

有機廃棄物の液肥化循環利用におけるバイオガスプラントの効果

—温室効果ガス排出と処理費用の削減に向けたLCAアプローチ—

九州大学 辻林 英高*

九州大学 矢部 光保

1. はじめに

バイオマス活用推進基本法（2009年）のもと策定されたバイオマス活用推進基本計画（2010年）では、2020年までに約2,600万炭素トン相当のバイオマス再生利用を目標としている。各種バイオマス資源の中で、本研究で扱う家庭系生ごみの再生利用率は2009年で6%ほどの低水準に止まっている。同計画では家庭系生ごみの再生利用率を2020年までに40%へ引き上げることを目指している。さらに、2011年の震災と原発事故を受け、これまで以上に地域のバイオマスを活用した自立・分散型のエネルギー供給体制が重要な課題として取り上げられるようになり、国のバイオマス利活用方針においても、再生可能エネルギー利用がより重視されるようになった。2012年9月のバイオマス活用推進会議では、個別重点戦略として食品廃棄物、下水汚泥、家畜排泄物の各バイオマス資源について、バイオガスプラントでの処理が第一の手法として示された。その理由として食品廃棄物と下水汚泥については、そのエネルギーポテンシャルの高さが挙げられている。

本研究では、食品廃棄物や浄化槽汚泥などの含水率の高い廃棄物系バイオマスのうち、自治体が処理しなければならない家庭由来の「生ごみ」「し尿」「浄化槽汚泥」を取り扱う。これら高含水率の有機廃棄物の処理に関しては、バイオガスプラント（嫌気性発酵処理）と液状コンポストプラント（好気性発酵処理）が、対象物をウェット状態のまま資源化できる点で評価されている。しかし、自治体が住民サービスとして行う有機廃棄物リサイクル事業において、両タイプのプラントを直接比較した研究はほとんど見受けられない。また、リサイクル・処理事業の中心的プラントの処理工程を対象としたLCA研究は存在するが、原料の収集運搬や最終残渣の利用・処分を含めたボトム・アップ・アプローチもほとんど見受けられない。そこで、本研究では実態に沿った両タイプのシステム全体の運営に関する環境コストと経済コストを明らかにすることを目的とした。

本研究ではバイオガスプラントと液状コンポストプラントのLCA分析をもとに、その環境コストと経済コストを明確にする。また、いずれのプラント方式においても最終残渣として消化液肥が発生し、その利用は車両による圃場散布によってなされているのが通常である。そのため消化液肥の運搬・散布に起因するGHGが問題視されるケースがあることから、その点を明らかにした。

以下、図-1に本研究で取り扱うプラント方式の概略を示す。

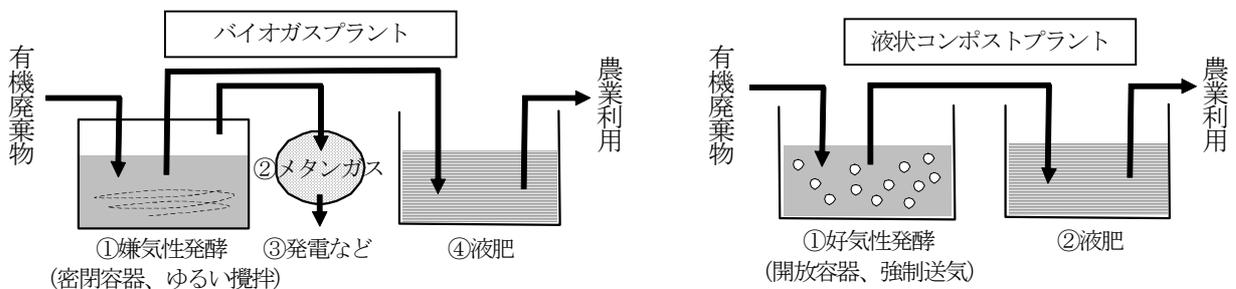


図-1 プラント方式の概略

2. 対象と手法

バイオガスプラントを用いたリサイクル事業として大木町（福岡県）を、液状コンポストプラントでは築上町（福岡県）をそれぞれ対象とした。2自治体とも、有機廃棄物を微生物や細菌によって液状肥料に変換しており、それを地域内農業で利用するシステムが存在し、かつ持続的に運営されていることが評価されている。

大木町では2006年から、町内の生ごみ、し尿、浄化槽汚泥をバイオガスプラントに投入し、処理後のメタン消化液を液体肥料として町内耕種農家の圃場に散布している。大木町のリサイクル事業では、各家庭で生ごみを分別し、週2回、ステーションに設置した大型ポリバケツに生ごみを直接入れる方法を採用しており、その収集率の高さ（全生ごみの9割以上）と精度の高さ（不純物の混入が極めて少ない）が全国的に注目されている。

築上町では1994年から、町内のし尿、浄化槽汚泥を液状コンポストプラントに投入し、好気性発酵後の液状コンポストを町内の圃場に散布している。築上町は西日本における液状コンポスト利用の草分け的存在で、これまでに水稻、麦、ナタネ、レタス、高菜など多くの作物に対する液状コンポストの施用手法を確立している（以後、メタン消化液と液状コンポストをいずれも液肥と呼ぶ）。液肥を用いた栽培技術の高さから、築上町は大木町などいくつかの自治体へ液肥散布に関する技術的支援を行っている。

表-1 大木町と築上町のリサイクル施設概要

項目	バイオガスプラント 大木町	液状コンポストプラント 築上町
人口(人)	14,500	20,100
施設名称	大木町バイオマスセンター	築上町有機液肥製造施設
処理方式	メタン発酵中温湿式発酵	好気性高温発酵
処理能力 (t/日)	し尿 7.0 浄化槽汚泥 30.6 生ごみ 3.8	し尿と浄化槽汚泥 18.7
年間処理量(t)	約12,000	約9,100
液肥量(t)	約5,200	約8,600
液肥の農地散布面積 (ha)	約100	約260

上記2自治体の高含水率の有機廃棄物のリサイクル事業について、コスト分析とLCAを用いたGHG排出量の算出を行い、その経済コストと環境コストを確認した。必要な各データは自治体担当部署や委託業者へのヒアリングをもとに得た。またGHG（註1）はLCA分析ソフトMilca（註2）をもとに算出した。LCAの調査範囲はシステム運営にかかるフロー分のエネルギーや副資材を対象とし、プラント本体や施設内の機器、車両等のインシヤル分は対象外とした（註3）。特に断りある場合を除き、大木町、築上町ともに平成23年度と24年度のデータの平均値を用いている。

3. 評価範囲とインベントリ分析

評価範囲は、対象となる廃棄物の収集運搬工程から、プラントでの処理変換工程、そして液肥利用工程までとした。図-2に大木町、築上町における高含水率の有機廃棄物リサイクル事業の大まかな流れを示す。図中、点線で囲われた部分がLCA評価対象となる。

（註1）GHGの対象はIPCCインベントリガイドラインで定められたCO₂、CH₄、N₂Oなどの6種類の温室効果ガスとした。

（註2）一般社団法人産業環境管理協会が提供しているLCAソフトウェア。

（註3）信頼性の高いデータを得るには調査労力が多大になること、一般的な製造業のLCAではインシヤル分はカットオフの範囲内の値になること、また「日本工業規格、JIS14040：2010(ISO 14040：2006)、環境マネジメント-ライフサイクルアセスメント-原則及び枠組み」に反しないことから本研究ではインシヤル分を除外した。

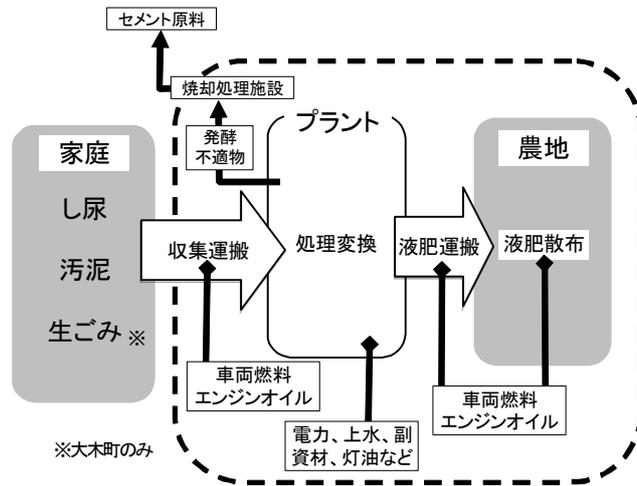


図-2 評価範囲

評価範囲内のインベントリ分析に必要となるデータは、大木町、築上町それぞれ表-2のように整理した。さらに、インベントリ分析に対応するGHG排出原単位を表-3に示す。

表-2 リサイクル事業のインベントリ分析

大木町・バイオガスプラント	築上町・液状コンポストプラント
1 生ごみ輸送	(1) し尿輸送
2 し尿輸送	(2) 浄化槽汚泥輸送
3 浄化槽汚泥輸送	し尿、浄化槽汚泥収集工程
生ごみ、し尿、浄化槽汚泥の収	(3) の車両メンテナンス (エン
4 集工程の車両メンテナンス (エン	ジンオイル製造)
ジンオイル製造)	(4) 前処理し渣輸送
5 除砂輸送	(5) 前処理し渣処理
6 除砂処理	(6) 発酵槽堆積物輸送
7 生ごみ不適物輸送	(7) 発酵槽堆積物処理
8 生ごみ不適物処理	(8) 電力使用
9 前処理し渣輸送	(9) 発酵促進剤の製造
10 前処理し渣処分	(10) 発酵促進剤の輸送
11 発酵槽堆積物輸送	(11) 上水の利用
12 発酵槽堆積物処分	(12) 液肥の散布
13 電力使用	(13) 液肥散布工程の車両メンテ
14 灯油の輸送	ナンス (エンジンオイル製造)
15 灯油の燃焼	
16 活性炭の製造	
17 活性炭の輸送	
18 ポリ鉄の製造	
19 ポリ鉄の輸送	
20 硫化鉄の製造	
21 硫化鉄の輸送	
22 苛性ソーダの製造	
23 苛性ソーダの輸送	
24 次亜塩素酸ソーダの製造	
25 次亜塩素酸ソーダの輸送	
26 上水の利用	
27 液肥の散布	
28 液肥散布工程のメンテナンス	
(エンジンオイル製造)	

表-3 GHG原単位

項目	原単位
灯油 (燃焼)	2.67 GHG-kg/ℓ
活性炭 (製造)	9.53 GHG-kg/kg
ポリ鉄 (製造)	0.04 GHG-kg/円
苛性ソーダ (製造)	1.35 GHG-kg/kg
次亜塩素酸ソーダ (製造)	0.41 GHG-kg/kg
硫化鉄 (製造)	2.49 GHG-kg/kg
硫化鉄 (製造)	2.49 GHG-kg/kg
発酵促進剤 (製造)	4.17 GHG-kg/kg
エンジンオイル (製造)	0.79 GHG-kg/ℓ
水道水	0.38 GHG-kg/m ³
電力	0.55 GHG-kg/kWh
焼却処理 (一廃、発電なし)	0.03 GHG-kg/kg
焼却処理 (産廃)	2.71 GHG-kg/kg
10tトラックによる輸送	0.13 GHG-kg/ t km
4tトラックによる輸送	0.15 GHG-kg/ t km
2tトラックによる輸送	0.23 GHG-kg/ t km
軽トラックによる輸送	0.55 GHG-kg/ t km

4. 環境影響評価

(1) 工程別 GHG 割合

表-3のGHG原単位にその使用量に乗じてGHG排出量を求めた。その結果、両プラントにおけるGHG排出量を得た。両プラントにおけるGHG排出割合ならびにGHG総排出量を表-4に示す。

表4 工程別GHG割合ならびにGHG総排出量

工 程	大 木 町 バイオガス プラント	築 上 町 液状コンポスト プラント
廃棄物の収集運搬工程	27.0%	9.6%
プラントでの処理工程 ※	69.5%	81.2%
液肥の運搬・散布工程	3.5%	9.2%
計	100%	100%
GHG総排出量	275.3t	309.7t

※ プラントでの処理工程に関して、大木町のバイオガスプラントでは、メタン発電の電力消費分を差し引いた。

両プラントとも「プラントでの処理工程」に占めるGHG割合が最も大きい。プラントでの処理工程の内訳は、バイオガスプラントでは投入される副資材由来のGHG割合が44%（全体の中の割合）と最も大きく、液状コンポストプラントではエアブロー運転による電力由来が77%（全体の中の割合）になっている。

「廃棄物の収集運搬工程」を見ると、大木町は27%で築上町の約3倍となっているが、これは大木町が生ごみ分別集を行なっているためである。

そして、「液肥の運搬・散布工程」のGHG割合を見ると、大木町3.5%、築上町9.2%といずれも分類中最下位であった。このことから、液肥運搬・散布を起因とするGHGは、リサイクル事業の環境評価を下げる主要原因になっていない。より具体的には、GHG量は液肥散布1ヘクタール当たり大木町90kg-GHG/ha、築上町103kg-GHG/haという値であった。築上町のGHGがやや大きい理由は、築上町の散布圃場地域が大木町より広域で、散布面積1ha当りの液肥輸送距離が大きいためである。さらに、築上町は比較的標高の高い圃場へも液肥散布しているのに対して、大木町は全域が平地であるため、液肥運搬車両の燃費に差が出たものと推察される。

(2) GHG比較

次に、投入物の炭素量を基準とした各プラントのGHG排出量を示す。ここで炭素量を基準としてGHGを比較する理由は、大木町と築上町の投入物の種類の違いによる有機物密度の差を修正するためである（註4）。

表-5は、大木町と築上町の投入物の総炭素量から、両プラントでリサイクルされる炭素1単位当りのGHGを算出したものである。バイオガスプラントでは投入される炭素1tにつき約1.5tのGHGを排出するのに比べ、液状コンポストプラントではその2.7倍の約4tのGHGを排出していることが確認された。この結果より、炭素の有効利用という視点で見たLCA評価では、バイオガスプラントの方が大幅に優位であることが確認された。

表-5 投入した炭素量で見たGHG排出量（優位な方に○印）

項 目	大 木 町 バイオガスプラント	築 上 町 液状コンポストプラント
投入した原料の 総炭素量(t)	187.4	78.2
GHG総排出量(t)	275.3	309.7
投入した炭素1t当たりの GHG排出量(GHG-t/t)	1.5 ○	4.0

5. 経済性比較

（註4）バイオマス利活用の指標として対象物（投入物）の炭素量を用いることは、自治体等が策定するバイオマス活用推進計画等で行われており、本研究でもその手法を用いた。

まず、次のように各費目の費用を算出し、2自治体の年間の費用合計を求めた。
プラント本体や建屋の建設価格を施設費とし、償還期間 50 年として計上した（註5）。バキュームカーや散布車両の購入価格を車両費とし、車格によって耐用年数を 5 年、6 年、7 年と設定し、耐用年数を超えて稼働しているものは耐用年数＝稼働年数として計算した。ランニングコストはフローデータをもとに副資材や水光熱費等の実数をもとめた。また、人件費やプラント内の機器や車両に掛かる修繕費等の実数をもとめた。これらを合計したものを費用合計とした。

さらに、本節でも異なる投入物の処理事業を適切に測るため、投入した炭素 1t 当たりという指標でコスト計算した。その結果、表-6 のように大木町・バイオガスプラントでは約 572,000 円、築上町・液状コンポストでは約 642,000 円となり、その差は 7 万円であった。

この 7 万円/炭素 t について補足すると次のようになる。築上町のコストを大木町と同様の 572,000 円/炭素 t にするためには、築上町は実費で約 550 万円/年のコストダウンが必要である。もしくは築上町の現在コストを維持したまま、生し尿を約 770t と浄化槽汚泥約 330t をそれぞれ多く受け入れるか、新規に生ごみを約 108t 受け入れる必要がある（註6）。以上のことから、大木町・バイオガスプラントの方が、築上町・液状コンポストプラントよりも経済面において優位なことが確認された。

表-6 リサイクル事業の年間費用（単位：円）（優位な方に○）

費 目	大 木 町 バイオガスプラント	築 上 町 液状コンポストプラント
施 設 費 (減価償却費)	15,760,000	7,654,000
車 両 費 (減価償却費)	10,071,458	5,297,169
ランニングコスト (水光熱費、消耗品費、車両燃料費、人件費、プラント修繕費、車両修繕費等)	81,434,423	37,297,531
費用合計	107,265,881	50,248,700
投入した炭素1t当たりで見た 費 用	572,000 ○	642,000

6. バイオガスプラントで再生可能エネルギーを得るために

大木町のバイオガスプラント施設で消費している電力の内訳は、メタンガス発電70%、電力会社からの購入26%、施設内での太陽光発電 4%である（いずれも平成 24 年度データ）。同プラントは発電機の排水熱利用システムが付属するエネルギー効率の良いプラントであるが、それでも新たにエネルギーを生み出すには到っていない。

他方、日田市（大分県）が運営するバイオガスプラント「日田市バイオマス資源化センター」では、家庭由来の生ごみ、浄化槽汚泥に加え、民間事業所で発生している「豚糞尿」と「焼酎粕」を多く受け入れており、そのため投入物の有機物濃度が高い状態にある。その分、メタンガス発生量が多く、同センターではメタンガス発電によって自家消費分以上の電力を生み出し、売電収入も得ている。

大木町ではすでに家庭由来の生ごみの 9 割以上、そして、し尿、浄化槽汚泥を全量投入していることから、より多くのメタンガス（＝発電量）を得るためには、日田市のように民間事業者からも有機廃棄物を受け入れる必

（註5）大木町、築上町ともに想定している実質的使用期間が 50 年だったため、その値を用いた。

（註6）以下の設定で試算。生ごみの含水率 80%、炭素含有率 44%。生し尿の含水率 98%、炭素含有率 45%。浄化槽汚泥の含水率 98%、炭素含有率 38%。

要がある。プラント処理量がすでに上限に近い大木町ではこうした手法は取れないが、今後、新たにバイオガスプラントを計画する自治体においては、原料による発電量の差を考慮する必要があるだろう。

7. まとめ

原料の炭素量から見た場合、大木町・バイオガスプラントでは投入される炭素 1tにつき約 1.5t の GHG を排出するのに比べ、築上町・液状コンポストプラントではその 2.7 倍の約 4t の GHG を排出していることが確認された。また、経済コストについても、大木町・バイオガスプラントの方が優位であることが確認された。よって、本研究による事例分析からは、自治体が管理しなければならぬ高含水率の有機廃棄物のリサイクル事業においては、環境面、経済面ともにバイオガスプラントを利用したリサイクル事業の方が優れているという結論が得られた。

さらに、液肥の運搬と散布に係る環境負荷が懸念されるという指摘に対しては、事業全体に占める液肥の運搬・散布の GHG 割合は 3~9%であったことから、有機廃棄物のリサイクル事業にともなう液肥散布（作業）は、GHG の排出源としてはかなり小さいことが確認された。

また、大木町のバイオガスプラントのケースでは、自家消費電力の 7 割程度の発電が限界であり、家庭由来の有機廃棄物のみを原料とする方式では正味のエネルギー生産を得ることは困難なことが示された。

国が目的としている家庭系生ごみのバイオマス利用率の向上を実現するためには、国が薦めるようにバイオガスプラントによるリサイクル事業が適していると判断される。しかし、このことが一般的に言えるためにはさらに事例を増やして検討していく必要があるとともに、家庭由来の「生ごみ」「し尿」「浄化槽汚泥」といった原料のみでは再生可能エネルギーの生産には結びつき難いことから、事業性や持続性を考慮した上で、近隣で発生する事業系の食品廃棄物や家畜排泄物などを合わせて活用するバイオガスプラントシステムを積極的に検討する必要があると思われる。

8. 今後の研究方針

今回得られたデータから、両町のリサイクル事業の効率化が可能かもしれない。例えば、築上町では GHG 排出量からブロー電源の消費量が大きいことが示され、その省エネ化を検討し始めている。また、バイオガスプラントや液状コンポストプラントの導入を考えている自治体に有効な検討材料を提供できるであろう。

さらに、この分野でより効率的な有機廃棄物のリサイクルシステム構築に貢献するためには、以下の調査や分析を進めることが必要と考えられる。

- ・ 従来型の焼却処理や浄化処理との LCA 比較ならびにコスト比較。
- ・ 液状コンポストプラント（好気性発酵処理）に生ごみを加えたケースの分析。
- ・ 液肥散布後の亜酸化窒素発生を加味した GHG 排出量評価。

引用文献

- [1] バイオマス活用推進会議（2012 年）「バイオマス事業化戦略～技術とバイオマスの選択と集中による事業化の推進～」, 3-7. <http://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/bioi/pdf/130322-04.pdf>（アクセス 2014 年 8 月 27 日）
- [2] 農林水産省（2012 年）「都道府県・市町村バイオマス活用推進計画作成の手引き」, 21 http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/local/pdf/tebiki.pdf（アクセス 2014 年 8 月 27 日）
- [3] 日本下水道協会 <http://www.jswa.jp/data-room/data.html>（アクセス 2014 年 8 月 27 日）
- [4] 森川則三（2010）「し尿処理施設の改善・改良整備について—CO₂ 排出量削減を中心として—」『JEFMA』58,(3),pp.27-28
- [5] 中村真人(2011)「メタン発酵消化液の液肥利用とその環境影響に関する研究」『農村工学研究所研究報告』,50, pp.35-39
- [6] 環境省 生ごみ等の 3R・処理に関する検討会参考資料（2006）『メタン発酵施設と焼却施設のコスト比較』
- [7] 浜坂岳暢(2013)「日田市バイオマス資源化事業における温室効果ガス排出量と経済性に関する評価分析」農村計画学会誌 / 農村計画学会 編, 論文特集号, 第 32 号, Special issue, pp.179-184