

6.4 廃棄物系改質バイオマスの農地等への施用による土壌の生産性改善技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：資源保全チーム

研究担当者：竹内英雄、横濱充宏、小野寺康浩、
中山博敬、桑原淳

【要旨】

本研究では乳牛ふん尿を主体とする廃棄物系改質バイオマスの特徴を明らかにするため、有機物組成等の分析を実施した。また、廃棄物系改質バイオマスを土壌へ施用した場合の土壌生産性改善効果を検証するため、共同利用型バイオガスプラントから採取した原料液および消化液を 8 年間連用している圃場の土壌理化学性を調査した。さらに、有機質肥料を散布した試験区において、温室効果ガス揮散量を測定した。地域で発生する有機性廃棄物の有効利用の検討では、バイオガスプラントの副原料としての利用を想定したシミュレーションを行い、エネルギー収支を求めた。

その結果、廃棄物系改質バイオマスのうち、嫌気発酵消化液の全炭素に占める腐植酸の割合が高く腐植化が進行していた。このため、他の廃棄物系改質バイオマスに比べ、土壌団粒形成にともなう土壌生産性改善能力が高いことが示唆された。また、廃棄物系改質バイオマス中の有機物含有量割合は、乾物率との間に有意な正の相関が認められた。土壌理化学性については、消化液を散布した試験区の表層 1 層目のマクロ団粒のうち、粗粒有機物画分に炭素が集積しており、消化液は土壌団粒化の促進効果が高いと示唆された。温室効果ガス揮散量は、化学肥料区の CO₂ フラックスが他の有機質肥料散布区の CO₂ フラックスより小さい値を示した。エネルギー収支の検討は、副原料の運搬距離が 100km のケースでは、乳業工場汚泥と廃チーズホエイを利用する場合にエネルギー投入産出比が 1 未満となり、その他の副原料では 1 より大きい値を示すことが明らかとなった。また、エネルギー収支を評価指標とし、地域で発生する廃棄物系改質バイオマス量および運搬距離を設定条件とする広域利用モデルを提案した。

キーワード：バイオマス、家畜ふん尿、有機物、土壌理化学性、温室効果ガス、エネルギー収支

1. はじめに

北海道では大規模な農地を生かして、土地利用型農業が展開されている。特に北海道東部および北部では、冷涼な気候に適した草地型酪農が営まれている。これらの地域では、乳牛が排泄したふん尿を適切に処理した後、有機質肥料として牧草地へ散布利用している。ふん尿処理には、堆肥化処理、好気性発酵処理、嫌気性発酵処理などの手法がある。したがって、処理方法によってそれぞれに特徴を持った肥料ができる（本報告では、これらの有機質肥料を廃棄物系改質バイオマスと呼ぶ）。肥料中の有機物は土壌の排水性や保水性などの物理性を改善する土壌団粒の形成に寄与する。すなわち、これらの廃棄物系改質バイオマスは、作物に吸収される肥料としての効果とともに土壌改良資材としての機能を持つ。また、有機質肥料には空気中の二酸化炭素を起源とする炭素が含まれており、農地へ散布したあとにその炭素が土壌中に貯留されれば、地球温暖化防止へ

寄与できる。さらに、嫌気性発酵処理では、地域で発生する有機性廃棄物（水産加工残渣など）を混合して発酵することができる。

しかし、各種廃棄物系改質バイオマスの農地への還元は、農家の土作りとして定着はしているものの、長期間の施用による土壌構造の改善効果の評価事例は少ない¹⁾。また、共同利用型バイオガスプラントは、主原料であるふん尿スラリーの発生する農村地帯に立地しており、有機性廃棄物の発生する食品工場などがバイオガスプラントの近傍に立地しているとは限らず、有機性廃棄物運搬に係るエネルギー消費の評価も重要である。

そこで本研究では、乳牛ふん尿を主体とする廃棄物系改質バイオマスについて、それぞれの有機物組成を明らかにし、その特徴を評価する手法を開発する。その上で、これらの廃棄物系改質バイオマスを農地へ継続して施用した場合の土壌構造などの物理性改善効果を比較検証する。また、地域で発生する

有機性廃棄物を有効利用できるように、農村一都市間の廃棄物系改質バイオマスの広域利用モデルを提案する。

2 廃棄物系改質バイオマス中の有機物組成等の分析

2.1 材料および方法

2.1.1 腐植物質組成および各種肥料成分含量の分析

表1、2に分析に供した廃棄物系改質バイオマスの種類および採取施設を示す。試料は4種類あり、うち2種類は嫌気性発酵施設であるバイオガスプラントにおける発酵前の液体（以下、原料液と表記）および発酵後の液体（以下、消化液と表記）である。また、残りの2種類は、肥培かんがい施設における好気性発酵前の液体（以下、原料液と表記）および好気性発酵後の液体（以下、曝気処理液と表記）である。各試料は、ポリエチレン製広口瓶に約1L採取した後、速やかに分析に供した。

表3に分析項目および分析方法を示す。一般性状としてpH(H₂O)、乾物率、強熱減量を、肥料成分としてアンモニア態窒素、硝酸態窒素、全窒素、全リン、カルシウム、マグネシウム、カリウムを分析した。また、有機物は全炭素、腐植酸、フルボ酸を分析した。さらに、試料中に含まれる固形分の大きさを把握するため、粒径組成を分析した。

表1 廃棄物系改質バイオマスの種類 (H23)

試料番号	種類	採取施設
①	嫌気発酵前 原料液B	共同利用型バイオガスプラントB
②	嫌気発酵後 消化液B	共同利用型バイオガスプラントB
③	嫌気発酵前 原料液C	共同利用型バイオガスプラントC
④	嫌気発酵後 消化液C	共同利用型バイオガスプラントC
⑤	嫌気発酵後 消化液A	個別型バイオガスプラントA
⑥	好気発酵後 曝気処理液D	肥培かんがい施設D

表2 廃棄物系改質バイオマスの種類 (H25,26)

試料番号	種類	採取施設
⑦	嫌気発酵前 原料液A	個別型バイオガスプラントA
⑧	嫌気発酵後 消化液A	個別型バイオガスプラントA
⑨	嫌気発酵前 原料液B	共同利用型バイオガスプラントB
⑩	嫌気発酵後 消化液B	共同利用型バイオガスプラントB
⑪	嫌気発酵前 原料液C	共同利用型バイオガスプラントC
⑫	嫌気発酵後 消化液C	共同利用型バイオガスプラントC
⑬	好気発酵前 原料液E	肥培かんがい施設E
⑭	好気発酵後 曝気処理液E	肥培かんがい施設E

表3 分析項目および分析方法

分析項目	分析方法
一般性状	
pH(H ₂ O)	ガラス電極法 ^{*)}
乾物率	105°C通風乾燥
強熱減量	550°C電気炉灼熱 ^{*)}
肥料成分	
アンモニア態窒素	水蒸気蒸留法
硝酸態窒素	水蒸気蒸留法 ^{*)}
全窒素	ケルダール分解・水蒸気蒸留法
全リン	比色法(バナドモリブデン酸法)
カルシウム	湿式灰化处理・原子吸光定量
マグネシウム	湿式灰化处理・原子吸光定量
カリウム	湿式灰化处理・原子吸光定量
有機物	
全炭素	チューリン法
腐植酸	アルカリ抽出・酸添加
フルボ酸	アルカリ抽出・酸添加
粒径組成	水中篩別法

^{*)} H23年度のみ分析

2.1.2 易分解性有機物および難分解性有機物含量の分析

表4~6に分析に供した廃棄物系改質バイオマスの種類および採取施設を示す。試料中の有機物量の分析は、家畜ふん堆肥中有機物の評価法として広く用いられている²⁾ デタージェント分析法³⁾により、酸性デタージェント繊維(ADFom)を求めた。また、供試試料を600°Cで2時間灰化し、その残りを粗灰分として求めた。易分解性有機物量および難分解性有機物量は、小柳ら⁴⁾の評価方法に従い、(1)および(2)式により求めた。

易分解性有機物

$$= \text{分析試料乾物} - \text{ADFom} - \text{粗灰分} \quad \dots (1)$$

$$\text{難分解性有機物} = \text{ADFom} \quad \dots (2)$$

表4 分析に供した廃棄物系改質バイオマスの種類 (H24)

試料番号	種類	採取施設
(1)	嫌気発酵前 原料液A	個別型バイオガスプラントA
(2)	嫌気発酵後 消化液A	個別型バイオガスプラントA
(3)	嫌気発酵後 消化液B	共同利用型バイオガスプラントB
(4)	嫌気発酵後 消化液C	共同利用型バイオガスプラントC
(5)	好気発酵後 曝気処理液D	肥培かんがい施設D
(6)	堆肥	共同利用型バイオガスプラントB

表5 分析に供した廃棄物系改質バイオマスの種類 (H25)

試料番号	種類	採取施設
(7)	嫌気発酵前 原料液A	個別型バイオガスプラントA
(8)	嫌気発酵後 消化液A	個別型バイオガスプラントA
(9)	嫌気発酵前 原料液B	共同利用型バイオガスプラントB
(10)	嫌気発酵後 消化液B	共同利用型バイオガスプラントB
(11)	嫌気発酵前 原料液C	共同利用型バイオガスプラントC
(12)	嫌気発酵後 消化液C	共同利用型バイオガスプラントC
(13)	好気発酵前 原料液E	肥培かんがい施設E
(14)	好気発酵後 曝気処理液E	肥培かんがい施設E
(15)	好気発酵後 曝気処理液F	肥培かんがい施設F
(16)	好気発酵後 曝気処理液G	肥培かんがい施設G
(17)	好気発酵後 曝気処理液H	肥培かんがい施設H
(18)	好気発酵後 曝気処理液I	肥培かんがい施設I
(19)	好気発酵後 曝気処理液J	肥培かんがい施設J

表6 分析に供した廃棄物系改質バイオマスの種類 (H26)

試料番号	種類	採取施設
(20)	嫌気発酵前 原料液A	個別型バイオガスプラントA
(21)	嫌気発酵後 消化液A	個別型バイオガスプラントA
(22)	嫌気発酵前 原料液B	共同利用型バイオガスプラントB
(23)	嫌気発酵後 消化液B	共同利用型バイオガスプラントB
(24)	嫌気発酵前 原料液C	共同利用型バイオガスプラントC
(25)	嫌気発酵後 消化液C	共同利用型バイオガスプラントC
(26)	好気発酵前 原料液E	肥培かんがい施設E
(27)	好気発酵後 曝気処理液E	肥培かんがい施設E
(28)	好気発酵前 原料液F	肥培かんがい施設F
(29)	好気発酵後 曝気処理液F	肥培かんがい施設F
(30)	好気発酵前 原料液G	肥培かんがい施設G
(31)	好気発酵後 曝気処理液G	肥培かんがい施設G
(32)	好気発酵前 原料液J	肥培かんがい施設J
(33)	好気発酵後 曝気処理液J	肥培かんがい施設J
(34)	好気発酵前 原料液L	肥培かんがい施設L
(35)	好気発酵後 曝気処理液L	肥培かんがい施設L

2.2 結果および考察

2.2.1 腐植物質組成および各種肥料成分含量

表7に一般性状分析結果を示す。pH (H₂O) についてみると、共同利用型バイオガスプラントで採取した消化液Bおよび消化液Cは、それぞれ原料液Bおよび原料液Cと比較して高い値を示した。一般的にバイオガスプラントの消化液は、発酵前の原料液と比較してpH (H₂O)が高くなる⁵⁾ことが明らかとなっており、今回の分析結果も同様の結果を示した。

乾物率では、消化液Bおよび消化液Cは原料液Bおよび原料液Cと比較して小さい値を示した。嫌気性発酵の過程で有機物が分解されることで乾物率が小さくなると言われており⁵⁾、今回の分析結果も同様の傾向を示した。また、消化液Aは消化液B、消化液Cよりさらに小さな値を示した。今回、消化液Aを採取した貯留槽では採取前に十分な攪拌を行うことができなかつたため、粗大有機物が貯留槽底部に沈殿したままとなり、採取した消化液の乾物率が小さな値となった可能性がある。また、この貯留槽は搾乳施設からの洗浄水の一部が混入する構造と

なっており、洗浄水による消化液の希釈の影響が考えられる。曝気処理液Dについては、バイオガスプラント原料液と同程度の乾物が含まれていた。強熱減量については乾物率と同様の傾向を示した。

表8に肥料成分分析結果を示す。共同利用型バイオガスプラントで採取した原料液Bと消化液Bおよび原料液Cと消化液Cを比較すると、消化液中のアンモニア態窒素が増加している。バイオガスプラントの消化液中のアンモニア態窒素は、原料液と比較して増加するといわれている⁵⁾。また、他のプラントでの分析結果⁶⁾でも同様の傾向を示している。全窒素、全リン、カルシウム、マグネシウム、カリウムは、既往の文献では⁶⁾原料液と消化液で変化がないと述べられている。しかしながら今回の分析結果では、原料液と消化液で差がみられた。曝気処理液Dは、他の肥培かんがい施設での分析結果¹⁾と同様の値であった。

表7 一般性状分析結果 (H23)

分析項目	単位	原料液B	消化液B	原料液C	消化液C	消化液A	曝気処理液D
pH(H ₂ O)	—	6.62	7.17	6.70	7.56	7.38	7.06
乾物率	%	7.79	4.84	8.26	5.99	2.15	8.03
強熱減量	%	6.47	3.69	6.86	4.46	1.35	6.56

表8 肥料成分分析結果 (H23)

分析項目	単位	原料液B	消化液B	原料液C	消化液C	消化液A	曝気処理液D
アンモニア態窒素	mg・L ⁻¹	1550	2120	2240	2880	1200	1740
硝酸態窒素	mg・L ⁻¹	ND	ND	ND	ND	ND	ND
全窒素	mg・L ⁻¹	3325	3730	4265	4495	2080	3525
全リン	mg・L ⁻¹	1580	1640	1490	1600	1090	1380
カルシウム	mg・L ⁻¹	2190	2390	1450	1480	1200	1880
マグネシウム	mg・L ⁻¹	758	717	707	763	453	657
カリウム	mg・L ⁻¹	3320	3490	4000	4260	2440	2700

(注)硝酸態窒素のNDは検出限界以下を示す。
硝酸態窒素の検出限界値は5mg・L⁻¹。

表9 有機物分析結果 (H23)

分析項目	単位	原料液B	消化液B	原料液C	消化液C	消化液A	曝気処理液D
全炭素	g・L ⁻¹	37.4	25.5	41.1	23.6	10.2	38.0
腐植酸	g・L ⁻¹	3.83	4.26	4.11	4.43	1.81	4.88
フルボ酸	g・L ⁻¹	8.18	2.72	9.33	2.13	0.93	6.48
全炭素に占める腐植酸の割合	%	10.2	16.7	10.0	18.8	17.8	12.8

表9にH23年度試料の有機物分析結果を示す。全炭素では、消化液Bおよび消化液Cは原料液Bおよび原料液Cより小さい値を示した。嫌気性発酵では、嫌気性細菌による有機物の分解によって乾物含量が減少する⁵⁾ことが明らかとなっており、今回の結果も同様の傾向を示した。消化液Aも全炭素が少ない。これは、嫌気性発酵による有機物の分解のほか、希釈による影響も作用していると考えられる。

腐植酸については消化液Bおよび消化液Cで原料液より増加し、フルボ酸については減少した。これは、発酵過程においてフルボ酸が微生物の分解を受け、その一部が腐植酸に変化したためと考えられる⁷⁾。全炭素に占める腐植酸の割合は、消化液Bおよび消化液Cでは他の廃棄物系改質バイオマスより大きい結果となった。

表10、11にH25、26年度試料の分析結果を示す。全炭素およびフルボ酸は、H23年度試料の結果と同様に、原料液より消化液または曝気処理液のほうが小さい値を示した。腐植酸は、H23年度の結果とは異なり、原料液より消化液または曝気処理液のほうが小さい値を示した。これは、H25年度の消化液および曝気処理液の乾物率が、H23年度と比べて小さくなっていることが要因と考えられる。そこで、全炭素に占める腐植酸の割合を図1に示す。H23年度と同様に、原料液より消化液または曝気処理液の方が高い値を示した(H26年度夏採取のBとEを除く)。腐植酸はフルボ酸より腐植化度が高い⁸⁾。また腐植化度の高い腐植物質は土壌の理化学性の改善に關与する物質とされている⁸⁾。すなわち、土壌へ施用される全炭素が同じ場合には、消化液および曝気処理液は他の廃棄物系改質バイオマスと比較して、土壌生産性改善効果が高いと考えられる。

図2にH23年度試料中に含まれる固形物の粒径組成を示す。共同利用型バイオガスプラントBから採取した原料液Bと消化液Bでは、消化液Bの粗大画分(500 μ m以上)の割合が小さかった。しかし、共同利用型バイオガスプラントCから採取した原料液Cと消化液Cでは、粗大画分に大きな差は認められなかった。

表10 有機物分析結果 (H25)

分析項目	採取時期	単位	原料液		消化液		原料液		消化液		曝気処理液E
			A	A	B	B	C	C	E		
全炭素	春	$g \cdot L^{-1}$	32.5	9.1	32.3	23.6	42.3	9.9	40.5	3.4	
	夏		23.2	6.0	36.0	18.2	37.7	17.8	32.3	5.6	
腐植酸	春	$g \cdot L^{-1}$	4.33	2.18	5.55	4.66	5.86	1.73	6.87	1.44	
	夏		4.78	1.56	6.54	4.50	4.07	4.26	6.20	2.31	
フルボ酸	春	$g \cdot L^{-1}$	6.10	1.39	7.69	2.32	7.10	1.47	6.81	0.73	
	夏		5.55	0.92	12.97	2.65	8.85	1.71	5.75	1.02	
乾物率	春	%	6.84	2.57	7.94	4.48	10.01	3.19	9.74	1.14	
	夏		7.89	1.60	9.85	5.13	10.81	4.39	7.72	1.69	

表11 有機物分析結果 (H26)

分析項目	採取時期	単位	原料液		消化液		原料液		消化液		曝気処理液E
			A	A	B	B	C	C	E		
全炭素	春	$g \cdot L^{-1}$	17.5	10.9	31.7	17.7	23.5	11.9	35.4	7.95	
	夏		31.4	16.2	22.0	13.9	44.3	17.1	14.0	11.6	
腐植酸	春	$g \cdot L^{-1}$	2.76	2.03	4.62	3.52	4.53	2.85	4.35	2.76	
	夏		3.98	2.18	4.26	2.63	4.38	3.73	2.89	2.26	
フルボ酸	春	$g \cdot L^{-1}$	5.75	2.52	5.68	1.60	4.86	1.15	5.51	1.85	
	夏		4.75	2.31	5.49	1.88	6.84	1.81	4.09	2.02	
乾物率	春	%	7.70	2.65	7.50	4.46	7.94	2.63	7.12	0.86	
	夏		8.26	4.14	6.10	5.14	9.98	5.67	3.42	1.27	

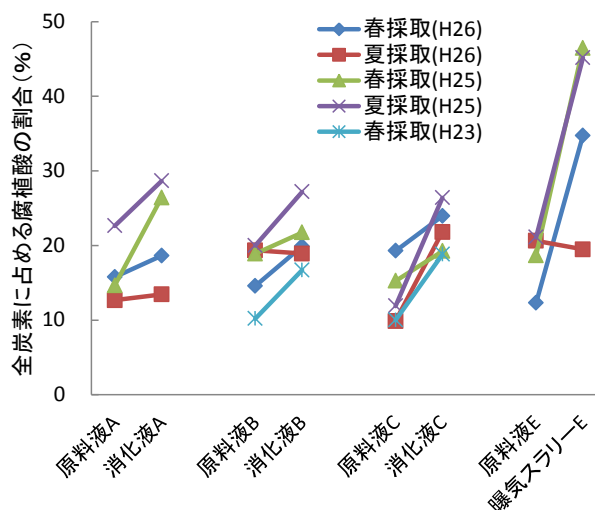


図1 全炭素に占める腐植酸の割合

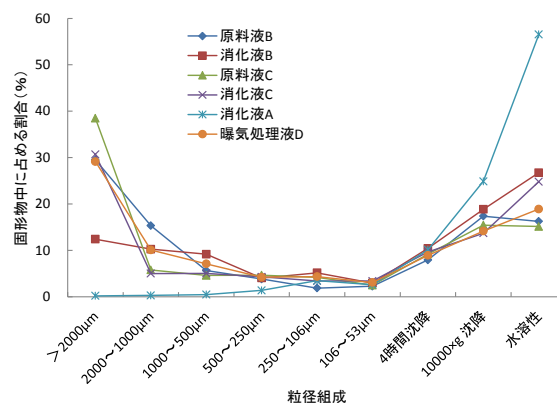


図2 試料中に含まれる固形物の粒径組成(H23)

図3~6に、H25年度試料中に含まれる固形物の粒径組成を示す。いずれの消化液および曝気処理液も、原料液と比較して粗大画分の割合が小さかった。消化液の粗大画分の割合は原料液より小さい⁹⁾といわれており、今回の結果はそれと同様であった。これ

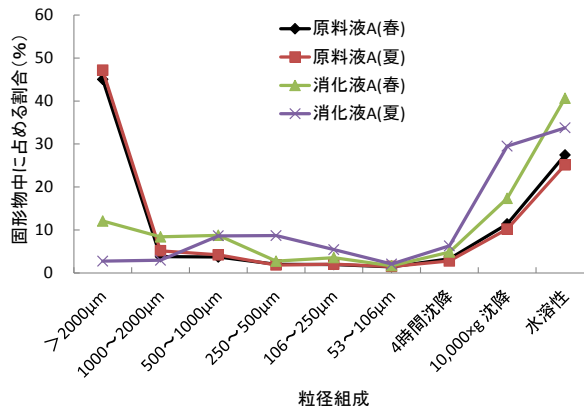


図3 プラントA 試料中の粒径組成(H25)

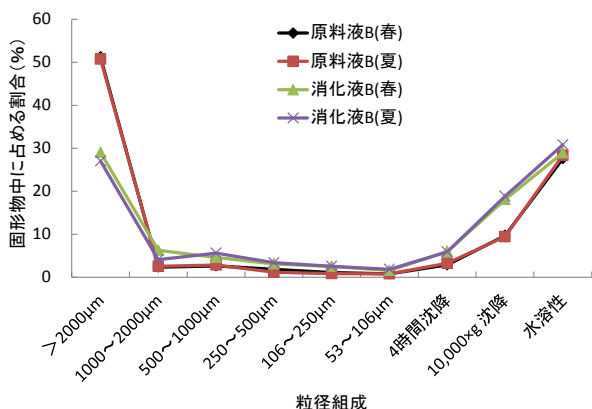


図4 プラント B 試料中の粒径組成(H25)

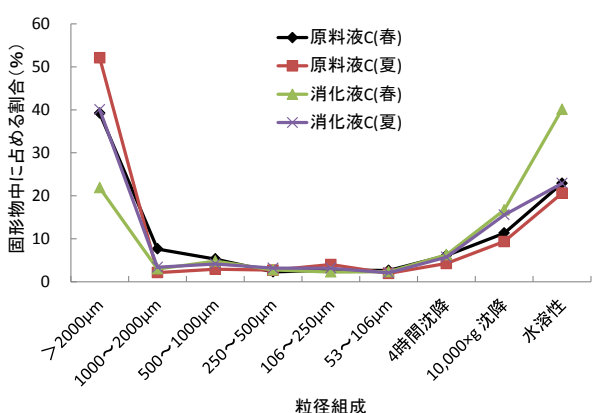


図5 プラント C 試料中の粒径組成(H25)

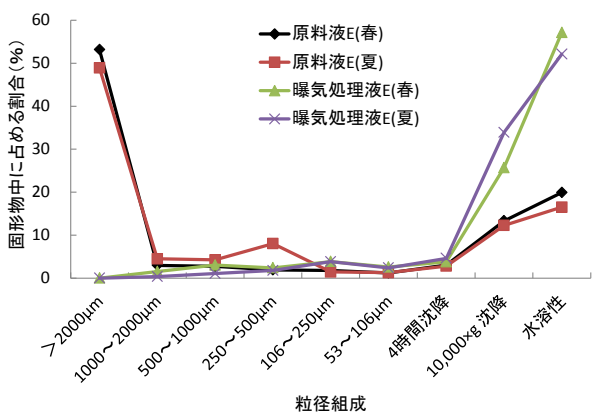


図6 肥培かんがい施設 E 試料中の粒径組成(H25)

ら廃棄物系改質バイオマスを土壌中に散布した場合、粗大な有機物ほど分解に時間を要すると考えられる。すなわち、施用する廃棄物系改質バイオマスの違いによって、土壌中での有機物分解量および有機物貯留量に違いが生じる可能性がある。

2.2.2 易分解性有機物および難分解性有機物含量

表 12 に H24 年度の、表 13 に H25 年度の廃棄物系改質バイオマス中の易分解性有機物および難分解性有機物の含有割合を示す。なお、H25 年度の堆肥は、分析用サンプルを採取できなかったため、欠測となった。H24 年度では、両有機物割合が最も多かった資材は堆肥であった。他の廃棄物系改質バイオマスでは、両有機物とも原料液で多く、消化液 A で少なかった。H25 年度は、両有機物とも原料液 A で多く、曝気処理液 E で少なかった。このように同じ施設から採取した試料でも、採取時期が異なると有機物含有割合も大きく異なることが明らかとなった。そこで、図 7 に H26 年度の乾物率と易分解性有機物割合の関係を、図 8 に H26 年度の乾物率と難分解性有機物含有割合の関係を示す。図 7、8 とも、乾物率と有機物含有割合との間に有意な正の相関が認められた。図 7、8 の結果より、簡易に分析が可能な乾物率を求めることで、有機物含有割合を推定できることが明らかとなった。

表 12 廃棄物系改質バイオマス中の有機物含有割合(H24)

分析項目	散布時期	単位	原料液A	消化液A	消化液B	消化液C	曝気処理液D	堆肥
易分解性有機物	早春		3.09	0.57	1.93	1.70	3.04	-
	一番草刈取後	%	3.44	0.61	1.79	1.75	-	-
	二番草刈取後		-	-	-	-	-	5.37
難分解性有機物	早春		2.53	0.25	1.66	1.81	1.93	-
	一番草刈取後	%	2.94	0.28	1.39	1.67	-	-
	二番草刈取後		-	-	-	-	-	8.73

表 13 廃棄物系改質バイオマス中の有機物含有割合(H25)

分析項目	散布時期	単位	原料液A	消化液A	消化液B	消化液C	曝気処理液E
易分解性有機物	早春		6.01	2.47	1.89	3.01	0.38
	一番草刈取後	%	3.40	0.97	2.19	1.44	0.67
	早春		7.53	2.21	1.41	4.33	0.42
難分解性有機物	一番草刈取後	%	3.56	0.84	1.48	1.95	0.84

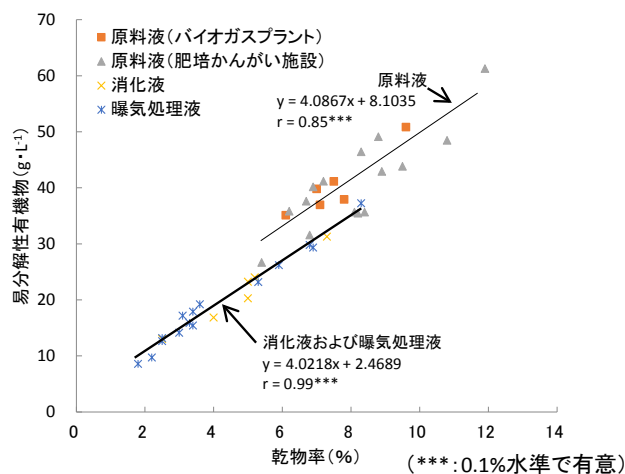


図7 乾物率と易分解性有機物割合との関係(H26)

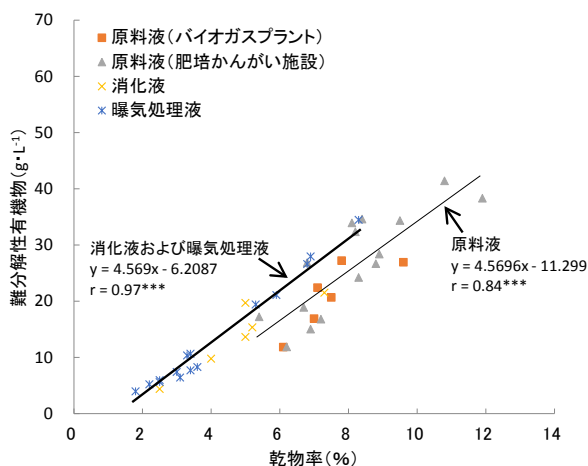


図8 乾物率と難分解性有機物割合との関係(H26)

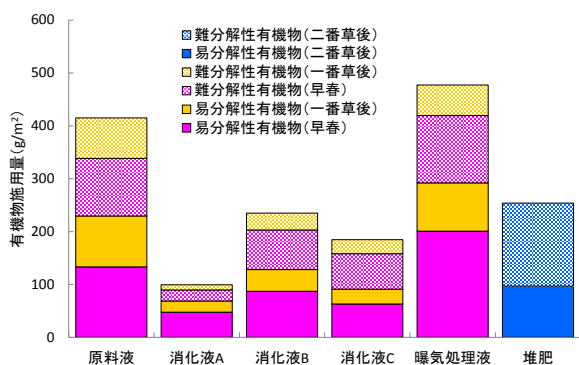


図9 有機物施用量 (H24)

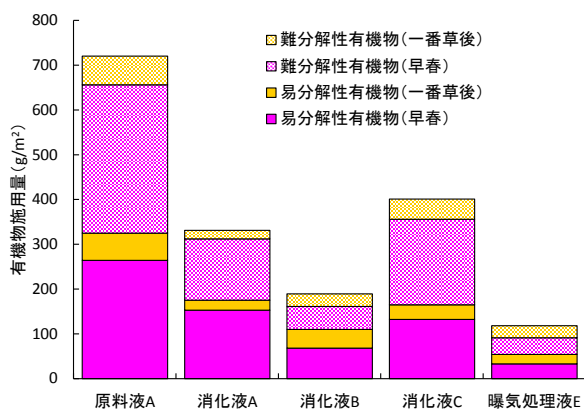


図10 有機物施用量 (H25)

図9にH24年度各肥料施用時における有機物施用量を示す。なお、曝気処理液については、一番草刈取後散布時の試料の分析ができなかったため、早春散布時の分析結果を用いて算出した。本試験での施肥量は、前述のように廃棄物系改質バイオマス中の肥料成分を基準に決定したため、有機物施用量に違いが生じた。春散布および一番草刈取後散布とも、1〜3ヶ月で分解される易分解性有機物施用量が少な

かったのは3種類の消化液であった。曝気処理液および原料液の易分解性有機物施用量は、消化液より多い結果となった。分解に時間のかかる難分解性有機物量は、消化液で少ない傾向を示し、曝気処理液および原料液では消化液より多い結果となった。堆肥では、難分解性有機物が易分解性有機物と比べて多かったが、原料液および曝気処理液の年間合計施用量より少なかった。

図10にH25年度各肥料施用時における有機物施用量を示す。年間の易分解性有機物施用量が最も多かったのは原料液Aであり、次いで消化液、曝気処理液の順に少なくなった。難分解性有機物も同様の傾向を示した。

このように、バイオマス中の有機物含有割合の大小と、実際に圃場に散布される有機物量の多少には、違いが生じることが明らかとなった。これは表16に示したように、各廃棄物系改質バイオマスの肥料成分が異なるためである。北海道立農業・畜産試験場では、乳牛ふん尿スラリー中の肥料成分を簡易に推定する方法の1つとして、乾物率と電気伝導度(EC)を測定する方法を示している¹⁰⁾。また、(独)北海道開発土木研究所(現在、(独)土木研究所寒地土木研究所)では、消化液中の肥料成分を推定する方法として、乾物率とECと水素イオン濃度(pH)を測定する方法を示している⁵⁾。乾物率からは、前述のように有機物含有割合を推定できることが明らかになっており、簡易に分析が可能な乾物率とECとpHより、圃場に散布される有機物量を推定できる可能性がある。

3 廃棄物系改質バイオマス施用による土壤生産性の改善⁴⁵⁾

3.1 材料および方法

3.1.1 試験区の概要

試験は、北海道別海町にある別海町資源循環センター(以下、別海プラントという)内の採草地で行った。採草地は2001年にチモシー単播草地として草地更新が行われ、2007年4月より図11に示す3つの試験区を設け、施用試験を開始した。草地更新から2007年までは、化学肥料による栽培が行われたが、2006年に試験区の一部で消化液の希釈施用試験が行われた¹²⁾。しかし、本研究の試験開始時には各試験区における表層土壤の理化学性に有意な差はないことを確認している(表14)。なお、表14の各分析項目の分析法は後述の3.1.4土壤の化学性・物理

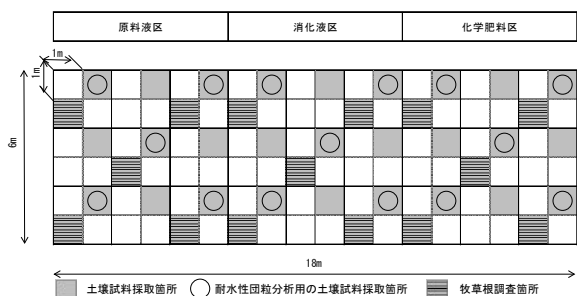


図 11 試験区の概要

表 14 各試験区の表層土壌（表層 0～5cm）の理化学性（散布開始前：2007 年）

試験区	pH (H ₂ O)	CEC* cmol _c kg ⁻¹	全炭素* g kg ⁻¹	全窒素* g kg ⁻¹	P ₂ O ₅ * g kg ⁻¹	K ₂ O* g kg ⁻¹	容積重 Mg m ⁻³	粗孔隙量 m ³ m ⁻³
化学肥料区	5.8	26	79	5.8	0.59	0.37	0.55	0.19
原料液区	5.9	25	75	5.6	0.78	0.53	0.56	0.17
消化液区	6.1	29	75	5.7	0.71	0.43	0.48	0.15
分散分析	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

*乾土当たり

n. s. : 有意差なし (P<0.05 Tukey 法)

性分析に示す。試験区の土壌は腐植質普通黒ボク土である。深さ 30cm までの粒径組成は粗砂 4.1%、細砂 40.0%、シルト 43.5 %、粘土 12.4% であり、土性は壤土であった。試験区には、酪農家の牛舎から別海プラントに搬入された家畜ふん尿を固液分離した液分（以下、原料液という）を施用した試験区（以下、原料液区という）、別海プラントの発酵槽から採取した消化液を施用した試験区（以下、消化液区という）、硫酸、過リン酸石灰および硫酸カリウムの化学肥料のみを施用した試験区（以下、化学肥料区という）の 3 試験区を設置した。国営環境保全型かんがい事業では、スラリーを 3 倍程度に希釈して牧草地に施用しており¹¹⁾、過年度の研究では、スラリーの希釈施用による牧草収量を増大させる効果が確認されている¹²⁾。本研究では、原料液および消化液は水道水で 3 倍に希釈して施用した。1 つの試験区は 6m×6m の広さとし、1 試験区から土壌試料などを最大 9 箇所採取できる設計とした。

3. 1. 2 有機質肥料の性状と施肥設計

2014 年に施用した原料液および消化液の性状を表 15 に示す。pH はガラス電極法、固形物 (TS) は炉乾燥法、全炭素はチューリン法、全窒素はケルダール法、P₂O₅ および K₂O は湿式灰化処理を行った後に P₂O₅ は比色法で、K₂O は原子吸光法で分析した。また、易分解性有機物および難分解性有機物の分析法

は、後述の 3. 1. 7 易分解性・難分解性有機物の分析に示す。メタン発酵後の消化液は、原料液と比較して固形物や炭素量が少なかった。肥料成分量は年によって変動し、2014 年では消化液のカリウムの含有量が原料液と比較して少なかった。2007 年の試験開始から試験区に施用した有機質肥料と化学肥料の年間平均施肥量を表 16 に示す。年間に施用した窒素、リン酸、およびカリウムは施肥標準量¹³⁾ となるように統一した。この施肥標準量の 3 分の 2 を早春 (5 月中旬頃) に、残る 3 分の 1 を 1 番草刈取後 (7 月上旬頃) に施用した。原料液および消化液の肥料成分分析は散布直前に実施し、施用量を算出した後、不足する肥料成分を化学肥料で補った。基準肥効率はスラリーの牧草に対する施用法¹⁰⁾ に従い、全窒素の 40%、全リンの 40%、カリウムの 80% とした。

表 15 有機質肥料の性状* (2014 年散布)

有機質肥料	散布時期	pH	TS g kg ⁻¹	全炭素 g kg ⁻¹	全窒素 g kg ⁻¹	P ₂ O ₅ g kg ⁻¹	K ₂ O g kg ⁻¹	易分解性		難分解性	
								有機物 g kg ⁻¹	有機物 g kg ⁻¹	有機物 g kg ⁻¹	有機物 g kg ⁻¹
原料液	5 月	7.2	98	58	3.5	1.9	6.0	40	8.9		
	7 月	6.8	76	35	3.7	1.7	7.4	29	5.5		
消化液	5 月	7.1	59	18	3.3	1.2	3.6	11	3.9		
	7 月	7.5	51	14	3.1	1.4	3.4	8.8	3.0		

*新鮮物当たり

表 16 有機質肥料および化学肥料の年間平均施肥量 (2007 年～2014 年)

試験区	有機質肥料散布量		肥料成分施肥量		
	kg m ⁻²	N (g m ⁻²)	P ₂ O ₅ (g m ⁻²)	K ₂ O (g m ⁻²)	
化学肥料区	—	16.0	8.0	18.0	
原料液区	4.3	5.9	3.3	16.6	
		10.1	4.7	1.4	
消化液区	4.9	5.9	3.0	15.0	
		10.1	5.0	3.0	

原料液区および消化液区の上段は、有機質肥料由来の肥料成分の散布量。不足する肥料成分量は硫酸、過リン酸石灰、硫酸カリウムで補い、下段に示した。

3. 1. 3 有機質肥料の固形物の粒径組成

2014 年に施用した原料液および消化液の固形物の粒径組成を表 17 に示す。分析は保井ら⁹⁾ の方法に準じた。有機質肥料 150ml に蒸留水を加え約 1L とし 2,000μm のふるいに通し水中し別を行った。ふるいを通過した懸濁液は同様に 1,000μm、500μm、250μm、106μm、53μm のふるいを通して水中し別を行った。ふるい上の固形物は蒸留水で洗浄し、洗浄液は懸濁液に合わせた。53μm を通過した懸濁液は洗浄液と蒸留水で約 2L とし、転倒混和させて 4 時

間静置した。静置後、上澄み液をサイホンで遠沈管に移し沈殿部（4 時間沈降）と分離した。上澄み液は 10,000×g で遠心分離し、沈殿部（10,000×g 沈降）と水溶性画分に分離した。分離した画分は 40℃で通風乾燥して重量を測定した。

表 17 有機質肥料の固形物の重量分布 (%)

有機性肥料	散布時期	2,000							4 時 間沈 降	10,000 ×g 沈降	水溶性
		>2,000 μ m	1,000 ~ μ m	500~ μ m	250~ μ m	106~ μ m	53 μ m	10,000 ×g 沈降			
原料液	5 月	42.4	5.2	3.5	3.3	2.5	1.4	5.7	12.6	23.4	
	7 月	17.2	3.0	4.9	2.4	2.6	1.8	8.0	22.9	37.2	
消化液	5 月	27.8	5.2	5.6	3.1	3.6	1.9	5.6	18.0	29.2	
	7 月	28.7	10.1	7.5	4.3	3.5	1.9	6.1	12.3	25.6	

3. 1. 4 土壌の化学性・物理性分析

土壌試料は、毎年早春の施肥を行う直前に採取した。各試験区 9 箇所、ルートマットを含む表層 0~5cm (以下、表層 1 層目という)、表層 5~10cm (以下、表層 2 層目という) および表層 10~15cm (以下、表層 3 層目という) の 3 層から剣先スコップを用いて攪乱試料と未攪乱試料 (50ml 採土管) を採取した。攪乱試料は牧草根を除去したあとに風乾させ、2mm のふるいを通し、化学分析に供試した。この時、牧草の根は出来る限り除去した。ただし、2012 年のデータは欠損している。化学分析は、pH(H₂O)、全炭素、全窒素、陽イオン交換容量 (CEC)、有効態リン酸およびカリウムを測定した。pH(H₂O) はガラス電極法で、全炭素および全窒素は乾式燃焼法 (MACRO CORDER JM1000CN)、陽イオン交換容量 (CEC) はショーレンベルガー法、有効態リン酸はブレイ第 2 法、カリウムはショーレンベルガー法で抽出後、原子吸光法で分析した。物理分析は未攪乱試料について、容積重、粗孔隙量、および易有効水分孔隙量を測定した。粗孔隙量および易有効水分孔隙量は砂柱法および遠心法で分析し、粗孔隙量は pF1.8、易有効水分孔隙量は pF1.8~3.0 である。飽和透水係数は、変水位法で測定した。

3. 1. 5 牧草根重量

牧草根は、2014 年早春の施肥を行う直前に各試験区 5 箇所 (図 11) で表層 1 層目から 50ml 採土管で採取した。採取後、1mm ふるいの上で水洗し、70℃で 48 時間通風乾燥した後、乾物重を測定した。

3. 1. 6 耐水性団粒の分析

耐水性団粒の分析は、2014 年早春の施肥を行う直

前に各試験区 5 箇所 (図 11) から採取した表層 1 層目の土壌試料について行った。土壌試料は剣先スコップを用いて採取し、団粒をつぶさないよう慎重に持ち帰った。湿潤状態のまま指で牧草根と土壌を分離してから分離した土壌を 5mm ふるいを通し、風乾させた。分析手法は、Aoyama et al.¹⁴⁾ の方法に準じた。Yorder 型土壌団粒分析器 (大起理化 DIK-2000) に 1,000μm、250μm、53μm のふるいを装着し、風乾土 50g 相当を 1,000μm のふるいに載せ、毎分 30 往復、振幅 3.8cm の条件で 10 分間振とうを行った。団粒を各サイズ (>1,000μm、1,000~250μm、250~53μm、<53μm) に分離した後、>1,000μm、1,000~250μm および 250~53μm サイズの団粒については、さらにガラスビーズとともに水中分散させ、>53μm および <53μm に分離した。以下、青山ら⁴⁴⁾ の報告に従い、>53μm 画分を粗粒有機物画分、<53μm 画分を有機・無機複合体画分と呼ぶ。さらに各団粒サイズ、粗粒有機物画分および有機・無機複合体画分の炭素含量を乾式燃焼法 (MACRO CORDER JM1000CN) で求めた。

3. 1. 7 易分解性・難分解性有機物の分析

耐水性団粒の分析で得られた >1,000μm の試料を分析に供試した。分析手法はデタージェント分析³⁾ に従い、酸性デタージェント繊維 (ADF)、酸性デタージェントリグニン (ADL)、酸性デタージェント可溶有機物 (AD 可溶有機物) を測定した。土壌 1,000mg を酸性デタージェント溶液 (0.5mol L⁻¹ 硫酸 1,000ml に臭化セチルトリメチルアンモニウム 20g を溶解したもの) で 1 時間煮沸後、ろ過した後乾燥させ秤量 (a) した。さらに、72% 硫酸で処理し蒸留水を加え煮沸後、ろ過した後乾燥させ秤量 (b) し、550℃で灰化後秤量 (c) した。これとは別に >1,000μm の試料について、550℃で灰化処理を行い、粗灰分を求めた。ADF、ADL、AD 可溶有機物は以下の式により求めた。

$$\text{ADF (mg g}^{-1}\text{)} = a - c$$

$$\text{ADL (mg g}^{-1}\text{)} = b - c$$

$$\text{AD 可溶有機物 (mg g}^{-1}\text{)} = 1,000 - \text{粗灰分} - \text{ADF}$$

AD 可溶有機物が易分解性有機物 (土壌中 14 日間で分解する有機物) の指標に、ADL が難分解性有機物 (土壌中 3 年間残存する有機物) の指標になることが小柳ら¹⁵⁾ によって報告されている。小柳ら¹⁵⁾

の評価に従い、易分解性有機物量と難分解性有機物量は以下の式により求めた。

$$\begin{aligned} \text{易分解性有機物量 (mg g}^{-1}\text{)} &= \text{AD 可溶有機物} \\ \text{難分解性有機物量 (mg g}^{-1}\text{)} &= \text{ADL} \end{aligned}$$

3. 1. 8 牧草収量調査

牧草収量調査は1試験区当たり9箇所で行った。1箇所あたり1m×1mの方型枠を設置し、牧草を地上部5cm程度で刈り取った。収穫後の牧草は、70℃で48時間通風乾燥した後、乾物重を測定した。牧草の刈り取りは、1番草および2番草ともに近傍の酪農家が刈り取り作業に入る直前に行った。1番草が6月下旬、2番草が8月下旬である。ただし、平成22年度は収量調査を実施していない。

3. 2 結果および考察

3. 2. 1 土壌理化学性への影響

表18、19に各試験区の採取年毎の表層1層目と表層2層目の炭素量と窒素量を示す。表の値は各試験区9箇所で行った分析結果の平均値である。表層1層目の炭素は施用開始前と比較して、原料液区では施用開始から4年目に、消化液区では施用開始から6年目に増加した。化学肥料区では、表層1層目の炭素は、施用開始前と比較して有意差はなく同程度であった。このことから、有機質肥料の散布が土壌の炭素貯留に有効であると考えられるが、本研究では、このような現象がみられるには少なくとも5年程度の施用が必要であった。これは施用開始前の表層1層目の炭素量が消化液区で1.79 kg-C m⁻²、原料液区で2.09 kg-C m⁻²であるのに対して、有機質肥料施用による年平均の炭素供給量は消化液区で0.15kg-C m⁻²、原料液区で0.21 kg-C m⁻²と少ないことが影響していると考えられる。また、2014年の表層1層目では牧草根重にも試験区で有意差がみられ(表20)、各試験区の牧草根の炭素量は化学肥料区で0.38kg-C m⁻²、原料液区で0.54kg-C m⁻²、消化液区で0.53kg-C m⁻²であった。表層1層目の化学肥料区で土壌炭素量が施用開始前と比較して同程度維持されていたのは、牧草根の一部が枯死腐朽することで土壌に供給されたためと推察される。原料液区および消化液区の牧草根の炭素量は化学肥料区より多いことから、牧草根由来の炭素の一部が土壌に集積し、土壌炭素量増加に寄与していると考えられる。このような牧草根由来の炭素の集積や有機質肥料に含ま

れる炭素の一部が残存することで、原料液区および消化液区の2014年の表層1層目の炭素は、化学肥料区と比較して有意に増加していたと考えられた。表層1層目の窒素は、施用開始前と比較して原料液区および消化液区では施用開始から4年目に増加しており、化学肥料区においても増加している年(2011年、2013年)があった。

表層2層目の炭素および窒素は、原料液区や消化液区で変動はなかった。また、後述する耐水性団粒の分析を表層2層目の土壌で行ったが、団粒形成量や炭素分布量に試験区による差はみられなかった。原料液および消化液は液状の肥料であり、<53μmの微細な固形物の合計割合は原料液で42~68%、消化液で44~53%(表17)であることから、土壌に浸透しやすいと考えられる。しかし、フミン酸溶液をガラスビーズ充填カラム中に浸透させると沈着すること¹⁶⁾、最も単純な水溶性有機物のひとつであるアニオン界面活性剤が、黒ぼく土壌中で疎水性相互作用によって良く吸着し¹⁷⁾、移動が抑制されること¹⁸⁾から推測すると、施用した液状の有機質肥料は、表層1層目で吸着・沈着したため、表層2層目への影響が認められなかったのではないかと考えられる。また、透水性は、溶質の移動を規定する。各試験区の飽和透水係数の値を表20に示す。草地土壌の飽和透水係数の基準値は10⁻³~10⁻⁴cm s⁻¹である¹³⁾ことから、本試験圃場では各試験区ともに表層2層目から表層3層目で飽和透水係数は低下していた。このように本試験圃場の表層土壌5cm~15cmには透水性の低い層が形成されており、有機質肥料が表層1層目より下層には浸透しにくい状況であった。この影響と表層1層目での施用有機物の沈着・吸着により、原料液および消化液施用による土壌中の炭素や窒素への影響は、本試験区では表層1層目に強く現れたと推察される。

表18 各試験区の年度毎の炭素量 (g kg⁻¹)

試験区	土層	採取年						
		2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2013年	2014年
化学肥料区	表層1層目	79±7 ab	72±6 a	76±6 ab	71±9 a	86±10 b	85±9 b	78±8 b
	表層2層目	60±5 a	60±3 a	59±3 a	58±2 a	59±2 a	56±1 a	61±3 a
原料液区	表層1層目	75±8 a	75±7 a	79±11 a	73±6 a	101±7 b	113±10b	104±12b
	表層2層目	56±5 a	58±4 a	59±4 a	59±2 a	59±2 a	59±2 a	62±7 a
消化液区	表層1層目	75±9 a	81±10 a	74±5 a	82±10 a	88±8 a	103±12 b	97±11 b
	表層2層目	59±4 a	58±4 a	60±6 a	57±2 a	58±3 a	56±2 a	60±3 a

数値は平均と標準偏差を表す

2012年のデータは欠損

同一行の異なる英子文字間には有意差ありを示す (P<0.05 Tukey法)

表 19 各試験区の年度毎の窒素量 (g kg⁻¹)

試験区	土層	採取年						
		2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2013年	2014年
化学肥料区	表層1層目	5.8±0.6 a	5.4±0.5 a	5.9±0.6 a	5.6±0.9 a	6.9±0.8 b	7.0±0.8 b	6.7±0.5 ab
	表層2層目	4.1±0.4 a	4.2±0.2 a	4.4±0.2 ab	4.3±0.2 ab	4.4±0.1 ab	4.2±0.1 a	4.6±0.2 b
原料液区	表層1層目	5.6±0.7 a	5.8±0.6 a	6.4±1.1 a	5.8±0.6 a	8.5±0.8 b	9.9±1.1 b	8.8±1.1 b
	表層2層目	4.1±0.2 a	4.1±0.3 a	4.3±0.4 a	4.4±0.2 a	4.4±0.2 a	4.4±0.2 a	4.5±0.4 a
消化液区	表層1層目	5.7±0.8 a	6.3±0.9 a	5.9±0.5 a	6.8±1.0 a	7.2±0.7 b	8.8±0.8 c	8.3±0.9 bc
	表層2層目	4.3±0.6 a	4.1±0.2 a	4.4±0.5 a	4.2±0.2 a	4.3±0.1 a	4.2±0.2 a	4.5±0.2 a

数値は平均と標準偏差を表す。2012年のデータは欠損
同一行の異なる英小文字間には有意差ありを示す (P<0.05 Tukey 法)

表 20 各試験区の飽和透水係数と牧草根重・牧草根炭素・窒素量 (2014年)

試験区	飽和透水係数 (cm s ⁻¹)			牧草根重 (g kg ⁻¹)	牧草根炭素含量 (g kg ⁻¹)	牧草根窒素含量 (g kg ⁻¹)
	表層1層目	表層2層目	表層3層目	表層1層目	表層1層目	表層1層目
化学肥料区	1.7×10 ⁻²	2.4×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻⁵	38 a	384.6 a	2.2 a
原料液区	2.1×10 ⁻²	3.7×10 ⁻⁵	3.9×10 ⁻⁵	57 b	398.5 a	1.8 a
消化液区	2.1×10 ⁻²	3.4×10 ⁻⁵	2.7×10 ⁻⁵	67 b	385.3 a	1.8 a

同一列の異なる英小文字間には有意差ありを示す (P<0.05 Tukey 法)

3. 2. 2 団粒の形成量と団粒内の炭素分布

2014年の表層1層目の土壌について、耐水性団粒の分析を行った。図12に団粒サイズ別の重量分布を示す。図12には各サイズの団粒について、さらに粗粒有機物画分 (>53μm) と有機・無機複合体画分 (<53μm) に分画し、得られた団粒の重量を示した。消化液区では、>1,000μmの団粒の粗粒有機物画分と有機・無機複合体画分の両画分ともに化学肥料区と比較して有意に増加しており、250~1,000μmの団粒の粗粒有機物画分の増加もみられた。原料液区では、>1,000μm、250~1,000μmのマクロ団粒の粗粒有機物画分が化学肥料区と比較して有意に増加していたが、有機・無機複合体画分の増加はみられなかった。粗粒有機物画分と有機・無機複合体画分を合わせた団粒形成量で化学肥料区と比較して有意に増加していた団粒サイズは、消化液区での>1,000μmであった。

図13に各画分の団粒形成量(図12)と炭素量(表21)からサイズ別の団粒の炭素分布量を示す。団粒内の炭素分布量をみると、原料液区および消化液区ともに>1,000μmの粗粒有機物画分において、化学肥料区と比較して有意に増加していた。消化液区では、250~1,000μmの粗粒有機物画分についても同様の傾向がみられ、化学肥料区と比較して炭素分布量に差がみられた(図13)。堆きゅう肥を施用した土壌では、施肥した有機物は主として粗粒有機物として存在する¹⁹⁾ことが明らかとされており、本研究結果もこれと一致する。一方で、消化液などのスラリーをポツ

ト土壌に施用した試験¹⁾では、マクロ団粒の粗粒有機物画分の炭素量を増大させるだけでなく、スラリーに含まれる微細な有機物により有機・無機複合体画分の炭素量も顕著に増大したと報告されている。しかし本研究では、マクロ団粒内の有機・無機複合体画分の炭素量は、化学肥料区と比較して有意な増加はなかった。この要因として、本研究の土壌が黒ボク土であることや牧草地土壌の特徴が影響していると考えられた。牧草地土壌は経年的に炭素が集積しやすく、本研究の化学肥料区の表層1層目の炭素は84 g-C kg⁻¹とポット試験¹⁾に供試した土壌と比較して5倍程度多い。このため、草地土壌である本試験圃場では化学肥料区の有機・無機複合体画分にも牧草根由来の炭素がもともと一定程度集積しており、消化液施用による微細な画分のさらなる炭素の集積には結びつきにくかったと推察される。

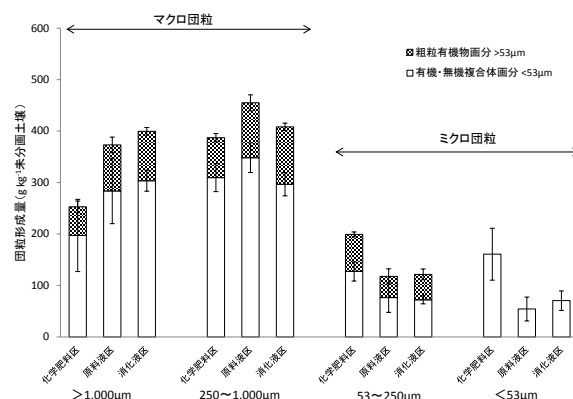


図 12 各試験区の団粒サイズ毎の重量分布 (>53μm, <53μm に分画)

英大文字は>53 μmにおいて異なる英大文字間に有意差ありを示し、また、英小文字は<53 μmにおいて異なる英小文字間に有意差ありを示す (P<0.05 Tukey 法)

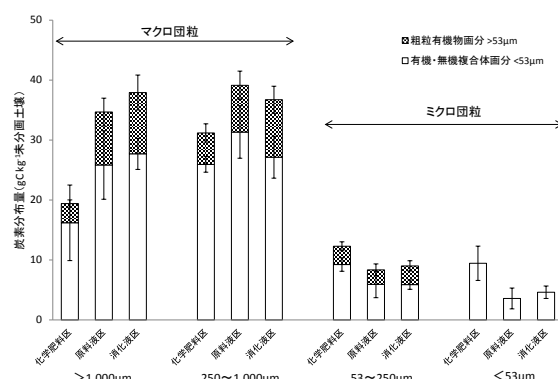


図 13 各試験区の団粒サイズ毎の炭素分布量 (>53μm, <53μm に分画)

英大文字は>53 μmにおいて異なる英大文字間に有意差ありを示し、また、英小文字は<53 μmにおいて異なる英小文字間に有意差ありを示す (P<0.05 Tukey 法)

表 21 各試験区の団粒サイズ別の炭素量 (g kg⁻¹)

試験区	全炭素量* 回収率	>1,000 μm		250~1,000 μm		53~250 μm		<53 μm
		>53 μm	<53 μm	>53 μm	<53 μm	>53 μm	<53 μm	
化学肥料区	75.1a 96%	58.2 a	78.8 a	64.5 a	81.4 a	40.8 a	70.7 a	57.2 a
原料液区	91.3b 94%	93.5 b	87.6 a	68.5 a	86.1 a	55.6 a	74.7 a	62.0 a
消化液区	92.1b 96%	98.4 b	88.3 a	82.2 a	87.5 a	60.9 a	78.7 a	63.7 a

*耐水性団粒分析に用いた土壌の全炭素量 (5mm ふるい通過後の土壌) 同一列の異なる英小文字間には有意差ありを示す (P<0.05 Tukey法)

3. 2. 3 マクロ団粒内の有機物の特徴

各試験区の>1,000μm の団粒内の易分解性有機物と難分解性有機物の全炭素に占める割合と含有量を表 22 に示す。原料液区および消化液区の全炭素に占める易分解性有機物、難分解性有機物の割合は、化学肥料区と比較して有意な差はなかった。含有量を見ると消化液区では、化学肥料区と比較して易分解性有機物量、難分解性有機物量ともに増加しており、原料液区では易分解性有機物量が増加していた。マクロ団粒の形成には、有機物が重要な役割を果たしているとされる²⁰⁾。微生物が生産する微生物代謝産物、糸状菌菌糸および作物の根によってマイクロ団粒が結合されることでマクロ団粒が形成される²¹⁾。本試験圃場においても表層 1 層目のマクロ団粒形成量 (>1,000μm) と牧草根重との間には、正の相関がみられた (図 14)。土壌中の微生物バイオマス量は、有機質資材の易分解性有機物画分の施肥量と相関関係にあり²²⁾、本研究の有機質肥料施用区では団粒内の易分解性有機物量は増加していることから(表 22)、微生物量も増加していると考えられる。また、連作畑への堆きゅう肥の施用試験では、糸状菌フロアの多様化や放線菌などの増加により、微生物的緩衝力が增大することで、根群が発達すると報告されている²³⁾。一方、難分解性有機物は土壌に残留し、土壌粒子を結合するといった土壌団粒形成などの効果をもたらす²⁴⁾。易分解性有機物は短期的なマクロ団粒の形成を促進するが、難分解性有機物は緩慢な微生物の分解を受けるために、長期的なマクロ団粒の維持に効果があるとされる⁸⁾。本研究の消化液区および原料液区では易分解性有機物量だけでなく牧草の根重量も増加していた (表 20) ことから、短期的には両試験区ともにマイクロ団粒が結合されマクロ団粒の形成につながったと考えられる。さらに消化液区の団粒内には、枯死腐朽した牧草根に含まれる難分解性有機物が有意に集積し、長期的にマクロ団粒の形成が維持されることで化学肥料区と比較して>1,000μm の団粒の増加につながったと推察される。

表 22 各試験区の>1,000μm 画分の易分解性有機物と難分解性有機物

試験区	全炭素に占める割合 (kg kg ⁻¹)		含有量 (g-C kg ⁻¹ 未分画土壌)	
	易分解性有機物	難分解性有機物	易分解性有機物	難分解性有機物
化学肥料区	0.55 a	0.16 ab	10 a	3.3 a
原料液区	0.54 a	0.15 a	17 b	4.9 a
消化液区	0.60 a	0.21 b	18 b	6.5 b

同一列の異なる英小文字間には有意差ありを示す (P<0.05 Tukey法)

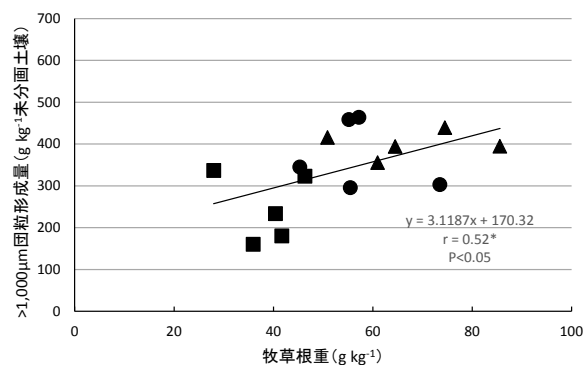


図 14 各試験区の>1,000μm 団粒形成量と牧草根重の関係

3. 2. 4 表層土壌の土壌物理性への影響

表 23 に各試験区の表層 1 層目の施用開始前の 2007 年と 2014 年の土壌物理性の値を示した。容積重および易有効水分孔隙量は、処理区による違いや年による有意な差はなかった。粗孔隙量は処理区による有意な差はなかったが、原料液区および消化液区では施用開始前と比較すると有意な増加がみられた。牧草地土壌では、施肥や牧草の刈取り、梱包作業、運搬など農作業機械による走行回数が多いため牧草地土壌表層は緻密化しやすく、容積重の増大や孔隙量の減少が問題となる²⁵⁾。本研究の試験区では、施肥時期は農作業機械の走行を行わないため、営農圃場とは走行回数は異なるが、表層 1 層目の容積重は施用開始前と比較して増加しておらず、孔隙量の減少もみられないことから各試験区で表層 1 層目の経年的な堅密化はないといえた。スラリーをポット土壌に施用した試験¹⁾では、消化液などの施用によりマクロ団粒の形成が促進されるために、土壌の容積重の低下、重力水孔隙率および飽和透水係数が増加したと報告している。本研究では、原料液区および消化液区において、粗孔隙量の経年的な増加はみられたが処理区間による有意差はなく、他の分析項目も処理区間や年による有意差は確認されなかった。この要因としてポット試験¹⁾では、>1,000μm と 250~1,000μm の両画分において顕著なマクロ団粒の形

成が確認されたのに対して、本研究では、 $>1,000\mu\text{m}$ の画分においてのみマクロ団粒の形成が確認されたことが影響していると考えられる。本研究では、化学肥料区においてもマクロ団粒の形成がみられ、原料液区や消化液区で顕著なマクロ団粒の形成に結びつかなかったことが、各試験での土壌物理性の明瞭な差とならない要因と推察される。ただし、原料液区や消化液区の容積重の低下や粗孔隙量の増加は継続している傾向がある。

表 23 各試験区の表層 1 層目の土壌物理性

試験区	容積重 (Mg m^{-3})		粗孔隙量 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		易有効水分孔隙量 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	
	2007年	2014年	2007年	2014年	2007年	2014年
化学肥料区	0.55 a	0.51 a	0.19 a	0.23 a	0.14 a	0.15 a
原料液区	0.56 a	0.47 a	0.17 a	0.28 b	0.12 a	0.15 a
消化液区	0.48 a	0.41 a	0.15 a	0.29 b	0.15 a	0.15 a

同一試験区内における各分析項目の年次間で、異なる英小文字間には有意差ありを示す ($P<0.05$ Tukey 法)

なお、各年次における処理区間には、いずれの分析項目においても有意な差は認められなかったため、英文字での表記は示さなかった

3. 2. 5 牧草収量への影響

図 15 に乾物重の結果を示す。牧草収量は、その年の気温などの天候に左右されるため、調査年度の異なる収量を単純に比較することは出来ない。このため、同じ年度同士で 3 試験区の乾物重を比較すると、平成 21 年度まで 3 試験区とも同程度の収量が得られた。平成 23 年度は、消化液区の 1 番草収量が他の試験区と比べて 5% 水準で有意に高く、合計の乾物収量も高い。平成 24 年度、25 年度は、原料区および消化液区の 1 番草の乾物重が対照区と比較して有意に大きく、合計の乾物重も大きかった。平成 26 年度は、原料区では 1 番草の乾物重と合計の乾物重が対照区と比較して高く、消化液区では 1 番草の乾物重が対照区より高かった。すなわち、平成 24 年度以降の原料区及び消化液区では、1 番草の乾物重について対照区より高い傾向が続いていた。

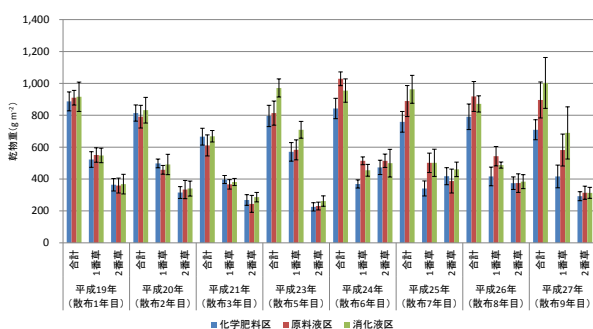


図 15 調査年度毎の乾物重

4 農家圃場における土壌理化学性調査

4. 1 材料および方法

4. 1. 1 調査圃場

廃棄物系改質バイオマスによる土壌理化学性改善効果の発現には時間がかかる。このため、長期間、廃棄物系改質バイオマスを施用した場合の土壌改善傾向を確認する目的で、試験圃場周辺で廃棄物系改質バイオマスを施用している農家圃場を選定し、施用年数の長い圃場における土壌理化学性を調査した。

調査圃場の概要を表 24 に示す。調査圃場は北海道別海町に位置し、チモシー主体のマメ科混播牧草地で、採草または放牧利用されている。土壌は黒ボク土である。調査圃場では、家畜ふん尿を原料にした廃棄物系改質バイオマスと化学肥料を施用している。肥料の他に、ホタテ貝殻の粉末を有機質肥料に投入し施用している圃場と生石灰を数年に 1 回程度、施用している圃場があった。

表 24 調査圃場の概要

圃場番号	有機質肥料の種類	施用年数	利用形態	有機質肥料の施用年数の区分
1	曝気処理液	2年	採草	曝気処理液4年以下
2	曝気処理液	2年	採草・放牧	
3	曝気処理液	3年	採草	
4	曝気処理液	10年	採草・放牧	曝気処理液9年以上
5	曝気処理液	12年	採草・放牧	
6	曝気処理液	13年	採草	
7	原料液	9年	採草	原料液9年以上
8	原料液	11年	採草・放牧	
9	原料液	14年	採草	

調査圃場に施用している廃棄物系改質バイオマスは、原料液と曝気処理液の 2 種類を選定した。廃棄物系改質バイオマス施用による土壌理化学性改善効果を明らかにするためには、その施用年数の把握が重要となる。本報告では、直近の草地更新からの経過年数を施用年数とした。施用年数が短い圃場と長い圃場の土壌理化学性を比較するため、施用年数によって 4 年以下と 9 年以上に区分し、それぞれの区分毎に分析値の平均値を求めた。平均値は、その有意性を明らかにするため t 検定で統計解析を行った。

4. 1. 2 土壌調査項目および方法

土壌採取は、2 番草刈り取り後で、かつ廃棄物系改質バイオマス施用前の 2013 年 9 月 27 日から 10 月 15 日の間に行った。採取地点は、1 圃場あたり 3 地点とした。土壌試料は表層 1 層目と表層 2 層目の 2 層に分けて採取した。土壌試料の採取数は、各地点の各層で攪乱試料 500g と 50cc 採土管を用いた不攪乱試料 1 試料である。採取した攪乱試料は風乾後 2mm のふるいにかけて、炭素含量の分析に供した。また、不攪乱試料は、全孔隙量、粗孔隙量、容積重の

分析に供した。

牧草地は一度更新すると、その後、数年間は耕起されない。そのため施用物は、牧草地土壌の表層 1 層目に集積しやすい²⁶⁾。したがって、廃棄物系改質バイオマスの施用による土壌理化学性改善効果を明確にするためには、土壌表層 1 層目の変化を把握することが重要である。そこで筆者らは、表層 1 層目の分析値から表層 2 層目の分析値を差し引いた値（以下、層差と表記する）を求める方法を採用した。層差を求めることで、圃場別の差異を分離することができる²⁷⁾。

4.2 結果および考察

4.2.1 炭素含量

図 16 に、施用年数と土壌の炭素含量層差の関係を示す。炭素含量は土壌中の有機物量の目安となり、炭素含量が多いほど、有機物が多いことを示す。炭素含量層差は、施用年数が長くなると増加する傾向を示した。

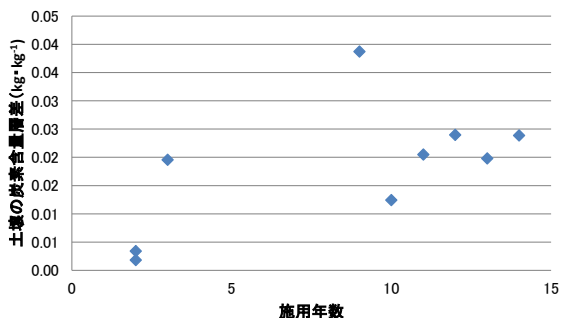


図 16 施用年数と土壌の炭素含量層差の関係

4.2.2 粗孔隙量

図 17 に、施用年数別の粗孔隙量層差を示す。粗孔隙量は、土壌の排水性の指標となり、値が大きいほど排水性がよい土壌であることを示す。曝気処理液または原料液を 9 年以上施用した圃場の粗孔隙量層差は、曝気処理液の施用期間が 4 年以下の圃場の粗孔隙量層差と比較して有意に多かった。

4.2.3 容積重

図 18 に、施用年数別の容積重層差を示す。容積重は土壌の単位体積あたりの乾燥重量²⁶⁾で、値が小さいほど、土壌が膨軟化していることを示す。曝気処理液または原料液を 9 年以上施用した圃場の容積重層差は、曝気処理液の施用期間が 4 年以下の圃場の容積重層差と比較して、有意に小さかった。

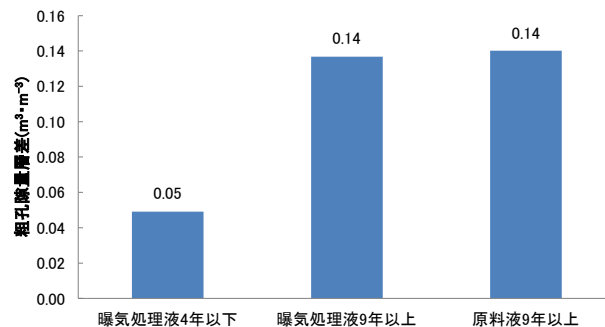


図 17 施用年数別の粗孔隙量層差

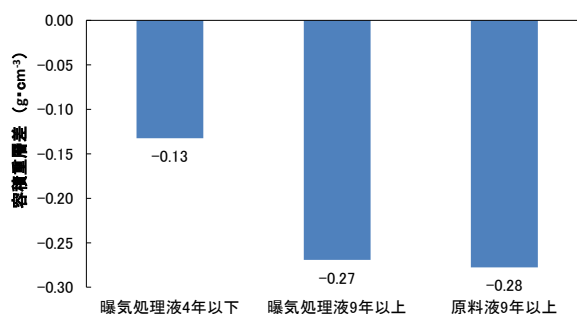


図 18 施用年数別の容積重層差

容積重は、土壌団粒構造の形成による全孔隙量の増加に伴い減少する。土壌中の有機物は土粒子と土粒子を結合させ、土壌団粒構造を形成するための接着剤として働く²⁶⁾。前述のとおり、施用年数が長くなると表層 1 層目の炭素（有機物）含量が増加する傾向を示しているため、有機物が接着剤として働き、全孔隙量を増加させ、容積重層差が拡大したものと考えられる。

5 廃棄物系改質バイオマス施用による温室効果ガス揮散⁴⁶⁾

5.1 材料および方法

5.1.1 乳牛ふん尿スラリーの種類および採取施設

表 25 に分析に供した乳牛ふん尿スラリーの種類および採取施設を示す。試料は 3 種類あり、うち 2 種類は嫌気性発酵施設であるバイオガスプラントにおける発酵前の原料液および発酵後の消化液である。また、残りの 1 種類は、肥培かんがい施設における好気性発酵後の曝気処理液である。各試料は、試験区へ散布する直前に各施設から採取し、肥料成分を分析した。分析結果を表 26、27 に示す。

表 25 乳牛ふん尿スラリーの種類および採取施設

試験区名	種類	採取施設
原料液A	嫌気発酵前 原料液	個別型バイオガスプラントA
消化液A	嫌気発酵後 消化液	個別型バイオガスプラントA
消化液B	嫌気発酵後 消化液	共同利用型バイオガスプラントB
消化液C	嫌気発酵後 消化液	共同利用型バイオガスプラントC
曝気処理液	好気発酵後 曝気処理液	肥培かんがい施設

表 28 試験区名と測定ガスの種類

試験区名	測定ガスの種類		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
原料液A	○		
消化液A	○		
消化液B	○		
消化液C	○	○	○
曝気処理液	○	○	○
化学肥料	○	○	○

表 26 乳牛ふん尿スラリー分析値(2013年)

分析項目	単位	原料液A		消化液A		消化液B		消化液C		曝気処理液	
		春採取	夏採取	春採取	夏採取	春採取	夏採取	春採取	夏採取	春採取	夏採取
乾物率	%	6.84	7.89	2.57	1.60	4.48	5.13	3.19	4.39	1.14	1.69
全炭素含量 (チューリン法)	g/L	32.5	23.2	9.08	5.99	23.6	18.2	9.89	17.8	3.41	5.63
全窒素(T-N)	mg/L	4600	3800	2300	5300	3600	3900	5000	3300	1500	4600
アンモニア態窒素 (NH ₃ -N)	mg/L	730	830	850	800	1700	1700	1400	1300	580	580
リン酸(P ₂ O ₅)	mg/L	1330	1440	870	640	1280	1600	1190	1100	440	480
カリ(K ₂ O)	mg/L	3370	4100	2410	2410	4100	3860	3370	3250	1690	1690

表 27 乳牛ふん尿スラリー分析値(2014年)

分析項目	単位	原料液A		消化液A		消化液B		消化液C		曝気処理液	
		春採取	夏採取	春採取	夏採取	春採取	夏採取	春採取	夏採取	春採取	夏採取
乾物率	%	7.70	8.26	2.65	4.14	4.46	5.14	2.63	5.67	0.86	1.27
全炭素含量 (チューリン法)	g/L	17.5	31.4	10.9	16.2	17.7	13.9	11.9	17.1	7.95	11.6
全窒素(T-N)	mg/L	3300	2500	2800	2700	3300	3100	2800	3300	2000	1600
アンモニア態窒素 (NH ₃ -N)	mg/L	1100	1600	1300	1300	1300	1600	1700	2000	1600	830
リン酸(P ₂ O ₅)	mg/L	990	1190	1720	1490	1240	1370	780	1600	500	660
カリ(K ₂ O)	mg/L	2170	2770	3610	4100	3610	3370	3980	4220	2170	1930

5.1.2 調査圃場および試験区の設定

試験圃場は北海道東部に位置する採草用牧草地である。この圃場は2000年8月に更新しており、土壌は黒色火山性土に分類される。この牧草地内に、図19に示した試験区を設けた。試験区は、横一列を一つのブロックと考え、一つのブロックを10区画に分け、種類の異なる肥料を施用した。各ブロック内での処理位置は、乱数表を用いて無作為に配置した。ブロック内の10区画の試験区のうち6区画で温室効果ガスを測定し、残りの4区画は予備区または他の試験に使用した。温室効果ガスを測定した試験区名と測定ガスの種類を表28に示す。

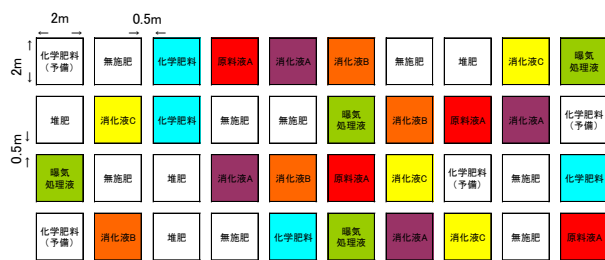


図 19 温室効果ガス計測試験区

5.1.3 各試験区への施肥量

各試験区への年間施肥量は、北海道施肥ガイド2010に記載された施肥標準量¹³⁾と同じになるように決定した。なお、乳牛ふん尿スラリー中の肥料成分のすべてが化学肥料と同等に作物に吸収されるわけではなく、乳牛ふん尿スラリー中の肥料成分が作物に吸収される割合は基準肥効率として定められている¹³⁾。北海道施肥ガイド2010によれば、乳牛ふん尿スラリーの窒素、リン酸、カリのそれぞれの基準肥効率は0.4、0.4、0.8であり、この基準肥効率を乳牛ふん尿スラリーの各肥料成分分析値に乘じることにより、化学肥料に換算することができる。また、基準肥効率とは別に乳牛ふん尿スラリーの品質と散布時期による補正係数が定められている¹³⁾。本試験で使用した乳牛ふん尿スラリー中にはカリウムが多く含まれている。そのため、乳牛ふん尿スラリー散布量の上限は、一部の試験区を除きカリウム含有量により決定された。不足する成分は、化学肥料により補った。化学肥料は硫酸アンモニウム、過リン酸石灰および硫酸カリを用いた。表29、30に乳牛ふん尿スラリー散布量と散布した乳牛ふん尿スラリー中に含まれる全炭素量を示す。また、表31、32に各試験区の施肥量を示す。表31、32に示したふん尿スラリーの化学肥料換算値は、基準肥効率および補正係数を用いて換算した値である。各試験区への施肥方法は、化学肥料を散布した後、取手付きビーカーに入れた乳牛ふん尿スラリーを試験区全体へ表面散布した(写真1)。施肥日は2013年の早春が5月16日、一番草刈取後が7月4日であり、2014年の早春が5月14日、一番草刈取後が7月17日である。

表 29 乳牛ふん尿スラリー散布量と全炭素量(2013年)

試験区名	早春施肥		一番草刈取後施肥		年間合計	
	乳牛ふん尿スラリー散布量(L/m ²)	散布したふん尿スラリーに含まれる全炭素量(g)	乳牛ふん尿スラリー散布量(L/m ²)	散布したふん尿スラリーに含まれる全炭素量(g)	乳牛ふん尿スラリー散布量(L/m ²)	散布したふん尿スラリーに含まれる全炭素量(g)
原料液A	4.4	143.0	1.8	41.8	6.2	184.8
消化液A	6.2	56.3	2.3	13.8	8.5	70.1
消化液B	3.6	85.0	1.9	34.6	5.5	119.6
消化液C	4.4	43.5	2.3	40.9	6.7	84.4
曝気処理液	8.8	30.0	3.2	18.0	12.0	48.0

表 32 各試験区への施肥量(2014年)

試験区名	肥料成分	早春施肥(g/m ²)			一番草刈取後施肥(g/m ²)			年間合計施肥量(g/m ²)
		化学肥料	ふん尿スラリーの化学肥料換算(※)	小計	化学肥料	ふん尿スラリーの化学肥料換算(※)	小計	
原料液A	窒素(N)	2.03	8.64	10.67	2.90	2.43	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	2.61	2.72	5.33	1.37	1.30	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.17	11.83	12.00	0.01	5.99	6.00	18.0
消化液A	窒素(N)	6.98	3.69	10.67	3.93	1.40	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	2.50	2.83	5.33	1.59	1.08	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.15	11.85	12.00	0.10	5.90	6.00	18.0
消化液B	窒素(N)	6.32	4.35	10.67	2.87	2.46	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	3.28	2.05	5.33	1.46	1.21	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.15	11.85	12.00	0.06	5.94	6.00	18.0
消化液C	窒素(N)	6.67	4.00	10.67	3.31	2.02	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	4.18	1.15	5.33	1.58	1.09	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.23	11.77	12.00	0.25	5.75	6.00	18.0
曝気処理液	窒素(N)	5.43	5.24	10.67	3.13	2.20	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	3.97	1.36	5.33	1.68	0.99	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.17	11.83	12.00	0.15	5.85	6.00	18.0
化学肥料	窒素(N)	10.67	-	10.67	5.33	-	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	5.33	-	5.33	2.67	-	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	12.00	-	12.00	6.00	-	6.00	18.0

※:「北海道施肥ガイド2010」¹³⁾pp.208~209の換算方法により算出

表 30 乳牛ふん尿スラリー散布量と全炭素量(2014年)

試験区名	早春施肥		一番草刈取後施肥		年間合計	
	乳牛ふん尿スラリー散布量(L/m ²)	散布したふん尿スラリーに含まれる全炭素量(g)	乳牛ふん尿スラリー散布量(L/m ²)	散布したふん尿スラリーに含まれる全炭素量(g)	乳牛ふん尿スラリー散布量(L/m ²)	散布したふん尿スラリーに含まれる全炭素量(g)
原料液A	6.8	119.0	2.7	84.8	9.5	203.8
消化液A	4.1	44.7	1.8	29.2	5.9	73.9
消化液B	4.1	72.6	2.2	30.6	6.3	103.2
消化液C	3.7	44.0	1.7	29.1	5.4	73.1
曝気処理液	6.8	54.1	3.8	44.1	10.6	98.2



写真 1 乳牛ふん尿スラリーの施肥状況

表 31 各試験区への施肥量(2013年)

試験区名	肥料成分	早春施肥(g/m ²)			一番草刈取後施肥(g/m ²)			年間合計施肥量(g/m ²)
		化学肥料	ふん尿スラリーの化学肥料換算(※)	小計	化学肥料	ふん尿スラリーの化学肥料換算(※)	小計	
原料液A	窒素(N)	5.48	5.19	10.67	3.37	1.96	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	3.00	2.33	5.33	1.63	1.04	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.12	11.88	12.00	0.10	5.90	6.00	18.0
消化液A	窒素(N)	6.08	4.59	10.67	0.06	5.27	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	3.16	2.17	5.33	2.07	0.60	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.03	11.97	12.00	1.56	4.44	6.00	18.0
消化液B	窒素(N)	5.70	4.97	10.67	2.67	2.66	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	3.49	1.84	5.33	1.45	1.22	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.19	11.81	12.00	0.15	5.85	6.00	18.0
消化液C	窒素(N)	3.63	7.04	10.67	2.59	2.74	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	3.22	2.11	5.33	1.66	1.01	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.12	11.88	12.00	0.02	5.98	6.00	18.0
曝気処理液	窒素(N)	5.57	5.10	10.67	0.02	5.31	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	3.75	1.58	5.33	2.06	0.61	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	0.12	11.88	12.00	1.68	4.32	6.00	18.0
化学肥料	窒素(N)	10.67	-	10.67	5.33	-	5.33	16.0
	リン酸(P ₂ O ₅)	5.33	-	5.33	2.67	-	2.67	8.0
	カリ(K ₂ O)	12.00	-	12.00	6.00	-	6.00	18.0

※:「北海道施肥ガイド2010」¹³⁾pp.208~209の換算方法により算出

5. 1. 4 温室効果ガス測定方法

温室効果ガスの測定はチャンバー法により行った(写真2)。チャンバーの大きさは、内寸30cm×30cm×30cmである。このチャンバーは任意の設定時間でふたを自動開閉することができる。CO₂の測定は、赤外線式CO₂分析計(LI-820またはLI-6252、LI-COR、USA)を用い、チャンバーとCO₂分析計間で気体を循環させ、測定値を1分毎にロガーへ記録した。赤外線式CO₂分析計は、校正ガスを用いて1~2ヶ月毎に校正を行った。CH₄とN₂O分析用気体の採取は、チャンバー内の気体をシリンジで約30ml採取し、15mlの真空バイアルビンに圧入した。この採取操作を、ふたを閉めた直後、ふたを開けてから10分後および20分後におこなった。CH₄およびN₂Oの分析は、バイアルビン中の試料ガス濃度の減衰が非常に小さい採取後5日以内に²⁸⁾、ガスクロマトグラフィー(CH₄:GC-14B、N₂O:GC-2014、Shimazu, JAPAN)を用いて行った。CO₂の測定およびガス採取は午前と午後1回ずつ行い、3日連続で実施した。施肥直後のみ、1週間連続で測定した。なお、チャンバーは1~2週間毎に他のブロックへ移設し、チャンバー移設時には移設先の地上部の植物体を刈り取って除去した。これは、同一地点での観測では常に地上部の植物体が刈り取られた状態となり、翌年の牧草の再生長に影響を及ぼすと考えたためである。2013年の測定期間は4月19日から11月17日まで、2014年の測定期間は5月4日から11月16日までである。その間、両年とも、一番草の刈取りが6月下旬に、二番草の刈取りが8月下旬に実施された。刈取り方法は、試験区内は小型電動バリカンを用いて行った。また、試験区周辺

はチャンバーを一時撤去し、トラクターで牽引するディスクモアで刈り取りを行った。



写真2 自動開閉式チャンバー

5.2 結果

5.2.1 気温および雨量

図20に2013年の、図21に2014年の調査期間中の日平均気温と日降水量を示す。なお、気温は調査圃場から約14km離れた地点にある気象庁のアメダスで観測した値であり、降水量は調査圃場内で観測した値である。2013年は9~10月の降雨が多く、2014年は7~8月の降雨が多い年であった。

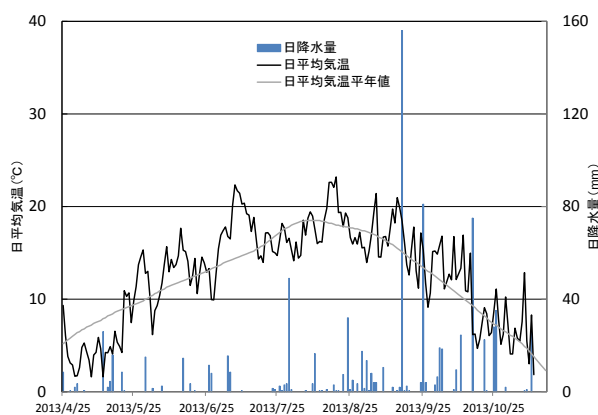


図20 日平均気温および日降水量 (2013)

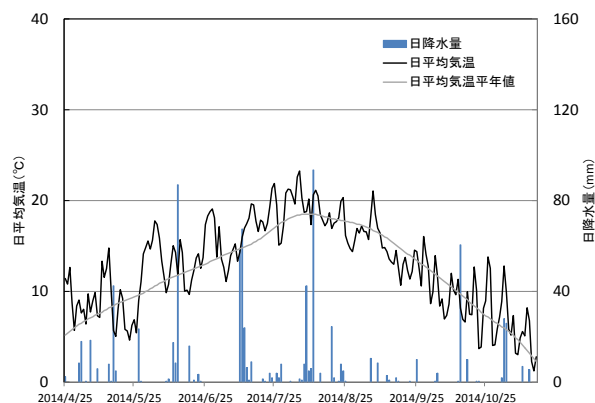


図21 日平均気温および日降水量 (2014)

5.2.2 CO₂フラックス

図22、23に2013年のCO₂フラックスを示す。すべての乳牛ふん尿スラリー散布区において、化学肥料区と比較して施肥直後のCO₂フラックスが大きい値を示した。図24、25に2014年のCO₂フラックスを示す。2013年と同様に、各種の乳牛ふん尿スラリー散布直後のCO₂フラックスが大きい値を示した。表33に、試験区毎のCO₂フラックスの平均値±標準偏差を示す。2013年のCO₂フラックス平均値は、原料液A区を除いた他の乳牛ふん尿スラリー散布区では化学肥料区に対して大きい値を示し、統計学的に有意な差が認められた。2014年のCO₂フラックスは、すべての乳牛ふん尿スラリー散布区において、化学肥料区に対して有意に大きい値を示した。

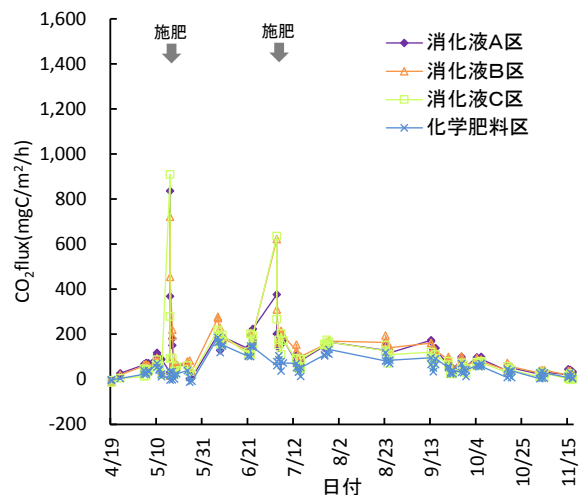


図22 CO₂フラックス (2013その1)

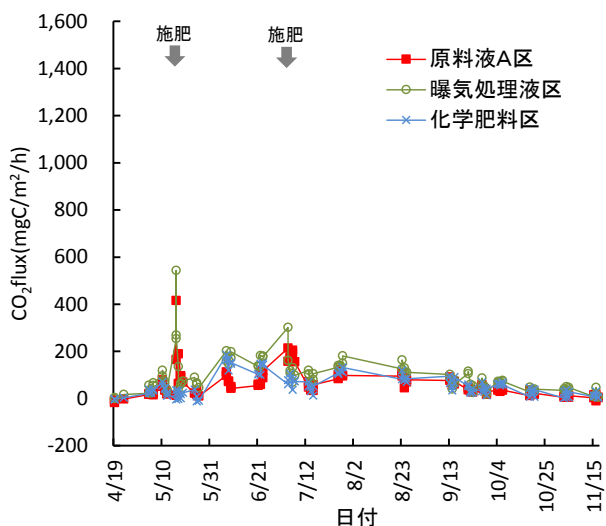


図 23 CO₂フラックス (2013 その2)

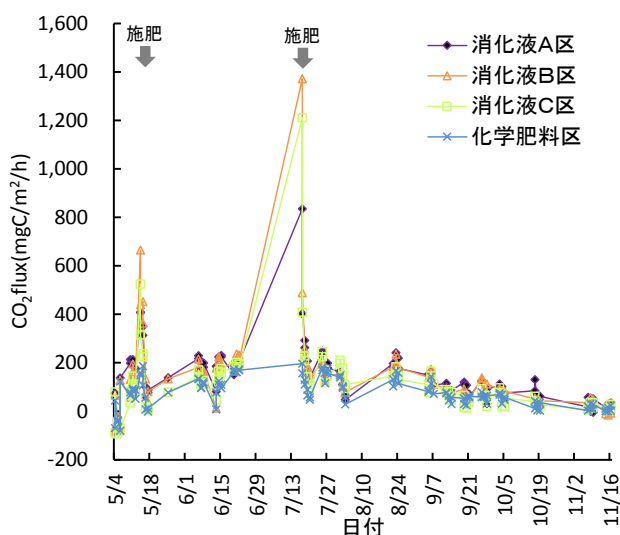


図 24 CO₂フラックス (2014 その1)

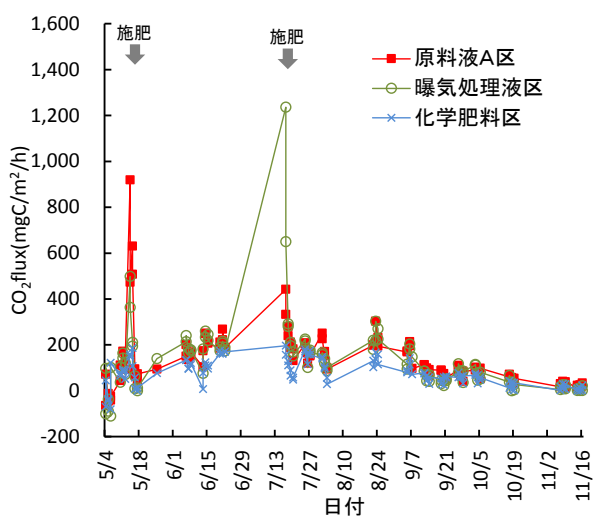


図 25 CO₂フラックス (2014 その2)

表 33 CO₂フラックス平均値

試験区名	mgC/m ² /h	
	2013年	2014年
原料液A	61 ± 60 a	139 ± 132 b
消化液A	105 ± 98 bc	140 ± 114 b
消化液B	116 ± 107 b	139 ± 159 b
消化液C	93 ± 115 c	108 ± 139 c
曝気処理液	91 ± 74 c	130 ± 152 bc
化学肥料	55 ± 60 a	77 ± 59 a

数値は、平均値±標準偏差
アルファベットの小文字は、異なる文字間に5%水準で有意な差があることを示す(Tukey法による多重比較検定)

5. 2. 3 CH₄フラックス

図 26 に 2013 年の CH₄ フラックスを、図 27 に 2014 年の CH₄ フラックスを示す。乳牛ふん尿スラリー散布直後に、CH₄ フラックスの大きな値が観測された。表 34 に試験区毎の CH₄ フラックスの平均値±標準偏差を示す。2013 年および 2014 年の両年とも、化学肥料区の平均値はマイナスとなった。また、消化液 C 区および曝気処理液区の平均値はプラスとなったが、いずれの試験区の間にも有意な差は認められなかった。

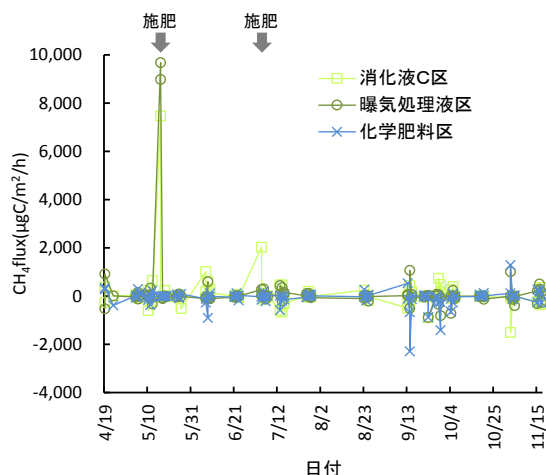


図 26 CH₄フラックス (2013)

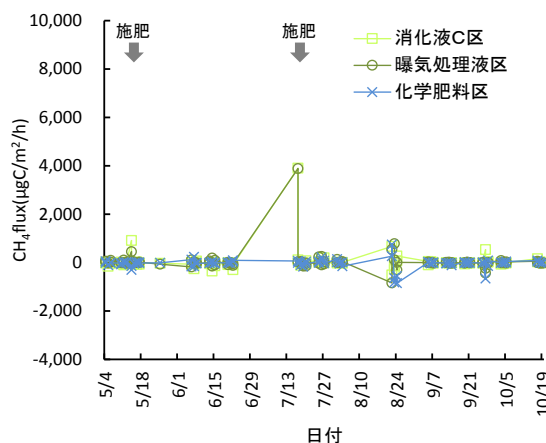


図 27 CH₄フラックス (2014)

表 34 CH₄ フラックス平均値

試験区名	mgC/m ² /h	
	2013年	2014年
消化液C	90 ± 810 n.s.	34 ± 399 n.s.
曝気処理液	180 ± 1305 n.s.	39 ± 398 n.s.
化学肥料	-65 ± 355 n.s.	-28 ± 180 n.s.

数値は、平均値±標準偏差
n.s.は有意な差がないことを示す(Tukey法による多重比較検定)

表 35 N₂O フラックス平均値

試験区名	μgN/m ² /h	
	2013年	2014年
消化液C	23 ± 82 b	17 ± 35 a
曝気処理液	20 ± 59 a	33 ± 92 b
化学肥料	8 ± 19 a	5 ± 11 a

数値は、平均値±標準偏差
アルファベットの小文字は、異なる文字間に5%水準で有意な差があることを示す(Tukey法による多重比較検定)

5. 2. 4 N₂O フラックス

図 28 に 2013 年の N₂O フラックスを、図 29 に 2014 年の N₂O フラックスを示す。両年とも、春の施肥時には N₂O フラックスは大きい値を示さなかったが、夏の施肥時には、消化液 C 区および曝気処理液区で大きい値を示した。表 35 に試験区毎の N₂O フラックスの平均値±標準偏差を示す。乳牛ふん尿スラリー散布区では両年とも化学肥料区と比較して大きい値を示し、2013 年は消化液 C 区が、2014 年は曝気処理液区が化学肥料区よりも有意に大きい値を示した。

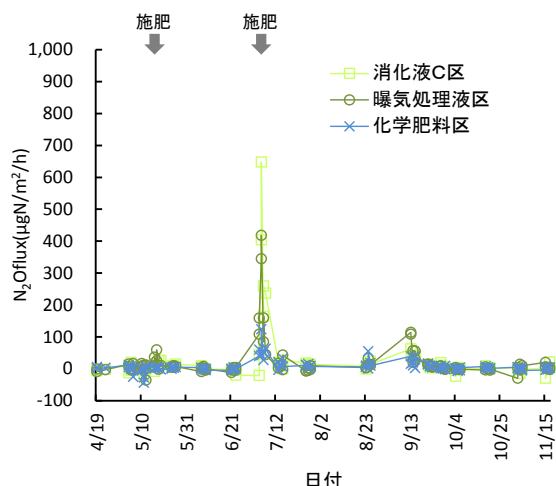


図 28 N₂O フラックス (2013)

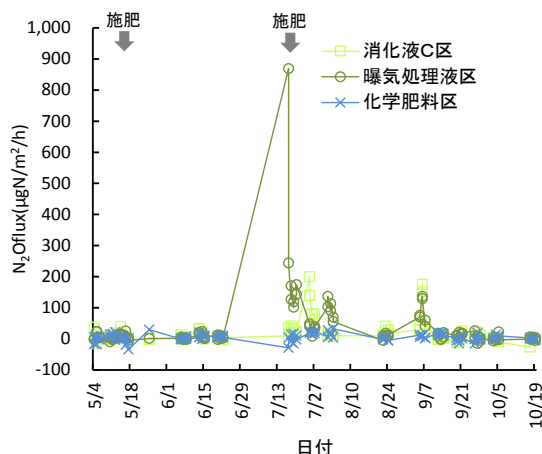


図 29 N₂O フラックス (2014)

5. 3 考察

藤川ら²⁹⁾は、消化液区の CO₂ フラックスの平均値は無施肥区より大きく、C を含む消化液の施用によって CO₂ フラックスが大きくなることが確認されたと述べている。本研究の結果も、乳牛ふん尿スラリーによる炭素供給により CO₂ フラックスが大きくなったことが要因の一つとして考えられる。ただし、表 29 に示したように、2013 年に散布した乳牛ふん尿スラリー中に含まれる全炭素量は原料液 A 区で最も多いが、2013 年の原料液 A 区の CO₂ フラックスは大きくなっておらず、今回の結果からはその理由を明らかにできなかった。

藤川ら²⁹⁾は、消化液区および無施肥区のどちらの区においても、CH₄ フラックスは負の値を取り、土壌中に CH₄ が吸収されていることが確認されたと述べている。また、消化液区のスラックスの平均値の方が無施肥区より大きい傾向がみられたと述べている。一方、中村ら³⁰⁾は、消化液施用直後にごく微量の CH₄ の発生が見られたが、CH₄ の発生、吸収の明確な傾向は見られなかったと述べている。本研究では、消化液 C 区および曝気処理液区において乳牛ふん尿スラリー散布直後に CH₄ フラックスの増加が観測された。嫌気性発酵では CH₄ が発生するため、消化液からは CH₄ が揮散する。また、好気性発酵後の曝気処理液からも CH₄ が発生する場合がある³¹⁾。すなわち、乳牛ふん尿スラリー散布直後の CH₄ フラックスの増加は、乳牛ふん尿スラリー中の CH₄ が大気中へ放出されたためと考えられる。ただし、藤川ら²⁹⁾の結果は消化液を散布した裸地圃場での測定値であり、中村ら³⁰⁾の結果は、コマツナまたはホウレンソウを栽培しているライシメーターでの測定値である。本研究では牧草地へ乳牛ふん尿スラリーを散布した結果であり、地表面での乳牛ふん尿スラリーの滞留状況や土壌中への浸透速度が裸地圃場やライシメーターとは異なると思われるが、これらが CH₄ フラックスの違いにどのように影響しているか

は明確ではない。

中村ら³⁰⁾は、土壌が乾燥したライシメーターに硫酸を施用した直後ではN₂O発生量が増加せず、その後の降雨で土壌水分量が多くなった後、N₂Oの発生量が増加したと述べている。また、消化液施用量が多いほどN₂Oの発生量が多く、その要因として、消化液施用にともない土壌水分量が増加したことをあげている。本研究では、2013年の春施肥時には散布前の24時間に16mmの降雨があり、2014年の春施用時には散布前の4日間に降雨はなく、散布後24時間に8mmの降雨が観測されており、土壌の乾燥状態に関係なく、両年とも春施用時にはN₂Oフラックスが増加していない。一方、一番草刈取後の施肥時には、2013年では3つの試験区すべてで、2014年では消化液C区と曝気処理液区でN₂Oフラックスが増加している。2013年は施肥直後から小雨が降り出し、施肥後24時間で18mmの降雨が観測され、2014年は施肥2日前に9mmの降雨が観測された。また、2013、2014年の両年とも9月にN₂Oフラックスが増加しており、2013年は観測前日に2mmの降雨が、2014年は10.5mmの降雨が観測されている。このように、N₂Oフラックス増加前の降雨量は大小さまざまであり、今回の結果からは土壌水分量とN₂Oフラックスの関係は判然としなかった。年間のフラックスの平均値では、表35に示したように消化液および曝気処理液散布区のN₂Oフラックスが大きい値を示した。藤川ら²⁹⁾および中村ら³⁰⁾の報告では、消化液散布区でN₂Oフラックスが増加したと述べられており、本試験でも調査年による違いはあるものの、乳牛ふん尿スラリー散布区においてN₂Oフラックスが増加する結果となった。

本研究では、乳牛ふん尿スラリー散布時に発生するガスとしてCO₂、CH₄、N₂Oを測定した。乳牛ふん尿スラリー散布区のCH₄フラックスは、化学肥料区と比較して有意な差は認められなかった。一方、乳牛ふん尿スラリー散布区のCO₂フラックスおよびN₂Oフラックスは、化学肥料区と比較して有意に大きい値を示した。すなわち、牧草地への乳牛ふん尿スラリー散布においても、畑地への施用時と同様に、CO₂フラックスおよびN₂Oフラックスの増加が認められた。

6 廃棄物系改質バイオマスの運搬距離とエネルギー収支⁴⁷⁾

6.1 材料および方法

6.1.1 エネルギー収支の検討方法

エネルギー収支の検討を行う際には、その検討範囲および期間を明確にする必要がある。本報告でのエネルギー収支の検討範囲を図30に示す。バイオガスプラントでは、バイオガスをCHPで電力および熱へエネルギー変換してプラント内部で消費し、余剰分はプラント外部へ供給することができる。また、不足するエネルギーは外部から投入する必要がある。さらに、発酵原料のふん尿スラリーおよび副原料の食品加工残渣をバイオガスプラントまで運搬するためのエネルギー(F)が必要となる。そこで本報告でのエネルギー収支の検討は、投入化石エネルギー(A)および(F)に対する産出エネルギー(E)の比率をエネルギー投入産出比(E/(A+F))と定義し、これを指標として評価する(式(3))。すなわち、エネルギー投入産出比が1より大きければ、投入する化石エネルギー量より産出するエネルギー量が大きく、新たにエネルギーを産出することを意味する。

エネルギー投入産出比

$$= \frac{\text{産出エネルギー (E)}}{\text{投入化石エネルギー ((A)+(F))}} \dots (3)$$

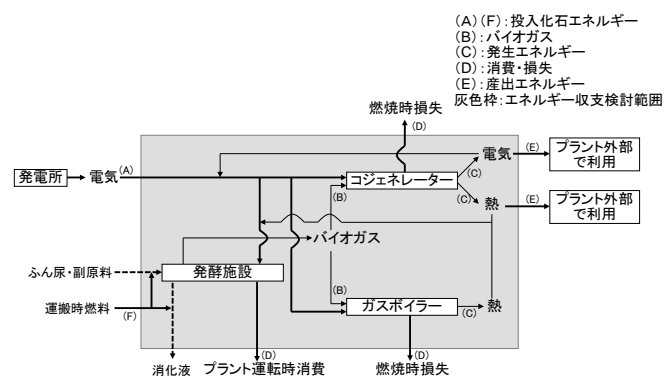


図30 バイオガスプラントにおけるエネルギー収支

6.1.2 解析対象バイオガスプラントの概要

解析の対象とした共同利用型バイオガスプラントは、北海道東部の別海町で稼働中の別海プラントである。図31に別海プラントのシステム構成の概要を示す。別海プラントは1,500m³の発酵槽を1基有しており、乳牛約1,000頭分のふん尿スラリーを処理することができる。発酵温度は37℃の中温発酵であ

る。また、複数の農家のふん尿スラリーを同じ発酵槽へ投入するため、病原菌などの拡散を防止する目的で、消化液を 55°C で 7.5 時間以上加熱処理する殺菌槽を有している。

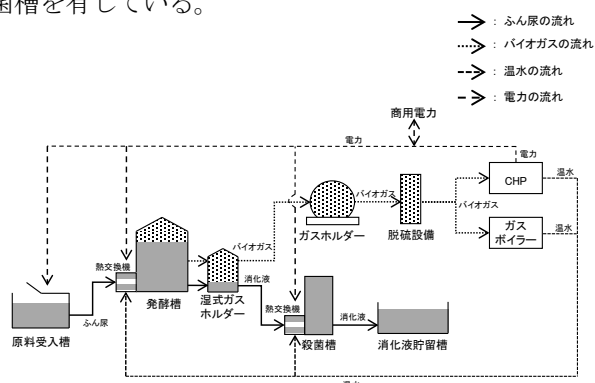


図 31 別海プラントのシステム構成

6. 1. 3 シミュレーションモデルの概要

解析に用いたバイオガスプラント運転シミュレーションモデルは中山ら³²⁾が開発したモデルを基本とし、別海プラントのエネルギー収支を検討できるように各種パラメータを変更して使用した³³⁾。主な入力条件は表 36 のとおりである。シミュレーションの計算は時間間隔を 1 分刻みとした。1 分刻みで連続して計算することにより、バイオガスプラントの実際の運転に近い状態でのシミュレーションが可能である³³⁾。シミュレーションの期間は、気温の年変化をシミュレーション結果に反映させるため、1 年間とした。

シミュレーションモデルの熱供給計算方法は図 32 のとおりである。なお、CHP の定格出力は、余剰バイオガスが発生しないようにするため、発生するバイオガスをすべて燃焼できる能力に設定した。

表 36 主な入力条件

入力条件	入力値
バイオガスのメタン濃度	61.8%
ガスボイラーのエネルギー変換効率	熱: 80%
CHP のエネルギー変換効率	電力: 30% 熱: 51%
発酵温度	37°C
殺菌温度	55°C

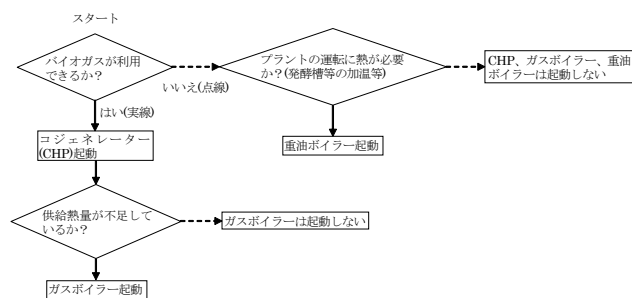


図 32 シミュレーションモデルの熱供給計算方法

6. 1. 4 設定条件

6. 1. 4. 1 ふん尿および副原料のバイオガスプラントへの投入量

表 37 にシミュレーションケースに設定した副原料の種類、適正投入量およびバイオガス単位発生量を示す。副原料を発酵槽へ一定量以上投入すると発酵障害が起こり、発酵が停止する可能性があるため、投入限界量を明らかにして投入量を適切に設定する必要がある⁵⁾。表 37 に示した適正投入量およびバイオガス単位発生量は、室内試験で求めた値をもとに設定した³⁴⁾。なお、廃乳、廃チーズホエイおよび乳業工場汚泥については、室内試験による投入限界量が未検証のため適正投入量が明らかにされておらず、表 37 に示した割合より多く投入できる可能性があるが、ここでは表 37 に示した割合を設定条件とした。ふん尿スラリーの投入量は、副原料の投入がなく、ふん尿スラリーのみを発酵原料とする場合で 50m³/d とし、副原料を投入する場合は、副原料の投入量と同量のふん尿スラリー投入量を減らし、ふん尿スラリーと副原料を合わせた量が 50m³/d となるように設定した。重さから体積への単位変換に用いる比重は文献値を参考とし、文献値を得られなかったふん尿スラリー、乳業工場汚泥および廃チーズホエイの比重は 1.0 とした。

表 37 副原料の適正投入量およびバイオガス単位発生量

	ふん尿または副原料の適正投入量 (kg/d)	ふん尿または副原料 1m ³ 当たりのバイオガス発生量 (m ³ /m ³)	比重	参考文献
①ふん尿スラリー	50000	25	1	
②乳業工場汚泥	5000	22	1	
③廃チーズホエイ	5000	45	1	
④廃乳	10000	107	1.032	※1
⑤廃チーズ	4000	408	1.094	※2
⑥廃生クリーム	5000	445	0.99	※1
⑦廃バター	5000	730	0.966	※3
⑧廃脱脂粉乳	5000	833	1.375	※1

※1: 食品科学便覧編集委員会 (1978)³⁵⁾

※2: (株)島津製作所 (2015)³⁶⁾

※3: 土井豊彦, 神崎幹雄, 渡辺正, 中沼浩, 渋谷美雪, 松本清 (1991)³⁷⁾

6. 1. 4. 2 副原料の運搬距離とエネルギー消費

過去に別海プラントへ搬入された副原料の発生地は、直線距離で約 100km 圏内に位置している³⁴⁾。また、100km 圏内に位置する乳業工場のうち、別海プラントから最も遠方の乳業工場までの運搬距離は約 90km である。そこで、副原料の運搬距離は最大 100km に設定した。輸送時の燃費は軽油 1L で 1.5km の走行とした。これは、別海プラントで使用しているアームロール車にバキュームタンクを搭載してふん尿スラリーを運搬した際の聞取り値である。また、1 回当たりの運搬量は、アームロール車の最大積載量である 8.1t に設定した⁵⁾。なお、軽油の単位発熱

量は 37.7GJ/kl に設定した³⁸⁾。運搬回数は、年間の副原料投入量を 1 回当たりの運搬量である 8.1t で除して求めた。

6. 1. 4. 3 ふん尿運搬時のエネルギー消費

ふん尿の搬入、搬出、散布時には、運搬車両の燃料として軽油が消費される。(独)北海道開発土木研究所⁵⁾では、別海プラントにおけるふん尿の搬入、搬出、散布時の年間 CO₂ 排出量を 105,244kg-CO₂ と算出している。そこでふん尿運搬時のエネルギー消費量は CO₂ 排出量を軽油の温室効果ガス排出係数³⁸⁾である 0.0187tC/GJ (=0.0686tCO₂/GJ) で除して求めた。なお、副原料の使用に伴いふん尿搬入量が少なくなる場合には、ふん尿搬入時の軽油消費量も減少する。そこで、副原料使用時のふん尿搬入時エネルギー消費量は、ふん尿搬入量の減少割合と同じ割合で軽油消費量も減少すると考えて算出した。

6. 2 結果および考察

6. 2. 1 副原料の運搬距離が同じ場合のエネルギー収支

表 38 に副原料の運搬距離が 100km の場合のエネルギー収支を示す。プラント運転時投入化石エネルギー(A)では重油は使用されず、購入電力のみが使用される結果となった。購入電力は、ケース①～③では約 261～355GJ/y であるが、ケース④～⑧では 3～39GJ/y となり、ケース①～③と比較して少ない結果となった。これは、発生するバイオガス(B)の多少に起因する CHP による発電量の違いが影響している。すなわち、ケース②の乳業工場汚泥のバイオガス単位発生量はふん尿スラリーよりも小さいため、ケース①よりもバイオガス発生量が少ない。また、ケース③の廃チーズホエイの単位発生量はふん尿スラリーよりも大きい、年間のバイオガス発生量の増加率は、ケース①のふん尿スラリーのみの場合と比較して約 8% と小さい。一方、ケース④～⑧では、投入する副原料のバイオガス単位発生量が 107～1,166m³/m³ と非常に大きいため、年間のバイオガス発生量も多くなり、このことが購入電力量の差に影響している。

発生エネルギー(C)では、電力は上述のとおりケース③とケース④の間で大きく変化した。熱は、CHP の発熱量で不足する時間帯にガスボイラーによる熱供給が行われており、ケース③とケース④の間でガスボイラーによる熱供給が大きく減少している。な

お、発生するバイオガスのみで必要熱量が供給されたため、重油ボイラーは使用されなかった。

消費・損失(D)では、バイオガスプラントへ投入する原料の合計量はいずれのケースも 50m³/d と同量のため、原料を保温するために必要な熱量である「プラント運転時消費熱」はすべてのケースで 5,690GJ/y を示した。また、「プラント運転時消費電力」も購入分と CHP 発電分の合計では約 1,066GJ/y となり、すべてのケースではほぼ同じ値を示した。

プラント外部へ供給可能な産出エネルギー(E)では、バイオガス発生量が増加するケース④以降で大きく、さらにケース⑤以降では電力よりも熱エネルギーが大きい値を示した。

運搬時投入化石エネルギー(F)では、副原料の搬入距離は片道 100km であり、また、ふん尿の搬入距離は同一農家から運搬するためいずれのケースも搬入距離は同じであるが、それぞれの運搬量が異なるために違いが生じた。これは、副原料の投入量分と同量のふん尿投入量が減少するためである。一方、ふん尿搬出時および散布時は運搬距離および運搬量がいずれのケースも同じであるため、運搬時投入化石エネルギーに違いは生じなかった。

これらの結果から、エネルギー投入産出比 (E/(A+F)) を求めると、ケース④～⑧ではエネルギー投入産出比が 1 より大きくなり、投入エネルギーよりも産出エネルギーが大きく、新たにエネルギーを産出する結果となった。一方、ケース①～③は 1 未満となり、投入エネルギーよりも産出エネルギーが小さい結果となった。投入エネルギーと産出エネルギーの差の大小を見るため、産出エネルギーからプラント運転時投入化石エネルギーおよび運搬時投入化石エネルギーを引いた値 ((E)-(A)-(F)) を見ると、ケース③で -537GJ/y を示し、副原料の搬入時燃料消費エネルギーの 1,136GJ/y を小さくできれば、エネルギー収支を改善できることが明らかとなった。

そこで、表 39 に副原料の運搬距離が 50km の場合の運搬時投入化石エネルギーとエネルギー投入産出比を示す。なお、投入する副原料の量は変化しないため、バイオガスプラントの運転に関する(A)～(E)は、運搬距離が 100km の場合の表 38 と同じである。ケース③の廃チーズホエイのエネルギー投入産出比は 1.0 となり、投入エネルギーよりも産出エネルギーが大きくなり、エネルギー収支を改善できることが明らかとなった。

6.4 廃棄物系改質バイオマスの農地等への施用による土壌の生産性改善技術に関する研究

表 38 副原料の運搬距離が 100km の場合のエネルギー収支

シミュレーションケース	(GJ/y)							
	(エネルギー投入産出比のみ無単位)							
	①乳牛ふん尿のみ	②乳牛ふん尿 + 乳業工場汚泥	③乳牛ふん尿 + 廃チーズホエイ	④乳牛ふん尿 + 廃乳	⑤乳牛ふん尿 + 廃チーズ	⑥乳牛ふん尿 + 廃生クリーム	⑦乳牛ふん尿 + 廃バター	⑧乳牛ふん尿 + 廃脱脂粉乳
プラント運転時投入化石エネルギー(A)	326	355	261	15	39	16	13	3
購入電力	326	355	261	15	39	16	13	3
重油	0	0	0	0	0	0	0	0
バイオガス(B)	10,095	9,980	10,900	16,681	22,534	27,037	38,514	43,004
発生エネルギー(C)	8,149	8,055	8,807	13,511	18,251	21,898	31,195	34,833
電力(CHP)	2,187	2,099	2,617	4,974	6,690	8,084	11,534	12,896
発熱(CHP)	3,719	3,569	4,450	8,457	11,373	13,743	19,607	21,924
発熱(ガスボイラー)	2,243	2,387	1,740	80	188	71	54	13
発熱(重油ボイラー)	0	0	0	0	0	0	0	0
消費・損失(D)	8,702	8,681	8,849	9,925	11,040	11,894	14,075	14,927
燃烧時損失	1,946	1,926	2,093	3,170	4,284	5,138	7,319	8,171
プラント運転時消費電力(購入分)	326	355	261	15	39	16	13	3
プラント運転時消費電力(CHP発電分)	740	710	805	1,050	1,027	1,050	1,053	1,063
プラント運転時消費熱	5,690	5,690	5,690	5,690	5,690	5,690	5,690	5,690
産出エネルギー(E)	1,720	1,654	2,312	6,770	11,532	15,158	24,453	28,081
電力	1,448	1,389	1,812	3,924	5,662	7,034	10,481	11,834
熱	272	265	500	2,846	5,870	8,124	13,972	16,247
運搬時投入化石エネルギー(F)	1,534	2,588	2,588	3,637	2,384	2,588	2,585	2,611
副原料の搬入時燃料消費(片道100km)	0	1,136	1,136	2,267	910	1,136	1,136	1,136
ふん尿の搬入時燃料消費	822	740	740	658	762	740	737	763
ふん尿の搬出時燃料消費	488	488	488	488	488	488	488	488
ふん尿の散布時燃料消費	224	224	224	224	224	224	224	224
(E)-(A)-(F)	-140	-1,289	-537	3,118	9,109	12,554	21,855	25,467
エネルギー投入産出比(E/(A+F))	0.92	0.56	0.81	1.9	4.8	5.8	9.4	11

表 39 副原料の運搬距離が 50km の場合のエネルギー収支

シミュレーションケース	(GJ/y)							
	(エネルギー投入産出比のみ無単位)							
	①乳牛ふん尿のみ	②乳牛ふん尿 + 乳業工場汚泥	③乳牛ふん尿 + 廃チーズホエイ	④乳牛ふん尿 + 廃乳	⑤乳牛ふん尿 + 廃チーズ	⑥乳牛ふん尿 + 廃生クリーム	⑦乳牛ふん尿 + 廃バター	⑧乳牛ふん尿 + 廃脱脂粉乳
運搬時投入化石エネルギー(F)	1,534	2,020	2,020	2,504	1,929	2,020	2,017	2,043
副原料の搬入時燃料消費(片道50km)	0	568	568	1,134	455	568	568	568
ふん尿の搬入時燃料消費	822	740	740	658	762	740	737	763
ふん尿の搬出時燃料消費	488	488	488	488	488	488	488	488
ふん尿の散布時燃料消費	224	224	224	224	224	224	224	224
(E)-(A)-(F)	-140	-721	31	4,251	9,564	13,122	22,423	26,035
エネルギー投入産出比(E/(A+F))	0.92	0.70	1.0	2.7	5.9	7.4	12	14

6.2.2 運搬距離および運搬量が変化した場合のエネルギー収支

前項で述べたように、廃チーズホエイを副原料として利用するケースでは、副原料の運搬距離を短くすることでエネルギー収支を改善できることが明らかとなった。表 38、39 のケースでは、副原料の運搬量は適正投入量を設定値としたが、運搬量を変えた場合には運搬時投入化石エネルギーに変化が生じるため、エネルギー収支も変化する。そこで、運搬距離を 5km 毎に、また運搬量を 500kg/d 毎に変化させた場合のエネルギー収支を検討した。図 33 に廃チーズホエイを副原料として利用する場合で、エネルギー投入産出比が 1 より大きくなる運搬距離と運搬量の関係を示す。適正投入量の 5,000kg/d を運搬する場合には、運搬距離が片道 52km 以下であれば、エネルギー投入産出比が 1 より大きくなることが明らかとなった。また、運搬距離が短くなれば、運搬量を適正投入量より少なくしてもエネルギー投入産出比が 1 より大きくなることが明らかとなった。なお、廃チーズホエイよりもバイオガス単位発生量が大きい廃乳、廃チーズ、廃生クリーム、廃バターおよび廃脱脂粉乳では、運搬距離が片道 100km で投入量が 500kg/d の場合でも、エネルギー投入産出比が 1 より大きい値であったため、運搬距離と運搬量との詳細な検討は行わなかった。また、乳業工場汚泥のケースでは、ふん尿スラリーよりバイオガス単位発生量が小さいため、運搬距離を短くしてもエネルギー投入産出比を 1 以上に改善することはできない。

このように、投入する副原料の種類によっては、運搬距離と運搬量を変化させることで、エネルギー投入産出比を 1 より大きい値に改善できることが明らかとなった。

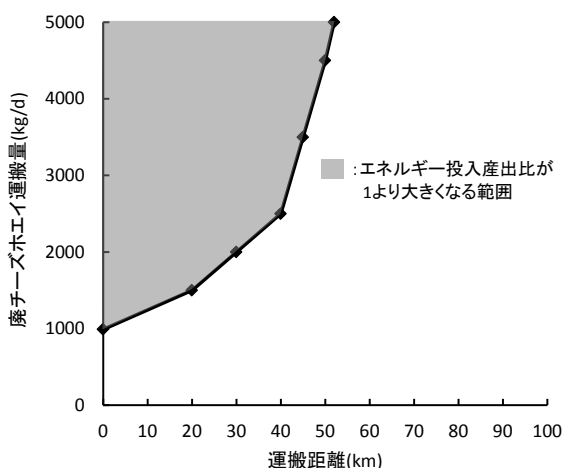


図 33 廃チーズホエイの運搬距離と運搬量との関係

7 農村—都市間の廃棄物系改質バイオマスの広域利用モデルの提案⁴⁸⁾

7.1 材料および方法

7.1.1 エネルギー収支の検討方法

エネルギー収支の検討方法は、前述の 6.1.1 と同様とした。

7.1.2 シミュレーションモデル

使用したシミュレーションモデルは、前述の 6.1.3 と同様とした。

7.1.3 食品加工残渣の種類発生量と運搬距離

バイオガスプラントへ副原料として投入する食品加工残渣は、これまでの研究³⁴⁾で重金属などによる汚染がないことが明らかとなっている乳業工場から発生するものを対象とした。一般社団法人北海道乳業協会へ加盟している会社のうち、釧路、根室地域で稼働している工場は 12 工場ある³⁹⁾。また、乳業工場から排出される食品加工残渣の量と種類については、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」によりその処理状況の報告義務がある多量排出事業者を対象とし、北海道庁から公開されている報告資料を基に整理した⁴⁰⁾。なお、多量排出事業者とは報告の前年度に産業廃棄物を 1,000t 以上または特別管理産業廃棄物を 50t 以上発生させた事業者のことである。図 34 に乳業工場の位置を示す。また、記号 A~E で示した多量排出事業者の工場からバイオガスプラントまでの運搬距離および食品加工残渣の種類と発生量を表 40 に示す。なお、公開されている報告資料に記載されている廃棄物の種類には、汚泥を除き、表 40 に示した具体的品名は表示されておらず、「動植物性残渣」と記載されている。そこで、ここでは動



図 34 乳業工場とバイオガスプラントの位置

表 40 乳業工場から発生する食品加工残渣の発生量

乳業工場	バイオガスプラントと工場との距離(km)	汚泥	食品加工残渣発生量(t/年)			
			動植物性残渣			
			廃チーズ	廃生クリーム	廃バター	廃脱脂粉乳
A	16	3438			106	
B	19	688				15
C	32	35999	151			
D	45	3729		6		
E	88	11188		3		
合計		55042	151	9	106	15

植物性残渣の具体名を、各工場の主要製品として整理した。

7. 1. 4 原料投入量とバイオガスプラントの規模

食品加工残渣をバイオガスプラントの副原料として使用する場合、副原料を一定量以上投入すると発酵障害が発生する可能性があるため、室内試験で適正投入量を明らかにする必要がある。既往の研究³⁴⁾では、乳業工場汚泥、廃生クリーム、廃バターおよび廃脱脂粉乳は重量換算で発酵槽への投入原料の10%まで、廃チーズは同じく8%までが適正投入割合であることが明らかになっている。表41に各原料のバイオガス単位発生量を示す。各工場から多量に発生している汚泥は、ふん尿よりもバイオガスの発生量が少ない。表42にシミュレーションで設定した原料投入量およびバイオガス発生量を示す。なお、図34および表40に示したように、工場Eは工場A~Dと比較してプラントからの距離が遠いため、ここでは工場A~Dの副原料を使用する場合と、工場A~Eの副原料を使用する場合を想定した。また、副原料は毎日同量投入する条件とした。

シミュレーションで設定するバイオガスプラントの規模は、表42に示した原料を処理可能な大きさにする必要がある。そこで表43に示したバイオガスプラントをシミュレーションモデルのパラメータとして設定した。なお、発酵槽の大きさは世界最大規模のバイオガスプラントであるデンマークのMaabjerg BioEnergyを参考として設定した⁴¹⁾。

バイオガスプラントで消費する電力および熱の設定条件は、過去に別海プラントで得られた実測値を基に、表44に示す比率で補正した。すなわち、電力および原料加温必要熱量は原料投入量の比率で、放熱量は発酵槽の表面積の比率で補正した。

そのほかの主な設定条件は表45の通りである。

7. 1. 5 ふん尿収集量と運搬距離

表46にふん尿運搬距離の算出基礎を示す。別海プ

表 41 各原料のバイオガス単位発生量

原料の種類	原料1m ³ 当たりのバイオガス発生量(m ³ /m ³)
汚泥	22
廃チーズ	449
廃生クリーム	441
廃バター	708
廃脱脂粉乳	1166
ふん尿スラリー	25

表 42 原料投入量およびバイオガス発生量

原料の種類	工場A~Dの副原料を使用する場合の投入量(t/d)		工場A~Eの副原料を使用する場合の投入量(t/d)	
	バイオガス発生量(m ³ /d)	バイオガス発生量(m ³ /d)	バイオガス発生量(m ³ /d)	バイオガス発生量(m ³ /d)
汚泥	120	2655.3	151	3332.7
廃チーズ	0.414	168.8	0.414	168.8
廃生クリーム	0.016	7.3	0.025	11.0
廃バター	0.290	211.9	0.290	211.9
廃脱脂粉乳	0.041	34.2	0.041	34.2
ふん尿スラリー	1214	30353.3	1548	38711.8
合計	1335	33431	1700	42470

表 43 バイオガスプラントの規模

原料の種類	プラント1	プラント2	別海プラント(参考)
	(工場A~Dの副原料を使用する場合)	(工場A~Eの副原料を使用する場合)	
発酵槽1基当たりの原料投入量(m ³)	8000	8500	1500
発酵槽数(基)	5	6	1
発酵槽形状	円柱形 (直径22m×高さ26m)	円柱形 (直径22m×高さ26m)	円柱形 (直径12.8m×高さ12.4m)

表 44 消費エネルギーの補正值

原料の種類	プラント1	プラント2	別海プラント
	(工場A~Dの副原料を使用する場合)	(工場A~Eの副原料を使用する場合)	
消費電力(倍)	26.7	34.0	1
原料加温熱量(倍)	26.7	34.0	1
放熱量(倍)	16.9	20.3	1

表 45 主な設定条件

条件	設定値
バイオガス中のメタン濃度	61.8%
ガスボイラーのエネルギー変換効率	熱:80%
CHPのエネルギー変換効率	電力:30% 熱:51%
発酵温度	37°C
殺菌温度	55°C

表 46 ふん尿運搬距離の算出基礎

原料の種類	プラント1	プラント2
	(工場A~Dの副原料を使用する場合)	(工場A~Eの副原料を使用する場合)
必要ふん尿量(t/d)	1335	1700
必要乳牛頭数(頭)	26700	34000
飼養密度(頭/ha)(※1)	1.61	1.61
必要乳牛頭数が飼育されている面積(ha)	16584	21118
プラントから酪農家までの距離(km)	5.14	5.80

※1: 飼養密度は、別海町の乳牛頭数102429頭⁴²⁾を別海町の耕地面積63500ha⁴³⁾で除した値である。

プラントは乳牛1,000頭分のふん尿を処理できる規模であり、一日あたりの原料投入量は50tである。そこで、乳牛1頭あたりのふん尿量を0.05t/d/頭(=50t/d/1,000頭)とし、原料ふん尿を収集するために必要な乳牛頭数を算出した。また、これらのふん

尿を収集する際の運搬距離は、プラントを中心とした円内に必要頭数が飼育されていると仮定し、別海町の乳牛飼養密度からその円の面積を求め、その半分の面積に相当する円周上に牛舎が配置されると仮定してその半径を運搬距離とした。なお、シミュレーションでは、家畜ふん尿のみを原料とする場合と副原料を投入する場合のエネルギー収支を比較するため、ふん尿のみを原料とする場合の頭数で運搬距離を設定した。

7. 1. 6 副原料およびふん尿運搬時のエネルギー消費

副原料運搬時のエネルギー消費は、輸送時の車輛の燃費を軽油 1L あたり 1.5km 走行として計算した。これは、別海プラントで使用しているアームロール車にバキュームタンクを搭載してふん尿スラリーを運搬した際の聞取り値である。また、1 回当たりの運搬量は、アームロール車の最大積載量である 8.1t に設定した⁵⁾。なお、軽油の単位発熱量は 37.7GJ/kl とし³⁸⁾、運搬回数は年間の副原料発生量を 1 回当たりの運搬量である 8.1t で除して求めた。

ふん尿運搬時のエネルギー消費は、ふん尿の搬入、搬出、散布時に分けて算出した。すなわち、既往の調査では⁵⁾、運搬距離を 5km とした場合の別海プラントにおけるふん尿の搬入、搬出、散布時の年間 CO₂ 排出量が明らかとなっており、運搬時の CO₂ 排出量を軽油の温室効果ガス排出係数³⁸⁾ で除して、運搬時のエネルギー消費量を求めた。この値を基に、表 46 に示した運搬距離およびふん尿運搬量の増加割合に応じて、エネルギー消費量を算出した。

7. 2 結果および考察

7. 2. 1 乳業工場 A~D の食品加工残渣を利用する場合のエネルギー収支

表 47 に副原料を工場 A~D から収集した場合のエネルギー収支を示す。投入化石エネルギー(A)では重油は使用されず、購入電力のみが使用される結果となった。発生するバイオガス(B)では、副原料を投入するケース②がふん尿のみを原料とするケース①よりわずかに多い結果となった。これは、表 40 および表 42 に示したとおり、工場からの発生量は少ないがバイオガスの単位発生量の大きい廃チーズ、廃生クリーム、廃バターおよび廃脱脂粉乳の投入により、バイオガス発生量が増加した結果である。そのため、発生エネルギー(C)、消費・損失(D)および産出エネ

表 47 工場 A~D の副原料を収集する場合のエネルギー収支

シミュレーションケース	(エネルギー投入産出比のみ無単位)	
	①乳牛ふん尿のみ	②乳牛ふん尿 + 副原料(工場A~D)
投入化石エネルギー(A)	4,643	4,514
購入電力	4,643	4,514
重油	0	0
バイオガス(B)	269,468	269,916
発生エネルギー(C)	217,863	218,233
電力(CHP)	68,639	68,977
発熱(CHP)	116,686	117,261
発熱(ガスボイラー)	32,538	31,995
発熱(重油ボイラー)	0	0
消費・損失(D)	219,548	219,626
燃焼時損失	51,605	51,684
プラント運転時消費電力(購入分)	4,643	4,514
プラント運転時消費電力(CHP発電分)	23,815	23,943
プラント運転時消費熱	139,485	139,485
産出エネルギー(E)	54,563	54,804
電力	44,824	45,033
熱	9,739	9,771
運搬時投入化石エネルギー(F)	42,032	48,639
副原料の搬入時燃料消費(工場A,B,C,D)	0	8,662
ふん尿の搬入時燃料消費	22,523	20,468
ふん尿の搬出時燃料消費	13,371	13,371
ふん尿の散布時燃料消費	6,138	6,138
(E)-(A)-(F)	7,888	1,651
エネルギー投入産出比(E/(A+F))	1.17	1.03

表 48 工場 A~E の副原料を収集する場合のエネルギー収支

シミュレーションケース	(エネルギー投入産出比のみ無単位)	
	③乳牛ふん尿のみ	④乳牛ふん尿 + 副原料(工場A~E)
投入化石エネルギー(A)	5,538	5,569
購入電力	5,538	5,569
重油	0	0
バイオガス(B)	343,217	342,927
発生エネルギー(C)	277,527	277,287
電力(CHP)	88,611	88,382
発熱(CHP)	150,639	150,249
発熱(ガスボイラー)	38,277	38,656
発熱(重油ボイラー)	0	0
消費・損失(D)	278,173	278,123
燃焼時損失	65,689	65,639
プラント運転時消費電力(購入分)	5,538	5,569
プラント運転時消費電力(CHP発電分)	30,700	30,669
プラント運転時消費熱	176,246	176,246
産出エネルギー(E)	70,581	70,372
電力	57,911	57,713
熱	12,670	12,659
運搬時投入化石エネルギー(F)	60,440	72,342
副原料の搬入時燃料消費(工場A,B,C,D,E)	0	14,779
ふん尿の搬入時燃料消費	32,387	29,510
ふん尿の搬出時燃料消費	19,227	19,227
ふん尿の散布時燃料消費	8,826	8,826
(E)-(A)-(F)	4,603	-7,539
エネルギー投入産出比(E/(A+F))	1.07	0.90

ルギー(E)のいずれも、副原料を投入するケース②が多い結果となった。運搬時投入化石エネルギー(F)では、副原料を投入するケース②がケース①より約 16%多くなっており、その主要因は副原料を運搬する際の燃料消費である。

これらの結果からエネルギー投入産出比を求めると、ケース①および②のどちらも 1 より大きく、新たにエネルギーを産出することが明らかとなった。

7. 2. 2 乳業工場 A～E の食品加工残渣を利用する場合のエネルギー収支

表 48 に副原料を工場 A～E から収集した場合のエネルギー収支を示す。投入化石エネルギー(A)では重油は使用されず、購入電力のみが使用される結果となった。発生するバイオガス(B)では、副原料を投入するケース④がふん尿のみを原料とするケース③より少ない結果となった。これは、工場 E から発生する食品加工残渣の大部分が汚泥であり、汚泥のバイオガス単位発生量はふん尿よりも小さいため、副原料を投入するケース④のバイオガス発生量が少ない結果となった。そのため、発生エネルギー(C)、消費・損失(D)および産出エネルギー(E)のいずれも、副原料を投入するケース④が少ない結果となった。運搬時投入化石エネルギー(F)では副原料を投入するケース④がケース③より約 20%多くなっており、運搬距離が長い工場 E からの副原料運搬に伴う燃料消費が影響している。

エネルギー投入産出比は、ケース③では 1 より大きい値となったものの、ケース④では 0.90 と 1 より小さい値となり、投入エネルギーよりも産出エネルギーが小さい結果となった。すなわち、汚泥のようなバイオガス単位発生量の小さい副原料を使用する場合には、運搬距離を考慮した収集範囲の設定が必要であることが明らかとなった。

8. まとめ

本研究では乳牛ふん尿を主体とする廃棄物系改質バイオマスについて、その特徴を明らかにするため有機物組成等の分析を実施した。廃棄物系改質バイオマスを土壌へ継続して施用した場合の土壌生産性改善効果の検証では、共同利用型バイオガスプラントから採取した原料液および消化液と、対照区として化学肥料のみを 8 年間連用している圃場の土壌理化学性と牧草収量を調査した。あわせて、有機質肥料及び化学肥料を散布した試験区において、温室効果ガス揮散量を測定した。また、地域で発生する有機性廃棄物の有効利用を検討するため、副原料の運搬距離と運搬量を設定条件として付加したシミュレーションを行い、食品加工残渣を副原料として利用する場合のエネルギー収支を求めた。さらに、投入化石エネルギーに対する産出エネルギーの比率をエネルギー投入産出比と定義し、これを指標としてエネルギー収支を評価した。

その結果、廃棄物系改質バイオマスのうち、嫌気

発酵消化液の全炭素に占める腐植酸の割合が高く腐植化が進行していた。このため、他の廃棄物系改質バイオマスに比べ、土壌団粒形成にもなう土壌生産性改善能力が高いことが示唆された。また、廃棄物系改質バイオマス中の易分解性および難分解性有機物含有割合は、乾物率との間に有意な正の相関が認められた。既往の研究から、乾物率、電気伝導度(EC)、水素イオン濃度(pH)を用いて肥料成分を推定することが可能となっている。したがって、乾物率、EC、pH を測定することで、圃場に散布される有機物量を推定できる可能性が示唆された。

土壌理化学性については、廃棄物系改質バイオマス施用 4 年目以降に、表層 1 層目への炭素の集積が認められた。さらに、散布 7 年目の土壌団粒分析の結果から、消化液を散布した試験区の表層 1 層目のマクロ団粒のうち、粗粒有機物画分に炭素が集積しており、消化液は土壌団粒化の促進効果が高いと示唆された。

温室効果ガス揮散量は、化学肥料区の CO₂ フラックスが有機質肥料散布区の CO₂ フラックスより小さい値を示した。

副原料の運搬距離と運搬量のシミュレーションの結果は、副原料の運搬距離が 100km のケースでは、乳業工場汚泥と廃チーズホエイを利用する場合にエネルギー投入産出比が 1 未満となり、その他の副原料を利用する場合では 1 より大きい値を示すことが明らかとなった。副原料の運搬距離が 50km のケースでは、廃チーズホエイを利用する場合のエネルギー投入産出比が 1.0 に改善することが明らかとなった。また、エネルギー収支を評価指標とし、地域で発生する廃棄物系改質バイオマス量および運搬距離を設定条件とする広域利用モデルを提案した。

参考文献

- 1) 保井聖一、筒井潔、明石憲宗、木村義彰 (2005) : 乳牛ふん尿スラリーの施用が土壌団粒形性および理化学性に及ぼす影響、土肥誌、76、269-276.
- 2) (財) 日本土壌協会 (2010) : 堆肥等有機物分析法(2010年版)、50-52.
- 3) 自給飼料利用研究会編 (2009) : 三訂版 粗飼料の品質評価ガイドブック、12-21.
- 4) 小柳渉、安藤義昭、棚橋寿彦 (2007) : 有機質資材の分解特性とその指標、土肥誌、407-410.
- 5) (独) 北海道開発土木研究所 (2005) : 積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト最終成果報告書、

6.4 廃棄物系改質バイオマスの農地等への施用による土壌の生産性改善技術に関する研究

- 124-134、160-168、224-227.
- 6) 松中照夫、成瀬住代、熊井実鈴 (2002) : 乳牛ふん尿のメタン発酵処理に伴う性状変化、土肥誌、297-300.
- 7) 保井聖一、筒井潔、明石憲宗、木村義彰 (2004) : 乳牛ふん尿消化液に含まれる有機物の化学的特徴、土肥誌、321-327.
- 8) 青山正和 (2010) : 土壌団粒、農文協、70、95-103
- 9) 保井聖一、筒井潔、明石憲宗、木村義彰 (2005) : 乳牛ふん尿スラリー施用による土壌団粒形成メカニズム、土肥誌、76、277-284.
- 10) 北海道立農業・畜産試験場家畜ふん尿プロジェクト研究チーム (2004) : 家畜ふん尿処理・利用の手引き 2004、55-67.
- 11) 下川裕太・金谷訓志・高木知貴 (2014) : 環境保全型かんがい事業における肥培施設整備後の効果検証—第六報—.平成 24 年度北海道開発局技術研究発表会.
- 12) 今井啓・横濱充宏 (2006) : 肥培かんがいの牧草収量および土壌物理性改善効果. 平成 18 年度北海道開発局技術研究発表会.
- 13) 北海道農政部 (2010) : 北海道施肥ガイド 2010、180-213.
- 14) Aoyama,M.、Angers ,D.A. and N'Dayegamiye,A. (1999) : Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications、Can. J. Soil Sci、295-302.
- 15) 小柳渉・村松克久・小橋有里 (2011) : 分解特性からみたバイオマスおよび堆肥の利用方法. 新潟畜産研報、17、9-14.
- 16) 山下祐司・田邊洋祐・足立泰久 (2013) : 分画分子量の異なるフミン酸の沈着速度と臨界沈着濃度. 農業農村工学会論文集、288、33-37.
- 17) Ahmed, F.、Ishiguro, M. (2015) : Effect of adsorption site potential on adsorption of sodium dodecylbenzenesulfonate in highly humic volcanic.
- 18) 石黒宗秀・鳥越崇宏・亀岡喜史・赤江剛夫 (2008) : 直鎖状アニオン界面活性剤(SDS)の黒ぼく土中における移動とそれに伴う透水性変化、農業農村工学会論文集、258、7-13.
- 19) 青山正和、谷内豊 (1992) : きゅう肥連用土壌の粒径画分および団粒サイズ画分の有機物とその無機化、土肥誌、63、571-580.
- 20) Tisdall,J.M. and Oades,J.M. (1982) : Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. Soil Sci、33、141-163.
- 21) Tisdall,J.M. 1994. Possible role of soil microorganism in aggregates in soils. Plant Soil、159、115-121.
- 22) 坂本一憲 (1998) : 微生物バイオマスと土壌窒素肥沃度. 土と微生物、51、35-47.
- 23) 松口龍彦・新田恒雄 (1988) : 連作に伴う根の糸状菌フロラの変動と根群発達に及ぼす堆きゅう肥施用効果. 土肥誌、59、1-11.
- 24) 西尾道徳 (2007) : 堆肥・有機質肥料の基礎知識. 40-55、農文協.
- 25) 土壌物理研究会編 (1979) : 土壌の物理性と植物生育. 268-274、養賢堂.
- 26) 松中照夫 (1996) : 土壌学の基礎—生成・機能・肥沃度・環境—202-205、社団法人農山漁村文化協会.
- 27) 横濱充宏、今井啓 (2007) : 肥培かんがいが土壌の理化学性におよぼす影響の評価、寒地土木研究所月報 No.655、21-32.
- 28) 長田隆、田中康男、和木美代子 (参照 2015.12.26) : バイアル瓶を採気容器としたガスサンプリングによる温室効果ガス測定、農研機構研究成果情報、(オンライン)、 < <http://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/3010017255> >
- 29) 藤川智紀、中村真人、柚山義人 (2008) : メタン発酵消化液の施用による土壌から大気への温室効果ガス発生量の変化、農業農村工学会論文集、No.254、85-95.
- 30) 中村真人、藤川智紀、柚山義人、前田守弘、山岡賢 (2009) : メタン発酵消化液の施用が畑地土壌からの温室効果ガス発生と窒素溶脱に及ぼす影響、農業農村工学会論文集、No.264、17-26.
- 31) 帯広開発建設部 (1998) : 平成 9 年度十勝地域環境保全型農業高度化検討委員会報告書.
- 32) 中山博敬、中村和正、大深正徳 (2005) : エネルギー収支からみたメタン発酵施設の効率的運転方法の検討. 農業土木学会資源循環研究部会論文集、第 1 号、25-35.
- 33) 中山博敬、干場信司、石田哲也、横濱充宏、今井俊行、菱沼竜男、森田茂 (2011) : バイオガスプラントにおけるガス利用方式の違いが運転時のエネルギー収支に及ぼす影響、農業施設、42(3)、109-118.
- 34) (独)土木研究所 (参照 2015.3.18) : 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、(オンライン)、入手先 < <http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project/2010/pdf/pro-16-1.pdf> >
- 35) 食品科学便覧編集委員会 (1978) : 食品科学便覧、共立出版株式会社、228-229.
- 36) (株)島津製作所 (参照 2015.3.18) : 島津試験 CSC ニュース No.135、(オンライン)、入手先 < <http://www.shimadzu.com/an/powder/support/beginner/qn504200000kera-att/csc135.pdf> >

- 37) 土井豊彦、神崎幹雄、渡辺正、中沼浩、渋谷美雪、松本清（1991）：比重と導電率によるバター中の食塩及び水分含量の非破壊、連続、同時測定、日本食品工業学会誌、38(10)、22-27.
- 38) 環境省・経済産業省（2014）：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル、Ver.3.5、II-26.
- 39) 一般社団法人北海道乳業協会（2016）（参照2016.3.18）：協会のご案内、（オンライン）、入手先<<http://h-nyukyoku.jp/publics/index/9/>>
- 40) 北海道環境生活部循環型社会推進課（2015）（参照2016.2.3）：H26 多量排出事業者提出書類の公表、（オンライン）、入手先<<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/jss/sanpai/taryou/kouhyouH26.htm>>
- 41) 中山博敬（2013）：デンマークのバイオガスプラント視察報告、農業土木北海道、第35号、53-57.
- 42) 別海町役場（2015）（参照2016.3.3）：牛の飼養戸数・頭数、（オンライン）、入手先<<http://betsukai.jp/blog/0001/index.php?ID=412>>
- 43) 農林水産省北海道農政事務所（2015）（参照2016.3.3）：概況、（オンライン）、入手先<<http://www.maff.go.jp/hokkaido/toukei/kikaku/database/gaikyo.html>>
- 44) 青山正和・周宝庫・斎藤雅人・山口紀彦（2003）：畑地への石灰系下水汚泥コンポストの施用が土壌の化学性と有機物性状に及ぼす影響、土肥誌、74、749-757.
- 45) 桑原淳、横濱充宏、中山博敬、石黒宗秀：メタン発酵消化液の施用が草地土壌の団粒形成に及ぼす影響、土壌肥料学会誌（投稿中）
- 46) 中山博敬、横濱充宏、桑原淳（2016）：処理方法の異なる乳牛ふん尿スラリーを散布した採草用牧草地から発生する温室効果ガス揮散量、寒地土研月報 No.754.
- 47) 中山博敬、石田哲也、横濱充宏（2015）：バイオガスプラントで利用する副原料の運搬距離がエネルギー収支に及ぼす影響、農業農村工学会資源循環研究部会論文集第10号.
- 48) 中山博敬、横濱充宏、竹内英雄（2016）：酪農地帯におけるバイオガスプラント副原料の広域収集の検討、農業農村工学会資源循環研究部会論文集第11号.

A STUDY ON TECHNOLOGY TO IMPROVE SOIL PRODUCTIVITY BY APPLYING MODIFIED WASTE BIOMASS TO FARMLAND

Budget : management expenses grant (general account)

Research Period : FY2011 – 2015

Research Team : Rural Resource Conservation Research Team

Author : TAKEUCHI Hideo, YOKOHAMA Mitsuhiko,
ONODERA Yasuhiro, NAKAYAMA Hiroyuki,
KUWABARA Jun

Abstract: In this study, the organic matter composition and other factors were analyzed to clarify the characteristics of modified waste biomass consisting mainly of dairy cattle manure. In addition, toward determining the soil productivity improvement afforded by applying such biomass, the physicochemical properties of soil were studied on farms where material slurry and digested slurry collected from centralized biogas plants were used continuously for eight years. Furthermore, the greenhouse gas emissions were measured in test plots applied with organic manure. To effectively utilize the organic waste generated in the region, we will be simulated on the assumption that the use of organic wastes as auxiliary materials for the biogas plant, to calculate the energy balance. The results indicated that, of the different types of modified waste biomass, anaerobic fermented/digested slurry had a larger proportion of humic acid in total carbon and achieved more significant humification. It was suggested that this type is better able to improve soil productivity associated with soil aggregate formation than are the other types. A significant positive correlation was found between the percentage of organic content in modified waste biomass and dry matter content. In terms of the physicochemical properties of soil, carbon has accumulated in the particulate organic matter fraction in the macroaggregate of the first layer surface of digested slurry application. It was suggested that digested slurry have a high promoting effect of soil aggregation. With respect to greenhouse gas emissions, CO₂ flux in the plot applied with chemical fertilizer was lower than that in the other plots applied with organic manure. It was clarified that, with a one-way distance of 100 km for transporting the auxiliary material, the energy output/input ratio was less than 1 when sludge from dairy plants or whey from cheese-making was used as the auxiliary material. On the other hand, in the case of using other auxiliary materials, the energy output/input ratio was greater than 1. We also used a simulation model to calculate and quantitatively evaluate the energy balance of those residues, which are collected extensively as auxiliary materials for centralized biogas plant operation.

Key Words : Biomass, farm animal manure, organic matter, physicochemical properties of soil, greenhouse gas, energy balance