

## 12. 下水汚泥保有エネルギーの高度利用システムに関する調査

独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ

リサイクルチーム 上席研究員 鈴木 穰

主任研究員 落 修一

交流研究員 越 智 崇

### 1. はじめに

下水汚泥は固形物当り 19kJ/g ほどを有するエネルギー資源である。しかし、これまでの汚泥処理は安定的な処分を図ることを前提とした単位プロセスの組み合わせでしかなかったために、汚泥の処理には多くの電力や化石燃料を必要とし、下水汚泥が保有しているエネルギーの3割ほどしか利用されて来なかったのが実情である。また、水処理プロセスにおいても汚泥処理プロセス以上のエネルギーを消費してきた。

下水道の人口整備率が6割を越えた現在、これからの下水道事業が使用料収入を主体とする経営形態となって行くことを踏まえると、今まで以上に事業運営の効率化が求められる。特に、人件費を除く維持管理費の大部分を占めているエネルギー経費の削減は今後の大きな課題である。下水汚泥が持つ潜在的な保有エネルギーは、下水道施設全体的大幅な省エネルギー、省コストに繋げられる可能性を秘めた唯一の固有資源であり、それを高度に開発・利用するシステム構築が求められる。

### 2. 調査の目的及び方法

本調査は、現有の汚泥処理プロセスをエネルギー生産プロセスに変革すべく、下水汚泥が持つ保有エネルギーを高度に開発、利用するシステムを構築することを目的とする。そのために、現有の焼却プロセスを発電プロセスに改変して、これと嫌気性消化プロセスとの一体化を図ることにより、メタンガスの再資源化を組み入れた電力・熱回収システムの構築を目指すものである。調査では、エネルギー高度利用評価モデルを整備するとともに、高温燃焼発電システム、消化ガス吸着貯蔵システムを開発する。

### 3. 平成13年度の調査結果

平成13年度は、下水処理プロセスのエネルギー効率を把握・評価するためのモデル構築の検討を行うとともに、下水汚泥保有エネルギーを高度に利用する場合の中核技術となる高温燃焼発電システムと消化ガス吸着貯蔵システムの開発を目指した共同研究を行った。また、汚泥処理プロセスを活用して草木及びその廃材が持つエネルギーを開発、利用する方法に関して基礎的な調査を行った。

#### 3.1 下水処理場におけるエネルギー消費評価のためのモデルと実態調査

##### 3.1.1 調査方法

エネルギー開発とその高度利用法を検討するために、下水処理場におけるエネルギー消費実態を容易に表現できるモデルが必要である。本調査では、下水道施設計画・設計指針（(社)日本下水道協会 2001）に基づき下水処理場の標準設計化を図り、設備・機器の電力使用量を出力させるモデルを作成した。また、このモデルの実用性を評価することと、エネルギー消費・変動の実状を詳細に把握し、効果的なエネルギー生産・利用システムを構築するための基礎データをを得ることを目的に、下水処理場の実態調査を行った。調査した下水処理場は、分流式下水道の計画処理人口が205,400人、現有処理能力が日最大134,000m<sup>3</sup>/日の1カ

表-1 エネルギー高度利用評価モデルの概要

流入水量 (m <sup>3</sup> /日)	水処理	汚泥処理		
		濃縮	消化	脱水
100,000	標準 活性 汚泥法	初沈：重力 余剰：遠心	1段 中温消化	遠心 ベルトプレス
50,000				
20,000		① 初沈：重力 余剰：遠心、常圧浮上	消化日数 ：20日	遠心 ベルトプレス
5,000				
1,000		初沈無し、汚泥：重力	なし	

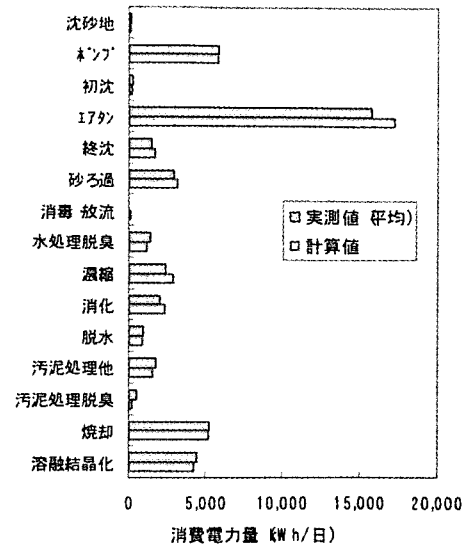


図-1 プロセス別消費電力量比較

所の下水処理場である。本処理場は、他の下水処理場との汚水や汚泥の受け渡しがなく完全に独立し、水処理では高度処理までを、汚泥処理では嫌気性消化、焼却、溶融までのプロセスを有していることを条件に選定した。調査は、各プロセスや主要設備・機器毎の電力使用量を1年間を通して連続モニターするものである。また、その間における処理実績についても調べ、電力や他のエネルギー消費量との関連付ける。

### 3.1.2 調査結果

作成したモデルは、水処理プロセスが標準活性汚泥法、汚泥処理プロセスが濃縮、消化、脱水までとし、流入水量を設定して下水処理場を構成している主要な機器について、性能、寸法、定格動力等の仕様を決定した。モデルの概要を表-1に示す。

図-1にモデルを適用した計算値と各プロセス別の電力量の平均値との比較を示す。計算値と実測値はほぼ等しく、モデルの信頼性が高いと言える。また、1m<sup>3</sup>の下水を処理するための各プロセスの単位消費電力量は、水処理系で0.29kWh/m<sup>3</sup>、汚泥処理系で0.17kWh/m<sup>3</sup>、合計0.46kWh/m<sup>3</sup>であった。

図-2、図-3、図-4は、平成13年12月から14年3月までの間にモニタリングした消費電力量の結果を施設や処理プロセス毎に時間毎にとりまとめ、経時的な変化として表したものである。消費電力は時間的に時期的に、また設備の維持補修・更新・工事等により大きく変動していた。本調査で開発するエネルギー生産・利用システムは、この変動に

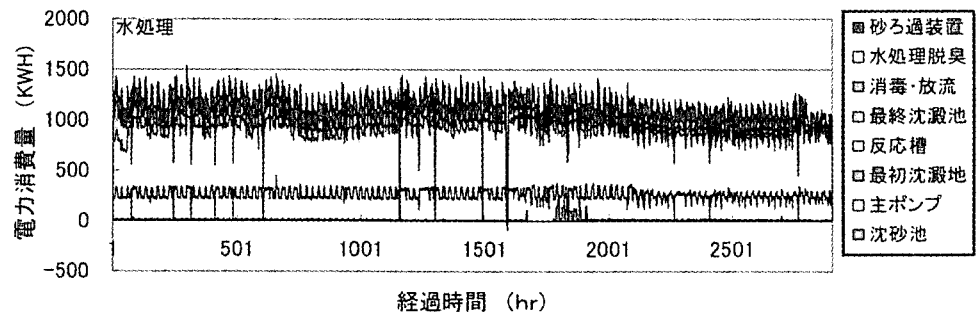


図-2 水処理系における電力消費量の変化

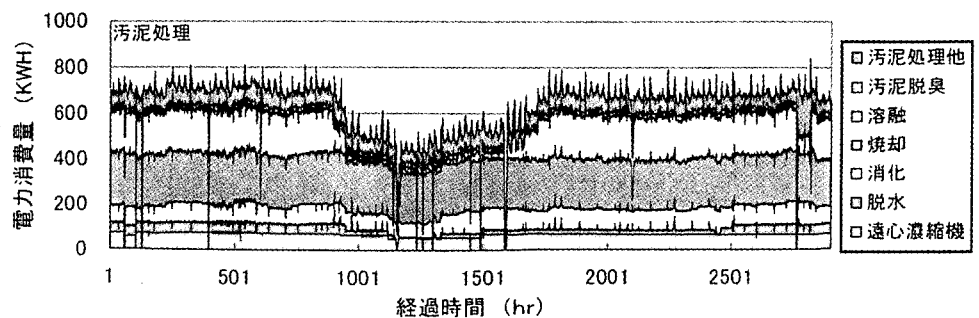


図-3 汚泥処理系における電力消費量の変化

効果的に対応できることが重要となる。

### 3.2 消化ガス吸着貯蔵法の開発

消化ガスの吸着貯蔵法の開発は、鶴岡市並びに財団法人下水道新技術推進機構との共同研究である。開発している吸着貯蔵法は、従来の低圧貯蔵法に比べて単位容積当たり20～30倍の貯蔵能力を有するものである。本年度は、鶴岡市浄化センターへの平成14年度の導入実用化を目指して、

実施建設の設計を支援するとともに、吸着貯蔵システムのLCA、LCC解析のためのデータを設計図書から収集し、整理した。

実用化施設のフローと主要設備機器の概略の仕様を図-5に示す。現在、鶴岡市浄化センターには600 m<sup>3</sup>を貯蔵する従来型

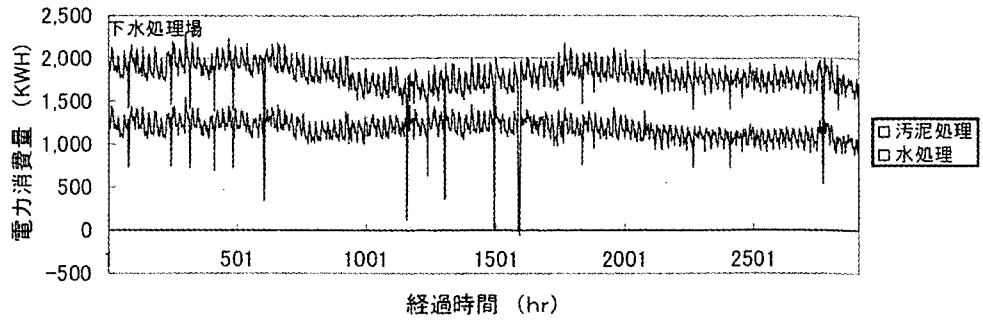


図-4 下水処理場全体における電力消費量の変化

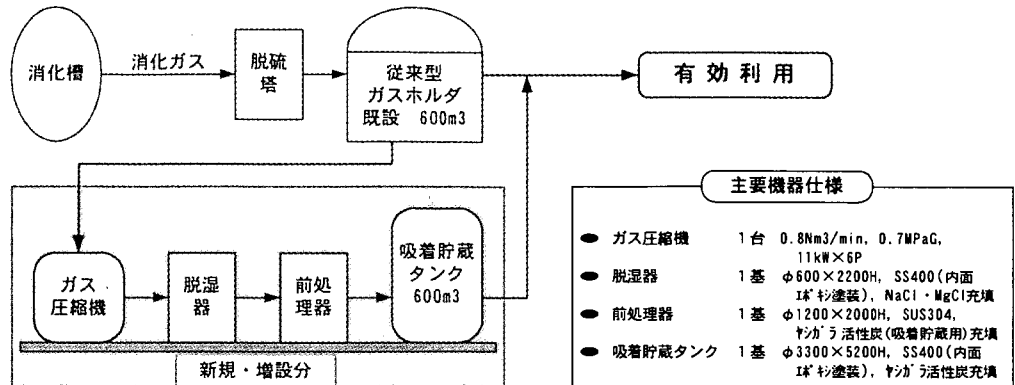


図-5 実用化施設のフローと仕様の概略

表-2 建設時点までに必要とした機器・資材等(設計データ)

工場加工			基礎工事			組立・設置		
SS400	(kg)	20,485	バックホー	(m <sup>3</sup> )	230	運搬 [8t車, 505km]	(台)	5
SUS304	(kg)	2,035	振動ローラ	(m <sup>3</sup> )	20	SUS304-TP φ40	(m)	12.7
SUS316	(kg)	60	ダンプトラック	(m <sup>3</sup> )	93	φ80	(m)	40.9
FC250	(kg)	490	ブルドーザ	(m <sup>3</sup> )	93	φ100	(m)	2.7
SCS13	(kg)	540	コンクリートポンプ車	(m <sup>3</sup> )	83	φ200	(m)	49.1
銅線	(kg)	190	クローラ式杭打機	(本)	16	VP φ40	(m)	37.4
活性炭	(kg)	15,650	ホイールクレーン	(本)	16	SGP-VA φ20	(m)	2.1
保温材	(kg)	1,240	クローラクレーン	(本)	16	φ25	(m)	29
脱湿剤	(kg)	250	クラムシェル	(本)	16	グレーチング FB32×3	(m <sup>2</sup> )	7.07
潤滑油	(L)	17	型枠	(m <sup>2</sup> )	41	FB25×4.5	(m <sup>2</sup> )	1.18
電力	(kwh)	7,600	RC40	(m <sup>3</sup> )	17	SS400架台加工品	(kg)	746
酸素ガス	(m <sup>3</sup> )	150	SD295A, D13mm	(kg)	240	手摺	(m)	15.2
アセチレンガス	(m <sup>3</sup> )	150	SD295A, D16mm	(kg)	4,410	配管被覆 25mm	(m)	29
上水	(m <sup>3</sup> )	4	R.M. コンクリート	(m <sup>3</sup> )	83	20mm	(m)	2.1
溶接棒	(kg)	36	PHC φ450 (A種)、11m	(本)	8	鉄筋コンクリート工	(m <sup>3</sup> )	1.28
グリース	(kg)	3	PHC φ450 (A種)、12m	(本)	8	鉄筋工	(kg)	44.9
スチーム	(m <sup>3</sup> )	200				モルタル仕上げ工	(m <sup>2</sup> )	9.99
その他	(kg)	295				型枠工	(m <sup>2</sup> )	3.59
						掘削工	(m <sup>3</sup> )	65.3
						埋戻し工	(m <sup>3</sup> )	65.3
						電力 [仮設]	(kwh)	3,200

の低圧ガスホルダが存在する。ここに、この従来型ガスホルダと同量の消化ガス量を約1/20の容積で貯蔵できる吸着貯蔵システムが増設される。なお、図中のフローに示された前処理器は、消化ガス中に含まれる微量の揮発性の有機化合物を除去するために設けられるものであり、そこには吸着貯蔵タンクと同じ吸着剤が充填される。表-2は、建設時点までのLCA解析用のデータとして、設計の時点から得られた情報を整理した仮のデータリストである。最終的には、施設の完成を待って必要なデータを確定し、更に供用時点、廃止時点におけるコストも含めたデータを付加して行くことになる。

### 3.3 高温燃焼発電システムの開発

現在の焼却プロセスに代わる有効な燃焼・発電システムを見出すために、株式会社クボタ、月島機械株式会社、石川島播磨重工業株式会社並びに独立行政法人産業技術総合研究所との5者による開発のための共同研究に着手した。

研究では、まず開発のベースを、既存の脱水汚泥が直接利用できることと、発電エネルギーには高温の燃焼ガスを直接利用することに置くこととした。図-6は、現在検討している基本システムのプロセスフローである。燃焼部は、一般的な脱水汚泥の含水率でも燃焼が可能で、且つ含有する

水分も蒸気エネルギーとして利用できる加圧流動床式の燃焼炉となっている。そして、ここで得られた高温高压の燃焼ガスは直接ガスタービンに導かれ、発電動力に変換されるものである。本システムにより得られる電力は全量が下水処理プロセスに利用されるとともに、ガスタービンからの排熱は燃焼用空気の加温や他の処理プロセスの熱源に利用される。

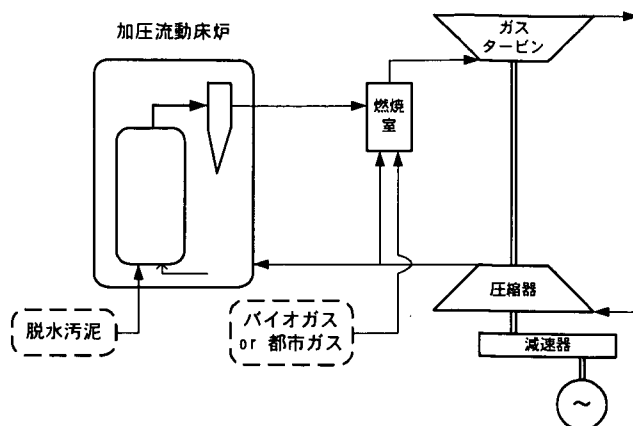


図-6 高温燃焼発電システム検討の基本フロー

### 3.4 草木類エネルギーの利用調査

#### 3.4.1 調査方法

土木工事や緑地管理、産業活動から発生する草木及びその廃材が持つエネルギーを開発、利用する方法を探るために、草木の粉碎と改質を目指した蒸気加圧爆砕法の実験を行った。

実験には雄物川の堤防管理から発生した刈草の乾燥物と、広葉樹チップ（ブナとナラの混合物）及び針葉樹（スギ）チップを用い、蒸気による圧力とその蒸煮時間を変え、それぞれ瞬時解放して爆砕した。用いた爆砕装置の概要を図-7に示す。加圧容器は設計圧力4 MPa、実容積30Lである。得られた爆砕物については、改質状況を調べるための水溶性成分分析を行うとともに、下水汚泥との混合メタン発酵実験に供した。

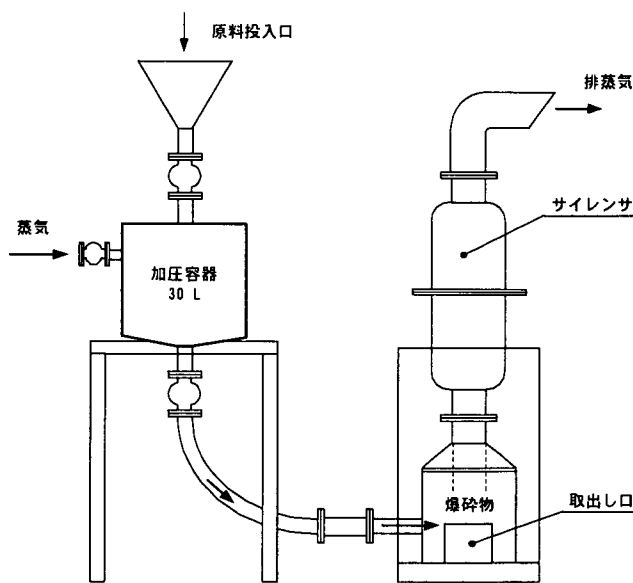


図-7 実験に用いた爆砕装置の概要

爆砕時の圧力と蒸煮時間は原料によりそれぞれ1～3MPa、1～30分に変化させた。また、水溶性成分の抽出は、イオン交換蒸留水500mLに爆砕物25g(湿重)を混合し、20℃で1時間振とうした。抽出液の分析は、pH、EC、TS、VSの測定と、1μmのろ液についてTOC、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>-Pの測定を行い、0.2μmのろ液について分子量分画(GPC)試験を行った。下水汚泥との混合メタン発酵実験は、35℃の恒温室にタイマー付きマグネチックスターラーを装備した10Lの密閉ガラス瓶6台を設置して、これに消化汚泥の初期量を6Lとして、休祭日を除き1日1回300mLづつ消化汚泥の引き抜きと基質の投入を行う連続実験を50日間行った。投入する基質は、下水汚泥の固形物(TS)量に対して、爆砕物を固形物(DS)量で

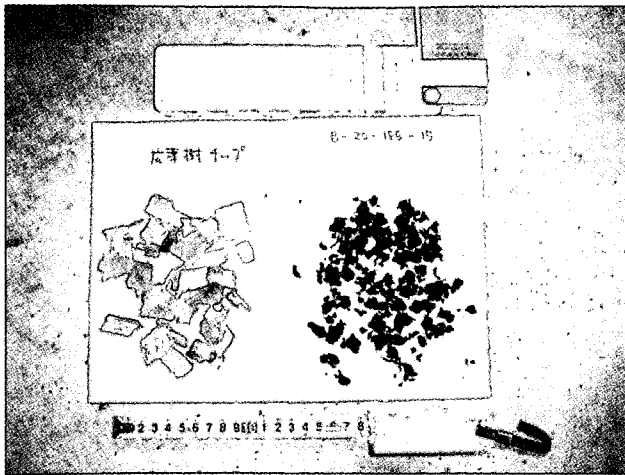


写真-1 広葉樹の2MPa(185℃)-15min 処理例

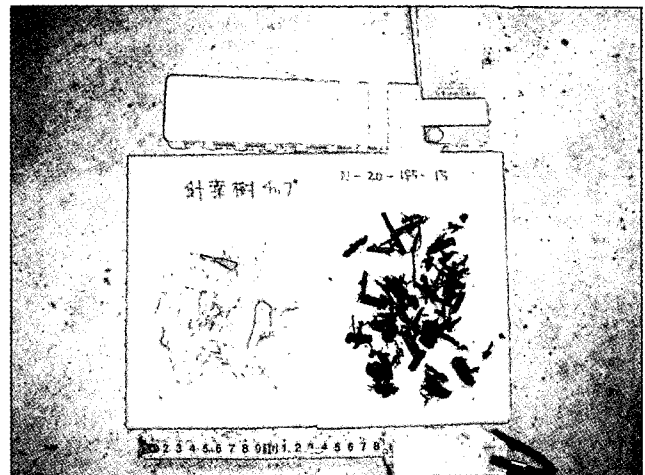


写真-2 針葉樹の2MPa(185℃)-15min 処理例

それぞれ0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 倍量混合したものであり、このときの基質中の下水汚泥 TS 濃度は 40g/L を目標に調整した。また、混合した爆砕物は、広葉樹系チップを 2.5MPa(195℃) - 5 min で蒸煮・爆砕したものである。

### 3.4.2 調査結果

草木の爆砕実験は、広葉樹チップに対して 11 ケース、針葉樹チップに対して 6 ケース、雑草に対して 9 ケース行った。写真-1～3 に試料の爆砕前後の状況を示す。観察からは、広葉樹の爆砕物は総じて糖蜜臭を呈していた。針葉樹は広葉樹よりも堅固な繊維質のものが得られた。雑草は、爆砕強度をチップ破碎と同レベルとすると堅固な繊維質と泥状物との混合体を呈した。爆砕操作は容易に円滑に行えるものであった。

#### (1) 爆砕物の水溶性成分

水溶性成分爆砕物を水抽出物した試料の pH 測定結果の一例を図-8 に示す。爆砕強度の増加に伴い、抽出液の pH 低下が見られた。これは、木質を構成する高分子成分が爆砕により低分子化し、有機酸にまで分解されたためと考えられた。また TOC は、爆砕強度の低い領域で増加し、高い領域で減少する傾向が見られた。これには爆砕強度が関係し、爆砕強度が高くなると高分子成分が糖や有機酸を経て炭酸ガスにまで分解されるためと考えられた。併せて、分子量分画試験から成分の低分子化が進むことを確認した。

#### (2) 爆砕物と下水汚泥との混合メタン発酵

発生した消化ガス量を爆砕物の混合が無い対照系の場合の結果との比として図-9 に示す。また、同図に

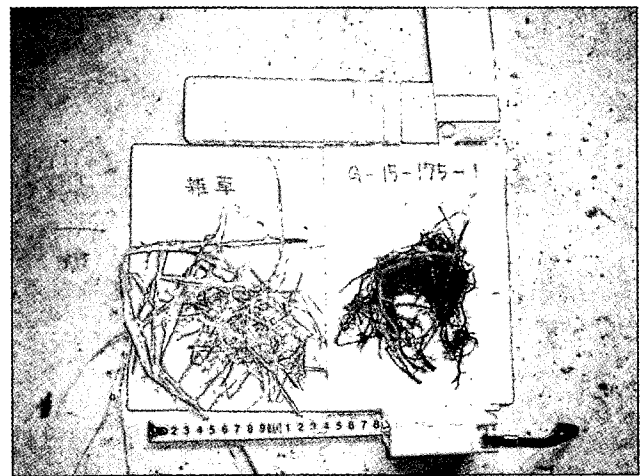


写真-3 乾燥雑草の1.5MPa(175℃)-1min 処理例

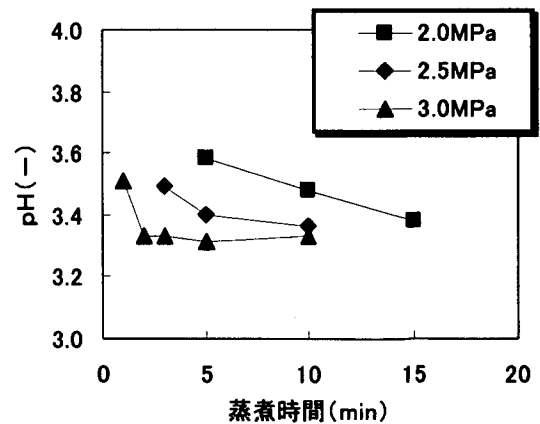


図-8 爆砕物水抽出液の pH の例

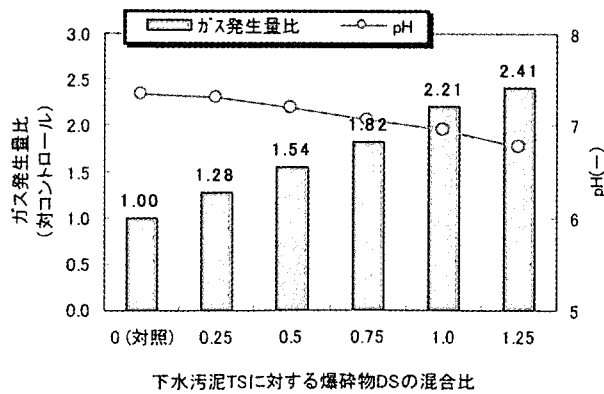


図-9 ガス発生量比と消化汚泥のpHの比較

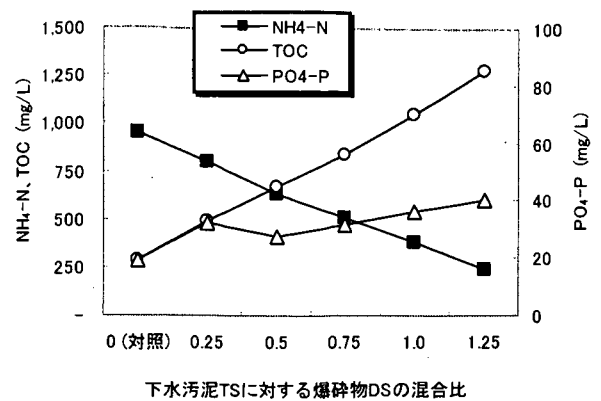


図-10 消化汚泥中のN, P, TOC液中濃度比較

はpHの結果も表した。実験では、全ての実験系においてガス発生量がコントロール系を上回り、酸発酵にも陥ることなく良好なメタン発酵が確認された。各系列のpHは、爆砕物混合比の増加に伴い低下する傾向を示し、旺盛な酸発酵があったことが伺えたが、本実験条件の範囲では酸発酵が卓越することなく、良好なメタン発酵が維持された。図-10は、TOC、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-Pの消化汚泥中の液中濃度である。セルロース分の増加により、液中に溶存していた窒素は効果的に利用・固定され、液中から減少していた。これは、草木系廃材を混合したメタン発酵において、消化液の水処理への負荷を低減できる大きな可能性を示すものである。

これらの結果より、広葉樹爆砕物のメタン発酵への適用性は高く、特に下水汚泥と一緒にすることにより、より容易に発酵が維持されたものと思われる。本実験からは、下水汚泥との同量以上の混合でも、安定したメタン発酵が得られることが示された。

#### 4. まとめ

平成13年度は、下水処理場におけるエネルギー消費評価モデルの検討と実態調査、高温燃焼発電システム、消化ガス吸着貯蔵システム開発のための共同研究、及び草木類をエネルギー利用に資するための実験、調査を行い、以下のことが明らかとなった。

- ① 下水処理場における電力消費評価モデルを開発した。また、処理場の実績データからは、消費電力量原単位として、水処理系：0.29kWh/m<sup>3</sup>、汚泥処理系：0.17kWh/m<sup>3</sup>、全体：0.46kWh/m<sup>3</sup>が得られた。
- ② 高温燃焼発電システムの開発を目指した(独)産業技術総合研究所、石川島播磨重工業(株)、月島機械(株)並びに(株)クボタとの共同研究により基本プロセスを検討するとともに、消化ガス吸着貯蔵システムの開発・実用化のための鶴岡市並びに(財)下水道推進機構との共同研究により実施施設建設の設計を支援し、LCA解析のためのデータを収集・整理した。
- ③ 草木に対して蒸気加圧爆砕を施した結果、繊維質の破碎と低分子化が効果的に生じた。そして、これらはバイオガス生産の有効な前処理法となることが示された。