

成分組成に基づいた有機性固形廃棄物の再資源化 用途の評価

保井 淳*・国次 純*・西嶋 渉*・岡田 光正*

摘要

本研究では、廃棄物の成分組成から各再資源化によって得られる生産物量を推定するための指標の作成を目的とした。再資源化方法としては、有機性固形廃棄物の一般的な再資源化方法の中から固形燃料化による熱量の回収、メタン発酵によるメタンガスの回収、酵素分解によるグルコースをはじめとする発酵原料の回収といった3つの方法について検討した。また、組み合わせによる再資源化についても検討した。

各有機性固形廃棄物の成分分析を行い、固形燃料としての熱量の回収は廃棄物中の有機物含有率から推定できる事が分かった。また、メタン発酵によるメタンガスの生成量はリグニンとヘミセルロースを除く有機物含有率から推定できる事が分かった。

共に熱量回収の方法である固形燃料化とメタン発酵の優劣は、廃棄物の水分含量によって判断できる事が分かり、水分含量の高い廃棄物ではメ

タン発酵が有利であり、低い廃棄物では固形燃料化による熱量の回収が有利であることが明らかとなった。

セルラーゼを用いた酵素分解では、廃棄物中のセルロース量から予測されるグルコース量は得られなかった。しかし、糖類の含有率が高いパン屑ではほぼ100%がグルコースになった。また、みかんの皮と汚泥では高いグルコース生成量は得られなかったものの廃棄物のそれぞれ75、47%が可溶化し、可溶化成分の発酵原料としての利用の可能性が示唆された。

酵素分解によって生成する残渣、いわゆる二次廃棄物をさらに固形燃料化、メタン発酵によって再資源化したところ、廃棄物によってはもとの廃棄物よりも単位重量あたり高い熱量の回収が可能であった。また、廃棄物の低減といった意味でも再資源化の組み合わせは有効であった。

キーワード：ゼロエミッション、有機性固形廃棄物、成分組成、熱量、メタン発酵

所属機関、住所：広島大学大学院工学研究科移動現象工学専攻環境基礎化学講座、〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1.

1. はじめに

容器包装、家電、建設資材、食品リサイクル法がここ数年間で施行、また、今後施行される。こういった社会の流れの中で、ゼロエミッションといった循環型社会を目指した思想が国連大学より提案された¹⁾。ゼロエミッションはプロセスの改良による廃棄物の発生量の抑制、産業間のネットワークの形成による資源の利用、新たな再資源化方法の開発などによって達成することができる。

食品廃棄物、一般可燃物、汚泥等の有機性固形廃棄物は、これまで主に焼却により処分されてきた。しかし、埋立地の不足²⁾、焼却によるダイオキシンの発生³⁾など今後とも焼却に頼った処分は困難を伴うと同時に、有機原料としての視点から有効利用を図ることがゼロエミッションの観点からも重要となる。

有機性固形廃棄物の再資源化には、コンポスト化、固形燃料化(RDF)、嫌気分解によるメタンガス化、飼料化、有用成分の抽出等多くの方法が現在提案、実施されている。コンポストに関しては、古くから様々な有機性固形廃棄物からの作成が試みられ、市販されてきた。一方、家庭系、事業系の廃棄物からのRDF生産施設の建設は1980年代からはじまったが、原料としてはプラスチックのみ、

厨芥を除いた可燃ゴミ、厨芥を含めた可燃ゴミ等様々であり、RDFの利用施設の確保を含めてまだ試行錯誤の段階といえる⁴⁻⁵⁾。メタン発酵は都市下水の汚泥処理法として発展してきた。近年、農畜産廃棄物やし尿系汚泥、厨芥ゴミに対してもその適用が検討されている⁶⁻⁷⁾。

しかしながら、有機性固形廃棄物の構成成分が多様であることから、ある廃棄物に対して有効であった再資源化方法が他の廃棄物に対して有効であるかは必ずしも明確ではない。様々な再資源化方法が提案されている中で、個々の有機性固形廃棄物に対して各再資源化方法を試すことは容易ではなく、今後有機性固形廃棄物の再資源化を進めていく上では大きな障害となるであろう。

そこで本研究では、廃棄物の成分組成から各再資源化によって得られる生産物量を推定するための指標の作成を目的とした。再資源化方法として、有機性固形廃棄物の一般的な再資源化方法の中から固形燃料化による熱量の回収、メタン発酵によるメタンガスの回収、酵素分解によるグルコースをはじめとする発酵原料の回収といった3つの方法について検討した。

また、再資源化方法の中には廃棄物が全て有用物質に変換されないものも多く、残渣が発生する

場合も考えられる。廃棄物を低減するという観点からは、どのような有用物質が作成できたかというだけでなく、廃棄物の絶対量をどれだけ低減できたかが重要である。そこで、1つの再資源化処理後の残渣に対し、別の再資源化方法を適用することについても同時に検討した。

2. 実験廃棄物及び方法

2.1 実験に用いた廃棄物

実験試料として用いた廃棄物は、籾殻、稲藁、木屑、コーヒー滓、みかんの皮、おから、パン屑、汚泥（下水汚泥の脱水ケーキ）の8種類である。廃棄物の選定にあたっては、構成成分が異なると思われるものを幅広く選択した。

2.2 成分分析

各廃棄物の水分、灰分を衛生試験法⁸⁾に基づき測定し、全重量から水分と灰分を差し引いた値を有機物量とした。さらに有機物については、粗脂肪（以後脂質）、粗タンパク質（以後タンパク質）、糖分、セルロース、ヘミセルロース、リグニンの存在比率を求めた。タンパク質、脂質は衛生試験法に従い、セルロース、リグニン、ヘミセルロースは American National Standard⁹⁾に基づいた。糖分は全有機物量からタンパク質、脂質、

-セルロース、ヘミセルロース、リグニンを差し引く事によって求めた。

2.3 固形燃料化

熱研式自動ボンブ熱量計（CA-3、島津製作所）を用いて乾燥廃棄物の熱量を測定した。廃棄物に水分が含まれている場合には、廃棄物を乾燥するために熱量を消費する。その消費熱量を水分1kg当たり $2,500\text{kJ}^{10)}$ として、乾燥廃棄物から得られる熱量から水分蒸発に必要な熱量を差し引いた値を回収熱量とした。

2.4 メタン発酵

広島県東部浄化センターから採取した嫌気性汚泥を荒木らの用いた基質、栄養塩¹¹⁾を添加し、4Lのガラス容器で1ヶ月馴養した。実験では、馴養汚泥100mlを窒素パージしながら160mlバイアルビンに移し変え、粉碎した廃棄物0.2gを加えた後、ブチルゴム栓とアルミキャップで密閉した。ゴム部にニードルを付けた100mlのプラスチックシリンジを差込み生成したガス量を目視によって測定した¹²⁾。生成したガスはガスタイトシリンジを用い、GC-TCDにより測定した。メタン発酵は、メタンの生成が停止した時点で終了した。

対照として、廃棄物試料を加えずに同様に培養した系を設定した。廃棄物を加えた系の発生した

メタンガス量から廃棄物無添加系列の発生したメタンガス量を差し引いた値を廃棄物試料由来のメタンガス量と定義した。

2.5 酵素分解

乾燥廃棄物を、乳鉢、または、ボールミルを用いて粉碎した。その廃棄物を分級し、粒子径を250~500 μ mにそろえた。10mM、pH5.0酢酸緩衝液にアジ化ナトリウム20ppm加え、酵素はセルラーゼオノヅカRS(ヤクルト製)を使用し、酵素濃度は実験により十分量と考えられる5,000ppmとした。300mlの耐圧ビンに、正確に重量を測定した廃棄物2gと酵素溶液100mlを投入し、恒温振とう槽を用いて100rpm、50 $^{\circ}$ Cの条件で廃棄物を酵素分解した¹³⁾。24時間毎にサンプリングを行い、ろ過廃棄物試料(Whatman GF/B)のグルコース濃度を吸光光度法で定量した¹⁵⁾。グルコースの生成が停止した時、実験を終了した¹²⁾。

3. 結果及び考察

3.1 成分分析

実験に用いた各有機性固形廃棄物の構成成分を明らかにした。表1に廃棄物を有機物、水分、灰分で分けた場合の湿潤基準の割合を示す。この時、廃棄物の水分、灰分以外の成分を有機物とし

ている。また、水分、灰分以外の有機物の構成成分を、タンパク質、脂質、糖分、セルロース、ヘミセルロース、リグニンに分けて表 2 に示す。食品分野では糖分とは全量から粗タンパク、脂質、粗繊維、灰分を差し引いた残りを言うが⁸⁾、ここでは粗繊維に変わり、セルロース、ヘミセルロース、リグニンを繊維質として分析し。糖分は全量から各測定成分を差し引いた値とした。以上の成分分析から本研究で用いた有機性固形廃棄物は、有機物含有量、また、その組成が多様な廃棄物である事が確認された。

表 1 各廃棄物の水分、灰分、有機物の構成比

廃棄物	水分	灰分	有機物
籾殻	9.7	19.7	70.6
稲藁	8.9	12.1	79.0
木屑	8.7	0.5	90.8
コーヒー滓	66.8	1.5	31.7
おから	80.6	0.8	18.6
みかんの皮	82.1	0.3	17.6
パン屑	33.7	1.6	64.7
汚泥	69.9	14.4	15.7

表 2 各廃棄物の有機物中の構成比（乾燥基準）

廃棄物	タンパク質	脂質	糖分*	セルロース	ヘミセルロース	リグニン
籾殻	1.1	0.4	13.6	27.4	30.7	26.7
稲藁	6.6	3.2	21.3	32.4	20.2	16.4
木屑	2.6	2.1	25.0	36.9	5.5	28.0
コーヒー滓	7.3	7.7	23.9	29.9	14.9	16.3
おから	30.8	4.8	12.8	12.3	37.2	2.1
みかんの皮	8.6	13.6	40.0	21.3	5.0	11.5
パン屑	13.8	4.3	57.0	1.8	23.1	0.0
汚泥	7.3	1.0	87.1	0.0	0.0	4.7

*糖分はタンパク質、脂質、セルロース、ヘミセルロース、リグニン以外の部分とした

3.2 固形燃料としての熱量回収

各廃棄物の固形燃料として回収可能な熱量を明らかにするために乾燥廃棄物について熱量を測定した。また、各廃物の水分を蒸発させるための熱量を計算し、消費熱量を差し引いた回収熱量を計算した。図1は廃棄物1kgから回収可能な熱量と有機物含有率との関係を示したものである。廃棄物中の有機物含有率と回収熱量には図中の式に示したように非常に高い相関があり、廃棄物中の有機物含有率から回収熱量を容易に推定できる事が明らかになった。例を挙げると、有機物含有率が90.8%の木屑は1kg当たり約17,700kJの熱量の回収が可能である事が分かり、おから、汚泥、みかんの皮といった有機物含有率の低い廃棄物の回収熱量は約2,000kJ程度にとどまった。本来、有機物の種類によって熱量が異なり、例えば脂質は比較的熱量が高いことが知られている¹⁷⁻¹⁸⁾が、廃棄物全体の熱量の推定には有機物含有率といった大まかな指標で十分であった。

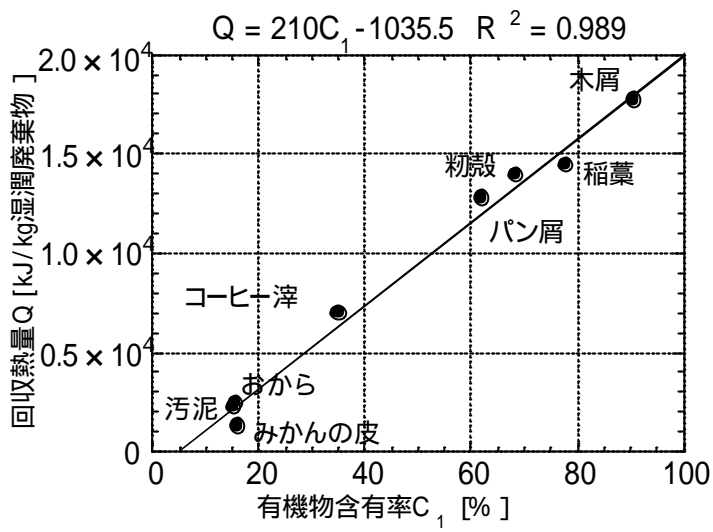


図1 回収熱量と有機物含有率の関係

3.3 メタン発酵によるメタンガスの回収

各廃棄物をメタン発酵した場合に生成するメタン量を測定した。図2に水分、灰分を含む廃棄物1kgからメタン発酵によって生成したメタンガス量とリグニンとヘミセルロース以外の有機物含有率の関係を示す。メタン発酵における分解性は成分によって異なる。リグニンの分解性は特に低いとされ、ヘミセルロース、脂質、タンパク質も分解されにくい成分とされる¹⁹⁾。様々な有機性成分と生成メタンガス量の関係調べた結果、全有機物量からリグニン、ヘミセルロースの量を差し引いた値がメタン生成量と最も高い相関を示した。木屑、パン屑といったリグニンとヘミセルロース以外の有機物含有率が約50%を超える廃棄物はメタンガスの回収量が $0.2\text{ m}^3/\text{kg}$ 以上であり、メタンによるエネルギー回収に有利な廃棄物である事が分かった。一方、おから、みかんの皮といったリグニン、ヘミセルロース以外の有機物量が比較的少なく、その含有率が20%程度のものは $0.05\sim 0.10\text{ m}^3/\text{kg}$ 程度のメタンガスの回収量であった。

また、各廃棄物から得られたバイオガス中のメタンの比率はそれぞれ、63.2% (籾殻)、52.2% (稲藁)、59.1% (木屑)、58.4% (コーヒー滓)、56.6% (おから)、56.7% (みかんの皮)、53.0% (パン

屑)、78.2% (汚泥)であった。

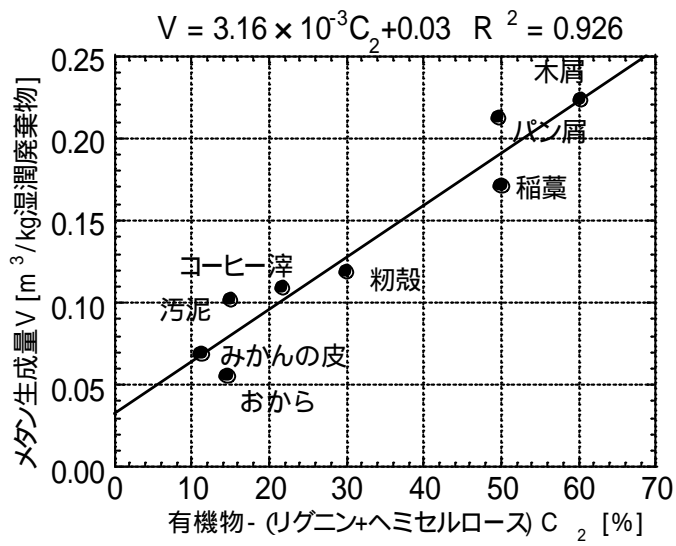


図 2 メタンガスとリグニン、ヘミセルロース以外の有機物の関係

3.4 固形燃料とメタン発酵における回収熱量の比較

固形燃料化とメタン発酵は、両者とも廃棄物から熱量を回収する手段であることから、どちらの熱量回収方法が優れているかについて評価した。図3に固形燃料化とメタン発酵による回収熱量の違いを示す。水分含量が両方法による回収熱量の違いに大きな影響を及ぼし、廃棄物の水分含量が70%以下の廃棄物では固形燃料として回収できる熱量がメタンガスとして回収できる熱量を上回った。メタン発酵が有利である汚泥、みかんの皮、おからは約1,700~2,100kJ/kgの熱量を乾燥のために使用するため固形燃料としての回収熱量が低い。メタン発酵は水分含量の高い廃棄物をそのまま使用できるためにメタン発酵による熱量回収が有利になったと考えられる。以上の結果は、熱量の回収方法を廃棄物の水分含量を指標に選択可能であることを示している。

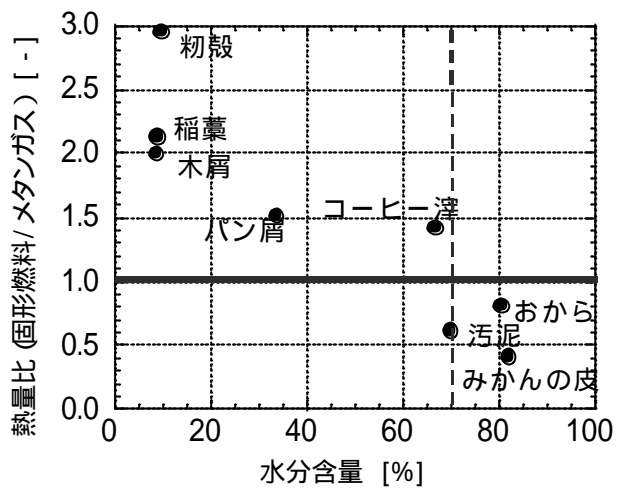
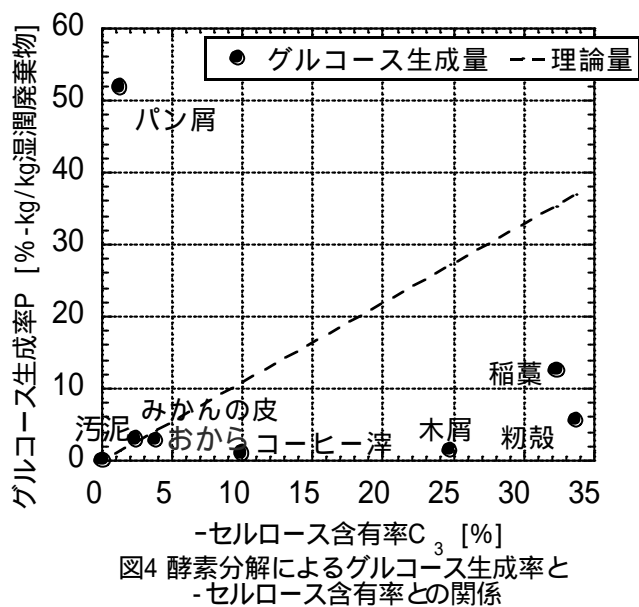


図3 固形燃料とメタンガスとしての熱量の比較

3.5 酵素分解

図 4 にセルラーゼを用いた酵素分解によるグルコースの生成率と各廃棄物のセルロース含有率との関係を示す。セルロースからは理論的には 1.1 倍 (w/w) のグルコースが生産され¹⁶⁾、アミロースからも加水分解によってグルコースは生成する¹⁴⁾。しかし、セルロースを多く含む木屑、籾殻、稲藁からのグルコースの生成率はそれぞれ 5.1、9.6、35.4% にとどまった。このことは粉碎のみではセルロースとリグニンの立体構造が崩せず、酵素が効果的にセルロースに対して作用しなかった事が考えられる²⁰⁾。パン屑についてはその主成分がアミロースであるため容易に加水分解され、パン屑全量とほぼ同量のグルコースを回収する事ができた。また、セルラーゼを使用しない、すなわち pH 5.0、50 のみの場合では同量のグルコースは得られなかったことから、パン屑中のアミロースはセルラーゼの効果によって加水分解されたことが分かった。この結果から、パン屑のような主成分が糖分である廃棄物については容易に発酵原料であるグルコースを回収する事ができるが、その他の廃棄物に対してはなんらかの前処理が必要である事が分かった。一方、表 3 に示したようにセルラーゼを用いた酵素分解に

よってグルコース以外にも可溶性成分が生成した。特に糖類分が大きいみかんの皮と汚泥では廃棄物のそれぞれ75、47%が可溶化した。これらの可溶性成分は発酵原料として利用できる可能性がある(14)。



3.6 再資源化率の比較

廃棄物の再資源化には本来2つの目的がある。一つは、有用物質の回収、生産であり、もう一つは廃棄物の低減である。廃棄物の低減といった観点で各資源化を評価するために、再資源化率という指標を用いた。再資源化率(%)は、乾燥基準で廃棄物量に対する再資源化によって減少した重量(再資源化率[%] = 乾燥基準で減少した重量 / 乾燥基準のもとの重量 × 100)と定義し、表3に示す。固形燃料は燃焼後に灰分が残るが、資源化の時点では全量が固形燃料になるので再資源化率は100%となる。メタン発酵の再資源化率は8%(粕殻)~62%(パン屑)であった。酵素分解はみかんの皮、パン屑に対し大きく減量させる事ができた。しかし、その他の廃棄物においては再資源化率が3~47%と再資源化率は低かった。メタン発酵、酵素分解ともなんらかの前処理等を行うことによって再資源化率を向上させる可能性があるが、今回の再資源化方法においては少なくとも再資源化されずに残った成分が多く、さらなる再資源化を検討する必要性が示唆された。

表 3 各廃棄物のメタン発酵、酵素分解による
再資源化率

廃棄物	メタン発酵 (%)	酵素分解 (%)
籾殻	8	12
稲藁	30	30
木屑	22	3
コーヒー滓	43	24
おから	59	15
みかんの皮	35	75
パン屑	61	99
汚泥	38	47

3.7 再資源化の組み合わせ

再資源化後の残渣を二次廃棄物と定義し、二次廃棄物のさらなる再資源化を検討した。対象は二次廃棄物の特に多かった酵素分解とし、酵素分解後の残渣を固形燃料化とメタン発酵による再資源化を試みた。ただしパン屑はほぼ全量分解したので除いた。酵素分解によって生成したグルコースを回収した後、残渣に機械的な脱水を施す事とし、脱水時の二次廃棄物の水分含有率は70%と仮定した。その結果、残渣のメタン発酵実験によって表4に示すように廃棄物を酵素分解した残渣から水分、灰分を含む湿潤基準でメタンガスとして820～3,598 kJ/kg、固形燃料として2,143～5,627 kJ/kg程度の熱量の回収が可能であった。酵素分解後の残渣から回収できた熱量は、廃棄物そのものをメタンガスとして、また、燃焼させ熱量を回収した場合と比べ、それと同等、または、それ以上の熱量が回収できる廃棄物もあった。特に残渣のメタン発酵によって多くの熱量が回収できる廃棄物はみかんの皮、コーヒー滓、おからといった比較的もとよりメタン発酵の効果が大きかったものであった。また、みかんの皮、コーヒー滓、おからといった再資源化前の水分が多い廃棄物は脱水の効果により固形燃料として高い熱量の回収

が可能であった。このことから、酵素分解後の残渣からでもメタン発酵、固形燃料化により十分に資源が回収でき、組み合わせによる資源化の有効性が示された。また、廃棄物の低減といった観点からは、酵素分解とメタン発酵の組み合わせで稲藁、コーヒー滓の再資源化率が大きく高まった。(図5)

表4 酵素分解後の二次廃棄物から回収できる熱量

廃棄物	メタン発酵 (kJ/kg 原料) (%)	固形燃料化(kJ/kg 原料) (%)
籾殻	1150 (24)	3438 (25)
稲藁	2709 (40)	3903 (27)
木屑	820 (9)	4754 (27)
コーヒー滓	3598 (83)	5627 (125)
おから	1727 (63)	4211 (190)
みかんの皮	3281 (104)	5368 (416)
汚泥	662 (16)	2143 (87)

(%) は二次廃棄物からの回収熱量がもとの廃棄物からの回収熱量に占める割合

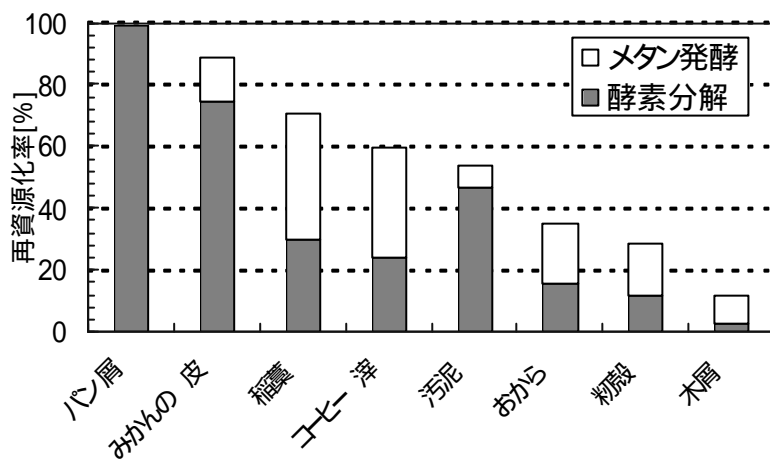


図5 酵素分解とメタン発酵の組み合わせによる再資源化率
 灰色部分は酵素分解によって減少した割合、
 白色部分はメタン発酵によって減少した割合

4.まとめ

本研究では、廃棄物の成分組成から各再資源化によって得られる生産物量を推定するための指標の作成を目的とした。再資源化方法としては、有機性固形廃棄物の一般的な再資源化方法の中から固形燃料化による熱量の回収、メタン発酵によるメタンガスの回収、酵素分解によるグルコースをはじめとする発酵原料の回収といった3つの方法について検討した。また、組み合わせによる再資源化についても検討した。

各有機性固形廃棄物の成分分析を行い、固形燃料としての熱量の回収は廃棄物中の有機物含有率から推定できる事が分かった。また、メタン発酵によるメタンガスの生成量はリグニンとヘミセルロースを除く有機物含有率から推定できる事が分かった。

共に熱量回収の方法である固形燃料化とメタン発酵の優劣は、廃棄物の水分含量によって判断できる事が分かり、水分含量の高い廃棄物ではメタン発酵が有利であり、低い有機物では固形燃料化による熱量の回収が有利であることが明らかとなった。

セルラーゼを用いた酵素分解では、廃棄物中のセルロース量から予測されるグルコース

量は得られなかった。しかし、糖類の含有率が高いパン屑ではほぼ100%がグルコースになった。また、みかんの皮と汚泥では高いグルコース生成量は得られなかったものの廃棄物のそれぞれ75、47%が可溶化し、可溶化成分の発酵原料としての利用の可能性が示唆された。

酵素分解によって生成する二次廃棄物をさらに固形燃料化、メタン発酵によって再資源化したところ、廃棄物によってはもともとの廃棄物よりも単位重量あたり高い熱量の回収が可能であった。また、廃棄物の低減といった意味でも再資源化の組み合わせは有効であった。

参考文献

- 1) 鈴木基之 (1999) ゼロエミッションが求める工業社会. 化学工学, 63(2), 69-72.
- 2) 筒井誠二 (1999) 下水汚泥資源化の現状と課題について. 下水道協会誌, 36(3), 4-8
- 3) 高橋康夫 (1999) 廃棄物処理に係るダイオキシン対策について. 水環境学会誌, 22(9), 8-9
- 4) 北大資料 (1995) 都市ごみ固形燃料生産の研究, 7-8
- 5) 大林茂昭 (1998) ごみ固形燃料化 (RDF) と発電への利用: 火力原子力発電, 49 (1), 38-47
- 6) 加藤明德 (1999) 各種農畜産廃棄物の嫌気性消化処理におけるメタンガス発生量: 廃棄物学会論文誌, 10(1), 1-8
- 7) 米山豊 (1999) し尿汚泥および厨芥のメタン発酵処理: 第10回廃棄物学会研究発表講演論文集, 301-302
- 8) 日本薬学会編 (1990) 衛生試験法・注解, 255-261
- 9) American National Standard (1974) American National Standard Institute
- 10) 本多淳裕他 (1980) 廃棄物のメタン発酵, 6-7
- 11) 荒木信夫・原田秀樹・桃井清至 (1993) 嫌気性流動床による浮遊性有機固形物の捕捉と分解. 水環境学会誌, 16(8), 585-592
- 12) TERRY L. MILLER AND M. J. WOLIN (1974) A Serum Bottle Modification of Hungate Technique for Cultivating Obligate Anaerobes. APPLIED MICROBIOLOGY, MAY, 985-987
- 13) Enzymic Hydrolysis of Rice Straw by Crude Cellulase from *Trichoderma* (1998) *Bioresource Technology*, 66, 267-269
- 14) 矢田美恵子・川口弘博子・佐々木健著 (1996) 廃棄物のバイオコンバージョン, 地人書館
- 15) 日本生物工学会編 (1992) 生物工学実験書, 培風館
- 16) BENU SETHI, SAROJ MISHA, VIRENDRA S. BISARIDA (1998) Adsorption Characteristics of *Trichoderma reesi*. *J of Fermentation and Bioengineering*, 86(2), 233-235
- 17) 日本薬学会編 (1990) 衛生試験法・注解, 343pp.
- 18) 日本化学会編: 化学便覧応用編 1286, 丸善
- 19) Richard M. Dinsdale et al (1996) The mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of coffee waste containing coffee grounds. *Water Reserch*, 30(2), 371-377
- 20) 越島哲夫 (編) (1991) セルロース資源, 学会出版センター

Evaluation of Recycling System for Organic Solid Wastes

Based on the Component Analysis

Atsushi YASUI, Jun KUNITSUGU, Wataru NISHIJIMA, Mitsumasa OKADA

Hiroshima University

1-3-2, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Japan, 739-8511

Abstract

The most effective component was studied in order to predict the potential of recovery resource from organic solid waste. Eight organic solid wastes were tested by three recycle methods. Three methods were the direct use as solid fuel, the methane recovery after fermentation, and the glucose recovery by enzymatic treatment, and the combination of methods was also tested. The recovery quantity of heat as solid fuel and methane can be estimated by the percentage of organic material in the waste. The glucose recovery was not high in case of enzymatic treatment and good indicator was not found for prediction of the reuse potential. However, enzymatic treatment can be used as pre-treatment for other two recycle methods. Furthermore the combination of recycle methods improved the acquired resource and reduced the waste.

Key words: Zero emission, organic solid waste, component, solid fuel, methane fermentation