

令和7年度中学生・高校生の科学・技術研究論文 高等学校 共同研究の部 最優秀賞



魚粉に替わる新たな飼料を開発し
郡山市の内水面養殖に高校生が貢献する
～大豆、昆虫性代替飼料のコイへの給餌実験、
電気泳動実験、及びコスト評価～

福島県立安積高等学校 生物部 魚班

3年 川崎友輝 吉田友朗 大内政輝 佐川夏美
2年 星絢乃 内田和花
1年 我孫子虎之介 菊地明紗 阿部正紀

要旨：近年、魚粉価格高騰に伴い養殖業者は経営難に陥り、持続可能な養殖実現のため魚粉代替飼料の開発が急務である。本研究では大豆粉、大豆油粕、昆虫粉(バッタ粉、コオロギ粉、カイコ粉)を用いて、コイを対象にした給餌試験と、代替飼料の SDS-PAGE によるタンパク質分析を行い、飼料効率と飼料作成時にかかる費用からコスト指数を算出し評価した。その結果、加熱加水成形大豆粉(オートクレーブ処理 2 時間)、生大豆粕で魚粉の約 3 割を代替でき、カイコ粉でも同程度の代替が可能であることが示された。一方、バッタ粉は単体では飼料効率の大幅な低下が見られたものの、米糠と魚油を添加することで代替飼料の有用なタンパク源となり得た。今後もこれらの代替飼料の実用化に向け、更なる飼料効率向上に向けた研究に取り組み、代替飼料の長期的な評価を継続していく。

キーワード：養殖業、代替飼料、コイ、大豆粉、大豆油粕、昆虫粉、飼料効率、コスト指数、
インヒビター、メイラード反応、熱変性、キチン、米糠、魚油

Abstract : Recent surges in fishmeal prices have placed aquaculture producers under economic strain, making the development of sustainable fishmeal substitutes an urgent priority. In this study, we evaluated soybean flour, soybean oilcake, and insect meals (grasshopper, cricket, and silkworm) in feeding trials using carp, and analyzed feed protein profiles by SDS-PAGE. Feed utility was assessed by calculating feed efficiency and a cost index that incorporates feed production costs. Results show that a heat-hydrated, autoclave-treated soybean flour (2 h) and unprocessed soybean oilcake enabled substitution of approximately 30% of fishmeal, and silkworm pupae meal achieved a similar level of replacement. Grasshopper meal alone caused a marked decline in feed efficiency; however, when supplemented with rice bran and fish oil it performed markedly better and can serve as a useful protein source. Future work will focus on improving feed efficiency further, optimizing nutritional balance for long-term growth and health, and conducting field trials toward practical implementation.

Keywords: aquaculture, alternative feed, carp, soybean flour, soybean oilcake, insect meal, feed efficiency, cost index, inhibitors, Maillard reaction, heat denaturation, chitin, rice bran, fish oil

I はじめに

1-1 研究動機

福島県郡山市は、全国の市町村別におけるコイ生産量で第1位を誇る。しかし近年、飼料価格の高騰(図 1)により、郡山市内の養鯉業者も経営的に厳しい状況に置かれていることが、廣瀬養鯉場への聞き取り調査により明らかとなった。この問題は郡山市に限らず、日本の養殖業全体に共通する深刻な課題である。特に、養殖飼料の主要原料である魚粉は、世界的な需要増加や漁獲量の減少等により、その価格が高騰しており、持続可能な養殖業の確立には魚粉に代わる代替資源の開発が喫緊の課題となっている。これまで植物性代替飼料の研究は進められてきたものの、その多くは複雑で高度な加工技術を要するものが多く、一般の養殖業者が導入するにはコストや設備の面で高い障壁がある。

そこで本研究では、現場での実用性を重視し、簡便な処理により製造可能な植物性代替飼料の作成法を検討した。また、将来的な飼料原料として注目されている昆虫粉を用いた飼料についても検討を行った。昆虫は、食品廃棄物等を餌として飼育できるため生産コストが低く、環境負荷も小さいといった特徴を有する。さらに、今後昆虫の生産体制が確立されれば、飼料用昆虫粉の価格の低下も期待できる。

本研究では、これらの代替飼料がコイ養殖において持続可能な選択肢となり得るかを検証した。特に、高校生が地域資源を活用し、地元企業と連携して代替飼料の開発に参加することは、学術的意義にとどまらず、持続可能な資源循環型社会の構築に寄与するとともに、地域社会の活性化や地

域産業の発展にも繋がる。

更に、未開拓分野であるコイ養殖における昆虫粉飼料の有用性を研究することは、養殖業界に新たな知見を提供し、持続可能な養殖技術確立への重要な第一歩となることが期待される。

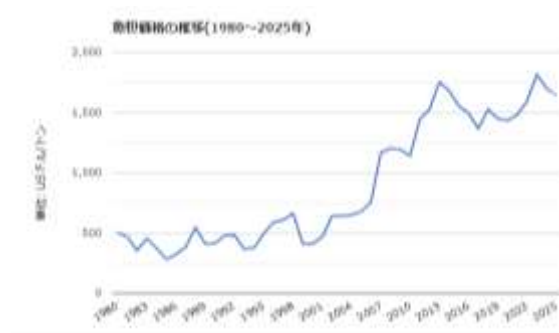


図1 魚粉価格推移¹⁾

1-2 先行研究

大豆粉に関しては、高タンパク質原料としての有用性が報告されている一方で、生大豆粉をそのまま飼料に利用した場合、抗栄養因子(トリプシンインヒビターなど)の影響により飼料効率が低下し、成長阻害を引き起こすことが報告されている²⁾。これらの問題は加熱処理を施すことで抗栄養因子が失活し、タンパク質の消化性が向上することで改善されることが示されている²⁾。

昆虫粉に関して、これまでの先行研究は主にナイルティラピアを対象として実施されている。アメリカミズアブを用いた研究が特に進められており、代替飼料の有用なタンパク質源となることが示されている³⁾。一方で、バッタ粉に関しても研究が存在しており、特に10%程度の代替では成長および飼料効率が向上することが報告されている⁴⁾。コオロギ粉についても栄養組成を調整することで飼料としての利用可能性が指摘されている⁵⁾。また、カイコ粉に関しては、魚粉の66%程度までの代替可能性が示されている⁶⁾。

しかしながら、これらの研究成果はいずれも胃を持つナイルティラピアを対象としており、ヤマトゴイのように胃を持たない魚種における昆虫粉の消化性・栄養吸収・成長性能などに関する科学的知見は極めて乏しいのが現状である。よって、コイ養殖における昆虫粉利用の有用性を明らかにするには、今後さらにヤマトゴイを対象とした実証的な研究の蓄積が求められる。

II 実験内容

実験1 加熱大豆粉の給餌

生大豆粉に含まれる消化阻害酵素を失活させることを意図して加熱処理を行い、加熱大豆粉の飼料効率を生大豆粉と比較した。

実験2 様々な条件で加熱した大豆粉の給餌

代替飼料のさらなる飼料効率向上のため、実験1とは異なる方法で加熱処理を行った大豆粉での飼料効率の測定を行った。

実験3 大豆油粕の給餌

実験1、実験2で実験対象として用いた大豆粉に比べてより安価な大豆油粕での飼料効率の測定を行った。

実験4 昆虫粉の給餌

昆虫粉でどの程度魚粉を代替できるのかを飼料効率を測定して検討した。

実験5 キチンを添加した飼料の給餌

昆虫粉の添加による飼料効率低下の原因を探るため、昆虫の外骨格に多く含まれるキチンを魚粉に添加した飼料で飼料効率を測定した。

実験6 バッタ粉に米糠を添加した飼料の給餌

昆虫粉の添加による飼料効率低下の原因を炭水化物の不足によるものであると考え、バッタ粉に炭水化物として米糠を添加した飼料での飼料効率を測定した。

実験7 飼料の電気泳動

給餌実験（実験1～実験6）での結果を飼料に含まれるタンパク質の分子量の差異にて考察するため、SDS ポリアクリルアミドゲル電気泳動（SDS-PAGE）を行った。

検討 コスト指数の算出

給餌実験から算出した飼料効率と、飼料作成時にかかる費用からコスト指数を計算し、飼料の有用性についてコストも考慮して検討を行った。

III 実験方法と結果

3-1 実験1～実験6

3-1-1 供試魚

令和6年の春に孵化したヤマトゴイ (*Cyprinus carpio*) の稚魚（約10 cm）を供試魚とした。

3-1-2 実験環境

コイの飼育は図2のように複数の水槽（L×W×H：60×25×30 cm 水量約45L）を連結した閉鎖循環式の水槽を用いて室内で行った。濾過槽にヒーターとサーモスタットを設置して水温を25℃に保った。



図2（左）使用した水槽（右）体重計測の様子

3-1-3 実験手順

コイを5匹ずつの群に分割してそれぞれの体重を計測し、水槽に入れて1日間馴致した。体重は電子天秤を用いて3回計測したのち、その平均を用いた。供試飼料を群ごとに变えて作成し、土日を除いて午前8時頃と午後5時頃に1日2回給餌を行った。コイの給餌率表を参考に食べ残しがないよう群の総体重の3%の質量で給餌することを1週間続けた。再び各群の体重を計測し飼料効率を算出した。これを2週間継続して平均値をとった。

3-1-4 成長の評価方法

成長成績は以下の式で表される飼料効率を算出して評価した⁷⁾。

$$\text{飼料効率(\%)} = \frac{\text{体重変化量(g)}}{\text{総給餌量(g)}} \times 100$$

飼料効率は1g給餌した時の体重変化を百分率で表したものであり、値が大きいほど良い成長成績であることを示す。

また、実験4、実験5では飼料効率を散布図にプロットし、その回帰係数からそれぞれの飼料の有用性を評価した。回帰直線はエクセルの機能を用いて求めた。

3-1-5 供試飼料

供試飼料は魚粉(株式会社ネブコのくみあい配合飼料うなぎ養中用A。魚粉74%、デンプン23%、リン酸カルシウム、飼料用酵母3%を含有している。)とそれぞれの実験対象である原料を混合した後、水を加えて攪拌し、餅状にしたものを使用した。実験6では米糠の水中での拡散が著しく、実験が困難であったために、飼料成形時に水ではなく魚油を使用した。

以下、各実験での供試飼料の組成を示す。

実験1 加熱大豆粉の給餌

表1 実験1 飼料組成

群	飼料組成	
①	魚粉 100 %	
②	魚粉 40 %	加熱大豆粉 60 %
③	魚粉 40 %	生大豆粉 60 %
④	魚粉 25 %	加熱大豆粉 75 %
⑤	魚粉 25 %	生大豆粉 75 %

大豆粉は丸大豆を破碎したものを使用した。加熱大豆粉は150℃のオーブンで10分加熱した後破碎したものである。加熱による飼料効率への影響を調査するため、その差が顕著に表れると考えた、事前実験で生大豆を与えた際に飼料効率が最も低かった大豆粉60%、75%の群で実験を行った。予備実験時に、大豆粉100%の群では摂食が見られなかったため除外した。

実験2 様々な条件で加熱した大豆粉の給餌

表2 実験2 飼料組成

群	飼料組成	
①	魚粉 100 %	
②	魚粉 70 %	加熱加水成形大豆粉 1時間 30 %
③	魚粉 70 %	加熱加水成形大豆粉 2時間 30 %
④	魚粉 70 %	蒸し大豆粉 1時間 30 %
⑤	魚粉 70 %	蒸し大豆粉 2時間 30 %
⑥	魚粉 70 %	生大豆粉 30 %
⑦	魚粉 70 %	加熱大豆粉 1時間 30 %

大豆粉(マルコメ株式会社製、実験3も同様)を様々な手法で加熱処理した。加熱加水成形大豆粉とは水を加えて団子状にした大豆粉をオートクレーブで加圧加熱処理(121℃で1時間と2時間)したものである。蒸し大豆粉は加圧による影響を調べるために料理用の金属蒸し器で加熱した飼料を給餌した。また、加熱大豆粉はオートクレーブで加圧加熱処理(121℃で1時間)したものである。なお実験2、3では生大豆粉を用いた予備実験時に魚粉との飼料効率の差が小さかった30%の代替率での実験を行った。

実験3 大豆油粕の給餌

表3 実験3 飼料組成

群	飼料組成		
①	魚粉 100 %		
②	魚粉 70 %	生大豆粉	30 %
③	魚粉 70 %	加熱大豆粉	30 %
④	魚粉 70 %	大豆油粕	30 %
⑤	魚粉 70 %	加熱大豆油粕	30 %

大豆油粕(有限会社たまごや製)を配合した飼料の給餌を行った。加熱大豆粉、加熱大豆粕はともにオートクレーブで加圧加熱処理(121℃で1時間)を行った。

実験4 昆虫粉の給餌

表4 実験4 飼料組成

群	①	②	③	④	⑤	⑥
魚粉 (%)	100	85	70	55	40	25
昆虫粉 (%)	0	15	30	45	60	75

TAKEO 株式会社製のバッタ(バッタ亜目)粉とジャマイカンフィールドコオロギ(*Gryllus assimilis*)粉、カイコ(蛹)粉を用いた。各群の昆虫粉の割合を15%ずつ変化させた。

実験5 キチンを添加した飼料の給餌

表5 実験5 飼料組成

群	①	②	③	④	⑤
魚粉 (%)	100	97	94	91	88
キチン (%)	0	3	6	9	12

キチンはキチンキトサン粉末(株式会社自然健康社)を用いた。バッタ粉に含まれるキチンの割合をもとに各群のキチンの割合を3%ずつ変化させた。

実験6 バッタ粉に米糠を添加した飼料の給餌

表6 実験6 飼料組成

群	①	②	③
魚粉 (%)	47	37	26
米糠 (%)	0	10	20
バッタ粉 (%)	21	21	21
魚油 (%)	32	32	32

米糠は精米所から入手したものである。バッタ粉は実験4と同様のものを使用した。また、魚油は

栄研商事株式会社の理研フィードオイルを用いた。米糠で魚粉を代替した際の影響を調べるためバッタ粉と魚油の割合を固定した。

3-1-6 実験結果

各実験結果を棒グラフまたは散布図に表した。それぞれのグラフの縦軸は飼料効率を表す。

実験1 加熱大豆粉の給餌

実験期間：2024年9月23日～10月4日

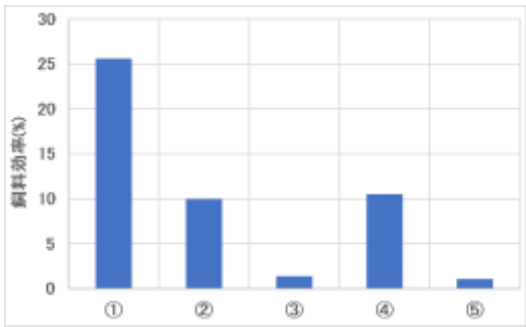


図3 実験1 結果

60%、75%の両群でもともに加熱したときのほうが飼料効率が向上したが、魚粉100%の群の半分未満であった。

実験2 様々な条件で加熱した大豆粉の給餌

実験期間：2025年3月17日～3月28日

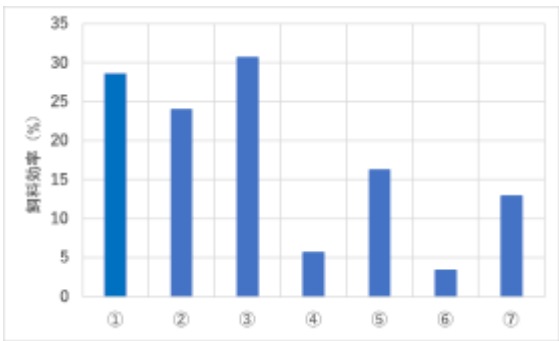


図4 実験2 結果

加熱加水成形大豆の両群は加熱大豆粉の群よりも飼料効率が高く、特に加熱加水成形大豆2時間の群では魚粉の群を超過するほどであった。蒸し大豆粉1時間の群では生大豆の群と飼料効率の差がほとんど無く、蒸し大豆粉2時間の群は加熱大豆粉の

群と同程度の飼料効率であった。これより大豆粉の加圧加熱処理は飼料効率を上げるために有効な手法であるといえる。

実験3 大豆油粕の給餌

実験期間：2025年4月14日～4月25日

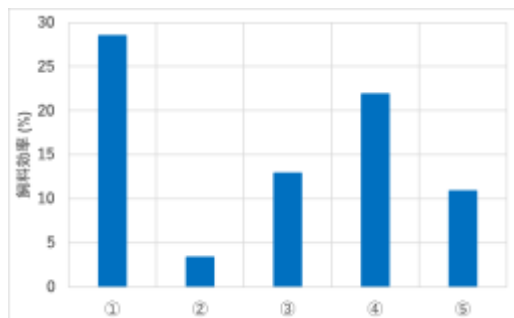


図5 実験3 結果

大豆油粕の群で加熱大豆粉よりも高い飼料効率を得られたが、魚粉 100 %の群には及ばなかった。また、加熱大豆粕の群は大豆油粕の群よりも飼料効率が低下した。

実験4 昆虫粉の給餌

実験期間

バッタ、コオロギ：2024年10月7日～10月18日

カイコ：2024年10月21日～11月1日

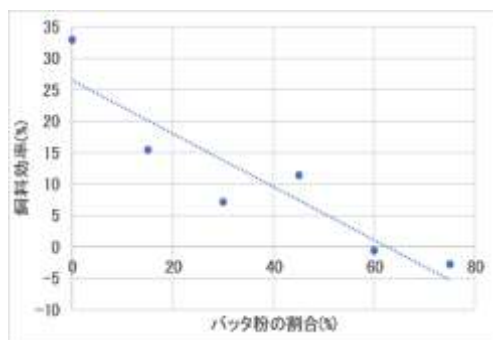


図6 実験4 バッタ粉

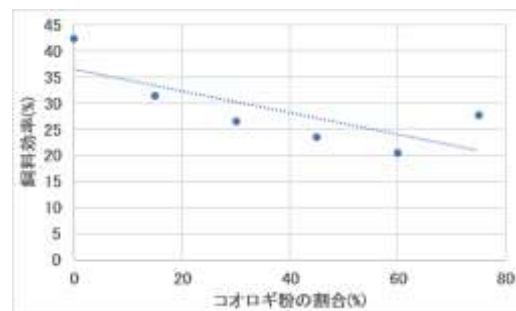


図7 実験4 コオロギ粉 結果

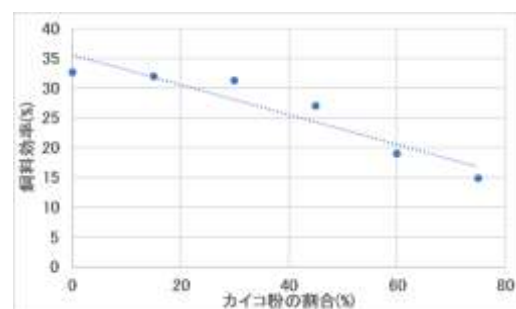


図8 実験4 カイコ粉 結果

バッタ粉では割合を増やすごとに飼料効率が低下し、60 %を超えると給餌したにもかかわらず体重の減少が見られた。回帰係数は -0.4234 であった。コオロギ粉ではバッタ粉と同様に割合の増加とともに飼料効率が低下したが、減少傾向は小さかった。回帰係数は -0.2086 であった。カイコ粉も同様の結果となり、回帰係数は -0.2522 であった。

実験5 キチンを添加した飼料の給餌

実験期間：2024年11月25日～12月6日

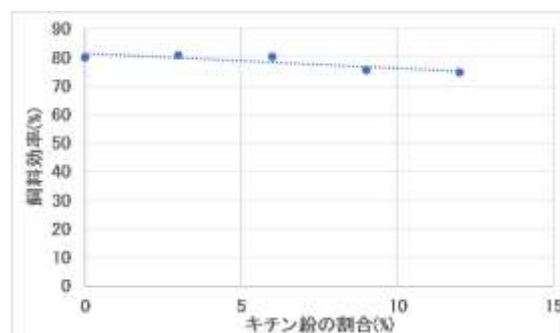


図9 実験5 結果 (1)

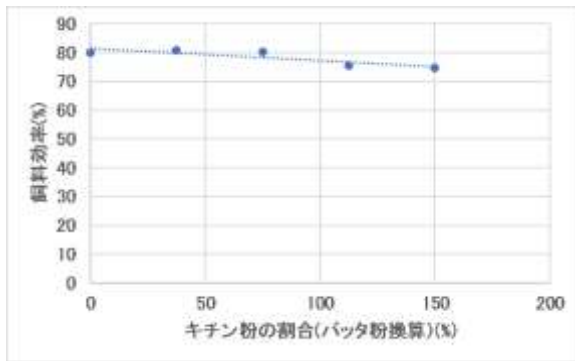


図 10 実験 5 結果 (2)

キチン粉では飼料効率の変化は見られなかった。飼料のキチンを含有する割合から同様の割合だけキチンを含むバクタ粉の割合に換算すると、図 10 のようになり、回帰係数は -0.0422 となった。

実験 6 バクタ粉に米糠を添加した飼料の給餌

実験期間：2025 年 4 月 7 日～4 月 18 日

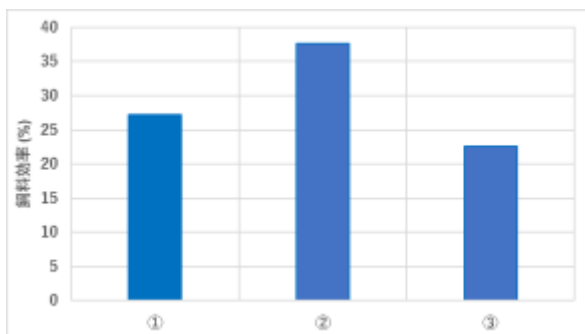


図 11 実験 6 結果

米糠の割合が 10 %の群で飼料効率が最大となり、20 %の群では減少した。

3-2 実験 7

3-2-1 実験試料

2 回の実験で用いた試料をそれぞれ以下のリストにまとめる。

実験①

1 生大豆粉	5 バクタ粉
2 蒸し大豆粉	6 コオロギ粉
3 加熱大豆粉	7 カイコ粉
4 魚粉	

実験②

1 魚粉	5 加熱加水成形大豆粉 1 時間
2 生大豆粉	6 加熱加水成形大豆粉 2 時間
3 加熱大豆粉 1 時間	7 大豆油粕
4 加熱大豆粉 2 時間	8 加熱大豆油粕

名称は給餌実験で用いたものと同様である。

3-2-2 実験手順

サンプル調製

各試料を 0.01 g 量り取ってプラスチックチューブに入れ、500 μ L のサンプルバッファー(×2、富士フィルム和光純薬株式会社製)を添加し、ボルテックスミキサーで攪拌した。その後ヒートブロックを用いて 95 $^{\circ}$ C で 5 分間加熱し、加熱後の試料を遠心分離した(20 $^{\circ}$ C で 15,000 G を 5 分間)。

電気泳動

遠心分離後の各サンプルの上清をマイクロピペットで 3 μ L 採取してゲル(アトー株式会社製、E-T520L)の各ウェルにアプライし、定電流 30 mA で 1 時間泳動を行った。

染色および脱色

CBB 染色試薬(アトー株式会社製、AE-1340)を用いてゲルを染色した後、水道水で振盪して脱色を行った。

3-2-3 実験結果

泳動後のゲルの画像を以下に示す。図 12 の点線は無関係な箇所を切り取ったことを表す。端の MW のレーンは分子量マーカを表す。

実験①

1、2 の試料では類似したバンドパターンが見られ、3 の試料では分子量が大きいバンドが消失した。動物性飼料である 4、5、6 では 46 kDa 付近に共通したバンドが見られたが、7 では確認されなかった。

実験②

1、2、3 では1回目の実験と同様のバンドパターンが見られた。4 では3に比べると分子量の大きいバンドが消失した。5、6 の試料については、サンプルバッファーに不溶で、バンドが見られなかった。7 では2 と類似のバンドパターンが見られ、8 では7と比べると分子量の大きいバンドが消失した。

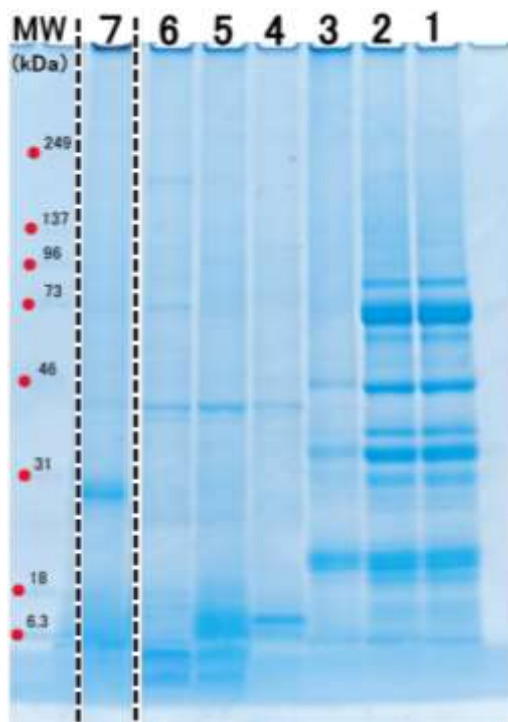


図 12 実験 7 実験① 結果

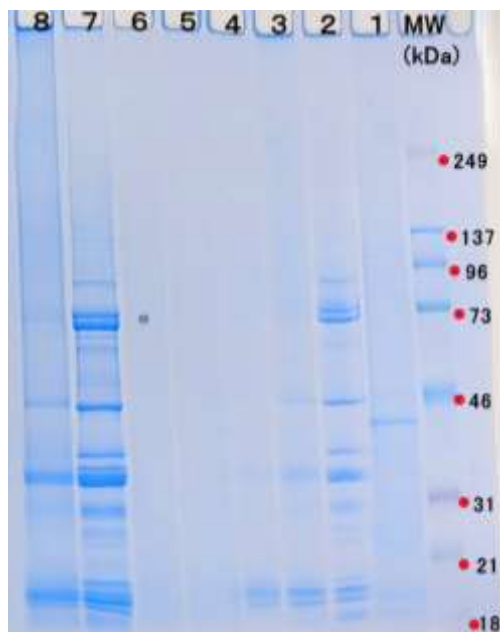


図 13 実験 7 実験② 結果

Ⅳ 考察

実験で用いたそれぞれの飼料について、複数の実験結果から総合的に考察する。

4-1 生大豆

60、75 %と生大豆の割合が多いことと、タンパク質消化阻害酵素(インヒビター)の影響^{2、8)}により飼料効率が大幅に悪化したと考えた。これは盛永ら²⁾の先行研究で明らかとなっている。また、飼料の電気泳動を行った結果、20 kDa 付近にインヒビターと思われるバンドが見られたが、大豆たんぱく質の主要成分であるグリシニンのサブユニットとも分子量が重なるため一概には判断できない。

4-2 加熱大豆

加熱処理に伴う熱変性により、インヒビターが失活したことで消化性が向上し、飼料効率が大幅に良化したと考えた。また、大豆にはタンパク質合成のエネルギーとなる脂質や炭水化物が多く含まれるため飼料効率が高かったと推測される。

4-3 他の加熱大豆(蒸し大豆粉、加熱大豆粉、加熱加水成形大豆粉)

オートクレーブで処理をした全ての加熱大豆粉で、生大豆粉に比べ飼料効率が改善したのは、オーブンで処理をした大豆と同様に、インヒビターの失活が起きたためであると考えられる。また、オートクレーブで加熱したものは、褐変と香りの変化が見られ、電気泳動時に沈殿が多く生じて分子量の大きいバンドが消失した。これらの結果から、オートクレーブでの加熱処理によりメイラード反応^{9、10)}や熱変性による新たな架橋、凝集が生成すると考えた。大豆粉はかなり細かい粒子のため、凝集しても粒度が大きくなり熱変性による不溶化の効果が薄いと考えられる。このことからタンパク質の高次構造の変化によって消化酵素の

活性部位とタンパク質の結合が促進され、飼料効率が向上した。

加熱加水成形大豆粉に関しては、適度な熱変性とメイラード反応により飼料効率が向上したと推測される。加水によって水素結合が切れやすくなりタンパク質の高次構造が緩みやすくなったこと、また、大豆粉がひとまとまりとなって粒子間距離が小さくなり、反応性が高まったことで熱変性が起きやすくなったと考えられる。また、加水に伴うメイラード反応の抑制により反応が過剰に起こり、タンパク質の不活化をおこした乾燥条件の加熱大豆粉よりも高い飼料効率を示したと考えられる。

蒸し大豆粉に関しては、飼料効率、電気泳動の結果がどちらも生大豆と比べ変化が見られなかったことから、この処理は熱変性等の反応を起こすには十分な圧力、温度ではなかった可能性がある。また、先行研究で示されていたインヒビター失活に要する温度にも達していなかったため、インヒビターは失活しなかったと考えられる。オーブンで処理をした加熱大豆粉と蒸し大豆粉はどちらも褐変があまり見られなかったため、加熱による反応は加圧によっても促進されると考えられる。

乾燥条件の加熱大豆粉に関して、メイラード反応が過剰に起きたことで、大豆たんぱく質に含まれるリジン等のアミノ酸が利用できなくなり、飼料効率の向上が抑えられたと考えた。

4-4 大豆油粕

電気泳動の結果から、生大豆粉と同様のバンドが見られたため、油分調節をしてもタンパク質面では生大豆粉と同等の栄養効果が期待でき、代替飼料として十分利用可能であるといえる。また、加熱処理後の大豆油粕は加熱大豆と同様に褐変と香りの変化が見られ、電気泳動時に沈殿が多く生じて分子量の大きいバンドが消失したため、加熱によりメイラード反応が起きたと考えられる。飼

料効率に関して、加工の過程における加熱処理でトリプシンインヒビターが失活したこと、また油分除去に伴って飼料中における他の栄養素の割合が増加したことで、ほかのオートクレーブ加熱処理飼料と同程度の効果を得られたと考えられる。しかし、加熱大豆油粕に関しては、通常栄養効果上昇のためには十数分の加熱が行われるが、今回他の飼料と条件を合わせるために1時間加熱したことで、過剰加熱による栄養効果の低下を引き起こしたと推測される。

4-5 昆虫粉

すべての昆虫粉で、割合の増加に伴う飼料効率の低下が見られた。この要因として、主に成長のエネルギーとなる脂質、炭水化物が不足していることと過剰摂取することで消化障害につながる食物繊維のキチン(昆虫等の外骨格に由来)が含まれている¹¹⁾ことが挙げられる。これは脂質量が低く、キチンの量が多いバッタ粉で飼料効率の低下が顕著であったことから推測できる。公示されている栄養成分表によると、すべての昆虫粉でタンパク質含有量は魚粉と同程度以上であった。また、電気泳動の結果では、バッタ、コオロギには魚粉と同様のバンドが見られた。このバンドを形成したタンパク質は動物性タンパク質に共通するもの(アクチン 41,8 kDa、リゾチーム 14,4 kDa等)と考え、タンパク質の量、質どちらの観点でも代替飼料としては十分使用可能と判断した。カイコに関してほかの昆虫粉とは異なるバンド(カイコ由来のタンパク質による¹²⁾が見られたものの、魚粉、バッタ、コオロギに共通するものよりも分子量が小さく消化性の悪化にはつながらない、また他の昆虫粉に比べ脂質量が多いため飼料効率の低下は見られなかったと考えられる。

4-6 キチン及び米糠、魚油添加飼料

今回用いたキチンは、昆虫由来ではなく甲殻類

由来のものであり、粒径が小さいため消化阻害性が微減すると考えられることが昆虫粉との相違として挙げられるが、実験の結果からはキチンの割合による飼料効率の変化が見られなかった。このことからキチンは昆虫粉添加による飼料効率低下の要因ではないと判断できる。

米糠、魚油添加飼料に関して、炭水化物、脂質を加えることでそれがエネルギー供給源として働き、バッタ粉配合飼料の栄養バランス改善、飼料効率向上が図れると考えた。また、より米糠を増やした群で飼料効率が低下した要因として、飼料中における魚粉、バッタ粉の割合が少ないことに伴うタンパク質不足と、米糠に含まれる大豆粉と同様のインヒビターの影響によると考えた。

4-7 実験期間の妥当性検討と長期的評価

本研究では各給餌実験の期間を2週間とした。1週間のみの給餌試験では、個体差などの影響により、得られる飼料効率の信頼性が十分とはいえない。一方、4週間にわたる予備実験の結果、2週間目以降は飼料ごとに飼料効率の傾向が大きく変動することがないことが確認された。したがって、本実験で得られた2週間時点のデータについても、一定の信頼性を有するものと考えられる。さらに現在、代替飼料の長期的な影響については、コイの糞を用いた電気泳動解析(DEEG)やメタゲノム解析により評価を進めている段階であり、飼料効率のみならず、腸内細菌叢への影響も含めて検討を行っている。

V コストの検討

5-1 評価手法

実験1、2、3で用いた各飼料についてコスト指数を用いて検討する。コスト指数は以下の式で表される⁷⁾。

$$\text{コスト指数} = \frac{\text{対照群の飼料効率}(\%) \times \text{飼料価格比}}{\text{実験群の飼料効率}(\%)}$$

コスト指数は対照群で1を取り、飼料価格が低く、飼料効率が高いほど1より低い値を示す。

なお、飼料作成時にかかる費用は加熱のみを考慮し、加熱にかかるコストは電気料金単価を27円/kwhとして計算した¹³⁾。

5-2 結果

図14はコスト指数が低かった飼料でのコスト指数を示す棒グラフである。コスト指数が2以上のものは除外している。

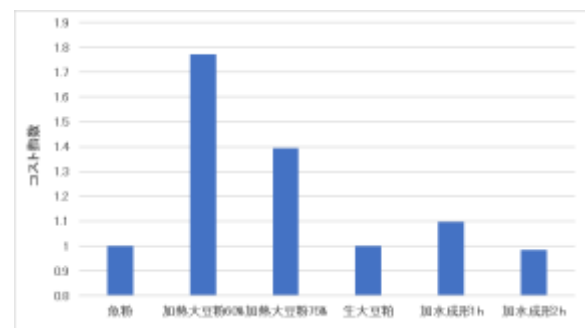


図14 コスト指数 計算結果

生大豆粕飼料(30%)、加熱加水成形大豆(2時間、30%)飼料では魚粉と同程度のコスト指数が得られた。このことから生大豆粕の使用と、大豆の加水加圧加熱処理は飼料効率とコストの両方を加味しても有効な手法であるといえよう。

現時点では魚粉と同等のコスト水準に留まるが、魚粉を部分的にでも代替できたことは、世界的に供給量が不安定で価格高騰の影響を受けやすい魚粉への依存を低減する上で意義がある。また、魚粉資源の枯渇や価格変動リスクを考慮すれば、魚粉を他飼料に置き換えられる技術的知見は、将来的な養殖業の持続可能性に大きく寄与すると考えられる。さらに、現在行っている実験において、魚粉よりもさらに低コスト指数を示した代替飼料も得られており、飼料効率や、代替飼料がコイの腸内細菌叢に与える影響を長期的に評価している段階である。また、コスト指数が最も低かった加

水成形大豆粉(オートクレーブ処理2時間)の飼料を用いて代替率を変化させた実験も行っている。これらの結果は、今後の低コストかつ持続可能な養殖飼料の開発に向けた重要な成果となる。

VI 結論

加熱加水成形大豆粉、生大豆粕を用いることで、魚粉を3割程度代替することができた。バタ粉単体では魚粉の代替に向かないが、米糠、魚油を添加すれば有用なタンパク源となった。カイコ粉は無加工でも魚粉を3割程度代替できた。

VII 謝辞

本研究にあたり多大なるご支援をいただきました。廣瀬養鯉場様には研究対象のコイを提供していただきました。福島大学松田幹教授、西尾俊亮先生、永井義人教授には電気泳動の実験協力、指導をしていただきました。栄研商事株式会社様には実験6で用いたフィードオイルを無償で提供していただきました。前顧問遠藤直哉先生、現顧問平山陽子先生には、本研究を進めるにあたり、我々の自主性を尊重しつつ、必要な場面での確なご助言とご支援を賜りました。なお、本研究は「中谷財団科学教育振興助成」を受けて行われました。ここに感謝の意を表します。

VIII 参考文献

- 1) 河内淳. 世界経済のネタ帳[ウェブサイト], 更新日 2025 年 7 月 3 日, https://ecodb.net/commodity/fish_meal.html
- 2) 森永宏太郎 (1997). 焙煎大豆粉のタンパク質の消化とトリプシンインヒビター活性に及ぼす粉碎と加熱処理の影響. 日本食品科学工学会誌, 44(3), 219-225.
- 3) Karol B Barragán-Fonseca, Julián Cortés-Urquijo, Julián Pineda-Mejía, Diego Lagos-Sierra, Marcel Dicke. (2023). Small-scale Black Soldier Fly-fish farming: a model with socioeconomic benefits. *ANIMAL FRONTIERS*, 13(4), 91-101.
- 4) Okoye, F. C. and J.C. Nnaji. (2005). Effects of substituting fish meal with grasshopper meal on growth and food utilization of the Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* fingerlings. *National Institute for Freshwater Fisheries Research, Nigeria*.
- 5) Perera, G.S.C., Perera, A.D., Piyavorasakul, C., Pumpuang, S. (2023). Fishmeal Replacement by House cricket (*Acheta domestica*) and Field cricket (*Gryllus bimaculatus*) Meals in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fingerling Feed. *Aquaculture Studies*, 23(SI), AQUAST1187.
- 6) Salem, M. F. I., M. M. E. Khalafalla., I. A. I. Saad, and A. M. A. El-Hais (2008). Replacement of fish meal by silkworm *Bombyx mori* pupae meal in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* diets. *Egyptian Journal of Nutrition and Feeds*, 11(3), 611-624.
- 7) 小澤 諒, 三浦正之, 岡崎 巧. (2021). 低魚粉飼料の有効性評価試験-V. 山梨県水産技術センター事業報告書第48号.
- 8) Krisztina Takács, Erika E Szabó, András Nagy, Zsuzsanna Cserhalmi, János Falusi, Éva Gelencsér. (2022). The effect of radiofrequency heat treatment on trypsin inhibitor activity and in vitro digestibility of soybean varieties (*Glycine max*. (L.) Merr.). National Library of Medicine.
- 9) Lu-Hui Wang, Xin Sun, Guo-Qing Huang, Jun-Xia Xiao. (2018). Conjugation of soybean protein isolate with xylose/fructose through wet-heating Maillard reaction.
- 10) Yazhou Ji, Ruican Wang, Yuanyifei Wang, Dongfei Tan, Yaya Wang,

- Yuekun Wu, Haoxin Cui, Yan Zhang, Shuo Wang.
(2024). Thermal-induced interactions between
soy protein isolate and malondialdehyde:
Effects on protein digestibility, structure,
and formation of advanced lipoxidation end
products. National Library of Medicine.
- 11) Müge Aliye Hekimoğlu, Cüneyt Suzer, Şahin
Saka, Kürşat Fırat. (2014). Enzymatic
Characteristics and Growth Parameters of
Ornamental Koi Carp (*Cyprinus carpio* var. Koi)
Larvae Fed by *Artemia nauplii* and Cysts.
Turkish Journal of Fisheries and Aquatic
Sciences.
- 12) Jie-Pin Yang, Xiao-Xiao Ma, Yong-Xing He,
Wei-Fang Li, Yan Kang, Rui Bao, Yuxing Chen,
Cong-Zhao Zhou. (2011). Crystal structure of
the 30 K protein from the silkworm *Bombyx mori*
reveals a new member of the β -trefoil
superfamily. Elsevier.
- 13) 一般社団法人エネルギー情報センター(EIC).
新電力ネット[ウェブサイト], 更新日 2025 年 6
月 17 日, <https://pps-net.org/unit>