

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「新冷凍システム技術による

魚貝類の高品質・低コスト省エネ凍結システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成27年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人埼玉県産業振興公社



## 目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景	1
1-2 研究開発の技術背景・研究目的と目標	3
1-3 研究体制	5
1-3-1 研究組織および管理体制	5
1-3-2 研究開発体制	6
1-3-3 研究実施場所一覧	6
1-3-4 管理・研究者氏名	6
1-4 当初の目的及び目標に対しての実施結果（成果概要）	8
1-4-1 超低温冷凍機による最適制御システムの開発	9
1-4-2 過冷却凍結による殻付きカキの高品質凍結方法の開発	10
1-5 当該研究開発の連絡窓口	11
第2章 本論（研究開発の方法と成果）	12
2-1 超低温冷凍機による最適制御システムの開発	12
2-1-1 超低温冷凍機による最適制御システムの開発	12
2-1-2 新冷凍システムの省エネルギー効果	12
2-2 凍結システム制御装置の開発	13
2-2-1 凍結システム制御装置の開発	13
2-2-2 遠隔監視・操作システムの開発	14
2-3 過冷却凍結による殻付きカキの高品質凍結方法の開発	15
2-3-1 過冷却凍結による殻付き貝類高品質凍結方法の開発	15
2-3-2 高品質凍結品の実証	17
2-4 魚介類の凍結試験による最適アルゴリズムの開発	20
第3章（最終章）	21
3-1 研究開発の総括	21
3-2 今後の事業化への課題	21
引用・参考文献	23



## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景

カキ、ホタテなどの二枚貝の凍結保管では、 $-60^{\circ}\text{C}$ 超低温急速凍結は一般的な凍結技術よりすぐれているが、殻は熱伝導を阻むという特性から殻付のままでは高品質な凍結は困難であるので、片方の殻をはずしたハーフシェル凍結品がオイスターバーなどで利用される高付加価値品となっている。



Fig.1 宮城県南三陸町の志津川湾



Fig.2 宮城県漁業協同組合志津川支所  
仮設カキ処理施設(平成24年10月稼働)

一方、殻付カキでは、過冷却（凍結温度以下でも凍結しない現象）凍結という凍結方法が有効であることが知られている。

過冷却現象を発生させる温度域（ $-2^{\circ}\text{C}$ ～ $-7^{\circ}\text{C}$ ）で冷凍機を高精度に制御して過冷却凍結をさせ、その後にすみやかに $-60^{\circ}\text{C}$ 超低温凍結できる凍結プロセスを可能とした凍結装置および制御装置は、現状では実用機の研究開発が行われていない。

平成23年3月の東日本大震災は、東北地方沿岸に甚大な津波被害をもたらした。

宮城県のカキ養殖施設はほぼ壊滅し、県内有数の生産地であった志津川地区(Fig.1)のカキ養殖も危機的状況になったが、生産者の復旧への強い願いから、平成24年10月には仮設カキ処理施設(Fig.2)が稼働を始めるなど、現在は最盛期の1/4程度であるがカキ生産量は戻りつつある。(Fig.3)

しかしながら、放射能の風評被害もあり、広島産カキに市場を占有された中で、これまでのような生カキのむき身出荷だけでは、以前と同じ量の市場を取り戻すのは困難となっている。

そこで、志津川地区では殻付カキの新たなブランド化を模索している。カキは春にかけて成熟し美味しくなることが知られるが、4月からのむき身出荷では出荷量が加工量によって制限される。また、出荷量が増加すると単価が急激に安価となる。(Fig.4)この春の美味しく

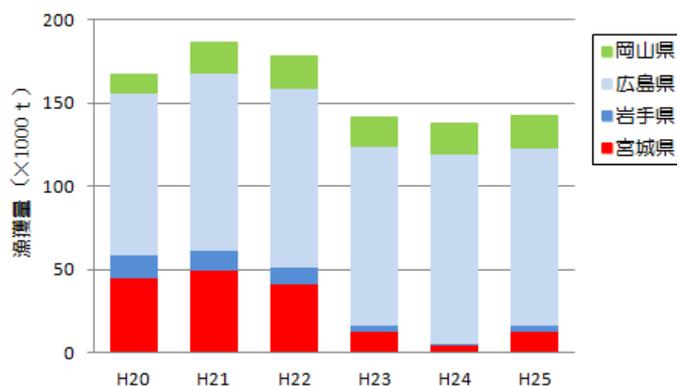


Fig.3 国内主要生産地のカキ生産量経年変動

安価なカキを殻付きのまま冷凍保管して夏～秋の観光時期にオイスターバーや焼ガキとして安定供給することができれば、新たな市場創出とブランド化が可能になる。

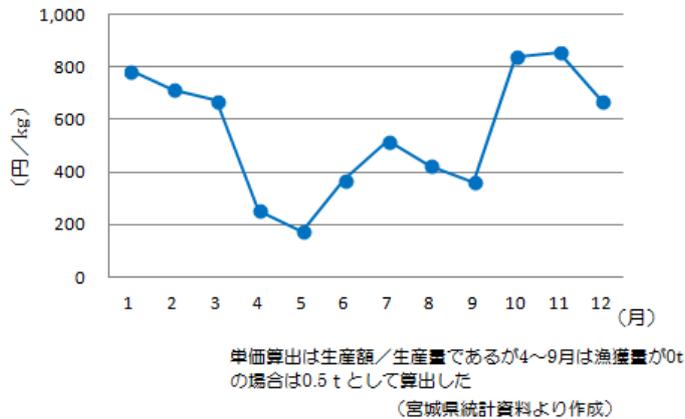


Fig.4 宮城県産カキ（むき身）の月単価（平成 20 年）

を開発し、殻付カキの高品質凍結のみならず他の魚介類の高品質凍結・保管を可能にする。これによって、志津川産カキを先行モデル事業としての東北地域でのカキ養殖業の復興に寄与する。

本研究開発はこの地元漁業関係者のニーズに基づき、中山エンジニアリング社が所有している凍結装置および制御技術であるイータマックス技術「 $\eta$  max Refrigeration System」をさらに高度化して、過冷却現象を発生させる温度域で冷凍機を高精度に制御し過冷却凍結させる技術（以下、「過冷却凍結」という）、 $-65^{\circ}\text{C}$ 超低温凍結と風量制御を組み合わせた大深度凍結技術（以下、「 $-65^{\circ}\text{C}$ 大深度凍結」という）の、凍結プロセスを可能とした凍結装置および制御装置の実用機



Fig.5 南三陸町の被災の状況  
(町防災センター（平成 25 年 6 月）)



Fig.6 カキの種付け作業（同年 6 月）

## 1-2 研究開発の技術背景・研究目的と目標

-60°Cなどの超低温急速凍結は一般的な凍結技術よりすぐれているが、殻は熱伝導を阻むという特性から殻付カキの高品質凍結は困難である。

そこで、本研究事業では、

- ◆過冷却凍結と超低温凍結を組み合わせた新技術凍結
- ◆冷凍機では困難とされる過冷却温度帯における温度制御の実用的技術（設定温度±0.5°C）
- ◆急速凍結制御の高度化（凍結時間▲10%、省エネ▲15%）
- ◆広範で高精度な温度制御システムを開発し、殻付きカキの外、魚介類の高品質凍結システムの実用機を開発する。

### (1) 技術シーズについて

中山エンジニアリング社が有しているイータマックス技術「 $\eta$  max Refrigeration System」(Fig.7)は、蒸発器の冷媒と空気の温度差(TD)を小さく運用することで冷凍機の吸入圧力を高く保ち高効率運転を行い、同時に着霜を抑制し、製品品質を長期にわたり保持することを可能とする。

さらに通年凝縮圧力を制限せず積極的に低く運用することでシステム効率を常に最大となるように制御しながら省エネルギー運転を行うという従来技術にはない新技術であるが、過冷却凍結温度域を高精度に制御(±0.5°C)し、過冷却凍結のちに-65°C大深度凍結を可能とする高度化を行う。

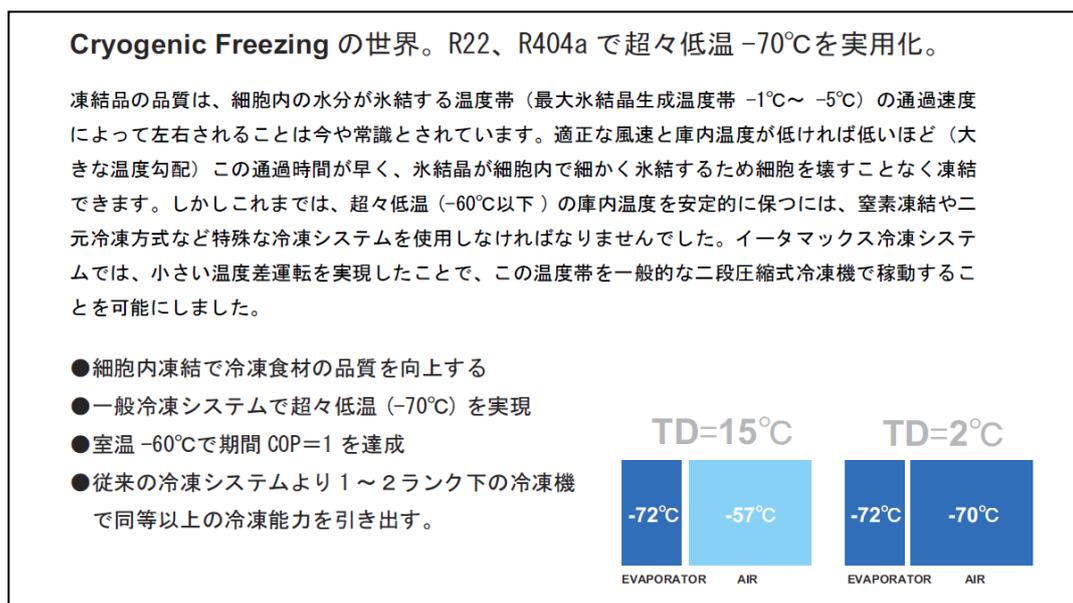
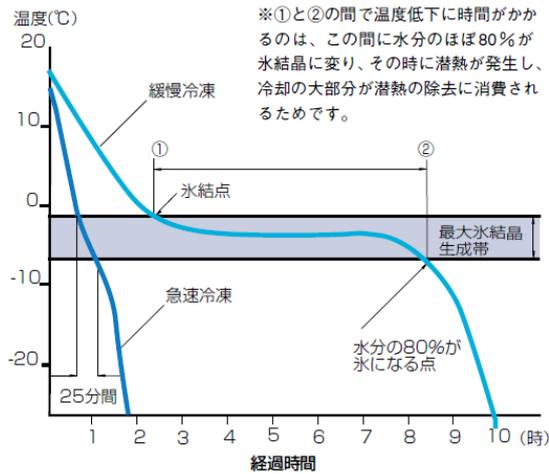


Fig.7 イータマックス技術「 $\eta$  max Refrigeration System」の特徴

### (2) 魚介類の高品質凍結（超低温凍結）

最大氷結晶生成温度帯（0~-5°C）を早く通過させることによって、細胞内外の水分が瞬時にアモルファス状態（非結晶）で凍結しガラス化する。(Fig.8)

この場合、氷の結晶は小さく分散した状態で存在するために、細胞に負担が加わらず傷みも最小限となり、食品の美味しさ（色、食感、解凍ドリップ減少など）を保つことができる。



本間清一・村田容常編「食品加工貯蔵学」東京化学同人 2004、田中宗彦「水産食品の加工 冷蔵品・冷凍品2」食品と容器2006 VOL.47 No.4より作成

Fig.8 食品を冷凍した場合の品温の下降パターン<sup>1)2)</sup>

### (3) 魚介類の高品質凍結（過冷却凍-65°C大深度凍結）

これまでの凍結は温度差を利用した熱伝達の促進による凍結時間の短縮を目指す技術開発であった。近年、過冷却状態を経た後に凍結させることで氷結晶の微細化が実現できることが注目されている。

食品が凍る温度（凝固点：魚などは約-2°C）を過ぎて凍らないようにゆっくりと温度を下げた後に、急速凍結（超低温）することによって氷の微細化と最大氷結晶生成温度帯を早く通過することができる。

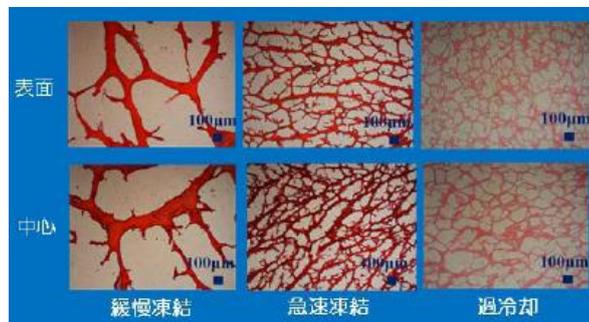
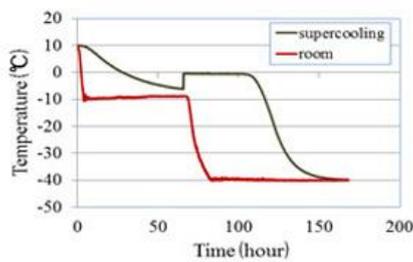


Fig.9 過冷却を経て凍結させた豆腐サンプルの凍結曲線（解消温度-6°C）と3方法で凍結させた豆腐の氷結晶観察結果（鈴木徹（2012）<sup>3)</sup>）

### 1-3 研究体制

#### 1-3-1 研究組織および管理体制

##### (1) 研究組織 (全体)

本研究開発の研究組織 (全体) は次図のとおりである。

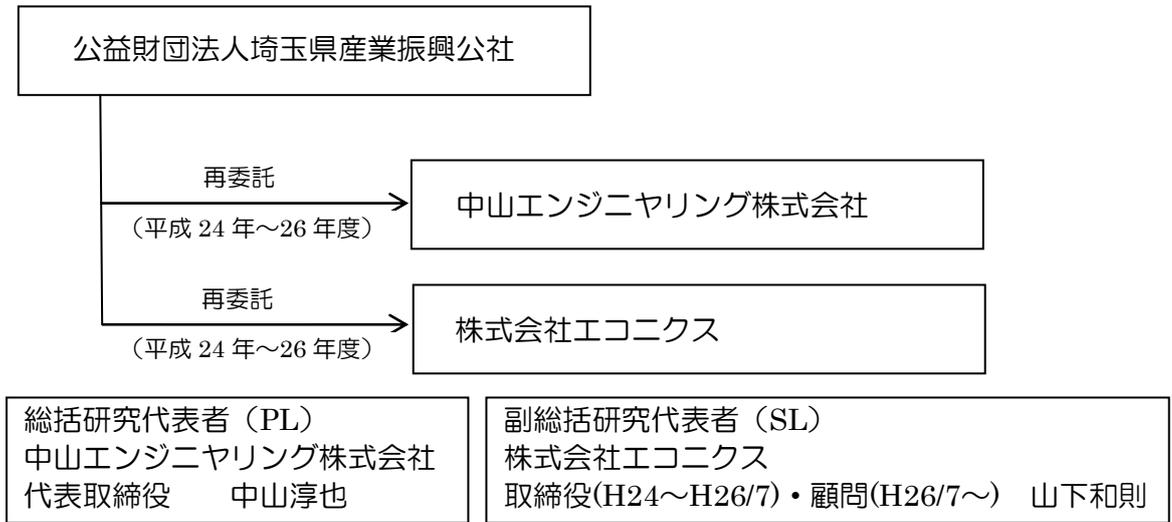


Fig.10 研究組織

##### (2) 管理体制

###### ① 事業管理機関

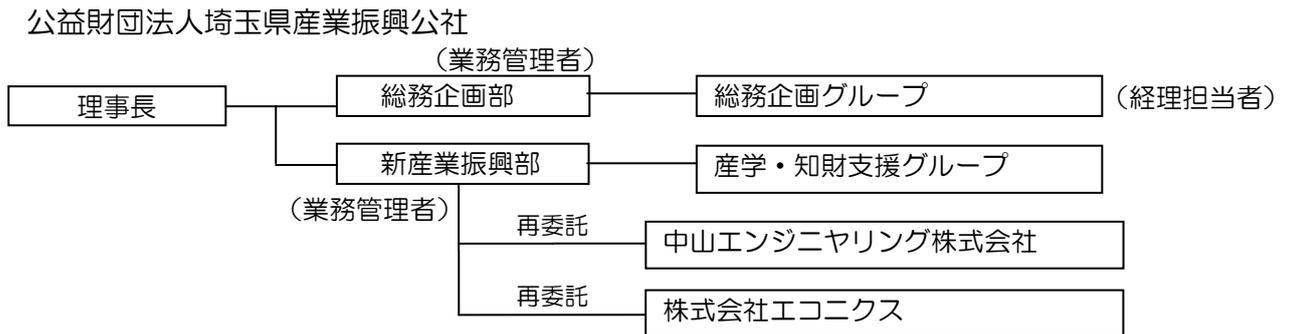


Fig.11 事業管理機関

###### ② 再委託先

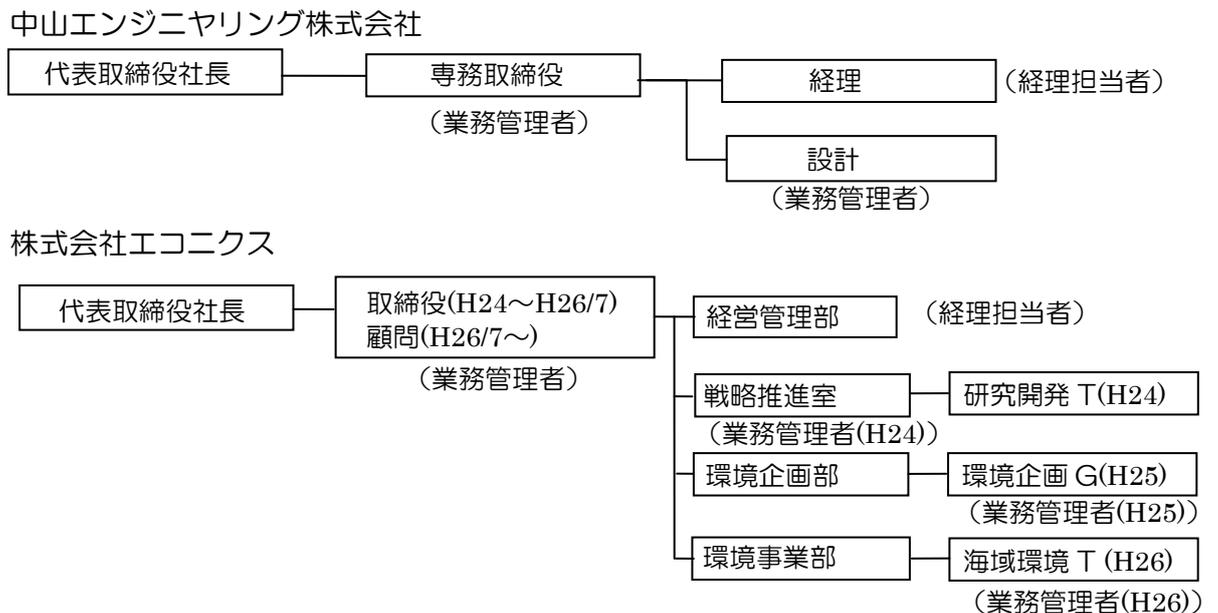


Fig.12 再委託先業務管理体制

### 1-3-2 研究開発体制

各研究項目の研究開発体制は次のとおりである。

Table.1 各研究項目の研究開発体制

		研究項目	研究機関	
管理人 公益財団法人埼玉産業振興公社	中山淳也 (中山エンジニアリング株式会社) 総括研究代表者	①超低温冷凍機による最適制御システムの開発	・ 中山エンジニアリング株式会社	
		②凍結システム制御装置の開発(過冷却・超低温凍結の制御装置の開発)	②-1 凍結システム制御装置の開発	・ 中山エンジニアリング株式会社
			②-2 遠隔監視・操作システムの開発	・ 中山エンジニアリング株式会社
		③過冷却凍結による殻付カキの高品質凍結方法の開発	③-1 過冷却凍結による殻付き貝類高品質凍結方法の開発	・ 中山エンジニアリング株式会社 ・ 株式会社エコニクス
			③-2 高品質凍結品の実証	・ 中山エンジニアリング株式会社 ・ 株式会社エコニクス
		④魚介類の凍結試験による最適アルゴリズムの開発	・ 中山エンジニアリング株式会社 ・ 株式会社エコニクス	
⑤プロジェクトの管理運営	・ 財団法人埼玉産業振興公社			

### 1-3-3 研究実施場所一覧

Table.2 研究実施場所一覧

組織名	所在地
公益財団法人埼玉産業振興公社	埼玉県さいたま市上落合2丁目3番2号 新都心ビジネス交流プラザ3階
中山エンジニアリング株式会社	埼玉県川口市戸塚1丁目7番5号
株式会社エコニクス	札幌市厚別区下野幌テハ <sup>®</sup> -ク1丁目2-14

### 1-3-4 管理・研究者氏名

【事業管理者】公益財団法人埼玉産業振興公社

Table.3 管理・研究者指名一覧(事業管理者)

氏名	所属・役職	実施内容(番号)	担当年度
五十嵐 久夫	総務企画部総務企画グループ・主査	⑤	H24~H25
神山 明	総務企画部総務企画グループ・主査	⑤	H26
小笠原 均郎	技術支援部産学連携コーディネーター (H25~新産業振興部産学・知財支援グループコーディネーター)	⑤	H24~H26
久保木 茂雄	技術支援部産学連携コーディネーター	⑤	H24
加藤 匠	技術支援部産学支援・新産業育成グループ・上級主査	⑤	H24
村上 征信	新産業振興部産学・知財支援グループ・主任	⑤	H25
中村 繁之	新産業振興部 産学・知財支援グループ・主任	⑤	H27

① 再委託先

Table.4 管理・研究者指名一覧（中山エンジニアリング株式会社）

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)	担当年度
中山 淳也	代表取締役社長	①②③④	H24～H26
山本 高男	専務取締役	①②③④	H24～H26
清水 学	設計・主幹	①②③④	H24～H26
鈴木 慧	設計	①②③④	H24

Table.5 管理・研究者指名一覧（株式会社エコニクス）

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)	担当年度
山下 和則	取締役（H26/7～顧問）	③④	H24～H26
江本 匡	環境事業部環境事業 3G・統括マネジャー（H26～ 戦略推進室・統括マネジャー）	③④	H24～H25
峰 寛明	復興推進室・副室長	③④	H24
大島 広幹	復興推進室・アソシエイト（H25～環境企画部環境 G 事業企画チーム・アソシエイト）	③④	H24～H25
斎藤 二郎	取締役（戦略推進室）	③④	H24
柴宮 孝明	戦略推進室・アソシエイト（H25～環境企画部環境 G 事業企画チーム・アソシエイト）	③④	H24～H25
塚本 友宏	戦略推進室・アソシエイト	③④	H24
上田 重貴	取締役（環境企画部）（兼）環境企画 G・統括マネ ジャー	③④	H25
鹿糠 幸雄	環境企画部環境企画 G 事業企画チーム・マネジャー	③④	H25
坂本 和佳	環境企画部環境企画 G 事業企画チーム・コンサルタ ント	③④	H25
山本 翔	環境企画部環境企画 G 事業企画チーム・アソシエイ ト	③④	H25
武田 康孝	環境事業部環境事業 1G・主任研究員	③④	H25～H26
山内 繁樹	環境事業部海域環境チーム・顧問・主幹研究員（環 境事業部）	③④	H26
田保 知佳	環境事業部海域環境チーム・マネージャー	③④	H26
田村 勝	環境事業部海域環境チーム・チーフコンサルタント	③④	H26
松本 光司	環境事業部海域環境チーム・チーフコンサルタント	③④	H26
安達 大	環境事業部海域環境チーム・コンサルタント	③④	H26
森山 友雄	環境事業部海域環境チーム・コンサルタント	③④	H26
斎藤 一	環境事業部海域環境チーム・コンサルタント	③④	H26
東 芳	環境事業部海域環境チーム・コンサルタント	③④	H26

#### 1-4 当初の目的及び目標に対しての実施結果（成果概要）

本研究開発の当初目標は、以下の4課題であった。

- ① 超低温冷凍機による最適制御システムの開発
- ② 凍結システム制御装置の開発（過冷却・超低温凍結の制御装置の開発）
- ③ 過冷却凍結による殻付きカキの高品質凍結方法の開発
- ④ 魚介類の凍結試験による最適アルゴリズムの開発

研究開発の最終実施結果は、いずれの課題も目標を達成することができた（Table.6）。

Table.6 当初の目的及び目標に対しての実施結果

当初の目的及び目標	最終実施結果
殻付きカキを高品質に凍結 （過冷却凍結と超低温凍結を組み合わせた新技術凍結）	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ <u>過冷却+超低温凍結の新技術凍結を開発</u></li> <li>◆ <u>品質は既存凍結よりも有意に優れていた</u>（官能試験、成分分析、電子顕微鏡観察）</li> </ul>
過冷却温度帯温度制御の実用的技術の開発 （設定温度±0.5℃）	◆ <u>0～-10℃域での温度制御±0.5℃を実証した</u>
急速凍結制御の高度化 （凍結時間▲10%、省エネ▲15%）	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ -65℃大深度凍結は、既存の急速凍結（-35℃）より▲33%凍結時間を短縮できる</li> <li>◆ 大深度凍結は、魚介類ホールの凍結に有効である（乾燥しない）</li> <li>◆ <u>▲50%の省エネを実証した</u>（-40℃定格運転時）</li> </ul>
広範で高精度な温度制御システムを開発し、魚介類の高品質凍結システム実用機の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ <u>過冷却+超低温凍結、超低温凍結（ファン制御が広範囲）の実用機を開発</u></li> <li>◆ <u>魚介類の凍結目的にあった冷凍方法を選択することが可能</u> （ex.ホヤロケット→超低温（風強）、サバ→超低温（弱風：皮の乾燥防ぐ）、殻付き貝類→過冷却+超低温凍結）</li> </ul> <p>ただし、事業化への試験データ蓄積が必要</p>

### 1-4-1 超低温冷凍機による最適制御システムの開発

イータマックス技術を高度化した新冷凍システム（開発された冷凍機（平行式）と制御装置）は、0～-10℃の過冷却温度帯での温度維持精度（±0.5℃）を達成した。0～-10℃の過冷却温度帯の高温域は小型のクーラーとファン、-65℃の超低温域は2段冷却式のコンプレッサー、クーラーとファンで形成されている（Table.7, Fig.10）。

**Table.7 高度化した新冷凍システム凍結機の仕様**

課題	過冷却温度帯および急速凍結温度帯の対応冷凍庫の開発	
目標	過冷却温度帯「0℃～-10℃」における温度維持（±0.5℃） 超低温温度帯「-65℃（実用温度-60℃）」における温度維持	
過冷却温度帯「0℃～-10℃」における温度維持 <構造> 専用冷凍機の使用 専用冷却器の使用 冷媒流量制御用バルブの使用 低風量 FAN の使用 <対応> 冷媒流量制御方法の確立 風量と温度の比例制御技術の確立	超低温温度帯「-65℃（実用温度-60℃）」における温度維持 <構造> イータマックス冷凍システムの使用（一般的な冷凍機による高効率冷凍システム） 冷媒流量制御用バルブの使用 風量制御 INV の使用 <対応> イータマックス冷凍システムと冷媒流量制御との融合化 風量と温度の比例制御技術の確立	
<製品仕様> 凍結用パネル庫 パネル厚 150mm 外形寸法 W 2100*D 3800*H 2250 庫内寸法 W 1800*D 3500*H 1950 防熱扉 2枚 冷凍機 過冷却用 KX-R4AU1 超低温用 RSU-R301TRCTK （イータマックス冷凍システム専用）	凝縮器 超低温用 RM-P110A1*2 蒸発器 過冷却用 58.7m <sup>2</sup> コイル 超低温用 EFR-168CFH 送風用 FAN 過冷却用 0.2kw*1 超低温用 0.75kw*2	



**Fig.10 新制御装置類と新技術の試験機（左側：凍結庫 右側：冷凍機器類）**

## 1-4-2 過冷却凍結による殻付カキの高品質凍結方法の開発

殻付きカキを高品質に凍結するのに最も優れていると考えた、過冷却凍結現象を発生させた後、すみやかに $-65^{\circ}\text{C}$ 超低温大深度凍結を行うことが、実用機タイプで可能であることを実証できた。試作された実用機タイプの試験機は、さらに、目標以上に省エネ率を実現した。

また、凍結した殻付きカキの品質の評価についての知見が少なかったが、本研究開発によって官能試験、電子顕微鏡観察が有効であることが分かった。

平成24年度の試作機は2月に現地志津川へ移動・設置して、遠隔監視・操作システムの構築、 $-65^{\circ}\text{C}$ 大深度凍結、過冷却温度帯での試験運転および殻付カキ凍結試験の基礎データの取得を行った。

平成25年度は $-65^{\circ}\text{C}$ 大深度凍結での殻付カキの凍結試験の再現性、過冷却温度帯での試験運転など殻付カキの凍結試験を行った。急速凍結では、試作機は $-65^{\circ}\text{C}$ 超低温凍結で安定した性能を発揮して、従来の $-35^{\circ}\text{C}$ 低温凍結に比べて、約30%の短縮時間で殻付カキを有意に早く凍結させることができる

(Fig.11)。

最終年度は、過冷却凍結の事業化に向けての凍結プロセスを確立した。殻付カキは、本過冷却対応急速凍結試作機で、 $-4^{\circ}\text{C}$ 1時間 $\rightarrow -7^{\circ}\text{C}$ 2時間 $\rightarrow -65^{\circ}\text{C}$ 大深度凍結という凍結プロセスで再現性がある凍結を可能とした (Fig.12)。

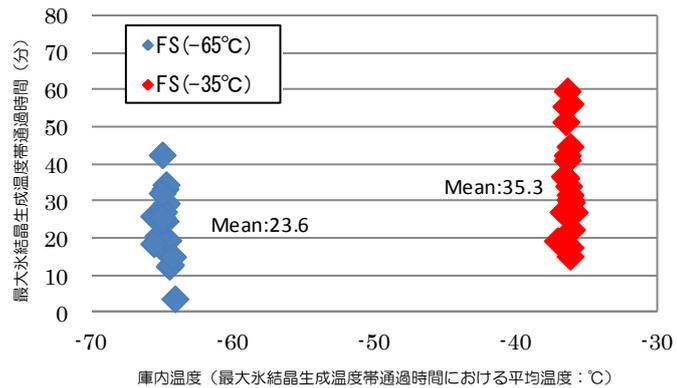


Fig.11  $-65^{\circ}\text{C}$ 大深度凍結と $-35^{\circ}\text{C}$ 急速凍結での最大氷結晶生成温度帯の通過時間の比較

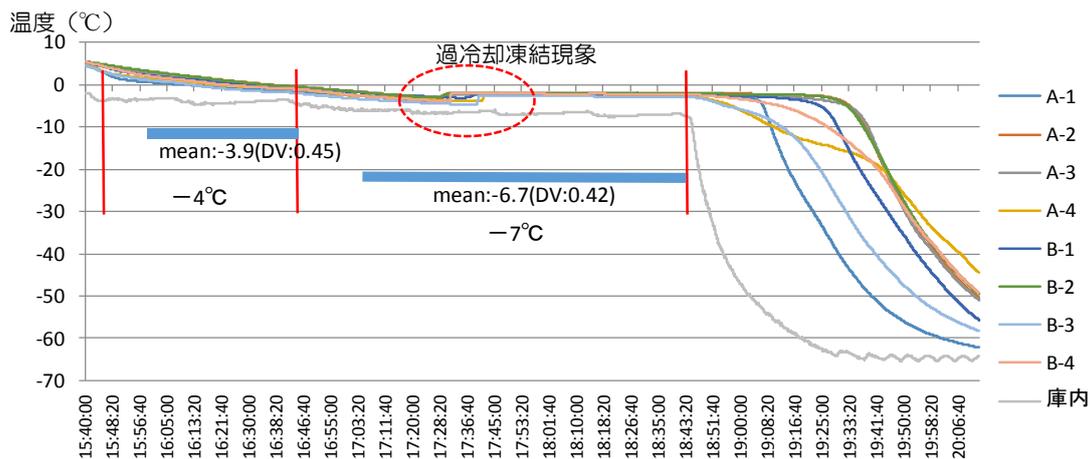


Fig.12 新冷凍システムによる殻付きカキの過冷却凍結試験結果 (再現性あり)

5月産の成熟した美味しい殻付きカキを過冷却凍結して $-40^{\circ}\text{C}$ で長期保管したカキは、1月産の生カキに比較して遊離アミノ酸含有量は豊富であった (Fig.13)。

また、電子顕微鏡による組織観察からも過冷却凍結は $-35^{\circ}\text{C}$ 急速凍結品に比べて空隙・凹凸が小さいように組織破壊が少ない高品質であることが分かる (Fig.14)。さらに、官能試験

でも、1月産生カキに比べて有意に高品質であった。

これらのことから、過冷却凍結-65℃大深度凍結は、殻付きカキの有効で高品質な冷凍方法であることが分かった。

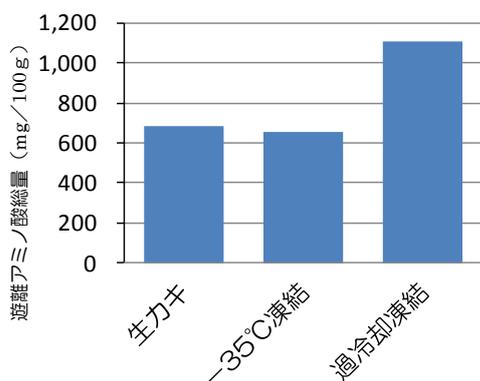


Fig.13 遊離アミノ酸含有量の比較

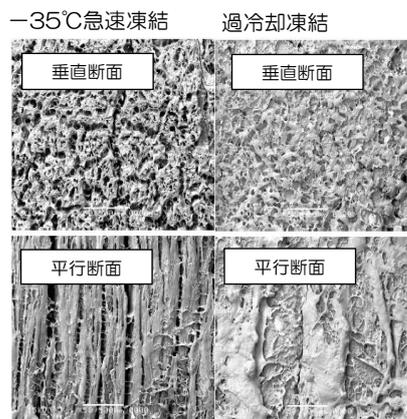


Fig.14 組織の電子顕微鏡観察

## 1-5 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関名	公益財団法人埼玉県産業振興公社
所在地	〒338-0001 埼玉県さいたま市中央区上落合2丁目3番2号
担当者	中村 繁之 TEL 048-857-3901 FAX 048-857-3921 E-mail : <a href="mailto:nakamura.shigeyuki@saitama-j.or.jp">nakamura.shigeyuki@saitama-j.or.jp</a>
プロジェクト参加機関 (企業)	中山エンジニアリング株式会社、株式会社エコニクス
主たる研究実施場所	宮城県南三陸町志津川地区

## 第2章 本論

### 2-1 超低温冷凍機による最適制御システムの開発

(中山エンジニアリング株式会社)

#### 2-1-1 超低温冷凍機による最適制御システムの開発

殻付カキの高品質な凍結が可能となる大深度凍結と過冷却凍結に対応した凍結装置を開発した。

これまでの既存冷凍技術では、過冷却現象を起こすであろう  $0\sim-10^{\circ}\text{C}$  付近の高温度域と、 $-65^{\circ}\text{C}$  の超低温域双方の冷凍温度域を移行させる技術、特に、低温冷凍機で高温度域での温度を安定・保持すること、過冷却現象を起こす高温度域からスムーズに超低温へ移行することが困難である。このような広範な温度帯とその安定・維持を可能とするような冷凍機、凍結庫などの冷凍機仕様を検討・設計し、試験機を製作した。(Fig.15)



Fig.15 試験機（左側：凍結庫 右側：冷凍機器類）と制御装置類

平成 24 年度では、試験機の試運転を実施し、過冷却現象を起こすであろう  $0\sim-10^{\circ}\text{C}$  付近の高温度帯でも  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  程度の温度維持がほぼ達成できた。また  $-60^{\circ}\text{C}$  の超低温による急速凍結も可能であった。

平成 25～26 年度では、①  $-65^{\circ}\text{C}$  の大深度凍結（以下、「 $-65^{\circ}\text{C}$  大深度凍結」という）、②  $-7^{\circ}\text{C}$  程度で過冷却現象を発生させた後に急速に  $-65^{\circ}\text{C}$  まで温度を下げる凍結（以下、「過冷却  $-65^{\circ}\text{C}$  大深度凍結」という）、の 2 つの凍結手法の開発のため解凍カキ、生カキ、ホヤ、サバなどの魚介類を使用してさまざまな試験を行った。

その結果、改造した試験機は  $-65^{\circ}\text{C}$  の安定した大深度雰囲気を作ることができ、 $-65^{\circ}\text{C}$  大深度凍結では最大氷結晶生成温度帯をほぼ 30 分以内に通過する急速凍結が可能となった。

また、過冷却  $-65^{\circ}\text{C}$  大深度凍結試験では、 $0\sim-7^{\circ}\text{C}$  の多段的な冷凍雰囲気を安定的につくり、過冷却現象を起こすことができ、一気に  $-65^{\circ}\text{C}$  までの急速大深度凍結も可能となった。

#### 2-1-2 新冷凍システムの省エネルギー効果

開発された超低温最適制御システムの電力使用量を、 $-40^{\circ}\text{C}$  の定格運転で測定した。 $\eta_{\max}$  実用機が、本研究の試作機の実績であり、比較対象としての一般機および  $\eta_{\max}$  はシミュレーション値である。

これによると、本研究開発で試作された実用機は、一般実用機に比較して 50% 以上の電力使用量の省エネルギー効果があることが実証された。このデータは 11 月データであるので、イータマックス技術の特徴である外気温を利用した冷凍システムは、東北地域である本研究場所のような寒冷地ではより効果を発揮することが分かる (Fig.16)。

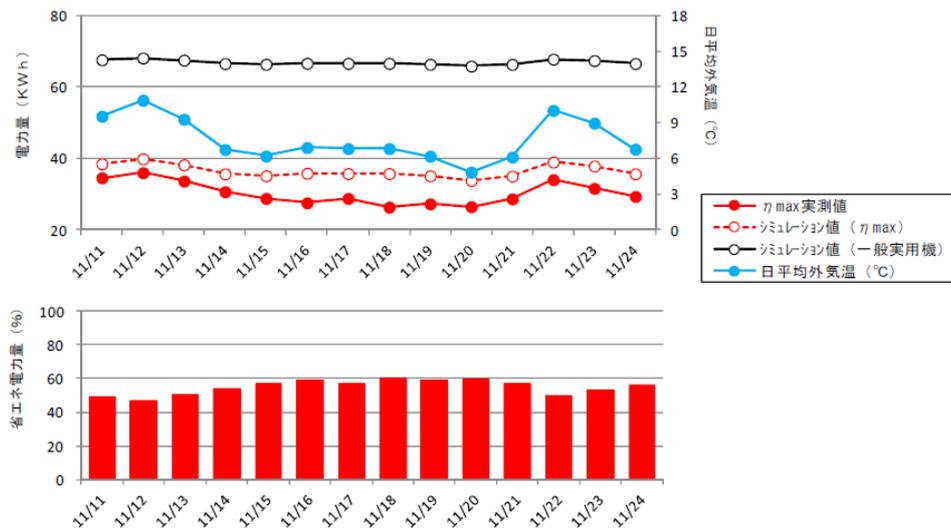


Fig.16 新冷凍システムの電力使用量の測定結果

## 2-2 凍結システム制御装置の開発（過冷却・超低温凍結の制御装置の開発）

### 2-2-1 凍結システム制御装置の開発

（中山エンジニアリング株式会社）

−65°C大深度凍結、および過冷却−65°C凍結を実現するための制御装置を開発する必要がある。本年度は、前年度に試作した新制御装置のプログラムの改修を行った。これにより、試験凍結の結果（温度設定・時間等）に合わせた凍結装置用アルゴリズムを設定し、設定値の一括保存を行うことで、凍結品毎の設定の簡素化を図り多品種の凍結に対応できる凍結システムとした。（Fig.17,18,19）



Fig.17 試作制御装置と現地動作確認・開発風景（冷凍機とは別の小屋からの操作）

<トップ操作画面>

制御対象	機器	制御内容
システム (1)	冷凍機 (1)	発停・状態信号
	冷却器 (1) 用 FAN	発停・状態信号 INTV 制御
	凝縮器 (1) 用 FAN	発停・状態信号 tk optimizer 機能
	電磁弁・膨張弁等	発停・状態信号 圧力制御
システム (2)	冷凍機 (2)	発停・状態信号
	冷却器 (2) 用 FAN	発停・状態信号 INTV 制御
	凝縮器 (2) 用 FAN	発停・状態信号 tk optimizer 機能
	電磁弁・膨張弁等	発停・状態信号 圧力制御
温度制御	システム (1) (2)	発停・状態信号

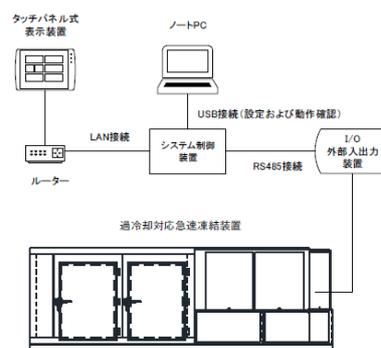


Fig.18 新冷凍システム制御装置の概要



Fig.19 開発された新冷凍システム制御装置と設置状況（制御盤内の様子）

## 2-2-2 遠隔監視・操作システムの開発

（中山エンジニアリング株式会社）

遠隔監視・操作のシステム使用は下図のとおりであり、平成 24 年度から稼働しており特に問題がなく遠隔監視・操作を実施している。

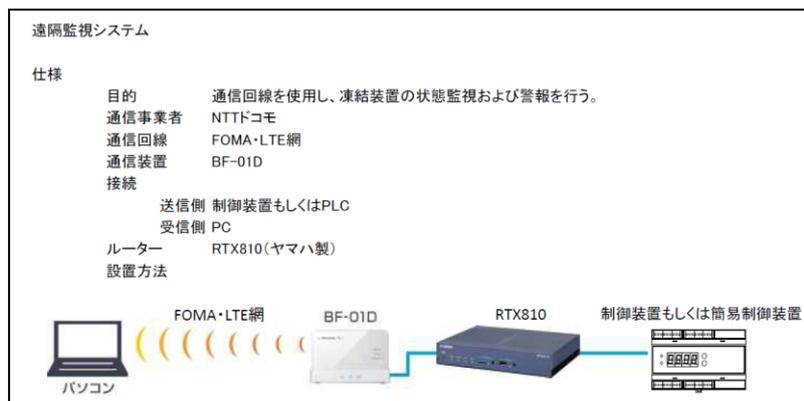


Fig.20 遠隔監視・操作システムの仕様

## 2-3 過冷却凍結による殻付きカキの高品質凍結方法の開発

### 2-3-1 過冷却凍結による殻付き貝類高品質凍結方法の開発

(中山エンジニアリング株式会社・株式会社エコニクス)

#### (1) 殻付きカキの-65℃大深度凍結

-60℃以下の超低温凍結は魚介類の高品質凍結に有効である。一般に、-35℃以下の超低温冷凍機はエアブロー式が多く普及しており、より早く食品等を凍結させるためにエアブロー（風）を強く吹かせているが、パックなどに入った加工食品などは風を強く吹かせても品質に影響はないが、生鮮海産物の場合、風によって表面が乾燥するなどの品質劣化が懸念されるので、庫内の風量をできるだけ抑えた凍結（これを大深度凍結という）が品質保全に有効であることが知られている。

殻付きカキの場合は、この風による大きな品質の劣化（乾燥）の影響は少ないと考えるが、殻付きカキの-65℃大深度凍結を実施した。

その結果、-65℃大深度凍結は、殻付きカキでも、従来技術である-35℃急速凍結に比べて有意（5%）に凍結時間を短縮することが実証された（Table.8）。

また、殻付きカキの最大氷結晶生成温度帯通過時間は、-65℃大深度凍結では、体積（殻長×殻高×殻幅）との関係は見られないが、-35℃凍結では正の相関がみられ、当然ではあるが、より大型の殻付きカキは、通常-35℃急速凍結では高品質での凍結は難しいことが分かる（Fig.21）。

	A	B
平均	23.604	35.331
分散	85.830	172.735
観測数	19	20
仮説平均との差異	0	
自由度	34	
t	-3.233	
P(T<=t) 片側	0.001	
t境界値 片側	1.691	
P(T<=t) 両側	0.003	
t境界値 両側	2.032	

A: -65℃大深度凍結

B: -35℃急速凍結

Table.8 殻付きカキの-65℃大深度凍結と-35℃急速凍結の検証結果（有意差）

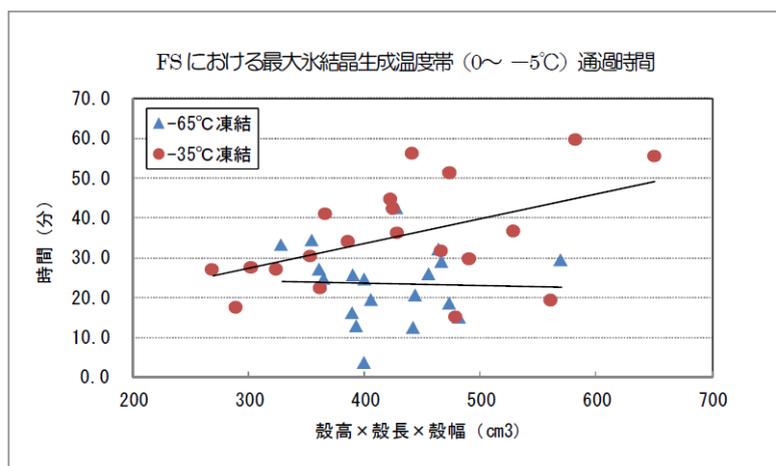


Fig.21 殻付きカキの体積と最大氷結晶生成温度帯通過時間との関係

#### (2) 殻付きカキの過冷却-65℃大深度凍結

これまでの凍結は温度差を利用した熱伝達の促進による凍結時間の短縮を目指す技術開発であった。近年、過冷却状態を経た後に凍結させることで氷結晶の微細化が実現できることが注目されている。

食品が凍る温度（凝固点：魚などは約-2℃）を過ぎても凍らないようにゆっくりと温度を下げた後に、急速凍結（超低温）することによって氷の微細化と最大氷結晶生成温度帯を早く通過することができることから、また、過冷却凍結現象が起こった後に、-65℃までの急速凍結を行うが、FANを制御してできるだけ風による劣化を抑えた「過冷却-65℃大深度凍

結」による、殻付きカキの高品質凍結を実証した。

平成 25 年度には、メッシュカゴによつての 7 ステップ凍結（予冷 0℃：2 時間→-1℃～-7℃：各 30 分→-65℃）で、過冷却凍結現象には再現性があることが実証されており、殻付きカキは、庫内温度が-4℃～-7℃で、カキの品温（中心温度）が-2.5℃～-4.5℃で過冷却凍結現象が発生することが分かる（Fig.22）。

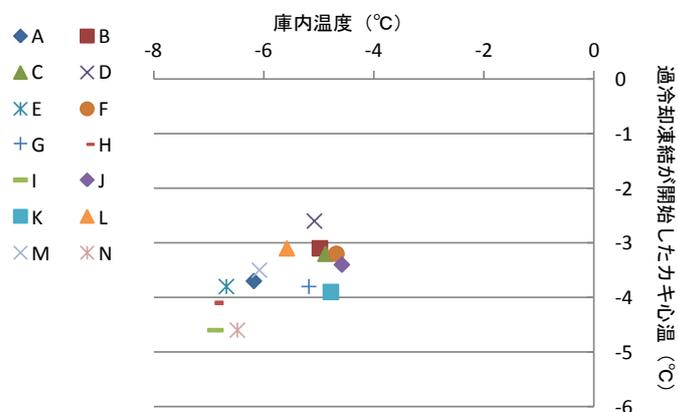


Fig.22 殻付きカキの過冷却現象発生時の庫内温度とカキ品温の関係

7 ステップ凍結では、いわゆる冷蔵温度帯でカキを凍結させることになることは、その間での低温凍結保管となることによる品質の低下が懸念されると同時に、事業化に向けて、1 日に 2 バッチの凍結を行うには、この過冷却-65℃大深度凍結が、最大でも 4 時間以内で行えるようにしなければならない。

そこで、平成 26 年度では、その時間を短縮し、さらに再現性のある過冷却凍結方法（温度と時間）の実証を繰り返した結果、-4℃：1 時間→-7℃：2 時間の 2 ステップ凍結で再現性を実証できた。これにより、殻付きカキの過冷却-65℃凍結は事業性の高い高品質な凍結方法であると考えられる。

前出の Fig.12 がその 2 ステップ凍結の再現性のある結果であり、研究目標である、この過冷却温度帯での庫内温度の高精度な制御（±0.5℃）を達成することもできた。



Fig.23 志津川産殻付きカキの凍結試験状況

## 2-3-2 高品質凍結品の実証

(中山エンジニアリング株式会社・株式会社エコニクス)

過冷却-65℃大深度凍結した殻付きカキの高品質性を、

- ① 化学的成分分析
- ② 電子顕微鏡による組織観察
- ③ 官能試験

で実証した。

### (1) 化学的成分分析

シーミルクと呼ばれるようにカキは豊富な栄養成分、とりわけ、美味しさ（甘さなど）にかかわる遊離アミノ酸類を豊富に含む有用水産物である。

Fig.24 に志津川産のカキの遊離アミノ酸量の季節変化を示した。

このように、冬季の旬の時期に比べ、カキは、産卵を控えるために春に栄養が豊富で美味しいことが知られるが、宮城県では、4月1日から剥きカキの生食が禁じられるので、魚価が大幅に低下する。そこで、この春のカキを高品質に凍結・保管できれば、単価向上のみならず、夏の観光シーズンでの利用などのブランド化が図れる。

また、Fig.25 には、平成 27 年 1 月産の生カキ、そのカキを-35℃急速凍結したもの、平成 26 年 5 月産のカキを過冷却-65℃大深度凍結して、同じくイータマックス技術の-40℃冷凍庫で保管（約 7 カ月）した 3 種の冷凍カキの化学的分析結果の比較図を掲げた。なお、冷凍カキの解凍は、-1℃のチルド解凍（1 昼夜）とした。

これによると、当然ではあるが、1 月産の生カキよりも 7 カ月の長期保管されていた 5 月産の冷凍カキが有意的にすぐれていることが分かる（Table.9）。なお、化学的な分析はいずれも一般財団法人食品分析開発センターに委託して実施した。

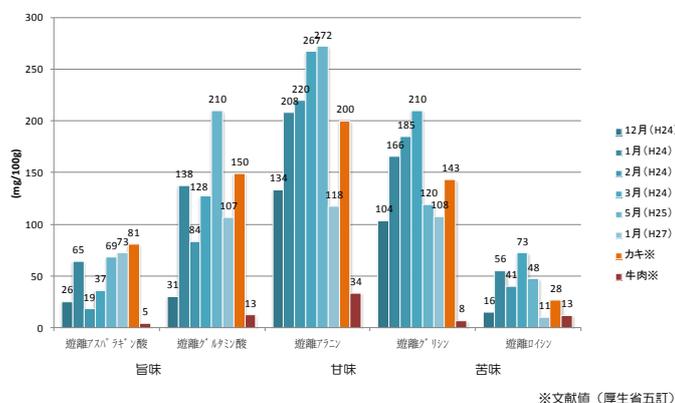


Fig.24 志津川産のカキの遊離アミノ酸の季節変化

群	採集年月日	サンプル名	遊離アミノ酸 (総量) (mg/100g)
母集団	2015/1/7	H26年1月生カキ	685
	2015/1/13	H26年-35℃急速凍結	655
	2014/1/29	H24年1月生カキ	776
比較値	2015/1/13	5月凍結 (過冷却-65℃凍結 (長期保管))	1,108

◆5月凍結カキは、生カキ・-35℃急速凍結に比べて、アミノ酸含有量は有意（99%信頼限界）に優れている

母平均の検定：t分布	
変数	変数1
n	3
不偏分散	3970.333
標準偏差	63.011
標準誤差	36.379
平均	705.333
比較値	1108.000
差	402.667
統計量:t	11.0686
自由度	2
両側P値	0.0051
判定	**
片側P値	0.0040
判定	**
判定	母平均が比較値よりも大きいまたは小さい

Table.9 3種類のカキの遊離アミノ酸総量の有意差検定結果

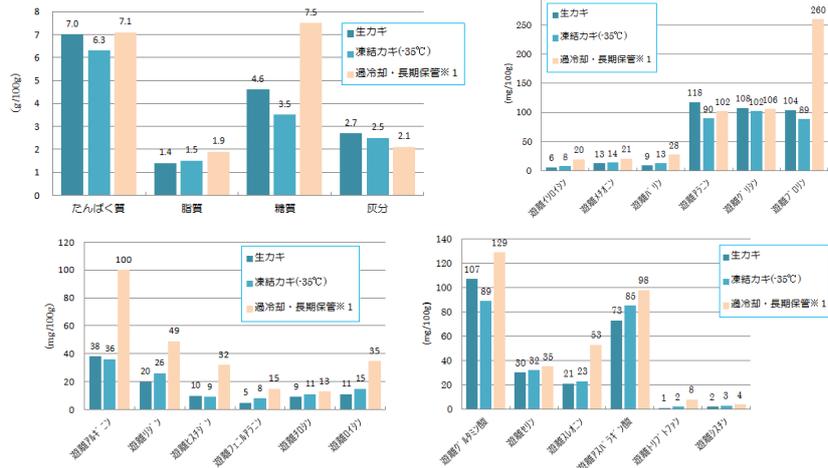


Fig.25 1月産生力干と-35℃急速凍結、5月産過冷却-65℃大深度凍結力干の化学的分析結果

## (2) 電子顕微鏡による組織観察

冷凍力干の品質評価として電子顕微鏡による組織観察を実施した。

最大氷結晶生成温度帯(0~-5℃)を早く通過させることによって、細胞内外の水分が瞬時にアモルファス状態(非結晶)で凍結しガラス化する。

この場合、氷の結晶は小さく分散した状態で存在するために、細胞に負担が加わらず傷みも最小限となり、食品の美味しさ(色、食感、解凍ドリップ減少など)を保つことができる。

このことから、冷凍によって生成される組織内の氷の大きさを、電子顕微鏡によって観察し、差異があるかどうかを確認した。

その結果、過冷却凍結-65℃凍結は、-65℃大深度凍結および-35℃急速凍結品に比べて空隙・凹凸が小さく、組織破壊が少ないという結果が得られた。

なお、電子顕微鏡観察は、北海道工業技術センターに委託して実施した。

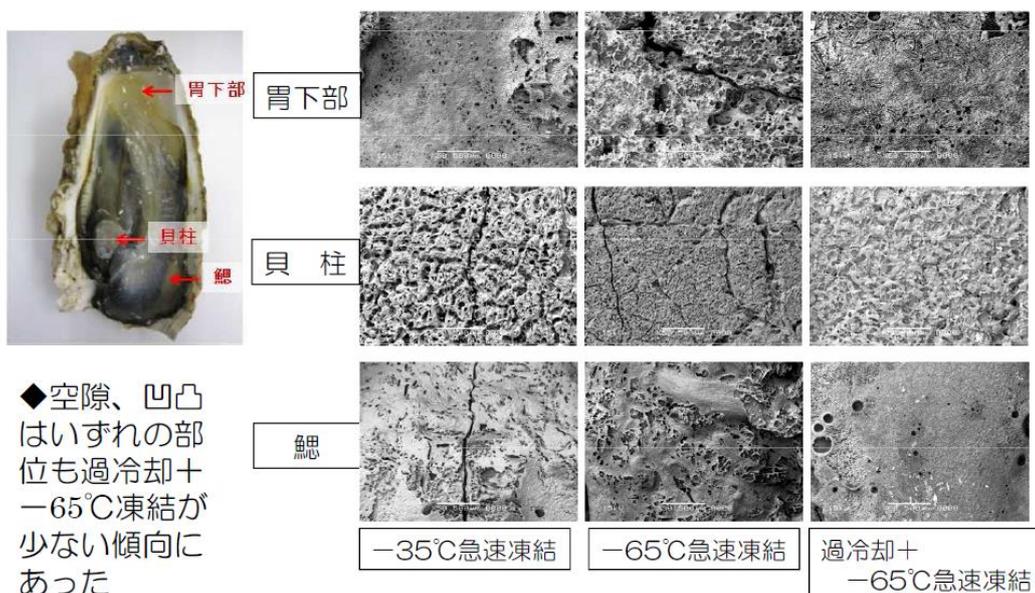


Fig.26 3種類の凍結殻付き力干可食部(垂直断面)の電子顕微鏡写真の比較

### (3) 官能試験

生鮮食品を冷凍した場合の品質の評価には、実際に食する官能試験は有効な方法であるが、カキの場合、食中毒の関係などから官能試験の知見や報告は少ないが、本研究では志津川支所のカキ部会の会員の協力によって生カキ(解凍カキ)の官能試験を実施することができた。

本試験の目的は、「殻付きカキの凍結—解凍処理が、品質を劣化させるのか」および、「漁獲時期の違いによる品質の違いが、凍結—解凍処理を経ても判るか」の検証を行うことである。サンプルは、水揚げ後、次亜塩素酸ナトリウム入りの海水に浸漬させた生カキ(現地生)、生カキと同時に水揚げされ冷凍したもの(1月凍結)、旬の時期に水揚げされ冷凍したもの(5月凍結)の3種類を用意し、官能試験によって評価した。(Table.10)

サンプル呼称	現地生	5月凍結	1月凍結
水揚げ	2015年1月6日	2014年5月	現地生と同時
凍結条件	—	過冷却凍結および -65℃急速凍結	-35℃急速凍結
保存条件	NaClO入り海水(水温8℃)に浸漬	-40℃冷凍倉庫	-40℃冷凍倉庫
保存期間	3日	8か月	3日
処理条件	試験直前に漁業者が殻むき	・インキュベータ(設定温度-1℃)で一晩解凍の後、NaClO入り海水による流水解凍30分以上 ・試験直前に大学スタッフが殻むき	・インキュベータ(設定温度-1℃)で一晩解凍の後、NaClO入り海水による流水解凍8分 ・8分経過後たちに海水から引き揚げ、大学スタッフが殻むき

Table.10 官能試験のサンプル条件



Fig.27 官能試験用サンプルと官能試験の風景

1月生カキと5月過冷却保管カキとの比較においては、「身全体の透明感」「噛んだ時のカキ特有の香り」において10%、「ツヤ」において5%、「甘味」「カキ特有の味の濃さ」において1%水準で有意差が得られた。有意差の得られなかったその他の項目においても、ほとんどの項目で5月凍結の平均点が現地生のものを上回っており、5月凍結サンプルの品質の良さを示唆している。(Fig.28, Table.11)

なお、統計処理は、正規性の判定には「正規性の適合度検定(Shapiro-WilkのW検定)」、正規性のある項目の解析には「t検定」、正規性のない項目の解析には「ウィルコクソンの順位和検定」を行った。

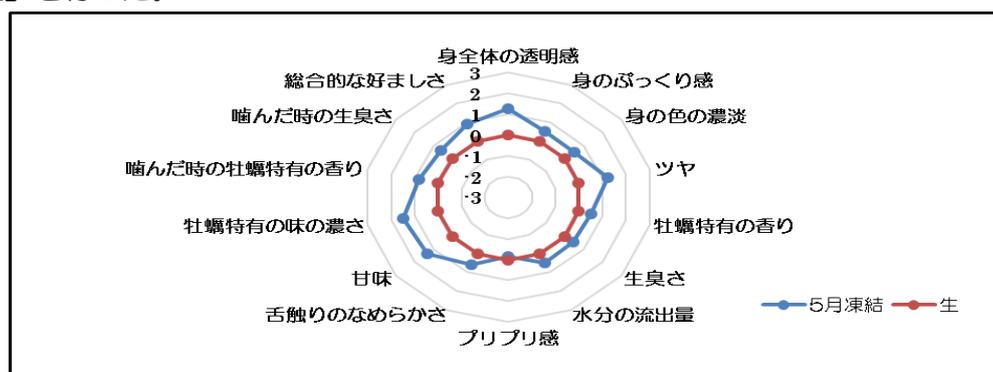


Fig.28 官能試験(生カキ—5月産過冷却凍結カキ)の結果

Table.11 官能試験（生カキー5月産過冷却凍結カキ）の統計結果

評価項目	5月凍結平均(点)	現地生平均(点)	正規性	p値	検定
身全体の透明感	1.25	0	なし	0.0607	*
身のぷっくり感	0.50	0	なし	0.4556	n.s.
身の色の濃淡	0.50	0	あり	0.3134	n.s.
ツヤ	1.25	0	なし	0.0492	**
カキ特有の香り	0.50	0	あり	0.1522	n.s.
生臭さ	0.42	0	あり	0.2829	n.s.
水分の流出量	0.50	0	あり	0.2809	n.s.
プリプリ感	-0.17	0	なし	0.7278	n.s.
舌触りのなめらかさ	0.58	0	なし	0.4730	n.s.
甘味	1.33	0	あり	0.0040	***
カキ特有の味の濃さ	1.50	0	なし	0.0021	***
噛んだ時のカキ特有の香り	0.83	0	あり	0.0720	*
噛んだ時の生臭さ	0.58	0	なし	0.2425	n.s.
総合的な好ましさ	0.92	0	なし	0.1432	n.s.

n.s. : 非有意、\* : p<0.1、\*\* : p<0.05、\*\*\* : p<0.01

## 2-4 魚介類の凍結試験による最適アルゴリズムの開発

(中山エンジニアリング株式会社・株式会社エコニクス)

本試作機を用いて、-65℃大深度凍結および過冷却-65℃凍結を、サバ、イワシ、およびホヤに適用する凍結実証試験を実施した。(Fig.29)

サバは個体が大きいので過冷却凍結は再現できなかった。また-35℃急速凍結では、サバ心温の最大氷結晶生成温度帯通過時間は1時間以上を要することが分かった。-65℃大深度凍結でも、心温では30分以上かかるが、最大40分程度であることから高品質な凍結方法となっていることが分かる。(Fig.30)

イワシは、-65℃大深度凍結で最大氷結晶生成温度帯通過時間が10分程度と極めて短時間で凍結されるので、この乾燥を防げる-65℃大深度凍結を最適アルゴリズムとした。

一方、カキと同様に国内有数の生産があるホヤについても-65℃大深度凍結および過冷却-65℃凍結試験を実施した。

その結果、ホヤロケット(ビニールのチューブに剥きホヤと海水が入ったもの)も過冷却凍結が再現性がある凍結方法であることが実証されたが、-65℃凍結では最大氷結晶生成温度帯通過時間も20分程度と短く凍結することから、ホヤロケットは乾燥など



Fig.29 凍結サバとイワシ



Fig.30 サバの-65℃超低温凍結結果

を考慮する必要がないので、ホヤロケットは $-65^{\circ}\text{C}$ でFANも最大に稼働させる凍結方法が最適アルゴリズムであると考えた (Fig.31)。



Fig.31 ホヤロケットと $-65^{\circ}\text{C}$ 大深度凍結されたホヤロケット

### 第3章 (最終章)

#### 3-1 研究開発の総括

本研究開発では、4つの課題と数値目標を立てて開発に取り組んできたが、いずれの目標も達成することができた。

なお、現地作業やカキサンプル・作業場所の提供など、宮城県漁業協同組合かき部会の前・部会長の遠藤氏、現部会長の行場氏をはじめとする部会員の協力に感謝する。

- ◆殻付きカキを高品質に凍結 (過冷却凍結と超低温凍結を組み合わせた新技術凍結)
- ◆過冷却+超低温凍結の新技術凍結を開発
- ◆品質は既存凍結よりも有意に優れていた (官能試験、成分分析、電子顕微鏡観察)
- ◆過冷却温度帯温度制御の実用的技術の開発 (設定温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )
- ◆ $0\sim-10^{\circ}\text{C}$ 域での温度制御 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ を実証した
- ◆急速凍結制御の高度化 (凍結時間▲10%、省エネ▲15%)
- ◆ $-65^{\circ}\text{C}$ 大深度凍結は、既存の急速凍結 ( $-35^{\circ}\text{C}$ ) より▲33%凍結時間を短縮できる
- ◆大深度凍結は、魚介類ホールの凍結に有効である (乾燥しない)
- ◆▲50%の省エネを実証した ( $-40^{\circ}\text{C}$ 定格運転時)
- ◆広範囲で高精度な温度制御システムを開発し、魚介類の高品質凍結システム実用機を開発
- ◆過冷却+超低温凍結、超低温凍結 (FAN制御が広範囲) の実用機を開発
- ◆魚介類の凍結目的にあった冷凍方法を選択することが可能  
(ex.ホヤロケット→超低温 (風強)、サバ→超低温 (弱風: 皮の乾燥防ぐ)、殻付き貝類→過冷却+超低温凍結)
- ◆ただし、事業化への試験データ蓄積が必要

#### 3-2 今後の事業化への課題

生鮮品の冷凍と冷凍保管技術は、食品の栄養や風味を損なうことなく長期に保存が可能な優れた保存方法である。

しかしながら、冷凍および冷凍保管は、対象品目によって冷凍保管温度は異なり、逆にいうと、脂質の多いサバやマグロなどは可能な限り低温で冷凍保管すべきであるが、脂質の少

ない貝類は超低温保管は必要がなく、冷凍温度の必要性和冷凍にかかる電力量のバランス、つまりコストパフォーマンスを良く検討して事業化を考えるべきである。

具体的に志津川地区で、殻付きカキを中心とした、新冷凍システムを事業化する場合の商品の製作方法を考えてみると、以下のような作業イメージとなる。メッシュカゴで凍結してから耐水性段ボールへ詰め直す作業は、商品の欠品や異物の排除等の対応策に有効であり商品の品質向上につながると考える。

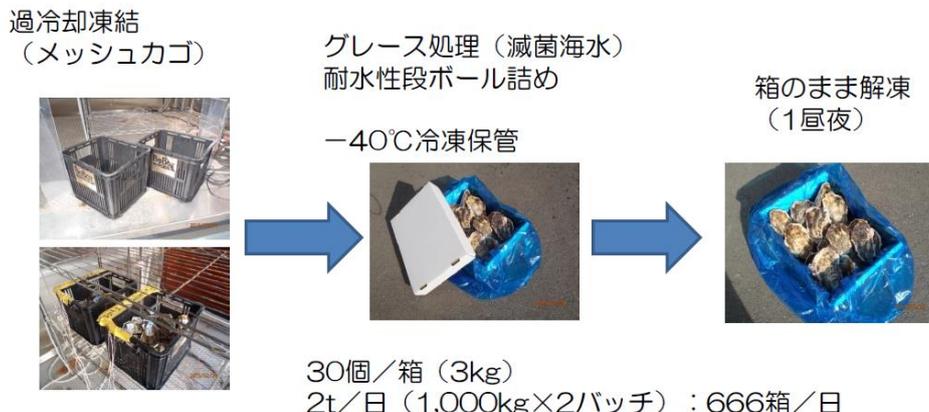


Fig.32 殻付き凍結カキの製造手順イメージ

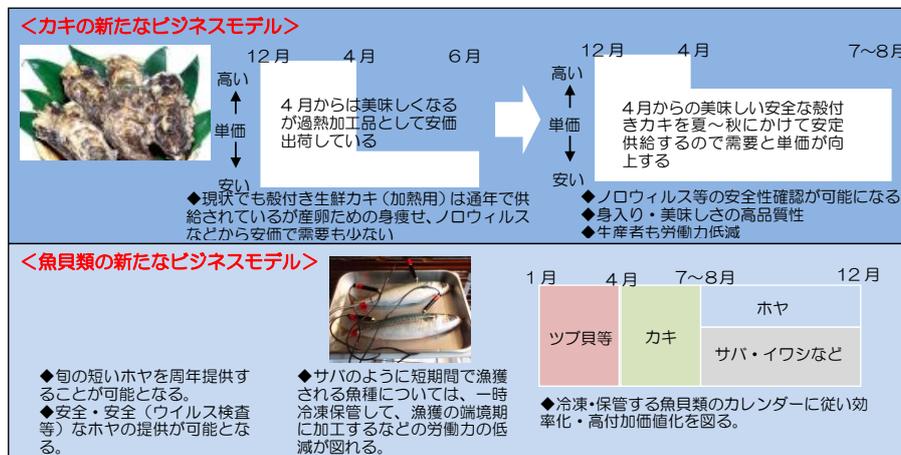
この方法で、1日に1tを2バッチ製造して、4月～6月に合計180トンの冷凍カキを製造して7月からの観光シーズンのカキ端境期に、高品質な殻付きカキを冷凍保管して安定的に販売することによってブランド化を図る。

7月～12月はホヤやサバ・イワシを、1月～4月はツブ類を冷凍保管して安定供給することによって通年の利用によるコストパフォーマンスを高めることが可能である。(Fig.34)

しかしながら、

- ◆ 生産方法 (シングルシード・形状など)
- ◆ 地域性ブランド
- ◆ 市場調査・F/S調査
- ◆ 衛生管理 (HACCPなど)
- ◆ IT環境
- ◆ コマーシャル
- ◆ 人材育成

についての今後の検討が必要で、とりわけ人材育成が最も重要な課題であろう。



➡ 新冷凍技術による志津川水産物のブランド化の推進

Fig.33 新冷凍システムを活用した志津川産水産物のブランド化事業のイメージ

## 引用・参考文献

- 1) 本間清一・村田容常編：「食品加工貯蔵学」東京化学同人（2004）
- 2) 田中宗彦：「水産食品の加工 冷蔵品・冷凍品 1～3」「食品と容器」Vol.47 No.3～5（2006）
- 3) 鈴木徹：過冷却現象を利用した次世代の食品冷凍技術 東京海洋大学 HP（2012）