

魚の鮮度保持のためのシャーベット状海水氷製氷機の開発

永石 博志^{1*}、稲田 孝明²、吉岡 武也³、佐藤 厚⁴

鮮魚の品質は漁獲時が最高であり、鮮度保持には漁獲時から消費までの一貫した最適処理が必要である。実用的には魚体を傷つけず急速冷却が可能で活締め効果が期待できるシャーベット状海水氷の活用が効果的である。この論文では、「食の安全・安心」とともに、国内外市場の冷ドチェーンでの競争力強化に貢献できる製氷機、すなわち漁船上で連続的かつ安定的に海水を原料にシャーベット状海水氷を効率よく製氷できる製氷機を開発するまでの経緯と設計方針およびその効果を示す。

キーワード：製氷機、スラリーアイス、新鮮さ、水産物、冷ドチェーン

Development of a compact, onboard slurry icemaker to rapidly produce optimal ice for maintaining freshness of marine products

Hiroshi NAGAISHI^{1*}, Takaaki INADA², Takeya YOSHIOKA³ and Atsushi SATO⁴

Marine products require optimal cold storage transport to maintain freshness and minimize damage. Slurry ice is suitable for this purpose due to its softness and immediate cooling capability. This paper describes the process from design to commercialization of a compact icemaker that continuously, stably, and rapidly produces slurry ice and can be placed on fishing vessels. This icemaker is expected to increase the competitiveness of both domestic and international cold chains by advancing both food safety and security.

Keywords: Icemaker, slurry ice, freshness, marine products, cold chain

1 はじめに

健康で豊かな食生活を確保するため、1965年に「食生活の体系的改善に資する食料流通体系の近代化に関する勧告（通称冷ドチェーン勧告）」が公示された。それ以来、冷蔵や冷凍等の温度管理により、生鮮食品の劣化を最小限に抑えた物流手段で、広域流通や長期間の保存が可能となる品質管理が求められるようになった。また、食の安全・安心を求める消費者ニーズに応えるために、生産地や市場から消費地までの低温流通体系（冷ドチェーン）のインフラ整備による高度化やトレーサビリティの確保のための技術開発が進み、さらに HACCP^{用語1} 対応や食品安全マネジメントシステム規格 ISO22000 認証の取得等、厳しい衛生管理基準への対応が迫られている。加えて、生食に用いられる鮮魚については、品質としてより高鮮度のものが高付加価値市場を形成する。

魚の鮮度保持を実現し、高付加価値を提供するためには、流通途中からの処置では不十分であり、漁獲時からの迅速な処理とそれに続く一連の適切な処置が不可欠である。一般に、漁場で水揚げされた魚は、劣化を防止し品質を保つために、魚船内に氷とともに低温保持され帰港する。ここで使われる氷は出航時に船に積み込み、多くは真水を原料とした破碎氷やフレーク氷が用いられる。さらに、魚の生きの良さを保つために「活締め」等の特殊な処理をすることがある。この活締め処理は、より高鮮度な保持を可能とする有効な初期処理とされており、魚体の暴れを防止し、生体エネルギー源である ATP^{用語2} の減少と乳酸の上昇を遅らせ肉質の劣化を防ぎ、死後硬直までの時間を遅らせる。さらに、微生物の繁殖が起こりやすい血液を抜くことにより腐敗の原因となる微生物の繁殖を遅らせることができ、自然死させた場合と比較して長時間鮮度を高く保

1 産業技術総合研究所 北海道センター 〒062-8517 札幌市豊平区月寒東 2-17、2 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東、3 函館地域産業振興財団（北海道立工業技術センター） 研究開発部食産業技術支援グループ 〒041-0801 函館市桔梗町 379、4 株式会社ニッコー 〒084-0924 釧路市鶴野 110-1

1. Hokkaido, AIST 2-17 Tsukisamu-Higashi, Toyohira-ku, Sapporo 062-8517, Japan * E-mail: h.nagaishi@aist.go.jp, 2. Research Institute for Energy Conservation, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan, 3. Industrial Technology Center, Hakodate Regional Industry Promotion Organization 379 Kikyochō, Hakodate 041-0801, Japan, 4. Nikko Co. Ltd. 110-1 Tsuruno, Kushiro-shi 084-0924, Japan

Original manuscript received May 17, 2016, Revisions received July 5, 2016, Accepted July 15, 2016

つことができる。しかし、その効果は認められているもののこれらの処理は一尾ずつに施す必要があり、非常に労力がかかるため、高級魚や比較的大型の魚以外では多くの現場において実施するのが難しい現状である。活締めと同じように、鮮度を高く保つためには、魚が暴れる苦悶死を避けるため、致死温度以下の低温に保ち致死時間を短くする必要がある。これには、氷の利用が考えられ、氷の粒径が小さく流動性が高く、魚との接触頻度が高く熱交換速度の速い急速冷却効果の高いシャーベット状の水が適している。このような氷を利用すれば、活締めよりも魚を大量にかつ容易に処理することができ、活締めとほぼ同様の効果が期待でき、軽くてやわらかいので、特に傷つきやすい魚の劣化を防止し、鮮魚の商品価値を高く保つことができるため、産業上有効な手段になり得ると考えられる。

この論文では、漁獲から消費地までの流過程で水産物の高鮮度保持に極めて有効なシャーベット状海水氷を供給するために、海水を原料とし漁船上で連続かつ安定的に製氷できる製氷機を開発するまでの経緯と設計方針、その効果を報告する。

2 製氷機開発に至る経緯

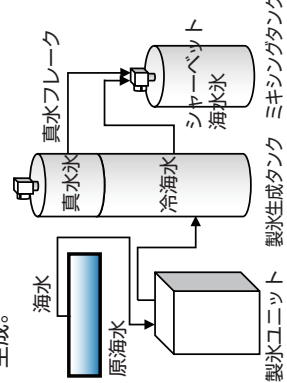
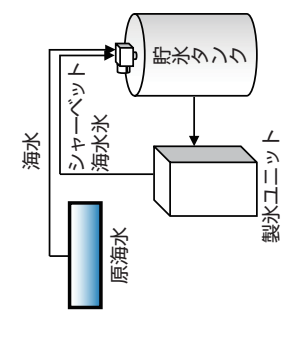
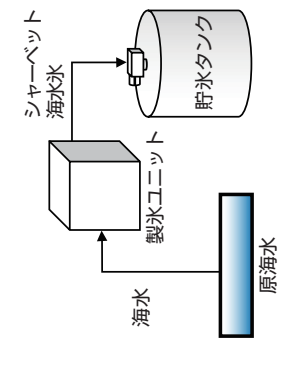
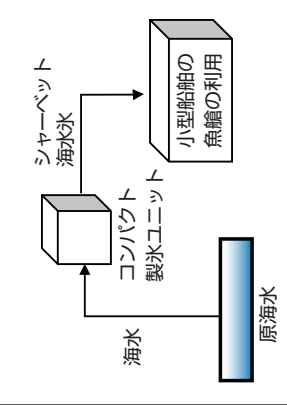
鮮魚の高付加価値化のために、魚体の高鮮度保持に最適な氷の性状を明らかにし、この性状を満たす氷を漁場において迅速かつ連続的に安定して製造できる製氷機を開発することが望まれていた。具体的には漁船搭載用の小型で高性能な国産シャーベット状海水氷製氷機である。1980年代の数多くの研究例が示すように、シャーベット状の水の有用性はすでに知られ注目されていた^{[1][2]}。しかし、当時開発されていた微細氷製氷機はほとんどが陸上設置型であり、製氷に20～24時間を要し、必要量の氷を直ちに漁船に供給できないため貯水タンクが必要等、設備面では大型でコスト高になるなどの課題があった(表1)。すなわち、シャーベット状海水氷を低コストで安定的に供給できる製氷機がなく、十分な実用化には至っていなかった。漁業における氷利用は、現在でも漁船への氷の積載には待ち時間も含めて比較的長時間を要するために、作業効率の低下が作業者の負担となっている。また、漁獲量の事前予測が必ずしも正確ではないために必要な氷の積載量の把握が難しく、必要以上の氷を積載して漁に出ると、氷費用、荷重増による燃料費増等経済的な負担と無駄が多くなる。過剰積載を避けた場合には、万一氷量が不足すれば漁獲物全体の品質保証ができず、商品価値が著しく低下するリスクが大きくなる。そこで、製氷機を漁船に搭載し、漁場までの往復路で海水を原料として製氷できれば、氷の積載時間の省略、燃費の節減、漁獲量に合わせた製氷量

の調整ができ、時間的にもコスト面でも大きな利点が得られる。

株式会社ニッコーは、地場産業への貢献を図るため、商品の付加価値を高め、地域ブランドの確立につながる水産加工に関わる技術開発を模索しており、「鮮度に勝る付加価値はない」との着眼から、生産現場から消費地までの鮮度保持を可能とする鮮度保持技術に着目した。同社は、真水を微粉碎した数ミリ程度の微細氷で農産物を繭のように包んで高密閉性と至適温度・湿度環境を実現できる野菜用の鮮度保持システムを先行して開発し、商品化しており、この技術の水産物に応用しようと氷を利用した鮮魚の鮮度保持技術について調査した。シャーベット状海水氷製氷機の開発例が国内外で数社見受けられたが、ほとんどが表1に示したカナダ、ドイツ、アイスランド等の先行企業の基本技術に類似したものであった。特許についても数件あるものの、いずれも装置形状に若干の差がある程度で、存続期間が終了したものもあり、製氷制御についてはノウハウに依存している部分が多いと見られ、微細氷の生成制御技術については不明な点が多いことがわかった。そこで、類似製氷機および微細氷の使用経験のある漁業関係者の聞き取り調査を行うなど、開発目標とする装置の具備すべき性能、生成氷の保持すべき特性および使用時の問題点等の情報収集を行い、開発すべき製氷機および微細氷の基本仕様の検討を行った。しかし、製氷が行われるジェネレータ内は基本的に直接見ることができず、試験で得られる様々な結果がどのようなメカニズムで得られているのか、そのメカニズムに基づいて改善にどのような対応法が考えられるのかなどの十分な知見を持ち合わせていなかった。また、社内に魚の鮮度を評価する技術がなかったので、鮮魚に対する氷の使用法および鮮度保持効果に関する知見も十分には得られなかった。すなわち、最適氷の仕様、また最適氷の仕様を満たす製氷条件および制御法については詳細な部分で不明な点が残っていたので、得意とするメカトロニクス技術を活かして鮮度保持のニーズに応えられる製氷機を自社生産するための設計を完全に行うまでには至らなかった^{[3][4]}。

これに対して、産業技術総合研究所は、氷生成や成長等に関する基礎的研究を行っており、超音波振動を利用したシャーベット氷の生成^{[5][7]}、不凍タンパク質や合成高分子を利用した氷の生成・成長制御^{[8][10]}、気泡を含有した機能性氷の生成等^{[11][12]}、製氷制御技術、特に氷の性状を左右する初期の核生成と結晶成長の制御に関する多くの知見を有していた。これらの知見は、鮮魚の鮮度保持に必要な氷の性状および使用法が提示されることにより初めて具体的に活かされるものであり、シャーベット状微細氷のプ

表1 海外の主なシャーベット氷製氷機の比較（2008年当時）

生産国	カナダ A社	ドイツ B社	アイスランド C社	開発機（設定目標）
製氷方法	<p>原海水を製氷ユニットに送り込み生成されたシャーベット氷を生成タンクへ送り込む。そこで分離された上部の塩分の無い氷をスクレーパーで削り取り、フレーク状の氷と冷海水をミキシングタンクにて混合させ海水シャーベット氷を生成。</p>  <p>製氷ユニット 製氷生成タンク ミキシングタンク</p>	<p>原海水を製氷生成タンクに貯め製氷ユニットと循環を繰り返し、長時間（20時間～24時間）をかけて海水シャーベット氷を生成。</p>  <p>製氷ユニット 貯水タンク</p>	<p>原海水を製氷ユニットに直接供給する。運転開始数分後に、連続的に海水シャーベット氷を生成。</p>  <p>製氷ユニット 貯水タンク</p>	 <p>製氷ユニット 小型船舶の魚艙の利用</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・シャーベット氷の含有率を自由に調整できる（0～100%） ・シャーベット氷の温度が高く融けやすい。 ・装置が大型で機能が複雑なため装置の保守・点検、メンテナンスが大変である。 ・シャーベット氷を連続して生成できるが、生成タンクを一旦停止させると、スクレーパーが凍りつくため氷が必要ない時も稼働していかねばならない。 ・製氷生成タンク冷海水の塩分濃度調整が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・シャーベット氷生成方式が循環方式で長時間（20時間～24時間）かかるので、生産スケジュールの調整が難しい。 ・シャーベット氷の生成温度を自由に調整できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・原海水を製氷ユニットに接続するだけで瞬時に連続してシャーベット氷を生成できるコンパクトな設備（船舶搭載が可能） ・シャーベット氷の濃度（氷含有率）を瞬時に自由に調整できる機能を持ち合わせている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・大量製氷を維持したままコンパクト化 ・日本国内に多い20トン未満の小型漁船に搭載可能なコンパクトユニット ・従来装置よりも生成量が多くシャーベット濃度の濃いものを生成可能 ・冷凍ユニットと製氷ユニットがセパレート式であるため省スペースで設置可
氷の性状、性能	約50 μm、-1.5℃、 10 kW（7.5 t/d 製氷時標準動力）	約1 mm、-3.2℃ 18 kW（7.5 t/d 製氷時標準動力）	約10 μm、-3.2℃ 8 kW（7.5 t/d 製氷時標準動力）	約10 μm、-3.2℃ 8 kW（7.5 t/d 製氷時標準動力）
船舶への搭載	不可	不可	可能（100トンクラス）	可能（20トンクラス）
付帯設備	大きなタンクが必要 シャーベット氷生成のためのミキシングタンクが必要	貯水タンク、製氷タンクが必要	陸上設置使用では、生成量が少ないため貯水タンクが必要	魚艙を貯水タンクとして使用することで小さな漁船でも使用可能

ロタイプ製氷機の開発において有効な設計方針および基本仕様の設定に役立つと期待された。

一方、函館地域産業振興財団（北海道立工業技術センター）は、魚介類の高鮮度保持に関する技術開発について早くから取り組んでおり、一例として最も鮮度低下が速い魚種といわれるスルメイカを対象として、食品の品質変化の定量的解析と鮮度低下に関する生化学的な検討を通して、鮮度保持のメカニズムを解明し、地域産業と共同で高鮮度スルメイカの商品化技術を開発していた^[13]。しかし、先述したようにシャーベット状の水を活用した低温処理の効果や利点は期待されていたものの、実際にシャーベット状の微細氷を十分に供給する手段が見当たらなかったため、種々の魚種や条件下で鮮度保持効果を確認するための試験結果の蓄積には難があった。漁獲物の鮮度保持効果に関する知見は、製氷機の生成する最適海水氷の性状の把握にも必要であり、製氷条件を制御する組込みソフトに求められる制御機能の設定にも不可欠であった。

このように、各々得意な技術分野を有する三機関が図1に示すように連携し、補完的に技術情報を交換しながら、それまで各機関の単独の技術開発のみでは実現できなかった製氷機の開発を目指した。これにより、さらに魚種、魚体に合わせた温度管理や鮮度管理に利用できる氷を製氷して、コールドチェーンで活用を図る利用基準の検討が可能になった。

3 製氷機の開発

まず、塩分濃度、海水温度等の環境条件によって異なる海水の性状変化に応じて最適な海水氷の製造条件をリアル

タイムで制御できる組込みソフト等の制御系の開発には、最適氷の仕様を知る必要がある。最適氷の仕様を知るには実際に魚を用いた鮮度評価試験を並行して行う必要がある。また、最適氷の仕様がわかっても何をどのように制御すれば結果として仕様を満たす製氷ができるのか、製氷のメカニズムや製氷技術に関する知見が不可欠である。

一般に氷の生成は、液相中の水分子が集まり結晶の種となる微小なクラスター（集団）を作る核生成（核形成）とその核が成長する結晶成長の2段階からなる。純水の場合は静かに冷却していくと凝固点以下になっても核生成が起きず過冷却状態となりやすい。凝固点との差である過冷却度は核生成の駆動力となり、最大過冷却度は水の体積の減少により増加する。古典的核生成理論によれば、液相から固相へ相変化する核生成の駆動力は液相と固相の自由エネルギー差であり、核の体積増加による自由エネルギーの減少量が表面自由エネルギーの増加量より小さいときには核生成は促進されない。このバランスが等しくなる臨界点を越えると表面自由エネルギーの影響が小さくなり核が安定して核生成が促進されると考えられている^[14]。

一方、現実の多くの場合は非水溶性の不純物（異物質）の存在により不均質核生成が起りやすい。図2に冷却固体面で起きる製氷のイメージを示す。不均質核生成においては、固相（氷）と液相（海水）と異物質（ここでは冷却固体面）の界面自由エネルギーを考慮する必要があり、固液間より固相と異物質間の界面自由エネルギーが小さいときには、固相は液相より異物質と接する方が全界面自由エネルギーが小さくなるので核生成が容易となる。したがって核生成温度は、水溶液濃度や異物質の固体表面の性状

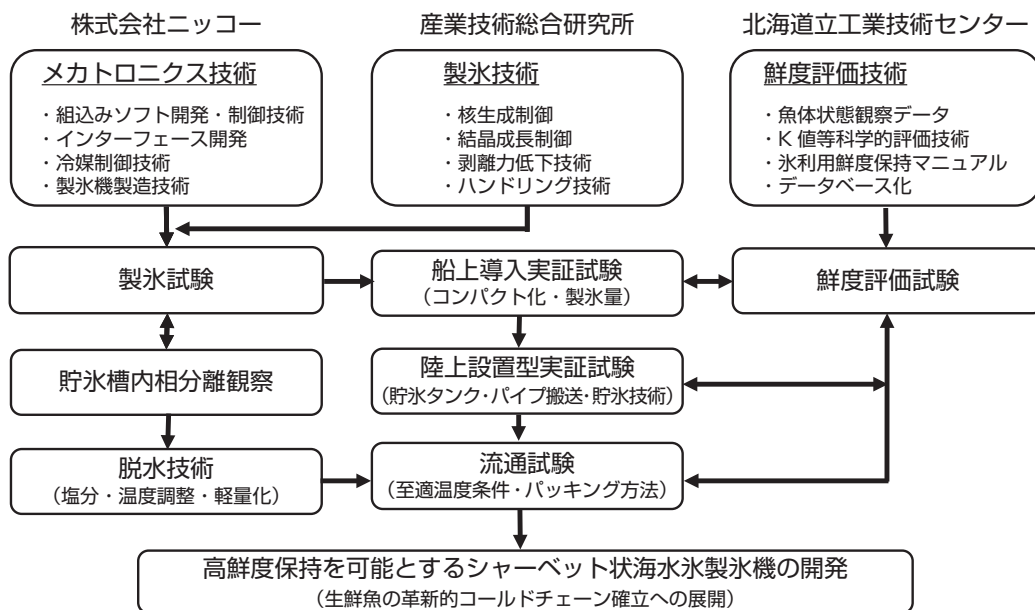


図1 シャーベット状海水氷製氷機の開発と導入のシナリオ

等によって決定される。その後の氷の成長形態は核生成温度の影響を受け、また水溶液濃度や冷却条件の影響を受ける。

上述の科学的なメカニズムを基本として工学的に製氷を行う場合は、水と接触している冷却伝熱面等の固体表面や水中の浮遊粒子が核生成の起点となり、核生成後は結晶化に伴う潜熱が除去されれば、結晶成長が継続すると考えられる。核生成後の結晶成長の進行具合は条件によって変化するため、結果として、大きさや形の異なる結晶が得られるので、核生成の条件を制御することにより生成する結晶の大きさ、形状の制御ができる可能性がある。成長時の結晶形態は、結晶構造の異方性、熱拡散（潜熱の排除等）、物質拡散（溶質の排除等）等により決まり、結晶成長過程で、これらのどの過程が律速になるか等によって様々な形態をとる。例えば、気相中で結晶表面での構成分子の取り込み、すなわち表面集積が律速になるときは雪の結晶のように分子的に平坦な結晶面を生成し、液相中で熱拡散や物質拡散が律速するときには潜熱放出の向きや溶質分子放出により表面が不安定になり、樹枝状成長の形態（デンドライト）をとりながら成長することもある^[14]。これらの結晶形態は固体面への付着力や結晶の破断に要する力にも影響を与えるので、固体表面に付着した氷の剥離を円滑に行い製氷動力を低減するためには、製氷機の冷却面や製氷方法を考慮する必要がある。以上のような考えに基づき、組込みソフト等の制御系の開発を行った。

次いで、プロトタイプ製氷機の設計においては、既存の船の空きスペースにも容易に導入できる構成ユニットの形状、設置方向等を詳細に検討しコンパクト化を図るとともに、同時に製氷量の増大を実現するための最適化を図る必要がある。

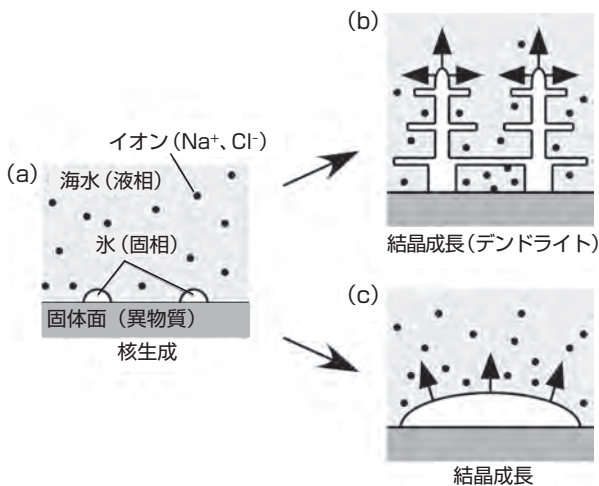


図2 製氷機内の冷却面の現象（製氷過程のイメージ）

当該事業の製氷機の設計方針は、①鮮魚の鮮度保持に有効な氷仕様を満たすこと、②低コスト化のため無駄な材料を省き加工の手間がかからないシンプルな構造であること、③単位時間当たりの製氷量が多いことである。

①のシャーベット状海水氷の仕様は、粒径、氷含有率、温度のパラメータ等で規定でき、魚体の冷却速度を大きくするためには粒径が小さいほど良い。ここで定義するシャーベット状海水氷とは、科学的には分散質が氷であり、分散媒が海水（塩化ナトリウムが主体）である氷の微細粒子が溶液内に均一分散している懸濁液であるため、凝固点降下によりマイナス温度帯となる。現実的には氷のサイズは10 μm前後から～100 μm程度、少なくとも1 mm程度以下であり、氷の温度は魚の致死温度より低い必要がある。ただし、致死温度と致死時間は魚種によって異なり不明な点も多い。これに対し、海水氷の温度は初期海水塩分濃度を基準にして推算することができる。例えば、海水の塩分濃度が約3.5 wt.%の場合、凝固点降下を $\Delta T = K \cdot m$ ^[15]で推算すると、凝固点は-2.2℃程度になる。ここで、 ΔT ：凝固点降下度、 m ：溶質の質量モル濃度（mol/kg）、 K ：モル凝固点降下（定数：溶媒が水の場合は1.85 K·kg/mol）である。氷の含有率を変えれば未凍結の海水濃度が変わり、凝固点降下が変化するためシャーベット状海水氷の温度帯も変えることができる。

次いで②の条件を満たし冷媒により効率よく原料水（海水）を冷却し製氷するには、

- (1) 熱交換表面積を大きくする。
- (2) ジェネレータの熱交換部に熱伝導率の高い材料を使う。
- (3) 冷媒蒸発温度を下げ冷媒と被冷却原料水間の温度勾配を大きくする。

などが有効な手段と考えられる。まず、熱交換表面積を大きくするには、大型化あるいは多管式にする手法が考えられるが、コンパクト化と製氷速度の増大を併せて実現し、最適性状の氷を連続的にかつ安定に製氷するために、ジェネレータの構造は複雑な冷却面の構造をとらないシンプルな二重管形の単管とし、冷却は直膨式^{用語3}とした（図3）。熱交換部の材料の選択は、熱伝導率の他、強度、耐食性、加工性、コストを総合的に考慮し、既製のパイプ加工で十分に対応できるSUS316ステンレスを選択した。

②の条件を満たすこのような方式であれば、製氷は二重管内管の内壁表面で不均質核生成とそれに続く結晶成長により進行すると考えられ、壁面で生成した氷結晶が大きく成長する前にすばやく掻き取れるスクレーパ（掻き取り機）をジェネレータ内部に取り付けることにより、①の仕様を満たす微細結晶のまま製氷できる。この場合、掻き取りを円滑に行うには、氷結晶の剥離力（氷結晶を壁面から離

す力、あるいは氷結晶を破断する力) を超える掻き取り動力が必要であり、必要最小限の動力で掻き取りが可能な最適形状のスクレーパにする必要がある。スクレーパにはジェネレータ内の攪拌効果により温度境界層を薄くし、半径方向の温度分布を小さくする効果もあり、結晶成長形態に影響を与え剥離力の低減が期待できる。また、剥離によって内壁に付着する氷の層を常に薄く保つことができれば、生成氷の付着による内壁の熱抵抗低減効果も期待され、③の条件を満たすことができる。

氷結晶の剥離は、図4に示すように大別して、氷結晶全体を壁面から根こそぎ剥離する完全剥離と、氷結晶を破断して剥離する部分剥離が考えられ、両者のうち剥離力の小さい方が現象を支配することになる。どちらの剥離が支配的になるかは条件によって変化する。完全剥離力を小さくするには、冷却面温度を上げるか¹⁵⁾、冷却面と氷の接触面積を低減する必要がある。冷却面温度の上昇は、製氷量とトレードオフの関係にあるので不利である。冷却面と氷の接触面積を低減するために、冷却面上での氷の核生成発生点数を減らし、核生成後の冷却面に沿った結晶成長を抑制する方法が有効であると考えられる。一方、部分剥離力を小さくするには空隙の多い氷の結晶形態が有利であり、デンドライト成長の形態が望ましい。熱拡散や物質拡散が成長を律速すればデンドライトの形態をとるので、冷媒蒸発温度を低くして固体表面温度を低くすれば、氷の成長速度が速くなり塩分拡散が追いつかず(物質拡散律速)、未凍結の高濃度海水が樹枝状の氷に包含され空隙の多い氷を生成し、部分剥離力の低減が期待できる。したがって、常識的には固体表面温度が低くなれば剥離が困難になると考えられるが、上述の様々な工夫を施すことにより、いずれの剥離の場合も冷媒蒸発温度を低くしても剥離力を低減できる可能性が示唆され、併せて単位時間当たりの製氷量を多くすることも可能である。これらのジェネレータ内部の製氷条件の制御の工夫が主な改良点である。また、核の発生起点となる海水中的の不純物(異物)を取り除

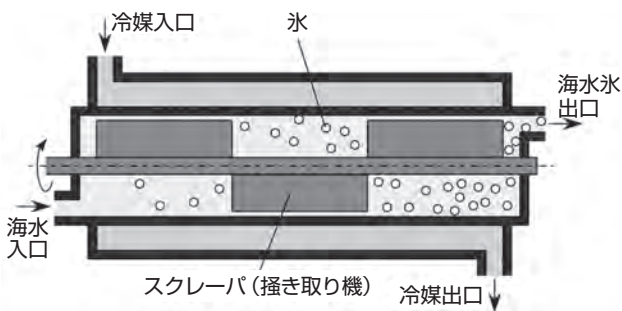


図3 シャーベット海水氷の製氷機 (ジェネレータ)

くためにフィルターによる事前の水核微粒子除去も効果的と考えられる。剥離された後の氷結晶は原理的には焼結やオストワルド熟成により流動流体内での粒径増大が考えられるが、滞留時間を適当に選ぶことにより成長前に製氷機より排出し、生成粒子径を制御して微細粒経のままで最適氷を製氷することができる。以上のような設計方針に基づきプロトタイプ製氷機を製作することができた。

プロトタイプ製氷機による製氷試験では、様々な条件設定と試験運転を繰り返すことにより、運転条件の最適化を図った。通常、低温下では氷結晶の付着力が強くなり冷却面からの剥離は困難であるが、 -15°C 以下の低温下でも冷却面上に氷が蓄積しないように、生成した氷を効率よく逐次剥離することができるジェネレータを開発することができ、これを実装した小型で高性能な目的の漁船搭載用のシャーベット状海水氷製氷機を実現することができた。さらに、このプロトタイプ製氷機による実証試験に備え、海上で想定されるピッチング、ローリング、ヨーイング等の大きな三次元の揺れが製氷能力に与える影響も特殊な試験装置を試作し確認した。さらに、製氷後もシャーベット状の形態を維持するためには、氷相と海水相の相分離を防ぐ必要があり、複数の魚艙を持つ漁船もあるため、シャーベット状海水氷の魚艙間移動を想定した魚艙内の最適攪拌法やパイプ搬送等も検討した。これらの知見は、陸上設置型では不可欠となる貯氷タンク内の攪拌羽根の形状、攪拌方法等の設計にも役立った。また、海外への鮮魚の長距離輸送試験等、鮮度保持効果を科学的に確認する数多く

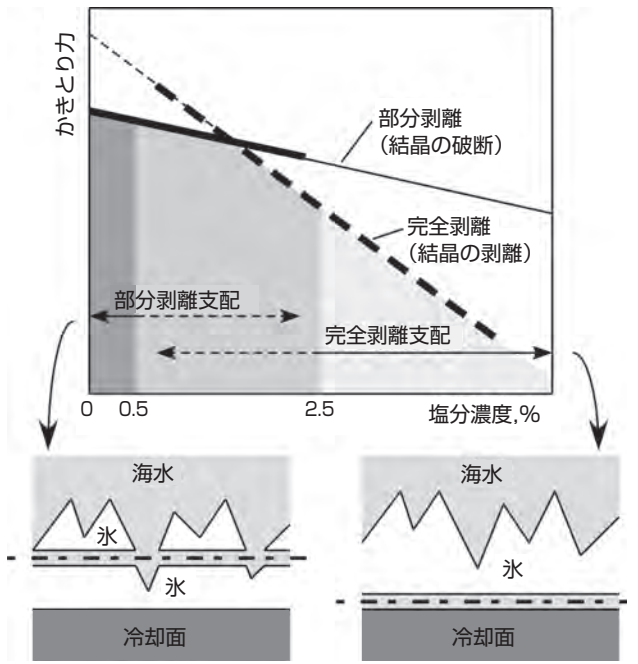


図4 氷結晶の完全剥離と部分剥離(破断)に要する力と塩分濃度の関係

の鮮度評価試験が容易に可能となり、魚種や流通段階における最適な鮮度保持条件や氷性状について有益な知見が得られるようになった。現在、魚種に応じた最適な鮮度管理手法の検討を種々行い、当該シャーベット氷を鮮魚の高鮮度保持に有効に利用する方法を明らかにしつつある。これらの知見の蓄積は、制御技術、製氷技術および鮮度評価技術について効果的な情報交換をする良好な連携関係により促進され、製氷機の開発開始から上市までが比較的短期間で可能となった。また、この連携を維持することにより、上市後も普及拡大を図りながら現場ニーズに対応できる製氷機の改善・改良に努めている。

4 シャーベット海水氷の効果

開発した製氷機で生成されるシャーベット状海水氷の効果について示す。シャーベット状であれば魚体を傷つけず、海水を原料水とすれば魚体を冷却した後の融解水が海水の浸透圧に近く魚体の色調および筋肉組織の維持にも有効である（図5）。魚の死によって酸素供給が断たれると生体のエネルギー源であるATPの再生はいずれ停止し、ATPは以下のように分解し、「鮮度」は低下を始める。



したがって、ATP量と不可逆的に進行するATP由来の生成物の分解過程の進行度を表すことができれば、「生きていた状態から如何に離れているか」、すなわち鮮度の低下状態を知ることができる。この分解速度は環境条件や魚種によって異なるものの、分解経路はほぼ一定であり、不可逆であることから、これらの分解過程の進行度を鮮度変化の指標と見なし、以下で定義されるK値がひとつの鮮度評価指標として利用されている。K値とは、ATPとその分解生成物の全成分の合計値に対する(HxR+Hx)量の百分率であり、以下のように定義される。

$$\text{K 値 (mol\%)} = (\text{HxR} + \text{Hx}) /$$

$$(\text{ATP} + \text{ADP} + \text{AMP} + \text{IMP} + \text{HxR} + \text{Hx}) \times 100 \quad (2)$$

すなわち、K値が低いほど鮮度が良いことを示す。図6はこのように冷却能が高いと考えられるシャーベット状海水氷を用いたときのK値を海水氷（海水+真水氷）と比較した例である。いずれも、シャーベット状海水氷のK値が低く、魚体の鮮度を高く保つことがわかる。

ただし、冷却のし過ぎによる漁体の凍結には注意すべきであり、凍結により結晶成長が進むと細胞が破壊され、解凍したときにドリップを生じる品質低下の原因となる場合もあり敬遠される。したがって、致死後は凍結を防ぐために、凍結点（魚種により異なり、概ね白身魚-0.8~-1.1℃、赤身魚-1.1~-1.5℃等）以上の温度保持が望ましい。実用的には、漁獲量に対して氷の使用量を調整するなど、シャーベット状海水氷で急冷、致死後の魚体内の温度を至適温度付近に保つ等の工夫が必要である。また、微生物の増殖を概ね抑制するには、一般に5℃以下の低温域であれば良いと考えられていることから、船の魚倉から揚げて陸上の流通過程に移行した後も鮮度保持には5℃以下の低温帯であることが望ましい。例えば、低温であるほど微生物の増殖は抑制できるが、致死後の輸送時には、シャーベット状海水氷から未凍結の海水を脱水した脱水氷とし、魚体を柔軟に包み込むなどして軽量化を図り、低塩分濃度で保持温度を-1℃付近の未凍結点付近に保ち、高鮮度を保持する輸送法等が最適と考えられる。

このような脱水処理は、重量軽減による輸送コストの低減とともに氷が融けにくくなるため、高鮮度保持時間の延長を可能とし、潜熱を利用していることから安定した低温が確保できる。したがって、遠距離輸送のみならず出荷調整



図5 フィールドテストで陸揚げされたサンマ（体表の青色は高鮮度の指標）

ここにもあった産総研, 2, 24-25 (2014)

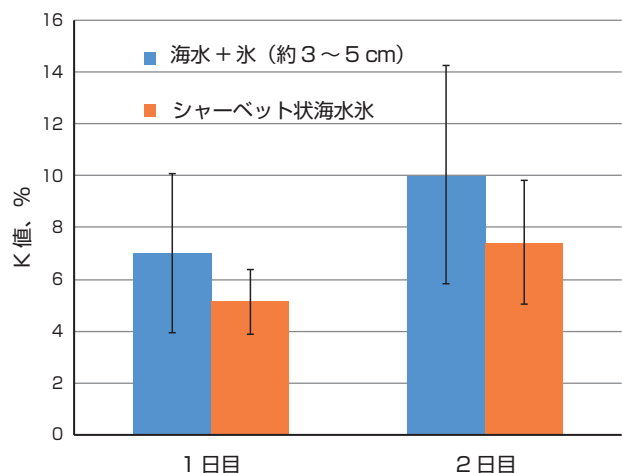


図6 冷却の相違によるサンマのK値の比較

水揚げ直後のサンマを、漁船上にて海水氷、シャーベット状海水氷にそれぞれ漬け込み、発泡スチロール容器にて保管。各6尾より筋肉中の核酸関連成分を定法により定量し、K値を算出。

や流通過程での不慮の足止め等に対しても有効に対応できるため優位性が期待でき、低温流通において競争力向上に繋がる新規な技術と考えられる。なお、鮮魚の流通においては最適な氷の使用法が魚種により異なると考えられることから、魚種に対して最適なシャーベット状海水氷の活用を図るためには、さらなる十分な検討が必要である。

5 おわりに

今後は衛生管理のみならず、氷の特性を積極的に利用して、魚種に応じた鮮度保持の最適条件を緻密に制御できる新たな鮮度管理技術にも氷の利用が期待される。水産物の高付加価値化や差別化を図るための鮮度管理技術は、特に、ユネスコ無形文化遺産に登録された「和食」等の日本料理に代表される魚の生食において重要な技術であり、日本がリードしてグローバル化することが望まれる。このように、シャーベット状海水氷の利活用は、高鮮度保持による最高級の付加価値を提供するビジネス手法としても有効な手段として有望であり、高度利用が期待される。

謝辞

本開発事業の開始前より当該製氷機開発の実現に多大なるご尽力をされた元株式会社ニッコー技術顧問の輪嶋壽勝氏に敬意を表し深謝いたします。また、事業化のご助言を頂いた元産業技術総合研究所技術支援アドバイザーの安達均氏、組込みソフト開発の基礎を確立された元株式会社ニッコー社員の下山利美氏、日頃より開発試験にご協力いただきました株式会社ニッコーの輪嶋史氏、平間和夫氏、千葉繁生氏、他社員の皆様に感謝いたします。

注) 厳密には溶質の濃度域によって凝固点効果の推算式が異なる。なお、世界の海面表層の塩分濃度は地域により異なり3.2～3.7 %程度である。また、海水面温度は、北極海付近でおよそ-2℃程度から赤道付近で35℃程度であり、日本近海は、15℃～20℃程度である。

用語の説明

用語1: HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Pointの略。微生物汚染等の危害をあらかじめ分析し、その結果に基づいて重要管理点を定め、これを監視することにより製品の安全を確保する国際的に採用を推奨されている衛生管理の手法。

用語2: ATP: アデノシン3リン酸。筋収縮活動に関与する塩基、五炭糖、リン酸が結合したヌクレオチドの一種であり、リン酸が外れる際にエネルギーを生み出す。

用語3: 直膨式: 利用する場所で冷媒を膨張させ熱を奪う方式。

用語4: ADP: アデノシン2リン酸。ATPよりリン酸がひとつ少ないヌクレオチド

用語5: AMP: アデノシン1リン酸(アデニル酸)。リン酸がひとつのヌクレオチド

用語6: IMP: イノシン酸(イノシン1リン酸)。AMPの塩基から脱アミノ化した核酸系の旨み成分

用語7: HxR: イノシン。ヒポキサンチンとD-リボースからなるN-リボシド

用語8: Hx: ヒポキサンチン。イノシン酸、イノシンの中の核酸塩基の部分成分。苦味を呈する。

参考文献

- [1] M. Kauffeld, M.J. Wang, V. Goldstein and K.E. Kasza: Ice slurry applications, *Int. J. Refrig.*, 33 (8), 1491–1505 (2010).
- [2] M. Kauffeld, M. Kawaji and P.W. Egolf (eds.): *Handbook on Ice Slurries: Fundamentals and Engineering*, International Institute of Refrigeration (IIR), (2005).
- [3] 経済産業省中小企業庁経営支援部創業・技術課: 戦略的基盤技術高度化支援事業 研究開発成果事例集 平成22～23年度研究開発プロジェクト, 6–8 (2011).
- [4] 経済産業省中小企業庁: 中小企業支援施策を活用した成果事例集, 4 (2016).
- [5] T. Inada, X. Zhang, A. Yabe and Y. Kozawa: Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 1. Control of freezing temperature, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44 (23), 4523–4531 (2001).
- [6] X. Zhang, T. Inada, A. Yabe, S.S. Lu and Y. Kozawa: Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 2. Generation of ice slurries and effect of bubble nuclei, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44 (23), 4533–4539 (2001).
- [7] X. Zhang, T. Inada and A. Tezuka: Ultrasonic-induced nucleation of ice in water containing air bubbles, *Ultrason. Sonochem.*, 10 (2), 71–76 (2003).
- [8] T. Inada and S.S. Lu: Thermal hysteresis caused by non-equilibrium antifreeze activity of poly(vinyl alcohol), *Chem. Phys. Lett.*, 394 (4–6), 361–365 (2004).
- [9] T. Inada and P.R. Modak: Growth control of ice crystals by poly(vinyl alcohol) and antifreeze protein in ice slurries, *Chem. Eng. Sci.*, 61 (10), 3149–3158 (2006).
- [10] T. Inada, T. Koyama, F. Goto and T. Seto: Inactivation of ice nucleating activity of silver iodide by antifreeze proteins and synthetic polymers, *J. Phys. Chem. B*, 116 (18), 5364–5371 (2012).
- [11] K. Yoshimura, T. Inada and S. Koyama: Growth of spherical and cylindrical oxygen bubbles at an ice-water interface, *Cryst. Growth Des.*, 8 (7), 2108–2115 (2008).
- [12] T. Inada, T. Hatakeyama and F. Takemura: Gas-storage ice grown from water containing microbubbles, *Int. J. Refrig.*, 32 (3), 462–471 (2009).
- [13] 吉岡武也: スルメイカの高鮮度保持と流通技術の開発, *日本水産学会誌*, 77 (5), 787–790 (2011).
- [14] N.H. Fletcher: *The Chemical Physics of Ice*, Cambridge Univ. Press, (1970).
- [15] H.H.G. Jellinek: Adhesive properties of ice, *J. Colloid Sci.*, 14 (3), 268–280 (1959).

執筆者略歴

永石 博志（ながいし ひろし）

産総研北海道センターイノベーションコーディネータ。工学博士。福岡県飯塚市出身。1987年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了後、三井鉱山株式会社入社、翌年旧工業技術院北海道工業開発試験場（現産業技術総合研究所）に入所。石油代替エネルギー研究の国家プロジェクトに従事、カナダアルバータ大学化学工学科博士研究員を経て、廃プラスチック、分散エネルギーシステムの研究から産学官連携業務に転向。企業支援を行い現在に至る。1996年日本エネルギー学会進歩賞（学術部門）、2016年産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞受賞。



稲田 孝明（いなだ たかあき）

産総研省エネルギー研究部門熱流体システムグループ上級主任研究員。工学博士。福岡県太宰府市出身。1996年に東京大学大学院工学系研究科博士課程修了後、同年に旧工業技術院機械技術研究所（現産業技術総合研究所）に入所。氷の発生や成長についての基礎的な研究を進めながら、冷熱の輸送媒体として氷を活用した冷凍空調機器の技術開発を実施。氷の発生や成長を制御し、エネルギー、食品、医療等の分野に貢献できる新しい技術の開発を目指す。1995年日本伝熱学会奨励賞、2016年産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞受賞。



吉岡 武也（よしおか たけや）

函館地域産業振興財団（北海道立工業技術センター）研究開発部研究主幹。博士（水産科学）、技術士（水産部門）。北海道函館市出身。1987年北海道大学大学院水産学研究科修士課程水産食品学専攻修了、日本水産株式会社入社、1999年現機関に入社、2003年北海道大学大学院水産科学研究科博士課程修了、2012年より現職。長年水産加工技術の研究開発に取り組み、近年は水産物の鮮度保持に関する研究開発を実施。2011年日本水産学会技術賞、2016年産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞受賞。



佐藤 厚（さとう あつし）

株式会社ニッコー代表取締役。北海道浜頓別町出身。旭川工業高校卒業。東京の食品包装メーカーに就職、退社後、1977年株式会社ニッコーを設立。一貫して加工機械の開発・製造に努め、2005年「第一回ものづくり日本大賞・経済産業大臣賞、優秀賞」を受賞。2007年経済産業省中小企業庁「元気なモノ作り中小企業300社」、2014年経済産業省「グローバルニッチトップ企業100選」においてネクストGNTに選定。2011年「インライン型全周三次元計測装置」および2013年「漁船搭載型海水氷製氷機「海水」にて北海道新技術・新製品開発賞ものづくり部門大賞、2016年産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞受賞。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（松田 宏雄：産業技術総合研究所 東北センター）

この論文は、新たな製氷機の開発と、それによって製造された海

氷水を用いた水産物鮮度保持に関する考察を述べています。複数の要素技術を合成して可能となる「水産物の品質向上」を追及している点は、シンセシオロジー論文として十分意義があると認めます。

コメント（湯元 昇：国立循環器病研究センター）

この論文では、魚の鮮度保持のため、シャーベット状海水氷の利用に着目し、低コストかつ安定的供給が可能で、漁船に搭載可能な製氷機を開発した過程が記載されています。これまでの技術開発では困難な課題を解決するため、明確なシナリオのもと、産学官連携により、それぞれの機関が得意とするメカトロニクス技術、製氷技術、鮮度評価技術等を融合したものであり、シンセシオロジー誌の論文としてふさわしいものと判断します。

議論2 論理構成の緻密化について

コメント（松田 宏雄）

それぞれの要素技術に関する研究がどのように行われたのか、プロセスの記述が不十分であり、あるいは単に先行研究を引用してデータを再掲しただけであったり、加えて表現への配慮も足りません。また、開発プロセスをわかりやすく表現するためには、新たに開発した製氷機が先行技術をどのような点で改良したのか、図等を用いて比較記述するとよいと考えます。

コメント（湯元 昇）

シンセシオロジー誌の研究論文としては、シナリオやその要素構成（選択・統合）についての著者の独自性が論文としての要件となっています。著者が図1のシナリオに基づいて、どのように要素を構成して、目的とするシャーベット状海水氷製氷機を開発したかが明確になるようにして頂けないでしょうか。

回答（永石 博志）

全体の構成を見直すとともに、課題とその解決策に関する記述を加筆いたしました。開発前の記述と開発中の記述に分けるとともに、組込みソフトの開発やプロトタイプ作成から上市に至る過程等開発過程の記述を若干加え、上市までの流れがわかるようにしました。具体的には、組込みソフト等制御系の開発、プロトタイプ製氷機の設計、製氷試験、実証試験に向けた試験と課題等の順に記載し、構成を変更しました。また、表1に新たに開発した製氷機の欄を追加しました。ただし、企業様のご希望もあり、詳細やノウハウにつきましては伏せさせていただきますことをご理解ください。

議論3 新たな鮮度指標について

コメント（松田 宏雄）

初稿において新たな鮮度指標をこの論文の中で提案されていますが、標準化の試みが行われたとは認められません。K値は多くの自治体が発行する鮮度保持マニュアルに活用されるなど、ステークホルダーのコンセンサスを得ようとしており、これらの活動は、明らかに標準化を推進していると言えます。しかし、新たに提案されている指標をそのレベルに上げるためには、その公開とステークホルダーによる比較活用まで進める必要があります。

コメント（湯元 昇）

初稿において新たな鮮度指標をこの論文の中で提案されていますが、この指標の妥当性については、専門誌での評価が必要と思います。シンセシオロジー誌は、研究開発の成果を社会に活かすために何を行えばよいかについての知見を記載することが目的ですので、新しい提案についての妥当性は評価できません（鮮度管理手法の標準化が達成されれば、そのプロセスは本誌の対象となり得ます）。

回答（永石 博志）

最初の原稿で記述した鮮度指標は新しい提案です。この定義自身は特許とはなり得ないものと考えておりますが、現在、知的財産・標

準化推進部のご協力の下、この指標を利用したコールドチェーンにおける技術について鋭意検討中ですので、この部分は大幅に削除しました。

議論4 先行技術の改良点

コメント(松田 宏雄)

ノウハウの秘匿は理解できますが、先行開発企業の機械をベースにして改良したのはどのような点でしょうか？

回答(永石 博志)

本開発機は先行開発機械をベースにしており、コンパクト化と省スペース化を図ってはいますが、製氷法や構成はほとんど同じです。改良点は、ジェネレータ冷却面(内壁)の仕上げと掻き取り機(スクレーパー)の羽数、位置、羽根の固定具合等、ジェネレータ内の製氷条

件の制御になります。これらの部分がノウハウの秘匿部分の主なものになりますが、設計方針の区分をわかりやすくし、記述を加えました。

議論5 鮮度について

コメント(松田 宏雄)

執筆者が行った鮮度に関する実験研究は、サンマのK値比較以外にはないのでしょうか？

回答(永石 博志)

共著者(北海道立工業技術センター吉岡氏)は多くの実験を行っています。ただし、ここでは開発した製氷機で生成した氷にどのような効果があるのかを示すための例示ですので、一例で十分と考えています。