

## 〈論文〉

バイオガス利用によるごみ収集時の二酸化炭素排出量の抑制  
—— 軽油トラックおよび天然ガストラックとEVトラックの評価 ——山下 温大<sup>1)</sup>, 宗村 健太<sup>2)</sup>, 藤原 健史<sup>1)</sup>, 哈 布 尔<sup>1)</sup><sup>1)</sup> 岡山大学 環境理工学部 環境デザイン工学科

(〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1 E-mail: takeshi@cc.okayama-u.ac.jp)

<sup>2)</sup> 高速道路トールテクノロジー(株)

(〒690-0015 島根県松江市上乃木3-13-17 E-mail: pkse22sf@s.okayama-u.ac.jp)

## 概 要

廃棄物系バイオマスをもetan発酵する施設の多くが、再生可能エネルギーとして生成バイオガスからの発電を行っているが、一方で廃棄物系バイオマスの収集を軽油トラックに頼っている。本研究では、廃棄物系バイオマスの収集過程も含めたmetan発酵システム全体のCO<sub>2</sub>排出量を、バイオガスを利用した天然ガス(CNG)トラックや生成電力を利用したEVトラックを用いる場合について計算した。その結果、CNGトラックとEVトラックの走行時のCO<sub>2</sub>排出量は、軽油トラックに比べてそれぞれ年間10.0、15.3 tCO<sub>2</sub>少なくなったが、バイオガス濃縮充填設備や車両用電池などの機器製造時のCO<sub>2</sub>排出量を含めると、総排出量では軽油トラックが最も少なくなった。

キーワード: metan発酵, CO<sub>2</sub>排出量評価, バイオガスの有効利用, 天然ガストラック, EVトラック

原稿受付 2023.6.15 原稿受理 2023.10.5

EICA: 28(2・3) 19-27

## 1. はじめに

## 1.1 地球温暖化対策としてのバイオマスの利用

地球温暖化の主な原因である石炭や石油、天然ガス等の化石燃料は現在、世界の一次エネルギー使用量の約8割程度を賄っている。これらを代替するために太陽光や未利用バイオマス等の再生可能エネルギーの利用が進められているが、今後50年間は化石燃料がエネルギー消費の大部分を占めると言われている<sup>1)</sup>。バイオマスはカーボンニュートラルであることから、マテリアルとエネルギーの両面での利用が進んできた。具体的には、バイオマスは燃料や素材への転換の柔軟性から、発電や熱利用だけでなく、輸送用液体燃料や種々の化学原料としても利用できる。しかし未利用バイオマスの現在の利用量は、日本全体の一次エネルギー消費量の約4%と少ない<sup>2)</sup>。まだ眠っている未利用バイオマスを最大限に利用して循環型社会を構築するためにバイオマスの循環率を高める必要がある<sup>1)</sup>。

## 1.2 真庭市のバイオマス利用とmetan発酵

真庭市は岡山県北部に位置し、人口約44,000人の農林畜産業の町である。その人口は1990年から減少していて、国立社会保障・人口問題研究所によると2040年には2015年の人口の約7割(32,800人)まで落ち込むとされている。また生産年齢人口が減るため、2040年には1人の労働者が1人の高齢者を支えるこ

とになると予想されている<sup>3)</sup>。このような過疎化に対する取り組みのひとつとして1993年に地元若手経営者や各方面のリーダーが中心となり、地域産業の見直しによる真庭市の再生が始まった。製材事業者が木材加工の過程で発生する廃木材を再利用する目的で設置した社内バイオマス発電が1997年に開催した地元見学会で人気を博したことから、真庭市、林業組合、木材加工業が協力して国の補助金に応募し、木質バイオマス発電所を建設した。FIT制度で得た売電収入を間伐材を搬入した林業事業者に手厚く還元することで林業の活性化を図った<sup>4)</sup>。バイオマス利活用の取り組みは木質資源にとどまらず、2014年には環境省と農林水産省の委託事業でmetan発酵実証用プラント(以下実証プラントと呼ぶ)を建設した。真庭市内の実証エリアから約4,000世帯分の生ごみとし尿・浄化槽汚泥を受け入れてバイオガスを製造し、ガス発電を行うとともに消化液をすべて液肥として農地に還元する実験を行ない、2020年にはバイオガス生成量が4.1万Nm<sup>3</sup>/年、発電量が9.3万kWh/年となった。なお、施設内の負荷電力量と売電量の調整が難しいことから、発電した電力は全量売電された。

## 1.3 研究の目的

製造したバイオガスを天然ガス(CNG)トラックの燃料に利用する実験が、2021年の環境省受託事業として同実証プラントで始まった(以下新事業と呼

ぶ)<sup>5)</sup>。これまでの実証プラントではバイオガスを生成しながらも、生ごみ等の収集には軽油トラックを使用してきた。また、売電すると送電中のエネルギーロスが発生する。新事業はこのようなエネルギー利用の非効率な部分を改善し脱炭素化を進めるために、メタンガスの濃縮、貯留、供給設備の設計と建設、天然ガストラックの改造と走行試験を行い、システム全体のエネルギー利用と脱炭素化のパフォーマンスを検証することを目的としている<sup>5)</sup>。

本研究では、新事業の設備や CNG トラックの情報から、バイオガスを CNG トラックに利用するシナリオを作成し、温室効果ガス排出量をライフサイクルの観点から試算した。また比較シナリオとして、軽油トラックによる生ごみ収集とガス発電・売電を組み合わせた従来の軽油トラックシナリオと、電気 (EV) トラックによる生ごみ収集とガス発電・トラック充電を組み合わせた新しいシナリオを想定し、3つのシナリオについて温室効果ガス排出量を比較評価した。

## 2. 研究の背景

日本のバイオマス活用推進基本計画 (第3次) では、地域の実情に応じてメタン発酵や炭化・焼却処理等による高度エネルギー利用を促進し、2030年に廃棄物系バイオマスの約90%を利用することを目指している。メタン発酵によるバイオガスのエネルギー利用として、バイオガスを貯留して天然ガスとして利用する方法、都市ガス導管へ導入する方法 (例えば神戸市東灘下水処理場)、ガス発電機により電気に変える方法などがある。バイオガスを天然ガスと同等のエネルギーとして取り扱うためにはメタンの濃縮が必要であり、その方法として加圧下において二酸化炭素や硫化水素がメタンよりも水への溶解率が高い性質を利用する高圧水吸収法や、高圧下で吸着剤のメタンガス吸着能が高いことを利用した PSA 法がある。新事業では後者の方法を用いている<sup>6)</sup>。一方、ガス発電機による発電は、多くのメタン発酵プラントで用いられており、電力は場内利用や売電に利用されている。

バイオガスの車両利用について、岡本ら<sup>7)</sup>は下水バイオガスを天然ガス車の燃料としての利用する研究を行った。大阪ガス<sup>8)</sup>は、農業残渣などで発生するバイ

オガスから二酸化炭素を取り除き、高純度のメタンガスを製造した上で CNG トラックへ供給する事業をすでにタイで行っている。CNG トラックは小型トラックから大型トラックまで普及が進んでいる<sup>9)</sup>。一方、EV トラックは世界で普及が始まったところであり、日本では三菱ふそうが Li-ion バッテリーを積んだ小型 EV トラックを販売している。しかし、天然ガストラックや EV トラックについては、運用時の温室効果ガス排出量のデータはあっても、製造も含めたライフサイクルの温室効果ガス排出量のデータは見当たらない。そこで、LCA ソフト (MiLCA) のディーゼルトラックに関する LCA データベースを参考にして、CNG トラックと EV トラックの温室効果ガス排出量について試算することにした。

トラックのライフサイクルを考える際、車両本体のリサイクルによる温室効果ガス排出量の削減効果を考慮する必要がある。佐野<sup>10)</sup>らは、ディーゼルトラックのリサイクルによる CO<sub>2</sub> 排出量の低減効果に関してトラックのライフサイクルを製造、走行、メンテナンス、リサイクルの段階に分けて LCA を計算したところ、リサイクルをしない場合の上記の3段階における二酸化炭素排出量の割合はそれぞれ 20%、78%、2%であった。リサイクルする場合は製造、走行、メンテナンスで発生する二酸化炭素排出量の約 7.3% 低減できることがわかっている。

## 3. 研究の方法

### 3.1 使用した LCA ソフトウェア

温室効果ガス排出量のインベントリ計算には、一般社団法人サステナブル経営推進機構 (SuMPO) LCA センターが提供する MiLCA ソフトウェアを用いる。MiLCA には 3,800 を超えた多数のプロセスデータ (製品の製造・運用・廃棄の段階での物品とエネルギーの使用、並びに環境汚染物質の排出に関するデータ) が登録されている。

### 3.2 評価シナリオの設定

本研究では、以下の3つのシナリオを設定し、温室効果ガス排出量を試算、比較した。3つのシナリオには同じメタン発酵施設があるため、その施設に由来す

Table 1 Scenarios setting

Scenario Name	Collection Vehicle	Biogas Utilization
Diesel Truck Scenario	Diesel truck	All electricity generated from biogas was sold.
CNG Truck Scenario	CNG truck	The concentration of methane in biogas is condensed up to 97%, and then, the calorie is pulled up to 12A town gas level by adding LPG. The power generated from the remaining biogas is sold.
EV Truck Scenario	EV truck	A part of the biogas is charged for the battery of EV truck and the remains are sold.

る温室効果ガス排出量はシナリオ間の差に影響しないが、より正確な各シナリオ間の温室効果ガス排出量の比率を求めるために含めている。Table 1 と以下にシナリオの設定を記す。

a) ディーゼルトラックを使用するシナリオ

現在の真庭市実証プラントで採用している方法である。ディーゼルトラックで生ごみを収集し、バイオガスによる発電量はすべて売電している。対象のシステム境界を Fig. 1 の破線内に示す。メタン発酵施設、脱硫塔、ガス発電機、ディーゼルトラックの製造と運用による温室効果ガス排出量を試算した。

b) CNG ガストラックを使用するシナリオ

CNGトラックで生ごみを収集する。バイオガスはメタン成分を濃縮・貯留してCNGトラックの燃料とし、残りは発電・売電する。バイオガスの熱量では安定した走行に不十分なため、プロパンとブタンを主成分とする液化石油ガス (LPG) をバイオガスに添加し、熱量を調節した。対象のシステム境界を Fig. 2 の破線内に示す。メタン発酵施設、脱硫塔、ガス発電機、CNGトラック、ガス調整設備の製造と運用による温室効果ガス排出量を試算した。

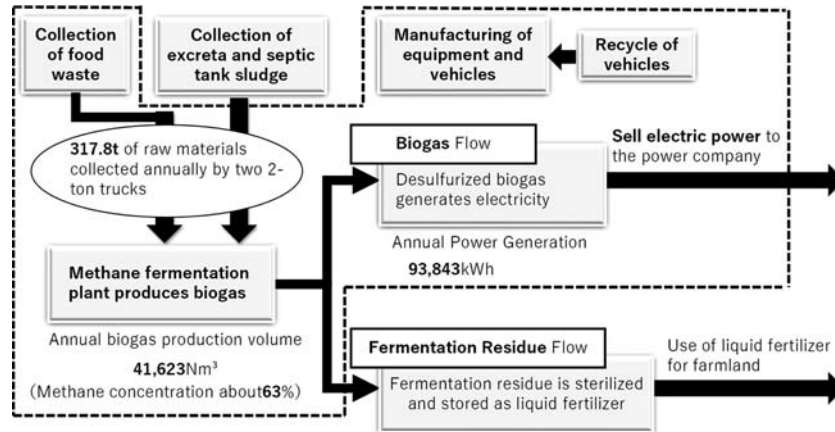


Fig. 1 System Boundaries for Scenario Diesel Truck Scenario

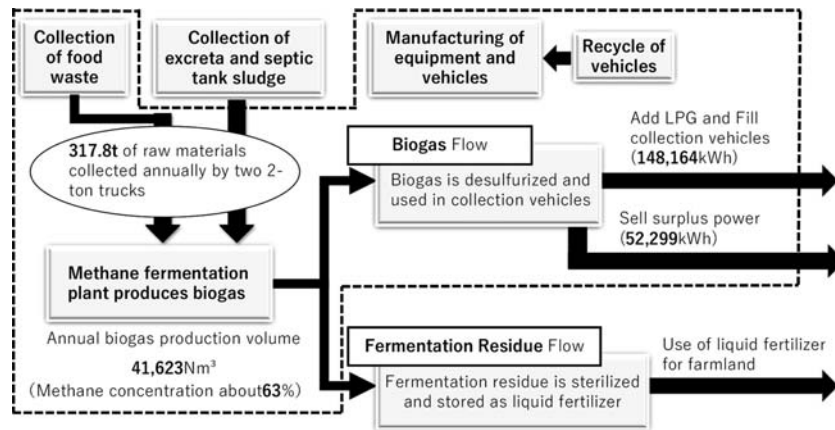


Fig. 2 System Boundaries for Scenario CNG Truck Scenario

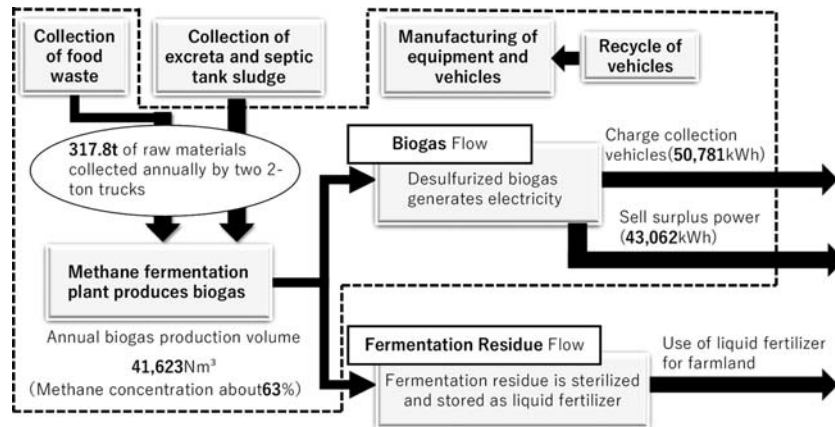


Fig. 3 System Boundaries for Scenario EV truck Scenario



### c) EVトラックを使用するシナリオ

EVトラックで生ごみを収集する。バイオガスによる発電量の一部をEVトラックのバッテリー充電に使い、残りを売電する。対象のシステム境界を **Fig. 3** の破線内に示す。メタン発酵施設、脱硫塔、ガス発電機、EVトラックの製造と運用による温室効果ガス排出量を試算した。

## 3.3 シナリオ共通の設定

次に、全シナリオに共通する事項をまとめる。

### a) 生ごみの収集

し尿・浄化槽汚泥の収集には液体ローリー車が必要であり、CNGトラックやEVトラックに貯留タンクを装備できるかが不明のため、バイオガスの利用を生ごみ収集のみに限定する。生ごみの収集エリアは真庭市旧久世地区の約4,000世帯であり、約280か所のステーションに生ごみ専用のバケツが置かれ、1週間に4日収集している。2台の車両が担当エリアを定めて収集しており、それぞれの平均走行距離は12,305 km/年、19,041 km/年で合計は31,346 km/年となっている。年間を通じてトラックの収集経路は変わらず、運搬するバケツ数も変わらないとして、この収集距離とトラックの燃費を一定とした。トラックの燃費と電費の値は、新事業で用いられた軽油トラックとCNGトラックの実測値および、EVトラックは想定するいすゞ社製トラックのホームページ<sup>11)</sup>の値を参照し、軽油トラックは5.97 km/L、CNGトラックは2.46 km/Nm<sup>3</sup>、EVトラックは0.62 km/kWhとした。

### b) メタン発酵施設および脱硫塔

メタン発酵施設と脱硫塔の製造時の温室効果ガス排出量は、メタン発酵槽および脱硫塔タンクの実寸値と原材料データより試算した。実証プラントでは施設内消費電力量を電力会社から買電している。実証プラントは他施設と併設されていてメタン発酵施設のみの消費電力量が不明なため、文献5に示された実証施設の消費電力量と日平均ガス濃度を用いて、メタン発酵施設の消費電力量を計算し温室効果ガス排出量を求めた。

### c) ガス発電機

全てのシナリオでYanmar製25 kW コージェネレーションシステムを使用している。MiLCAのLCAデータベースに既登録のエンジン発電機のプロセスデータを使用して、ガス発電機の製造時の温室効果ガス排出量を試算した。使用時については、カーボンニュートラルの観点からバイオガス燃焼による温室効果ガス排出量は計上せず、発電時に使用される機器消費電力量に由来する温室効果ガス排出量のみを計上した。生成した電力を電力会社へ売電する場合には、東京電力の送配電ロス率を参考にし、5%の送電ロス分を減算した<sup>12)</sup>。その上で全電力会社平均の電力量当た

り二酸化炭素排出量係数を乗じることで、二酸化炭素排出削減量を求めた。

### d) 発酵残渣の利用

発酵液の農地施肥は、特殊な散布用車両を使用することが多いため、発酵残渣の利用(殺菌、散布)については試算に含めていない。

### e) 評価期間と年間排出量

温室効果ガス排出量はすべて年間排出量で表す。メタン発酵施設、脱硫塔、ガス発電機、およびCNGトラック用ガス調整設備の各運用期間を20年とし、これら設備製造に伴う温室効果ガス排出量を20年間で割って年間平均排出量とした。次にトラックの運用期間については、実際の生ごみ収集距離が年間約2万kmであり、10年間走行すると20万kmとなるため、運用期間は10年が妥当と考えた。EVトラックのバッテリーについても三菱ふそうのバッテリーの保証期間を参考として運用期間を10年間とした。車両製造に伴う温室効果ガス排出量を10年間で割って年間平均排出量とする。車両修理については主に消耗部品の交換を想定し、トラック間の違いは小さく、佐野らの研究では車両修理にともなう温室効果ガス排出量が全体の2%と小さいため、運用期間中の車両修理に伴う温室効果ガス排出量は考慮しない。その他の運用時に必要となる脱硫助剤(酸化鉄)、買電量、売電量について、温室効果ガス排出量は年間排出量で表す。

### f) LCAソフトの使用

本研究では3.1で述べた通りMiLCAというソフトウェアを用いてライフサイクルの温室効果ガス排出量を試算した。しかし、本研究に使用する設備のほとんどはMiLCA内のLCAデータベースに存在しないため、データベースに既登録の部品(プロセスデータ)を組み合わせて対象設備のプロセスデータを作成し、温室効果ガス排出量を試算する必要がある。例えば、MiLCA内にCNGトラックの製造というプロセスはないため、「トラック・バス用タイヤの製造」、「バス・トラックシャシーの製造」、「トラックボデーの製造」、「高圧容器(ボンベ)の製造」、「汎用ガソリン・石油機関(汎用ガス機関を含む)の製造」のプロセスを組み合わせて「CNGトラックの製造」プロセスを作成する。また、EVトラックでは、「リチウムイオンバッテリーの製造」などの先進的な部品のプロセスデータ自体が少ないため、先行研究をもとにプロセスデータを新規作成したのちに他のEVトラックの製造に必要な部品のプロセスデータと組み合わせて試算を行った。

### g) 二酸化炭素等価量の試算

燃料の燃焼により二酸化炭素以外にも一酸化二窒素などの温室効果ガスが発生する。ここでは、温室効果ガスごとに地球温暖化係数GWP100を乗じて二酸化

炭素の重量換算値で表す。

### 3.4 シナリオ別の設定

#### a) トラック別のプロセスデータ

上述したように既存の LCA データベースにはディーゼルトラックのプロセスデータがあるだけで、CNGトラックとEVトラックのプロセスデータはない。そこでディーゼルトラックのプロセスデータをベースに、CNGトラックとEVトラックに使われている主要部品を交換して、両車種のプロセスデータを作成する。交換した主要部品を **Table 2** に示す。CNGトラックについては、軽油タンクとは大きさや材質の違うCNG用燃料タンクに変更する。EVトラックについては、ディーゼルエンジンの代わりに電動モーターを、軽油タンクの代わりにバッテリーを積み込んだ。EVトラック用バッテリーの製造プロセスは、中野ら<sup>13)</sup>の自動車用リチウムイオンバッテリーのデータを参考にした。また、バッテリーを収容しておくためのバッテリーバックケースは、日産の電気自動車に搭載されているバッテリーバックケースの仕様を参考にして高抗張力鋼製の部品を設定した<sup>14)</sup>。

**Table 2** Specific Truck Parts Considered in Life Cycle Inventory Analysis

	Driver (Engine/Motor)	Energy storage (fuel tank/ battery)
Diesel truck	Automotive diesel engines	Sheet metal tank
CNG truck	General-purpose gas engine	High-pressure container (cylinder)
EV truck	AC motor	Lithium-ion batteries for automobiles

#### b) CNGトラック用のガス調整設備

実証プラントではガス調整設備としてPSA装置、濃縮タンク、成分調整タンクを設けている。バイオガスのメタン濃度は約60%と低く、それを97%まで高めるために、圧力スイング吸着法(PSA)を用いてバイオガスから二酸化炭素を分離除去する。PSA装置は吸着剤(活性炭)のタンクと分離膜から構成され、加圧して吸着剤にメタンを吸着させて二酸化炭素を排除する工程と、大気圧まで減圧してメタンを脱着させる工程を繰り返すことでメタンを濃縮する。この工程でシロキサン濃度も定量下限値以下まで下げることができる<sup>6)</sup>。濃縮したメタンガスは吸着剤を充填した貯留タンクで蓄えられる。しかし、濃縮したメタンガスでもCNGトラック燃料に必要な熱量に達していないため、ここではLPGを用いて都市ガス12Aの発熱量まで高めた。

実証プラントの設備製造時の温室効果ガス排出量の試算では、実証プラントの設備データを参考に、タンクやパイプの部品実寸(外形寸法、肉厚、長さ)及び

材質データから、MiLCAに既登録のプロセスデータを組み合わせ対象設備のプロセスデータを作成した。同様に吸着剤やプロパンガスも既存のプロセスデータを使用した。ガス調整設備の消費電力量は、PSA装置や冷却器のコンプレッサーが主要機器であるため、実証プラントの当該設備で消費された電力実績値を用いた。

#### c) トラック走行時の温室効果ガス排出量

走行時にディーゼルトラックは軽油から、CNGトラックはLPGから温室効果ガスが発生する。実証実験で計測した両車種の燃費と走行距離を参考に1年間の燃料消費量を算出し、MiLCA内にある各燃料種と整合性のとれるプロセスデータと乗じることで温室効果ガス排出量を試算した。

#### d) 余剰ガスと余剰電力

CNGトラックを収集車両として用いる場合、メタン発酵で発生したバイオガスは収集の際に必要な燃料分のみを精製設備に回し、余剰ガスはガス発電に回して全量を売電した。EVトラックを収集車両に用いる場合ではバイオガスをすべて発電に使用するが、収集車両に使用しなかった電力は全量を売電する。なお、売電の場合は送電ロス5%を考慮した。

#### e) トラック廃車時の部品リサイクル

本研究ではトラックは10年の運用期間後に引退し、その後中古車として再利用される等した後に最終的に廃車される。廃車時には有用な部品がリユースあるいはリサイクルされ、利用できない部分がシュレッダーダストとなり、リサイクルできないものが焼却処理や埋立処分される。シナリオごとにトラック部品のリユース・リサイクルによる温室効果ガス削減効果を正確に見積もることは困難であるが、佐野ら<sup>10)</sup>の研究より、トラックのリサイクルを行うことでトラックの製造、走行、メンテナンスの三つの段階における二酸化炭素排出量に対して約7.3%の削減効果があることがわかっている。本研究ではその削減効果をトラックの製造プロセスに組み込んで試算するため、リサイクルによる削減効果の7.3%をトラックのライフサイクルに対する製造段階の重みで割った36.5%をトラックの製造プロセスに対する削減効果としてプロセス内に組み込んだ。

### 3.6 シナリオの試算方法

製造時の温室効果ガス排出量の計算については、実証施設に合わせてMiLCAプロセスデータベース上に作成したメタン発酵、ガス精製・貯蔵・充填の各設備のプロセスを結合してモデル(ケーススタディ)を作成し、MiLCAの計算機能を使った温室効果ガス排出量を試算した。

運用時の温室効果ガス排出量の計算方法は、下記の

ようにトラックタイプにより異なる。ディーゼル燃料, LPG ガス, 脱硫剤, 売電, 買電に関する温室効果ガス排出量を試算した。

#### a) ディーゼルトラックの場合

生ごみ収集に必要なディーゼル燃料量を走行距離とディーゼル燃費から試算し, その燃料量を購入・使用するとした。メタンガスについては全量をガス発電機で発電し売電する。また, 買電としてメタン発酵設備, ガス発電設備に必要な電力を計上した。

#### b) CNGトラックの場合

生ごみ収集に必要な CNG 燃料量を走行距離と CNG 燃費から試算した。その CNG 燃料の発熱量が都市ガス 12A 相当となるように, 濃縮メタンガス量と添加する LPG 量を試算した。濃縮メタンガス量が余る場合は, 濃縮前に余分なメタンガスをガス発電機で発電することとした。買電は, メタン発酵設備, ガス濃縮・充填設備, ガス発電設備に必要な電力を計上した。

#### c) EVトラックの場合

生ごみ収集に必要な電力を走行距離と電費から求め, ガス発電機から必要な電力と余剰な電力を試算した。余剰な電力は売電し, 買電はメタン発酵設備, ガス発電設備に必要な電力を計上した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 各シナリオの温室効果ガス排出量

シナリオごとの温室効果ガス排出量の結果について述べる。

#### a) 軽油トラックシナリオ (Table 3)

対象システムの製造時の温室効果ガス排出量は 9.9 (tCO<sub>2</sub>/t), 運用時は -11.5 (tCO<sub>2</sub>/t), 合計で -1.6 (tCO<sub>2</sub>/t) となった。製造時ではメタン発酵施設の排出量に比べてディーゼルトラックの排出量は少ない。運用時では売電による排出量削減効果が -38.9 (tCO<sub>2</sub>/t) と高く, 結果的に排出量削減に寄与することが分かった。

Table 3 Greenhouse Gas Emissions in Diesel Truck Scenario

Stage	Items	CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /y)
Production	Methane fermentation facility	8.6
	Gas power generator	0.035
	Diesel truck (2 vehicles)	1.30
	Emission in production	9.9
Operation	Iron oxide for desulfurization	1.9
	Diesel fuel burned	15.3
	Power purchased	10.2
	Power sold	-38.9
	Emission in operation	-11.5
Total emission in the diesel truck scenario		-1.6

#### b) CNGトラックシナリオ (Table 4)

対象システムの製造時の温室効果ガス排出量は 12.6 (tCO<sub>2</sub>/y), 運用時は -0.2 (tCO<sub>2</sub>/t), 合計で 12.5 (tCO<sub>2</sub>/y) となった。製造時ではガス調整設備の排出量が CNG トラックの排出量の 2 倍以上, メタン発酵施設の排出量の約 30% と比較的大きな値となった。運用時では, 買電による排出量 14.3 (tCO<sub>2</sub>/y) と加えた LPG による排出量 5.3 (tCO<sub>2</sub>/y) 大きな値となり, トータルでは温室効果ガスを排出するシステムとなった。実証プラントの過剰設備の改善や, CNG トラックの必要発熱量の低下等を考慮すれば今後の CNG 利用は従来の軽油トラックシナリオよりも温室効果ガス排出量を低減できる可能性がある。CNG トラックの必要発熱量が低下し, LPG の追加が不要になれば運用段階で 5.3 (tCO<sub>2</sub>/y) の温室効果ガス排出量を削減することが見込める。過剰設備に関しては, どこまでが過剰設備であるかが不明瞭なため定量的な削減効果を予想するのは難しい。

Table 4 Greenhouse Gas Emissions in CNG Truck Scenario

Stage	Item	CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /y)
Production	Methane fermentation facility	8.6
	Gas power generator	0.035
	CNG truck (2 vehicles)	1.28
	Gas concentration, storage & charge facility	2.7
	Total emission in production	12.6
Operation	Iron oxide for desulfurization	1.9
	LPG burned	5.3
	Power purchased	14.3
	Power sold	-21.7
	Total emission in operation	-0.2
Total emission in CNG truck scenario		12.4

#### c) EVトラックシナリオ (Table 5)

対象システムの製造時の温室効果ガス排出量は 16.3 (t-CO<sub>2</sub>), 運用時は -5.8 (t-CO<sub>2</sub>), 合計で 10.5 (t CO<sub>2</sub>/t) となった。EV トラックの運用では温室効果ガスの発生はないものの, EV トラックの充電によって売電量が減るため, トータルでは温室効果ガスを排出するシステムとなった。本研究では EV トラック用充電設備の建設・運用を考慮していないため, 結果以

Table 5 Greenhouse Gas Emissions in EV Truck Scenario

Stage	Item	CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /y)
Production	Methane fermentation facility	8.6
	Gas power generator	0.035
	EV truck (2 vehicles)	7.65
	Total emission in production	16.3
Operation	Iron oxide for desulfurization	1.9
	Power purchased	10.2
	Power sold	-17.8
	Total emission in operation	-5.8
Total emission in EV truck scenario		10.5



上の温室効果ガスを排出されると考えられる。EVトラックに関してはトラックの改良が進んでおり、今回の参考としたトラックよりも走行性能が良いものも発表されている。本研究でEVトラックの参考にしている三菱ふそうのeCanterには、次世代モデルがあり、eCanterの電費が1.23 km/kWhであるのに対し、次世代モデルは約2.83 km/kWhとなっている。これより、運用時の温室効果ガスの発生がより抑えられる可能性がある。

4.2 シナリオ間の比較

本研究の目的である3つのシナリオの各段階の温室効果ガス排出量比較をTable 6にまとめ、その比較を棒グラフにして表した比較図をFig. 4に示す。この図では、中央のゼロを境に左側は売電による排出量の削減を、右側には製造時・運用時の排出量を示している。メタン発酵施設(脱硫塔を含む)と発電機についてはシナリオ共通であるため、製造・運用時の排出量を合計して表示している。さらに右側にはトラック(製造時)、ガス調整施設(製造時)、収集(運用時)を表している。この図から、ディーゼルトラックの収集時の排出量は他のシナリオに比べて10(tCO<sub>2</sub>/y)以上多いことが分かった。しかし、売電による削減効果も大きいため、結果として削減に寄与することに

なった。一方CNGトラックでは、バイオガスの熱量調節で添加されたLPGの燃焼があるため5.3(tCO<sub>2</sub>/y)の温室効果ガスが排出された。排出量を下げするためには、CNGトラック用燃料の発熱量を下げるようなエンジンの改善が必要である。EVトラックは製造時の排出量が他のシナリオに比べて倍の大きさとなった。これはバッテリー製造における排出量が多いため、製造時の排出量全体の約67%を占めていた。余剰電力の売電による削減量はCNGトラックと同じレベルであった。Table 3~Table 5でシナリオ間の詳細なプロセスの比較をみると、製造段階ではトラックの製造で大きな差があることがわかる。軽油トラックとCNGトラックの製造は1.30(tCO<sub>2</sub>/y)、1.28(tCO<sub>2</sub>/y)とほとんど差はないが、EVトラックは内部の構造がほかのトラックと異なるため製造時の温室効果ガス排出量が7.65(tCO<sub>2</sub>/y)と他のトラックの製造に比べて6倍以上となった。シナリオの運用段階では燃料の燃焼と売電効果に大きな差が見られた。燃料の消費による温室効果ガス発生量は軽油の燃焼が15.3(tCO<sub>2</sub>/y)と最も多く、次にカーボンニュートラルの燃料を使用しているCNGが5.3(tCO<sub>2</sub>/y)、温室効果ガスの発生が無いEVトラックが0(tCO<sub>2</sub>/y)と最も少ないという結果になった。また、売電による温室効果ガス発生量の削減効果は発電電力量を全て売電する軽油トラックシナリオが38.9(tCO<sub>2</sub>/y)と最も大きく、次にCNGトラックシナリオが21.7(tCO<sub>2</sub>/y)、そして発電電力をトラックの動力として利用するEVトラックシナリオが17.8(tCO<sub>2</sub>/y)と最も小さな値となった。運用段階と製造段階を合わせてシナリオ間を比較すると、軽油トラックシナリオが-1.6(tCO<sub>2</sub>/y)、CNGトラックシナリオが12.4(tCO<sub>2</sub>/y)、EVトラックシナリオが10.5(tCO<sub>2</sub>/y)となり、軽油トラックシナリオが最も脱温暖化に寄与するという結果が得られた。

Table 6 Greenhouse Gas Emissions by Scenario and Phase

Phase	Greenhouse Gas Emissions (tCO <sub>2</sub> /y)		
	Diesel Truck Scenario	CNG Truck Scenario	EV Truck Scenario
Production			
Truck (2 vehicles)	1.30	1.28	7.65
Gas regulation equipment	0	2.7	0
Operation	-11.5	-0.2	-5.8
Total	-10.2	3.96	1.85

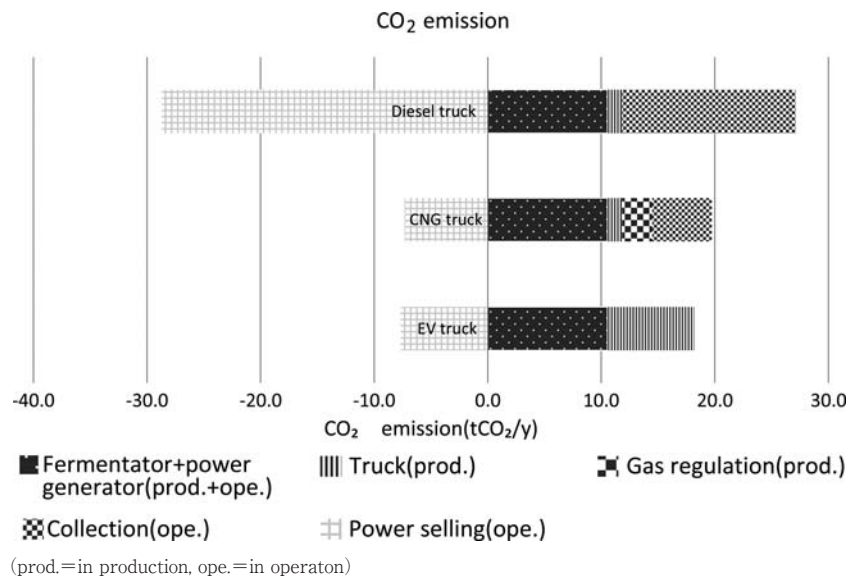


Fig. 4 Comparison of Greenhouse Gas Emissions among Scenarios

軽油トラックシナリオでは、軽油を外から供給して温室効果ガスを多量に排出していながら、バイオガスを売電することで、それより多くの削減量を獲得したことになる。バイオマスの利用によって局所的な化石燃料の使用は増えたが、大域的には削減することができたと考えられる。次に、生成したバイオガスをその場で使う場合には燃料運搬による温室効果ガスはゼロであるが、軽油については製油所から現地までの運搬による温室効果ガスがある。文献14では日本全国の燃料輸送距離のデータから国内輸送（陸上輸送と内航輸送）を推算している。国内輸送によるCO<sub>2</sub>排出量は、軽油製造過程全体でのCO<sub>2</sub>排出量の6.8%であった。したがって、軽油輸送分のCO<sub>2</sub>を加味しても軽油トラックの燃料燃焼による排出量はTable 3の15.3 (tCO<sub>2</sub>/y) が15.4 (tCO<sub>2</sub>/y) にかわるだけで全体の排出量に大きな変化は見られなかった。

また、今後の再生可能エネルギーの普及による電力のCO<sub>2</sub>排出係数の低下やLPGのCN化を考慮するとシナリオ間の温室効果ガス発生量の大小が逆転することが分かった。2021年の電力のCO<sub>2</sub>排出係数は、0.44 (kgCO<sub>2</sub>/kWh) である。LPGのCN化を考慮しない場合は電力のCO<sub>2</sub>排出係数が0.15 (kgCO<sub>2</sub>/kWh) で、軽油トラックシナリオ全体の温室効果ガス排出量が17.236 (tCO<sub>2</sub>/y)、CNGトラックシナリオでは17.214 (tCO<sub>2</sub>/y) となり、温室効果ガス排出量の大小が逆転する。また、LPGのCN化を考慮する場合は電力のCO<sub>2</sub>排出係数が0.25 (kgCO<sub>2</sub>/kWh) で軽油トラックシナリオ全体の温室効果ガス排出量が10.655 (tCO<sub>2</sub>/y)、CNGトラックシナリオでは10.278 (tCO<sub>2</sub>/y) となり、LPGのCN化を考慮しない場合よりも電力のCO<sub>2</sub>排出係数が大きい値で脱炭素化に対する優位性の逆転が見られた。CNGトラックシナリオにおいては、バイオガスのメタン濃度を高めてもCNGトラック用燃料の必要発熱量には及ばず、追加のLPGを加える必要があるため、温室効果ガスの排出が増えている。将来的にCNGトラック用燃料の必要発熱量を下げることができればトラックの走行段階で発生している5.3 (tCO<sub>2</sub>/y) の温室効果ガス排出量が低減され、運用段階での温室効果ガス排出量は下がると考えられる。

## 5. さ い ご に

本研究では、生ごみとし尿・浄化槽汚泥を原料としてメタン発酵を行っている真庭市の実証プラントにおいて、温室効果ガスの排出量削減という観点から、生成したバイオガスを最も有効に利用する方法として、1) バイオガスはすべて発電・売電し、ディーゼルトラックで生ごみを収集するシナリオ、2) バイオガス

を調整しCNGトラックの燃料として収集させるシナリオ、3) 発電電力をEVトラックに充電し収集させるシナリオの3つのシナリオを作成してインベントリ分析を行い、温室効果ガス排出量を比較した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・トラック製造段階においては、EVトラックがリチウムバッテリーを装備するために温室効果ガス排出量が他のトラックの6倍以上の大きさであった。
- ・送電ロスも考慮しても売電による温室効果ガスの削減効果が大きく、軽油トラックシナリオが3つのシナリオの中で最も温室効果ガス排出量が低かった。
- ・今後の再生可能エネルギーやLPGのCN化を考慮すれば、売電の価値が落ちることやCNGトラックの走行時の温室効果ガス排出量の低減が考えられる。これにより、軽油トラックシナリオとCNGトラックシナリオの脱温暖化に対する優位性の逆転の可能性があることが分かった。
- ・精製バイオガスはCNGトラックの必要発熱量に満たないため、直接投入することは難しい。現段階ではLPGを追加することにより必要発熱量を満たしているが、CNGトラックの必要発熱量を低くすることができれば、CNGトラックの走行段階における温室効果ガスの排出量は低減すると考えられる。

なお、本研究では、バイオマスを生ごみの収集には利用するがし尿や浄化槽汚泥の収集に活かさなかったこと、設備の修理については評価しなかったことなどの点については今後の研究の課題としたい。

## 謝 辞

温室効果ガス排出量の試算では(株)ファーマントにお世話になりました。CNGシナリオに関するデータを提供していただいた真庭広域廃棄物リサイクル事業協同組合、大阪ガスリキッド株式会社には謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 坂西欣也, バイオマス利活用の意義と今後の方向性, 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 21, No. 1, pp. 18-22 (2010)
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁, 令和2年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2021), (2022)
- 3) 真庭市総合計画推進本部, 真庭市 人口ビジョン, 令和2年12月改訂, (2020)
- 4) 平岡和久・岸道雄・石川伊吹・矢野晴香・江成穰・山本沙也加・劉慶玲, 真庭市のバイオマス産業計画の生成と展開, 政策科学 25-3 (2018)
- 5) 真庭広域廃棄物リサイクル事業協同組合, 令和4年度 脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業 (バイオガスのハイブリッド精製と真庭市地域の生ごみ収集車両への利用実証)



- 委託業務成果報告書(2022)
- 6) 大阪ガスリキッド(株), バイオガス精製設備, <https://www.liquidgas.co.jp/product/biogas.html>, 2023/8/1
- 7) 岡本誠一郎, 落修一, 田中裕子, 豊久志朗, バイオ天然ガスの利用——下水からつくる自動車燃料——, 土木技術資料52-4(2010)
- 8) 大阪ガス, タイにおけるバイオガス精製システム実用化プロジェクト, <https://www.daigasgroup.com/rd/theme/member/08/index.html>, 2023/8/1
- 9) 一般社団法人日本ガス協会, 天然ガス自動車の普及に向けて,(2021)
- 10) 佐野慶一郎, 富岡佳祐, 大井康寛: 自動車リサイクルのLCA検証, 自動車技術会論文, Vol.49, No.4(2018)
- 11) 三菱ふそう, 製品情報, eCanter, <https://www.mitsubishi-fuso.com/ja/product/ecanter/>, 2023/08/29
- 12) 東京電力ホールディングス, 数表で見る東京電力, 送配電ロス率, <https://www.tepco.co.jp/corporateinfo/illustrated/electricity-supply/transmission-distribution-loss-j.html>, 2023/8/1
- 13) 中野諭, 平湯直子, 鈴木将之: 電気自動車 ELIICA の LCA, KEO Discussion Paper No.112(2008)
- 14) MARKLINES, 日産リーフ分解調査: リチウムイオンバッテリーパックの構造解説, [https://www.marklines.com/ja/report\\_all/rep1786\\_201811](https://www.marklines.com/ja/report_all/rep1786_201811), 2023/8/1
- 15) トヨタ自動車(株), みずほ情報総研(株), 輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価 日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書(2004), [https://www.mizuho-rt.co.jp/solution/improvement/csr/lca/pdf/jisseki02\\_wtwghg2004.pdf](https://www.mizuho-rt.co.jp/solution/improvement/csr/lca/pdf/jisseki02_wtwghg2004.pdf), 2023/8/30

## Reduction of Carbon Dioxide Emissions during Garbage Collection using Biogas: Evaluation of Natural Gas Trucks and Electric Trucks

Haruto Yamashita<sup>1)</sup>, Kenta Munemura<sup>2)</sup>, Takeshi Fujiwara<sup>1)†</sup> and Habuer<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University

<sup>2)</sup> Nippon Expressway Toll Technology Co., Ltd.

† Correspondence should be addressed to Takeshi Fujiwara:  
Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University  
E-mail: takeshi@cc.okayama-u.ac.jp

### Abstract

Although many of the methane fermentation facilities for waste biomass generate electricity from the produced biogas as a renewable energy, collection of biomass waste often relies on diesel trucks on the other hand. In this study, the CO<sub>2</sub> emissions of the entire methane fermentation system, including the biomass waste collection process, were calculated for natural gas trucks using the produced biogas and electric trucks using generated electricity. The finding revealed that, when compared to the diesel trucks, CNG trucks and electric trucks emitted 10.0 and 15.3 tons per year less during driving, respectively. However, when we factored in the CO<sub>2</sub> emission from manufacturing additional equipment, such as biogas concentrating and charging facilities, as well as electric batteries for vehicle, we discovered that the total CO<sub>2</sub> emissions of diesel trucks were the lowest.

**Key words:** methane fermentation, evaluation of carbon dioxide, effective use of biogas, CNG truck, EV truck