

〈研究発表〉

生ごみ分別回収済の可燃ごみを炭化処理することによる 温室効果ガスの排出削減効果

遠 入 野 生¹⁾, 藤 原 健 史¹⁾

¹⁾ 岡山大学 環境生命自然科学研究科
(〒700-0089 岡山市北区津島3-1-1 E-mail: takeshi@cc.okayama-u.ac.jp)

概 要

本研究では、生ごみ分別回収済の可燃ごみについて炭化処理を検討し、炭化物のエネルギー利用と炭素貯留の2つのケースについて、二酸化炭素排出削減効果を比較した。岡山県の中山間地にある真庭市では、森林バイオマス燃料としたバイオマス発電所が稼働中で、市では新たに生ごみやし尿を回収してメタン発酵を行なう予定である。データをもとに分別済の可燃ごみの組成、重量、発熱量を、炭化物について生成量、熱量を計算した。そして、1) 従来の焼却施設で焼却、2) バイオマス発電所での混焼、3) 処分場覆土の3つのシナリオで二酸化炭素排出量を試算したところ、それぞれ7,589, 6,452, 5,073[t-CO₂]となり、炭化物の覆土利用が最も脱炭素効果が優れていた。

キーワード：可燃ごみの炭化処理、生ごみ分別回収、エネルギー回収と炭素貯留、二酸化炭素排出削減量
原稿受付 2024.8.26 EICA: 29(2・3) 156-160

1. はじめに

脱炭素化の実現には、再生可能エネルギーの利用だけでなく、廃棄物のエネルギー・資源化や炭素貯留など様々な方法があり、その1つとして廃棄物の炭化処理及びその炭化物の貯留がある。本研究では、生ごみを含まない一般廃棄物を処理するケースについて、炭化の有効性を検討した。

日本は2050年の実質的カーボンニュートラルの実現に向けて、脱炭素化を目指した地域循環共生圏の在り方を模索している¹⁾。そのため、国は脱炭素先行地域を各地に創出させて、成功した取り組みについては他地域にも広める「脱炭素ドミノ」を実現しようとしている²⁾。地方では未利用バイオマスや廃棄物を地域内で有効利用する取り組みがすでに始まっており、岡山県の真庭市³⁾や西粟倉村⁴⁾では、森林に放置されてきた間伐材や林地残材、そして製材ごみなどの木質バイオマスを、エネルギーや木質原料として地域で積極的に利用してきた。真庭市では、それらをバイオマス発電所で燃やして発電し、FIT制度を活かして得た収入を、木質バイオマスを持ち込んだ林業関係者に還元することで、地域林業の活性化に繋げてきた⁵⁾。さらに真庭市では、生ごみ等の生活系バイオマスの資源化にも着手した⁶⁾。市は全域から生ごみとし尿、浄化槽汚泥を収集して嫌気性消化を行う施設を、令和6年10月の竣工を目指して建設中である。そのパイロットプロジェクトが平成27年7月に立ち上げられ、現在も一部の地区から生ごみを分別回収してメタン発酵

を行い、ガス発電や発酵残渣の液肥利用を行っている⁷⁾。残る課題は「生ごみ分別回収済の可燃ごみ」の処理である。真庭市には現在処理能力が30t/8時間(2施設)と20t/8時間(1施設)の機械式バッチ燃焼式ストーカ炉が稼働しているが、発電によるエネルギー回収を行っていない。生ごみの分別後は可燃ごみの収集量が減ることから、施設の運転計画の見直しが必要になっている。我々は、中山間地でバイオマスの有効利用が進むと、可燃ごみについては炭化処理が有効ではないかと考えた。

現在、日本で稼働している炭化施設の数は少ない。長崎県にある西海市炭化センター⁸⁾では可燃ごみを炭化し、炭化物を近隣の火力発電所に燃料として供給している。炭化炉は発電設備を持たない小規模処理に適しており、炭化物は燃料として利用できるとともに、貯留すれば脱炭素化に貢献する。特に生ごみが分別回収されていれば可燃ごみの低位発熱量が高まり、炭化処理の補助燃料は少なくすむはずである。本研究では、最初に真庭市で生ごみ分別が行われた時の可燃ごみの性状を推定する。次に可燃ごみの炭化処理による炭素固定量と化石燃料の消費量を計算する。最後に可燃ごみを焼却処理する標準シナリオと、炭化処理により炭化物製造しバイオマス発電所の燃料とするシナリオ、炭化物を最終処分場の覆土とするシナリオ(**Fig. 1**)について、環境負荷である二酸化炭素の排出削減量を比較する。

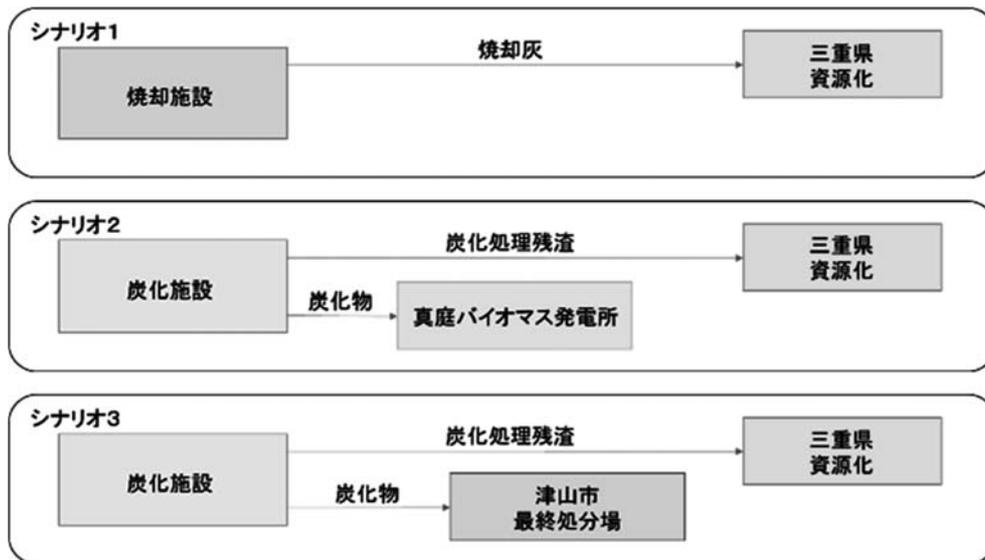


Fig.1 scenario

2. 研究方法

2.1 生ごみの分別協力率

平成 28～30 年に真庭市久世地区ではパイロット地区として生ごみの分別回収が行われていた。そこで、久世地区で平成 29 年に調査された生ごみ分別回収量と、隣接している落合地区で同年に調査された可燃ごみ細組成データをもとに⁹⁾、市民の生ごみ分別協力率を求める。真庭市全体の家庭ごみ収集量を W [t/年]、久世地区で回収された生ごみ量を w [t/年] とするとき、可燃ごみの減量化率 ε [-] を、真庭市全体と久世地区の人口をそれぞれ、 P 、 p [人] として (1) 式で表す。

$$\varepsilon = w / (W + w) (P / p) \quad (1)$$

可燃ごみ中の生ごみ含有率を λ [wet-] とする。分別に協力する市民の割合 (分別協力率) を α [-] とし、その人たちは生ごみ全てを分別し、残り的人たちは生ごみを可燃ごみとして排出すると仮定すると、生ごみが分別回収される割合、すなわち減量化率は、

$$\varepsilon = \lambda \alpha \quad (2)$$

(1), (2) 式から、分別協力率 α は (3) 式で表される。

$$\alpha = w / (W + w) (P / p) / \lambda \quad (3)$$

落合地区の組成分析から λ は 0.321 [wet-] であり、それを久世地区の λ とする。Table 1 の各値を (3) 式に代入し、減量化率 ε と分別協力率 α を求める。

Table 1 Parameters for calculating the food waste sorting cooperation rate

W	5631.61	t/年	平成 29 年真庭市の家庭からの可燃ごみ収集量
w	283.59	t/年	平成 29 年久世地区で家庭から回収された生ごみ量
P	45,767	人	平成 29 年真庭市の人口
p	10,675	人	平成 29 年久世地区の人口

2.2 生ごみ回収済の可燃ごみの性状

まず真庭市全体の可燃ごみ量 (分別生ごみを含む) を求め、分別協力率 α を用いて生ごみ回収済の可燃ごみ性状を推定する。まず、市内のごみ焼却炉 3 施設の可燃ごみ量に、収集エリア内のパイロット地区で回収された生ごみの量を加える。次に真庭市の平成 28 年～30 年の 3 焼却施設のデータ¹⁰⁾ から、真庭市全体の可燃ごみ量と組成割合を求める。さらに落合地区のごみ細組成区分⁹⁾ と各含水率のデータ^{11,12)} (Table 2) から整合をとりつつ、組成区分を細かく設定した (Table 2 の区分)。以上により得られた可燃ごみの組成区分のうち、一般厨芥および手つかず食品のうち分別協力率分を除いたものを生ごみ回収済の可燃ごみ性

Table 2 Various values

	含水率 [%]	炭素含有率 (乾燥ベース) [%]	炭素の化石燃料起源割合 [%]	低位発熱量 [kJ/kg]
紙くず	20.0	40.8	9.6	12,000
紙おむつ	72.1	56.0	59.0	3,800
天然繊維くず	20.0	45.0	0.0	16,800
合成繊維くず	20.0	63.0	100.0	16,800
包装容器 プラスチック	28.8	74.7	100.0	24,200
製品 プラスチック	6.1	73.3	100.0	31,200
ゴム・皮革	9.1	54.5	20.0	19,600
一般厨芥	75.0	43.4	0.0	1,890
手つかずの食品	49.5	45.5	0.0	6,900
木・竹・藁	45.0	45.2	0.0	7,510

状とする。

2.3 炭化炉による可燃ごみの炭化

炭化物への炭素固定量は、ごみ中の炭素が化石燃料由来かバイオマス由来かによって異なる。篠原ら¹³⁾の研究を参考にし、炭化処理による炭素固定の割合を、化石由来とバイオマス由来でそれぞれ 35.6、48.7[%]とする。また、組成区分ごとの炭素含有率[dry%]と化石燃料起源率[%]^{11,12)}を **Table 2** とする。

炭化炉では加熱によって生成する熱分解ガスを燃焼して炉を加温する。熱分解ガスの生成量は炭化の原料によって異なり、熱量が少ないと補助燃料も焚いて加熱しなければいけない。ここでは補助燃料の必要性を調べるため、まず生ごみ回収済の可燃ごみ性状と可燃ごみの組成別低位発熱量[kJ/kg] データ^{11,12)} (**Table 2**) から基準ごみの低位発熱量を求める。次に、平成 28 年度～令和 3 年度の 3 焼却施設のデータ¹⁰⁾ から低位発熱量の標準偏差を求め、全国都市清掃会議の正規分布 90% 信頼区間¹⁴⁾ から低質ごみの低位発熱量を計算する。そして、清水ら¹⁵⁾が示す炭化処理施設の月ごとのごみ処理量、発熱量及び灯油使用量から、低質ごみの場合の補助燃料の必要性を判断する。

2.4 炭化物の燃料利用

炭化物を真庭バイオマス発電所で木質バイオマスと混焼する場合の発電増量を求める。真庭バイオマス発電所では、含水率 25.0[%]～29.9[%] の木質チップを年間 107,506[t] 燃やして 70[GWh] の発電量を得ている¹⁷⁾。そこで木質チップの含水率を 27.5[%] とし、全国木材チップ工業連合会が示す含水率と低位発熱量の関係を用いて低位発熱量を 2,705[kcal/kg] とし、発電所の発電効率[kWh/kcal] を推計する。炭化物は可燃ごみに比べて発熱量の変動が小さく安定していることから¹⁵⁾、炭化物の性状データ¹⁶⁾を Dulong の式に代入し、湿潤状態の炭化物の低位発熱量を計算する。そして、炭化物 2,245[t/年] の投入に対する発電量[kWh/年] を求める。

2.5 二酸化炭素排出削減効果

前述の 3 つのシナリオについて二酸化炭素の排出量と削減量を計算し、焼却処理の場合と比較する。各シナリオでは、ごみ処理施設の運転、可燃ごみの燃焼、焼却灰や炭化灰の輸送、炭化物の利用先への輸送、炭化物の燃料利用後の灰の輸送のそれぞれについて化石燃料由来の二酸化炭素排出量を計算する。一方、炭化物の燃料利用と炭化物の貯留については二酸化炭素削減量を計算する。処理施設運転にかかる消費電力量は清水ら¹⁵⁾を参考にし、炭化物や灰の輸送による二酸化炭素排出量の算定には、トンキロ法¹⁸⁾を用いる。輸送

車は最大積載量 8 t 以上 10 t 未満、平均積載率 51%、軽油を燃料とする 2015 年排ガス基準達成車とする。現在の真庭市では、3 焼却施設からの焼却灰を三重県伊賀市に運び焼成処理していることから、灰もそこで処理することにする。炭化物の燃料利用先は真庭バイオマス発電所、炭化物の貯留先は津山市最終処分場で炭化物を覆土材と混ぜて使用する。電力消費量・発電量に中国電力の二酸化炭素排出係数の 0.545[kg-CO₂/kWh] (2022 年度実績) を用いて二酸化炭素排出削減量を求める。炭化物貯留による二酸化炭素排出削減量をバイオ炭貯留量(クレジット量)¹⁹⁾ の算定方法を参考に求める。なお、100 年後の炭素残存率を 0.5 とする。

3. 結果と考察

3.1 生ごみ回収率

平成 29 年の真庭市パイロット地域での生ごみ分別回収が行われたことによる可燃ごみの減量化率は 20.6 [%] であった。また、パイロット地域近くの落合村落部の可燃ごみ中生ごみの割合が 32.1[%] であることから、市民の生ごみ分別協力率は 64.0[%] となった。真庭市の試算では協力率を 65[%] としており、結果は妥当な数値である。

3.2 生ごみ分別回収開始後の可燃ごみ性状推定

真庭市全域で生ごみ分別回収を行う時の可燃ごみの組成割合[%] (乾重量ベース) は **Table 3** のようになった。可燃ごみの回収量は 10,700[t] から 8,802[t] に減少した。また、ごみ中の水分量が 46[%] から 42 [%] までに減少したため、可燃ごみの発熱量が基準ごみで 11,153[kJ/kg] まで高まった。

Table 3 Composition of combustible waste types (dry weight basis)

	種類組成[%]
紙・布類	54.4
紙くず	38.8
紙おむつ	11.2
天然繊維くず	1.7
合成繊維くず	2.6
ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革	26.8
包装容器プラスチック	19.5
製品プラスチック	6.2
ゴム・皮革	1.1
木・竹・藁	7.3
厨芥類	7.3
一般厨芥	3.6
手つかずの食品	3.7
不燃物類	1.7
その他	2.8

3.3 炭化処理炭素固定・燃料使用量

炭化による可燃ごみ中の炭素固定率を **Table 4** に示す。炭素固定率は 41.7[%] であり、焼却処理に比べて二酸化炭素排出量を大きく削減できた。炭化処理に必要な発熱量は 7,325[kJ/kg] と推定されたが、低質ごみでも低位発熱量が 9,399[kJ/kg] と上回っていたため、炭化処理に外部燃料を使用する必要はないと判断した。

Table 4 Carbon content of combustible waste, carbon fixation

	炭素量 [t/年]	炭素固定量 [t/年]
紙・布類	1259.1	570.5
紙くず	811.2	390.0
紙おむつ	322.8	131.4
天然繊維くず	39.8	19.7
合成繊維くず	85.3	29.5
ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革	1011.1	353.4
包装容器プラスチック	747.5	258.6
製品プラスチック	233.5	80.8
ゴム・皮革	30.0	14.0
木・竹・藁	170.1	84.2
厨芥類	158.7	78.6
一般厨芥	77.1	38.2
手つかずの食品	81.6	40.4

3.4 炭化物の燃料利用

処理施設から搬出される炭化物の低位発熱量は 9,450[kJ/kg] となり、可燃ごみの低位発熱量よりも低い値となった。これは、可燃ごみ中の揮発分が抜けたためと考えられる。真庭市バイオマス発電所の燃料熱量当たりの電力量（発電率 21[%]）は 0.058 [Wh/kJ] となり、炭化物をすべて発電所で燃やした場合の発電量は 1,220[MWh] となった。これは真庭バイオマス発電所の年間発電量の約 1.7[%] にあたる。

3.5 二酸化炭素排出量の削減効果

各シナリオの残渣発生量、二酸化炭素の排出量と削減量を **Fig. 2** に示す。シナリオ 1, シナリオ 2, シナリオ 3 の二酸化炭素排出量はそれぞれ 7,589, 6,452, 5,073[t-CO₂] となった。残渣発生量はそれぞれ 1,111, 797, 270[t], 炭化物・残渣輸送にかかる二酸化炭素発生量はそれぞれ 72, 55, 28[t-CO₂] であった。焼却処理に比べ炭化処理は残渣発生量を抑えられるが、輸送にかかる二酸化炭素排出量は他の項目に比べて小さく、大きな削減に結びつかなかった。また、シナリオ 2, シナリオ 3 の二酸化炭素排出削減量はそれぞれ 1,137, 2,516[t-CO₂] となった。炭化物発電による CO₂ 削減量は 665[t-CO₂]、炭化物貯留による CO₂ 削減量は 2,017[t-CO₂] となった。炭化物の燃料利用に比べて貯留による二酸化炭素の排出削減量が大きいことが分かった。

4. おわりに

真庭市を対象に、生ごみの分別回収に可燃ごみの炭化処理を組み合わせた場合の二酸化炭素排出量の削減効果について試算した。炭化物の利用方法として、バイオマス発電炉で混焼するケース（エネルギー利用）と、埋立地覆土材の一部に利用するケース（炭素貯留）を設定した。炭化物の良い点は、再生可能エネルギーが不足している時期はエネルギー利用し、足りている時期には炭素貯留するというように、エネルギー事情に合わせて利用先を切り替えられることである。

計算の結果、生ごみの分別回収によって可燃ごみ量は 10,700 から 8,802[t/年] に減少し、低位発熱量は 8,747 から 11,153[kJ/kg] と高まり、そのため炭化燃料が必要なくなることが分かった。発電用燃料として利用すると 1,220[MWh] の電力を生成することがで

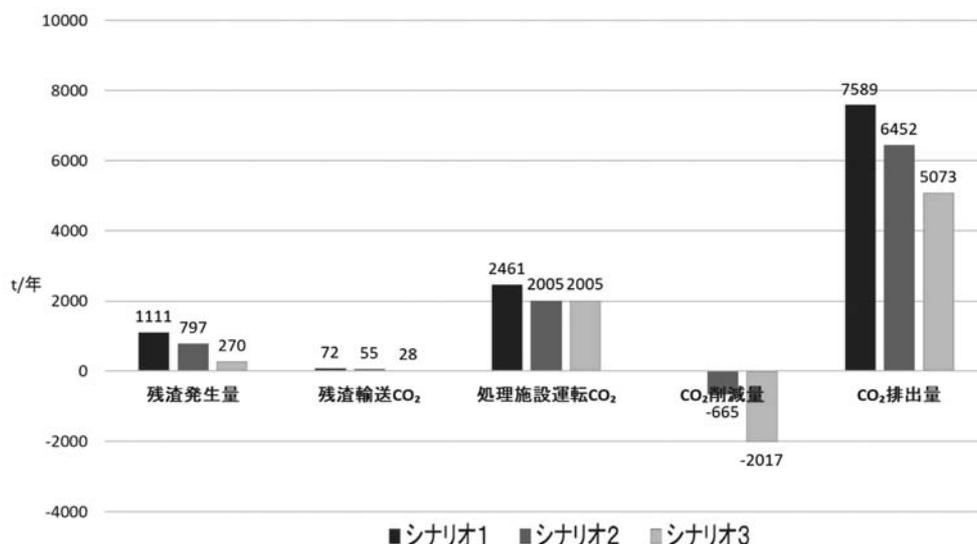


Fig. 2 Residue generation and carbon dioxide emissions and reductions for each scenario

き、真庭バイオマス発電所の発電量の1.7%に相当した。エネルギー利用と炭素貯留の二酸化炭素排出削減量はそれぞれ1,137, 2,516[t-CO₂]であり、発電によるCO₂削減量は665[t-CO₂]、炭化物貯留による削減量は2,017[t-CO₂]となった。

実用にあたっては、炭化物の貯留方法、エネルギー利用については、炭化物中の重金属濃度、バイオマス発電所での混焼による装置への影響、適正な灰処理、炭素貯留については溶出、そして炭化施設の建設・運転コストなどを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 環境省, 循環型共生圏, https://www.env.go.jp/recycle/circul/area_cases.html 2024/8 (2024/8 現在)
- 2) 環境省, 脱炭素先行地域, <https://policies.env.go.jp/policy/roadmap/preceding-region/> (2024/8 現在)
- 3) 真庭市, 真庭バイオマス産業都市構想 (2014)
- 4) 西粟倉村, 2050 “生きるを楽しむ” むらまると脱炭素先行地域づくり事業 (2022)
- 5) 真庭市, 木質バイオマスエネルギー活用指針 (2013)
- 6) 真庭市, 一般廃棄物資源化等基本計画 (一般廃棄物処理基本計画) (2016)
- 7) 真庭広域廃棄物リサイクル事業協同組合, メタン発酵プラント, <https://maniwariyo.org/methane-fermentation-plant/> (2024/8 現在)
- 8) 西海市, 西海市炭化センター, <https://green-coal.jimdofree.com/> (2024/8 現在)
- 9) 真庭市, 平成 25 年度 家庭ごみ (生ごみ) 資源化促進モデル事業結果報告 (2013)
- 10) 環境省, 一般廃棄物処理実態調査結果, 処理状況 (2023)
- 11) 国立環境研究所, 日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 2024 年 4 月版 (2024)
- 12) 早崎真也, 大下和徹, 河井紘輔, 高岡昌輝, 脱炭素社会における都市ごみ焼却施設からの温室効果ガス排出量の将来推定, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 33, pp. 69-82 (2022)
- 13) 篠原偉, Sylwia Olezek, 清水正也, 塩田憲司, 大下和徹, 日下部武敏, 高岡昌輝, 都市ごみ炭化処理における化石由来炭素の固定評価, 第 33 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, pp. 321-322 (2022)
- 14) 全国都市清掃会議, ごみ処理施設設計整備の計画・設計要領 (2017)
- 15) 清水正也, 松末一博, 浦島真人, 小竹正人, 内田博之, 一般廃棄物炭化燃料化施設によるリサイクルとエネルギー回収について, 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 講演原集, pp. 261-262 (2016)
- 16) 清水正也, 鬼塚遼太郎, 小竹正人, 内田博之, 一般廃棄物炭化燃料化施設によるリサイクルとエネルギー回収, J. Jpn. Inst. Energy, Vol. 97, No. 8, pp. 252-260 (2018)
- 17) 鈴木伸, 岡山県真庭市のバイオマス発電事業のコスト分析, 経済論叢 (京都大学), Vol. 194, No. 3, pp. 207-220 (2020)
- 18) 経済産業省, 物流分野の CO₂ 排出量に関する算定方法ガイドライン, <https://www.greenpartnership.jp/co2brochure.pdf> (2024/8 現在)
- 19) 農林水産省, J-クレジット制度における「バイオ炭の農地施用」の方法論について, <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/jcredit/biochar/attach/pdf/biochar-2.pdf> (2024/8 現在)