

特集③

水循環を基本とした 総合水管理に向けた研究動向



総括ユニット 山口 充弘

1. はじめに

我が国は河川流域を単位として自然の水循環を中心とした国土基盤に都市が成立し、日々の暮らしを営んできた。しかし、社会経済活動の発展による環境負荷等が影響し様々な弊害が生じている。

これは国内を問わず全地球的規模で同様に発生している。世界の水をめぐる諸問題は量・質両面から自然地形の改変や人間活動との相互作用によって引き起こされている。

本年8月に行われたヨハネスブルグ環境サミットにおいても、世界の水需給の現状と予測なども報告され、広く水問題が議論の対象になっている。さらに、2003年3月に日本で開催される第3回世界

水フォーラムにおいても多くの研究事例の報告が行われ、研究に基づく議論が展開されるものと思われる。

水問題の根元的な視点に立つと、いかに水資源を有効に利活用するか、さらには、清浄で豊富な水が連続と循環する、健全な水循環系を確立・維持するかが大きなポイントといえる。

我が国でも、第2期科学技術基本計画分野別推進戦略において、「環境」及び「社会基盤」各分野で「流域水循環系健全化・総合水管理」構築等の研究開発が重点領域として位置づけられ鋭意推進されている。

総水循環機構を明らかにする水

循環モデル等については、都市流域における基本モデル、地球的規模での水資源需給解析モデルが構築されかなり定量的評価が可能となっており、今後は、土砂移動や複雑な地形等も反映可能なモデルの精度アップが望まれるところである。これは取りも直さず水循環変動モデル構築へつながり、日本を含むアジア地域の水循環変動や水資源評価の大きなツールとなるものである。

総合水管理関連では、都市河川流域をケーススタディーとして、検討が進められているが、治水・利水の研究に比べて、これらと深く関係する環境指標や環境評価手法の研究は遅れているのが現実で

図表1 環境分野の重点課題

重点課題	イニシアティブ	概要
自然共生型流域圏 都市再生技術研究	都市・流域圏環境モニタリングプログラム	生態系と都市の現状について、自然環境基盤（水循環、物質循環、生物多様性等）及び社会環境基盤（都市河川、沿岸等）双方から観測・診断評価する技術開発
	都市・流域圏管理モデル開発プログラム	水循環モデル、生態系モデル等要素モデルの開発と統合管理モデルの開発
	自然共生化技術開発プログラム	水循環に焦点を当て、生態系と生活空間の修復再生技術開発
	自然共生型創造シナリオ作成	総合的推進のためのシナリオ構築とそれに基づく実践技術開発
地球規模水循環 変動研究	全球水循環観測プログラム	観測・モニタリング体制の充実及びデータベース整備
	水循環変動モデル開発プログラム	エネルギー輸送・水循環自然変動機構の解明及び人間活動による水循環変動・環境変動予測モデルの開発
	人間社会への影響評価プログラム	水循環変動が食糧生産や社会・経済に及ぼす影響評価
	対策シナリオ・技術開発の総合的評価プログラム	水問題に関する最適な対策シナリオの提示

科学技術基本計画 分野別推進戦略より作成

ある。

本報告では、第2期科学技術基本計画における水循環に関連した

重点領域に着目し、地球規模での水需給解析モデル開発等水循環を基本とした総合水管理に向けた研

究動向について述べる。

2. 分野別推進戦略における研究目標

第2期科学技術基本計画によると「環境(図表1)」、「社会基盤(図表2)」各分野の推進戦略プログラムにおいて下記の通り、水循環に関する研究開発の重点課題が規定されている。

図表2 社会基盤分野の重点領域

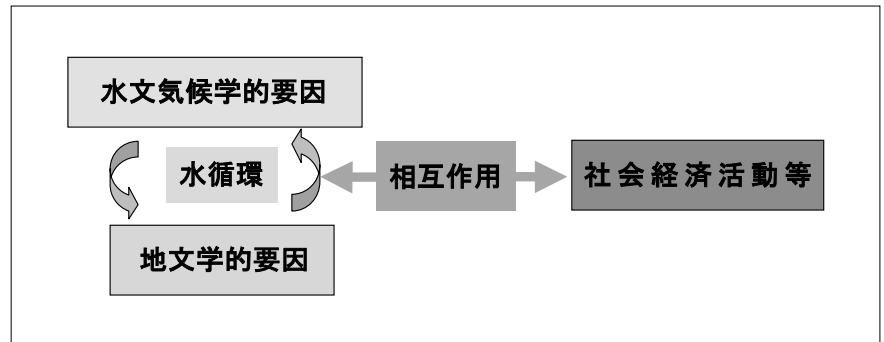
重点領域	研究項目	研究開発目標
美しい日本の再生と質の高い生活基盤創成	流域水循環系健全化・総合水管理	重要な水系、主要中小都市河川、地盤沈下防止等対策要綱対象地域(関東平野北部、濃尾平野、筑後・佐賀平野)及び世界数河川流域の水循環系健全化の研究開発

図表1に同じ

3. 水循環—水資源システム

水循環—水資源システムとは水、土地、人間が織りなすシステムであり、降水、蒸発散、気温、日射等の「水文気候的要因」と、地形、地質、土壌等の「地文的要因」が、社会経済活動等の「人工的要因」との相互作用によって、それぞれの要因がまた変化するというダイナミックなシステムである。これらの要因が水問題の特徴づけているものといえる。

図表3 水循環—水資源システム概念図



※科学技術政策研究所講演録No.93「水循環と水資源—ローカルな視点からグローバルな視野へ」より作成

4. 流域水循環系健全化・総合水管理の研究動向

4-1

水循環健全化に資する技術

健全な水循環を構築・維持するための基本的な技術の1つに貯留・浸透技術がある。

森林や農地などはそれ自体が大きな貯留・浸透施設といえるものであるが、高度に都市化された河川流域においては、いかに水を土中に貯留・浸透させて、さらに、地下水流動に乗せて河川などに還元させるかが清浄かつ豊富な量の水循環確保の要といえるものである。このためのインフラとして、浸透施設(浸透升、浸透トレンチ等)がある。良好な浸透能力を持つ浸透施設を設置するには、地

形・地質条件がポイントとなる。一般的には台地、扇状地、丘陵地、砂地などが適地であるが、空気間隙率が低く締め固まった地盤、粘性土、地下水位が高い箇所などは避けた方がよい。この浸透施設は各戸で設置し雨水を土中に導水している。又、下水道雨水幹線とも接続され、豪雨時には余剰水が雨水幹線に流れる仕組みとなっている。

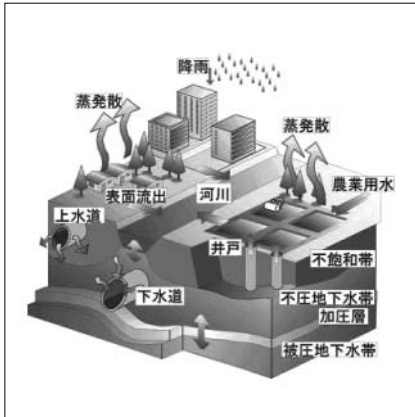
又、歩道などでも従来の標準的構造の舗装に代わって、透水性舗装が都市域を中心に普及している。この舗装は表面アスファルトに適度な空隙を持たせ、路盤を通じて地下に浸透させる構造のものである。

4-2

流域水マネジメントにおける環境評価手法

健全な水循環系とは「流域を中心とした水循環の場において、治水と利水と環境保全に果たす水の機能を、持続性があり、適切でバランスのとれた状態にする。」と定義され、世界的に共通の概念となっている。人間との係わりから見ると、治水、利水、環境保全という、価値観と利害が異なる3つの側面が有る。ここで問題となるのが環境とのバランスをどう評価するかという事である。環境というある意味抽象的で主観的判断・評価が支配する対象であることか

図表4 水循環概念図



※鶴見川流域水委員会資料より

ら、関係者間で合意形成を図るのは非常に困難である。

各側面での要求の相違や利害の対立などを新たな技術の適用とそれに伴う制度的な対応で和らげ、水循環系と人間との好ましい関係を構築する。このことが、流域水マネジメントの目標であり、成果ともいえる。

現在、環境省、国土交通省等で生態系調査、水質調査、河川水辺の国勢調査などが毎年実施され基礎的データの蓄積と特性、分布などの解析評価が行われている。又、森林や農地・緑地の涵養機能評価や遮熱性評価なども実施されている。

これらの基礎データから適切な環境指標を設定し、流域に生息する生物の種や生息場について治水、利水との関係から総合的に評価し、環境配慮型対策事業や自然再生事業に反映させるための評価手法が進められている。

4-3

水循環モデル

健全な水循環を基本とする、流域水マネジメントの構築に当たっては、関連する各種観測データを蓄積しこの基本データに基づき、施策の効果や影響を定量的に把握し、評価する様々な解析モデルの開発が必要不可欠である。

ここでは、水文、地質、地形、土地利用などのデータから流域に

図表5 水循環モデルにおける入力データ

水循環系を構成する要素	自然系	雨量、蒸発散量
	人工系	雑排水、上水道漏水、下水道漏水、農業用水、地下水揚水、流出抑制施設
流域情報	地表面	標高、勾配、流下方向、不浸透域分布、土壌被覆、窪地貯留能
	表層土壌	表層土壌特性
	帯水層	水理地質構造、境界条件
	自然系	河道諸元

図表4と同じ

図表6 流域内設定条件

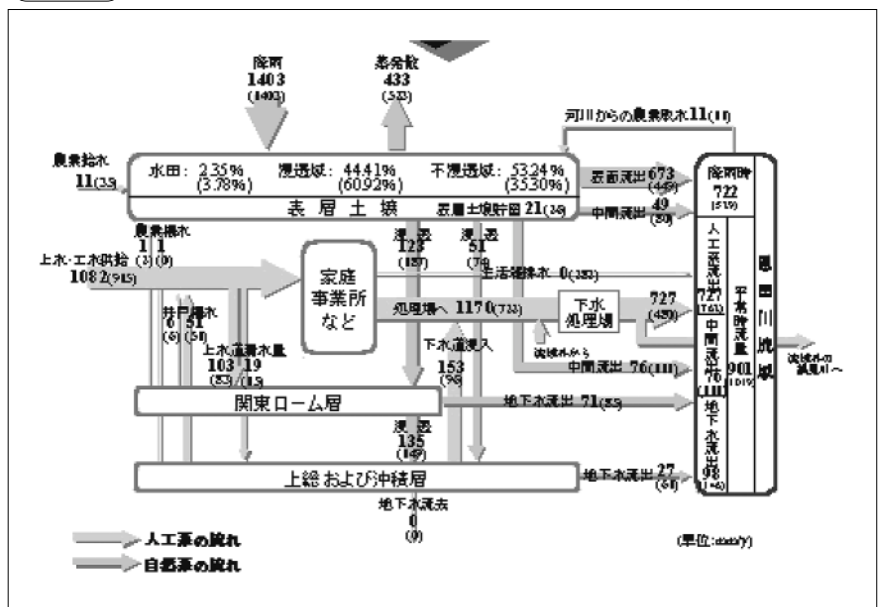
	現在 (1994)	将来 (95%開発時)
不浸透面積率	細密数値情報	法的に担保された自然地以外は開発されると仮定
流域人口	住民台帳	新規市街地に現在の市街地人口密度から仮定
上水道使用水量	使用水量原単位を人口に乗じる。	現在の使用原単位に人口を乗じる。
雑排水量	下水道普及率、水洗化率より算出	下水道普及率100%とし、排出0。
上水道漏水量	無効水量から推定	現在の無効水量が維持されると仮定
地下水揚水量	自治体資料	現在と同量とする
農業用水量	水田面積に減水深*を乗じる。	同左
農業揚水量	自治体資料	現在と同量とする
下水道浸入水量	不明水量から算出	現在の不明水量が維持されると仮定
処理場放流量	自治体資料	使用水量から推定

*減水深とは溜まった水の減少量を表す。通常1日当たりの減少深さを用いる。

図表4と同じ

図表7 水循環モデルによる将来予測結果例

()内は将来予測値



図表4と同じ

における水の挙動を把握し評価できる「水循環モデル」について詳述

する。水循環系を解析する手法の中で

最も精緻なものとして、「分布型物理モデル」がある。

これは、流域を一定間隔の格子状に分割し、各メッシュの水分移動を追跡することで流域の水循環系を表現するモデルである。水循環機構の概念を図表4に示す。

地表面及び河道では従来の洪水解析手法、表層土壌部分では飽和不飽和浸透流計算、地下水層では準3次元地下水計算を行い、地表、地中、地下水層における水の移動をそれぞれ追跡できる。

主な入力データについては図表

5のとおりである。

ここでは、鶴見川における、解析事例を示す。解析に当たっては、1994年現在における流域の状況を「現在」とし、流域内で最大開発が行われ、流域内市街化率が95%になった場合を「将来」と設定している。

上記条件下で、将来予測の解析結果を図表7に示す。

これは、鶴見川支川恩田川の小流域における将来水収支の予測結果であるが、①降雨の浸透量が減少し表面流出が増大、②河川への

地下水流入量が減少、③河川流量の内下水処理水の占める量が増大する等の変化が予測されている。この様に水循環の変化を定量的に捉える事が可能である。又、流域内の何処に、どんな対策をすると水循環が変化するかなども定量的に解析可能で、効果的な対策を立案する上で大きなツールとなる。その他、水質評価のための「分布型汚濁負荷流出モデル」も開発され、水循環の「質」の部分においても評価、予測が可能となっている。

5. 地球規模水循環変動に関する研究動向

5-1

社会的背景

「World Water Vision、2000」(オランダハーグで開催された第2回世界水フォーラムにおける報告書)において21世紀には世界全体での取水量は主に灌漑用水の需要増加が原因で、1995年の3,800 km³から2025年には4,300～5,200 km³にまで増加すると予想されている。又経済成長は過度の水利用を引き起こし、自然生態系に深刻な影響を与え、さらに、水問題も含め国際的な衝突や緊張を引き起こす懸念があると報告された。

地球規模での水資源評価の研究は従来、国毎にラフに算定した水量からの評価であったが、最近、地域的特性を評価可能な河川流域毎の水資源評価モデルの研究が国際的にも開始されている。

5-2

水供給モデル

全地球0.5°メッシュ(緯度・経度換算)の陸面水文植生モデルにより、降水量から蒸発散量を引いた量が陸地の表面流出や地下への浸透により最終的に河川に流出

するものとして流出量をメッシュ毎に算出する。次に世界の地理分布に基づき河川流域毎に河川流量を算出し流域の水資源賦存量(注1)とみなす。河川における年間総流量が最大利用可能な水資源であると仮定する。

基本的には雨量の多い熱帯域や大陸東岸、アジアモンスーン地域などで流量が多く、上流からの流下により、エジプト等ではナイル川沿いに利用可能な水が多く存在する。

(注1) 水資源賦存量とは降雨量から蒸発散量を引いた量に面積を乗じたもの。人間が使える最大可能水量といえるものである。

5-3

水需要モデル

生活用水、工業用水は国毎に人口当たりの原単位を求め、人口分布に従い国別総取水量を各国内地域に割り振る。同様に農業用水も灌漑農地面積当たりの原単位を国毎に求め、灌漑農地面積分布に従い国別総取水量を分布させる。世界の灌漑農地面積の47%を占めるインド、中国、アメリカは国単

位ではなく、州あるいは郡単位の統計データに基づき農地面積分布が推定されている。

アメリカ西海岸、東欧を含むヨーロッパ全域から西アジア、インド北部、中国、日本等で大量に取水されている。

5-4

水資源需給分布の現状

現状の水資源需給を評価する指標として水利用率 R_{ws} を用いる。年取水量を W 、塩水の淡水化により賄われている年水資源量を S 、年水資源賦存量を Q とすると、 $R_{ws} = (W - S) / Q$ と定義される。この R_{ws} のとり値により渇水レベルを分類する。 $R_{ws} < 0.1$ でストレス無し、 $0.1 < R_{ws} < 0.2$ で低い、 $0.2 < R_{ws} < 0.4$ でやや高い、 $0.4 < R_{ws}$ で高い(水不足状態)と評価する。

結果を示す図表8を見ると、アメリカ西部、中近東、インドパキスタン国境付近、インド北部チベット南縁、中国北部黄河流域～華北平原付近が利用可能な水資源量に対して実際に利用している水量が多く、変動に対して脆弱で水ストレスがかかっている状態と言える。

また図表9に示すもう1つの水資源需給指標として1人当たり年使用水量 (W-S) / C、C：人口) を算出すると、特にアメリカ合衆国西部において突出して多くなっている。これは、他地域へ出荷する農業生産物用であると考えられる。

この農産物等の生産に伴い消費される水は仮想水 (Virtual water) と呼ばれ、日本は農産物の輸入と共に大量の水を輸入していることとなります。これはまさに、日本人の生活は仮想水の輸入に頼っている事で、その恩恵を世界に還元することを考えることも必要である。

5 - 5

水資源需給の将来予測

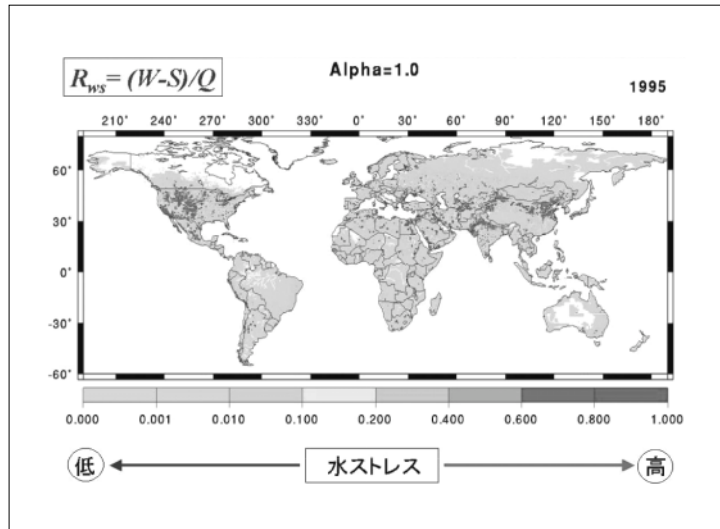
将来予測に当たっては、現状分析と同様、水資源量と水需要量とのバランスを考える。

水資源量の推計に関しては、東京大学気象システム研究センターと国立環境研究所が開発した「大気大循環モデル (GCM)」によるCO₂ 倍増時の数値計算結果を利用。これは、ほぼ2050年頃の状況に対応する。この降水量予測から河川流出量を算定し、水供給モデルの場合と同様に将来の河川流量を求める。予測の結果からは、中国北部、インド、インド・パキスタン国境付近～アラル海方面にかけて流量が増加し、水資源供給面では緩和が期待できる結果となっている。

一方、需要予測に当たっては、人口に関しては国連による中位推計に従い増加し、農業用水取水量は人口増加に比例して増加するとしている。生活用水、工業用水の水需要原単位の増加についてはRaskin等の将来推計を利用している。

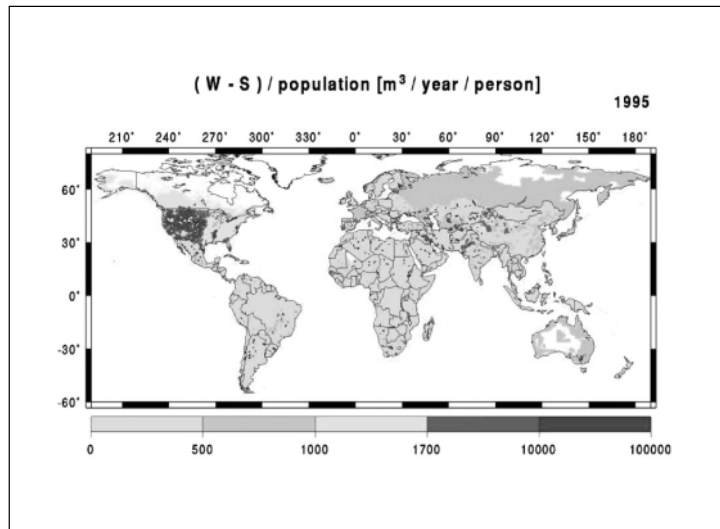
以上の条件から算出された、河川流域毎の2050年までの経年的な水利用率変化の予測を図表10

図表8 水ストレス指標 (年利用量/潜在的年利用可能量)



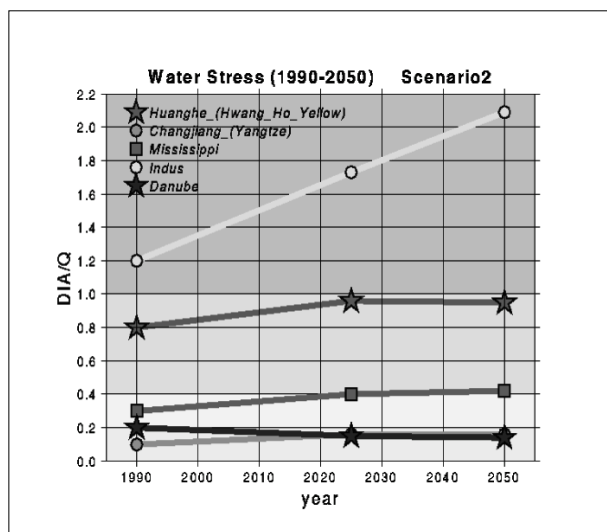
図表3と同じ

図表9 一人当たり年使用水量 (m³/年・人)



図表3と同じ

図表10 河川流域毎の経年的な水利用率変化



図表3と同じ

に示す。

- インダス川 (Indus) では温暖化の影響で水資源量が増加する。しかし、水利用率は90年から2025年、2050年と線形に高くなっている。これは、

持続的な人口増加によるものである。この流域においては、人口増加の影響の方が気候変動の影響を上回ることを意味している。

- 黄河流域 (Huang he) では人口増加率が低下するため、

水利用率は2025年から2050年まで安定する。

なお、気候変動と比較すると人口増加の方が水利用率に対して主要な影に対して影響を与えるという同様の研究報告事例がある。

6. 日本を含むアジア地域の特性を考慮した研究の視点

全球水循環の評価モデルの構築により、マクロな水の変動を捉える事は地球温暖化などの影響による対応を考える上で大きなツールとなる。従来の研究は欧米を中心に進められてきたため、欧米の持つデータに基づく解析となっている。しかし、多くの都市が沖積平野に位置し、造山運動の影響を直接受ける等の自然特性を持つアジア地域における水循環—水資源システムの解明も重要な視点である。今後の途上国における持続的発展を支えるためにもこの種の研究を推進する必要性はたかいものと言える。現在、日本が中心となり、アジア太平洋水文水資源協会設立に向けて活動が始まっている。主な研究課題は以下の通りである。

- ① ヨーロッパで共同開発された分布型水文モデル (水の浸透、

流出、蒸発散等の定量的解析モデル) はなだらかな地形を対象としていることから、鉛直浸透のみのモデルとなっている。これは山地・丘陵地での適用性が低いもので、斜面流成分を含むモデル化によりアジア地域の山地に適用できる新たなモデルの開発を推進。

- ② 欧米では特殊な水循環過程をもつ石灰岩地帯を対象に「石灰岩地帯水文学」が成立しているが、アジア地域—火山地帯は特殊な水循環過程と土砂生産・流出過程をもっており、「火山水文学」の体系化が必要。
- ③ 欧米での土砂生産の主体は雨滴による土壌剥離と地表流による浸食として定式化している。アジア地域では浸食の他、山地崩壊、地滑り、火山噴火、土石流などの不連続な土砂生

産の効果が大きく、これらの現象を反映した解析技術が必要。

- ④ その他、アジアモンスーン地域に特有な研究課題として、次の様な課題がある。
 - アジアモンスーン地域の降水機構、水資源変動、エルニーニョの効果
 - 水田稲作地帯の灌漑排水技術と水管理
 - 沖積低地に立地する都市の治水、利水、環境問題
 - 水の絶対量が多いが、需要とのインバランスによる大都市の水不足と水域汚染問題
 - 多量の土砂生産、流出に対する対策 (砂防技術、沖積河道の安定化など) が必要
 - 気象学、農業工学、河川工学、林学、地下水学等それぞれの分野で、安定帯 (欧米) と異なる研究課題の抽出と研究開発。

7. おわりに

国内の河川流域を単位とした総合水マネジメントにおける基礎技術や水循環モデル、水循環系健全化に向けた具体的な研究動向について地球的規模での研究を含め概観してきた。これらは、まさに今後の水管理対策の重要なツールである。総合水マネジメントにおける様々な検討はいわば壮大な社会実験であるといえる。しかし、多くの課題が山積していることも事実である。以下、現段階で考える視点を提起する。

- 水循環モデルの様な現象を視覚的に把握できるモデリング手法をより精度よく、広範囲な領域に拡げることが重要である。環境評価については、合意形成の上でキーとなる領域であることから、研究開発を強力に推進する必要がある。
- 土地利用に水循環系の視点を取り入れる。必要であれば、法的規制を行使できる等社会科学からの検討も十分考慮す

る。

- 市民、企業、自治体、国が役割分担と連携を図り取り組むのは当然であるが、とりわけ、流域における都市づくり、治水対策、防災対策等多くの事業・行政を担当する自治体側の主体的取り組みが大きなポイントとなる。国側でも地方分権の推進や技術協力を積極的に推進することが求められている。
- 日本はこれまで欧米のモデル

に基づき研究が進められてきたため、アジアとの共通性を意識する姿勢が少なかった。日本がこれまで培ってきた水循環—水資源システムにおける様々な施策や精度、技術等、成功と失敗を含め提示、発信して、特にアジア諸国への適用性を検証する。さらに、アジア地域特有な地形や社会経済活動等から規定される水循環—水資源システムについても世界に発信し、必要な研究開発を推進する。

- 今や水問題は世界の共通認識となっている。健全な水循環系の構築に資する社会・技術システムについて、日本からアジア諸国等への技術移転の

円滑かつ適切なシステムを構築する時期である。従来のODA等の海外援助システムを改善していく際、相手国特有の習慣、風土等を大切した視点も効果的技術移転において重要である。

謝 辞

本稿は、科学技術政策研究所において2002年8月7日に行われた東京大学生産技術研究所教授虫明功臣氏による講演会「水循環と水資源 —ローカルな視点からグローバルな視野へ」を基に、我々の調査を加えてまとめたものである。

本稿をまとめるに当たって、虫明教授にはご指導を賜ると共に、関連資料を快くご提供いただきま

した。文末にはなりますが、ここに、深甚な感謝の意を表します。

参考文献・引用文献

- 1) 総合科学技術会議第2期科学技術基本計画分野別推進戦略（平成13年9月）
- 2) 科学技術政策研究所講演録No.93「水循環と水資源 —ローカルな視点からグローバルな視野へ」
- 3) 鶴見川とその流域の再生（平成14年4月）
- 4) 「気候変動を考慮したグローバルな水資源需給の将来」東京大学生産技術研究所：沖大幹、虫明功臣、鼎 信次郎、安形 康、(株)ニュージェック：猿橋崇央

