

博士論文

ブロック凍結食品のグレース氷の機械的分離技術  
に関する研究

(要約)

令和4年3月

広島大学大学院統合生命科学研究科

統合生命科学専攻

許 政

## 第1章：序論

食品は冷凍保存中に水分が蒸発し、乾燥が進み、あわせて油脂の酸化などが進む。凍結直後に、表面に薄い氷の膜を付けるグレーズ処理（アイスグレーズ処理）を行うことにより、食品自体の水分が保たれるようになる。また、氷の膜が空気を遮断ため、脂質の酸化防止にも有効である。従って、アイスグレーズ処理は、冷凍貯蔵中の食品の乾燥や酸化などの品質の変化を防ぐことができる。

冷凍エビは、20～50尾のエビを冷凍パンの中に殻付きの状態ですべて、水を注いで凍結し、冷凍ブロックの状態にして通流している。このブロック凍結エビは、氷を完全に溶かさないとエビを無傷で取り出すことができない。また、解凍時間が長くなると、氷の一部が溶け、氷から露出したエビの一部が部分的な温度上昇を起し、急激に鮮度が低下する。

そこで、ブロック凍結エビのような食材を解凍する際には、鮮度や食感などを保持するため、解凍時間の短縮が必要になってくる。本研究では、ブロック凍結エビに代表されるアイスグレーズ食品の表面のグレーズ氷だけを機械的に破壊・分離する新たな加工技術の検討を行った。

## 第2章 実験装置及び解析方法

本研究では、圧縮試験及び割裂試験を行うための装置として、耐荷重 1960N (200kgf)、 $-120^{\circ}\text{C}$ まで冷却可能な自作の材料試験機を使用した。この材料試験機の試料部は、一定の設定温度で低温状態を維持しつつ材料試験が実施できる。この材料試験機を用いて $-20^{\circ}\text{C}$ ～ $-70^{\circ}\text{C}$ の任意の試験温度で圧縮試験及び割裂試験を行った。

応力集中とは、物体の形状変化部で局所的に応力が増大する現象である。一般に、物体内部の応力の分布は一様ではなく、力の負荷の仕方や物体の形状によって応力は場所ごとに変化する。機械や構造物の疲労破壊や脆性破壊では、この応力集中を起す部分が破壊の起点となることが多い。

本研究では、アイスグレーズ食品に割裂荷重を加えることにより、グレーズ氷のみの破壊が起こる条件を探った。アイスグレーズ食品を単純化し、円筒状の氷の中心部に円柱状の食品を挿入したモデルを設定した。この場合、中心部の食品は氷に対して介在物とみなすことができる。さらに、このモデルを一次元の平面で解析する場合は、介在物を有する無限平板が引張力(又は圧縮力)を受ける場合と同様の荷重状態と見なすことができる。平板側及び介在物側の応力集中率は $\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_0$ 及び $\alpha' = \sigma'_{\max} / \sigma_0$ で計算することができる。ここで、 $\alpha$ は平板の応力集中率[-]、 $\sigma_{\max}$ は平板の最大発生応力[MPa]、 $\alpha'$ は介在物の応力集中率[-]、 $\sigma'_{\max}$ は介在物の最大発生応力[MPa]、 $\sigma_0$ は系全体が受け持っている応力 [MPa]である。

アイスグレーズ食品の割裂試験では、グレーズ氷と食品について、それぞれ最大発生応力と破壊応力の関係の評価する必要がある。割裂荷重をアイスグレーズ食品に加えるとグレーズ氷内では、最大の応力が発生する。この最大応力がグレーズ氷の破壊応力に達するとグレーズ氷が破壊する。このとき、食品内で発生する応力が食品の破壊応力に達していなければ、内側の食品は破壊しない。すなわち、グレーズ氷を優先的に破壊することができる。

## 第3章 単体試料の低温材料力学物性の測定

本章では、アイスグレーズ食品を構成する各部材（単体試料）の低温材料力学物性を明らかにすることを目的とした。グレーズ氷、魚肉ソーセージ及びエビミンチについて $-20$ ～ $-70^{\circ}\text{C}$ で圧縮試験及び割裂試験を行い、圧縮破壊応力、ヤング率及び割裂破壊応力を測定した。

圧縮破壊応力とヤング率は温度の低下に伴って増加した。グレーズ氷については、既往の研究よりも本研究で得られたヤング率がかなり小さいことが明らかになった。これは、本研究で使

用したグレーズ氷には微細な気泡が存在する、多結晶氷であったことが原因であった。しかし、通常のグレーズ氷と同程度の品質であることから、数値解析には、ここで得られた物性値を用いることにした。魚肉ソーセージとエビミンチについては、 $-20\sim-40^{\circ}\text{C}$ で荷重を加えると連続した変形が続き、塑性変形のみが起り、破断及び亀裂は生じなかった。 $-50\sim-70^{\circ}\text{C}$ では破断が生じ、温度の低下に伴って圧縮強度とヤング率が増加する傾向を示した。魚肉ソーセージ及びエビミンチは脂質、水分、タンパク質などが含まれる多成分系であるため、温度の低下に伴って延性の減少と同時に、脆性が徐々に発現したことを示している。

割裂破壊応力について、グレーズ氷では僅かな応力で破壊し、塑性変形なく割裂していることから脆性破壊が起こっていた。魚肉ソーセージ ( $-20^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ ) とエビミンチ ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) では、試料は完全に凍結しておらず、荷重を加えると連続した変形が続き、塑性変形のみが起り、破壊することはなかった。 $-30^{\circ}\text{C}$ と $-40^{\circ}\text{C}$ のエビミンチの場合、試験片の載荷線上に縦長の裂け目状の空洞が発生したが、試料全体が塑性変形し、分裂することはなかった。 $-50\sim-70^{\circ}\text{C}$ では、魚肉ソーセージとエビミンチの試験片は載荷線上でほぼ二分裂していた。

#### 第4章 アイスグレーズ食品及び氷挿入食品の割裂破壊挙動の解析

本章では、魚肉ソーセージまたはエビの外側にグレーズ氷をつけた「アイスグレーズ食品」と魚肉ソーセージの中心部に氷の円柱を挿入した「氷挿入食品」を実験試料として用いた。アイスグレーズ食品の破壊挙動を明らかにするため、 $-20\sim-70^{\circ}\text{C}$ の各温度で割裂試験を行った。

割裂試験後の観察の結果、非拘束条件のアイスグレーズ食品では全ての試験温度において、外側のグレーズ氷が優先的に破壊し、中心部の食品（魚肉ソーセージまたはエビ）を傷つけることなく無傷で取り出すことができた。拘束条件のアイスグレーズ魚肉ソーセージについても、非拘束条件と同様に、魚肉ソーセージを傷付けることなく、グレーズ氷を分離することができた。

応力集中現象に関する数値解析の結果、グレーズ氷と食品について、非拘束条件の試料及び拘束条件の試料とも、グレーズ氷内で発生する最大応力がグレーズ氷の破壊応力に達した時点では、食品内で発生する最大応力は食品の破壊応力に達していないことが明らかになった。これは、割裂荷重を加えることにより、魚肉ソーセージまたはエビよりもグレーズ氷の方が先に破壊することを示唆しており、実際の割裂試験の結果も応力集中現象の解析結果と良好に一致していた。

#### 第5章 治具形状がアイスグレーズエビの割裂破壊に与える影響

本章では、くさび型治具と二山型治具を用い、アイスグレーズエビに押し込むことでグレーズ氷の破壊・分離を検討した。具体的には、上部加圧板にスリット状の溝加工を施し、このスリット溝にくさび型治具または二山型治具を固定した。下部加圧板には、スリット溝付き加圧板を使用し、試料の回転を防いだ。割裂試験は $-30^{\circ}\text{C}$ 、 $-50^{\circ}\text{C}$ 、 $-70^{\circ}\text{C}$ で行った。試験終了後、荷重-変位曲線により割裂破壊挙動を解析し、割裂破壊応力を求めた。加えて、アイスグレーズエビの割裂試験後の状態を目視により観察し、グレーズ氷の分離状況、食品の傷の有無を評価した。これらの結果より、くさび型治具または二山型治具が割裂破壊応力やグレーズ氷の分離率に与える影響を検討した。

試験温度 $-30^{\circ}\text{C}$ 、 $-50^{\circ}\text{C}$ 、 $-70^{\circ}\text{C}$ において、くさび型治具及び二山型治具を使用することにより、平面加圧板と比較して割裂破壊応力が大幅に低減できることを明らかにした。しかし、両治具の押し込み試験後のグレーズ氷の分離率については、平面加圧板と比較して、くさび型治具、二山型治具とも低下していた。

## 第6章 有限要素法 (FEM) によるアイスグレーズエビの破壊挙動の解析と新規グレーズ氷分離装置の提案

本章では、FEM (Fusion 360 解析ソフト) を使用し、直方体状アイスグレーズ食品の破壊挙動の数値解析を行った。①平面加圧板による平面圧縮、②平面加圧板にステンレス丸棒を取り付けた線荷重による加圧、③ローラー式加圧治具による連続式線荷重による加圧、④並列スプロケット付きローラー加圧治具による連続式点荷重による加圧について、破壊試験及び FEM 解析を行った。①については、各実験温度において FEM 解析は実験結果を良好に説明することができた。FEM 解析を利用した本解析手法の妥当性を示すことができた。②については、グレーズ氷の破壊に必要な荷重を算出することができた。この結果より、グレーズ氷を分離するためには、膨大な荷重を加える必要があり、直方体の面を加圧する方法は、実用的ではないことが明らかになった。③については、平面加圧板の場合は平面載荷 (面荷重) であり、円柱状のローラー式加圧治具の場合は線状の載荷状態 (線荷重) となっている。線荷重のグレーズ氷の破壊は応力が集中しやすいことから、平面加圧板よりもローラー式加圧治具の方がグレーズ氷の破壊に必要な荷重の低減が可能であった。④については、スプロケット付きローラー式加圧治具の場合は点載荷の状態となっているため、グレーズ氷の破壊に必要な荷重の低減効果については、ローラー式加圧板よりもスプロケット付きローラー加圧治具の方がさらに高い効果を示した。また、従来の解凍方法に比べて大幅に時間の短縮ができたことが示した。アイスグレーズ食品のグレーズ氷の破壊挙動についての FEM 解析及び破壊試験により、グレーズ氷を壊すための必要な荷重は面荷重より線荷重、線荷重より点荷重の順に減っていくとの仮説が検証できた。

## 第7章 総括

本研究において、ブロック凍結食品に代表されるアイスグレーズ食品のグレーズ氷の機械的分離について、食品を傷つけることなくグレーズ氷を優先的に破壊することが可能であることを示すことができた。そのために材料試験を行うことにより、単体試料の材料力学物性を評価し、応力集中現象に基づいたグレーズ氷の優先的破壊を解析した。その後、FEM 解析と破壊試験を組み合わせ検証を行った。その結果、食品を傷つけることなくグレーズ氷を優先的に破壊することが可能であることを示した。その際に平面加圧板、くさび型治具、二山型治具、円柱状のローラー式加圧治具およびスプロケット付きローラー加圧治具を用いてアイスグレーズ食品のグレーズ氷の破壊分離を行い、治具形状がグレーズ氷の分離に及ぼす影響を検討した。グレーズ氷の破壊に必要な荷重を低減するためには、点荷重が有効であることが FEM 解析により明らかになり、スプロケット付きローラー加圧治具が荷重の低減効果が最も良好な治具であることが明らかになった。点荷重治具でブロック凍結エビを分離したところ、エビが一尾一尾に分離することができた。それについて、解凍時間が測ると90%低減することができることが明らかとなった。以上の結果より、本研究の目的が達成できたと考えている。食品産業にとって、点荷重治具は実用性の高いグレーズ氷の分離装置であり・提案した機械的分離方法は有効な分離方法だと考えており、食品産業の解凍加工に利用されることを希望している。