

ヒト胃消化シミュレーター（GDS）を用いた澱粉性主食および  
介護食モデルの胃内消化挙動に関する基礎的研究

帝京平成大学大学院  
健康科学研究科 健康科学専攻  
博士課程  
117M13301  
芝崎 本実

## 【本論】

### 目次

第1章	緒言 .....	1
1-1	日本の高齢化について .....	2
1-2	高齢者の低栄養の要因 .....	2
1-3	介護食について .....	4
1-4	ヒトにおける消化・吸収の機序 .....	4
1-4-1	ヒトの胃消化について .....	5
1-4-2	人工消化試験法 .....	5
1-4-3	ヒト胃消化シミュレーター（GDS）について .....	6
1-5	本研究の目的 .....	7
第2章	澱粉性主食の種類が胃内消化挙動に与える影響 .....	8
2-1	緒言 .....	9
2-2	実験方法 .....	9
2-2-1	材料および試料の調製 .....	9
2-2-1-1	食品 .....	9
2-2-1-2	試料の調製 .....	10
2-2-1-3	試料における力学特性の測定 .....	10
2-2-2	人工消化試験 .....	10
2-2-2-1	人工唾液および人工胃液の調製 .....	10
2-2-2-2	人工食塊の調製 .....	11
2-2-2-3	人工消化試験の方法 .....	11
2-2-3	分析方法 .....	11
2-2-3-1	直接観察の分析 .....	11
2-2-3-2	栄養成分の分析 .....	12
2-3	結果 .....	13
2-3-1	試料の力学特性 .....	13
2-3-2	直接観察 .....	13
2-3-2-1	胃内容物の見かけ体積比および pH 変化 .....	14
2-3-2-2	胃内消化物の粒子サイズ分布 .....	15
2-3-3	栄養成分の分析 .....	16
2-3-4	振とう法消化試験 .....	17
2-4	考察 .....	17

2-5	結語 .....	19
<b>第 3 章</b>	<b>介護食モデルの胃内消化挙動におけるとろみ剤および胃内 pH の影響 .....</b>	<b>21</b>
3-1	緒言 .....	22
3-2	実験方法 .....	23
3-2-1	材料および試料の調製 .....	23
3-2-1-1	とろみ剤添加および濃度の違いについて .....	23
3-2-1-2	胃内 pH の違いについて .....	23
3-2-1-3	試料の調製 .....	23
3-2-2	人工消化試験 .....	24
3-2-2-1	人工唾液および人工胃液の調製 .....	24
3-2-2-2	人工食塊の調製 .....	24
3-2-2-3	GDS 消化試験の方法 .....	24
3-2-3	分析方法 .....	24
3-2-3-1	直接観察の分析 .....	24
3-2-3-2	栄養成分の分析 .....	24
3-3	結果 .....	25
3-3-1	直接観察 .....	25
3-3-1-1	とろみ剤添加および濃度の違いについて .....	25
3-3-1-2	胃内 pH (人工胃液) の違いについて .....	25
3-3-2	胃内容物の見かけ体積比および pH 変化 .....	26
3-3-2-1	とろみ剤添加および濃度の違いについて .....	26
3-3-2-2	胃内 pH (人工胃液) の違いについて .....	27
3-3-3	胃内消化物の粒子サイズ分布 .....	27
3-3-3-1	とろみ剤添加および濃度の違いについて .....	27
3-3-3-2	胃内 pH (人工胃液) の違いについて .....	28
3-3-4	栄養成分の分析 .....	28
3-3-4-1	とろみ剤添加および濃度の違いについて .....	28
3-3-4-2	胃内 pH (人工胃液) の違いについて .....	29
3-4	考察 .....	29
3-4-1	とろみ剤添加および濃度の違いについて .....	29
3-4-2	胃内 pH (人工胃液) の違いについて .....	30
3-5	結語 .....	31
<b>第 4 章</b>	<b>総括 .....</b>	<b>33</b>

第 5 章	参考文献 .....	36
	謝辞 .....	43
	図表	



## 【図表】

### 目次

#### 第1章 緒言

- 図 1-1 エネルギー産生栄養素バランス（エネルギー％）
- 図 1-1 食事バランスガイド
- 図 1-3 健康のために積極的に摂っている栄養素と摂ることを制限している栄養素についてのアンケート結果
- 図 1-4 目標とする BMI の範囲の分布
- 図 1-5 日本人の食事摂取基準（2020 年版）策定の方角性
- 図 1-6 GDS の構造
- 図 1-7 本研究の構成

#### 第2章 澱粉性主食の種類が胃内消化挙動に与える影響

- 表 2-1 澱粉性主食の栄養成分（60g あたり）
- 表 2-2 人工唾液および人工胃液の組成
- 図 2-1 分級時の模式図
- 表 2-3 澱粉性主食の力学特性
- 図 2-2 GDS を用いた澱粉性主食の違いによる消化挙動の経時変化
- 図 2-3 GDS を用いた澱粉性主食の違いによる粒子層の見かけ体積比
- 図 2-4 澱粉性主食の違いによる pH の経時変化
- 図 2-5 GDS および振とう法試験における澱粉性主食の消化物，180 分後  
－湿潤重量とサイズ分布－
- 図 2-6 澱粉性主食の違いによる各画分における粒子形態，180 分後の消化物
- 図 2-7 澱粉性主食の違いによるタンパク質の消化物，合計面積（AREA）  
－食パン・十割そば－

- 図 2-8 澱粉性主食の違いによるタンパク質の消化物，合計面積（AREA）  
ー白米飯・うどん・中華麺・スパゲティ
- 図 2-9 澱粉性主食の違いによる糖質の消化物，合計面積（AREA）の変化率

### 第 3 章 介護食モデルの胃内消化挙動に関するとろみ剤および胃内 pH の影響

- 表 3-1 とろみ剤の種類や特徴
- 図 3-1 とろみ剤の生産量および高齢者人口
- 表 3-2 嚥下調整食学会分類 2013 早見表（とろみ）
- 表 3-3 とろみ剤の栄養成分（100g あたり）
- 表 3-4 とろみ剤の濃度や性状について
- 表 3-5 GDS に供した「全粥」および「全粥＋とろみ剤＋水」の栄養成分
- 図 3-2 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる消化挙動の経時変化
- 図 3-3 胃内 pH（人工胃液）の違いによる消化挙動の経時変化
- 図 3-4 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる粒子層の見かけ体積比
- 図 3-5 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる pH の経時変化
- 図 3-6 胃内 pH（人工胃液）の違いによる粒子層の見かけ体積比
- 図 3-7 胃内 pH（人工胃液）の違いにおける胃内消化挙動による pH の経時変化
- 図 3-8 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる介護食モデルの消化物，180 分後  
ー湿潤重量とサイズ分布ー
- 図 3-9 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる各画分の粒子形態，180 分後の  
消化物
- 図 3-10 胃内 pH（人工胃液）の違いによる介護食モデルの消化物，180 分後  
ー湿潤重量と粒子サイズ分布ー
- 図 3-11 胃内 pH（人工胃液）の違いによる各画分の粒子形態，180 分後の消化物
- 図 3-12 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによるタンパク質の消化物，合計面積（AREA）  
の変化率
- 図 3-13 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる糖質の消化物，合計面積（AREA）の変  
化率

図 3-14 胃内 pH（人工胃液）の違いによるタンパク質の消化物，合計面積（AREA）の  
変化率

図 3-15 胃内 pH（人工胃液）の違いによる糖質の消化物，合計面積（AREA）の変化率

## 第 1 章 緒言

### 1-1. 日本の高齢化について

日本における高齢期は、65 歳以上とされ、65～75 歳未満を前期高齢者、75 歳以上を後期高齢者、さらに 85 歳以上を超後期高齢者の区分を設けている。

日本の平均寿命は、高度経済成長に伴い、急激に延伸し、1970～1980 年代は世界一となり、以前として世界トップレベルである<sup>1)</sup>。そして、2008 年以降は、出生数が死亡数を下回り、人口減少とともに少子高齢化が加速している。2025 年には、国内の 65 歳以上の高齢者人口が全人口の 30 %に到達すると予想されている。

WHO は、健康寿命を「自立して活動的な生活が継続してできる期間」と定義している。

超高齢社会となった我が国では、平均寿命と健康寿命との差が大きいことが懸念されており、今後の高齢者における健康寿命の延伸は、社会的、経済的に重要な課題にもつながっている<sup>2)</sup>。そこで、2040 年を展望し、誰もがより長く元気に活躍できる社会の実現として、健康寿命を男女ともに 3 年以上延伸し、75 歳以上にすることを目標としている<sup>3)</sup>。

さらに、高齢者に対する社会の負担軽減を多角的に進める必要に迫られており、非介護状態を保つ意義は高い<sup>4)</sup>。そこで、高齢者の介護を社会全体で支え合う仕組みである介護保険を創設した。2000 年に介護保険法が施行され、高齢期を細分化し、年齢や身体機能に則した様々な介護サービスを楽しむことができるようになった。

### 1-2. 高齢者の低栄養の要因

加齢に伴い、運動機能や生理機能の低下や変化は徐々に進み、次第に顕在化する。

これらが進行すると、身体活動量が低下し、虚弱（フレイルティ）のリスクが高まり、さらにサルコペニアやロコモティブシンドロームなどの筋力低下につながる。さらに、骨や関節の病気にも罹患しやすく、自立した生活が困難となり、介護リスクが高くなる。これらは、食欲低下の要因にもなるため、慢性的なエネルギーやタンパク質の摂取不足により、必要とされる栄養素が摂取できず、栄養バランスが崩れて低栄養に陥りやすい。

図 1-1 は、日本人の食事摂取基準で新たにフレイル予防を加味して設定された高齢者 65 歳以上の男女におけるエネルギー・産生栄養素バランスを示したものである。

高齢者の低栄養を防ぐタンパク質の摂取を促す一方で、一日の摂取エネルギーの 50～65 %は炭水化物、すなわち糖質に依存している。それらを踏まえ、シニア世代の健康的な生活をサポートするツールとしても活用できる厚労省と農水省が作成した図 1-2 の食事バランスガイドでは、一般的な高齢者の 1 日の摂取エネルギーに応じ、主食（米飯以外にもパンや麺類を含む）を 1 日に 5～7 皿分心がけて摂るよう提言している。

図 1-3 は、高齢者 60～75 歳（n=1,000）を対象とした「シニアの食生活と健康意識に関する調査」（株式会社ネオマーケティングが運営するアンケートサイト「アイリサーチ」のシステムを利用した WEB アンケート方式で調査を実施。実施期間：2017 年 8 月 23 日～25 日の 3 日間）では、積極的に摂取している栄養素・制限している栄養素について、積極的に摂取している栄養素はタンパク質が 31.4 %、次いで食物繊維が 31.3 %となり、タンパク

質摂取の意識が高かった。一方で、制限していると回答した栄養素は、「糖質」が 22.3 %、次いで「油・脂質」19.1 %となり、エネルギー源となる糖質を制限する意識が高かった。

糖質は、人体において、優先的にエネルギーへと変わる機序を有している。それ故に、筋肉や内臓、脳などのエネルギー源であり、筋肉の合成を促進するなど、身体の構成にとって必要不可欠な栄養素である。また、脳機能においても、糖質を定量に保つことで、脳の活性化を促すことが示されており、認知症リスク低下にも繋がる<sup>4)</sup>。

高齢者にとって、タンパク質だけではなく、糖質、脂質を合わせた三大栄養素を食事にバランスよく取り入れることが、低栄養や加齢による身体機能低下を防ぐ有効な方法の一つである。これらを踏まえて、先行研究においては、高齢者の栄養状態と寿命や健康寿命、日常生活動作等との関連について、数多く報告されており、低栄養はそれらを低下させることも明らかとなっている<sup>5-8)</sup>。低栄養を防ぐためにも、適正な栄養管理による予防やリスク軽減による取り組みが必要である。

栄養管理では、体重が重要な指標となり、高齢者の「目標とする BMI (体重 (kg) ×身長 (m)<sup>2</sup>) の範囲」は、50～69 歳では 20.0～24.9、70 歳以上では 21.5～24.9 とされている。

令和元年の国民健康・栄養調査を参考にした図 1-4 では、50 歳以上になると目標とする BMI の範囲未満が徐々に増加し、70 歳以上では全体の 30 %を超え、低栄養のリスクが高まっている。

厚生労働省は、健康増進法に基づき、国民の健康の保持・増進を図る上で摂取することが望ましいエネルギーおよび栄養素量の基準を定めた「日本人の食事摂取基準」を発出し、5 年毎に改定している。「日本人の食事摂取基準 (2020 年版)」では、図 1-5 の策定の方向性として、方針に、従来の健康の保持・増進、生活習慣病の発症予防および重症化予防の観点に加え、高齢者の低栄養およびフレイル予防に寄与する項目が追加された ([厚労省, 2020])。このように、高齢者の健康維持・増進の観点から、低栄養の改善が喫緊で重要な問題であることが認識できる。また、加齢による咀嚼・嚥下機能、唾液・胃液分泌機能といった生理機能の低下による栄養摂取・吸収不良も低栄養に大きな影響を与える。

咀嚼・嚥下機能は、口腔内における歯の喪失や咬合能力の低下、咀嚼筋が衰えていく。また、嚥下困難な状態になると、のどにつかえる、むせるなど症状で普通の食事が困難になり、誤嚥性肺炎や拒食などを引き起こす<sup>9)</sup>。

生理機能については、舌の味蕾数減少や萎縮、唾液分泌の低下などにより、味覚が鈍くなる。さらに消化吸収においては、消化液および消化酵素の分泌の減少が報告されている<sup>10-12)</sup>。特に、胃酸・ペプシンの分泌、胃排出機能が消化吸収に関与する因子とされ、胃酸分泌量が減少すると、胃内 pH が常に高い状態となり、食品の消化動態に影響を与え、栄養摂取・吸収不良になる可能性がある。また、筋力低下などによってぜん動運動が減じ、食物の胃内滞留時間を延長させ、腹部膨満感を感じて食欲不振の原因となる。これらが誘因となり、高齢者の食事摂取量や栄養素摂取不足が生じ、低栄養につながる事が懸念されている。

### 1-3. 介護食について

低栄養の主な原因として摂食、嚥下障害がある。口から食べることは、ヒトとして大きな楽しみであり、その行為が行われなくなると QOL（Quality of life, 生活の質）の低下が顕著にみられる<sup>4)</sup>。特に、嚥下障害は、食事摂取において様々な問題を引き起こし、窒息や誤嚥、食欲不振などによる低栄養を招く。そのため、これらの障害においては、個人の食事能力によって、食事の援助や対応を図り、調理の工夫が必要である。

そこで、咀嚼、嚥下、その他の摂食機能に障害のある人に対して、適切な食事を摂取させるために、二次調理をして形態的に摂取しやすい状態にした食事「介護食」<sup>13)</sup>がある。

介護食は、食形態によって、刻み食、ソフト食・軟菜食、ムース食、ゼリー食、ミキサー食があり、段階的に形態が細かく、ペースト状になっていく。

食べ物の形態が、さらさらした液体、ばらばらとしてまとまりにくいもの、水分が少なく、ばさばさしたもの、粘りが強すぎるものなどは、気管に入りやすく、誤嚥性肺炎や窒息の危険性がある。その場合は、澱粉や増粘剤で粘度をつけ、嚥下の補助を行う調理上の工夫が必要となる。

厚労省は 2009 年 4 月に健康増進法施行規則の一部を改訂し、食品の特別用途表示を従来の高齢者用から嚥下困難者用に改め、嚥下を容易にさせ、かつ誤嚥、窒息を防ぐことを目的とし、嚥下困難者用食品の硬さ、付着性、凝集性の基準を設け、許可基準Ⅰ～Ⅲを定めた。

さらに、2013 年には、日本摂食嚥下リハビリテーション学会から、嚥下困難者に対する嚥下調整食の段階分類「学会分類 2013」が発表され、嚥下機能に応じてコード 0, 1, 2, 3, 4 の 5 段階の食品分類の設定に基づき、介護保険施設などの食事形態の指標に用いられている<sup>14)</sup>。

2014 年には、「新しい介護食品」として、「スマイルケア食」が農水省より示され、嚥下困難者等の介護を必要とする者に対して、機能性と嗜好性の双方に配慮した介護食品の見直しが行われている<sup>15)</sup>。また、日本介護食品協議会では、咀嚼、嚥下機能が低下している人でも安心して食べられる目安として、「ユニバーサルデザインフード」の自主規格を定めた<sup>16,17)</sup>。

介護食品の種類や形状、形態の基準が整備され、現場に配慮した商品が多く開発、販売されている。

### 1-4. ヒトにおける消化・吸収の機序

ヒトが食した食品は、栄養成分が含まれており、それを体内で吸収させるために、消化・吸収の機序がある。ヒトの消化器系は、口腔、咽頭、食道、胃、小腸、大腸の順序に並ぶ一本の管で形成されている。それらの器官を介して、食した食品の消化は、口腔内消化、嚥下、胃内消化、小腸内消化、大腸内消化から構成される。まず、食品は、口腔に入ると咀嚼によって、小さな断片となると同時に、唾液と混合されて食塊に変化する。唾液には  $\alpha$ -アミラーゼが含まれており、食塊となる際、澱粉の一部は  $\alpha$ -1.4 結合が加水分解し、オリゴ糖や少

糖に分解される。その後、食道を通過して、胃に送達される。胃液に含まれる消化酵素であるペプシノーゲンが pH 2.0 以下の強酸を示す塩酸の作用を受けて、ペプシンとなり、タンパク質はペプチドまで加水分解される。その際、塩酸によって、 $\alpha$ -アミラーゼの活性は不活化し、タンパク質の分解が優位となる。やがて、食塊の形状や形態は、主に幽門の胃壁で発生するぜん動運動<sup>18)</sup>により、せん断および糜粥、混合される<sup>19)</sup>。消化物は、幽門部が開いた際に、少しずつ小腸へ輸送され、胆汁酸・膵液との混合および三大栄養素の分解反応も進行し、栄養素が吸収可能な状態まで消化される。未消化物は、大腸に移行し、腸内細菌によって発酵・分解がおこり、残差は最終的に体外へ排出される<sup>20)</sup>。

#### 1-4-1. ヒトの胃内消化について

ヒトの胃内消化において、胃の噴門に送達された食塊は、幽門部へ輸送されると共に、状況によって、胃体部で貯蔵される。胃体部には、前述した胃液を分泌する細胞が存在しており、内容部の状態や pH の胃液分泌調節が行われている。胃の幽門では、化学的消化である唾液や胃液による食品成分の分解に加え、物理的消化であるぜん動運動が食品の破碎、摩砕、混合などが行われている。糜粥状になった消化物は、幽門部のサイズによる分級を経て、小腸へと排出される<sup>21)</sup>。

ぜん動運動による胃内流動の影響については、食品組織構造の変化、胃液等の浸透による硬さの低下<sup>22)</sup>、および澱粉と結合したタンパク質の分解による澱粉の消化促進作用<sup>23)</sup>が報告されている。胃内では、物理的および化学的消化が連続的に行われ、小腸内で吸収されるために有用な消化挙動が行われている。しかし、胃内消化に関する報告の多くは、化学的消化に関する評価であり、物理的消化を考慮した研究手法や知見は少ない。また、加齢による消化機能低下が示されているにも関わらず、それらを考慮した消化動態においては、不明な点が多く、エビデンスも少ない。

#### 1-4-2. 人工消化試験

食品の胃内消化試験手法には、生体を用いる *in vivo* 手法、実験装置を用いる *in vitro* 手法、およびコンピューターを用いる *in silico* 手法がある。*in vivo* 手法では、核磁気共鳴画像法 (MRI)<sup>24,25)</sup> や体外式超音波装置<sup>26)</sup> など、特別な機器を用いて視覚的に消化挙動を観察できる研究が報告されている。これらは、専用機器や専門家が必要で、被験者の倫理面に制約がある。*In silico* 手法では、コンピューター解析を用いた評価のため、食品のように複雑な組織や成分を持つ試料については、原理上対応が困難である。そこで、倫理面、および試験規模などの制約が少ない *in vitro* 手法が多く利用されている。*in vitro* 手法は胃の構造および機能を精密に模擬した装置や化学的消化を簡易的に模擬した手法がある。従来の手法であるフラスコ振とう法や静置試験法<sup>27)</sup> など、試験管内で胃内部の科学的な環境を模擬する方法がある。これらは簡便で安価な手法ではあるが、物理的な消化を評価できず、消化挙動※を視覚的に観察することが難しい。そこで、オランダ応用化学研究機構では、コンピュー



ター制御が可能で、ヒトの消化器管全体を模擬し、胃腸での混合やぜん動運動による輸送および吸収、代謝をモニタリングできる TNO 腸管モデル装置 (The TNO Gastro-Intestinal Model)<sup>28)</sup>が開発された。その他、英国食品研究所では、Dynamic Gastric Model(DGM)<sup>29)</sup>、Kong らの胃モデル装置<sup>30)</sup>なども開発されている。このように、近年様々な胃および小腸を模擬したシミュレーターによって、ヒトの消化動態を定量的に評価する方法が提案されている<sup>31,32)</sup>。

しかし、それらは操作が複雑で、かつ特殊な設備下で実験する機器となっている。これらの実情から胃内消化に関する物理的消化を配慮した研究知見が少ないのが現状である。

そこで、小林らはヒト胃における消化動態に大きな影響を与える胃の部位、および胃壁の運動、胃内容物の流動を模擬し、かつ胃内容物の消化挙動を直接観察できる装置「ヒト胃消化シミュレーター (Gastric Digestion Simulator：以下、GDS)」を開発した<sup>21)</sup>。

※本論では、シミュレーター装置による物理的、化学的消化を包含した消化動態を「消化挙動」とする。

#### 1-4-3. ヒト胃消化シミュレーター(GDS)

GDS の主な特徴は、化学的消化および物理的消化を模擬できること、食品や成分の消化過程を直接観察できることである。

Kozu らによる数値流体力学の手法を用いて、幽門部を単純化した二次元モデルをコンピューターで構築し、ぜん動運動に誘起される液状内容物の流動状態をシミュレートし、胃内における特徴的な流れを数値化した<sup>33)</sup>。この結果は、三次元モデルを用いた胃全体の流体シミュレーション同様であることが確認されている。

GDS の構造を図 1-6 示した。

GDS は、幽門部を模した容器 (550 mL)、ぜん動運動駆動部、および温度制御部で構成されている。GDS 容器の両側面は、胃壁を模擬した伸縮性あるゴムシートが張られている。GDS 容器の前後面は、透明な平板となっており、消化挙動の直接観察が可能である。

GDS 容器の上面は開放され、サンプリングや pH 測定が可能な構造となっている。

ぜん動運動駆動部では、一定間隔で設置されたローラーが軸を介して、チェーンで接続されている。チェーンの駆動により、GDS 容器側面のゴムシートがローラーで収縮される。ローラーの圧縮によるゴムシートに起こるぜん動運動の速度は、2.5 mm/s、周期は 1.5 mm、および高さは成人を対象とした *in vivo* 試験<sup>34)</sup>による知見を基に設計された。温度制御部は、加湿機器と透明保温ケースで構成され、GDS 容器をヒトの体内温度に加温可能となっている<sup>21)</sup>。

GDS では、定量的なぜん動運動の駆動により、食品の微細化が模擬できるため、固形食品モデルとして、寒天ゲル<sup>35)</sup>や豆腐などの食品を対象にした先行研究<sup>36)</sup>がある。また、消化試験法は既往の文献で示されている情報 (食品試料の形状やサイズ、人工消化液の組成、消化試験時の操作条件や時間など)を参考に、GDS 装置に適したデザインを確立している。

このように GDS 消化試験では、胃のぜん動運動で誘起された内容物の微細化などの消化挙動を直接観察し、固形食品の複雑な消化プロセスの解析を進めてきた。

#### 1-5. 本研究の目的

本研究の構成を図 1-7 に示した。

本研究は、胃のぜん動運動を定量的に模擬し、食品の胃内消化挙動を直接観察できる装置であるヒト胃消化シミュレーター（Gastric Digestion Simulator：以下、GDS）を用い、第 2 章では、澱粉性主食の種類による消化挙動の違い、第 3 章では、介護食モデル（とろみ剤添加や濃度の違い）および胃内 pH が消化挙動に及ぼす諸特性について、解明することを目的とした。

## 第 2 章 澱粉性主食の種類が胃内消化挙動に与える影響

## 2-1. 緒言

私たち日本人の食生活は、澱粉性主食である米飯および一汁三菜を基本としている食事形式で、特に昭和 50 年代頃の米飯を主食としながら、主菜・副菜に加え、適度に牛乳・乳製品や果物が加わったバランスのとれた食事のことを「日本型食生活」<sup>37)</sup>という。長寿国である日本の食生活には、海外からも多くの関心が寄せられている。

しかし、近年のライフスタイルの変化に伴い、米飯の消費量は年々減少しており、家計における主食の購入数量は、米飯と比べてパンや麺類などの割合が増加傾向にある<sup>38)</sup>。

これらの主食は、米飯や食パン、うどんなどの麺類なども含めて、エネルギーに対して炭水化物の割合は 100 g あたり、約 70 %以上を占める澱粉性食品である。

食品の主成分が澱粉である場合、「澱粉性食品」という名称を使用する<sup>39)</sup>ことから、本研究では、日本人が一般的に食べている主食において、「澱粉性主食」と定義する。

澱粉性主食は、主に体のエネルギー源となるグルコースを分解物として供給するため、食べ方や種類によって、それらの栄養成分の消化吸収が異なる。栄養成分の吸収は、胃排出時間にも影響するとされ、胃から小腸に排出された栄養成分の吸収速度は、血液中のグルコース濃度である血糖値に反映される。

血糖値の上昇を緩慢にする食品においては、グリセミック・インデックス(glycemic index: GI) 値(血糖上昇という消化性炭水化物の生理機能の違いに着目して消化・吸収される炭水化物の質の評価を行うための指標である<sup>40)</sup>。

食品は、栄養組成や微細構造が異なるため、種類によっては、胃内消化動態が異なり、小腸での吸収に影響を与える可能性がある<sup>41,42)</sup>。

そして、糖尿病や腎臓病などの食事管理が必要な場合は、食品の種類によるエネルギーや栄養摂取量を変えるだけでなく、消化吸収にも配慮する必要があるため、消化過程やその機序を解明することは重要である。

本章の目的は、GDS を用いて、日本人が多く喫食する澱粉性主食の種類が、消化挙動にどのような影響を与えるのかを検討した。また、従来の振とう法では、どのような消化挙動を示すのかを理解した上で、GDS のぜん動運動による影響を考察する必要があるため、振とう法での人工消化試験も行った。

## 2-2. 実験方法

### 2-2-1. 材料および試料の調製

#### 2-2-1-1. 食品

試料として、総務省による家計調査<sup>38)</sup>において、主食として多く喫食している白米飯(佐藤食品工業(株)、サトウのごはん)、食パン(㈱ヤマザキ、ロイヤルブレッド 8 枚切り)、うどん(㈱シマダヤ、ゆでうどん 純麺)、十割そば(㈱シマダヤ、風味際立つ 十割そば)、中華麺(㈱岩崎食品工業、冷やし中華)、スパゲッティ(日清フーズ(株)、ママーパスタ(乾麺) 1.6 mm) の合計 6 種類を用いた。

#### 2-2-1-2. 試料の調製

白米飯は、レトルトパックのまま電子レンジ（NE-S20，松下電器産業(株)）を用いて出力 600 W で 1 分 40 秒間加熱した。食パンは、1 枚を 16 分割したものをフードプロセッサー（récolte カプセルカッター ボンヌ RCP-3，ウィナーズ(株)）に入れ、ブレードを高速回転（7 秒間）させて粉碎した。うどん、十割そばおよび中華麺は、沸騰させた浄水（TK7300，松下電工；麺重量の 30 倍量）の中に入れ、98 °C を保ちながら加熱した（うどんは 3 分間、十割そばは 1 分 30 秒，中華麺は 3 分間）。その後、ざるにあげ、10 回水切りをした。スパゲッティは沸騰させた浄水（麺重量の 30 倍）に食塩（食塩，塩化ナトリウム 99 % 以上，公益財団法人塩事業センター）30 g を加えた中に入れ、7 分間加熱し、他の麺と同様に水切りした。麺類はすべて 5 mm 幅に切り揃えたものを試料とした。それぞれの試料重量は 60 g とした。

試料 60 g あたりの栄養成分については、表 2-1 に示した。

#### 2-2-1-3. 試料における力学特性の測定

食品の力学特性は、組織構造や調理法によって影響を受け、ぜん動運動を伴う胃内消化に影響していると考えられる。そのため、食品自体の力学特性の指標として、最大荷重値および破断歪率を評価した。力学特性の測定には、卓上型物性測定器（TPU-2C，(株)山電）および解析ソフトウェア（TPU 解析 Windows TPU-A2 Ver. 2.0，(株)山電）を用いた。

白米飯は、電子レンジ加熱調理後、ラップフィルムで包み、30 分放冷したものを試料とした。白米飯粒を 1 粒ずつ測定ステージに設置し、岡留ら<sup>43)</sup>の方法を参考に測定した。測定条件は、白米飯粒を短軸方向に直径 16 mm の円筒形プランジャー（No.3）用いて、圧縮率 90 %，圧縮速度 5 mm/秒，測定の繰り返し回数は 1 回とした。

食パンは、AACC 公定法<sup>44)</sup>を参考に、外皮側 10 mm を除いたクラムについて、長方体（縦 50 mm × 横 50 mm × 高さ 25 mm）に切り出したものを試料とした。直径 40 mm の円形プランジャー（No.2）を用い、圧縮率 99%，その他は白米飯と同様の条件で測定した。

うどん、十割そば、中華麺、スパゲッティは、加熱調理後、10 分以内に 5 cm の長さに切ったものを試料とした。測定ステージに設置した試料は、くさび型プランジャー（No.64）に垂直に配置し、圧縮率 99 % および圧縮速度 5 mm/秒の条件下で測定した<sup>45-47)</sup>。

物性値については、各試料を 20 個測定して算出される平均値 ± 標準偏差を用いた。

#### 2-2-2. 人工消化試験

##### 2-2-2-1. 人工唾液および人工胃液の調製

消化試験に用いた人工唾液および人工胃液の組成は、既報<sup>48,49)</sup>の条件を参考に、表 2-2 に示した。消化液の調製では塩化カリウム (KCl)，リン酸二水素カリウム (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)，炭酸水素ナトリウム (NaHCO<sub>3</sub>)，塩化マグネシウム六水和物 (MgCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>)，炭酸アンモニウム ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)，塩化カルシウム (CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>)（富士フィルム和光純薬(株)，大阪）を用い、

消化酵素は  $\alpha$ -アミラーゼ (Sigma-Aldrich, Bacillus 菌由来, #BCCB4170, 51.0 U/mg) およびペプシン (Sigma-Aldrich, Inc, 豚の胃粘膜由来, #BCBQ7633 V, 714 U/mg) を使用した. 調製した各消化液は, 恒温水槽中で 37 °C に加温した. 人工胃液の pH については, 6 M 塩酸 (富士フィルム和光純薬(株)) を用いて 1.3 に調整した. 人工消化試験において, 人工唾液および人工胃液をそれぞれ 30 mL, 240 mL 使用した.

#### 2-2-2-2. 人工食塊の調製

白米飯および麺類には, 人工唾液を加えた後, 30 秒毎にビーカーの上下を反転させる操作を 4 回繰り返した<sup>29)</sup>. 食パンは, 人工唾液を加えた後, 薬さじを用いて, 一定速度 (2 回/秒) で 1.5 分間攪拌した後, 30 秒間静置したものを人工食塊とした. 人工唾液と混合した際の試料温度は, 35 ± 2 °C とした.

#### 2-2-2-3. 人工消化試験の方法

GDS は, ヒトの胃において, ぜん動運動が活発に起きる幽門部を単純化したモデルとしており, 幽門に向かって内径が小さくなる先細り構造を模擬した台形型になっている. 容器の容量は, 幽門部の体積を考慮して約 500 mL となっている. ぜん動運動は, 胃壁を模擬したゴム板をローラースポンジで圧縮しながら周期的に発生させて模擬されている. 成人の文献値<sup>18,49)</sup> を参考に, ローラーの駆動により発生するぜん動運動の進行速度 2.5 mm/秒, 発生周期 1.5 回/分の条件で試験を行った. GDS 容器内に人工食塊と人工胃液を投入した後, 試験温度 37 °C, 試験時間 180 分間<sup>50)</sup> で人工消化試験を行い, 直接観察を行った.

GDS と従来の *in vitro* 人工消化試験を比較するために, Wang ら<sup>51)</sup> の方法を参考にフラスコ振とう法を行った. GDS を用いた人工消化試験と同様に, 試料と人工唾液を混合して得た人工食塊に人工胃液を加えたものを三角フラスコに投入し, 卓上型振とう恒温槽 (PERSONAL-11, タイテック株式会社) に振とう速度 65 strokes/分, 37 °C に加温しながら, 試験時間を 180 分に設定して消化試験を行った.

試験中は, 30 分毎に pH メーター (LAQUAact D-71, (株)堀場製作所) を用い, ISFET 電極を液面から 1 cm 下へ挿入して測定を行った. pH 測定と同時に, サンプルも採取した.

また, GDS の正面をビデオカメラ (WZX992M, パナソニック(株)) で撮影し, 消化過程を直接観察, 録画した.

実験は, GDS を用いた先行研究<sup>33)</sup> を参考に, 各試料について 3 回ずつ繰り返し行い, 平均値を用いた.

#### 2-2-3. 分析方法

##### 2-2-3-1. 直接観察の分析

GDS および振とう法を用いた消化試験後 (180 分後) の胃内消化物において, 直接観察画像による試料の微細化, 浮遊, 沈殿を経時的に評価した.

胃内消化物の分級方法について、図 2-1 の目開き (d) が異なる篩 (d :3.35, 2.36, 1.18 および 0.60 mm) を積層した状態で行い、各サイズ画分で捕捉された粒子形状およびサイズ分布を観察した。

さらに、消化挙動による微細化の程度や各サイズ画分で捕捉された量を湿潤重量として評価した。

そして、撮影した観察画像を基に、胃内消化物の粒子堆積層の見かけ体積比を経時的に評価した。見かけ体積比は人工食塊および人工胃液から構成される堆積層の初期見かけ体積 ( $V_0, a$ ) を 1 とし、消化時間  $t$  (分) における体積比 ( $V_t, a$ ) との比を指標として、式 2-1 を用いた。

$$\text{式 2-1} \quad V_a = (V_t, a / V_0, a) \times 100$$

#### 2-2-3-2. 栄養成分の分析

栄養成分の分析には、高速クロマトグラフ (以下、HPLC) を用い、タンパク質の分子量分布および糖類のオリゴ糖鎖分析を行った。分析試料は、GDS 試験中に採取した分析試料を用いた。その試料を遠心分離 (20,000g, 5 分) 後、上清を抽出液とした。

前処理の方法は、上清液を親水性 PTFE シリンジフィルター 13 mm ( $0.45 \mu\text{m}$ , Hawachi Scientific) を通した後に、HPLC 用 1.5 mL ガラスバイアル瓶に入れ、HPLC 分析に供した。

HPLC 分析装置は、高速液体クロマトグラフ Prominence UFLC 分析システム (島津製作所株式会社) を用いた。装置構成は、Pump : LC-20AD, Degasser : DGU-20A3, Communication Bus Module : CBM-20A, Auto Sampler : SIL-10AF, Column Oven : CTO-20A, UV/VIS Detector : SPD-20A, Refractive Index Detector : RID-10A, データ解析 : LCsolution である。

タンパク質分子量分布では、上記の HPLC 分析システムを用い、分析用カラムの固定相はシリカ系水系 SEC (GFC カラム) 用のガードカラム Shodex PROTEIN KW-G6B (6 mm I.D.  $\times$  50 mm) と本カラム Shodex PROTEIN KW-803 (8.0 mm I.D.  $\times$  300 mm : 排除限界分量 1,000,000) を用い分析を行った。紫外検出器の検出波長は 220 nm にて、移動相は 50 mM Sodium phosphate buffer (pH 7) + 0.3 M NaCl, 流速 1.0 mL/分, カラム庫内温度は 30°C, そして、注入量は 20  $\mu\text{L}$  の条件で分析を行った。また、タンパク質分子量マーカー (MW-Marker (HPLC), オリエンタル酵母工業株 : 分子量 12,400 から 290,000 までの 5 種類, 馬心筋チトクローム c (分子量 12,400), 酵母ミオキナーゼ (分子量 32,000), 酵母エノラーゼ (分子量 67,000), 豚心筋乳酸脱水素酵素 (分子量 142,000), 酵母グルタミン酸脱水素酵素 (分子量 290,000)) を同条件で分析した。

糖類のオリゴ糖鎖分析では、上記の HPLC 分析システムを用い、分析用カラムの固定相は配位子交換クロマトグラフィ用のガードカラム SUGAR KS-G6B (6.0 mm I.D.  $\times$  50 mm) と 2 本のカラム SUGAR KS-802 (8.0 mm I.D.  $\times$  300 mm) を用いて分析を行った。示差屈

折検出器にて、移動相は超純水、流速は 1.0 mL/分、カラム庫内温度は 80°C、そして、注入量は 20  $\mu$ L の条件で分析を行った。また、標準試料 C1~10 の混合物 (株)センシュエ科学) を同条件で分析した。

HPLC 分析から得られたクロマトグラムから、LCsolution を用いて解析を行った。クロマトグラムに検出された各ピークの相対保持時間 (分) およびピーク面積 (AREA) を算出した。また、タンパク質分子量分布は、MW マーカーの結果から保持時間と分子量との検量線を作成し、分析試料から検出された各ピークの保持時間からタンパク質分子量を推定した。測定対象となるタンパク質の分子量は 10,000 から 700,000 である。

そして、オリゴ糖鎖分析では、C1 から C10 までのオリゴ糖鎖マーカーで定性確認ができた、C1 から C7 (C1 グルコース, C2 マルトース, C3 マルトトリオース, C4 マルトテトラオース, C5 マルトペンタオース, C6 マルトヘキサオース, C7 マルトヘプタオース) までの各ピークの保持時間、ピーク面積を算出し、C8 以上のオリゴ糖鎖に関しては合計面積として算出した。

## 2-3. 結果

### 2-3-1. 試料の力学特性

各試料の力学特性について、表 2-3 に示した。食パンについては、得られた応力-歪曲線に非線形領域<sup>52)</sup>を示したため、白米飯以外の食品の破断歪率を参考に 50 % の荷重 (N) を読み取った。

白米飯は、粒子の表層が硬く、一度圧縮されると壊れやすい特性がみられた。実際、白米の胚乳部中央から円心円状に澱粉貯蔵細胞が並び<sup>53)</sup>、細胞壁の存在が米の食感や味にも影響する。このような構造を押しつぶす際に軋轢が生じ、他の試料より硬い特徴が見られたのではないかと推察した。

食パンは、多孔質空間が潰され、形成された密度の高い生地を押し潰す様子が観察された。生地は柔らかく、破断点を持たないため、組織構造は変形しやすかった。

麺類は小麦粉製品であるうどんや中華麺、スパゲッティが同程度の物性を示し、グルテンの影響によって、噛み切るにはやや力が必要であることがわかった。十割そばでは、硬さはあるが、脆く壊れやすかった。

以上の結果より、本研究で用いた粒状の白米飯、小麦粉を加工した膨化食品の食パン、麺類において、特徴的な力学特性が示された。

### 2-3-2. 直接観察

GDS における各澱粉性主食の胃内容物を経時的に観察した結果として図 2-2 に示した。容器の側壁では、ローラーの駆動により一定周期で発生した収縮波が、底部に向かって進行する。この動作が胃内容物を圧縮、混合する機序となっている。

胃内容物は、いずれの試料においても上部の液層と下部の粒子堆積層の二層から構成さ



れ、試料によっては時間経過とともに粒子堆積層の上面に白濁液層が出現していた。

白米飯は、開始直後では米粒の形状を維持していたが、60 分後には容器壁面と底面などに位置する粒子が崩壊して微細化しながら、その周りに白濁した糊状の物質（以下、白濁液）が浮遊していた。白濁液には、粒子表面から放出された糊状物質<sup>54)</sup>が拡散・分散しており、粒子が微細化するにつれて白濁液量が増え、濁りは強くなった。90 分後になると粒子堆積層の粒子間に白濁液が浸透し始め、中央部分の粒子も崩壊する様子が見られた。上部液層および堆積粒子層中に分散している微細粒子の存在も観察できた。180 分後では、微細化した粒子と白濁液による自重とぜん動運動の影響により、細かな崩壊を段階的に繰り返していた。

食パンの場合は、開始直後は人工胃液が食パン粒子の食塊間隙に浸透し、ぜん動運動によって両側面から力が加わると食塊粒子が人工胃液中に速やかに分散される様子が観察された。60 分後では、粗大粒子が上部液層の上面に浮遊したとともに、微細粒子は下部の粒子堆積層に沈殿した。時間経過とともに粒子の微細化が進み、糜粥状を呈している様子も観察された。また、浮遊していた粗大粒子も下部堆積層へ下降しながら堆積した。

うどんの場合は、開始直後から 90 分までうどん粒子の形状がほぼ維持されていた。その後、ぜん動運動の存在下でうどん粒子の表面が擦られながら白濁液量の増加および濁りが強くなった。180 分経過しても粒子がほとんど崩壊しておらず、当初の形状のまま縮小した粒子も多く残存していた。

十割そばは、GDS 前の調理過程において一部の成分が溶出し、表面に凹凸が認められた。粒子は脆弱で、開始直後から白濁液が液層および粒子堆積層に出現していた。60 分後には、そば粒子の微細化が粉状へと進行している様子が観察され、90 分以降では、粒子堆積層の密度や白濁液の濁りがさらに強くなった。

中華麺の場合は、十割そばと同様に開始直後から白濁液が多く出現し、60 分後では濁りが強くなった。同時に、ぜん動運動の駆動による中華麺の破断、切削が見られ、粒子の微細化が進行した。90 分以降は、容器中央にある粒子が粉状となり、液層および粒子堆積層に流動する白濁液量の増加と粒子の漸次的な崩壊が観察された。180 分後には、粒子堆積層の上面に白濁液層が停滞している様子も観察された。

スパゲッティは、60 分後の時点で白濁液量が増加し、液層まで上昇した後、粒子堆積層へ下降する様子が繰り返された。90 分までスパゲッティ粒子の形状に大きな変化は認められなかったが、次第にぜん動運動の駆動による削切、せん断が起こり、微細化した。

#### 2-3-2-1. 胃内容物の見かけ体積比および pH 変化

GDS における各澱粉性主食の粒子堆積層の見かけ体積比が、経時的に変化した結果を図 2-3 に示した。

白米飯では、開始から 90 分後までに  $V_a$  が 1.8 倍と大幅に膨潤し、180 分後の  $V_a$  は 2.1 倍に達した。食パンでは、開始から 30 分後までに  $V_a$  が 1.3 倍へと膨潤したが、180 分後

は 1.2 倍になった。うどんおよびスパゲッティについては、 $V_a$  の経時変化は小さく、180 分後の  $V_a$  は 1.0~1.2 倍であった。中華麺は、白米飯と類似した傾向を示し、90 分後と 180 分後の  $V_a$  はそれぞれ 1.6 倍と 1.8 倍であった。十割そばでは膨潤が見られず、180 分後の  $V_a$  は 0.9 倍となった。そば粒子の微細化が膨潤よりも優位であったため、消化試験中に  $V_a$  が減少したものと考えらえる。

澱粉性主食を含む胃内容物の pH の経時変化は図 2-4 に示した、GDS 終了時までに pH 上昇幅が 1.4~2.1 へと上昇した。食パンおよび十割そばを用いた場合は、胃内容物の pH 上昇幅が大きかった。これは粒子の微細化が他の主食よりも速やかに進行したことと、含有水溶性タンパク質の溶出が、pH の上昇幅の増大につながったと推察された。しかし、胃内容物の pH がペプシン活性の失活する 3 付近より低く<sup>55)</sup>、一度に摂取する食品重量や組み合わせを工夫し、調節することにより、化学的消化が長時間持続する可能性も示唆された。

#### 2-3-2-2. 胃内消化物の粒子サイズ分布

GDS 終了後における、胃内消化物の粒子サイズ分布と写真をそれぞれ図 2-5 と図 2-6 に示した。

ヒトが口腔から食品以外を誤飲、誤食し、ぜん動運動で微細化できないものは、胃や小腸まで送達され、体外へ自然排出されることが稀にある<sup>56)</sup>。一方で、一般的な食品は、大きな食塊を飲み込んでも、食道から胃を介して微細化される。そして、微細化した粒子は胃の出口である幽門を通り、小腸へ送達される。その際、粒子サイズは、2 mm 以下<sup>57)</sup>とされ、微細化または糜粥化した粒子は、約 2~4 Kcal/分のエネルギー量で小腸受容体に調節されながら排出される<sup>58)</sup>。

これらの先行研究を参考に、本研究では、食品粒子のサイズが消化に影響を与えと考え、篩に捕捉された総湿潤重量および篩サイズ毎に捕捉された粒子の中で、2.36 mm 以上のサイズ画分とそれ以下に区別し、結果を示した。

粒子サイズ分布による各食品の篩上で捕捉された総湿潤重量は、白米飯が 63.1 g、食パンは 15.1 g、うどんは 50.1 g、十割そばは 50.2 g、中華麺は 49.3 g、スパゲティは 64.2 g であった。白米飯およびスパゲティは、篩上に残存している粒子が多い食品であることが明らかとなった。

さらに 2.36 mm 以上の湿潤重量は、それぞれ 40.2 g、7.9 g、42.9 g、25.2 g、32.8 g、52.9 g となり、長時間の消化によっても、白米飯およびスパゲティは大きなサイズのまま、粒子が残存していた。また、うどんは、粒子のほとんどが最も大きなサイズ画分に捕捉されていた。

粒子形態の写真より、白米飯では、人工胃液の浸透による粒子の膨潤が見られ、最大サイズの目開きに米粒状の粒子の状態が残存していた。また、粒子表面には凹凸が存在し、ぜん動運動によって粒子同士が摩擦されたことが推察された。さらに、微細化した粒子は不均一な形状で、崩壊した様子が観察できた。

食パンは、糜粥化され、総湿潤重量の減少が顕著に見られた。これは、目開きが 0.60 mm の篩を通過した微粒子の重量の増大に起因するものと考えられた。また、目開きが 0.60 mm および 1.18 mm の篩上では、糜粥状に微細化された粒子が多数観察された。

うどんは、目開きが 3.35 mm の篩上に多数残存していた。また、3.35 mm 以上の目開きに麺形状のまま残存しているものが多く観察された。目開きが小さくなるにつれ、切削、分断された破片が捕捉されていた。目開きが 0.60 mm および 1.18 mm の篩に捕捉された微細化粒子は、わずかししか認められなかった。以上の結果より、うどんは人工胃液の浸透による粒子の膨潤もあまり見られず、胃内での物理的消化の影響を受けにくい食品であることが示唆された。

十割そばおよびスパゲッティでは、2.36 mm 以上の目開きの篩に捕捉された粒子は麺形状を有していた。さらに、粒子表面からは糖類やタンパク質<sup>59)</sup>などの成分が放出されたと推察され、細径化した麺が観察できた。1.18 mm 以下の目開きの篩上には、不規則に破壊された粒子や粉状の微粒子が捕捉されていた。

中華麺では、削切された麺が 2.36 mm 以上の目開きの篩に捕捉され、消化試験前の厚みより薄い切片となって存在していた。

麺類の中で、特にスパゲッティは、縦長の形状を維持しながら、細径化したため、篩上に残存する粒子が多いことも観察できた。

各食品粒子の表面付近には、いずれも糊状物質が付着していた。これらは食品から溶解または溶出した糖類やタンパク質、また微細化した粒子と考えられた。特に白米飯は、糊状物質が他の食品より多く存在した。

澱粉性主食の違いによって、胃内消化挙動が異なり、人工胃液の浸透による膨潤の違いや微細化の形状が異なることを詳細に観察することができた。

### 2-3-3. 栄養成分の分析

澱粉性主食の違いによるタンパク質の消化物の合計面積において、同様の傾向を示した食パン、十割そばの結果を図 2-7、白米飯、うどん、中華麺およびスパゲッティを図 2-8 に示した。いずれも時間の経過とともに消化物が増加した。

結果より、変化率は 0 時間の面積値を 1.0 とした場合の 180 分後の変化を割合 (%) で式 2-2 に示した。

$$\text{式 2-2 } A_a = A_t / A_0 \times 100$$

食パンは、試験後 30 分で急激な消化が始まり、変化率が試験終了後は 4.1 倍にもなり、対数的な増加を示した。十割そばも対数的な増加傾向を示したものの、1.4 倍となった。

それ以外の主食は、試験後、緩やかに消化され、終了後は、白米飯が 1.6 倍、うどんが 1.4 倍、中華麺が 1.5 倍、スパゲッティが 1.7 倍となった。

澱粉性主食の種類の違いにより、タンパク質の消化挙動が異なることが明らかとなった。

次に、糖類の消化物における合計面積の変化率の結果について、図 2-9 に示した。いずれ

も時間の経過とともに増加または微増した。特に食パンは他の主食とは異なり、終了後は2.1倍と突出した増加を示し、C8以上のオリゴ糖の消化が増加していることが確認できた。その他は1.1～1.3倍となった。

澱粉性主食の60gあたりの栄養成分において、各主食の炭水化物含量を比較すると、食パンは27.8gと他の食品13.0～20.3gより多いことが影響していると考えた。しかし、胃内の低酸性環境においては、ほとんど消化しないとされていた糖類の一部が、主食の種類によって、変化率、消化物の種類も異なることが明らかとなった。

#### 2-3-4.振とう法消化試験

図2-5に振とう法の湿潤重量を示した。

各主食が篩上で捕捉された総湿潤重量は、白米飯が80.3g、食パンは11.3g、うどんは63.4g、十割そばは58.6g、中華麺は91.4g、スパゲティは73.0gであった。食品初期重量に対して、食パン以外は、篩上に捕捉されている粒子が多かった。

さらに2.36mm以上の湿潤重量は、それぞれ70.7g、5.1g、58.3g、53.0g、87.9g、72.4gとなり、食パン以外は、人工胃液の浸透による膨潤が観察されたものの、長時間の消化によって、微細化されていないことが示された。さらに、うどんや中華麺およびスパゲティは大きなサイズ画分に形状を維持したまま、残存しており、振とう法による微細化はほとんど進行していなかった。しかし、食パンは、振とう法でも微細化が促進されていた。化学的消化が優位な振とう法において、微細化されていない食品は、人工胃液の浸透による膨潤を確認することができた。さらに、微細化される食品とそうでない食品が顕著にみられたことから、食品の組織構造や化学的消化以外の要因が食品の微細化に影響を与えることが示された。

#### 2-4. 考察

本章で用いた澱粉性主食は、米粒子をそのまま炊飯して飯とした粒状の白米飯と小麦粉を加工・焼成した食パン、小麦粉に副材料を加えて混捏して加工した麺類に分別できる。

直接観察画像より、いずれの主食においても、粒子堆積層における粒子は、表面から内部への人工胃液の拡散および浸透による物質移動を示唆する挙動が観察された。特に、白米飯は他の主食よりも消化試験後の体積比が大きく、消化試験中に膨潤しやすい食品であることが示された。

白米飯は、米粒子をそのまま炊飯して飯とした粒状のものである。胃内消化過程において、粒子を構成している胚乳組織のペクチン質が強酸により溶脱<sup>42)</sup>し、さらにぜん動運動に伴って誘起された圧縮、摩擦により微細化が進んだと推察された。

食パンは、小麦粉粒子を加工した粉状食品である。膨化食品でもあり、内側にある多孔質構造のクラム<sup>60)</sup>にはグルテンによる立体網目構造が構築されている。空隙に存在している気泡壁には微細な無数の気孔が存在している<sup>61)</sup>。そのような構造上、人工胃液が内部に浸

透しやすく、組織が崩壊しやすいことが考えられた。また、ぜん動運動による圧縮および摩擦によって崩壊した組織構造は、時間経過とともにより細かな糜粥状になっていくことが観察された。さらに人工胃液にも分散しやすく、胃内滞留時間が短いことが示唆された。

麺類に関して、うどんは中力粉に食塩水を加えて混捏することにより、緻密なグルテン構造を形成し、弾力のある食感が付与される。茹でたうどんの表面において、グルテン構造に由来する凹凸の存在が報告されている<sup>62)</sup>。容器内でうどん粒子が圧縮された状態で、粒子同士に摩擦が起こった結果、表面の凹凸が切削、せん断されたことが推察された。しかし、180分後でも微細化されにくいいため、胃内滞留時間が長いことが示唆された。

中華麺は、強力粉に強アルカリ性のかん水を加えることでグルテン形成が速く、麺が収斂して硬くなり、弾力が強くなる<sup>63)</sup>。茹でた中華麺は、外部よりも内部の糊化度が低いため中心部の強度が高い<sup>64)</sup>。さらに、中華麺は製造時に圧延され、配向性が一定な構造であるため、比較的柔らかい表面部分が麺線に沿って切削されたと推察した。

スパゲッティは、小麦の種類の中でもデュラムセモリナ粉を使用し、水で混捏したドウをダイスから圧延され成型加工したものである。うどんと同様に緻密なグルテン構造を形成し、さらに乾燥スパゲッティの場合は製品の特徴として、外表面には乾燥によるひびや亀裂が見られたり、ダイスから押し出された際に生じる凹凸が出現したり、圧延方向に線が見られる<sup>65)</sup>などの報告がある。小麦粉を用いた他の麺類と同様の傾向が見られ、組織構造による微細化の影響が大きいことが示唆された。

次に、GDSと振とう法の比較に関して、白米飯および十割そば、中華麺、スパゲッティは、GDS消化試験の方が振とう法より微細化が顕著に進行することがわかった。

振とう法では、主に往復運動に誘起される流動がフラスコ内で生じているものの、GDS消化試験とは異なり、粒子同士の圧縮や摩擦、せん断が非常に弱く、微細化の影響は少なかったと考えられた。この結果は、小林ら<sup>54)</sup>やKozuら<sup>36)</sup>によって報告された結果と同様の傾向を示した。GDS消化試験では、ぜん動運動による物理的作用が食品の微細化のみならず、その挙動が食品成分の溶解や放出の一助にもなっていると考えられた。従って、消化試験方法により各サイズ画分の比率が異なることが示された。

次に、栄養成分分析について、本研究で用いた試料には、澱粉が多く含まれており、それらの食品は、細胞壁中の組成の中に澱粉粒が多数配置されている。そして、熱処理などを加えた後は、物理的に状態が変化している。さらに胃内消化において、人工消化液によるタンパク質や他の成分が分解されていく過程で、澱粉と相互作用を示し、澱粉の消化性および物理的、化学的特性の変化につながるとされている<sup>66)</sup>。

よって、胃内消化において、タンパク質だけでなく、糖類の消化も一部認められたと推察できた。

主食の中でも食パンは、タンパク質および糖質の消化物による増加が特徴的であった。この傾向について、栄養成分を比較すると、各主食のタンパク質含量を比較すると食パンは5.4 g、次いで、十割そばが3.2 gとなっており、他の食品の1.3~2.9 gより多い。さらに、

炭水化物含量も 27.8 g で、他の食品の 13.0~20.3 g より多い。タンパク質含量が多いと分解が進み、それに伴って澱粉と相互作用を示し、糖質の消化につながったと推察した。さらに、対数的な増加傾向については、食パンの多孔質性による組織構造の脆弱により、微細化が急激に進行したことに関連していると考えられた。胃内消化挙動の化学的および物理的消化が重なったことで、消化物の変化率が他の主食より突出した結果となったと推察した。

そして、食パンの次に微細化が進行していた十割そばも同様の傾向を示していた。十割そばは、炭水化物の含有量においては、中華麺などと同程度を示す一方、タンパク質の含有量が食パンに次いで多く、早い段階で分解が促進されたと推察した。一方で、微細化が進みにくく、タンパク質含量の少ない食品は、時間の経過と共に、微細化の影響を受けながら、徐々に栄養成分が放出されていくことが示された。

さらに、小川ら<sup>67)</sup>は、米飯粒の構造を破壊したスラリー状のサンプルを胃一小腸二段階式模擬消化試験法で消化処理をした結果、粒状のものよりスラリー状のほうが、澱粉の加水分解速度が 8 倍速いことを報告しており、ぜん動運動による食塊の微細化と栄養成分の消化に関連することが示されている。すなわち、本実験の結果も、食塊粒子が、早い段階で微細化、糜粥化した主食は、消化液による加水分解が促進され、栄養成分の消化物の合計面積変化率にも影響することが推察された。

以上の考察から、澱粉性主食の種類による組織構造や成分、調理法などの違いは、胃のぜん動運動の存在下で微細化の程度や形状に影響を及ぼすことが観察された。サイズ画分の分布や各篩上に捕捉された量に関する結果は、胃内滞留時間に関わる考察に有用であった。また、ぜん動運動の有無は食品の *in vitro* 消化挙動に影響することが示された。

そして、直接観察と栄養成分の分析結果より、食品の組織構造だけでなく、タンパク質や澱粉の含有量によっても、消化挙動が異なることが明らかとなった。

## 2-5. 結語

定量的なぜん動運動の駆動および消化プロセスの可視化が可能な GDS を用いて、澱粉性主食の種類が胃内消化挙動に及ぼす影響を観察・解析した。さらに、化学的消化を模擬可能な振とう法とも比較し、胃内消化挙動に与える因子についても検討した。

直接観察では、GDS において、いずれの主食においても、人工胃液が、粒子堆積層の粒子表面から内部へ拡散および浸透による物質移動が観察された。特に、白米飯は他の主食よりも体積比が増大し、膨潤しやすい食品であることが示された。また、目開きが異なる篩上に捕捉された主食の胃内消化物では、主食の種類に依存した摩砕、せん断、切削、および不均一な崩壊を示す様子が観察された。ぜん動運動の駆動による粒子の微細化は、食品の組織構造の影響を受けていると考えられた。さらに、目開きが 2.36 mm の篩を通過した胃内消化物の湿潤重量結果より、うどんやスパゲッティなどの小麦粉加工食品は、他の主食に比べてぜん動運動の影響を受けにくく、最大サイズ画分に多く捕捉されていた。

これは胃内停滞時間の延長にもつながると推察された。

栄養成分の分析では、食品に含まれるタンパク質の含有量が多いほど、糖類の消化において、相互作用を示し、胃内においても糖質の一部が消化されている可能性が示唆された。

GDS および振とう法を用いた消化試験の結果を比較検討したところ、澱粉性主食がぜん動運動の影響によって微細化していく点において、振とう法とは異なる消化挙動を示すことが認められた。

以上のことから、食品に含まれる栄養成分の組成だけでなく、ぜん動運動による食品の微細化に伴う消化挙動は、食品成分の溶解や放出にもつながることが示された。

### 第3章 介護食モデルの胃内消化挙動におけるとろみ剤および胃内 pHの影響



### 3-1. 緒言

一般的に加齢とともに、運動量の減少による食欲低下や複数の疾患を罹患することによる薬剤の種類や量の増加、舌の味蕾細胞の減少、咀嚼力の低下等により、口腔内のドライマウスや味覚の鈍化などが起こる。さらに、歯数<sup>68)</sup>や多剤併用<sup>69)</sup>による唾液分泌量の減少、加齢とともに出現する胃の萎縮に伴う形態学的変化が胃酸分泌量の減少が生じている<sup>70)</sup>という報告がある。それらは、摂取した食品の消化不良や下痢の要因となり、慢性的になると低栄養へとつながる可能性がある。

栄養士・管理栄養士は、栄養指導において、高齢者に必要な栄養素を考慮した献立を計画し、食事を提供する。しかし、栄養の消化・吸収面で消化機能を憂慮した食事・栄養指導までは検討されていない。

また、嚥下機能が低下した高齢者の食事には、補助剤として、とろみ剤の活用がある。

とろみ剤は、介護食の定義の中では、とろみ調整食品に属しており、表 3-1 に示すように、現在は澱粉系、グアーガム系、キサンタンガム系の商品が市販されている。

その中でも、キサンタンガム系のとろみ剤は、「ダマ」になりにくく、常温で容易に溶解するなど調製しやすい上に、食品の成分に関係なく安定した粘度を出しやすい。さらに食品の味や外観を損ないにくく、口の中で唾液による分解が少ない。そして、嚥下時に誤嚥しにくい<sup>71)</sup>などのメリットがあるため、近年では、介護老人福祉施設や在宅介護などで多く使用されている。

とろみ剤を含む、とろみ調整食品の市場は、高齢人口の増加とともに年々拡大している。図 3-1 示す通り、2020 年度は、生産量前年比 2.4 %増 (3,956t)、生産額前年比 4.4 %増 (94 億 3,400 万円) となった。

前述した日本摂食嚥下リハビリテーション学会作成の「嚥下調整食学会分類 2013」は、国内の医療・福祉関係者が共通して使用できる食事（嚥下調整食）およびとろみについての段階分類を表 3-2 のように示しており、高齢者施設や在宅介護などでは、利用者の身体機能に合わせ、目安として活用されている。

しかし、とろみ剤の使用については、高濃度の調製や多用することでの、弊害も報告されている。清水ら<sup>72)</sup>は、とろみ剤の添加濃度によって薬剤の吸収が抑制されたことを確認し、とろみ剤の使用方法には注意が必要であることを報告している。利点が多い反面、とろみ剤は、吸水性や耐酸性があり、腹部膨満感を誘発するなどの胃内消化動態に影響を与えることも報告されている<sup>73,74)</sup>。とろみ剤を使用した食事を摂取している高齢者は、一日三食で利用するため、喫食頻度や量が多い。よって、とろみ剤の使用方法によっては、食品の消化に影響を与えることも懸念される。

高齢者が主食として多く食べている白米飯は、高齢者の咀嚼機能に合わせて、水分量や調理時間を長くすることで、軟飯や全粥などの形態に変化させることができる。しかし、嚥下機能が低下すると、その形態でも誤嚥を起こす可能性があるため、個々人の嚥下機能を見極めながら、とろみ剤を適宜添加して食べている。

これらの対応は、各施設や在宅介護現場で、主に管理栄養士が指示をしているとはいえ、食事介助する際に多くの職種が携わっており、様々な方法で食事をサポートしている。

そのため、施設によってとろみ剤の調製方法や濃度などは独自性が高く、とろみの硬さの指標はあるものの、実際に添加濃度の範囲などにばらつき、硬さの統制が難しいとの声が報告されている<sup>75)</sup>。すなわち、とろみ剤添加の有無だけでなく、添加濃度についても、配慮しなければならないと考える。しかし、とろみ剤添加の有無や濃度や加齢によって生じる消化機能の低下が、食品の胃内消化にどのような影響を与えるのかなどに着目した研究は少ない<sup>76,77)</sup>。そこで、本章では、とろみ剤を添加した介護食や胃内 pH の違いが消化にどのような影響を与えるのかを検討し、GDS を用いて、それらの消化挙動や栄養成分の消化過程を解明することを目的とした。まず、3-2-1-1 では「とろみ剤を用いた介護食モデルの消化挙動における特性」について、とろみ剤の添加および濃度において、検討した。さらに 3-2-1-2 は、「胃内 pH が介護食モデルの消化挙動に与える影響」において、胃内 pH の条件をいくつか設定し、介護食モデルの消化挙動への影響を検討した。

## 3-2. 実験方法

### 3-2-1. 材料および試料の調製

#### 3-2-1-1. とろみ剤添加および濃度の違いについて

全粥は、作業性や再現性を踏まえ、市販のレトルトパック仕様のもの（㈱pigeon：やわらかごはん、全粥、80 g 入り）を用い、試料重量は 60 g とした。

とろみ剤は、高齢者福祉施設や在宅介護等で多く使用されている文献<sup>75,78)</sup>キサンタンガム系の「とろみ Quikly, (㈱クリニコ製)」を用いた。

試料 100g あたりの栄養成分については、表 3-3 に示した。

#### 3-2-1-2. 胃内 pH の違いについて

胃液は消化酵素であるペプシンと塩酸の混合物である。ペプシンは、塩酸によって、不活性な形のペプシノーゲンから活性な形のペプシンに変換される。塩酸の pH は 2.0 以下で、その強い酸は、食品とともに混入したバクテリアの増殖を抑える働きがある。さらに低酸性下の pH により、食品とともに移動した唾液アミラーゼは、胃内で不活性化される。主な胃内での消化は、タンパク質分解酵素であるペプシンによって、タンパク質がペプチドまで加水分解されることである<sup>20)</sup>。

GDS で用いる人工胃液は、pH 1.3 を健常者とし、加齢によって上昇する pH<sup>79,80)</sup>を 2.0, 3.0, 5.0 の 4 段階とした。

#### 3-2-1-3. 試料の調製

全粥は、レトルトパックのまま電子レンジ (NE-S20, 松下電器産業㈱) を用いて出力 600 W で 50 秒間加熱し、試料重量は 60 g とした。

とろみ剤の粘度の調製は、表 3-4 に示した。

きざみ食や全粥などに用いるあんやソースの形状については、口腔内で保持する時間を要する粘度を基準<sup>81)</sup>とし、「日本摂食嚥下リハビリテーション学会、嚥下調整食分類 2013」<sup>82)</sup>の「とろみ 3 段階区分表」のうち、濃いとろみの第 3 段階に相当した。すなわち、ずり速度  $50\text{s}^{-1}$  における粘度が、 $450\text{ mPa}\cdot\text{s}$  となるよう、2.7 % (w/w) を基準の添加濃度<sup>83)</sup>として定めた。さらに、飲料などに用いる第 1 段階の薄いとろみに相当する 1.3 % (w/w)、第 3 段階の濃いとろみよりもさらに粘度の高い 5.5 % (w/w) の 3 段階に調整した。

調製方法は、Milli-Q 水 100 g にとろみ剤を加え、2 分間攪拌 (2 回/秒) し、30 分間放置したものを使用した。

とろみ剤の添加量は、全粥重量の 75 % (全粥 60 g に対してとろみ剤と水を 45 g 添加) とし、10 秒攪拌 (2 回/秒) して混合したものを試料とした。

試験に供した全粥と各濃度のとろみ剤を添加した試料における栄養成分は表 3-5 に示した。

### 3-2-2. 人工消化試験

#### 3-2-2-1. 人工唾液および人工胃液の調製

消化試験に用いた人工唾液および人工胃液の組成は、第 2 章と同様とした。

人工胃液の調製について、3-1-1-1 では、pH 1.3 を用い、3-1-1-2 では、pH 1.3 を基準とし、2.0, 3.0, 5.0 の 4 段階に調整した。

また、本章の実験では、高齢者を対象イメージとしているため、加齢とともに唾液腺の形態変化<sup>69,84,85)</sup>による、唾液分泌量の減少を加味した。高齢者 (70~92 歳) は、若年者 (22~55 歳) より 30~38 % 減少したという先行研究<sup>86,87)</sup>を参考に、人工唾液量については、健常者の 1/3 量として 10 mL、人工胃液は第 2 章と同じく、240 mL 使用した。

#### 3-2-2-2. 人工食塊の調製

全粥およびとろみ剤添加の試料は、人工唾液を加えた後、第 2 章と同様の操作を行って調整した。

#### 3-2-2-3. GDS 消化試験の方法

GDS 消化試験の方法は、第 2 章と同様とした。

実験は、GDS の先行研究<sup>33)</sup>を参考に、2 回ずつ繰り返し行い、平均値を用いた。

### 3-2-3. 分析方法

#### 3-2-3-1. 直接観察の分析

GDS 消化試験による直接観察の分析は、第 2 章と同様の方法を用いた。

#### 3-2-3-2. 栄養成分の分析

栄養成分の分析は、第 2 章と同様の方法を用いた。

### 3-3. 結果

#### 3-3-1. 直接観察

##### 3-3-1-1. ころみ剤添加および濃度の違いについて

ころみ剤添加の有無および濃度の違いが、介護食モデルに与える影響について、胃内容物を経時的に観察した結果を図 3-2 に示した。

胃内容物は、いずれも上部の液層と下部の粒子堆積層の二層から構成され、時間経過とともに粒子堆積層の上面に白濁液層が出現していた。

全粥は、試験開始直後から米飯粒子が崩壊しているものもあり、ぜん動運動による微細化が、第 2 章の 2-3-2 で示した白米飯の結果より早く進行した。さらに、60 分後は、微細化しながら膨潤し、白濁液が上部液層に放出されては、粒子堆積層へ重積する様子が観察できた。そして、白濁液量が顕著に増加し、粒子堆積層の上部に留まって、層を形成していた。180 分後は、ほとんどが糜粥状を呈し、白濁液の濁りも濃くなった。

ころみ剤添加 1.3 %では、GDS 開始直後は米飯粒の隙間にころみ剤が入り込み、ぜん動運動の圧縮や摩擦を受けると滑るように移動していた。60 分後では、ころみ剤は米飯粒から剥離されながら、白濁液層へ溶出している様子が観察できた。ころみ剤が剥離された粒子は、微細化が進行し、180 分後ではほとんどが糜粥状となっていた。白濁液層は、ころみ剤の溶出と粒子の浮遊により、やや粘稠状を呈している様子が確認できた。

ころみ剤添加 2.7 %では、1.3 %と同様に米飯粒の隙間にころみ剤が入り込み、圧縮や摩擦を受けると大きな動きで滑るように移動していた。60 分後では、米飯粒が微細化されていたものの、その周囲はころみ剤が付着していた。さらに、ころみ剤自体が胃液を吸収して膨潤し、粒子への胃液浸透を抑制している可能性が示唆された。そして、ころみ剤は粒子間に存在し、その隙間を広げている状態が確認できた。180 分後では、ローラー付近の米飯粒は微細化されていたものの、容器中央部は粒状を維持している粒子が残存し、粒子同士が凝集塊を作っていた。

ころみ剤添加 5.5 %では、1.3 %や 2.7 %より、さらにころみ剤の影響が顕著に観察できた。ころみ剤の膨潤によって、米飯粒の隙間はより大きく広がっていた。60 分後でも、米飯粒の周りにころみ剤が厚く付着しているため、粒状を維持しているものが多く残存していた。180 分後は、ローラー付近はやや微細化が見られたものの、中央部はころみ剤が付着したままの米飯粒がぜん動運動で混合されながら、圧縮や摩擦を逃れている様子が観察できた。

全粥にころみ剤を添加することで、米飯粒の微細化が妨げられ、粒子内部からの物質移動を抑制することも明らかとなった。さらに、ころみ剤の添加濃度が高くなるにつれて、米飯粒の微細化および糜粥化は抑制され、人工胃液の吸水、膨潤をする様子が観察できた。

##### 3-3-1-2. 胃内 pH（人工胃液）の違いについて

胃内 pH の違いが、介護食モデル（全粥）に与える影響について、胃内容物を経時的に観察した結果を図 3-3 に示した。

一般的な健常者の胃内 pH と加齢に伴う胃酸分泌低下の影響による胃内 pH を想定し、胃内消化挙動を直接観察した。

pH 1.3 では、第 3 章の 3-3-1-1 の結果を参考にした。すなわち、時間の経過とともに、人工胃液が浸透し、膨潤しながら、180 分後にはほとんどの粒子が糜粥状となることが観察できた。

pH 2.0 では、GDS 開始直後から白濁液層が出現し、粒子内の栄養成分が放出していた時間の経過とともにぜん動運動による圧縮や摩擦によって、その放出は顕著に確認され、pH 1.3 で見られた人工胃液の浸透による膨潤が確認できなかった。60 分後には、粒子の微細化が進行し、粒子堆積層へ沈殿する様子が見られた。それと同時に、白濁液層の濁りも強くなっていた。

pH 3.0 では、開始直後から粒子内の栄養成分が放出され、上部液層に白濁液が拡散した。

pH 2.0 の様子とは明らかに異なる消化挙動を示し、60 分後には、白濁液層が分厚く層を作り、透明な液層と粒子堆積層の三層で構成する様子が観察できた。粒子が膨潤しないため、粒子堆積層は減少した。180 分後では、白濁液層が GDS 容器の大半を占め、細かな粒子がぜん動運動の圧縮や摩擦によって、浮遊している様子が観察できた。

pH 5.0 では、pH 3.0 と同様の傾向を示した。全粥に人工胃液を混合した直後から、白濁液が大量に出現した。開始直後からほとんどの粒子が、粒状を維持しておらず、すでに微細化しているものが多かった。60 分後では、さらにその進行が早く、栄養成分の放出量が多く、白濁液層の濁りが強くなった。180 分後には、粒子が細かな粉塵状になり、白濁液層を浮遊しており、粒子堆積層の沈殿する粒子が減少した。

pH の違いは、pH 1.3 では全粥の組織構造が維持され、人工胃液の浸透による膨潤、栄養成分の放出および拡散が確認できた。しかし、pH 2.0 では、早い段階で栄養成分が先に放出されて、組織構造が破壊されていく様子が確認できた。その現象は pH 3.0 になると顕著で、pH 5.0 では、よりその様子がはっきりと認められた。

胃内 pH の違いによって、全粥の消化挙動が変化し、特異的な消化を示すことが明らかとなった。

### 3-3-2. 胃内容物の見かけ体積比および pH 変化

#### 3-3-2-1. とうもろこし添加および濃度の違いについて

とうもろこし添加および濃度の違いによる見かけ体積比の経時変化の結果を図 3-4 に示した。

全粥のみでは、開始直後から 60 分後までに  $V_a$  が 1.4 倍へと大幅に膨潤し、180 分後の  $V_a$  は、1.8 倍に達した。

とうもろこし添加 1.3 %、2.7 %、5.5 % と添加濃度が増加するにつれて、見かけ体積比が増加し、それぞれ、180 分後の  $V_a$  が 1.4 倍、1.5 倍、1.6 倍となった。

とろみ剤添加および濃度の違いによる胃内容物の pH の経時変化を図 3-5 に示した。

開始直後から 180 分後の pH 上昇幅は、全粥、とろみ剤添加 1.3 %, 2.7 % は 0.2, とろみ剤添加 5.5 % は 0.3 となり、いずれも pH 2.0 以下となった。

### 3-3-2-2. 胃内 pH (人工胃液) の違いについて

胃内 pH の違いによる見かけ体積比の経時変化を図 3-6 に示した。

pH 1.3 では、第 3 章の 3-3-2-1 を参考とした。

pH 2.0 では、開始直後から体積が微減、微増を繰り返し、180 分後の  $V_a$  は、当初の体積と同程度となり、1.0 倍となった。

pH 3.0 では、開始直後から 30 分後までに、体積は大幅に減少し、180 分後の  $V_a$  は、0.3 倍をととなった。

pH 5.0 においても、pH 3.0 と同様の傾向を示し、30 分後の早い段階で、見かけ体積比が他の pH よりも減少した。180 分後の  $V_a$  は、0.3 倍にとどまった。

胃内 pH (人工胃液) の違いによる胃内容物の pH の経時変化を図 3-7 に示した。

開始直後から 180 分後の pH 上昇幅について、pH 1.3 は第 3 章の 3-3-2-1 に示した 0.2, pH 2.0 は 0.4, pH 3.0 は 0.9, pH 5.0 は 0.5 となり、胃内 pH が高くなると上昇幅が大きくなる傾向があった。

### 3-3-3. 胃内消化物の粒子サイズ分布

#### 3-3-3-1. とろみ剤添加と濃度の違いについて

GDS 終了後における、胃内消化物の粒子サイズ分布と写真をそれぞれ図 3-8 と図 3-9 に示した。

粒子サイズ分布による各試料が篩上で捕捉された総湿潤重量は、全粥が 36.2 g, とろみ剤添加 1.3 % は 40.6 g, とろみ剤添加 2.7 % は 63.4 g, とろみ剤添加 5.5 % は 67.3 g となった。とろみ剤の添加濃度が高くなるにつれて、篩上に残存している粒子が多いことが明らかとなった。

さらに 2.36 mm 以上の湿潤重量は、それぞれ 10.7 g, 12.8 g, 22.9 g, 32.4 g となり、微細化の程度も異なることが示された。特に、とろみ剤添加 2.7 % 以上になると、湿潤重量が多くなり、粒子サイズも大きくなる傾向が見られた。

粒子形態の写真より、全粥では、最大サイズが目開きに米粒状の粒子の状態で残存し、人工胃液による浸透および膨潤を観察できた。また、粒子表面には凹凸が存在し、ぜん動運動によって粒子同士が摩擦されたことが推察された。さらに、サイズ画分が小さくなるにつれて、微細化した粒子は不均一な形状となり、最終的には糜粥状のものが捕捉されていた。

とろみ剤添加 1.3 % は、最大サイズが目開きに米粒状の粒子にとろみ剤が付着しているものとそうでないものが残存していた。サイズ画分が小さくなるにつれて、とろみ剤が付着している粒子が残存し、とろみ剤が付着していないものは微細化し、糜粥化していた。

とろみ剤添加 2.7 %は、最大サイズの日開きに残存している粒子は、ほとんどが米粒状の粒子にとろみ剤が厚く付着し、全粥の形状を維持しているものが多かった。サイズ画分が小さくなると、微細化が進んだ粒子を取り囲むようにとろみ剤が付着していた。

とろみ添加 5.5 %では、最大サイズの日開きに米粒状の粒子が多く残存し、とろみ剤が厚く付着していた。また、とろみ剤の部分は、180 分後でも粘度がほとんど維持されていた。さらに、サイズ画分が小さくなるにつれて、粒子は微細化されているものの、とろみ剤の粘度によって、篩の日開きを通過することが困難な状態となっている様子も観察できた。

とろみ剤の濃度が高くなるにつれて、粒子の周囲に付着する量が増加していることから、体積増加の要因と考えた。これは、見かけ体積比の増加にも影響していることが推察できた。

### 3-3-3-2. 胃内 pH（人工胃液）の違いについて

GDS 終了後における、胃内消化物の粒子サイズ分布と写真をそれぞれ図 3-10 と図 3-11 に示した。

粒子サイズ分布による各試料が篩上で捕捉された総湿潤重量は、pH 1.3 は、第 3 章 3-3-3-1 の結果で示した 35.2 g、pH 2.0 は 15.7 g、pH 3.0 は 11.3 g、pH 5.0 は 12.3 g となった。pH が高くなるにつれて、篩上に残存している粒子が少ないことが明らかとなった。

さらに 2.36 mm 以上の湿潤重量は、それぞれ 10.7 g、5.6 g、5.9 g、6.6 g となった。特に pH 3.0 以上になると、湿潤重量が減少し、粒子サイズも小さくなる傾向が見られた。

粒子形態の写真より、pH 1.3 は、第 3 章の 3-3-3-1 を参考にした。

pH 2.0 は、2.36 mm 以上の日開きに粒子がほとんど残存せず、それ以下のサイズ画分には、わずかに残存していた。

pH 3.0、pH 5.0 も同じく、2.36 mm 以上およびそれ以下の日開きにおいて、粒子がほとんど残存せずしていなかった。

pH 2.0 以上の粒子は、人工胃液による膨潤はしておらず、直接観察でも示した内部の成分がほとんど溶出し、組織構造が収縮、裂断している様子が確認できた。

これは、第 2 章および第 3 章の 3-3-3-1 の結果とは、全く異なる特徴的な現象であった。

また、見かけの体積比が減少した要因につながる現象であることが推察できた。

以上のことから、pH 1.3 では、胃液の浸透による膨潤が見られたが、pH 2.0 になると栄養成分が早い段階で粒子表面から放出・拡散し、胃液が浸透しにくい、すなわち膨潤が阻害されている現象が確認された。さらに、粒子の微細化の程度だけでなく、特異的な形状を示した。pH 3.0 以上では、さらにその現象が顕著に見られ、胃内 pH の違いによる介護食モデルの消化挙動が、微細化の程度だけでなく、形状なども大きく異なっていることが明らかとなった。

### 3-3-4. 栄養成分の分析

#### 3-3-4-1. とろみ剤添加と濃度の違いについて

とろみ剤添加と濃度の違いによるタンパク質の合計面積の変化率の結果について、図 3-12 に示した。

全粥は、180 分後 1.3 倍までタンパク質の消化が進んでいた。

とろみ剤添加 1.3 %, 2.7 %, 5.5 %は、試験終了後は 1.0～1.1 倍とほとんど増加せず、とろみ剤を添加することによって、タンパク質の消化が抑制される傾向が見られた。

次に、糖類の消化物による合計面積の変化率の結果について、図 3-13 に示した。

全粥における糖質の消化物は、C8 以上のオリゴ糖がやや増加する傾向が見られた。おとろみ剤添加では、いずれの濃度で試験終了後 1.0～1.1 倍となり、糖質の消化が抑制または進んでいないことが示された。

とろみ剤添加では、タンパク質の消化を抑制し、糖質はほとんど消化されていないことが明らかとなった。

#### 3-3-4-2. 胃内 pH（人工胃液）の違いについて

胃内 pH の違いによるタンパク質の合計面積の変化率の結果について、図 3-14 に示した。

pH 1.3 は、第 3 章の 3-3-4-1 の結果を参考とした。

pH 2.0, 3.0, 5.0 は、試験終了後は 1.0～1.1 倍とほとんど消化せず、pH の上昇によって、タンパク質の消化が抑制される傾向が見られた。

次に、糖類の消化物による合計面積の変化率の結果について、図 3-15 に示した。

pH 1.3 は、第 3 章の 3-3-4-1 の結果を参考とした。

pH 2.0 は、試験終了後 1.1 倍、pH 3.0 は 1.2 倍となり、pH が上昇するとやや糖質の消化が進む傾向が見られた。

pH 5.0 では、試験終了後 2.0 倍まで増加し、他の pH とは異なる消化挙動であることが示された。さらに pH 5.0 の糖質の消化物は、C7 以下のオリゴ糖が急増した。

胃内 pH が高くなるとタンパク質の消化が進まず、ほとんど消化されていなかった。一方で、pH が高くなると糖質の消化が促進されていた。

### 3-4. 考察

#### 3-4-1.とろみ剤添加と濃度の違いについて

本節では、全粥および全粥にキサントランガム系のとろみ剤を添加したものを試料とし、GDS 消化試験によって、直接観察および栄養成分分析を行った。

直接観察画像より、全粥のみでは、粒子に人工胃液が浸透し、膨潤したが、とろみ剤添加では、とろみ剤が人工胃液を吸水し、膨潤していた。これは、とろみ剤に含まれているキサントランガムが、水に水和および膨潤する性質<sup>71)</sup>があるため、添加濃度の増加に伴って、直接観察および見かけ体積が増加したと推察した。さらに、人工胃液を吸水し、膨潤したとろみ剤が微細化した粒子に付着し、本来、通過するサイズ画分であっても、目開きを通過する



ことができず、篩上に残存したと推察した。

永口らの研究<sup>88)</sup>では、酸性でゲル化を保つとろみ剤や寒天およびゼラチンを用いた固形化栄養剤の溶解性について、ゼラチン以外は60分間の振とうしてもゲル化物の残存率は低下しなかったことを報告している。本研究でも、耐酸性を示すキサンタンガム系のとろみ剤は、180分後でも最大サイズに粒子に付着し、残存していた。

また、栄養成分の分析結果では、とろみ剤が微細化した粒子に付着し、粒子間はとろみ剤が入り込み、内部の成分の溶出を抑制していることが明らかとなった。佐々木ら<sup>89)</sup>の研究では、キサンタンガムを含むとろみ剤を米澱粉ゲルに添加した場合、粘度が高くなると、水分子の運動が制限され、消化が抑制したと報告している。さらに、グルコースにキサンタンガムを添加した場合、それらが共存すると相互作用により拡散が遅くなり、加水分解が抑制されると推察している。そして、長野ら<sup>90)</sup>、澱粉の消化に与えるとろみ剤（グアーガム）の影響として、加熱による澱粉の糊化において澱粉粒の構造破壊を抑制し、アミロースなどの成分の溶出を抑制することを明らかにしている。糖質の消化が抑制され、合わせてタンパク質も消化しなかったのは、キサンタンガム系のとろみ剤であったことも要因の一つとして考えた。これらの消化挙動は、胃内滞留時間にも影響し、腹部膨満感にもつながる可能性が示唆された。

佐川ら<sup>91)</sup>は、咀嚼・嚥下しやすさの観点からだけでなく、消化酵素の分泌量や消化管の働きが低下した高齢者のとろみ剤利用について消化性の観点からも検討すべきであると懸念している。

耐酸性や耐塩性、耐熱性などを有したとろみ剤<sup>74,75)</sup>が多く市販され、利便性が良くなる一方で、本実験で使用したとろみ剤のように、食品の胃内消化に影響を与え、胃内滞留時間や腹部膨満感につながる要因ともなる。そのため、高齢者に用いるとろみ剤の特徴を理解した上で、個人の消化能力を考慮しながら、選択する必要があることが示唆された。

本節では、とろみ剤添加および濃度の違いには、介護食モデルの微細化や栄養成分の消化に影響を与えることが明らかとなった。

### 3-4-2. 胃内 pH（人工胃液）の違いについて

本節では、全粥を試料とし、胃内 pH の違いによる胃内消化挙動の直接観察および栄養成分分析を行った。

直接観察画像より、pH 1.3 では、第3章の3-4-1で示したように、全粥は、粒子に人工胃液が浸透し、膨潤した。そして、時間の経過とともに見かけ体積も増加し、微細化がさらに糜粥化している様子が観察できた。これは、田村ら<sup>92)</sup>の報告にあるように、胃内消化時における強酸およびペプシンが組織の破壊と胚乳細胞や澱粉、細胞壁にペプシンが作用し、ぜん動運動による粒子の微細化に寄与したと推察した。

しかし、pH 2.0 以上では、粒子内部の成分が放出し、その後、圧縮、裂断した粒子が白濁液層に浮遊していた。この現象については、本実験では、参考とする先行研究が見当たら

ないため、科学的に解明することができず、直接観察による報告となるが、引き続き、組織観察等で詳細を調べる必要があると考えている。

栄養成分の分析は、pH 1.3 では、タンパク質の消化が見られ、pH 2.0 以上では、ほとんど消化されていなかった。これは、人工消化液に含まれるペプシンが、pH 2.0 以下で活性化され、一方で pH 4.0 以上では活性化しないとされる<sup>93)</sup>、pH 2.0 以上ではペプシンのタンパク質分解能が低下し、消化物の増加が見られなかったと推察された。

一方、糖質では、pH 1.3 や pH 2.0 では糖質の消化はほとんど見られず、pH 3.0 では増加傾向が見られ、pH 5.0 では、急激に消化されていることが明らかとなった。

大石ら<sup>94)</sup>は、炊飯時の炊飯液の pH の違いによる米の澱粉に与える影響について、pH 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 の炊飯液を用いて米を炊飯し、還元糖およびグルコース量を測定した結果、 $\alpha$ -アミラーゼの至適 pH 5.5 付近である pH 5.0 の炊飯液を用いた炊飯米が最も多く、次いで pH 3.0 の炊飯米であることを報告している。本実験でも、介護食モデルである全粥自体が pH 5.0 付近の人工胃液中によって、糖質の分解が促進された可能性がある。

また、pH 5.0 の GDS 試験中の粒子近傍の pH は、pH 5.3 とやや高くなる傾向が見られ、人工胃液中のペプシンが活性化する至適 pH 1.5~2.0 の範囲をはるかに超えていた。人工唾液中に含まれる  $\alpha$ -アミラーゼの活性が維持された可能性があり、それが糖質の消化を急激に増加させたと推察し、いくつかの要因が糖質の消化に影響したと考えた。

また、米の主要成分である糖質が、細胞壁に囲まれた胚乳細胞に存在する。それらは立体的なマトリックス構造で形成されている。胃内 pH が 2.0 以上の粒子が収縮、裂断された微細化の状態は、米の約 80 % 近い割合を占める糖質が溶出することで、細胞壁とタンパク質などの栄養成分のみが取り残され、組織構造破壊が起きているのではないかと推察した。

本節では、胃内 pH の違いによって、介護食モデルの微細化や栄養成分の消化に影響を与えることが明らかとなった。食品粒子の微細化は、ぜん動運動より、胃内 pH によって、栄養成分の溶出が促進され、組織構造を破壊する起因となることが明らかとなった。これは、胃内 pH が高い場合、粒子内部から外部への物質移動やペプシンの活性低下の影響から、化学的消化の影響が高まったことが示唆された。

### 3-5. 結語

本章では、介護食モデルにとろみ剤を添加し、さらに、添加濃度の違いが、消化挙動にどのような影響を与えるかを検討した。次いで、胃内 pH (人工胃液) が異なることで、介護食モデルの消化挙動への影響や特性についても検討した。また、それらの消化挙動や栄養成分の消化についても観察・解析をおこなった。

とろみ剤の添加および濃度の違いについては、介護食モデルである全粥を用い、キサンタンガム系のとろみ剤を添加した。

直接観察においては、とろみ剤は、GDS 容器内が低酸性状態でもゲル化を維持し、さらに、人工胃液を吸水し、見かけ体積比が増加した。とろみ剤の添加濃度が増加するにつれて、

吸水も増し、見かけ体積比が増加する傾向も観察できた。

粒子には、とろみ剤が付着したため、ぜん動運動による圧縮、摩擦の影響が受けにくく、微細化されにくかった。そして、とろみ剤の添加濃度が高い場合、180 分後でもその状態を維持し、微細化を抑制していた。これは栄養成分の分析とも関連し、タンパク質および糖質の消化も抑制する傾向が明らかとなった。

以上のことから、全粥にとろみ剤添加および添加濃度の違いによって、粒子の微細化および栄養成分の溶出を抑制することが明らかとなった。

これは、胃内滞留時間にも影響し、腹部膨満感にもつながる可能性が示唆された。

次に、胃内 pH（人工胃液）の違いについて、直接観察では、pH 1.3 では、人工胃液が粒子に浸透し、膨潤しながら、微細化、糜粥化する様子が観察できた。pH 2.0 では、人工胃液が浸透する前に、成分の溶出が見られ、ぜん動運動による影響はほとんど受けず、粒子は圧縮、裂断し、特異的に微細化が促進していることが明らかとなった。それは、pH 3.0 以上になると顕著に観察され、見かけ体積比が減少した。さらに溶出した成分は白濁液層を作り、粒子が浮遊していた。

栄養成分の分析について、タンパク質の消化は pH 1.3 では消化が進んだが、pH 2.0 以上ではほとんど消化が見られなかった。一方、糖質については、pH 1.3, 2.0 ではほとんど消化が見られなかったが、pH 3.0 では増加傾向となり、pH 5.0 では急激な増加となった。

以上のことから、胃内 pH の違いによって、介護食モデルの消化挙動に特異的な影響を与え、栄養成分の消化にも関連している可能性が示唆された。

介護食モデルにとろみ剤を添加する際には、胃内消化動態を考慮し、とろみ剤の種類や添加濃度に配慮しなければならない。さらに加齢に伴う胃内 pH の上昇は、消化挙動に影響を与え、栄養成分の消化だけでなく、吸収面においても影響する可能性が示唆された。

## 第 4 章 総括

第1章では、研究の背景として、日本人の高齢化や身体機能の低下などの特徴を述べた。また、それから派生した低栄養の問題を詳細に調べ、低栄養を予防するための指針や政府の施策を示した。さらに、食の観点から低栄養を予防するために、先行研究を用いて、高齢者の介護食の現状や問題点を明示した。そこで、嚥下機能を補助する目的で使用される介護食について、とろみ剤の使用方法や加齢による胃内消化に着目した。

食品の消化挙動に用いられる *in vitro* 消化試験において、従来法では、化学的消化を主に評価していることが多い。しかし、ヒトの胃内消化で重要とされる物理的消化を加味した検討は少なく、ぜん動運動を考慮した食品の消化挙動は、明らかとなっていない点が多い。また、それらの消化挙動において、食品の栄養成分がどのような拡散・放出挙動を示すのか明らかとなっていない。そこで、澱粉性主食および介護食モデルの胃内消化挙動に関する基礎的研究について、胃のぜん動運動を定量的に模擬し、食品の胃内消化挙動を直接観察できる装置である GDS を用い、直接観察および HPLC による栄養成分分析を行った。

第2章では、GDS を用いて、日本人が多く喫食する澱粉性主食の種類が、消化挙動にどのような影響を与えるのかを検討した。実験の結果より、澱粉性主食の種類による組織構造や成分、調理法などの違いは、胃のぜん動運動の存在下で微細化の程度や形状に影響を及ぼすことが観察された。サイズ画分の分布や各節上に捕捉された量に関する結果は、胃内滞留時間に関わる考察に有用であった。また、ぜん動運動の有無は食品の *in vitro* 消化挙動に影響することが示された。そして、直接観察と栄養成分の分析結果より、食品の組織構造だけでなく、タンパク質や澱粉の含有量によっても、消化挙動が異なることが明らかとなった。

第3章では、とろみ剤を添加した介護食や胃内 pH の違いが消化にどのような影響を与えるのかを検討し、GDS を用いて、それらの消化挙動や栄養成分の消化過程を解明することを目的とした。とろみ剤を用いた介護食モデルの消化挙動における特性については、とろみ剤の添加および濃度について検討した。とろみ剤は、食品粒子に付着し、人工胃液を吸水しながら、胃内において体積を増した。これにより、胃内滞留時間にも影響し、腹部膨満感にもつながる可能性が示唆された。さらに、ぜん動運動による圧縮、摩擦の影響が受けにくく、食品粒子の微細化を抑制していた。とろみ剤の添加濃度が高い場合、その影響は顕著に見られた。粒子の微細化が抑制されることから、栄養成分の消化とも関連し、タンパク質および糖質の消化もとろみ剤によって抑制される傾向が明らかとなった。

次に、胃内 pH が介護食モデルの消化挙動に与える影響について、胃内 pH（人工胃液）の条件を pH 1.3～5.0 の4段階に設定し、介護食モデルの消化挙動への影響を検討した。

胃内 pH（人工胃液）の違いによって、介護食モデルの消化挙動に特異的な影響を与え、栄養成分の消化において、タンパク質は抑制し、糖質は pH が高くなるほど促進することが明らかとなった。そして、加齢に伴う胃内 pH の上昇は、消化挙動や栄養成分の消化だけでなく、吸収面においても影響する可能性が示唆された。本研究において、主食の種類によって、微細化の程度やパターンが異なり、胃内消化挙動が異なることが可視化され、微細化の程度や形状が経時的にどのように変化しているのかが明らかとなった。食品が有する食品

構造や含有する栄養成分の違いにも関連していることが推察された。すなわち、食品構造が脆弱な場合は微細化されやすく、胃液の影響も受けやすく、強靱な場合はそれらの影響を受けにくいことが示唆された。そして、これらは、胃内滞留時間や排出および栄養成分の吸収にも影響する可能性が示唆された。

介護食モデルを用いたとろみ剤添加および濃度の違いについては、とろみ剤を添加することで、微細化や栄養成分の放出・拡散の現象から消化を抑制することが、直接観察および栄養成分の分析から示された。さらに添加濃度が高くなればなるほど、その傾向が強く示されたことも確認できた。本来、嚥下を補助するためのとろみ剤が、逆に消化を抑制させることが示され、使用方法に配慮が必要であることが示唆された。

胃内 pH の違いについては、これまでの知見から、口腔内消化は糖質、胃内消化は主にタンパク質が主に消化されると示されていたが、胃内 pH が上昇した胃内では、タンパク質の消化を抑制し、糖質の消化を促進させる可能性が示された。これは、pH が高い場合、消化酵素の至適 pH が胃内 pH の変化によって、活性が低下し、化学的消化の影響が高まったことが推察された。そして、微細化の程度や形状が特異的な消化挙動を示し、糖質が経時的に消化されていることが明らかとなった。

本研究で得られた結果は、とろみ剤を利用している、また胃液分泌が低下している高齢者などの消化挙動に関する新たな知見となった。

本研究では、GDS を用いたことで、食品の微細化などの胃内消化挙動を直接観察することができた。一方で、ヒトの胃の幽門部を単純化したシミュレーターのため、実際のヒトの胃の消化挙動に近い結果を示すまでにとどまった。本来であれば、消化物を小腸へ排出することも考慮した消化挙動が必要である。

現在、GDS に消化物の排出機能を備えた装置が開発され、今後はその装置を用いて、小腸消化につながる知見を得たいと計画を立てている。

また、とろみ剤については、高齢者施設や在宅介護で多く利用しているとされるキサンタンガム系のものを用いたため、その他のとろみ剤との消化挙動を比較できていない。今後、市販されているとろみ剤について、系統の異なる種類を用いて、多角的な特徴を捉え、胃内消化および胃腸内消化に与える影響の指標となるような成果を示したいと考えている。

本実験で使用した試料は、日本人の主食についてのみ検討した。

食べ物は単体で食べることが少ないため、料理の組み合わせの工夫や食べ方も考慮した消化挙動についての検討も必要であると考えている。

これらの知見を得ることは、加齢による消化機能低下を考慮した食事を具体的に提案でき、低栄養を予防するための食事指導につながる。さらに、消化性が配慮された新しい介護食モデルの開発などにも貢献できる。今回得られた研究成果を基に、新たな社会的意義のある研究を進めていきたいと考えている。

## 第 5 章 参考文献

- 1)厚生労働省：令和元年簡易生命表概要，平均寿命の国際比較：6，2019
- 2)稲山貴代，大森玲子，小川聖子，加藤勇太，鍵穴森陽子，近藤春美，玉木雅子，根本裕太：食と健康の科学．111-112，建帛社，東京，2017
- 3)厚生労働省：2040年を展望した社会保障・働き方改革本部のとりまとめ等について，健康寿命の更なる延伸（健康寿命延伸プラン概要より）：2019年5月29日
- 4)大村健二，葛谷雅文：高齢者の栄養－はじめの一步．1-15，羊土社，東京，2013
- 5)新開省二：高齢者の低栄養の現状とその予防．日本医事新報 4615：71-77，2012
- 6)吉田祐子，鈴嶋よしみ，岩佐一：地域高齢者における性別・居住形態別に見た食行動の実態．老年社会科学 40：384-392，2019
- 7)楠原清里，河野篤子：高齢者の食生活の実態－男性と女性の比較－．京都女子大学食物学会 58：19-25，2003
- 8)秋山理加，濱崎朋子，岩崎正則，角田聡子，片岡正太，茂山博代，濃野要，葭原明弘，小川祐司，安細敏弘，宮崎秀夫：地域在宅超高齢者の食事パターンと栄養素摂取量，栄養状態および嚥下状態との関連．口腔衛生学会雑誌 71：136-146，2021
- 9)藤谷順子：摂食嚥下過程と誤嚥の関係．日本調理科学会誌 51：1-6，2018
- 10)千葉勉：高齢者の消化器疾患．日本老年医学会誌 37：353-359，2000
- 11)C, Muñoz-González., M, Vandenberghe-Descamps., G, Feron.,F,Canon.,H,Labouré., Claire,Sulmont-Rossé：Association between Salivary Hypofunction and Food Consumption in the Elderlies. A Systematic Literature Review. The journal of nutrition, health & aging 22：407-419，2018
- 12)宮坂京子，船越顕博：加齢と消化・吸収．化学と生物 37：368-374，1999
- 13)松崎政三，藤本真美子：高齢者施設の栄養管理業務ガイドブック．145-152，中央法規出版(株)，東京，2004
- 14)藤谷順子，宇山理紗，大越ひろ，栢下淳，小城明子，高橋浩二，前田広士，藤島一郎，植田耕一郎：でん粉などを原料とするろみ調整食品の利用について．日摂食嚥下リハ会誌 17：255-267，2013
- 15)添野寛：スマイルケア食の現状と展望．砂糖類・でん粉情報 56：2-6，2017
- 16)手嶋登志子：ユニバーサルデザインフード(UDF)の活用．総合リハビリテーション学会 35：82-83，2007
- 17)藤崎亨：ユニバーサルデザインフード．日本食品科学工学会誌 55：78-79，2008
- 18)Pal, A., Indireskumar, K., Scheizer, W., Abrahamsson, B., Fried, M. and Brasseur, J.G.：Gastric flow and mixing studied using computer simulation. Proc. R. Soc. Lond 271：2587-2594，2004
- 19)Guerra, A., Erienne-Mesmin, L., Livrelli, V., Denis, S., Blanquet-Diot, S., and Alric, M：Relevance and challenges in modeling human gastric and small intestinal digestion, Trends Biotechnol., 30, 591-600，2012



- 20)吉田勉, 伊藤順子, 井上久美子, 笠原賀子, 小築康弘, 小林実夏, 小松渡, 志田万里子, 篠原粧子, 南道子, 村上淳: わかりやすい栄養学. 13-15, 三共出版(株), 東京, 2016
- 21)小林功, 市川創作: 食品の胃消化プロセスの *in vitro* 評価〜ヒト胃消化シミュレーター研究を例として〜. 日本食品工学会誌 20: 7-11, 2019
- 22)Kong, F., Oztop, M.H., Singh, R.P. and McCarthy, M. J: Physical changes in white and brown rice during simulated gastric digestion, J. Food Sci., 76, 450-457, 2011
- 23)Würsch, P., Vedovo, S.D. and Koellreutter, B: Cell structure and starch nature as key determinants of the digestion rate of starch in legume, Am. J. Clin. Nutr., 43, 25-29, 1986
- 24)Ajaj, W., Goehde, S.C., Papanikolaou, N., Holtmann, G., Ruehm, S.G., Debatin, J.F. and Lauenstein, T.C: Real time high resolution magnetic resonance imaging for the assessment of gastric motility disorders, Gut, 53, 1256-1261, 2004
- 25)Marciani, L., Gowland, P.A., Spiller, R.C., Manoj, P., Moore, R.J., Young, P. and Fillery-T, A.J: Effect of meal viscosity and nutrients on satiety, intragastric dilution, and emptying assessed by MRI, Am. J. Physiol-Gastr. L., 280, 1227-1233, 2001
- 26) 山本涼子: 体外式超音波による胃内要物の評価, 米子医学雑誌, 59, 174-178, 2008
- 27) 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
- 28)Minekus, M., Alminger, M., Alvito, P., Balance, S., Bohn, T., Bourlieu, C., Carrière, F., Boutrou, R., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Egger, L., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, F., Lesmes, U., Macierzanka, A., Mackie, A., Marze, S., McClements, D.J., Ménard, O., Recio, I., Santos, C.N., Singh, R.P., Vegarud, G.E., Wickham, M.S.J., Weitschies, W. and Brodtkorb, A.: A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food—an international consensus, Food Funct 5: 1113-1124, 2014
- 29)Eva, C., Thuenemann, G., Giuseppina, Mandalari, Gillian, T., Rich, R., Richard, M., Faulks: Dynamic Gastric Model (DGM). The Impact of Food Bio-Actives on Gut Health Chapter 6: 46-59, 2015
- 30)F.Kong, R.P.Singh: A Model stomach system to investigate deintegration kinetics of solid foods during gastric digestion. J Food Sci 73: 202-210, 2008
- 31)Cheng, Li., Wenwen, Yu., Peng, Wu., Xiao, Dong Chen: Current *in vitro* digestion systems for understanding food digestion in human. Trends in Food Science & Technology 96: 114-126, 2020
- 32) I, Sensoy: A review on the food digestion in the digestive tract and the used *in vitro* models. Current Research in Food Science 4: 308-319, 2021
- 33)Kozu, H., Wang, Z., Nakajima, M., Neves, M.A., Uemura, K., Sato, S., Kobayashi.: *in vitro* digestion of hydrogels using gastric digestion simulator. A model analysis for oil release control inside human stomach. Japan Journal of Food Engineering 19: 89-101, 2018

- 34) Marciani, L., Gowland, P. A., Spiller, R. C., Monaj, P., Moore, R. J., Young, P., Al-Sahab, S., Bush, D., Wright, J., Fillery-Travis, A. J : Gastric response to increased meal viscosity assessed by echo-planar magnetic resonance imaging in humans. *J. Nutr.*, 130 : 122-127, 2000
- 35) Zhong, C., Langrish, T : A comparison of different physical stomach models and an analysis of shear stress and strains in these systems, *Food Res. Int.*, 135, 109296, 2020
- 36) Kozu, H., Nakata, Y., Nakajima, M., Neves, M. A., Uemura, K., Sato, S., Kobayashi, I. and Ichikawa, S : 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
- 37) 農林水産省・消費・安全局 消費者行政・食育課：「日本型食生活」のススメ：更新日：平成 28 年 3 月 16 日 ([https://www.maff.go.jp/j/syokuiku/nihon\\_gata.html](https://www.maff.go.jp/j/syokuiku/nihon_gata.html))，閲覧日：2021 年 12 月 8 日
- 38) 総務省 (2019/8/20)，家計調査家計収支編 1 世帯当たり年間の品目別支出金額，[https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&query=%E5%93%81%E7%9B%AE%E5%88%A5%20%E6%94%AF%E5%87%BA%E9%87%91%E9%A1%8D&layout=dataset&cycle=7&stat\\_infid=000031964824&metadata=1&data=1](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&query=%E5%93%81%E7%9B%AE%E5%88%A5%20%E6%94%AF%E5%87%BA%E9%87%91%E9%A1%8D&layout=dataset&cycle=7&stat_infid=000031964824&metadata=1&data=1)，(2021/12/21)
- 39) 渋川祥子，福工博保：急速凍結によるでんぷん性食品の変化について(1)．*家政学雑誌* 22 : 232-237, 1971
- 40) Barclay, A. W., Petocz, P., McMillan-Price, J : Glycemic index, glycemic load, and chronic disease risk—a meta-analysis of observational studies. *Am J Clin Nutr* 87 : 627-37, 2008
- 41) 内藤博，船引 龍平，安本 教伝，菅野 道広，岩井 和夫，木村 修一，杉本 悦郎，桐山 修八，吉田 昭：4.炭水化物，「新栄養化学」，朝倉邦造，株式会社朝倉書店，東京，pp.53-106，1987
- 42) 田村匡嗣，熊谷千敏，小川幸春：搗精度の異なる米飯粒の組織構造と人工消化試験系における消化性の関係，*美味技術学会誌*，12, 30-36, 2013
- 43) 岡留博司，豊島英親，須藤充，安東郁男，沼口憲治，堀末登，大坪研一：米飯 1 粒の多面的物性測定に基づく米の食味評価，*日本食品科学工学会*，45, 398-407, 1998
- 44) AACC Approved Methods of Analysis, 11th Ed. Method 74-09.01. Measurement of Bread Firmness by Universal Testing Machine. Approved November 3, 1999. Cereals & Grains Association, St. Paul, MN, U.S.A. <http://methods-74-09.01>
- 45) 嶋田浩基，渡邊亜沙子，喜田直考：うどん食感の客観的評価法，*日本食品工学会誌*，12 169-172, 2011
- 46) 阿部芳子，市川朝子，下村道子：中華麺の物性に及ぼすかん水の影響，*日本家政学会誌* 57, 461-467, 2006
- 47) 仲西由美子，平内亨，河原俊雄，入江謙太郎：パスタの品位および物性について，*日本*

- 食品工学会誌,16,257-261, 2015
- 48) Z,Wang.,H,Kozu.,K,Uemura.,I,Kobayashi.,S,Ichikawa : Effect of hydrogel particle mechanical properties on their disintegration behavior using a gastric digestion simulator Author links open overlay panel. Food Hydrocolloids110 : 106-166, 2021
- 49)Schwizer, W., Steingoetter, A., Fox, M : Magnetic resonance imaging for the assessment of gastrointestinal function, Scand. J. Gasutro., 41, 1245-1260 , 2006
- 50)Camilleri, M., Malagelada, J.R., Brown, M.L., Becker, Gand Zinsmeister, A.R : Relation between antral motility and gastric emptying of solids and liquids in humans, Am. J. Physiol., 249, 580-585, 1985
- 51)Wang, Z., Neves, M.A., Kobayashi, I., Uemura, K. and Nakajima, M. Biosci : Biotechnol. Biochem., 77, 467-474 , 2013
- 52)豊嶋愛子, 大滝未鶴希, 渡辺雄二: 機器測定による食パンのテクスチャー客観的評価. 大妻女子大学家政系研究紀要 41 : 45-50, 2005
- 53)丸山悦子: 米飯のおいしさへのアプローチ, 奈良女子大紀要人間環境科学, 9, 159-166, 2000
- 54)小林功, 市川創作: ぜん動運動を備えたヒト胃消化シュミレーターによる高齢者用ソフト食品の消化動態の観測, 食に関する助成研究調査報告書,27,1-7, 2014
- 55)吉沢良平: 胃機能のテレメーターリングの研究—主として pH 測定用ラジオカプセルの臨床応用について, 日本消化器病学会雑誌, 66, 456-473, 1969
- 56)下山和弘, 清水一夫, 大渡凡人, 松尾美穂: 日常生活で起こる可撤性義歯の誤飲. 老年歯学 27 : 121-127, 2012
- 57)Hellström, P.M., Grybäck, P. and Hans, J : The physiology of gastric emptying, Best Pract. Res. Clin. Anaesthesiol., 20, 397-407, 2006
- 58)H,Faas.,A,Steingoetter.,C,Feinle.,T,Rdesa.,H, Lengsfelda.,P, Boesiger., M, Fried.,W, Schwizer : Effects of meal consistency and ingested fluid volume on the intragastric distribution of a drug model in humans-a magnetic resonance imaging study. Aliment Pharmacol Ther 16: 217-224, 2002
- 59)大日方洋,小原忠彦,村松信之,唐沢秀,大池昶威, そば粉に含まれる水溶性粘質物の特性について: 日本食品工業学会誌, 38, 391-397, 1991
- 60) 一般社団法人日本パン技術研究所 (2013), パンの用語集,<http://www.panpedia.jp/knowledge/termtip.html>(2021/12/21)
- 61)西津貴久: 小麦粉製品の内部構造と食感の評価,化学と生物,52,671-679, 2014
- 62) 三木英二: うどんのテクスチャー, 日本バイオレオロジー学科誌 (B & R) ,20, 32-39 , 2006
- 63) 長尾精一: 小麦の科学,「小麦粉生地 of 構造と性状」,長尾精一, 朝倉書店, 東京, pp157 , 1995

- 64) 阿部芳子, 市川朝子, 下村道子: 中華麺の物性に及ぼすかん水の影響, 日本家政学会誌 57, 461-467, 2006
- 65) 酒井孝, 長沼陽介: 製造条件の異なるスパゲティの機械的性質の調査, 日本食品工学会誌, 15, 259-265, 2014
- 66) J, Singh., L, Kaur., H, Singh: Food Microstructure and Starch Digestion. Advances in Food and Nutrition Research 70: 137-179, 2013
- 67) 小川幸春, 田村匡嗣: 直物性食品の消化特性. 科学と生物 58: 596-598, 2020
- 68) Mathilde.V.D., Helene.L.A.P., Claire.S.R., Salivary: flow decreases in healthy elderly people independently of dental status and drug intake. Journal of texture studies 47: 353-360, 2016
- 69) Xu, F, Laguna, L and Sarkar, A: Ageing related changes in quantity of saliva: Where do we stand in our understanding?. J. Texture Stud 50: 27-35, 2019
- 70) 宮坂京子, 船越顕博: 加齢と消化・吸収. 化学と生物 37: 368-374, 1999
- 71) 船見孝弘, 堤之達也, 岸本一宏: とろみ調整食品や外語食品に使用されている増粘剤およびゲル化剤. 日本調理科学会誌 39: 233-239, 2006
- 72) 清水敦哉: 半固形栄養の臨床的メリット・デメリットについて. 臨床栄養 136: 180-185, 2020
- 73) 大本俊郎: キサンタンガムの特性と食品への応用 (特集: 食品における多糖類の構想と物性 (2)). FFI Journal 208: 935-942, 2003
- 74) 白尾美佳: でん粉などを原料とするとろみ調整食品の利用について 砂糖類・でん粉情報 3: 2-5, 2019
- 75) 黒澤 廣子: 福島県の介護保険施設における嚥下食に関する実態調査と今後の課題. 郡山女子大学紀要 2: 261-269, 2018
- 76) 田中弥生, 工藤美香, 池田重雄, 藤井真: 成分栄養剤及び消化態栄養剤に対する各種増粘・ゲル化調整食品の半固形化特性の比較. 静脈経腸栄養 23: 255-262, 2008
- 77) John, E, Morley., Arshag, D, Mooradian., Andrew, J, Silver., David, Heber., Roslyn, B, Alfin-Slater: Nutrition in the Elderly. Annals of Internal Medicine 109: 890-904, 1988
- 78) 吉永奈津希, 馬場智子, 古賀貴子: 摂食・嚥下機能に対応した食事に関するアンケート調査. 長崎国際大学論叢 17: 211-222, 2017
- 79) 島巢隆資: 直視下胃粘膜 pH 測定に関する研究. 日本消化器病学会雑誌 75: 12-22, 1978
- 80) 黒坂半造, 青木高仁, 広岡達夫, 貞永嘉久, 金子庄之介, 鈴木啓央, 小笹潔, 石川昌澄, 岩井力, 黒沢三雄, 山本宇生, 西田茂, 野口昂, 田蒔正治, 上西紀夫, 大原毅: 経内視鏡的測定による加齢に伴う胃粘膜 pH の変化. 日本消化器内視鏡学会 34: 81-88, 1992
- 81) 中川裕子, 本多優美, 高橋智子, 大越ひろ: とろみ調整食品添加試料の摂食過程における性状変化. 日本調理科学会 50: 133-140, 2017
- 82) 日本摂食嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会: 日本摂食嚥下リハビリテーショ

- ン学会嚥下調整食分類 2013. 日本摂食嚥下リハビリテーション学会雑誌 17 : 255-267, 2013
- 83)富田隆, 福井嵩浩, 鷹薮綾香, 後藤英和, 吉田正, 住谷賢治, 幸田幸直, 工藤賢三 : とろみ調整食品に増粘剤として添加されているキサンタンガムが速崩壊性錠剤の崩壊に及ぼす影響. 回復期リハビリテーション病棟協会 : 1-6, 2018
- 84)Y,Yamauchi,T,Matsuno.,K, Omata.,T,Satoh : Relationship between hyposalivation and oxidative stress in aging mice. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition61 : 40-46, 2017
- 85)R,S, Percival., Sj, Challacombe.,P,D, Marshi : Flow Rates of Resting Whole and Stimulated Parotid Saliva in Relation to Age and Gender. J Dent Res 73 : 1416-1420,1994
- 86)Niessen,Linda, C : 高齢者の口腔保健と唾液分泌. 老年歯学 18 : 107-116, 2003
- 87)V-Descamps,M.,Laboure,H.,Prot,A,Sepier,C.,Tournier,C.,Feron,G.,S-Rosse,C : Salivary flow decreases in healthy elderly people independently of dental status and drug intake. Journal of Texture Studies47 : 353-360, 2016
- 88)永口美晴, 幣憲一郎 : 増粘剤と胃内での変化. 臨床栄養 100 : 696-701, 2007
- 89)Sasaki,T.,Kohyama,K : Effect of non-starch polysaccharides on the *in vitro* digestibility. Food Chemistry127 : 541-546, 2011
- 90)長野隆男, 樋渡友美, 河原和枝 : デンプンの消化に与えるグアーガムの影響. 川崎医療福祉学会 20 : 391-396, 2000
- 91) 佐川敦子, 中西由季子, 小野仁志, 森高初恵 : 増粘剤添加が米飯の消化性および米飯食塊の力学特性に及ぼす影響. 日本食品科学工学会誌 60 : 387-396, 2013
- 92) 田村匡嗣, 前原那波, 熊谷千敏, 齋藤穂高, 小川幸春 : *In vitro* 模擬消化試験での異なる胃消化環境における米飯粒の糖質消化性、および組織構造の変化. 日本食品科学工学会誌 66 : 170-178, 2019
- 93) 本郷道夫 : 胃酸分泌, 胃内分泌そして胃内運動. 化学と教育 67 : 356-357, 2017
- 94) 大石恭子, 金成はるな, 大田原美保, 香西みどり : 炊飯液の pH の違いが飯の炊飯特性および米のタンパク質, デンプンに与える影響. 日本調理科学会誌 53 : 197-206, 2020

謝辭

本論を結ぶにあたり、本研究を遂行する上でご指導、ご鞭撻をいただいたすべての方に感謝の意を表します。

本研究は、2020年2月より2022年3月までの約2年間、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・素材研究領域食品加工グループにて依頼研究員として所属させていただき、実験を行いました。

2020年3月以降、新型コロナウイルスにより、緊急事態宣言が発令され、世界中でパンデミックが起きました。日々の生活に制限が強られる中、感染予防対策を徹底して、研究ができるよう配慮してくださった貴機構に心から感謝申し上げます。

本研究を行うにあたり、帝京平成大学健康科学研究科健康科学専攻博士課程に在籍し、指導教員の野口律奈 准教授より、幾度となく研究テーマについて議論し、研究に対する様々な視野を学ばせていただきました。また、研究の進捗状況において、貴重なご助言、ご指導をいただき、心より感謝申し上げます。同・前田竜郎 教授には、副指導教員として、サンプル分析や栄養成分および物性の解析方法について、多くのご助言をいただきました。研究テーマにつながるご縁を繋いでくださったことと合わせて、深く御礼申し上げます。さらに、同・長濱辰文 教授には、大学院の授業において、研究計画や実験の結果および考察などの多角的な視点からのアドバイス、また学会発表や大学院の発表においても客観的に質疑応答などのご指導をいただきました。心より感謝いたします。

食品研究部門・上級研究員および筑波大学グローバル教育院、小林功 教授には、博士論文の研究遂行、学会発表の指導、論文の執筆に至るまで、終始一貫して温かく、そして細部にわたり、ご丁寧なご指導、ご鞭撻をいただきました。さらに、素晴らしい研究環境と様々な経験をさせていただき、多くの知識を学ばせていただきました。また、いつ何時も、温かい言葉をかけていただき、焦る気持ちを穏やかにしていただきました。寛大なる感謝の意を表します。

食品研究部門・山村裕子 氏には、実験の試料調製や片付けなど、限られた時間の中で実験を遂行するために、多くのサポートと温かい声を掛けてくださいました。同・梅田拓洋 氏、長屋美玖 氏、高橋千栄子 氏、Grace Lara-Valderrama 博士、筑波大学大学院生の黄秋安 氏には、実験機器の使用方法や設定条件などについてご教示いただきました。部門内では、様々な分野において、専門的な知識を有する先生方や学生が多く、意見や情報交換をさせていただき、他では得られない深い学びを得ることができました。心より感謝申し上げます。

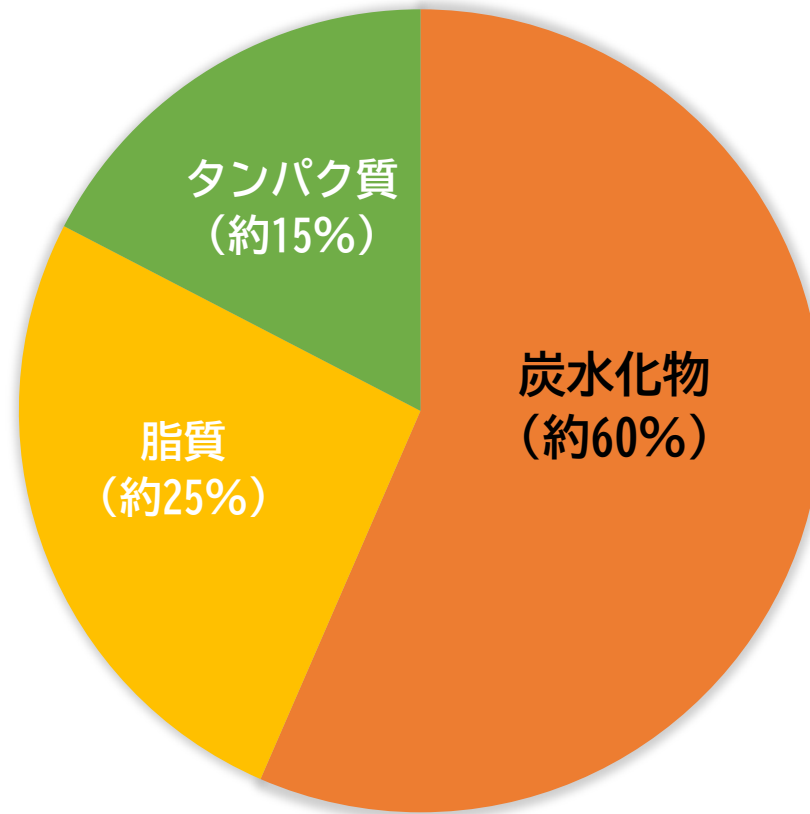
帝京大学中央機器室の黒木 先生およびそのスタッフの方々、帝京平成大学大学院健康科学専攻健康栄養学専攻修士課程大学院生の田中理祥 氏には、サンプルの分析や解析につい

て、多大なるご協力をいただき、心より感謝申し上げます。

最後に、家庭と仕事に加え、学業を両立するために、理解を示し、最後まで応援をして、支えてくれた家族に感謝いたします。そして、ここに記しきれない方々の学恩、ご支援によって、本研究の成果が得られたことを忘れずに、今後の研究活動において、精進していきたいと思います。ありがとうございました。



図表



**図1-1 エネルギー産生栄養素バランス（エネルギー%）**

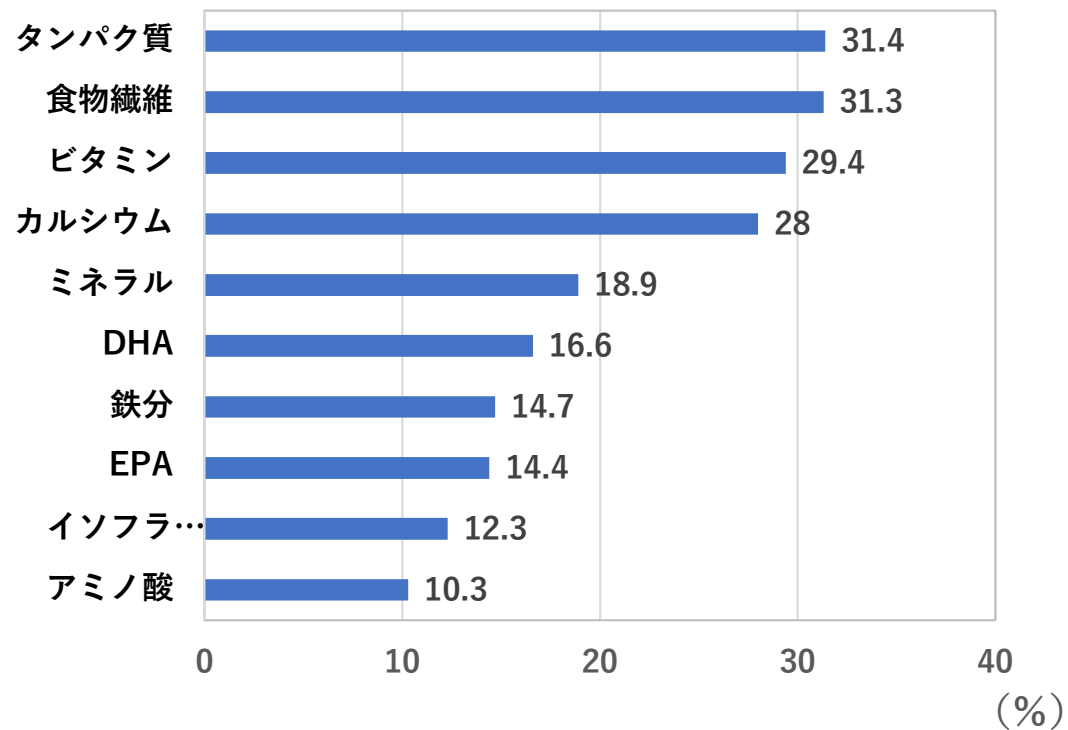
※厚労省，「日本人の食事摂取基準（2020年版）」，エネルギー産生栄養素バランス  
65歳以上男女のデータを基に作図

# シニア世代の健康的な生活をサポート 食事バランスガイド

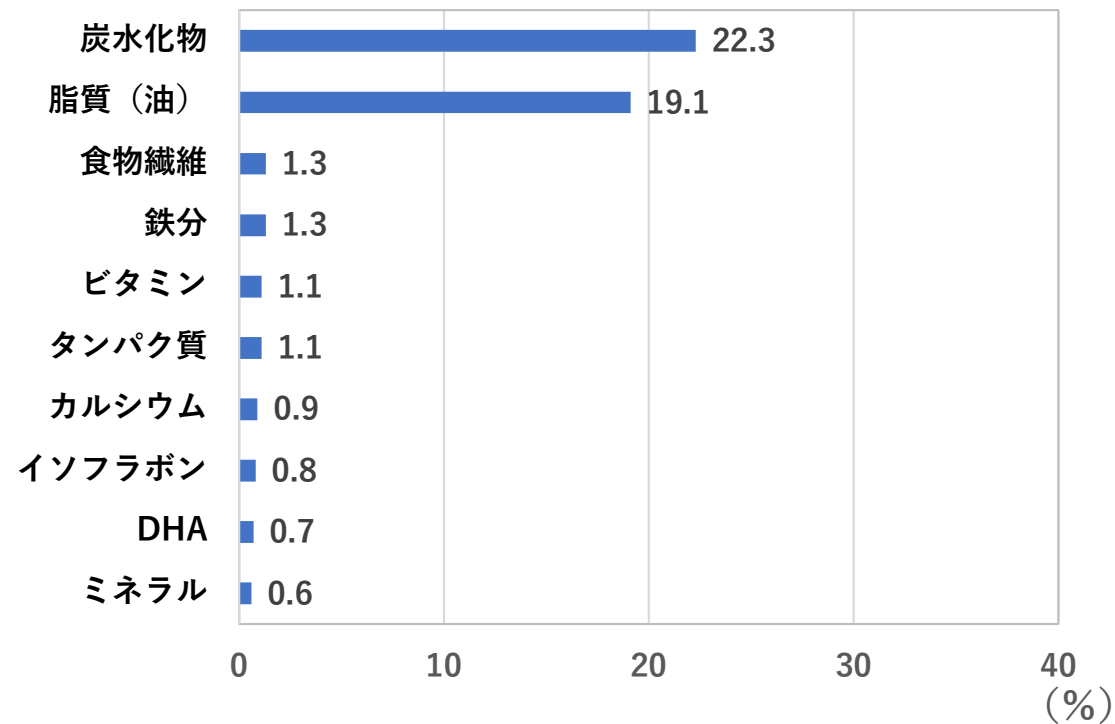


図1-2 食事バランスガイド

※「食事バランスガイド」，厚生労働省・農林水産省，2005



積極的に摂っている栄養素



摂ることを制限している栄養素

**図1-3 健康のために積極的に摂っている栄養素と摂ることを制限している栄養素についてのアンケート結果**

※高齢者60～75歳（n=1,000）を対象とした「シニアの食生活と健康意識に関する調査」を基に作成

（株式会社ネオマーケティングが運営するアンケートサイト「アイリサーチ」のシステムを利用したWEBアンケート方式で調査を実施

実施期間：2017年8月23日～25日の3日間）

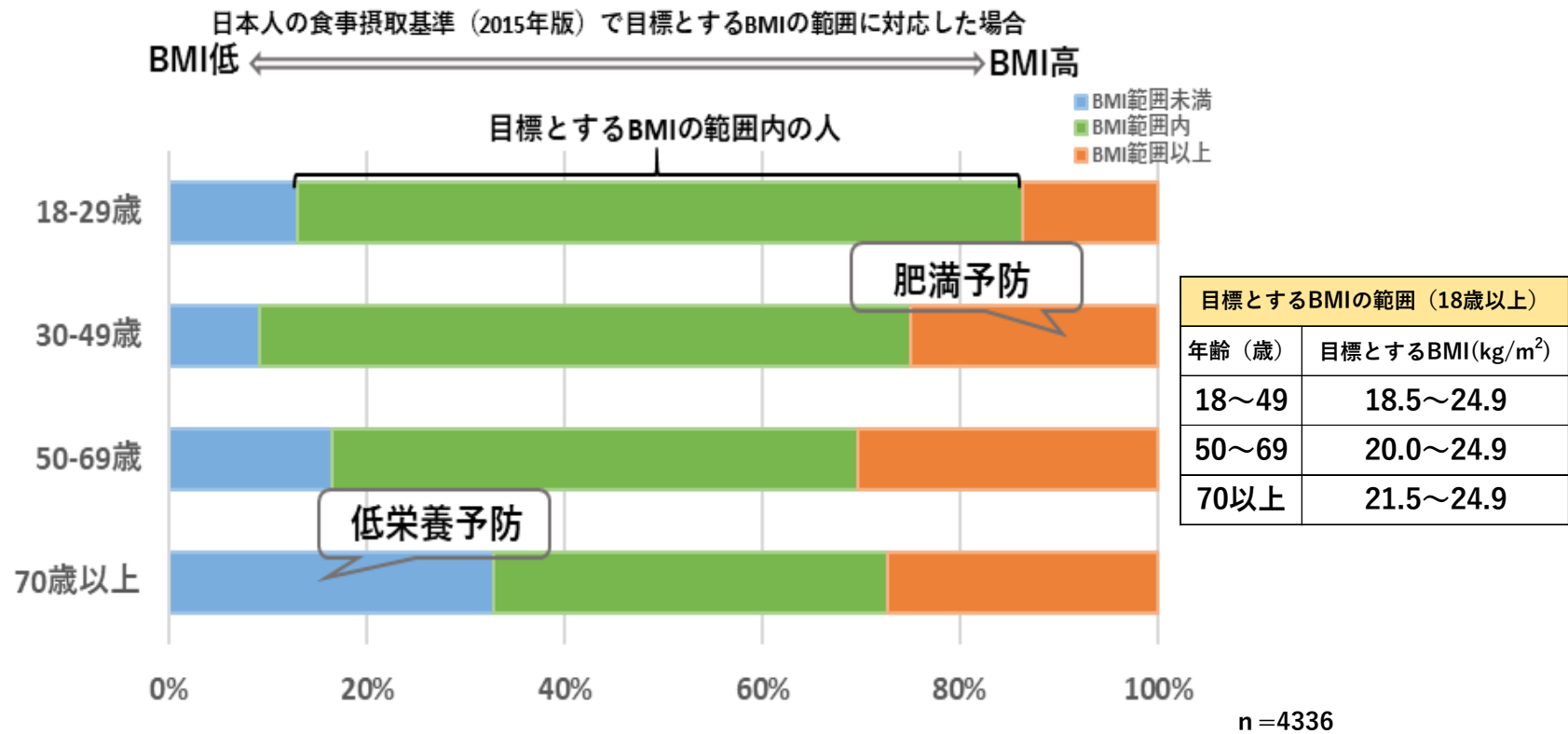


図1-4 目標とするBMIの範囲の分布

※厚生労働省、「令和元年国民健康・栄養調査」第2部 身体状況調査の結果、  
目標とするBMIの範囲の分布より作図

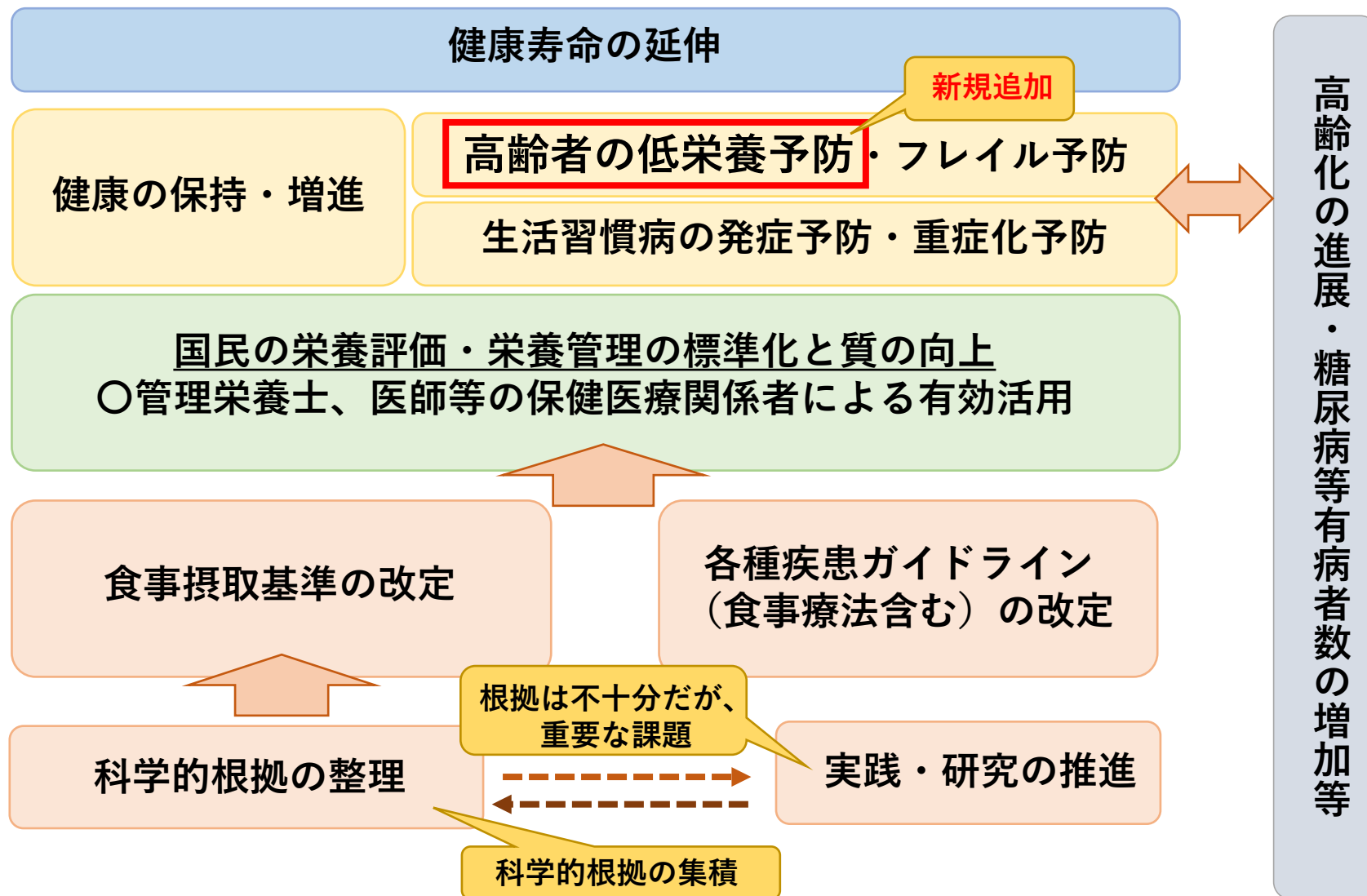
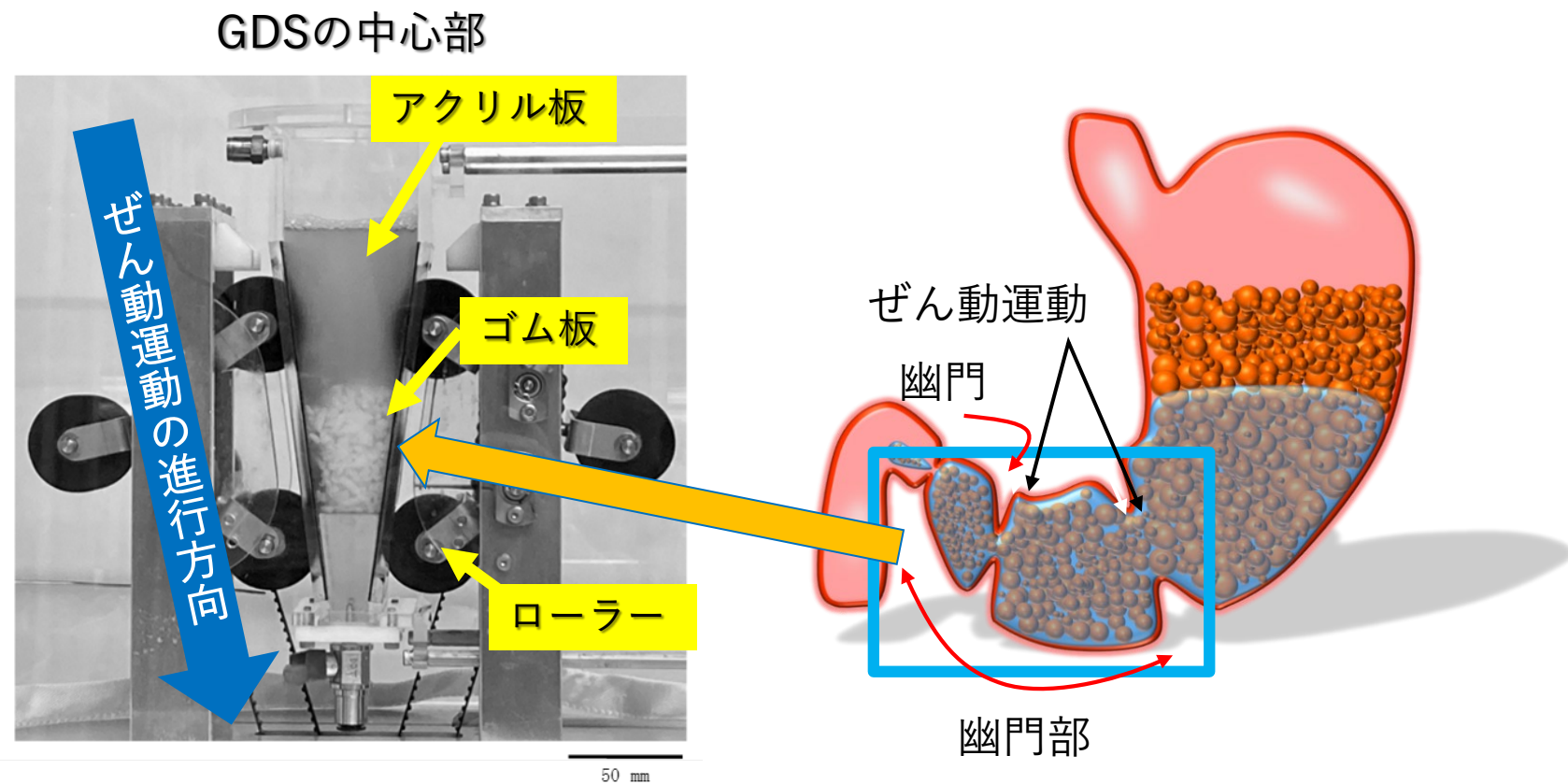


図1-5 日本人の食事摂取基準（2020年版）策定の方方向性

※厚生労働省，日本人の食事摂取基準策定会「日本人の食事摂取基準（2020年版）策定検討会報告書を基に作図



右側のローラーの軌道は時計回り、左側のローラーは反時計回り

図1-6 GDSの構造

※Kozu et al. (2021) を参考に作図

第1章 緒論	
第2章 澱粉性主食の種類が消化挙動に及ぼす影響	第3章 介護食モデルの胃内消化挙動におけるとろみ剤および胃内 pH の影響 * とろみ剤添加および濃度の違いについて * 胃内 pH の違いについて
第4章 総括	
第5章 参考文献	

図1-7 本研究の構成



表2-1 澱粉性主食の栄養成分（60gあたり）<sup>1)</sup>

澱粉性主食	食品名	エネルギー (kcal)	水分含量 <sup>2)</sup> (g)	たんぱく質(g)	脂質 (g)	炭水化物 (g)	食塩相当量(g)
白米飯	サトウのごはん	88	37.4	1.3	0.0	20.3	0.0
食パン	ロイヤルブレッド	155	17.0	5.4	2.4	27.8	0.7
ゆでうどん	ゆでうどん 純麺	61	42.8	1.5	0.3	13.0	0.1
十割そば	風味際立つ 十割そば	91	37.9	3.2	0.7	16.3	0.0
中華めん	冷やし中華	93	40.5	1.8	0.4	16.1	0.4
スパゲティ	ママーパスタ(乾麺)1.6mm	94	34.1	2.9	0.4	19.5	0.0

1) 主食は各メーカーの調理指示により調製し、栄養成分表示に記載されている値を60gあたりに算出した。

2) 水分含量は栄養成分表示に記載されていなかったため、105℃12時間の恒温乾燥法により算出した。

表2-2 人工唾液および人工胃液の組成※

人工唾液		人工胃液	
KCl	1.126 g/L	KCl	0.514 g/L
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.503 g/L	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.122 g/L
NaHCO <sub>3</sub>	1.142 g/L	NaHCO <sub>3</sub>	2.1 g/L
MgCl <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0.03 g/L	NaCl	2.76 g/L
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.006 g/L	MgCl <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0.02 g/L
CaCl <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	0.221 g/L	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.074 g/L
$\alpha$ -Amylase	150 U/mL	CaCl <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	0.022 g/L
HCl	1.1 mM	Pepsim	4000 U/mL
		HCl	49.8 mM
pH	6.8	pH	1.3

※ Wang et al, 2021

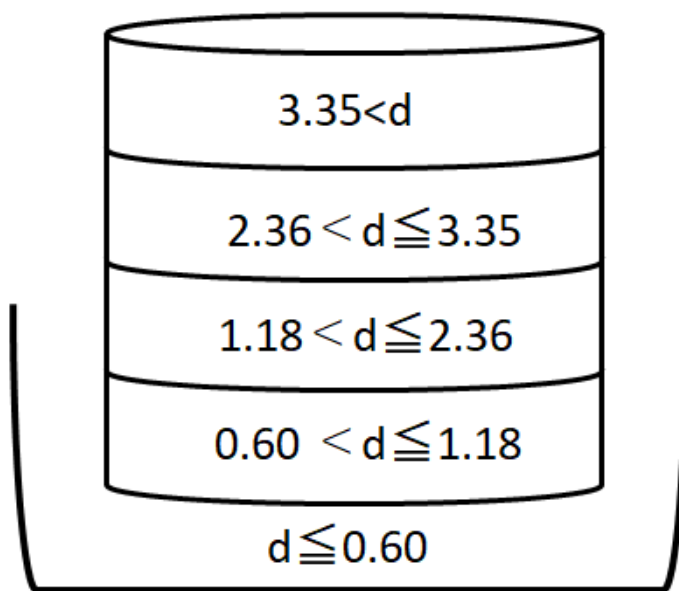


図2-1 分級時の模式図， $d$  = 目開きサイズ，最大画分から最小画分

※すべての篩を通過した粒子， $d \leq 0.60$  mm

表2-3 澱粉性主食の力学特性<sup>1)</sup>

	最大荷重 (N)	破断歪率 (%)
白米飯	34.9 ± 5.5	89.1 ± 0.9
食パン <sup>2)</sup>	4.2 ± 0.6	50.0
うどん	33.7 ± 1.5	67.6 ± 4.1
十割そば	44.4 ± 1.8	38.1 ± 4.6
中華麺	38.1 ± 1.5	54.0 ± 3.6
スパゲッティ	41.2 ± 2.0	64.9 ± 2.4

1)数値は平均値±標準誤差 (n=20)。

2)食パンは延性曲線を示したため、白米飯以外の破断歪率を参考に50%の荷重 (N)を記載した。

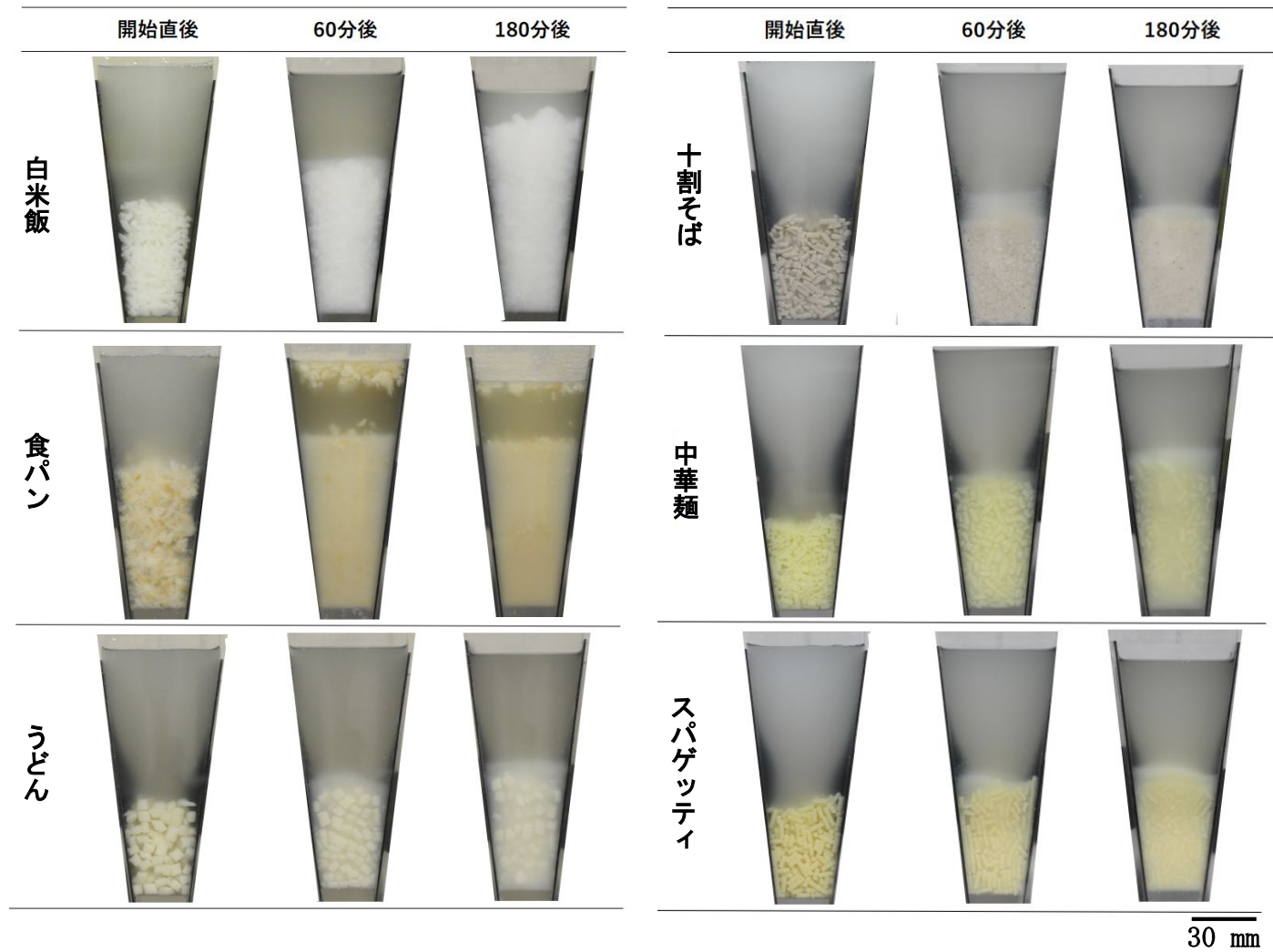


図2-2 GDSを用いた澱粉性主食の違いによる消化挙動の経時変化

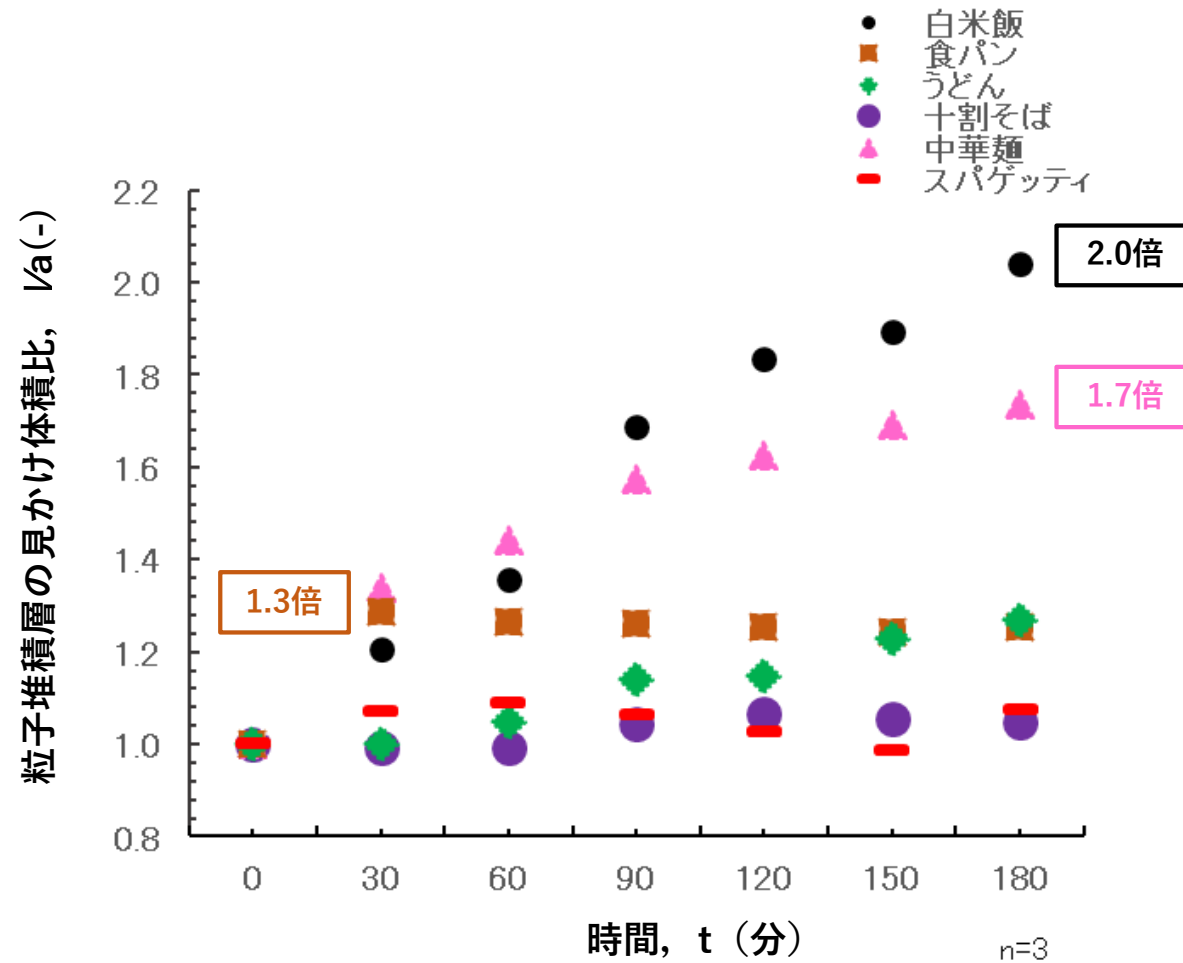


図2-3 GDSを用いた澱粉性主食の違いによる粒子層の見かけ体積比

\* 食塊と胃液から構成される堆積層の初期見かけ体積を1とし、消化時間t(分)における体積比( $V_t, a$ )との比を指標として、時系列に算出・評価

見かけの体積比  $I_a = (V_t, a / V_0, a) \times 100$

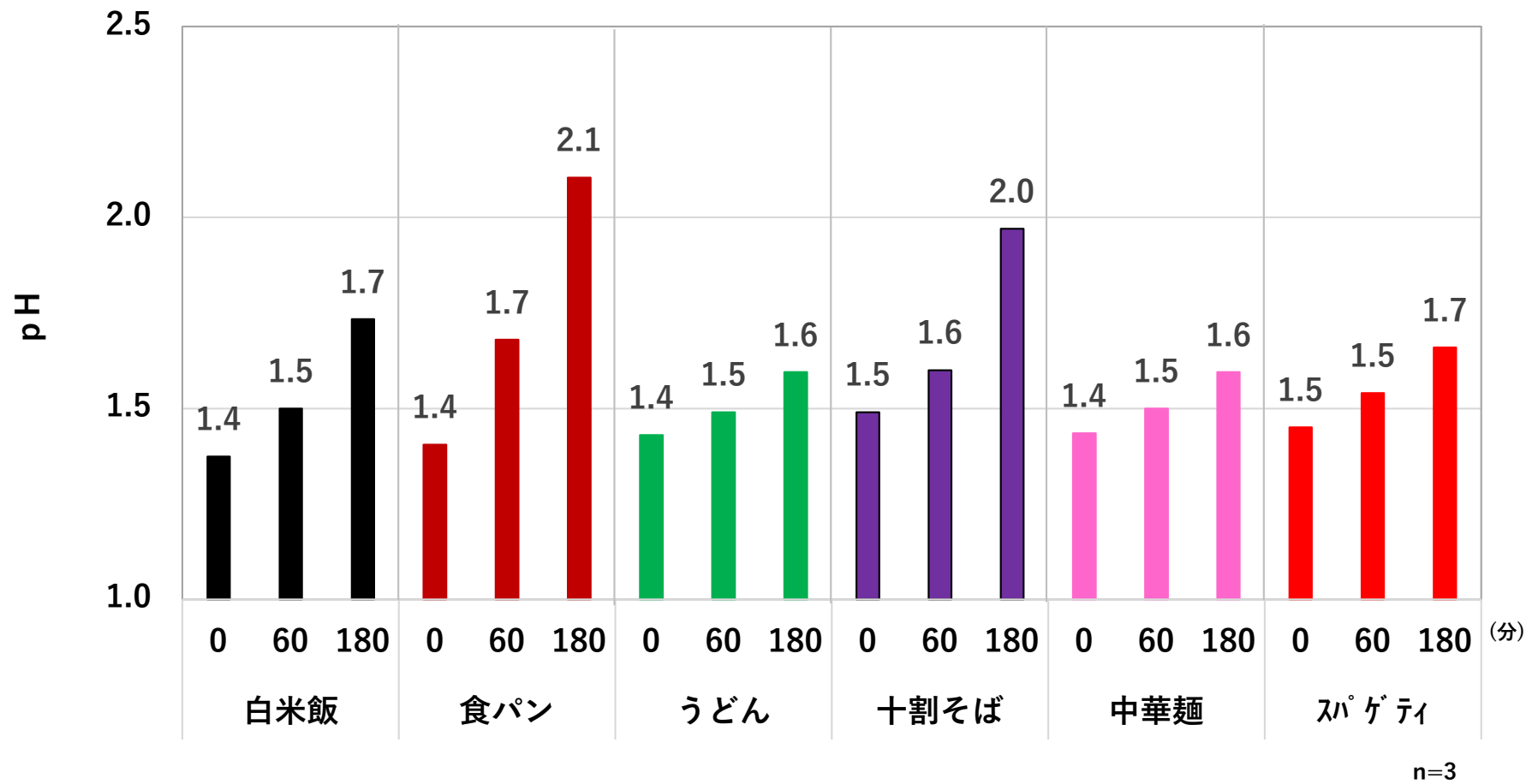


図2-4 澱粉性主食の違いによるpHの経時変化

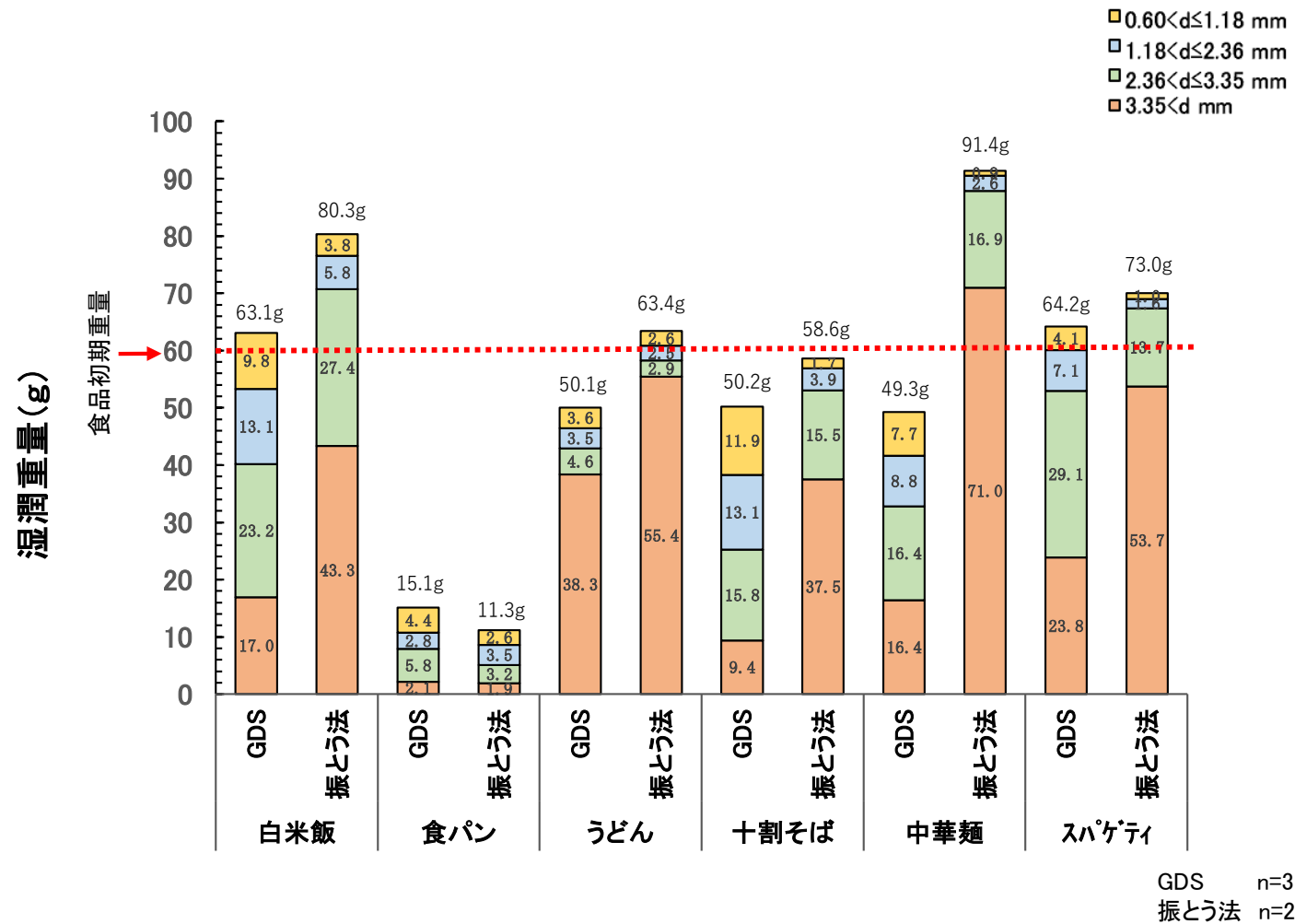


図2-5 GDSおよび振とう法試験における澱粉性主食の消化物，180分後一湿潤重量とサイズ分布一



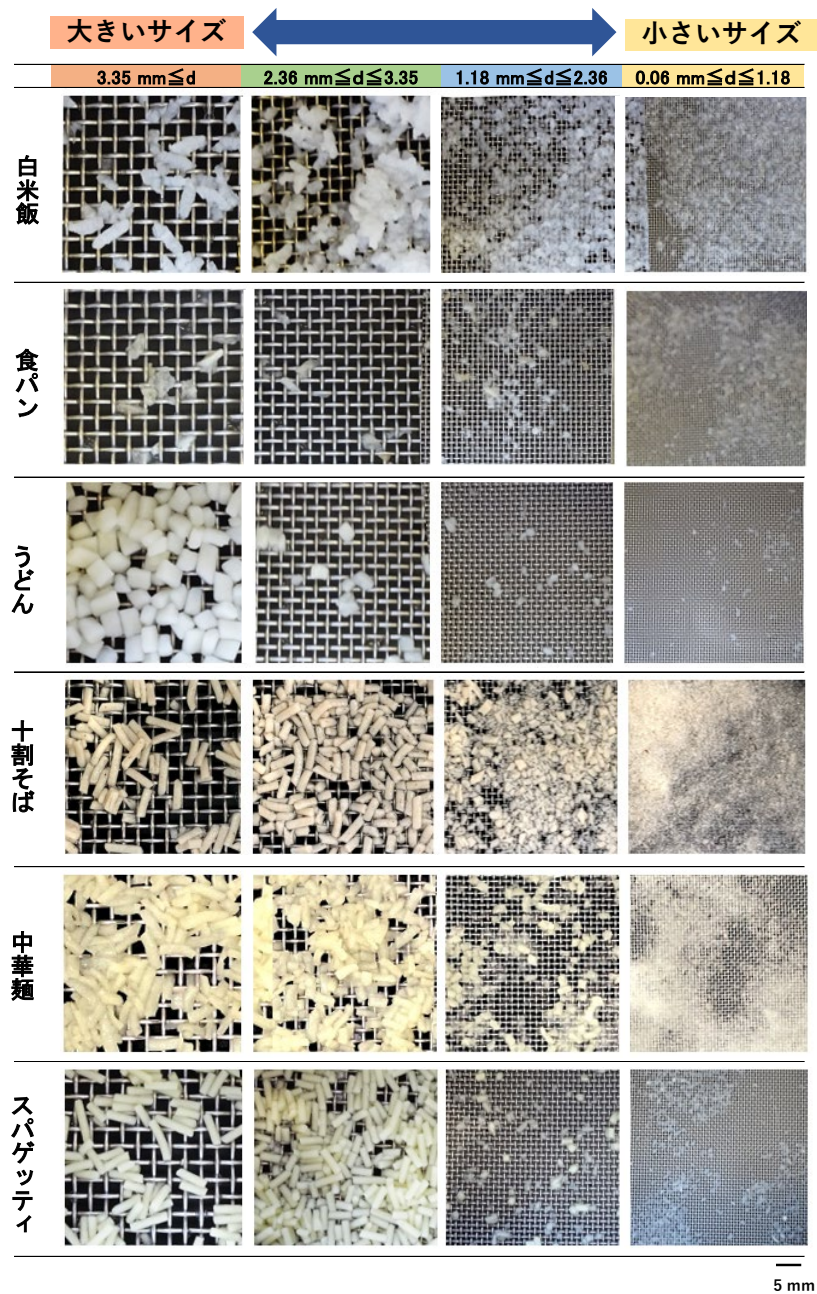


図2-6 澱粉性主食の違いによる各画分における粒子形態，180分後の消化物

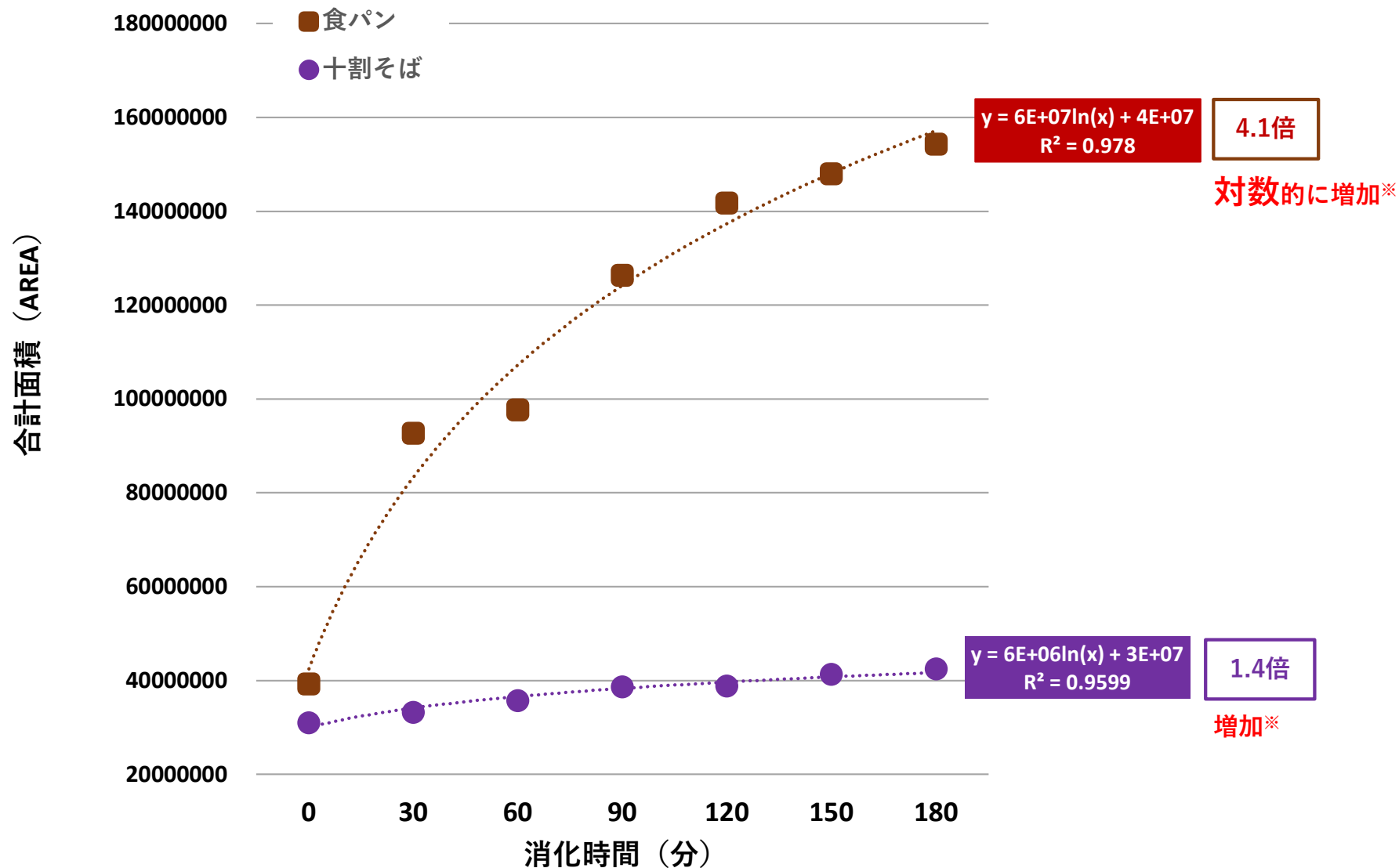


図2-7 澱粉性主食の違いによるタンパク質の消化物，合計面積 (AREA)  
ー食パン・十割そばー

※ 0 時間の面積値を1.0とした場合の180分後の変化率を示した。

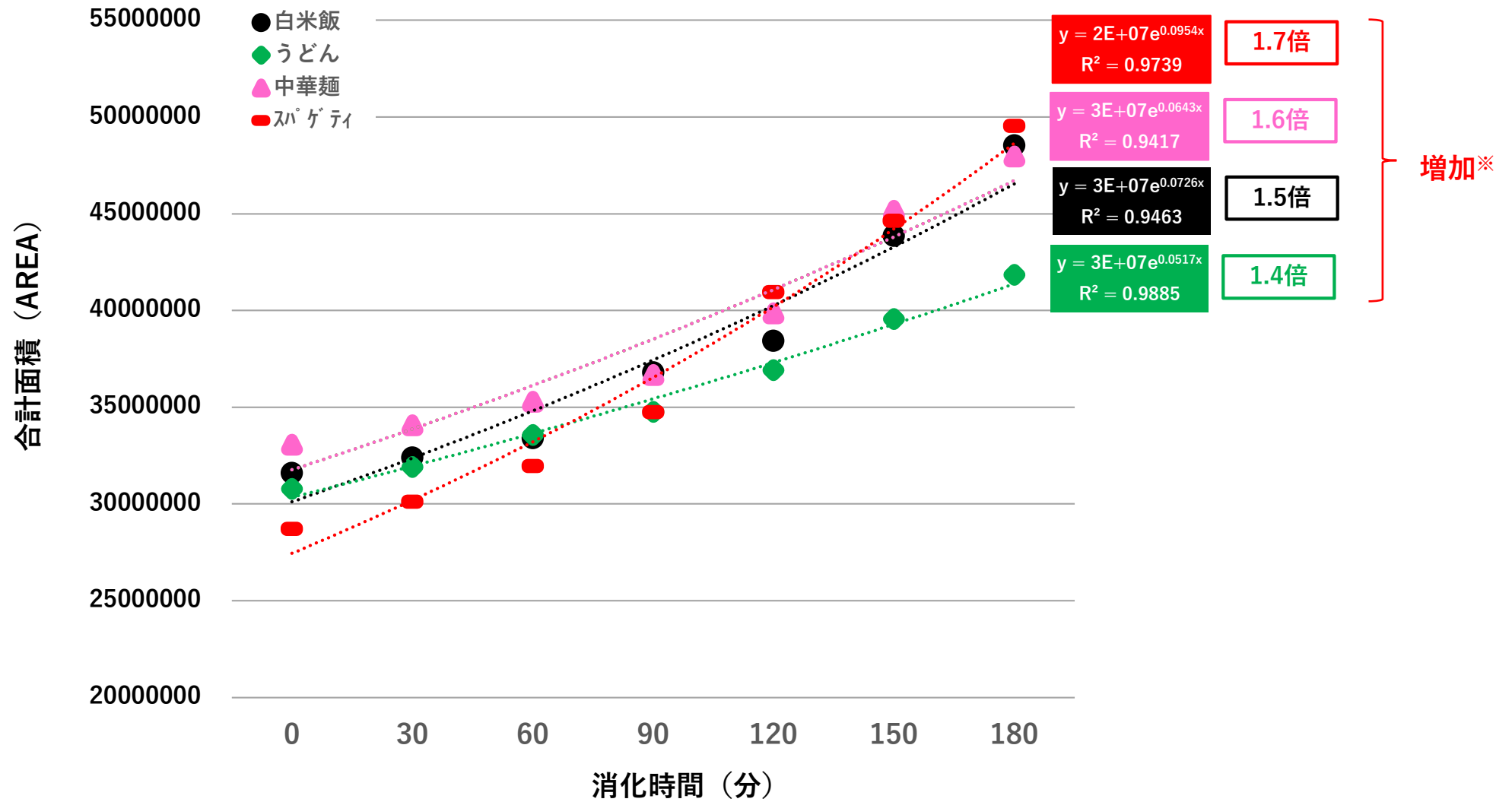


図2-8 澱粉性主食の違いによるタンパク質の消化物，合計面積 (AREA)  
ー白米飯・うどん・中華麺・スパゲティー

※ 0 時間の面積値を1.0とした場合の180分後の変化率を示した。

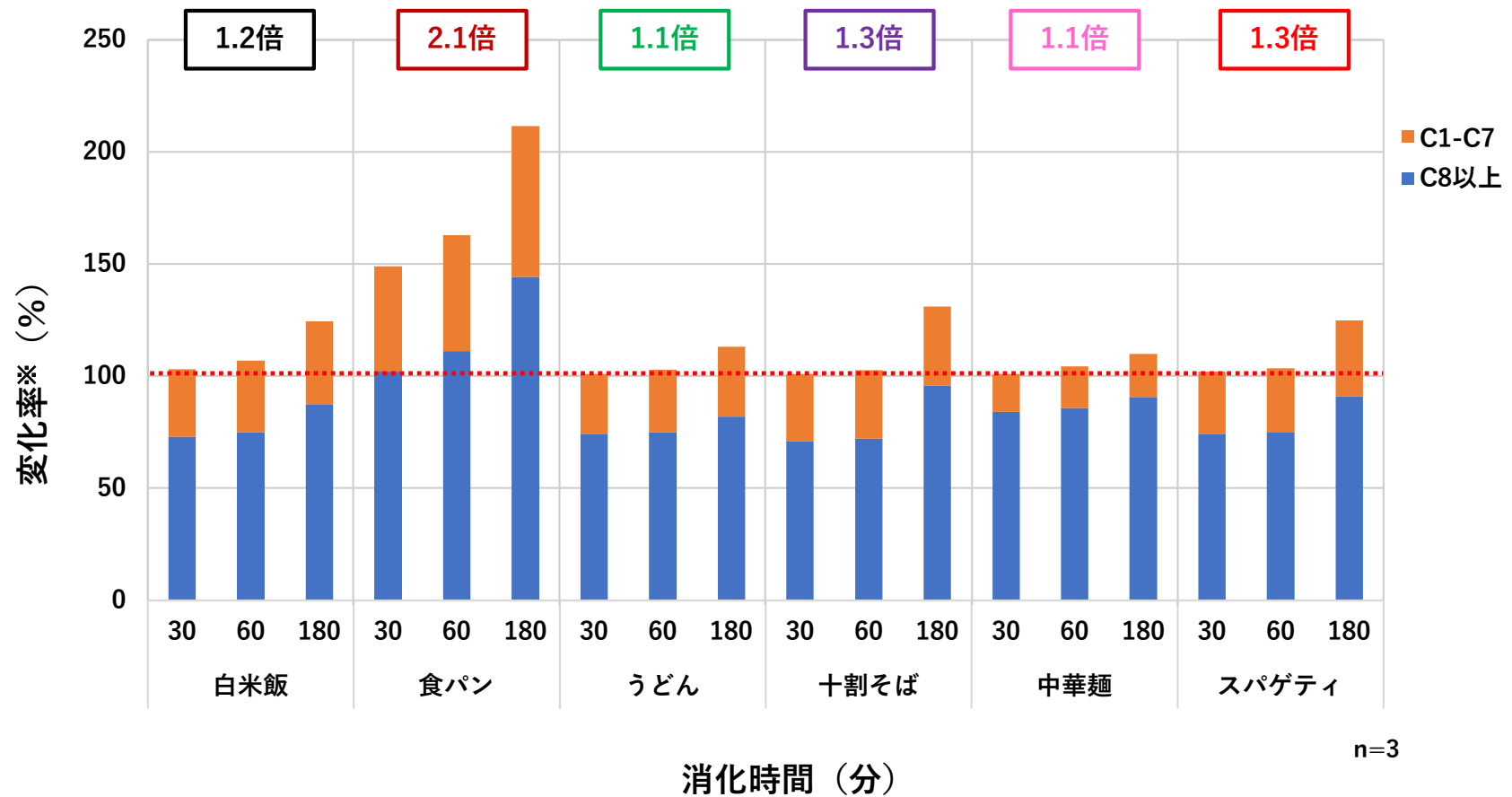


図2-9 澱粉性主食の違いによる糖質の消化物，合計面積（AREA）の変化率

※ 0時間の面積値を1.0とした場合の各時間の変化率（ $A_t/A_0 \times 100$ ）を示した。

表3-1 とろみ剤の種類や特徴

分類	澱粉系 <sup>1)</sup>	グアーガム系 <sup>2)</sup>	キサンタンガム系 <sup>3)</sup>
主原料	澱粉・加工澱粉	植物の種子由来のグアーガム	微生物由来のキサンタンガム
特徴	とろみをつける添加量が多い	少量でとろみがつく	少量でとろみがつく
	唾液アミラーゼの影響がある	唾液の影響を受けにくい	唾液の影響を受けにくい
	液体が白く濁る	使用量が多いと付着性が増す	透明度が高い
	においや味に影響がある	経時変化が大きい	においや味に影響しにくい
		温度によって粘度が異なる	付着性が少なく、凝集性がある

<sup>1)</sup>カラギーナン : 紅藻類の海藻より抽出される多糖類を主成分としたもので、増粘安定剤として利用される。

<sup>2)</sup>グアーガム : インドなどで栽培されるグアーという植物から得られた多糖類を主成分としたもので、増粘安定剤として利用される。

<sup>3)</sup>キサンタンガム : キサントモナス属菌の培養液から得られた多糖類を主成分としたもので、増粘安定剤として利用される。

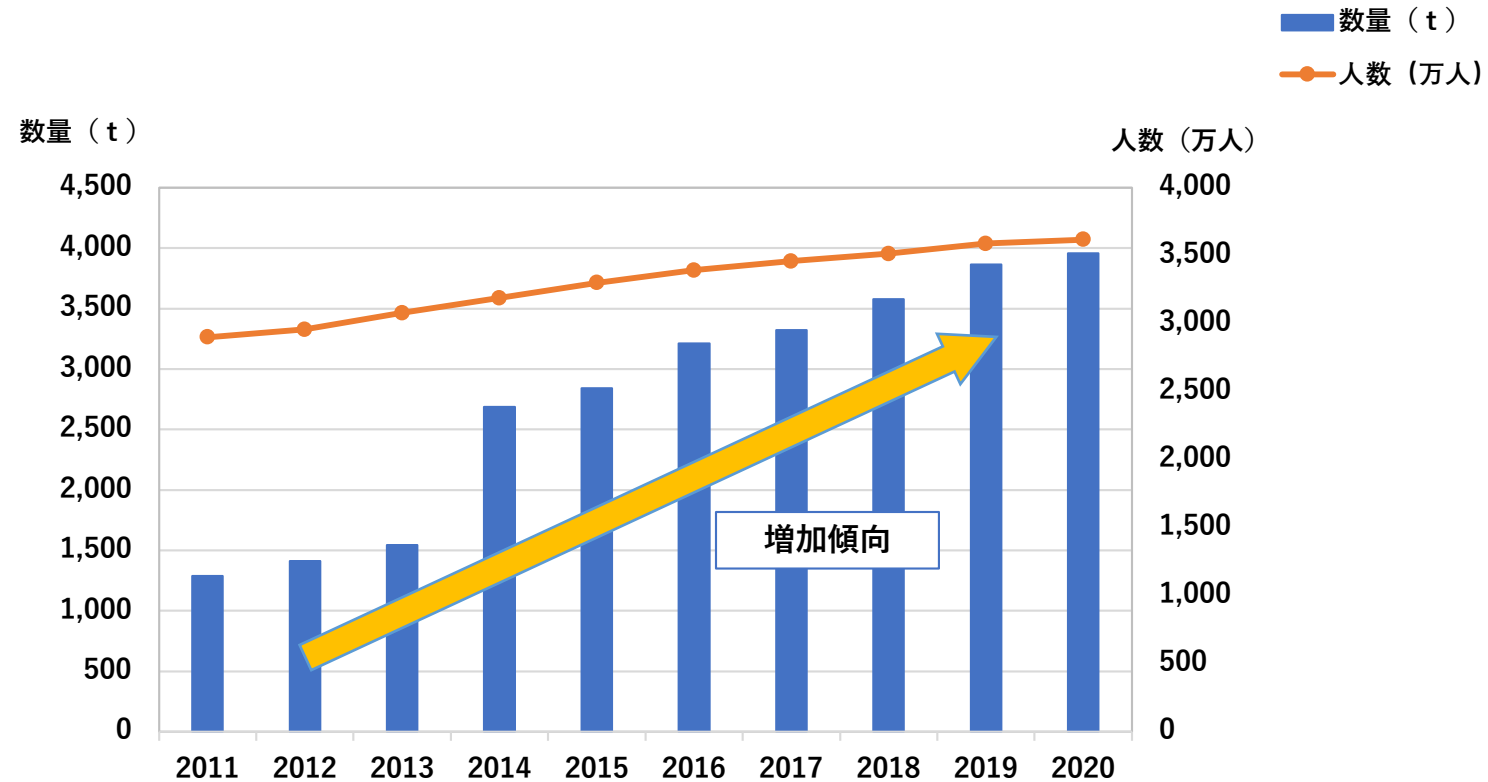


図3-1 とろみ剤の生産量および高齢者人口

\* 厚生労働省, 「高齢社会白書」, 第1章: 高齢化の状況, 第1節: 高齢化の状況  
(2011~2020年) のデータおよび日本介護食品協議会, 「生産統計」,  
ユニバーサルデザインフード生産統計 (2011~2020年) のデータより作図

表3-2 嚥下調整食学会分類2013 早見表（とろみ）



	段階1 薄いとろみ【Ⅲ-3項】	段階2 中間のとろみ【Ⅲ-2項】	段階3 濃いとろみ【Ⅲ-4項】
英語表記	Mildly thick	Moderately thick	Extremely thick
性状の説明（飲んだとき）	「drink」という表現が適切なとろみ程度。 口の中に入れると口腔内に広がる液体の種類・味や温度によっては、とろみが付いていることがありあまり気にならない場合もある。飲み込む際に大きな力を要しない、ストローで容易に吸うことができる。	明らかにとろみがあることを感じ、かつ「drink」という表現が適切なとろみ程度。口腔内での動態はゆっくりですぐに広がらない。舌の上でまとまりやすい。ストローで吸うのは抵抗がある。	eat」という表現が適切なとろみ程度。ストローで吸うことが困難。
性状の説明（見たとき）	スプーンを傾けるとずっと流れ落ちる。フォークの歯の間から素早く流れ落ちる。カップを傾け、流れた後には、うっすらと跡が残る程度の付着。	スプーンを傾けるととろりと流れる。フォークの歯の間からゆっくりと流れ落ちる。カップを傾け、流れ出た後には、全体をコーティングしたように付着。	スプーンで傾けても、形状がある程度保たれ、流れにくい。フォークの歯の間から流れでない。カップを傾けても流れ出ない（ゆっくりと塊になっておちる）。
粘度（mPa・s）【Ⅲ-5項】	50-150	150-300	300-500
LST値（mm）【Ⅲ-6項】	36-43	32-36	30-32

\* 日本摂食嚥下リハビリテーション学会「嚥下調整食学会分類2013」、白尾ら（2019）を参考に作表

\* ニュートリー株式会社公式通販サイト「嚥下まるわかり集Q&A」より、イメージ写真を抜粋、著者改編

表3-3    とろみ剤の栄養成分（100gあたり）<sup>1)</sup>


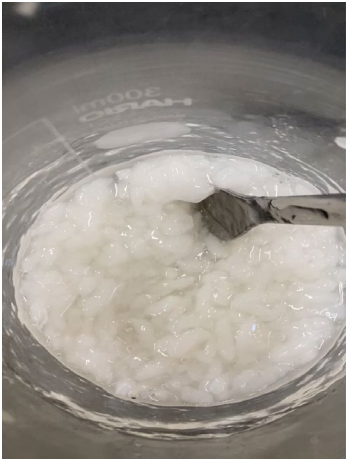
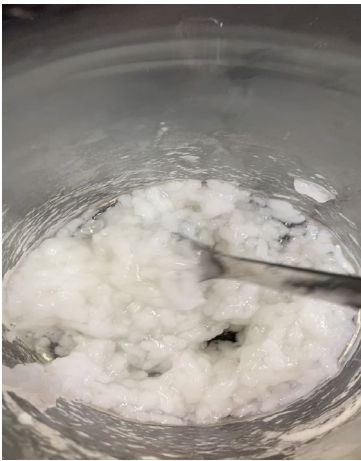
試料	食品名	エネルギー (kcal)	水分含量 <sup>2)</sup> (g)	たんぱく質 (g)	脂質 (g)	炭水化物 (g)	糖質 (g)	食塩相当量(g)
とろみ剤	森永クリニコ つるりんこ Quickly	270	—	0.5	0.0	88.9	67.0	2.4

1) 全粥はメーカーの栄養成分表示に記載されている値を100gあたりを示した、

2) 水分含量は栄養成分表示に記載されていなかったため、未記入とした。



表3-4     とろみ剤の濃度や性状について<sup>1)</sup>

とろみ剤の調製濃度 <sup>1)</sup>			
とろみ剤の濃度範囲	- 1.4%	コントロール	+ 2.8%
とろみ剤の添加濃度	1.3%	2.7%	5.5%
キサンタンガム含有率	0.4%	0.8%	1.6%
とろみの性状			
	スプーンを傾けるとずっと流れ落ちる。	スプーンを傾けても形状がある程度保たれ、流れにくい。	スプーンを傾けても形状が保たれ、流れるまでに時間がかかる。

<sup>1)</sup> とろみ剤はつるりんこQuikly（株森永）を用いた。添加濃度に合わせたとろみ剤を100mlのMilliQ水に加え、30秒間攪拌したもの（2回/秒）を使用した。

表3-5 GDSに供した「全粥」 および「全粥＋とろみ剤＋水」の栄養成分

試料	エネルギー (kcal)	水分含量 <sup>2)</sup> (g)	たんぱく質 (g)	脂質 (g)	炭水化物 (g)	食塩相当量(g)
全粥のみ <sup>1)</sup>	41	49.0	0.7	0.1	9.2	0.0
全粥＋とろみ剤(1.3%) <sup>3)</sup>	42	93.4	0.7	0.1	9.8	0.0
全粥＋とろみ剤(2.7%) <sup>3)</sup>	44	92.8	0.7	0.1	10.3	0.0
全粥＋とろみ剤(5.5%) <sup>3)</sup>	47	91.5	0.7	0.1	11.4	0.1

<sup>1)</sup> 全粥はメーカーの調理指示により調製し、栄養成分表示に記載されている値を60gあたりに算出した。

<sup>2)</sup> 水分含量は栄養成分表示に記載されていなかったため、105℃12時間の恒温乾燥法により算出した。

<sup>3)</sup> 全粥にとろみ剤を添加した栄養成分は、全粥60gにとろみ剤45gを添加した合計の栄養成分を算出した。

食品試料: 全粥・全粥+とろみ剤



図3-2 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる消化挙動の経時変化

食品試料:全粥

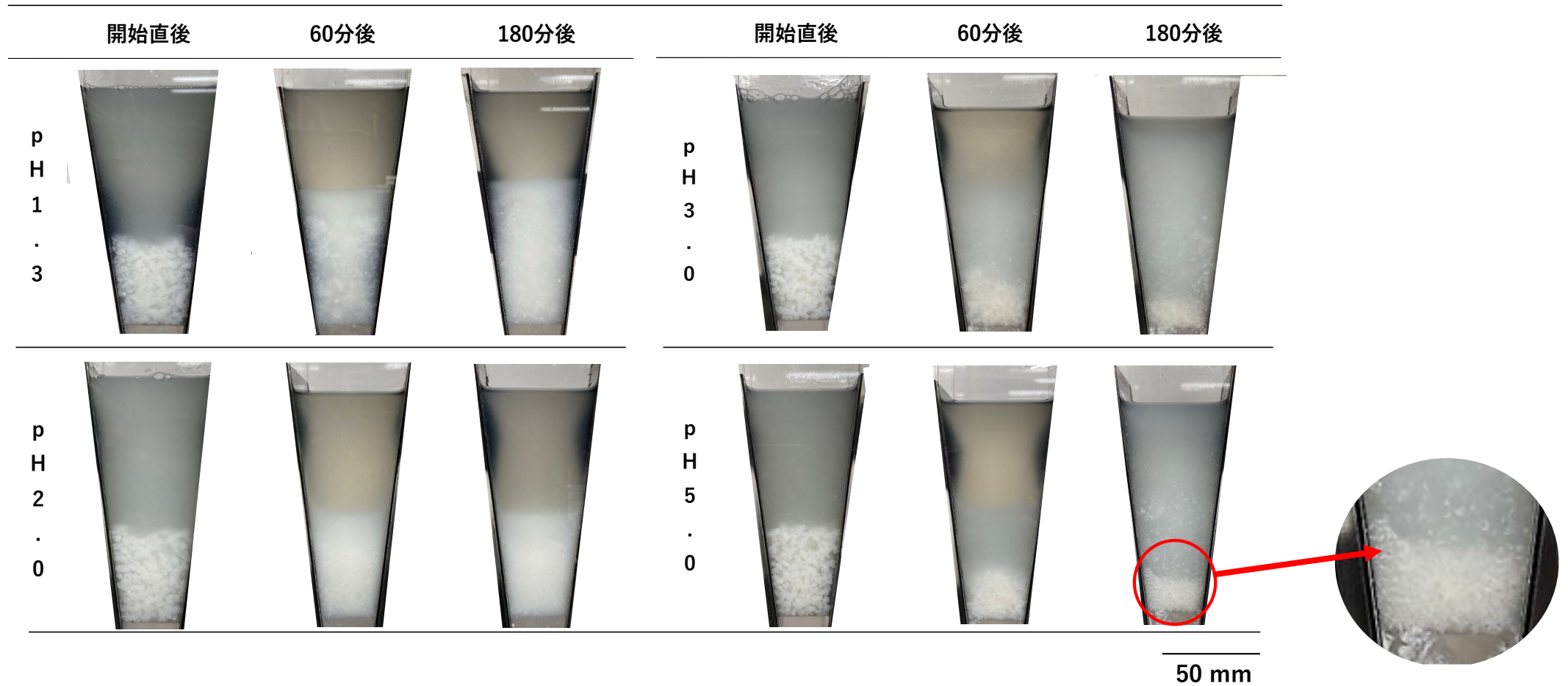


図3-3 胃内pH(人工胃液)の違いによる消化挙動の経時変化

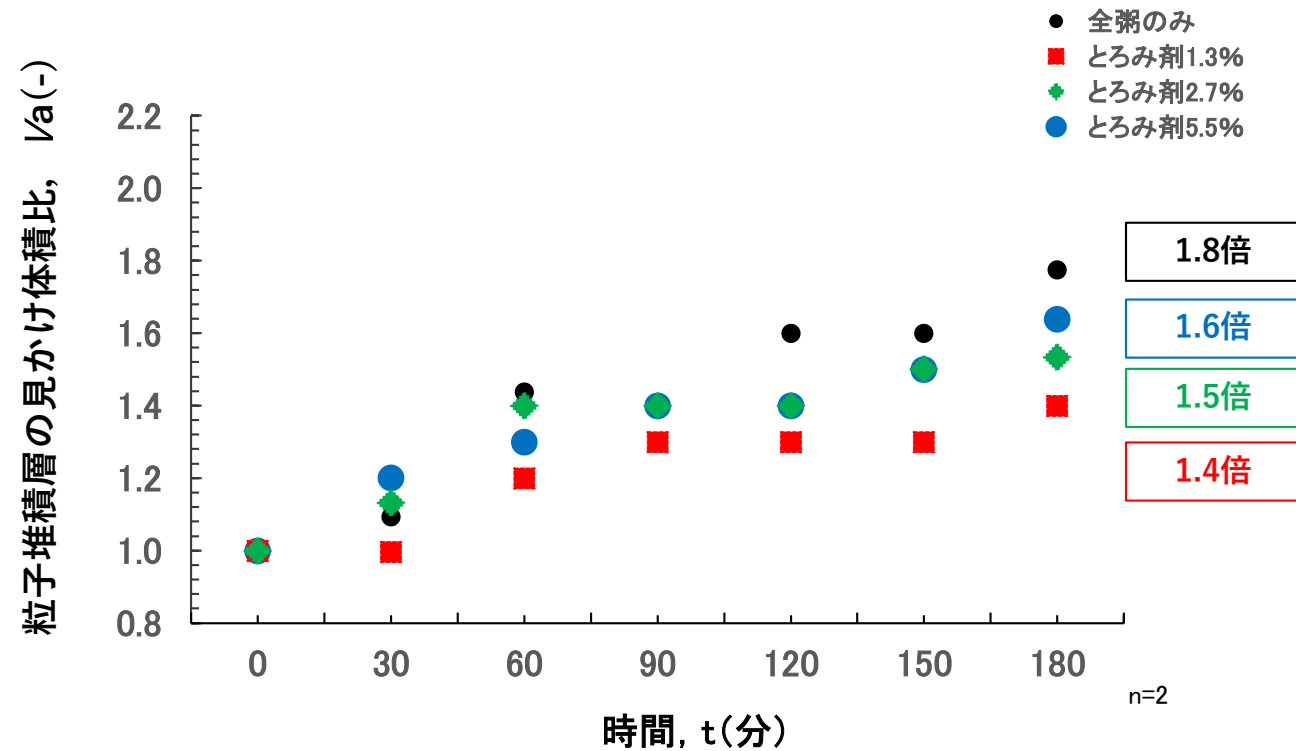


図3-4 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる粒子層の見かけ体積比

\* 食塊と胃液から構成される堆積層の初期見かけ体積を1とし、消化時間t(分)における体積比( $V_t, a$ )との比を指標として、時系列に算出・評価

見かけの体積比  $V_a = (V_t, a / V_0, a) \times 100$

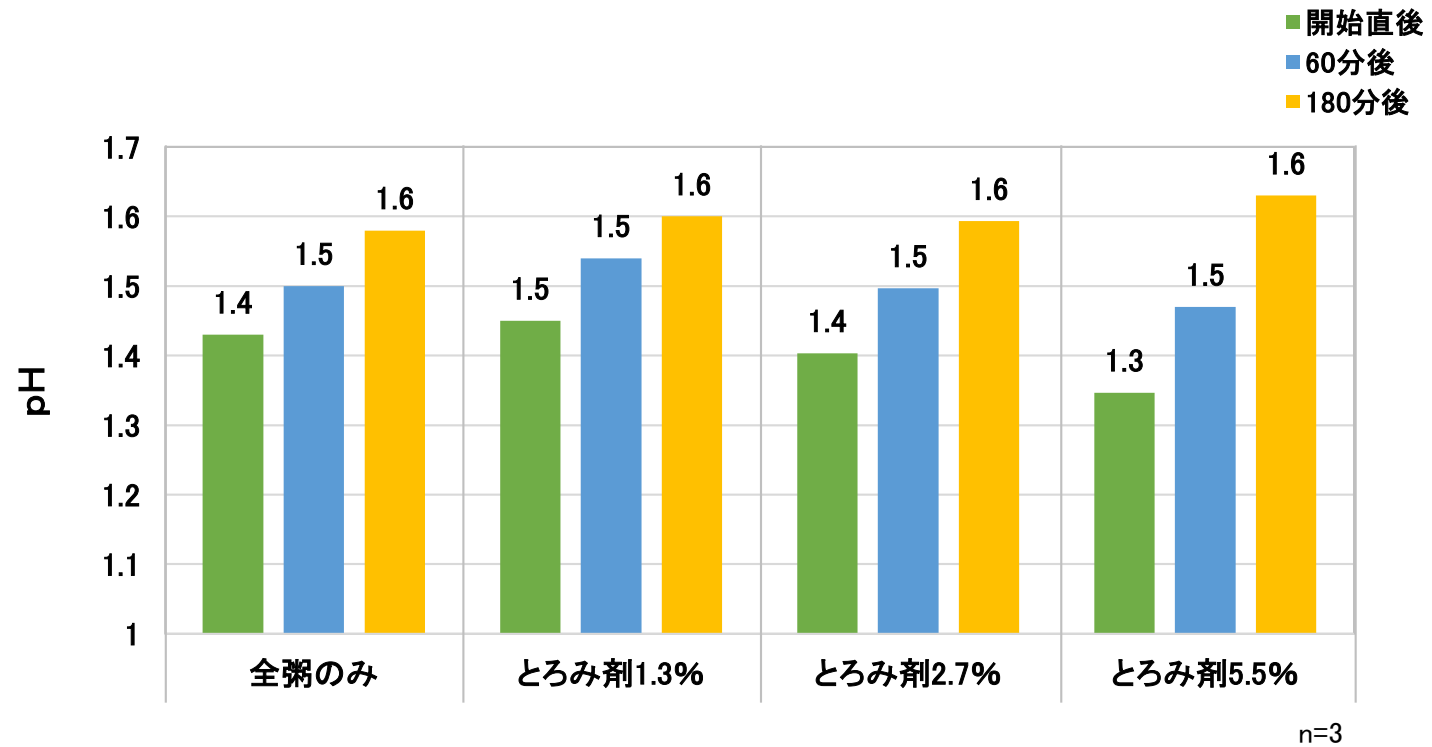


図3-5 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによるpHの経時変化

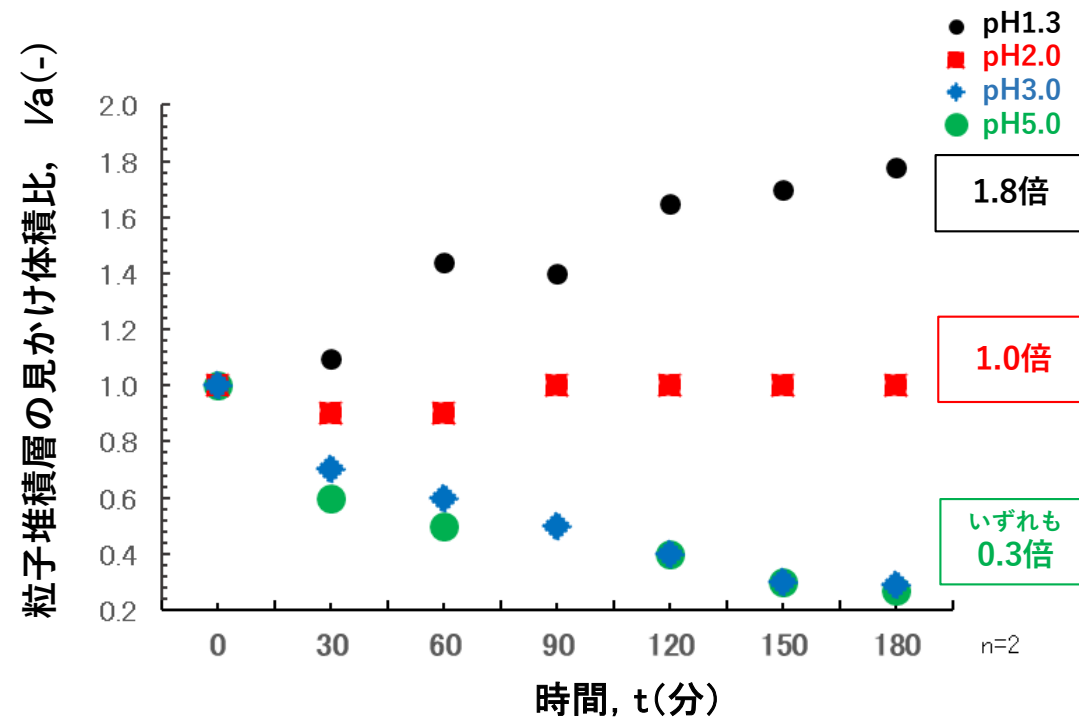


図3-6 胃内pH（人工胃液）の違いによる粒子層の見かけ体積比

\* 食塊と胃液から構成される堆積層の初期見かけ体積を1とし、消化時間t(分)における体積比( $V_{t,a}$ )との比を指標として、時系列に算出・評価

見かけの体積比  $V_a = (V_{t,a} / V_{0,a}) \times 100$

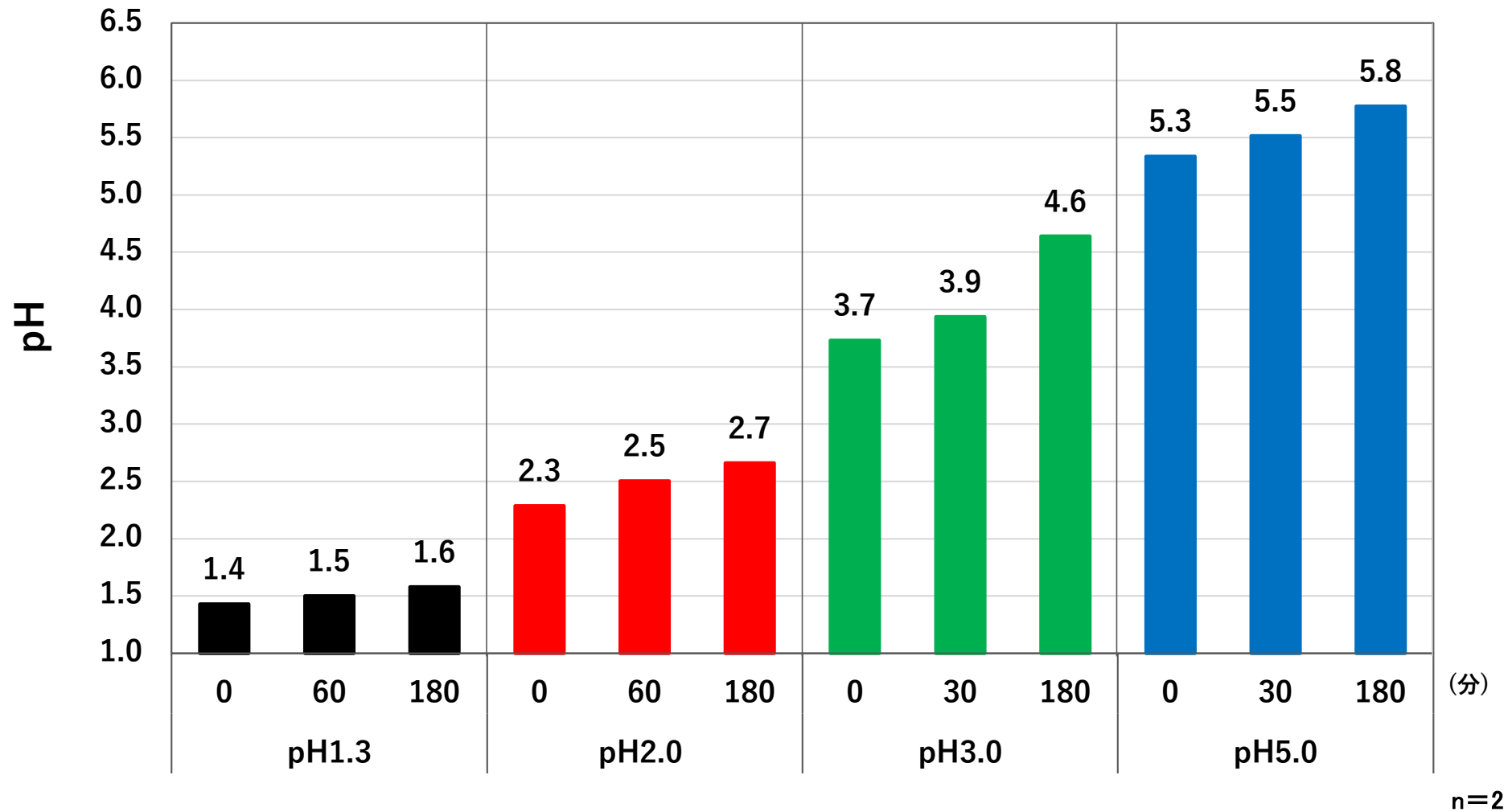


図3-7 胃内pH（人工胃液）の違いにおける胃内消化挙動によるpHの経時変化



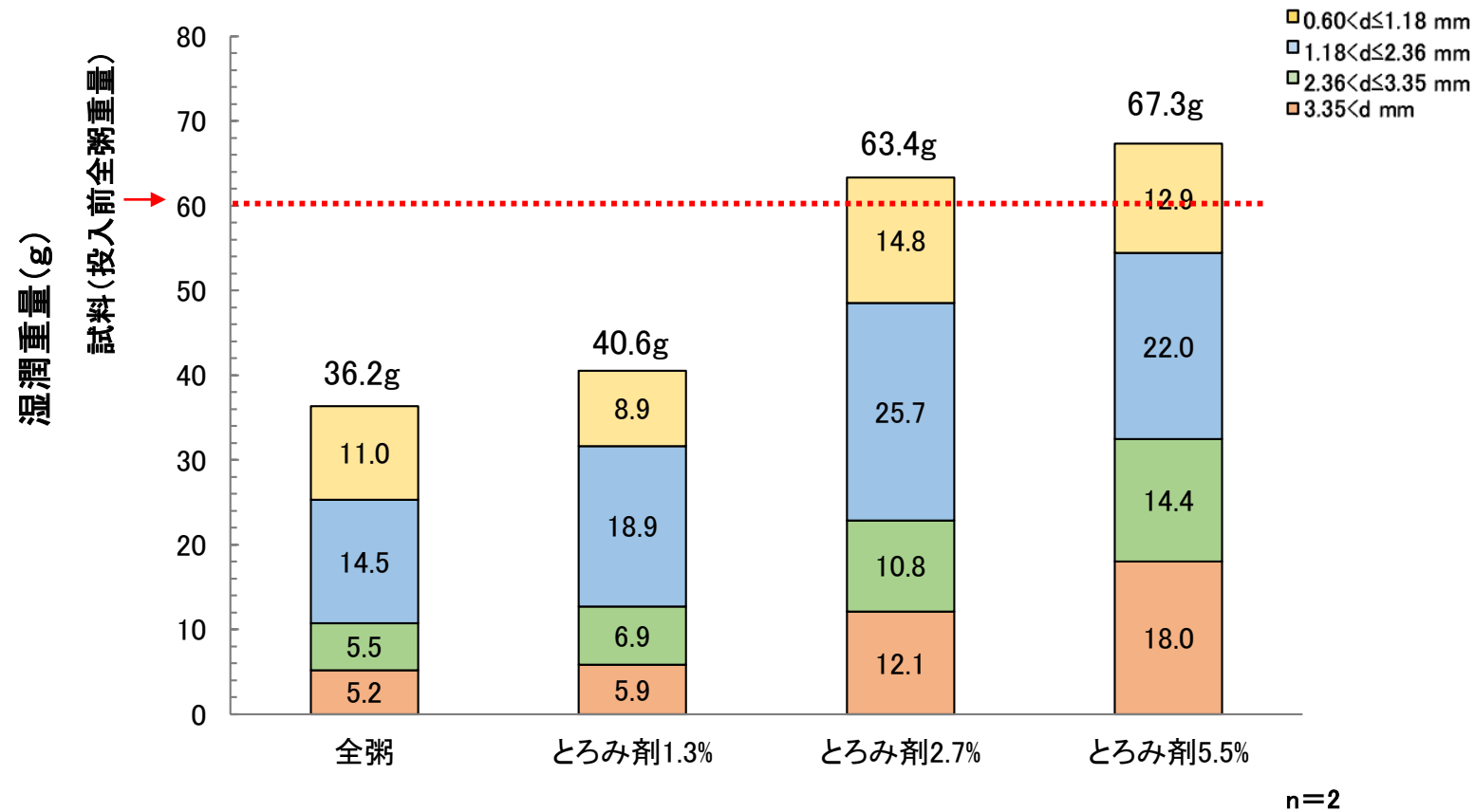


図3-8 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる介護食モデルの消化物, 180分後  
一湿潤重量とサイズ分布一

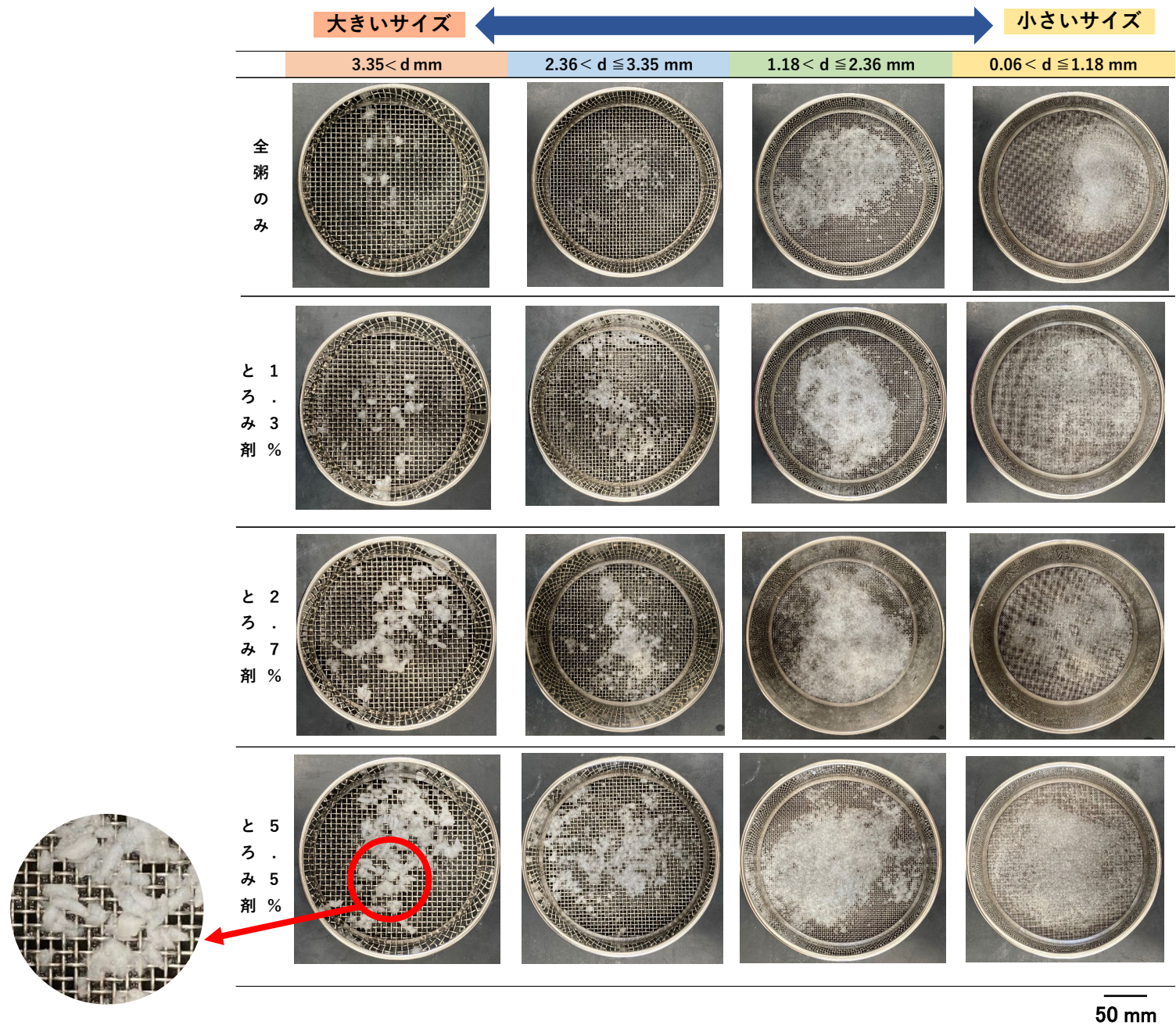


図3-9 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる各画分の粒子形態，180分後の消化物

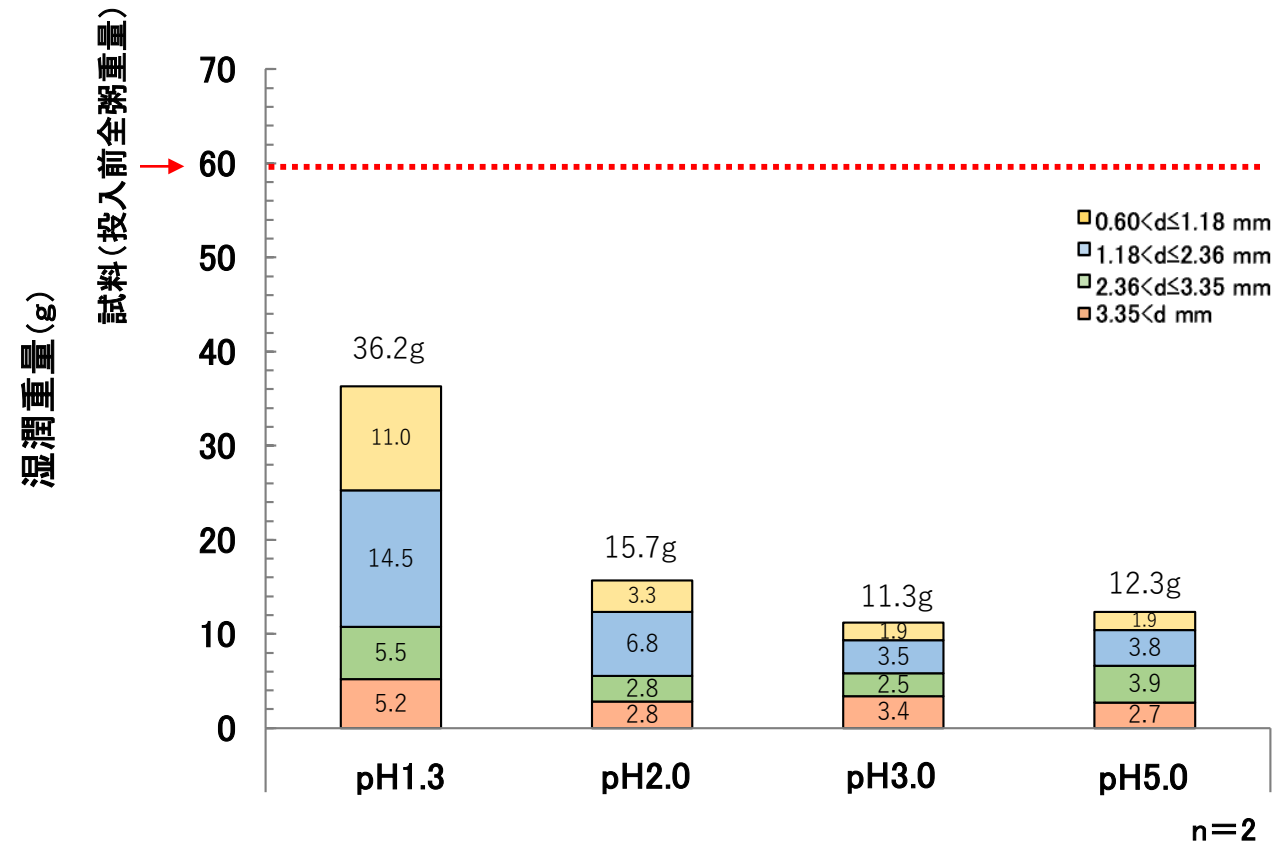


図3-10 胃内pH（人工胃液）の違いによる介護食モデルの消化物，180分後  
ー湿潤重量と粒子サイズ分布ー



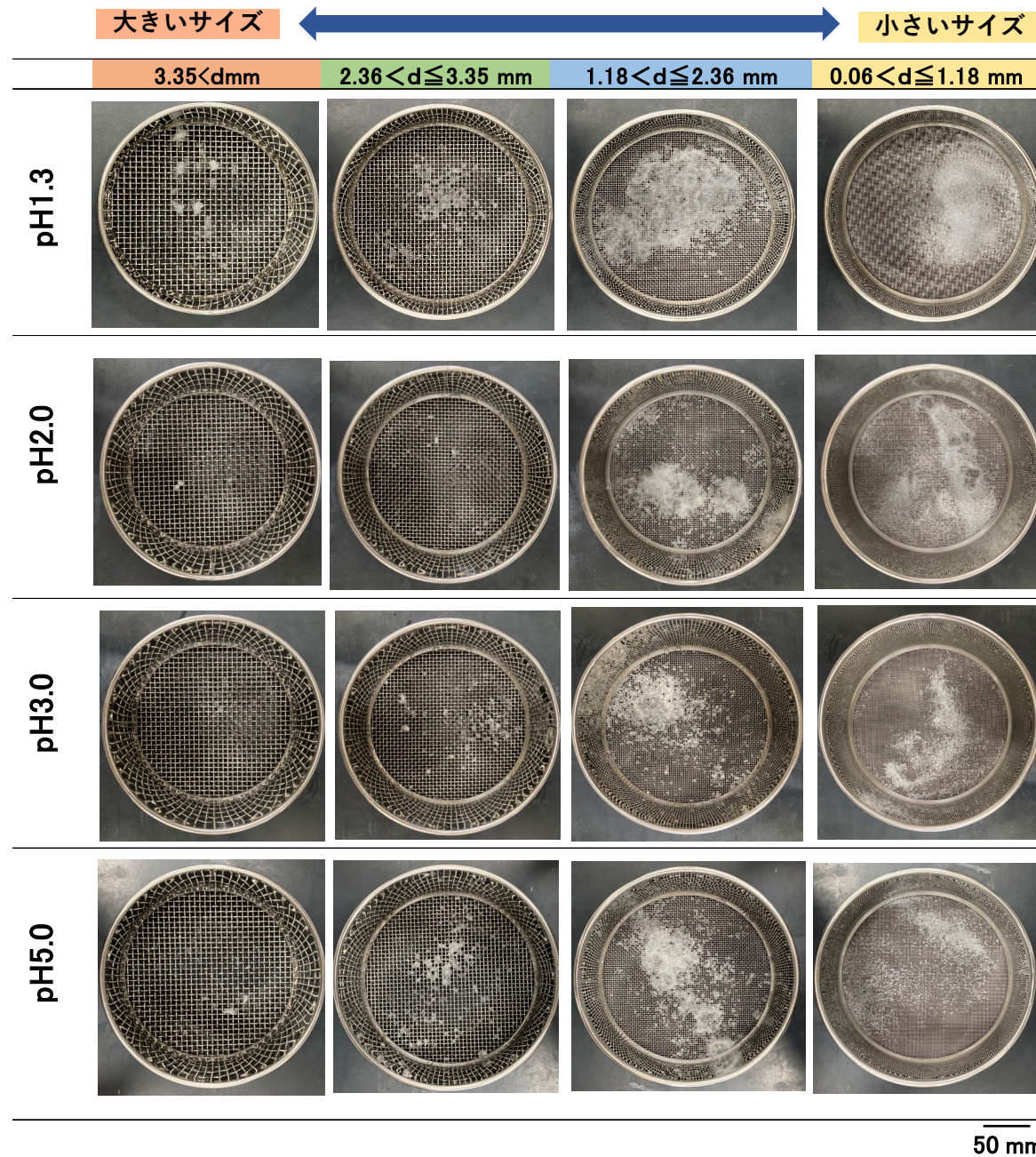


図3-11 胃内pH(人工胃液)の違いによる各画分の粒子形態, 180分後の消化物

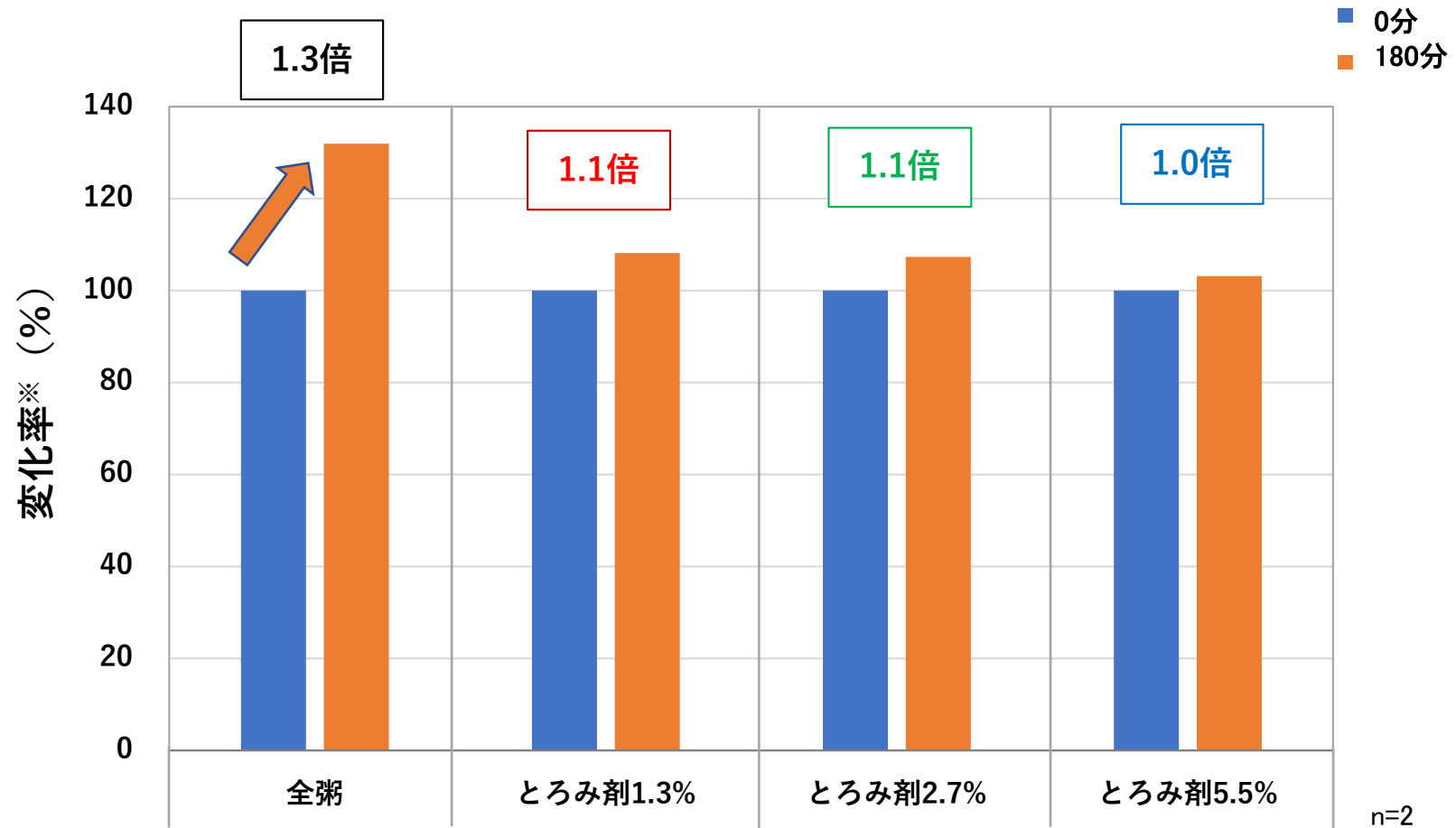


図3-12 とろみ剤添加の有無と濃度の違いによる介護食モデルのタンパク質の消化物, 合計面積 (AREA) の変化率

※ 0 時間の面積値を 1.0 とした場合の各時間の変化率 ( $A_t/A_0 \times 100$ ) を示した。

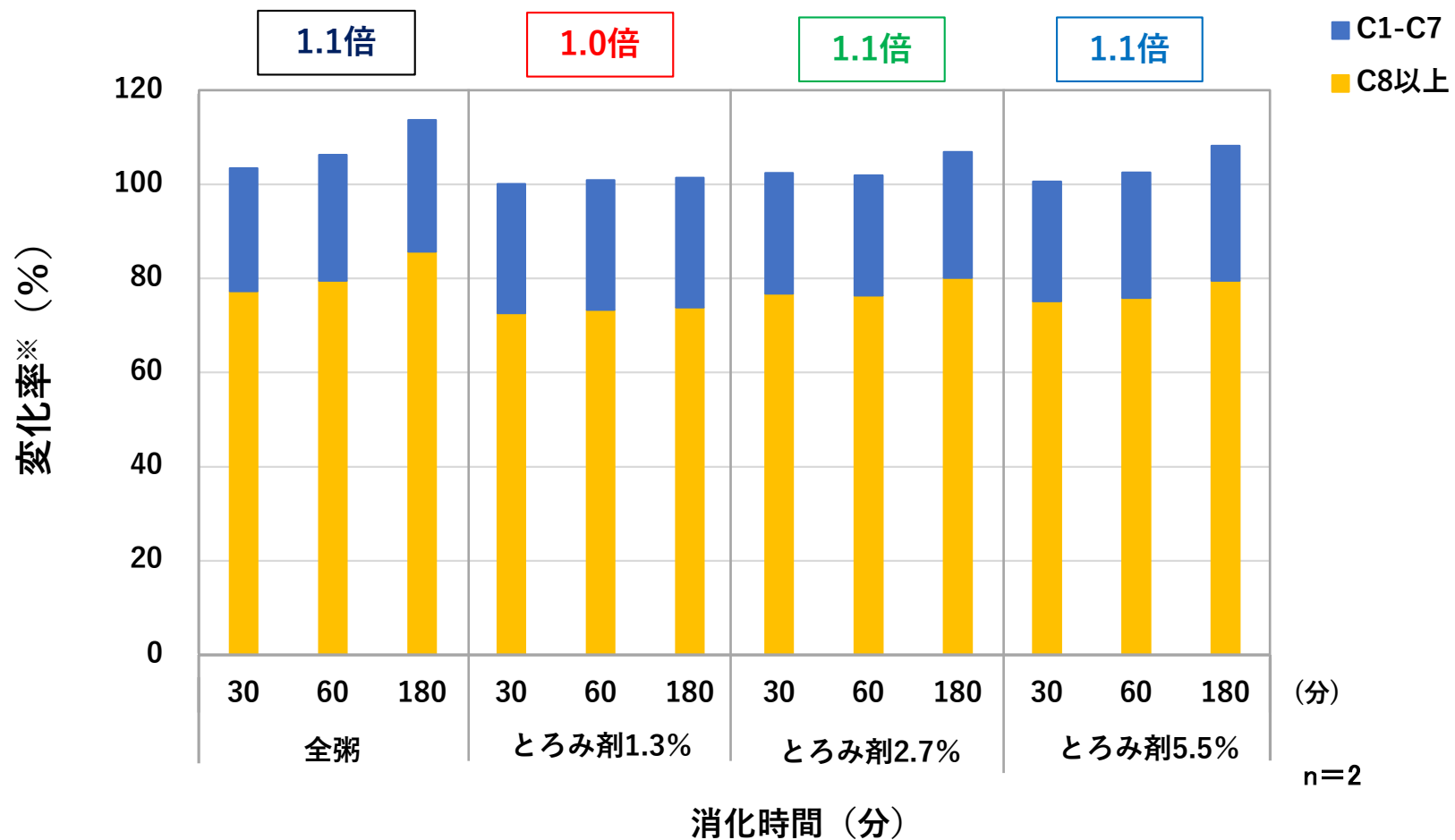


図3-13 とろみ剤添加の有無と濃度による介護食モデルの糖質の消化物, 合計面積(AREA)の変化率

※ 0 時間の面積値を1.0とした場合の各時間の変化率( $A_t/A_0 \times 100$ ) を示した。

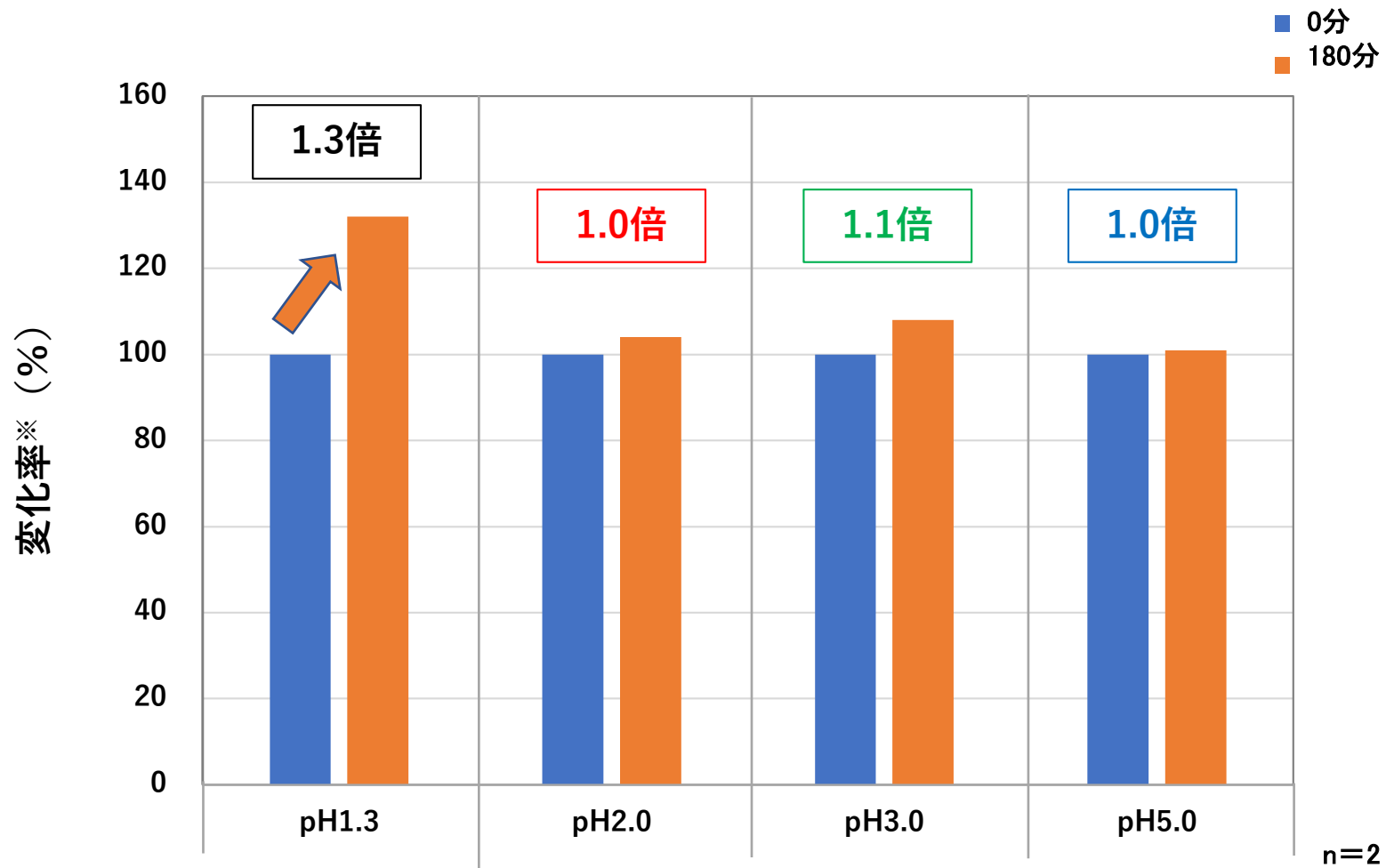


図3-14 胃内pH(人工胃液)の違いによるタンパク質の消化物, 合計面積(AREA)の変化率

※ 0時間の面積値を1.0とした場合の各時間の変化率( $A_t/A_0 \times 100$ )を示した。

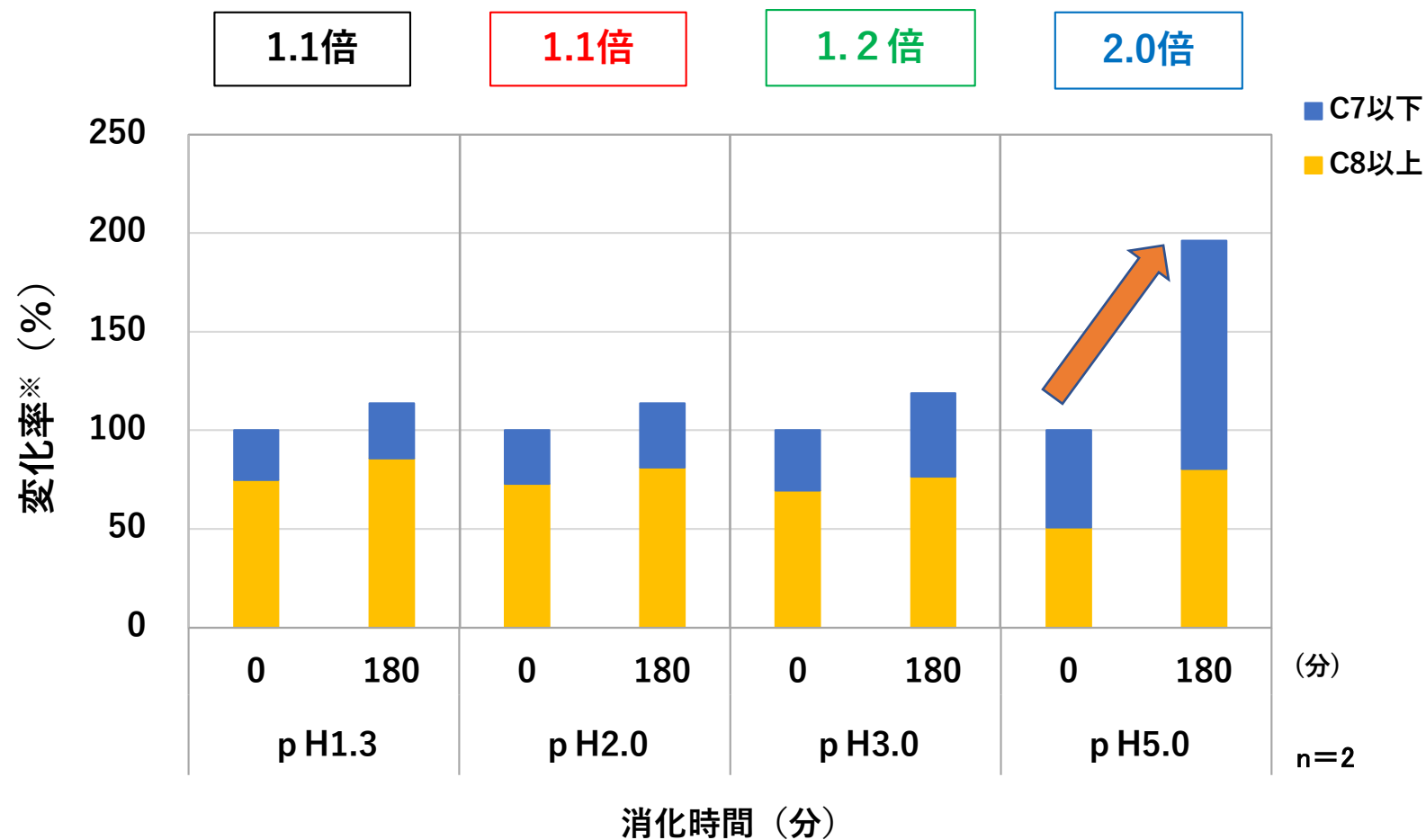


図3-15 胃内pH(人工胃液)の違いによる糖質の消化物, 合計面積(AREA)の変化率

※ 0時間の面積値を1.0とした場合の各時間の変化率( $A_t/A_0 \times 100$ )を示した。