

2023年度（第19回）研究助成報告

研究題名	昆虫粉末の流動特性の解明と製造プロセスの最適化
研究期間	2023年4月1日～2024年3月31日
研究機関・所属 研究者名	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 根井 大介

1. 研究成果の概要

昆虫は新たな蛋白質源として期待されているが、消費者が抱く外観への忌避感を考慮すると、粉末化した上での利用が現実的な選択肢となる。粉末素材の流動性は取り扱い性や生産性に影響を与える重要な要素であるが、昆虫粉末については十分な知見が集積されていない。本研究では、粉碎条件および添加物の利用がコオロギ粉末の流動性に及ぼす影響を検討した。乾燥コオロギをハンマーミルおよびカッターミルで粉碎した結果、粒径が 136～397 μm のコオロギ粉末を得た。粉碎条件の違いは粉末の空気透過性とせん断特性に影響を与えるが、圧縮性にはほとんど影響を及ぼさないことを明らかにした。また、市販のコオロギ粉末を用いて、流動性改善剤として微粒二酸化ケイ素、ケイ酸マグネシウム、ステアリン酸ナトリウムの効果を検討した。その結果、コオロギ粉末の流動性改善剤として、微粒二酸化ケイ素が最も効果的であると考えられた。

2. 助成期間内での研究成果の概要

1. はじめに

昆虫素材は新たな蛋白質源として期待されているが、食文化の違いから外観等に忌避感を抱く消費者も多く、普及への障害となっている。外観の問題を軽減する手段のひとつとして、昆虫を粉末化して多様な食品に添加する利用方法が考えられる。昆虫を粉末として利用する場合、その流動特性は粉末の取り扱い性や製品の生産性に影響を与える重要な要素であるが、昆虫粉末については十分に知見が整理されていない。そこで本研究では、コオロギを対象として、粉碎条件および添加物の使用がコオロギ粉末の流動特性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

粉末試料の調製：市販の乾燥コオロギを使用し、カッターミルおよびハンマーミル（吉田製作所製）を用いて粉碎処理を行った。カッターミルでは 10 秒間および 30 秒間の粉碎処理を加えた。ハンマーミルには目開き 3 mm の篩を取り付けて、

粉碎後に分級された粉体を回収した。ハンマーミル、カッターミルで 10 秒間および 30 秒間の粉碎操作で作製したコオロギ粉末について、以下ではそれぞれ HM、CM10 および CM30 として表記する。

流動性改善剤：微粒二酸化ケイ素（東海化学工業所製）、ステアリン酸マグネシウム（Thermo Fisher Scientific 製）、ケイ酸マグネシウム（Sigma-Aldrich 製）を使用した。添加剤を市販のコオロギ粉末（はまる食品製）に加えて、60 分間の攪拌処理を行った。添加剤は重量濃度で 0.5、1.0 および 1.5% となるように加えた。

粉体特性の評価：粒度分布および粉体形状の評価は動的画像法粒度分布測定装置（QICPIC、Sympatec 社製）により測定した。測定は湿式モジュールにより行い、粉体形状は任意に抽出した 5,000 個の粒子について、球形度、アスペクト比および包絡度を解析した。粉体の流動特性の解析はパウダーレオメーターFT4（Freeman Technology 社製）（図 1）により行い、圧縮性、空気透過性およびせん断特性を測定した。



図1. パウダーレオメーターFT4

3. 実験結果

表 1 にハンマーミルおよびカッターミルで粉碎したコオロギ粉末の粒径および形状特性を示した。ハンマーミルで粉碎する際には目開き 3mm の篩を設置して分級を行ったが、目開き 3 mm 以下のメッシュでは試料が目詰まりしやすく、連続的な粉碎操作を行うことが困難であった。コオロギには脂肪分が高く、その粉末は凝集しやすい性質であることが理由として考えられた。また、気流式の粉碎機である高速ジェットミル（IDS2、日本ニューマチック工業株式会社）による微粉末化を試みたが、上記のような粉末特性のため粉末試料の回収が困難であり、高速ジェットミルへの適合性は低いと考えられた。HM3 の D_{50} は 136 μm であり、CM10 および CM30 の D_{50} はそれぞれ 165 μm および 397 μm であった。得られた粉末試料の形状特性を比較したところ、球形度は 0.80～0.81、アスペクト比は 0.67～0.70、包絡度は 0.86 となり、粉碎条件間で顕著な差はみられなかった。

表1 異なる粉碎方法で調整したコオロギ粉末の粒径および形状特性

粉碎方法	D_{50} (μm)	球形度	アスペクト比	包絡度
ハンマーミル	136	0.81±0.10	0.70±0.13	0.86±0.09
カッターミル				
10秒間	165	0.80±0.11	0.67±0.15	0.86±0.08
30秒間	397	0.80±0.10	0.67±0.15	0.86±0.07

図2に異なる粉碎方法で調整したコオロギ粉末の圧縮性(a)と空気透過性(b)を示した。圧縮性については、ガラス製の容器にコオロギ粉末を充填し、ピストンを 0.05 mm s^{-1} の速度で移動させ、 $0.5\text{~}15 \text{ kPa}$ の法線応力をかけながら粉体層の体積変化を測定した。印加した法線応力とそのときの体積変化率をプロットして、粉末の圧縮性を評価した。法線応力が 0.5 kPa において、体積変化率は8.8~10.6%であり、CM10の体積変化率が最も大きかった。法線応力が増加するにしたがって、体積変化率も上昇した。法線応力を 15 kPa に達した際、HM3、CM10、CM30の体積変化率はそれぞれ36.6、39.1および38.3%であり、CM10が最も高く、HM3で低い体積変化率が記録された。しかしながら、試料間の圧縮性の差はわずかであり、実用上の影響は限定的であると考えられる。

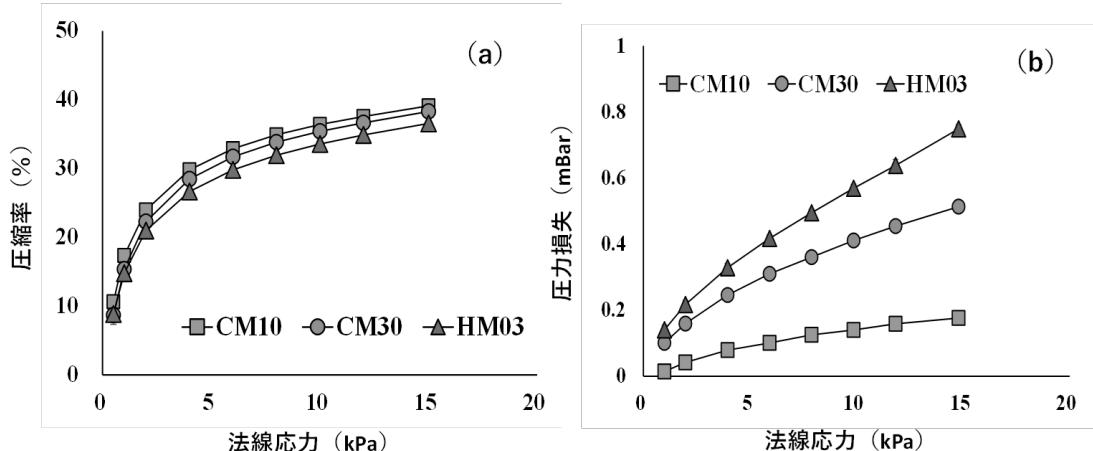


図2. コオロギ粉末の圧縮性(a)と空気透過性(b)

空気透過性について、圧縮性評価と同様にガラス製の容器にコオロギ粉末を充填したのち、ベントピストンから $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度で空気を導入しながら、 $0.5\text{~}15 \text{ kPa}$ の範囲の法線応力を粉末層に加え、粉体層を空気が通過する際の圧力損失を測定した。法線応力と圧力損失の関係をプロットし、透過性を評価した。圧力損失の挙動は粉碎方法によって大きく異なり、粒径がもっとも大きなCM10の試料において、低い圧力損失が記録された。粒径が大きくなるにしたがって、粒子間の空隙が大きくなり、その結果として粉体層を空気が通過する際の圧力損失が小さくなつたと考えられる。

空気透過性試験においては、一般的に圧力損失が小さいほど流動性が良好と判断されるため、圧力損失の視点ではハンマーミルで調整されたコオロギ粉末は最も流動性が低いと見なせる。上記のように、コオロギ粉末の粒度の違いが圧縮性に及ぼす影響は微小であったが、通気性の尺度では大きな差を与えることに留意するべきである。

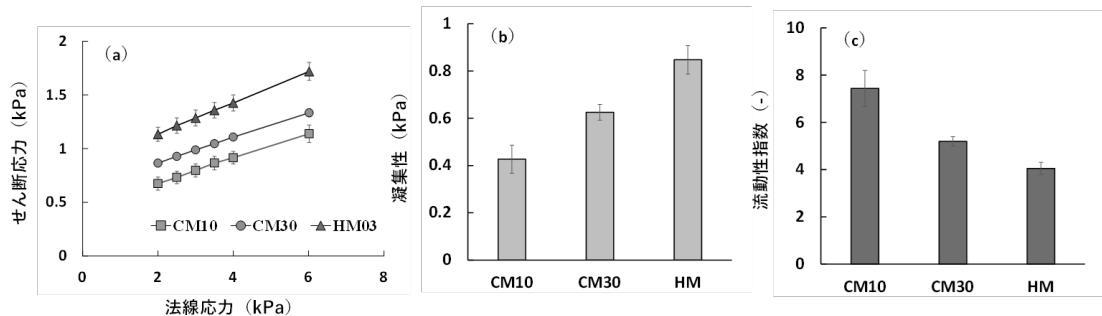


図3. コオロギ粉末のせん断特性

図3にHM3、CM10およびCM30のせん断特性試験の結果を示した。せん断特性試験では、静止状態の粉体層が崩壊によって動的状態に変わると、崩壊面にかかる垂直応力とせん断応力の関係を求め、粉体層の崩壊特性の評価を行うものとなる。各法線応力におけるせん断応力を示したのが図3aであり、粉碎方法によってせん断特性に有意な差が確認された。同一の法線応力を印加した場合、崩壊面にかかるせん断応力はHM3が最も高く、CM10で低い数値が検出された。せん断特性試験で得られるパラメータとして、凝集性と流動性指数を付属の解析ソフトによって算出し、これを図3bおよび図3cに示した。試料間で凝集性と流動性指数を比較すると、HM3では高い凝集性と低い流動性指数が検出され、作製した試料の中で流動性が最も低いと考えられ、HM3の粒度が小さいことが主な原因としてあげられる。

コオロギ粉末の圧縮性に及ぼす添加剤の影響を図4に示した。添加濃度を0.5%とした条件では、ステアリン酸マグネシウム、ケイ酸マグネシウムおよび微粒二酸化ケイ素のいずれを加えても、圧縮性は未添加のコオロギ粉末と大きな違いはみられなかった。添加濃度が高くなると添加剤の影響が大きくなり、未添加の粉末と比較して圧縮性の差が明確となった。添加濃度を1.5%とした条件では、未添加のコオロギ粉末と比較して、添加剤を用いた試料では圧縮性の低下が認められた。圧縮性の低下は微粒二酸化ケイ素が最も大きく、15 kPaの法線応力においては、未添加の粉末の圧縮性が44.4%であったのに対して、微粒二酸化ケイ素を添加すると38.5%であった。ステアリン酸マグネシウムとケイ酸マグネシウムは同等の流動性改善効果であり、15 kPaの法線応力化でのコオロギ粉末の圧縮性はそれぞれ40.9%と41.3%となった。

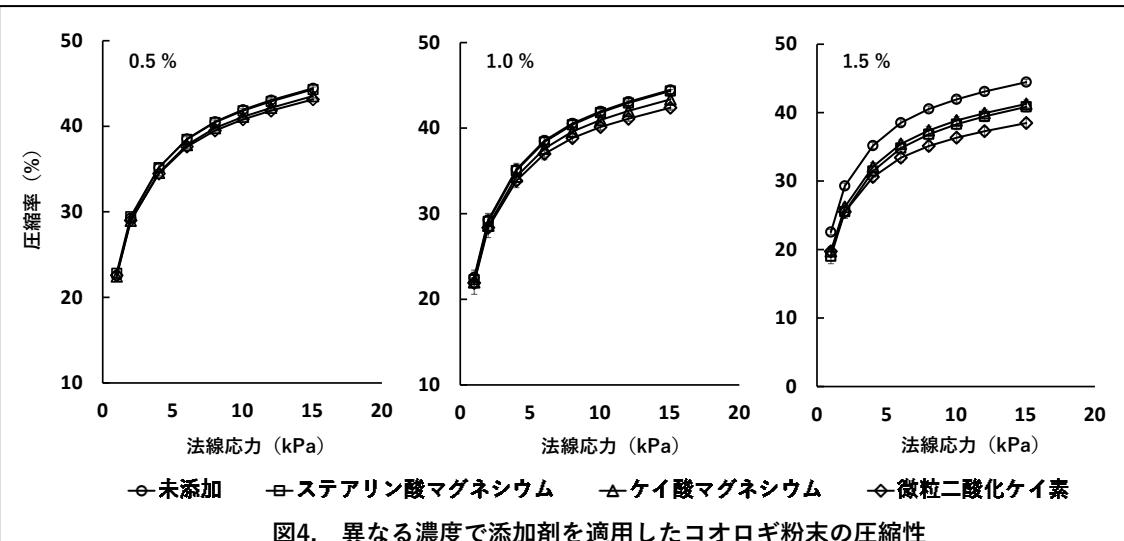


図4. 異なる濃度で添加剤を適用したコオロギ粉末の圧縮性

4. おわりに

将来的な蛋白質源の不足に備えて、コオロギ粉末の基礎物性に関する知見を収集した。コオロギ粉末の粒度は粉体の流動特性に影響を与えたが、その強弱は評価指標によって大きく異なる。具体的には、圧縮性にはほとんど影響しないが、空気透過性やせん断特性には粒度の関与が大きくなる。食品に適用する場合には、加工プロセスを考慮して、粉碎条件を決定することにより、食品製造の効率化につながると考えられる。また、コオロギ粉末は脂肪分が多く、基本的に凝集性が高い粉末となり、用途によっては適切な添加剤の利用が推奨される。3種類の添加剤の候補を検討した結果、微粒二酸化ケイ素が流動性改善剤としての機能が高かった。食品用途の場合には法律上の使用基準を逸脱しないように添加する必要があり、微粒二酸化ケイ素については食品の2%以下となるように使用しなければならないことに留意する必要がある。

最後に、本研究に対しまして助成を賜りました粉体工学情報センターの関係者の皆様に深くお礼申し上げます。

3. 研究発表

【学会発表】

根井大介、鎌田樹、五月女格. 昆虫粉末の流動特性に及ぼす粉碎条件および添加剤の影響. 第 82 回農業食料工学会年次大会. 山形大学、2024 年 9 月.