

受賞者総説

低温材料力学物性を利用した凍結魚の加工技術に関する研究

(平成 12 年度日本水産学会賞技術賞受賞)

羽 倉 義 雄*

広島大学生物生産学部

Studies on the New Processing Methods of Frozen Fish Using
Its Cryogenic Mechanical Properties

Yoshio Hagura*

*Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University,
Kagamiyama 1-4-4, Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8528, Japan*

1. はじめに

食品素材（例えば、魚体）が置かれている物理学的環境因子（圧力 p -体積 v -温度 T ）を変化させると、食品自体のあらゆる物性が大きく変化する。食品素材の物理学的環境因子を制御した加工や保存の技術では、冷蔵や冷凍による水産物の保存が古くから行われている。¹⁾ また近年では、高圧を利用した食品の加工（殺菌、解凍、タンパク質の変性や凝固、酵素の失活など）に関する研究^{2,3)}やガラス化による食品の保存に関する研究^{4,5)}などが盛んに行われている。物理学的環境因子（ p - v - T ）の中では、温度は比較的制御が容易なパラメータである。また、材料力学物性の面から見ると、温度変化に伴う固体（凍結状態）-液体（未凍結状態）の相変化を境にして、食品素材（魚肉など）の物性が大きく変化的ことが知られている。⁶⁾ さらに、凍結状態の食品素材では、温度の低下に伴って、食品素材そのものが硬く壊れ難くなるが、脆化（ぜいか）温度以下になると急激に脆く壊れ易くなる現象が発現する。⁷⁻⁹⁾ このように食品素材の温度を制御することにより、その食品素材の材料力学物性（例えば、破壊強度や粘弾性）を変化させることができる。

本研究では、食品素材（魚体）の物性変化の中で、とくに低温下の材料力学物性に着目し、温度変化に伴う凍結魚の材料力学物性の変化を魚体の加工処理に積極的に利用する方法について検討を行った。その結果、魚体を構成する組織の低温下での材料力学物性の違いを利用した、魚体の新規加工法を提案することができた。本稿においてはその概要を説明する。

2. 凍結粉碎と分級操作を組み合わせた魚体の組織分離^{10,11)}

現在の魚体処理工程では人手に頼る部分が多いため、大量の魚体を短時間で処理することは困難である。ところが、サバやイワシなどの多獲性赤身魚では、その漁獲に季節性があるため、一時期に集中して水揚げされることが多い。そのため、漁獲量が多い時期には、食品としての加工処理が追いつかず、鮮度の面で問題がある魚は飼料や肥料などの非食品として加工されることが多い。また、赤身魚は白身魚と比べて脂肪の含有量が多く、とくに EPA や DHA などの高度不飽和脂肪酸を多く含むため、生化学的にも利用価値が高い油脂を抽出できる可能性がある半面、油脂の酸化が起り易い問題もある。そこで、より多くの多獲性赤身魚を食品として利用するためには、迅速かつ大量に魚体を加工処理する方法を開発し、魚の鮮度低下を抑える必要がある。さらに、魚体の組織ごとの利用特性を考慮して、利用特性が異なる組織を別々に分離回収し、それぞれを別々に利用・加工することも重要である。例えば、多獲性赤身魚では、脂肪が多い組織と少ない組織に分離し、脂肪が多い組織（例えば、皮下脂肪層）は脂質の抽出に利用し、脂肪が少ない組織（筋肉）は魚肉（酸化等の変性を起こし難い加工原料）として利用することが、資源の高率的な利用の面からも望ましい。また、加工残滓（廃棄物）の減量にも役立つ。そこで本研究では、魚体処理の一つの方法として、凍結粉碎と分級操作を組み合わせた機械的な魚体の組織分離法の開発を目指した。具体的には、多獲性赤身魚から低脂肪組織を分離する方法と水産加工廃棄物（魚

*Tel : 81-824-24-7938, Fax : 81-824-24-7938, E-mail : hagura@hiroshima-u.ac.jp

頭部と中落ち)から可食部(筋肉組織)と非可食部(骨、皮、スジ、エラ等)を分離する方法について検討を行った。

凍結粉碎と分級操作を組み合わせた魚体の組織分離法に関する考え方を「多獲性赤身魚からの低脂肪組織の分離」を例に説明する。多獲性赤身魚の筋肉組織と皮下脂肪組織では、その脂肪含有量に大きな違いがある。¹²⁾ この脂肪含有量の違いは、凍結時には、組織の硬さの違いや脆化温度の違いとなって表われる。すなわち、脂肪の少ない筋肉組織は比較的高い凍結温度で脆化するのに対して、脂肪の多い皮下脂肪組織ではかなりの低温で凍結を行わないと脆化しない。⁹⁾ 例えば、筋肉組織と皮下脂肪組織の脆化温度が、それぞれ -50°C と -70°C であったとする。この両組織を含んだ魚体全体を -60°C で凍結粉碎すると、既に脆化温度に達している筋肉組織は、粉碎が良好に進行し微粉末に、また、脆化温度に達していない皮下脂肪組織については、あまり粉碎されず比較的大きな粒子となる(この現象を優先粉碎と言う)。得られた粉碎物を適切な目開きのふるいで分級することにより、小粒子径のフラクション(微粉末)から筋肉組織が、大粒子径のフラクション(粗粉末)から皮下脂肪組織が、それぞれ分離回収できることになる。

本研究では、至適温度で凍結した魚体を凍結粉碎し、適切な目開きのふるいを用いて分級操作を行うことにより、必要とする組織の分離回収が可能であることを明らかにした。^{8,13)} さらに、魚体の各組織の脂肪含有量により最適凍結粉碎温度が決まることを明らかにした。⁹⁾ この分離法を用いることにより、サバ、イワシ等の多獲性赤身魚から低脂肪組織(筋肉組織)の分離回収が可能であった。¹³⁾ さらに、魚の頭部や中落ち等の水産加工廃棄物から可食部(筋肉組織)と非可食部(骨、皮、スジ、エラ等)をそれぞれ分離回収することも可能であった。¹⁴⁾ 本研究では、この分離法による組織の分離機構を記述する数学モデルの構築を行い、組織の分離回収を行うための最適操作条件(凍結粉碎と分級の操作パラメータ)の決定方法を提案した。¹⁵⁾

3. 低温脆性を利用した魚体の切断加工(凍結切断)^{11,16)}

現在、冷凍マグロに代表される大型魚の切断加工には、電動鋸が使用されている。電動鋸を用いた切断では、鋸屑の発生に伴う歩留まりの低下や、鋸の歯の破損に伴う食品への混入などの問題に加え、その作業には危険が伴う。また、鋸屑となる可食部分の大部分は廃棄されている。これらの食資源を無駄にしないためには、鋸屑を発生させずに凍結魚を切断する必要がある。また、小型魚に対しても、凍結状態のまま切断加工が可能になれば、機械的な大量処理などの利点がある。また、漁獲直後の凍結時から加工・調理される直前の解凍時まで、

凍結状態の一定温度下で一貫して温度管理が可能になるため、鮮度や衛生面での利点も期待できる。そこで本研究では、低温脆性を利用した魚体の切断加工(凍結切断)技術の開発を目指した。

低温脆性を利用した魚体の切断加工に関する考え方を「凍結魚の輪切り加工」を例に説明する。冷凍魚の材料力学物性(破断挙動)の温度依存性は、筋肉や内臓、骨などの組織ごとにそれぞれ異なる。そこで、この温度依存性を利用して、これらの組織の破断挙動を温度制御により一致させることができれば、破断挙動を利用した切断加工(凍結切断)を行う上では、複数の組織からなる魚体においても組織の種類に係わらず、見かけの上では単一の組織として取り扱えるようになる。すなわち、冷凍魚の魚体温度を低温下(各組織が脆性を示す温度付近)で制御し、各組織の破断挙動をほぼ一致させることが可能になれば、あたかもチョーク(白墨)を折るように、複数の組織からなる冷凍魚を3点曲げ荷重により切断(割断)できることになる。

本研究では、至適温度で凍結した魚体に曲げ荷重(輪切り加工)や割裂荷重(縦切り加工)を加えることにより、刃物を使用しない魚体の切断加工が可能であることを明らかにした。^{17,18)} さらに、輪切りおよび縦切り加工では、魚体の脂肪含有量により最適加工温度が決まることを明らかにした。輪切り加工では、魚体に僅かな切り欠きを加えることにより、滑らかな切断面が得られ、さらに、切断に必要な荷重を大幅に低減できることを示した。¹⁹⁾ 魚体の縦切り加工では、加工温度を厳密に選択することにより、背骨や内臓の分離も可能であった。この場合、内臓や骨が筋肉に対して応力集中源として作用していることを明らかにした。²⁰⁾ 本研究では、凍結割断法による魚体の切断機構を記述する数学モデルの構築を行い、最適切断加工条件の決定方法を提案した。²¹⁾

4. 終わりに

本研究では、温度変化に伴う凍結魚の材料力学物性の変化を魚体の加工処理に積極的に利用する方法について検討を行ってきた。その結果、魚体を構成する組織の低温下での材料力学物性の違いを利用した、魚体の新規加工法として、「凍結粉碎と分級操作を組み合わせた魚体の組織分離」と「低温脆性を利用した魚体の切断加工(凍結切断)」を提案することができた。終わりに代えて、本研究が目指す最終的な目標を紹介させて頂く。

本研究では現在までに、凍結状態で流通している魚体を解凍することなく加工処理し、魚体の組織を分離する技術と魚体を切断加工する技術の開発を行ってきた。その過程で、魚の頭部や中落ち等の水産加工廃棄物から可食部(筋肉組織)と非可食部(骨、皮、スジ、エラ等)をそれぞれ分離回収できることが明らかになった。今後

の目標として、これらの技術を組み合わせることにより、魚体の完全利用が可能になる加工処理技術の構築を行いたい。具体的には以下のような加工処理の流れを考えている。

凍結状態の魚体を輪切りや3枚おろしの状態に加工することにより、可食部（例えば、フィレ）と非可食部（頭部や中落ち）に分離する。ここでは、魚体の鮮度保持や細菌汚染の防止、廃棄物（鋸屑）の減量が可能になる。また、凍結状態の魚体を凍結粉碎し、精密な分級を行うことにより、利用特性ごとに組織を分離する。ここでは、魚体処理効率の向上による鮮度保持や利用特性ごとに組織を分離することによる廃棄物の減量が可能になる。次に、魚体の切断加工により発生する非可食部（頭部や中落ち）については、凍結粉碎と分級操作を組み合わせた組織分離法を利用して、さらに可食部（筋肉組織）と非可食部（骨、皮、スジ、エラなど）に分離する。ここで得られた可食部は食用として再資源化する。また、非可食部の中では、骨に魚油が多く含まれていることから、魚油の抽出と抽残魚骨からのカルシウムの回収を現在試みている。さらに、皮やスジからコラーゲンなどを抽出できる可能性がある。以上のような加工処理の流れを構築することにより、廃棄物を可能な限り減らす加工技術（魚体の完全利用技術）の開発に関する一つの手法を提案できる可能性がある。しかし現状では多くの課題も残っている。例えば、分離精度の向上は、回収率の向上のためには欠かせない課題である。また、切断精度の向上もフィレなどの商品価値や歩留りを左右する重要な課題である。

謝 辞

本研究は東京水産大学水産学部旧食品変換操作工学講座（現食品プロセス工学研究室）ならびに広島大学生物生産学部食品工学研究室において行ったものである。本研究を遂行するにあたり、東京水産大学水産学部元教授故酒井愿夫先生、同教授渡辺尚彦先生、同助教授石川雅紀先生、広島大学名誉教授久保田清先生、生物生産学部教授鈴木寛一先生をはじめ、多くの先生方に終始ご指導ご鞭撻を賜った。皆様に心から御礼申し上げる。

文 献

- 1) 桑野貢三：冷凍史概論，「日本冷凍史」（社団法人日本冷凍空調学会日本冷凍史編集委員会編），社団法人日本冷凍空調学会，東京，1998；pp. 8-34.
- 2) 早川 功．殺菌と解凍への高圧技術，「食の先端科学」（相良泰行編），朝倉書店，東京，1999；pp. 133-149.
- 3) 食品産業超高圧利用技術研究組合編．高圧技術と高密度

- 培養，健康産業新聞社，東京，1993；pp. 1-299.
- 4) 高井陸雄．食品におけるガラス状態（固化状態）の利用技術，「食の先端科学」（相良泰行編），朝倉書店，東京，1999；pp. 119-132.
- 5) Roos YH. Phase Transitions in Food, Academic Press, San Diego, 1995, pp. 1-360.
- 6) 小川 豊，羽倉義雄．マグロ類のヤング率およびポアソン比の測定．日本冷凍協会論文集 1992；9：283-290.
- 7) Watanabe H, Hagura Y, Ishikawa M, Sakai Y. Elastic modulus of orange juice ice. J. Food Process Engineering 1991；14：1-8.
- 8) Hagura Y, Watanabe H. Factors affecting separation of low fat flesh from fatty fish by cryo-shattering. J. Food Sci. 1991；56：1567-1571.
- 9) 羽倉義雄，渡辺尚彦．シャルピー衝撃試験機を用いた最適凍結粉碎温度の決定，日本冷凍協会論文集 1992；9：277-282.
- 10) 羽倉義雄．食品加工における凍結粉碎，「食品とガラス化・結晶化技術」（村勢則郎，佐藤清孝編），サイエンスフォーラム，東京，2000；pp. 215-220.
- 11) 羽倉義雄．冷凍破砕と食品素材，「低温環境利用技術ハンドブック」（関信弘編），森北出版，東京，2001；pp. 380-384.
- 12) 野中順三九他．新版水産食品学，恒星社厚生閣，東京，1976，pp. 27-29.
- 13) Hagura Y, Watanabe W, Ishikawa M, Sakai Y. An application of cryo-shattering to low-fat meat separation from whole fish of mackerel and sardine, Nippon Suisan Gakkaishi 1989；55：2119-2122.
- 14) 羽倉義雄，堀田隆平，鈴木寛一，久保田清．凍結粉碎を利用した水産加工廃棄物の再資源化に関する研究，化学工学会第32回秋季大会研究発表講演要旨集，1999；p. c303.
- 15) 羽倉義雄，堀田隆平，鈴木寛一，久保田清．凍結粉碎を利用した水産加工廃棄物からの未利用資源の機械的分離回収法に関する研究，日本食品工学会第1回年次大会講演要旨集，2000；p. 143.
- 16) 羽倉義雄．食品の低温材料力学物性を利用した食品素材の加工処理，食品工学ニュースレター 1996；No. 12：3-6.
- 17) Okamoto K, Hagura Y, Suzuki K, Kubota K. Utilization of Brittle fracture properties of frozen foodstuffs, in "Developments in Food Engineering" (ed. By T. Yano, R. Matsuno, and K. Nakamura), Blackie Academic & Professional, London, 1994；pp. 253-255.
- 18) 岡本 清，羽倉義雄，鈴木寛一，久保田清．曲げ荷重により切断した凍結魚肉の切断面角度に及ぼす筋線維配向角度の影響，日本食品科学工学会誌 1996；43：pp. 1035-1041.
- 19) 羽倉義雄，高岡詩織，鈴木寛一，久保田清．刃物を使用しない凍結魚体の切断加工に関する研究（曲げおよび割裂荷重を加えた凍結魚体の破断挙動），平成9年度日本水産学会春季大会講演要旨集，1997；p. 141.
- 20) 羽倉義雄，横畑真紀，鈴木寛一，久保田清．刃物を使用しない凍結魚体の切断加工に関する研究（割裂荷重下の凍結魚体の破断機構），平成10年度日本水産学会春季大会講演要旨集，1998；p. 186.
- 21) 羽倉義雄，岡本 清，鈴木寛一，久保田清．凍結魚肉の引っ張り破壊挙動の筋線維配向角度依存性に関する研究，日本冷凍空調学会論文集 1999；16：pp. 257-262.