 30～60 分の血糖値間および、1.0%および 1.5%GGP 添加米飯摂取被験者の摂取後 30～90 分の血糖値間で有意差は

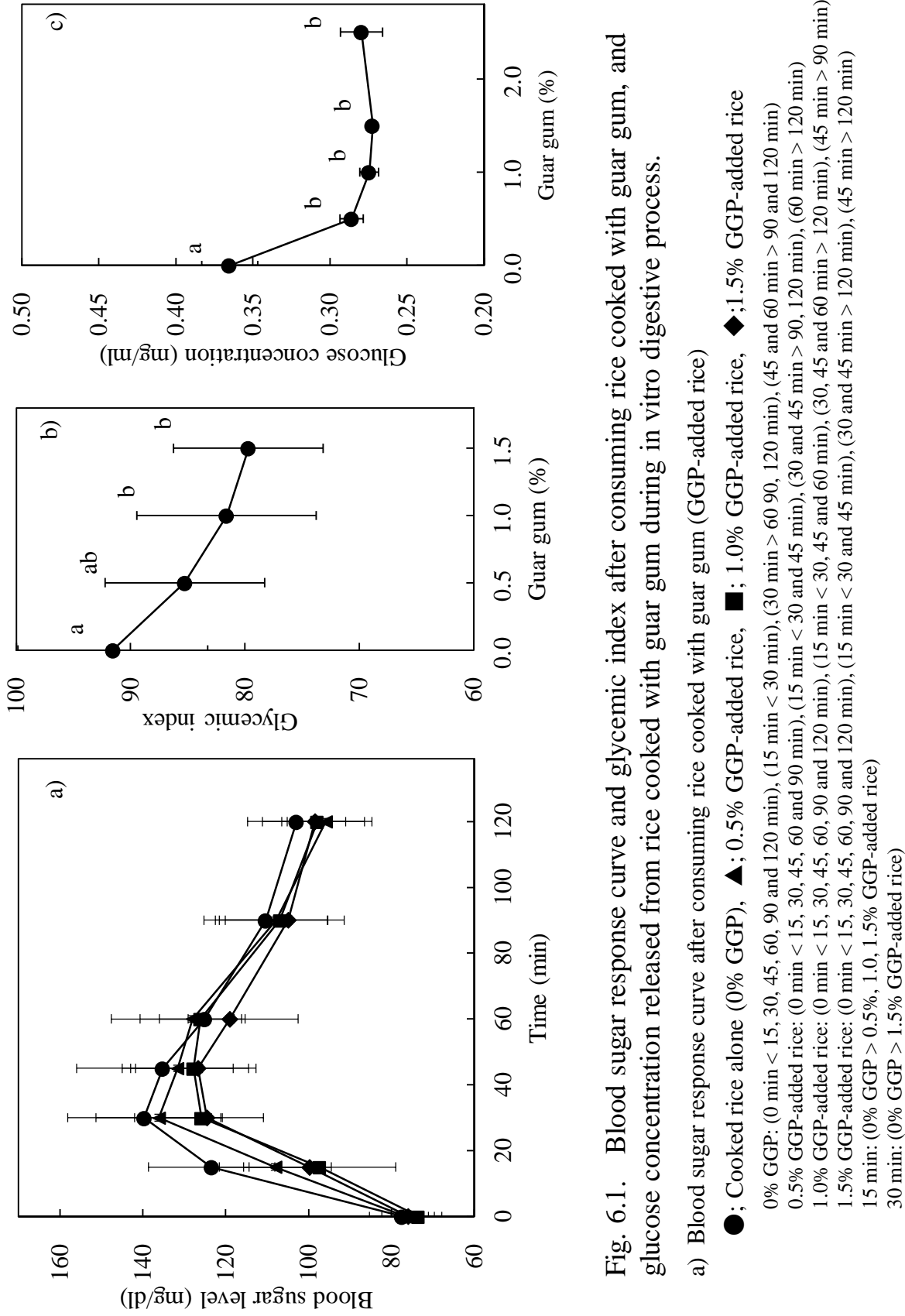


Fig. 6.1. Blood sugar response curve and glycemic index after consuming rice cooked with guar gum, and glucose concentration released from rice cooked with guar gum during in vitro digestive process.

a) Blood sugar response curve after consuming rice cooked with guar gum (GGP-added rice)

●; Cooked rice alone (0% GGP), ▲; 0.5% GGP-added rice, ■; 1.0% GGP-added rice, ◆; 1.5% GGP-added rice

0% GGP: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30 min), (30 min > 60, 90, 120 min), (45 and 60 min > 90 and 120 min)

0.5% GGP-added rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (15 min < 30 and 45 min), (30 and 45 min > 90, 120 min), (60 min > 120 min)

1.0% GGP-added rice: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30, 45 and 60 min), (30, 45 and 60 min > 120 min), (45 min > 90 min)

1.5% GGP-added rice: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30 and 45 min), (30 and 45 min > 120 min), (45 min > 90 min)

15 min: (0% GGP > 0.5%, 1.0, 1.5% GGP-added rice)

30 min: (0% GGP > 1.5% GGP-added rice)

b) Glycemic index after consuming rice cooked with guar gum (GGP-added rice)

c) Glucose concentration of released from rice cooked with guar gum (GGP-added rice)

n=13. Each value represents the mean \pm SD. Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

見られなかった。0.5%GGP 添加米飯摂取被験者の摂取後 90 分の血糖値は、摂取後 30 分および 45 分よりも有意に低下した。1.0%GGP 添加米飯摂取被験者の摂取後 120 分の血糖値は、摂取後 30～60 分よりも有意に低く、1.5%GGP 添加米飯摂取被験者の摂取後 120 分の血糖値は、摂取後 30～45 分よりも有意に低かった。1.0%以上の GGP 添加米飯摂取被験者の摂取後 120 分の血糖値は、基準米飯と同様に、摂取前 0 分よりも有意に高かった。

各測定時間において、摂取後 15 分で基準米飯と比較して全ての GGP 添加米飯摂取被験者の血糖値は有意に低下し、摂取後 30 分で基準米飯よりも 1.5%GGP 添加米飯摂取被験者の血糖値は有意に低かった。

Fig.6.1b.に GGP 添加米飯摂取被験者の GI を示す。1.0%以上の GGP 添加米飯摂取被験者の GI は、基準米飯と比較して有意に低下したが、0.5～1.5%GGP 添加米飯間に有意な差は見られなかった。

Fig.6.1c.にグルコース放出量を示す。0.5%以上の GGP 添加米飯のグルコース放出量は、基準米飯のグルコース放出量よりも有意に低下したが、GGP 添加濃度による差は見られなかった。

5.3.1.2. テクスチャー特性

GGP 添加米飯の硬さおよび付着性を Fig.6.2.に示す。0.5%以上の GGP 添加米飯の硬さは、基準米飯よりも有意に増加し、さらに 1.5%GGP 添加米飯の硬さは、0.5%および 1.0%GGP 添加米飯の硬さよりも有意に増加したが、2.0%GGP 添加米飯の硬さは再び低下した。

付着性は、基準米飯と比較して 1.5%以上の GGP 添加米飯で有意に低下したが、1.5%と 2.0%GGP 添加米飯間には有意な差は見られなかった。

5.3.1.3. 炊飯による米飯粒の長さおよび重量変化

Fig.6.3.に GGS 添加米飯粒の長軸方向の長さを示す。長軸方向の長さは、基準米飯粒よりも、1.0%以上の GGP 添加米飯粒で有意に短くなった。

Table 6.1.に米の炊飯による重量変化を示す。炊き上がり重量は、基準米飯よりも 1.0%GGP 添加米飯で有意に増加し、さらに 1.5%GGP 添加米飯は 1.0%GGP 添加米飯よりも有意に増加した。

5.3.1.4. 官能評価

グアーガムを炊飯時に添加した米飯の官能評価の結果を Fig.6.4.に示す。外観、総合評価について、基準米飯と比較して全ての GGP 添加米飯は有意に劣ると評価された。0.5%より 1.0%GGP 添加米飯の評価は有意に低下したが、1.0

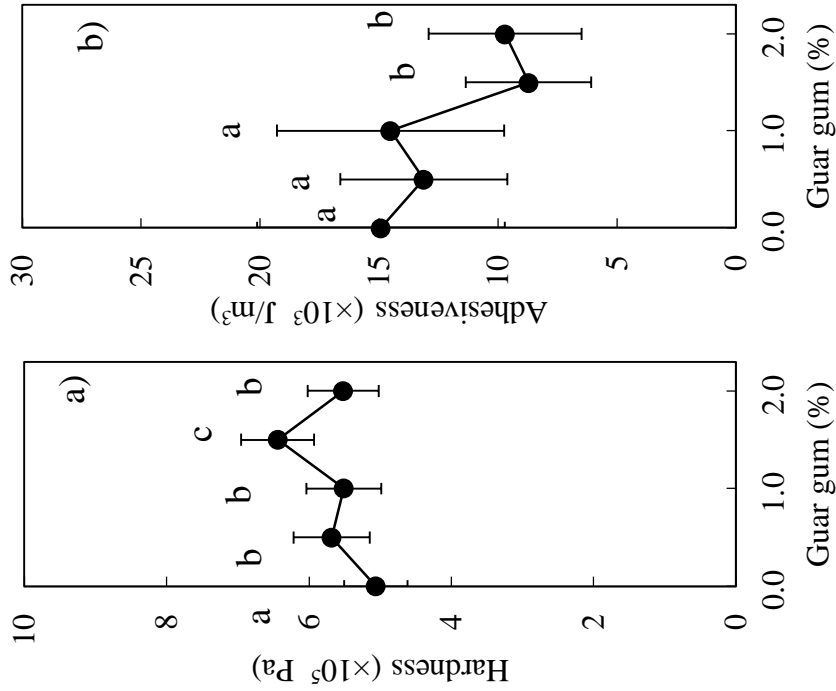


Fig. 6.2.1. Texture properties of rice cooked with guar gum.

a) Hardness, b) Adhesiveness

Each value represents the mean \pm SD.
Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

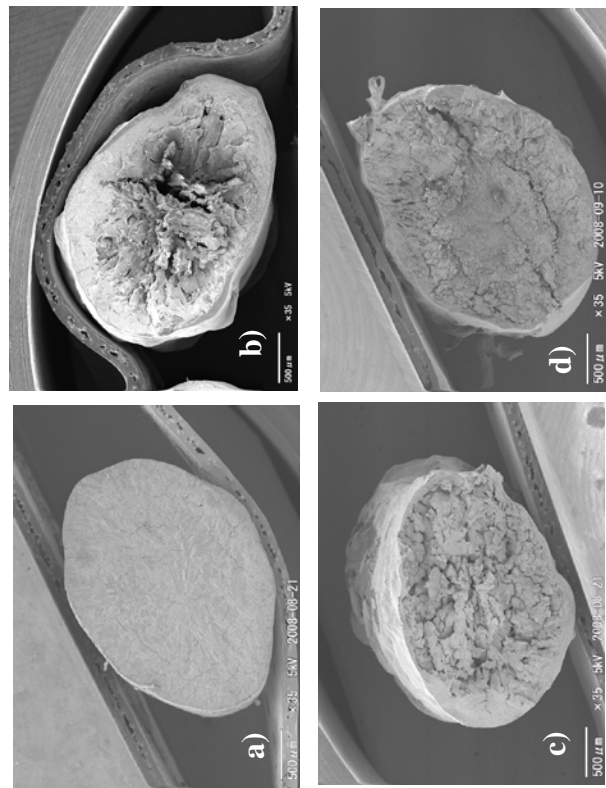


Fig. 6.2.2. Scanning electron micrographs of the cross-section rice grain cooked with guar gum.

a) raw rice grain,

b) 0%, c) 0.5%, and d) 2.0%

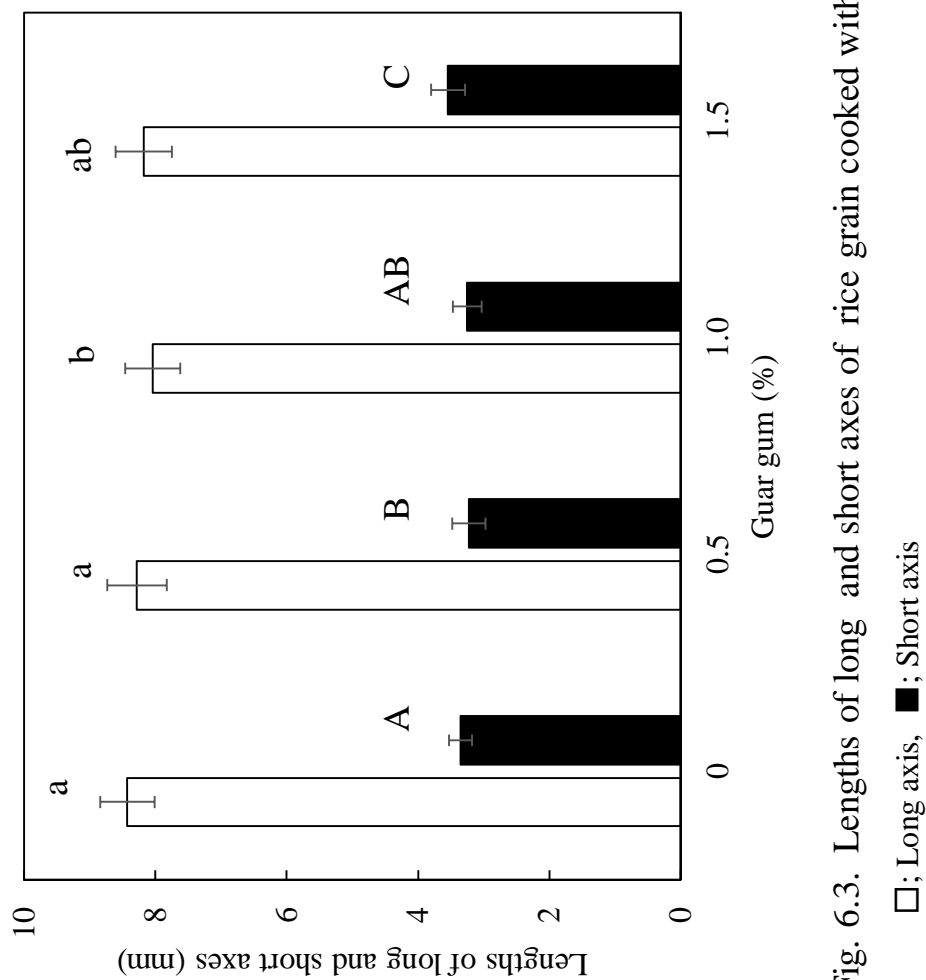


Fig. 6.3. Lengths of long and short axes of rice grain cooked with guar gum.

□; Long axis, ■; Short axis

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

Table 6.1. Weight ratio of rice cooked with guar gum to raw rice.

Sample	Weight ratio (%)
0% cooked rice	217 \pm 0.7 ^a
0.5% rice cooked with guar gum	217 \pm 1.5 ^a
1.0% rice cooked with guar gum	223 \pm 4.1 ^b
1.5% rice cooked with guar gum	226 \pm 4.0 ^c

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

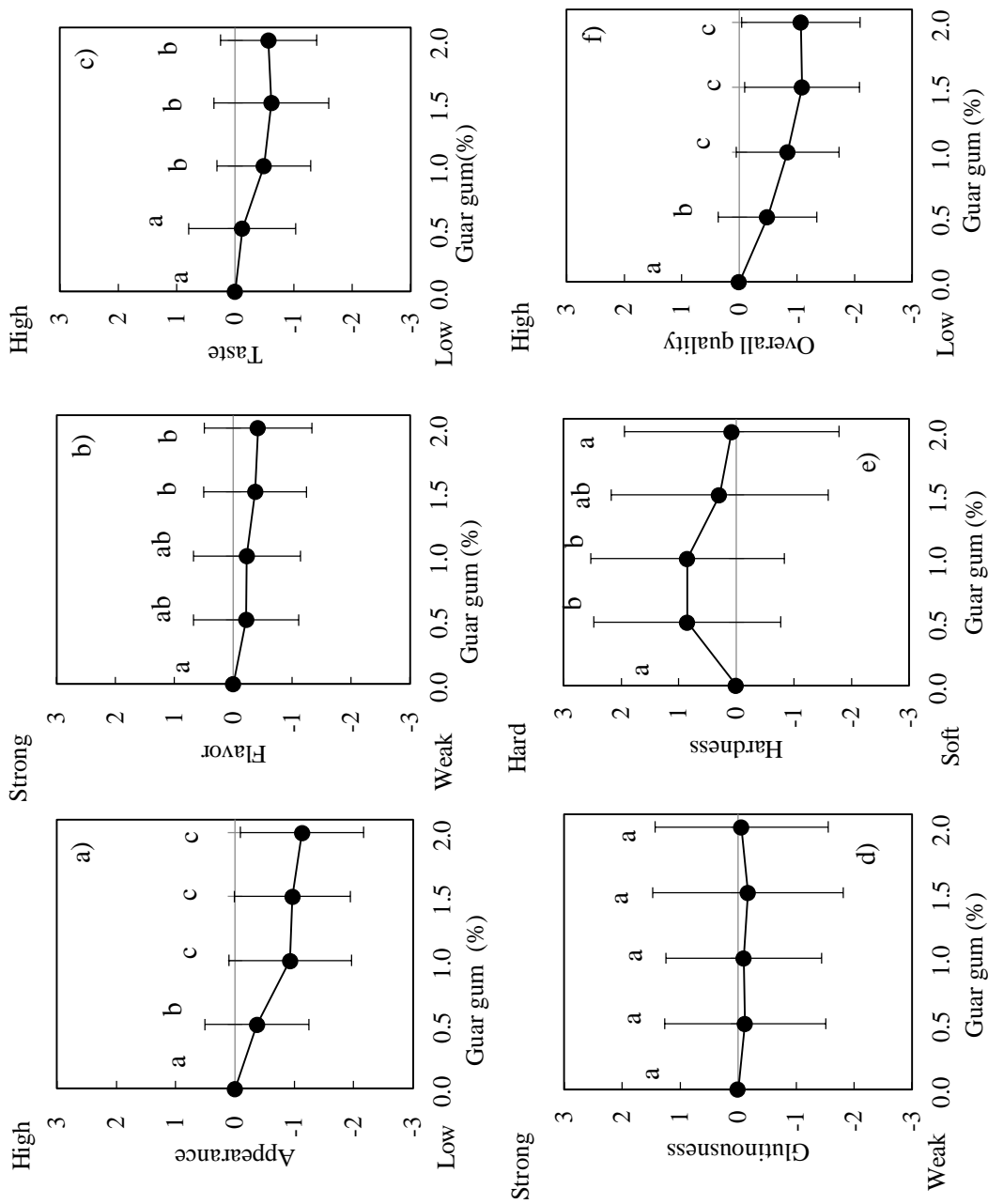


Fig. 6.4. Sensory evaluation of rice cooked with guar gum.

a) Appearance, b) Flavor, c) Taste, d) Glutinousness, e) Hardness, f) Overall quality

Each value represents the mean \pm SD.

Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

～2.0%GGP 添加米飯間に有意差は認められなかった (Fig.6.4a.,6.4f.)。香りについて、基準米飯と比較して、1.5%以上の GGP 添加米飯は有意に劣ると評価されたが、0.5～2.0%GGP 添加米飯間に有意差は認められなかった (Fig.6.4b.)。味について、基準米飯と比較して 1.0%以上の GGP 添加米飯は有意に劣ると評価されたが、1.0～2.0%GGP 添加米飯間に有意差は認められなかった (Fig.6.4c.)。粘りについて、基準米飯と全ての GGP 添加米飯との間で有意差は認められなかった (Fig.6.4d.)。硬さについて、基準米飯と比較して 0.5%および 1.0%GGP 添加米飯は有意に硬いと評価されたが、1.5%および 2.0%GGP 添加米飯は基準米飯と有意差が認められなかった。

5.3.2. グアーガムゾル混合米飯

GGP 添加米飯においては、GGP の添加量は 0.5～1.5%までとしたが、GGS 混合米飯においては 0.5%および 1.0%で有意な血糖値上昇抑制が認められたため、GGS 混合量を 2.5%として実施した。Fig.6.5a.に GGS 混合米飯摂取後の血糖値変化を示す。0.5%および 1.0%GGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と比較して摂取後 15 分では有意に上昇し、摂取後 15～90 分の血糖値間に有意な差は認められなかった。摂取後 120 分の血糖値は、摂取後 30 分よりも有意に低下し、摂取前 0 分と摂取後 120 分の血糖値間に有意差は認められなかった。

2.5%GGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と摂取後 15 分間に有意差は認められず、摂取後 15～120 分の血糖値間に有意差は認められなかった。2.5%GGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は、摂取前 0 分と摂取後 120 分間に有意差は認められなかった。

各測定時間において、摂取後 15 分で、基準米飯よりも 1.0%GGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は有意に低く、摂取後 30 分で、基準米飯よりも全ての GGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は有意に低かった。摂取後 45 分および 60 分において、0.5%および 1.0% GGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は、基準米飯摂取被験者の血糖値よりも有意に低下し、2.5%GGS 混合米飯とは有意差は認められなかった。

Fig.6.5b.に GGS 混合米飯摂取被験者の GI を示す。0.5%および 1.0%GGS 混合米飯摂取被験者の GI は、基準米飯と比較して有意に低下したが、2.5%GGS 混合米飯摂取被験者の GI は、基準米飯との間に有意な差は見られなかった。

Fig.6.5c.にグルコース放出量を示す。0.5%以上の GGS 混合米飯のグルコース放出量は、基準米飯のグルコース放出量よりも有意に低下したが、グアーガムの添加濃度による差は見られなかった。

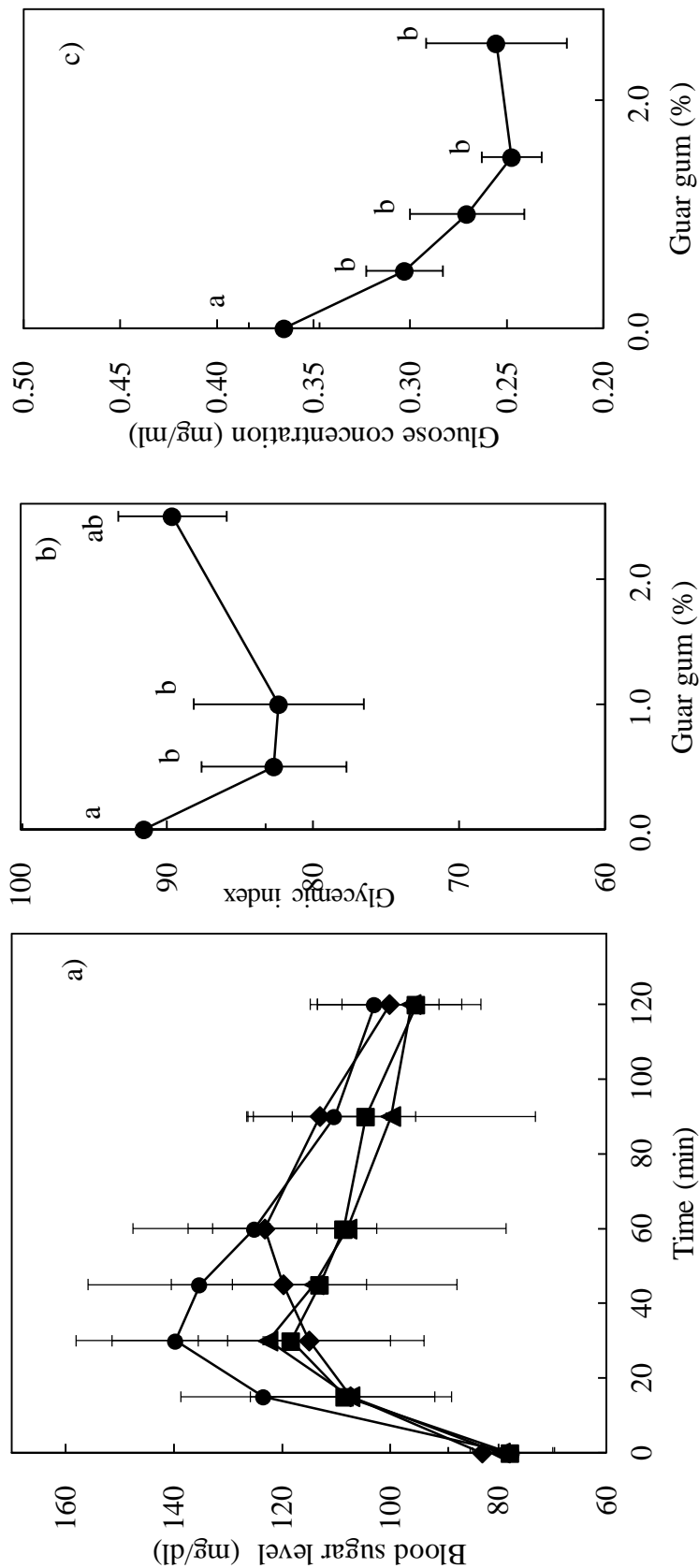


Fig. 6.5. Blood sugar response curve and glycemic index after consuming cooked rice mixed guar gum sol, and glucose concentration released from cooked rice mixed guar gum sol during in vitro digestive process.

a) Blood sugar response curve after consuming cooked rice mixed guar gum sol (GGS-mixed rice)

●; Cooked rice alone (0% GGS), ▲; 0.5% GGS-mixed rice, ■; 1.0% GGS-mixed rice, ◆; 2.5% GGS-mixed rice

0% GGS: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30 min), (30, 45 and 60 min > 90 and 120 min), (15 min < 30 min), (15 min > 120 min)

0.5% GGS-mixed rice: (0 min < 15, 30, 45 and 60 min), (30 min > 120 min)

1.0% GGS-mixed rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (30 min > 120 min)

2.5% GGS-mixed rice: (0 min < 30, 45, 60 and 90 min)

15 min: (0% GGS > 1.0% GGS-mixed rice)

30 min: (0% GGS > 0.5%, 1.0%, 2.5% GGS-mixed rice)

45 and 60 min: (0% GGS > 0.5%, 1.0% GGS-mixed rice)

b) Glycemic index after consuming cooked rice mixed guar gum sol (GGS-mixed rice).

c) Glucose concentration of released from cooked rice mixed guar gum sol (GGS-mixed rice).

n=13. Each value represents the mean \pm SD. Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

5.3.3. グアーガムゾル摂取時期の血糖値への影響

Fig.6.6a.に米飯摂取前 GGS および米飯摂取後の血糖値を示す。参考として基準米飯および 1.0%GGS 混合米飯についても示す。米飯摂取後 30 分、45 分および 60 分において、基準米飯よりも 1.0%GGS 混合米飯摂取被験者の血糖値は有意に低下したが、米飯摂取前 GGS および米飯摂取後 GGS 摂取被験者の血糖値については、いずれの測定時間においても有意差は見られなかった。Fig.6-6b に米飯摂取前 GGS、米飯摂取後の GI を示す。参考として基準米飯および 1.0%GGS 混合米飯の GI も示した。全ての試験食間に有意な差は見られなかった。

5.4. 考察

本研究ではグアーガムの添加条件と摂取時期の違いが、米飯摂取後の血糖値にどのような影響を及ぼすのか検討した。

GGP 添加米飯摂取被験者の血糖値については、基準米飯と比較して、摂取後 15 分においては全ての GGP 添加米飯摂取被験者の血糖値で、摂取後 30 分では 1.5%GGP 添加米飯摂取被験者の血糖値で有意に低下した (Fig.6.1a.)。1.0%以上の GGP 添加米飯摂取被験者の GI は、基準米飯と比較して有意に低下し (Fig.6.1b.)、グルコース放出量では 0.5%以上の GGP 添加米飯で基準米飯よりも有意に低下した (Fig.6.1c.)。

これらの原因を調べるために、炊飯後の米飯の重量を測定した結果、炊飯後の米飯の重量は基準米飯よりも 1.0%GGP 添加米飯で有意に増加し、さらに GGP の添加濃度が増すと、GGP 添加米飯の重量は増加した (Table 6.1.)。この結果は、グアーガムを添加して炊飯した場合には、炊飯過程における水の対流が低下して、水の蒸発量が減少したことを示す。

また、GGP 添加米飯粒の長軸方向の長さは、基準米飯粒よりも 1.0%以上の GGP 添加米飯粒で有意に短くなった (Fig.6.3.)。このことは、グアーガムの添加により、水の運動の自由度が低下し、炊飯中の水の蒸発量が減少すると共に、米粒への水の浸透も低下したことを示すと考えられる。

さらに、テクスチャーの硬さは、基準米飯粒よりも 0.5%以上の GGP 添加米飯粒で有意に増加し、グアーガム添加濃度が増すとさらに硬くなった (Fig.6.2a.)。これらの結果より、炊飯過程での米粒の吸水がグアーガム無添加の場合よりも抑制されたために、基準米飯よりも米の糊化が抑制されたのではないかと推察される。その結果、炊飯過程でグアーガムを添加した米飯摂取被験者の血糖値が抑制されたと考えられる。

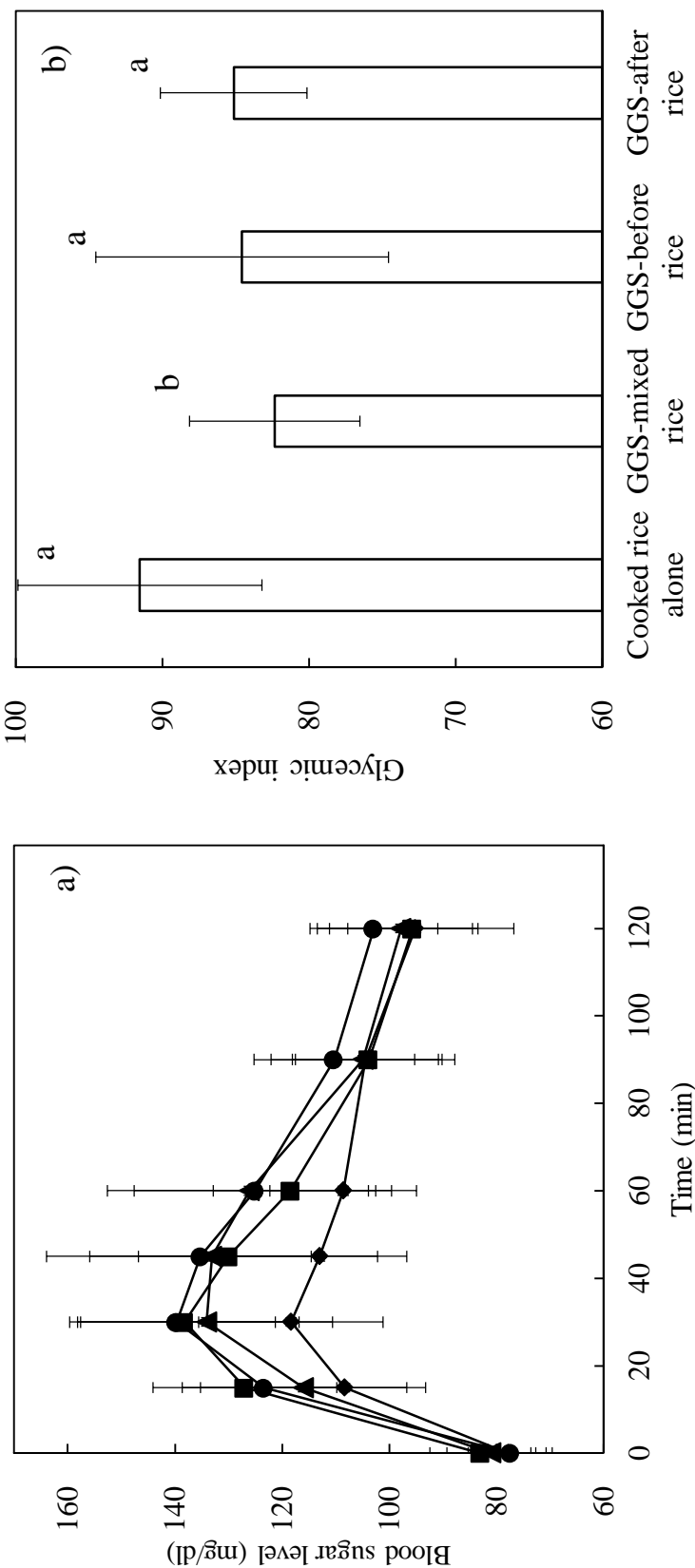


Fig. 6.6. Blood sugar response curve and glycemic index after consuming rice cooked with guar gum (GGG-mixed rice), 10 min earlier than the consumption of cooked rice (GGG-before rice), or 10 min later than consumption of cooked rice (GGG-after rice).

a) Blood sugar response curve after consuming GGG-mixed rice, GGG-before rice and GGG-after rice

●; Cooked alone (0% GGS), ▲; 1.0% GGS-before rice, ■; 1.0% GGS-after rice, ◆; 1.0% GGS-mixed rice

0% GGS: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (15 min < 30, 45 and 60 min > 90 and 120 min)

GGG-before rice: (0 min < 15, 30, 45, 60, 90 and 120 min), (30 and 45 min > 90 and 120 min), (60 min > 120 min)

GGG-after rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 min), (15, 30 and 45 min > 90 and 120 min), (60 min > 120 min)

GGG-mixed rice: (0 min < 15, 30, 45, 60 and 90 min), (30 and 45 min > 120 min)

b) Glycemic index after consuming GGG-mixed rice, GGG-before rice and GGG-after rice

n=13. Each value represents the mean ± SD. Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

しかし、官能評価における硬さは、基準米飯と比較して 0.5%および 1.0%GGP 添加米飯は有意に硬いと評価されたが、1.5%および 2.0%GGP 添加米飯は基準米飯との間に有意差が認められなかった (Fig.6.4e.)。また、Fig.6.2a.より 2.0%GGP 添加米飯の機器測定 of 硬さは、1.5%GGP 添加米飯の硬さより有意に低下し、1.0%GGP 添加米飯と同等の値となった。グアーガムを添加して炊飯した場合には、前述のように、炊飯過程における水の対流が低下して、水の蒸発量が減少すると同時に米粒への水の浸透も低下し、その結果、残存した水が米飯粒表面に付着し、共存しているグアーガムゾルと共に影響を与えて、主観評価と客観測定の値を下げたのではないかと推察される。

GGG 混合米飯摂取被験者の血糖値は、基準米飯の血糖値と比較して、摂取後 15 分では 1.0%GGG 混合米飯摂取被験者の血糖値は有意に低く、摂取後 30 分では全ての GGG 混合米飯で有意に低く、摂取後 45 分および 60 分では 0.5%および 1.0% GGG 混合米飯で有意に低かった (Fig.6.5a.)。また、全ての GGG 混合米飯摂取被験者の摂取後 120 分の血糖値は、摂取前 0 分と有意差は認められず、基準米飯とは異なったパターンを示した (Fig.6.5a.)。GI では、基準米飯と比較して、0.5%および 1.0%GGG 混合米飯摂取被験者で有意に低下したが、2.5%GGG 混合米飯では有意な差は認められなかった (Fig.6.5b.)。

長野ら¹⁰⁰⁾は、加熱処理前のデンプン溶液にグアーガムを添加した場合に、デンプン構成成分はデンプン粒から溶出せず構成成分が詰まっている状態であることを、共焦点レーザー走査顕微鏡の観察によって報告している。また、水溶性高分子多糖類の物性のうち、グアーガムやコンニャクグルコマンナンによる食後の血糖値上昇の抑制に関して、土井ら⁸⁰⁾は粘度が高いものほど抑制作用が強いことを報告している。さらに、高粘度の食物繊維による血糖値上昇の抑制作用は、食物の胃内停滞時間の延長による糖質の吸収遅延によるものと報告されている^{21,76-79)}。一方、グアーガムによって消化管内の移動速度が低下し、消化・吸収が緩慢となるため、血糖値のピークが低くなるとともに、その後の変化は対照よりも血糖値が高い状態を持続するという報告もされている^{17,80,101)}。これらの報告は、本研究結果と一致していた。しかし、2.5%GGG 混合米飯では血糖応答曲線が他とは異なり、GI においても基準米飯と有意差が認められなかった。この点については、今回の結果からは明確に究明できないため、今後の課題と考えられる。

グアーガムゾル若しくはキサンタンガムゾルを米飯と混合して摂取した場合の血糖値について比較すると、前章で述べたキサンタンガムゾルの方が血糖値上昇の抑制効果は強かった。Fig.6.7.にグアーガムゾルとキサンタンガムゾルの歪に対する貯蔵弾性率 (G') と損失弾性率 (G'') を示す。グアーガムゾ

ルとキサンタンガムゾルの G' および G'' は共に、濃度の増加に伴って増し、いずれの濃度のゾルにおいても、 G' が G'' より大きかった。本研究および前章のキサンタンガムゾルの研究に用いた 2% 濃度では、 G' と G'' の値はグアーガムゾルの方がキサンタンガムゾルよりも大きかったが、 G'' の線形領域はキサンタンガムゾルの方が大きく、ゲルの挙動を示すことが示唆された (Fig.6.7b.)。これらのことからキサンタンガムゾルはグアーガムゾルよりも分子の絡み合いは強く、ゲルの挙動を示し、変形の負荷に対する構造の崩壊も難しかったことが示唆される。そのため、ゾル内に取り込まれた米飯粒は放出され難くなり、血糖値上昇の抑制効果が高まったと考えられる。反対に、グアーガムゾルはキサンタンゾルよりも分子の絡み合いは弱く、よりゾルの挙動を示し、変形の負荷に対する構造の崩壊も容易であったと考えられる。その結果、グアーガムゾルでは構造内に取り込んだ米飯粒を、構造内に保持する力が弱く、血糖値上昇の抑制効果が弱かったと考えられる。このことは、キサンタンガムゾルの側鎖基が大きく、グアーガムの側鎖基が小さいという分子構造の相違とも一致する。

グアーガムゾルを摂取する時期の効果についても検討したが、米飯摂取前 GGS および米飯摂取後 GGS 摂取被験者の血糖値については、いずれの測定時間においても基準米飯との間に有意差は見られなかった (Fig.6.6a.)。これらの結果は、米飯の摂取時間とグアーガムゾルの構造内に米飯粒を取り込むことが困難であることを示唆していると考えられる。

グアーガムゾルよりもキサンタンガムゾルを米飯と混合することで食後の血糖値上昇の抑制効果が高いことが示されたので、グアーガムゾルもしくはキサンタンガムゾルと基準米飯を混合した混合米飯の官能評価の結果を Fig.6.8. に示す。全ての項目において、基準米飯と比較していずれの濃度においても XGS 混合米飯の評価は有意に劣ると評価された。一方、 GGS 混合米飯において、粘りについて、基準米飯と全ての GGS 混合米飯間には有意差は認められなかった (Fig.6.8d.)。外観について、基準米飯と比較して 1.0% 以上 GGS 混合米飯は有意に低下した (Fig.6.8a.)。香り、味、総合評価において、基準米飯と比較していずれの濃度においても GGS 混合米飯の評価は有意に劣ると評価された (Fig.6.8b., 6.8c., 6.4f.)。しかし、グアーガムゾルとキサンタンガムゾル間における比較では、全ての項目全濃度において有意な差は認められなかった。

これらのことより、グアーガムゾルを混合して摂取した場合に血糖値上昇の抑制効果は高いが、キサンタンガムゾルとの比較においては、血糖値上昇の抑制効果と利用性は、総合的にはキサンタンガムゾルのほうが優勢であることが示唆された。

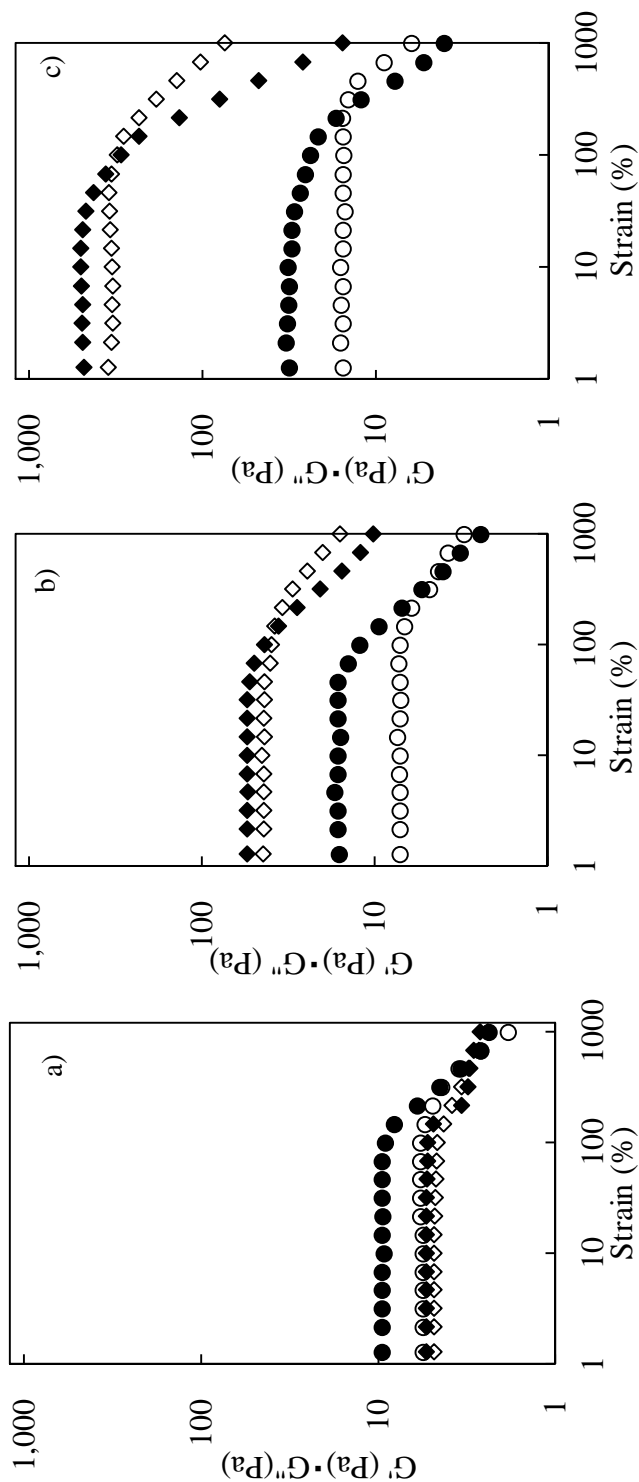


Fig. 6.7. Strain dependencies of G' and G'' for guar gum sol and xanthan gum sol.

- a) 1.0% guar gum sol and 1.0% xanthan gum sol,
- b) 2.0% guar gum sol and 2.0% xanthan gum sol,
- c) 4.0% guar gum sol and 4.0% xanthan gum sol.

Guar gum : \blacklozenge ; G' , \blacklozenge ; G''
Xanthan gum : \bullet ; G' , \circ ; G''

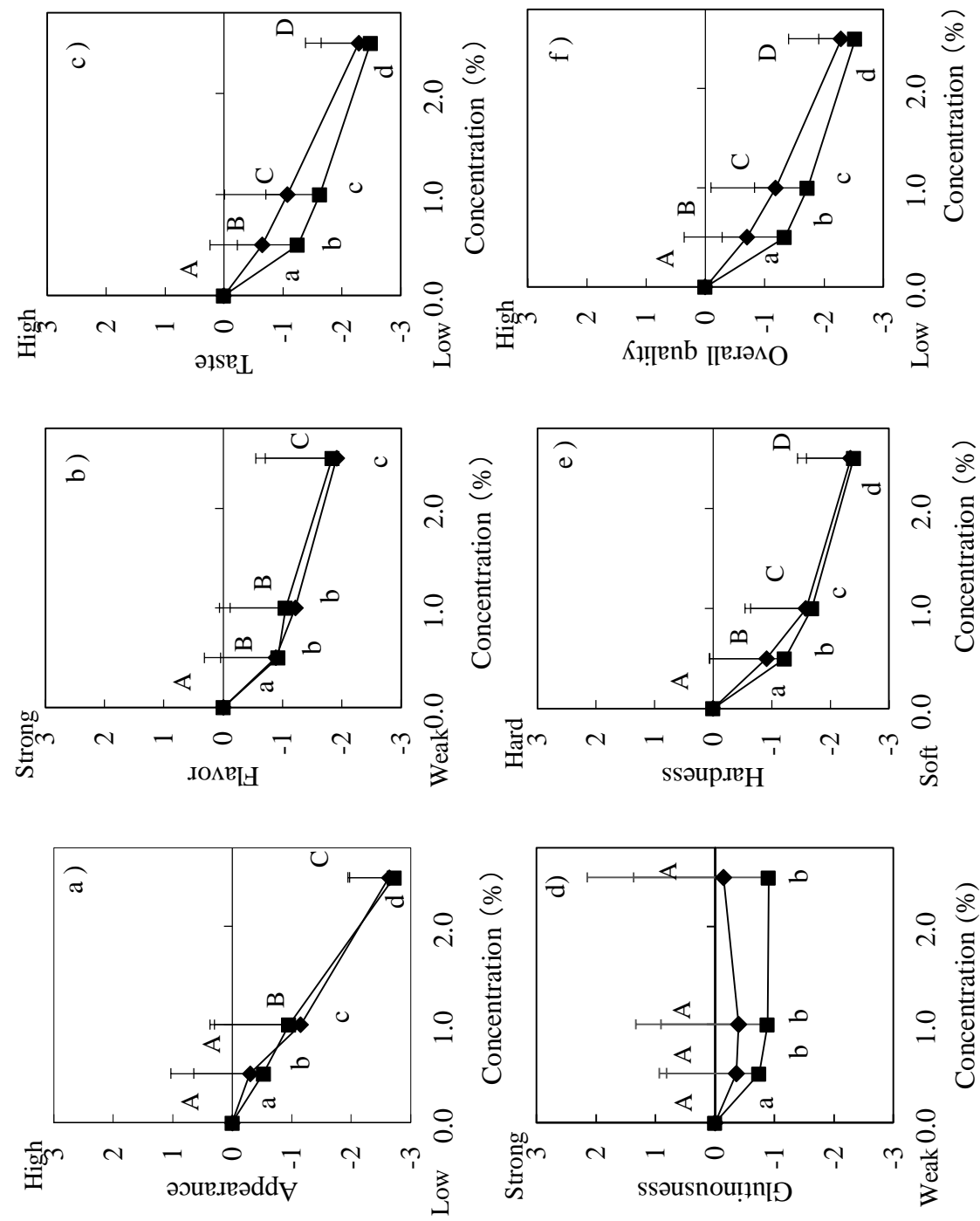


Fig. 6.8. Sensory evaluation of cooked rice mixed guar gum or xanthan gum.

a) Appearance, b) Flavor, c) Taste, d) Glutinousness, e) Hardness, f) Overall quality

◆; Guar gum, ■; Xanthan gum

Each value represents the mean \pm SD.
Means indicated by different letters are significant at $p < 0.05$.

5.5. 要約

グアーガムゾルの添加および摂取条件が、米飯摂取後の血糖値に及ぼす影響について検討した。

全てのグアーガム添加米飯摂取被験者の血糖値は、基準米飯よりも有意に低下し、また、グアーガム添加米飯摂取による GI は、1.0%以上のグアーガム添加米飯で基準米飯よりも有意に低下し、グルコース放出量は、全てのグアーガム添加米飯で有意に低下した。グアーガムゾル混合米飯では、全てのグアーガムゾル混合米飯摂取被験者の血糖値は有意に低かった。GI は、0.5%および 1.0%のグアーガムゾル混合米飯で基準米飯よりも有意に低下し、グルコース放出量は、全てのグアーガムゾル混合米飯で有意に低下した。グアーガムゾルの摂取時間を変化させた際に、最も血糖値上昇の抑制に効果が高かったのは、グアーガムゾルと米飯の同時摂取であることが示された。

第 6 章 食物繊維の種類による米飯摂取後の血糖応答の相違

6.1. 緒言

本章では、これまでに検討してきた全種類の食物繊維の米飯摂取後の血糖値上昇に対する影響について横断的に比較して検討した。

6.2. 結果および考察

本研究で用いた全種類の 1.0% の食物繊維添加米飯摂取後の 120 分間の GI、摂取後 15～60 分の測定時間における血糖値と *in vitro* におけるグルコース放出量について、基準米飯との有意差の有無を Table 7.1. に示す（寒天添加米飯のみ 1.7% で示す）。なお、測定した摂取後 90 分および 120 分の血糖値は、全ての食物繊維において、基準米飯との有意差が認められなかったので表から除外した。GI では、全ての食物繊維の添加米飯で、基準米飯との間に有意な低下が認められた。さらに、表には示していないが、食後 120 分間の血糖応答曲線で、摂取後 15 分で基準米飯よりも有意に低下したのは、 κ -カラギーナン、キサンタンガムおよびグアーガム添加であった。摂取後 30 分において有意に低下したのは、 κ -カラギーナンとキサンタンガム添加であった。Table 7.1. に示したように、各項目において基準米飯と有意な差がみられたのは、 κ -カラギーナン添加米飯で 4 項目、キサンタンガム添加米飯で 4 項目、グアーガム添加米飯で 3 項目、グルコマンナン添加米飯で 2 項目となった。これらのことから食物繊維を炊飯時に添加した場合の食後血糖値上昇の抑制効果を示す項目は、グルコマンナン添加米飯 < グアーガム添加米飯 < κ -カラギーナン添加米飯、キサンタンガム添加米飯の順に多かった。また、1.0% の添加濃度における κ -カラギーナン添加米飯とキサンタンガム添加米飯の基準米飯に対する有意差が認められた項目数は同じであったが、0.5% の添加濃度において、キサンタンガム添加米飯のみで GI は基準米飯よりも有意な低下が認められたため、 κ -カラギーナンよりもキサンタンガム添加の方が、血糖値上昇の抑制項目は多かったといえる。

食物繊維添加米飯の血糖値上昇の抑制効果は、米飯の炊飯時に食物繊維が共存することによる、米の糊化の抑制が主原因ではないかと前章までに述べた。いずれの食物繊維においても米の糊化の抑制は認められたが、食物繊維の種類によって米飯摂取後の血糖値上昇の抑制の程度は異なるのではないかと推測される。このことは、炊飯後に米飯粒に付着する食物繊維の性質に影響されたのかもしれない。キサンタンガムは、第 4 章でも述べたように米飯粒の周囲に絡みつくように付着したことが血糖値上昇の抑制に影響し、 κ

Table 7.1. The presence or absence of a significant difference the rice cooked with dietary fiber to the reference cooked rice on glycemic response after consuming.

	GI	Blood sugar level				Glucose concentration
		15 min	30 min	45 min	60 min	
1.7% agar-added rice	b	a	a	a	a	-
1.0% glucomannan-added rice	b	a	a	a	a	b
1.0% κ -carrageenan-added rice	b	b	b	a	a	b
1.0% xanthan gum-added rice	b	b	b	a	a	b
1.0% guar gum-added rice	b	b	a	a	a	b

a; It is not significantly different than standard cooked rice.
ab; It is or is not significantly different than standard cooked rice.
b; It is significantly different than standard cooked rice.

-カラギーナン単独ゲルでは、ゲルの融解温度が低く米飯粒に付着しやすい状態であることが、血糖値上昇の抑制の程度に異なった結果をもたらしたのではないかと考えられる。グアーガムはゾル状態であるが、分子の絡み合いが弱く、米飯粒の周囲に付着する力が小さかったと推察される。グルコマンについては、米飯に付着しやすく、血糖値上昇の抑制にも影響を及ぼすが、同時に井上や印場等^{74,75)}が報告しているように腸内細菌によりグルコマンナンが分解された可能性も考えられる。以上のことから、添加する食物繊維によって米飯摂取後の血糖値上昇の抑制の効果が異なったと考えられる。

一方、ゲル状態あるいはゾル状態の 1.0%濃度の食物繊維と米飯を混合して米飯と同時に摂取した場合について、Table 7.2.に示す。GI が基準米飯よりも有意に低下したのは、 κ -カラギーナンゲル、キサンタンガムゾルおよびグアーガムゾル混合米飯であった。基準米飯と有意差が認められた項目数は、キサンタンガムゾル混合米飯およびグアーガムゾル混合米飯は 6 項目で、 κ -カラギーナンゲル混合米飯は 1 項目、しらたき混合米飯と CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲル混合米飯については基準米飯と有意差が認められる項目はなかった。従って、ゲル状態あるいはゾル状態の食物繊維と米飯を混合して摂取した場合の米飯摂取後の血糖応答に抑制を示す項目は、 CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲル混合米飯、しらたき混合米飯 < κ -カラギーナンゲル混合米飯 < グアーガムゾル混合米飯、キサンタンガムゾル混合米飯の順に多かった。表には示していないが、キサンタンガムゾルとグアーガムゾルを混合した場合については、0.5%の混合濃度においても基準米飯よりも有意に低下した。また、0.5%のキサンタンガムゾル混合のみで、摂取後 15 分の血糖値は基準米飯よりも有意な低下が認められた。0.5%の混合濃度を考慮に含めると、グアーガムゾルよりもキサンタンガムゾルの混合の方が、米飯摂食後の血糖値上昇の抑制がみられた項目は多かったこととなる。

グアーガムゾルとキサンタンガムゾルの G' および G'' は共に、濃度の増加に伴って増し、いずれの濃度のゾルにおいても、 G' が G'' より大きかった。グアーガムゾルあるいはキサンタンガムゾルの混合米飯に用いたゾルと同一濃度の 2%濃度のゾルでは、 G'' の線形領域はキサンタンガムゾルの方が大きく、ゲル的挙動を示すことが示唆された。分子構造の違いからグアーガムゾルよりもキサンタンガムゾルの方が主鎖に対する側鎖の割合が大きく、分子の絡み合いは強く、変形の負荷に対する構造の崩壊も難しかったことが示唆される。そのため、キサンタンガムではゾル内に取り込まれた米飯粒は放出され難くなり、ゾル構造内に留まったのではないかと考えられる。反対に、グアーガムゾルはキサンタンゾルよりも分子の絡み合いは弱く、よりゾル的

Table7.2. The presence or absence of a significant difference the cooked rice mixed dietary fiber to the reference cooked rice on glycemic response after consuming.

	GI	Blood sugar level			Glucose concentration
		15 min	30 min	45 min	60 min
1.0% konjac noodles-mixed rice	a	a	a	a	a
1.0% κ -carrageenan gel without CaCl_2 -mixed rice	b	a	a	a	ab
1.0% κ -carrageenan gel with CaCl_2 -mixed rice	a	a	a	a	a
1.0% xanthan gum sol-mixed rice	b	b	b	b	b
1.0% guar gum sol-mixed rice	b	b	b	b	b

a; It is not significantly different than standard cooked rice.

ab; It is or is not significantly different than standard cooked rice.

b; It is significantly different than standard cooked rice.

挙動を示し、変形の負荷に対する構造の崩壊も容易であったと推測される。その結果、グアーガムゾルでは構造内に取り込んだ米飯粒を、構造内に保持する力が弱かったと考えられる。

κ -カラギーナンゲルにおいて CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルと効果が異なったのは、 κ -カラギーナンゲルが体温付近の温度で一部融解し、 κ -カラギーナゾルが米飯を包み込むことができたためと考えられる。 CaCl_2 添加 κ -カラギーナンゲルでは、 κ -カラギーナンの硫酸基由来のマイナス電荷は、カルシウムイオンとイオン結合し、ゲルの熱安定性が高まり、米飯摂取後の血糖値上昇の抑制効果が発揮されなかったと考えられる。また、しらたきは、グルコマンナンをアルカリ処理して加熱することでアセチル基が離脱し、水素結合によるゲルが形成されるために、ゲルの構造が融解することはなかった。ゲルと米飯が共存するのみでは、米飯摂取後の血糖値上昇の抑制効果は期待しにくいことが判明した。

Table 7.3.に Table 7.1.と 7.2.をまとめて示す。これらのことから、食物繊維の米飯摂取後の血糖値上昇の抑制に対して、炊飯時に添加して摂取したものと混合して同時に摂取したものでは、基準米飯と有意差のある項目数が異なった。前述の 0.5%濃度の添加あるいは混合して摂取した場合の結果も考慮に入れると、体内で融解しないゲルとの混合<体内で融解するゲルとの混合、炊飯時に食物繊維と米粒の共存<ゾル状の食物繊維との混合により血糖値上昇の順で基準米飯との間に有意差が出やすい結果となった。実用面では、食物繊維の中でもキサントガムが低濃度での抑制の効果が認められ、有用であると考えられた。

以上の結果より、米飯摂食後の血糖応答に及ぼす食物繊維の影響は、体温で融解しないゲル状態での共存では基準米飯との間に有意差が出にくい、体温で融解する弱い結合を有するゲルではやや出やすくなり、米の糊化抑制およびゾル状態での共存下では最も強い基準米飯との間に有意差が出やすい結果であった。つまり、食物繊維による米飯摂食後の血糖値の抑制効果は、摂食前に米飯をゾル状態で覆ったり、米飯の糊化を抑制することであったりと、その効果の程度は食物繊維の構造や物理的性質に依存するものであった。

Table 7.3. The presence or absence of a significant difference in the rice cooked with dietary fiber or cooked rice mixed dietary fiber to the reference cooked rice on glycemic response after consuming.

	GI	Blood sugar level			Glucose concentration
		15 min	30 min	45 min	60 min
1.7% agar-added rice	b	a	a	a	a
1.0% glucomannan-added rice	b	a	a	a	a
1.0% κ -carrageenan-added rice	b	b	b	a	a
1.0% xanthan gum-added rice	b	b	b	a	a
1.0% guar gum-added rice	b	b	a	a	a
1.0% konjac noodles-mixed rice	a	a	a	a	a
1.0% κ -carrageenan gel without CaCl_2 -mixed rice	b	a	a	a	a
1.0% κ -carrageenan gel with CaCl_2 -mixed rice	a	a	a	a	a
1.0% xanthan gum sol-mixed rice	b	b	b	b	b
1.0% guar gum sol-mixed rice	b	b	b	b	b

a; It is not significantly different than standard cooked rice.
ab; It is or is not significantly different than standard cooked rice.
b; It is significantly different than standard cooked rice.

第 7 章 結語

本論文は、日本人の主食である米飯を摂取した後の血糖応答に、食物繊維がどのような影響を及ぼすのか、さらに食物繊維の種類によってどのように異なるのかを究明したものである。本研究では、ゲルを形成する寒天、アルカリ処理後の加熱によりゲル化するグルコマンナン、単独でもカチオンによってもゲル化する κ -カラギーナン、ゲルではなくゾルを形成するキサンタンガムおよびグアーガムなどの食物繊維をとりあげた。食物繊維は、生米と共に炊飯する方法を中心とした。また、寒天を除いて、米飯にゲル状態またはゾル状態の食物繊維を混合し、同時に摂取する方法もあわせて検討した。

食後の血糖応答の指標として、米飯摂取後 120 分間のヒトの血糖応答曲線を測定し、血糖応答曲線からグリセミックインデックス (GI) を算出し、咀嚼と消化・吸収をモデル化した *in vitro* におけるグルコースの放出量もあわせて測定した。食物繊維の米飯摂取後の血糖応答に及ぼす原因を明らかにするために、米飯粒の形態を観察し、炊飯後の米飯の重量、米飯の力学特性値および熱特性値を測定し、主観評価を実施した。

第 1 章では、寒天添加米飯摂取後の血糖値上昇の抑制効果とその原因について検討した。寒天の添加により、米飯摂取後の血糖値の上昇は緩慢になり、最大血糖値は米飯単独（基準米飯）と比較して低下した。GI は 1.7% 以上の寒天添加で基準米飯より低下した。昇温 DSC 曲線において、米粒の高温側の吸熱ピークは、寒天の添加により、高温側へシフトし、エンタルピーは寒天の添加濃度が増加すると低下した。降温 DSC 曲線では、発熱ピークは高温側へシフトしエンタルピーは減少した。これらのことから、寒天添加による米飯摂取後の血糖値上昇抑制の原因の一つには、でんぷんの糊化抑制によるものではないかと考えられた。

第 2 章では、グルコマンナンおよびしらたきが米飯摂取後の血糖応答に及ぼす影響について検討した。グルコマンナン添加米飯摂取後の血糖値は、摂取後 30 分において 2.0% 以上のグルコマンナンの添加で基準米飯よりも低下し、GI は 1.0% 以上の添加により低下し、グルコース放出量は全てのグルコマンナンの添加で低下した。グルコマンナン添加米飯粒の透明度は基準米飯粒と比較して低下し、米飯粒の中心部分に白濁が観察され、昇温 DSC 曲線の吸熱ピークは高温側にシフトし、降温 DSC 曲線では、発熱ピークは高温側へシフトしエンタルピーは減少した。また、炊飯による精白米の重量増加

率はグルコマンナンの添加により上昇した。さらに、米飯粒の硬さは増加した。これらのことから、グルコマンナンを炊飯時に添加すると、米粒の糊化が抑制されることが示唆され、さらに、米飯粒に付着したグルコマンナンによっても、血糖値上昇が抑制されることが考えられた。しらたき混合米飯の血糖応答は、摂取後 30 分においてのみ 2.0%しらたきの混合で、基準米飯よりも低下し、GI についても 2.0%のしらたき混合のみで低下した。2.0%以上のしらたき混合で基準米飯との間に有意差が見られなかったのは、GI が低下する被験者と上昇する被験者がいて、相殺されたためであった。しらたきの摂取により GI の上昇が見られた被験者については、文献から腸内細菌によるグルコマンナンの分解の可能性が考えられたが、本実験においては、確認することはできなかった。

第 3 章では、 κ -カラギーナンによる血糖値上昇の抑制効果について検討した。ここでは、 κ -カラギーナンを炊飯時に添加した κ -カラギーナン添加米飯と、 CaCl_2 無添加 κ -カラギーナングルあるいは CaCl_2 添加 κ -カラギーナングルと米飯を混合した試料の血糖応答について検討した。 κ -カラギーナン添加米飯摂取後の血糖値は、摂取後 15 分および 30 分では 1.0%以上の添加により基準米飯よりも低くなり、摂取後 45 分では 1.6%の添加で低下した。GI では 1.0%以上の添加により低下し、グルコース放出量は 0.5%以上の添加で低下した。 κ -カラギーナン添加米飯粒の形状や組織観察より、炊飯時における米の吸水の抑制や、米飯粒中に不均一な膨潤が見られ、さらに硬さは 0.5%以上の添加で増加した。これらのことから、 κ -カラギーナンを添加すると炊飯時に糊化が抑制されると考えられる。 κ -カラギーナングル混合米飯の食後 120 分間の血糖応答については、基準米飯と比較して GI は 1.0%以上の混合で低下し、グルコース放出量は 1.6%の混合で低下した。 CaCl_2 添加 κ -カラギーナングル混合米飯の GI およびグルコース放出量については、基準米飯との間に有意差は見られなかった。これらの相違は、 κ -カラギーナングル混合米飯では、ゲルが体温以下で融解する弱い結合を有するためと考えられる。以上のことから、 κ -カラギーナンによる米飯摂取後の血糖値上昇の抑制効果は、炊飯時の添加で最も高く、次いで CaCl_2 無添加 κ -カラギーナングル混合米飯であり、 CaCl_2 添加 κ -カラギーナングル混合米飯では抑制効果は認められなかった。

第 4 章では、第 3 章の結果を受けて、ゾルを形成するキサンタンガムについて検討した。米飯摂取後の血糖値は、1.0%以上のキサンタンガム添加によ

り摂取後 15 分と 30 分で基準米飯よりも低くなり、摂取後 45 分では 1.5%の添加で低下した。また、GI は全てのキサンタンガム添加濃度で基準米飯よりも低下し、グルコース放出量は 2.5%の添加で低下した。米飯粒の長軸方向の長さは、0.5%以上の添加で基準米飯粒よりも短くなり、硬さは、0.5%の添加で増加したが、それ以上の濃度では基準米飯と等しいかあるいは低下した。これは、キサンタンガムの添加により米粒の糊化の抑制が強くなるが、同時に米飯粒の周囲に付着する膜あるいは糸状のキサンタンガムゾルの付着量も増加し、両効果が相殺されるが、キサンタンガムの高濃度では、キサンタンガムの米粒への付着効果が高まるためと考えられる。キサンタンガムゾル混合米飯摂取後の血糖値は、摂取後 15～60 分で全濃度のキサンタンガムゾルの混合において基準米飯より低下した。GI は全てのキサンタンガムゾルの混合で低下し、グルコース放出量は 0.5%以上の混合により低下した。キサンタンガムゾルの摂取時期を米飯摂取の 10 分前あるいは 10 分後とした場合には、GI に有意差は認められなかった。以上の結果から、米飯摂取後の血糖値上昇の抑制は、米飯にキサンタンガムゾルを混合する方法が最も有効であることが判明した。

第 5 章では、ゾルを形成するグアーガムの米飯摂取後の血糖応答に対する影響について検討した。全濃度のグアーガム添加米飯摂取後の血糖値は、同一測定時間において、基準米飯よりも低下し、GI は 1.0%以上の添加で低下し、グルコース放出量は全濃度のグアーガム添加において低下した。炊飯後の米飯の重量は、1.0%以上の添加で濃度依存的に増加した。また、1.0%以上のグアーガム添加米飯粒の長軸方向の長さは、基準米飯粒よりも短くなり、硬さは 0.5%以上の添加で増加した。これらの結果から、グアーガムを添加することで、炊飯過程での米粒の吸水が抑制され、米の糊化も抑制されたのではないかと推察された。グアーガムゾル混合米飯において、全濃度のグアーガムゾル混合米飯摂取後の血糖値は基準米飯よりも低下し、GI は 0.5%および 1.0%の混合により低下し、グルコース放出量は全てのグアーガムゾルの混合で低下した。これらの結果から、最も血糖値上昇の抑制に効果が高かったのは、グアーガムゾルと米飯を混合した場合であることが示された。

第 6 章では、本研究で用いた全ての 1.0%の食物繊維の米飯摂取後の 120 分間の GI、摂取後 15～60 分の血糖値と *in vitro* におけるグルコース放出量について、横断的に基準米飯と比較して検討した。食物繊維の米飯摂取後の血糖値上昇の抑制の効果は、体内で融解しないゲルとの混合＜体内で融解す

るゲルとの混合、炊飯時に食物繊維と米粒の共存<ゾル状の食物繊維との混合の順に高い結果であった。

以上の結果から、炊飯時に添加する場合、ゾル状態で混合する場合に食物繊維は米飯摂食後の血糖値を基準米飯より有意に抑制した。体温で融解しないゲル状態での共存では極めて弱く、体温で融解する弱い結合を有するゲルではやや強かった。つまり、食物繊維による米飯摂食後の血糖値の抑制効果は、糊化を抑制することや、摂食前に米飯をゾル状態で覆うことでみられ、その効果は食物繊維の構造と物理的性質によるものであることが示唆された。食物繊維の中でも、キサントガムは低濃度での抑制の効果が認められ、実用面では有用であると考えられた。

各種の食物繊維による米飯摂取後の血糖値上昇の抑制効果の機序は、食後の血糖値をコントロールする一助として活用され、人々の健康に寄与できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 厚生省,「平成 9 年度糖尿病実態調査報告」, pp.20 (1997).
- 2) 厚生労働省,「平成 14 年度糖尿病実態調査報告」, pp.22 (2002).
- 3) 厚生労働省,「国民健康・栄養の現状」, 健康・栄養情報研究会編, pp.44-45 (2007).
- 4) 厚生労働省,「国民健康・栄養の現状」, 健康・栄養情報研究会編, pp.127 (2012).
- 5) 弘世貴久, 河盛隆造, 糖質代謝異常,「病気がみえる 代謝・内分泌疾患」, 第 1 版, 医学情報科学研究所編, (メディックメディア, 東京), pp.12-15 (2004).
- 6) 井上修二, 糖尿病,「新 臨床栄養学Ⅱ」, 第 1 版, (光生館, 東京), pp.67-72 (2004).
- 7) 日本糖尿病学会,「糖尿病食事療法のための食品交換表」, 日本糖尿病学会, (文光堂, 東京), pp.2-4 (2004).
- 8) 今井佐恵子, 梶山静夫, 食品の摂取順序を重視した糖尿病栄養指導の血糖コントロール改善効果. 糖尿病, **55**, 1-5 (2012).
- 9) 松下美加, 宮崎滋, 糖尿病の病態と糖尿病を予防する食生活. Food Style, **8**, 45-48 (2004).
- 10) Ye, E.Q., Chacko, S.A., and Chou, E.L., Greater whole-grain intake is associated with lower risk of type 2 diabetes, cardiovascular disease, and weight gain. *J. Nutr.*, **142**, 1304-1313 (2012).
- 11) Schulze, M.B., Schulz, M., and Heidemann, C., Fiber and magnesium intake and incidence of type 2 diabetes: a prospective study and meta-analysis. *Arch. Intern. Med.*, **167**, 956-965 (2007).
- 12) 厚生労働省,「日本人の食事摂取基準 2015 年版」, 第 1 版, (第一出版, 東京), pp.145-147 (2014).
- 13) 厚生労働省,「国民健康・栄養の現状」, 健康・栄養情報研究会編, pp.64 (2013).
- 14) 山下亀次郎, 糖質の代謝と血糖上昇作用の抑制,「食物繊維」, 第 3 版, 日本食物繊維学会編集委員会編, (第一出版, 東京), pp.127-134 (2008).
- 15) Jenkins, D.J., Leeds, A.R., Gassull, M.A., Cochet, B. and Alberti, G. M., Decrease in postprandial insulin and glucose concentrations by guar and pectin. *Annals of Intern. Med.*, **86**, 20-23 (1977).
- 16) Leclère, C.J., Champ, M., Boillot, J., Guille, G., Lecannu, G., Molis, C.,

- Bornet, F., Krempf, M., Delort-Laval, J., and Galmiche, J.P., Role of viscous guar gums in lowering the glycemic response after a solid meal. *Am.J.Clin.Nutr.*, **59**, 914-921 (1994).
- 17) Wolever, T.M.S., Jenkins, D.J.A., Nineham, R., and Alberti, K.G.M.M., Guar gum and reduction of post-prandial glycaemia : effect of incorporation into solid food, liquid food, and both. *Br. J. Nutr.*, **41**, 505-510 (1979).
 - 18) Torsdottir, I., Alpsten, M., Andersson, H., and Einarsson, S., Dietary guar gum effects on postprandial blood glucose, insulin and hydroxyproline in humans. *J. Nutr.*, **119**, 1925-1931 (1989).
 - 19) 高橋陽子, 繊維質と食物繊維. 日本食品科学工学会誌, **58**, 186-186 (2011).
 - 20) Juliet, G. "Dietary fiber." ILSI Europe Concise Monograph Series, pp.2-5 (2006).
 - 21) Jenkins, D.J.; Wolever, T.M.; Leeds, A.R.; Gassull, M.A.; Haisman, P.; Dilawari, J.; Goff, D.V.; Metz, G.L.; Alberti, K.G. Dietary fibres, fibre analogues, and glucose tolerance; importance of viscosity. *Br.Med. J.*, **6124**, 1392-1394 (1978).
 - 22) 池上幸江, 食物繊維と消化・吸収機能. 栄養学雑誌, , **51**, 251-258 (1993).
 - 23) Ebihara, K., Masuhara, R., Kiriya, S. and Manabe, M., Correlation between viscosity and plasma glucose and insulin flattening activities of pectins from vegetables and fruits in rats. *Nutrition Reports International*, **23**, 985-992 (1981).
 - 24) Ebihara, K., and Kiriya, S. Comparative effects of water-soluble and water-insoluble dietary fibers on various parameters relating to glucose tolerance in rats. *Nutrition Reports International*, **26**, 193-201 (1982).
 - 25) Vuksan V., Jenkins D.J., Spadafora P., Sievenpiper J.L., Owen R., Vidgen E., Brighenti F., Josse R., Leiter L.A., and Bruce-Thompson C. Konjac-mannan(Glucomannan) improves glycemia and other associated risk factors for coronary heart disease in type 2 diabetes. *Diabetes Care.*, **22**, 913-919 (1990).
 - 26) 海老原清, 食物繊維の栄養・生理機能に関する研究. 日本栄養・食糧学会誌, **61**, 3-9 (2008).
 - 27) 埋橋祐二, 滝ちづる, 寒天の種類・特性と使用方法. 日本調理科学会誌, **38**, 292-297 (2005).
 - 28) 山下亀次郎, 糖質の代謝と血糖上昇作用の抑制,「食物繊維」, 第3版, 日

- 本食物繊維学会編集委員会編, (第一出版, 東京), pp.57-58 (2008).
- 29) 清水寿夫, グルコマンナン, 「ルミナコイドの保健機能と応用-食物繊維を超えて-」, 第 1 版, 池田義雄監修, (シーエムシー出版, 東京), pp.97-98 (2009).
- 30) 國崎直道, 佐野征男, 「食品多糖類」, 第 1 版, (幸書房, 東京), pp.198-199 (2001).
- 31) 芳村美紀, 清水寿夫, コンニャクグルコマンナン, 「食品ハイドロコロイドの開発と応用」, 第 1 版, 西成勝好監修, (シーエムシー出版, 東京), pp.279 (2007).
- 32) 印南敏, 「食物繊維」 日本栄養士会, 桐山修八編, (第一出版, 東京), pp.233-250 (1995).
- 33) 山下亀次郎, 糖質の代謝と血糖上昇作用の抑制, 「食物繊維」, 第 3 版, 日本食物繊維学会編集委員会編, (第一出版, 東京), pp.58-59 (2008).
- 34) 國崎直道, 佐野征男, 「食品多糖類」, 第 1 版, (幸書房, 東京), pp.95-101 (2001).
- 35) 森高初恵, 多糖のゾルーゲル転移と食塩. 日本海水学会誌, **61**, 1-9 (2007).
- 36) Moritaka H., and Shimada A., Effects of sodium chloride on the sol-gel transition of agar κ -carrageenan and gellan gum. *J. Home Economics of Japan*, **57**, 393-401 (2006).
- 37) 武政誠, 大本俊郎, キサンタンガム, 「食品ハイドロコロイドの開発と応用」, 第 1 版, 西成勝好監修, (シーエムシー出版, 東京), pp.169-170 (2007).
- 38) Jansson, P.E., Kenne, L., and Lindberg, B, Structure of the extracellular polysaccharide from *Xanthomonas campestris*. *Carbohydr. Res.* **45**, 275-282 (1975).
- 39) Rogovin, S.P., Anderson, R.F., and Cadmus, M.C., Production of polysaccharide with *Xanthomonas campestris*. *J. Biochem. Microbiol. Technol. Eng.* **3**, 51-63 (1961).
- 40) 中尾欣樹, 宝川厚司, フードケミカル, **8**, 40-50 (1995).
- 41) Pettitt, D. J. "Xanthan gum: Food Hydrocolloids". Vol.1, M. Glicksman, eds., CRC Press, pp.127 (1982).
- 42) Urlacher, B., Dalbe, B., Xanthan Gum, Thickening and gelling agents for food. A. Imeson ed., Blackie Academic Professional, London, pp.202 (1994).
- 43) 山下亀次郎, 糖質の代謝と血糖上昇作用の抑制, 「食物繊維」, 第 3 版, 日

- 本食物繊維学会編集委員会編, (第一出版, 東京), pp.60-61 (2008).
- 44) Baker, C.W., and Whistler, R.L., Distribution of D-galactosyl groups in guaran and locust-bean gum. *Carbohydr. Res*, **45**, 237-243 (1975).
 - 45) 余川丈夫, ガラクトマンナン, 「食感創造ハンドブック」, 第1版, 西成勝好, 大越ひろ, 神山かおる, 山本隆編, (サイエンスフォーラム, 東京), pp.325-331 (2005).
 - 46) 山崎清子, 島田キミエ, 渋谷祥子, 下村道子, 市川朝子, 杉山久仁子, 穀類の成分と特徴, 「NEW 調理と理論」, 第1版, (同文書院, 東京), pp.72-73 (2011).
 - 47) 中村禎子, 田辺賢一, 森山実枝, 野元加奈恵, 奥恒行, 摂取エネルギー低減を目的とした食物繊維混合疑似米飯の食後血糖上昇ならびにインスリン分泌抑制に及ぼす影響. 日本臨床栄養学会雑誌, **33**, 136-143 (2011).
 - 48) 糖類研究部会・簡易評価法研究会, 「食品の血糖応答性簡易評価法(GR法)の開発に関する基礎調査報告書」, ILSI Japan Report Series (2005).
 - 49) FAO Food and Nutrition Paper 66, “Carbohydrate in human Nutrition. Report of an FAO/WHO Expert Consultation on Carbohydrates2, April 14-18, Rome, Italy. (1997).
 - 50) Englyst K.N., Englyst H.N., Hudson G.J., Cole T.J., and Cummings J.H. , Rapidly available glucose in foods: An in vitro measurement that reflects the glycemic response. *Am. J. Clin. Nutr.*, **69**, 448-454 (1999).
 - 51) Backhouse, S.H., Williams, C., Stevenson, E., and Nute, M., Effects of the glycemic index of breakfast on metabolic response to brisk walking in females. *European. J. Clin. Nutr.*, **61**, 590-596 (2007).
 - 52) Murakami, K., Sasaki, S., Takahashi, Y., Okubo, H., Hosoi, Y., Horiguchi, H., Oguma, E., and Kayama, F., Dietary Glycemic index and load in relation to metabolic risk factors in Japanese female farmers with traditional dietary habits. *Am. J. Clin. Nutr.*, **83**, 1161-1169 (2006).
 - 53) Vuksan V., Sievenpiper J.L., Owen R., Swilley J.A., Spadafora P., Jenkins D.J., Vidgen E., Brighenti F., Josse R.G., Leiter L.A., Xu Z., and Novokmet R., Beneficial effects of viscous dietary fiber from Konjac-mannan in subjects with the insulin resistance syndrome: Results of a controlled metabolic trial. *Diabetes Care*, **23**, 9-14 (2000).
 - 54) 佐藤伸一, 井本精一, 小島正明, 神勝紀, 唐澤豊, ラットに給与した寒天末の栄養生理的效果. 日本栄養・食糧学会誌, **47**, 227-233 (1994).

- 55) Flammang A.M., Kendall D.M., Baumgartner C.J., Slagle T.D., and Choe Y.S., Effect of a viscous fiber bar on postprandial glycemia in subjects with type 2 diabetes. *Journal of the American College of nutrition*, **25**, 409-414 (2006).
- 56) 赤津裕康, 山本孝之, 鈴木裕介, 蟹江治郎, 固形化経腸栄養剤の投与により血糖管理が容易になった 1 例. 日本老年医学会雑誌, **42**, 564-566 (2005).
- 57) 山本由喜子, 中川佳子, 森川和浩, 廣瀬香, アガロペクチンによる血中コレステロール上昇抑制効果. 日本栄養・食糧学会誌, **55**, 143-147 (2002).
- 58) Maeda H., Yamamoto R., Hirao K., and Tochikubo O., Effects of agar (kanten) diet on obese patients with impaired glucose tolerance and type 2 diabetes. *Metab.*, **7**, 40-46 (2005).
- 59) 石崎和彦, 松井崇晃, 金田聡, 水稻早生新品種「ゆきん子舞」. 新潟県農業総合研究所研究報告, **9**, 89-98 (2008).
- 60) 川端晶子, 大羽和子, 森高初恵編, 「時代と共に歩む新しい調理学」, (学建書院, 東京), pp.56 (2009).
- 61) Hayakawa K., Tanaka K., Nakamura T., Endo S., and Hosino T., Quality characteristics of waxy hexaploid wheat (*Triticum Aestivum* L.): Properties of starch gelatinization and retrogradation. *Cereal Chem.*, **74**, 576-580 (1991).
- 62) Eliasson A.C., DSC studies of gamma irradiation influence on gelatinization and amylase-lipid complex transition occurring in wheat starch. *Thermochim. Acta*, **246**, 343-356 (1994).
- 63) Takaya T., Sano C., and Nishinari K., Thermal studies on the gelatinization and retrogradation of the moisture treated starch, *Carbohydrate Polymers*, **41**, 97-100 (2000).
- 64) 大塚愛, 森高初恵, 福場博保, 木村修一, 石原三妃, コーンスターチの糊化・老化に及ぼす炭酸カルシウムおよび水酸化カルシウムの影響. 日本食品工業学会誌, **48**, 751-758 (2001).
- 65) Moritaka H., Naito S., Nishinari K., Ishihara M., and Fukuba H., Effects of various ingredients on the texture of milk jelly. *J. Texture Stud.*, **29**, 387-396 (1998).
- 66) 土井邦紘, 松浦省明, 馬場茂明, 食物繊維と糖尿病. ファルマシア, **17**, 204-208 (1981).
- 67) 田中照二, 鈴木正成, 杉山みち子, 「臨床栄養のための Glycemic Index」(第一出版, 東京) pp.13-15 (2011).

- 68) 與座宏一, 熊井英志, 松木順子, 佐々木朋子, 大江洋正, 津志田藤次郎, 徳安健, 食品・食事の血糖応答性の簡易評価法(GR法)の開発. 食品と科学, **51**, 35-38 (2009).
- 69) Yamamoto Y., Takahashi Y., Kawano M., Iizuka M., Matsumoto T., Saeki S., and Yamaguchi H., In vitro digestibility and fermentability of levan and its hypocholesteromic effects in rats. *J. Nutr. Biochem.*, **10**, 13-18 (1999).
- 70) 熊井英志, 大江洋正, 佐々木朋子, 松木順子, 與座宏一, 徳安健, グルコース遊離率 (GR) を指標とした GI in vitro 代替法「GR法」の開発. ジャパンフードサイエンス, **46**, 33-37 (2007).
- 71) 中西由季子, 今田文子, 稲毛寛子, 木村修一, 増粘多糖類共存下での食事中に含まれるアミロース・アミロペクチン含量と消化後のグルコース放出との相関解析. すかいらく助成金報告書, 23-25 (2006).
- 72) Nakanishi, Y., Toward practical application of the GR method. Presented at The 6th international conference on Nutrition and Aging, Tokyo, Sep. 28-30, pp.87 (2011).
- 73) 森高初恵, 中西由季子, 不破眞佐子, 谷井涼子, 米飯の熱特性, 感覚特性とグリセミックインデックスに及ぼす寒天の影響. 日本調理科学会誌, **45**, 115-122 (2012).
- 74) 井上憲政, 井上勝弘, 蒟蒻マンナン分解に関与する腸内細菌に関する研究. 栄養学雑誌, **12**, 29-32 (1954).
- 75) 印南敏, 長谷川忠男, 鈴木隆雄, 佐橋佳一, 腸内細菌によるこんにゃくマンナンの代謝機構に関する研究 (第4報). 栄養と食糧, **18**, 421-425 (1966).
- 76) Cummings, J.H.; Branch, W.; Jenkins, D.J.; Southgate, D.A.; Houston, H.; James, W.P. Colonic response to dietary fibre from carrot, cabbage, apple, bran and guar gum. *Lancet*, **1**, 5-9 (1978).
- 77) Holt, S., Carter, D., Tothill, P., Heading, R., Prescott, L. Effects of gel fiber on gastric emptying and absorption of glucose and paracetamol, *Lancet*, 1979, **24**, 636-639
- 78) Calle-Pascual A.L., Marengo G., Asis M.J., Bordiu E., Romeo S., Romero C., Martin P.J., Maranes J.P., and Charro A.L., Effects of different proportions of carbohydrates, polysaccharides/ monosaccharides, and different fibers on the metabolic control in diabetics rats. *Metabolism*, **35**, 919-923 (1986).
- 79) Gardner, D.F., Schwartz, L., Krista, M. and Merimee, T.J., Dietary pectin and glycemic control in diabetes. *Diabetes Care*, **7**, 143-146 (1984).

- 80) 土井邦紘, 松浦省明, 河原啓, 馬場茂明, 西川和典, 食物繊維の糖尿病治療への応用 (第4報) とくに食物繊維の粘度と食後血糖上昇抑制効果. 糖尿病, **25**, 197-203 (1982).
- 81) 西澤一俊, 大野正夫, 海藻由来の水溶性食物繊維の化学構造と薬理学的機能. 日本食物繊維学会誌, **8**, 1-12 (2004).
- 82) 望月聡, 高橋美香, 山元亜弥子, カジメの耐糖性改善効果. 日本水産学会誌, **61**, 81-84 (1995).
- 83) Dumelod, B.D., Ramirez, R.P., Tiangson, C.L., Barrios, E.B. and Panlasigui, L.N., Carbohydrate availability of arroz caldo with λ -carrageenan. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **50**, 283-289 (1999)
- 84) 森高初恵, 郡司恵, 極性多糖類のゲル化に及ぼす食塩の影響. 昭和女子大学生生活科学紀要, **794**, 7-13 (2006).
- 85) 佐久間康夫, 「カラー図解よくわかる生理学の基礎」, (メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京) pp222 (2006).
- 86) 不破眞佐子, 中西由季子, 小野仁志, 森高初恵, グルコマンナンおよびしらたきが米飯摂取後の血糖値上昇に及ぼす影響. 日本家政学会誌, **64**, 567-576 (2013).
- 87) 北出晶美, 檜木宏美, 小林奈央樹, 森高初恵, サイズの異なる寒天ゲルの咀嚼および嚥下特性. 日本食品科学工学会誌, **59**, 369-377 (2012).
- 88) Edwards, C.A., Blackburn, N.A., Craigen, L., Davison, P., Tomlin, J., Sugden, K., Johnson, I.T., and Read, N.W., Viscosity of food gums determined in vitro related to their hypoglycemic actions. *Am J Clin Nutr.* **46**, 72-77 (1987).
- 89) Cameron-Smith, D., Collier, G.R., and O'dea, K., Effect of soluble dietary fibre on the viscosity of gastrointestinal contents and the acute glycaemic response in the rat. *British Journal of Nutrition*, **71**, 563-571 (1994).
- 90) Shiyi Ou, , Kin-chor Kwok, Yan Li, and Liang Fu, In Vitro Study of Possible Role of Dietary Fiber in Lowering Postprandial Serum Glucose. *J. Agric. Food Chem.*, **49**, 1026-1029 (2001).
- 91) 佐川敦子, 中西由季子, 小野仁志, 森高初恵, 増粘剤添加が米飯の消化性および米飯食塊の力学特性に及ぼす影響. 日本食品科学工学会誌, **60**, 387-396 (2013).
- 92) Sasaki, T. and Kohyama, K., Effect of non-starch polysaccharides on the in vitro digestibility and rheological properties of rice starch gel. *Food Chem.*,

- 127**, 541-546 (2011).
- 93) Sasaki, T. and Kohyama, K., Influence of non-starch polysaccharides on the in vitro digestibility and starch suspensions. *Food Chem.*, **133**, 1420-1246 (2012).
 - 94) Fabek, H., Stefanie Messerschmidt, Valentin Brulport, H. Douglas Goff, The effect of in vitro digestive processes on the viscosity of dietary fibres and their influence on glucose diffusion. *Food Hydrocolloids*, **35** 718-726 (2014).
 - 95) Karen, L.J., Caroline, M., Yu-Chung, S., Fiona, W., Ian, M.C., Anne, T., and Michael, H., Guar gum reduces postprandial hypotension in older people. *Journal of American Geriatrics Society*, **49**, 162–167 (2001).
 - 96) John, W. F., Adriana, S.V., James, H., T. P. Rao., Lekh, R. J, Joanne S., and George C. F., Safety assessment and caloric value of partially hydrolyzed guar gum. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **61**, 1756–1771 (2013).
 - 97) Raymundo, H., Michael, B., and Gregory, R., Guar gum improves insulin sensitivity in streptozotocin-induced diabetic rats. *The Journal of nutrition*, **127**, 359–364 (1997).
 - 98) Pertti, E., Hannele, Y.J., Antti, A., and Eero, H., Glucose and lipid metabolism and insulin sensitivity in type 1 diabetes: the effect of guar gum. *American Journal of Clinical Nutrition* **48**,98-103 (1988).
 - 99) 中島昭, 海老原清, 胃切除ラットの耐糖性に対するグアーガムの影響. 日本農芸化学会誌, **60**, 515-520 (1986).
 - 100) 長野隆男, 樋渡友美, 河原和枝, デンプンの消化性に与えるグアーガムの影響. 川崎医療福祉学会誌, **20**, 391-396 (2011).
 - 101) 岩崎良文, 内野治人, 食物繊維の投与形態と効果. 医学のあゆみ, **113**, 164-166 (1980).

謝辞

本論文を遂行するにあたり、終始ご懇切なご指導を賜りました昭和女子大学大学院生活機構研究科 森高初恵教授に心より感謝と敬意を申し上げます。森高初恵教授には、研究者としてのあるべき姿勢をご教示いただき、研究の道に導いていただいたことに深甚の謝意を表します。

本論文作成にあたり、審査員として多くのご助言を頂きました日本女子大学大学院家政学研究科 大越ひろ教授、昭和女子大学大学院生活機構研究科 松本孝教授、高尾哲也教授に深く感謝申し上げます。

GR 法の実施にあたり、昭和女子大学大学院生活機構研究科 木村修一名誉教授、人間総合大学 中西由季子教授には数多くのご指導ご助言を賜り、深く感謝申し上げます。

試料の提供に際し、快くご協力いただきました三栄源エフ・エフ・アイ株式会社に感謝申し上げます。

本論文作成にあたり、また研究と仕事の両立を支援していただきました昭和女子大学大学院生活機構研究科、生活科学部健康デザイン学科、生活科学部管理栄養学科の諸先生方に数多くのご指導、ご鞭撻を賜り、深く感謝申し上げます。

本論文作成にあたり、数多くのご指導ご助言をいただきました東海学園大学 佐川敦子准教授に深く感謝申し上げます。

大学院博士課程進学の道へ導いてくださいました大森和子博士に厚く御礼申し上げます。

測定および官能評価に快くご協力いただいた多くの被験者の皆様に心より御礼申し上げますとともに、共に実験を行なった卒論研究室所属の大山恵美氏、田中栞氏、村松杏里沙氏、眞田実和氏、松田紗恵氏および皆様に感謝申し上げます。

本研究室の学生諸氏の存在が、研究を進めていく上で大きな励みになりました。心より感謝申し上げます。