

16.1 バイオマスの肥料化・エネルギー化技術の開発と効率的搬送手法の解明

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：資源保全チーム、寒地技術推進室

研究担当者：横濱充宏、石田哲也、桑原淳、大岸譲、煤孫英雄

【要旨】

本研究では、乳牛ふん尿を主原料とし、他の安全な有機性廃棄物を副資材として共同利用型バイオガスプラントで共発酵処理し、その生成物であるバイオガスを再生可能エネルギーとして利用し、消化液を肥料として農地に還元利用する技術の確立を図る。本研究では、地域での各種副資材の基本的性状の把握、副資材がバイオガス発生および消化液の性状に及ぼす影響の評価、消化液の長期施用が土壌理化学性へ及ぼす影響および牧草の収量・品質に及ぼす影響の把握、原料スラリーと消化液の圧送管路搬送適性と原料スラリー濃度による発酵適性の評価、原料スラリーを車両運搬する場合と圧送管路搬送する場合の経済性の比較検証および共同利用型バイオガスプラントシステムによる地球温暖化ガス削減効果の評価を行った。また、消化液の長期施用が土壌および牧草の微量要素含量におよぼす影響、真空式管路システムによる乳牛ふん尿の搬送特性の評価および経済性の検討、共同利用型バイオガスプラントシステムからの酸性化物質（アンモニア、イオウ酸化物、窒素酸化物および塩酸）の排出量の試算を行った。共同型バイオガスプラントを中心にして農村・漁村・都市を包含する広域のバイオマス資源循環利用圏の形成が可能なことを実証した。

キーワード共同利用型バイオガスプラント、バイオマス、副資材、バイオガス、消化液、温室効果ガス

1. はじめに

本研究では、乳牛ふん尿を主原料とし、地域で発生するその他のバイオマスを副資材として利用する共同利用型バイオガスプラントを核として、バイオガスを再生可能エネルギーとして効率的に利用し、消化液の品質・安全性を確保しつつ、肥料として農地に還元利用する技術の確立を図る。

そのため、下記の達成目標を設定した。

1)各種バイオマスの特性・安全性とその消化液の品質解明（実施時期：H18～H20）、2)各種バイオマス副資材の効率的発酵手法の解明（H18～H20）、3)副資材を用いた消化液の長期施用の効果と影響の解明（H18～H22）、4)スラリー・消化液の物性把握と効率的搬送手法の解明（H18～H22）、5)システムの環境負荷軽減効果の解明（H20～H22）、6)バイオマスの肥料化・エネルギー化の技術開発と効率的搬送手法の解明（H22）。

2. 各種バイオマスの特性・安全性とその消化液の品質解明

寒地土木研究所が別海町に保有する共同利用型バイオガスプラント（以下、別海プラント）において受け入れている各種副資材の基本性状を整理した。また、副資材を受け入れる前後における投入原料お

よび消化液の性状の違いを検証した¹⁾。また、原料の発酵処理による臭気軽減効果も検証した。

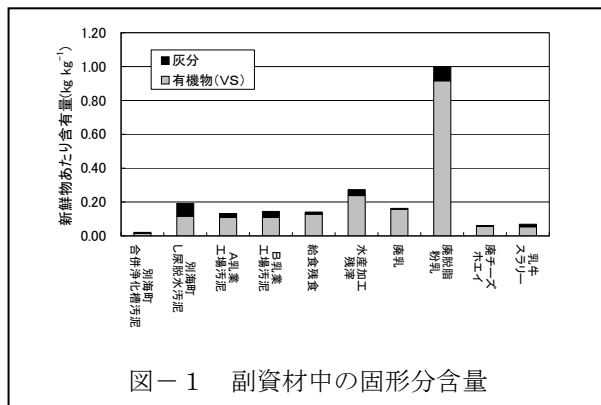
2.1 調査手法

別海プラントで受け入れている各種副資材について、有機物含量および灰分含量の分析を行い、いくつかについて、有機物の構成（蛋白質、脂質、炭水化物）の分析を行った。また、有害物質の含有が懸念される汚泥類の副資材については、肥料取締法に基づいて、有害物質の溶出試験を行った。更に、副資材の積極的受け入れを開始したH17年度以降における原料および消化液の各種性状および成分の変化を月1回、原料スラリーと消化液を採取・分析し、乳牛ふん尿のみ受け入れの場合と対照した。更に、H20年度においては、原料スラリーと消化液の臭気強度を年3回測定した。

2.2 調査結果

別海プラントの主原料である乳牛スラリーの有機物含量は $0.054 \text{ kg kg}^{-1}\text{FM}$ である。メタン発酵細菌は他の微生物群が原料中の有機物を分解して生成した水素、酢酸およびプロピオン酸からメタンガスを発生させる²⁾ことから、乳牛スラリーより有機物含量の多い副資材がバイオガスの生産上、有利である。

し尿脱水汚泥、乳業工場汚泥、給食残食、水産加工残滓、廃乳および廃脱脂粉乳は乳牛スラリーより有機物含量が多いことを明らかにできた（図－1）。また、過年度の研究においても、室内試験レベルでこれらの有機物含量の多い副資材のバイオガス発生効果が高いことが確かめられている³⁾。また、し尿脱水汚泥、乳業工場汚泥、水産加工残滓および廃脱脂粉乳は、主原料の乳牛スラリーより灰分が多いことが明らかとなった。発酵処理によりバイオガスと共に生成する消化液の肥料としての活用を考える場合、これらの副資材の灰分が消化液中の各種必須元素の増加をもたらすことが期待できる。



図－1 副資材中の固形分含量

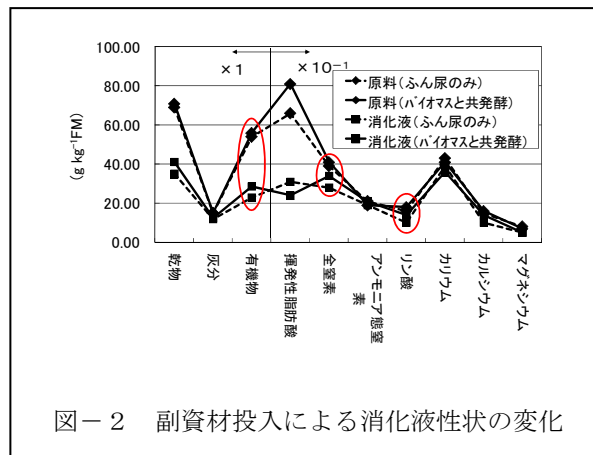
別海プラントにおける投入実績の多い代表的な副資材の有機物構成も調査したが、水産加工残滓と廃脱脂粉乳は蛋白質が多く、大量投入により、アンモニアの発生による発酵障害が発生する可能性が示唆された（表－1）。室内試験の実績（表－3）から、水産加工残滓は全投入原料中の 100 g kg^{-1} 程度、廃脱脂粉乳は同 80 g kg^{-1} までが上限であると予測される。

表－1 副資材中の栄養成分と水分

副資材名	水分 (g kg^{-1})	蛋白質 (g kg^{-1})	脂質 (g kg^{-1})	炭水化物 (g kg^{-1})	灰分 (g kg^{-1})
水産加工残滓	72.6	14.3	8.9	0.6	3.6
廃脱脂粉乳	2.0	36.5	0.7	52.6	8.2
廃乳	83.7	2.5	9.7	3.4	0.7
廃チーズホエイ	93.7	0.8	0.4	4.6	0.5
乳業工場汚泥	86.8	6.3	0.6	3.9	2.4

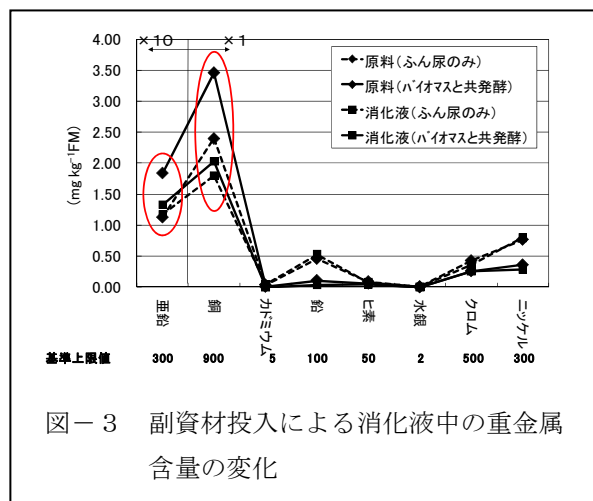
別海プラントでは、バイオガスとともに生成する消化液を肥料として草地圃場に還元しているが、肥料取締法では、汚泥を原料として用いる場合、これらについて溶出試験を行い、安全性を確認することが求められている。溶出試験を行った結果、別海プラントで副資材として利用している汚泥類はいずれも有害物質含量が基準上限値をはるかに下回っており、これらの安全性が確かめられた（表－2）。

別海プラントでは、H17 年度より各種副資材の原料としての積極的使用を開始したが、H20 年度までの調査の結果、それ以前のほぼ乳牛スラリーのみを原料としていた場合に比べ、消化液中有機物の 24.8 %の増加をもたらし、その増加が重要な肥料成分である窒素およびリン酸のそれぞれ、21.4 %および 40.0 %の増加につながっていることを明らかにできた（図－2）。



図－2 副資材投入による消化液性状の変化

消化液のような有機質肥料の場合、これの施用だけでは不足する肥料成分は化学肥料で調整されるが⁴⁾、消化液中の肥料成分の増加は化学肥料の施用量の節減につながり、副資材の原料としての利用は消化液の品質向上に望ましいことが判明した。



図－3 副資材投入による消化液中の重金属含量の変化

一方、副資材の投入は、各種重金属類の増加をもたらす危険性も否定できない。分析の結果、副資材の積極的受け入れを開始した後も、亜鉛および銅が1割程度消化液中で増加する傾向が認められたが、消化液中のこれらの含有量とその他の重金属の含有量は許される基準上限値をはるかに下回っており、副資材を受け入れた場合も、肥料取締法で定められた安全基準を満たした副資材のみを受け入れる限

表－２ 副資材の溶出試験結果

分析項目	単位	別海町 合併浄化 槽汚泥	別海町 し尿脱水 汚泥	A乳業 工場汚泥	B乳業 工場汚泥	C乳業 工場汚泥	A社水産 加工場 汚泥	B社水産 加工場 汚泥	基準 上限値
アルキル水銀	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
総水銀	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.005
カドミウム	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.300
鉛	mg L ⁻¹	0.009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.300
有機リン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.000
六価クロム	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.500
ヒ素	mg L ⁻¹	0.075	0.010	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.300
全シアン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.000
PCB	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.003
トリクロロエチレン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.300
テトラクロロエチレン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.100
ジクロロメタン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.200
四塩化炭素	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.020
1,2-ジクロロエタン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.040
1,1-ジクロロエチレン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.200
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.400
1,1,1-トリクロロエタン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3.000
1,1,2-トリクロロエタン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.060
1,3-ジクロロプロペン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.020
チウラム	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.060
シマジン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.030
チオベンカルブ	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.200
ベンゼン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.100
セレン	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.300

備考：N.D.=不検出

り、消化液の安全性が確保できることがわかった。
また、副資材の投入により、鉛、クロムおよびニッケルが明らかに減少していることも明らかになった（図－３）。

また、H20年度に採取した原料スラリーと消化液について、臭気強度（臭気を感じなくなるまでに希釈した希釈倍数の値）を測定した結果、原料スラリーが 184,000、消化液が 49,000 であり、消化液の臭気強度が原料スラリーの 26.6%にまで低下しており、発酵処理が消化液の臭気の低下に効果的であることが明らかとなった。

3. 各種バイオマス副資材の効率的発酵手法の解明

副資材の発生時期および発生量に応じて、不定期・不等量の副資材と乳牛スラリーの共発酵処理を行った場合の原料投入および各種副資材投入がバイオガス発生量および別海プラントの各種バイオマス処理収入におよぼす影響の解析を行った。

また、地球温暖化防止や循環型社会形成の観点から軽油の代替燃料として注目されているバイオディーゼル燃料（以下、BDF）の製造工程で副産物とし

て生成する粗製グリセリンのメタン発酵における共発酵効果を検証するため、乳牛ふん尿と粗製グリセリンの共発酵の室内試験を行った。

別海プラントにおける乳牛ふん尿とその他の地域バイオマスの処理量と処理料金の関係を整理し、別海プラントにおける地域バイオマス処理収入の重要性を示した。

3.1 調査手法

別海プラントの運転管理日報から、乳牛スラリーおよび各種副資材の投入量を集計し、各種原料の日別および月別投入量を整理した。また、コンピューターシステムにより自動収集されるバイオガス発生量から、日別および月別バイオガス発生量を集計した。更に、副資材を過年度の室内試験³⁾により解明した、単位投入量当たりのバイオガス発生量から、乳牛ふん尿との共発酵により強いバイオガス増産効果を持つグループ（一般に有機物含量が多く、以下、強効果副資材と呼ぶ）と乳牛ふん尿とほぼ同等のバイオガス発生能力しか持たないグループ（一般に有機物含量が低く、以下、弱効果副資材と呼ぶ）に区

分（表－3）し、原料投入量、強効果副資材投入量および弱効果副資材投入量がバイオガス発生量によぼす効果を検証した。

表－3 副資材の有機物含量、バイオガス発生能力と投入実績

資材名	室内試験での適正投入割合 (g kg ⁻¹)	有機物含量 (g kg ⁻¹)	単位有機物当たりバイオガス発生量 (L kg ⁻¹)	単位バイオガス発生量による区分	H18～19での月平均投入割合 (g kg ⁻¹)
廃バター	100	820	890.0	強効果副資材	1.0
廃チーズ	80	480	850.0		1.0
水産加工残滓	100+	280	488.0		6.0
廃脱脂粉乳	100	980	850.0		7.0
廃生クリーム	100	500	890.0		9.0
廃乳	200+	130	820.0	弱効果副資材	15.0
し尿脱汚泥	100+	130	170.0		2.0
牛体洗浄水	100+	30	375.0		5.0
廃チーズホエイ	100+	100	450.0		7.0
合併浄化槽汚泥	100+	30	375.0		16.0
乳業工場汚泥	100+	130	170.0		83.0
乳牛スラリー	—	60	375.0		848.0

備考：＋は投入限界未検証で適正投入量がより大きい可能性がある。

また、H19年度分の各種バイオマスの処理量と処理料金について取りまとめ、家畜ふん尿、強効果副資材および弱効果副資材の処理量と処理料金収入の関係について検証した。

粗製グリセリンの共発酵室内試験では、室内ジャーファーマンターを用いて、乳牛ふん尿のみを発酵原料とする対照区、家畜ふん尿にそれぞれ 20、40、80 g kg⁻¹の粗製グリセリンを含む原料を共発酵させる 2%区、4%区および 8%区を設け、バイオガス発生量の比較検証を行った。

3.2 調査結果

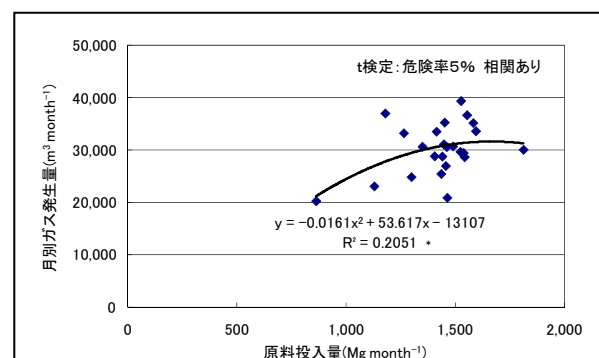
H18～19年度の月別原料投入量と月別バイオガス発生量の二次相関係数を求め、t 検定で有意性を検証したところ、危険率 5%の正の有意な相関があった（図－4）。一方、同じく、月別原料投入量と月別の単位原料投入量当たりのバイオガス発生量との相関関係を同様に検証したところ、危険率 5%の負の相関があることが明らかとなった（図－5）。

図－4 から、別海プラントでは、月別原料投入量が 1,200 Mg month⁻¹以下になるとバイオガス生産が減少することが分かった。

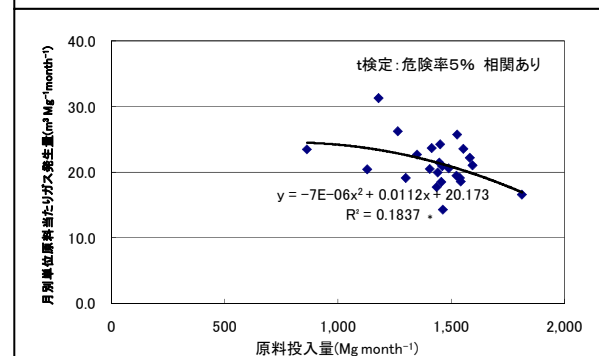
図－5 から、副資材の投入量が増えて月別原料投入量が増えると、単位原料投入量当たりのバイオガス発生効率が低下する現象が認められた。表－3に示すように、別海プラントに投入されている副資材は強効果副資材と弱効果副資材に区分されることから、それぞれの全原料投入量に対する月別投入割合と月別バイオガス発生量および月別単位原料投入

量当たりのバイオガス発生量との相関性を解析した。

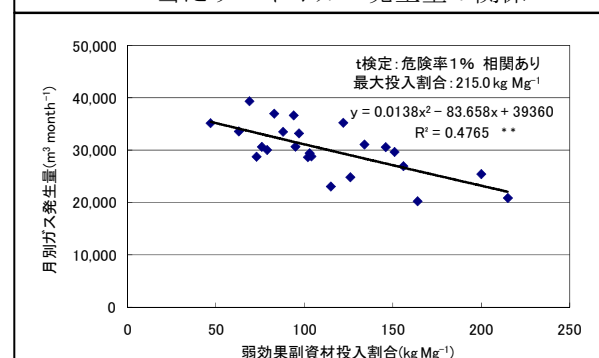
月別全原料投入量に対する弱効果副資材の月別投



図－4 月別原料投入量とバイオガス発生量



図－5 月別原料投入量と単位原料投入量当たりバイオガス発生量の関係



図－6 月別弱効果副資材投入量とバイオガス発生量の関係

入割合に対する、月別バイオガス発生量（図－6）および単位投入原料当たりの月別バイオガス発生量（図－7）の相関は、それぞれ、t 検定で危険率 1%および 5%の負の有意な相関を示した。

乳牛ふん尿のみを原料とした場合の単位原料投入量当たりのバイオガス発生量は 14～26 m³ Mg⁻¹とされていることから⁵⁾、図－7の結果はいずれもこの

値を下回っておらず、別海プラントにおいて、弱効果副資材の投入がバイオガス生産に大きな支障をきたしていないことを示している。しかし、図-7から、全原料に占める弱効果副資材の投入割合が 150 kg Mg^{-1} を超えると、バイオガス発生効率の低下が生じていた。

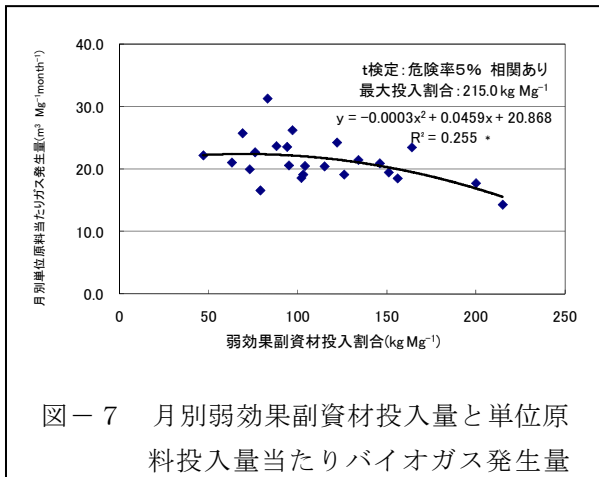
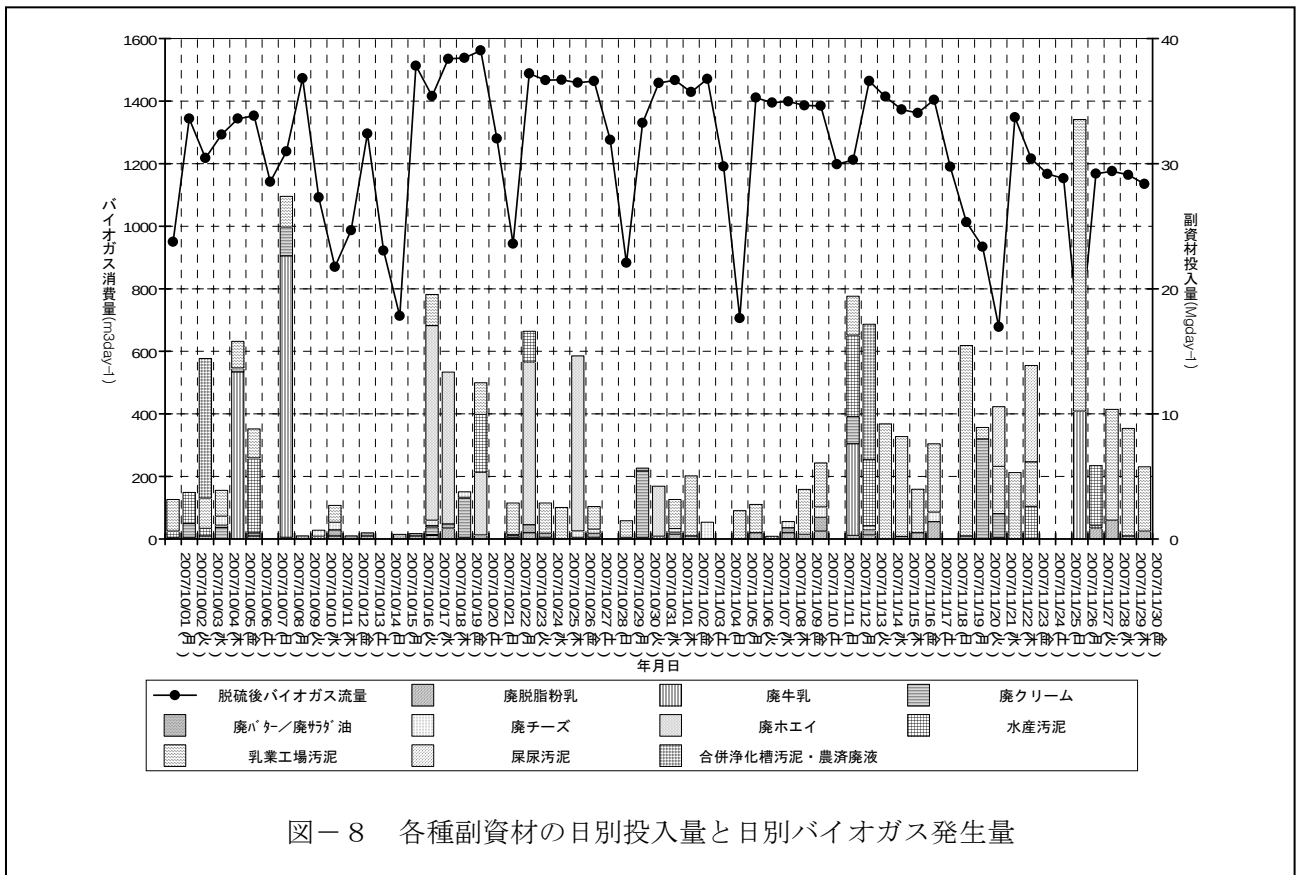


表-3に示すように、室内試験では、単一の弱効果副資材を 100 g kg^{-1} の投入割合で共発酵しても、乳牛ふん尿のみの発酵と同程度のバイオガス発生効率を示していることから、本来ならば、各種の弱効

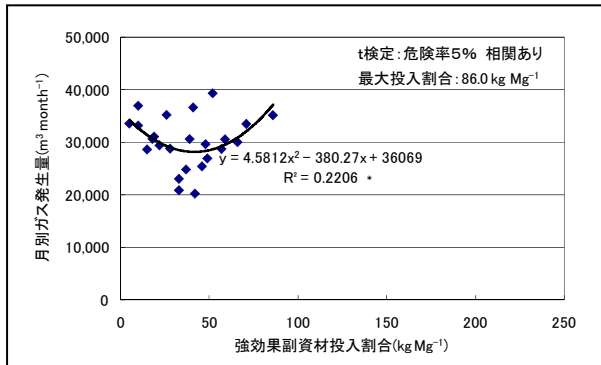
果副資材合計で 150 kg Mg^{-1} 程度の投入割合でバイオガス発生効率の低下が生じるとは考えにくい。図-8に示すように、各種副資材の投入は副資材の発生時期および発生量に応じて、毎日極めて不規則に行われていることから、弱効果副資材の投入割合増加によるバイオガス発生効率の低下は副資材の1日当たりの投入量と投入種が不規則であったためと推察された。

月別全原料投入量に対する強効果副資材の月別投入割合に対する、月別バイオガス発生量（図-9）および単位投入原料当たりの月別バイオガス発生量（図-10）の相関は、t検定で前者は危険率5%の有意な相関を示し、後者は相関が認められなかった。

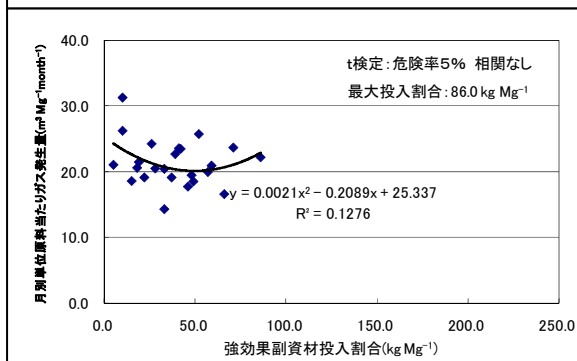
図-9では、全原料投入量当たりの強効果副資材の投入割合が 50 kg Mg^{-1} 前後でバイオガス発生量が最も減少し、それ以上の投入割合で増加する傾向を示し、図-10でも有意な相関はないが、同様な傾向を示した。表-3に示すように、各種の強効果副資材は $80 \sim 200 \text{ g kg}^{-1}$ の投入割合で顕著なバイオガス増産効果を示すものの、別海プラントにおける実際の投入量は $1 \sim 15 \text{ g kg}^{-1}$ と極めて少なく、強効果副資材の投入量が非常に少ないために、これらの投入がバイオガス増産に結び付いていないといえる。



図－8にH19年10～11月の日当たりの副資材投入量とバイオガス発生量を示す。副資材の発生時期および発生量に応じて投入処理を行う、不定期・不等



図－9 月別強効果副資材投入量とバイオガス発生量の関係

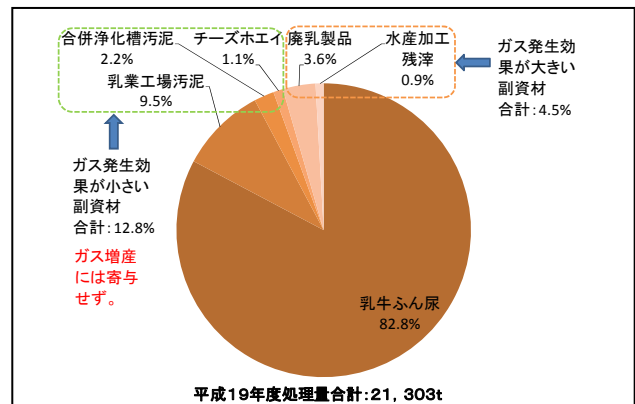


図－10 月別強効果副資材投入量と単位原料投入量当たりバイオガス発生量

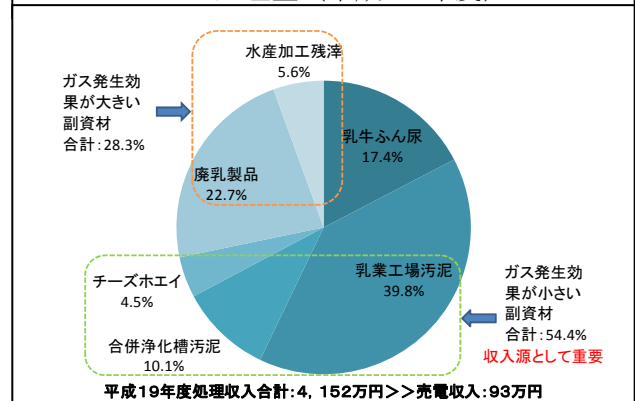
量の副資材と乳牛スラリーの共発酵処理を行った場合、図に示すように、副資材の日当たりの投入量と投入種が不規則となり、メタン発酵原料の質的ばらつきが生じ、メタン発酵細菌への負荷が増大せざるを得ない。従って、副資材の一時貯留槽を設置し、搬入された副資材は一旦そこに一時貯留し、そこで各種副資材を混和しつつ、一定量をプラントの原料受入槽に投入するようにすれば、一定品質・一定量の発酵原料をメタン発酵細菌に提供することとなり、バイオガス発生効率の向上につながる可能性がある。また、プラント運転員の労働事情から、別海プラントにおける日曜日の原料受入は行っていないが、このために、日曜日から月曜日にかけて顕著なバイオガス発生量の低下がみられる。バイオガスの安定的生産には、毎日の原料の投入が効果的と判断される。

別海プラントにおける乳牛ふん尿とその他の地域バイオマスの処理量と処理料金の関係を整理した。

図－11に別海プラントにおける平成19年度（2007年度）の乳牛ふん尿とその他地域バイオマスの処理量を図－12に同処理料金を示す。処理量を見ると、年間合計が21,303tで乳牛ふん尿が82.8%と大部分を



図－11 別海プラントでの各種地域バイオマス処理量（平成19年度）



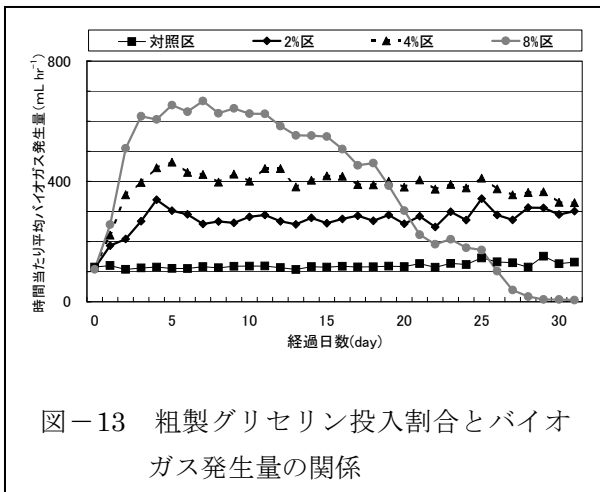
図－12 別海プラントでの各種地域バイオマス処理料金（平成19年度）

占める一方で、バイオガス発生効果の小さい副資材が12.8%、同効果の大きい副資材が4.5%となっている。一方、処理料金は4,152万円とこれに比べると売電収入の93万円は1/40程度と少なく、別海プラントにおけるバイオマス処理収入の重要さがわかる。特に、バイオガス発生効果の小さい副資材の処理収入に占める割合は54.4%と半分以上を占め、その重要度が際立っており、ヨーロッパとは異なり、バイオガス発電の売電価格が低い日本において共同利用型バイオガスプラントの経営を安定化させるには、現状ではバイオガス発生効率は低い安全で処理収入の大きい地域バイオマスを積極的に受け入れることが重要である。

地球温暖化防止や循環型社会形成の観点から軽油の代替燃料として注目されているBDFの製造工程

で副産物として粗製グリセリンが生成する。この副産物のバイオガスプラントにこける循環利用の可能性を検討するため、乳牛ふん尿と粗製グリセリンの共発酵の室内試験を行った⁶⁾。

その結果、図-13 に示すとおり、8%区（全原料中の粗製グリセリンの投入割合が 80 g kg^{-1} である試験区）では15日経過以降バイオガス発生量の低下が認められるが、2%区（同投入割合 20 g kg^{-1} ）および4%区（同投入割合 40 g kg^{-1} ）では、対照区よりバイオガス発生量が多い上に、このようなバイオガス発生量の低下が認められなかった。また、4%区で2%区よりバイオガス発生量が多く、乳牛ふん尿のみが原料の場合に比べ、およそ2倍のバイオガスが発生することが明らかとなった。BDF 製造の副産物である粗製グリセリンはバイオガスプラントのバイオガス増産に効果的な副資材であると評価できる。



4. 副資材を用いた消化液の長期施用の効果と影響の解明

別海プラントで生成する消化液の施用が草地圃場の土壌理化学性および牧草収量・品質におよぼす影響および畑作物の収量におよぼす影響を検証した。また、別海プラントで生成する消化液の施用が草地圃場の土壌中および牧草中の微量元素含量におよぼす影響について検討した。

4.1 調査手法

別海町の消化液の施用を行っている4圃場、行っていない4圃場の計8圃場において、1圃場につき6カ所、深さ0～5 cmおよび深さ5～10 cmの2層から試料採取して分析を行い、消化液の長期施用が草地土壌の理化学性におよぼす影響を検証した。過年度の調査により、消化液は施用直後は深さ5 cmまで

浸透し、それ以下には浸透しないことが確かめられている¹⁾。したがって、消化液施用による土壌の変化は作土層のうちでも深さ5 cm以下には現れず、深さ0～5 cmのみに現れると考えられる。また、今回調査した圃場の深さ5～10 cmの分析結果から、消化液施用の影響に由来しない土壌性状の差異が各圃場間に認められた。そこで、消化液施用による土壌変化のみを抽出するため、各分析項目について、深さ0～5 cmの分析値から深さ5～10 cmの分析値を差し引いた値について、消化液施用圃場と非施用圃場間でt検定による統計的比較検証を危険率5%で行った。各圃場の管理履歴については、表-5に示す。

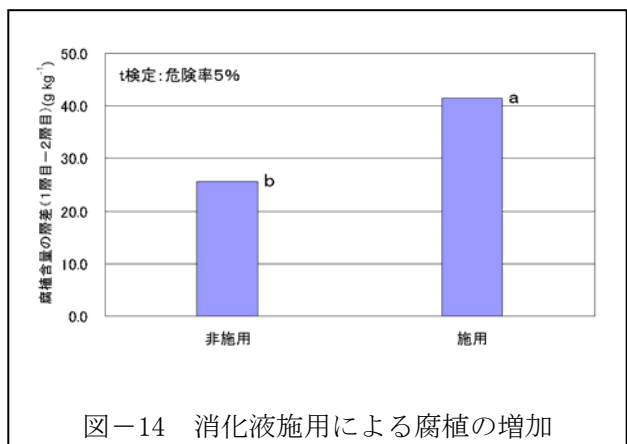
また、別海資源循環試験施設内の試験圃場に 36m^2 の試験区を2区設け、一方を必要施肥量を化学肥料のみで施用する対照区、もう一方をカリウムの必要施肥量を消化液のみで施用し、消化液だけでは不足する窒素およびリン酸分を化学肥料で補う消化液区とした。1番草および2番草を 1m^2 で9反復ずつ試料採取し、収量の試験区差および品質の試験区差を危険率5%のt検定により検証した。

消化液の施用が畑作物の収量におよぼす影響については、湧別資源循環試験施設内の試験圃場に 25m^2 の試験区を6区設け、秋まき小麦、青刈りトウモロコシ、テンサイの3種の作物のそれぞれで、標準区と消化液区を設定した。標準区では湧別町の標準的な施肥管理の基づく化成肥料を施用し、消化液区では標準的な施肥管理を消化液で行い、不足分を化成肥料で補った。

4.2 調査結果

4.2.1 消化液の施用効果

腐植物質の増加は土壌の団粒化を介して保肥力の増加、土壌の膨軟化、孔隙特性の改善に関与するとされている。



別海プラントで生成した消化液の非施用圃場では、腐植含量は1層目が2層目より平均で 25.6 g kg^{-1} 多い程度であったが、施用圃場では、1層目で2層目より

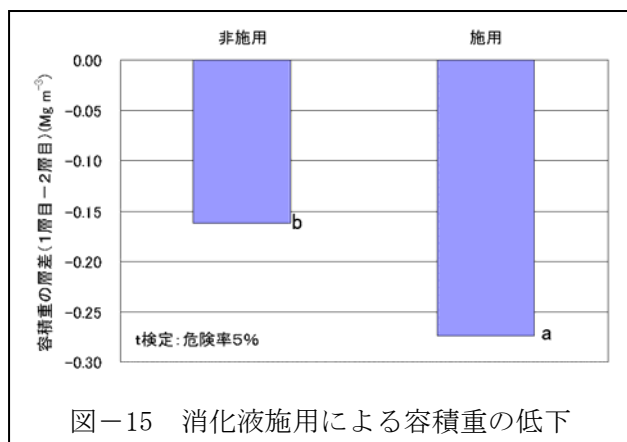


図-15 消化液施用による容積重の低下

平均で 41.4 g kg^{-1} 多くなっており、消化液施用により、作土層の深さ 0~5cm で腐植含量の増加が統計的に有意に生じていた (図-14)。このように、今回の調査により消化液の施用が、消化液が浸透する作土層の深さ 0~5cm の領域において、腐植物質の増加を生じさせることが明らかとなった。

図-15 に示すように、消化液施用がなされていない圃場の容積重は深さ 0~5cm で 5~10cm に比べて殆ど変わらず、深さ 0~5cm で -0.16 Mg m^{-3} 程小さい程度であったが、消化液施用圃場では表層での容積重の低下が顕著で深さ 0~5cm の容積重が 5~10cm の容積重に比べて、 0.27 Mg m^{-3} 程度小さくなっていた。このように、消化液施用圃場では非施用圃場に比べて表層での容積重の低下つまり、土壌の膨軟化が顕著に進行していた。

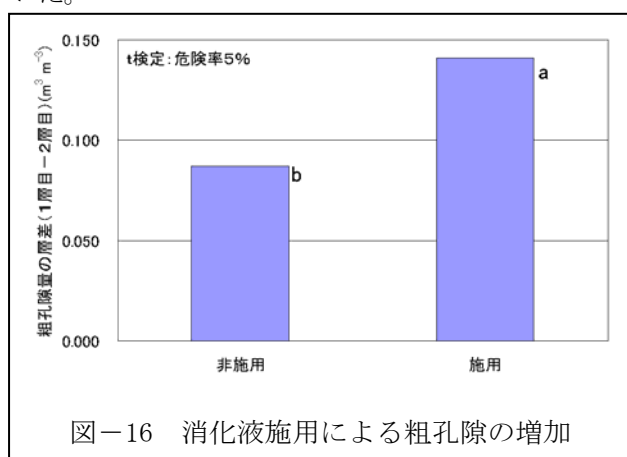


図-16 消化液施用による粗孔隙の増加

消化液の長期的施用は営農機械の走行による土壌表層の堅密化を防ぐだけでなく、膨軟化をもたらし、牧草の根の伸長にとって良好な土壌環境の形成に役立っているといえる。

粗孔隙は土壌の排水性を改善し、余剰水を迅速に排

除する働きがあり、この孔隙が増加すると圃場内の余剰水が迅速に排除され、植物の根に十分な空気を供給することが可能となる。消化液非施用圃場では、1層目が2層目より平均で $0.087 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 多い程度であったが、施用圃場では、1層目で2層目より平均で $0.141 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 多くなっており、消化液施用により作土層の深さ 0~5cm で粗孔隙の増加が統計的に有意に生じていた (図-16)。今回の調査により、消化液の施用が、消化液が浸透する作土層の深さ 0~5cm の領域において、土壌の排水性の改善をもたらしていることがわかった。

易有効水分孔隙は植物が利用可能な水分を保持する働きがあり、この孔隙が増加すると土壌の保水性が増大し、干魃害が発生しにくくなる。しかしながら、別海で調査した草地圃場では、消化液の施用、非施用に関わらず、1層目と2層目の易有効水分孔隙量はほとんど変わらなかった (図-17)。

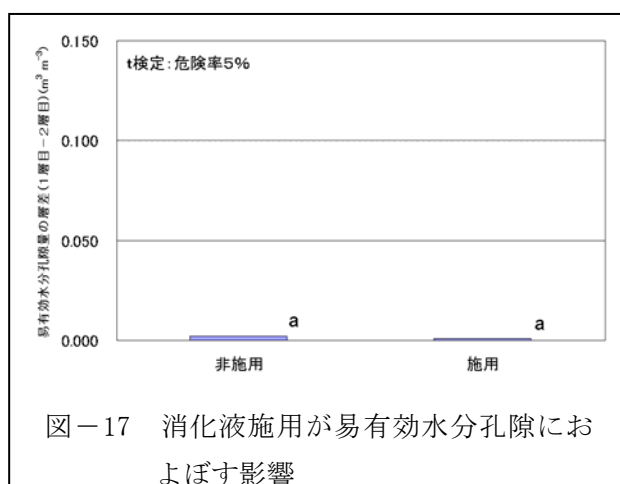


図-17 消化液施用が易有効水分孔隙におよぼす影響

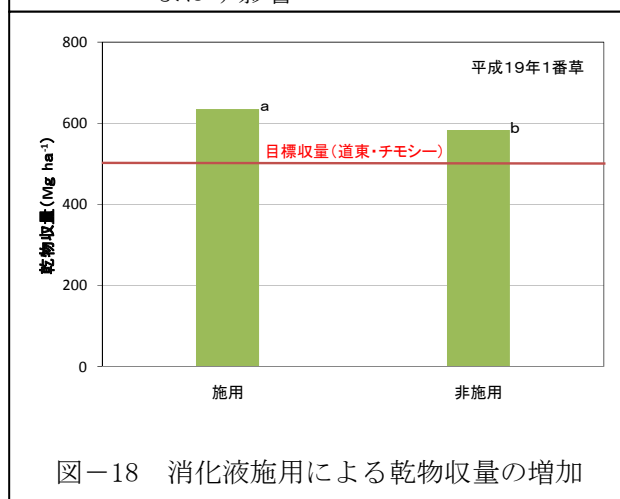


図-18 消化液施用による乾物収量の増加

試験圃場における牧草収量は、H19年度の1番草に関しては消化液区で対照区より有意に収量が多く、乾物で9.0%の収量増 (図-18) となったが、同年度の2番草およびH20年度の1番草および2番草は、消化液

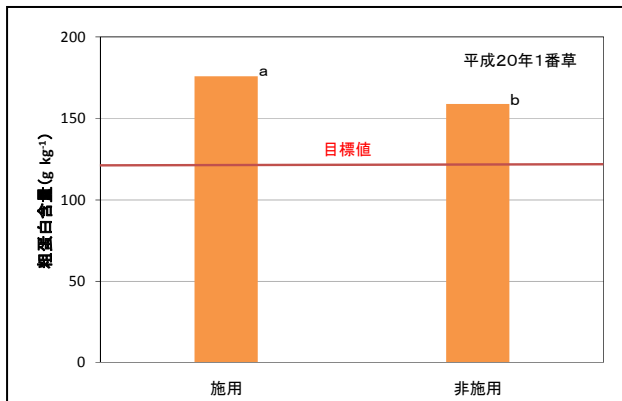


図-19 消化液施用による粗タンパクの増加

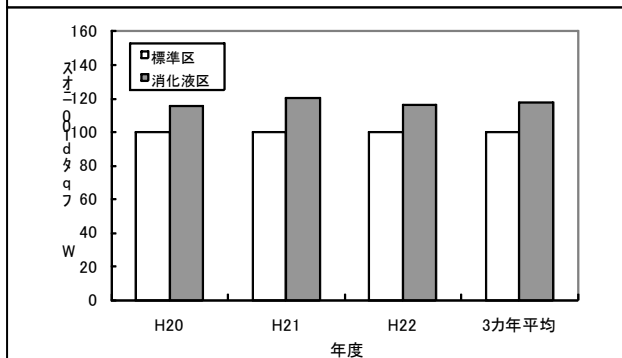


図-20 秋まきコムギへの消化液の施用効果

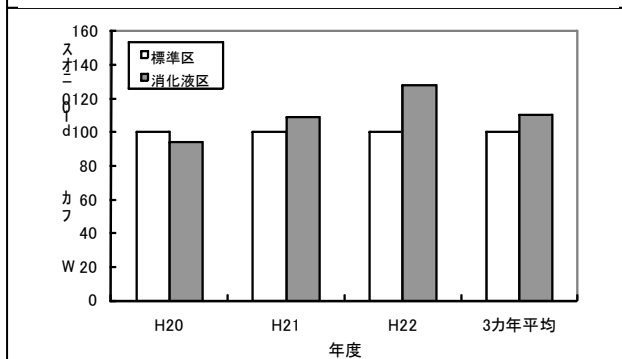


図-21 青刈りトウモロコシへの消化液の施用効果

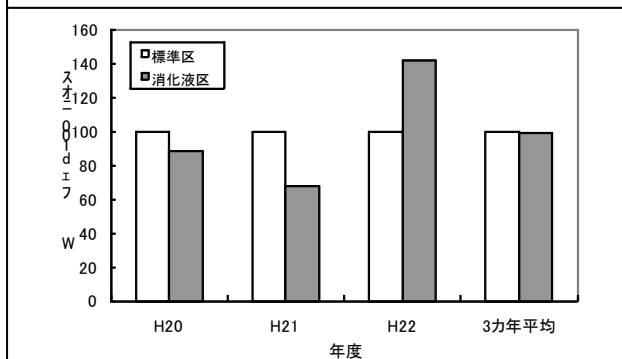


図-22 テンサイへの消化液の施用効果

区と対照区で有意な収量差が認められなかった。

一方、試験圃場における牧草品質は、H20年度において、1番草(図-19)、2番草ともに粗タンパク含量が消化液区において対照区よりも有意に多くなった。

図-20～22に畑作物を対象として実施した標準区と消化液区の単位面積当たり収量の比較を示す⁷⁾。標準区を100%とした場合の消化液区の収量の3カ年の平均値で見ると、秋まきコムギや青刈りトウモロコシ、テンサイでは、標準区と同程度の収量が得られた。

4.2.2 消化液の施用が土壌および牧草の微量元素含量におよぼす影響

消化液散布年数と牧草地土壌表層1層目の全亜鉛、全銅含量の関係を示す(図-23)。消化液には、亜鉛と銅が多く含まれることから、土壌への蓄積が懸念されたが、消化液散布圃場と非散布圃場の全亜鉛、全銅含量に明確な差はなかった。また、消化液散布年数に関係なく全亜鉛、全銅含量はほぼ一定であった。農用地(水田)における亜鉛の暫定的な管理基準値は120mg/kgとされている。仮にこれと比較しても各圃場の値は基準値未満であり、消化液の散布年数が8年程度であれば、亜鉛が牧草地土壌表層に蓄積される様子にはなかった。

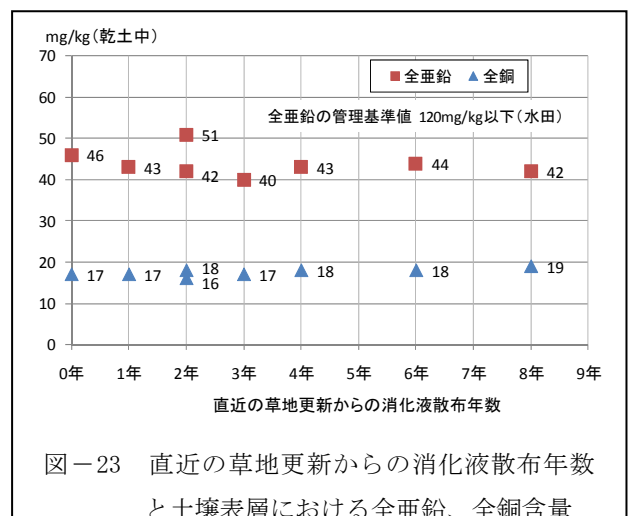


図-23 直近の草地更新からの消化液散布年数と土壌表層における全亜鉛、全銅含量

亜鉛や銅、マンガンは牧草の生長に必要な必須微量元素でもある。このため、牧草が吸収可能な形態である可溶性微量元素の基準値が示されており、土壌中に不足すると欠乏症が、過剰であると生育障害が発生するとされる。図-24に消化液散布年数と土壌の可溶性微量元素含量の関係を示した。易還元性マンガンと可溶性亜鉛については、全ての圃場でほぼ基準値の範囲を維持しているのが分かる。消化液散布年数との間にも一定の傾向は見られず、散布年数の増加に伴い過剰に溶出する様子はなかった。

可溶性銅は全ての圃場で基準値を下回った（図-24）。調査圃場の土壌は、黒色火山性土であり、東北海道の黒色火山性土ではムギ類の銅欠乏発現が報告されている。本調査圃場の黒色火山性土においても可溶性銅が不足していた。

牧草の微量元素含量から、生育上適正な含有量が維持されているか判断出来る。図-25に消化液を8年間散布した圃場で採取した牧草の成分分析結果を示す。結果、銅含量が低かったが、欠乏しているという状態ではなかった。他の微量元素含量についても異常値は確認されず、適正な範囲内であることが分かる。消化液を8年間散布した圃場であっても牧草内の微量元素は蓄積されることはなく、粗飼料としての品質は維持されているといえる。

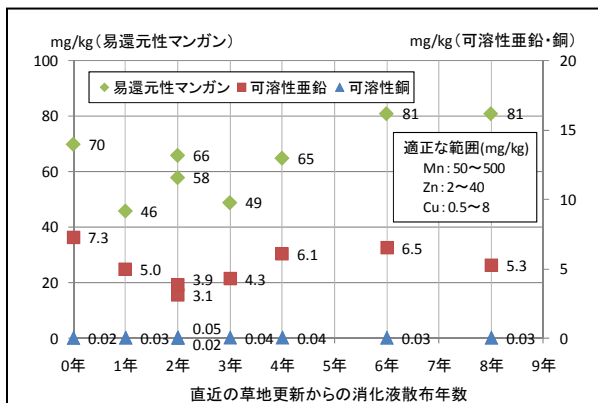


図-24 直近の草地更新からの消化液散布年数と土壌表層における可溶性微量含量

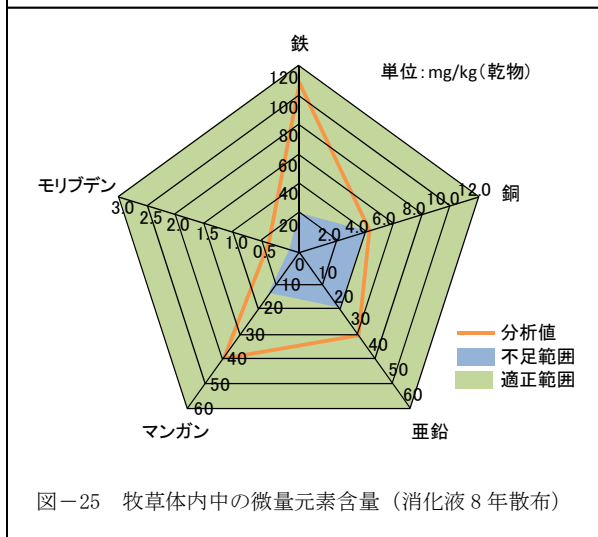


図-25 牧草体内中の微量元素含量（消化液8年散布）

5. スラリー・消化液の物性把握と効率的搬送手法の解明

副資材との共発酵処理で生成する消化液の搬送効

率を評価するための基礎資料として、消化液とその原料スラリーの固形分含量の把握を行った。その結果、原料スラリーをパイプラインで搬送するためには、原料スラリーを水で希釈し粘性を低下させる必要性が明らかとなった。

そこで、適正なメタン発酵が可能な乳牛ふん尿の希釈限界濃度を明らかにするための室内発酵試験を行った。その結果、3倍希釈においても、無希釈と同程度のバイオガスが発生することが明らかとなったので、プラントー農家間の乳牛ふん尿等の運搬を無希釈で搬送車で行った場合と乳牛ふん尿を2、3倍希釈し、プラントー農家間の乳牛ふん尿等の運搬をパイプラインで行った場合のエネルギー収支および経営収支を比較検討した。

また、下水道では実用化されている真空式管路システムの、乳牛ふん尿搬送への適応性について検証し、既存の乳牛ふん尿搬送システムとの経済性比較を行った。

5.1 調査手法

ほぼ乳牛ふん尿のみを受け入れていたH16年度以前と副資材の積極的受け入れを開始したH17年度以降における原料および消化液の固形分含量を月1回、原料スラリーと消化液を採取し分析することにより把握した。なお、原料スラリーの採取は乳牛ふん尿と副資材があらかじめ混和攪拌処理がなされる受入槽から行った。

原料スラリーの希釈が嫌気発酵におけるバイオガス発生におよぼす影響について、ジャーファーマンターを用いた室内試験を行った。発酵試験においては、乳牛スラリー原液を用いる無処理区の他に、対照区と同量の原料スラリーを水でそれぞれ、1.5倍、2倍、3倍に希釈する試験区を設けて実験を行った。ちなみに、無処理区、1.5倍希釈区、2倍希釈区、3倍希釈区の投入原料の固形分（以下、TS）はそれぞれ、 115.0 g kg^{-1} 、 76.7 g kg^{-1} 、 57.5 g kg^{-1} 、 38.3 g kg^{-1} である。

半径4.5km以内に分散する9戸の農家から、ある一定量の乳牛ふん尿を無希釈で搬送車でプラントに搬入し、生成した消化液と堆肥を農家地先およびサテライトタンクまで搬出する場合（以下、運搬車収集方式モデル）と、同じ量の乳牛ふん尿を農家地先で固液分離した後、固分は農家が堆肥化を行い、液分は水で2、3倍希釈してから管路でプラントまで圧送し、生成した消化液を農家圃場貯留池まで圧送

する場合（以下、圧送管路モデル（2倍希釈）、圧送管路モデル（3倍希釈））のモデルを作成し、既存知見^{3), 8) ~ 13)}を参考にしながらそれぞれのモデルのエネルギー収支と経営収支を整理した。なお、圧送管路モデルでは、乳牛ふん尿液分の希釈倍率に応じて、発酵槽、殺菌槽、消化液貯留槽等の施設容量を大きくすることとした。

真空式管路システムによる乳牛ふん尿の搬送試験は、管路延長およそ 546m の試験管路システムを実際に組み立てて試験を行った。なお、試験は積水化学北海道（株）との共同研究で行った。運搬車収集方式モデルおよび圧送管路モデルとの経済性比較は、真空式管路システムが、物質を吸引して搬送するという特徴を勘案して、真空式管路システムでは農家からプラントへの流入管路を真空式管路とし、プラントから各圃場貯留池への流出管路を圧送管路として行った。

5.2 調査結果

既報¹⁴⁾によれば、圧送管路での損失水頭は、スラリーの粘度試験結果から推量できることが明らかになっている。このとき、固形分含量が 40~50 g kg⁻¹ を超えると、損失水頭の増大が顕著になるとともに、乱流状態での輸送が困難と言われている。

原料がほぼ乳牛ふん尿のみに限られた H16 年度以前の原料スラリーの固形分含量は 69 g kg⁻¹ であり、副資材を積極的に受け入れ始めた H17~18 年度の原料スラリーの固形分含量は 72 g kg⁻¹ であった。調査の結果、副資材の受け入れにより、原料スラリーの固形分含量が増加していることが明らかとなった。これに伴い、消化液の固形分含量も H16 年度以前の 35 g kg⁻¹ から、H17~18 年度の 39 g kg⁻¹ へと増加していた。

共同利用型バイオガスプラントでは、副資材は受入量が少量で、発生元の責任でプラント受入槽まで搬送されるため、原料の搬送で問題となるのは大量に発生する乳牛ふん尿の農家からプラントまでの搬送である。H16 年度までの分析結果から、各農家で発生する乳牛スラリーの平均固形分含量は 69 g kg⁻¹ であった。既報⁹⁾を適用すると、農家からの乳牛スラリーの搬送は、このままの濃度では圧送管路による搬送手法では損失水頭が大きくなり、困難であると推察された。原料スラリーの搬送はバキュームカーで行うか、圧送管路で行う場合は乳牛スラリーを水で 2 倍程度に希釈する必要があると評価された。

一方、消化液はほぼ原料が乳牛ふん尿に限られた H16 年度以前でも、副資材を積極的に受け入れた H17~18 年度でも、固形分含量は 40 g kg⁻¹ を下回っており、圧送管路による搬送適性があると評価できた。

図-26 にバイオガス発生量の経時変化を示す。また、希釈倍率の影響によるバイオガス発生量の差をみるため、1.5 倍希釈、2 倍希釈、3 倍希釈のバイオガス発生量と無処理の場合とを比較した（図-27）。

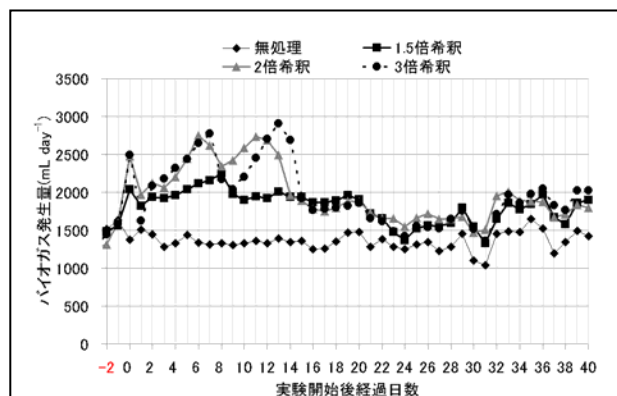


図-26 原料スラリーの希釈によるバイオガス発生の増加

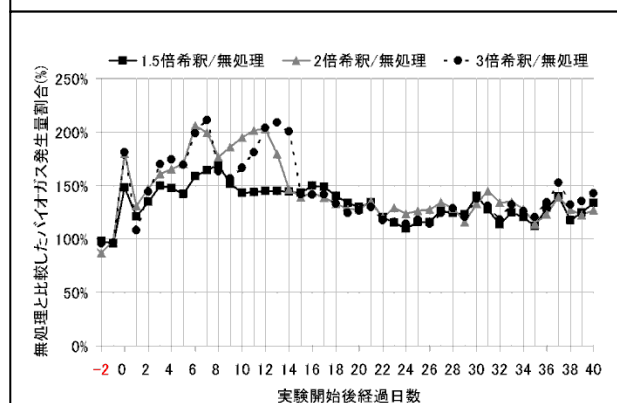


図-27 原料スラリーの希釈によるバイオガス発生の増加比率

図-26 をみると、実験開始 0 日目以後しばらくの間、2 倍希釈、3 倍希釈スラリーを投入した培養槽からのバイオガス発生量は、2,000~3,000 mL day⁻¹ の間で増減しており、また、1.5 倍希釈スラリーを投入した培養槽でもわずかな幅の増減が認められた。

実験開始 15 日目に、1.5 倍希釈、2 倍希釈、3 倍希釈スラリーを投入した培養槽からのバイオガス発生量はほぼ同量になった（図-26、27）。一方、この間、原料スラリーを投入した培養槽からのバイオガスは平均で約 1,360 mL day⁻¹ の発生量を示しており、安定し

たガスの発生量を示していた。希釈した調整スラリーを投入した培養槽からのバイオガス発生量は実験開始 20 日目当たりから減少傾向を示したことから、原料スラリーを投入した場合のバイオガス発生量に近づき、どの培養槽でもほぼ同量のバイオガス発生量になるかとも思われたが、最終的には原料スラリーを投入した場合のみバイオガス発生量が少ない結果になった。実験開始 24 日目以降で原料スラリーを投入した場合と希釈スラリーを投入した場合のバイオガス発生量を比較すると、平均で約 26%の差があった。既存文献によると、振動などを与えてスラリー中の気泡を脱気するとき完全に脱気できる乾物率が存在すると言われている。この限界点は脱気限界とよばれており、TS で 90~100 g kg⁻¹である¹¹⁾。また、一定の懸濁液を静置すると、固形物は次第に沈降し、上部に上澄み液が発生する。この上澄み液の占める体積は自由間ゲキ体積と言われ、この自由間ゲキ体積の占める割合によって懸濁液の流動性が微妙に変化する。懸濁液の濃度が増して液の TS が、自由間ゲキ体積が 0 となる 74.0 g kg⁻¹を超すと粒子は互いに常時接触し、そのため流動に際し強い降伏値が発生する。この状態にな

ると均一な攪拌が困難となる¹⁵⁾。これらの知見を参考にすると、今回、生スラリーを投入した場合のみバイオガス発生量が少ない結果になった原因として、発酵液中にガスが封じ込められたことや、攪拌が不足し不十分な発酵になってしまったことが考えられる。

以上の結果を考察すると、原料スラリーの希釈範囲が TS=40 g kg⁻¹程度までであり、かつ、滞留日数も同一であり、さらに投入原料スラリー量、あるいは投入有機物量が同量であれば、原料スラリーを希釈しても中温メタン発酵のバイオガスやメタンガスの発生量は減少しないことが分かった。また、別な言い方をすれば、本実験結果からは、原料の連続投入を前提条件として、適正なメタン発酵を行うことが可能な家畜ふん尿の希釈限界濃度は TS=40 g kg⁻¹程度であるといえよう。

図-28 に運搬車収集方式モデル、圧送管路モデル（2 倍希釈）および圧送管路モデル（3 倍希釈）の 1 日当たりのエネルギー収支を示す。なお、エネルギー収支は運搬車収集方式モデルの 1 日当たりのエネルギー供給量（以下、e）を 100%としたときの割合として示した。

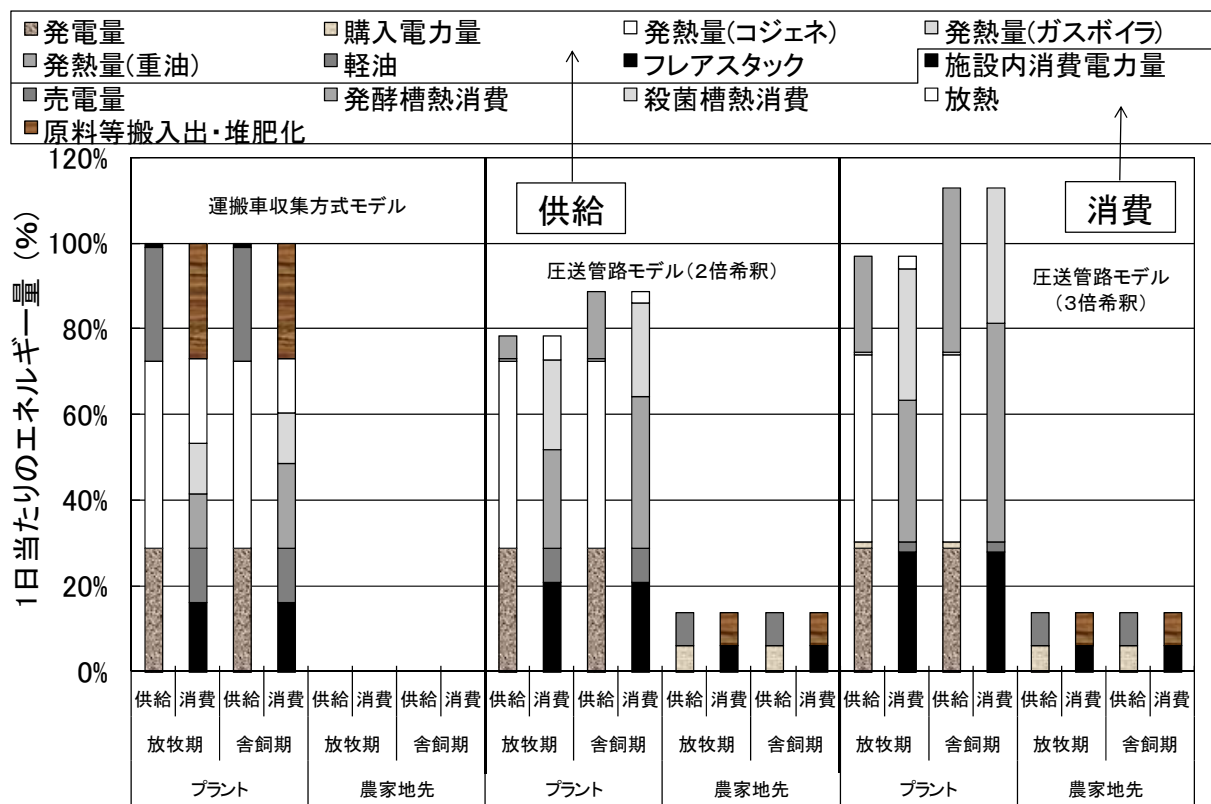
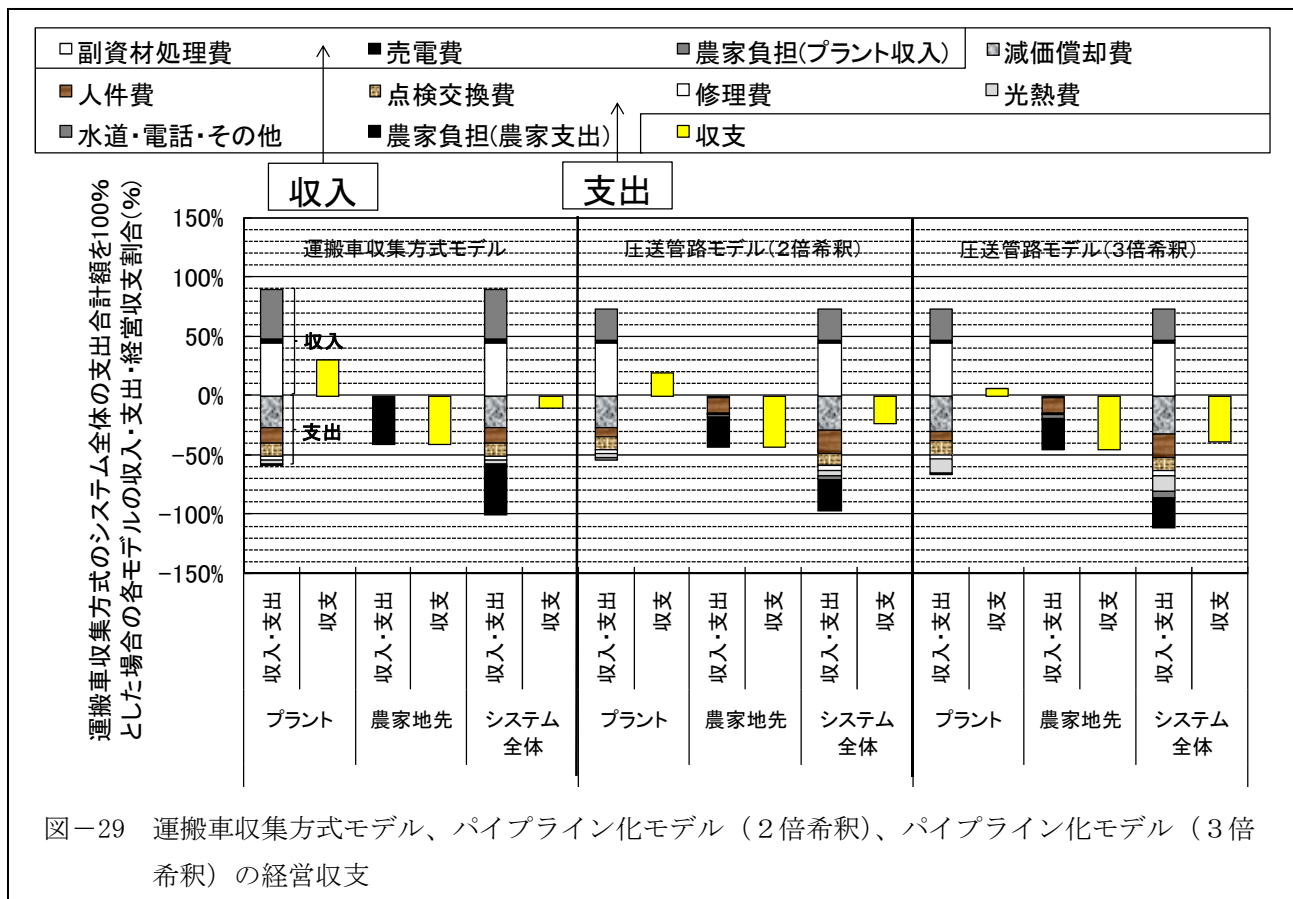


図-28 運搬車収集方式モデル、パイプライン化モデル（2 倍希釈）、パイプライン化モデル（3 倍希釈）のエネルギー収支



運搬車収集方式モデルでは、プラントにおいて乳牛ふん尿等の搬送を運搬車で行い、堆肥化作業もフロントローダーによりプラントで行っていたため、プラントにおける原料等搬入出・堆肥化に伴う軽油エネルギー消費量割合がeの27%にのぼっていたが、圧送管路モデルでは運搬車による乳牛ふん尿等の搬送がなくなり、堆肥化作業は農家地先で行うようになるため、プラントにおける原料等搬入出・堆肥化による軽油エネルギー消費がなくなり、農家地先における堆肥化作業に伴う軽油エネルギー消費のみとなり、その割合はeの8%にまで低下した。

また、運搬車収集方式モデルでは、発酵槽および殺菌槽の施設容量がプラント化モデルに比べて小さいために、発酵槽および殺菌槽の加温に必要な熱エネルギーの供給をコジェネレーターのみで賄うことが可能であったが、圧送管路モデルでは、発酵槽および殺菌槽の施設容量が2、3倍となるために発酵槽および殺菌槽の加温に必要な熱エネルギーが大きくなり、コジェネレーターによる熱供給だけでなく重油ボイラによる熱供給も必要となった。

プラントおよび農家地先全体で必要なエネルギー割合は、放牧期と舎飼期の平均で、圧送管路モデル（2倍希釈）でeの98%、圧送管路モデル（3倍希釈）

でeの119%であり、乳牛ふん尿を3倍希釈して管路で圧送すると、運搬車収集方式モデルの約2割の必要エネルギー増となった。

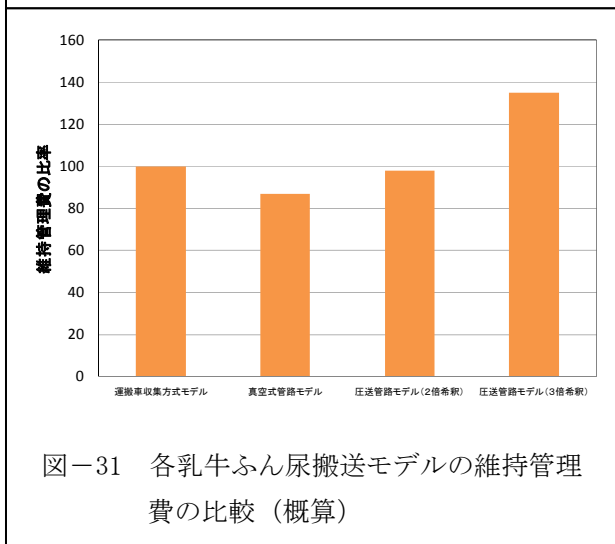
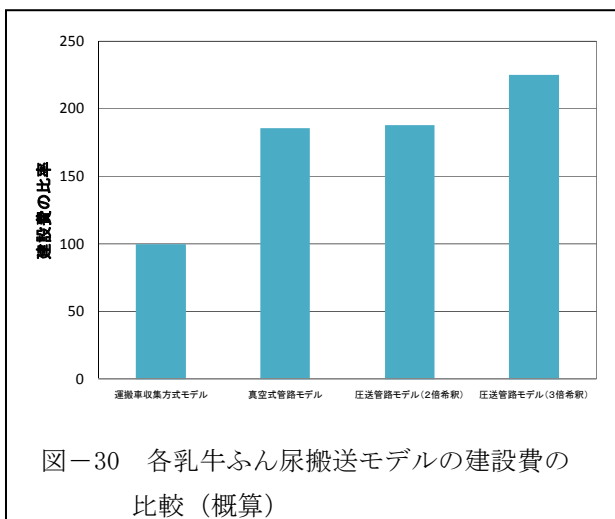
図-29に運搬車収集方式モデルのシステム全体の支出合計額（以下、p）を100%とした場合の各モデルの年間の収入・支出・経営収支割合を示す。なお、ここでは購入肥料節減額、労力節減額、減価償却費（乳牛ふん尿処理関係重機等）節減額、直接経費（光熱水費等）節減額を農家便益額³⁾とし、これを農家がプラントへ農家負担額として支払うこととした。

農家負担は運搬車収集方式モデルでpの41%、圧送管路モデルでpの26%であるため、プラントの収入は運搬車収集方式モデルでpの90%、圧送管路モデルでpの73%と圧送管路モデルで少なかった。圧送管路モデルでの農家負担の減少は固液分離作業および堆肥化作業の農家地先での実施により、労力削減額、減価償却費削減額および直接経費削減額等の農家便益額が減少したためである。

一方、プラントの支出は運搬車収集方式モデルでpの59%、圧送管路モデル（2倍希釈）でpの54%、圧送管路モデル（3倍希釈）でpの67%であった。プラントの支出が圧送管路モデル（2倍希釈）で少なかったのは運搬車による原料等搬入出作業が不要で、

堆肥化作業が農家に移行したため、プラントでの人件費が少なくなったためである。また、プラントの支出が圧送管路モデル（3倍希釈）で多かったのは図－28で示したとおり、発酵槽等の加温に必要な熱エネルギーを得るために、重油消費量が増えたためである。

以上の結果からプラントの収支を計算すると、運搬車収集方式モデルでpの31%のプラス、圧送管路モデル（2倍希釈）でpの20%のプラス、圧送管路モデル（3倍希釈）でpの7%のプラスとなり、プラントによる農家便益額を考慮すれば、乳牛ふん尿を3倍まで希釈してもプラント運営は経済的に成立すると推察された。



また、真空式管路システムの乳牛ふん尿搬送特性および経済性に関する検証を行った²³⁾。その結果本システムでは固形分 82 g kg⁻¹の圧送管路では搬送困難な乳牛ふん尿も支障なく搬送できることが実証され、農家から排出される液状ふん尿を水で希釈せず

にプラントへ搬送できることが明らかとなった。そこで真空管路モデルにおいて、乳牛ふん尿を希釈せずに運ぶという条件で各モデルの経済的比較を行った。

運搬車収集方式モデルの建設費あるいは維持管理費を100としたときの真空式管路モデル、圧送管路モデル（2倍希釈）および同（3倍希釈）の建設費あるいは維持管理費の比率を図－30および図－31に示す。

建設費は真空式管路モデルで186、圧送管路モデル（2倍希釈）で188、同（3倍希釈）で225となり、真空式管路モデルで圧送管路モデル（2倍希釈）とほぼ同等のコストとなった。

一方、維持管理費では真空式管路モデルで87、圧送管路モデル（2倍希釈）で98、同（3倍希釈）で135となり、真空式管路モデルで安価となった。

5. システムの環境負荷軽減効果の解明

別海プラント導入前の従来の地域バイオマス処理利用システムと別海プラント導入後の地域バイオマス処理利用システムにおける地球温暖化ガス（メタン、亜酸化窒素、二酸化炭素）発生量および被害額を算出し、共同利用型バイオガスプラント導入による地球温暖化ガス削減効果を検証した。

また、酸性化物質（アンモニア、イオウ酸化物、窒素酸化物、塩酸）の削減効果を検証した。

5.1 調査手法

別海プラント導入前後の地域バイオマスの各処理利用工程を表－4、8の左欄のように区分した。工程ごとに各種地球温暖化ガス（表－4）および酸性化物質（表－8）の単位当たり排出量を既往の文献^{16)～22)}から整理した。

地域バイオマスの年間処理利用量は別海プラントにおけるH19年度実績より求めた（表－5）。なお、完成堆肥の量は既往の研究成果¹⁶⁾より堆肥原料の1/3とした。また、乳牛ふん尿およびその処理物の有機物含量および全窒素含量はH19年度の分析結果の平均値を用いた。ただし、固形ふん尿の有機物含量および全窒素含量はH13年度分析結果の平均値で、固形ふん尿の堆肥化により生成する完成堆肥の有機物含量および全窒素含量は実測できないので、下記の計算式により求めた。

①固形ふん尿からの完成堆肥の有機物含量＝固形ふん尿の有機物含量×分離固分からの完成堆肥の

表－４ 地球温暖化ガスの単位当たり発生量の算出根拠

	メタン	亜酸化窒素	二酸化炭素
堆肥発酵・堆積時	有機物1kg当たり3.3g ⁽⁶⁾	全窒素1kg当たり11.8g ⁽⁶⁾	重機での切返しによる軽油消費1L当たり2.64kg ⁽²⁰⁾
液状ふん尿・尿溜め液貯留時	有機物1kg当たり9.2g ⁽⁶⁾	全窒素1kg当たり11.8g ⁽⁶⁾	カーボンニュートラルのため0.0kgと算定
消化液貯留時	有機物1kg当たり3.1g ⁽¹⁷⁾	全窒素1kg当たり0.2g ⁽¹⁷⁾	カーボンニュートラルのため0.0kgと算定
完成堆肥の圃場施用時	0.0g ⁽¹⁸⁾	全窒素1kg当たり0.94g ⁽⁶⁾	カーボンニュートラルのため0.0kgと算定
液状ふん尿・尿溜め液の圃場施用時	0.0g ⁽¹⁸⁾	全窒素1kg当たり2.8g ⁽⁶⁾	カーボンニュートラルのため0.0kgと算定
消化液の圃場施用時	0.0g ⁽¹⁸⁾	全窒素1kg当たり2.7g ⁽⁶⁾	カーボンニュートラルのため0.0kgと算定
バイオガスプラントでの電力消費時	0.0g ⁽¹⁹⁾	1kWh当たり0.0021g ⁽¹⁹⁾	1kWh当たり425g ⁽¹⁹⁾
農家－バイオガスプラント間のふん尿類運搬時	0.0g ⁽²⁰⁾	0.0g ⁽²⁰⁾	運搬車による軽油消費1L当たり2.64kg ⁽²⁰⁾
共同型バイオガスプラント受入バイオマスの焼却処理時	1kg当たり0.01175g ⁽¹⁹⁾	1kg当たり0.05394g ⁽¹⁹⁾	カーボンニュートラルのため0.0kgと算定

備考：圃場施用機械の軽油消費に伴う二酸化炭素発生量は考慮していない。

表－５ 乳牛ふん尿およびその発酵生成物の年間処理利用量、有機物含量および全窒素含量

	共同利用型バイオガスプラント 別海プラント導入後			従来処理方式 別海プラント導入前		
	処理利用量	有機物含量	全窒素含量	処理利用量	有機物含量	全窒素含量
	(Mg)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(Mg)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)
堆肥原料(固形ふん尿)	—	—	—	5,124	160.5	5.0
堆肥原料(分離固分)	3,124	224.5	5.5	—	—	—
完成堆肥	937	216.0	7.7	1,537	154.4	7.0
液状ふん尿(従来方式で圃場施用)	—	—	—	7,678	54.0	3.9
尿溜め液(従来方式で圃場施用)	—	—	—	4,830	28.8	2.1
消化液(共同型バイオガスプラントで圃場施用)	17,970	34.5	4.0	—	—	—

表－６ 各種貯留槽の形式

	共同利用型バイオガスプラント 別海プラント導入後		従来処理方式 別海プラント導入前
	プラント	農家地先	農家地先
	密閉型	密閉型	解放型
①液状ふん尿貯留槽	密閉型	密閉型	解放型
②尿溜め液貯留槽	なし	密閉型	密閉型
③消化液貯留槽	解放型	なし	なし

有機物含量／分離固分の有機物含量、②固形ふん尿からの完成堆肥の全窒素含量＝固形ふん尿の全窒素含量×分離固分からの完成堆肥の全窒素含量／分離固分の全窒素含量。

過年度の調査により、別海プラント導入前後のプラントおよび農家地先における液状ふん尿貯留槽、尿溜め液貯留槽および消化液貯留槽の形状は把握している（表－６）。この結果に基づき、地球温暖化ガスおよび酸性化物質は密閉型では発生せず、解放型に限って発生するものとして発生量の計算を行った。

なお、有機物の分解・焼却によって発生する二酸化炭素の由来は植物が光合成により固定した大気中の二酸化炭素であり、大気中の二酸化炭素増加には

寄与しないと考えられる（カーボンニュートラル）ので、地球温暖化ガスの発生量としては算入しなかった。

また、完成堆肥、液状ふん尿、尿溜め液または消化液の圃場施用時の施用機械の軽油消費に伴う二酸化炭素および酸性化物質の発生量の算出は、各農家が施用機械の軽油消費量を把握していなかったため、調査できなかった。

5.2 調査結果

表－７に別海プラント導入後の共同利用型バイオガスプラントでの地域バイオマス処理利用システム（以下、プラント処理）および別海プラント導入前の従来の地域バイオマス処理利用システム（以下、

表－7 地球温暖化ガス年間発生量の試算

	①共同利用型バイオガスプラント			②従来処理方式			備考
	別海プラント導入後			別海プラント導入前			
	メタン (Mg)	亜酸化窒素 (Mg)	二酸化炭素 (Mg)	メタン (Mg)	亜酸化窒素 (Mg)	二酸化炭素 (Mg)	
堆肥発酵・堆積時	2.31	0.203	14.6	2.71	0.302	24.0	二酸化炭素はフロントローダー による切り返し作業による
液状ふん尿・尿溜め液貯留時	0.00	0.000	0.0	3.81	0.353	0.0	
消化液貯留時	1.92	0.014	0.0	0.00	0.000	0.0	
完成堆肥の圃場施用時	0.00	0.007	0.0	0.00	0.010	0.0	
液状ふん尿・尿溜め液の圃場施用時	0.00	0.000	0.0	0.00	0.112	0.0	
消化液の圃場施用時	0.00	0.146	0.0	0.00	0.000	0.0	
バイオガスプラントでの電力消費時	0.00	0.000	44.1	0.00	0.000	0.0	
農家ーバイオガスプラント間のふん尿類運搬時	0.00	0.000	38.6	0.00	0.000	0.0	
共同型バイオガスプラント受入バイオマスの焼却処理時	0.00	0.000	0.0	0.03	0.158	0.0	地域バイオマスを受け入れない ②で計上
合計	4.23	0.370	97.3	6.55	0.935	24.0	
被害額換算値(円/kg) ¹⁹⁾	44.16	569.2	1,714	44.16	569.2	1,714	
被害額小計(円)	186,797	210,831	166,772	289,447	532,259	41,136	
被害額合計(円)	564,400			862,842			

備考：カーボンニュートラルとみなされる二酸化炭素は被害に算入しない。

表－8 酸性化物質の単位あたり発生量の算出根拠

	アンモニア	イオウ酸化物	窒素酸化物	塩酸
堆肥発酵・堆積時(重機による切り返し作業時に発生する酸性化物質も含む)	全窒素1kg当たり333g ³⁾	軽油1L当たり35.6g ²⁰⁾	軽油1L当たり661g ²⁰⁾	軽油1L当たり47.3g ²⁰⁾
液状ふん尿・尿溜め液貯留時	全窒素1kg当たり126g ³⁾	—	—	—
消化液貯留時	全窒素1kg当たり304g ³⁾	—	—	—
完成堆肥の圃場施用時	注1参照	—	—	—
液状ふん尿の圃場施用時	全窒素1kg当たり191g ³⁾	—	—	—
尿溜め液の圃場施用時	全窒素当1kgたり96.6g ³⁾	—	—	—
消化液の圃場施用時	全窒素1kg当たり84.0g ³⁾	—	—	—
バイオガスプラントでの電力消費時	—	1kWh当たり0.13g ²⁰⁾	1kWh当たり0.17g ²⁰⁾	1kWh当たり1.04g ²⁰⁾
農家－バイオガスプラント間のふん尿類運搬時	—	軽油1L当たり35.6g ²⁰⁾	軽油1L当たり661g ²⁰⁾	軽油1L当たり46.0g ²⁰⁾
共同型バイオガスプラント受入バイオマスの焼却処理時	—	1kg当たり0.0544g ¹⁹⁾	1kg当たり1.22g ¹⁹⁾	—

備考：圃場施用機械の軽油消費に伴う二酸化炭素発生量は考慮していない。

注1：単位面積当たりの揮散アンモニア量(g/m²)=(0.787×単位面積当たりに施用されたアンモニア態窒素量(g/m²)+0.076)×0.75×17/14²²⁾

従来処理)での年間地球温暖化ガス発生量と被害額の算定結果を示す。

メタン、亜酸化窒素およびカーボンニュートラルでない二酸化炭素の年間排出量は、プラント処理で各々4.23 Mg、0.370 Mg、97.3 Mgであり、従来処理で各々6.55 Mg、0.935 Mg、24.0 Mgであった。これらに各地球温暖化ガスの被害額換算値²²⁾を掛け合わせるにより、メタン、亜酸化窒素およびカーボンニュートラルでない二酸化炭素の排出に伴う被害額は、プラント処理で各々およそ 187,000 円、211,000 円、167,000 円で合計 565,000 円であり、従来処理で各々およそ 289,000 円、532,000 円、41,000 円で合計 862,000 円であった。

このように、プラント処理で従来処理に比べて、被害額にして 35%、額にして 297,000 円の減となった。これは液状ふん尿が消化液に比べて貯留中のメタンおよび亜酸化窒素の揮散量が多く、液状ふん尿を液肥利用している従来処理において、消化液を液肥利用しているプラント処理に比べて、液肥の貯留

期間におけるこれら単位量当たりの被害額の大きい地球温暖化ガスの揮散量が多かったことに主に由来している。地球温暖化の防止には液状ふん尿の嫌気発酵処理による消化液化が重要であることが明らかとなった。

表－11 にプラント処理および従来処理での年間酸性化物質の発生量と被害額の算定結果を示す。

アンモニア、イオウ酸化物、窒素酸化物および塩酸の年間排出量は、プラント処理で各々29.3 Mg、0.850 Mg、13.5 Mg、1.01 Mgであり、従来処理で15.3 Mg、0.680 Mg、0.760 Mg、0.620 Mgであった。これらの値に各酸性化物質の被害換算値²⁰⁾を掛け合わせるにより被害額が算出され、アンモニア、イオウ酸化物、窒素酸化物および塩酸の排出に伴う被害額はプラント処理で各々およそ 12,000,000 円、57,400 円、822,000 円および 176,000 円で合計 12,000,000 円であり、従来処理で各々およそ 6,170,000 円、46,000 円、46,000 円および 73,000 円で合計 6,290,000 円であった。このように、酸性

表－9 酸性化物質の発生量および被害額の比較

	①共同利用型バイオガスプラント				②従来処理方式			
	別海プラント導入後				別海プラント導入前			
	アンモニア (Mg)	イオウ酸化物 (Mg)	窒素酸化物 (Mg)	塩酸 (Mg)	アンモニア (Mg)	イオウ酸化物 (Mg)	窒素酸化物 (Mg)	塩酸 (Mg)
堆肥発酵・堆積時(重機切り返しによる酸性化物質発生量も含む)	5.72	0.20	3.67	0.23	8.52	0.33	0.60	0.42
液状ふん尿・尿溜め液貯留時	0.00	0.00	0.00	0.00	3.76	0.00	0.00	0.00
消化液貯留時	21.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
完成堆肥の圃場施用時	0.68	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00
液状ふん尿・尿溜め液の圃場施用時	0.00	0.00	0.00	0.00	1.84	0.00	0.00	0.00
消化液の圃場施用時	1.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
バイオガスプラントでの電力消費時	0.00	0.14	0.18	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
農家－バイオガスプラント間のふん尿類運搬時	0.00	0.52	9.66	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00
共同型バイオガスプラント受入バイオマスの焼却処理時	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.16	0.00
合計	29.71	0.85	13.50	1.01	15.32	0.68	0.76	0.42
被害額換算値(円/kg) ¹⁹⁾	403.00	67.30	60.90	175.00	403.00	67.30	60.90	175.00
被害額小計(円)	11,973,936	57,400	822,339	175,980	6,173,960	45,993	46,308	73,150
被害額合計(円)	12,207,316				6,293,103			

備考：カーボンニュートラルとみなされる二酸化炭素は被害に算入しない。
備考：圃場施用機械の軽油消費に伴う二酸化炭素発生量は考慮していない。

化物質発生による被害額はプラント処理で従来処理に比べて、およそ2倍、額にしておよそ5,710,000円の増と試算された。

このように、プラント処理による地球温暖化ガスの削減効果より、酸性化物質の増加被害の方が大きな影響となる試算結果を得た。酸性化物質の排出は消化液貯留時のアンモニアの揮散およびプラント－農家間の家畜ふん尿輸送時の運搬車両からの窒素酸化物の排出量の増加によるところが大きく、今後のバイオガスプラントの設計では、消化液貯留槽を有蓋型とする、プラント－農家間の家畜ふん尿の輸送をパイプライン化するなどの対策も示唆される。

6. バイオマスの肥料化・エネルギー化の技術開発と効率的搬送手法の解明

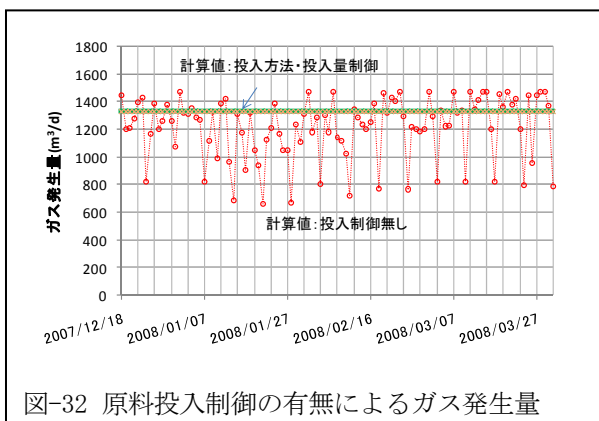


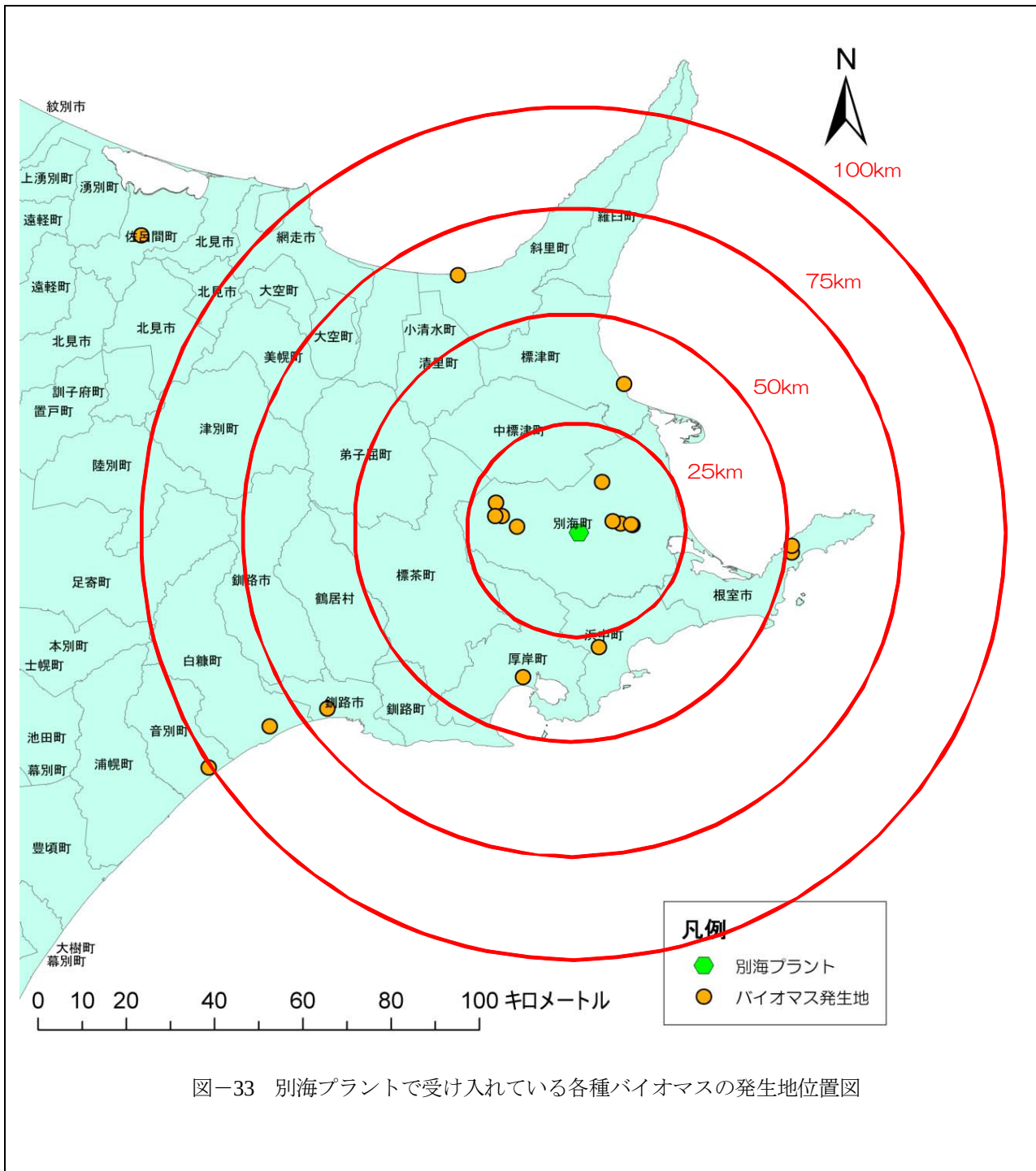
図-32 原料投入制御の有無によるガス発生量

バイオマスを肥料化・エネルギー化するには、各原料をできるだけ同じ割合で同じ量で毎日投入することが望ましい。図-10に各原料の投入に制限を設けずに各原料を発生者本位に投入した場合と、投入制限を設け、各原料を毎日同じ割合で同じ量投入した場合のバイオガス発生量のシミュレーション結果²⁴⁾を示す。図からわかるように、各原料の投入を同

じ割合で同じ量行った場合はバイオガスの発生が一定となり、投入制限を設けず投入を原料発生者本位で行った場合は、バイオガスの発生が不規則になることがわかる。バイオガスの安定した発生はコジェネレーターやバイオガスボイラーの安定運転につながり、各施設機械の運転にも、売電の実施にも有利である。主原料の家畜ふん尿の投入量は農家のふん尿発生量とふん尿の性状を考慮した上でのふん尿搬入計画の策定により比較的容易に実現できる。一方、副資材の場合は廃乳製品のように不定期に発生し、その発生量の制御が不可能なものが存在するので、各副資材を同じ量と同じ割合での投入は困難である。均一な性状の副資材の等量投入のためには、副資材専用の一時貯留槽を設け、そこで各副資材を均一に混合して毎日等量を投入する方法が考えられる。

図-33に別海プラントに副資材として搬入される各種バイオマスの発生位置を示す。図からわかるように、直線距離でおよそ100kmの、釧路市、根室市といった道東地方の中核都市も含む広範な範囲からバイオマスが別海プラントに搬入されており、別海プラントという共同型バイオガスプラントが都市、農村および漁村を含む広範囲の地域における各種バイオマスの循環利用の役を担えること、また、道東地方の広範囲から受け入れたバイオマスのゲートフィーによりプラントの経済的自立を可能にするポテンシャルを有していることを示すことができた。

リン酸は窒素およびカリウムと並んで作物にとって極めて重要な肥料成分である。図-2に示すように、乳牛ふん尿のみを原料とするメタン発酵後の消化液は窒素(3.4 g kg⁻¹ FM) およびカリウム(3.6 g



kg⁻¹ FM) に比べて、リン酸 (1.4 g kg⁻¹ FM) が少ないことがわかる。表-10 に別海町のし尿脱水汚泥の窒素、リン酸、カリウムの新鮮物当たり含有量を示す。窒素が 4.9 g kg⁻¹ FM、リン酸が 12.8 g kg⁻¹ FM、カリウムが 0.3 g kg⁻¹ FM とリン酸が豊富なことがわかる。これにより、農村地域のバイオマスプラントが近隣市町村のし尿脱水汚泥を積極的に受け入れれば窒素、リン酸、カリウムの肥料三要素のバランスの取れた液肥の生産が可能であることを示すことができた。事実、別海プラントでは図-2 に示すように、

し尿脱水汚泥や乳業工場汚泥（例えばA社：窒素 11.7 g kg⁻¹ FM、リン酸 15.4 g kg⁻¹ FM、カリウム 2.2 g kg⁻¹ FM）といったリン酸の豊富なバイオマスを受け入れることによって、消化液のリン酸がふん尿のみの場合に比べて 40%増量となっている。

共同型バイオガスプラントで発生するバイオガスのエネルギーとしての活用法として、日本は施設内で必要な電力や熱の自賄いを第一としている。これはバイオガスプラントから発生したバイオガスで発電を行い、電気の小売り値段の倍程度の値段で電力

表-10 別海プラントの消化液と別海町のし尿脱水汚泥の肥料成分含量

	窒素(g kg ⁻¹ FM)	リン酸(g kg ⁻¹ FM)	カリウム(g kg ⁻¹ FM)
別海プラント消化液	3.4	1.4	3.6
別海町し尿脱水汚泥	4.9	12.8	0.3

会社が発生電力を購入してくれるドイツと事情が異なる。ドイツではバイオガスプラント内で生成した電力を売れば収支をプラスにすることができるが、日本では、電力会社が、バイオガスで生成した電気を電気の小売値の半額程度でしか購入してくれず、電気を売っても収支がマイナスにしかならないためである。そういった中で、バイオガスの多角化を目指して、バイオガスを精製圧縮して都市ガス相当の規格のガスを製造し、それを使用する研究を共同研究で行ってきた。その結果、室内暖房、ガスコンロ、農家の大型給湯器、バイオガス自動車、温室暖房、鉄筋の端部圧接、金属の切断等に精製ガスが使用可能なことがわかった。特に、鉄筋の端部圧接、金属の切断は既往の燃料のアセチレンの価格高騰により、実用化が有望視されている。

バイオガスプラントの主原料である乳牛ふん尿の搬送法であるが、図-32, 33 に示したとおり、建設コストは運搬車方式が真空式管路方式、圧送式管路方式（2倍希釈）のおよそ半分程度で、維持管理費は真空式管路方式、圧送式管路方式（2倍希釈）と遜色なく、運搬車方式が最も経済的であった。

7. まとめ

各種副資材の基本的性状の把握、副資材がバイオガスの発生および消化液の性状におよぼす影響の評価を行った。また、消化液の長期施用が土壌理化学性および牧草の収量・品質におよぼす影響も検証した。

別海プラントで受け入れている各種副資材の固形分含量、有機物含量、灰分含量の特徴を明らかにし、汚泥系副資材の安全性を確認した。

別海プラントでは、全原料投入量の内、約 170 g kg⁻¹ が副資材であるが、副資材の投入は、消化液中の有機物の増加をもたらす、これが、有害物質の増大にはつながらず、重要な肥料成分である窒素およびリン酸の増加につながっていることを明らかにできた。

各副資材の投入量および投入割合は毎日の変動が大きく、不定期・不等量の投入がなされている実態

が明らかとなった。このような副資材の不規則な投入実態にも係わらず、バイオガス発生量は順調に推移し、副資材を発生元の発生事情に合わせて、全原料投入量の 170 g kg⁻¹ 程度受け入れても、バイオガス生産に支障が少ないことが明らかとなった。しかしながら、副資材の受け入れがガス発生に結び付かない実態も明らかとなった。また、別海プラントでは日曜日の原料投入を行っていないが、これにより、日曜日から月曜日にかけてのバイオガス発生量が顕著に低下することも明らかとなった。

一方で、バイオガス発電の売電価格が低い日本において共同利用型バイオガスプラントの経営を安定化させるには、バイオガス発生効率が低くとも安全で処理収入の大きい地域バイオマスを積極的に受け入れることが重要であることを明らかにした。

また、地球温暖化防止や循環型社会形成の観点から軽油の代替燃料として注目されている BDF の製造工程で副産物として生成する粗製グリセリンと乳牛ふん尿との共発酵の室内試験を行った。

その結果、全投入原料に占める粗製グリセリンの濃度が 40 g kg⁻¹ までならば、乳牛ふん尿のみが原料の場合に比べ、およそ 2 倍のバイオガスが発生することが明らかとなり、粗製グリセリンはバイオガスプラントのバイオガス増産に効果的な副資材であると評価できた。

消化液施用 3～7 年目の草地圃場において、腐植物質の集積とこれに伴う土壌の膨軟化、排水性に関わる孔隙の増加を確認できた。しかし、保水性に関わる孔隙の増加は認められなかった。消化液の施用圃場で 8 年程度での消化液施用では各種微量要素の経年的増加は認められないことを確認した。また、消化液施用 2 年目の試験圃場において、牧草の重要な栄養素である粗タンパク含量が消化液施用により有意に増加することを確認できた。

各農家で発生する乳牛スラリーの平均固形分含量は 69 g kg⁻¹ であり、農家からの乳牛スラリーの搬送は、このままの濃度では圧送管路による搬送手法では損失水頭が大きくなり、困難であると推察された。原料スラリーの搬送はバキュームカーおよび真空式

管路で可能な他、圧送管路で行う場合は乳牛スラリーを水で2倍程度に希釈する必要があると評価された。一方、消化液は乳牛ふん尿のみを原料とした場合も、副資材と共発酵した場合も、固形分含量は 40 g kg^{-1} を下回っており、パイプラインによる搬送適性があると評価できた。

また、希釈後の原料スラリーの濃度が $\text{TS}=4 \text{ g kg}^{-1}$ 程度までであり、かつ、投入原料スラリー量や投入有機物量が同量であり、さらに、滞留日数が同一であれば、原料スラリーの希釈に伴ってメタン発酵のバイオガス発生量、メタン濃度が減少することではなく、原料スラリーの希釈はバイオガスの発生に支障をきたさない結果が得られた。

更に、乳牛ふん尿とその生成物を無希釈で運搬車により搬入出するモデルと圧送管路で2ないし3倍希釈して搬入出するモデルについてエネルギー収支と経済性を検討し、プラントによる農家便益額を考慮すれば、乳牛ふん尿を3倍まで希釈してもプラント運営は経済的に成立すると試算された。

真空式管路システムの建設費は圧送管路システムとほぼ同等で、維持管理費は運搬車収集方式モデルの約13%減と試算された。

共同利用型バイオガスプラントによる地域バイオマスの処理利用はプラント導入前の従来方式による地域バイオマスの処理利用に比べて、地球温暖化ガスによる被害が35%減少すると試算された。一方、酸性化物質の排出はほぼ倍増すると試算された。酸性化物質の排出量は消化液貯留槽からのアンモニアおよびプラントー農家間の家畜ふん尿運搬車からの窒素酸化物が多く、消化液貯留槽の有蓋化およびプラントー農家間のふん尿運搬の管路化など、具体的な対策の検討が示唆された。

別海プラントは直線距離で100km程度の遠隔地からもバイオマスを受け入れており、この圏内には道東の中核都市である釧路市や根室市も含まれるため、都市ー農村ー漁村間の広域バイオマス循環利用システムの構築が可能であることを実証した。

参考文献

- 1) 横濱充宏・石田哲也・山田 章：地域バイオマスを共発酵処理したバイオガスプラントの生成物の特性と曝気スラリーの土壌改善効果、農業農村工学会資源循環研究部会論文集第3号、pp. 73-86、2007
- 2) 重松 亨・湯 岳琴・木田健次：メタン発酵プロセスに参与する微生物群集、生物工学会誌、87(12)、pp. 570-596、2009
- 3) (独) 北海道開発土木研究所(現土木研究所寒地土木研究所)：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト研究最終成果報告書、476p.、2005
- 4) 北海道立農業・畜産試験場家畜糞尿プロジェクト研究チーム：家畜糞尿処理利用の手引き1999、124p.、1999
- 5) 北海道バイオガス研究会：バイオガスシステムによる家畜ふん尿の有効活用、p. 20、酪農学園大学エクステンションセンター
- 6) 山田 章・石田哲也・石渡輝夫・大嶋 武：グリセリンを副資材とする室内投入実験、平成19年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp. 602-603、2007
- 7) (独) 土木研究所寒地土木研究所水利基盤チーム：湧別資源循環試験施設圃場試験結果報告書、pp. 1-16(2010)
- 8) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 計画「農業用水(畑)」 基準書・技術書、p. 250、1997
- 9) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」 基準書・技術書、p. 144、1998
- 10) 農林水産省農村振興局整備部設計課：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「ポンプ上」、p. 411、2006
- 11) 小菅定雄、山本義弘編著：スラリーかんがい(スラリーゲーション)-その理論と実際-、pp.346~347、pp.384~385、(社)北海道土地改良設計技術協会、1997
- 12) 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)、pp. 34-36、2005
- 13) 大深正徳・石田哲也・横濱充宏・山田 章・桑原 淳：水で希釈した乳牛ふん尿のメタン発酵特性、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所月報、No. 669、pp. 11-17、2009
- 14) 中村和正・宮崎健次・門間 修：牛ふん尿スラリーの管路輸送に関する基礎的実験、開発土木研究所月報、No. 532、pp.12-20、1997

- 15) 農林水産技術会議事務局監修、畑地と水編集委員会編：畑地と水-畑地灌漑技術の進歩、pp.330-331、(社) 畑地農業振興会、1984
- 16) 社団法人畜産技術協会：畜産における温室効果ガスの発生制御（総集編）、pp. 84-155、2002
- 17) 吉田宗史・干場信司・澤本卓治・猫本健司・小川人士・高崎宏寿・鈴木崇司・森田 茂：実規模消化液貯留槽からの環境負荷ガス測定例、2008 年度農業施設学会大会講演要旨集、pp. 7-8、2008
- 18) 農村工学研究所農村総合研究部資源循環システム研究チーム：メタン発酵消化液の施用による土壌からの温室効果ガス発生量、平成 19 年度農村工学研究所研究成果情報、pp. 9-10、2007
- 19) LCA 日本フォーラム：LCA データベース、<https://lcadb.jemai.or.jp/lca/servlet/Default>
- 20) 南齋規介・森口祐一・東野 進：産業関連表による環境負荷原単位データブック、pp. 22, 34-35、2002
- 21) 伊坪徳宏・稲葉 敦：ライフサイクル環境影響評価手法、pp. 84-121、社団法人産業環境管理協会、2005
- 22) Menzi et al.: Ammonia Emissions Following the Application of Solid Manure to Grassland, Gaseous Nitrogen Emissions from Grasslands, CAB International, 265-274, 1997
- 23) 独立行政法人土木研究所・積水化学北海道株式会社：真空式管路システムによる家畜ふん尿の搬送に関する研究報告書、pp. 17-60、2009
- 24) 秀島好昭・石田哲也・横濱充宏・中山博敬・大深正徳：共同利用型バイオガスプラントにおけるガス発生量の特徴と予測、農業農村工学会北海道支部第 57 回研究発表会講演要旨集、pp. 24-32、2008

DEVELOPMENT OF RECYCLING METHOD OF BIOMASS AS FERTILIZER AND