

(15) 都市における水循環システムの多目的評価
～河川水循環利用と雨水浸透システムに関するケーススタディ～

Multi-objective Evaluation of Water Recycle Systems in Urban Area
～ A Case Study on Indirect Potable Reuse and Rainwater Infiltration Systems ～

松本重行*・山本和夫*

Shigeyuki MATSUMOTO*, Kazuo YAMAMOTO*

ABSTRACT; Progress in urbanization has caused water-related problems such as large expenditure for water resource exploitation, floods in urban rivers and natural flow rate reduction. Indirect potable reuse of treated wastewater and rainwater infiltration systems are part of major artificial water recycle technologies for solving these problems. In this study, the two systems mentioned above were evaluated in several indices : flow rate, water quality, cost, CO₂ emission, energy consumption and others. The case of the Tama River in the Tokyo metropolitan area was examined.

Indirect potable reuse proved to flatten the flow rate and preserve upstream water environment, while water quality in the lower course became worse than a case without reuse. However, the cost, CO₂ emission and energy consumption were 10% smaller because of diminution of waterworks sizes. The rainwater infiltration systems resulted in 8% increase in the natural flow rate for the main river part and the maximum 80% increase was achieved in a downstream region of the branch rivers. Therefore, 10 - 20% reduction in terms of COD_{Mn} was obtained in the region, indicating an improvement of the water environment. The rainwater infiltration systems accounted for approximately 10% of the total cost, whereas only 4 - 5% of the total CO₂ emission and energy consumption was due to the infiltration systems. Thus, they are expected to have environmentally low impact.

KEYWORDS; water recycle system, indirect potable reuse, rainwater infiltration system, multi-objective evaluation

1. はじめに

都市化に伴う人口の集中、不浸透域の拡大は、水資源開発コストの上昇、都市型洪水の発生、地下水涵養量の減少に起因する河川自流量の減少など、都市の水循環に係わる多くの問題を生みだしている。これらの問題を解決すべく、下水処理水の再利用や雨水浸透システムなどの新たな技術の開発が進められ、近年その実用例も増加してきている。

これらの技術に関する従来の研究は、個々のシステムの技術的確立を目指したものが中心である。しかし、今後さらにこのような「水循環創造技術」の普及を図っていくためには、流域レベルあるいは都市レベルの水環境・水循環に与える影響、社会的経済的側面に与える影響、個々の技術を効果的に組合わせた最適形態等に関する考察を進めていく必要があると考える。

そこで筆者らは、種々の水循環形態の特徴を流域スケールで定量的に明示することを目的として、複数の評価指標に関する具体的な流域を想定した評価を試みている。本報ではこのうち、小規模の上下水道による河川水の繰り返し利用と雨水浸透システムについて検討した結果を報告する。4つのシナリオを設定し、対

* 東京大学工学部都市工学科 (Department of Urban Engineering, The University of Tokyo)

象流域の支川、本川の流量および水質を簡単なモデルによって計算し、合せてコスト、二酸化炭素排出量、エネルギー消費量、その他の効果についても定量的な評価を行なった。

2. 評価モデル

2. 1 概要

本研究の水循環システム評価モデルは、具体的な流域を対象としたシナリオを想定し、複数の評価指標について評価値を計算するものである。その概要を、図1に示す。

本研究は水循環システムが水環境あるいは社会的経済的因子等と与える一般的な影響を評価することを目的としているが、土地利用や人口等の基礎データ、自浄係数、および水文関連の諸数値は流域によって大きく異なると考えられるため、対象流域の現状を代表値として利用した。一方、上下水道の設定など流域にそれほど依存しないと思われる部分については独自の設定を行ったため、本研究の結果は対象流域の現状や実存する計画を忠実に再現するものではない。

2. 2 対象流域

モデルの対象流域としては、多摩川を選定した。多摩川は、山梨県塩山市に源を発し、山梨県、東京都、および東京都・神奈川県の都県境を流下した後東京湾に至る、全長138 km、流域面積1240 km²、流域人口360万人の1級河川である。中・下流域は都市化が進んでおり、湧水の枯渇や支川自流量の減少が問題となっている。また、水利用は水道原水の取水が主なものであり、上流部の小作、羽村で大量の取水を行っているために、羽村堰下流部では著しく流量が減少する。その後支川や下水処理水の流入によって流量は回復していくものの、水質に関しては環境基準を満たしていない地点も多い。

支川の水環境も評価の対象とするために、本川流域を主な支川の流域と直接流入域、合せて16の小流域に分割し、それぞれについて行政区別の統計データ^{1)・3)}から、面積、人口、土地利用、工業生産額等の基礎データを計算した。対象年度は1988年を基本とした。また、本川流下方向の条件の変化を考慮するため、本川を4つの流域に分割し、それぞれについて降水量や自浄係数等の設定を行なった。対象流域の地図および人口を図2に、主な支川流域の土地利用を図3に示す。

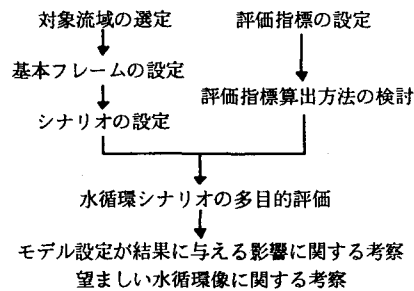


図1 水循環システム評価のプロセス

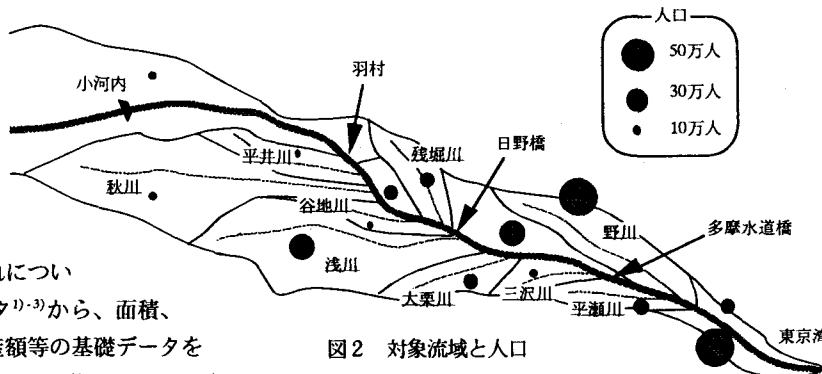


図2 対象流域と人口

表1 シナリオ

		上水道	
		河川水1回利用	河川水循環利用
雨水	なし	シナリオ1	シナリオ2
浸透	あり	シナリオ3	シナリオ4

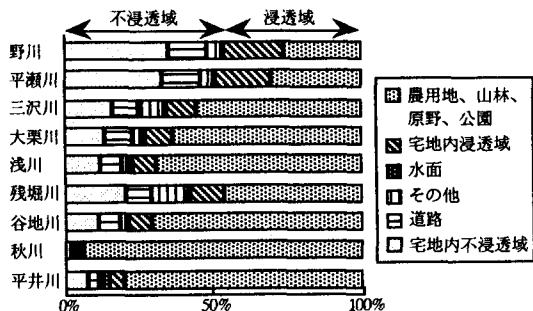


図3 支川流域の土地利用割合

2. 3 シナリオ

比較の対象としては、水循環の形態や規模をモデルケースとして記述したシナリオを考える。本研究で検討した4つのシナリオを表1に示す。各シナリオは、上水道システム、下水道システム、雨水浸透システムから成る。

2. 3. 1 上水道システム

ダム（小河内地点に建設）、浄水場、配水池、配水管を構成要素とする。ダム貯水池容量は、過去10年間第1位の渇水年である1984年を基準年とし、水道原水需要のみを対象とする水収支計算によって求めた⁴⁾。浄水場は日最大配水量に対応した規模とし、配水池は日最大配水量の12時間分の容量とした。配水管延長は道路延長に比例するものとし、管径分布は水道統計より事業規模別に求めた。

日平均配水量は、生活用水を一人1日280Lとし、これに工業小分類製品出荷額と排水量原単位⁵⁾から求めた工業用水量を加え、漏水率10%を見込んだ値とした。日最大配水量は、負荷率0.8によって求めた。

①河川水1回利用上水道システム（シナリオ1、3）

現在の多摩川流域における水道原水は、その主要な部分は上流域が多摩川河川水、下流域が利根川、相模川等の他流域からの導水となっている。この形態の水利用では、多摩川の河川水は上流部で取水された1回のみ使用となる。

これに近い状況を記述するものとして、上流部及び下流部2つの給水区によるシステムを設定した。上流給水区は羽村地点で多摩川の河川水を取水する。給水人口150万人（流域人口の42%）、日平均取水量 $7.5\text{m}^3/\text{s}$ で、ダム貯水容量は 2.1億m^3 である。一方下流給水区は他流域から導水する。すなわち、取水に関しては多摩川に影響を与えず、コスト等の指標に関してのみ計算を行う。給水人口210万人、日平均取水量 $9.7\text{m}^3/\text{s}$ で、水資源関連施設の設定は日最大取水量に比例した容量のダムを導水元の河川に建設することとした。

②河川水循環利用上水道システム（シナリオ2、4）

上流部だけでなく中・下流部でも分散して取水し、流量の安定化を図るとともに水資源開発の負担を軽減するシステムである。このシステムでは、上流部の下水処理水を河川を経由して再利用することになる。

シナリオは給水人口数十万人規模の給水区10カ所からなるものとし、うち下流部の2つの給水区は他流域からの導水（取水量 $2.1\text{m}^3/\text{s}$ ）、その他の給水区は多摩川の河川水を3カ所から取水する（取水量 $15.2\text{m}^3/\text{s}$ ）設定とした。1回取水に比べて多摩川からの取水量は約2倍となり、流域人口の88%が多摩川を水源とすることになる。多摩川に建設するダムの貯水池容量は、シナリオ2（雨水浸透システムなし）の場合 2.5億m^3 、シナリオ4（雨水浸透システムあり）の場合 2.1億m^3 である。後者では雨水浸透システムの導入によって流量が増加するため、ダム容量が減少する。他流域からの導水の扱いについては、①と同様とした。

2. 3. 2 下水道システム（シナリオ1～4共通）

処理場と管渠を構成要素とする分流式下水道を設定した。処理場は日最大処理水量に対応した規模とし、処理水量は上水道配水量から工業用水量を差し引いた量に漏水量と10%の地下水侵入量を見込んだ値とした。管渠延長は道路延長に比例するものとし、管径分布は事業規模別に設定した。処理区の設定は循環利用上水道システムの給水区に準じた10カ所とし、処理水放流地点は多摩川本川上に6カ所、東京湾岸2カ所とした。

なお現在多摩川流域で進められている下水道計画は、7処理区からなる流域下水道、4カ所の単独公共下水道等から構成され、これらが完成すると多摩川中・下流域には13の処理場が設けられることになる。本研究での設定は、処理場の位置や数が異なるものの、処理区のおおよその規模や処理水を少量ずつ多摩川に還元する計画であるという基本的な特徴に関しては実際の計画に準じたものとなっている。

表2 評価指標とその算出方法

評価指標	算定対象
河川平時流量	雨天時流出を除く平時河川流量
河川水質	平時における河川水質を、CODをもとに類型分類で表現
コスト	システムの維持管理に要する費用と減価償却費
二酸化炭素排出量	システムの建設及び維持管理を対象として産業連関表*を用いてコストから換算
エネルギー消費量	システムの建設及び維持管理を対象として産業連関表*を用いてコストから換算
その他	雨水浸透システムによる面源負荷削減効果、治水効果、水収支の変化について記述

*) 総務庁：昭和60年産業連関表 基本表

表3 流出係数

土地利用	流出係数
浸透域*	0.2
宅地内不浸透域	0.8 ⁷⁾
その他の不浸透域**	1.0

*) 農用地、山林、原野、公園、宅地内浸透域、雨水浸透システム。ただし、羽村より上流部の農用地、山林、原野については山地の流出係数に準じて0.4とした。

**) 道路、水面、その他

2. 3. 3 雨水浸透システム（シナリオ3，4）

雨水浸透システムは屋根雨水の浸透枳による処理と透水性舗装の2種類を組合わせたシステムとして設定した。浸透枳は屋根面積の75%を対象とし、30㎡につき1個設置することとした。透水性舗装は5.5m未満の道路を浸透対象面積とした。その結果、野川流域等の下流部では全土地利用の25%を超える面積が新たに浸透域となった。清掃頻度は3年に1回とした。

2. 4 評価指標

評価指標は、表2に示す6項目である。流量、水質、その他の3項目は流域の水環境、生活環境を評価する指標、コスト、二酸化炭素排出量はそれぞれ経済的側面及び地球環境に係わる指標である。また、エネルギー消費量は、地球環境への影響、化石燃料の枯渇、都市廃熱の発生などの諸問題に関する指標として一般に用いられていることから、評価指標に加えた。各指標の計算方法について以下にまとめる。

①河川平時流量

河川への平時流出量（ Q_N ）と工場排水量（ Q_I ）および下水処理水放流量の合計とする。 Q_N は多摩川流域における既存の研究より、以下の関数式によって表した⁶⁾。

$$Q_N = A \times Q_{GR}^2 \quad (\text{mm}/\text{年})$$

$$Q_{GR} = (P - E - R) + (W - S) \quad (\text{mm}/\text{年})$$

A：定数（ $6 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3}$ ） P：降水量（流域毎に設定）

E：蒸発散量（流域毎に設定） R：雨天時流出量（土地利用毎の流出係数から計算）

W：漏水量（配水量の10%） S：下水道侵入量（汚水量の10%）

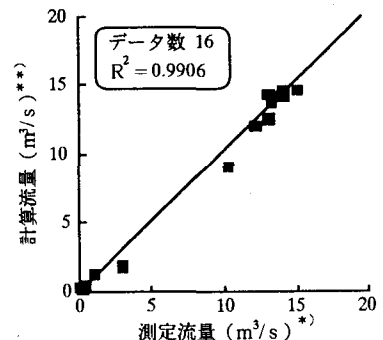
降水量は統計値より下流ほど小さく設定し、浸透域からの蒸発散量はThornthwaite法による可能蒸発散量の計算結果を元に下流ほど大きな値を取るよう流域毎に設定した。不浸透域からの蒸発散量は、凹地貯留量と降水日数より200mm/年⁷⁾、雨水浸透システムからの蒸発散量は300mm/年とした。また、流出係数は表3に示した値を用いた。ただし、以下の式を用いて宅地面積（R）を浸透域と不浸透域に分割するとともに、雨水浸透枳設定のベースとなる屋根面積を定義した。

$$\text{宅地内浸透域} : 0.6 \cdot R (1 - B)$$

$$\text{宅地内不浸透域} : R \cdot B + 0.4 \cdot R (1 - B)$$

$$\text{屋根面積} : R \cdot B + 0.2 \cdot R (1 - B) \quad B : \text{建坪率} (-)$$

工場排水量 Q_I は前述の方法によって計算し、全量河川に放流する設定とした。また、1988年度の実際の流量データに合うよう定数Aを上記の範囲に設定することにより、図4に示すような適合度を得た。



*) 実測流量から東京都による人為排水量推定値を引いた値

**) 平時流出量

図4 平時流出量の適合度

②河川水質

河川水質を表現する指標としては、CODを選択した。これは、CODがトリハロメタン前駆物質や有機塩素化合物、異臭味等の指標として有効である過マンガン酸カリウム消費量⁸⁾から換算式によって推定可能であるため、水道原水の汚染状況を示す指標として適当であること、及び東京湾に係わる総量規制の規制項目として用いられていることによる。COD値はStreeter-Phelps式によって計算したが、その評価にあたってはCOD値そのものよりも河川の利用形態やそこから喚起される河川水質のイメージを対象とする方が適当であると考え、湖沼の環境基準に準じて類型分類を行なった。水道原水としての適否の判断は、水道水源の水質環境基準による。

自浄係数は、原単位法による発生負荷量計算と水質測定値から流域及び支川毎に求めた。貯水池における水質変化は、小河内貯水池における水質データからその影響は小さいものと判断し、モデル化を省略した。各種排水のCOD設定値は、平時流出0.5mg/L、下水処理処理水15mg/L、工場排水15mg/Lとした。

③コスト

上下水道については、費用関数もしくは統計的に求めた原単位を用いた。雨水浸透システムについては情報が限られているため実例値を使用し、いずれも下水道事業費デフレターおよび同工事費デフレター⁹⁾を用いて、1994年度価格に揃えた。算定の対象はシステムの維持管理に要する費用と減価償却費とした。減価償却費は取得原価から残存価額を差し引いた値を耐用年数で割って算出した(定額法)。すなわち本研究では減価償却費という形で利用期間単年度あたりに直した建設費を考察の対象に含めていることになる。耐用年数は地方公営企業法施行令等に準じて、表4に示した値とした。上下水道事業については、業務費および総係費を含む営業費用を対象とし、支払利息等の営業外費用は含めていない。また、建設費には用地費を含めていない。コスト計算の結果は後述の産業連

表4 耐用年数

	耐用年数
ダム	50
浄水場、配水池	60
浄水場機械設備	15
配水管	40
管渠、処理場	50
処理場機械設備	18
透水性舗装	10
雨水浸透枳	30

表5 費用関数(94年度価格・百万円)

建設費	上水道	ダム 浄水場 ⁸⁾ 配水池 ⁸⁾ 配水管 ⁹⁾	$23 \times V^{23}$ $106 \times (1.1 \times Qm/1000)^{0.915}$ $18 \times Qm/2000+33$ $(7.79 \times 10^{-5} x^2 + 1.15 \times 10^{-1} x + 24.7) \times L(x)$
	下水道	管渠 処理場	$(40 + 0.14 x + 7.1 \times 10^{-5} x^2) \times L(x)$ $588 \times (Qm/1000)^{0.719}$
	浸透	透水性舗装 雨水浸透枳	$785 \times A$ $2.01 \times N \times 10^{-2}$
	減価償却費		残存価額10%の定額法、浄水場と処理場は土木：機械=7：3に分割
	年間維持管理費	上水道 下水道 浸透	$(16.4 + 3.45C) \times Qa \times 3.70 \times 10^{-4}$ $(0.33 + 1.8 \times 10^{-3} p - 5.3 \times 10^{-7} p^2 + 9.6 \times 10^{-11} p^3) \times L$ $8.14 \times 10^{-3} \times Qa$ $7.3 \times 10^{-3} (Qa \times 365)^{0.23} \times L$ $52 \times (Qa/1000)^{0.596}$ $8.1 \times 10^{-3} \times Qa$ $493 \times A$ $3.83 \times N \times 10^{-3}$

V : ダム貯水容量(千 m^3)

C : 原水水質(COD mg/L)

x : 管径(mm)

Qm : 日最大配水量,日最大処理水量(m^3 /日)

A : 透水性舗装面積(km^2)

L : 管渠延長(km)

Qa : 日平均配水量,日平均処理水量(m^3 /日)

N : 雨水浸透枳個数

p : 給水人口(千人)

注) 表中の関数式は、統計データや調査結果から筆者が作成したもの、及び文献中の関数式を加工(デフレターによる対象年度の統一、過マンガン酸カリウム消費量からCODへの換算等)したものである。

表6 二酸化炭素排出量およびエネルギー消費量の原単位

対象項目	部門名	CO ₂ 排出量原単位 ¹²⁾ (t/百万円)	エネルギー集約度 ¹³⁾ (GJ/百万円)
上水道建設	その他の土木建設	4.52	66.7
下水道建設	河川・下水道・その他の公共事業	4.27	63.3
透水性舗装建設	道路関係公共事業	4.20	69.9
浸透枹本体	セメント製品	15.3	103
浸透枹透水シート	プラスチック製品	3.40	99.1
浸透枹碎石	碎石	5.38	128
上水道維持管理	上水道・簡易水道	3.69	85.7
下水道維持管理	下水道	5.30	106
下水道補修	河川・下水道・その他の公共事業	4.27	63.3
透水性舗装維持管理	道路関係公共事業	4.20	69.9

関表を用いた計算にも用いるため、同表の部門分類に対応した算定範囲となるよう考慮した。使用した費用関数を表5に示す。

④二酸化炭素排出量

二酸化炭素排出量およびエネルギー消費量の主な算出方法としては、個々の原材料や燃料に関する原単位を積み上げる方式と、産業連関表から産業部門毎に生産額あたりの原単位を求めコストから換算する手法がある。本研究では、流域規模のシステムを対象としたマクロスケールの分析であることから、計算が容易な後者の方法を採用した。この手法は、燃料等の直接的な消費に加えて、部品の製造や輸送に伴う間接的な消費も捉えることができるという特長をもつが、一方で産業連関表というマクロな統計資料を元としているため、同一部門内の製品間の差が表現されないという点に注意する必要がある。

二酸化炭素排出量の算出には、吉岡らによる原単位¹²⁾を用いた。CO₂発生源としては、固定発生源と移動発生源における燃料の燃焼、及び生石灰の焼成などの原料使用を計算の対象としている。対象年度は昭和60年、部門数は406である。今回計算に使用したCO₂排出量原単位を表6に示す。

算定対象範囲は建設と維持管理とし、建設に係わる排出量に関しては耐用年数で割ることによって1年あたりの数値とした。

⑤エネルギー消費量

野村らによるエネルギー集約度¹³⁾を用いて、コストから換算した。エネルギー集約度とは、上述のCO₂排出量原単位と同様に産業連関表を用いて単位生産額あたりのエネルギー消費量を求めたものである。対象年度は昭和60年、部門数531である。算定対象範囲に関しては、二酸化炭素排出量と同様の扱いとした。今回計算に使用したエネルギー集約度を表6に示す。

なお、本研究の手法において二酸化炭素排出量とエネルギー消費量の挙動の違いは、産業部門毎の原単位の違いによってもたらされる。より具体的には、各種エネルギー源の炭素含有量の違いやセメント消費量の違いに由来する。

⑥その他の効果

雨水浸透施設の効果としては、治水効果、面源汚濁負荷削減効果、地下水涵養効果などがあるとされている。これらの効果についても若干の考察を試みた。

3. 計算結果

①河川平時流量

本川流量の流下方向の変化を図5に示す。シナリオ1と3では羽村での取水による流量減少と支川、処理

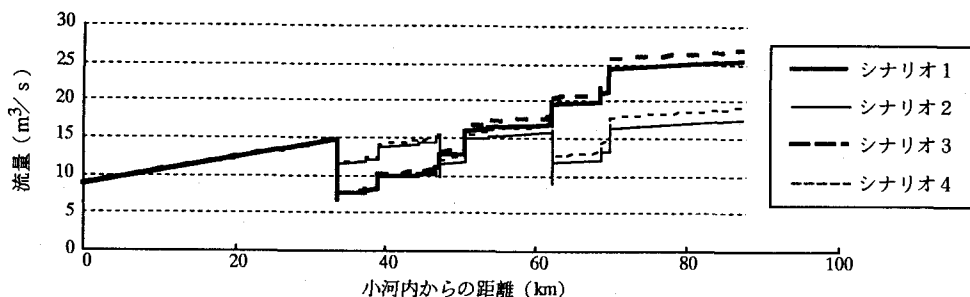


図5 本川平時流量

水の流入による増加が見られる。それに対してシナリオ2と4では、下流部での取水によってやはり流量が大きく減少するものの、全体を通じて10~20m³/s程度の安定した流況となる。一方、雨水浸透システムの導入による流量増は、下流部で1.5m³/sであった。これは、シナリオ3の自然流量の7.2%にあたる量である。

雨水浸透システムによる流量増加は、本川よりもむしろ下水道普及による自流量減少が懸念されている支川において期待されている。図6は雨水浸透の有無による支川流量の変化を示したものである。都市化の進んだ下流域での効果が大きく、野川では雨水浸透システムの導入によって自然流量が1.8倍に増加する。しかし絶対量でみるとさほど小さくなく、最大の野川でも0.19m³/sの増加量である。

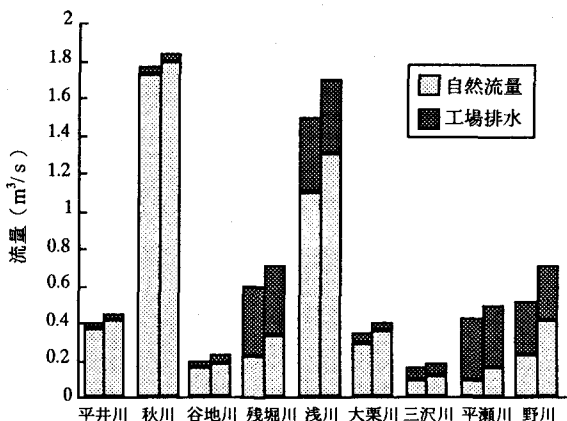


図6 支川平時流量

(左側が雨水浸透なし、右側が雨水浸透あり)

②河川水質

図7は支川および本川の水質を示したものであ

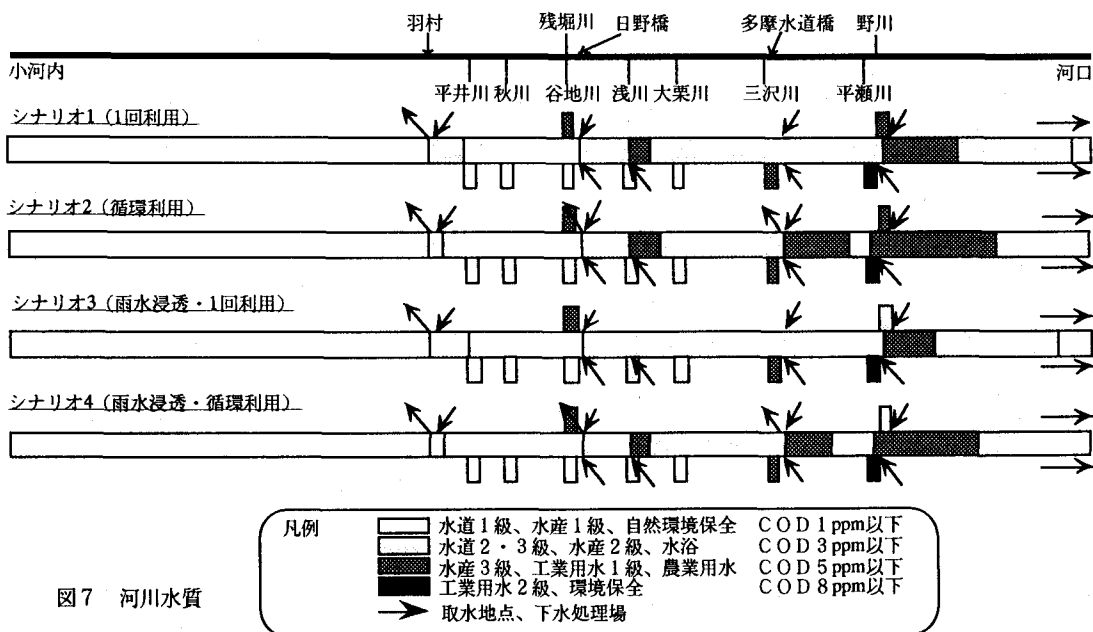


図7 河川水質

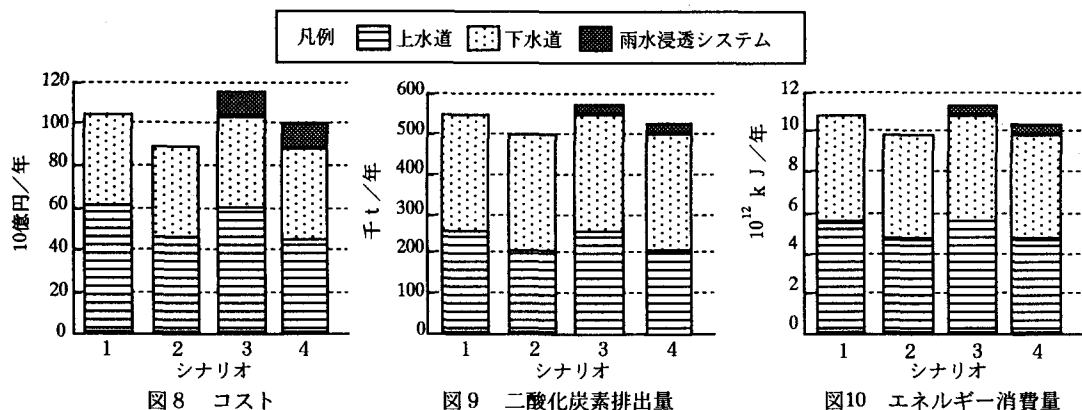


図8 コスト

図9 二酸化炭素排出量

図10 エネルギー消費量

る。いずれのシナリオにおいても下水処理水流入の影響が大きく、流量が減少する取水地点下流側において悪化が顕著である。特にシナリオ2と4では、人為的な河川利用が高密度となる下流部で水質悪化が見られる。また、支川の水質は本川合流点での類型を示したもので、平時流量中に占める工場排水の割合が大きく影響している。ただし、ここでの工場排水量は産業分類別原単位を使用し全量河川放流という仮定の下で計算したもので、工場排水を下水道に受け入れている実際の状況とは異なる。

雨水浸透システムの導入による水質改善効果は下流ほど大きい。本川下流部では5～7%程度の浄化にとどまっているが、支川に関しては最も都市化の進んだ野川で25%、その他の中・下流域の支川で10%強の改善になるという結果であった。

③コスト (図8)

最も小さな値となったのはシナリオ2で、シナリオ1に対して13%小さい。この理由については次節で考察する。

雨水浸透システムの導入によるコスト上昇は年間約120億円で、シナリオ3では雨水浸透システムがコスト全体の1割強を占めている。このうち55%が透水性舗装、残りが雨水浸透樹に要する経費であるが、浸透対象面積あたりでは透水性舗装のコストが浸透樹の3.7倍になる。これは、透水性舗装が定期的な舗装替えおよび高圧ジェット洗浄を必要とすることによるものと思われる。ただし、雨水浸透システムのコストは統計値ではなく特定事業体の実績値であり、維持管理の頻度にも左右されることから、変動幅が大きいものと考えられる。

④二酸化炭素排出量 (図9)

コストと同様にシナリオ2が最も小さな値となっているが、シナリオ1との差は9.6%に縮まっている。雨水浸透システムはシナリオ3においては5.2%を占めており、コストに比べてその寄与が小さくなっている。

⑤エネルギー消費量 (図10)

シナリオ1に対してシナリオ2は11%の減少となっている。また、雨水浸透システムの寄与は二酸化炭素排出量よりもさらに小さく、シナリオ3において4.2%である。すなわち、雨水浸透システムを含むシナリオと含まないシナリオの差は、コストに比べて縮まっている。

⑥その他の効果

まず雨水浸透システムによる治水効果については、ピークカットの効果よりも総流出量抑制効果の方が主であることが指摘されている¹⁴⁾ことから、総括流出係数の変化による総流出量の減少効果をみてみる。流域全体では、雨水浸透システムなしのシナリオで0.34、ありのシナリオで0.28である。これより、雨水浸透システムなしのシナリオにおける50 mm/hr降雨に対する総流出量は、雨水浸透システムありのシナリオにおける60 mm/hr降雨の総流出量に等しい。都市化の進んだ下流部では特に改善効果が大きく、総括流出係数が0.55から0.38に低下し、20 mm/hr分の総流出量を軽減することが可能となる。

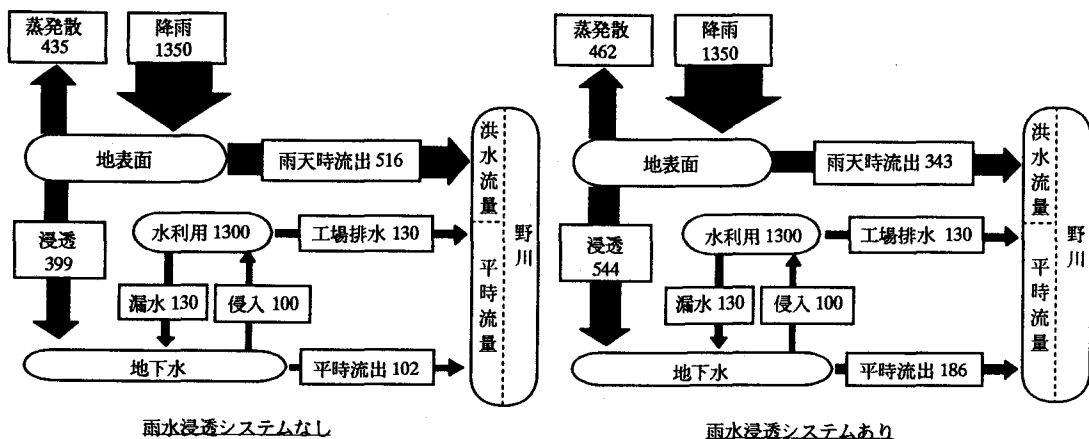


図11 雨水浸透システムの導入による野川流域の水収支の変化（数値の単位はmm/年）

表7 発生活濁負荷量（t/日）

次に、面源負荷削減効果の概算を試みた結果を表7に示す。面源負荷の原単位は文献値⁹⁾を、点源負荷のTN、TP濃度は東京湾流域7都県市による水質管理目標値を使用した。また、雨水浸透率は面源負荷の80%

	工場排水	下水処理水	面源負荷	合計 (A)	浸透システム削減量 (B)	削減率 B/A (%)
COD	5.00	17.43	19.17	41.59	3.31	8.0
TN	3.47	11.62	4.18	19.27	0.46	2.4
TP	0.28	0.58	0.35	1.21	0.06	5.2

を、透水性舗装は50%をカットすると仮定している。最も効果が大きいCODで8.0%の削減効果があるという結果であった。

図11は、最も雨水浸透システム導入の効果が大きかった野川流域の水収支を表したものである。雨水浸透システムの導入によって、蒸発散量は6%、浸透量は36%、平時流出量は82%の増加となっている。浸透量、漏水量の和と平時流出量および下水道侵入量の差を地下水涵養量とみなすと、約2割の増加となる。野川流域での絶対量は、61mm/年、1.2万m³/日の増加である。

4 考察

4.1 河川水循環利用の評価

河川水循環利用のシナリオと1回利用のシナリオの差は、河川水の循環利用に起因する部分と上水道事業の規模に由来する部分に分けることができる。

水質と流量に関しては、循環利用による影響が示されている。循環利用を行うシナリオでは、上流部が良好な水環境を保持できるのに対し下流部で水質の悪化が見られる。この点は水道原水の水質悪化につながる。本研究では水道原水としての適否をCODのみで判断しているが、1993年に改正された水道水質基準は一般有機化学物質や農薬に関する規制を強めており、これらの汚染物質に関するリスク評価も行っていく必要があるだろう。

水道原水の水質悪化のマイナス影響を、本研究では浄水コストの上昇という形で評価に含めている。しかし、シナリオ2はシナリオ1に比べて配水・給水費で129億円/年、減価償却費で18億円/年低コストなのに対し、浄水コストの上昇は8億円/年にすぎない（図12）。また、減価償却費の差額の

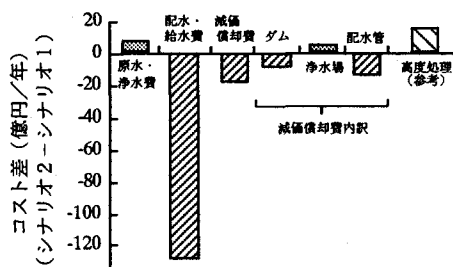


図12 シナリオ1とシナリオ2のコスト差内訳

うちシナリオ2の方が低コストである費目は、ダム9億円／年、配水管15億円／年、逆に高コストである費目は浄水場5億円／年となっている。これらの増減要因のうち河川水を循環利用することによる部分は浄水コスト上昇8億円／年とダム減価償却費減少9億円／年であり、その差1億円はダム建設コストの1割減や下流部水質が 0.1mg/L 悪化することによって相殺されてしまう程度の小さなものである。すなわち、河川水を循環利用することによるコスト面でのメリットはなく、シナリオ1と2のコスト差は上水道事業の規模の違いによってもたらされている。

本研究において事業規模の差が最も顕著に現れているのは配水・給水費であり、これは水道統計の財務データの分析から得た給水人口の増加に伴って配水・給水費の原単位が増加するという結果を用いていることに起因する。この点に関しては施設の老朽化など一概に規模の違いのみに由来するとはいえない要因が働いている可能性も否定できないが、配水管建設費の減少（減価償却費で15億円／年）等の要因も併せて考慮すると、中小規模の事業体が低コストであるという定性的傾向が逆転する可能性は低いと思われる。エネルギー消費量を指標とした今井らの研究¹⁵⁾によっても、5～30万 m^3 ／日程度の中規模の事業体においてエネルギー消費量が最小になるという結果が示されている。

また、循環利用に伴う下流部の水質悪化を防止するためには、高度処理の導入が考えられる。シナリオ1と同程度の水質を確保するためには、下流部において日量44万 m^3 の下水処理水を高度処理（凝集沈殿＋急速濾過、処理水 $\text{COD } 8\text{mg/L}$ ）する必要があり、そのためのコストは16億円／年と試算できる（計算には流総指針⁹⁾の費用関数を使用した）。これは、シナリオ1と2のコスト差の約1割程度の負担となる。

循環利用による水質の悪化は、循環利用を行わないシナリオに比べて他流域からの導水量が少ないことが影響しているが、一方で他流域からの導水は導水元河川流域の社会環境及び自然環境に影響を与える。本研究ではダム建設に伴うコスト、二酸化炭素排出、エネルギー消費は評価の対象に含めているが、導水元河川における流量減少や水質悪化、新たなダム建設に伴う否定的側面（水没地区の移転、自然環境や文化財の水没、堆砂と河口浸食、ダム湖における水質悪化など）といった諸点は評価していない。これらの点を考慮に入れると、循環利用の評価が相対的に上がるものと思われ、その定量化を今後追求していく必要がある。

本研究で得られた河川水循環利用の影響をまとめると、その効果として水資源開発の負担軽減、上流部の水環境保全、および分散取水によって水道事業体が小規模になることによるコストやエネルギー消費量等の低減、マイナス面として下流部の水質悪化、特に水道原水の水質悪化を挙げることができる。このうち、下流部の水質悪化に関しては高度処理の導入によって解決が可能であり、その負担も大きなものではない。また、上述のように本研究では他流域からの導水に伴う導水元流域の水環境の変化やダム建設に伴う外部効果は評価の対象としていない。以上のような諸点も勘案すると、下水道普及時には河川水の循環利用も十分検討に値する水利用形態であると思われる。

4. 2 雨水浸透システムの評価

雨水浸透システムは、治水、流量増、地下水涵養等様々な効果を持つことが特徴である。従ってその評価にあたっては、得られる効果がコストやエネルギー消費量等の増加に見合うものであるかどうかが主要な論点になるであろう。コストやエネルギー消費量等の指標において雨水浸透システムが占める割合は、すでに示したようにコストにおいて最も大きく、地球環境に係わる指標である二酸化炭素排出量やエネルギー消費量に関しては小さい。すなわち、雨水浸透システムは環境負荷という点からは受け入れやすいシステムであるということが出来る。よって、雨水浸透システムに関するマイナス面の影響としては主としてコストについて考察すればよいと考えられる。

一方雨水浸透システムによる効果としては、本研究では平時流出量の増加による河川流量および水質に対する影響を中心に計算している。本川流量の増加は下流部において6～9%、絶対量にして $1.5\text{m}^3/\text{s}$ であるが、この量を水資源として評価すると13万 m^3 ／日、約25万人分（流域人口の7%）の水使用量となる。シナ

リオ4のダム貯水容量がシナリオ2に比べて16%の小さい設定となっているのは、この流量増の効果である。しかし、これに伴うダム建設費の減少は減価償却費にして0.9億円/年にすぎない。また、流量の増加に伴う水質の改善によって浄水コストが低減するが、この分も0.3億円/年にとどまっている。すなわち、本研究のモデルにおいてコスト低減に反映されている雨水浸透システムの効果は合計1.2億円/年であり、雨水浸透システムのコスト120億円/年の1%でしかない。

しかし、雨水浸透システムの効果は現在必ずしも経済的便益として計上されていない部分で大きいと考えられる。支川環境の改善効果や治水効果がその主なものである。これらの効果は代理市場や所得損失の計測などの経済的手法による価格化も可能ではあるが、基本的には個々人の価値判断によって指標値の解釈が大きく変化するものと思われる。そのような価値判断に供する客観的な知見の蓄積が必要である。そのうえで、同種の効果を得られる代替技術と比較することによって、雨水浸透システムの評価を進めていくことが必要であろう。本研究では個々の指標に関する評価値の算出を行ったが、得られた値の上述のような相対的評価は課題として残されている。

5. 結論

本研究では、都市の水循環を改善する技術として河川水の循環利用と雨水浸透システムを取上げ、流域の水環境および地球環境や経済的側面に係る複数の指標について流域スケールの評価を行った。その結果、以下のような結果を得た。

(1) 河川水循環利用は、上流部で1回のみ取水するシナリオに比べて約2倍の水量を多摩川から取水する設定としたが、取水を分散するため本川流量を安定化し上流部で良好な水環境が保全できるという結果であった。他流域からの導水量が少ないため水利用が高密度になる下流部では水質が悪化するが、CODで見る限りは水道原水としての利用は可能であり、河川水質に関しても高度処理によって大きな負担になることなく対応が可能であると思われる。コスト、二酸化炭素排出量、エネルギー消費量に関しては循環利用を行うシナリオが行わないシナリオに対して10%前後小さいという結果が得られた。これは循環利用を行なうことに伴って水道事業の規模が小さくなることによるものであった。

(2) 透水性舗装および雨水浸透枳からなる雨水浸透システムについてその影響を調べた。河川流量に関しては、本川下流部で $1.5\text{m}^3/\text{s}$ の増加、野川で自然流量が1.8倍になるなど都市化の進んだ下流部で効果が大きかった。流量増に伴う水質改善効果は支川で大きく、中・下流部で10~25%程度であった。コストでは上下水道も含めた合計値の約1割を雨水浸透システムが占めるという結果であったが、二酸化炭素排出量、エネルギー消費量ではその割合がそれぞれ5%、4%に縮まり、環境負荷という点からは優れたシステムであることが示された。その他の効果としては、下流部で $20\text{mm}/\text{hr}$ の治水効果、CODで8%の面源負荷削減効果などの結果が得られた。

本報は多摩川流域を対象としたケーススタディーという形態をとっており、結果として得られた諸数値は流域によって変わりうるものであるが、各水循環システムの基本的な特徴として得られた定性的な結果の中には、多摩川のみでなく他の河川流域にも敷衍しうるものがあると思われる。今後は、今回考察の対象とした河川水循環利用と雨水浸透システムに加えて、中水道や処理水による支川流量の維持等のオプションについても考察を行い、複数の指標からみたこれらの技術の相対的な評価を進めていく必要があるだろう。

謝辞 エネルギー集約度の入手にあたっては、通産省工業技術院機械技術研究所の野村昇氏に特別の御厚意を賜った。ここに心から謝意を表する次第である。なお、本研究の一部は文部省科学研究費（一般研究（C））、課題番号06650601）の助成を受けて行なわれたものである。

参考文献、参考資料

- 1) 東京都統計年鑑
- 2) 川崎市統計書
- 3) 山梨県統計年鑑
- 4) 水道施設設計指針・解説 1990年版, 58 - 61, 1990
- 5) 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説 平成5年版, 1993
- 6) 都市水文学研究会：多摩ニュータウンにおける流出変化に関する研究報告, 土木学会論文集 No.375 II-6, 29 - 41, 1986
- 7) 岡村, 虫明, 松下：都市域の水循環系の枠組みと定量化の試み, 土木学会第44回年次学術講演会第2部, 144 - 145, 1989
- 8) 早貸, 真柄, 乙間：水量及び水質の安定供給のための水道システムにおけるコスト最小化に関する一考察, 水道協会雑誌 Vol.59 No.1, 3 - 11, 1990
- 9) 水道と地球環境を考える研究会報告書, 1992
- 10) 水道統計 平成3年度版
- 11) 下水道統計 平成3年度版
- 12) 吉岡, 早見, 池田, 菅：環境分析用産業連関表の応用, イノベーション&I-Oテクニク Vol.3 No.4, 31 - 41, 1992
- 13) 野村, 赤井, 山下：産業連関表によるエネルギー原単位および消費構造の推定, 機械技術研究所所報 Vol.48 No.2, 34 - 51, 1994
- 14) 虫明功臣：都市と水循環, 環境情報科学 19 - 2, 1990
- 15) 今井ほか：水道事業におけるエネルギー消費の分析, 水道協会雑誌 Vol.62 No.4, 40 - 49, 1993