

Ⅱ 玄米の澱粉消化性および玄米摂取後の 血糖値の制御要因

1. はじめに

澱粉は穀類を原料とする食品の主成分であり、重要なエネルギー源として食事には欠かせない成分だが、国内外で糖尿病患者が年々増加している状況下では食後の血糖値上昇に影響を及ぼす成分として、その摂取方法に関心が集まっている。Englystらは、1990年代に人工消化液による澱粉の消化性を酵素分解の反応時間によって①RDS (Rapidly Digestible Starch：易消化性澱粉)、②SDS (Slowly Digestible Starch：遅消化性澱粉)、③RS (Resistant Starch：難消化性澱粉)に分類し(表1)、RDSとSDSの量比が食後血糖値の上昇度と関連性が高いことを明らかにしている^{1) 2)}。その後もSDSの重要性は注目されており、2011年には欧州食品安全委員会(EFSA)でも、穀類加工食品に含まれるSDSの含量と食後血糖値の相関性に関する意見が発表された。一方、我々日本人の主要な主食のひとつである米は、澱粉含量が高く、さらには含まれている澱粉は炊飯後、消化されやすい状態になるために、食後血糖値の上昇程度を指標化したグリセミックインデックス(GI)が高い食品として知られている。そのため、食後血糖値上昇が緩やかな主食となる食品や素材の開発が望まれている。一般的には、玄米は白米よりも歯ごたえがあり、消化吸収が遅いと考えられているため、血糖値上昇を緩やかにする素材として期待されている。しかし、白米と玄米の摂取後の血糖値を比較した過去の研究例を見ると、玄米摂取後の血糖値上昇が、白

表1 消化性(酵素分解性)による糖質の分類²⁾

	定義
Rapidly digestible starch (RDS)	<i>in vitro</i> 法での反応時間20分以内に消化される澱粉
Slowly digestible starch (SDS)	<i>in vitro</i> 法での反応時間20～120分の間に消化される澱粉
Resistant starch (RS)	<i>in vitro</i> 法での反応時間120分後の未消化画分
FSG	遊離のグルコース+ショ糖由来のグルコース
RAG	RDS+急速に食品から遊離するFSG
SAG	SDS+ゆっくり食品から遊離するFSG

米よりも緩やかになる傾向が見られた論文と、両者の違いが見られなかった論文が混在していた。Itoらは玄米、発芽玄米、白米摂食後の血糖値を比較し、白米と比較して玄米、発芽玄米ではGI値が有意に低くなったと報告している³⁾。Panlasiguiらの研究では、健常人および糖尿病患者での白米と玄米摂食後の血糖値を比較し、玄米摂食後では健常人で12.1%、糖尿病患者では35.6%も白米よりGI値が低くなったと示されている⁴⁾。Laiらも同様に、数種類の品種の米を用いて、玄米摂食後のGI値が、同じ品種の白米を摂取した時よりも低くなることを報告している⁵⁾。一方でMillerらの研究では、3品種の米について玄米と白米摂食後のGI値を比較し、1品種については玄米摂食後のGI値は白米摂取後より低くなったが、残り2品種については玄米と白米ではGI値に有意差が認められなかった⁶⁾。O'Deaらは粒のままとすりつぶした炊飯米について、玄米および白米摂食後の血糖値を比較して、すりつぶした炊飯米では玄米と白米摂食後の血糖値の推移はほぼ同じであったとの報告をしている⁷⁾。これらの論文では、白米および玄米の炊飯条件が論文によって異なる上に、日本人の我々の基準からすると加水量が低すぎるような条件も含まれていた。玄米は表層が果種皮で覆われており、吸水性が低く、白米と同じ炊飯条件で炊飯すると硬くてパサパサした炊飯米になってしまうため、一般的には玄米の炊飯時には加水量を増やし、圧力鍋や炊飯器の「玄米モード」を使用して炊飯する。ここでは玄米の炊飯条件に重点をおいて、炊飯米に含まれる澱粉の消化性に及ぼす影響について検討したので紹介する。さらに、代表的な炊飯条件で調製した炊飯米については、食後血糖値の推移も比較したので併せて結果を紹介する。

2. 炊飯条件が炊飯米の澱粉消化性に及ぼす影響

炊飯時の基本的な条件である洗米後の浸漬時間、加水量、炊飯器の機能としての炊飯モード、および炊飯器の種類の各種炊飯条件が玄米の炊飯米の澱粉消化性に及ぼす影響を調べた。茨城県産コシヒカリ玄米を原料に、精米機により搗精した白米（精米歩合91%程度）と玄米の表面を加工した表面加工玄米（精米歩合99.5%以上）を試料とした。表面加工玄米は、農研機構・食品研究部門で開発された穀類表面に創傷を形成させる技術（特許第4849520号）を用いて、玄米から調製した試料で、表面に傷があるために吸水が速く、通常のエ米よりは柔らかく炊きあがる特徴がある。玄米、表面加工玄米、および白米を試料として、同一の炊飯器を用いて炊飯前の浸漬時間、加水量、炊飯モードを変えて炊飯した炊飯米を用意した。炊飯米は炊き上がり直後に容器に移し、室温で30分間放置後、Englystらが提案した評価法¹⁾に従って、澱粉消化性の評価を実施した。人工消化液を作用させた20分後に遊離グルコース量の定量を行い、消化酵素による澱粉分解率の測定を行った。

玄米、表面加工玄米、白米について、浸漬条件（浸漬なし、5℃で一晩浸漬）

のみを変えて炊飯米の消化酵素による澱粉分解率を評価した結果、いずれの試料でも浸漬条件による影響は見られず、洗米後すぐに炊飯したものと一晚浸漬した後炊飯した試料の澱粉分解率に有意差は認められなかった (図 1A)。使用した炊飯器では予熱機能があり、通常の炊飯モードでも浸漬の必要がないように設計されているので、炊飯器にセットする直前の米の吸水状態は炊き上がりにあまり影響がない可能性が考えられる。一方で、加水量のみを変えて炊飯した試料では、加水量の影響が顕著に見られた。加水量を 1.5 倍から 2.0 倍に増やすことで、澱粉分解率は有意に上昇した (図 1B)。加水量が多い状態で炊飯すると炊飯米のテクスチャーは柔らかくなり、消化酵素が組織内部に浸透しやすくなることが主な原因として考えられる。

最近の炊飯器は多機能化が進み、様々な炊飯器および炊飯モードを選択できる。玄米モードを使えば、炊飯器で手軽に玄米がおいしく炊けるようになっていく。そこで、加水条件は同じにして、基本的な白米モードと玄米モードで玄米を炊飯し、澱粉分解率を比較した。その結果、玄米モードで炊飯した試料の澱粉分解率が白米モードの試料の値より、有意に高くなった (図 1C)。各炊飯モードでの炊飯中の温度変化を観察すると、玄米モードは 100℃ 付近での加熱時間が白米

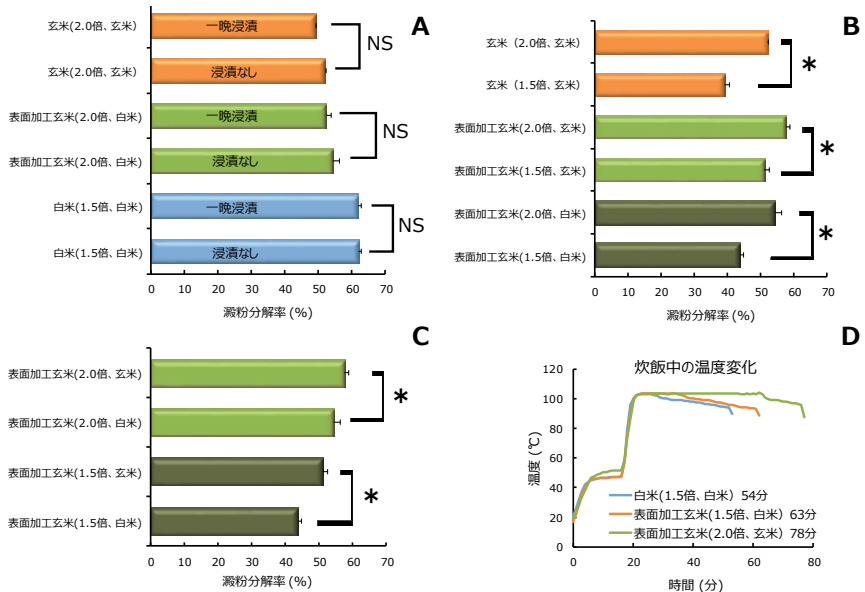


図 1 炊飯米の澱粉消化性に及ぼす炊飯条件の影響

A : 浸漬時間, B : 加水量, C : 炊飯モード, D : 炊飯中の温度変化, NS : 有意差なし, * : $p < 0.05$ 括弧内 : 数値は加水量, 玄米および白米は各々炊飯モードの玄米モード, 白米モードを示す。

モードよりも20分以上も長いので(図1D)、加熱時間の違いが内部の澱粉の糊化状態や炊飯米のテクスチャーに影響を及ぼしているものと考えられる。炊飯器の種類による影響を調べるために、代表的な4種類の炊飯器、①圧力IH式、②IH式、③マイコン式、④マイコン式(炊飯モードの選択ボタン無し)を使用して、洗米後浸漬をせず、同じ加水量(1.7倍)、通常の白米モード(④以外)で炊飯した表面加工玄米の澱粉分解率を比較した。その結果、圧力IH式とIH式で炊飯した炊飯米はほぼ同程度の澱粉分解率を示したが、マイコン式の炊飯器では有意に低い値を示した(図2)。さらに、2種類のマイコン式炊飯器の間にも有意差が認められた。炊飯時間、100℃までの昇温速度、および100℃付近での加熱時間が各種炊飯器で異なるため、各炊飯器による加熱方式と炊飯時の温度履歴の違いが、玄米の澱粉消化性の差異に反映されている結果となった。

3. 破碎処理が各種炊飯米の澱粉消化性に及ぼす影響

澱粉消化性の *in vitro* 評価法では、ヒトの消化過程を模擬した評価法になるべく近づけるために、消化過程の最初のステップである咀嚼に相当する破碎処理が不可欠である。Hoeblerらは、消化性を評価する *in vitro* 評価法における破碎処理の重要性に着目し、パンとパスタについてヒトが咀嚼した試料の粒度分布を解析し、ミンサー(肉挽き器)で破碎した試料が似たような粒度分布を示すことを明らかにした⁸⁾。著者らも炊飯米について、ミンサーとホモジナイザーを用いて破碎した後、破碎した試料の平均面積を解析した。塩沢ら⁹⁾によって報告された咀嚼した炊飯米の平均面積と比較し、ミンサーで前処理をした試料の方が咀嚼

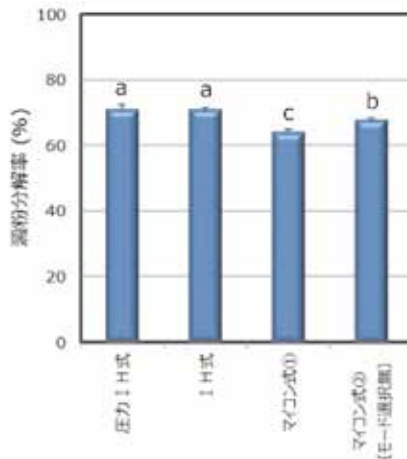


図2 炊飯器の種類による表面加工玄米の澱粉消化性の比較
洗米後浸漬せず、加水量は1.7倍、通常の白米モード(④以外)で炊飯。

した試料の平均面積に近いことを確認したので、各種炊飯米について粒のままとミンサーで破碎処理をした試料の澱粉消化性の評価を行った（図3）。その結果、試料の形態によって、白米、表面加工玄米、玄米の澱粉分解率の試料間差の傾向が大きく異なった。

粒の状態で測定した場合は、米の精米歩合の影響がはっきりと見られ、玄米の澱粉分解率が最も低く、表面加工玄米は白米と玄米の中間的な値を示した。玄米は表層が果種皮で覆われているため、吸水性が低く、内部への酵素浸透性も妨げられるため、内在する澱粉の分解速度が抑えられたと考えられる。表面加工玄米と玄米の精米歩合の違いはほんのわずかであるが、炊飯米の硬さを測定してみると表面加工玄米の方が柔らかいため、加工処理によって表面に傷があることから、玄米よりも吸水および酵素の浸透性が早いことが、玄米より澱粉分解率が高くなった原因として考えられる。玄米については炊飯条件の影響が顕著に見られ、白米と同じ炊飯条件で調製した玄米（1.5倍加水、白米モード）は、他の試料と比較して顕著に酵素による消化に対する抵抗性が高く、酵素反応2時間後の澱粉分解率も他の試料と比べて有意に低い値を示した。ただし、この条件下で炊飯した玄米はかたくてバサバサしているため、食感的には他の試料に比べてかなり劣る。一方、2.0倍加水、玄米モードで炊飯した玄米はほぼ白米同様の柔らかさになり、澱粉分解率は上昇した。表面加工玄米についても炊飯条件の影響は確

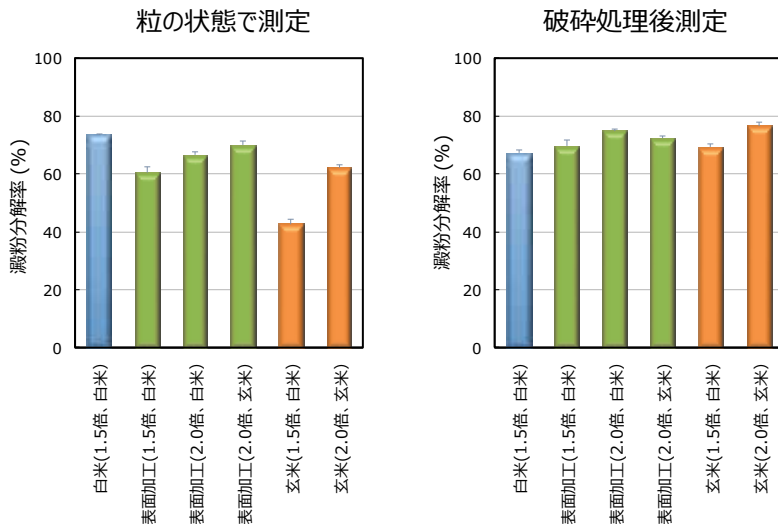


図3 各種炊飯米の消化酵素による澱粉分解率（反応時間20分）

括弧内：数値は加水量、玄米および白米は各々炊飯モードの玄米モード、白米モードを示す。

認でき、加水量の増加と玄米モードの炊飯によって、澱粉分解率は上昇した。

しかし、咀嚼を模擬したミンサーによる破碎処理をした試料では、各試料間差が小さくなり、同じ炊飯条件（1.5 倍加水，白米モード）で炊飯した白米，表面加工玄米，玄米では有意な差が認められなかった。さらに、2.0 倍加水で炊飯した表面加工および玄米については、白米よりも澱粉分解率が有意に高くなった。玄米と表面加工玄米は、粒のままで測定した澱粉分解率よりも、ミンサーで破碎処理をした試料を用いて測定した澱粉分解率が高くなったが、標準試料の白米はミンサー処理をすることによって澱粉分解率が低下する傾向が見られた。破碎処理をすれば、食品試料の粒度は小さくなり、消化酵素が作用できる表面積が増える上に、組織内部の澱粉に酵素が作用しやすい状態になる。しかし、白米の炊飯米の場合は、付着性が極めて高いために（図4）、ミンサー処理をすることによって部分的に凝集し、団子状の食塊を形成したため、今回の測定における振盪・攪拌条件では酵素液中の試料の拡散が制御され、消化酵素による澱粉の分解速度が遅くなったと考えられる。

4. 各種炊飯米摂取後の血糖値の推移

日本人の代表的な主食のひとつである米飯は澱粉含量が高く、食後血糖値が上がりやすい食品として認識されているため、食後血糖値が急激に上昇しにくい食

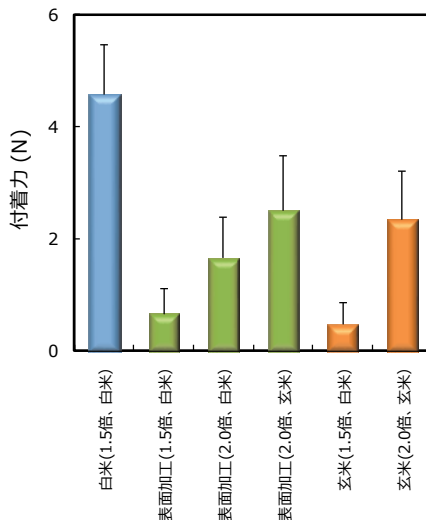


図4 各種炊飯米の付着性

括弧内：数値は加水量，玄米および白米は各々炊飯モードの玄米モード，白米モードを示す。

べ方に関心が集まっている。杉山らは食後血糖値の上昇程度の指標となるGI値の観点からごはん食の食べ方を検討した¹⁰⁾。116種類の米飯の食べ方についてGI一覧表を作成し、食べ合わせや調理法等の影響を明らかにした。国内だけではなく、海外でも“cooked rice”の食後血糖値に関する様々な研究が報告されている。Leeらは白米の炊飯方法がラットにおける食後血糖値に及ぼす影響を調べ、高圧蒸気で炊飯した白米が他の加熱方法で炊飯した白米よりも血糖値が高くなることを明らかにした¹¹⁾。澱粉を構成するアミロースとアミロペクチンの2種類の高分子の組成割合が澱粉の消化性に影響を及ぼしており、アミロース含量が高い澱粉ほど消化抵抗性が高い傾向にあるので、炊飯米についても食後血糖値上昇を緩やかになる効果を期待し、高アミロース品種の利用が検討されてきた^{6) 12) 13)}。しかし、高アミロース米の炊飯米は澱粉の老化が速く、硬くて粘り気が少ない。炊飯米としては日本人の嗜好にはなかなか合わないため、主に米粉や麺などの加工品として利用されている。そして、玄米については最初に述べたように血糖値上昇を緩やかにする効果が期待され、白米と玄米の摂食後の血糖値を比較した研究例が報告されている。

今回著者らは、玄米および表面加工玄米について、澱粉消化性が異なった代表的な条件で炊飯した炊飯米を用いて血糖値測定の実験を実施した¹⁴⁾。試験食は①白米(1.5倍加水, 白米モード)、②表面加工玄米(1.5倍加水, 白米モード)、③表面加工玄米(2.0倍加水, 白米モード)④表面加工玄米(2.0倍加水, 玄米モード)、⑤玄米(1.5倍加水, 白米モード)、⑥玄米(2.0倍加水, 玄米モード)の6種類を用意し、炊飯器は1台に限定して、すべて同じ炊飯器を使用した(表2)。炊飯完了1時間後に各種炊飯米のグルコース量50gに相当する量を150mLの

表2 試験食の組成と摂取量

試料	総グルコース量 (%, db)	炊き上がり水分 含量(%, wb)	摂取量(グルコース 50g相当量)
白米 (1.5倍加水, 白米モード)	95.4 ± 2.3a	62.6 ± 0.6d	140.3
表面加工玄米 (1.5倍加水, 白米モード)	88.2 ± 0.3b	54.2 ± 0.0f	123.8
表面加工玄米 (2.0倍加水, 白米モード)	88.2 ± 0.3b	65.4 ± 0.4c	164.0
表面加工玄米 (2.0倍加水, 玄米モード)	88.2 ± 0.3b	67.4 ± 0.3b	174.1
玄米 (1.5倍加水, 白米モード)	86.2 ± 0.0b	56.3 ± 0.2e	132.6
玄米 (2.0倍加水, 玄米モード)	86.2 ± 0.0b	68.4 ± 0.2a	183.7

水と共に摂取し、血糖自己測定器によって空腹時（0分）、摂取15、30、45、60、90、120分後に血糖値を測定した。今回は、被験者（男性2名、女性4名）に15分間で試験食をすべて摂取するように指示しただけで、一口の量や咀嚼回数等は制限しなかった。加水量を1.5倍から2.0倍にすることで炊き上がりの水分含量が10%程度上昇し、さらには白米、玄米、表面加工玄米では精米歩合によって総グルコース含量が異なるため、炊飯米としての摂取量は試験食によって最大43gの差が生じた（表2）。

図5に各種炊飯米摂食後の血糖値の推移を示した。玄米および表面加工玄米と白米では若干血糖曲線のパターンに違いが見られ、玄米と表面加工玄米では摂食45分後に最大値を示したが、白米では摂食60分後が血糖値のピークであった。同じ条件で炊飯した玄米、表面加工玄米、白米（加水量1.5倍、白米モード）を比較すると、有意差は認められなかったが玄米および表面加工玄米がピーク値を示した摂食45分後では白米の方が低い値を示し、一方で摂食60分以降は白米が玄米より高くなる傾向を示した（図5A）。同じ条件で炊飯した玄米と表面加工玄米はほぼ同様の血糖値の推移を示した。異なる条件で炊飯した表面加工玄米および玄米を比較すると、表面加工玄米では炊飯条件の違いによる顕著な影響は見られず、60分以降で加水量が少ない条件で炊飯した試験食（1.5倍加水、白米モード）を摂食した際の血糖値がわずかに2.0倍加水の試験食より低くなる傾向を示した（図5B）。ところが、玄米では炊飯条件の影響が顕著に見られ、炊飯条件の異なる2種類の試験食では血糖値の推移にはっきりとした違いが認められた（図5C）。2.0倍加水、玄米モードで炊飯した玄米は他の試験食と比較すると摂取後45分まで急激な血糖値上昇を示し、45分後の血糖値では最も低い値を示した白米との間に有意差が認められた。そして45分以降は急激に低下し、最終的には白米よりも低い血糖値を示した。GI値の算出に用いる血糖値曲線下面積を解析した結果、4,216（白米）、3,349（表面加工玄米、1.5倍加水、白米モード）、4,272（表面加工玄米、2.0倍加水、白米モード）、4,020（表面加工玄米、2.0倍加水、玄米モード）、3,792（玄米、1.5倍加水、白米モード）、4,533（玄米、2.0倍加水、玄米モード）となり、各試料間で有意差が見られなかったが、2.0倍加水、玄米モードで炊飯した玄米が最も高い値を示した。一方で、1.5倍加水、白米モードで炊飯した玄米および表面加工玄米は白米よりも低くなる傾向を示した。

これらのデータは、玄米に期待されている血糖値上昇抑制効果とは相反する結果になったが、澱粉消化性や炊飯米のテクスチャーのデータも考慮すると、玄米の加水量と加熱時間を増やすことによって玄米がかなり柔らかくなり、澱粉分解率が増加したことが、摂取直後の急激な血糖値上昇の要因として考えられる。以上の結果から、白米と玄米の食後血糖値の比較試験は、特に玄米の炊飯条件によって違った傾向が見られることが明らかになった。

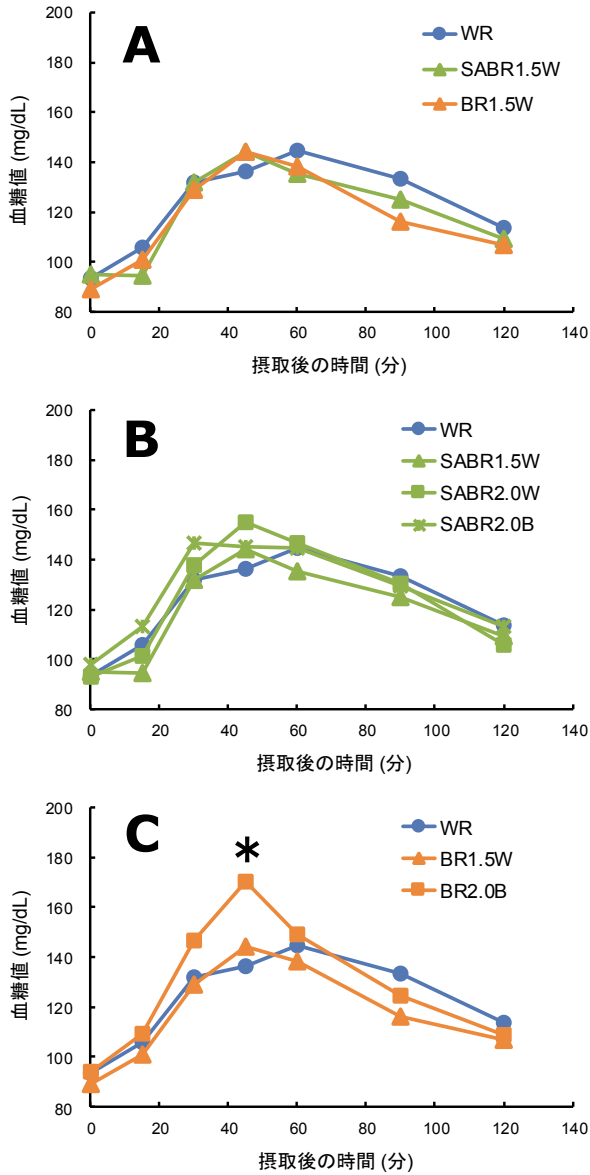


図5 各種炊飯米の食後血糖値の推移

A : 同じ炊飯条件での比較, B : 白米と表面加工玄米の比較, C : 白米と玄米の比較
 (WR: 白米, SABR: 表面加工玄米, BR: 玄米, W: 白米モード, B: 玄米モード)
 * : $p < 0.05$ vs WR (白米)

5. 澱粉消化性と食後血糖値の関連性

Englyst らは、穀類加工食品に限定して自ら提案した澱粉消化性の *in vitro* 評価法を用いて、酵素を作用させた後20分までの間に消化された澱粉 (RDS:Rapidly digestible starch) 由来のグルコースと遊離グルコース、ショ糖由来のグルコースを併せたグルコース量 (RAG: Rapidly available glucose, 表1参照) が、血糖値曲線下面積との間に有意な相関性があることを報告している²⁾。一方で、食後の血糖値上昇には澱粉の消化性だけでなく、澱粉の消化吸収に関わる共存成分の影響も大きい。Clegg らはパンケーキに異なる脂質を添加し、脂質の種類によって食後血糖値が異なることを明らかにした¹⁵⁾。さらに *in vitro* 評価法で測定した澱粉消化性と血糖値の間に関連性が見られなかったことから、脂質のような胃内容物の排出速度に関する成分の影響は *in vitro* 評価法では反映できないことを報告している。Brand らも、米、馬鈴薯、とうもろこしの加工食品を用いて、*in vitro* 評価法での澱粉消化性と *in vivo* での血糖値応答の関連性を解析し、脂質の多いポテトチップ以外は高い相関性が得られたと報告している¹⁶⁾。ポテトチップに含まれる澱粉自体は消化されやすいがGI値は低かったので、脂質によって胃からの排出速度が遅くなり、小腸内での吸収が遅くなったと推察している。

今回の実験材料である炊飯米については、米と水だけのシンプルな食品だけに、澱粉自体の消化性が食後血糖値の主な変動要因になっていることが予想できるため、澱粉消化性と血糖値の関連性を調べた。*In vitro* 評価法で測定した澱粉分解率 (反応時間 20, 60, 120 分) と試験食摂取後 15, 30, 45, 60, 90, 120 分後の血糖値、および血糖値曲線下面積との間の関連性を解析した。炊飯米を粒のままの状態 で測定した澱粉分解率と血糖値との間には関連性は見られなかったが、ミンサーで破碎した炊飯米を用いて測定した場合は、反応時間 20 分後の澱粉分解率と摂取後 45 分の血糖値との間に高い相関性が認められた (図6)。摂取後 45 分は、玄米および表面加工玄米では血糖値のピークを示した時間である。以上の結果から、加水量と炊飯モードを変えて炊飯した各種炊飯米については、澱粉消化性の評価方法にミンサーによる破碎処理を加えることによって、試験食の澱粉消化性の違いが、摂取後の血糖値応答の差を反映するような結果が得られた。澱粉消化性の評価法においては、ヒトの咀嚼を模擬した試料の前処理方法によって、澱粉分解率が大きく変動するため^{8) 17)}、なるべく咀嚼した後の試料に近づけることが望ましいが、咀嚼後の試料サイズには個人差があり、食品の形態によって適している破碎方法が異なるため、理想の前処理法を見出すことが困難である。食品摂取による血糖値応答には摂取前の食品の形態が重要な影響を与えている。Read らはトウモロコシ、馬鈴薯、米、リンゴを試験食として、咀嚼をした時と細かく切ったサンプルをそのまま飲み込んだ時の血糖値を比較し、特に米とトウモロコシでは血糖値に顕著な差が見られ、咀嚼をすることによって血糖

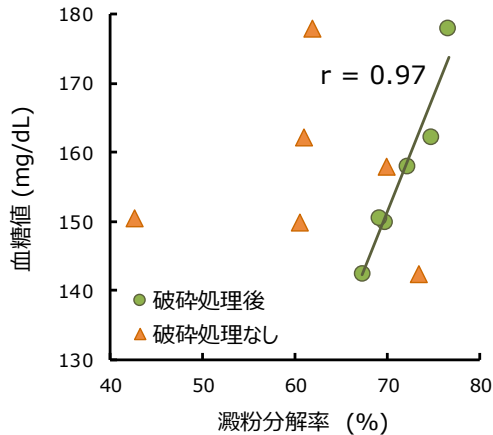


図6 澱粉分解率と血糖値の関係

値が上昇することを示した¹⁸⁾。一方で、咀嚼にはインスリン分泌を促すインクレチンの分泌量を増やし、さらには胃内容物の排出速度を遅くする効果もあることが報告されている¹⁹⁾。

著者らが測定した各種炊飯米の食後血糖値の比較では、加水量2.0倍、玄米モードで炊飯した玄米について、他の試料と比較して食後急激な血糖値上昇が見られた。この条件で炊飯した玄米はテクスチャー解析の結果から、かたさは白米と同程度であるが、付着性は白米よりもかなり低い特徴を示した。従って、咀嚼によって玄米は白米よりも小粒状にバラバラになりやすく、さらには酵素が浸透しやすい柔らかさも兼ね備えているので、消化酵素が作用できる表面積が増えることで摂取直後の血糖値が上昇したのではないかと推測する。一方で、白米は付着性が極めて高いために、咀嚼後凝集してしまい、内部まで消化酵素が浸透するまでに時間がかかり、食後血糖値の上昇が緩やかになったと考えられる。

6. おわりに

本稿では、玄米の炊飯条件を中心に、炊飯米の澱粉消化性と食後血糖値に影響を及ぼす要因に関する研究成果を紹介した。玄米と白米の食後血糖値の推移の比較は、玄米の炊飯条件によって異なる傾向が見られ、炊飯米に含まれる澱粉の消化性だけでなく、咀嚼による試料の形態変化が摂取直後の血糖値上昇に影響を及ぼす重要な要因であることが示された。玄米食が食後血糖値に及ぼす影響については、搗精前の玄米には白米と比べて胚芽や糠層に多く含まれる有用成分が多いため、これらの成分の効果を期待して様々な報告例があり、長期的な玄米食の摂取が2型糖尿病のリスク軽減に有効であるとの報告もある²⁰⁾。著者らの実

験では、単回摂取による摂取直後の血糖値の推移に及ぼす影響について検討したが、玄米の炊飯条件が澱粉消化性と玄米摂食後の血糖値の推移に及ぼす影響が予想以上に大きかったため、食品の加工調理条件、形態、および破碎による形態変化が澱粉消化性および食後血糖値に及ぼす影響を解明することが今後の検討課題である。また、今回は澱粉消化性の評価に、ミンサー処理を加えることによって食後血糖値の変動を反映できる結果が得られたが、澱粉消化性の評価に適している食品の前処理法は食品の種類、形態によって異なるので、各試料に適した方法の検討が必要である。

謝辞

本研究は、「農研機構：機能性を持つ農林水産物・食品開発プロジェクト」により実施されたものである。

(食品加工流通研究領域 食品品質評価制御ユニット 佐々木 朋子)

引用文献

- 1) Englyst, H. N., Kingman, S. M., and Cummings, J. H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur. J. Clin. Nutr.*, **46** (S2), S33-S50 (1992).
- 2) Englyst, K. N., Englyst, H. N., Hudson, G. J., Cole, T. J., and Cummings, J. H. Rapidly available glucose in foods: an *in vitro* measurement that reflects the glycemic response. *Am. J. Clin. Nutr.*, **69**, 448-454 (1999).
- 3) Ito, Y., Mizukuchi, A., Kise, M., Aoto, H., Yamamoto, S., Yoshihara, R., and Yokoyama, J. Postprandial blood glucose and insulin responses to pre-germinated brown rice in healthy subjects. *J. Med. Invest.*, **52**, 159-164 (2005).
- 4) Panlasigui, L., and Thompson, L. U. Blood glucose lowering effects of brown rice in normal and diabetic subjects. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, **57**, 151-158 (2006).
- 5) Lai, M-H., Liu, K-L., Chen, P-Y., Ke, N-J., Chen, J-J., Sung, J-M., Wu, Y-L., and Lin, S-D. Predicted glycemic index and glycemic index of rice varieties grown in Taiwan. *Cereal Chem.*, **93**, 150-155 (2016).
- 6) Miller, J. B., Pang, E., and Bramall, L. Rice: a high or low glycemic index food? *Am. J. Clin. Nutr.*, **56**, 1034-1036 (1992).
- 7) O'Dea, K., Nestel, P. J., and Antonoff, L. Physical factors influencing postprandial glucose and insulin responses to starch. *Am. J. Clin. Nutr.*, **33**, 760-765 (1980).
- 8) Hoebler, C., Devaux, M. -F., Karinthi, A., Belleville, C., and Barry, J. -L. Particle size of solid food after human mastication and *in vitro* simulation of oral

- breakdown. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, **51**, 353-366 (2000).
- 9) 塩澤光一, 城所寛子, 佐藤洋子, 神山かおる, 柳沢慧二. 米飯咀嚼時の食塊物性と嚥下閾値との関係, *日本咀嚼学会雑誌*, **13**, 58-65 (2003).
 - 10) 杉山みち子, 若木陽子, 中本典子, 小山和作, 三橋扶佐子, 井上倫, 清水瑠美子, 星野和子, 佐藤さぬ子, 杉山佳子, 鈴木純子, 安江千歳, 藤谷朝実, 鶴見克則, 川島由起子, 宮下実, 中村丁次, タン・アン・チュオ, 安部眞佐子, 合田敏尚, 細谷憲政. ごはん食と Glycemic index に関する研究, *日本健康・栄養システム学会誌*, **3**, 1-15 (2003).
 - 11) Lee, S-W., Lee, J-H., Han, S-H., Lee, J-W., and Rhee, C. Effect of various processing methods on the physical properties of cooked rice and on *in vitro* starch hydrolysis and blood glucose response in rats. *Starch*, **571**, 531-539 (2005).
 - 12) Panlasigui, L. N., Thompson, L. U., Juliano, B. O., Perez, C. M., Yiu, S. H., and Greenberg, G. R. Rice varieties with similar amylose content differ in starch digestibility and glycemic response in humans. *Am. J. Clin. Nutr.*, **54**, 871-877 (1991).
 - 13) Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z., and Wu, D. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *J. Cereal Sci.*, **40**, 23-237 (2004).
 - 14) Sasaki, T., Okunishi, T., Sotome, I., and Okadome, H. Effects of milling and cooking conditions of rice on *in vitro* starch digestibility and blood glucose response. *Cereal Chem.*, **93**, 242-247 (2016).
 - 15) Clegg, M. E., Pratt, M., Markey, O., Shafat, A., and Henry, C. J. K. Addition of different fats to a carbohydrate food: Impact on gastric emptying, glycaemic and satiety responses and comparison with *in vitro* digestion. *Food Res. Int.*, **48**, 91-97 (2012).
 - 16) Brand, J. C., Nicholson, P. L., Thorburn, A. W., Truswell, S. Food processing and the glycemic index. *Am J. Clin. Nutr.*, **42**, 1192-1196 (1985).
 - 17) Foschia, M., Peressini, D., Sensidoni, A., Brennan, M. A., and Brennan, C. S. Mastication or masceration: Does the preparation of sample affect the predictive *in vitro* glycemic response of pasta? *Starch*, **66**, 1096-1102 (2014).
 - 18) Read, N. W., Welch, I. M., Austen, C. J., Barnish, C., Bartlett, C. E., Baxter, A. J., Brown, G., Compton, M. E., Hume, K. E., Storie, I., and Worthington, J. Swallowing food without chewing: a simple way to reduce postprandial glycaemia. *Brit. J. Nutr.*, **55**, 43-47 (1986).
 - 19) Pera, P., Bucca, C., Borro, P., Bemocco, C., De Lillo, A., and Carossa, S. Influence of mastication on gastric emptying. *J. Dent. Res.*, **81**, 179-181 (2002).

- 20) Sun, Q., Spiegelman, D., van Dam, R. M., Holmers, M. D., Malik, V. S., Willert, W. C., and Hu, F. B. White rice, brown rice, and risk of type 2 diabetes in US men and women. *Arch. Intern. Med.*, **170**, 961-969 (2010).