

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01957

研究課題名(和文) 栄養吸収の制御を目指した胃小腸消化シミュレーターによる固形食品の消化特性の解析

研究課題名(英文) Analysis of digestibility of solid foods by gastrointestinal digestion simulators aiming for controlling nutrient adsorption

研究代表者

市川 創作 (ICHIKAWA, Sosaku)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：00292516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：タンパク質、炭水化物、脂質をそれぞれ含む固形食品を用い、ヒト胃消化シミュレーターなどによる系統的なin vitro胃腸消化試験を行った。ヒトの消化管運動を模擬したシミュレーターによる消化試験、ならびに試験管レベルの振とう式消化試験との結果を比較することで、消化管運動が固形食品粒子の微細化などの物理的消化性に与える影響、および含有成分の化学的消化性に与える影響を明らかにした。また、テクスチャーを変化させる加工処理を施した固形食品を用い、同様の消化試験を行った。これにより、同種・同量の栄養成分を含む固形食品におけるテクスチャーの違いが、物理的消化性および化学的消化性に与える影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

消化管運動を模擬できる新規な消化試験シミュレーターを使用し、物理的な消化が支配的な消化初期の段階から化学的消化が支配的な消化後期の段階まで固形食品の一連の消化性挙動を評価できたことが本研究成果の学術的意義である。

本研究により、固形食品を含む不均一系での消化性に関する基礎的知見が明らかにされたことで、これまで均一系の評価しかできず、液状あるいは流動状の食品に限定されていた消化特性評価の範囲が、一般的な固形食品にまで拡張された。得られた知見は、高齢者向けの新規な栄養強化固形食品などの評価、ならびに設計・開発に幅広く応用されると期待される。

研究成果の概要(英文)：In vitro gastrointestinal digestibility of model foods containing protein, carbohydrate, or lipid was systematically investigated using a human gastric digestion simulator. Digestion experiments simulating a human peristaltic motion were performed, and a shaking method was also used for investigating in vitro gastrointestinal digestibility of the model solid foods. The results clarified how gastric peristaltic motion affects physical digestion process (e.g., disintegration of solid food particles) and chemical digestion process of the components embedded in food particles. In vitro gastrointestinal digestion experiments were also performed using solid foods whose texture was controlled. The difference of texture of solid foods containing the same type and amount of a nutrient affected their physical and chemical digestion processes.

研究分野：食品工学

キーワード：食品消化 固形食品 加工食品 in vitro消化 ぜん動運動 タンパク質 乳製品 消化性制御

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 食品は摂食後、口腔内、胃、小腸での消化プロセスを通して、咀嚼・ぜん動運動による物理的微細化・混合、消化酵素による化学的分解を受け、最終的に小腸上皮細胞から体内へ吸収される。消化の度合いを示す言葉として、消化性(ダイジェスティビリティ: バルクサイズの食品が微細化・化学分解などにより、どの程度小さな画分になったかを表す)、バイオアクセシビリティ(どの程度の画分が小腸壁から吸収されうる状態になったかを表す)、バイオアベイラビリティ(どの程度が生体内で利用されるかを表す)がある。

これまで摂食後の食品の研究では、栄養素の代謝や特定の機能性成分の体内動態、体内でのバイオアベイラビリティの評価、およびモデル小腸細胞を用いたバイオアクセシビリティの評価が主であった。そのため、吸収以前の食品の消化性に関する定量的な知見は必ずしも十分ではない。特に固形食品の消化は、分泌される消化酵素が固形食品の外側の液体側にあり、一方で、基質である栄養成分が固形食品の内側に存在する異相系の反応と捉えられ、均一な液系の消化酵素-基質の反応とは異なる複雑な現象が起きていると考えられる。

(2) 固形食品の消化では、初期段階においてある程度の大きさと形状を保った食品粒子と消化液とが不均一に存在し、消化管運動による食品粒子の微細化・混合を受けながら、徐々に消化液と食品微粒子・成分が均一に分散した系へと移行する。このプロセスにおいて、初期の段階では微細化・混合といった物理的消化性が重要であり、これらが消化後期の消化酵素反応などの化学的消化性に影響を与えると考えられる。

例えば食品粒子の微細化は比表面積の増大をもたらし、粒子界面での酵素反応を促進させる。特に固形食品のテクスチャー(形状、硬さ、弾力など)が異なる場合、同じ種類・量の栄養成分であっても、微細化の度合いなどの物理的消化性が異なると考えられる。その結果、化学的消化性、さらには吸収以降のバイオアクセシビリティとバイオアベイラビリティも影響を受ける可能性が高い。これらの影響を明らかにできれば、固形食品の消化性の制御が可能となり、例えば消化機能が低下した高齢者向けの栄養強化固形食品の設計なども期待できる。

(3) 食品の消化性を評価する方法として、実験的制約が多い動物試験(*in vivo*)に代わり、体外(*in vitro*)での消化試験が提案されている。簡便な食品の消化試験法として、ガラス容器などに食品と人工消化液を入れて振とうする振とう消化試験(引用文献①)、消化管を模擬したより複雑な *in vitro* 消化装置として、TNO gastrointestinal model (TIM) (引用文献②)が提案されている。しかし、これら既往の研究は、化学的消化性の評価が目的であり、固形食品の消化を評価する場合、実験的制約上、予め固形食品を微細化する必要がある。従って、消化初期の物理的消化性の評価は難しい。筆者らは最近、ヒトの消化管運動(ぜん動運動)を模擬した *in vitro* 消化評価装置、ヒト胃消化シミュレーター(図1)(引用文献③、④)、およびヒト小腸シミュレーター(引用文献⑤)を開発している。これらの消化モデル装置により、消化管運動に誘起される固形食品の胃内微細化といった物理的消化性を評価できるようになりつつある。

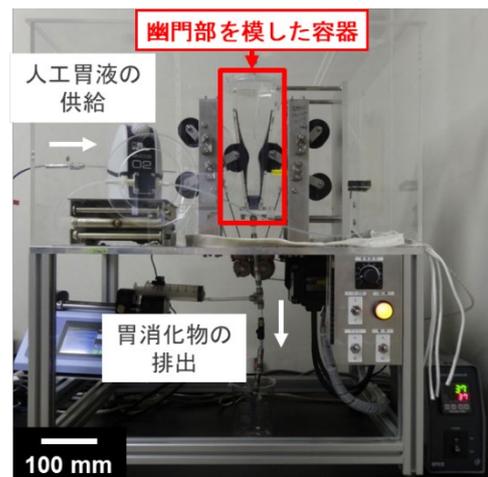


図1 連続型ヒト胃消化シミュレーター (引用文献④)

2. 研究の目的

(1) 本研究では、栄養吸収の制御を目指し、消化管運動を模擬したヒト胃小腸消化シミュレーターを用いて、固形食品の物理・化学的消化性を系統的に解析することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 胃の物理的消化環境の模擬性評価と胃内容物粘度の影響: 胃のぜん動運動を模擬した *in vitro* 装置であるヒト胃消化シミュレーター (Gastric Digestion Simulator; GDS) に装備されているローラーとして二層構造の発泡ゴムを使用し、GDS で駆動するぜん動運動の最大圧縮力がヒト胃内の圧縮力に近くなるように調整した。球状寒天ゲル(直径 12.7 mm)の作製は、寒天粉末を 90 °C に加熱した水に 1.5~3 wt% の濃度で溶解させた後、アクリル樹脂製の鋳型に注入して 8 °C で 2 時間冷却させて行った。ローカストビーンガム (LBG) の粉末 10.5 g を 1 L の人工胃液に添加し、12 時間攪拌して LBG 分散液を作製した(引用文献⑥)。得られた球状ゲルを LBG 分散液 330 mL に加えて GDS に投入し、37 °C で 150 分間の消化試験を行った。ぜん動運動は成人の文献値を参考にして、進行速度 2.5 mm/s、発生周期 40 s とした(引用文献③)。未破壊の球状ゲルの数を 10 分ごとに計測した。球状ゲルの微細化の程度を経時的に比較するため、Marciani ら(引用文献⑥)と同じ方法を用いて、胃のぜん動運動によって未破壊の球状ゲルの数が半分減少するまでの時間(半減期 $t_{1/2}$)を算出した。

ウシ血清アルブミン (BSA (66 kDa)) 水溶液 (10 g/L) の 37 °C における粘度を 0.87 mPa · s (水あめ濃度 0 wt%)、及び 11.30 mPa · s (同 60 wt%) に調整した。BSA 水溶液 100 mL を、ヒトの胃のぜん動運動を模擬した連続型ヒト胃消化シミュレーター (continuous-type Gastric Digestion Simulator; c-GDS) (引用文献④) に投入し、流量 1.0 mL/min (引用文献⑥) で人工胃液 (引用文献⑦) (ペプシン濃度:0 あるいは 2.1 g/L (活性 4000 U/mL 相当)) の分泌と内容物の排出を連続的に行いながら、37 °C で 180 分間消化試験を行った。ぜん動運動は、健常者の値を参考に、進行速度 2.5 mm/s、発生周期 40 秒とした (引用文献③)。c-GDS 容器からの排出物を 15 分毎に分取し、Bradford 法により BSA 濃度を求めた。本研究では、Bradford 法で発色しない約 3 kDa 未満のペプチドを BSA 分解物とみなした。

(2) タンパク質含有固形食品の消化: タンパク質の消化性を試験するモデルとして BSA を使用した。はじめに BSA を包含した寒天ゲル粒子をタンパク質含有モデル固形食品として消化試験を行った。立方体 (5 mm 角) に整形したタンパク質を含む寒天ゲル (寒天 1.5 wt%、牛血清アルブミン (BSA) 5 wt%) 100 g と人工唾液 30 mL とを混合した後、その混合物を人工胃液 260 mL (pH 1.3、ペプシン 9.5 g/L (活性 4,000 U/mL 相当 (引用文献⑦))) と共に GDS に投入し 37 °C で最長 180 分間消化試験を行った。消化試験を所定時間行った後、内容物を目開きの異なる篩で分級し、各画分に含まれる乾燥重量を測定した。また、消化試験後に各画分のゲル粒子を SDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動 (SDS-PAGE) により分析し、ゲルに含まれるタンパク質の消化分解の程度を評価した。

次に、BSA 水溶液を加熱してゲル化させた BSA ゲル粒子をモデル固形食品として消化試験を行った。BSA ゲルは、NaCl 濃度を調整した BSA 溶液 (BSA 5 wt%、消泡剤 0.05 wt%、pH 6.5) を減圧して十分に脱気した後、オートクレーブで加熱 (105 °C、30 分) することで調製した。得られた BSA ゲルを円筒状に成形し、テクスチャーアナライザにより破断応力と破断歪率を測定した。

化学的消化のみを模擬した消化試験では、BSA ゲル 30 g を 5 mm 角に成形し、人工唾液 (引用文献⑦) 9 mL と 2 分間混合して咀嚼を模擬した後、人工胃液 (引用文献⑦) (pH 1.3、ペプシン 4000 U/mL) 78 mL と混合し、37 °C で 180 分間穏やかに攪拌した。所定の消化時間ごとに液相を採取した。

化学的消化と物理的消化を模擬した GDS による消化試験では、BSA ゲル 100 g を 5 mm 角に成形し、人工唾液 30 mL と 2 分間混合して咀嚼を模擬した後、人工胃液 (pH 1.3、ペプシン 4000 U/mL) 260 mL と共に GDS に投入し、37 °C で 180 分間消化試験を行った。ぜん動運動は、健常者の値を参考に、進行速度 2.5 mm/s、発生周期 40 秒とした (引用文献③)。所定の消化時間経過後、内容物を目開きの異なる篩で分級し、透過液を採取した。各消化試験で採取した液を、NaOH 溶液で pH 8 に調整することでペプシンによる消化を停止させ、消化液に放出されたタンパク質量を求めた。消化試験に使用したゲル粒子中の全 BSA 量に対する測定されたタンパク質量を、消化液に放出されたタンパク質放出率とした。

(3) 糖質含有固形食品の消化: デンプンを包含した寒天ゲル粒子を糖質含有モデル固形食品として消化試験を行った。異なる濃度の寒天 (AG) とネイティブ型ジェランガム (NGG) を 90 °C で水と 30 分間攪拌し、溶解した。これにジャガイモデンプン 10 wt% を添加し、30 分間加熱しながら攪拌した後、8 °C で 2 時間冷却させてデンプン含有ゲルを調製した。調製したゲル試料を円筒状に成形し、テクスチャーアナライザによりゲル試料の力学的特性として破断応力と破断歪率を測定した。調製したデンプン含有ゲル 100 g を 5 mm の立方体に成形し、人工唾液 30 mL と 2 分間混合して咀嚼を模擬した (引用文献③)。次に、人工胃液 200 mL (pH 1.3) をこの混合物に加えて c-GDS に投入し 37 °C で最大 180 分間の消化試験を行った。胃液の分泌速度は 2.5 mL/min、c-GDS からの内容物の排出速度は 3.0 mL/min、排出フィルターのサイズは 2 mm に設定した (引用文献⑧)。c-GDS からの胃消化排出物を 30 分間隔で採取し、人工腸液と 1:1 (v/v) で混合し、120 分間小腸消化振とう試験を行った。小腸消化試験前と 120 分試験後に 1 mL をサンプリングし、4 mL のエタノールと混合し酵素反応を止めて遠心分離を行い、上清を消化されたデンプン、沈殿を未消化デンプンとして定量した (引用文献⑨)。

(4) 脂質含有固形食品の消化: 脂質含有固形食品としてプロセスチーズ (PC、KRAFT)、シャープチェダーチーズ (CC、KIRKLAND)、およびゴーダチーズ (GC、東京デリカ) を用いた。In vitro 消化試験に用いた人工唾液および人工胃液の調製については、既報の方法に基づいて行った (引用文献⑩)。各チーズを一辺 5 mm の立方体 (CC、GC) もしくは 5 x 5 x 4 mm の直方体 (PC) にカットした後、チーズ試料 (60 g) と人工唾液 (30 mL、pH 7) を 2 分間混合して人工食塊を形成した。次に、人工食塊および人工胃液 215 mL (pH 1.3) を回分型 GDS に投入し、37 °C で 180 分間の胃消化試験を行った。なお、GDS 容器側面のゴム壁を進行するぜん動運動の速度は、2.5 mm/s に設定した。また、人工食塊および人工胃液 215 mL (pH 1.3) を三角フラスコに投入し、往復振とう法 (115 strokes/min) による胃消化試験を 37 °C で 180 分間行った。胃消化試験中、所定の時間間隔で塩酸 (0.5 mol/L) を添加して胃内容物の pH を制御した。試験終了後の胃消化物を、目開き (d) が異なる 4 段式篩 (d = 3.35, 2.36, 1.18, 0.60 mm) を用いて分級した。各サイズ画分の胃消化物を真空オーブンで乾燥 (105 °C、12 時間) させ、その乾燥重量を測定した。

4. 研究成果

(1) 胃の物理的消化環境の模擬性評価と胃内容物粘度の影響: GDS 消化試験に供された球状ゲルは、いずれの寒天濃度でも経時的に破壊される様子が観察された。球状ゲルの破壊に関する半減期を図 2 に示す。寒天濃度が 2.39 wt% と 3.00 wt% の場合では、寒天濃度が 1.50 wt% と 1.89 wt% と比べて半減期が約 2 倍長くなった (図 2b)。既往のヒト試験の結果においても (引用文献⑥)、半減期は同じく 1.89 wt% から 2.39 wt% への寒天濃度増加に伴って急激に増加した (図 2a)。半減期が急激に増加した原因は、胃のぜん動運動に起因する圧縮力が、隣接する球状ゲル同士の圧縮を誘起した結果、破断荷重の閾値以下の球状ゲルが崩壊したものと考えられる。以上の結果より、GDS に装備するローラーの材質を適切に設計し使用することで、ヒトの胃に類似した物理的な微細化環境を再現できることがわかった。

ペプシンを添加していない人工胃液を使用した系では、粘度 0.87 mPa・s の場合、排出物の BSA 濃度が時間と共に指数関数的に減少した。一方、粘度 11.30 mPa・s の場合、平均滞留時間である 100 分付近で BSA 濃度がステップ的に大きく減少した。この結果、内容物の粘度によりタンパク質の排出挙動が大きく異なることがわかった。ペプシンを添加した系では、粘度 0.87 mPa・s では、0~15 分の排出画分に BSA 分解物が含まれており、180 分の消化試験の間に排出された全 BSA 量の 61.9 % が BSA 分解物であった。一方、粘度 11.30 mPa・s の場合、75~90 分の排出画分に BSA 分解物が含まれており、180 分の消化試験の間に排出された全 BSA 量の 12.2 % が BSA 分解物であった。この結果、c-GDS 容器上部から分泌される人工胃液と胃内容物は、BSA 溶液の粘度が低いほど良く混合され、消化試験開始後の早い段階から BSA が分解され、排出物により多くの BSA 分解物が含まれることがわかった。以上、c-GDS による胃消化試験から、タンパク質溶液の粘度によりタンパク質の消化・排出挙動が異なることが定量的に明らかになった。

(2) タンパク質含有固形食品の消化: BSA を包含した寒天ゲルを使用して GDS による消化試験を行った結果、ゲル粒子が微細化される様子が観察された。各消化時間において、目開き 3.35 mm の篩に阻止された寒天ゲル粒子について、SDS-PAGE を行った結果、消化試験開始 60 分経過後では、BSA のバンドが確認できたのに対し、90 分経過後では BSA のバンドは消失し、完全に消化分解されていることがわかった。この結果から、胃消化液中のペプシンがゲル粒子内部へと拡散し、ゲル粒子内部で BSA がペプシンにより分解されることが示唆された。そこで、ゲル粒子内へのペプシンの拡散挙動をシミュレーションした結果、消化試験後約 90 分でゲル粒子の中心部までペプシンが到達すると算出された。これより、固形食品に含まれるタンパク質の胃消化挙動を、固形食品への消化酵素ペプシンの拡散と関連付けて解析、評価できた。

BSA ゲルを NaCl 濃度 3 mM で調製した場合、ゲルは透明であった。一方、NaCl 濃度 20, 40 mM で調製した BSA ゲルは白濁していた。NaCl 濃度の増加に伴い破断応力と破断歪率は低下した。この結果、変性・凝集状態と力学特性の異なる BSA ゲルを調製できることがわかった。

攪拌による消化試験、および GDS 消化試験を 180 分行った後のタンパク質の消化液への放出率に関しては、攪拌による消化試験では、NaCl 濃度の増大に伴い放出率が減少した。この結果、BSA の変性・凝集状態により放出率が異なることがわかった。一方、GDS 消化試験では、いずれのゲル粒子においても攪拌消化試験と比較して高い放出率を示した。また、放出率の値は、NaCl 濃度の増大に伴って増加し、攪拌消化試験と逆の傾向を示した。ぜん動運動による物理的消化の影響を評価できる GDS 消化試験では、高 NaCl 濃度で調製した力学強度が低いゲル粒子の方がぜん動運動により微細化され易い。そのため、BSA の変性・凝集状態よりもゲル粒子の力学特性が消化の支配的因子となり、変性・凝集による放出率の抑制効果よりもゲル粒子の力学強度の影響が大きくなり、タンパク質放出の傾向が逆転したと考えられる。

以上の結果から、タンパク質の変性・凝集状態とゲルの力学特性により、固形食品に含まれるタンパク質の消化挙動が異なることが明らかとなり、これらの因子を制御することでタンパク質の消化特性を制御できる可能性が示唆された。

(3) 糖質含有固形食品の消化: ゲル化剤である寒天 (AG) とネイティブ型ジェランガム (NGG) の組成を制御することで、破断応力 30 kPa 程度と同程度でありながら破断歪率が異なるデンプン含有ゲル試料を調製できた。c-GDS 消化試験の結果、デンプン含有ゲルの破断応力が同程度の場合、破断歪率約 50% の AG-NGG 混合デンプン含有ゲルは、破断歪率約 30% の AG 混合デンプン含有ゲルより小腸へのデンプン流入量が低下することがわかった。また、小腸消化試験開始前の消化デンプン量 (口腔と胃で加水分解) は、排出されたデンプン量に対して約 15% 程度であった。

小腸消化試験後の未消化と消化デンプンの割合から、排出されたデンプンは 120 分小腸消化

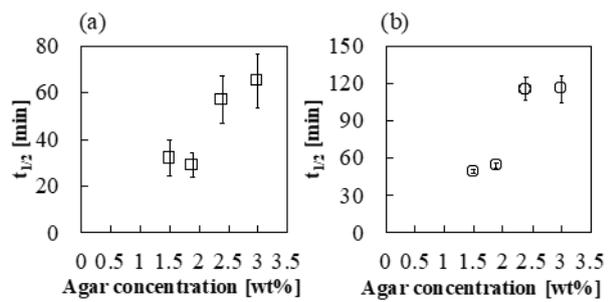


図 2 異なる寒天濃度の球状ゲルを胃消化試験した際の球状ゲル崩壊の半減期 (a: ヒト試験 (引用文献⑥), b: GDS 試験)

試験を経るとほとんど加水分解され、異なる力学特性のゲルに含有させたデンプンの消化の進行程度に違いが見られた。

以上より、固形食品の力学特性により食品に含まれているデンプンの消化特性を制御できる可能性が示唆された。

(4) **脂質含有固形食品の消化**：GDS を用いた胃消化試験による PC およびナチュラルチーズ (CC、GC) の消化挙動の直接観察結果を図 3 に示す。PC の場合では、ぜん動運動の駆動に伴う粒子の圧縮・変形、隣接する粒子同士の凝集、および粒子表面の崩壊が観察された。GDS 容器底部に存在する PC 粒子層の高さは、胃消化試験中に大きな変化は認められなかった。一方、CC および GC の場合では、ぜん動運動の駆動に伴う粒子の不規則な微細化、粒子表面の崩壊、および粒子表面からの脂質の放出が観察された。図 3 における胃消化挙動の違いは、本研究で用いたチーズの力学特性、組成、および微細構造に起因するものと推察される。往復振とう法による胃消化試験を行った結果、いずれのチーズにおいても粒子の膨潤および粒子表面の崩壊が観察された。チーズ粒子表面からの脂質の放出については、GDS を用いた場合よりも少ない傾向にあった。消化試験後における胃消化物の乾燥重量を測定した結果、GDS を用いた場合では、幽門の内径と同程度の目開き (2.36 mm) の篩を通過した粒子の割合は、PC が 47.1%、CC が 88.4%、GC が 78.4%であった。これに対し、往復振とう法の場合では、前記の篩を通過した粒子の割合は、PC が 36.0%、CC が 41.1%、GC が 41.8%であった。分級後の各サイズ画分における乾燥重量結果は、胃消化試験中の挙動を反映していると考えられる。

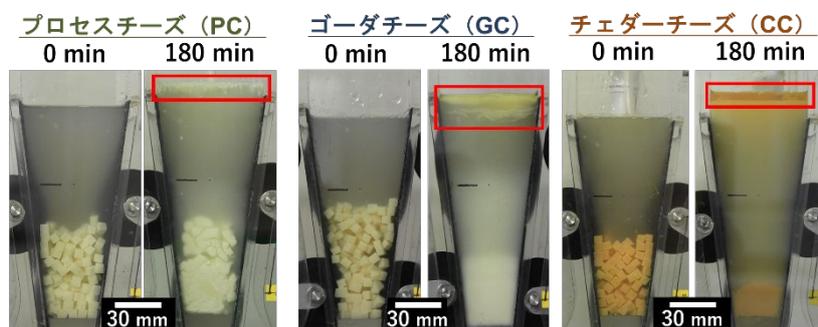


図 3 GDS を用いた *in vitro* 胃消化試験中におけるチーズの消化挙動

以上の結果より、本研究で用いたチーズでは、胃壁のぜん動運動に駆動される物理的消化 (例：粒子の微細化) および化学的消化 (例：粒子表面の崩壊) が並列的に進行することが示された。GDS を用いた場合のみ、プロセスチーズとナチュラルチーズの消化挙動に大きな差異が認められ、定量的なぜん動運動を考慮した胃消化試験の必要性が示された。チーズに含まれるタンパク質の消化挙動については、今後検討する必要がある。

<引用文献>

- ① McClements, D. J. and Li, Y., Review of *in vitro* digestion models for rapid screening of emulsion-based systems, *Food. Funct.*, **1**, 32–59 (2010).
- ② Van der Werf, M. J. et al., Bifidobacteria: Genetic modification and the study of their role in the colon, *J. Agri. Food Chem.*, **49**, 378–383 (2001).
- ③ Kozu, H. et al., Development of a Human Gastric Digestion Simulator Equipped with Peristalsis Function for the Direct Observation and Analysis of the Food Digestion Process, *Food Sci. Technol. Res.*, **20**, 225–233 (2014).
- ④ Kozu, H. et al., Mixing characterization of liquid contents in human gastric digestion simulator equipped with gastric secretion and emptying, *Biochem. Eng. J.*, **122**, 85–90 (2017).
- ⑤ Erlangga, T.ほか, ぜん動運動を具備したヒト十二指腸消化シミュレーターにおける内容物の混合特性の解析, 化学工学会第 83 年会, 2018 年 3 月 13~15 日, 関西大学 (大阪府, 吹田市)
- ⑥ Marciani, L. et al., Assessment of antral grinding of a model solid meal with echo-planar imaging, *Am. J. Physiol. Gastrointest. Liver Physiol.*, **280**, 844–849 (2001).
- ⑦ Kozu, H. et al., Mixing characterization of liquid contents in human gastric digestion simulator equipped with gastric secretion and emptying, *Biochem. Eng. J.*, **122**, 85–90 (2017).
- ⑧ Minekus, M. et al., A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food – an international consensus, *Food Funct.*, **5**, 1113–1124 (2014).
- ⑨ Guo, Q. et al., Behaviour of whey protein emulsion gel during oral and gastric digestion: effect of droplet size, *Soft Matter*, **10**, 4173–4183 (2014).
- ⑩ Dartois, A. et al., Influence of guar gum on the *in vitro* starch digestibility – rheological and microstructural characteristics, *Food Biophys.*, **5**, 149–160 (2010).
- ⑪ Kozu, H. et al., *In vitro* digestion of oil-containing hydrogels using Gastric Digestion Simulator: a model analysis for oil release control inside human stomach, *Japan J. Food Eng.*, **19**, 89–101 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小林 功, 市川 創作	4. 巻 20
2. 論文標題 食品の胃消化プロセスの in vitro 評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本食品工学会誌	6. 最初と最後の頁 A-7 - A-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 小林 功	4. 巻 82
2. 論文標題 食品の胃消化プロセスの in vitro 評価と食品の消化性制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 化学工学	6. 最初と最後の頁 307-310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 小林 功, 神津 博幸, 王 政, 市川 創作	4. 巻 65
2. 論文標題 ヒト胃消化シミュレーターを利用した食品粒子の微細化プロセスの可視化および評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本食品科学工学会誌	6. 最初と最後の頁 543-551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3136/nskkk.65.543	査読の有無 無
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16件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 三平 浩人, 神津 博幸, 小林 功, 市川 創作
2. 発表標題 変性・凝集状態が異なるタンパク質ゲル粒子の胃消化挙動の解析
3. 学会等名 日本食品工学会第20回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shengjie Du, Zaitian Wang, Mitsutoshi Nakajima, Marcos A. Neves, Kunihiko Uemura, Sosaku Ichikawa
2. 発表標題 Cheese digestion behaviors analyzed with a human Gastric Digestion Simulator
3. 学会等名 日本食品工学会第20回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三平 浩人, 神津 博幸, 小林 功, 市川 創作
2. 発表標題 ヒト胃消化シミュレーターを用いた液状食品中タンパク質の消化・排出挙動の解析
3. 学会等名 日本食品科学工学会第65回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zaitian Wang, Hiroyuki Kozu, Kunihiko Uemura, Isao Kobayashi, Sosaku Ichikawa
2. 発表標題 Analysis of physical and chemical digestion of starch-containing hydrogels using an in vitro gastrointestinal method
3. 学会等名 The 13th International Congress of Engineering and Food (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isao Kobayashi, Zaitian Wang, Hiroyuki Kozu, Kunihiko Uemura, Sosaku Ichikawa
2. 発表標題 Direct observation and analysis of disintegration of hydrogel particles with different mechanical properties using a gastric digestion simulator
3. 学会等名 The 13th International Congress of Engineering and Food (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sosaku Ichikawa, Isao Kobayashi
2. 発表標題 Digestion dynamics of solid foods analyzed by using a Gastric Digestion Simulator
3. 学会等名 The 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isao KOBAYASHI, Sosaku ICHIKAWA
2. 発表標題 Human gastric digestion simulator: From device development to evaluation of food digestibility
3. 学会等名 The 2019 NSFC-JSPS Joint Symposium on Hydrocolloids for Modern Food Function Design (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王 在天, 神津 博幸, 植村 邦彦, 小林 功, 市川 創作
2. 発表標題 胃消化シミュレーターと小腸消化試験によるゲル状食品中の澱粉消化挙動の解析
3. 学会等名 日本食品工学会第19回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三平 浩人, 神津 博幸, 小林 功, 市川 創作
2. 発表標題 ヒト胃消化シミュレーターを用いた粘度の異なるタンパク質溶液の消化・排出挙動の解析
3. 学会等名 日本食品工学会第19回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lin Han, Zaitian Wang, Hiroyuki Koza, Kunihiko Uemura, Isao Kobayashi, Sosaku Ichikawa
2. 発表標題 Disintegration behavior of gel mixtures with different textures using GDS
3. 学会等名 日本食品工学会第19回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三平 浩人, 神津 博幸, 小林 功, 市川 創作
2. 発表標題 連続型ヒト胃消化シミュレーターを用いたタンパク質溶液の消化・排出挙動の解析
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市川 創作, 小林 功
2. 発表標題 ヒト胃消化シミュレーターを利用した食品消化動態の評価
3. 学会等名 化学工学会第84年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鬼柳 裕介, 神津 博幸, 小林 功, 市川 創作
2. 発表標題 固形食品の消化酵素ペプシンの拡散と含有タンパク質の消化挙動のモデル解析
3. 学会等名 日本食品工学会第18回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 王 在天、神津 博幸、植村 邦彦、小林 功、市川 創作
2. 発表標題 胃消化シミュレーターにおける固形食品の胃内微細化環境の模擬性評価
3. 学会等名 日本食品工学会第18回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 風呂本 拓磨、神津 博幸、王 在天、磯田 博子、植村 邦彦、小林 功、市川 創作
2. 発表標題 In vitro胃小腸消化試験による固形食品中の低分子栄養成分の放出挙動のモデル解析
3. 学会等名 日本食品工学会第18回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鬼柳 裕介、神津 博幸、小林 功、市川 創作
2. 発表標題 ヒト胃消化シミュレーターを用いたタンパク質含有モデル固形食品の消化挙動の解析
3. 学会等名 化学工学会第49回秋季大会
4. 発表年 2017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
研究 分担者	小林 功 (KOBAYASHI Isao) (70425552)	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 (82111)	