

B-16. 地球温暖化抑制のための污水・廃棄物処理処分システムの確立と評価に関する研究

- (1) 污水・廃棄物の処理処分に伴う温室効果ガス発生量、有効利用可能エネルギー量、リサイクル可能資源量の評価と解析に関する研究
- ② 汚泥からのメタンガス回収・有効利用に関する研究

研究代表者 建設省土木研究所 竹石 和夫

建設省土木研究所下水道部	新下水処理研究官	竹石 和夫
	汚泥研究室 主任研究員	落 修一

平成4-6年度合計予算額	22,059 千円
（平成6年度予算額	6,842 千円）

〔要旨〕現在その大部分が廃棄物として処分されている下水汚泥の有効利用を促進するため、汚泥の嫌気性消化プロセスの問題点を調査するとともに、消化により生産されたメタンガスを活用するためのガス発電システムの適用性、および都市ガスとしての利用性について検討した。また、他の汚泥有効利用法であるコンポストプロセスからの亜酸化窒素の発生機構について、室内実験による検討を行った。

〔キーワード〕メタンガス、下水汚泥、エネルギー回収、有効利用、温室効果ガス

1. 序

下水の処理に伴って発生する汚泥は有機物を多く含むことから、下水処理の分野では従来より汚泥の減量と安定化を目的とした嫌気性消化が行われてきた。嫌気性消化によって発生するメタンガスは、これまでも汚泥消化タンクの加温用熱源として使われてきているが、地球温暖化ガスの放出の抑制ならびに新たなエネルギー源としての観点から、メタンガスの有効利用を一層推進していくことが望まれている。

一方、汚泥には窒素やリン酸に代表される植物への肥効成分が多く含まれているため、汚泥の質の管理次第では良好な肥料となり得るものであり、汚泥資源のリサイクルは、地球上の肥料資源の枯渇という観点からも推進されるべきものである。本研究は、以上のように汚泥をエネルギーあるいは肥料資源として捉え直し、地球環境問題の観点から適切な汚泥の処理・有効利用について、そのシステムを検討、評価するものである。

2. 研究内容

4年度は、汚泥の嫌気性消化によって発生するメタンガスの有効利用について、エネルギー資源としての観点からその潜在的な有効利用量について検討を行うとともに、消化ガス発電システムについて、その電力回収効率、システムの熱収支、及びシステムの安定性について検討した。

5年度は、汚泥資源のリサイクルのための緑農地利用に着目し、そこで有効な手段となるコンポスト及び乾燥プロセスについて、地球温暖化ガスの発生量を調査するとともに、汚泥からのエ

エネルギー回収システムである嫌気性消化プロセスとコンポストプロセス、もしくは乾燥プロセスとの組み合わせシステムについて、経済性、エネルギー消費量、地球温暖化ガス放出量等について検討、評価した。

6年度は、嫌気性消化法と発生ガスの利用に関して、中小規模下水処理場における本法の運転管理の実状をアンケート調査するとともに、消化ガス発電システムの適用性及び消化ガスの都市ガスとしての利用性について検討した。また、前年度に明らかとなったコンポストプロセスからの亜酸化窒素の発生について、その詳細を把握するための室内実験を行った。

3. 平成6年度の研究成果

本年度は、嫌気性消化法と発生ガスの利用に関して、中小規模下水処理場における本法の運転管理の実状をアンケート調査するとともに、消化ガス発電システムの適用性及び消化ガスの都市ガスとしての利用性について検討した。また、前年度に明らかとなったコンポストプロセスからの亜酸化窒素の発生について、その詳細を把握するための室内実験を行った。

3.1 嫌気性消化法と発生ガスの利用に関する調査

本調査は、メタンガスの有効利用を推進して行くに際しての課題を、生産者である下水道事業の担当者の意見・要望として抽出し、今後の技術開発や改善策への取り組みに資することを目的としたものである。

3.1.1 調査方法

(1) 運転管理に関するアンケート調査

近年、中規模以上の下水処理場においても嫌気性消化法を採用しない事例が増えてきている。本アンケート調査は、この要因を明らかにし、今後の嫌気性消化法の在り方や最適化の検討に資するために実施したものである。調査は、嫌気性消化法を採用している全国の中小規模下水処理場（日平均汚水処理量：約 5,000～50,000 m³/日）の中から、稼働率が高く且つ処理場規模や地域を考慮して50カ所を選定し、嫌気性消化法の運転実績と本法を採用したことによる効用や問題点、課題等について意見を徴集した。

(2) 消化ガス発電システムの適用性の検討

消化ガス発電は、余剰となった消化ガスの有効利用方法として着目され、昭和50年代後半から導入されるようになり現在16カ所の下水処理場で稼働している。しかし、ここ数年来の導入実績は無く、導入に際して何らかの問題があるものと推察される。ここでは、消化ガス発電システムの導入費用及び運転経費等をメーカーヒヤリングにより求め、これらの経費と発電により生じる便益とを比較することにより、本システムの適用性を処理場規模を考慮して検討した。また、本システムを導入している4カ所の処理場に対してその運転実績や意見等についてアンケート調査した。

(3) 消化ガスの都市ガスへの利用性の検討

消化ガスを都市ガスに供給・利用している我国唯一の例として北見市がある。そこでは、都市ガス源としての消化ガスの量や品質の安定供給のために種々の工夫がなされている。ここでは、消化ガスを都市ガスへ供給・利用して行く際の一般的な水準を明らかにするために、都市ガス側の技術的水準や条件を考慮し、消化ガスの供給の手法について検討した。

3.1.2 調査結果

(1) 運転管理に関するアンケート調査

アンケートの回答は、北海道及び東北地方：10カ所、関東地方：9カ所、中部及び北陸地方：8カ所、近畿・中国及び四国地方：9カ所、九州地方：10カ所の計46カ所の処理場から得られた。回答のあった処理場の水処理方式及び汚泥処理方式の内訳はそれぞれ表－1及び表－2の通りである。

アンケートからは運転実績データ等も得られているが、ここでは、意見として得られた事項についてその概要を示す。

表－1 水処理方式別処理場数

水処理方式	処理場数
高速散水ろ床法	2
同上＋標準活性汚泥法	1
標準活性汚泥法	36
同上＋高速エアレーション沈殿池法	1
高速エアレーション沈殿池法＋酸素法	1
ステップエアレーション法	1
嫌気好気法＋凝集剤添加循環法	1
好気性活性汚泥法	1
回転生物接触法	2
計	46

表－2 汚泥処理方式別処理場数

汚泥処理方式	処理場数
濃縮－消化	1
濃縮－消化－乾燥	1
濃縮－消化－脱水	31
濃縮－消化－脱水－乾燥	1
濃縮－消化－脱水－乾燥－焼却	5
濃縮－消化－脱水－コンポスト	4
濃縮－消化－脱水－焼却(コンポスト)	1
濃縮－消化－脱水－溶融	2
計	46

1) 消化ガスの有効利用

消化ガスの有効利用に関して、有効利用用途、設備面及び維持管理面の問題点についての複数回答による意見集計結果をそれぞれ表－3、4、5に示す。ここで注目される点としては、有効利用用途では将来ともガス発電がないこと、設備面の問題点では関連施設の腐食とガスホルダーの容量不足が大きいこと、維持管理面の問題点では硫化水素対策や消化ガスの量が少ないこと及び有資格技術者の確保等が上げられる。

表－3 消化ガス有効利用用途

内 容	現 在		将 来	
	回答数(件)	割合(%)	回答数(件)	割合(%)
消化タンク加温	38	70.3	29	60.4
消化ガス発電	0	0	0	0
ガスエンジン補助燃料	0	0	0	0
汚泥焼却炉の補助燃料	4	7.4	5	10.4
汚泥乾燥炉の補助燃料	3	5.6	5	10.4
処理場内の暖房・給湯等熱源	3	5.6	2	4.2
処理場内の照明(ガス燈)	1	1.8	1	2.1
消化ガスの場外への直接供給	2	3.7	4	8.3
処理場外へ熱供給	0	0	0	0
その他	3	5.6	2	4.2
計	54	100.0	48	100.0

表－4 有効利用に関する設備面の課題と問題点

内 容	現 在		将 来	
	回答数(件)	割合(%)	回答数(件)	割合(%)
関連設備の腐食	14	27.5	4	8.5
ガスホルダーの容量不足	7	13.7	3	6.4
返流水路の腐食	2	3.9	0	0
その他	1	2.0	3	6.4
問題ない	5	9.8	3	6.4
無回答	22	43.1	34	72.3
計	51	100.0	47	100.0

2) 嫌気性消化プロセス

嫌気性消化プロセスに関して、施設配置や建設、運転方法の難易、施設整備等の維持管理、汚泥処理システムとしての効果及び水処理システムや環境への影響等について意見収集した。施設配置や建設面からは表-6のとおりデメリットの要因が多く上げられメリットが有るとしたものは1件のみであった。また、運転方法の難易に関しては易しい14件(30%)に対して、難しい32件(70%)であった。これらの結果は、図-1に示す施設設備の維持管理に対する意見にも反映されているものと思われる、負の要因が幅広く挙げられている。汚泥処理システムへの効果に関しては表-7のとおり汚泥の減量化が多く挙げられている。ここで注目されることは、消化の汚泥脱水への効果に関して肯定的な意見と否定的な意見とがほぼ同数、同率であったことである。表-8は水処理システムや環境への影響に関する意見である。メリット

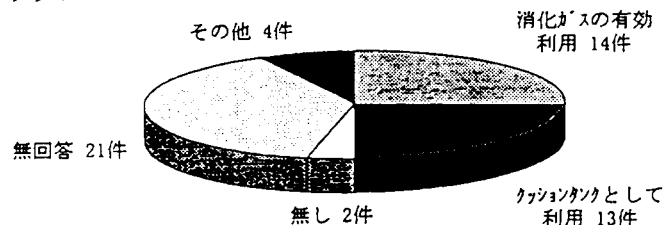
表-5 有効利用に関する維持管理面の課題と問題点

内 容	現 在		将 来	
	回答数(件)	割合(%)	回答数(件)	割合(%)
消化ガス中水分の凍結	3	6.3	1	2.0
ボイラ技師確保等の法制度	1	2.1	4	8.0
消化ガス量の不足	4	8.3	3	6.0
硫化水素除去等のガスの安全性	5	10.4	3	6.0
消化タンク停止時への対応等のエネルギーの安定供給	3	6.3	2	4.0
その他	1	2.1	2	4.0
問題なし	4	8.3	3	6.0
無回答	27	56.2	32	64.0
計	48	100.0	50	100.0

表-6 施設配置や建設面からみた嫌気性消化プロセス

メリット	件 数	割合(%)	デメリット	件 数	割合(%)
な い	7	15.2	用地の確保	19	27.2
あ る	1	2.2	建設費の増加	14	20.0
無回答	38	82.6	爆発の危険性	10	14.3
			関連設備機器の増加	8	11.4
			ガス等配管の困難性	3	4.3
			無回答	15	21.4
			その他	1	1.4
計	46	100.0	計	70	100.0

メリット



デメリット

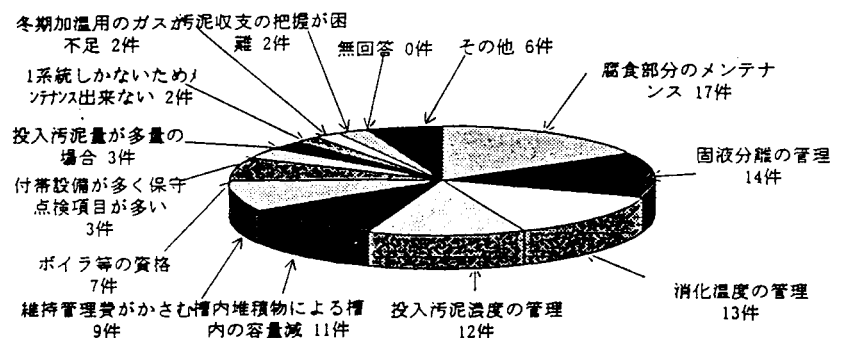


図-1 施設整備等の維持管理面に関する意見構成

としては悪臭の抑制が圧倒的に多く、デメリットとして脱離液の水処理への影響が多く指摘されていた。

(2) 消化ガス発電システムの適用性の検討

1) 消化ガス発電システム導入による便益性の検討

消化ガス発電に要する費用（減価償却費＋運転経費）と便益を比較することにより、本システム導入の便益性を検討した。ここで、減価償却費の対象は機械、電気、土木・建築等に要する経費とし、運転経費には補修費、補機用電力、冷却水、運転人件費を含むものとした。これらの基礎数値にはメーカーヒヤリングより求めたものを参考とした。また、減価償却費は国庫補助（3/4相当と仮定）が有る場合と無い場合について求めた。一方、発電による便益に関しては、発電機の設置時の位置付けが常用か否かにより契約電力、特に基本料金に差異が生じる。

また、契約違反には契約超過金が果たされるため、ここでは発電機の稼働率を100%まで高めた運転を行うものとし、発電機編成を3台（通常運転2台、予備機1台）として設備費用にも計上した。そして、同じ発電機編成下で発電機の設置時位置付けを常用とするケースとしないケースについて便益計算を行った。本検討に用いた代表的な数値、係数を表-9に示す。

表-7 汚泥処理システムとしての効果

メリット	件数	割合(%)	デメリット	件数	割合(%)
汚泥の減量化	31	56.3	脱水しづらい	7	14.0
脱水効率の向上	9	16.4	汚泥移送管の閉塞	4	8.0
薬注量の減少	3	5.5	低濃度汚泥による	4	8.0
無回答	12	21.8	脱水設備への過負荷		
その他	0	0	なし	3	6.0
			無回答	30	60.0
			その他	2	4.0
計	55	100.0	計	50	100.0

表-8 水処理システムや環境への影響

メリット	件数	割合(%)	デメリット	件数	割合(%)
悪臭の抑制	25	42.3	脱離液等の水処理への影響	18	34.0
汚泥の質の安定化	9	15.3	臭気発生	4	7.5
汚泥の衛生面向上	7	11.9	カロリー減で焼却等に影響	3	5.7
埋立て地の確保	3	5.1	地球温暖化ガスの放出	2	3.8
無回答	10	16.9	なし	1	1.9
その他	5	8.5	無回答	22	41.4
			その他	3	5.7
計	59	100.0	計	53	100.0

表-9 検討に用いた主要数値・係数等

減価償却費	利率率：6.2% 耐用年数：15年 設備建設費：メーカーヒヤリングを参考
運転経費	補修修理費等：発電機能力 410KW ≤ メーカーヒヤリングを参考 300KW ≤ 7.5円/kwh-発電量 150KW ≤ 8.0円/kwh- " 150KW > 9.0円/kwh- " 補機電力費：補機電力量：消化ガス発電量の5% 電力単価：12円/kwh（高圧電力単価の平均） 運転人件費：人員：2人 単価：5,000,000円/人・年 冷却水費：使用水量：発電機能力 410KW ≤ メーカーヒヤリング 150KW ≤ 0.3 m³/hr 150KW > 0.2 m³/hr 冷却水単価：100円/m³
消化ガス発生量	平均流入SS濃度：200 mg/L、SS除去率：95%、汚泥発生量：SS除去量 消化ガス発生量：投入汚泥量（m³/日）の16倍 投入汚泥濃度：3 g/v-%
消化ガス発電量	発電量原単位：1.8 kwh/m³-gas（消化ガス発電による平均的な値）
発電便益	電力単価：12円/kwh 基本料金単価：高圧甲契約：1,200円/kw 高圧乙契約：1,600円/kw 基本料金は、契約種別により異なるため、処理場規模別の契約電力を次式から求め、この値から消化ガス発電分を差し引く操作を行った。 $W = 730.9 \cdot X^{(-0.3182)} \cdot X \cdot 10^{(-3)}$ ここで、W：契約電力(KW)、X：水処理能力(m³/日) 出典：「電力使用合理化の手引」(社)日本下水道協会、1989

解析結果を図-2に示す。同図では、発電便益の経費を上回った段階で発電による利益が生じることを表す。これより、発電に要する費用として国庫補助が無いとした場合（経費-1）には、いずれの処理場規模においても消化ガス発電による利益は生じていない。一方、国庫補助が有るとした場合（経費-2）は、基本料金の低減を見込んだ便益-2において 60,000 m³/日以上の規模から利益が生じている。また、この規模以上では運転経費のみを見込んだ（経費-3）と基本料金の低減を見込

まない便益-1との関係からも利益が生じている。利益を計上する上で最も緩やかな条件である運転経費のみ（経費-3）と基本料金低減を見込んだ便益-2の間で利益が生じるのは約 40,000 m³/日以上の規模からである。本検討手法によれば、この処理場規模付近が費用便益から見た消化ガス発電システム導入の限界と言える。

消化ガス発電システム導入の費用面からの限界処理場規模が、比較的大きな処理場規模と言える 40,000 m³/日付近（処理人口：8万～13万人に相当）に存在した原因は、図-2からも分かるように、運転経費（経費-3）が高いことにある。従って、この費用の削減が図られない限り消化ガス発電システムの幅広い円滑な普及は望めない。

2) ガス発電システムに対する現場からの意見

アンケートに挙げられた代表的な意見は次のように集約された。

〔消化ガス発電システムの運転管理〕

- ・ 供用後10年が経過し、機器の老朽化が著しく、年4回の定期点検が欠かせない。
- ・ 点検整備に係わる費用が膨大であり、この経費は発電機の運転時間を延ばし稼働率を上げるほど増加する。また、潤滑油や重油、冷却用水等の費用も無視できない。

〔下水処理場としての効用〕

- ・ 処理場内電気使用量の6～8%を賄っているが、安定供給のためには予備機が必要である。
- ・ 常用発電とすることにより、昼間消費電力量のピークカットが図られ、電力料金が安価となる特別電気料金制度の適用が受けられる。
- ・ 余剰ガスの有効利用方法として見学者に好評である。しかし、費用と手間の掛かる設備であると感じている。

〔その他〕

- ・ 年間を通じて安定的な発電を目指す必要があるため、ガス発生量の変動を考慮して発電機容量が低い設備となる。関連して、消化ガス発生量の変動への対応や他の処理場で発生する

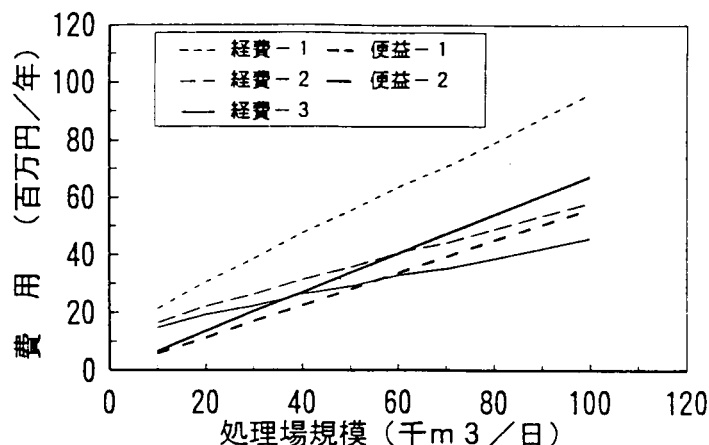


図-2 消化ガス発電システムの適用性解析結果

- 経費-1：減価償却費（国庫補助無し）＋運転経費
 - 2：減価償却費（国庫補助有り）＋運転経費
 - 3：運転経費
 便益-1：基本料金の低減を見込まない
 - 2：基本料金の低減を見込む

消化ガスの運用を図りたいが、消化ガスの長期保存や輸送の方法がない。

- ・ 消化ガス発電設備の点検修理時の対応に配慮するために、受変電設備やボイラー設備のバックアップの必要から二重の設備投資となる。
- ・ 今後改善を図りたい事項として、二次冷却水及び排気ガス中の余熱利用がある。
- ・ 汚泥処理システム全体のエネルギー効率アップのために、熱回収の対応を進めるほど処理プロセスが複雑化し、付帯設備の消費エネルギーやメンテナンスコストも無視できなくなり、故障等で稼働率が低下するとコスト回収が困難となる。

(3) 消化ガスの都市ガスへの利用性の検討

都市ガスは、各種の単体ガスの混合物であり、用いる原料や製造法によって石炭系の石炭ガス、水性ガス、増熱水性ガス、発生炉ガス、及び石油系の油ガス、石油廃ガス、天然ガス、LPGに大別されている。ガス事業便覧（平成5年版，（社）日本ガス協会）によれば、都市ガスの大部分を液化天然ガスと石油系ガスが占め、液化天然ガスの増産が年々の需要増加を賄ってきている。都市ガスは、平成5年3月現在、244の私営・公営の一般ガス事業者により供給されている。一方、地方の小都市や農山漁村等の都市ガスの製造工場がない地域ではLPGに依るところが大きく、平成2年度末では約2,400万世帯が利用している。

都市ガスの運用に当たっては、利用者の保護、事業者の健全な発展、公共の安全性、公害防止等を目的にしたガス事業法に準拠しなければならない。ここでは、特に消化ガスを扱う技術上の観点から、ガス事業法に基づいた消化ガスの燃焼性、安全性、供給形態等について検討した。

1) 消化ガスの燃焼性

ガス事業法では、ガスの燃焼性を数値的に表現するために、ウォッペ指数（WI）と燃焼速度指数（Cp）を定義し、これらの関係からLPGを除く15種類の都市ガス（13A, 12A, 11A, A, 7C, 6A, 6B, 6C, 5A, 5AN, 5B, 5C, 4A, 4B, 4C）に分類している。

[ウォッペ指数（WI）]

$$WI = Hg \cdot s^{-(1/2)}$$

ここで、
Hg : ガスの発熱量(kcal/Nm³)
s : ガスの空気に対する比重

[燃焼速度指数（Cp）]

$$Cp = K \cdot \{H_2 + 0.6(CO + CmHn) + 0.3(CH_4)\} \cdot s^{-(1/2)}$$

ここで、
K : ガス中の酸素の含有率により定めた定数
H₂ : ガス中の水素含有率（容量％）
CO : " 一酸化炭素含有率（容量％）
CmHn : " メタン以外の炭化水素（容量％）
CH₄ : " メタン含有率（容量％）

ここで、一般的な消化ガスの性状をメタン含有率：65％、二酸化炭素：35％、総発熱量：6,200 kcal/Nm³、比重：0.896としてウォッペ指数と燃焼速度指数を求め、どの都市ガスグループに属するかを判定したところ、それぞれWI:6,550, Cp:20.6となり、いずれのグループにも属さず消化ガス単独の供給・利用はできないものであった。その原因は、消化ガスの発熱量が相対的に小さいこともあるが、燃焼ガス組成がメタン単独であるために燃焼速度指数が相当に低いことにある。

この解決法として、消化ガス中の炭酸ガスを除去して発熱量を高めること、他の燃焼ガスと混

合して用いることが考えられる。ここでは、今後、嫌気性消化法の普及を主に地方都市を中心に進める必要があることから、消化ガスの混合相手方としてLPGを想定した検討を行った。また、消化ガスからの炭酸ガスの除去技術も開発されつつあることから、消化ガス中の二酸化炭素含有率を35%から5%に低減した場合を想定し検討を行った。

検討結果を表-10に示す。消化ガスのみでは都市ガスの範疇には入らないのが、LPGとの混合によりそれが可能となり、更に炭酸ガスを除去することにより適用範囲も広がっている。

ここで重要なことは、今後、都市ガスのCO中毒対策や設備の安全・保安対策、環境対策、省エネルギー設備への適用性及び消費者ニーズ等の面から、都市ガス

性状の高カロリー化が図られて行く状況にあり、消化ガスの活用の際にも11A, 12A, 13A等の高カロリーのグループの性状が求められることである。

2) 消化ガスの安全性

ガス事業法では、供給ガス（天然ガス又はプロパン、ブタン若しくはプロピレンを主成分とするガス及びこれらに空気を混入したガスを除く）の有害成分について含有基準及び検査義務を表-11のとおり

り定めており、検査結果の記録は1年間保管することになっている。

この基準に対して、消化

表-10 消化ガスとLPGとの混合による都市ガス化への検討結果

混 合 割 合 (%)			脱炭酸なし			脱炭酸あり		
空気	消化 ガス	LPG	ガスの燃焼性		燃 焼 範 囲	ガスの燃焼性		燃 焼 範 囲
			ウエハ [*] 指 数	燃 速 指 数		ウエハ [*] 指 数	燃 速 指 数	
30	5	65	13.765	41.1	—	14.028	42.0	—
	10	60	13.039	39.2	—	13.437	40.6	—
	15	55	12.588	38.1	A	13.125	40.0	A
	20	50	11.917	36.3	—	12.726	39.2	A
	25	45	11.226	34.5	—	12.315	38.3	—
	30	40	10.435	32.4	6A	11.665	36.8	—
	35	35	9.963	31.2	—	11.313	36.1	—
	40	30	9.197	29.2	5AN	10.858	35.2	6A
	45	25	8.438	27.2	—	10.388	34.2	—
	50	20	7.556	24.9	—	9.646	32.5	5A
40	5	55	12.118	40.8	12A	12.376	41.8	11A
	10	50	11.357	38.5	11A	11.751	40.1	11A12A
	15	45	10.884	37.2	—	11.409	39.3	11A
	20	40	10.176	35.0	—	10.969	38.2	—
	25	35	9.456	32.9	—	10.516	37.1	—
	30	30	8.615	30.4	A	9.810	35.2	—
	35	25	8.081	28.9	—	9.417	34.3	—
	40	20	7.305	26.6	—	8.909	33.1	—
	45	15	6.504	24.2	—	8.381	31.9	A
	50	10	5.564	21.4	—	7.567	29.8	—
50	5	45	10.026	41.2	13A	10.274	42.5	—
	10	40	9.214	38.3	13A	9.590	40.2	13A
	15	35	8.700	36.5	12A	9.207	39.0	13A
	20	30	7.935	33.8	11A	8.712	37.5	12A13A
	25	25	7.183	31.0	—	8.199	36.0	12A
	30	20	6.500	28.6	—	7.642	34.3	11A
	35	15	5.706	25.7	—	6.972	32.1	11A
	40	10	4.870	22.6	—	6.388	30.3	—
	45	5	4.014	19.5	—	5.776	28.5	—
	50	0	3.235	16.8	—	5.116	26.5	—

表-11 都市ガス中の有害成分の含有基準

検査対象成分	こえてはならない値 〔温度0度、圧力1.013250 ヘクトパスカルのもとにおける乾 燥したガス1m ³ につき〕	検査場所	検査周期
硫黄全量 (Total S)	0.5 g / Nm ³	ガスホルダーの出口 〔ホルダーがない 場合は通産大臣 が指定する場所〕	毎週1回
硫化水素 (H ₂ S)	0.02 g / Nm ³		
アンモニア (NH ₃)	0.2 g / Nm ³		

ガスでは主に硫化水素が問題となる。消化ガス中には 2,000～3,000 ppm の硫化水素が含まれており、0.02 g/Nm³に相当する 13 ppm 以下にまで除去する必要がある。現在、嫌気性消化プロセスにおける脱硫後の硫化水素濃度は 10～300 ppm の範囲にあり、都市ガスへの利用を図る場合には脱硫装置の更なる除去性能の向上と性能の安定化を図らなければならない。

3) 供給形態

消化ガスの供給形態としては、下水道管理者が利用者に直接供給する場合と、一般ガス事業者に供給する場合が考えられる。ここでは、これらに係わる法的な規制の面からの整理を行い、その要約を表－12に示した。

表－12 消化ガス供給形態別の主な法的規制

下水道管理者が利用者に直接供給する場合	・ 下水道管理者側に「ガス主任者選任届」が必要 ・ 有資格者の確保が必要 ・ 供給条件の届出、工事計画届出書、ガス主任技術者届、準用事業開発届出書等の手続きが必要
下水道管理者が一般ガス事業者に供給する場合	・ 下水道管理者が卸供給事業者となる ・ ガス主任者は置かなくてもよい ・ 卸供給条件認可申請書、準用事業開始届出書等の手続きが必要

3.1.3 考 察

嫌気性消化システムの実状や消化ガス発電システムの適用性、消化ガスの都市ガスへの利用性などについて、アンケートによる調査と検討を行った結果、運転管理の担当者から嫌気性消化法や消化ガスの有効利用について多くの問題点や課題が寄せられた。これらの意見や検討結果をまとめると、今後、取り組むべき事項として次のことが挙げられる。

- (1) 嫌気性消化法に関しては、①関連施設の防食対策、②性能の向上・安定化を図った脱硫（硫化水素対策）技術の開発、③汚泥の投入・引抜きを含めた消化プロセスの容易な運転法の開発が挙げられる。
- (2) 消化ガスの有効利用の観点からは、直接的には①ガスホルダーの十分な容量確保、②硫化水素の効果的な除去が挙げられる。また、今後取り組むべき課題として③炭酸ガスの除去による消化ガスの高品質・高カロリー化、④利用用途拡充に欠かせない消化ガスの長期貯留及び輸送技術の開発がある。
- (3) 一方、汚泥処理プロセスは大型且つ精密な機器より構成されており、これらの定期点検や整備には多くの経費が投入されている。これらのノウハウはメーカーに依る所が大きく、それに係わる経費が削減されない限り、消化ガスの有効利用の円滑且つ効果的な推進は望めないと考えられる。現在、その経費は、機器の耐用年数の間に概ね単体価格に相当する額が必要となっており、更なる機器の長寿命化と性能の信頼性向上が望まれる。

3.2 コンポスト化過程における亜酸化窒素発生に関する実験

3.2.1 実験方法

実験は、保温加工してある内径10cm、高さ60cmの発酵槽4台を用い、表－13の実験条件により30℃の恒温槽で実施した。N₂Oの発生は脱窒作用と硝化作用に起因していると想像されることから、これらの現象を読みとるための仕込み条件として、酸化態の窒素の含有率が高いコンポストを種コンポストとして用いた。また、下水汚泥のコンポスト化における硝化作用は、仕込み時に副資材を混合しているケースで活発に認められることから、副資材としてモミガラを混合

するケースも
設定した。一
方、硝化細菌
は60℃以上
で不活性化す
ることから、
発酵初期の3
日間を60℃

表-13 実験条件

実験ケース名	仕 込 み 条 件		発 酵 環 境
	混合比率 (DSベース) 主原料：種コバ [®] スト：モミガラ	含 水 率 (%)	
30-無	1 : 0.5	50	30℃恒温室にて発酵
30-モ	1 : 0.5 : 0.25	55	
60-無	1 : 0.5	50	発酵初期3日間は60℃恒温庫、 その後、30℃恒温室にて発酵
60-モ	1 : 0.5 : 0.25	55	

(注) 主 原 料 : 余剰活性汚泥に高分子凝集剤を加えて脱水、風乾後 5mm 以下に粉碎したもの
種コバ[®]スト : H市コンポスト (破碎モミガラと下水汚泥の混合コンポスト、70日間発酵)
モミガラ : H市コンポスト工場の破碎モミガラ

の恒温庫内で発酵させるケースについても実施した。

実験は5週間行い、この間、発酵温度を連続測定しながら発酵排ガスと発酵物の性状の変化を調べた。また、切り返し時には必要に応じて供給空気量の変更と発酵中水分の調整を行った。ガス組成の分析はガスクロマトグラフ (TCD: N₂, O₂, CO₂ ECD: N₂O) により、発酵物の性状分析は下水試験法 (1984) と肥料分析法 (1992) によった。

3.2.2 実験結果

(1) 発酵状況

実験に用いた原料及び仕込み時調整試料の性状・成分組成を表-14に示した。

実験では、各ケースの仕込み量約5ℓに対して実験開始時の空気供給量を500 ml/minに設定して発酵を図った。

表-14 実験に用いた原料及び仕込み時調整試料の性状・成分組成

		含水率 (w/w-%)	pH (-)	EC (mS/cm)	VS/DS (-)	N (w/DS-%)	C/N (-)	NOx-N (mg/DSkg)
原 料	余剰活性汚泥	8.68	6.16	4.0	0.744	7.71	4.8	32.0
	モミガラ	9.20	5.45	0.48	0.783	0.382	104	41.2
	種コンポスト	37.8	7.47	3.7	0.422	2.47	9.1	471
仕込み時	モミガラ 無し	49.3	6.76	3.7	0.633	6.11	5.4	140.5
	モミガラ 有り	55.2	6.80	3.6	0.668	5.29	6.2	134.8

図-3は、実験前半における発酵温度の経日変化である。各ケースは仕込み後間もなく発酵が始まり早々に60℃以上に達した。そして、その高温発酵期が3～4日間維持された。60℃恒温庫内にセットした60-無と60-モのケースについては、その間発酵温度をモニターしていなかったが、ここでも発酵が旺盛となり庫内温度からみて60℃以上になっていたものと思われる。各ケースにおける空気供給量は、その後の発酵温度の低下に従い随時低減させ、14日目以降は100 ml/minに固定

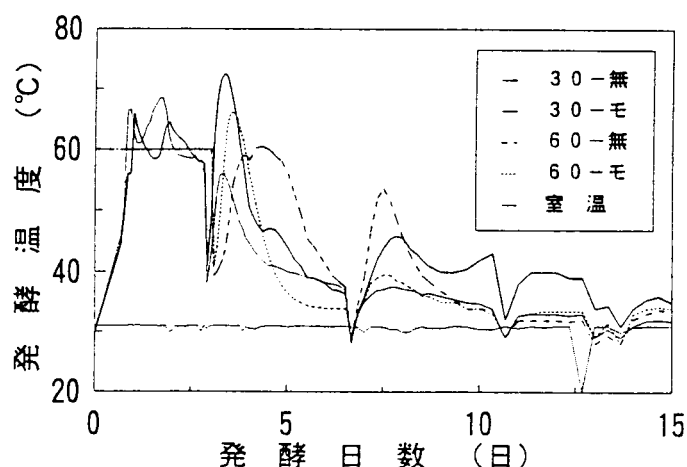


図-3 実験前半における発酵温度の変化

した。なお、図中の急激な発酵温度の低下が見られるポイントは切返し操作によるものである。

(2) 発酵物中の酸化態窒素と排ガス中の亜酸化窒素の変化

図-4は、発酵過程における発酵物中の酸化態窒素($\text{NO}_x\text{-N}$)と排ガス中の亜酸化窒素(N_2O)の累積変化量を表したものである。

これより、
亜酸化窒素
の放出は、
酸化態窒素
の変化に応
じていたこ
とが読みと
れる。発酵
初期におけ
る双方の急
激な変化は
旺盛な発酵
にともなう
脱窒作用の
発現による
ものと思わ
れる。

しかし、
この発酵旺
盛期でも排
ガス中の酸

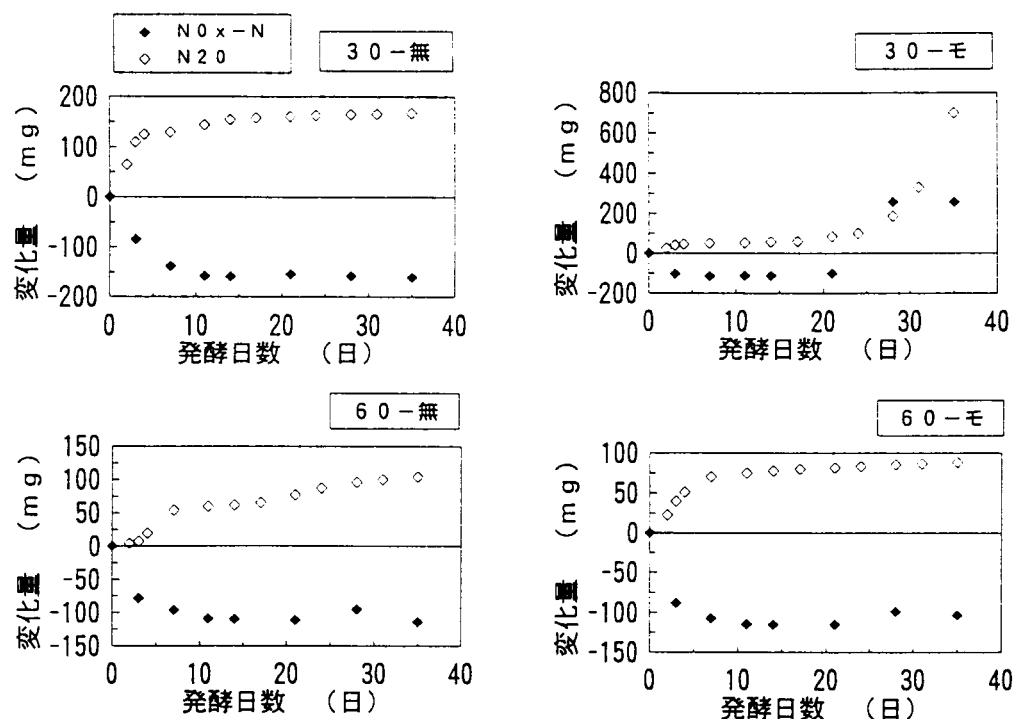


図-4 発酵過程における発酵物中酸化態窒素と
排ガス中亜酸化窒素の累積変化量

素濃度は $14 \text{ O}_2 \text{ v/v-\%}$ 以上が確保されていた。このことは、発酵槽内は平均的には好氣的雰囲気にあったものの、発酵物表面及びその内部では微生物の酸素要求が強く酸素欠乏となり、硝酸呼吸等に代表される脱窒作用が発現したと推察される。一方、発酵後期では、30-モのケースみで双方が著しく増加し、これは活発な硝化作用の発現によるものである。

本実験から得られたデータから、コンポスト化過程における亜酸化窒素の発生率を求めると、それぞれ単位脱窒量当り $0.54 \sim 0.92 \text{ N}_2\text{O-w/N-w}$ 、単位硝化量当り $0.94 \text{ N}_2\text{O-w/N-w}$ であった。

3.2.3 考 察

下水汚泥のコンポスト化過程から発生する亜酸化窒素は、その原因を硝化作用に求めることができる。脱窒作用が顕在化する条件としては2つあり、1つは、原料に酸化態窒素が多く含まれていることであるが、下水汚泥の場合この可能性は少ない。他の1つは、仕込み時の植種のために混合される返送コンポスト中に酸化態窒素が多く含まれていることであるが、それはコンポスト化過程での硝化作用の発現に由来するものである。

従って、コンポスト化過程において亜酸化窒素の放出を抑制するためには硝化作用の発現を抑える必要がある。しかし、その良否は、緑農地土壌における脱窒作用と硝化作用のそれぞれから

の亜酸化窒素の発生率と、コンポスト製造過程での発生率に基づいた地球環境レベルでの総合的な検討・評価を待たなければならない。それによって、コンポストに含有される窒素のあるべき形態が定まるものと思われる。

なお、本実験で得られた亜酸化窒素の発生率については、更に実験や調査を進め、地球環境保全上の検討に耐え得るものとして行く必要がある。

4. ま と め

平成6年度は、嫌気性消化法と発生ガスの利用に関する調査と、コンポスト化過程における亜酸化窒素発生に関する実験を行った。その結果の概要を以下にまとめた。

- ① 嫌気性消化法を採用している下水処理場に対して、その運転管理や消化ガスの有効利用についてアンケート調査した結果、46カ所から回答があり、嫌気性消化法について汚泥の減量化等の効果が挙げられている一方、運転管理の困難性や関連機器の腐植、硫化水素対策、ガスホルダーの容量不足、有資格者の確保難等が挙げられた。
- ② 消化ガス発電システムの適用性について検討した結果、その適用限界の処理場規模は日平均下水処理量40,000m³/日程度と想像され、60,000m³/日以上規模になると明確に発電利益が生じるというものであった。
- ③ 消化ガスの都市ガスへの適用性を検討した結果、消化ガスは単独での利用はできず、他の高カロリー且つ燃焼速度の速いガスとの混合利用が必要であり、ここでは、LPGとの混合利用を検討して利用可能であることを確かめた。都市ガスへの利用に際しては、消化ガス中の硫化水素濃度を13 ppm以下に落とすことが条件となる。
- ④ 下水汚泥のコンポスト化においても、亜酸化窒素が放出される場合があることが確認された。実験から得られた亜酸化窒素の放出率は、脱窒及び硝化量のN当り、それぞれ 0.54~0.92, 0.94 N₂O-w/N-w であった。

[謝 辞]

本研究では、嫌気性消化法の運転管理や消化ガスの有効利用の調査に関して、多くの自治体関係者、メーカーに協力を仰ぎ、貴重な意見や指摘、多くの運転管理データを頂いた。また、コンポストの実験では自治体から試料の提供を受けた。ここに、厚く御礼申し上げる。

[参考文献]

1. 「電力使用合理化の手引」(社)日本下水道協会, 1989
2. 「ガス事業便覧」平成5年版, (社)日本ガス協会
3. 「ガス事業法令集」平成5年版, (社)日本ガス協会

[研究発表の状況]

1. 佐藤和明, 水落元之 「下水汚泥のメタンガス回収量に関する調査」第30回環境工学研究フォーラム講演集, vol 30, pp 97~99, 1993.12, 土木学会