

調理科学における重力の影響の検討 その2 ～メカニズム解明と過重力加熱調理～

宮城大学食産業学群・教授 石川 伸一

■ 緒言

現在、宇宙での長期滞在や居住、月面基地計画の実現を目指した様々な研究が行われている。最新の月探査宇宙ミッション計画を示す国際宇宙探査ロードマップ GER(Global on Exploration Roadmap)では、将来的に月や火星など地球以外の惑星居住も想定されており、人間と生物を共存させることで、人類の生命活動に必要な水や空気、食料など供給する物質循環システムの構築が計画されている¹⁾。

数年単位の長期宇宙滞在を想定した場合、保存性の優れた調理済みの宇宙食のみに頼ることなく現地資源を用いて持続的な食料生産および加工・調理を可能にする技術開発が必要となる。これらを踏まえ、今後調理学の研究分野にも宇宙環境で有効な調理方法や調理機器の提案・提供を求められることが予想される。これらの現在まで行われている研究のうち、宇宙での食品製造法や過重力変化と調理に関する研究は一部で報告されているものの微小重力環境が調理現象に及ぼす影響についてはほとんど報告されていない。

微小重力の影響を解析するためには、重力の影響をできるだけ排除した環境下で実験を行う必要がある。宇宙空間の特徴である重力変化の影響を検討する際には、クリノスタット(試料回転装置)を用いることで、重力の持つ特性のうち方向性を除去した状態での実験が可能となる²⁾。クリノスタットは重力生物学の実験手段として百数十年以上前から利用され、植物の重力屈性などの知識の集積に有効な手段として認められてきた。そこで本実験では、本研究では、クリノスタットを用い、模擬微小重力および過重力環境が基礎的な調理現象に及ぼす影響について調べることを目的として、米の吸水、パンの膨化およびヨーグルトの発酵の3つを取り上げ、それぞれの重力変化の影響について検討を行った。

■ 方法

1. 米の吸水実験

重力変化はクリノスタット(Zeromo CL-1000, ヤマト科学)を用い、模擬的な微小重力(1/1000G)の環境条件下での実験を行った。クリノスタットは冷凍機付きプログラム低温恒温器(IN604, ヤマト科学)内に設置し、温度を一定に保った。1G環境の実験はインキュベーター内クリノスタットの隣に試料を静置して行った。

実験には、うるち米(コシヒカリ, 新潟県産), もち米(こがねもち, 新潟県産), 玄米(コシヒカリ, 新潟県産)を用いた。米重量に対し水の重量が1.5倍となるように、米16gに対し水24gを組織培養用フラスコ(型番:353107, Falcon)に空気が入らないように入れ、クリノスタットに設置した(1/1000G条件)。1G条件はフラスコをインキュベーター内に静置した。各重力環境下において、5°C, 25°C, 50°Cの浸漬温度, 60分, 120分, 180分の浸漬時間となるような条件で吸水実験を行った。吸水後フラスコ内部の米を取り出し、キムタオルで表面の水分を軽くふき取ったのち、米粒の重量を測定し、以下の式によって水分を算出した。

$$\text{吸水率(\%)} = (\text{浸漬後の米重量} / \text{浸漬前の米重量}) \times 100$$

統計解析は統計ソフト KaleidaGraph 5(ヒューリンクス)を用いて、対応のあるt検定により行った。有意水準は5%とした。

2. パンの膨化実験

実験には市販の冷凍パン生地(「国産小麦の食パン」生地, 敷島製パン)を用いた。冷凍貯蔵しておいた冷凍パン生地を密閉しながら25°Cで150分間解凍後、こねて再度25°Cで30分間放置することで生地休めを行った。その後、フラスコ内に入る自作したパン型に成形した生地を5.0gずつ入れた。パン型は型ごと焼成を行うことを想定し、牛乳パックに耐熱アルミテープを巻いた型(内寸:縦17mm, 横34mm, 高さ37mm)を作製した。フラスコ内のパン生地を各重力条件下で、25°Cの温度下で発酵を行った。発酵時間は60分, 90分, 120分とした。発酵後、フラスコからすみやかにパン型を取り出し、X線CT(NAOMI-CT 3D-L, アールエフ)で内部構造を確認後、そのまま200°Cに予熱

したオーブン(Anova Precision™ Oven, Anova Applied Electronics)中で5分間焼成した。焼成したパンは、菜種置換法を用いて体積を算出し、体積と重量からその比容積を求めた。さらに、X線CTで確認したパンの内部構造に対し、画像解析・計測ソフトウェア WinROOF 2021(Mitani Corporation)を用いてパンの断面積における気泡の割合を算出した。

3. ヨーグルトの発酵実験

市販の牛乳(おいしい雪印メグミルク牛乳, 雪印メグミルク)を中心温度75°Cで5分間加熱した。中心温度が35°C以下になるまで氷冷した後、牛乳1Lに対し、市販のヨーグルト種菌{ABCT種菌(アシドフィルス菌GL-1, ビフィズス菌BL-730, カゼイ菌CS-107, サーモフィルス菌), タニカ電器}を2g入れ、十分攪拌した。その後フラスコに試料を空気が入らないように充填し、1/1000G環境下の実験ではクリノスタットに設置し、1G環境下はインキュベーター内に静置した。40°Cで12, 24, および48時間発酵を行った。発酵後、フラスコ内の試料を十分に攪拌し、pHはpH計(PH-220Spaer, サトテック), 糖度(Brix値), 酸度(総酸乳酸換算値)はヨーグルト用糖酸度計(PAL-BX|ACID96, ATAGO), 乳酸菌数はペトリフィルム(乳酸菌数測定用プレート(LABプレート), 3M)を用いてそれぞれ測定した。pHと酸度の測定には原液試料を、糖度は蒸留水で50倍に希釈した試料溶液をそれぞれ用いた。乳酸菌数は24時間発酵後の試料を100,000倍に希釈してペトリフィルム上に培養させた。

■ 結果及び考察

1. 重力が米の吸水に及ぼす影響

異なる重力環境下における米の浸漬後の吸水率(%)の結果を図1～3に示す。うるち米の吸水率は5°Cでは重力の違いは見られなかったが、25°C120分, 180分浸漬及び50°C60分, 120分浸漬において1/1000Gの模擬微小重力環境下で浸漬を行った米の吸水率が1Gと比較して有意に低下した。先行研究において、うるち米へ水の浸漬温度と時間を変化させた実験において、どの温度帯も60分付近でほぼ吸水率が飽和となった³⁾ことから、本実験においても60分から180分にかけては吸水率に変化がなかったものと考えられる。また、5°C浸漬では有意差がみられず、25°C, 50°C浸漬で1/1000Gの吸水率が1Gと比較して有意に低下した要因として浸漬温度の違いが考えられる。

もち米の吸水率は一般的にうるち米より高くなると言われており、本研究においても同様の結果となった⁴⁾。もち米の吸水率は5°C, 60分, 180分浸漬, 25°Cや50°Cに関してはすべての浸漬時間において1/1000Gの模擬微小重力環境下で浸漬を行った米の吸水率が1Gと比較して有意に低下した。これはもち米がうるち米と比較して膨張しやすく粘性が大きいアミロペクチンが多く含まれていることで米の内部に水が浸透しやすいことから、低温かつ吸水時間が最も短い実験条件である5°C60分浸漬の段階で1/1000Gと1Gの間で吸水率に有意差がみられたのではないかと考えられる。

玄米の吸水率は、5°C, 180分浸漬, 25°Cすべての浸漬時間において1/1000Gの模擬微小重力環境下で浸漬を行った米の吸水率が1Gと比較して有意に低下した。本実験においても、水分率の実験と同様に、うるち米やもち米と比較して吸水が緩やかであった。玄米はうるち米やもち米と比較して、糠部を含むためタンパク質, 脂質, 灰分, 無機質, ビタミン, 食物繊維などが多く含まれているがその分吸水が進みにくい。玄米の果皮・種皮にはセルロース・ヘミセルロース, リグニンなどの消化性の悪い成分が含まれているため、果皮は軟化しにくく、玄米飯の硬さやぼそぼそ感に影響しており、温度間における吸水率の上昇幅に大きな差があり吸水が進みにくい。そのため、5°C180分浸漬や25°Cのすべての浸漬時間では有意差がみられ、50°C浸漬ではどの浸漬時間においても有意差が見られなかったと考えられる。

2. 重力がパンの膨化に及ぼす影響

図4に示したパンの比容積の結果からは、発酵に伴い1Gと1/1000Gどちらも比容積が減少傾向となったものの外観も含め1Gと1/1000G間における差は見られなかった。内部構造を解析した際のパン全体の面積に対する気泡率の結果(図4)から、60分発酵において気泡割合が1Gと比較して1/1000Gで有意に高くなった。このことから、模擬微小重力環境下で発酵を行ったパンの内部構造においては、発酵初期段階でのパンの断面積に占める気泡割合の増加が1Gと比較して促進されるのではないかと考えられる。

3. 重力がヨーグルトの発酵に及ぼす影響

異なる重力環境下で12, 24, 48時間発酵を行ったヨーグルトのpH, 糖度, 酸度および乳酸菌数の測定結果を図5～6にそれぞれ示す。pHは、本実験の発酵初期段階の12時間後では、1/1000Gでは6.1前後に対し、1Gでは4.13～4.17と有意に低下したことから重力変化における明確な違いが

みられた。24時間後では、1/1000G環境下が3.99～4.00と1G環境下である4.01～4.15と比較して低下傾向であったものの有意差は見られなかった。一方で48時間後では、1/1000Gが3.73前後であったのに対し、1Gが3.68前後まで低下し、有意なpHの低下がみられた。

糖度は、12時間後では1Gでは6.7%前後、1/1000Gでは13%前後であり、1/1000Gと比較して1Gで有意に低下した。24時間後では1Gでは7.2%前後、1/1000Gでは5.9%であったが、両群間に有意差は見られなかった。48時間後では、1Gでは6.7%前後となり減少し、1/1000Gでは6.3%前後まで増加したことによって重力間でも増減に違いが見られたが、有意差は見られなかった。

酸度は、発酵開始後から12時間後において、1/1000Gでは発酵直後から変化はなかったものの1Gでは0.48前後まで上昇し、1/1000Gと比較して有意に増加した。24時間後では1Gおよび1/1000Gどちらも増加がみられ、1/1000Gと比較して1Gで増加幅が大きいものとなったが、48時間後ではほぼ同じ値となった。

1Gと1/1000Gそれぞれの経時的変化に伴う乳酸菌数の変化について一元配置分散分析およびTukey法を行った結果、1Gに関しては0時間発酵と比較して24時間発酵で有意に増加し($p<0.01$)、1/1000Gに関しては0時間発酵と比較して12時間発酵で有意に増加し($p<0.05$)、24時間発酵でも有意に増加した($p<0.01$)。

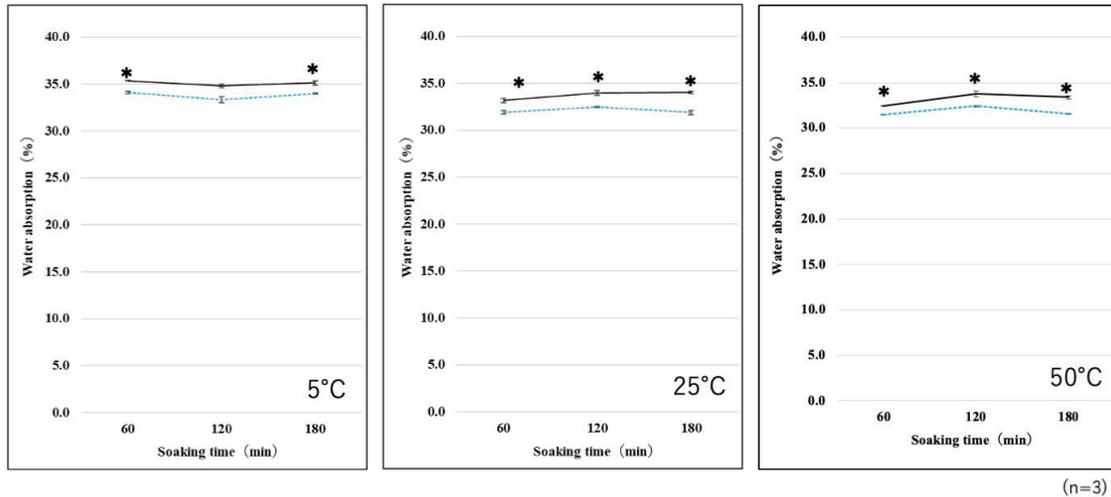
模擬微小重力環境下でヨーグルトの発酵が抑制される原因として、乳酸菌などの微生物の重力応答への影響がまず考えられる。ラットの骨髄細胞を模擬微小重力環境に暴露することで細胞分化が抑制され、未分化状態が維持されることや⁵⁾、モデル生物線虫を用いた実験では微小重力環境が筋形成に抑制的に働き、遺伝子発現や修飾機構の制御に至っていること⁶⁾などが報告されている。ヨーグルトの発酵過程においても、模擬微小重力環境が乳酸菌などの微生物の増殖、遺伝子発現、生理活性などに影響を与えている可能性が考えられる。

■ 要 約

模擬微小重力下で調理現象を調べた本研究成果は、今後宇宙等で調理を行う上での基盤となると思われる。これら重力が調理に及ぼす影響のメカニズムに関する知見を蓄積することや、調理そのものの以外にも調理動作や喫食者の身体的変化についても包括的に研究を進めることで、「宇宙調理学」の創成へとつながると考えられる。さらに重力が調理に及ぼす影響のメカニズムに関する知見を蓄積することで、日常の調理においても「重力」を調理の観点に入れた新たな食の多様性にも貢献できると考えられる。

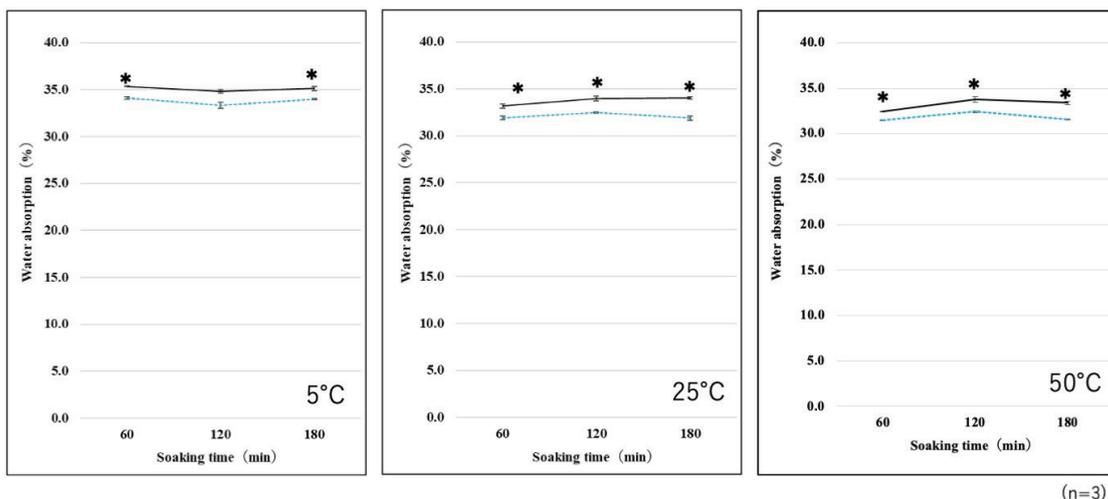
■ 文 献

- 1) JAXA, 国際宇宙探査ロードマップ 追補版 2020年8月, [https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/news/GER_Supplement_Japanese/\(2024/3/25\)](https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/news/GER_Supplement_Japanese/(2024/3/25))
- 2) 保尊隆享(1999), 微小重力環境における植物の成長と形態形成, 植物の化学調節, 34, 226-235
- 3) 坂本薫, 森井沙衣子, 上田 眞理子(2015), 炊飯における温水浸漬と低温浸漬が米の吸水率に与える影響, 日本調理科学会誌, 48, 193-199
- 4) 柳瀬肇, 遠藤勲, 竹生新治郎(1982), もち米の品質, 加工適性に関する研究(2), 食品総合研究所研究報告, 39, 1-14
- 5) 武田正明, 籬拓郎, 河原裕美, 弓削類, 栗栖薫(2010), 脊髄損傷に対する模擬微小重力培養骨髄間質細胞移植, 脊髄外科, 24, 90-91
- 6) 東谷篤志, 東端晃, 石岡憲昭(2006), モデル生物線虫を用いた ICE-first 宇宙実験の成果と今後の展開について, 宇宙利用シンポジウム, 22, AA0064113086



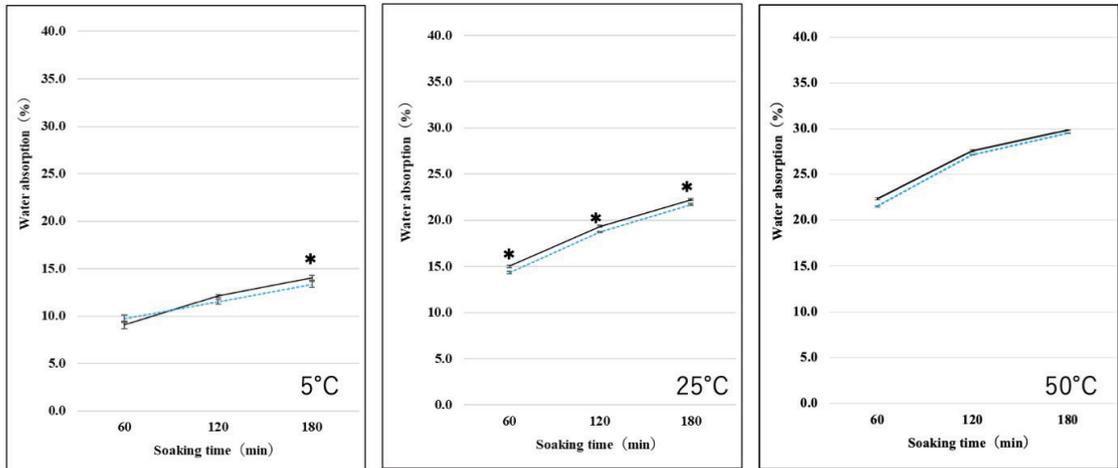
(n=3)

図1 重力がうるち米の吸水に及ぼす影響



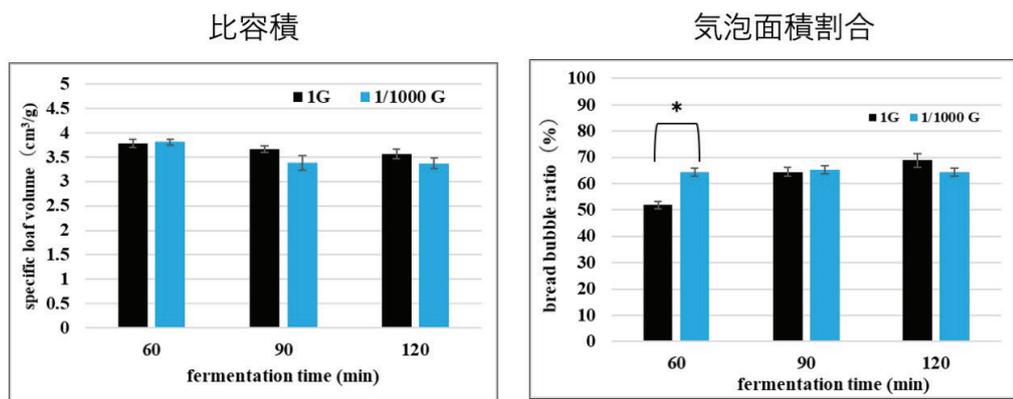
(n=3)

図2 重力がもち米の吸水に及ぼす影響



(n=3)

図3 重力が玄米の吸水に及ぼす影響



(n=6)

図4 重力がパンの膨化に及ぼす影響

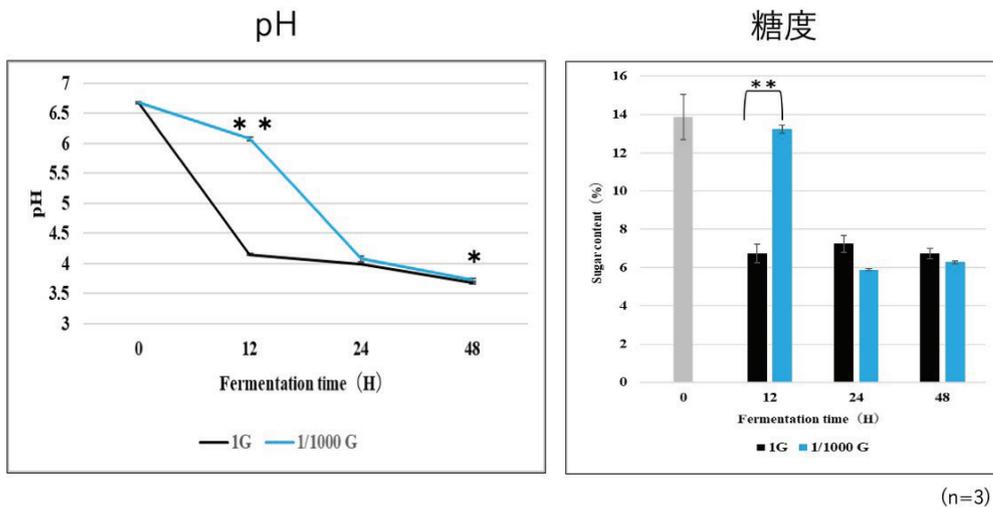


図5 重力がヨーグルトの発酵に及ぼす影響(pH, 糖度)

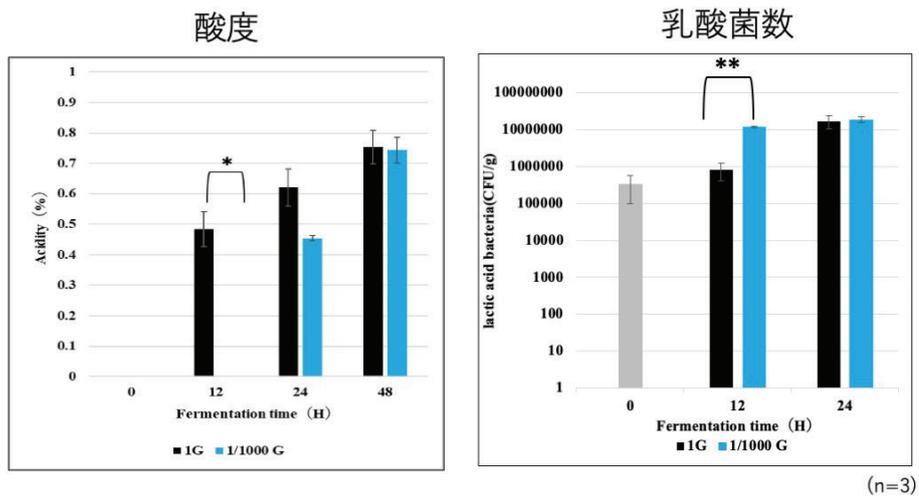


図6 重力がヨーグルトの発酵に及ぼす影響(酸度, 乳酸菌数)