

令和元年6月25日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K07760

研究課題名(和文) 食品加工技術による食後血糖値上昇抑制作用のメカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Study on mechanism of effects of food processing on glycemic response

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：澱粉の酵素分解性に対して高い消化遅延効果を示すキサンタンガムについて、実際の加工食品である米粉パンにおける澱粉消化性に及ぼす影響を解析した結果、キサンタンガムを2.0%添加することによって有意な抑制効果が認められた。その抑制効果には、クラム組織の内部結着力が高まることによって食塊の拡散速度が遅くなったことが関与していることが示唆された。また米を利用したゲル状食品においても、ゲルの構造特性が消化酵素の浸透性に関与し、澱粉消化性の制御要因のひとつになっていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

澱粉系食品・素材には近年血糖値上昇抑制効果が期待されており、食後血糖値上昇と関連性の高い澱粉酵素分解性の制御技術を開発できれば、食品の高機能化を可能にする加工技術に繋がる。本研究は、多糖類を添加したパンを試料として、「素材加工摂食」の過程における澱粉消化性の制御要因を網羅的に解析し、制御メカニズムを明らかにしたことで、食後の血糖値上昇を緩やかにする効果が期待できる食品加工技術の開発に寄与する新しい視点からの研究成果が得られたと考える。

研究成果の概要(英文)：The effect of adding xanthan gum on starch digestibility and textural properties were investigated in rice and wheat flour blend breads. The addition of xanthan gum at concentrations greater than 1% to the bread formula caused a significant decrease in the extent of starch digestion. The results indicated that the effect of xanthan gum on starch digestibility was because of the molecular function and bread structure alteration. For rice gels prepared from cooked rice and rice flour, the gel network had a high impact on starch digestibility in rice gels.

研究分野：食品化学、穀物科学

キーワード：澱粉 消化性 キサンタンガム 米粉パン 食後血糖値

1. 研究開始当初の背景

(1) 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増加し続けている状況下では、食後の血糖値上昇を考慮した澱粉の摂取方法が求められている。消化酵素による分解速度が緩やかな澱粉は、グルコース生成速度も遅くなるため、血糖上昇速度も緩やかになる効果が期待できる。

(2) 申請者はすでに、澱粉消化性の制御要因を明らかにするために、澱粉の酵素分解性と澱粉の化学構造、物理特性との関連性の解明、および澱粉と多糖類の相互作用の解析を行ってきた。糯米澱粉を用いてアミロペクチンの構造および結晶性と澱粉消化性の関連性を明らかにし、通常の糯米澱粉よりも緩やかに消化される糯米品種を見出した。さらに、澱粉系食品に増粘剤、安定剤として頻繁に使用される多糖類に着目し、多糖類の一種であるキサントガムが、澱粉消化性を顕著に抑制する作用をもつことを確認した。キサントガムは他の多糖類と比べて、澱粉糊化液に対して極めて高い粘度上昇作用を示すだけでなく、分子間の相互作用によって澱粉に吸着し、酵素作用を阻害していることを明らかにした。キサントガムについては、ラットを用いて澱粉摂取後の血糖値上昇に対して抑制作用を示すことを確認している。また、炊飯米の加工・炊飯条件と澱粉消化性及び食後血糖値との関連性を解析し、炊飯米の澱粉消化性を *in vitro* 評価法で評価する際に、試料の破砕処理の影響を検討し、ヒトの咀嚼による試料の破砕性と咀嚼後の食塊形成が、澱粉消化性や食後血糖値の変動に顕著な影響を与えているという予備的な結果を得ており、これらは澱粉消化性の制御メカニズムを解明するための新しい視点として期待できる。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の酵素分解性を緩やかにする食品加工技術の制御メカニズムを解明すると共に、ヒトの摂食過程の影響を考え、咀嚼時の食品の破砕性および咀嚼後の食塊形成まで考慮した澱粉消化性の制御要因を解明することを目指す。

2. 研究の目的

本研究は、食後血糖値の上昇を緩やかにする効果をもつ食品の加工技術に着目し、食品に含まれる澱粉の消化酵素による分解を抑制する加工技術を見出すと共に、澱粉の物理化学的特性、食品の内部構造と物性、およびヒトの摂食過程における食品の破砕性までを網羅的に解析することによって、食品の加工技術による澱粉消化性の制御メカニズムを解明することを目的とする。具体的には以下の3項目である。

(1) 澱粉の消化性を抑制する多糖類を利用し、食後血糖値上昇抑制効果が期待できる食品加工技術を見出す。

(2) ゲル状食品の加工条件による内部構造の改変と消化酵素の浸透性阻害作用の関連性を解明する。

(3) 咀嚼後の破砕性および食塊形成と澱粉消化性の関連性を解明する。

3. 研究の方法

(1) キサントガムの澱粉消化性に対する抑制効果に及ぼす食品加工条件の影響

①多糖類の中では、米、トウモロコシ、馬鈴薯由来の澱粉と組み合わせた試料において、顕著に高い澱粉消化遅延効果を示したキサントガムを用いてパンを調製し、パンの中に含まれている澱粉の消化酵素による分解性に及ぼす影響を解析した。

②キサントガムとリン含量の異なる数種類の馬鈴薯澱粉を組み合わせた試料について、澱粉の酵素分解性を評価し、キサントガムと澱粉の相互作用の関与を検討した。

(2) 咀嚼による破砕性および食塊形成と澱粉消化性の関連性解明

粉末化した試料で澱粉消化性に対する抑制効果が認められたキサントガム添加の米粉パンについて、咀嚼を模擬した破砕処理を行った試料の澱粉消化性を評価し、パンの物性との関連性を解析した。

(3) 食品のネットワーク構造を利用した消化酵素の浸透性阻害作用と食品加工条件の関連性解明

モデル系食品として多様な品種の米からゲル状食品を調製し、澱粉消化性を評価した。さらに、その加工条件がゲルの内部構造と消化酵素の浸透性に及ぼす影響を解析した。

4. 研究成果

(1) キサントガムの澱粉消化性に対する抑制効果に及ぼす食品加工条件の影響

試料には小麦粉に米粉を1:1の割合で配合した粉に、粉の重量に対してキサントガムと比較試料としてグアガムを0.5、1.0、2.0%添加したパン（米粉パン）を調製した。パンは焼成90分後（0日目）の試料と室温で2日間および4日間保存した試料を解析に用いた。澱粉消化性の評価には、パンのテクスチャー等の物理的要因を排除した状態で評価するために、凍結

乾燥後粉碎した試料を調製した。総澱粉量に対する一定反応時間での消化酵素によって分解される澱粉の量の比率である澱粉分解率を測定した結果、キサンタンガム 2.0 % 添加試料が多糖類を添加していない対照試料よりも有意に低い値を示した (図 1a)。同じ試料で 0 日目と 4 日目の試料間を比較した結果、キサンタンガム 1.0% 添加試料以外では有意差は認められず、澱粉消化性に対するパンの老化の影響はほとんど見られなかった。グアガム添加試料については、対照試料と比較して、澱粉分解率が低くなる傾向は見られたが、有意差は認められなかった。

また、リン含量の異なる 6 品種の馬鈴薯から澱粉を精製し、電荷の異なる 3 種の多糖類 (キサンタンガム、グアガム、キトサン) を各々混合した澱粉懸濁液と糊化液について消化酵素による澱粉分解率を解析した結果、キサンタンガムが澱粉消化性に対して最も高い抑制効果を示したが、澱粉分解率とリン、ナトリウム、カルシウム、カリウム、マグネシウム含量およびイオン当量との間に有意な相関性は認められなかった。

(2) 咀嚼による破砕性および食塊形成と澱粉消化性の関連性解明

(1) の評価に用いた米粉パンについて、咀嚼を模擬して、加水後ミンサーで破砕処理をすることによってある程度食塊を形成させた試料を調製した。同様に、総澱粉量に対する一定反応時間での消化酵素によって分解される澱粉の量の比率である澱粉分解率を測定した結果、キサンタンガム 2.0 % 添加試料の値が最も低く (図 1b)、凍結乾燥後粉碎した試料 (図 1a) よりも対照試料との差が顕著であった。

ある程度食塊を形成させた試料を用いた際にキサンタンガム添加の抑制効果がより明確に現れているため、澱粉消化性に対してはキサンタンガム自体の作用に加えてキサンタンガムを添加したことによるパンの組織構造の変化の影響が大きいことが示された。そこで、パンの組織構造が強く反映されるテクスチャーを解析した。パンのテクスチャー解析にはテクスチャーアナライザーを使用し、AACC 公定法によるクラムの硬さの評価法を基本として、クラムの硬さの経時変化を測定した。さらに、クラムの内部結着力の指標となる回復率は圧縮試験を 2 回繰り返した際の 1 回目と 2 回目の厚さの比率としてもとめた。多糖類を添加しない対照試料と硬さを比較した結果、グアガムを添加したパンは有意差が認められなかったが、キサンタンガムを添加したパンは硬さが有意に上昇し、硬化速度が明らかに大きくなった。この結果はキサンタンガムを添加することによってパンの比容積が低下したことが原因として考えられる。圧縮試験を 2 回繰り返すことによって測定した回復率に関しても、キサンタンガム添加の影響が大きく、添加濃度が高いほど回復率が低くなる傾向を示した。グアガムを添加した試料の回復率も対照試料と比べて有意に低かったが、キサンタンガムはグアガムよりもさらに顕著に回復率を低下させる作用を示した (図 2)。その作用は焼きたてのパンだけではなく、2 日および 4 日間保存したパンでも確認できた。クラムの回復率が低いということは、クラムを指で押しつぶした後に指を離しても、クラム組織が圧縮されてなかなか元の状態に回復しない特徴をもつことを示す。キサンタンガムやグアガムは粘度上昇効果が高い多糖類なので、少量でもパン生地混合することによって生地のテクスチャーに影響を及ぼし、最終的にはパンの気泡を形成する膜の付着性を高めることによって内部結着力が高まったと考えられる。

以上の結果から、キサンタンガムを 2.0 % 添加することによって認められた澱粉消化性に対する有意な抑制効果は、凍結乾燥後粉碎した試料よりもミンサーで破砕して食塊を形成した試料で顕著であったことから、キサンタンガムが示す増粘効果や澱粉粒に吸着することによって澱粉の酵素分解性を抑制するキサンタンガム自体の作用に加えて、クラム組織の内部結着力を高めることによって食塊の拡散速度が遅くなったために澱粉の酵素分解性が抑制されていると考えられる。

(3) 食品のネットワーク構造を利用した消化酵素の浸透性阻害作用と食品加工条件の関連性解明

高アミロース米 5 品種の精白米について、米の重量に対して 3 倍の水を加えて、約 100°C で 30 分間加熱することによって炊き上げた炊飯米を調製した。炊飯米は 25°C および 75°C の恒温槽に 30 分間静置した後、エクセルオートホモジナイザー (日本精機株式会社) を用いて攪拌せん断処理を行った。攪拌せん断処理を行った試料は成型した後、4°C で 1 日および 5 日間保存し、ゲル状の試料 (米ゲル) を調製した。一方で、米ゲルを調製した 5 品種の高アミロース米を製粉し、米粉の重量に対して 3 倍加水した後に 100°C で 30 分間加熱を行い、米粉ゲルを調製し、4°C で 1 日および 5 日間保存した。これらの試料に人工消化液を作用させ、一定反応時間での澱粉分解率の測定を行った。併せてゲルの素材となる炊飯米と米粉に対しても澱粉の酵素分解率を測定した。

米ゲルの消化酵素による澱粉分解率には顕著な品種間差が認められた。さらに、75°C に保持した炊飯米から調製したゲルは、炊飯後 25°C に冷却した米から調製したゲルよりも、すべての品種において澱粉分解率が低くなる傾向が認められた。走査型電子顕微鏡による内部組織の観察により、75°C に保持した炊飯米から調製したゲルは気泡が小さく、密な網目構造をもつ傾向が観察されたためゲルの構造特性が消化酵素の浸透性に関与している可能性が示唆された。また同品種の米から調製した米ゲルと米粉ゲルについて消化酵素による澱粉分解率を比較した結果、米粉から調製したゲルの方が炊飯米から調製した米ゲルよりも澱粉分解率が高くなる傾向が見られた。一方で、米ゲルの素材となる炊飯米の澱粉分解率の品種間差と米ゲルの澱粉分解

率の品種間差は必ずしも同じ傾向を示さないことが明らかになり、米ゲルの澱粉消化性の品種間差には素材特性に加えて加工条件の差に起因する物理的要因が関与していることが考えられた。

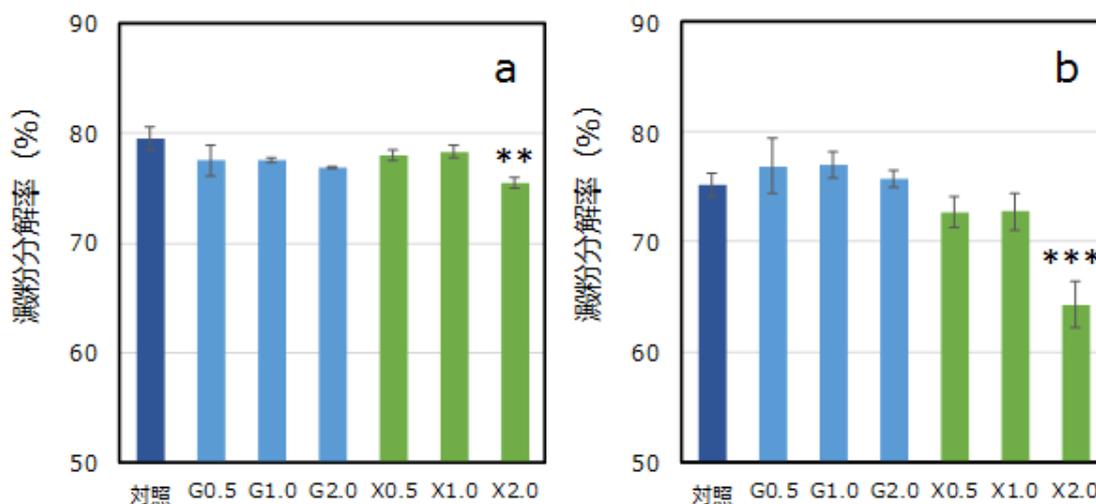


図1 増粘多糖類を添加した米粉パンの消化酵素による澱粉分解率 (グアガム (G)、キサンタンガム (X) を粉の重量に対して 0.5、1.0、2.0 % 添加) a:凍結乾燥後粉末化した試料、b:加水後ミンサーで破碎した試料 **、***: 各々 $P < 0.01$ 、 0.001 の水準で対照群と有意に異なることを意味する。(Tukey 法による検定)。データは平均値±標準偏差 (n= 3) で示す。

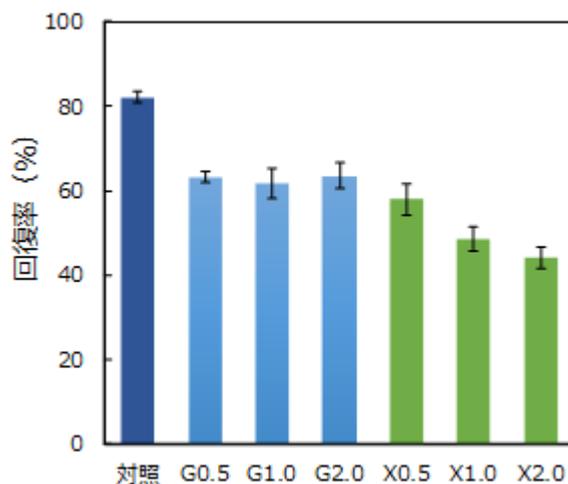


図2 圧縮試験によるクラムの回復率の比較 (グアガム (G)、キサンタンガム (X) を粉の重量に対して 0.5、1.0、2.0 % 添加) グアガムおよびキサンタンガムを添加したすべてのサンプルについて $P < 0.001$ の水準で対照群と有意に異なる (Tukey 法による検定)。データは平均値±標準偏差 (n=10) で示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

① [Tomoko Sasaki](#), Junko Matsuki, Koichi Yoza, Junichi Sugiyama, Hideo Maeda, Akiko Shigemune, Ken Tokuyasu, Comparison of textural properties and structure of gels prepared from cooked rice grain under different conditions, Food Science and Nutrition, 査読有, 7, 721-729, 2019
DOI: 10.1002/fsn3.916

② 佐々木 朋子, 澱粉消化性および食後血糖値に対する澱粉系食品の物理的特性の影響, New Food Industry, 査読無, 60 巻, 15-22, 2018

③ Tomoko Sasaki, Effects of xanthan and guar gums on starch digestibility and texture of rice flour blend bread, *Cereal Chemistry*, 査読有, 95, 177-184, 2018

DOI: 10.1002/cche.10024

④ Tomoko Sasaki, Kai Kawamata, Kazuyuki Okamoto, Comparison of starch physicochemical properties of waxy rice cultivars with different hardening rates, *Cereal Chemistry*, 査読有, 94, 699-704, 2017

<http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM-08-16-0220-R>

〔学会発表〕(計5件)

①佐々木朋子、松木順子、徳安健、高アミロース米を利用したゲルの澱粉消化性に及ぼす加工条件の影響、日本農芸化学会 2019 年度大会、2019

②佐々木朋子、リン含量の異なる馬鈴薯澱粉の酵素分解性に及ぼす多糖類の影響、日本農芸化学会 2018 年度大会、2018

③佐々木朋子、米粉パンの澱粉消化性とテクスチャーに及ぼすキサンタンガムおよびグアーガムの影響、日本食品科学工学会第 64 回大会、2017

④佐々木朋子、松木順子、與座宏一、杉山純一、前田英郎、重宗明子、安東郁男、徳安健、炊飯米を利用した高濃度ゲルの硬化過程に及ぼす品種特性の影響、日本農芸化学会 2017 年度大会、2017

⑤佐々木朋子、松木順子、與座宏一、杉山純一、前田英郎、重宗明子、安東郁男、徳安健、炊飯米を利用したゲルの破断・圧縮特性に及ぼす調製条件の影響、日本食品科学工学会第 63 回大会、2016

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。