

凍結条件が解凍後マアジフィレーの離水に及ぼす影響

鈴木絢子・宮木廉夫・大島育子・眞角（宮崎）里帆・野口絵理香・桑原浩一

Effects of freezing conditions on drip loss from thawed fillets of jack mackerel

Ayako SUZUKI, Kadoo MIYAKI, Ikuko OSHIMA, Riho MIYAZAKI-MASUMI, Erika NOGUCHI and Koichi KUWAHARA

近年の世界的な和食ブームにより寿司や刺身といった水産物の消費形態が浸透し、海外においても生食用水産物の需要が高まっている。本県では新たな輸出向け対象魚種として、養殖マアジの生産及び出荷を推進しているが、更なる輸出拡大を図るため、長期保管が可能な生食用冷凍商材の品質を高める技術が求められている。また、鮮魚の生食ではアニサキス症のリスクが懸念されるが、一定期間冷凍保管した魚肉ではそのリスクが解消される。

一般的に冷凍解凍した魚肉では、解凍後のドリップ（離水）生成や肉質の劣化などの品質低下が起こる。¹⁾ これらの品質低下は冷凍魚肉の普及当初から指摘されている重要な課題であり、その主要因は、筋肉タンパク質の変性や物理的破壊と考えられているが、根本的な解決策は見出されていない。これまで、筋肉タンパク質のモデルとして魚肉から抽出した筋原線維タンパク質（Mf）を用いた解析²⁻⁴⁾が盛んに行われ、品質を向上させる方法がいくつか提案されているものの、筋肉そのものを用いた解析は少ない。ヒラメ *Paralichthys olivaceus* 肉において、凍結前の鮮度と解凍後の離水について解析⁵⁾されているものの、筋肉中の死後の生化学的変化は魚種によって異なることが報告^{6,7)}されており、マアジにおける凍結解凍後の品質低下の程度は不明である。さらに、物理的破壊に

は凍結過程における氷結晶生成が大きく関与しており、凍結や解凍条件が影響すると予想される。

そこで、本研究では養殖マアジにおいて冷凍商材の品質を高める目的で、マアジフィレーに適した凍結条件の検討と、凍結前の鮮度が解凍後の肉質に与える影響について調べた。また、これらを調べるにあたって、初めに適切な解凍方法の選定をした。

材料と方法

供試魚 長崎県総合水産試験場の海面生簀で飼育した養殖マアジ *Trachurus japonicus* を供試魚とした（平均体重 251.49 ± 30.48 g）。海面生簀から取り上げた後、海水を満たした 200 L 水槽に収容し、流水掛け流し（換水量 200 L/h 以上）で 17~24 時間静養した。静養後に取り上げ、延髄破壊、脊髄破壊（神経締め）を 1 尾ずつ速やかに行い、三枚におろしてフィレーとした。

解凍方法の検討 左右両側のフィレーをそれぞれ真空包装した後、 -20°C に設定したエタノールブライン凍結機（凍眠 S-150W, 株式会社テクニカン; 以後ブライン凍結機）で 10 分間急速凍結した。凍結後のフィレーは -20°C に設定した冷凍庫内で保管した。解凍処理は、 25°C

に設定したインキュベーター内で約 3.5 時間 (25°C区), 4°Cに設定した冷蔵庫で約 24 時間 (4°C区), 氷中で約 24 時間 (0°C区), 氷:塩 =40:1 (重量比) で混合した氷中で約 24 時間 (-1~-3°C, -2°C区) 静置した 4 区とした。なお, 1 試験区当たり 3 尾を供し, 解凍処理後に離水率を測定した。

凍結方法の検討 三枚におろした左右両側のフィレをそれぞれ真空包装し, -20°Cに設定した冷凍庫内 (緩慢区), -35°Cに設定した冷凍機の送風口前 (エアブラスト区), -35°Cに設定したブライン凍結機 (ブライン区) で凍結した。左側フィレは凍結完了直後の試料とし, 右側フィレは凍結完了後-20°Cに設定した冷凍庫内で 34 日間保管した。なお, 1 試験区当たり 5 尾を供した。また, 凍結前の魚肉中のアデノシン 3 リン酸 (ATP) 量を測定するため 5 尾を即殺神経締めし, 背部普通筋から約 1 g の肉片を採取した。さらに, 各試験区 1 尾をおんどとり (TR-52i, 株式会社ティアンドディ) を用いて, 凍結中の芯温を測定した。フィレの芯温が, 設定温度あるいはそれに近い温度に達したことを確認し, 凍結完了を判断した。凍結完了直後及び 34 日間冷凍保管後に, 中澤と福田⁸⁾の方法に準じて凍結後の普通筋を採取し, ATP 量の測定に供した。また, 34 日間冷凍保管後に解凍し, 離水率を測定した。

凍結前の鮮度が解凍後の肉質に与える影響の検討 即殺神経締めした後, 直ちにフィレ処理した高鮮度区, 約 24 時間氷蔵してフィレ処理した 24 時間氷蔵区, 各区 3 尾を供した。処理したフィレは左右両側とも真空包装し, -20°Cに設定したブライン凍結機で直ちに凍結し, -20°Cの冷凍庫内で 30 日間保管した。なお, 対照として凍結前の高鮮度区及び 24 時間氷蔵区, 各区 3 尾ずつから魚肉片を採取し, ATP 量の測定, 圧出水分率の測定, Mf の変性の解析及び筋肉の組織観察に供した。また, 30 日間の冷凍保管後に解凍し, 離水率を測定後, 魚肉片を採取し, 圧縮弾性強度の測定, Mf の

変性の解析及び筋肉の組織観察に供した。

離水率の測定 離水を含めた解凍後フィレの総重量及びフィレ表面の離水を拭き取ったフィレの重量を測定し, これらの重量差を算出して離水重量として, 以下の式により離水率を算出した。

離水率 (%) = 離水重量 / 解凍後フィレの総重量 × 100

ATP 量の測定 Ehira ら⁹⁾の方法で普通筋から ATP 関連化合物を抽出し, 蒸留水で 10 倍に希釈して Millex-GP フィルターユニット (0.22 µm, メルク株式会社) でろ過した。ATP 量の測定は, 高速液体クロマトグラフィー自動分析システム (ポンプ: LC-20AD, オートサンプラ: SIL-20AC HT, カラムオーブン: CTO-10A, 検出器: SPD-20A, システムコントローラ: CBM-20A, 株式会社島津製作所) を用いた。カラムは InertSustain AQ-C18 (粒子径 3 µm, 長さ 100 mm × 内径 3.0 mm, ジーエルサイエンス株式会社), 移動相はリン酸緩衝液 (50 mM K₂HPO₄ in H₂O (pH 7.0 H₃PO₄)) を用い, 移動相流量は 0.8 mL/min, カラム温度は 40°C, 検出波長は 260 nm とした。

圧出水分率の測定 フィレの背部普通筋から 10 mm 角の魚肉片を 3 片切り出して重量を測定し, 魚肉片の上下をろ紙 (魚肉片に接触する面より順に, No. 4A: 1 枚, No. 2: 3 枚, アドバンテック東洋株式会社) で挟み込み, 遊離水分測定器 (株式会社中央理研) で加圧した。加圧は 10 kg/cm² で 2 分間とし, 加圧後の重量を測定して以下の式により圧出水分率を算出した。

圧出水分率 (%) = (加圧前魚肉片重量 - 加圧後魚肉片重量) / 加圧前魚肉片重量 × 100

圧縮弾性強度の測定 フィレの背部普通筋から厚さ 10 mm 幅で 1 個体当たり各 6 片切り出して, レオメーター (RT-2010D・D, 株式会社レオテック) に直径 3 mm の円柱状プランジャーを装着し, 筋線維方向に対して平行となるように, 荷台上昇速度 1 mm/s で押し込み, プ

ランジャーが魚肉内部に5 mm 進入したときの応力を測定した。6 片の測定値から1 個体当たりの平均値を算出し, 各区3 尾における平均値を算出した。

Mf の変性の解析 フィレーの背部普通筋を採取後, ミンチにして秤量し 50 mL 遠沈管に入れた。50 倍量の 0.05 M NaCl, 20 mM Tris-maleate (pH 7.0) 緩衝液を添加し, スパーテルで懸濁した後, 4,000 rpm で5 分間 (4°C) 遠心分離して得られた沈殿に 10 倍量の同緩衝液を加えて, ホモジナイズ (ポリトロン, Model.K, KINEMATIC 社) し, ナイロンメッシュでろ過した。遠沈管を 5 倍量の同緩衝液で洗浄し, 同じナイロンメッシュでろ過してホモジネートとした。終濃度が 0.05 M 及び 1 M となるよう調製した NaCl 溶液 (20 mM Tris-maleate 含む), 終濃度が 1 M NaCl, 2 mM Mg-ATP となるよう調製した計 3 種の NaCl 溶液で, ホモジネートを 2 倍に希釈した。各希釈液は 20,000 × g で 30 分間遠心分離 (4°C) し, 上清に 8 M 尿素, 2% SDS, 2%-2 メルカプトエタノール, 20 mM Tris-HCl (pH 7.5) 緩衝液を添加して加熱処理 (90°C 程度, 2 分間) 後, 室温で 30 時間以上攪拌し, SDS 電気泳動 (SDS-PAGE) 用試料とした。既成ゲル PAGEL NPG-310L (アトー株式会社) を用い, マーカーは Low (High) molecular weight calibration kit for SDS electrophoresis (GE ヘルスケアジャパン株式会社) とし, 電気泳動後 EZ StainAQua (アトー株式会社) で染色し, 蒸留水で脱色した。

筋肉の組織観察 フィレーの背部普通筋から筋線維方向に対して垂直になるよう 10 mm 幅で切り出して小片とし, 10% 中性緩衝ホルマリンで固定後, 70% エタノールに置換して常温で保管した。試料はエタノール系列で脱水後, パラフィン (ParaPlust, シグマアルドリッチジャパン合同会社) に包埋してマイクロトームで厚さ 4 μm に薄切し, 切片を作製した。切片はワンギーソン法で染色し, 封入後の切片を光学顕微鏡で観察した。

統計処理 Statcel Ver.3 (有限会社 OMS 出版) を用い, 各群について正規性の検定及びバートレット検定による等分散性の検定を行った。正規性及び等分散性が認められた場合, 一元配置分散分析により有意差を確認し, Tukey-Kramer 法, または Bonferroni/Dunn 法により各群間での有意差を検定した。正規性及び等分散性のいずれか, あるいはいずれも認められなかった場合, Steel-Dwass 法により各群間での有意差を検定した。また, 2 群間の有意差の検定には Student の T-test を用いた。有意水準は $P < 0.05$ とした。

結 果

解凍方法の検討 異なる解凍温度で解凍した養殖マアジフィレーの離水率は, 25°C 区, 4°C 区, 0°C 区及び -2°C 区それぞれ 2.71 ± 0.42 , 1.42 ± 0.93 , 1.07 ± 0.46 及び $1.30 \pm 0.20\%$ で, 0°C 区が最も低い値, 25°C 区が最も高い値を示し, 0°C 区と 25°C 区間のみ有意な差が認められた (Fig. 1)。この結果から, 以降の試験での解凍温度は, 最も離水が少なかった 0°C とした。

凍結方法の検討 各試験区のフィレーの芯温変化を Fig. 2 に示した。緩慢区では, 凍結開始から約 14 時間経過して最低温度 -19°C に到達し, 凍結速度勾配が最も緩やかであった。エアブラスト区は, 凍結開始から 75 分間後に -35°C に到達した。ブライン区は, 凍結開始から

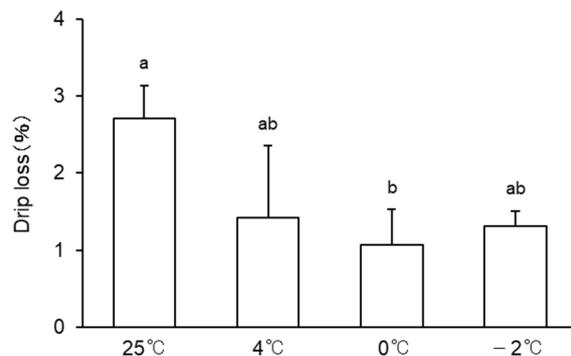


Fig. 1 Drip loss of frozen fillets at different thawing temperature. Values are the mean ± SE ($n=3$). Different letters indicate statistical significance ($P < 0.05$).

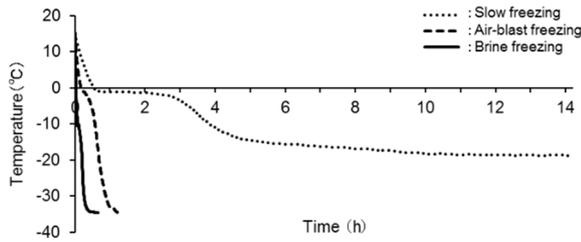


Fig. 2 Changes in fillets temperature during different freezing conditions. The temperature was measured at central part of fillets.

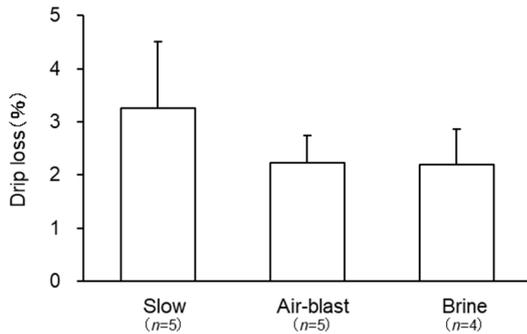


Fig. 3 Drip loss of fillets frozen by different freezing conditions. Fillets were stored at -20°C for 34 days, and thawed for 24 hours at 0°C . Values are the mean \pm SE ($n=4$ or 5). No significant difference was observed among three groups ($P > 0.05$).

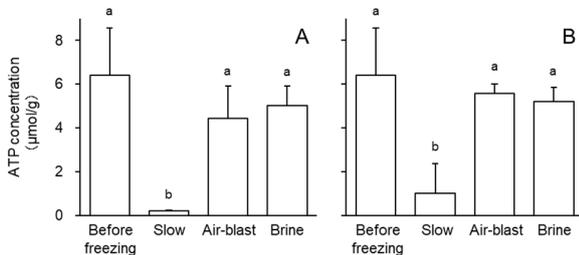


Fig. 4 ATP concentration of fillets frozen by different freezing conditions. (A) just after freezing, and (B) after 34 days storage at -20°C . Values are the mean \pm SE ($n=5$). Different letters indicate statistical significance ($P < 0.05$).

40分間後に -35°C に到達し、3試験区で凍結速度の勾配は最も急であった。

凍結方法が異なる3試験区(緩慢区, エアブラスト区及びブライン区)の離水率は、それぞれ 3.26 ± 1.25 , 2.22 ± 0.52 及び $2.19 \pm 0.67\%$ であり、有意差は認められないものの、緩慢区の離水が最も多かった (Fig. 3)。

ATP量を測定した結果、凍結前は 6.40 ± 2.16 $\mu\text{mol/g}$ 、凍結直後のエアブラスト区及びブライン区は、それぞれ 4.43 ± 1.50 及び 5.01 ± 0.89

$\mu\text{mol/g}$ と高い値で、凍結前と有意差は認められなかった。緩慢区では 0.20 ± 0.04 $\mu\text{mol/g}$ で他試験区と比べ有意に低く、凍結過程での顕著なATP分解が確認された (Fig. 4A)。また、 -20°C 下で34日間保管してもATP量は凍結直後と同様の傾向を示した。すなわち、エアブラスト区及びブライン区は、凍結前との有意差はなく、それぞれ 5.57 ± 0.45 及び 5.21 ± 0.64 $\mu\text{mol/g}$ と高い値を示し、一方で、緩慢区は 1.01 ± 1.37 $\mu\text{mol/g}$ と凍結前と比べて有意に低かった (Fig. 4B)。

エアブラスト区とブライン区の離水率及びATP量に有意差は認められなかったが、より短時間で凍結が完了するブライン凍結を以降の試験での凍結方法とした。

凍結前の鮮度が解凍後の肉質に与える影響の検討

凍結前のATP量が解凍後の肉質に与える影響を調べるため、即殺後の保存期間が異なる試料を用いた。凍結前のフィレー(普通筋)中のATP量は、即殺直後(高鮮度区)は 5.13 ± 1.57 $\mu\text{mol/g}$ 、即殺後24時間氷蔵後(24時間氷蔵区)は 0.20 ± 0.01 $\mu\text{mol/g}$ であった。両試験区間のATP量には、有意差が認められた (Fig. 5)。

圧出水分率については、高鮮度区で $15.18 \pm 1.24\%$ 、24時間氷蔵区では $23.26 \pm 4.86\%$ であり、高鮮度区の圧出水分率が有意に低い値を示し (Fig. 6)、高濃度のATPを含有している方が保水性は優れていた。

両区のフィレーをブライン凍結し、 -20°C 下で30日間冷凍保管後解凍した際の離水率は、高鮮度区は $3.16 \pm 0.07\%$ 、24時間氷蔵区は $5.58 \pm 6.21\%$ を示し、高鮮度区の方が値は低かったが有意差は認められなかった (Fig. 7)。

圧縮弾性強度は、高鮮度区は 55.80 ± 11.26 gf、24時間氷蔵区は 41.14 ± 6.66 gf を示し、高鮮度区の方が値は高かったが有意差は認められなかった (Fig. 8)。

普通筋中のミオシンの塩溶解性をSDS-PAGEで解析したところ (Fig. 9)、凍結前の高

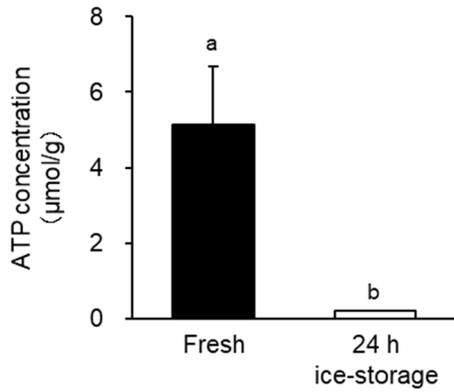


Fig. 5 ATP concentration of fillets from fresh and 24 h ice-stored fish. Values are the mean±SE ($n=3$). Different letters indicate statistical significance ($P < 0.05$).

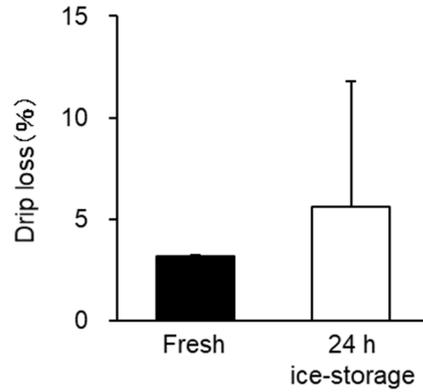


Fig. 7 Drip loss of frozen and thawed fillets from fresh and 24 h ice-stored fish. Fillets were stored at -20°C for 30 days, and thawed for 24 hours at 0°C . Values are the mean±SE ($n=3$). No significant difference was observed between two groups ($P > 0.05$).

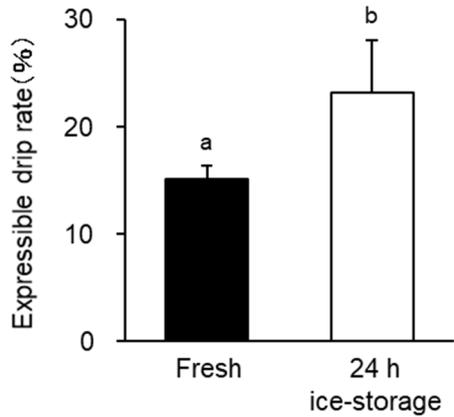


Fig. 6 Expressible water of fillets from fresh and 24 h ice-stored fish. Values are the mean±SE ($n=3$). Different letters indicate statistical significance ($P < 0.05$).

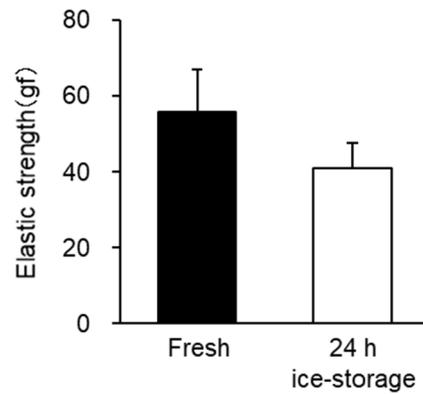


Fig. 8 Elastic strength of frozen and thawed fillets from fresh and 24 h ice-stored fish. Fillets were stored at -20°C for 30 days, and thawed for 24 hours at 0°C . Values are the mean±SE ($n=3$). No significant difference was observed between two groups ($P > 0.05$).

鮮度区では, 0.05 M NaCl 下では遠心上清に Mf 成分はほとんど回収されず (Fig. 9A-b), 1 M NaCl 下ではミオシンを含む大半の Mf 成分が遠心上清に回収され, 塩溶解性を保持していることが確認できた (Fig. 9A-c)。凍結前の 24 時間氷蔵区では, 1 M NaCl 下で回収されるミオシン (Fig. 9B-c) が減少し, 1 M NaCl+Mg-ATP 下で回収されるミオシンは, ホモジネート全体 (Fig. 9B-a) と同程度であり, ミオシンそのものは塩溶解性を保持していた (Fig. 9B-d)。冷凍保管後解凍した場合, 高鮮度区では, 凍結前 (Fig. 9A-c) と異なり, 1 M NaCl 下で回収されるミオシンはごく僅かとなり, 塩溶解性を消失

していることが確認された (Fig. 9C-c)。しかし, 1 M NaCl+Mg-ATP 下では, 回収されるミオシン (Fig. 9C-d) はホモジネート全体 (Fig. 9C-a) と同程度となった。24 時間氷蔵区では, 1 M NaCl 下 (Fig. 9D-c) だけではなく, 1 M NaCl+Mg-ATP 下でも回収されるミオシンは僅かであった (Fig. 9D-d)。冷凍保管後解凍すると, 高鮮度区のみミオシン自身は塩溶解性を保持していることが認められた。

普通筋断面の光学顕微鏡の組織像を Fig.10 に示した。凍結前は, 高鮮度区と 24 時間氷蔵区で明らかな違いは確認されなかった (Fig. 10A, B)。冷凍保管後解凍した高鮮度区は, 筋

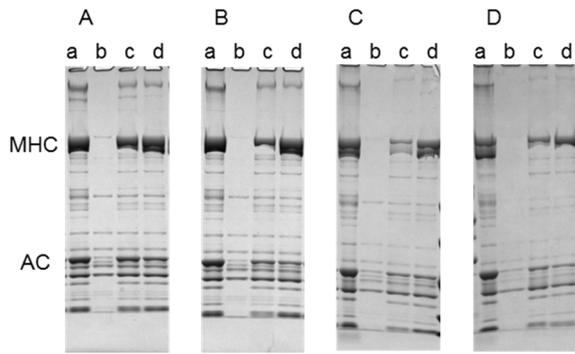


Fig. 9 Myosin denaturation pattern of the fillets from fresh and 24 h ice-stored fish using SDS-PAGE. (A) fillets from fresh fish, (B) fillets from 24 h ice-stored fish, (C) freeze-thawed fillets treated by same condition as (A), (D) freeze-thawed fillets treated by same condition as (B). (a) whole protein, (b) supernatant, (c) salt-soluble fraction without Mg-ATP, and (d) salt-soluble fraction with Mg-ATP. MHC and AC indicate myosin heavy chain and actin.

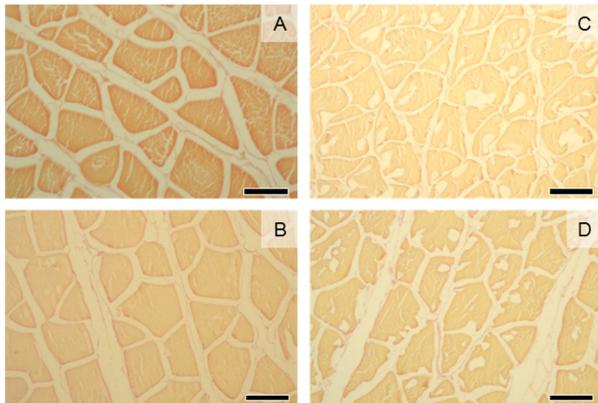


Fig. 10 Light microscopic images of cross-sections of ordinary muscles stained by Van Gieson method. (A) and (C), fillets from fresh fish, and (B) and (D), fillets from 24 h ice-stored fish. The left side are before freezing fillets, and the right side are freeze-thawed fillets. Bar, 100 μ m.

細胞の損傷が 24 時間氷蔵区よりも小さく、解凍後の筋細胞の復元状態が良好であった (Fig.10C) が、24 時間氷蔵区は、解凍後に筋細胞から結合組織が剥離し、筋細胞の損傷が確認された (Fig. 10D)。

考 察

養殖マアジ冷凍フィレートの品質を高めることを目的に、養殖マアジフィレートを凍結、冷凍保管及び解凍処理し、筋肉の保水性の一つの指標である離水への影響について検討を進めた。

高鮮度な状態で急速凍結した魚肉を急速に解凍すると解凍硬直で筋肉が収縮し、多量の離

水が発生することがある。^{1),10)} 今回即殺処理した養殖マアジのフィレートを急速凍結し、各種条件で解凍した結果、0°C下 (氷水中) での解凍が最も低い離水率を示すことを明らかにした。ミンクジラ *Balaenoptera acutorostrata* の冷凍肉では、-3°C程度の温度帯で予冷したのち解凍することで、解凍硬直を抑制できると報告¹⁰⁾ されているが、本結果では0°Cと-1~-3°C下での解凍では、離水率は同程度に低かった。0°C下での解凍は氷水中に浸漬するだけであり、氷が全て融解しない限り温度安定性も高く、冷凍商材の出荷先においても実用可能な簡便な方法と想定される。

養殖マアジフィレートのエアブラストまたはエタノールブラインでの凍結速度は緩慢凍結よりも明らかに速く、凍結完了までにそれぞれ約 75 分間または 40 分間で完了した。また、0°C解凍後の離水率は、エアブラスト及びブライン凍結が緩慢凍結よりも低かった。さらに、各凍結方法で凍結したフィレートに残存する ATP 量を凍結完了後に測定した。エアブラスト及びブライン凍結では凍結前と同程度の高い ATP 量を示し、ATP はほとんど分解されていなかったが、緩慢凍結したフィレートの ATP 量は、他の試験区よりも有意に低い値を示し、凍結完了までに大半の ATP が分解されてしまうことを確認した。高濃度の ATP はタンパク質の冷凍変性抑制効果があるといわれている^{3),4)} が、即殺直後の魚肉には ATP が多く含まれるものの、ATP は死後速やかに分解されてしまう。そのため、ATP の分解が進行する前に急速凍結することで、高濃度の ATP を含有する冷凍フィレートの製造が可能であり、解凍後の離水が抑制される傾向にあると推察した。このことは、コイ *Cyprinus carpio* 筋肉においても、凍結速度が速いほど ATP 量は高濃度に維持されていたことが報告¹¹⁾ されており、速やかな凍結による ATP 保持の有効性を示している。また、本研究では、エアブラスト凍結とブライン凍結の差が見られなかった。今回用いたマアジ程度のフィ

レーの厚みであれば, エアブラスト凍結も有効であると考えられる。

養殖マアジを即殺し, 直ちに, または, 即殺後 24 時間氷蔵した後にフィレーを調製して ATP 残存量を測定したところ, 即殺直後のフィレーは高い ATP 残存量であったが, 氷蔵後に調製したフィレーはほぼ ATP が分解されていた。そこで, 両フィレーをブライン凍結し, -20°C 下で 30 日間冷凍保管後, 解凍して離水率を比較すると, ATP が残存するフィレーは ATP が分解されたフィレーよりも低い離水率であった。フィレー中の Mf の変性を SDS-PAGE で解析すると, ATP が分解されたフィレーでは解凍後にミオシンの塩溶解性は消失していたが, ATP が残存するフィレーではミオシンが塩溶解性を保持していることを確認し, ATP によるミオシンの冷凍変性抑制作用が推測された。また, 解凍したフィレーで普通筋組織の復元状態を観察すると, ATP が残存するフィレーは ATP が分解されたフィレーよりも, 解凍後の筋細胞の復元状態が良好であった。

これらのことから, 凍結保管中の高濃度の ATP は, ミオシンの変性や筋細胞の損傷を抑え, 結果的に解凍後の離水を抑える傾向があると推察された。ATP の作用機序は不明であるが, 凍結前の鮮度が, 凍結後の氷結晶の生成に影響するともいわれている^{12), 13)} ことから, ATP の存在は Mf 成分の各種結合, 水和力の変化, 筋細胞内のミオシン構造の維持, 氷結晶の生成抑制など, 生理的, 物理的に何らかに作用したと考えている。

凍結前の魚肉の鮮度, すなわち高濃度の ATP 残存は, フィレーなど生食用冷凍商材の品質を向上させる。本研究の対象である養殖マアジは, 旋網の様に大量に漁獲されるものではなく, 1 尾ずつ水揚げし, 即殺神経締め後直ちに急速凍結するといった処理が可能である。この一連の工程で処理することで, 養殖マアジは高品質で高価格な輸出用冷凍商材となり得る可能性がある。

謝 辞

この研究において, ATP の測定ならびに組織観察に際してご指導頂いた長崎大学総合生産科学域水産・環境科学総合研究科の橘 勝康教授ならびに王 曜博士に感謝いたします。また, 取りまとめに際してご助言を頂いた長崎大学総合生産科学域水産・環境科学総合研究科の吉田朝美准教授に感謝いたします。試料の提供ならびに試験の実施にご協力いただいた長崎県総合水産試験場環境養殖技術開発センター養殖技術科ならびに水産加工開発指導センターの皆様にお礼申し上げます。

文 献

- 1) 岡崎恵美子. 水産物の冷凍. 「新版食品冷凍技術」(新版食品冷凍技術編集委員会編), 社団法人日本冷凍空調学会, 東京. 2009; 67-110.
- 2) 松本行司, 大泉 徹, 新井健一. コイ筋原線維たんぱく質の冷凍変性に及ぼす糖の保護効果. 日本水産学会誌 1985; 51: 833-839.
- 3) 緒方由美, 進藤 穰, 木村郁夫. ATP による魚類筋原線維タンパク質の冷凍変性抑制. 日本水産学会誌 2012; 78: 461-467.
- 4) 今野久仁彦, 今野敬子. 筋肉と筋原線維で異なるミオシンとアクチン凍結変性. 日本冷凍空調学会論文集 2015; 32: 21-27.
- 5) 緒方由美, 岩根理歩, 木村郁夫. 高濃度のアデノシン三リン酸存在下で凍結し解凍したヒラメ肉の性状. 日本水産学会誌 2018; 84: 835-842.
- 6) 内山 均. 鮮度変化. 「白身の魚と赤身の魚」(日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京. 1976; 78-92.
- 7) 岩本宗昭. 致死条件と貯蔵温度. 「魚類の死後硬直」(山中英明編), 恒星社厚生閣,

- 東京. 1991; 74-82.
- 8) 中澤奈穂, 福田 裕. 冷凍魚肉の品質評価指標とその測定法 (1). 冷凍 2012; 87: 126-132.
- 9) Ehira S, Uchiyama H, Uda F, Matsumiya H. A rapid method for determination of the acid-soluble nucleotides in fish muscle by concave gradient elution. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 1970; 36, 491-496.
- 10) 村田裕子, 荻原光仁, 舟橋 均, 上野久美子, 岡崎恵美子, 木村郁夫, 福田 裕. 高鮮度冷凍クジラ肉の解凍方法の開発. 水産技術 2008; 1: 37-41.
- 11) 山中英明. コイ筋肉の解凍硬直ならびに解糖に及ぼす凍結速度の影響. 冷凍 1984; 59: 11-16.
- 12) Love RM, Haraldsson, SB. The expressible fluid of fish fillets. XI. Ice crystal formation and cell damage in cod muscle frozen before rigor mortis. *J. Sci. Food Agric.* 1961; 12: 442-449.
- 13) 橋本加奈子, 川島時英, 吉野暢之, 白井隆明, 瀧口明秀. 冷凍前の鮮度がゴマサバ冷凍品のドリップと氷結晶生成に及ぼす影響について. 日本水産学会誌 2015; 81: 124-129.