

熊本県を対象とした 水処理技術導入シナリオの環境効率の評価

EVALUATION OF ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF WATER TREATMENT TECHNOLOGY SCENARIOS IN KUMAMOTO PREFECTURE

村野昭人¹・滝川清²
Akito MURANO, Kiyoshi TAKIGAWA

1正会員 博士(工学) 東洋大学准教授 理工学部都市環境デザイン学科
(〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

2フェロー 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター
(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

To prevent the pollution of enclosed coastal seas, it is necessary not only to purify by on-site technologies but to manage the inflow of water pollutant. In this paper the environmental efficiency is evaluated in scenarios of introducing the water treatment technology system in Kumamoto prefecture.

In the result, in the case of introducing sewage system to the area that population density is 100 (person/km²) or more and a septic tank to other areas, CO₂ emissions are 617kt-CO₂ and 23.5t-CO₂/t-BOD. In the case of introducing sewage system to the area that population density is 350 (person/km²) or more and a septic tank to other areas, CO₂ emissions are 480kt-CO₂ and 18.2t-CO₂/t-BOD. In the case of introducing a septic tank to all areas, CO₂ emissions are 798kt-CO₂ and 30.1t-CO₂/t-BOD.

Key Words : Environmental Efficiency, Water treatment technology, sewage system, septic tank, LCA

1. 研究の背景と目的

近年、有明海を始めとする閉鎖系水域では、環境悪化が進んでいる。その問題を解決するために、海域内の汚濁物質の挙動を解明する取り組み、生物生態数に影響を与える因子を解明する取り組み、生物が環境悪化に与えるメカニズムを解明する取り組みなど、様々な取り組みがなされている。一方で、水域における浄化を推進するだけでなく、水域へ流入する負荷量を分析し、汚濁負荷を適切にマネジメントする取り組みも重要である。閉鎖性水域の環境改善を目指した取り組みの関連を図-1に示す。

平成19年度末の日本における污水处理人口普及率を表-1に示す¹⁾。全国平均では83.7%となっているものの、人口5万人未満の地域では70%未満と低い水準にある。また、主な処理施設である下水道は国土交通省、農業集落排水施設は農林水産省、浄化槽は環境省と、それぞれ管轄が異なっており、各処理施設の特性を活かした総合的な対策が取られているとは言い難い。国および自治体の財政状況が厳しく、また地球温暖化対策が急務となる中、処理規模や人口密度といった地域特性に応じて、環境効率の高い水処理技術を適用することが求められる。

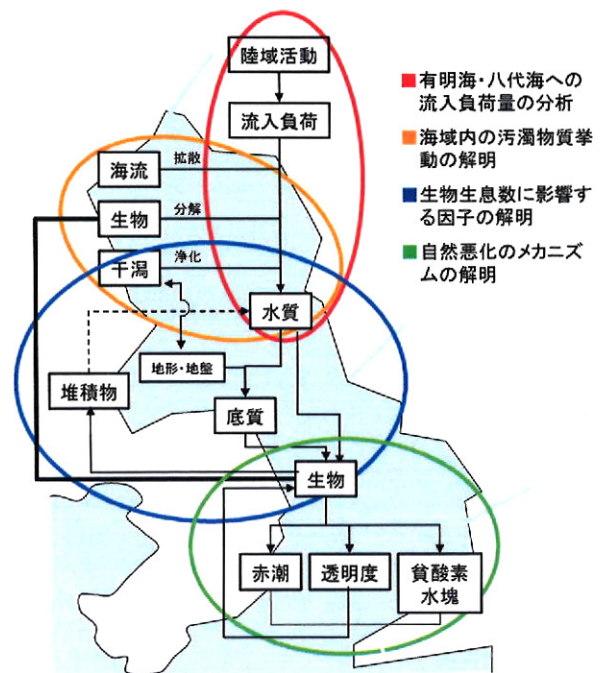


図-1 閉鎖性水域の環境改善を目指した研究の関連図

表-1 処理施設別汚水処理人口普及状況
(平成 19 年度末)

処理施設名		汚水処理人口 (単位:万人)
下水道		9,111
農業集落排水施設等 漁業集落排水施設 林業集落排水施設 簡易排水施設 を含む		370
浄化槽	合計	1,121
	浄化槽市町村整備 推進事業等分	83
	浄化槽設置整備事 業分	514
	上記以外分	524
コミュニティ・プラント		33
計		10,635
総人口		12,707
汚水処理人口普及率		83.7%

下水道や浄化槽などの個別の技術を対象として、環境負荷排出量を算出した研究事例として、井村ら (1996)²⁾ は、管渠や処理場を対象とする下水道システムについて、ライフサイクルエネルギーを産業連関法を用いて推計している。また宮原ら (2006)³⁾ は、下水処理場の維持管理段階における温室効果ガス排出量について、積み上げ法を用いた推計を行っている。さらに井村ら (2007)⁴⁾ は、浄化槽を対象として積み上げ法によるインベントリーデータの作成を行っている。

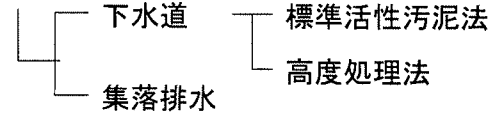
それらのインベントリーデータを活用して、筆者ら⁵⁾ は地域に対して水処理技術を導入することの効果を、人口密度を変数として定量的に推計することを試みた。本研究では、水処理技術の導入シナリオを構築し、それらの環境効率を評価することを目的とする。対象エリアは、日本の代表的な閉鎖性水域であるとともに、近年環境悪化の著しい有明海・八代海の集水域である熊本県とする。

2. 水処理技術システムを対象とした環境効率の評価方法

(1) 対象とする水処理技術システム

本研究では、水処理技術システムを、汚水を集めて水処理を行い、浄化した水を川や海に排水するまでを含めたシステムとする。日本における水処理技術システムの体系を図-2 に示す。水処理技術システムは、大きく集中型技術システムと分散型技術システムの二つに分けることができる。前者は、多くの発生源から汚水を集めて、大型の施設で集中的に水処理を行う技術である。後者は、汚水の個別の発

集中型技術



分散型技術

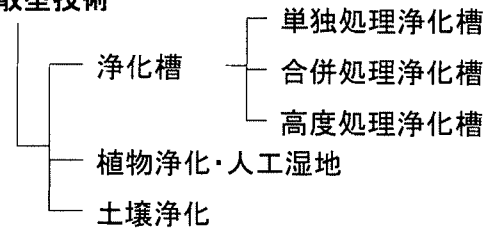


図-2 日本における水処理技術システムの体系

生源ごとに小規模な水処理施設を設置する技術である。分散型技術に区分される植物浄化や土壌浄化などの技術は、まだ開発途上であり、今後の展開が期待される。一般的に、人口の集中地区では集中型が、人口が希薄な地区では分散型の効率が良いとされるが、その効果を定量的に分析する研究は、端緒に付いたばかりである。

本研究で評価対象とする水処理技術システムとして、集中型技術からは下水道システムを、分散型技術からは浄化槽を選択する。その理由として、普及率が高いこと、今後の水処理技術導入においても中心的な役割を果たすと考えられること、分析に必要なインベントリーデータの整備が進んでいることなどが挙げられる。

(2) ライフサイクル CO₂ の評価方法

a) 評価対象とするライフサイクルステージ

水処理技術システムの導入に伴う環境負荷量を、ライフサイクルアセスメントを用いて評価する。評価の対象は、下水道の管渠の建設段階、処理場の建設段階、運用段階、浄化槽の設置段階、使用段階の各段階とし、環境負荷の指標として CO₂ 排出量を採用する。建設段階の CO₂ 排出量は、耐用年数で除することによって、1 年あたりの CO₂ 排出量に換算する。各水処理技術システムの CO₂ 排出量の算出フロー図については、既報⁵⁾ を参照されたい。

b) 下水道システムの評価方法

下水道の管渠の建設段階の CO₂ 排出量を算出は、管渠延長に原単位を乗じて行う。管渠延長の推定には、管渠延長と処理区域面積との相関関係 (図-3) を用いる。ただし、この相関関係は、下水道システムが整備されている地域のデータを基に作成したものである。下水道システムは、人口集中地区すなわち処理面積に対して管渠を密に設置することが求められる地区を中心に整備されている可能性が高い。すなわち、人口が希薄な地区に対して、図-3 で得られた相関関係をそのまま当てはめると、管渠の密度を過大評価している可能性があり、今後の課題となる。

次に、求めた管渠延長の値を基に、環境省が作成しているマニュアル⁶⁾を用いて、下水道の管渠の建設費を算出する。算出した建設費を、工事種類別の費用割合で按分した上で、各々の産業分類に応じたCO₂排出量原単位⁷⁾を乗じ、耐用年数で除して一年当たりのCO₂排出量を求める。

下水処理場の建設段階についても、管渠建設段階と同様に、環境省のマニュアルを用いて建設費を算出し、工事種類別の費用割合、産業分類別のCO₂排出量原単位、耐用年数を考慮して、年間CO₂排出量を求める。

下水処理場の運用段階については、使用実績データ²⁾を基にして、下水処理量当たりの電気使用量、油・ガス系燃料使用量、薬品使用量、汚泥処理量を求め、それらの値に環境負荷原単位を乗じて算出する。

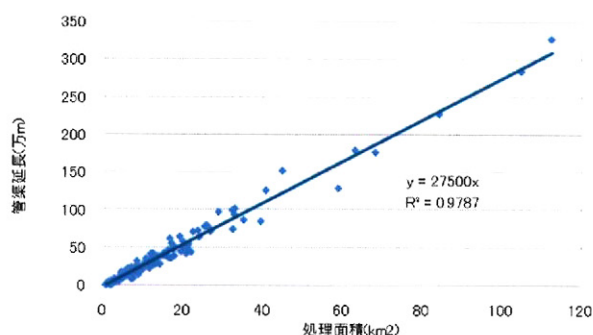


図-3 管渠延長と処理区域面積の関係

c) 浄化槽の評価方法

浄化槽の設置段階については、製造・輸送・施工の各プロセスにおけるエネルギー使用量データ⁴⁾を積み上げた上で、環境負荷原単位を乗じ、耐用年数で除することで一年当たりのCO₂排出量を算出する。本研究では5人槽の値を採用し、平均世帯人数を3人とする。

浄化槽の使用段階については、浄化槽の運転実績データ⁴⁾を基に、浄化槽の運転に必要な電気使用量の値を算出し、環境負荷原単位を乗じてCO₂排出量を求める。

(3) 水質浄化能力の評価方法

水処理技術システムの導入による便益として汚濁負荷除去量を算出し、汚濁負荷除去量当たりのCO₂排出量を求めることで、各システムの環境効率を評価する。そこで、水処理技術システムの運転実績データより、BOD除去率を求める(表-2)。次に、一人一日当たりの平均汚水量および評価対象地域の人口を、BOD除去率に乗じて年間のBOD除去量を算出する。最後に、年間CO₂排出量を、年間BOD除去量で除することで、単位汚濁負荷除去量当たりのCO₂排出量を算出する。なお、本研究では水質指標としてBODのみを取り上げたが、多様な汚濁負荷指標を一元化した汚濁削減性能指標⁸⁾の考慮が、今

表-2 汚濁負荷除去能力の設定値

		流入水平平均 BOD濃度 (mg/L)	除去率		
			BOD	N	P
下水道システム	標準活性汚泥法	178.3	97.35%	60.70%	71.44%
浄化槽	リン・窒素除去型	180.5	97.03%	70.63%	77.68%

後の課題となる。

3. 水処理技術システム導入シナリオの環境効率の評価

(1) 水処理技術システム導入によるCO₂排出量の評価

前章で述べた評価方法を用いて、水処理技術システムの導入に伴うCO₂排出量を推計する。まず、人口密度を500(人/km²)と仮定した上、下水道システム導入に伴うCO₂排出量について、処理区域面積の規模を変化させた感度分析を行った(図-4)。図より、下水道においては管渠建設に伴うCO₂排出量が多いことが明らかとなった。管渠建設の占める割合は、処理区域面積が10km²の時は約74%、500km²の時は約91%と、処理区域面積が広がるほど割合が大きくなる結果となった。これは、管渠建設段階のCO₂排出量が処理区域面積に比例すると仮定しているのに対し、処理場運用時のCO₂排出量には、スケールメリットが働いているためである⁶⁾。

次に、人口密度および処理区域面積を変化させた場合の、水処理技術システム導入による単位汚濁負荷除去量当たりのCO₂排出量を算出した(図-5)。この結果、処理区域面積が大きくなるほど、下水道システムの単位汚濁負荷除去量当たりのCO₂排出量は小さくなることが分かった。また、浄化槽と比較した場合、人口密度が100人/km²の場合には処理区域面積に関わらず浄化槽のCO₂排出量が大幅に小さくなった。一方で、500人/km²の場合には、処理区域面積に関わらず浄化槽のCO₂排出量が大きくなった。この結果から、人口密度によって、水処理技術

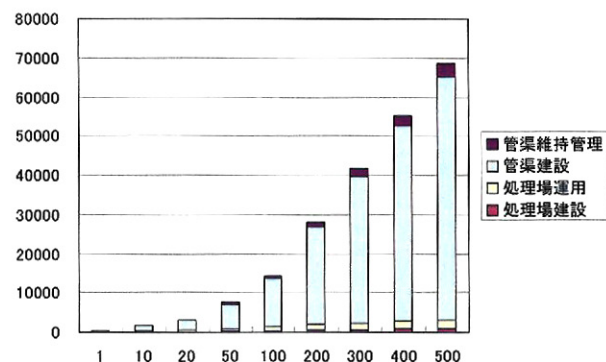


図-4 人口密度500(人/km²)における下水道システム導入に伴う処理規模別のCO₂排出量
(t-CO₂/year, X軸の数値の単位はkm²)

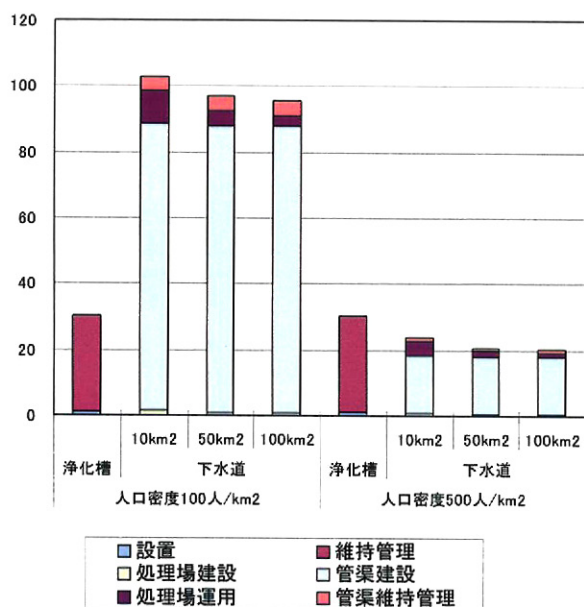


図-5 水処理技術システムの汚濁負荷除去量当たりのCO₂排出量 (t-CO₂/t)

システムの環境効率が大きく左右されることが明らかとなった。

(2) 水処理技術システム導入シナリオの環境効率の評価

a) 熊本県における自治体別の下水道システム導入に伴うCO₂排出量

熊本県における人口密度分布を図-6に示す。さらに各自治体の人口・面積を、人口密度別に集計した結果を表-3に示す。県全体の約50%のエリアが、人口密度100人/km²以上500人/km²未満であり、人口密度100人/km²未満のエリアを加えると90%を超えることが分かる。

熊本県の各自治体に下水道システムを導入したと仮定した場合の年間CO₂排出量の分布を図-7に示す。人口密度の高い熊本市周辺では、一人当たり0.06~0.30t-CO₂/year程度の値となった一方で、人口密度の低い阿蘇地域や県南部などの山間部では、一人当たりの年間CO₂排出量が3t-CO₂以上となっており、一部の自治体では5t-CO₂を超える結果となった。日本の一人当たりの年間CO₂排出量が、産業・民生・運輸などの各部門をすべて合わせても約10t-CO₂であることを考えると、非常に大きい値である。この原因として、2章2節で述べた通り、人口密度が低い地域において管渠の敷設密度を過大評価している可能性が考えられる。

自治体別の下水道システム導入に伴う一人当たりの年間CO₂排出量と人口密度の関係を図-8に、面積との関係を図-9に示す。図-8より、人口密度と一人当たりのCO₂排出量の間には、ほぼ反比例の関係があることが明らかになった。この結果は、下水道システムのライフサイクルCO₂において、管渠建設段階の占める割合が高いことと、管渠延長を処理区

域面積に比例すると仮定して分析を行っていることから妥当な結果といえる。

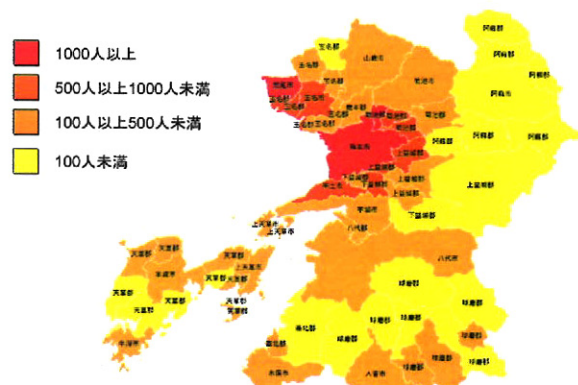


図-6 熊本県における人口密度分布

表-3 熊本県における人口密度別の人口・面積

人口密度(人/km ²)	人口(万人)	面積(km ²)	面積割合(%)
1000以上	66.3	267	3.6
500以上1000未満	26.0	361	4.9
100以上500未満	77.5	3,693	49.9
100未満	16.1	3,085	41.7
合計	185.9	7405.2	100.0

t-CO₂/year・人

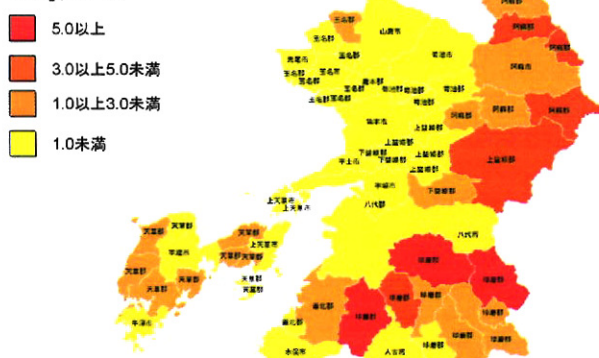


図-7 熊本県における下水道システム由来のCO₂排出量 (t-CO₂/year・人)

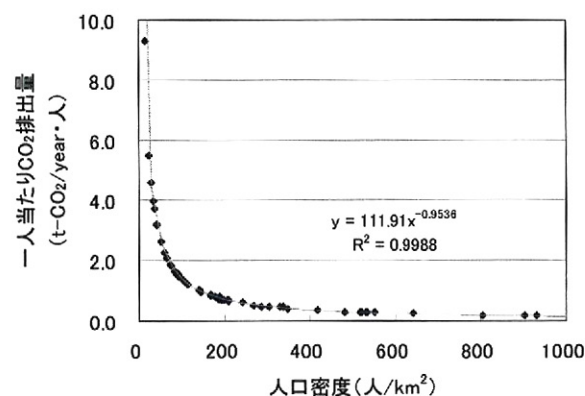


図-8 下水道システム由来のCO₂排出量と人口密度の関係

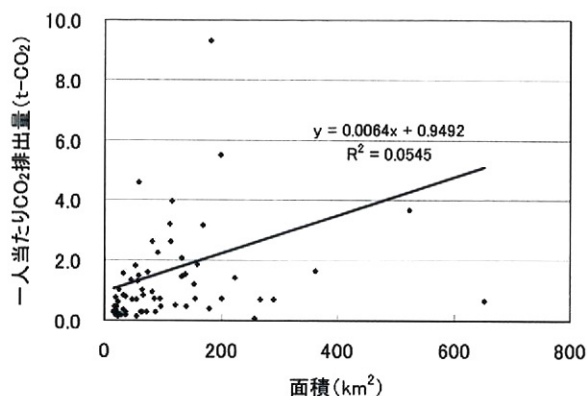


図-9 下水道システム由来のCO₂排出量と面積の関係

一方、CO₂排出量と面積との間には、有意な関係は見られなかった。

b) 水処理技術システム導入シナリオの環境効率の評価

前節で地域に水処理技術システムを導入した際の環境効率に対し、人口密度が大きな影響を与えることが明らかになったことから、人口密度を考慮した導入シナリオを構築する。

熊本県を対象として、人口密度 1000 人/km² 以上の自治体のエリアに下水道システム、それ以外の自治体に浄化槽を導入した場合をシナリオ 1、システム導入の分岐点を 500 人/km² 以上とした場合をシナリオ 2、分岐点を 100 人/km² 以上とした場合をシナリオ 3 とする。そして、全てのエリアに浄化槽を導入した場合をシナリオ 4 とする。

それぞれのシナリオについて一人当たりの年間 CO₂ 排出量を算出した結果、シナリオ 1 では年間 522kt-CO₂、シナリオ 2 では年間 480kt-CO₂、シナリオ 3 では年間 617 kt-CO₂ の排出、シナリオ 4 では年間 798 kt-CO₂ の排出となった。さらに、汚濁負荷除去量あたりの CO₂ 排出量を算出した結果、シナリオ 1 で 19.8t-CO₂/t、シナリオ 2 で 18.2t-CO₂/t、シナリオ 3 で 23.5t-CO₂/t、シナリオ 4 で 30.1t-CO₂/t となり、500 人を分岐点としたシナリオが最小となることが分かった。

次に、年間の CO₂ 排出量が最小となるシナリオを探るために、分岐点となる人口密度を 100 人/km² から 500 人/km² の間で変化させて分析した。その結果、350 人/km² を分岐点とする場合（シナリオ 5）の CO₂ 排出量が最も少なく、年間 472kt-CO₂、汚濁負荷除去量あたりでは 17.9t-CO₂/t という結果となった（図-10）。

本研究では、下水道システムのライフサイクル CO₂ の中で、管渠建設に伴う CO₂ 排出量が占める割合が大きかった。そこで最後に、管渠建設における資材使用量の削減、工事におけるエネルギー量の削減などにより、管渠建設の CO₂ 排出量が削減されたと仮定した場合の、県全体の水処理技術システム導入による CO₂ 排出量を最小化する分岐点について試算した。その結果、10%削減した場合には、人口密

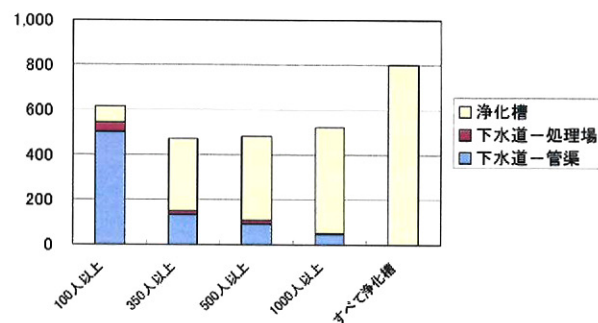


図-10 熊本県を対象とした水処理技術システム導入によるCO₂排出量 (kt-CO₂/year)

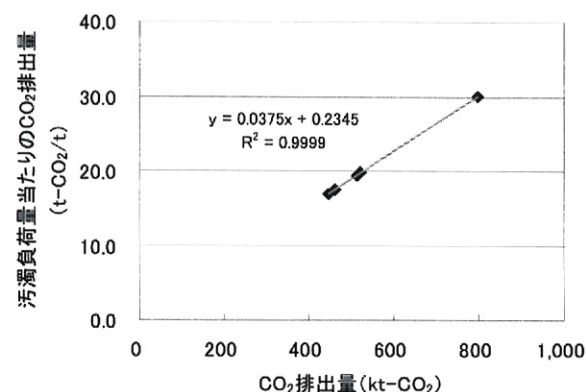


図-11 CO₂排出量と汚濁負荷量当たりのCO₂排出量の関係

度 265 人/km²、20%削減した場合には 250 人/km²、50%削減した場合には 180 人/km² となった。すなわち、人口密度 200~300 人/km² 前後の地域であれば、今後の技術開発次第で下水道システムの効率が良くなる可能性があるが、人口密度 100 人/km² 以下の地域では、浄化槽を導入することが妥当であると言える。

なお、表-2 に示した通り、本研究で汚濁負荷除去量の算出に用いた設定では、下水道システムと浄化槽の水質浄化能力に大きな違いが無かったことから、シナリオごとの年間 CO₂ 排出量と、汚濁負荷除去量当たりの CO₂ 排出量がほぼ比例する結果となった（図-11）。

4. 結論および今後の課題

本研究では、熊本県を対象として、下水道システムと浄化槽の導入シナリオごとの環境効率を定量的に評価した。

その結果、下水道システムに由来するライフサイクル CO₂ 排出量においては管渠建設段階が大きな割合を占めることが分かった。さらに人口密度が環境効率を左右する大きな要素であることが明らかとなった。具体的には、人口密度 350 人/km² 以上の自治体には下水道システムを導入し、それ以下の自治

体には浄化槽を導入した場合、年間 472kt-CO₂、汚濁負荷除去量あたりでは 17.9t-CO₂/t となり、最も環境負荷が小さいことがわかった。

今後は、インベントリーデータの更新や、推計に用いた設定の精査等によって、推計の精度を高める必要がある。特に検証・改善が必要な点として、以下の3点を挙げる。

一つ目として、今回の分析では、下水道システムごとの管径の分布を推計することが困難であったため、管渠の太さによる影響を考慮していない。より現実的な分析を行うためには、管渠の太さの分布を推計するモデルを組み込み、管径ごとの CO₂ 排出量原単位の違いを考慮した推計をすることが求められる。

二つ目として、積み上げ法と産業連関法を併用したことが分析結果に与えた影響を把握する必要がある。一般的に産業連関法を用いる場合、間接経費が含まれる金額を算出に用いると過大推計になることが指摘されている⁹⁾。本研究では、下水処理場の運用段階の CO₂ 排出量の推計に積み上げ法を用いていることから、この部分の推計結果が過小評価された可能性がある。

三つ目として、下水道システムは長期的に運用するものであることから、人口、技術、産業構造等の時系列変化を考慮したシナリオの構築が求められる。また、平成に入って自治体間の合併が進んだ影響で、同じ自治体内でも地域特性にばらつきが生じているため、自治体内の人口密度分布データを GIS を用いて分析し、より現実的なシナリオを構築することが必要となる。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 若手研究 (B) (平成 21～22 年度、研究代表者：村野昭人) の一部として行われた。

参考文献

- 1) 浄化槽システム協会 HP, <http://www.jsa02.or.jp>
- 2) 井村秀文, 森下兼年, 池田秀昭, 銭谷賢治, 楠田哲也: 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.
- 3) 宮原高志, 柏木秀仁: 下水浄化センターの LCA における処理水再利用の効果, 下水道協会誌 Vol. 43, No. 526, 2006.
- 4) 井村正博, 水野雄次: 浄化槽およびブロワの省資源化, 省エネ化, 月間浄化槽 N0380, pp. 23-29, 2007.
- 5) 村野昭人, 滝川清, 園田吉弘: 熊本県沿岸域を対象とした水処理技術システムの評価, 海洋開発論文集, Vol. 25, pp. 503-507, 2009
- 6) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 廃棄物対策課 浄化槽推進室, 生活排水処理施設整備計画策定マニュアル, 2002.
- 7) 国立環境研究所: 産業連関表による環境負荷データブック (3EID), 2002.
- 8) 石田整, 荒巻俊也, 花木啓祐: 東京湾流域の下水処理場への排出権取引制度導入効果の推定, 土木学会論文集, No. 804/VII-37, pp. 73-82, 2005.
- 9) 鶴巻峰夫, 田中康平, 田本雅典: 下水道整備の温暖化影響と水質改善効果について, 第 5 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp. 296-297, 2010