

(53) 下水処理場のエネルギー解析に関する研究

ENERGY BUDGET ANALYSIS OF SEWAGE PLANT

大平 晋*, 水野 稔**, 下田 吉之**, 小林 幸成***

Sin OHIRA*, Minoru MIZUNO**,

Yoshiyuki SHIMODA** and Yukinari KOBAYASHI***

ABSTRACT; Sewage plant is urban infra-structure consuming much energy and containing several unused energy sources such as digestion gas and waste heat from sludge-burning plant. Then optimizing the energy budget in sewage plant has been important. In this paper, energy budget in the standard sewage plant was modeled and analyzed. First, simulation results were compared with measured data. Secondly, several parameters related to water and sludge treatment were optimized numerically to minimize total energy consumption in sewage plant. Thirdly, utilization method of digestion gas in the sewage plant was discussed.

KEYWORDS; sewage plant, energy consumption, heat recovery system, simulation model

1. はじめに

近年、地球環境問題の深刻化等の理由から、従来の化石燃料依存のエネルギー利用体系を見直し、都市廃熱や温度差エネルギーなどの未利用エネルギーを有効に活用して化石燃料消費量を削減するシステムが提案されている。

本論文では、都市基盤施設の中でも大量にエネルギーを消費する施設である下水処理場を考察の対象とする。下水処理場は大量のエネルギーを消費する施設である一方、汚泥を消化して発生する消化ガス、汚泥焼却時の焼却廃熱、夏に大気より温度レベルが低く冬に大気より温度レベルが高い下水処理水など未利用エネルギーの供給施設であるという面もあり、都市の民生用エネルギーシステムの中で重要な位置を占めている。従って、今後下水処理場の計画に際しては、水処理の面のみならず省エネルギーの面からの考慮も重要となると考えられる。そこで下水処理場のエネルギー収支を表わすモデルを構築し、その省エネルギー的な最適化を検討した結果について述べる。

2. 下水処理場のエネルギー消費動向

2.1 下水処理場のエネルギー消費の実態

水代謝の末端に位置する下水処理場は、エネルギー多消費施設である。下水道統計[1]によると、昭和63年度における全国のポンプ場並びに下水処理場で消費された電力量は 3.89×10^8 kWhであり、日本全国で消費された総電力量 5.79×10^{11} kWhの約0.7%を占めている。またそのうちの約90%に当たる 3.50×10^8 kWhが処理場で使用されている。昭和58年度の東京都23区の下水道の年間使用電力量は約5億2900万kWhで、東京都総使用電力量の1.22%、東京都産業用総使用電力量の5.84%に当たるとの報告[2]もある。下水処理場で使用

*大阪ガス(株) Osaka Gas Co., Ltd. **大阪大学工学部環境工学科 Department of Environmental Engineering, Osaka University. ***トヨタ自動車(株) Toyota Motor Corporation.

するエネルギーは電力が多くを占めているが、そのほかに発生した汚泥の乾燥・焼却や消化槽の保温のために重油、灯油、ガスなどの燃料使用量も多い。

(A)使用電力

表1には昭和63年度下水道統計[1] による使用電力量とその内訳を示す。尾島ら[2] による東京都の調査結果でも同様の内訳となっており、一般的にはほぼポンプで20%、水処理に50%、汚泥処理に20%、その他に10%の電力を使用していると言える。

(B)使用燃料

表2に下水処理場で使用された燃料を下水道統計[1] から用途別に示す。実際には多種類の燃料が使用されていたため、表2では熱量に換算して表わしている。このデータを見ると、焼却炉やボイラなどで一次エネルギー換算では使用電力をはるかにしのぐほどの燃料が使用されていることがわかる。下水処理で発生する汚泥は水分を多量に含んでいるため（焼却炉に投入される脱水ケーキで70%、乾燥させたケーキで30～40%程度の含水率である）、自然は難しく補助燃料を必要とする。下水処理プロセスにおけるエネルギー問題が議論されるときは消費電力が中心となることが多いが、消費される燃料も重要な議論の対象である。

表1 下水処理場使用電力[1]

	[$\times 10^8$ kWh/年]	%
場内ポンプ	5.97	17.1
水処理	18.73	53.5
汚泥処理	6.53	18.6
その他	3.78	10.8
計	35.01	100.0

表2 用途別使用燃料[1]

用途	熱量換算値 [$\times 10^9$ kcal/年]	割合 %
管理部門	99300	7.0
消化槽	325600	22.8
汚泥焼却炉	828100	57.9
ポンプ	18700	1.3
自家発電設備	24300	1.7
ボイラー	5000	0.4
乾燥機	42300	3.0
熱処理	63700	4.5
水質試験	100	0.0
脱臭炉	8200	0.6
その他	11600	0.8
合計	1426900	100.0

2.2 下水処理場におけるエネルギー回収の現状

下水処理場において発生するエネルギーを積極的に回収し、これを利用することが考えられている。その方法として最も可能性及び有効性があるのは、汚泥を嫌気性消化して発生する消化ガスを利用するものである。そのほかに、汚泥焼却廃熱の利用、下水の持つ熱エネルギーの利用などが考えられる。ここではその現状について述べる。

(A)消化ガスの利用

嫌気性汚泥消化法は、主として汚泥による有機物の安定化と衛生的安全化および汚泥の減量のために従来より広く行なわれている汚泥処理方式である。この方式では、消化過程において下水汚泥中の有機物がメタン菌を主とした微生物群により分解され、メタンガスを60～70%程度含む可燃性ガスに変換される。この消化ガスは5000～6000kcal/Nm³の熱量を有しており良好な燃料となるものであって、消化槽に投入される有機物1kgあたり約0.5Nm³の割合で発生する[3]。このような大きな熱量を有する消化ガスの利用方法として、以前は消化槽加温用ボイラーの燃料として用いられているのがほとんどであった。そのため、消化ガスの持つ高エクセルギーは生かされておらず、せいぜい、夏場、ボイラー燃料としての消化ガスが余る時期に冷房などに用いられているにすぎなかったようである。

この余剰ガスのみを有効利用するのではなく、消化ガス全量をエンジンに導入して発電しエンジン廃熱によって消化槽加温エネルギーを賄うシステムにより大幅な省エネルギーが可能となる[3,4,5]。最近はその有効性に着目して、実施例も増加しつつある。北九州市日明処理場の消化ガス発電における例[5,6,7,8]では、発生した消化ガス量の1/3を発電に用いて場内消費電力量の約10%の発電電力量を得ている。またこの時の平均的エネルギー利用効率は、電力31.4%、温水34.6%、廃熱ボイラー14.0%となっており、総合熱効率としては80%に達する。しかし消化槽が蒸気加温方式であるので温水として回収された廃熱は消化槽の加温に利用できず、廃熱ボイラーで蒸気として回収された廃熱しか利用できない。この例からもわかるように、エネルギーの合理的な活用には適切なシステム計画が必要である。山形市の山形浄化センターの消化ガス発電システムの例[9,10]では、汚泥を全量消化し、発生した消化ガスを発電に用いて場内消費電力の約30%の

発電電力量を得ている。この時のエネルギー効率は、電力27%、温水53%となり総合熱効率率は80%となる。

このように汚泥を消化して得られる消化ガスを発電に用いその廃熱を蒸気、温水として回収し利用するのは、エクセルギーの点から好ましい。しかし、2.1の結果から見ると、汚泥焼却の補助燃料としての、消化ガスの利用も考えられる。

(B)汚泥焼却廃熱の利用

近年、汚泥の資源化・減量化のために、最終的に焼却・熔融処理する処理場が増えている。汚泥（脱水ケーキ）は水分を含んでいるために自然しにくく、補助燃料が必要である。焼却炉の燃焼温度は約800℃、熔融炉の燃焼温度は1000℃以上とかなり高温であり、その余剰エネルギーの活用が望まれる。従来より焼却廃熱は廃熱ボイラーに送られ、そこで蒸気を作り、焼却用空気の加熱、あるいは焼却のための前処理としての汚泥乾燥用の熱源として利用されている[4]。また、焼却廃熱の処理場外の利用例としては、近隣の温水プールや公民館などの公共施設の熱源として供給しているものが見られる。

六甲アイランドの汚泥焼却廃熱利用の例[4, 11]では、焼却廃熱をケーキの乾燥および燃焼用空気の予熱用として活用しており、ケーキの自燃性を高め燃料消費量を抑えるために廃熱を利用するので、廃熱が低温(50~64℃)となる。これを利用して集合住宅の給湯システムの熱源として温水供給を行なっている。

(C)処理水賦存熱による地域熱供給

下水処理水の賦存熱は大量にあるが、その温度レベルは極めて低く、ヒートポンプを用いエクセルギーの高い仕事を投入することにより回収される[4]。賦存量が大量にあるため場外利用が前提になり、流入水温に依存するヒートポンプのCOPや周囲の熱需要状況に依存する搬送エネルギー量など、場内で操作できないパラメータによりその省エネルギー性が決定される。従って、処理水賦存熱による地域熱供給は本論文の検討対象からは外す。

3. 下水処理場のエネルギーシミュレーションモデルの概要

3.1 モデル化の対象とする下水処理プロセスの設定

(A)下水処理プロセスの実態

標準的な下水処理プロセスは水処理系統と汚泥処理系統の二つから成る。昭和63年度下水道統計[1]によると全国で736ヶ所の処理場が運転中であり、その処理プロセスについて以下で考察する。

まず、水処理施設について処理方式の内訳を見ると、活性汚泥法が圧倒的に多く680ヶ所で全体の約92%を占め、次に回転生物接触法の24ヶ所となっている。

次に汚泥処理方式を見ると、汚泥の処理方式で最も多く採用されている方式は濃縮→脱水で218処理場であり全体の約30%を占めている。次いで濃縮→消化→脱水で197処理場であり全体の約27%を占め、両方式を合わせると全体の約57%を占めている。ただ都市域では、汚泥の減量化と安定化に有効であることや、処分地の確保が困難である等の理由から最終的に焼却処分を行なう傾向にある。また、汚泥濃縮を行なっている処理場633ヶ所のうち、沈降式はその他の方式との併用を含めて620ヶ所(98%)の処理場にのぼり圧倒的な数を占めている。しかし近年、汚泥の濃縮性が悪化しているため重力による沈降式では十分な濃縮汚泥の濃度が確保できず、今後浮上式や遠心式の汚泥濃縮方法が増加するものと予想される。またガス発生による濃縮性の違いのため、効率的な汚泥処理をするためには最初沈殿池汚泥と余剰汚泥の分離処理が必要である[12, 13]。汚泥脱水機について見ると、昭和57年度末において約1400台が稼働しており、そのうち約40%を真空ろ過機が占めていたが、その後5年間の推移を見ると真空ろ過機は毎年減少し続け、昭和63年度末では452台と、全台数に占める割合は約26%に低下している。これに対し、他の機種は着実に増加しているが、その中でベルトプレス式は6年間で316台と際立った増加を示している。汚泥焼却炉は昭和63年度末で173基が稼働しており、そのうち最も多い焼却炉が多段焼却炉であり72基が採用されており、次に流動焼却炉の53基となっている。新規に設置される焼却炉はほとんどが流動焼却炉である。

(B) モデルプロセスの設定

本研究では以上の現状をふまえ、以下のような処理法を対象として設定した。1) 水処理システムでは標準活性汚泥法を用いるものとし、流入水は最初沈殿池の後に曝気槽、最終沈殿池を通り処理水として流出する。2) 汚泥処理システムでは最初沈殿池で引き抜かれた汚泥は重力式の初沈汚泥濃縮槽で濃縮され、最終沈殿池で引き抜かれた汚泥は重力式の余剰汚泥濃縮槽で濃縮された後で遠心式濃縮機で濃縮される。それら濃縮汚泥は混合され、消化槽に投入され消化汚泥は汚泥洗浄槽で洗浄され、ベルトプレス式脱水機で脱水される。脱水ケーキは乾燥機で乾燥され、流動槽焼却炉で焼却される。図1に対象とする処理場構成を示す。

(C) プロセスのモデル化

この研究で用いる下水処理場エネルギーシミュレーションモデルでは、消費するエネルギーを定量的に評価できることおよび消費エネルギーと処理の効果の関係を定量的に評価できることが必要である。そのためにそれぞれの処理プロセスをサブモデルとしてもち、各プロセス毎でのエネルギー収支をシミュレートするモデルを作成した。

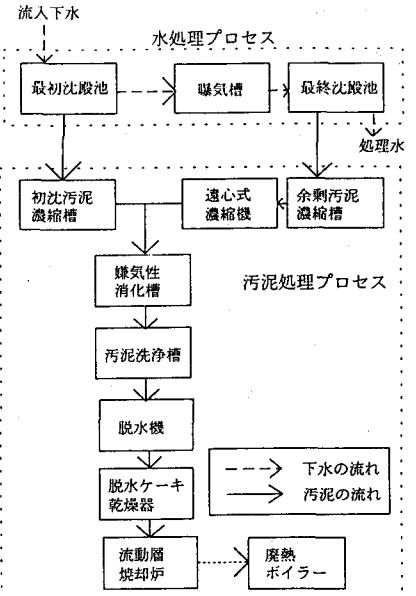


図1 処理場の構成

表3 動力学モデル式

(1) 水処理プロセスへの流入水はポンプを

用いて揚水するものとし、ポンプ効率を設定することによりポンプの消費電力を計算する。

(2) 最初沈殿池のサブモデルでは COD及び SSの除去率を設定して水質変化を計算し、消費電力は汚泥かき寄せ機は消費電力原単位を与え、ポンプは効率を設定して求める。

(3) 曝気槽のサブモデルにおけるブローの消費電力は曝気空気量原単位とブロー効率から計算する。また曝気槽における活性汚泥の増殖量は表3に示す活性汚泥動力学モデルを用いて計算する。

(4) 最終沈殿池での水質変化は CODは変化なしとしSSは汚泥沈降速度を与えて計算する。また最終沈殿池における消費電力は最初沈殿池と同様に汚泥かき寄せ機消費電力原単位とポンプ効率から計算する。

(5) 初沈汚泥濃縮槽のサブモデルでは、濃縮汚泥の含水率及び固形物回収率を設定して固形物の濃度変化を計算する。また初沈汚泥濃縮槽での消費電力は汚泥及び返送水のポンプによるものとし、それぞ

(1) 活性汚泥法動力学モデル

$$\frac{dS_i}{dt} = S_i \left(Y \frac{k \cdot \frac{l_i}{S_i}}{K_m + \frac{l_i}{S_i}} - b \right) + (1+r) \frac{Q_0}{V_i} S_{i-1} - (1+r) \frac{Q_0}{V_i} S_i$$

$$\frac{dl_i}{dt} = -S_i \frac{k \cdot \frac{l_i}{S_i}}{K_m + \frac{l_i}{S_i}} + (1+r) \frac{Q_0}{V_i} l_{i-1} - (1+r) \frac{Q_0}{V_i} l_i$$

$$k = 2.00 \times 10^5 \times e^{-\frac{5530}{T-20}}$$

$$K_m = 4.54 \times 10^2 \times e^{-\frac{1230}{T-20}}$$

$$Y = 1.18$$

$$b = 1.04 \times 10^5 \times e^{-\frac{7530}{T-20}}$$

S : 曝気槽 MLSS 濃度 [g/m³]
 l : COD 濃度 [g/m³]
 k : 最大比基質除去速度 [1/日]
 K_m : 飽和恒数 [-]
 Y : 収率係数 [-]
 b : 自己分解速度 [1/日]
 r : 汚泥返送率 [-]

(2) 嫌気性消化動力学モデル

$$\frac{dL_{out}}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot (L_{in} - L_{out}) - K \cdot (L_{out} - L_o) \cdot S_{out}$$

$$\frac{dS_{out}}{dt} = K \cdot Y_{S/L} \cdot (L_{out} - L_o) \cdot S_{out} - \frac{Q}{V} \cdot S_{out}$$

$$G_{out} = Y_{G/L} \cdot K \cdot (L_{out} - L_o) \cdot S_{out} \cdot V$$

L_{in} : 投入汚泥固形物濃度 [kg/kg]
 L_{out} : 消化汚泥固形物濃度 [kg/kg]
 L_o : 投入汚泥中の難分解性固形物濃度 [kg/kg]
 S_{out} : 消化槽微生物濃度 [Nm³/m³]
 K : 有機物除去定数 [t/Nm³・日] = 0.0387 (標準)
 $Y_{S/L}$: 有機物微生物収率定数 [Nm³/Nm³] = 1000.0 (標準)
 $Y_{G/L}$: ガス有機物収率定数 [Nm³/t] = 1000.0 (標準)
 G_{out} : 消化ガス発生量 [Nm³]

れのポンプ効率を設定して消費電力を求める。

表4 モデルの設定値

サブモデル	パラメータ	標準設定値	ケーススタディ
揚水ポンプ	ポンプ効率	0.8 [-]	0.65 [-]
最初沈殿池	COD除去率	0.332 [-]	0.442 [-]
	SS除去率	0.4 [-]	0.9 [-]
	初沈汚泥含水率	0.987 [-]	0.989 [-]
曝気槽	曝気空気量原単位	15 [m ³ /日・m ³ 槽容積]	
	風量定格値		600,450 [m ³ /min]
	ブロー効率	0.729 [-]	0.429 [-]
最終沈殿池	汚泥沈降速度	7.0 [l/hr]	19.8 [l/hr]
汚泥濃縮槽	固形物回収率	0.9 [-]	
	初沈濃縮汚泥含水率	0.98 [-]	
	余剰濃縮汚泥含水率	0.99 [-]	
遠心濃縮機	汚泥滞留時間	100[秒]	
	遠心効果	2000[G]	
	固形物回収率	0.9 [-]	
	動力原単位	4.0×10 ⁻³ [kWh/G・m ² 沈降面積]	
消化槽	平均熱貫流率	0.7 [kcal/m ² ・hr・℃]	
	投入汚泥有機物含率	0.7 [-]	
	固形物回収率	0.9 [-]	0.989 [-]
	消化汚泥含水率	0.98 [-]	0.984 [-]
洗浄槽	希釈倍率	3.6 [-]	
	濃縮倍率	1.25 [-]	
	固形物回収率	0.9 [-]	
脱水機	固形物回収率	0.93 [-]	0.939 [-]
	動力原単位	288 [kWh/日m ² ろ布]	
汚泥乾燥機	総括伝熱係数	100 [kcal/m ² ・hr・℃]	
	乾燥ケーキ含水率	0.3 [-]	
焼却炉	空気比	1.3 [-]	
	燃焼温度	800 [℃]	
廃熱ボイラ	ボイラ効率	0.8 [-]	

- (6) 余剰汚泥濃縮槽のサブモデルでも初沈汚泥濃縮槽のサブモデルと同様に各種設定値を与えて汚泥濃度及び消費電力を計算する。
- (7) 遠心濃縮機のサブモデルでは汚泥濃度の変化は固形物回収率及び濃度変化の経験式から求め、消費電力は遠心濃縮機の動力原単位と、返送水及び汚泥のポンプ効率の設定値を与えて計算するものとする。
- (8) 嫌気性消化槽のサブモデルでは、消化ガスの発生量は表3に示す動力学モデルから計算し、消化槽の消費電力は攪拌機と返送水及び汚泥ポンプによるものとし、攪拌機は動力原単位を、ポンプはポンプ効率を設定してそれぞれ計算するものとする。また、消化槽壁体の熱貫流率を設定して熱損失量を計算し、それと汚泥の昇温に必要な熱量の和を消化槽の加温熱量とする。
- (9) 汚泥洗浄槽のサブモデルでは、希釈倍率、濃縮倍率、固形物回収率から汚泥濃度を計算し、消費電力は返送水及び汚泥ポンプの効率から計算する。

- (10) 汚泥脱水機のサブモデルでは経験式から脱水ケーキの濃度を求め、脱水機の動力原単位及び返送水ポンプの効率を設定して、脱水プロセスにおける消費電力を計算する。
- (11) 乾燥機のサブモデルでは、乾燥ケーキの含水率は設定値によるものとし、消費電力は乾燥面積の関数であるとして計算する。また、乾燥に必要な熱量は乾燥面での総括伝熱係数を設定して計算する。
- (12) 流動層焼却炉のサブモデルでは、焼却に必要な熱量は燃焼温度を設定し汚泥及び燃料の発熱量と蒸発潜熱から計算する。また流動層焼却炉の消費電力は、炉床面積の関数として炉床面積から計算する。
- (13) 廃熱ボイラサブモデルでは、ボイラ効率から蒸気熱量を計算し、消費電力は発生蒸気量の関数であるとし発生蒸気量から計算する。
- (14) 排ガス処理のサブモデルでは、消費電力は排ガス量の関数であるとし焼却炉サブモデルで計算した排ガス量から消費電力を計算する。
- なお、各サブモデルでの設定値を表4に示す。

3.2 ケーススタディ

前節で説明したエネルギーシミュレーションモデルの妥当性を検証するため、O市H処理場を対象としてケーススタディを行なった。このH下水処理場は都心部に位置するため用地の制約が厳しく、限定された敷地内に各種の処理設備が隙間なく配置されている。水処理プロセスでは標準活性汚泥法を用いており、汚泥処理では濃縮、消化、脱水、焼却を行なっている。なおH処理場の年平均処理水量は90000m³/日である。

(A) 計算条件

エネルギーシミュレーションモデルに対して、H下水処理場の各月の平均の日流入下水量、流入水COD濃度、流入水SS濃度を入力条件として、各月毎に定常計算を行なった。なお、動力学パラメータは最終沈殿池

SS濃度及び消化ガス量の実データを用い、表5のような最適値を求めた。表5 動力学パラメータの最適値

なお、活性汚泥法の動力学パラメータは様々な研究者によって発表されている値の妥当な範囲内にあることを文献[14]から確認している。また、除去率、固形物回収率等の設定値の一部は表4に示すように実際の物質収支と機器定格に合わせて標準値と異なる値を与えた。ブロー風量についてはH下水処理場の運転風量・スケジュールに従い、外部からの汚泥受け入れ量は実データを使用し、外部からの脱水ケーキ搬入量は無視した。各種ポンプの揚程は実データを与えた。

(B)シミュレーション結果

モデルの構成をH下水処理場に合わせ、消費電力及び燃料についてエネルギーシミュレーションをおこなった。実際のH下水処理場のエネルギー消費記録の分類項目に合わせて、消費電力についてはポンプ、曝気プロセス、汚泥処理プロセス、焼却プロセス、全消費電力のそれぞれについて個別のサブプロセスの計算結果を足し合わせて求めた。また消費燃料および発生消化ガス量についても計算により求めた。その結果を図2から図8に示す。消費燃料以外はH下水処理場の実データも合わせて示す。消費燃料については、モデル中ではA重油を用いることとしているが、H処理場では消化ガスおよび都市ガスを用いているので計算結果

(ケーススタディ)

活性汚泥法動力学モデル	
Y	0.24
k	1.00
K _m	1.52
b	0
Non	0.2
嫌気性消化動力学モデル	
K	0.0476
Y _{s/l}	1173.8
Y _{g/l}	1173.8

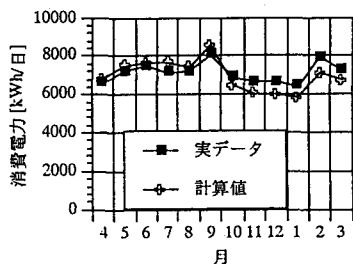


図2 ポンプ室消費電力

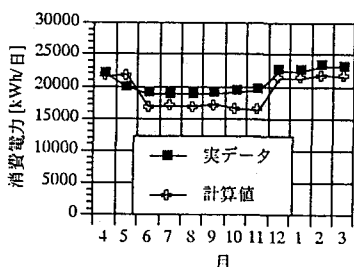


図3 曝気プロセス消費電力

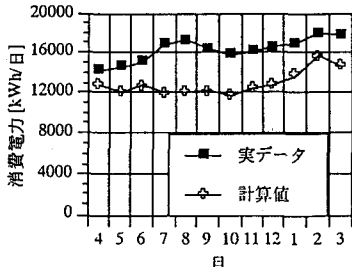


図4 汚泥処理プロセス消費電力

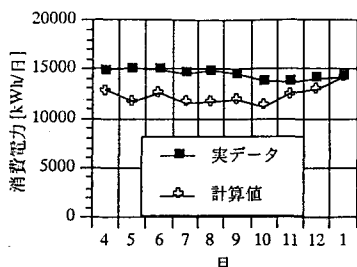


図5 焼却プロセス消費電力

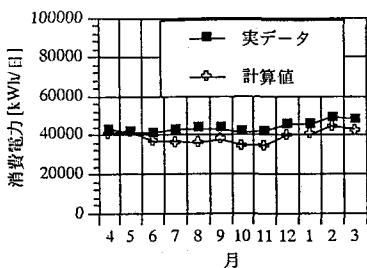


図6 全消費電力(焼却を除く)

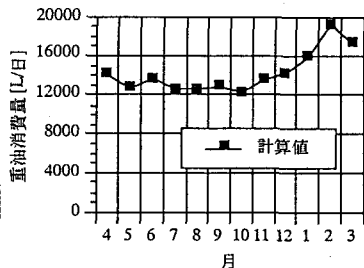


図7 焼却プロセス消費燃料

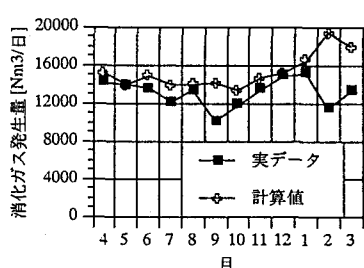


図8 消化ガス発生量

と実データを合わせて示さなかった。図2によると、ポンプ消費電力の計算結果では、機器定格から推定したポンプ効率を用いることにより実データと良く一致する。曝気プロセスに関する電力に関しては、H処理場が夏期と冬期別の二段階定風量運転のため標準モデルとの厳密な比較はできないが、風量に対する消費エネルギーについて、ブロー機器定格値より推定した効率を用いて計算をおこなえば、図3に示すように両者のオーダーは良く一致しているといえる。図4に汚泥処理プロセスにおける消費電力の実データと計算値を示す。一般的に実データより計算値の方が小さい。これは汚泥発生量の計算値が実際の値より小さ目となることが原因と考えられる。また汚泥処理プロセスは多種多様な機器から構成されており、このモデルでは必

ずしもそれら全てを忠実に表現したわけではなく、モデルと仕様の異なるものがあることもその原因の一つと考えられる。図5に焼却プロセスにおける消費電力の計算結果と実データを合わせて示す。この処理場では年度の途中より流動層焼却炉が二基、新規に導入されており、それに伴って既存の焼却炉は使用されなくなったので、1月までの結果を示す。なお、他の処理場から脱水ケーキの搬入が不規則にあるので、焼却プロセス消費電力は計算値が実データより低めに出て来る。また新規の流動層焼却炉の消費電力は、試運転のための空焼き等が行なわれているので、ケーキ量から計算することは不可能である。図6に全消費電力の計算結果と実データを示す。なお、前述した理由から焼却プロセスの消費電力を除外したものを示す。これを見ると両者は良く一致している。図7に焼却プロセスにおける補助燃料の消費量の計算値を示す。これに関しては前述したように比較できる実データがないため、参考として示す。図8には発生した消化ガス量の実データと計算値を示す。ほぼ良く一致しているが、9、2、3月のように差の生じる場合もある。このように、このエネルギーシミュレーションモデルは特定の下水処理場を対象として、そのエネルギー消費を逐一シミュレートする場合には若干精度が落ちる。モデル中の各種設定値を表4のようにH下水処理場の実状に合うように設定したとしてもここで見たような差が生じる。このモデルは、流入水量、流入水質のデータのみより仮想的な下水処理場全体のエネルギー消費を計算するという汎用性を目指してモデル化したものであるため、表4の標準設定値を用いた場合には特定の下水処理場のシミュレートにおいて更に差は大きくなるものと思われる。しかし、ケーススタディの結果においてそのオーダーや月変化の傾向は大きな差がないため、一般的な下水処理場のエネルギーシミュレーションモデルとしては、妥当な精度があると考えられる。

3.3 標準モデルにおけるエネルギー収支

このエネルギーシミュレーションモデルを使用して、モデルの設定値には表4の標準設定値を用いた標準モデルにより計算を行なった。なおポンプ揚程に関してはH処理場の実データをそのまま用いた。流入水量の年間平均値を100000m³/日とし、O市の主な処理場流入水量の毎月のデータを用いて年間変動パターンを与えた。また、流入水COD濃度および流入水SS濃度は、O市の各処理場のデータを平均した月データをそのまま用いた。これらの入力データをもとに、1月から12月までの各月についてそれぞれ定常計算を行なった。

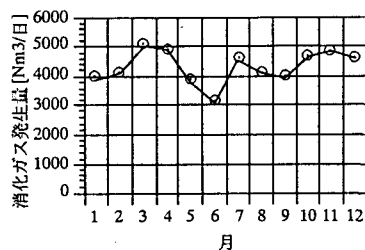
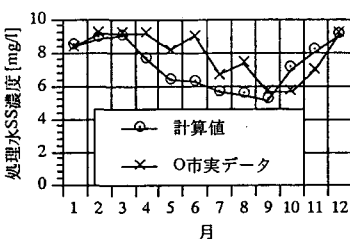
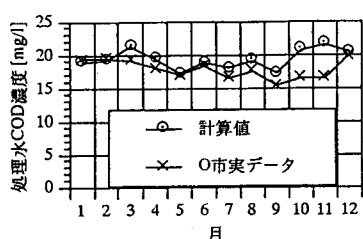


図9 処理水 COD濃度の計算結果

図10 処理水SS濃度の計算結果

図11 消化ガス発生量の計算結果

図9に処理水COD濃度の計算結果を示す。また図10に処理水SS濃度の計算結果を示す。両図とも流入水水質データを使用した下水処理場における実測値の月別平均値を併せて示すが、計算結果はこの実測データとはほぼ同様のオーダーになっている。また、図11には各月の消化ガスの発生量の変化を示す。図12には水処理系消費電力、汚泥処理系消費電力、汚泥処理系熱需要を示す。ただし、それぞれの項目を一次エネルギーに換算した量で示している。ここでは、それぞれの処理プロセスの一次エネルギー消費量の合計値しか示していないが、シミュレーション結果としてはそれぞれのサブプロセスの一次エネルギー消費量および物質収支を求めることができる。その年平均値をエネルギー

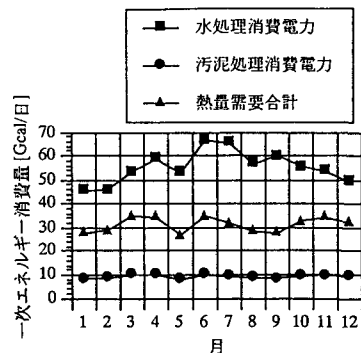


図12 各プロセスの一次エネルギー消費

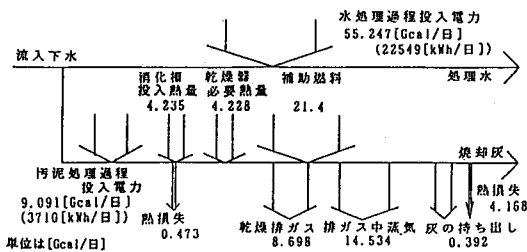


図13 エネルギー収支 (標準モデル)

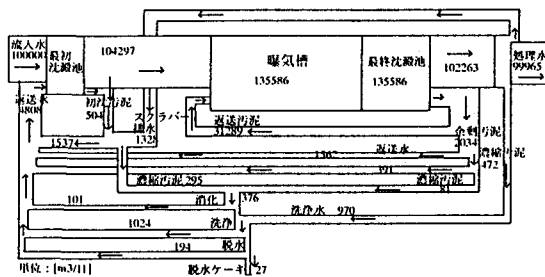


図14 流量収支 (標準モデル)

収支については図13に、流量の収支については図14に示す。図13を見ると、下水処理場での消費エネルギーには電力だけではなく燃料などの熱エネルギーも多く占めていることがわかる。また処理の過程に加えた熱エネルギーの多くは廃熱として排出されるので、これをリサイクルすることにより下水処理場で必要とする一次エネルギーの量を削減する可能性があることもわかる。

4. エネルギーを対象とした下水処理場の最適化

4.1 数理計画法による最適化

前章で示した下水処理場のエネルギーシミュレーションモデルを用いて、下水処理場の省エネルギーの問題を検討する。下水処理場におけるそれぞれの処理プロセスの構成やその規模は今まで経験によって定められてきたのみで、省エネルギーを念頭においた検討はあまり行なわれていないようである。ここでは、省エネルギーの手法として、それぞれの処理プロセスの規模を変更することによりエネルギー的に最適なプロセス構成を検討し、また処理場内部での熱回収を行なうことを考えた。

(A)最適化の目的関数

ここで行なう最適化の目的は、下水処理場の一次エネルギー消費量を削減することである。ただし、下水処理場では消化槽にてメタンを多く含む消化ガスが得られる。この消化ガスの有効利用を前提とし、消化ガスを熱量換算した消化ガスエネルギーを処理場消費エネルギーから差し引いた実質消費エネルギーを最適化の目的関数とする。すなわち目的関数Yは次式で表される。

$$Y = E1 + E2 - E3 \quad (1)$$

ここで、E1は処理場消費電力、E2は汚泥焼却の補助燃料、E3は消化ガスのエネルギーである。

電力は一次エネルギー換算(2450kcal/kWh)し、消化ガス中のメタンガスの割合は62%、メタンの低位発熱量は8557kcal/Nm³とした。

(B)操作パラメータ

最適化を行なうときの操作対象としては、処理場全体のエネルギー消費に関係が深いと考えられる、曝気槽容量(曝気時間)、最終沈澱池からの汚泥返送率、最終沈澱池の汚泥引き抜き率、遠心濃縮機の遠心効果、遠心濃縮機の滞留時間、消化槽滞留時間を考えた。なお、これら以外に脱水プロセス及び焼却プロセスも処理場全体のエネルギー消費に関係が深いと考えられるが、脱水のサブモデルにおいては、脱水ケーキの含水率は脱水機投入汚泥濃度から一意的に定まり、それにより脱水機の消費エネルギーを求めるようなモデルとなっており、一方、焼却のサブモデルでは助燃用エネルギーは脱水ケーキの含水率から一意的に求められるようなモデルとなっている。そのようなプロセスのモデル化の都合上、操作対象とはしなかった。

(C)制約条件

制約条件としてまず操作パラメータの非負制約を考えた。また水質に関しては、曝気槽容量を小さくし曝気時間を少なくすると、曝気に要するエネルギーが削減できる一方、処理水の水質が悪化することが予想される。そこで、現状の水質より悪化させないという方針で、O市の実際の水質データを参考にしてSS濃度に

4.2 下水処理場内での熱回収システム導入の検討

下水処理場内での熱回収システムとして、1)消化ガスによる発電、2)消化ガスを焼却補助燃料とし焼却炉熱で発電、の二通りを考える。これらの熱回収システムを実現するためには、イニシャルコスト等経済性について十分な検討が必要であるが、ここではエネルギー量のみを検討の対象とする。

(A) 消化ガスによる発電

発生した消化ガスをガスエンジンの燃料とし、その動力で発電するシステムである。ここでは消化槽において発生する消化ガスは全量を発電に用いるものとする。最適モデルによる計算結果では、発生する消化ガスを熱量に換算すると、35.5Gcal/日 とな

る。これを表8に示す各種効率の設定値を用いて消化ガス発電を行なった場合の発電量および回収熱量を計算すると、表9に示すような結果が得られた。この結果をもとに、エネルギー需要量と比較する。発電電力により電力需要(44.6Gcal/日)のうち30.3Gcal/日(67.9%)(10.7 Gcal/日 を一次エネルギー換算)を賄える。消化槽加温熱量は7.4 Gcal/日 必要であるのに対して、冷却水の熱量は12.4Gcal/日 であるので、十分賄え余剰が生ずる。また、排ガスによって燃焼用空気の余熱を行なうとし、150℃まで上昇させるものとするれば2.2 Gcal/日 必要であるが、これはガスエンジン排ガスで十分賄える。よって一次エネルギー削減量は32.5 Gcal/日 となり、削減率は全体の一次エネルギー消費量の約42.6%となる。また消化ガス発電を導入する場合の消化槽、乾燥機、ガスエンジン、焼却炉での熱収支は図17のようになる。

(B)消化ガスを補助燃料とし焼却廃熱で発電

このケースでは、消化槽から得られる消化ガスを全量補助燃料として用いるものとする。焼却廃熱を廃熱ボイラで回収した後、回収蒸気で蒸気タービンを駆動し発電を行なう場合のエネルギー収支を検討する。この場合、補助燃料として必要な熱量は31.8Gcal/日であるのに対し、発生した消化ガスを熱量に換算すると35.5Gcal/日であるので、消化ガスだけで十分賄えることになる。消化ガスを全量汚泥焼却炉で燃焼させたとすると、焼却炉の熱収支から考えて焼却排ガスを廃熱ボイラで熱回収すれば30.1Gcal/日の蒸気が得られる。この蒸気タービン効率を15%、発電機効率98%として発電量は12.6Gcal/日（4.42Gcal/日を一次エネルギー換算）となる。これは処理場全体の電力需要の28.3%にあたる。一方、蒸気タービンから得られる廃蒸気の持つ熱量は25.7Gcal/日であり、それを汚泥乾燥機および消化槽の加温に利用するものとする。以上

表 8 効率の設定値

電力	30%
冷却水	35%
排ガス	20%

表 9 計算結果

	[Gcal/日]
電力	10.7
冷却水	12.4
排ガス	7.1

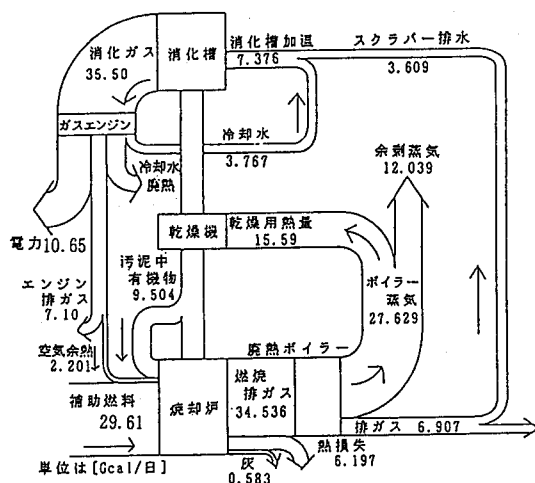


図17 消化ガス発電導入時の熱収支

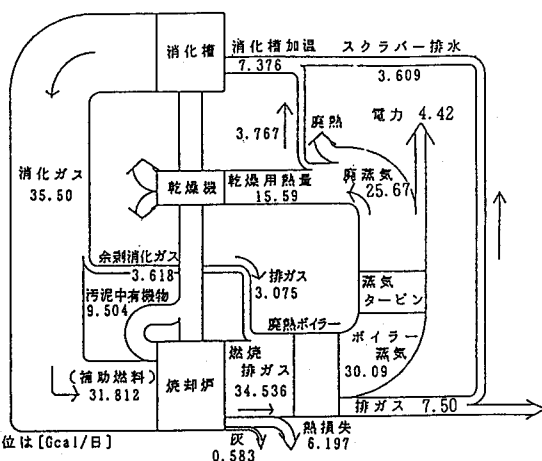


図18 蒸気タービン導入時の熱収支

の結果蒸気タービンの導入によって補助燃料31.8 Gcal/日、電力12.6Gcal/日 で合計44.4Gcal/日 を削減することができ、導入前と比較して41.9%の一次エネルギーの削減が見込める。また、蒸気タービン発電導入による熱収支は図18ようになる。

5. 結論

本研究では、下水処理場のエネルギーシミュレーションモデルを作成し、それをもとに下水処理場の省エネルギーに関する検討を行なった。得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1)統計資料などをもとに、下水処理場のエネルギー消費の実態及びエネルギー回収の現状を示した。
- (2)標準的な構成をとる下水処理場のエネルギーシミュレーションモデルを作成した。
- (3)ケーススタディを行ない、モデルの妥当性を検証した。
- (4)数値計画法により、下水処理場のそれぞれのプロセス規模の最適化を行ない、その結果標準設定状態から36%の一次エネルギー消費量を削減できる可能性のあることを明らかにした。
- (5)最適化に加えて、消化ガス発電を導入することにより43%、また消化ガスを污泥焼却の補助燃料とし、焼却廃熱で発電を行なった場合42%、一次エネルギー消費量を削減できる可能性のあることを示した。

謝辞：本研究の遂行に当たり、〇市下水道局より水質、電力消費量などのデータの提供を受けた。また、大阪大学工学部の藤田正憲先生、岩堀恵祐先生からは有益な助言を賜った。また、本研究の一部は文部省科研費重点領域研究「人間・環境系」課題番号04202130による。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] (社)日本下水道協会：昭和63年下水道統計
- [2] 尾島 俊雄，佐土原 聡，上原 力，柴田 理：東京における上・下水道のエネルギー消費に関する研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，(1986)，pp1105-1106
- [3] 栗林 宗人：下水処理における省エネルギー，環境技術，9-3(1980)，pp255-260
- [4] 江藤 隆：下水道における省エネルギー技術の現状と展望：環境技術，20-6(1991)，pp379-384
- [5] 石川 忠男：下水污泥消化ガスによる発電，空気調和・衛生工学，58-5(1984)，pp423-429
- [6] 石川 忠男，佐藤 和明：消化ガスの発電への利用，土木技術資料，8-24(1982)，pp438-443
- [7] 藤沢 勝一郎：北九州市日明下水処理場における污泥消化ガス発電(メタトピア計画)の実際，公害と対策，17-7，pp617-621
- [8] 石川 忠男：污泥消化ガス発電の実用化の展望，公害と対策，17-7(1981)，pp596-600
- [9] 高野 玉紀：消化ガス発電・廃熱回収利用システムの運転，水道公論，25-9(1989)，pp85-90
- [10] 金子 光輝：山形市浄化センターの熱供給システム，水，9(1989)，pp32-40
- [11] 中村 秀行：下水污泥焼却処理施設の排熱利用システム，エネルギー資源，13-2(1992)，pp164-172
- [12] 井前 勝人：污泥の処理、処分に関する実験的研究(1)，下水道協会誌，14-157(1977)，pp41-52
- [13] 櫻井 克信，白石 隆，大嶋 吉雄，京才 俊則，石川 忠雄：余剰污泥と初沈污泥を分離した重力濃縮の評価，下水道協会誌，27-308(1990)，pp25-35
- [14] 橋本 奨，中野 孝二，岩堀 恵祐：活性污泥連続培養の動力学解析に関する検討，下水道協会誌，25-289(1988)