

地域における廃棄物系バイオマス利活用 システムの最適化モデルの構築

楊 翠芬¹・山成 素子²・匂坂 正幸³

¹非会員 研究員 産業技術総合研究所 (〒305-8569 つくば市小野川16-1)

E-mail:yang.cuifen@aist.go.jp

²非会員 研究員 産業技術総合研究所 (〒305-8569 つくば市小野川16-1)

³非会員 主任研究員 産業技術総合研究所 (〒305-8569 つくば市小野川16-1)

バイオマスのエネルギー利用技術, マテリアル利用技術および再生製品の需要量を考慮する最適化モデルを構築した。また, 最適化モデルを用いて千葉県旧山田町をケーススタディに廃棄物系バイオマス利活用システムの設計を試みた。さらに, 二酸化炭素削減コスト, 輸送単価, 再生製品販売価格の変動による感度解析を行った。その結果, コスト最小化シナリオでは, 牛・豚糞尿は堆肥化处理が主体となった。GHG最小化および合計コスト最小化シナリオでは, メタン発酵発電施設が選ばれ, 約30%がメタン発酵施設で処理された。また, コストもGHG排出量も優れるシステム(合計コスト最小化)では, 現状処理システムより合計コストは年間約104百万円が削減できることが示唆された。

Key Words : biomass utilization system, optimization model, cost, greenhouse gas emission (GHG), cost of CO₂ reduction

1. はじめに

地球温暖化防止, 循環型社会の形成, 競争力のある戦略的産業の育成および農林漁業・農山村の活性化をはかるため, エネルギーや製品としてバイオマスを総合的に最大限利活用し, 持続的に発展可能な社会を実現するための道筋として, 平成 14 年 12 月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が決定された。バイオマス・ニッポン総合戦略(平成 18 年 3 月改正版)では, 2010 年までに 300 市町村がバイオマスの利活用を促進することを目標としている。本戦略に即し, 地域においてバイオマスを持続的に利活用していくためには, バイオマスの賦存量, 変換技術, バイオマス再生製品需要を考慮しながら地域の実情に応じたシステムを構築することが重要である。

林地残材, 家畜糞尿のような一種類のバイオマスエネルギー利活用システムの構築・設計に関する既存研究は数多く報告されてきた¹⁾³⁾。地域におけるバイオマス利活用システムを検討する際, 一種類のバイオマスではなく, すべてのバイオマスを考慮することが必要である。また, バイオマス利活用技術としては, エネルギー利用だけではなく, マテリアル利用も考慮することは重要と考えられる。森岡ら⁴⁾は宮古島を対象地域としバイオマス利活用システムのモデルの構築・設計を行ったが, バ

イオマス輸送段階を考慮していない。バイオマス利活用システムの設計を行う際には, どこで, どのようなバイオマスが, どのくらい発生しているのかを把握し, 質的・量的にそれが資源として利用可能であるか, 収集や運搬をどうするのかなどの検討を行い, 地域に役立てることのできる使い方を考えていくことが大切である。

本研究では, 地域内に存在する廃棄物系バイオマスを対象として, エネルギー利用とマテリアル利用技術, および再生製品需要を考慮する最適化モデルを構築する。モデル解析を通して, 地域に適したバイオマス利活用システム設計を支援することを目的とする。また, 先行研究⁵⁾⁶⁾を行った千葉県旧山田町(現在は香取市の一部, 以下, 山田町)をケーススタディに, バイオマス発生, 輸送, 需要を考慮したバイオマス利活用システムの設計を試みる。

2. 解析方法

(1) 解析フロー

図-1 に本研究の解析フローを示す。①対象とするバイオマス利活用システムを構成要素別にモデル化する(次の節で説明する)。②目的関数や制約条件などを決め,

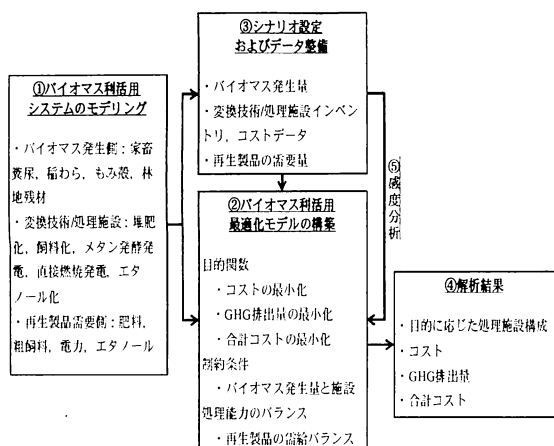


図-1 解析フロー

バイオマス利活用の最適化モデルを構築する。③バイオマス利活用システムにおけるバイオマス発生側、変換処理側、および再生製品の需要側のデータを整備し、地域条件をシナリオ検討に反映させ、最適化モデルに入力する。④最適化解析を実施し、目的に応じた処理施設構成、コストや環境負荷排出量などの解析結果が得られる。最後に、輸送単価や再生製品の販売価格が変動したとき、結果にどの程度の影響を与えるかを調べ、感度分析を行う。

最適化計算には、汎用最適化ツール GAMS を用いて解析した。バイオマスの発生量、変換技術・施設、再生製品需要などのデータを整備し、バイオマス利活用システムの最適化モデルを構築することで、地域的な制約条件を考慮しながらコストや環境負荷排出量の最小化を目的とした処理施設構成やコスト、環境負荷排出量を算出することができる。この解析を行うことで、地域における最適なバイオマス利活用システム案を検討できる。

(2) バイオマス利活用システムのモデリング

図2 にバイオマス利活用システムの概要を示す。このシステムはバイオマス発生側、変換技術、再生製品需要側から構成される。バイオマスは、家畜糞尿、稲わら、もみ殻、林地残材を対象とした。家畜種類によって家畜糞尿の組成が異なるため、本研究では乳牛糞尿、肉牛糞尿、豚糞尿、鶏糞に分けた。バイオマス変換技術として、メタン発酵発電、直接燃焼発電、エタノール化のエネルギー利用技術のほか、堆肥化、飼料化の材料利用方式も検討の対象としている。また、再生製品の肥料、稲わら粗飼料（以下、粗飼料）、電力、エタノールの需要も考慮した。さらに、バイオマス発生側、変換技術、再生製品需要側はすべて同一地域に存在し、バイオマス発生から変換、消費までを地域内で行うことを想定し、

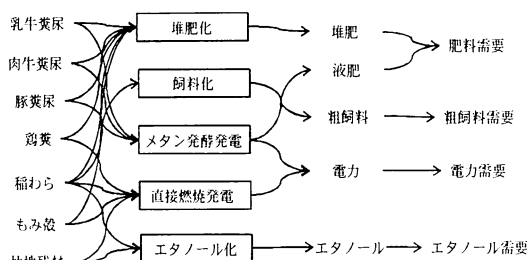


図-2 バイオマス利活用システムの概要

表-1 対象とするバイオマスの特性

バイオマス	含水率 (%)	性状						
		固形分(%)			無機物	成分(乾物%)		発熱量 (MJ/kg-dry)
		微生物 分解性	難分 解性	計		炭素 (T-C)	窒素 (T-N)	
乳牛糞尿	90	2.4	5.6	8.0	2.0	35.1	2.5	13.4
肉牛糞尿	78	5.3	12.3	17.6	4.4	35.1	2.5	13.4
豚糞尿	90	3.8	3.8	7.6	2.4	35.1	3.5	13.4
鶏糞	70	15.8	5.2	21.0	9.0	35.1	5.5	13.4
稲わら	15	33	37	70.0	15.0	40.9	0.6	15.2
もみ殻	12	32	38.7	70.7	17.3	40.9	0.6	15.2
林地残材	35	12.8	51.2	64.0	1.0	52	0.4	21.2

地産地消型小規模システムの構築を検討している。

各対象バイオマスの性状について、一般的な数値⁷⁹⁾を表-1 にまとめる。家畜糞尿には窒素（以下、N）、リンその他のミネラルなど多くの肥料成分が含まれている。その中、N は重要な養分であるが、環境中に放出されると汚染の原因物質にもなるため、本研究では N に着目して解析を行う。

(3) バイオマス利活用最適化モデルの構築

a) 目的関数

バイオマス利活用システムの最適化において考えられる目的関数は多数存在するが、バイオマス利活用を推進するにあたってコストの高さが一つの大きな障壁であることから、本研究ではバイオマス利活用システムの経済性を重視し、年間コストの最小化を目的関数として設定した。また、地球温暖化に注目して温室効果ガス（Greenhouse Gas, 以下、GHG）排出量の最小化を目的関数として設定した。ただし、バイオエタノールの燃焼、稲わらの焼却による二酸化炭素（以下、CO₂）はカーボンニュートラルであるため計上していない。以下は目的関数の定式化を説明する。

経済性を重視する場合は、バイオマス利活用システムのコストの最小化（式 1）を目的関数として設定して最小化シミュレーションを行う。

$$\text{Minimize } C_{\text{Total}} = C_{\text{TR}} + C_{\text{CS}} + C_{\text{OM}} - P_{\text{CO}} \quad (\text{式 1})$$

$$C_{TR} = \sum_j \sum_i A_{ij} \times C_{TS_i} \quad (式 2)$$

$$C_{CS} = \sum_j \left(\frac{CSP_j \times 0.9}{YL_j \times CA_j} \times \sum_i \frac{A_{ij}}{365} \right) \quad (式 3)$$

$$C_{OM} = \sum_j \sum_i A_{ij} \times OMP_j + \frac{\sum_j \sum_i A_{ij}}{CA_j} \times CLA \quad (式 4)$$

$$P_{CO} = P_{MS} + P_{Bio} = \sum_j \sum_k (RM_{j,k} \times RMSP_k) + \sum_j \sum_i (A_{ij} \times BTP_j) \quad (式 5)$$

ここで、i はバイオマス種類、j は変換技術、k は再生製品を表す。C_{Total} はコストを表し、輸送費、固定費、運用費の費用から再生製品販売収益を差し引いて求める

(式 1)。C_{TR} はバイオマス輸送費で、バイオマス処理量A_{ij}とバイオマスの輸送単価C_{TS_i}より算出する(式 2)。バイオマス輸送単価はバイオマス種類、輸送距離、道路状況など地域状況によって異なる。また、バイオマス輸送単価を入手するには現地調査、文献データの引用、および輸送費用関数⁹⁾による推計などの方法がある。本研究では現地調査データおよび文献⁹⁾¹⁵⁾値を参考に、輸送車両は牛・豚糞尿が 10t バキューム、鶏糞・稲わら、もみ殻、林地残材(チップ)が 4t トラック、輸送距離は 30km とし、牛・豚糞尿は 4,000 円/t、鶏糞は 2,000 円/t、林地残材は 5,000 円/t、もみ殻は 5,000 円/t、稲わらは 10,000 円/t と設定した。C_{CS} は固定費を表し、施設の建設費CSP_j、耐用年数YL_jより算出した減価償却費(定額法、残存価値 10%とする)、施設の規模CA_j、バイオマス処理量を用いて算出する(式 3)。光熱費および薬品資材費などの施設維持費と人件費の合計値を運用費C_{OM}とする。施設維持費はバイオマス処理量、施設維持費単価OMP_jより算出する。人件費は施設に利用されるバイオマスの量に比例し、バイオマス処理量、施設の規模、人件費単価CLAを用いて算出する⁴⁾(式 4)。人件費単価は厚生省による平成 15 年年間平均所得中央値より 476 万円と設定した。各変換施設に係るデータは、文献値および実績データ⁹⁾¹²⁾¹⁵⁾を使用した(表-2)。P_{CO} は電力、堆肥(液肥は無償提供とする)、粗飼料、エタノールの再生製品の販売による収益、および廃棄物系バイオマスの処理料金収入の合計収益を表す(式 5)。各再生製品の販売収益P_{MS}は、再生製品の産出量RM_{j,k}と販売価格RMSP_kの積から算出する。再生製品の販売価格は文献⁹⁾¹⁶⁾¹⁸⁾をもとに、電力は 4 円/kwh、ばら売り堆肥は 5,000 円/t、粗飼料は 20,000 円/t、エタノールは 100 円/L と設定した。廃棄物系バイオマスの処理料金収入P_{Bio}はバイオマス処理量にバイオマス原料受入価格BTP_jを乗じて算出する。バイオマス受入価格は、文献値⁹⁾を参照し、家畜糞尿は 500 円/t、林地残材、もみ殻、稲わらは無償取引されると想定した。

GHG 排出削減を重視する場合、GHG 排出量の最小化

表-2 変換施設の特徴

変換施設	処理規模 (t/d)	建設費 (百万円)	施設維持費 (円/t)	電力消費量 (kwh/t)	耐用年数 (年)
堆肥化	25	930	3,287	86	20
飼料化	25	106	300	15	5,20 ^{注1)}
メタン発酵発電	25	765	1,468	20	15,20 ^{注2)}
直接燃焼発電	50	1,000	2,136	86	20
エタノール化	50	1,671	3,082	33	20

注1: 機器5年, 建屋20年

注2: タンク類・発電設備15年, 建屋20年

を目的関数として設定して最小化シミュレーションを行う。

$$\text{Minimize } GHG_{Total} = G_{TR} + G_{CS} + G_{OM} - G_{RE} \quad (式 6)$$

$$G_{TR} = \sum_j \sum_i A_{ij} \times G_{TS_i} \quad (式 7)$$

$$G_{CS} = \sum_j \left(\frac{CSP_j \times 0.9}{YL_j \times CA_j} \times \sum_i \frac{A_{ij}}{365} \right) \times G_{EID_j} \quad (式 8)$$

$$G_{OM} = \sum_j \sum_i A_{ij} \times GP_j \quad (式 9)$$

$$G_{RE} = \sum_j \sum_k RM_{j,k} \times RMGE_k \quad (式 10)$$

ここで、GHG_{Total} はバイオマス利活用システムにおける GHG 排出量を表し、輸送過程、施設建設段階、施設運用段階での GHG 排出量から再生製品使用による GHG 排出削減量を差し引いて求める(式 6)。

バイオマスの輸送過程における GHG 排出量G_{TR}はバイオマス処理量と輸送原単位G_{TS_i}より算出する(式 7)。輸送原単位は文献値¹⁴⁾¹⁹⁾をもとに、牛・豚糞尿は 19kg-CO₂eq/t、鶏糞は 17kg-CO₂eq/t、林地残材は 15kg-CO₂eq/t、もみ殻は 17kg-CO₂eq/t、稲わらは 21kg-CO₂eq/t と推定した。本研究では最適な処理システム構成の検討を目的とするため、バイオマス発生源から処理場所までの距離が考慮されておらず、輸送距離を固定にする単位質量あたりの輸送原単位を使用している。しかし、バイオマス発生分布、輸送距離を考慮して処理施設立地場所を検討する場合、単位質量、単位輸送距離あたりの輸送原単位を使用することが必要である。施設建設時の GHG 排出量G_{CS}は、施設の減価償却費、産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID 文献)の原単位G_{EID_j}を用いて算出する(式 8)。また、施設調査事例や試験報告⁹⁾¹²⁾¹⁵⁾を参考に電力や燃料、資材などの消費量のデータを整理して、環境負荷原単位を乗じて各処理施設での単位処理あたりの GHG 排出量GP_jを算出した。バイオマス処理量に、算出された GHG 排出原単位GP_jを乗じて施設運用段階での GHG 排出量G_{OM}を求めた(式 9)。ただし、バイオマスの組成によるエネルギー・資材の使用量の差異を考慮していない。系統電力や軽油、関連資材の GHG 排出原単位は東京電力の販売電力量あたりの環境負荷原

単位¹⁹⁾、JEMAL-LCA Pro（（社）産業環境管理協会）に掲載されている各環境負荷排出原単位を利用した。堆肥化、メタン発酵発電施設で処理時に排出される糞尿由来のメタンガス（以下、CH₄）、一酸化二窒素（以下、N₂O）排出原単位、および稲わらの焼却に伴う CH₄ および N₂O 排出原単位は環境省の値²⁰⁾を用いた。アンモニア（以下、NH₃）排出（揮散）原単位は文献値^{6),13)}を利用した。各再生製品使用による GHG 削減量 G_{RE}ⁱ は、再生製品の産出量 RM_{j,k} と GHG 削減原単位 RMGE_k の積から算出する（式 10）。再生製品の GHG 削減原単位は文献値²¹⁾を利用した。

b) 制約条件

本研究では、バイオマスが対象地域内で循環利用可能であることを想定しているため、発生したバイオマスを地域内で処理・利用すること、再生製品の供給量を地域内の需要量以下となるように制約条件を設定した。

$$T_i = \sum_j A_{i,j} \quad (\text{式 11})$$

$$\sum_j T_{N1} + \sum_j T_{N2} \leq TND \quad (\text{式 12})$$

ここで、T_i は i 種バイオマスの発生量を表す。T_{N1}、T_{N2} は生産される堆肥・液肥中の N 含有量、TND は農地での基肥 N 需要量を表し、堆肥・液肥の N 供給量が農地での基肥 N 需要量を超えないように設定した。また、粗飼料の生産量が地域の粗飼料の需要量を超えないように設定した。エタノールの需給バランス制約条件の設定を以下に述べる。本研究ではガソリンに体積割合で 10% のエタノール（以下、E10 ガソリン）を添加して乗用自動車燃料として使用すると想定した。地域における乗用自動車によるガソリン消費量を熱量ベースで E10 ガソリン消費量に換算し、エタノールの生産量が E10 ガソリン消費量に添加されるエタノールの量を超えないように設定した。上述の目的関数、制約条件をモデルに入力して最適解析を行った。

3. シナリオ設定および使用データ

(1) 対象地域

千葉県は資源循環社会の推進の一環として「バイオマス立県ちば」を目指し、バイオマスを利用した先進的な街づくりとしてバイオマスタウン構築を進めている。その中、山田町は千葉県北東部における農林水産系のバイオマスタウン構築事例として、農林業系バイオマス利活用に積極的に取り組んでいる地域である。本研究では、山田町を対象地域とし、バイオマス利活用システムについて検討した。山田町は稲作と畜産業が盛んであり、家畜糞尿、稲わら、もみ殻、林地残材の発生量は地域内のバ

イオマスの 95% 以上を占めている。現在家畜糞尿の約 70% は堆肥化、30% はメタン発酵施設に利用されている。稲わらは約 50% が焼却、20% が鋤き込みされている。

(2) シナリオの設定

経済性、地球温暖化影響を考慮してコストの最小化、GHG 排出量の最小化を目的関数に設定し、コスト最小化シナリオ、GHG 最小化シナリオを想定した。また、経済コストメリットと GHG 排出量の削減の両立を目指すには、GHG 排出量をコスト指標で表し、経済コストと統合して経済コストも GHG 排出削減量も重視されるシナリオを想定した。本研究では、二酸化炭素 1t を削減するために必要な費用（以下、CO₂ 削減コスト）を用いた。GHG 排出量に CO₂ 削減コストを乗じて経済コストとして内部化し、経済コストとの合計コスト（以下、合計コスト）の最小化を目的関数に設定し、合計コスト最小化シナリオを設定した。国立環境研究所によれば日本の CO₂ 排出量をほぼ 1990 年の水準とするには、いろいろな省エネ技術やリサイクル技術を導入しなければならない。これらの技術を導入して CO₂ 排出量を削減し、1990 年の目標を達成するためには、少なくとも 30,000 円（CO₂ 1t あたり）が必要となる²²⁾。また、世界の 9 つの経済モデルにより、日本の CO₂ 削減コストは 2010 年時点でおおよそ 100～500\$/t-CO₂ の範囲にあると算定された。そこで、本研究では、現在 CO₂ 削減コスト 30,000 円/t-CO₂ を用いた。さらに、現状処理シナリオを設定して現状処理システムについて解析を行った。

コスト最小化シナリオでは経済性を優先させた施設構成、GHG 最小化シナリオでは GHG 排出削減量を優先させた施設構成が得られる。合計コスト最小化シナリオでは、経済コストも GHG 排出削減量も優先させた施設構成、コスト、GHG 排出量が得られる。

(3) 使用データおよび算出方法

a) バイオマス発生量

乳牛、肉牛、豚、鶏の飼養頭数は農業集落カード（千葉県）（2005 年農林業センサス）のデータを用いて整理し、それぞれの糞尿排せつ量の原単位⁸⁾を乗じて糞尿量を推計した。稲作付面積（2005 年農林業センサス）、副産物発生係数（千葉県農業統計）を用いて、稲わら、もみ殻の発生量を推計した。また、林地残材の発生量は千葉県バイオマスプランより引用した。山田町の概況は、面積 51.54km² で、2005 年において乳牛の飼養頭数が約 1,200 頭、肉牛の飼養頭数が約 1,210 頭、豚の飼養頭数が約 11,450 頭、採卵鶏の飼養羽数が約 59,200 羽、稲作付面積が約 970ha である。表 3 に山田町におけるバイオマス発生量を示す。

表-3 山田町におけるバイオマス発生量

バイオマス	乳牛糞尿	肉牛糞尿	豚糞尿	鶏糞	稲わら	もみ殻	林地残材
発生量(t/年)	25,648	11,851	33,864	2,939	4,855	1,524	460

b) 変換技術・施設のインベントリ・コスト

堆肥化：家畜糞尿、稲わら、もみ殻を対象とする。堆肥化方式にはいろいろなタイプがあり、本研究では実際広く使用されている堆肥舎を利用するとした。ショベルローダで切り返しによって好氣的に分解・発酵させて堆肥を得る。施設構成は、混合槽、発酵槽、貯蔵庫とし、発酵槽床面に通気装置を付設した。堆肥舎およびショベルローダの導入費用、通気装置の単価、設備機器の費用、ショベルローダの燃料消費量、通気装置の電力消費量を文献^{9),13)}から引用した。家畜糞尿の乾物分解率を30%とした⁷⁾。また、もみ殻を副資材として添加し、乾物分解率45%、堆肥化原料の含水率調整目標65%と設定した⁷⁾。この設定をもとに堆肥生産量（堆肥含水率50%とする）を推計した。生産された堆肥のN含有量は、糞尿中のN量から処理に伴う N_2O や NH_3 揮散などによるN分の減少量を差し引いた量と、副資材中のN含有量の合計値から推計した。

飼料化：稲わらを対象とする。稲わらを収集、ロール状に梱包し、牛農家へ飼料として販売している。農家で稲わらロールを家畜飼料用シュレッターで約5cmに切断し、牛の粗飼料に利用すると設定した。施設は稲わら保存庫、シュレッターから構成され、投資額は文献値を用いた²⁰⁾。また、1t稲わらから0.9tの粗飼料が生産されるとした（歩留まり90%とする）。

メタン発酵発電：牛・豚の糞尿を対象とする。施設構成は発酵槽、ガスエンジン発電機および消化液の貯留槽とした。対象バイオマスをメタン発酵槽に入れて、酸素を遮断し暖めると、微生物の働きでバイオガスと消化液が生成し、脱硫後にガスエンジン式発電機で発電が行われる。本研究では、37℃程度の中温発酵とし、発酵槽での滞留時間は25日程度、貯留時間は6ヶ月、糞尿の分解率は30%とした⁹⁾。メタン発酵発電施設の導入費用、施設維持費を文献値を用いた¹³⁾。また、有機物の単位質量あたりの CH_4 発生量は $0.5Nm^3/kg$ 、バイオガスの低位発熱量(CH_4 :60%, CO_2 :40%)は $21MJ/Nm^3$ 、発電機の発電効率は30%、熱効率は50%とした⁹⁾。バイオガスとともに生成される消化液は液肥として利用するとした。また、発生した電力、熱は施設内で利用され、余剰電力は売電すると想定した。

直接燃焼発電：鶏糞、稲わら、もみ殻、林地残材を対象とする。対象バイオマスの含水率を約30%以下に乾燥させた後、直接燃焼により電力と熱に変換する。施設は、

燃焼炉、バイオマスを燃焼して蒸気を得るボイラーと得られた蒸気を電気に変換する発電機の三つのプロセスから構成されている。発電効率は15%とし、発生した電力は施設内で利用され、余剰電力は売電するとした。また、焼却灰は産廃として処理するとした。発電設備および関連設備の導入費用は文献値¹⁴⁾を用いた。

エタノール化：稲わら、林地残材を原料とする。エタノール製造プロセスは、粉碎、酸加水分解・糖化、エタノール発酵・蒸留・脱水、リグニン燃焼ボイラー、廃水処理、廃棄物の埋立処分から構成されている。また、糖化工程の収率85%、発酵効率84%、精製効率95%と設定し¹⁵⁾、ホロセルロースがすべてグルコースに変換するとし、含水率15%の稲わら1tから0.236kLのエタノール、含水率35%の林地残材1tから0.35kLのエタノールが生産されると推計した^{12),15)}。加水分解反応によって不溶となるリグニンを固液分離し、リグニンケーキをボイラーで燃焼して蒸気を発生させる。発生した蒸気が施設内の発酵、精留・濃縮塔などの熱使用量の一部に充当される。また、濃縮塔から排出される廃水は廃水処理装置で処理するものとした。原料保存庫、設備機器、施設建設の減価償却費の合計値を固定費とした。施設建設費は既存研究¹⁵⁾をもとに、施設スケールファクター²³⁾より推計した。運用費、およびエネルギー・資材・薬品使用量を文献値から引用した^{12),15)}。

c) 再生製品の需要量

山田町における作物別作付面積データ（H20年千葉県作物統計）、千葉県の主要農作物等施肥基準を用いて山田町各作物のN需要量を基肥、追肥別に算出した。有機肥料は主に基肥として利用されるため、基肥N需要量を堆肥・液肥のN需要量とした。粗飼料の需要量は、牛の飼養頭数、飼料給与量²⁴⁾、粗飼料の投入量²⁴⁾を用いて算出した。また、山田町における乗用自動車保有台数（H18年千葉県市町村別自動車保有車両数）、年間走行距離（10,000km）、燃費（15km/L）よりガソリン消費量を算出した。算出されたガソリン消費量をガソリン発熱量、E10ガソリン発熱量を用いてE10ガソリンの消費量に換算し、E10ガソリンに添加されるエタノールの需要量を求めた。

4. 解析結果と考察

(1) バイオマス利活用システムの施設構成

表-4に各シナリオの処理施設構成、コスト、GHG排出量を示す。粗飼料、エタノールの生産量が地域の需要量を超えないように設定したため、コスト、GHG、合計コスト最小化シナリオでは、稲わらは約3,900tが飼料

表4 シナリオ別の処理施設構成・コスト・GHG 排出量

項目		コスト 最小化	GHG 最小化	合計コスト 最小化	現状処理	
処理施設構成 (1年)	堆肥化	乳牛糞尿	25,648	23,950	25,648	
		肉牛糞尿	11,851	11,851		11,851
		豚糞尿	33,864	17,800	28,480	33,864
		鶏糞				2,939
		稲わら				
		もみ殻				
	飼料化	林地残材				
		乳牛糞尿				
		肉牛糞尿				
		豚糞尿				
		鶏糞				
		稲わら	3,908	3,908	3,908	
	メタン発酵 発電	もみ殻				
		林地残材				
		乳牛糞尿		1,698		25,648
		肉牛糞尿			11,851	
		豚糞尿		16,064	5,384	
		鶏糞				
	直接燃焼 発電	稲わら				
		もみ殻				
		林地残材				
		乳牛糞尿				
		肉牛糞尿				
		豚糞尿				
	エタノール化	鶏糞	2,939	2,939	2,939	
		稲わら	189	189	189	
		もみ殻	1,524	1,524	1,524	
		林地残材				
		乳牛糞尿				
		肉牛糞尿				

化、約 760t がエタノール化に利用されるほか、残りの約 190t が直接燃焼発電に利用されることが示された。また、林地残材はエタノール化に、鶏糞、もみ殻は直接燃焼発電に利用される結果となった。牛・豚糞尿に関しては、コスト最小化シナリオでは、堆肥化利用が主体となったが、GHG および合計コスト最小化シナリオでは、約 72%が堆肥化、約 28%がメタン発酵発電施設に利用されることが示された。これは、メタン発酵発電施設では発電による GHG 削減効果が大きい原因である。また、現状処理シナリオでは、家畜糞尿がすべて堆肥化、メタン発酵処理されているため、堆肥・液肥の N 供給量が農地での基肥 N 需要量を約 30t 超えていることが分かった。

(2) 経済コスト

表4 に示したように、コストとしては、コスト最小化シナリオでは約 608 百万円で、GHG 最小化シナリオで

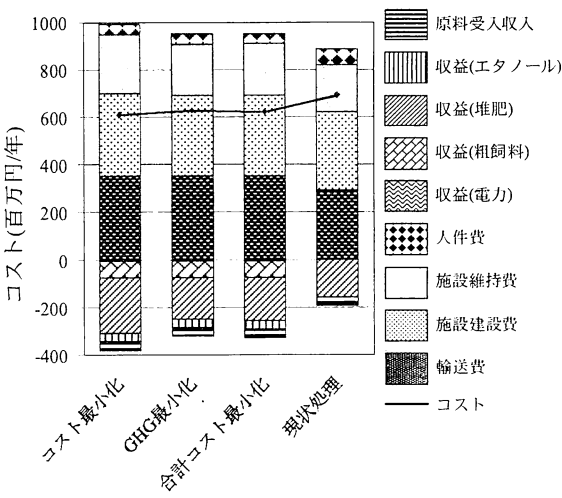


図3 各シナリオのコスト

は約 628 百万円で、合計コスト最小化シナリオでは約 622 百万円であった。現状の処理システムと比し、コスト最小シナリオでは約 84 百万円が減少した。

図3 に各シナリオのコストの内訳を示す。各シナリオともバイオマス輸送費約 35%、施設建設費約 36%、施設維持費約 24%、人件費約 5%を占めている。また、各シナリオとも堆肥の販売収益が見られた。コスト最小化、GHG 最小化、合計コスト最小化のシナリオでは、粗飼料、エタノールの販売収益も見られた。

(3) GHG 排出量

図4 に各シナリオの GHG 排出量を示す。各シナリオとも施設運用段階でのエネルギー・資材・薬剤に由来する GHG 排出量が約 50-60%、大きな割合を占めている。また、コスト最小化、GHG 最小化、合計コスト最小化シナリオでは、肥料、粗飼料、電力、エタノールによる GHG 削減量が見られた。また、現状では約 50%の稲わらが焼却処分されているため、稲わら焼却処分による GHG 排出量 (CH₄と N₂O) が約 680t-eqCO₂と推計された。現状処理シナリオに比較し、GHG 最小化シナリオでは約 1,160t-CO₂が減少した。

(4) CO₂削減コストの変動による影響

本研究では、現在 CO₂削減コストを 30,000 円/t-CO₂とし、また、技術の発達に伴い CO₂削減コストが削減する可能性を考慮して CO₂削減コストの変動幅を 5,000～50,000 円/t-CO₂の範囲とした。図5 に CO₂削減コストの変動による処理施設の構成、コスト、GHG 排出量を示す。図5 に示されたように、CO₂削減コストが 10,000 円/t-CO₂以下になる場合、バイオマスの 88%は堆肥化に処理され、

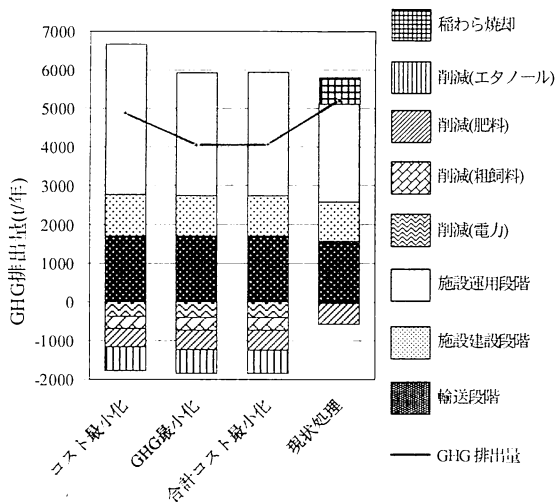


図4 各シナリオのGHG排出量

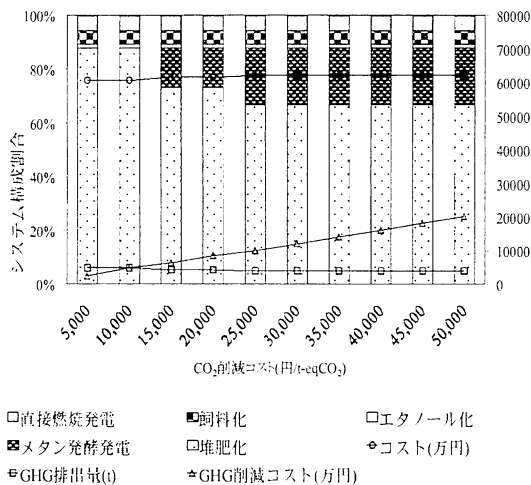


図5 CO₂削減コストの変動の影響

GHG 排出量が約 4,870t になることが示された。CO₂削減コストが 15,000-20,000 円/t-CO₂ である場合、バイオマスの 73%は堆肥化処理、約 15%はメタン発酵処理となり、GHG 排出量が約 4,310t になった。さらに、CO₂削減コストが 25,000 円/t-CO₂ 以上である場合、約 21%がメタン発酵処理となり、GHG 排出量が約 4,050t になった。これは CO₂ 削減コストが増大すると、GHG 削減の価値が高く評価されて、GHG 排出削減効果の高いメタン発酵発電施設が選択される原因である。

(5) 輸送単価や再生製品販売価格などの変動による影響
コストにどの程度の影響を与えるかを把握するには、

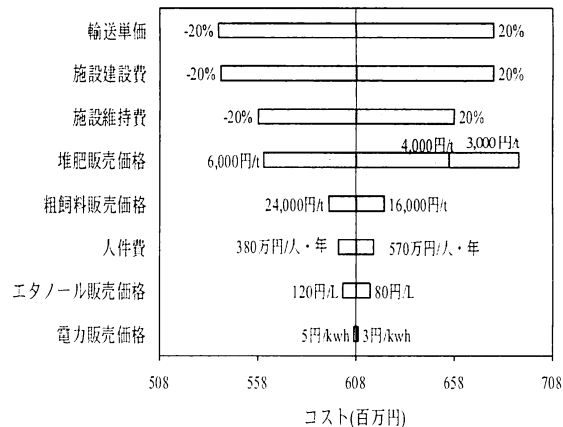


図6 輸送単価、再生製品販売価格などの影響

各要素の感度分析を行った。図6に輸送単価や再生製品販売価格などが基本設定値から±20%変動したとすると、コストがどのように変化するかが示されている。図6に示されたように、輸送単価、施設建設費、施設維持費が最もコストを左右し、輸送単価、施設建設費、施設維持費が 20%削減すると、コストがそれぞれ約 12%、11%、8%減少した。また、堆肥販売価格を 5,000 円/t から 4,000 円/t に変動させると、コストが約 8%増加した。さらに、堆肥化販売価格が 3,000 円/t に減少すると、メタン発酵施設が選ばれ、コストが約 14%増加した。また、他の要素の変動によるコストへの影響が小さいことが分かった。

5. まとめ

本研究では、地域内に存在する廃棄物系バイオマスを対象として、エネルギー利用、マテリアル利用、経済性、GHG 排出量を考慮してバイオマス利活用システム設計のための最適化モデルを作成した。千葉県山田町を対象にしたケーススタディの解析結果から、コスト最小化、GHG 最小化、合計コスト最小化の三つの最適処理システムを提案した。その結果、以下のことが判明した。

- (1) 最適化計算では、目的関数や制約条件によって得られる処理施設の構成が異なる。コスト最小化シナリオでは牛・豚糞尿は堆肥化が主体処理となったが、GHG 最小化および合計コスト最小化では GHG 削減効果の高いメタン発酵発電施設が選ばれた。
- (2) 現状処理システムと比較して、コストも GHG 削減量も優れる最適化処理システム（合計コスト最小化シナリオ）では合計コストが約 104 百万円が削減された。
- (3) CO₂ 削減コストの変動を考慮した解析では、CO₂ 削

減コストの増大に伴い、GHG 削減効果の高いメタン発酵発電施設が選択された。

(4) 本稿の設定条件では輸送単価、施設建設費、施設維持費、堆肥販売価格によるコストへの影響が大きかった。

本研究では、バイオマスの発生や利用に関しては地理的な分布や季節的な変動は考慮していない。バイオマスの発生地点ごとの発生量や発生時期、堆肥などの再生製品の需要地を考慮してより詳細な解析が今後の課題である。

参考文献

- 1) 伊藤吉紀, 中田俊彦: 規模の効果と需給均衡を考慮した木質バイオマスエネルギーシステムの試設計, *Journal of the Japan Institute of Energy*, No.86, pp. 718-729, 2007.
- 2) 磐田朋子, 玄地裕, 島田荘平: 再生製品の需給バランスを考慮した家畜糞尿処理最適化モデルの開発, *Journal of the Japan Institute of Energy*, No.85, pp. 531-541, 2006.
- 3) 河西英明, 森岡泰樹, 中田俊彦: 畜産廃棄物利活用のための地域最適システム設計に関する研究, *Journal of the Japan Institute of Energy*, No.86, pp. 256-264, 2007.
- 4) 森岡泰樹, 中田俊彦: 技術特性および経済性を考慮した地域バイオマス利活用システムの最適設計, *電学論 C*, Vol.128 (2), pp. 176-183, 2008.
- 5) 志水章夫, 楊翠芬, 井原智彦, 玄地裕: ライフサイクルを考慮した家畜排せつ物の地域内処理システム設計手法, *環境システム研究論文集* 33, pp. 241-248, 2005.
- 6) 菱沼竜男, 志水章夫, 楊翠芬, 玄地裕: 地域的な家畜糞尿処理・利用システム検討への LCA 適用例: 共同型メタン発酵施設の導入に伴う温室効果ガス排出量と費用の試算, *日本 LCA 学会誌*, Vol.5 (1), pp. 68-78, 2009.
- 7) 中央畜産会: 堆肥化施設設計マニュアル, pp. 246, 2001.
- 8) 畜産環境整備機構: 家畜糞尿処理・利用の手引き, 東京, 1998.
- 9) 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」: バイオマス利活用システムの設計と評価, 2008.
- 10) 森口敬太, 鈴木保志, 後藤純一ほか: 林地残材を木質バイオマス燃料として利用する場合のチップ化と運搬コスト, *日林誌*, 86(2), pp. 121-128, 2004.
- 11) 秋田県: 秋田県バイオエタノール推進戦略(案), 2008.
- 12) 楊翠芬, 匂坂正幸: 稲わらからのバイオエタノール生産システムに関する評価, *日本 LCA 学会誌*, Vol.5 (4), pp. 501-509, 2009.
- 13) 菱沼竜男, 井原智彦, 志水章夫, 楊翠芬, 玄地裕: LCA 手法を用いた肥育豚糞尿処理システムの環境影響の比較, *農業施設*, Vol.38 (1), pp. 43-56, 2007.
- 14) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): バイオマスエネルギー導入ガイドブック, 2005.
- 15) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/セルロース系バイオマスを原料とする新規なエタノール醗酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発, 2006.
- 16) 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会: RPS 法の評価検討について, 2005.
- 17) 農林水産省生産局畜産部: 稲わらをめぐる状況, 2005.
- 18) 小泉達治: 米国におけるバイオエタノール政策・産業の展開と課題, *農林水産政策研究所レビュー*, 2008.
- 19) 東京電力: “サステナビリティレポート”, 2009.
- 20) 環境省地球環境局: 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン(試案 ver1.6), 2003.
- 21) 楊翠芬, 菱沼竜男, 匂坂正幸: LCA 手法を用いた稲わらの利活用システムにおける GHG 排出量と経済性評価, *環境情報科学論文集* 23, pp. 303-308, 2009.
- 22) 甲斐沼美紀子: 地球温暖化対策立案のための政策分析ツールの開発, *地球環境研究センターニュース* Vol.10, No.4, 1999.
- 23) 朝野健司, 美濃輪智朗: 日本におけるバイオエタノールの生産コストと CO₂削減コスト分析, *Journal of Japan Institute of Energy*, 86 (12), pp. 957-963, 2007.
- 24) (独) 農業技術研究所機構: 日本標準飼料成分表, 中央畜産会, 東京, 2001.

DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZATION MODEL FOR WASTE BIOMASS UTILIZATION SYSTEM

Cuifen YANG, Motoko YAMANARI and Masayuki SAGISAKA

In this study, we built an optimization model for waste biomass utilization system that considered

energy conversion technology, material utilization of the biomass and demand of biomass by-product. Also, we designed a waste management system and a biomass utilization system in Yamada town of Chiba prefecture using the optimization model. Furthermore, we performed sensitivity analysis of carbon dioxide reduction cost, transportation unit price and by-product selling price to the economic cost.

As a result, while the livestock excreta were mainly treated for composting in the cost minimization scenario, but about 30% of the livestock excreta were treated in the methane fermentation plant in the GHG emission minimization scenario and in the total cost minimization. In the total cost minimization scenario, the total cost was reduced by 104 million yen in comparison with the current disposal system.