

7. 下水高度処理の評価手法に関する調査

下水処理研究室 室長 中島英一郎
主任研究官 山下 洋正
研究官 中島 智史

1. はじめに

閉鎖性水域の水質改善、下水処理水の安全性の向上等が求められており、そのためには下水の高度処理が不可欠である。しかし、高度処理の実施にあたり、財政負担について住民の理解が得られない、合理的な目標の設定が困難である等の問題が発生している。従って、高度処理による便益及び要する費用を含めた科学的知見に基づき、住民との合意形成を踏まえた意志決定を行う手法が求められている。

本調査の目的は、高度処理に関する評価手法を開発し、高度処理に関して科学的知見に基づく明確なシナリオ及び意志決定のための合意形成手法を提示することにより、高度処理を推進するための政策提言を行うことである。また、提示にあたっては、琵琶湖流域等をモデルケースとし、提言の実用性を検証する。

平成 14 年度は、琵琶湖を例に取り、水質保全に必要な高度処理による便益について、原単位的に汚濁負荷削減便益を計上する手法の開発に着手し、便益項目を整理して計算手法の案を作成した。また、全国的な観点からの下水道事業の水質保全効果の試算と評価に関する検討も行った。

2. 高度処理の便益測定手法

2. 1 調査方法

我が国の主要な水域については、環境基本法に基づく環境基準や、その実現のための各種計画が策定されており、水環境が社会資本を投じて保全すべき一定の価値を有していることについては、社会全体の合意事項となっている場合が多いと考えられる。この場合、水質保全の効果について、社会全体で共有すべき「原単位」、つまりどの手段により達成しても同じ価値を持つ水質保全上の単位便益を仮定することができるはずである。

従って、社会共通の水質保全目標の達成のための個別施策の取り組みにおいて、個々に水質保全便益を計測するよりも、共通の便益原単位を用いて評価する方が、整合性・効率性等の観点から妥当であると考えられる。

そこで、本調査においては、社会的な合意に基づく水環境保全計画について、その実施に必要な最小の事業費が住民の支払い意思額以下となっていると仮説に基づき便益の原単位を算出する手法（以下、「事業コスト代替法」と呼ぶ）を開発することとした。具体的には、琵琶湖流域等をモデルケースとして検討を行い、琵琶湖の水質環境保全のために必要となる各種施策が最も効率的に実施されたとき、その事業コストが琵琶湖環境保全に対する住民の支払い意思額以下であると見なし、その金額を琵琶湖環境保全の便益と考えるものである。

そのため、まず現在の琵琶湖の水質保全に関する社会的合意と考えられる琵琶湖総合保全整備計画「マザーレイク 21」（以下、ML21 計画と呼ぶ）¹⁾ 及び関連する事業計画に基づき、水質保全のための各施策の事業費用及び削減負荷量を算出し、各施策の単位負荷削減量当たりの負荷削減単価を求めた。次に、各施策による全体費用を最小化するため、仮想的に排出権取引を行い、各施策による負荷削減量の仮想最適配分とその事業費用を推定した。最後に、各施策における便益全体のうち、水質保全に係る便益の割合をそれぞれ算出し、その割合を各事業費用に乗じることにより、水質保全に係る各施策の最小費用として求め、その合計を琵琶湖全体の水質保全便益の最小推定値とした。

2. 2 結果及び考察

(1) 各施策の負荷削減単価の算出

「ML21 計画」では、H11 から H22 にかけて、表-1 に示す負荷削減事業が計画されている。これらのうち、「農業系施策の施肥改善の推進」は削減量が小さく費用推定も困難であるため分析対象外とし、残りの各施策について、建設費および維持管理費の推計を行い、年費用化したものを事業費用として表-2 に示した。

表-1 「ML21 計画」における削減負荷量¹⁾

項目	系列	対策	H22無対策			H11-22		
			放流量(kg/日)			削減量(kg/日)		
			COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P
点源対策	生活系	下水道事業	18,598.0	6,741.0	631.9	12,115.0	596.0	389.8
		農業集落排水事業						
		合併処理浄化槽設置整備事業						
		下水道超高度処理				1,742.0	2,547.7	59.5
		農業集落排水事業(土壌トレンチ)				48.6	11.3	6.0
		農業集落排水事業(処理水の再利用)				25.7	28.0	2.8
	工業系	工場、事業場排水規制	12,888.0	3,971.0	438.6	5,423.0	1,312.0	150.4
面源対策	農業系	施肥改善の推進(緩効性肥料等推進対策)	6,919.0	3,038.0	145.8	0.2	25.0	4.7
		水質保全対策事業				132.4	44.0	3.0
		農業用水再編対策事業(地域用水機能増進)				114.2	38.0	2.5
	土地系	市街地排水浄化事業	6,856.0	2,660.0	94.3	129.6	38.2	2.5
	自然系	ダム環境保全事業	10,724.0	5,266.0	155.0	159.0	4.0	0.4
		流入河川浄化事業				210.2	127.8	8.6
計			55,985.0	21,676.0	1,465.6	20,099.9	4,772.0	630.2

表-2 事業費用(年費用)の推計

項目	系列	対策	建設費 百万円	耐用年数 年	建設費年費用 百万円/年	維持管理費 百万円/年	年費用計 百万円/年
点源対策	生活系	下水道事業	900,206	42	44,494	13,196	57,690
		農業集落排水事業	34,719	30	2,008	605	2,613
		合併処理浄化槽設置整備事業	10,440	15	939	557	1,496
		下水道超高度処理	53,727	20	3,953	1,955	5,909
		農業集落排水事業(土壌トレンチ)	11,440	30	662	143	805
		農業集落排水事業(処理水の再利用)	446	30	26	8	33
	工業系	工場、事業場排水規制	7,941	15	714	780	1,494
面源対策	農業系	水質保全対策事業	14,614	40	738	1,524	2,262
		農業用水再編対策事業(地域用水機能増進)	12,602	40	637	1,314	1,950
	土地系	市街地排水浄化事業	38,873	40	1,964	562	2,526
	自然系	ダム環境保全事業	450	15	40	9	49
		流入河川浄化事業	37,650	40	1,902	3,925	5,827
計			1,123,109		58,078	24,577	82,655

維持管理費の算出に当たっては、点源対策のうち農業集落排水事業の土壌トレンチ及び処理水再利用並びに面源対策については具体事例の維持管理費/建設費の比率を用いて求め、他の対策は積み上げ方式で求めた。

上で求めた各施策の削減負荷量及び事業費用から、T-COD 削減負荷単価を求め、T-COD 削減負荷量とあわせて図-1 に示した。ここで、T-COD 削減負荷量とは、COD、N、P を 1 : 0.48 : 0.30 の換算係数で統合し、
 $T-COD \text{ 削減負荷量} = COD \text{ 削減負荷量} + 0.48 \times T-N \text{ 削減負荷量} + 0.30 \times T-P \text{ 削減負荷量}$
 として負荷を統合したものである。

なお、換算係数は琵琶湖に関する水質シミュレーション結果²⁾ より、異なるケースにおける負荷量及び水質の差を用いて、以下の式により求めた。

$$\text{T-N、T-P の COD への換算係数} = \frac{\Delta \tilde{L}_{\text{COD}} / \Delta \tilde{q}_{\text{COD}}}{\Delta \tilde{L}_{\text{T-N,P}} / \Delta \tilde{q}_{\text{T-N,P}}}$$

($\Delta \tilde{L}$ は琵琶湖のシミュレーションにおける削減負荷量、 $\Delta \tilde{q}$ は湖内水質の改善分)

この結果より、ML21 計画の各施策において削減負荷単価にかなり違いがあること、ダム環境保全事業以外の面源対策は他の施策と比較してかなり割高となること、農業集落排水（土壌トレンチ）以外の点源対策は削減負荷単価が 10,000(円/T-COD Kg)以下の範囲に収まり相対的に割安であることが分かった。

(2) 負荷削減量の仮想最適配分及び事業費用の推定

上述の(1)の結果より、ML21 計画における各施策には、削減負荷単価の観点から高コストな施策と低コストな施策が混在していることが明らかとなった。ここで、仮に、高コストな施策での削減負荷量を減らすことにより浮いた事業費を低コストな施策に回して余分の負荷を削減することを考えると、全体としてより少ない費用で同じ削減負荷量を達成することができる。

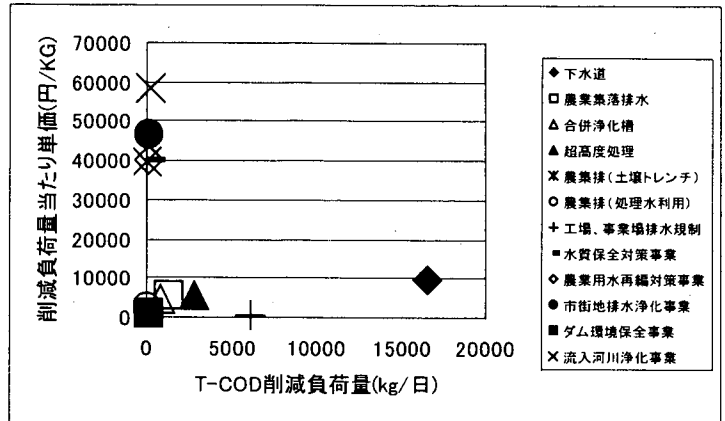


図-1 各施策の T-COD 削減負荷量と削減負荷単価

これは、削減負荷単価が高い施策と低い施策との間で、削減負荷量の取引（排出権取引）を行っていることになり、仮想的な市場取引における均衡価格（排出権としての削減負荷単価）をシミュレーションにより決定すれば、各施策における削減負荷量の最適配分（全体費用の最小化）が定まることになる。これにより、ML21 計画の目標削減負荷量達成のための仮想的な最小費用を求めることができる。

排出権取引のシミュレーションにあたり、各施策の拡大範囲として、現実的に可能な範囲を想定して表-3に示す通りとした。

表-3 各事業の拡大範囲の設定

	系	対策	計画対象	拡大範囲	備考
点源対策	生活系	下水道事業	約56万人	約56万人	100%
		農業集落排水事業	約4.5万人	約4.5万人	100%
		合併処理浄化槽設置整備事業	3.5万人	3.5万人	100%
		下水道超高度処理	87万m ³ /日	142万m ³ /日	超高度処理全体計画
		農業集落排水事業(土壌トレンチ)	15670人	15670人	100%
		農業集落排水事業(処理水の再利用)	14580人	14580人	100%
	工業系	工場、事業場排水規制			100%
面源対策	農業系	施肥改善の推進(緩効肥料等推進対策)	54ha	54ha	100%
		水質保全対策事業	6825ha	41298ha	水田面積
		農業用水再編対策事業(地域用水機能増進)	5885ha	41298ha	水田面積
	土地系	市街地排水浄化事業	1800ha	3600ha	2期計画対象まで
	自然系	ダム環境保全事業	4ダム	15ダム	主要既設ダム
		流入河川浄化事業	15河川	20河川	2期計画対象まで

ここで、ダム環境保全事業の15ダムとは、ML21対象4ダムに、総貯水量100万m³以上の既設ダム11箇所（ダム年鑑における総貯水量による）を加えたものである。

ML21対象：余呉湖、姉川、石田川、北川第一

11ダム：丹生、芹川、犬上、宇曾川、永源寺、日野川、蔵王、野洲川、青土、淡海池

取引価格を 100 円/kg から 12,000 円/kg の範囲で変化させた場合の T-COD 売買要望量と、売買調整後の費用を図-2 に示す。同図で、売買要望量のバランスが取れるのは 10,000 円/kg 付近であるが、売買調整量は 7,400 円/kg 以上から一定であるため、均衡価格は 7,400 円/kg とした。7,400 円/kg で売買が均衡した場合、当初費用の 82,655 百万円/年から 18%削減されて 67,491 百万円/年となり、平均価格は 6,445 円/kg となる。なお、削減量は 28,690 T-COD kg で変化せず、これは ML21 計画の各事業量より算出した削減量の合計であるため、表-1 の合計削減量と完全には一致しない。

各種事業の当初削減目標量と、均衡価格 7,400 円/kg における調整された売買量を図-3 に示す。当初単価が 7,400 円/kg より高い事業はすべて購入となり、売却はダム環境保全事業、湖南中部、湖西、東北部、高島の超高度処理事業となる。

以上より、各施策の削減負荷量の仮想最適配分が試算され、その際の各施策の事業費用が明らかとなった。

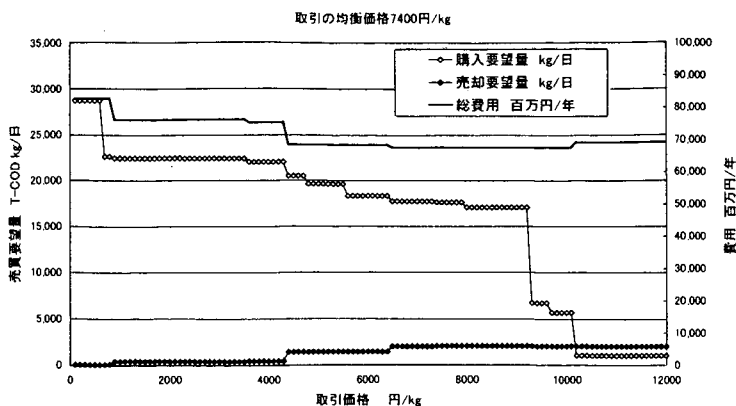


図-2 排出権取引のシミュレーション結果

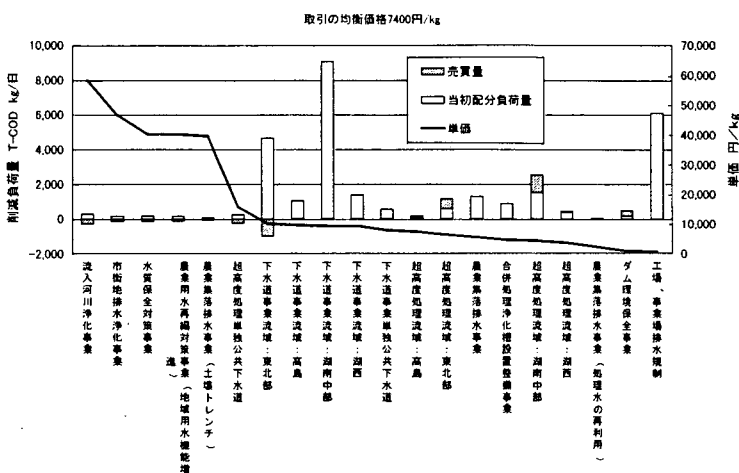


図-3 削減負荷量の仮想最適配分状態

(3) 水質保全のための仮想最小費用の推定と水質保全便益原単位の試算

上の(2)で求めた各施策の事業費用の合計が、琵琶湖の水質保全のための諸施策の実施に最低限必要な費用であり、琵琶湖の水質保全のための諸施策に対する社会全体の支払い意志額はこれ以上であるとみなすことができる。ただし、この費用(又は支払い意志額)の中には、下水道によるトイレの水洗化や生活環境の改善など、水質保全以外の便益をもたらすための費用(又はその便益に対する支払い意志額)が含まれている。従って、施策ごとに、その事業費の中で水質保全に用いられる部分を算出し、その割合(水質保全便益の比率)を乗じることによって、水質保全に対する真の支払い意志額を求めることとする。

例えば、単独公共下水道について、水質保全便益以外の便益(水洗化、生活環境改善)と年費用の比率が 0.743 と算出されることから、水質保全便益の比率は $1-0.743=0.257$ となる。農業集落排水事業及び合併浄化総事業については、汚濁負荷の削減率が下水道と比較してそれぞれ 0.85、0.7 程度と推定されることから、それぞれを 0.257 に乗じた値である 0.217、0.179 を水質保全便益の比率とした。他の施策のうち、流域下水道については個別に算出し、超高度処理事業、流入河川浄化事業その他の事業は全て水質保全便益の比率が 1.0、すなわち水質保全のためだけの事業とみなした。これらより、水質保全便益を算出した結果を表-4 に示す。これより、全体の負荷削減量 28,690kg T-COD/日に対する水質保全便益が 32,777 百万円とみなしうることから、水質保全便益の原単位は 3,130 円/T-COD kg と求められた。この水質保全便益原単位は、様々な水質保全施策について、その水質保全面の便益を算出するために用いることができる。

表-4 各施策の水質保全便益の推定

	最小事業費(取引後) 百万円/年	水質保全便益比率	水質保全便益 百万円/年
下水道事業流域: 東北部	13,491	0.461	6,220
下水道事業流域: 高島	3,619	0.458	1,658
下水道事業流域: 湖南中部	30,689	0.401	12,306
下水道事業流域: 湖西	4,604	0.426	1,961
下水道事業単独公共下水道	1,592	0.257	409
超高度処理流域: 高島	439	1.000	439
超高度処理流域: 東北部	2,672	1.000	2,672
農業集落排水事業	2,613	0.217	567
合併処理浄化槽設置整備事業	1,496	0.179	268
超高度処理流域: 湖南中部	4,041	1.000	4,041
超高度処理流域: 湖西	561	1.000	561
農業集落排水事業(処理水の再利用)	33	1.000	33
ダム環境保全事業	148	1.000	148
工場、事業場排水規制	1,494	1.000	1,494
合計	67,491		32,777

なお、流入河川浄化事業、市街地排水浄化事業、水質保全対策事業、農業用水再編対策事業(地域用水機能増進)、農業集落排水事業(土壌トレンチ)、超高度処理単独公共下水道については、削減量がゼロである。

3. 下水道による全国的な水質保全効果の評価

3.1 調査方法

現在、個別事業についての B/C 評価は行われているが、わが国全体としての下水道整備による水質保全効果について定量的な検討が行われた事例はこれまで見受けられない。そこで、データが比較的整備されている 1975 年度以降 2000 年度までの 26 年間について、下水道に関する投資額及び削減負荷量 (T-COD 換算) について下水道統計³⁾より集計を行い、B/C 評価を行った。

検討にあたっては、公共水域の水質保全のための二次処理又はそれ以上の処理を行っている処理プロセスを対象とし、再生水利用目的の処理は除外した。

3.2 結果及び考察

(1) 処理水量及び削減負荷量の変化

1975 年度から 2000 年度までの処理水量及び削減負荷量の経年変化を図-4 に示す。なお、削減負荷量の計算にあたっては、「下水道施設計画・設計指針と解説」を参考に、二次処理の BOD 除去率は 90%、高度処理による BOD 除去率は 94%と設定している。

また、高度処理による栄養塩類除去については、循環式硝化脱窒法等の窒素除去法について TN 除去率 80%、凝集剤添加活性汚泥法等のりん除去法について TP 除去率 86%、嫌気-無酸素-好気法等の窒素・りん同時除去法について TN 除去率 74%、TP 除去率 83%と設定した。同図より BOD の負荷削減は下水道の整備すなわち二次処理水量の増加とほぼ比例して進展しており、栄養塩類の除去は高度処理の導入により近年急速に進んだことが伺える。

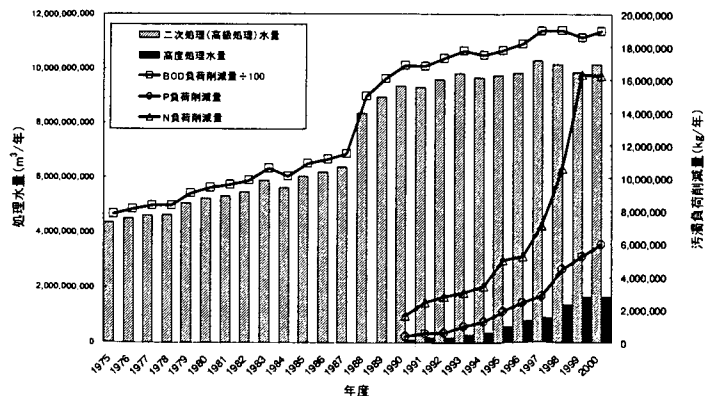


図-4 処理水量と削減負荷量の経年変化

(2) 下水道整備への投資額の変化
 1975年度から2000年度までの下水道整備への投資額の変化を図-5に示す。ここで、年間投資額は、建設費を利率4%で年費用化したものと維持管理費とを合計したものであり、費用は全て2000年度を100としたデフレータにより補正している。これより高度処理は近年急速に増加していることが分かる。

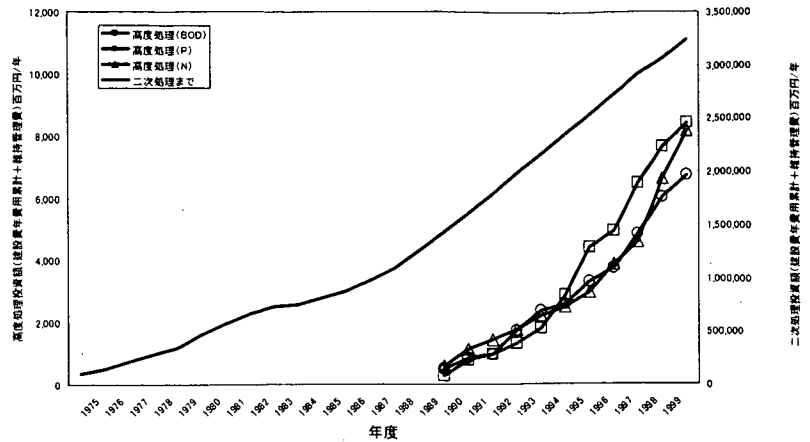


図-5 下水道整備への投資額の経年変化

(3) 下水道による過年度の水質保全便益の推定とB/C評価

1975年度から2000年度までの全国の下水道負荷削減量をT-CODに換算した結果を示す表-5より、過年度の削減負荷量の総量は2,119 T-COD万tであることが分かる。ここで、「2. 高度処理の便益測定手法」で求めた水質保全便益原単位3,130円/T-COD kgを適用すると、水質保全便益は約66兆円と推定される。

表-5 過年度の削減負荷量

	BOD計(万t)	P計(万t)	N計(万t)	合計
汚濁負荷削減量累計(1975~2000)	3,524	2.7	7.4	
COD換算係数	0.60	0.30	0.48	
COD換算負荷削減量(万t)	2,114	0.8	3.5	2,119

図-5に示す通り、過年度の下水道整備への投資額は約35兆円と算出されることから、B/Cは約1.9であり、全国的な見地から十分な投資効果を上げていると判断できる。また、下水道整備では水質保全以外の便益(トイレの水洗化、生活環境の改善等)も大であるため、事業全体のB/C評価はさらに高くなると考えられる。一方、栄養塩類を対象とした高度処理に限定してB/C評価を行った場合でも、便益は約1,400億円、費用は約700億円と算出されることから、高度処理についてもB/Cは約2.0であり、十分効率的とみなしうる。以上より、1975年度から2000年度までの26年間の下水道投資は、費用対効果の観点から、十分な水質保全効果をもたらしたことが分かった。

4. まとめ

(1) 琵琶湖を例に取り、水質保全に必要な高度処理による便益について、原単位的に汚濁負荷削減便益を計上する手法の開発を行い、便益項目を整理して計算手法の案を作成した。水質保全便益原単位は3,130円/T-COD kgと算出された。

(2) 全国的な観点から、これまでの下水道事業の水質保全効果の試算とB/C評価を行った結果、下水道事業全体及び高度処理部分の双方について、十分な投資効果を上げていることが分かった。

なお、琵琶湖水質保全及び滋賀県下水道整備に関する情報収集にあたり、滋賀県琵琶湖環境部下水道計画課及び下水道建設課にご協力いただいた。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) マザーレイク21計画(琵琶湖総合保全整備計画)、滋賀県、平成12年
- 2) 琵琶湖流域別下水道整備総合計画計画説明書、滋賀県、平成10年
- 3) 下水道統計行政編・財政編、社団法人日本下水道協会、昭和50年~平成12年