連載講義

地域循環圏：地域特性・資源特性に応じて形成する循環型社会

第4回 牛ふん尿の適正処理と資源化方策としてのバイオガス化の多面的効果と事業採算性

JW SEMINAR

北海道大学大学院工学研究院　循環計画システム研究室　准教授
石井一英

《連載にあたって》

平成24年7月に、環境省から「地域循環圏形成推進ガイドライン」が公表されました。これは、地域循環圏の形成を促進するために、主に地方公共団体等向けに策定されたガイドラインで、地域循環圏の概念・類型パターン、基本構想の策定から地域循環圏形成までの流れ、地域循環圏の形成事例などについて、基本的な考え方を整理して示したものです。本年度の連載講義は、当ガイドラインの策定に携わった「地域循環圏形成推進に向けた検討会」の委員やその有識者の方々に、4回にわたり「地域循環圏:地域特性・資源特性に応じて形成する循環型社会」と題してご解説いただきます。第4回は北海道大学大学院工学研究院の石井准教授に「牛ふん尿の適正処理と資源化方策としてのバイオガス化の多面的効果と事業採算性」についてご解説いただきました。

1．牛ふん尿利活用の現状と課題

全国で毎年発生する産業廃棄物の内、約22%を動物のふん尿（以下「家畜ふん尿」、約8,485万トン、H22年度）が占めている[1]のに対して、北海道では産業廃棄物の50%以上が家畜ふん尿（約2,100万トン、H19年度）であり、その大部分が牛ふん尿である[2]。北海道における産業廃棄物の適正処理と資源化を考える上で、家畜ふん尿を無視することはできない。

全国で発生する多くの家畜ふん尿は、その約90%が堆肥等として利活用されている[2]。北海道においても、そのほとんどが堆肥等として農地還元されている（北海道の統計では、利活用割合は約70%とされているが、堆肥化過程の含水率の低下分を考慮した値となっている[2]）。しかし、牛ふん尿の場合、近年の飼養頭数の増大に伴って生じる、草地等への過剰施肥、堆肥舎や貯留槽の容量不足、切り返し不足による未完熟堆肥の施肥、悪臭、地下水汚染等による水質汚染の問題等が、依然として指摘されているのが実情である。

家畜ふん尿は、適正処理されなければならない産業廃棄物であると同時に、草地等にとって有効な土壌改良材や肥料、さらにはエネルギーにも変換可能な資源である。本稿では、家畜ふん尿の内、特に牛ふん尿を取り上げ、牛ふん尿の適正処理と資源化の側面から、バイオガス化の効果（副次的効果も含む）とバイオガス化プラントの事業採算性について述べる。

2．バイオガス化による効果

牛ふん尿はその飼養形態によって排出性状が異なる。スタンチョン（いわゆる、つなぎ飼い）では、敷料により排せつ物が固液分離されるため、牛ふんは敷料の混合物として排出される（固形状のふん）。一方、コンクリート製の床上を、牛が自由に動き回れるフリーストールの場合は、スタンチョンとは異なり、ふん尿は固液分離されないので、スラリー状として排出される。バイオガス化は、主に、スラリー状で排出されるふん尿に適用される場合が多い（ドイツでは、固形状のふんも同時に投入される場合もある）。

一般にバイオガス化の効果として、バイオガスのエネルギー変換がよく取り上げられる。しかしながら、バイオガスプラント導入の動機付けは、必ずしも、エネルギー利用だけではない。**図1**は、バイオガス化によって得られる効果を、著者らの現地ヒアリング調査やアンケート調査[3]からまとめたものである。酪農家にとっては、毎日発生するふん尿管理が第一であることから、ふん尿の連続的処理が可能なバイオガス化が、①悪臭の低減、②貯留槽（堆肥舎）の容量不足の解消、③過剰施肥の改善（自営系外への搬出による）、④水質汚染の改善、⑤草地や土壌質の改善など、主に環境問題の解決に効果があるとされている。

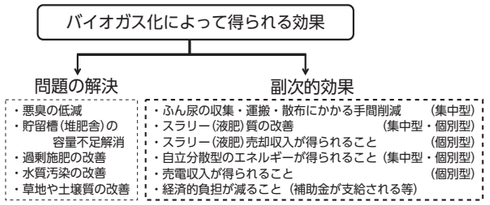


図1　バイオガス化によって得られる効果

一方で、それ以外の副次的な効果もある。個人で導入する個別型と複数の酪農家を対象とする集中型に分けて考えることにする。例えば、集中型では、ふん尿の収集・運搬及び発酵後の液肥の散布を、バイオガスプラント事業者やコントラクタに委託して行っている場合が多いので、それらの手間が大幅に削減されるのに対して、個別型は自ら行う必要があるのと、バイオガス化プラントの維持管理の手間が増大する。また、集中型の場合、自治体の事業として補助される場合や、国からの補助制度が受けられるなど経済的負担が軽減される（個別型でも補助制度はある）。一方、個別型の場合は、売電や液肥販売による収入は、直接酪農家個人の収入になるのに対して、集中型の場合は、プラント運営のために利用され、直接、酪農家に還元される訳ではない。そして、個別型・集中型共通の副次的効果としては、発生したスラリーを未完熟のまま散布していた導入前と比べて、発酵後の液肥は、悪臭や肥効性の点で質が改善されること、そして地域の自立分散型のエネルギーが得られることが挙げられた。

3．酪農家のニーズ解析

3.1　解析の目的と対象

これまでは、外部コストとしてふん尿の管理を行ってきたが、バイオガス化を導入する際には、相応の費用負担が生じる。一方で、前節で述べたように、バイオガス化を導入することによって酪農家がメリット（便益）と感じる効果もある。そこで、便益と費用のトレードオフを考慮した多属性のニーズ解析が可能なコンジョイント分析を適用し、酪農家のニーズや実際に許容できる経済負担を考慮したバイオガス化推進策を検討することにした[4]。

調査対象は、北海道道東地域の3町（以下、A、B、C町とする）である。**表1**には、コンジョイント分析の調査票を設計するための1次アンケートの送付数、回収数、回収率、また既にバイオガス化プラントを導入している酪農家数をまとめた。

表1　1次アンケートの実施概要

	A町	B町	C町	住所未記入
送付数	112	605	84	—
回収数	22 (16)	88 (32)	12 (5)	16 (4)
回収率	19.6%	14.5%	14.3%	—
内、バイオガスプラント参加・導入農家数	集中型 2件	個別型 1件	個別型 1件	0件

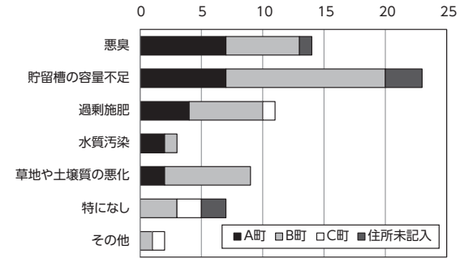
（ ）内の数値は、解析に使用したフリーストール農家の数

3.2　酪農家の問題意識とバイオガスがもたらす副次的効果への期待

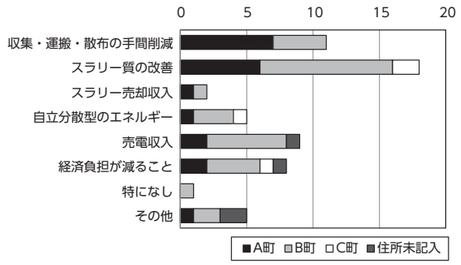
まず、「スラリー管理に関して、実際に困っていること、問題だと感じていること」に対する回答（2つ選択）を、**図2**(A)に示す。近年の飼養頭数の増大に伴う貯留槽の容量不足、悪臭、過剰施肥が主たる問題であることが分かる。これらの問題に対して、回答者の9割以上が、「改善の意思がある」あるいは「コスト次第では考える」と回答した。

一方、「上記の環境問題がバイオガス化（集中型を前提）の導入により解決されると想定して、さらに副次的効果として期待される点」についての回答結果を**図2**(B)に示す（2つまで選択）。スラリー質の改善、及びふん尿の収集・運搬、液肥散布の手間削減（以下、収集・運搬・散布の手間削減）に期待する回答が多かった。

以上より、①悪臭に対する効果、②貯留槽の容量不足、③過剰施肥、④スラリー（液肥）質改善効果、⑤ふん尿の収集・運搬・散布の5つの属性を取り上げて、コンジョイント分析を行うこととした。



(A) 環境問題の解決（2つ選択と依頼）



(B) 副次的効果（2つまで選択と依頼）

図2　スラリー適正管理に対する酪農家のニーズ
(A)困っていること，問題だと感じていること
(B)バイオガス化を導入することで期待する効果（副次的効果）

3.3　コンジョイント分析の実施

まず、コンジョイント分析に関する詳細は参考文献[4]を参照されたい。本稿では概略のみ述べる。まず**図3**に示すように、上記の5つの属性に経済負担を加えた6つの属性を用意し、属性毎に、アンケート結果やヒアリング結果に基づいた水準を設定する。各属性から、1つずつ水準を抽出して作成したものはプロファイルと呼ばれ、酪農家に提示するふん尿の適正管理と資源化方法（以下、スラリー管理方法）となる。全ての組み合わせ数である216通り（＝3×3×2×2×3×2）のプロファイルを作成することは非現実的であるので、実験計画法に基づき16個のプロファイルを作成した。そして、**図4**に示すように、3つのプロファイルを1セットとして組み合わせたものを、回答者に提示し、最も好ましいものを選択してもらう、選択型コンジョイント分析を行うことにした。調査対象は、1次アンケートで、コンジョイント分析への協力が可能であると回答したスラリー農家47軒であり、1軒につき10セットの回答を依頼した。

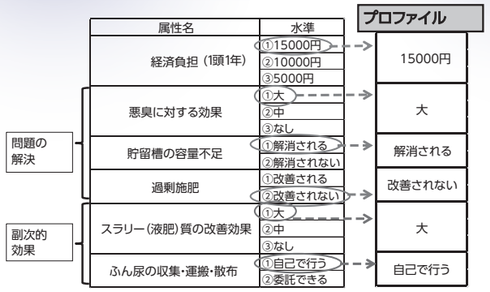


図3　属性と水準の設定

例　以下の中で選ぶとすれば、あなたはどの管理方法を最も望みますか？
当てはまるものを一つ選び、回答欄に○を付けて下さい。

	管理方法1	*管理方法2*	*管理方法3*
経済負担	10000円	15000円	5000円
悪臭に対する効果	中	大	なし
貯留槽の容量不足	解消される	解消されない	解消される
過剰施肥	改善される	改善される	改善されない
スラリー質の改善効果	中	なし	なし
ふん尿の収集・運搬・散布	委託できる	委託できる	委託できる

図4　選択型コンジョイント分析による設問

3.4　コンジョイント分析の結果

コンジョイント分析では、回答者があるスラリー管理方法を選択したときの効用の内、観測可能な部分Vについて、図3に示した属性と水準を用いて、(1)式のように線型モデルで表現できると仮定している。

$$V=\beta_{\mathrm{cost}}X_{\mathrm{cost}}+\sum_{a=1}^{2}\beta_{A_a}X_{A_a}+\beta_B X_B+\beta_C X_C+\sum_{d=1}^{2}\beta_{D_d}X_{D_d}+\beta_E X_E \quad (1)$$

X_{ij}：各属性（X_{cost}：経済負担、X_A：悪臭、X_B：貯留槽の容量不足、X_C：過剰施肥、X_D：スラリー質の改善効果、X_E：ふん尿の収集・運搬・散布）、β：各属性水準Xの評価ウエイト

その上で、回答者の選択と最も合うように、最尤法にて、評価ウェイトβを、条件付きロジットモデルを用いて推定する（誌面の都合上、詳細は参考文献[4]を参照されたい）。A町とB町の推定されたモデルは、統計学上有意なものとして構築することができた。

そして、属性1単位の増加（または各水準）に対する評価額（以下、限界評価額とし、限界支払意思額と同じ意味である）は、推定された効用関数を基に算出される。この際、効用水準を初期水準に固定し（(2)式で、$dV=0$）、X_1以外の属性も初期水準に固定（$dX_k=0$、$k\neq1$）すると仮定している。このとき属性X_nが1単位増加したときの限界評価額は、(3)式で与えられる。

$$dV=\sum_n\frac{\partial V}{\partial X_n}dX_n+\frac{\partial V}{\partial X_{\mathrm{cost}}}dX_{\mathrm{cost}} \quad (2) \qquad \frac{dx_{\mathrm{cost}}}{dx_n}=-\frac{\partial V}{\partial X_n}\Big/\frac{\partial V}{\partial x_{\mathrm{cost}}}=-\frac{\beta_n}{\beta_{\mathrm{cost}}} \quad (3)$$

この限界評価額の推定結果を図5に示す。この値は、例えば、貯留槽の容量不足が解消されるということと、

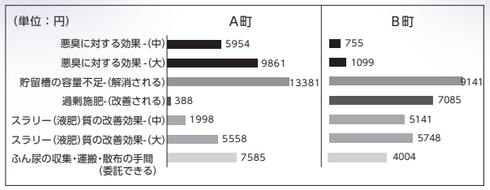


図5　限界評価額の推定結果

13,381円を負担するということが、同等の価値であることを示している。

A町の場合は、「悪臭に対する効果」、「貯留槽の容量不足」、「ふん尿の収集・運搬・散布の手間」が比較的高い値を示しており、「貯留槽の容量不足」は、現状の負担額である1頭1年当たり12,000円よりも高い値となった。一方、B町の場合も、「貯留槽の容量不足」、「過剰施肥」、「スラリー質の改善」が比較的高い値を示している。以上、限界評価額の値は、実際に酪農家が負担可能であるという値を統計的に算出したものであり、各限界評価額の和の取り扱いについては議論が残るが、酪農家が抱くふん尿の管理についての価値を、その属性毎に金銭的に示すことができ、かつ現状の負担額と比べて十分にそのニーズがあることを示せた意義はあると考えられる。

この結果は、これら地域ごとに異なる酪農家のニーズに応じたバイオガス導入方法を検討する必要があることを示している。例えば、悪臭防止対策が講じられた、かつ容量的に十分なコンテナを各酪農家に配置して、定期的に牛ふんスラリー運搬するなど、貯留槽の容量不足と悪臭の両方に考慮したふん尿の運搬形態と合わせたバイオガス化システムを講じる。または、液肥の成分分析や作物への効果の実証実験を通して、耕種農家への液肥の販売にも力を入れることによって、自身が保有する牧草地への散布量を軽減できるバイオガス化システムの構築などを考えていく必要があろう。

4．集中型バイオガス化プラントの事業採算性[5]

牛ふん尿のバイオガス化を推進するためには、事業採算性の向上が不可欠である。

図6は典型的な集中型バイオガス化システムを表している。FIT導入前は、売電単価が安かったため、酪農家の負担金と液肥の契約酪農家草地への還元のみでは、バイオガス化プラントの維持管理費を捻出することはできなかった。一方、図7は北海道で実際に事業化されている事例を参考に、採算のとれるシステムを構築した例となる。ポイントは、酪農家からの負担金以外の収入の確保である。すなわち、①産業廃棄物の受入料金、②液肥の近隣畑作農家への売却収入、あるいは③FITによる売電あるいはバイオガスの売却収入（未精製バイオガスのパイプライン輸送、精製バイオガスのボンベ輸送、低圧容器輸送、天然ガス自動車）を考慮する必要がある。

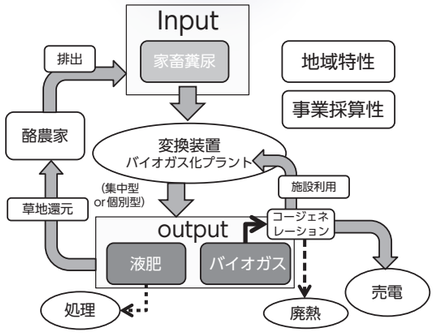


図6　事業採算性が悪いシステム

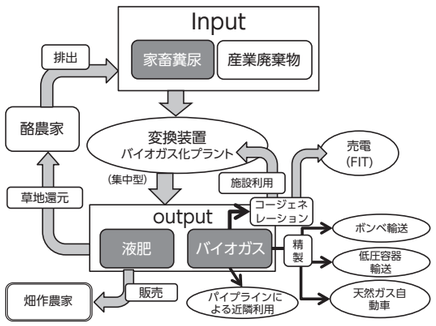


図7　地域特性と事業採算を考慮した集中型バイオガスシステム

そこで、北海道のみならず全国ベースでの事業採算性を考察するために、単位草地当たりの飼養頭数として全国平均の4頭/haを用いて、ケーススタディを行った（計算条件の詳細は、参考文献[5]を参照されたい）。表2に示すように、ベースシナリオでは、草地に散布できない液肥は処理せざるを得ず、また売電単価も低いことから、事業として成立しない。

一方、近隣畑地で液肥が全量利用できる場合には、液肥を販売することと、あるいは産業廃棄物を受け入れることで事業として成立するようになる（なお、ケース1では、液肥をN成分で化学肥料価格と等価とした価格で販売することを想定している）。また、液肥処理が必要な場合であっても、液肥販売とバイオガスの売却の両方を考慮することで、事業成立の可能性がある。

5．おわりに

本稿のケーススタディは、FIT導入前の解析であるが、FIT導入後の現在でも、地域特性を考慮して、①ふん尿以外の有機性廃棄物の受入、②畑作農家への液肥の販売、③エネルギーの売却（売電、あるいは売ガス）による収入を考慮することが事業採算には必要である。

一方、本稿で示したように、酪農家は、日々のふん尿管理に困っているのが現実であり、バイオガス化を導入する意義は極めて大きい。また、地域環境を保全し、経済基盤としての農業振興を考えた場合には、行政による一部経費負担等による連携も考えられる。

表2　ケーススタディの計算条件と各ケースのB/C（15年間）

シナリオ	数値	単位	B/C
ベースシナリオ			
単位面積当たりの飼養頭数	4	頭/ha	−1.23
家畜飼養規模	1500	頭	
液肥			
草地散布量（関係酪農家）	13125	t/年	
液肥処分量	19725	t/年	
販売価格（関係酪農家）	50	円/t	
アウトプット			
売電（現行法）	8	円/kWh	
ケース1：液肥全量散布可能な場合1			
液肥			
草地散布量（関係酪農家）	13125	t/年	1.01
液肥処分量	0	t/年	
畑地散布量	19725	t/年	
販売価格（関係酪農家）	1500	円/t	
販売価格（畑地）	1500	円/t	
有機性廃棄物受入割合	1	%	
ケース2：液肥全量散布可能な場合2			
液肥			
草地散布量（関係酪農家）	13125	t/年	1.05
液肥処分量	0	t/年	
畑地散布量	19725	t/年	
販売価格（関係酪農家）	50	円/t	
販売価格（畑地）	100	円/t	
有機性廃棄物受入割合	15	%	
ケース3：液肥処理が必要な場合			
液肥			
草地散布量（関係酪農家）	13125	t/年	1.01
液肥処分量	19725	t/年	
畑地散布量	0	t/年	
販売価格（関係酪農家）	1500	円/t	
有機性廃棄物受入割合	1	%	
バイオガス			
パイプラインにて販売	45	円/㎥	

以上のように、バイオガス化は、単に牛ふん尿をエネルギーに変換するだけではなく、輸入依存の窒素やリンの地域循環としての液肥利用、そして何よりも地域の環境保全に大きく貢献しうることを、関係主体間で再認識する必要があると考える。

謝辞
本稿の内容の一部は、環境省環境研究総合推進補助金（K2351）の補助を受けたものである。

参考文献
1）環境省報道発表資料：産業廃棄物の排出及び処理状況等（平成22年度実績）について，2012.
2）北海道：北海道廃棄物処理計画，2010.
3）谷川昇，古市徹，石井一英，清水心太：アンケート調査による北海道の畜産農家における家畜排せつ物適正処理の現状分析，廃棄物学会論文誌，Vol.18，No. 6，pp.392-399，2007.
4）土屋翔，古市徹，石井一英，翁御棋，金　相烈：コンジョイント分析に基づいた牛ふんスラリーの適正処理と資源化のための酪農家のニーズ解析―北海道道東地域を対象として―，土木学会論文集G，Vol.69，No. 6，pp.II329-336，2013.
5）矢萩健太，古市徹，石井一英，翁御棋：地域特性と事業採算性を考慮した集中型家畜糞尿バイオガス化施設のシステム化の検討，第40回環境システム研究論文発表会講演集，pp.153-162，2012.