

沿岸漂着ゴミ由来のバイオメタノールによる 沿岸域水産施設への熱・電力・燃料併給の可能性の検討

石田武志

Feasibility study of combined heat, power, and fuel supply system using bioethanol derived from marine debris for coastal fisheries facilities

Takeshi Ishida

Abstract : The author has previously developed and published energy and resource flow models focusing on the post-collection process of marine debris. These models were designed to examine the technical and economic feasibility of establishing businesses with energy systems. One of the previous studies examined the economic feasibility of a microgrid system combining a styrene oil conversion device from drifted styrofoam and a cogeneration system (CGS). The current study focuses on the “biomass gasification furnace and methanol synthesis furnace” technology, which has a proven track record with woody biomass. If this methanol synthesis furnace could be applied to drifting marine debris, it would be an option for providing energy to coastal facilities. In this study, an energy flow model was developed that can easily calculate the energy flow of a methanol synthesis furnace, CGS, and fuel supply system using biomethanol obtained from coastal biomass such as marine debris. If only marine debris is taken into account, the amount of biomass will be insufficient. For this reason, discarded fish and food residues from fishing ports and fish processing plants were also evaluated. Furthermore, this biomethanol can be used together with waste cooking oil to synthesize biodiesel fuel (FAME), enabling various applications including marine fuel. Using this energy model, the potential for energy self-sufficiency for coastal fisheries facilities (fishing ports, fish processing plants, and fishing boats) was calculated. The calculation results show energy self-sufficiency as a function of changes in biomass volume. However, they also found it difficult to be self-sufficient in electricity, heat, and fuel at the same time. Additionally, an optimization model was developed to determine the optimal size of the CGS, demonstrating the potential to improve the energy self-sufficiency of coastal fishery facilities.

Key words : marine debris, bio-methanol, bio-diesel fuel, FAME, cogeneration system (CGS), system simulation model, optimization model

緒言

沿岸漂着ゴミの状況

マイクロプラスチック等の海洋プラスチックゴミの問題がクローズアップされ、廃プラスチックが海洋生態系へ与える影響の調査や、プラスチックゴミの削減への取り組みが始まってきている。しかし、既に海洋に放出された廃棄物は膨大な量と考えられ、九州東シナ海側や北海道東部の離島では、沿岸部が大量の漂着ゴミで埋まる状況も続いて

いるなど、沿岸部での漂着ゴミの問題解決には長期間の取り組みが必要である。2009年7月には「美しく豊かな自然を保護するための海岸における良好な景観及び環境の保全に係る海岸漂着物等の処理等の推進に関する法律」(海岸漂着物処理推進法)が施行され、漂着ゴミの発生抑制や回収処理が進められている¹⁾。しかし日本全国に漂着するゴミの総量は、環境省報告書²⁾の推計によれば、約22～42万t(2015年時)であると報告されている。また回収については、環境省報告書³⁾によれば、令和4年度(2022年度)海

岸漂着物地域対策推進事業による漂着ゴミの回収重量の合計は 54,264 t、清掃延べ距離は16,742 km であり、多くの漂着ゴミは回収されていない状況であると考えられる。さらに令和4年度の全国の漂着ゴミ組成調査結果の集計結果³⁾によると全国で 123,898個 (7,939 kg) の漂着ゴミ (人工物) が回収・処理され、人工物の占める割合が大きい上位 10 位を整理した結果、10 品目は全てプラスチック (発泡スチロールを含む) であった。このうち発泡スチロールは漂着したのち、波力などで破碎され、そのプラスチック片が沿岸部岩場の間に堆積し、集計にカウントされていないものも多くあると考えられる。そしてこのプラスチック片の破碎が進むと、5 mm以下のマイクロプラスチックとなると考えられている。近年、マイクロプラスチックによる生態系への影響が懸念されるようになり、その実態調査や海洋へのプラスチックの流出を防ぐ対策も近年始められている²⁾。

これに加え、回収された漂着ゴミの処理についても課題が残されている。特に離島においては島内処分施設の不整備のため島外処理を行う必要があり、島外への運搬費が非常に高くなる。対馬市の事例では、1.05 m³の袋1袋当たり、島外への運搬費が約1万円と報告されている⁴⁾。このように、漂着ゴミの回収・処理においては補助金に頼る部分が多く、回収量や事業の継続性は、補助金の規模により決まる形となる。補助金が不足した場合、回収が進まなくなると共に、回収されたゴミについても、最も費用がかからない山間地への埋立て処分方式になることが危惧されている。漂着ゴミは塩分や化学物質を吸着している場合が多く、そのまま山間地に埋め立て処分を行うと、土壤汚染などの2次汚染につながる可能性も考えられる。このため今後は、浮遊状態も含めた漂着ゴミの効率的な捕捉・回収技術と、事業採算性を踏まえた処理・再資源化システムを検討していくことが必要である。

沿岸ゴミの処理技術についての検討経緯

筆者は、漂着ゴミの回収について、特に回収後の再資源化処理のプロセスに注目して、事業として成立するための技術的、制度的、経済的条件をエネルギー・資源フローモデルなど様々な数理モデルを構築して検討してきている。2018年には、漂着発泡スチロールの油化装置とコージェネレーションシステム (CGS)、太陽光発電を組み合わせたマイクログリッドによる経済性の最適化モデルの検討を行った⁵⁾。このモデルによりスチロール油化装置からのス

チレン油がCGSの経済性を向上させ、その利益を、漂着ゴミ回収へと投じることで、経済的な自立性を確保しつつ資源循環が成立できる可能性を示すことができた。

また2021年には、様々な変動要因下においても漂着ゴミ回収が長期的にかつ経済的に継続されるシステムの稼働方策を導出できる基礎モデルを構築するために、深層強化学習の一つである深層Q学習 (DQN) の手法を検討した。具体的には、一定規模の漂着ゴミを削減していくために、CGSから生み出される利益を、システムの運用上のどの部分 (CGS容量の拡張、漂着ゴミの回収の推進、利益のストックなど) に投入すれば、短期間でより多くの漂着ゴミの処理が可能なのかについて検討した⁶⁾。

さらに2023年には、マイクログリッド・エネルギーをひとつのエージェントとして考え、そのエージェントが地域のバイオマス資源を「捕食」しながら、電力と熱エネルギーを「創出」していく単位として考え、電力と熱をバランス良く消費できる場所に「生息」して、「増殖」していくというプロセスをマルチエージェント型のシミュレーションモデルとして考案した⁷⁾。このモデルを用いて、地域に広がった複数のバイオマス資源とエネルギーシステムを自己組織的に連携させることにより、地域全体が循環型社会へ移行していくプロセスの基礎をシミュレーションすることができた。

また筆者らとは別に、漂着ゴミの再資源化については、発泡スチロールの油化装置の導入などが長崎県対馬市や沖縄県鳩間島などで試みられている⁸⁾。油化されたスチレン油は、油化装置の加熱用燃料に用いられるとともに、重油などと混ぜ合わせることで燃料として利用できる。また輸送費がかさむ発泡スチロールは、植物油を用いた脱塩・減容化技術の開発がKawahara et al.⁹⁾ やYamaguchi et al.¹⁰⁾ により行われ、容積を1/50程度にできると報告されている。しかし漂着ゴミの効果的な処理を行う技術開発はこれら以外はあまり行われていない状況である。漂着ゴミ中のプラスチックの再使用が進まない原因の一つが、プラスチックに付着している汚れや海特有の臭いである。この海特有の臭いは洗浄するだけでは落ちず、再生利用の過程でも臭いが落ちない状況となっている。Ishida¹¹⁾は、沿岸漂着発表スチロールゴミの油媒によるリサイクル過程において、魚の臭い成分が植物油に移行するかどうかを、ハンセン溶解度パラメータにより評価を行っている。

一方で海洋漂着ゴミをエネルギー資源として再利用する取り組みは、いくつかの事例や研究があり、例えば官民の

取り組みとして「クリーンオーシャンプロジェクト2050」が進行中であり、漂着プラスチックゴミをエネルギー資源として活用するシステムが検討されている。これは、漂着プラスチックを圧縮しペレット化して燃料として利用する樹脂ボイラー実証実験を行い(2016年)、東町漁業協同組合(鹿児島県長島町)にて、廃フロートをペレット燃料にして水産加工(ワカメの湯通し作業)に必要な90~95℃のお湯の供給に成功している¹²⁾。また北海道では、海岸漂着物のリサイクルモデルが検討され、特に流木のリサイクルに焦点を当て、流木を燃料として利用するための処理方法が模索されている¹³⁾。沖縄県竹富町では、漂着した発泡スチロールを油化するプロジェクトが実施されており、発泡スチロールを移動式油化装置で処理し、スチレン油に変換している。このスチレン油は、焼却炉やディーゼルエンジンの燃料として利用可能であり、実証実験では104 kgの発泡スチロールから74 Lのスチレン油が生成されたと報告されている¹³⁾。

研究目的

以上のように漂着ゴミについては回収後の処理についてもコストがかかる状況であり、筆者らは、それらのゴミからエネルギーを回収するなどにより少しでも経済性が確保できる可能性を探ってきている。本研究では、木質系のバイオマスなどで既に実績のある「バイオマスガス化炉+メタノール合成炉」(以下バイオメタノール合成炉)に注目して、これらの技術によるエネルギー回収の可能性について試算を行った。バイオメタノール合成炉については、海洋漂着ゴミ(プラスチック、バイオマスゴミ)の処理を行った事例は確認できていないが、技術的には可能であると考えられる。この技術が利用できれば海洋漂着ゴミからバイオメタノールの合成が可能となるとともに、このバイオメタノールは廃食油と共に用いてバイオディーゼル燃料(FAME)の合成も可能になるなど、船舶燃料を始めとして様々な用途に用いることができる。また同時に、沿岸の水産施設から生じる廃棄魚や食品残渣なども同時に処理することが可能であると考えられる。

メタノールの利用については、ノーベル化学賞を受賞したジョージ・オラー氏が「メタノール経済社会」を提唱している¹⁴⁾。これはエネルギーの媒体としてメタノールを中核とする概念である。近年、メタノールは、基礎化学品としての幅広い用途や、船舶・ボイラー燃料などの用途への展開ができるなどの点から注目されている。沿岸部の漁港

や水産加工施設からの食品廃棄物や廃棄魚などのバイオマスも含めてバイオメタノールを製造することが可能となれば、バイオメタノール合成プロセスによる漁港・水産施設のエネルギー自給を達成するとともに資源循環も実施できるシステムを構成することが可能であると考えられる(Fig. 1)。本研究は、沿岸水産施設において、漂着ゴミや水産系廃棄物から製造したバイオメタノールを用いて、漁港や食品事業所、漁船などへの熱・電力・燃料併給システムの可能性を検討したものである。

バイオメタノールの沿岸水産施設・船舶での利用可能性

バイオマスからメタノールの合成は、バイオマスの熱化学変換により、「バイオマスのガス化・メタノール合成プロセス」で製造される。有機物であるバイオマスをガス化炉により、CO、CO₂、CH₄とH₂に転換したのち、メタノールを合成するものであり、このプロセスは、バイオマスの種類を選ばず、メタノールの収率が高いという特徴がある。国内では新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)などの主導により試験炉がつくられ、長崎バイオメタノール事業¹⁵⁾などのように、商業生産も開始されている。

漂着ゴミや水産系廃棄物を利用したバイオメタノールの合成の実績はまだ報告されていないが、沿岸部や漁港などから出る有機物を利用したバイオメタノール合成プロセスが可能となれば、Fig. 1のように沿岸部の漁港・水産施設のエネルギー供給を実現するとともに資源循環が実現できるシステムを考えることができる。Fig. 1に示すようにこのシステムで生成されたメタノールは、以下のような様々な用途に利用することができる。

- 1) バイオマスガス化炉からのH₂+COは、メタノールを合成するだけではなく、直接燃焼してエンジンを稼働させて発電したり、燃料電池の発電燃料として利用でき、漁港や水産加工場の電力の自給が可能となる。
- 2) メタノールは小型漁船の燃料であるガソリンや軽油に直接添加することも可能であり、燃料費の削減が可能である。またメタノール自動車の燃料としても利用できる。近年メタノールは船舶の主燃料として注目されている。例えばトヨタ自動車の子会社のトヨフジ海運(愛知県東海市)は、メタノールを主燃料に使う自動車運搬船2隻を2027年度に導入すると発表している¹⁶⁾。既存の化石燃料で稼働する船舶と比較し、二酸化炭素(CO₂)排出量を約20%削減できると報告されている。

- 3) 水産加工場から出る廃食油とメタノールを利用することにより、バイオディーゼル燃料 (FAME) を生成することが可能であり、中大型漁船にA重油代替燃料として供給することもできる。さらに超臨界メタノールとの反応を利用すると石けんなどの副生成物なしでバイオディーゼル燃料が精製できる研究¹⁷⁾も行われている。
- 4) バイオマスガス化炉から出る最終的なスラグも、セメント材料として用いることができ、沿岸部土木工事や漁場形成などに利用することができる。
- 5) メタノールは様々な化学製品製造の起点となる基礎物質であり、プラスチックの精製など、様々な工業材料を製造することができる。
- 6) メタノールを栄養源とするC1微生物によるタンパク質の精製も、海外では技術的な事業例があり、養殖用の餌として大豆などの合成試料に添加することができる⁸⁾。
- 7) メタノール燃料電池の発電燃料として利用でき、漁港や水産加工場の電力の自給が可能となる。

このように、メタノール合成炉は、漁港や沿岸水産施設のエネルギー自給やゼロエミッション化を可能にするだけでなく、化学基礎製品や人工飼料もつくりだすことがで

きる可能性がある。

バイオメタノールによる熱・電力・燃料供給システムシミュレーションモデルの構築

検討対象のシステム

本研究では、沿岸水産施設 (漁港、水産加工場、漁船) における電力・熱・燃料を併給するFig. 2に示すバイオメタノールシステムについて、定量的な検討を行うための基礎的なエネルギー・物質フローモデルを構築した。システムは主として、メタノール合成炉、バイオディーゼル油製造装置、CGS (コージェネレーションシステム) の3つより構成されるシステムを対象とした。そして沿岸水産施設に対して、エネルギー供給の自給率の向上の観点から定量的な検討をした。また本検討では、エネルギー需給のバランスの視点で考察を行い、経済性の評価は将来の課題としている。

本研究では漂着ゴミをバイオマス資源として利用することを目指しているが、投入される資源としては木質系の漂着ゴミのみでは、回収量が少なくメタノール合成炉を稼働できる規模にはないと考えられるため、水産施設から生じる食品残渣や廃棄魚もバイオマス資源として検討対象とし

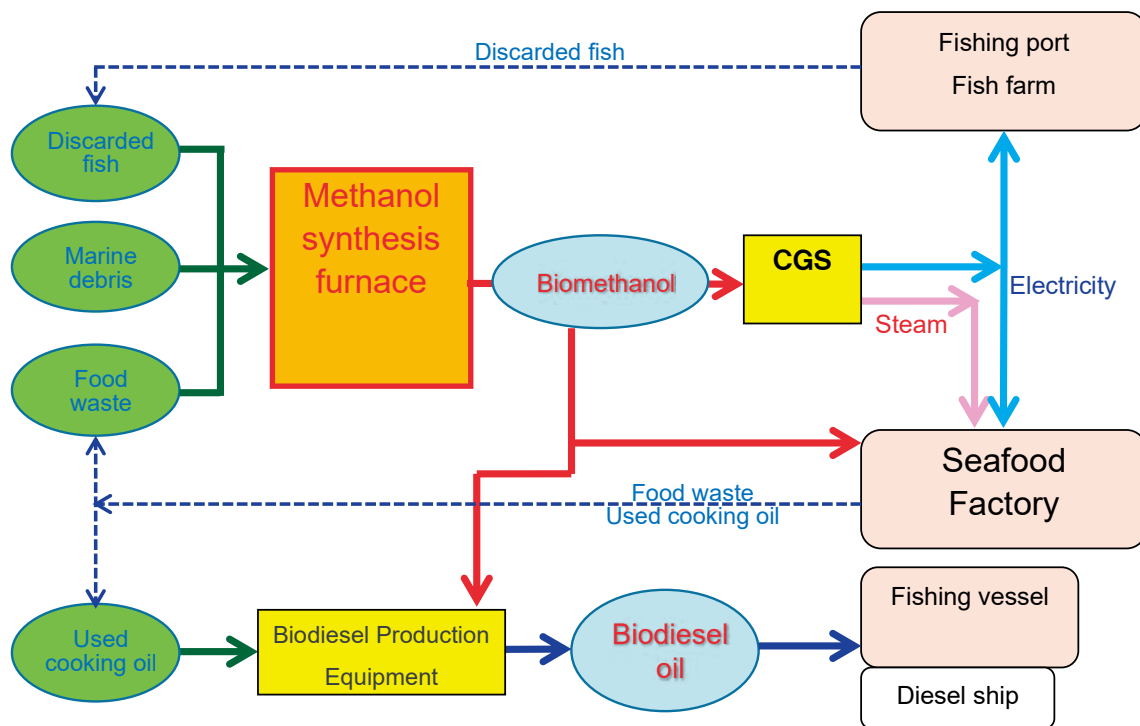


Fig. 2. Flow diagram of the energy system to be analyzed and evaluated.

た。これにより水産施設からの廃棄物もエネルギー資源として有効に利用できる可能性を検討できると考えられる。また漂着ゴミのうち発泡スチロールなどのプラスチック系のゴミについてもバイオマス資源ではないが、漂着ゴミの処理という視点からメタノール合成炉に投入すると設定した。

システム構成要素の設定

バイオマス投入系の設定

想定したエネルギーシステムに投入されるバイオマス資源は、水産加工工場から出る食品残渣、漁港から出る廃棄魚、漂着ゴミ（プラスチック系、木質系）とした。食品残渣と廃棄魚の設定は、モデル食品工場の設定、およびモデル漁港の設定の部分に示す。

漂着ゴミは、沿岸距離に対する回収量を以下に示す方法により推計した。環境省の平成 30 年度の海洋漂着ゴミの調査¹⁸⁾において、2018年度の全国の回収重量と清掃延べ距離の関係式が提示されており、回収量 y (t) = $4.674 \times$ 回収延べ距離 x (km) + 268.13と報告されている。この式は距離が100 kmオーダーの相関式であり、これに直接 $x = 1$ を代入して1 km当たりの回収量を求めると誤差が大きくなると考えられるため、100 kmの推計値を100で割ることにより、沿岸1 km当たりの回収量の原単位を求め、7.36 t/kmが得られた。仮に沿岸10 kmを想定すると、海洋ゴミの回収量は、 $7.36 \text{ t/km} \times 10 \text{ km} = 73.6 \text{ t/年}$ となる。また同調査¹⁹⁾において、下関などのいくつかの地域の回収ゴミ

の分類別重量や構成比が示されている。これからいくつかの地域の一般的な漂着ゴミの規模や組成をまとめるとTable 1のようになる。下関などでの回収ゴミのうち、プラスチックと木材系をあわせると8割から9割程度となることが読み取れる。このため、本推計では回収ゴミのうち、バイオマス資源として利用できるものは8割として、沿岸10 km 当たりのバイオマス系の漂着回収ゴミは $73.6 \text{ t/年} \times 0.8 = 58.9 \text{ t/年}$ となる。これより、本推計では10 km長の海岸の平均回収量は58.9 t/年としてエネルギー収支の計算に用いた。仮に10 km長の海岸の漂着ゴミの平均回収量は58.9 t/年をバイオメタノール反応炉に投入すると、次に示すバイオメタノール合成炉の製造原単位0.2 t-メタノール/t-バイオマスより、 $58.9 \text{ t/年} \times 0.2 = 11.8 \text{ t-メタノール/年}$ となる。この規模ではメタノール合成炉を常に稼働させるためのバイオマス量の規模とはならないため、水産加工工場から出る食品残渣、漁港から出る廃棄魚を加えて推計を行った。

バイオメタノール反応炉の条件

バイオマス熱分解炉およびメタノール合成炉により、バイオマス1トンから得られるバイオメタノール量の調査を行った。バイオメタノールの生産量は、いくつかの実働プラントにおける投入バイオマス量とメタノール産出量のデータから、バイオマス当たりの生産量の原単位を求めた。Table 2は2つのバイオマスプラント（事例1は京都バイオサイクルプロジェクト²⁰⁾、事例2は三菱重工業²¹⁾）におけるメタノール製造量の事例である。これらの実績より、バ

Table 1. Size and composition of marine debris in Japanese some regions

Region	Plastic rate (%)	Wood rate (%)	Sum (%)
Shimonoseki	40	58	98
Amami	70	11	81
Kouchi	33	47	80
Matsue	66	27	93

Table 2. Example of methanol production volume in biomass plants

Case study	Biomass input amount (kg/day)	Methanol yield
1 ²⁰⁾	500	40-50 L/day
2 ²¹⁾	2,000	400 kg/day

バイオマス当たりの生産量の原単位 (重量収率) は0.1～0.2程度であると推計できる。

Table 2の調査結果より、バイオメタノールの製造原単位 (バイオマス1トンに対するバイオメタノールの製造量) の設定としては、0.2 t-メタノール/t-バイオマスを本研究では採用した。

バイオディーゼル油製造の設定

バイオマスからバイオディーゼル燃料を生成する技術には、以下のようなものがある^{22,23)}。

- 1) FAME (Fatty Acid Methyl Ester, 脂肪酸メチルエステル) : 廃食油などを原料として製造される最も一般的なバイオディーゼル燃料であり、既存のディーゼルエンジンでそのまま使用できるため、導入が容易である。この中には菜種油などの植物性油脂をメチルエステル化して、ディーゼルエンジン用燃料を得る技術や、家庭の使用済みてんぷら油を回収し、バイオディーゼル燃料を製造する技術も存在している。
- 2) HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, 水素化処理油) : 植物油を水素化処理して製造されるバイオディーゼル燃料であり、FAMEよりも安定性が高く、低温での流動性も優れている。
- 3) SVO (Straight Vegetable Oil) : 植物油をそのまま燃料として利用するもので、バイオディーゼル燃料の一種である。主に廃食油などが利用され、精製処理を最小限にとどめることで、製造コストを低く抑えられる点が特徴である。

本研究では廃食油からバイオディーゼル燃料を製造する最も一般的な技術であるFAMEを推計の対象とした。FAMEを生成する一般的な方法は以下の通りとなる。

- ① 原料となる廃食用油の準備 (使用後の食用油や飲食店などから回収)。
- ② エステル交換反応 : 廃食用油にメタノールを反応させる。これにより、廃食用油の主成分であるトリグリセリドが低分子化され、粘度の低い脂肪酸メチルエステル (FAME) へと変換される。このFAMEがバイオディーゼル燃料として利用できる。
- ③ 副産物の除去 : エステル交換反応の過程で生成される副産物であるグリセリンを除去する。
- ④ 精製 : 生成されたバイオディーゼル燃料をさらに精製し、不純物を取り除く。
- ⑤ 品質確認 : 最終的に得られたバイオディーゼル燃料の品質を確認する。

以上の工程を経て、廃食用油からバイオディーゼル燃料が生成される。ただし、具体的な製造方法や条件は、使用する設備や原料の種類、品質などにより異なる。廃食油に対する、メタノールの使用量、バイオディーゼル燃料の製造量の比率としては、植田油脂株式会社²⁴⁾ による情報を基にまとめたTable 3の値を用いた。また廃食油の回収量については統計的なデータが得られなかったため、モデル食品工業あたり月10 tとして年間120 t/年と仮定して計算を行った。

コージェネレーションシステム (CGS) の設定

CGSはエンジン式のものや燃料電池式のものがあるが、本推計ではエンジン式のを想定し、発電規模は、100 kW程度、発電効率0.4 (低位発熱量基準)、排熱回収効率0.3 (低位発熱量基準)、年間稼働時間3,000 hのシステムを考え、バイオメタノールで駆動するとした。最適化モデルにおいてはCGS 発電容量を変数とした。

Table 3. Biodiesel production ratio*

Biodiesel production	Ratio
Methanol consumption	20
Biodiesel fuel production	70
Waste	10

*Weight ratio when waste cooking oil is taken as 100.

Table 4. Specifications of the model food factory

Energy consumption	
Electricity	520,429 kWh/factory
Fuel	2,583 GJ/factory
Stream	1,089 GJ/factory
Production	2,830 t/factory
Discard residual rate	0.035
Food waste amount	99 t/factory

現在メタノールでエンジンを駆動するCGSの事例はほとんどないと考えられるが、船舶燃料において、North-C-Methanolプロジェクト²⁵⁾など、メタノールを船舶燃料として利用することが計画されるなどしており、CGSでのメタノール利用に関しては技術的障壁は低いと考えられる。また、メタノールを燃料とする燃料電池は現在までの多くの実証や製品化の事例があり、比較的小型のものが多く。具体的な事例としてはSFC Energy AG社の直接メタノール型燃料電池²⁶⁾などがある。メタノール燃料電池によるCGSも技術的に可能であると考えられる。

モデル漁港の設定

一般的な規模の漁港として、高知県の田ノ浦漁港について文献^{27,28)}を参照し、漁港の電力消費量、漁獲量、船舶数を把握し、これをモデル漁港として、本計算では使用した。この漁港での年間電力消費量は1,550 GWh/年(平成22年)²⁷⁾である。廃棄魚は漁獲量12,847 t²⁸⁾と廃棄率9.1%²⁹⁾から1,169 t/年と設定した。

モデル食品工場の設定

平均的な規模の水産食品工場の想定として、消費エネルギーについては「令和4年度エネルギー消費統計調査」³⁰⁾の食品製造業の1事業所当たりの数値を用いた(Table 4)。生産量については、「2022年経済構造実態調査 製造業事業所調査(品目別統計表データ)」[1. 製造品に関する統計表, 第1表 品目別出荷及び産出事業所数(全事業所)]³¹⁾の鯖缶詰、まぐろ缶詰の出荷数量と事業所数のデータから、事業所当たりの生産量を算定した(Table 4)。食品残渣量は、生産量、食品残渣率から99 t/年と推計した。食品残渣率は、「食品製造業の食品ロス削減対策に対する調査事業」報告書【概要版】³²⁾の記述「冷凍食品製造業全体では「製品生産量」に対するロスの発生率は合計で3.5%となった。」より3.5%を利用した。

漁船の燃料消費量

水産庁の研究調査において、いくつかの漁船の実態調査が「沖合漁船の動力構成および燃料消費実態の調査」³³⁾にまとめられており、漁船の燃料消費量の実績として、沖合底びき網漁船(板びき 105 GT, A 丸)の月別燃料消費量などが掲載されているが、これを集計して、年間のt数に変換すると、658 t/年(A重油)となる。このほかに沖合底びき網漁船(かけまわし 144 GT, B 丸)、大中型まき網漁業

網船(北まき 199 GT, C 丸)、大中型まき網漁業網船(遠まき 199 GT, D 丸)の実態調査結果が掲載されている。しかしこの調査では特定の漁船の実績のみで、これらの数値を漁船全体に一般化したデータとして取り扱うことが難しい。

本研究では、漁船における燃料使用量は、経済産業省がPRTR (Pollutant Release and Transfer Register; 化学物質排出移動量届出) 制度のもとで推計・公表しているものを利用した³⁴⁾。Table 5に漁船の大きさ別の燃料消費量を抜粋したものを示す。この推計では、「沿岸漁船(12 海里以内)」及び「沖合漁船(12~200 海里)」のみが推計対象となっており、「主たる操業水域が陸地から 200 海里以遠である遠洋漁業の漁船」については、推計の対象外とされている。

システムシミュレーションの設定

Fig. 2のシステム構成について、各構成要素の入出エネルギー量の計算を行うためのExcelによるシステムシミュレーションシートを作成した。シートの概観をFig. 3に示す。このシートによりバイオマス投入量に対して、メタノールの製造量、さらにそれから派生的に生成される、電力、熱、バイオディーゼル油の量が簡易に計算できるものとなっている。

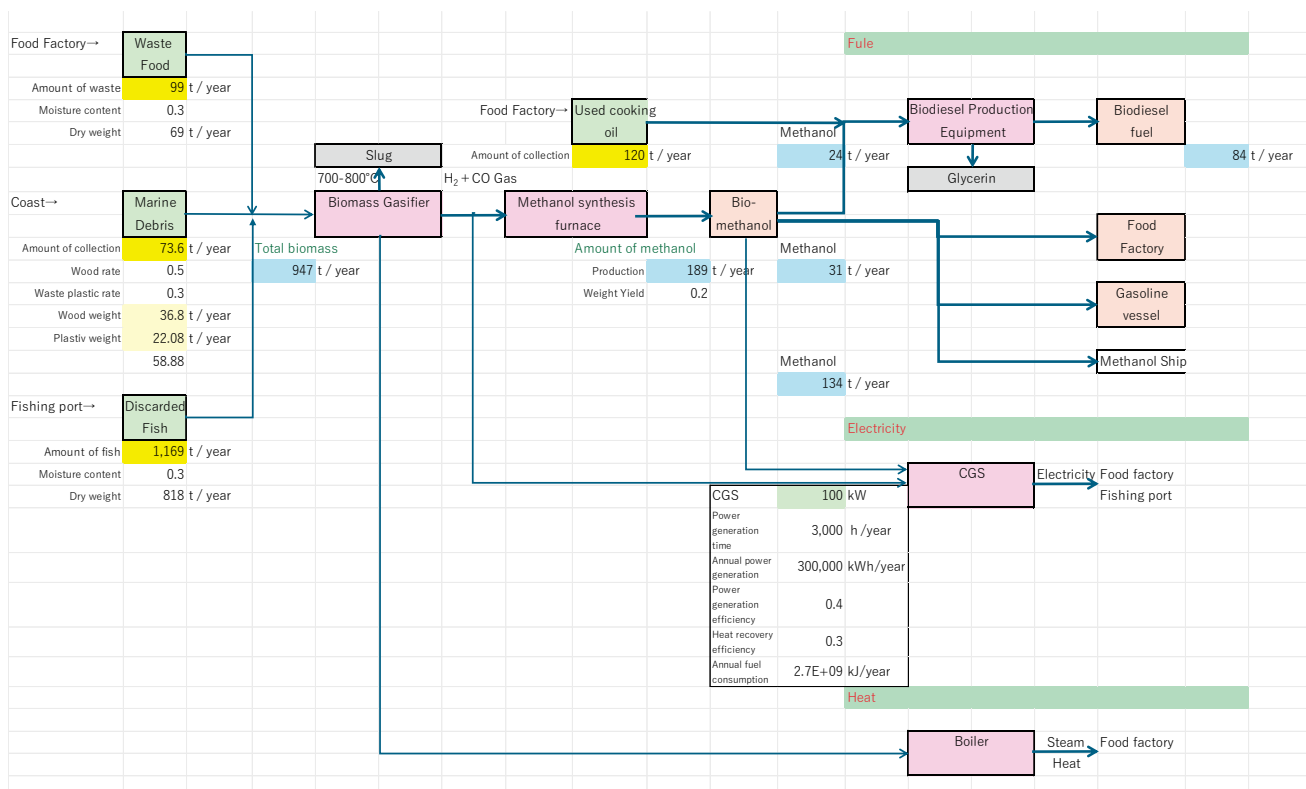
シート上に入力項目として、食品残渣量、漂着ゴミ回収量、廃棄魚量、廃食油量、CGS発電容量を設定すると、バイオメタノール生産量、それによるCGS発電量、熱回収量、バイオディーゼル燃料量が算出される。CGSと漁船のバイオディーゼル燃料に利用されなかったバイオメタノールは、食品工場の燃料として利用するとしている。

最適化モデルの設定

Fig. 3のシステムシミュレーションシートを基礎として、Excelのソルバーを用いた最適化モデルもあわせて構築した。システムシミュレーションの設定でCGSを稼働させた場合、CGSから回収される熱を食品工場だけでは使いきれず余ってしまう可能性があり、全体のエネルギー効率が低減してしまう。しかし電力、熱、燃料をバランスよく供給するためのCGS容量などを決定することが困難である。このためモデル漁港とモデル食品工場に対して、どの程度の規模の食品工場(本推計でのモデル食品工場がいくつか)と漁港(本推計でのモデル漁港がいくつか)があれば、エネルギー需給がバランスするか、自給率を高く保つことができるかを推計できる最適化モデルを構築した。こ

Table 5. Estimated fuel consumption per fishing vessel in 2022

Ship	Tonnage	Number of ships	Fuel consumption (kg/ship·year)
With outboard motor		53,257	2,404
Without outboard motor	Less than 1	3,540	1,721
	1-3	15,469	3,644
	3-5	24,213	7,226
	5-10	10,799	14,754
	10-15	3,844	19,699
	15-20	3,164	30,977
	20-30	49	51,724
	30-40	33	74,135
	40-50	22	64,620
	50-60	11	145,953
	60-70	25	113,021
	70-80	49	153,844
	80-90	47	149,112
	90-100	31	148,679
	100-150	98	297,032
	150-200	160	288,621
	200-350	115	466,455
	350-500	177	548,899
	500-1,000	9	1,397,997

**Fig. 3.** Overview of system simulation sheets.

れにより、沿岸水産施設の需要の変動に対応できるシステムが構築できるかの検討を行うことができる。最適化モデルの概要は以下の通りである。

(目的関数) 自給率の合計の最大化

$$\text{自給率の合計} = \text{電力の自給率} \times a + \text{熱の自給率} \times \beta \\ + \text{燃料の自給率} \times \gamma$$

$$\text{電力の自給率} = \text{CGS電力発電量} \\ / \text{電力消費量 (食品工場 + 漁港)}$$

$$\text{熱の自給率} = \text{CGS熱回収量} \\ / \text{熱消費量 (食品工場)}$$

$$\text{燃料の自給率} = \text{バイオマス燃料量 (CGS, バイオディーゼル燃料の生産の分を除いた量)} \\ / \text{燃料消費量 (食品工場)}$$

ただし a , β , γ はどの自給率を重視するかの重み係数 (標準ケースではそれぞれ 1 を設定した)。

(制約条件)

変数は全て非負数という条件に加え、以下を設定

$$0.5 \leq \text{工場規模} \leq 10$$

$$0.5 \leq \text{漁港規模} \leq 10$$

$$\text{CGS容量} \geq 50$$

$$\text{エネルギー自給率 (電力)} \leq 1.2$$

$$\text{エネルギー自給率 (熱)} \leq 1.2$$

余剰熱量 ≤ 0 (ケース 3 のみで設定; ケースの詳細は最適化モデルの結果で提示)

(最適化ソルバー) GRG非線形

定量的評価の結果とまとめ

システムシミュレーションの結果

以上に述べた条件の設定値に基づいてシステムフロー計算を行った結果はTable 6, Fig. 4のとおりである。これより、生産できるバイオメタノールは、189 t/年であり、100 kWのCGSで消費されるバイオメタノールは134 t/年であり、300 MWh/年の電力と810 GJ/年の熱を生み出すことが可能である。また年間120 tの廃食油からバイオディーゼル油を生成した場合、24 tのメタノールを消費し、84 t/年のバイオディーゼル油を精製できる。これは100トンクラスの漁船の年間燃料消費量297 t/年に対して、28.3%に相当する。Table 6より電力全体の自給率は14.5%となり、モデル工場、モデル漁港の規模に対しては、一部の電力の代替にとどまることがわかる。

Table 7は、漂着ゴミ回収量、CGS発電容量、食品工場、漁港の規模をそれぞれ変化させた場合のシミュレーション

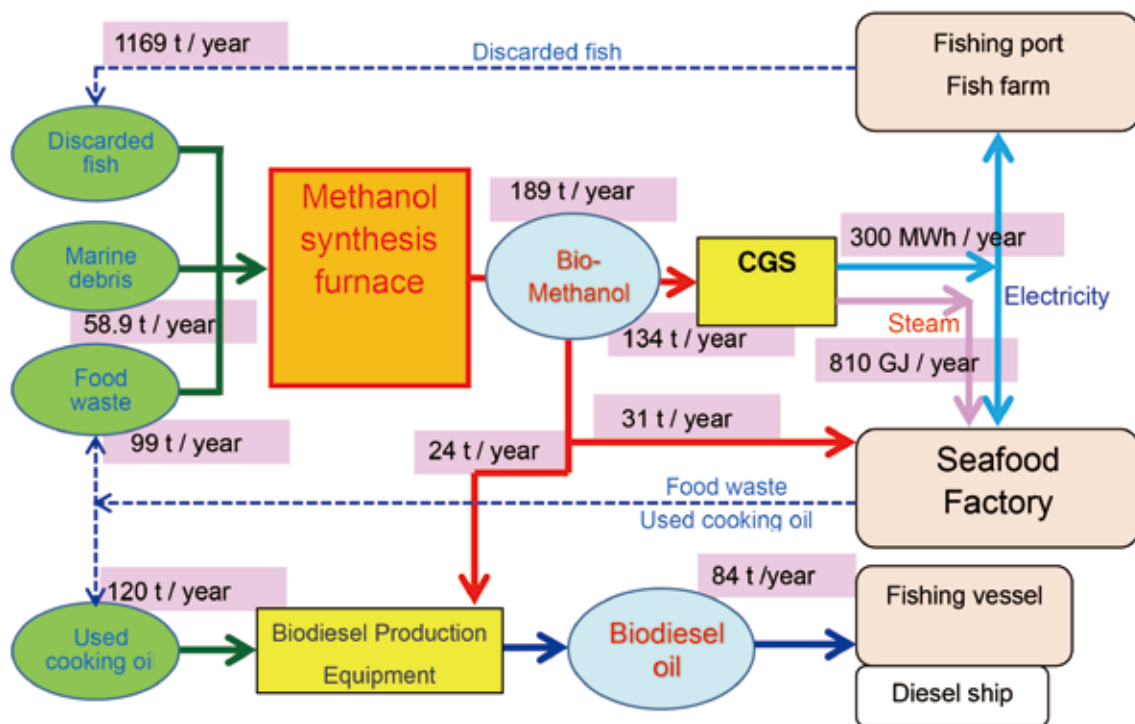


Fig. 4. Flow diagram of input resources and energy production (standard case).

モデルの計算結果を示す。漂着ゴミを回収する沿岸の延長を長くした場合は、漂着ゴミ量が大きくなるためバイオメタノールの生産量は増加するが、CGSは発電容量が変わらないので発電量、熱量とも同じになり、自給率は変化しない。食品工場の燃料供給が100%を超え、メタノールが余ることがわかる。また、投入される廃食油量が変わらないので、バイオディーゼル燃料の生産量も同じであり、自給率も同じとなる。

標準ケースに対して、CGS発電容量を150, 200 kWと大きくした場合、電力の自給率が向上するとともに、CGSからの熱の供給も増加し、自給率が100%を超える状態となるが、CGSの稼働でほとんどのバイオメタノールが消費されるため、食品工場への燃料としての供給は不足してしまう状況となる。

食品工場の規模をそれぞれ2, 3倍とすると、それにともない食品残渣、廃食油量が増加するため、メタノール生産量も増加するが、CGSの発電容量が変わらないため、電力と熱の自給比率は変化しない。一方で廃食油の量が増えるため、バイオディーゼル燃料の生産量も増加し漁船への燃料供給比率も増加する。逆にバイオディーゼル燃料の生産にメタノールが消費されてしまうため、食品工場への燃料の供給比率が低下してしまう。

漁港の規模をそれぞれ2, 3倍とすると、それにともない廃棄魚が増加するため、メタノール生産量も増加するが、CGSの発電容量が変わらないため、電力と熱の自給比率は変化しない。廃食油の量も同じなので、増加したメタノールは食品工場の燃料用となるが、自給率が100%を超え、余剰となることがわかる。

最適化モデルの結果

CGS発電容量、モデル漁港の数 (規模)、およびモデル食品工場の数 (規模) を変数として、エネルギー自給率の合計が最大になるように最適化計算をした結果をTable 8に示す。

標準ケース；エネルギーフロー計算の標準ケース (Table 8のBase Case)

ケース 1 ；最適化モデルの計算結果 ($\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 1$)

ケース 2 ；目的関数において、電力の自給率に重み ($\alpha = 50$) をかけた場合 ($\alpha = 50, \beta = 1, \gamma = 1$)

ケース 3 ；熱供給がバランスするように余剰熱がでないような制約をかけた場合 ($\alpha = 20, \beta = 1, \gamma = 1$)

最適化の結果、ケース 1 ではモデル食品工場0.5個、モデル漁港2.9個、CGS容量81 kWで、自給率の合計が最大となると計算された。しかし結果をみると、食品工場の規模が小さくなるため燃料が大きく余剰となっていることがわかる。これは熱の余剰を下げる方向に最適化が進んでしまうためであると考えられる。このため、ケース 2 として、目的関数において、電力の自給率に重み ($\alpha = 50$) をかけることで電力の自給率を達成することを優先させた場合は、食品工場規模が10倍となり、電力の自給率は向上するものの、食品工場の燃料は逆に不足する形となる。一方で漁船の燃料も過剰となっているため、この分を食品工場に回すことも可能であると考えられる。ケース 3 は、食品工場の熱の需給を100%に近づくように制約を行ったものである。食品工場規模0.8倍、漁港規模0.5倍、CGSが112 kWと標準ケースに規模に近い形となり、ほぼ熱を使いきる状況となり電力自給率も向上しているが、食品工場の燃料供給が不足する形となった。また電力を100%とする制約での最適化を行ったが、最適解を得ることはできなかった。

考 察

計算結果に示すように、エネルギーフローモデルの各パラメータを変更させた場合の検討が可能になった。本研究においては、入手できるデータに基づいて、漂着ゴミの回収規模、食品工場の規模、漁港の規模を設定したが、これらの想定では、電力、熱、燃料の自給率を同時に100%近くにするのは困難であることがわかる。漂着ゴミの回収規模、食品工場の規模、漁港の規模は、地域の特性として外生的に決まるものであり、これらのパラメータは簡単には変更できない。変更できるパラメータは、CGS容量などであるが、CGS容量のみでは、電力、熱、燃料の自給率を総じてバランス良く向上させることは難しい可能性が示唆された。CGSが作り出す電力は売電や蓄電が可能である。しかし売電の単価や安くなる傾向であり、蓄電システムの導入はコストが増加しシステムの経済性が低くなる。また熱は余剰になると蓄熱しておくことが困難であるため、その場での消費が求められ、熱を余らせると全体のエネルギー効率が低下してしまう。このため、熱を100%使いきる形で、CGS発電規模を調整していくことが現実的である。最適化モデルのケース 3 などであれば、燃料不足分は外部から投入するために現実的であると考えられる。

また、今システムでは、食品工場向けのバイオメタノールが余った場合、漁船への燃料供給やボイラー等で工場に必要な熱に変換することも可能である。本推計システムの構成では、最適化モデルの構成が複雑になるため計算を行っていないが、今後、蓄電システムの導入、燃料の貯蔵・融通なども含めた最適化モデルを構築していくことにより、自給率をバランスよく向上させることが可能な解が見つかる可能性があると考えられる。

結 論

バイオメタノール合成炉により、漂着ゴミからメタノールが製造できた場合、どの程度の規模で電力や燃料が供給可能であるかの、基礎的な推計を実施した。具体的には漂着ゴミなどの沿岸バイオマスから得られたバイオメタノールによる熱・電力・燃料併給システムのエネルギーフローを簡易に計算する表計算シートを作成した。またCGS規模などを求める最適化モデルをあわせて構築することが可能となり、沿岸水産施設のエネルギー自給率の向上の可能性を示すことができた。しかしバイオメタノール合成炉での漂着ゴミを処理事例は未だないため、今後技術的な条件を検討していく必要があると考えられる。漂着ゴミの利用が可能となれば、船舶への燃料供給可能性が広がっていくと考えられる。また一方で本モデルでは、経済性の検討やCO₂等の温室効果ガス排出量の計算を行っておらず、今後

の課題として検討していく予定である。CO₂排出量に関しては、木材系の漂着ゴミ、廃棄魚、食品残渣から製造されたバイオメタノールは、カーボンニュートラルとして、燃料しても排出量を参入する必要はないと考えられるが、漂着ゴミのうちの発泡スチロールなどの廃プラスチック分については、CO₂排出量の評価方法を検討する必要がある。以上のように本研究においては、入手できるデータに基づいて基礎的な計算のみを実施したが、今後より詳細な検討を行っていく必要がある。

引用文献

1) 環境省ホームページ: 海岸漂着物処理推進法関係: https://www.env.go.jp/water/marine_litter/law.html (最終閲覧日: 2024年10月21日)

2) 内外地図株式会社: 環境省委託業務 平成28 年度 漂着ごみ対策総合検討業務報告書, II-105 (2017): <https://www.env.go.jp/content/900543551.pdf> (最 終 閲 覧 日: 2024年10月21日)

3) 日本エヌ・ユー・エス株式会社: 令和5 年度 海洋ごみの実態把握及び効率的な回収に関する総合検討業務報告書, II-5, III-8 (2024): <https://www.env.go.jp/content/000220884.pdf> (最終閲覧日: 2024年10月21日)

4) 石田雅照, 三原 悠, 三原伊文: 漂着ゴミに関する規制の動向. 日本マリンエンジニアリング学会誌 **52**, 560-565

Table 8. Energy production and self-sufficiency rate using the optimization model

		Base case	Case 1	Case 2	Case 3
Energy self-sufficiency rate (%)	Electricity (Factory + Fishing port)	14.5	5.1	80.9	27.8
	Food factory (Heat)	74.4	120.0	120.0	100.0
	Food factory (Fuel)	41.6	1,000.0	-292.7	-105.9
	Fishing vessel (100 t, Fule)	28.3	14.1	282.8	23.6
Optimization parameters	Food factory size	1.0	0.5	10.0	0.8
	Fishing port size	1.0	2.9	0.5	0.5
	CGS capacity	100	81	1,613	112
	Weighting factory (electricity) α	-	1	50	20
	Weighting factory (heat) β	-	1	1.0	1.0
	Weighting factory (fuel) γ	-	1	1.0	1.0

- (2017)
- 5) 石田武志, 石田雅照, 津田 稔, 生駒信康: 発泡スチロール系漂着ゴミの資源循環システムのための経済性評価基礎モデル. 水産大学校研究報告, **67**, 79-90 (2018)
 - 6) 石田武志: 深層強化学習による発泡スチロール系漂着ゴミの資源循環方策の導出. 日本マリンエンジニアリング学会誌, **56**, 816-823 (2021)
 - 7) 石田武志: 多要素型セルオートマトンモデルによる持続型地域エネルギーシステムの創発シミュレータ. 第93回マリンエンジニアリング学術講演会 講演論文集, 263-264 (2023)
 - 8) 宇野秀敏: 発泡スチロールから燃料 ～宝の島を夢みて～. 食品と容器, **52**, 496-501 (2011)
 - 9) Kawahara H, Yamaguchi S, Mihara Y: Attempts to desalt and shrink foaming polystyrene waste by using oil bath. *Journal of the JIME*, **52**, 569-573 (2017)
 - 10) Yamaguchi S, Mihara Y, Fujita H, Kawahara H, Kita Y, Nishinotsuji T, Murakami N: On volume reduction of foam polystyrene for local supply and local consumption, *Journal of the JIME*, **49**, 185-187 (2014)
 - 11) Ishida T: Removal of fish odors from styrofoam packaging to improve recycling potential using Hansen solubility parameters, *Recycling*, **5**, article 30 (9pp) (2020)
 - 12) 株式会社エルコムホームページ: https://www.elcom-jp.com/company/sdgs_initiatives (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 13) 内外地図株式会社: 漂着ゴミ対策総合検討業務海洋ゴミ対策に関する事例集 (環境省資料), 平成 30 年 3 月: <https://www.env.go.jp/content/900543464.pdf> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 14) Olah GA, Goeppert A, Prakash GKS: メタノールエコノミー CO₂ をエネルギーに変える逆転の発想 (小林四郎, 齋藤彰久, 西村晃尚訳), 化学同人, 京都 (2010); Beyond oil and gas: The methanol economy (2nd edition), Wiley-VHS, Weinheim (2009)
 - 15) 株式会社中央環境ホームページ: <https://www.chu-ou.co.jp/jigyo/biomethanol> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 16) トヨタ系海運, 27 年度にメタノール船導入 排出2割減. 日本経済新聞 (朝刊) (2024年 6月18日): <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOFD17BFW0X10C24A600000/> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 17) 住友化学工業 (株) ホームページ: 超臨界メタノールを用いた脂肪酸メチルエステルの製造方法, 住友化学 2001-II: https://www.sumitomo-chem.co.jp/rd/report/files/docs/20010206_rss.pdf (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 18) 環境省資料: 令和元年度 漂着ゴミ対策総合検討業務報告書, 令和元年度環境省請負業務, 日本エヌ・ユー・エス株式会社, 2020年3月, II 章 漂着ゴミ等の回収実態把握調査等の実施結果: <https://www.env.go.jp/content/900539025.pdf> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 19) 環境省資料: 令和元年度 漂着ゴミ対策総合検討業務報告書, 令和元年度環境省請負業務, 日本エヌ・ユー・エス株式会社, 2020年3月, III 章 漂着ゴミの種類・組成等に関する調査, 表 2.3-2 調査結果の地点間の比較: 人工物の大分類別の組成 (III-59頁): <https://www.env.go.jp/content/900543448.pdf> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 20) 京都バイオサイクルプロジェクト: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsmcwm/23/4/23_1111101/_pdf-char/ja (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 21) 三菱重工業ホームページ: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/423/423130.pdf> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 22) 国土交通省 船舶におけるバイオ燃料取り扱いガイドライン: <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001732712.pdf> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 23) ClassNK CHART THE FUTURE 船舶におけるバイオ燃料の使用に関する取り扱い: https://www.classnk.or.jp/hp/ja/info_service/bio/ (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 24) 植田油脂株式会社ホームページ: <https://uedayushi.co.jp/service/%e3%83%90%e3%82%a4%e3%82%aa%e3%83%87%e3%82%a3%e3%83%bc%e3%82%bc%e3%83%ab%e7%87%83%e6%96%99/> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 25) 経済産業省カーボンリサイクルロードマップ検討会資料【別冊2】産業間連携の事例: https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/pdf/20230623_04.pdf (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 26) 豊田通商 燃料電池事業: <https://www.ttc-fuelcell.com/partner/sfc/> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
 - 27) 水産庁 漁港のエコ化推進のための技術検討会資料:

- <https://www.jfa.maff.go.jp/j/study/keikaku/pdf/shiryou1-5.pdf> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
- 28) 田ノ浦地区漁業地域 BCP 策定・運用協議会:『田ノ浦地区における水産物の生産・流通に関する業務継続計画』(令和 4年11月) (2022): https://www.pref.kochi.lg.jp/doc/2021030300272/file_contents/file_20221284145949_1.pdf (最終閲覧日: 2024年10月21日)
- 29) 三菱総合研究所資料: <https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20230124.html> (最終閲覧日: 2024年10月21日)
- 30) 政府統計の総合窓口e-stat: エネルギー消費統計調査, 令和 4 年度エネルギー消費統計調査結果: https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00551005&tstat=000001042017&cycle=8&tclass1=000001216724&stat_infid=000040172481&tclass2val=0 (最終閲覧日: 2024年10月21日)
- 31) 政府統計の総合窓口e-stat: 経済構造実態調査, 2022年経済構造実態調査 (製造業事業所調査): https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200555&tstat=000001207540&cycle=0&tclass1=000001207542&stat_infid=000040082442&tclass2val=0 (最終閲覧日: 2024年10月21日)
- 32) 一般財団法人食品産業センター:「食品製造業の食品ロス削減対策に対する調査事業」報告書【概要版】, 令和 5 年 3 月 (2023): https://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/attach/pdf/161227_8-42.pdf (最終閲覧日: 2024年10月21日)
- 33) 水産庁: 令和 4 年度 ゼロエミッション漁船等技術調査事業 報告書, 令和 5 年 3 月, 一般社団法人海洋水産システム協会 (2023): https://www.jfa.maff.go.jp/j/kenkyu/pdf/attach/pdf/130515gizyutsukaihatsu_a-4.pdf [このうち「第 3 章 沖合漁船の動力構成および燃料消費実態の調査」]: https://www.jfa.maff.go.jp/j/kenkyu/pdf/attach/pdf/130515gizyutsukaihatsu_a-37.pdf (最終閲覧日: 2024年10月21日)
- 34) 経済産業省PRTR制度: 令和 4 年度 届出外排出量の推計方法等に係わる資料 (2022): https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/r4kohyo/todokedegaisanshutudata.html [このうち「詳細版, I. 推計方法の詳細 14. 船舶に係る排出量 (PDF形式: 1,327KB)」中の「表 14-28 全国における漁船のトン数規模別の燃料消費量の推計結果 (2022年度)」]: https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/r4kohyo/05todokedegaiyou/syousai/14.pdf (最終閲覧日: 2024年10月21日)