

廃棄物系バイオマスの新エネルギー源としての積極活用

長戸路 雄厚

The Positive Use of Biological Waste Disposal as a New Energy Source

Yuukou NAGATORO

地球温暖化対策として、化石燃料に代わり太陽光，太陽熱，風力，地熱，バイオマス，波力，潮汐力等の利用が大きく進展している。人間生活を維持する上で，し尿を中心とした下水汚泥や紙くず・厨芥（生ごみ）等の廃棄物が定常的に発生する。増え続ける人類が出すそれら廃棄物の持つバイオエネルギーの可能性を軽視することはできない。

本論文では，これら賦存量の大きい廃棄物系バイオマスを燃焼させて発生するエネルギー量（発熱量）を算出し，発電に利用した場合の原油削減量，そしてその結果としてのCO₂発生量削減への貢献度を評価した。

1. 緒言

“気候変動に関する政府間パネル”（IPCC）の第4次報告書によると，世界平均気温は100年前（15℃と推定）に比べ0.74℃上昇したとされる。¹⁾ IPCCは，人間が大量生産，大量消費，そして大量廃棄といった各種の経済活動を行う際に放出される大量のCO₂を始めとする各種の温室効果ガスの増加が原因であるとしている。もっとも，地球温暖化は，地球それ自体の活動，太陽活動等の宇宙的要因の影響等も無視できないとの主張もある。

いずれにせよ，現在地球に生存している68億人を超える人類が排出するCO₂の温室効果は大きい。急速に増大した地球人口が社会経済活動で排出する大量の各種の廃棄物は，地球環境の脅威ともなっている。中でも紙くず・厨芥等のごみと，し尿等の下水汚泥といった廃棄物の大量発生と生活空間における蓄積は，人間生活に著しい支障をきたす。これらの廃棄物を燃焼させて発生するエネルギー（発熱量）を活用する意義は大きい。ごみや下水汚泥の廃棄物はエネルギーの観点から廃棄物系バイオマスと呼ばれ，動植物資源や農作物，木材，海藻などの農林水産資源や黒液（製紙業で発生する廃液），アルコール発酵残渣などの有機性廃棄物等と同列のバイオマスである。²⁾

ごみや下水汚泥に含まれる炭素は，燃焼でCO₂となり大気中に放出されるが，それは本来地球環境中に存在していたものなので，カーボンニュートラルである。

また，太陽光や風力等の自然再生エネルギー利用と比べ天候，季節等の自然現象の影響を

受けないことや、年間を通じて廃棄物量がほぼ一定であるため、バイオマスエネルギーとしての有効活用度が高い。ことに、大都市ほど廃棄物量が多いため、人口の多い大都市近郊の安定エネルギー源として期待できる。

廃棄物系バイオマスの燃焼エネルギーによる発電は既に実績があるものの、今日までその利用は比較的小規模に留まっている。新エネルギー確保の観点から規模の拡大が求められよう。

本論文では、廃棄物系バイオマスについて考察し、発生させることのできるエネルギー、それに相当する原油量即ち視点を変えれば削減できる原油量、ひいては発生するCO₂の削減量の評価を行った。

更に、廃棄物系バイオマスエネルギーが次世代電力網スマートグリッドで果たせる役割にも触れた。

2. ゴミの持つバイオエネルギーの活用

2.1 廃棄物の区分

廃棄物の区分を図1に示す。³⁾ 廃棄物は一般廃棄物と産業廃棄物に大別され、一般廃棄物はし尿とごみ、そしてごみは更に家庭系と事業系に分類される。家庭系と事業系のゴミは組成として同一と考えてよい。

本論文では、図1の廃棄物のうち一般廃棄物としてのごみ（不燃ごみは除く）とし尿に着目する。一般廃棄物の従来の処分方法は、燃焼させるか埋め立てるかである。燃焼方式では、燃焼熱の一部は発電や他の熱利用に使われるが、単純燃焼も多い。そのため、エネルギー源としてのポテンシャルを持っているにも拘らず、一般廃棄物は十分に活用されているとはいえない。

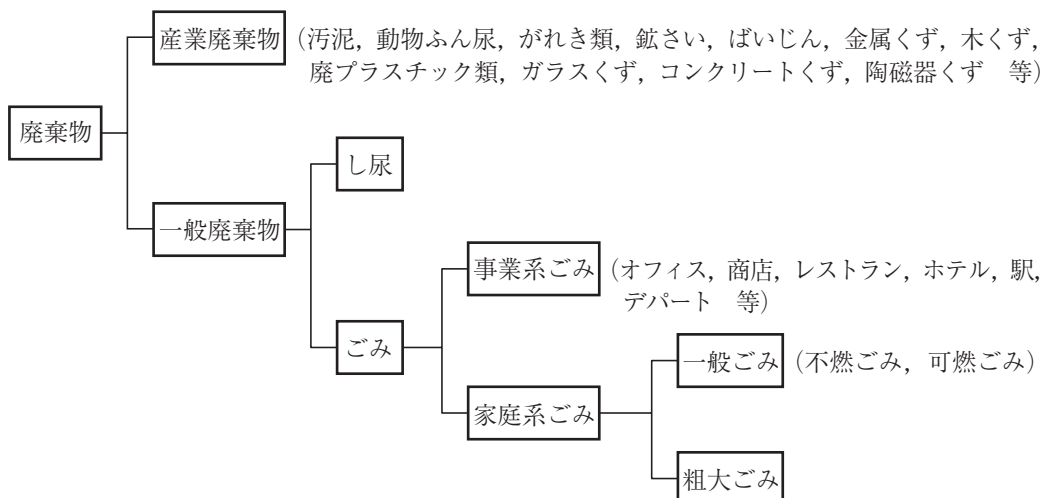


図1 廃棄物の区分

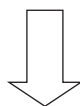
2.2 大都市におけるごみ組成とその成分の実例

表1に例示として2006年度の東京都における焼却ごみの組成とその成分を示す。²⁾ 組成は、都内各々の焼却施設に搬入されるごみ組成測定値の平均をとることにより算出したものである。表1のごみには、家庭系ごみと事業系ごみの双方が含まれている。組成としては紙・繊維と厨芥で殆どを占め、ついでプラスチックとなっている。成分としては、水分と可燃物が各々50%近い。

表1 大都市における焼却ごみ組成と特性（2006年度 東京都の例）

組 成	組成量 (kg/kg)
紙・繊維	0.50
プラスチック	0.13
木類	0.03
厨芥(生ごみ)	0.35
不燃物	0.04

（注 組成量＝ごみ1kg中の重量(kg)）



成 分	成分量(%)
水 分	46
可燃物	48
灰 分	7

（注 灰分＝各種無機物全般）

2.3 ごみの燃焼利用によるエネルギー生産

ごみに関する物理量を表2の(1)に示す。^{1),4)} ごみの発生量は、国内全体で年5100万トンに及ぶ。最近のごみ発生量は、環境保護の意識の高まりから漸次低減傾向にあるが、それでも年間5000万トンを超える。これは国民1人1日あたりの量に換算すると、1.1kg/人・日となる。簡略化のため東京都人口を1千万人とする、東京都の1日のごみ発生量は1万トンを超える。

表2 ごみ（家庭系、事業系）の燃焼利用によるエネルギー生産

(1) ごみに関する物理量一覧表

物理量	数値	備考
発生量	5100万トン／年 (国内全域)	1) 2種類の文献値の平均値 (5000万トン／年, 5200万トン／年) 2) 1人・1日当りごみ発生量・・・1.1kg
発熱量	9.3MJ/kg	1) 2種類の文献値の平均値 (8～10MJ/kg, 9.5MJ/kg) 2) 発熱量は低位発熱量(水分潜熱の影響除去)

(2) ごみ燃焼利用により発生させることのできるエネルギー量(発熱量)と
それに相当する原油量ならびにその結果削減できるCO₂量

ごみ発生場所	ごみ発生量 (万トン／年)	発熱量 (MJ／年)	発熱量 相当原油量 (万kl／年)	削減CO ₂ 量 (万トン／年)
国内全域	5100	4.74×10^{11}	1240.8	3276
東京都区部 (人口1千万人想定)	402	3.74×10^{10}	97.9	258.5

(注 MJ＝メガジュール, 1J＝0.238cal)

ごみを燃焼させた場合の発熱量を試算する。^{1),2)} 発熱量は、複数の測定値の平均値より9.3 MJ/kgであるとした。この発熱量は、ごみ成分で多くを占める水分の影響を取り除いた低位発熱量である。ごみの発熱量は、石炭燃焼の発熱量の約1/3に相当し、ごみ発電の利用価値は低くない。表2の(1)の2種類の基本物理量を用いて、国内全域と東京都区部のごみ発熱量とその熱量に相当する原油量を表2の(2)に試算した。

国内で発生するごみを全て燃焼させると、年間 4.74×10^{11} MJ (メガジュール) の発熱が得られ、これを原油発熱量38.2MJ/1(リットル)を用いて原油量に換算すると1240.8万klに相当する。即ち、ごみ燃焼によって1240.8万klの原油を削減できることになる。

カーボンニュートラルであるごみ発電で削減できるCO₂量は、原油1リットルの燃焼で発生するCO₂量が2.64kg/1であるので、年間3276万トンとなる。

2006年時点で、日本には1301箇所のごみ焼却施設があるが、このうち発電設備を持つのは293施設で22.5%でしかない。¹⁾ エネルギー確保の面からも、CO₂削減の面からも更に多くの焼却施設に発電設備の設置が望まれる。

また、東京都(人口1千万人と仮定)のごみ焼却時発熱量は年間 3.74×10^{10} MJで原油換算258.5万トンとなる。削減CO₂量は年間258.5万トンになる。人口の多い都会ほどごみ活

用の意義は大きい。ただし、ごみは水分含有量が多いため乾燥を必要とし、そのためにエネルギーを要することを勘案する必要がある。

ごみを燃焼させるまでに採る工程には2通りある。ごみを乾燥させて直接に燃やす方式と、最初に発酵を行わせメタンを発生させ、その後にごみを乾燥させて固形燃料（RDF, Refuse Derived Fuelの略）として火力発電燃料とする方式がある。メタンガスは収集して燃料として使用できる。いずれを採用するかは、経済性等を考慮して決めるべきであろう。

3. 下水汚泥の持つバイオエネルギーの利用

通常、汚泥とは工場排水などの処理後に残る泥状のもの、各種製造業の工程で生じる泥状のもの、そしてし尿等を指している。下水道から排出される下水汚泥が最も量が多く、2005年業種別汚泥排出量国内統計では全体の28.1%に及ぶ。²⁾ ついで多いのがパルプ・紙・紙加工品製造業からの汚泥であり、19.5%である。本論文では、下水汚泥に着目する。

図2に下水汚泥利用フローチャートを示す。²⁾ 下水汚泥の約97%は水分である。⁵⁾ 収集後の下水汚泥は、消化（熱分解）、脱水、焼却の各工程を経て残渣は埋立処分される。消化では、メタンガスが発生し、燃料として利用される。消化後の脱水工程で乾燥された汚泥は肥料や固形燃料等に使われる。乾燥汚泥は焼却後焼却灰として、一部はセメント原料、軽量骨材、土壌改良材、園芸用土壌等に使われるが、残りは埋立処分される。

同じく図2に、下水汚泥の用途別割合を示す。²⁾ 用途は大別して3分野に分かれる。建設資材や緑農地への利用が多いが、単に埋立処分される分量も多く全体の34%に及ぶ。

下水汚泥の燃焼利用によるエネルギー生産について表3にまとめる。表3の（1）に下水汚泥に関する物理量を示す。下水汚泥発生量（乾燥重量）は、国内全体で年間220万トンに至る。これは2004年度と2006年度の2年間の平均値である。^{5), 6)} 2005年度における全国の下水道普及率は68%であるから、⁵⁾ その後の普及率の上昇に比例して下水汚泥発生量も更になる。

東京都内にある「東部スラッジプラント汚泥炭化施設」の運転実績によれば、東京都区部の下水汚泥は1日当たり2700トンで、年間では98.6万トンとなる。都会の下水道普及率は高いので汚泥量も多い。発熱量は3個の測定値の平均値をとって、15MJ/kgとした。^{6), 7)} 汚泥の水分含有量の差異の関係で測定値には幅が生じている。今後の継続調査が必要であろう。

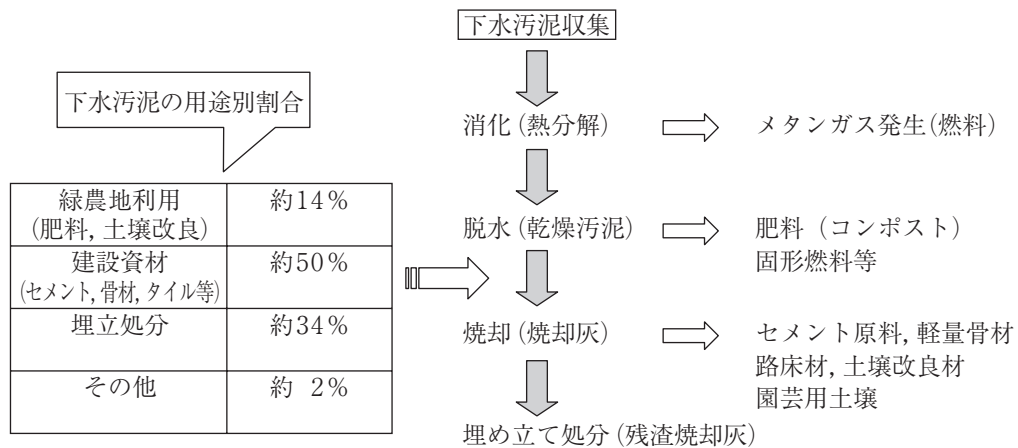


図2 下水汚泥利用 フローチャート

つぎに、表3の(2)に下水汚泥燃料により発生するエネルギー量と、それに相当する原油量即ち削減できる原油量そして削減できるCO₂量を試算する。

国内全体では年間 3.3×10^{10} MJの発熱量、これは原油量で年間86.4万トンの削減に相当する。CO₂の削減量は年間228.1万トンに達する。

東京都区部では、発熱量は年間 1.48×10^{10} MJ、原油削減量は年間38.7万トン、CO₂削減量は年間102.2万トンになる。

以上の試算値は、発生する下水汚泥全てを燃焼させ発電に利用したと仮定する場合である。図2の下水汚泥の用途別割合に示したように、下水汚泥を発電燃料として利用できるのは、現状では埋立処分とその他の合計36%分である。今後発電に供する汚泥の割合を高めれば、エネルギー供給源として期待が高まる。

なお、本論文では触れなかったが下水汚泥以外のお業種から排出される汚泥についても今後の検討の積極化が望まれる。

表3 下水汚泥の燃焼利用によるエネルギー生産

(1) 下水汚泥に関する物理量一覧表

物理量	数値	備考
発生量	国内全域 220万トン/年 (下水道普及率 2005年時点 68%)	2004年度, 2006年度の平均値
	東京都区部 2700トン/日	年間発生量 98.6万トン/年
発熱量	15MJ/kg	3個の測定値の平均値 (20MJ/kg, 16.6MJ/kg, 8.4MJ/kg)

(2) 下水汚泥燃焼により発生させることのできるエネルギー量(発熱量)とそれに相当する原油量ならびにその結果削減できるCO₂量

汚泥発生場所	発生量 (万トン/年)	発熱量 (MJ/年)	発熱量相当 原油量(万kl/年)	削減CO ₂ 量 (万トン/年)
国内全域	220	3.3×10^{10}	86.4	228.1
東京都区部	98.6 (2700トン/日)	1.48×10^{10}	38.7	102.2

(kl = キロリットル)

4. 廃棄物系バイオマスの持つトータルなエネルギー量

これまでの、ごみと下水汚泥各々別々に検討を加えてきたが、本章では表2と表3を用い双方の合計量について考える。

1) 国内全体の場合(年間)

ごみと下水汚泥を合わせた発熱量は年間 5.07×10^{11} MJ, 原油削減量は年間1327万kl, CO₂削減量は年間3504万トンとなる。2006年度の日本のCO₂排出量は13.4億トンであるから、その2.6%に相当するCO₂を削減できることとなる。

2) 東京都区部の場合(年間)

ごみと下水汚泥を合わせた発熱量は 5.22×10^{10} MJ, 原油削減量は年間136.6万kl, CO₂削減量は年間361万トンとなる。

本論文では廃棄物系バイオマス利用の発電において、その発電効率については言及していない。発電効率向上に向けた技術開発が進められているが、現状ではまだ10～20%で火力発電(約40%)と比べて低い。^{1),8)} 今後の発展が待たれる。

しかし、廃棄物系バイオマス発電は地域性が高いので、廃熱が生じても発電所内や地域への温水供給や暖房に使用できるメリットがある。

なお、下水汚泥とごみを混合させて利用すれば、地域でインフラストラクチャーの共用化が図られ、より効率化が期待される。

5. 廃棄物系バイオマス発電のスマートグリッドへの貢献性

近年、自然再生エネルギーの利用が普及してきているが、これらの発電は気象条件に左右されるため、安定出力に欠ける点は否めない。リチウムイオン電池等で構成される蓄電池を用いて発電安定化が図られているが、高性能化には至っていない。

そこで、安定高出力の火力発電や原子力発電等と自然再生エネルギー利用発電を組み合わせた制御システムを稼働させ、安定出力を得る試みがなされている。更には、ITを用いて

電力効率の良い次世代電力網スマートグリッドシステムが提案され、研究・開発が進展している。スマートグリッドシステムに採用される自然再生エネルギー利用発電は、太陽光発電や風力発電である。

執筆者は、スマートグリッドシステムに、太陽光発電や風力発電と併用して廃棄物系バイオマス発電の取り込みを提案する。図3にその代表例を廃棄物系バイオマス発電の特色と共に示す。廃棄物系バイオマス発電は、太陽光発電等と同様発電効率は高くはないものの、廃棄物は定常的に発生するため発電量が安定している。そのため、このスマートグリッドシステムに廃棄物系バイオマス発電を接続し機能させれば、太陽光パネルからの出力に変動が生じても、グリッド内の出力を安定化できる負荷追従運転が可能である。それによって、火力発電への過大な負荷追従運転の要求や蓄電池システムにかかる高負担を軽減できると期待される。

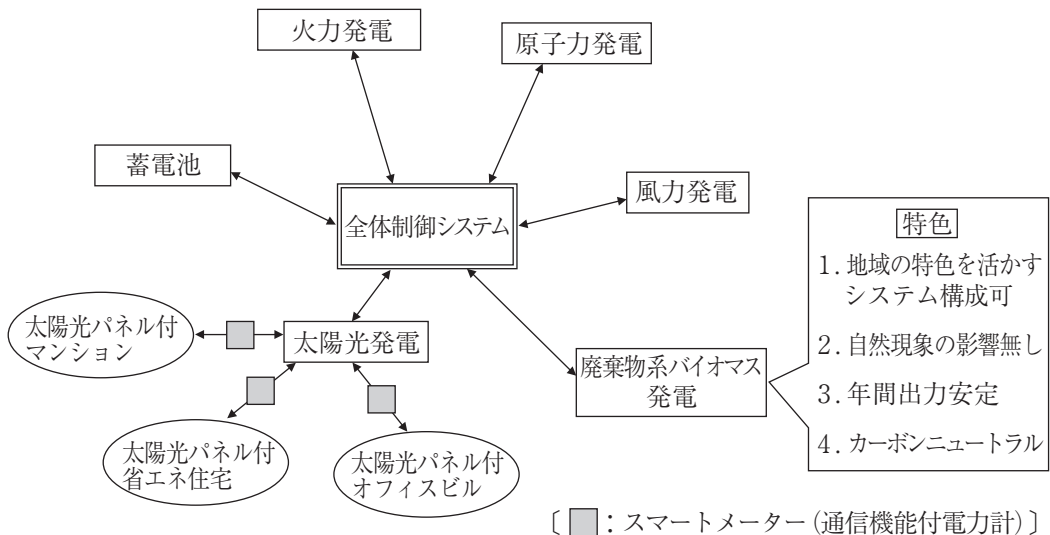


図3 スマートグリッド（次世代電力網）構成図例

6. 結言

廃棄物系バイオマスを燃焼させ、その発熱量を積極的に発電に供することによって新エネルギー分野での貢献を評価した。その結果、以下のことを明らかにした。

- 1) 廃棄物系バイオマス（ごみ、下水汚泥）は、エネルギー生産に適した発熱量を有し、定常的な電力供給に資することができる。廃棄物バイオマスを現在以上に発電に積極活用する意義は大きい。
- 2) 次世代電力網スマートグリッドの構成要素として、廃棄物系バイオマス発電は高いポテンシャルを持つ。

参考文献

- 1) 廃棄物資源循環学会監修：“地球温暖化と廃棄物”，中央法規（2009年）
- 2) 社団法人日本エネルギー学会編：“バイオマスハンドブック”，オーム社（平成21年）
- 3) 長戸路 雄厚：地球環境破壊防止に関する考察，千葉敬愛短期大学紀要第30号（平成20年3月）
- 4) 理科年表オフィシャルサイト／環境部：一般廃棄物の発生量
http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kankyoku/kan_007.html
- 5) 社団法人日本下水道協会ホームページ
http://www.jswa.jp/05_arekore/data-room/05/riyou/data.html
- 6) 財団法人新エネルギー財団ホームページ
http://www.asiabiomass.jp/topics/0911_03.html
- 7) フリー百科事典『ウィキペディア』（検索語）バイオマス
- 8) 環境省編：“平成22年版 環境白書”，株式会社ぎょうせい（平成22年）