

第30回衛星設計コンテスト

アイデアの部 ミッション概要書(3ページ以内)

1. 作品情報・応募者情報

作品名(20文字以内) 軌道上クレープ調理実証機「すべ〜ぷ」 <small>キドウジョウクレープチョウリジッショウキ</small>
副題(自由記入) 無重力空間におけるクレープ調理手法の検討
学校名 東京工業大学

2. ミッションの概要(プレスリリース等で使用するもので、200字程度でわかりやすく表現して下さい。)

軌道上の無重力環境においてフワフワモチモチとした焼き立てクレープを実現する手法を提案する。クレープの調理は薄く延ばす工程で重力を必要としており、軌道上にて地上と同じ手法で調理を行うのは難しい。そこで射出成型の原理を応用し軌道上においても問題がなくクレープの調理が可能なことを示した。また提案手法で調理したクレープの食感評価を行い、理想としたフワフワモチモチな食感の実現の有無も検討した。

3. ミッションの目的と意義(目的・重要性・技術的/社会的意義等)

(a)目的

軌道上においてフワフワモチモチとした食感を有する焼き立てクレープを提供することが我々の提案手法の目的である。フワフワモチモチとしたクレープの実現を目指す背景としては、軌道上の居住環境が閉鎖環境であり居住者に大きなストレスが及ぼされること、スイーツは食事の幅を広げ、ストレス軽減の助けとなることがある。我々はそのスイーツの一つとして、日本をはじめ世界的に知名度のあるクレープに注目し、クレープを軌道上でも地上と同じ食感を有する出来立ての状態を提供することを目的とした。

(b)重要性・技術的、社会的意義等

クレープを軌道上の無重力空間で調理することは実現性に課題がある。地上におけるクレープの一般的な調理手法では、重力を利用し液状の生地を薄く広げる。無重力空間では重力を利用できないため、同様の手法では軌道上でクレープを焼くことはできず、工夫をする必要がある。

クレープは軌道上住環境のストレス軽減のためのスイーツの一つであり、ストレス軽減のための手法は今後の人類の宇宙開発において重要である。とくに近年は民間人の宇宙旅行も活発化しており、宇宙飛行士に比べ適応性や耐ストレス性の低い居住者も宇宙での活動を行うことが予想される。その場合にスイーツをはじめとする軌道上での娯楽はストレス軽減のために重要である。

4. ミッションの具体的な内容

(a)システム

(地上局やミッション機器等を含む全体の構成・機能・軌道・データ取得を含む運用手順等、必要に応じて図表添付のこと)

本ミッションでは射出成型の原理を基本としクレープ調理を行う機器を提案する。液状の生地については、地上であらかじめ原材料を混ぜ合わせておき、パウチなどに入れ軌道上へ運搬し利用することを想定する。

(b)具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

機器の構成を図1に示す。機器はおもにシリンダと金型、チューブ、ヒータ、吸引機構から構成され

る。シリンダにより液状の生地を金型内部に数十 kPa の高圧で押し込み、生地を瞬時に型の中空部分に広げることで薄い円板状であるクレープ生地の形状へ成型することができる。

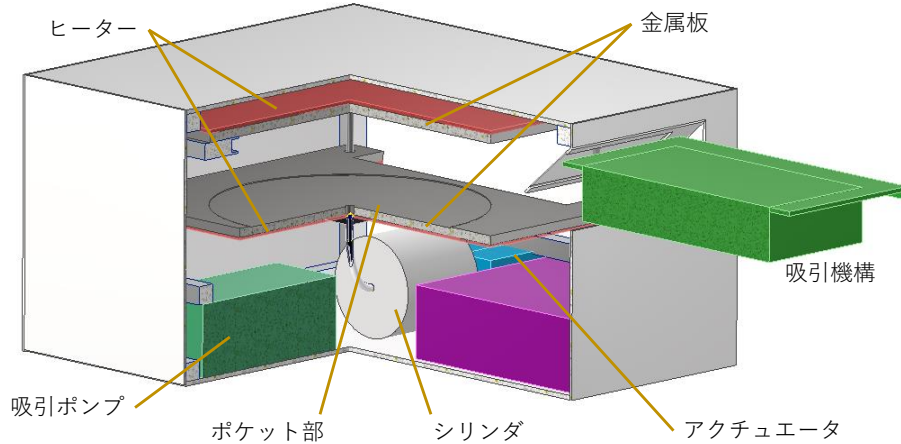


図 1. 提案する機器の主なコンポーネントと構成図

また調理後のクレープは吸引機構を利用し高温の金属板に触れることなく取り出すことができる。実現にあたる課題としては以下の事項の確認が必要である。

- ・無重力環境下でクレープ生地を焼き上げる場合に十分に加熱できるとともに焼き上げた生地が理想の食感を実現できること
- ・軌道上で実際に液状の生地を詰まることなく押し出し、薄く成型できること
- ・出来上がったクレープが鉄板から剥離することが可能であるか確認すること

上記のうち前者の二つについては、無重力実験もしくは無重力環境を模擬する実験により確認する必要がある。また最後の項目については実際に装置を自作してクレープを焼くことで検証する必要がある。とくに、剥離を助けるために鉄板表面へテフロン加工することを検討しており、その工夫が要求に対して十分であるか確認する必要がある。

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

本ミッションでは、地上のクレープ調理手法とは大きく異なる射出成型の原理を利用し、クレープ調理の軌道上実現を目指しているため独創性がある。トンボを使って生地を薄い円板状に広げる既存手法では重力の存在を前提としており、軌道上でそのまま利用することはできない。そこで本ミッションではクレープ生地の調理工程を、液状の生地を薄い円形状に成型すること、クレープ生地を十分加熱し焼き上げることの二つに分け、それぞれを軌道上でも実現可能な手法で議論した。クレープ調理の既存手法を別の視点から考察することで軌道上でも利用可能なまったく新しい手法の提案に成功しており、その点において本ミッションは高い独創性を有していると考えられる。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

軌道上などの無重力環境においても、フワフワモチモチの食感を持つ出来立てクレープを調理する方法を実現することで、宇宙飛行士や、さらには今後間違いなく増加する一般の宇宙旅行客らへの食事に、楽しみを提供できることが期待できる。また、本提案方法を基礎として、クレープに使用した生地を使用した小麦粉をそば粉、米粉など他のものに変えて、それに応じた温度管理などをすることで、類似の様々な軽食やお菓子料理などに応用できる可能性もあり、宇宙食にさらなる彩を提供できよう。

別の側面では、軌道上環境では限られた活動スペース内で生活をする必要があり、居住者は閉鎖環境での生活に起因する過酷なストレスをうけることが知られている。訓練をうけた宇宙飛行士であれば問題なく生活が可能であると予想できるが、一般の人であればさらに深刻な影響が出ることが想定される。その中で唯一の娯楽と考えることもできる食事に甘味を取り入れることで、食事に多様性を与えることができ心身共に健康な状態を保つ一助さらには、新たな娯楽創造の第一歩になれるのではないかと考えている。

以上

第30回衛星設計コンテスト

アイデアの部 解析書

キドワジョウクレープチョウリジツシヨウキスベ〜ぷ
軌道上クレープ調理実証機「すべ〜ぷ」

東京工業大学

アマキユウキ アライユウスケ オギキユウサク カワクボタツマ
天木祐希、荒井湧介、尾関優作、川久保辰真、
キノシタミキヒロ コバヤシダイキ タシロカヅキ タナカトモハル、
ヤマダシュウヘイ
山田周平

1. 背景と目的

1.1. 宇宙空間におけるスイーツの必要性

クレープをはじめとするスイーツは生きる上で必ずしも食べる必要はなく、日常生活においてその重要性を意識することは少ない。しかしながら、スイーツは味や食感、さらにはその見た目によって我々の生活に彩りを与え、我々の生活をより豊かなものにしていく。より QOL をあげ心身ともに健康的な生活をおくるという視点で、クレープなどのスイーツは有効なものの一つである。

スイーツの重要性は軌道上環境においても同様である。ISS をはじめとする軌道上環境では限られた活動スペース内で生活をおくる必要があり、居住者は閉鎖環境での生活に起因する過酷なストレスをうける。食事は軌道上での生活における限られた娯楽活動の一つであり、食事の楽しみが増えることは軌道上環境でのストレス軽減に有効である。そしてスイーツは食事の多様性を高め、食事をより楽しいものとしストレス軽減に貢献することができる。とくに十分に訓練された宇宙飛行士であれば適応が可能であるものの、今後宇宙旅行の様に一般の人が宇宙に行く状況が広がった際には、ますますその重要性が大きくなるのではないかと考えられる。

我々は軌道上で実現するスイーツとしてクレープを選択した。日本においてクレープは繁華街などの店舗や移動販売車により提供されることが多く、薄い生地クリームやフルーツを包んだ甘いスイーツとして知られている。日本においてクレープは専門店が各地で展開され、幅広い年代で認知されている知名度の高いスイーツであると言える。このクレープを軌道上においてもおい

しく食すことを実現したいと考えた。

1.2. 軌道上におけるクレープ調理について

クレープは小麦粉、牛乳、卵、バターなどを混ぜ合わせた液状の生地（以下、タネとよぶ）を、鉄板の上で平坦に伸ばし加熱することで調理する。一般的なクレープ店は、T字型の木製の調理器具であるトンボにより加熱された鉄板の上でタネを薄く広げ焼きあげている。

クレープをつくる工程は重力を前提としたものになっており、地上で行われている方法によりクレープを軌道上で焼くことは難しい。一般的な手法は地上で行っているため、重力によってタネが鉄板から浮き上がらないことが前提にある。しかし、無重力空間では十分な時間タネを鉄板上に維持することが難しい。したがって、軌道上でクレープを焼くためには何らかの工夫が必要になる。

軌道上でクレープを調理した先行事例としては、トマ・ペスケ宇宙飛行士が ISS 内で調理したクレープがある^[1]。同氏はクレープ生地としてトルティーヤを利用し、図 1 に示すようなチョコソースとイチゴによるクレープを調理した。この事例ではクレープ生地がトルティーヤで代用されており、薄くモチモチとした生地のクレープは実現されていないことがわかる。

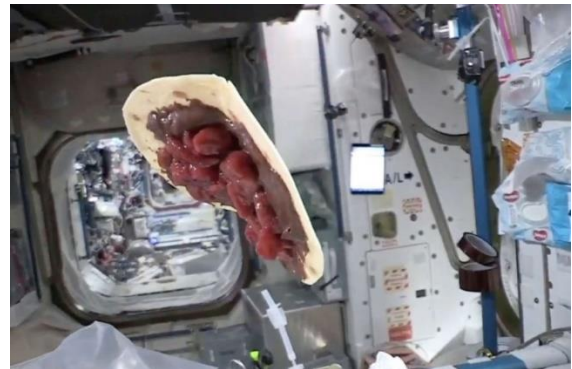


図 1. 軌道上におけるクレープの例

文献[1]より引用

1.3. 本提案の目的

本提案の目的は、軌道上においてフワフワモチモチ（以下ではフワモチと表記する）とした焼き立てのクレープを実現することにある。上記で述べたように軌道上で地上と同様の手法によりクレープを焼き上げることは重力がないために難しい。すなわち、現状では軌道上においてフワモ

チ食感の焼き立てクレープを提供することは実現されておらず、定性的な議論から実現には工夫が必要である。

加えて我々の提案は、フワモチクレープを実現することにとどまるのではなく、宇宙食の多様化やそれによるストレス軽減に貢献できる。クレープの生地を別のものに変えることで、類似の軽食や菓子調理に応用できる期待がある。すなわち本提案は、クレープはもちろん、さまざまな宇宙食の実現に貢献できる期待がある。この宇宙食の多様化は軌道上住環境のストレス軽減にもおよぶ。上記で指摘したように、軌道上環境は居住者に深刻なストレスを及ぼす。我々の提案は軌道上での限られた楽しみである食事にさらなる多様性を与え、ストレス軽減のための強力な手法となることも期待できる。

2. 安全性要求

ISS内の機器の安全基準について定めた”ISS Safety Requirements Document”（以下ISS規約とする）では、「機器の露出表面接触温度の範囲は、0℃（32°F）から45℃（113°F）であれば、危険はなく素肌での接触は許容される」と述べられている²⁾。この要件はISS内部の与圧環境にある機器に対して適用されるもので、提案するシステムもこの規約を遵守する必要があると考える。

またISS規約には安全上重要な機構の汚染についての規約があり、「安全上重要な機構の清浄度レベルは、機構または他の安全上重要なハードウェアの劣化または故障につながる、製造、使用、輸送、保管、飛行中の汚染を防ぐために設定、維持されなければならない。」と述べられている²⁾。したがって、クレープ生地がISS内に飛散して安全上重要な機構を汚染する可能性がある場合はISS規約の違反となってしまうため、クレープ生地の飛散を防ぐ機構が求められる。

加えてISS規約には圧力システムに対する要求もある。ISS規約では流体の毒性がなく、蓄積エネルギーが19 kJ以下、最大圧力が22 psia以下の場合にはSealed Container with No Analysis/Testingに分類でき、特に追加の試験などは必要がないとされている²⁾。なお22 psiaはゲージ圧50kPaに相

当する。提案手法ではタネが押し出される際に高圧流体となったり、クレープを取り出す際の吸引で負圧が生じたりするが、その圧力がゲージ圧50kPaを超えないか検証する必要がある。

3. 提案手法

3.1. 提案手法の概要

提案手法では射出成型の原理を主に利用しクレープ生地を薄く引き伸ばしながら加熱することで、クレープ調理を実現する。薄い円板状の金型を利用し高圧でタネを押し込むことで、タネが円板状の中空部分全体に瞬時に広がる。また同時に金型の一方の面は高温としておくことで、タネを薄く円板状に広げつつ加熱しクレープ生地を焼き上げることができる。加えて焼き上げたクレープは吸引機構により吸い付けて安全に取り出すことができる。

図2に提案手法を実現する機器の全体図を示す。本機器は主にポケットを有する金属板一枚と平坦な金属板、シリンダ、及びそれらを覆う筐体、さらに吸引機構で構成される。外形は横幅が約600mm、奥行きが約700mm、縦方向が約300mmである。

下部に存在するシリンダによりタネの押し出しを行い、中央に存在する二枚の金属板のうちの下の平坦な金属板およびヒータによりクレープ生地を加熱する。クレープ生地が機器外部に漏れ出ることを防ぐため、全体はフィルターを有した筐体で密閉されている。また高温部が露出することを防ぐため筐体は加熱中に開くことができない安全装置を有している。加えてタネは、前面部の接続口にタネを入れたパウチを接続し装置に補填する。

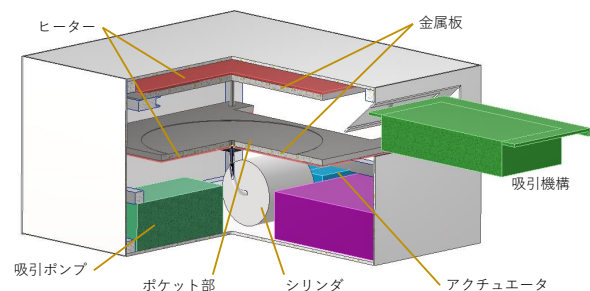


図 2. 提案手法の概要図

クレープ生地の加熱および成型を担う二枚の金属板は片方が平坦な金属板であり、もう片方はポケット加工をした金属板になっている。ポケットの深さはクレープの厚さとし、ポケットの径はクレープの径と同じ径とする。ただし片方の板には中心に直径 10 mm の貫通穴をあけておく。またクレープ生地と触れる面はテフロン加工を行い、加熱後に生地が鉄板へ焦げ付いてしまうことを防ぐ。

平坦な金属板を 200 °C に熱しポケット加工した金属板を中空部分が内側となるように押し当てる。金属板が熱せられたら事前にあけておいた穴から内径 8 mm のチューブを介してポケットの隙間にクレープの生地を流しこむ。ただし、ポケット内でクレープが十分な速さで広がるように圧力をかける必要がある。

クレープ調理後、筐体側面の差し込み口から吸引機構を差し込んでクレープを回収する。吸引機構は片面のみ吸引できるため、二枚の金属板が分離した後にクレープ生地がとどまっている金属板の位置をモニターで確認し、吸引機構の差し込む向きを決定する。なお吸引機構で回収が困難となった場合などには、金属板の冷却が完了したのを確認して筐体を開き回収する。なお吸引は筐体内にある吸引ポンプにより行う。吸引ポンプの生じる負圧は絶対値が 50kPa を超えない設計とする。

金属板の下部には生地に圧力をかけて押し入れるためのシリンダおよびその間を結ぶチューブがある。シリンダおよびチューブは、内圧が 3.2.1 によれば約 25 kPa のため安全に見積もって最大 50 kPa 以下であり、ISS 規約により正の安全余裕をもって設計すればよい。よってシリンダは上記圧力に耐える肉厚の設計とする。加えてチューブは金属板に接続するため最大 200 °C 程度まで耐える必要がある。PTFE チューブは耐熱温度 260 °C、常用耐圧 170 kPa (at 200 °C) のため要求を満たす⁵⁾。なお PTFE チューブは低摩擦であることが知られており管内摩擦を小さくできる。また吸引ポンプと吸引機構をつなぐチューブも同様に PTFE チューブを採用する。

金属板の上下移動には送りねじとモータを利

用する。モータによってねじを回転させ、金属板を上下させ、隙間なくクレープを挟み込むことができる。焼きあがったらモータを逆回転させ、クレープを取り出す。

またシリンダの駆動にはリニアアクチュエータの使用を検討している。評価と詳細な選定は 3.2.2 において述べるが、既存のリニアアクチュエータにより要求仕様を十分満たすことが可能なことを確認している。

3.2. 提案手法の原理と評価

3.2.1. クレープ生地を薄く延ばす原理の評価

ここでは図 3 のようなモデル図のもと以下の仮定に基づき、本提案手法の原理によりタネを広げることが可能であることを示す。まずシリンダとチューブおよびチューブと型の間などの管内径が変化する箇所における圧力損失は無視できるものとする。またチューブなどの管内摩擦による圧力損失も無視できるものとする。また各パラメータは以下のように定めるものとする。

$$D_0 = 10 \text{ cm}, \quad D_1 = 40 \text{ cm}, \quad d = 1.3 \text{ mm}$$

$$D_t = 8 \text{ mm}, \quad L = 5 \text{ mm}$$

またタネは卵、牛乳、強力粉、砂糖、バターを十分に混ぜ合わせたものとする。その物性値は文献[3]のスポンジケーキ生地の物性値を参考に次のように定める。

$$\rho = 650 \text{ kg/m}^3, \quad \mu = 6.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

地上においてクレープを焼く工程ではおよそ 1s から 2s 程度で生地を広げている。そのためここでもタネを 2s 以内に広げることを要求とする。

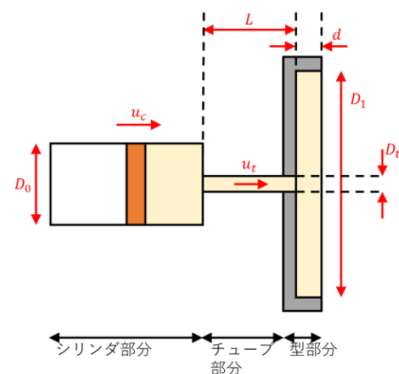


図 3. タネを薄く延ばす部分のモデル

上記の仮定のとおりチューブにおける管内流れのレイノルズ数 Re は 1.5 となりチューブ内部の流

これは層流になることがわかる。よってチューブ内部の流れは助走区間を無視するとハーゲンポアズイユ流れで考えることができ、チューブによって生じる圧力損失 Δp はチューブ内部の流速を u [m/s]とすると

$$\Delta p = \frac{32\mu Lu}{D_t^2} = 2.44 \times 10^4 \text{ Pa}$$

として求めることができる。

シリンダではチューブにおける圧力損失よりも大きな圧力を生じることでタネ生地を設計要求の時間内で型全体に流し込むことができる。よってシリンダ部分に負荷する必要のある力の大きさ F は $F = \pi D_0^2 \Delta p / 4 = 191 \text{ N}$ として求めることができる。またシリンダ部分の移動速度はおよそ 1 cm/s となる。このような仕様を満たすアクチュエータとしてはSMC製 LEY25C-30-1Pが挙げられる。

3.2.2. クレープ焼き上げ部分の原理の評価

無重力環境においてクレープが焼けるときの生地の熱の伝搬の様子を調べるため、シミュレーションを行った。軌道上では重力がなく対流が無いためクレープ生地の熱の移動は熱伝導のみである。よってここでは熱拡散方程式を数値的に解くことによりクレープ生地の加熱の様子をシミュレーションした。

数値計算により得られた熱拡散シミュレーションの結果を図4に示す。ただし、物性値は文献[2]の値を参考に、 $\lambda = 0.165 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、 $\rho = 454 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_v = 2636 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ とした。また、クレープの厚みを 1 mm 、加熱温度を 200°C 、周囲温度を 20°C とした。計算の結果、クレープの温度がほぼ一様となる加熱時間は約 12.4 秒 であることがわかった。

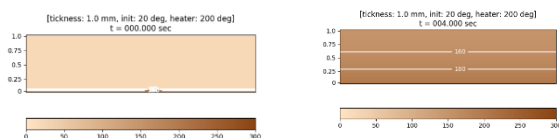


図 4. 熱拡散計算の結果

4. 提案手法の地上実証実験

4.1. 実験目的

提案手法によりクレープを焼く実験装置を作り、地上にて実証実験を行う。焼き方を変更したことでクレープ生地の見目、味、食感に大きな違いがないことを確認し提案した焼き方で通常のクレープと差異がほとんどないことを確認する。加えて焼きあがったクレープの Texture Profile Analysis (以下 TPA と書く) を行い食感の評価も行う。

とくに食感評価は提案手法の必要性を確認する目的のため重要である。ISS 内にてクレープを食べる手段の一つとして、市販品のクレープをそのまま持っていく方法が考えられる。市販品のクレープでフワモチ食感を再現できているのであれば ISS 内で焼く必要性はない。

そのため市販品のクレープの食感と我々が焼いた出来立てクレープの食感を TPA にて評価し、ISS 内で出来立てのクレープを焼く必要性があることを確かめる。さらに、今回提案する手法で作成したクレープの食感も TPA にて評価しフワモチ触感になっているか定量的に評価を行う。これによって今回の提案手法で作成したクレープを我々の理想とするクレープと比較ができ、宇宙空間でもフワモチな食感のクレープを作成することが可能であることを示す。

4.2. 提案手法によるクレープ調理実験

4.2.1. 実験方法

図5に示すような型を作成した。これは提案手法における二枚の金属板に相当する。3.2.1 においてはクレープ直径として 40 cm を仮定したが、本実験は提案手法によりクレープを既存手法と同等の食感でつくることが可能か確かめることにあるため、簡単のため直径 6 cm とした。

自作した型、シリンダ、PTFE チューブ、クツ

キングシート、ホットプレートを利用し実験を行った。図 5 に示すように型とシリンダ、PTFE チューブを組み立てた。この装置をホットプレートの上のせ、型部分をホットプレートに押しえつげるとともにシリンダを押し込むことで提案手法を模擬した。クッキングシートについては自作した型の表面が粗く、焼き上げたクレープ生地が張り付いてしまう事例が確認されたため、剥離を助けるため型の表面に張り付けて利用した。

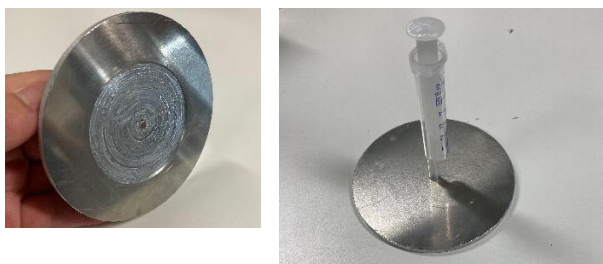


図 5. 自作した型と組み立てた様子

4.2.2. 実験結果

実際にクレープを焼いた結果を図 6 に示す。図から確認できるように均等的な厚みで円形状にクレープを焼き上げられていることがわかる。



図 6. 提案手法で調理したクレープの様子

4.3. 調理したクレープの TPA による食感評価

4.3.1. 実験原理

TPA は食品試験片を決められた変位で二度圧縮し、その際の時間と圧縮力のグラフから食感を評価する手法である^[6]。圧子は歯を模しているものであり、二度の圧縮は二回の咀嚼を模している。

今回評価する項目は、硬度、凝集性、弾力性、咀嚼性の計四つある。硬度は、試験片の硬度を表す指標である。凝集性は、試験片の一回目の変形時の抵抗と比較して、二回目の変形にどれだけ耐えられるかを示している。弾力性は、変形後に試験片が元の形状にまで戻る傾向を示している。噛み応えは、飲み込むのに十分な程度まで固形食品

を噛むのに必要なエネルギーの尺度である。四つの指標はすべて時間と圧縮力のグラフを特徴づける値により定義されており、文献^[6]に倣い評価を行った。

4.3.2. 実験方法

本実験で使用した卓上圧縮引張試験機は株式会社東京試験機小型卓上試験機(リトルセンスター)LSC シリーズ/2 段レンジ対応である。試験片については試験片のサイズを一定とするため、対角線を 40 mm とする正方形上に切り出した。また TPA は 65%ひずみで測定を行った。

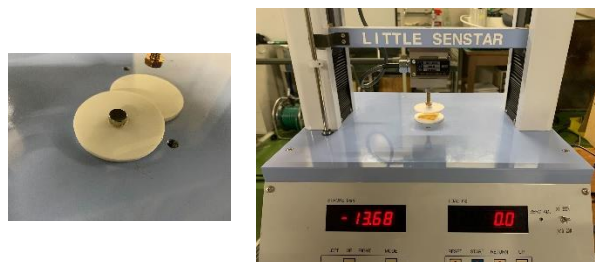


図 7. 実験で使用した機器

左は圧子、右は引張圧縮試験機である。

4.3.3. 実験結果

TPA による評価項目に対して t 検定を用いて 95%信頼区間を求め、平均値、信頼区間をエラーバーにて表現したものを図 8 に示す。黒い線が市販のクレープ、青い線が我々の作成した既存手法による理想的なクレープ、赤い線が今回提案した手法を用いて作成したクレープである。なお青い縦の点線の範囲は理想的なクレープの信頼区間を示している。

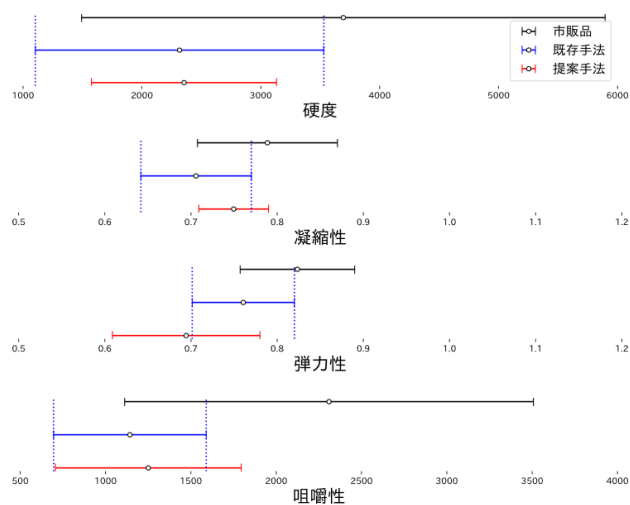


図 8. 試験結果

白い点はそれぞれの評価値の平均値を表す

4.4. 考察

4.4.1. 提案手法によるクレープの食感評価

フワモチの定義は我々が調理して得る理想としているクレープの TPA 評価指標に基づき決定する。TPA とフワモチ食感の対応関係を定義することは難しいため、評価対象のクレープの TPA と比較しフワモチの議論を行った。我々が既存手法で調理したクレープは焼き立ての場合に理想とするフワモチ食感が実現できていることをチーム内で確認できており、我々が軌道上で実現を目指す理想的なクレープとなっている。よってこのクレープの TPA 評価指標をフワモチのクレープとし、市販品とこのクレープのそれぞれの TPA 評価指標の大小関係によりフワモチを特徴づけた。

硬度と咀嚼性について考えると、提案手法のクレープはこれらの指標で評価するときフワモチであると考えることができる。これらの指標について理想とするクレープと市販品のクレープを比較すると、硬度と咀嚼性はより有意に小さいほうがフワモチであると定義できる。提案手法のクレープも市販品のクレープより硬度と咀嚼性は有意に小さいためフワモチといえる。

弾力性と凝集性は市販品より理想的なクレープの方が値は小さい。よってこれらの指標はより小さい方がフワモチ食感であるといえる。提案手法のクレープも市販品より値が小さいため、弾力性と凝集性についてもフワモチと判断できることが示唆される。しかし、弾力性と凝集性は理想的なクレープと提案手法のクレープの間にも優位な差がみられたため、提案手法のクレープの食感は理想的なフワモチとは差が生じてしまっていることが否定できない。より確かな議論のためには、これらの指標がどれほど理想的なフワモチ食感に寄与しているかどうかなどの定量評価が必要になる。

上記より提案手法で作成したクレープは、各々の項目について市販品と比較した結果、より理想的なクレープに近い値をとっておりフワモチであると考えられる。硬度と咀嚼性については確かに我々の定義するフワモチ食感であることが示せた。凝集性や弾力性については、提案手法のク

レープと理想的なクレープの間にも有意な差がみられたためフワモチ食感であると判断することはできなかった。しかし、値の傾向によりこれらの指標においてもよりフワモチであることが期待できる結果となった。よって以上を踏まえると提案手法のクレープは市販品よりフワモチ食感であることがある程度の妥当性をもって確認できた。

5. 提案手法の考察ならびに今後の課題

5.1. 提案手法の安全性評価

提案手法は安全性要求を満たしており、軌道上で実際に利用することの実現可能性も十分に有していると考える。本提案手法はタネを加圧および加熱するため安全性要求で議論するように、圧力の設計要求を満たすこと、露出部の温度が45℃以下となること、タネが空間中に分散しないことが要求される。圧力の要求については内部の最大圧力が50 kPa以下のため、シリンダおよびチューブの耐圧を安全余裕のある設計としたことにより満たしている。温度の要求については、①加熱部が筐体によって保護されていること②筐体の安全装置により加熱部が高温の状態で露出される得ないことの二つの設計により満たしている。最後の要求についてはタネが分散しうる領域が筐体に囲まれていることにより満たしている。

5.2. 既存の実証実験の有する課題と評価

現在の地上実証実験では重力の影響を正確に評価できておらず、無重力環境での実現可能性を評価する実験として不十分と考える。本実験は地上において加熱した鉄板の上に型を置き、上からシリンダでタネを流し込み行った。この手法ではタネの運動は重力の影響も受けており、正確に軌道上の無重力環境を模擬した実験とはなっていない。よって本実験で確認した提案手法の実現可能性は、重力の影響を借りた上で成立していた可能性も否定することができない。

しかし本提案手法におけるタネの運動はシリンダの圧力が支配的であるため、無重力環境においても実現性は期待できると考える。本提案手法におけるタネの運動の原理は重力に基づくものではなく、シリンダが排除した空間を占めていた

液体が、型の部分に押し出されることに拠っている。この原理は重力の存在を仮定せず、重力の有無によらず成立することが強く支持できる。

また提案手法の原理において示したようにクレープの加熱は熱伝導のみを考慮した計算とよく一致するため、軌道上においてもクレープを地上実証実験と同様に焼き上げることが可能であると期待できる。無重力環境では対流が生じないため、液体の加熱は熱伝導のみである。3.2.2で示した熱伝導のみを考慮する熱拡散計算の結果は熱平衡に達するまで10s程度であり、一般的にクレープを焼く際の所要時間とよく対応することがわかり、地上においてクレープを焼く際の内部の熱移動は熱伝導が支配的となることが示唆される。よって軌道上においても地上においても熱伝導が支配的となって生地内部の熱移動が生じる可能性を支持することができ、本提案手法は軌道上においても十分な熱移動を達成し、クレープを焼き上げることが可能と予想できる。

5.3. 今後の課題

本提案手法の軌道上における実現可能性をより強く確かなものにするために、無重力環境試験や軌道上試験が必要になると考える。とくに熱伝導に関する議論は、熱伝導のみでクレープを地上と同様に焼くことが可能な根拠として、熱拡散計算における熱伝搬の時間が地上と大きく差がないことにのみ拠っており、確証性に欠ける議論になってしまっている。また実証実験では金属板をテフロン加工する代わりにクッキングシートで代用しており、テフロン加工によりクレープ生地が焦げ付くことはないか確認する必要もある。

6. まとめ

本ミッションではISS内での宇宙飛行士の娯楽を提供するため、フワモチクレープをISS内で作成することを目的とした。軌道上におけるフワモチクレープの調理の実現性を検討するために、ISS内の安全要求について調査を行った。結果、露出部の温度範囲が0°Cから45°Cの範囲にあること、液体が外部に漏れ出ないこと、圧力が既定の範囲内にあることという要求を満たす必要があった。この要求を満たすために、図2に示すよう

に密閉した空間の中で金型の中にシリンダで生地を注入し、焼き固めるという装置を提案した。これは3.2で行ったモデル評価により、十分ISS内で使用可能であるということを示すことができ、我々の提案手法でクレープを作成することが可能であると主張できる。

我々はさらに実際に提案手法を再現する装置を作成し、地上試験にて実際に提案手法でクレープが焼けることを示した。また、この装置にて作成したクレープがフワモチ食感を再現することをTPAという食感評価法で定量評価をした。その結果、実際に装置をつくりフワモチクレープの調理が可能であると示すことができた。

7. 参考文献

- [1]. Kelly Mccarthy. "French astronaut makes 'crepe' in space". GMA, 2021/7/2. <<https://www.goodmorningamerica.com/food/story/french-astronaut-makes-crepe-space-78630185>>(2022年7月1日アクセス).
- [2]. NASA. (2019). ISS Safety Requirements Document. <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210009936/downloads/SSP%2051721-Baseline.pdf>> (2022年7月1日アクセス).
- [3]. 白木まさこ, 貝沼やすこ (1979)「スポンジケーキの性状に及ぼす攪拌の程度と放置時間の影響について (第一報) —焙煎前のケーキ生地の安定性—」. 家政学雑誌, 30(8), 651-657
- [4]. 杉山久仁子. (2013). 「加熱調理と熱物性」. 日本調理科学会誌, 46(4), 299-303.
- [5]. 淀川ヒューテック株式会社. 「フッ素樹脂チューブ耐圧力値」. <https://www.yodogawa.co.jp/upload/dl/products/yodogawa-hu-tech_taiat_20200131.pdf>. (2022年7月2日アクセス).
- [6]. "Overview of Texture Profile Analysis". <<https://texturetechnologies.com/resources/texture-profile-analysis>> (2022年7月1日アクセス).