特集「社会システムのLCA: Social/Dynamic LCAの確立を目指して」

研究論文

地域的な家畜ふん尿処理・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

菱沼 竜男・志水 章夫・楊 翠芬・玄地 裕

An Approach of Investigating Local Livestock Manure Treatment System by LCA: Calculation of Greenhouse Gas Emissions Reduction Performance on Utilizing Centralized Biogas Plant

Tatsuo HISHINUMA, Akio SHIMIZU, Cuifen YANG and Yutaka GENCHI

Synopsis:

Objectives. From the viewpoint of importance to construct local livestock manure treatment and utilization system with low environmental impact, there was required planning local manure treatment system by quantitative and comprehensive evaluation on environmental aspects and cost. We evaluated local dairy cow manure treatment and utilization system introducing centralized biogas plant using life cycle assessment (LCA) and cost analysis with optimization software and database construction on geographic information system (GIS) to confirm availability of LCA approach for local manure treatment system planning.

Results and Discussion. LCA approach was applied to case study, dairy cow manure treatment and utilization system at Yamada town in Chiba. As the results, it revealed that urine purification process at current manure treatment system was large impact at GHG emission. From the results of comparing GHG emission and total cost at each scenario, the alternative manure treatment and utilization system, utilizing manure compost depot for individual farm and introducing centralized biogas plant at west area was effective to reduce GHG emission. This approach was able to show the different types of equipments selection at system planning by objectives of scenario conditions. And it indicated introducing location for centralized biogas plant utilization, considered with nitrogen demands at local agricultural land. Furthermore, it calculated life cycle GHG emission by applying LCA including analyzing relation and link of several processes.

Conclusions. We showed LCA approach, using GIS and optimization software, is able to consider local livestock manure treatment and utilization system planning for low environmental impacts.

Keywords: Livestock manure treatment; Centralized biogas plant; Local system planning; Greenhouse gas emission; Cost

1. はじめに

家畜ふん尿は、窒素（以下、N）や有機物を含むため、作物への養分供給や農地土壌の改良などの効果をもつ資材と位置付けることができる。しかし、家畜ふん尿は、その栄養塩類や易分解性有機物のために環境負荷物質の排出源としての一面を持っていることから、より環境負荷の少ない処理および利用システムの構築が望まれている。家畜ふん尿処理に関する環境面での規制は、2004年に施行された「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用促進に関する法律」がある。これによって、ふん尿の処理・保管施設の管理の適正基準が設定されるとともに、堆肥利用を基本とし

た畜産農家と耕種農家との連携システムの構築など、ふん尿利用の促進のために地域の実情に即した施設設備の促進が図られている。ただし、これらの取組みには、個別対応だけでは労働作業および費用の面から限界があり、畜産農家や営農集団の自助努力と同時に自治体や関連組合による個別経営の枠を越えた地域的なふん尿処理・利用システムの構築が必要だと考える。

また、家畜ふん尿処理では、処理に伴って排出される温室効果ガス（以下、GHG）が課題となっている。特に、堆肥化処理や液肥化処理、浄化処理などの代表的な処理方式では、その作業過程においてメタン（以下、CH₄）や重

菱沼 竜男・楊 翠芬・玄地 裕／(独)産業技術総合研究所安全科学研究部門／〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1

志水 章夫／(株)エー・アイ・イー研究社／〒102-0072 東京都千代田区飯田橋2丁目9-6 東西館本館34号室

Tatsuo HISHINUMA, Cuifen YANG and Yutaka GENCHI / National Institute of Advanced Industrial Science and Technology / 16-1 Onogawa Tsukuba Ibaraki 305-8569

Akio SHIMIZU / AIE Research, Inc. / Room no.34 Touzaikanhonkan 9-6 2 Iidabashi Chiyodaku Tokyo 102-0074

酸化窒素（以下、 N_2O ）などの温室効果ガスが排出される¹⁾。2005年における家畜ふん尿処理に関連するGHG排出量は、二酸化炭素（以下、 CO_2 ）に換算して $7.2\text{Mt}^{2)}$ であった。一方で、ふん尿処理段階のGHG排出量が低い施設としてはメタン発酵施設が有効である。メタン発酵施設は、密閉系の処理方式であることから処理段階の環境負荷物質の排出が抑制され³⁾、処理後のふん尿（以下、消化液）ではアンモニア態窒素の含有量が増加⁴⁾し化学肥料の代替として利用できる⁵⁾など、環境面やふん尿利用の面で有効性が報告されている。北海道の共同利用型のメタン発酵施設利用事例において、導入前のシステムに比べてGHG排出量が低減したという報告がある⁶⁾。また、共同型メタン発酵施設（以下、共同型メタン施設）の利用については、北海道だけでなく府県での導入事例もあり、県や市町村が事業主体となって小中規模の畜産農家を対象とした利用例がある⁷⁾。これらのことから、自治体や関連組合が、家畜ふん尿処理に伴う環境負荷を低減するための地域的なシステム構築の方向性として、共同型メタン施設の導入を検討することは十分に考えられる。

地域における新たなふん尿処理・利用システムを構築するためには、現状や具体的なシステム案を客観的に比較し評価する必要があると考える。これまでに、地域的なふん尿処理・利用システムに関してNフロー分析による評価⁸⁻¹⁰⁾や堆肥の需給バランスを考慮した地域診断¹¹⁾などが行われている。メタン発酵施設の導入検討に関しては、メタン発酵施設を発電施設として捉えた場合の検討事例として施設配置と費用に関する報告がある¹²⁾。このような評価に加えて、ライフサイクル的な観点から導入するシステムに伴う環境負荷排出量や費用などを定量的に把握することは、地域のふん尿処理・利用計画への意思決定に関し有用だと考える。

そこで本研究では、LCAを用いて地域的なふん尿処理・利用システム案の検討および共同型メタン施設導入案について定量的な判断材料を整理することを目的とし、千葉県旧山田町（現在は香取市の一部）の乳牛を対象として共同型メタン施設を導入した場合のライフサイクルのGHG排出量および費用を試算した。また、LCAを用いたふん尿処理・利用システム検討方法の妥当性について考察した。

2. 方法

2.1 システム案の検討方法

より環境負荷の少ないふん尿処理・利用システム案（以下、代替システム案）を検討するためには、システムの環境負荷排出量および費用を現状のふん尿処理・利用システムと代替システム案の間で比較できることが必要である。

また、地域におけるふん尿処理・利用システムを検討するには、目的に応じた処理技術（施設）の選択、施設立地場所の選定およびふん尿または堆肥や液肥の輸送経路の選定が必要である。ここでは、これらの検討を行うために、志水ら¹³⁾が報告したLCAを用いた地域的な家畜ふん尿処理システムの設計方法を参考に、代替システム案の検討を行った。

システム検討では、対象地域を設定し、現状のふん尿処理・利用システムと代替システム案を検討するために、ふん尿処理・利用システムの評価モデル（プロセスモデル）を整理し、複数のシナリオを作成した。対象地域の家畜飼養頭数、農地面積などのデータは、地域環境データとして量と分布情報を持ったデータを整理し、地域の特徴をシナリオ検討に反映させた。また、最適化計算を用いた解析を行うことで、目的に応じた処理技術選択、立地場所選定および輸送経路の選定を行った。最適化計算には、線形計画法や整数計画法、混合整数計画法を用いた計算から技術選択や輸送経路選択、施設配置問題の解析が可能な解析ソフト¹⁴⁾（以下、RCACAO）を用いた。RCACAOは、各種制約条件下で目的に応じた最適化計算を行うことができる¹⁵⁾。すなわち、ふん尿処理・利用システムの評価モデルと対象地域の地域環境データを整備することで、地域的な制約条件を考慮しながら総合的な環境負荷排出量や費用の最小化などを目的としたシステムの施設配置や環境負荷排出量、費用を把握することができる。これによって、現状のふん尿処理・利用システムの課題を抽出し、より環境負荷の少ないふん尿処理・利用システムの具体的な代替システム案を検討できると考えた（Figure 1）。

2.2 対象地域

本研究では、千葉県旧山田町を共同型メタン施設の利用可能性を検討する調査対象地として選定した。千葉県は、資源循環型社会の推進の一環として「バイオマス立県千葉」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。その中で、旧山田町は、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、家畜ふん尿を中心とした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¹⁶⁾。本評価では、LCAを用いた代替システム案の検討事例として旧山田町の肉牛と乳牛のふん尿を対象とし、特に乳牛ふん尿処理・利用システムについて検討した。旧山田町の概況は、2000年において耕地面積が $2,340\text{ha}^{17)}$ で、肉牛の飼養頭数が約1,200頭、乳牛の飼養頭数が約1,200頭¹⁸⁾である。

Figure 1. The procedures for investigation of local livestock manure treatment system utilizing RCACAO at this case study.

2.3 システム境界と機能単位の設定

評価対象としたシステム境界は、ふん尿を収集し、処理して農地に還元されるまでの一連のプロセスとし、ふん尿の利用は旧山田町域内で完結するとした (Figure 2)。特に、乳牛を対象としたふん尿処理施設の違いを検討するために、堆肥化施設5種、尿処理施設2種と共同型メタン施設の処理技術を選択肢として整備した。評価では、各処理施設の導入段階、消費される電力や燃料、薬剤の製造および使用

段階を調査範囲に含めた。輸送、散布作業については既存の作業車両を利用できると考え、トラクタおよび作業車両の導入段階は調査範囲外とした。ただし、共同型メタン施設で利用する作業車両は新規導入されると考え、その導入段階を調査範囲に含めて評価を行った。また、機能単位は、旧山田町で飼養されている肉牛および乳牛から1年間で排泄されたふん尿を処理・利用することと設定した。

Figure 2. Process flow model and system boundary for evaluation of manure treatment and utilization systems.

2.4 評価項目

評価対象とする環境影響は、近年の地球規模での環境問題として注目されている地球温暖化への影響とし、一連のふん尿処理および利用作業に消費された化石燃料および家畜ふん尿に由来して排出されたCO₂、CH₄およびN₂Oとした。また、これらのGHGについて温暖化ポテンシャル係数（GWP₁₀₀）¹⁹⁾を用いた特性化評価を行った。ただし、ふん尿由来のCO₂はカーボンニュートラルの考え方から計上しなかった。また、ここでは、地域的なふん尿処理・利用システムの代替案の検討を目的としており農作業に伴う影響を評価対象としないことから、堆肥や液肥などの散布段階でのGHG排出量は散布作業で消費した燃料由来の排出量のみを計上し、土壌からのCH₄やN₂Oの排出は調査範囲外とした。

費用の試算では、ふん尿処理・利用システムに関連した費用として施設の導入費、運用費とふん尿、堆肥などの輸送、散布に係る費用を計上した。また、共同型のふん尿処理施設の利用では、農家のふん尿処理作業、労働時間を低減できる一方で共同型施設の管理に人件費を要すると思われる。共同型施設の利用による経済効果を判断するためには、農家での現状のふん尿処理の労務費と共同型施設の人件費を比較することが必要となるが、個別農家のふん尿処理に係る労務費は農家の経営状況で大きく異なると思われること、評価モデルにおいて畜産経営に関する詳細な設定まで踏み込めなかったことから、ふん尿処理に関連する労務費および人件費は調査範囲外とした。ただし、本事例は、同じシステム境界、評価範囲の中でふん尿処理システムからの包括的な環境負荷排出量とそこに投入される各種資材の費用を推計し、代替システム案を検討することをねらいとしており、この点において今回の評価項目は検討内容に耐えるものだと考える。

2.5 データ整備と評価シナリオ

2.5.1 プロセスインベントリの整備

乳牛ふん尿処理施設のプロセスインベントリは、固形物（ふん）の処理施設として堆肥舎、開放型堆肥化施設、ハウス乾燥施設、密閉縦型堆肥化施設、液分（尿）の処理施設として浄化処理施設と液肥化処理施設、ふん尿混合物の処理施設としてセミソリッド処理用の堆肥舎およびスラリー処理用の共同型メタン施設を整備した。

現在、乳牛ふん尿を主要な処理対象とした共同型メタン施設では、小規模で日処理量10t（乳牛の成牛換算で200頭程度）、大規模で日処理量20 - 60t（乳牛の成牛換算で400 - 1,000頭程度）の処理規模となっている^{7, 30)}。これらの施設は、実証試験を目的とした施設や堆肥化設備、排水処理設備を併設した施設など、その仕様が大きく異なっており、

実施施設のデータから代表的と考えられる共同型メタン施設のプロセスインベントリを作成することができなかった。そこで、共同型メタン施設は、プラントメーカーから提案された数値として比較的整理されたエネルギー収支や施設費用などのデータ²⁹⁾が得られたことから、日処理量23t（乳牛の成牛換算で400頭程度）の施設と設定した。ただし、設定した共同型メタン施設の単位頭数当りの建設費は、既存の施設（日処理量20 - 60tの施設）に比較して1.2 - 2.5倍であった。したがって、今回の事例は、乳牛ふん尿の処理・利用を目的とした施設として施設設計値が得られた日処理量23tの共同型メタン施設を導入した場合の評価であり、処理規模の異なる共同型メタン施設を導入した場合の分析までは適用できない。

肉牛のふん尿処理施設のプロセスインベントリは肉牛用堆肥舎のみとした。また、輸送および散布作業での利用車両は、堆肥でトラクタけん引式マニュアルスプレッダ、液肥および消化液でけん引式スラリータンクを用いると仮定した。ふん尿処理施設および作業機のプロセスインベントリは、菱沼ら³⁾と同様の方法で施設設計値や利用事例などを参考にデータを収集して（Table 1）、単位量のふん尿処理を基準として導入段階及び運用段階のデータを整備した。施設の導入段階の環境負荷排出量は、導入費（建設費と設備機器費など）から減価償却費を求め、産業連関表による環境負荷原単位データブック³⁷⁾の環境負荷原単位を乗じて整理し、施設の処理規模で除して算出した。運用段階の環境負荷排出量は、施設調査事例や試験報告などを参考に各処理施設、散布車両での単位処理量あたりの環境負荷排出量、電力や燃料、資材などの消費量のデータを整理した。また、各プロセスで消費される燃料や電力などの消費資材も同様に、単位量当りの環境負荷排出量や費用という形式でデータを整備した。また、生産された堆肥や液肥、消化液中のN含有量は、ふん尿中のN量から、処理に伴うアンモニア揮散や脱窒、N₂O揮散などによるN分の消失量を差し引いて推計した。これによって、各ふん尿処理・利用システムに関連する物質収支、環境負荷排出量および関連費用が、ふん尿処理量を基準として算出できる形式で整理できたと考える。

2.5.2 地域環境データの整備

地域的なふん尿処理・利用システムを検討するためには、対象地域の家畜ふん尿の発生場所、発生量、処理施設の位置、また堆肥や液肥の需要場所、需要量などを考慮する必要がある。また、ふん尿の発生場所と処理施設、堆肥などの需要場所を結ぶ輸送活動が必要となり、輸送経路を整理する必要がある。そこで、旧山田町の地域環境データとして乳牛、肉牛の飼養頭数、農地面積および道路距離をGIS

Table 1. Condition of manure treatment equipments and references.

	Manure treatment equipments	Reference
Compost depot with ventilation	3.0 t/day, Compost depot, Shovel loader, Aeration system, Storage shed	
Opened composting equipment	3.0 t/day, Opend composting system (automatic)* Compost depot **, Aeration system, Storage shed	
Plastic house drying	3.0 t/day, Compost depot *, Aeration system Plastic house drying (automatic)** , Storage shed	Dairyman(1996) ²⁰ , JLIA(2003) ²¹ , LEIO (1998 ²² , 2004 ²³ , 2005 ²⁴), Miyazaki Livestock Industry Association (2001) ²⁵ , Maeda <i>et al</i> (1998 ²⁶ , 2001 ²⁷), MoE(2002) ²⁸ , Osada(2002) ¹
Fermentation tank of vertical kiln type	3.6 t/day, Fermentation tank, Storage shed	
Purification (batch)	7.8 t/day, Activated sludge process (batch), Aeration tank, Sterilization process	
Purification (continuous)	7.8 t/day, Activated sludge process (continuous), Aeration tank, Clarifier process x 2, Sterilization process	
Liquid composting equipment	6.0 t/day, Aeration tank, Storage tank	
Centralized biogas plant	23.0 t/day, Digested tank, Mesophilic, Retention period (25 days) Digested slurry storage tank (6 months), Co-generation system, Biogas production (40m ³ /t-raw manure), CH ₄ content (65%) Slurry Tanker(12.5t) x 2	Iwate prefecture(2003) ²⁹ ,CERI(2005) ³⁰ , JORA(2003) ³¹ , LEIO(2005) ²⁴ , NILGS(2005) ³² ,
Vehicle	Truck, Manure spreader, Slurry tanker	LEIO (1998) ²² , NEDO(2005) ³³
Other materials	Electricity, Diesell fuel, and so on	MAFF(2003) ³⁴ , EDMC(2005) ³⁵ JEMAI-LCA Pro data base ³⁶ , Nansai <i>et al</i> (2002) ³⁷

* Primary manure treatment

** Secondly manure treatment

(Geographic Information System: 地理情報システム) を用いて、3次メッシュ (1km×1km) 単位のデータとして整理し (Figure 3)、各メッシュでのふん尿発生量、N需要量を推計した。家畜飼養頭数や分布は、2000年農業集落カード (千葉県)¹⁸⁾ のデータを用いて整理し、乳牛および肉牛のふん尿排せつ量の原単位²¹⁾ を用いてふん尿量を推計した。旧山田町の土地利用分布は、平成14年度日本水土図鑑データ³⁸⁾ から田、畑、樹園地、牧草地の4つに分けて整理した。農地でのN需要量は、農地での作物別の作付面積を農林水産関係市町村別データ³⁹⁾ から推計し、千葉県の主要農作物等施肥基準を用いて田、畑、樹園地、牧草地の区分で算出した。ここで推計した農地別のN需要量を、先に整理した土地利用分布データと結合させてN需

要量の分布を整理した。また、道路網データは、千葉県デジタル道路データ⁴⁰⁾ を用いて整理した。

GISを用いて整備した結果、旧山田町は48個の3次メッシュで表現され、乳牛が10箇所、肉牛が8箇所のメッシュであり、排せつされるふん尿量を約35,000t/年と推計した。また、農地でのN需要量が、旧山田町の作付作物を反映して農地の分布とともに整理できた。これによって、乳牛および肉牛のプロセスを機能単位であるふん尿排せつ量でデータを整備し、農地プロセスでは堆肥や液肥などの散布量を制限するためにN需要量を基準とした施肥可能量としてデータを整備でき、旧山田町の家畜ふん尿処理・利用に関する発生量と需要量の量的なデータが、位置データを持った形式で整理できた。

Figure 3. Site specific data construction by GIS.

2.5.3 評価シナリオの設定

評価対象としたシナリオは、旧山田町の現状のふん尿処理施設の利用状況から仮定したふん尿処理・利用システム（以下、基本シナリオ、図表ではBase scenarioとする）、システム全体における費用を最小化した場合のふん尿処理・利用システム（以下、費用最小化シナリオ、図表ではCost minimizingとする）、システム全体でのGHG排出量を最小化した場合のふん尿処理・利用システム（以下、GHG最小化シナリオ、図表ではGHG minimizingとする）および共同型メタン施設（23t/日）を利用しながらシステム全体の費用を最小化した場合（以下、共同型シナリオ、図表ではCBP + Cost minimizingとする）を設定した。また、共同シナリオでは、RCACAOによる最適化計算での解析を簡易化するために共同型メタン施設（23t/日）の利用数は1基に限定した。

基本シナリオで利用されるふん尿処理施設は、ヒアリング調査などから既存の処理施設と立地場所を整理することで、旧山田町の現状のふん尿処理施設の利用状況を部分的に反映させた。ただし、利用している施設が不明であった部分については、堆肥化施設にはふんを対象とした堆肥舎、尿処理には浄化処理施設を利用すると仮定した。費用最小化シナリオでは、費用削減を優先事項とした場合の施設選定とGHG排出量および費用が明らかになる。GHG最小化シナリオでは、全体的なGHG排出量の低減を最優先した場合の施設選定と費用が把握できる。共同型シナリオでは、共同型メタン施設（23t/日）の導入効果について、立地場所や収集、配送範囲とこれに伴うGHG排出量および費用が把握できる。

3. 結果と考察

3.1 シナリオ別の施設選択と立地場所

基本シナリオでの利用施設は、密閉縦型堆肥化施設、開放型堆肥化施設が実際に利用されている場所のメッシュで選択された。また、その他のメッシュでは、固形物を対象とした堆肥舎が選択され、尿処理では設定したとおり浄化処理施設が選択された（Figure 4）。ふん尿の農地利用のプロセスでは、飼養頭数の多いメッシュにおいて隣接するメッシュまで輸送を行い堆肥の散布を行っており、部分的なメッシュで堆肥が過剰となることがわかった。

費用最小化シナリオでは、ハウス乾燥施設を個別的に利用し、集約的に液肥化施設を利用するというシステムが選択された（Figure 5）。また、乳牛ふん尿の利用プロセスで液肥の輸送が無かったことから、集約的に利用する液肥化処理施設の立地は農地でのN需要量の影響を受けて選択されたと考えられた。GHG最小化シナリオでは、処理施設にはセミソリッド処理用の堆肥舎が選択された。基本的には、個別での堆肥化処理を行うが、部分的に集約化を行うシステムであった（Figure 6）。GHG最小化シナリオでは、肉牛だけでなく乳牛ふん尿も堆肥化処理が行われた。また、部分的なメッシュで施用堆肥からのN供給量が過剰となり、隣接するメッシュに堆肥を振り分けていた。また、これらのシナリオ分析で、ふん尿処理施設の集約的な利用が示されたことは、作成した評価モデルとRCACAOによる解析によってふん尿処理の集約化の有効性を反映できた結果だと考える。

共同型シナリオでは、設定した共同型メタン施設（23t/日）は、町の西側の乳牛飼養数の比較的多い地域に立地し

Figure 4. Manure treatment system and compost distribution at Base scenario.

Figure 5. Manure treatment system and solid or liquid compost distribution at Cost minimizing.

Figure 6. Manure treatment system and compost distribution at GHG minimizing.

た。その他の部分は、費用最小化シナリオと同様にハウス乾燥施設と液肥化施設を用いたシステムであった (Figure 7)。消化液の利用プロセスでは、共同型メタン施設の立地メッシュから離れたメッシュまで輸送し散布していた。これは、堆肥よりも消化液でN含有量が多いために、消化液を利用する農地を比較的広範囲で確保する必要性が示されたと考える。

分析結果は、施設選定においてあらかじめ設定した施設

利用が表現でき、農地のN需要量の制約を受けた施設の立地場所選定、ふん尿資材の施用先の選定が表現できた。また、システム全体での費用またはGHG排出量の最小化という目的に対して、ふん尿を集約的に処理するという効率的な施設利用方法が表現できた。これらのことから、本評価モデルと地域環境データおよびRCACAOを利用して、地域的なふん尿処理・利用システムの検討は可能であると判断した。

Figure 7. Manure treatment system and compost or digested slurry distribution at CBP + Cost minimizing.

3.2 シナリオ別の温室効果ガス排出量の比較

各シナリオでのGHG排出量は、その92.7 - 95.8%がふん尿処理段階の排出であり、施設導入に伴う影響は3.6 - 5.4%と小さかった (Figure 8)。また、費用最小化シナリオ、GHG最小化シナリオおよび共同型シナリオでの集約化に伴う輸送の影響は、全体の0.1 - 0.5%と小さかった。

基本シナリオでのGHG排出量は6,200t-CO₂eq/年と推計され、ふん尿に由来したN₂Oの影響が85.9%を占めた。特に、浄化処理に伴って排出した尿由来のN₂Oが全体の64.9%を占めた。費用最小化シナリオのGHG排出量は6,000t-CO₂eq/年であり、基本シナリオと比較して3.9%少なかった。特に、影響が大きかったのは液肥化処理に伴うN₂Oの影響 (63.0%) であった。GHG最小化シナリオでは、2,600t-CO₂eq/年のGHG排出量であり、基本シナリオよりも58.7%減少した。GHG最小化シナリオでは、ふん尿混合物をセミソリッドとして堆肥化しており基本シナリオや費用最小化シナリオでN₂O排出源となった尿処理を行っていない。これによって、ふん尿処理段階のGHG排出量を低くすることができたと考える。また、堆肥化に用いる水分調整材のオガクズ輸送に伴うGHG排出量の影響は非常に小さかった。共同型シナリオでは、4,800t-CO₂eq/年のGHG排出量と推計され、基本シナリオよりも22.8%少ない結果であった。また、費用最小化シナリオと共同型シナリオの比較から、共同型メタン施設 (23t/日) の導入に伴うGHG排出量低減効果は約1,200t-CO₂eq/年であった。

Figure 8. Comparison of life cycle greenhouse gas emissions at all scenarios.

3.3 シナリオ別の合計費用の比較

各シナリオでの費用では、施設導入費が46,600 - 71,800千円/年であり合計費用の28.9 - 83.2%を占めていた (Figure 9)。また、集約化に伴う輸送費の影響は1.0%以下と小さかった。

基本シナリオでは合計費用が119,600千円と試算され、施設導入費が52.9%、運用費46.9%、散布費0.2%を占めた。費用最小化シナリオでは合計費用が68,700千円であり、基本シナリオに比べてふん尿処理段階の費用が大きく低減した。特に、ハウス乾燥施設は、天日利用方式の施設であり処理段階の燃料消費量が少なく、戻し堆肥を水分調整材として利用するためにオガクズなどの水分調整材の購入費を必要としない。また、尿処理では、液肥化処理施設を集約

Figure 9. Comparison of total cost at all scenarios.

化することで施設の立地数を少なくしていた。費用最小化シナリオでは、運用費の少ないハウス乾燥施設の利用と集約的な液肥化処理施設の利用で導入費用を抑え、合計費用を低減したと考えられる。GHG最小化シナリオの合計費用は161,300千円であった。GHG最小化シナリオでは、基本シナリオに比べて施設導入費用が26.3%減少したが、ふん尿処理段階の運用費が2倍程度の増加となり合計費用は34.9%増加した。特に、GHG最小化シナリオでは、含水率の高いふん尿混合物を堆肥化するために水分調整資材であるオガクズを大量に確保する必要がある。合計費用の56.6%がオガクズ購入費用であったことから、水分調整材の費用が課題となることが明らかであった。共同型シナリオの合計費用は86,300千円であった。共同型シナリオでは、基本シナリオに比べて施設導入費用が13.5%増加するものの運用費が75.3%減少し、合計費用は27.9%減少した。メタン発酵施設は、産出したバイオガスの利用で施設運用に必要とするエネルギーの供給が可能ことから、共同型メタン施設（23t/日）の利用によって運用費用は増加しなかった。また、費用最小化シナリオとの比較から、今回設定した共同型メタン施設の導入費用は年間約19,200千円となることがわかった。

3.4 現状のふん尿処理・利用システムの課題と代替システム案の検討

基本シナリオの評価結果より、旧山田町の乳牛ふん尿処

理・利用システムから排出されるGHGの低減には、 N_2O 排出源となる尿処理施設の検討が課題であると考えた。そこで、基本シナリオと複数の検討シナリオの評価結果から、各シナリオおよび共同型メタン施設（23t/日）の単位費用当りのGHG排出低減量を求め（Table 2）、GHG排出量の低減にむけた施設構成に関する代替システム案を検討した。

費用最小化シナリオでは、単位費用当たりのGHG排出量低減効果は $-3.5\text{kg-CO}_2\text{eq/千円}$ であり、尿処理施設を液肥化処理に変更しても尿処理過程での N_2O 排出量の低減効果は小さいと考えられた。GHG最小化シナリオのふん尿混合物の堆肥化を行う堆肥舎を利用した場合では、単位費用当たりの効果が $-22.7\text{kg-CO}_2\text{eq/千円}$ であり、GHG排出量の低減策として期待できた。特に、ふん尿混合の堆肥化処理は、個別農家や営農集団などの個別的に対応できる改善策として有効であると考ええる。ただし、オガクズなどの水分調整材を十分に確保することが必要となる。共同型シナリオでは、単位費用当たりのGHG排出量の削減効果が $-16.4\text{kg-CO}_2\text{eq/千円}$ であった。また、費用最小化シナリオの評価結果との比較から、共同型メタン施設（23t/日）の単独での単位費用当たりのGHG排出量削減効果は $-66.6\text{kg-CO}_2\text{eq/千円}$ であり、他のシナリオに比較して効果が高いことがわかった。これらの結果より、旧山田町の乳牛ふん尿処理・利用システムでは、個別的な対策としてふん尿混合物を対象とした堆肥化処理を推進し、一方で共同型メタン施設（23t/日）の導入を検討することがGHG排出量の低減に寄与する代替システム案になると考える。また、この場合の共同型メタン施設（23t/日）の導入先は、家畜飼養頭数や農地のN需要量の分布から旧山田町の西地区が候補になると考える。

3.5 システム検討方法の妥当性と課題

家畜ふん尿の地域的な処理・利用計画は、これまでも堆肥需要やコスト面からの評価がなされている^{41, 42)}。また、地域農業で体系的な計画を検討に対して小林ら⁴³⁾は、計画プロセスに関連する項目の整理やシステムの構成要素間の関係や内容を整理することの重要性を指摘している。特に、家畜ふん尿の利用計画に関してはシステムに伴う環境負荷の大きさ、地域内でのふん尿の利用可能性を把握する

Table 2. Performance of greenhouse gas emissions reduction at scenarios and centralized biogas plant.

	GHG emissions [t-CO ₂ eq/year]	Total cost [1,000yen/year]	Efficiency of GHG emission mitigation [kg-CO ₂ eq/1,000yen]
Base scenario	6,250	119,606	-
Cost minimizing	6,008	68,662	-3.5
GHG minimizing	2,582	161,334	-22.7
CBP + Cost minimizing	4,834	86,275	-16.4
(Centralized biogas plant, 23t/d)	-	-	-66.6

ことの必要性を指摘している。これらの指摘に照らして、今回の分析ではプロセスインベントリの整備および地域環境データを整備したことで、システムにおける要素間の関係や地域の特色を反映できたと考える。また、これらの整備データを基にLCAを適用し、最適化計算によるシナリオ別の環境負荷排出量および費用を定量的に把握できたことは、地域的なふん尿処理・利用システム検討に対してLCAを用いた今回の分析手法の有効性を示していると考ええる。

一方、LCAでは、分析における前提条件や収集したデータの詳細度や適用性などと検討内容との間に整合性を持った上で評価、解釈を行うことになる。今回の分析では、対象家畜を肉牛と乳牛に限定していることや、田や畑地での消化液利用が可能としているなどの前提条件を踏まえている。旧山田町では、乳牛、肉牛に加えて豚、鶏からのふん尿を含めた場合には、ふん尿量が農地での需要量を上回ることが判っている。また、現状の農作業では堆肥利用が主体であり、消化液を用いた施肥設計および作業体系の構築には技術的な課題があると考ええる。また、共同型メタン施設の導入案を検討した共同型シナリオでは、収集できたデータによる制約や解析上の理由から施設の処理規模や導入基数を限定している。今後、共同型堆肥化施設を利用して堆肥利用の範囲を地域外へ広げたり、浄化処理を積極的に整備したりするなどのシナリオ検討、規模の異なる共同型メタン施設や各種作目での農作業体系に即した散布方式などのプロセスインベントリを整備することで、より現実的な評価が行えると考える。

また、今回の評価では人件費を含んだ費用の評価ができなかったが、共同型メタン発酵施設の運営費に関しては人件費を含めた詳細な報告^{44, 45)}があり、このような報告とLCAによる環境面の評価を組み合わせで代替案を検討していくことも可能だと考える。ただし、地域的なふん尿処理・利用システムとして様々な共同型施設の利用シナリオを検討する必要性を考えると、現状における労働費と新規施設導入に伴う人件費のデータを整理し、比較方法を整理することが必要である。

4. まとめ

LCAを用いて地域的な環境負荷の少ないふん尿処理・利用システムの代替案を検討するために、千葉県旧山田町の乳牛ふん尿処理・利用システムを対象として、ライフサイクルのGHG排出量および費用の把握を行った。評価では、代表的な施設によるふん尿処理・利用システムの評価モデルを作成し、地域性を反映させるためにGISを用いて家畜飼養頭数や農地面積、道路距離などの量および分布データを整備した。また、基本システムの評価と

ともに複数のシナリオ分析からGHG排出量と費用を比較した。特に、分析ではRCACAOを用いて、シナリオ別のふん尿処理・利用システムの施設構成および立地場所の検討を行った。分析結果から、旧山田町の現状のふん尿処理・利用システムにおけるGHG排出の課題を把握した。また、シナリオ分析から、システム別のGHG排出量と費用を把握し、対策案の費用対効果を整理できた。結果として、旧山田町の西地区に共同型メタン施設(23t/日)を導入し、個別農家での対策案としてふん尿混合物を対象とした堆肥舎利用を促進することが、GHG排出量の低減に対して費用対効果の高い代替システム案になると提案できた。また、地域的なふん尿処理・利用システム検討への接近方法について、既存の地域農業システムの計画手法に関する報告と比較を行い、今回のLCAを用いた分析方法の妥当性を把握した。

今後、規模の変化に対応した処理施設の技術特性データを整理するとともに、費用評価の枠組みの整理および関連する費用項目のデータ収集を行うことが、LCAを用いて地域的なふん尿処理・利用システムをより現実的に検討していくことに役立つと期待される。

(平成20年7月28日受付、平成20年11月18日採択)

参考文献

- 1) 長田隆: 畜産草地研究所研究報告, 2, (2002), pp.15-62
- 2) 温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編: “日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2007 年 5 月”, (オンライン), 入手先 <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-archives_j.html>, (参照 2008-7-23)
- 3) 菱沼竜男, 井原智彦, 志水章夫, 楊翠芬, 玄地裕: 農業施設, 38(1), (2007), pp.43-56
- 4) 松中照夫, 成瀬往代, 熊井実鈴: 日本土壤肥料学会誌, 73(3), (2002), pp.297-300
- 5) Tafdrup S.: Water Science and Technology, 30(12), (1994), pp.133-141
- 6) 日向貴久: 2004 年度日本農業経済学会論文集, (2004), pp.337-341
- 7) 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導入ガイドブック (第2版)”, (2005)
- 8) 小林久, 千賀裕太郎, 上條雄喜: 第10回環境情報科学論文集, (1996), pp.137-140
- 9) 山口絵美, 澁澤栄, 笹尾彰, 千賀裕太郎, 上條雄喜, 小林久: 農作業研究, 32(3), (1997), pp.179-190
- 10) 白波瀬京子, 小林久, 財津吉寿: 農業土木学会資源循環研究部会論文集, 1, (2005), pp.81-94
- 11) 上條雄喜, 千賀裕太郎: 農村計画学会誌, 19(2), (2000), pp.119-130

- 12) 伊藤吉紀, 中田俊彦: 日本エネルギー学会誌, 87, (2008), pp.56-67
- 13) 志水章夫, 楊翠芬, 井原智彦, 玄地裕: 環境システム研究論文集, 33, (2005), pp.241-248
- 14) 産業技術総合研究所: “Regional Circulation And Capacity Optimizer (RCACAO) ver.0.9”
- 15) 菱沼竜男: 平成 18 年度家畜ふん尿処理利用研究会 畜産における環境影響評価とその利活用, 畜産草地研究所, (2006), pp.85-94
- 16) 農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」: “アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ”, 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所, (2007)
- 17) 農林水産省: “わがマチ・わがムラ -市町村の姿-”, (オンライン), 入手先 <<http://www.tdb.maff.go.jp/machimura/>>, (参照 2008-7-23)
- 18) 農林業統計協会: “2000 年世界農林業センサス農業集落カード (千葉県)”, (2000)
- 19) Intergovernmental Panel on Climate Change: “Climate Change 2001 The Science Basis”, (オンライン), 入手先 <http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/>, (参照 2008-10-31)
- 20) 羽賀清典 監修: “マニユア・マネージメント”, デーリイマン社, 札幌, (1996)
- 21) 中央畜産会: “堆肥化施設設計マニュアル”, 社団法人中央畜産会, 東京, (2003)
- 22) 畜産環境整備機構: “家畜ふん尿処理・利用の手引き”, 財団法人 畜産環境整備機構, 東京, (1998)
- 23) 畜産環境整備機構: “家畜ふん尿処理施設・機械選定ガイドブック (汚水処理編)”, (2004), (オンライン), 入手先 <<http://leio.lin.go.jp/>>, (参照 2008-7-23)
- 24) 畜産環境整備機構: “家畜ふん尿処理施設・機械選定ガイドブック (堆肥化処理施設編)”, (2005), (オンライン), 入手先 <<http://leio.lin.go.jp/>>, (参照 2008-7-23)
- 25) 宮崎県畜産会: “尿污水处理情報”, (2001), (オンライン), 入手先 <<http://miyazaki.lin.go.jp/osui/index.html>>, (参照 2008-7-23)
- 26) 前田武己, 松田従三: 農業機械学会誌, 60 (6), (1998), pp.63-70
- 27) 前田武己, 松田従三, 近江谷和彦: 農業機械学会誌, 63 (1), (2001), pp.41-47
- 28) 環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会: “平成 14 年度温室効果ガス排出量算定方法検討会農業分科会報告書 平成 14 年 8 月”, (オンライン), 入手先 <<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/index.html>>, (参照 2008-7-23)
- 29) 岩手県: “資源循環型モデル施設整備に係る基礎調査業務報告書”, (2003)
- 30) 北海道開発土木研究所: “積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト最終成果報告書”, (2005), (オンライン), 入手先 <<http://hozen.ceri.go.jp/project/top/>>, (参照 2008-7-23)
- 31) 日本有機資源協会: “バイオガスシステムの現状と課題”, 社団法人 日本有機資源協会, 東京, (2003)
- 32) 畜産環境対策技術評価手法検討委員会: “環境負荷と運搬費用の観点からの畜産環境対策施設評価プログラムの開発 - 養豚編 -”, 独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構畜産草地研究所, (2005)
- 33) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: “平成 16 年度成果報告書 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 / 製品等ライフサイクル二酸化炭素排出評価実証等技術開発 / LCA ケーススタディ: 三重県、千葉県、岩手県における LCA 手法の研究開発”, (2005)
- 34) 農林水産省: “平成 15 年農作物価統計”, (2003), (オンライン), 入手先 <<http://www.tdb.maff.go.jp/toukei/a02stopframeset>>, (参照 2008-10-31)
- 35) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット: “エネルギー・経済統計要覧”, 財団法人省エネルギーセンター, 東京, (2005)
- 36) 産業環境管理協会: “JEMAI-LCA Pro”
- 37) 南斉規介, 森口祐一, 東野達: “産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) - LCA のインベントリデータとして -”, 独立行政法人 国立環境研究所, (2002)
- 38) 農林水産省: “平成 14 年度日本水土図鑑データ”
- 39) 農林水産省: “農林水産関係市町村別データ (年産)”, (オンライン), 入手先 <<http://www.tdb.maff.go.jp/toukei/a02stopframeset>>, (参照 2008-7-23)
- 40) 財団法人日本デジタル道路地図協会: “千葉県デジタル道路データ (平成 14 年度)”
- 41) 山本直之, 生雲晴久, 山口武則: 農業技術, 56 (9), (2001), pp.416-420
- 42) 小野学, 鶴川洋樹: 農業経営研究, 40 (1), (2002), pp.57-62
- 43) 小林久, 上條雄喜, 千賀裕太郎: 農業土木学会誌, 62 (11), (1994), pp.1045-1055
- 44) 小野学, 鶴川洋樹: 農業経営研究, 42 (1), (2004), pp.79-84
- 45) 小野学, 鶴川洋樹: 農業経営研究, 43 (1), (2005), pp.182-187