

(38) エネルギーと経済費用見積による下水道の評価

ENERGY ASPECT AND ECONOMIC COSTING OF SEWAGE WORKS

楠田 哲也*, 森山 克美*

Tetsuya KUSUDA*, Katsumi MORIYAMA*

ABSTRACT; Infrastructures have been constructed to improve the urban life circumstance. They, however, spend much fossil energy and natural resources for their construction and O&M. In consequence, some risk and environmental issues may take place, so that we should pay attention to saving of energy and resources on them. A new evaluation method, based on energy conservation and friendly technologies of the global environment, is necessary to discuss present and future infrastructures. The purposes of this study are to learn actual states of the energy aspect on sewage works in Japan and to investigate a selecting/evaluating strategy of possible wastewater treatment alternatives in response to site specification. In this study, the energy consumption rate to unit volume of treated wastewater is evaluated for each unit process of wastewater treatment plants in Japan. Power generation using sludge digestion gas and heat recovery from treated wastewater are also discussed for estimating the energy recovery in wastewater treatment plants. Based on the results, a feasibility study on constructing a wastewater treatment system is also carried out, employing an economic costing function. As a result, an evaluated strategy of a feasible treatment system applicable to site specification is shown by use of an economic costing function of construction and O&M on sewage works in Japan.

KEYWORDS; sewage works, energy saving, energy consumption, wastewater treatment, energy recovery, economic costing

1. はじめに

現代の都市は、エネルギーを大量に消費しながら、その活動を続けている。その結果、地球温暖化現象が生じ、人類の生存と生活基盤が恒久的に保障されない可能性もあると懸念され始めている。従来、都市基盤施設の建設は、市民生活の利便性、快適性、安全性を向上させるために行なわれてきたが、施設の供用開始後は構造的にエネルギーや資源の消費量を増加させ、地球環境の保全とは相反する方向に進んでしまう結果になっていることも稀ではない。近年、民需によるエネルギーの消費量が漸増しているが、これは個人による直接の消費量の増加に加えて、個人の努力では如何ともしがたいシステムとしての構造に由来する部分もあると考えられる。したがって、今後の社会基盤施設の建設に際しては、機能評価の指標に、利便性、快適性、安全性、審美性に加えて、地球温暖化への寄与率の低いこと、省資源・省エネ度の高いこと等を加えて

*九州大学工学部水工土木学科 Department of Civil Engineering, Kyushu University

判断していく必要がある。

本研究の最終目標は、以上のような視点に立ち、社会活動や市民生活に必要な水循環を支える社会基盤施設を対象に、そのあり方を地球環境保全を含めた指標のもとで考察しようとするものである。そのための手順を、①現行供用施設によるエネルギー消費・回収の評価、②現行施設供用時の費用評価、③利便性、快適性、安全性の現行の指標に加えて、地球環境への影響度や省エネ・省資源度を表す指標を考慮した評価、④途上国を含めた各国に適用可能な適正技術による施設のあり方の検討とする。

本報では、その第一段階として、下水道を対象に、エネルギーの消費、回収、および必要用地面積の観点から現行施設の状況を整理し、さらに現在用いられている「経済性」の尺度での下水道技術の選択結果について考察を加える。具体的には、まず現行の下水道のエネルギー消費状況と回収可能エネルギーの評価、処理プロセスと処理場用地面積の関係の評価を行う。評価対象は、集水プロセス(管渠、ポンプ場)、水処理プロセス(沈殿池、生物反応槽)、汚泥処理プロセス(濃縮、消化、脱水、焼却など)の各施設、および汚泥の最終処分プロセスである。ついで、現行の下水道評価の一指標である「経済性」のもとでの施設選択の状況を明らかにし、さらに経済的に外部化されている環境影響要因も後々考慮できるように、施設の建設、運転、維持管理に要する費用から下水道を評価できる経済費用見積関数を提案し、現行の「経済性」のもとでの地域特性に応じて選択される下水道方式と環境影響について検討する。

2. 下水処理に要するエネルギーと用地面積

2.1 マクロなエネルギー消費構造の評価

水の供給と処理に関わるエネルギー消費量は、平成2年度において、わが国の石油換算エネルギー総消費量の2.8%を占め、この2.8%のさらに80%が各種廃水処理に要するエネルギーとして推計されている¹⁾。また、下水道施設の使用電力に限ってみると、平成元年度実績で日本全国の総消費電力量の0.7%をこれが占めている²⁾。この値は下水道普及率44%に対応したもので、今後のさらなる普及を考えると、下水道施設における省エネルギーの重要性は明かである。そこで、まず前述の各プロセスにおけるエネルギー消費の実態を検討する。図-1に検討対象とする下水道システムを示す。なお、本論文では解析に参考文献2)のデータを使用し、原単位は流入下水1m³当たりとする。

2.1.1 下水集水プロセスにおけるエネルギー消費

下水集水プロセスにおけるエネルギー消費は、すべてがポンプ場におけるものである。その消費量は、統計²⁾によれば下水処理場における電力消費量の1/9となっている。消費電力原単位の平均値は0.028kWh/m³となる。

2.1.2 下水処理プロセスにおけるエネルギー消費

下水処理プロセスにおけるエネルギー消費の97%は電力、残り3%が燃料である。この消費電力の大半は生物反応槽へのエアレーション(酸素供給)のためのもので、残りが場内ポンプ用である。標準活性汚泥法(標準法)、純酸素曝気法(純酸素法)、長時間エアレーション法(長時間法)、オキシデーションディッチ法(OD法)、回転円板法(RBC法)、散水ろ床法、酸化池の7方式の消費電力原単位(kWh/m³)の平均値を求めた結果を図-2に示す。ただし、場内ポンプの消費電力原単位は、統計²⁾より一律0.054kWh/m³とした。標準法につい

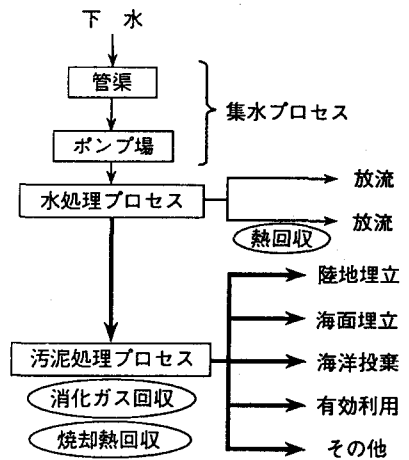


図-1 下水道システム

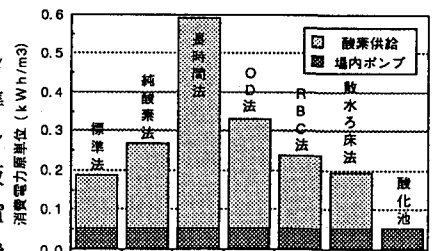


図-2 方式別水処理系消費電力原単位

ては、スケールメリットが反映している処理水量50,000m³/d以上の処理場のデータを採用した。他の処理法は、ほとんどが数千m³/dの処理規模であるため、スケールメリットは認められなかった。また、酸化池の日本での実施例はないが、光合成により酸素供給がなされるので酸素供給のための消費電力量を0とした。

2.1.3 汚泥処理プロセスにおけるエネルギー消費

日本で現在用いられている処理方法は、主として①濃縮－脱水、②濃縮－消化－脱水、③濃縮－脱水－焼却、④濃縮－消化－脱水－焼却の4方式である。そこで、これらについてのみ、消費電力、消費燃料原単位を求めた。ただし、濃縮は最も省エネの重力濃縮、消化はメタンガス回収のできる嫌気性消化、脱水はベルトプレス、遠心脱水を使用している処理場のデータを用いた。

以上の①～④の汚泥処理方式について消費電力・消費燃料を基に消費エネルギー原単位(流入水1 m³当たり)を求めた結果を図-3に示す。ただし、発熱量をA重油:9,200kcal/ℓ、灯油:8,900kcal/ℓとした。また、860.4kcal=1kWhである。データとなった処理場数は、①55、②28、③8、④4であった。

④は大規模処理場でしか採用されていないので処理場数が限られた。消化のための燃料の消費エネルギー原単位である①と②の差が③と④の差と異なるのは④が4処理場だけに限られた上にデータにバラツキがあったためである。図-3より、汚泥焼却は自然可能といわれるが、実態はエネルギーをかなり消費することが分かる。

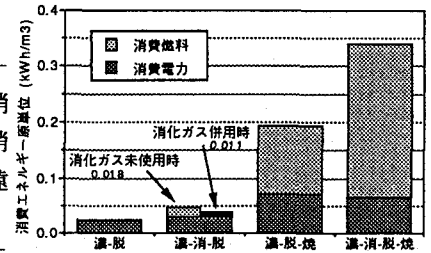


図-3 方式別汚泥処理系消費エネルギー原単位

2.1.4 汚泥の処理処分に関わるエネルギー消費

汚泥の処理処分に要するエネルギーを、定量的に求めることは、処理処分の形態が各処理場で千差万別のため平均値ですら不可能である。現在の汚泥最終処分方法別の比率は、陸地埋立46.2%、海面埋立12.1%、有効利用20.1%、海洋投棄9.3%、その他12.3%である²⁾。そこで、ここでは最大比率の陸地埋立についてのみ検討する。

汚泥をコンポスト化すれば、焼却に要するエネルギーは必要なくなるが、実際には安定的な需要の確保や汚泥含有重金属の問題等があり、大規模には行われていない。したがって、以上の比率からみて汚泥の処理処分に関わる問題は、汚泥ケーキでの埋立に要するエネルギーと、焼却による消費エネルギーの増加と焼却灰での埋立に要するエネルギーの和の比較検討、および最終処分地の確保という問題に帰着する。消費エネルギーに関する比較検討手法を図-4に、汚泥処理方式①～④の最終生成物の質量比較を図-5に示す。図-5によると消化脱水汚泥の質量を1とした場合、焼却灰の質量は0.13となる。ただし、含水率を消化脱水汚泥80%、焼却灰24%としている。図-3と5から、汚泥処理の消費エネルギーと最終処分質量がトレードオフとなっていることは明らかで、大都市における汚泥の処分に、エネルギーを用いて短期的、長期的に用地問題を和らげていることが分かる。なお、以上の費用比較には、焼却炉建設費、修繕費、焼却費(電力費+燃料費+薬品費)等と埋立費(埋立地建設費+輸送費+浸出水処理費)を考慮している。

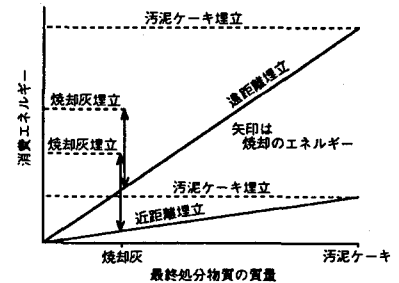


図-4 汚泥の処理処分に関わるエネルギー(汚泥ケーキ埋立と焼却灰の埋立)

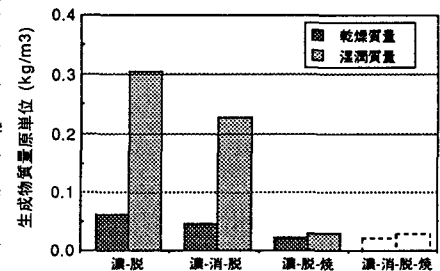


図-5 処理方式別汚泥最終生成物質量(濃-消-脱-焼は、データ不足のため推定値)

2.2 回収可能なエネルギーの評価

2.2.1 消化ガスによるエネルギー回収

図-6に日本の35処理場における処理水量と消化ガス発生量の関係を示す。この結果より、消化ガス発生量原単位は0.0348Nm³/m³-水量となる。また、消化ガスのエネルギーは、5,000kcal/Nm³である。したがって、流入下水の消化ガスとしてのエネルギー原単位は、0.202kWh/m³-水量となる。メタンガスエンジンによる発電効率30%(発電電力原単位は、0.06kWh/m³-水量)、ガスエンジンの冷却水・排ガスからの熱回収率を50%とすると³⁾、トータルとして約80%の回収を期待できる。したがって、回収可能なエネルギー原単位は0.162kWh/m³-水量となる。また、電力として使用可能なガスエンジンによる発電電力原単位0.06kWh/m³-水量は、下水処理場の消費電力原単位として従来示されている値0.3kWh/m³(水処理系0.18、場内ポンプ0.07、污泥処理系0.05kWh/m³)の20%に相当する。

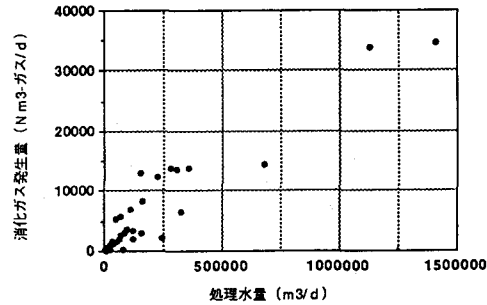


図-6 嫌気性消化における消化ガス発生量

2.2.2 下水処理水からの熱エネルギーの回収

下水処理水の水温は、冬季、気温に比べ高く、その水温、水量も安定している。このため、下水処理水からの熱回収が一部で実行されている。下水の熱エネルギーを仕事として取り出すとき、このエネルギーは大気温を基準としたエクセルギーで評価される。このエクセルギーEは、kWh/m³単位で示すと次式になる。

$$E=1.16(T_1-T_0)-1.16T_0\ln\frac{T_1}{T_0}\dots\dots(1)$$

ここで、T₀: 気温(K)、T₁: 下水水温(K)である。

たとえば、福岡市の1月の平均気温7℃と平均下水水温16℃を例にとると、エクセルギーEとして0.172kWh/m³が得られる。しかし、実際に仕事として取り出すときには、そのエネルギー変換装置の効率(ヒートポンプならばCOP)を考慮しなければならない。

2.2.3 焼却炉におけるエネルギー回収

消化脱水污泥のもつ内部エネルギーは、消化率を50%と仮定すると、消化ガスのもつエネルギーとほぼ等しくなる。したがって、消化脱水污泥がもつエネルギー0.202kWh/m³が焼却過程での回収の対象になる。

2.3 用地面積についての検討

排水処理では、かなりの用地があればエネルギーを消費して集約処理する必要のないことが多い。したがって、ここでは、最初沈殿池-生物反応槽-最終沈殿池からなる下水処理プロセスや酸化池の用地面積、污泥処理施設、管理棟等の用地面積、および処理場全体の用地面積の原単位について整理する。

表-1 処理方式による下水処理プロセスの用地面積原単位

処理方式	有効水深 m	滞留時間 hr	反応槽面積 原単位 m ² /m ³	沈殿池面積 原単位m ² /m ³		水処理系全 面積原単位 m ² /m ³
				初沈	終池	
①標準法	4.81	7.6	0.066	0.02	0.05	0.136
②純酸素法	4.08	3.6	0.037	0.02	0.05	0.107
③長時間法	4.33	24	0.233	なし	0.05	0.283
④OD法	1.96	38	0.811	なし	0.05	0.861
⑤RBC法	3.52(円盤)	2.2	0.066	0.02	0.05	0.136
⑥散水ろ床法	—	—	0.078	0.02	0.05	0.148
⑦酸化池	1	10日	10.0	なし	なし	10.0

2.3.1 下水処理プロセス用地面積原単位

ここでは消費エネルギーの項で対象とした下水処理プロセスの7方式について、生物反応槽と沈殿池の面積を水量原単位として求めた。面積は、参考文献2)の処理水量、滞留時間、有

①: 21処理場 ②: 4処理場 ③: 111処理場 ④: 9処理場
⑤: 20処理場 ⑥: 4処理場 のデータより求めた。

効水深から求めた。最初、最終沈殿池の水面積負荷をそれぞれ50ml/m²d、20ml/m²dと一定にした。酸化池面積の計算に際しては、以下の仮定を用いた。日本における12月の平均日射量は1,860kcal/m²dであり、このとき酸化池における平均的な濃度の藻類による酸素供給量は10～15g-O₂/m²dである。5g-O₂/m²d程度の空気中からの酸素供給も考慮すると全酸素供給量は15～20g-O₂/m²dとなる⁴⁾。つまり、BOD200mg/ℓの下水に対しては全酸素供給量20g-O₂/m²d、水深1mの好気性酸化池とすれば、滞留時間10日で処理できる。この仮定にしたがって求めた下水処理プロセスの用地面積原単位を表-1、図-7に示す。滞留時間の長いプロセスほど面積を必要とするのはいうまでもないが、生物酸化池の面積原単位は標準活性汚泥法の約70倍、OD法の約10倍の値となる。

2.3.2 汚泥処理施設等用地面積原単位

汚泥処理施設(濃縮槽、消化槽、脱水施設、焼却施設)、管理棟、場内道路、その他の施設用地の原単位を東京都区部の40万ml/dの下水を処理する処理場(標準活性汚泥法、濃縮槽、消化槽、脱水施設、焼却施設をもつ)の平面図から求めた。東京都区部の処理場であるため、ここで得られる値は必要最小限の各施設用地面積原単位と考えられる。この結果を表-2に示す。

2.3.3 処理場全体の用地面積原単位

2.1.3で対象とした汚泥処理の4方式を採用している処理場について処理場全体の用地面積原単位を求めた結果を図-8に示す。また、汚泥処理方式別の処理水量-処理場数の実態を表-3に示す。これらの結果より、焼却を行っている処理場の処理水量は比較的大きな値を示していることがわかる。つまり、処理水量が多く焼却、または消化と焼却を行なわざるを得ない大都市の処理場では十分な処理場用地を確保できず、必要最小限の用地面積となっていることがわかる。それに比べて、濃縮-脱水のような処理方式は、処理水量の少ない都市で用いられており、処理場用地がゆとりをもって確保されていることを示している。

3. 経済費用見積関数による下水道の評価手法

技術の評価指標は、条件の変化にともなって変化する。現在は、市場経済ベースに基づいて評価されているので、建設費、人件費、エネルギー費等が基本指標になっている。残念ながら、放流水水質のレベルによる便益、排気ガス、汚泥処分時の環境影響等はまったく考慮されていない。また、これらの影響の程度は、地域や国によって異なる。このように異なる空間での評価を行なえるようにするために経済費用見積関数による評価手法を提案する。

3.1 経済費用見積関数の検討

下水道の経済費用見積関数Yは、式(2)に示す各要素から構成されるものとする。

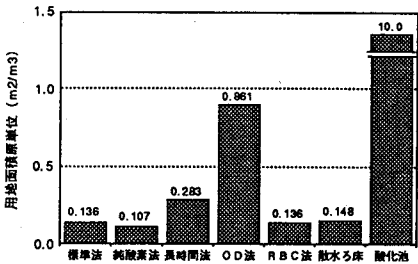


図-7 処理方式別水処理系用地面積原単位

表-2 汚泥処理施設等用地面積原単位

施設	用地面積原単位 m ² /m ³
濃縮槽	0.010
消化槽	0.018
脱水施設	0.006
焼却施設	0.005
管理棟	0.011
道路等	0.108

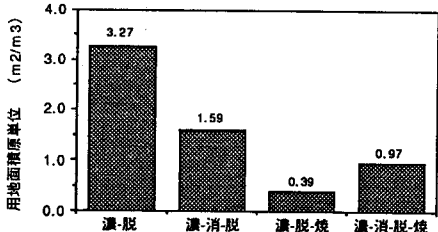


図-8 汚泥処理方式別の処理場用地面積原単位

表-3 汚泥処理方式別処理場数

計画晴天時 日最大処理 水量 (千m ³ /日)	汚泥処理方式				
	濃縮-脱水	濃縮-消化-脱水	濃縮-脱水-焼却	濃縮-消化-脱水-焼却	その他
5 未満	38	8	0	0	—
5～10	34	16	2	0	—
10～50	80	95	4	3	—
50～100	26	35	24	6	—
100～500	25	38	20	10	—
500 以上	2	2	7	3	—
計	205	194	57	22	300

$$Y = \text{建設費(管渠・ポンプ場)} + \text{建設費(処理場)} + \text{維持管理人件費} + \text{消費エネルギー費} + \text{用地費(管渠・ポンプ場)} + \text{用地費(処理場)} + \text{調査設計委託費} + \text{その他} \dots (2)$$

下水道は、処理場を含め数年にわたって建設されるのが一般的である。したがって、維持管理人件費と消費電力費以外のデータは、一処理区域における管渠や処理場の完成に要した費用ではなく、2%/yで普及率増を示す今日のわが国の下水道事業への投資額になっている。したがって、式(2)の経済費用はこの意味で使われている。この表現法は、先進国、開発途上国を問わず、下水道事業への適正な投資額や実行可能性を評価するのに有効である。すなわち、わが国の下水道事業に対する投資が現在の日本経済の規模を反映しているとすれば、式(2)で求まる費用とGNPや1人当たり国民所得等の値との比較により、経済規模とそれに見合った下水道事業への投資の一基準、あるいは水準を評価し得る。なお、下水道の供用による上水使用量の増加、これによる間接的費用の増加や環境に関わる経済的に外部化されている部分等についても同様に式化できる。

3.2 日本における下水道事業の経済費用

式(2)に示した各要素のわが国における費用を、以下のように求めた。解析に使用したデータは、わが国の下水道関連の全事業費の95%を占める公共下水道と流域下水道に関するものである。得られる事業費のデータは、運転・維持管理費と建設事業費に分類されている。

運転・維持管理費については、図-9に示す平成元年度公共下水道・流域下水道の維持管理費内訳比率²⁾の各要素を式(2)の要素に対応させるために、次のように整理した。維持管理人件費[：人件費、委託費、水質測定・監視等経費、点検費、清掃費]、エネルギー費[：電力費、燃料費、薬品費]、補修費[：補修費(後に建設費(管渠・ポンプ場)と建設費(処理場)へ配分)、その他[：上記以外のもの]。]

建設事業費についても、同様に図-10、11に示す管渠・ポンプ場と処理場の建設費の工事別内訳の各要素を式(2)の要素に対応させるために、次のように整理した。建設費[：土木工事費、建築工事費、機械工事費、電気工事費]、用地費[：用地・補償費]、調査設計委託費[：設計委託費、調査委託費]、その他[：事務費等]。ただし、年間の建設事業費は年利5%、償還年数30年を仮定し、データとして得られた昭和43年度から累計して平成元年度に支払うべき元利償還費とした。このようにして得られた金額が、図-10の14,186億円、図-11の5,486億円である。なお、建設費の一部は国費で賄われているが、ここではすべて借入金とした。

以上の結果を基に、式(2)の構成要素に従ったわが国における

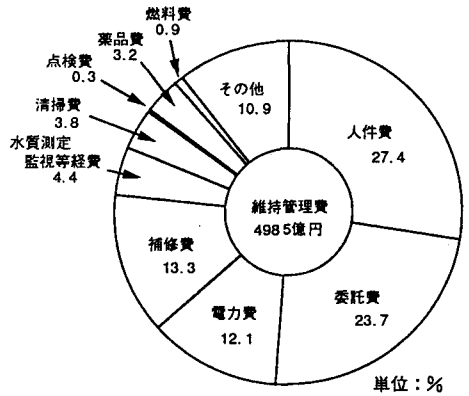


図-9 維持管理費内訳比率
(平成元年度公共下水道・流域下水道の合計)

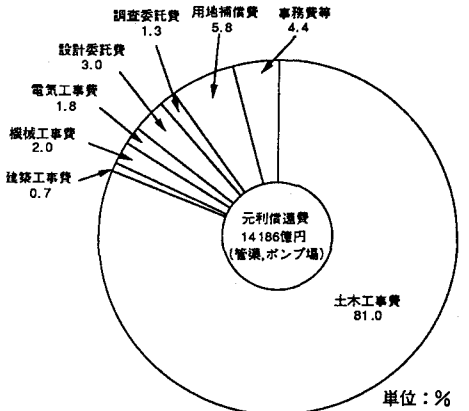


図-10 建設費(管渠・ポンプ場)の起債元利償還費
(平成元年度公共下水道・流域下水道の合計)

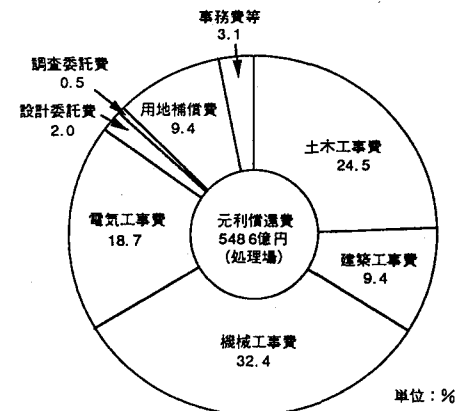


図-11 建設費(処理場)の起債元利償還費
(平成元年度公共下水道・流域下水道の合計)

下水道事業の平成元年度経済費用内訳が求まる。結果を図-12に示す。これらの中でエネルギー消費に直接結びつく項目は、管渠・ポンプ場及び処理場の建設費と、エネルギー費である。この中でも管渠・ポンプ場の建設費(管渠建設費の比率が90%を占める)は全体の50%を超えることから、管渠建設費の低減が事業全体の省エネにおいて重要であることが分かる。また、同図における消費エネルギーの比率3.3%は小さいが、2.1の項で述べたように、日本全国の総消費電力量の0.7%に相当しているため、その省エネは依然として重要なことには変わりはない。

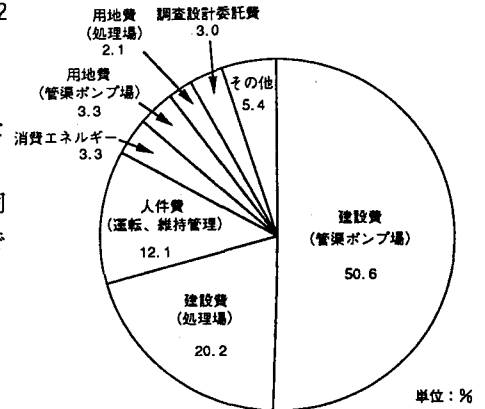


図-12 下水道事業の経済費用内訳比率 (平成元年度)

3.3 経済費用見積関数による下水道の評価手法

経済費用見積関数の体系を決定できたので、この関数を基礎に、様々な経済規模における実行可能な下水道事業の選択手法を検討することができる。

日本の下水処理水量の約90%が標準活性汚泥法により処理されている。また、汚泥処理については、濃縮-消化-脱水の処理場が25%であり、2.3.3で示したように処理汚泥量では、濃縮-消化-脱水の処理場が中規模となっている。したがって、図-12に示した内訳比率のうち建設費(処理場)と消費エネルギー費は、水処理が標準活性汚泥法、汚泥処理が濃縮-消化-脱水によりなされている場合の費用と見なすことができる。

上述の前提のもとで、経済(建設資材物価、電気料金、国民所得、地価等)の違い、水処理・汚泥処理方式の違いを式(2)に導入すれば、これらの違いによる下水道事業の経済費用を評価することが可能となる。この概念を式化すれば、

$$Y = \alpha aA + \beta bB + \gamma cC + \delta dD + \varepsilon eE + \zeta fF + \eta gG + \theta hH \cdots (3)$$

ただし、 $\alpha \sim \theta$: 基準となる国において基準となる処理方式で下水道事業を実施したときの経費内訳比率 (日本の下水道事業を基準とすれば、 $\alpha \sim \theta$ は、図-12に示した内訳比率となる。)

$a \sim h$: 処理方法によって決まる処理方式係数(標準活性汚泥法、濃縮-消化-脱水における経費を1とする。)

$A \sim H$: 国や地域ごとに決まる地域特性係数(日本における経費を1とする。)

したがって、日本の下水道事業(水処理:標準活性汚泥法、汚泥処理:濃縮-消化-脱水)を基準($Y=100$)とすれば、次式が得られる。

$$Y = 50.6aA + 20.2bB + 12.1cC + 3.3dD + 3.3eE + 2.1fF + 3.0gG + 5.4hH \cdots (4)$$

右辺の各項は、式(2)に示す各項に対応する。さらに、式(4)に、以下の仮定を適用する。

①建設費は、建設資材費と建設人件費に分けられる。その比率は、積算の実態とする。

管渠、ポンプ場建設では、資材費：人件費＝7：3、処理場建設では、資材費：人件費＝8：2

②処理場の建設費の内訳は、図-11の内訳から設計委託費、調査委託費、用地補償費、および事務費を除き改めて残りの土木工事費～電気工事費の比率を求める。

土木工事費：建築工事費：機械工事費：電気工事費＝29：11：38：22

③管渠、ポンプ場の項は、処理法によらない($a=e=1$)。

④調査設計委託費は、処理法によらない($g=1$)。

⑤その他の項は、国や処理法によって変化しない($H=h=1$)。

これらの仮定により、式(4)は式(5)となる。

$$Y = 50.6(0.7A_1 + 0.3A_2) + 20.2(0.29b_1 + 0.11b_2 + 0.38b_3 + 0.22b_4)(0.8B_1 + 0.2B_2) + 12.1cC + 3.3dD + 3.3E + 2.1fF + 3.0G + 5.4 \cdots (5)$$

ここで、

$$A_1=B_1=\frac{\text{各国の建設資材物価}}{\text{日本の建設資材物価}}, \quad A_2=B_2=C=G=\frac{\text{各国の1人当り国民所得}}{\text{日本の1人当り国民所得}}, \quad D=\frac{\text{各国の電気料金}}{\text{日本の電気料金}},$$

$$E=F=\frac{\text{各国の地価}}{\text{日本の地価}}, \quad b_1 \sim b_4=\frac{\text{各法の土木、建築、機械、電気工事費}}{\text{標準法の土木、建築、機械、電気工事費}},$$

$$c=\frac{\text{各法の運転管理所要人員数}}{\text{標準法の運転管理所要人員数}}, \quad d=\frac{\text{各法の消費電力}}{\text{標準法の消費電力}}, \quad f=\frac{\text{各法の用地面積}}{\text{標準法の用地面積}}$$

以上の評価法によれば、日本における標準活性汚泥法(汚泥処理:濃縮-消化-脱水)建設の経済費用を基準として、Yの値と1人当り国民所得より、国情や地域特性に応じた実行可能な下水道を選択することが可能となる。

3.4 経済費用見積関数を用いた下水道評価の具体例

3.4.1 処理方式係数($b_1 \sim b_4$, c , d)の決定

ここでは管渠で下水を集水し、一律0.05kWh/m³の場内ポンプ消費電力が必要となることを前提として表-4に示す処理方式について考える。処理方式1、2、3は有機物(BOD)除去に加えて、窒素、リンの同時あるいは個別の除去が可能である。4~12は有機物除去、13は4~12よりグレードの低い有機物除去、14と15は更にグレードの低い有機物除去を想定している。基準システムは、水処理を標準活性汚泥法、汚泥処理を濃縮-消化-脱水とする。ここで、表-4に示す各値は、2の項で得られた下水処理に要するエネルギー、用地面積の各原単位を基礎として以下のように決定した。

消費エネルギー：前述した水処理・汚泥プロセスの消費エネルギー原単位を基準にして決定した。

用地面積：前述した用地面積原単位より決定した。

土木工事費：基準システムを100とし、用地面積等を考慮して決定した。

建築工事費：同上

機械工事費：基準システムを100とし、消費エネルギー等を考慮して決定した。

電気工事費：同上

維持管理人員数：基準システムを100とし、これに対する維持管理の難易度等を考慮して決定した。

表-4 処理方式とその建設、維持管理の諸条件

処理方式	消費エネルギー kWh/m ³	用地面積 m ² /m ³	土木 工事費	建築 工事費	機械 工事費	電気 工事費	維持管 理人員
1 高度処理(循環法+凝集剤添加法)	0.540	0.344	118	118	180	180	110
2 高度処理(循環法)	0.530	0.344	115	115	177	177	100
3 高度処理(凝集剤添加法)	0.310	0.278	103	103	103	103	110
4 長時間法(濃縮-脱水)	0.620	0.419	125	125	100	100	90
5 OD法(濃縮-脱水)	0.350	1.072	288	288	100	100	90
6 標準法(濃縮-脱水-焼却)	0.450	0.276	90	90	150	150	110
7 標準法(濃縮-消化-脱水)：基準	0.300	0.278	100	100	100	100	100
8 標準法(濃縮-脱水)	0.275	0.271	88	88	92	92	90
9 純酸素法(濃縮-消化-脱水)	0.325	0.263	90	90	108	108	110
10 RBC法(濃縮-消化-脱水)	0.300	0.277	98	98	100	100	90
11 散水ろ床法(濃縮-消化-脱水)	0.250	0.301	100	100	83	83	90
12 OD法(汚泥処理無し)	0.325	1.056	20	10	65	65	50
13 酸化池(汚泥処理無し)	0.050	10.119	100	10	15	15	50
14 簡易沈殿(濃縮-脱水)	0.075	0.205	70	70	25	25	50
15 簡易沈殿(汚泥処理無し)	0.050	0.189	10	10	15	15	10
16 無処理(集水して放流)	0.050	0.000	5	5	15	15	10

注1)：7の標準活性汚泥法(汚泥処理：濃縮-消化-脱水)が基準システムとなっている。

2)：1~3の汚泥処理は、基準システムに同じ。

また、“汚泥処理無し”の方式については、池(反応槽、沈殿池)には自然の地形(窪地など)を利用し、汚泥の引き抜きは行わず、池底部に汚泥が堆積して処理が困難になった場合はそのまま埋立てまたは放置して、別の場所に処理施設を建設するものとする。以上の各値を定めることにより、処理方式係数が決定される。

3.4.2 地域特性係数(A~G)について

統計資料⁵⁾より、地域特性係数の算定基礎となる建設資材物価等の経済条件を対象都市別に求め、表-5に示す。日本(平均値)との比が、地域特性係数となる。

3.4.3 処理方式選定基準(経済規模に応じた実行可能な処理方式の選定基準)について

日本における1人当り国民所得(15,400ドル)によって、日本において標準活性汚泥法、濃縮-消化-脱水の処理施設が建設、運転可能であること(Y=100)を基準にとると、ある地域における処理方式選定基準Xは、式(6)で示される。

$$X = \frac{\text{対象地域の1人当り国民所得}}{\text{日本の1人当り国民所得}} \times 100 \quad \dots (6)$$

例えば、Xが50の地域で、日本と同じ負担割合の投資を下水道事業へ行なおうとするならば、その地域の地域特性係数を用いて処理方式毎の経済費用見積を式(5)により実施し、その中からYが50となる処理方式を選択すればよいことになる。

3.4.4 計算例とその結果

表-5に示す経済条件を用いて、表-4に示した16方式について計算した結果を図-13(1)~(4)に示す。これらの図から次のようなことが言える。

- ①東京都では、Xは150程度であるが、地域特性係数も高くなるのでYが高くなり、日本の平均より高い負担率で下水道事業が実施されている。
- ②ロサンゼルスでは1人当り国民所得が高く、地価が安いので、下水道システムの建設、運転は比較的安価で行われていることになる。凝集剤添加活性汚泥による高度処理の実行が同じ負担率のもとで可能である。
- ③ソウルでは日本の約3倍の投資水準でないと下水道事業は実施できない。

本計算結果では、管渠の建設費が事業費のかなりの部分を占めるので発展途上国においては、現状の管渠建設方式では経済的に困難になる。したがって、管渠建設費をまず切り下げることが必要である。ついで、用地費の安さを生

表-5 評価対象都市とその経済条件

都市名	建設資材物価	電気料金(円) 200kWh使用	1人当り国民所得(ドル)	地価 (円/㎡)
日本(平均)	100	4,433	15,400	80,500
東京都	91	4,433	22,549	858,600
ロサンゼルス	100	4,311	16,590	10,897
ソウル	76	3,368	2,778	51,480

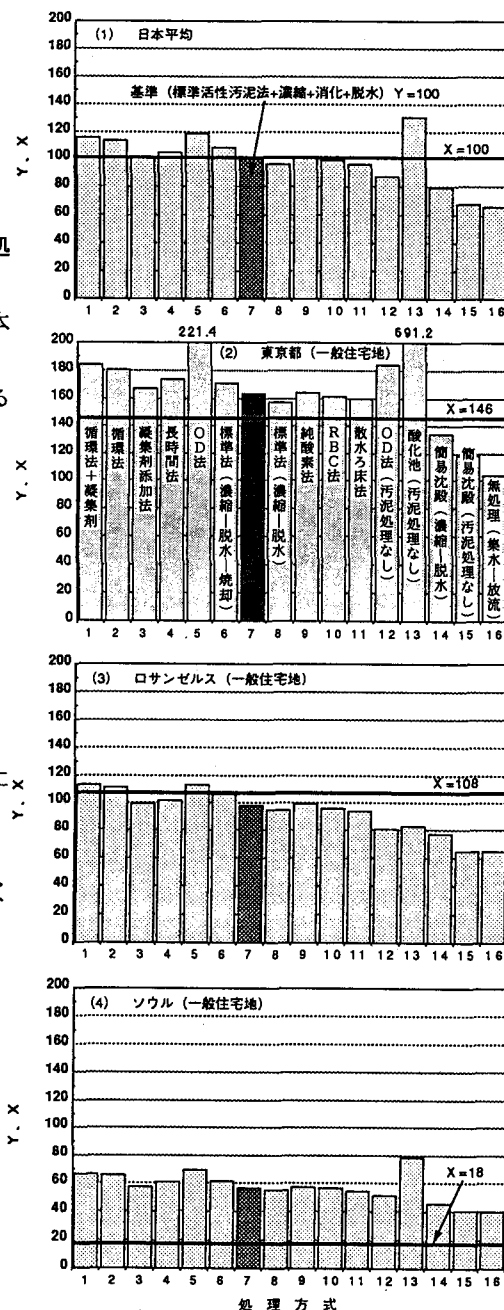


図-13 経済費用見積計算例

かす方法を考えなければならない。つまり、自然の浄化機能を排水発地点で利用したシステムを考案することが求められる。また、経済的に外部化されている環境影響分の費用のうちCO₂分は、化石燃料消費量に比例する部分とガス化しないで一時的に貯留する効果分(貯留量×発生遅延日数)に分けられるので、原単位の負担金額が決定できるとそのまま上述の考え方で加算できる。さらに、放流水の水質分は、放流水域の利水計画や環境保全計画に従って理論上価値を決定できる。下水道が導入されたことによる地域の水循環量の変化分等をこれらに加算しなければならない。明確な数値としてこれらの値を決定できるまでに至っていないが、最適の下水道システムは化石燃料を用いない、簡易なシステムの費用と用地費との関連のもとで決定される可能性が大きい。

4. 結論

本研究で得られた成果は、以下のとおりである。

- 1) わが国の下水処理場における下水1 m³当たりの消費エネルギー原単位は、集水プロセスが0.028kWh/m³、水処理プロセスでは場内ポンプが0.054kWh/m³、水処理で0.134～0.537kWh/m³、汚泥処理プロセスでは0.024～0.2kWh/m³である。
- 2) 汚泥処理に要するエネルギー量と最終処分質量は増減が互いに逆の関係になる。わが国では用地費の増加をエネルギー消費量の増加で補っている。
- 3) 消化ガスからの回収可能なエネルギー原単位は、0.162kWh/m³-水量となる。これは、従来いわれている下水処理場の消費電力原単位0.3kWh/m³の54%に相当する。下水熱エネルギーの回収可能熱量は冬季にエクセルギー0.172kWh/m³となる。また、焼却熱の回収可能熱量は、焼却燃料の熱量を含めずに、0.202kWh/m³となる。
- 4) 日本における処理場全体の敷地面積原単位は、水処理プロセスの用地面積にはよらず、汚泥処理方式に関係する。
- 5) 日本の下水処理場では、エネルギーを消費し用地問題を和らげる傾向にある。
- 6) 日本の下水道事業と1人当たり国民所得を基準として、様々な下水道事業・処理方式の実行可能性を評価する方法を提案した。

次報では、経済的に外部化している要因や雨水排除時における災害リスク等を考慮した評価方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 田井慎吾：水システムにおける省エネルギーの基本概念、公害と対策、Vol.18、No.5、pp.409-416、1982
- 2) 日本下水道協会：下水道統計(平成元年度版)
- 3) 東京都下水道局：小台処理場消化ガス発電設備調査報告書、1989
- 4) 川島博之他：酸化池による生活雑排水の処理、水質汚濁研究、Vol.10、No.7、pp.423-430、1987
- 5) 朝日新聞社：朝日年鑑1991年版