

ヒト胃消化シミュレーター

～ 装置開発から食品応用まで ～

食品研究部門

食品健康機能研究領域

食品物理機能ユニット

小林 功

【はじめに】

世界に先駆けて超高齢社会に突入した日本において、人生 100 年時代の到来は夢物語ではなくなりつつある。超高齢社会の真っ只中にある日本における課題の一つとして、平均寿命と健康寿命の差の短縮が挙げられる。国内における高齢者向け食品の市場規模は 1,000 億円を突破しており、潜在的な市場規模はその数倍以上といわれている。日本を含む先進諸国では、高齢化に加えて生活習慣病の顕在化も問題になっており、ライフステージ毎の健康リスクの低減につながる消化性が適切に制御（促進、遅延）された食品に対する高い関心が寄せられている。

食品の消化プロセスは、咀嚼やぜん動運動による物理的消化、唾液や胃液等による化学的消化、および腸内細菌による生物的消化に大別される。ヒトの胃では、物理的消化と化学的消化ともに重要な役割を果たしている。胃内における物理的消化は、食品に含まれる脂質等の栄養成分の放出・消化挙動にも影響する。しかし、胃内での物理的消化を考慮した知見は不足しているのが現状である。本講演では、定量的なぜん動運動を具備したヒト胃消化シミュレーター（Gastric Digestion Simulator, GDS）の開発、および GDS を利用した食品粒子の微細化等の消化性評価について紹介する（文献 1）。

【ヒト胃消化シミュレーターの開発】

最初に試作された GDS（文献 2）の全体像を図 1 に示す。GDS の開発にあたり決定したコンセプトは、ヒト胃における消化プロセスの特徴を抽出・単純化して再現することである。そこで筆者らは、消化挙動に重要な影響をもたらす胃の部位、胃壁のぜん動運動、および胃内容物の流動を適切に模擬することを目指した。GDS の主な特徴は、胃消化に関わる物理的環境と化学的環境の模擬、ならびに食品粒子・成分の消化挙動の直接観察である。特に後者は、他の *in vitro* 胃消化試験装置では見られないユニークな特長である。

GDS の心臓部は、胃の下部である幽門部を模した容器（550 mL）である（図 1 の赤枠内）。GDS 容器の両側面に張られたゴム製シート上で発生・進行するぜん動運動は、成人を対象と

した *in vivo* 試験による知見（文献3）をもとに設計されている。このぜん動運動を駆動するローラーの材質は、胃内容物に作用する圧縮力に影響を及ぼす因子である。そのため、*in vivo* 試験による知見を参考にして、ローラーの材質改良が進められてきた（文献4）。GDS 容器内部で起こる消化挙動は、前後面の透明平板を介して直接観察することができる。また、消化試験中における GDS 容器の温度は、加温機器および保温器具の利用により、ヒトの体内温度（約 37 °C）を維持できるようになっている。

【ヒト胃消化シミュレーターを利用した固形食品の消化挙動】

筆者らは、市販食品や食品モデルを利用した GDS 研究を推進してきた（文献1）。ここでは、日本における代表的な固形食品の一つである豆腐を利用した GDS 研究により得られた成果（文献2）を中心に紹介する。絹ごし豆腐の特徴である「均質ゲルで整形しやすく、粒子サイズも容易に調整可能」「胃消化酵素の作用を受けるタンパク質が豊富」「品質のバラツキが少なく、安定的に入手可能」は、胃内で同時進行する物理的消化と化学的消化の影響の検討に好適である。図2は、GDS を用いた胃消化試験中における豆腐粒子の挙動の一例である。GDS 容器内に投入された豆腐粒子（5 mm 角の立方体）は、隣接する粒子間の相互作用による破断・摩砕といった不規則な微細化が起きるとともに、粒子表面の緩やかな崩壊による液層上部の白濁化も観察された。一方、振とう法による *in vitro* 胃消化試験では、豆腐粒子の立方体状を維持したまま縮小することがわかった。試験終了後に胃消化物を分級したところ、幽門の内径（2 mm 程度）よりも小さな豆腐粒子の割合が GDS では約 70%（乾燥重量基準）に達したのに対し、振とう法では約 40%（乾燥重量基準）に留まった。以上の結果より、胃のぜん動運動が定量的に模擬された GDS は、固形食品の（物理的）胃消化挙動の検討に有用であることが示唆された。

GDS 研究の実施により、人工胃液の影響を受けにくい食品モデル（ハイドロゲル）の力学特性が粒子の微細化挙動に与える影響についても有意義な知見が得られてきた（文献4,5）。胃消化における食品粒子の微細化が、破断応力（硬さ）よりも破断歪率（脆さ）の影響を受けやすいことを示唆する結果が得られている。また、エマルションゲルを利用した GDS 研究においても、力学特性がゲル粒子の微細化および含有栄養成分（微小油滴）の放出挙動に影響を及ぼすことが報告されている（文献4）。GDS はさらに、不均質な食品粒子である米飯の *in vitro* 胃消化特性の検討にも用いられており、米飯粒子の微細化や膨潤ならびに糊化成分の放出などの特徴的な挙動が観察された（文献6）。GDS を利用した研究は、ほかの食品（モデル）にも対象を拡大して実施されている。筆者らは最近、人工胃液の連続供給および胃消化物の排出が可能な機構を備えた連続型 GDS を開発し（文献7）、本装置の改良を鋭意進めているところである。

【おわりに】

GDS を利用した一連の研究（筑波大学と共同）より、胃のぜん動運動が関与する物理的消化プロセスが食品の胃消化に重要な役割を果たしていることが強く示唆された。GDS に関わる今後の研究開発により、食品の胃消化プロセスに関する知見や消化性が制御された食品（脂質含有食品、スマイルケア食、機能性食品等）の設計・開発に有用な知見の蓄積が期待されるとともに、GDS 自体の改良も進展するものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 小林ら（2018）日本食品科学工学会誌 **64**:543-55
- 2) Kozu H. *et al.* (2014) *Food Sci. Technol. Res.* **20**:225-233
- 3) Pal A. *et al.* (2004) *Proc. Biol. Sci.* **271**:2587-2594
- 4) Kozu H. *et al.* (2018) *Japan J. Food Eng.* **19**:89-10
- 5) Kozu H. *et al.* (2015) *Japan J. Food Eng.* **16**:161-166
- 6) Wang Z *et al.* (2015) *Food Res. Int.* **71**:16-22
- 7) Kozu H. *et al.* (2017) *Biochem. Eng. J.* **122**:85-90



図1 ヒト胃消化シミュレーターの全体写真

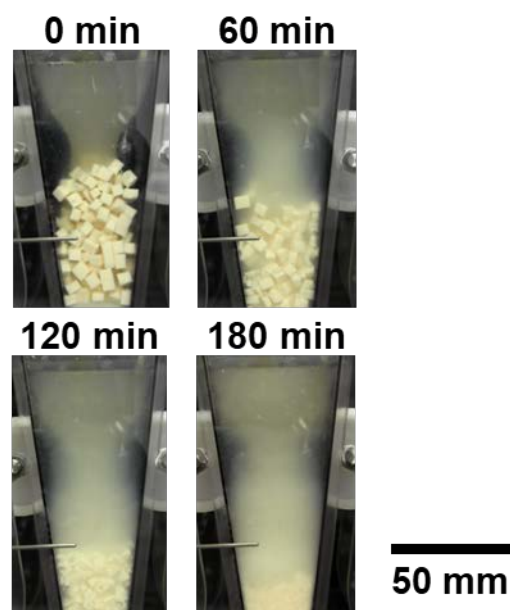


図2 ヒト胃消化シミュレーター内部における絹ごし豆腐粒子の *in vitro* 胃消化挙動