

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05886

研究課題名（和文）血糖値上昇抑制効果を目指した食品構造改変による澱粉消化制御技術に関する研究

研究課題名（英文）Effect of food structure on starch digestion for slow glucose release

研究代表者

佐々木 朋子（Sasaki, Tomoko）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品研究部門・上級研究員

研究者番号：10353939

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は澱粉の消化過程における酵素分解性の制御要因について、食品構造と咀嚼による破壊過程での構造変化に着目して、食後血糖値の急激な上昇を抑制する効果が期待できる食品構造特性の解明を目的とした。グルテンフリー米粉パンを対照試料として、グルテンおよび多糖類を添加することによって、内部構造およびテクスチャーを改変した米粉パンを調製し、クラムの内部構造およびテクスチャーと澱粉消化性との関連性を明らかにした。さらに、品種および調製条件の異なる米を原料としたゲルおよび馬鈴薯ペーストについて、物理的な構造特性および各種物性値と澱粉消化性との関連性を解析し、制御要因となりうる物理的パラメータを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農産物の品種特性と加工プロセスを組み合わせることによって食品の構造特性を改変して、澱粉の消化性を制御しうる食品構造とそのメカニズムを明らかにした。本成果は、食後の血糖値上昇抑制を可能にする食品加工技術開発への発展が期待できる新しい視点からの研究成果であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to investigate the effects of food structure on starch digestibility, which is related with blood glucose level. The relationships between starch digestibility and structural properties of breadcrumb including porosity and sticky structure were clarified using the rice bread mixed with gluten and non-starch polysaccharides. Moreover, the effects of structural and textural properties on starch digestibility were clarified using rice gel and potato pastes. Both variety and processing conditions strongly influenced the textural properties of gels and pastes, resulting in the formation of a stronger structure and suppression of the extent of starch digestion.

研究分野：食品科学、穀物科学

キーワード：starch digestibility gluten-free bread rice gel potato paste textural properties

1. 研究開始当初の背景

食後の急激な血糖値の上昇は、糖尿病や動脈硬化を引き起こす原因になると報告されており、近年食後血糖値が上昇しにくい食品や食事メニューへの消費者の関心が高まっている。主食となるご飯、パン、麺のような澱粉を多く含む食品において食後の急激な血糖値の上昇を抑えるためには、食品に含まれている澱粉が消化酵素によって緩やかに分解されるような食品の形態であることが望ましい。申請者はこのような背景のもと、澱粉消化性の制御要因を明らかにし、消化酵素による澱粉の分解速度を緩やかにする食品加工技術開発に発展させるために基盤研究を行ってきた。さらに、加工調理プロセスが決定づける食品の物理的特性や食品構造に着目して、澱粉消化性および食後血糖値の制御要因解明を目的とした研究を行っている。その中で、一般に白米よりも食後血糖値の上昇が緩やかであると考えられている玄米において、炊飯条件によっては白米よりも急速に摂食直後の血糖値が上昇することを見出した。その理由として、咀嚼による食品構造の破壊過程での構造状態の変化が口腔内消化、そして結果的には摂食直後の急激な血糖値上昇に影響を与えていると考えられた。このように口腔内の消化過程に深く関与している食品構造は食品の加工プロセスによって制御が可能である。そこで本研究では、食後の急激な血糖値上昇抑制機能の付与を目的として、澱粉消化の制御要因となりうる食品の構造特性を解明し、加工プロセスによる制御機構を明らかにすることを目指した。

2. 研究の目的

本研究は澱粉の消化過程における酵素分解性の制御要因について、食品構造と咀嚼による破壊過程での構造変化に着目して、摂食直後の急激な血糖値上昇を抑制する効果が期待できる食品の構造特性の解明を目的とした。具体的には以下の3項目である。

- (1) グルテン添加による食品構造の変化が澱粉消化性に及ぼす影響を明らかにする。
- (2) グルテンフリー食品と各種増粘多糖類の組み合わせを検討し、澱粉消化性に対する抑制効果の高い多糖類を探索するとともに、食品構造と抑制効果の関連性を解明する。
- (3) 各種澱粉素材から調製したゲルおよびペーストを試料として、構造特性と消化酵素の浸透性との関係性を解明する。

3. 研究の方法

- (1) 米粉100%のグルテンフリー米粉パンを対照試料として、グルテンと澱粉の相互作用がパンの内部構造、物性および澱粉消化性に及ぼす影響を解析した。
- (2) グルテンフリー米粉パンに添加剤として使用されている各種多糖類を添加したパンを調製し、パンの内部構造およびテクスチャーが澱粉消化性に及ぼす影響を解析した。
- (3) 米から調製したゲルおよび馬鈴薯から調製したペーストを試料として、構造特性を反映した物理特性と澱粉消化性との関連性を解析した。

4. 研究成果

(1) グルテンが米粉パンの澱粉消化性に及ぼす影響

米粉100%のパンおよび米粉重量に対して20%の割合でグルテンを添加したパンを調製し、焼成1日および4日後のパンを試料とした。ヒトの咀嚼を模擬した破碎処理を加え、タンパク質分解酵素のペプシンを添加した後澱粉分解酵素による澱粉分解率を測定する系と、ペプシンを反応させずに澱粉分解率を測定する系を用いて澱粉消化性を比較することによって、グルテンと澱粉の相互作用の影響を評価した。さらに、パンの内部構造を観察し、画像解析により空隙率をもとめ、併せて構造特性を反映するテクスチャー解析を実施した。グルテンを添加することによって米粉パンの澱粉分解速度は若干速くなり、急速に消化される澱粉(RDS: Rapidly Digestible Starch)の量が、米粉100%のパンよりも高くなる傾向が見られた(図1)。一方で、評価系におけるペプシンの添加による澱粉分解率の顕著な差異は見られず、グルテンと澱粉の相互作用が澱粉消化性に及ぼす影響は今回実験で用いた系では確認できなかった。パンの内部構造を観察した結果、グルテンを添加することによってクラム内の気泡が大きくなり、空隙率が増加した。テクスチャー解析によるクラムの回復率はグルテンを添加することにより高くなり、内部結着力が低下する傾向が見られた。以上の結果から、グルテンと澱粉の相互作用が澱粉消化酵素の作用を抑制する効果は見られなかったが、グルテンを添加することによってパンの内部構造は大きく変化し、クラム内部組織に空隙が増え、凝集性が低下したことによって消化酵素の浸透性が高まった可能性が考えられた。

(2) 多糖類が米粉パンの澱粉消化性に及ぼす影響

米粉100%のグルテンフリー米粉パンを対照試料として、米粉パンの添加剤として

使用されている数種類の多糖類を添加したパンを調製した。これらの試料について澱粉消化性を評価した結果、添加剤の中ではキサンタンガムのみが澱粉消化性に対して抑制効果を示した。そこで、グルテンフリー米粉パンの米粉の重量に対して20%のグルテンを添加したグルテン添加米粉パンに1%および2%のキサンタンガムを添加し、澱粉消化性に及ぼす影響を解析した。併せて、パンの内部構造を反映するテクスチャー特性の評価および画像解析による空隙率の測定を実施した。対照試料のグルテンフリー米粉パンのRDS含量と比較すると、キサンタンガムを2%添加した米粉パンのRDS含量は焼成1日および4日後の試料共に顕著に低くなったが、キサンタンガム2%と併せてグルテン20%を添加したパンではRDS含量は対照試料と同程度を示し、キサンタンガムが示した澱粉消化性に対する抑制効果はグルテンを添加することに低減することが明らかになった(図1)。グルテンフリー米粉パンにキサンタンガムを添加することによって、パンの比容積および空隙率は顕著に減少し、密な内部構造をもつ特徴が示された。またテクスチャー解析により、回復率が顕著に低く、クラムの内部結着力が高まる傾向が認められた。一方で、キサンタンガムと併せてグルテンを添加した米粉パンでは、キサンタンガムのみでの添加で見られた比容積の低減、および内部結着力の上昇等の効果は抑えられた。以上の結果から、キサンタンガムによる澱粉消化性の抑制効果にはパンの内部構造の変化が顕著に影響を及ぼしていることが明らかになった。

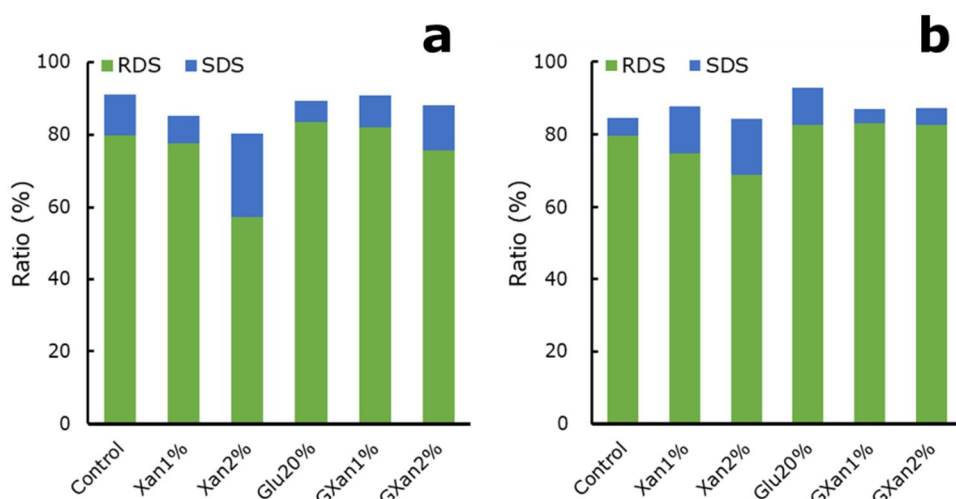


図1 焼成1日後(a)と4日後(b)の米粉パンの澱粉消化性に及ぼすキサンタンガムとグルテンの影響
(Xan:キサンタンガム、Glu:グルテン、GXan:グルテンとキサンタンガムを併用、RDS: Rapidly Digestible Starch、SDS: Slowly Digestible Starch)

(3) ゲルおよびペースト状食品の構造特性と消化酵素の浸透性との関連性

5品種の高アミロース米を用いて、各品種から2種類のゲル状のモデル食品を調製した。製粉して米粉を調製し、加水後加熱してペースト状にしてから冷却することによって調製したゲル(米粉ゲル)そして米粒に加水して炊飯後、高速せん断処理をすることによって炊飯米をペースト状にして冷却したゲル(炊飯米ゲル)を試料とした。これらの試料を用いて、澱粉消化性の評価、澱粉構造の解析、テクスチャー特性の評価および内部構造の観察を行った。同じ品種の米から調製した2種類のゲルの澱粉消化性を比較すると、加水量および温度履歴を同じにしたにもかかわらず、いずれの品種も米粉ゲルの方が炊飯米ゲルよりも消化酵素による澱粉の分解速度が速くなる傾向が見られた。また、ゲルのテクスチャー特性を比較すると、米粉ゲルの方が炊飯米ゲルよりも硬くて脆い構造をもつことが明らかになった。ゲルの破断荷重値と消化酵素による一定時間の澱粉分解率との間に負の相関性が認められた(図2)。以上の結果から、米から調製したゲルの澱粉消化性には物理的な構造特性が顕著に影響を及ぼしていることが考えられた。また、各品種の澱粉構造と澱粉消化性との関連性を解析した結果、アミロペクチンの側鎖長分布と澱粉消化性との間に有意な相関性が認められた(図3)。グルコース重合度13~24の側鎖の比率が高い品種は強固なゲルを形成し、ゲルに含まれる澱粉の消化速度が緩やかになる傾向が認められた。

調理特性の異なる6品種の馬鈴薯から生馬鈴薯粉とマッシュポテト粉の2種類の粉末を調製し、3Dフードプリンタ用素材としてペーストを調製した。ペーストの澱粉消化性を評価すると共に、粘性、動的粘弾性、圧縮特性値、およびフードプリンタによる成形性を評価し、各種パラメータと澱粉消化性との関連性を解析した。粉末のタイプを比較すると、生馬鈴薯粉よりもマッシュポテト粉から調製したペーストが高い消化抵抗性を示した。またペーストの物性評価から、マッシュポテト粉から調製したペー

ストの方が高い貯蔵弾性率と圧縮荷重値を示したため、マッシュポテト粉の調製過程で生成される老化澱粉が澱粉消化性の抑制とペーストの物性値の変化に寄与していることが推察された。食後の急激な血糖値上昇と関連性の高い RDS 含量が最も低かった品種のペーストは、貯蔵弾性率および圧縮荷重値が高く、一方で貯蔵弾性率と損失弾性率のクロスポイントからもとめた降伏値が低い特徴を示した。さらにはフードプリンタによる造形物の成形性に優れていたことから、澱粉の老化によるゲル形成がペーストの成形性に関し、内部構造を強固にすることによって、消化酵素の浸透性を抑制していることが推察された。

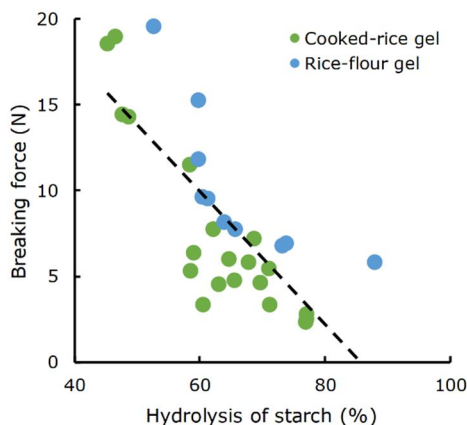


図2 ゲルの破断荷重値と消化酵素による澱粉分解率の関係

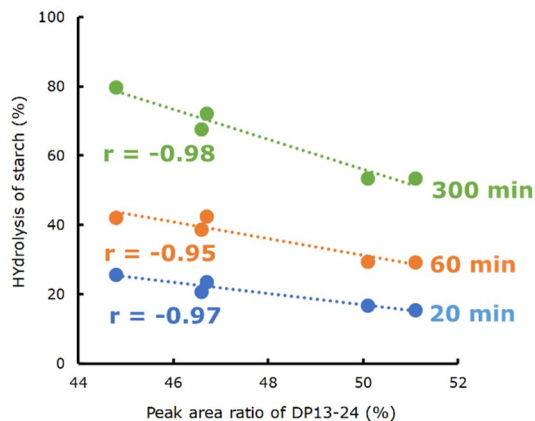


図3 アミロペクチンの側鎖長分布と各反応時間での澱粉分解率との関係

従来、急激な食後血糖値の上昇抑制効果を期待して、澱粉源となる素材としてアミロース含量が高い品種、もしくはアミロペクチンの側鎖に超長鎖や長鎖を多く含む品種等の消化抵抗性の高い澱粉構造をもつ品種が選択されてきた。しかし、これらの品種は加工用途が限定されており、さらに加工食品となると澱粉消化性には澱粉以外の成分や加工調理過程における澱粉構造の変化、マトリックス構造等の影響が大きく、意図した素材の機能性が確認できない場合がある。本課題は、澱粉消化性の制御要因を食品の物理的な構造特性に着目して解明した新しい観点からの成果であり、いずれの成果も国際誌に掲載することができた。今後は澱粉系食品の品質向上と機能性向上の両立を実現できるような食品構造の解明と構造をデザインする加工技術の検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sasaki Tomoko	4. 巻 57
2. 論文標題 Influence of xanthan gum and gluten on in vitro digestibility and textural properties of rice bread	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Food Science & Technology	6. 最初と最後の頁 2376 ~ 2383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ijfs.15593	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoko Sasaki, Junko Matsuki, Ken Tokuyasu	4. 巻 98
2. 論文標題 Effects of processing methods of rice gel on starch digestibility and textural properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cereal Chemistry	6. 最初と最後の頁 450 - 461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cche.10384	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki Tomoko	4. 巻 58
2. 論文標題 Impact of chemical and rheological properties on 3D printability and starch digestibility of potato pastes from different cultivars	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Food Science & Technology	6. 最初と最後の頁 1912 ~ 1921
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ijfs.16333	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tomoko Sasaki
2. 発表標題 Influence of xanthan gum on in vitro starch and protein digestibility of gluten-free rice breads
3. 学会等名 Cereals&Grains21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoko Sasaki, Junko Matsuki, Ken Tokuyasu
2. 発表標題 Influence of rice variety and processing conditions on starch digestibility of rice gels
3. 学会等名 Cereal&Grains 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 朋子
2. 発表標題 電荷の異なる多糖類が馬鈴薯澱粉の消化性および粘度特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本応用糖質科学会2020年度大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 朋子
2. 発表標題 米粉パンの澱粉およびタンパク質消化性に及ぼす添加剤の影響
3. 学会等名 日本食品科学工学会第69回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木 朋子
2. 発表標題 馬鈴薯の品種特性が3Dフードプリンタ造形物の成形性に与える影響
3. 学会等名 日本農芸化学会2023年度大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------