

下水汚泥処理に伴う発生負荷の現状評価と汚泥管理の将来展望

～ 東京都を例として ～

Evaluation of energy consumption and CO₂ emission in sludge treatment

processes and prospectus for the efficient sludge treatment Case study in Tokyo

原 圭史郎*

佐藤 弘泰*

味埜 俊*

Keishiro Hara

Hiroyasu Satoh

Takashi Mino

ABSTRACT; Huge amount of sludge are being discharged from sewage treatment plants, and proper sludge management is, therefore, a critical issue for sustainable swage works at each local government. In Japan, very complicated sludge treatment systems have been historically applied and the overall evaluation of environmental impacts such as energy consumption and CO₂ emissions in sludge treatment systems have been difficult. In this study, we successfully evaluated energy consumption and CO₂ emissions of each unit process in existing sludge treatment systems, by using primary and detailed sludge processing data from several sludge treatment plants in Tokyo. Based on the evaluation, we tried to figure out what would be crucial to make the sludge treatment system more efficient for sustainable sewage works.

KEYWORDS; sludge treatment technology, energy consumption, sludge management

1. はじめに

下水道インフラは、我々が快適な社会生活を営む上で重要な役割を担っているが、この下水道からは下水処理に伴って毎日大量の「下水汚泥」（産業廃棄物に分類）が排出されている。今後、高度処理の普及や合流式下水道の改善に伴って、下水汚泥の排出量、処分量は増加していくことが予想される。

この下水汚泥は、含水率が高いことから濃縮、脱水、焼却などといった数次の処理プロセスを経て処理処分が行われているわけであるが、この処理プロセスは広大な用地と膨大な処理経費や処理エネルギーを要する¹⁾。一方で、今までのように焼却後に処分場に埋め立てるのではなく、積極的に下水汚泥を再利用しようという試みがなされており、コンポスト化による緑農地利用のほか、セメントの原料としての利用、焼却灰を原料としたレンガや路盤材の製造なども試みられている²⁾。

このような下水汚泥の処理処分や汚泥再資源化に際しては、多くのコストやエネルギーが必要とされることから、効率的な処理や再資源化の方向性が望まれる。また地球温暖化問題が叫ばれていることに鑑み、処理プロセスから排出される二酸化炭素排出量を抑えることも考慮していかねばならない。これらのことを考えていくために、まずは現行の各汚泥処理プロセスにおけるエネルギー消費の状況と、処理・再資源化プロセスに伴う二酸化炭素排出量について定量的な算出を試みることにした。また、自治体における将来方針として汚泥処理施設の大規模集約化の流れがあることを受けて、エネルギー消費の観点から、処理施設大規模化のメリットについても考察を行った。

*東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

Institute of Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

2. 定量算出の方法と枠組み（エネルギー消費量と二酸化炭素排出量の算出）

本研究においては、平成9年度における東京都の下水汚泥の処理状況を具体的に例として取り上げて、汚泥の処理プロセスや再資源化プロセスにおけるエネルギー消費（燃料消費・電力消費）と、それに伴う二酸化炭素排出量についての算出を行った。ここでは、都内にて稼働している12の下水処理場から排出された下水汚泥の処理、再資源化プロセスを扱った。エネルギーと二酸化炭素に関して、定量算出の対象とした範囲としては、下水汚泥処理プロセス全体（図1参照）のうち「輸送工程」、「脱水工程」、「焼却工程」、「再資源化工程」の4工程を選択した。ただし、「再資源化工程」の定量評価に関しては、脱水・焼却処理された汚泥の全量が再資源化工程に進むわけではない（再資源化以外の方は、最終処分場にて埋め立て）点に留意されたい。

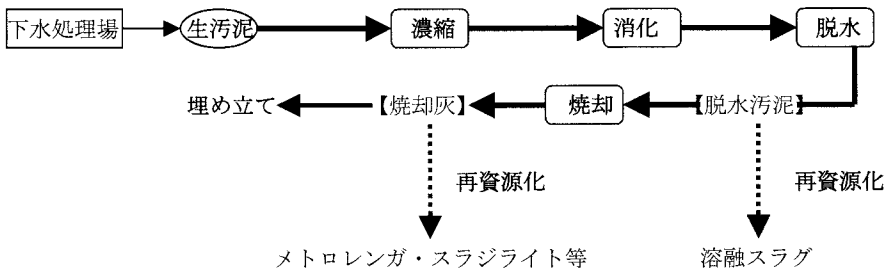


図1 下水汚泥の処理、再資源化のプロセス概要

【各工程概要】

{脱水工程}・・・脱水方法として「ベルトプレス」「遠心分離」「真空ろ過」の3種類があり、処理場によって採用されている方法が異なる。

{焼却工程}・・・焼却方法として「多段式炉」「流動式炉」の2種類があり、処理場によって採用されている方法が異なる。

{輸送工程}・・・各下水処理場から排出された汚泥や処理後の汚泥の輸送は「陸上輸送（トラック）」「海上輸送（船舶）」「管路輸送」の3方法が用いられており、現在はそれらがミックスされた形で汚泥輸送が行われている。（将来的には管路に統一される予定）

【汚泥フローの把握】

現在東京都では、汚泥処理場での各処理工程の有無や処理システムが、処理場によってまちまちであるため、12の下水処理場を出た後の汚泥のフローを正確に把握する必要がある。そこで、最初に東京都の汚泥関係の資料やデータ^{3) 4)} などをもとに、汚泥の発生から最終処分までの汚泥全体のフローを整理して各下水処理場で発生した汚泥がその後どのように処理、処分されるかについて定量的把握を行った。

● 脱水・焼却・再資源化工程での燃料消費量と電力消費量

脱水・焼却・再資源化工程については、上記の汚泥フローと各汚泥処理場における燃料消費量、電力消費量に関しての実測データを整理し直し、それらを積算することによって求めた。

● 輸送工程における燃料消費量と電力消費量

算出上必要となる、汚泥輸送の距離を決定するため、陸送と海送それぞれについて、地図上の輸送ルートを想定し、2地点間の距離をGIS用ソフト（MapInfo）に読み取らせた。また管路輸送

に関しては、東京都からのデータにもとづき、実際の値を使用した。陸送、海送ともに、汚泥輸送時の積載量を、往路では10t、復路では2tであったと仮定をおき、以下のような原単位表を用いて燃料消費量の計算をおこなった。

表1 燃料消費原単位

陸送		燃料消費 (km/l)
	10tトラック	3.5
海送	2tトラック	8.0
		燃料消費 (kg/t・km)
	内航油タンカー	0.00203
	往路10t、復路2t	

表2 燃料換算表

軽油 (トラック)	9700 Kcal/l
重油 (タンカー)	10300Kcak/kg

● 二酸化炭素排出量

二酸化炭素の排出量に関しては、エネルギー消費量（燃料、電力）の結果にもとづいて、二酸化炭素排出原単位等⁵⁾を用いて算出を行った。

表3 発熱係数・二酸化炭素排出原単位

	g-CO2/1000kcal	Kcal/l, Kcal/m3
A重油	290.08	9,300
都市ガス	214.1	10,000
購入電力	469.33 g-CO2/kwh	-
灯油	284.1	8,900

表4 輸送工程（陸送、海送）に使用した原単位

陸送		CO2 (kg／k m)
	10tトラック(往路)	0.742
海送	2tトラック (復路)	0.323
		CO2 (kg/t・km)
	内航油タンカー	0.00634
	往路10t、復路2t	

3. エネルギー消費量・二酸化炭素排出量に関する算出結果とその考察

算出の結果、各工程での燃料消費、電力消費、二酸化炭素消費について、以下のような結果を得た。ただし、ここでの焼成、溶融、細粒材の各工程は、再資源化工程に相当している。

表5 各工程でのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量（年間）

	脱水工程	焼却工程	焼成工程	溶融工程	細粒材工程	輸送工程
燃料消費 (Gcal/year)	174,000	250,000	5,280	15,500	3,440	255
電力消費(mWh/year)	94,600	86,400	3,090	5,470	1,500	4,590
二酸化炭素排出(t-CO2/year)	94,800	103,000	2,580	5,880	1,440	2,220

【エネルギー消費】

燃料、電力とも「脱水工程」「焼却工程」においての消費が大きい。これらの工程にていかに性能のよい設備を用いて、効率のよい処理を行うことができるか、そして結果的にこれらの工程での消費量を

軽減することができるか、ということが重要である。「2. 定量算出の方法と枠組み」でも言及してあるように、脱水工程ではベルトプレス・遠心分離・真空ろ過の3種類が、焼却工程では、多段式炉・流動式炉の2種類が用いられており、より効率の高い設備を用いることが一つの鍵になることが考えられる。設備ごとの効率性については、「4. 処理規模とエネルギー消費量との関係」のところでも多少触れることにする。

【二酸化炭素排出】

燃料や電力の消費に伴う二酸化炭素排出量に関しては、本研究で定量化の対象とした4工程での算出結果を全て足し合わせた合計が、年間で約20万t強という結果を得た。エネルギー消費量に比例して、脱水工程、焼却工程での排出量が多い。

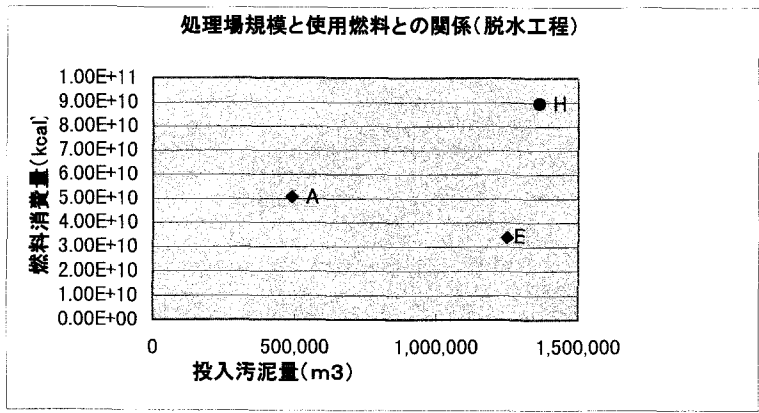
4. 処理規模とエネルギー消費量との関係（脱水工程、焼却工程）

東京都では、現行の汚泥処理場を将来的に大規模集約化していく計画がもたれている。汚泥処理施設の集約化による効率性について考察を行うために、平成9年度現在において、「脱水工程」「焼却工程」について、各汚泥処理場の処理規模とエネルギー消費量（燃料消費量、電力消費量）との関係をプロットし、グラフ化してみた。ここで言う汚泥処理規模とは、各処理工程に投入される汚泥量として扱っている。グラフを作成することにより、処理規模が増大するにつれて、燃料や電力の消費量が逓減していくような傾向があるかどうか考察を試みた。この分析では「脱水工程」の場合は、脱水工程に投入される汚泥量（ここでの単位はm³/年）を脱水処理工程での規模とみなし、「焼却工程」においては、焼却工程に投入される脱水工程を経た脱水済みの汚泥量（ここでの単位はt/年）を焼却処理工程での規模であると見なしている。

4. 1 処理規模とエネルギー消費との関係グラフ

1) 脱水工程での関係性

(A～Hは汚泥処理場の名称)



対象となる処理場が3ヶ所と少ないために、全体としての傾向が捕らえにくいですが、真空ろ過を使用しているH汚泥処理場に関しては、単位あたりの汚泥に要する燃料消費が大きく、効率がよくないものと思われる。

図2 処理規模と燃料消費量との関係（脱水工程）

(注)

- ・・・真空ろ過方式を採用している処理場
- ◆・・・ベルトプレス方式を採用している処理場
- ・・・ベルトプレス方式+真空ろ過方式を採用している処理場
- ▲・・・遠心分離方式を採用している処理場

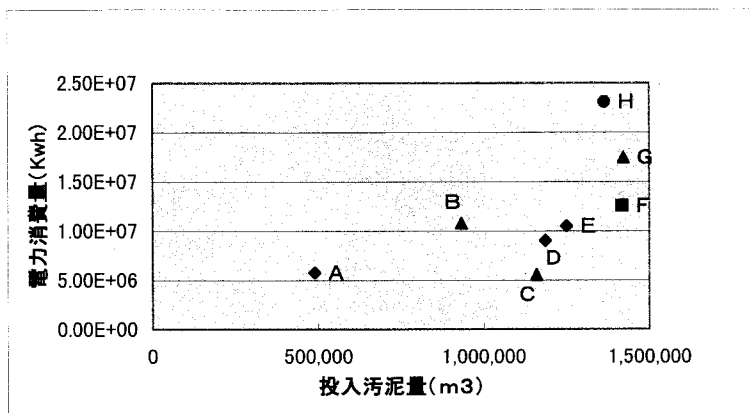


図3 処理規模と電力消費量との関係（脱水工程）

方式の違いによって傾向が分かれているように見受けられる。ベルトプレス方式を採用しているA、D、E処理場に関しては、単位投入汚泥あたりに要する電力が、ほかの方式を採用しているところに比べて小さい、つまり効率がよい傾向にある。

2) 焼却工程での関係性

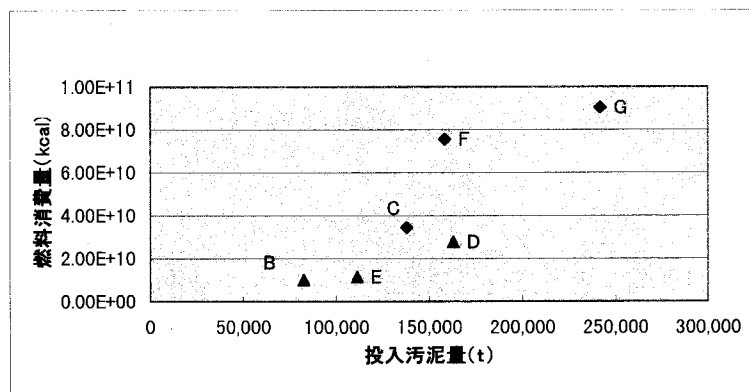


図4 処理規模と燃料消費との関係（焼却工程）

傾向として、流動式炉を用いているB、E、D処理場が単位投入汚泥あたりの燃料消費が少ないという傾向が見て取れる。つまり、多段式炉を採用しているほかの処理場よりも処理効率が高いようである。

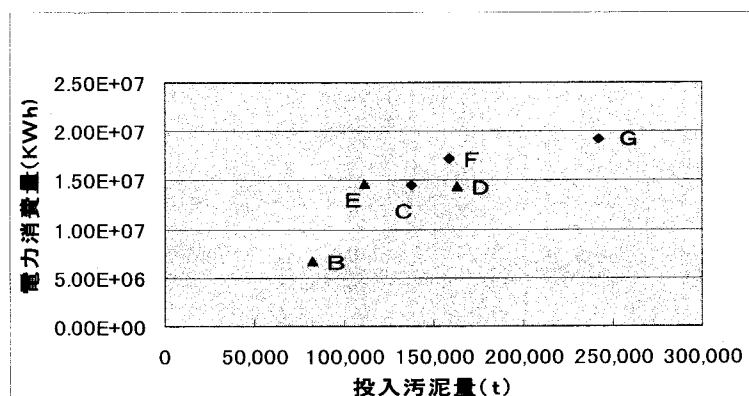


図5 処理規模と電力消費との関係（焼却工程）

全体として見たときには、投入汚泥の量が増大するほど（処理規模が大きくなるほど）電力消費量が逓減する傾向にあるように見受けられる。ただし、はっきりとした傾向を確認するためには、さらにデータが必要。

(注)

- ▲・・・流動式炉を採用している処理場
- ◆・・・流動式炉＋多段式炉を採用している処理場

4. 2 処理場集約化について

処理規模を大きくすることによって、処理に要される燃料や電力の消費の逓減を図ることが可能であるか（スケールメリットはあるか）を考察するために、汚泥処理場での実測データ（平成9年度）を用いて「処理の規模と燃料消費量・電力消費量との関係」をグラフに表してみた。その結果、脱水工程・焼却工程ともおよそ以下のようなことが推察された。

- ・理場を集約化して処理の規模を大きくすることが必ずしも単位汚泥あたりの処理に関する燃料消費や電力消費を軽減するという確実な結果は得られなかった。（各グラフからは、明らかなスケールメリットを見出すのは困難であった）
- ・脱水工程においては「ベルトプレス方式」を、焼却工程においては「流動式炉」を用いている処理場が、他の方式を用いている処理場と比較しても単位投入汚泥あたりに要するエネルギーが少ない傾向にあることが示唆された。脱水工程、焼却工程とも、処理に用いられる設備種類の選択のしかたが、結果的に汚泥の処理効率性を高めるカギとなりうるのではないか。一般に「ベルトプレス」「流動式炉」については原理的にもエネルギー効率が指摘されているが、様々な要因が働いているであろう実際稼働をしている処理場のデータを使った今回の分析においても、その傾向が見受けられたことになる。

5. 結び

本研究で行った方法を通じ、下水汚泥の処理や再資源化のプロセスに伴うエネルギー消費や二酸化炭素排出といった負荷状況を把握することができた。また、汚泥処理における規模のメリットについての考察についても試みたわけであるが、グラフ作成のためのデータ数を増やし、統計による検定などを通して、汚泥処理におけるスケールメリットの有無や、処理設備選択の重要性などについてさらに定量客観的な評価を行う必要がある。

(参考文献)

- 1) 東京都下水道局　これからの下水道事業（説明編）－全体計画－　平成10年3月
- 2) 東京都下水道局　下水汚泥の再資源化に関する調査報告書（Ⅱ．汚泥資源利用の今後の展開に関わる検討）　平成10年3月
- 3) 社団法人日本下水道協会　平成9年度版下水道統計－行政編
- 4) 東京都下水道局　下水汚泥の再資源化に関する調査報告書（Ⅰ．既存資源化施設に関わる技術等の評価）　平成10年3月
- 5) 環境庁規格調整局、環境研究技術課監修、環境情報科学センター　ライフサイクルアセスメントの実践、環境負荷低減を目指して　化学工業日報社　1996年3月