

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

稲葉陸太¹・花木啓祐²・荒巻俊也³・中谷隼⁴

1 工修 東京大学大学院博士課程学生 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

2 正会員 工博 東京大学大学院教授 工学系研究科都市工学専攻 (同上)

3 正会員 工博 東京大学講師 先端科学技術研究センター (〒153-8904 目黒区駒場 4-6-1)

4 東京大学大学院修士課程学生 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

水環境改善対策の実施に際してはCO₂などの環境負荷が増加する可能性がある。本論文では、CVMやLCAなどの手法を組み合わせ環境改善対策にともなう地域環境および地球環境への影響の費用・便益換算による統合的評価を目的とし、ケーススタディとして長野県・諏訪湖における下水道整備および底泥浚渫について評価を試みた。まず、諏訪湖集水域においてCVMを適用したアンケート調査を行い対策による諏訪湖の水環境改善便益を解析した結果、年間7.3億円となった。一方、対策についてLCインベントリー分析を行い追加的CO₂排出による地球温暖化の損害費用を算出した結果、年間100万～2,300万円となった。これらの結果から、評価対象の対策は統合的にみて環境改善効果が大いことが示された。

Key Words: Integrated Environmental Impact Assessment, CVM, Global Warming, Climate Change, Water Environment, Lake Suwa, LCA

1. はじめに

湖沼や内湾などの閉鎖性水域においては、人為由来の栄養塩が流入することによる富栄養化が問題となっており、これまで以上の対策が必要となっている。しかし、水環境改善対策の実施にあたっては、資源・エネルギー消費に伴ないCO₂などの水質項目以外の環境負荷が追加的に排出されるため、地球温暖化などの富栄養化以外の環境影響に対する寄与が懸念されている。特に、地球温暖化の影響は甚大な被害をもたらすことが予想されるため、あらゆる人間活動に伴うCO₂の排出削減は急務であり、水環境改善対策においても例外ではない。

地域環境と地球環境の間には、規模や機構などの自然科学的な次元、および所有権や責任の所在など社会経済的な次元の相違が存在するため、両者への影響を統合的に議論するのは容易でない。ただし、次元の相違を解消せずに地域環境問題と地球環境問題を別個の事象としたままでは、両者に影響する人間活動の妥当な改善水準を設定することが出来ず、効果的な改善が出来ない。こういったことから、水環境改善対策においても多側面の環境影響のトレードオフを何らかの手段で同次元に捉え統合的に評価する必要がある。

また、水環境は周辺地域と密接な関係にある一方、CO₂

排出源の地理的位置は地球温暖化の程度に関係せず、その影響が及ぶ範囲は地球全体である。こういった地域性の相違を考慮しつつ、水環境改善効果および対策に伴うCO₂排出の地球環境への影響に対して、環境負荷の変化量の把握、それにもとづく環境影響の予測、さらに環境影響の統合的評価手法の検討がそれぞれ必要となる。これら3つのステージにおける近年の議論を以下で述べる。

まず、環境負荷の変化量の把握に関する議論を述べる。水環境改善に関しては、対策による水質項目の削減負荷量を把握する必要があるが、多くの場合、対策の計画・設計段階で目標値として示されている。一方、追加的CO₂排出に関しては、対策の計画・設計段階では考慮されておらず、独自に把握する必要がある。CO₂などの環境負荷の変化量の把握に対しては、LCA (Life Cycle Assessment) 手法の1ステージであるライフサイクルインベントリー分析が広く適用されている。

次に、環境負荷の変化量にもとづく環境影響の予測に関する議論を述べる。水環境改善に関しては、対象とする水環境の条件を可能な限り再現した生態系モデルを構築し、これに流入負荷削減量をはじめとする種々のパラメータを入力することによって対策後の水環境の変化を予測する手法がほぼ確立されている。一方、追加的CO₂排出に関しては、人為的なCO₂排出によってもたらされ

る気候変化や、気候変化による生物種や海面上昇、熱帯性暴風雨など個別の項目への影響についての研究が数多くなされている。

続いて、環境影響の統合的評価手法に関する議論を述べる。統合的評価に関しては様々な議論があるが、一つの手法として環境影響を貨幣価値に換算する考え方がある。環境の貨幣価値を定量化する計測手法としては様々なものがあるが、CVM (Contingent Valuation Method: 仮想評価法) やコンジョイント分析などの社会経済学的手法が近年注目されている。CVMは、対象とする環境の周辺地域の住民に対してアンケート調査を行い、環境改善などに対する便益を解析する手法である。地域性が大きい水環境の改善効果に対しては、このCVMを適用し周辺地域への便益として貨幣価値に換算することも考えられる。一方、CO₂排出の地域性は小さく、あえて特定の地域においてCVMを適用した調査を行う意義は小さい。また、影響項目は多岐にわたっており、全ての項目を一度にCVMで計測するのは困難である。しかしながら、影響項目ごとに様々な手法を適用して気候変化による損害費用を推定し、さらにその結果を統合して、CO₂排出量に対する損害費用の定量的予測を行った研究がこれまで多くなされており、これを貨幣換算された環境影響として捉えることが出来る。

このような背景から本研究は、CVMやLCAの手法、および費用便益分析の考え方を組み合わせた、環境改善対策に伴う地域環境および地球環境への影響の費用・便益換算による統合的評価を目的とし、ケーススタディとして長野県・諏訪湖における下水道整備および底泥浚渫の実施に伴う環境影響について評価を試みた。富栄養化問題を抱える閉鎖性水域として長野県の諏訪湖を選定した理由は、依然として富栄養化の状態が続いており水質改善対策が必要なこと、流域界が明確であること、および関連市町村の規模がCVMを適用した調査に適していること、の3点が挙げられる。

2. 対策による諏訪湖の水質改善

長野県が1998年にまとめた「天竜川流域別下水道整備総合計画 計画説明書」¹⁾の中で、様々な対策における削減負荷量と、生態系モデルなどを用いた諏訪湖の水質改善予測値が示されている。予測における基準年の水質と、下水道整備および底泥浚渫を一括して完了させた場合の水質の予測値を表-1に示す。今回の試算ではこれらの予測値を用いることにする。

表-1 施策後の諏訪湖の水質予測

対策	削減対象	削減目標	施策後の水質予測 (mg/l)		
			COD	T-N	T-P
対策前基準年(H3)			5.6	1.21	0.107
下水道整備100%	家庭工場	ほぼ100%	4.0	0.98	0.068
底泥浚渫の完了	底泥流出	全流出負荷に対し T-N 27% T-P 25%			
環境基準値			3.0	0.60	0.050

参考:長野県(1998), 天竜川流域別下水道整備総合計画 計画説明書



図-1 調査対象地域

3. 対策による水環境改善便益

本研究におけるCVMを適用したアンケート調査は、調査票において、諏訪湖の環境改善とその対策に必要な増税額を組み合わせた仮想的なシナリオを提示し、それに対する賛否によってWTP (Willingness to Pay: 支払意思額) を表明させるものである。

本研究で行ったCVM調査の特色は、提示する水質改善水準が従来の多くの研究では単一であった^{2) 3) 4)}ものを複数設定した点で、水質改善水準と便益との定量的関係の把握をめざしている。

(1) 予備調査

2000年11月に諏訪地方の環境NPOである「諏訪環境まちづくり懇談会」の会員の方々を調査対象者として予備調査を行った。水質改善は4水準用意し、それに基づくシナリオを調査票で提示した。質問形式は二段階二項選択形式を適用した。ここで二項選択形式とは、評価対象に対してある一つの付け値が提示され、被験者がその提示額以上の支払意思があるかについて「Yes (賛成)」あるいは「No (反対)」の回答をするものである⁵⁾。消費者は、財・サービスに与えられた提示額に対し、受け入れられるので購入する、受け入れられないので購入しない、という行動を日常的によく経験していることから、二項選択形式は被験者にとって回答しやすい⁶⁾とされて

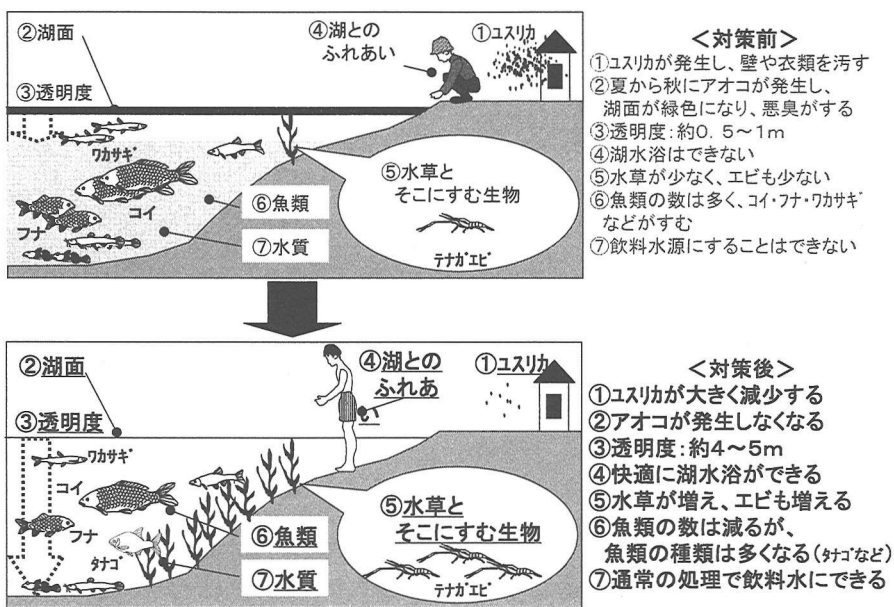


図-2 調査票で提示した環境変化のシナリオ (水準4)

いる。また、この形式は戦略バイアスなどが少ないとされている。二段階選択形式とは、一段階でYesと回答した場合に、同じ調査票の二段階目の設問でより高い提示額に対するYesもしくはNoを問い、一段階でNoと回答した場合により低い提示額に対するYesもしくはNoを問う形式である。この形式は、一段階よりも統計的効率性が高く、推定結果の信頼区間が狭まるとされている。最初提示金額は世帯あたりの年額で、5,000円、10,000円、15,000円、20,000円の4種類とし、二段階目ではそれぞれ5,000円ずつ増減させた金額を提示した（ただし、最初提示額5,000円における拒否回答については、二段階目での提示額を1,000円とした）。128通の調査票を郵送した結果、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なかった。この原因について、回答データを検討した結果、6割のYes回答者が「水質改善そのものに価値がある」と答えており、「どのような水準であれ水質が改善するというのであれば、表明金額に差異はない」といういわゆる包含効果バイアスが生じた可能性が考えられる。

(2) 本調査

(1) で述べたように、「改善」というプラスイメージの強い言葉の印象が、個々の環境変化項目に対する認識を弱め、包含効果バイアスを誘因した可能性があったため、本調査の調査票においては「水質改善」の代わりに「環境変化」という比較的中立的な言葉を用いることにした。また、税金による支払い形式は、NOAAガイドラ

インで最も正しい値に近いとされている⁶⁾が、予備調査では抵抗回答が多かった。そこで本調査では基本的に支払い形式は税金としながらも、回答者のストレスを緩和するため一段階目の設問で「税金以外なら賛成する」という選択肢を追加した。また、提示する環境変化のシナリオは、環境基準で定められた水質類型の濃度とそれに対応する利用形態および指標生物の記述⁷⁾、富栄養湖沼水質とアオコの消長に関する調査報告⁸⁾などをもとに原案を作成した。さらに、信州大学山地水環境教育研究センターの花里孝幸教授の助言を得てシナリオの原案を修正した。

以上のような予備調査からのフィードバック、専門分野の研究者の意見を反映させて、2000年12月に諏訪地方における本調査を行った。環境変化のシナリオは予備調査に続き4水準用意し、調査票において環境変化後の諏訪湖の状況を図示することによって被験者が具体的な諏訪湖のイメージを得られるように工夫した。質問形式は予備調査と同様、二段階二項選択形式を適用し、最初提示金額と二段階目での提示金額も予備調査と同様にした。本調査で用意した環境変化を表-2に、実際に調査票で提示したシナリオの一例（水準4）を図-2に示す。

調査手法も予備調査同様郵送方式である。調査対象者は諏訪集水域の市町村（岡谷市、諏訪市、茅野市、下諏訪町、富士見町、原村）の住民5,000人を住民基本台帳から無作為抽出（世帯主に限らない）した。その結果回収率は30.8%（1,539通（1月8日時点））であり、このうち有効回答率は92.7%（1,426通（1月8日時点））であった。

表-2 本調査で用意した環境変化

水準	水質類型	COD	T-N	T-P	追加的効用(一部)
1	B-V	5.0	0.95	0.071	・エスリカの減少
2	B-IV	3.6	0.60	0.050	・フコギが発生しなくなる ・快道ではないが湖水浴ができる
3	B-III	3.6	0.40	0.030	・高度な処理で飲料水にできる ・高度に湖水浴ができる
4	A-II	3.0	0.20	0.010	・快道に湖水浴ができる ・通常の処理で飲料水にできる

参考: 松本順一郎編集(1994), 水環境工学, 朝倉書店
環境庁国立環境研究所(1993), 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

表-3 水準ごとの WTP 平均値

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

表-4 諏訪湖の水環境改善便益

市町村	人口 (人)	世帯数 (世帯)	WTP (円/世帯/年)	便益 (億円/年)
合計	209,557	72,836	10,000	7.28

参考: 長野県企画情報政策課(1999), 平成9年 長野県統計書, 長野県統計協会

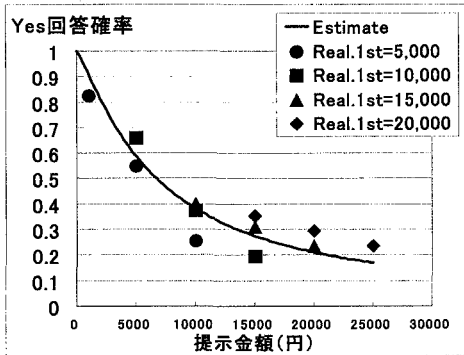


図-3 Yes 回答確率曲線

(税金形式のみ、水準1、ロジットモデル)

(3) 本調査の回収データの解析

本調査で回収したデータの解析にあたっては、効用差関数が対数線形で、誤差項の分布がロジスティック分布に従うと仮定するロジットモデルを用いた。ロジットモデルにおけるパラメータの推計は、ワークシートを独自に Excel 上に作成して行った。入力するデータは提示額と回答数であり、各々の環境変化の水準ごとにパラメータの推計、Yes 回答確率曲線の決定、WTP 平均値の算出を行った。例として、税金形式における Yes 回答者の、水環境改善水準が1の場合の Yes 回答確率曲線を図-3に示す。図-3において「Real…」と表記されているのは元のデータから直接求めた実測の Yes 回答確率である。同じ凡例が3点ずつプロットされているが、真中の点は一段階での Yes 回答確率、右端の点は一段階での Yes 回答者の二段階め(提示金額=最初提示金額+5,000 円)での Yes 回答確率、左端の点は一段階での No 回答者の二段階め(提示金額=最初提示金額-5,000 円)での Yes 回答確率となっている。また、「Estimate…」と表記された曲線は、推計された Yes 回答確率曲線で、「税金形式のみ、環境変化の水準1」の場合、実測値によくフィッティングしていることがわかる。

各々の環境変化水準における WTP 平均値を表-3に示す。解析の結果得られた環境変化の水準に対する WTP 平均値は、表-3に示すように、水準1と水準2、3および4との差が比較的大きい。一方、水準2、3および4

の間の差は小さいが、この理由としては次のようなことが考えられる。まず、環境変化自体に対する認識が環境変化の属性各々に対する認識より大きくなることで、被験者が感じる効用に有意な差がなくなるという「包含効果」の存在が考えられる。もしくは、環境変化の属性各々に対する認識がある程度なされた上で被験者が感じる効用に有意な差がなかった可能性も考えられる。

なお、水準2、3で順位が逆転しているが、この理由としては次のようなことが考えられる。本研究では各環境変化水準・提示金額毎に異なる被験者を無作為抽出して調査を行ったが、抽出方法の不確定性によって被験者の属性に偏りが存在し、結果として各水準の WTP 平均値にばらつきが表れた可能性がある。有意な差があるとはいえない水準2から4の間における順位の逆転は、このばらつきによるものと考えられる。

これらのことを踏まえ、CVMの結果に対する信頼性水準の解析は、今後解決すべき課題といえる。

(4) 諏訪湖水環境改善便益の算定

流総計画で予測された水質改善水準(表-1)と本調査で提示した水質改善水準(表-2)より、下水道整備と底泥浚渫の完了によって水質改善水準1はほぼ達成されていることから、水準1に対して表明された平均 WTP が年間1世帯あたりの水環境改善便益に相当すると考える。これに諏訪集水域の各市町村の世帯数⁹⁾を乗じて、地域全体の年間の水環境改善便益を求めたところ、表-4に示すように年間7億2,800万円という結果になった。

4. 対策に伴う追加的CO₂排出

(1) 下水道整備に伴う追加的CO₂排出

a) 管渠敷設

諏訪集水域の下水道整備は、長野県による幹線管渠の敷設(流域下水道)と、関連市町村による面整備(関連

公共下水道) からなる。前述の流総計画における水質改善予測に合わせるため、以下の試算では対策前の基準年度を平成3年度とする。

管渠敷設におけるエネルギー投入量およびCO₂排出量の算出手順について簡単に述べると、まず、参考文献から得た幹線および枝線管渠の管径および管渠延長などのデータから平均管径を求めた。一方、既存研究によって求められた管渠敷設における投入エネルギー原単位について、施工種および投入形態で区分される各部門の原単位が管径の何乗に比例しているかを推定した。この乗数と基準となる既存研究の原単位、および先に求めた平均管径を用いて、幹線および枝線管渠のエネルギー原単位を求めた。これに未整備の管渠延長をそれぞれ乗じて、管渠敷設における投入エネルギーを算出した。さらに、既存研究で対象とした福岡市の事例における管渠敷設のエネルギー投入量とCO₂排出量から、エネルギー投入に対するみかけのCO₂排出原単位を求め、管渠敷設におけるCO₂排出量を算出した。これを管渠耐用年数で除して年間の値を求めた。以上の手順を図-4に示し、以下ではそれぞれについて詳細を述べる。

対象地域の幹線管渠については、幹線ごとの管渠延長、最小径および最大径のデータ¹⁰⁾は得られているが、管径ごとの延長のデータは得られていない。そこで、各幹線の管渠を一端が最小管径、もう一端が最大管径である半円錐と近似的に考え、幹線管渠全体の体積を求めて、これと体積が同じ円柱の直径をもって、幹線管渠の平均管径とした。その結果、幹線管渠の平均管径は1189[mm]となった。面整備で敷設される枝線管渠の延長については管径ごとではなく、管径の区分ごとのデータ¹¹⁾が得られている。そこで、各区分の管渠は最大管径と最小管径の2種類からなり、それぞれの延長は管渠断面積に反比例して配分されると仮定した。この仮定から求めた管渠全体の体積と管渠全体の延長から平均管径を算出した。その結果、枝線管渠の平均管径は管径区分600mm以下では268[mm]、600～2000mmでは813[mm]、2000mm以上では2000[mm]となった。

下水道管渠の敷設にともなうライフサイクルでの投入エネルギー、CO₂排出に関しては、井村らが詳細な研究¹²⁾を行っている。その中で管径が700、1000および2000mmの場合について、施工種および投入形態といった部門ごとにエネルギー原単位が示されている。そこで、管径が700、1000および2000mmの各部門のエネルギー原単位について、管径が1000mmの値を1とした比率を算出した。この比率から、各部門のエネルギー投入原単位が管径の何乗に比例するかを推定した(表-5)。

表-5をみると、管断面積(管径の2乗)に比例する部門が最も多い。こうして求めた乗数と、管径が1000mm

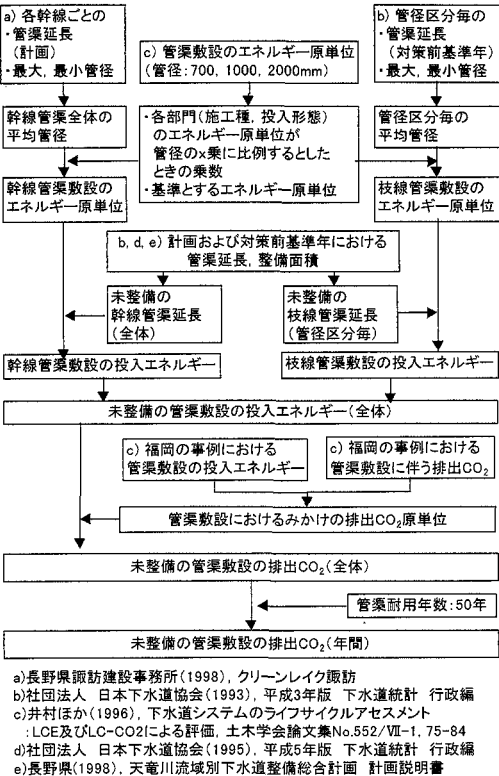


図-4 管渠敷設における排出CO₂の算出フロー

表-5 エネルギー原単位が管径のx乗に比例するとしたときの乗数

	直接投入	間接投入		
		建設機械	建設資材	労働力
掘削工	2.0	2.0	*	2.0
掘削工	2.0	2.0	*	2.0
砂埋戻工	*	*	2.0	2.0
発生土埋戻工	2.0	2.0	*	2.0
残土処分工(積込)	2.0	2.0	*	2.0
矢板打込工	0.5	0.2	*	0.5
矢板引抜工	0.5	0.5	*	0.5
支保材取付工	0.0	0.0	*	0.0
支保材取除工	0.0	0.0	*	0.0
管布設工(ヒューム管)	0.5	0.5	2.0	0.5
ぐり石基礎工	*	*	2.0	2.0
水替工	0.0	0.0	*	0.0
舗装取壊工	1.0	0.2	*	1.0
路面復旧工	1.0	1.2	1.0	1.2

*…いずれの管径においてもエネルギー原単位が0であった部分。

のときのエネルギー原単位を基準に、諏訪流域下水道で敷設される管渠について管渠敷設のエネルギー原単位を求めた。幹線管渠の敷設エネルギー原単位を表-6に、枝線管渠の敷設エネルギー原単位の一例(813mmの場合)を表-7に示す。

表-6、表-7で示したようなエネルギー原単位に未整備の管渠延長を乗じて、幹線管渠および枝線管渠の敷

表-6 幹線管渠敷設エネルギー原単位 [Mcal/m]

1189 (mm)	直接投入	間接投入		合計	
	建設機械	建設資材	労働力	(労働除)	(労働含)
掘削工	70.8	11.6	0.0	4.0	86.4
掘削工	35.5	5.8	0.0	7.9	49.2
砂埋戻工	0.0	0.0	71.2	7.9	79.2
養生土埋戻工	63.2	10.3	0.0	20.4	93.8
残土処分工(積込)	184.2	24.6	0.0	9.0	217.8
矢板打込工	153.7	40.9	0.0	22.1	216.8
矢板引抜工	104.5	13.5	0.0	10.1	128.1
支保材取付工	34.6	38.3	0.0	14.5	85.4
支保材取除工	15.7	5.1	0.0	9.0	29.8
管布設工(二重管)	14.0	3.2	917.9	10.9	945.9
ぐり石基礎工	0.0	0.0	34.5	3.4	37.9
水替工	5.4	0.2	0.0	0.2	5.8
舗装取除工	16.2	1.7	0.0	0.8	18.7
路面復旧工	1.7	0.4	69.8	0.7	72.6
合計	699.3	153.5	1093.4	121.0	1946.2

表-7 枝線管渠敷設エネルギー原単位 [Mcal/m]

813 (mm)	直接投入	間接投入		合計		
	建設機械	建設資材	労働力	(労働除)	(労働含)	
掘削工	33.1	5.4	0.0	1.8	38.5	40.4
掘削工	16.6	2.7	0.0	3.7	19.3	23.0
砂埋戻工	0.0	0.0	33.3	3.7	33.3	37.0
養生土埋戻工	29.5	4.8	0.0	9.5	34.3	43.9
残土処分工(積込)	86.1	11.5	0.0	4.2	97.6	101.8
矢板打込工	127.1	37.9	0.0	18.3	165.0	183.3
矢板引抜工	86.4	11.2	0.0	8.4	97.5	105.9
支保材取付工	34.6	38.3	0.0	14.5	70.9	85.4
支保材取除工	15.7	5.1	0.0	9.0	20.8	29.8
管布設工(ホム管)	11.5	2.6	429.0	9.0	443.1	452.1
ぐり石基礎工	0.0	0.0	16.1	1.6	16.1	17.7
水替工	5.4	0.2	0.0	0.2	5.6	5.8
舗装取除工	11.1	1.5	0.0	0.6	12.6	13.2
路面復旧工	1.1	0.2	47.7	0.5	49.7	49.5
合計	458.2	119.5	526.1	85.0	1103.8	1186.3

設エネルギーを求めた(表-9)。未整備の管渠延長は、下水道統計などの文献で示された計画および対策前基準年の管渠延長および整備面積といったデータ¹¹⁾(富士見町は平成5年度のデータ¹³⁾)から求めた。

つぎに、管渠敷設に伴うCO₂排出についてであるが、井村らの論文ではエネルギー種類ごとの投入量は示されていない。そこで、井村らの研究による福岡市の下水道整備の管渠敷設工事全体におけるエネルギー投入量とCO₂排出量の値から、管渠敷設エネルギーに対するみかけのCO₂排出原単位を求めた(表-8)。諏訪流域下水道の管渠敷設においてもみかけのCO₂排出原単位は同等と考え、これを管渠敷設エネルギーに乗じて、未整備管渠敷設にともなうCO₂排出量を求め、さらに管渠耐用年数50年で除して年間の値を求めた(表-9)。

b) 管渠の維持・管理

管渠の維持・管理についても、井村らが管渠長さあたりの年間エネルギー原単位を算出しているが、最終的に算出されたエネルギーを原単位で除して逆算した管渠延長は、総延長の2割程度の値になっている。このことから、福岡市における管渠の維持・管理作業は、毎年管渠全体の2割程度の部分について行われると考えた。この割合は、諏訪流域下水道においても同等と考え、これとエネルギー原単位を用いて維持・管理エネルギーを算出した(表-9)。また、管渠敷設の場合と同様に、福岡市の維持・管理における投入エネルギーに対するみかけのCO₂排出原単位を求め、これを諏訪流域下水道にも適用し、維持・管理の年間CO₂排出量を求めた(表-9)。

表-8 福岡市下水道の管渠敷設、維持・管理の

エネルギーとCO₂排出

a)管渠延長 に対する割合 (%)	b)総延長に 対する割合 (%)	c)エネルギー 原単位 (Mcal/m/year)	d)エネルギー 投入量 (Gcal/year)	e)みかけの CO ₂ 原単位 (t-C/Gcal)	f)CO ₂ 排出量 (t-C/year)	
建設	3,220,602	100.0	22.8	73,580	0.074	5,447
維持・管理	681,627	21.2	1.9	1,326	0.076	101

a)建設は総延長の文献値、維持・管理は総延長に維持・管理の割合を乗じた値
b)維持・管理はエネルギー投入量を原単位で除した値
c)建設はエネルギー投入量を総延長で除した値、維持・管理は文献値、いずれも文献値
d)いずれもCO₂排出量をエネルギー投入量で除した値
参考：井村ほか(1996)．下水道システムのライフサイクルアセスメント
LC4及びLC-C2による評価、土木学会論文誌No.552/VII-1, 75-84

a:建設は総延長の文献値、維持・管理は総延長に維持・管理の割合を乗じた値
b:維持・管理はエネルギー投入量を原単位で除した値
c:建設はエネルギー投入量を総延長で除した値、維持・管理は文献値
d:いずれも文献値
e:いずれもCO₂排出量をエネルギー投入量で除した値
参考:井村ほか(1996)、下水道システムのライフサイクルアセスメント
:LCE及びLCO-CO₂による評価、土木学会論文集No.552/VII-1, 75-84

表-9 諏訪流域下水道の未整備管渠の敷設、

維持・管理に伴うエネルギーとCO₂排出

	a)管渠延長 に対する割合 (m)	b)総延長に 対する割合 (%)	c)エネルギー 原単位 (Mcal/m/year)	d)エネルギー 投入量 (Gcal/year)	e)みかけの CO2原単位 (t-C/Gcal)	f)CO2 排出量 (t-C/year)
建設(幹線)	7,184	100.0	41.3	297	0.074	22
(枝線)	799,344	100.0	9.0	7,219	0.074	534
維持・管理	170,693	21.2	1.9	332	0.076	25
合計	-	-	-	7,848	-	582

a:建設はインベントリー分析の推定値、維持・管理は総延長に維持・管理の割合を乗じた値
b:維持・管理は福岡の事例における値
c:建設はエネルギー投入量を総延長で除した値、維持・管理は文献値
d:建設はインベントリー分析の推定値、維持・管理は管渠延長に原単位を乗じた値
e:いずれも福岡の事例における値
f:いずれもエネルギー投入量にみかけのCO₂原単位を乗じた値
参考:井村ほか(1996)、下水道システムのライフサイクルアセスメント
:LCE及びLCO-CO₂による評価、土木学会論文集No.552/VII-1, 75-84

表-10 下水処理に伴うエネルギーとCO₂排出

a)新たに整備 される人口 (person)	b)処理水量 (m ³ /person/day)	c)エネルギー 原単位 (Mcal/m ³)	d)エネルギー 投入量 (Gcal/year)	e)CO ₂ 排出量 原単位 (kg-C/m ³)	f)CO ₂ 排出量 (t-C/year)
46,188	0.42	7,080.620	1.47	10,409	0.082

参考 a: 社団法人 日本下水道協会 (1993), 平成3年度 下水道統計 行政版
b: 齋藤峰夫・野池達也 (2000), LCA手法を用いた排水処理の評価手法
に関する研究, 土木学会論文誌 No.643/V-17, 11-20

参考…a: 社団法人 日本下水道協会(1993)、平成3年版 下水道統計 行政編
b: 鶴巻峰夫・野池達也(2000)、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/Ⅳ-14, 11-20

c) 下水道整備に伴う下水処理量の増加分

下水道整備に伴い増加する終末処理場での処理水量の増加分のエネルギーとCO₂排出も求めなければならない。処理水量は処理人口に比例すると考え、管渠拡充に伴う増加分を求めた。これに終末処理場での詳細なLCAを行った鶴巻ら¹⁴⁾の研究におけるエネルギーおよびCO₂排出原単位を乗じてそれぞれの年間の値を求めた(表-10)。

(2) 底泥浚渫にともなう追加的CO₂排出

下水道管渠の整備と並行して行われているのが、諏訪湖の底泥の浚渫である。工事は1期、2期に分かれており、それぞれの計画量と完了した量¹⁵⁾から推定した平成3年度の未浚渫の底泥は415万[m³]となっている。

浚渫工事にともなうライフサイクルでのエネルギー消費、CO₂排出に関しては、運輸省などが港湾における検討¹⁶⁾を行っており、その中で、ドラグサクソン船およびグラブ浚渫船による浚渫について表-11に示すような原単位が算出されている。このうち、諏訪湖の底泥浚渫に用いられている浚渫船はポンプ吸引船もしくはドラグサクソン船と考えられるため、ドラグサクソン船の浚渫に関する原単位を用いることにした。

表-11 浚渫のエネルギー、CO₂排出源単位

	エネルギー原単位(Mcal/m ³)			CO ₂ 排出原単位(kg-C/m ³)		
	直接投入	間接投入	合計	直接投入	間接投入	合計
	燃料消費	機械消費		燃料消費	機械消費	
ドラグダクション船	15.3	2.0	17.3	1.2	0.1	1.4
グラブ浚渫船	44.5	8.7	53.2	3.5	0.6	4.2

参考：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(1998)。
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

表-12 底泥浚渫に伴うエネルギー、CO₂排出

	エネルギー(Gcal)			CO ₂ 排出(t-C)		
	直接投入	間接投入	合計	直接投入	間接投入	合計
	燃料消費	機械消費		燃料消費	機械消費	
全体	63,639	8,182	71,821	5,017	611	5,628
*年間	1,093	141	1,234	86	10	97

*…浚渫工事は継続的に必要と考え、浚渫に要する全体年数で除した値
参考：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(1998)。
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

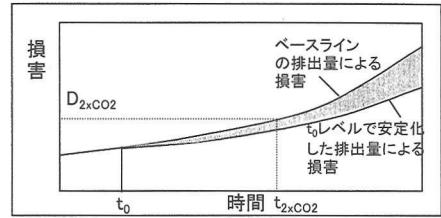
諏訪湖の底泥浚渫においては1期工事、2期工事に分かれており、現在2期工事の途中である。今後の2期工事の進捗率がこれまでと同様であると仮定すると、全体の浚渫工事の期間は約58年となる。二期工事完了後も底泥の堆積は継続するため、今回の試算では浚渫工事を継続的に行っていくものと仮定し、投入エネルギー、CO₂排出量全体を浚渫工期58年間で除することによって、年間の値とした。これを表-12に示す。

5. 対策に伴う追加的CO₂排出による損害費用

CO₂の排出量増加に伴う気候変化の損害費用を算出した研究は数多くあり¹⁷⁾、そのほとんどが大気中CO₂濃度が産業革命以前の濃度の2倍になった場合の損害費用を算出したものである。このシナリオを benchmark warming；2xCO₂と呼ぶ。

IPCCの報告書¹⁷⁾では、いくつかの研究による1991年から2030年までの10年毎のCO₂排出量あたりの社会的限界費用の値を示している。本研究では、これらの値のうち最も小さい Nordhaus (1993)の推定結果 5.3[\$/t-C] (最確値)と、最も大きい Cline (1992, 1993)の推定結果 124[\$/t-C] (最大値)を適用することにした。両者の違いは、気候変化による損害の不確実性の扱い方や、将来的損害を現在価値に直す割引率の相違によるものである。彼らの研究では、気候変化による損害項目として、農業、森林喪失、生物種の損失、海面上昇、電力、非電力暖房、アメニティー、疾病、人命、移住、熱帯性暴風雨、建造物、レジャー活動、利水性および都市基盤などが扱われており、損害の推定方法に改良の余地があるとしても、網羅的に損害が把握されていると言えよう。

彼等の研究において示された社会的限界費用は、次のような議論に基づく推定結果である。まず、年間CO₂排出量について、今後100年もしくはそれ以上にわたって排出量が増加し続けた場合の「ベースライン」と、基準年t₀のレベルでの「安定化」のシナリオを考える。次に、



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

図-5 地球温暖化の損害

表-13 水環境改善対策に伴う

追加的CO₂排出の社会的費用

研究	対策に伴うCO ₂ 排出 t-C/年	社会的 限界費用*	1990年 の為替レート	年間の 社会的費用
		1990 \$/t-C	円/\$	億円/年
Nordhaus	最確値	1,259	5.3	0.01
(1994)	期待値		12	0.02
Cline	最小値		5.8	0.01
(1992,1993)	最大値	124		0.23

*1991-2000の値、シャドー・バリュー。

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

それぞれの排出シナリオにともなう損害を示したのが図-5である。図-5において、t₀ (1990年)のレベルで排出量を安定化した場合の便益 (回避された損害費用) はハッチングを施した部分の面積となる。それぞれの損害曲線は、benchmark warmingの損害費用D_{2xCO2}をもとに多項式近似の損害関数によって求められている (IPCC, 1996)。彼らの研究における社会的限界費用とは、このCO₂削減便益、すなわち、「排出量を1990年レベルで安定化すれば回避されていたであろう損害費用 (=シャドー・バリュー)」の削減CO₂1t-Cあたりの値である。

先に算定した対策に伴う年間のCO₂排出量は、対策全体の排出量を工期や耐用年数で除した平均値である。また対策は、基準年である平成3年 (1991年)度の時点での未整備分を考えている。そこで、社会的限界費用として、1991年を含む1991年～2000年の値を用い、対策に伴うCO₂排出による年間の社会的費用を算出することにした。対策が10年以上の工期を要するかどうかの判定は行なわなかった。対策に伴う年間のCO₂排出の値に社会的限界費用と1990年の為替レートを乗じて、年間の社会的費用を算出したところ、表-13に示すように、シャドー・バリューとしては年間100万円～2,300万円となった。なお、ここで求めた年間の社会的費用は、1991年から2000年までの10年間にわたるCO₂排出による損害費用の平均値ということになり、2000年以降のCO₂の蓄積による損害は考慮していない。

表－14 諏訪湖水環境改善対策に伴う環境影響の

費用便益換算による評価

影響項目	貨幣価値(億円/年)		備考
	便益	費用	
水環境改善 諏訪湖	7.28	-	
天竜川	未推定	-	
追加的CO ₂ 最小推定値	-	0.01	シャドー・バリュー、Nordhausによる最確値、
排出による			
気候変化 最大推定値	-	0.23	シャドー・バリュー、
の損害			Clineによる最大値、
CO ₂ 以外の負荷の影響	-	未推定	

6. 諏訪湖の水環境改善対策の統合的評価

これまでの試算によって求めた、対策による諏訪湖の水環境改善便益、および対策に伴う追加的CO₂排出による気候変化の損害費用を、表－14に示す。これらの値を貨幣換算された同次元の環境影響として統合的に評価を行っていく。表－14をみると、水環境改善便益は年間7億2800万円であり、追加的CO₂排出による損害費用の最も大きな値（Clineの費用便益分析による限界的シャドー・バリューを適用した値）である年間2,300万円と比べても、非常に大きな値（約30倍）になっている。この結果から、諏訪湖水環境への影響とCO₂による地球環境への影響に限定すれば、CO₂による気候変化の不確実性が非常に大きいことを考慮に入れても、評価対象の対策は環境面で効果が非常に大きいといえる。

ここで、地球規模の気候変化は当然のことながら諏訪湖水環境へも影響すると予想される。しかし、全世界の排出量と比較すると対策に伴うCO₂排出量は非常に小さく、全世界のCO₂排出による諏訪湖周辺の気温や降雨の変化量を、対策に伴うCO₂排出分に割当てても、諏訪湖水環境に影響するほどの値にはならないと考えられる。このような理由から、対策に伴う気候変化の影響を諏訪湖水環境改善予測へフィードバックすることは行わなかった。

ただし、水環境改善は2000年を基準年とした2001年以降の環境変化、CO₂による気候変化は1991年を基準年とした1992年以降の環境変化に対する評価額であり、単純に比較することは出来ないため、より厳密な評価を行うためには基準年を統一して、各対策の導入と水環境改善の効果を解析する必要がある。しかし、CO₂による損害予測の基準年を水環境改善と同じく2000年とすると、未整備工事はさらに小さくなり、対策に伴うCO₂排出量、それによる気候変化の損害費用も小さくなると予想されるため、基本的な結果には影響しないと考えられる。

このように、地域性が異なる環境影響項目どうしであっても、適切な評価手法を用いることによって、そのインパクトを統合的に評価する可能性を提示できた。

表－14にも示すとおり、諏訪湖の水質を改善した場

表－15 諏訪湖水環境改善対策に伴う

環境影響以外の項目の費用便益

影響項目	貨幣価値(億円/年)		備考
	便益	費用	
生活環境改善	未推定	-	
観光収入増大	未推定	-	
対策に	管渠整備	-	14.58 対策前基準年である
必要な	下水処理	-	6.70 平成3年度において
事業費用	底泥浚渫	-	2.75 未着手の部分の推定値
合計		24.02	

合の下流側である天竜川流域における便益や、NO_xなどCO₂以外の負荷による損害費用など、環境影響として未推定のものが存在している。環境影響項目間のトレードオフを議論するならば、できる限りこれらを網羅する必要がある。これらの環境面で費用・便益の値と比較するため、各々の対策の事業費用も算出した（表－15）。管渠敷設は、幹線に関しては管渠延長に、枝線に関しては整備面積に比例すると仮定し、管渠耐久年数を50年として年間事業費用を算出している。追加的下水処理は、処理人口比から処理場における費用を求め、建設費を50年、維持管理費を30年で除し、年間事業費用を求めた。底泥浚渫は、平成11年度までの実績をもとに基準年度（平成3年度）における事業費用を推定し、浚渫期間58.2年で除して年間事業費用を求めた。これらの結果、年間事業費用の合計は約24億円となった。ただし、算定の根拠とする計画費用は流総指針に基づく費用関数を適用した推定値であり、実際の費用とは異なる。なお、ここでは下水道整備に伴う生活環境改善効果などを算出してないため、公共事業としての下水道の費用便益分析をこれらの値から行うことは適切でない。

7. まとめ

本論文では、諏訪湖における下水道整備および底泥浚渫事業を対象とし、これらの対策による諏訪湖水環境改善効果と、対策に伴う追加的CO₂排出による地球環境への影響の統合的評価を試みた。統合化手法として、環境影響を費用もしくは便益に換算する手法を取った。また、環境影響における地域性を考慮した評価手法を用いた。具体的には、より地域性の大きい影響である水環境改善効果の評価についてはCVM、より地域性の小さい影響であるCO₂排出による気候変化の損害についてはLCA手法および文献値による世界共通の値を適用した。諏訪湖水環境改善効果については、諏訪地方の住民に対してCVMを適用したアンケート調査を行った結果、年間7億2800万円の便益があるという結果になった。CO₂排出による地球環境への影響としては、LCインベントリー分析を行い対策に伴う追加的CO₂排出量を求め、これにCO₂排出の限界的損害費用を乗じた結果、年間100万～2,300万円の

損害費用が生じるという結果になった。これらの結果の比較から、検討の対象になった水環境改善対策は統合的にみて環境改善効果が大いことが明らかになった。

本論文で構築を試みた手法は評価対象の多側面での環境影響を統合的な指標で示し環境に配慮した意思決定を容易に行なう手段として活用できる。具体的には、環境負荷項目間でトレードオフがある場合の評価、包括的な環境影響が小さい政策・事業の代替案の選定、製品・サービスにおける環境情報の提供などといった活用が考えられる。また、本論文で示した手法は環境影響を経済的価値に換算するため費用便益分析への導入も考えられる。

具体的に政策支援などに用いる上での課題としては、大気汚染物質による影響、評価の基準年や影響が及ぶ期間といった時間的特性の考慮、不確実性の考慮などについてさらなる改善が必要である。また、他の環境改善事業への適用も視野に入れた手法の一般化も必要である。

謝辞：諏訪湖水環境改善便益の算定では、調査票で提示する諏訪湖水環境の変化シナリオを作成するにあたり、予備調査および本調査を通じて信州大学山地水環境教育研究センターの花里孝幸教授には貴重かつ多大な助言をいただいた。諏訪環境まちづくり懇談会副会長の高木保夫氏には予備調査対象者の抽出および長野県諏訪建設事務所へのコンタクトなど、多岐にわたる局面において支援をいただいた。長野県諏訪建設事務所の方々は水質改善対策に関する様々な情報を提供していただき、また多くの疑問に答えていただいた。予備調査で対象とさせていただいた諏訪環境まちづくり懇談会の会員各位、本調査で対象とさせていただいた諏訪地方の住民の方々には、貴重な実データを回答および返送していただいた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長野県：天竜川流域別下水道整備総合計画 計画説明書，1998。

- 2) 高木朗義，大野栄治：水質浄化事業による環境改善便益の計測。環境システム研究Vol.27，1999。
- 3) 東京都下水道局，(財)下水道新技術推進機構：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，1998。
- 4) 尾崎昭彦：神戸市下水道ネットワークの費用効果分析について，下水道協会誌Vol.36, No.439，1999。
- 5) 鷲田豊明：環境評価入門，勁草書房，1999。
- 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) 松本順一郎編集：水環境工学，朝倉書店，1994。
- 8) 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。
- 9) 長野県企画局情報政策課：平成9年 長野県統計書，長野県統計協会，1999。
- 10) 長野県諏訪建設事務所：クリーンレイク諏訪，1998。
- 11) 社団法人 日本下水道協会：平成3年版 下水道統計 行政編，1993。
- 12) 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-1，75-84，1996。
- 13) 社団法人 日本下水道協会：平成5年版 下水道統計 行政編，1995。
- 14) 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/VII-14，11-20，2000。
- 15) 長野県諏訪建設事務所：きれいな諏訪湖をめざして，2000。
- 16) 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。
- 17) James P. Bruce, Hoesung Lee, Erik F. Haites : Climate Change 1995 Economic and Social Dimensions of Climate Change, Cambridge University Press, 1996。

Integrated Assessment of Improvement of the Water Environment in Lake Suwa and Arising Impact on Global Environment by Evaluating their Costs and Benefits

Rokuta INABA, Keisuke HANAKI, Toshiya ARAMAKI and Jun NAKATANI

Environmental load, such as CO₂, will increase with the enforcement of the measures to improve water environment. The objective of this study is the integrated assessment of such measures by evaluating the regional and global environmental impacts with costs and benefits. The construction of sewer pipe network and sediment dredging in Lake Suwa, Nagano prefecture was assessed as the case study. The benefit of improvement in water environment was estimated as 728 million [yen・year⁻¹] by analyzing the results of the questionnaire applied contingent valuation method on basin of Lake Suwa. On the other hand, the damage cost of global warming by additional CO₂ emission was estimated to be 1 to 23 million [yen・year⁻¹] by carrying out life cycle inventory analysis of the measures. Environmental benefit of improvement of water environment was much higher than the damage in global environment.