家畜ふん尿とウェット系バイオマスの混合発酵処理における消化液中の肥効成分の実験的把握

古瀬　友咲子[1]・藤山　淳史[2]・石井　一英[3]・佐藤　昌宏[4]

[1]非会員　北海道大学工学部（現：横浜市水道局）（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）
E-mail:yusako.furuse@gmail.com
[2]正会員　北海道大学特任助教　大学院工学研究院（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）
E-mail:fujiyama@eng.hokudai.ac.jp
[3]正会員　北海道大学准教授　大学院工学研究院（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）
E-mail:k-ishii@eng.hokudai.ac.jp
[4]正会員　北海道大学助教　大学院工学研究院（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）
E-mail: satomasahiro@eng.hokudai.ac.jp

酪農地域での今後の廃棄物処理の一つの形態として，現在導入が進んでいる家畜ふん尿バイオガス化プラントを活用したウェット系バイオマスとの混合処理の方法が考えられる．しかしながら，バイオガス化後に発生する消化液を排水処理していては，費用の増加を招く恐れがあるため，消化液の効果的な利用方法が求められている．そこで本研究では，家畜ふん尿とウェット系バイオマスを混合発酵することによって，処理した際に発生する消化液の肥効成分である全窒素（以下，T-N）と全リン（以下，T-P）への影響を実験的に把握した．実験を行った結果，混合割合が増加しても安定的に発酵することを確認するとともに，消化液中の肥効成分も増加することを確認した．さらに，消化液の高度利用方法として固液分離を取り上げ，固液分離後の液相にT-Nが約50～60%，T-Pが約70%移行することを把握した．

Key Words : *livestock manure, wet biomass, co-fermentation, digested liquid, fertilizer component*

1.　はじめに

酪農地域では，家畜ふん尿の処理と，未利用資源のエネルギー利用を推進するための方策の一つとして，家畜ふん尿バイオガス化プラントの導入が進んでいる．同じ酪農地域でも，生ごみや下水汚泥，し尿・浄化槽汚泥などのウェット系バイオマスは，賦存量が少ないことからそれぞれ単独で処理を行った場合，単位廃棄物量当たりの処理コストが高くなる傾向にあり，課題となっている．廃棄物処理施設整備計画[1)]によると，廃棄物処理施設の整備は重点的，効果的かつ効率的に進めていくことが求められており，酪農地域を対象とした場合，その一つの整備方法として，家畜ふん尿バイオガス化プラントでのウェット系バイオマス（本研究では，自治体に処理責任のある生ごみおよびし尿・浄化槽汚泥，下水汚泥を対象）の混合処理（集約化）が考えられる．東らの先行研究[2)]によると，家畜ふん尿79.0%にウェット系バイオマスである生ごみを2.5%，し尿・浄化槽汚泥を16.0%，下水汚泥を2.5%の割合で混合発酵した場合でも，安定的に発酵することが確認されている．このように混合発酵（集約処理）を行うことは，トータルでの処理費用の低減と未利用エネルギーの利活用促進に繋がることが期待される．また，バイオガス化プラントではプラントへ投入したバイオマスとほぼ同量，多くの肥効成分を含んだ消化液が発生するため，これらを緑農地還元することで，肥効成分の有効活用に繋がるとともに，循環型社会の形成にも貢献することが期待される．しかしながら，消化液を散布できる圃場などがない場合は排水処理を行い下水道などへ放流する必要があり，効果的な物質循環の仕組みを作ることができないだけでなく，多額の処理費用がかかることによって事業採算性の悪化を招くことが懸念されている．そのため，消化液は可能な限り緑農地還元を行う仕組みを作ることが，バイオガス化プラントを運営するうえで重要な項目の一つであり，利用先の確保などの観点からも消化液の肥効成分とその特徴を把握しておくことは重要である．なお，十分な圃場を持たない

日本においては，消化液を散布できる土地を確保でいないことも多く，仮に散布できる土地を確保できたとしても，消化液は固形分を含んでいるために，固形分が野菜の葉に付着する問題やバキュームカーの目詰まりの原因になるなど利用上の課題[3]があるのも現状である．消化液の利用先を確保するためには，利用者が使用し易い形で提供するなど消化液に付加価値を付けていくことも重要な点である．消化液を高度利用するための一つの方法として，固液分離がある．固液分離した後は，固分は堆肥として，液分は液肥として利用することが可能であるが，それぞれの肥効成分の移行率や特徴を把握できていないなど利用に向けては課題があるのも実情である．

そこで本研究では，家畜ふん尿バイオガス化プラントでウェット系バイオマスを混合処理した際に発生する消化液の有効利用を促進させることを目指し，

① 家畜ふん尿とウェット系バイオマスの混合割合を変化させた場合に発生する消化液の肥効成分である全窒素（以下，T-N）と全りん（以下，T-P）への影響を実験によって把握すること，

② 消化液を高度利用するための方法の一つとして固液分離を取り上げ，消化液を固液分離した後のT-NとT-Pの固相と液相への移行割合を把握すること

を目的とした．

2. 家畜ふん尿とウェット系バイオマスの混合処理によって発生する消化液の特性

バイオガス化後に発生する消化液の組成は，投入するバイオマス資源によってほぼ規定される．単独でバイオガス化を実施した場合に発生する消化液の主な特性を下記に示す．

- 家畜ふん尿：家畜ふん尿を原料としている場合，生ごみに比べて窒素の含有量は低く，りんおよびカリウムの含有量は比較的高くなる傾向がある．なお，家畜の中でも，牛ふんと比べ，鶏ふんや豚ふんは肥効成分を多く含むという傾向がある．
- 生ごみ：家畜ふん尿や下水汚泥に比べ，たんぱく質など窒素含有率を多く含んでいるため，一般的に消化液の窒素濃度は高い傾向にある．
- 下水汚泥：VSが低く，水分量が多く，肥効成分は低い傾向にある．

このように単独でバイオガス化を実施した場合に発生する消化液の肥効成分が偏っているが，これらを混合発酵することで，肥効成分のバランスがとれた消化液となる可能性を有している．

3. 家畜ふん尿とウェット系バイオマスの混合発酵における消化液の特性把握

(1) 実験方法

a) 実験目的

本研究では，バイオガス化に関連する下記4点の特性を把握することを目的に，家畜ふん尿とウェット系バイオマスの混合割合を段階的に変化させるバイオガス化実験を行った．

①原料バイオマスの性状を把握する

②安定発酵を把握する

③消化液中の肥効成分（T-N，T-P）を把握する

④消化液の高度利用のための方法の一つとして固液分離を取り上げ，消化液を固液分離した後のT-NとT-Pの液相と固相への移行割合を把握する

b) 混合割合の設定

一般廃棄物の処理は自区内処理が基本であることから，北海道の酪農地域に，家畜ふん尿バイオガス化プラントを導入することを想定し，検討した．家畜頭数については，道内の比較的大規模なバイオガスプラントの規模を参考に，1,300頭と設定した．次にプラントの立地する地域の人口規模については，道内のごみ処理管轄人口（市町村だけではなく一部事務組合などを考慮）の分布を参考に5,500人を基本とし，4パターンを想定した．設定したシナリオを**表-1**に示す．次に，先行研究[2]を参考に，**表-2**に示す家畜ふん尿とウェット系バイオマスの原単位から設定したシナリオ毎の年間処理量を算出し，実験における試料のシナリオ毎の混合割合を**表-3**および**図-1**に示すように決定した．

c) 実験装置と実験条件

実験に使用した装置のイメージ図を**図-2**に示す．発酵槽は容積10Lのガラス円筒製の広口瓶を用いた．広口瓶の上部に，原料バイオマス投入および消化汚泥引き抜き口とバイオガス捕集口を設けたゴム栓を用い，またプロペラ式攪拌機シャフトがゴム栓を通るように加工した．嫌気性状態を保つため，原料バイオマス投入および消化汚泥引き抜き口につながるゴム管は発酵槽内部の汚泥に

表-1 シナリオ毎の家畜頭数と人口規模

	家畜頭数[頭]	人口規模[人]
シナリオ①	1,300	5,500
シナリオ②	1,300	11,000
シナリオ③	1,300	22,000
シナリオ④	1,300	44,000

表-2 家畜ふん尿とウェット系バイオマスの原単位

	原単位	
家畜ふん尿	18.2	[t/年･頭]
生ごみ	0.059	[t/人･年]
し尿浄化槽汚泥	0.373	[kL/人･年]
下水汚泥	0.058	[t/人･年]

表-3　実験における試料のシナリオ毎の混合割合

	家畜頭数	生ごみ	し尿浄化槽汚泥	下水汚泥
シナリオ①	89.8%	1.2%	7.8%	1.2%
シナリオ②	81.5%	2.2%	14.1%	2.2%
シナリオ③	68.7%	3.7%	23.9%	3.7%
シナリオ④	52.3%	5.7%	36.3%	5.6%

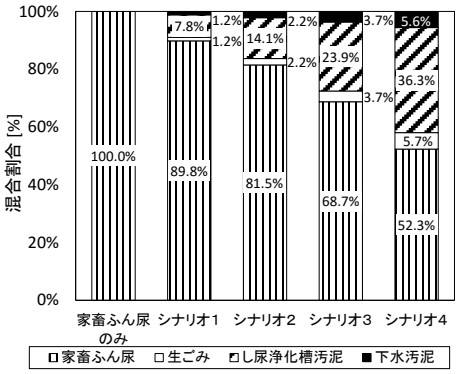

図-1　実験における試料のシナリオ毎の混合割合

浸らせ，基質の出し入れにより空気に触れないよう留意した．ガス発生量を計測するため，バイオガス捕集口とミリガスカウンターをゴム管で繋いだ．発酵槽内はプロペラ式攪拌機により，撹拌回数120rpmで連続撹拌を行った．発酵槽は水槽用恒温器により調整された温水に浸し，発酵液温度を37℃（中温発酵）に保った．

今回のラボ実験では，発酵槽内の種汚泥を6L，滞留時間を30日と設定したため，1日1回，200mLの汚泥を引き抜き，同量の原料バイオマスを投入した．採取した家畜ふん尿と消化液，ウェット系バイオマスは常温で保管すると発酵が進行する恐れがあるため，採取した後は，投入直前まで冷蔵庫の中で保管した．家畜ふん尿と各ウェット系バイオマスは，投入直前に混合した後，発酵槽に投入した．実験開始後，約1か月は立ち上げ期間とし，家畜ふん尿スラリーのみで発酵槽内が安定するまで管理を行った．その後，設定したシナリオに従い，段階的に混合割合を変えた混合基質を投入した．段階的に混合割合を変えた理由は，投入バイオマスの急激な変化による発酵阻害を防止するためである．

d)　使用サンプル

実験には，家畜ふん尿として，牛ふんのみでバイオガス化を行っているA牧場の家畜ふん尿スラリーを，種汚泥としてA牧場の消化液を用いた．ウェット系バイオマス（下水汚泥，生ごみ，し尿・浄化槽汚泥）は，B市のものを用いた．下水汚泥は，B市は分流式であり，下水汚泥（標準活性汚泥法）は，最初沈殿池と最終沈殿池で発生した汚泥を濃縮し，引き抜かれたものを使用した．生ごみスラリーは，回収された生ごみが，破砕分別機により生ごみとビニール袋などの発酵不適物に分けられた後に，細かく粉砕され，生ごみと希釈水を1:1.2で混合したものを使用した．し尿・浄化槽汚泥は，し尿と浄化槽汚泥が施設へ搬入された後，し渣が除去されたものを使用した．

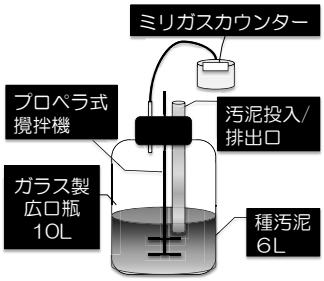

図-2　実験に使用した装置のイメージ図

表-4　実験の分析項目・測定方法・分析方法

分析項目	測定方法	分析方法
ガス発生量	ミリガスカウンター	
メタンガス発生量	ガスクロマトグラフィー，ミリガスカウンター	
メタン濃度	ガスクロマトグラフィー	
CODcr	下水試験法	
TS	下水試験法	
VS	下水試験法	
灰分	下水試験法	
含水率	下水試験法	
T-N	下水試験法	ケルダール窒素法
T-P	下水試験法	モリブデン青吸光光度法

e)　分析項目と分析方法

実験で用いた原料バイオマスと消化液の性状把握のために行った分析項目と分析方法を**表-4**に示す．なお，バイオガス発生量，メタン濃度とメタンガス発生量は毎日測定を行い，その他の項目については必要に応じて適時測定を行った．

(2)　実験結果と考察

a)　安定発酵の確認

実験により得たバイオガスのメタン濃度は55～65%で，一般的なメタン発酵によって発生するメタンガスの濃度の範囲内であった．実験で得られたメタンガス発生量と各シナリオのCODcr負荷量（**表-5**）を用いて，全シナリオのCODcr当たりのメタンガス発生量を求めた（**図-3**）．混合率が上がるにつれ，CODcr当たりのメタンガス発生量は減少しているため，発酵阻害が疑われるが，pHは7.55～7.95と適正範囲内で推移しているため，発酵阻害は起こっていないと判断した．なお，全体的にCODcr当たりのメタンガス発生量が減少した原因は，バイオガス発生に寄与しないし尿・浄化槽汚泥由来のCODが増加しているためだと考えられる．

b) 原料バイオマスおよび消化液の性状把握分析

実験で使用した原料バイオマスの性状を**表-6**に，実験で得られた消化液の性状を**表-7**に示す．

c) 消化液の肥効成分の実験値と理論値の比較

消化液の肥効成分は，原料バイオマスとほぼ同じ組成になるという特徴があるため，肥効成分（T-N，T-P）の実験値と理論値を比較した．実験値と理論値のT-N量を比較した結果を**図-4**に，T-P量を比較した結果を**図-5**に示す．T-N量，T-P量ともに，ウェット系バイオマスの混合割合が増加（シナリオ①→シナリオ④へ）するにつれ，実験値と理論値の乖離などに大きな変化は見られないことから，実験によって概ね理論的な傾向を再現できていることが確認された．また，原料バイオマスの混合割合から，消化液の肥効成分の量をある程度予測できることが確認された．

d) シナリオ評価

メタンガス発生量，肥効成分（T-N，T-P）を用いて，シナリオ評価を行った．まずはじめに，滞留時間は30日と設定し，実験を行ったが，実際の実験継続時間は30日に満たなかったため，実験継続時間の換算を行った．実際の実験継続時間を**表-8**に示す．次に，実験値は，実験における試料のシナリオ毎の混合割合であったことから，これを実験で得られた原単位（メタンガス発生量：**表-9**，肥効成分：**表-10**）を用いて，シナリオ毎の年間処理量に換算した．この換算後の値（**表-11**）を用いてシナリオ評価を実施した．

換算したシナリオ毎のメタンガス発生量の変化を**図-4**に示す．家畜ふん尿のみでバイオガス化を行った場合に比べ，シナリオ④では約7.4%メタンガスの発生量が増えることがわかった．

T-N量について試算した結果を**図-5**に，T-P量について試算した結果を**図-6**に示す．T-N量においても，家畜ふん尿のみでバイオガス化を行った場合に比べ，シナリオ④では約30.9%増加すること，T-P量についても約55.3%増加することがわかった．以上より，家畜ふん尿のみの

表-5 シナリオ毎のCODcr負荷量

	CODcr 負荷量
家畜ふん尿のみ	29,200
シナリオ①	27,400
シナリオ②	25,900
シナリオ③	23,700
シナリオ④	20,800

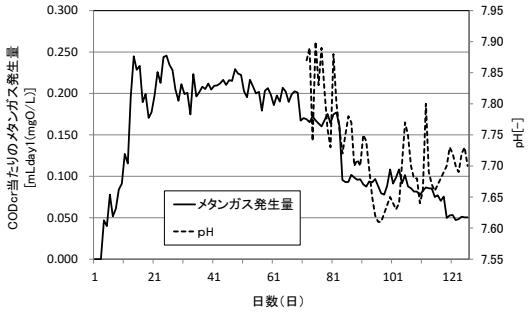

図-3 CODcr 当たりのメタンガス発生量の推移

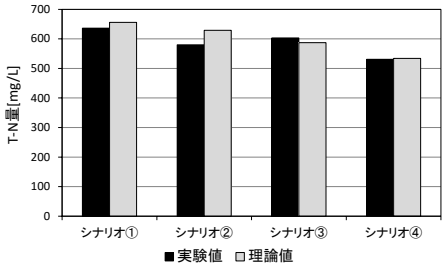

図-4 T-N量の実験値と理論値の比較

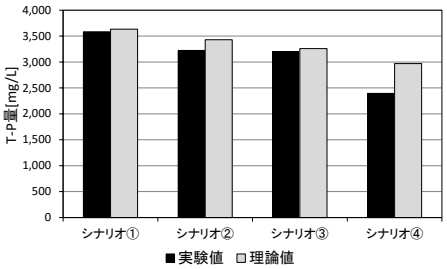

図-5 T-P量の実験値と理論値の比較

表-6 原料バイオマスの性状

	CODcr[mg/L]	T-P[mg/L]	T-N[mg/L]	TS[%]	VS[%]	含水率[%]	灰分[%]
家畜ふん尿	146,000	690	3,820	8.82	7.47	91.18	1.35
生ごみ	156,000	740	5,440	4.15	3.27	95.85	0.87
し尿・浄化槽汚泥	45,000	140	900	0.40	0.35	99.60	0.05
下水汚泥	42,000	1,400	5,900	5.50	4.76	94.50	0.74
種汚泥（消化液）	120,000	650	3,820	1.89	1.14	98.11	0.75

表-7 消化液の性状分析結果

	CODcr[mg/L]	T-P[mg/L]	T-N[mg/L]	TS[%]	VS[%]	含水率[%]	灰分[%]
家畜ふん尿のみ	122,000	650	3,720	4.83	3.82	95.17	1.02
シナリオ①	119,000	640	3,620	4.85	3.82	95.15	1.03
シナリオ②	116,000	610	3,420	3.54	2.33	96.46	1.20
シナリオ③	112,000	590	3,220	3.72	2.95	96.28	0.77
シナリオ④	103,000	530	2,550	2.92	1.38	97.08	1.55

表-8　シナリオ毎の実験継続時間

	同一条件での実験継続時間
家畜ふん尿のみ	47 日
シナリオ①	22 日
シナリオ②	14 日
シナリオ③	13 日
シナリオ④	30 日

表-9　メタンガス発生量の原単位

	メタンガス発生量[m³/t]
家畜ふん尿のみ	15.9
シナリオ①	7.0
シナリオ②	0.1
シナリオ③	2.7
シナリオ④	1.3

表-10　肥効成分の原単位

	T-P [mg/L]	T-N [mg/L]
家畜ふん尿のみ	650	3,720
シナリオ①	60	270
シナリオ②	60	250
シナリオ③	230	950
シナリオ④	360	1,150

表-11　実験継続時間換算後の消化液の分析結果

	T-P [mg/L]	T-N [mg/L]
家畜ふん尿のみ	650	3,720
シナリオ①	636	3,584
シナリオ②	580	3,223
シナリオ③	603	3,203
シナリオ④	530	2,550

消化液と，シナリオ④まで混合発酵させた消化液の肥効成分を比べた結果，ウェット系バイオマスの混合割合が増えるほど，肥効成分のバランスが良くなり，肥料価値は向上することが示唆された．

(3)　消化液の固液分離

a)　実験目的

混合割合の違いが肥効成分の固液分離に与える影響を把握するため，消化液を固液分離した後の固相と液相への移行率について測定を行った．

b)　固液分離の方法

消化液40mLを遠心分離器（2,330rpm，10分間）にかけ，その後，遠心分離した上澄みを１μmのガラスフィルターでろ過したものを液相とした．固液分離後の液相のT-NとT-Pを測定した．固相のT-NとT-Pは，固液分離前の消化液のT-NとT-Pから，固液分離後のT-NとT-Pを引くことで算出した．

c)　T-Nの実験結果と考察

T-Nの分析結果を図-7に示す．液相のT-Nの割合は約45～60%で推移し，混合率が増加するにつれて，液相のT-Nの割合が減少することが明らかになった．これは，混合率上昇に伴ってウェット系バイオマス（生ごみ，下水汚泥）の割合が高くなり，そこに含まれている窒素が固相に滞留するためであると推測される．

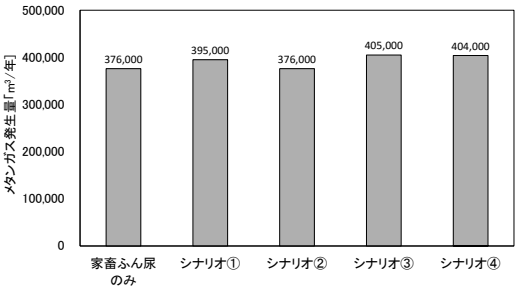

図-4　シナリオ毎のメタンガス発生量の変化

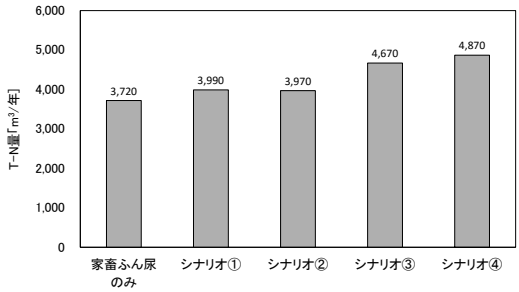

図-5　シナリオ毎のT-N量の変化

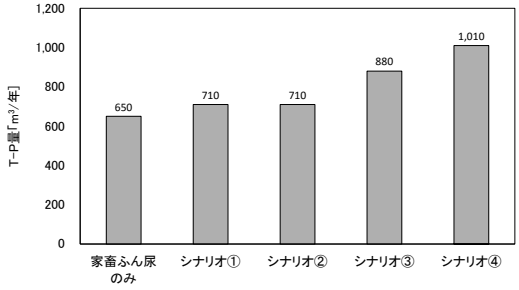

図-6　シナリオ毎のT-P量の変化

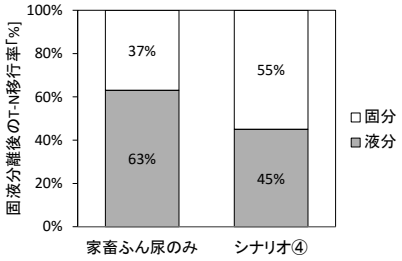

図-7　シナリオ毎の消化液固液分離後のT-N移行率の変化

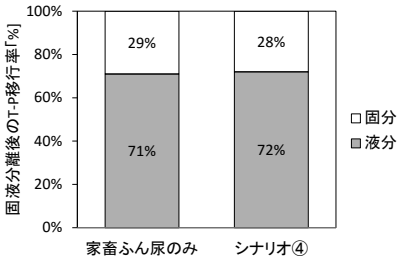

図-8　シナリオ毎の消化液固液分離後のT-P移行率の変化

d) T-Pの実験結果と考察

T-Pの分析結果を図-8に示す．T-Pはすべてのシナリオ（いずれのシナリオにおいても移行率に大きな変化はなし）において，約70%が液相に移行することがわかった．固液分離後の液肥を有効利用することで，T-P成分の大半を利用できることが確認された．

4. 結論と今後の課題

(1) 結論

本研究では，家畜ふん尿主体のバイオガス化プラントにおいて地域で発生するウェット系バイオマスを混合処理（処理施設の集約化（効率化）を図る）し，ウェット系バイオマスの混合割合を段階的に増加させた場合のラボ実験を行った．その結果，消化液の肥効成分について以下のことが明らかとなった．

- 家畜ふん尿とウェット系バイオマスの混合発酵において，混合割合の異なる条件でも安定的に発酵することを確認し，肥効成分（今回の研究では，T-NとT-P）が増加することを確認した．
- 消化液の高度利用の方法の一つとして，固液分離後の肥効成分について，T-PとT-Nの固相と液相への移行率を実験によって把握した．本実験のように混合割合を変化させた場合でも，液相の方にT-Nで約45～60%，T-Pで約70%が移行することが分かった．

(2) 今後の課題

家畜ふん尿とウェット系バイオマスの混合発酵において，バイオガス発生に寄与しないCODが増加する可能性が示唆された．このCODがどの種類のウェット系バイオマス由来であるか，どのような成分であるかは，今後確認を進めることが必要であると認識している．

本実験では，消化液中の肥効成分の一つである，カリウムについて把握していない．カリウム量を測定することにより，消化液としてどのような特性をもつ肥料になるか確認することも必要である．

消化液の高度利用の方法として固液分離についても検討したが，固液分離の方法は，膜分離やスクリュープレス式固液分離など様々な方法があり，どの方法を採用するかによって固液分離後の固相，液相の肥効成分の移行率は異なると考えられる．今後様々な固液分離の方法を試し，固液分離後の肥効成分への動態を調べることも必要である．

謝辞：サンプルの提供にご協力を頂きましたA牧場およびB市の関係者の皆様に，感謝申し上げます．また，本研究は北海道立総合研究機構「戦略研究」の支援を受けて実施した研究成果の一部である．記して謝意を表する．

参考文献

1) 環境省：廃棄物処理施設整備計画，平成 25 年 5 月 31 日閣議決定．
2) 東祐樹，古市徹，石井一英，藤山淳史，翁御棋:ウエット系バイオマスを混合した家畜ふん尿バイオガス化プラントの処理特性と事業性の検討，土木学会論文集 G，Vol.71，No6，ppⅡ_229-Ⅱ_240，2015．
3) 農林水産省（2012）：バイオマス事業化戦略．

(2016. 8. 26 受付)

EXPERIMENTAL STUDY OF FERTILIZER EFFECT COMPONENTS IN DIGESTED FROM CO-FERMENTATION OF LIVESTOCK MANURE AND WET BIOMASS

Yusako FURUSE, Atsushi FUJIYAMA, Kazuei ISHII and Masahiro SATO

The introduction of biogas plants from livestock manure has progressed in diary regions. As a method of future waste disposal, there is a co-fermentation of livestock manure and wet biomass. This is an effective method of utilizing digested liquid from co-fermentation of livestock manure and wet biomass, because effluent treatment of digested liquid is expensive in cost. This study clarified the impact of co-fermentation of livestock manure and wet biomass on fertilizer component (total nitrogen and total phosphorus) of digested liquid by the experiment. The results of experimentation were as follows; co-fermentation was confirmed as stable fermentation and increase of fertilizer component even increasing the mixing ratio of wet biomass. As the high-degree application of digested liquid showed, this study considered solid-liquid separation. This analysis showed that the liquid phase after solid-liquid separation was about 50-60% of the total nitrogen and about 70% of total phosphorus.