

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450195

研究課題名(和文)食品の高機能化を目指した澱粉の酵素分解性制御技術に関する研究

研究課題名(英文)Study on controlling starch digestibility for improving food functionality

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・食品研究部門食品加工流通研究領域・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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：澱粉の酵素分解性に対して抑制効果を示した多糖類について、その制御機構を明らかにするためにラットを用いた澱粉負荷試験を行った。酵素分解性に対して極めて高い抑制効果を示した多糖類は、摂食直後の血糖値を有意に低下させる効果を示し、さらには澱粉の糊化時の粘度を顕著に上昇させたため、粘度上昇効果が澱粉の酵素分解性および摂食直後の血糖値に影響を及ぼしていることが示唆された。さらに、炊飯米、パン、澱粉ゲルを用いてマトリクス構造の中に包括されている澱粉の酵素分解性に及ぼす試料の物理特性および破砕性の影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For some polysaccharides retarding starch digestibility, their effects on in vivo glucose response of gelatinized potato starch were evaluated. One of water-soluble polysaccharides, which remarkably reduced the digestion of gelatinized potato starch, significantly reduced the postprandial blood glucose response in rats and dramatically increased the viscosity of gelatinized starch. These results imply that the increased viscosity contributes to reduction of starch hydrolysis and the blood glucose level in the initial stage of digestion by rats. In addition, the effects of food form and texture on starch digestibility were investigated for cooked rice, bread, and starch gels.

研究分野：食品化学

キーワード：澱粉 酵素分解性 食後血糖値上昇抑制効果

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 澱粉はヒトの主要なエネルギー源であり、食生活には欠かせない重要な成分であるが、近年糖尿病患者の増加が国内外で問題になっており、糖質の摂取方法に注目が集まっている。Englyst et al.は、人工消化液による澱粉の酵素分解性を反応時間によって易消化性澱粉(RDS: Rapidly Digestible Starch)、遅消化性澱粉(SDS: Slowly Digestible Starch)、難消化性澱粉(RS: Resistant Starch)に分類し、血糖値の上昇度を指数化したグリセミック・インデックス(GI)とSDS含量との間に有意な負の相関性があることを明らかにした。その結果、SDS含量を増加させる技術の重要性が注目されている。

(2) 申請者はすでに、食品中に含まれている澱粉中のSDS含量を増加させるために、澱粉の酵素分解性と澱粉の化学構造、熱的特性、物理的特性、および共存成分との相互作用の関連性の解析を行ってきた。糯米澱粉のアミロペクチンの化学構造と澱粉の酵素分解性の関連性を解析し、一般的な糯米品種よりも緩やかに消化される糯米品種を見出した。さらに、食品中に存在する澱粉の共存成分として非澱粉性多糖類に着目し、澱粉の酵素分解性を顕著に抑える多糖類を発見した。澱粉と多糖類の混合ゲルおよび懸濁液の物理化学的特性と澱粉の酵素分解性の関連性を解析し、ゲルのかたさや懸濁液の粘性の違いだけでは澱粉酵素分解性に対する多糖類の抑制効果を説明できないことを明らかにした。また、従来澱粉の分析には用いられてこなかった水晶振動子マイクロバランス(QCM)を用いて、馬鈴薯由来のアミロペクチンと多糖類の相互作用、および消化酵素による澱粉の分解をオンタイムで計測できる手法を確立した。本研究では今までの研究成果をさらに発展させ、食品に含まれている澱粉中のSDS含量を高めるために、澱粉の酵素分解性に対する共存成分や食品のマトリクス構造の影響を解析し、食品加工まで想定した総括的な制御要因を明らかにするとともに、その制御機構を解明することを目指す。

## 2. 研究の目的

本研究は、食後血糖値の上昇に顕著な影響をもたらす澱粉の酵素分解性に着目し、食品の加工技術を利用した酵素分解性の制御方法を見出し、その制御メカニズムを解明することを目的とする。本研究での具体的な目的は(1)澱粉の酵素分解性を抑制する共存成分を見出す、(2)共存成分と澱粉の相互作用解析による酵素分解性制御機構の解明、(3)食品のマトリクス構造変化による澱粉の酵素分解性の制御、の3項目である。

(1) 澱粉の酵素分解性を抑制する共存成分の探索と澱粉素材の影響

申請者はすでに、澱粉の酵素分解性を顕著

に抑制する多糖類をいくつか見出しているが、本研究では対象を多糖類以外にもタンパク質、油脂に広げ、澱粉の酵素分解性を抑制する新たな素材を見つけ出す。さらに、特徴のある澱粉試料を用いて、澱粉素材(植物源、遺伝背景)による効果の違いを明らかにする。

(2) 澱粉の酵素分解性に対する共存成分の制御機構の解明

澱粉の酵素分解性に対して抑制効果を示した成分について、そのメカニズムを解明する。具体的には澱粉粒に吸着することによって、消化酵素の作用を阻害、酵素の拡散を抑えることで物理的に澱粉と消化酵素の接触を減少、澱粉の結晶性を変化させることで酵素分解性を制御、以上の3項目について解析を行う。

(3) 食品のマトリクス構造変化による澱粉の酵素分解性の制御

モデル食品として澱粉、タンパク質、油脂、非澱粉性多糖類等を混合したゲルを調製し、ヒトの消化過程を模擬した反応系で溶出する澱粉量を測定し、ゲルのマトリクス構造との関連性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 澱粉の酵素分解性を抑制する共存成分の探索と澱粉素材の影響

数種類の水溶性多糖類(α-グルカン、アラビノキシラン、ガラクトマンナン、キトサン、ムチン)およびゼラチン、ポリリジンと澱粉を混合した系について、澱粉の酵素分解性を解析した。

澱粉の酵素分解性に対して抑制効果が確認できている多糖類について、数種類の馬鈴薯澱粉の生澱粉と糊化澱粉に添加した後、澱粉の酵素分解性を評価し、澱粉の種類による抑制効果を比較した。

(2) 澱粉の酵素分解性に対する共存成分の制御機構の解明

多糖類の中で抑制効果の高かったキサンタンガムとグアガムについて、2種類の多糖類を併用した場合の澱粉酵素分解性に対する抑制効果を評価した。

馬鈴薯糊化澱粉の酵素分解性に対して抑制効果が見られた多糖類について、同じ試料を用いてラットを用いた澱粉負荷試験を行い、食後血糖値上昇抑制効果を検証した。さらに、これらの試料については粘度の測定も行った。

(3) 食品のマトリクス構造変化による澱粉の酵素分解性の制御

白米および玄米の炊飯米の酵素分解性と硬さを測定し、その関連性を評価した。さらに、破碎処理をした試料の酵素分解性を解析し、試料の形態による影響を評価した。また、数種類の多糖類と澱粉を組み合わせた高濃

度澱粉ゲル、そして米粉を50%配合した米粉パンに品質改良剤として使用されている多糖類を配合したパンについて、各試料の物理特性とマトリクス構造の中に包括されている澱粉の酵素分解性との関連性を解析した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 澱粉の酵素分解性を抑制する共存成分の探索と澱粉素材の影響

水溶液にした際に増粘効果がある食品ハイドロコロイド（ $\beta$ -グルカン、アラビノキシラン、ガラクトマンナン、ゼラチン、ムチン）を、ハイアミロースコーンスターチ懸濁液に0.1、0.3、0.5% (W/V)の濃度で添加し、澱粉の酵素分解性を解析した結果、いずれのハイドロコロイドも酵素分解性に対する抑制効果は認められなかった。さらに、水晶振動子マイクロバランスを用いて馬鈴薯澱粉に電荷の違いによって吸着することが確認できたポリリジン、キトサンについても馬鈴薯澱粉に添加し、酵素分解性を解析したが、顕著な抑制効果は認められなかった。そこで、すでにハイアミロースコーンスターチと米澱粉に対して澱粉酵素分解性の高い抑制効果が確認できていた多糖類を、数種類の馬鈴薯澱粉の生澱粉と急速に消化される馬鈴薯糊化澱粉に添加し、澱粉の酵素分解性を評価した結果、多糖類の酵素分解性に対する抑制効果は他の澱粉に比べて馬鈴薯澱粉を用いた時に増強されることが明らかになった。さらに、馬鈴薯澱粉の種類によってもその抑制効果の程度は異なることが確認できた。

##### (2) 澱粉の酵素分解性に対する共存成分の制御機構の解明

多糖類の中で、澱粉の酵素分解性に対して抑制効果の高かったキサンタンガムとグアガムを用いて、2種類の多糖類を併用した場合の酵素分解性を評価した結果、多糖類として澱粉に対してキサンタンガムおよびグアガムを単独で同じ濃度で添加した時よりも抑制効果が低下する傾向が見られた。水晶振動子マイクロバランスを用いた澱粉との相互作用の解析から、キサンタンガムは澱粉に吸着するが、一方グアガムは吸着しない現象を確認していることから、キサンタンガムとグアガムでは澱粉の酵素分解性に対する制御機構が異なるために、併用することによって抑制効果が低下したと考えられた。

キサンタンガム、グアガム、コンニャクグルコマンナン、およびペクチンについては馬鈴薯糊化澱粉の酵素分解性に対して顕著な抑制効果が認められたため(図1)、同じ試料を用いてラットを用いた澱粉負荷試験を行い、各種多糖類の食後血糖値上昇抑制効果を検証した。その結果、澱粉酵素分解性に対して高い抑制効果を示したキサンタンガムを添加した試料は対照群と比較して、投与30分後の血糖値を有意に下げたが、60分以降では抑制効果が見られなかったため(図2)、キ

サンタンガムの澱粉酵素分解性に対する高い抑制効果は、澱粉摂取直後の血糖値上昇にのみ影響を及ぼしていることが示唆された。また、馬鈴薯澱粉の糊化時の粘度変化を測定した結果、各種多糖類の添加により馬鈴薯澱粉の粘度は上昇したが、キサンタンガムの粘度上昇効果が極めて高く、糊化時のピーク粘度を澱粉の酵素分解性との間に有意な相関性が認められたため、多糖類の粘度上昇効果が澱粉の酵素分解性の主な制御要因のひとつであることが推察された。

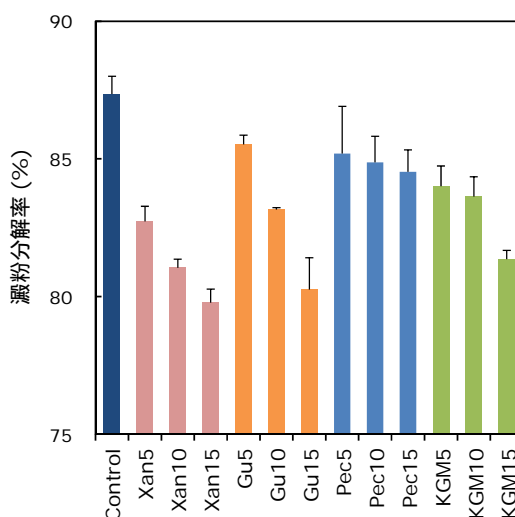


図1 各種多糖類を添加した馬鈴薯糊化澱粉の澱粉分解率

(キサンタンガム (Xan)、グアガム (Gu)、ペクチン (Pec)、コンニャクグルコマンナン (KGM)を澱粉重量に対して5、10、15%添加した澱粉を糊化させた試料を使用)

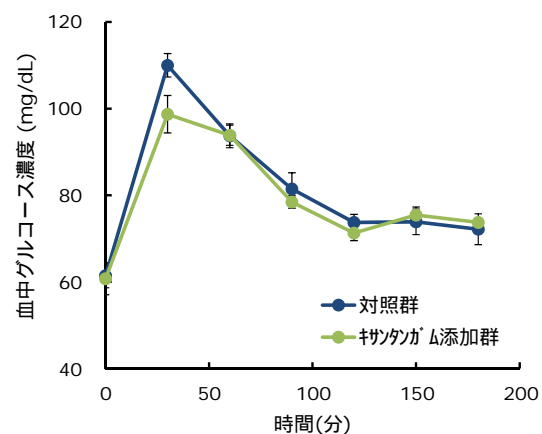


図2 馬鈴薯糊化澱粉とキサンタンガム(5%添加)の混合試料摂取後の血糖値の推移

##### (3) 食品のマトリクス構造改変による澱粉の酵素分解性の制御

白米および玄米の炊飯米の酵素分解性と硬さを測定し、その関連性を評価した結果、

圧縮時の応力値が高い炊飯米ほど、消化酵素によって分解された後、遊離するグルコース量が低い傾向を示した。しかし、咀嚼を模擬した手法で破碎処理をした試料の澱粉分解率を測定すると、試料間で顕著な差が見られなかったため、マトリクス構造が破碎されれば澱粉分解率に炊飯米の硬さの影響は少ないことが考えられた。

澱粉と多糖類を組みあせた高濃度澱粉ゲルについては、ゲルのマトリクス構造の強度の指標となる硬さや動的粘弾性の各種パラメータと澱粉の酵素分解性については有意な相関性は見られなかった。一方、ヒトの消化過程を模擬した澱粉の酵素分解性の評価法の過程で、破碎処理、振動、衝撃によって破碎された後の試料の粒度を測定した結果、粒径の小さい断片が多い試料ほど、酵素分解性が低い値を示した。これは、細かく破碎されやすい試料ほど、マトリクス構造の中から多糖類が流出し、酵素反応液の粘度が上昇するために、酵素分解性が抑制された可能性が示唆された。

各種多糖類の配合率を変えて調製したパンについては、焼成後0日目と4日目の試料について、パンの物理特性（硬さ、回復率、伸長率）をテクスチャーアナライザーで解析し、物理的パラメータと澱粉の酵素分解性との関連性を解析したが、有意な関連性は認められなかった。パンは気泡が多いため、硬いパンでもマトリクス構造の中に含まれる澱粉は酵素の作用を受けやすい状態であると考えられた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Tomoko Sasaki, Tomoya Okunishi, Itaru Sotome, Hiroshi Okadome, Effects of milling and cooking conditions of rice on in vitro starch digestibility and blood glucose response. *Cereal Chemistry*, 査読有, 93巻, 2016, 242-247  
<http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM-08-15-0155-R>

Md. S. Hossen, Tomoko Sasaki (他3名, 4番目) Functional properties of submicron sized rice flour produced by wet media grinding, *Cereal Chemistry*, 査読有, 93巻, 2016, 53-57  
<http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM-03-15-0045-R>

Tomoko Sasaki, Itaru Sotome, Hiroshi Okadome, In vitro starch digestibility and in vivo glucose response of gelatinized potato starch in the presence of non-starch polysaccharides. *Starch/Starke*, 査読有, 67巻, 2015, 415-423

DOI: 10.1002/star.201400214

Tomoko Sasaki, Kaoru Kohyama, Tomoya Okunishi, Effects of rice flour blends on bread texture and staling. *Cereal*

*Chemistry*, 査読有, 91巻, 2014, 146-151  
<http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM-08-13-0150-R>

〔学会発表〕(計10件)

佐々木朋子, 奥西智哉, 五月女格, 岡留博司, 各種炊飯米の澱粉酵素分解性に及ぼす破碎処理の影響, 日本食品科学工学会第62回大会, 2015年8月29日, 京都大学(京都・京都市)

佐々木朋子, 食品の物理特性と澱粉の消化遅延効果について, 食品工学会フォーラム2015, 2015年6月9日, 東京ビッグサイト(東京・江東区)

佐々木朋子, 奥西智哉, 五月女格, 岡留博司, 炊飯条件が各種炊飯米の澱粉酵素分解性および食後血糖値に及ぼす影響, 日本作物学会第239回講演会, 2015年3月28日, 日本大学(神奈川・藤沢市)

Md. S. Hossen, Tomoko Sasaki (他3名, 4番目), Enzymatic digestibility and hydration properties of submicron-scale rice flour, The 3rd Asia Pacific Symposium on Postharvest Research, Education, and Extension (APS2014), 2014年12月8日, Ho Chi Minh City (Vietnam)

佐々木朋子, 血糖値上昇抑制効果を目指した澱粉の酵素分解性制御について, 日本穀物科学研究会第160回講演会, 2014年12月6日, 神戸女子大学(兵庫・神戸市)

佐々木朋子, 岡留博司, 五月女格, 川又快, 岡本和之, 硬化性が低い新形質糯米の澱粉特性と加熱調理後の餅のテクスチャー, 日本応用糖質科学会平成26年度大会, 2014年9月24日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)

佐々木朋子, 神山かおる, 岡本和之, 餅硬化性が異なる餅米品種の澱粉物理化学的特性, 日本農芸化学会2014年度大会, 2014年3月29日, 明治大学(神奈川県・川崎市)

Dede Adawiyah, Kaoru Kohyama, Tomoko Sasaki, Potential utilisation of arenga (*Arenga Pinnata*) starch in comparison with sago (*Metroxylon Sago*) starch, 13th Asean Food Conference 2013, 2013年9月9日, Toa Payoh Central (Singapore)

佐々木朋子, 神山かおる, 非澱粉製多糖類の澱粉消化性および血糖値上昇抑制効果, 日本食品科学工学会第60回記念大会, 2013年8月30日, 実践女子大学(東京・日野市)

佐々木朋子, 澱粉系食品のテクスチャー評価, 第15回応用糖質科学ワークショップ, 2013年5月23日, 東京大学(東京都・文京区)

## 6. 研究組織

(1) 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・食品加工流通研

究領域・上級研究員  
研究者番号：10353939

(2)連携研究者

神山 かおる (KOHYAMA KAORU)  
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・食品健康機能研  
究領域・ユニット長  
研究者番号：00353938