

酪農畜産廃棄物によるメタンガス発電の量的拡大に向けた課題

—フードサプライチェーンの業際連結に着目して—

A study on the challenges to quantitative expansion of methane gas power generation
using dairy and livestock waste

—Focusing on inter-industrial linkage in the food supply chain—

坂内 久

大妻女子大学社会情報学部

Hisashi Bannai

Faculty of Social Information Studies, Otsuma Women's University

12 Sanban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8357 Japan

キーワード：メタンガス発電，酪農畜産廃棄物，食品加工残渣

Key words : Methane gas power generation, Dairy and livestock waste, Food processing residue

抄録

われわれは2011年の東日本大震災から原子力依存の後発的問題や廃炉にかかわる永続的な問題についてさらに深く学びつつある。また、地球の温暖化対策として二酸化炭素の削減は、国連地球サミットをはじめ既定路線として一定のコンセンサスを得ている。二酸化炭素を削減するためには、再生可能エネルギーを中心に置いて、近年著しく進展しつつある節電や省エネの技術に基づく需要と供給の両面を考慮した体系的なエネルギー政策の構築が不可欠である。

再生可能エネルギーのなかでも太陽光や風力などの変動型自然エネルギー主体の電力供給システムにあっては、電力需給コントロールの脆弱性が取り上げられる。わが国においては電力の安定供給に不可欠なベースロード電源として原子力が位置付けられているが、原子力は出力調整が苦手な電源であり不適格である。本稿の目的は、長期的な視点から再生可能エネルギーの電力供給にフロー面で不可欠な出力調整に柔軟な対応力を持ち、またストック面からも地域分散型で貴重な電源となる畜産廃棄物主体のメタンガス発電を有力なベースロード電源と位置づけ、その生産能力と確実性をもとに量的拡大方策とその可能性を探ることにある。本研究の成果としては、国内の飼養搾牛頭数からメタンガス発電の潜在発電電力量が国内の水力発電量の1.8%（少なく見積もっても0.9%）を占めると推計できた。その潜在発電電力量を前提にメタンガス発電の量的拡大に向けて、本研究の事業実証モデルに基づいて範囲を全国域に広げた場合、畜産廃棄物に加えて食品加工残渣の数量確保が重要であり、発電量拡大をより確実にできるのが、酪農畜産廃棄物の発生源のクラスターと産業廃棄物収集運搬事業者との連携であることが見いだされた。

1. 研究の背景

2018年9月に北海道全域でいわゆるブラックアウトと呼ばれる全面停電が発生した。直接の原因は胆振地方東部を震源とする最大震度7の北海道胆振東部地震であった。この地震によって厚真町にある北海道電力最大の苫東厚真火力発電所（とまとうあつまかりよくはつでんしょ）が停止した。この緊急停止によって電力の供給量と需要量のバランスが大きく崩れ、道内の他の火力発電所も連

鎖的に運転を停止する事態となった。電力は常に需要と供給が同量にならなければ周波数が安定せず、最悪の場合は大規模な停電が起きる。周波数を一定に保つには電力の発電量と使用量を一致させる必要があり、電力会社は需要と供給が一致するよう発電能力を常に調整し運用している[1]。また、ブラックアウトとは異なるが、2019年9月には千葉県で長期大停電が起こった。この原因は、台風15号の直撃によって県内の各所で電柱や鉄

塔が倒れたことによるもので、約 20 万戸で停電が発生した[2]。これらの停電には、背後に大手電力の地域独占体制下における一極集中発電という構造問題を内包していたとしても、さしあたり送電網の回復と電力の需給調整といった短期的問題として焦点が当てられた。

われわれは2011年の東日本大震災から原子力依存の後発的問題や廃炉にかかわる永続的な問題についてさらに深く学びつつある。また、地球の温暖化対策として二酸化炭素の削減は、国連地球サミットをはじめ既定路線として一定のコンセンサスを得ている。そうしたなかで、設定期限までの削減目標の達成に重きを置き過ぎると、直接的には二酸化炭素を発生させない原子力発電に安易に傾斜しかねない。二酸化炭素等の温暖化ガスを削減するためには近年著しく進展しつつある節電や省エネの技術開発に基づく需要と供給の両面を考慮した体系的なエネルギー政策の構築が不可欠である。そのうえで電源を化石燃料や原子力から再生可能エネルギーに少しでも多くシフトすることが重要であると考えられる。

近年、再生可能エネルギーのなかでも太陽光や風力などの変動型自然エネルギーが主体となった電力供給システムについて、電力需給の短期的なコントロールに関わる脆弱性を強調する論議が根強くある。この問題に対しては、出力調整に柔軟な対応性を持つベースロード電源を組み合わせることで、発電システム全体の安定化を図ることができるが、わが国においては、電力の安定供給に必要な不可欠なベースロード電源に依然として原子力が重視される。しかしながら、「出力調整が苦手な原子力」はベースロード電源に不適合であるとされ、むしろフレキシブルに出力調整が可能なベースロード電源として「揚水力発電、バイオマス発電、パワー・トゥ・ガス(余剰電力を使って水を電気分解して水素やメタンなどに変換し、貯蔵・再利用する技術)」等の投入・拡大が期待される[3]。環境への配慮と安全性の長期的視点からすると、再生可能エネルギーによる電力供給の拡大が求められ、かつ柔軟性に欠ける原子力と違って出力調整への柔軟な対応が可能で地域に分散したバイオマス発電が適任である。

2. 先行研究

バイオマス発電に関しては、バイオマス全般を対象としたものと、焦点をバイオガスに絞ったものに大別できるが、それらはつぎのように分類できる。①バイオマス発電の必要性和費用便益分析さらに発電の技術的問題を扱ったもの、②バイオガス発電を対象に、バイオガス発電の実用化の事例やメタン発酵によるガス化発電の技術開発を紹介したもの、③食品廃棄物や畜産廃棄物利用によるメタンガス発電を紹介したものである。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDO)による2010年代前半までのバイオマス発電に関する技術研究開発動向の紹介[4]によれば、バイオマスエネルギー利用からバイオマス発電の技術開発、とりわけメタン発酵によるガス化発電については民間企業の研究テーマと概要の紹介が主でありその技術開発が緒に付いた段階であった。その後、NEDO 補助事業を利用した民間ベースでの技術研究開発が急速に進んだことから、これらの事例に基づいたメタン発酵系バイオマス発電の導入にあたっての体制整備や投資計画、バイオマス調達等の事業化要件や導入技術が詳細に示される段階に至っている[5]。そうした導入ガイドや技術論が多い中であって、上記分類の③に近接してバイオマス発電の必要性和その拡大を探る本研究に比較的近い論文は下記の通りである。

生産段階の集落排水に付随する汚泥を利用したバイオマス発電による費用便益分析を主体とした伊藤寛幸ほか(2018)[6]やバイオマス発電への期待に対する誤解を解説した日経ビジネス(2015)[7]、畜産の生産段階におけるバイオマス発電の促進にむけ事例を紹介した中西孝平(2019)[8]、ドイツの事例を基に北海道の畜産におけるバイオマス発電を促した梅津一孝ほか(2013)[9]、バイオマス資源の利用事例を紹介した川嶋淳ほか(2007)[10]、木質やメタンなどバイオマス・廃棄物起源の再生可能エネルギーの利用に関わる技術や制度を記述した鈴木康夫編(2013)[11]がある。これら広義のバイオマス発電のうち、本稿が対象とするメタンガスの生成を利用し発電するものに関しては、バイオガス発電の原材料となる食品廃棄物のメタン発酵の事例を紹介した海老澤拓哉ほか(2020)[12]、畜産の生産段階におけるメタン発酵技術の導入効果を紹介した高崎力也ほか(2019)[13]がある。

本稿と同じく畜産と食品の廃棄物に着目したものと小川幸正 (2005) [14], さらに畜産と食品の廃棄物によるメタン発酵技術を論じた小川幸正ほか (2005) [15], バイオガス発電への投資的価値に着目した福留豊 (2002) [16], 羽賀清典 (2008) [17]などがある。このうち後者の羽賀は早い時期から多くの著作で畜産廃棄物とりわけ家畜糞尿をバイオマス資源と位置づけ, その処理法や利用の仕方について論究している。しかし, 当該論文は, 家畜糞尿のメタン発酵によるバイオガス利用について暖房など燃料として過去に何度か注目された経緯に触れまた新たなガス発酵方式の紹介とエネルギーとしての経済性を評価しているが, いずれも畜産糞尿から得られるメタンガスの暖房等の燃料利用に着目するにとどまり, メタンガス利用から発電までの展開は視野に入っていない。また北海道開発局が中心になった北海道酪農における集中型共同利用型バイオガスプラントの実証試験結果に基づいた小野学ほか (2002) [18]と同 (2003) [19], 北海道開発土木研究所 (2005) [20]がある。これは1999年の家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律の施行を契機に, 家畜糞尿の処理と再生可能エネルギーの産出を目的としてヨーロッパの先行事例を参考に建設された共同利用型プラントの実証試験から緻密に分析検証した成果である。北海道内への事業誘因に寄与したと考えられるが, ただ建設費負担を含めほぼ官製のプラントに基づく実証試験であり, 経営的効果も検証されてはいるが, FIT 開始前のプロジェクトということもあって売電収入が今日のような固定価格買取制度下と異なり実践的な収益管理が見通せていない。

以上のように, バイオマス発電およびバイオガス発電に関する論文は, 技術的な問題に焦点を絞ったものが大方であり, バイオマス発電およびバイオガス発電をベースロード電源として位置づけ, その拡大の必要性を論じたものは管見の限り見いだせない。加えて, 以下にみる畜産糞尿によるメタンガス発電プラントにおける発電電力量およびその拡大のための課題の実践的な分析についても先行研究からは見いだせない。

3. 分析の目的と枠組

2012年のFIT制度創設以降, 国内のバイオマス発電において先行したのは直接燃焼方式の木質系である。だが, 林業や製材業から派生する林地残材や未利用間伐材, 製材くずなどの原材料は, 国産材に拘泥すると空間的に広域かつ散在しているため, それらの収集・運搬と管理に要するコストが既存の木質系バイオマス発電所にとっては大きな課題となっている。バイオマスを原材料とした発電を拡大するには, 地理的な広域分散への対処と一定規模の継続的な供給原材料の確保という両面での対処が必要であり, それと同時に空間コストをカバーできる規模の量的確保によるコスト削減も求められる。これらは木質系バイオマスに限らずメタンガス発電 (以下, 広義の「バイオマス発電」と, 狭義の「メタンガス発電」を適宜使い分ける。)にも共通する課題である。

本稿の目的は, 長期的な視点から再生可能エネルギーの電力供給にフロー面で不可欠な出力調整に柔軟な対応力を持つベースロード電源として, またストック面からも地域分散型で貴重な電源となるバイオガス発電に焦点を当てる。その中でもとりわけ畜産廃棄物を主体としたメタンガス発電を有力なベースロード電源と位置づけ, その生産能力と確実性をもとに量的拡大方策とその可能性を探ることにある。本稿の分析によって, メタンガス発電の量的拡大とそれに要する一定規模の継続的な原材料確保に寄与したい。

分析の枠組みとしては, はじめに再生可能エネルギー発電およびバイオマス発電の現状を概観する。そして酪農畜産が盛んな北海道十勝地域において, 酪農経営体と連携し実際に稼働して数年におよぶ精緻な実績データを有するメタンガス発電プラントを実証モデルに設定する。このようなデータに裏付けられた当該プラントの事業実績から, FIT制度の下での発電電力量による採算性ラインを求める。さらに当該発電モデルの分析結果に基づき, 酪農畜産廃棄物を主体としたメタンガス発電の全国ベースの潜在発電量を推計する。

つぎに, 十勝地域に比して賦存するバイオマスの与件が異なる本州域では, フードサプライチェーン川下の食品産業の展開密度が高く, それだけに畑作物残渣のみならず発電に有力な食品加工廃棄物など副次的原材料が豊富である。他方, 十勝地域に比べると川上の酪農畜産の経営体密度は,

全般に疎でかつ中小規模の経営体が広域に散在する。したがって、本州域ではこれまで廃棄されていた食品加工残渣をバイオガス発電に加えることが原材料の量的確保の要点となる。そうしたことを与件として、まず東北や関東周辺のメタンガス発電における酪農畜産廃棄物や食品加工廃棄物といった原材料の集積と利用の実態を把握する。そのうえで量的拡大に要する一定規模の継続的な原材料確保に必要となるフードサプライチェーンの廃棄物に応じた集積（集積者を含む）のあり方と連結主体構築の可能性を探る。

4. 再生可能エネルギー発電とバイオマス発電

4.1. 再エネ発電の現状と課題

2012年から開始された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」(Feed in Tariff. 以下, FIT) は、国が再生可能エネルギー発電(以下, 再エネ発電)による電気を電力会社に一定期間、一定価格で買い取らせる制度であるため、その期間の発電収入は安定する。しかし、発電設備によって異なるものの再エネ発電が本格化してきた最近では FIT による優遇措置が徐々に縮小される方向にあり、

2022年4月からは再エネ特措法の改正により FIP (Feed in Premium. 以下, FIP) 制度が並行する形でスタートした。FIP 制度は、電力市場の取引実勢価格に一定の支援措置(プレミアム(補助額)単価の上乗せ)を維持しながら、段階的に電力市場に価格統合することで再エネ発電の自立化を目指すものである。FIT による再エネ発電の中でも普及拡大している太陽光や風力などは、普及拡大が進展して制度当初に比べ発電開始時の買取価格が徐々に下がっているため、発電事業者としては市場価格の高騰時に発電量を増やし収入を増やすことが可能となる FIP 制度への移行も選択肢に入りつつある。いずれにしろ再エネ発電の種類によって移行時期に違いは出るであろうが、FIT 制度を利用した期間が終了する発電事業者から徐々に FIP 制度への移行が進み FIT による発電は最終盤を迎えることになる。そのような状況にあって、本稿が対象とするメタンガス発電は、太陽光や風力に比べると普及拡大には課題が少なくなく、それもあって FIT スタート時から 2022 年度まで 1kWh あたり 39 円、23 年度から 35 円と単価が高く設定され比較的安定している注 1[21]。

表 1-1. FIT 制度に基づく太陽光および風力発電設備の国内導入状況

		太陽光発電設備									風力発電設備			
		計	10kW 未満		小計	10kW 以上					計	20kW 未満	20kW 以上	
			うち自家発電設備併設	小計		うち 50kW 未満	うち 50kW 以上 500kW 未満	うち 500kW 以上 1,000kW 未満	うち 1,000kW 以上 2,000kW 未満	うち 2,000kW 以上			うち 20kW 以上	うち 洋上風力
2018年	容量	38,933,701	5,408,110	348,171	33,525,591	12,346,579	3,542,931	3,791,613	8,427,905	5,416,563	963,964	8,563	955,401	1,990
	件数	1,697,471	1,179,211	90,948	518,260	492,148	14,615	5,483	5,597	417	585	499	86	1
	容量/件		4.6	3.8	64.7	25.1	242.4	691.5	1,505.8	12,989.4		17.2	11,109.3	1,990.0
2020年	容量	50,207,580	6,912,757	444,838	43,294,823	15,398,192	4,263,117	4,406,987	10,038,287	9,188,240	1,603,872	24,238	1,579,634	4,390
	件数	2,100,254	1,477,974	113,969	622,280	591,555	17,111	6,353	6,640	621	1,437	1,307	130	2
	容量/件		4.7	3.9	69.6	26.0	249.1	693.7	1,511.8	14,795.9		18.5	12,151.0	2,195.0
2022年	容量	60,535,992	8,534,484	553,638	52,001,508	17,508,983	4,963,146	4,865,467	11,268,650	13,395,262	2,268,328	33,121	2,235,207	4,390
	件数	2,449,200	1,772,893	137,761	676,307	641,636	19,403	6,988	7,435	845	1,936	1,763	173	2
	容量/件		4.8	4.0	76.9	27.3	255.8	696.3	1,515.6	15,852.4		18.8	12,920.3	2,195.0

(出所) 資源エネルギー庁「固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト」をもとに作成。

注：① 導入とは、FIT 制度の下で買取が開始された状態のもの。

② データ:各年3月末現在。

③ バイオマス発電設備容量：バイオマス比率が考慮されたもの。

表 1-2. FIT 制度に基づくバイオマス発電設備の国内導入状況

(単位: kW、件)

		計	バイオマス発電設備					
			メタン 発酵 ガス	未利用木質		一般 木質・ 農作物 残さ	建設 廃材	一般廃 棄物 (木質 以外)
				2,000kW 未満	2,000kW 以上			
2018年	容量	1,260,132	40,670	14,011	312,050	662,714	13,050	217,637
	件数	295	127	17	36	34	4	71
	容量/件		320.2	824.1	8,668.1	19,491.6	3,262.5	2,826.5
2020年	容量	2,198,044	63,580	21,342	364,337	1,365,167	85,690	297,927
	件数	418	186	30	40	57	5	100
	容量/件		341.8	711.4	9,108.4	23,950.3	17,138.0	2,979.3
2022年	容量	3,326,707	81,586	37,077	428,410	2,245,100	85,690	448,844
	件数	539	228	59	46	73	5	128
	容量/件		357.8	628.4	9,313.3	30,754.8	17,138.0	3,506.6

(出所) 表 1-1 と同じ。

注: 表 1-1 と同じ。

4.2. 再エネプラント設置と発電状況

表 1-1 および表 1-2 の再エネ発電設備の最近 5 年の推移をみると、FIT 制度の下で既に取り上げられた 3 種の発電設備の容量はつぎのようになっている。太陽光発電では、家庭用中心を除いた 10kW 以上のものが年々増設されている。その中でとりわけ集計上最大の 2,000kW 以上の設備にあっては、1 設備当たりの発電容量が年々大きくなっている。風力発電は、1 件当たりにして約 12,000kW となる大規模設備が直近 5 年間に倍増している。そして、原材料別に 5 種類に区分されたバイオマス発電設備を見ると、燃焼系の製材等残材や輸入木材が主体の一般木質・農作物残渣発電と、間伐材が中心の未利用木質発電 (2,000kW 以上) は、設備数、発電容量ともに徐々に増えており、とりわけ後者にあっては 2022 年時点で 1 設備の平均発電容量が約 31,000kW となっている。同じく燃焼系で清掃工場等の木質以外の燃えるゴミ主体の一般廃棄物は、1 件当たりの発電容量はほぼ同程度ながら設備数が増えている。これに対して発酵系のメタンガス発電は、原材料が下水汚泥、家畜糞尿、食品残渣等であり[22]、その 1 件当たりの発電容量は 350kW 前後とそれほど大きくなく推移するが、設備数は直近 5 年間で倍増している。とはいえメタ

ンガス発電は、太陽光や風力、燃焼系バイオマス発電に比べると容量の合計は最も少ない。

4.3. バイオマス発電

国内バイオマス発電では木質系に続いて、畜産糞尿系、食品産業系、行政主体の生活系が追随した。技術開発が進化した現在、いずれの分野でも発電設備は大規模化しているのが特徴的である。北海道から沖縄におよぶ全国約 300 の木質バイオマス発電所をみると、出力 10,000kW 超が 125 か所と 4 割を占める (森のエネルギー研究所, 2016 年末データ[23])。6 割の比較的小規模なところでは主に国内調達材を燃料としている。多くが沿岸の工業地帯に立地する 4 割の大規模発電所は、輸入パーム椰子殻のみあるいは石炭と輸入パーム椰子殻、石炭と国産材を燃料としている。化石燃料との混焼となると温室効果ガス削減の観点から考察の範疇外である。近年、輸入材に依存せず国内のバイオマス発電拡大を可能にする原材料として、畜産糞尿および農作物残渣、食品加工残渣、生ゴミ等の廃棄物系バイオマスに期待が寄せられている注 2[24]。

畜産糞尿系の発電は、酪農や肉牛肥育、養豚、養鶏の分野で、しかも全国各地に点在する規模の大きな経営体の個別設備で行われている。それらに

共通するのは養畜の排泄物発酵からメタンガスを発生させる発電方式である。ところが最近では、畜産糞尿の原材料にとどまらず、農地や共選場から派生する農作物残渣や比較的均質な食品加工廃棄物を混入し発酵させる技術の開発や海外技術の導入を経た発電設備が登場している。この新たな方式によって近年、廃棄バイオマスという共通項をもとに業際間を透過する新たなネットワーク型バイオガス発電が実用化されてきている注3。これにより広域に点在する畜産糞尿の発生点に、近隣の農作物残渣や食品廃棄物を加えた面展開によって、空間コストを削減し規模の経済性を獲得することが可能となる。

以下、本研究で実証モデルとした地域とメタンガス発電プラントを検討する。

5. 十勝地域と実証モデルのバイオガスプラント

5.1. 十勝地域のバイオガスプラント

十勝地域注4の農業協同組合（以下、農協）管内のバイオガスプラント設置状況を表2にみると、2021年末現在、全23農協管内にプラントのある農協がこの6年の間に5から10農協に広がり、そこでのプラント設置数が合計14基から32基と2倍強に増えている。また、発電能力合計は1,896kWから7,130kWと3.7倍に増加し、1基当たりの発電能力も135.4kWから222.8kWに増加した。

10農協の中でバイオガスプラントの導入が比較的早かったのは、大樹町、十勝清水町、新得町、鹿追町、士幌町の各農協管内である。そうしたな

かでプラント設置件数が最も多いのは士幌町、次いで上士幌町であり、発電容量の合計が最も多いのは上士幌町、次いで鹿追町、士幌町である。この中でプラント1基当たりの容量が大きいのは、鹿追町で2基平均650kWと突出している。これを除く30プラントの内訳は、1基当たり約300~200kWのところは15、約150~100kWが14、そして75kWが1となっている。この中で、後述する実証モデルの音更町農協の発電プラントは150kWと比較的小さい方に属する。

リストアップしたプラント設置のある農協管内には、いずれも酪農家組合員が多くしかも乳用牛の飼養頭数も多い。とりわけ大樹町と浦幌町の農協には飼養頭数が突出して多い酪農家が存在するが注5、それ以外の農協管内では、時期によって経産牛の飼養頭数に変動があるものの酪農専門の組合員の割合が高い注6[25]。

全国と対比して十勝地域のバイオガス発電プラントの設置状況をみると、全国の発酵系のメタンガス発電の1件当たり（2022年）の発電容量は357.8kW、これに対し十勝地域の1基当たり（2021年）の発電容量は222.8kWである注7。ただし、全国のメタンガス発電は家畜糞尿だけでなく、下水汚泥を原材料にした公共の浄化処理施設併設の大規模メタンガス発電プラントが含まれるので、単純に全国と対比して十勝地域の発電容量が小さいと判断するのは早計である。しかし、いまのところ全国の酪農畜産に基づくバイオガスプラントの設置数や発電容量を集計したデータが見当たらないので相対的な比較ができない。

表2. 十勝地域の農協管内におけるバイオガスプラントの設置状況

	2015年						2018年						2021年					
	設置数 (基)	発電能力 (kW)	1基 平均 (kW)	利用 農家 (戸)	経産牛 (頭)	1戸 平均 (頭)	設置数 (基)	発電能力 (kW)	1基 平均 (kW)	利用 農家 (戸)	経産牛 (頭)	1戸 平均 (頭)	設置数 (基)	発電能力 (kW)	1基 平均 (kW)	利用 農家 (戸)	経産牛 (頭)	1戸 平均 (頭)
大樹町農協	2	450	225.0	2	1,917	959	2	450	225.0	2	2,052	1,026	2	450	225.0	2	2,192	1,096
十勝清水町農協	1	25	25.0	1	192	192	1	25	25.0	1	181	181	2	494	247.0	10	2,372	237
新得町農協	1	300	300.0	1	900	900	2	600	300.0	6	2,400	400	3	750	250.0	5	2,528	506
鹿追町農協	1	300	300.0	12	1,245	104	2	1,300	650.0	28	3,864	138	2	1,300	650.0	26	4,059	156
音更町農協							1	150	150.0	1	342	342	2	300	150.0	2	794	397
士幌町農協	9	821	91.2	9	2,973	330	12	1,261	105.1	13	4,767	367	12	1,261	105.1	13	5,256	404
上士幌町農協							4	1,200	300.0	54	13,675	253	6	1,950	325.0	55	16,732	304
浦幌町農協													1	250	250.0	1	2,348	2,348
足寄町農協													1	300	300.0	4	830	208
陸別町農協							1	75	75.0	1	343	343	1	75	75.0	1	350	350
合計	14	1,896	135.4	25	7,227	289	25	5,061	202.4	106	27,624	261	32	7,130	222.8	119	37,461	315

(出所) 十勝農協連『十勝畜産統計』(各年12月末)から作成。

注：①発電能力は、稼働中のバイオガスプラントを集計。

②飼養頭数は、集計時点。

そこで以下では、具体的に稼働しているプラントの事例を取り上げ、乳牛の飼養頭数や原材料として発生する糞尿量と発電容量の関係、さらには発電実績との関係を分析することによって、酪農畜産をベースにした十勝地域および全国のメタンガス発電の拡大の可能性を探ることとする。

なお断っておきたいのは、国内で先行するメタンガス発電プラントの事業化事例の多くは大規模畜産業の企業的経営であり、そこでは情報開示に消極的である。以下にモデルとした農協のプラントの発電実績とそれに対応する経営データは、大変希少であり一般に入手し難いのが実情である。また同プラントをとりあげたのは、酪農畜産が盛んな道東地域が家畜糞尿によるメタンガス発電の先進地であり、しかも発電設備が中規模で道外域においても比較的適応性が高いと考えられるからである。ただし、国内のメタンガス発電プラントの運営体制という観点で当該事例が代表性を保持すると言い切るには無理がある注8

5.2. 音更町農協の発電プラント

十勝地域の農協の中でプラント設置時期がやや後発の音更町農協管内にある2つのメタンガス発電プラントのうちの1つを考察対象とする。この発電プラントは、十勝地域の中の音更町を事業区域とする音更町農協が所有している。このメタンガス発電の発酵原料は、乳牛の糞尿と同農協の共

同選果場から排出される野菜クズである。糞尿は発電プラントに隣接するS牧場から供給され、野菜クズや馬鈴薯クズなどは季節に偏りがあるものの選果場から運搬・搬入される。発電プラント設置の土地は、S牧場の所有地で農協がこれを賃借使用する。発電施設は音更町農協が運用するが、メンテナンスについては施設建設を請け負った会社注9が受託管理する。

糞尿を供給するS牧場は売電を開始した2016年当時、育成牛を除く経産牛が約220頭の規模であったが、2020年末現在では約360頭飼養となり、近い将来400頭規模まで拡大する計画である。というのも音更町農協は、組合員の経営規模の拡大支援策の一環としてメタンガス発電事業をスタートさせており、したがって当該発電施設は計画当初からS牧場の規模拡大計画に沿ったかたちで糞尿受入可能な発電容量に設計されている。当該発電プラントは、組合員の酪農経営における規模拡大と畜産糞尿の付加価値化の一つのモデルケースとなっている。S牧場のほかにも同農協の管内には経営規模の拡大と併せメタンガス発電を希望する大規模酪農経営の組合員が存在するが、2020年末時点で北海道電力(以下、北電)の系統接続の関係で保留となっている。

表3. 音更町農協バイオガスプラントにおける年間の発電量および糞尿・野菜残渣の受入量等

			2018年度	2019年度	2020年度	3ヶ年平均
発電	総発電量 (a)	(kWh)	595,251	558,750	750,736	634,912
	年間1頭当たり (a/c)	(kWh)	2,085	1,643	2,310	2,013
	発電日数	(日)	363	365	365	364
原材料 累計	糞尿 (b)	(t)	8,134	10,337	10,464	9,645
	年間1頭当たり (b/c)	(t)	28.5	30.4	32.2	30.4
	雑排水	(m ³)	3,954	3,697	3,673	3,775
	野菜残渣	(t)	878	507	1,491	959
搾乳牛	年間累計	(頭)	3,426	3,668	4,355	3,816
	平均搾乳頭数 (c)	(頭)	286	340	325	317

(出所) 音更町農協「バイオガスプラント運転状況」(各年4月～3月)。

注：①飼養頭数は育成牛を除く。

②(a/c)と(b/c)は、参考までに搾乳牛年間1頭当たりの数量を算出。

③ 平均搾乳頭数は、乾乳期の差で変動する搾乳牛の月次平均合計を12分の1で算出。

5.3. 発電実績と収支

このバイオガス発電プラントの基本的な構成はつぎの通りである。大まかに原料受入は約40トン/日で、そのうち約35トン/日がS牧場からの糞尿（雑排水を含む）、残りが野菜等残渣である。2018～20年の3年間の原材料投入量と発電量は表3の通りである。3カ年の平均注10は、年間総発電電力量が365日稼働して63万4,912kWh、これに要した搾乳牛が累計3,816頭で、糞尿が9,645トン、投入野菜残渣が959トンであった。ちなみに、3カ年平均の搾乳頭数は317頭で、1頭当たり糞尿産出量は30.4トン/年である。

総発電量は、3カ年の19年を中心にみてみると、19年は発電量が最も少なく、反対に搾乳頭数が最も多かった。糞尿は18年より多いものの20年とはほぼ同量で、雑排水の投入量は20年とほぼ同量である。一方、19年は野菜残渣の投入量が18年よりも少なく20年の3分の1程度であったことから野菜残渣の量が影響している可能性があるが、断定はできない。というのは、共選場からの野菜残渣投入時期の外気温により発酵スピードや発酵槽の残留時間が変わり、また気候の変化や作柄によっても数量に差が生じるからである。また野菜残渣は選果場での発生に応じて投入し、そのような変化に対応する調整は行われていない。これまで

毎年投入された実績のある中で、最も多いエンジンは早ければ7月から遅くとも11月までに約3～4か月間、少ない年で約400トン、多い年には約1,000トンの投入実績がある。つぎに多い馬鈴薯は5～7月の間に約60～90トン/年、さらにタマネギは4～7月の間に12～55トン/年の投入の実績があった。このほか年により共選残渣の発生量が異なるものに長芋、カボチャ、アスパラなどがある注11。

3年間の農協におけるバイオガス発電事業の収支は表4の通りで、これは農協職員の人件費等を含まない直接的な収入と支出の実績である（表では収支実額を合計で表し、個別項目を構成割合で表す）。北電への売電料は3カ年の平均で、収入が4,640万円、支出が6,630万円、差引1,990万円の赤字となっている。収入の内訳は、FIT買取単価39円/kWhでの売電料が54.8%、このほか共選場からの野菜残渣処理料が20.0%、希望組合員への消化液散布料が14.3%、S牧場の糞尿受入に要する施設使用料が11.0%から成り、その中で最も多い売電収入が5割強を占める。一方の支出は、プラント設備の減価償却費が65.7%、施設管理を委託した会社への管理費支払いが14.8%、消化液の散布を委託した委託料が10.2%、償却固定資産税が5.1%、施設維持のための購入電気料が3.3%、火災保険料が0.8%、と減価償却費が支出の6割強を占める。

表4. 音更町農協バイオガスプラントの事業実績と計画

(%)

項目/年度	2018年	2019年	2020年	3カ年平均	2024年	2034年	
	発電開始 4年目	4年目	4年目		10年目計画	20年目計画	
収益	売電料	58.0	59.7	46.8	54.8	62.1	62.1
	消化液散布料	13.7	17.8	11.3	14.3	13.8	13.8
	野菜残渣処理料	21.3	13.9	24.8	20.0	19.9	19.9
	牧場施設利用料	7.0	8.6	17.2	11.0	4.3	4.3
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
(百万円)	40.0	36.5	62.6	46.4	64.5	64.5	
費用	減価償却費	69.4	66.0	61.7	65.7	41.6	9.0
	消化液散布委託費	8.3	10.2	12.3	10.2	15.9	26.1
	施設維持電力費	2.9	3.6	3.4	3.3	2.8	4.5
	修繕費（火災共済）	0.7	0.9	0.9	0.8	3.6	6.0
	固定資産税（償却資産）	6.4	4.9	4.0	5.1	4.2	2.2
	施設管理費	12.3	14.4	17.8	14.8	31.8	52.3
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
(百万円)	74.7	64.8	59.4	66.3	36.2	22.1	
損益	▲34.6	▲28.3	3.2	▲19.9	28.3	42.4	
(百万円)							

（出所）音更町農協「バイオガスプラント運転状況」（各年4月～3月）。

この表 4 は発電開始から 3 年目以降の 3 カ年の実績であるが、年間発電量に左右されるものの収入は徐々に増え、支出の方は平均で 65%を占める減価償却費（20 年定率償却）が当然ながら年々減少してゆく。したがって損益は赤字基調から 6 年目に黒字に転換し、それ以降にあっては収益が増え 10 年目の 2024 年には 2,830 万円の黒字が計画され、20 年目の 2034 年には 4,240 万円の黒字化が見込まれている。FIT 制度による 20 年間の固定買取が事業計画を支える注 12。

5.4. バイオガス発電事業による変化

当該農協と発電事業に参画する S 牧場に成果や課題について聞き取りを行った。

発電事業開始以前の 2011 年に個人経営から株式会社化した S 牧場は、労働力が家族 4 人と従業員 7 人（含、当時研修生 2 人）で、搾乳牛約 330 頭、飼料用畑 78ha（うち借地 15ha）を保有していた。法人化当初から経営規模の拡大を考えていたが、増頭による糞尿量の増加とそれに伴う処理施設拡大への対応という課題に直面していた。事業参加後の増頭計画は、搾乳牛の 300 頭から 400 頭への拡大とそれに必要な育成牛や乾乳牛を加えた総頭数 500 頭である。この規模拡大計画に併せダブルライン畜舎を 10 棟から 16 棟に、ミルクパーラーとバルククーラーも追加するなど畜舎設備等を拡大することになった。さらにこれに見合う乳牛素牛の導入のほか、飼料畑 100~150ha の確保と、付随するコントラクター費用の増額、飼料購入費の増額など相当の投資を要した。発電が始まって以降、牧場運営で大きく変わったのは糞尿処理である。それ以前にあっては、S 牧場は自前で堆肥を製造、飼料畑に散布し、また麦生産者の麦藁と堆肥の交換をしていた。堆肥盤で麦藁と糞尿を発酵させ畑に還元していたが、堆肥盤の広さに制約されて目一杯入れ水分過多気味でしかも発酵中の堆肥の切返し作業も必要だった。発電開始後には、搾乳牛の糞尿は横移動するかたちで発電プラントに投入し、残る育成牛や乾乳牛の糞尿はスペースに余裕のできた堆肥盤で敷麦藁の完熟堆肥を作っている。搾乳牛の糞尿処理作業が不要になって、その分の時間と労力を飼養管理に充当できるようになり増頭計画に応じた飼養管理態勢の確保に繋がっている。また当該糞尿に関わる貯留槽増築費（約 500 万円）とそのメンテナンス料（200 万円/年、含、毎年の発酵菌交換代金）も不要になってそ

の分のコスト削減が実現しているという注 13。

音更町農協においても発電事業開始後の変化がある。具体的には、これまで農協の選果場では野菜残渣は産業廃棄物として有料で処理していた。共選施設における残渣を産業廃棄物として外部の専門業者に委託していた廃棄処理料が 16 円/kg で毎年 1,000 万円以上を要した。バイオガスプラントで 10 円/kg（運搬費込み）で処理することができるようになり、野菜出荷農家としては差引き 6 円/kg の節約になる。直接的には共同計算の農家支出がその分減っている注 14。2019 年度の残渣処理量 507 トンが産廃処理であった 16 円/kg で 811.2 万円であるのに対し、プラント投入 507 万円で済み、年間約 300 万円のコスト削減が実現している。なお、地域雇用に関連して、音更町農協の発電プラント建設とメンテナンスを請け負った十勝地域を営業区域とする会社では、メタンガス発電設備の建設を始めたころ（約 10 年前）に比べ当該事業に関係する社員数が 27 人純増となっている注 15。

6. モデルからの農産畜産酪農廃棄物によるメタンガス発電拡大の可能性

音更町農協のメタンガス発電実績から北海道を含め全国の潜在発電量を推計し、地域資源に基づいたメタンガス発電の拡大の可能性を探ってみることにする。その手法では、食品廃棄物（生ごみ）や下水汚泥、間伐材・林地残材などと同じくバイオマス資源として期待されている乳牛排泄物の原単位がカギになる。畜種別の家畜排せつ物の年間発生量がわが国におけるバイオマス種類別の年間発生量とともに公表されているが、それらは環境省や農水省等の所管庁により数値が異なる。さらに公表年次の違いで数値のブレが大きい注 16 [26][27][28]。そのため一定時点の畜種別頭数が明らかな畜産統計を基に推計する。

表 3 で見たように音更町農協のメタンガス発電プラントの 3 年平均では、搾乳牛が 317 頭、1 頭当たりにして年間 2,013kWh という発電実績が析出された。これに要した原材料の糞尿投入は 1 頭当たり年間 30.4 トンであった。この投入量は、農水省が全国の酪農・畜産農家を対象とした調査報告（表 5）に使用する「乳用牛 1 頭当たり排せつ物量（ふん、尿）の原単位」注 17[29]は搾乳牛で年間 21.5 トンと設定されており、それに比べると音更町農協の搾乳牛の糞尿実績はやや多い。

参考値として、NEDO が作成した「バイオマス種毎のガス発生量およびエネルギー発生量の目安」[30]に示された乳牛排泄物1トン当たり電気発生量40kWh(約145MJ)に基づき、農水省の前記原単位「搾乳牛年間21.5トン」から推計してみた。ただし、この発電量40kWhには自家消費量約25%が想定されてその分が減じられているので、これを補正した発電量を50kWhとして21.5トンとの積(1,075kWh)に基づく潜在発電量も算出した。

表 5. 家畜排せつ物排せつ量の原単位

畜種		排せつ物量 (kg/頭・日)			年間 (kg)
		糞	尿	合計	
乳用牛	搾乳牛	45.5	13.4	58.9	21,499
	乾牛・未經産牛	29.7	6.1	35.8	13,067
	育成牛	17.9	6.7	24.6	8,979
肉用牛	2歳未満	17.8	6.5	24.3	8,870
	2歳以上	20.0	6.7	26.7	9,746
	乳用種	18.0	7.2	25.2	9,198
豚	肥育豚	2.1	3.8	5.9	2,154
	繁殖豚	3.3	7.0	10.3	3,760

(出所) 「家畜排せつ物の排せつ量の原単位 (kg/頭・日) の例」.
農水省畜産振興課『畜産環境をめぐる情勢』2022年10月
注：年間数量は、排せつ量合計を365日に換算。

表 6. 搾乳牛飼養頭数に基づく潜在発電量 (2021年2月)

	飼養頭数 (頭)	経産牛 (頭)		年間1頭当たり発電量 2,013kWhに 基づく (MWh) *a	(参考)	
		搾乳牛	乾乳牛		年間1頭当たり 発電量860kWhに 基づく (MWh) *b	左の(25%補正 50kWh×21.5トン =) 1,075kWhに 基づく (MWh)
全国	1,356,000	849,300	726,000	1,461,438	624,360	780,450
北海道	829,900	470,200	400,600	806,408	344,516	430,645
都府県	525,900	379,000	325,400	655,030	279,844	349,805

(出所) 農林水産省「畜産統計」(2021年2月1日現在) から作成。

注(*a)：音更町農協発電プラントの年間1頭当たり発電実績「2,013kWh」から推計。

注(*b)：農水省の搾乳牛排泄物年間21.5トンに、NEDOの1トン当たり40kWhの積=860kWhから推計。

なお、NEDOの発電量は自家消費量約25%が想定されており、その分が減じられている。

注：音更町プラント併設のS牧場では、糞尿収集牛舎から乾乳牛は隔離され発電に直接寄与していないためこれに合わせ算入から除外。

表 7. 音更町農協選果場への共計出荷量に占める発電プラント投入野菜残渣の割合 (参考値)

	2018	2019	2020	3カ年平均
野菜残渣プラント投入実績 (t)	877.6	507.1	1,491.1	958.6
選果場共計出荷平均量に占める割合 (%)	2.7	1.5	4.5	2.9

(出所) 音更町農協資料。

(注) ①農協選果場の農産・青果の各共計出荷量実績の記録がある2015年産と2020年産の平均を分母に算出。

②共計：生産者が出荷する農産物の農協共同計算方式による販売。

③農産販売担当経験者によると、同農協組合員の共計利用率は約9割とされる。

④本表は、便宜的に算出したものであり、あくまでも参考値である点に留意されたい。

表 6 に示したのは、2021 年現在、全国および北海道、都府県で飼養されている搾乳牛頭数に、音更町農協の 1 頭当たり 3 カ年平均の年間発電実績に基づいたそれぞれの地域の発電量を推計したものである。それによると全国ベースの搾乳牛排泄物の潜在発電電力量は約 146.1 万 MWh という結果である。国内水力発電の 2020 年の電力量 8,290 万 MWh の 1.8% を賄える大きな電力量である注 18[31]。推計ではそのうち北海道では 80.6 万 MWh (全国の 55.2%)、都府県計では 65.5 万 MWh (同 44.8%) の電力量が見込まれ、飼養頭数の多い北海道の潜在発電量が都府県全体を 20% ほど上回るという結果である。また表には掲示していないが、都府県にあっても東北 6 県で 11.6 万 MWh (同 7.9%)、関東・東山 10 県で 21.4 万 MWh (同 14.6%)、九州 7 県で 12.6 万 MWh (同 8.7%) の電力量が見込まれる。

一方、参考とした農水省の原単位に基づく自家消費補正後の発電量から推計した場合、少なく見積もっても全国で約 78 万 MWh、北海道で約 43 万 MWh、都府県計で約 35 万 MWh の発電電力量が見込まれ、同様に水力発電の 0.9% を賄える電力量である。両者の発電量には、ほぼ 2 倍の開きがある。音更町農協の 1 頭当たり 3 カ年平均発電実績には、前述したように選果場の野菜残渣投入約 960 トンが寄与していると考えられる。現段階では、それがメタン発酵素材の増量になっているとしても、発電電力量にどの程度寄与しているのかは直接追究できていない。環境省の「廃棄物系バイオマス利活用導入マニュアル」に示された「バイオマス種別の強熱減量 (VS/TS)、VS 分解率、メタンガス発生率」に基づくと、乳牛排泄物のバイオガス発生効率やメタン濃度は、他の廃棄物種 (食品廃棄物 (生ごみ)、下水 (濃縮) 汚泥、草木系廃棄物、紙系廃棄物) に比べけって劣っていないし、む

しろそれらはほぼ同程度の発生効率や濃度を示している注 19[32]。したがって、参考値として示した表 7 を前提にすると、十勝地域のみならず全国において農産物の選果販売にともなう野菜残渣は毎年一定の割合で発生し、また各地で食品加工残渣等が毎日のように発生することから、それらはメタンガス発電における有力な原材料となる。これを農畜産物生産の周辺地域に賦存する有力なバイオマスと捉えることができる。

7. 発電量拡大に寄与するサプライチェーン川下の食品加工廃棄物との連携

7.1. メタンガス発電における食品廃棄物等の収集・受入の事例

前述のモデルプラントのようにメタンガス発電で発電量アップが期待できる食品廃棄物等について、その収集、連携のあり方を検討する。はじめに、十勝地域で最大規模の発電プラントをとりあげ、つぎに本州域でメタンガス発電に取り組む 4 つのプラントの事例を示す。国内で先行したメタンガス発電プラントの事業化事例の多くが大規模畜産業の企業的経営で情報開示に消極的である。前述のモデルとした農協の実際の発電実績に応じたプラントの経営データは希少で一般に入手し難いのが実情である。畜産酪農廃棄物や食品加工廃棄物等の調査の受け入れにおいても同様であり、ここに取り上げるのは、そうした中であって幸運にも一定の情報提供が得られた貴重な事例である。

(1) 鹿追町環境保全センターバイオガスプラント

前述の十勝地域で町が直接運営するメタンガス発電の事例である。

この時点で十勝地域にあつて国内最大規模のメタンガスプラントを町が所有し運営するのが「鹿追町環境保全センター」である注 20。鹿追町がバイオガス発電に取り組むきっかけは、畜産糞尿の臭気

表 8. 鹿追町環境保全センターの 2 ヶ所発電プラント概要

・ 乳牛糞尿, 生ごみ等 投入量	94.8t/日
・ 発電機	100kW×1台, 190kW×1台
・ 乳牛糞尿, 生ごみ等 投入量	210.0t/日
・ 発電機	250kW×4台

(出所) 鹿追町環境保全センターでの聞き取りに基づく。

対策である。町は酪農と畑作の 2 本柱で成り立っており、搾乳頭数が増加するとともに畑地への糞尿散布が増えていった。町の人口は約 5,500 人で、酪農家数が 90 戸強、養豚専業が 3 戸、ほかに耕種兼営の肉牛農家が 4~5 戸で、酪農以外は水分の少ない糞尿のため堆肥化により各自畑地に散布している。酪農家も乳牛糞尿を堆肥化し畑地に還元していたが、家屋の集中する中心地で臭気が問題となっていた。20 年前に町として臭気対策の必要性が議論され、その 5 年後にバイオガス発電の計画を策定、2007 年からバイオガス発電プラントの 1 号機が中鹿追地区で稼働、2016 年から瓜幕地区で 2 号機も稼働し、両施設合わせこの時点で国内最大規模のメタンガス発電所である。両施設とも鹿追町がプラント全体の建設費等ハード面（含、減価償却費）を負担した。

飼養頭数が増えて搾乳にフリーストールが導入されると、洗浄用水を多用するので水分の多い糞尿で完熟堆肥化に時間を要する。一方、バイオガス発酵にはそれが好都合であるため、個々の農場の糞尿を集約して発電原材料に確保する、また町内で 1 日約 1 トン発生する生ゴミも集約して原材料に使用する注 21。

畜産糞尿は、トラック荷台の着脱式コンテナを各戸に配置して、飼養頭数の多い農家で 1 日 3~4 台分、少ないところで週 1~2 台分を収集する。現在、収集している対象農家の範囲は、バイオガスプラントからいずれも半径約 4 キロメートル圏内で、2 ヶ所のバイオガスプラントでそれぞれ受入れる。それは、町内全酪農家で発生する糞尿量の約 3 割（戸数でも約 3 割）に相当する。また、町内の生ごみは、他の自治体の方式同様、民間事業者者に委託し月・木の地域と火・金の地域に分け収集する。

2 ヶ所のプラントでは共に、酪農家（中鹿追 10 戸、瓜幕 17 戸）で構成する施設利用組合が設立さ

れ、町が事務局となって施設および組合の運営にあたる。2 つの利用組合は、糞尿排出量をともに 1 頭当たり約 23 トン/年で設定し、処理料金を 2,000 円/頭/年（運搬費込み）とし、産業廃棄物で処理する場合に比べ安価とした。

バイオガスプラントの稼働によって、地域での雇用が 2 つの施設を合わせ 20 人が必要なところ、労働力不足から組合職員 15 人で運営にあたる。糞尿収集と消化液散布は、施設ごとにトラック（2 台と 3 台）とトラクター牽引方式の液肥散布車（2 台と 3 台）で行うが、人員は 2 人と 3 人の計 5 人でここに固定人員を要する。消化液散布の時期は、春にビートや豆類、デントコーンの作付け前、夏に牧草の刈取り後、秋に麦やイモ類の収穫後とされる。収集と同様、糞尿散布も各施設から半径 4 キロメートル圏内限定である。消化液散布の料金は、組合員と非組合員で 51 円の差がある。

今後の見通しと課題は、バイオガスプラントから離れていて糞尿が持ち込めない酪農家から 3 基目の設置要望が出ているが、現在、北電がこれ以上の売電接続が困難と保留状態である。また前述の労働力不足が解消されていない。

(2) ながめやま・バイオガス発電所

銘柄肉牛の生産が盛んな山形県の事例である注 22。山形県西置賜郡飯豊町は、米沢市と長井市に隣接する。この「ながめやま・バイオガス発電所」は、町内の畜産臭気対策がきっかけとなって 7 年前に計画し着工までに 5 年を要し、2020 年 7 月に竣工となった。当該発電施設は東北おひさま発電株式会社が所有し、同社の持ち株会社的那須建設株式会社（長井市）の社屋に事務所を置く。

発電プラントは、飯豊町の肉牛繁殖農家 3 戸（肉牛計 130 頭）と肥育業者 1 社（肉牛 1,000 頭）の畜舎が一カ所に団地化された畜産団地に隣接して設置された。発電プラントには、この 4 者と団地外の酪農家 1 戸（乳牛 300 頭）の 5 者からの糞尿

表 9. ながめやまバイオガス発電所のプラント概要

・肥育牛乳牛糞尿, 食品廃棄物 投入量	67t/日
・発電機	250kW×2台

(出所) ながめやま・バイオガス発電所での聞き取りに基づく。

が約 12,000 トン/年と、食品加工場の食品廃棄物が約 4,800 トン/年、計 16,800 トン/年が投入される。ここでは団地の 4 者 11 棟の畜舎で排出される糞尿が加水、液状化され、埋設パイプラインを通じて発電施設に投入されるところに特徴がある注 23。これによって畜舎管理と運搬の労力が省力化され併せて臭気対策が実現している。このほか原料槽上部の臭気発生源施設の密閉化、食品残渣の副原料棟にも装置を稼働させ臭気の低減対策を講じている。

このバイオガス発電施設では、計画当初 250kW の発電機 2 台 (500kW) により原材料を約 50 トン/日の投入で年間約 360 万 kWh の発電を見込んでいたが、現段階で計画を達成できていない。一番の要因は、食品残渣の投入不足である。3 年ほど前から食品残渣の収集・運搬に関して既存業者の権益主張が強くなり、さらに食品ロス削減政策もあって、年々、原材料確保が難しくなっている。計画通りの発電には食品残渣の投入が不可欠であり、このため発電事業者側からの食品加工会社等の新規開拓が欠かせないという。昨今は、3 年前の収集先 8 事業者を、収集地域と併せて 18 事業者に拡大しても収集量がほぼ変わらず、食品加工廃棄物の取り合いのような状況を呈しているという。

(3) 天童環境株式会社/株式会社リアクト米沢

酪農畜産廃棄物のメタンガス発電と発酵原材料 (各種廃棄物) の発生源を結び付ける業際連結の主体が発電事業者となった事例である注 24。

同社の主業は産業廃棄物や一般廃棄物、各種廃棄物の収集、運搬、処分、再生、汚染土壌や地下水の浄化および環境汚染物質の除去である。同社は、約 10 年前から産業廃棄物運搬事業の中で食品リサイクルを開始し、それを活かしてメタンガス発酵原材料となる食品加工廃棄物の収集・仕分から原材料の調達・精選、発電プラントへの供給を担っている。また同社は、発酵原材料の供給先であるメタンガス発電プラントの共同出資社のうち主たる企業という位置付けでもある。言ってみれば、

当該企業は廃棄物の収集・運搬・処分の事業から派生した多角経営の一環としてバイオガス発電事業に参画したわけである。

2016 年ごろから天童環境がバイオガスプラント建設を計画した。当時先行していた県北にある養豚場のバイオガス発電プラントに数年間、発酵原材料となる食品残渣を破碎・混合調製後に供給していた。この前後に東京都に本社のある株式会社ハイポテックと共同出資で 2015 年 10 月にバイオガスプラントのコンサルティングを行うリアクトバイオガス株式会社 (天童市) を設立した。そして 2020 年 1 月に株式会社リアクト米沢 (米沢市) を設立、1 号機のバイオガスプラントを同所に設置し、8 月に発電を開始し現在に至る。

原材料の食品残渣の収集先は、山形県内および隣接する福島県と宮城県の食品加工やカット野菜など 20~30 社の加工場である注 25。収集した食品残渣等は、天童環境の食品リサイクル中間処理施設において破碎・混合調製する。具体的には固形物の破碎とリキッド系の水分調整後に混合調製するもので、ここに質の面と収集量の歩留まりの両面でノウハウが求められるという。そして調製後の約 9 割がリアクト米沢のバイオガスプラントに運び込まれる (10~15 トン/日)。食品残渣以外には米沢市内で発生する酪農・肉牛肥育農家から排出される糞尿を含んだ敷料 (40 トン/日) である。食品加工会社の廃棄物については料金を徴収するが、ゴミとして産業廃棄物で出せば 1 トン 10 円のところ 7 円に対応する注 26。

リアクト米沢の発電機の能力は 1 台 370kW で、50~60 トン/日の原材料投入により 8,000~9,000kWh/日を発電する。プラントに関しては、リアクトバイオガスが統括し、EPC 注 27 からプラント運用・保守までをハイポテックが担う。

米沢市や飯豊町などの酪農・畜産農家では、周辺住民対応として以前から野積み堆肥の臭気対策が課題であったことからこの解決ニーズが存在し

表 10. リアクト米沢の発電プラント概要

・ 乳牛肉牛糞尿 投入量	40t/日
食品残渣 投入量	9~13.5t/日
・ 発電機	370kW×1台

(出所) 株式会社リアクト米沢での聞き取りに基づく。

表 11. 信州中野エコパワーランドの発電プラント概要

・ 菌床培地, 加工食品残渣 投入量	10t/日
・ 発電機	375kW×1台

(出所) 株式会社信州中野エコパワーランドでの聞き取りに基づく。

た。それもあって、リアクト米沢のプラントには肉牛生産が盛んな米沢市や飯豊町の農家から畜産糞尿が搬入されている。同プラントでは、周辺に対する臭い対策を厳密に実施している。糞尿搬入搬出口をその都度開閉し外部と遮断し、糞尿投入の粉碎ミキサー設置所もテント内に閉鎖して、消化液タンクも天幕で閉鎖して臭いが外に出ないよう臭気対策を徹底している。

メタン発酵で発生する消化液 10 m³/日は、原材料を柔らかくするため一部が投入口に戻されるが、多くは水で希釈し BOD (生物化学的酸素要求量) を基準以下にして、600m先の下水本管に放流している。

ところで、メタンガス発電 (2021 年後半稼働) の営利企業としては日が浅く事業実績と言えるようなデータ蓄積は浅薄であった。しかし、共同出資企業 (株式会社ハイポテック) がバイオガス発電プラントのエンジニアリング (排ガス処理装置の設計・製作・施工等) を本来業務としていることから、当該発電所の技術的サポートは徹底しており、本州域でのメタンガス発電に伴い発生する周辺住居への臭気対策 (閉鎖系設備対応) や消化液処分技術、コスト面での課題等について、今後のコンサルティングが経営戦略として視野に入ったプラント経営である。

(4) 信州中野エコパワーランド

メタンガス発電の発酵原材料に廃棄菌茸培地を主体にする希少な事例である。

当該発電企業の「株式会社信州中野エコパワーランド」注 28 においては、メタンガス発酵に使用済みきのこ培地 (以下、廃棄菌茸培地) を主原材料とし食品加工残渣を付加的に利用してメタンガ

ス発電を行っている。当該発電企業が所在する長野県中野市は、菌床キノコ栽培による生産量が国内有数の地域の一つで、生産者のクラスター形成により原材料の量的確保に優位性をもつ。そうした地域特性を背景にした廃棄菌茸培地のメタンガス発電は、畜産廃棄物資源によるメタンガス発電との差異や親和性を検討する上で貴重な事例であり、さらに本州域に共通する発電課題もみえてくる注 29。

中野市は農業が中心産業で年間産出額 280 億円のうちきのこが 200 億円を占める。廃棄菌茸培地が年間 15 万トン発生し、堆肥化して野菜畑地に散布するにも限度があつて 5 万トンの余剰が出ている。また畑地への過剰投与で臭気問題も起きている。

発電プラント設置前は、廃棄菌茸培地を堆肥化し野菜に施肥していた。このグループ全体で廃棄菌茸培地が年間 6 万トン発生するが、徐々に処理が難しくなっていたところ、バイオガス発電で FIT 補助があることから 2019 年に会社を設立、バイオガスプラントを設置した。土地は借地で、最大出力が 375kW の発電プラントに 7 億円を投資した。当初、一般廃棄物処理施設としての許可が取得できないので、有価で買い取って発電するのであれば廃棄物処理の許可が不要で稼働できるというのでスタートした。

発酵原料は廃棄菌茸培地であるが、畜産業者からの牛糞を種菌にして、20 トン/日の処理計画でスタート。開始早々、3 割が液化しても 7 割が固体で残り不具合が発生したため 4 基の攪拌機を設置して固形化率を 5%にまで低減した。現在、10 トン/日の原材料を投入するが、内訳は、コーンコブが

ベースの使用済み菌茸培地^{注 30}[33]を砕断したものに
加えて、油カス、リンゴジュース搾りカス、加工
食品残渣（大豆加工食品会社の高野豆腐や油揚げな
どの廃棄物。同社とは菌茸栽培地に使用する豆腐
おからを仕入れる相補の関係がある）、ドライフル
ーツ漬後のシロップ、米糠、小豆煮沸カスなどを
投入している。本プラントでは、消化液処理にコス
ト過多であるという。700万円/日の売電（375
kW×稼働率 75%×24h=4,950kWh からプラント
自家消費 20~30kWh）に対して、薬剤と加水処理
後に下水放流の必要があり、そのため水に 200 万
円/日、高分子凝集剤に 170~180 万円/日、さら
に電気代を要する。

菌茸培地を利用したバイオガス発電事業からの
反省点として、廃棄菌茸培地は固形であるため、
固形系メタン発電には湿式発酵は適さず、乾式発
酵で計画する必要がある。また廃棄菌茸培地によ
るメタンガス発電で FIT を申請したが、当該原料
はバイオマス燃焼発電が適当として経済産業省が
認可をしなかった点などが挙げられている。

7.2. 食品廃棄物等を加えメタンガス発電に取り 組む 4 つの事例からの示唆

上記事例の中で、リアクト米沢の親会社に相当
し廃棄物の収集を本業とする天童環境と収集が本
務である鹿追町は収集主体そのものである。直接
的か間接的かの違いがあるにしても、時々の収集
に多寡が生じることから、両者は廃棄バイオマス
の発電プラントへの投入物や量を一定程度コント
ロールできる。この典型的な収集主体に近似であ
るのが信州中野エコパワーランドである。当該発
電会社は、菌茸栽培地に豆腐おからを使用する同
グループ企業とその廃棄物を提供する大豆加工食
品企業とが相補関係にあるため、同様に廃棄バイ
オマスの量的確保と投入のコントロールに優位性
がある。また、主原材料の廃棄菌茸培地の確保に
は、グループ企業を含む菌床キノコ生産者のクラ
スター形成が寄与している。主原材料の量的な安
定確保の観点からすると、畜産団地に隣接するな
がめやま・バイオガス発電所も一種のクラスター
形成による恩恵を受けている。

いずれも酪農畜産廃棄物を主原材料として、こ
れに生ごみや食品加工廃棄物といった廃棄バイ
オマスを追加する業際間連携による新たなネット
ワーク型バイオガス発電を実用化した事例と言え
る。ただ、これら事例のうちの 3 つは、既存の酪農畜

産廃棄物の処理に伴った周辺環境への臭気対策が
事業開始の大きな起点になっている。またほかの
1 つは、発電原材料が異なるものの発電事業に伴
う臭気対策が不可欠と位置付け対策を徹底してい
る。

これら事例からすると、廃棄バイオマスを利用し
た業際間連携によるバイオガス発電において、臭
気対策は事業の開始前後を問わず持続可能なメ
タンガス発電の重要管理点ということが出来る。

7.3. 業際連結主体形成の可能性を想定した事例
つぎに鍵になっているのは、フードサプライチ
ェーン川下の原材料の確保と収集主体である。1
つは、関東地域で養豚経営を主業とする企業が食
品廃棄物を再利用して、いわゆるエコフィードと
いう飼料製造に取り組む関連企業の事例である。
さらに本稿のモデルプラントが存在する十勝地域
にあって、地域の農業協同組合に近接した組織で
あることから互いに連携しやすいとみられる 2 つ
の組織において、業際連結の主体形成の可能性を
探った事例について検討する。

(1) エコフィード製造企業

フードサプライチェーンの川上に相当する食品
製造業と川下の小売業からバイオマス原材料とほ
ぼ同等の原料を受入れ、リキッドフィード^{注 31}
を製造して自社農場に供給する有限会社ブライト
ピック千葉・溝原飼料工場が考察対象である^{注 32}。
ブライトピックは、繁殖農場と肥育農場合わせ 8
農場を保有し、2021 年 8 月現在の平均稼働母豚
が 6,040 頭、年間出荷頭数が千葉と神奈川の農場
を合わせ約 155,000 頭と大規模な養豚経営であ
る。溝原飼料工場で、原料調達、仕分け、配合設
計、農場への出荷まで使用する食料品残渣をリキ
ッド状にしたエコフィードの加工製造をしてい
る。ここでは食品廃棄物取扱いに必要とされる産
業廃棄物処理業と一般廃棄物処理業の許可を取得
している。また同工場の原材料受入量は、年間
55,000~65,000 トン（うち産業廃棄物が約 25,000
トン、一般廃棄物が約 6,500 トン）である。ブラ
イトピックの飼料原材料の調達先は、大きく分け
て食品加工業とコンビニやスーパーなど食料品小
売業の 2 つの業態である。ブライトピックは、食
品メーカーの工場ラインで発生する端材や廃棄
物、店頭にはばななかった食品の残り等を原料と
して飼料用にリサイクルし、主業である養豚場にエ
コフィードとして供給している。

同社の当面する課題は、原材料の安定確保であり、2020年頃から食品ロスの問題が叫ばれるようになって、加工食品工場ではロス削減対策を徹底するようになり排出量が抑制されてきた。このため同工場での受入量も2014~17年に比べると半減しているという。社会状況次第で受入量が変わるため、比較的安定した有価による原材料調達を増やしつつある。しかしながら、同社の担当者は、食品残渣を活用したバイオガス発電に関心を示さない。養豚経営が主であり、前述したように首都圏においては原料調達が困難になっているからであるという。

(2) 酪農ヘルパー組織

バイオガス発電とフードサプライチェーンからの食品廃棄物を繋ぐ有力な主体と指定した酪農ヘルパー組織の可能性を期待した事例である注33。酪農経営にあっては、朝夕2回の搾乳作業が不可欠であり、家族が主体の中小酪農経営の場合、年中就労の状態に置かれている。冠婚葬祭等で酪農家が休みをとる必要のある場合、当該酪農家に代わり搾乳や飼料給与等の作業を補充する労働力が酪農ヘルパーであり、酪農ヘルパー組合は、酪農家が組合構成員となってヘルパー職員を雇用するという組織形態が一般的な姿である。ヘルパーの利用は、組合員が月単位で利用希望を申込み、ヘルパー組合側が対応可能な出勤要員に基づき応諾の可否を決める。

十勝地域の場合、17のヘルパー組織があり（組合がほとんどで、会社の形態もある）、1農協に1つのヘルパー組織を設置したケースが多い。ヘルパー職員の数は、1組織あたり最多20数人、最小4~5人、平均10人である。十勝地域のヘルパー組織のほとんどは、不動産を保有せず職員が使用する自家用車をリースで利用する。ヘルパー職員の就労時間は、午前5~9時（4時間）と午後4~8時（4時間）の計8時間で、午前10~午後4時は自由に休息する人など様々である。シフト制で月間勤務日数は22日、休日が8日。雇用形態や給料体系は組織ごとに異なる。17組織の定年は、60~65歳と一般企業と変わらない。ヘルパー組織としては関知しないが、自由時間を含め拘束時間外のアルバイトは可能であるという。

現在、十勝地域の酪農ヘルパー組織に所属する職員は、地域内酪農家の子弟は不在で、動物系専門学校卒の20~30歳代の道外出身者が多く、傾向

として10年ほど働いて転職するパターンが一般化している。酪農家の子弟は、一戸当たりの飼養頭数が多くなり、全国的な人手不足もあって、専門学校や農業大学校を卒業と同時に実家に入る傾向が強まっている。このためヘルパーとして修業する酪農家子弟が不在のうえ、全般に専任の酪農ヘルパーが不足気味の状況にある。また、全国的に酪農ヘルパー組合自体は減少傾向にある。国内の酪農経営体は、中小規模の家族経営が減少し、従業員を擁する大規模な法人経営が増えて、ヘルパー需要が減じていることも一因である。

(3) 農作業受託コントラクター

バイオガス発電とフードサプライチェーンの接点を繋ぐ有力な主体と指定した農作業受託を専門とするコントラクター組織の可能性を期待した事例である注34。

十勝地域では1990年代後半までに各地にコントラクター組織が設置され、現在31組織が受託事業を実施する。当該コントラクター組織の約半数は農業機械を自前で所有するが、中には受託窓口業務だけで実作業は域内の生産者が自前の機械で行うところもある。コントラクターの組織形態は、農協組織の作業受託部門や農協の子会社、あるいは運送会社や建設会社、農機・建機会社などがある。受託作業は、全て飼料用作物関連で、牧草刈取り、デントコーン収穫、畑地への堆肥・肥料散布など季節性はあるもののほぼ通年である。余力のある組織は、複数の農協管内で作業を受託するが、約半数は単一農協管内に限定している。

コントラクターの職員や従業員の勤務体制は、午前6時出勤、7時作業開始、午後5時作業終了が基本パターンで、実労働で約10時間、しかし雨天は休業日となる。このように就労時間が変則的であるが、11~2月の農閑期は長期休暇がとれ、特に12月20日~1月15日の間は完全休業である。冬期間の作業は主に農業機械の整備である。

大規模酪農の十勝地域では、農業機械の操縦に大型特殊免許や牽引車両免許が必須で、作業そのものは収穫、積込み、運搬がセットになるため、チームで取り組む必要がある。そのためローションの組める最低要員の確保が大前提となる。これまでオペレーターは、農業大学校卒や退職自衛官（50歳台）が中心であったが、今日の人手不足を背景に人員確保がこれまで以上に困難になってきている。

人員の確保のみならず、コントラクター組織が現在抱える課題は少なくない。酪農家戸数が減って飼養頭数が増え、酪農家は牛の飼養に労力を傾注せざるを得ず、さらに飼養規模の拡大にあわせ粗飼料作物の栽培面積も増えるが、これに伴って高額の大型農業機械の更新が必要になる。設備更新投資が難しくなると農作業委託が増えてくる。ひとたび作業委託に移ると自前の農作業には戻らないと言われることから、コントラクター組織としては受託作業量がさらに増える可能性があり、同時に大規模農業機械の新規投資や更新投資の必要に迫られる。十勝地域で使用する農業機械は、大型特殊機械ゆえにリースに馴染まず、自前の大規模投資となる。このような条件下で、これからコントラクター組織は減ることがあっても増えることは考えにくく、一方で作業受託面積が減ることも考えられないという事業環境に置かれている注 35。

7.4. 可能性を想定した3つの事例からの検討

フードサプライチェーンの業際連結主体としての可能性を、いずれも事業分野が異なる3つの事例から検討すれば、つぎのようにまとめられよう。エコフィード製造企業は、川下の食品加工業や食料品小売業からの食品加工廃棄物に近接しているが、その利用は企業グループの中で完結している。近年の社会的な食品ロス削減対策が徐々に浸透して食品加工廃棄物の排出抑制から受入量が明確に減少している。このため、メタンガス発電との連携に食指を伸ばすほどの余力がないというのが同企業および同種企業の実情であろう。酪農ヘルパーと農作業受託コントラクターは、どちらの組織も川上の酪農畜産廃棄物に近接しているが、今日の人手不足問題を直に受け、当該組織自体の人員確保が難しい状況にある。しかも、業際連結主体として成り立つには新規の設備投資も考慮しなければならない。これら両側面を直ちに解決して、新たな業務を追加できる条件が現状で整っているとは言い難い。

8. まとめ

畜産糞尿の原材料にとどまらず、農地や共選場から派生する農作物残渣や比較的均質な食品加工廃棄物を混入し発酵させる近年登場したネットワーク型ともいべきメタンガス発電の実用化事例を見てきた。

これらを通して第一に言えることは、十勝地域におけるメタンガス発電事業の実績および農産物の選果販売にともなう野菜残渣の集約実績から、事業実証モデルの経営収支に基づくメタンガス発電の拡大の可能性である。前述した音更町農協のメタンガス発電実績から北海道を含む全国の潜在発電量の推計分析の結果、酪農畜産農産廃棄物に基づくメタンガス発電の潜在発電電力量が国内の水力発電量の約1.8%（少なく見積もっても0.9%）を占めると推計できた。量的な差や集約程度を別にすれば条件は揃っていることから、北海道および十勝地域に限らず都府県においても導出された発電量は決して獲得できない値ではない。また本稿の事業実証モデルをもとにしたメタンガス発電の全国域への拡大は、原子力や化石燃料依存のエネルギーから再生可能エネルギーへの転換に、さらにはベースロード電源として少なくとも一定程度寄与することが明らかとなった。

それだけでなく第二には、農畜産業におけるメタンガス発電の地域への影響についてである。S牧場の事例にみるように、メタンガス発電によって酪農経営の規模拡大が計られ、直接的には労働力の省力化や作業スペースの確保といったプラス面がもたらされ、さらに糞尿処理のコスト低減や作業量の軽減が生み出される。特に時間的なゆとりの発生は、生き物を扱う畜産経営にとり最も重要な家畜の健康維持のための飼養管理に充当されて更なるコスト低減に結び付く。また、酪農畜産農産廃棄物に基づくメタンガス発電がこれまで廃棄されていた畜産酪農糞尿と畑作物残渣の資源化と副次的な付加価値化に結び付き、畜産酪農経営の規模拡大とコスト削減、省力化、さらに農業経営のコスト削減といった農業地域全般へのサポートにも役立ちうる。地域の活性化にはほど遠くとも、現在の農業およびその周辺地域がおかれた高齢化や人口減少、それによる経済活動の後退を考慮すると、このような再生可能エネルギーによる経済活動の創設と維持は大変貴重である。

つづいて発電電力量拡大の視点から、酪農畜産廃棄物に基づくメタンガス発電の都府県域への拡大に関連し、限られた事例であるにしても、それら廃棄物集約による発電事業体を検討した。分析の結果、メタンガス発電の発酵主原材料の継続的かつ安定的な量の確保に、それら排出源のクラスター形成が寄与する。また、酪農畜産廃棄物に食

品加工廃棄物を混入し発酵させることによって発電電力量の増加に有効であることが、本州域のメタンガス発電の事例から裏付けられた。さらに、少なくとも本州域においては、既存の酪農畜産廃棄物による臭気対策がメタンガス発電事業に乗り出す一つの契機になっており、それだけに臭気対策の徹底が持続可能な発電事業の要点であることが確認できた。

一方、本研究で目的が満たせなかった点も挙げておきたい。フードサプライチェーンの業際連結の主体形成について、それを既存組織の追加的業務とすることは、今日の労働市場環境から困難と言わざるを得ない。さらに連結主体の新規創設も食品ロス対策の浸透による食品加工廃棄物の減量化や既存の廃棄物事業者の収集ルートが存在とその権益との関係を考慮すると非常に難しいものがある。むしろ既存の廃棄物事業者の発電事業への進出事例にみるように、ネットワーク型バイオガス発電においてフードサプライチェーンの業際連結を重視するとすれば、産業廃棄物収集運搬事業者との連携が本州域ではとりわけ有力なアプローチと考えられる。

最後に、本研究は再生可能エネルギー発電のなかでもメタンガス発電の拡大方策の追究を目的とした。そこで業際連結によるネットワーク型バイオガス発電方式においてポイントとなるのが、サプライチェーンからの発電原材料の安定確保であり、投入物の破碎調整等のコントロールである。発電原材料が集約的な北海道・十勝地域から範囲を本州域に広げた場合、発電量の拡大をより可能にするのが酪農畜産廃棄物の発生源のクラスターと産業廃棄物収集運搬事業者との連携である。この点に本研究の事業実証モデルから導出したメタンガス発電の潜在発電電力量の実現可能性の一端を見いだすことができたと考える。

なお、メタンガス発電拡大の要点となる酪農畜産の飼養規模と農産その他の発酵原材料の量質両面の相関関係、酪農畜産廃棄物およびその他の原材料の季節的変動と発電量の関係、さらに発電施設と電力会社の送電線との連系問題などについて一定の知見が得られたことは重要な成果であるが、それらの相関分析・検討は今後の課題である。

(補論) メタンガス発電の基本構成

発電実証モデルを検討するにあたり、文献に基づいてメタンガス発電の基本を押さえておくことにする[34]。メタン発酵とは、種々の微生物の作用により有機物が段階的に分解され、最終的にメタンと二酸化炭素が生成される現象である。嫌気性の条件で行われるので嫌気性消化ともよばれる。また、発生したガスをバイオガス、残った液体を消化液と呼ぶ。バイオガスは熱源や内燃機関の燃料として用いられる。

メタン発酵の原料として用いられるのは、主に食品廃棄物、下水汚泥、家畜糞尿、有機性廃水などの廃棄物である。メタン発酵の過程は、複数段階で進行する。原料となる廃棄物中には一般的に多種多様な有機物が含まれるが、まずこれらの高分子が細菌によって加水分解される。これにより炭水化物とセルロースなどの多糖類は単糖に、タンパク質はペプチドとアミノ酸に、油脂はグリセリンと脂肪酸に低分子化される。低分子有機酸が発生するまでの過程を酸発酵とよぶことがある。そして最終段階では、メタン生成菌によりメタンが生成される。酢酸はメタンと二酸化炭素に分解され、水素と二酸化炭素はメタンと水に変換される。狭義のメタン発酵とは、この最終過程を指す。

メタン発酵で発生するバイオガスはメタンと二酸化炭素を主成分とし、水蒸気、微量の硫化水素、アンモニア、窒素などを含む。硫化水素は脱硫装置で除去する。メタンの濃度は条件によって異なるが、55~65%程度である。

(1) メタン発酵方式

補図1に示したように、畜産糞尿や下水汚泥、生ごみ、食品廃棄物等の固形性の有機系廃棄物に適用されるメタン発酵系の発酵法には、大きく分けてつぎの4つの分類がある[35][36]。

①原料の基質に基づく分類

メタン発酵の原料の基質による分類では、水分が約90%以上の原料(糞尿や下水汚泥等)を主に対象とする「湿式メタン発酵方式」と、水分が約85%以下の原料(食品廃棄物や生ごみ等)を対象とする「乾式メタン発酵方式」がある。ただ、乾式法と湿式法のそれぞれの区分に学術的定義はないとされている。

②発酵温度による分類

発酵槽内の温度を35~40°Cで発酵させる「中温発酵方式」と、それよりも高温の55~60°Cで発酵

させる「高温発酵方式」、さらに加温しない「無加温発酵方式」がある。一般に中温発酵方式では反応に時間を要しその分発酵槽が大きくなるが、高温発酵方式に比べ必要な加熱が少なく制御が容易である。一方、高温発酵方式は短時間で発酵が進むため発酵槽を小さくできるが、加熱量を多く必要とするため制御が比較的難しいとされる。

③発酵槽内の攪拌方式による分類

発酵槽内の基質攪拌の方法が「機械攪拌方式」、「ガス攪拌方式」、発生ガス圧力利用の「無動力攪拌方式」に分かれるが、いずれも攪拌することによる「完全混合方式」であり、これが一般的方式とされ、このほか攪拌混合しない「プラグフロー（押し流し）方式」がある。

④発酵過程の分離の有無による分類

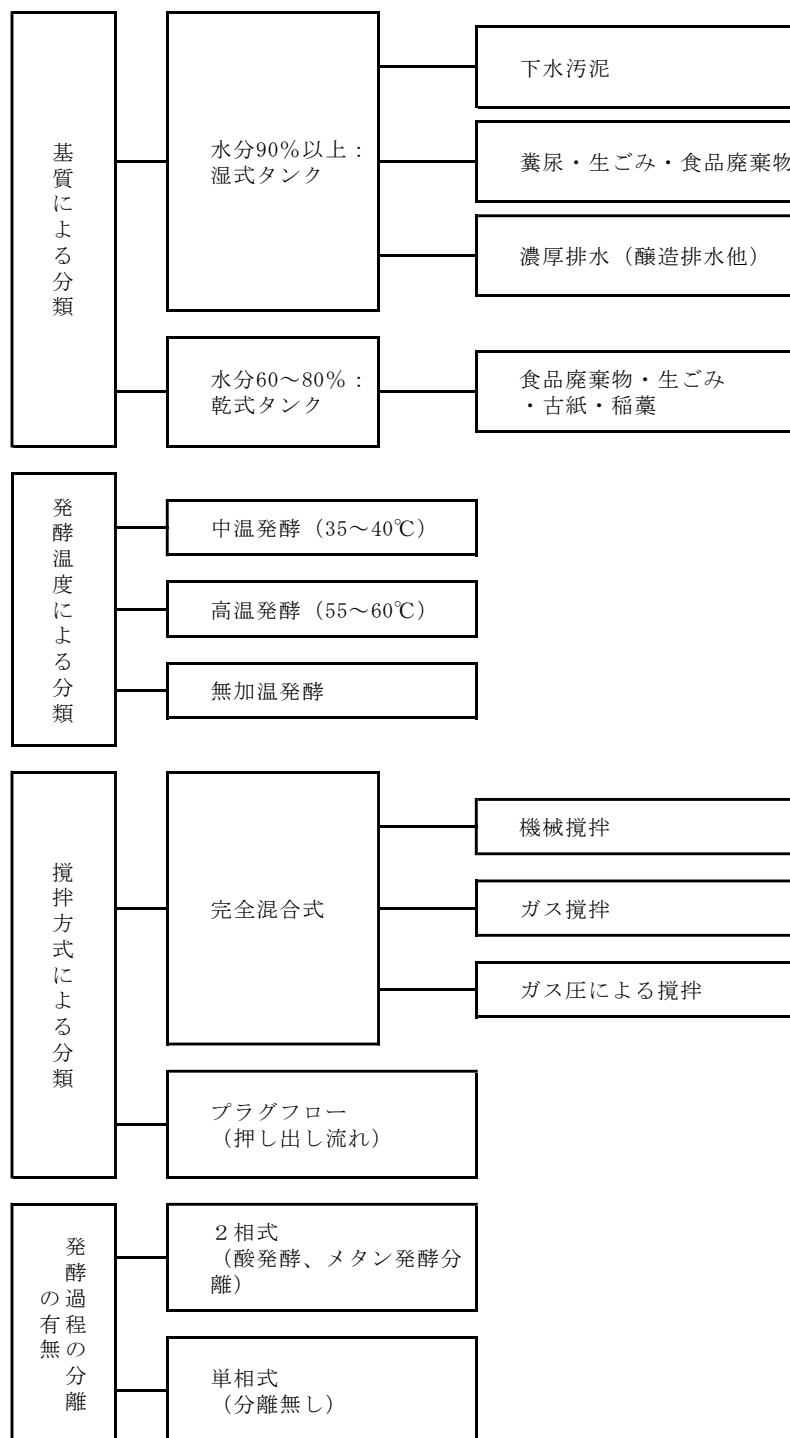
酸発酵とメタン発酵の発酵過程を槽別に分離する「2相式」と、分離しないで1槽で酸発酵とメタン発酵の両方を行う「単相式」がある。2相式は各反応が安定するが建設費が高つくため、一般的には安価な単相式による発酵法が多いとされる。

これらの分類に基づくと、本稿でとりあげた音更町農協のプラントは、「湿式メタン発酵方式」で「中温発酵方式」、「機械攪拌方式」、「単相式」による発酵法を採用している。

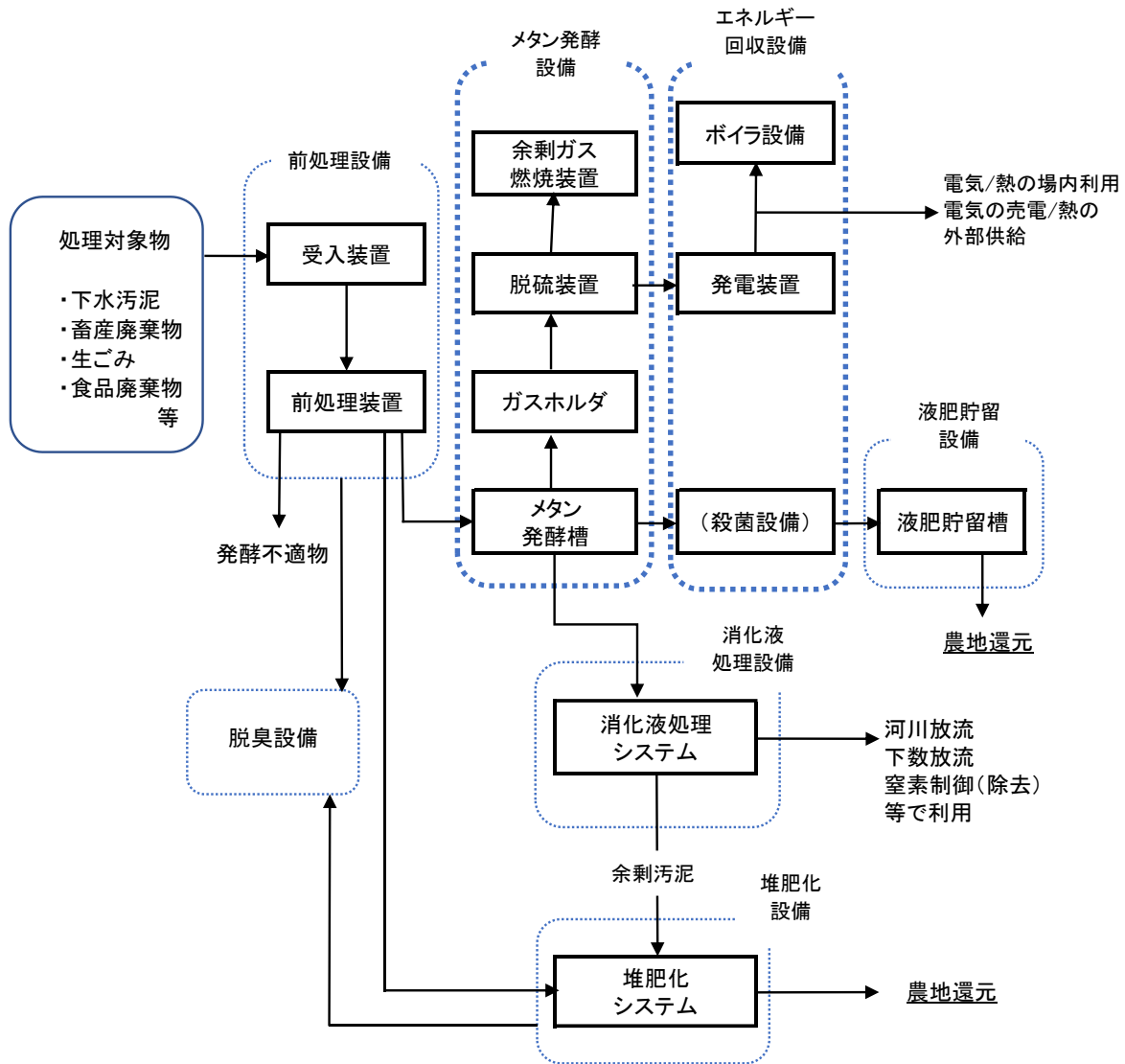
(2)メタンガス発電の基本構成

つぎに、補図2はメタン発酵プロセスからみた発電プラントの基本構成である[37][38]。メタン発酵の原料となる対象物は、前処理設備で受入れ、破碎・選別の処理後にメタン発酵槽に投入される。なお、この前処理段階では悪臭が発生するので脱臭、排気が必要となる。メタン発酵槽で発生するメタンガスは、ガスホルダーに貯留・硫化水素除去後、ガス発電機で電気に、ボイラーで温水・蒸気にそれぞれ変換されエネルギーとして利用される。メタン発酵槽内で対象物の発酵後に派生する汚泥や消化液は一定期間貯留後、消化液は畑等の圃場に液肥として直接利用される場合と、調製後下水等へ排水処理される場合とがある。また消化液処理から派生する汚泥も堆肥化等で処理される。

以上がメタン発酵と発電の基本構成である。



補図 1. メタン発酵法の各種方式
(出所) 鈴木 (2013) [35]から筆者作成.



補図 2. メタン発酵システムの基本構成
(出所) 野池 (2009) [37]から筆者作成.

<謝辞>

本稿は、大妻女子大学戦略的個人研究費 (S2120, N2210) 助成による成果の一部である。また、匿名の2名の査読者には懇切丁寧かつ確かなコメントを頂きました。記して感謝申し上げます。

注

1. 2023年度から太陽光(10kW以上50kW未満)が10円、陸上風力が15円(2024年度14円)となる。
2. 我が国における廃棄物処理の目的は元来、公衆衛生(防疫)最終処分前工程の中間処理における減容化に対する社会的要請によるものであり、廃棄物発電を中心とする熱エネルギー利用に対する要求は1990年頃まで副次的なものでしかなかった。
3. 株式会社土谷特殊農機具製作所(帯広市)からのヒアリングに基づく(2021年10月と23年2月)。
4. 本稿では、北海道十勝総合振興局管内の1市16町2村の合計19市町村を総称して「十勝地域」ないし単に「十勝」と表現する。
5. 農協別の飼養頭数が突出して多い農家の存在については十勝農協連でのヒアリングに基づくが、その確定数は抽出できていない。
6. 生乳出荷農家に占める酪農専業農家の割合。
7. ここでは便宜上、1件=1基と解釈する。
8. 協力を得られたのは、発電開始以前から数年にわたり筆者が農畜産業資金の研究のため、当該農協管内を定点観測地としていた経緯によると理解している。
9. 土谷特殊農機具製作所。
10. 一つの目安として参考となるので平均の平均も算出している。
11. 発電量と野菜残渣の投入量や時期、発酵スピード等の関係については、音更町農協からのヒアリングに基づく(2019年3月)。
12. この6年間にあっても機械設備の故障発生等で修繕費等の変動要因がある(同じく、音更町農協から)。
13. S牧場からのヒアリングに基づく(2019年3月)。
14. 音更町農協からのヒアリングに基づく(2021年10月)。
15. 土谷特殊農機具製作所からのヒアリングに基づく(2021年10月)。
16. 農水省ホームページ「家畜排せつ物の発生と管理の状況」(畜産局畜産振興課)に示された「畜種別にみた家畜排せつ物発生量」では合計が8,013万トン(うち乳用牛2,186万トン)となっており、2020年畜産統計からの推計とある。
2015年1月の農水省畜産局畜産企画課公表資料では「畜種別にみた家畜排せつ物発生量」の合計は約8,295万トン(うち乳用牛約2,357万トン)となっている。「家畜排せつ物の管理と利用の現状と対策について」2015年1月, p.1。
環境省ホームページに掲示された「廃棄物系バイオマス活用の現状」(p.1-3)の「表1-1 バイオマス活用推進基本計画におけるバイオマスの利用率目標」では、家畜排せつ物の現在の年間発生量約8,800万トンとなっている。
17. 農林水産省畜産局畜産経営課長通知(1999年11月1日)「家畜排せつ物の管理の適正化および利用の促進に関する法律の運用について」。これに関連する最近の資料としては、「家畜排せつ物の排せつ量の原単位(kg/頭・日)の例」農水省畜産振興課『畜産環境をめぐる情勢』2022年10月がある。
18. 2020年の国内水力発電による電力量8,290万MWhは、経済産業省発電コスト検証ワーキンググループに基づく。
19. TS=廃棄物系バイオマス中の固形物量(単位kg)。VS=廃棄物系バイオマス中の有機物量(同)。
20. 鹿追町担当職員からのヒアリングに基づく。
なお、同町のバイオガス発電による事業収支データは開示されなかった(2021年10月)。
21. 鹿追町内で排出される生ごみ1日約1トンは、人口からすると少ないように見えるが、各家には庭や畑に設置したコンポストが少なくないためそこでかなりの量が処理されている。
22. 東北おひさま発電株式会社でのヒアリングに基づく(2021年11月)。
23. 酪農畜舎からの糞尿は、住民が承認した運搬回数内でトラック搬入される。
24. 天童環境株式会社および株式会社リアクト米沢でのヒアリングに基づく(2023年3月)。
25. 同社は、産業廃棄物収集運搬業の許可を東北および関東各県で取得、広域の活動が可能である。
26. 多くの会社で当初、バイオガス発電への供出

- 廃棄物が「有料」に抵抗感があったという。
27. EPC とは、E=設計 (Engineering), P=調達 (Procurement), C=建設 (Construction) の頭文字をとった略称。工場や太陽光発電所などの設計・調達・建設を一貫した形で請け負う契約をいう。
 28. 信州中野延徳きのこグループ 3 社の培養センターをベースに同社を設立。
 29. 中野市農業振興課および信州中野エコパワースタンドでのヒアリングに基づく (2023 年 3 月)。
 30. 一般にきのこ培地には、コーンコブ (飼料用トウモロコシの子実除去後に芯部を粉砕したもの。現在コーンコブのほとんどが輸入品) や米糠、粃殻、麦ふすま、大豆皮、甜菜搾りかす、マイロ、乾燥おから、ビール粕、等々が利用される。
 31. 飼料用米や配合飼料といった固体と液体の原料を使用してスープ状の飼料を製造、配管により自動給飼する。
 32. 神奈川県綾瀬市の有限会社ブライトピックと千葉県旭市の有限会社ブライトピック千葉 (2021 年 8 月訪問) の 2 つの法人から成るグループ。
 33. 十勝管内酪農ヘルパー組合連絡協議会と十勝清水町酪農ヘルパー有限責任事業組合の各担当者からのヒアリングに基づく (2021 年 9 月と 23 年 3 月)。
 34. 十勝地区農作業受託事業協議会の担当者からのヒアリングに基づく (2021 年 9 月と 23 年 3 月)。
 35. 現に十勝地域内のコントラクターの 1 社が機械更新への高額投資が困難で、2022 年度内に解散になった。

引用文献

- [1]北海道地震, なぜ全域停電 復旧少なくとも 1 週間. 日本経済新聞. 2018 年 9 月 6 日, 日本経済新聞電子版,
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO35045160W8A900C1000000>, (参照 2022-12-22).
- [2]大規模停電, 千葉でなお 20 万戸超 断水は 2 万 9 千戸. 日本経済新聞. 2019 年 9 月 13 日 6:16 更新,
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO49743990S9A910C1CC1000>, (参照 2022-12-22).
- [3]梶村良太郎. “ベースロード電源が邪魔者になる日” (連載コラム ドイツエネルギー便り). 自然エネルギー財団 HP (以下、HP はホームページの略).
<https://www.renewable-ei.org>, (参照 2021-6-18).
- [4]国立研究開発法人新エネルギー・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 (第 4 版). 2015, p.1-8.
- [5]国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). バイオマスエネルギー地域自立システムの導入要件・技術指針 (第 6 版). 2022, p.3-334.
- [6]伊藤寛幸ほか. 農業集落排水施設の汚泥利用によるバイオマス発電の費用便益分析. 農林業問題研究. 2018, 54(3), p.111-116.
- [7]日経ビジネス. 新電力が頼るバイオマス発電 5 つの誤解と真実. 日経エネルギーNext. 2015, (10), p.14-19.
- [8]中西孝平. 豚ふんバイオマス発電の促進と協同組合. 地域総合研究. 2019, 47(1), p.35-49.
- [9]梅津一孝ほか. 先進国におけるバイオガスプ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, 2013(6), p.67-78.
- [10]川嶋淳ほか. バイオマス利活用施設「日田市バイオマス資源化センター」の運転状況. 廃棄物学会研究発表会講演論文集. 2007, 18, p.515-517.
- [11]鈴木康夫編. バイオマス・廃棄物発電によるエネルギー利用の最前線と課題—地産地消と地域活性—. S&T 出版, 2013, p.3-12, p.101-107, p.133-145.
- [12]海老澤拓哉ほか. 食品廃棄物のメタン発酵処理施設の運転報告. 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集. 2020, 31, p.235-236.
- [13]高崎力也ほか. 中規模養豚農家における小規模普及型メタン発酵システムの導入効果. 廃棄物資源循環学会論文誌. 2019, 30, p.95-102.
- [14]小川幸正. エネルギー自立型畜産・食品廃棄物処理への挑戦. 環境技術. 2005, 34(3), p.177-182.
- [15]小川幸正ほか. ふん尿・食品残渣の中温および高温メタン発酵の性能比較に関する研究. 廃棄物学会論文誌. 2005, 16(1), p.44-54.
- [16]福留豊. 食品廃棄物を利用したバイオガス発電事業の投資採算性 (投稿論文). オフィス・オートメーション学会誌. 2002, 23(1), p.88-95.
- [17]羽賀清典. 畜産廃棄物バイオマスとしての家畜ふん尿のメタン発酵. 廃棄物学会誌. 2008, 19(6), p.257-263.

- [18]小野学ほか. 北海道酪農における集中型バイオガスシステム導入経営の事前評価—『積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト』湧別資源循環試験施設を対象に—. 農業経営研究. 2002, 40(1), p.57-62.
- [19]小野学ほか. 分散型バイオガスシステムの運営実態と畑地型酪農経営に及ぼす効果—『積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト』湧別資源循環試験施設の稼働初年目実績を対象に—. 農業経営研究. 2003, 41(2), p.98-103.
- [20]独立行政法人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 (2000～04年度) 最終成果報告書. 2005, p.1-309.
- [21]経済産業省資源エネルギー庁. 再生可能エネルギー固定価格買取制度等のガイドブック 2021年度版. 2021, p.7.
- [22]経済産業省資源エネルギー庁. バイオマス発電について. 2018, p.16.
- [23]“全国木質バイオマス発電所一覧”. 森のエネルギー研究所 HP.
<https://www.mori-energy.jp/power-plant/>, (参照 2016-12)
- [24]吉葉正行. “環境—エネルギー問題と廃棄物・バイオマス発電”. バイオマス・廃棄物発電によるエネルギー利用の最前線と課題—地産地消と地域活性—. 鈴木康夫編. S&T 出版, 2013, p.5.
- [25]十勝農業協同組合連合会. 2021 年十勝畜産統計. 2022, p.21.
- [26]農水省畜産局畜産振興課. “家畜排せつ物の発生と管理の状況”.
https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t_mondai/02_kanri/index.html, (参照 2022-11-7).
- [27]農水省畜産局畜産企画課. 家畜排せつ物の管理と利用の現状と対策について 2015 年 1 月. 2015, p.1.
- [28]環境省. “廃棄物系バイオマス活用の現状”. 廃棄物系バイオマス活用ロードマップ, p.1-3.
<https://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/roadmap.html>, (参照 2022-11-7).
- [29]農水省畜産振興課. 家畜排せつ物の排せつ量の原単位 (kg/頭・日) の例. 畜産環境をめぐる情勢. 2022-10.
- [30]国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). 序章. 持続可能なバイオマスエネルギーを始めるために. バイオマスエネルギー地域自立システムの導入要件・技術指針「メタン発酵系バイオマス編」. 2018, p.8 所収「図 序章 2-3 バイオマス種毎のガス発生量およびエネルギー発生量の目安」.
- [31]経済産業省発電コスト検証ワーキンググループ. 基本政策分科会に対する発電コスト検証に関する報告. 2021, p.12.
- [32]環境省. 廃棄物系バイオマス利活用導入マニュアル. 2017, p.63.
- [33]株式会社清水製粉工場 HP.
<https://shimizu-scifun.com/company/>, (参照 2023-9-6).
- [34]横山伸也ほか. メタン発酵. バイオマスエネルギー. 森北出版, 2009, p.10-104.
- [35]前掲[11], p.102.
- [36]前掲[5], p.443-462.
- [37]野池達也編著. メタン発酵. 技法堂出版, 2009, p.86.
- [38]前掲[5], p.448-472.

Abstract

We are learning more deeply from the Great East Japan Earthquake of 2011 about the subsequent problems of nuclear dependence and the permanent problems associated with decommissioning. It has been pointed out that power supply systems that mainly rely on variable renewable energy such as solar and wind power among renewable energies are vulnerable in terms of power supply and demand control.

In power supply systems that are dominated by variable natural energy sources such as solar and wind power, the vulnerability of power supply and demand control is a concern. In Japan, nuclear power is considered a baseload power source that is essential for a stable supply of electricity, but it is not suitable as a power source because it is not good at adjusting output.

The purpose of this paper is to position methane gas power generation, which is mainly made from livestock waste, as a useful baseload power source that has the flexible output adjustment that is essential for renewable energy power supply in terms of flow from a long-term perspective, and it is a valuable locally distributed power source in terms of stock, and to explore quantitative expansion measures and their possibilities based on its production capacity and reliability. As a result of this study, it was estimated that the potential power generation capacity of methane gas power generation accounts for 1.8% (at the very least, 0.9%) of hydroelectric power generation based on the number of milking cattle kept in Japan. Based on this potential power generation capacity, if the scope is expanded nationwide based on the business demonstration model of this study, it is important to secure the quantity of food processing residues in addition to livestock waste. It was also found that the expansion of power generation can be more reliably achieved by collaboration between the clusters of dairy and livestock waste sources and industrial waste collection and transport companies.

(受付日：2023年10月31日，受理日2024年9月13日)

坂内 久 (ばんない ひさし)

現職：大妻女子大学社会情報学部社会情報学科環境情報学専攻教授

プロフィール：

東北大学大学院農学研究科資源生物科学専攻博士課程修了。博士（農学）。
専門は農業経済学，地域経済学。