

18. 地域環境改善技術の導入効果と副次的 CO₂ 排出による地球温暖化への影響のトレードオフ評価

EVALUATION OF TRADE-OFF RELATION BETWEEN THE IMPROVEMENT OF REGIONAL ENVIRONMENT WITH AN INTRODUCTION OF ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES AND THE IMPACT OF IT ON GLOBAL WARMING BY CO₂ EMISSION

稲葉陸太*, 荒巻俊也**, 花木啓祐***, 中谷隼***

Rokuta INABA*, Toshiya ARAMAKI**, Keisuke HANAKI***, Jun NAKATANI***

ABSTRACT; Objectives of this study are building and applying methodologies to evaluate trade-off relation between the improvement of regional environment with an introduction of environmental technologies and the impact of it on global warming by CO₂ emission.

In this study, reduction of target load and emission of additional CO₂ are calculated and converted to an economic value to evaluate trade-off relation. And some methodologies, which enable to consider regional characteristics, are applied to estimate an economic value of the improvement of regional environment. In addition, marginal social cost of CO₂ emission is applied to estimate an economic value of the impact of global warming. Along with methodologies shown above, improvement technologies for water environment of Lake Suwa in Nagano prefecture were evaluated as a case.

As results of this study, the improvement of water environment was simulated by ecosystem model, and using Contingent Valuation Method, the economic value of it was estimated as 728 million/year. On the other hand, CO₂ emission was calculated by applying inventory analysis of LCA, and the maximum value of global warming was estimated as 30million/year by using marginal social costs. It can be inferred that both technologies are effective within environmental aspects of eutrophication and global warming.

KEYWORDS; Evaluation of Trade-off Relation, Global Warming, Improvement of Regional Environment, LCA, CVM

1 背景と目的

環境改善技術の導入にあたっては、技術が目標とする環境改善が達成される一方、投入される資源・エネルギーの消費に伴う副次的なCO₂により地球温暖化への影響がもたらされるという、トレードオフの発生が懸念されている。また環境改善技術は、ある特定の地域における事業として導入されることが多いため、地域環境の改善効果の推定にあたっては、技術が導入される地域の特性を十分考慮することが必要である。

ライフサイクルでの多側面の環境影響を統合的に評価する手法としてはLCA (Life Cycle Assessment) が期待されている。これまで研究開発されてきたLCA手法の多くは製品の評価を目的としたもので、影響評価における地域特性の考慮は重要視されてこなかった。そのため、特定地域の事業評価にLCAを適用する場合

* 独立行政法人 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies

** 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

*** 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

は、地域特性を考慮するための改良が必要である。一方、事業の環境アセスメントにおける評価項目は地域環境に関するものがほとんどで、地球環境に関するものは考慮されてこなかった。このように、従来の地域環境の特性を考慮した評価と地球環境への影響評価は両立してこなかったといわざるをえない。

以上の背景から、本研究では環境改善技術の評価対象とし、地域環境の特性を考慮した改善効果の評価、および技術導入に伴う副次的CO₂排出による影響評価に基づくトレードオフの評価手法を構築することを第一の目的とした。また、構築手法を適用したケーススタディの実施を第二の目的とした。著者らはこれまでもトレードオフ評価を試みている¹⁾が、本研究では実際に地域環境改善効果および副次的CO₂の推定を行うことによってより厳密な評価を目指した。

2 トレードオフ評価手法の構築

本研究では以下の議論に基づきトレードオフ評価の手法を構築した。まず、技術が対象とする負荷の削減量は、導入地域の特性を考慮するために地域の統計データに基づいて算定することにした。一方、副次的CO₂の排出量はLCAのインベントリ分析を適用して算定することにした。

トレードオフ評価に必要な統合化に関してはLCAの分野で研究・開発されている手法を参考にした。まず、アンケート調査やパネリングによって影響カテゴリ間の重み付け係数を決定する手法では、一部の影響項目における地域特性のみを考慮することは困難である。また、負荷排出目標に対する到達度を評価するDtT (Distance to Target) 手法では、環境基準値が存在しない項目については評価が困難である。これらの手法に対して、環境影響を貨幣換算する手法は一部の影響項目における地域特性の考慮や、環境基準値が存在しない項目を含めた評価が可能であるため、これを統合化手法として適用することにした。

地域環境改善効果の推定・貨幣換算については、事業の環境アセスメントで用いられる影響評価手法や社会経済的評価手法など、地域特性を考慮できる手法を適用することにした。一方、地球温暖化の影響の推定・貨幣換算については、既存研究で推定されたCO₂排出量あたりの限界的外部費用を適用することにした。以上で構築した手法を図1に示した。

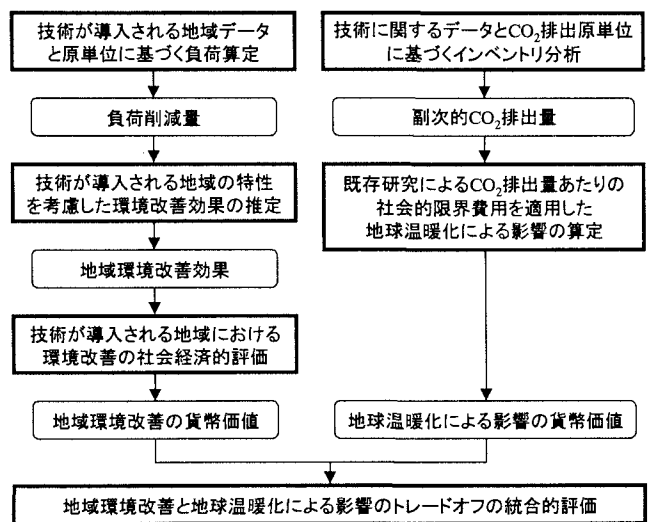


図1 構築したトレードオフ評価手法

3 構築手法の適用事例

本研究では構築した評価手法を適用するケーススタディとして、長野県・諏訪湖における水環境改善技術の導入効果と副次的CO₂による地球温暖化の影響のトレードオフ評価を試みることにした。諏訪湖を対象環境とした理由は、富栄養化状態が続く閉鎖性水域、集水域の境界が明確、および関連市町村の規模がアンケート調査を行う上で適当（図2参照）、という3点である。環境改善技術としては現在進行中の下水道整備と底泥浚渫の完遂を対象とした。

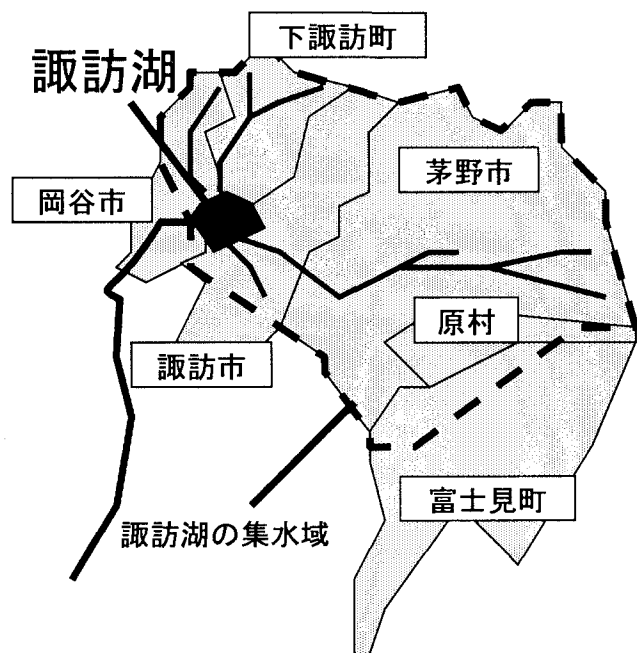


図2 諏訪湖とその集水域および関連市町村

4 技術導入による諏訪湖水環境改善効果の推定

4.1 技術導入による水質負荷削減量の算定

ケーススタディで削減対象とする負荷は、富栄養化に寄与するCOD、T-NおよびT-Pである。まず、下水道整備対象を全ての家庭・観光施設・工場と仮定し、これら排出源からの2000年現況（1999年9月現在で普及率85.5%）での排出量を下水道整備完遂による削減量として算定した。この結果を表1に示す。排出源の数量は2000年度の統計データ²⁾を用い、負荷排出原単位は「天竜川流域下水道整備総合計画 計画説明書」³⁾（以下「流総計画説明書」と呼ぶ）等を参考にした。また、水質改善値を予測するためには流入する負荷量全体を把握する必要があるため、全ての排出源からの排出量を算定した。

つぎに、流総計画説明書で示された浚渫前後における底泥からの水質負荷溶出速度の測定結果³⁾と浚渫工事に関する資料⁴⁾を参考にして、2000年（3月現在で進捗率60.9%）における平均溶出速度、底泥浚渫が完遂した場合の溶出速度も求めた。さらに、これらの溶出速度に諏訪湖面積を乗じて溶出量を算定し、水質負荷削減量を算定した。この結果を表1に示した。

表1 導入技術ごとの水質負荷削減量

導入技術	負荷削減量(t/年)		
	COD	T-N	T-P
下水道整備完遂	371	151	17
底泥浚渫完遂	49	11	1

4.2 負荷削減による諏訪湖水質改善の予測

2節で構築した手法に従い、4.1で算定した水質負荷削減量をもとに諏訪湖の特性を考慮した水質改善予測を行った。諏訪湖は形状が単純で面積が小さく水深が浅いといった理由から、湖全体を完全混合の1ボックスと捉えた生態系モデルを適用することにした。生態系モデルで考慮する物質収支（図3参照）、基礎式およびパラメータは、長野県の流総計画説明書³⁾を参考とした。生態系モデルの数値計算は2ステップのRunge-Kutta法を用い、時間ステップは1日、計算期間は1年とした。

水質予測は、排出負荷量に流入河川ごとの流達率³⁾を乗じた流達負荷量を生態系モデルに入力して行った。下水道整備完遂については家庭・工場・観光由来を除いた流達負荷量を入力し、底泥浚渫完遂については浚渫完遂後の溶出速度³⁾を入力して水質改善予測を行った。これらの結果を表2に示した。

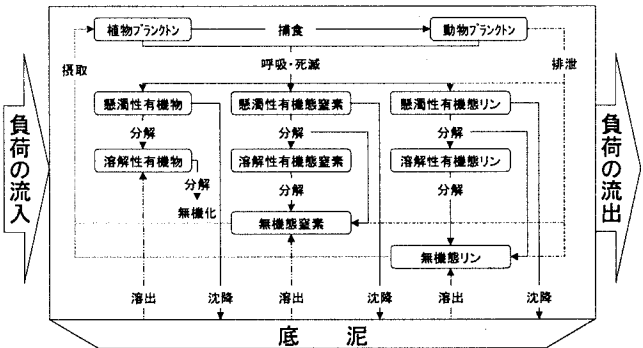


図3 生態系モデルで考慮した物質収支

表2 生態系モデルによる水質改善予測値

導入技術	水質改善予測値(mg/l)		
	COD	T-N	T-P
(2000年現況実測値)	5.8	0.80	0.048
単独 下水道整備完遂	4.9	0.69	0.040
底泥浚渫完遂	5.7	0.79	0.047
複合 下水+浚渫	4.8	0.68	0.040

4.3 諏訪湖水環境改善の貨幣価値の推定

本研究では環境改善の貨幣価値推定手法として、周辺地域社会による自然生態系の評価が可能なCVM（Contingent Valuation Method）を適用することにした。実際の調査では、ある環境改善水準と対策に必要な増税額を組み合わせたシナリオをアンケート調査票に提示し、税金支払いの賛否を問うことによってWTP（Willingness to Pay：支払意志額）を表明させた。複数の技術導入の効果を評価するために、シナリオで提示する水質改善水準を4段階設定した。ここで、水質改善予測値を提示するだけでは被験者がシナリオを理解することは困難と考え、本研究では様々な知見⁵⁾に基づき水質改善水準に対応する環境状態を推定してイラストで表現した。質問形式は戦略バイアスが少ない⁶⁾とされている二段階二項選択形式を適用した。

(A) 予備調査

本調査に先駆け、2000年11月に諏訪地方の環境NPO会員の方々を調査対象者として予備調査を行った。

128通の調査票を郵送したところ回収率は50.8%（65通）であった。WTP平均値はいずれの環境変化の水準に対しても大きな変化は見られず包含効果バイアスが生じた可能性が考えられた。

(B) 本調査

予備調査における包含効果バイアスの可能性等を踏まえて調査票を改良し、2000年12月に諏訪地方における本調査を行った。提示金額、質問形式は予備調査と同様とした。本調査のシナリオで設定した水質改善水準とそれに対応する環境変化を表3に示す。調査対象者は諏訪集水域の市町村の住民5,000人を住民基本台帳から無作為抽出した。その結果回収率は30.8%（1,539通）であった。

各水準における WTP 平均値は回収データにロ

ジットモデルを適用して推定した。その結果を表4に示す。水準2、3で順位が逆転している理由として、標本抽出における偏りの存在などが考えられるが、回答者の属性等に関する解析内容は中谷の論文⁷⁾で詳しく述べられている。

(C) 技術導入による諏訪湖水環境改善効果の貨幣価値の推定

表2の技術導入による水質改善予測値と表3の水質改善設定値を比較すると、両技術を導入しても達成される改善水準は1までと判断された。水準1におけるWTP平均値（10,000円/世帯/年）に諏訪地方の世帯数（約7万世帯）を乗じたところ、諏訪湖水環境改善の貨幣価値は約7.28億円/年と推定された。

表4 WTP 推定結果

水環境改善水準	WTP (円/世帯/年)
1	10,000
2	12,900
3	12,200
4	13,200

5. 技術導入に伴う副次的 CO₂ 排出による地球温暖化への影響の推定

5.1 技術導入に伴う副次的 CO₂ 排出量の算定

(A) 下水道整備完遂

下水道整備完遂に伴うプロセスとしては未整備分の下水道幹渠敷設、幹渠の維持・管理、および管渠敷設で増加する下水処理・汚泥処理があげられ、それぞれについて CO₂ 排出量の算定を行なった。

(1) 下水管渠敷設

下水道管渠敷設に伴う CO₂ 排出量については、まず下水道工事の積算に関する文献を参考に、ある管径における建設資材・燃料などの積算工事数量・積算価格（管渠敷設長さ当たり）を求めた。また、管径ごとに管渠の体積、掘削幅などが変化するため、管径に対する積算工事数量の変化を表す関係式を求めて、諏訪湖流域下水道における管径別の積算工事数量を推定した。この数量に CO₂ 排出原単位⁸⁾を乗じて、資材・燃料の誘発分・燃焼分の CO₂ 排出量（管径別、長さ当たり）を算定した。これに管径別の未整備管渠延長⁹⁾を乗じて、さらに耐用年数を50年と仮定して年間の CO₂ 排出量を算定した。以上の算定フローを図4に、算定結果を表5に示した。

表3 調査票(本調査)で提示した属性とその変化

改善水準	現状	1	2	3	4
水質					
COD	7.2	5.0	3.6	3.6	3.0
T-N	1.10	0.95	0.60	0.40	0.20
T-P	0.077	0.071	0.050	0.030	0.010
類型	C-V(以下)	B-V	B-IV	B-III	A-II
調査票で提示する属性	ユスリカ発生する	減少する			大きく減少
湖面	アオコが発生する		アオコが発生しなくなる		
透明度	約1m		約2m	約3~4m	約4~5m
湖とのふれあい	湖水浴は出来ない		快適ではないが湖水浴ができる	快適に湖水浴ができる	
水生生物	水草が少なく、エビも少ない		水草が増え、エビも増える		
魚類	魚類の数は多く、コイ・フナ・カサギなどがすむ		魚類の数は減るが、魚類の種類は多くなる(タナゴなど)		
水質		飲料水源にすることはできない	高度な処理で飲料水にできる	通常の処理で飲料水にできる	

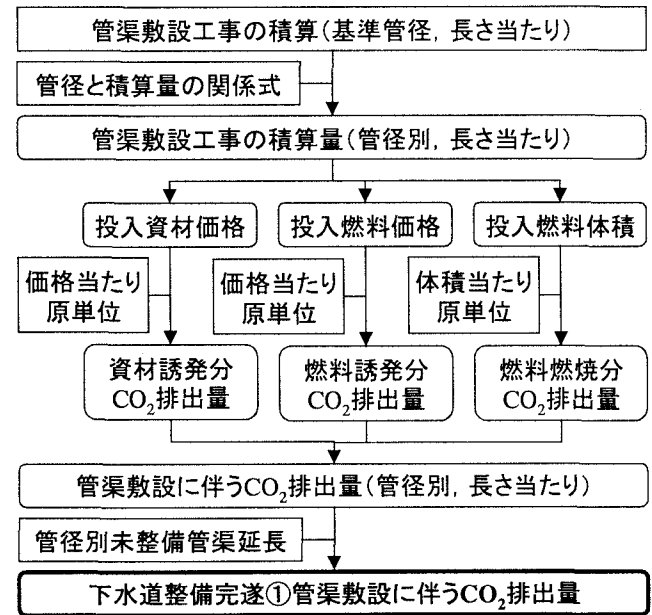


図4 下水管渠敷設に伴う CO₂ 排出量算定フロー

(2) 下水管渠維持・管理

下水管渠のライフサイクルを考えると、敷設後の維持・管理に伴う CO₂ 排出量も算定する必要がある。本研究の算定では、管渠の維持・管理作業として清掃作業のみを対象とすることにした。管渠の維持・管理に伴う CO₂ 排出は管渠清掃機械の誘発分および燃料燃焼分が考えられるが、まず、福岡の事例研究¹⁰⁾で示されたそれぞれのエネルギー消費量（清掃管渠長さ当たり）を適用し、これに対応するエネルギー消費量当たりの CO₂ 排出量原単位⁸⁾ を乗じて機械誘発分、燃料燃焼分の CO₂ 排出量を算定した。これに未整備管渠の年間維持・管理延長⁹⁾ を乗じて年間 CO₂ 排出量を算定した。以上の算定結果を表5に示した。

(3) 下水処理、汚泥処理増加分

管渠拡充に伴う下水・汚泥処理増加分に伴う CO₂ 排出量の算定も行なった。まず、下水道未整備人口⁹⁾ に一人当たり処理水量⁹⁾ を乗じて未整備分の年間処理水量を求めた。これに処理水量当たりの CO₂ 排出量原単位¹¹⁾ を乗じて、下水・汚泥処理に伴う年間 CO₂ 排出量を算定した。以上の算定結果を表5に示した。

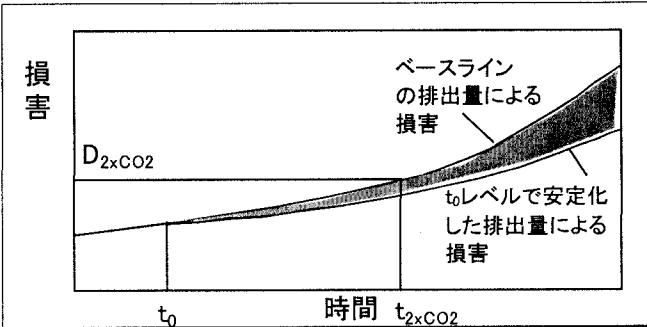
(B) 底泥浚渫完遂

底泥の浚渫において CO₂ が発生しうる要因としては、浚渫機械の誘発分と燃料燃焼分である。まず、これらの原単位として浚渫量あたりの CO₂ 排出量原単位の算定事例¹²⁾ の値を適用することにした。これに未浚渫量⁴⁾ を乗じて底泥浚渫完遂に伴う CO₂ 排出量全体を算定した。これを浚渫効果が持続する期間で除して年間の CO₂ 排出量を求めた。浚渫効果持続期間の厳密な算定は困難であることから、本研究ではこれまでの工事進捗速度⁴⁾ から推定した未浚渫分工期とこれまでの工期⁴⁾ を合わせた全体工期 58 年間に適用した。以上の算定結果を表5に示した。

表5 導入技術ごとの CO ₂ 排出量		
導入技術		CO ₂ 排出量
区分	内訳	t-C/年
下水道整備完遂	管渠敷設	479
	管渠維持	7
	下水処理	766
	汚泥処理	286
	合計	1,538
底泥浚渫完遂	合計	292

5. 2 CO₂ 排出による地球温暖化への影響と損害費用に関する既存研究結果

CO₂ の排出量増加に伴う地球温暖化による気候変化の損害を予測した研究は数多くあり¹³⁾、これらの研究では気候変化による損害項目が網羅的に把握されている。これらの研究では、年間 CO₂ 排出量について今後増加し続ける「ベースライン」と、基準年 t₀ のレベルでの「安定化」のシナリオが考えられている。それぞれのシナリオに伴う損害費用を示した図5において、ハッチングを施した部分の面積は t₀ のレベルで排出量を安定化した場合に回避される損害費用となる。社会的限界費用は、この回避される損害費用の CO₂ 単位削減量 (1t-C) あたりの値である。以上の議論に基づき社会的限界費用を推定した研究結果が IPCC の報告書¹³⁾にまとめられているが、本研究では、最も小さい Nordhaus の推定結果と、最も大きい Cline の推定結果を適用した。



James P. Bruce, Hoesung Lee, Erik F. Haites, Climate Change 1995
Economic and Social Dimensions of Climate Change, Cambridge University Press, 1996

図5 CO₂ 排出による損害費用

5. 3 技術導入に伴う副次的 CO₂ 排出による地球温暖化の損害費用の推定

5. 1 で算定した水環境改善対策に伴う年間の CO₂ 排出量は平均値であり、排出される時間的特性を考慮していない。そこで本研究では、社会的限界費用についても時間的特性は考慮せず、対策の基準年を含む1991年～2000年の値を用いることにした。

表7 技術導入に伴う CO ₂ 排出の貨幣価値				
貨幣価値	単位	導入技術	最小値	最大値
限界費用	円/t-C		769	18,000
社会的費用	万円/年	下水道整備完遂	118	2,769
		底泥浚渫完遂	22	525
		下水道+浚渫	141	3,294

表 7 に本研究で適用したCO₂の社会的限界費用（1991年為替レートで換算）を示した。表 5 の各導入技術に伴うCO₂排出量に、社会的限界費用を乗じて各導入技術に伴うCO₂排出の社会的費用を算定した結果を表 7 に示した。地球温暖化の貨幣価値を推定したところ、下水道整備完遂で最大約3,000万円/年、底泥浚渫完遂で最大約500万円/年という結果になった。

6 技術導入による水環境改善と地球温暖化への影響のトレードオフ評価

これまでの推定結果を用いて環境改善技術導入によるトレードオフを貨幣価値で表した結果を図 6 に示す。この図では地球温暖化の影響の貨幣価値は平均値が示されているが、いずれの導入技術においても諏訪湖水環境改善便益に比べて地球温暖化の外部費用は非常に小さく、考慮した影響の範囲内では効果的な環境改善技術であるという結果になった。

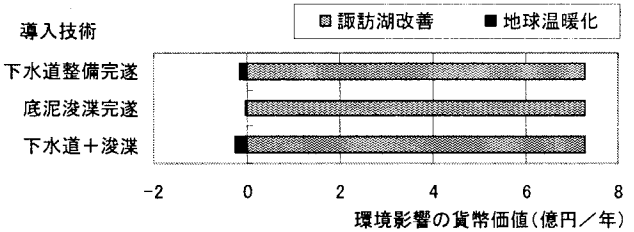


図6 環境改善と環境悪化のトレードオフ

7 まとめ

本研究では環境改善技術を対象として、地域特性を考慮した環境改善の推定と、副次的 CO₂ による地球環境への影響の推定を両立させ、さらにトレードオフを評価する手法を構築した。トレードオフ評価のために環境影響を貨幣換算すること、特に地域環境改善効果については社会経済学的手法を適用することを提案した。また、ケーススタディとして諏訪湖水環境の改善技術の評価を試み、構築手法に従った定量的かつ統合的なトレードオフ評価が実行可能であることを示した。構築手法は地域特性の考慮を一つの前提としていることから、他の環境改善技術や一般的な事業のトレードオフ評価手法としても適用可能といえる。今後の課題としては、評価結果における不確実性の解釈や、CO₂ 以外の負荷を含めた評価などが考えられる。

主要参考文献

- 1) 稲葉陸太, 花木啓祐, 荒巻俊也, 中谷隼, 諏訪湖水環境改善効果と対策に伴う地球環境への影響の費用便益換算による統合的評価, 環境システム研究論文集, Vol.29, 2001
- 2) 長野県総務部情報統計課, 平成 10 年長野県統計書, 長野県統計協会, 2000
- 3) 長野県, 天竜川流域別下水道整備総合計画 計画説明書, 1998
- 4) 長野県諏訪建設事務所, きれいな諏訪湖をめざして, 2000
- 5) 環境庁国立環境研究所, 環境容量から見た水域の機能評価と新管理手法に関する研究, 国立環境研究所特別研究報告 SR-11-93, 1993
- 6) 肥田野登編著, 環境と行政の経済評価 CVM〈仮想市場法〉マニュアル, 勁草書房, 1999
- 7) 中谷隼・稲葉陸太・花木啓祐・荒巻俊也, 仮想評価法を用いた諏訪湖水環境改善による社会的便益の解析, 土木学会平成 13 年度全国大会 第 56 回年次学術講演会, 2001
- 8) 鶴巻峰夫・野池達也, LCA における多項目環境負荷量の定量化に関する研究, 環境システム研究 Vol.25, 1997
- 9) 社団法人日本下水道協会, 平成 11 年度版 下水道統計・行政編・第 56 号の 1, 2001
- 10) 井村秀文ほか, 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/□・1, 75-84, 1996
- 11) 鶴巻峰夫・野池達也, LCA 手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究, 土木学会論文集 No.643/□・14, 11-20, 2000
- 12) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所・財団法人 港湾空間高度化センター, ライフサイクルアセスメント手法を導入した環境影響評価手法開発調査報告書, 1998
- 13) James P. Bruce, Hoesung Lee, Erik F. Haites, Climate Change 1995 Economic and Social Dimensions of Climate Change, Cambridge University Press, 1996