

原著論文

乳牛ふん尿と有機性廃棄物による混合メタン発酵消化液の 秋蒔き小麦 (ホクシン) への施用

梅津一孝*・山縣真人**・岸本 正*・谷 昌幸*・林 峰之***・三崎卓也****

*帯広畜産大学

**北海道農業研究センター

***上士幌町役場

****三井造船株式会社

Field Application of Anaerobically Co-digested Dairy Manure and
Food Processing Wastes for a Winter Wheat Cultivar Hokushin

Kazutaka UMETSU *, Masato YAMAGATA **, Tadashi KISHIMOTO *,
Masayuki TANI *, Mineyuki HAYASHI *** and Takuya MISAKI ****

* Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

** National Agricultural Research Center for Hokkaido Region

*** Kamishihoro town

**** Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., LTD

1. 緒言

現在、家畜ふん尿処理施設の一つとしてふん尿処理とエネルギー回収可能なバイオガスプラント (メタン発酵) が関心を集めている (梅津 1999)。メタン発酵消化液は有機物の多くが分解され無機化しているので農地に施用すると非常に高い肥料価値がある。さらに、メタン発酵にはふん尿中の雑草種子や各種病原性菌が死滅するメリットも兼ね備えているため (木村ら 1998; Umetsu ら 2002) 消化液の特性を生かし、作物生産を行うことで環境に与える負荷を低減できる。

現在、メタン発酵消化液の土壌還元に関する研究報告は飼料作物対象のものがあるのみで畑作物対象のものは少ない (義平 2002 など)。

本研究は、メタン消化液の散布による土壌中での

窒素形態の変化と、メタン消化液が小麦の収量に与える影響を検討し、メタン発酵消化液の肥効特性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

1) 供試作物とメタン発酵消化液

供試作物は秋蒔き小麦 (ホクシン) とし、メタン発酵消化液と化学肥料を施用した。

メタン発酵消化液は乳牛ふん尿と有機性廃棄物を混合メタン発酵処理したものを供した。乳牛ふん尿は帯広畜産大学附属畜産フィールド科学センターのフリーストール牛舎床面より採取した。有機性廃棄物は十勝地方の食品加工場などから排出される家畜血液、チーズホエイ、コロケ廃油、コロケ廃棄物を収集し、それを重量比 3:3:3:1 の割合で混合したものをを用い、乳牛ふん尿と有機性廃棄物を重量比 7:3 で混合し実験に供した。メタン発酵槽は有効容積 60 L のステンレス製発酵槽を使用し、サーモスタットとテープヒーターにより 55℃ に常時保温した。図 1 に実験用発酵槽の概略図を示す。供試発酵槽に毎日 6 L の混合原料を投入し、水理学的平均滞留日数を 15 日間とした。高温発酵における乳牛ふん

平成15年3月13日受付
平成15年11月8日受理
Corresponding author
梅津一孝 Kazutaka UMETSU
〒080-8555 帯広市稲田町
Inada, Obihiro, 080-8555
E-mail: umetsu@obihiro.ac.jp

尿と有機性廃棄物の混合発酵特性については前報に示した (Umetsu ら 2001). 表 1 に基肥, 追肥時のメタン発酵消化液の肥料成分量を示す.

化学肥料は硫酸 (硫酸アンモニウム), 過石 (過リン酸石灰), 硫加 (硫酸カリウム) を使用した.

2) インキュベーションテスト

土壌窒素の評価方法にはインキュベーション法, 熱水抽出法, リン酸緩衝液抽出法, 硝酸抽出法などがあるが, インキュベーション法が作物窒素の吸収量ともっとも相関が高い (山縣ら 1996). それゆえ, メタン発酵消化液を土壌に施用した場合の土壌中の窒素形態に及ぼす影響を検討するためインキュベーションテストを行った. 供試土壌は実験圃場より土壌を採取し, 風乾させ, 2 mm メッシュのふるいに通し, 実験に供した. その時に乾土率も測定した. 消化液添加区はインキュベーション瓶に供試土壌 10 g を入れ, その中に 2.8 g のメタン発酵消化液を添加し, コントロールは供試土壌 10 g に 2.8 g の蒸留水を添加した. 実験は恒温器により 30 °C で保温し, 101 日間静置した. この間わずかではあるが水分が蒸発するので, 蒸発した水分を補給した. アンモニア

態窒素, 硝酸態窒素の測定は試料に 2N-KCl を 25 mL 加え, 1 時間振とうし, しばらく静止したものの上澄み液をろ過し (ろ紙 No.6), 試料液とした. 窒素の測定は分光光度計を用い比色法で行った.

3) 実験圃場と施肥法

実験圃場には基肥と追肥に消化液を利用する液肥区, 基肥と追肥に化学肥料を使用する化肥区, 基肥を化学肥料で追肥に消化液を使用する追肥区を設けた. 表 2 に実験圃場の試験区分を示す. 土壌は淡色黒ボク土であった (農耕地土壌分類委員会 1995). 液肥区および化肥区はそれぞれ 1 区画 3 m × 6 m の 4 反復とした. 追肥区は 1 区画を 3 m × 6 m とし, 追肥施肥量を窒素換算で 0, 3, 5, 8 g/m² とし, それぞれを追肥区 0, 追肥区 3, 追肥区 5, 追肥区 8 とした.

圃場播種方法は北海道の播種標準に基づき種の量は 9 g/m² とした. 畝幅は 30 cm とした. 施肥は 9 月の播種時に基肥を 5 月に追肥を行った. 基肥は北海道施肥標準に基づき, 窒素 (N) 6 g/m², リン (P) 15 g/m², カリウム (K) 7.5 g/m² とした. 液肥区は消化液中の K₂O 含有量が高いので消化液散布量は K₂O の量で決定し, メタン発酵消化液に含有される NH₄-N, P₂O₅ は化学肥料の N, P と同等とし, 不足分の N 成分は硫酸で, P 成分は過石で補い施用した. 化肥区は N, P, K をそれぞれ硫酸, 過石, 硫加で施用した. なお, 栽培期間中の平均気温は平年並みであった. 一方, 降水量は 3 月から 5 月にかけて平年よりも多かったが, 期間全体を通しては平年並みであった.

4) 小麦の収穫量調査

小麦の収穫は圃場より 3 畝 × 1 m をロープで囲い, 鎌で刈り取った. 刈り取られた小麦は穂数を数え, 1 m² 当たりの穂数とした. また, 無作為に選ばれた 30 穂の粒数の平均を 1 穂当たりの粒数とした. 刈り

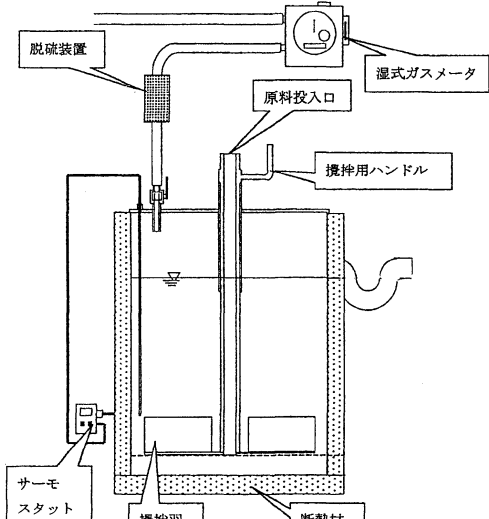


図 1 実験用発酵槽の概略図

表 1 基肥時, 追肥時のメタン発酵消化液の肥料成分

	基 肥	追 肥
NH ₄ -N (mg/L)	1,700	2,770
P ₂ O ₅ (mg/L)	3,050	4,970
K ₂ O (mg/L)	3,030	4,940

表 2 試験区分

試験区分名	反復数	基肥	窒素量 (g/m ²)	追肥	窒素量 (g/m ²)
液肥区	4	液肥	6	液肥	5
化肥区	4	化肥	6	化肥	5
追肥区 0	なし	化肥	6	液肥	0
追肥区 3	なし	化肥	6	液肥	3
追肥区 5	なし	化肥	6	液肥	5
追肥区 8	なし	化肥	6	液肥	8
慣行区	なし	化肥	6	化肥	5

取られた小麦を脱穀し、子実の重量を計測し、1 m² 当たりの重量とした。子実 1000 粒の重量を 3 回計測し、その平均を 1000 粒重とした。

子実成分の分析は水分、T-N、P₂O₅、CaO、MgO、K₂O、灰分、粗タンパクとした。水分は 105℃ 24 時間法、T-N はケルダール法、P₂O₅ は ICP 発光分析法、CaO、MgO、K₂O は酸分解したのち原子吸光法、灰分は 600℃ 24 時間法、そして粗タンパクは T-N に 5.71 を乗じて測定した。

5) 土壌採取

各試験区において土壌採取場所は無作為に 3 点選出し、オーガーにより採取した。そのサンプリング深さは 0～20、20～40、40～60、60～80 cm とした。各試験区においてサンプリングした土壌は各深さでまとめてビニール袋に入れた。ビニール袋に入れて冷凍保存しておいた土壌サンプルを解凍し、ビニール袋の中でよくもみほぐしサンプルを 2 mm メッシュのふるいに通し、調製した。

アンモニア態窒素、硝酸態窒素の測定はガラス瓶に調製した生土を 10 g 入れ、そこに 2N-KCl を 25 mL 加え、1 時間振とうした。その後しばらく静止し、上澄み液をろ過し（ろ紙 No.6）、試料液とした。その際、乾土率も測定した。測定方法はインキュベーションテストによる窒素の測定方法と同様とした。

3. 結果及び考察

1) インキュベーションテスト

図 2 にインキュベーション法によるアンモニア態窒素量の変化を、図 3 に硝酸態窒素量の変化を示す。アンモニア態窒素は、ほぼその全量が 4 週間で硝酸態窒素に変化した。通常、土壌中ではアンモニア態窒素は硝化菌の硝化作用により、畑の状態が良好なら 2 週間から 4 週間程度で亜硝酸態窒素や硝酸態窒素に変化する（山縣ら 1996）。消化液添加に伴う 4 週目以降の硝酸態窒素の増加は、消化液に含まれた有機態窒素の硝化作用によるものであると考えられる。

図 4 にインキュベーションによる無機態窒素量の変化を示す。ここでの無機態窒素量はアンモニア態窒素量と硝酸態窒素量の合計値とした。無機態窒素は 101 日間で約 55 mg/kg-乾土の増加を示した。これは、実験開始時における無機態窒素全量の約 15% の増加であった。乳牛ふん尿中の有機態窒素はメタン発酵により無機化され、アンモニア態窒素が増加した（Umetsu ら 2001）。これは乳牛ふん尿中の易分解

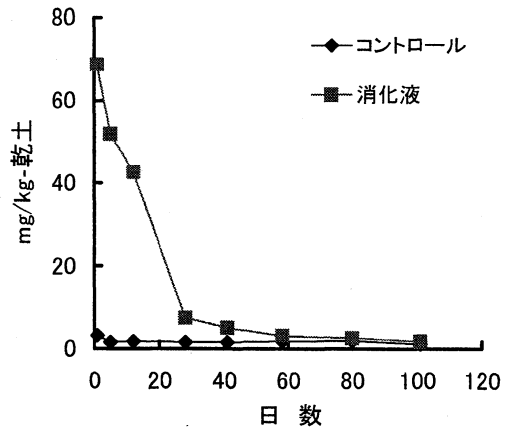


図 2 アンモニア態窒素量の変化

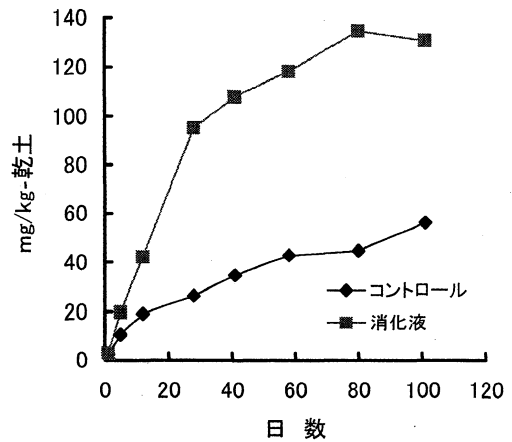


図 3 硝酸態窒素量の変化

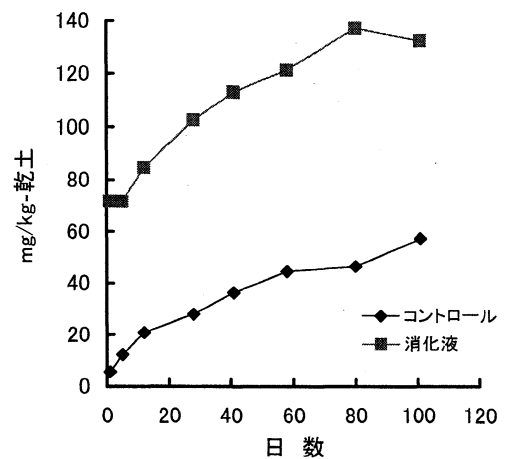


図 4 無機態窒素量の変化

性有機態窒素がメタン発酵によりアンモニア態窒素に変化したことを意味する。よって、消化液中の有機態窒素は乳牛ふん尿中の易分解性窒素がメタン発酵によって無機化された残渣であることから、相対的に難分解性窒素であると考えられる。通常の牛ふん尿スラリーはその無機化パターンを見ると、無機化のピークはかなり早い。メタン発酵消化液の無機化パターンは牛ふん尿スラリーの無機化パターンと同様に非常に早く、添加初期から無機態窒素量は多く、その量はコントロール（土のみ）の上昇と平行して増加していることから、無機態窒素量は消失することなくほぼ一定の値で推移した。すなわち、メタン発酵消化液は速効性が利点の牛ふん尿スラリー同様、もしくはそれ以上に速効性の有機性肥料と言える。

2) 小麦の収穫量と成分

表3に小麦の収穫量を示す。1 m²当たりの重量は液肥区の方が平均で化肥区よりも5.6%多かった。1 m²当たりの平均穂数も液肥区の方が化肥区よりも6.5%多かった。1穂当たりの粒数は化肥区の方が液肥区より平均2粒多かった。1000粒重は液肥区、化肥区でほぼ同じであった。液肥区は化肥区に比べて、1 m²当たりの穂数は多くなるが、1穂当たりの粒数は少なくなかった。以上の結果、平均収量は液肥区が化肥区よりやや増収となったが、t検定ではその差（有意水

準5%）は認められなかった。追肥区は窒素施肥量が多くなるほど1 m²当たりの重量、1 m²当たりの穂数、1穂当たりの粒数は多くなった。しかし、追肥区3は例外で、収穫前の台風の影響で倒伏が多かったために収量が減少したと考えられる。小麦にメタン発酵消化液、鶏糞、堆肥を施用した場合、メタン発酵消化液施用区の収量が多いこと（Dravid 1996）や、メタン発酵消化液は堆肥に比べ、畑作物の収量が10~20%増収するという報告（Chhabraら1996）もある。今回、小麦への施用についても、メタン発酵消化液の施用効果が明らかとなった。

表4に小麦の子実成分の結果を示す。液肥区、化肥区ともに子実成分には差が見られなかった。しかし、液肥区のP₂O₅含有率は化肥区よりやや高い値を示した（有意水準5%）。

土壤に施用されたリン酸は一部が可給態として残るが、大部分が土壤中の活性アルミニウムや鉄と結合して、難溶解性リン酸に変化する。化成区は追肥を硫酸のみで施用したが、液肥区は消化液を散布したことにより、消化液中の有機物が分解され代謝産物として放出されて自由になった有機陰イオン、あるいは消化液中に含まれる揮発性脂肪酸などがFeやAlと反応し、キレート化することが予想される（熊沢ら1976）。その結果、PイオンがFeやAlと反応するのを妨げることににより、土壤中でPイオンの大

表3 小麦の収穫量（平均値±標準偏差）

	収量 g/m ²	穂数 本/m ²	粒数/穂 粒/本	1000粒重 g/1000粒
液肥区	660.83 ± 40.92	611.11 ± 18.70	30.99 ± 2.34	40.8 ± 0.054
化肥区	625.56 ± 6.24	574.08 ± 31.64	32.65 ± 0.66	39.5 ± 0.033
追肥区0	606	722	31.20	39.2
追肥区3	500	556	33.75	40.2
追肥区5	800	778	34.80	39.2
追肥区8	767	789	37.65	39.4
慣行区	561	556	30.90	38.5

表4 小麦の子実成分（乾物当たり）（平均値±標準偏差）

	水分（現物中）	T-N	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	灰分	粗タンパク
液肥区（%）	15.73 ± 0.16	1.96 ± 0.051	0.74 ± 0.017	0.035 ± 0.0011	0.11 ± 0.003	0.56 ± 0.004	1.70 ± 0.041	11.12 ± 0.345
化肥区（%）	15.80 ± 0.23	1.95 ± 0.099	0.67 ± 0.005	0.043 ± 0.0015	0.10 ± 0.002	0.51 ± 0.010	1.57 ± 0.033	11.12 ± 0.563
追肥区0（%）	13.5	1.92	0.71	0.028	0.09	0.45	1.72	10.94
追肥区3（%）	13.2	2.40	0.79	0.028	0.10	0.47	1.74	11.64
追肥区5（%）	13.4	2.57	0.70	0.033	0.09	0.45	1.62	14.68
追肥区8（%）	12.8	2.49	0.73	0.032	0.10	0.45	1.73	14.20
慣行区（%）	12.9	2.70	0.77	0.033	0.09	0.49	1.73	11.83

部分が可給態として存在できたため、小麦によるPの吸収が非常に効率よく行われ、子実成分に影響を与えたと推察される。同様の結果は報告（Dravidら1996）されている。小麦では品質重視の傾向が強まり、子実タンパク含有率の適正化が望まれる。品質の基準として重要視されている子実タンパク含有率はグルテンの量を左右し、めん色にも影響を及ぼすために、9.5～11.5%の好適な範囲である。液肥区、化肥区ともにその平均値は11.1%となり、良質の範囲であった。追肥区では子実中の粗タンパク含有率は窒素施肥量が多いほど高くなった。一般に収量と子実タンパクは窒素吸収量が多ければ収量、タンパクが高くなる傾向がある。しかし、追肥区5、追肥区8の粗タンパク含有率は良質の範囲を大きく上まわった。追肥区は基肥の窒素施肥量は同量であるこ

とや、止葉期付近での窒素施肥は基肥に比較して、増収効果は少ないが子実タンパク含有量を上昇させる効果が大きいとした報告もあることから（南十勝農業改良普及センター1999）、追肥による窒素施肥量が子実タンパク含有量に影響を与えたと考えられる。

3) 土壌中の窒素量の変化

図5に液肥区の、図6に化肥区の土壌中でのアンモニア態窒素量の変化を示す。液肥区、化肥区ともにアンモニア態窒素量は同様の推移を示した。また、その値は非常に小さく変化はほとんどなかった。これはアンモニア態窒素が土壌中に保持されたためであると考えられる。

図7に液肥区、図8に化肥区の土壌中での硝酸態窒素量の変化を示す。液肥区、化肥区ともに硝酸

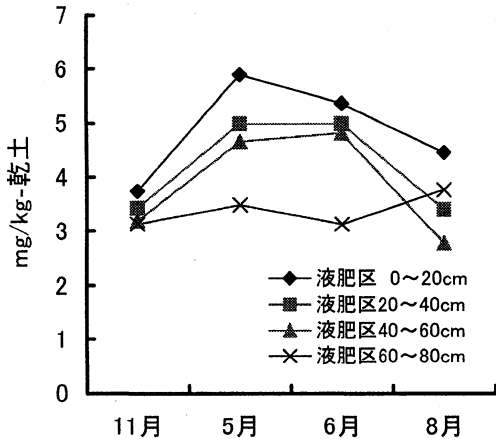


図5 液肥区のアンモニア態窒素量の変化

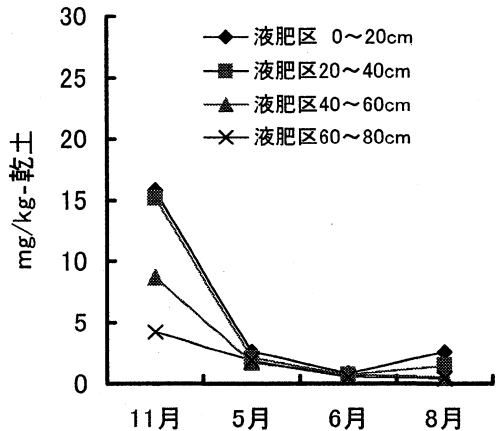


図7 液肥区の硝酸態窒素量の変化

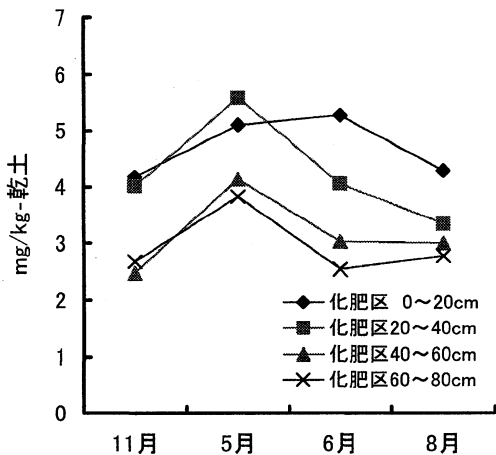


図6 化肥区のアンモニア態窒素量の変化

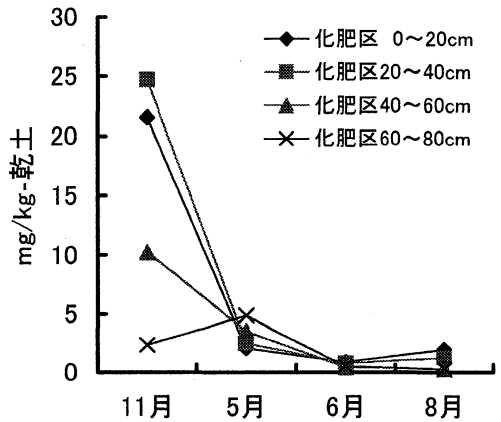


図8 化肥区の硝酸態窒素量の変化

態窒素量の変化は同様の推移を示した。しかし、11月において、液肥区と化肥区を比べると、硝酸態窒素量は深さ40～60、60～80cmでは同等の値を示しているが、深さ0～20、20～40cmでは明らかに液肥区の方が低い値を示した。これは、消化液が化学肥料とは異なり揮発性脂肪酸などの有機物を含んでおり、これらを炭素源とする微生物による硝酸態窒素の有機化（微生物バイオマスへの取り組み）が生じたためであると考えられる。豚ふんおよび牛ふんスラリーを土壤に添加するインキュベーション実験では、スラリー中の脂肪酸が土壤微生物に対して易分解性炭素供給源として働き、窒素の固定化（有機化）を引き起こすことを報告している（Kirchmann & Lundvall 1993）。硝酸態窒素量は11月から5月にかけて著しい減少が見られた。これは小麦への吸収のほかに硝酸態窒素が溶脱したためと推察される。化肥区においては深さ60～80cmで11月から5月にかけて硝酸態窒素の増加が認められた。これは硝酸態窒素の上層から下層への移動と考えられる。翌年の5月に追肥をしたにもかかわらず6月の硝酸態窒素量の増加はほとんどなかった。溶脱による下層への移動も認められなかった。この結果は小麦が起生期から止葉期にかけての窒素吸収量が多くなることを考慮すると、硝酸態窒素が小麦に吸収され、生長に使われたためであると考えられる。よって、追肥は窒素の溶脱や損失を抑制する上で非常に効率的であったと考えられる。

図9に液肥区、図10に化肥区での土壤中の無機態窒素量の変化を示す。前述のアンモニア態窒素量はその値が非常に小さく、ほとんど変化がなかった

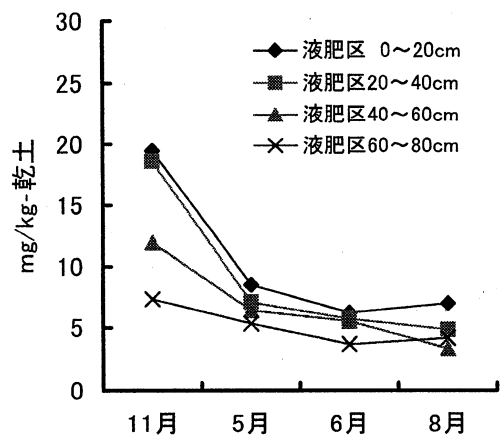


図9 液肥区の無機態窒素量の変化

ことから無機態窒素量の変化は硝酸態窒素量の変化と同様であった。よって、メタン発酵消化液（液肥）も化学肥料も土壤中での窒素形態の変化には大きな差がないと言える。

4. 摘要

乳牛ふん尿と有機性廃棄物の混合メタン発酵消化液の土壤中での窒素形態の変化と、秋蒔き小麦への施用が収量に及ぼす影響を検討した。インキュベーションテストの結果、メタン発酵消化液中のアンモニア態窒素は約4週間でほぼ全量が硝酸態窒素に変化した。また、メタン発酵消化液からの有機態窒素の無機化による無機態窒素量の増加率は約15%であった。メタン発酵消化液と化学肥料を窒素量換算で同量施用した場合、小麦の収量に有意差はなく、子実成分もほとんど同じであり、粗タンパク含有率も良質の範囲であった。メタン発酵消化液と化学肥料を施用した場合、消化液施用では散布初期に微生物バイオマス窒素への移行によるものと考えられる硝酸態窒素量の減少が起き、化学肥料施用では11月から5月にかけて溶脱が起った。しかし、その後の土壤中での窒素量の推移はほとんど変わらなかった。

キーワード

バイオガス, メタン, 消化液, 圃場還元, 秋蒔き小麦

引用文献

Chhabra, K. K. (1996): Utilization of biogas plant spent

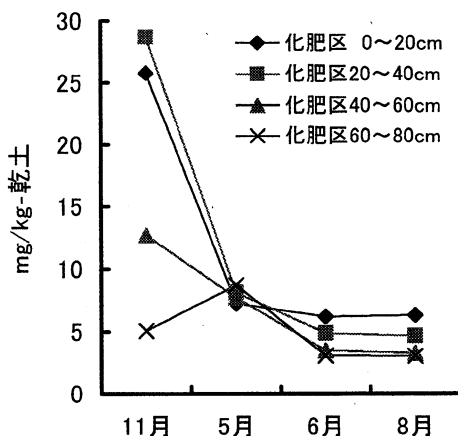


図10 化肥区の無機態窒素量の変化

- slurry as organic manure in farming, Indian J. Environmental Protection, 16(8); 579-580.
- Dravid, M. S., Biswas, D. R. (1996): Effect of phosphorus, poultry manure, biogas slurry and farmyard manure on dry matter yield and utilization of applied P by wheat. J. Nuclear Agric. Biol., 25 (2); 89-93.
- 木村義彰・梅津一孝・高畑英彦 (1994) : メタン発酵処理がエゾノギシギシ (*Rumex obtusifolius* L.) 種子の生存率に及ぼす影響, 日本草地学会誌第 40 卷 2 号 ; 165-170.
- Kirchmann, H., Lundvall, A. (1993): Relationship between N immobilization and volatile fatty acids in soils after application of pig and cattle slurry, Biol. Fertil. Soils, 15: 161-164.
- 熊沢喜久雄・西沢直子 (1976) : 植物の栄養吸収, 東京大学出版会 ; 88.
- 農耕地土壌分類委員会 (1995) : 農耕地土壌分類 - 第 3 次改訂版, 農業環境技術研究所資料第 17 号
- 十勝支庁十勝南部地区農業改良普及センター (1999) : 十勝南部の秋まき小麦, 十勝南部地区農業振興推進協議会 ; 6-9.
- Umetsu, K., Kishimoto, T., Takahashi, J. (2002): Survival of coliform bacteria during mesophilic anaerobic digestion of dairy manure slurry, Global perspective in livestock waste management, Malaysian society of animal production; 227-230.
- Umetsu, K., Kondo, R., Tani, M., Hayashi, T. (2001): Fertilizer value of anaerobically co-digested dairy manure and food processing wastes; Greenhouse gases and animal agriculture GGAA2001, Dairy Japan, (ISBN4-924506-11-7); 178-186.
- 梅津一孝 (1999) : バイオガスプラントによる家畜糞尿の有効利用, 北海道草地研究会報 33 ; 10-15.
- 山縣真人・阿江教治・大谷 卓 (1996) : 作物の生育反応に及ぼす有機態窒素の効果, 日本土壤肥料学会雑誌第 667 巻第 4 号 ; 345-353.
- 義平大樹 (2002) : サイレージトウモロコシに対するバイオガス消化液の施肥効果, 北海道バイオガス研究会報, 13-14.

Summary

The purpose of this study was to evaluate the effect of anaerobically co-digested dairy manure and food processing wastes as an organic fertilizer, and to investigate the changes in soil nitrogen and grain yield of winter wheat (Hokushin) comparing digested dairy manure with chemical fertilizer.

By the incubation test, it was clear that the $\text{NH}_4\text{-N}$ was almost converted into the $\text{NO}_3\text{-N}$ for four weeks. Over the period of 101 days, 15 % of inorganic N was accumulated in the soil.

Between grain yields where co-digested dairy manure and chemical fertilizer were applied, there were no significant difference, but protein contents in grain were higher in co-digested manure applied than chemical fertilizer one ($p < 0.05$).

Keywords

Biogas, Methane, Digested slurry, Field application, Winter wheat