

アメリカミズアブを基点とした新規地域バイオマス循環プロセスの構築

長岡技術科学大学 教授 山口隆司、准教授 牧慎也、助教 渡利高大、助教 ヌルアデリン
長岡工業高等専門学校 教授 村上祐貴、准教授 川上周司
金沢大学 教授 竹内裕
新潟県内水面水産試験場 場長 樋口正仁、参事 佐藤将、大野佑紀、中川 至
株式会社プラントフォーム 代表取締役 CEO 山本祐二

1. 研究の経緯と課題

北陸地方の主要な農作物の生産副産物（もみ殻、稲わら、食品残渣等）は、その有効な活用策が見出せず、廃棄あるいは処分に苦慮している。このような貴重な農産資源を最大限に活用し資源完全循環を達成することが、17 の SDGs の目標達成に貢献すると共に北陸地域が世界に誇れる資源循環地域を発信するための課題である。本事業では、このアメリカミズアブ (BSF) を基点として廃棄物である酒粕から魚粉代替飼料を作成し、長岡技大・金沢大学が得意とする陸上養殖と複合することで地域バイオマスの新たな循環サイクルを構築するとともに地域資源の”アップサイクル”を目指す。本研究では、BSF の飼育技術の開発、錦鯉への BSF 給餌試験、BSF 混合給餌におけるニジマス幼魚の成長特性を実施し、社会実装に向けた基盤技術の開発を行った。

2. アメリカミズアブの飼育技術の開発

2.1 目的

BSF を用いた廃棄物の処理技術はすでに、欧米やアフリカなどで社会実装されており、タンパク質の供給源である既存畜産と比較して生育に必要な資源や温室効果ガスの排出が圧倒的に少ない。一方で、酒粕などのアルコール分を含む廃棄物を用いて飼育した例はない、本実験では、新潟県長岡地域で発生する酒粕を用いて BSF を飼育する技術の開発に取り組んだ。また、BSF 幼虫による廃棄物の堆肥化を行う上で問題となるのが、飼育終了時に幼虫と残渣の分離が難しいことである。過去の飼育で、廃棄物が BSF によって分解され、残った残渣はスラリー状になり、これにより BSF 幼虫と残渣の分離が難しくなる。また、スラリー状の残渣は乾

燥すると幼虫に張り付いた状態で固形になってしまうため、飼育期間後のアプローチは効果が薄い。そこで、本研究では、BSF 分解残渣が砂状に分解する条件を検討した。

2.2 実験方法

2.2.1 実験準備

堆肥化実験に用いた幼虫は、長岡高専内に設置した成虫飼育インキュベーターから採取した受精卵を孵化させたものを用いた。採取した受精卵はオカラに含水率70%になるように水を添加した基質の上に静置し、幼虫の体重、体長、栄養組成等を出来るだけ揃えること、また、実験者が扱いやすいサイズまで育てることを目的に3日間の前飼育を行った。前飼育を終えた幼虫の体重を計測し、幼虫一匹当たりの重量を算出した。また、前実験として酒粕を給餌して飼育した BSF について基礎成分とアミノ酸について日本食品分析センターに外注分析を依頼した。

2.2.2 堆肥化実験

BSF 飼育は、プラスチックコンテナ内で行った。基質の総量は1.5kgとし、酒粕750g、オカラ75g、水675gを添加し、スプーンを用いてかき混ぜた。幼虫は重量換算で1146匹を添加した。飼育条件は温度27℃、湿度60%以上とした。また、実験期間は幼虫の半分以上が前蛹になった時とした。実験期間中は残渣の状態を記録し、実験開始から3、5、10、14日目に幼虫10匹の合計体重を計測し、平均体重を算出した。

2.3 実験結果と考察

2.3.1 パイロット BSF 飼育プラントの整備

酒粕を用いた BSF 飼育技術を確立するため、長岡高専内に設置したコンテナ内にパイロット BSF 飼育プラントを整備した。整備したプラ

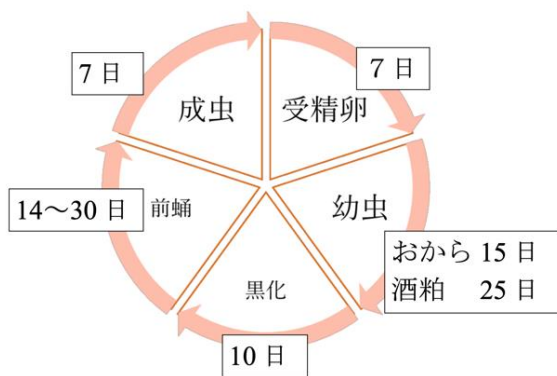


図 2.1 長岡における BSF 飼育サイクル

ントを使用して長岡地域における BSF 飼育サイクルを構築した (図 2.1)。

表 2.1 に事前実験として酒粕を用いて飼育した BSF の基礎成分、図 2.2 にアミノ酸の成分を示す。酒粕を給餌して飼育した BSF は通常の飼育方法で飼育した BSF に比べタンパク質が多く 49.1 g/100 g であった。既往の研究から、魚の廃棄物を給餌して飼育した BSF のタンパク質量が最大 78.8 g/100 g であるため、取り扱いが難しい魚廃棄物と同程度の高タンパク質な BSF を飼育可能であった。一方で、通常の BSF と比べてナトリウム量が高いため、今後、このナトリウム量が嗜好性餌としてどのような影響が出るか調査が必要である。アミノ酸量についても全ての項目において通常の BSF と比べて増加傾向であった。

表 2.1 通常の餌で飼育した BSF と酒粕で飼育した BSF の基礎成分

	通常	酒粕	単位
水分	1.14	1.19	g/100g
タンパク質	37.5	49.1	g/100g
脂質	48.3	32.5	g/100g
灰分	3.3	3.8	g/100g
炭水化物	9.8	13.4	g/100g
エネルギー	624	543	kcal/100g
ナトリウム	20.1	28.2	mg/100g
食塩相当量	0.0511	0.0716	g/100g

2.3.2 砂質化実験

実験期間中の餌の状態を図 2.3 に示す。時間

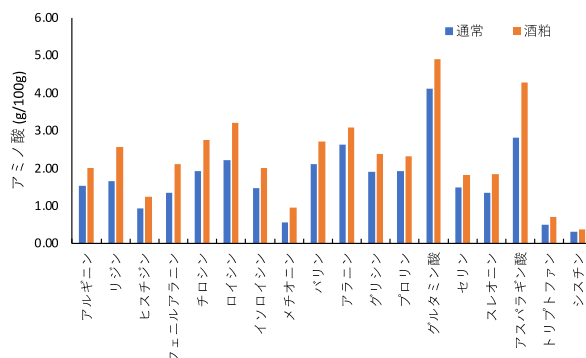


図 2.2 BSF のアミノ酸成分

の経過につれて堆肥化が確認されたが、砂質状の残留物は確認されなかった。最終的な残留物は径が大きな団子状であった。原因として幼虫の摂食よりも乾燥が先行してしまったことが考えられる。これにより栄養が残っている為、粘性を保持して乾燥してしまい団子状態になったと考える。改善する点としては完全に乾燥させないように水の添加頻度を多くすることや幼虫の餌当たりの匹数を多くすることで摂食速度の増加、動きが多くなることで乾燥時の径が小さくなるなどが考えられる。また実験中にプラスチックコンテナの底面が見えてしまったため、今後は餌の添加量を増やす必要がある。

2.3.2 体重の増加

図 2.4 に BSF の体重の推移を示す。体重のピークは 22 日 0.144g/匹であった。体重の最大値は 2019 年に行った副産物消費試験 (小規模飼育) と比較して倍程度であり、Wontae²⁾ らの実験と同程度であった。体重のピークはオカラと同程度であった。このことから BSF の数に対して餌は充分量であったと考える。飼育スペースの差が大きくなったことと飼育密度が増加したことで基質の分解速度が速くなったことで副産物消費試験に比べて体重が大きくなったと考える。

3. 錦鯉への BSF 給餌試験

3.1 目的

近年、配合飼料 (原材料である魚粉) の高騰が養魚経営を圧迫している。錦鯉はその養殖生産の特徴から、選別により生産された魚のほと

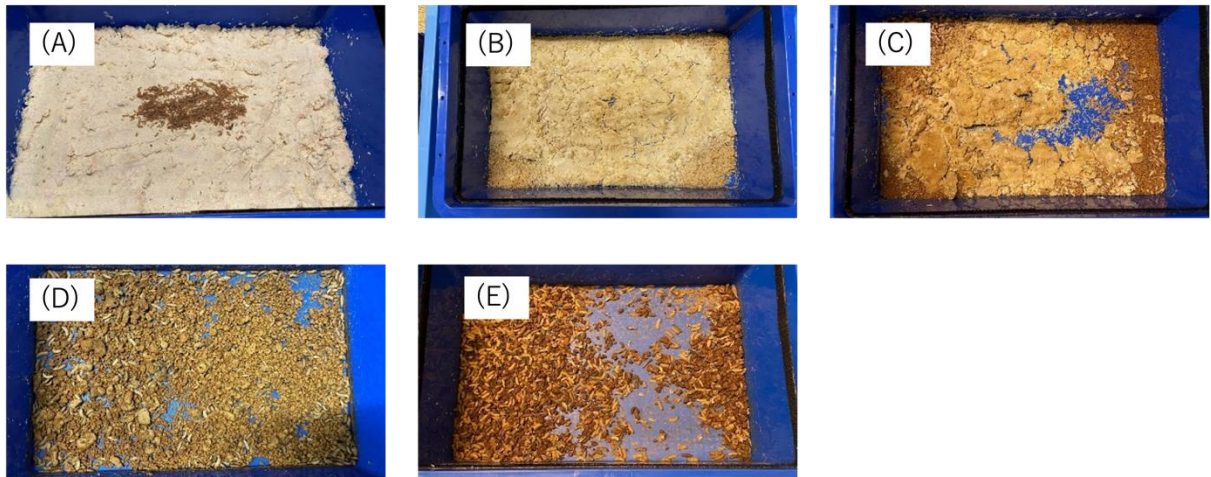


図 2.3 堆肥化実験の様子 (A) 1 日目、(B) 3 日目、(C) 5 日目、(D) 10 日目、(E) 14 日目

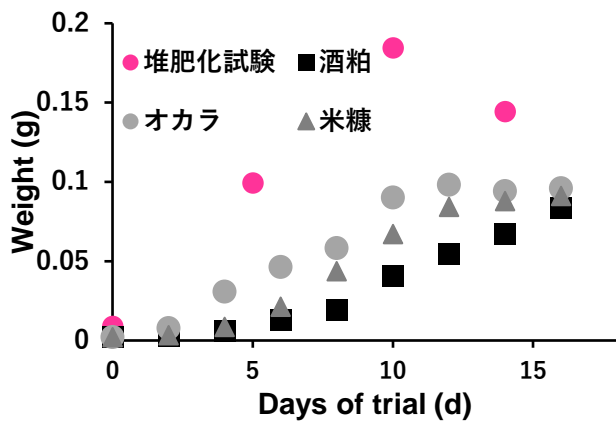


図 2.4 各実験条件における体重の推移

んどが廃棄されており、飼料用のタンパク質源としての選別淘汰魚の活用も進んでいない。こうした中、食品系の残渣を効率よく処理し、高タンパク高脂肪の BSF が養魚飼料としても注目されている。本研究では、BSF 生産に錦鯉の選別淘汰魚を活用することを目標に、まず養魚飼料としての有効性を検討したので報告する。

3.2 実験方法

【BSF】株式会社生物技研で生産した BSF 幼虫を乾燥し、電動ミルで粉末化し、粉末のまま若しくは粉末化した配合飼料と混合したのちミンサーでペレット化し、試験に供した(図 3.1)。

【予備試験】BSF に 20%置換した混合ペレットを与えた区 (以下、置換区) と、配合飼料のみの対照区を設けた。各区とも R3 生産群 20 尾ずつ (平均体重 68.1~71.6g) を屋外コンクリート池 (5 または 7 m²) で 2 セット飼育し、給餌率

4%で 1 日 2 回 (平日のみ)、30 日間(R4.7-8)給



図 3.1 BSF 飼料の作製方法

餌した。

【屋外試験】BSF の置換率を 5、20、50、100%とした置換区 (20%置換区は 2 区) を設け、配合飼料のみ給餌する対照区は給餌量を 80%または 100%とする 2 区を設けた。2 次選別サイズの稚魚 20 尾ずつ (平均体重 7.9~8.2 g) を屋外コンクリート池 (5 m²) で飼育し、給餌率 3~8%で 1 日 2 回 (平日のみ)、60 日間(R4. 8-10)給餌した。置換区では粉末 BSF を用い、2 回のうち初回に BSF のみ (100%置換区は 2 回とも) を与えた。環境把握のため水温は連続、pH・DO・NH₄ は 10 日ごとに測定した。

【屋内試験】BSF50%置換区と、対照区は配合飼料の給餌量を 50%または 100%とする 2 区を設けた。秋あげサイズの幼魚 30 尾ずつ (平均体重 51.7~51.9g) を 800L_FRP 水槽で加温循環ろ過飼育 (共通循環) し、給餌率 2.2%でペレットを 1 日平日 2 回・土日は半量を 1 回、6 週間(R4.12-

R5.1)給餌した。環境把握のため、水温・pH・DO・NH₄・NO₂・NO₃を10日ごと（NO₃は隔回）に測定した。

3.3 結果と考察

予備試験では終了時の平均体重(98.7~111.4g)に有意な差がなく（t検定、①P=0.727, ②P=0.327）、錦鯉はBSFを摂餌し、通常の配合飼料と同等に成長することが示唆された。

屋外試験の期間中、水温は大きく変化し、期末では水温が10℃近くまで低下したため給餌しない日もあった。期首は水温や日照の関係で藻類が繁茂し、pHやDOにばらつきがあった。試験終了時の平均体重(21.9~27.5g)には統計上の有意な差がなかった（図3.2 ANOVA、P=0.508）が、100%置換区が最も小さく、投餌後に粉末BSFが水面に浮くなどし、摂餌量が十分でなかった可能性がある。一方、給餌量の少ない対照区(80%)は2番目に高い数値(27.5g)であったが、この明確な理由は不明である。肥満度(体重/体長³×1000)で比較した場合は終了時に有意差はなく（図3.3 Kruskal-Wallis検定、P=0.584）、また、増肉係数は置換区(1.56~2.10)・対照区(80%)：1.23、同(100%)：1.76と一部の試験区では飛び値もあったが、BSFに置換した飼料であっても配合飼料と遜色ない成績を示した。

屋内試験での水温は20.1~21.2℃で、その他水質に異常値はなかった。各試験区の平均体重は、50%置換区と対照区(50%)が同様に推移したのに対し、対照区(100%)は高成長を示したが、終了時の有意差はなかった（図3.4 Kruskal-Wallis検定、P=0.069）。また、終了時の肥満度にも有意差はなかった（Kruskal-Wallis検定、P=0.136）が、増肉係数は対照区：1.26~1.31に対し50%置換区：2.34と置換区の成長効率は悪かった。置換区の成長があまりよくなかった原因について、BSF混合飼料は嗜好性が悪く、摂餌に時間を要したことから、完食前にペレットが崩壊し流失した可能性も考えられた。

3.4 本章のまとめと今後の展望

錦鯉にBSFを与えた場合、摂餌をし、配合飼料との混合給餌では、通常使用している配合飼

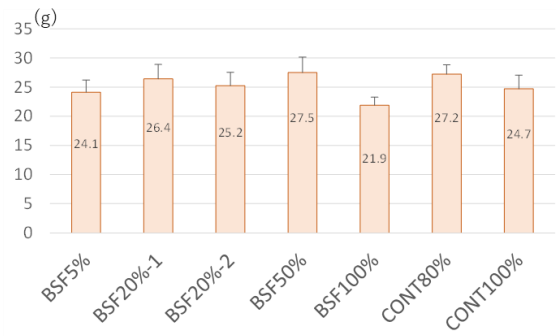


図 3.2 終了時の平均体重(屋外試験)

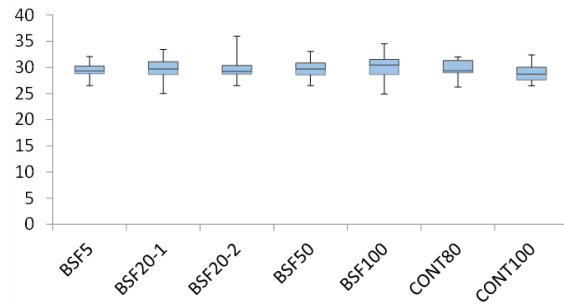


図 3.3 終了時の肥満度(屋外試験)

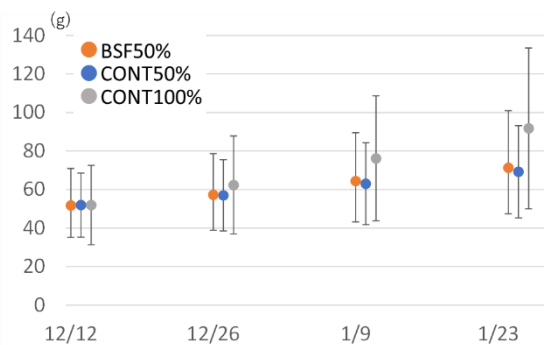


図 3.4 平均体重の推移(屋内試験)

料と同程度の成長を期待できることがわかった。屋外池での試験では、藻類の繁茂等により池水の透明度が低いため気が付きにくかったが、屋内水槽試験で給餌したところ、BSF混合飼料への嗜好性が悪いことが判明した。BSFを生産供給する長岡高専の試験では、乾燥温度によりBSFの仕上がりが異なったとの報告があり、乾燥により嗜好性を低下させる要因、例えば苦味が生じたことが推察される。今後は嗜好性を低下させる要因の解明に加え、苦味だとしたならば、乾燥方法を含め苦味を緩和する手法の検討が必要と考える。

今回は屋外・屋内試験で基本的な条件での飼育試験を実施したが、BSFを活用していくためには、さらなる条件検討が必要である。このた

め来年度は、小規模な条件検討試験のほか、屋外池での生産規模での試験も考えている。また、錦鯉の選別淘汰魚を用いた簡易施設での BSF 生産にも取り組んでみたい。

4. BSF 混合給餌におけるニジマス幼魚の成長特性

4.1 目的

ニジマス養殖では魚粉等から製造された配合飼料を主に給餌しているが、近年、価格が上昇し、養殖業者はより安価で付加価値がある代替飼料を求めている。一方、持続的な社会の構築には、産業廃棄物を資源に活用する資源循環

表 4.1 ニジマス幼魚における BSF 給餌試験設定

	対照区	混合給餌区
飼育期間	2022年7月1日～9月8日	
飼育日数	70	70
給餌期間	2022年7月4日～9月7日	
給餌日数	46	46
収容個体数	40	40
収容時の平均体重(g)	24.8	24.7
1日あたりの給餌量(g)	18.0	18.0
1日あたりの給餌回数	4	4
1日の給餌内容	①配合飼料 4.5g	①BSF粉末 3.8g ②配合飼料 4.8g
	②配合飼料 4.5g	③配合飼料 4.8g
	③配合飼料 4.5g	④配合飼料 4.8g
	④配合飼料 4.5g	④配合飼料 4.8g

型産業の確立も重要となっている。そこで本研究では、廃棄物で育成されたアメリカミズアブ (BSF) 幼虫が、ニジマス養殖の飼料として利用可能かを明らかにするため、給餌試験を行い、成長特性を把握した。

4.2 方法

供試魚には、令和 3 年秋産のニジマスの 0 才魚 (体重: 約 25g) を用いた。試験では、配合飼料のみを給餌した対照区と、対照区と比べて重量比で 20%が BSF 粉砕物、残りの 80%が配合飼料を与える混合給餌区の 2つの区を設定した (表 4.1)。試験は 100 L 水槽を用い、注水は地下水のかけ流しとした。それぞれの水槽には平均体重が同程度になるように供試魚 40 個体を収容し (表 4.1)、66 日間平日のみ給餌を行った。一日あたりの給餌量は、ライトリッツの給

餌率表から設定し (18g/日)、1日に 4回給餌を行った。混合給餌区で与えた BSF は、乾燥した幼虫を電動ミルで粉砕ものとした。給餌期間終了後に、生存した個体数を計数し、各個体の体長および体重を測定し、成長特性に関する比較を行った。

4.3 結果と考察

2つの区において給餌期間中に異常な行動や魚病の発生は認められず、生残率は 100%であった。また、対照区と混合試験区間で給餌試験終了時の体長、体重の平均値に有意な差は認められなかった (図 4.1)。さらに、肥満度についてみると、対照区の中央値が 16.7、混合給餌区が 17.2 であり、有意差は認められなかった。熊川ら (1999) は、体重 45~130 g のニジマスの肥満度を 16.4~17.8 と報告している。飼育条件は同一ではないが、本試験のニジマスは順調に成長し、混合給餌区の成長は、対照区と同程度であったと考えられた。

摂取した飼料量に対し体重がどれだけ増加したかを示す飼料効率の値は、対照区が 105.5%、混合給餌区が 120.4%と算出され、いずれも 100%を超えた値であった (表 4.2)。このことから、混合給餌区における給餌物や給餌方法は、ニジマス幼魚を十分に成長させるものであると推測された。

4.4 まとめと今後の展望

以上のことから、乾燥幼虫の粉末は、ニジマス幼魚の飼料として利用できると考えられた。一方、今回の試験設定では、対照区や混合試験区のいずれにおいても、給餌量より多く体重が増加したことから、配合飼料の給餌量だけで成長に必要な量を満たしていた可能性も考えら

表 4.2 給餌試験における生産効率の比較

	対照区	混合給餌区
飼料効率(%)	105.5	120.4
増肉係数	0.95	0.83
日間増重率(%)	0.87	0.96

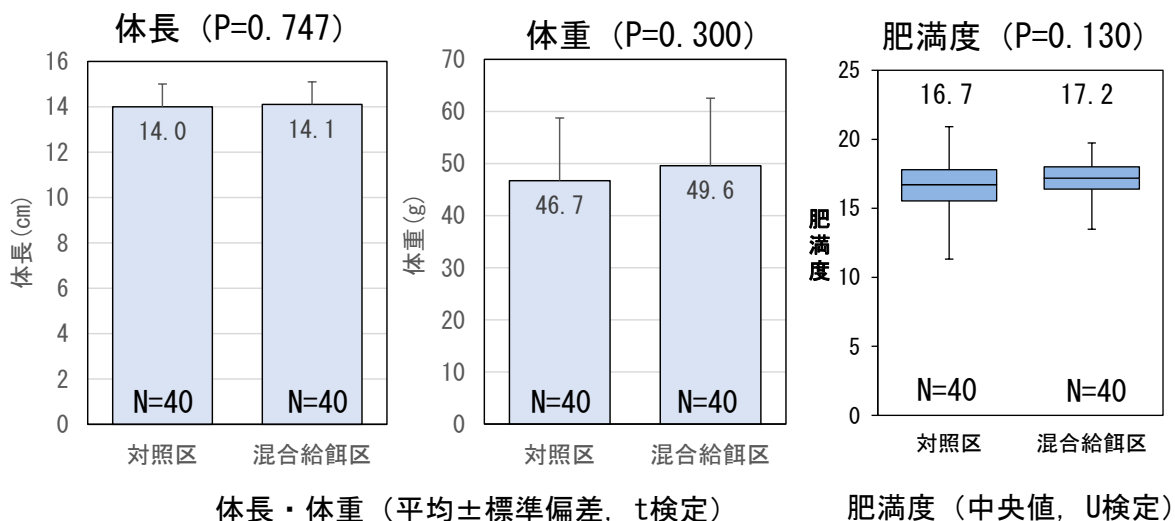


図 4.1 給餌試験終了時における体長、体重および肥満度の比較

れた。今後は、ニジマス養殖にとって、最も効率的な給餌量や BSF の混合量を把握することにより、BSF を活用した資源循環型ニジマス養殖技術の開発が期待されると考えられた。

5. まとめと今後の展望

本研究から、北陸地域の未利用資源である酒粕から BSF を用いて飼料を作製し、錦鯉とニジマスへ給餌する実証を行った。酒粕を給餌した BSF は高タンパク質であり、嗜好性の高い餌として高付加価値なペットフードとして販売できる可能性を見出した。給餌実験では、錦鯉とニジマスともに通常の餌と遜色ない成長率を示した。今後は、社会実装を目指した実規模 BSF 飼育プラントの整備、BSF 給餌による高付加価値なブランド魚の創出を目指す。

謝辞

本研究は、第 27 回「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業によって実施いたしました。本事業で使用した BSF の一部は生物技研株式会社から提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hopkins, I., Newman, L. P., Gill, H., & Danaher, J. (2021). The influence of food waste rearing substrates on black soldier fly larvae protein composition: A systematic review. *Insects*, 12(7), 608.
- 2) Kim, W. T., Bae, S. W., Park, H. C., Park, K. H., Lee, S. B., Choi, Y. C., ... & Koh, Y. H. (2010). The larval age and mouth morphology of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *International Journal of Industrial Entomology*, 21(2), 185-187.