

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業（第3次補正予算）

「発酵・競争吸着法による水産加工残渣（イカゴロ）の
脱カドミウム飼料化技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 2月

委託者 北海道経済産業局

委託先 一般財団法人函館国際水産・海洋都市推進機構

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	2
1-3	成果概要	2
1-3-1	発酵・自己消化工程の可溶化条件の決定	2
1-3-2	キレート樹脂の効果確認及び同樹脂の再生の検証	3
1-3-3	溶解自動化装置の設計・試作	3
1-3-4	イカゴロの脱カドミウム装置の設計・試作	4
1-3-5	給餌・輸送試験	5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	5

第2章 本論

2-1	発酵・自己消化工程の可溶化条件の決定	6
2-1-1	加温温度及び蛋白質の変性・腐敗に関わる検証	6
2-1-2	自己消化酵素の補完に関わる検証	11
2-1-3	溶解終了となる粘度の決定	14
2-2	キレート樹脂の効果確認及び同樹脂の再生の検証	19
2-2-1	カドミウムの減少確認	19
2-2-2	キレート樹脂の再生方法の検証	20
2-3	溶解自動化装置の設計・試作	23
2-3-1	イカゴロ溶解装置の設計と試作	23
2-3-2	イカゴロの溶解槽の稼動と調整	24
2-4	イカゴロの脱カドミウム装置の設計・試作	28
2-4-1	装置の設計・試作	28
2-4-2	イカゴロのカドミウム分離実証試験	29
2-4-3	樹脂の再生カドミウムを含む再生液の処理	32
2-5	給餌・輸送試験	33
2-5-1	真鯛への給餌による比較検証	33
2-5-2	チョウザメ及びウナギへの給餌による比較検証	50
2-5-3	輸送法の検討	52

最終章 全体総括

研究開発成果	58
研究開発後の課題・事業展開	61

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

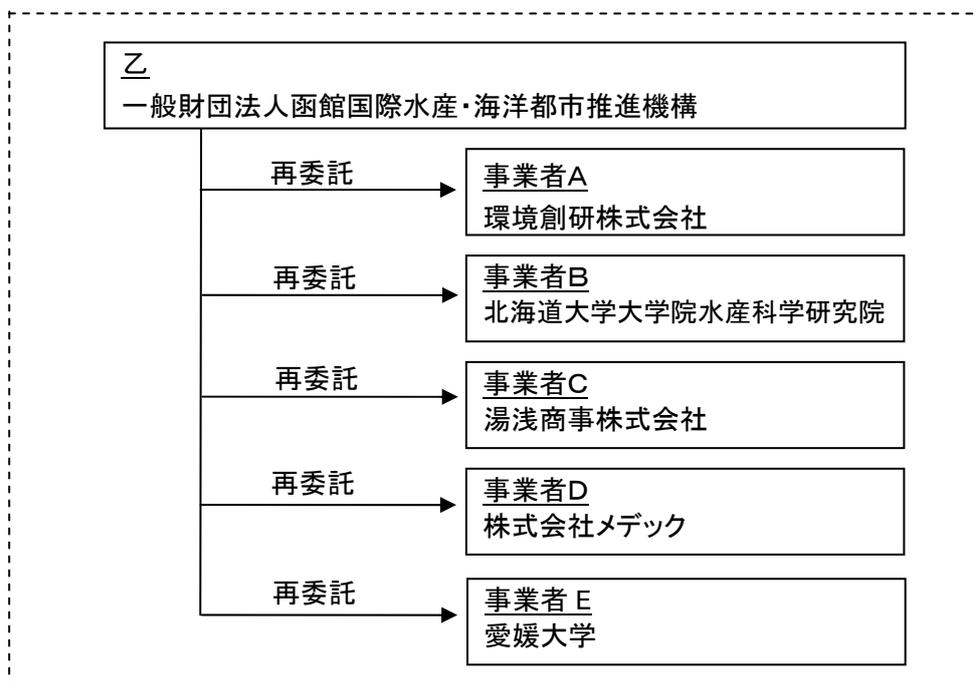
本研究開発の川下企業である水産養殖業では、過去にブリやハマチなどの養殖用飼料として水産加工残渣となったイカ内臓（イカゴロ）が利用されていた。しかし、イカゴロには、飼料の有害物質の指導基準（3.0ppm）を上回る数値のカドミウム（数十 ppm）が蓄積されていることが判明し、現在、国内では、イカゴロを飼料として利用できない状況となっている。

更に、養殖用飼料の主原料であるフィッシュミールの価格が2006年から従来の価格の約2倍まで高騰し、その価格高騰は、そのまま右肩上がりを続け、現在、約1,600USドル/トンの価格を推移している。

また、東日本大震災の影響で、東北地方の漁港が壊滅的な被害を受けたことにより、国内における養殖用の生餌が極度に不足している状況も相まって、脱カドミウムのイカゴロを利用した飼料の要望は、極めて高く、この飼料化は重要かつ緊急の課題となっている。

よって、本研究開発では、脱カドミウム技術（競争吸着法）を用い、水産廃棄物であるイカゴロを養魚用飼料の原料としての高度利用を目指す。

1-2 研究体制



総括研究代表者（PL）

所属：環境創研株式会社

役職：代表取締役

氏名：川辺 雅生

副総括研究代表者（SL）

所属：北海道大学大学院水産科学研究院

役職：教授

氏名：関 秀司

1-3 成果概要

1-3-1 発酵・自己消化工程の可溶化条件の決定

- (1) イカゴロ溶解物の平均比熱を決定した後に、容量 1L のステンレス容器を用いて 300~800g のイカゴロ溶解物の温度上昇実験を行い、ニュートンの伝熱速度式を用いた解析により総括伝熱係数（ステンレス容器壁と流体境膜を合わせた伝熱係数）を決定した。
- (2) 上記のラボスケールで決定した総括伝熱係数を用いて実機（0.5~0.7 トン）におけるイカゴロの温度上昇速度（応答）についてのシミュレーションを行い、約 1000 倍スケールアップした実機を用いた実証試験の結果とよく一致することを確認した。
- (3) イカゴロ溶解物の濾過速度がルースの濾過速度式に従うことを検証し、実際に用いるフィルターの濾過抵抗係数と混雑物（眼球、嘴、未消化胃内容物等の固形分）の濾

過比抵抗を決定した。その際、イカゴロ溶解物の粘度の温度依存性がアンドレイド式を用いることにより 20℃~60℃におけるイカゴロ溶解物の濾過速度が予測できることを確認した。

1-3-2 キレート樹脂の効果確認及び同樹脂の再生の検証

腐敗防止用に有機酸を添加し pH5 にすることで一般細菌の増加を抑制させ、6 時間以内に溶解を完了できた。当初の条件における発酵菌（スタフィロコッカス）の増殖は確認できなかったため、乳酸菌添加による発酵について検討を行った。

5L のスケールにてイカゴロのカドミウムを 4 時間以内に 2.0ppm 以下することを確認し、電極析出による方法を用いて酸の混入工程 1 回でキレート樹脂を適切に再生した。また、0.5 トンのスケールによる溶解・脱カドミウムの各目標を達成することができ、フィールド・水槽での給餌試験と輸送試験に脱カドミウムイカゴロの供給を行った。

1-3-3 溶解自動化装置の設計・試作

環境創研(株)及び北海道大学が決定した条件を元に、イカゴロの溶解を自動化する装置の設計・試作をした。

装置はイカゴロの受入・溶解を兼用した「溶解槽」、腐敗を防止するための「酢酸供給部」、溶解したイカゴロをポンプで供給しイカゴロに付着した眼球・嘴及び未消化胃内容物等、細かい夾雑物を分離する機能を兼用した「スクリーン分離機」で構成し試作をした。

(1) 「溶解槽」

投入したイカゴロを温水ボイラーにより自動昇温し、可溶化するために決定した数値を事前に温度センサー、攪拌機及び pH センサーに設定し、実働時において得られる誤差等を修正しつつ、調整可能な装置を設計・試作した。

イカゴロの溶解時の攪拌速度はインバーターにより可変可能な機能を付加し、実働時において得られた誤差等の微調整を容易にした。また、イカゴロの粘度について、粘度状態によって変化するモーターへの負荷をインバーターからの電流値を監視することにより自動で溶解終了を判別可能となった。

(2) 「酢酸供給部」

「溶解槽」に設置した pH センサーで pH 値を監視し供給量を制御できるように設計・試作をした。これにより自動でイカゴロの腐敗を防止する pH 値を制御可能となった。

(3) 「スクリーン分離機」

溶解槽より供給されたイカゴロには眼球・嘴及び未消化胃内容物等が混在している状

態である。この状態から眼球・嘴及び未消化胃内容物等を同時に取り除く機能を装備した装置を試作した。しかし、イカゴロの粘性、落下速度・距離等の要因により固液分離が不十分な状態となった。そのためスリット部の傾斜の見直しと振動機能を付加することにより 1mm 未満の目を通過するスラリー状のイカゴロの製造が可能となった。また、眼球・嘴及び未消化胃内容物等の除去を 1 台で兼用可能のため少スペース化に繋がった。

(1)、(2)及び(3)項の実機製作したことにより自動的に 6 時間以内にイカゴロを可溶化となることと、目開き 1mm 未満の網を通過するスラリーを製造することが可能となった。

1-3-4 イカゴロの脱カドミウム装置の設計・試作

環境創研㈱が決定した諸条件を元に、自動で脱カドミウムを行なう装置の設計・試作をした。

装置は、溶解自動化装置より供給されるイカゴロを受け入れる「脱カドミウム槽」、キレート樹脂とイカゴロを攪拌する「攪拌部」、キレート樹脂とイカゴロを分離する「樹脂分離メッシュ」、キレート樹脂を再生する「樹脂再生部」、キレート樹脂の再生時に発生する廃酸からカドミウムの分離、酸の中和をする「凝集沈殿槽」で構成し試作をした。

(1) 「脱カドミウム槽」

溶解自動化装置より供給されるイカゴロを 0.5 トン受入、温水ボイラーで加温制御できる槽の設計・試作をした。溶解自動化装置より供給されたイカゴロの温度を保つように制御可能となった。

(2) 「攪拌部」

キレート樹脂とイカゴロを「脱カドミウム槽」内で万遍なく混ぜ合わせることに、回転速度を可変できる機能を装備した攪拌機を設計・試作した。

回転速度を容易に調整することによりキレート樹脂とイカゴロが槽内で万遍なく混ぜ合わせることが可能となった。

(3) 「樹脂分離メッシュ」

「脱カドミウム槽」内に入れたキレート樹脂がイカゴロと攪拌、イカゴロを排出時に槽外に流れ出さないような目開きの細かく、排出時の変形がない分離メッシュを槽内に設置可能な構造に設計・試作をした。これにより、イカゴロとキレート樹脂の分離が可能となった。

(4) 「樹脂再生部」

イカゴロの脱カドミウムに使用したキレート樹脂の再生のために「脱カドミウム槽」に自動で塩酸を霧状に供給でき、供給流量を調整可能な仕様で設計・試作をした。

これによりキレート樹脂全体に塩酸を供給可能となり樹脂の再生が可能となった。

(5) 「凝集沈殿槽」

キレート樹脂の再生時に発生する廃酸からカドミウムの分離、酸の中和をするために

廃酸の pH 値を監視し、NaOH を供給しながら攪拌可能な槽を試作した。

これにより廃酸からのカドミウムの分離と酸の中和が可能となった。

本装置により溶解自動化装置から自動供給されたスラリー状のイカゴロから 4 時間以内にカドミウム含有量を 2.0mg/kg 以下にすることが可能となった。

1-3-5 給餌・輸送試験

(1) 真鯛への給餌による比較検証

愛媛県宇和島市の(株)ダイニチにおいてフィールドテストを行い、イカゴロを添加した餌と添加していない餌を与えた真鯛の食味試験と遊離アミノ酸の分析を行い、イカゴロ 5%の添加では問題はないが、10%では過剰の可能性がある。また、食味試験では問題はなく、遊離アミノ酸分析においても問題はなかった。

脱カドミウム処理イカゴロ添加飼料を用いて真鯛の給餌飼育試験を行い、脱カドミウムイカゴロの真鯛の成長及び肉質に与える影響を調べた。検討したイカゴロの添加量は 0.1、0.5、1.0、5.0 及び 10%とした。飼育試験の結果、何れの添加量でも、目標である摂餌量 10%、成長率 5%以上の向上を大きく上回る効果を確認することができた。また、肉質 (Ki 値) に関しても、イカゴロによる悪影響は観察されなかった。

(2) チョウザメ及びウナギへの給餌による比較検証

コントロール餌とイカゴロ餌のチョウザメへの給餌試験を 60 日間行なった結果、ベストルにおいては、コントロール群は、平均体重 1.85±0.09kg、増重率 29.4%、成長率 0.44%、生残率 95.5%だった。一方、イカゴロ群は、平均体重 1.89±0.09kg、増重率 24.3%、成長率 0.36%、生残率 95.5%であり、群間に有意な差はみられなかった。

(3) 輸送法の検討

脱カドミウムイカゴロは、常温で 1 週間程度保存可能である事を確認し、0.5 トンを常温で輸送を行ったが品質に問題はなかった。また、他の輸送方法の検討を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

一般財団法人函館国際水産・海洋都市推進機構 経理・総務部門 伊藤 晶

TEL : 0138-43-0220 FAX : 0138-42-6223

e-mail: a.ito@marine-hakodate.jp

一般財団法人函館国際水産・海洋都市推進機構 調査・研究部門 福田 覚

TEL : 0138-43-0220 FAX : 0138-42-6223

e-mail: s.fukuda@marine-hakodate.jp

第2章 本論

2-1 発酵・自己消化工程の可溶化条件の決定

目標1：腐敗を防止しながら(一般細菌数200個/g以下)6時間以内に可溶化を実現する。

目標2：最適温度(40°C~46°C)の実証、測定pH値は、pH5~pH6を実現する。

今まで溶解に関しては、溶解完了の決定、溶解温度及び溶解時間等を目視及び感覚的な手法で管理していた。

更に、イカゴロの溶解時、加熱温度の上昇が早くなると、加熱面において蛋白質の凝固が生起し、その凝固した蛋白質が濾過時において網の目詰まり等を発生させていた。また、逆に温度上昇が遅いと、イカゴロに腐敗菌が増殖し、腐敗が生起するという不具合があった。

そこで本研究では、腐敗防止を行う最適温度の実証とpH条件の決定を下記のとおり実施する。

2-1-1 加温温度及び蛋白質の変性・腐敗に関わる検証

50~500mlの容器を用いて容積対伝熱面積比を変えたイカゴロ溶解実験を行い、最適温度と推察される温度に至るまでの溶解速度等を検証するとともに、併せて最適温度帯におけるイカゴロの蛋白質の変性及び腐敗状況を確認して目標1を検証する。

(1) 実施内容

50~500 mLの容器を用いて容積対伝熱面積比を変えたイカゴロ溶解実験を行い、最適温度(40°C~46°C)と推察される温度に至るまでの溶解速度等を検証する。

(2) イカゴロの比熱の決定

温度上昇速度の解析に不可欠なイカゴロ溶解物の比熱を以下の方法で決定した。温度の異なる水とイカゴロ溶解物を断熱容器で混合して温度を測定した。水の重量を W_w (kg)、比熱を C_{pw} (J/kg K)、混合前後の温度差を ΔT_w (°C)とし、イカゴロ溶解物の重量を W_s (kg)、混合前後の温度差を ΔT_s (°C)、イカゴロ溶解物の平均比熱を C_{ps} (J/kg K)とすると、混合前後の熱収支は次式で表すことができる。

$$C_{pw}W_w\Delta T_w = C_{ps}W_s\Delta T_s \quad (1)$$

式(1)より、x軸に $W_s\Delta T_s$ 、y軸に $C_{pw}W_w\Delta T_w$ をプロットすると原点を通る直線となり、その傾きからイカゴロ溶解物の平均比熱が求められる。実験結果についての式(1)のプロットを図1に示す。原点を通る直線が得られ、その傾きからイカゴロ溶解物の平均比熱 $C_{ps} = 4656$ J/kg Kが得られた。

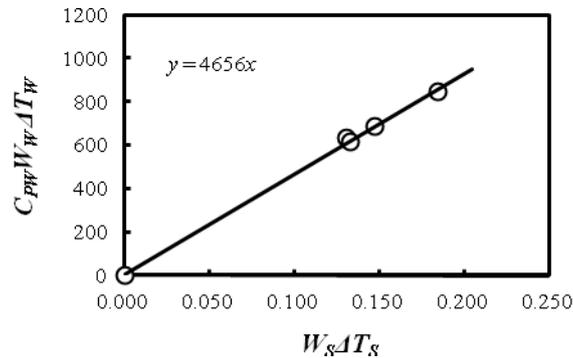


図1 式(1)のプロット

(3) イカゴロ溶解工程における温度上昇速度の解析

① Newton の伝熱速度モデル

伝熱速度は伝熱面積と温度差に比例し、熱源から低温流体への伝熱量 Q (J)、加熱時間 t (s)、伝熱面積 A (m²)、低温流体の温度 T (K)、熱源温度 T_h (K) の間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{dQ}{dt} = UA(T_h - T) \quad (2)$$

ここで、 U (W/m² K) は総括伝熱係数とよばれ、固体壁とその表面の流体の境膜の熱伝導度を総括したパラメータである。

低温流体の質量を w (kg)、比熱を C_p (J/kg K) とおくと次の関係が成立する。

$$\frac{dQ}{dt} = wC_p \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

式(2)と(3)から次式が得られる。

$$wC_p \frac{dT}{dt} = UA(T_h - T) \quad (4)$$

式(4)を T について解けば次式が得られる。 T_0 は $t=0$ における低温流体の温度である。

$$T = T_h - (T_h - T_0) \exp\left(-\frac{U}{C_p} \frac{A}{w} t\right) \quad (5)$$

式(5)において、熱源温度、低温流体の初期温度と質量及び伝熱面積は実験条件として既知の値である。よって、低温流体の比熱がわかれば非線形最小二乗法を用いて実験結果と式(5)の計算結果の残差平方和が最小となる総括伝熱係数を決定することができる。

② 水道水の加熱実験と伝熱速度モデルによる解析

上記のモデルを検証するために、ステンレス缶（内径 0.098m、外径 0.100m、深さ 0.125m）を用いて蒸留水の加熱実験を恒温水槽（17L）で行った。実験結果を図 2a-d に示す。図中の実線は式(5)による計算値である。また、実験条件と計算に用いた物性値を表 1 に示す。伝熱面積/重量比 (A/w) の異なる実験結果が同じ総括伝熱係数を用いて計算した結果とよく一致した。

表 1 水道水の加熱実験の条件と解析パラメータ

	w (kg)	A (m ²)	A/w	T_h	T_0	C_p (J/kg·K)	U (W/m ² ·K)
図 2a	0.5	0.0202	0.040	61.1	22.0	4200	1380
図 2b	0.5	0.0279	0.056	56.0	25.5	4200	1380
図 2c	0.8	0.0323	0.040	57.4	21.5	4200	1380
図 2d	0.8	0.0400	0.050	56.8	15.8	4200	1380

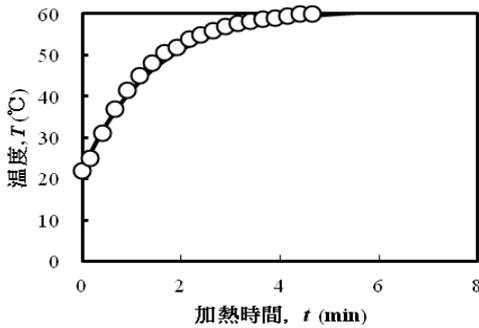


図 2a 水の加熱実験 : $A/w = 0.040$

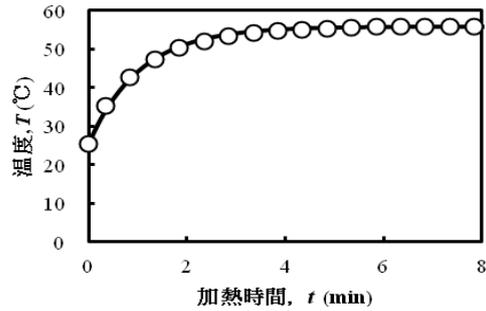


図 2b 水の加熱実験 : $A/w = 0.056$

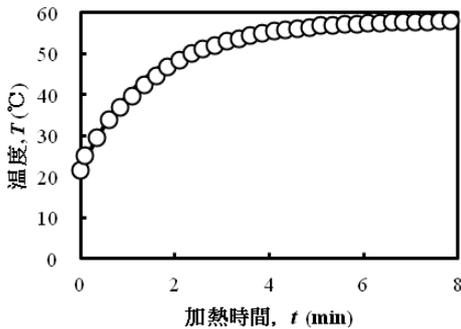


図 2c 水の加熱実験 : $A/w = 0.040$

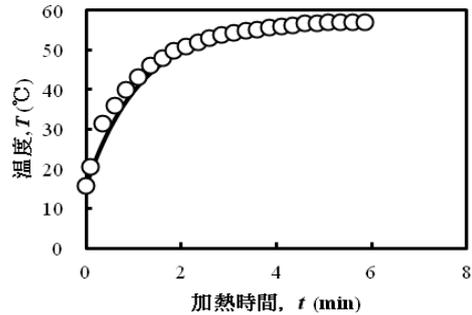


図 2d 水の加熱実験 : $A/w = 0.050$

③ イカゴロの加熱実験と伝熱速度モデルによる解析

ホモジナイズしたイカゴロを用いて②と同じ実験を行い、その結果に式(5)を適用して総括伝熱係数を決定した。結果を図 3a-d に示す。図中の実線は式(5)による計算値で

ある。実験条件と計算に用いた物性値を表 2 に示す。イカゴロについても加熱面積/重量比 (A/w) の異なる実験値が同じ総括伝熱係数を用いて計算した結果とよく一致した。このことから、本モデルを用いてイカゴロ溶解工程における温度上昇速度を予測できると考えられる。

表 2 カゴロ加熱実験の条件と解析パラメータ

	w (kg)	A (m ²)	A/w (-)	T_h	T_0	C_p (J/kg·K)	U (W/m ² ·K)
図 3a	0.3	0.0198	0.066	56.1	23.0	4680	740
図 3b	0.5	0.0279	0.056	56.1	25.1	4680	740
図 3c	0.6	0.0319	0.053	56.2	24.2	4680	740
図 3d	0.8	0.0323	0.040	55.1	37.0	4680	740

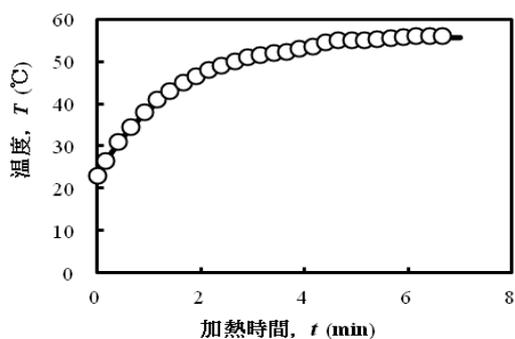


図 3a イカゴロの加熱実験 : $A/w = 0.066$

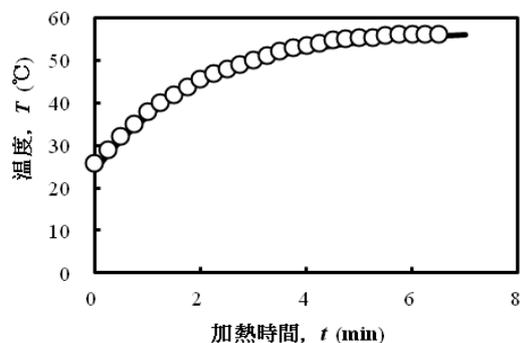


図 3b イカゴロの加熱実験 : $A/w = 0.056$

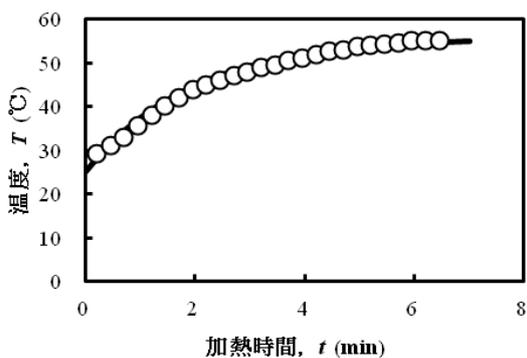


図 3c イカゴロの加熱実験 : $A/w = 0.053$

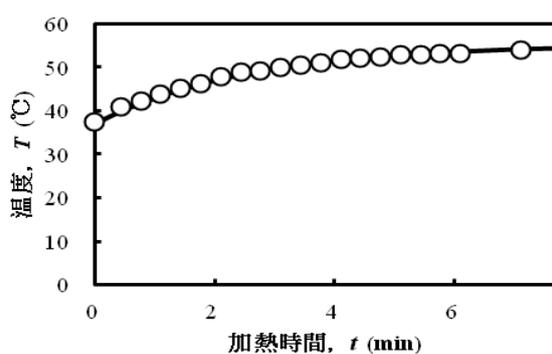


図 3d イカゴロの加熱実験 : $A/w = 0.040$

④ 実機を用いた実証試験の結果への適用

上記の②と③で決定した総括伝熱係数及び式(5)を、㈱メデックが製作したイカゴロ溶解槽（700 L）を用いた実証試験の結果に適用した結果を図 4a と 4b に示す。図 4a は水道水、図 4b はイカゴロについての加熱実証試験の結果であり、図中の実線が式(5)による計算値である。実機では約 1000 倍のスケールアップとなるが、ラボスケールで決定した総括伝熱係数を用いたシミュレーション結果とよく一致した。

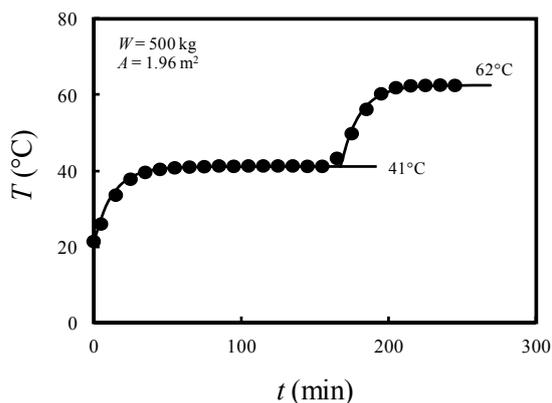


図 4a 実機による水の加熱試験

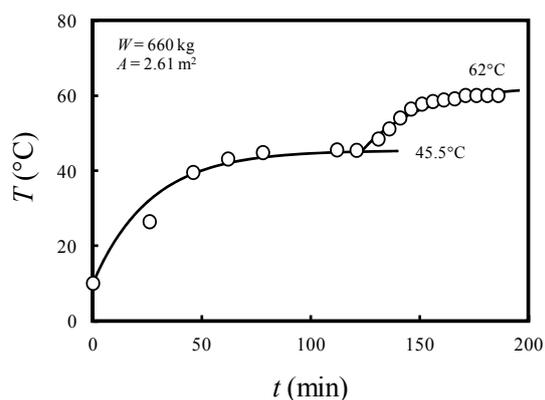


図 4b 実機によるイカゴロの加熱試験

(4) 検証方法

(2) 項より解析されたイカゴロの溶解条件に基づき 500 mL の容器を用いて溶解試験を行い、腐敗を防止しながら一般細菌数 200 個/g 以下、6 時間以内に可溶化されることを検証した。

(5) 検証結果

(2) 項より解析されたイカゴロの溶解条件に基づき、500 mL 容器を用いてイカゴロを 45°C で約 2 時間加熱溶解した後に 60°C で 1 時間低温殺菌を行う工程を行った。昇温工程を合わせて約 4 時間後にイカゴロ液の粘度は 9mPa・s となり溶解工程を終了し 6 時間以内に可溶化されることを確認した。この溶解液をナイロン網を用いて濾過し夾雑物を除去し溶解したイカゴロ液を得た。この溶解・低温殺菌処理したイカゴロ中の一般細菌数を標準寒天培地による混釈し 35°C 48 時間培養し測定した。

その結果、溶解処理前のイカゴロ生鮮品の一般細菌数は 1.7×10^3 個/g であったが、イカゴロ溶解処理後のイカゴロ液中に含まれる一般細菌数は 30 個/g 以下であり、目標 1 の一般細菌数 200 個/g 以下を確認した（表 3）。

一般的に製品中の細菌数が $10^7 \sim 10^8$ 個/g になると腐敗していると判断されるが、本溶解工程での一般細菌数は非常に少ないことが確認されたことから、腐敗の防止効果が確認された。

表 3 解処理前後の一般細菌数

	一般細菌数 (個/g)	備 考
溶解処理前	1.7×10^3	生鮮品(10℃)
溶解処理後	30 以下	45℃ 2 時間 +60℃ 1 時間

2-1-2 自己消化酵素の補完に関わる検証

イカゴロの可溶化の実現には、自己消化酵素を活用することが適しているが、その反面、食中毒菌及び腐敗菌が容易に増殖されるとともに、それに伴う臭みの発生が懸念される。

そこで、それらの懸念を解消するため、発酵菌の活用が考えられるが、発酵菌の増殖に適した pH 値と温度帯の設定が必要となる。そこで、最適温度と推察される温度を維持した 50~500 mL の容器に酢酸を加えて pH 調整を行い、目標 2 を検証する。

(1) 検証方法

イカゴロの可溶化にはイカゴロに含まれる自己消化酵素を活用するが、最適条件における加温溶解は食中毒菌及び腐敗菌の増殖が懸念された。そこで 2-1-1 の検証によって確認された最適温度帯における発酵菌の検討を行い、イカゴロ中の菌相を食中毒菌及び腐敗菌ではなく発酵菌優勢となるような条件を検索した。ビーカーにイカゴロを 50 mL 分取し、恒温槽において培養した。発酵菌の培養条件は以下のとおりである。発酵菌としてはイカゴロが持つスタフィロコッカスを検討した(表 4)。また、45℃培養時の一般細菌数をあわせて測定した。スタフィロコッカスはマンニット食塩寒天培地「ダイゴ」に塗布し 35℃48 時間培養、菌数を測定した。また、乳酸菌の活用の可能性についても検討を行った(表 5)。

表 4 イカゴロスタフィロコッカスの培養条件

pH	培養温度(℃)		
	35	40	45
4	6 時間培養		
5	6 時間培養		
6	6 時間培養		

初期菌数 : 1.35×10^5 個/g (生鮮品 10℃)

表 5 発酵菌の添加・培養条件(40℃)

No.	イカゴロ (g)	乳酸菌 添加量(%)	グルコース 添加量(%)	酢酸添加 量(%)
1	50	0	0	0
2	50	1.0	2	0
3	50	0.5	2	0
4	50	0.1	0	0
5	50	0.1	2	0
6	50	0.1	2	0.4
7	50	0.01	2	0
8	50	0.01	2	0.4
9	50	0.01	4	0

(2) 検証結果

本処理方法では加工場から低温のまま移送された生のイカゴロを用いるが、低温での溶解処理が長い場合、一般細菌数の増加により腐敗が進行する恐れがあった。

イカゴロにはスタフィロコッカス属の球菌類が常在し、これを利用した製品が伝統的な食品である塩辛である。本試験研究においてもこのスタフィロコッカスを使用しての可溶化の検討を行った。

スタフィロコッカスの培養は新鮮なイカゴロを粉砕し、酢酸により pH4 から 6 に調整した後、ビーカーにそれぞれ 50 mL を分取し密閉、恒温槽にて 6 時間加温を行った。イカゴロに含まれるスタフィロコッカスは、6 時間の加温により菌数が減少し特に 40℃ を超えると菌数が大きく減少することが確認された (図 5)。これはイカゴロに含まれるスタフィロコッカスが低温性であることを示唆していると推察された。本処理条件では溶解温度が 40℃ から 46℃ であるため、スタフィロコッカスの大部分が死滅することが確認され、自己消化酵素との相乗効果は期待できないと考えられる。

また、溶解条件である 45℃ における一般細菌の測定の結果、pH6 では幾分加温による殺菌効果が低く、また、酢酸を用いて pH4 及び 5 に調整した場合において一般細菌の増殖は抑制されていることが確認された (表 6)。

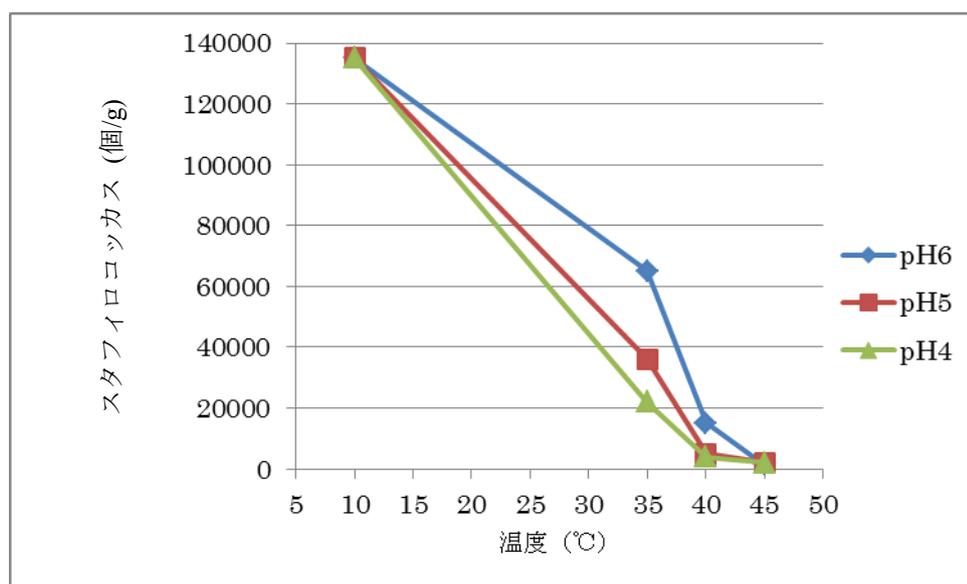


図5 イカゴロ中のスタフィロкокカスの pH と温度の関係(6 時間加温)

表 6 可溶化処理前後の一般細菌数(45°C)

pH	一般細菌数(個/g)	
	初期	6 時間後
4	2.0×10^3	110
5		120
6		230

発酵菌として乳酸菌の適用についても検討した。イカゴロには自己消化酵素が含まれ、また、多量の油分も含まれることから、乳酸発酵菌の増殖には適さないのではないかと懸念もあったが、前記条件における培養試験の結果、0.01%~1.0%の乳酸菌添加量と栄養源の添加により乳酸菌の増殖と pH の低下が確認された(図 6)。培養温度は使用した乳酸菌種 (*Streptococcus faecalis* 129BIO 3B、*Lactobacillus acidophilus* M-13) の最適培養温度が約 37°C 付近であり、イカゴロの溶解最適温度が 40~46°C であることから溶解最適温度下限の 40°C とした。また、pH は一般細菌の増殖抑制効果が期待できる pH5 付近まで低下することが確認された。乳酸菌の添加のみでは乳酸菌の増殖、pH の低下は確認されず、乳酸菌を添加せずイカゴロのみ場合と同様に pH 上昇が認められた。

pH の低下には 40~48 時間を要するため、可溶化初期からの酢酸添加により雑菌の増殖を抑えることは好ましいが、乳酸発酵による pH 低下と乳酸菌の増殖は可溶化段階での適用よりも、イカゴロ製品の長期保管に適していると考えられる。本処理条件においては、速やかに pH を調整する必要があることから、酢酸等の酸添加による pH 調整が好適であると考えられる。

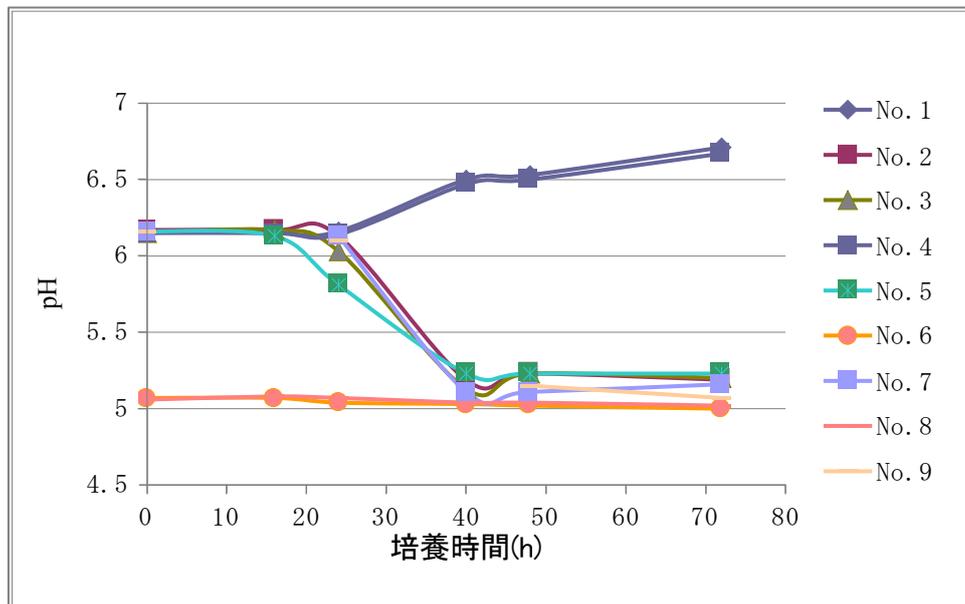


図6 乳酸菌によるイカゴロ培養及び pH の推移

また、近年プロバイオティクス機能を取り入れた製品の有用性が注目を集めている。プロバイオティクスとは消化管内のフローラに作用し、フローラの健全化をはかり、疾病の予防・改善を期待するものである。養魚用餌原料としてのイカゴロにプロバイオティクス機能が期待できる乳酸菌を用いることで、養殖魚に対する免疫賦活の効果と、それに伴うへい死率の低下等の付加価値も期待できる。

2-1-3 溶解終了となる粘度の決定

(1) 実施内容

イカゴロの溶解工程終了の判定基準は、①混雑物（眼球、嘴、未消化胃内容物等）を除去するための濾過工程が阻害されない粘度、②カドミウム除去工程におけるキレート樹脂の混合状態が最適となる粘度が目安となる。そのため、イカゴロ溶解物粘度を粘度計で測定・検証し、溶解工程終了の目安となる粘度を決定する。

(2) イカゴロの粘度に及ぼす温度の影響

① イカゴロ溶解工程における温度と粘度の関係

イカゴロの加熱溶解工程においては、イカゴロの腐敗を防ぐためにできるだけ速やかに溶解工程を終えて低温殺菌効果のある 60℃に昇温しなければならない。イカゴロの加熱溶解実験の結果を図 7a と 7b に示す。図 7a はイカゴロ 0.79kg を 60℃恒温水槽で加熱した結果であり、図 7b はイカゴロ 0.7kg を 45℃で 2 時間溶解した後に恒温水槽の温度を 60℃に上昇させた結果である。イカゴロの粘度は音叉型振動式粘度計（楸エーアンドデイ、Vibro Viscometer SV-10）で測定した。いずれの場合もイカゴロの粘

度は1時間以内に8~12 mPa·sまで低下した後にほぼ一定となったが、最終的な粘度は45℃で2時間加熱した方が低い値となった。この結果から、60℃ではイカゴロの自己消化酵素が約1時間で失活するため、45℃で約2時間加熱溶解した後に60℃で低温殺菌を行う工程が効率的であると考えられる。

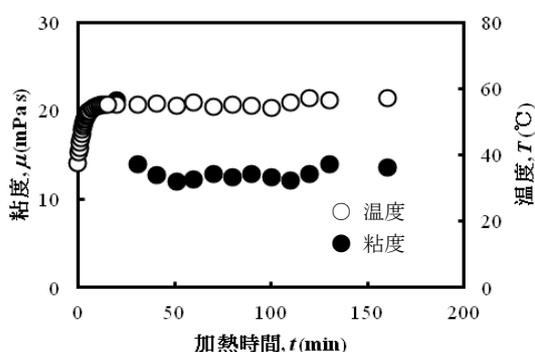


図 7a イカゴロ加熱溶解 (60℃)

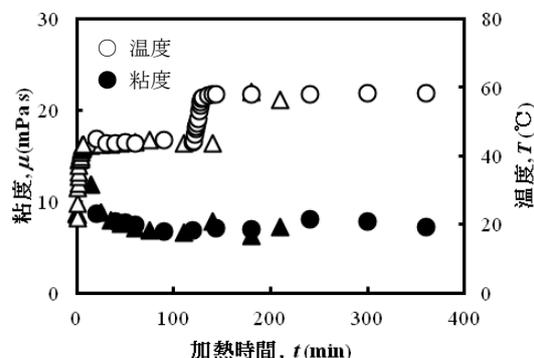


図 7b イカゴロ二段階加熱溶解 (45-60℃)

② イカゴロ溶解物の粘度に及ぼす温度の影響

濾過工程では流体の粘度が濾過効率に大きく影響を及ぼすことが知られている。そこで、温度を変えてイカゴロ溶解物の粘度を測定し、その結果にアンドレイド粘度式を適用した。

$$\mu = A \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (6)$$

$$\ln \mu = \frac{E}{R} \frac{1}{T} + \ln A \quad (7)$$

μ は粘度、 T は絶対温度、 R は気体定数、 A は定数、 E は流動活性化エネルギーである。

イカゴロ溶解物の粘度と温度の関係を図 8a に示す。図 8b は、図 8a の結果に Andrade プロット式を適用した結果である。プロットの結果、30℃に交点をもつ2本の直線が得られ、各直線から任意の温度における粘度を予測することが可能であると考えられる。

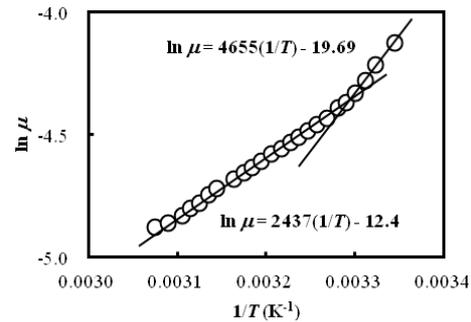
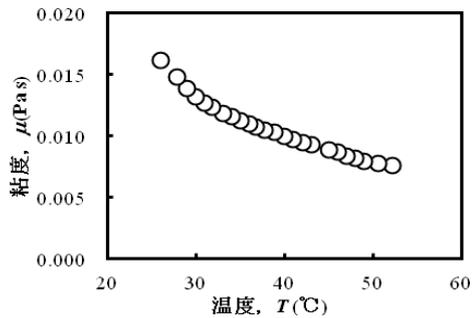


図 8a イカゴロ溶解物の温度と粘度の関係

図 8b 図 7a の結果の Andrade プロット

(3) イカゴロの濾過速度に及ぼす粘度の影響

① イカゴロ溶解物の濾過実験

競争吸着法によるイカゴロからのカドミウム除去工程では、混雑物の除去とキレート樹脂を分離する 2 回の濾過操作が必要である。そこで、イカゴロ溶解物の濾過速度に及ぼす温度、すなわち粘度の影響を明らかにするために、実操作と同じ濾材（ナイロンメッシュ、目開き 0.27mm）を用いて、温度を変えて（18~60℃）イカゴロ溶解物の濾過実験を行った。

混雑物を含むイカゴロ溶解物 0.1kg 及び混雑物を除去したイカゴロ溶解物 0.05kg について濾過実験を行った結果の一例を図 9a と 9b に示す。ただし、混雑物を除去したイカゴロ溶解物の濾過実験では、濾過速度が非常に速く測定が困難であったため、ナイロンメッシュを 6 枚重ねて濾過を行った。いずれの場合も温度の上昇とともに濾過速度が上昇した。

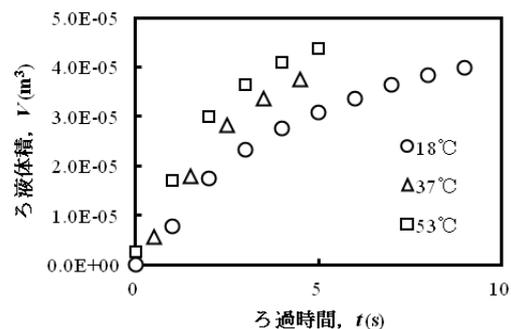
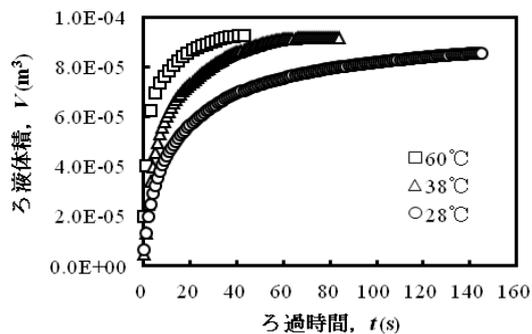


図 9a イカゴロ溶解物の濾過（混雑物あり）

図 9b イカゴロ溶解物の濾過（混雑物なし）

② 濾過速度解析モデル

濾過の基本式は次式で表わされる。

$$v = \frac{1}{A_f} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_c)} \quad (8)$$

v (m/s) は濾液の流速、 A_f (m²) は濾過面積、 V (m³) は濾液量、 t (s) は濾過時間、 μ (kg/m·s) は流体の粘度、 ΔP (Pa) は濾過圧力である。 R_m と R_c (m⁻¹) はそれぞれ、濾材 (ろ紙) とケーキ (ろ紙上の堆積物、濾滓) の抵抗係数である。

濾過が進むにつれて液面が降下する重力濾過の場合、濾過の進行とともに濾過圧力が低下するので、式(8)は次式で表わされる。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A_f}{\mu} \frac{\Delta P}{R_m + R_c} = \frac{A_f}{\mu} \frac{\rho g (h_0 - V/A_v)}{R_m + \delta C V/A_f} \quad (9)$$

式(9)の ρ (kg/m³) は液の密度、 g (m/s²) は重力加速度、 h_0 (m) は濾過開始時の液面の高さ、 A_v (m²) は濾過器の断面積、 δ (m/kg) はケーキ比抵抗、 C (kg/m³) は液中の固形分濃度である。

式(9)を $t=0 \rightarrow t$ 、 $V=0 \rightarrow V$ の条件で積分すると次式が得られる。

$$\frac{\rho g A_f}{\mu A_v} t - R_m \ln \frac{h_0 A_v}{h_0 A_v - V} = \delta \left(\frac{C}{A_f} \right) \left(h_0 A_v \ln \frac{h_0 A_v}{h_0 A_v - V} - V \right) \quad (10)$$

式(10)において R_m が決まれば、 δ 以外は装置仕様、操作条件及び実験結果として得られる値なので、式(10)の左辺を y 軸、右辺の δ 以外を x 軸にプロットした結果は原点を通る直線となり、その傾きからケーキ比抵抗 (δ) が得られる。

濾材の抵抗係数 R_m は以下の方法で決定した。混雑物を除去したイカゴロ溶解物を濾過した場合はケーキの抵抗が無視できるので、式(10)において $\delta=0$ とおくと次式を得る。

$$\ln \frac{h_0 A_v}{h_0 A_v - V} = \frac{1}{R_m} \frac{\rho g A_f}{\mu A_v} t \quad (11)$$

よって、混雑物を除去したイカゴロ溶解物の濾過実験の結果について、式(11)の左辺を y 軸、右辺の $1/R_m$ 以外を x 軸にプロットした結果は原点を通る直線となり、その傾きの逆数から濾材であるナイロンメッシュの抵抗係数 R_m が得られる。

③ 濾材の抵抗係数の決定

混雑物を除去したイカゴロ溶解物の濾過実験の結果に式(11)を適用した結果を図 10 に示す。各温度におけるイカゴロの粘度は Andrade 式を用いて算出した (図 8b)。18°C から 53°C まで温度を変えた実験の結果についてのプロットは、原点を通りほぼ同じ傾きをもつ直線となった。得られた直線の傾きの逆数は 5.05×10^6 であるが、本実験では

濾材であるナイロンメッシュを 6 枚重ねて使用しているため、抵抗係数はその 1/6 の $R_m = 8.42 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$ となる。

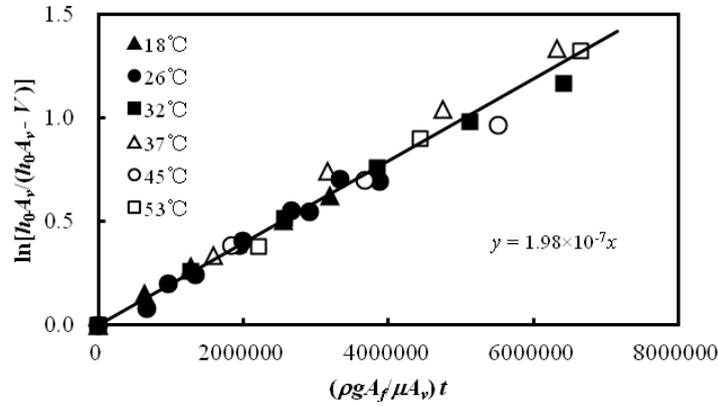


図 10 イカゴロ溶解物(混雑物なし)の濾過実験の式(11)のプロット

④ 混雑物のケーキ比抵抗の決定

図 11 は混雑物を含むイカゴロ溶解液の濾過実験の結果について式(10)のプロットを行った結果である。各温度におけるイカゴロの粘度は Andrade 式を用いて算出し、濾材の抵抗係数には図 10 で決定した値を用いた。28°C から 60°C まで温度を変えて行った濾過実験の結果についてのプロットは、原点を通りほぼ同じ傾きをもつ直線となった。このことから、温度によらず混雑物の比抵抗がほぼ一定であることがわかる。また、得られた直線の傾きから混雑物のケーキ比抵抗、 $\delta = 7.55 \times 10^7 \text{ m/kg}$ 、が得られた。

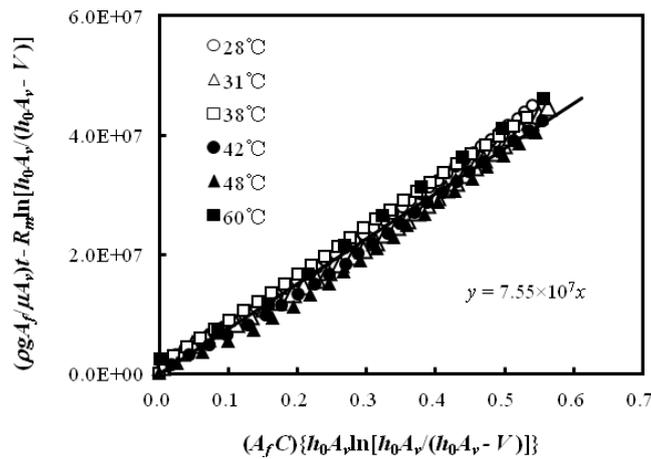


図 11 イカゴロ溶解物(混雑物あり)の濾過実験の式(10)のプロット

2-2 キレート樹脂の効果確認及び同樹脂の再生の検証

目標1：イカゴロに含有するカドミウムを4時間以内に2mg/kg以下にする。

目標2：酸の混入工程1回で、キレート樹脂を適切に再生させる。

カドミウム除去に係わるキレート樹脂の効果を検証するとともに、吸着されたカドミウムを分離するため酸を用いる必要がある。そのため、本研究では電極析出により酸の再生を促進させ、酸の使用量の軽減を実現する。

2-2-1 カドミウムの減少確認

5Lスケールにおいて、6時間以内に樹脂が十分に攪拌され、イカゴロの最適な粘度を得られた状態においてイカゴロ含有のカドミウムがキレート樹脂に吸着し、目標1まで減少していることを確認する。

(1) 検証方法

生イカゴロ約6kgを8Lのプラスチック製バケツに分取し5時間、60℃で攪拌可溶化後、夾雑物をナイロン製網を用いて取り除いた。得られたイカゴロ液5kgを8Lのプラスチック製バケツに分取し、キレート樹脂(IRC748)500mLを添加後、酢酸を用いてpH5.0に調整し60℃に加温、投入した樹脂が均一にバケツ内で攪拌されるよう攪拌機を用いて100rpmにて攪拌した。1時間毎にイカゴロの一部をサンプリングしてイカゴロに含まれるカドミウム量の測定を実施した。本処理工程では同一樹脂を3回繰り返し使用することを想定しているため、さらに2回、同一の樹脂を繰り返し使用しイカゴロのカドミウム量の測定を実施した。

(2) 検証結果

キレート樹脂を用いたイカゴロに含まれるカドミウムの減少は図のように1回目、2回目、3回目ともに飼料の有害物質の指導基準(3.0mg/kg)を下回ることが確認された(図12)。同一キレート樹脂を再生せずに用いたイカゴロからのカドミウム除去では回を重ねるごとに除去能は低下するが、3回目であってもイカゴロに含まれるカドミウムは4時間で1.9mg/kg、6時間で1.7mg/kgまで低下しており、十分なカドミウム除去性能を持つことが確認された。1日の処理回数を3回とすると、この3回分の処理製品を混合均一化して出荷することで、平均1mg/kg前後の製品(リキッドフィード)を安定して生産可能となる。

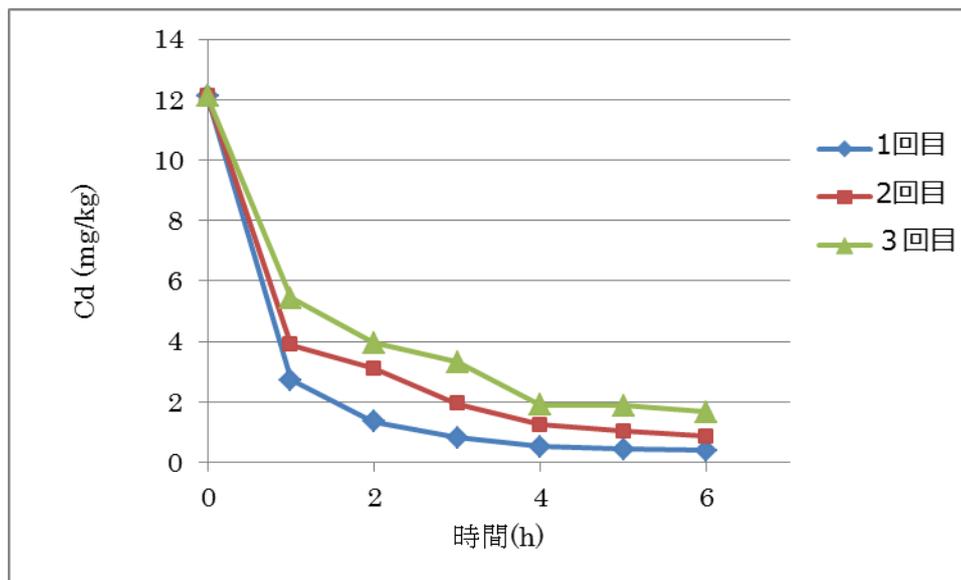


図 12 イカゴロの脱カドミウム及び連続処理

2-2-2 キレート樹脂の再生方法の検証

キレート樹脂の再生方法として、カラムへ充填して再生する方法と、バッチで行う方法を行ってきたが、樹脂の再生を自動化するためには、カドミウム吸着を行うタンクから樹脂を取り出さずに行う必要がある。その場合、キレート樹脂が酸に反応して吸着物質を脱着させる性質を利用するのが最も有効的である。しかし、ただ単に酸を混入させた方法では、キレート樹脂を再生するために酸を5回程度入れ替える必要があり、自ずと処理に必要となる酸の量も増加することとなる。そのため、本研究では、電極折出により、酸の混入工程を1回まで減少させ、酸の使用量を減少させるとともに、キレート樹脂の再生を実現する。

(1) 検証方法

イカゴロのカドミウム除去に3回使用したキレート樹脂 300g に水を 600 mL 加え、濃塩酸を添加して pH1.2 から 1.7 前後となるように調整した。これを1時間攪拌し樹脂からカドミウムを液中に解離させた。このカドミウムを含む液の一部を電解槽に導入し、循環通水を行いながらカドミウムを電極析出により除去した。

電極はカソード側がステンレス板電極(45mm×150mm×0.3mm)2枚、アノード側は炭素板電極(42mm×165mm×8mm)1枚を使用した。電解装置は DIAMOND ANTENNA 製直流安定化電源装置 GSV3000 を使用した。電解電圧は 2.7~4.0V の定電圧電解とした(写真1)。2枚のステンレス電極板の液中浸漬面積は約 108cm²、電流密度はおおよそ 6.5~8.3mA/cm²であった。

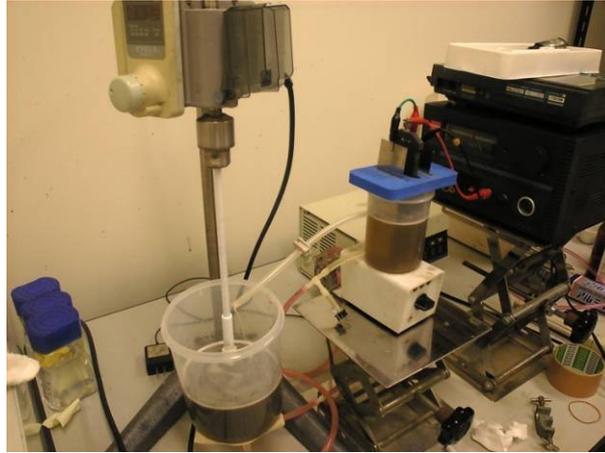


写真 1 カドミウムの電解試験装置

(2) 検証結果

図 12 のように時間経過とともにカドミウムイオンの減少が確認され、15 時間後には液中のカドミウムイオンは 1mg/kg 前後となり、さらに電解を継続し 29 時間後には 0.4mg/kg となった。通常の 1N 塩酸による樹脂塔を使った再生では液中カドミウム濃度は 0.1mg/kg 以下であるからややカドミウムの残留が認められた。これは、樹脂からのカドミウム溶出割合が液中の pH に依存するためである。

また、電解 pH が低い場合、電解処理の遅延が認められた。これは低 pH による電極からのカドミウム再溶出によるものと推察された。キレート樹脂から解離したカドミウムイオンは電解処理によりカソード側のステンレス板電極に黒灰色金属粒子として析出した (写真 2)。

また、電解電圧が 3.0V 以上の場合、発生やアノード側の炭素電極の損耗が激しく、使用後に電極の摩耗・脆化が確認された。これは、過剰な電解によりカソード側でのカドミウム等の金属イオンの還元や水素発生だけではなく、アノード側で酸素発生や、塩素発生による次亜塩素酸の発生などによる炭素電極の酸化劣化と思われた。

電解電圧を 2.7V 以下にすることで炭素電極の過剰な劣化は抑制されることを確認し、電解性能においても大きな影響を及ぼさないことを確認した。

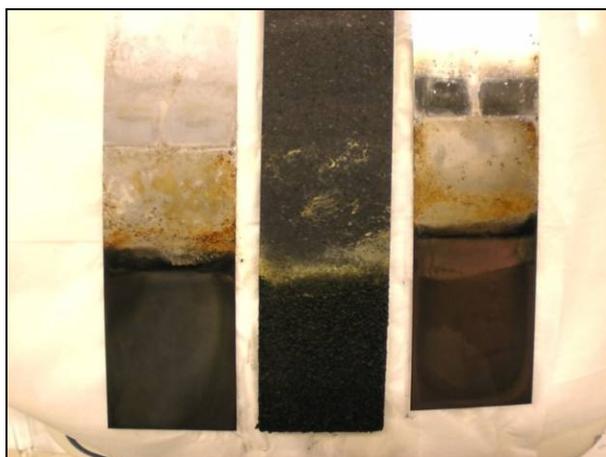


写真 2 使用後の電極板(左からステンレス板電極、炭素電極、ステンレス電極)

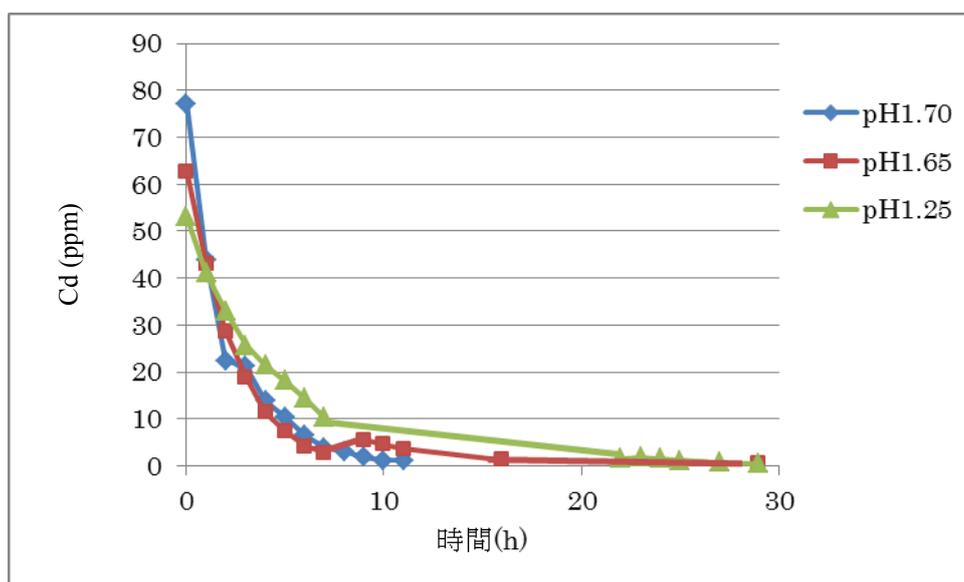


図 13 キレート樹脂の電解再生処理(2.7V)

また、発生する次亜塩素酸により、着色した電解溶液の脱色作用も確認された。電極表面からの微発泡は液中の有機物を浮上分離する泡沫分離効果もあり、上層の有機物を多く含む泡部分を効果的に除去することで電解処理後の液は処理前と比べ清澄な液となった。

処理後の液 pH は処理前と大きく変わらず、この液は再度利用することが可能であった。

電解処理を行った樹脂（残液カドミウムが 0.2mg/kg と 3.1mg/kg のもの）を使用して既存の条件にてイカゴロからのカドミウム除去を行ったところ、初期カドミウム量が

10.4mg/kg のイカゴロが 6 時間後にはそれぞれ 0.52mg/kg、0.73mg/kg となり、電解再生液のカドミウム濃度は 1mg/kg 程度でも問題なく利用できることが確認された。

一般的なキレート樹脂の樹脂塔による再生処理では樹脂量の 6～10 倍の希塩酸が必要とされるが、電解処理では樹脂量と同量の希塩酸の使用のみで繰り返し使用できることから、排水の中和・処理コストが低減できると考える。

2-3 溶解自動化装置の設計・試作

目標：自動的に 6 時間以内に可溶化となること、目開き 1mm 未満の網を通過するスラリーを製造すること。

2-1 で決定した条件を元に、イカゴロの溶解を自動化する装置 (1 トンバッチ) の設計と試作を以下のように行う。

2-3-1 イカゴロ溶解装置の設計と試作

装置構成はイカゴロの受入・溶解を兼用した「溶解槽」、腐敗を防止するための「酢酸供給部」、溶解したイカゴロをポンプで排出しイカゴロに付着した眼球・嘴及び未消化胃内容物等の細かい夾雑物を分離する機能を兼用した「スクリーン分離機」で構成し試作をした。以下にユニット詳細を示す。

(1) 「溶解槽」

- ①イカゴロを昇温するための構造としてジャケット式とした。
- ②熱源は灯油式ボイラー。
- ③温度監視、制御のための熱電対を設置。
- ④pH 監視、制御のための pH センサー設置。
- ⑤イカゴロの溶解促進、温度・pH 値の均一化のために攪拌機を設置。
- ⑥攪拌機はインバーター制御により回転数を可変。また、インバーターからの電流値を監視してイカゴロの粘性を自動判別可能とした。

(2) 「酢酸供給部」

- ①酢酸供給タンク容量は 500L とした。
- ②定量供給のため、ダイヤフラムポンプにより供給。
- ③pH 値監視のための pH センサーを設置。
- ④pH センサーより pH 値を監視し酢酸供給を自動制御する。

(3) 「スクリーン分離機」

- ①イカゴロに付着した眼球、嘴及び未消化胃内容物等を分離するためにスペース効率がよく、かつ低コスト（動力なし）の傾斜式スクリーン方式を採用した。
- ②スクリーンのスリットサイズは未消化胃内容物サイズ 0.5mm も想定して 0.25mm を採用。
- ③スクリーンのスリット目詰まり防止のためにブラシによる清掃機能を装備。ブラシ動作は連続・断続で動作可能とした。

上記仕様で設計・試作をしたが「スクリーン分離機」において、イカゴロの粘性、落下速度・距離等の要因により固液分離が不十分な状態となった。そのためスリット部の傾斜の見直しと振動機能を付加することにより 1mm 未満の目を通過するスラリー状のイカゴロの製造が可能となった。また、眼球・嘴及び未消化胃内容物等の除去を 1 台で兼用可能のため少スペース化に繋がった。

(1)、(2) 及び (3) 項の実機製作したことにより自動的に 6 時間以内にイカゴロを可溶化となることと、目開き 1mm 未満の網を通過するスラリーを製造することが可能となった。

2-3-2 イカゴロの溶解槽の稼働と調整

試作した溶解装置については実稼働を行い、各種性能の確認を行う。この際、2-1 で決定した数値を事前に温度センサー及び pH センサーに設定し、実働時において得られた誤差等を微修正しつつ、装置の調整を行う。

また、攪拌速度については、インバーター回路を利用した可変可能な機能を付加し、実稼働において得られた誤差等の微修正を容易にする。

更に、イカゴロの粘度については装置に粘度計を付加し、イカゴロの粘度状態によって変化するモーターへの負荷値を検知し、自動的に溶解の終了を決定する。それらの目標達成後は、加温により酵素が失活することを確認する。

(1) 検証方法

溶解装置の仕様を環境創研(株)で作成し、(株)メデックが設計・製作を行った。当初計画した 1 トンの規模では、設置する施設のスペースが狭いため、0.5 トン/バッチの規模とした（写真 3）。溶解・脱カド処理における時間・pH・攪拌速度等は操作パネルにより設定可能である。



写真 3 イカゴロ溶解脱カド自動化装置

(2) 検証結果

溶解槽での溶解条件は 2-1 で決定した数値を操作パネルに入力し温度及び pH を設定した。水での加温上昇テストを実施し、溶解槽の最終温度が加温ジャケット内の残熱の影響により設定よりも約 5℃高くなることが判明したため、設定温度を 5℃低く設定し調整した。攪拌速度は水の状態で 10Hz、30rpm の設定において水全体が十分攪拌されることを確認した。加温処理時の建物内での臭気充満を防ぐため、溶解槽上部に強制排気弁を設けた。

イカゴロを使った作動テストを実施し、イカゴロ溶解温度と時間に問題がないことを確認した（写真 4、5）。水と比べイカゴロの粘度は非常に高く攪拌速度は 40Hz、120rpm とした（写真 6）。この攪拌時のモーターの作動アンペア数は初期値が 2.2A であった。温度の上昇と時間経過ともにイカゴロの溶解が進み、モーターに掛かる負荷が減少することでアンペア数は徐々に低下し 2-1 で決定した溶解後の粘度、約 9mPa・s では 1.8A であった。この 1.8A を溶解処理終了目安のファクターとして条件設定した。

イカゴロに含まれる自己消化酵素の影響を調べるため 60℃加温状態においてさらに一時間加温攪拌を行い、粘度の変化を測定した。少量レベルでの溶解試験同様に粘度の低下はほとんど見られず、約 9mPa・s となり酵素の失活を確認した。



写真 4 イカゴロの投入状況



写真 5 溶解槽に投入したイカゴロ



写真 6 溶解したイカゴロ及び粘度計による計測状況

投入したイカゴロを温水ボイラーにより自動昇温し、設定時間以内に昇温可能であることを確認した。可溶化するために2-1で決定した数値を事前に温度センサー、攪拌機及び pH センサーに設定し、実働時において得られる誤差等を修正しつつ、調整可能となった。

また、イカゴロの溶解時の攪拌速度はインバーターにより可変可能な機能を付加し、実働時において得られた誤差等の微調整を容易にした。更に、イカゴロの粘度について、粘度状態によって変化するモーターへの負荷をインバーターからの電流値を監視することにより自動で溶解終了を判別可能とした。

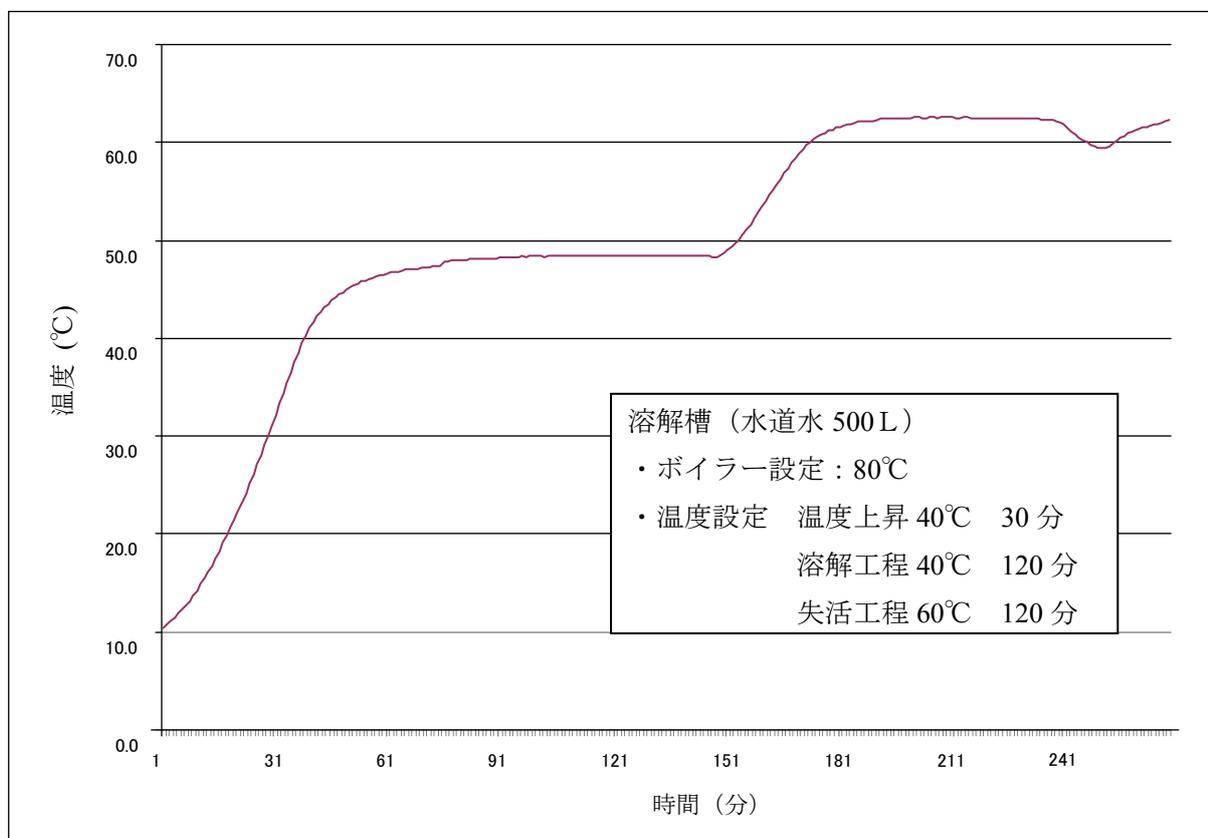


図 14 溶解槽温度測定結果

これら条件の設定・修正を経て少量レベルでの溶解試験とほぼ同様の溶解状況を自動化装置においても達成することができた (図 14)。

2-4 イカゴロの脱カドミウム装置の設計・試作

目標：スラリー状となったイカゴロのカドミウム含有量が4時間以内に2.0mg/kg以下となっていること、人件費以外のコストが5,000円/トン以下であること。

決定した諸条件を元に、自動で脱カドミウムを行う装置(1トンバッチ)の設計及び試作を以下のように行う。

2-4-1 装置の設計・試作

装置の構成は溶解自動化装置より供給されるイカゴロを受け入れる「脱カドミウム槽」、キレート樹脂とイカゴロを攪拌する「攪拌部」、キレート樹脂とイカゴロを分離する「樹脂分離メッシュ」、キレート樹脂を再生する「樹脂再生部」、キレート樹脂の再生時に発生する廃酸からカドミウムの分離、酸の中和をする「凝集沈殿槽」で構成し試作をした。

以下にユニット詳細を示す。

(1) 「脱カドミウム槽」

- ①イカゴロを昇温するための構造としてジャケット式とした。
- ②熱源は灯油式ボイラー。
- ③温度監視、制御のための熱電対を設置。
- ④pH監視、制御のためのpHセンサー設置。
- ⑤イカゴロの脱カドミウム促進、温度・pH値の均一化のために攪拌機を設置。
- ⑥攪拌機はインバーター制御により回転数を可変。
- ⑦キレート樹脂再生時の塩酸液面安定化のための液面センサーを設置。
- ⑧キレート樹脂全体に塩酸がかかるように塩酸供給口より霧状で供給。

(2) 「攪拌部」

- ①攪拌機はインバーター制御により回転数を可変。

(3) 「樹脂分離メッシュ」

- ①キレート樹脂平均粒径0.65mmを通過しないメッシュサイズ0.25mmを使用。
- ②樹脂メッシュはキレート樹脂荷重を受ける為にSUSパンチング板上に設置し、浮き上がりを抑えるために樹脂メッシュ上よりSUS押え板で挟み込み固定する構造とした。
- ③樹脂メッシュと上からのSUS押え板の間にはキレート樹脂が隙間から流れださないようにゴムパッキンにてシールをする。

(4) 「樹脂再生部」

- ①樹脂再生のための塩酸は薄めた状態でタンクに収納する。
- ②塩酸供給口はキレート樹脂全体に均一に浸透するように霧状で供給できる形状とした。
- ③塩酸はダイヤフラムポンプにより供給し「脱カドミウム槽」の液面センサーで液面を検出して常に同じ量が槽内に保たれている状態に供給量を制御する。

(5) 「凝集沈殿槽」

- ①キレート樹脂の再生時に発生する廃酸からカドミウムを分離するための凝集材と廃酸を中和する為の NaOH とを効率良く混合させる為に攪拌機を装備する。
- ②攪拌機はインバーターにより回転速度を可変とする。
- ③オーバーフロー防止のために液面センサーを装備。
- ④廃酸の pH 値制御は pH 監視用センサーを装備し、その信号より pH コントローラーにより適量をポンプにより自動供給をする。

本装置により溶解自動化装置から自動供給されたスラリー状のイカゴロから 4 時間以内にカドミウム含有量を 2.0mg/kg 以下にすることが可能となった。

2-4-2 イカゴロのカドミウム分離実証試験

試作した装置の性能上、イカゴロと樹脂が十分攪拌する回転速度をインバーター回路により調整し、最適な回転速度を決定する。

また、イカゴロは、樹脂を脱カドミウム槽下部に設置した 0.5mm 未満ステンレスメッシュにて濾され、イカゴロだけがカドミウム吸着槽から分離される。その際、分離に要する時間、樹脂の洗浄時間及び洗浄方法を検証する。

(1) 検証方法

イカゴロのカドミウム分離実証試験

カドミウム分離装置の仕様を環境創研㈱で作成し、㈱メデックが設計・製作を行った。当初計画した 1 トンの規模では、設置する施設のスペースが狭いため、0.5 トンバッチの規模とした。

㈱メデックが製作したカドミウム分離装置に、溶解槽にて溶解させセパレータにて眼球等を分離したイカゴロを投入後、カドミウム分離装置内に投入してあるキレート樹脂と一緒に攪拌させイカゴロのカドミウムを吸着させる。

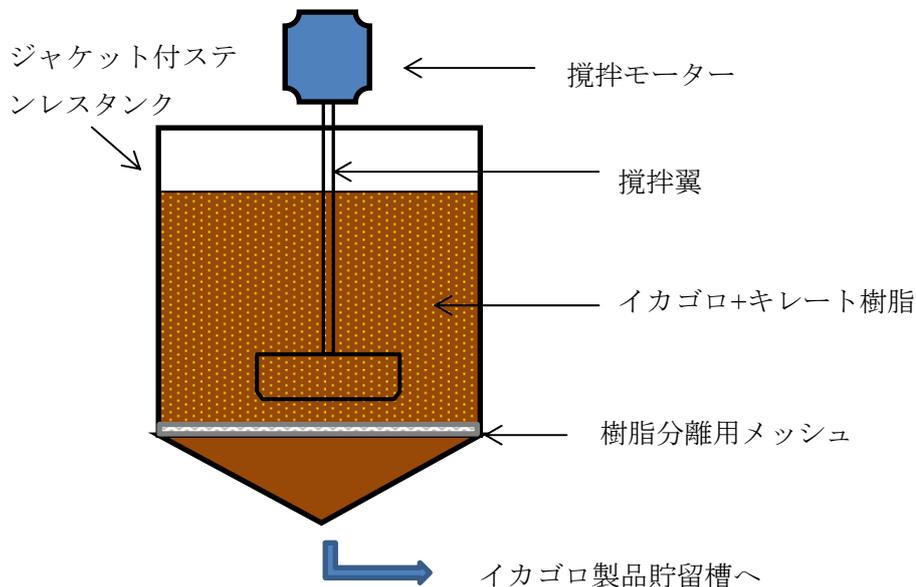


図 15 カドミウム吸着槽模式図

カドミウム吸着槽の模式図を図 15 に示す。タンク内のイカゴロはタンク外部から温水によって加温され、 $50^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ に保たれている。

イカゴロと樹脂が十分攪拌される回転速度を決定するために、一度水を張り攪拌させ樹脂が均一に攪拌される回転数をインバーターによってモーターの回転数を調整し最適な回転速度の目安を決めた。イカゴロは水よりも粘性があるため、経験により 1.5 倍程度回転数を多く設定し実証試験を行った。

使用したキレート樹脂は平均の粒径は 0.5mm 程度ではあるが、実際には 0.3mm 近くの樹脂も混在しているため、脱カドミウム槽下部に設置するステンレスメッシュは目開き 0.27mm のものを設置し、イカゴロを処理する前に一度、水と一緒に攪拌後下部から水を抜き 0.27mm の目開きのステンレスメッシュを通過する樹脂をろ布にて除外することにより、イカゴロへの樹脂の混入を防いだ。

イカゴロを脱カドミウム槽に投入し樹脂の攪拌状態を見ながら回転数を決定した。また、1 時間ごとにイカゴロのサンプルを採取し、カドミウムの低下状況を確認し分離に要する時間を決定する。また、カドミウムを吸着した樹脂は 3 回使用できるが、使用直後に水で洗浄した方が樹脂にイカゴロが浸透しにくいいため、脱カドミウム後樹脂を水で洗浄し、その洗浄時間を決定する。

洗浄方法は、タンクに水を満たしバッチで洗浄する方法と上部からシャワーを散布し洗浄する方法の 2 つについて検証を行った。

コストの検証は、原材料、電気、水道、灯油の使用量について調べコストを算出する。

キレート樹脂の使用回数の検証を以前行っており、200 回程度使用してもカドミウム吸着の性能はほぼ変わらなかったため、キレート樹脂の耐用年数を仮に 1 年とし、1 年後に樹脂をすべて交換する計算でコストを試算する。

(2) 検証結果

脱カドミウム槽でのカドミウム分離の実証試験は、装置の完成が 12 月初旬までかかったため、12 月中旬から 1 週間程度行い、0.5 トンのイカゴロの脱カドミウムを 2 回行い宇和島の㈱ダイニチに送付した。

溶解時の攪拌速度は、あらかじめ水の試験により決定した回転で行った。操作盤上では回転数は表示されず、インバーターにて変更させた周波数が表示されることから、表示された周波数によって回転数を決定した。回転周波数は 20~30Hz の間であり、粘度によっては変動するが、おおむね 25Hz 程度で良好な攪拌が得られたため、本装置での回転周波数を 25Hz とした。

イカゴロのカドミウムの低下は、最初の 1 時間で大きく低下し 3 時間経過頃から緩やかに減っていった。4 時間経過後のカドミウムは 0.37mg/kg と目標の 2.0mg/kg を大きく下回った。

2 回目の試験では、4 時間後で 0.7mg/kg となった。3 回目については時間がなかったことと、宇和島の給餌試験においてイカゴロの供給がこれ以上必要なかったことから、脱カドミウム槽のキレート樹脂の一部を取り出し、20kg のイカゴロで実験を行い 4 時間後にカドミウムが 1.4mg/kg となることを確認した。

また、脱カドミウムしたイカゴロは安定的にステンレスメッシュを通過させ貯留タンクに貯留後、輸送用の 20L ポリタンクに充填後、常温で宅配便にて愛媛県宇和島の㈱ダイニチまで送付し、養殖魚の餌として試験を行った。イカゴロが脱カドミウム槽から排出に要した時間は 30 分程度であったが、樹脂の洗浄に 1 時間程度要した。バッチでの樹脂の洗浄では脱カドミウム槽に水を溜めるための時間がかかったことから、水道から直接投入するのではなく水の貯留タンクを設け、短時間で水を満たす方法にした方が良いと考えられる。また、シャワー散布による樹脂の洗浄では、徐々に樹脂はきれいになって行った、洗浄に要した水の量はバッチ洗浄及びシャワー洗浄共に 250L であった。

樹脂の洗浄は、3 回に 1 回行うが、今回は、2 回目の処理まで間隔があくため、1 回目終了後も樹脂の洗浄を行った。

表 7 コストの計算

項 目	金 額
電気	¥310
水道	¥69
灯油	¥660
原材料	¥1,401
0.5トン当たり	¥2,440
1トン当たり	¥4,881

コストの計算を表 7 に示す。0.5 トンバッチにおける処理費は目標の 5,000 円/トンを下回った。クエン酸、キレート樹脂の占める割合が大きかったが、クエン酸は大量に購入すると安くなり、キレート樹脂についても 1 年での交換ではなく、1.5 年または 2 年使用可能であると予想されるため、実施規模である 20 トン/日での処理においても、5,000 円/トン以下で処理は行えると推察される。

2-4-3 樹脂の再生カドミウムを含む再生液の処理

塩酸の濃度及び添加量にて、樹脂の再生をバッチで行う。再生に使用する塩酸は NaOH で中和後、ポリ鉄などの凝集剤にて凝集処理後沈殿物を濾過分離し、セメント固化させる。

(1) 検証方法

試作したカドミウム分離装置と樹脂再生装置の完成が延びたことから、環境創研(株)日高事業所において樹脂の再生の実証を行った。

50L の樹脂が入っている 1,000L のステンレス槽に、水道水 250L 何回かに分けて入れ攪拌し樹脂を洗浄した。その後、再生用塩酸（30%塩酸を 50 倍に薄めたもの）を加え攪拌することを繰り返し樹脂の再生を行った。再生液（カドミウムを含む酸）は、NaOH により中和し沈殿させ、ろ布にて濾過後、ろ布に溜まったカドミウムを含む沈殿物をセメント固化した。

(2) 検証結果

再生した樹脂をイカゴロの脱カドミウムに使用し、樹脂の再生は十分行えることを確認した。また、カドミウムを含む廃酸は 500L のステンレスタンクにより処理した。排水中のカドミウムは 0.01ppm となった。濾過した沈殿物はセメント固化した。セメント固化した沈殿物の溶出試験を行い、溶出したカドミウムを分析したところ、0.01ppm 以下であった。

2-5 給餌・輸送試験

目標1：給餌魚種は、摂餌量10%、成長率5%以上向上すること。

目標2：モイストペレットの添加量は、真鯛を対象とし、愛媛大学で餌全体の10%、フィールドテストで餌全体の5%とすること。

目標3：脱カドミウムイカゴロは、常温で1週間程度保存可能なこと。

多様な魚種（真鯛、チョウザメ、ウナギ）に対して市販品の飼料と脱カドミウムイカゴロを配合したモイストペレットを与え、対象魚の摂餌量及び成長率を比較検証を以下のように行う。また、脱カドミウム処理されたイカゴロの輸送方法についても併せて検討する。

2-5-1 真鯛への給餌による比較検証

試作したカドミウム分離装置によって、処理されたイカゴロを環境創研(株)が愛媛大学に送り、愛媛大学側が真鯛（魚体重 30~50g）を対象とした確認を行う。また、環境創研(株)がイカゴロを湯浅商事(株)に送り、湯浅商事(株)と関係のある宇和島の養殖業者が管理飼育する真鯛（魚体重 1,600g）を対象にフィールドテストを行う。その際、魚粉を主体にした飼料を給餌した対象魚と、飼料に脱カドミウムイカゴロを配合した飼料を給餌した対象魚を比較し、摂餌量、消化状況、成長率及び肉質鮮度の検証（魚体重 30~50g のみ実施する）を行う。

(1) 検証方法

当初、試作したカドミウム分離装置で製造した脱カドミウムイカゴロを環境創研(株)が(株)ダイニチと愛媛大学に送り試験を行う予定であったが、装置が間に合わないため、環境創研(株)の施設にて脱カドミウムイカゴロを製造し送付した。(株)ダイニチは真鯛（魚体重 1,600g）を対象にフィールドテスト、愛媛大学側が真鯛（魚体重 30~50g）の水槽試験を行った。

また、油脂が多く冷凍で輸送できない事から、油脂を分離して冷凍後、運搬する試験についても行い、分離した油脂に付加価値をつけることが可能かどうかを検証するために油脂の分析を行った。

(2) 検証結果

環境創研(株)の飼料製造の許可を受けている小規模施設において試作し、合計1トンの脱カドミウムイカゴロを(株)湯浅商事に送り(株)ダイニチで試験を行った、愛媛大学は水槽試験のため10kgを送付した。いずれも問題はなく、愛媛大学の水槽試験では嗜好性が高い事が証明された。

カドミウムを分離したイカゴロを遠心分離し油脂を分離し冷凍後、宇和島まで輸送し造粒試験を行ったが、完全に油脂を分離できないため、冷凍保管時に油脂がにじみ出る。また、使用した遠心分離機は固形分を押し出すのに水を使うため、油脂を分離した残りの含水率が高くなる。そこで、油脂分離後の液体を真空濃縮する実験を行った（写真7~12）。



写真7 三相遠心分離機



写真8 油脂分離状況



写真9 真空濃縮器



写真10 濃縮器による濃縮状況



写真11 濃縮した脱脂イカゴロ



写真12 冷凍状況

油脂の脂肪酸組成の分析は、日本食品分析センターに依頼し分析を行った（表8）。

表 8 イカ油脂肪酸組成



第 12095192001-01 号
2012年(平成24年)10月16日

分析試験成績書

依頼者 環境創研株式会社

検体名 イカ油



2012年(平成24年)10月04日 当センターに提出された上記検体について分析試験した結果は次のとおりです。

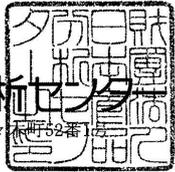
分析試験結果

分析試験項目	結果	定量下限	注	方法
カンキサンチン	検出せず	0.05 mg/100g		高速液体クロマトグラフ法
酸価	8.87	-----	1	-----
過酸化値	1.1 meq/kg	-----		酢酸-クロロホルム法
酵素価	185	-----		WIJS法
脂肪酸組成	-----	-----		ガスクロマトグラフ法
14:0	3.6 %	-----		-----
15:0	0.3 %	-----		-----
16:0	16.9 %	-----		-----
16:1	4.1 %	-----		-----
16:2	0.3 %	-----		-----
16:4	0.2 %	-----		-----
17:0	1.1 %	-----		-----
17:1	0.2 %	-----		-----
18:0	3.4 %	-----		-----
18:1	17.4 %	-----		-----
18:2n-6	0.7 %	-----		-----
18:3n-3	0.4 %	-----		-----
18:4n-3	0.6 %	-----		-----
20:0	0.2 %	-----		-----
20:1	5.8 %	-----		-----
20:2n-6	0.5 %	-----		-----
20:3n-6	0.2 %	-----		-----
20:3n-3	0.2 %	-----		-----
20:4n-6	1.8 %	-----		-----
20:4n-3	0.7 %	-----		-----
20:5n-3	13.4 %	-----		-----
21:5n-3	0.4 %	-----		-----
22:1	2.8 %	-----		-----
22:5n-6	0.5 %	-----		-----
22:5n-3	1.3 %	-----		-----
22:6n-3	18.9 %	-----		-----
24:1	0.6 %	-----		-----
未同定	3.5 %	-----		-----

注1. 基準油脂分析試験法(日本油化学会編)。

以 上

表 9 イカ油アスタキサンチン分析結果

	<h2>分析試験成績書</h2>	第 12095192001-02 号 2012年(平成24年)10月16日
依頼者 環境創研株式会社		
検体名 イカ油		
		 財団法人 日本食品分析センター 東京都渋谷区元代々木5-2-1
2012年(平成24年)10月04日 当センターに提出された上記検体について分析試験した結果は次のとおりです。		
分析試験結果		
分析試験項目	結果	定量下限
アスタキサンチン	1.78 mg/100g	-----
注1. エステル型アスタキサンチンを遊離型に酵素分解後、測定した。		注 方法
		1 高速液体クロマトグラフ法
以上		

酸価値は 10 以下であることから精製の必要がない。また、油脂中の EPA(20:5N-3)は 13.4%、DHA(22:6n-3)は 18.9%と合計 32.3%と非常に多いことが分かり、養殖魚用の魚油としても価値があり、油脂だけを販売する事も検討することとした。

また、アスタキサンチンの分析も行った(表 9)。当社での分析では、12mg/100g 以上であったが、食品分析センターで分析値は 1.78mg/100g であった。これは、当社ではエステル型アスタキサンチンとして定量しているが、日本食品分析センターでは、酵素分解後遊離したアスタキサンチンとして分析している事に起因している。健康食品の場合は、エステル型として表記している場合が多い。

(3) フィールドテスト

- ・ 4月～7月にかけてイカゴロを 5%添加した餌の試験
- ・ 10月～12月にかけてイカゴロ 10%添加した試験
- ・ 5%添加の試験では遊離アミノ酸の分析についても行った

①リキッド状イカゴロ添加(5%)モイストペレット(MP)の給餌試験実施結果

愛媛県宇和島市の(株)ダイニチに依頼し試験漁場にて試験を行った(図 16)。真鯛用 MP へイカゴロエキスを 5%添加したものを試験 MP とし、対照区 MP として従来の MP にオイルを添加し、一般成分がほぼ同等となる MP を用意した。表 10 に給餌飼料の配合割合、表 11 に使用飼料の分析結果を示す。

試験開始時と試験終了(出荷)の魚体サイズから成長成績を確認し、食味試験により肉質への影響がないかを確認した。



試験魚：真鯛(魚体重約 1,600 g)
 試験委託先：遊子地区 養殖業者
 試験海域：遊子地区 魚泊沖
 試験開始日：平成 24 年 4 月 4 日
 試験終了日：平成 24 年 7 月 19 日
 試験尾数： 試験区 約 8,600 尾
 対照区 約 6,720 尾

図 16 MP 飼料製造場所と試験魚所の位置図

表 10 試験区、対象区給餌飼料の配合割合

	試験区	対照区
マダイマッシュ	40.0%	40.0%
MS18	3.0%	3.0%
魚粉	7.0%	7.0%
カタクチイワシ	27.0%	35.0%
アミエビ	14.0%	10.0%
オイル	2.0%	3.0%
イカゴロ	5.0%	0.0%
水	2.0%	2.0%
合計	100.0%	100.0%

使用 MP： 試験区 MP-T (W-UP イカゴロ)

対照区 MP-C (W-UP)

表 11 使用飼料の分析結果

	試験区 MP	対照区 MP	イカゴロ
粗蛋白	40.3%	40.9%	15.5%
粗脂肪	6.7%	6.5%	6.4%
水分	28.8%	29.0%	70.6%

表 12 に示す通り、成長面において試験区、対照区で優位な差は見られなかった。魚体重において試験区と比較して対照区の方が大きかったのは放養尾数の差が大きいと考えられた。当初 16,000 尾を二つに分養した時に均等に 8,000 尾ずつできていない結果となった。生産者からは試験区の生簀の方が嗜好性が良いと言われていたが、出荷時の放養尾数の差が要因になると考えられる。

表 12 試験魚の成長成績結果

	開始時		終了時	
飼育期間	H24.4.4		H24.7.19	
飼育日数(日)	106			
水温(°C)	試験区	対照区	試験区	対照区
総尾数(尾)	8,650	6,720	8,650	6,720
総重量(kg)	13840.0	10752.0	16262.0	12969.6
平均体重(g)	1600.0	1600.0	1880.0	1930.0
平均尾叉長(cm)	41.2	41.1		
肥満度	22.9	23.0		
増肉量(kg)			2422.0	2217.6
MP給餌量(kg)			15975.0	13725.0
給餌回数(回)			56	56
増肉係数			6.60	6.19
飼料効率(%)			15.16	16.16
日間摂餌率(%/日)			1.00	1.09
摂餌率(%/給餌回数)			1.90	2.07
日間成長率(%/日)			0.15	0.18
餌料名			MP-T	MP-C

食味試験は、㈱ダイニチの社員数名にて行ったが試験区と対照区で味の優劣はつけることはできないくらい差は見られず、出荷の際の魚の状態を比較してみても変わらなかった。表 13 に身の水分、粗脂肪、粗蛋白の結果を示す。また、写真 11～14 に各試験区のサンプリング写真を示す。

表 13 身の分析

身の分析			
	水分	粗脂肪	粗蛋白
試験区開始時	70.6%	6.4%	21.4%
試験区終了時	71.8%	6.6%	18.9%
対照区開始時	74.6%	5.7%	17.3%
対照区終了時	71.1%	7.7%	18.9%



写真 11 .試験区真鯛 5 月サンプリング



写真 12 .試験区真鯛 7 月サンプリング



写真 13 .試験区真鯛 5 月サンプリング



写真 14 .試験区真鯛 7 月サンプリング

②真鯛の遊離アミノ酸の分析結果

イカゴロを与えた真鯛と与えていない真鯛の遊離アミノ酸、核酸関連成分の比較を行った。分析用サンプルの採取方法は次のように行った。通常区と試験区の魚（6尾程度）の生き〆処理を行った。各個体から背肉の一部（厚さ 1cm 程度の刺身一切れ薄かったら二切れ）を通常区と試験区で同じような部位から採取した。個体別に小さなビニール袋に密封後、凍結（ドライアイスのブロックで挟み込んで凍結）し、冷凍状態で発送（輸送中に凍結が緩まないように保冷剤を入れる）し、北海道立工業技術センターにて分析した。分析結果を表 14 に示す

表 14 真鯛の遊離アミノ酸、核酸関連成分分析結果

	サンプル名	試験区							対照区						
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	平均	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	平均
遊離 アミノ酸 (mg/100g)	アラニン	15.80	11.02	13.75	14.08	14.34	13.96	13.82	10.69	12.06	13.28	14.23	9.50	13.39	12.19
	アルギニン	16.61	17.08	17.32	16.23	17.98	19.26	17.42	24.32	25.68	31.63	38.34	20.58	54.91	32.58
	アスパラギン酸	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.82	0.30	0.00	1.36	2.16	1.81	1.48	1.24	1.34
	システイン	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	グルタミン酸	7.45	9.57	5.72	5.90	6.43	8.69	7.29	9.01	9.55	10.40	11.07	10.98	11.79	10.47
	グリシン	9.85	10.97	13.05	9.66	11.80	10.16	10.91	10.48	14.83	18.37	17.39	8.87	12.31	13.71
	ヒスチジン	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.47	13.38	15.42	15.58	21.27	20.08	18.53
	イソロイシン	3.04	2.65	3.11	3.47	3.90	4.25	3.40	0.00	0.84	0.65	0.77	0.74	1.65	0.78
	ロイシン	4.72	4.10	4.66	5.21	5.90	6.32	5.15	1.39	1.47	1.30	1.94	1.39	3.71	1.87
	リジン	8.28	19.48	9.36	5.86	10.74	10.36	10.68	76.44	63.16	43.86	55.19	70.77	88.30	66.29
	メチオニン	1.78	1.27	1.36	1.76	2.08	1.60	1.64	1.10	1.11	1.71	1.53	0.86	1.09	1.23
	フェニルアラニン	0.98	1.06	0.76	1.17	1.23	1.42	1.10	0.00	0.61	0.95	0.75	0.54	0.90	0.63
	プロリン	5.49	3.93	4.87	4.62	4.71	6.80	5.07	3.24	2.88	4.18	10.76	1.23	14.89	6.20
	セリン	3.13	2.69	3.12	2.98	3.23	3.61	3.13	2.06	3.12	3.01	4.91	2.33	2.59	3.00
	タウリン	340.87	358.46	329.02	341.00	319.36	360.98	341.62	313.57	333.76	358.36	373.81	339.75	392.61	351.98
	スレオニン	3.73	2.67	3.40	3.65	3.77	4.22	3.57	8.02	6.51	7.74	9.51	5.47	15.19	8.74
チロシン	2.43	2.32	2.07	2.35	2.70	2.72	2.43	1.33	1.68	2.08	2.07	1.19	2.64	1.83	

	パリン	4.54	4.00	4.55	4.98	5.67	5.91	4.94	1.72	1.74	1.79	2.14	1.63	3.84	2.14	
	合計	428.68	451.26	416.11	422.91	413.82	462.09	432.48	488.83	493.72	516.89	561.81	498.61	641.14	533.50	
核酸 関連成分 (μ mol/g)	ATP	8.61	8.68	8.37	7.93	9.04	9.40	8.67	7.88	6.06	8.29	2.74	9.43	7.23	6.94	
	ADP	1.55	1.49	1.69	1.72	1.66	1.65	1.63	1.96	2.00	1.78	1.89	1.87	1.93	1.91	
	AMP	0.09	0.06	0.09	0.09	0.07	0.06	0.08	0.10	0.11	0.10	0.16	0.08	0.09	0.11	
	IMP	0.95	0.26	2.24	1.42	1.17	0.47	1.08	2.11	5.19	1.82	7.96	1.26	2.57	3.48	
	HxR	0.06	0.02	0.09	0.05	0.06	0.06	0.06	0.02	0.09	0.02	0.09	0.02	0.00	0.04	
	Hx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	合計	11.26	10.51	12.48	11.21	12.00	11.66	11.52	12.07	13.46	12.00	12.84	12.67	11.83	12.48	
K 値(%)		0.53	0.20	0.73	0.42	0.47	0.55	0.48	0.20	0.69	0.16	0.71	0.13	0.00	0.32	

遊離アミノ酸は、イカゴロを給餌した試験区(C)は、アルギニン、ヒスチジン、リジンが少なく、イソロイシン、ロイシン、バリンが多い結果であり、この遊離アミノ酸の差異は、餌料中の全アミノ酸組成を反映していると考えられる。しかし、上記の中でヒスチジンの変化は顕著で、試験区では認められなかったのに対し、対照区では18.5mg/100g含まれています。また、リジンについても同様に、対照区で非常に高い値となった。

また、核酸関連成分については、いずれの試料（T-4以外）もATPはしっかり残っているため、高鮮度の肉であったと判断できる。

今回の結果からMP原料である生餌を脱カド液体状イカゴロと5%代替しても問題ないことが判明した。今後の課題として、最大配合率、イカゴロ原料の形状（冷凍、液体等）、それによる副次的な効果（成長、免疫力、旨み等）を検証する必要がある。

③リキッド状イカゴロ添加(10%)MPの給餌試験実施結果

愛媛県宇和島市の㈱ダイニチに依頼し、以下の条件で試験を行った。

試験魚：真鯛(800g)

漁場：北灘地区湾内漁場

総試験尾数：20,000尾 小割数：2小割 各区10,000尾(試験区の方が尾数が多い可能性有)

試験開始日：2012年10月24日 試験予定期間：3ヶ月

使用MP：試験区 セミシングルMP(イカゴロ入)(10mm)

対照区 MP95YY(MPコード11200)(10mm)

表 15 飼料内容

配合割合	試験MP	対照MP	成分	試験MP	対照MP
SSMSV47	52.9%	0.0%	水分	43.0%	44.5%
タイマッシュ	0.0%	44.0%	粗脂肪	2.9%	2.5%
魚粉	0.0%	5.0%	粗蛋白質	30.9%	29.0%
カタクチイリン	0.0%	35.0%	カロリー	1981.1	1812.5
アミエビ [®]	37.0%	10.0%	CP比	64.1	62.5
イカゴロ	10.0%	0.0%			
DMコールト [®]	0.1%	0.1%			
水	0%	2.9%			

表 15 の飼料を試験区、対照区に給餌してもらい、魚の成長、嗜好性、身質などへの効果を定期的な魚体測定及びサンプリングにより確認した。

表 16: 試験期間中の飼育成績

	試験区		対照区	
	10月24日	12月11日	10月24日	12月11日
飼育期間 飼育日数(日)	48日			
総尾数(尾)	10,000	9,967	10,000	9,992
弊死尾数(尾)		33		8
歩留まり(%)		99.67		99.92
平均体重(g)	938.2	1060.0	1018.0	1217.0
平均尾叉長(cm)	33.5	35.1	34.4	37.0
肥満度	25.0	24.5	25.0	24.0
増肉係数		5.90		3.30
飼料効率(%)		17.02		30.30
給餌量(kg)		6952.0		6534.8
給餌回数(回)		34		34
日間摂餌率(%/日)		1.45		1.22
摂餌率(%/給餌回数)		2.05		1.72
日間成長率(%/日)		0.25		0.37
日間増体長(mm)		0.33		0.54
使用MP	イカゴロMP 10mm		MP95YY 10mm	

表 17: 12月11日にサンプリングした魚の魚体データ

	魚体重	尾叉長	肥満度	脾比重	肝比重	腸比重	内臓比重
試験区	930 g	34.6 cm	22.5	0.11%	1.67%	1.47%	13.5%
対照区	1260 g	38.5 cm	22.1	0.10%	1.41%	1.42%	10.3%

表 18: サンプリングした魚体可食部の成分分析結果

	水分	粗脂肪	粗蛋白
試験区	72.2%	5.1%	20.8%
対照区	72.3%	5.0%	21.5%

試験飼料がセミシングル MP ということで、アミエビが主となる組成の MP であるため製造段階での造粒性、給餌時の保形性などに問題がでるかと思われたが、MP としての物性には問題はなかった（写真 15、16）。試験 MP 自体は給餌時に濁りなどもなく対照区 MP に比べても嗜好性が高く、魚の反応のしかたにも違いがあった。



写真 15 試験区真鯛



写真 16 対照区真鯛

成長に関しては表 16 の通りであり、対照区と較べると増肉係数、歩留まり、体長の伸びなど悪い結果がでた。増肉係数に関しては嗜好性が高いため給餌量が増加してしまったということが原因の一つであると思われるが、開始時と 2 回目の測定での 2 点での結果であるため、結果としては参考にはならないと考える。

食味試験を行うため 2 回目の測定時に各区 1 尾ずつサンプリングを行い、各内臓比重を測定した結果は表 17、写真 17、18 の通りある。対照区に較べて、試験区のほうが魚体自体は小振りであったが内臓中の脂肪量が多く感じた。また、肝臓など各臓器の異常はみられなかった。



写真 17 真鯛の内臓

上：試験区 下：対照区



写真 18 真鯛の切り身

左：試験区 右：対照区

食味試験を(株)ダイニチの社員約 10 名で行った。

身の色に違いがみられた。対照区は普通の真鯛の飴色に見え、試験区は少し暗い色であった。味の評価に関しては比較すると五分五分ぐらいであり、表 18 の可食部の分析結果からも数字ではほぼ似たようなものであるため、試験区、対照区に差は見られなかった。

身質の確認として前回遊子地区で試験を行った際に、試験後出荷した魚の身に白い斑点があったことがあり、脂が固形化したものではないかとの見解があったが、今回も確認のため可食部を冷凍してが、同じような症状はみられなかった。

試験を開始して 50 日の結果のため、成長面に関して信頼性のある結果ではないが、給餌量の割には長さに伸びが見られていないなど対照区に較べ悪い結果がでており、生餌の栄養分に頼れない以上マッシュの改良やビタミン、ミネラル類の強化が必要と推察される。

身質などについてはイカゴロ自体が酸っぱい匂いがするため、身への影響があるのではないかと疑われたが食味試験を行い、身質、味に影響が見られていないため、現時点では問題無いと考えられる。

しかし、試験を開始して一週間ほどで試験区から斃死が出始めた。試験先の保有する生簀の中でも斃死が続いているのが試験区の小割のみという報告を受けており、対照区、それ以外の小割と較べても斃死率が高くなっており、原因は不明である。泳いでいる魚の状態は悪くなく、体表の状態や色や内臓にも妙な点が見つかっていないが、測定時に魚を船上に上げてみると、対照区と較べ試験区のほうが腹部部分の張りが大きく、出荷魚のような腹部の形をしており、腹腔内が脂肪で詰まっている様子であった。

嗜好性が高く、脂分の高いイカゴロが配合された試験 MP が影響もあると考えられ、そうであればセミシングルである試験 MP の栄養バランス面の問題が考えられる。そのため、試験をこのまま継続すると試験先の魚に悪影響を及ぼす可能性があり、生産者も不安に感じていることから 10% 添加試験の中止とした。今後、サンプリングを行い脂肪酸組成とアミノ酸組成の分析を行う予定である。

イカゴロは今回の結果から魚を膨らます、嗜好性のアップという点から、低水温期の出荷魚への使用など効果が期待できる

(4) 水槽試験

①実施内容（試験 1）

脱カドミウムイカゴロを 0.5%、5%、10%添加したモイストペレットを作製し、真鯛を用いて飼育実験を行った。対照区として、魚粉のみで作製したモイストペレットを用いた。飼育試験開始前に測定した真鯛は、尾叉長 8.2 ± 0.05 cm、体重 12 ± 0.2 g であり、当初の予定よりも小さいものを使用した。60L の掛け流し式水槽に、それぞれの実験群で 2 水槽で 7 尾ずつ収容し、馴致のため 1 週間魚粉のみで作製したモイストペレットを与えた。その後、毎日朝夕（午前 10 時、午後 4 時）の 2 回、飽食になるまでそれぞれの飼料をあたえ、1 日に与えた飼料の重量を測定した。試験開始から、2 週間目、4 週間目に尾叉長、体重の測定を行い、成長率及び摂餌量を検証した。

②実施結果（試験 1）

実際に給餌を行うと、イカゴロを添加した群では、真鯛の摂餌行動が非常に活発であり、摂餌誘因性が非常に向上していた。特に、給餌を開始して 3-4 日目以降は 1 日当たりの給仕量が、対照区に比べて 3 倍以上を示す日も存在した。期間内の個体当たり給仕量を以下の表 19 に示す。

表 19 試験 1 における期間内の個体当たり給仕量

	対照区	0.5%添加区	5%添加区	10%添加区
2 週間目までの給仕量 (g)	7.1	10.2	11.1	13.4
4 週間目までの給仕量 (g)	29.0	45.6	44.4	49.0
増肉係数	3.05	2.33	1.90	1.73

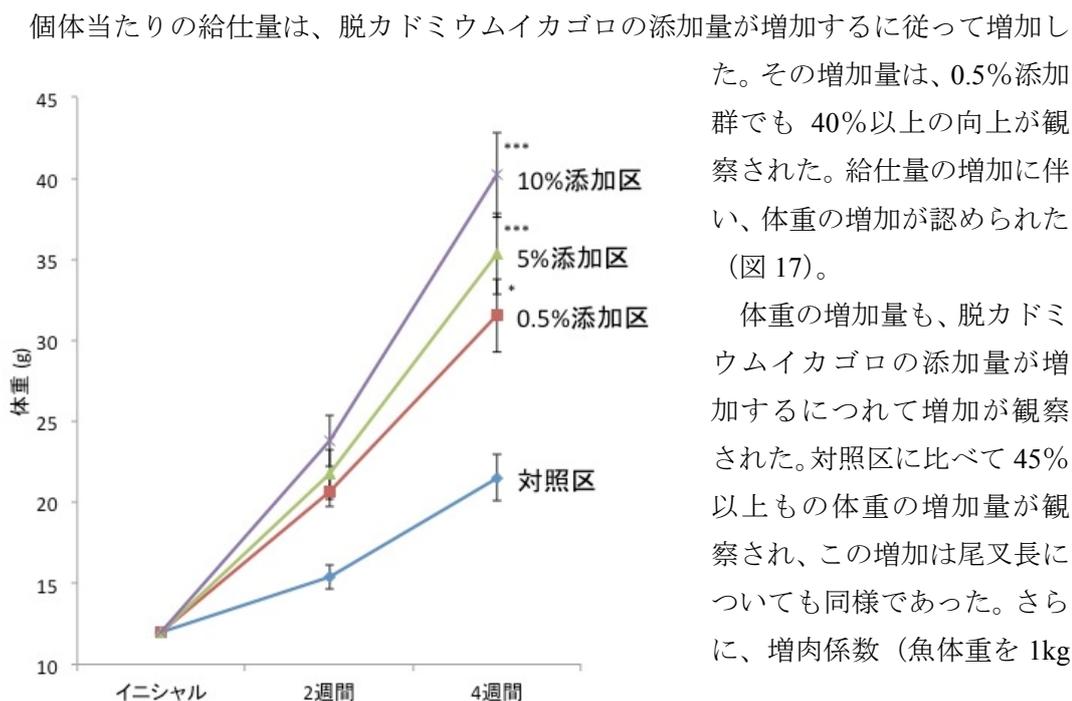


図 17 体重の変化(試験 1) 統計的有意差は Bonferroni 法による (***: $p < 0.001$ 、*: $p < 0.05$)

増加させるために必要な給仕量)も、脱カドミウムイカゴロ添加量が増加することで低下した。これは、脱カドミウムイカゴロ添加による成長促進作用が、摂餌誘因性が高まり、摂餌量が増加しただけでは無く、飼料転換効率も向上しており、効率的な成長につながったことを示している。この飼料転換効率の向上は、イカゴロを添加する事により消化性が向上したものと考えられる。

真鯛の商品価値にイカゴロ与える影響を調べるために、可食部(筋肉部)の肉質を調査するために鮮度の指標であるKi値を測定した(図18)。餌に含まれる成分によって、鮮度の指標であるKi値が変化し(Ki値が高いと鮮度が悪く、おおむね20を超えると生食が不可能となる)、実際の商品としての価値が低下してしまう可能性があ

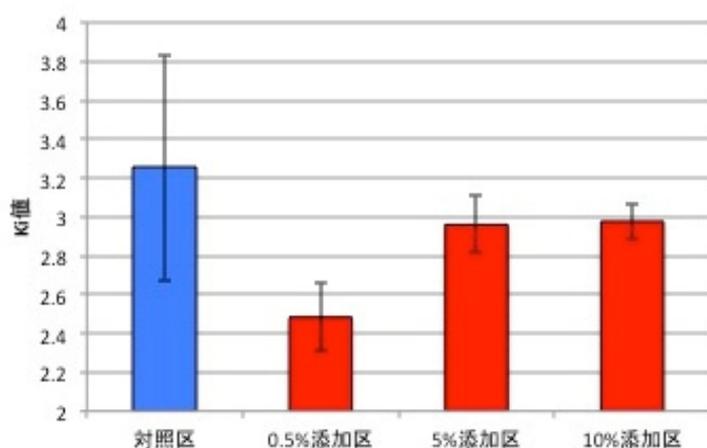


図18 各試験区の肉質鮮度(Ki値)の測定

たが、イカゴロを添加する事によって鮮度が悪くなることは観察されなかった。

試験1において、脱カドミウムイカゴロの添加量は**0.5%**で充分であり、目標である**摂餌量10%以上の向上及び成長率5%以上の向上**を上回り、**摂餌量50%の向上及び成長率45%の向上**を達成した。

③実施内容(試験2)

試験1で明らかになった、脱カドミウムイカゴロの摂餌誘因、成長促進の各効果を詳細に検討するため試験を行った。低い添加量でも効果が見られるかの検証するため、脱カドミウムイカゴロ0.1%添加飼料を作製し、同様に試験を行った。さらに、イカゴロに脱カドミウム処理を行う事で、イカゴロが持っている機能を大きく増幅しているかを検証するため、脱カドミウム処理を行っていないイカゴロ(脱カドミウム前)と脱カドミウム処理を行ったイカゴロ(脱カドミウム後)の効果の比較も行った。試験の方法は、試験1と同様に行い、試験に用いた真鯛は、尾叉長 12 ± 0.28 cm、体重 43 ± 2.9 gであった。試験1よりも、2週間試験を延長し、6週間飼育試験を行い、成長率及び摂餌量を検証した。

④実施結果(試験2)

期間内の個体当たり給仕量を以下の表20に示す。

表 20 試験 2 における期間内の個体当たり給仕量

	対照区	脱 Cd 前 0.1%区	脱 Cd 後 0.1%区	脱 Cd 前 0.5%区	脱 Cd 後 0.5%区
2 週間目までの給仕量(g)	7.73	8.11	10.56	9.97	9.69
4 週間目までの給仕量(g)	14.33	20.29	24.71	18.51	18.78
6 週間目までの給仕量(g)	25.01	34.49	41.77	29.36	31.38
増肉係数	5.97	3.15	2.66	2.73	3.33

個体当たりの給仕量は、イカゴロを添加する事で、対照区よりも大きく増加した。しかし、試験 2 は試験開始が 2012 年 11 月と、冬期の低水温期に試験を開始したため、給仕量が試験 1 に比べて低調であった。試験 1 は、9 月に実施したため、水温は 22℃ 以上であったが、試験 2 は試験開始時で 20℃を下回り、6 週間の飼育試験終了時には 17℃であった。低水温であったために、馴致期間が不足してしまい、試験開始時には全ての試験区で摂餌がほとんど見られ無かった。しかし、このような低水温期であ

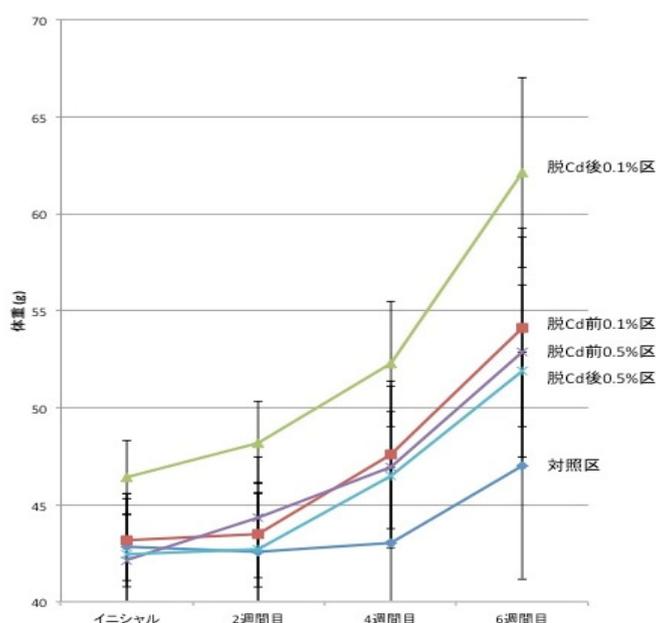


図 19 体重の変化(試験 2)

性が大きく高まる事を示している。体重の増加量も、イカゴロを添加することで増加した。特に、試験開始から 4 週間目まで対照区はほとんど成長していないが、イカゴロ添加群では成長している。これは、低水温による成長遅滞が、イカゴロを添加することで回避されたことを示している(図 19)。試験 1 とは異なり、個体間の差が大きく統計的な有意差は得られていないが、これも低水温期の成長のばらつきが影響していると考えられる。摂餌誘因性の非常に高いイカゴロを飼料に添加することで、このようなばらつきが回避できるようになるものと期待される。

体重の増加も、イカゴロの脱カドミウム処理の有無との明瞭な相関は見られなかったが、試験 1 と同様に増肉係数の低下がイカゴロを添加する事により見られた。さら

ても、イカゴロ添加区では、給仕量が増加していることから、イカゴロに含まれる摂餌誘因効果は非常に高いものと言える。最終的な試験終了時である 6 週間後では、脱カドミウム処理後イカゴロ 0.1%添加区で 60%以上の給仕量の向上が見られ、最も低かった脱カドミウム処理前イカゴロ 0.5%添加区でも、17%の給仕量の増加が見られた。0.1%添加区が 0.5%添加区よりも給仕量が増加したが、これは低濃度の方が効果があるというよりも、イカゴロは 0.1%添加するだけで摂餌誘因

に、0.1%添加でも、目標である摂餌量10%以上の向上及び成長率5%以上の向上を上回る、摂餌量35%の向上及び成長率100%の向上を達成した。

今後は、今回得られた摂餌誘因、成長促進効果に加えて、実際の商品として問題となるカドミウムの体内蓄積量を測定し、脱カドミウム処理によりイカゴロが養殖魚のための安全、有用な飼料原料となり得ることを証明していく。さらに、養殖魚としての価値を高めるために肉質鮮度の計測を行い、安心・安全だけでなく、商品価値の高い養殖魚の養殖に有用な飼料原料であるかどうかなどを検証していく。

2-5-2 チョウザメ及びウナギへの給餌による比較検証

試作したカドミウム分離装置によって、処理されたイカゴロを環境創研(株)が北海道大学に供給し、同大学が管理飼育するチョウザメ及びウナギを対象とした給餌試験を行う。その際、比較する市販飼料として、チョウザメに対しては、ニジマス用飼料を、ウナギに対しては、ウナギ用の飼料を給餌した対象魚と、脱カドミウムイカゴロを配合した飼料を給餌した対象魚を8週間に渡り比較し、飼育成績を検証する。

(1) 検証方法

環境創研(株)にて脱カドミウムイカゴロ 150kg を作成し、北海道大学大学院水産科学研究院に送付し給餌試験を行った。

(2) 検証結果

チョウザメ給餌実験には、ベステル及びカラマムを用いた。ベステルはオオチョウザメ雌とコチョウザメ雄との交雑種である。カラマムは北海道沿岸で捕獲されたカラム雌(ダウリアチョウザメとアムールチョウザメとの天然交雑種)とアムールチョウザメ雄の交雑種である。ベステルは、5m 円形水槽で飼育し、コントロール群(66匹、体重 1.43 ± 0.09 kg)とイカゴロ群(63匹、体重 1.52 ± 0.09 kg)の2群を設けた。一方、カラマムは、3m 円形水槽で飼育し、コントロール群(51匹、体重 0.81 ± 0.02 kg)とイカゴロ群(51匹、体重 0.83 ± 0.02 kg)の2群を設けた。飼料の作製は、コントロール群では、マス稚魚スーパー1号(以下、1号餌)78%、水を22%混合し、イカゴロ群では、1号餌70%、イカゴロ30%を混合したモイストペレットを造粒機を用いて作製し、使用時まで冷凍庫にて保存した。給餌は、月曜日と金曜日は、全体重の2%を、火曜日から木曜日は1%を給餌した。飼育は、湧水を用いた掛け流しで行なった。飼育期間中の水温は、ベステルは約 17°C 、カラマムは約 13°C だった。飼育期間終了後、増重率と成長率を算出した。

ウナギ給餌実験には、2012年4月に購入したシラスウナギを用いた。試験区として、ウナギ用飼料東海を50%、水を50%混合した練り餌を与えるコントロール群(50匹、

体重 1.05 ± 0.09 g) と東海を 40%、イカゴロを 60% 混合した練り餌を与えるイカゴロ群 (50 匹、体重 1.05 ± 0.09 g) を設けた。餌は、1 日 2 回、全体重の 5% を与え、成長に合わせて飽食給餌になるようにして与えた。飼育は、60 cm 水槽 (水量 60L) で行ない 1 日 1 回換水を行ない、飼育期間中の水温は、約 27°C だった。給餌は、6 月から開始し、開始 2 ヶ月後に体重を測定した。飼育終了後、増重率と成長率を算出した。さらに、2 ヶ月後の体重測定後、再度コントロール群 (45 匹、体重 5.72 ± 0.61 g) とイカゴロ群 (45 匹、体重 5.72 ± 0.61 g) に分け、250L の円形水槽で 2 回目の給餌試験を 2 ヶ月間行なった。また、1 回目の試験では、イカゴロ餌が水中で散逸するのが早かったため、イカゴロの含量を 60% から 55% に変えてイカゴロ餌を作製した。飼育期間終了後、前回同様、増重率と成長率を算出した。

$$\text{増重率 (\%)} = 100 \times (L2 - L1) / L1$$

$$\text{成長率 (\%)} = 100 \times (\ln L2 - \ln L1) / T$$

L1: 飼育期間開始時の平均体重 L2: 飼育期間終了時の平均体重 T: 日数

コントロール餌とイカゴロ餌のチョウザメへの給餌試験を 60 日間行なった結果、ベステルにおいては、コントロール群は、平均体重 1.85 ± 0.09 kg、増重率 29.4%、成長率 0.44%、生残率 95.5% だった。一方、イカゴロ群は、平均体重 1.89 ± 0.09 kg、増重率 24.3%、成長率 0.36%、生残率 95.5% であり、群間に有意な差はみられなかった (図 20)。また、カラマムにおいては、コントロール群は、平均体重 1.09 ± 0.03 kg、増重率 34.6%、成長率 0.5%、生残率 100% だった。一方、イカゴロ群は、平均体重 1.17 ± 0.03 kg、増重率 41%、成長率 0.6%、生残率 100% であり、イカゴロ群がコントロール群に比べて体重増加がみられたが、群間に有意な差はみられなかった (図 21)。以上のように、両チョウザメ種ともコントロール餌とイカゴロ餌給餌群で体重増加に有意差はなかったが、イカゴロを 3 割含む餌でも通常餌と同等あるいはそれ以上の成長が期待できることが確認された。

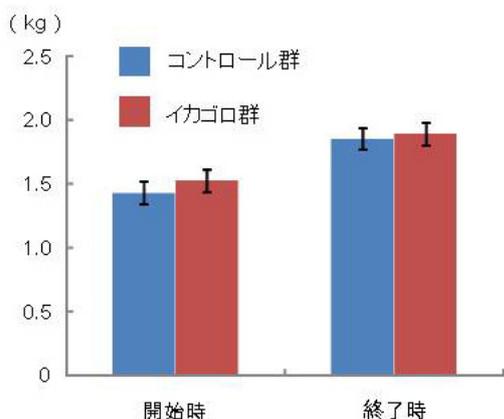


図 20 2 か月間給餌後の体重変化(ベステル)

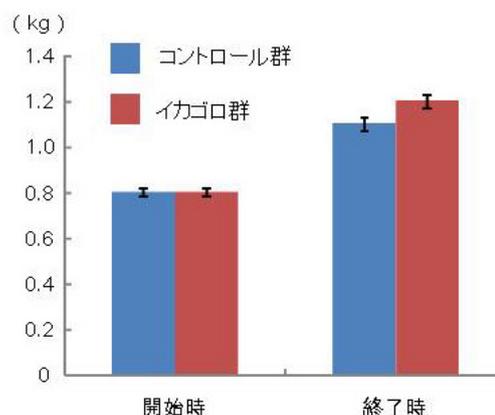


図 21 2 か月間給餌後の体重変化(カラマム)

7月からイカゴロ餌のウナギへの給餌試験を開始し、63日後に体重測定を行なった結果、コントロール群は平均体重 8.34 ± 1.19 g、増重率 694.3%、成長率 3.5%、生残率は 80%だった。一方、イカゴロ群は、平均体重 4.64 ± 0.85 g、増重率 372.4%、成長率 2.6%、生残率 86%であり、コントロール群がイカゴロ群に比べて有意な体重増加がみられた ($p < 0.05$) (図 22)。しかし、これはイカゴロ餌が水中で碎け散逸するのが早かったと考えられたため、イカゴロ含量 60%から 55%に変えて2回目の60日間給餌試験を行なった。その結果、コントロール群の平均体重 8.12 ± 0.91 g、増重率 42%、成長率 0.6%、生残率 100%で、イカゴロ群は平均体重 10.54 ± 2.25 g、増重率 83.6%、成長率 1.0%、生残率 82.2%となった。コントロール群に比べイカゴロ群で体重増加がみられたが、統計的な有意な差はみられなかった (図 23)。

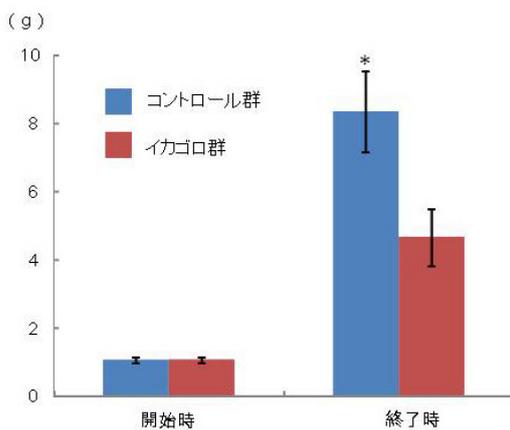


図 22 2 か月間給餌後の体重変化(ウナギ:1 回目)
*は群間に有意差があることを示す($p < 0.05$)

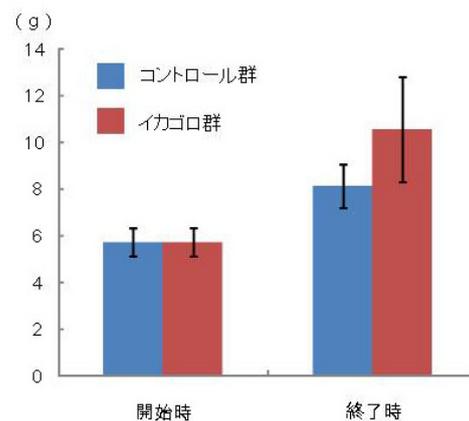


図 23 2 か月間給餌後の体重変化(ウナギ:2 回目)

2-5-3 輸送法の検討

イカゴロには油脂が多く、 -15°C 程度から溶解が始まる性質をもっており、冷凍での輸送及び保管には向かない。また、常温での輸送にあつては、腐敗する恐れがあり、輸送法には更なる検討が必要となる。

そのため、イカゴロ溶解時における加温温度及びキレート樹脂添加量の調整等を行い、リキッドフィードの状態、目標 1 の実現を環境創研(株)が実施するとともに、湯浅商事(株)がコスト等の観点を踏まえた他の保存技術も模索しつつ、輸送法を決定する。

(1) 検証方法

常温で1週間保存可能なイカゴロのpHの調査と輸送試験。

脱カドミウムしたイカゴロ(pH6.2)を試料とし、有機酸にてpH5、pH4に調整したイカゴロと未調整のイカゴロを、30℃の恒温槽にて密閉保存し、1週間、2週間、3週間ごとに一般細菌数と臭い・ガスの発生を調べ妥当なpHの検討を行った。

環境創研(株)日高事業所において、1,000L程度のジャケット付ステンレスタンク2つを借りて、1つは溶解槽と脱カドミウム槽として使用し、0.5トンのイカゴロのカドミウム分離を行った。最終的なpHを5とし、20Lのポリタンク22本に充填し常温にて名古屋の湯浅商事まで宅配便で輸送した(写真19~22)。

(2) 検証結果

脱カドミウムイカゴロの常温保存テスト

表 19 一般細菌数

	p H 6 . 2	p H 5	p H 4
0週	100	100	100
1週	9,000以上	1,200	200
2週	230万	6,000	900
3週	-	7,000	1,100

表 20 臭い・ガスの発生

	p H 6 . 2	p H 5	p H 4
0週	—	—	—
1週	腐敗臭有 ガス発生有	なし	なし
2週	〃	なし	なし
3週	—	なし	なし

表 19 と 20 に一般細菌数の増加状況と臭いとガスの発生を示す。pH6.2では腐敗したが、pH5では腐敗しない事からpH5に調整し運搬を行う事とした。また、pH5以下では、3週間経っても腐敗しない事から、常温での保存も可能であることが分かった。

3月に宅配便によりポリタンク22本をトラックで、北海道から名古屋まで1週間程度かけて陸送したが、イカゴロは腐敗しなかった。また、9月、10月、11月、12月には、

20L ポリタンクにて常温で愛媛県宇和島市の榑ダイニチに陸送で送付した。pH の調整は当初酢酸を使用していたが、9月の陸送試験よりクエン酸を使用した。



写真 19 リースしたステンレスタンク



写真 20 イカゴロ溶解状況



写真 21 樹脂の投入



写真 22 脱カドミウムイカゴロ

養殖魚の餌に添加する酸は、天然物から抽出したものでなければならぬため、安価な醸造酸は醸造酢酸かクエン酸になる。醸造酢酸は液体で酢酸臭が強いが、クエン酸は揮発性ではないため酸臭はしない。イカゴロの酢酸臭が気になるとの指摘があったため、9月の発送分からはクエン酸を使用している。

(3) 試験方法

pH5 に調整したイカゴロの輸送方法の検討及び保管方法の検討

常温での輸送・保管の場合、容器上部に空隙が多くあると、腐敗する場合があるため、小分けした密閉容器がベストである。しかし、容器にかかるコストが大きいため、冷蔵保存・輸送について検討した。

(4) 試験結果

① 冷蔵運搬の検討結果

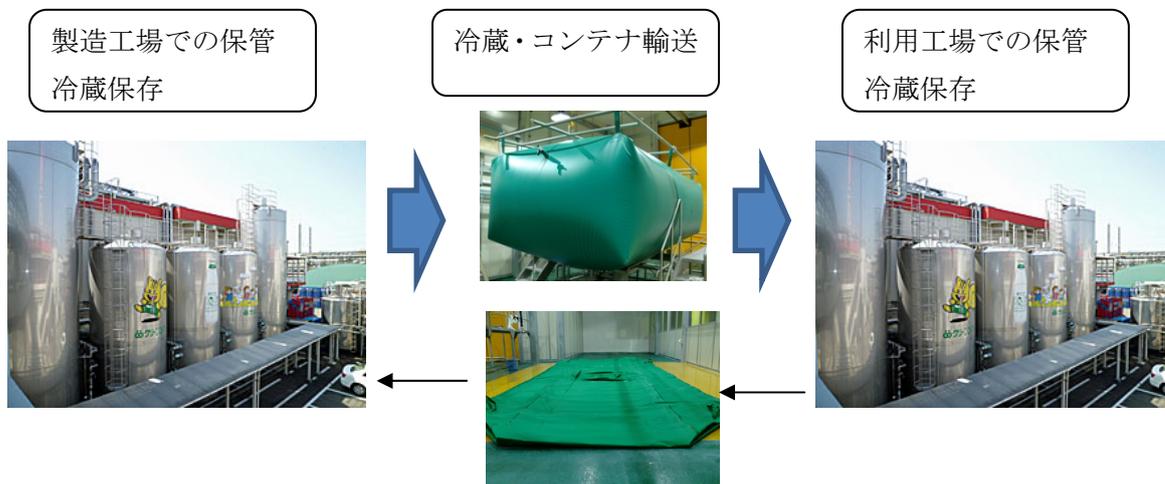


図 24 コンテナでの冷蔵運搬の例

冷蔵での保存は、牛乳の保存で使われているタンクを利用可能であり、中古ではそれほど高額ではない。輸送についても同様に、牛乳の輸送に利用されているビニール製のフレキシブルタンクが利用可能であり、冷蔵コンテナの中に折りたたみができる袋を入れイカゴロを充填し輸送が可能である。また、飼料製造工場においても、冷蔵で保存することにより腐敗を防止できる。容器には、攪拌機が付いており油脂や固形分の分離を防ぐ事が可能である。

コンテナでの冷蔵運搬の例を図 24 に示す。

② 米ぬか等と混合し運搬する方法の検討結果

イカゴロを同重量の米ぬかと混合後乳酸発酵させ、フレコンバックにて常温で輸送する方法について検討を行った。弊社では、飼料を乳酸発酵させ牛用発酵飼料「FM フィード」を製造販売している（図 25）。FM フィードは、おからなどを主体として乳酸発酵させた牛用飼料であり、水分を含んでいるが乳酸発酵させているため、常温でも腐敗しない特徴がある。



図 25 FM フィード

本技術を応用し、イカゴロと米ぬかを同量で混合後、乳酸発酵させることにより、常温においても腐敗させずにフレコンによって運搬する方法を検討した（写真 23、24）。また、環境創研㈱において試作品を作り、臭いや腐敗の状況、水分の状況について調べた。



写真 23 イカゴロを混合した米ぬか



写真 24 乳酸発酵状況

イカゴロと米ぬかを同量で混合するため、含水率は 35%程度であるが、油脂が多いため、見た目では 40%以上あるように見え、味噌のような外観である。また、発酵温度を 30℃とし、1 週間程度発酵させたところ上部にカビが発生したことから、空気に触れないような方法を取る必要がある。

一般的に米ぬか等を乳酸発酵させるには 30%から 45%の含水率が適当であることから、混合率は 1 対 1 が適当であると考えられる。

2 週間以上経過したが腐敗臭はせず、状態も安定していることから、十分に利用可能であることが分かった。写真 25 と 26 にフレコンの使用例を示す。



写真 25 フレコンの積み重ね



写真 26 フレコン積み込み例

③ 液状での常温輸送試験結果

3 月下旬に脱カドミウムイカゴロを 20L のポリタンク 22 本に充填後(写真 27)、北海道から常温で輸送し腐敗しないことを確認した。また、常温で 1 か月以上保存したが、腐敗は起こらなかった。しかし、中身を半分ぐらい取り出してから蓋を閉め保存すると、空気中の菌が入るため腐敗したことから、開封後は再保存せずに、すぐに使用する必要がある

また、当初は酢酸により pH を 5 以下にしていたが、価格を調査するとクエン酸の方が安く、揮発性ではなく酢酸臭がしないため、10 月からのサンプル提供ではクエン酸を使用し pH5 以下にして輸送している。当初から指摘されていた酢酸臭は、クエン酸に変更しても同様に臭いがすることから、油脂の分解による脂肪酸の増加とクエン酸添加による水素イオンの増加により酢酸臭がすると考えられる。



写真 27 20L ポリタンクに充填したイカゴロ

最終章 全体総括

研究開発成果

(1) 発酵・自己消化工程の可溶化条件の決定

目標 1 の腐敗を防止しながら（一般細菌数 200 個/g 以下）6 時間以内に可溶化は実現でき、目標 2 の最適温度（40℃～46℃）の実証と pH を pH5-6 についても実現できた。また、イカゴロの温度を 60℃ににし pH5 にすることで腐敗防止が可能となった。

本研究開発において構築を目指す脱カドミウム飼料化システムは、下記の 4 工程によって構成されている。

- ・溶解槽でイカゴロを加温し発酵・自己消化によって液化する「溶解工程」
- ・スクリーン分離機を用いてイカゴロに混入する眼球、嘴、未消化胃内容物等を濾過除去する「混雑物濾過工程」
- ・カドミウム除去槽で混雑物を除去したイカゴロ溶解物と吸着剤（キレート樹脂）を混合攪拌してカドミウムを吸着除去する「競争吸着工程」
- ・カドミウム除去槽に内蔵した濾過装置でイカゴロ溶解物に混合したキレート樹脂を槽内に残し濾液を製品（リキッドフィード）とする「樹脂濾過工程」

これまで溶解工程においては、溶解の完了を目視などの経験的な方法で判断し、溶解温度と時間についても定量的な管理を行っていなかった。そのため、温度上昇が速いと加熱面でたん白質が凝固して濾過工程で目詰まりが生じ、温度上昇が遅いと腐敗菌が増殖して腐敗が起こる等の不具合があった。

ここでは、委託業務実施計画に示した「発酵・自己消化工程の可溶化条件の決定」のうち、下記の 2 項目を実施した。

- ① 加温温度及び蛋白質の変性・腐敗に関わる検証
- ② 溶解終了となる粘度の決定

「①加温温度及び蛋白質の変性・腐敗に関わる検証」では、50~500mL の容器を用いて容積対伝熱面積比を変えたイカゴロ溶解実験を行い、最適温度（40℃~46℃）と推察される温度に至るまでの昇温速度と溶解速度についてラボスケールで実験と解析を行い、実機レベルのシミュレーションを行った結果、下記の成果が得られた。

イカゴロ溶解物の平均比熱を決定した後に、容量 1L のステンレス容器を用いて 300~800g のイカゴロ溶解物の温度上昇実験を行い、ニュートンの伝熱速度式を用いた解析により総括伝熱係数（ステンレス容器壁と流体境膜を合わせた伝熱係数）を決定した

上記のラボスケールで決定した総括伝熱係数を用いて実機（0.5~0.7 トン）におけるイカゴロの温度上昇速度（応答）についてのシミュレーションを行い、約 1,000 倍スケール

アップした実機を用いた実証試験の結果とよく一致することを確認した。

「②溶解終了となる粘度の決定」では、イカゴロの溶解工程終了の判定基準を、混雑物（眼球、嘴、未消化胃内容物等）を除去するための濾過工程が阻害されない粘度及びカドミウム除去工程におけるキレート樹脂の混合状態が最適となる粘度と設定し、イカゴロ溶解物粘度を粘度計で測定・検証し、溶解工程終了の目安となる粘度を決定した。

また、カドミウム除去システムでは、混雑物の除去とキレート樹脂を分離する 2 回の濾過操作が必要である。そこで、イカゴロ溶解物の濾過速度に及ぼす温度、すなわち粘度の影響を明らかにするために、実操作と同じ濾材（ナイロンメッシュ、目開き 0.27mm）を用いて、温度を変えて（18~60℃）イカゴロ溶解物の濾過実験と解析を行った結果、以下の成果を得た。

イカゴロの溶解工程を、60℃で行った場合（一段階加熱）と 45℃で 2 時間溶解した後に 60℃に上昇させた場合（二段階加熱）を比較した。いずれの場合もイカゴロの粘度は 1 時間以内に 8~12mPa·s まで低下した後にほぼ一定となったが、最終的な粘度は二段階加熱の方が低い値となった。この結果から、60℃ではイカゴロの自己消化酵素が約 1 時間で失活するため、45℃で約 2 時間加熱溶解した後に 60℃で低温殺菌を行う工程が効率的であることがわかった。

イカゴロ溶解物の濾過速度がルースの濾過速度式に従うことを検証し、実際に用いるフィルターの濾過抵抗係数と混雑物（眼球、嘴、未消化胃内容物等の固形分）の濾過比抵抗を決定した。その際、イカゴロ溶解物の粘度の温度依存性がアンドレイド式に従うこと、またアンドレイド式を用いることにより 20℃~60℃におけるイカゴロ溶解物の濾過速度が予測できることを確認した。

(2) キレート樹脂の効果確認及び同樹脂の再生の検証

目標 1 である、イカゴロに含有するカドミウムを 4 時間以内に 2mg/kg 以下は達成できた。目標 2 については、電極析出させることで、酸の混入工程 1 回で、キレート樹脂を適切に再生させることができた。また、溶解自動化装置においては目標である、自動的に 6 時間以内に目開き 1mm 未満の網を通過するスラリーの製造を行った。

(3) 溶解自動化装置の設計・試作

環境創研(株)及び北海道大学が決定した条件を元に、イカゴロの溶解を自動化する装置の設計・試作をした。

装置はイカゴロの受入・溶解を兼用した「溶解槽」、腐敗を防止するための「酢酸供給部」、溶解したイカゴロをポンプで供給しイカゴロに付着した眼球・嘴及び未消化胃内容物等、細かい夾雑物を分離する機能を兼用した「スクリーン分離機」で構成し試作をした。

本装置を製作したことにより自動的に 6 時間以内にイカゴロを可溶化となることと、目開き 1mm 未満の網を通過するスラリーを製造することが可能となった。

(4) イカゴロの脱カドミウム装置の設計・試作

目標である、スラリー状となったイカゴロのカドミウム含有量が 4 時間以内に 2.0mg/kg 以下は達成できた。また、人件費以外のコストが 5,000 円/トン以下についても達成できた。

環境創研㈱が決定した諸条件を元に、自動で脱カドミウムを行なう装置の設計・試作をした。

装置は溶解自動化装置より供給されるイカゴロを受け入れる「脱カドミウム槽」、キレート樹脂とイカゴロを攪拌する「攪拌部」、キレート樹脂とイカゴロを分離する「樹脂分離メッシュ」、キレート樹脂を再生する「樹脂再生部」、キレート樹脂の再生時に発生する廃酸からカドミウムの分離、酸の中和をする「凝集沈殿槽」で構成し試作をした。

本装置により溶解自動化装置から自動供給されたスラリー状のイカゴロから 4 時間以内にカドミウム含有量を 2.0mg/kg 以下にすることが可能となった。

(5) 給餌・輸送試験

目標 2 であるモイストペレットの添加量は、真鯛を対象とし、フィールドテストで餌全体の 5%で行い、問題がないことを確認した。また、目標 3 である、脱カドミウムイカゴロを常温で 1 週間程度保存する事にも成功した。

当該研究開発により、飼料への脱カドミウムイカゴロの添加が真鯛の摂食性を向上させるとともに、著しい飼料効率の上昇、その結果として高成長を誘導することが明らかとなった。また、肉質に関しても、脱カドミウムイカゴロ添加による悪影響は認められなかった。以上より、脱カドミウムイカゴロは、飼料添加物として非常に有望であることが明らかとなった。今回の試験は、液状のイカゴロをモイストペレットへ添加することにより行われたが、養殖用飼料添加物として広く普及するためには、保存性、取り扱いの容易さ、一般に広く普及しているエクストルーデッドペレット (EP) 飼料への添加を考慮すると、同資材の効率的な乾燥化法の開発を行うとともに、乾燥しても機能が保持されるか否かを確認する必要がある。イカゴロの機能性を維持した効率的な乾燥法が開発されれば、魚類養殖用飼料の機能性添加剤として広く普及することは間違いないものと考えられる。

ウナギでもチョウザメ同様、イカゴロを含む餌を使用できることが確認された。さらにウナギの場合は、イカゴロを 5 割以上含む餌でも通常餌と同等あるいはそれ以上の成長が期待できた。しかし、ウナギ用のイカゴロ練り餌は給餌後の飼育水懸濁がみられたことから、この点は改善する必要がある。

研究開発後の課題・事業展開

研究開発での課題はほとんどクリアできた。米ぬかとの混合製品は、使用者側の了解を得ることと、米ぬかの確保が課題である。今後は、販売単価及び処理コスト施設の償却及び輸送コストについて検証を行い、事業採算性をとるための販売単価と処理コストの検証を行うとともに、補助金などを利用してイカゴロを 20 トン/日処理する施設を函館近郊に建設し、できるだけ早く事業化に繋げたいと考えている。