

氏名（本籍）	WANG ZAITIAN		
学位の種類	博 士（生物工学）		
学位記番号	博 甲 第 9734 号		
学位授与年月日	令和 2 年 12 月 31 日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	生命環境科学研究科		
学位論文題目	Effect of Mechanical Properties of Model Food Hydrogels on Their Digestibility Using Gastric Digestion Simulator (モデル食品ハイドロゲルの力学特性が消化性に及ぼす影響の胃消化シミュレーターを用いた評価)		
主査	筑波大学教授	博士（工学）	市川 創作
副査	筑波大学教授	博士（農学）	青柳 秀紀
副査	筑波大学准教授	博士（農学）	Marcos Antonio das NEVES
副査	筑波大学教授（協働大学院）	博士（農学）	小林 功

## 論 文 の 要 旨

世界的な社会状況の変化や人口変動に伴い、人々の年齢や健康状態に応じて適切な栄養摂取ができる消化性が制御された食品の開発が求められている。ヒトの消化管における食品の消化過程では、固形物の微細化などの物理的消化と、消化酵素の作用などによる化学的消化が進行する。特に、固形食品については、物理的消化が重要な役割を果たしていると考えられる。摂取された固形食品は口腔内で咀嚼による物理的消化を受け、嚥下により食道を通過して胃へと送られる。胃壁はぜん動運動を行っており、この胃壁のしごき運動も固形食品の物理的消化に寄与すると考えられる。しかしながら、胃における固形食品の消化は、口腔内消化と比較して評価が困難であるため十分な知見が得られておらず、本論文で著者は胃における固形食品の消化に影響を及ぼす因子としてその力学特性に着目した。著者は、異なるゲル化剤を組み合わせることで力学特性が異なるハイドロゲルを調製し、これを固形食品のモデルとして利用することで、固形食品の消化性に対する力学特性の影響を系統的に評価できるとの着想から研究を行った。食品の消化に関する研究は、ヒトを被験者とした *in vivo* 試験が行われているが、実験的制約などから得られる情報が限られている。このため、振とうフラスコなどを用いた *in vitro* 消化試験が行われているが、胃のぜん動運動による物理的消化影響を評価できない。そこで、著者はぜん動運動の機能を具備し、ヒト胃の物理的な消化環境を模擬した *in vitro* 胃消化試験装置であるヒト胃消化シミュレーター (Gastric Digestion Simulator; GDS) を使用し、モデル食品ハイドロゲルの消化性に対する力学特性の影響を評価した。

はじめに、著者はGDSとヒト胃の物理的消化環境の模擬性を定量的に検証するため、既往の研究で報告されているヒト胃における球状寒天ゲルの *in vivo* 消化試験と同等の試験を、*in vitro* 胃消化試験装置 (GDS) で実施した。GDS消化試験における球状寒天ゲルの経時的な崩壊過程を観察し、崩壊の半減期を求めた。その結果、GDS における寒天ゲル崩壊の半減期は、ヒトにおける試験と同じ寒天濃度を閾値として大きく変化することを明らかにした。この結果から、GDSがヒト胃の物理的消化環境と高い模擬性を有することを示した。

次に著者は、固形食品の物理的消化に対する食品の力学特性の影響を系統的に調べた。固形食品のモデルとして、寒天とネイティブ型ジェランガムを異なる濃度で混合することで、破断応力と破断ひずみ率を独立に制御したハイドロゲルを調製できることを示した。これらのハイドロゲル（一辺5 mmの立方体）を使用してGDSによる消化試験を行い、ハイドロゲルの破断ひずみ率が閾値を越えると、ハイドロゲルの微細化の程度が顕著に低下することを明らかにした。この閾値よりも破断ひずみ率が低いハイドロゲルでは、破断応力の増大に伴い微細化が抑制された。一方、破断ひずみ率が閾値よりも高いハイドロゲルでは、微細化に対する破断応力の影響はほとんどみられなかった。また、得られた知見を総合的に考察し、ハイドロゲルの力学特性に応じた微細化機構のモデルを示した。

さらに著者は、栄養成分が含まれる固形食品のモデルとしてトウモロコシデンプンを含むハイドロゲルを作製し、胃および小腸における消化挙動を評価した。異なる力学特性を有する4種類のデンプン含有ハイドロゲル（一辺5 mmの立方体）を使用し、連続的な胃液の分泌と胃消化物の腸への排出を模擬した連続型ヒト胃消化シミュレーターを使用して胃における消化を評価するとともに、排出された胃消化物を人工小腸消化液により消化し、小腸における消化挙動も評価した。その結果、デンプン含有ハイドロゲルの力学特性より、胃から腸へのハイドロゲル粒子、ならびにデンプンの排出・消化挙動が異なることを明らかにした。この結果から著者は、同等の栄養成分が含まれている固形食品であっても、その力学特性により胃から小腸への経時的な排出および消化挙動が異なることを示唆した。

以上、本論文において著者はハイドロゲルをモデル固形食品として使用し、その消化性に対する力学特性の影響を系統的に明らかにした。

## 審 査 の 要 旨

本論文で著者は、ぜん動運動の機能を具備し、ヒトの胃の物理的消化環境を模擬した*in vitro*胃消化試験装置であるヒト胃消化シミュレーターを使用し、モデル食品ハイドロゲルの消化性に対する力学特性の影響を評価した。その結果、ハイドロゲルの力学特性である破断応力と破断ひずみ率が、胃における微細化に影響し得ることを、はじめて定量的に明らかにした。また、ハイドロゲルの力学特性を指標とした胃における微細化機構のモデルを示した。さらに、デンプンを含むハイドロゲルを使用した消化試験により、固形食品の力学特性により栄養成分の消化挙動が異なることを示唆した。本論文はこれまで十分な検討が行われていない固形食品の消化性に対する力学特性の影響を、*in vitro*消化試験により系統的かつ定量的に評価しており、ヒト消化管における固形食品の消化挙動に関する意義ある学術的な成果であると共に、消化性が制御された食品開発に有用な基礎的知見を提示する成果として高く評価される。

令和2年11月10日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもとに論文の審査及び最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士（生物工学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものとして認める。