

*Original article***Effect of heat-moisture-treated high-amylose corn starch-containing food on postprandial blood glucose.**

Masayuki Yagi¹⁾, Wakako Takabe¹⁾, Ursula Wickramasinghe¹⁾, Fuka Okuda¹⁾, Misato Kon¹⁾, Aki Fujimura²⁾, Hideaki Nakamoto²⁾, Junichi Takahara²⁾, Yoshikazu Yonei¹⁾

1) Anti-Aging Medical Research Center and Glycative Stress Research Center, Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto, Japan

2) R&D Division, Sanwa Starch Co., Ltd, Kashihara, Nara, Japan

Glycative Stress Research 2018; 5 (3): 151-162

(c) Society for Glycative Stress Research

(原著論文：日本語翻訳版)

湿熱処理ハイアミロースコーンスターチを配合した食品摂取後の血糖変化

八木雅之¹⁾、高部稚子¹⁾、Ursula Wickramasinghe¹⁾、奥田風花¹⁾、今美知¹⁾、藤村揚²⁾、中許昆照²⁾、高原純一²⁾、米井嘉一¹⁾

1) 同志社大学大学院生命医科学研究科アンチエイジングリサーチセンター・糖化ストレス研究センター、京都

2) 三和澱粉工業株式会社研究開発部、奈良県橿原市

抄録

【目的】 アミロースを豊富に含む湿熱処理ハイアミロースコーンスターチ (HMT-HAS) は難消化性食材である。本食材の食後血糖に及ぼす効果を検証した。

【方法】 0歳以上60歳未満の健康な男女(学生と企業従業員)を対象に、小麦澱粉を小麦粉の5割置換で配合したロールパンを対照品として、HMT-HAS(商品名アミロジェル HB-450)を5割配合したパン(試験品)をそれぞれ別の日に摂取後血糖試験を行った。血糖試験は試験食摂取開始から15, 30, 45, 60, 90, 120分後に自己血糖値測定器にて測定した。事前検査として血液学的検査、血液生化学一般検査、被験者背景調査を実施した。本研究は倫理審査の承認のもとに行われた。

連絡先：教授 米井嘉一
〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3
同志社大学大学院生命医科学研究科アンチエイジングリサーチセンター/
糖化ストレス研究センター
TEL & FAX : 0774-65-6394 メール : yyonei@mail.doshisha.ac.jp
共著者：八木雅之 yagi@yonei-labo.com、高部稚子 wtakabe@mail.doshisha.ac.jp、
Ursula Wickramasinghe Ursula : cygb2502@mail4.doshisha.ac.jp、
奥田風花 ctuc2017@mail4.doshisha.ac.jp、今美知 ctuc2013@mail4.doshisha.ac.jp、
藤村揚 aki-fujimura@sanwa-starch.co.jp、中許昆照 h-nakamoto@sanwa-starch.co.jp、
高原純一 jun-ichi-takahara@sanwa-starch.co.jp

Glycative Stress Research 2018; 5 (3): 151-162
本論文を引用する際はこちらを引用してください。
(c) Society for Glycative Stress Research

【結果】 全被験者における食後血糖値は、対照食（小麦澱粉含有パン）の方が試験食（HMT-HAS含有パン）より高値を示した。血糖値変化下曲線面積（incremental area under the curve: iAUC）は対照食と比較して試験食で有意に低下、最大血糖変化値（maximum value of glucose concentration change: ΔC_{max} ）は対照食と比較して試験食では有意な低下を示した。サブクラス解析として企業従業員群（ 36.9 ± 9.3 歳）と大学生群（ 22.6 ± 1.3 歳）を比較した結果、企業従業員ではインスリン抵抗性指数（homeostasis model assessment of insulin resistance: HOMA-IR）が高く対照品摂取後最大血糖値（maximum value of glucose concentration: C_{max} ）が有意に高かったが、HMT-HAS含有食摂取後血糖値には両群間で有意差はなかった。

【結論】 HMT-HAS含有パンの摂取は対照の小麦澱粉配合パンに比べて食後高血糖を抑制した。食後高血糖の抑制作用は年齢層及びインスリン抵抗性が大きい群でより顕著であった。HMT-HAS配合パンの摂取により、摂取者の食後血糖上昇が緩和され、健康維持に貢献できる可能性が示唆された。

KEY WORDS: 湿熱処理ハイアミロースコーンスターチ、食後高血糖、小麦澱粉、インスリン

はじめに

グルコースなどの還元糖が蛋白と非酵素的に結合し、糖化蛋白を経て糖化最終生成物（advanced glycation end products: AGEs）の生成に至る現象を「糖化」という^{1,2)}。還元糖やアルデヒドによる生体へのストレスは、「糖化ストレス」と呼ばれ、身体の老化を促進する危険因子の一つである。糖化ストレスの軽減には、食後高血糖の抑制、糖化反応抑制、糖化反応生成物の分解・排泄促進などの方法が挙げられる。食後高血糖の抑制方法には、主食として食後血糖値（GLU）の上昇がゆるやかである低グリセミックインデックス（glycemic index: GI）食品を選択すること、

野菜などの食物繊維を糖質よりも先に食べることで、糖質の摂取を制限することなどの方法がある³⁾。以前から顕著な食後高血糖（最大血糖値 C_{max} 140 mg/dL 以上）は「血糖スパイク」（Fig. 1）と呼ばれ、血管内皮障害を始め様々な組織障害が惹起されることが示されてきた。近年ではグルコースの一部が開環してアルデヒド官能基が露出し、これに起因して連鎖反応により同時多発的に多種の中間体アルデヒドが生じることがわかってきた⁴⁾。この現象を我々は「アルデヒドスパーク」と呼んでいる。糖化ストレスの観点からみると、食後高血糖の予防はアルデヒドスパークの予防につながり、これまで考えられてきたよりも重要である。

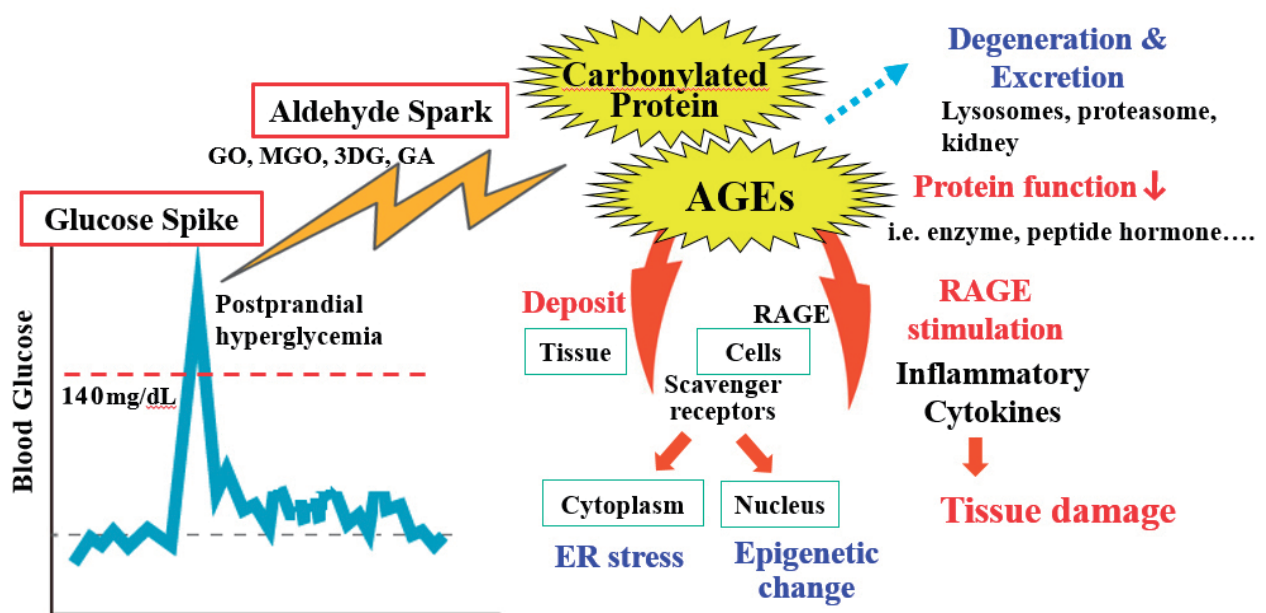


Fig. 1. “Glucose spike” evokes “Aldehyde spark.”

The glucose spike evokes an “aldehyde spark.” Various types of aldehyde are simultaneously formed with a chain-reaction, *i.e.* GO, MGO, 3DG, GA. Glucose is normally saccharides with a cyclic form, however, in 0.002% of glucose, a portion of the molecule structure is decyclized to present an open-linear form, exposing the aldehyde group (-CHO) which is highly reactive. AGEs, advanced glycation end products; RAGE, receptor for AGEs; ER, endoplasmic reticulum; GO, glyoxal; MGO, methylglyoxal; 3DG, 3-deoxyglucosone; GA, glyceraldehyde.

本試験では加工澱粉を配合した食品（試験食品）摂取後の血糖値変化についてヒトに対する摂取試験を実施し、その評価を行うことを目的とした。本試験は20歳以上60歳未満の健康な男女を対象に、小麦澱粉を小麦粉の5割置換で配合したテーブルロール（パン）を対照として、湿熱処理ハイアマミロースコーンスターチ（heat-moisture-treated high-amylose corn starch: HMT-HAS）⁵⁾を配合したパンを単回摂取する事により、試験食品の血糖値上昇抑制作用をオープン試験で検証した。

方法

対象

本試験の参加を事前に文書で同意した者で、20歳以上60歳未満の健康な男女を対象にHMT-HAS（アミロジェルHB-450;三和澱粉工業、奈良県橿原市）を配合したテーブルロール（パン）を単回摂取する事による摂取後の血糖値の上昇抑制について検証した。

同志社大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会での承認後、試験説明会を実施した上で、本試験の参加を事前に文書で同意かつ以下の除外基準に抵触していない32名を被験者として組み込んだ。

- ① 現在、何らかの疾患を患い薬物治療を受けている者
- ② 耐糖能異常、精神疾患、睡眠障害、高血圧、糖尿病、高脂血症や重篤な疾患の既往歴・現病歴のある者
- ③ 過去1ヶ月において、疾患治療を目的とした、薬物の服薬習慣のある者（頭痛、月経痛、感冒などの頓服薬は除く）
- ④ 肝、腎、心、肺、血液等の重篤な障害の既往歴・現病歴のある者
- ⑤ 消化器官に併存疾患および既往歴のある者（盲腸の既往歴は除く）
- ⑥ 体格指数 (body mass index: BMI) が 30 kg/m^2 以上の者
- ⑦ 過去1ヶ月間において200 mL、又は3ヶ月以内に400 mLを超える献血等をした者
- ⑧ 高度の貧血がある者
- ⑨ 試験食品にアレルギー症状を起こす恐れのある者、また、その他食品、医薬品に重篤なアレルギー症状を起こす恐れのある者
- ⑩ 妊娠中、授乳中あるいは妊娠の可能性のある者
- ⑪ 現在、ならびに過去3ヶ月以内において、糖代謝関連を標榜する機能性表示食品、健康食品類の継続的な摂取習慣のある者、また試験期間中に摂取予定のある者（健康維持を目的した摂取は可）
- ⑫ その他、試験責任医師が本試験の対象として不適当と判断した者

試験デザイン

本試験は対照のあるオープンラベル試験とした。

被験食は、HMT-HASを小麦粉の5割置換で配合した

テーブルロール（パン）を使用した。対照食には小麦澱粉を小麦粉の5割置換で配合したテーブルロール（パン）を使用した（Table 1-1, 1-2）。

被験者は検査前日に過度の運動を禁止とし、夕食は指定された前日食を摂取するとともに6時間以上の十分な睡眠をとることとした。前日食の内容をTable 2に示す^{6,7)}。被験食は被験者の自由意志で①または②を選択したが、各自2回とも同じものを摂取した。検査前日より検査当日の検査終了まで、アルコールの摂取を禁止した。

検査当日は検査終了まで運動及び発汗の可能性のある身体活動を禁止し、検査中は座位での安静待機とし、電話、睡眠、過度な頭脳活動、身体活動を禁止とした。試験食品摂取後については、水のみ摂取可とした。

1回目の検査当日被験者は、安静待機の後、身体計測および採血による血液学的検査・血液生化学検査を実施するとともに自己血糖測定を実施した（1回目）。その後水200 mLとともに対照食を3個摂取した。対照食は1個を6カットして1カットあたり10回咀嚼後嚥下することとし、摂取時間の目安は9分～10分以内とした。摂取開始から15分（2回目）・30分（3回目）・45分（4回目）・60分（5回目）・90分（6回目）・120分（7回目）の自己血糖測定を実施した。2回目の検査当日被験者は、安静待機の後、自己血糖測定を実施した（1回目）。その後水200 mLとともに被験食を3個摂取した。摂取方法および自己血糖測定の実施時間は1回目の検査と同様とした。

試験期間は2017年8月～2017年12月とした。

自己血糖測定

自己血糖測定は、自己血糖測定器（自己検査用グルコース測定器 グルコカードG ブラック：GT-1830、アークレイ株式会社、京都府京都市）を用いて被験者自身に測定させた。測定は2回行い、測定値には、その平均値を採用した。2回の誤差が10%以上あった時は3回目を測定させ、測定値には誤差の小さい2回の平均値を採用した。

身体計測

身体計測としては、身長、体重、体脂肪率、体格指数 (body mass index: BMI)、収縮期および拡張期血圧、脈拍数を計測した。

血液検査

血液試料を用いて末梢血液検査、生化学検査を行った。今回の実施項目は白血球数 (WBC)、赤血球数 (RBC)、血色素量 (Hb)、ヘマトクリット値 (Ht)、平均赤血球容積 (MCV)、平均赤血球血色素量 (MCH、平均赤血球血色素濃度 (MCHC)、血小板数 (PLT)、尿素窒素 (BUN)、クレアチニン (CRE)、尿酸 (UA)、アスパラギン酸アミノトランスフェラーゼ (AST)、アラニンアミノトランスフェラーゼ (ALT)、 γ -グルタミルトランスペプチダーゼ (γ -GTP)、総コレステロール (TC)、トリグリセライド (TG)、LDLコレステロール定量 (LDL-C)、HDLコレ

Table 1-1. Composition of test meal (%).

	Control food	Test food
Flour	25.9	24.1
Starch	26.7	24.9
Vital gluten	0.8	0.7
Yeast	1.1	1.0
Yeast food	0.1	0.0
Refined sugar	6.4	6.0
Salt	1.0	0.9
Powdered skim milk	1.6	1.5
Margarine	6.4	6.0
Water	30.2	34.9

Table 1-2. Nutrition facts of test meal.

test food	unit (g)	energy (kcal)	protein (g)	fat (g)	carbohydrate (g)	sugar (g)	fiber (g)	sodium chloride equivalent (g)
Control food	100	298.4	4.8	6.6	53.5	52.6	0.9	1.2
Test food	100	244.6	4.6	6.1	49.6	32.5	17.1	1.1

Table 2. Dinner menu on the day before the test.

	Selection ①	Selection ②
Cooked white rice	200 g	300 g
Ingredients of beef bowl	1 pack	1 pack
Ingredients of beef bowl (mini size)	—	1 pack
Freeze-dried miso soup	1 pack	1 pack
Energy intake (kcal)	668	1,014
PFC ratio	12 : 39 : 48	12 : 41 : 46

Cooked rice: "Papatto Rice" Koshihikari (Hagoromo Foods Corporation, Suruga-ku, Shizuoka).

Side dishes: Ingredients of beef bowl, Ingredients of beef bowl (mini size) (Yoshinoya Holdings Co., Ltd., Chio-ku, Tokyo, Japan) 5, 6), Freeze-dried miso soup: Yoshinoya Holdings Co., Ltd

ステロール (HDL-C)、HbA1c、空腹時血糖 (FPG)、インスリン (immunoreactive insulin: IRI)、グルカゴンである。血液試料を用いた検査は株式会社 LSI メディエンス (東京都千代田区) にて測定した。

統計解析

解析項目は血糖実測値 (GLU)、血糖値変化下曲線面積 (incremental area under the curve: iAUC)、初期値からの変化量 (Δ 血糖値)、最大血糖値 (maximamu value of GLU: Cmax)、最大血糖変化値 (maximamu value of

GLU change: Δ Cmax) とし、各項目について基本統計量 (平均値、標準偏差、95% 信頼範囲) を算出した。

有意差の検定は、対照食、被験食摂取時の群間比較を、対応のない T 検定あるいは Bonferroni の多重検定 (対応あり) で評価した。有意差の検定には適切な統計解析ソフト (エクセル統計, 社会情報サービス) を使用し、有意水準は 5% 未満、10% 未満を傾向とした。また、被験者特性に応じた層別解析、有効性の観点から相関関係を調べるなど、探索的な研究の見地から様々な統計解析を行なえるものとした。

倫理審査

本試験は、ヘルシンキ宣言（2013年WMAフォルタレザ総会で修正）および人を対象とする医学系研究に関する倫理指針（文部科学省、厚生労働省告示）を遵守した。本試験は「同志社大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会」（京都市上京区）にてヒト試験倫理委員会を開催し、試験の倫理性および妥当性について審議を行い、承認された（申請番号#17054）。本試験については臨床試験事前登録を行った（UMIN#000029026）。

結果

一般背景

本試験の解析対象者32名（全被験者）には、人間ドック学会判定区分D（要治療）に該当する者が無く、全て健康な成人であった（Table 3）。全被験者の内訳は男性19名、女性13名、年齢 30.9 ± 10.7 歳であった。

解析対象者は大学生群（同志社大学学生、大学院生）13名（男性6名、女性7名）と企業従事者群（三和澱粉工業社員）19名（男性13名、女性6名）の2群に分けられる。企業従事者は大学生と比べて、年齢、体重、BMI、TC、LDL-C、インスリン抵抗性指数（homeostasis model assessment of insulin resistance: HOMA-IR）が高値であった（ $p < 0.01$ ）。一方、脈拍数、IRI値は有意に低値であった（ $p < 0.01$ ）。2群には年齢平均値の差が14.3歳あり、検査値の違いに加齢の影響が推定された。企業従事者群の糖代謝能に関連する検査項目では、大学生群よりもIRI値が $2.7 \mu\text{unit/mL}$ （1.8倍）の低下、HOMA-IR値が0.5ポイント（1.7倍）上昇していた。糖代謝能の違いは基準範囲内であったが、企業従事者群が加齢に伴うインスリン抵抗性増大傾向にあった（Table 4）。

Table 3. Subject background profile.

		Average	SD
Age	year	30.9	± 10.7
Height	cm	166.7	± 7.7
Weight	kg	60.0	± 10.8
BMI	—	21.5	± 2.7
Blood pressure	mmHg	119.7	± 13.1
	mmHg	70.7	± 10.4
Pulse	/min	66.8	± 14.1

n = 32. BMI, body mass index; SD, standard deviation.

食後血糖変化（全体解析）

全被験者における各食品摂取後の血糖変化曲線は、対照食（小麦澱粉含有パン）では試験食（HMT-HAS含有パン）より高値を示した。試験食摂取開始後の血糖値は、30分後、45分後、60分後、90分後、120分後に有意な低下を示した（Table 5, Fig. 2）。iAUCは、対照食と比較して試験食で有意に低下した（ $p < 0.01$, Table 6, Fig. 3-a）。Cmaxは対照食と比較して試験食で有意に低下した（ $p < 0.01$, Table 7, Fig. 3-b）。 ΔCmax は対照食と比較して試験食で有意に低下した（ $p < 0.05$, Table 8, Fig. 3-c）。

食後の血糖変化（サブクラス解析）

全被験者を大学生群13名と企業従事者群19名の2群に分けて解析した。大学生群において各食品摂取後の血糖変化曲線は全被験者群での解析と同様に、対照食で試験食より高値を示した。試験食摂取開始後の血糖値は、対照食と比較して30分後に有意に低下（ $p < 0.05$ ）、45分後に低下傾向を示した（ $p < 0.1$, Table 9, Fig. 4）。iAUCおよびCmaxは、両群間に有意差がなかった。 ΔCmax では対照食と比較して試験食で有意な低下を示した（ $p < 0.05$, Table 10, Fig. 5）。

企業従事者群は各食品摂取後の血糖変化曲線が全被験者群での解析と同様に、対照食より試験食の方が高値を示した。試験食摂取開始後の血糖値は45分後、60分後、90分後、120分後に対照食に比べ有意な低下を示した（ $p < 0.01$, Table 11, Fig. 6）。iAUCは対照食と比較して試験食で有意に低下した（ $p < 0.05$, Table 11, Fig. 7-a）。Cmax、 ΔCmax は対照食と比較して試験食で有意に低下した（ $p < 0.05$, Table 11, Fig. 7-a, b）。

考察

結果の概要

全被験者における食後血糖値は、対照食（小麦澱粉含有パン）の方が試験食（HMT-HAS含有パン）より高値を示した。iAUCは対照食と比較して試験食で有意に低下、 ΔCmax は対照食と比較して試験食では有意な低下を示した。これらの結果は、試験食に配合されたHMT-HASが食後高血糖抑制に作用したと考えられた。

サブクラス解析から企業従事者群は、大学生群と比べて試験食に配合されたHMT-HASによる食後高血糖抑制がより有効に作用したことが推定された。大学生群と企業従事者群のiAUC、Cmax、 ΔCmax を比較すると、対照品を摂取後のCmaxのみ企業従事者群が高かった（ $p < 0.05$ ）。インスリン抵抗性増大傾向がある企業従事者群の食品をHMT-HAS含有試験品に置き換えることによる高血糖状態の軽減は、糖化ストレスの軽減となる可能性を示した。

Table 4. Comparison between College students and Company workers.

		College student (n=13)	Company worker (n=19)	p value
Gender	Male	6	13	0.419
	Female	7	6	
Age		22.6 ± 1.3	36.9 ± 9.3	<0.001
Height	cm	164.1 ± 7.1	168.1 ± 8.0	0.118
Weight	kg	52.3 ± 6.4	64.1 ± 9.1	<0.001
BMI	–	19.4 ± 1.6	22.6 ± 2.1	<0.001
Blood pressure (systolic)	mmHg	124.2 ± 13.1	119.1 ± 16.4	0.095
	(diastolic) mmHg	70.4 ± 9.5	73.9 ± 13.8	0.899
Pulse	/min	74.7 ± 15.4	61.9 ± 11.5	0.005
TC	mg/dL	165.9 ± 22.5	196.9 ± 39.3	0.004
LDL-C	mg/dL	88.5 ± 18.5	107.4 ± 34.5	0.004
HDL-C	mg/dL	63.5 ± 10.3	75.6 ± 17.5	0.500
TG	mg/dL	76.5 ± 32.9	72.4 ± 39.3	0.782
FPG	mg/dL	82.9 ± 6.6	89.9 ± 9.4	0.454
HbA1c	%	5.1 ± 0.2	5.2 ± 0.2	0.138
IRI	μU/mL	5.9 ± 2.3	3.2 ± 1.1	0.002
Glucagon	pg/mL	107.5 ± 10.4	112.8 ± 14.2	0.793
HORMA-IR		0.7 ± 0.2	1.2 ± 0.6	0.004

Data are expressed as mean ± SD, paired t test. BMI, body mass index; TC, total cholesterol; LDL-C, low-density-lipoprotein-cholesterol; HDL-C, high-density-lipoprotein-cholesterol; TG, triglyceride; FPG, fasting plasma glucose; IRI, immunoreactive insulin; HORMA-IR, homeostasis model assessment of insulin resistance; SD, standard deviation.

Table 5. Changes in GLU (mg/dL) after meals: Total analysis.

	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
Control food	0.0 ± 0.0	16.3 ± 16.6	58.8 ± 17.1	61.9 ± 20.5	48.1 ± 18.0	33.5 ± 18.3	29.5 ± 17.7
Test food	0.0 ± 0.0	17.6 ± 13.1	48.0 ± 17.8	49.5 ± 22.4	35.8 ± 20.6	25.8 ± 16.1	15.0 ± 12.7

Data are expressed as mean ± SD, 95% CI, n = 32. GLU, blood glucose; SD, standard deviation; CI, confidence interval.

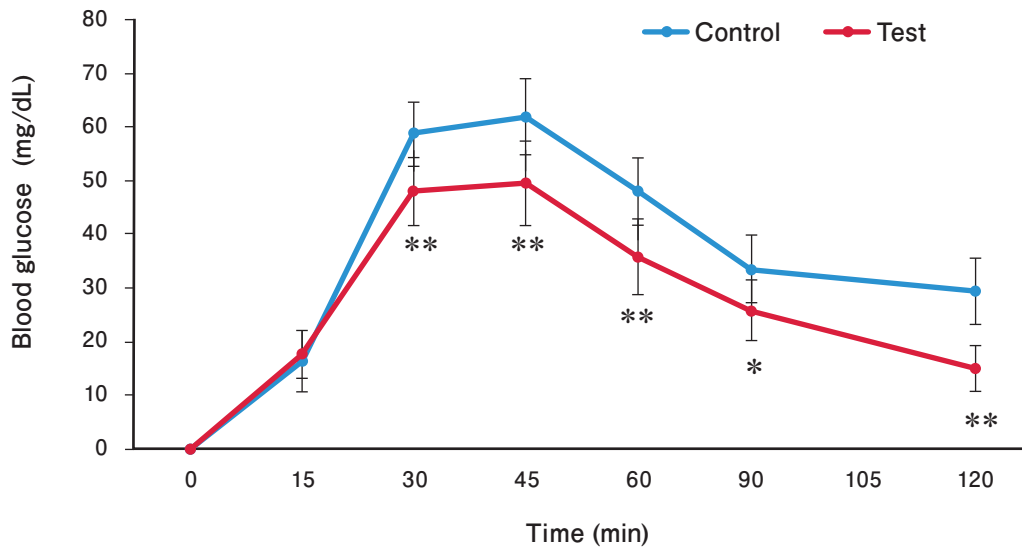


Fig. 2. Changes in GLU level after meals.

Data are expressed as mean \pm 95% CI, n = 32, * p < 0.05, ** p < 0.01 vs control by Bonferroni multiple comparison analysis with related data. GLU, blood glucose; CI, confidence interval.

Table 6. iAUC, Cmax and Δ Cmax: Total analysis.

	iAUC		Cmax (mg/dL)		Δ Cmax (mg/dL)	
Control food	4583.9 \pm 1422.1	492.7	162.5 \pm 22.2	7.7	68.5 \pm 17.6	6.1
Test food	3530.5 \pm 1202.9	416.8	151.3 \pm 20.8	7.2	57.4 \pm 19.4	6.7

Data are expressed as mean \pm SD, 95% CI, n = 32. GLU, blood glucose; iAUC, incremental area under the curve; Cmax, maximum value of GLU concentration; Δ Cmax, maximum value of GLU concentration change; SD, standard deviation; CI, confidence interval.

Table 7. Multiple comparison analysis by Bonferroni: Total analysis.

Level2	Level2	Changes in GLU level (min)							iAUC	Cmax	Δ Cmax
		0	15	30	45	60	90	120			
Control	Test	-	1.000	0.007	0.001	0.001	0.033	<0.001	<0.001	0.001	0.001

n = 32. GLU, blood glucose; iAUC, incremental area under the curve; Cmax, maximum value of GLU concentration; Δ Cmax, maximum value of GLU concentration change.

Table 8. Changes in GLU (mg/dL) after meals: Subclass analysis in College students.

	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
Control food	0.0 \pm 0.0	17.3 \pm 15.7	62.0 \pm 17.0	64.2 \pm 19.1	46.7 \pm 16.7	31.5 \pm 13.3	30.8 \pm 20.2
Test food	0.0 \pm 0.0	22.1 \pm 14.0	49.5 \pm 14.4	49.0 \pm 22.2	36.2 \pm 23.3	29.1 \pm 18.1	19.0 \pm 14.5

Data are expressed as mean \pm SD, 95% CI, n = 13. GLU, blood glucose; SD, standard deviation; CI, confidence interval.

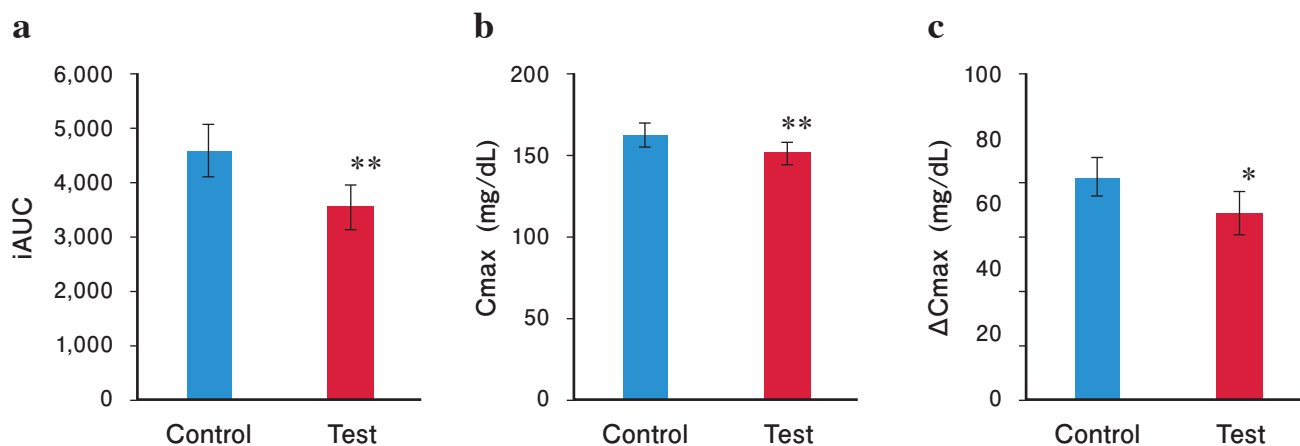


Fig. 3. Comparison between test group and control.

a: iAUC, b: Cmax, c: ΔCmax.

Data are expressed as mean ± 95% CI, n = 32, * p < 0.05, ** p < 0.01 vs control by Bonferroni multiple comparison analysis with related data. GLU, blood glucose; iAUC, incremental area under the curve; Cmax, maximum value of GLU concentration; ΔCmax, maximum value of GLU concentration change; CI, confidence interval.

Table 9. Multiple comparison analysis by Bonferroni: Subclass analysis in College students.

Level2	Level2	Changes in GLU level (min)							iAUC	Cmax	ΔCmax
		0	15	30	45	60	90	120			
Control	Test	-	0.837	0.036	0.051	0.225	1.000	0.178	0.144	0.264	0.048

n = 13. GLU, blood glucose; iAUC, incremental area under the curve; Cmax, maximum value of GLU concentration; ΔCmax, maximum value of GLU concentration change.

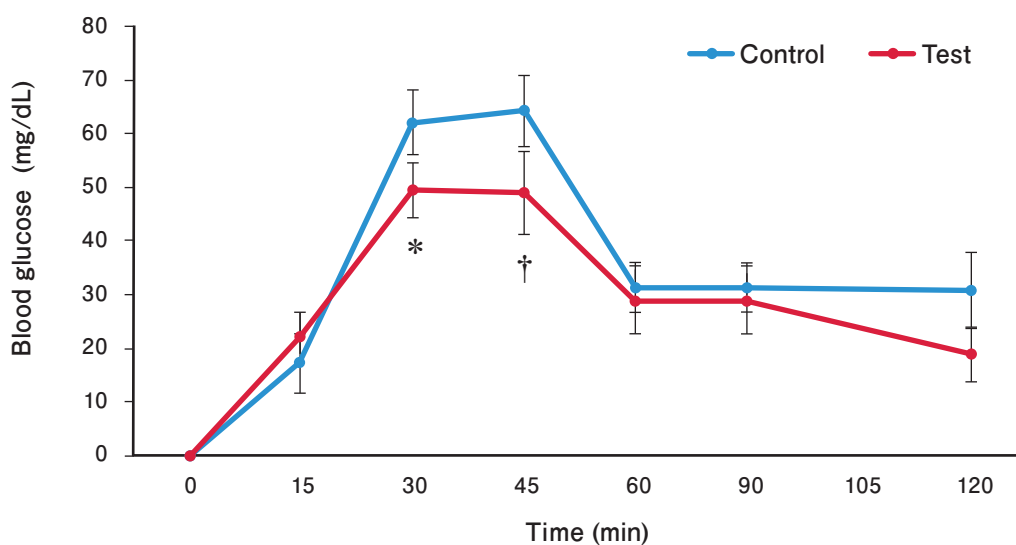


Fig. 4. Changes in GLU level after meals in College students.

Data are expressed as mean ± 95% CI, n = 13, * p < 0.05, † p < 0.1 vs control by Bonferroni multiple comparison analysis with related data. GLU, blood glucose; CI, confidence interval.

Table 10. Changes in GLU level after meals: Subclass analysis in Company workers.

	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
Control food	0.0 ± 0.0	15.7 ± 17.5	56.5 ± 17.2	60.3 ± 21.8	49.0 ± 19.3	34.9 ± 21.4	28.6 ± 16.3
Test food	0.0 ± 0.0	14.5 ± 11.8	46.9 ± 20.0	49.9 ± 23.1	35.5 ± 19.2	23.6 ± 14.6	12.3 ± 10.8

Data are expressed as mean ± SD, 95% CI, n = 19. GLU, blood glucose; SD, standard deviation; CI, confidence interval.

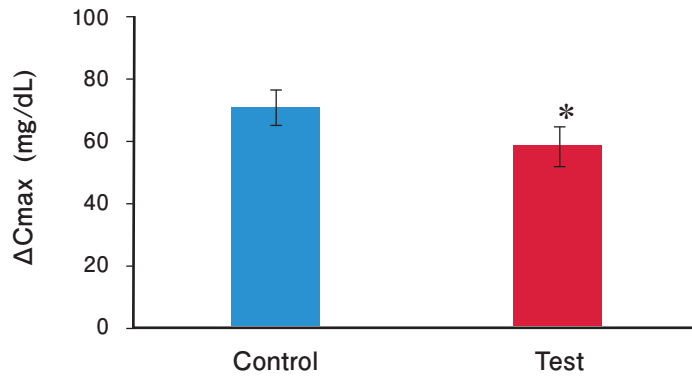


Fig. 5. ΔCmax in College students.

Data are expressed as mean ± 95% CI, n = 13, * p < 0.05 vs control by Bonferroni multiple comparison analysis with related data. GLU, blood glucose; ΔCmax, maximum value of GLU concentration change; CI, confidence interval.

Table 11. Multiple comparison analysis by Bonferroni: Subclass analysis in Company workers.

Level2	Level2	Changes in GLU level							iAUC	Cmax	ΔCmax
		0	15	30	45	60	90	120			
Control	Test	-	1.000	0.168	0.031	0.003	0.005	<0.001	<0.001	0.003	0.017

n = 19. GLU, blood glucose; iAUC, incremental area under the curve; Cmax, maximum value of GLU concentration; ΔCmax, maximum value of GLU concentration change.

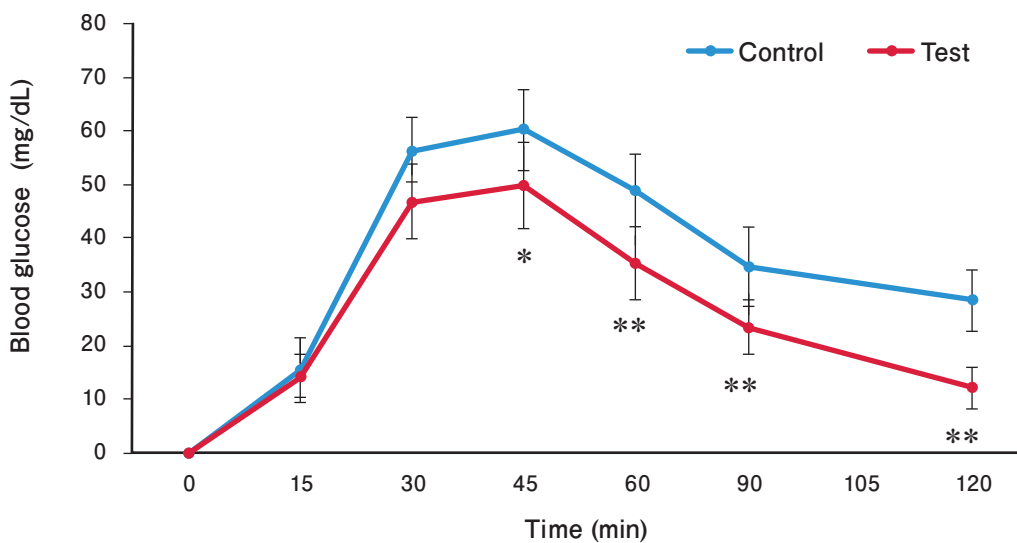


Fig. 6. Changes in GLU level after meals in Company workers.

Data are expressed as mean ± 95% CI, n = 19, * p < 0.05, ** p < 0.01 vs control by Bonferroni multiple comparison analysis with related data. GLU, blood glucose; CI, confidence interval.

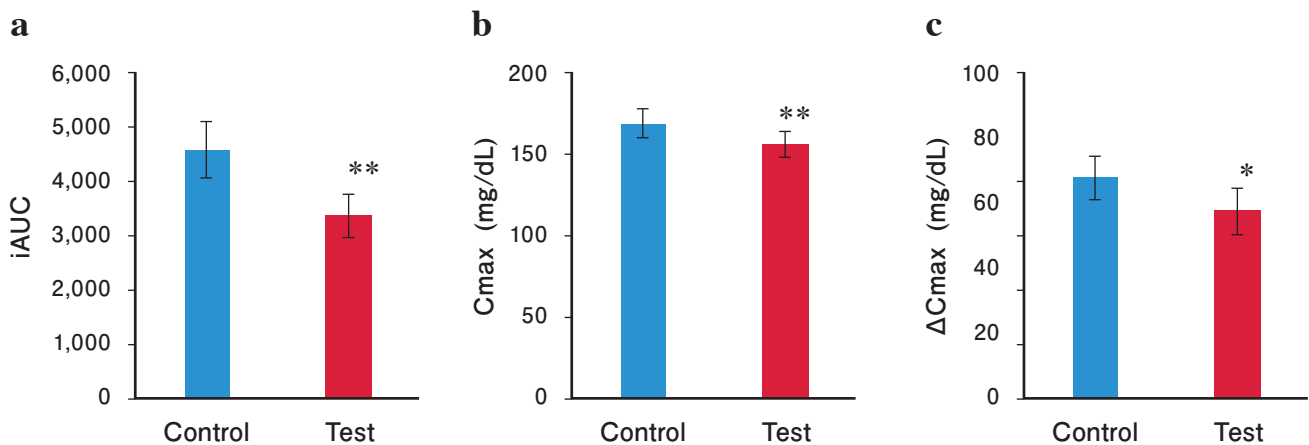


Fig. 7. Comparison between test group and control in Company workers.

a: iAUC, b: Cmax, c: ΔCmax.

Data are expressed as mean ± 95% CI, n = 19, * p < 0.05, ** p < 0.01 vs control by Bonferroni multiple comparison analysis with related data. GLU, blood glucose; iAUC, incremental area under the curve; Cmax, maximum value of GLU concentration; ΔCmax, maximum value of GLU concentration change; CI, confidence interval.

解析対象 32 名の背景因子をみると、被験者は学生と企業従事者に大別され、企業従事者は学生と比べて年齢が 14.3 歳高く、体重、BMI、TC、LDL-C が高値、脈拍数は有意に低かった。糖代謝関連項目では、企業従事者は学生よりも IRI 値が 2.7 μunit/mL (1.8 倍) 低く、HOMA-IR 値が上昇しており、インスリン抵抗性増大傾向にあることが推察された。試験食品の効能をみると学生では効能が明確でなく、企業従事者では試験食品の食後高血糖を緩和する効果が見られた。本食品の効能は、20 歳前後の若年者よりも 30 歳以降の中高齢者、インスリン抵抗性が増え食後高血糖をきたしやすい者でより発揮しやすいと予想される。

パンは朝食、昼食等で主食として摂取する機会が多い。HMT-HAS は食物繊維素材であり、これをパンに配合することで日常的にこれらの素材を摂取することが可能になり、摂取者の健康維持に寄与すると期待できる。

澱粉について

世界で食される主食の代表は米と小麦であり、主成分はいずれも澱粉である。米(稲)は世界各地で栽培されている。アジア稲はインディカとジャポニカに大別され、前者は軟らかくて粘りの強い米飯となり、後者は硬くて粘りの弱い米飯となる。米の主成分は澱粉であり、主としてカロリー源となる。米澱粉の消化性は、粉末状と粒状、あるいは米飯、麺、餅などの形態によっても影響を受ける^{8,9)}。

日本では新形質米を中心に、米粉パン、米粉麺、発芽玄米など、各種の機能性米加工食品の開発が行われている。もち米や低アミロース米は消化吸収が速い。一方、高アミロース米や超硬質米は、食後血糖上昇を抑制する効果が認められる。内臓肥満、メタボリックシンドローム、2 型糖尿病といった糖化ストレスの強い生活習慣病に予防や進展抑制の面から効果が期待される^{8,9)}。

澱粉は多数のグルコースが重合した天然の高分子であり、グルコースが直鎖状に連なった分子であるアミロースと、枝分かれの多い分子であるアミロペクチンによって構成される。アミロースとアミロペクチンが水素結合により規則的に配列されることで、澱粉の結晶構造が保たれている。澱粉は白色の粉状物質で、水に分散しても溶解することなく、放置すると沈殿する。この性状が澱粉という名称の由来となっている。

澱粉を溶解するためには、水を加えて加熱する必要がある。水存在下の澱粉粒子は、ある一定の温度以上に達すると吸水を始めて膨潤し、その膨潤が最大になると崩壊して、糊状に変化する。この現象は澱粉の糊化と呼ばれる。

澱粉の糊化特性はアミロースとアミロペクチンの比率によってことなる。米の場合は、アミロースの比率が低い米ほど炊飯したときに、飯の粘りがある。

HAS は食物繊維の含有量が高い機能性澱粉である。難消化性澱粉やレジスタントスターチという名称も用いられる。HAS は高濃度でなければ粘度が発現せず、糊化温度も非常に高い^{10,11)}。

試験品に用いたのは、HMT-HAS である。HAS に澱粉が糊化しない程度の水分下で行う加熱処理(湿熱処理)を施すことで、食物繊維含量を約 3 倍に高めた試験品(HMT-HAS)が開発された⁵⁾。

動物実験

HAS あるいは HAS 含有飼料を用いた動物実験も行われている。ラットに 10%~40% の HAS 含有飼料を摂取させたときの脂質代謝及び体脂肪蓄積を検討した結果、HAS 摂取群(10%、20% 及び 40% HAS 飼料群)では副睾丸脂肪組織重量及び体脂肪/体蛋白質比が有意な低値又は低値傾向を示した。血清脂質(TG、TC 及びリン脂質)濃度ならびに肝臓中中性脂肪含量は、飼料中 HAS の用量依

存性の低下が認められた¹²⁾。

マウスにおいて食餌中アマミロース含有量の違いについて検証した成績では、高アマミロース群（アマミロース含量 29%）の食後血糖応答は低アマミロース群（アマミロース含量 17%）に比べてどの時点でも低かったが、特に食後 15, 30, 45, 60 分後では有意に低く、高アマミロース群の AUC は低アマミロース群のそれより 16% 低かった¹³⁾。

血糖試験

ヒトにおける高アマミロース群（アマミロース含量 29%）の食後 60 分の血糖とインスリンの応答は低アマミロース群（アマミロース含量 17%）より有意に低く、高アマミロース群の食後 30 分と 60 分の血糖応答、食後 60 分のインスリン応答及び AUC は低アマミロース群より有意に低かった¹³⁾。

2 型糖尿病患者 10 例における大麦および高アマミロース米配合低 GI 米と対照米を比較した血糖試験では、高アマミロース米配合米において 60 分以降の血糖値とインスリンの上昇度が有意に抑制された¹⁴⁾。グルカゴンについては抑制効果がみられず、逆に軽度増加した。

スルホニル尿素薬単独あるいは併用の糖尿病患者（n = 21）における食事負荷試験（総エネルギー量 616 kcal；エネルギー比率：糖質 56%、脂質 27%、蛋白質 14%、食物繊維 3%）を施行、高アマミロース米（アマミロース含量 25%）とのコシヒカリ（アマミロース含量 17%）を比較した結果、高アマミロース米では食後血糖推移が低値で推移し、Cmax が有意に低かった（平均 7%、 $p < 0.001$ ）¹⁵⁾。

耐糖能正常な成人男性 7 名を対象に行ったアマミロース含有率の異なる食材摂取後の食後血糖変化を比較した試験では、グルコース 75 g と等量の糖質を含むご飯と餅の 3 種の食材間で、血糖、インスリン値に有意な差はなかったとの報告もある¹⁶⁾。

長期摂取試験

高アマミロース米（アマミロース含量 25%）とのコシヒカリ（アマミロース含量 17%）を比較した臨床試験報告がある。

未治療の糖尿病型あるいは境界型の耐糖能障害者（成人男子 52 名）に対し高アマミロース米（アマミロース含量 25%）とのコシヒカリ（アマミロース含量 17%）をそれぞれの米飯 1 パック（糖質 50 g を含む包装米飯）を 1 日 2 回、12 週間連日摂取した結果、空腹時血糖値には有意差はなかったが、高アマミロース米摂取者で HbA1c および 1,5-AG が有意に改善した¹⁷⁾。

官能評価

食料自給率の向上に期待される高アマミロース米だが、特にパンでの食味が悪く改善が必要である。各種アマミロース含有米やパンの硬さ及び官能検査から食味を評価が行われている。

アマミロース含量の異なる米パンは、テンシプレスによる物性値及び Semantic Differential (SD) 法の官能検査

からおいしさについて評価した結果を以下に示す¹⁸⁾。物性はアマミロース含量が高くなるほど有意に硬くなった。しかし食味でおいしくないといわれる高アマミロース米パンは、配合の工夫により「ややおいしくない」程度の評価であるが改善することが示されている。

アマミロース含有率の異なるもち米（アマミロース含量 0%）、低アマミロース米（アマミロース含量 11.9%）、中アマミロース米（アマミロース含量 16.2%）、高アマミロース米（アマミロース含量 27.9%）を官能評価により比較した試験では、高アマミロース米試料は最も口中でたたく、べたつかないと評価された¹⁹⁾。

大麦および高アマミロース米配合低 GI 米と対照米（通常米）を比較した官能試験の結果を以下に示す¹⁴⁾。食感では通常米で「良い」が 3 例、「普通」7 例であったが、低 GI 米では「あまり良くない」が 2 例、「普通」が 8 例であった。炊き具合は通常米では「丁度良い」が 6 例であったが、低 GI 米では 1 例、「軟らかい」が通常米 1 例、低 GI 米で 3 例であった。味は通常米では「まあまあ美味しい」が 5 例であったが、低 GI 米では 4 例、「あまりおいしくない」が 1 例であった。「少し違和感があるが血糖やインスリン値が良いなら使用する」が 7 例、3 例は「費用を考慮して使用」であった。

今後の研究により、更に「おいしく」「やわらかい」パンなどの食材が作成できると考えられる。

安全性

アミロジェル HB-450 は、天然のハイアマミロースコーンスターチを原料として、湿熱処理加工を施すことにより、食物繊維含量を高めた不溶性の食物繊維素材である。食物繊維は、体内の老廃物や有害物を体外へ排出する効果（ファイバートックス）を有する。その中でもレジスタントスターチは、加工性に優れ、パンや麺類をはじめ各種食品への応用が可能な食材として用いられてきた。

ヒトでの食経験として、アミロジェル HB-450 は 1997 年に販売開始され、これまで多数の食品への使用実績を有する。これまで健康被害の報告がないことが三和澱粉工業、品質保証部の確認書に記載されている。

研究限界

今回の試験は HMT-HAS 含有パン摂取後の食後血糖上昇が対照品（小麦澱粉含有パン）摂取後の血糖上昇よりも緩和されることを示した試験である。食後高血糖はアルデヒドスパークを誘発するが、今回の試験で中間体アルデヒド（glyoxal [GO], methyglyoxal [MGO], 3-deoxyglucosone [3DG] など）を測定しているわけではない。従ってアルデヒドスパークが緩和される可能性については推定評価に過ぎない。

単回の食後血糖上昇の緩和が、長期的な観点からみてどの程度糖化ストレスの軽減に貢献できるかについては今回の試験では明らかにしえなかった。

結論

HMT-HAS は食物繊維含有素材として、食後高血糖並びに血糖スパイクを緩和する作用があり、糖化ストレスを軽減することにより摂取者の健康維持に寄与すると期待できる。

謝辞

本研究は第15回糖化ストレス研究会(2018年5月18日、東京)にて発表した。

利益相反申告

本研究は三和澱粉工業株式会社より支援を受けた。

参考文献

- 1) Nagai R, Mori T, Yamamoto Y, et al. Significance of advanced glycation end products in aging-related disease. *Anti-Aging Med.* 2010; 7: 112-119.
- 2) Fukami K, Yamagishi S, Okuda S. Role of AGEs-RAGE system in cardiovascular disease. *Curr Pharm Des.* 2014; 20: 2395-2402.
- 3) Ichihashi M, Yagi M, Nomoto K, et al. Glycation stress and photo-aging in skin. *Anti-Aging Med.* 2011; 8: 23-29.
- 4) 米井嘉一, 八木雅之, 高部稚子. 【タンパク質核酸の分子修飾】糖化ストレス. *生体の科学.* 2018; 69(5): 2-3.
- 5) 蔵橋嘉樹, 吉野善一. 湿熱処理澱粉の新規製造法の開発とその応用に関する研究. *J Appl Glycosci.* 2000; 47: 125-132.
- 6) Ogura M, Takabe W, Nagano Y, et al. Physical effects of a 12-week protocol of daily gyudon (beef bowl) ingredients consumption: Implications for fast food research. *Glycative Stress Res.* 2016; 3: 99-109.
- 7) Ogura M, Kubo R, Kobayashi T, et al. Influence of beef bowl (gyudon) materials on postprandial blood glucose. *Glycative Stress Res.* 2016; 3: 210-221.
- 8) 大坪研一. 米粉および米粉利用食品の機能性について. *日本顎口腔機能学会雑誌.* 2014; 20: 97-105.
- 9) 大坪研一. 米デンプンの食文化と機能性. *Functional Food.* 2016; 10: 72-77.
- 10) 安東竜一. コーンスターチの特性と新加工・利用技術. 独立行政法人 農畜産業振興機構: でんぷん情報 [2008年5月] https://www.alic.go.jp/joho-d/joho08_200805-01.html
- 11) 井浦和也, 菅原正義. 湿熱処理ハイアミロースコーンスターチのボールミル処理による酵素分解抵抗性の変化. *日本栄養・食糧学会誌.* 2002; 56: 142. (抄録)
- 12) 笠岡誠一, 森田達也, 猪飼利圭, 他. ハイアミロースコーンスターチ摂取によるラットの血中脂質上昇ならびに体脂肪蓄積抑制作用. *日本栄養・食糧学会誌.* 1998; 51: 345-353.
- 13) Yamasaki M, Watanabe M, Yoneyama T, et al. Influence of rice with different amylose contents on postprandial glycemic response. *Journal of Rural Medicine.* 2007; 2: 51-58.
- 14) 前田亜耶, 名引順子, 芝地美樹, 他. 大麦および高アミロース米配合低GI米の血糖上昇軽減効果とその意義. *日本臨床栄養学会雑誌.* 2012; 34: 2-7.
- 15) 海野良一, 林 靖久, 高木龍一郎, 他. 薬物療法中の2型糖尿病患者における高アミロース米品種「雪の穂」米飯の食後血糖およびインスリン分泌に及ぼす影響. *日本病態栄養学会誌.* 2016; 19: 111-120.
- 16) 斉藤篤司. アミロース含有率が糖質食後の血糖応答に及ぼす影響. *健康科学.* 2003; 25: 49-53.
- 17) 海野良一, 林 靖久, 高木龍一郎, 他. 耐糖能障害者における高アミロース米品種「雪の穂」米飯の長期摂取による血糖プロファイルの改善効果. *日本病態栄養学会誌.* 2015; 18: 375-385.
- 18) 斉藤弘樹, 白石弘美, 梅國智子, 他. 高アミロース米パンの食味改善と評価およびGlycemic Index (GI) と Glucose releasing-Rate (GR) の相関関係. *人間総合科学.* 2014; 26: 133-140.
- 19) 河村彩乃, 田丸省吾, 伊藤裕子, 他. アミロース含有率の異なる米粥のガラスリング法を用いた力学的特性評価の有効性. *栄養学雑誌.* 2014; 72: 67-75.