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：資源保全チーム
研究担当者：横濱充宏、大深正徳、石田哲也、今井啓、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。H18～19 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に及ぼす影響の把握および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)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）。

H18～19 年度は 1)～4)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。

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

H18～19 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)]。

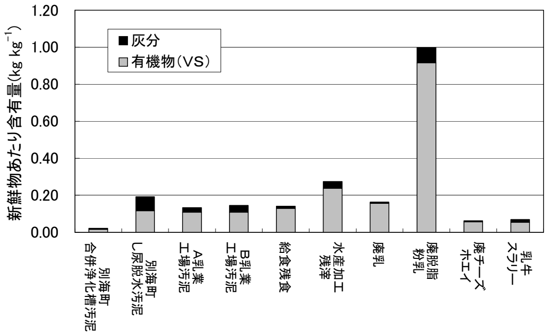
2.1 調査手法

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。

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 kg kg^{-1}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

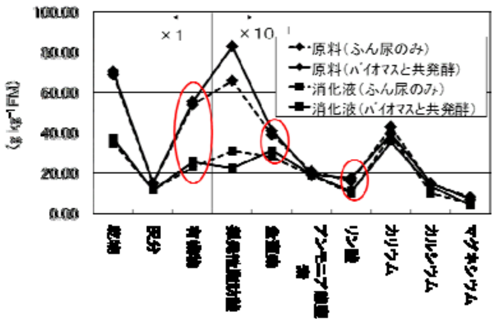
別海プラントにおける投入実績の多い代表的な副資材の有機物構成も調査したが、水産加工残滓と廃脱脂粉乳は蛋白質が多く、大量投入により、アンモニアの発生による発酵障害が発生する可能性が示唆された（表－１）。室内試験の実績（表－３）から、水産加工残滓は全投入原料中の 100 g kg^{-1} 程度、廃脱脂粉乳は同 80 g kg^{-1} までが上限であると予測される。

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

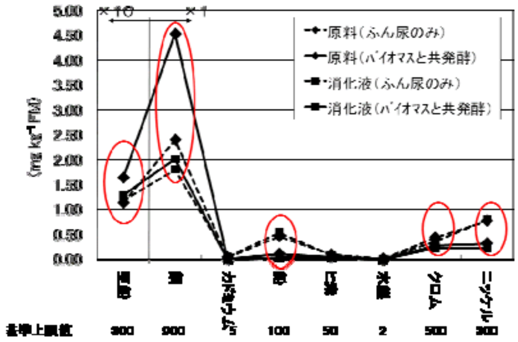
別海プラントでは、バイオガスとともに生成する消化液を肥料として草地圃場に還元しているが、肥料取締法では、汚泥を原料として用いる場合、これらについて溶出試験を行い、安全性を確認することが求められている。溶出試験を行った結果、別海プラントで副資材として利用している汚泥類はいずれも有害物質含量が基準上限値をはるかに下回っており、これらの安全性が確かめられた（表－２）。

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、H19 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 11.7 %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、11.5 %および 11.7 %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 [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－２　副資材投入による消化液性状の変化

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）。



図－３　副資材投入による消化液中の重金属含量の変化

今後も、副資材受け入れによる消化液の品質・安全性の変化についてデータの収集を進め、副資材を原料として用いた消化液の品質と安全性の検証を継続する必要がある。

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

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量および各種副資材投入量がバイオガス発生量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。

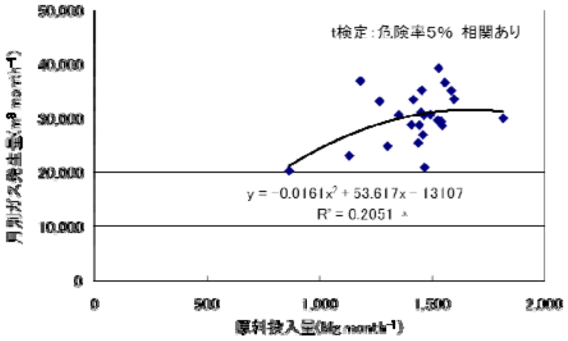
表－３　副資材の有機物含量、バイオガス発生能

[redacted]

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

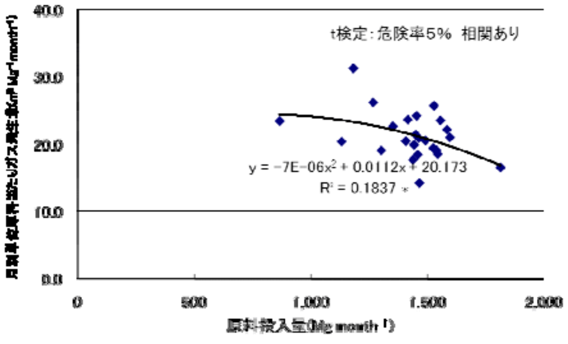
H18～19 年度の月別原料投入量と月別バイオガス発生量の二次相関係数を求め、t 検定で有意性を検証したところ、危険率 5%の正の有意な相関があった（図－4）。一方、同じく、月別原料投入量と月別の単位原料投入量当たりのバイオガス発生量との相関関係を同様に検証したところ、危険率 5%の負の相関があることが明らかとなった（図－5）。



図－4　月別原料投入量とバイオガス発生量の関係

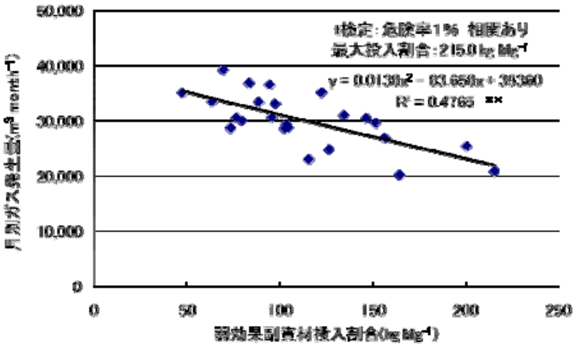
図－4から、別海プラントでは、月別原料投入量が 1,200 Mg month^{-1} 以下になるとバイオガス生産が減少することが分かった。

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。

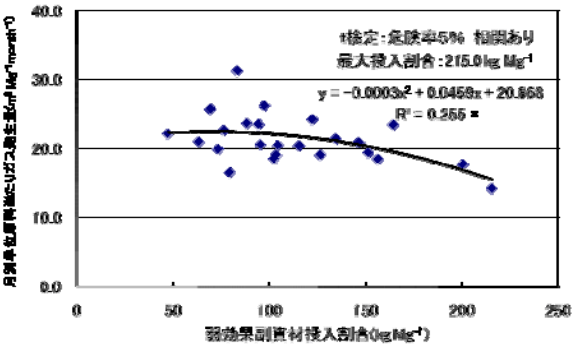


図－5　月別原料投入量と単位原料投入量当たりバイオガス発生量の関係

月別全原料投入量に対する弱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－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。



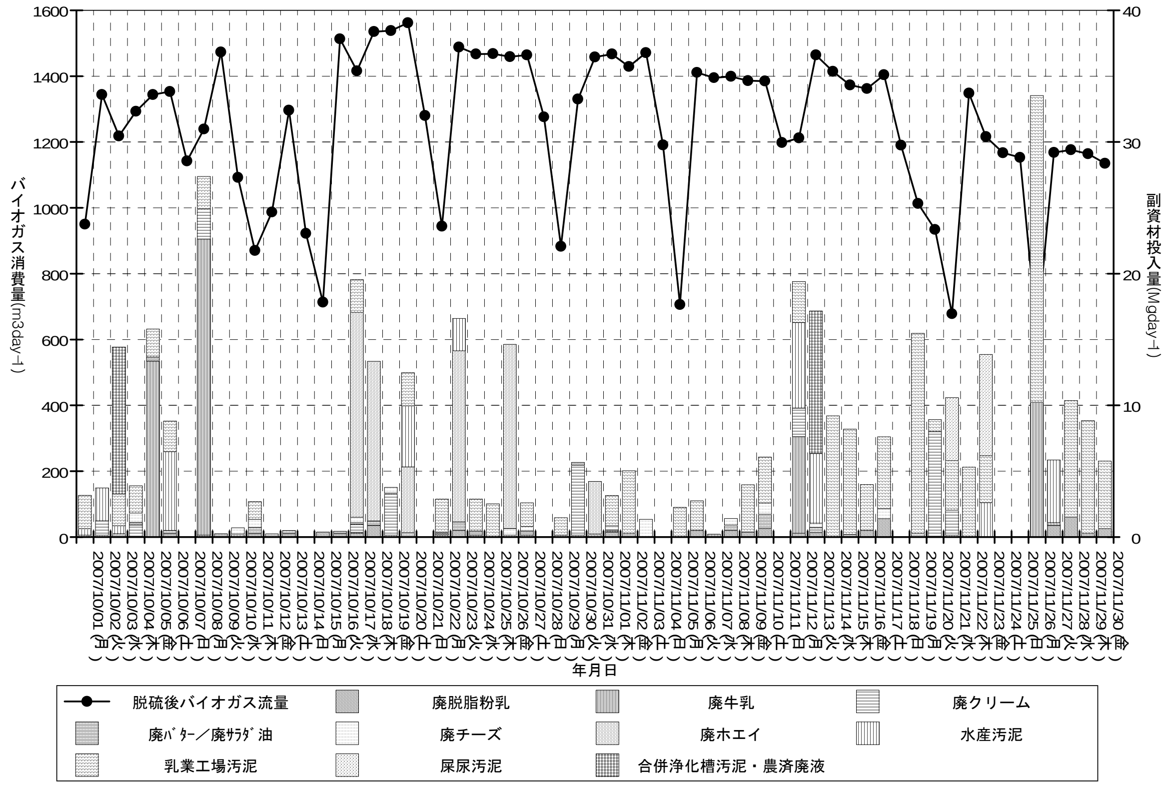
図－6　月別弱効果副資材投入量とバイオガス発生量の関係



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

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。

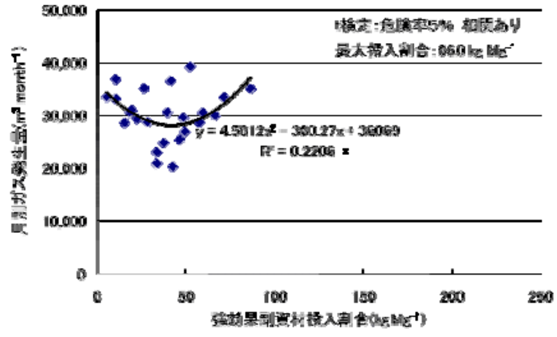
表－3に示すように、室内試験では、単一の弱効果副資材を 100 g kg^{-1} の投入割合で共発酵しても、乳牛ふん尿のみの発酵と同程度のバイオガス発生効率を示していることから、本来ならば、各種の弱効果副資材合計で 150 kg Mg^{-1} 程度の投入割合でバイオガス発生効率の低下が生じるとは考えにくい。図－8に示すように、各種副資材の投入は副資材の発生時期および発生量に応じて、毎日極めて不規則に行われていることから、弱効果副資材の投入割合増加によるバイオガス発生効率の低下は副資材の日当たりの投入量と投入種が不規則であったためと推察さ



図－８　各種副資材の日別投入量と日別バイオガス発生量

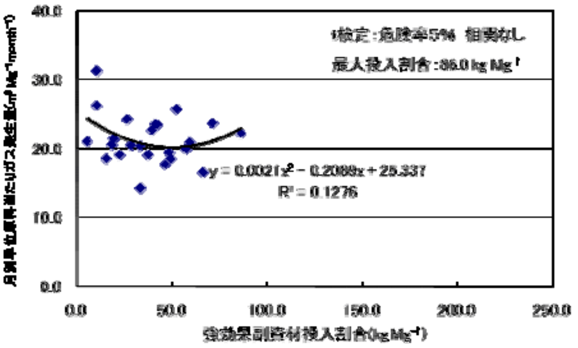
れ、今後、検証する必要がある。

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　月別強効果副資材投入量とバイオガス発生量の関係

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。

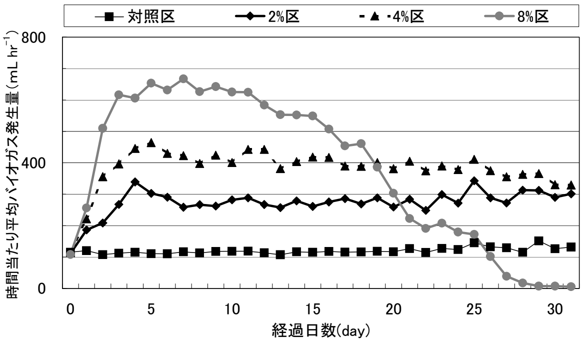


図－10　月別強効果副資材投入量と単位原料投入量当たりバイオガス発生量の関係

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。

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]。



図－11　粗製グリセリン投入割合とバイオガス発生量の関係

その結果、図－11 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。

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 年度は別海プラントで生成する消化液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。

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暴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 0～5 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、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 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、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 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、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 0～5 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、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 年にのぼり、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箇所の深さ 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

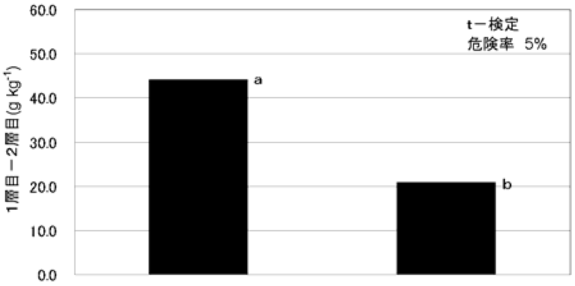
番号	圃場状況	
	更新後経過年数	消化液散布年数
1	1年	散布なし
2	10年	3年
3	5年	散布なし
4	7年	3年
5	不明	散布なし
6	不明	7年
7	5年	散布なし
8	5年	7年

4.2 調査結果

4.2.1 曝気スラリーの施用効果

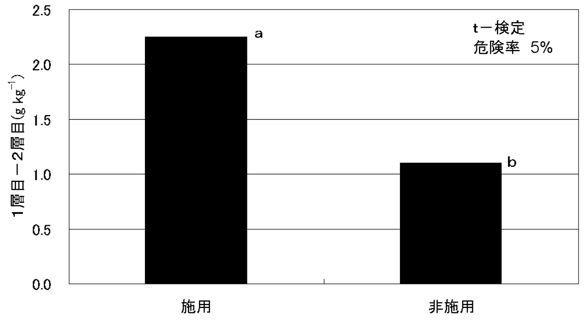
一般に、腐植物質の増加は、保肥力の増加、土壌の膨軟化､孔隙特性の改善に関与するとされており、土壌分析データとしては全炭素×2.274 で計算される腐植含量、全窒素の増加として現れてくる。

図－12､13 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－12～17 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。



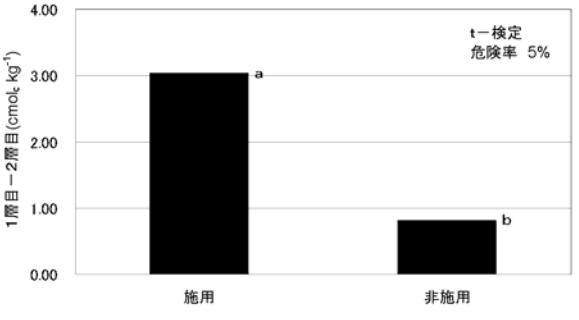
図－12　曝気スラリー施用による腐植の増加

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－12、13）。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。



図－13　曝気スラリー施用による全窒素の増加

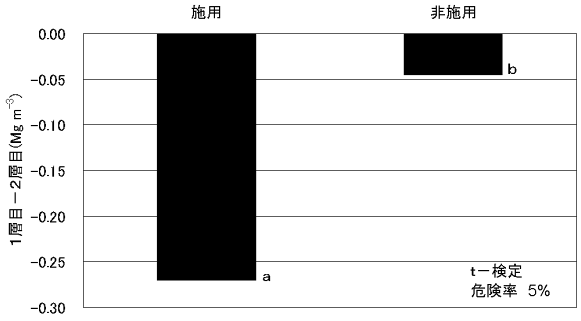
CEC（塩基置換容量）は土壌が陽イオンを保持する能力を現しており､保肥力の指標の一つとされる。これが増加すると、作物が養分を吸収利用しやすくなる。曝気スラリー非施用圃場では、１層目が２層目より平均で 0.82 $cmol_c$ kg^{-1} 多い程度であったが、施用圃場では、１層目で２層目より平均で 3.03 $cmol_c$ kg^{-1} 多くなっており、曝気スラリー施用により､作土層の深さ 0～5 cm で CEC の増加が統計的に有意に生じていた（図－14）。今回の調査により、曝気スラリーの施用が、曝気スラリーが浸透する作土層の深さ 0～5 cm の領域において、土壌の保肥力を増大させることが判明した。



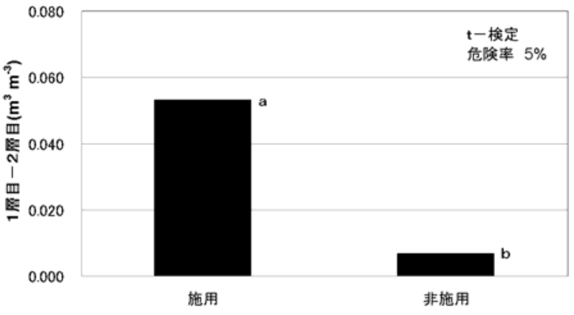
図－14　曝気スラリー施用による CEC の増加

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

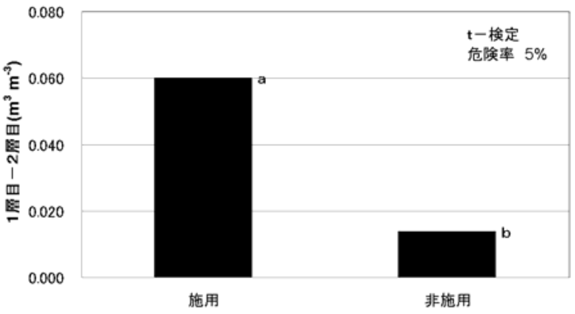
の深さ 0～5 cm で土壌の膨軟化が統計的に有意に生じていた（図－15）。土壌の膨軟化は牧草の根が伸長しやすくなる効果をもたらすため、牧草の生育上望ましい変化であるが、今回の調査により、曝気スラリーの施用が、曝気スラリーが浸透する作土層の深さ 0～5 cm の領域において、この土壌の膨軟化をもたらすことが明らかとなった。



図－15　曝気スラリー施用による容積重の低下



図－16　曝気スラリー施用による粗孔隙の増加



図－17　曝気スラリー施用による易有効水分孔隙の増加

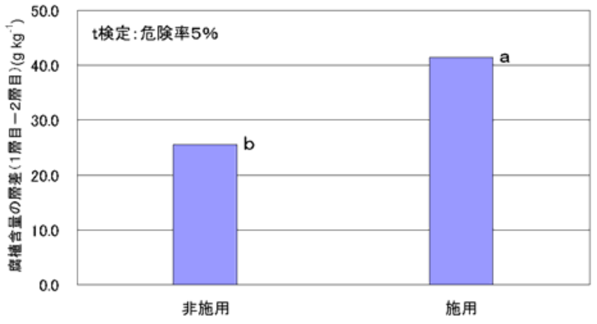
粗孔隙は土壌内の排水性を改善し、余剰水を迅速に排除する働きがあり、この孔隙が増加すると、圃場内の余剰水が迅速に排除され、降雨後に営農機械が圃場内でに作業可能になるまでの期間が短縮されるとともに、牧草の根に十分な空気を供給することが可能となる。曝気スラリー非施用圃場では、１層目が２層目より平均で 0.007 m^3 m^{-3} 多い程度で、１層目と２層目の差異がほとんどなかったが、施用圃場では、１層目で２層目より平均で 0.053 m^3 m^{-3} 多くなっており、曝気スラリー施用により、作土層の深さ 0～5 cm で粗孔隙の増加が統計的に有意に生じていた（図－16）。今回の調査により、曝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、土壌の排水性の改善がなされることがわかった。

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 m^3 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 m^3 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－17）。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

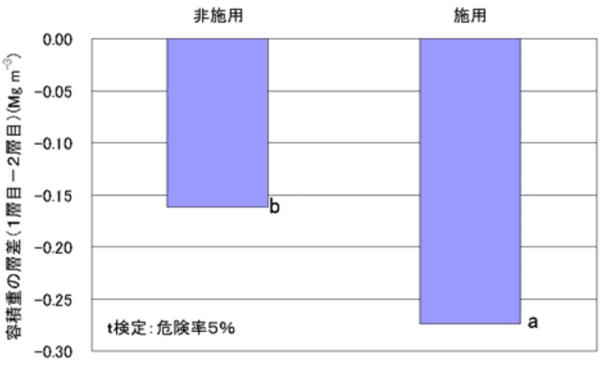
腐植物質の増加は土壌の団粒化を介して保肥力の増加，土壌の膨軟化，孔隙特性の改善に関与するとされている。



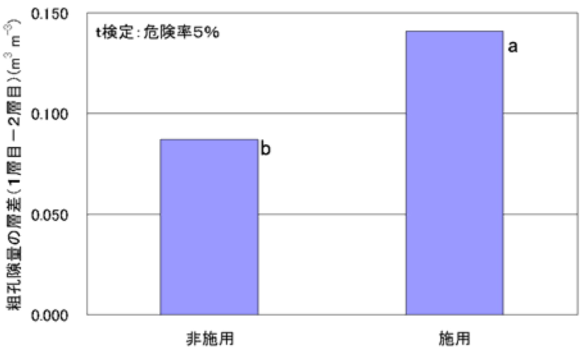
図－18　消化液施用による腐植の増加

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

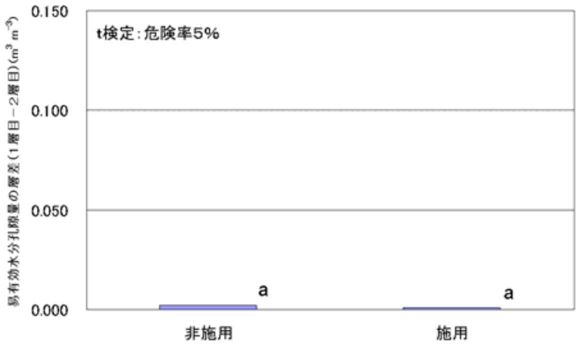
平均で 41.4 g kg^{-1} 多くなっており、消化液施用により、作土層の深さ 0～5cm で腐植含量の増加が統計的に有意に生じていた（図－18）。このように、今回の調査により消化液の施用が、消化液が浸透する作土層の深さ 0～5cm の領域において、腐植物質の増加を生じさせることが明らかとなった。



図－19　消化液施用による容積重の低下



図－20　消化液施用による粗孔隙の増加



図－21　消化液施用が易有効水分孔隙におよぼす影響

図－19 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。

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 m^3 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 m^3 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－20）。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－21）。

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ろう。

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す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。

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のを月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漕から行った。

また、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、ジャーファーメ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。

5.2 調査結果

既報[7]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らかになっている。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。

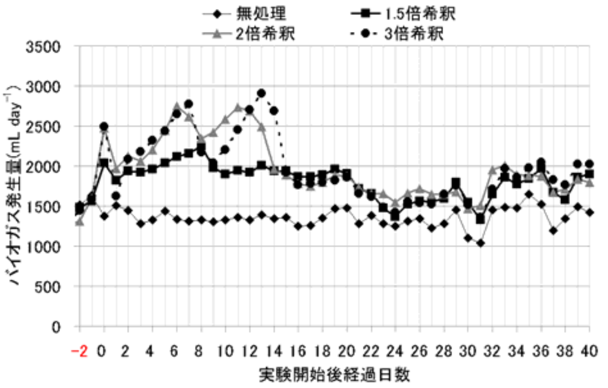
原料がほぼ乳牛ふん尿のみに限られたH16年度以前の原料スラリーの固形分含量は69 g kg^{-1}であり、副資材を積極的に受け入れ始めたH17～18年度の原料スラリーの固形分含量は72 g kg^{-1}であった。調査の結果、副資材の受け入れにより、原料スラリーの固形分含量が増加していることが明らかとなった。これに伴い、消化液の固形分含量もH16年度以前の35 g kg^{-1}から、H17～18年度の39 g kg^{-1}へと増加していた。

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漕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。

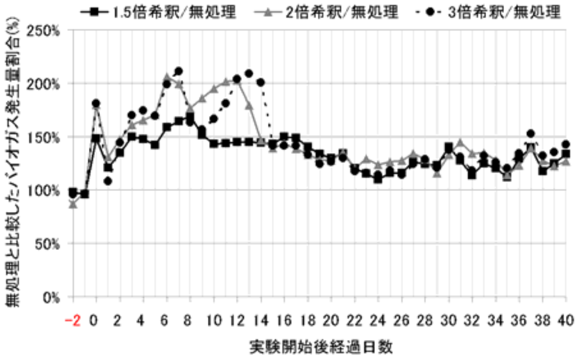
一方、消化液はほぼ原料が乳牛ふん尿に限られたH16年度以前でも、副資材を積極的に受け入れたH17～18年度でも、固形分含量は40 g kg^{-1}を下回っており、パイプラインによる搬送適性があると評価できた。

図－22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－23）。

図－22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。



図－22　原料スラリーの希釈によるバイオガス発生の増加



図－23　原料スラリーの希釈によるバイオガス発生の増加比率

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−22、23)。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 1,360mL 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[8]。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[9]。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、撹拌が足らず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 TS=4 g kg^{-1} 程度であるといえよう。

なお、今回の実験では、投入原料スラリー量、あるいは投入有機物量を同量にするため、発酵液の容量を変えることができた。しかし、現状のバイオガスプラントの活用を想定する場合はメタン発酵槽が既に存在しており、実在するメタン発酵槽への搬送を考えなければならない。すなわち、容積の決まったメタン発酵槽にパイプラインで原料スラリーを運ぶ場合、たとえば原料スラリーを 3 倍希釈するのであれば、投入できる原料スラリー量は希釈しない場合の 3 分の 1 になってしまうように、希釈に伴ってバイオガスの発生量が期待できなくなってしまう。これまでの研究成果でもバイオガスプラントの経済収支やエネルギー収支の成立には厳しい条件を伴うことが指摘されてきた。希釈に伴いバイオガスの発生量が減少してもパイプライン化が可能なのかは改めて経済収支、エネルギー収支の面から検討しなければならないであろう。

6. まとめ

H18〜19 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、消化液中の灰分および有機物の増加をもたらし、それぞれの増加が、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。今後も、副資材受け入れによる消化液の品質・安全性の変化についてデータの収集を進め、副資材を原料として用いた消化液の品質と安全性の検証を継続する必要がある。

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。

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。

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 TS=4 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。

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) 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

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) 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、12-20、1997

7) 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

8) 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

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 2006-2007'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, and the long-term application effects of aerobically or anaerobically digested cattle slurries on the physical and chemical properties of grassland soils.
Keywords：centralized biogas plant, biomass, co-substrates, biogas, digested slurry