

都市由来のバイオマス廃棄物のエネルギー変換における技術や事業収支要因の不確実性が環境負荷や事業性に及ぼす影響の分析

矢野 貴之¹・吉田 登²・曾田 真也³・金子 泰純⁴・山本 祐吾⁵

¹正会員 修 (工) 株式会社タクマ エネルギー技術第二部 (〒660-0806 尼崎市金楽寺町2-2-3)

E-mail: t-yano@takuma.co.jp

²正会員 博 (工) 和歌山大学准教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

E-mail: yoshida@sys.wakayama-u.ac.jp

³非会員 大建工業株式会社 (〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20)

E-mail: s084034@sys.wakayama-u.ac.jp

⁴正会員 博 (工) 和歌山大学准教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

E-mail: kaneko@sys.wakayama-u.ac.jp

⁵正会員 博 (工) 大阪大学助教 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail: yugo@see.eng.osaka-u.ac.jp

バイオマス廃棄物のエネルギー変換に関する評価は一定の技術効率を仮定して実施されることが殆どであるが、開発途上技術の場合、将来の技術革新の不確実性が評価に影響を及ぼすことが考えられる。本研究では、都市由来のバイオマス廃棄物を対象とするエネルギー変換技術に注目し、まずエネルギー変換、前処理、利用に関する技術効率の不確実性が二酸化炭素削減量に及ぼす影響についてモンテカルロ・シミュレーションを用いて分析し、次に事業収支要因の不確実性が内部収益率に及ぼす影響について感度分析を行った。分析の結果、下水汚泥では前処理技術での有機分分解率の不確実性が二酸化炭素削減量の変動に大きく寄与すること、また食品廃棄物の湿式メタン発酵では建設費、処理費の不確実性が内部収益率に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

Key Words : uncertainty, biomass, conversion, feasibility, Monte Carlo simulation

1. はじめに

再生可能な有機性資源であるバイオマスは、二酸化炭素の発生量を増加させない新たなエネルギー源として注目されている。今後、再生利用技術の進展などにより、可能性はさらに拡大することが期待されている。しかし、バイオマスのエネルギー利活用の事業化にあたっては、不安定な収分量や低い事業採算性などの課題がある。また、バイオマスのエネルギー変換に関する転換・利用技術の中には、水熱反応や燃料電池などのように高い変換効率期待されるもののまだ開発途上の段階にあり、技術面やコスト面で不確実な部分が多いものもある。

本研究では、バイオマスのエネルギー変換技術に注目し、技術ロードマップ等でエネルギー変換技術に設定されている技術効率の不確実性が期待しうる二酸化炭素削減量にどのような影響を及ぼすかを分析する。さらに、エネルギー変換技術の施設を導入する場合、事業収支を

規定する要因の不確実性が事業性に及ぼす影響について分析することを目的とする。

2. バイオマスのエネルギー変換における不確実性の分析

(1) エネルギー変換の要素技術の体系と本研究での対象技術

バイオマス資源は多種多様なものが存在し、その性状(発熱量、比重、含水率等)、発生形態、発生規模等が異なる。バイオマス資源の利用はエネルギー利用とマテリアル利用に分類され、変換技術も様々なものが実用化・研究開発されている。エネルギー変換技術は燃焼(直接燃焼、混焼、固形燃料化)の他に熱化学的変換(ガス化、液化、炭化、エステル化)と生物化学的変換(メタン発酵、エタノール発酵等)が存在する。¹⁾

これらのエネルギー変換技術は各種バイオマス資源が

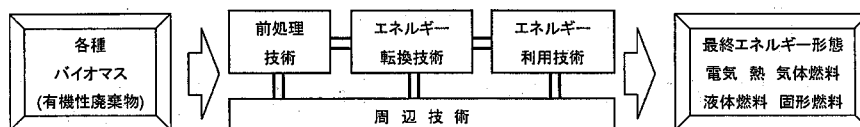


図-1 エネルギー変換技術の要素技術の体系²⁾

表-1 対象とするエネルギー変換技術の要素技術の分類²⁾

	前処理技術	エネルギー転換技術	エネルギー利用技術	周辺技術
① i 下水汚泥のメタン発酵 前処理水熱可溶化 ① ii 下水汚泥のメタン発酵 前処理アルカリ処理	・水熱可溶化 ・アルカリ処理 ・最初沈殿池の構造最適化	・メタン発酵(中温) ・メタン発酵(高温)	・ガスエンジン発電 ・マイクロガスタービン発電 ・燃料電池発電 ・都市ガス混入	・乾式脱硫 ・湿式脱硫 ・活性炭吸着 ・消化液からのリン回収 ・消化残渣の固形燃料化
②下水汚泥のガス化	・廃熱・熱風乾燥	・常圧噴流床ガス化炉 ・内部循環流動層ガス化炉	・ガスエンジン発電 ・マイクロガスタービン発電 ・燃料電池発電	・バグフィルタ ・スクラバ ・乾式精製 ・触媒フィルタ
③食品廃棄物の湿式メタン発酵 ④食品廃棄物の乾式メタン発酵	・発酵不適物除去 ・破砕(スラリー化) ・超音波可溶化	・メタン発酵(中温) ・メタン発酵(高温) ・メタン発酵(中温・高温)+膜分離 ・固定化 ・小型ユニット化	・ガスエンジン発電 ・マイクロガスタービン発電 ・燃料電池発電	・乾式脱硫 ・湿式脱硫 ・残渣脱水 ・残渣コンポスト化 ・消化液の液肥利用 ・消化液からのリン回収 ・消化残渣の固形燃料化 ・余剰水処理
⑤木質バイオマスのバイオガス化	・破砕 ・廃熱・熱風乾燥	・固定床ガス化炉 ・気泡流動層ガス化炉 ・常圧噴流床ガス化炉 ・キルン熱分解ガス化炉	・蒸気タービン発電 ・ガスエンジン発電 ・マイクロガスタービン発電 ・燃料電池発電 ・蒸気供給	・バグフィルタ ・スクラバ ・乾式精製 ・触媒フィルタ

らエネルギー変換技術を介して最終エネルギー形態を得る際に関連する技術群、即ちバイオマス種に適合した、「前処理技術」、「エネルギー転換技術」、「エネルギー利用技術」、「周辺技術」に体系化して位置づけることができる²⁾(図-1参照)。これに対応して、本研究では主原料が都市部で発生する有機性廃棄物(下水汚泥、食品廃棄物、剪定枝等の木質バイオマス)に対して、バイオマス技術戦略調査委員会²⁾が将来的に期待する以下の技術システムを対象とした。

① i 下水汚泥のメタン発酵で前処理水熱可溶化

① ii 下水汚泥のメタン発酵で前処理熱アルカリ処理

②下水汚泥のガス化

③食品廃棄物の湿式メタン発酵

④食品廃棄物の乾式メタン発酵

⑤木質バイオマスのバイオガス化

表-1はこれらのエネルギー変換技術システムに含まれる各要素技術を、「前処理技術」、「エネルギー転換技術」、「エネルギー利用技術」、「周辺技術」ごとに分類したものを示している。各要素技術は基礎研究段階のものから実用化されている技術まで幅広い。また、各要素技術の将来的な技術革新により回収できるエネルギー量の増加が期待されるものもある。

(2) エネルギー変換効率に影響する要因

これらの要素技術には、エネルギー変換効率に影響する不確実な変動要因が存在する。不確実な変動要因の主

表-2 エネルギー変換効率に影響する変動要因の目標値²⁾

主原料	エネルギー変換技術	エネルギー変換に影響する変動要因	現在～2010年	2010年～2020年	2020年以降
下水汚泥	① i メタン発酵 水熱可溶化	有機分分解率	50%	55%	60～65%
		発電効率	35%	37%	40%(GE), 45%(FC)
	① ii メタン発酵 アルカリ処理	有機分分解率	50%	60%	60～65%
		発電効率	35%	37%	40%(GE), 45%(FC)
	②ガス化	冷ガス効率	65%	70%	75%
		発電効率	35%	37%	40%(GE), 45%(FC)
食品廃棄物	③湿式メタン発酵	有機分分解率	75%	80%	90%
		発電効率	35%	37%	40%(GE), 45%(FC)
	④乾式メタン発酵	有機分分解率	70～75%	75～80%	80～85%
		発電効率	35%	37%	40%(GE), 45%(FC)
木質バイオマス	⑤バイオガス化	冷ガス効率	65%	70%	75%
		発電効率	35%	37%	40%(GE), 45%(FC)

GE:ガスエンジン FC:燃料電池

表-3 発電+熱利用システムの特徴³⁾

ガス利用設備	特徴	発電・総合効率	余熱利用
ガスエンジン式 コージェネレーションシステム	・4サイクルガスエンジンは様々な用途に用いられた実績が多く、信頼性・安全性に優れている。	・発電効率: 25～35% ・総合効率: 75～85%	・「温水」 ・「温水+蒸気」
燃料電池式 コージェネレーションシステム	・燃焼ではなく、電気化学反応により発電を行う。 ・化学反応により、部分負荷運転でも、高い発電効率を期待できる。	・発電効率: 40～50% ・総合効率: 80%以上	・「温水」 ・「温水+蒸気」
ガスタービン式 コージェネレーションシステム	・バイオガスを燃焼、そこで発生する高温排ガスによりタービンを回転させ発電を行う。	・発電効率: 20～30% ・総合効率: 70～80%	・「蒸気」
マイクロガスタービン式 コージェネレーションシステム	・バイオガスを燃焼、そこで発生する高温排ガスによりタービンを回転させ発電を行う。 ・原動機の機器冷却水設備や潤滑設備等が不要。	・発電効率: 15～30% ・総合効率: 60～80%	・「温水」 ・「温水+蒸気」

なものは有機分分解率（下水汚泥ガス化及び木質バイオマスガス化では冷ガス効率に相当）と発電効率であると考えられるが、バイオマス技術戦略調査委員会では技術ロードマップ上でこれらの効率の変動を時間軸に沿って、現状から2010年、2020年の目標値として表-2のように示している²⁾。これら①～⑤の有機分分解率は前処理工程の技術開発により分解率が向上する。これらのエネルギー変換技術においては生成ガスが得られるが、利用目的によって生成ガスのエネルギー利用技術も変わる。生成ガスの利用には「発電+熱利用」、「熱利用のみ」、「自動車用燃料」、「都市ガス代替燃料」の形式が考えられる。生成ガス利用では一般にエネルギー変換技術の施設自体や隣接する工場に電力を供給するケースが一番多いことから、本研究では①～⑤の全てで「発電+熱利用」の場合を想定した。「発電+熱利用」システムには大きく分けて「ガスエンジン式」、「燃料電池式」、「ガスタービン式」、「マイクロガスタービン式」がある³⁾（表-3参照）。総合効率とは発電効率と熱利用効率を合計したものであるが、それぞれ、エネルギーの利用状況によって使い分けられる。「ガスタービン式」、「マイクロガスタービン式」は発電効率が「ガスエンジン式」、「燃料電池式」より劣る。しかし熱の需要が多い場合や限られた電力量の発電でよい場合などは「ガスタービン式」、「マイクロガスタービン式」を用いる場合もある。本研究では生成ガスの全量発電を主体として熱を含めたエネルギーの有効利用を考え、「ガスエンジン式」、「燃料電池式」の場合を想定する。なお、「ガスエンジン式」、「燃料電池式」でもエネルギー変換技術の施設内の熱需要を十分に賄えられている場合が多く、余剰熱量は放熱している。よって2020年レベルでは燃料電池の商用化によりガスエンジンの発電と燃料電池の発電の2通りのパターンを想定している。

(3) モンテカルロ・シミュレーションを用いた二酸化炭素削減量の変動分析

先に示したエネルギーの変換技術における、変換効率

の不確実性が環境負荷の削減に及ぼす影響をモンテカルロ・シミュレーションを用いて分析する。

モンテカルロ・シミュレーションとは「確率論的なインプット変数に対して、アウトプット変数の分布を推定することを目的としたサンプリング実験」⁴⁾である。モンテカルロ・シミュレーションを使うことで、仮定されている確率に従って生成された数（乱数）に基づいて、何度も試行計算を行うことにより、結果として確率的事象を定量的に把握することができることが特徴である⁵⁾。

a) 二酸化炭素排出削減量の推計方法

技術効率の不確実性がもたらす環境負荷への影響を分析する指標として、本分析では二酸化炭素削減量を用いる。二酸化炭素削減量とは、対象の有機性廃棄物1t当たりから取り出したエネルギーを化石燃料からのエネルギーに代用した場合に、削減された化石燃料を使用した時に発生する二酸化炭素量(kg-CO₂/t)とし、以下のように定義する。

$$Tc = (E_1 - E_2 - E_3 + E_4) \times C \quad (1)$$

但し、Tc：二酸化炭素削減量原単位 (kg-CO₂/t)，E1：回収できるエネルギー量原単位 (kWh/t)，E2：投入されたエネルギー量 (kWh/t)，E3：残渣の処理に伴う化石燃料消費のエネルギー原単位 (kWh/t) E4：全量焼却処分した場合の化石燃料消費のエネルギー原単位 (kWh/t)，C：二酸化炭素排出量の原単位 (kg-CO₂/kWh) (Cは実際にはエネルギー種別により異なるが式での取扱い上、エネルギー種別ごとの値を電気事業連合会による使用端CO₂排出原単位により割り戻してkWh換算している)，上記のE1、E2は変数でE3、E4は技術ごとの定数

先ほど挙げた①～⑤のエネルギー変換技術の、現状技術水準での二酸化炭素削減量を求めた。使用したデータを表-4に示し、得られた現状での有機物トンあたり二酸化炭素削減量を表-5に示す。結果は主原料が下水汚泥の

表-4 各エネルギー変換技術に必要なエネルギー量²⁾

主原料	エネルギー変換技術	有機分解率 (%)	冷ガス効率 (%)	発電効率 (%)	場内電力量 (kWh/t)	焼却にかかる電力量 (kWh/t)	CO ₂ の原単位 (kg-CO ₂ /kWh)
下水汚泥	① i メタン発酵 水熱可溶化	50	-	35	13	85	0.407
	① ii メタン発酵 アルカリ処理						
	②ガス化	-	65	35	72	85	
食品廃棄物	③湿式メタン発酵	75	-	35	100	170	
	④乾式メタン発酵	75	-	35	132	170	
木質バイオマス	⑤バイオガス化	-	65	35	279	175	

場合、①メタン発酵が21.03kg-CO₂/tと二酸化炭素削減

表-5 現状の二酸化炭素削減量

主原料	エネルギー変換技術	二酸化炭素削減量 kg-CO ₂ /t
下水汚泥	①メタン発酵	21.03
	②ガス化	9.97
食品廃棄物	③湿式メタン発酵	117.34
	④乾式メタン発酵	107.96
木質バイオマス	⑤バイオガス化	265.86

量が多くなった。ただし、発生したメタンガスを全量発電した場合の値である。主原料が食品廃棄物の場合、④湿式メタン発酵が117.34 kg-CO₂/tと二酸化炭素削減量が多くなった。理由としては、⑤乾式メタン発酵では発生するバイオガス量は多いが、場内電力量も多くなり結果として二酸化炭素削減量が④湿式メタン発酵より悪い値になったものと考えられる。

b) 技術の不確実性を考慮した二酸化炭素削減量の分析

モンテカルロ・シミュレーションにおいて設定した条件を表-6に示す。条件は有機分解率・冷ガス効率±5.0%、発電効率±2.0%でそれぞれ正規分布の形状の一部を有する分布(図-2参照)とし、試行回数1000回とした。確率分布の形状については、各技術を扱う専門技術者への紙面ヒアリングを行った結果、正規分布を妥当とする回答を得たこと、また多くの事象が正規分布に従うこと

から、この分布を仮定した。また、設けた技術効率の最低値は現状より下がることは考えられないため現状の値、平均は表-2の目標値とし、最高値は専門家へのヒアリングで得られた標準的な目標値と到達しうる最高値(いわゆるチャンピオン値)とのレベル差を参考にして、平均値から概ね標準偏差1つ分離した値とした(正規分布では平均値±標準偏差に収まる確率がほぼ7割(0.6826)であるから、厳密には7割の確率で実現する最高値として仮定した値を意味する)。①～⑤のエネルギー変換効率に影響する変動は二酸化炭素削減量として表し、信頼区間95%での最大値、平均値、最小値をモンテカルロ・シミュレーションにより求める。

図-3には、得られた二酸化炭素削減量における有機分解率・冷ガス効率と発電効率の相対的な寄与度、すなわち影響力の大きさを示す。まず各効率の寄与度をノンパラメトリック統計量で用いられる以下に定義される⁹⁾スピアマンの順位相関係数を%で表示したものとする。

$$\gamma_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N D_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (2)$$

但し、 γ_s : 順位相関係数、D : 2変数の順位の差、N : 試行回数、上記のD、Nは変数。

表-6 シミュレーションの設定条件

技術		(Ⅰ)2010年 GE		(Ⅱ)2020年 GE		(Ⅲ)2020年 FC	
		有機分解率・ 冷ガス効率	発電 効率	有機分解率・ 冷ガス効率	発電 効率	有機分解率・ 冷ガス効率	発電 効率
① i メタン 水熱	最高値	60	39	65	42	65	47
	平均値	55	37	60	40	60	45
	最低値	50	35	50	35	50	40
① ii メタン アルカリ	最高値	65	39	70	42	70	47
	平均値	60	37	65	40	65	45
	最低値	50	35	50	35	50	40
② 下水 ガス化	最高値	75	39	80	42	80	47
	平均値	70	37	75	40	75	45
	最低値	65	35	65	35	65	40
③ 食廃 湿式	最高値	85	39	95	42	95	47
	平均値	80	37	90	40	90	45
	最低値	75	35	75	35	75	40
④ 食廃 乾式	最高値	85	39	90	42	90	47
	平均値	80	37	85	40	85	45
	最低値	75	35	75	35	75	40
⑤ 木質 ガス化	最高値	75	39	80	42	80	47
	平均値	70	37	75	40	75	45
	最低値	65	35	65	35	65	40

GE : ガスエンジンを発電に利用 FC : 燃料電池を発電に利用

有機分分解率の向上(50%⇒55%) 発電効率の向上(35%⇒37%)

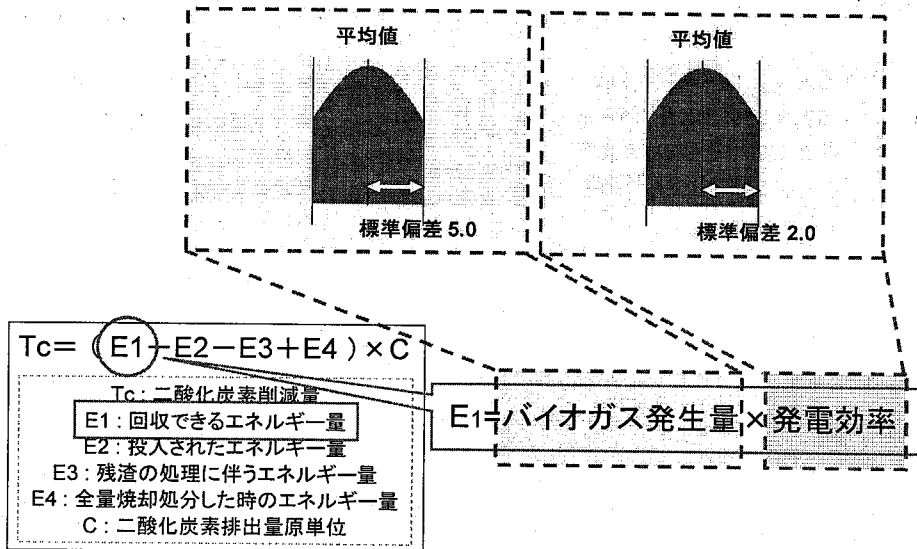


図-2 モンテカルロシミュレーションに設定した条件の概略図

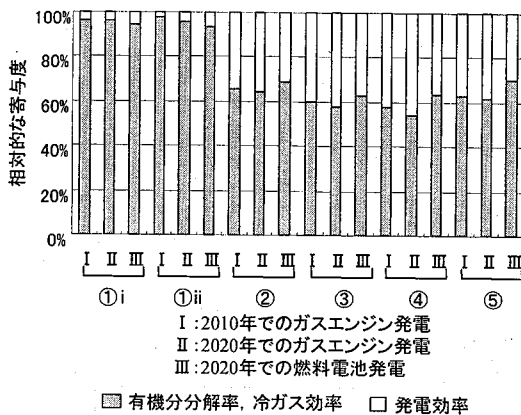


図-3 変動要因の相対的な寄与度

次に、これにより求まる各効率の寄与度間での相対的な大小関係を示すため、有機分分解率・冷ガス効率と発電効率の各寄与度の両者の比率を、合計して100%とする相対的な寄与度として図-3に示した。

分析の結果、「①i 下水汚泥のメタン発酵での前処理水熱可溶化」、「①ii 下水汚泥のメタン発酵での前処理アルカリ処理」が有機分分解率に対する相対的な寄与度が90%以上と大きい結果となった。一方、それ以外の技術の有機分分解率・冷ガス効率に対する相対的な寄与度は60%前後となった。また、2020年ガスエンジン発電の利用と燃料電池発電の利用では「①i 下水汚泥のメタン発酵で前処理水熱可溶化」、「①ii 下水汚泥のメタン発酵で前処理アルカリ処理」の場合は発電効率の相対的な寄与度が大きくなった。一方、それ以外の技術では発電効率の相対的な寄与度が小さくなり、ガスエンジン発電

の利用と燃料電池発電の利用に対する一定の傾向はみられなかった。

(3) 各技術における二酸化炭素削減量の変動分析

a) ①i 下水汚泥のメタン発酵での前処理水熱可溶化および①ii 下水汚泥のメタン発酵での前処理アルカリ処理

表-7に①i、①iiでの二酸化炭素削減量の変動を、図-4に二酸化炭素削減量の変化率を示す。結果は「①i 下水汚泥のメタン発酵での前処理水熱可溶化」の場合、平均値で現状21.03 kg-CO₂/tから (I) 2010年GEで25.10 kg-CO₂/t, (II) 2020年GEで28.06 kg-CO₂/t, (III) 2020年FCで29.64 kg-CO₂/tと増加していく。

表-7 下水汚泥メタン発酵でのCO₂変動 (①)

単位: kg-CO ₂ /t					
		現状	(Ⅰ) 2010年GE	(Ⅱ) 2020年GE	(Ⅲ) 2020年FC
① i	最大値	21.03	27.86	31.40	33.29
	平均値		25.10	28.06	29.64
	最小値		22.48	23.88	26.35
① ii	最大値	21.03	30.57	34.35	36.52
	平均値		27.32	30.70	32.54
	最小値		23.26	25.23	26.99
GE: 発電にガスエンジンを利用			FC: 発電に燃料電池を利用		

GE: 発電にガスエンジンを利用 FC: 発電に燃料電池を利用

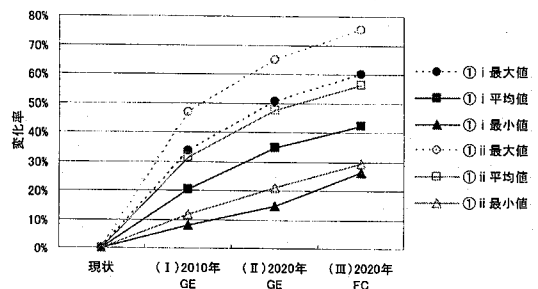


図-4 下水汚泥メタン発酵でのCO₂変化率 (①)

「①ii 下水汚泥のメタン発酵での前処理アルカリ処理」の場合、平均値で現状21.03 kg-CO₂/tから（Ⅰ）2010年GEで27.32 kg-CO₂/t、（Ⅱ）2020年GEで30.70 kg-CO₂/t、（Ⅲ）2020年FCで32.54 kg-CO₂/tと増加していく。

二酸化炭素削減量の変化率では「①ii 下水汚泥のメタン発酵での前処理アルカリ処理」の最大値と平均値の変化率が「①i 下水汚泥のメタン発酵での前処理水熱可溶化」の最大値と平均値の変化率よりも10%以上大きくなった。一方、最小値における両技術の差は5%前後となった。「①i 下水汚泥のメタン発酵での前処理水熱可溶化」と「①ii 下水汚泥のメタン発酵での前処理アルカリ処理」では、有機分分解率の目標値に5%の差がある。図-3で有機分分解率の二酸化炭素削減量への寄与率が90%以上であったことから下水汚泥のメタン発酵処理では有機分分解率の向上率5%の差は大きいことが分かる。

b) ③食品廃棄物の湿式メタン発酵および④食品廃棄物の乾式メタン発酵

表-8に③、④の二酸化炭素削減量の変動を、図-5に二酸化炭素削減量の変化率を示す。結果は「③食品廃棄物の湿式メタン発酵」の場合、平均値で現状117.34 kg-CO₂/tから（Ⅰ）2010年GEで132.63 kg-CO₂/t、（Ⅱ）2020年GEで157.89 kg-CO₂/t、（Ⅲ）2020年FCで178.77 kg-CO₂/tと増加する。食品廃棄物の乾式メタン発酵」の場合、平均値で現状107.96 kg-CO₂/tから（Ⅰ）2010年GEで123.75 kg-CO₂/t、（Ⅱ）2020年GEで130.62 kg-CO₂/t、（Ⅲ）2020年FCで161.23 kg-CO₂/tと増加していく。

二酸化炭素削減量の変化率では2020年にガスエンジンを利用した場合、「④食品廃棄物の乾式メタン発酵」が「③食品廃棄物の湿式メタン発酵」に比べて最大値、平均値、最小値全てにおいて10%以上小さい値となった。一方、2020年に燃料電池を利用した場合では「③食品廃

表-8 食品廃棄物メタン発酵でのCO₂変動 (③④)

		単位: kg-CO ₂ /t		
③	現状	(Ⅰ) 2010年GE	(Ⅱ) 2020年GE	(Ⅲ) 2020年FC
	最大値	144.80	174.87	197.17
食品廃棄物 湿式	平均値	132.63	157.89	178.77
	最小値	121.21	137.98	158.04
④	現状	(Ⅰ) 2010年GE	(Ⅱ) 2020年GE	(Ⅲ) 2020年FC
	最大値	135.60	145.03	179.03
食品廃棄物 乾式	平均値	123.75	130.62	161.23
	最小値	112.11	114.78	140.83

GE: 発電にガスエンジンを利用 FC: 発電に燃料電池を利用

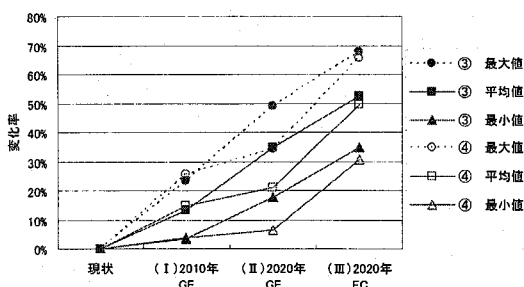


図-5 食品廃棄物メタン発酵でのCO₂変化率 (③④)

棄物の湿式メタン発酵」と「④食品廃棄物の乾式メタン発酵」での二酸化炭素削減量の変化率の差は5%以内となった。図-3で（Ⅱ）2020年GEでの有機分分解率の寄与率が「③食品廃棄物の湿式メタン発酵」では57.7%、「④食品廃棄物の乾式メタン発酵」では53.6%であった。二酸化炭素削減量の変化率の差は、有機分分解率の寄与率の差にも表れている。食品廃棄物のメタン発酵処理の湿式と乾式では燃料電池の技術革新によって二酸化炭素削減量に違いが生じることが分かった。

c) ②下水汚泥のガス化（流動床ガス化炉）および⑤木質バイオマスのバイオガス化

表-9に②、⑤の二酸化炭素削減量の変動を、図-6に二酸化炭素削減量の変化率を示す。結果は「②下水汚泥のガス化」の場合、平均値で現状9.97 kg-CO₂/tから（Ⅰ）2010年GEで10.64 kg-CO₂/t、（Ⅱ）2020年GEで11.27 kg-CO₂/t、（Ⅲ）2020年FCで12.03 kg-CO₂/tと増加していく。「⑤木質バイオマスのバイオガス化」の場合、平均値で現状265.86 kg-CO₂/tから（Ⅰ）2010年GEで312.43 kg-CO₂/t、（Ⅱ）2020年GEで362.98 kg-CO₂/t、（Ⅲ）2020年FCで357.47 kg-CO₂/tと増加していく。

両技術とも燃焼の過程でバイオガスを生成させる技術である。2020年でも原料1t当たりのバイオガスの発生量そのものは現状から変化しない。つまり、生成したバイオガスをどれだけ効率良く精製して発電できるかが発電電力量に影響し、二酸化炭素削減量にも影響する。「②下水汚泥のガス化」は二酸化炭素削減量の変化率が小さいが、下水汚泥1t当たりのバイオガス発生量が少ないことが原因と考えられる。

(4) 不確実性を考慮しない場合との比較

表-10は、モンテカルロ・シミュレーションによる二

表-9 下水汚泥・木質ガス化のCO₂変動 (②⑤)

		単位: kg-CO ₂ /t		
②	現状	(Ⅰ) 2010年GE	(Ⅱ) 2020年GE	(Ⅲ) 2020年FC
	最大値	11.09	11.94	12.76
下水汚泥 ガス化	平均値	10.64	11.27	12.03
	最小値	10.16	10.49	11.23
⑤	現状	(Ⅰ) 2010年GE	(Ⅱ) 2020年GE	(Ⅲ) 2020年FC
	最大値	350.60	413.32	469.49
木質 バイオガス化	平均値	312.43	362.98	416.42
	最小値	277.45	308.73	357.47

GE: 発電にガスエンジンを利用 FC: 発電に燃料電池を利用

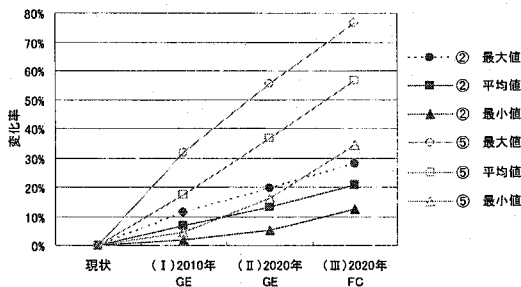


図-6 下水汚泥・木質ガス化のCO₂変化率 (②⑤)

表-10 モンテカルロシミュレーションを用いた場合と

用いない場合の二酸化炭素削減量

単位: kg-CO₂

		モンテカルロシミュレーションの結果			モンテカルロシミュレーションを用いない場合		
		(I) 2010年GE	(II) 2020年GE	(III) 2020年FC	(I) 2010年GE	(II) 2020年GE	(III) 2020年FC
① I	最大値	27.86	31.40	33.29	28.57	32.47	34.28
	平均値	25.10	28.06	29.64	25.14	28.91	30.57
	最小値	22.48	23.88	26.35	21.03	21.03	23.22
① II	最大値	30.57	34.35	36.52	31.39	35.37	37.32
	平均値	27.32	30.70	32.54	27.90	31.75	33.56
	最小値	23.26	25.23	26.99	21.03	21.03	23.22
②	最大値	144.80	174.87	197.17	149.52	181.00	203.15
	平均値	132.63	157.89	178.77	132.96	162.81	183.80
	最小値	121.21	137.98	158.04	117.34	117.34	134.83
③	最大値	136.60	145.03	179.03	141.18	151.74	186.92
	平均値	123.75	130.62	161.23	123.97	135.96	166.38
	最小値	112.11	114.76	140.83	107.95	107.95	121.13
④	最大値	11.09	11.94	12.76	11.31	12.20	13.03
	平均値	10.64	11.27	12.03	10.62	11.46	12.23
	最小値	10.16	10.49	11.23	9.97	9.97	10.64
⑤	最大値	350.60	413.32	469.49	364.06	429.82	490.27
	平均値	312.43	362.98	416.42	313.46	375.42	432.00
	最小値	277.45	308.73	357.47	265.55	265.55	314.97

GE: 発電にガスエンジンを利用 FC: 発電に燃料電池を利用

酸化炭素削減量の将来変動の結果と、設定条件からそのまま二酸化炭素削減量を求めた結果を示している。設定条件では平均値をその時点の目標値に設定しており、最低値は現状の値を設定している。エネルギー変換技術の技術開発に2010年、2020年の時点での目標値は設定されているが、実際は目標どおりに開発されるとは限らない。よって、モンテカルロ・シミュレーションを用いて技術開発の確率を設定することによって95%の信頼区間でどれだけの変動が予測されるのかが表-10の結果の意味するものである。確率分布を設定することによって、しない場合より二酸化炭素削減量の幅は数%小さくなることがわかる。一定の信頼区間を考慮した二酸化炭素削減量が得られること、また国レベルでの二酸化炭素削減量の目標値がやはり数%のオーダーで設定されているわけであるから、このような技術効率に幅を伴う場合の対策効果を信頼性を含め推計する際にはモンテカルロ・シミュレーションのような分析が意義をもつと考えられる。

3. 事業収支要因の不確実性が事業性にもたらす影響の分析

(1) 事業性指標（内部収益率）の設定

エネルギー変換技術を適用した施設の事業性に関する分析を、食品廃棄物の湿式メタン発酵を例として行う。

事業性の分析には内部収益率（IRR）を用いて検討する。ここでIRRとは正味現在価値（NPV）の累計が0になる割引率 r として、以下のように定義される⁷⁾。

$$PV = \sum_{k=0}^n \frac{Ak}{(1+r)^k} = 0 \quad (3)$$

但し、PV：現在価値（円）、Ak：k年に受けとるキャッシュフロー（円）、n：減価償却年数（年）、r：割引率（%）。

PV=0の時は初期投資がちょうど回収できることを意味している。一般的に投資目標となる値はIRR $\geq$ 10(%)の時

表-11 キャッシュフローの計算条件

項目	計算方法
I a. 建設費	図-7参照
b. 補助率	建設費に補助率をかける
c. 実質建設費	上記のa-bより実質建設費を算出
II a. 収入	①～②の合計
①売電収入	売電単価×売電電力量
②生ごみ処理費	生ごみ処理料金×年間処理量
b. 支出	①～⑦の合計
①運転維持費	5000円/tを見込む
②メンテナンス費	建設費の2%を見込む
③人件費	人件費単価×人数
④減価償却費	(実質建設費-残存価格÷実質建設費の10%)÷耐用年数
⑤残渣処理費	残渣処理単価×残渣処理量
⑥租税公課	(実質建設費-累積減価償却費)×税率(1.4%)
⑦一般管理費	人件費の10%を見込む
c. 税引前利益	上記のa-bより算出
d. 法人税等	c×40.87%より算出
e. 税引後利益	上記のc-dより算出
f. 減価償却費	bの④と同値を設定
g. 毎年キャッシュフロー	上記のe+fより単年度のキャッシュフローを算出
III a. キャッシュの累計	毎年のキャッシュフローを累計
b. 回収率	aがcの何%に当たるかを回収率として試算

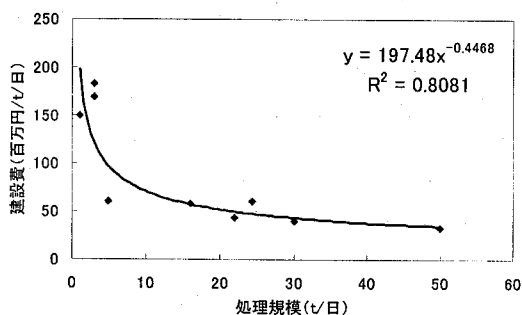


図-7 メタン発酵施設のイニシャルコスト

表-12 事業収支要因の初期設定条件

項目	前提設定条件
規模	12t/日
減価償却	20年
建設費	6000万円/t/日
補助率	50%
発電電力量	240kWh/t
売電価格	7.5円/kWh
生ごみ処理費	2.0万円/t
運転維持費	182.5万円/t
メンテナンス費	160万円/t
人件費	500万円/年・人
残渣処理費	200円/m ³
法人税等	40.87%

※白抜きの項目は固定値

であるとされる。

(2) 事業性分析の前提条件

食品廃棄物の湿式メタン発酵の原料となる食品廃棄物としては、一般廃棄物のうち食品流通業から排出される事業系食品廃棄物であるコンビニ、スーパー、百貨店からのものを処理規模の基準とする。ここでは、人口20万人規模の都市から排出される、事業系食品廃棄物の処理規模に相当する、12t/日の湿式メタン発酵施設を対象とする。

表-11にIRRに使用するためのキャッシュフローの計算条件を示す。表中、建設費については、バイオマスエネルギー導入ガイドブック⁸⁾と食品循環資源最適利用マニ

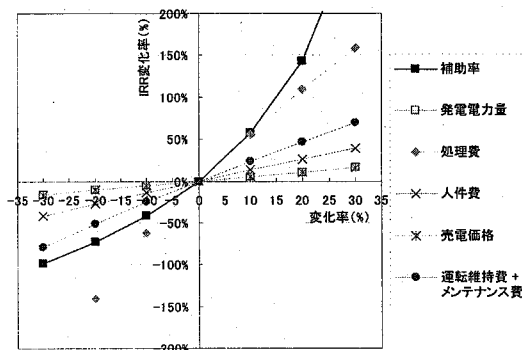


図-8 事業収支要因が内部収益率に及ぼす影響

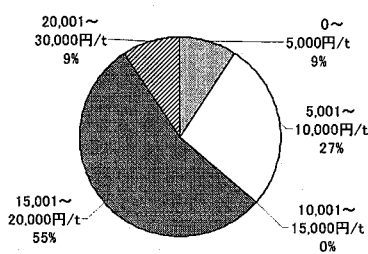


図-9 食品廃棄物の処理業者引き取り価格¹⁰⁾

ユアル⁹⁾に掲載されている食品廃棄物のメタン発酵施設の導入事例のデータをもとに推計した回帰式により算定した(図-7参照)。なお、回収率とは初期投資に対して回収できる利益率のことであり、回収率100%の時にちょうど初期投資が回収できることを意味する。表-12に事業収支要因についての初期の設定条件を示す。表中の網掛け項目を変動させて感度を分析する。設定した基準値の時の回収率は145%でIRRは3.72%であった。

(3) 内部収益率の分析結果

図-8に事業収支要因を変動させた場合の内部収益率への影響を整理した結果を示す。横軸のプラス方向の変化率は変動項目が基準値より事業性が有利になる場合を表しており、マイナス方向の変化率は変動項目が基準値より事業性が不利になる場合を表している。プラス方向では補助率が一番大きな影響力をもつことが分かる。当然ながら補助率は建設費の低減率に寄与する。マイナス方向では生ごみ処理費が一番大きな影響力を示している。ここで補助率に次いで影響の大きい要因である、生ごみ処理費に注目する。前提条件で生ごみ処理費は20,000円/tと設定したが、図-8ではマイナス方向の感度が一番大きくなった。図-9は兵庫県が兵庫県の都市部の事業所に食品廃棄物の処理状況の把握をするために行われたアンケート結果¹⁰⁾の一部である引き取り価格を示す。15,001~20,000円が一番多く半数を占めている。この価格は安定的に推移するわけではなく、同じ都市部でもそのとき

表-13 事業収支要因の不確実性分析の設定条件

項目	設定条件	表-12	分布	シミュレーション
建設費(万円/年)	6,000	三角分布	最低値 4,000 最尤値 6,000 最高値 7,000	条件
有機分解率(%)	60	正規分布	最低値 75 平均値 90 最高値 95 標準偏差 5.0	
発電効率(%)	37	正規分布	最低値 35 平均値 40 最高値 42 標準偏差 2.0	
売電価格(円/kWh)	7.5	三角分布	最低値 5 最尤値 7.5 最高値 10	
生ごみ処理費(円/t)	20,000	三角分布	最低値 8,800 最尤値 15,000 最高値 30,000	

表-14 シミュレーションの結果

	建設費補助率 0%	建設費補助率 50%
信頼区間95%でのIRRの変動	-8.9~4.3%	-8.3~13.0%
IRR ≥ 0 になる信頼度	30.1%	66.6%
IRR ≥ 10 になる信頼度	0%	12.0%

の社会状況(焼却施設の規模や最終処分場の有無)によって変化してくると考えられる。

(3) 事業収支要因の不確実性が事業性にもたらす影響

ここではバイオマス導入ガイドブックでの食品廃棄物の湿式メタン発酵施設の導入を推進するための建設費や売電価格、生ごみ処理費の全国標準の価格を設定したが、現状との間には価格差がある。そこで、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、表-12の前提条件からバイオマス導入ガイドブックの理想とする値に対する内部収益率(IRR)の不確実性を分析する。表-13にシミュレーションに設定した条件を示す。発電電力量は表-6の「③食品廃棄物の湿式メタン発酵」の(II)2020年GEの条件を適用した。建設費は三角分布とし、最尤値を現状の値、最低値を理想とする値、最高値を現状より悪い値を適用した。売電価格は三角分布とし、最尤値を現状の値、最低値を現状より悪い値、最高値を購入電力料金の値を適用した。生ごみ処理費は三角分布とし、最尤値を図-9より設定し、最低値を尼崎市の現状の値、最高値を理想とする値を適用した。

結果を表-14に示す。補助率が50%の場合でもIRR ≥ 10 となる信頼度は12.0%でIRR ≥ 0 でも66.6%となった。IRRの変動も-8.3~13.0%とかなり変動幅があることが分かった。

4. 結論

本研究では二酸化炭素削減量に対するモンテカルロ・シミュレーション及び内部収益率に対する感度分析によりエネルギー変換技術の技術効率や事業収支要因の不確実性が、環境負荷や事業性に及ぼす影響を分析した。まとめを以下に述べる。

a) 下水汚泥のメタン発酵の場合、水熱可溶化やアルカリ処理などの前処理での有機分解率・冷ガス効率の不確実性が二酸化炭素削減量へ及ぼす相対的な寄与率は発電効率を合わせた寄与率全体の90%以上を占めており、今後の前処理工程における技術開発が二酸化炭

素削減量に大きく左右すると考えられる。

- b) 食品廃棄物の湿式及び乾式のメタン発酵では、利用技術である燃料電池の技術革新に伴う発電効率の不確実性によって二酸化炭素削減量の増加率に大きな違いが生じることが示唆される。また同様のことが、木質ガス化においても示される結果となった。
- c) 確率分布を設定することによって、通常の設定しない場合より二酸化炭素削減量の幅は数%小さくなることがわかり、一定の信頼区間を考慮した二酸化炭素削減量が得られるなど、対策効果を信頼性を含め推計する際のこのような分析が意義をもつと考えられる。
- d) 食品廃棄物の湿式メタン発酵処理は建設費の改善及び補助、生ごみ処理費による IRR の変化率が大きく、売電価格の IRR の変化率は小さい。また、補助率のいかんによっても IRR は 5%程度のかんりの変動幅を有することが分かった。

謝辞：本研究は、地球環境研究総合推進費（課題番号H-9「物質フローモデルに基づく持続可能な生産・消費の達成度評価手法に関する研究」）の支援を受けて実施された。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本エネルギー学会: バイオマスハンドブック, pp.86-199, オーム社, 2002.
- 2) エネルギー総合工学研究所: バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ策定に関する調査, pp.52-101, 2004.
- 3) 吉川邦夫・森塚秀人監修: バイオマス発電の最新技術, pp.1-259, シーエムシー出版, 2006.
- 4) J.R.Evans, D.L.Olson 著, 服部正太監訳: リスク分析・シミュレーション入門, pp.9, 共立出版, 1999.
- 5) 橋詰匠監修, 早稲田大学経営リスク研究会編: ビジネスリスク分析入門ーモンテカルロ・シミュレーションの応用事例, pp.14-18, 早稲田大学出版部, 2006
- 6) 内山敏典: 計量分析のための統計解析技法, pp.25-27, 晃洋書房, 2003.
- 7) 井上裕: まちづくりの経済学, pp.50-51, 学芸出版社, 2001.
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: バイオマス導入ガイドブック第2版, pp.1-264, 2005
- 9) 阿部亮他編: 食品循環資源最適利用マニュアル, サイエンスフォーラム, pp.1-330, 2006
- 10) ひょうごエコタウン推進会議: ひょうごエコタウン事業化可能性調査 平成 17 年度報告書, pp.1-63, 2006

AN ANALYSIS ON UNCERTAINTY IN TECHNOLOGICAL EFFICIENCY AND BUSINESS BALANCE FACTORS FOR ENERGY CONVERSION OF BIOMASS WASTE FROM URBAN AREA AND ITS FEASIBILITY

Takashi YANO, Noboru YOSHIDA, Shinya SOTA, Yasuzumi KANEKO
and Yugo YAMAMOTO

While constant technological coefficients are usual in evaluating energy conversion of biomass waste, future innovation would influence on the evaluated values for developing technologies. In this study, an analysis was made to examine the influence of uncertainty in technological efficiency and business balance factors on reduced carbon dioxide and business feasibility using Monte Carlo simulation. As a result of the analysis, it is clarified that decomposition rates of organic components in pre-treatment stage give great contribution on the uncertainty of reduced carbon dioxide in the case of sewage sludge. We also found that construction cost and treatment charge give great contribution on the business feasibility in methan fermentation of food waste from business activities.