

積雪寒冷地におけるゼロエミッション型エネルギー地産地消モデルの構築
～北海道十勝地域の酪農農場を対象として～

A Study on Local Production-and-Consumption Model of Zero-Emission Energy in Snow-Covered Cold Regions -Targeted at Dairy Farms in the Region of TOKACHI,HOKKAIDO-

田島 洋輔*・松嶋 健太**

Yousuke TAJIMA and Kenta MATSUSHIMA

要旨：北海道では、冬期の暖房などによりエネルギー消費量に占める化石燃料の割合が高く、一人当たりの二酸化炭素排出量は全国平均の約1.28倍（2012年実績）であることから、地域特性を踏まえた低炭素社会の構築に向けた筋道を形成することが課題となっている。本研究では、再生可能エネルギーによる持続可能なまちづくりの方針を構築することを目的として、北海道特有の気候や産業の特性を活かし、雪氷から得る冷熱エネルギーや家畜ふん尿から得るバイオマスエネルギー等を活用したシステムの成立可能性を探るとともに、畜産経営における経済性の両立を図ったゼロエミッション型エネルギー地産地消モデルの構築に向けた検討を行った。その結果、100頭規模の酪農農場を対象としたモデルの実現可能性として、①エネルギーの年間収支が確保可能、②二酸化炭素の排出抑制および廃棄物の有効活用に寄与、③経済性改善の必要性という示唆を得た。

キーワード：積雪寒冷地、酪農農場、ゼロエミッション、エネルギー地産地消、再生可能エネルギー

Abstract : In Hokkaido, Japan, fossil-fuel consumption increases in the winter months as the consumers require energy for heating. This increased energy usage boosts CO₂ emissions per person to approximately 1.28 times the national average (2012). Therefore, constructing a low-carbon-fuel society based on Hokkaido's own characteristics is a challenging task. To pave the way for sustainable urban development with renewable energy, this study explores the characteristics of the climate and industries unique to Hokkaido. The proposed system utilizes the cold energy obtained from largely existing snow and ice and/or the biomass energy obtained from the feces and urine of livestock. This study also proposes and examines a local production-and-consumption model of zero-emission energy that simultaneously intends to secure economy in livestock farming. As a result, it clarified the important production of (1) Realized in annual balance of energy, (2) Contribute to suppression of CO₂ emissions and waste utilization, (3)Economic improvement is necessary.

Key Words : Snow-covered cold regions, Dairy farm, Zero-emissions, Local production-and-consumption of energy, Renewable energy

はじめに

東日本大震災による福島第一原子力発電所における原発事故を背景として、再生可能エネルギーを活用した自立・分散型エネルギー生産システムの導入による「災害に強く環境負荷の小さい持続可能なまちづくり」が国をあげての喫緊の課題となっている（環境省、2016）。

これに関し、北海道は涼冷低温な気候であるため、暖房利用に伴う石油系・石炭系の化石燃料の割合が高く、道内人口一人当たりの二酸化炭素排出量（2012年実績）は全国平均の約1.28倍（北海道環境生活部環境局地球温暖化対策室、2016）と非常に高い水準となっている。このため、北海道特有の実情を踏まえた「環境負荷の小さい持続可能なまち」の形成に向けた筋道をつけることが喫緊の課題となっている。そうした中で、北海道には、太陽光や風力、バイオマス、雪氷熱といった多様なエネルギー源が豊富に賦存しており、そのポテンシャルは非常に高い¹⁾²⁾ことから、各種再生可能エネルギーの有効活用が期待されている。さらに、酪農農業が盛んな北海道地域では、1999年より施行

された家畜排せつ物法の対応策の一つとして2000年前後より累計70基以上のバイオガスプラントが設置・運転（梅津ら、2013）されており、畜産経営およびバイオガスプラントの生産・技術面の条件を満たす資源循環システム形成に向けた様々な研究が展開されている（中村ら、2010；吉田ら、2014）。こうした研究結果より、家畜ふん尿には水質汚濁の抑制のための適正処理の必要性などの課題がある。一方で、家畜ふん尿から抽出できるバイオガスが電気・熱エネルギーの燃料となることが確認されている。本研究では、こうした廃棄物という地域の負の資源を逆手にとり、地域のエネルギー資源として有効活用したゼロエミッション型の資源循環システムの構築を目指すべきであると考え。

資源循環システム形成を目的とした再生可能エネルギー導入事業に係る先行研究としては、道内の畜産系廃棄物を活用したバイオガスプラントの運用実態について物質循環や経済性の観点から評価し、その持続運転の成功要因を考究した研究（吉田ら、2014）がある。また、地域特性を踏まえた低炭素社会形成に向けたエネルギー生産システムの構築に係る先行研究としては、積雪寒冷な中山間地域の公共施設を対象として木質バイオマスや太陽光等の

* 日本大学理工学部 まちづくり工学科

** 株式会社建設技術研究所 東京本社地球環境センター

複数の再生可能エネルギーを組み合わせたエネルギー供給計画を設定し、非常時にも一定のエネルギーを賄える自立・分散型エネルギー供給システムを提案した研究(池澤ら, 2014)などがある。しかし、地域内における二酸化炭素の排出抑制および廃棄物の有効活用と、各種再生可能エネルギーの要素技術のベストミックスによるエネルギーの地域的自立の両立を目指した資源循環システムの形成を目指した研究はみられない。

そこで本研究では、各種再生可能エネルギーの組み合わせによるエネルギーの地域的自立と二酸化炭素の排出抑制および廃棄物の有効活用を成立させる「ゼロエミッション型エネルギー地産地消モデル(以下:「モデル」)」を構築するために、北海道農業の主幹をなす酪農農業を中心とした「モデル」の提案とその評価を行うことを目的とする。

なお、本研究では複数の再生可能エネルギーを組み合わせた複合的なハイブリッド型モデルを構築することを目的に、これら枠組みの中で物質循環やエネルギー需給を達成する「モデル」の実現可能性を探ることが重要であるとの認識から、第一義として資源循環やエネルギー需給の年間収支を大枠として捉えるものとした。

1. 研究の方法

1.1 検討手順と「モデル」の評価の枠組み

検討手順は、図1に示すとおりである。また、検討条件は、酪農農場を対象範囲とし、そのエネルギー需要を設定し、廃棄物を原料とする再生可能エネルギーで賄うことを目的とした「モデル」を設定する(図2)。その際、「モデル」の想定管理頭数の設定および年間エネルギー需要量と購入費用を設定するにあたっては、表1に示す各種再生可能エネルギーや酪農農場に関する有識者へのヒアリング調査および文献調査を実施し、その妥当性を確認した。さ

らに、「モデル」の効果検証として、地域資源の循環的利用という観点からふん尿の適正処理や化学肥料に代わる消化液(液肥)利用など、資源およびエネルギーの地産地消が成立するか否かの「物質循環性」を検証するとともに、二酸化炭素排出削減量など環境対策の公的機能の便益

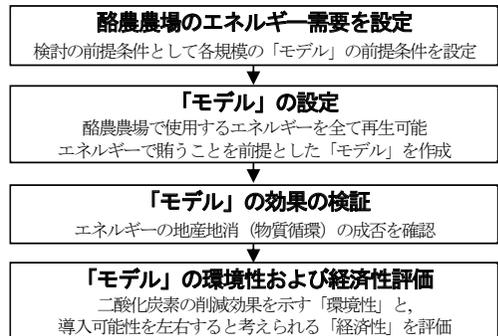


図1 「モデル」の検証手順

表1 調査概要

(1) バイオガスプラント・太陽光・雪氷冷熱利用に関するヒアリング調査	
調査日時	1回目:平成22(2010)年1月21日 13:00~14:50 2回目:平成22(2010)年3月24日 13:00~15:00
調査対象	・帯広畜産大学 バイオガスプラント管理責任者 ・帯広畜産大学 酪農農場管理責任者
調査内容	・酪農農場モデルの利用施設および規模設定の妥当性 ・バイオガスプラントのエネルギー需要量や製造量(H19実績) ・十勝地域における太陽光発電エネルギー製造量(H22実績) ・十勝地域における雪氷冷熱エネルギーの製造量(H22実績) ・メタン発酵残さ(液肥)の活用事例(土幌町, 鹿追町など)
(2) バイオディーゼル燃料に関するヒアリング調査	
調査日時	平成21(2009)年11月26日 10:00~11:30
調査対象	BDF 製造業者(帯広市及び豊頃町)
調査内容	・事業規模および製造実績 ・酪農農場モデルの利用施設および規模設定の妥当性 ・帯広を中心としたネットワーク規模, 収集実績(生協との連携) ・エネルギー地産地消モデルとの連携可能性
(3) 各種エネルギーの稼働実績・経済性・環境性に関する文献調査	
分析期間	平成28(2016)年4月1日(金)~7月29日(金)計4か月間
分析対象	・稼働実績資料: 各種エネルギーに関する需要量情報 ・経済性分析: 導入可能性を左右する支出累計の比較 ・環境性分析: 二酸化炭素(CO ₂)排出量の削減効果の検証
調査内容	・各種エネルギーに関する稼働・効果実績 ³⁾ ・燃料価格などの経済性データ ^{4)~6)} ・CO ₂ 削減排出係数等の試算に用いる基礎データ ^{7) 8)}

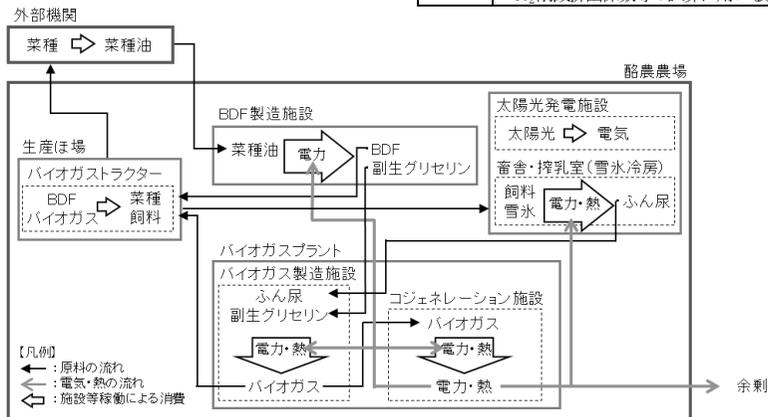


図2 「モデル」の概念図

[注意]当概念図は筆者作成

評価を示す「環境性」、導入可能性を左右するエネルギー等製造施設の建設費や毎年の運営収支、補助金等を含めた投資効果を示す「経済性」に関する評価を実施した。

1. 2 「モデル」の設定およびエネルギー需要

1) 「モデル」の管理頭数と設定根拠

本研究では、現地の実態を「モデル」に反映させるために、十勝地域の平均管理頭数である100頭規模の酪農農家が単独でバイオガスプラントを所有した想定で「モデル」の検討を行う。そこで、この条件におけるバイオマス資源量を捉えるため、100頭規模の酪農農場の管理者へヒアリング調査(表1(1))を行った結果、100頭規模の単独農家のふん尿発生量は1日あたり6.3t(1年あたり2,300t)であることを捉えた。

2) 年間エネルギー需要量と購入費用

前述したバイオマス資源量の分量に対して、100頭規模の単独農家のエネルギー需要を把握するために、同規模の酪農農場を管理する有識者へのヒアリング調査(表1(1))を実施した。その結果、表2に示すように、搾乳設備やバルククーラー、ミルク冷却機などの稼働や畜舎冷房(扇風機等)など生乳処理に係る畜舎内の「電力」とともに、畜舎の暖房用燃料である「灯油」、および飼料作物の収穫や畜舎管理のためのトラクター燃料となる「軽油」を消費するという一般的な100頭規模の単独農家におけるエネルギー種別の年間エネルギー需要量を捉えた。

これに加えて、エネルギー種別の平成28(2016)年度の単価^{4)~6)}を基に、100頭規模の単独農家モデルにおける電気、熱(灯油)、軽油の購入金額を算出した結果、年間約200万円の総購入費を要することを捉えた。

2. 結果および考察

2. 1 エネルギー需給の考え方

1) エネルギー等製造施設および製造内容の設定

本「モデル」では、エネルギーの地域的自立を図るために、表2で想定した100頭規模の単独農家で使用する年間エネルギー需要をすべて賄うのに必要なエネルギー等製造施設を設定する。このため、有識者へのヒアリング調査および文献調査(表1)を実施し、表3に示すとおり設定した。

エネルギー等の製造内容としては、畜産系廃棄物の有効活用ができ、原料(家畜ふん尿)のストックが可能で安定電源の燃料を製造できるバイオガス製造施設を中心とする。これに加え、電気および熱を製造するコージェネレーション施設、不足する電気を補うための太陽光発電施設、軽油代替燃料を製造するバイオディーゼル燃料(以下;BDF)

製造施設、乳牛の暑熱対策としての雪氷冷房施設の全5施設により100頭規模の単独農家の年間エネルギー需要(表2)を賄う設定とした。

2) 施設別のエネルギー源の設定

本「モデル」では、100頭規模の一般的な酪農農場を運営するにあたり、最低限必要なエネルギー利用施設についてヒアリング調査(表1(1),(2))を実施し、表4に示す施設区分別のエネルギー源を設定した。エネルギーの使用内容は、前章1.2)で述べたように、生乳処理や畜舎内の温度制御に係る電力・灯油の需要に加え、車輛燃料(軽油)の需要のほか、エネルギー等製造施設におけるエネルギー需

表2 年間エネルギー需要量と購入費用

エネルギー種別	農場内での用途	使用量		単価(円/年)	購入金額(円/年)
		種別使用量	熱量(GJ/年)		
電力(kWh/年)	搾乳設備	41,544	—	18.12	752,777
	ミルク冷却機等	3,456	—	18.12	62,623
	扇風機等	45,000	—	18.12	815,400
	小計	—	—	—	1,630,799
灯油(L/年)	暖房用燃料	500	18	58.72	29,360
軽油(L/年)	作業車両燃料	12,700	485	98.60	1,252,220
合計	—	—	—	503	—
					2,096,980

【備考】・電力単価：北海道電力 電力契約標準約款(高圧)平成28(2016)年4月1日実施の業務用電力の電力量料金(一般料金)の1kWh当たりの電力使用料金⁴⁾。

・灯油単価：財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センター(一般小売価格、月次調査、平成28(2016)年4月)に示される「灯油店頭現金価格」を基に1L当たりの価格を算出⁵⁾。

・軽油単価：財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センター(一般小売価格、月次調査、平成28(2016)年4月)に示される「軽油店頭現金価格」を基とした⁶⁾。

表3 施設区分とエネルギー等の製造内容の設定

施設区分	エネルギー等の製造内容
①バイオガス製造施設	家畜ふん尿およびBDF製造施設による副産物(グリセリン)からバイオガスを取得。なお、メタン発酵残さ(バイオガス抽出後の家畜ふん尿)は液肥として使用する。
②コージェネレーション施設	バイオガス製造施設で得られるバイオガスから、電気および熱を得る。
③BDF製造施設	菜種油からBDFを取得。なお、副産物(副生グリセリン)はバイオガス製造施設において家畜ふん尿と合わせて使用する。
④雪氷冷房施設	冬季に氷を製造・保管し、夏季の冷房に利用する。
⑤太陽光発電施設	太陽光から電気を取得。

表4 施設別のエネルギー源の設定

区分	内容	
畜舎	a)搾乳設備	エネルギー需要量は表2同様。コージェネレーション施設又は太陽光発電施設で製造した電力を使用。
	b)バルククーラー	
	c)ミルク冷却機	
	d)ボイラー(配管洗浄・暖房・床暖)	エネルギー需要量は表2と同様。コージェネレーション施設で製造した熱を使用(灯油を代替)。
e)バイオガス製造施設	規模および稼働条件は有識者ヒアリング調査を基に設定。コージェネレーション施設で製造した電気および熱を使用。	
f)BDF製造施設	規模および稼働条件は先行研究(北海道滝川市, 2007)を参考として設定。コージェネレーション施設又は太陽光発電施設で製造した電気を使用する。	
g)雪氷冷房施設	規模および稼働条件は先行研究(北海道開発局, 2009; 田島ほか, 2010)を参考として設定。コージェネレーション施設又は太陽光発電施設で製造した電気を使用する。	
h)車輛(トラクター等)	エネルギー需要量は表2と同様。バイオガス製造施設とBDF製造施設で製造したバイオガスおよびBDFを使用(軽油を代替)。	

要についても併せて設定した。なお、冷房用扇風機のエネルギー需要（年間電気使用量3,456kWh）は、北海道の地域特性を活かした雪氷冷房施設で代替すると想定した。

3) 各種エネルギー需給の収支

本研究では、ゼロエミッションの考えに基づき、酪農場場およびその周辺から得られる未利用エネルギー源を活用し、表4に示すエネルギー等製造施設において100頭規模の単独農家の年間エネルギー需要量（表2）を農場内の廃棄物資源を有効活用して賄うことを前提とした「モデル」を構築した。この「モデル」のエネルギー需要に基づいた施設別のエネルギーの消費および製造、配分状況（年間エネルギーの収支）について表5および図3に整理した。表5および図3より、本「モデル」では、バイオガス製造施設に2,300t/年のふん尿とBDF製造施設で発生した副生グリセリン1,047L/年を投入して71,906m³/年のバイオガスを製造する。そのバイオガスをコジェネレーション施設へ61,405m³/年、車輻燃料（BDFと併用）へ10,501m³/年を振り分ける。さらに、コジェネレーション施設で製造した電力（78,804kWh/年）を、畜舎へ38,421kWh/年、コジェネレーション施設内へ36,250kWh/年、雪氷冷房システムへ1,620kWh/年、BDF製造施設へ2,513kWh/年配分する。他方、太陽光発電施設で製造した電力（3,123kWh/年）のすべてを畜舎で使用する。以上の構成により、一般的な100頭規模の単独農家の年間電力需要量（表2：電力）が賄えることを捉えた。

次に、コジェネレーション施設で製造した熱（851GJ/年）

は、コジェネレーション施設内（196GJ/年）および畜舎で使用する年間熱需要（18GJ/年）を全て供給でき、さらに、637GJ/年の熱が余ると推計される。この余剰熱量は北海道の一般家庭の1年間の熱需要⁹⁾の17世帯分に相当する。

また、バイオガス製造施設で製造したバイオガス（10,501m³/年）と、BDF製造施設で製造したBDF（7,328L/年）を用いて飼料生産ほ場で使用するトラクター等の車輻燃料（485GJ/年）を全て賄うことができる。

これらのことから、100頭規模の単独農家モデルを活用することで、再生可能エネルギーによるエネルギーの完全自給（地産地消）が可能となることを示した。

4) 関連する物質循環の収支

図3より、ゼロエミッションの概念を基に、畜舎で発生する家畜ふん尿（2,300t/年）は、全てバイオガス製造に利用する。さらに、バイオガス抽出後の家畜ふん尿（メタン発酵残さ）は、化学肥料の代わりに液肥としてほ場に還元することが可能であるため、飼料生産ほ場で使用するものとした。また、BDF製造施設で製造したBDF（7,328L/年）は車輻燃料（バイオガスと併用）として使用する。さらに、BDFの製造過程で発生する副生グリセリン（1,047L/年）については、既往調査（北海道開発局、2009）よりガス製造時にふん尿に4%混合することで約3.2倍のバイオガスの発生が見込めること¹⁰⁾から、バイオガス製造施設で利用することが可能となる。

以上より、図3で提案した「モデル」を活用することで、物質面でも各種資源の循環が図れることを示した。

表5 100規模の単独農家モデルにおける施設別エネルギー等の消費および製造、配分状況

施設名	エネルギー等の製造概要		
	資源受入	消費	製造
バイオガス製造施設	・ふん尿:2,300t ・副生グリセリン:1,047L	・電力:36,250kWh ・熱:196GJ ※先行研究(北海道開発局, 2009)を参考としてプラント施設の消費量を設定。	●バイオガス71,906m ³ および液肥2,300tを得る (内訳)有識者ヒアリング調査結果を参考として、1tのふん尿から30.5m ³ のバイオガスが得られると仮定。また、先行研究(北海道開発局, 2009)よりふん尿に副生グリセリンを4%濃度で混合することで、バイオガスの発生が未投入時の3.2倍とされていることから、26tのふん尿から通常の3.2倍の2,554m ³ のバイオガスが発生し、残り2,274tのふん尿から通常量の69,352m ³ のバイオガスが発生すると仮定。
コジェネレーション施設	・バイオガス:61,405m ³ (1,418GJ)		●電力78,804kWhおよび熱851GJを得る (内訳)有識者ヒアリング調査結果および先行研究(北海道開発局, 2009)を参考として、コジェネレーション施設に供給されるバイオガスは61,405m ³ (1,418GJ)から、電力78,804kWh、熱851GJを製造すると仮定。
BDF製造施設	・菜種油・廃食油:8,053L ※廃食油の算出経緯は「製造」で記載した。	・電力:2,513kWh ※製造機の性能を考慮して消費量を設定。	●BDF7,328Lおよび副生グリセリン1,047Lを得る (内訳)先行研究の実測値(北海道開発局, 2009)を参考として、バイオガストラクターにおけるBDFの必要量を7,328Lと設定。先行研究(北海道滝川市, 2007)を基に製造施設のBDF化率を91%と設定すると、8,053Lの菜種油・廃食油が必要となる。また、先行研究(北海道開発局, 2009)より投入量の約13%の副生グリセリン(1,047L)が生成されると仮定。
雪氷冷房施設	・雪氷:6,300t ※畜舎気温を2℃低下と仮定。	電力:1,620kWh ※出力0.9kWの扇風機3台を60日間、10時間稼働と仮定。	●畜舎気温を2℃低下させ、搾乳量の低下を抑制させる
太陽光発電施設およびリチウムイオン電池	なし	なし	●電力3,123kWhを得る (内訳)畜舎の使用電力量のうちコジェネレーション施設で賄いきれない不足分3,123kWhを製造すると仮定した。具体的には、帯広市内の太陽光発電実測値(北海道開発局, 2009)およびリチウムイオン電池での放電ロス約20%を考慮して、出力3.536kWの太陽光パネルを用いて約3,904kWhを発電すると設定した。

[注意]表中に示すエネルギーの消費、製造、配分などの記載事項は図3と対応

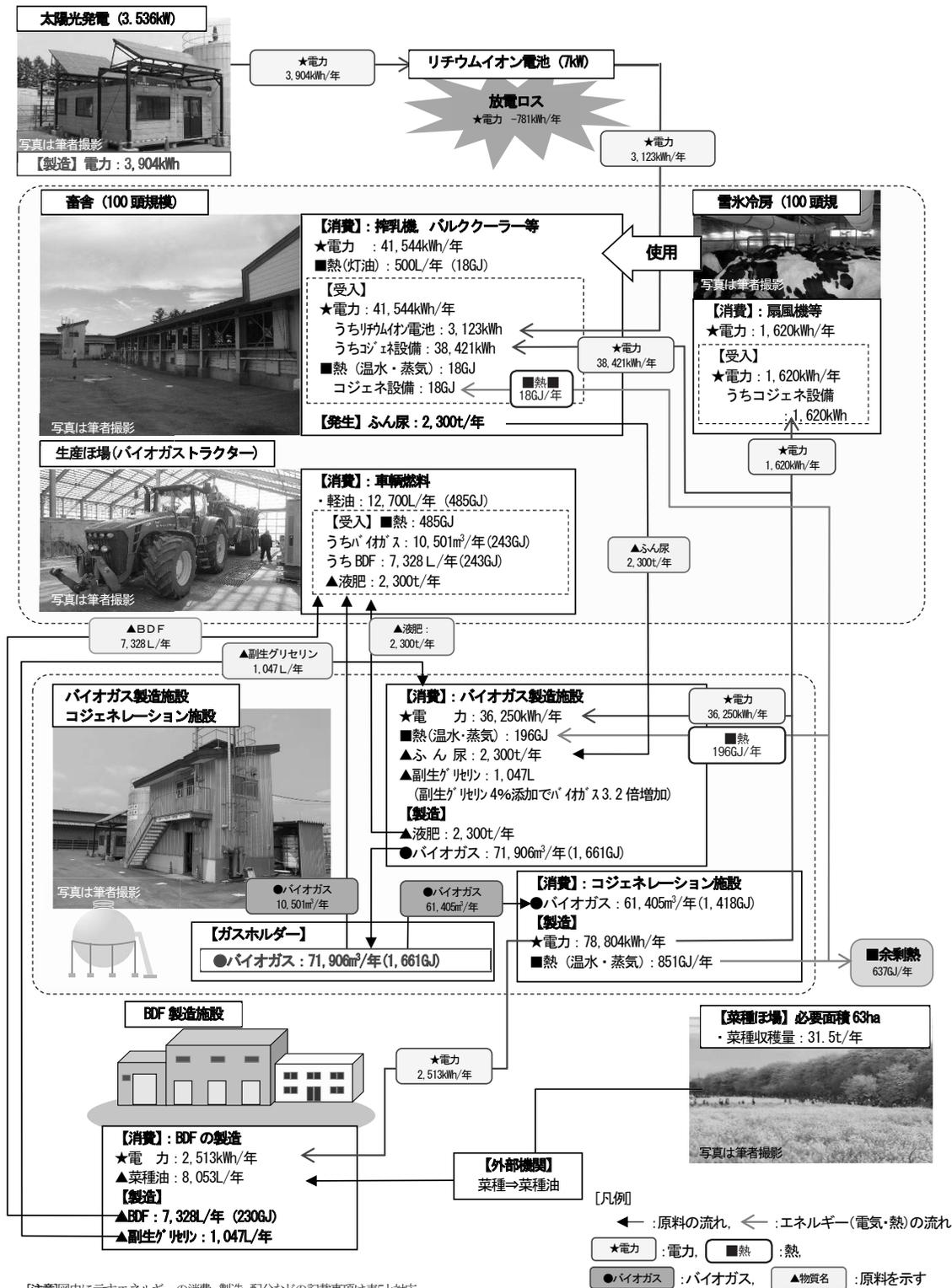


図3 100頭規模の単独農家モデルにおける年間エネルギー収支

2. 2 単独農家モデルの経済性評価

経済収支の算出に当たっては、100頭規模の単独農家が、農場経営の一環としてエネルギー等製造施設(表3)を導入するものとし、バイオマスエネルギー導入ガイドブック(NEDO, 2015)に示される畜産系バイオガспラントの事業収支の検討方法を参考とした。

上述した考えに基づき、経済性評価に当たっての収支計算の範囲および条件を表6に整理した。表6より、ガイドブックに示される「収入」に該当する項目としては、雪氷冷房による搾乳量の低下の抑制に伴う生乳売上の増加による「(d1) 生乳収入」、余剰電力や余剰熱、液肥等の販売による「(d2) 新規収入」、外部からの電力や燃料の購入費の「(d3) 経費削減」の3つとした。また、「支出」は、各施設の導入に伴い新たにかかるユーティリティ費やメンテナンス費、借入金返済費などの一般経費とした。さらに、同ガイドブック(NEDO, 2015)で設定されている設備の標準耐用年数である「15年間」を目処として、上述した増加収入と新規経費の差(利益)と減価償却額によって実質建設費を回収できるかを評価した。

1) 生乳収入 (d1) の設定

雪氷冷房施設を利用することによる、(d1) 生乳収入は次のとおり設定した。乳牛は生産適温域(4~24℃)を超過した場合、搾乳の減少が発生するとされており、図4に示すとおり「環境温度」と「産乳減少量¹¹⁾」の関係が確認されている(津田, 1987)。北海道十勝地域(帯広市川西観測所)における乳牛の生産適温域(24℃)を超過する日数は過去10か年平均で約50.9日間であり、その日数の内訳は表7(1)に示すとおりである。さらに、先行研究(田島ほか, 2010)において確認されている雪氷冷房の性能評価を踏まえ、搾乳待機室内の環境温度を2℃低下させたと仮定し、図4に示す産乳減少量を参考としてその減産解消量¹²⁾を表7(2)に整理した。前述した乳牛の生産適温域(4~24℃)を超過する日数(表7(1))に減産解消量(表7(2))を乗じて搾乳牛1頭あたりの減産解消量(48.7kg/年)を捉えた。

一般的に管理頭数が100頭の場合、搾乳牛は60頭程度であるため、温度調節により2,922kg/年(=48.7kg/年×60頭)の減産が解消できるので、生乳の販売単価97.08円/kg(JA道東あさひ, 2016)を乗じて搾乳量の減産抑制効果額を約28.4万円(=2,922kg/年×97.08円/kg)と試算した。

2) 経済性評価

表6および前述1)の結果に基づいて、BDF製造施設および太陽光発電施設、バイオガス製造施設、コジェネレーション施設、雪氷冷房施設を対象に既述した経済性評価¹³⁾を実施した。その結果、実質建設費回収率は15年目においても50%を下回っており、分析期間(15年間)内では、初期投資額を回収することができないと推計された(図

5)。この検討にあたっては、バイオガス製造施設およびコジェネレーション施設等に50%補助金を前提(表6)として試算したが、100頭規模の単独農家を想定した「モデル」では自立した畜産経営は困難であることを捉えた。

2. 3 二酸化炭素排出量の削減効果

1) 前提条件

100頭規模の単独農家でこれまでどおり通常のエネルギーを使用した場合と、再生可能エネルギーを使用した場合とを比較し、ランニングにおける二酸化炭素排出量の削減効果を把握するものとする。この際、カーボンニュートラルの考え方により、コジェネレーション施設で得られる電力および熱、BDF・バイオガストラクターの利用に伴う二酸化炭素の排出量はゼロとする。また、再生可能エネルギーを利用する太陽光発電、氷の製造・保管に伴う二酸化炭素の排出量はゼロとなる。さらに、余剰熱による二酸化炭素の排出削減量の算出では、バイオガспラント周辺の家庭の給湯・暖房で一般的な灯油を使用すると仮定し、その灯油使用をバイオガспラントの余剰熱で代替することにより、二酸化炭素排出量を削減するものとした。

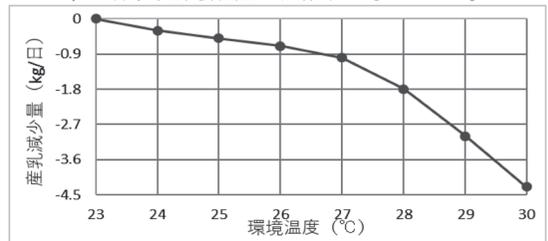


図4 高温域における産乳減少量(津田ら, 1987)

表7 雪氷冷房による減産解消量

気温(°C)	日数(日) [1]	環境温度を2℃低下させた場合の減産解消量(kg/日・頭) [2]	夏季の環境温度を2℃低下させた場合の年間減産解消量(kg/頭) (1)×(2)	
24	6.9	24⇒22	0.2	1.4
25	9.3	25⇒23	0.4	3.7
26	9.4	26⇒24	0.5	4.7
27	6.3	27⇒25	0.6	3.8
28	7.3	28⇒26	1.1	8.0
29	4.3	29⇒27	2.0	8.6
30以上	7.4	30⇒28	2.5	18.5
合計	50.9			48.7

【注意】※1: 2000年~2009年の10か年分の帯広市川西観測所の気象データを基として、乳牛の生産適温域(4~24℃)を超過する日数を算出した。

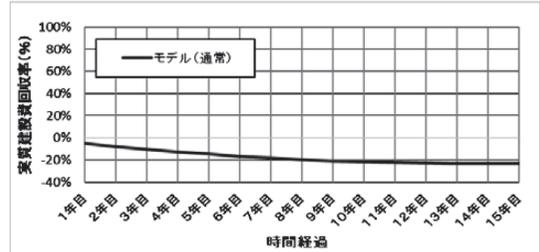


図5 単独農家モデルの実質建設費回収率の推移

表6 単独農家のエネルギー等製造施設の収支計算条件および通常時の費用

項目		費用(万円)	計算方法	
初期投資	(a)建設費	BDF 施設	128.2 Biomass Japan inc. ¹⁴⁾ の事例を参考に1日当たりの製造量100Lあたりの単価を500万円と設定し、1日当たり製造量(37L/日)を乗じて算定	
		太陽光発電システム	270.7 グリーンエネルギーナビ ¹⁵⁾ (2016年の相場)を参考に1kWあたりの導入単価を35万円と設定し、施設規模(3,533kW)を乗じて算定	
		リチウムイオン電池		
		バイオガス製造施設・コジェネレーション施設	6,000.0 RecoD ¹⁶⁾ (相場)を参考に1kWhあたりの導入単価を21万円(131.2万円/6.2kWh)と設定し、施設規模(7kW)を乗じて算定 同規模事例を参考として6,000万円と設定 ¹⁷⁾	
	(b)補助金	BDF 施設	64.1 NEDOの補助金制度 ¹⁸⁾ を参考として補助率を50%と設定	
		太陽光発電施設	5.0 帯広市 ¹⁹⁾ を参考として補助額5万円とした	
		バイオガス製造施設・コジェネレーション施設	3,000.0 農林水産省の地域バイオマス産業化推進事業における補助を参考として補助率50% ²⁰⁾ と設定	
	(c)実質建設費	3,329.8	建設費(a)ー補助金(b)として算出	
	(d1)生乳収入	雪氷冷房による搾乳量低下の抑制効果	28.4	表7に示す減産解消量(48.7kg)に生乳単価(97.08円/kg) ²¹⁾ を乗じて算出
	(d2)新規収入	外部販売	副生グリセリンの販売	0.0 副生グリセリンはモデル内で消費するため販売は行わない
電力の販売(売電)		0.0	FIT制度を活用して算出 但し、余剰電力は発生しないため本モデルでは使用しないものとした	
余剰熱の販売		101.9	熱を外部に供給してボイラーや暖房の燃料となる灯油を代替すると仮定した。余剰熱量(637GJ)を灯油に換算(36.7MJ/L)し、灯油単価(58.72円/L) ⁵⁾ を乗じて算出	
液肥の販売		0.0	液肥は、自らのほ場で利用することを想定する(外部へ販売しない)	
バイオガスの販売		0.0	バイオガスはすべて車輻燃料又はコジェネレーション施設により電気および熱に変換する(外部への販売収入として計上しない)	
(d3)経費削減	車両軽油	BDF 利用	62.9 BDFによる軽油削減量(6,350L/年)に軽油単価(98.60円/L) ⁶⁾ を乗じて算出	
		バイオガス利用	62.9 バイオガスによる軽油削減量(6,350L/年)に軽油単価(98.60円/L) ⁶⁾ を乗じて算出	
	電力	バイオガス・太陽光利用	81.5 施設の総電力量(45,000kWh/年)に電力単価18.12円/kWh ⁴⁾ を乗じて算出	
		畜舎灯油	2.9 灯油削減量(500L)に灯油単価(58.72円/L) ⁵⁾ を乗じて算出	
	肥料	液肥利用	115.0 窒素肥料の代替物として自らの農場で使用することを想定。鹿沼町における液肥販売価格を参考に1tあたり500円の肥料代を削減するとみなし、液肥発生量(2,300t)を乗じて算出	
		ふん尿処理	0.0	施設備導入前と同様に自らの農場で処分するため経費削減は考慮しない
(d)増加収入合計		455.0	—	
(e)新規経費	BDF 施設	原料購入費	0.0	菜種油は生産ほ場で生産されると仮定して計上しない
		ユーティリティ費	6.4	バイオマスエネルギー導入ガイドブック(NEDO,2015)を基に建設費の5%と設定
		メンテナンス費	2.6	バイオマスエネルギー導入ガイドブック(NEDO,2015)を基に建設費の2%と設定
		副産物の処理費	0.0	副生グリセリンはモデル内で処理するため、処理費用は計上しない
	太陽光発電施設	人件費	0.0	農業活動の一環として実施するため計上しない
		原料購入費	0.0	太陽光を用いるため計上しない
		ユーティリティ費	0.0	なしとした
		メンテナンス費	0.0	なしとした
	バイオガス製造施設・コジェネレーション施設	人件費	0.0	なしとした
		原料購入費	0.0	原材料となる「ふん尿」および「副生グリセリン」は、畜舎およびBDF製造施設より提供されるため、原材料費・運搬費は発生しないものとした
		ユーティリティ費	300.0	バイオマスエネルギー導入ガイドブック(NEDO,2015)を基に建設費の5%と設定
		メンテナンス費	120.0	バイオマスエネルギー導入ガイドブック(NEDO,2015)を基に建設費の2%と設定
	施設共通	副産物の処理費	0.0	発生する液肥はモデル内で処理する(処理費用は計上しない)
		人件費	0.0	新たな人員を雇用することなく導入事業者の人材で運用すると想定
		借入金返済費	222.0	実質建設費を初年度に一括して借入れ、15年間で元本を均等返済すると設定
		支払い金利	128.0	バイオマスエネルギー導入ガイドブック(NEDO,2015)を参考として、実質建設費用を年2%の金利で借り入れるものと仮定。2年目は補助金の申請期間を含むため、建設費に2%を乗じて算定。2年目以降は補助金を考慮し、実質建設費から当年までの借入金返済額を減じた額に2%を乗じて算定
一般管理費	0.0	バイオマスエネルギー導入ガイドブック(NEDO,2015)を基に人件費の10%と設定。本モデルでは農場管理の一貫として管理するため実質的作業員1名分(200万円/年)の10%とした。		
	20.0			
租税公課	43.5	当該年の資産価額(実質建設費(c)ー当該年までの減価償却費(k)の累計額に税率(1.4%)を乗じて算定		
(e)支出合計		715.4	—	
収支	(f)税引き前利益	-260.3	収入合計(d=d1+d2+d3)から新規経費合計(e)を差し引いたもの	
	(g)法人税など	0.0	農業経営の一環として運営するものであり、エネルギー供給事業体(法人)として事業を前提としないため考慮しない	
	(h)税引き後利益	-260.3	税引き前利益(f)ー法人税等(g)として算出	
(i)年間キャッシュフロー	-260.3	税引き後利益(h)と同等		
(j)キャッシュフローの累計額	-260.3	当年までの毎年のキャッシュフローの累計額		
(k)減価償却額	222.0	当初の資産価額(実質建設費(c))を償却年数15年間で減価償却すると設定		
(l)収支累計	-38.4	キャッシュフロー累計額(j)＋減価償却額(k)として算出		
(m)実質建設費回収率	<-1.2%>	収支累計(l)/実質建設費(c)で回収率として算出		

2) ランニングにおける二酸化炭素排出削減効果

100 頭規模の単独農家で一般的に使用するエネルギー需要量は、電力 45,000kWh、熱 18GJ、燃料 485GJ (表 2) であり、二酸化炭素排出量は 65.2t-CO₂ となる (表 8 小計①)。これらのエネルギーをバイオガス、BDF、雪氷および太陽光で全て賄うため、二酸化炭素排出量はゼロ (表 8 小計②) となることから、「65.2t-CO₂」すべてが削減量となる。

また、余剰熱 637GJ を外部供給して活用することで、表 8 小計③のとおり年間 43.2t-CO₂ の削減に貢献できると推定できた。以上より、この「モデル」によって年間 108.4t-CO₂ の二酸化炭素削減 (表 8④) に貢献できることが示された。この二酸化炭素排出削減量は、わが国の一般家庭の 1 年間の二酸化炭素排出量²²⁾ の約 30 世帯分に相当する。

なお、環境性能の評価はライフサイクルを通じた評価も必要となる。そのため、環境省の公表する LCA ガイドライン (環境省, 2013) を参考として、バイオガスプラントの建設・解体段階での二酸化炭素排出量を推計し、本モデルによる排出削減量との比較検証を行った。その結果、建設・解体段階における二酸化炭素排出量は約 197.4t-CO₂²³⁾、ランニングによる二酸化炭素排出削減量が 1,626.0 t-CO₂ (設備の耐用年数 15 年) と削減量が排出量を大きく上回る結果となった。これより、バイオガスプラントの導入に伴う環境負荷の増加を加味したライフサイクル全体で考えても二酸化炭素排出量の削減に寄与すると考えられる。

3. まとめ

3. 1 「モデル」の評価結果

本研究では、十勝地域の平均的な管理頭数 (100 頭規模) の単独農家における「モデル」の実現可能性について、以下に示す結果を得た。

- ① 100 頭規模の酪農農場を中心とした「モデル」を構築することで、エネルギーの年間収支を確保することが可能である。
- ② 同「モデル」を活用することで二酸化炭素排出量 (108.4 t-CO₂/年) の排出抑制および廃棄物 (家畜ふん尿 2,300 t) の有効活用に寄与することが可能である。
- ③ 当該「モデル」はバイオガスプラント施設の整備費用が過大となり経済収支が赤字となるため、事業採算性の向上策を検討することで実現可能性が高まる。

3. 2 今後の課題

1) 経済性の課題とその解消策

本提案のとおり「モデル」の実現・推進を図るためには、更なる事業採算性の向上が必須であることが確認された。

ヒアリング調査²⁴⁾ より北海道鹿追町では家畜ふん尿のメタン発酵後の残さ (液肥) を周辺農家へ販売しており、購入している農家の評判が良いとの結果を得たことから、当「モデル」の適用範囲 (酪農農場) を超過するが、周囲の酪農農場を対象として化学肥料の代替として液肥を販売すると仮定して試算を行った。十勝地域の液肥は化学肥料換算すると 1 t あたり 3,000~7,000 円程度 (中村, 2012) とされている。そのため、本検討においても 3,000 円/t で販売できると仮定すると、(d2) 新規収入として「液肥販売 (690 万円=2,300 t×3,000 円/t)」を追加できる。この場合、(d3) 経費削減として見込んでいた「肥料 (液肥利用)」の 115 万円/年は 0 となる。すなわち、正味の増加収入合計は、当初の (d) 増加収入合計 455 万円に液肥販売 (690 万円) を加えて、経費削減分として見込んでいた肥料 (115 万円) を差し引いた 1,030 万円/年となる。これにより、実質建設費回収率 (図 6) をみると 7 年程度で実質建設費を回収することが可能となる。

以上のことから、液肥を 3,000 円/t で販売することで経済性は向上することが確認された。しかし、これを実現するためには、化学肥料の代替物としての品質の良さや安定性の確保、それに見合った価格、ふん尿の回収や液肥の運搬・散布に係る諸費用などの新たな体制整備が求められる。

2) 時間や季節変動を考慮したモデルへの発展

本「モデル」は複合的な枠組みの中で再生可能エネルギー

表 8 二酸化炭素排出量の削減効果

区分		使用量等	CO ₂ 排出係数	CO ₂ 排出量
通常 使用	電力	購入 45,000 kWh	0.683 kg-CO ₂ /kWh	+ 30.7 t-CO ₂
	うち冷房等	購入 3,456 kWh	0.683 kg-CO ₂ /kWh	+ 2.4 t-CO ₂
	熱 (暖房等)	灯油購入 18 GJ	0.0678 t-CO ₂ /GJ	+ 1.2 t-CO ₂
	燃料 (トラクター)	軽油購入 485 GJ	0.0686 t-CO ₂ /GJ	+ 33.3 t-CO ₂
	小計 ①			+ 65.2 t-CO ₂
地産 地消 モデル	電力	バイオガス 85,272 kWh	0 kg-CO ₂ /kWh	0.0 t-CO ₂
	太陽光			
	うち冷房等	バイオガス 1,659 kWh	0 kg-CO ₂ /kWh	0.0 t-CO ₂
	太陽光			
	熱 (暖房等)	灯油購入 230 GJ	0 t-CO ₂ /GJ	0.0 t-CO ₂
燃料 (トラクター)	軽油購入 214 GJ	0 t-CO ₂ /GJ	0.0 t-CO ₂	
冷熱	氷 422 GJ	0 t-CO ₂ /GJ	0.0 t-CO ₂	
小計 ②			0.0 t-CO ₂	
余 剰	電力	バイオガス 0 kWh	0.683 kg-CO ₂ /kWh	0.0 t-CO ₂
	太陽光			
	バイオガス	637 GJ	0.0678 t-CO ₂ /GJ	-43.2 t-CO ₂
小計 ③			-43.2 t-CO ₂	
削減量 ④=①-②-③				108.4 t-CO ₂

【備考】二酸化炭素排出係数²⁷⁾、電力に関する二酸化炭素排出係数²⁸⁾

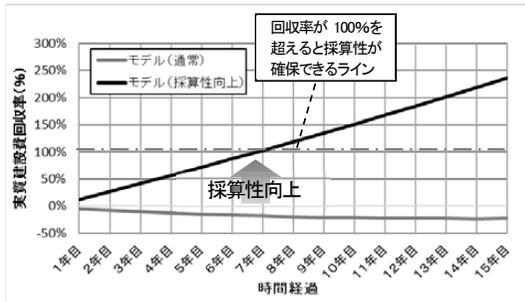


図 6 採算性向上策実施後の実質建設費回収率の推移

一のエネルギー地産地消を大枠として捉えることを目的として、エネルギー資源の年間収支での検討にとどまっている。しかし、ふん尿の資源量やエネルギー需給量、メタン発酵残さ(液肥)の受入体制などは、季節や時間により変化する。そのため、季節・時間変動を考慮した「モデル」へ発展させることでより確度が高まると考えられる。

おわりに

本研究では、十勝地域の平均的な管理頭数である 100 頭規模の単独農家における「モデル」を構築した。本「モデル」は、地域資源である雪水冷房システムを組み込んでいる点が積雪寒冷地ならではの特徴である。しかし、雪水冷房システムを除いたとしても、家畜ふん尿等の廃棄物資源の有効活用が可能な資源循環システムであることから、地域内の資源を用いたエネルギー地産地消を目指す全国の酪農農場で活用可能なシステムであると認識する。

今後の展望としては、単独農家を対象とした本「モデル」を都市・地域レベルへと拡張し、持続可能なまちづくりに活用可能な「モデル」へと発展させることが望まれる。そのため、本研究成果として確認された、以下に示す 2 つの課題を考慮することが重要となると考える。

1) 余剰熱の有効活用

経済性を高めるためには、バイオガспラントの余剰熱を四季を通じて安定活用し、新たな資金源とすることが望まれる。例えば、北海道鹿追町環境保全センターでは、バイオガспラントの敷地内に熱需要施設を整備することで熱ロスを最小限に抑え、かつ、季節変動を考慮して余剰熱が余りやすい夏季にも熱利用を図る事業(チョウザメ養殖およびマンゴー栽培)とつなげることで新たな価値・雇用の創出を目指している。こうした事例を踏まえた「余剰熱の有効活用」を検討する必要がある。

2) エネルギーの安定移送

100 頭規模の酪農農場であれば、エネルギーの製造場所や需要家(住宅)が近接するため移送手段を検討する必要はなかった。しかし、本モデルを地域全体へ拡張する際には、電気や熱等のエネルギーをロスなく安定して移送する技術が必要となる。酪農団地のように農場を集約する方法も検討されるが、十勝地域において酪農家を集約し、酪農団地を造成することは現実的ではないことから、新たなエネルギーの安定移送手段を検討する必要がある。例えば、北海道鹿追町では、平成 28(2016)年 1 月より水素の製造・貯蔵・輸送・利用を一貫して行う、水素サプライチェーンの実証試験が開始されたことから、こうした事例を含めた「エネルギーの安定移送」について参考にする必要が

あると考える。

今後、これらの 2 つの課題を解決することで、都市・地域レベルでのエネルギーの地産地消に取り組むことができ、より実現性の高いモデルとして、畜産系廃棄物を活用した再生可能エネルギーによる持続可能な酪農まちづくりの実現に大きな役割を果たすことが期待できよう。

謝辞

本研究は、国土交通省北海道開発局による「ゼロエミッション型エネルギー地産地消エリアの形成に関するモデル調査業務」の一環として帯広畜産大学と共同実施した内容を基に、筆者らが新たな考察を加えたものである。本研究を進めるにあたり貴重なご意見、資料提供、実証試験への協力等をいただいた当時帯広畜産大学畜産衛生学研究部門環境衛生学分野教授梅津一孝氏、同食品衛生学分野教授関川三男氏、同動物医科学分野准教授木田克弥氏に感謝の意を表す。

補注

- 1) 北海道経済産業振興局環境・エネルギー室(2015.12.1 更新)北海道における新エネルギー導入拡大の取組<<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/kke/sene/gaiyou.pdf>>, 2017.10.10 参照
- 2) 環境省(2017.5.10 更新)再生可能エネルギー導入ポテンシャルマップ<<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep/>>, 2017.10.10 参照
- 3) 北海道開発局, 2009; 北海道滝川市, 2007 を参考とした。
- 4) 北海道電力株式会社(2016.4.1 更新)北海道電力 電力契約標準約款(高圧) .<http://www.hepco.co.jp/business/stipulation/pdf/h2804_ret_pwrcont_policy_hi.pdf>, 2016.7.1 参照
- 5) 財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センター(2016.4.1 更新)灯油店頭現金価格(2016 年 4 月) .<<https://oil-info.iej.or.jp/price/price.html>>, 2016.7.1 参照
- 6) 財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センター(2016.4.1 更新)軽油店頭現金価格(2016 年 4 月) .<http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/>, 2016.7.1 参照
- 7) 環境省(2016.4.1 更新)算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 .<<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calco/itiran2015.pdf>>, 2016.7.1 参照
- 8) 環境省(2015.11.30 公表)電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)平成 26 年度実績 .<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calco/h28_coefficient_rev2.pdf>, 2016.7.1 参照
- 9) 北海道における 1 世帯当たりの年間灯油消費量(37.4GJ)は、総務省統計局の家計調査(家計収支編)二世帯以上世帯の 2000~2009 年平均灯油購入量(札幌市)を基に算出した。
- 10) 副生グリセリン投入による混合発酵実験(北海道開発局, 2009)の実験概要は、表 9 に示すとおりである。約 2 か月間の混合発酵実験の結果、バイオガспラントの運用面の大きな問題は確認されていない。
- 11) 産乳減少量は、乳牛に対する暑熱感(伴うストレス)による搾乳量の減少割合を示す指標である(津田, 1987)。

- ¹²⁾ 減産解消量は、雪氷冷房を実施したことにより、暑熱感作に伴うストレスによる搾乳減少を解消した量を示す。例えば、環境温度を26℃から24℃に「2℃」低下させた場合、図4より産乳減少量は26℃（-0.7kg/日）から24℃（-0.2kg/日）であり、0.5kg/日の産乳減少を解消したとして、その減産解消量の算出結果を表7(2)に整理した。
- ¹³⁾ 経済評価に際して、建設費に雪氷冷房施設の導入に係る初期費用を考慮すべきであるが、雪氷冷房実証試験では、コンテナやビニール製送風管などの用いた簡易設備で実施したため、エネルギー損失の解消やコストをかけない建設方法の検討が不十分であり適切な施設導入費用が見いだせないことから、本検討では考慮しないこととした。
- ¹⁴⁾ Biomass Japan inc. (2016.4.1更新) バイオディーゼル燃料 (BDF) のQ&A.<<http://biomass.jp/faq/>>, 2016.7.1 参照
- ¹⁵⁾ グリーンエネルギーナビ (2016.4.1更新) 太陽光発電システムの最新 (2016) 相場費用.<<http://www.green-energyナビ.com/library/articles/market-price.html>>, 2016.7.1 参照
- ¹⁶⁾ RecoD (2016.4.1更新) 蓄電池の材質ごとのコスト・リチウムイオン電池.<<http://www.recod.jp/epress/>>, 2016.7.1 参照
- ¹⁷⁾ 積雪寒冷地型バイオガスパラントの稼働実績のある有識者へのヒアリング調査 (表1(1)) を踏まえて設定した。
- ¹⁸⁾ Biomass Japan inc. (2017.8.20更新) BDF 補助金一覧：新エネルギー・省エネルギー非営利活動促進事業 (NEDO) 設備導入 1/2 以内 <http://www.biomassjapan.jp/biodesel_project/420.html>, 2017.8.20 参照
- ¹⁹⁾ 帯広市 (2016.4.1更新) 平成28年度新エネルギー導入促進補助金・太陽光発電システム導入資金貸付金.<<http://www.city.obihiro.hokkaido.jp/shiminkankyoubu/kankyoubu/h25subsidy02.html>>, 2016.7.1 参照
- ²⁰⁾ 農林水産省 (2015.4.6更新) 平成27年度地域バイオマス産業化整備事業の追加募集<<http://www.maff.go.jp/supply/hozyo/shokusan/150406.html>>, 2017.8.20 参照
- ²¹⁾ JA 道東における2016年1月の生乳生産・乳代単価情報に示される単価97.08円/kg (JA 道東あさひ, 2016) を設定した。
- ²²⁾ 環境省の示す1世帯あたりの年間の二酸化炭素排出量 (電気, ガス, 灯油の合計) 3.5t-CO₂を基に算出した。
- ²³⁾ 環境省の公表するLCAガイドライン (環境省, 2013) に示される温室効果ガス排出原単位 (表4-1 建設段階のバイオガスパラント) を参考として表10に示す試算を行った。なお、建設費用 (60百万円) は同

表9 実験概要

項目	概要
実験目的	バイオガスは、基質の有機物が分解されて発生することから、有機物の割合が大きい物質を用いずバイオガス発生量が多くなると想定される。そこで有機物の割合や、通年で確保可能で扱いやすい物質として、廃食油からBDFを製造する過程で精製される副生グリセリンとした。
実験期間	平成20年10月22日～平成21年1月3日
実験場所	帯広畜産大学内バイオガスパラント
混合率	約4%
投入回数	2時間おきに1日12回 (家畜ふん尿の投入と同時)
バイオガス発生ガス量	副生グリセリン投入前 (10月1日～21日) : 34m ³ /日 副生グリセリン投入中 (10月22日～1月3日) : 109m ³ /日 (投入前より約3.2倍)
主な実験結果	・ 液状であるため、運搬・投入が比較的容易 ・ 前処理を行わずに発酵槽への投入が可能 ・ 約2か月間の運用でバイオガスパラントに大きな変化なし

ガイドラインを参考に設備費6割、土木費4割として算出した。

²⁴⁾ 有識者へのヒアリング調査 (表1(1)) より、ふん尿の回収や、メタン発酵残さ (液肥) の運搬・散布を行っている鹿追町の集中型バイオガスパラントの事例を確認した。鹿追町では、液肥を500円/tで販売することで、液肥 (年間量) の有効活用に成功していることから、当該モデルにおいても同様に周辺農場へ販売できると仮定し、検討した。

引用文献

北海道開発局 (2009) 平成20年度ゼロエミッション型エネルギー地産地消エリアの形成に関するモデル調査報告書, 北海道開発局, 北海道。

北海道環境生活部環境局地球温暖化対策室 (2016) 北海道の温室効果ガス排出実態について北海道の現状と取り組み (2012年実績), 北海道環境生活部, 北海道。

北海道滝川市 (2007) 平成18年度ナタネ油のBDF化利用実証試験報告書, 北海道滝川市, 北海道, 8pp。

池澤紀幸・今道博 (2014) 中山間地域における自立・分散型エネルギー供給システムに関する調査研究, 日本建築学会東北支部研究報告集, 計画系第77号, 15-18。

JA 道東あさひ (2016) 1月生乳生産・乳代単価情報 (全道: 乳代合計) . まきばの風ほかほか, No.83, 14。

環境省 (2013) 再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関するLCAガイドライン第IV部複数の機能を有する事業 (バイオマス利活用等) 編, 環境省, 東京, 102pp。

環境省 (2016) 平成28年度版環境白書/循環型社会白書/生物多様性白書-地球温暖化対策の新たなステージ, 環境省, 東京, 383pp。

中村裕 (2012) 酪農バイオガスシステムにおけるメタン発酵由来消化液の活用の効果, 酪農学園大学紀要人文・社会科学編, 36 (2), 77-122。

中村裕・肉絲垣木買提・大場裕子・市川治 (2010) 酪農共同利用型バイオガスシステム導入の経営経済的評価による分析—北海道鹿追町の事例を対象に—, 酪農学園大学紀要人文・社会科学編, 34 (2), 111-121。

NEDO (2015) バイオマスエネルギー導入ガイドブック (第4版), NEDO, 東京, 274pp。

田島洋輔・松嶋健太・千葉雅広 (2010) 積雪寒冷地におけるゼロエミッション型エネルギー地産地消モデルの構築—十勝地方を事例として—, Civil Engineering Consultant, No.249, 50-53。

津田恒之 (1987) 新乳牛の科学, (一社) 農山漁村文化協会, 東京, 458pp。

梅津一孝・竹内良曜・岩波道生 (2013) 先進国におけるバイオガスパラントの利用実態に学ぶ—北海道における再生可能エネルギーの利用促進に関する共同調査報告書—, 畜産の情報, 2013年6月号, 67-78。

吉田文和・村上正俊・石井努・吉田晴代 (2014) バイオガスパラントの環境経済的評価—北海道鹿追町を事例として—, 廃棄物資源循環学会論文集, Vol.25, 57-67。

表10 温室効果ガスの試算概要

工程	内訳	建設費用	原単位	二酸化炭素排出量
建設段階	設備費	36百万円	2.89 tCO ₂ /百万円	104.04 tCO ₂
	土木費	24百万円	3.89 tCO ₂ /百万円	93.36 tCO ₂

(2017年6月2日受付, 2018年2月21日受理)