

下水汚泥の集約処理とエネルギー回収・活用による 環境負荷低減化に関する研究

三浦浩之¹・中野加都子²・和田安彦³・村岡 治⁴・藤井 亮⁵

¹正会員 博士(工学) 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

²正会員 関西大学工業技術研究所研究員 (同 上)

³正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (同 上)

⁴正会員 株式会社極東技工コンサルタント (〒564-0042 大阪府吹田市穂波町 19-40)

⁵学生会員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

下水汚泥集約処理において汚泥輸送に伴うエネルギー消費量、CO₂ 排出量を定量し、送泥規模と送泥距離との関係を明確化した。さらに、下水汚泥の集約処理と汚泥の未利用エネルギーの活用を併せて実施した場合の、エネルギー消費量、CO₂ 排出量の削減効果を定量した。運用開始時には、集約処理施設と未利用エネルギー回収・活用施設の建設に伴うエネルギー消費、CO₂ 排出が生じるが、ライフサイクルで考えるとエネルギー消費量、CO₂ 排出量共に集約化前よりも少なくできる。つぎに、その削減量は集約条件によって変化するため、処理場規模と処理場間距離を集約条件として最も削減量の多い集約方法について検討した。これより、処理場規模、処理場間距離と各集約方法によるエネルギー、CO₂ 削減量との関係を明確にすると共に、各汚泥集約条件下で適切な汚泥集約方法を示した。

Key Words: sludge transportation and treatment, LCA, energy consumption, carbon dioxide emission, digester gas, generation of electricity, waste heat

1. 緒論

下水道施設のエネルギー消費量は年々増加しており、今後の下水道普及率の向上に伴いさらに増加すると予想されている^{1)~3)}。しかし、資源消費型社会から循環型社会への転換、地球温暖化を防止するための温室効果ガス排出量削減のため、下水処理、汚泥処理においてもエネルギー消費量、CO₂ 排出量の削減が重要な課題となっている^{3)~5)}。これに対して、近年、処理のスケールメリット、エネルギー・資源の効率的活用、環境対策の効率性等のメリットがある下水汚泥集約処理が大都市を中心に実施されはじめている^{6)~9)}。効率的で安定した処理と維持管理が行えること、資源活用が促進されること、施設建設費、運転管理費の軽減が図れることなどが、下水汚泥処理を集約化し、一括処理することのメリットである¹⁰⁾。しかし、下水汚泥を集約化処理するには汚泥輸送が必要であり、車両や送泥管による輸送ネットワークを構築する必要がある。さらに、受泥側の

処理場における下水汚泥処理施設の能力拡大等が必要となる。

また、建設省は「持続可能な発展」に向けた「次世代都市整備事業」を創設し、エネルギー・資源の効率的な活用などを行う「新しい都市インフラ」の整備の促進による、環境負荷の少ない都市の整備を支援している。この中で、下水の持つ未利用エネルギーを回収し、活用することが期待されている¹¹⁾。

一方、人々の様々な活動の局面において発生する環境負荷を総合的に評価し、その低減を図ることが必要となっている。土木建設業においても LCA の考え方を適用して、ライフサイクルを通しての環境負荷を定量すること、および、適切な工法の選定、リサイクル資材の使用等によって環境負荷を低減することが重要視され始めている¹²⁾。汚泥集約処理の検討においても、従来の経済性のみではなく環境負荷も考慮していく必要がある。

花木らは¹³⁾ある集約条件、集約方法について、集約処理が個別処理よりもライフサイクルでの CO₂ 排

出量が少なくなることを指摘している。しかし、汚泥の集約条件、集約方法によりその経済性と環境負荷は異なる。そこで、環境負荷も考慮した汚泥集約処理を実施していくために、集約条件と環境負荷の少ない集約方法の関係について検討する必要がある。また、汚泥の集約により汚泥再資源化やエネルギー回収などの汚泥リサイクルが容易になるため、多くの自治体では集約処理とあわせてリサイクルを実施している。

そこで、まず汚泥集約方法毎の環境負荷量を定量化し、集約条件と環境負荷量との関係を明確にする。次に、受泥側処理場において下水汚泥からのエネルギー回収・活用を併せて実施した場合の下水汚泥処理システム全体での環境負荷量を、様々な集約条件において定量化する。そして、集約の条件、方法と環境負荷量との関係を明確にし、下水汚泥処理システム全体の環境負荷低減に貢献できる集約方法について検討を行う。

2. 汚泥を集約処理する下水汚泥処理システムの環境負荷

(1) 汚泥集約処理と環境負荷

下水汚泥を集約化して処理する場合、汚泥を送る送泥側処理場では生汚泥を輸送汚泥形態まで処理するのに必要な施設のみでよい（例；生汚泥で輸送する場合は全下水汚泥処理施設が不要、濃縮汚泥で輸送する場合は濃縮施設のみ）。反対に送泥された下水汚泥を一括して処理する受泥側処理場では、集約以降のプロセスを輸送された下水汚泥量に適した規模に拡大する必要がある。したがって、この施設建設段階の環境負荷と運用段階のエネルギー資源消費に伴う環境負荷を評価する必要がある。また、送泥側処理場では送泥以降の処理をしなくてすむため、不要となる処理プロセスでの消費エネルギーも評価する。

そこで、評価に用いる下水汚泥処理施設の建設時負荷量と運用時負荷量および未利用エネルギーの回収可能量を設定する。

環境負荷としてはエネルギー消費量とCO₂排出量を評価する。なお、評価結果にエネルギー消費量とCO₂排出量で同様の傾向が見られた場合には、CO₂排出量のみを考察とする。ここで用いる環境負荷原単位を表-1、2に示す。

(2) 下水汚泥処理施設の建設・運用時の環境負荷

a) 施設建設時の環境負荷

処理規模 50t-DS/日の場合の建設CO₂より、産業

表-1 エネルギー資源の環境負荷原単位

エネルギー資源	低位発熱量	CO ₂ 排出原単位
電力	2,250 kcal/kWh ⁽⁴⁾	0.1492 kg-C/kWh ⁽⁴⁾
A重油	9,300 kcal/l ⁽⁴⁾	0.7358 kg-C/l ⁽⁷⁾
灯油	8,900 kcal/l ⁽⁴⁾	0.7022 kg-C/l ⁽⁸⁾
消化ガス	5,500 kcal/Nm ³ ⁽⁵⁾	0.5357 kg-C/Nm ³ ⁽⁹⁾

表-2 産業連関分析による環境負荷原単位⁽²⁰⁾

産業部門	エネルギー消費	CO ₂ 排出
公共工事	1.86×10 ⁹ kcal/百万円	1.54t-C/百万円
建設用金属製品	1.37×10 ⁹ kcal/百万円	0.98t-C/百万円
運搬機械	1.05×10 ⁹ kcal/百万円	0.78t-C/百万円
重電機器	1.25×10 ⁹ kcal/百万円	0.98t-C/百万円

表-3 下水汚泥処理施設建設時・運用時環境負荷量

建設時負荷量	建設CO ₂ (t-C/年)	建設エネルギー (Gcal/年)
重力濃縮	30	230
機械濃縮	80	560
消化	280	1,900
ベルトプレス脱水	77	520
焼却	324	2,200
運用時負荷量	運用CO ₂ (kg-C/m ³)	運用エネルギー (kcal/m ³)
重力濃縮	0.00331	50
機械濃縮	0.133	2,000
消化	1.39	15,300
ベルトプレス脱水	0.122	1,850
焼却	1.01	13,800

連関分析による環境負荷原単位、施設耐用年数を用いて耐用年数を考慮した年間建設負荷量を算出した^{(13),(20),(21)}。

b) 施設運用時の環境負荷

施設運用時の環境負荷は、筆者らが既往研究⁽²²⁾にて算出した結果を用いる。なお、下水汚泥自体から発生する環境負荷量（焼却時のCO₂排出量等）については評価しない。

c) スケールメリットと環境負荷

施設建設時・運用時の環境負荷量を表-3に示す。この値を基に、評価する規模の汚泥処理施設の建設時及び運用時の環境負荷を、施設のスケールメリットを考慮して設定した。処理規模が2倍になった場合の単位処理汚泥量当たりのエネルギー消費量の削減率として次の値を用いる。

- ・建設時 20%⁽²⁰⁾
- ・運用時 10%⁽²³⁾

(3) 下水汚泥からのエネルギー回収と活用

対象とするエネルギーは、受泥側処理施設において広く導入されている嫌気性消化による汚泥消化ガス回収と、汚泥焼却時の焼却廃熱回収とする。

a) 下水汚泥消化ガスの回収と発電活用

下水汚泥処理過程で発生する消化ガスは多量のメタンを含み、有用なエネルギー源であるため、補助

燃料や発電用燃料に用いられている。本論文では、ガスエンジンによる発電を対象として評価を行う。

ガスエンジン発電は消化ガスを燃料とするガスエンジンを用いて発電する方法であり、現在わが国では 17ヶ所の処理場で消化ガス発電が行われている²⁴⁾。ガスエンジン発電の単位消化ガス当たりの発電出力は稼働実績等より 2.0kWh/Nm³とする²⁴⁾⁻²⁶⁾。

消化ガスを用いたガスエンジン発電の場合、発電時の廃熱を熱交換し(活用可能熱量：投入熱量の 44%²⁵⁾)、消化槽加温等の熱活用を行うことができる²⁵⁾⁻²⁷⁾。そこで、ガスエンジン発電の廃熱を消化槽の加温に用いることとする。

消化ガス活用における設定条件を表-4に、ガスエンジン発電のマテリアルフローを図-1に示す。

b) 汚泥焼却廃熱の活用

焼却炉で発生する高温の余剰廃熱を活用して廃熱タービンにより熱回収し、蒸気発電及び余熱活用することが行われている²⁸⁾。そこで、焼却廃熱を廃熱タービンにより回収し、廃熱発電及び余熱により消化槽加温を行う場合を対象として評価を行う。廃熱活用における設定条件を表-4に、汚泥焼却廃熱活用のマテリアルフローを図-2に示す。

焼却廃熱量は、下水汚泥の持つエネルギー量を 3,500kcal/kg-DS²⁹⁾として、エネルギー収支より算出すると 78.6Gcal/日であった。廃熱タービンの発電効率を 5%²⁸⁾として算出した発電原単位は 58.1 kWh/Gcal となる。

3. 下水汚泥集約の環境負荷

(1) 汚泥の集約方法

通常下水汚泥集約方法は、輸送の経済性の面から選択される¹⁰⁾。タンクローリーは比較的規模が小さい処理場の集約用に用いられ、トラックは液状汚泥に比べ容量が大幅に小さい脱水ケーキを集約するため、より多量な汚泥の集約に適している。また、液状汚泥の管路による輸送も考えられている。そこで、評価対象とする下水汚泥集約方法を表-5に示すものとする。なお、実際に汚泥の管路輸送を導入する際には、管内での硫化水素発生抑制、送泥停止時対策、汚泥中のしきによる送泥ポンプの目詰まりへの対応、送泥管路の洗浄等を併せて検討する必要がある。

(2) 下水汚泥管路輸送の環境負荷

汚泥輸送用管路建設時の環境負荷として、輸送管路の製造、布設工事(開削工法)とポンプ場の製造、施工を評価対象とする。運用時の環境負荷としては、

表-4 未利用エネルギーの活用における設定条件

活用方法	設定条件
消化ガス	①ガスエンジンの発電原単位：2.0kWh/Nm ³ ②ガスエンジンからの廃熱により消化槽を加温 ③全消化ガスを発電に使用
廃熱	①廃熱タービンの電力への変換効率：回収熱の5% ②消化槽加温を廃熱により行う

表-5 下水汚泥集約方法と汚泥状態

集約方法	下水汚泥の状態
管路輸送	生汚泥、濃縮汚泥
車両輸送(タンクローリー)	濃縮汚泥
車両輸送(トラック)	脱水ケーキ

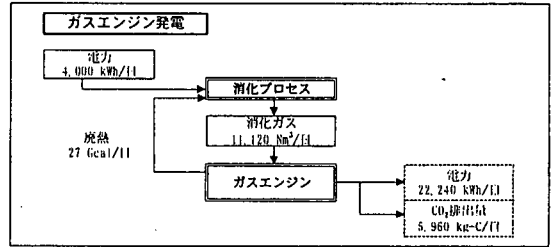


図-1 ガスエンジン発電のマテリアルフロー

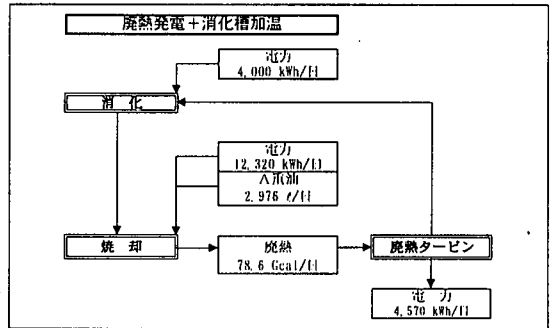


図-2 汚泥焼却廃熱活用のマテリアルフロー

ポンプ場の運転に伴う電気等のエネルギー消費を対象とする。

建設時の環境負荷は、下水汚泥処理総合計画策定マニュアル³⁰⁾における建設費を基に費用関数を算出し、この関数と産業連関分析により求められた土木工事に関する環境負荷原単位より環境負荷量の関数式を求め、この関数式により建設時の環境負荷量を算出する。

a) 管路建設の環境負荷

管は一般的なダグタイプル鉄管とし、開削工法により布設する。管きょ耐用年数は、土木建築物の耐用年数として示されている 50 年を用いる。管きょ径毎の送泥管路建設費³⁰⁾より、土木工事費と管きょ製造費に分け費用関数を算出し、ここから環境負荷量関数を求める。

表-6 費用関数と環境負荷量関数の一覧

	費用関数	産業部門	環境負荷関数
管路建設			
土木工事	$C_{kc} = 0.10 \times D^2 + 6.6 \times D + 4,000$	公共事業	$L_{kc} = 0.000002 \times D^2 + 0.0008 \times D + 0.55$
管路製造	$C_{kp} = 0.032 \times D^2 + 36 \times D + 27,000$	建設用金属製品	$L_{kc} = 0.0001 \times D^2 + 0.063 \times D + 45$
	D :公称管径(mm)		L_{ec} :エネルギー消費量(Gcal/m) L_{ec} :CO ₂ 排出量(kg-C/m) D :公称管径(mm)
ポンプ場建設			
土木建築	$C_{pc} = 70 \times Q^{0.24}$	公共事業	$L_{pec} = 1,300 \times Q^{0.21}$
機械設備	$C_{pm} = 42 \times Q^{0.29}$	運搬機械	$L_{pem} = 440 \times Q^{0.29}$
電気設備	$C_{pe} = 60 \times Q^{0.42}$	重電機器	$L_{pee} = 750 \times Q^{0.42}$
	C_{pc} :土木建築費(百万円) C_{pm} :機械設備費(百万円) C_{pe} :電気設備費(百万円) Q :送泥量(m ³ /分)		L_{pec} :土木建築のエネルギー消費量(Gcal) L_{pem} :機械設備のエネルギー消費量(Gcal) L_{pee} :電気設備のエネルギー消費量(Gcal) L_{pec} :土木建築のCO ₂ 排出量(t-C) L_{pem} :機械設備のCO ₂ 排出量(t-C) L_{pee} :電気設備のCO ₂ 排出量(t-C) Q :送泥量(m ³ /分)
ポンプ場運用			
	送泥量と電動機出力の関係より算出		$L_{mic} = 370 \times Q^{0.30}$ $L_{mic} = 0.025 \times Q^{0.30}$
			L_{mic} :エネルギー消費量(kcal/m ³) L_{mic} :CO ₂ 排出量(kg-C/m ³) Q :送泥量(m ³ /分)

b) ポンプ場建設の環境負荷

送泥ポンプ場の建設箇所は、最低、送泥側処理場に1箇所とする。管内圧力が負圧となる場合には、管路途途中に中継ポンプ場を設け、管内圧力を一旦開放した後に送泥する事とする。

送泥量と全揚程の関係は次のものを用いる。

$0 \leq Q(\text{m}^3/\text{min}) < 1.2$	全揚程 $H \approx 20 \times 2 = 40 \text{ m}$
$1.2 \leq Q(\text{m}^3/\text{min}) < 2.5$	全揚程 $H \approx 30 \times 2 = 60 \text{ m}$
$2.5 \leq Q(\text{m}^3/\text{min}) < 8.0$	全揚程 $H \approx 50 \times 2 = 100 \text{ m}$

送泥ポンプは2台直列で設置し、設置台数は予備系列を含めて2系列、合計4台とする。

ポンプ場の各施設の耐用年数は次の値³⁰⁾とする。

土木建築	: 50年
機械	: 15年
電気	: 10年

送泥量毎のポンプ場建設時の土木建築、機械設備、電気設備の建設費³⁰⁾より、費用関数と環境負荷量関数を求める。

c) ポンプ運用の環境負荷

送泥量と定格電力の関係³⁰⁾より、環境負荷量関数を求める。

d) 汚泥管路輸送の環境負荷量関数

以上の汚泥管路輸送施設の建設および運用時の環境負荷量関数を表-6に示す。なお、建設時負荷量は耐用年数を考慮した値である。

(3) 下水汚泥車両輸送の環境負荷

タンクローリーとトラックの2種類の車両を評価対象とする。各車両の製造時環境負荷と運用時の燃料消費に伴う環境負荷を評価する。

a) 車両製造の環境負荷

車両価格と産業連関分析による車両の環境負荷原単位より車両製造の環境負荷量を求める。車両の耐用年数は10年とし、10年ごとに新たに製造するものとした。

既往文献³¹⁾における車両製造時のエネルギー原単位は次の値である。

1985年	12,720 (Mcal/百万円)
1990年	10,800 (Mcal/百万円)

1990年では技術力の向上に伴い1985年に比べてエネルギー原単位が減少している。この技術力の向上が1990年以降も同様に継続していると仮定し、1995年の車両製造時のエネルギー原単位を9,000Mcal/百万円と設定する。

車両の製造時CO₂排出量は0.78t-C/百万円(運搬機械²⁰⁾)とする。

輸送車両価格を参考資料³²⁾より設定し、算出した車両製造時環境負荷量を表-7に示す。

b) 車両輸送の環境負荷

輸送車両の燃費を基に、エネルギー消費量、CO₂排出量を算出する。なお、濃縮汚泥輸送に用いるタンクローリーと脱水ケーキ輸送に用いるトラックの同一積載可能量での燃費は同じとする。

積載可能量	燃費 ¹⁶⁾
10t	3.5 km/l
20t	2.2 km/l

(4) 集約方法と環境負荷

集約条件を変えて各集約方法の単位送泥量当たりの環境負荷量を比較する。

a) 送泥規模と環境負荷

送泥距離は地域により数km~数十kmまで存在するため³³⁾⁻³⁵⁾ここでは10kmとし、送泥管きよ径は損失水頭を考慮して最も管路輸送施設建設費(管路布設費、ポンプ場建設費)が少なくなるように計画した場合の、送泥規模(100~10,000 m³/日)と単位生汚泥当たりのCO₂排出量の関係を図-3に示す。

どの集約方法も送泥規模が大きくなるに従いCO₂排出量は減少するが、送泥規模3,000m³/日以上ではほとんど一定値となる。

表-7 車両製造時環境負荷量

積載可能量		10t	20t
タンクローリー	車両価格	17百万円	34百万円
	製造エネルギー	153 Gcal	306 Gcal
	製造CO ₂	13.3 t-C	26.5 t-C
トラック	車両価格	10百万円	20百万円
	製造エネルギー	90 Gcal	180 Gcal
	製造CO ₂	7.8 t-C	15.6 t-C

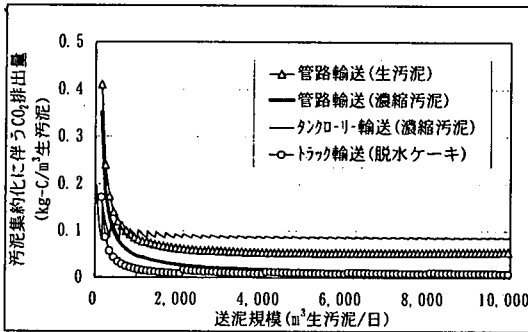


図-3 送泥規模と汚泥集約化に伴うCO₂排出量の関係

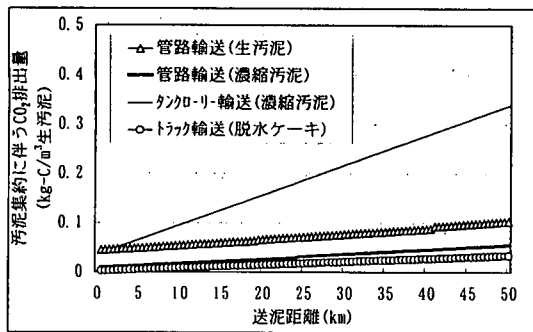


図-4 送泥距離と汚泥集約化に伴うCO₂排出量の関係

最も輸送量が少ない脱水ケーキのトラック輸送が、どの送泥規模でも最もCO₂排出量が少なく、次にCO₂排出量が少ないのは濃縮汚泥の管路輸送である。

しかし、管路輸送では、送泥規模1,000m³/日以下では送泥規模が小さくなるにつれCO₂排出量が急激に多くなる傾向が見られ、送泥規模500m³/日以下では濃縮汚泥のタンクローリー輸送よりも濃縮汚泥の管路輸送の方がCO₂排出量は多くなっている。これは、送泥規模に関係なく管路の布設によりほぼ同程度の建設時CO₂排出量が発生するため、送泥規模が小さい場合には単位生汚泥量当たりの管路建設時CO₂排出量が多くなるためである。

また、タンクローリー輸送において、送泥規模が小さい時に結果に振幅が表れているが、これは車両の積載効率によるものである。送泥規模100m³/日(車両台数1台)では積載効率が悪くCO₂排出量が多いが、200m³/日(車両台数1台)では100m³/日に比べ積載効率がよくなり、CO₂排出量が減少している。しかし、300m³/日の送泥量では車両台数が2台必要と

なるため、200m³/日に比べ積載効率が悪くなりCO₂排出量が増加する。このような車両台数の増加に伴う積載効率の変化が連続して生じている。

b) 送泥距離と環境負荷

送泥距離(0.5~50 km)と単位生汚泥当たりのCO₂排出量の関係を図-4に示す。なお、集約が行われている送泥規模は、地方都市や集落での100m³/日程度から、東京、大阪等の大都市域での10,000m³/日以上まで存在する³⁶⁾ため、ここでは、その中間的な送泥規模である4,000m³/日とした。また、送泥管の管きょ径は送泥規模と環境負荷の評価と同様に設定した。

どの方式においても送泥距離にほぼ比例して単位輸送量当たりのCO₂排出量は増加している。距離によるCO₂排出量の増加割合が最も多い集約方法は濃縮汚泥タンクローリー輸送であり、増加割合が最も少ない脱水ケーキのトラック輸送と比較すると約10倍である。

4. 下水汚泥エネルギー回収を考慮した汚泥集約化処理による環境負荷評価

下水汚泥集約処理に併せて汚泥からのエネルギー回収を実施した場合の下水汚泥処理システム全体での環境負荷量を定量化し、集約条件、方法と環境負荷量の関係を検討する。

(1) 評価方法

a) 前提条件

汚泥集約処理では、集約した汚泥を処理できるだけの規模を持った汚泥処理施設が必要となる。そのため、一般的には既存の汚泥処理施設の処理規模を拡大し対応している³⁷⁾。しかし、大都市では建物が高密度に集積しており、既存の汚泥処理施設の周りに処理規模拡大に必要な用地を得ることが困難である。そのため、沿岸域の埋め立て地等に新規に大規模汚泥処理施設が建設されている^{33),34),39)}。また、中小都市においてもより広域的な集約処理が行われてきており、集約処理を実施している地域の中心部に新規に大規模汚泥処理施設を建設する事例が見られる⁴⁰⁾。さらに、汚泥最終処分量の減容化に向け、焼却・溶融等の高度な処理や汚泥リサイクルの必要性が高まっており、これらの実施にはより広い用地が必要となる。これより、今後の汚泥集約処理においては、受泥側処理施設として汚泥リサイクルを含めた新規の大規模汚泥処理施設が建設されるものと考えられるため、本論文においても受泥側処理場を新規に建設する事とする。

集約処理実施地域では2処理場の集約処理が最も多く、国内の集約処理実施地域の70%以上を占める³⁶⁾。しかし、川崎市⁴¹⁾(集約処理を2処理場から4処理場へ拡大)のように今後はより広域的な集約処理が行われると考えられるため、集約処理場数は最も事例の多い2処理場の倍の集約処理場数と考え、4処理場とする。なお、集約地域内の処理場は、実際には各々異なった処理規模であるが、同一地域内の処理場において処理規模に何十倍もの差が生じていることは少なく、ほぼ同程度の処理規模である。これより、集約対象の処理場は全て同規模とした。

受泥側処理場までの距離は、集約地域内において大きく異なり³³⁾⁻³⁵⁾、近接している処理場もあれば遠距離の送泥を必要とする処理場もあると考えられる。そこで、集約地域内の処理場間距離を1~4倍と単純化し、処理場毎に設定する事とした。

以上の条件を基に図-5に示すモデル地域を設定した。

処理場規模、処理場間単位距離を変化させ、汚泥集約処理に併せて下水汚泥からのエネルギー回収・活用を実施した場合の環境負荷量を定量化し、汚泥集約化処理による処理の効率化と環境負荷量の削減効果を評価する。なお、下水汚泥からのエネルギー回収・活用は、集約化処理を行うことで新たに建設する受泥側の汚泥処理施設において実施すると考える。

b) 評価範囲

評価範囲を図-6に示す。集約処理の実施に伴う環境負荷には以下のものがある。

- ・新規の受泥側処理場建設時負荷
- ・管路輸送での管きょ、ポンプ場等の集約施設建設時負荷
- ・車両輸送での輸送車両製造時負荷
- ・送泥ポンプ、輸送車両の運用時負荷
- ・汚泥集約施設、輸送車両の更新時負荷
- ・各処理場での汚泥処理における負荷
- ・下水汚泥エネルギー回収に必要な汚泥消化槽の建設時負荷

c) 評価の視点

汚泥集約処理を実施することで、集約施設建設、受泥側処理施設建設に伴うエネルギー消費量、CO₂排出量が発生するが、その後処理の効率化、未利用エネルギーの活用により現状の処理よりも運用時エネルギー消費量、CO₂排出量は削減できると考えられる。しかし、それは各集約方法において違った傾向を示すはずである。そこで、各評価ケースにおいて、集約方法毎の年間エネルギー消費量、CO₂排出量を算出し、経過年数と累積エネルギー消費、CO₂

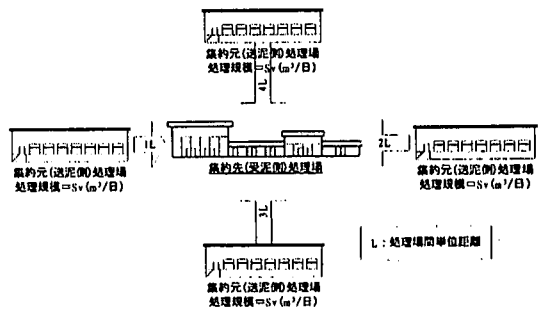


図-5 モデル地域イメージ図

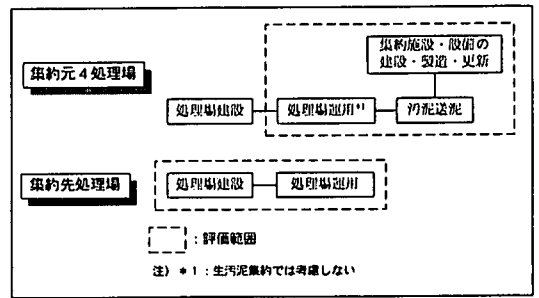


図-6 評価範囲

排出量の関係を求める。さらに、各集約方法と現状のままの処理方法との比較を行い、各集約方法の建設時・運用時エネルギー消費量、CO₂排出量の傾向を把握する。

集約条件として処理場規模、処理場間距離の設定を行う。評価対象集約条件として、大規模汚泥処理施設が近接して存在する大都市域での集約(条件I)、中規模の処理場が分散して存在する地方都市域での集約(条件II)、分散型小規模集落地域での集約(条件III)とし、次の3条件を設定する。

	処理場規模 Sv (m ³ /日)	処理場間単位距離 L (km)
条件I	8,000	1
条件II	4,000	10
条件III	100	20

(2) 評価結果

経過年数と累積負荷量の関係を図-7~9に示す。大規模汚泥処理施設が近接して存在する大都市域では集約処理実施時の建設負荷量の影響は小さく、どの集約方法の累加CO₂排出量も経過年数3年程度で集約処理を実施しなかった場合(以下現状)の累加CO₂排出量を下回る。生汚泥管路輸送、濃縮汚泥管路輸送、濃縮汚泥タンクローリー輸送は建設時、運用時共に差は小さく、20年間の累加CO₂排出量はそれぞれ現状の1/4程度となっているが、脱水ケータトラック輸送の運用時CO₂排出量は他の集約方法に比べ多く、現状に比べあまりCO₂排出量を削減

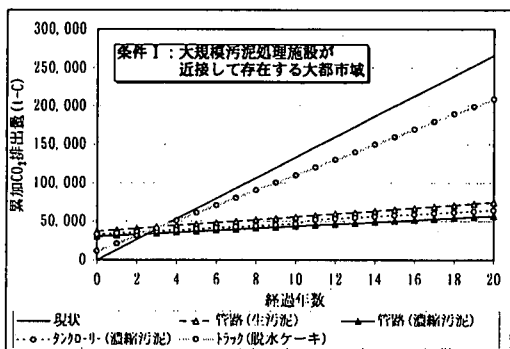


図-7 経過年数と累加 CO₂ 排出量の関係(条件Ⅰ)

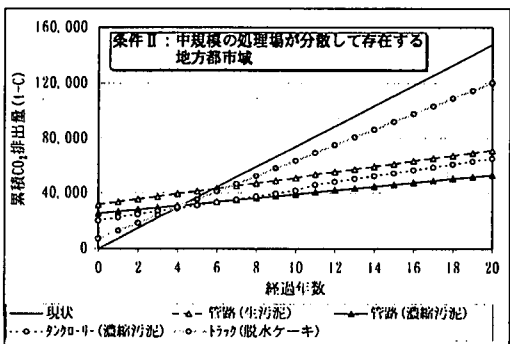


図-8 経過年数と累加 CO₂ 排出量の関係(条件Ⅱ)

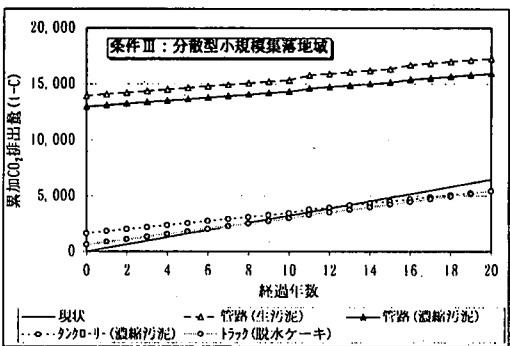


図-9 経過年数と累加 CO₂ 排出量の関係(条件Ⅲ)

できない。

中規模の処理場が分散して存在する地方都市域では、現状の累加 CO₂ 排出量を下回るまでの年数は経過年数 4~6 年程度である。生汚泥管路輸送、濃縮汚泥管路輸送、濃縮汚泥タンクローリー輸送は現状と比べ 20 年間の累加 CO₂ 排出量は少なく 1/3~1/2 程度である。また、脱水ケーキトラック輸送は条件Ⅰとほぼ同様の傾向を示した。

分散型小規模集落地域では生汚泥、濃縮汚泥の管路輸送は現状の累加 CO₂ 排出量を下回っておらず、集約処理実施により CO₂ 排出量がかえって増加する。これは、施設間を結ぶ送泥管建設に伴う CO₂ 排出量が非常に多いためである。また、他の方式も現状値を下回るまでの年数は 7 年(脱水ケーキトラック輸

送)、13 年(濃縮汚泥タンクローリー輸送)となり、条件Ⅰ、Ⅱと比べ年数が長い。

これより、現状における CO₂ 排出量と各集約方法における CO₂ 排出量を比較すると、どの集約条件においても現状を下回る集約方法は存在する。しかし、現状の累加 CO₂ 排出量を下回るまでには最低 3 年、集約条件によっては 10 年以上要する場合や、現状を下回らない集約方式もあることが明らかになった。また、20 年間の累積 CO₂ 排出量を比較すると、生汚泥・濃縮汚泥の管路輸送では現状の約 1/4~3 倍、濃縮汚泥タンクローリー輸送では約 1/4~4/5、脱水ケーキトラック輸送ではどの条件でも 4/5 程度となる。汚泥を集約処理することで、一部の管路輸送を除いて 20 年間のエネルギー消費量、CO₂ 排出量を現状に比べ削減できる。さらに、集約処理場の規模が大きく近接しているほど、早期に現状に比べ CO₂ 排出量を削減でき、さらに累加 CO₂ 排出量の削減率も大きいことが明らかになった。

5. 下水汚泥エネルギー回収を考慮した最も環境負荷の少ない汚泥集約方法の検討

前章において集約条件、集約方法により現状と比較した累加 CO₂ 排出量の削減率は異なることが明らかとなった。そこで、集約条件を更に細分化し、各汚泥集約条件における長期的な累加エネルギー消費量、CO₂ 排出量を算出し、ある汚泥集約条件における最もエネルギー消費量、CO₂ 排出量の少ない集約方法を検討する。

(1) 集約条件と環境負荷量との関係

前章で設定した集約条件の範囲内(処理場規模 100~8,000m³/日、処理場間単位距離 1~20km)で各集約条件を細分化し、処理場規模又は処理場間単位距離による、下水汚泥処理システム全体の単位生汚泥処理当たりのエネルギー消費量、CO₂ 排出量の変化について検討する。ここで、土木構造物の耐用年数として 45 年²⁰⁾という値が示されているが、下水処理施設ではこれ以前から更新・補修などを必要とするため、本論文では評価期間を約 1/2 の 20 年と設定した。

a) 処理場規模との関係

各集約方式における処理場規模と単位生汚泥処理当たりの CO₂ 排出量の変化を、処理場間単位距離 10km の場合を例に図-10 に示す。

どの集約方式も処理場規模が大きくなるにつれ、単位生汚泥量当たりの CO₂ 排出量は減少している。

汚泥状態で比較すると、濃縮汚泥の管路または車

両輸送が最も単位処理当たりのCO₂排出量が少なく(現状より24~75%削減), 次いで生污泥集約(現状より-74~61%削減)であり, 脱水ケーキ集約は最もCO₂排出量が多い(現状より17~20%削減)。これは, 濃縮汚泥, 生污泥集約では受泥側処理場において嫌気性消化による消化ガスの回収が可能となるため, これによるCO₂排出量の削減が大きく影響している。

輸送方法で見ると, 車両輸送では全処理場規模において現状よりもCO₂排出量は減少しているが, 管路輸送では処理場規模が500m³/日未満では現状よりもCO₂排出量が増加している。これは, 処理場規模が小さいため, 処理規模が大きい場合に比べ10kmの管路布設とポンプ場建設時のCO₂排出量が大きく影響したためである(図-11)。

また, 濃縮汚泥集約では, 処理場規模2,000m³/日程度で逆転が生じており, それ以下では車両輸送, 以上では管路輸送の方がCO₂排出量は少なくなっている。

b) 処理場間距離との関係

各集約方式における処理場規模と単位生污泥処理当たりのCO₂排出量の変化を, 処理場規模4,000m³の場合を例に図-12に示す。

処理場間単位距離が遠くなるに従い, 全集約方法においてCO₂排出量は増加しているが, 脱水ケーキのトラック輸送での増加量は他の集約方法に比べ少なく, どの処理場間距離でもほぼ1.0kg-C/m³程度(現状より約20%削減)である。また, 処理場規模4,000m³/日ではどの処理場間距離においても濃縮汚泥管路輸送が最もCO₂排出量は少なく(現状より65~75%削減), 次いで濃縮汚泥車両輸送(現状より42~72%削減)であり, 処理場間距離による最もCO₂排出量の少ない集約方法の逆転は生じていない。

c) 総合評価

受泥側処理場での未利用エネルギーの活用を考慮した場合, 受泥側処理場において汚泥消化と消化ガスの活用が行える生污泥集約, 濃縮汚泥集約が, 脱水ケーキ集約に比べ全てのケースにおいてエネルギー消費量, CO₂排出量の面で優れている。生污泥集約と濃縮汚泥集約を比べた場合, 輸送量の違いにより濃縮汚泥集約の方がエネルギー消費量, CO₂排出量は少なく, 最も優れた集約汚泥状態は濃縮汚泥であることが明らかになった。

また, 濃縮汚泥について管路輸送と車両輸送を比較した場合, 処理規模2,000m³/日程度で逆転が生じており, 処理場規模が大きければ管路輸送, 小さければ車両輸送の方が環境負荷量は少なくなっていることが明らかになった。

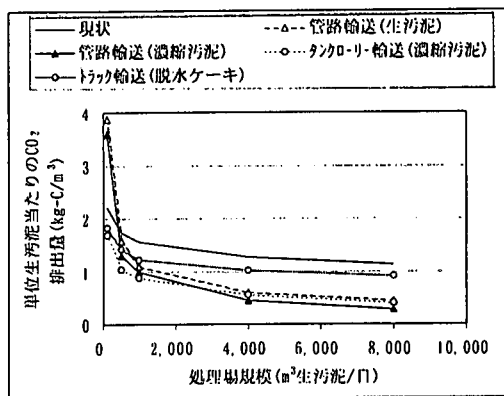


図-10 処理場規模とCO₂排出量の関係(L=10km)

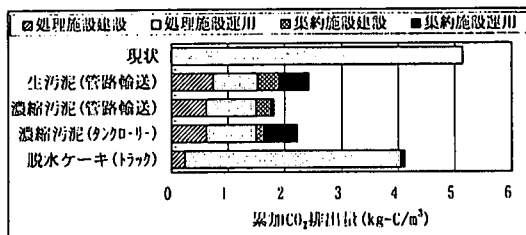


図-11(1) 各集約方法のCO₂排出量の内訳 (4,000m³/日, 10km)

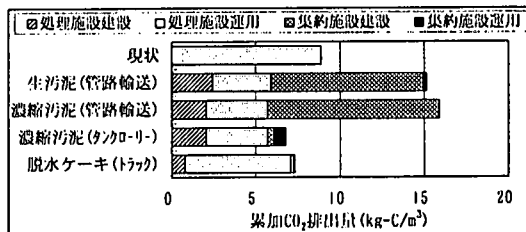


図-11(2) 各集約方法のCO₂排出量の内訳 (100m³/日, 10km)

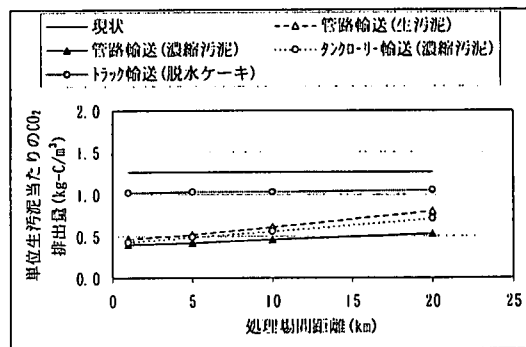


図-12 処理場間単位距離とCO₂排出量の関係 (4,000m³/日)

(2) 最も環境負荷の少ない集約方法の評価

a) 評価ケース

細分化した処理場規模, 処理場間単位距離の組み合わせにより, 評価ケースを表-8に示す20ケー

表-8 評価ケース一覧

処理場規模 Sv	処理場間単位距離 L			
	1 km	5 km	10 km	20 km
8,000 m ³ /日	Case 1-①	Case 2-①	Case 3-①	Case 4-①
4,000 m ³ /日	Case 1-②	Case 2-②	Case 3-②	Case 4-②
1,000 m ³ /日	Case 1-③	Case 2-③	Case 3-③	Case 4-③
500 m ³ /日	Case 1-④	Case 2-④	Case 3-④	Case 4-④
100 m ³ /日	Case 1-⑤	Case 2-⑤	Case 3-⑤	Case 4-⑤

表-9 集約条件毎の20年間での累加環境負荷量の相対値(現状=100)

<エネルギー消費量>

処理場規模 Sv (m ³ /日)	処理場間単位距離 L							
	1 km		5 km		10 km		20 km	
	管(濃)	タンク	管(濃)	タンク	管(濃)	タンク	管(濃)	タンク
8000	17	18	17	23	18	29	22	41
4000	26	28	28	32	37	38	35	54
1000	45	44	50	47	58	52	75	60
500	53	50	61	53	70	57	93	65
100	83	65	113	68	150	72	224	80

<CO₂排出量>

処理場規模 Sv (m ³ /日)	処理場間単位距離 L							
	1 km		5 km		10 km		20 km	
	管(濃)	タンク	管(濃)	タンク	管(濃)	タンク	管(濃)	タンク
8000	21	24	22	29	24	36	28	49
4000	31	33	33	38	36	44	41	56
1000	49	48	54	52	63	57	82	66
500	55	52	63	55	75	59	99	68
100	88	69	121	72	162	76	245	84

管(濃):濃縮汚泥管路輸送 タンク:濃縮汚泥タンクローリー輸送

ス設定する。なお、これまでの評価結果より、濃縮汚泥の集約が最も優れていることが明らかとなったため、ここでは濃縮汚泥管路輸送、濃縮汚泥タンクローリー輸送の2集約方法のみの評価とする。

b) 評価指標

長期的に最も効果的な集約方式として、各評価ケースにおいて20年間の累加エネルギー消費量、CO₂排出量が最も少ない集約方式について検討する。

c) 20年の累加エネルギー消費量、CO₂排出量が最も少ない集約方法

各ケースの20年間の累加エネルギー消費量、CO₂排出量を各ケースの現状における累加エネルギー消費量、CO₂排出量を100とした場合の相対値として表-9に示す。相対値が小さいほど現状に比べ環境負荷が少ない。

相対値の範囲はエネルギー消費量が17~224、CO₂排出量が21~245であり、どちらも処理場規模が大きく、処理場間単位距離に近いほど小さい値となる。特に処理場間単位距離よりも処理場規模に大きく影響している。

各集約条件における相対値より、20年間の累加エネルギー消費量、CO₂排出量が少ない(相対値が最も小さい)集約方法の分布状況を図-13に示す。

20年間の累加エネルギー消費量、CO₂排出量が少ない集約方法は処理場規模により分けられ、境界となる処理場規模の範囲はエネルギー消費量、CO₂排出量共2,000~3,000m³/日である。また、CO₂排出

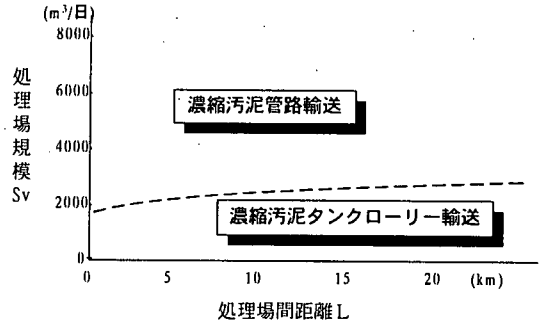


図-13(1) 最もCO₂排出量の少ない集約方法の分布状況

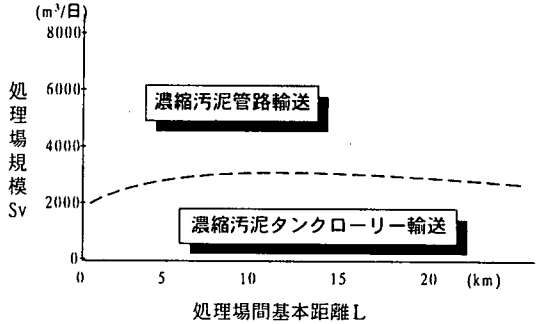


図-13(2) 最もエネルギー消費量の少ない集約方法の分布状況

量では処理場間単位距離の延長により少しずつ境界となる処理場規模が拡大している。

現状の累加CO₂排出量と比較したCO₂削減率は、濃縮汚泥管路輸送が79%削減~145%増加、濃縮汚泥タンクローリー輸送が76~16%削減である。なお、管路輸送では処理場規模500m³/日以下の場合に現状よりもCO₂排出量が増加している場合がある。これは管路・ポンプ場等の集約施設建設によるものである。

以上より、20年間の累加CO₂排出量で評価した場合、処理場規模が2,000m³/日程度以下の場合には濃縮汚泥タンクローリー輸送が適しており、それ以外では濃縮汚泥管路輸送が適している。しかし、境界は生じているものの処理場間単位距離が1kmの場合や処理場規模1,000m³/日では、濃縮汚泥の管路輸送とタンクローリー輸送のCO₂排出量にはほとんど差は見られない。

6. 結論

下水汚泥処理における省エネルギー施策として、汚泥の集約処理による処理の効率化と未利用エネルギーの回収・活用を対象にエネルギー消費量、CO₂排出量の削減について検討を行った。対象とした集

約方法は、①生汚泥管路輸送、②濃縮汚泥管路輸送、③濃縮汚泥タンクローリー輸送、④脱水ケーキトラック輸送である。

まず、管路輸送施設の環境負荷量関数と車両輸送のエネルギー消費量、CO₂排出量を求め、送泥規模、送泥距離と汚泥集約に伴うエネルギー消費量、CO₂排出量との関係を検討した。これより、脱水ケーキのトラック輸送が、輸送量が最も少ないためどの送泥規模、送泥距離においても最も単位生汚泥当たりのエネルギー消費量、CO₂排出量が少ないこと、次にエネルギー消費量、CO₂排出量が少ない方式は送泥規模 500m³/日以上であれば濃縮汚泥管路輸送であり、500m³/日未満では濃縮汚泥タンクローリー輸送であることを明らかにした。

次に、下水処理施設の環境負荷低減策として、汚泥集約処理に併せて未利用エネルギーの活用を行った場合の、集約条件と集約方法毎のエネルギー消費量、CO₂排出量との関係について検討した。これより、最もエネルギー消費量、CO₂排出量の少ない集約方法は、経済性を重視した一般的な送泥方法の分布¹³⁾(小規模・近距離：液状汚泥運搬、大規模・近距離：送泥管輸送、中規模・遠距離：脱水汚泥運搬)とは異なり、濃縮汚泥のタンクローリー輸送と管路輸送の2集約方法の分布となった。これは未利用エネルギーの活用を考えた場合、一般的に輸送距離が遠い場合に効果的とされている脱水ケーキトラック輸送では、汚泥消化ガスの活用が行えないため他の方法に比べエネルギー消費量、CO₂排出量が多くなるためである。

また、処理規模により最もエネルギー消費量、CO₂排出量の少ない集約方法は異なり、処理場規模 2,000m³/日程度以下では濃縮汚泥タンクローリー輸送、それ以上では濃縮汚泥管路輸送となった。

さらに、エネルギー消費量、CO₂排出量の少ない集約方法により、汚泥集約処理と併せて未利用エネルギーの活用を実施することで、集約処理を実施しなかった場合と比較してエネルギー消費量、CO₂排出量を最大で約20%まで低減可能であった。

この様に、今後の汚泥集約処理においては、従来の経済性の評価だけでなく、環境負荷低減化に向け、本論文の様な未利用エネルギーの活用も考慮したトータルな汚泥集約方法の評価を行い、最適な汚泥集約方法を選定する必要がある。

謝辞：最後に、本研究の遂行に当たり、種々の面からお世話になった方々に心からお礼を申し上げます。また貴重な資料を提供いただいた方にも厚くお礼申し上げます。なお、データ収集・処理に当たっては

卒研生の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木下勲、佐々木稔：下水処理場におけるエネルギーの効率的利用に関する調査、日本下水道事業団技術開発部報、pp.238-242、1995。
- 2) 岡久宏史、福地大二郎：下水処理場におけるエネルギーの効率的利用に関する調査、日本下水道事業団技術開発部報、pp.197-208、1996。
- 3) 江藤隆：下水熱利用の現状と課題—熱利用研究会の成果を踏まえて—、月刊下水道、Vol.16、No.9、pp.5-13、1993。
- 4) 堀江信之：エネルギーの有効利用を下水道で、月刊下水道、Vol.16、No.9、pp.2-4、1993。
- 5) 山根昭：創エネ・リサイクル型の快適なまちづくりに関する調査、下水道新技術研究所年報、pp.54-59、1996。
- 6) 市川泰生：汚泥輸送、処理機能から見たフェイルセイフ名古屋における汚泥集約処理の場合—、下水道協会誌、Vol.30、No.360、pp.7-12、1993。
- 7) 石川好夫、戸澤義久：横浜市の汚泥集約処理システム、月刊下水道、Vol.15、No.15、pp.39-43、1992.12。
- 8) 水野英治：浜松市における下水汚泥の集約処理事業、月刊下水道、Vol.15、No.15、pp.44-47、1992.12。
- 9) 佐藤和明：汚泥集約処理の課題と方向、下水道協会誌、Vol.28、No.326、pp.6-9、1991.5。
- 10) 佐藤和明、関根富明、井上茂治：汚泥集中処理計画調査、下水道新技術研究所年報、pp.54-59、1996。
- 11) 山本直、新美大作：都市インフラ整備の新しいニーズ～次世代都市整備事業～、都市計画、Vol.46、No.5、pp.15-18、1997。
- 12) 地球環境委員会土木建設業環境管理システム研究小委員会第2部会：土木建設業における環境負荷評価(LCA)検討(その1)、第3回地球環境シンポジウム講演集、1995.7。
- 13) 黄龍雨：LCCO₂による汚泥集約処理の評価、下水道協会誌、Vol.33、No.405、pp.88-95、1996.11。
- 14) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課：総合エネルギー資源統計平成7年度版、1996。
- 15) 玉寄長立：消化ガス発電システムによるエネルギーの有効利用について、月刊下水道、Vol.16、No.9、pp.43~48、1993。
- 16) プラスチック処理促進協会：プラスチック製品の使用量増加が地球環境に及ぼす影響評価報告書、1993.3。
- 17) 北九州市：地球温暖化対策地域促進モデル計画策定調査報告書、1992.3。
- 18) 参考文献16)の原単位(kg単位)から、灯油の比率を0.82として算出。
- 19) 参考文献12)より、消化ガスをメタン65%、CO₂35%として算出。
- 20) 井村秀文、銭谷賢治、中嶋芳紀、森下兼年、池田秀昭：下水道システムのライフサイクルアセスメント：LCE及びLC-CO₂による評価、土木学会論文集、No.552/VII-1、pp.75-84、1996。
- 21) 井村秀文：下水道システムのライフサイクルアセスメントに案する研究：LCEを指標としたケーススタディ、環境システム研究、Vol.23、pp.142-149、1995。
- 22) 三浦浩之、中野加都子・和田安彦・藤井 亮：エネルギー自給型の下水処理システムと下水汚泥処理シ

- ステムに関する研究, 土木学会論文集第七部門, 投稿中, 1999.
- 23) 下水道事業団ヒアリング調査, 1997.
 - 24) 平成6年度 下水道統計.
 - 25) 中本至監修: 未利用エネルギー活用の手引き, 下水熱利用促進研究会編, 山海堂, 1994.
 - 26) 小杉聖海: 汚泥資源化工場の運転, 月刊下水道, Vol.16, No.9, pp.33-37, 1993.
 - 27) 権藤清隆: 北九州市の消化ガス発電, 月刊下水道, Vol.16, No.9, pp.38-42, 1993.
 - 28) 水上 啓, 冠城敏之: 汚泥焼却廃熱の回収システムと蒸気発電設備の導入, 第34回下水道研究発表会講演集, pp.959-961, 1997.
 - 29) (社)日本下水道協会文献委員会: 文献レビュー「下水道資源の有効利用」, 下水道協会誌, Vol.33, No.397, pp.76-90, 1996.
 - 30) 日本下水道協会: 下水汚泥処理総合計画策定マニュアル, 建設省都市局下水道部監修, 1991.10.
 - 31) 電力中央研究所報告: 産業連関分析による財: サービス生産時のエネルギー消費量とCO₂排出量, pp.44-55, 1996.5.
 - 32) いすゞ自動車ヒアリング資料.
 - 33) 7)に同じ
 - 34) 水野英治: 浜松市における下水汚泥の集約処理事業, 月刊下水道, Vol.15, No.15, pp.44-47, 1992.
 - 35) 平石光弘: 大阪南エースにおける広域送泥施設の維持管理, 月刊下水道, Vol.15, No.15, pp.28-32, 1992.
 - 36) 地田修一, 三品文雄: 青森市における汚泥の集約処理に関する調査(Ⅱ), 日本下水道事業団技術開発部報, pp.276-300, 1987.
 - 37) 前橋隆介: 恒久的な最終処分を目指して, 下水道協会誌, Vol.28, No.326, pp.15-18, 1991.
 - 38) 高柳枝直: 大阪市における汚泥集中処理計画, 下水道協会誌, Vol.34, No.409, pp.27-31, 1997.
 - 39) 小川健一: より効率的な汚泥の処理処分に向けて—集約処理計画と今後の課題—, 月刊下水道, Vol.20, No.11, pp.79-83, 1997.
 - 40) 小池健彦: 栃木県における流域下水汚泥処理事業, 下水道協会誌, Vol.34, No.409, pp.16-22, 1997.
 - 41) 岡田三郎: 集約処理のメリットを市民サービスに, 下水道協会誌, Vol.28, No.326, pp.10-14, 1991.

(1999. 2. 22 受付)

ENVIRONMENTAL LOADS REDUCTION
IN A SEWAGE SLUDGE TREATMENT SYSTEM COLLECTING SLUDGE
FROM SOME SEWAGE TREATMENT PLANTS WITH ENERGY PRODUCING
FROM THE SLUDGE AND IT'S UTILIZATION

Hiroyuki MIURA, Kazuko NAKANO, Yasuhiko WADA,
Osamu MURAOKA and Ryo FUJII

Recently, sludge treatment systems collecting sludge from some sewage treatment plants is increasing. And we are working on a utilization of energy producing from sludge in sludge treatment systems in Japan. Therefore, we investigated a method of sludge collection and a method of energy producing from the collected sludge in order to reduce energy consumption and carbon dioxide emission effectively in the sludge treatment system. As the result, it become clear that the sludge treatment system could reduce the environmental loads when we collect the thickened sludge and utilize the digester gas produced from the sludge to generate electricity. And, in the sludge treatment system, the thickened sludge is collected by tank lorries in case of the sludge production is less than 2,000 m³/day of the sewage treatment plant and by sludge transportation pipes in case of it's 2,000 m³/day or more.