

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(一般勘定)

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（資源保全）

研究担当者：横濱充宏、石田哲也、桑原淳、山田章

【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する共同利用型バイオガスプラントで処理し、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。H18～20年度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、消化液および曝気スラリーの長期施用が土壌理化学性へ及ぼす影響および消化液の長期施用が牧草の収量・品質に及ぼす影響の把握、原料スラリーと消化液のパイプライン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パイプライン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。

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）。

H18～20年度は1)～5)に関連して、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、原料スラリーと消化液のパイプライン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パイプライン搬送する場合の経済性の比較検証を行った。また、バイオガスプラントで生成する消化液の長期施用効果の検証に先立ち、比較検証のため、消化液と類似の性質を持つ曝気スラリーの長期施用圃場において、曝気スラリーの長期施用が土壌理化学性におよぼす影響を検証するとともに、同様に消化液の施用3～7年の施用効果の検証

を行った。また、試験圃場において、消化液の施用1～2年における牧草収量・品質への影響の評価を行った。

更に、H20年度より、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。

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

H18～20年度は、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的性状を整理した。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⁾。更にH20年度には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 $0.054 \text{ kg kg}^{-1}\text{FM}$ であり、メタン発酵細菌は原料中の有機物を分解してメタンガスを発生させることから、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²⁾。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。

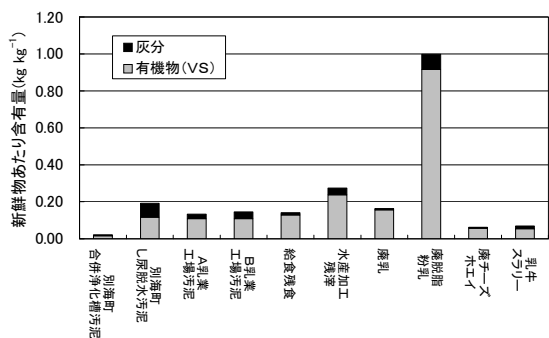


図-1 副資材中の固形分含量

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)。

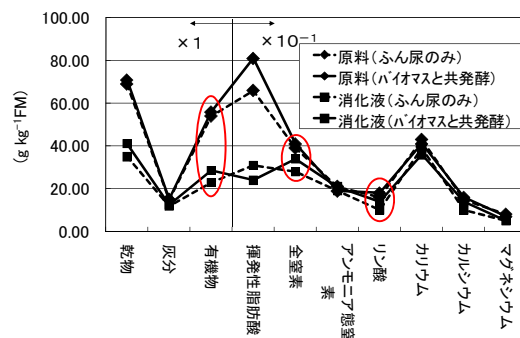


図-2 副資材投入による消化液性状の変化

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)。消化液のような有機質肥料の場合、こ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³⁾、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。

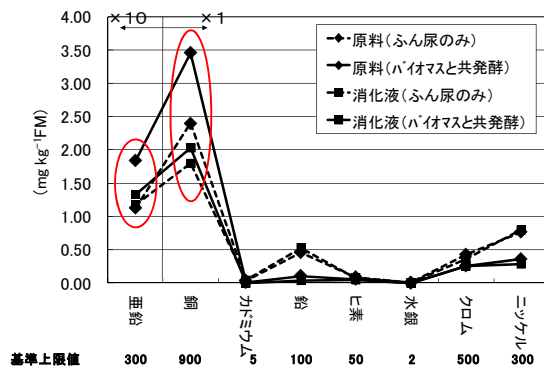


図-3 副資材投入による消化液中の重金属含量の変化

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

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

H18~19年度は、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。

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⁴⁾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お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		15.0
し尿脱水汚泥	100+	130	170.0	弱効果副資材	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、室内ジャーファーメンターを用いて、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)。

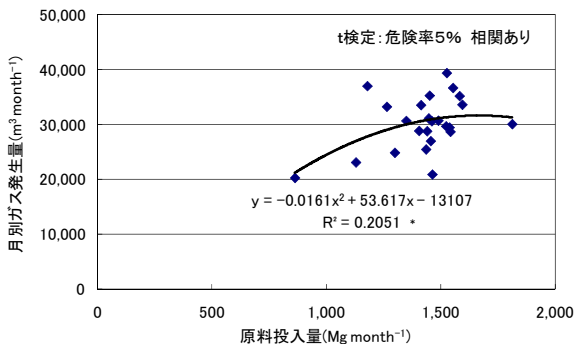


図-4 月別原料投入量とバイオガス発生量の関係

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。

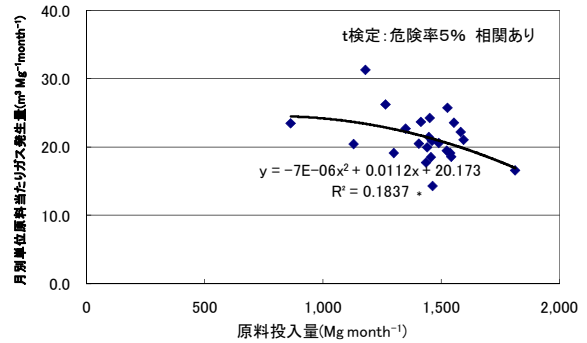


図-5 月別原料投入量と単位原料投入量当たりバイオガス発生量の関係

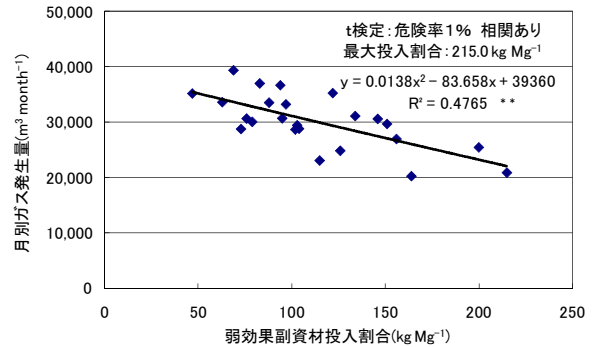


図-6 月別弱効果副資材投入量とバイオガス発生量の関係

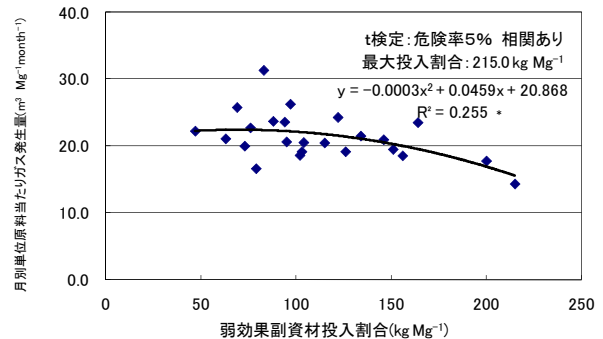


図-7 月別弱効果副資材投入量と単位原料投入量当たりバイオガス発生量の関係

月別全原料投入量に対する弱効果副資材の月別投

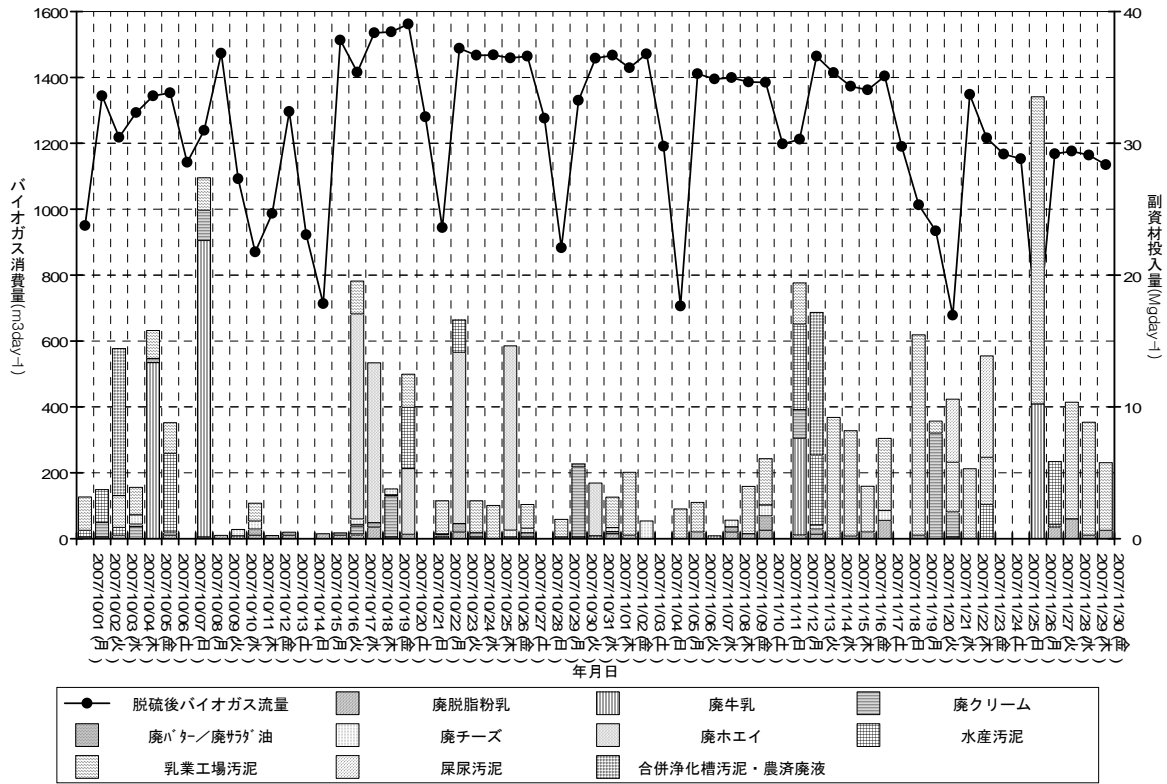


図-8 各種副資材の日別投入量と日別バイオガス発生量

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、今後、検証する必要がある。

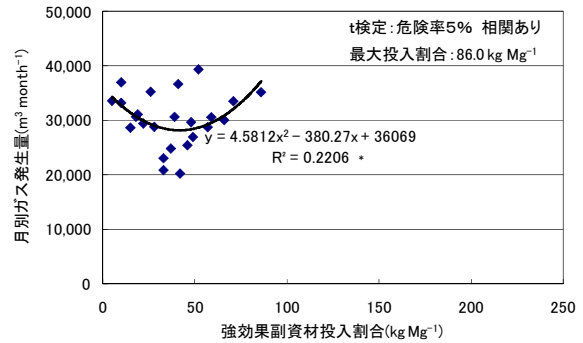


図-9 月別強効果副資材投入量とバイオガス発生量の関係

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80~200 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1~15 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。

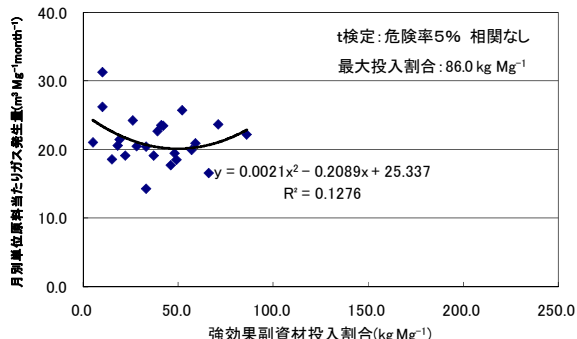


図-10 月別強効果副資材投入量と単位原料投入量当たりバイオガス発生量の関係

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。

平成20年度には、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が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。

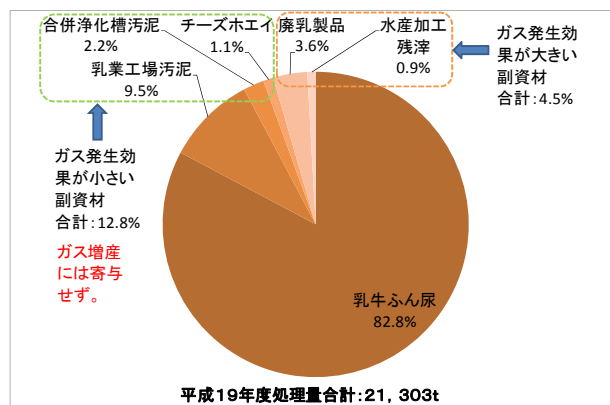


図-11 別海プラントでの各種地域バイオマス処理量(平成19年度)

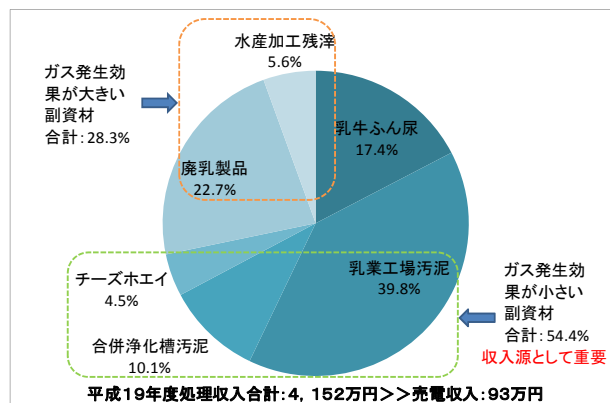


図-12 別海プラントでの各種地域バイオマス処理料金(平成19年度)

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お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

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。

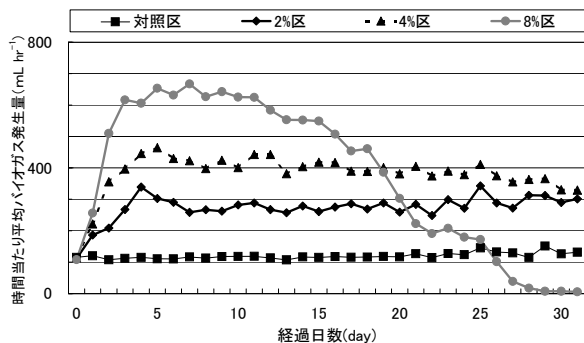


図-13 粗製グリセリン投入割合とバイオガス発生量の関係

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

H18年度は、消化液の長期施用効果の調査に先立ち、比較検証のため、消化液と性質が類似している曝気スラリーの長期施用が草地圃場の土壌理化学性におよぼす影響を検証した¹⁾。H19~20年度は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を検証した。

4.1 調査手法

H18年度の調査では、乳牛ふん尿の曝気処理により生成した曝気スラリーの長期にわたる施用実績があるA町の草地圃場4圃場を選定し、近隣の曝気スラリーの施用実績のない4圃場とともに、1圃場につき6カ所、深さ0~5cmおよび深さ5~10cmの2層から試料採取して分析を行い、曝気スラリー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、曝気スラリー、消化液ともに、施用直後は深さ5cm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、曝気スラリー施用による土壌の変化は作土層のうちでも深さ5cm以下には現れず、深さ0~5cm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5~10cmの分析結果から、曝気スラリー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、曝気スラリー施用による土壌

変化のみを抽出するため、各分析項目について、深さ0~5cmの分析値から深さ5~10cmの分析値を差し引いた値について、曝気スラリー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。

表-4 曝気スラリー施用効果調査圃場の管理履歴

番号	圃場状況	
	更新からの年数	肥培かんがい年数
5	更新後9年	タンカー2年、リールマシン8年
7	更新後11年	タンカー2年、リールマシン8年
11	更新後5年	リールマシン12年
12	更新後16年	リールマシン12年
9		散布なし
10	更新後7年	散布なし
13		散布なし
14		散布なし

選定した圃場の管理履歴を表-4に示す。曝気スラリーの更新時からの施用年数は、5年から12年へのぼり、長期にわたる施用がなされている。

別海町においては、消化液散布を行っていない4圃場、行っている4圃場の計8圃場において、各圃場ともそれぞれ6箇所、深さ0~5cmおよび5~10cmの2層から土壌の物理性、化学性分析のための試料採取を行った。各圃場の管理履歴については、表-5に示す。

表-5 消化液施用効果調査圃場の管理履歴

番号	圃場状況	
	更新後経過年数	消化液散布年数
1	1年	散布なし
2	10年	3年
3	5年	散布なし
4	7年	3年
5	不明	散布なし
6	不明	7年
7	5年	散布なし
8	5年	7年

また、別海資源循環試験施設内の試験圃場に36m²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1m²で9反復ずつ試料採取し、平成19~20年度は収量の試験区差を平成20年度は品質の試験区差を危険率5%のt検定によ

り検証した。

4.2 調査結果

4.2.1 曝気スラリーの施用効果

一般に、腐植物質の増加は、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おり、土壌分析データとしては全炭素×2.274 で計算される腐植含量、全窒素の増加として現れてくる。

図-14、15に腐植含量および全窒素含量の分析結果を示す。なお、ここで言及する図-14~19はいずれもY軸に、各分析項目の1層目（作土層の深さ0~5 cm）の分析値から2層目（作土層の深さ5~10cm）の分析値を差し引いた値を示している。

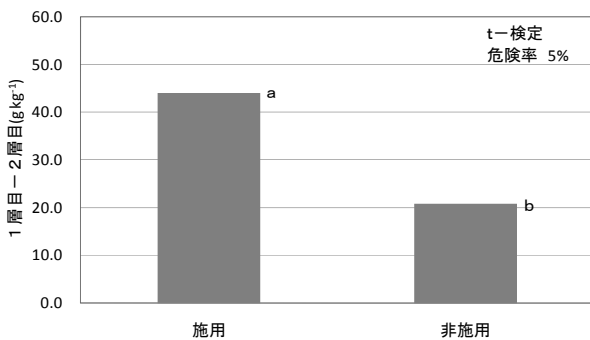


図-14 曝気スラリー施用による腐植の増加

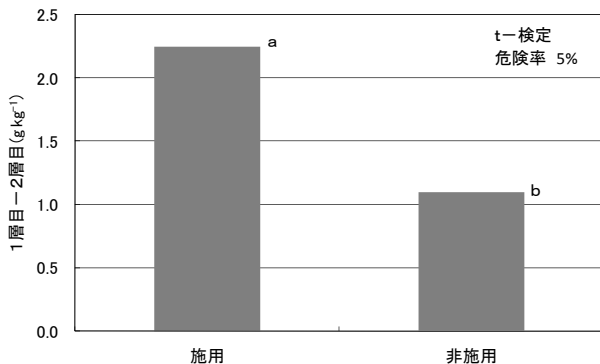


図-15 曝気スラリー施用による全窒素の増加

曝気スラリー非施用圃場では、腐植含量および全窒素含量は、1層目が2層目より平均でそれぞれ 20.9 g kg^{-1} および 1.1 g kg^{-1} 多い程度であったが、施用圃場では、1層目で2層目より平均でそれぞれ 44.1 g kg^{-1} および 2.3 g kg^{-1} 多くなっており、曝気スラリー施用により、作土層の深さ0~5 cmで腐植含量および全窒素の増加が統計的に有意に生じていた（図-14、15）。このように、今回の調査により、曝気スラリーの施用が、曝気スラリーが浸透する作土層の深さ0~5 cm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。

CEC（塩基置換容量）は土壌が陽イオンを保持す

る能力を現しており、保肥力の指標の一つとされる。これが増加すると、作物が養分を吸収利用しやすくなる。曝気スラリー非施用圃場では、1層目が2層目より平均で $0.82 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 多い程度であったが、施用圃場では、1層目で2層目より平均で $3.03 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 多くなっており、曝気スラリー施用により、作土層の深さ0~5 cmでCEC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、曝気スラリーの施用が、曝気スラリーが浸透する作土層の深さ0~5 cmの領域において、土壌の保肥力を増大させることが判明した。

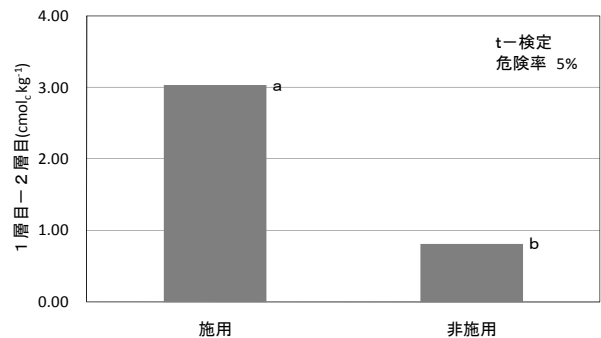


図-16 曝気スラリー施用によるCECの増加

容積重は、曝気スラリー非施用圃場では、1層目が2層目より平均で 0.05 Mg m^{-3} 小さい程度で、1層目と2層目の差異がほとんどなかったが、施用圃場では、1層目で2層目より平均で 0.27 Mg m^{-3} 小さくなっており、曝気スラリー施用により、作土層の深さ0~5 cmで土壌の膨軟化が統計的に有意に生じていた（図-17）。土壌の膨軟化は牧草の根が伸長しやすくなる効果をもたらすため、牧草の生育上望ましい変化であるが、今回の調査により、曝気スラリーの施用が、曝気スラリーが浸透する作土層の深さ0~5 cmの領域において、この土壌の膨軟化をもたらすことが明らかとなった。

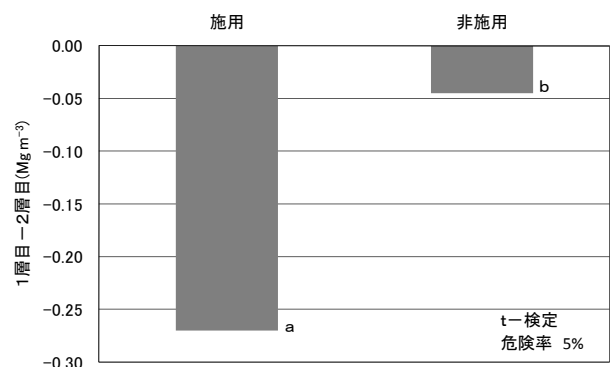


図-17 曝気スラリー施用による容積重の低下

粗孔隙は土壌内の排水性を改善し、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、降雨後に営農機械が圃場内で作業可能になるまでの期間が短縮されるとともに、牧草の根に十分な空気を供給することが可能となる。曝気スラリー非施用圃場では、1層目が2層目より平均で $0.007 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 多い程度で、1層目と2層目の差異がほとんどなかったが、施用圃場では、1層目で2層目より平均で $0.053 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 多くなっており、曝気スラリー施用により、作土層の深さ0~5 cmで粗孔隙の増加が統計的に有意に生じていた(図-18)。今回の調査により、曝気スラリーの施用が、曝気スラリーが浸透する作土層の深さ0~5 cmの領域において、土壌の排水性の改善がなされることがわかった。

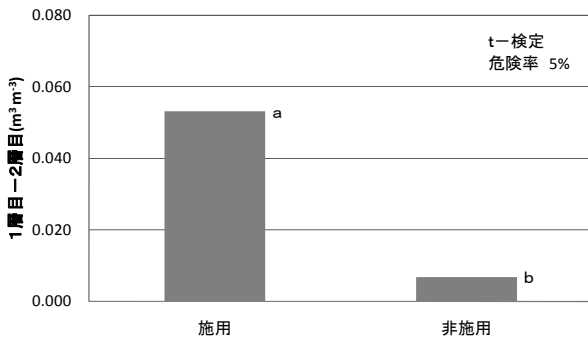


図-18 曝気スラリー施用による粗孔隙の増加

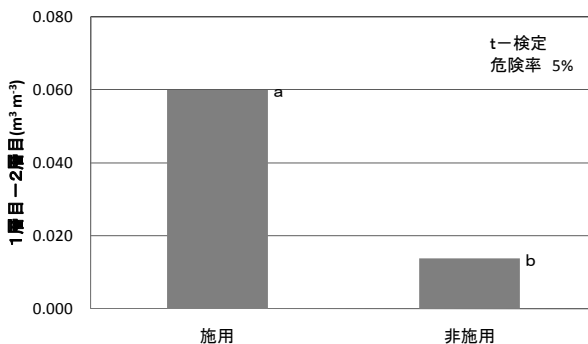


図-19 曝気スラリー施用による易有効水分孔隙の増加

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、干魃害が発生し難くなる。曝気スラリー非施用圃場では、1層目が2層目より平均で $0.014 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 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 $0.060 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 多くなっており、曝気スラリー施用により、作土層の深さ0~5 cm

で易有効水分孔隙の増加が統計的に有意に生じていた(図-19)。今回の調査により、曝気スラリーの施用が、曝気スラリーが浸透する作土層の深さ0~5 cmの領域において、土壌の保水性を増大させることが判明した。

以上のように、本年度の調査により、曝気スラリー施用5~12年目の草地圃場において、曝気スラリーが浸透する深さ0~5 cmの深さにおいて、腐植物質の集積とこれに伴う土壌の膨軟化、排水性、保水性に係わる土壌孔隙の増加および保肥力の増大が認められることを明らかにできた。

4.2.2 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0~5 cmで腐植含量の増加が統計的に有意に生じていた(図-20)。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0~5 cm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。

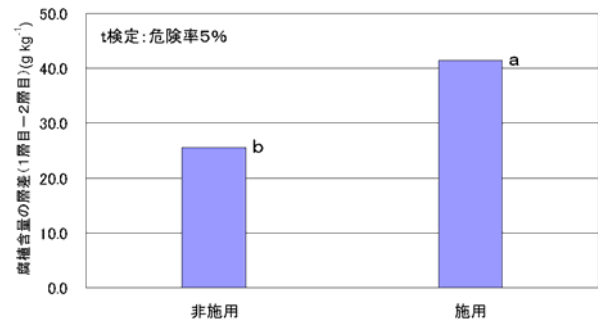


図-20 消化液施用による腐植の増加

図-21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0~5 cmで5~10 cmに比べて殆ど変わらず、深さ0~5 cm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0~5 cmの容積重が5~10 cmの容積重に比べて、 0.27 Mg m^{-3} 程度小さくなっていった。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。

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。

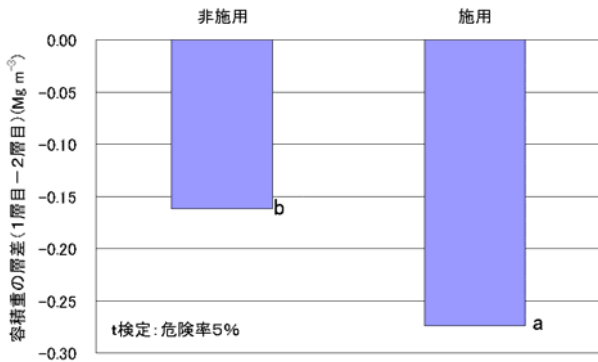


図-21 消化液施用による容積重の低下

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 m³ 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 m³ 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-22)。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。

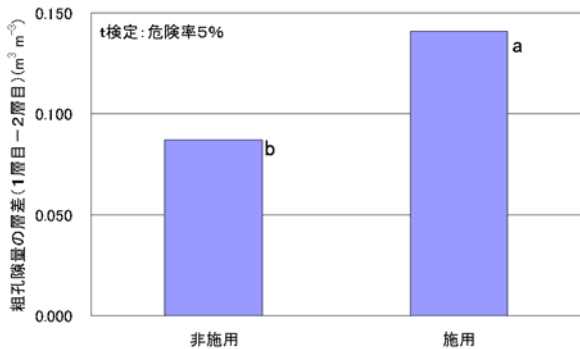


図-22 消化液施用による粗孔隙の増加

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-23)。

易有効水分孔隙の増加が天塩町の曝気スラリー施

用圃場で認められ、別海町の消化液施用圃場で認められない原因は、散布経過年数の違い、土壌の違い、散布液の性状の違い等の面から、今後、解析を進めていく必要がある。

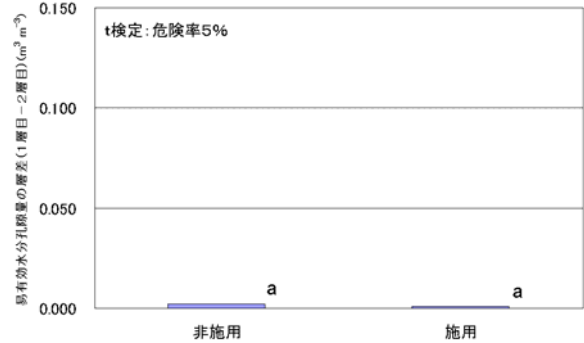


図-23 消化液施用が易有効水分孔隙におよぼす影響

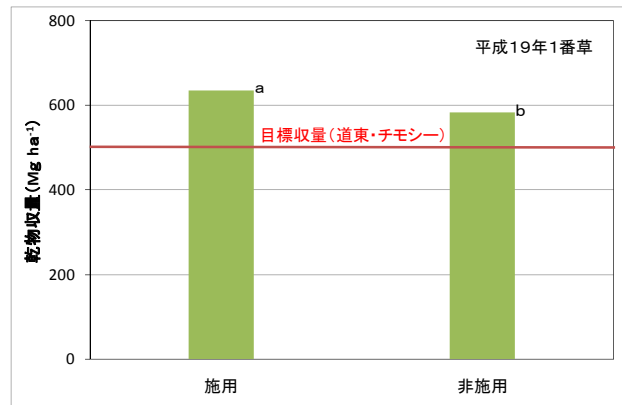


図-24 消化液施用による乾物収量の増加

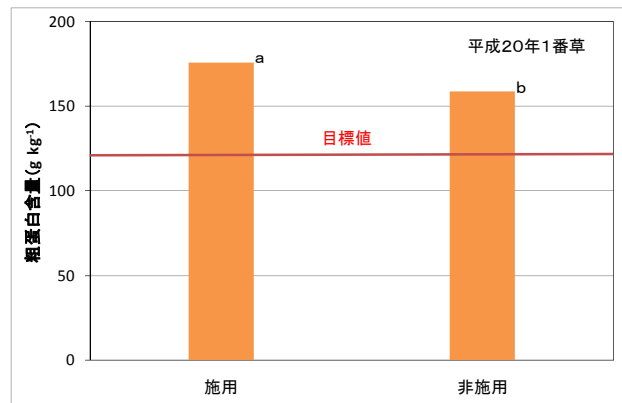


図-25 消化液施用による粗タンパクの増加

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-24)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

区と対照区で有意な収量差が認められなかった。消化液施用がもたらす収量増効果については今後とも試験を継続し、検証を続ける必要がある。

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-25)、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。消化液施用が牧草品質におよぼす影響についても今後とも検証を続けていく。

5. スラリー・消化液の物性把握と効率的搬送手法の解明

H18年度は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、H19年度は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、H20年度は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。

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倍希釈してからパイプラインでプラントまで搬送し、生成した消化液を農家圃場貯留池まで搬送する場合(以下、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))のモデルを作成し、既存知見^{2),6)~11)}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、パイプライン化モデルでは、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。

5.2 調査結果

既報¹²⁾によれば、パイプラインでの損失水頭は、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きている。このこき、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なると証されている。

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⁷⁾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パイプライン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、パイプライン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、パイプライン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 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、 $2,000 \sim 3,000 \text{ mL day}^{-1}$ 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。

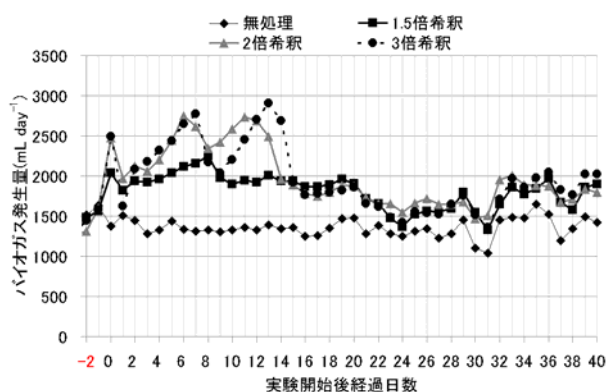


図-26 原料スラリーの希釈によるバイオガス発生量の増加

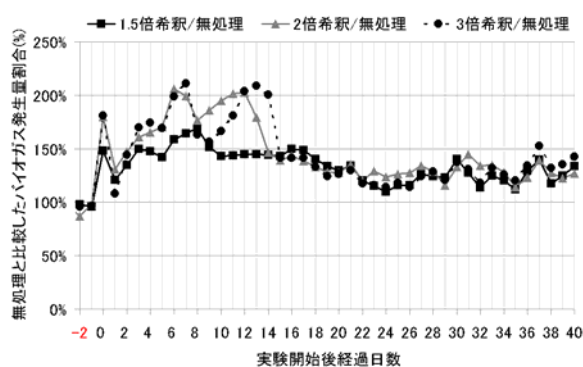


図-27 原料スラリーの希釈によるバイオガス発生量の増加比率

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 $1,360 \text{ mL day}^{-1}$ 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 $90 \sim 100 \text{ g kg}^{-1}$ である⁹⁾。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¹³⁾。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、攪拌が不十分で発酵が不十分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 $\text{TS}=40 \text{ g kg}^{-1}$ 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の下、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 $\text{TS}=4 \text{ g kg}^{-1}$ 程度であるといえよう。

図-28 に運搬車収集方式モデル、パイプライン化モデル (2 倍希釈) およびパイプライン化モデル (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。

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

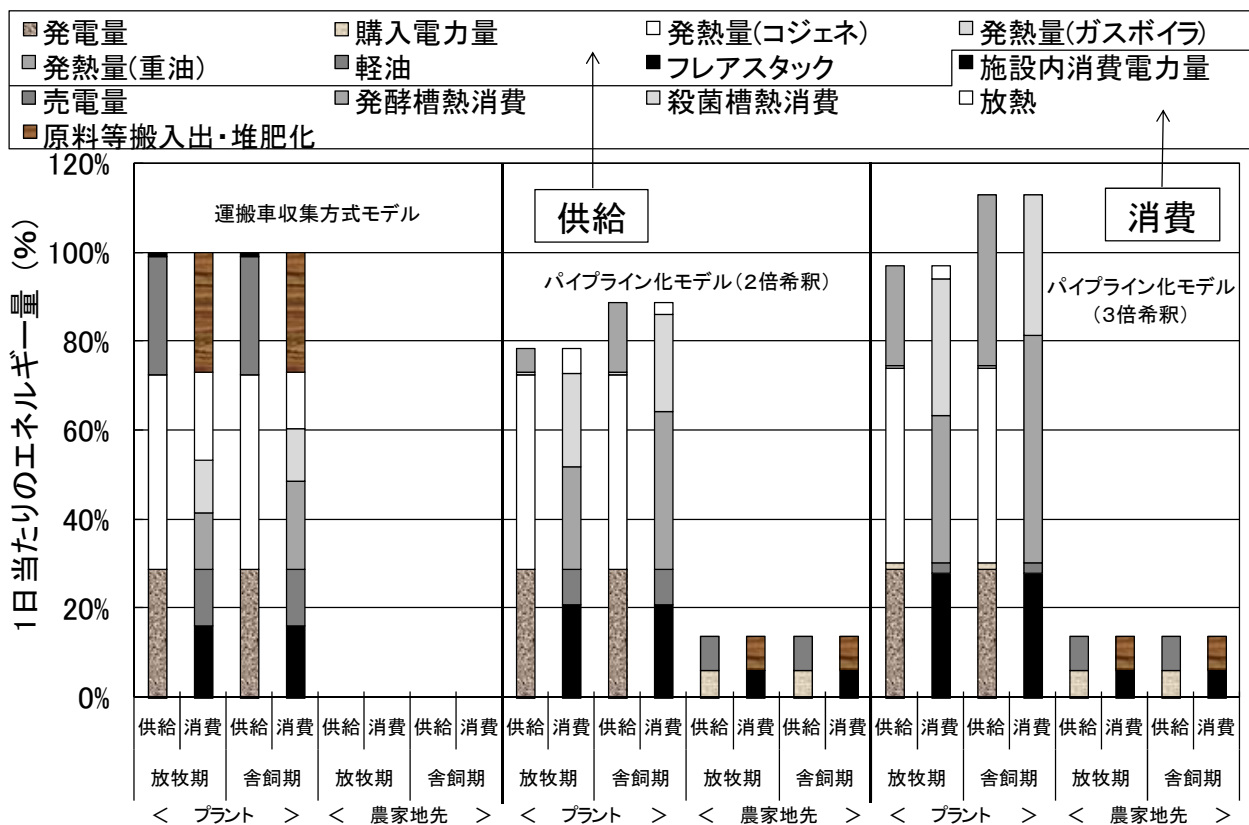


図-28 運搬車収集方式モデル、パイプライン化モデル（2倍希釈）、パイプライン化モデル（3倍希釈）のエネルギー収支

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割合がeの27%にのぼっていたが、パイプライン化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、パイプライン化モデルでは、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に必要なエネルギー割合は、放牧期と舎飼期の平均で、パイプライン化モデル（2倍希釈）でeの98%、パイプライン化モデル（3倍希釈）でeの119%であり、乳牛ふん尿を3

倍希釈してパイプライン搬送すると、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²⁾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%、パイプライン化モデルで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%、パイプライン化モデルでpの73%とパイプライン化モデルで少なかった。パイプライン化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%、パイプライン化モデル（2倍希釈）でpの54%、パイプライン化モデル（3倍希釈）でpの67%であった。プラントの支出がパイプライン化モデル

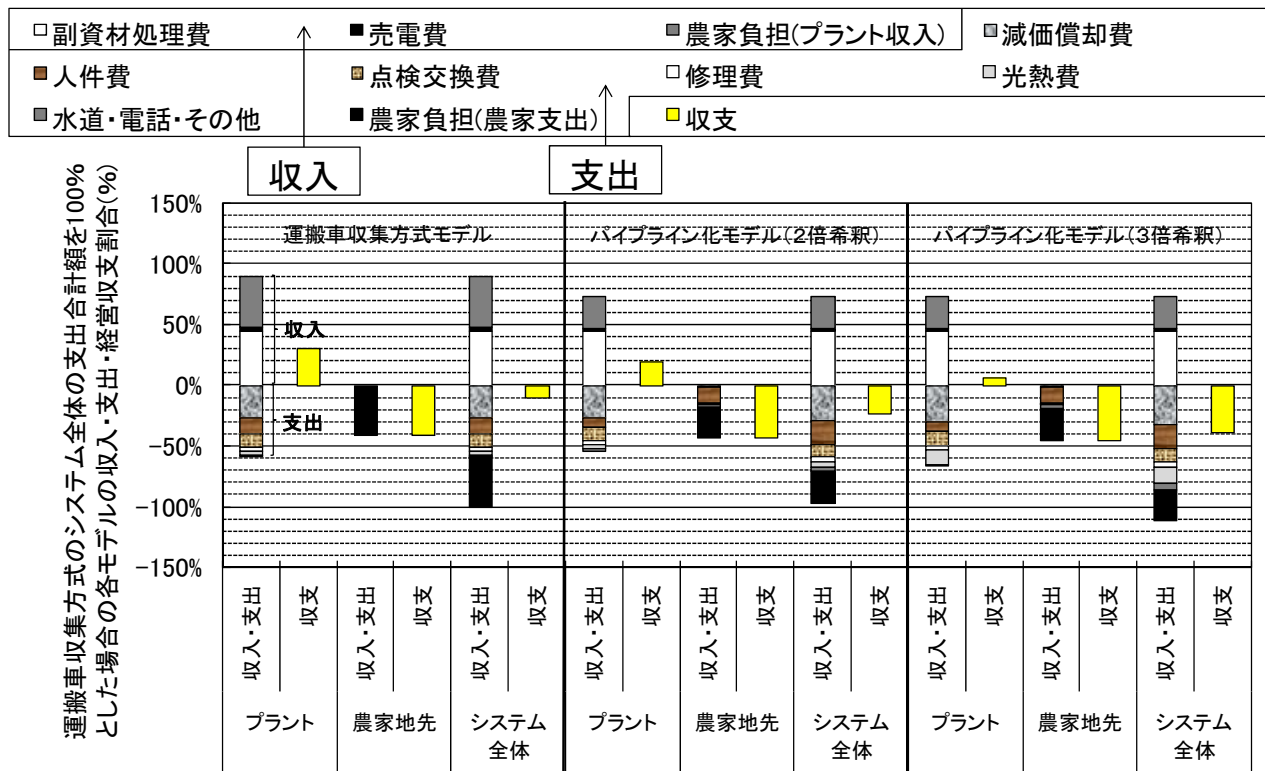


図-29 運搬車収集方式モデル、パイプライン化モデル（2倍希釈）、パイプライン化モデル（3倍希釈）の経営収支

（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、プラントの支出がパイプライン化モデル（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、パイプライン化モデル（2倍希釈）でpの20%のプラス、パイプライン化モデル（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。

5. システムの環境負荷軽減効果の解明

H20年度は、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。

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-6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の単位当たり排出量を既往の文献^{14)~18)}から整理した（表-6）。

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-7）。なお、完成堆肥の量は既往の研究成果¹⁴⁾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

表－6 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 ¹⁴⁾	全窒素1kg当たり11.8g ¹⁴⁾	重機での切返しによる軽油消費1L当たり2.64kg ¹⁸⁾
液状ふん尿・尿溜め液貯留時	有機物1kg当たり9.2g ¹⁴⁾	全窒素1kg当たり11.8g ¹⁴⁾	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 ¹⁵⁾	全窒素1kg当たり0.2g ¹⁵⁾	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 ¹⁶⁾	全窒素1kg当たり0.94g ¹⁴⁾	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 ¹⁶⁾	全窒素1kg当たり2.8g ¹⁴⁾	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 ¹⁶⁾	全窒素1kg当たり2.7g ¹⁶⁾	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 ¹⁷⁾	1kWh当たり0.0021g ¹⁷⁾	1kWh当たり425g ¹⁷⁾
農家－バイオガスプラント間のふん尿類運搬時	0.0g ¹⁸⁾	0.0g ¹⁸⁾	運搬車による軽油消費1L当たり2.64kg ¹⁸⁾
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 ¹⁷⁾	1kg当たり0.05394g ¹⁷⁾	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－7 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			従来処理方式		
	別海プラント導入後			別海プラント導入前		
	処理利用量 (Mg)	有機物含量 (g kg ⁻¹)	全窒素含量 (g kg ⁻¹)	処理利用量 (Mg)	有機物含量 (g kg ⁻¹)	全窒素含量 (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－8 各種貯留槽の形式

	共同利用型バイオガスプラント		従来処理方式
	別海プラント導入後		別海プラント導入前
	プラント	農家地先	農家地先
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

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－8)。この結果に基づき、地球温暖化ガス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発生量の算出は、今年度は施用機械の軽油消

費量が調査未了のため、できなかった。次年度以降に算定したい。

5.2 調査結果

表－9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、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。

表－9 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－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。

これらに各地球温暖化ガスの被害額換算値¹⁹⁾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%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。

7. まとめ

H18～20 年度は、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、バイオガスプラントで生成する消化液の長期施用効果の検証に先立ち、比較検証のため、消化液とよく似た性質を持つ曝気スラリーの長期施用圃場において、曝気スラリーの長期施用が土壌理化学性におよぼす影響を検証した。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、污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し、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が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。

曝気スラリー施用 5～12 年目の草地圃場において、曝気スラリーが浸透する深さ 0～5 cm の深さに

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、保水性に係わる土壌孔隙の増加および保肥力の増大が認められることを明らかにできた。また、消化液施用3～7年目の草地圃場においても、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。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パイプライン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、パイプライン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パイプラインで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。

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。

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) (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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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、

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

- 2008 年度農業施設学会大会講演要旨集、
pp. 7-8、2008
- 16) 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
- 17) LCA 日本フォーラム：LCA データベース、
<https://lcadb.jemai.or.jp/lca/servlet/Default>
- ult
- 18) 南齋規介・森口祐一・東野 進：産業連関表による環境負荷原単位データブック、
pp. 22, 34-35、2002
- 19) 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

DEVELOPMENT OF RECYCLING METHOD OF BIOMASS AS FERTILIZER AND BIOGAS ENERGY AND ELUCIDATION OF EFFECTIVE CONVEYANCE SKILLS FOR BIOMASS AND DIGESTED SLURRY

Abstract :The object of the study is to establish co-fermentation method for recycling cattle slurry and regional biomass and to build up application way of digested slurry as fertilizer. In 2006-2008's fiscal year, we investigated the general characteristics of the regional biomass, the co-fermentation and dilution effects on the characteristics of the digested slurry and the biogas production, the long-term application effects of aerobically or anaerobically digested cattle slurries on the physical and chemical properties of grassland soils, the long-term application effects of anaerobically digested cattle slurry on the grass yield and qualities, the economical feasibility study on application of pipeline transportation system to centralized biogas plant system, and the effect of centralized biogas plant system on greenhouse gas mitigation.

Keywords : centralized biogas plant, biomass, co-substrates, biogas, digested slurry, greenhouse gas