

## 野菜加工残渣のアップサイクルによる飼料用ミズアブ (*Hermetia illucens*) の生産と水産飼料としての利用検討

Upcycling of vegetable processing residues for the production and aquafeed  
utilization of the black soldier fly (*Hermetia illucens*)

酒井 麻衣<sup>1)</sup> 大原 裕也<sup>1,2)</sup> 井戸 篤史<sup>3)</sup> 三浦 猛<sup>3)</sup> 小林 公子<sup>1,2)</sup>

1) 静岡県立大学大学院 薬食生命科学総合学府 食品栄養環境科学研究所

2) 静岡県立大学 食品栄養科学部 食品生命科学科

3) 愛媛大学 大学院農学研究科

**抄録** 近年、限りある天然資源である魚粉に代わる飼料資源の候補として昆虫が注目されている。なかでもミズアブ (*Hermetia illucens*) は、野菜加工副産物などの未利用資源を乾燥させることなくそのまま餌として利用できるため、効率的に飼料原料として生産することができる。本研究では、静岡県内の食品工場で恒常的に発生する野菜加工副産物であるバイオソリッドとジャガイモ加工残渣を主原料としてミズアブ幼虫の生産の条件検討を行った。その結果、これらの素材を 1:3 の比で配合した際にミズアブ幼虫の生産効率が最も高くなった。さらに、この条件で得られたミズアブ幼虫が魚粉を代替する飼料原料として有用かを評価するため、モデル魚類であるゼブラフィッシュ (*Danio rerio*) を用いて飼育試験を行った。その結果、ミズアブ幼虫脱脂粉末を 45% 配合した飼料で飼育した群は、魚粉を 45% 含む対照飼料群と同等かそれ以上の成長を示した。以上の結果から、本研究で生産したミズアブ幼虫は、魚粉の代替原料として有望であることが示唆された。

**キーワード:** 昆虫配合飼料、資源循環、アメリカミズアブ、ゼブラフィッシュ

**Abstract** In recent years, insects have attracted increasing attention as promising alternative feed ingredients to fishmeal. The black soldier fly (BSF) (*Hermetia illucens*) is particularly suitable for efficient feed insect production, as it can utilize residues of vegetable processing and other unused biomass directly as feed substrates without the need for drying. In this study, we examined the optimal conditions for producing BSF larvae using vegetable processing by-products, bio-solids and potato residues. The highest production efficiency was achieved when these two substrates were mixed at a 1:3 ratio (bio-solids:potato residues). Furthermore, to evaluate the potential of the produced BSF larvae as a fishmeal alternative, a feeding trial was conducted using zebrafish (*Danio rerio*) as a model species. Fish fed a diet containing 45% BSF meal exhibited growth performance comparable to or greater than that of fish fed a control diet containing 45% fishmeal. These results suggest that BSF valorized from food processing residues is a promising alternative protein source to fishmeal for aquaculture feeds.

**Key words:** Insect-based feed, Resource circulation, Black soldier fly, Zebrafish

受理日: 2025年12月8日

採択日: 2026年3月4日

オンライン公開日: 2026年3月20日

連絡先: 大原 裕也

静岡県立大学食品栄養科学部食品栄養科学科

e-mail: y-ohhara@u-shizuoka-ken.ac.jp

## 1. 序論

世界的に養殖漁業の生産量は増加し続けており、2033年には全食用魚の約60%が養殖由来になると予測されている<sup>1)</sup>。このような潮流に対応するため、水産飼料の主要なタンパク質源である魚粉の安定的供給体制を確立する必要があるが、気候変動や世界的な魚粉需要の増大などを背景に、魚粉の持続的な確保が危ぶまれている。わが国においても、カタクチイワシ等の輸入魚粉の価格は上昇傾向で推移している<sup>2)</sup>。そのため、養殖漁業を持続可能なものにするためには、魚粉を代替する新規飼料資源の開発と実用化が急務となっている。

魚粉の配合率を低下させるアプローチとして、大豆粕などの植物性原材料の配合率を増加させる取り組みが進められてきた<sup>3)</sup>。しかしながら、肉食性の養殖魚を対象とした場合、植物性原料をベースとした飼料では成長効率が低下するケースがあるため、部分的な代替にとどまっている。そこで近年、魚粉を代替する新たな飼料資源の探索・開発が活発化し、その候補として昆虫由来のタンパク質が注目されている。国際連合食糧農業機関 (FAO) が2013年に発表した、持続可能な食料生産における昆虫の潜在的な有用性を示した「Edible insect」<sup>4)</sup>により、食料・飼料資源としての昆虫の可能性が世界的に注目されるようになった。昆虫はタンパク質が豊富であり、乾燥重量に占めるタンパク質の割合は魚粉や食肉に匹敵する<sup>4,5)</sup>。昆虫のアミノ酸組成は種により異なるが、魚粉とのアミノ酸組成の類似性の点において植物性原料より優れている<sup>4,5)</sup>。昆虫の飼育に必要な土地面積は小さく、ミールワーム (*Tenebrio molitor*) やアメリカミズアブ (*Hermetia illucens*) (以下ミズアブとする) などの雑食性昆虫は、野菜加工副産物などの未利用食資源を栄養源として生産が可能である<sup>4,6,7)</sup>。すなわち、未利用食資源から水産用動物性原料として利用可能な昆虫への変換 (アップサイクル) が可能である。また、ミールワームの飼育には乾燥した環境が適しているのに対し、ミズアブは水分含有量が高い餌が適している。そのため、ミズアブの生産においては、乾燥のコストを発生させることなく、水分の多い野菜加工副産物をそのまま餌として利用可能である。

これまでに、モデル魚類であるゼブラフィッシュ (*Danio rerio*) や、ブリ、マダイといった養殖魚を対象

に、ミズアブミール (乾燥・脱脂・粉末化したミズアブ) の栄養価や有効性に関する研究が行われてきた<sup>8-12)</sup>。さらに、未利用食資源を栄養源としてミズアブ幼虫を生産するための研究開発も進められている。未利用食資源の栄養価が、ミズアブ幼虫の発育タイミングや体サイズに影響することや、ミズアブ生産には複数の未利用食資源を組み合わせることが不足する栄養を補う上で有効であることが示唆されている<sup>6,7)</sup>。そのため、利用検討する食資源ごとにミズアブ幼虫生産に最適な配合条件を見出す必要がある。また、未利用食資源を餌料として生産したミズアブ幼虫が、実験用の高栄養餌料で育成したミズアブ幼虫と比較しても飼料原料として遜色がないかどうかを検証する必要がある。

本研究では、静岡県内の食品工場で恒常的に発生する野菜加工副産物をモデル資源として、小規模生産が可能な閉鎖飼育方法を用い、効率的にミズアブ幼虫を生産するための条件の検討を行った。さらに、生産したミズアブ幼虫を用いてゼブラフィッシュを対象とした飼育試験を実施し、魚粉代替飼料としての有用性を評価した。

## 2. 材料および方法

### 2.1 野菜加工副産物を用いたミズアブ幼虫生産条件の検討

本研究では、静岡県内の食品工場で発生する「ジャガイモ加工残渣」と、野菜の洗浄で発生した排水を微生物処理し沈殿させた「バイオソリッド」を所定の組成で混合し、ミズアブ幼虫の餌として使用した。これらは、分譲元の食品企業において主たる野菜加工副産物であり、ミズアブの生産モデルを検討する上で適した資源であると判断し使用した。これらの野菜加工副産物の粗タンパク質含有量をケルダール法により測定し、二種類の残渣の配合により粗タンパク質の組成が15-20%となるように調整した。ミズアブ若齢幼虫は、試験開始までグルコース・コーンミール・酵母餌 (GCY 餌) (表1) で飼育した。幼虫は室温28-30°C・湿度約60%の環境で飼育した。

配合組成を最適化するために、各種閉鎖型容器を活用し以下の試験を行った。50 mL 容量のバイオリアクターチューブ (グライナー、227-245) に餌20gを入れ、

そこへ産卵後 6 日の若齢幼虫 100 個体を投入した。7 日後に各容器から無作為に 10 個体ずつ取り出して重量を測定した。その後、80g の餌を入れた 730mL 容量の飼育容器 (ジップロック R スクリューロック : 通気用の穴とフィルターを導入) (旭化成) に幼虫を餌ごと移した。産卵後 16、19、22、および 26 日において各容器から無作為に 10 個体ずつ取り出して重量を測定した。産卵後 26 日では、摂食期の幼虫 (1-6 令) と外骨格が黒化した非摂食期の個体 (7 令・前蛹・蛹) の個体数をカウントした。

個体密度の検討は以下の手順で実施した。730mL 容量の飼育容器に餌 120g を入れ、そこへ産卵後 5 日の若齢幼虫を約 600 個体投入した。産卵後 12 日に幼虫を餌から一度洗い出し、幼虫 100 個体の総重量が均等 (1 ケース約 2g、1 匹あたり約 20mg) になるように新しい飼育容器に分け、飼育容器に餌を 100g または 150g 入れた。産卵後 26 日には、ミズアブ幼虫を容器から回収し水洗後、個体の総重量、摂食期の幼虫、および非摂食期の個体数を計測・カウントした。

最終的に、上記研究で見出した飼育条件をスケールアップしミズアブ生産試験を行った。730mL 容量の飼育容器に、コーンミール・酵母を原料とする「CY 餌」 (表 1) 100g、または、ジャガイモとバイオソリッドを原料とする「PB 餌」100g を入れ、そこへ産卵後 7 日の若齢幼虫を 2.5g ずつ投入した。産卵後 10 日に、CY 餌 1kg または野菜加工副産物の餌 1.5kg を入れた 20L 容量のウォータータンク (大澤ワックス社) に幼虫を餌ごと移し、通気メッシュを挟んで蓋をした。産卵後 19 日に、ミズアブ幼虫を水洗し総重量を測定したのち、1 日絶食させ餌抜きを行った。翌日、水洗したのち再度総重量を測定し、これを後述する方法で加工し、ゼブラフィッシュの飼育試験に用いた。

## 2.2 ミズアブミールの加工

上記の実験で生産したミズアブ幼虫を 1 分間煮沸処理した。煮沸処理したミズアブ幼虫を恒温乾燥機により 60°C で一晩乾燥させたのち、スピードミルを用いて破碎した。破碎したミズアブ粉末を 4 倍量のヘキサンに加え攪拌し脱脂を行った。脱脂の操作を 2 回行ったのち、ドラフト内でミズアブ粉末を静置し、残存するヘ

キサンを揮発させた。ミズアブ脱脂粉末を目開き 500 および 250  $\mu\text{m}$  のふるいに 1 回ずつかけ、250  $\mu\text{m}$  のふるいを通過したものをゼブラフィッシュ飼育試験に使用した。粗タンパク質および粗脂質の含有量は、それぞれ、ケルダール法およびソックスレー抽出法により分析した。

## 2.3 ゼブラフィッシュ飼育試験

魚粉を 45%配合した対照飼料と、魚粉を全て CY ミズアブ脱脂粉末または PB ミズアブ脱脂粉末に置き換えた飼料の 3 種類を設計した (表 2)。各飼料の粗タンパク質を同等にするために、動物性原料以外の素材を配合した「植物性飼料」を作製した (表 3)。混合した原料に餌がまとまるように水を加えて重量 40mg の練り餌を作製し、給餌まで 4°C で保存した。保存期間は最長 1 週間とした。

ゼブラフィッシュ飼育実験は、静岡県立大学動物実験委員会の承認を得て実施した (承認番号 F235425)。実験に用いた野生型ゼブラフィッシュ (RIKEN WT) は、産卵後 59 日までゾウリムシ、ブラインシュリンプ、および市販の配合飼料・Gemma Micro ZF (スクレッティング社) を与え、水温 28-29°C、14・10 時間の明暗サイクルで飼育した。産卵後 55 日の時点で、ゼブラフィッシュを 9 個の水槽に 20 匹ずつ分け飼育した (1 種類の飼料につき水槽 3 基)。試験開始前日である産卵後 60 日は給餌を行わなかった。産卵後 61-120 日の 60 日間、1 日あたり練り餌を 1 粒 (産卵後 61-81 日)、2 粒 (産卵後 82-95 日)、3 粒 (産卵後 96-104 日)、4 粒 (産卵後 105-120 日) を目安に給餌した。それぞれのタイムポイントにおいて、一尾ずつ体長測定用のケースに入れ写真を撮影し、ImageJ を用いて標準体長を測定した。産卵後 123 日に重量の測定を行った。

## 2.4 統計解析

各種統計解析 (One-way ANOVA、Tukey's test、t-test、カイ 2 乗検定) は R を用い実施した。

表 1. GCY 餌および CY 餌の組成

原料	使用量		単位
	GCY 餌	CY 餌	
コーンミール	70	180	g
粉末酵母	40	130	g
グルコース	100	-	g
寒天	5.5	-	g
おがくず	-	60	g
プロピオン酸	-	3.8	mL
水	1000	630	mL
粗タンパク質 (% in dry weight)	12	22	

表 2. ミズアブ幼虫配合飼料の組成

原料	原料の栄養組成 (% in dry weight)			配合率 (%)	
	粗タンパク質	粗脂質	対照飼料	CY ミズアブ 配合飼料	PB ミズアブ 配合飼料
魚粉 (新東亜交易)	65	7.8	45	-	-
CY ミズアブ脱脂粉末	66	3.4	-	45	-
PB ミズアブ脱脂粉末	57	2.9	-	-	45
植物性飼料 (対照飼料用)	36	2.8	45	-	-
植物性飼料 (CY ミズアブ配合飼料用)	35	2.5	-	45	-
植物性飼料 (PB ミズアブ配合飼料用)	44	3.9	-	-	45
魚油 (タラ肝油) (新東亜交易)	0	100	10	10	10
合計	-	-	100	100	100
練り餌 1 粒当たりの重量 (mg)			40	40	40
粗タンパク質 (% in dry weight)			45	45	45
粗脂質 (% in dry weight)			15	13	13

表 3. 植物性飼料の組成

原料	原料の栄養組成 (% in dry weight)		配合率 (%)	配合率 (%)	
	粗タンパク質	粗脂質		対照飼料用	CY ミズアブ 配合飼料用
大豆粕	46	1.2	44	44	44
コーングルテンミール	61	8.7	22	18.6	37.1
小麦粉	11	1.2	26	29.4	10.9
ビタミンミックス	-	-	1	1	1
ミネラルミックス	-	-	0.6	0.6	0.6
塩化コリン	-	-	0.1	0.1	0.1
安定化ビタミンC	-	-	0.3	0.3	0.3
第一リン酸カルシウム	-	-	1	1	1
カルボキシメチルセルロース	-	-	5	5	5
合計	-	-	100	100	100
粗タンパク質 (%)			36	35	44
粗脂質 (%)			2.8	2.5	3.9

### 3. 結果

#### 3.1 野菜加工副産物を用いたミズアブ生産の最適化

ジャガイモ加工残渣とバイオソリッドを用い、乾燥重量に対する粗タンパク質量が 10、15、20%となる餌を作製し、これらの餌で飼育したミズアブ幼虫の成長効率を比較した(図 1)。各群 3 つの飼育容器で構成し、各飼育容器に 100 個体を使用した(総個体数は各群 300 とした)。産卵後 13 日(残渣投与 7 日)の時点では、粗タンパク質量の多い餌ほど重量が大きくなった。その後、産卵後 16 日から 19 日にかけてミズアブ幼虫の重量が増加し、産卵後 22 日でピークに達した。産卵後 16-22 日の間は、餌の粗タンパク質量によってミズアブ幼虫の重量に有意差はなかった。産卵後 26 日目になると、粗タンパク質 10 および 15%の群と比較し、粗タンパク質 20%の群ではミズアブ幼虫の重量が有意に小さくなった。このタイムポイントにおける致死個体数を比較すると、粗タンパク質 15%および 20%の群では致死個体は 300 個体中 21 個体(7%)であったのに対し、粗タンパク質 10%の群では致死個体が 300 個体中 48 個体(16%)となり有意差がみられた。また、粗タンパク質量 20%の餌を摂取した群では、生存個体のうち 75 個体(27%)が非摂食期に移行していた一方で、粗タンパク

質量 15%および 10%の餌を摂取した群では非摂食期の個体の割合がそれぞれ 18 個体(6.5%) および 3 個体(1.2%)であった。粗タンパク質 10%と 15%の餌を摂取した群を比較すると、どのタイムポイントにおいても粗タンパク質 15%の群において重量が高い傾向が見られたことから、以後のミズアブ生産試験では、粗タンパク質量が 15%となる、ジャガイモ加工残渣 75%とバイオソリッド 25%を混合した餌・PB 餌を使用した。

PB 餌で飼育したミズアブ幼虫の平均重量は、最も大きい群でも 100mg にとどまっておらず(図 1)、最大 200mg を超える重量にまで到達するミズアブ幼虫のポテンシャルを十分に活かしてきれていないことが課題となった。そこで次に、産卵後 12-26 日の間に、若齢幼虫 100 個体を 100g(餌 1g/個体)または 150g の餌(餌 1.5g/個体)で飼育し、1 個体あたりの餌を多くすることで重量が増加するか調べた(図 2)。各群 3 つの飼育容器を用いて総個体数を 300 とした。産卵後 12 日において総重量 2g であった幼虫は、産卵後 26 日まで飼育すると、ミズアブの総重量は餌 100g の群で 11g となった一方で、餌 150g の場合は総重量が 14g に到達していた。また、産卵後 26 日目において生存個体数と非摂食期の個体をカウントすると、餌 100g の群でそれぞれ平

均 98%および 9.5%、餌 150 g の群で平均 99%および 8.4%となっており、どちらも群間で有意差はなかった。以上の結果から、PB 餌を使用する場合、幼虫に対する餌の量を 1.5 倍に増やすことで重量を大きくすることができることが分かった。

次に、上記研究で見出した飼育条件をスケールアップし、ミズアブ幼虫生産試験を行った (図 3)。比較対象として、ミズアブの系統維持・研究に用いられる CY 餌 (粗タンパク質約 20%) を用いた。各群 3 つの飼育容器で構成し、各飼育容器に産卵後 7 日目の若齢幼虫を 2.5 g 投入した。また、非摂食期への移行による重量減少を最小限にとどめるために、生産試験は受精後 20

日目までとし、ゼブラフィッシュでの飼育試験に用いることを考慮して受精後 19-20 日の間に餌抜きを行った。その結果、産卵後 20 日の時点で PB 餌 1.6 kg から平均総重量 110 g のミズアブ幼虫が得られた一方、対照区である CY 餌 1.1 kg の群では、平均総重量 150 g のミズアブ幼虫が得られた。見かけの飼料効率 (増加した重量/使用した飼料の重量) を算出すると、PB 餌を摂取した群では見かけの飼料効率が平均 0.067 であったのに対し、CY 餌を摂取した群では平均 0.13 となった。この結果は CY 餌と比べ PB 餌はミズアブ幼虫の生産効率が低いことを示している。

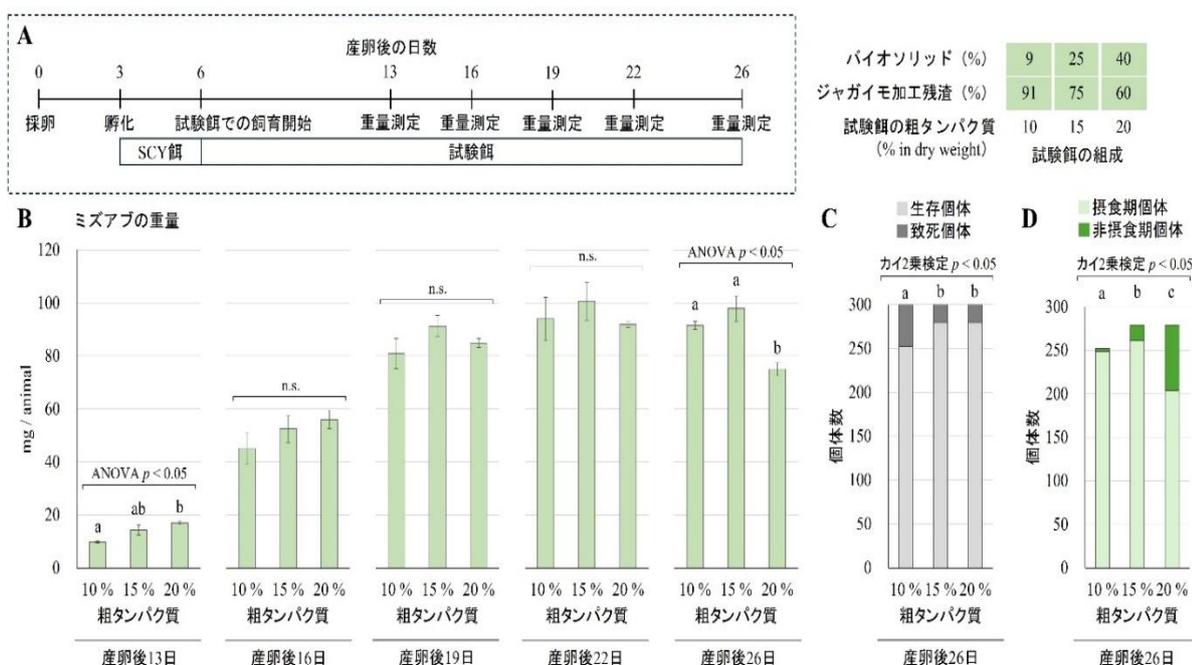


図 1. ジャガイモ加工残渣およびバイオソリッドの配合率の検討

(A) 飼育試験のタイムスケジュールを示す。1つのバッチにつき 100 g の餌で 100 個体を飼育し、1群あたり 3 つのバッチを試験した。産卵後 6 日から試験餌で飼育した。(B) 産卵後 13、16、19、22、および 26 日におけるミズアブ幼虫の重量を示す。各群 3 つのバッチの平均値と標準誤差を示す。各バッチにおいて、無作為に選抜した 10 個体の平均値を算出した。各タイムポイントで統計学的解析を実施した (ANOVA および Tukey's test)。異なるアルファベット間で有意差があることを示す (Tukey's test) ( $p < 0.05$ )。n.s.: 統計学的有意差なし (ANOVA、 $p > 0.05$ )。

(C and D) 産卵後 26 日における生存個体数と致死個体数 (C)、および、摂食期個体の数と非摂食期に移行した個体の数 (D) を示す。3 群のカイ 2 乗検定後、2 群間総当たりのカイ 2 乗検定を実施した。異なるアルファベット間で有意差があることを示す ( $p < 0.0167$ : Bonferroni 補正後)。

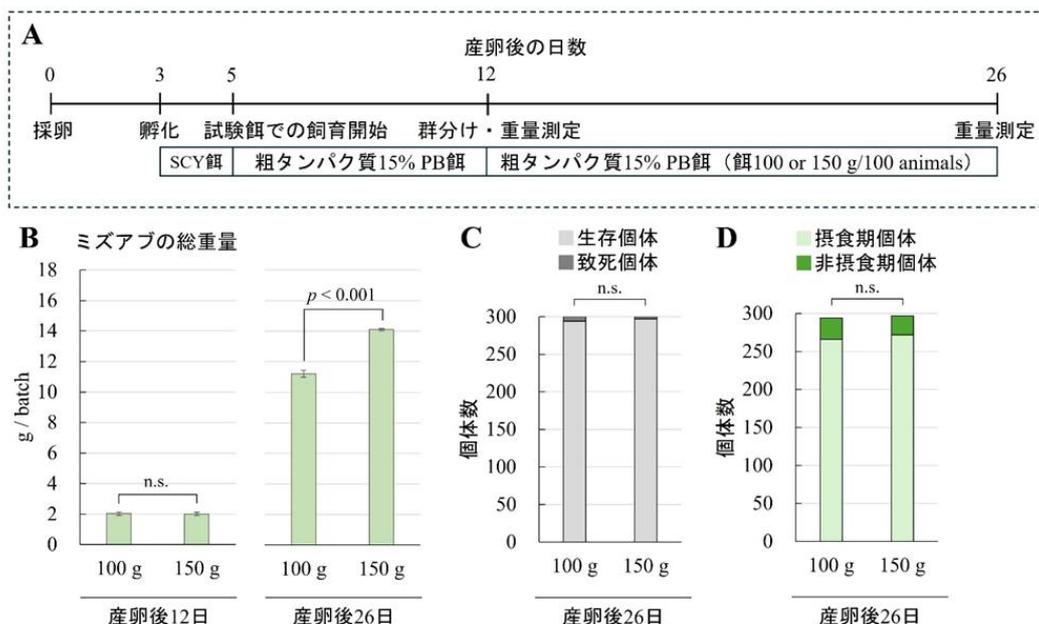


図2. ミズアブ個体数と餌の比率の検討

(A) 飼育試験のタイムスケジュールを示す。1つのバッチにつき100個体を飼育し、1群あたり3つのバッチを試験した。産卵後5-12日の間、100個体の幼虫を20gのPB餌で飼育したのち、100個体を100gまたは150gのPB餌で飼育する条件に切り替えた。(B) 産卵後12および26日におけるミズアブ幼虫の総重量を示す。各群3つのバッチの平均値と標準誤差を示す。各タイムポイントで統計学的解析を実施した (*t*-test)。n.s.: 統計学的有意差なし ( $p > 0.05$ )。(C and D) 産卵後26日における生存個体数と致死個体数 (C)、および、摂食期個体の数と非摂食期に移行した個体の数 (D)を示す。n.s.: 統計学的有意差なし (カイ2乗検定、 $p > 0.05$ )。

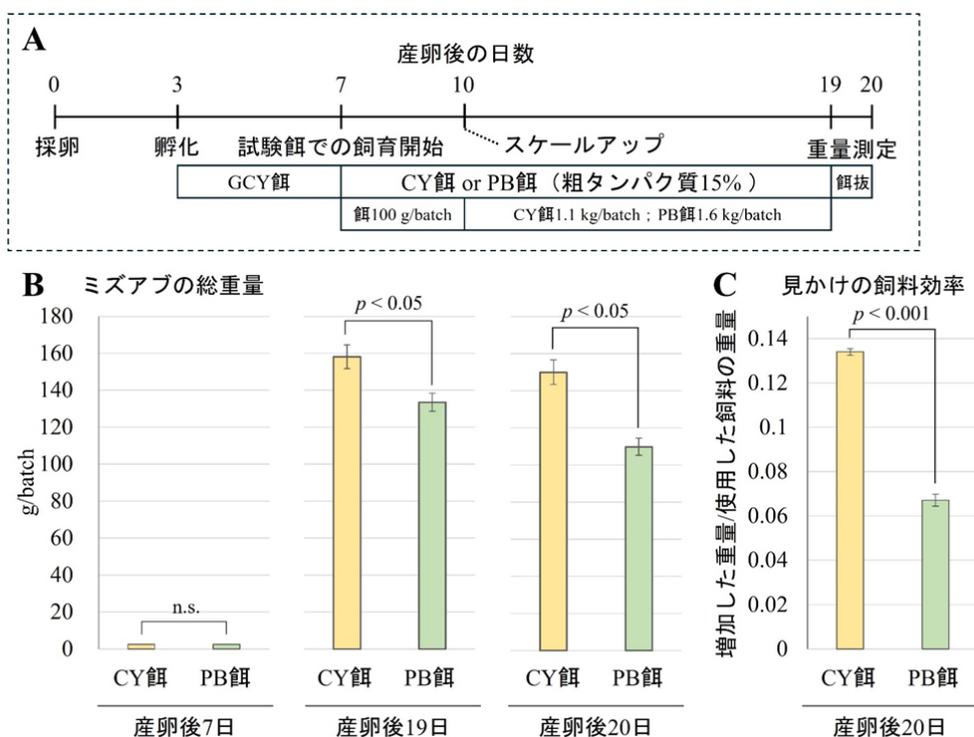


図3. 飼料用ミズアブの生産

(A) 飼育試験のタイムスケジュールを示す。1群あたり3つのバッチを試験した。産卵後7日において総重量2.5gの幼虫を100gのCY餌またはPB餌に投入し飼育したのち、産卵後10日において1kgのCY餌または1.5kgの

PB 餌を追加し飼育した。産卵後 19-20 日に餌抜きを行った。(B) 産卵後 7、19、および 20 日におけるミズアブ幼虫の総重量を示す。各群 3 つのバッチの平均値と標準誤差を示す。各タイムポイントで統計学的解析を実施した (*t*-test)。n.s. : 統計学的有意差なし ( $p > 0.05$ )。(C) 産卵後 20 日における見かけの飼料効率 (増加した重量/使用した飼料の重量) を示す。*t*-test を実施した。

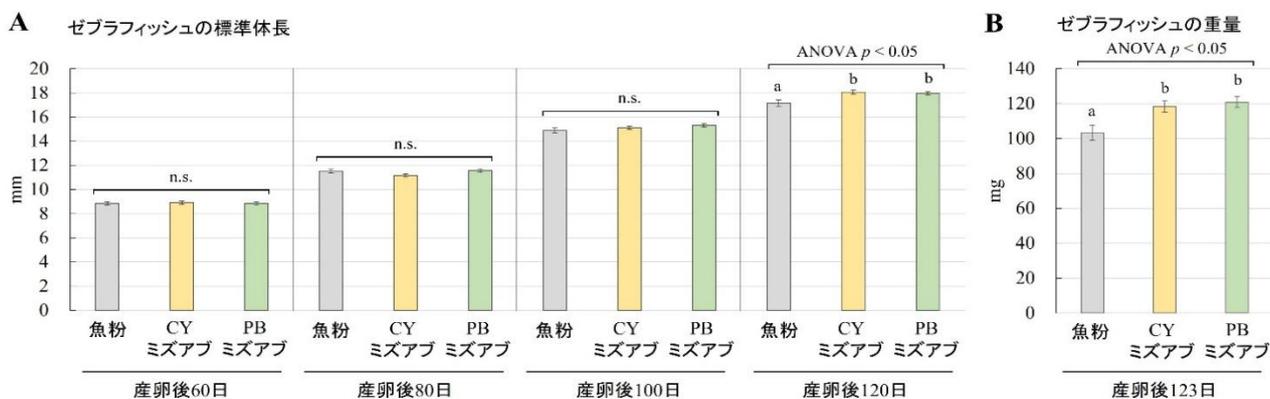


図 4. ミズアブミール配合飼料によるゼブラフィッシュ飼育試験

魚粉を主体とする飼料を投与した対照区 (魚粉) と、CY 餌および PB 餌で生産したミズアブを配合した飼料を投与した群 (それぞれ、CY ミズアブおよび PB ミズアブと示す) の飼育試験の結果を示す。飼育試験は受精後 60-123 日に実施した。(A) 産卵後 60、80、100、および 120 日目における標準重量を示す。各群のサンプルサイズは 56-60 であり、平均値と標準誤差を示す。各タイムポイントで統計学的解析を実施した (ANOVA および *t*-test)。n.s. : 統計学的有意差なし (ANOVA、 $p > 0.05$ )。異なるアルファベット間で有意差があることを示す (Tukey's test) ( $p < 0.05$ )。(B) 産卵後 123 日における重量を示す。各群のサンプルサイズは 56-60 であり、平均値と標準誤差を示す。統計学的解析として ANOVA および Tukey's test を実施した。異なるアルファベット間で有意差があることを示す (Tukey's test) ( $p < 0.05$ )。

### 3.2 ゼブラフィッシュ飼育試験

野菜加工副産物から生産したミズアブ幼虫の、水産飼料としての有効性を明らかにするために、魚粉を 45% 配合した対照飼料と、魚粉を全て CY ミズアブ脱脂粉末 (CY 餌で生産したミズアブの脱脂粉末) または PB ミズアブ脱脂粉末 (PB 餌で生産したミズアブの脱脂粉末) に置き換えた飼料を 60 日間ゼブラフィッシュに給餌し、成長効率を解析した (図 4)。各群 3 つの水槽で構成し、各水槽に 20 個体を使用した (各群の総個体数は 60 とした)。試験開始時の受精後 60 日は 3 群の体長に有意差はなく、受精後 80 および 100 日時点においても 3 群の体長に有意差はなかったが、受精後 120 日の時点では、対照群と比べ CY 餌および PB 餌の群で体長が有意に大きくなっていった。対照群では平均体長が 17.1 mm であったのに対し、CY ミズアブ脱脂粉末および PB ミズアブ脱脂粉末で飼育した群では平均体長が 18.0

mm であった。また、試験終了後にゼブラフィッシュの重量を測定したところ、対照群では平均重量が 103 mg であったのに対し、CY ミズアブ脱脂粉末および PB ミズアブ脱脂粉末で飼育した群では平均重量がそれぞれ 118 および 121 mg であり、統計学的有意差が認められた。この結果は、ゼブラフィッシュに対してミズアブ脱脂粉末は魚粉と同等以上の成長作用を有することを示している。

## 4. 考察

### 4.1 野菜加工副産物がミズアブの発育タイミングに及ぼす影響

本研究では、野菜加工で発生する未利用資源であるバイオソリッドとジャガイモ加工残渣を栄養源として、ミズアブ幼虫の生産の最適化を試みた。この中で、バイオソリッド配合量ならびに粗タンパク質の割合が高い

餌の場合、ミズアブの非摂食期への移行が早まり収量が低下することが分かった (図 1)。タンパク質・アミノ酸レベルの高い富栄養状態では、Target of rapamycin (TOR) シグナルやインスリンシグナルといった栄養シグナルが活性化し、全身の成長が活性化する<sup>13)</sup>。さらに、成長期終盤では、これらのシグナル伝達経路は摂食を停止させ蛹への変態を惹起する鍵ホルモンである「エクジステロイド」の産生を活性化させる<sup>13)</sup>。このことから、一つの可能性として、バイオソリッドの配合率が高い場合、ミズアブ体内のアミノ酸レベルが上昇することで栄養シグナルとエクジステロイド産生が活性化し、結果として非摂食期への移行が早まったことが考えられる。別の可能性として、バイオソリッドに含まれる微生物群によるエクジステロイド産生促進作用が予想される。ショウジョウバエでは、腸管内の乳酸菌が、成長シグナルの制御を介してエクジステロイド産生ならびに非摂食期への移行を促進することが報告されている<sup>14)</sup>。これらの可能性を検証するために、今後、ミズアブ幼虫餌中のアミノ酸組成・含有量や、加熱による微生物の不活性化の有無が、栄養シグナル、エクジステロイド産生、および発育タイミングに及ぼす影響を明らかにしていく必要がある。しかし、ミズアブにおける栄養シグナルの活性指標やエクジステロイド合成経路などは明らかにされていないため、まずはショウジョウバエでの知見をもとに、ミズアブ発育過程の栄養依存性に関する分子生物学的知見を積み重ねていく必要がある。

#### 4.2 飼料資源としてのミズアブの有用性と課題

ゼブラフィッシュ飼育試験の結果から、PB 餌で生産したミズアブ幼虫は、CY 餌で生産したミズアブ幼虫と同様に、魚粉と同等に飼料として利用できることが分かった (図 4)。魚粉すべてをミズアブ脱脂粉末に置き換えたが、ゼブラフィッシュの発育効率を低下させることはなかった。よって、ミズアブ幼虫生産に使用する食資源によらず、ミズアブ幼虫は魚粉を代替するタンパク質源として利用可能であることが示唆される。しかし、PB 餌で生産したミズアブ幼虫は、CY 餌で飼育したミズアブ幼虫と比較し粗タンパク質の割合が低く (表 3)、タンパク質含有量の観点では CY 餌で生産し

たミズアブ幼虫に劣る。PS 餌で生産したミズアブ幼虫の粗タンパク質は 57% となり魚粉よりやや低く (表 2)、魚粉代替率の増加に伴い他の飼料原料で不足するタンパク質を補う必要がある。実際、本研究においても、PB 餌で生産したミズアブ幼虫をゼブラフィッシュ用の飼料に配合する際に植物性タンパク質の割合を増やし、餌全体の粗タンパク質を底上げしている (表 2)。より粗タンパク質の割合が高いミズアブ幼虫を生産するためには、ミズアブ幼虫生産用の餌の粗タンパク質を 20% 程度に高める必要があると予想される。しかし、本研究で用いた野菜加工副産物の場合、粗タンパク質を 20% にすると収量が低下した (図 1)。そのため、ミズアブ幼虫の粗タンパク質と収量のバランスを考慮した生産条件の調整が求められる。

ゼブラフィッシュを用いた先行研究においても、全魚粉をミズアブ脱脂粉末に置換することによりゼブラフィッシュの成長は阻害されず、むしろ成長効率が向上傾向となることが報告されている<sup>15)</sup>。しかし、ミズアブ幼虫を含む飼料用昆虫は、魚の正常な発育と健康維持に重要なタウリンを欠いているため<sup>16)</sup>、タウリン要求性の高い魚種の場合はタウリンの添加が必須であると予想される。さらに、ミズアブなどの昆虫類は、特に海水魚において栄養要求性の高い必須脂肪酸・ドコサヘキサエン酸 (DHA) やエイコサペンタエン酸 (EPA) などの長鎖オメガ 3 脂肪酸を欠いているため<sup>16)</sup>、ミズアブ幼虫を水産飼料として使用する場合、DHA や EPA が豊富な魚油の添加は必須である。本試験においても、ミズアブ幼虫配合飼料には魚油が添加されている。魚油もまた限りある天然資源であるため、持続可能な養殖漁業を目指すうえでは、魚粉だけでなく魚油を代替する資源についても今後の更なる研究開発が望まれる。ミズアブに EPA を蓄積させるために、海藻を配合した餌でミズアブを生産する試みはなされているが、総脂肪酸のうち EPA が 6% 含まれる海藻で飼育した場合であってもミズアブの総脂肪酸に占める EPA の割合は 1% にしか到達しない<sup>17)</sup>。このように、現段階ではミズアブを介して長鎖オメガ 3 脂肪酸を濃縮させることは難しく、目的に応じて、カイコなどの長鎖オメガ 3 脂肪酸の蓄積能力の高い昆虫種<sup>18)</sup>の利用を検討することが望ましい。

今後、ミズアブを水産飼料用原料として社会実装するためには、生産効率を高めるための研究や飼料研究だけでなく、社会受容性の改善も重要な課題として挙げられる。昆虫は東南アジアを中心に食料として利用されており<sup>4)</sup>、自然界では昆虫類は淡水魚の主要な栄養源となっている<sup>19)</sup>。しかし、欧米やわが国では、昆虫を食資源とみなし利用することに対して根強い抵抗感がある<sup>20,21)</sup>。このことを解決するためには、飼料原料としての昆虫の栄養特性や安全性について科学的エビデンスを積み重ね、その成果を発信し続けることが必要である。また、飼料として昆虫特有の機能性を見出し、それを最大限高める技術を開発することも、飼料資源としての昆虫の価値・地位を高めることに繋がる。これらの課題に一つ一つ取り組んでいくことにより、水産養殖におけるミズアブ配合飼料の社会実装への道筋が見えてくるものと期待される。

以上、本研究では、2種類の野菜加工副産物を栄養源としてミズアブを生産する条件を最適化するとともに、ゼブラフィッシュをモデルに魚粉代替飼料としての有効性を検証した。本研究で活用した閉鎖型ミズアブ生産系は、小規模でのミズアブ生産の検討に有用であり、ミズアブ生産研究の新たな選択肢となり得る。さらに、本研究で得られた成果は、昆虫を核とした資源アップサイクル研究を応用基盤的な段階から社会実装へと押し進める基盤となるものであり、この点において発展性を有する。特に、ゼブラフィッシュの飼育において魚粉を完全にミズアブで代替できたという結果は、養殖魚でのミズアブの利用検討を進めるうえで重要な知見となる。

## 謝辞

野菜加工副産物を提供くださいました株式会社ヤマザキ様に御礼申し上げます。また、野生型ゼブラフィッシュ系統を分譲くださいました、ナショナルバイオリソースプロジェクト・理化学研究所脳神経科学研究センターに感謝申し上げます。

## 引用文献

1) OECD/FAO (2024), OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033, Paris and Rome,

<https://doi.org/10.1787/4c5d2cfb-en>.

2) Fisheries Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries. (2025, June 6). Annual report on the developments in Japan's fisheries in FY2024 (令和6年度水産白書).

[https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/r06\\_h/index.html](https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/r06_h/index.html)

3) Hussain SM, Bano AA, Ali S, Rizwan M, Adrees M, Zahoor AF, Sarker PK, Hussain M, Arsalan MZ, Yong JWH, Naeem A (2024), Substitution of fishmeal: highlights of potential plant protein sources for aquaculture sustainability. *Heliyon*, 10(4), e26573.

4) van Huis A, Van Isterbeeck J, Klunder H, Mertens E, Halloran A, Muir G, Vantomme P (2013), Edible insects: future prospects for food and feed security. (FAO forestry paper; No. 171). Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

5) Tang C, Yang D, Liao H, Sun H, Liu C, Wei L, Li F (2019), Edible insects as a food source: a review. *Food Prod Process and Nutrition*, 1, 8.

6) Eggink KM, Lund I, Pedersen PB, Hansen BW, Dalsgaard J (2022), Biowaste and by-products as rearing substrates for black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae: effects on larval body composition and performance. *PLoS One*, 17(9), e0275213.

7) Nguyen TT, Tomberlin JK, Vanlaerhoven S (2013), Influence of resources on *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larval development. *Journal of Medical Entomology*, 50(4), 898–906.

8) Vargas A, Randazzo B, Riolo P, Truzzi C, Gioacchini G, Giorgini E, Loreto N, Ruschioni S, Zarantoniello M, Antonucci M, Polverini S, Cardinaletti G, Sabbatini S, Tulli F, Olivotto I (2018), Rearing zebrafish on black soldier fly (*Hermetia illucens*): biometric, histological, spectroscopic, biochemical, and molecular implications. *Zebrafish*, 15(4), 404–419.

9) Hirayasu H, Yamamoto T, Tsujimura H, Seyama T, Ido A, Hashizume A, Miura T, Yamamoto K (2023), Growth experiment of juvenile red sea bream *Pagrus major* fed low or non-fish meal diets formulated with black soldier fly

- Hermetia illucens* meal. *NIPPON SUISAN GAKKAISHI*, 89(5), 414–423.
- 10) Daifuku T, Tsujimura H, Hirayasu H, Yamamoto K, Seyama T (2024), Effect of long-term feeding diet containing defatted black soldier fly *Hermetia illucens* larvae meal on the growth of red sea bream *Pagrus major*. *NIPPON SUISAN GAKKAISHI*, 90(6), 551–553.
- 11) Ido A, Ali MFZ, Takahashi T, Miura C, Miura T (2021). Growth of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) fed on a diet including partially or completely defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal. *Insects*, 12(8), 722.
- 12) Tran HQ, Nguyen TT, Prokešová M, Gebauer T, Doan HV, Stejskal V (2024), Systematic review and meta - analysis of production performance of aquaculture species fed dietary insect meals. *Reviews in Aquaculture*, 14(3), 1637–1655.
- 13) Texada MJ, Koyama T, Rewitz K (2020), Regulation of body size and growth control. *Genetics*, 216(2), 269–313.
- 14) Storelli G, Defaye A, Erkosar B, Hols P, Royet J, Leulier F (2011), *Lactobacillus plantarum* promotes *Drosophila* systemic growth by modulating hormonal signals through TOR-dependent nutrient sensing. *Cell metabolism*, 14(3), 403–414.
- 15) Zarantoniello M, Randazzo B, Gioacchini G, Truzzi C, Giorgini E, Riolo P, Gioia G, Bertolucci C, Osimani A, Cardinaletti G, Lucon-Xiccato T, Milanović V, Annibaldi A, Tulli F, Notarstefano V, Ruschioni S, Clementi F, Olivotto I (2020), Zebrafish (*Danio rerio*) physiological and behavioural responses to insect-based diets: a multidisciplinary approach. *Scientific Reports*, 10(1), 10648.
- 16) Rossi G, Psarianos M, Ojha S, Schlüter OK (2025), Review: Insects as a novel feed ingredient: processing technologies, quality and safety considerations. *Animal*, 3, 101495.
- 17) Liland NS, Biancarosa I, Araujo P, Biemans D, Bruckner CG, Waagbø R, Torstensen BE, Lock EJ (2017), Modulation of nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae by feeding seaweed-enriched media. *PLoS One*, 12(8), e0183188.
- 18) Yu XB, Shen YY, Cui QM, Chen Y, Sun W, Huang XZ, Zhu Y (2018), Silkworm (*Bombyx mori*) has the capability to accumulate C20 and C22 polyunsaturated fatty acids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 120(2), 1700268.
- 19) Ueda R, Kanaiwa M, Terui A, Takimoto G, Sato T (2025), Seasonal timing of ecosystem linkage mediates life-history variation in a salmonid fish population. *Ecology*, 106(5), e70114.
- 20) Kröger T, Dupont J, Büsing L, Fiebelkorn F (2022), Acceptance of insect-based food products in western societies: a systematic review. *Frontiers in Nutrition*, 8, 759885.
- 21) Ngo HM, Moritaka M (2021), Consumer attitudes and acceptance of insects as food and feed: a review. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 66(2), 259–266.