

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：横濱充宏、大深正徳、中山博敬、
町田美佳、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5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。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。土壌理化学性については、散布4年目では表層1層目への炭素の集積が認められたが、他の土壌理化学性への明確な改善効果は見られなかった。温室効果ガス揮散量は、圃場への有機物施用量が多い原料液区の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。

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

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、堆肥化处理、好気性発酵処理、嫌気性発酵処理などの手法がある。特に嫌気性発酵処理では、地域で発生する有機性廃棄物（たとえば水産加工残渣など）を混合して発酵することができる。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）。また、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つながる。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。

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⁵⁾。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。

2. 方法

2.1 廃棄物系改質バイオマス中の有機物組成等の分析

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。この6試料のうち3試料は、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後の液体（以下、消化液と表記）である。また、2試料は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）である。残る1試料は、肥培かんがい施設における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

表1 廃棄物系改質バイオマスの種類および採取施設

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

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 2 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 2 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℃通風乾燥
強熱減量	550℃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

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 3 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。これらの試料は、後述する温室効果ガス揮散測定圃場において、平成 24 年度に施用したものである。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¹⁴⁾ デタージェント分析法¹⁵⁾ により行った。デタージェント分析では、酸性デタージェント繊維(ADFom)を求めた。また、供試試料を 600℃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¹⁶⁾ の評価方法に従い、(1)および(2)式により求めた。なお、ここでの易分解性有機物とは 1~3 カ月で分解される有機物を意味し、難分解性有機物とは分解に 3 カ月以上を要する有機物を意味する。

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 3 分析に供した廃棄物系改質バイオマスの種類

試料番号	種類	採取施設
(1)	嫌気発酵前 原料液	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	肥培かんがい施設
(6)	堆肥	共同利用型バイオガスプラントB

2.2 廃棄物系改質バイオマス施用による土壌生産性の改善

2.2.1 試験区概要

バイオガスプラントである別海町資源循環センター(以下、別海プラントと表記)内の試験圃場に図 1 に示した試験区を設けた。試験区には、原料区、消化液区および対照区の 3 試験区を設置し、1 試験区は 6m×6m とした。試験区内には 1m ごとにピンポールを設置し、1 試験区から土壌試料と牧草試料をそれぞれ 9 箇所採取できる設計とした。試験圃場の土壌は、黒色火山性土である。3 試験区に散布している廃棄物系改質バイオマスは以下の通りである。なお、散布試験は平成 19 年度から継続実施している。

【原料区】

別海プラントに搬入された家畜ふん尿を固液分離した原料液を散布した。ただし、固液分離した原料液は粘性が高いため、そのまま散布しても土壌に浸透しにくい。このため、本試験では 3 倍に希釈して散布した。

【消化液区】

別海プラントの発酵槽から採取した消化液を散布した。平成 17 年度に実施した消化液の散布試験では、消化液を 3 倍希釈して施用した区の牧草収量が、消化液の原液を散布した区よりも有意に増加している。そこで本試験では、消化液を 3 倍に希釈して散布した。

【対照区】

対照区には、硫酸アンモニウム、過リン酸石灰および硫酸カリウムの化学肥料のみを散布した。

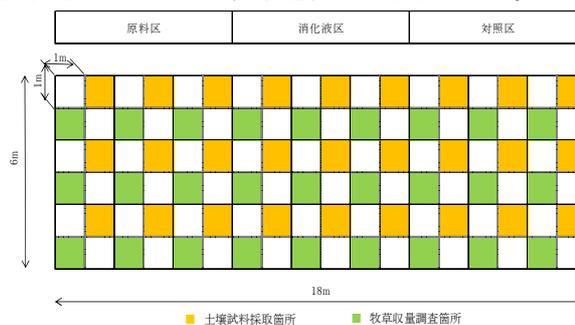


図 1 試験区配置図

2.2.2 施肥設計

3 試験区に散布した年間の窒素、リン酸、およびカリウムの施肥量は北海道施肥ガイド2010²⁾に記載された施肥標準量となるように決定した。この年間施肥量の3分の2を早春に、残る3分の1を1番草刈取後に散布した。原料区および消化液区では、原料液および消化液の散布量を算出した後、不足する肥料成分を化学肥料で補った。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た。なお、有機質肥料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いため、それを補正するための基準肥効率²⁾を乗じて、施肥設計を行った。さらに、有機質肥料の品質と散布時期による補正²⁾を行った。施肥量計算の結果、原料液および消化液の散布量は、早春時に $3.0L \cdot m^{-2}$ 、1番草刈取後に $1.5L \cdot m^{-2}$ である。これにより、年間に必要な肥料成分のうち、窒素およびリン酸で3割程度、カリウムで8割程度を廃棄物系改質バイオマスでまかなえることになる。

2.2.3 試料採取方法と分析項目

土壌試料は、1試験区当たり9箇所から採取した。1箇所あたり、深さ0~5cm（以下、表層1層目と表記）と深さ5~10cm（以下、表層2層目と表記）の2層から攪乱試料と未攪乱試料（50ml採土管）を採取した。土壌試料は、調査年毎に早春の施肥直前（5月上旬）に採取した。採取した土壌試料は表4に示す項目について分析を行った。また、団粒分析は平成24年度に採取した土壌を対象に実施し、9箇所から採取した攪乱試料のうち、5試料を分析に供した。平成24年度は、土壌調整作業の不具合により表層1層目の試料が欠損となったため、団粒分析の結果は表層2層目について述べる。

表4 土壌分析項目と分析手法

分析項目	分析手法
炭素	乾式燃焼法
団粒分析	水中篩別法 ¹⁾
C/N比	乾式燃焼法
容積重	炉乾燥法
孔隙分布	遠心法

なお、これらの分析項目は以下の指標とするために選定した。すなわち、炭素は土壌団粒を形成する上で重要な役割を果たしており、有機物含量の指標となる。団粒分析は、有機質肥料の散布により土壌団粒の形成に及ぼす影響を明らかにするために

た。分析方法は、Aoyamaらの方法¹⁾に従い、団粒を各サイズ（ $>1,000 \mu m$ 、 $1,000 \sim 250 \mu m$ 、 $250 \sim 53 \mu m$ 、 $<53 \mu m$ ）に分離した。 $>1,000 \mu m$ 、 $1,000 \sim 250 \mu m$ および $250 \sim 53 \mu m$ 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、 $>53 \mu m$ および $<53 \mu m$ に分離した。以下、青山らの報告¹²⁾に従い、 $>53 \mu m$ 画分を粗粒有機物画分、 $<53 \mu m$ 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により求めた。C/N比は、全炭素含量と全窒素含量の比率であり、窒素欠乏の指標となる。容積重は、単位体積あたりの乾燥土壌の重量であり、土壌の堅密化の指標となる。孔隙分布は土壌孔隙の大きさとその分布割合を知ることができ、ここでは排水性および通気性の指標として粗孔隙量を、保水性の指標として易有効水分孔隙量を求めた。

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 $1m \times 1m$ 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。

後述する団粒分析を除く土壌分析値と牧草収量は、9箇所から採取した試料の平均値である。団粒分析は、5箇所から採取した試料の平均値である。本報告では、団粒分析を除く土壌分析の結果は平成23年度までを、団粒分析の結果は平成24年度について述べる。また牧草収量の結果は、平成24年度までについて述べる。ただし、平成22年度は収量調査を実施していない。

2.3 廃棄物系改質バイオマス施用による温室効果ガス揮散

2.3.1 試験区概要

別海プラント内の試験圃場に、図2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、ブロック内にすべての処理が入るようにした。ブロックは5セット設けた。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。平成24年度は、第1ブロックと第2ブロックの間で機器を移設して測定を行った。ブロック内試験区は予備を含めて10区あり、そのうち温室効果ガスを測定している処理区は表5のとおりである。



図2 温室効果ガス計測試験区

表5 施肥(処理)内容と測定ガスの種類

施肥(処理)内容	測定ガスの種類		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
原料液	○		
消化液A	○		
消化液B	○		
消化液C	○	○	○
曝気処理液	○	○	○
化学肥料	○	○	○

2.3.2 施肥設計

各試験区への年間施肥量は、北海道施肥ガイド2010²⁾に記載された施肥標準量になるように決定した。なお、有機質肥料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いため、それを補正するための基準肥効率²⁾を乗じて、施肥設計を行った。さらに、有機質肥料の品質と散布時期による補正²⁾を行った。本試験で使用した廃棄物系改質バイオマスは乳牛ふん尿が主体であり、乳牛ふん尿中にはカリウムが多く含まれている。そのため、廃棄物系改質バイオマス散布量の上限はカリウムにより決定された。不足する窒素およびリン酸は、化学肥料(硫酸アンモニウムおよび過リン酸石灰)

表6 各種廃棄物系改質バイオマスおよび化学肥料の散布量

処理区	散布時期	廃棄物系改質バイオマス		化学肥料散布量(g/m ²)		
		散布量(L/m ²) (堆肥のみ kg/m ³)	散布量(L/m ²)	硫酸 アンモニウム	過リン酸石灰	硫酸カリ
原料液	早春	4.3	32.4	15.7	-	-
	一番草刈取後	2.6	14.4	6.3	-	-
消化液A	早春	8.3	29.5	18.6	-	-
	一番草刈取後	3.5	12.4	10.9	-	-
消化液B	早春	4.5	27.0	17.1	-	-
	一番草刈取後	2.3	8.9	8.5	-	-
消化液C	早春	3.7	29.1	18.6	-	-
	一番草刈取後	1.6	14.5	10.1	-	-
曝気処理液	早春	6.6	27.6	12.3	-	-
	一番草刈取後	3.0	6.4	5.0	-	-
堆肥	早春	-	30.3	17.7	-	-
	一番草刈取後	-	30.3	17.7	-	-
	二番草刈取後	1.8	2.4	0.2	26.3	-
化学肥料	早春	-	50.8	30.5	24.0	-
	一番草刈取後	-	25.4	15.3	12.0	-

により補った。施肥設計の結果は表6のとおりである。なお、堆肥については散布時期が二番草刈取後のため、早春および一番草刈取後は化学肥料のみを散布した。また、堆肥散布時には堆肥の肥料成分を分析し、北海道施肥ガイド2010²⁾に記載された施肥標準量になるように化学肥料で調整した。

2.3.3 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(図3)。チャンバー(内寸30cm×30cm×30cm)は任意の設定時間でふたを自動開閉することができる。二酸化炭素(CO₂)の測定は、赤外線式CO₂分析計(LI-820またはLI-6252)を用い、チャンバーとCO₂分析計間で気体を循環させ、1分ごとの測定値をロガーに記録した。メタン(CH₄)と一酸化二窒素(N₂O)は、①ふたを閉めた直後、②10分後および③20分後の3回、シリンジで気体を約30mlずつ採取し、15mlの真空バイアルビンに圧入した。CH₄およびN₂Oの分析は試料ガス採取後5日以内にガスクロマトグラフィー(CH₄:GC-14B、N₂O:GC-2014)を用いて行った。CO₂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。その後、1~2週間経過後にチャンバーを移設し、同様に測定を行った。施肥直後のみ、1週間連続で測定した。なお、チャンバー移設前には地上部の植物体を除去した。平成24年の測定期間は、一番草刈取後の7月4日(施肥直後)から11月11日までである。その間、二番草の刈取りが8月下旬に実施された。二番草刈取時には、一時的にチャンバーを撤去した。



図3 自動開閉式チャンバー

3. 結果および考察

3.1 廃棄物系改質バイオマス中の有機物組成等の分析

3.1.1 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②および④は、それぞれの原料液である①および③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³⁾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②および④は原料液①および③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³⁾、今回の分析結果も同様の傾向を示した。また、消化液⑤は消化液②、④よりさらに小さな値を示した。今回、消化液⑤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ったため、粗大有機物が貯留槽底部に沈殿したままとな

表7 一般性状分析結果

分析項目	単位	試料番号					
		①	②	③	④	⑤	⑥
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

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⑥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①と消化液②および同じく③と④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³⁾。また、他のプラントでの分析結果⁴⁾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⁴⁾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。今後、分析試料数を増やし、この差が変動の範囲内なのかどうかを確

表8 肥料成分分析結果

分析項目	単位	試料番号					
		①	②	③	④	⑤	⑥
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

分析項目	単位	試料番号					
		①	②	③	④	⑤	⑥
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

認する必要がある。曝気処理液⑥は、他の施設での分析結果⁵⁾と同様の値であった。

表9に有機物分析結果を示す。全炭素では、消化液②および④は原料液①および③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³⁾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⑤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②および④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⁶⁾。全炭素に占める腐植酸の割合は、消化液②および④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。腐植酸はフルボ酸より腐植化度が高い¹⁾。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関与する物質とされている¹⁾。すなわち、嫌気性発酵消化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。消化液⑤および曝気処理液⑥については、今後、処理前の原料との比較を行い、処理による影響を明らかにする必要がある。

図4に試料中に含まれる固形物の粒径組成を示す。消化液の粗大画分の割合は原料液より小さい⁷⁾といわれている。今回の分析では、共同利用型バイオガスプラントBから採取した原料液①と消化液②では消化液の粗大画分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③と消化液④では、粗大画分に大きな差は認められ

なかった。プラントCは原料に長わらが多く含まれており、嫌気性発酵により粒径は小さくなると思われるが、微細な大きさまでは分解されていないことが考えられる。これら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。今後、採取時期や試料数を変えて分析を行い、各種廃棄物系改質バイオマスの特徴を明らかにしていく必要がある。

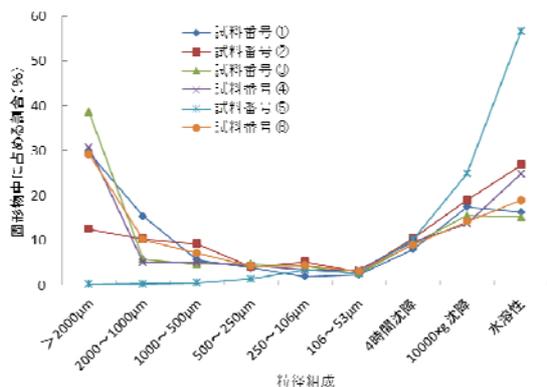


図4 試料中に含まれる固形物の粒径組成

3. 1. 2 易分解性有機物および難分解性有機物含量

表10に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。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。

図5~7に、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、前述のように有機質肥料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。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。

表10 廃棄物系改質バイオマス中の有機物含有割合

分析項目	散布時期	単位	原料液	消化液A	消化液B	消化液C	曝気処理液	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

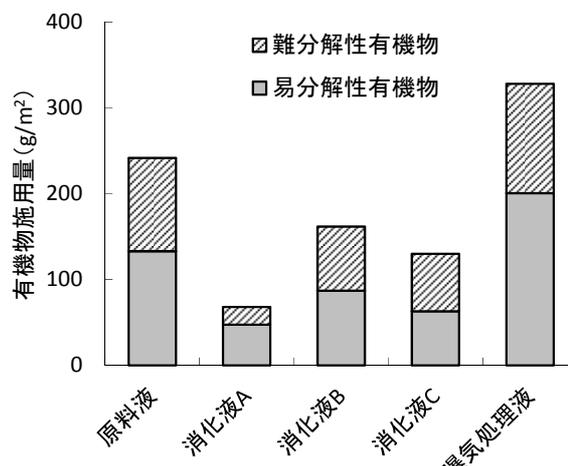


図5 有機物施用量（春施用時）

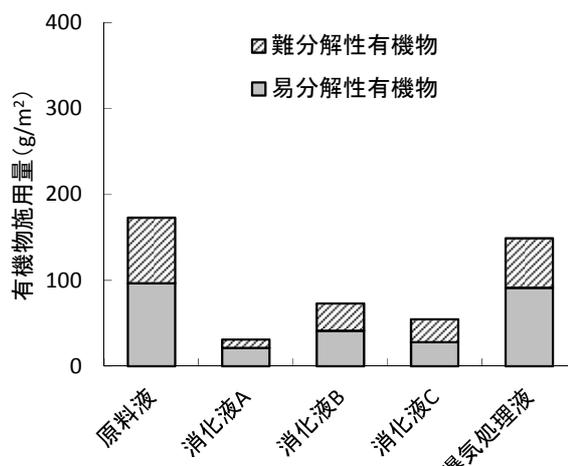


図6 有機物施用量（一番草刈取後施用時）

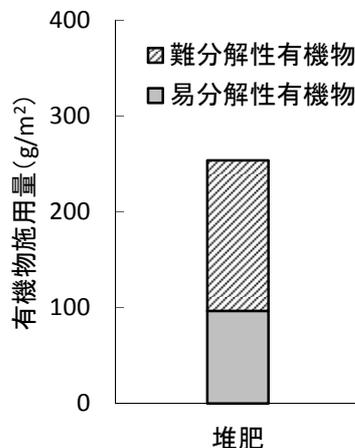


図7 有機物施用量（秋施用時）

3.2 廃棄物系改質バイオマスの施用効果

3.2.1 炭素

牧草地の表層1層目では、毎年、牧草が枯死脱落することで有機物が集積しやすい⁸⁾。図8に各試験区の表層1層目と表層2層目の炭素の推移を示す。表層2層目の炭素は、3試験区とも平成19年度から変化が少なく、 $0.06\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ でほぼ一定である。表層1層目の炭素は、平成19年度と比較して平成23年度に有意な差が確認されたのは、原料区および消化液区であった。平成19年度から23年度までの4年間に、原料液および消化液の散布により投入された炭素量は、原料区では $1.01\text{kg}/\text{m}^2$ 、消化液区では $0.71\text{kg}/\text{m}^2$ である。これらの1部が土壌に貯留されることで、原料区および消化液区において炭素の集積につながった可能性がある。

廃棄物系改質バイオマスの土壌への散布効果は、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）を求めることで、明確になる⁹⁾。各試験区における炭素層差の推移を図9に示す。結果、3試験区ともに平成24年度の炭素層差は平成23年度と比較して増加していた。特に表層1層目の炭素に顕著な増加がみられた原料区においてその傾向が強い。対照区においても炭素層差が増加しているのは、枯死した牧草遺体の集積のためと考えられる。ただし、炭素層差は調査年度によって増減がある。このため、特に表層1層目の炭素含量を継続して調査していく必要がある。

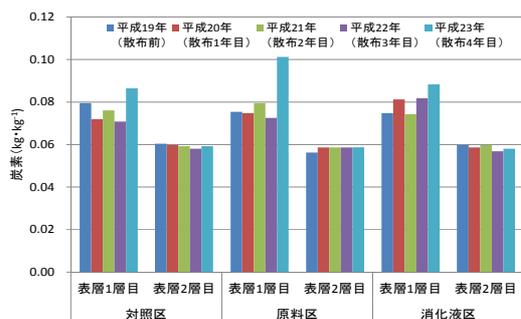


図8 各試験区における炭素の推移

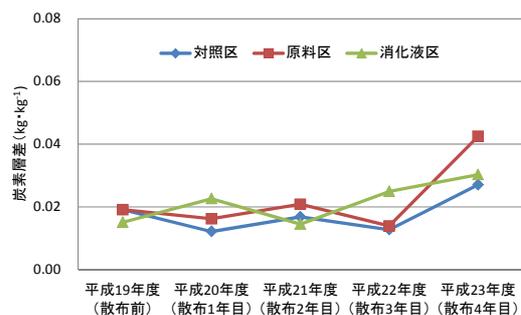


図9 各試験区における炭素層差の推移

3.2.2 土壌団粒への影響

有機質肥料の散布が土壌の団粒形成に及ぼす影響を明らかにするため、表層土を団粒サイズごとに粒径分画を行い、団粒サイズ別重量および炭素分布量を調べた。前述のとおり、表層1層目の試料は土壌調整作業の不具合により欠損したため、表層2層目の土壌のみを対象とした。既往の研究では、堆きゅう肥を4年間連用した黒ボク土畑地表層土では、堆きゅう肥の連用により、マクロ団粒($>250\mu\text{m}$)の割合が増加している¹³⁾。また、未処理液、曝気処理液および消化液といったスラリーを細粒質褐色低地土のポット土壌に施用した研究では、スラリーの施用はマクロ団粒を著しく増加させ、マクロ団粒をさらに粒径分画したところ、特に有機・無機複合体分画($<53\mu\text{m}$)の割合が増加し、スラリー由来の炭素が多く集積することが明らかとなっている⁵⁾。

各試験区で採取した表層2層目の団粒サイズ別重量を図10に、炭素分布量を図11に示す。結果、散布5年目の表層2層目では、既往の研究のような有機性肥料散布によるマクロ団粒の増加はみられず、各試験区で団粒サイズ別重量と炭素分布量に差は認められなかった。図8から、土壌炭素の増減は表層1層目にみられ、表層2層目では変化していないことが分かる。このため、有機性肥料散布による炭素の集積や団粒の形成は表層1層目での検証が重要であると推察される。

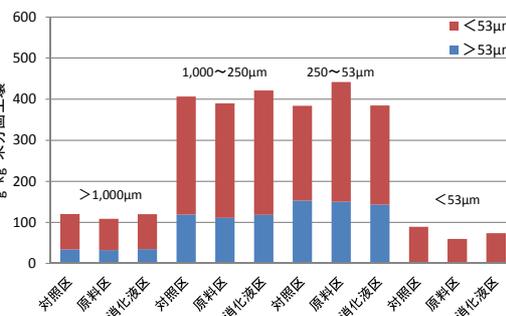


図10 表層2層目の団粒のサイズ別重量分布

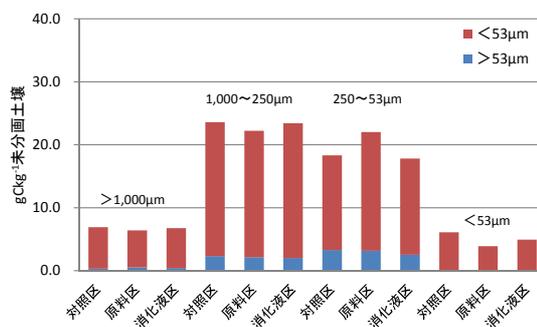


図11 表層2層目の団粒のサイズ別炭素分布

3.2.3 C/N比

C/N比がおよそ20以上になると土壌中の無機態窒素が有機化し、牧草に窒素欠乏が生じる可能性がある¹⁰⁾。別海プラントの原料液および消化液のC/N比は、15~20程度である。

図12に表層1層目のC/N比の推移を示す。各試験区のC/N比を散布前と平成23年度で比較すると対照区で、13.6から12.4に、原料区で13.5から11.9に、消化液区で13.1から12.3にそれぞれ減少している。図8および図9に示したとおり平成23年度の表層1層目の炭素は散布前と比較して、いずれの試験区とも増加している。それに関わらず、平成23年度の表層1層目のC/N比が散布前と比較して減少しているのは、土壌の窒素についても増加しているためである(図13)。

各試験区を比較すると、原料区および消化液区のC/N比は12~14程度で推移し、対照区と比較しても同程度である。このことから、散布年数が4年目までは、異なる廃棄物系改質バイオマスの散布による土壌表層のC/N比への効果の違いは認められなかった。

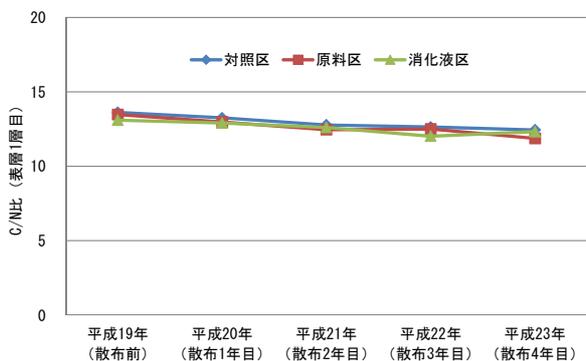


図12 各試験区における表層1層目のC/N比の推移

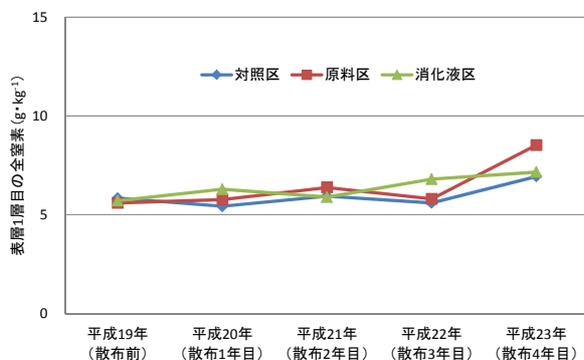


図13 各試験区における表層1層目の全窒素

3.2.4 容積重

農作業機械の走行により土壌表層が圧縮、堅密化すると容積重は増大し、後述する粗孔隙量が減少する可能性がある。本試験区での農作業機械の走行は、試験区周辺の牧草の刈り取り時のみである。このため、実圃場と比べると土壌表層が圧縮される機会は少ない。

各試験区における容積重の推移を図14に、各試験区における容積重層差の推移を図15に示す。容積重は、各試験区とも表層2層目より表層1層目の方が小さい値であったため、層差が負の値となった。各試験区の表層1層目の容積重に有意な差はなく、有機質肥料散布による容積重への影響は散布4年目までは認められなかった。また、表層1層目の容積重は減少傾向を示しており、牧草地の経年変化に伴う表層1層目の堅密化は3試験区ともに認められなかった。

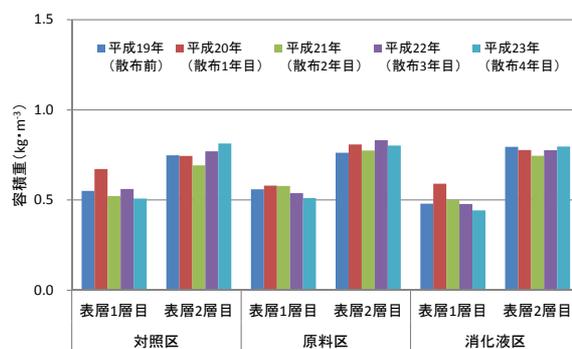


図14 各試験区における容積重の推移

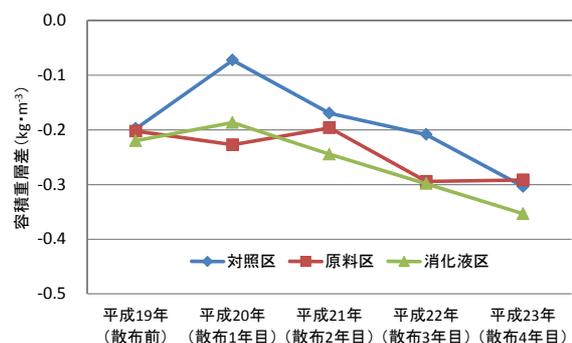


図15 各試験区における容積重層差の推移

3.2.5 孔隙分布

表層1層目の粗孔隙量の土壌診断基準は、草地の維持管理時で $0.10\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 以上である²⁾。消化液区の表層1層目の粗孔隙量は増加する傾向を示しているが、平成19年度と平成23年度の間には有意差は認められなかった(図16、18)。ただし、3試験区の表層1層目の粗孔隙量は平成19年度時点で改良目標値

内にあり、排水性・通気性は試験開始時から良好な土壌である。表層2層目の粗孔隙量は3試験区とも改良目標値を下回っており、排水性・通気性がよいとはいえない。

表層1層目の易有効水分孔隙量の土壌診断基準は、草地更新時のみに設定されており、それを参考にすると $0.15 \sim 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ である²⁾。平成23年度の表層1層目の易有効水分孔隙量は、各試験区ともに $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ であり(図17)、保水性は確保されている。粗孔隙量と異なるのは、表層1層目と表層2層目の差が少ない点である(図19)。

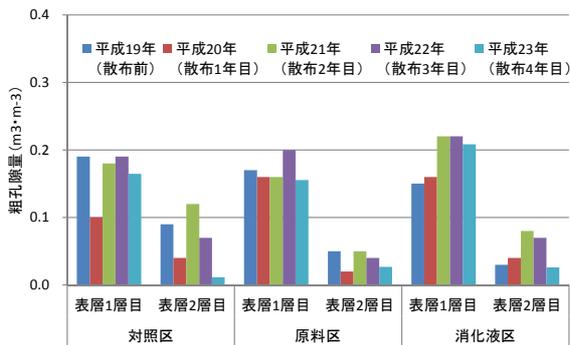


図16 各試験区における粗孔隙量の推移

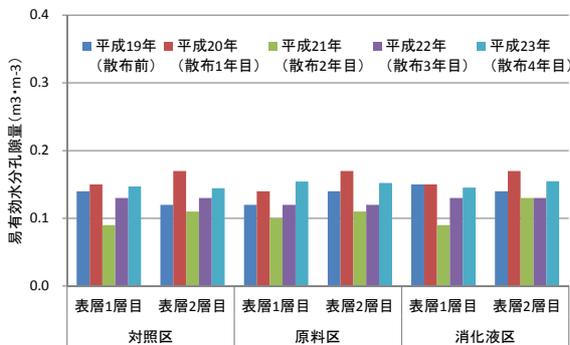


図17 各試験区における易有効水分孔隙量の推移

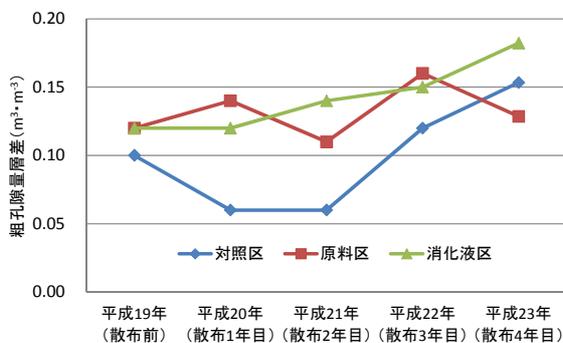


図18 各試験区における粗孔隙量層差の推移

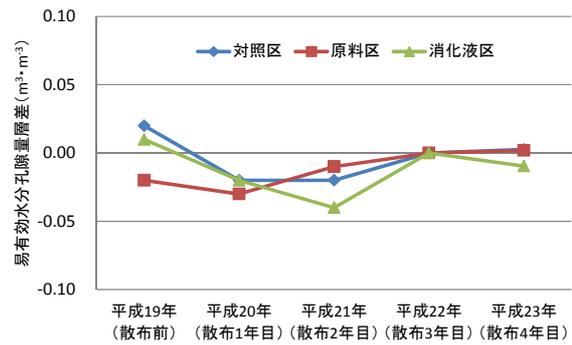


図19 各試験区における易有効水分孔隙量層差の推移

3.2.6 牧草収量への影響

図20に各試験区の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。今後もこの傾向が続くかを注視していきたい。

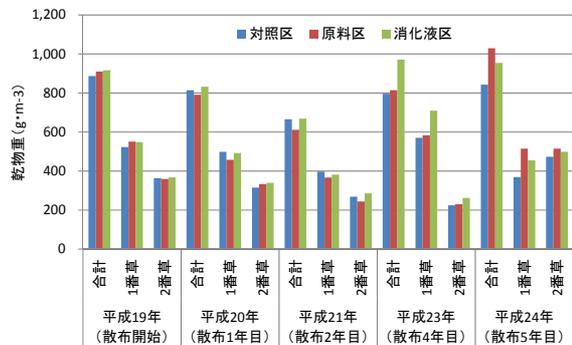


図20 各試験区の調査年度ごとの乾物重

3.2.7 廃棄物系改質バイオマスの施用4年目までの散布効果

上記結果より、散布を開始して4年目では、原料区および消化液区において散布開始前と比較して表層1層目に炭素が集積していた。土壌団粒、C/N比、容積重、孔隙分布では、散布した廃棄物系改質バイオマスの違いによる効果は判然としなかった。

3.3 廃棄物系改質バイオマス施用による温室効果ガス揮散

3.3.1 二酸化炭素揮散量

図21および図22に、各種有機質肥料区と、対照区である化学肥料区における一番草刈取後施肥直後から二番草刈取り前までの二酸化炭素揮散量(以下、CO₂フラックスと表記)を示す。いずれの有機質肥料散布区も、施肥直後にCO₂フラックスが多い値を示した。これは、液体中に溶け込んでいたCO₂ガスの揮散に伴うものと考えられる。その後、二番草刈取前までのCO₂フラックスは、原料液区以外の有機質肥料散布区では化学肥料区よりも高い値で推移した。原料液区は化学肥料区とほぼ同じ値で推移した。図23および図24に二番草刈取後から初冬までのCO₂フラックスを示す。いずれの有機質肥料散布区のCO₂フラックスも化学肥料区のそれと同様の値で推移した。今回の試験結果では、施肥後の二番草生育期で、消化液区および曝気スラリー区のCO₂フラックス

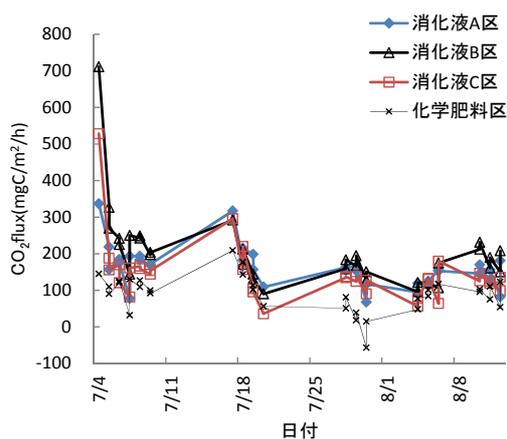


図21 CO₂フラックス(消化液区および化学肥料区)(施肥直後～二番草刈取前)

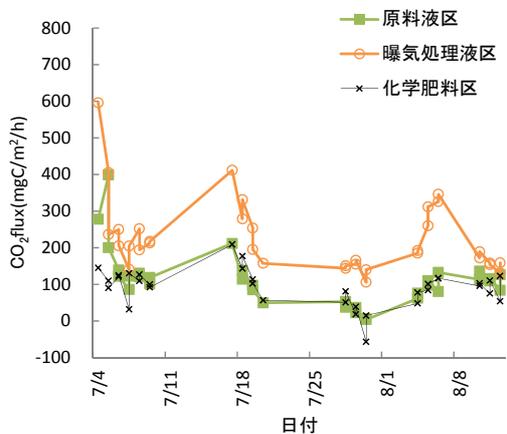


図22 CO₂フラックス(消化液区以外)(施肥直後～二番草刈取前)

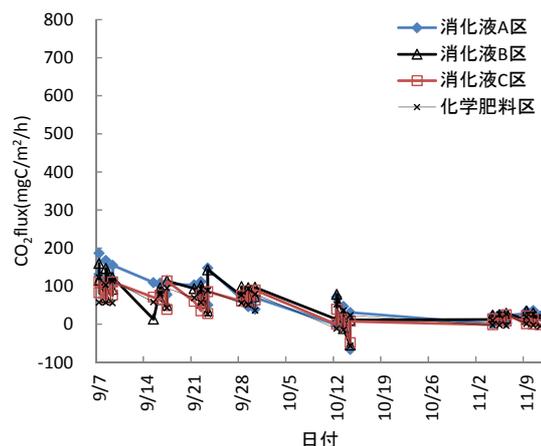


図23 CO₂フラックス(消化液区および化学肥料区)(二番草刈取後以降)

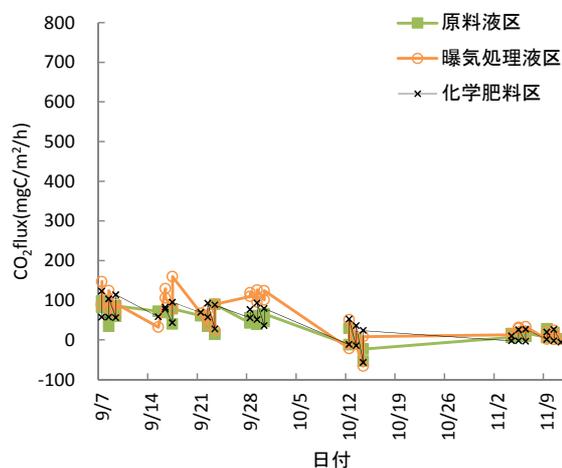


図24 CO₂フラックス(消化液区以外)(二番草刈取後以降)

が化学肥料区と比べて増加している。しかし、有機物施用量の多かった原料液区でのCO₂フラックスは化学肥料区と同様であった。原料液は他の有機質肥料と比較して固形分が多く、散布時には固形分が草地表面にとどまり、土壌中へ浸入しにくい。そのため、原料スラリー区でのCO₂フラックスが他の有機質肥料区よりも少なくなったと推察される。

3.3.2 メタン揮散量

図25に、消化液C区、曝気処理液区および化学肥料区における、一番草刈取後施肥直後から二番草刈取前までのメタン揮散量(以下、CH₄フラックスと表記)を示す。施肥直後に曝気スラリー区のCH₄フラックスが他の試験区と比較して大きい値を示したが、その後は他の試験区と同様の傾向を示した。

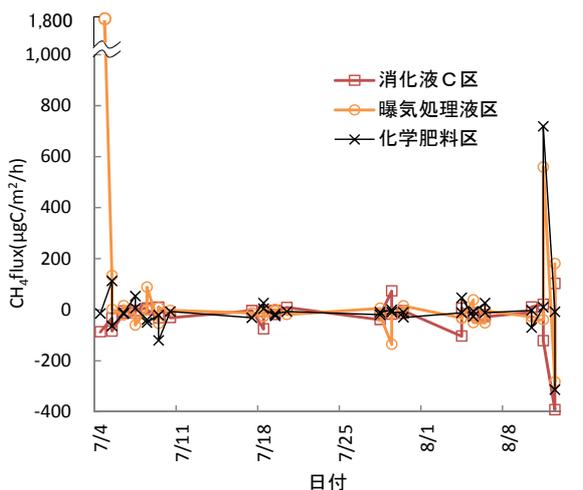


図 25 CH₄ フラックス (施肥直後～二番草刈取前)

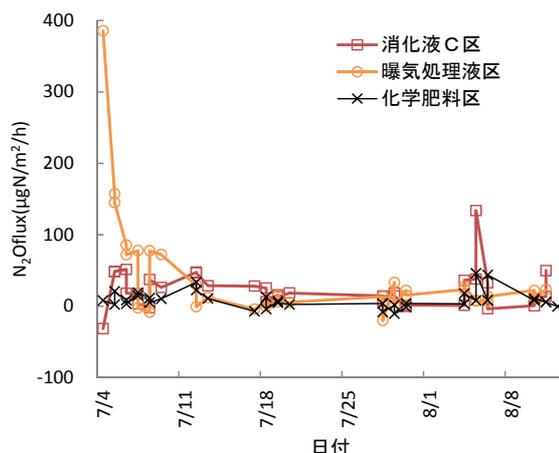


図 27 N₂O フラックス (施肥直後～二番草刈取前)

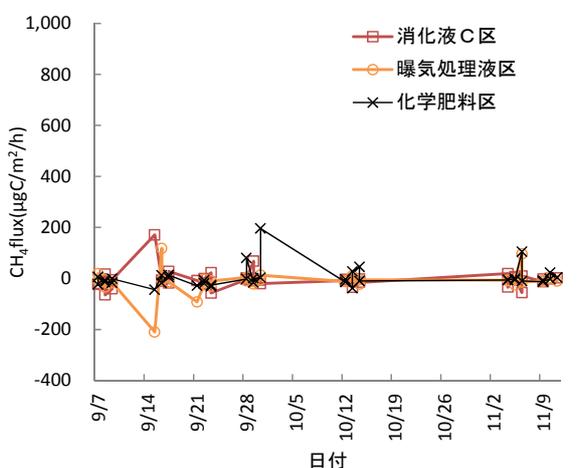


図 26 CH₄ フラックス (二番草刈取後以降)

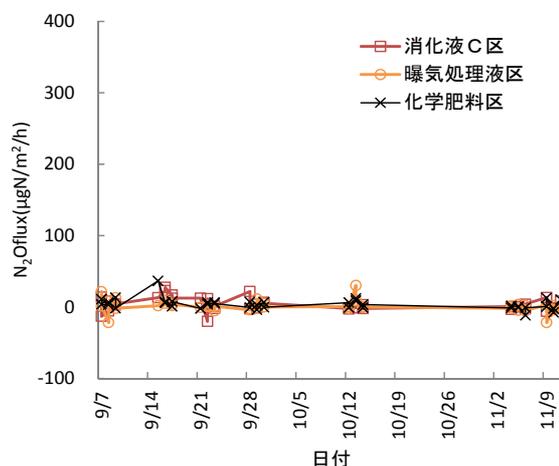


図 28 N₂O フラックス (二番草刈取後以降)

図 26 に二番草刈取後から初冬までの CH₄ フラックスを示す。3 つの試験区とも、一定の傾向は認められなかった。

3. 3. 3 一酸化二窒素揮散量

図 27 に、消化液 C 区、曝気処理液区および化学肥料区における、一番草刈取後施肥直後から二番草刈取前までの一酸化二窒素揮散量（以下、N₂O フラックスと表記）を示す。施肥後 1 週間までの曝気処理液区の N₂O フラックスが化学肥料区と比較して大きい値を示した。また、消化液 C 区の N₂O フラックスは、曝気処理液区よりは小さいものの、化学肥料区と比較してやや大きい値で推移した。図 28 に二番草刈取後から初冬までの N₂O フラックスを示す。3 つの試験区とも、一定の傾向は認められなかった。

4. 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。また、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と、対照区として化学肥料のみを 5 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。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。

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易分解性および難分解性有

機物含有割合は、堆肥で最も多く、原料液、曝気処理液の順に少なくなった。圃場への有機物施用量は、曝気処理液区で最も多く、原料液区、堆肥区の順に少なくなった。バイオマスの散布量は肥料成分により決定するため、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は異なることが明らかとなった。

土壌理化学性については、散布4年目では表層1層目への炭素の集積が認められたが、他の土壌理化学性への改善効果は判然としなかった。牧草収量は、平成23年度の消化液区と、平成24年度の消化液区および原料区において多い値を示した。

温室効果ガス揮散量は、圃場への有機物施用量が多い原料液区の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。原料液は他の有機質肥料と比較して固形分が多く、散布時には固形分が草地表面にとどまり、土壌中へ浸入しにくい。すなわち、有機質肥料の性状がCO₂フラックスの大小へ影響することが示唆された。

参考文献

- 1) 青山正和：「土壌団粒」、農文協、p.70、2010
- 2) 北海道農政部：北海道施肥ガイド 2010、pp.180-213、2010.
- 3) (独)北海道開発土木研究所：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト最終成果報告書、pp.224-225、2005.
- 4) 松中照夫、成瀬住代、熊井実鈴：乳牛ふん尿のメタン発酵処理に伴う性状変化、土肥誌、pp.297~300、2002.
- 5) 保井聖一、筒井潔、明石憲宗、木村義彰：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、pp.269~276、2005.
- 6) 保井聖一、筒井潔、明石憲宗、木村義彰：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、pp.321~327、2004.
- 7) 保井聖一、筒井潔、明石憲宗、木村義彰：乳牛ふん尿スラリー施用による土壌団粒形性メカニズム、土肥誌、pp.277~284、2005.
- 8) 北海道農協「土づくり」運動推進本部編：草地の土づくり、p7、2007.
- 9) 横濱充宏、今井啓：肥培かんがいと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、pp.21-32、2007.
- 10) 松中照夫：土壌学の基礎—生成・機能・肥沃度・環境—pp.202-205、社団法人農山漁村文化協会、1996.
- 11) Aoyama,M., Angers ,D.A. and N ‘Dayegamiye,A. : Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications, Can, J.Soil Sci, pp.295~302、1999.
- 12) 青山正和、周宝庫、斎藤雅人、山口紀彦：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、pp.749~757、2003.
- 13) 青山正和、谷内豊：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、pp.571~580、1992.
- 14) (財)日本土壌協会：堆肥等有機物分析法(2010年版)、pp.50-52、2010.
- 15) 自給飼料利用研究会編：三訂版 粗飼料の品質評価ガイドブック、pp.12-21. 2009.
- 16) 小柳渉、安藤義昭、棚橋寿彦：有機質資材の分解特性とその指標、土肥誌、pp.407-410. 2007.

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

Budget : management expenses grant (general account)

Study period : FY 2011 – 2015

Research Team : Rural Resource Conservation Research Team

Author : Yokohama Mitsuhiro, Ofuka Masanori, Nakayama Hiroyuki, Machida Mika, 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 five years. Furthermore, the greenhouse gas emissions were measured in test plots applied with organic manure. 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. In terms of the physicochemical properties of soil, although the accumulation of carbon was observed in the surface layer in the fourth year of application, no other clear improvement effects were found. With respect to greenhouse gas emissions, CO₂ flux in the plots where material slurry with high organic matter content was applied was lower than that in the other plots applied with organic manure.

Key Word: Biomass, farm animal manure, organic matter, physicochemical properties of soil, greenhouse gas