

## 人間—水循環系におけるバランスとサステナビリティ

## Balance and Sustainability in Human-Hydrological Interaction System

虫 明 功 臣\*

Katumi MUSIAKE

## 1. はじめに

地球規模の環境変化に対する危機感から生まれた「持続可能な開発」の概念は、各国の水資源開発・管理においても中心的なコンセプトになりつつある。しかし、各地域の発展段階と水文条件を与件とした水資源開発レベルの相違から、国によってフォーカスポイントは著しく異なる<sup>1)</sup>。いっぽうの極端、後発開発途上国では、今後予想される爆発的な人口増加と都市への人口集中に対して、飲料水と食料生産のための水をいかに確保するかが中心課題である。もういっぽうの極端、先進国では、需要を充たすための水資源量の開発から、需要調整を含む種々の代替案を有機的に組み合わせた環境負荷の少ない水資源の量と質のマネジメントへと重点をシフトさせている<sup>2)</sup>。前者については、根本的な解決は極めて困難であり、当事国の戦略的政策の立案とこれに対する国際的な技術ならびに経済支援によってマイナスをいかに減らすかが当面の課題になっていると考えられる。後者については、陸域で水循環の閉じた系をなす河川流域を単位として、治水、利水、水環境を総合した水管理が模索されつつある。

我が国では、ここ数年、都市域を対象に持続可能な「総合水管理」に向けての試行がなされている。本稿では、都市の水循環再生プロジェクトにおいて、合意形成や意思決定支援のための工学的ツールの意義と役割を中心に議論する。

## 2. 水資源管理におけるサステナビリティと水文・水資源工学の役割

「水資源」という言葉は、日本では通常水の利用を指して使われる。しかし、欧米で water resources engineering や water resources management という場合、単に利水だけでなく、治水そして自然環境の保全・回復を含む水の環境的側面も包含している。本論では、「持続可能な人と水との関

係」を模索する立場から、「水資源」を利水に限定せず、治水と環境面も含む用語として使用する。

‘sustainable development’には、分野や立場により様々な定義が与えられているが、World Commission on Environment and Developmentによる次の定義<sup>3)</sup>、「将来のニーズを充たすための可能性を損なうことなく現在のニーズを充たす発展過程」が包括的で広く受け入れられるものであろう。1992年にリオデジャネイロで開催された「地球環境サミット」における‘アジェンダ21’<sup>1)</sup>では、持続可能な開発について多方面の問題がとりあげられ、淡水資源の管理については、次の7項目の行動計画、すなわち、①総合的水資源開発・管理、②水資源アセスメント、③水資源、水質および水域生態系の保護、④飲料水の供給と衛生、⑤水と持続可能な都市開発、⑥持続可能な食料生産と農村開発のための水、⑦水資源に対する気候変動の影響、が提案された。これらの項目は、世界共通の課題であるが、各国の社会経済状況によって比重の置き方と具体的な行動内容は著しく異なる。項目④、⑤、⑥は、特に途上国において重要な課題であり、先進国では②、③、⑦をベースとして①を実現するのが最重要課題である。しかし、現状では、過去四半世紀かけて開発優先から利害調整型の質・量両面からの水資源マネジメントへの途に就いた米国の先進事例<sup>2)</sup>、10数年の蓄積の上に体系的な枠組みを構築しつつあるオランダの事例<sup>4)</sup>等を除いて、「持続可能な水資源管理」へ向けて方法論を模索している段階にあるといえる<sup>5)</sup>。

日本では、いわゆる縦割り行政と呼ばれるように水行政も個別目的毎に細分化されており、統合化が難しい環境にある。施設建設中心の水資源開発管理では個別目的毎に行政機関が主導的に実施したほうが効率的な側面があったと考えられるが、施設整備がかなりの水準に達した現在、環境負荷の少ない水資源管理を展開するには行政諸機関の連携はもとより水関連団体、企業、地域住民等の主体的な協力が不可欠である。こうした時代の変化を背景に、ここ数年「健全な水循環系の構築」を基本理念として関係省庁が

\*東京大学生産技術研究所 第5部

連携・協働の気運を見せている<sup>6)</sup>。しかし、基本理念で一致したとしても、これを具体化するには、官と民、国と地方における役割分担と連携の仕組みを基礎として政策面、財政・経済面、制度面、さらに科学技術面から全体的な枠組みを構成しなければならない。

人と水との係わりには、価値観の異なる3つの側面、すなわち水利用の側面、水害軽減の側面および水環境の保全・回復の側面がある。また、同じ側面においても、例えば治水・利水における上下流問題や左右岸問題のように、利害が異なる場合がある。これらの異なる要求をいかにバランスさせ、持続可能な人と水との関係を構築するかが、これからの水資源管理の課題であり、‘健全な水循環系’とは、例えば‘河川流域を中心とした水循環の場において、利水と治水に対する国民の要望が充たされ、同時に自然環境・生態系の保全に果たす水の機能が損なわれないなど、水循環における種々のバランスと持続可能性が保たれた状態’と定義されている<sup>7)</sup>。

持続可能な水資源管理に対する科学技術の役割は一般に、環境負荷の少ない技術手段を開発すること、および政策の形成や選択に際して異なる価値観や利害を調整し意思決定するために科学的に根拠のある情報を提供することである。後者の意味で、現在、水文・水資源工学上、最も重要な研究課題は、望ましい人と水との関係を考究する前提として、両者の関係を人間-水循環相互作用システム(以下、人間-水循環系と呼ぶ)と捕らえ、その構成要素のブラックボックスを可能な限りホワイトボックスにするとともに、全体のシステムの中で個々の技術手段や施策の

効果がヴィジブルに理解できるようなツールを提示することである。

我が国の一般河川流域においては、特に農業用水や地下水の循環過程にブラックボックス的な要素が多く、現状では人間-水循環システムを明示することが困難である。いっぽう、都市流域においては、データの蓄積とともに人間-水循環の相互作用を明らかにする研究が比較的進んでおり、こうした研究を基礎として、水循環系再生へ向けての行政部局間、地域住民、企業等の連携と協働の枠組みが出来つつある。次節ではその事例について紹介する。

### 3. 都市における人間-水循環系とその再生のプロセス

#### 3.1 都市化が水循環に及ぼす影響と対処すべき課題

都市化、すなわち都市への人口集中と都市域の拡大は水問題に様々な影響を与え、それらへの対策が必要になってくる。水循環の視軸から、問題発生の因果関係と対応すべき課題を整理すると、図1のようになる<sup>8)</sup>。図中、下段の二重枠で囲まれているのが、対処すべき課題である。都市化に伴う水問題発生のこうした構造は、地域の自然条件や社会・経済的発展段階に応じて多少の相違はあるが、日本のみならず世界的に共通なものを見ることが出来る。

従来、それぞれの課題は、別々の専門分野で研究され、各行政部局で縦割りのかつ対症療法的に施策が講じられてきた。それらは一般に、貯水池の建設、河川改修、下水処理施設の建設など大規模集中型のものであった。こうした基幹施設の整備によって、高度経済成長期に起った深刻な水不足、都市水害、水質汚濁などの問題については、危機

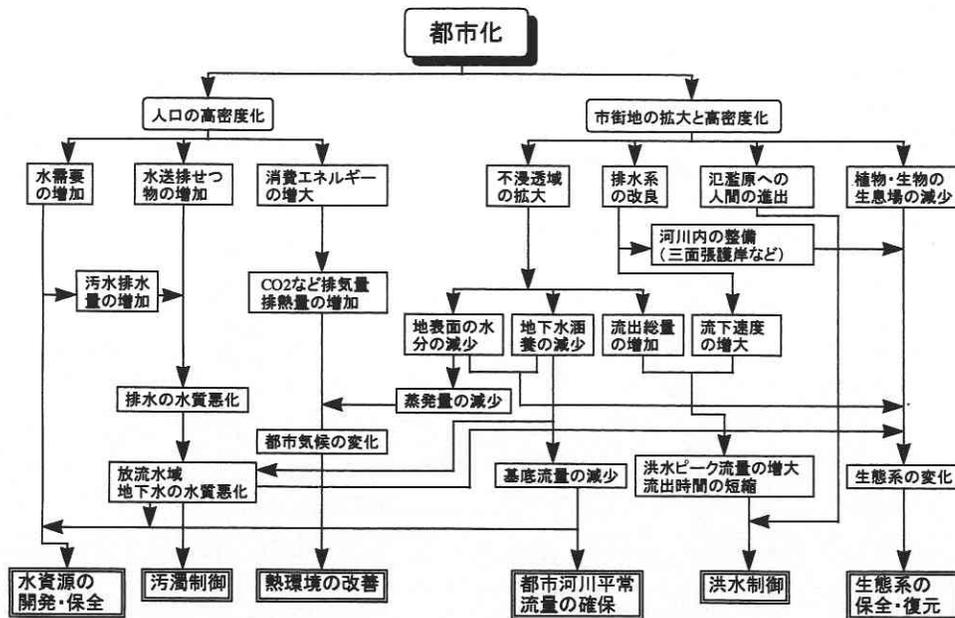


図1 都市化が水循環に及ぼす影響と対処すべき課題

的な状態から脱することができた、しかし、いっぽうで環境問題を残したといえる。

今後、環境負荷の少ない都市における人間-水循環系を構築するには、一点集中型の施設建設だけでなく、流域における小規模分散型の貯留浸透対策、下水処理水のリサイクル、雨水利用などきめ細かな対策を有機的に組み合わせ、図1のそれぞれの対処すべき課題を総合的に改善する方向を採らなければならない。

表1は、水循環系改善のための種々の対策とそれらが各課題に及ぼす効果との関係を定性的に示したものである。1つの対策が複数の課題に効果を発揮することが一目瞭然で分かり、各施策が連携した統合的アプローチの必要性が示されている。

3.2 都市の人間-水循環トータルシステムの把握

都市の水循環系は、自然的な経路に加えて様々な人工的経路が交錯する複雑なものとなっている。水循環系の望ましい姿を考えるためには、システムを構成する個々の自然的要素と人工的要素およびそれらの相互関係を明らかにする必要がある。都市によりシステム構成要素は異なるが、

一般にこのシステムは大別して3つのサブシステムに分けることができる。第一は、降水が大地を介して自然的に循環する経路、すなわち降水-蒸発散-浸透-地下水涵養-河川流出といった‘自然的水循環サブシステム’である。第二は、雨が人工的な経路を通過して排出される系統、すなわち屋根-路面-側溝-（オンサイト型貯留・浸透施設）-下水道-調節池-排水機場-河川・海域への排水といった‘人工的雨水排水サブシステム’である。第三は、上水としてそのほとんどが都市域の外から導入され使用された後廃水となる経路、すなわち上水道-漏水-家庭・工場・事業所等（閉鎖系循環再利用）-下水道-地下水の下水道への浸出-（処理場）-河川・海域といった‘上水・排水サブシステム’である。そしてこれら3つのサブシステムは独立ではなく各所で互いにつながっている<sup>9)</sup>。

都市の水循環の改善を考えるには、まず、水循環システムの全体像を定量的に把握することが重要である。図2は、現在都市の水循環再生リーディングプロジェクトとしてパイロット的取り組みが進められている海老川流域（千葉県船橋市）の年間水収支である<sup>10)</sup>。こうしたトータルシス

表1 課題と対策との関係

対 策	課 題	平常時流量の確保	洪水制 御	水資源の保全と有効利用		生態系の 復元	汚 濁 制 御	熱環境の 改善等
				都市用水	家庭用水			
自然地の保全		○	○			○		○
下水道の整備		○	○	△		○	○	
河川の整備			○			○		○
雨水浸透施設の普及		○	○	△		○		○
雨水貯留施設の普及		○	○	○	○			○
下水処理水の活用		○		○	○		○	
水資源の循環利用		○		○	○			
効率的な水利用意識の高揚				○	○			
河川・湖沼の浄化				△		○	○	
汚濁源対策				△	△	○	○	
未利用エネルギーの活用								○

注) ○は直接的な関係を、△は間接的な関係を示す。

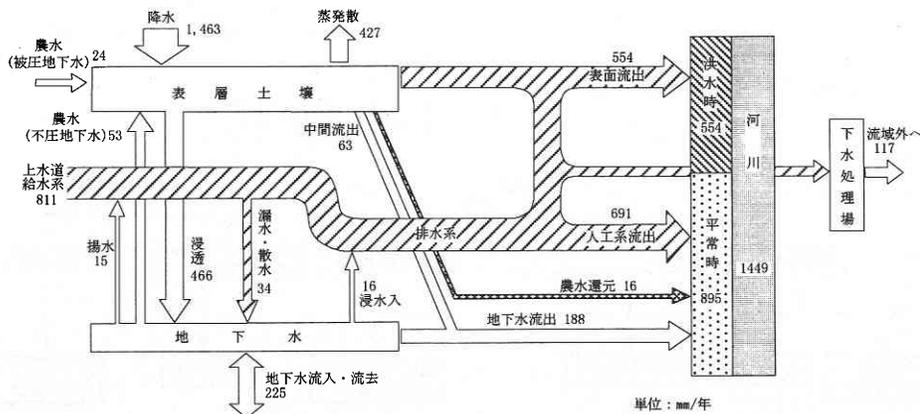


図2 海老川流域における年間水収支（1993年）

テムとしての現状把握を通して、どこを改善すべきかについてのアイデアが生まれる。

以下の項では、海老川流域の上記プロジェクトを具体例として、水循環再生計画の基本方針と目標設定、対策選択のための意思決定支援ツールと効果の評価について紹介する。

### 3.3 海老川流域水循環再生プロジェクト<sup>10)</sup>

#### (1) 基本方針と目標設定

このプロジェクトは、流域における水循環を基軸として、治水、利水、水環境を統合的に改善すること基本方針として1996年に発足した。関連行政部局間および地域住民との連携・協働の下に実施する必要があるため、計画立案当初から、河川、下水道、環境、都市計画、公園、建築、住宅、宅地、道路、教育委員会等の行政部署、地域民間団体(NPO)および学識経験者による流域協議会が設けられている。

後述する各種対策案の効果の定量的評価をフィードバックさせながらいくつかの代替案を検討した結果、表2のように基本方針と計画目標が合意された。計画目標欄の中期計画とは概ね15年後、長期計画とは40年後を想定している。

さらに、表1の左欄に示される対策メニューの中から海老川流域で有効な対策として、①公園・緑地の整備と保全、②雨水浸透施設、③雨水貯留施設、④下水処理水のリサイクル、⑤調節池の設置、⑥河川浄化施設、⑦調節池への環境容量の確保、⑧合併処理浄化槽、を採用することが合意され、効果の定量的評価とのフィードバックの上で、それぞれの対策の規模が中期計画、長期計画それぞれについて設定されている。

#### (2) 意志決定支援のためのツール

これまで各行政部局がそれぞれの目的に沿って個別に進めてきた事業を‘都市の水循環系の再生’という統合的目標に向けて体系化し、地域とも連携・協働してプロジェクトを進めるためには、目標設定、対策の選択、役割分担等の各レベルで異分野間の合意形成を支援するツールが必要である。こうしたツールが無ければ、既存の価値観や既得権に捕らわれたネゴの世界になるであろう。

図1の因果関係と対処すべき課題の整理、また、図2の流域における水循環のトータルシステムとしての表現も広い意味では、そうしたツールの範疇に入る。これらは、初期の段階で施策間の連携と統合化の必要性を認識するのに役割を果たしている。

種々の対策メニューの効果を算定し計画目標の達成度を判定するツールとして、分布型水循環モデル(図3)が極めて有用である。当研究室ではこのタイプのモデルの開発と改良を1つの重要テーマとしており、海老川流域はモデルの改良・検証のためのテストサイトとして1991年から水文・気象観測を続けてきたという経緯がある。このモデルは土地利用の局所的な変化や貯留・浸透施設等のオンサイト分散型対策の効果を判定できる能力を備えており<sup>11)</sup>、この種のプロジェクトには不可欠のツールとなっている。

(1) に挙げた各対策の効果をこのモデルによって算定した結果が図4である。各対策の効果を合わせることにより、治水安全度の向上と環境の改善に関するそれぞれの計画目標値をクリアーしている。

#### (3) 今後の展開

上記のように‘海老川流域水循環再生’に関する基本構想が流域協議会で合意され、1998年度から実施の段階に

表2 基本方針と計画目標

基本方針		計画目標	
		中期計画	将来計画
治水安全度の向上	治水施設の整備促進	50 mm/hrの降雨に対して水害の心配のない川づくり	50年に一度の降雨(70 mm/hr)に対して安全な川づくり
	分散系治水の促進		
清らかで豊かな流れの創出	良好な水質の確保	BOD値 5 mg/l (きれいな水がイメージされる水質) 悪臭とゴミのない川づくり	BOD値 3 mg/l (水遊びが出来る水質)
	平常時流量の確保	概ね現在の河川流量を確保する(生物の棲息や景観に必要な流量を確保する)	
	湧水の保全と再生	昭和40年代の流域浸透量を確保する	自然地状態(昭和20年代)の流域浸透量を確保する
水資源の有効利用の促進	水利用合理化促進	雨水や処理水の利用や節水により水資源の有効利用を進めるとともに渇水時、災害時の水源の確保を図る。	
	節水型社会システムの構築		
生物の多様な生息・生育環境の確保		生物の生息・生育に適した地域を保全するとともに新規開発や都市基盤整備には生態系に配慮した工法を極力取り入れる	

分布型水循環モデル；空間的に分布する地理的特性（地形、地質、土地利用等）とそれが水循環に及ぼす効果を空間的に表現できるモデル

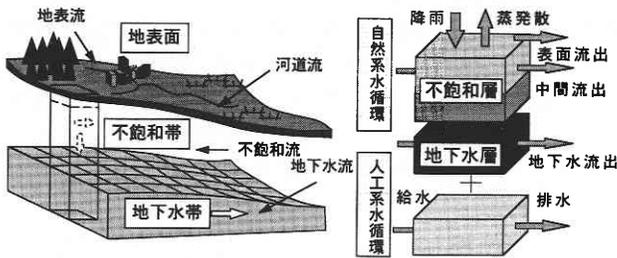


図3 分布型水循環モデルの概念

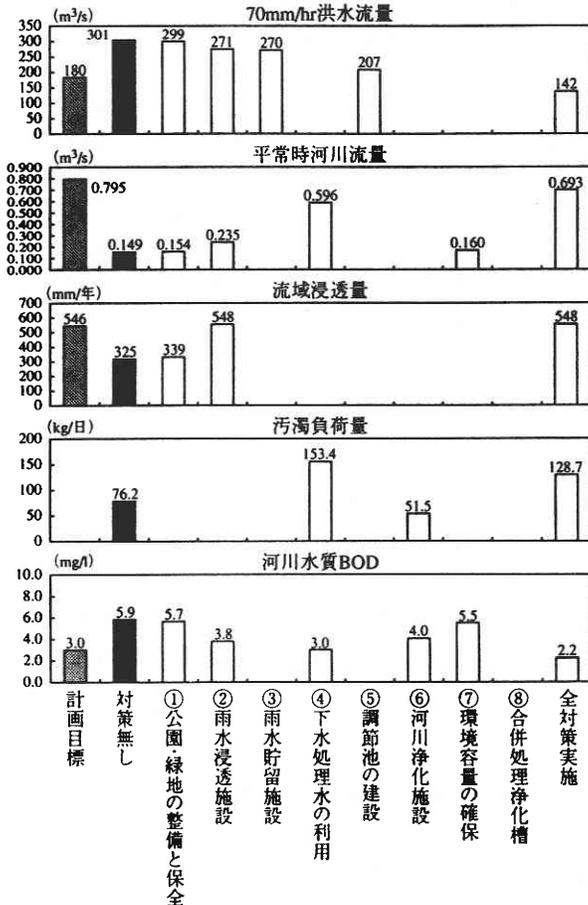


図4 計画目標と対策の効果

入っている。実施方針として、1) 行政間の連携強化、2) 開発業者への協力要請と義務付け、3) 市民参加の推進、を掲げ、協議会が啓蒙、施策の調整、実施状況の監視等の機能を果たすことになっている。また、施策の効果を確認するために水質・水文長期モニタリング体制を敷くことにしている。

#### 4. む す び

本稿では、都市域を対象に持続可能な人間-水循環系の構築に際して水文・水資源工学が果たす役割を例示的に論

じた。対象とした都市域はデータの蓄積があり研究も進んでいるので、意思決定支援にとって有用なツールを提供することができた。今後、プロジェクトの効果のモニタリングにともなうデータの集積によって、分布型水循環モデルの改良、さらには水質モデル、生態系モデルの開発が進むことも期待できる。

一般河川流域では、まず関連行政部局が協力して、ブラックボックスを埋めるためのデータを体系的に取得し公開・共有することが、統合的水資源管理へ向けての前提条件になるであろう。

いっぽう、グローバルな水循環について当研究所の地球環境工学研究グループは、国際共同研究「アジアモンスーン・エネルギー水循環観測研究計画」や未来開拓学術研究「水・物質バランスの時空間変化に着目した環境影響評価とその軽減方策に関するシステム的研究」において、政策形成や意思決定支援に役立つデータとツールを提示することを目的の1つとして研究を進めている。

(1998年10月19日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 環境庁・外務省監訳：アジェンダ21実施計画（'97），エネルギージャーナル社，1997。
- 2) 浅野 孝，吉谷純一，佐橋義仁：米国の水資源開発・管理の動向—そのパラダイム・シフト，第5回水資源に関するシンポジウム，水資源に関するシンポジウム委員会，1997。
- 3) Environmental and Energy Study Task Force：Partnership for Sustainable Development, A New U.S. Agenda for International Development and Environmental Security, Washington DC, 1991。
- 4) Eelco van Beek: PAWN オランダにおける総合的水管理政策分析のための支援手法，'93 Integrated Water Management Seminar 講演集，国土開発技術研究センター，1994。
- 5) 海外水資源開発保全問題研究会監訳：水資源管理と他の政府諸政策とのより良い統合—各国概況の要約と分析—(OECD環境委員会自然資源グループ)，水文・水資源学会，1994。
- 6) 建設省河川局開発課：健全な水循環の構築に向けた施策の推進，河川No.626，1998。
- 7) 水資源基本問題研究会：水資源基本問題研究会報告書—水資源政策長期展望—，国土庁水資源部，1994。
- 8) 虫明功臣：都市の水環境とその改善方法，第11回環境工学連合講演論文集，1996。
- 9) 虫明功臣：都市の水循環システムにおけるエコの側面，エコ・シビルエンジニアリング読本，土木学会誌別冊増刊Vol.77-9，1992。
- 10) 虫明功臣，忌部正博，大久保信彦，他：都市河川流域における水循環再生構想の考え方と適用例，第4回河道の水利と河川環境に関するシンポジウム論文集，土木学会水理委員会，1998。
- 11) Herath, S. and K. Musiakie：Modelling Basin Hydrological Changes due to Urbanization and Remedial Measures, Proc. Innovative Technologies in the Domain of Urban Drainage, NOVATECH 92, Lyon, 1992。