

## 研究展望

## 流域水マネジメントに向けた研究の展開

RESEARCH NEEDS TOWARDS WATERSHED MANAGEMENT

楠田哲也

Tetsuya KUSUDA

フェロー会員 工博 九州大学大学院工学研究院環境都市部門 教授  
(〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)  
kusuda@civil.kyushu-u.ac.jp*Key Words* : watershed, river basin, management, sustainability

## 1. はじめに

地球環境の有限性が顕在化しつつある現在、人類社会の持続性を高めるために法制度、技術、社会システムをはじめ、人々の発想、行動様式に至るまで環境革命といわれるほどの大きな変革が迫られている。このような変革は、今までに日本人が経験してきた「物質文明の高度化」、「都市活動の高度化」、「利便性の向上」のような単純拡大型のものではなく、「世界人口の増加」、「鉱物資源の枯渇」、「自然環境の劣化」、「生態系の劣化」、「水資源の不足」、「食糧の不足」を前提とし、さらに「国家間の富の再配分」に対処しなければならない限度内再調整型のものである。このような状況に対処するには、単なる技術開発や法制度の整備だけでなく、個人の倫理観や価値観を深化させて社会のあり方や技術を転換していく必要がある。いいかえれば、有限という制約のもとで持続性の高い解を模索する統合的なマネジメントが必要となっている。

本質的に人はどうしても今日の問題を重視し、将来より厳しい問題の出現が予想されてもそれを軽視する傾向にある。この特徴は社会の高持続性化にはそぐわない。これに対処するためには、累積的環境劣化と残存資源消費の削減、いいかえれば時間に関わる因子を如何に体系化して行動規範を転換していくか、心理学をも踏まえた検討が要る。

人類社会の持続性を高めるためには、科学的根拠に基づき技術体系と社会システムおよび個人の認識と価値観を転換していかなければならない。その目標として地球温暖化防止、生態系の多様性の保全と個体数の維持、再生不可能鉱物資源の消費削減等が挙げられる。水資源は太陽熱による自然循環があり基本的に再生可能資源であるため枯渇の心配はないが、利用可能量は水質に依存する。世界をおしなべて見れば、人口増加や使用量原単位の増加、食糧増産用の灌漑用水確保などによりどうしても不足は免れなくなりつつあ

る。それゆえ、21世紀は水で紛争が生じるとされ、他に劣らず重要度が高いと考えられている。

全球的な自然環境の調査が本格化してすでにかなり経過している。全体的な把握ができなかった初期とは違い、現在では地球規模の大気大循環もかなり理解されてきている。このような段階に到達しえたのは、支援ツールとしてのGISをはじめとする空間情報技術、人工衛星やレーダーなどの計測技術、微量物質の分析技術等の進展や長年にわたるデータとその解析結果の集積による。科学的知見の増加により大気圏、水圏、土壌圏は物質循環や熱輸送において相互に影響しあい地域間で強い関係性を有していることが明らかにされている。たとえば、インドに降雨が多いと黄河流域は乾燥するとか、エルニーニョの出現で中南米西岸域が早魃傾向になるとか、黒潮の流路がわが国の太平洋岸に近づくと内湾の水位が上昇し干潟面積が減少するなどの関係である。このようにメゾスケールの事象が特定地域の自然現象を左右することが明らかになっている。一方、人間に関わるミクロスケールの事象がより大きなスケールの現象に影響を与えることも知られている。たとえば土壌圏の利用形態の変化が大気陸面過程に影響し大気圏を経由する水循環系を変化させることや利用物質の環境放出が質的環境を変化させ生物圏の様相を変化させることなどである。このため身の回りの水に関わる環境を考察する際には、まず従来と同様に人の営為のスケールを水の流れの単位である流域と関係づけ、次いで流域(地域)をメゾスケールの大気・海水循環系と関係づけ、逆にこの大循環を人の営為のスケールにまで戻して考察する観点が必要である。つまり、大気圏、水圏、土壌圏と生物圏における双対的關係性を考慮に入れる必要がある。

本稿ではこのような視点から、流域スケールの水環境研究の現状を整理し、人の営為のスケールの水環境を流域を経由してメゾスケールと繋ぐところまでの今後の研究課題について議論する。なお、水循環の要素

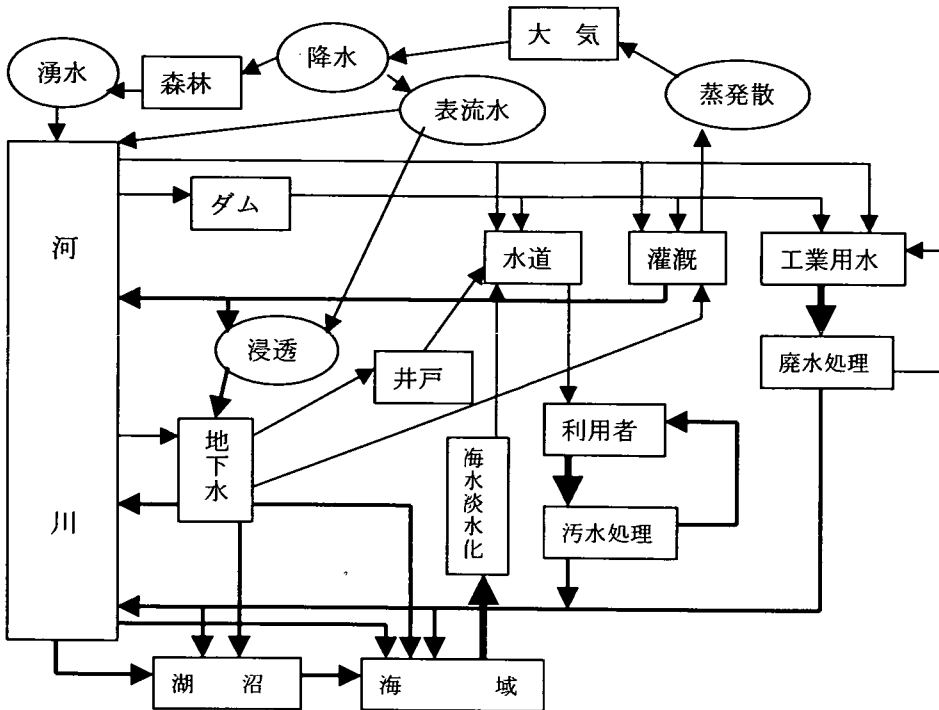


図-1 利水から見た水の流れ (太線は水質汚染を示す)

技術である水・排水処理に関わる環境技術の展開過程は参考文献 1), 2) に詳しいのでここでは割愛する。

## 2. 水に関わる環境の構造と関係性

水に関わる環境を身の回りからメソスケールまで考察する際のフレームを構成する要素は着目する局面に応じて異なり複雑多岐である。大項目別に主要要素を抽出すると以下ようになる。

- 気 候：気温、降水量、湿度
- 物理空間：陸域、陸水域（湖沼、河川、湿地、地下水）、海域（河口域、沿岸域、海洋）
- 物質空間：大気、水、土壌、生物、地殻
- 土地特性：林地、農地、住宅、産業用地、山地、草地、砂漠、氷原、湿地、湖沼、河川
- 水 循 環：自然循環：降水、積雪、凝結、融雪、流出、湧水、浸透、蒸発散、地下水  
人工循環：取水、貯水、利水（農業、工業、都市）、処理、放流、内包水移出入、
- 機 能：治水、利水、排水、発電、舟運、生態系保全、生産、リクレーション
- 法 制 度：国際河川、水法、水利権、水域、沿岸域利

- 用権、環境基準
- 経 済：便益、費用、料金制、施設寿命、フリーライダー
- 社 会：農工商業、生活水準、水利用習慣
- 指 標：経済指標；コスト、安全性、利便性  
環境指標：LCE、生態系多様性、資源消費、水量、水位、水質、快適性、審美性
- 技 術：治水；ダム、拡幅、浚渫、堤防、遊水池、雨水浸透  
利水；節水灌漑、掛け流し  
水処理；BOD除去、脱窒、脱リン、重金属・難分解性有機物質除去  
制御情報；気象、必要水量、水位、水質、水量
- 学問領域：気候学、気象学、水文学、林学、農学、農業工学、砂防、灌漑工学、上下水道工学、水処理学、水質学、生物学、生態学、毒性学、環境学、流体力学、水工学、法学、経済学、社会学、心理学、教育学

水のマネジメントには、これらの項目の細目を必要に応じて選択し、項目間の関連図を描いた上で議論することになる。たとえば、利水に焦点を当てた水の流れは図-1のように示される。

### 3. 流域水マネジメントの定義と目的

ここで扱う流域水マネジメントを「流域において住民が求める治水、利水、生態系保全、生活環境保全を、より少ない環境負荷、資源消費、リスク、およびコストで社会的に公正になるように達成し、永らく維持できるようにすること」と定義する。したがって、流域水マネジメントは海域を含む流域において自然と人工の水循環系を組み合わせ、洪水制御、水資源の確保、利水、農業、水産、自然・生活環境保全に関わる便益を、社会的により少ない不平等さ、環境負荷、資源消費と費用で最大にし、かつ人類が恒久的に生存できるように環境を維持し、その利用を制御することを意味する。そのためには、法制度、国際関係、社会構造、資源、自然環境、技術、人の意識、ライフスタイル等すべてが検討対象となる。なお、ここでいうマネジメントとは、単に対象物の管理だけでなく、創造、応用、調整を含めた幅広い行為を包含したものである。

### 4. 水環境に関わる現状と課題

水環境の操作性は地形、水の流況形態、行政の責任分担形態、利用に関わる法制度などにより異なる。この操作性は国によって千差万別である。人類社会の持続性維持、生態系保全の立場から、機能に関わる項目を中心に現状と研究上の課題を述べる。

#### (1) 気候学的水文学的問題・水資源賦存量

各国における地球温暖化による気候変動はIPCC等で定量的に予測されているが、人間活動等の外部条件に大きく支配されるために確度の高いものではない。しかし、温暖化傾向は否めず、ダムのような長寿命施設にはそれに伴う降水量の変動等を見込むのが望ましいが、未だ具体化されたものは見当たらない。

地球のメソスケールにおける大気循環と降水量の相関や変動特性は全球的エネルギー水循環観測実験計画(GEWEX)のアジアモンスーン地域国際共同研究(GAME)などにより調査が進められてきている。体系的な理解はかなり進んできており、さらなる観測により定量的な特性が明らかにされる日が近いと思われる<sup>3)</sup>。わが国にとっては梅雨前線の北上度合いや台風経路と発生個数に影響する太平洋気団、シベリア気団との関連性が重要である。

水資源賦存量は近年の気象異常により平均値、年変動いずれも変化している<sup>4)</sup>。最新のデータによると平

均値はやや減少していたものが1999年から2000年にかけて増加気味であるが、年変動は相変わらず以前に比し大きい。しかも、ひと雨における降雨強度も大きくなっている。このため名古屋市の新川における2000年の氾濫のように洪水が増える一方で、渇水も頻発するようになり、貯水施設があっても満水状態にならない例も増えつつある。また水資源賦存量の空間分布の度合いは大きく、わが国だけに限っても、東京、福岡、松山で渇水が生じやすくなっている。近年の気象変動を考慮した水資源計画の基本的考え方の樹立や大渇水のように稀にしか起こらない事象の精度の高い確率表現化が求められている。この種の課題は1960年代の研究の再登場で、研究課題再出現特性(研究者の1世代に相当する大凡30年ごとに同一系統の課題が出現し、周辺技術や情報の進展により高度化していくという特性)にしたがっている。

乾燥地域において植林したり深部の地下水を利用するためにパイプを地下水水面以深まで差し込みそこに樹木を植えるなどの工夫がなされている。広域にて実施された場合、蒸散量の増加により気象が変化することがあるし、水収支の均衡が崩れ地下水位が低下することがあるので、収支を平衡させる技術と収支の予測技術が求められている。

#### (2) 治水

洪水制御は最重要課題である。わが国では氾濫発生確率年をおおよそ100年とし、地域特性に応じて増減している。この氾濫発生確率は被害リスクとは異なる。安全性の定め方は行政に委ねられているがその背景となる理論には定量化の課題が残されている。ダムの新規建設は治水が進んできたことと水余り現象により減少している。農業用水の水余りは田畑面積を減少させていることによるものであり、わが国の2000年の食糧自給率30%程度という食糧安全保障の問題に繋がる。食糧確保と平常時の負担増の関係は保険であり、飢饉のリスク管理として検討されるべきものである。現在、所定の氾濫発生確率年を担保するための手法として遊水池がかなり注目されており、河川法第6条の規定を広げていく傾向にある。また都市では雨水流出率の増加が内水氾濫を助長するため、雨水調整池のような代替施設の建設が進められている。わが国で提案されて30年近くたつ総合治水の発想は費用負担の点から興味深いだが、この発想を流域内で具体的に実現していく手法の研究には余地が残されている。氾濫原が安全になれば人は氾濫原に移住し、さらにもともと氾濫原に住んでいた人は安全対策を軽視するようになるため、安全策を講じるほど氾濫時の被害額が増える傾向にある。地価の低いところに住むという経済性

と安全性の相克や安全の基準の時間的变化を如何に計画論に取り込むか課題である。防災のための工事は行っても、被害回避のための立ち退きや洪水保険は行政手法として取られていない。費用と安全性を考え自由に手法を選択できない行政手法について考えてみる価値がある。

都市の内水氾濫は古くて新しい問題である。排水先の水位や流下能力により排水がままならぬことや都市低平均の等高線が意外と知られていないことなどの問題がある。集合型の地下街の防災対策と通行人の安全への配慮方法の検討は課題である。

### (3) 用水供給

自然循環系の水量が不足する地域では人工循環系の水を加えて補っている。その際の水質と水量確保策の組合せ方を選定された指標のもので如何にするかが課題である。水利用量からみれば灌漑用水が大半を占める。灌漑のための水循環利用が高度に工夫されている水不足地域、たとえばイスラエル<sup>6)</sup>、チュニジア<sup>6)</sup>などでは畑作に下水処理水を用いたドリップ灌漑を導入して節水を図っている。中国北西部でも地下水や河川水をドリップ灌漑しているところがある<sup>7)</sup>。さらなる節水型の灌漑方式の開発は灌漑スケジューリングや植え付け作物にも依存する。乾燥地農業としてわが国からも乾燥地に出かけかなり調査、研究が進められている。水不足度と作物収量の関係についての研究はこれからの課題である。わが国では下水処理水の農業利用にも心理的抵抗感が強いが、窒素濃度を低下させた処理水を水田に利用する試みが福岡でなされている。

工業用水は先進国では循環利用が進んでいる。わが国の大企業では料金体系や放流水基準のために循環利用率が90%を超えるのが常態になっている。

WHOによると現在安全な飲料水を得がたい人口は約5億人、廃水を安全に処理できていない人口は12億人といわれている<sup>8)</sup>。開発途上国における廉価な飲料水供給や排水処理技術も開発されはじめているが本格化していない。米国カリフォルニア州サンディエゴ<sup>9)</sup>では下水処理水の再利用が水道用に準備されたが、現時点では住民の反対により輸送水路の浸透率を減らすことで下水処理水の再利用を回避している。わが国では東京都、大阪府、大阪市、福岡県宗像市をはじめとして下水処理水の放流口の下流に上水道の取水口があるところは珍しくない。淀川下流では夏季に上水道原水への下水処理水の混入率が最高で20%近くになることがあるし、福岡県宗像市釣川では40%に達することがある。現在のところ、技術で衛生学的安全性を確保しているが、内分泌攪乱化学物質や心理的、安全面からの検討が求められている。またわが国

では味を問題にする人の増加につれて、他の先進国や開発途上国では硬水の回避や衛生学的安全性を増すために、ミネラルウォーターの消費量が増加し続け、実質的な二元給水化が生じている。これらの問題は上水道水源のあり方を根本的に問うているものである。

サウジアラビアをはじめ、わが国では沖縄や小さな島々で海水淡水化による飲料水が供給されている。RO膜ろ過による海水淡水化ではハウ素の濃度が飲料水基準より高いため通常の上水による希釈がなされなければならない。ハウ素基準の最新の改定により基準が緩和されたが、小動物の実験値を人間の許容値に換算する際の技術には課題が残されている。海水淡水化は通常の水道のエネルギー消費の6倍にも及ぶ<sup>10)</sup>ので地球環境負荷から回避されるべき技術である。

中国黄河流域では河川取水制限のために華北平原では水不足のために地下水汲み揚げが続いており、黄河支流に位置する西安では年に50cm以上低下している<sup>11)</sup>。化石地下水は汲み揚げによりいずれ枯渇するので予防措置の検討が必要である。農業とともに節水型の都市のあり方の検討もこれからである。一方、わが国の地盤沈下地帯では地下水汲み揚げを規制したためにほとんどのところで地下水位が回復している。東京ではかなり上昇し建物に作用する浮力が問題視されているところもある。したがって、流域における水利用計画とあわせた地下水位管理計画が必要である。

### (4) 水質保全

水質の問題には人への直接的な安全性、生物の安全性と生物経由の人への安全性がある。わが国は上水道水源でのテロによる汚染に全く無防備である。テロ対策技術は新規の研究課題である。水道の広域化はこの種のリスクを上昇させるので、量の確保以外の安全性を考慮した再検討が必要である。ドイツ、米国をはじめとする先進国では、水源を数10km離れた汚染の少ないところに確保し想定できないリスクを低く保つようにしている。オランダやドイツで見られる原水地下一時貯留システムでもいく分かリスクは少ないと思われる。

世界の大河川において懸濁物質35mg/l、BOD3mg/l、全窒素0.7mg/l、全リン0.025mg/lを1項目でも越えない清浄な河川はほとんど存在しない<sup>12)</sup>。たとえば、ライン川ではWHOの飲料水基準である硝酸+亜硝酸イオンの濃度が10mg/lを越えている。このように汚染は先進国においても解消したわけではない。またアジアの河川は汚染が進んでいるが、比較的多雨地域の河川の汚染は、中近東やアフリカの水量の少ないところにおける汚染とは様相が異なる。

わが国では排水処理の進展により水域における外来

性の有機物汚濁は少なくなったものの、湖沼や内湾での陸域からの窒素とリンの負荷による内生的な有機物負荷、つまり植物プランクトンの増殖は増加の傾向にある。これは人口が増加していることと一人当たりの尿尿と雑排水の汚濁負荷原単位をBODで(18+27)g/人日、TN(8+2)g/人日、TPで(0.6+0.4)g/人日とすると、尿尿処理のみの地区では汚濁負荷はBOD27g/人日、TN2g/人日、TPO.4g/人日となるが通常の下水2次処理のところではBODで4g/人日、TN5-6g/人日、TPで0.5g/人日程度となりTN負荷は少なくとも増加することによる。浄化槽においては同様ときにはそれ以上である。対策として下水の高度処理を将来導入し絶えることなく継続するか、放流先の富栄養化する水域での対策(内湾では域外放流や海水交換の増強など)を別途考慮するか、あるいはトイレのあり方を根本的に考え直すかなどがあるが、費用、資源消費、地球温暖化、生態系保全等の指標のもとで判断できるまでに至っていない。

尿と尿の混合処理は窒素の含有率からみて問題であり、尿尿と雑排水の混合もエントロピーから見て無駄といえる。北欧型の尿と尿の分離トイレは興味深い。

有機塩素系化合物の使用は禁止され水域の濃度は減少傾向にあるが、他の発癌物質や内分泌攪乱化学物質はその同定すらなされていないものが多い。船底塗料のTBTの影響も無視できない。水塊への直接の負荷ではなく、化学反応により生じる化学物質の影響も少なくなる傾向にはあるがなくなったわけではない。水中の有機物のうち同定されているのは5%程度であることからかなり問題であることがわかる<sup>13)</sup>。重金属汚染はかなり減少しているが自然由来のものまでなくなったわけではない。

農薬は生分解性の高いものが用いられるようになってきているが、環境に散布してはじめて効果を発揮する薬剤にとって生分解性の調整はかなり微妙な問題である。農薬の衰退につれ農薬の使用量も減少しつつあるが、さらに生物影響のある化学物質の使用種類と量を減らすことが進められている。一方、水域に残留しているDDTをはじめとする有機塩素系化合物の懸念は解消していない。特に規制の緩やかな開発途上国では依然問題として残されている。

貯水池における富栄養化防止策は流域対策と池内対策に分けられ、前者では発生源対策が取られている。後者では、プレダムによる沈澱除去、曝気による循環やフェンスによる循環阻止、流入水のバイパスなどが工夫されているが、定量的に技術を表現するには至っていないし、技術マニュアルもない。養殖漁業の飼料と薬剤によっても水域の富栄養化や汚染が引き起こされている。この汚染は原因者と被害者が同一である

が、解決への名案は未だない。湖沼や河口域の溶存有機物として生分解性の低い物質の増加が見られ汚染形態に対する警鐘もならされている。またフミン質に吸着し分解される内分泌攪乱化学物質の挙動なども研究課題となっている。

富栄養化の結果、湖沼や閉鎖性の海域では貧酸素水塊が高水温期に発生することが多くなっている。穴道湖における貧酸素水塊発生は低気圧通過に関連した塩水の侵入と連動したもので、東京湾では浚渫によるくぼみ、博多湾では滞留時間の増加が引き金となっている。貧酸素水塊の解消に、上下層の強制混合、外界水導入、硝酸塩の底泥注入、冷水注入による酸素供給、イトゴカイを用いた冬季の底泥中の有機物削減、生育生物の取り出しなど数多く工夫されているが決め手に欠いている。

わが国では火山由来の河川や湖沼の酸性化が見られるが、スウェーデンやカナダでは人為起源の湖沼の酸性化が見られる。緩衝能の小さい土壌では酸性雨が問題になっている。放射性物質のフォールアウトが問題にならなくなって久しいのは極めて好ましい。

土壤汚染に強く関係する地下水汚染は溶剤であるトリクロロエチレン、テトラクロロエチレンが目立って多い。環境省や経済産業省、企業による浄化事例がかなり増えてきている。バイオオーグメンテーション、バイオスティミュレーションのための菌種の選択も現実になされている<sup>14)</sup>。

## (5) 生態系保全

生態系保全には生物種の保全に留まらず、その構造と機能を合わせて保全しなければならない。そのため保全は生活史のすべてにわたってなされる必要がある。絶滅確率を指標にする方法<sup>15)</sup>も考案されている。

ダムは米国において廃止される例も出ているが、人間にとってその機能は無視できるものではない。しかし便益ばかりではない。ダム建設により治水上の安全性は確かに向上したが、生態系から見ると洪水の減少、つまり河川水位の変動は河道の固定、河床空隙の減少、植物群落の河道内への進入などを生じ、土砂輸送の減少は沿岸侵食につながっている。氾濫しない程度の人工洪水を作り土砂を輸送し生態系の多様な存在基盤を確保する手法を早く確立する必要がある。また河川を横断する構造物は遡上・降河する魚類の妨げとなっている。一層効率の良い魚道の開発は課題である。

産卵や稚子魚の生育の確保は生態系保全の根源である。農業の労力の軽減のための施策である圃場整備による給排水施設は掛け流しに代わるもので栄養塩の流出を増やして生態系を変化させ、水路の三面張り化は

生態系を劣化させている。河川の近自然工法は従来の施工に比べると優れたものとなっているが、残念ながら区間が短い。生物の生活史を護る視点から支川の小川の保全も欠かせない。本川、支川を合わせた計画論を提案できるようにする必要がある。また、湖沼や河川では稚子魚や水辺の植物にとって水位の確保は重要である。水位の確保と同時に魚種によって流入をも求めるものがある。さらに水辺の植物は小動物の生息場所を提供し有機物の酸化に貢献している。そのため広い水域の波による水辺の侵食も無視できない。オランダでは舟運のある河川の水辺保全のための防御施設が工夫されている。これらの定量的評価はこれからの課題である。

地下水水位は利水だけでなく植物にも大きな影響を及ぼす。さらに山麓における湧水の出現にも関わっている。地下水の確保には地表面の浸透量をできうる限り大きくする必要があるので構造物の構築に関わる私権の制限も課題である。わが国ではほとんど見られないが、地下水が海水の侵入や歴史的に塩水化しているところでは、地下水水位が地表から2m程度まで近づくと塩害が生じる。オーストリア東部のマレー・ダーリング河流域では、樹林を伐採し牧草地化させたために浸透量が増し、その結果地下水水位が上昇し塩害が現われやすくなっている。

わが国では、河川や湖沼における生態系の保全のために、実験専用河川が国土交通省により設置され、公募研究を受け入れ水辺の整備方式の研究が進められている。水辺の整備においては適応的管理手法が導入され始め、保全生態学的には好ましい方向に進んでいる。生態系保全度を定める指標や推定方法の開発も推し進められているが一層の推進が必要である。

生物の絶滅速度が増加しているといわれている中、希少でなかったメダカや両生類までが世界各地で希少になっているのは、遺伝的に絶滅が近づいているようなことではなく、何らかの化学物質の影響であると思われる。

## (6) 環境

都市内に水域が存在すると潜熱により気温が低下し湿度が上昇することが知られている。壁面緑化同様、このような生活環境面への好影響を市街区の計画の際に取り入れるような微気象対応的発想の具体化技術が求められている。

森林や田畑が本来の生産機能を果たすとともに環境機能を有している。この機能が思いのほか有効に作用しており、本来の利用を停止した際の環境影響が懸念されて久しい。森林では降雨の保持機能や生物生息空間の提供、田畑では汚染防止機能、降水貯留機能、良

好景観の提供などが考えられる。本来の利用停止後の環境機能の維持方法は今後の課題である。

内湖の機能が湖沼の水質保全としての重要性が再認識されている。内湖は沈澱機能や生物反応機能を有している。琵琶湖では総合開発に伴いかなりの内湖をなくした結果、水質汚染の進行を招いている可能性が高い。現在、湖岸では国土交通省により人工内湖を作り機能が検証されている。

## (7) 制度的課題

水に関わる法制度は各国で異なる。水を管理する行政部局が複数存在するところは珍しくない。そのため、流域単位での統合的マネジメントを実施しにくい国が多い。さらに重要なのは水利権であり、わが国では市場経済下にはないが米国では水利権の売買が見られる。オーストラリアでは水利権市場の整備が進められている。わが国の慣行水利権は米作に関わる長い歴史の結果の産物である。

国際河川には水をめぐる戦争も稀でないほど問題が多い。1986年スイスのSandoz-Baselにおける化学物質の流出によるライン川の汚染、ドナウ川での汚染、ユーフラテス川やナイル川における取水量の維持の問題など枚挙に暇がない。国際河川は210以上あり、2池にまたがるものはその内の70%である。ドナウ川は10か国以上を流れている。このような川では上下流関係による取水や汚染の問題、国境線を通る河川を挟む取水や河川構造物の設置に関わる左右関係が根幹にある。さらにアラブ海は3国が領有し1960年から農業構造の変化により水位は低下し続け、しかも塩分も海水の10分の1程度になっている。国際河川や水域の管理にはEU Directive (指令)<sup>16)</sup>のような大枠を規定する規則が必要である。この問題の解決には流域の水需給と経済等を統合したマネジメントが必要である。そのための手法はこれからの課題である。

## (8) 技術システムの問題

黄河流域では2000年から断流が見られなくなっている。これは灌漑区における取水に対する課金の増額と行政命令による。しかし乾燥農地地帯の塩害を防止するには至っていない。技術的に流域の水マネジメントがまさに求められている。マレー・ダーリング河の河川水の塩分濃度上昇阻止のための河川にそった井戸における強制汲み揚げはかなり塩分上昇抑制の効果を発揮している。

ダムにおける貯水と放流の時間差のために、濁水と水温変化が問題となって久しい。さらに、水位低下時にダム上流端の堆積泥の巻き上げによる濁水発生も時々問題になっている。バイパスや選択放流施設の設

置が考えられているが魚類や付着藻類の生育への影響を最小化する技術的決め手は未だない。

水質を改善することは技術的に可能であるが、地球環境負荷の削減のための LCE を指標とする具体的な評価手法は未だ行政の意思決定に用いられていない。

衛生学的安全性を飲料水で保障するための消毒は、わが国では第 2 次大戦後の米国の影響により塩素消毒が採用されている。下水処理では、紫外線やオゾンが代用されることもある。塩素消毒にはトリハロメタンの生成、紫外線にはウイルスの光回復、オゾンには副成酸化物の生成などがあり、完全なものはない。安全性に対するリスクの削減を技術による取水水源を含めたシステムによるかの議論はテロのリスクにより大きく変わってしまい、現在解は得られていない。

生態系の保全に関わる技術も現在発展中である。陸上植物の保全技術はかなり進展しているものの、移動性の高い魚類や底生生物の保全技術はこれからの課題である。流速と生息場の関係は IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) としてかなり研究<sup>17)</sup>が進んでいる。絶滅危惧種すべての生態がわかっているわけではないので生活史、餌、生活環境などの確認と洪水、渇水、河川工事などの影響を把握し確率微分方程式で絶滅確率を求め、指標として利用することも考えられはじめている。

### (9) 社会的人間的問題

人口減少期が近々到来することは間違いない。その際、インフラを支える人の数も減少するので、このままでは負担率が徐々に上昇することになる。この回避のためには、従来型の施設をそのまま更新していくのではなく、新たな施設を導入する必要がある。わが国では下水道施設の建設には現在一人当たり 130 万円を要する。管渠の建設費が総建設費の 75% を占めていることを考えると更新にあたっての費用が従前どおりだとほとんど変わらない再負担となる。したがって、長期的には都市周辺域ではなんらかの工夫が要る。

社会習慣の問題として、水汲みにおけるジェンダーの問題がある。女性に強い重労働は開発途上国や最貧国での大きな課題である。先進国は看過しているがこのままでは済みそうにない。さらに、先進国では節水行動への経済的インセンティブ供与は上下水道価格の家計に占める割合が 1% 前後であるために大きくない。水が無い時の節水行動は意識改革によるしかないが、その手法は未知である。

### (10) 援助に関わる問題

人道的な視点から、種々の援助がなされている。わが国はバンコク郊外の水道技術に関わる教育施設の運

営をはじめ、物的な無償供与や借款による援助を多数の国に行っている。オランダやイギリスなど旧宗主国の関連の国々にも援助している。

援助は ODA 関連が多いだけに従来はタイドローンが多く見られたが最近はアンタイドローンが増えている。それでも NGO からすると援助の効率性が課題にされることがままある。援助システムも国策と人道主義の 2 面性から判断する時期になっている。物的な援助だけでなく設定基準や設計方式の提供も重要な支援である。基準値の提供に対する WHO の貢献度はきわめて高い。援助終了時以降の財政的、人的課題は自国で責任を取るべき根幹的な問題である。

## 5. 流域水マネジメントの課題

### (1) 水に関わる問題の特徴

#### a) 地域性

水資源の賦存量や利水方式は地域により異なり、平均的な議論では解決できない。しかし、世界的にかなりの地域で渇水や汚染が生じていること、安全な飲料水が保障されない地域がかなり広がっていることと以下に述べる連鎖性という視点で地球規模での問題とされる。逆に、この連鎖性を利用して水不足を少し緩和することができるはずであるが、研究は進んでいない。

また、国際河川の場合上流国がすべて取水することも可能であり上下流問題が存在する。まさに国際問題であり、解決はきわめて困難である。

#### b) 連鎖性

水不足の影響は食糧生産、工業生産を介して連鎖的に広がり、その影響が他国に及ぶ。たとえば、ある食糧輸出国が渇水で食糧生産を計画どおり行えなかったとき輸入が大量になされ、他の食糧輸入国は直ちに影響を受ける。また、そのための外貨を工業製品の輸出に頼ることになると近隣の諸国の輸出と競合することになる。わが国の将来動向の解析と対応策はこれからの課題となっている。

#### c) 物質による水の輸送

水は物質に内包されている。したがって、物質とともに動く水、つまり物質の生産に要した水を無視することはできない。たとえば、輸入穀類には水、土地、肥料、薬剤、労働力が内包されている。このように、貿易や国内移送により他地域に水を依存しているが、なかなか表面化しない。産業構造と水利用は地域的な問題であるが影響は地球規模である。内包水を含めた解析も始まっている。

#### d) 国際的注目度

飲料水の安全性や量の確保は人道的問題であるが故に国際問題になりやすい。UNEP, WHO, WMO, UNESCO, WB, ADBなどの国際機関が開発途上国の種々の計画やプロジェクトに関与している。わが国の関与度を上げる方策を検討する時期になっている。

#### e) 科学的知見の不足

流域における水収支はあまり明確にされていない。森林や田畑における蒸発散量や浸出水量の定量的表現は研究課題になっている。アジア諸国の流域における水循環構造は気候条件が違うこともありほとんどわかっていない。特にモンスーンアジアにおける水量の多い国での水質汚染への対応は乾燥地の国々の汚染に対する欧米の対応とは違うはずである。わが国の責任は大きい。

### 6. 2 流域水マネジメントの技術と手法

GISをはじめとする空間情報操作技術が急速に発展し、動的LCAを含めてマネジメントに活用できる時期になっているので、水不足を補う際の水源の選択などを含め地球環境負荷削減に配慮した流域水マネジメントの技法の樹立が望まれる。韓国では2001年から10年計画でGISを基本に据えた管理手法の開発を始めている。わが国でもGISデータや国土数値情報が整備され表現用ソフトもかなり作られているので作業は容易になっている。中国の黄河や長江流域の流域水マネジメントは世界銀行やアメリカの大学により試みられているし、わが国においてもJICAによるものなどいくつかのプロジェクトが進行中である。

流域水マネジメントの手法は未だわが国では試みられたものはない。マレー・ダering流域の管理組織に見られるように、各自治体で決定権を有する立場の人が集い全会一致で決まったことを持ち帰り、全体決定に従いつつ他の事項を自律的に定めて、全体に知らせていく方式はかなり効率的に機能している。関係機関全体で枠組みを決定できない時には、従来型の各セクターごとの最適解の重ね合わせでなく、各セクターの自律性を認め、情報を実時間で全体に伝えつつ統合型の解を求める方法が考えられる。関係者が少しずつ我慢する最小我慢解を如何に求めるかという自己規制がまさに課題となっている。

個々の地区では既得権を何らかの手段により補償しつつ住民全体の負担が減る方向で改善すべきである。ステークホルダーの参加が欠かせないので、情報を伝える技術もより良いものを開発する必要がある。

経済的価値評価にそぐわない生態系や水質の評価に

は、なんらかの共通言語が必要であるが、名案は未だない。そのため共通言語なしで統合的評価をしようとする動きもある。

流域水マネジメントを具体化している国は少ない。オーストラリアやオランダが先進国である。わが国はこれからの段階にあり、役所の責任分担制が制御性を低めているので工夫が必要である。

### 7. おわりに

アジア地域における流域水マネジメントは着手されたばかりであり、今後の展開が期待される。この展開に合わせて行政手法も変わっていくであろう。環境工学は人々の今日の要求に答えていくことを役割として認めなければならないが、明日の問題にも留意し環境学が栄え環境が減びることのないように留意したい。

#### 参考文献

- 1) 松尾友矩：モデルによる計算環境工学あるいは理論環境工学の薦め—蓄積される研究成果のために—, 土木学会論文集, No. 622/VII-11, pp. 1-14, 1999.
- 2) 宗宮功：衛生工学から環境工学研究へ, 土木学会論文集, No. 643/VII-14, pp. 1-10, 2000.
- 3) 寶 啓：アジアの水文学動向, 国際水文研究セミナー講演集, 京都大学防災研究所水資源センター, pp. 2-23, 1997.
- 4) 国土庁水資源部：日本の水資源, 2000.
- 5) Oron, G.: Wastewater reclamation and reuse in Israel, Asano, T. (ed.), Wastewater reclamation and reuse, Technomic, pp. 757-778, 1998.
- 6) Bahri, A.: Wastewater reclamation and reuse in Tunisia, Asano, T. (ed.), Wastewater reclamation and reuse, Technomic, pp. 877-916, 1998.
- 7) 楠田哲也：黄河流域における水危機による生活・産業・経済への影響分析と技術的・政策的対応, 平成12年度文部科学省科学研究費報告書, 172 p., 2001.
- 8) Tolba, K. M.: Saving Our Planet, Chapman & Hall, 287 p., 1992.
- 9) Hamilton, S.: Reclamation of water, 第7回 WEF/JSWA 合同下水道技術セミナー講演集, pp. 93-99(訳文), 1998.
- 10) 巖斗鎔, 楠田哲也, 石川和也：濁水に見まわれやすい流域における水資源確保対策の検討とその評価—博多湾流域を対象として—, 環境工学研究論文集, Vol. 35, pp. 61-71, 1998.
- 11) 近藤昭彦, 田中正, 唐常源ら：中国華北平原の水問題, 水文・水資源学会誌, Vol. 14, No. 5, pp. 376-387, 2001.
- 12) Lean, G., Hinrichsen, D. and Markham, A.: Atlas of the Environment, Arrow Books, pp. 62-63, 1990.
- 13) 内海英雄：化学物質による生物・環境負荷の総合的評価手法の開発に関する研究, 用水と排水, Vol. 42, No. 4, pp. 9-13, 2000.
- 14) 中村寛治, 石田浩昭, 飯泉太郎, 鈴木義彦：バイオスティミュレーションのプロセス管理を目的とした 16 SrRNA 遺伝子



- による微生物群集構造の解析, 環境工学研究論文集, Vol. 38, pp. 175-186, 2001.
- 15) Hakoyama, H. and Iwasa, Y.: Extinction Risk of a Density-dependent Population Estimated from a Time Series of Population Size, Jour. Theoretical Biology, Vol. 204, pp. 337-359, 2000.
- 16) EC (ed.): DIRECTIVE 2000/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, Official Journal of the European Communities, L 327/1-72, 2000. 12.
- 17) Nestler, J. M., Milhaus, R. T. and Layzer, J. B.: Instream habitat modeling technique, Alternative in Regulated River Management, edited by Gore, J. A. and Petts, G. E., CDC Press, 1989.

(2001.12.10 受付)