

持続可能な上下水道システム構築へ向けた 総合評価手法

木村 昌弘¹・伊藤禎彦²

¹正会員 ㈱クボタ 鉄管事業部 (〒556-8601 大阪市浪速区敷津1丁目2番47号)
E-mail: masahiro_kimura@nk.kubota.co.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター)
E-mail: itoh@urban.env.kyoto-u.ac.jp

地球環境の保全、流域の水循環の健全性、水道の安定性・安全性などを貨幣価値で統合的に評価するため「流域水資産健全度指数」という新しい指標を用いた上下水道システムの総合評価手法を提案した。その指標によるモデル流域での総合評価では、下水の処理水を河川に還流するケースが最も高い評価となり、地球温暖化対策としては自律分散型のシステムが有効との結論を得た。

Key Words : sustainability, water circulation, comprehensive evaluation, water and sewage systems

1. はじめに

20世紀型の経済発展がもたらした地球環境問題は、今や我々人類の将来の前に大きく立ちはだかろうとしている。2007年2月のIPCC報告では、地球温暖化が経済発展による温暖化ガスによるものであることが科学的に裏づけされたとして大きな警鐘が鳴らされた。限りある水資源とエネルギーに支えられた現在の上下水道事業においても、長期的な視野での環境戦略が必要であり、そのためには地球環境や人口減少等を見据えてシステムを再構築していくための新たな指標が必要となる。本研究は、以上の視点から「流域水資産健全度指数」という新たな指標を用いて流域の水循環の健全性や水道の安定性・安全性などを貨幣価値で統合的に評価する総合評価手法を提案する。また、検討のモデルとして大阪府南部の河川流域を選定し、設定の異なる上下水道システムについてその評価を試みたものである。

2. 評価手法と指標設定の考え方

(1) 総合評価手法

これまで環境を含む総合的な評価は、大規模な事業の実施や企業活動、国や府県のマクロな環境の評価など多くの分野で研究され実施に移されてきた。環境アセスメントは、事業の環境評価分野で発展し、現在では政策決定段階から評価しようとする戦略的アセスメントも実施に移されつつある。ライフサイクルアセスメント(LCA)は、企業の商品製造分野か

ら出発したもので国際規格化されたことで、上下水道を含む広い分野で、政策立案などより高次の目的での利用に発展しつつある。また環境会計は、企業の環境活動の評価手法として発展し、環境だけでなく社会・経済を含むパフォーマンス評価の反映へと移行しつつある。マクロ経済の分野では、グリーンGNPといわれる環境経済統合勘定の導入が進められ、そのほかにも国の「総合的環境指標」など国や地域の豊かさや幸福度を評価する指標の検討や導入も行われている。

これらの評価の項目と手法は多種多様で分類方法も多数あるが、国内外の事例を指標の数で分類すると、単一指標と指標群に分けられる。単一指標は、全体の理解が容易で計画全体のコンセプトを広く伝えやすくなる反面、指標の統合による、個別情報の損失が大きく、単一化により、一面的な評価になるおそれがある。指標群では、個別情報の損失が少なく、多面的な評価が可能な分、全体の分かりやすさが犠牲になり、全体の評価・コンセプトが曖昧になると指摘されている¹⁾。利用分野や目的によって指標の項目や数は判断されなければならないが、今後の持続可能なシステムの方向性へ判断するには、環境項目だけでなく安全性や安定性といったシステムそのものの評価を含めることが不可欠なことから、環境指標も含め、個々の指標群とともにそれらを統合評価する単一指標が必要である。このような指標の統合化に関して、これまでLCAでは影響項目の特性化結果に、環境問題の重み付けによって統合化を試みる問題比較型といわれる手法を中心に開発が進められてきた。この代表的な重み付けの方法には、アンケートなどを利用して支払い意思額などを問う方法や、環境目

標とその達成度を指標として利用する DtT 法, 専門家などが重み付けするパネル法などがある。しかし, 近年では問題比較型の統合化手法についての問題点が指摘され, 欧州を中心として新たな被害算定型と呼ばれる統合化手法の開発が主流となりつつある。²⁾ このほか単一指標による環境全般の総合評価方法として土地面積やエネルギー消費量, 物質の総使用量などで環境影響を間接的に表現する「エコロジカルフットプリント」や「エコロジカル・リュックサック」, 「エコスペース」, 目標値と現状値との差が環境影響を顕示するものと仮定した基準比較法などがある。また地域計画の分野では, 住民アンケートを通じて環境の質の重み付けなどを行い地域環境の総合評価が行われてきた。

上水道の分野では, これまで事業の評価には普及率や経営収支などが, また環境評価には有収率や水質, 電力使用量などの指標が個々の事業体で独自に用いられてきた。最近では環境会計を導入する事業体も増加してきている。こうした中で, 平成 17 年に「水道事業ガイドライン」³⁾ が制定され, 水道の安心に関わる水源の保全, 水質管理や環境にかかる温暖化防止, 健全な水循環などの 137 項目の業務指標が導入され, 統一した基準で事業を評価できるようになった。これにより全国レベルでの個々の課題の他事業体との相対的評価が可能になったが, これは事業体単位での指標群による評価指標であり, 絶対的な評価や総合的評価, さらに流域全体としての水循環や下水道との関連評価などの課題は依然として残されている。また, 流域の水環境の総合評価に関する最近の研究では, 環境・経済統合勘定を適用した評価⁴⁾ やウォーターサプライフットプリント指標を用いた研究⁵⁾ などがあるが, これらはマクロな評価指標であり, 治水, 利水, 環境といった個々の評価には適さない。上下水道分野では, エコデザインによる評価⁶⁾, LCA を用いた上下水道の評価^{7), 8)} やアセットマネジメントを導入した水道施設の維持管理手法の研究⁹⁾ も進められているが, 環境影響だけでなくシステムの安全性・安定性などの社会的影響や維持管理コストなどの経済的影響を含めて統合的に総合評価できる手法には至っていない。

こうした背景を下に本研究では, 持続可能な上下水道システムの構築という視点から, 地球環境や流域の治水, 利水, 環境, 上下水道システムの安全性, 安定性を全て貨幣価値で評価し, ライフサイクルコスト (LCC) を含めて「流域水資産健全度指数」という新しい指標で全体を統合的に評価する手法を提案する。

(2) 評価指標と評価項目

総合的な指標には, 環境効率性や環境容量, 物質フロー, 貨幣価値などを用いる方法があるが, 貨幣価値ですべてを統一する研究事例は少ない。

「経済価値化は環境影響により受ける被害量、例えば人

間の損失余命を貨幣価値で評価することで得られる。このような評価は, 倫理的な問題や代表的な環境価値を測ることの困難さなど多くの論点が存在するが, 費用対便益分析や環境会計など, 様々なコミュニケーションツールとして活用できるため, その利用性は医療経済や環境経済, 政策評価において高く評価されている。」¹⁰⁾とされており, 評価の手法として, ここでは, 実用性や汎用性, 住民の理解しやすさを考慮し, 貨幣評価を用いることとしたものである。この金銭化に当たっては, 最近の研究成果を最大限に活用し, LCIA 分野で世界的な潮流となりつつある被害算定法を中心に基準比較法や環境経済評価法の一種である再生費用法や便益移転等を用いた。

表-1 事項別の課題と今回の評価指標

	事項別の諸課題	今回の評価指標
地球環境 ①	地球温暖化	③CO ₂
	森林の減少	①自然緑地
	土壌劣化砂漠化	①自然緑地
	生物多様性の減少	①自然緑地
	水資源不足	②渇水被害
	エネルギー資源枯渇	③エネルギー
水循環 ②	通常時河川流量減少	①平常時流量
	洪水被害ポテンシャル増大	①洪水流量
	非常時水確保困難	②渇水被害
	水質問題の発生	①河川水質
	地下水位の低下	①平常時流量
	ヒートアイランド現象	①湖沼等水面
	生態系への悪影響	①河川自然度
	親水機能の低下	①河川親水度
水道 ③	安心	②安全性
	安定	②安定性
	持続	④LCC
	環境	③CO ₂ , エネルギー
	国際	—
①環境白書 (H12) ¹¹⁾		①河川・流域指標
②健全な水循環系構築のための計画づくりに向けて ¹³⁾		②水道指標
③水道ビジョン ¹²⁾		③地球環境指標
		④LCC指標

(3) 指標の選定

国の環境白書¹¹⁾や水道ビジョン¹²⁾などで示された諸課題を基に, 表-1に示すとおり, ①河川流域指標として平常時流量, 洪水流量, 河川水質, 自然緑地, 湖沼等水面, ②水道指標として安定性 (渇水, 事故, 地震), 安全性 (発ガン, クリプトสปリジウム, 水源水質事故) ③地球環境指標としてCO₂, エネルギー, ④ライフサイクルコストとして上下水道 LCC を選定し指標とした。

3. 河川及び流域評価指標

健全な水循環系構築に関する省庁連絡会議の報告¹³⁾において、今日の水循環系の問題点として挙げられた要因より、河川指標 5 項目、流域指標 2 項目を選定した。

(1) 河川指標

河川状況を示す指標は、文献¹⁴⁾等を基に平常時の流量 Q_0 、洪水流量 Q_f 、水質 (COD)、自然度、近接度とした。

a) 平常時の流量 Q_0

河川の流況を示す指標には、豊、平、低、渇水流量等があるが、ここでは平常時に住民が接する機会を考慮して年間に185日下回らない流量である平水流量を用いた。平常時の流量の算定は式(3-1)に示す水収支法を用いた。また目標流量は、親水性や魚類の生息環境より設定して、これを確保するために必要な費用を指標とした。

$$Q_0 = A_n (R - E_n) / 0.365 - Q_f - Q_{out} + Q_{in} \quad (3-1)$$

ここで、

Q_0 : 平常時の流量 ($m^3/日$)

Q_f : 降雨流出流量 ($m^3/日$)

$$(Q_f = f_n \cdot A_n \cdot (R - E_n)) / 0.365$$

A_n : n流域面積 km^2 , f_n : 降雨(表面)流出率

R : 年間降雨量 ($mm/年$), E_n : 年間蒸発散量 ($mm/年$)

Q_{out} : 河川からの取水量+地下水等の下水管への漏出量

Q_{in} : 生活排水等流入量+下水処理水還流量+水道漏水量

なお下水道への漏水量は、下水処理場に流入する汚水流量と水道使用量分(有収水量)の差とし、モデル計算では、対象流域の実績¹⁵⁾より下水処理量の10%とした。生活排水等の流入量は、生活・業務営業用等の水道使用水の下水道未整備地区からの河川への流入量を表す。下水処理水還流量は、下水処理場で処理した水を再び河川に還流させる流量である。また蒸発散量は、Thornthwaite式により年間蒸発能を求め、地目毎の抵抗係数¹⁶⁾乗じて地目別の値を求めた(表-2)。

表-2 地目別蒸発散量・流出率

	森林	農地	宅地	水面	道路	その他
蒸発量 E ($mm/年$)	640	640	160	890	320	530
流出率 f	0.3	0.2	0.7	1	0.9	0.5

目標流量 Q_G は、三浦ら¹⁷⁾の検討等を参考に表-3に示す親水活動の容易さや魚類の生息環境より設定した。なお平常時の水深・流速の計算は等流式を用いた。

平常時流量指標 D_{Q_0} は、次式で求めた。

$$D_{Q_0} = J_{Q_0} \times (Q_G - Q_0) \quad (3-2)$$

ここに J_{Q_0} は、平常時の水量不足に対する費用原単位で、こ

れまで大阪府営水道が関与してきた安威川ダム、紀ノ川大堰、丹生ダム、日吉ダム等 6 事業の水源開発単価¹⁸⁾の平均値 61 億円/($万 m^3/日$) を耐用年数 50 年で除した 1.2 億円/年/($万 m^3/日$) を用いた。

表-3 河川の目標水深と流速

		水深(m)	流速(m/S)
魚類の生息	コイ・フナ	0.15-0.2	0.3
川遊び等の 親水活動 レベル	浅くて困難 幼児が遊べる 危険で困難	~0.1 ~0.2 0.4以上	 ~0.2 0.5以上

b) 河川水質 q_{COD}

水道水源水質(水質管理目標設定項目)としてこれまで COD と対応する過マンガン酸カリ消費量が用いられてきたこと、また、農業(水稻)用水の水質基準としても COD が用いられていること、住民参加の点からバック方式など簡易な方法で測定することができること、更に、底生生物と水質の関係で COD が EPT 値(カゲロウ、カワゲラ、トビケラの種の合計値)との相関が最も高い¹⁴⁾ことなどを踏まえ、湖沼等の COD 評価など流域全体の水質との整合性も総合的に勘案して、ここでは河川水質として COD を用いることにした。

河川水質 q_{COD} (mg/L) の算定には、流出負荷と流出流量の比で求める原単位法¹⁹⁾を用い次式で求めた。

$$q_{COD} = Lt / Q \times 1000 \times f_a \quad (3-3)$$

ここで、 Q : 平均流量 ($m^3/日$), f_a : 負荷流達率

Lt : 総流出負荷 (Lp : 点源負荷 + L_n : 面源負荷) ($kg/日$)

L_p : 点源負荷 ($kg/日$) (生活排水+産業排水+畜産系排水+下水処理水)

生活排水原単位は、文献¹⁹⁾で示された 1 人 1 日当たりの汚濁負荷量と浄化槽の排出負荷量原単位より、合併浄化槽: 8g/人/日、単独浄化槽: 21(浄化槽 4+雑排水17)g/人/日、し尿処理: 17(雑排水17)g/人/日、下水処理水の水質は COD5mg/L(高度処理水実績)とした。また、産業排水は業種別原単位(g/百万円)に出荷額を乗じて、また畜産系は、家畜の原単位(g/頭/日)と飼育頭数より求めた。

L_n : 面源負荷 [原単位 ($kg/km^2/日$) $\times$ 面積 (km^2)]

COD の面源負荷流出原単位は、表-4に示すわが国の既往の調査報告値の平均値²⁰⁾を用いた。

表-4 地目別 COD 面源負荷流出原単位 ($kg/km^2/日$)

森林	農地	宅地	水面	道路	その他
28	4.9	39.6	0	39.6	22.25

平常時水質については、流出負荷は流出流量に比例するとして、式(3-3)で求められる平均水質を用いた。

負荷流達率 f_a は、比流量 $q(Q/A)$ ($m^3/日/km^2$)と年間負荷との関係¹⁹⁾より、次式を作成した。

$$f_a = \text{比流量} \times 0.0002 \quad (3-4)$$

水質指標としての水質嫌悪度 D_q は次式により算定した。

$$D_q = J_q \times (q_g - q_o) \times Q_o \quad (3-5)$$

ここで、 q_g :目標水質、 q_o :河川水質、 J_q :水質価値原単位
 J_q は河川の水質(COD)が1mg/L変化することによる水質価値の変化を示すものである。水質とその価値に関しては、水道水(100円/ m^3 : COD 0.6mg/L)と農業用水(4円/ m^3 : COD 20mg/L)の単価と水質を用いて式(3-6)に示す関係式を求めた。この式から COD1g当たりの価値が5円となることから J_q :5円/g(COD) $\times$ 365日/年と設定できる。

$$Y = -4.95X + 103 \quad (3-6)$$

ここに、Y:水質価値(円/ m^3)、X:水質(COD,mg/L)

なお、水道水の水質は、大阪府村野浄水場水質実績²¹⁾を基に設定し、農業用水の単価は、表-5に示す全国の水利負担額²²⁾と農業用水使用量²²⁾より設定した。

全国農用地(田+普通畑)面積	3760.0(千ha)
1アール当たり水利負担額	6412.0(円/アール/年)
全国水利負担額	2410.9(億円/年)
全国農業用水使用量	557.0(億 m^3 /年)
農業用水単価	4.3(円/ m^3)

表-5 農業用水単価算定内訳

今回検討モデルとした西除川流域における過去20年間の年間降雨²⁴⁾、気温²⁵⁾、土地利用²⁶⁾、面源・点源負荷量等²⁷⁾の資料を収集して(図-1 参照)、今回の計算モデルを用いて平常時流量と水質を計算し、実測値と比較することによってそれらの妥当性を検討した。

西除川の流量観測値は、大阪府流量観測報告²⁸⁾に記載された布忍橋地点(流域面積 39 km^2)の平水流量値を用いた。計算値は最下流部(流域面積 47 km^2)の計算結果に流域比を乗じた値とした。水質観測値については大阪府域河川等水質調査報告書²⁹⁾に記載された西除川流量観測地点の近傍にある宮橋の観測記録を用いた。結果を、図-2、図-3に示すが、これらのモデルの適応性がほぼ確認できた。

○) 洪水流量 Q_f

洪水流量(河川の治水能力以上の流量)の算定は、広く中小河川計画に用いられている合理式(式(3-7))を用いた。

$$Q_f = 1/3.6(f_a \times A_a \times r_a + f_n \times A_n \times r_n) \quad (3-7)$$

ここに、 f_a :0.9、 f_n :0.6:都市域、自然域の洪水流出係数、

A_a 、 A_n :都市域、自然域の流域面積(km^2)、

r_a 、 r_n : "、" の洪水到達時間(t_a 、 t_n)内降雨強度(mm/h)

洪水到達時間は、土木研究所の式³⁰⁾(3-8)を用いた。

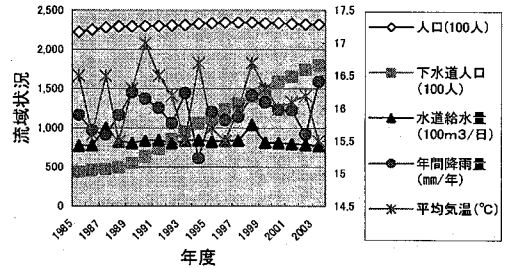


図-1 西除川流域状況の推移

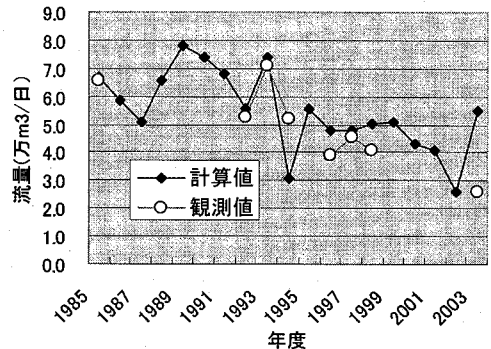


図-2 西除川流量の観測値と計算値の比較

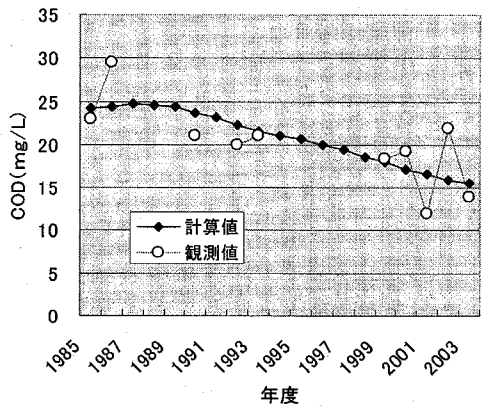


図-3 西除川水質の観測値と計算結果の比較

$$t_a = 1.8(L/1^{1/2})^{0.7} \quad t_n = 12.6(L/1^{1/2})^{0.7} \quad (3-8)$$

ここに、L:流域長km、I:斜面勾配

降雨強度式は、大阪府流域下水道計画³¹⁾で用いられているシャーマン型の式(3-9)を用いた。

$$r(t) = \alpha \cdot t^{-\beta} \quad (3-9)$$

大阪管区気象台の過去30年(1971-2000)のデータによる年間の時間最大、日最大降雨強度より、各降雨確率に対する α 、 β を求めた。(表-6)

洪水指標としての洪水被害度D_fは次式で算定した。

$$D_f = J_f \int Q_f \times f(Q_f) dQ \quad (3-10)$$

ここで J_f : Q_f による洪水被害額, $f(Q_f)$: Q_f の発生確率

J_f は西除川上流部にある狭山池ダムの年平均被害軽減額³²⁾と洪水調節流量より0.1億円/m³/sとした。

表-6 降雨の発生確率と降雨強度式の各定数

降雨確率	1時間(mm/h)	1日(mm/h)	α	β
1/10	53.8	5.7	970	0.706
1/100	75	7.9	1362	0.708

d)水辺への接近度、河川自然度

水辺への近づき難さを示すものとして、図-4に示す護岸の法面勾配や天端幅員を用い、近づきやすい理想の断面形とするために必要な用地を確保する年間費用を指標とし次式で算定した。

$$D_{wac} = J_a \Sigma [(3-I)hw + (3m-Br)] \Delta L \quad (3-11)$$

ここに hw : 水面からの高さ(m), I : のり面勾配, Br : 河川側道幅(m), ΔL : 区間距離(m), J_a : 用地単価(円/m²/年)

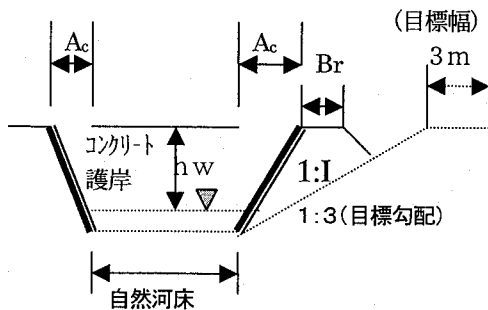


図-4 河川非自然指標算定模式図

河川の自然度を示すものとして、矢板やコンクリートなどの人工構造物で固められた河川に本来の自然河川機能を確保するためには、代替となる新たな用地が必要と考え、その確保費用(年間費用)を指標とし、次式で算定した。

$$D_n = J_n \times A_n \quad (3-12)$$

ここに A_n : 河川敷内に非自然的な構造物が占める面積, J_n : 用地単価(円/m²/年)

(2)流域指標

a)自然緑地

流域の健全度に関する指標としては、流域内の自然域(森林と農地面積)の価値 N_w を取り上げた。年間の単位面積当たりの価値(原単位)は、森林と農地の多目的機能評価³³⁾で示された全国の森林と農地の年間価値を、洪水調節等河川指標と重複する評価項目は除き、全国のそれ

ぞれの面積で除して設定した(表-7)。

表-7 森林・農地の多目的価値

森林 評価額	農地 評価額
CO ₂ 吸収: 12391億円/年	気候緩和: .87 億円/年
化石燃料: 2261 億円/年	
保健リクリエーション: 22256 億円/年	保健休養・安らぎ: 23758 億円/年
計:36908 億円/年	計:23845 億円/年
森林面積: 2512 万 ha	耕地面積: 470 万 ha
森林価値原単位 0.15 億円/km ² /年	農地価値原単位 0.51 億円/km ² /年

$$N_w = J_{w_f} \times A_w + J_{a_f} \times A_a \quad (3-13)$$

ここに A_w : 森林面積(km²), A_a : 農地面積(km²)

J_{w_f} (森林価値原単位): 0.15 億円/km²/年

J_{a_f} (農地価値原単位): 0.51 億円/km²/年

b)湖沼等水面

湖沼等の水面にも森林や農地と同様に多目的価値があり、水質の良い水面には農地の気候緩和や保健休養・安らぎ機能と同様な効用が考えられる。ここでは水質によりその価値が異なることから、次式で表されるものとした。

$$I_w = J_{wa} \times f(q_p) \times A_{wa} \quad (3-14)$$

ここに J_{wa} : 水面価値原単位(0.51 億円/km²/年), A_{wa} : 水面面積(km²), q_p : 湖沼等の水質(CODmg/L)

$f(q_p)$: 水質価値指数で、式(3-6)を用いて、 $q_p = 2\text{mg/L}$ で

$f=1$, $q_p = 20\text{mg/L}$ で $f=0$ とすれば、次式で表される。

$$f(q_p) = (-4.95q_p + 103) / 93.1 \quad (3-15)$$

4. 水道評価指標

水道ビジョン¹²⁾に示された政策目標である「安全」、「安定」、「持続」、「環境」、「国際」から水道指標として安定性(3項目)と安全性(2項目)を用いた。

(1) 安定性指標

a) 渇水断水リスク指標(D_q)

渇水の発生確率と給水制限量、被害度等を基に被害リスク指標を算定した。

水の価値曲線 $C(q)$ は、1人1日平均給水量 q_0 では100円/m³の価値とし、断水で33,000円/日/人の被害が生じるとして式(4-1)を用いた。¹³⁾

$$C(q) = a \cdot \exp(-b \cdot q) \text{ (円/m}^3\text{)} \quad (4-1)$$

式(4-1)から $q < q_0$ における被害額は次式となる。

$$D(q) = a/b \cdot \{ \exp(-b \cdot q) - \exp(-b \cdot q_0) \} \quad (4-2)$$

ここで、 q :給水量(m^3 /人/日)、 a 、 b : q_0 によって定まる定数で、 $q_0:0.4$ では $a=734,700$ 、 $b=22.26$ となる。

次に 河川の流況は、豊水流量までは線形で推移し、回復勾配は最低流量で決まるとして n 年における i 番目の流況 $Q_n(i)$ を次式で与えた。(図-5、図-6参照)

$$Q_n(i) = Q_n(365) + (365-i) \cdot Q_n(365) / T \quad (4-3)$$

$$T = 1249 \cdot Q_n(365)^{-0.47} \quad (4-4)$$

ここで、 $Q_n(365)$: n 年の最低流量 T :回復期間。

式(4-2)、(4-3)より n 年における年間被害額 $DL(n)$ は次式で算定できる。

$$DL(n) = a/b \times (-b \cdot q_0(1-1/T) \cdot [\{ \exp(b \cdot q_0 \cdot r_n(365)) \} - 1] / (\exp(b \cdot q_0/T) - 1) - 100 \cdot r_n(365) \cdot T/b) \quad (4-5)$$

ここに、 $r_n(365)$: n 年の最大給水制限率

ここで、 $r_n(365)$ の発生確率を $f_r(r_n)$ 、流域人口を P とすると流域の年平均被害額(断水リスク) D_r は次式となる。

$$D_r = P \times \int DL(n) \times f_r(r_n) dr_n \quad (4-6)$$

図-5 は、淀川の過去 20 年の流量データから求めた、各流況(豊、平、低、渴、最低)の発生確率別の流量を示す。

図-6 は、最低流量と渴水回復期間の関係を示す。

図-7 は、これらの関係式を用いて 100% 淀川に依存する場合の取水制限率と渴水被害度の関係を求めたものである。ただし、流況及び過去の渴水実績より最大給水制限期間は 271 日(365-95+1)とした。

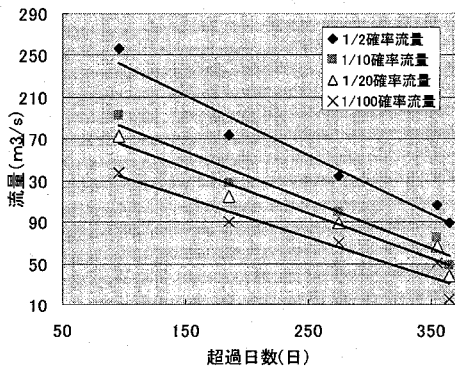


図-5 淀川(枚方)の流況

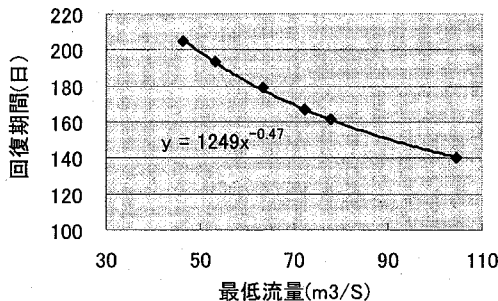


図-6 淀川における最低流量と回復期間

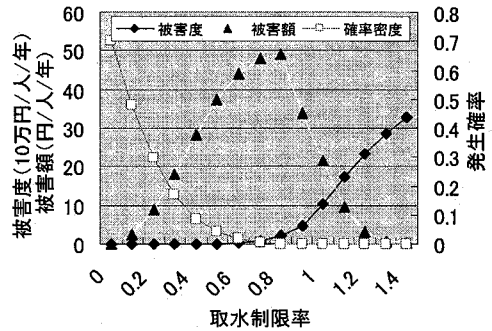


図-7 淀川における取水制限と渴水被害度曲線

b) 平常時事故断水リスク指標

平常時の管路事故リスク指標 D_p は、管種、管径等による事故発生被害件数、被害度等より次式で算定した。³⁴⁾

$$D_p = P_f \times P_p \times V_p \times D_i \quad (4-7)$$

ここに、 P_p : 路線が受け持つ給水人口(人)、 V_p : 路線の復旧速度(日/件)、 D_i : 1人1日当たり断水被害額(33千円/人/日)、 P_f : 平常時の事故件数(件/年)で次式で与えられる。

$$P_f = C_f \times C_p \times \alpha \quad (4-8)$$

ここに、 C_f : 事故危険度係数、 C_p : 管径による補正係数、 α : 事故断水率。

P_p (人)については、管径等による管路の流下能力より施設稼働率や負荷率を考慮して設定した。

c) 地震断水被害リスク指標

地震による断水被害指標 D_{pa} は地震の発生確率と規模、耐震化状況、断水期間等より次式で算定した。³⁵⁾³⁶⁾

$$D_{pa} = P \times Y \times L_d / 2 \times D_i / 50 \text{ 年} \quad (4-9)$$

ここに、 P : 人口(人)、 L_d : 断水期間(日)、 D_i : 被害原単位(3.3万円/日/人)、 $P \times Y \times L_d / 2$: 延べ被害人数(人・日)、 Y : 初期断水率で算定は次式を用いた。³⁵⁾

$$Y = 1 / (1 + 0.0473 R_m^{-1.61}) \quad (4-10)$$

ここに、 $R_m(\beta)$: 管路地震被害率、 β : 地震の最大加速度で、 $R(\beta)$: 標準被害率とすると次式で与えられる。

$$R_m(\beta) = C_p \times C_d \times C_g \times C_1 \times R(\beta) \quad (4-11)$$

$$R(\beta) = 2.88 \times 10^{-6} \cdot (\beta - 100)^{1.97} \quad (4-12)$$

ここに、 C_p, C_d, C_g, C_1 は、管種、管径、地盤、液状化条件による係数。また、地震発生周期は 50 年とし、断水期間 L_d は、水道管路の管種、管径別の延長と管路地震被害率より地震による流域全体の被害件数 N_d を求め復旧速度 V_d を 10 箇所/1 日として次式で求めた。

$$L_d = N_d / V_d \quad (4-13)$$

(2) 安全性指標

a) 発ガンリスクとクリプトスポリジウムによる感染リスク

水道水質の健康リスクは有害化学物質に起因するものと病原性微生物に起因するものに類別される。ここでは、

浄水処理で問題となっている、トリハロメタン等による発ガンとクリプトスポリジウムによる発症によってもたらされる人の健康被害等を基にリスクを算定した³⁷⁾。また水道水質の安全性を金銭評価するため、WHO や世界銀行が世界の疫病負担の総合的指標として公表したDALYs(障害調整生存年数)とその原単位(0.1億円/人)³⁸⁾を用いた。

発ガンリスクは、水道水質で発ガンに関して閾値のない

①プロモジクロロメタン(WHO 勧告値 0.06mg/L)

②ジクロロ酢酸(基準値 0.04mg/L)

③臭素酸(基準値 0.01mg/L)を評価対象とした。

クリプトスポリジウムリスク(Cpl)については、原水に含まれるオシト個数と浄水処理性を基に、浄水の汚染確率を算定し、米国ミシシッピにおける集団発生事例等より、水道水での検出が1個/10Lの時DALYs: 1.5×10^{-4} とし、沈殿ろ過で除去率は2log、オゾン・活性炭処理で2logとした。なお、下水処理水については、既往の調査³⁹⁾を基に河川原水の10倍のオシトが含まれるものとした。

b) 水源水質事故リスク指標

水源水質事故リスク指標は、水源水質事故の発生頻度と取水停止、取水制限等による被害額を基に算定した。淀川での水質事故実績と流下時間より、発生頻度は0.06(3回/50年)、取水停止期間1日とした。水質事故での給水制限による影響度は、漏水被害と同じ水価値曲線式(4-2)より算定した。

5. 地球環境指標

地球環境指標として、地球温暖化の主な原因物質であるCO₂排出量と資源の枯渇が問題となっているエネルギー消費量を用いた。これらの数値の算定に当たっては、「積み上げ法」と「産業連関分析法」によるL. C. Aの手法を用いた。⁴⁰⁾

(1)建設段階

建設段階の環境負荷排出量は、浄水場の建設、管路の布設、設備の設置などに分け、費用関数(表-8)を用いて費用を計算し、L.C.A 原単位(表-9)を用いてCO₂排出量とエネルギー消費量へ変換した。

なお施設の耐用年数は法定耐用年数を基本とした。

(2)運用段階

水道統計⁴¹⁾、下水道統計⁴²⁾等をもとに、大阪府内の各水道事業体、下水処理場等の運用実績から各規模別の電力消費量(表-11、表-12)や薬品使用量(表-10)の原単位を求めてモデル流域に適用した。

表-8 費用関数

対象施設 費用関数(95年度価格・百万円) ⁴⁰⁾	
上水道	取導水施設 土木 0.044×Q
	取導水施設 設備 0.0067×Q
	浄水施設 土木 $73.9 \times (1.1 \times Q / 1000)^{0.915}$
	浄水施設 設備 $31.7 \times (1.1 \times Q / 1000)^{0.915}$
	配水池 $18.4 \times Q / 2000 + 32.8$
下水道	配水管 $(7.79 \times 10^{-5} x^2 + 1.15 \times 10^{-1} x + 24.7) \times L(X)$
	管渠 $(40 + 0.14 x + 7.1 \times 10^{-5} x^2) \times L(X)$
	ポンプ場 490×N
	処理場 $588 \times (Q / 1000)^{0.719}$
Q:施設能力 (m ³ /日)、x:管径 (mm) L(x):管路延長 (km)、N:施設数	

表-9 LCA 原単位

LCA原単位 (建設段階)	エネルギー消費 (TOE/百万円)	CO ₂ 排出 (t-C/百万円)
土木(上水道)	1.00	1.05
土木(下水道)	0.914	1.00
設備	1.10	0.98

TOE(石油換算トン)=10⁷kcal

(運用段階)	エネルギー消費	CO ₂ 排出
塩素剤	9.54kcal/g	299kg-C/t
凝集剤(PAC)	0.58 kcal/g	299 kg-C/t
苛性ソーダ	7.23 kcal/g	178 kg-C/t ¹
電力	2250 kcal/kWh	0.104kg-C/kWh

表-10 浄水薬品使用量

	塩素剤 (kg/m ³)	凝集剤 (kg/m ³)	苛性ソーダ (kg/m ³)
府内市町村	0.0174	0.026	0.0077
府営水道	0.0104	0.031	0.0041

表-11 浄水給水規模別電力原単位

給水規模 (万m ³)	原単位 (kWh/m ³)	給水規模 (万m ³)	原単位 (kWh/m ³)
30以上	0.452	5~3	0.335
30~10	0.226	1~3	0.430
10~5	0.252	1以下	0.616
		府営水道	0.741

表-12 下水処理規模別電力原単位

下水規模 (万m ³)	原単位 (kWh/m ³)	下水規模 (万m ³)	原単位 (kWh/m ³)
10以上	0.369	3~0.1	0.594
10~5	0.405	0.1以下	1.249
5~3	0.466		

なお汚泥の処分については考慮していない。

環境負荷の金額評価に関しては、エネルギーは量とともにその質が重要とされることから、最も質の高いエネルギー源の一つである電力費(11円/kwh)に換算して指標とした。CO₂については、わが国での6%削減を実現するために必要な炭素税額3万円/t-Cを用いた。⁴³⁾

6.ライフサイクルコスト(L.C.C)

L.C.Cの算定は、建設費についてはL.C.Aの建設段階で費用関数を用いて求めた1995年時点の価格を、デフレーターを用いて2003年の単価に変換した。また、運用費については、L.C.Aで求めた使用量と、2003年の使用単価実績から求めた。

ただし、ここでは水源開発、汚泥処理、廃棄は含めていない。また、総合評価にあたっては運用と重複する地球環境指標のエネルギー分を減じた。

7.モデル流域の設定

河川の水質に課題を抱える大和川支川で水道水源となっている西除川流域(図-8)を参考に図-9、表-13に示す流域モデルを設定した。(以下これをN流域と称する)

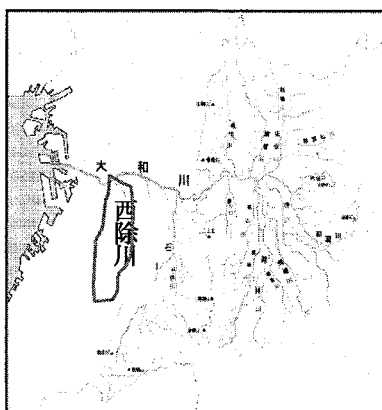


図-8モデル流域位置図

(1)N流域モデル

GISデータ⁴⁴⁾と市町村の統計資料等²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾を基に現況流域の土地利用、人口、水道供給量、下水道整備率等を設

定した。また大阪管区気象台観測データ⁴⁶⁾等を基に、降雨量、気温、地盤高等を設定した。(表-13)

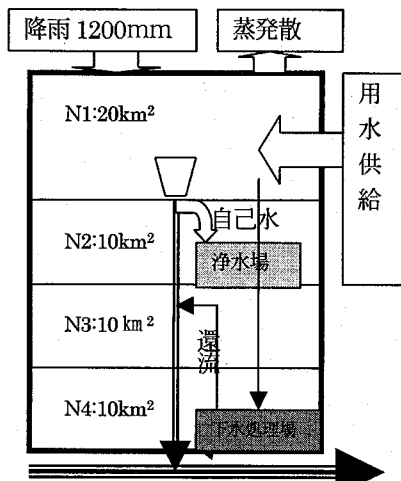


図-9 N流域模式図(ケース1-1)

表-13 N流域の河川流域諸元

人口: 25万人	水道水給水量 10万m ³ /日
流域面積: 50km ²	下水道: 分流式
森林: 6km ²	下水道: 整備率 70%⇒100%
農地: 10km ²	合併浄化槽 10%
宅地: 20km ²	単独浄化槽 10%
水面: 4km ²	し尿処理 10%
道路: 4km ²	河川: 延長 12km
その他: 6km ²	縦断勾配 1/500~1/250
降雨量: 1200mm/年	川幅 20~10m(天端 3m)
平均気温: 16.5℃	法面勾配 5% (ブロッグ張)
	治水レベル 1/10

(2)検討ケース

モデル流域は4流域に分割し、以下に示す各ケースで検討した。現況(ケース0)の下水道の整備率は70%であるが、各検討ケースではこれが100%整備されたとした。

ケース1: 現状の上下水道システムを継続

ケース1-1: 現状システムで下水処理水を河川に還流

ケース1-2: 流域内雨水を循環利用し自立分散型へ移行

ケース2: 流域外から全て給水するシステムに移行

ケース3: 用水供給100%で下水還流水を河川に還流

各ケースの給水内訳と下水処理水還流量を表-14に示す。

ここで、用水供給とは、他流域から長距離導水管路を通じて供給される水道水。自己水とは、流域内で水源を確保し処理して供給する水道水としている。

ケース1-2では、下水処理水を河川に還流することにより、自己水で100%まかなうこととしている。

表-14 ケ-別給水量・還流水量の内訳 (単位: 万m³/日)

		水道給水量		下水道 還流量
		用水供給	自己水	
ケース0		8	2	0
検討 ケース	1	8	2	0
	1-1	8	2	6
	1-2	0	10	10
	2	10	0	0
	3	10	0	4

(3)上下水道施設の配置

a)浄水場、下水処理場

下水処理場は、現状を参考に流域最下流に一箇所配置、浄水場については、ケ-ス1-2は、下流3流域に分散配置、その他は現状を参考に1箇所配置した。(図-9参照)

b)上下水道の配管網

管路の延長は、統計資料⁴⁰⁾、⁴¹⁾を基に上下水道とも人口密度と配管密度との関係式より設定した。(図-10、図-11) 上水道の管径、管種については、大阪府下各市町村の規模別の内訳⁴⁰⁾等を基に設定した。

下水道の污水管の管径については、下水道統計には規模別内訳が記載されていないため、文献⁴⁷⁾を基に河川の分岐則(地形則)を適用して規模別の管径内訳を設定した(図-12)。なお下水処理水の還流施設については、流量及びポンプ揚程等を基に設定した。

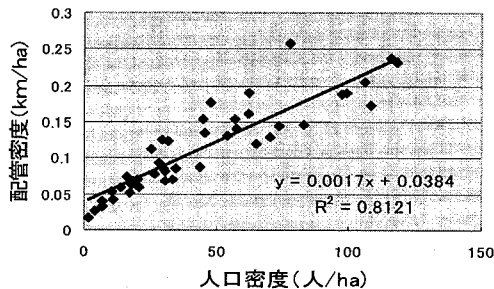


図-10 水道配管密度と人口密度の関係

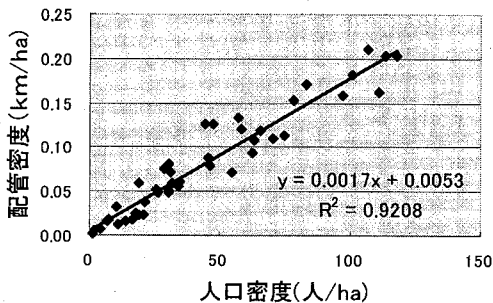


図-11 下水道配管密度と人口密度の関係

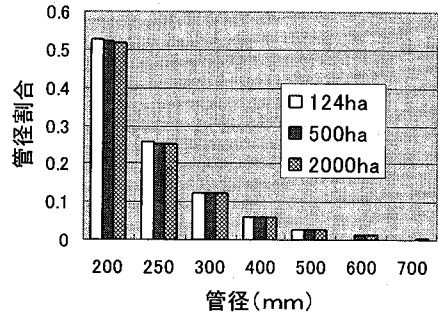


図-12 下水道配管の管径割合(地形則より)

表-15 上下水道管渠の内訳

水道管渠 L=610 km 最大口径Φ=700 mm	下水道管渠 L=460 km 最大口径Φ=900 mm
-------------------------------	--------------------------------

8. 計算結果

N流域での河川流量・水質と各指標値の計算結果を図13～図18に示す。各指標値は、流域指標を除き1年間あたりに流域内に住民が受けるリスクや被害度を金銭で評価したものであり、流域の水環境にとって望ましくない状況の程度を表したもので貨幣価値はマイナス(一億円/年)で評価される。流域指標については、表-7に示す自然休養機能など流域の持つ望ましい環境価値であり、その貨幣価値はプラス(億円/年)で評価されることになる。

これらの貨幣指標値を全て合計したものを「流域水資産健全度指数」と定義し、これが流域としての総合評価指標となる。

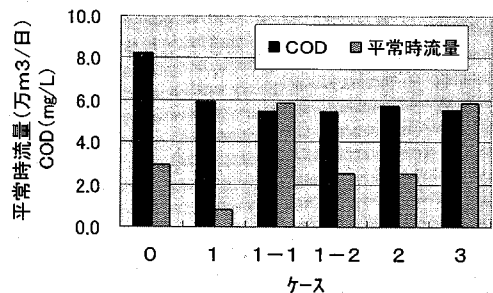


図-13 河川流量・水質計算結果

(1)河川・流域指標(図-14、15)

ケ-ス1では、現状から下水道の整備が進み、水質は改善されるものの、平常時流量が減じ、その効果は相殺される(図-13)。下水の処理水を河川に還流するケ-ス1-1、ケ-ス3では平常時の流量が大幅に改善され指標値も向上す

る。ケース1-2、ケース2では、平常時の流量が若干減少し指標値も低下する。流域指標については、今回の検討では条件に変化はなく指標値にほとんど変化はなかった

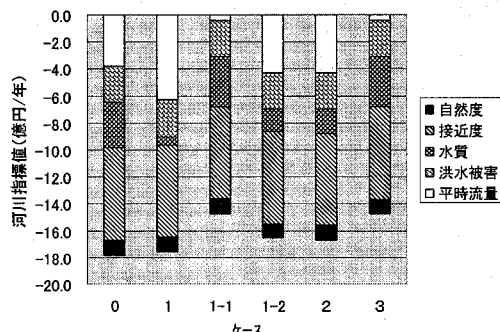


図-14 河川指標計算結果

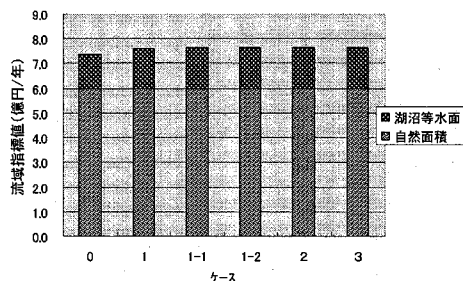


図-15 流域指標計算結果

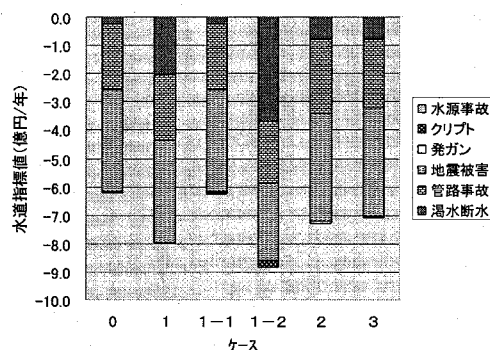


図-16 水道指標 計算結果

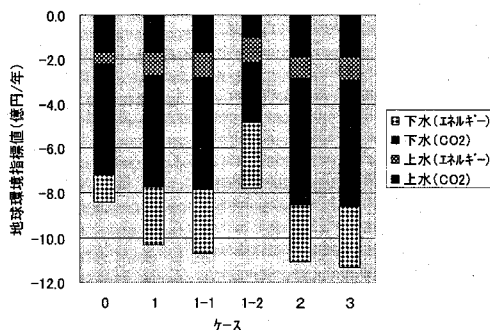


図-17 地球環境指標 計算結果

(2)水道指標 (図-16)

いずれのケースにおいても現状に比べ被害度は増大した。特に、ケース1、1-2では渇水被害度が増大し、用水供給に100%頼るケース2、3では渇水と地震被害リスクの増大が見られた。

(3)地球環境指標 (図-17)

上水道に関しては、現在のシステムと同じケース1、1-1に変化はないが、ケース2、3では、遠距離送水が増大することから、環境負荷は増大し指標値は悪化、逆に自己水源にたよるケース1-2では向上した。

下水道では、整備の進捗や高度処理の導入によりいずれのケースにおいても、環境負荷が増大し、現状より指標値は悪化した。ただし、今回は下水道の公衆衛生面での効果は加味していない。

(4)ライフサイクルコスト(図-18)

いずれのケースも環境指標と同様な傾向が見られた。特にケース1-1、1-2、3では、処理水の還流施設分のコストが上乗せされる結果となった

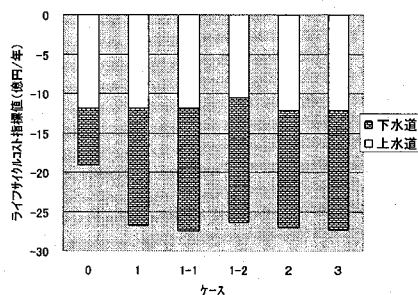


図-18 ライフサイクルコスト指標 計算結果

9. N流域での総合評価と考察

N流域の各指標を各ケース別に集計した総合評価結果「流域水資産健全度指数」を表-16に示す。

表-16 N流域での総合評価結果(単位:億円)

ケース	0	1	1-1	1-2	2	3
河川流域	-10.5	-10.0	-7.1	-8.9	-9.1	-7.1
水道指標	-6.2	-8.0	-6.2	-8.8	-7.3	-7.1
地球環境	-8.4	-10.3	-10.7	-7.8	-11.1	-11.3
小計	-25.1	-28.3	-24.0	-25.5	-27.4	-25.5
LOC	-19.1	-26.8	-27.5	-26.5	-27.1	-27.3
総合計	-44.2	-55.0	-51.5	-52.0	-54.5	-52.9

これによれば、河川流域指標と水道指標ではケース 1-1 が、地球環境指標と L.C.C ではケース 1-2 が高く評価され、総合評価(流域水資産健全度指数)では、下水処理水を河川に還流するケース 1-1 が最も高く評価された。

以上の結果より、N流域での上下水道システムに関しては、今後の下水道整備により、現状のシステム(ケース1)では、その効果は平常時流量の減少で相殺され、渇水リスクや地球環境への負荷の増大などで、「流域水資産健全度」は大きく低下する。その対応策として、下水高度処理水の河川への還流(ケース1-1)や自己水源にすべて依存するシステム(ケース1-2)の導入、さらに逆に自己水源を廃止して他流域からの水源に全て依存するシステム(ケース2-1)への移行が考えられるが、今回の計算では、現在のシステムで下水処理水を河川へ還流するケース1-1が最も高い評価となった。しかし、水源を他流域に頼らない自律分散型のケース1-2や100%用水供給に依存するケース3との差は、大きなものではなく、地球温暖化対策という視点に立てば地球環境への影響の最も少ないケース1-2への移行の必要性も考えられる。

なお、今回の評価では、貨幣価値を用いたが、これについては、環境や生命の価値を金銭で評価することの可否や割引率の扱い等研究者の間でもまだ議論の多いところである。また、CO₂の貨幣評価についても地球温暖化は深層海流の停止など破局的な影響の発生を考え、気温上昇を抑止する環境税額で評価したが、他の研究³⁸⁾では具体的な健康や経済的被害額での評価も行われている。また「エネルギー」についても、最も質の高い電力の現在価格で評価したが、資源の不足が予想される次世代でも現在単価で評価すべきかどうかの議論も考えられる。さらに、水循環やLCAなどの個々のテーマが大きな研究課題であり、より精度の高い評価はそれらの研究成果を待つ必要がある。しかしながら地球温暖化は確実に進行しており、わが国の人口減少、上下水道施設の老朽化も確実に進行することから、今まさに早急な対応、具体的な行動が求められている。こうしたことから、今回は、今後の上下水道システム再構築の方向性を評価する指針づくりを目指し、汎用性や住民へのわかり易さを基本とした総合評価手法を提案したものである。

10. おわりに

持続可能性には種々な定義があるが、持続可能な発展とは、一般に「環境」、「社会」、「経済」が調和した発展とされている。本文は、持続可能な上下水道システム評価のために環境として地球環境や水循環、社会として水道の安全性・安定性、経済としてLCCを抽出し、それらを貨幣価値で総

合的に評価する「流域水資産健全度指数」を提案し、N流域モデルでの上下水道システムの評価を試みた。

これによれば、比較的人口密度の高いN流域モデルでは、用水供給に依存する現状のシステムで、下水処理水を河川に還流するケースがもっとも高い評価となった。一方、地球環境という視点では用水供給に依存しない自立分散型が望ましいとの結果も得た。

今回の検討では、今後の社会的、自然的条件の変化、下水道事業の効用、さらに浄水処理手法の変更等は考慮していない。また、水源や人件費の評価なども考慮していない。今後、更に詳細な資料データを収集し、地球温暖化や人口減少の影響、他の流域や流域対策の効果の検討などを追加し、上下水道の再構築の方向性、また水循環から見た流域の望ましい姿などを評価する手法として発展させていきたい。

参考文献

- 1) 環境省:総合的環境指標について環境基本計画における指標のあり方に関する調査検討会参考資料,2006
- 2) 産業技術総合研究所: LCAのケーススタディ(三重県,千葉県,岩手県におけるLCA手法の研究開発),2005
- 3) 日本水道協会:水道事業ガイドライン(JWWA Q100),2007
- 4) 木山正一:環境・経済統合勘定を適用した流域水環境の実態把握と将来型管理計画への一考察,環境システム研究論文集,Vol 34,2006
- 5) 氏原岳人,谷口守・古米弘明・小野芳朗:ウォータサプライ・フットプリント指標を用いた都市活動配置評価ー水利用・循環の視点から地区整備を考えるー,環境システム研究論文集,Vol 34,2006
- 6) 多田律夫・三浦浩之・和田安彦他:分散型水供給システムのエコデザインによる評価,環境システム研究論文集,Vol.28,2000
- 7) 鶴巻峰夫:水環境関連分野でのLCA適用の試み,水環境学会誌,Vol23, No.2,2000
- 8) 近藤博幸,藤原正弘,中村洋,滝沢智:浄水施設を対象としたライフサイクルアセスメントに関する研究,全国水道研究発表会講演集,pp.84-85,2007
- 9) 岩竹貴則,馬場啓輔,市川浩:アセットマネジメントを適用した浄水施設の更新計画事例,全国水道研究発表会講演,pp.60-61,2007
- 10) サステナビリティの科学的基礎に関する調査プロジェクト:サステナビリティの科学的基礎に関する調査報告書,2006
- 11) 環境庁:環境白書,2000
- 12) 厚生労働省:水道ビジョン,2002
- 13) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議:健全な水循環系構築のための計画づくりに向けて, 2003
- 14) 国土交通省:今後の河川水質管理の指標について(案), 2005
- 15) 地方公営企業経営研究会:地方公営企業年鑑,(財)地方財政協会,2003

- 16) 平山晴章:琵琶湖淀川における土地利用変化を考慮した窒素負荷流出に関する研究.京都大学修士論文,pp.26,2003.
- 17) 三浦浩之,和田安彦,多田律夫,尾崎 平:下水処理水還流システムの環境調和性に関する研究, 土木学会論文集, No.629/VII-12,pp.57-66,1999.
- 18) 大阪府水道部:大阪府水道用水供給事業の水需要予測結果,pp.29,2005
- 19) 日本下水道協会:流域別下水道整備総合計画調査指針と解説, 1999.
- 20) (財)琵琶湖・淀川水質保全機構:琵琶湖・淀川水環境改善対策総合調査報告書,p234,2000.
- 21) 大阪府水道部:水質試験成績並びに調査報告,2003
- 22) 農林水産省:H17 食料,農業,農村白書,p107,2006
- 23) 国土交通省:水資源白書,p107,p29,2006
- 24) 大阪府土木部:大阪府の雨量第8~10集
- 25) 河内長野市:河内長野市統計書,2006
- 26) 大阪府建築都市部:国土計画関係資料集(土地利用現況), 2005
- 27) 大阪府企画調整部:H15 大阪府統計年鑑,2004
- 28) 大阪府土木部:大阪府流量観測報告,1986-2005
- 29) 大阪府:大阪府域河川等水質調査結果報告書
- 30) 土木学会:水理公式集H11 年版,p37
- 31) 大阪府下水道課:H18下水道統計, p274
- 32) 日本ダム協会:ダム年鑑, p593,2002
- 33) 日本学術会議答申:地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多目的評価について(付表), 2001.
- 34) (社)日本水道協会:水道施設更新指針,p109-111,2005.
- 35) 水道産業新聞社:全国446都市の水道の地震安心度評価,p9, 2003.
- 36) 日本水道協会:地震による水道管路の被害予測,p54-56, 1998.
- 37) 齊藤方正,木村昌弘,伊藤禎彦:DALYによる水道水質リスク評価,第58回全国水道研究発表会講演集, p716-717, 2006.
- 38) 伊坪徳宏,稲葉敦:ライフサイクル影響評価手法,社団法人 産業環境管理協会,p350,2005.
- 39) 諏訪守,鈴木穰:下水および河川水におけるクリプトスピリウムの実態調査,土木技術資料,40-9, p50-55,1998
- 40) 伊藤禎彦,千田祐一郎:流域における小規模分散型水供給システム導入可能性の解析,日本水環境学会年次講演会集p419,2005.
- 41) 日本水道協会:H15 水道統計(行政編)
- 42) 日本下水道協会:H15下水道統計(行政編)
- 43) 環境庁:地球温暖化システム検討会第2次中間報告書, 1994.
- 44) 国土交通省国土計画局:国土数値情報, L03-09M-27, W07-52M
- 45) 総務省統計局:地域メッシュ統計(H12)
- 46) 気象庁:気象統計情報(大阪年ごとの値),2007
- 47) 田中修司(執筆代表者):下水道管渠学,環境新聞社,p37-41

A COMPREHENSIVE EVALUATION FOR ESTABLISHING SUSTAINABLE WATER AND SEWAGE SYSTEMS

Masahiro KIMURA Sadahiko ITOH

We proposed a new comprehensive evaluation index for the water and sewage systems including preservation of global environment, soundness of water cycle of a basin, stability and safety of water service and performed this evaluation in a model basin. The result of this comprehensive evaluation indicated that the recirculation of treated waste water to upstream was the best option among the five scenarios evaluated in this study. Also, decentralized water and sewage systems were found to be most effective for the prevention of global warming.