

下水の高度処理導入による地球及び地域への環境負荷変化量の統合的評価

Integrated Assessment of Change of Environmental Load to Global and Local Environment by
Introduction of Advanced Wastewater Treatment

稲葉陸太¹ 花木啓祐¹ 荒巻俊也²

Rokuta Inaba Keisuke Hanaki Toshiya Aramaki

ABSTRACT : There are few researches that compare among several environmental impact categories by analyzing quantitative relation between environmental load and external cost-benefit. A case study in this research deals with the introduction of advanced wastewater treatment (AWWT) to the wastewater treatment plant which drained area is Suwa Lake in Nagano Prefecture. The social benefits by additional improvement of water quality and the social cost with introduction of AWWT were calculated, and compared. The values of Willingness to Pay (WTP) calculated in existing researches was considered as social benefit. The social benefit by additional improvement of water quality was calculated as 116million~1,862million[¥·year⁻¹]. On the other hand, external cost by additional CO₂ emission was calculated as 0.9~22million[¥·year⁻¹]. Then the whole social cost was calculated as 790~810 million[¥·year⁻¹], including internal cost (789 million[¥·year⁻¹]) with introduction of AWWT. As conclusion, the method of integrated assessment to transform different types of environmental loads into the external cost-benefit is shown. In the case study, if the value of WTP showed only external benefit, the external benefit with introduction of AWWT is found to be greater than the external cost with introduction of AWWT.

KEYWORD; Integrated assessment, Advanced Wastewater Treatment, Global Warming, Improvement of Water Quality

1 研究の背景と目的

環境影響評価として、環境負荷と社会的費用便益の量的関係を解析し、複数の環境影響項目間の比較を行った研究はほとんどない。また、下水の高度処理においては放流先の水質改善が期待される一方で、追加的な CO₂ 排出による地球温暖化への影響が懸念され、環境影響項目間の比較を行う必要がある。異なる環境影響を定量的かつ統合的に評価する手法の 1 つとして、費用便益に換算する手法が考えられる。

本研究では、長野県・諏訪湖を放流先とする A 下水処理場をケーススタディとし、高度処理導入にともなう環境負荷の増減による影響の評価を試みた。具体的には、高度処理導入による諏訪湖の追加的水質改善でもたらされる社会的便益、追加的な CO₂ 排出でもたらされる社会的費用を算出し、これらの値を環境負荷の増減による社会的影響として比較評価を試みた。図 1 に示すように、

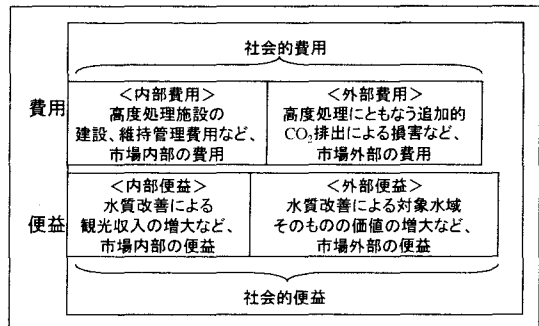


図1 算出する社会的費用と社会的便益

¹ 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 Department of Urban Engineering, The University of Tokyo

² 東京大学先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

社会的費用および社会的便益はそれぞれ市場システム内部に含まれるものとそうでないもので構成される。内部費用としては、高度処理施設の建設、維持管理費用を算出し、外部費用としては追加的CO₂排出でもたらされる損害費用を算出した。社会的便益としては後述する Contingent Valuation Method (CVM；仮想評価法)を用いた既存の研究における Willingness to Pay (WTP；支払い意志額)の値を用いて算出した。

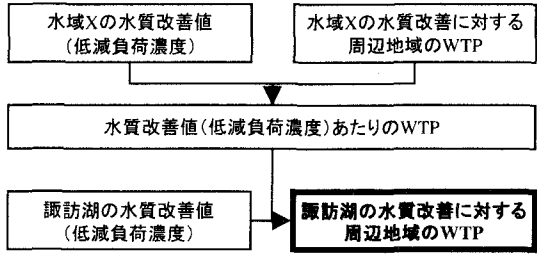


図2 諏訪湖の水質改善に対する WTP 算出の考え方

2 高度処理導入による社会的便益

A 処理場における高度処理導入による水質改善の社会的便益は、高度処理導入後の諏訪湖の水質改善に対する WTP の値に諏訪湖流域人口を乗じて算出できる。WTP を算出する手法としては、Contingent Valuation Method (CVM；仮想評価法、仮想市場法)が多く用いられている。CVM は表明選好法の一つであり、環境の貨幣的価値を定量化する社会経済学的手法¹⁾である。諏訪湖の水質改善に関して CVM を行なった研究はまだないが、諏訪湖と同様に富栄養化問題を抱える閉鎖性海域の水質改善に関して CVM を行なった研究事例が存在するので、本研究ではこれらの研究で算出された水質改善に対する WTP の値を適用する。考え方としては、図2に示すように、水域 X の WTP の値を水質改善値で除して水質改善値あたりの WTP を算出する。これに諏訪湖の水質改善値を乗じて諏訪湖の水質改善に対する WTP の値とした。適用した研究事例は東京湾および伊勢湾の水質改善に関するもの^{2) 3) 4)}である。高度処理導入による社会的便益の算出フローの全体像を図3に示す。

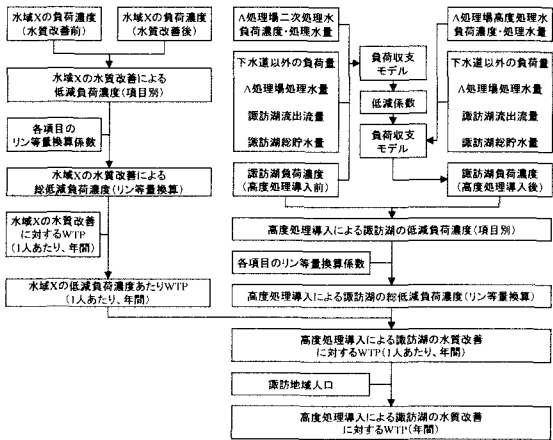


図3 高度処理導入による社会的便益の算出フロー

表1 各水域の水質改善に対する WTP の値

地域	人口 ⁵⁾ (person)	一般世帯数 ⁵⁾ (household)	世帯人数 (person-household ⁻¹)	WTP 世帯あたり1人あたり (yen-household ⁻¹ ・year ⁻¹)	備考
東京湾(湾内側)	11,773,805	4,952,354	2.38	7,992 ²⁾	3,362(人口、世帯数)
伊勢湾	10,810,009	3,587,841	3.01	21,551 ⁴⁾	7,153(三重県+岐阜県+岐阜県)

2) 東京都下水道局・(財)下水道新技術推進機構(1998)、「東京湾における下水の高度処理導入に伴う効果に関する研究」
 4) 伊勢湾浄化下水道計画連絡協議会(1999)、「伊勢湾に関する下水道事業費用効果分析」、下水道協会誌Vol.36 No.439
 5) 総務庁「国勢調査報告」都道府県・郡市別人口及び一般世帯数(平成7年10月1日現在)

表2 水質改善前後の各水域の負荷濃度

水域	負荷項目	負荷濃度(mg/l)	備考
東京湾	COD	水質改善前	3.4
		水質改善後	2.4・改善前の値はH7～H11の平均 ¹⁾
	T-N	1.50	0.90・改善後の予測値は「CODが3割改善」
	T-P	0.100	0.060 T-N、T-Pが「4割改善」とする記述 ³⁾ から
伊勢湾	COD	3.3	2.3・改善前の値はS63～H40の平均 ⁴⁾
		0.57	0.39・改善後の予測値はH371における値 ⁴⁾
	T-N	0.57	0.39
	T-P	0.057	0.031

1) 東京都HP、平成11年度公共用水域水質調査報告書、公共用水域水質測定結果(平成11年度)測定結果のまとめ
<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/mizu/kansi/11sokutei/11press01.htm>
 3) 佐伯謙吾(1999)、「下水の高度処理導入および高度処理に伴う費用効果分析」(東京都一)、下水道協会誌Vol.36
 4) 伊勢湾浄化下水道計画連絡協議会(1999)、「伊勢湾に関する下水道事業費用効果分析」、下水道協会誌Vol.36

2.1 水質改善値あたりの WTP の算出

各水域の水質改善に対する WTP の値を表1に示す^{2) 4) 5)}。水質改善値(低減負荷濃度)は水質改善前後の負荷濃度^{3) 4) 17)}(表2に示す)の差で求められる。水質改善値(低減負荷濃度)あたりの WTP を算出するためには、COD、T-N およびT-Pそれぞれの負荷濃度を統合した値もしくは制限栄養塩の負荷濃度のみを用い

表3 リン等価係数の値

負荷項目	リンに対する等価係数	備考
汚染単位 ¹⁾	富栄養化 ポテンシャル ²⁾	
COD	0.06	0.022・1汚染単位に相当するのは、COD:50kg、
T-N	0.12	0.42 T-N:25kg、T-P:3kg
T-P	1	1

7) 植田和弘・岡田弘・新澤秀則(1997)、「環境政策の経済学 理論と現実」、日本評論社
 8) 伊藤健彦・山本良一(1997)、「研究展望」5/1974-1978 分析手法の現状、土木学会論文集No.573-VII-4、1-8

なければならない。諏訪湖は富栄養湖であるが1979 年の下水道供与開始以来、リン制限型に移行しつつある⁶⁾ので、COD およびT-N の濃度をリン等量に換算して統合した値、もしくはリン濃度の値のみを用いることを考えた。リン等量に換算する係数(表3に示す)は、ドイツの排水課徴金制度における概念である「汚染単位」と「富栄養化ポテンシャル」の値から算出した。汚染単位は、「いくつもの水質汚染物質の汚染度を統一的に評価するための共通の尺度」と説明される⁷⁾。また、富栄養化ポテンシャルはT-N や COD の富栄養化への影響度をリン等量で表したものである⁸⁾。

水質改善値あたりのWTPを表4に示す。

表4 水質改善値(低減負荷濃度)あたりのWTP

リン等量換算係数	A	B	単位
汚染単位	15.700	66.500	yen・l・mg ⁻¹ ・person ⁻¹
富栄養化ポテンシャル	8,600	57,900	yen・l・mg ⁻¹ ・person ⁻¹
リン濃度単独	63.700	275.100	yen・l・mg ⁻¹ ・person ⁻¹

Aは東京湾の水質改善値、WTPを適用した場合

Bは伊勢湾の水質改善値、WTPを適用した場合

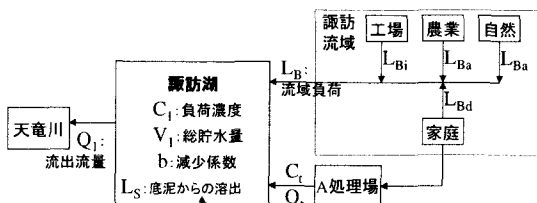


図4 負荷収支のモデル

2.2 高度処理導入による諏訪湖の水質改善値の算出

諏訪湖におけるCOD、T-NおよびT-P濃度のデータは用意に入手できるが、実際の施策では下水道整備とA処理場における高度処理導入は同時に進められており、高度処理導入単独の効果は明らかではない。

そこで、表5から表7に示した高度処理導入以前の諏訪湖の水質(平成2年～平成6年の平均)¹⁰⁾、A処理場の二次処理系列および高度処理系列の処理水質⁹⁾などのデータをもとに、諏訪湖の負荷収支を考慮して、高度処理導入後の諏訪湖の水質を算出する。諏訪湖は平均水深が4.7m¹⁰⁾と浅く、形状も単純であることから、図4に示すように1BOXの簡単な負荷収支モデルを考える。諏訪湖の水質(負荷濃度)C₁に関して式(1)の関係が成り立ち、定常状態を考えると式(2)の関係が導かれる。ここで、減少係数bは生物分解や沈殿さらには内部生産の合計を総括的に示したものであるが、現状の諏訪湖の水質などのデータをもとにbの値を求めたところ、-0.02(COD)、0.05(T-N、T-P)となった。さらに、bや高度処理系列処理水質などの値から、高度処理導入後の諏訪湖の水質を求めた。CODの底泥からの溶出のデータは不明であるため、ここでは0とした。

$$\frac{dC_1V_1}{dt} = C_1(-Q_1 - bV_1) + C_iQ_i + L_B + L_S \quad \cdots (1)$$

$$C_1 = \frac{L_B + L_S + C_iQ_i}{Q_1 + bV_1} \quad \cdots (2)$$

算出した高度処理導入による諏訪湖の水質改善値(低減負荷濃度)を表6中に示した。

表5 諏訪湖の流域負荷

負荷項目	諏訪湖流域負荷(t/day) ⁹⁾					底泥からの溶出(t/day) ⁶⁾
	家庭	工場	農業	自然	合計	
COD	1.3	0.5	0.5	1.5	3.8	0.0
T-N	0.52	0.5	1.4	0.7	3.12	1.57
T-P	0.078	0.04	0.08	0.02	0.218	0.074

・家庭由来の流域負荷は、負荷発生量⁹⁾と(下水道普及率/100)の積とした

・下水道普及率は平成6年度の値73.7%¹⁰⁾

9)建設省土木研究所・(財)国土開発技術研究センター(1984)、「湖沼の総合的水管理技術の開発に関する研究報告書」

10)長野県諏訪建設事務所・(財)長野県下水道公社南信管理事務所(1998)、「クリーンレイク諏訪 諏訪湖流域下水道」

6)沖野登輝夫(1990)、「諏訪湖 ミクロコスモスの生物」、八坂書房

表6 A処理場処理水と諏訪湖の負荷濃度

負荷項目	A処理場処理水		諏訪湖		改善値
	二次処理	高度処理	高度処理導入前 ¹⁰⁾	高度処理導入後	
COD	10	10	6.1	6.1	0.0
T-N	15	10	1.16	1.08	0.08
T-P	2.6	0.5	0.099	0.065	0.034

11)長野県・(財)長野県下水道公社(1997)、「諏訪湖流域下水道の高度処理」

10)長野県諏訪建設事務所・(財)長野県下水道公社南信管理事務所(1998)、「クリーンレイク諏訪 諏訪湖流域下水道」

表7 試算に用いたその他の数値

項目	値	単位	備考
A処理場の処理水量 ¹²⁾	82,394	m ³ /day	年間処理水量
諏訪湖の流出水量 ⁹⁾	1,728,000	m ³ /day	
諏訪湖の総貯水量 ¹⁰⁾	62,987,000	m ³ /day	
諏訪流域人口 ¹⁰⁾	200,000	person	計画区域人口をもとにした

12)財団法人日本下水道協会(1999)、「平成9年度 下水道統計 行政版」

9)建設省土木研究所・(財)国土開発技術研究センター(1984)、「湖沼の総合的水管理技術の開発に関する研究報告書」

10)長野県諏訪建設事務所・(財)長野県下水道公社南信管理事務所(1998)、「クリーンレイク諏訪 諏訪湖流域下水道」

2. 3 高度処理導入による諏訪湖の水質改善の社会的便益の算出

2. 1で算出した水質改善値（低減負荷濃度）あたりの WTP の値に、2. 2で算出した高度処理導入による諏訪湖の水質改善値を乗じ、さらに諏訪湖流域人口¹⁰⁾を乗じて、社会的便益の値を算出し、表8に示した。

表8 高度処理導入による水質改善の社会的便益

リン等量換算係数	A	B	単位
汚染単位	137,000,000	579,000,000	yen/year
富栄養化ポテンシャル	116,000,000	784,000,000	yen/year
リン濃度単独	431,000,000	1,862,000,000	yen/year

Aは東京湾の水質改善値、WTPを適用した場合
Bは伊勢湾の水質改善値、WTPを適用した場合

3 高度処理導入に伴う社会的費用

3. 1 内部費用の算出

A 処理場における内部費用は、施設全体の一括したデータしか得られておらず、高度処理施設・設備に限定したデータは得られていない。そこで表9に示すように東京都の処理場²⁾に関するデータをもとに、処理能力¹²⁾との比例関係で A 処理場の高度処理にかかる工事費、維持管理費および年費用を算出した。その結果、A 処理場の高度処理導入にともなう内部費用は 7.9 億円/年となった。

表9 高度処理導入にともなう内部費用

下水処理場名	工事費	維持管理費	高度処理		年費用	処理能力	処理水あたり費用
			高級処理	差分			
東京都 芝浦	31.4	47.2	36	11.2	42.6	113	10.3
三河島	32.1	40.7	31.4	9.3	41.4	70	16.2
小台	19.6	22.4	18.1	4.3	23.9	35.8	18.3
新河岸	38.1	45.1	34.5	10.6	48.7	70.5	18.9
鎌倉	20.2	30	23.7	6.3	26.3	45	16.1
合計					183.1	334.3	15.0
諏訪湖 A					7.9	14.4	15.0

出典：東京都下水道局（財）下水道新技術推進機構（1998）、「東京湾における下水の高度処理導入に伴う効果に関する共同研究団法人日本下水道協会（1999）、「平成九年度 下水道統計 行政版」

3. 2. 外部費用の算出

高度処理導入にともなう外部費用は、追加的電力消費量から追加的 CO₂ 排出を算出し、CO₂ 排出量増加でもたらされる気候変動の損害費用を算出して求められる。外部費用の算出フローを図5に示す。

A 処理場における処理水量あたりの電力消費量を、下水道統計¹²⁾のデータから算出した。下水道統計では、従来型処理および高度処理それぞれの系列の処理水量は記載されているが、電力消費に関しては処理場全体の値しか記載されていない。そこで、式（3）で算出される¹³⁾標準活性汚泥法の下水処理にともなう電力消費の一般的な値を用いて、A 処理場の二次処理系列の電力消費量をまず求めた。つぎに、水処理全体の電力消費量からこれを除して高度処理系列の電力消費量を求めた。これらの値を表10に示す。

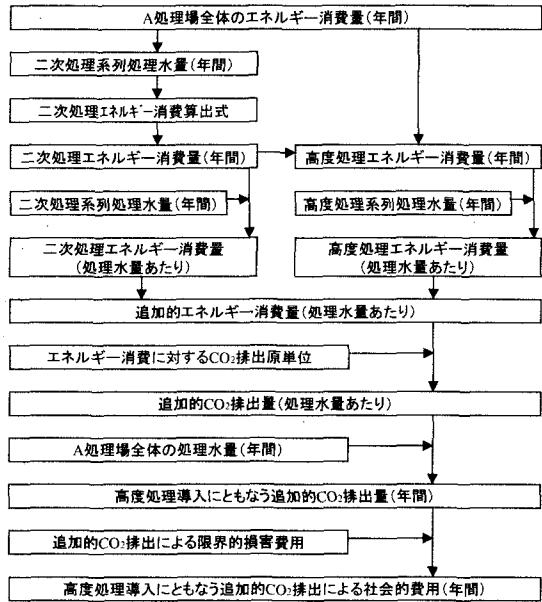


図5 外部費用の算出フロー

表10 処理水量あたりの電力消費量

種類	方式	年間電力使用量		処理水量あたり電力使用量
		千kWh/年	m ³ /年	
二次処理	標準活性汚泥法	7,800	23,433,092	0.333
高度処理	凝集剤添加活性汚泥法	4,945	6,640,664	0.745
全体	循環式硝化脱窒法	12,744	30,073,756	0.424

日使用電力（kWh/日）＝0.2808×日処理水量（m³/日）＋3341.4 …（3）

以上の議論から、処理水量あたりの電力消費量は従来型処理系列で 0.333kWh/m³、高度処理系列で 0.745kWh/m³となり、高度処理にともなう追加的な電力消費は 0.412kWh/m³、これと年間処理水量の値から、全体で約 1,200 万 kWh/年と算出された。これに電力消費あたりの CO₂ 排出原単位 0.129kg-C/kWh¹⁴⁾

を乗じて、追加的 CO₂ 排出量は約 1,600t-C /年と算出された。CO₂ 排出による限界の損害費用は、地球温暖化への影響に関する多くの研究によって算出されている。図6に、CO₂ 排出量増加で予測される気候変動の損害費用から算出された排出量あたりの限界費用¹⁵⁾を示した。限界費用には大きな幅があるが、これは温度上昇の推定値、科学的予測、影響に対する解釈および貨幣的評価の差が原因¹⁶⁾である。限界費用は 578 円/t-C

(Nordhaus) ~13,516 円/t-C (Cline) であるから、これに追加的 CO₂ 排出量に乗じて、高度処理導入による社会的費用は約 90 万~2,200 万円/年と算出された。

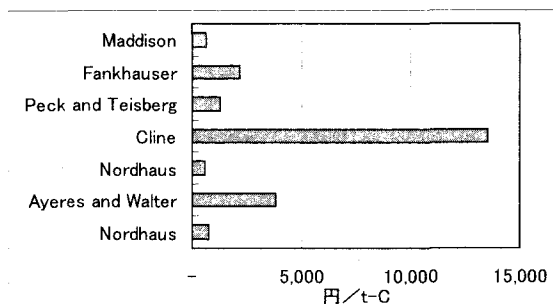


図6 CO₂排出量あたりの社会的限界費用

4 社会的費用便益の比較

2章算出した諏訪湖の水質改善に対する社会的費用と、3章で算出した CO₂ 排出量増加による社会的費用を比較したものを図7に示す。既存の研究におけるCVMで計測されたWTPが、内部便益を含むかどうかは明確ではない。まず、適用したWTPの値は社会的便益全体を表しており、最終的に算出された便益も社会的便益全体であると考え、これを社会的費用全体と比較する。東京湾の研究事例にもとづくデータでは、いずれのケースでも社会的費用が社会的便益を上回

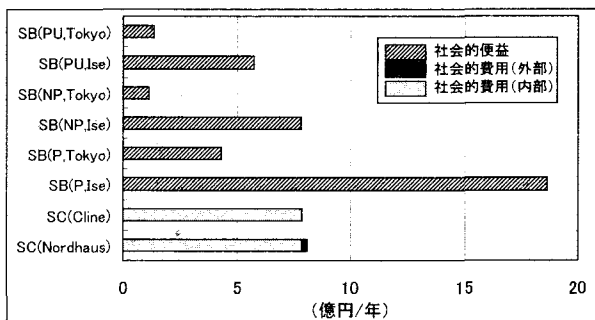


図7 社会的便益と社会的費用の比較

PU：汚染単位でリン換算，NP：富栄養化ポテンシャルでリン換算，P：リン単独

Tokyo：東京湾の研究にもとづく，Ise：伊勢湾の研究にもとづく

Cline：Clineの研究にもとづく，Nordhaus：Nordhausの研究にもとづく

るという結果になった。一方、伊勢湾の研究事例にもとづくデータでは、リン単独で評価した場合、社会的便益が社会的費用を大きく上回った。これらの結果は以下の理由によると考えられる。まず、伊勢湾と東京湾の研究事例のデータを比較すると、水質改善値では後者が大きく、WTPの値では前者が大きいいため、水質改善値あたりのWTPは前者が大きくなる。また、A処理場においては高度処理導入により、CODや窒素に比べて相対的にリンが大きく削減されるため、リン濃度を大きく見積もる換算方法ほど社会的便益の値は大きく算出される。つぎに、適用したWTPの値が外部便益のみを表しており、最終的に算出された便益も外部便益のみであると考え、これを外部費用と比較すると、水質負荷の減少による外部便益がCO₂の増加による外部費用を大きく上回っていることがわかる。よって、環境負荷の変化による外部費用便益に限って議論すると、ケーススタディの高度処理導入事業は非常に有効であるといえる。

5 結論

本研究では、異種の環境負荷の変化量を外部費用便益に換算し比較することによって、環境負荷を統合的に評価する手法を示した。また、ケーススタディでは、高度処理導入にともなう施設建設費や維持管理費用などの内部費用が大きいものの、適用するWTPの値や換算方法によっては高度処理導入による社会的便益がそれを大きく上回るという結果が示された。対象である諏訪湖は現在リン制限型であるので、負荷項目のうちリンを重視する換算方法がより現状を反映していると考えられるが、その意味では現状の諏訪湖で高度

処理を導入する費用効果は大きいと考えられる。また、水質改善効果による外部便益と比較すると、CO₂排出量増加による外部費用は非常に小さく、これを環境影響の側面としてとらえ統合的に評価するならば、高度処理の導入は非常に有効な事業であるといえる。

今後の課題としては、まず、CVM によるアンケート調査を行ない評価対象地域における実際の WTP の値を計測する必要がある。その際には計測しようとする WTP は外部便益なのか、社会的便益全体なのかを明確にする必要がある。また、評価対象施設の高度処理施設における電力消費量、費用などに関する実際のデータを用いて厳密に評価する必要がある。

参考文献

- 1) 鷺田豊明 (1999)「環境評価入門」、勁草書房
- 2) 東京都下水道局・(財)下水道新技術推進機構 (1998)、「東京湾における下水の高度処理導入に伴う効果に関する研究」
- 3) 佐伯謹吾 (1999)、「下水の高度処理導入および合流改善に伴う費用効果分析ー東京都ー」、下水道協会誌 Vol.36 No.439
- 4) 伊勢湾浄化下水道計画連絡協議会 (1999)、「伊勢湾に関する下水道事業費用効果分析」、下水道協会誌 Vol.36 No.439
- 5) 総務庁「国勢調査報告」都道府県・都道府県庁所在市別人口及び一般世帯数(平成7年10月1日現在)
- 6) 沖野登輝夫 (1990)、「諏訪湖 ミクロコスモスの生物」、八坂書房
- 7) 植田和弘・岡敏弘・新澤秀則編著 (1997)、「環境政策の経済学 理論と現実」、日本評論社
- 8) 伊坪徳宏・山本良一 (1997)、「研究展望 ライフサイクルインパクト分析手法の現状」、土木学会論文集 No.573/Ⅶ-4, 1-8
- 9) 建設省土木研究所・(財)国土開発技術研究センター (1984)、「湖沼の総合的水管理技術の開発に関する研究報告書」
- 10) 長野県諏訪建設事務所・(財)長野県下水道公社南信管理事務所 (1998)、「クリーンレイク諏訪 諏訪湖流域下水道」
- 11) 長野県・(財)長野県下水道公社 (1997)、「諏訪湖流域下水道の高度処理」
- 12) 財団法人日本下水道協会 (1999)、「平成九年度 下水道統計 行政偏」
- 13) 建設省都市局下水道部(1996)、「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」
- 14) 土木学会地球環境委員会、「二酸化炭素排出量原単位」
- 15) IPCC 第3作業部会編・天野明弘・西岡秀三監訳 (1997)、「地球温暖化の経済・政策学 IPCC 第3作業部会報告」、中央法規
- 16) 植田・羅・林 (2000)、「地球温暖化の日本への影響 2000 (仮称) 合同編集会議合宿 0次ドラフト集」, 第8章 気候変動の影響の経済評価: 日本とアジア途上国への示唆 (暫定版)
- 17) 東京都HP、平成11年度公共用水域水質速報発表、公共用水域水質測定結果(平成11年度)測定結果のまとめ <http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/mizu/kansi/11sokutei/11press01.htm>