

環境資源の最適輸送システムに関する研究
- 概念的アプローチ -

STUDY ON OPTIMUM TRANSPORT SYSTEM OF ENVIRONMENTAL RESOURCES
- A CONCEPTUAL APPROACH

○宮本敏光* 平塚 彰* 長坂悦敬**

Toshimitsu MIYAMOTO* Akira HIRATSUKA* Yoshiyuki NAGASAKA**

ABSTRACT; In recent years, a life cycle assessment (LCA) has been noteworthy as an excellent technique. And now, turning to the sludge flow from a viewpoint of environmental control, we cannot completely treat the sludge in the sewage treatment system, that is, in the process of sludge treatment there is another troublesome problem that we must return a treated water to the sewage treatment process. Therefore we need to conduct the optimum design in which sludge is at the core of sewage treatment system by applying the idea like a LCA to sludge. In this paper, we conduct the introductory examination on an optimum transport pathway of sludge recycled as an environmental resources by using a linear programming. An optimum pathway can be indicated by taking up three typical sludge transport pathways and conducting a comparative examination.

KEY WORDS; environmental resources(sludge), linear programming, optimum pathway

1. はじめに

最近、廃棄物処理・リサイクルシステムに関する環境政策への関心が高まり消費-廃棄システムに関する経済的分析や廃棄物処理・リサイクルシステムのライフサイクル分析(LCA)が注目されている。LCAは、基本的には各種の環境負荷を物質毎にライフサイクル(原料採取-生産-流通-消費-リサイクル-廃棄)全体にわたって積み上げることにより、その負荷量の低減を図ろうとするものであり、非常に優れた手法であると考えられる。

翻って、これまでの汚泥の流れを環境制御の視点からみると、ツケの回しあいみたいなところがあったことは否めない。したがって、上述のLCAのように、システム内におけるライフサイクルのバランスのうえで、汚泥はどういう形で形成されるのか、またその形成過程のなかで、問題点があれば制御していくということが重要であると思われる。もしシステム内においてキーとなる環境要素のバランスを考え、汚泥を核とした最適デザインを行うことが可能となれば、今後のリサイクル社会を考える上での情報を提供できるものと考えられる。

本研究は、このLCA的な考え方を下水汚泥処理システムに応用し、環境資源である汚泥の最適輸送経路に関して、線形計画法を用いて初歩的な検討を行ったものである。LCA的な解析からみた汚泥の固液分離システムの分析・評価を考えるにあたっては、操作レベルで処理性能を評価するというスタンスになるが、このことは境界の出入りの情報によっては、ここで求めたものが最適かどうかは分からないことになる。つまり、ここでいう評価はシステムの主要な構成要素が変わればその評価も変わるという限定付きのものである。そのため、評価の対象としては分離水の水量・水質、コスト及び時間等を取りあげ、その方法論として統計的方法を用いて検討を行う必要があるが、今回は水質、コスト及び時間を評価の対象として、システム内における代表的な3つの汚泥の輸送経路を取りあげ、その最適性について比較検討を行った。

* 大阪産業大学工学部 Dept.of Civil Engineering, Osaka Sangyo Univ., Osaka, 574 Japan.

** 大阪産業大学経営学部 Dept.of Distribution Sci., Osaka Sangyo Univ., do.

2. 環境システムからみた汚泥の固液分離システムについて¹⁾

固液分離に関するこれまでの研究は、あくまでも汚泥の含水率を基本的なベースにした物理的アプローチであり、汚泥固液プロセスにおいて、その含水率を低下させるという単一の目標に対して最適操作条件の決め方を検討したものであり、この含水率をベースにする限り、環境インパクトを視野に入れた操作レベルでの処理性能の検討を行うことが難しい。しかし、実際汚泥の種類としては、下水汚泥、上水汚泥、し尿浄化槽汚泥の他に、環境系汚泥があることや、汚泥発生場所（地域条件）の観点からみたとき、汚泥返送率が高く全酸化処理に近い汚泥や有機物や窒素分の比率が比較的高い地域で発生するような汚泥もある。また焼却等で無機化した灰を回収するのであれば、汚泥の含水率を下げる（分離水量を優先する）方に最大の力を注げばいいし、逆にコンポストイング等をするのであれば、強制的な力を加えての固液分離は行わずに、ある程度水分があっても乾燥とか腐敗がない程度（分離水質を優先する）になれば、コンポストイングを採用すればよいということになる。したがって、各種の固液分離装置とそれを取り巻くまわりの条件との絡み、いわゆる環境システムの視点で処理性能を評価することが重要であると思われる。

環境システムからみた汚泥の固液分離システムの分析評価を考えるにあたっては、操作レベルで処理性能を評価するというスタンスになるが、このことは境界の出入りの情報によっては、ここで求めたものが最適かどうかは分からないことになる。つまり、ここでいう評価はシステムの主要な構成要素が変わればその評価も変わるという限定付きのものであるということになる。

ここでは、環境システムからみた下水処理システムにおける固液分離プロセスに着目しているので環境インパクトを視野に入れた操作レベルでの処理性能を評価する必要がある。そのため、評価の対象としては分離水の水量・水質、コスト、及び時間等を取りあげ、その方法論として統計論的方法を用いて検討を行う必要があるが、今回は、アプローチの第一段階として固液分離前の汚泥の流れに注目した関係で、水質、コスト及び時間を評価の対象として汚泥の輸送経路についての比較検討を行っている。

3. 分離水の水量・水質からみた固液分離の評価²⁾

2.での取扱いの後、分離水の水量・水質から固液分離の評価を行う必要がある。ここでは、その概念について述べることにする。なお、今回はこの評価に関するLPによるアプローチは行っていない。下水汚泥処理システムにおける固液分離プロセスからの分離水の水量とその水質を一つのシステムとして捉え、その量と質との観点より環境インパクトを視野に入れた操作レベルでの固液分離の評価を行うにあたっては多変量解析手法を用いる。まず、分離水の水量 V が時間 t の関数であると仮定し、実際に得られた分離累積曲線の形よりモデル（たとえば、 $V(t) = \alpha t^\beta$ ($\alpha > 0$, $1 > \beta > 0$, $t > 0$)）を提案したのち、同曲線の対数線形モデルへの変換を行い、それを回帰分析することにより、単位時間経過後の初期分離水の水量を示す推定値 α' 及び分離水の増大の時間的傾向を示す推定値 β を求め、これらの値、とくに α' 値より任意の固液分離時間における分離水の水量を推定できる。そして、各分離要因レベル A_i , B_j , C_k ($i = 1 \sim \ell$, $j = 1 \sim m$, $k = 1 \sim n$)の各分離累積曲線において α' 及び β 値が得られるが、これらをベクトル表示($\chi_{ijk} = (\alpha', \beta)$)し、この二次元の観測ベクトルをベースに各平均ベクトルと変動を求め、それらの値から三元配置(L_{27})の多変量解析(χ^2 検定)が実行できる。なお、五元配置(L_{32})の分析の場合は、計算をシンプルにするために独自に開発したベクトルの表示式とその変動を示す式{①ベクトル表示式: $(\alpha', \beta) = \chi_n$ $n = 1, 2, \dots, 32$ ②変動の式: $S_i = 1/32 (T_1 - T_2)(T_1 - T_2)'$ }を用い、これらの値から五元配置における多変量解析ができる。次に、分離水の水質からみた分離要因の最適レベル、分離装置の違いからみた分離水の水質の比較及び分離スピード(水量)と分離水の水質の関係に関する分離水の水質の解析ができる。すなわち、多変量解析により、分離装置の違いによる分離水の水質からみた分離要因の最適レベルが、それぞれ A_i , B_j , C_k で表せる。また、両側 t 検定を行うことにより、分離装置の違いによるトータルな分離水の水質を比較し評価できる。さらに、分離スピード(水量)と水質に関するオーダリング/ランキングをしたのち、両者のランキングナンバーを用いて相関分析ができ、これにより量と質からみた固液分離の評価が可能となる。

4. 線形計画法による汚泥の最適輸送経路の検討³⁾

生産計画や実験計画を考えると、ある制約条件の下で最大限効果がでるように関係する各項目の値を決めたいことがある。このような問題を解く数学的方法の一つとして線形計画法(LP)がある⁴⁾。LPは、互いに関連するいくつかの活動において、総合的にみて最もよい計画を立てるための一つの計算手法であり、1次式制約の下で1次式を最適化する問題であるといえる。

今回、下水処理システムにおいて、汚泥を核とした最適経路を求めるにあたり、LPの適用可能性について初歩的な検討を行った。すなわち、水質、コスト及び時間の制約条件の下で、最大の効果が期待できる汚泥の経路について考察を行った。なお、LPについては、多くの汎用ソフトウェアが市販されているが、今回は現代数学社の Micro-NAPS⁵⁾ を参考にしながら独自のプログラムをつくり計算を行った。

1) 下水処理システムについて

一般に、下水処理システム(sewage treatment system)をプロセスで大別すると、流入下水を処理する、いわゆる下水処理(sewage treatment)、汚泥処理(sludge treatment)および汚泥処分(sludge disposal)となる。ところで、これまでのシステム内における汚泥の流れを環境制御の視点からみると、現行のシステムは下水処理(sewage treatment)→汚泥処理(sludge treatment)→下水処理(sewage treatment)というフローであることから、汚泥処理プロセスから再度下水処理プロセスへ汚水を戻すという、いわゆる返流水の問題が生じ、汚泥を核としてみるとツケの回しあいみたいな感が否めない。今後のリサイクル社会における汚泥の資源化を考えると、システム内における汚泥の状況を総合的・かつ的確に把握することは非常に重要であると考えられる。ここでは、下水処理システムにおいて、汚泥を核とした場合の最適経路を検討する。

2) LPによる汚泥の最適経路について

Fig.1に下水処理システムにおける処理フローを示す。ここでは、代表的な3つのフローについて検討を行った。

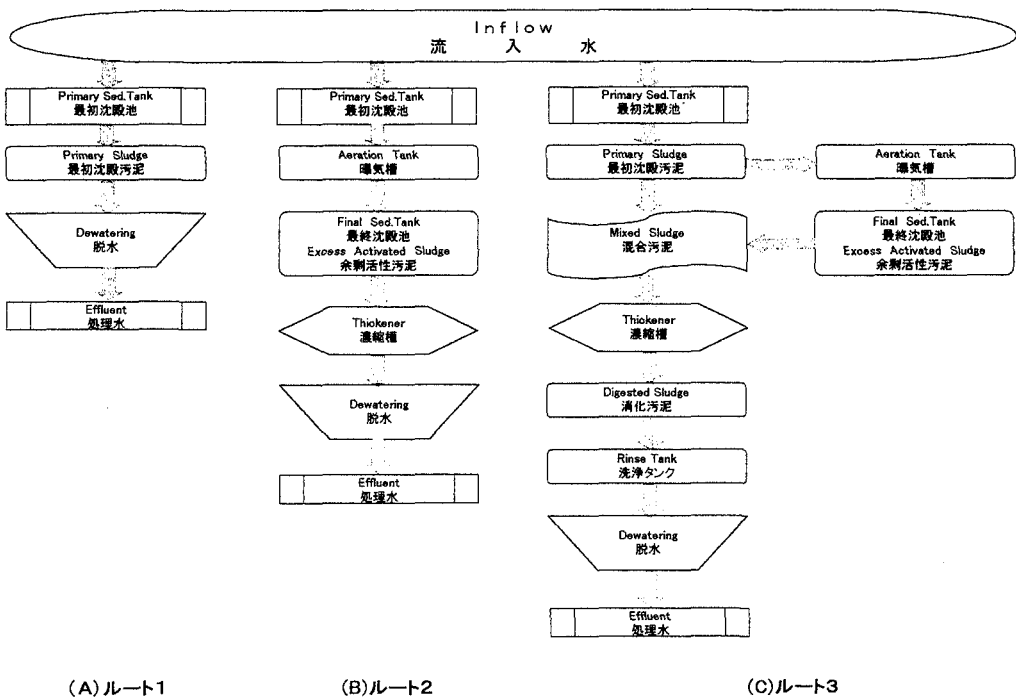


Fig.1 下水処理システムにおける処理フロー

各ユニットにおける BOD, SS, 設備費及びランニングコスト等に関する各値 を Table 1 のように便宜上与えた. ただし, ランニングコストについては 時間の経過とともに変動する可能性があるものについては考慮していない.

Table.1 各ユニットにおける制約条件

Unit 設備名	設備コスト(百万円/Year)	ランニングコスト(百万円/Year)	流量 : 一定 (仮定:100000m ³) 処理能力(mg/l)		所要時間(h)
			BOD	SS	
Primary Sed. Tank 最初沈殿池			200	250	
Primary Sludge 最初沈殿汚泥	100	0.5	8000	50000	
Aeration Tank 曝気槽	100	50	106	200	2
			6900	40000	
Final Sed. Tank 最終沈殿池			—	—	
Excess Activated Sludge 余剰活性汚泥	100	0.5	6800	48000	4
Mixed Sludge 混合汚泥			17	18	
Thickener 濃縮槽	100	0.5	4600	30000	5
Digested Sludge 消化汚泥	100	5	—	—	
Rines Tank 洗浄タンク	50	3	4500	30000	4
Dewatering 固液分離R1	2200	150	—	—	
Dewatering 固液分離R2	2000	140	4400	28000	20
Dewatering 固液分離R3	1900	120	5000	5000	10
			—	—	
			—	—	1
			—	—	
			1350	4200	10
			—	—	
			1300	4000	8
			—	—	
			850	400	6

例として, ルート2 の場合の関係式(1次式)を以下に示す.

X_1 : エアレーションタンク

X_2 : 最終沈殿池

X_3 : 濃縮槽

X_4 : 脱水

目的関数 Z : $Z = 11.47X_1 + 11.47X_2 + 3.43X_3 + 228.47X_4$

BOD : $1220X_1 + 230X_2 + 20X_3 + 320X_4 \geq 550$

SS : $200X_1 + 1000X_2 + 200X_3 + 2600X_4 \geq 3500$

ランニングコスト : $57X_1 + 0.57X_2 + 0.57X_3 + 159.82X_4 \leq 1000$

時間 : $2X_1 + 5X_2 + 20X_3 + 8X_4 \leq 96$

コスト : $10X_1 + 10X_2 + 3X_3 + 100X_4 \leq 1000$

このときの Z = 最小となるような各 X_1, X_2, X_3, X_4 を求める.

ルート1 について 時間だけの制約量の変化 でみると, 96時間でみたとき 目的関数の係数は 114.48となり, 192時間でみたときは 342.96となった. また, ルート1 については48時間でも考えたが, これは制約条件を満たすことができなかった. 以上のことから, 時間を倍にしたとき, 目的であるコストに関しては約3倍 となった. このことから, 同じコストで同様の処理を行うことができないという結果が得られた. このことから, ルート1 に関しては時間は96時間でほぼ制約条件を満たすということがわかった.

ルート2について、時間だけの制約量の変化でみると、96時間でみたときの目的関数の係数は1143となり、192時間でみたときは、1144となった。これより、時間を倍にしても目的であるコストに関しては変化しなかった。このことから、この範囲の時間では時間に関しての制約を受けず、同じコストで同様の処理を行うことができることがわかった。ただし、エアレーションタンクと最終沈澱池に関しては、そのルートにおける時間的な割合に関して、前者と後者で1:2から3:1と変化がみられた。

ルート3についても同様に、96時間、240時間とそれぞれについて考察を行ったが、それぞれ制約量を満たすことができず、モデルとして成立しなかった。時間を480時間、ランニングコスト及び減価償却費等を大きくし、また制約条件を緩くしたとき目的値が3106で成立した。しかし、これでは目的値が大きくなり、時間やコストといった面で他のルートより劣るといった結果になった。また、本ルートにおいては、濃縮・消化といった他のルートにはない条件があるのでBOD・SSといった制約だけでは比較することができないこともわかった。

5. 結論

今回、下水処理システムにおける主要な処理フローを3つとりあげ、システムにおける汚泥の最適経路についてLPの初歩的な適用可能性を検討した。その結果、同一の条件では、ルート2がルート1より10倍近いコストがかかるという結果が得られたが、処理能力の面では、ルート2の方が大きく上回り、よりきれいな処理ができることがわかった。ルート3については、同一の条件下では、目標値を得ることができなかった。時間を増やしていくうえでルート1と同じような時間の割合のとき、最適となるような現象もあったが、コストをある程度無視したときには違ったルートが導き出された。コスト面では、ルート2に比較して3倍弱のコストがかかることがわかった。これより、時間とコストの両面で、ある程度融通が利くときに有効なルートであることがわかった。しかし、時間に関しては480hrsと大きくかかることがわかる。しかし、このルート3では、濃縮・消化等といった水質と汚泥についての総合的な処理ができると考えられるが、本ルートには複雑な要因が多くあるので、ここでは濃縮・消化の詳細については触れていない。この問題について考えるには、流入水の量や他の水質要因そして水質と汚泥についての総合的な検討が必要になってくる。

今後の課題は、以下のとおりである。

- 1) 今回使ったプログラムに汎用性をもたせる意味で、WINDOWSで動くようにする。そのため Visual Basic によってプログラムを改良する。
- 2) 今回は流量に基づいた規定値をそれぞれ想定値(水質・時間・コスト等)で与えたが、今後は可能な限り正確な値を使い、これらの諸関係をプログラム上でシミュレーションできるようにする。
- 3) 今回試みたルート3の詳細についての検討が必要である。

参考文献

- 1) A.Hiratsuka and I.Kyu : Study on Optimum Paths of Sludge Management - A Conceptual Approach, 環境システム研究, Vol.21, pp.104~109, 1993.
- 2) A.Hiratsuka, T.Isogai, K.Ogawa, Y.Takashima and K.Horikawa : Study on Sludge Dewatering Evaluation Techniques Using a Statistical Model - In View of both Quantity of Filtrate and Filtrate Quality, 環境システム研究, Vol.20, pp.231~241, 1992.
- 3) 長坂悦敏 : 「マテリアル」と「経営」のバウンダリー, BOUNDARY, 1996.
- 4) 松永省吾 : BASICシステム工学, 東京電気大学出版局, 1987.
- 5) 南石晃明 : micro-NAPS 計画手法(第3版), 1995.