

2022年度 油脂産業論文

2050年油脂産業界展望

ワームオイル生産による
環境調和型国内油脂安定供給システムの提案

花王株式会社

マテリアルサイエンス研究所

さいとう あきら
齋藤 明良

加工・プロセス開発研究所5室

なかい たけし
中井 武史

加工・プロセス開発研究所5室

すぎやま ゆきてる
杉山 征輝

<目次>

| | |
|--|----|
| はじめに | 1 |
| 第1章 環境調和型油脂安定供給システムの実現に向けて | |
| 1-1. 2050年問題が油脂産業に与える影響 | 2 |
| 1-2. 油糧作物代替に向けた新たな油脂原料の開発 | 4 |
| 1-3. 新規油脂原料を起点とした国内安定供給システムの提案 | 5 |
| 第2章 国内油脂安定供給システムにおけるワーム利用の価値 | |
| 2-1. ワームオイルのポテンシャル | 6 |
| 2-2. ワーム育成のフレキシブル性 | 8 |
| 2-3. ワーム飼料としての下水汚泥と食品廃棄物の利用 | 10 |
| 2-4. ワームオイル生産における既存技術の活用 | 14 |
| 第3章 ワームオイル生産による国内油脂安定供給システムの妥当性評価 | |
| 3-1. 妥当性評価のためのモデル | 17 |
| 3-2. 人口あたりのワームオイル生産量 | 18 |
| 3-3. ワーム飼育に必要な面積 | 20 |
| 3-4. 提案システム実装による実質的CO ₂ 削減量 | 20 |
| 3-5. 提案システムの妥当性評価 | 21 |
| 第4章 ワーム飼育による油脂安定供給システムの広がり | |
| 4-1. 老朽化する下水処理インフラへの導入 | 23 |
| 4-2. ワーム育成エネルギーを獲得する新たな産業への展開 | 23 |
| おわりに | 24 |
| 参考文献 | 26 |

はじめに

2050年の人々の生活や地球環境はどうなっているだろうか。

農林水産省の「2050年における世界の食料需給見通し」では、世界総人口の増加による食料需要の増大が予測される一方で¹、気候変動に関する政府間パネル（IPCC^A）の第5次評価報告書では、気温上昇に伴う乾燥化や海水上昇による深刻な作物生産量の減少が指摘されている²。これらは相互に関連し、『「環境破壊を伴う農地拡大、さらには気候変動」に繋がり、再び「農地減少による収穫量減少や供給不足、さらには農地拡大の必要性」に迫られる』³といった「負の連鎖」に陥ることが指摘されている。この「負の連鎖」は今後今までにないスピードで進行し、このまま放置すれば制御不能となる事態が想定される。このような状況を鑑み、2015年には、温室効果ガス（GHG^B）排出削減等のための新たな国際的枠組みとしてパリ協定が採択された。2050年にカーボンニュートラル^Cを実現するという野心的な目標達成に向けた国際協力が加速している⁴。

このように、油脂産業を取り巻く環境は現在大きな変換点に来ている。将来、油糧作物^Dが供給不足に陥るリスクに備えながら、脱炭素を前提とした持続的な油脂安定供給を可能にする産業への変革が必要である。また、多くの原料を輸入に頼っている日本にとって昨今のウクライナ問題のような国際情勢不安もリスクを高める懸念材料となる。2050年に向けて、輸入に頼らない国内油脂安定供給は日本にとって最も重要な問題の1つであると言える。

本論文では、2050年における油脂産業のあるべき姿を展望し、地域社会を巻き込んだ「既存油糧作物に頼らない環境調和型国内油脂安定供給システム」を提案する。

A Intergovernmental Panel on Climate Change の略語

B Greenhouse Gas の略語

C 温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させること

D 油の採取を目的として栽培される作物のこと

第1章 環境調和型油脂安定供給システムの実現に向けて

1-1. 2050年問題が油脂産業に与える影響

我々は人口増加と地球温暖化を2050年（までに解決すべき最重要な）問題と捉え、この2050年問題が油脂産業に与える影響を考えた。図1は今後の油糧種子生産量の予測である。人口増加に伴う食糧油脂やバイオ燃料^Eの需要の高まりを、油糧種子生産量の拡大（対2010年比1.6倍）で賄う見通しになっている¹。一方で、パーム油の80%以上を生産しているマレーシアとインドネシアにおいて（表1）⁵、パーム生育エリア適性評価では、地球温暖化のため2030年以降、生育エリア減少の加速が懸念されている（図2）³。

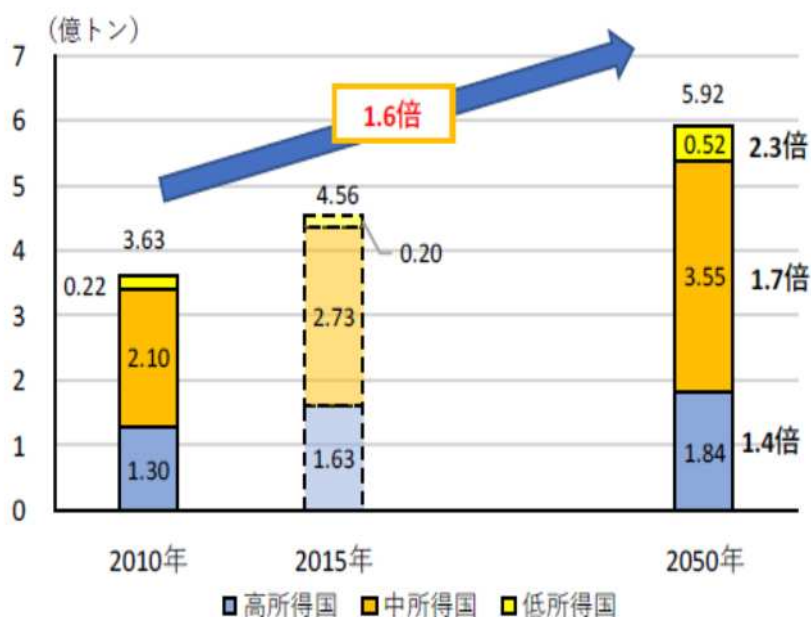


図1 油糧種子生産の見通し（生産量）

（出典：農林水産省、https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_mitosi/attach/pdf/index-12.pdf より引用、作成）

^E バイオマス（生物資源）を原料とする燃料のこと

表 1 パーム油の主要生産国の国別生産量の推移

| 主な油種・生産国 | 2010/11 | 2011/12 | 2012/13 | 2013/14 | 2014/15 | 2015/16 | 2016/17 | 2017/18 | 2018/19 | 2019/20 (見込み) |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|
| パーム油 | 49,515 | 52,560 | 56,479 | 60,194 | 62,530 | 59,226 | 67,568 | 73,567 | 77,339 | 75,021 |
| インドネシア | 23,950 | 26,190 | 28,330 | 31,010 | 33,340 | 31,950 | 37,780 | 41,870 | 43,710 | 44,150 |
| マレーシア | 18,210 | 18,206 | 19,324 | 20,161 | 19,879 | 17,683 | 18,860 | 19,684 | 20,809 | 18,660 |
| タイ | 1,491 | 1,866 | 2,212 | 2,219 | 1,972 | 1,820 | 2,197 | 2,873 | 3,267 | 2,640 |

(出典：日本植物油協会、https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan02_01.html (2022.06.20 参照) より引用、作成)

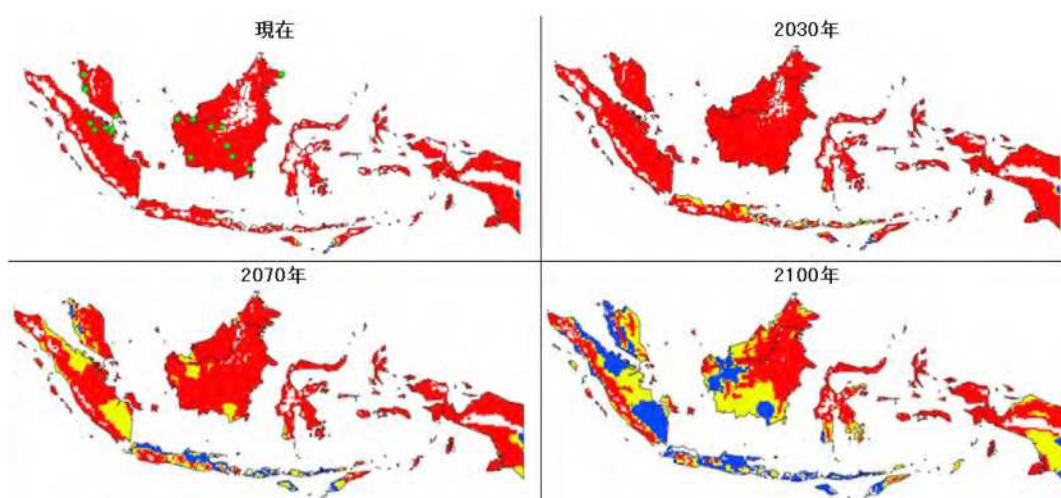


図 2 世界気候変動モデルを用いた将来のパーム生育エリア適性評価

(出典：油脂工業会館、<https://www.yushikaikan.or.jp/content/files/2019%20KenkyukaiHoukokusyo.pdf>)

より引用、作成)

このような中、油脂産業界では、RSPO^F 等の認証制度の普及を通じた無秩序な農地開拓リスクの低減、森林や泥炭地資源の回復などの各種緩和策、そして油脂生産性を高める取り組み等を行ってきた³。

これに加え、2050年にむけて日本の油脂産業を維持・発展させるには、原料となる油糧作物の安定確保に取り組むことが必要不可欠である。そして究極的には、原料の海外依存を脱却して、既存油糧作物に頼らない、新たな油脂原料の獲得が必要と考える。

^F 持続可能なパーム油のための円卓会議(Roundtable on Sustainable Palm Oil)の略語

1-2. 油糧作物代替に向けた新たな油脂原料の開発

新たな油脂原料として、既にジェトロファ油脂^G やリサイクル油脂^H の活用、微細藻類^I を用いた油脂生産等の取り組みが行われている³。しかし現状では、栽培地の確保、回収システムの構築、安定供給やコストなどの様々な課題を抱えている。

そこで我々は高い生産性と油脂組成の多様性の点から、ワームオイルに着目した。2013年に国連が昆虫食^J と昆虫飼料を推奨したことから、先進国でもタンパク源としての昆虫食が注目され始めている。昆虫食や昆虫飼料のスタートアップも海外で次々に誕生している現状からも、ワームオイルは有望な代替油脂になり得ると考えた。日本でのビジネス事例はほとんどなく注目度は低いですが、世界的には2030年までにワームオイルを含む昆虫産業の大きな市場成長が見込まれている(図3)⁶。



図3 世界のBlack Soldier Fly Market (BSFL) の市場予測

(出典: Meticulous RESEARCH, sales@meticulousresearch.com より引用、作成)

G ドウダイグサ科の多年生の落葉低木 (Jatropha Curcas) になる種子から抽出される油脂

H 食品リサイクル法及び廃棄物処理法に基づき、食品製造業、食品小売業、外食産業などから発生する廃食用油を適正に食品循環資源として再生利用する油のこと

I 藻類のうち個体の識別に顕微鏡が必要な藻類が微細藻類と呼ばれる

J 人間が昆虫をエネルギー源として摂取すること

本油脂産業論文でもこれまでに昆虫からの油脂回収の提案がされてきた^{7, 8}。本提案はそれらに対して、多様性ある油脂組成のワームオイルを活用し、CO₂排出量を削減する環境調和性を有する点（第2章を参照）が特長である。

1-3. 新規油脂原料を起点とした国内安定供給システムの提案

本論文では、ワームを油糧作物の代替とし、ワームオイルの国内安定供給システムを提案する。日本の「植物油脂の油脂（原油）生産量」に記載されている国内原油輸入量の156万 ton/Y (2020年)のうち⁹、1st-Stepでは化成品^K向け油脂（パーム核油）の国内輸入量の約7万 ton/Y¹⁰を、2nd-Stepでは食品向け油脂輸入量の約149万 ton/Yをワームオイルで置き換えることを目指す。ワームの飼料には、持続的に調達可能な下水汚泥と食品廃棄物を活用し、ワームを各下水処理設備で分散育成することによってワームオイルの国内油脂安定供給システムを構築する（図4）。さらにCO₂排出量の削減にも結び付け、2050年カーボンニュートラルの実現に貢献する。

以降、「2章」ではワームオイルの特性と供給システム、「3章」では油脂供給量とCO₂削減量の試算、「4章」では本提案の波及効果、「おわりに」では総括と今後の展望を述べる。



図4 本提案の全体像

^K 工業原料として用いられるもの。本論文では食用以外の用途に用いられるもの。

第2章 国内油脂安定供給システムにおけるワーム利用の価値

2-1. ワームオイルのポテンシャル

ワームオイルの魅力は生産性の高さや油脂組成の多様性である。

表 2 に様々な生物の油脂含量を示す¹⁾。ワームのオイル含量は 20~30% であり、他の昆虫に比べても高い。例えば、ハチノスツヅリガの幼虫は 20% (乾燥ベースで 73%) の油脂を含み、生産面積当たりの油脂生産性は 240t/ha/Y (24 kg/m²/Y) と報告されている³⁾。既存油糧作物の中で生産性が高いパーム油でも 2.4~5 t-油脂/ha/Y¹²⁾ であり、ワームオイルの生産性はパーム油の 100 倍にも達する。さらに、表 3 に示すようにワームオイルは燃料油や化成品にも利用可能な幅広い組成 (C12~C20) の油脂^{3, 13, 14, 15} を含有する。これら組成は既存油脂 (表 4)¹⁶⁾ と類似しており、代替油脂原料としてのポテンシャルを有していることが分かる。

以上のように、ワームオイルは既存油糧作物の約 100 倍の生産能力に加え、既存油糧作物と類似の油脂組成を有することから、国土面積が限られた日本においても安定な代替油脂供給源となることが期待できる。

表 2 各種虫と肉のマクロ栄養素 (乾燥重量あたり) とエネルギー (kcal, 乾燥重量 100g あたり)

| | タンパク質 | 脂 質 | 炭水化物 | 灰分 | エネルギー-kcal | 引 用 |
|------------|--------|--------|--------|--------|------------|-------------------------------------|
| カイコ蛹 | 67.77% | 32.23% | ND | ND | 120 | 片山ら (2009) |
| イナゴ | 76.76% | 5.50% | 13.15% | 4.59% | 134 | 三橋 (未発表) |
| トノサマバッタ | 67.49% | 21.18% | ND | 11.33% | 147 | Bukkers (1997) |
| コオロギ (成虫) | 63.90% | 19.90% | 20.70% | 4.20% | ND | Perninoら (1991) |
| セミ幼虫 | 67.46% | 17.61% | 11.64% | 3.28% | 159 | 三橋 (未発表) |
| イエバエ | 59.65% | 19.00% | ND | 7.26% | ND | Ocio and Vinaras (1979) |
| ミールワーム | 48.32% | 34.63% | 14.73% | 2.33% | 205.6 | Firke (2002) |
| 牛肉 (かたロース) | 56.00% | 40.70% | 0.50% | 2.00% | 212 | 文科省食品成分データベース (2014) ²¹⁾ |
| 豚肉 (かたロース) | 72.20% | 23.80% | 0.00% | 3.85% | 151 | 文科省食品成分データベース (2014) ²¹⁾ |
| 鶏肉 (むね皮つき) | 52.10% | 45.98% | 0.00% | 1.90% | 244 | 文科省食品成分データベース (2014) ²¹⁾ |

¹⁾ <http://foodh.mext.go.jp/>

ND: Not determined.

牛肉: 乳用肥育牛肉系肉生

豚肉: 中型種肉系肉生

鶏肉: 成鶏肉皮付き生

(出典: brought to you by CORE, View metadata, citation and similar papers at coer.ac.uk より引用、作成)

表 3 ワームオイルの油脂組成

| 脂肪酸 | | 組成 (重量%) | | | |
|----------|-------|----------------------|------------|---|----------------|
| | | ハチノスツヅリ ガ幼虫 ※1 | BSFL ※2 | Housefly (Musca domestica) larva ※3 | Mealworm ※4 |
| ラウリン酸 | C12:0 | | 40.1 | 0.4 | 0.3 |
| ミリスチン酸 | C14:0 | 0.4 | 9.9 | 5.2 | 4.0 |
| パルミチン酸 | C16:0 | 28.4 | 13.1 | 28.6 | 15.8 |
| パルミトレイン酸 | C16:1 | 1.3 | 1.5 | 18.9 | 1.8 |
| ステアリン酸 | C18:0 | 1.9 | 2.1 | 6.6 | 2.3 |
| オレイン酸 | C18:1 | 48.1 | 12.0 | 23.1 | 44.5 |
| リノール酸 | C18:2 | 12.2 | | 11.4 | 19.5 |
| リノレン酸 | C18:3 | 1.5 | | | 0.4 |
| アラキジン酸 | C20:0 | | 0.1 | | 0.1 |
| エイコセン酸 | C20:1 | 6.1 | 0.1 | | 0.1 |

(出典：※1 油脂工業会館、<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vo19/pdf/all.pdf> より引用、作成)

(出典：※2 Femi J. Fawole *et. al.*, “Animal Nutrition” より引用、作成)

(出典：※3 Sheng-qing Wu *et. al.*, “Renewable Energy” より引用、作成。データのみ、最終エステル製品の組成比率を記載)

(出典：※4 Yang-Ju Son *et. al.*, “Foods” doi:10.3390/foods9010040 より引用、作成)

表 4 代表的な油糧作物の脂肪酸組成

| 脂肪酸 | | 組成 (重量%) | | | |
|----------|-------|----------|------|------|------|
| | | パーム油 | ヤシ油 | 大豆油 | 菜種油 |
| ラウリン酸 | C12:0 | | 51.2 | | |
| ミリスチン酸 | C14:0 | 1.1 | 17.6 | | |
| パルミチン酸 | C16:0 | 45.3 | 8.5 | 12.2 | 5.1 |
| パルミトレイン酸 | C16:1 | | | | 0.4 |
| ステアリン酸 | C18:0 | 4.4 | 2.7 | 4.2 | 1.8 |
| オレイン酸 | C18:1 | 40.3 | 6.5 | 23.1 | 57.5 |
| リノール酸 | C18:2 | 9.8 | 1.2 | 55.8 | 22.7 |
| リノレン酸 | C18:3 | 0.1 | | 10.1 | 10.6 |
| アラキジン酸 | C20:0 | 0.7 | | | |
| エイコセン酸 | C20:1 | | | | 6.5 |

(出典：油脂工業会館、<https://www.yushikaikan.or.jp/content/files/Kenkyu15.pdf> より引用、作成)

2-2. ワーム育成のフレキシブル性

ワームはフレキシブルな育成が可能である。

代表的なワームである Black Soldier Fly Larva (BSFL、アメリカミズアブ) のライフサイクルを図 5 に示す¹⁷。卵、幼虫、蛹、成虫の主に 4 つの段階からなり、40～50 日の短サイクルで成長する¹⁸。しかも、比較的温かな環境（湿度 60～70%、温度 26～27℃と光強度 135～200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ）での高密度育成が可能である。例えばハチノスツヅリガ幼虫の事例ではその育成面積（密度）は 40 億匹/ha（幼虫 5000 匹を柵 10 段（1 m^2 、厚さ 5cm 培地）で育成できる）と報告されている³。

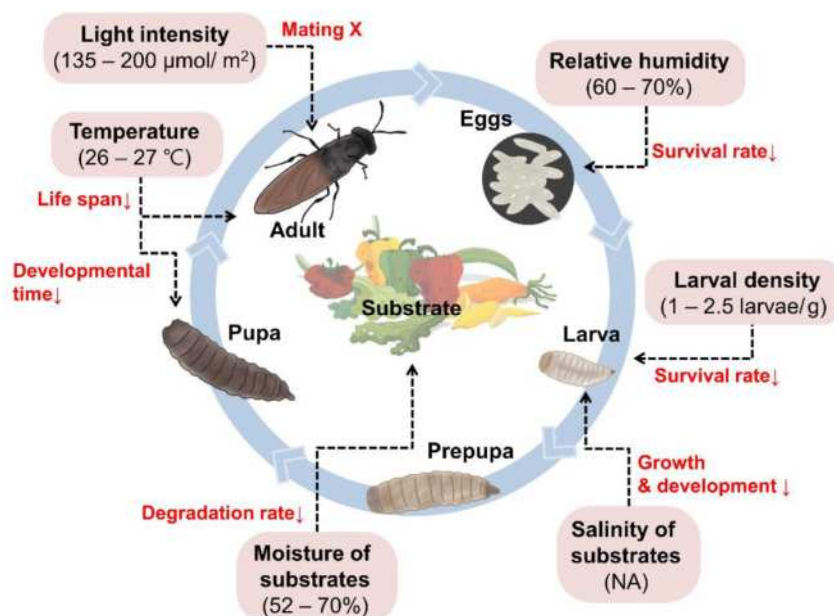


図 5 Black Soldier fly (*Hermetia illucens*) 幼虫 (BSFL) の成長に影響する因子

(出典: Chul-Hwan Kim *et al.*, “Processes”, <https://doi.org/10.3390/pr9010161> より引用、作成)

また、ワーム育成において人間の廃棄物（食品残渣や糞尿）を飼料にすることができ、表 5 は人間にとっても有用な食材（果物等）の他、食品残渣や人間の糞などの廃棄物に対する BSFL の飼料要求率の研究報告である。飼料要求率 FCR (Feed conversion ratio) とは「消費された飼料の合計÷生産されたワーム重量 [g/g]」の指標で、この値が小さいほど飼料がワームにとって高い栄養価であることを表す。興味深いことに、廃棄物の FCR 値が 1.7～3.6 と低い点（高い栄養価）を示している（表

5) ¹⁹。従来の廃棄物削減を目的にした研究では、飼料が多量に消費されること (=高 FCR) が求められるが、本提案では逆に、ワームの高効率生産の点から低 FCR が必要になる。「人間からの廃棄物 (食品残渣や糞尿)」の「低品位エネルギー^L」はワームにとって栄養価の高い飼料になり得るのである。

以上より、温和な生育環境で短期間、高密度に育成でき、低品位エネルギー源を飼料とするワーム育成のフレキシブル性は高いと言える。

表 5 様々な飼料を用いた、アメリカミズアブ (BSFL) の飼料要求率 (FCR) 値

| No | Substrate | FCR | Reference |
|----|-------------------------|-----------|--------------------------------|
| 1 | Avocado | 3.05 | Nyakeri (2018) |
| 2 | Banana | 1.97 | Nyakeri (2018) |
| 3 | Banana peelings | 4.50 | Nyakeri (2018) |
| 4 | Brewer's waste | 2.70 | Nyakeri (2018) |
| 5 | Chicken manure | 13.40 | Sheppard et al. (1994) |
| 6 | Cookie meal | 1.11 | Nyakeri (2018) |
| 7 | Faecal sludge | 3.40 | Nyakeri (2018) |
| 8 | Feed mixed | 2.40-3.60 | Heckmann and Gligorescu (2019) |
| 9 | Food remains | 2.60 | Nyakeri (2018) |
| 10 | Food waste | 1.70-3.60 | Gligorescu et al. (2020) |
| 11 | Formulated diet | 4.96-7.11 | Danieli et al. (2019) |
| 12 | Human feces | 2.00-3.00 | Banks et al. (2014) |
| 13 | Kales | 3.83 | Nyakeri (2018) |
| 14 | Municipal organic waste | 14.50 | Diener et al. (2011a) |
| 15 | Pig manure | 9.60 | Newton et al. (2005b) |
| 16 | Pineapple | 2.45 | Nyakeri (2018) |
| 17 | Water melon | 2.04 | Nyakeri (2018) |
| | Average | 4.67 | |

Note: FCR = Total feed consumed/Total weight of product produced. Where Total weight of product produced = final weight of the product - the initial weight of the product.

(出典: Shahida *et. al.*, "Waste Management" より引用、作成)

^L 様々な理由 (分散している、扱いにくいなど) で一般的にエネルギー変換効率の低いもの

2-3. ワーム飼料としての下水汚泥と食品廃棄物の利用

「人間からの廃棄物」である下水汚泥と事業系食品廃棄物の、ワーム育成用飼料としての適性を検討した。

下水処理施設は国内に約 2200 か所あり²⁰、そこから乾燥重量にして年間 230 万 ton もの下水汚泥が発生している (図 6)²¹。その多くはセメント用として再利用され、バイオマス源として有効利用されているのは全体の 37%にすぎない (図 7)。このような状況に対し、国土交通省では汚泥が持つ有望なエネルギーの活用推進を期待し、「資源・エネルギー等の集約・自立・供給拠点化」に向けた「新下水道ビジョン」政策を掲げている²⁰。実際に、生汚泥の化学エネルギーは小麦粉同等の高エネルギー密度 (約 15.0 kJ/kg) であることが報告されている²²。このように下水汚泥は多量に存在する有望なエネルギー源であるにも関わらず、有効利用が進んでおらず、ワーム用飼料としての活用が期待される。

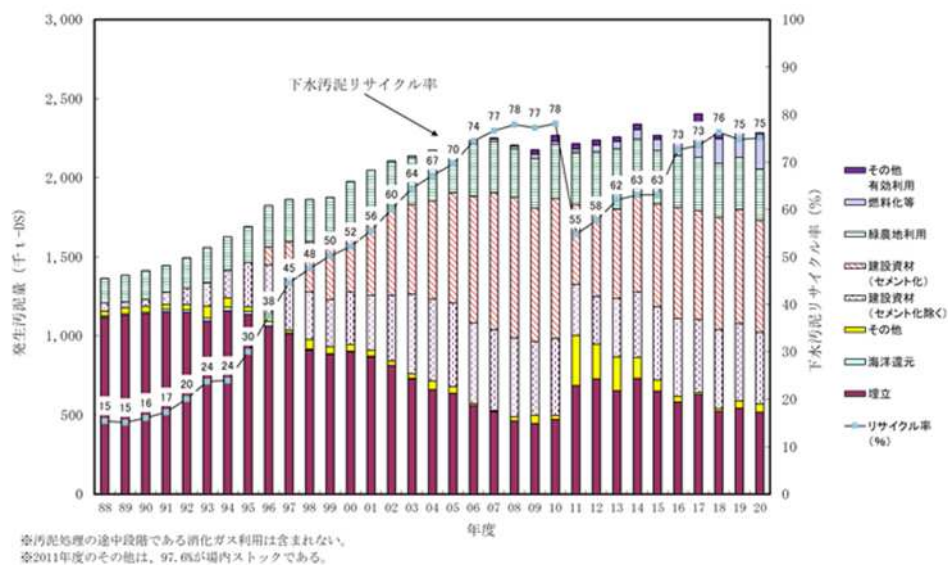


図 6 発生汚泥量及び処理・有効利用状況の推移

(出典： 国土交通省、下水道：脱炭素化／資源・エネルギー利用 - 国土交通省 (mlit.go.jp)

(2022年7月1日参照)より引用、作成)

食品廃棄物についても、その排出量は事業系と家庭系を合わせて年間 2010 万 ton と報告されている。特に事業系廃棄物は高リサイクル率に加え (図 8)²³、エネルギー密度も高く (約 8 kJ/kg)²⁴、ワーム用飼料として有用なエネルギー源となることが期

待できる。さらに、全国でまだ9か所（平成30年現在）ではあるが、食品系廃棄物等の地域バイオマスを下水処理施設へ集約する取り組みも検討されており、下水処理施設からの一括供給も期待できる（図9）²⁵。

一方、下水処理設備は日本の年間消費電力量の約0.7%を占め、節電が求められている。一定水準以上の省エネを達成できない設備は国庫補助事業の対象から外れることから、安定経営のためのエネルギー対策が不可欠である（図10）²⁶。下水処理設備において大きなエネルギーを要するのは、約70%の水分を含む下水汚泥²⁷を処理する焼却設備である。一方で、ワームの飼料の最適水分量は52~70%（図5）と報告されていることから、焼却前の下水汚泥はそのままワームの飼料に利用できる。ワーム育成によってエネルギー負荷の大きい焼却工程を省略でき、しかも焼却に伴うCO₂発生削減につながる。さらに、年間を通して温度が安定している未利用の下水熱（図11）²⁸はワーム育成に必要な温度環境（20~30℃）の維持に活用できる。

以上より、下水処理設備の活用によって、下水汚泥と事業系食品廃棄物をワーム用飼料として安定的に回収するとともにCO₂の削減と熱エネルギーのカスケード利用も期待できるワーム育成システムが構築できると考えた。

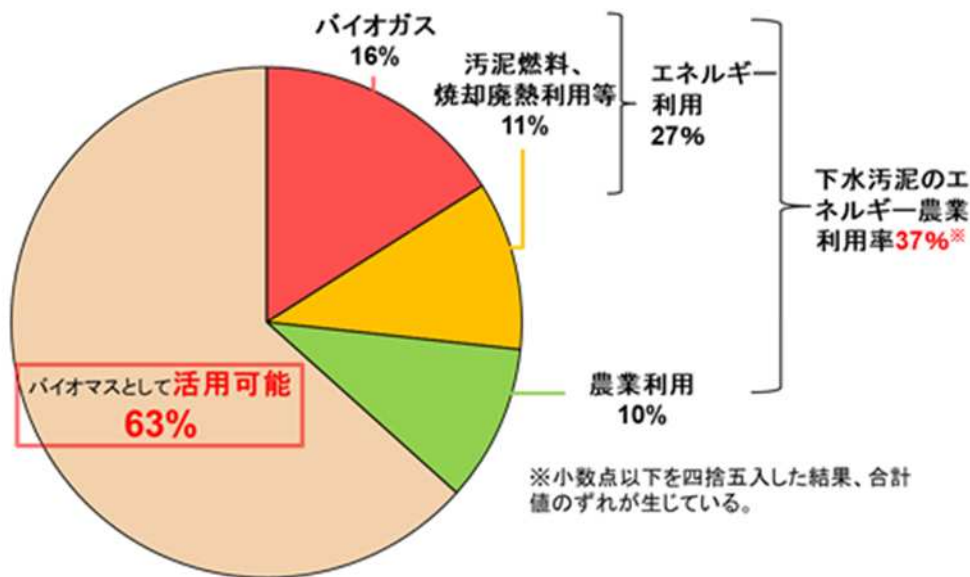


図7 下水汚泥エネルギー化率

（出典：国土交通省、下水道：脱炭素化／資源・エネルギー利用 - 国土交通省 (mlit.go.jp)

(2022年7月1日参照)より引用、作成)

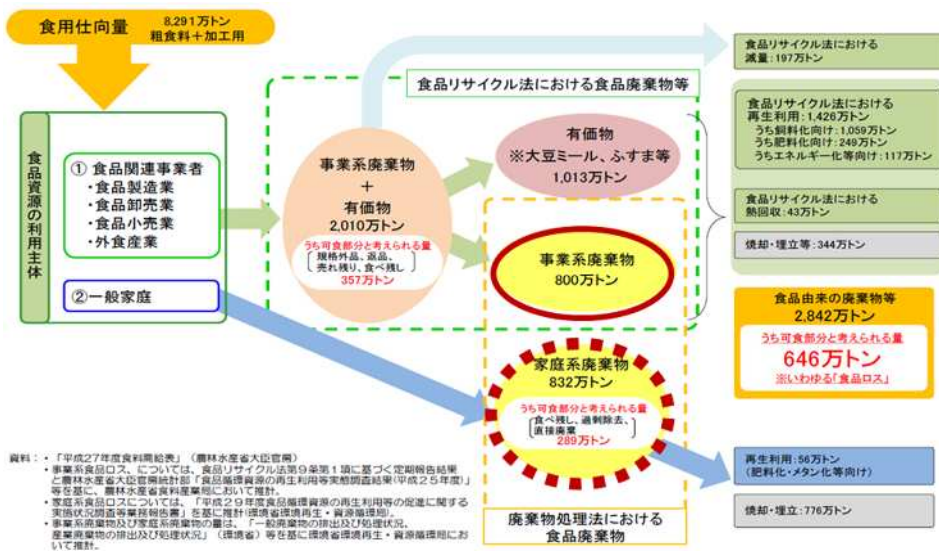


図 8 食品廃棄物等の利用状況等 (平成 27 年度推計) <概念図>

(出典: 環境省、<https://www.env.go.jp/content/900511406.pdf> より引用、作成)

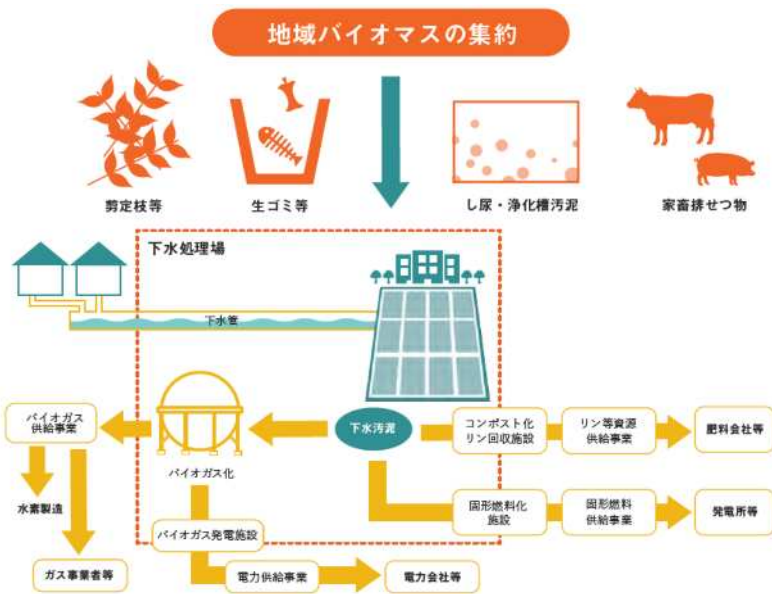


図 9 下水処理施設を利用した地域バイオマスの集約システムの検討事例

(出典: 国土交通省、<https://www.mlit.go.jp/common/001232781.pdf> より引用、作成)

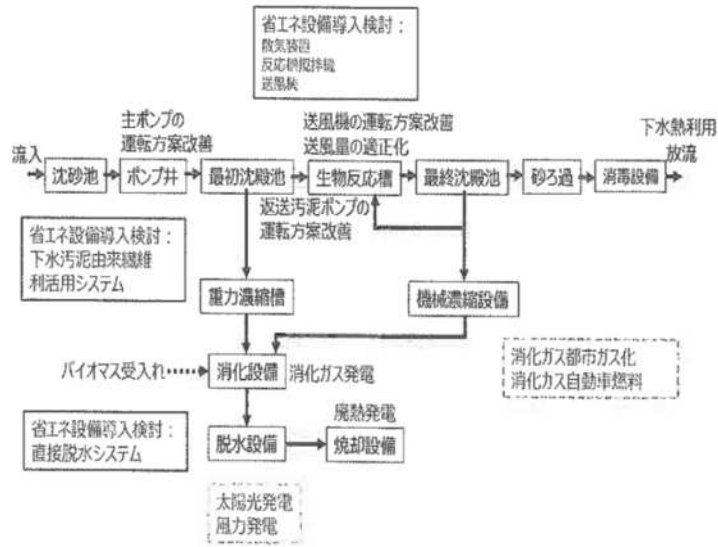


図 10 下水処理の製造フローと設備導入検討事例

(出典：“みんなで止めよう温暖化 環境浄化技術”より引用、作成)

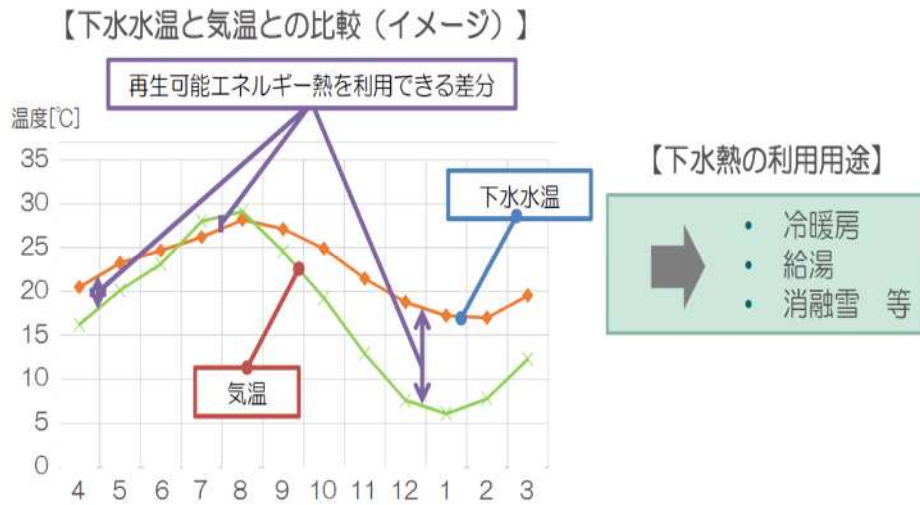


図 11 下水水温と気温の年次変動

(出典：国土交通省、<https://www.mlit.go.jp/common/001149855.pdf>より引用、作成)

2-4. ワームオイル生産における既存技術の活用

ワームオイルは、育成したワームの搾油（原油として回収）によって得られる。その後、原油であるワームオイルは精製され、様々な商品に利用される¹⁸。ワームの育成や圧搾設備の導入によって、この一連のワームオイル生産（育成、搾油、精製）は実現可能と考える。また、生産においてワームの研究知見や油脂産業界が有する精製設備の既存技術の活用が期待できる。

ワームの育成は、図 12 に示す汎用機器を用い、防虫ネットを施した育成用コンテナを多段型に設置して行われている²⁹。現在、このような高密度生産が可能な設備によってワームオイルは 1240 US ドル/ton (表 6)⁶ の価格で生産されている実績があり、パーム油（

図 13)³⁰や菜種油（図 14)³¹（1500～2500 US ドル/ton）との価格差がほぼ無い状況にある。

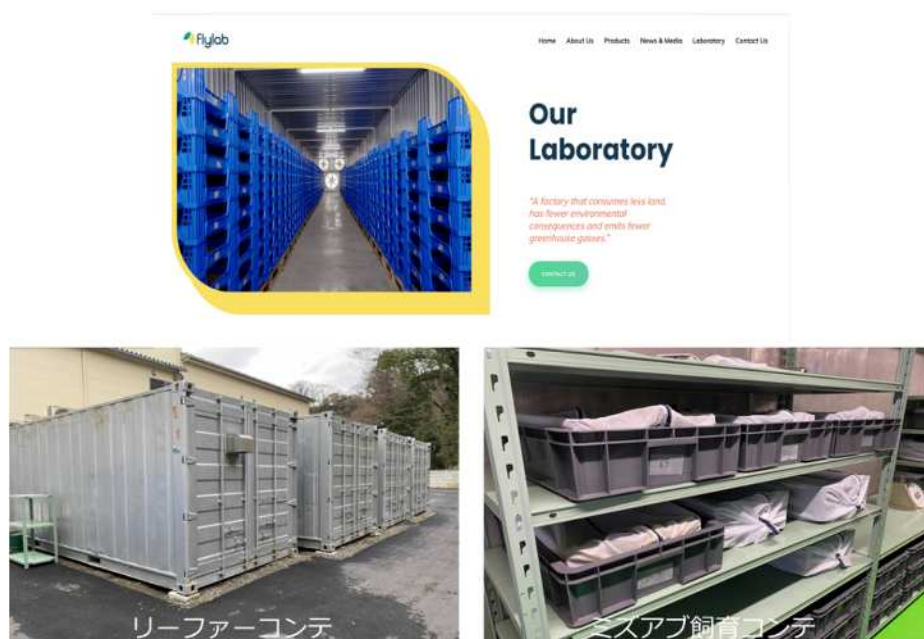


図 12 アメリカミズアブの飼育環境イメージ

（上段：Fly LAB、下段：エコラーバ（旧生物技研BSFプロジェクト）

（出典：上段[FlyLAB] Thailand <http://www.flylabfeed.com/laboratory/> より引用、作成）

（出典：下段 エコラーバ(旧生物技研BSFプロジェクト)、https://gikenbio.com/bsf/commercial_production/より引用、作成）

表 6 幼虫油の国/地域別平均販売価格 (2018-2030年) (USD/TON)

| 国-地域 | 2018 | 2019 | 2020 | 2025 | 2030 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 米国 | 1,435 | 1,440 | 1,445 | 1,543 | 1,832 |
| カナダ | 1,330 | 1,337 | 1,344 | 1,483 | 1,770 |
| オランダ | 1,162 | 1,166 | 1,170 | 1,249 | 1,441 |
| フランス | 1,229 | 1,234 | 1,239 | 1,346 | 1,545 |
| 英国 | 1,192 | 1,200 | 1,208 | 1,377 | 1,699 |
| ドイツ | 1,224 | 1,234 | 1,244 | 1,464 | 1,944 |
| フィンランド | 1,159 | 1,166 | 1,172 | 1,315 | 1,584 |
| デンマーク | 1,122 | 1,131 | 1,141 | 1,342 | 1,796 |
| ベルギー | 1,157 | 1,166 | 1,174 | 1,360 | 1,744 |
| その他欧州 | 1,228 | 1,234 | 1,240 | 1,364 | 1,601 |
| 中国 | 1,190 | 1,200 | 1,210 | 1,423 | 1,843 |
| 韓国 | 1,254 | 1,269 | 1,283 | 1,608 | 2,233 |
| 日本 | 1,228 | 1,234 | 1,240 | 1,369 | 1,610 |
| マレーシア | 1,162 | 1,166 | 1,170 | 1,249 | 1,400 |
| ベトナム | 1,084 | 1,097 | 1,100 | 1,156 | 1,264 |
| タイ | 1,128 | 1,131 | 1,133 | 1,172 | 1,250 |
| その他アジア太平洋地域 | 1,227 | 1,234 | 1,238 | 1,309 | 1,450 |
| 中南米 | 1,186 | 1,200 | 1,207 | 1,354 | 1,631 |
| 中近東アフリカ | 1,122 | 1,131 | 1,136 | 1,234 | 1,416 |

(出典： Meticulous RESERCH、sales@meticulousreserch.comより引用、作成)



図 13 パーム油価格の推移

(出典：“パーム油価格の推移”，https://ecodb.net/commodity/palm_oil.html，より引用、作成)

図 14 菜種油価格の推移

(出典：“菜種油価格の推移”，https://ecodb.net/commodity/rapeseed_oil.html，より引用、作成)

ワームオイルの搾油についても汎用機器を用いて実施することができる。例えばアメリカミズアブの事例では、60°C（湿度 58%）のオープン形式でワームを乾燥した後、既存のプレス機を用いた圧搾で 90%以上のワームオイル回収率が得られると報告されている¹⁸。

これらのワームの育成／搾油工程は、下水処理施設に併設した設備で行うことが有効である。下水処理施設から排出される汚泥をそのまま飼料化できるメリットに加えて、ワーム輸送に伴う新たな運搬管理の必要もなくなる。

ワームオイルの精製には既存油脂メーカーの設備と技術が活用できる。代表的な国内油脂メーカーの工場は各地方の工業地帯に分布している^{32、33、34}。これらの工場には油脂精製に必要な設備が既に備わっており、且つ長年の生産実績や物流ノウハウもある。そのため、下水処理施設で回収したワームオイルを、地方の精製工場に集約することによって、スケールメリットを生かした効率生産による品質管理、貯蔵、投資や運搬費削減が期待できる。

以上より、ワームの育成／搾油工程と精製工程を分けることによって、前者は原料や熱エネルギーの安定供給、後者はスケールメリットを生かした効率生産ができると考えた。その上で、現在も活発化しているワーム研究の知見を活かし、労働生産性向上やオペレーション省力化による更なる価格競争力を獲得していきたい。そしてこれらをスタンダードパッケージ化することで、技術伝承を可能にし、普及を促進していくことをめざしている。

第3章 ワームオイル生産による国内油脂安定供給システムの妥当性評価

3-1. 妥当性評価のためのモデル

本章では、提案した国内油脂安定供給システムが社会実装可能かをマテリアルバランス^Mの観点から定量的に検証した。

妥当性評価を実施するために、マテリアルバランスモデルを設定した(図 15)。まず、ワームを育成するためのエネルギー源である下水汚泥と事業系食品廃棄物は人間の数に比例して排出されると仮定し、統計データから、人口あたりの下水汚泥量や食品廃棄物量を算出した。次にそれをエネルギー源として育成できる(人口あたりの)ワーム量を算出し、それをもとに、得られるワームオイル量や育成に必要な面積を推算した。なお、オイルを抽出した後のワームの搾りかすは、ワームの育成飼料として再利用することを想定した。また、CO₂の削減量は、下水汚泥や食品廃棄物の焼却回避による実質的CO₂削減量と、本来調達していた植物油脂の輸入停止に伴う持ち込みCO₂の削減量の和として算出した。

以上のモデルを構築することで、ワームオイルの生産規模(必要人口、オイル生産量、飼育面積)および実質的CO₂削減量の試算を行い、システム実装の妥当性評価を行った。



図 15 定量的評価のためのマテリアルバランスモデル

^M 一般に物質収支と呼ばれ、活動におけるエネルギーおよび資源の投入量とその活動によって発生したアウトプットの全体像を表したもの。

3-2. 人口あたりのワームオイル生産量

まず、1年間に人口あたりに排出される下水汚泥と事業系食品廃棄物を算出する。全国各都市の下水処理量のデータ³⁵から人口あたりの下水処理水量の関係は図 16 の回帰式^N(式 3-1) のようになる。そして下水処理水量あたりの標準的な発生汚泥量(約 0.082%)³⁶を用いて、人口あたりの下水汚泥量の関係(式 3-2)に換算した。また、事業系食品廃棄物の発生量は、環境省の調査によると年間約 800 万 ton 発生²³していることから、日本総人口 1.2 億人で割ることで人口あたりの発生量の関係(式 3-3)を導出した(図 16)。

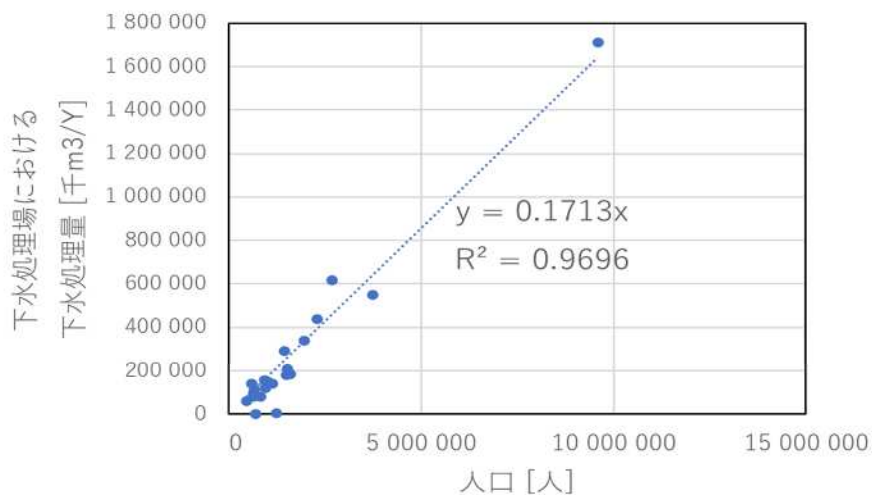
続いて、上記下水汚泥量及び事業系食品廃棄物量を育成飼料として得られるワームオイル量は、図 17 に示す下水汚泥の油脂変換率や各ワームからの油脂回収率等のデータ^{3, 13, 19, 22, 23}を用いてそれぞれ図 17 の(式 3-4), (式 3-5) のように見積もれる。さらにオイルの抽出過程で生じるワーム搾りカスを育成飼料として得られるワームオイル量は、上記データとワーム搾りカスのエネルギー原単位から(式 3-6) のように見積もれる。(式 3-4) ~ (式 3-6) を合算して、各ワームにおける人口あたりのワームオイル生産量の関係式(式 3-7, 3-8) が得られた。

$$\text{BSFL ワームオイル生産量(ton/Y)} = 0.0263 \times \text{人口(人)} \cdots \text{(式 3-7)}$$

$$\text{ハチノスツヅリガワームオイル生産量(ton/Y)} = 0.0205 \times \text{人口(人)} \cdots \text{(式 3-8)}$$

なお、BSFL により生産されるワームオイルは、主に C12, 14 系油脂¹³であり、洗剤などの化成品に適した組成である。また、ハチノスツヅリガにより生産されるワームオイルは、主に C18 不飽和系油脂³であり、食用油として適した組成といえる。

^N 目的変数について説明変数を使用して表した式のこと



(出典： 横浜市「大都市比較統計年表/令和元年XIII上・下水道」より)

| |
|--|
| 下水処理水量(千m ³ /Y) = 0.1713 × 人口(人) . . . (式3-1) |
| 下水処理水量あたりの標準的な発生汚泥量 = 0.082% |
| 下水汚泥発生量A (ton/Y) = 0.1405 × 人口(人) . . . (式3-2) |
| 事業系食品廃棄物量B (ton/Y) = 0.067 × 人口(人) . . . (式3-3) |

図 16 人口あたりの下水汚泥量/事業系食品廃棄物量の関係式の導出

| | |
|--|---|
| A:人口あたりの下水汚泥発生量 (ton/Y/人) | E:ワーム搾りカスのエネルギー原単位(kcal/g) [※] = 1.87 |
| B:人口あたりの事業系食品廃棄物量 (ton/Y/人) | F:BSFLからの油脂回収率(wt%) ¹³ = 0.26 |
| C:下水汚泥エネルギー原単位 (kJ/g) ²² = 15 | F':ハチノスツリガからの油脂回収率(wt%) ³ = 0.2 |
| D:食品廃棄物エネルギー原単位(kcal/g) ²³ = 1.87 | G:下水汚泥の油脂変換率 (BSFL、ハチノスツリガ) (wt%) ¹⁹ = 2.0 |

※EはDと同じと仮定した

下水汚泥からのワームオイル生産量(kg/Y) = $A \times 1000 \times (1/G) \times ForF'$. . . (式3-4)

食品廃棄物からのワームオイル生産量(kg/Y) = $B \times 1000 \times D \times (1/C) \times (1/G) \times ForF'$. . . (式3-5)

虫糞りカスからのワームオイル生産量(kg/Y) = $A \times 1000 \times (1/G) \times (1-ForF') \times E \times (1/C) \times (1/G) \times ForF'$. . . (式3-6)

ワームオイル生産量(ton/Y) = (式3-4) + (式3-5) + (式3-6)

BSFLワームオイル生産量(ton/Y) = $0.0263 \times 人口(人)$. . . (式3-7)

ハチノスツリガワームオイル生産量(ton/Y) = $0.0205 \times 人口(人)$. . . (式3-8)

図 17 各エネルギー源からのワームオイル生産量の関係式の導出

3-3. ワーム飼育に必要な面積

ワーム飼育に必要な面積はワームオイル生産量(式3-7、式3-8)、および図18に示す各種データ(飼育サイクル数、飼育面積、飼育段数、産卵に回す割合)^{3, 13, 18, 37, 38}から一般に図18の(式3-9)のように見積もれる。各ワームの飼育に必要な面積は(式3-10、3-11)のようになる。

$$\text{BSFL 飼育に必要な面積 (m}^2\text{/回)} = 0.20 \times \text{人口(人)} \cdots \text{(式 3-10)}$$

$$\text{ハチノスツヅリガ飼育に必要な面積 (m}^2\text{/回)} = 0.86 \times \text{人口(人)} \cdots \text{(式 3-11)}$$

| | |
|---|--|
| H:産卵に回すワーム (BSFL、ハチノスツヅリガ) の割合 (%) = 1.0 ³² | K:飼育面積 (BSFL:30000 匹/m ² /段 ³⁸ 、ハチノスツヅリガ:5000 匹/m ² /段 ³) |
| I:ワーム質量 (BSFL: 0.17g/匹 ³⁸ 、ハチノスツヅリガ:0.3g/匹 ³) | L:飼育段数 (BSFL、ハチノスツヅリガ:10 段 ³) |
| J:年間飼育サイクル数 (BSFL:10 回/Y ¹⁸ 、ハチノスツヅリガ:8 回/Y ³) | |

$$\begin{aligned} & \text{飼育に必要な面積 (m}^2\text{/回/人)} \\ & = \text{(式 3-7, 3-8 の係数)} / F \text{ or } F' / (1-H) / (I / 1000000) / J / K / L \cdots \text{(式 3-9)} \end{aligned}$$



$$\text{BSFL 飼育に必要な面積 (m}^2\text{/回)} = 0.20 \times \text{人口(人)} \cdots \text{(式 3-10)}$$

$$\text{ハチノスツヅリガ飼育に必要な面積 (m}^2\text{/回)} = 0.86 \times \text{人口(人)} \cdots \text{(式 3-11)}$$

図 18 人口あたりのワーム飼育面積の関係式の導出

3-4. 提案システム実装による実質的 CO₂ 削減量

本提案によると、下水汚泥をワーム飼育の飼料として利用することによって、従来下水汚泥を焼却処理する際に発生していた CO₂ 量を削減できる。平成 28 年度環境省の報告書³⁶に、汚泥焼却炉有の施設における「処理水量当たり温室効果ガス排出量の全国平均値の算出関数」が示されている。本関数と下水汚泥処理に占める焼却設備のエ

エネルギー消費量に相当する CO₂削減割合のデータ（約 30%²⁶）を用いて、人口当たりの上記 CO₂削減量を求めると以下（式 3-12）のようになる。

$$\text{下水汚泥利用による実質的 CO}_2\text{削減量(ton-CO}_2\text{/Y)} = 0.446 \times \text{人口(人)} \cdots \text{(式 3-12)}$$

また、ワームオイルにより、従来パームや大豆等から得られていた油脂を代替すると、それらが排出していた CO₂量も削減できる。2018 年 RSP0 資料³⁹のパームオイルおよび大豆油脂の CO₂排出量原単位(2024 kg/ton-oil)を用いて CO₂削減量を算出し、(式 3-12)に加えると、ワームオイル生産による実質的 CO₂削減量として以下の関係式(式 3-13)を得る。

$$\text{実質的 CO}_2\text{削減量(ton/Y)} = 0.446 \times \text{人口(人)} + 2024/1000 \times \text{ワームオイル生産量(ton/Y)} \cdots \text{(式 3-13)}$$

3-5. 提案システムの妥当性評価

ここまでに導出した（式 3-7）～（式 3-13）をもとにシステムの妥当性評価を行った。

1 章で述べたように、1st-Step ではパーム核油国内輸入量の約 7 万 ton/Y に、2nd-Step では食品向け油脂輸入量約 149 万 ton/Y に相当するワームオイルの生産を想定して規模を算出した（表 7）。1st-Step では、266 万人から排出される下水汚泥及び食品廃棄物の利用でパーム核油の代替が可能となり、育成に必要な総面積は 53ha、実質的 CO₂削減総量は 133 万 ton/Y と試算された。また、2nd-Step では、7300 万人から排出される下水汚泥及び食品廃棄物の利用で食品向け油脂輸入量全量の代替が可能となり、育成に必要な総面積は 6271ha、実質的 CO₂削減総量は 3549 万 ton/Y になった。

試算結果から国内の人口で想定量の油脂を生産可能と試算されたが、広い育成面積が必要になるため 1 カ所での集約的生産は困難であり、生産の分散化が必要である。この意味で、それぞれの下水処理施設での分散生産の仕組みは適しているといえる。

仮に 1st-Step について 300 カ所で分散化すると、1 カ所あたりでは約 0.9 万人から発生する下水汚泥と食品廃棄物で事足り、育成面積も 42m 四方となり実装可能な規模になる（表 7）。また、両 Step を実現したときの実質的な CO₂削減量は、2050 年カーボンニュートラルの目標（パリ協定における日本の約束草案記載の 2013 年度排出量 14 億 800 万 ton/Y 分の削減⁴⁰）の約 2.6%に相当する。

以上のように、日本の下水処理施設でワームを分散育成する本提案のワームオイル供給システムは、植物油脂の輸入量に相当するワームオイルを、実装可能な育成面積で安定供給可能であることが検証できた。しかも 2050 年のカーボンニュートラルの実現に対して有意な貢献が期待できる。

表 7 定量的評価

| | ターゲット油脂 | 量 | 虫種 | 必要人口 | 必要飼育面積 | 削減CO ₂ 量 |
|-----------------------|---------------------------------|------------|----------|---------------|----------------------------------|---------------------|
| 1 st -Step | 化粧品向け油脂 (パーム核油国内輸入量分) | 約7万ton/y | BSFL | 266万人 | 53万m ² (730m四方) | 133万ton/y |
| | ⇒300地域分散 | 233ton/y | | 0.9万人 | 1777m ² (42m四方) | 4354ton/y |
| 2 nd -Step | 食品向け油脂 | 約149万ton/y | ハチノスツツリガ | 7300万人 | 6271万m ² (7919m四方) | 3549万ton/y |

⇒ 日本人口の約60%に相当する規模から発生する下水汚泥および食品廃棄物が必要

第4章 ワーム飼育による油脂安定供給システムの広がり

4-1. 老朽化する下水処理インフラへの導入

国土交通省の調査では、令和2年度現在の日本に存在する2200か所の下水処理施設のうち、9割以上（約2000か所）が標準耐用年数の15年を超えて運用されている²⁰。今後、下水処理事業は「普及」から「維持管理」に舵が切られ、持続可能な事業の実現に向けて老朽化対策が積極的に行われるであろう。今回の我々の提案を、このような下水道インフラの改修時に順次導入していきたい。ワームオイルの生産によって事業の付加価値が高まり、多点展開型で規模を拡大するとともに、大都市圏だけではなく地方都市にとっても社会インフラに稼ぐ力を付与できる機会がつけられると期待している。

4-2. ワーム育成エネルギーを獲得する新たな産業への展開

平成27年度の環境省の食品廃棄物調査によると、事業系で排出される量とほぼ同量である年間832万トンの食品廃棄物が家庭から排出されており、その9割以上が埋め立てや焼却処分されている²³。第3章で示した試算に当てはめると、約800万tonの家庭系食品廃棄物からは、約42万ton（輸入由来食用油原油量の28%）のワームオイルが生産できる。家庭系食品廃棄物はワーム育成に対して極めて有効な未利用資源であると言える。

家庭系の食品廃棄物が有効利用されていない原因のひとつに、食品廃棄物の分別収集が進んでいないという現状がある。令和元年度の調査では、全国の1666自治体のうち、家庭から排出される食品廃棄物を他の可燃ごみ等と分別して収集を行っていると答えた自治体はわずか9.4%であった⁴¹。そのほとんどが人口5万人未満の小さな自治体であり、用途は堆肥化もしくはメタン化での利用にとどまっていた²³。

我々の提案によって、これまであまり進んでいなかった家庭系の食品廃棄物の分別回収が推進され、資源循環を促進する新たな産業として発展する可能性にも期待したい。

おわりに

2050年において世界は人口増加と地球温暖化の苦難に直面しているに違いない。必然的に世界の油糧作物は、人口増加に伴う需要増大と気候変動に伴う供給不足のリスクにさらされるであろう。これにそなえ、日本の油脂産業界は地球温暖化の防止に貢献しつつ、油脂の安定供給に向けて具体的な施策を示す必要がある。我々はこの問題に対して、既存の油糧作物と類似の油脂組成をもち、約100倍の油脂生産能力を示すワームに注目した。ワームは人間の廃棄物（食品残渣や糞尿）を餌に育つため、育成飼料の調達にも不自由しない。

試算によると、ワームを各所の下水処理施設において実装可能な規模で分散育成することによって、国内の「植物油脂の輸入量」のほぼ全量をワームオイルで賄えることを見積もることができた。しかも2050年カーボンニュートラル目標の最大2.6%のCO₂排出相当量を低減できる可能性を示した。本提案は下水処理施設の高度利用を通じた地域の活性化や、これまで未利用であった家庭系食品廃棄物の有効活用にも貢献が期待できるものである。

本提案を実現するまでには、ワームの育成やワームオイルの利用に関する技術的課題に加え、多くの制度的、心理的課題（抵抗感）を克服する必要がある。そのために、動物園のような排泄物や廃棄物が管理できる小規模な下水処理設備にラボ設備を導入して、技術確立や課題抽出を進めることを計画している。続いて、実際の下水処理設備に併設した育成設備にて非食用（化成品用）ワームオイル活用を進めながら技術のブラッシュアップや法整備を行って人々の理解を深めていく。そして、下水道設備の改廃や家庭系食品廃棄物回収システムの実装に合わせて規模を拡大し、2050年には食用油に展開するロードマップを描いている（図19）。

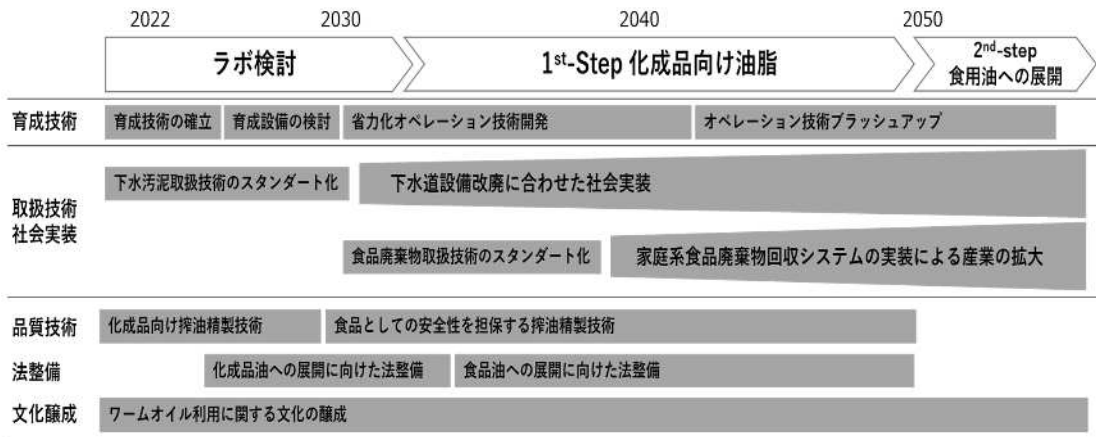


図 19 ロードマップ

かつての日本では、“蚕を育てて生糸を得る”養蚕が盛んにおこなわれてきた。最盛期の昭和5年（1930年）頃には約40万tonの繭を生産しており、当時は世界最大の養蚕国であった。このように日本には古くからワームと共生する文化がある。“ワームを育ててオイルを得る”油脂産業は予想以上に日本になじんでいくのではないだろうか。

——2050年の人々の生活や地球環境はどうなっているだろうか。

冒頭の問いに対し、我々の提案が不安から希望へと変化させる契機になれば幸いである。

<参考文献>

- 1 農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室, “2050 年における世界の食料需給見通し 世界の超長期食料需給予測システムによる予測結果”, 令和元年 9 月,
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_mitosi/attach/pdf/index-12.pdf
- 2 気象庁, “地球温暖化予測情報 IPCC の RCP8.5 シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測”, 第 9 巻
- 3 一般財団法人 油脂工業会館 油脂原料獲得研究会, “気候変動および異常気象リスクを見据えた油脂原料の獲得～持続可能な油脂調達～”, pp. 1-56, 2020. 5. 27,
<https://www.yushikaikan.or.jp/content/files/2019%20KenkyukaiHoukokusyo.pdf>
- 4 経済産業省, “2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(経済産業大臣説明資料)”, 令和 3 年 2 月,
<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-1.pdf>
- 5 一般社団法人 日本植物油協会, “植物油の基礎知識 植物油の未知—植物油の生産から消費まで 2. 世界の植物油生産と貿易”,
https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan02_01.html, (2022 年 6 月 20 日参照)
- 6 Meticulous RESERCH, ” Black Soldier Fly Market - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast (2020-2030).”, sales@meticulousreserch.com
- 7 中村雄己ら(ミヨシ油脂株), “雇用と油脂産業 「シロアリ」を活用した地域雇用開発”, 財団法人 油脂工業会館, 第 4 2 回 油脂産業論文
- 8 長谷川義博(花王株), “生物多様性に貢献する油脂産業 昆虫(ゴキブリ)を生物資源に活用した保全策の提案”, 財団法人 油脂工業会館, 第 4 3 回 油脂産業論文
- 9 農林水産省, 油糧生産実績調査, <https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/oil/>
(2022 年 06 月 27 日参照)
- 10 認定特定非営利活動法人 ボルネオ保全トラストジャパン (BCTJ), ” 2020 パーム白書”, 発行 2021 年 2 月
<https://www.bctj.jp/2017/wp-content/uploads/2022/02/pamlWP2020.pdf>
- 11 水野 壮, “現在の昆虫食の価値”, brought to you by CORE, View metadata,

citation and similar papers [at coer.ac.uk](http://coer.ac.uk)

¹² 認定特定非営利活動法人 ボルネオ保全トラストジャパン (BCTJ) , ” 2018 パーム白書” , 2019 年 2 月

<https://www.bctj.jp/2017/wp-content/uploads/2020/06/palmwp2018.pdf>

¹³ Femi J. Fawole *et al.*, “Insect (black soldier fly larvae) oil as a potential substitute for fish or soy oil in the fish meal-based diet of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)” , *Animal Nutrition*, **7**, 1360–1370, 2021.

¹⁴ Sheng-qing Wu *et al.*, “A renewable liquid source for biolubricant feedstock oil from housefly (*Musca domestica*) larva, *Renewable Energy*, **113**, 546–553, 2017.

¹⁵ Yang-Ju Son *et al.*, “Could Defatted mealworm (*Tenebrio molitor*) and Mealworm Oil Be Used as Food Ingredients?” , *Foods*, **9**, 40, 2020; doi:10.3390/foods9010040

¹⁶ 財団法人 油脂工業会館 油脂原料研究会, “世界の油脂原料事情” , 2004.3
<https://www.yushikaikan.or.jp/content/files/Kenkyu15.pdf>

¹⁷ Chul-Hwan Kim *et al.* , “Use of Black Soldier Fly Larvae for Food Waste Treatment and Energy Production in Asian Countries : A Review” , *Processes*, **9**, 161, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9010161>

¹⁸ K.C. Surendra *et al.*, “Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming” , *Renewable Energy*, **98**, 197–202, 2016

¹⁹ Shahida *et al.*, “Black soldier fly larvae (BSFL) and their affinity for organic waste processing” , *Waste Management*, **140**, 1–13, 2022.

²⁰ 国土交通省, “下水道 (下水道の維持管理) “,
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html, (2022 年 6 月 30 日参照)

²¹ 国土交通省 <https://www.mlit.go.jp> 下水道：脱炭素化／資源・エネルギー利用 - 国土交通省 (mlit.go.jp) , (2022 年 7 月 1 日参照)

-
- ²² 池 *et. al.*, (想創技術社会), 『サステナビリティ実現に向けて』, 大阪大学出版会、pp. 107, 2016
- ²³ 環境省, ”我が国の食品廃棄物等及び食品ロス量の推計値(平成27年度)等の公表について (env. go. jp)” , 平成30年4月17日
<https://www.env.go.jp/content/900511406.pdf>
- ²⁴ 渡辺浩平, ”食品廃棄の実態把握をめぐる国際動向”, *廃棄物資源循環学会誌*, **31**(4), 232-243, 2020.
- ²⁵ 国土交通省水管理・国土保全局下水道部 下水道企画課資源利用係, ”地域の未利用資源を 下水処理場でまとめてエネルギーに”, 平成30年4月
<https://www.mlit.go.jp/common/001232781.pdf>
- ²⁶ 蓮見 修平ら, ”下水処理場におけるエネルギー自立化に関する共同研究”, *みんなで止めよう温暖化 環境浄化技術*, **21**(2), 15-19, 2022.
- ²⁷ 織田 健司, ”設備更新を機に汚泥の処分費縮減と有効活用を実現<秦野市>”, *Journal of Sewerage, Monthly*, **45**(2), 47-51, 2022.
- ²⁸ 国土交通省, ”下水熱でスマートなエネルギー利用を~まちづくりにおける下水熱活用の提案~“, 平成28年作成, <https://www.mlit.go.jp/common/001149855.pdf>
- ²⁹ Armel Gougbedji *et. al.*, “Technical basis for the small-scale production of black soldier fly, *Hermetia illucens* (L. 1758), meal as fish feed in Benin”, *Journal of Agriculture and Food Research*, **4**, 100-153, 2021.
- ³⁰ 世界経済のネタ帳, “パーム油価格の推移:2022年6月3日更新”, https://ecodb.net/commodity/palm_oil.html, (2022年6月27日参照)
- ³¹ 世界経済のネタ帳, “菜種油価格の推移:2022年6月3日更新”, https://ecodb.net/commodity/rapeseed_oil.html, (2022年6月27日参照)
- ³² 国内生産拠点 | 企業情報 | 植物のチカラ 日清オイリオ (nisshin-oillio.com), <https://www.nisshin-oillio.com/company/corporate/branch/>, (2022年7月15日参照)
- ³³ 会社概要 | JOYL - J-オイルミルズ (j-oil.com), <https://www.j-oil.com/corporate/profile.html>, (2022年7

月 15 日参照)

³⁴ 事業拠点 | 企業情報 | 不二製油株式会社
(fujioil.co.jp) ,
<https://www.fujioil.co.jp/company/base/index.html>, (2022 年 7 月 15 日参照)

³⁵ 横浜市、「大都市比較統計年表/令和元年XIII 上・下水道」
<https://www.city.yokohama.lg.jp/city-info/yokohamashi/tokei-chosa/portal/nenpyo/d-r1.html#13>, (2022 年 6 月 27 日参照)

³⁶ 環境省・国土交通省、「下水道における地球温暖化対策マニュアル」、表 4-2②、平成 28 年作成

³⁷ e-Stat、繭生産累計統計 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500224&tstat=000001018007&cycle=7&year=20070&month=0&tclass1=000001036913>、(全国(明治 19 年から平成 16 年)より、収繭量に対する種繭量の経年変化データより 1.0%と設定)、(2022 年 6 月 27 日参照)

³⁸ Sungyup Jung *et. al.*, “Biodiesel production from black soldier fly larvae derived from food waste by non-catalytic transesterification”, *Energy*, **238**, 121700, 2022.

³⁹ RSPO、「Compilation of Best Management Practices to Reduce Total Emissions from Palm Oil Production」, Fig. 4, 2018

⁴⁰ 経済産業省資源エネルギー庁、
「令和元年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2020)」、第 1 部第 1 節
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/1-3-1.html>、(2022 年 6 月 27 日参照)

⁴¹ 環境省、「令和 2 年度 食品廃棄物等の発生抑制及び再生利用の促進の取組に係る実態調査報告書」、令和 3 年 3 月発行