

# 技術開発報告書

(中間報告)

## 「鯨肉の凍結及び冷凍保管に関わる 省エネルギー凍結技術の開発」



# 技術開発報告書(中間報告)

## I 課題名

「鯨肉の凍結及び冷凍保管に関わる省エネルギー凍結技術の開発」

## II 実施主体名

共同船舶株式会社

## III 技術開発の内容

### 1 目的

調査母船（鯨肉凍結運搬船）の燃油消費の約 40%を占める鯨肉の凍結と冷凍保管に関わるエネルギーの省力化及び計画されている新造船の凍結・冷凍保管設備の省エネ設計に資するため、以下の4件の技術開発を目的とした。

### 2 技術開発の概要

#### (1) 技術開発の内容

##### ア. 鯨肉の省エネルギー凍結保管温度のモデル試験

鯨肉はタンパク質の安定性が魚肉タンパク質に比べ数十倍安定であることが報告されているにも関わらず、冷凍保管は魚類よりも低い $-30^{\circ}\text{C}$ で実施している。

そこで、本事業において冷凍保管温度と鯨肉の品質の関係を数量化し適正な省エネ冷凍保管温度を明らかにすることを目的とした。

##### イ. 鯨肉の省エネルギー凍結速度のモデル試験

凍結速度（凍結温度）が遅ければそれだけ省エネルギー効果が高い。そこで凍結速度について、鯨肉の品質に影響しない、最適の省エネ凍結速度を明らかにすることを目的とした。

##### ウ. 船上での凍結と冷凍保管温度の実証試験

南極海での捕獲調査鯨肉を用い、凍結と冷凍保管温度を変えて船上実証試験を行った。その後国内に搬入後にモデル実験と同様に品質劣化指標（タンパク質凍結変性、筋肉細胞の組織観察など）の試験を加え品質を総合的に評価する。

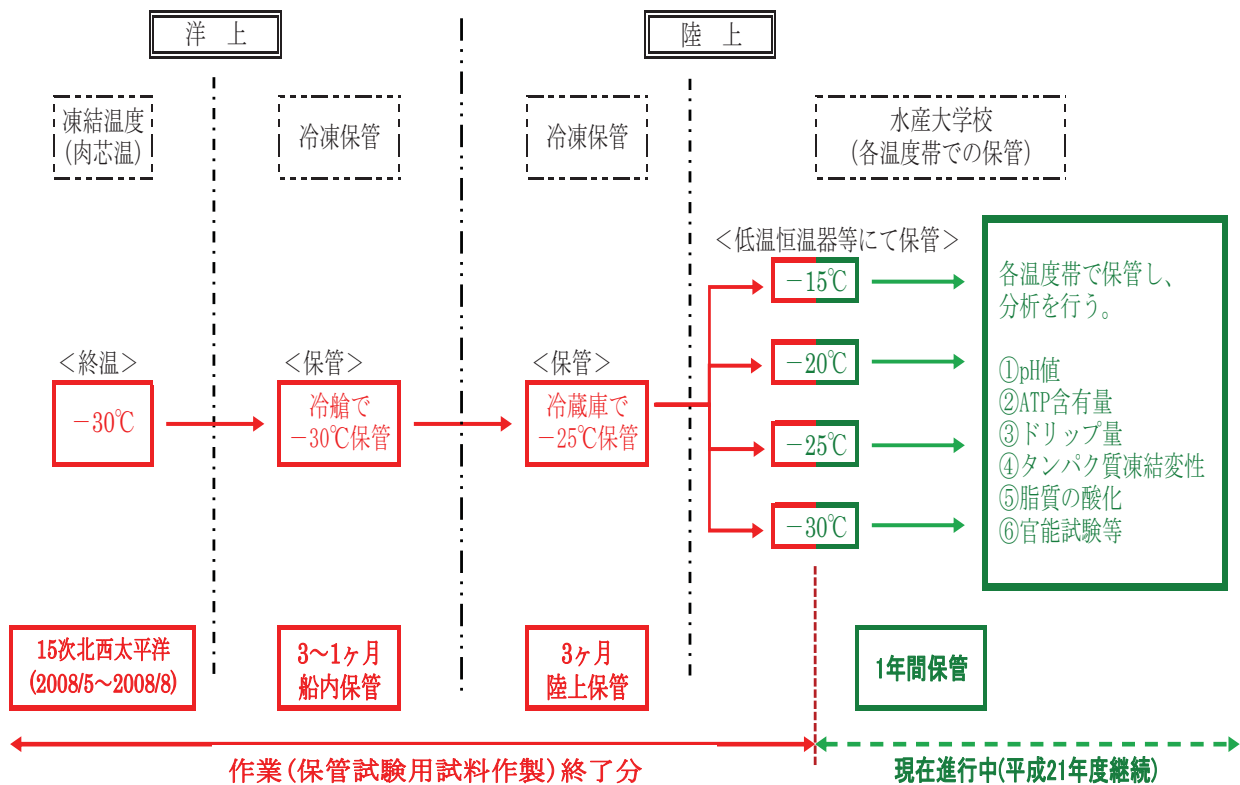
##### エ. 恒温調整装置の開発

現行の $-30^{\circ}\text{C}$ から高温度側に冷凍保管温度を変更するだけでなく、システムの省エネ効率を上げるため、省エネタイプの保管庫自動温度制御システム、及び冷凍機自動運転管理システムの開発を目的とした。

(2) 技術開発の方法（手法）

ア. 鯨肉の省エネルギー凍結保管温度のモデル試験

凍結保管温度は高ければ、それだけ省エネルギー効果が高い。そこで、 $-15^{\circ}\text{C}$ ～ $-30^{\circ}\text{C}$ の各温度で鯨肉を保管し、品質劣化の指標としてタンパク質凍結変性、ドリップ量、ATP含有量などを分析し、保管温度と品質劣化の関係を数量化するモデル試験を調査で捕獲された鯨を用いて行い、省エネ凍結保管温度を明らかにする。（図Ⅲ. 2-1 参照）



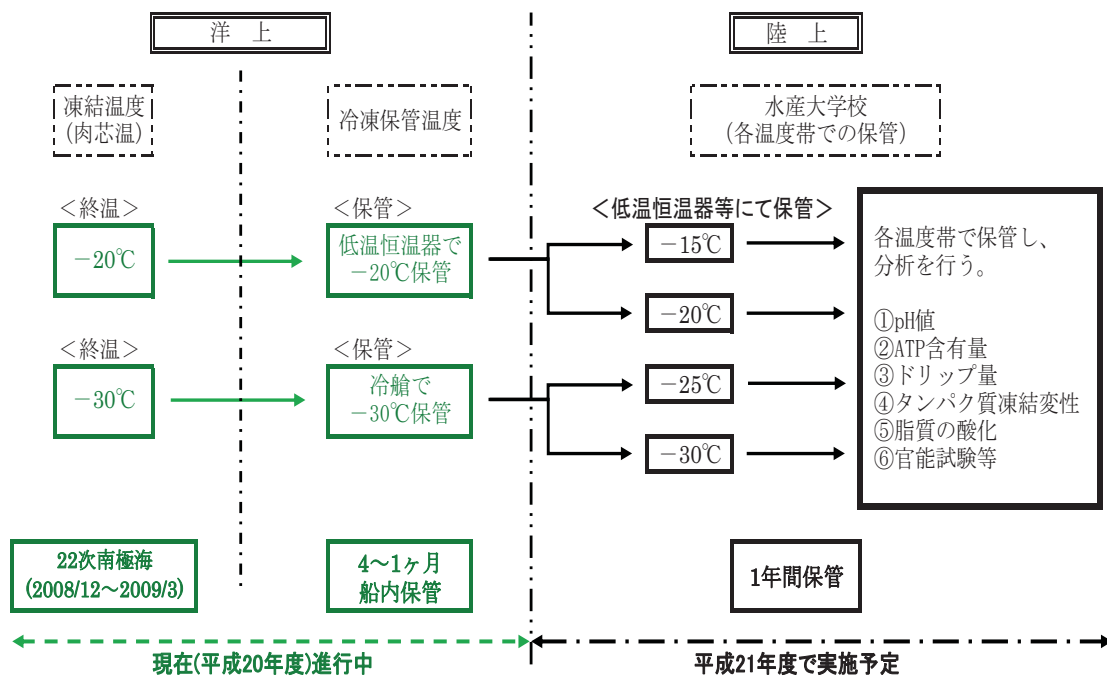
図Ⅲ. 2-1 平成 20 年度の冷凍保管試験進捗状況図

## イ. 鯨肉の省エネルギー凍結速度のモデル試験

凍結終温を高く設定できれば、過剰凍結部分の省エネが行える。また冷媒の冷凍機吐出温度を高く設定するほど、凍結速度は低下するが、省エネルギー効果は高い。そこで複数の凍結速度と品質の関係を調査で捕獲された鯨肉を用いてモデル実験を行い、省エネ凍結速度を明らかにする。

## ウ. 船上での凍結と冷凍保管温度の実証試験

南極海での捕獲調査鯨肉を用い、凍結と冷凍保管温度を下記組み合わせで行い、船上実証試験を行う。国内に搬入後に陸上保管モデル実験を引き続き実施し、タンパク質凍結変性、筋肉細胞の組織観察などを加え品質を総合的に評価する。(図Ⅲ. 2-2 参照)



図Ⅲ. 2-2 平成 20・21 年度の技術開発状況図

## エ. 恒温調整装置の開発

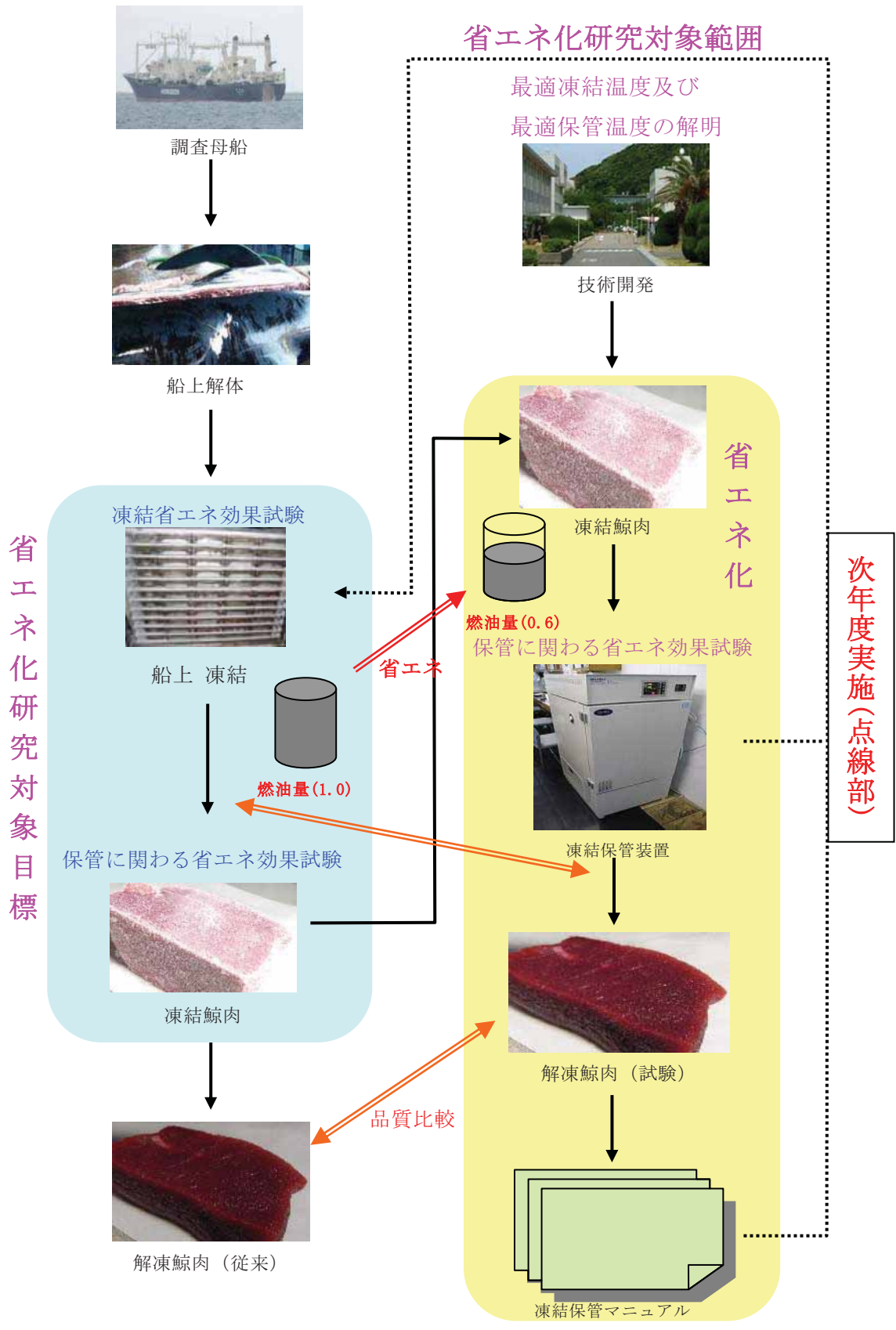
当面、現状の設備で保管温度記録用データロギング（記録）しながら最適な条件を解明する。

### (ア) 保管庫の自動温度制御システム

日新丸急冷セットに2セットの冷媒給液ヘッド部にタイマー式開閉弁を設置。

### (イ) 冷凍機の自動運転管理システム

冷凍速度データロガーデータを元に、-25°C以下になる時間をセットして給液をストップし、過冷却を防止する。



図Ⅲ.2-3 実験概要イメージ図

### 3 技術開発の結果

#### (1) 技術導入前後の省エネルギー効果比較

##### ア. 鯨肉の省エネルギー凍結保管温度のモデル試験

平成 20 年 11 月から各温度（ $-15^{\circ}\text{C}$ ～ $-30^{\circ}\text{C}$ ）において保管試験を継続中であり、今後の品質劣化指標等の分析結果に期待したい。

品質劣化指標の分析結果の詳細は「4 技術開発の評価」で述べる。

##### イ. 鯨肉の省エネルギー凍結速度のモデル試験

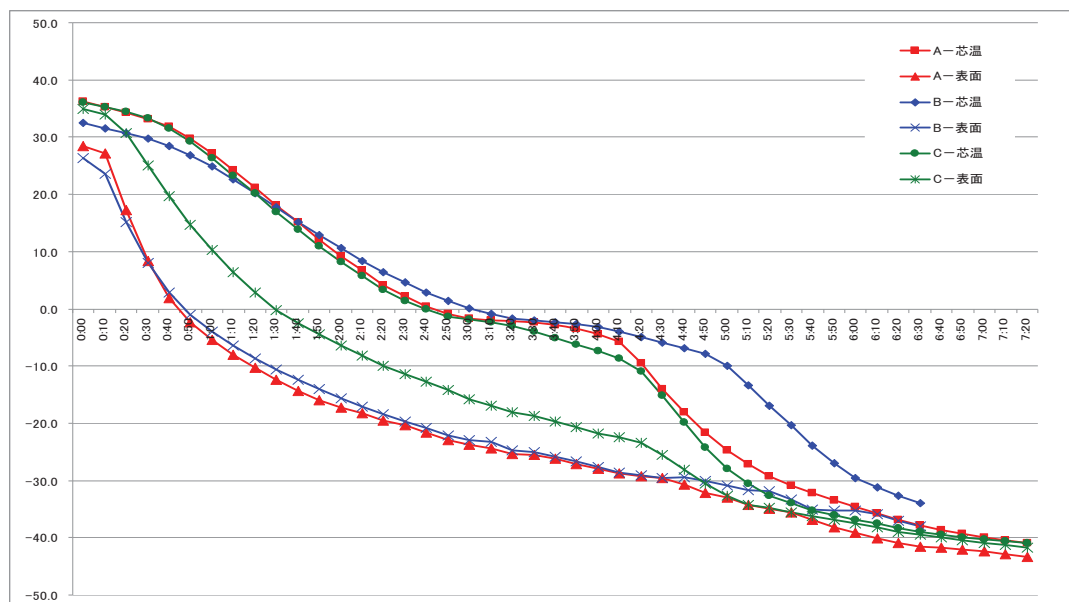
凍結速度（凍結温度）の試験は平成 21 年度に実施し、その省エネ効果と品質の関係を明らかにしたい。

##### ウ. 船上での凍結と冷凍保管温度の実証試験

平成 20 年度実施の 22 次南極海捕獲調査において、凍結速度（終温度）が $-20^{\circ}\text{C}$ と $-30^{\circ}\text{C}$ で試料作製を行った。作製試料は国内持ち戻り後、凍結保管温度の試験と同様に品質劣化指標についての分析試験を行う。

作製した試料は、対象個体の pH 値が高（7.0 前後）、中（6.5 前後）、低（6.0 前後）で選定し、凍結時の肉温変化の中芯（表面から 6 cm 程度）と表面（表面から 2 cm 程度）を測定した。また各々の試料を A、B、C とした。

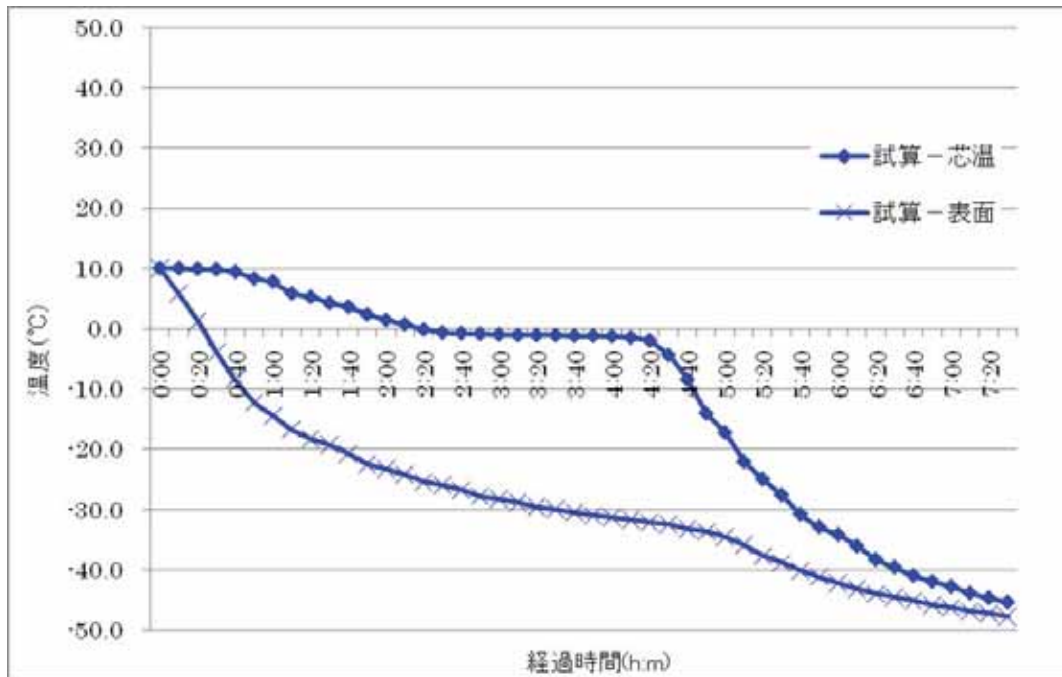
測定結果は下図のようになる（図Ⅲ.3-1 参照）。



図Ⅲ.3-1 鯨赤肉の凍結曲線（実測）

測定個体の違いにより、凍結曲線にズレが生じているものの、中芯部・表面部は概ね同様な温度変化を示した。

現状の日新丸（22次南極海調査）における実測凍結曲線（上図）は、前川製作所提示のブライン間接接触式凍結装置での試算凍結曲線とほぼ一致した挙動を示した。



図Ⅲ.3-2 鯨赤肉の凍結曲線（試算：南極海）

以下に日新丸船上での実験状況を示す（図Ⅲ. 3-3～8 参照）。



図Ⅲ. 3-3  
データ測定機器  
サーモロガー（左）  
pH 値測定器（中）  
温度測定機（右）



図Ⅲ. 3-4  
急速凍結庫（船内）  
コンタクトフリーザー



図Ⅲ. 3-5  
実験試料作製状況



図Ⅲ. 3-6  
庫内凍結状況



図Ⅲ. 3-7  
作製試料保管庫  
(低温恒温器)



図Ⅲ. 3-8  
低温恒温器  
温度コントローラー

イ. このことより、前川製作所提示のブライン間接触式凍結装置による試算及び推定される省エネ効果は以下の通りとなる。

南極海用

(ア) ブライン間接触式凍結装置のデータを参考に、R-22 直接膨張式凍結装置をシュミレーションして作成した凍結曲線の試算データは以下の通りである。

①初温：+10℃、境界温度（膨張温度）：-50℃、K値：80

②初温：+10℃、境界温度（膨張温度）：-40℃、K値：80

③初温：+10℃、境界温度（膨張温度）：-40℃、K値：60

(イ) 初温：+10℃として、終温の変化による凍結熱量は下記の通りとなる。

①終温：-20℃のとき  $0.83 \times 10^\circ\text{C} + 58.2 + 0.46 \times 20^\circ\text{C} = 75.7\text{kcal/kg}$

②終温：-25℃のとき  $0.83 \times 10^\circ\text{C} + 58.2 + 0.46 \times 25^\circ\text{C} = 78.0\text{kcal/kg}$

③終温：-30℃のとき  $0.83 \times 10^\circ\text{C} + 58.2 + 0.46 \times 30^\circ\text{C} = 80.3\text{kcal/kg}$

④終温：-40℃のとき  $0.83 \times 10^\circ\text{C} + 58.2 + 0.46 \times 40^\circ\text{C} = 84.9\text{kcal/kg}$

(ウ) 凝縮温度：+10℃、境界温度：-50℃、K値：80 の冷凍機運転状態は冷凍能力が 153,510kcal/hr で、動力が 109.00kw である。

①初温：+10℃、終温：-20℃、凍結時間：5.1hr で

冷凍重量：10,342.2kg、電力量：555.90kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0538kwhr で、現状との電力比率は 0.94

②初温：+10℃、終温：-25℃、凍結時間：5.3hr で

冷凍重量：10,430.8kg、電力量：577.70kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0554kwhr で、現状との電力比率は 0.97

③初温：+10℃、終温：-30℃、凍結時間：5.5hr で

冷凍重量：10,514.4kg、電力量：599.50kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0570kwhr で、現状の電力比率で 1.00

④初温：+10℃、終温：-40℃、凍結時間：6.5hr で

冷凍重量：11,752.8kg、電力量：708.50kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0603kwhr で、現状との電力比率は 1.06

(エ) 凝縮温度：+10℃、境界温度：-40℃、K値：80 の冷凍機運転状態は冷凍能力が 243,982kcal/hr で、動力が 117.70kw である。

①初温：+10℃、終温：-20℃、凍結時間：6.4hr で

冷凍重量：20,627.3kg、電力量：753.28kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0365kwhr で、現状との電力比率は 0.64

②初温：+10℃、終温：-25℃、凍結時間：6.8hr で

冷凍重量：21,270.2kg、電力量：800.36kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0376kwhr で、現状との電力比率は 0.66

③初温：+10℃、終温：-30℃、凍結時間：7.4hr で

冷凍重量：22,484.0kg、電力量：870.98kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0387kwhr で、現状との電力比率は 0.68

(オ) 凝縮温度：+10℃、境界温度：-40℃、K値：60 の冷凍機運転状態は

冷凍能力が 243,982kcal/hr で、動力が 117.70kw である。

①初温：+10℃、終温：-20℃、凍結時間：7.0hr で

冷凍重量：22,561.1kg、電力量：823.90kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0365kwhr で、現状との電力比率は 0.64

②初温：+10℃、終温：-25℃、凍結時間：7.5hr で

冷凍重量：23,459.8kg、電力量：882.75kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0376kwhr で、現状との電力比率は 0.66

③初温：+10℃、終温：-30℃、凍結時間：8.2hr で

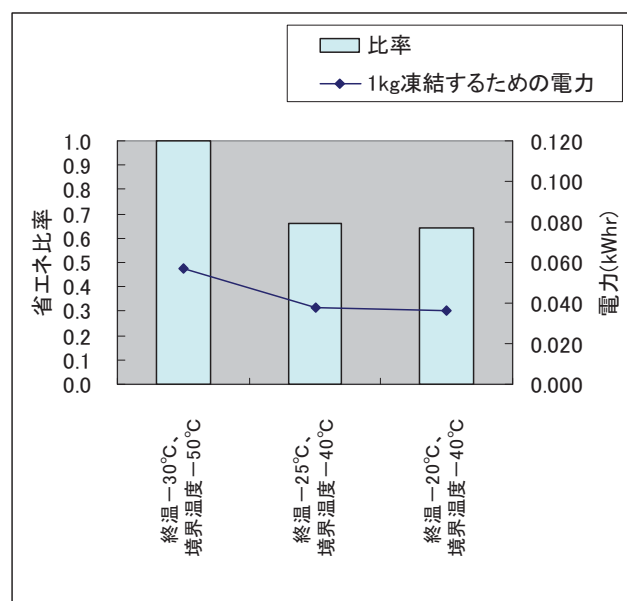
冷凍重量：24,914.7kg、電力量：965.14kw となり、

1kg 凍結するための電力は 0.0387kwhr で、現状との電力比率は 0.68

となり、南極海における凍結終温度移行（-30℃⇒-25℃及び-20℃）による省エネ効率  
は下表と下図の通りとなる。

表Ⅲ. 3-1 終温変化による凍結熱量と電力（南極海）

初温 (℃)	終温 (℃)	境界 温度 (℃)	凍結 時間 (hr)	凍結熱量 (kcal/kg)	電力量 (kWhr)	1kg 凍結す る為の電力 (kWhr)	電力の 比率	
+10	-30	-50	5.5	80.3	599.50	0.0570	1.00	現状
+10	-25	-40	6.8	78.0	800.36	0.0376	0.66	
+10	-20	-40	6.4	75.7	753.28	0.0365	0.64	計画



図Ⅲ. 3-9 終温変化による省エネ比率と電力（南極海）

北西太平洋用

(ア) ブライン間接触式凍結装置のデータを参考に、R-22 直接膨張式凍結装置をシミュレーションして作成した凍結曲線の試算データは以下の通りである。

- ①初温：+30℃、境界温度（膨張温度）：-50℃、K値：80
- ②初温：+30℃、境界温度（膨張温度）：-40℃、K値：80
- ③初温：+30℃、境界温度（膨張温度）：-40℃、K値：60

(イ) 初温：+30℃として、終温の変化による凍結熱量は下記の通りとなる。

- ①終温：-20℃のとき  $0.83 \times 30^\circ\text{C} + 58.2 + 0.46 \times 20^\circ\text{C} = 92.3\text{kcal/kg}$
- ②終温：-25℃のとき  $0.83 \times 30^\circ\text{C} + 58.2 + 0.46 \times 25^\circ\text{C} = 94.6\text{kcal/kg}$
- ③終温：-30℃のとき  $0.83 \times 30^\circ\text{C} + 58.2 + 0.46 \times 30^\circ\text{C} = 96.9\text{kcal/kg}$
- ④終温：-40℃のとき  $0.83 \times 30^\circ\text{C} + 58.2 + 0.46 \times 40^\circ\text{C} = 101.5\text{kcal/kg}$

(ウ) 凝縮温度：+35℃、境界温度：-50℃、K値：80 の冷凍機運転状態は  
冷凍能力が 129,516kcal/hr で、動力が 156.80kw である。

- ①初温：+30℃、終温：-20℃、凍結時間：5.5hr で  
冷凍重量：7,717.6kg、電力量：862.40kw となり、  
1kg 凍結するための電力は 0.1117kwhr で、現状との電力比率は 0.95
- ②初温：+30℃、終温：-25℃、凍結時間：6.0hr で  
冷凍重量：8,214.5kg、電力量：940.80kw となり、  
1kg 凍結するための電力は 0.1145kwhr で、現状との電力比率は 0.98
- ③初温：+30℃、終温：-30℃、凍結時間：6.3hr で  
冷凍重量：8,420.5kg、電力量：987.84kw となり、  
1kg 凍結するための電力は 0.1173kwhr で、現状の電力比率で 1.00
- ④初温：+30℃、終温：-40℃、凍結時間：7.3hr で  
冷凍重量：9,314.9kg、電力量：1,144.64kw となり、  
1kg 凍結するための電力は 0.1229kwhr で、現状との電力比率は 1.05

(エ) 凝縮温度：+35℃、境界温度：-40℃、K値：80 の冷凍機運転状態は  
冷凍能力が 216,892kcal/hr で、動力が 177.10kw である。

- ①初温：+30℃、終温：-20℃、凍結時間：7.3hr で  
冷凍重量：17,154.0kg、電力量：1,292.83kw となり、  
1kg 凍結するための電力は 0.0754kwhr で、現状との電力比率は 0.64
- ②初温：+30℃、終温：-25℃、凍結時間：7.6hr で  
冷凍重量：17,424.7kg、電力量：1,345.96kw となり、  
1kg 凍結するための電力は 0.0772kwhr で、現状との電力比率は 0.66
- ③初温：+30℃、終温：-30℃、凍結時間：8.2hr で  
冷凍重量：18,354.1kg、電力量：1,452.22kw となり、  
1kg 凍結するための電力は 0.0791kwhr で、現状との電力比率は 0.67

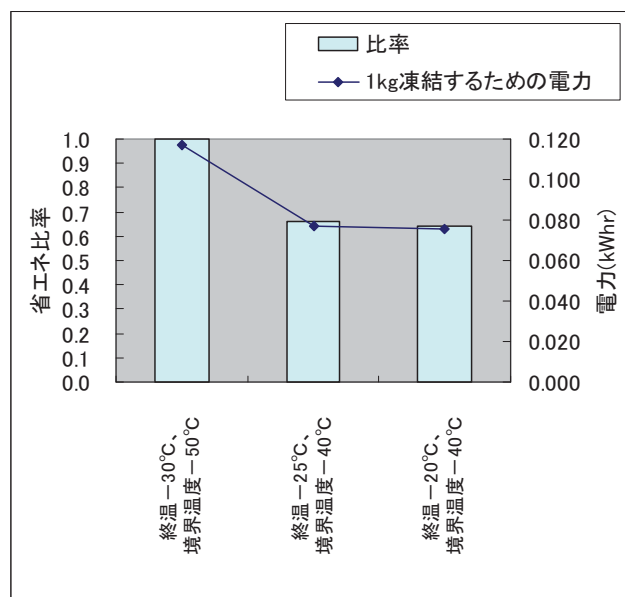
(オ) 凝縮温度：+35℃、境界温度：-40℃、K値：60 の冷凍機運転状態は  
 冷凍能力が 216,892kcal/hr で、動力が 177.10kw である。

- ①初温：+30℃、終温：-20℃、凍結時間：7.8hr で  
 冷凍重量：18,328.9kg、電力量：1,381.38kw となり、  
 1kg 凍結するための電力は 0.0754kwhr で、現状との電力比率は 0.64
- ②初温：+30℃、終温：-25℃、凍結時間：8.4hr で  
 冷凍重量：19,258.9kg、電力量：1,487.64kw となり、  
 1kg 凍結するための電力は 0.0772kwhr で、現状との電力比率は 0.66
- ③初温：+30℃、終温：-30℃、凍結時間：9.0hr で  
 冷凍重量：20,144.8kg、電力量：1,593.90kw となり、  
 1kg 凍結するための電力は 0.0791kwhr で、現状との電力比率は 0.67

となり、北西太平洋における凍結終温度移行（-30℃⇒-25℃及び-20℃）による省エネ効率は下表と下図の通りとなる。

表Ⅲ. 3-2 終温変化による凍結熱量と電力（北西太平洋）

初温 (°C)	終温 (°C)	境界温度 (°C)	凍結時間 (hr)	凍結熱量 (kcal/kg)	電力量 (kWhr)	1kg 凍結する為の電力 (kWhr)	電力の比率	
+30	-30	-50	6.3	96.9	987.84	0.1173	1.00	現状
+30	-25	-40	7.6	94.6	1,345.96	0.0772	0.65	
+30	-20	-40	7.3	92.3	1,292.83	0.0754	0.64	計画



図Ⅲ. 3-10 終温変化による省エネ比率と電力（北西太平洋）

ウ. 南極海と北西太平洋における冷凍保管（冷倉）温度移行（ $-30^{\circ}\text{C} \Rightarrow -25^{\circ}\text{C}$ 及び $-20^{\circ}\text{C}$ ）による省エネ効果を下表に示す。

表Ⅲ. 3-3 冷凍保管温度移行による省エネ効果

	冷倉保管温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	外気温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	海水温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	冷凍機能力 (kcal/hr)	軸動力 (Bkw)	運転台数 (台)	運転動力 /1hr 当り (kWhr)	運転の比率	
南極海	-30	+15	+10	126,100	80.6	0.6	50.4	1.00	現状
	-25	+15	+10	160,500	83.6	0.5	38.3	0.76	
	-20	+15	+10	201,600	87.2	0.3	29.4	0.58	計画
北西太平洋	-30	+33	+30	95,400	116.2	1.1	122.2	1.00	現状
	-25	+33	+30	125,100	119.2	0.8	90.4	0.74	
	-20	+33	+30	160,500	122.8	0.6	68.4	0.56	計画

冷凍機能力、軸動力は冷倉保管温度の数値変更に伴い、蒸発温度条件を合わせて変更した。その条件での数値は下表の通りである。

表Ⅲ. 3-4 冷凍保管温度の変更に伴う蒸発温度条件

	冷倉保管温度	凝縮温度( $T_c$ )	蒸発温度( $T_e$ )
南極海	$-30^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$
	$-25^{\circ}\text{C}$		$-35^{\circ}\text{C}$
	$-20^{\circ}\text{C}$		$-30^{\circ}\text{C}$
北西太平洋	$-30^{\circ}\text{C}$	$40^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$
	$-25^{\circ}\text{C}$		$-35^{\circ}\text{C}$
	$-20^{\circ}\text{C}$		$-30^{\circ}\text{C}$

#### エ. 恒温調整装置の開発

結果的に期間内での恒温調整装置の開発まで展開できなかった。

マグロでは同様な装置開発が進んでいる。ただ鯨用（コンタクトフリーザー方式）恒温調整装置とするには、開発課題が残っていると考ええる。

## (2) 省エネルギーの効果

上表(①、②)からも判る様に現状の $-30^{\circ}\text{C}$ 冷凍から計画の $-20^{\circ}\text{C}$ 冷凍に移行出来れば、凍結温度移行だけでも36%の省エネ効果が見込まれる。また $-25^{\circ}\text{C}$ 冷凍への移行でも34%の省エネ効果が見込まれる。

なお冷艙の保管温度変更における省エネ効率は、南極海・北西太平洋ともに $-30^{\circ}\text{C}$ から $-20^{\circ}\text{C}$ への変更を行うことで約40%強、 $-25^{\circ}\text{C}$ への変更でも約25%の省エネ効果が期待できる。

現在各温度での保管試験を継続中であり、省エネ効果を期待できる結果が見られた。

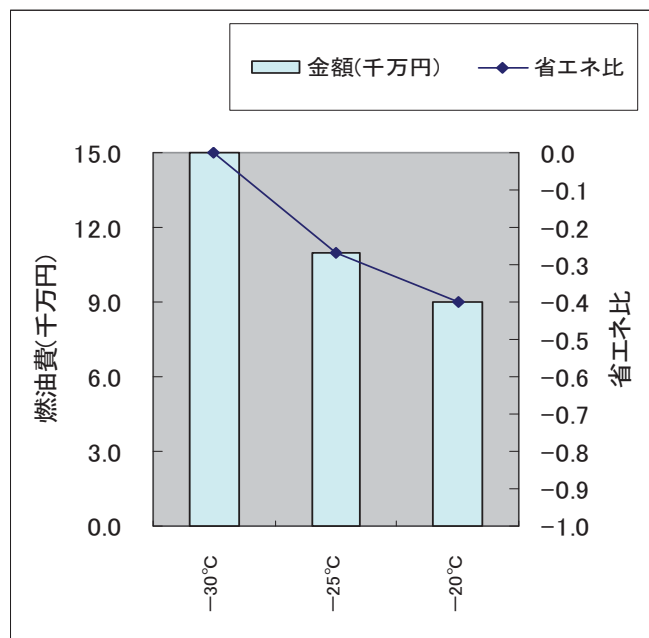
## (3) 開発成果物による費用対効果と普及の見込みについて

### ア. 費用対効果(図Ⅲ.3-10 参照)

(ア) 母船(日新丸)の燃油費の年間金額は約4億円弱(平均単価6.8万円/KL)となっている。その内、約40%の1.5億円が冷凍機の運転に費やされている。

(イ) 凍結及び冷凍保管温度を現在の $-30^{\circ}\text{C}$ から $-20^{\circ}\text{C}$ に変更することによって約35~40%、また $-25^{\circ}\text{C}$ への変更でも約25~30%の省エネ効果が見込まれる。

(ウ) 省エネ金額は、 $-20^{\circ}\text{C}$ に変更した場合、燃油費4億円×冷凍機部分が40%×省エネ率が35~40%で約6千万円となり、 $-25^{\circ}\text{C}$ に変更した場合でも省エネ率が25~30%で約4千万円となる。



図Ⅲ.3-11 省エネ効果に対する燃油費とその比率

### イ. 普及の見込み

開発した凍結・保管技術のシステムを応用し、他の魚種に適応した温度帯を把握することで、幅広い省エネ技術として運用できるものとする。

#### 4 技術開発の評価

冷凍鯨肉の品質低下要因としては、主に色調の低下、脂質の劣化、タンパク質の変性及び筋細胞膜の破壊が考えられている。またこれらは鯨肉の味、香り、テクスチャー、色に大きく関係している。

そこで-15、-20、-25 及び-30℃に保管した冷凍鯨肉につき、タンパク質凍結変性、ドロップ量、ATP 含有量などを品質劣化の指標として分析し、保管温度と品質劣化の関係を数量化し、省エネ凍結保管温度を明らかにする。

##### 【総括】

筋原線維 Ca-ATPase 活性、塩溶解度により筋肉の主要構成成分であるミオシンの変性度合いを、ミオグロビンのメト化率により鯨肉の色調を、顕微鏡による組織観察により冷凍保管中および解凍後の筋肉細胞の状態を保管 79 日まで調べた。その結果、測定開始日から保管 79 日までは全ての保管温度において明確な変化が見られなかった。

また ATP 含有量、pH 値及びドロップ量についても、-20℃の保管 40 日以降に起こった温度上昇トラブル後の保管 64 日の両試料の値に変化が見られたが、他では大きな変化がみられることはなかった。一方、筋原線維 Ca-ATPase 活性、塩溶解度、筋肉細胞の組織観察及ミオグロビンのメト化率は、突発的な温度上昇にも大きな影響を受けないと推測できる。これらのことから、-15℃から-30℃の保管 79 日経過においては品質上ほとんど影響がなく、初期の品質を維持していることがわかった。

また脂質酸化の変化としての過酸化物質価と脂肪酸組成においても、保管温度や経時変化に伴う明確な変化は見られなかった。

##### 【実験結果】

凍結と保管及び解凍の過程における水の動きに着目すると、凍結直後に水（自由水）は氷結し、タンパク質と分離する。冷凍保管中にタンパク質が変性すると解凍後に水は吸収されずドロップとともに流出し品質低下につながる。このように、冷凍保管中のタンパク質の変性の程度は筋肉細胞の復元に影響することから、タンパク質の状態は冷凍鯨肉の品質を規定する最重要の項目である。興味深いことに、冷凍保管温度とタンパク質変性の間に見られる関係は、ミオグロビンのメト化、脂質の酸化、筋肉細胞の復元でも見られ、これらの変化は見かけ上連動して起こっているように思われる。

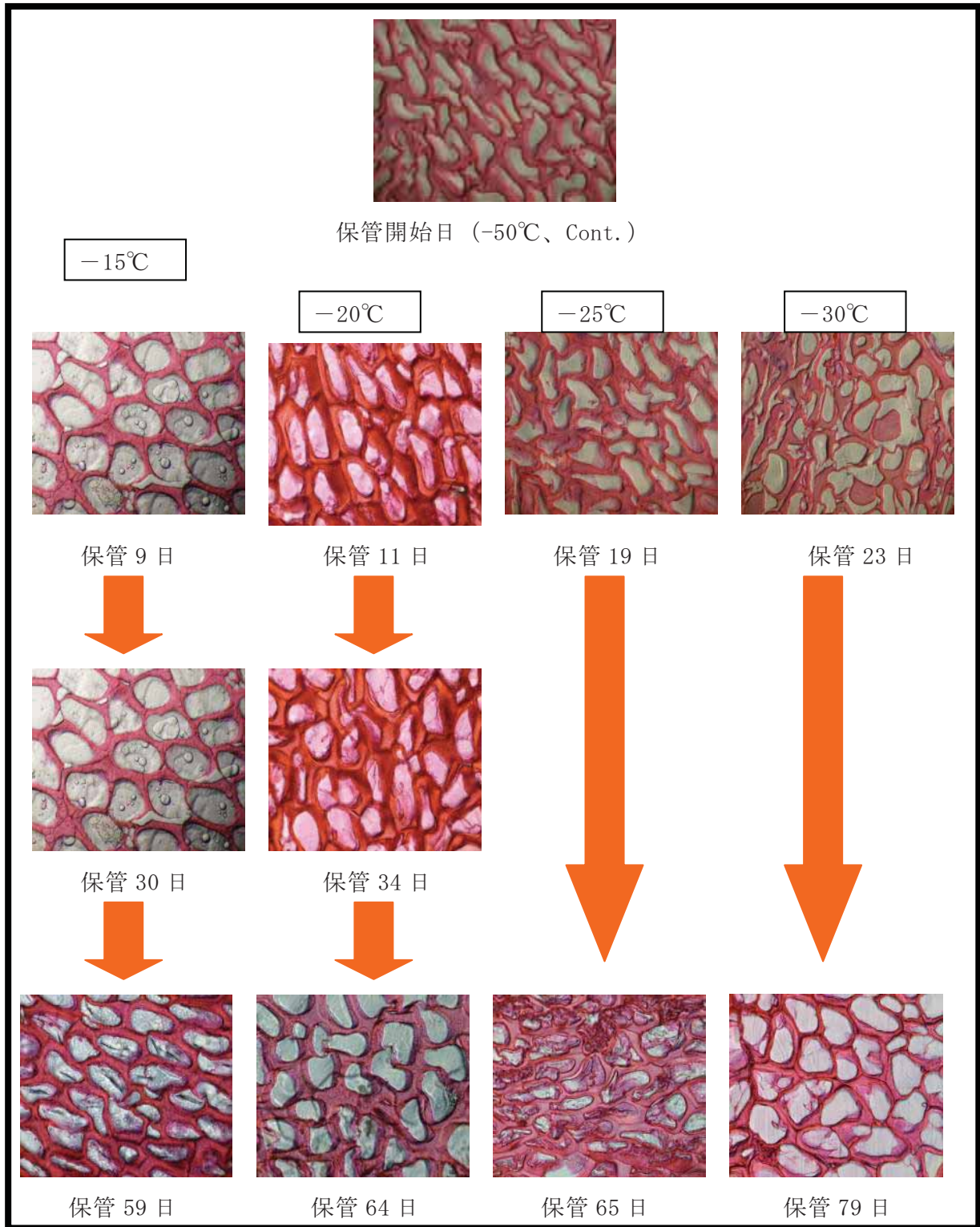
##### (1) 冷凍保管中の筋肉細胞の変化

鯨筋肉の冷凍保管中の氷結晶の形成と、解凍後の細胞復元を組織学的観察法で評価した（図Ⅲ. 4-1～4 参照）。

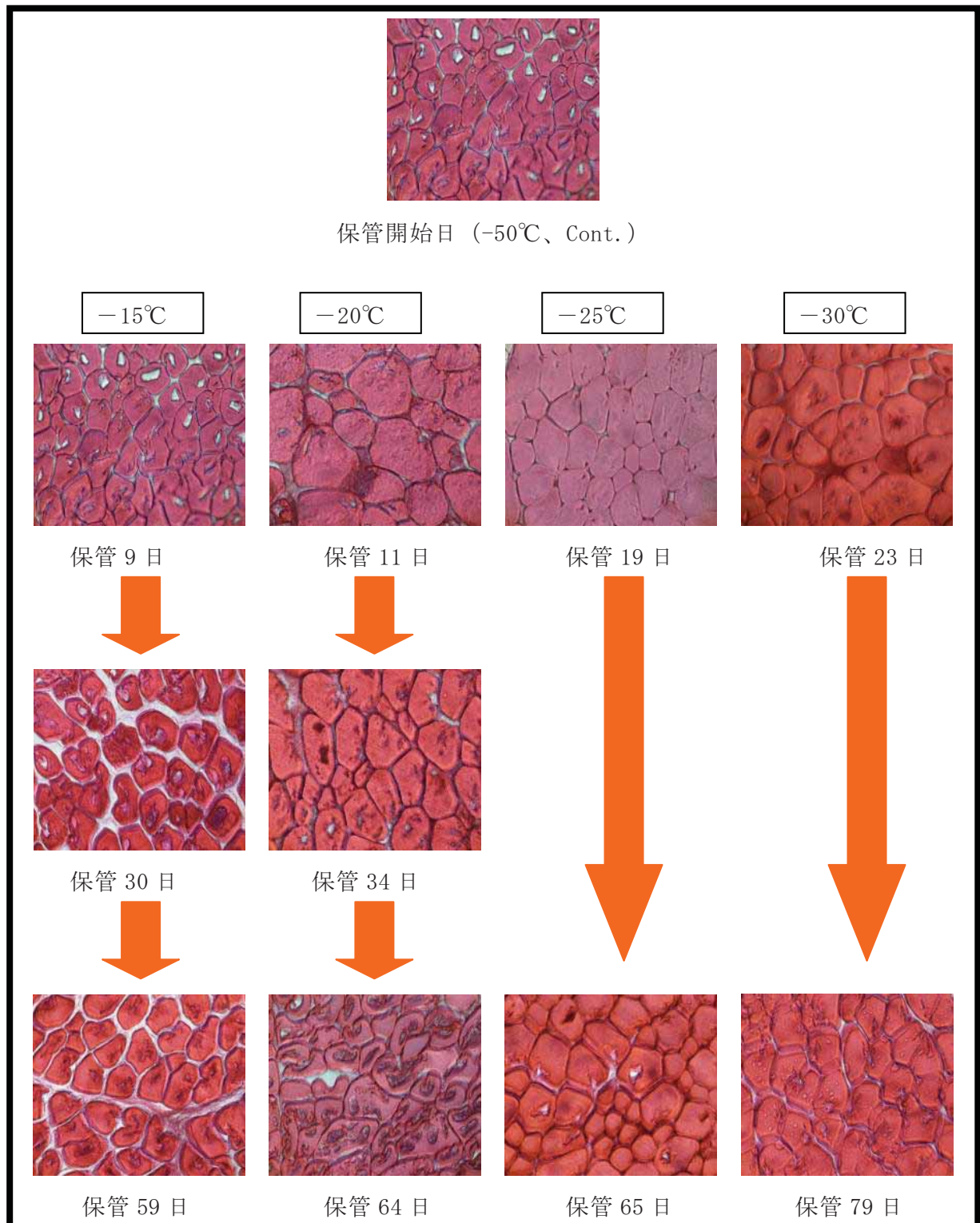
イワシクジラ、ニタリクジラ共に全ての温度において、保管開始日から保管 79 日までに明確な差は見られなかった。このことより、凍結から解凍における過程で

細胞の復元に問題はなく、細胞は破壊されていないと考えられる。

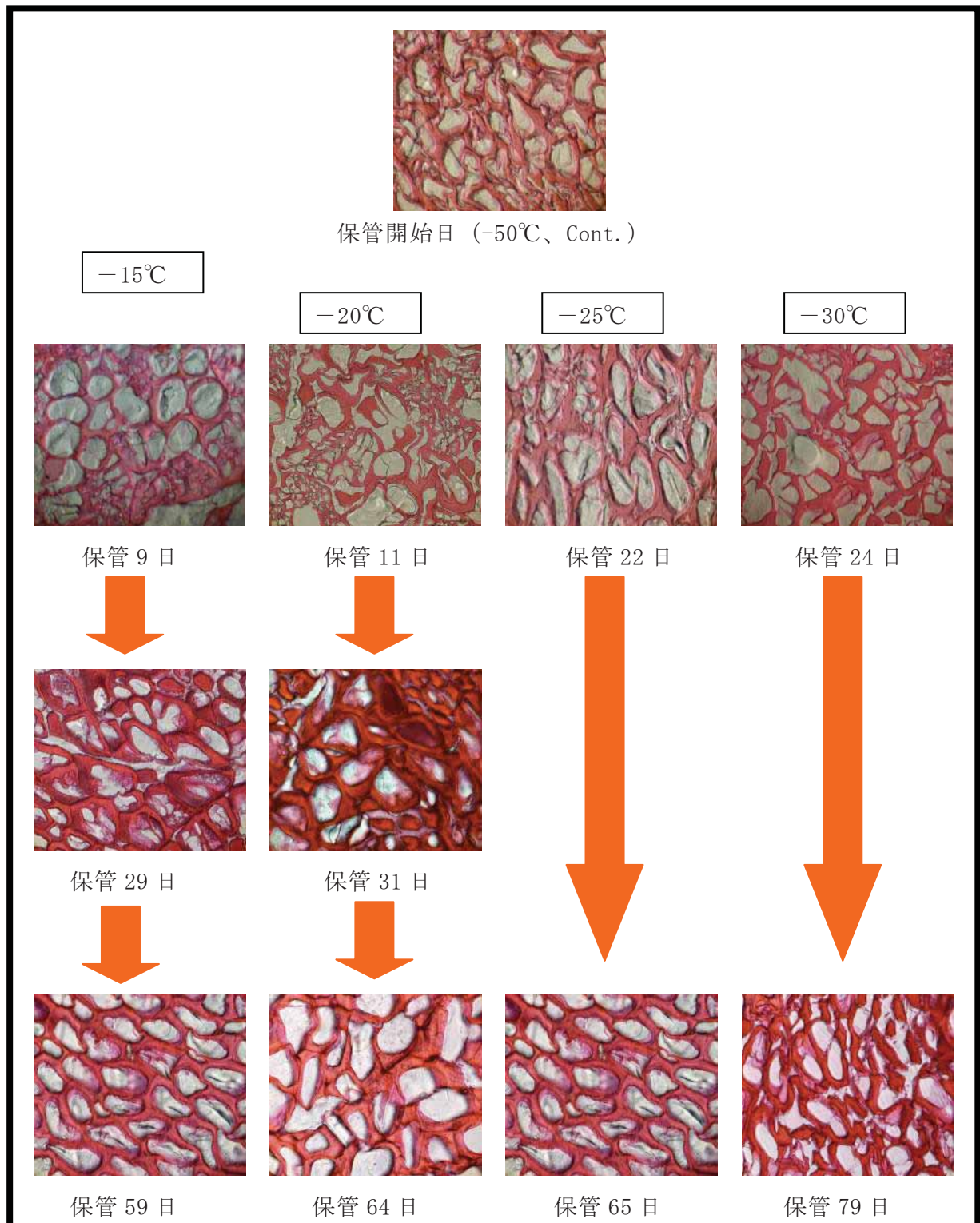
なお $-20^{\circ}\text{C}$ の64日保管での細胞復元にわずかながら違いが見られるが、これは保管中に温度上昇のトラブルが発生したことによる違いと考えられる。なお、現在 $-20^{\circ}\text{C}$ での保管再試験を行っている。



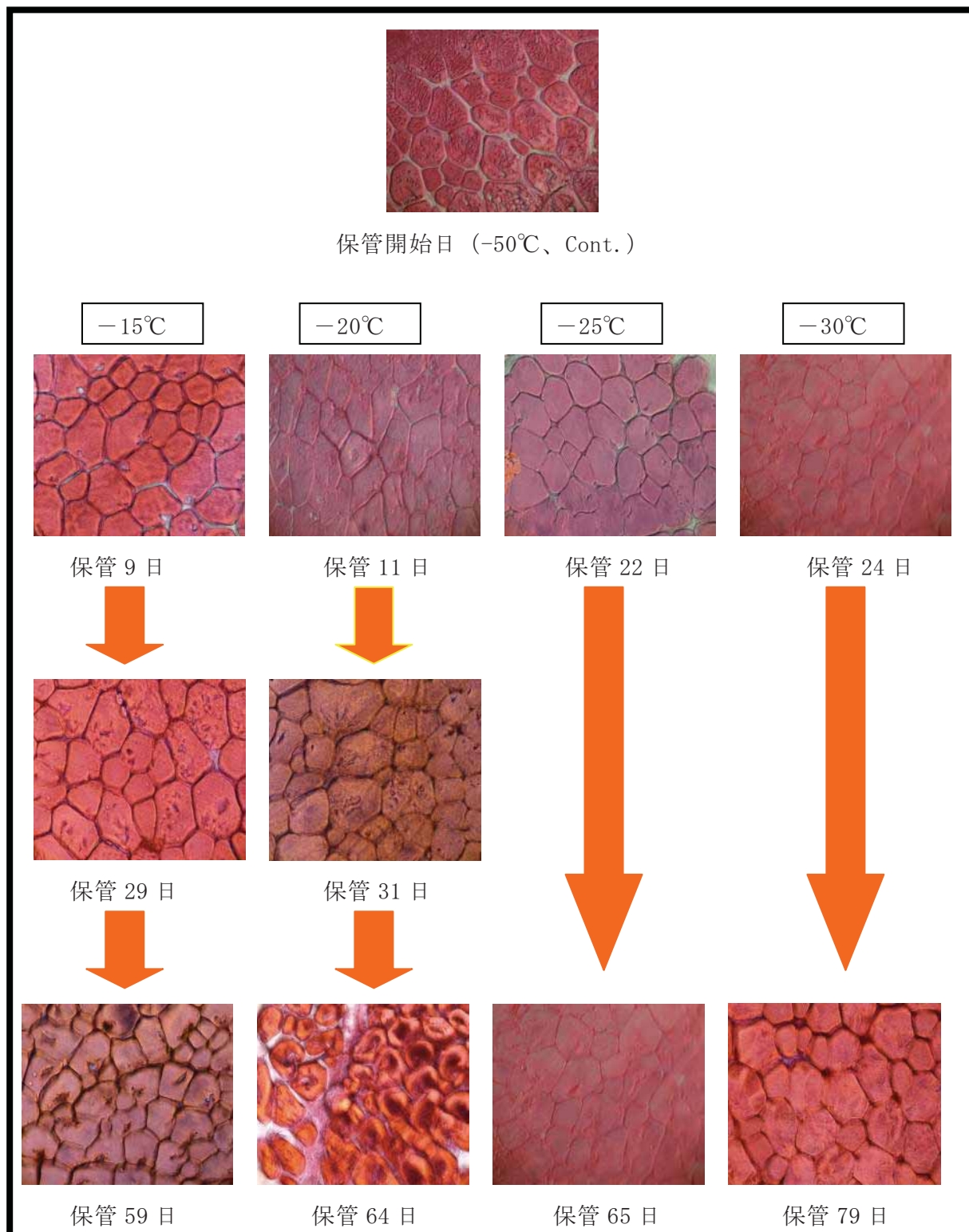
図Ⅲ. 4-1 凍結イワシクジラ肉の保管温度別の光学顕微鏡による細胞組織 (倍率 200 倍)



図Ⅲ. 4-2 解凍イワシクジラ肉の保管温度別の光学顕微鏡による細胞組織 (倍率 200 倍)



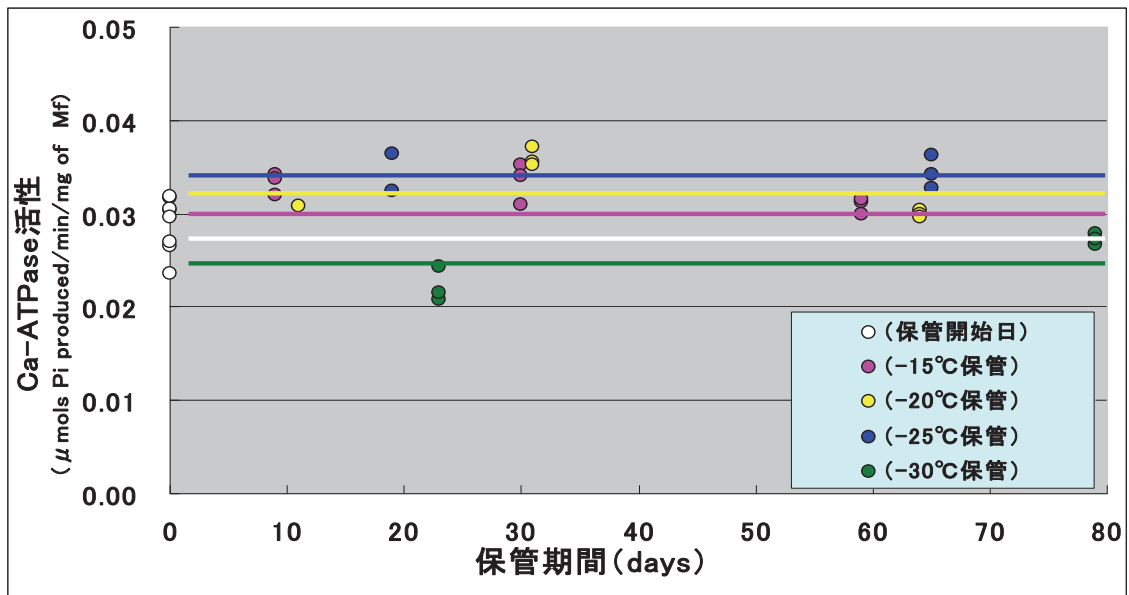
図Ⅲ. 4-3 凍結ニタリクジラ肉の保管温度別の光学顕微鏡による細胞組織 (倍率 200 倍)



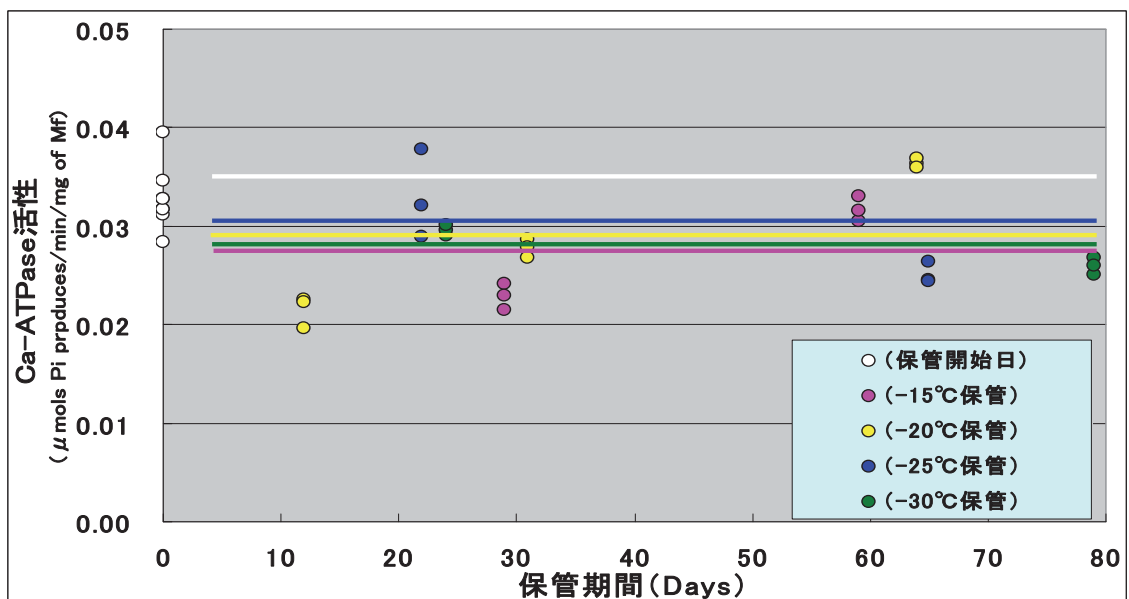
図Ⅲ. 4-4 解凍ニタリクジラ肉の保管温度別の光学顕微鏡による細胞組織 (倍率 200 倍)

(2) 筋原線維 Ca-ATPase 活性の変化

筋肉の主要なタンパク質であるミオシンは、頭部 head 領域に Ca-ATPase 活性を、尾部 rod 領域には高塩濃度下における溶解性・生理条件下におけるフィラメント形成能を有する。ミオシンの変性度合いを Ca-ATPase 活性を指標に、凍結保管温度別に調べた(図Ⅲ. 4-5 ~6 参照)。その結果、分析開始時から凍結保管 79 日後まで、どの保管温度においても明確な変化は見られなかった。



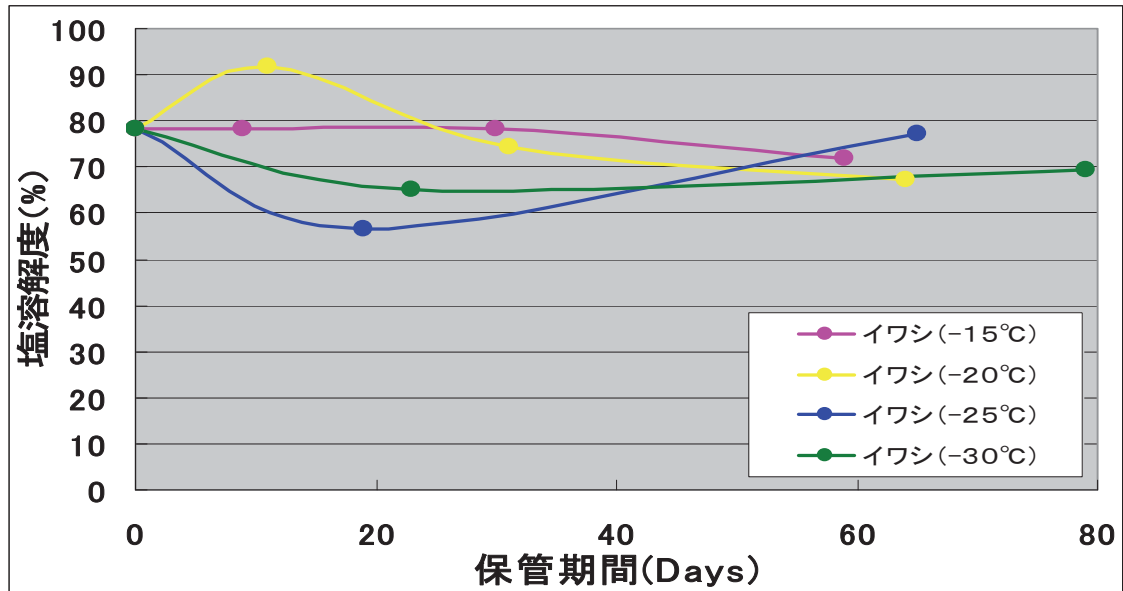
図Ⅲ. 4-5 イワシクジラ肉の凍結保管温度による筋原線維 Ca-ATPase 活性の変化



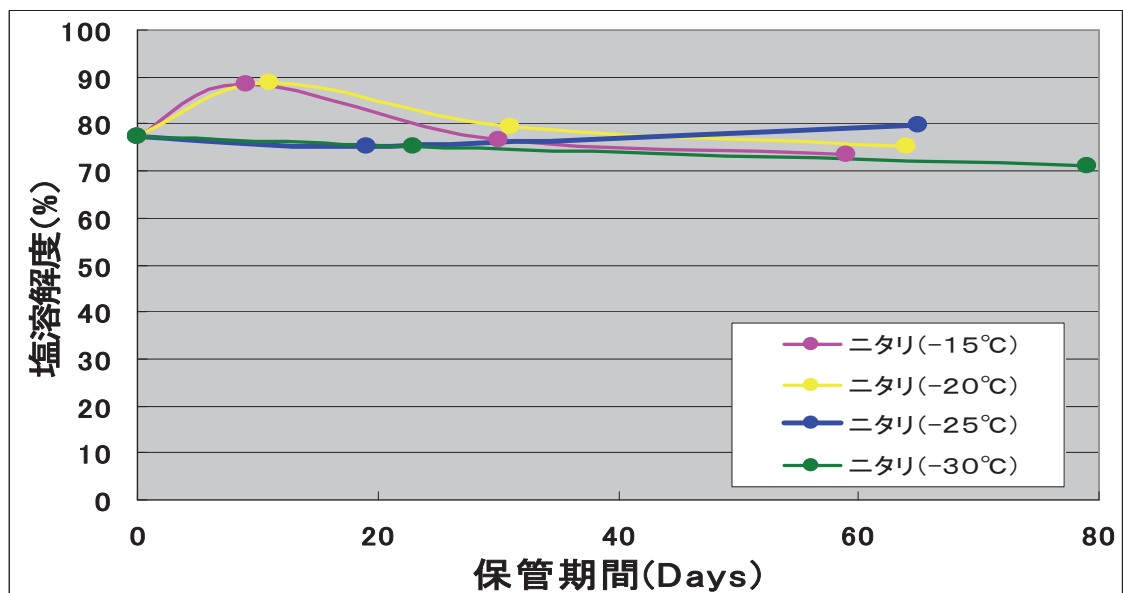
図Ⅲ. 4-6 ニタリクジラ肉の凍結保管温度による筋原線維 Ca-ATPase 活性の変化

### (3) 塩溶解度の変化

ミオシン尾部の塩溶解度を測定し、タンパク質変性の度合いを調べた。凍結保管温度別の塩溶解度の変化をみると、多少のばらつきはあるもののCa-ATPase活性と同様に分析開始時からの明確な変化は見られなかった(図Ⅲ.4-7~8参照)。



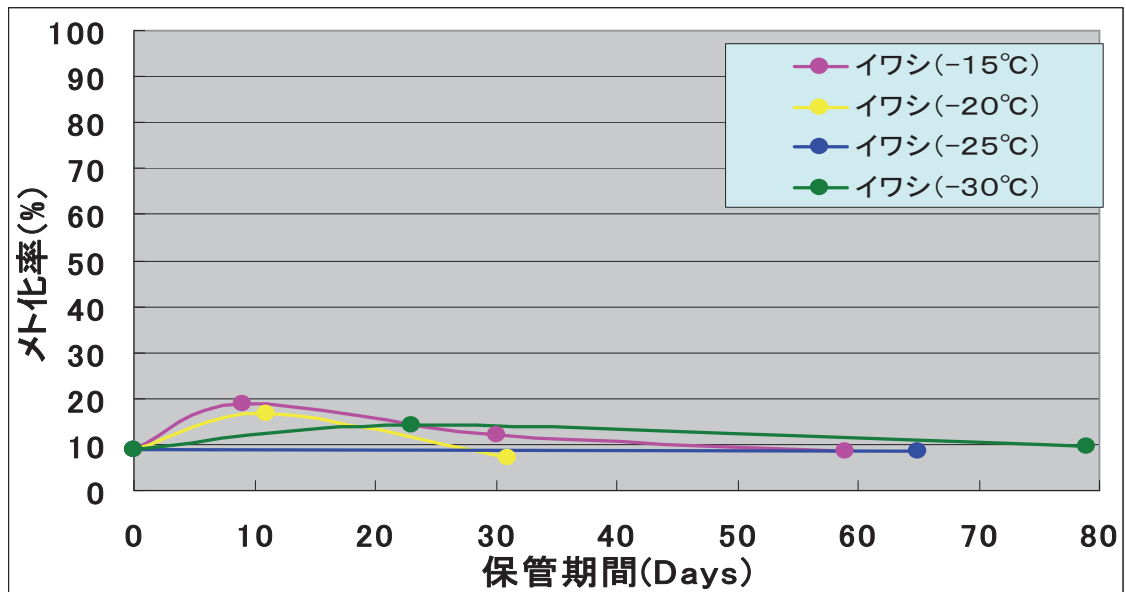
図Ⅲ.4-7 イワシクジラ肉の凍結保管温度による塩溶解度の変化



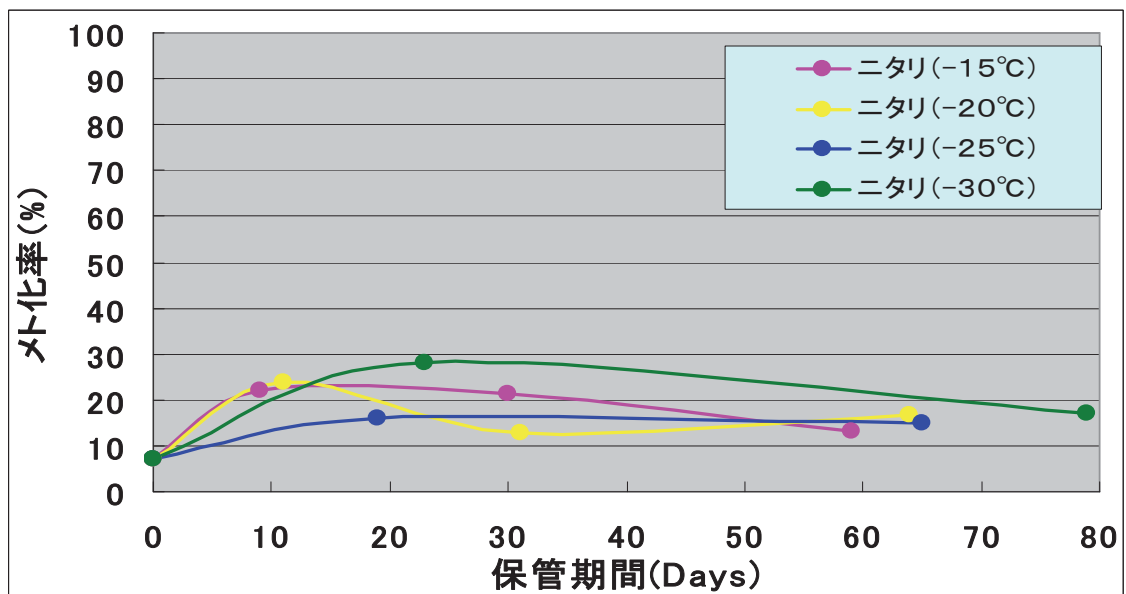
図Ⅲ.4-8 ニタリクジラ肉の凍結保管温度による塩溶解度の変化

(4) ミオグロビンのメト化率の変化

鯨肉の色調には色素タンパク質であるミオグロビンの性状が関与する。ミオグロビンが酸化する（メト化）と暗褐色を呈し、色調低下の主要因と考えられる。ミオグロビンのメト化率は、ともに15%前後の値を示し、保管温度や保管日数での明確な変化は見られなかった（図Ⅲ.4-9～10 参照）。このことから、各保管温度においてミオグロビンの酸化はほとんど進んでいないと考えられる。



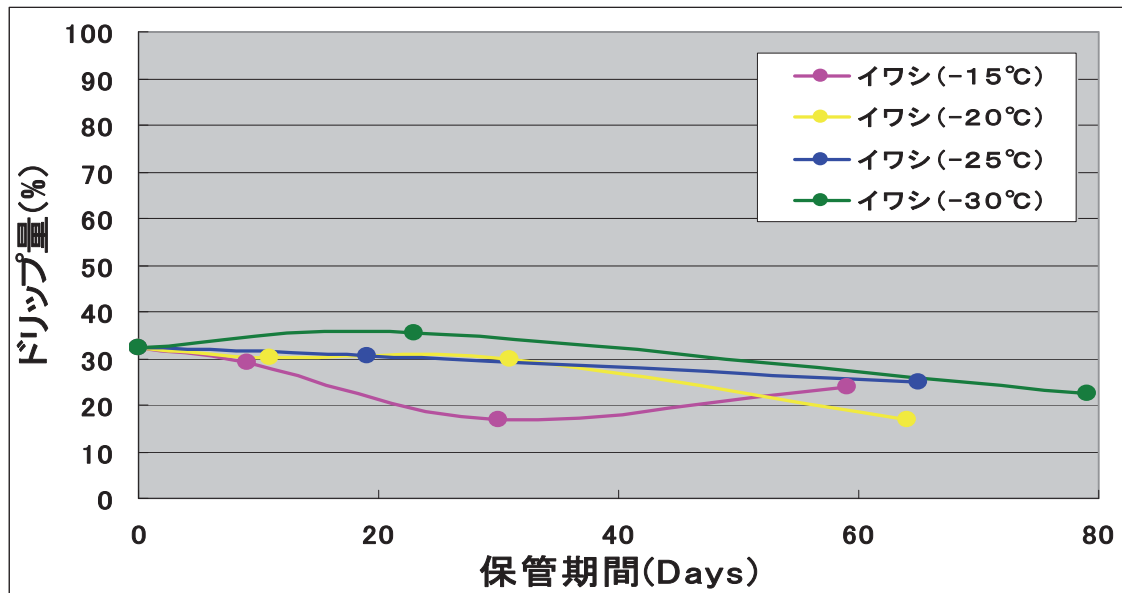
図Ⅲ.4-9 イワシクジラ肉の凍結保管温度におけるミオグロビンのメト化率の変化



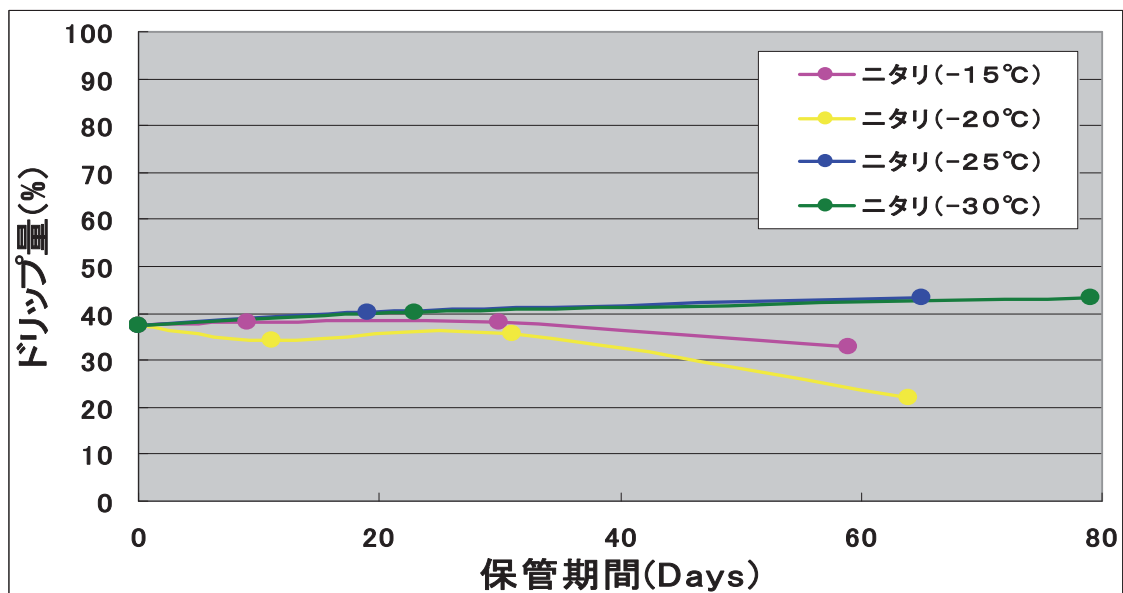
図Ⅲ.4-10 ニタリクジラ肉の凍結保管温度におけるミオグロビンのメト化率の変化

(5) 解凍ドリップ量の変化

解凍ドリップ量は、 $-15^{\circ}\text{C}$ 保管のニタリクジラで若干の減少傾向が見られたが、全体的にみると、どの保管温度でも大きな変化は見られなかった（図Ⅲ. 4-11～12 参照）。



図Ⅲ. 4-11 イワシクジラ肉の解凍ドリップ量の変化



図Ⅲ. 4-12 ニタリクジラ肉の解凍ドリップ量の変化

(6) ATP 含有量の変化

ATP 含有量は、 $-20^{\circ}\text{C}$  の 64 日保管以外、全ての温度において初期値を維持した（図 III. 4-13~14 参照）。 $-20^{\circ}\text{C}$  に設定された冷凍庫は保管 40 日以降で温度が上昇するトラブルが発生したため、両クジラともに  $-20^{\circ}\text{C}$  の 64 日保管試験では ATP 含有量が消失した。しかし  $-20^{\circ}\text{C}$  より高温度の  $-15^{\circ}\text{C}$  保管では ATP の減少は認められなかったことから、両クジラともに保管 60 日程度まで ATP 含有量はほとんど変化しないと考えられた。

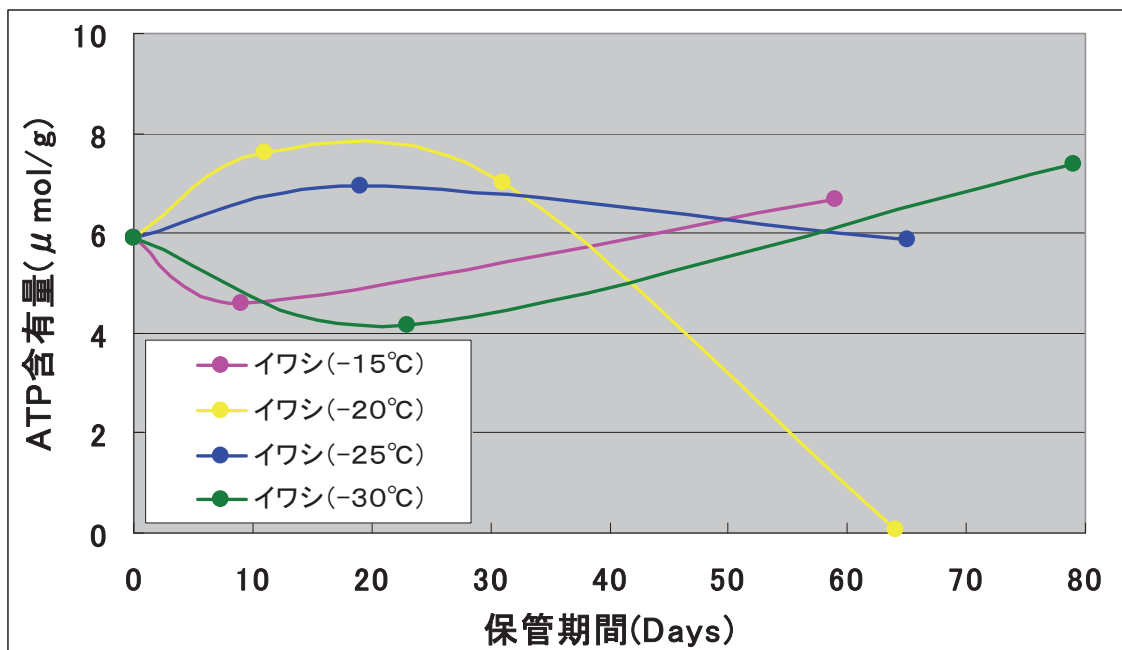


図 III. 4-13 イワシクジラ肉の凍結保管温度における ATP 含有量の変化

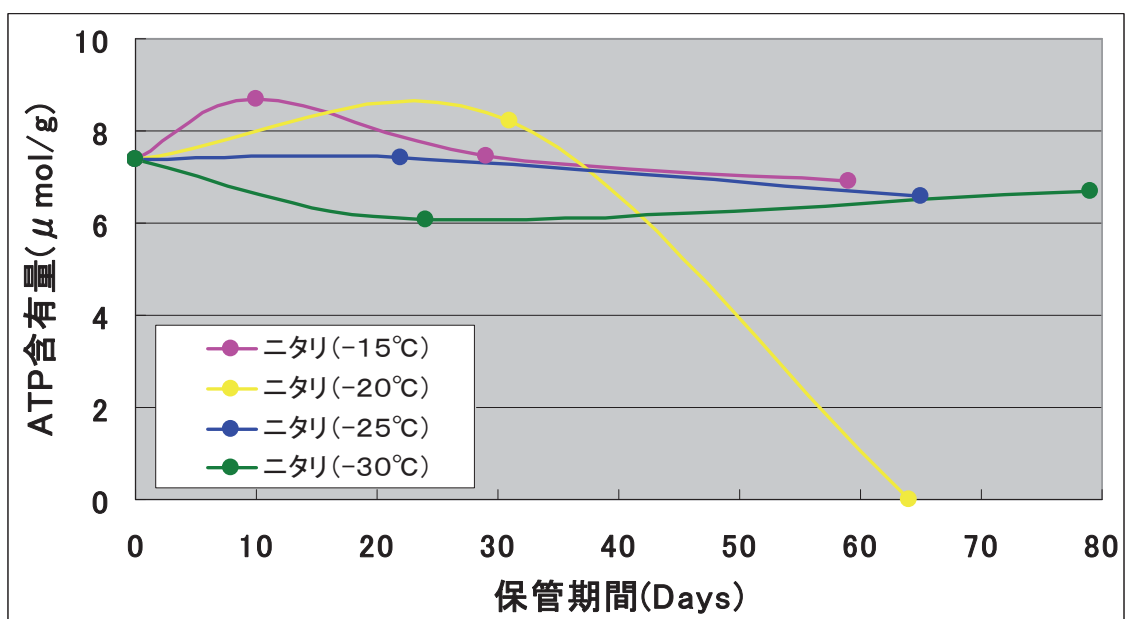
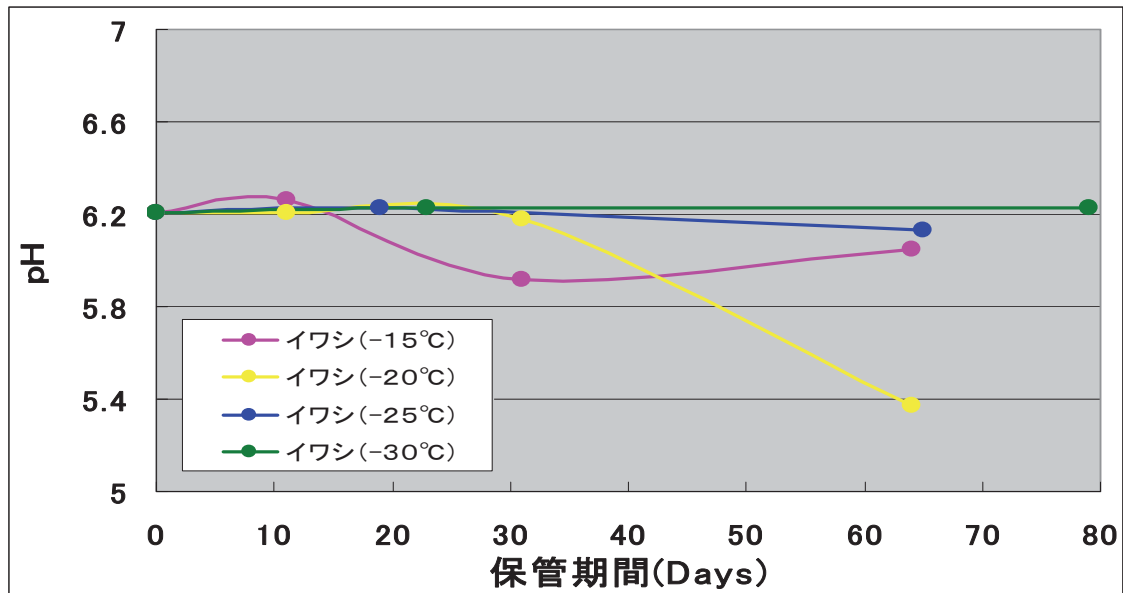


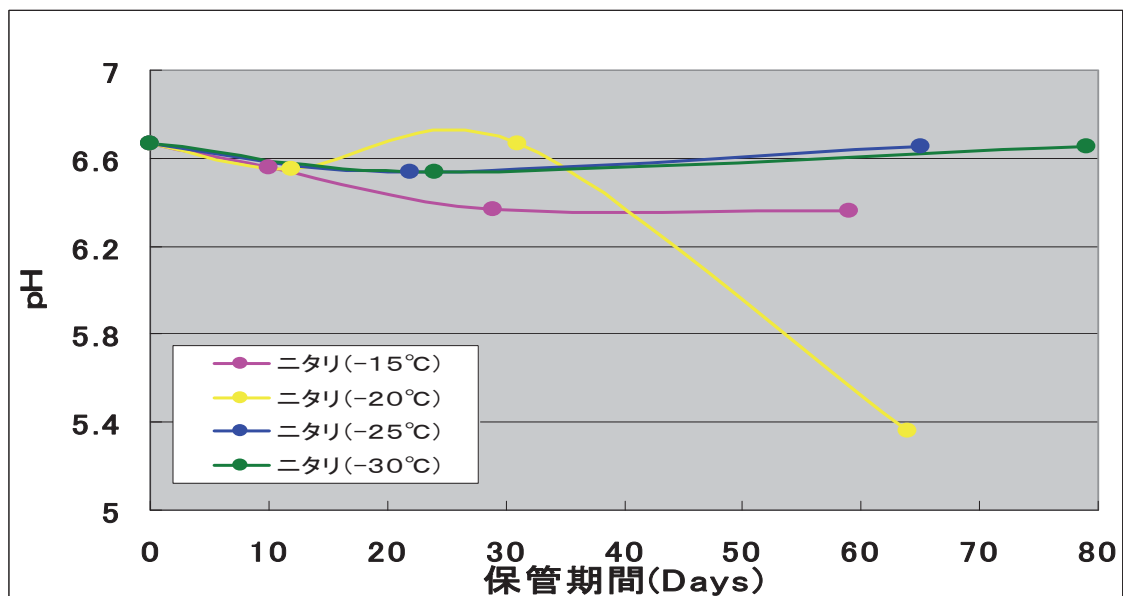
図 III. 4-14 ニタリクジラ肉の凍結保管温度における ATP 含有量の変化

(7) pH 値の変化

pH 値では、 $-15^{\circ}\text{C}$ 保管のニタリクジラで保管開始日から若干の減少傾向が見られたが、全体として差はほとんど見られなかった(図Ⅲ. 4-15~16 参照)。また前述の ATP 含有量と同様の理由により $-20^{\circ}\text{C}$ の 64 日保管において pH 値が大きく減少した。しかし $-15^{\circ}\text{C}$ で pH はほとんど変化しないことから、どの保管温度においても 80 日までは初期 pH を維持することが示唆された。



図Ⅲ. 4-15 イワシクジラ肉の凍結保管温度における pH 値の変化



図Ⅲ. 4-16 ニタリクジラ肉の凍結保管温度における pH 値の変化

## (8) 脂質酸化の変化

鯨肉には、魚類同様 EPA・DHA などの高度不飽和脂肪酸が含まれている。これらは様々な機能性を有する一方、その化学的構造から酸化しやすく、その結果生じる酸化脂質は、脂質の機能性そのものだけでなく他の構成成分にも影響を及ぼす。脂質の酸化は $-50^{\circ}\text{C}$ 以下の冷凍保存では進行しにくい、それ以上の温度では温度上昇に従い酸化が進行する可能性が示唆されている。しかし水産物の種類により脂質酸化が抑制される温度は異なるため、鯨肉について脂質酸化を抑制できる最適な温度についての詳細は知られていない。

本事業では、冷凍鯨肉を凍結保存 ( $-30^{\circ}\text{C}$ 、 $-25^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-15^{\circ}\text{C}$ ) し、経時的に脂質酸化レベルの分析を行い、脂質酸化を進行させない保存温度について検討した。また脂肪酸組成を分析して高度不飽和脂肪酸量を把握し、脂質酸化の進行について検討した。これらをもとに凍結及び冷凍保管の省エネ化を検討した。

各温度で冷凍保管した鯨肉を経時的にサンプリングし、脂質抽出後に過酸化価並びに脂肪酸組成の分析を定法に従って行った。

### ア. 冷凍保存による過酸化価の変化

実験開始から約 80 日経過したが、イワシクジラ、ニタリクジラともに冷凍保存温度の違いによる過酸化価の有意な上昇は見られなかった。過酸化価が 0~5 (meq/kg) を示しているが、食用としては十分耐えられるレベルである (図 III. 4-17~18 参照)。ちなみに食品衛生法では、即席麺や油菓子などの油調理食品の過酸化価の上限は 30 と定められている。

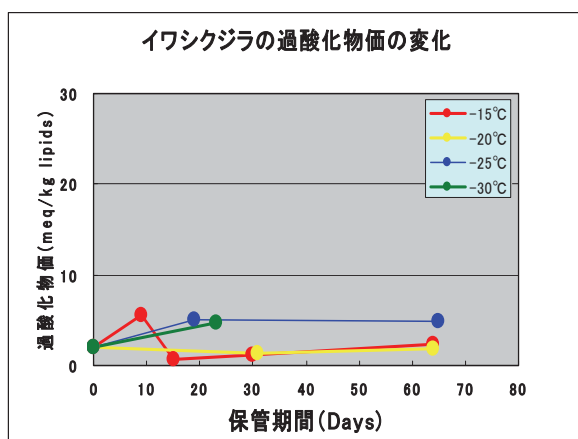


図 III. 4-17 イワシクジラの凍結保管温度における過酸化価の変化

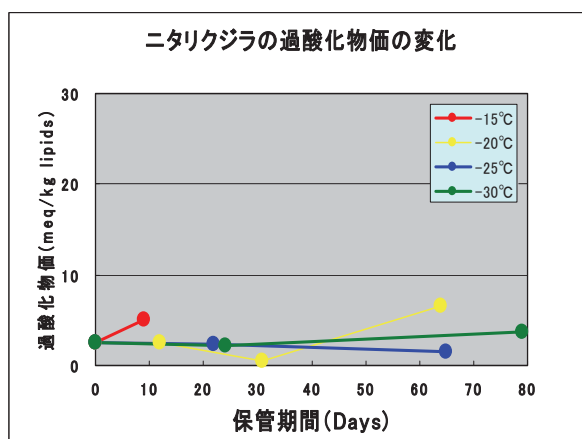
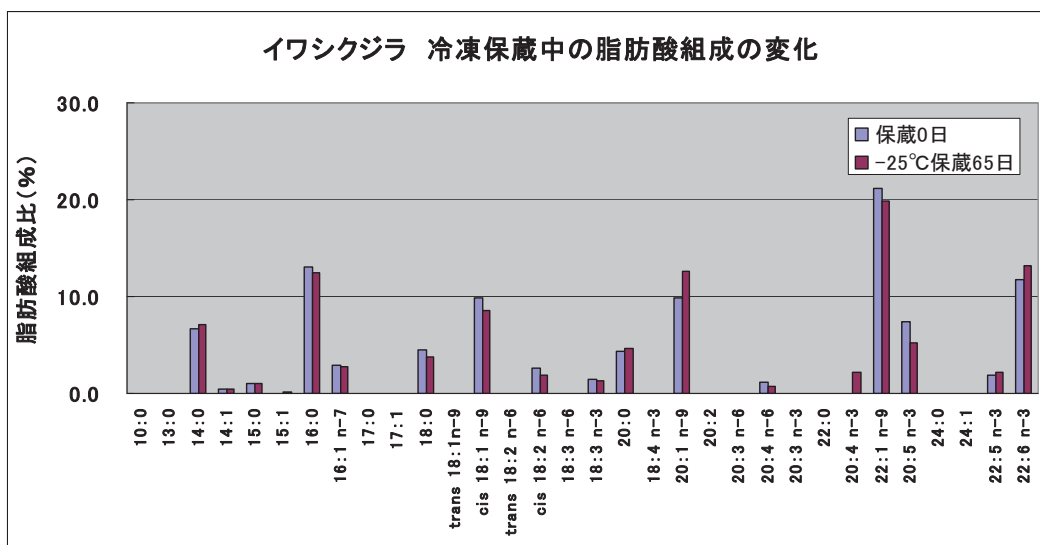


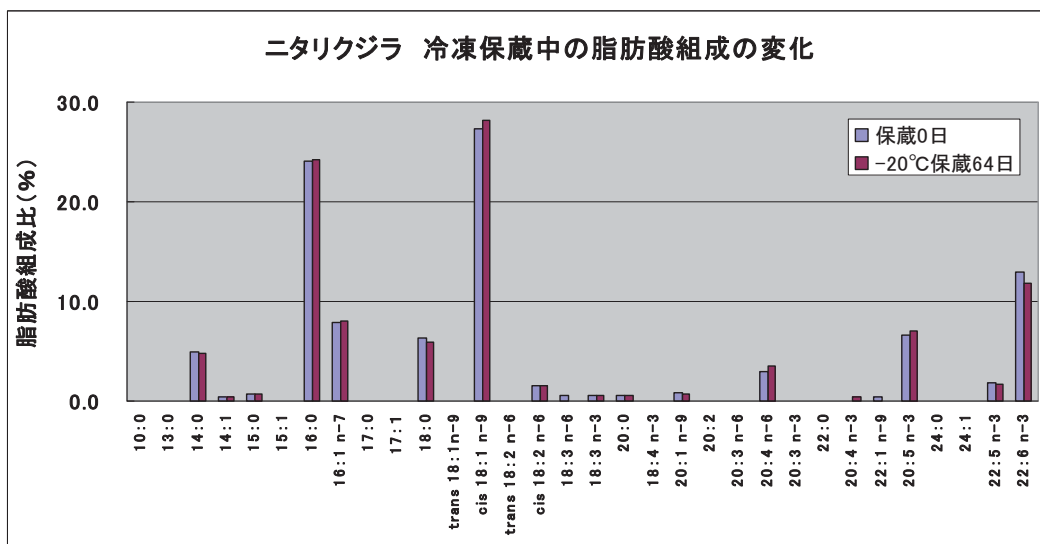
図 III. 4-18 ニタリクジラの凍結保管温度における過酸化価の変化

## イ. 脂肪酸組成

下にイワシクジラ、ニタリクジラの脂肪酸組成を示す。イワシクジラはその食性を反映してイワシ・サンマなどに多く含まれる 20:1n-9 イコセン酸 (9.8%)、22:1n-9 ドコセン酸 (21.7%) が含まれていたが、ニタリクジラは一般的な魚類の脂肪酸組成を示した。なお、脂質酸化の進行の指標となる二重結合が2個以上の脂肪酸の総計は、イワシクジラ、ニタリクジラでそれぞれ 26.1%、27.1%で一般的な魚類の含有比であった (図Ⅲ. 4-19~20 参照)。また現時点で過氧化物価が高い試料の脂肪酸組成を分析した結果、貯蔵温度や時間経過に伴う変化は見られなかった。



図Ⅲ. 4-19 イワシクジラの冷凍保蔵中の脂肪酸組成の変化



図Ⅲ. 4-20 イワシクジラの冷凍保蔵中の脂肪酸組成の変化

今後の課題として各温度での保管を長期的に行うなか、脂質の酸化レベルや脂肪酸組成の変化について着目し、省エネの検討指標の一つとして分析を行う。

## 5 導入のあり方

本事業において冷凍保管温度と鯨肉の品質の関係を数量化し適正な省エネ冷凍保管温度を明らかにすることを目的とした。冷凍保管温度調整システム技術として、現行の $-30^{\circ}\text{C}$ から高温側へ冷凍保管温度を変更し、省エネ効率を上げるため、省エネタイプの保管庫自動温度制御システム及び冷凍機自動運転管理システム技術を採用する。

省エネ効果に対する試算によると、現行の $-30^{\circ}\text{C}$ の冷凍から $-20^{\circ}\text{C}$ の冷凍に移行できれば冷凍温度移行だけでも 36%の省エネ効果が見込まれ、 $-25^{\circ}\text{C}$ の冷凍への移行でも 34%の省エネ効果が見込まれる。

また冷凍保管温度を現在の $-30^{\circ}\text{C}$ から $-20^{\circ}\text{C}$ に変更するだけでも 40%程度の省エネ効果が見込まれ、 $-25^{\circ}\text{C}$ への変更でも 25%の省エネ効果が見込まれる。

これらを費用に換算すると、省エネ金額としては $-20^{\circ}\text{C}$ への変更を実施した場合約 6 千万円で、 $-25^{\circ}\text{C}$ への変更でも約 4 千万円の効果である。

なお省エネ凍結速度の技術開発として、凍結速度について、鯨肉の品質に影響しない、最適の省エネ凍結速度を明らかにすることを目的とした。

なお調査捕鯨においては厳密な生物学的調査を行うため、得られる鯨肉は極めて鮮度が良く ATP (アデノシン三リン酸) 含有率が高いものが多い。そのため解凍時に ATP の作用で解凍硬直を起し大量の解凍ドリップを排出する。ATP が少なくなれば解凍ドリップ量は軽減されるので、鯨肉中の ATP の分解と冷凍保管温度の関係を解明し、省エネ冷凍保管温度の解凍ドリップの軽減効果について明らかにすることも目的とした。この問題は直接燃油の削減とは関係しないが、輸送中に解凍ドリップの問題が解決されれば、流通販売段階での対策が必要なくなり広義の意味で省エネに貢献できるものとする。

