

# 大学内の有機性廃棄物を活用した循環システム構築に関する研究\*

樋口 壯太郎\*

坂本 晋太郎\*\*

## Study on the circulation systems construction that utilized organic waste in a university

Sotaro HIGUCHI\* and Shintaro SAKAMOTO\*\*

Fukuoka University has 24,000 people, there are various facilities. As a result, there are exhausting the various types of waste. A discharge of waste of one year of Fukuoka University is 374.9t. Waste holds 78.5% (294.4t) in that, and recycled waste holds 21.5% (80.6t). Therefore, a ratio of waste is high. Organic waste (kitchen waste, a cut branch, paper waste) is not recycled besides one part. Therefore I used dry methane fermentation and examined recycling of organic waste. As a result, I understood that the raw materials which put garbage and paper garbage together were suitable for dry methane fermentation.

I assumed that I used energy (electricity, thermal energy) generated by dry methane fermentation at a university. I performed economy evaluation of that case. As a result, only organic wastes that are discharged from the university, found that economic efficiency is low. Therefore, in order to increase energy production and economic effects, it is necessary to increase the size of the project.

*KeyWords* : recycling of organic waste , dry methane fermentation

### 1. はじめに

持続可能な社会形成の実現に向け日本各地で様々な取り組みがなされている。代表的な取り組みとして、地域で排出されたバイオマス等の資源化を行い、地域内で循環利用を行うバイオマスタウン構想がある。この取り組みにより、各地で処理、処分されている廃棄物の資源化を行い、地域内で循環利用することで、廃棄物の有効活用並びに減容・減量化を目指している。前述した取り組みは各自治体で積極的に進められ、現在では企業や学校、工場等の小規模コミュニティを対象とした取り組みにも期待が高まっている。このような中、ワンキャンパス内に約2万4千人の学生・教職員をはじめ、多くの施設を有する福岡大学からも様々な種類の廃棄物が排出され

ている。福岡大学から1年間排出されている廃棄物は374.9tである。そのうち、廃棄物が78.5%で294.4t、資源化物が21.5%で80.6tであり、資源化されずに廃棄物として処理・処分されているものが多くの割合を占める<sup>1)</sup>。その中でも、大学内の食堂から排出される厨芥類(以下、学食系生ごみと略称)、剪定枝、紙ごみ等の有機性廃棄物は一部を除き資源化が進んでいない実態がある。

そこで、大学内の有機性廃棄物の資源化及び資源化物を学内で活用した場合の効果について実証実験、経済性評価により検討を行ったので報告する。

### 2. 研究目的及び概要

#### 2.1 研究目的

本研究は、大学から排出される廃棄物の中でも、一部を除き資源化が進んでいない学食系生ごみ、剪定枝、紙ごみ等の有機性廃棄物の資源化を行い、それらの資源化

\*平成24年5月31日受付

\*\*資源循環・環境グループ

物を学内でエネルギー（電力，熱エネルギー等）利用した場合の経済性について検討することを目的とする。

## 2. 2 研究概要

学内から排出されている廃棄物の排出状況について把握するために各排出元に対してアンケート及びヒアリング調査を行った。次に各有機性廃棄物の資源化の方法として，学食系生ごみ，紙ごみは乾式メタン発酵によるエネルギー回収（電力，熱エネルギー）を，剪定枝は炭化による資源化（土壌改良剤）を想定した。また，発酵残渣は好気性発酵による堆肥化を想定した。このうち乾式メタン発酵については実証実験により検証した。これらを基に，学内で資源化物を活用した場合の効果について，複数のケースを想定した経済性評価（ケーススタディー）を行った。

## 3. 乾式メタン発酵を用いた学内の有機性廃棄物の資源化の検討

### 3. 1 検討方法

乾式メタン発酵実験は，学内の有機性廃棄物の中から乾式メタン発酵に適した原料（以下，基質と略称）を選定するため2回実施した。1回目は，種類の異なる混合物（基質）を用いバイオガス発生量の比較を行い，2回目は，1回目の実験で最もバイオガスの発生量が多かった混合物に着目し，混合割合を変えた複数の試料を用いバイオガス発生量の比較を行った。

### 3. 2 基質選定実験

#### 3. 2. 1 実験概要及び目的

本実験は乾式メタン発酵に適した基質を選定するため，各基質からどの程度のバイオガス生成が見込めるのかを把握するために実施した。表-1に示すとおり，学食系生ごみ，剪定枝，紙ごみ（シュレッダー紙），鶏糞（参考値を得るため使用）の4つを混合させた試料を用いた。

#### 3. 2. 2 実験条件

乾式メタン発酵の実証機は，ドイツのビオフェルム社製の横型（BioFerm方式）の乾式メタン発酵実証機を用いた。発酵槽内の温度は37～42℃に保ち中温発酵とした。実証機の発酵槽は5槽あり，1槽あたりの容量（有効容量）は150Lである。（図-1参照）実施期間は29日間であり，基質は1度に全て投入し発酵槽を密閉

表1 基質の内訳

発酵槽	基質重量 (kg-wt)	重量比 (%-wt)				TS (%)	C/N	pH
		学食系生ごみ (%-wt)	剪定枝 (%-wt)	紙ごみ (%-wt)	鶏糞 (%-wt)			
F1	44.7	40	60	—	—	45.0	40.1	5.1
F2	57.4	60	40	—	—	42.6	18.8	4.1
F3	15.2	40	—	60	—	72.2	44.1	7.8
F4	19.9	60	—	40	—	60.7	73.1	7.7
F5	39.5	—	40	—	60	55.4	10.9	8.9

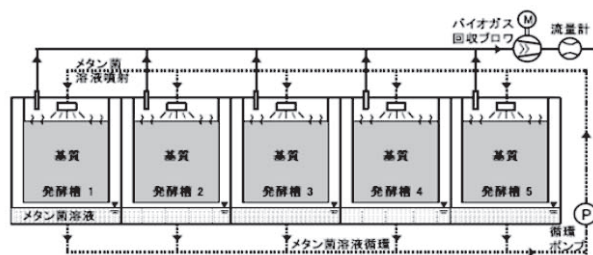


図1 乾式メタン発酵実験槽概要

し嫌気条件とし槽内は攪拌せず静置状態とした。また，各発酵槽内には発酵促進の役割を果たすメタン菌溶液が循環する仕組みとなっている。バイオガス生成量及びメタン濃度，炭酸ガス濃度等の測定を行った。ガスの成分分析には非分散型IR計（CH<sub>4</sub>，CO<sub>2</sub>），磁気力式（O<sub>2</sub>）及び定電位電解式（H<sub>2</sub>S）を用いた。

#### 3. 2. 3 実験結果

表-2に示すとおり，バイオガス発生量が多かった基質はF3，F4の学食系生ごみ，紙ごみの混合物であった。次に各基質の最高メタン濃度をみると55.8～60.4%であった。一般的にバイオガス中のメタン濃度は60%（±10%）といわれているが本試験でもほぼ同レベルの値を示した。<sup>2)</sup>

#### 3. 2. 4 考察

##### 3. 2. 4. 1 実験開始前のpH及びC/N比

表-1に実験開始前の各基質のpHを示す。F1，F2は酸性を，F3，F4は弱アルカリ性を，F5は明らかなアルカリ性を示した。一般的にはメタン生成の段階で大きな役割を果たすメタン生成菌の最適なpHの範囲は6.6～7.6と言われているが，結果より，最適なpHの範囲に近い値を示したのはF3（pH:7.8），F4（pH:7.7）であった。<sup>3)</sup>したがって，予め基質のpHを中性値付近に調整しておくことで大きな効果が得られることが考えられる。次に，表-1に実験開始前の各基質のC/Nを示す。F1，F3，F4は40.1～73.1を，F2は18.8を，F5は10.9を示した。一般的にメタン発酵の投入物の生物分解性炭素（C）の量が生物分解性窒素（N）に比べ少な

表2 バイオガス発生量及びメタン濃度

発酵槽	バイオガス発生量 (L/kg-wt)	最高メタン濃度 (%)
F1	133.1	60.4
F2	135.1	59.6
F3	333.4	56.8
F4	472.1	57.3
F5	92.9	55.8

すぎると、バイオガス発生の阻害要因となる。また、基質の C/N が 25 ~ 60 (もしくは 20 ~ 250) の場合多くのバイオガスの生成が見込まれるといわれている。<sup>4)</sup> 結果より、多くのバイオガスを発生させた F4 の 73.1, F3 の 44.1 は生物分解性炭素の相対的比率が高く、バイオガスの発生量が最も少なかった F5 は 10.9 と生分解性炭素の相対的比率が低かった。したがって、C/N が 25 ~ 60 もしくは 20 ~ 250 を示す基質が乾式メタン発酵に適していることが考えられる。

**3. 2. 4. 2 乾式メタン発酵に適した基質**

バイオガスを多く発生させた基質は、学食系生ごみと紙ごみを混合した F3, F4 であり、pH 及び C/N も適正な値を示した。したがって、乾式メタン発酵に適した学内の有機性廃棄物は、学食系生ごみと紙ごみを混合した基質であると考えられる。

**3. 3 本実験**

**3. 3. 1 実験概要及び目的**

基質選定実験結果を基に、学食系生ごみ、紙ごみの混合比率を変えた場合のバイオガス発生を把握するため表-3 に示す 5 つの基質を用い実験を行った。実験条件は 1 回目と同様である。

**3. 3. 2 実験結果**

表-4 に示すようにバイオガス発生量は F3, F1, F2 の順に多くなる結果を示したが、これは前述の基質選定実験結果から予測されるであろう数値とは大きく異なる結果となった。この原因として、バイオガス発生量が想定外の著しく高い値を示したことから、ガス量計測器の不具合が考えられる。従って、本実験結果では前回の実

表 3 基質の内訳

発酵槽	基質重量 (kg-wt)	重量比 (%-wt)		TS (%)	C/N	pH
		生ごみ	紙ごみ			
F1	15.3	60	40	45.5	37.7	7.4
F2	9.1	40	60	54.5	57.8	7.6
F3	7.6	30	70	59.0	72.8	7.8
F4	21.4	70	30	41.0	30.6	7.3
F5	71.5	95	5	29.7	17.9	4.8

表 4 バイオガス発生量及びメタン濃度

発酵槽	バイオガス発生量 (L/kg-wt)	最高メタン濃度 (%)
F1	645.1	63.0
F2	582.2	61.8
F3	968.4	58.6
F4	(191.5)	(53.4)
F5	166.1	60.7

※F4 は試験機の不具合により発酵不良を起こした

表 5 基質の内訳

発酵槽	基質重量 (g-wt)	重量比 (%-wt)		TS (%)	C/N	pH
		生ごみ	紙ごみ			
F1	4	60	40	54.6	37.7	7.4
F2	4	40	60	68.2	57.8	7.6
F3	4	30	70	75.0	72.8	7.8
F4	4	70	30	47.8	30.6	7.3

験結果との比較ができない。そこで、次に示す補足の実験を行った。

**3. 4 補足実験 (本実験)**

**3. 4. 1 実験概要及び目的**

各基質の正確なバイオガス生成量を把握するため、表-5 に示す 4 つの基質を用い実験を行った。補足実験では、本実験とは異なり、250mL のメスシリンダーを模擬発酵槽とした。また、実証機の条件に近づけるためメタン菌溶液の投入量を一律 150mL とし、基質の投入量を一律 4g-wt とした。実施期間は 29 日間(実質 25 日間)とし、実験中は 40°C に保温し基質は 1 度に全てを投入し、発酵槽を密閉して(嫌気条件)槽内は攪拌せず静置状態とした。

**3. 4. 2 実験結果**

表-6 にバイオガス発生量の結果を示す。結果より、紙ごみの混合割合が高い順にバイオガス発生量が多い結果となった。また、乾式メタン発酵の研究に取り組む企業へのヒアリング結果を基に、各基質のバイオガス発生量の予測を行った。結果より、どの基質も予測値に近い値を示した。

**3. 4. 3 考察**

結果より、バイオガス発生量が最も多かった基質は紙ごみを最も多く含む F3 (学食系生ごみ 30%, 紙ごみ 70%) であることが確認された。本研究では乾式メタン発酵だけではなく、発酵残渣の堆肥化も想定している。本学より排出される廃棄物の実態は学食系生ごみと紙ごみの割合はおおよそ 1 : 1 であること、更に、紙ごみは有価物であることからして、バイオガス発生量は若干低下するものの、紙ごみの割合を下げ、堆肥として有効な成分を含む学食系生ごみの混合割合を高めた方が好まし

表 6 バイオガス発生量の予測値と実績値

発酵槽	予測 バイオガス発生量 (NmL/g-wt)	実績 バイオガス発生量 (NmL/g-wt)
F1	210	229
F2	240	249
F3	255	300
F4	195	191

い。その割合は、学食系ごみ 60%、紙ごみ 40%程度の混合割合が望ましいと考えられる。

4. 経済性評価

4. 1 背景及び目的

乾式メタン発酵実験の結果より、乾式メタン発酵に適した基質は学食系生ごみ、紙ごみの混合物であることが確認された。そこで、乾式メタン発酵を用いた学食系生ごみ、紙ごみよりバイオガスを回収し電力及び熱エネルギーとして学内で活用する場合の経済性評価を行った。

4. 2 概要

経済性評価を行うにあたり、事業の運営主体を福岡大学と仮定し、学内でエネルギー回収事業の実施することを想定した。図-2に学内で乾式メタン発酵を用いたエネルギー回収事業を行う場合の想定システムを示す。本事業におけるバイオガスのエネルギー利用方法として、コジェネレーションによる電力利用と熱エネルギー（都市ガス）利用の併用を想定した。エネルギー効率として、発電効率を25%（うち80%を施設内消費）、熱回収率を50%（うち50%を施設内消費）と仮定し、本システムにより生成されたエネルギーは全て学内利用（消費）することを想定した。また、乾式メタン発酵を用いるため、原則として排水の排出はないものと仮定し、発酵残渣は廃棄物として処理委託するケースと堆肥化するケースの2通りを想定した。さらに、表-7に示すとおり、条件の異なる4つの事業ケースを想定し経済性評価を行った。

4. 3 結果

4. 3. 1 投資回収率

各ケースのキャッシュフローの結果を基に、投資回収率の比較を行った。図-3に各ケースの感度分析（投資

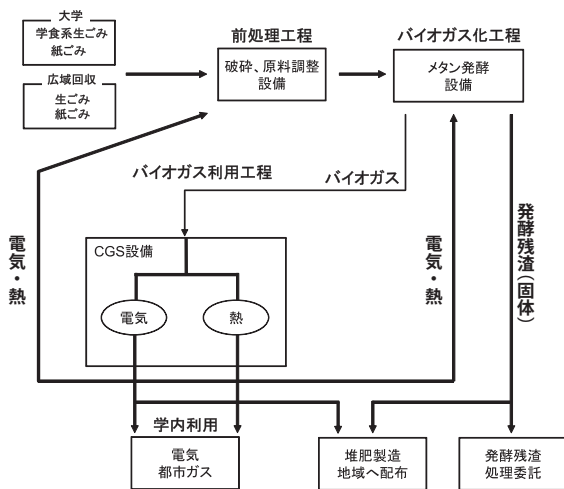


図2 事業の想定システム

表7 想定した4つの事業ケースの条件

	原料（生ごみ、紙ごみ）の調達先	施設規模	交付金（補助金）	堆肥化	事業年数
ケース①	学内	0.5t/日	なし	なし	15年
ケース②	学内+広域回収（生ごみのみ）	0.5t/日	なし	なし	15年
ケース③	学内+広域回収	10t/日	あり（1/3）	あり	15年
ケース④	学内+広域回収	15t/日	あり（1/3）	あり	15年

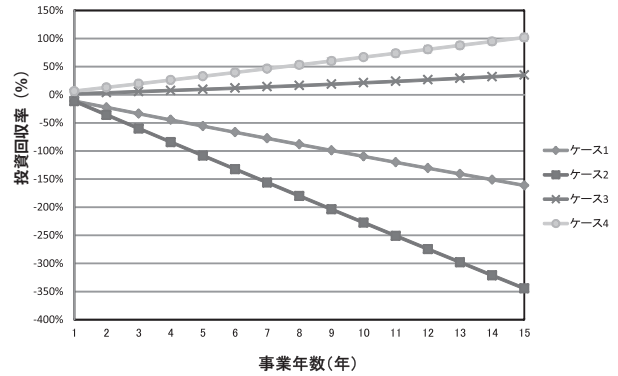


図3 感度分析結果

回収率の比較)の結果を示す。ケース①が-161%、ケース②が-344%であり、ともに15年での投資回収が困難な結果を示した。ケース③は35%であり、15年での投資回収は困難な結果となったが、回収率は右上がりになり上昇する傾向を示した。ケース④は、15年目に回収率が102%を達成し、15年での投資回収が可能であることを示した。

4. 3. 2 各ケースのエネルギー節約費及び供給量の比較

図-4、5に各ケースで生成されたエネルギーが1年間の学内の電力及び都市ガスの使用料金、使用量に占める割合を表したものを示す。

電力の使用料金及び使用量に占める割合の結果より、全ケース0.02~1.0%の範囲にあり、学内の電力使用料金及び使用量に占める割合は非常に少ないことが確認された。また、この結果を一般家庭の電力使用量に置き換えた場合を想定した。一般家庭の1年間の平均電力使用量は、3403.2kWh/年である<sup>1)</sup>。したがって、ケー

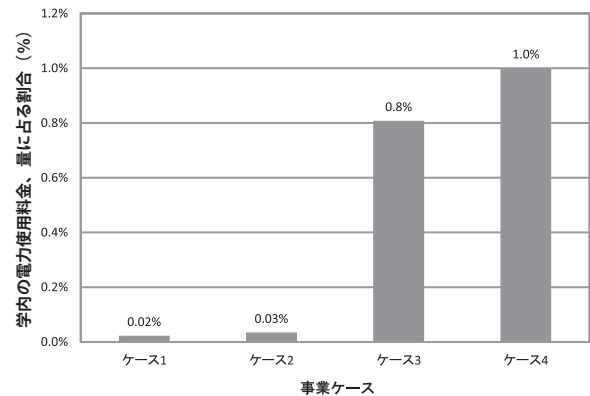


図4 学内の1年間の電力使用料金及び使用量に占める割合

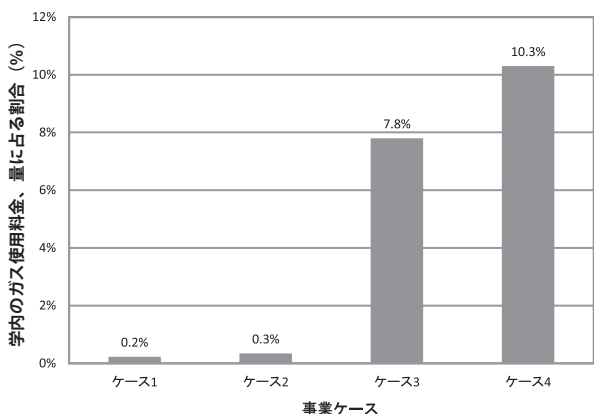


図5 学内の1年間の都市ガス使用料金及び使用量に占める割合

ス①は1.3世帯分、ケース②は2.0世帯分、ケース③は46.8世帯分、ケース④は61.8世帯分の使用量と同等であり小規模であることがいえる。

都市ガスの使用料金及び使用量に占める割合の結果より、全ケース0.2～10.3%の範囲にあり、事業規模の小さいケース①、②は電力と同様、学内の都市ガスの使用料金及び使用量に占める割合は非常に少ないことが確認された。一方、ケース③、④は、学内の使用料金及び使用量の約1割程度を占めており、他のケースと比較すると一定の効果が高いことが確認された。また、一般家庭の1年間の平均都市ガス使用量は、304m<sup>3</sup>/年である<sup>11)</sup>。したがって、ケース①は6.6世帯分、ケース②は9.8世帯分、ケース③は229.5世帯分、ケース④は303.0世帯分の使用量と同等であり、小規模であることがいえる。

#### 4. 3. 3 学内の有機性廃棄物のみを対象とした事業を成立させるための条件

想定した4ケースでは、学内の有機性廃棄物を主な原料としたケース①、ケース②では投資回収が難しい結果となった。したがって、事業として成立させるためには、ケース③、ケース④のように事業規模の拡大が必要であることが示唆された。そこで、ケース①のように学内の有機性廃棄物のみを対象とした事業を成立させる条件を調べるため、ケース①の諸条件を変更し再度感度解析を行った。

表-8に示すとおり、投資回収を達成するために変更した条件は、堆肥化の販売、初期費用の削減、人件費及び一般管理費の削減である。これらの条件を変更することで、変更前の投資回収率は-161%であったが、変更後は115%を達成し小規模でも投資回収が可能である結果が得られた。したがって、諸条件を変更することで学

表8 ケース①の各条件の変更前と変更後の比較

	堆肥化	初期費用	人件費	一般管理費
変更前	なし	250百万円/t	あり	あり
変更後	あり (10円/kgで販売)	50百万円/t	なし	なし

内の有機性廃棄物のみを対象とした小規模事業でも投資回収が可能であることが示唆された。

#### 4. 3. 4 考察

経済性評価の結果より、学内の廃棄物のみを対象とした事業は規模が小さく投資回収が困難であることが考えられる。また、想定した4ケースでは十分なエネルギーを学内へ供給できない結果となった。したがって、十分なエネルギーを確保するためには、事業規模の拡大が必要であることが考えられる。そこで、事業の実施条件をケース④と同じにし、施設規模50t/日の場合のエネルギー回収量について試算した。試算の結果、学内の1年間の電力使用量の4.1%、都市ガス使用量の40.6%を回収することが確認された。したがって、事業規模を拡大し回収できるエネルギー量を増加させることが必要だと考えられる。

#### 4. 3. 5 提案

想定した4ケースを基にした経済性評価では、学内の廃棄物のみを対象とした事業の実施は諸条件を変更することで事業として成立する結果が得られたが、変更しない場合は事業規模の拡大(原料の広域回収)が必要であることがわかった。また、事業規模を拡大するにあたり、多量の原料の確保、処理・収集運搬のコスト増大等の問題が懸念されるため、大学だけの事業運営には限界があることが考えられる。したがって、外部機関(企業、民間団体等)との共同運営が必要であることが考えられる。そこで、既存の生ごみ、紙ごみの収集運搬及び中間処理業者、学内の食堂事業者、福岡大学の4者でSPC(特別目的会社)を形成し事業運営を実施することを提案する。

図-6に構想した事業の概念図を示す。事業系の生ごみ、紙ごみの収集運搬、中間処理に取り組む企業は、原料確保するためのネットワークを保有し、中間処理業にも取り組んでいるケースがあることから、原料確保が可

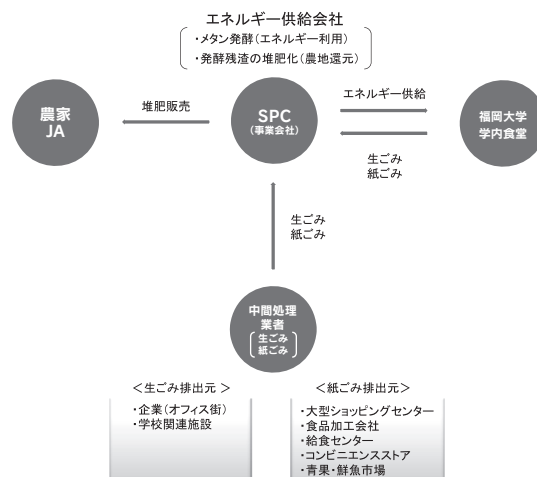


図6 構想事業の概念図

能なこと及び中間処理のノウハウを保有することが想定される。また、これらの企業に対して別途行われたヒアリング調査により、大学と連携し原料の確保及び資源化による事業への興味があることが確認された。したがって、既存の生ごみ、紙ごみの収集運搬、中間処理業に取り組む企業が原料（生ごみ、紙ごみ）の確保及び収集運搬に取り組むと仮定し、原料の中間処理（資源化）を4者のノウハウを結集し、施設の運営は福岡大学と食堂事業者が中心となり実施する。食堂事業者の中には既存の廃棄物処理システムを構築しているところもあるため原料の確保に繋がることが考えられる。企業や大学は生ごみや紙ごみ等の中間処理（資源化）に取り組むことで企業や大学の社会的責任等の達成に繋がることが考えられる。

## 5. 総括（研究成果）

経済性評価の結果より、大学から排出される有機性廃棄物のみを対象とした事業の実施は難しい結果となったが、諸条件を変更することによって投資回収が可能であることがわかった。また、原料の広域回収により事業規模を拡大や交付金等により投資回収が可能であることがわかった。しかし、学内でのエネルギー利用を考えた場合、想定した4ケースでは効果が低い結果となった。したがって、エネルギーの供給量を増やし効果の増大を図るためには、提案でも記したように広域回収による事業規模の拡大が必要であることが考えられる。

### (1) 乾式メタン発酵を用いた大学内の有機性廃棄物の資源化検討

学内の有機性廃棄物の資源化について乾式メタン発酵を用い検討した。その結果、学食系生ごみと紙ごみを組み合わせた混合物より多くのバイオガス生成が見込まれることが確認された。

### (2) 経済性評価

(1)で得られた結果を基に、学内より排出される学食系生ごみ、紙ごみを用いたエネルギー回収事業について4ケースを想定し経済性評価を行った。その結果、学内の廃棄物のみを対象とした事業運営は難しく、広域回収による事業規模の拡大や交付金等による補助により投資回収が可能であり、エネルギー回収率も増加することがわかった。以下に、今後事業として成立させるための検討条件について列記する。

#### ① 大学単独ではなく、広域回収を含めた地域での循環システムの事業の検討

学内の有機性廃棄物のみを対象としたエネルギー回収事業の実施は難しいことが確認された。したがって、学内の有機性廃棄物だけでなく周辺地域から広域回収し、事業規模を拡大させることが事業採算性及びエネルギー

回収率の向上のためには重要だと考えられる。

#### ② 事業規模拡大に伴う原料（生ごみ、紙ごみ）の確保

事業規模を拡大するためには広域回収による原料の確保が必要となる。したがって、事業規模拡大に伴い、多量の原料の排出元及び発生量を抑えておく必要がある。広域回収の対象範囲によっては処理費（収集運搬費を含めた）が増大し事業に支障を来す恐れがある。したがって、多くの廃棄物（原料）を発生する排出元から回収し、収集運搬の効率を高め処理費（収集運搬を含めた）の削減が必要だと考える。

## 6. 今後の展望

本研究では、乾式メタン発酵によるエネルギー利用について電力、熱エネルギー（都市ガス）について検討した。したがって、その他のエネルギー利用について検討し、最も効果の高いエネルギー利用について検討する必要がある。また、本研究の全体像として生ごみ、紙ごみの他に剪定枝、発酵残渣の資源化も計画している。したがって、今後は剪定枝、発酵残渣の資源化の検討を行い、大学内の全ての有機性廃棄物を活用した循環システムの構築について検討することが課題として残っている。

## 参 考 文 献

- 1) 福岡大学環境保全センターヒアリング資料
- 2) 財団法人バイオマス技術ハンドブック、オーム社、pp.278
- 3) 野池達也監修、メタン発酵、技報堂、pp.122
- 4) 有機性廃棄物の乾式メタン発酵方法（特許第4543504号）、栗田工業株式会社

## 参 考 資 料

- i) 日本電気事業連合会：<http://www.fepc.or.jp/present/jigyou/japan/index.html>
- ii) 日本の標準消費量（電気・ガス・灯油）<http://www.hinodeya-ecolife.com/ecowiki/16.html>