

博士学位論文

米飯を主食とする日本人の食後高血糖を抑制する  
食事摂取方法に関する研究

Study on the eating patterns in Japanese consuming rice as a staple food  
for suppressing postprandial hyperglycemia

2017 年 2 月

静岡県立大学大学院  
薬食生命科学総合学府  
食品栄養科学専攻  
博士後期課程  
フードマネジメント研究室

若杉 悠佑



## 目次

略語一覧.....	1
序論 .....	2
第一章 Glycemic Index に基づく食事構成が食後血糖値におよぼす影響	
序 .....	6
第一節 日常的に摂取し GI 低減効果のある食品および調理方法の探索	
1. 芋類・雑豆類の GI および米飯同時摂取による GI 低減作用の検討	
方法 .....	8
1) 被験者	
2) 実験方法	
3) GI 値算出方法	
4) 検査食	
5) 統計解析	
結果.....	11
考察.....	12
2. 芋類の調理方法の違いによる GI への影響	
方法.....	14
1) 被験者	
2) 実験方法	
3) GI 値算出方法	
4) 検査食	
5) 統計解析	
結果.....	15
考察.....	16
第二節 主食の置換、油脂・酢の添加による血糖応答の変化	
序 .....	19
方法.....	20
1) 被験者	
2) 実験方法	
3) GI 値算出方法	
4) 検査食	

5) 統計解析	
結果.....	22
考察.....	23
要約.....	25
 第二章 高 GI 食/低 GI 食摂取による糖質・脂質代謝指標の変動	
序.....	27
方法.....	28
1) 被験者	
2) 実験方法	
3) GI 値算出方法	
4) 検査食	
5) 統計解析	
結果.....	31
考察.....	32
要約.....	35
 第三章 低 GI 食の継続摂取と生活習慣病関連因子の関係	
序.....	37
方法.....	38
1) 被験者	
2) 実験方法	
3) GI 値算出方法	
4) 検査食	
5) 統計解析	
結果.....	41
考察.....	42
要約.....	44
 総括.....	45
引用文献.....	46
謝辞.....	53
付録.....	54

## 略語一覧表

1,5-AG	: 1,5-anhydroglucitol (1,5-アンヒドログルシトール)
ALT	: alanine transaminase (アラニンアミノトランスフェラーゼ)
AST	: aspartate aminotransferase (アスパラギン酸アミノトランスフェラーゼ)
BMI	: body mass index (体格指数)
CRP	: C-reactive protein (C 反応性蛋白)
CVD	: cardio vascular disease (心血管疾患)
FBG	: fasting blood glucose (空腹時血糖)
GI	: glycemic index (グライセミックインデックス)
GIP	: glucose-dependent insulintropic polypeptide (グルコース依存性インスリン分泌刺激ポリペプチド)
GL	: glycemic load (グライセミックロード)
GLP-1	: glucagon-like peptide-1 (グルカゴン様ペプチド-1)
$\gamma$ -GTP	: $\gamma$ -glutamyl transpeptidase ( $\gamma$ -グルタミルトランスペプチターゼ)
HbA1c	: hemoglobin A1c (ヘモグロビン A1c)
HDL-chol	: high-density lipoprotein cholesterol (高比重リポタンパクコレステロール)
IAUC	: incremental area under the blood glucose response curve (血糖上昇曲線下面積)
LDL-chol	: low-density lipoprotein cholesterol (低比重リポタンパクコレステロール)
IGT	: impaired glucose tolerance (耐糖能異常)
IRI	: immunoreactive insulin (免疫反応性インスリン)
RS	: resistant starch (レジスタントスターチ、難消化性デンプン)
nRS	: non resistant starch (ノンレジスタントスターチ)
TC	: total cholesterol (総コレステロール)
TG	: triglyceride (トリグリセライド、中性脂肪)
TS	: total starch (総デンプン)

## 序 論

近年、生活習慣病罹患者およびそのリスク者の増加により、医療費の増大が大きな問題となり、疾病予防および健康の維持・増進活動は重要な課題の一つとなっている。平成 20 年度から特定健康診査・特定保健指導が始まり、生活習慣病予防のための取り組みが数多く実施されている。そのため、人々の食に対する関心、健康志向は高まっている。また、厚生労働省は日本人の長寿を支える「健康な食事」について、国民や社会の理解を深め、取り組みやすい環境を整備するため、平成 25 年から「健康な食事」のあり方に関する検討が進められてきた[1]。

近年の疫学研究は、HbA1c よりも食後高血糖が耐糖能異常（IGT）または 2 型糖尿病の患者の CVD や全死亡率の増加に関係していることを報告している[2~4]。さらに、the Study to Prevent Non-Insulin-Dependent Diabetes Mellitus（STOP - NIDDM）試験および the Meta-analysis of Risk Improvement under Acarbose 7（MeRIA7）試験では、 $\alpha$ -グルコシダーゼ阻害薬アカルボースによる食後高血糖の抑制が 2 型糖尿病前段階の中程度の耐糖能異常者および 2 型糖尿病患者の CVD の発症を抑制することが報告されている[5]。また、食後の血糖変動が酸化ストレスを引き起こすこと [6,7]、食後の血糖上昇に伴うインスリンの過剰分泌が体脂肪の増加につながることも明らかになっている。したがって、食後高血糖の抑制は、健常者、耐糖能異常者、肥満者および 2 型糖尿病患者における代謝性疾患の発症や合併症発症の減少につながると考えられる。

また、日本における多目的コホート研究（JPHC Study）では、米飯の摂り過ぎが女性における糖尿病発症リスクを上昇させることを報告している[9]。日本人の主食である白米は食後高血糖を引き起こしやすいとされ [10]、食後の高血糖を抑制するためには、炭水化物の「量」を減らすこととともに、炭水化物の「質」を改善することが重要であると考えられる。例えば、全粒の穀類は生成された穀類に比べて食後の血糖上昇が緩やかである[11]。これは、主に食物繊維含有量およびレジスタントスターチ含有量が多いことによる[12]。また、アミロース含量率が多い食品はアミロペクチン含量率が多い食品に比べて血糖上昇が緩やかである[13, 14]。さらに、炭水化物とたんばく質または酢の摂取によって食後の血糖上昇が抑制されることなども知られている [15~17]。このように、複数の成分と調理方法の違いが炭水化物摂取後の血糖上昇に影響を及ぼす。それゆえ、日本人の食事において、食後高血糖を抑制する「食べ方」を明らかにすることは、食後高血糖に起因する疾病の予防および健康の維持増進に極めて有効かつ重要であると考えられる。

摂取する炭水化物の質と糖質代謝、生活習慣病との関連については、食品の食後血

糖上昇の度合いに基づいた評価指標であるグライセミックインデックス（以下GI）、あるいはグライセミックロード（以下GL）との関係性を評価した研究が、近年盛んに行われてきた。GIは、Jenkinsらによって1981年に提唱された食品の食後血糖上昇能を示す指標である[18]。1991年には測定手法が国際的に統一され[19]、1995年には、GI国際表がシドニー大学グループによって作成され[20]、2002年、2008年にはその改訂版が作成されている[21, 22]。さらに、1998年にはFAO/WHOがGIを炭水化物の重要な代謝指標であるとして、低GI食品の摂取を推奨している[23]。ヨーロッパ、カナダ、オーストラリアなどの糖尿病患者に対する栄養教育では、食品のGIに基づいた食品や食品の組み合わせについての指導が取り入れられている[24~26]。GIが低い食事は食後血糖上昇が緩慢であり、インスリン過剰分泌を抑制し、メタボリックシンドロームの予防につながると考えられている。欧米における37報の前向きコホート研究によるメタアナリシスによると、高GIは、独立した因子として2型糖尿病、CVD、胆嚢疾患等の生活習慣病のリスクとの関連がみられた[27]。また、欧米における45報のランダム化比較試験のメタアナリシスでは、低GI食を一定期間以上摂取することにより、糖質、食物繊維の摂取量と独立して、空腹時血糖と糖タンパク質を減少させるとしている[28]。

一方、日本人においても、GIがメタボリックシンドロームに関与している可能性が指摘されている。日本人女性を対象とした観察研究では、食事のGIが高い者は、低い者に比べてBMI、中性脂肪、空腹時血糖、およびHbA1cが高く、食事のGLが高くなるほど、中性脂肪、空腹時血糖は高くなり、HDLコレステロールは低くなると報告されている[29]。しかし、2009年5月に発表された「日本人の食事摂取基準（2010年版）」策定検討会報告書においては、GIに関する記述が追加されたものの、指標を示すほどの十分な科学的根拠が得られていないとされた[30]。わが国におけるGI活用の有効性に関する研究はまだ少なく、「日本人の食事」を対象としたさらなる検討が必要である。日本におけるGI研究はこれまで、食品を単体、または白米と副食1品の組み合わせによる検討が中心であり[31]、主食・主菜・副菜の揃った「複合食」における検討は少ない。また、食事調査等から算出される食事のGIは、食事を構成する各食品のGIとその炭水化物量をもとに計算によって得られる推定値であり、実際の食後血糖を直接的に表すものではない。日本人は米飯を主食とする複合食を基本としており、また三大栄養素による摂取エネルギーの総量とエネルギー比率（PFC比率）を考慮する点からも、複合食を基本にGIを議論する必要がある。

本研究では、食後高血糖、耐糖能異常の予防を目的とした食事摂取方法として、GIに基づく食品選択や組み合わせに焦点を当てた複合食の低GI食の開発と、ヒトでの複合食摂取後の糖質代謝指標に着目した食後高血糖を防ぐ「食べ方」を検討した。第一

章では、GIに基づく食品構成が食後血糖値におよぼす影響を明らかにするため、日常的な食品におけるGI低減効果のある食品および調理方法の探索と、GIへの影響が報告されている主食の置換、油脂・酢の添加による血糖応答の変化の検討を行った。第二章では、第一章の結果をもとに高GI食と低GI食のモデルメニューを作成し、食後の糖質及び脂質代謝指標の変動を検討した。さらに第三章では、作成した血糖上昇抑制食の継続摂取と生活習慣病関連因子の関係を5週間の介入試験により検討した。

## 第一章

### Glycemic Index に基づく食事構成が食後血糖値におよぼす影響

#### 第一節 日常的に摂取し GI 低減効果のある食品および調理方法の探索

1. 芋類・雑豆類の GI と米飯同時摂取による GI 低減作用の検討
2. 芋類の調理方法の違いによる GI への影響

#### 第二節 主食の置換、油脂・酢の添加による血糖応答の変化

## 序

Glycemic Index (GI) は、欧米諸国、オーストラリアを中心に広く研究され、各国で日常的に摂取されている生鮮食品から加工食品に至るまで多くの食品の GI が示されている[20～22]。しかし、日本人の食生活に着目し、日本で生産消費され、日常的に摂取されている食品の GI の報告は、Sugiyama ら[32]による米飯およびその加工品、柳井ら[33]による果物の GI などがあるものの、その数は多くない。そのため、日本人を対象とした疫学研究[29]においても、食事の GI 算出には欧米諸国の食品で測定された GI 値が代替値として用いられており、日本特有の食習慣に基づく食品の GI が反映できていない。日本人を対象に日本人が日常的に摂取している食品の GI を明らかにすることは、日本における GI の概念の普及、さらには GI 研究の発展に寄与すると考えられる。

日本人の食事は、血糖上昇に最も関連する栄養素である炭水化物からのエネルギー摂取割合が諸外国に比べて高い。主たる炭水化物源を主食と位置づける食文化はアジア圏に限られ、特に日本では食事の GI に占める主食の寄与率が高く、また主食の種類（米類、パン類、麺類、朝食シリアル）が最も大きく影響している[29]。食品の GI は高・中・低に区分され、値は GI 算出の基準となる食品（基準食）によって異なる。グルコース基準では GI 70 以上を高 GI、55 以下を低 GI とし[21]、白米基準では GI 85 以上を高 GI、70 以下を低 GI としている。白米は高 GI 食品に分類され、白米を日常的に摂取している日本人の食事の GI は欧米に比べて高い[29]。さらに、減量プログラムに参加した日本人女性の心疾患リスクに関する調査では、食事の GI が低い群で米類の摂取量、炭水化物摂取量が低く、脂質の摂取量が高いことが報告されている[34]。すなわち、米類の摂取量を控えれば食事の GI の低減が可能であるが、反対に脂質の過剰摂取を招き、循環器疾患のリスクを高めることが考えられる。このような日本人の食生活に当てはめて食事の GI を考えると、主食にできる限り GI の低い食品を用いることが有効であると考えられる。たとえば、白米を GI の低い玄米等に変えることで、食事の形態を変えずに食事の GI を下げることができる。

一方、Sugiyama らは、ごはん食と GI に関する研究において、白米に副食 1 品を組み合わせた場合の GI を検討し、米飯に酢、大豆、牛乳・乳製品を組み合わせることで GI が低くなることを報告している[31]。炭水化物、特に白米との同時摂取で GI を低減する食品、料理を取り入れることも、食後血糖の上昇抑制に有効であると考えられる。芋類および雑豆類は、血糖値の上昇に関与する炭水化物を豊富に含むが、同時に食物繊維や粘性成分を含むことから GI の低減効果が期待される。しかし、日本人が日常的に摂取している芋類および雑豆類の GI に関する研究はほとんどみられず、

米飯との同時摂取による影響を検討した報告も少ない。そこで、本研究では芋類4種、雑豆類3種のGIを明らかにするとともに、日本人の主食である米飯と同時にこれらを摂取した場合のGI低減効果を検討した。さらに、海外における研究では、調理方法により食品のGIが変化することが報告されている[35, 36]。そこで、芋の種類および調理方法によるGIの変化を明らかにし、さらにGIに影響を及ぼす因子として考えられているレジスタントスターチについて検討した。

## 第一節 日常的に摂取し GI 低減効果のある食品および調理方法の探索

### 1. 芋類・雑豆類の GI、米飯同時摂取による GI 低減作用の検討

#### 方 法

##### 1) 被験者

被験者は静岡県立大学に在籍する年齢 18 歳以上、BMI  $30 \text{ kg/m}^2$  以下、過去 1 年以内の検査において耐糖能異常の指摘がなく、降圧剤など血糖値に影響を及ぼす薬剤の服用がない一般健常人の学生とした。各検査食につき 8~12 名で測定を行った。芋類の GI 測定は、9 名（男性 4 名、女性 5 名）、年齢  $21.9 \pm 1.7$  歳、BMI  $19.8 \pm 1.7 \text{ kg/m}^2$ 、雑豆類の GI 測定は、12 名（男性 2 名、女性 10 名）、年齢  $20.7 \pm 1.6$  歳、BMI  $20.1 \pm 1.8 \text{ kg/m}^2$  を被験者とした。

##### 2) 実験方法

被験者に関する条件ならびに GI の測定方法は、日本 GI 研究会の「GI 研究のための統一プロトコール」に準じて行った[37]。実施にあたっては、静岡県立大学研究倫理審査委員会において承認を受けた (21-32)。

検査時の条件として、繰り返し実施する場合は、前回の検査より 1 日以上経過し他時点で実施し、女性は生理期間中ではないことを確認した。また、検査前日の過激な運動、夜更かし、暴飲暴食、多量の飲酒を禁止した。被験者は 10 時間以上の絶食の後、検査日の午前 7 時から 9 時の空腹時に基準食もしくは検査食を摂取した。飲食時間は 10~15 分間とし、それ以降は検査終了まで絶食絶飲とした。血糖値は、被験者自身が自己血糖測定機（グルテスト PRO RGT-1661、株式会社三和化学研究所）を用いて空腹時、基準食または検査食摂取開始後 15、30、45、60、90、120 分後の計 7 回の測定を実施した。測定中の喫煙は避け、身体活動は、静かな立ち仕事、座位の仕事程度とした。

##### 3) GI 算出方法

GI の算定は Wolever らの方法[19]にもとづいて、杉山ら[31]が米飯を基準食にして検証した方法にもとづき行った。個人内変動は変動係数 (C.V.) 25% 以上、個人間誤差は 2 SD 以上を棄却条件とした。被験者は基準食を 2 回摂取して、摂取後の血糖上昇曲線下面積 (IAUC) の平均値を算出した。ただし、2 回の IAUC の差が 25% を超える場合は、3 回摂取させて IAUC の差が 25% 以内になった 2 つの IAUC の平均値を、その個人の GI 値算出用の基準値とした。

GI は、各被験者の検査食摂取から得られた結果より血糖曲線を描き、データの有効性を確認後に IAUC を求め、基準食の米飯に対する GI を算出した。さらに、各検査食の平均値と標準偏差 (SD) を求め、2SD より外れた GI 値は除外し、再度平均値を求めて各検査食の GI 値とした。米飯を基準食とした GI は、係数 0.8 でグルコース基準の GI に変換した[31]。

#### 4) 基準食および検査食

基準食には、栄養成分表示のある包装米飯 (サトウのごはん新潟産コシヒカリ 100%、佐藤食品工業株式会社) を用いた。検査食には芋類としてさつまいも (*Ipomoea batata*)、じゃがいも (*Solanum tuberosum*)、里芋 (*Colocasia esculenta*)、長芋 (*Dioscorea batatas*) の 4 種類、雑豆類として小豆 (*Vigna angularis*)、手亡 (*Phaseolus vulgaris*)、金時 (*Phaseolus vulgaris*) の 3 種類を用いた。検査食は芋類または雑豆類の単独摂取に加えて、米飯と芋類または雑豆類の同時摂取について検討を行った。検査食の糖質量は、芋類の単品は 50 g、雑豆類の単品は 25 g になるよう調製した。米飯と芋類または雑豆類の同時摂取では、米飯の糖質量 40 g、各芋類または雑豆類の糖質量を 10 g、総糖質量 50.0 g とした。基準食は、検査食と糖質量が同量となるよう 25 g または 50 g に調製した。基準食および検査食の使用量、栄養成分を表 1-1、1-2 に示した。

検査食に用いた芋類は、さつまいも (紅高系、浜松産)、じゃがいも (男爵、三方原産)、里芋 (鹿児島県産)、長芋 (青森県産) の 4 品種とした。じゃがいもはオーブン加熱およびマッシュ (裏ごし) の 2 種類、長芋は生食 2 種類 (生、とろろ) およびオーブン加熱の合計 3 種類とし、合計 7 種類について検討した。加熱調理には同一のスチームオーブン (ヘルシオ AX-HC3、シャープ株式会社) を使用し、加熱時間は予備実験の結果をもとに、食品の中心温度上昇が平衡に達した点を終点とした。芋類は検査当日に洗浄後皮をむき、オーブンをういて加熱した。さつまいも、じゃがいもは 3 cm 角に切り、それぞれ 200℃で 25 分、30 分加熱した。じゃがいも (マッシュ) は 20 分間蒸した後に裏ごした。里芋は 200℃で 25 分加熱した。長芋 (生) は 3 cm 長の拍子木切り、長芋 (加熱) は (生) と同様の試料を 200℃で 30 分加熱した。長芋 (とろろ) はすりおろした。

雑豆類は、小豆 (乾燥、北海道産)、手亡 (白インゲン、乾燥、北海道産)、金時 (赤インゲン、乾燥、北海道産) の 3 種類とした。加熱調理 (ゆで加熱) は、家庭で用いられる一般的な調理方法を用いて予備実験を行い、五訂増補・日本食品標準成分表に記載されているあずき、いんげんまめの重量変化率 230%となる点を終点とした。加熱調理は測定前日に行い、ゆで上がりの重量を測定した。約 12 時間冷蔵庫で保存した後、測定当日に同一の電子レンジを用いて再加熱し、提供した。

#### 5) 統計解析

結果は平均値±SD で示した。検査食の血糖値の基準食に対する有意差の検定は対応のある t 検定を用いて行い、統計的有意水準は 5%とした。全ての解析には、統計パッケージ SPSS 14.0 for Windows (SPSS Japan Inc.) を用いた。

## 結 果

検査食摂取後の血糖値の変化を表 2-1、2-2、IAUC および GI を表 3-1、3-2 に示した。米飯と生の長芋を除く芋類は、食後 45 分に食後血糖値が最大となった。さつま芋の食後血糖値の最大値は、米飯に比べて有意に高値となった。長芋（生）の GI は  $10 \pm 6$  (mean  $\pm$  SD)、長芋（とろろ）は、 $9 \pm 6$  と、他と比較して顕著に低値を示した。一方、最も高い値を示したものはじゃが芋（マッシュ）( $140 \pm 46$ ) であった。また、生食である長芋（生）および長芋（とろろ）の GI の平均がいずれも 10 前後と低値であるのに対し、長芋（加熱）の GI は  $100 \pm 33$  と基準食（白米）を上回る高い値を示した。

雑豆類の小豆、手亡は、摂取後 15、30、45、60 分において基準食に比べて血糖値が有意に低かった。金時は摂取後 15、30、45 分において基準食に比べて有意に低かった。雑豆類の GI は、小豆  $64 \pm 34$ 、手亡  $44 \pm 21$ 、金時  $52 \pm 25$  であり、いずれの豆も基準食である米飯の GI より低値であった。

芋類と米飯の同時摂取による GI は、長芋（とろろ）が、GI :  $85 \pm 19$  と最も低い値を示した。一方、最も高い値を示したのはさつま芋の  $117 \pm 38$  であった。

雑豆類と米飯の同時摂取時の血糖値は、基準食と比較していずれの時間においても有意な差はみられなかったが、基準食の血糖値のピークが摂取後 30 分であるのに対し、雑豆類と米飯の同時摂取では、血糖値のピークは摂取後 45 分とピークの遅延がみられた。雑豆類と米飯の同時摂取による GI において、最も低い値を示したのは金時の  $81 \pm 16$  であり、基準食に比べ低かった。また、小豆の GI は  $94 \pm 22$ 、手亡の GI は  $96 \pm 32$  であり、いずれも基準食との間に有意な差はなかった。

## 考 察

本研究では、日本で一般的に消費される芋類および雑豆類の GI を明らかにした。さつま芋はじゃが芋、長芋（加熱）の GI は、グルコース基準ではそれぞれ 80、78、80 であり、GI の国際表[22]で示された値（baked sweet potato, 94 ; baked Irish potato, 69-98 ; roasted yam, 73-82 ）と類似していた。このように、GI の国際表に示される GI には幅があり、特にじゃが芋の GI については幅が広い。これは、品種の違いや調理方法による違いが影響していると考えられる。じゃが芋（マッシュ）の GI は、オーブン加熱したじゃが芋に比べて高値となった。Behall ら[38]は、生のじゃが芋に比べて加熱されたじゃが芋の消化性が高いと報告している。生のじゃが芋は多くのレジスタントスターチを含み、消化酵素の作用が阻害される。また、じゃが芋のデンプン顆粒は、加熱により糊化され消化性が向上することが知られている。十分な煮熟後、細胞単位に分離されたじゃが芋（マッシュ）は、じゃが芋（オーブン）と比較して糊化度が高く、消化酵素が作用しやすくなり、それに伴い急激な血糖上昇が起こったと考えられる。Soh ら[35]は、じゃが芋の異なる調理方法（茹で、焼き、電子レンジ加熱、マッシュ）における GI の違いについて検討し、いずれの調理方法においても GI に差はなかったと報告している。一方、Wolever ら[39]は、焼き、茹で、缶詰のじゃが芋の GI に有意差はみられないが、マッシュしたものについては血糖反応が 15～20% 有意に増加すると報告している。本研究の結果は、食品の調理方法が食後の血糖上昇に影響することを示唆する。長芋の GI は、生では著しく低値であったが、加熱した長芋では米飯と同程度の高値であった。また、米飯との同時摂取でも米飯のみの摂取に比べて低値となった。この結果は、山芋を米飯と摂取することで食後の血糖上昇を抑制した先行研究[40]の結果と一致している。一方、長芋は多くの粘性糖タンパク質：ムチンを含む。ラットにメカブの粘性物質とグルコースを同時に摂取させて血糖上昇の検討を行った研究[41]では、添加した粘性物質により血糖上昇抑制が示されている。この要因として、消化管内容物の粘度上昇がグルコースの吸収を抑制したものと考えられ、さらに内容物の粘度上昇が腸内発酵速度を抑制することが示唆された。長芋に含まれるムチンは、メカブの粘性物質であるアルギン酸（水溶性食物繊維）とは構造的に異なるが、粘性を有する点において消化管内容物の粘度に関与している可能性が高いと考えられる。

本研究では、生の長芋による米飯の GI 低減効果を明らかにした。これは、日本人が食文化として継承している、生の長芋や山芋を米飯とともに摂取する食べ方が、食後の高血糖抑制効果に有効であることを示す。

小豆、手亡、金時の GI は、グルコース基準ではそれぞれ 51、35、42 であり、GI

の国際表[21]のインゲン豆（Kidney beans, boiled : 25-51）と同様に低 GI 食品であることが確認された。雑豆類のデンプンは米飯に比べ、アミロースを多く含む。アミロペクチンは分枝構造をもつため、デンプン分解酵素の作用を受ける表面積が大きいため、アミロペクチンはアミロースに比べて消化・吸収されやすい。このことから、高アミロース食品は高アミロペクチン食品に比べ、GI が低いとされる[42]。アミロース：アミロペクチンの割合は、うるち米は 19：81、小豆 22：78、大手芒豆 28：72 であり[43]、雑豆類は米飯よりアミロース比率が高い。そのため、豆類は米飯より消化・吸収されにくく、血糖上昇が穏やかであったと考えられる。さらに、手亡および同じインゲン種である金時は、小豆よりアミロース含量が少なく、GI が低値となったと考えられる。

雑豆類は食物繊維を豊富に含み、水溶性食物繊維の食物拡散阻害作用などにより、多糖類の消化・吸収の遅延を起こすことが考えられる。食物繊維による血糖上昇抑制効果は、不溶性食物繊維に比べて水溶性食物繊維による影響が大きいとされている。本研究で用いた雑豆類は不溶性食物繊維が多く、水溶性食物繊維による血糖上昇抑制効果の影響は小さいと考えられる。また、3 種の豆の総食物繊維量に大きな違いはみられず、雑豆の種類による GI の違いには食物繊維量以外の要因が関与していると考えられる。本研究で検査食に用いた雑豆類は、ゆで調理後に冷蔵保存をした。そのため、ゆで調理およびその後の冷蔵保存の過程でレジスタントスターチ（RS）が生成していると推察される。RS は食物繊維と類似の生理作用をもつことが明らかになっており[44]、食物繊維と同様 GI に作用したと考えられる。小豆、赤インゲン豆に含まれるポリフェノールは、 $\alpha$ -アミラーゼ活性および $\alpha$ -グルコシダーゼ活性を抑制する働きをもち[45]、血糖上昇抑制効果があるとされる。しかし、ポリフェノールは大部分がゆで調理の過程で水中に流出するため、有効な血糖上昇抑制効果はなかったと考えられる。また、インゲン豆にはアミラーゼ阻害物質が特異的に存在するが、加熱により失活すると報告されており、本研究ではゆで調理により GI への影響は小さいと推察される。米飯と雑豆類の同時摂取では、基準食（糖質量 50 g）の米飯の一部を豆に置き換えた（糖質量：米飯 40 g、豆 10 g）。米飯を豆に置き換えたことで、高 GI 食品である米飯からの糖質の摂取量が減少し、GI が低下した可能性もある。そこで、基準食と同量の米飯に、小豆を加えて食後血糖測定を行った。その結果、加えた豆の分だけ糖質量が増加したにもかかわらず、基準食に比べ IAUC が低値となった。したがって、米飯と雑豆類の同時摂取による血糖上昇の抑制は、米飯からの糖質摂取量の減少ではなく、雑豆類の追加摂取による血糖上昇抑制効果であると考えられる。

## 2 芋類の調理方法の違いによる GI への影響

### 方 法

#### 1) 被験者

被験者は静岡県立大学に在籍する年齢 18 歳以上、BMI  $30 \text{ kg/m}^2$  以下、過去 1 年以内の検査において耐糖能異常の指摘がなく、降圧剤など血糖値に影響を及ぼす薬剤の服用がない一般健常人の学生とした。条件を満たした女性 12 名（年齢  $20.0 \pm 1.4$  歳、BMI  $20.7 \pm 1.9 \text{ kg/m}^2$ ）を被験者とした。

#### 2) 実験方法

1) 芋類・雑豆類の GI 測定と同様の方法で行った。

#### 3) 検査食

基準食には、栄養成分表示のある包装米飯（サトウのごはん新潟産コシヒカリ 100%、佐藤食品工業株式会社）を用いた。検査食に用いた芋は、じゃが芋（男爵、三方原産）、さつま芋（ベニアズマ、千葉県産）、里芋（宮崎県産）の 3 品種とした。それぞれオーブン加熱、電子レンジ加熱、ゆで加熱、揚げ加熱、冷蔵保存の合計 15 種類について検討した。五訂増補・日本標準食品成分表を用いて栄養価計算を行い、各検査食の総糖質を  $50.0 \text{ g}$  に調製した。基準食および検査食の使用量、栄養成分を表 4 に示した。調理時間は予備実験の結果をもとに、食品の中心温度が平衡に達した点を終点とした。冷蔵保存は、電子レンジ加熱後、42 時間の冷蔵保存し、提供前に電子レンジで再加熱した。

#### 4) RS 測定

各検査食の RS は、レジスタントスターチ測定キット（メガザイム社製）を用い、McCleary らの方法[46]に準じて行った。ノンレジスタントスターチ（nRS）は、総デンプン（TS）と RS との差で求めた。

#### 5) 統計処理

解析は、芋の種類別に行った。血糖上昇曲線下面積（IAUC）および空腹時血糖を 0 としたときの摂取後 15、30、45、60、90、120 分の血糖値を比較した。全ての解析には、統計パッケージ SPSS 14.0 for Windows（SPSS Japan Inc.）を使用した。結果は平均値  $\pm$  SD で示し、一元配置分散分析および Tukey による多重比較を用いて、各検査

食摂取後の IAUC および血糖値を比較検討した。統計的有意水準は 5% とした。

## 結 果

検査食摂取後の血糖変動を図 1 に示した。芋類の種類による比較では、じゃが芋は血糖値がピークに達する時間は摂取後 30 分で、基準食および他の芋より速かった。里芋摂取後の血糖値は、ゆで加熱を除き、基準食に比べて低い傾向がみられた。ゆで加熱した検査食の血糖値は、他の調理方法と比較して高い傾向がみられた。特に里芋では、ゆで加熱は摂取後 30 分、45 分、60 分でオーブン加熱、揚げ加熱に対して有意に高かった ( $p<0.05$ )。電子レンジ加熱に対しても摂取後 30 分、45 分で有意に高い値を示した ( $p<0.05$ )。

検査食摂取後の血糖上昇曲線下面積 (IAUC) は、芋類の種類による比較では、じゃが芋、さつま芋、里芋の順に IAUC が大きい傾向がみられた。じゃが芋では、いずれの調理方法別においても基準食に対して高い値を示した。調理方法による比較では、ゆで加熱で大きく、オーブン加熱、揚げ加熱で小さい傾向がみられた。また、冷蔵保存した検査食は電子レンジ加熱したものより、IAUC が小さくなる傾向がみられた。里芋では、オーブン加熱、揚げ加熱、電子レンジ加熱の IAUC はゆで加熱に対して有意に低かった ( $p<0.05$ )。

検査食の GI を表 5 に示した。芋類の種類による比較では、じゃが芋、さつま芋、里芋の順に GI が高い傾向がみられた。調理方法による比較では、ゆで加熱、電子レンジ加熱で高く、オーブン加熱、揚げ加熱、冷蔵保存で低い傾向がみられた。さつま芋、里芋では、ゆで加熱の GI が最も高かった。冷蔵保存した検査食は電子レンジ加熱したものより、GI が低くなる傾向があった。

冷蔵保存の有無によるレジスタントスターチ量と IAUC の比較を図 2 に示す。レジスタントスターチの量は冷蔵によって増加し、IAUC は減少した (図 2)。

## 考察

GI は、3 品種の芋類の中で里芋が低くなる傾向がみられ、オーブン加熱、揚げ加熱、冷蔵保存において基準食に比べ低値を示した。これは、里芋の特徴的な性質である粘性が、胃および腸管内の内容物に影響を与え、消化吸収に関与している可能性があると考えられる。里芋の粘性物質は多糖類のガラクトンである。ラットを対象としてメカブの粘性物質とグルコースを同時に摂取させ血糖上昇の検討を行った研究[41]では、添加した粘性物質により血糖上昇抑制が示されたと報告している。この要因として、消化管内容物の粘度上昇がグルコースの吸収を抑制したものと考えられ、さらに内容物の粘度上昇が腸内発酵速度を抑制することが示唆された。里芋に含まれるガラクトンとメカブの粘性物質であるアルギン酸は、ともに粘性を有するため消化管内容物の粘度に関して類似した作用を示した可能性が高いと考えられる。

里芋において、ゆで加熱の血糖上昇曲線下面積（IAUC）は、オーブン加熱、揚げ加熱、電子レンジ加熱と比較して有意に高い値を示した（ $p < 0.05$ ）。ゆで加熱では、過熱すると細胞膜が破壊される。特に里芋のゆで加熱において IAUC が有意に高くなったのは、血糖上昇抑制効果があるとして示されている粘性物質が煮汁中に流出したためであると考えられる。

検査食に含まれる食物繊維については、じゃが芋が 4.0 g、さつま芋が 3.9 g、里芋が 10.6 g であった。水溶性および不溶性食物繊維の割合は五訂増補食品成分表より、じゃが芋でそれぞれ 46.2%、53.8%、さつま芋で 21.7%、78.3%、里芋で 34.8%、65.2% である。食物繊維は血糖上昇抑制作用があるとしてよく知られているが、先行研究[47]において、GI は低下するものの食物繊維の量に依存していなかったと報告している。また、水溶性食物繊維および不溶性食物繊維の GI の比較を行った研究[48]では、水溶性食物繊維が多い食事において GI の低下を示したと報告している。粘度の異なる水溶性食物繊維を用いて血糖上昇抑制効果を検討した試験[49]では、粘度が大きくなるにつれてグルコース胃内滞留時間は延長され、血糖上昇抑制効果が強くなることが認められている。しかし、じゃが芋は水溶性食物繊維の割合が 3 品種の芋の中で最も多いにも関わらず、今回の測定で GI は 105~121 と他の芋に比べて高値を示した。さつま芋の加熱調理による食物繊維の性状変化を検討した研究[50]では、電子レンジ加熱したさつま芋の水溶性食物繊維は蒸し加熱したさつま芋に比べて粘性が上昇した可能性があるとして報告している。消化管内容物の粘性の上昇は、グルコースの吸収を遅延させ血糖値の上昇抑制につながると示唆しているが、今回の測定では、電子レンジ加熱した検査食の GI は高い傾向があった。これらのことから、食物繊維の量および質の違いが GI に影響を与える直接の要因であるとは言い切れない。

ゆでる、煮る、蒸す、焼く、炒める、揚げるなどの調理操作の結果、食品中のデンプンの糊化やたんぱく質の熱変性が起こる。長時間高温での加熱では糖生成量の低下が認められ[51]、本研究でも、オーブン加熱した検査食の GI は低い傾向がみられた。芋類の GI における調理方法の影響を検討した研究[52]では、オーブン加熱した芋においてデンプンの消化性が低下し、GI が低い値を示したと報告している。揚げ加熱した検査食においても GI が低値を示す傾向がみられた。脂質は、消化管ホルモンや迷走神経を介して胃の平滑筋運動に影響し、胃排泄速度を低下させる作用をもっている[53]。また、ガストリンの分泌抑制やインスリンの分泌刺激が、血糖上昇を抑制したと考えられる。さらに、アミロースは脂質と複合体を形成することで、アミロース単体に比べ、ブタ  $\alpha$ -アミラーゼに対する感受性が低下することが *in vitro* の試験から明らかとなっている[52]。したがって、今回の測定において、揚げ加熱した検査食の GI が低くなった要因として脂質の同時摂取による影響が大きいと考えられる。

GI を決定する要因の 1 つとして、炭水化物食品のデンプンに占めるアミロースとアミロペクチンの構成比が知られている。高アミロース食品は、高アミロペクチン食品に比べ GI が低いとされる[42]。また、アミロース含量や分子量の大きさはデンプンの老化性にも影響する。アミロース含量が高いほど老化が促進されやすく、調理後の冷却によりレジスタントスターチ含量が高まる。検査食に用いた芋のデンプンに含まれるアミロースは、じゃが芋で 19.8%、さつま芋で 18.2%、里芋で 13.7% である。今回の測定では、検査食を冷蔵したときのレジスタントスターチ含量はじゃが芋で 2.28 倍となり、他の芋と比較して最も増加した。しかし、さつま芋 1.15 倍、里芋 2.18 倍であり、アミロース含量との関連はみられなかった。このことから、本研究に用いた検査食のアミロース含量には、レジスタントスターチの生成に影響を及ぼし、GI を変化させるほどの差がなかった可能性が考えられる。

レジスタントスターチ (RS) とは、健常人の小腸腔内で消化・吸収されずに大腸に達するデンプンおよびデンプンの部分分解物の総称であり[54]、GI に大きく影響すると考えられている。レジスタントスターチは、物理的に消化酵素が作用できない RS1、デンプン粒がその結晶構造ゆえに消化抵抗性を示す RS2、デンプンの老化に基づいて生成する RS3 の 3 つのタイプに分類される[52]。さらに、加工デンプンも消化抵抗性を示し生理効果を有することから[55]、RS4 と表現されている。アミロース含量の高いデンプンは、それ自体が消化抵抗性であり、レジスタントスターチ含量 (RS2) が高い。また、糊化後冷却すると結晶構造の形成が促進される (デンプンの老化) 結果、消化抵抗性部分 (RS3) が増える。今回の測定でも、冷蔵保存した検査食でレジスタントスターチ含量が増加する傾向がみられた (図 2)。芋類の GI に与える調理方法の影響を検討した研究[42]では、調理後冷却することは、皮のむき方、切り方、

形よりも GI に大きく影響することを報告している。本研究においても、冷蔵保存した検査食の GI は低値を示す傾向があり、レジスタントスターチは血糖反応を抑制し、GI の低減において効果があることが示唆された。

本研究では、芋類の種類および調理方法の違いが食後血糖に影響を与えていることが明確になったが、それらの違いは GI を大きく変化させるほどの差ではないことが示唆された。さらに、GI に影響を与えると推察される要因は多く、これらが複合的に作用していることが考えられる。しかし、今回レジスタントスターチを測定したことにより、芋に含まれるレジスタントスターチの増加が GI 低減に有効であることが明らかとなった。すなわち、調理後の冷却・冷蔵は GI に大きく影響を与える方法であるといえる。本研究では、電子レンジ加熱したものを冷蔵保存して検査食として摂取した。しかし他の研究[55]では、ゆで加熱後冷蔵保存した検査食においても GI の低下が認められている。調理後の冷却・冷蔵を、低 GI 食の開発につなげるとともに、同様の基礎研究を積み重ねていく必要がある。

## 第二節 主食の置換、油脂・酢の添加による血糖応答の変化

### 序

GI と慢性疾患との関連についての研究は欧米が中心であり、そのほとんどが、じゃが芋及び小麦を主な糖質性食品として摂取する欧米型食生活に基づいた検証である。米飯を主な炭水化物供給源として摂取する日本型食生活についての研究としては、Sugiyama ら[31] による米飯と副食の組み合わせによる研究がある。しかし、この研究をはじめ、日本における GI 研究は、食品を単品または白米と副食 1 品の組み合わせによる検討が中心であり、主食・主菜・副菜の揃った複合食における検討は少ない。高 GI 食品である白米を主食とする日本人の食事は、食後の高血糖を招く。また、日本の食生活も欧米化が進み、主食として摂取する食品も米飯に加え、パン類や麺類等の小麦製品も大きな割合を占めている。そこで、食後高血糖の抑制を目的に、高 GI 食品である白米を GI が低い食品である玄米およびパスタ（スパゲッティ）に置き換え、主食の GI が食事全体の GI に与える影響を検討した。さらに、主食の GI が異なる食事において、GI 低減効果が報告されている油脂および酢を添加した場合の効果を検討した。

## 方 法

### 1) 被験者

被験者は、1.と同じく静岡県立大学に在籍する年齢 18 歳以上、BMI 25 kg/m<sup>2</sup> 以下、過去 1 年以内の検査において耐糖能異常の指摘がなく、降圧剤など血糖値に影響を及ぼす薬剤の服用がない一般健常人の学生とした。条件を満たした 8 名（男性 3 名、女性 5 名）、年齢 22.1±1.6 歳、BMI 20.4±1.4 kg/m<sup>2</sup> を被験者とした。途中 1 名を、血糖値に影響を及ぼす薬剤の服用を始めたため除外し、残りの 7 名（男性 3 名、女性 4 名）が全ての検査食について GI 測定を行った。実施にあたっては、静岡県立大学研究倫理審査委員会において承認を受けた（21-32）。

### 2) 実験方法

1. の芋類・雑豆類の GI 測定と同様に行った。

### 3) 血糖上昇曲線下面積（IAUC）からの GI 値算出方法

1. の芋類・雑豆類の GI 測定と同様に行った。

### 4) 検査食

主食として白米、玄米、パスタの 3 種類を用いた。主食単独（a）に加え、これら 3 種類の主食に主菜、副菜を組み合わせた複合食（基本食：b）、各基本食にオリーブ油 10 g（油脂添加食：c）または穀物酢 10 g（酢添加食：d）、オリーブ油 10 g と穀物酢 10 g（油脂・酢添加食：e）を添加した食事の 5 つの食種（a～e）について検討を行った。各検査食は、炭水化物量から食物繊維量を除いた総糖質量が 50 g になるよう、五訂増補・日本標準食品成分表を用いて立案した。白米として包装米飯（サトウのご飯新潟産コシヒカリ 100%、佐藤食品工業株式会社）、玄米として包装米飯（穀民生活玄米 100% 玄米ごはん 山形産はえぬき 100%、東洋水産株式会社）、パスタとして乾燥スパゲッティ（マ・マー スパゲッティ、太さ 1.6 mm、日清フーズ株式会社、標準ゆで時間 7 分）を用いた。それぞれ包装に表示された方法で加熱調理を行った。オリーブ油（AJINOMOTO EXTRA VIRGIN OLIVE OIL、J-オイルミルズ株式会社）、穀物酢（穀物酢、ミツカン株式会社、酸度 4.2%）は、副菜に添加し摂取した。基本食の主菜としてゆで卵、副菜として温野菜（キャベツ 40 g、ブロッコリー 30 g、タマネギ 30 g、塩 1 g）、コンソメスープ 150 mL を用いた。検査食の栄養価を表 5 に示した。

#### 5) 統計解析

主食別および食種別の各検査食の血糖値の平均値および GI について、Tukey の方法による多重比較により検定を行った。統計処理はいずれも SPSS 14.0 for Windows (SPSS Japan Inc.) を使用し、危険率 5%未満をもって有意とした。

## 結 果

検査食摂取後の血糖値の変動は、単独摂取では 30 分値の玄米とパスタ ( $p<0.05$ )、45 分値の白米とパスタ ( $p<0.05$ )、玄米とパスタ ( $p<0.05$ )、60 分値の白米とパスタ ( $p<0.05$ )、90 分値の白米と玄米 ( $p<0.05$ ) の間に有意な差が認められた。なお、同主食内において油脂および酢添加による有意な差はみられなかった。

各検査食の平均 GI を表 6 に示す。食種別にみると、a. 単独摂取では、パスタの GI ( $47\pm28$ ) は白米 (100) および玄米 ( $78\pm28$ ) に比べ、有意に低く ( $p<0.05$ )、b. 複合食ではパスタの GI は玄米に比べ、有意に低かった ( $p<0.05$ )。

主食別にみると、単独摂取時の GI と複合摂取時の GI との比較において有意差はなかったが、白米を主食とした場合において複合食では GI が低下し、玄米主食とパスタ主食においては上昇した。また、オリーブ油および酢添加による影響は、白米、玄米、パスタ主食時においてそれぞれ異なる傾向を示した。

## 考 察

日本型食生活の特徴は、主食、主菜、副菜を組み合わせた複合食の形態をとることである。元来、主食の中心は白米であり、エネルギー、炭水化物、たんぱく質の主要な供給源であった。しかし、高度成長期以降の食生活の多様化に伴い白米の消費は減り、小麦・加工品の消費が伸びてきた。このような状況から、白米以外の炭水化物性食品を主食とする食事について GI を検討する必要があると考えた。白米を単独摂取する場合に比べ、主菜や副菜を組み合わせることで、GI が低減するとが報告されている[31]。しかし、白米に比べ、もともと GI が低いパスタや玄米は、複合食にしたときにどのような血糖反応を示すかは明らかにされていない。複合食の GI は各食品単独の GI の組み合わせからは求められず、複合食として検討する必要がある。本研究における玄米、パスタを主食とする b. 複合食の GI は、a. 単独摂取に比べて高い傾向を示した。玄米の GI は、国際表[21] よりグルコース基準で  $55 \pm 5$  であり、米飯基準では 66 となる。また、スパゲッティの GI は Sugiyama ら[31]の行った健康な日本人 10 名を被験者とした試験において、米飯基準で  $56 \pm 37$  であった。本研究における玄米とパスタの GI は、単独でそれぞれ  $78 \pm 28$ 、 $47 \pm 28$  であり、先行研究と比較すると玄米の GI は高く、パスタの GI はさらに低い傾向であった。

また、単独摂取後の血糖反応は、白米と玄米は 45 分でピークに達し、その後白米は緩やかに低下するが、玄米では急激に下降した。一方、パスタは 30 分でピークに達するが、その値も白米の 30 分値に比べ有意に低く ( $p < 0.05$ )、それ以降はほぼ一定の値を示した。パスタの単独摂取は、緩やかな食後血糖反応を示すことが明らかとなった。

パスタ食等の麺類の一部は低 GI であることが知られている。本研究においても示されたように、パスタ単独の GI は白米 ( $p < 0.01$ )、玄米 ( $p < 0.05$ ) 単独と比べて有意に低い。この要因としては、パスタの製造・調理工程におけるデンプンの状態および構造の変化や、単糖類・多糖類の組成の違いが挙げられる。近年、注目されているのが小麦アルブミン（中でも 0.19 アルブミン）の  $\alpha$  アミラーゼ活性阻害作用である。小麦アルブミンには、腸管内での炭水化物の吸収を遅延させ、食後の急激な血糖上昇およびインスリンの大量分泌抑制作用があることが明らかになってきた[56~62]。HPLC により分画された 0.19 アルブミンは、総小麦アルブミン中 24.9% 含まれ、小麦アルブミンの  $\alpha$  アミラーゼ活性阻害作用効力のうちの 80% を担っているといわれる。しかし、同じ小麦で作られた白パンの GI は  $92 \pm 38$  と高値であり、同じ材料を用いて作ったパスタとパンの GI では、食後 90 分までパスタの方がパンに比べ有意 ( $p < 0.05$ ) に低く、インスリンの分泌も同様の傾向であることが報告されている[63]。

パスタとパンはそれぞれの製法により、加熱時間や組織の構造が大きく異なる。長時間加熱による $\alpha$ アミラーゼ活性阻害作用効力の失活、組織構造の違いによる消化酵素の効きやすさの違い等が複雑に関わり、パスタとパンの血糖反応の違いを生じさせていると推察される。

本研究では、オリーブ油 10 g、酢 10 g、オリーブ油 10 g+酢 10 g をそれぞれ複合食に添加した。しかし、各主食における複合食 GI の有意な低下はみられなかった。この原因として、一食の食事を低 GI とするのに十分なオリーブ油および酢の添加量ではなかったことが考えられる。白米とパスタにおける d. 酢添加食の GI は、b. 複合食に比べ、上昇傾向を示した。これについては酢酸が嗅覚や味覚の刺激となり、消化酵素の分泌や消化管の蠕動運動を促進し、消化吸收の活性化が行われたことが考えられる。また、油脂や酢の添加により、高 GI 食品（白米）と低 GI 食品（玄米・パスタ）の GI および血糖変動の差が小さくなる、すなわち、食後血糖に及ぼす高 GI 食品の影響が小さくなることが示された。日本型食生活の特徴である複合食では、主食にさまざまな副食を組み合わせる形態をとる。油脂や酢は日本型の食事にも多様な形で取り入れられ、自然に白米食の GI を緩和させていると考えられる。ごはん食と GI の研究において、白米に酢、大豆、牛乳・乳製品を組み合わせることで GI が低くなることが報告されている[31]が、パスタや玄米にこれらを添加した複合食の結果は報告されていない。異なる主食の食事に、GI 低減効果が期待される食材を添加した場合の検討は、低 GI の機構を探るうえでのこれからの課題である。

## 要 約

第一章ではまず、芋類および雑豆類の GI を明らかにし、また、調理方法による影響を検討した。生の長芋を除く芋類の GI は高く、雑豆類の GI は低いことがわかった。米飯に生の長芋、雑豆類を組み合わせることにより、GI の低下がみられた。芋類は加熱方法の違いにより GI が変化し、冷蔵によるレジスタントスターチの増加により GI が低下することを確認した。

次に、高 GI の白米を低 GI の主食に置換することで食事全体の GI が低下することを確認した。さらに、高 GI の白米を主食とする複合食では、白米単独での摂取に比べて GI が低下したが、単品での GI が低かった玄米、パスタでは GI の顕著な低下はみられなかった。これらの結果から、GI にもとづく食品構成は、複合食での食後血糖上昇抑制に有効であることが明らかになった。

以上のことから、GI の概念を食生活に取り入れることで、メタボリックシンドロームや 2 型糖尿病等の食後高血糖に起因する生活習慣病の発症リスク軽減に繋がる可能性が示唆された。

Table1-1. Composition of test meals (potatoes)

Test meal		Single <sup>†</sup>					Potato with white rice			
		White rice	Sweet potato	Irish potato	Taro	Chinese Yam	Sweet potato	Irish potato	Taro	Chinese Yam
White rice	(g)	147	-	-	-	-	117	117	117	117
(Available carbohydrate)	(g)	(50.0)	-	-	-	-	(40.0)	(40.0)	(40.0)	(40.0)
Potato <sup>‡</sup>	(g)	-	171	307	463	388	34	61	93	78
(Available carbohydrate)	(g)	-	(50.0)	(50.0)	(50.0)	(50.0)	(10.0)	(10.0)	(10.0)	(10.0)
Energy	(kcal)	222	226	223	268	252	223	225	232	228
Protein	(g)	3.1	2.1	4.9	6.9	8.5	2.9	3.5	3.9	4.2
Fat	(g)	0.6	0.3	0.3	0.5	1.2	0.6	0.6	0.6	0.7
Carbohydrate	(g)	51.0	53.9	54.0	60.6	53.9	51.6	51.6	52.9	51.6
Dietary fiber	(g)	1.0	3.9	4.0	10.6	3.9	1.6	1.6	2.9	1.6
Available Carbohydrate	(g)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0

Taken from Food Composition for the STANDARD TABLES OF FOOD COMPOSITION IN JAPAN Fifth Revised and Enlarged Edition, 2005).

<sup>†</sup> Single : white rice or potatoes only consumed, <sup>‡</sup> Potatoes weighed raw, peeled.

Table1-2. Composition of test meals (beans)

Test meal		Single <sup>†</sup>				Bean with white rice			
		White rice	Adzuki bean	Tebo bean	Kintoki bean	White rice	Adzuki bean	Tebo bean	Kintoki bean
White rice	(g)	73.5	-	-	-	147	118	118	118
(Available carbohydrate)	(g)	(25.0)	-	-	-	(50.0)	(40.0)	(40.0)	(40.0)
Bean <sup>§</sup>	(g)	-	202	217	217	-	81	87	87
(Available carbohydrate)	(g)	-	(25.0)	(25.0)	(25.0)	-	(10.0)	(10.0)	(10.0)
Energy	(kcal)	111	288	311	311	222	293	302	302
Protein	(g)	1.5	17.9	18.5	18.5	3.1	9.7	9.9	9.9
Fat	(g)	0.3	2.0	2.2	2.2	0.6	1.3	1.4	1.4
Carbohydrate	(g)	25.5	48.8	53.9	53.9	51.0	60.3	62.4	62.4
Dietary fiber	(g)	0.5	23.8	28.9	28.9	1.0	10.3	12.4	12.4
Available Carbohydrate	(g)	25.0	25.0	25.0	25.0	50.0	50.0	50.0	50.0

Taken from Food Composition for the STANDARD TABLES OF FOOD COMPOSITION IN JAPAN Fifth Revised and Enlarged Edition, 2005.

<sup>†</sup> Single : white rice or potatoes only consumed, <sup>§</sup> beans weighed boiled.

Table 2-1. Blood glucose responses in groups of normal subjects elicited by white rice (WR ) or potatoes consumed.

	n	0min	15min	30min	45min	60min	90min	120min
WR	9	81.3±8.0	96.4±15.5	129.9±17.4	136.9±16.8	132.1±18.8	114.7±15.5	98.1±12.4
Sweet potato	9	81.3±9.3	92.2±11.5	141.3±17.4	153.1±16.4*	141.6±26	97.3±27.6	76.7±20.3*
WR with Sweet potato	9	74.3±5.5*	92.7±15.9	141.1±19.6	149.3±27.2	137.7±29.5	110.4±16.6	92.1±12.8
Irish potato	9	80.4±9.4	89.6±13.9*	133.8±10.2	142.1±17.8	138.9±28.6	101.8±29.1	83.8±13.2*
WR with Irish potato	9	77.7±10.1	99.8±21.1	133.4±16.1	140.6±21	124.7±26.9	107.1±21.7	94.8±17.2
Taro	9	76.4±9.5	92.7±13.1	129.6±11.3	134.7±9.9	122.6±13.9	101.6±13.9	88.9±10.9*
WR with Taro	9	74.2±5.3*	95.4±10.3	133.4±17.5	138.7±15.1	131.1±15.6	110.6±13.2	95.7±14.6
Chinese yam	9	76.7±6	86.3±7.2	134.9±11.7	144.8±15.6	132.6±29.4	98.6±24.4	87.8±19.7
WR with Chinese yam	9	74.1±9.5*	96.2±13.7	134.0±14.1	138.9±25.2	126.3±29.6	108.2±32	100.2±26.2
Chinese yam (raw)	9	74.2±5.3*	77.3±5.4*	78.6±5.4*	77.4±4.0*	77.8±4.9*	78.8±7.7*	77.4±9.0*
WR with Chinese yam (raw)	9	73.6±8.2*	86.1±11.5	115.8±18.6*	119.8±17.5*	114.2±12.4*	98.7±13.4*	90.4±8.8

Values are means ± SD. \*Significantly different from WR ( $p < 0.05$ ) using by paired sample t-test.

Table 2-2. Blood glucose responses in groups of normal subjects elicited by white rice (WR ) or beans consumed.

	n	0min	15min	30min	45min	60min	90min	120min
WR25	11	73.3±5.6	93.4±11.3	111.5±18.3	111.1±19.2	104.6±16.4	92.3±19.6	82.5±10.1
WR50	9	77.1±6.5	93.7±7.2	128.4±11.8	126.1±16.0	120.8±22.3	108.8±16.7	98.6±14.4
Adzuki bean	11	72.9±5.0	79.2±5.5*	80.8±6.1*	89.8±8.9*	90.0±7.1*	93.0±9.7	84.7±5.0
WR with Adzuki bean	9	74.8±8.4	86.0±11.0	120.9±18.7	128.2±20.6	119.6±19.8	103.4±15.5	92.6±16.0
Tebo bean	11	74.2±5.8	77.5±6.7*	80.3±6.0*	86.4±7.3*	89.5±10.5*	89.5±12.9	81.4±12.6
WR with Tebo bean	9	72.9±3.4	87.9±9.7*	121.2±18.4	124.7±18.9	118.6±26.5	101.7±26.2	91.0±16.2*
Kintoki bean	11	77.3±6.4*	78.0±5.4*	82.4±7.3*	92.6±10.8*	94.7±11.1	93.3±10.5	86.3±10.7
WR with Kintoki bean	9	80.1±6.5	92.3±10.6	125.0±13.5	130.1±19.2	118.9±22.1	102.6±22.9	96.4±14.4

Values are means ± SD. \*Significantly different from WR ( $p < 0.05$ ) using by paired sample t-test.

Table 3-1. Comparison of glucose slope after loading test meals and the Glycemic Index of the test meals.

	n	IAUC <sub>0-120</sub>	n	GI <sub>wr</sub>	GI
WR	9	4190±1066	9	100	80
Sweet potato	9	4138±1835	9	100±35	80±28
WR with Sweet potato	9	5177±1683	8	117±38	93±31
Irish potato	9	3956±2032	9	98±48	78±39
WR with Irish potato	9	4333±1762	9	102±23	82±18
Taro	9	3934±940	8	90±18	72±14
WR with Taro	9	4865±1195	8	111±33	89±26
Chinese yam	9	4168±1926	9	100±33	80±26
WR with Chinese yam	9	4811±2282	9	113±40	90±32
Chinese yam (raw)	9	451±297*	7	10±6	8±5
WR with Chinese yam (raw)	9	3438±773	9	86±26	69±20

Values are means ± SD. \*Significantly different from WR ( $p < 0.05$ ) using by paired sample t-test.  
WR ; white rice, GI<sub>wr</sub> ; White rice-based GI score.

Table 3-2. Comparison of glucose slope after loading test meals and the Glycemic Index of the test meals.

	n	IAUC <sub>0-120</sub>	n	GI <sub>wr</sub>	GI
WR25	11	2864±1147	11	100	80
WR50	9	4020±1115	9	100	80
Adzuki bean	11	1635±751*	11	64±34	51±27
WR with Adzuki bean	9	3800±1231	9	95±22	114±26
Tebo bean	11	1318±773*	11	44±22	35±17
WR with Tebo bean	9	3895±1870	9	97±33	116±39
Kintoki bean	11	1373±704*	11	52±26	42±20
WR with Kintoki bean	9	3409±1211	9	85±22	102±26

Values are means ± SD. \*Significantly different from WR ( $p < 0.05$ ) using by paired sample t-test.  
WR ; white rice

Table 4. Composition of test meals

Test meal		White rice	Sweet potato	Irish potato	Taro
White rice	(g)	147.0	-	-	-
(Available carbohydrate)	(g)	(50.0)	-	-	-
Potato <sup>†</sup>	(g)	-	171	306	462
(Available carbohydrate)	(g)	-	(50.0)	(50.0)	(50.0)
Energy	(kcal)	222	226	223	268
Protein	(g)	3.1	2.1	4.9	6.9
Fat	(g)	0.6	0.3	0.3	0.5
Carbohydrate	(g)	51.0	53.9	54.0	60.6
Dietary fiber	(g)	1.0	3.9	4.0	10.6
Available Carbohydrate	(g)	50.0	50.0	50.0	50.0

Taken from Food Composition for the STANDARD TABLES OF FOOD COMPOSITION IN JAPAN  
Fifth Revised and Enlarged Edition, 2005.

<sup>†</sup> Potatoes weighed raw, peeled.

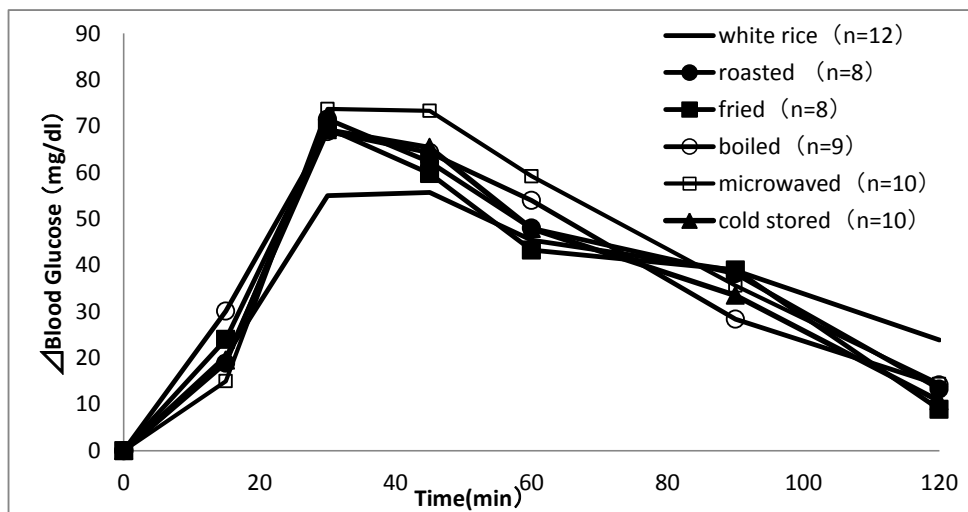


Figure 1-1 Incremental glycaemic response to sweet potato by cooking method

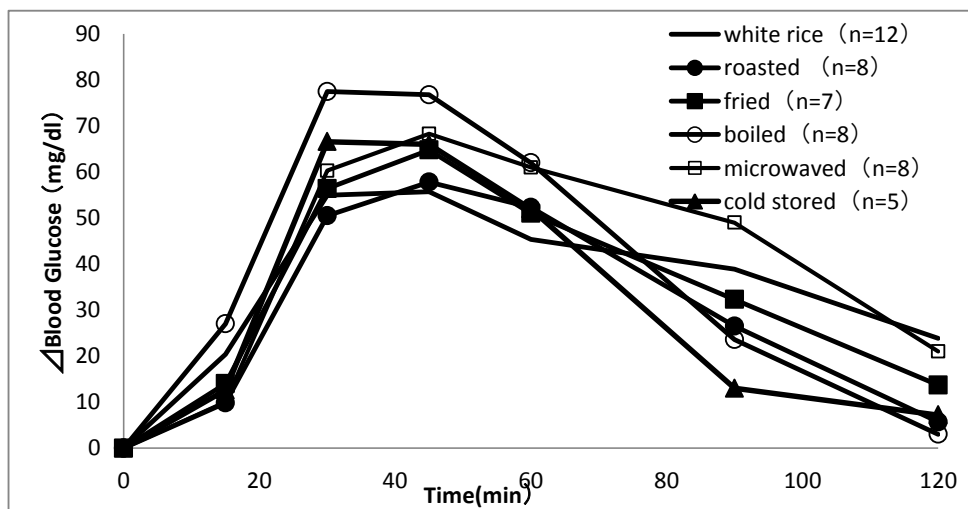


Figure 1-2 Incremental glycaemic response to Irish potato by cooking method

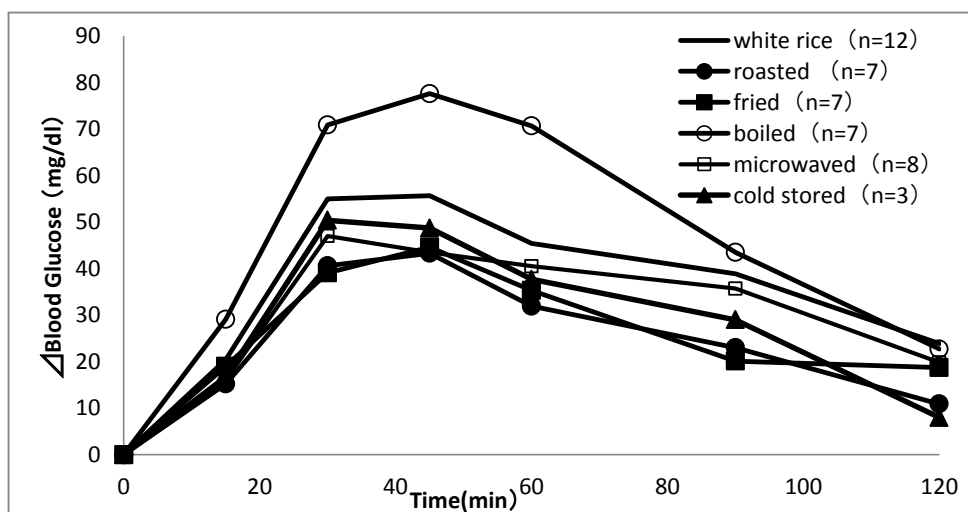


Figure 1-3 Incremental glycaemic response to taro by cooking method

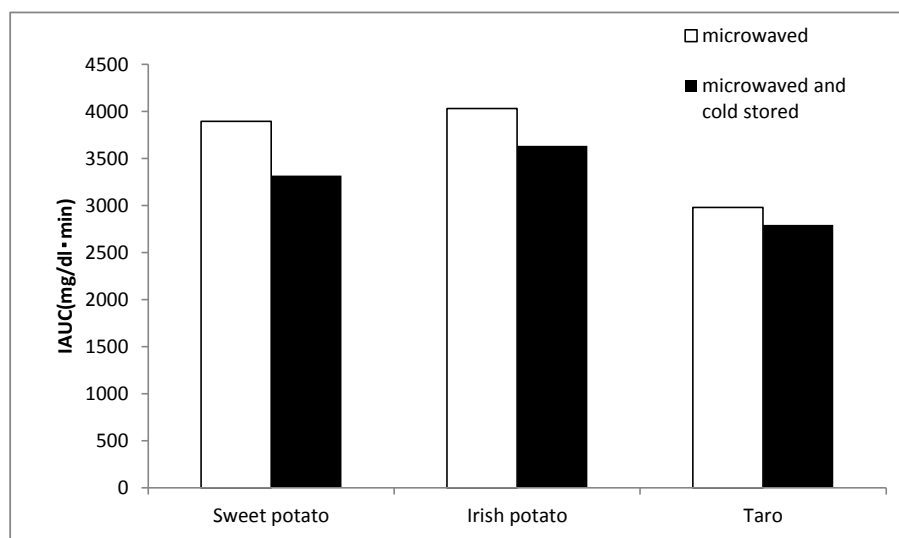
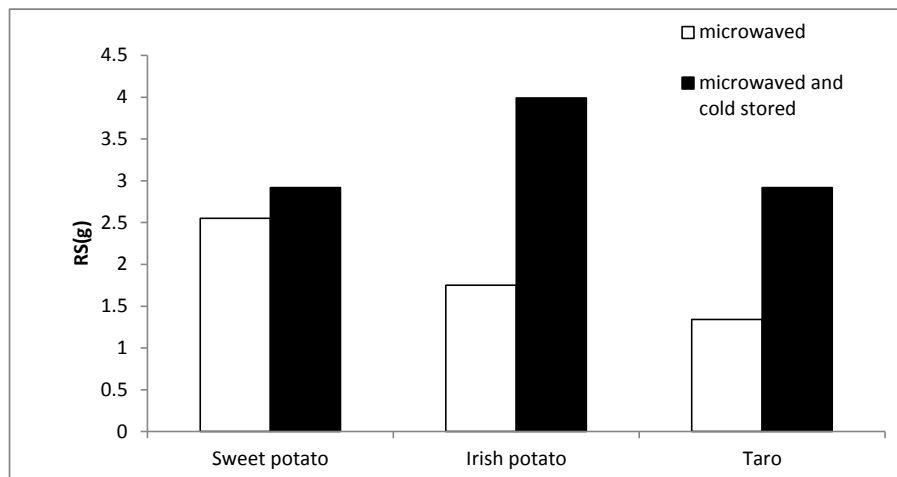


Figure 2 Bottom: by cooking  
 Top: The incremental area under the blood glucose curve: IAUC by cooking method.  
 Bottom: content of resistant starch by cooking method.

Table 5. Composition of test meals

Test meal		Energy	Protein	Fat	Carbohydrate	Dietary fiber	Available Carbohydrate
		(kcal)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
White rice	a	222	3.1	0.6	51	0.4	50.6
	b	310	11.6	5.9	52.7	2.9	49.8
	c	402	11.6	15.9	52.7	2.9	49.8
	d	311	11.5	5.9	52.9	2.9	50.0
	e	403	11.5	15.9	52.9	2.9	50.0
Brown rice	a	242	4.4	1.7	52.2	2.4	40.8
	b	332	12.8	6.9	54.9	4.7	50.2
	c	424	12.8	16.9	54.9	4.7	50.2
	d	332	12.8	6.9	54.5	4.6	49.9
	e	424	12.8	16.9	54.5	4.6	49.9
Pasta	a	258	9.4	1.4	51.8	1.9	49.9
	b	345	17.3	6.7	54.4	4.3	50.1
	c	437	17.3	16.7	54.4	4.3	50.1
	d	348	17.3	6.7	54.6	4.3	50.3
	e	440	17.3	16.7	54.6	4.3	50.3

Taken from Food Composition for the STANDARD TABLES OF FOOD COMPOSITION IN JAPAN Fifth Revised and Enlarged Edition, 2005.

a:only consumed, b: complex meal, c:b+oil, d:b+vinegar, e:b+oil +vinegar

Table 6. The Glycemic Index of the test meals.

Test meal		n	GI
White rice	a	8	100
	b	8	77±28
	c	8	81±36
	d	8	97±30
	e	8	65±38
Brown rice	a	5	78±28
	b	7	87±20
	c	7	65±19
	d	7	76±27
	e	6	72±29
Pasta	a	8	47±28
	b	6	54±15
	c	8	50±17
	d	8	66±36
	e	8	60±39

mean±SD

a:only consumed, b:meal, c:meal with olive oil,

d:meal with vinegar, e:meal with olive oil and vinegar

## 第二章

### 高 GI 食/低 GI 食摂取による糖質・脂質代謝指標の変動

## 序

GI が低い食事は食後血糖の上昇が緩慢であり、インスリン過剰分泌を抑制し、糖尿病をはじめとする生活習慣病の予防につながると考えられている。日常の食事において GI に配慮することは、生活習慣病予備軍のリスクの軽減、生活習慣病患者の減少に繋がる可能性が高い。これまでに報告された GI と生活習慣病に関する介入研究では、指標としてコレステロールや TG、体重変化、糖尿病患者における血糖コントロール、インスリン感受性が用いられてきた[64, 65]。しかし、GI の有用性について、より高いレベルのエビデンスを得るためには、さらに代謝指標を増やして詳細に検証する必要がある。

インクレチンは、現在、最も注目されている糖質代謝に関する重要なホルモンである。インスリン分泌促進の要因の 1 つはインクレチンの生理作用によるものであり、食後高血糖抑制と強く関わっている。低 GI 食摂取による食後高血糖抑制は、いくつかの作用機序によるが、胃排出速度の遅延もその 1 つであるといわれている[66]。また、食事を摂取すると、小腸上部に存在する K 細胞からインクレチンの GIP が分泌され、一方、小腸下部の L 細胞から GLP-1 が分泌される。GLP-1 の作用の 1 つにも、食欲抑制、胃排出速度の遅延作用が認められている[67]。このことは、低 GI 食における食後血糖抑制作用が GLP-1 などのインクレチンの働きに起因する可能性を示している。GI の評価は現在、食後の血糖上昇変動により認めているが、食後のインクレチン分泌量と GI との間に一定の傾向があれば、インスリン分泌の節約を含めた検討が必要と考えている。それゆえ、GI の違いによる食事とインクレチンとの関連について検証し、科学的なエビデンスを構築する必要がある。

そこで第二章では、第一章の結果に基づいた食品および調理法の選択により、糖質量、エネルギー量、PFC 比率をそろえた高 GI 食と低 GI 食のモデルメニューを調製し、両者における食後の血糖値、インスリン濃度の変動に加え、インクレチン濃度および中性脂肪値の変動の違いを明らかにし、低 GI 食の機序の解明と GI の新たな評価法の確立を目的とした。

## 方 法

### 1) 被験者

被験者は、静岡県立大学に在籍する年齢 18 歳以上、降圧薬などの薬剤服用がない、過去 1 年間に耐糖能異常の指摘を受けたことがない、BMI  $25 \text{ kg/m}^2$  以下、試験日が生理期間中でない（女性のみ）の条件全てを満たす一般健康人学生 9 名（男性 2 名、女性 7 名）で構成され、年齢  $21.2 \pm 2.8$  歳、BMI  $20.6 \pm 1.2 \text{ kg/m}^2$  であった。

### 2) 実験方法

#### (1) 実験実施の流れ

被験者を無作為に 2 群に割り付け、高 GI 食、低 GI 食の単回摂取試験を 1 週間のウォッシュアウト期間をはさんでクロスオーバーで行った。実験日前日の夕食は、規定の食事（3）検査食に記述）を午後 19:30～20:00 に摂取し、夕食後は水以外を絶飲、絶食とした。非日常的な過度の運動、暴飲暴食、飲酒は避けた。実験日当日、被験者は朝 7:30 実験室に来室し、実験室到着後 10 分以上の安静を保った。その後、空腹時の血糖値を測定し、同時に、血清インスリン濃度、TG 濃度およびインクレチン（GIP、GLP-1）濃度測定用血液を各 2 mL、合計 6 mL を肘静脈より採血した。なお、採血は静岡県立大学において研究実施者および協力者立ち会いのもと、静岡県ナースセンターより派遣の看護師が行った。試験日当日は、朝 8:00 に高 GI 食または低 GI 食および飲料水 200 mL を 20～25 分程度で完食できるよう摂取した。空腹時と朝食後 3 時間までの血糖、血清インスリン濃度、TG 濃度及びインクレチン（GIP、GLP-1）濃度を経時的に測定した。検査食摂取前および摂取後 30、60、90、120、180 分の計 6 回、各 6 mL を肘静脈より採血した。

#### (2) 血糖値の測定方法

肘静脈から採血した血液を用い、自己血糖測定機（グルテスト PROR GT - 1661、株式会社三和化学研究所）にて血糖値を測定した。

#### (3) 血清インスリン濃度及び TG 濃度測定用血液サンプル採取方法

肘静脈から採血した血液を用い、血清分離用真空採血管（ベノジェクト<sup>®</sup> II 真空採血管、テルモ株式会社）に 4 mL 注入した。その後、室温で 30 分以上凝固させ、3000 rpm で 15 分間遠心分離し、上清である血清をマイクロチューブに回収後、 $-80^{\circ}\text{C}$  で冷凍保存した。

(4) インクレチン (GIP、GLP-1) 濃度測定用血液サンプル採取方法

肘静脈から採血した血液を用いてインクレチン保存用真空採血管 (BD™ P800 GLP-1、GIP、Glucagon、Ghrelin 保存用真空採血管、日本ベクトン・ディッキンソン株式会社製) に 2 mL 注入し、速やかに採血管を静かに 8-10 回転倒混和した。採血直後 3000 rpm で 15 分間遠心分離し、上清である血清をマイクロチューブに回収後、-80℃で冷凍保存した。

(5) 血清インスリン濃度測定方法

測定には Ultrasensitive Insulin ELISA (Mercodia 製) を使用した。

(6) 血清 TG 濃度測定方法

測定にはトリグリセライドキット (GPO・DAOS 法、和光純薬工業製) を使用した。

(7) 血漿 GIP 濃度測定方法

測定には Human GIP (total) ELISA (Millipre 製) を使用した。

(8) 血漿 GLP-1 濃度測定方法

測定には Glucagon Like Peptide-1 (Active) ELISA (Millipre 製) を使用した。

3) 検査食

検査食は、日本人の食習慣を考慮し、米飯を主食とする主菜、副菜をそろえた複合食とした。まず、エネルギー、栄養比率、各栄養素量を考慮したモデルメニューを作成し、メニューの食材比率にもとづいて、糖質相当の量を換算して検査食とした。メニューの作成基準は、日本人の食事摂取基準 (2010 年版) における、18~29 歳男女 (身体活動レベル I~II) の基準値にもとづき、1 食で 1 日の 1/3 程度を補う、エネルギー 663.5±15.5 kcal、たんぱく質エネルギー比 20%以下、脂質エネルギー比 20~30%、炭水化物エネルギー比 60~70%、食物繊維 2.0 g 以上とした。検査食は各使用食品の GI をもとに高 GI 食および低 GI 食を調製した。

高 GI 食は、国際 GI 表[21]に示される GI が 75 以上で高 GI と定義されている食品から、主食には白飯として包装米飯 (サトウのごはん新潟産コシヒカリ 100%、佐藤食品工業株式会社) を用いた。副菜は、粉ふき芋 (じゃが芋、北海道産)、デザートに大学芋 (国産カリホク! 皮付き大学芋、日本食品開発促進株式会社) を用いた。低 GI 食は、主食には包装玄米 (ご飯玄米ごはん山形県産玄米 100%、東洋水産株式会社) を用いた。副菜には、長芋サラダ (生長芋、青森県産) とし、デザートにヨーグルト

（ソフールプレーン、ヤクルト株式会社）を用いた。なお、主菜のさばの煮付け（おかず畑 さばの煮付け、フジッコ株式会社）と汁物のみそ汁（減塩即席みそ汁、永田園株式会社）については、高 GI 食、低 GI 食共通とした。献立と栄養価を表 7 に示す。料理は、それぞれのパッケージに記載された方法で調理し、加熱には、家庭用電子レンジ（ヘルシオ AX-2000、シャープ株式会社製）を使用した。

#### 4) 実施期間

2012 年 10 月～2012 年 11 月に実施した。

#### 5) 研究倫理

実施にあたり、静岡県立大学倫理審査委員会において承認を受けた（21-32、継続承認）。また、被験者には本研究の参加可否による不利益が生じないこと、自由意志によって任意の時期に試験から離脱できることを事前に説明し、試験実施に先駆けて十分なインフォームドコンセントを行った。被験者の個人情報には本試験のみに使用し、保管にあたっては個人が特定されないように匿名化した。

#### 6) 解析方法

被験者の特性および血糖値変動等の試験結果は、平均値±SD で示した。血糖値、血漿インスリン濃度については、空腹時（試験開始時）の値による影響を避けるため全て変化量（Δ値）を用いた。血漿 TG 値、血漿 GIP 濃度、GLP-1 濃度は測定値を用い、平均値±SD で示した。統計処理には SPSS 14.0 for Windows（SPSS Japan Inc.）を使用した。検査食間の比較には、対応のある t 検定を行った。統計的有意水準は 5% 以下で有意差ありとした。

## 結 果

### 1) 検査食摂取後の血糖値の変動

高 GI 食および低 GI 食摂取による食後血糖値の変動を図 3-1 に示した。

高 GI 食と低 GI 食の間で、食後 30、90、120 分において有意な差が認められた。低 GI 食は、食後 30 分と 120 分の血糖値が高 GI 食より有意に低値を示した（30 分： $p=0.008$ 、120 分： $p=0.038$ ）。また、食後 90 分では、低 GI 食に比べ、高 GI 食が有意に高かった（ $p<0.001$ ）。低 GI 食の食後血糖変動曲線は、高 GI 食より緩やかな下降を示していた。

### 2) 検査食摂取後のインスリン濃度の変動

高 GI 食および低 GI 食摂取による食後インスリン濃度の変動を図 3-2 に示した。

食後 120 分において、低 GI 食が高 GI 食に比べ有意に低値を示した（ $p=0.036$ ）。さらに食後 180 分で、低 GI 食が高 GI 食に比べインスリン濃度が低い傾向がみられた（ $p=0.053$ ）。

一方、高 GI 食におけるピークが食後 30 分で現れたのに対し、低 GI 食では食後 60 分に現れており、インスリン分泌ピークの遅延が認められた。低 GI 食の摂取によりインスリンの分泌は抑制され、インスリン濃度の変動曲線は緩やかな下降を示した。

### 3) 検査食摂取後の TG 値の変動

高 GI 食および低 GI 食摂取による食後 TG 値の変動を図 3-3 に示した。

低 GI 食が高 GI 食に比べて低い傾向を示したが、両群の間に有意な差はみられなかった。

### 4) 検査食摂取後の GIP 濃度の変動

高 GI 食および低 GI 食摂取による食後 GIP 値の変動を図 3-4 に示した。

GIP について、高 GI 食と低 GI 食の間に有意な差はみられなかった。

### 5) 検査食摂取後の GLP-1 濃度の変動

高 GI 食および低 GI 食摂取による食後 GLP-1 値の変動を図 3-5 に示した。

GLP-1 について、高 GI 食と低 GI 食の間に有意な差はみられなかった。

## 考 察

本研究で用いた複合食の低 GI 食の摂取は、高 GI 食に比べて明らかに食後の血糖上昇を抑制し、インスリンの初期分泌を抑制した。一方、GIP、GLP-1 の分泌には影響してないことが観察された。本研究で用いた低 GI 食摂取は、GIP、GLP-1 の分泌量や、それに続くインスリンの分泌濃度を増大させることなく、食後の血糖値を低く保つことができた。

GI 低減の機序は、大きく 3 つに分類される[68]。一つ目は、胃排出速度の遅延によるもので、脂肪、食物繊維、有機酸などが関与する。二つ目は、腸管における消化吸収の遅延によるものであり、食物繊維（水溶性食物繊維含有量）、加工・調理方法（デンプンの  $\alpha$  化の程度、形態、細胞構造）、穀物の精製度、糖質組成（ブドウ糖、果糖、乳糖）、多糖類の構造（アミロース/アミロペクチン比率、レジスタントスターチ）、消化酵素の阻害物質などが影響する[69]。三つ目は、インスリンの分泌の刺激によるもので、糖、脂肪、たんぱく質が作用する。しかし、これはインスリン分泌の亢進によって血糖値が下がることで、見かけ上の GI は低くなるが、膵臓の負担は軽減しない。今回低 GI 試験食に用いた「酢」は、胃からの排出速度の遅延、「玄米」は主に、腸管における消化吸収の遅延によって GI を低減すると報告されている[17]。

今回の複合食モデルメニュー摂取による結果では、低 GI 食、高 GI 食のいずれも食後 30 分において血糖値がピークとなったが、低 GI 食では食後 30 分と 120 分において高 GI 食より有意に血糖上昇が抑えられていた。また食後 90 分においては有意に高くなっており、高 GI 食より緩やかに下降していた。また、インスリン濃度のピークは、高 GI 食が 30 分であったのに対し、低 GI 食では 60 分に遅延されていた。さらに、高 GI 食では、食後 90 分で血糖値が急激に低くなり、低血糖の領域に達していた。これは、食後 90 分に高 GI 食のインスリン分泌量が増大し、血糖値が下がり過ぎたことが原因と考えられる。反対に、低 GI 食の方では、食後 90 分で血糖値がゆっくり下がり、低血糖状態になることなく緩やかな血糖下降が続き、120 分では空腹時血糖値と同等まで戻っていた。高 GI 食は食後 90 分で血糖値が下がり過ぎた結果、120 分で血糖値がもう一度上がっている。これは、90 分時の低血糖を回復するために、グルカゴンが分泌されたことによるものと推察される。以上のことから、低 GI 食は高 GI 食に比べ、明らかなインスリンの節約効果があることがわかった。

今回の低 GI 食は、食事中的糖質量の 67% が主食である玄米であった。血糖値とインスリン分泌上昇抑制効果には、主に玄米が影響していると考えられた。玄米は、白米に比べてビタミン、ミネラル、食物繊維を豊富に含む。国際表[21]より玄米の GI は  $55 \pm 5$ （ブドウ糖基準）、白米基準で換算すると  $66 \pm 5$  となり、低 GI 食品に分類さ

れる。玄米の GI 低減効果は、白米に比べて精製度が低いこと、また食物繊維含有量が豊富であることによるものと考えられる。すなわち、GI 低減の機序の一つ目（胃排出速度の遅延）と二つ目（腸管における消化吸収の遅延）による。

また、長芋を低 GI 食品として低 GI 食に使用した。長芋の特徴的な性質である粘性が、胃および腸管内の内容物に何らかの影響を与え、消化吸収に関与している可能性が考えられる。つまり、GI 低減の機序の二つ目の、腸管における消化吸収の遅延によるものである。第一章でも述べた通り、食品の粘性と血糖上昇抑制に関する報告では、ラットを対象としてメカブの粘性物質とグルコースを同時に摂取させた研究[35]や、ヒトを対象とした納豆摂取による研究[40]などで、粘性物質による血糖上昇の抑制が報告されている。この要因として、消化管内容物の粘度上昇がグルコースの吸収を抑制し、さらに内容物の粘度上昇が腸内発酵速度を抑制すると推察されている。長芋に含まれるムチンは糖タンパク質であり、メカブの粘性物質であるアルギン酸（水溶性食物繊維）とは構造的に異なるが、粘性を有する点において、消化管内容物の粘度に関与している可能性が高いと考えられる。

酢を使用したことも GI 低減要因の一つである。酢の GI 低減は、機序の一つ目、胃排出速度の遅延によるものである。酢の低減効果につて、Liljeberg と Bjorck による研究[70]では、白パンをベースにした食事に酢を添加することで、食後の血糖と血清インスリン反応を低下させることを報告している。

さらに、低GI食のデザートとしてヨーグルトを使用した。従来、乳製品の摂取でも、乳清タンパク質の顕著な血糖上昇抑制作用によりGIを低減することが知られている[71]。乳清タンパク質の組成は、分岐鎖アミノ酸含量が多いという特徴があり、特にロイシンの含量が多い。ブドウ糖溶液と共にアミノ酸の混合物（ロイシンを含む）を摂取すると、相加的に血中インスリン濃度の上昇がみられ、血糖上昇曲線下面積も低下するが、このときには血中のGIP濃度とGLP-1濃度が変化することはなかった[72]。食事として摂取した乳清タンパク質は、インクレチンの分泌の亢進と血中の分岐鎖アミノ酸などの濃度の上昇の両方の作用によって、強くインスリン分泌を促し、血糖上昇を抑制すると考えられる。ところが、今回用いたヨーグルトは糖質量14.6gと少量で、たんぱく質も3.9gと極めて微量であった。このため、本実験では乳清タンパク質摂取によるインスリン分泌の促進による血糖上昇抑制効果はなかったと推察する。

低 GI 食は肥満を改善する効果があると報告されている[73]。今回の実験は短回摂取だったため、TG の変動については、低 GI 食において TG 値変動曲線の低値傾向があったものの、両群間で有意な差はなかった。血清 TG は、食後約 1 時間より上昇し始め、食後 3～4 時間後に最高値に達し、おおよそ 5～6 時間は食事の影響が持続するとされる。今後、低 GI 食の継続摂取と、測定時間の延長による体重減少や脂肪変動な

どへの影響を調べることが望まれる。

最後に、インクレチン濃度変動では、GIPは食後30、60、120、180分において、いずれも低GI食が高GI食に比べて高値であったが、有意な差はなかった。また、GLP-1の結果においても、低GI食と高GI食の間に差はみられなかった。先述した低GI食品を選択したことにより、ゆっくりと胃から排出された食事由来の栄養成分は、小腸上部のK細胞を刺激することなく、すなわちGIPの分泌を刺激することなく、緩徐な消化吸収で小腸下部に運ばれ、L細胞からのGLP-1の分泌を促すと考えられたため、低GI食摂取の場合に高GI食摂取よりもGLP-1濃度が有意に高くなると予測していた。Ingerら[74]は、過体重の健常女性29名を対象に高GI食摂取群と低GI食摂取群で10週間の比較対照試験を行い、低GI食群で血糖値、インスリン濃度、GLP-1濃度が低く、GIP濃度と満腹感が高かったと報告している。また、Juntunenら[75]は、高GI食と低GI食による12週間のクロスオーバー試験を行い、血糖値、インスリン濃度のいずれも差がなかったと報告している。また、低GIと高GIパンを用いた別の試験では、GIP、GLP-1のいずれにおいても、低GIパンの方が低かったと報告されている[76]。食事のGIの違いによるGIP、GLP-1の分泌変動への影響については、メカニズムが解明されておらず、統一された見解は得られていない。今回の試験食は、食事中のたんぱく質と脂質量の違いによる影響を除外するため、低GI食と高GI食のPFC比率をそろえた。その結果、低GI食の摂取によって、食後の血糖値上昇が抑制され、インスリンの初期分泌が抑制された。一方、GIP、GLP-1の分泌量には影響していなかった。すなわち、GI低減の機序のうち、不溶性および水溶性の食物繊維や、有機酸を多く含むことによる胃排出速度の遅延と、腸管における消化吸収の遅延効果を利用した低GI食であった。

これらのことより、一定のPFC比率であり、GI低減化の一つ目と二つ目の機序に働きかける食材料を利用した低GI食の摂取は、GIP、GLP-1の分泌に関与せずに、インスリンを節約しながら血糖値を下げることが示された。

本研究では、このように優れた特徴を有する低GI食を開発することができた。今後は、インスリン分泌を節約しながら低GI効果のある食品構成や、調理方法に関する情報を発信し、食後高血糖に関わる生活習慣病の予防に役立つ食事の普及を目指したい。

## 要 約

第一章の結果に基づいた食品および調理法の選択により、高 GI と低 GI のモデルメニューを調製し、両者における食後の血糖値、インスリン濃度、インクレチン濃度（GIP、GLP-1）および中性脂肪値の変動の違いを明らかにし、低 GI 食の評価を行うことを目的とした。低 GI 食の摂取は、高 GI 食に比べて明らかに食後の血糖値上昇を抑制し、インスリンの初期分泌を抑制した。一方、GIP、GLP-1 の分泌量には影響していなかった。これらのことより、一定の PFC 比率であり、GI 低減の機序のうち、不溶性および水溶性の食物繊維や有機酸による胃排出速度の遅延効果、腸管における消化吸收の遅延効果を利用した低 GI 食の摂取は、GIP、GLP-1 の分泌に関与せずに、インスリンを節約しながら血糖値を下げることを示された。

Table7. Composition of test meals

Meal composition	Weight per portion (g)	Energy (kcal)	Protein (g)	Fat (g)	carbohydrate (g)	Dietary fiber (g)	Available carbohydrate (g)
High-GI diet							
White rice	200	294	4.2	0.0	67.8	0.6	67.2
potato	50	38	0.8	0.1	8.8	0.7	8.0
salt and pepper	0.25	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
candied sweet potato	27	82	0.4	2.3	15.0	1.2	13.9
simmered mackerel	70	207	9.3	15.4	7.8	0.0	7.8
miso soup	165	26	1.6	0.6	3.5	0.6	2.9
total	362	648	16.3	18.3	103.0	3.0	99.8
% of energy			10.0	25.5	63.6		
Low-GI diet							
Brown rice	225	320	5.9	2.3	69.1	2.6	66.5
chinese yam (raw)	60	39	1.3	0.2	8.3	0.6	7.7
vinegar	6	1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3
stock granules	0.04	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
salt	0.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
yogurt	100	85	3.9	2.0	14.6	0.0	14.6
simmered mackerel	70	207	9.3	15.4	7.8	0.0	7.8
miso soup	165	26	1.6	0.6	3.5	0.6	2.9
total	477	679	22.0	20.4	103.7	3.8	99.9
% of energy			13.0	27.1	61.1		

Taken from Food Composition for the STANDARD TABLES OF FOOD COMPOSITION IN JAPAN Fifth Revised and Enlarged Edition, 2005).

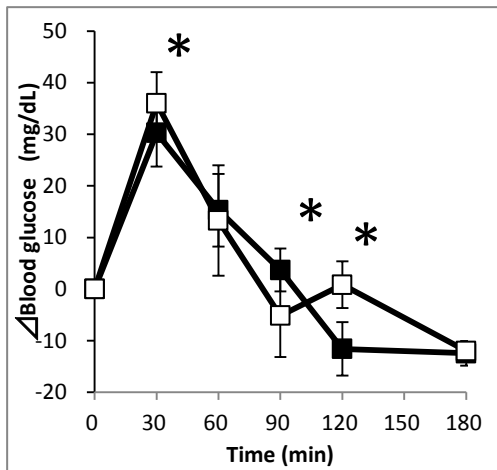


Figure3-1. Blood glucose

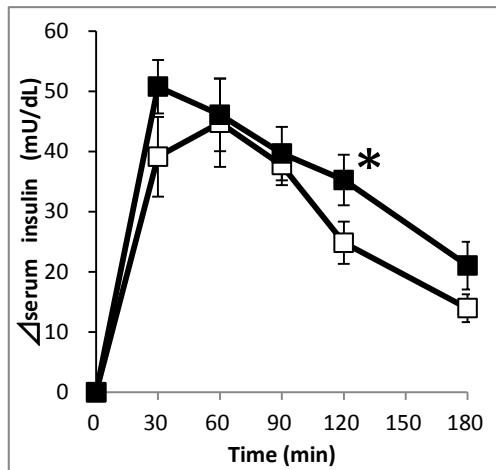


Figure3-2. Serum insulin

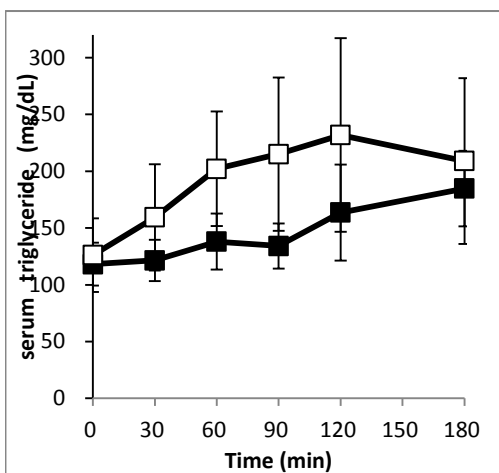


Figure3-3. serum triglyceride

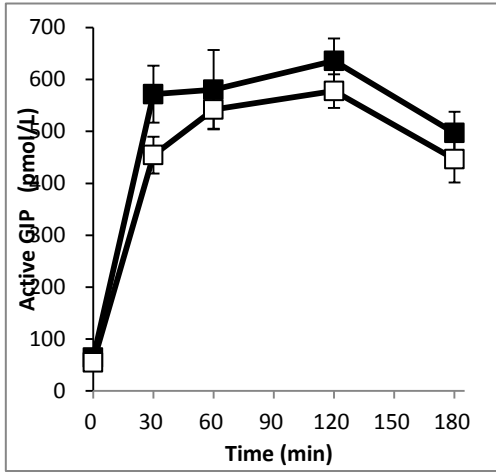


Figure3-4. Active GIP

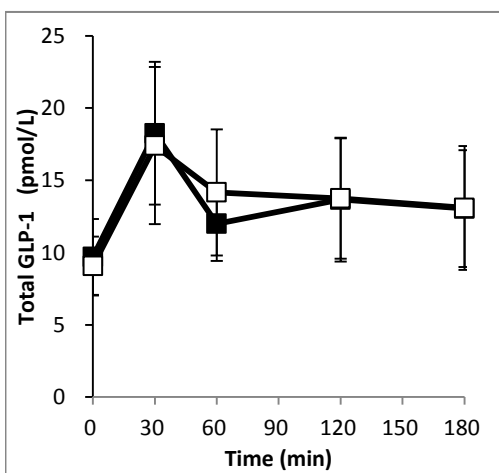


Figure3-5. Total GLP-1

Figure.3 Mean changes in each markers response to equal amounts of carbohydrate from the high GI diet (□) and the low GI diet (■). Values are means  $\pm$  SEM.

\*Significantly different ( $p < 0.05$ ) using by paired sample t-test.

### 第三章

#### 低 GI 食の継続摂取と生活習慣病関連因子の関係

## 序

食後高血糖は、インスリンの過剰分泌、インスリン抵抗性を介して生活習慣病の発症に関与すると考えられている。これまで述べてきたように、食事の GI がメタボリックシンドロームや糖尿病に対して有意な関連を示すという報告は近年相次いでおり、日本人を対象に肥満度との関連を検討した疫学研究も報告されている[29, 34]。メタボリックシンドロームの最も基礎にある因子は肥満であるが、肥満状態では脂肪組織が全身に潜在的な慢性炎症を引き起こしている可能性が示唆されている。すなわち、脂肪細胞が肥大化し、アディポサイトカイン分泌の調整不全が引き起こされ、炎症性サイトカイン（TNF- $\alpha$ ）の分泌が増加する。GI の低い食事を習慣的に摂取することは、炎症の改善にも関与する可能性がある。

しかしながら、糖質の消化吸収制御によって、ヒトの糖代謝、脂質代謝および慢性炎症状態にも改善がみられることを、各関連指標（血糖上昇マーカー、脂肪細胞マーカー、炎症マーカー、肝機能マーカー等）を用いて検討した例はほとんどない。生活習慣病患者およびそのリスク者が増加する中にあることは、糖質吸収抑制に配慮した「日本人の食事」とメタボリックシンドローム関連指標との関係についての検証が求められる。また、一定の食事パターンが、肥満をはじめとする生活習慣病関連因子の低減に対して有効であり、かつ安全であることを立証するためには、中・長期間にわたる継続摂取による効果判定が必要である。

低 GI 食の概念を用いた栄養教育では、低 GI 食品の摂取割合を増やすことを目的に、食品の提供または摂取を勧める指導が行われる[77~79]。本研究においても、第一章の結果より高 GI 食品であり、食後高血糖を招く白米を GI が低い玄米またはパスタに置き換えることによって、食後高血糖を抑制することが示された。しかし、日本人の嗜好性、炭水化物供給源として白米に大きく依存する食習慣を考慮すると、主食を白米から玄米またはパスタのような食品に置き換えることは、大きな行動変容を必要とし、継続的な食習慣の変更は困難であると考えられる。

本研究の第一章、第二章では、インスリン分泌の促進を介さず、食後の血糖上昇を抑制する食品として粘性食品、酢等を明らかにした。そこで第三章では、これらの結果をもとに、白米摂取による食後高血糖の抑制が期待される副食構成を考案し、低 GI 惣菜として調製した。この低 GI 惣菜を用い、メタボリックシンドロームリスク者の日本人における低 GI 食の継続摂取と糖代謝および慢性炎症状態の各指標との関連を、前向き介入試験により検証することとした。

## 方 法

### 1) 対象者

S市役所職員および静岡県内企業の従業員に試験への参加を呼びかけ、20歳以上の男性、BMI  $\geq 23$ 、医療機関等を定期的に受診していない、特定保健指導の対象となっていないといった条件を満たし、同意が得られた成人男性51名（年齢 $38.4 \pm 9.2$ 歳、BMI  $26.4 \pm 2.8$ ）を対象とした。

### 2) 研究デザイン

被験者を年齢、BMIを対応させた上で無作為に介入群（26名）と対照群（25名）に割り付け、介入群には試験食を1週間に15食分を提供し、5週間継続摂取させた。また介入前に年齢、身長、体重、身体活動レベルから推定エネルギー必要量を算定し、米飯の摂取目安量、食事バランスガイドにもとづくリーフレットを教育媒体として提示した。提供した食事以外の飲食は、間食、飲酒を含めて介入前に比べて意識的に変化させないように指示し、摂取食品および摂取量の制限は行わなかった。対照群には通常の食事を自由に摂取させた。両群とも、介入前に身体活動量、飲酒習慣、喫煙習慣に関する調査、介入前および介入期間中には3日間の食事記録法による食事調査を行い、エネルギーおよび栄養素摂取量を算出した。介入期間の前後に身体計測および糖代謝、炎症等の関連指標の血液生化学検査を行った。

### 3) 試験食

すべての試験食（低GI惣菜）は、主菜、副菜からなる献立とし、主食の提供は行わなかった。試験食の立案にあたっては、日本人の食事摂取基準（2010年版）にもとづいて、エネルギー、栄養素比率、各栄養素量等を設定した。低GI惣菜のメニューは全部で30種類であった。試験食の調製は、静岡県内の食品加工製造業者（ベンダー）に委託し、個別包装された冷凍惣菜として調理後、対象者の自宅に週に15食分ずつ食事宅配業者が届けた。宅配された冷凍惣菜は対象者が電子レンジを用いて再加熱し、摂取した。試験食は1食あたりエネルギー $253 \pm 63$  kcal、たんぱく質 $18.5 \pm 4.4$  g、脂質 $11.8 \pm 5.2$  g、炭水化物 $17.8 \pm 6.4$  g、食塩相当量 $2.2 \pm 0.6$  gであった。

### 4) 評価指標および分析方法

評価指標として、体重、BMI、体脂肪率、腹囲、空腹時血糖（FBG）、インスリン（IRI）、中性脂肪（TG）、総コレステロール（TC）、HDLコレステロール（HDL-chol）、LDLコレステロール（LDL-chol）、AST、ALT、 $\gamma$ -GTP、HbA1c、高感度CRP（h-CRP）、

1,5-アンヒドロ-D-グルシトール（1・5AG）を測定した。血液検査および身体計測は、ベースライン、5週間後に行った。採血は、早朝空腹時に、看護師によって行われた。採取した血液は低温保存し、株式会社MBL（静岡県静岡市）に搬送して血液分析を行った。体重は100g単位、体脂肪率は0.1%単位（体重体組成計HBF-353：インピーダンス法、オムロン株式会社）、腹囲は1 cm単位で測定した。BMIは体重（kg）/身長（m<sup>2</sup>）によって算出した。

生活習慣（身体活動量、飲酒習慣、喫煙習慣）は、ベースライン時に自記式質問表によって把握した。食事記録法を用いた食事調査は、ベースライン、5週間後に行った。対象者は3日間（平日2日、休日1日）の食事を所定の用紙に自己記入し、面接時に管理栄養士が対象者と共に記入内容の確認を行った。栄養素等摂取量の算出には、五訂増補日本食品標準成分表に準拠した栄養計算ソフト（エクセル栄養君 Ver4.0、建帛社）を用いて行った。提供したヘルシーメニューの食事のGIは、GIの国際表および日本国内の研究をもとに算出した。食事評価指標（栄養素等摂取量、GI関連指標）は、3日間の食事についての値の平均値を解析に使用した。算出した項目は、エネルギー摂取量（kcal）、たんぱく質摂取量（g）、たんぱく質のエネルギー割合（以下E%）、脂質摂取量（g）、脂質E%、炭水化物摂取量（g）、炭水化物E%、カルシウム摂取量（mg）、鉄摂取量（mg）、ビタミンA（レチノール当量）摂取量（μgRE）、ビタミンB1摂取量（mg）、ビタミンB2摂取量（mg）、ビタミンC摂取量（mg）、コレステロール摂取量（mg）、食物繊維摂取量（g）、食物繊維摂取量（g/1000 kcal）、食塩摂取量（g）、食事のGI（グルコース基準）、食事のGL、食事のGL（/1000 kcal）とした。

#### 5) 食事のGI、GLの算出

国際的に標準化された手法にもとづいて測定された値を掲載したGIの国際表および日本国内の研究をもとに、GIを算出した。米飯基準の食事のGIは、算出した値に0.8を乗じて、グルコース基準に換算した。複数の値がある食品はその平均値を用い、該当する食品の値がない場合は類似する食品の値を用いた。

食事のGI、食事のGLは以下の[1]および[2]式より算出した。

$$\text{食事のGI} = \left[ \frac{\sum (\text{食品のGI} \times \text{摂取量あたりの食品の糖質量})}{1 \text{ 日の糖質摂取量}} \right] \quad [1]$$

$$\text{食事のGL} = [\text{食事のGI} \times 1 \text{ 日の糖質摂取量} / 100] \quad [2]$$

#### 6) 倫理的配慮

本研究は、静岡県立大学倫理審査委員会の承諾のもとに推進した（21-32、継続承認）。インフォームドコンセントにおいては、文書および口頭による内容の確認を行い、全員から直筆による同意書を回収した上で介入を開始した。

#### 7) 統計解析

結果は平均 $\pm$ SDによって示した。全ての解析には、統計パッケージSPSS 14.0 for Windows（SPSS Japan Inc.）を使用した。2群間の比較には、Wilcoxonの順位和検定、各群の介入前後における各指標の比較には、対応のあるt検定を行った。統計的有意水準は5%とした。

## 結 果

対象者の身体計測値および生化学検査値を表 8、食事評価指標を表 9 に示す。

### 1) 対象者の特性

表8より、ベースライン時の年齢、体重、腹囲、BMI、に両群間の差はみられなかった。すべてのデータが得られた介入群22名、対照群17名を解析の対象とした。脱落率は介入群15%、対照群32%であった。解析対象者39名の平均年齢は、 $39.2 \pm 8.4$ 歳、BMIは、 $35.9 \pm 2.3 \text{ kg/m}^2$ 、腹囲は88.9cmであった。

### 2) 各群内における指標の変化

介入群では、5週間の低GI惣菜の摂取により食事評価指標では、エネルギー摂取量、脂質摂取量、脂質エネルギー比が有意に減少し ( $p < 0.01$ )、たんぱく質エネルギー比が有意に増加した ( $p < 0.05$ )。対照群では、変化がみられなかった。身体計測値では、介入群で体重、腹囲、BMIの有意な ( $p < 0.01$ ) 減少がみられたが、対照群では有意な差はみられなかった。血液生化学検査値では、介入群で血中HbA1c値の低下傾向 ( $p = 0.083$ ) が示された。また、血漿  $\gamma$ -GTP活性、 $1 \cdot 5 \text{ AG}$ 、総コレステロール、LDL-コレステロールが有意に低下した ( $p < 0.05$ )。一方、対照群では、介入期間後に空腹時血糖値 ( $p < 0.01$ )、 $1 \cdot 5 \text{ AG}$  ( $p < 0.01$ ) の有意な減少がみられた。

### 3) 2群間の指標比較

食事評価指標については、介入群の方が介入期間中のエネルギー、脂質摂取量および脂質エネルギー比率、食塩摂取量が有意に低値であり、レチノールの変化量が有意に高かった。

身体計測値、血液生化学検査値については、介入群の方が体重、腹囲の変化量が有意に高値であった。生化学検査値には2群間の変化量に有意な差は認められなかった。

## 考 察

5週間の低GI惣菜の摂取により、介入群ではエネルギー摂取量、脂質摂取量および脂質エネルギー比率が有意に減少した。本研究で対象者に提供した低GI惣菜は、食後高血糖の抑制とともに摂取エネルギー総量とエネルギー比率に考慮したものであり、低GI惣菜の摂取によりエネルギー摂取量と脂質の摂取量が減少したと考えられる。主食である米飯の摂取量については、各個人の推定エネルギー必要量から米飯の摂取目安量を提示したが、炭水化物摂取量に有意な差はみられなかった。また、提供した食事以外の飲食は、間食、飲酒を含めて介入前に比べて意識的に変化させないよう指示し、摂取食品および摂取量の制限は行わなかった。高GI食の摂取では、食後の急激な血糖上昇に伴うインスリン分泌の増大およびグルカゴンの分泌の抑制により、食後数時間で血糖と遊離脂肪酸の不足が起こり、空腹感を感じるとされている[80]。すなわち、低GI食の摂取により、満腹感が持続し、間食摂取の減少による1日の総摂取エネルギーの低下によって体重が減少すると考えられる。本研究においても、低GI惣菜の摂取により食後の急激な血糖上昇が抑制され、満腹感が維持されることによるエネルギー摂取量の減少が示唆された。

低GI食による減量は、満腹感の持続、肥満児を対象としたランダム化比較試験では、低GI食摂取群が従来の食事療法である低脂肪食（高GI食）摂取群に比べ、12か月後にBMI、体脂肪量が有意に減少したと報告している[77]。また、肥満児を対象とした後ろ向きコホート研究でも低GI食群にBMIと体重の減少がみられた[78]。Thomasら[81]によるメタアナリシスでは、高GI食に比べて低GI食は体重、BMIが有意に低いことを示している。一方で、成人で肥満の糖尿病患者を対象としたランダム化比較試験では、エネルギーを制限した高GIまたは低GI食を8週間摂取させたが、両群ともに体重が減少し、2群間に有意な差がなかったことを報告している[79]。このように低GI食による体重減少の可能性を示唆する研究はみられるものの、明確な結論は示されていない。

介入群の体重、腹囲、BMIの有意な減少（ $p<0.01$ ）は、エネルギー摂取量の減少とともに、低GI惣菜の摂取による血中インスリン分泌の抑制により体内脂肪の蓄積が抑制されることによるものと考えられる。体重および腹囲の減少からも内臓脂肪の減少が推察される。さらに、本研究では、介入群の血漿 $\gamma$ -GTP活性の有意な低下がみられた（ $p<0.05$ ）。最近の研究によると、従来、肝障害の指標として考えられてきた血漿 $\gamma$ -GTP活性は、健常者においては酸化傷害や炎症の指標と強く関連する[82]。また、健診受診者を対象とした腹部CTスキャンによる内臓脂肪面積と皮下脂肪面積の要因分析から、血漿 $\gamma$ -GTP活性が、皮下脂肪面積ではなく、内臓脂肪面積と強く関連することが明らかになっている[83]。それゆえ、本研究では、低GI食の継続的な摂取により、

軽度肥満者の内臓脂肪が減少し、その結果として耐糖能の改善あるいは炎症の抑制が起こっているものと考えられた。また、血中HbA1c値の低下傾向 ( $p=0.083$ ) を示したことからも低GI惣菜による食後高血糖の抑制が酸化障害および炎症の抑制に関与したと考えられる。本研究では、高GI食品である白米の摂取に対する介入は行っていないため、介入前後に食事のGIに変化はみられなかった。疫学研究におけるGIの検討は、一定期間に摂取した食品のGIとその摂取量から算出される「食事のGI」によって行われるため、本研究のように食品の組み合わせによる食後血糖値の抑制は、「食事のGI」には反映されない。今後は、一食ごとの食品の組み合わせを考慮した検討が必要であると考えられる。

## 要 約

第三章では、軽度肥満者を含む健常者を対象に、摂取エネルギー総量・比率および GI に配慮した低 GI 惣菜の継続摂取が、栄養素等摂取状況および生活習慣病関連指標に与える影響を検討した。成人男性 51 名を年齢、BMI 等を対応させた上で介入群と対照群に割り付け、介入群には調理済み低 GI 惣菜を 1 週間に 15 食分ずつを宅配し、5 週間継続摂取させた。対照群には通常通りの食事を継続させた。ベースラインおよび介入期間中に 3 日間の食事記録法による食事調査を行い、栄養素等摂取量を算出した。介入期間の前後に、身体計測および血液生化学検査を行った。

介入群は、介入期間中にエネルギー摂取量および脂質摂取量が有意に減少した ( $p < 0.01$ )。また、体重、腹囲、BMI、LDL コレステロール、 $\gamma$ -GTP が有意に減少し ( $p < 0.01$ )、HbA1c に減少傾向 ( $p = 0.08$ ) がみられた。本介入試験では、エネルギーおよび GI に配慮した低 GI 惣菜の継続的な摂取により軽度肥満者の内臓脂肪が減少し、結果として耐糖能の改善あるいは炎症の抑制が起こっているものと考えられた。

Table 8 Body composition and Clinical indicators in the 2 groups.

Intervention (n=22)					Control (n=17)						
		Baseline		Intervention		<i>p</i> <sup>*</sup>	Baseline		Intervention		<i>p</i> <sup>*</sup>
		mean	sd	mean	sd		mean	sd	mean	sd	
Body weight	kg	76.4	9.8	73.9	9.8	<0.001	72.2	5.4	71.7	5.3	
Waist circumference	cm	90.4	7.4	88.7	8.0	0.008	86.9	3.2	86.7	3.4	
BMI	kg/m <sup>2</sup>	26.3	2.4	25.4	2.5	<0.001	25.4	2.1	25.2	1.9	
AST	U/l	23.5	8.8	24.4	9.1		25.4	9.6	26.6	12.3	
ALT	U/l	29.2	16.3	27.6	18.7		35.3	24.8	39.2	38.6	
γ-GTP	U/l	44.1	22.4	38.7	21.7	0.024	41.2	27.7	41.4	22.2	
TC	mg/dl	211.4	38.7	201.9	41.3	0.009	193.5	28.0	192.1	25.0	
HDL-C	mg/dl	50.7	8.6	49.3	12.2		52.5	8.4	53.9	9.1	
LDL-C	mg/dl	130.6	35.6	121.3	36.0	0.007	121.8	31.8	117.8	26.5	
TG	mg/dl	187.2	165.2	172.0	150.5		131.9	62.8	114.8	41.3	
FPG	mg/dl	100.3	21.5	96.0	12.0		99.3	10.2	94.5	9.2	0.004
HbA1c	%	5.0	0.4	4.9	0.4	0.083	5.0	0.3	5.0	0.4	
1•5AG	μg/ml	26.5	9.3	25.5	8.6	0.026	24.6	8.9	23.8	8.5	0.018
IRI	μU/ml	9.1	7.5	7.9	10.0		6.8	4.4	6.3	3.3	
HOMA		2.3	2.2	1.9	2.5		1.7	1.3	1.5	0.7	
h-CRP	mg/dl	0.09	0.14	0.08	0.11		0.05	0.05	0.04	0.04	

\* :P values were calculated by paired t-test.

Table 9 Dietary record data in the 2 groups.

		Intervention (n=22)				Control (n=17)			
		Baseline		Intervention		Baseline		Intervention	
		mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd
Energy	kcal/□	2301	511	2062	361	2423	212	2335	184
Protein	g/□	81.3	17.8	80.4	11.5	89.6	13.7	81.2	14.5
(% of energy)	%	14.4	2.5	15.8	2.0	14.8	2.1	14.0	2.5
Fat	g/□	66.0	19.1	50.4	13.4	68.2	13.5	62.4	12.5
(% of energy)	%	25.8	4.4	21.9	3.7	25.2	3.9	24.1	4.4
Carbohydrate	g/□	312.3	79.9	292.7	60.9	328.2	39.2	324.2	52.6
(% of energy)	%	59.8	5.6	62.3	3.9	59.9	4.2	62.0	5.8
Calcium	mg	416	232	414	135	530	161	448	191
Iron	mg	7.7	2.3	8.0	1.8	8.9	2.0	7.8	1.7
retinol	μg	418	186	534	185	522	252	347	171
Vitamin B1	mg	1.0	0.3	1.1	0.3	1.0	0.3	1.1	0.3
Vitamin B2	mg	1.1	0.3	1.1	0.3	1.4	0.4	1.2	0.2
Vitamin C	mg	72	41	100	50	84	31	82	38
soluble dietary fiber	g	2.6	0.9	2.7	0.7	2.8	1.0	2.9	0.9
insoluble dietary fiber	g	8.1	2.9	10.0	2.3	9.7	2.2	9.5	3.4
Dietary fiber	g	11.6	3.9	13.4	3.1	13.0	3.3	12.7	4.1
Salt	g	10.0	2.3	8.7	1.6	10.8	2.5	10.2	2.6
Glycemic Index		61.0	13.0	63.1	13.0	63.2	6.5	63.8	5.9
Glycemic Load	(/1000kcal)	80.2	20.3	85.2	19.0	82.5	13.3	82.5	13.3

\*:P values were calculated by paired t-test.

## 総 括

本研究では、日本人の食事における炭水化物の「質」に着目し、GI 低減効果のある食べ方の探索、低 GI 食の単回および中期継続摂取による検討を行った。低 GI の有効性については国内外で報告され、多くの国々で糖尿病の予防および治療に取り入れられつつある。近年、大きな問題となっているメタボリックシンドロームや2型糖尿病の増加に、GI および GL が関与している可能性が指摘されている。白米を主食とする日本人の食事は、他国に比べて「食事全体の GI」が高く、日本はこの問題に積極的に取り組む必要がある。しかし、研究の多くは日本とは食習慣が異なる欧米諸国によるものであり、米飯を主な炭水化物源とする日本をはじめとしたアジア諸国からの報告は少なく、また、研究の多くは食品単独または米飯と副食一品による検討が中心で、日本人の日常的な食事の形式である主食・主菜・副菜がそろった食事、複合食での検討はなされてこなかった。

本研究の第一章では、①米飯を主食とする複合食の血糖上昇を緩慢にする食事構成として、主食である白米を玄米、パスタへ置換すること、②白米による高血糖を抑制する副食の選択として、生の長芋、雑豆類が効果のあることを示した。

第二章では、第一章の結果をもとに低 GI 食を開発した。開発した低 GI 食は、インスリンの分泌を抑制しながら急激な血糖上昇を抑制していることを明らかにした。

第三章では、高 GI 食品である白米を主食としながら、GI 低減効果のある副食によって日常の習慣的な食事を低 GI 化した際の生活習慣病関連因子の改善傾向を、前向き介入試験により示した。

本研究の成果は、現在厚労省がまとめている外食・中食における「健康な食事」認証への科学的根拠の付加など、食環境整備においても有益であると考ええる。今後は、GI との関連が報告されているメタボリックシンドロームリスク者を対象に、低 GI 食摂取による炎症関連遺伝子の変化とその意義や、低 GI 食の長期継続摂取の効果等について、一次予防の観点からより詳細な検証を行っていきたい。

## 参考文献

- [1] 厚生労働省, 日本人の長寿を支える「健康な食事」のあり方に関する検討会報告書 (2014)
- [2] DECODA Study Group; International Diabetes Epidemiology Group. : Cardiovascular risk profile assessment in glucose-intolerant Asian individuals--an evaluation of the World Health Organization two-step strategy : the DECODA Study (Diabetes Epidemiology : Collaborative Analysis of Diagnostic Criteria in Asia) . *Diabet. Med.*, **19**, 549-557 (2002) .
- [3] DECODE Study Group, the European Diabetes Epidemiology Group. : Glucose tolerance and cardiovascular mortality: comparison of fasting and 2-hour diagnostic criteria. *Arch. Intern. Med.*, **161**, 397-405 (2001) .
- [4] Tominaga, M., Eguchi, H., Manaka, H., Igarashi, K., Kato, T. and Sekikawa, A.: Impaired Glucose Tolerance Is a Risk Factor for Cardiovascular Disease, but Not Impaired Fasting Glucose. The Funagata Diabetes Study. *Diabetes. Care.*, **22**, 920-924 (1999) .
- [5] Hanefeld, M. : Cardiovascular benefits and safety profile of acarbose therapy in prediabetes and established type 2 diabetes. *Cardiovasc. Diabetol.*, **6** , 20 (2007) .
- [6] Mochizuki, K., Shimada, M., Tanaka, Y., Fukaya, N. and Goda, T. : Reduced expression of  $\beta 2$  integrin genes in rat peripheral leukocytes by inhibiting postprandial hyperglycemia. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **74**, 2470-2474 (2010) .
- [7] Osonoi, T., Saito, M., Mochizuki, K., Fukaya, N., Muramatsu, T., Inoue, S., Fuchigami, M., and Goda, T.: The  $\alpha$ -glucosidase inhibitor miglitol decreases glucose fluctuations and inflammatory cytokine gene expression in peripheral leukocytes of Japanese patients with type 2 diabetes mellitus. *Metabolism.*, **59**, 1816-1822 (2010).
- [8] Murayama, Y., Mochizuki, K., Shimada, M., Fujimoto, S., Nukui, K., Shibata, K., and Goda, T. : Dietary supplementation with alpha-amylase inhibitor wheat albumin to high-fat dietinduced insulin-resistant rats is associated with increased expression of genes related to fatty acid synthesis in adipose tissue. *J. Agri. Food. Chem.*, **57**, 9332-9338 (2009) .
- [9] Nanri, AI., Mizoue, T., Noda, M., Takahashi, Y., Kato, M., Inoue, M. and Tsugane, S. : Japan Public Health Center-based Prospective Study Group. Rice intake and type 2 diabetes in Japanese men and women: the Japan Public Health Center-based Prospective Study. *Am. J. Clin. Nutr.*, **92**, 1468-77 (2010) .
- [10] Oba, S., Nanri, A., Kurotani, K., Goto, A., Kato, M., Mizoue, T., Noda, M., Inoue, M.

- and Tsugane, S.: Japan Public Health Center-based Prospective Study Group. Dietary glycemic index, glycemic load and incidence of type 2 diabetes in Japanese men and women: the Japan Public Health Center-based Prospective Study. *Nutr. J.*, **12**, 165 (2013) .
- [11] Jenkins, DJ, Wolever, TM, Jenkins, AL, Giordano, C, Giudici, S, Thompson, LU, Kalmusky, J., Josse, RG. and Wong, GS. : Low glycemic response to traditionally processed wheat and rye products: bulgur and pumpernickel bread, *Am. J. Clin. Nutr.*, **43**, 516-520 (1986) .
- [12] Slavin, JL., Martini, MC., Jacobs, DR Jr. and Marquart, L. : Plausible mechanisms for the protectiveness of whole grains. *Am. J. Clin. Nutr.*, **70**, 459S-463S (1999) .
- [13] Behall, KM., Scholfield, DJ., Yuhaniak, I. and Canary, J. : Diets containing high amylose vs amylopectin starch : effects on metabolic variables in human subjects, *Am. J. Clin. Nutr.*, **49**, 337–344 (1989) .
- [14] Panlasigui, LN., Thompson, LU., Juliano, BO., Perez, CM., Yiu, SH. and Greenberg, GI : Rice varieties with similar amylose content differ in starch digestibility and glycemic response in humans. *Am. J. Clin. Nutr.*, **54**, 871–877 (1991) .
- [15] Collier, G. and O’Dea, K.: The effect of coingestion of fat on the glucose, insulin, and gastric inhibitory polypeptide responses to carbohydrate and protein. *Am. J. Clin. Nutr.*, **37**, 941–944 (1983) .
- [16] Nuttall, FQ., Mooradian, AD., Gannon, MC., Billington, C. and Krezowski, P. : Effect of protein ingestion on the glucose and insulin response to a standardized oral glucose load. *Diabetes. Care.*, **7**, 465–470 (1984) .
- [17] Ostma, E., Granfeldt, Y., Persson, L. and Björck, I. : Vinegar supplementation lowers glucose and insulin responses and increases satiety after a bread meal in healthy subjects. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **59**, 983-988 (2005) .
- [18] Jenkins, DJA., Wolever, TMS., Taylor, RH., Barker, H., Hasemein, F., Baldwin, JM., Bowling, AC., Newman, HC., Jenkins, AL. and Goff, DV. : Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. *Am. J. Clin. Nutr.*, **34**, 184–190 (1981) .
- [19] Wolever, TMS., Jenkins, DJA., Jenkins, AL. and Josse, RG. : The glycemic index: methodology and clinical implications. *Am. J. Clin. Nutr.* **54**, 846–854 (1991) .
- [20] Foster-Powell, k., Miller, JB. : International table of glycemic index. *Am J Clin Nutr.* **62**, 871-890 (1995) .
- [21] Foster-Powell, K., Holt, SH. and Brand-Miller, JC. : International table of glycemic index and glycemic load values. *Am J Clin Nutr.* **76**, 5-56 (2002) .

- [22] Atkinson, FS., Foster-Powell, K. and Brand-Miller, JC. : International tables of glycemic index and glycemic load values: 2008. *Diabetes, Care.*, **31**, 2281-2283 (2008) .
- [23] FAO/WHO Expert consultation. Carbohydrates in human nutrition. FAO/WHO Food and Nutrition, *FAO/WHO Geneva*, 1-66 (1998) .
- [24] Diabetes and Nutrition Study Group of the European Association for Study of Diabetes. Recommendations for nutritional management of patients with diabetes mellitus. *Diab Nutr Metab.*, **8**, 186-189 (1995) .
- [25] World Health Organization. Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases. Technical Report Series., **797**, 1-204 (1990) .
- [26] Canadian Diabetes Association. : Guidelines for the nutritional management of diabetes mellitus in the 1990's (Position Statement). *Beta. Release.*, **13**, 8-17 (1989) .
- [27] Barclay, AW., Petocz, P., McMillan-Price, J., Flood, VM., Prvan, T., Mitchell, P. and Brand-Miller, JC. : Glycemic index, glycemic load, and chronic disease risk a meta-analysis of observational studies. *Am. J. Clin. Nutr.*, **87**, 627-37 (2008) .
- [28] Livesey, G., Taylor, R., Hulshof, T. and Howlett, J.: Glycemic response and health--a systematic review and meta-analysis : relations between dietary glycemic properties and health outcomes. *Am. J. Clin. Nutr.*, **87**, 258S-268S (2008) .
- [29] 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) .
- [30] 厚生労働省. 日本人の食事摂取基準 (2010年版)「日本人の食事摂取基準」策定検討会報告書, 111 (2009) .
- [31] Sugiyama, M., Tang, AC., Wakaki, Y., Koyama, W.: Glycemic index of single and mixed meal foods among common Japanese foods with white rice as a reference food. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **57**, 743-52 (2003) .
- [32] 杉山みち子, 中本典子, 安部亘佐子, 小山和作, 若木陽子, 細谷憲政. 米飯ならびに米加工品のグリセミック インデックスに関する研究. *Health Sciences.*, **16**, 175-186 (2000) .
- [33] 柳井一男, 松井貞子, 伊部陽子, 大川武, 藤山康広, 荒木達夫, 林進, 横山淳一, 田中照二.: 果物に関する Glycemic Indexの検討. 日本病態栄養学会誌 **11**, 29-35, (2008)
- [34] Amano, Y., Kawakubo, K., Lee, JS., Tang, AC., Sugiyama, M. and Mori, K. : Correlation between dietary glycemic index and cardiovascular disease risk factors among Japanese

- women. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **58**, 1472–1478 (2004) .
- [35] Soh, NL. and Brand-Miller, J. : The glycemic index of potatoes : the effect of variety, cooking method and maturity. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **53**, 249-254 (1999) .
- [36] Tahvonen, R., Hietanen, R. M., Shihvonen, J. and Salminen, E. : Influence of different processing methods on the glycemic index of potato (Nicola) , *J. Food. Compost. Anal.*, **19**, 372-378 (2006) .
- [37] 日本Glycemic Index研究会. : 第5回日本glycemic Index研究会記録, pp 30-31 (2007) .
- [38] Behall, KM., Scholfield, DJ., Hallfrisch, JG. and Liljeberg-Elmståhl, HG. : Consumption of both resistant starch and beta-glucan improves postprandial plasma glucose and insulin in women. *Diabetes. Care*, **29**, 976-981 (2006) .
- [39] Wolever, TMS., Katzman-Relle, L., Jenkins, AL., Vuksan, V., Josse, RG. and Jenkins, DJA. : Glycemic index of 102 complex carbohydrate foods in patients with diabetes. *Nutr. Res.*, **14**, 651-669 (1994) .
- [40] Taniguchi, A., Yamanaka-Okumura, H., Nishida, Y., Yamamoto, H., Taketani, Y. and Takeda, E.: Natto and viscous vegetables in a Japanese style meal suppress postprandial glucose and insulin responses. *Asia. Pac. J. Clin. Nutr.*, **17**, 663-668 (2008) .
- [41] Yamanaka, N., Ogawa, N., Takahashi, T., Maki, Y., and Sakata, T. : Effect of the Viscous Exudate of Mekabu (Sporophyll of *Undaria pinnatifida*) on Glucose Absorption in Rats. *Food. Sci. Technol. Res.*, **6**, 306-309 (2000) .
- [42] Behall, KM., Scholfield, DJ. and Canary, J. : Effect of starch structure on glucose and insulin responses in adult, *Am. J. Clin. Nutr.*, **47**, 428-432 (1988) .
- [43] 福島和彦, 船田良, 杉山淳司, 高部圭司, 梅澤俊明, 山本浩之.: 木質の形成 バイオマス科学の招待. 海青社, 東京. (2003) .
- [44] 海老原清.: レジスタントスターチの生理機能, 日本食品素材研究会誌, **8**, 1-8 (1992) .
- [45] 齋藤優介, 西繁典, 小疇浩, 弘中和憲, 小嶋道之.: 豆類ポリフェノールの抗酸化活性ならびに  $\alpha$ -アミラーゼおよび  $\alpha$ -グルコシダーゼ阻害活性, 日本食品科学工学会誌, **54**, 563-567 (2007) .
- [46] AOAC INTERNATIONAL: Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL 18th Ed. (2006) .
- [47] 丸山亜希, 廣田幸子, 下田妙子.: 健常成人女性の食後血糖値に及ぼす切干大根およびひじきの食物繊維量の影響, 九州女子大学紀要, **41**, 55-63 (2005) .
- [48] 日本 Glycemic Index 研究会.: 第 5 回日本 Glycemic Index 研究会抄録集, p 7

(2007) .

- [49] Ebihara, K. and Kiriya, S.: Comparative effects of water-soluble and water-insoluble dietary fibers on various parameters relating to glucose tolerance in rats. *Nutr. Rep. Int.*, **26**, 193-201 (1982) .
- [50] 大場君枝, 山となつみ, 小川宣子 : さつま芋の加熱調理及び保存による食物繊維の性状変化, 岐阜女子大学紀要, **36**, 115-120 (2007) .
- [51] 綾野雄幸 : 澱粉の加熱処理並びに糊化後の貯蔵温度が消化に及ぼす影響. 千葉大学園芸学部学術報告, **12**, 45-49 (1964) .
- [52] Englyst, H. N., Kingman, S. M. and Cummings, J. H.: Classification and measurement of nutritionally important starch fractions, *Eur. J. Clin. Nutr.*, **46**, S33-S60 (1992) .
- [53] García-Alonso, A. and Goñi, I.: Effect of processing on potato starch : In vitro availability and glycaemic index. *Nahrung.*, **44** : 19-22 (2000) .
- [54] Asp, N. G.: Resistant starch. Proceeding of the second plenary meeting of EURESTA: European FLAIR Concerted Action No. 11 on physiological implications of the consumption of resistant starch in man, *Eur. J. Clin. Nutr.*, **46**, S1 (1992) .
- [55] Ebihara, K., Shiraishi, R. and Okuma, K.: Hydroxypropyl-modified potato starch increases fecal bile acid excretion in rats, *J. Nutr.*, **128**, 848-854 (1998) .
- [56] Kneen, E., Standstedt, R.M. An amylase inhibitor from certain cereals. *J. Am. Chem. Soc.*, **65**, 1247 (1943) .
- [57] Oda, Y., Matsunaga, T., Fukuyama, K., Miyazaki, T. and Morimoto, T. Tertiary and quaternary structures of 0.19 -amylase inhibitor from wheat kernel determined by X-ray analysis at 2.06-Å resolution. *Biochemistry.*, **36**, 13503-13511 (1997) .
- [58] Maeda, K., Hase, T. and Matsubara, H. Complete amino acid sequence of an alpha-amylase inhibitor in wheat kernel. *Biochem. Biophys. Acta.*, **743** : 52-57 (1983) .
- [59] Kashlan, N. and Richardson, M. The complete amino acid sequence of a major wheat protein inhibitor of  $\alpha$ -amylase. *Phytochemistry.*, **20**, 1781-1784 (1981) .
- [60] Koike, D., Yamadera, K. and DiMagno, EP. : Effect a wheat amylase inhibitor on canine carbohydrate digestion, gastrointestinal function, and pancreatic growth. *Gastroenterology.*, **108**, 1221-1229 (1995) .
- [61] Choudhury, A., Maeda, K., Murayama, R. and DiMagno, EP. : Character of a wheat amylase inhibitor preparation and effects on fasting human pancreaticobiliary secretions and hormones. *Gastroenterology.*, **111**, 1313-1320 (1996) .
- [62] Kodama, T., Miyazaki, T., Kitamura, I., Suzuki, Y., Namba, Y., Sakurai, J., Torikai, Y. and Inoue, S.: Effects of single and long-term administration of wheat albumin on blood

- glucose control: randomized controlled clinical trials. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **59**, 384-392 (2005) .
- [63] Grandfeldt, Y., Björck, I. and Hagander, B.: On the importance of processing conditions, product thickness and egg addition for the glycaemic and hormonal responses to pasta : a comparison with bread made from 'pasta ingredients'. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **45**, 489-499 (1991) .
- [64] Miller, JC. : Importance of glycemic index in diabetes. *Am. J. Clin. Nutr.*, **59**, 747S-752S (1994) .
- [65] Brang-Miller, J., Hayne, S., Petocz, P. and Colagiuri, S.: Low-glycemic index diets in the management of diabetes: a metaanalysis of randomized controlled trials. *Diabetes. Care.*, **26**, 2261-2267 (2003) .
- [66] Gentilcore, D., Chaikomin, R., Jones, KL., Russo, A., Feinle-Bisset, C., Wishart, JM., Rayner, CK. and Horowitz, M. : Effects of fat on gastric emptying of and the glycemic, insulin, and incretin responses to a carbohydrate meal in type 2 diabetes. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, **91**, 2062-2067 (2006) .
- [67] Gutzwiller, JP., Drewe, J., Göke, B., Schmidt, H., Rohrer, B., Lareida, J. and Beglinger, C. : Glucagon-like peptide-1 promotes satiety and reduces food intake in patients with diabetes mellitus type 2. *Am. J. Physiol.*, **276**, R1541-1544 (1999) .
- [68] Jenkins, DJ., Kendall, CW., Augustin, LS., Franceschi, S., Hamidi, M., Marchie, A., Jenkins, AL. and Axelsen, M. : Glycemic index : overview of implications in health and disease. *Am. J. Clin. Nutr.*, **76**: 266S-73S (2002) .
- [69] The technical collaboration of the FAO., Eurotex L. : Glycaemic Index and Health : the Quality of the Evidence, Danone, France. *John. Libbery. Eurotext.*, 1-48 (2001) .
- [70] Liljeberg, H. and Björck, I.: Delayed gastric emptying rate may explain improved glycaemia in healthy subjects to a starchy meal with added vinegar. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **52**, 368-371 (1998) .
- [71] Dangin, M., Boirie, Y., Garcia-Rodenas, C., Gachon, P., Fauquant, J., Callier, P., Ballèvre, O. and Beaufrère, B.: The digestion rate of protein is an independent regulating factor of postprandial protein retention. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, **280**, E340-348 (2001) .
- [72] Nilsson, M., Holst, JJ. and Björck, IME. : Metabolic effects of amino acid mixtures and whey protein in healthy subjects: studies using glucose-equivalent drinks. *Am. J. Clin. Nutr.*, **85**, 996-1004 (2007) .
- [73] Spieth, LE., Harnish, JD., Lenders, CM., Raezer, LB., Pereira, MA., Hangen, SJ. and

- Ludwig, DS. : A low-glycemic index diet in the treatment of adolescent obesity. *Arch. Pediatr. Adolesc. Med.*, **157**, 773-779 (2003) .
- [74] Krog-Mikkelsen, I., Sloth, B., Dimitrov, D., Tetens, I., Björck, I., Flint, A., Holst, JJ., Astrup, A., Elmståhl, H. and Raben, A. : A low glycemic index diet does not affect postprandial energy metabolism but decreases postprandial insulinemia and increases fullness ratings in healthy women. *J. Nutr.*, **141**, 1679-1684 (2011) .
- [75] Juntunen, KS., Niskanen, LK., Liukkonen, KH., Poutanen, KS., Holst, JJ., Mykkanen, HM. : Postprandial glucose, insulin, and incretin responses to grain products in healthy subjects. *Am. J. Clin. Nutr.*, **75**, 254-262 (2002) .
- [76] Juntunen, KS., Laaksonen, DE., Autio, K., Niskanen, LK., Holst, JJ., Savolainen, KE., Liukkonen, KH., Poutanen, KS., Mykkanen, HM. : Structural differences between rye and wheat breads but not total fiber content may explain the lower postprandial insulin response to rye bread. *Am. J. Clin. Nutr.*, **78**, 957-964 (2003) .
- [77] Ebbeling, CB., Leidig, MM., Sinclair, KB., Hangen, JP., Ludwig, DS.: A reduced-glycemic load diet in the treatment of adolescent obesity. *Arch. Pediatr. Adolesc. Med.*, **157**, 773-9 (2003) .
- [78] Spieth, LE., Harnish, JD., Lenders, CM., Raezer, LB., Pereira, MA., Hangen, SJ. and Ludwig, DS.: A low-glycemic index diet in the treatment of pediatric obesity. *Arch. Pediatr. Adolesc. Med.*, **154**, 947-51 (2000) .
- [79] Heilbronn LK., Noakes, M., Clifton, PM. : The effect of high- and low-glycemic index energy restricted diets on plasma lipid and glucose profiles in type 2 diabetic subjects with varying glycemic control. *J. A. Coll. Nutr.* 21, 120-127 (2002) .
- [80] Ludwig, DS1. : The glycemic index: physiological mechanisms relating to obesity, diabetes, and cardiovascular disease. *JAMA*. **287**, 2414-23 (2002) .
- [81] Thomas, D., Elliott, EJ. and Baur, L. : Low glycemic index or low glycemic load diets for overweight and obesity. *Cochrane. Database. Syst. Rev.*, 18 (2007) .
- [82] Mochizuki, K., Misaki, Y., Miyauchi, R., Takabe, S., Shimada, M., Miyoshi, N., Ichikawa, Y. and Goda, T.: Circulating interleukin-1 $\beta$  and interleukin-6 concentrations are closely associated with  $\gamma$ -glutamyltranspeptidase activity in middle-aged Japanese men without obvious cardiovascular diseases. *Metabolism.*, **60**, 914-922 (2011) .
- [83] Mochizuki, K., Miyauchi, R., Misaki, Y., Shimada, M., Kasezawa, T., Tohyama, K. and Goda T.: Accumulation of visceral fat is positively associated with serum ALT and  $\gamma$ -GTP activities in healthy and preclinical middle-aged Japanese men. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, **57**, 65-73 (2011) .

## 謝 辞

本研究を遂行し、学位論文をまとめるにあたり、終始丁寧なご指導、ご援助を賜りました、静岡県立大学大学院 薬食生命科学総合学府 フードマネジメント研究室・市川陽子准教授ならびに佐野文美助教に深く感謝申し上げます。

さらに、研究に際し、多くのご助言を賜りました、静岡県立大学大学院 薬食生命科学総合学府 栄養生理学研究室・合田敏尚教授、山梨大学大学院 総合研究部 生命環境学域生命環境学系（地域食物科学）・望月和樹教授に心より感謝申し上げます。

また、研究にご協力いただきました、アオノミート株式会社およびアオノフレッシュミート株式会社の皆様、静岡市役所 経済局商工部 産業政策課の皆様、全ての被験者の皆様、静岡県立大学フードマネジメント研究室の皆様に、心より深く感謝申し上げます。

1	◎豚肉ともやしの炒め物 ◎ほうれん草のじゃこ炒め ◎大根煮あんかけ 251kcal 塩分相当量2.6g	◎鯖のカレームニエル ◎ブロッコリー焼成 ◎ラタトゥイユ 302kcal 塩分相当量2.7g	◎鶏の照り焼き ◎チンゲン菜の煮浸し ◎炒り豆腐 256kcal 塩分相当量3.3g
2	◎ごぼうと鶏肉の味噌煮 ◎切干大根の炒り煮 ◎なすとわかめの和え物 272kcal 塩分相当量2.9g	◎鮭の南部焼き ◎長芋のポテトサラダ ◎ほうれん草のごま和え 299kcal 塩分相当量2.2g	◎豚肉のしょうが焼き ◎かぶの煮物 ◎にんじんの炒め煮 262kcal 塩分相当量1.5g
3	◎カレイ煮つけ ◎オクラとなすの香味炒め ◎チンゲン菜の煮浸し 176kcal 塩分相当量1.9g	◎マーボ茄子 ◎じゃがいもと青菜のおかかまぶし ◎ブロッコリーの中華和え 175kcal 塩分相当量2.3g	◎牛肉と長芋の炒め物 ◎キャベツとしらすのさっぱり和え ◎ひじきの煮物 275kcal 塩分相当量2.1g
4	◎鮭のトマトソースがけ ◎かぼちゃのチーズ焼き ◎キャベツのブレザー 261kcal 塩分相当量2.2g	◎鶏肉のくわ焼き ◎小松菜の炒め煮 ◎揚げ茄子 311kcal 塩分相当量1.9g	◎牛肉とごぼうの煮物 ◎大根とにんじんの煮なます ◎チンゲン菜のナムル風 168kcal 塩分相当量1.4g
5	◎鶏肉と大豆のうま煮 ◎オクラとわかめのしょうが醤油がけ ◎キャベツ炒め 161kcal 塩分相当量1.8g	◎さばのピリ辛味噌煮 ◎チンゲン菜の炒め煮 ◎ごぼうのごま酢和え 234kcal 塩分相当量2.7g	◎豚肉のマスタード焼き ◎ほうれん草のごま和え ◎南瓜の煮物 324kcal 塩分相当量1.6g
6	◎南蛮漬け ◎れんこんのきんぴら ◎ほうれん草のお浸し 283kcal 塩分相当量1.8g	◎牛肉おろし煮 ◎きのこピリ辛炒め ◎もやしのごま酢和え 200kcal 塩分相当量1.5g	◎きのこハンバーグ ◎ごぼうとにんじんのごま和え ◎ブロッコリーと桜海老ナッツ炒め 270kcal 塩分相当量3.1g
7	◎白身魚の中華風あんかけ ◎まいたけとれんこん炒め ◎青梗菜スープ煮 153kcal 塩分相当量2.4g	◎鶏肉のとろろ焼き ◎ほうれん草の磯部和え ◎大根の炒め煮 234kcal 塩分相当量2.6g	◎豚肉と枝豆のさっぱり炒め ◎なすとじゃこの田舎煮 ◎きんぴらごぼう 294kcal 塩分相当量2.0g
8	◎きのこ長芋グラタン ◎ほうれん草の粒マスタード風味 ◎にんじんのナッツ和え 218kcal 塩分相当量1.5g	◎豚肉とゴーヤのみそ炒め ◎油揚げと小松菜の煮浸し ◎炒めなます 282kcal 塩分相当量3.2g	◎鰯の揚げ煮おろし ◎チンゲン菜のピリ辛和え ◎根菜の炒め物 219kcal 塩分相当量2.5g
9	◎鶏肉の山椒焼き ◎れんこん炒め ◎蒸しなすの和え物 293kcal 塩分相当量2.4g	◎鮭の甘酢あんかけ ◎大根と三つ葉のじゃこ炒め ◎土佐煮 239kcal 塩分相当量2.0g	◎つくね煮揚げ ◎いんげんのごまみそ和え ◎なすの煮浸し 354kcal 塩分相当量3.3g
10	◎キャベツと大豆の味噌炒め ◎南瓜の煮物 ◎なすの煮おろし 267kcal 塩分相当量1.8g	◎からあげ ◎ひじきの煮物 ◎きゅうりの酢の物 299kcal 塩分相当量2.7g	◎アスパラと豚肉のソテー ◎キャベツのブレザー ◎長芋のポテトサラダ 219kcal 塩分相当量0.8g