

# イエバエによる有機性廃棄物の飼料／肥料化技術

川崎 稔弥 石川 光祥

## 概 要

有機性廃棄物の循環利用技術として、イエバエ (*Musca domestica*) システムを開発した。

イエバエは有機性廃棄物で生育可能であり、幼虫は高タンパク質な飼料原料として、排泄物（フラス）は有機肥料として利用可能であることから、有機性廃棄物の飼料および肥料化技術として着目されている。

本報では、イエバエシステムと飼料および肥料効果について報告する。システムは、イエバエの習性を応用した卵の大量生産を可能とする採卵システムと7日間で飼料および肥料生産を可能とする処理システムからなる。飼料効果は、ブロイラーの飼育後期において増体を促す効果が示唆されており、肥料効果は、コマツナにおいて従来堆肥よりも少量で生育を促す効果が示唆された。今後は、システムの自動化と適用可能な廃棄物種の拡大、飼料および肥料効果の更なる解明を目標とする。

## Technology for Producing Feed and Fertilizer from Organic Waste Using Houseflies

### Abstract

We developed a housefly (*Musca domestica*) system as a technology for recycling organic waste.

Houseflies can grow on organic waste, with their larvae serving as a high-protein feed ingredient and their excrement (frass) usable as organic fertilizer. Thus, the system is a promising solution for converting organic waste into feed and fertilizer.

This report outlines the housefly system and its demonstrated effects as feed and fertilizer. The system consists of an egg collection unit that leverages the behavioral traits of houseflies for mass egg production and a processing unit capable of producing feed and fertilizer within seven days. Feed trials suggest the system promotes weight gain in broilers during their late growth stage. Fertilizer trials indicate that the system enhances *komatsuna* growth using smaller quantities than conventional compost. Future work will focus on automation, expanding waste types, and further studying its feed and fertilizer effects.

キーワード：有機性廃棄物処理、昆虫技術、昆虫飼料

## §1. 背景

近年、環境保全と持続可能な資源利用の観点から、食品廃棄物および家畜排泄物の処理に関する課題が世界的に注目されている。これらの課題は、環境負荷の軽減と資源の有効活用という二つの側面から重要性が増している。本研究では、これらの課題に対する革新的なアプローチとして、昆虫技術、特にイエバエ (*Musca domestica*) による有機性廃棄物の飼料／肥料化技術を用いたシステムの開発と応用について検討する。

### 1.1 有機性廃棄物処理の現状と課題

#### 1.1.1 食品廃棄物の処理

食品廃棄物の処理は、環境保全と資源循環の観点から重要な課題である。日本では、食品リサイクル法に基づき、食品関連事業者に対して可能な限りの再生利用が義務付けられている。しかしながら、再生利用が困難な廃棄物も存在し、自社での再生利用が難しく、また処理委託先の中間処理事業者にとっても処理コストが増える場合もある。

#### 1.1.2 家畜排泄物の処理

家畜排泄物の処理は、時間的制約と環境影響の両面で課題を抱えている。従来の堆肥化プロセスは3～6ヶ月を要し、労働力不足や土地の制限により、適切な処理が困難な状況もみられる。さらに、不適切な処理による悪臭や野積みによる環境汚染のリスクも懸念されている。

### 1.2 国産飼料・肥料原料生産の必要性

#### 1.2.1 持続可能な飼料原料の探索

魚粉に代わる新たな動物性タンパク質源の開発は、水産資源の保護と持続可能な畜産業の維持のために急務となっている。特に、国産の代替飼料原料の生産は、食料安全保障の観点からも重要性が高い。

#### 1.2.2 有機肥料の開発

化学肥料への依存度を低減し、環境負荷の少ない農業生産を実現するため、新たな有機肥料の開発が求められている。これは、循環型農業の推進と土壌の健全性維持にも寄与する。

### 1.3 昆虫技術の可能性

上記の課題に対する統合的な解決策として、昆虫技術が注目を集めている。昆虫技術は、昆虫の高い適応力と消化能力を活用し、従来利用が困難とされてきた

有機性廃棄物を短期間で処理し、有用な生産物（虫体およびその排泄物（以下、フラス））を得ることができる。

本研究では、特にイエバエ (*Musca domestica*) に着目し、その高い成長速度と処理能力を活かした有機性廃棄物処理の飼料／肥料化システムの（以下、イエバエシステム）開発を行った。

### 1.4 研究目的

本研究の目的は以下の2点である。

- ・イエバエシステムおよび処理効率の向上に寄与する専用処理用装置を開発すること
- ・生産された幼虫とフラスの効果を明らかにすること

これらの検討を通じて、イエバエを用いたシステムが、有機性廃棄物処理と持続可能な資源生産に対してもたらす可能性と課題を明らかにする。

## §2. イエバエシステムおよび処理効率の向上に寄与する専用処理用装置の開発

### 2.1 イエバエシステムの開発

#### 2.1.1 イエバエ

イエバエは、双翅目短角亜目イエバエ科に属し日本各地に生息する昆虫である。イエバエ幼虫は腐食性であり、食品廃棄物や家畜排せつ物など腐敗した有機物であっても消化可能であり自身の栄養源とする。

イエバエシステムはイエバエの採卵及び生育工程をそれぞれに以下に示す2つのシステムで再現および応用したものであり、特に、イエバエ卵の大量生産と7日間で有機性廃棄物がイエバエ幼虫とフラスに変換することを最大の特徴としている。



Fig. 1 イエバエシステム概念図

#### 2.1.2 採卵システム

イエバエ成虫の卵を量産するシステムである。当システムは、成虫への給餌システム及び採卵システムから構成されており、イエバエ成虫育成専用ケージ及

びケージが複数設置された専用部屋で運用されている。なお、専用部屋は空調機器により温度及び湿度が制御されており一年中を通して成虫の育成及び採卵が可能である。

### 2.1.3 処理システム

イエバエ幼虫により対象の有機性廃棄物を処理するシステムである。ここでの処理とは下記2点の要件を満たす必要があり、後述する専用の飼育容器（以下、処理トレー）内にて行われる。

また、処理トレーは専用のトレー充填用のラックに垂直方向に数段が積み重なるように設置されており、ラックは専用の処理室に複数設置されている。なお、処理室は空調機器等の環境制御設備が設置されており、幼虫の処理に適した環境（原料により異なるが、例えば室温30℃、相対湿度80±5%）の制御を行っている。

当システムは、この処理トレーを最小単位とし、これを利用した幼虫の自動分離システム及び処理空間の空調制御システムから構成されており、7日間の期間を基本とし処理が行われる。



Fig. 2 おからを充填した処理トレー



Fig. 3 処理室内の様子

#### 2.1.3.1 処理の要件

- ・ 幼虫の死亡や生育不良が見られず、一定の歩留まり

で生産されること（例えば、大豆由来原料の処理の場合、原料比10%量の幼虫が生産される）

- ・ 有機性廃棄物が減量、変質し、含水率が20%以下の残渣に7日間以内で置き換わることであり、このとき残渣を構成する主な物質はフラスである（例えば、大豆由来原料の処理の場合、原料比10%量のフラスが生産され、その含水率が10%である）

すなわち、幼虫が十分に生産されても、残渣の含水率が20%より高い場合は、残渣にはフラスだけでなく未処理の腐敗した有機性廃棄物を含むと考え、処理は不十分と判断する。

#### 2.1.3.2 幼虫の自動分離システム

当システムは、処理トレーの機能および後述の空調制御により5、6日目に自動で処理トレーから幼虫のみを分離することができる。ただし、処理開始後4、5日目までは、処理トレー内において幼虫とフラスは混在し処理が行われている。処理トレーの機能に関する実験結果及び開発成果については後述する。

#### 2.1.3.3 処理空間の空調制御システム

処理空間は処理トレーの周縁部のマイクロ環境及び処理トレーを格納するマクロ環境からなり、それぞれで制御方法が異なる。特に、マイクロ環境においては適切に処理が完了し、かつ生育途中の幼虫の処理トレーからの意図しない離脱を防止するため特殊な制御を必要とする。マクロ環境は、幼虫の処理に適した環境になるよう制御されており、一年中を通して処理が可能である。

### 2.2 処理効率の向上に寄与する専用処理用装置の開発

前述の幼虫の自動分離システムは、イエバエ以外の昆虫による同様の有機性廃棄物処理において共通する、効率的な幼虫とフラスの分離についての課題から開発されたものである。

当システムも開発当初は、処理トレーに自動分離の機能は搭載されておらず、処理後は篩によって幼虫とフラスの分離を試みていたが、幼虫とフラスのサイズや形状が類似していたため完全な分離は困難であった。

そこで下記に示すような、幼虫の持つ習性を利用した自動分離機能を有する専用トレーの設計、開発を行った。当機能の詳細及びその機能開発に至った実験結果を示す。

#### 2.2.1 実験概要

イエバエ幼虫には、自らが蛹になるために乾燥した

場所へ移動する習性がある。処理トレーは、この習性を応用し、幼虫が処理中の湿った廃棄物またはフラスから、乾燥したトレー外へ移動しやすい機構を設けており、その機構の設計のため次に示す実験を行った。

なお、機構は、先行研究及び特許等から、処理培地内に設けられた傾斜及びその形状に特徴をもつものと考え、当実験では幼虫が最もトレーから分離され、かつ処理の要件も達成することができる傾斜角度を明らかにするために行った。幼虫は、蛹になるためにこの傾斜面を自ら上ることで処理中培地から自動的に分離される。

### 2.2.2 実験方法

試験区は傾斜角度の異なる3つの傾斜トレー（水平面から15度、20度、30度の傾斜）とし、対照区は傾斜を持たない平面トレーとした。なお、傾斜トレーはいずれも、平面トレーのもつ4辺のうち1短辺のみに傾斜を前述の角度で傾斜を設けた。また、平面トレーは550 mm × 435 mm × 90 mmのポリエチレン製トレーであり、傾斜トレーをこれに各角度を作るためにアクリル板を取り付けて作成した。さらに、傾斜面となるアクリル板にはスリット（幅5 mm、リブ高3 mm）が対向する1短辺と直工する方向に全面彫られている。これは、幼虫が傾斜を上りやすくするための工夫であり、登っている幼虫が傾斜を滑り落ちることを防止する機能がある。

実験は、処理トレーにそれぞれ、おからを4 kgずつ充填したのち、採卵して1時間以内のイエバエ卵を静置し、処理システムの処理室にて7日間処理を行った。

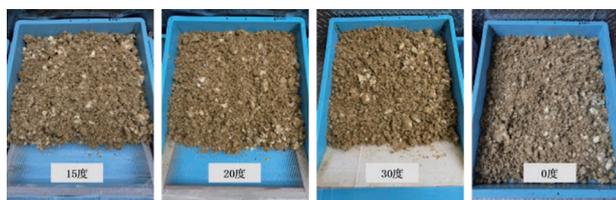


Fig. 4 処理前の3種の傾斜トレーと平面トレー  
傾斜30度が培地から見て最も傾斜面が急である。

### 2.2.3 実験結果

いずれの区も7日間で処理は完了した。このとき、傾斜トレー区は処理開始から5日目に幼虫の分離が確認され、6日目には最大の分離量を確認し、7日目には目視にて9割近くの幼虫が分離したことを確認した。

処理開始前および後の原料または残渣の減少率およ

び幼虫の分離量はFig. 5のとおりとなった。傾斜角度15度の時が最も処理率が高く、幼虫も分離重量も多かった。また、対照区は幼虫の回収が困難であるため、残渣量に分離されずトレー内に残った幼虫の重量を含む。ただし、平面トレーにおいては幼虫が分離されないため、傾斜トレー区にくらべ幼虫の蛹化の進行が早く、実験終了の7日目には目視にて9割近くの幼虫の蛹化を確認した。対照区において、残渣重量が他の試験区と比べ小さいのは、蛹化により幼虫重量が減少したためと考えられる。

この結果から、処理トレーには傾斜角度15度になるように傾斜面の機構を設けることが、幼虫の処理トレーの分離には最適だと考えられた。実験期間中の観察においては、20、30度の傾斜面では上手く登れない幼虫が傾斜下部で塊になり、それが別の幼虫の傾斜登攀を困難にしていることが観察された。

Fig. 5 実験結果

	おから			分離幼虫	
	処理前重量 (g)	処理後重量 (g)	処理率 (%)	全重量 (g)	分離率 (%)
15度トレー	4000	504	12.6	319	8.0
20度トレー	4000	508	12.7	220	5.6
30度トレー	4000	538	13.45	128	3.2
平面トレー	4000	562	14.05	-	-

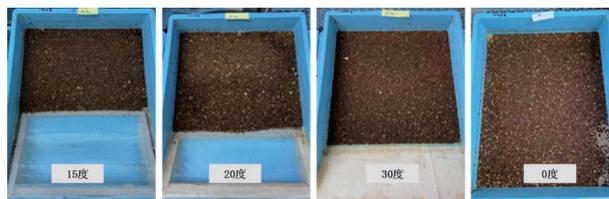


Fig. 6 処理後のトレー内残渣の様子  
傾斜トレーは幼虫分離後のためトレー内には幼虫は僅かしか確認されないが、平面トレーには分離されず蛹化した蛹が確認できる。

### 2.2.2 処理トレーの開発

実験結果から、傾斜角度15度が最適と明らかになったため、処理トレーの一辺に傾斜を設けた量産可能な専用のトレーを設計、開発した。



Fig. 7 開発した処理トレー

### §3. 生産された幼虫とフラスの効果検証

イエバエシステムにて生産された幼虫及びフラスは、それぞれ飼料、肥料原料としての活用が期待される。

#### 3.1 イエバエ幼虫の飼料原料としての機能

##### 3.1.1 イエバエ乾燥幼虫の飼料分析

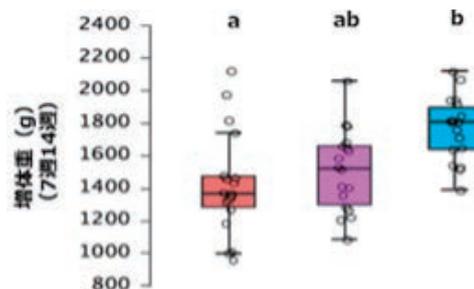
処理システムにて自動で分離された幼虫は、回収され煮沸及び送風乾燥により屠殺され飼料原料として加工される。加工後の成分を下記に示す。なお、加工に伴い大腸菌等の検出は見られず、一般的な飼料原料に求められる基準を満たしている。

Fig. 8 イエバエ乾燥幼虫の飼料分析結果（単位：%）  
参考に魚粉の同成分を掲示する。ただし魚粉は脱脂済、乾燥幼虫は未脱脂である

一般成分 (%)	魚粉	乾燥幼虫
水分	8.1	3.9
たんぱく質	52.0	52.5
脂肪	12.0	28.9
繊維	0.6	5.9
可溶性無窒素物	3.7	4.5
ミネラル	23.7	4.3

##### 3.1.2 プロイラーへの給餌試験

プロイラーへの給餌試験では、基本の配合飼料のうち5%量を占める動物性タンパク質源である魚粉を、乾燥幼虫で完全代替及び半分代替し生後から出荷までの49日間の給餌実験を行った。この時、配合飼料の総タンパク質給餌量は各区で同量になるよう調整した。その結果、プロイラーへの生育障害等は見られず、飼育後期において半分代替区では魚粉区よりも有意に高い増体重を示した。このことから、イエバエ幼虫の給餌により飼育後期で何らかの栄養吸収能力の亢進効果がみられることが示唆された。



配合 (%)	魚粉区	幼虫区	混合区
魚粉	5	-	2.5
幼虫	-	5	2.5
その他	95	95	95

Fig. 9 プロイラー（7-14週目）の増体重  
異符号間で有意差あり ( $p < 0.01$ ) その他はトウモロコシや大豆粕等の植物性飼料数種により構成された配合飼料

#### 3.2 イエバエフラスの肥料原料としての機能

##### 3.2.1 イエバエフラスの肥料分析

処理システムにて分離後処理トレー内に残った残渣はフラスとして回収され、肥料原料として利用される。フラスは含水率が10%と腐敗しにくいいため、真空詰すれば保管が容易である。下記は、乾燥を行っていないフラスの成分である。

Fig. 10 フラスの肥料分析結果（単位：%）

一般成分 (%)	牛糞	フラス
水分	54.8	9.9
窒素	1.9	5.1
りん酸	2.3	2.7
カリウム	2.4	4.5
マグネシウム	3.0	1.2
C/N	1.0	0.6
PH	19	10.8
EC (MS/CM)	8.39	7.9

牛糞：農研機構（1996）全国平均

植害試験は、「植物に対する害に関する栽培試験の方法」（昭和59年4月18日付け59農蚕第1943号農林水産省農蚕園芸局長通知、改正令和3年10月12日付け3消安第3183号農林水産省消費・安全局長通知）に則って行い、コマツナへのフラス施肥の安全性を試験したが、生育障害は確認されなかった。

##### 3.2.2 植物に対する害に関する栽培試験

生育試験では、コマツナに総施肥窒素量が同一にな

るように、牛糞堆肥との生育比較試験をしたが、生育上障害等が確認されることはなかった。なお、「植物に対する害に関する栽培試験の方法」(昭和59年4月18日付け59農蚕第1943号農林水産省農蚕園芸局長通知)を参考に実施した。

Fig. 11 発芽及び生育調査成績

試験区	ポット No.	発芽調査成績		生育調査成績			
		8月29日	8月30日	9月2日	9月17日		
		発芽率 (%)	発芽率 (%)	葉長 (cm)	葉長 (cm)	生体重 (g/ポット)	生体重指数
基準区	1	85	85	3.3	10	22.4	127
	2	85	90	3.3	10.1	23.5	
	3	100	100	3.3	10.1	23.4	
	4	90	95	3.4	10.2	24.1	
	平均	90	93	3.3	10.1 a	23.4 a	
0.5倍量区	1	95	95	3.4	9.8	19.4	110
	2	95	95	3.4	9.9	20.5	
	3	80	80	3.4	9.8	19.5	
	4	90	90	3.4	9.9	21.5	
	平均	90	90	3.4	9.9 b	20.2 b	
対象区	1	90	90	3.4	10.2	24.5	132
	2	100	100	3.4	10.2	24.5	
	3	95	95	3.4	10.2	24.4	
	4	85	90	3.3	10.1	23.9	
	平均	93	94	3.4	10.2 a	24.3 a	
無施肥区	1	100	100	3.4	9.8	19	(100)
	2	90	90	3.4	9.7	18	
	3	90	90	3.4	9.7	18.1	
	4	100	100	3.4	9.8	18.7	
	平均	95	95	3.4	9.8 b	18.5 c	

注) 1. 生体重指数は無施肥区を100とした指数  
 2. 葉長(9月17日)及び生体重について Tukey-Kramer 法による検定を行い、有意水準5%未満で差が認められた試験区間に異なる英小文字を付記した。

### §4. まとめ

本研究により、イエバエシステムおよび処理効率の向上に寄与する専用処理トレーを開発することができた。特に、処理トレーの開発は、今後の生産性向上に寄与することが期待できる。また、イエバエシステムを1日数トン規模の処理で運用する場合には、現状のシステムのうち自動化可能な工程について検討を行う必要がある。その中でも、採卵システムの給餌・採卵の自動化、処理システムの処理トレーへの原料充填等、自動化が重要検討項目であり、実証試験等を通じ更なる研究を行う。

また、生産された幼虫とフラスの効果をそれぞれ成分分析および給餌試験、植害、生育試験により明らかにすることができた。これまで、本研究のように人工的に大量に生産されたイエバエ幼虫やフラスの成分や、それらを飼料、肥料原料として実際に給餌、施肥した実験報告は少なく、今後のイエバエ技術の発展においては更なる研究が必要となる。

今後、イエバエをはじめとした昆虫技術による、有機性廃棄物の処理および飼料、肥料原料の生産技術を社会に普及させるためには、前述した大量処理および生産を前提とした自動化システムの運用と適合可能な廃棄物の拡大が欠かせない。さらに、虫体やフラスの飼料、肥料原料としての利用についての安全性や効果について、社会に適切に説明し普及させていく必要がある。これらの実現に向け、さらなる応用研究および廃棄物発生事業者と飼料・肥料原料の利用者、そして地域を巻き込んだ実証事業の実施を行っていきたい。

### 謝辞

本研究に際し、株式会社フライハイ 木下 啓介様及び山口 竜様、国立大学法人北海道国立大学機構帯広畜産大学 岩佐 光啓様及び東 陽介様、国立大学法人香川大学 川崎 淨教様より多大なご協力を得ました。関係各位に感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 食品廃棄物等の年間発生量及び食品循環資源の再生利用等実施率について 農水省 (2024)
- 2) ハエハンドブック 145ページ 文一総合出版
- 3) 特許第5582560号 昆虫育成堆肥床
- 4) 特開2002-11440 結城瀬廃棄物の昆虫バイオ処理システムと有機廃棄物養生棚
- 5) 日本標準飼料成分表 (2009年度版) 122ページ 中央畜産会



Fig. 12 コマツナへのフラス施肥試験結果

### ひとこと

有機性廃棄物の新しい再生利用技術として昆虫技術に期待します。持続可能な循環経済の発展のため、昆虫による未利用資源を活用した国産飼料・肥料原料の自給のため今後も技術開発に尽力いたします。



川崎 稔弥