

水環境における課題とソリューション

Water Environment Problems and Their Solutions

篠原 哲哉

野口 和彦

■ SHINOHARA Tetsuya

■ NOGUCHI Kazuhiko

水の豊かな日本の国土であるが、食料を得るために必要な水量である“仮想水”を考えると水は不足し、海外からの輸入に依存している。地球温暖化の影響は水を得るためのリスク要素になりつつある。また、世界の水環境を眺めると水資源の不足や偏在が国際的なひずみを生みつつある。

日本の人口トレンドが減少に転じ、水に対する要望も量的拡大から質の追求に価値感がシフトしてきている。上下水道は社会生活に必要であるだけでなく、健全な水循環を持続させるためにも重要な位置づけを占めるようになりつつある。

東芝は上下水道における課題解決の担い手となるため、いくつかのキーとなる技術をもって官と民、あるいは民間企業間のパートナーシップ構築を推進している。また、システムエンジニアリング力を活用し、様々なソリューションの提供を行っている。

Japan is a country with abundant water. However, when "virtual water" (water necessary to obtain food) is taken into consideration, the country in fact has a lack of water, and imports a large amount of virtual water from around the world. Obtaining water has become associated with risks because of global warming. An examination of the water situation in the world reveals conspicuous insufficiencies and uneven distribution of water resources.

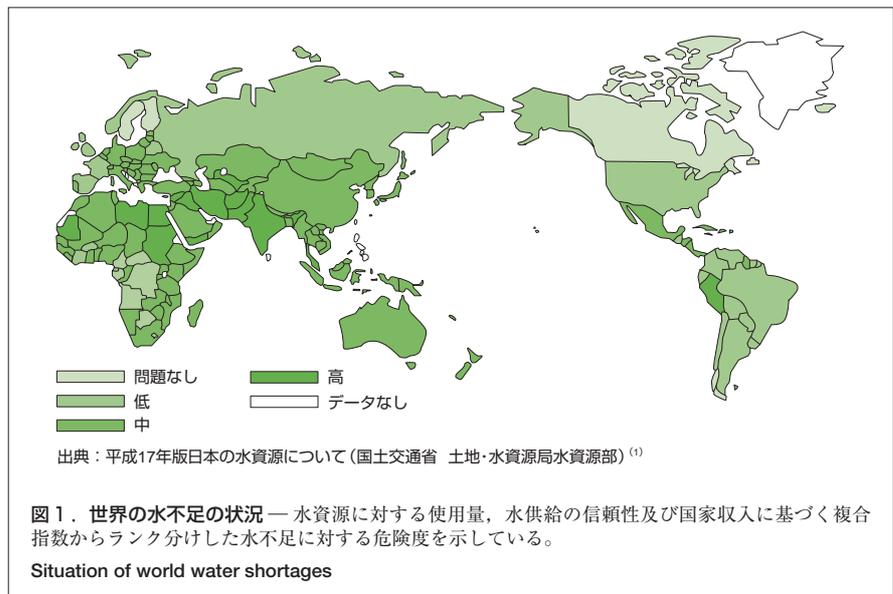
The population of Japan has begun to decline and the volume of water required is decreasing. As a result, demand for water is shifting from quantity to quality. Water supply and sewerage services are an essential part of society, and sustaining healthy water circulation is playing an increasingly important role.

Toshiba is devoting its efforts to the solution of problems in the water supply and sewerage services field by providing key technologies and promoting partnerships with both government bodies and the private sector, making full use of its systems engineering capabilities.

世界の水環境

地球は、よく“水の惑星”と例えられる。人工衛星などによって宇宙から見た地球は満々と青い水をたたえる水の惑星に見え、また、白く輝く雲も水滴である。地球の物質循環のうちでもっとも大規模なものは水の循環であり、生命の源となる現在の海水の組成も、水循環により生まれたと言われている。地球上の水の量は約14億km³であり、そのうちの2.5%が淡水である。更に、淡水の多くは極地の氷や氷河という形で存在するため、河川や湖沼の水として存在するのはわずか0.8%であると言われている。

世界規模で見ると、この“水資源”が不足している。特にアジアでは、人口増加とそれに伴う都市化により、半世紀で水需要が3倍になったと言われて



いる。この人口増加はまだ続く見込みである。中国、アメリカ、インドなど穀物の生産大国では灌漑(かんがい)用水として地下水を大量に揚水している

が、これにより地下水位の低下や塩水化が深刻な状況となってきている。世界における水不足の深刻度については図1に示されるとおりである。

地球温暖化の水循環への影響

人類にかかわりが大きく、また飲料や植物育成に欠くことのできない淡水の循環は、蒸発～雨や雪などの降水～河川と地下水による海洋への流下によりもたらされる水循環である。

われわれが活用できる水資源の多くは、このなかの降水によってもたらされる。水資源を活用する際の障害は、降水を時間的、空間的、更には量的にコントロールできないことである。降水は気象現象であることから、地球の温暖化の影響によって大きく左右される。地球の温度が上昇すれば、海洋などからの蒸発量が増え降水が増えるように思われるが、実際の気象現象はそれほど単純ではない。極地方の水が溶ければ海流にも影響をもたらすことがわかっている。例えばカナダ北部の水河が溶け、塩分濃度が低く冷たい水が大西洋に流れ出すと、メキシコ湾流の流れを阻害する。このメキシコ湾流は、ヨーロッパに高緯度のわりには温暖な気候をもたらしている暖流であり、これが阻害されるとヨーロッパの気候は寒冷化する。更に、メキシコ湾流はすべての海流につながる海の大動脈であるから、黒潮や親潮はもちろん世界中の海流が止まり、赤道から極への熱移送のメカニズムも崩れると言われている。

地球温暖化の結果、降水にどのような影響をもたらされるかは、いまだ明らかでないが、一般的には気象現象が従来と異なるところで平衡することになることから、今まであまり起こらなかった現象が現れるようになる。豪雨や豪雪の増加、度重なる台風の襲来、記録的猛暑や早魃(かんばつ)など、激しい気象現象の増加により、人命や財産の喪失やインフラ機能の麻痺(まひ)を招くだけでなく、地球温暖化は水資源の安定的供給を阻害し、より深刻な水不足をもたらす事態も想定される。

日本の水循環の姿

日本の平均降水は、水量にすると年間6,500億 m^3 であるが、蒸発散する水量を除いた利用可能な量である水資源賦存量としては4,200億 m^3 である。この中から約20%の852億 m^3 を生活で活用している。渇水年の減少まで考えると、自然界の水循環に対し20～30%について人工的な関与をしていることになる。

水循環には、表流水だけでなく地下水も寄与している。雨水が都市部のコンクリートやアスファルト舗装により地下への浸透を遮られると、その分の雨水が道路や管渠(かんきょ)を流れる。すなわち、とぎれた分だけ下水道として人工的に補完しなければならないことになる。

質的には、下水処理水が影響を与える。東京の隅田川下流では、生活圏で使われ下水として処理された水の比率が河川水量の70%を占めると言われている。全国的には132億 m^3 /年の下水処理水が放流されており、隅田川の例ほど極端ではないが生活用水163億 m^3 の80%、水資源賦存量の3%がいったんは下水処理水に姿を変えているということになる。

日本の閉鎖性水域では窒素、リンの流出による富栄養化が問題となり、水処理の高度化が求められている。下水道には雨水と生活排水をいっしょに集水する合流式と別の管渠で集水する分流式があるが、疫病対策が急がれた下水道の黎明(れいめい)期には合流式が選択され、歴史ある大都市では現在も合流式下水道が用いられている。合流式下水道では、大雨が降り水かさが増すと汚水処理の能力を超えるため、雨水で希釈された生活排水だけでなく、晴天時は流されず堆積(たいせき)していた汚濁物まで、河川や海域に流出する問題が顕在化している。このような合流式下水道の改善を図る技術は、国土交通省の下水道技術開発プロジェ

クト(SPIRIT21)のテーマに取り上げられ実用化が進められている。

一方、水循環の中では、河川の上流で下水処理水が放流され、河川水との混合水を下流の浄水場で飲み水の原料として取水するという状況は、もはや避けられない。このとき、浄水場の原水中に有機物やフミン質が含まれている場合、消毒のため塩素を加えるとトリハロメタンという有害物質が発生してしまう。このリスク低減と異臭味のない“おいしい水”を水道で供給するために、オゾンを用いた上水高度処理の導入が進められている(囲み記事参照)。

仮想水の輸入大国 日本

日本の降水量(1,718mm/年)は世界平均の約2倍である。一時的な渇水に見舞われることはあるが、飲料水や生活用水には不自由をしないことから、日本は水の豊かな国であると感じる人が多い。しかし、1人当たりの水資源量は3,332 m^3 /人・年であり、世界平均の9,123 m^3 /人・年と比べれば約1/3である。このギャップは仮想水(バーチャルウォーター)という概念を導入すれば“日本の水の豊かさ”が非常に危ういものであることがわかる。

仮想水とは、農畜産物や工業製品を生産するのに必要な水の量のことである。精米後の米1kgを作るのに約8トン、小麦粉1kgを作るのに4トン以上の水が必要となる。畜産物では、家畜を育成するための飼料生産に必要な水量に換算するためもっと大きな数字となり、例えば牛肉1kgに対して70～100トンの水が必要であると推定されている。日本は食糧自給率が低く、カロリーベースで約60%の食糧を輸入に頼っているが、これらを仮想水に換算すると、日本は年間640億 m^3 もの仮想水を輸入していることが東京大学生産技術研究所の沖 大幹助教授らのグループにより示された。この試算結果を図2に示す。

とーくとーく “水の循環”



Q.高度処理ってなに？

A. 水道では、浄水処理したらきれいな水になるんだけど、消毒したときにトリハロメタンと呼ばれる化合物が新しくできてしまったり、クリプトスポリジウムという難しい名前の微生物が入っちゃうとおなかを壊すような水がでちゃうときがあるんだ。だから、こういうのができなくて、入らないような施設（活性炭処理施設、オゾン処理施設、生物処理施設）を作るなどいろいろなことを推進しているんだ。

A. 下水道では、ふだんは、処理されてきれいになった水が川や海に戻るんだけど、目に見えないほどの有機物がちょっとだけ入ってしまったり、大雨のときには下水道があふれて、

川を汚したりしちゃうこともあったんだ。だから、法律も下水道ではそういう有機物をもっと少なくしなさいとか、雨が降っても余計なものを流さない、雨水は浸透させなさい、雨はためて後で処理しなさいとか、より高度な処理をするようにしなさいと改正されたんだよ。

Q.トリハロメタンってなぜできるの？

A. 有機物の中には処理してもなかなか分解されない物質があって、それが消毒するときに使う塩素に反応してトリハロメタンと呼ばれる化合物がでちゃうんだ。これはね、発がん性があるかもしれないとか、体に悪いものを作っちゃうとか、そういうふうにな人に悪いものなんだ。だから浄水場ではちゃんと取り除くよう

にしてるんだよ。

Q.クリプトスポリジウムってなに？

A. 体の中に入っちゃうとおなかを壊しちゃう病原菌って呼ぶ悪い奴なんだ。これはね、殻で覆われた卵みたいな形をしていて塩素で消毒しても死なないので、水といっしょにおなかに入り増殖しちゃうんだ。

Q.きれいな水をつくるのってたいへんだね！

A. だからね、水は自然に循環しているんだけど、みんなが飲んだり使ったりした水もちょっとだけその循環の中に入っているから、みんなで協力してきれいに処理していかなければならないんだ。

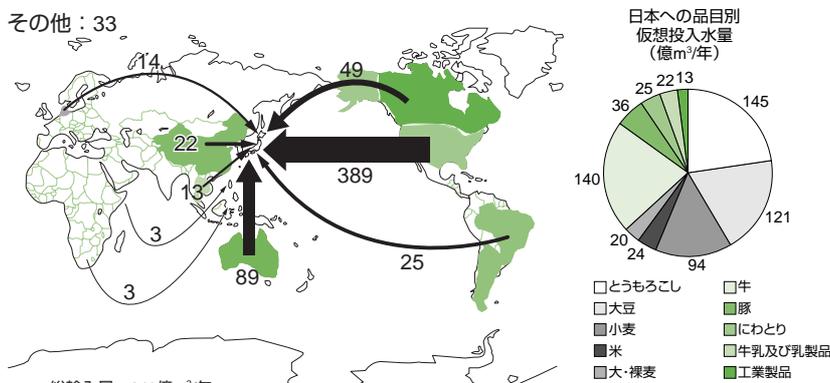


図2. 日本の仮想水の総輸入量 — 世界の水事情が日本の食糧事情に直結している。
Total volume of virtual water imported by Japan

このように、ほんとうは日本の水資源が海外に依存しており、世界の水事情が日本国内の食糧事情に直結することを理解したうえで世界の水環境を振り返ると、水不足の危機がより身近で切実なものであることがわかる。

日本の水需要の変化

日本の人口は、2005年末から既に減少が始まっていることが明らかになった。

従来都市拡大の背景には常に人口増加があり、上下水道の整備も都市化に連動して進められてきた。今後人

口の減少に伴い、都市の縮小→水需要の低下→上下水道施設の規模縮小という負のスパイラルに入るものと予測される。水資源の枯渇、単位人口当たりの水需要という観点では楽になるが、上下水道インフラの維持という観点では負担が大きくなる。上下水道需要量は人口減少に先立つ形で減少し始めている。量から質の向上に社会的な要求は変わってきている。

まちづくりの方向性と水の活用

人口の減少がすぐに都市部の過疎化につながるわけではないが、別のトレンドとしてコンパクトな都市作りを評価する動きが1990年代から主にヨーロッパから広まりつつある。コンパクトシティとはエネルギー、資源、環境負荷が小さく、“持続可能”であることに価値を置く都市作りである。具体的には徒歩による移動性を重視し、様々な機能が比較的小さなエリアに高密度に詰まっている都市形態を指す。構成する

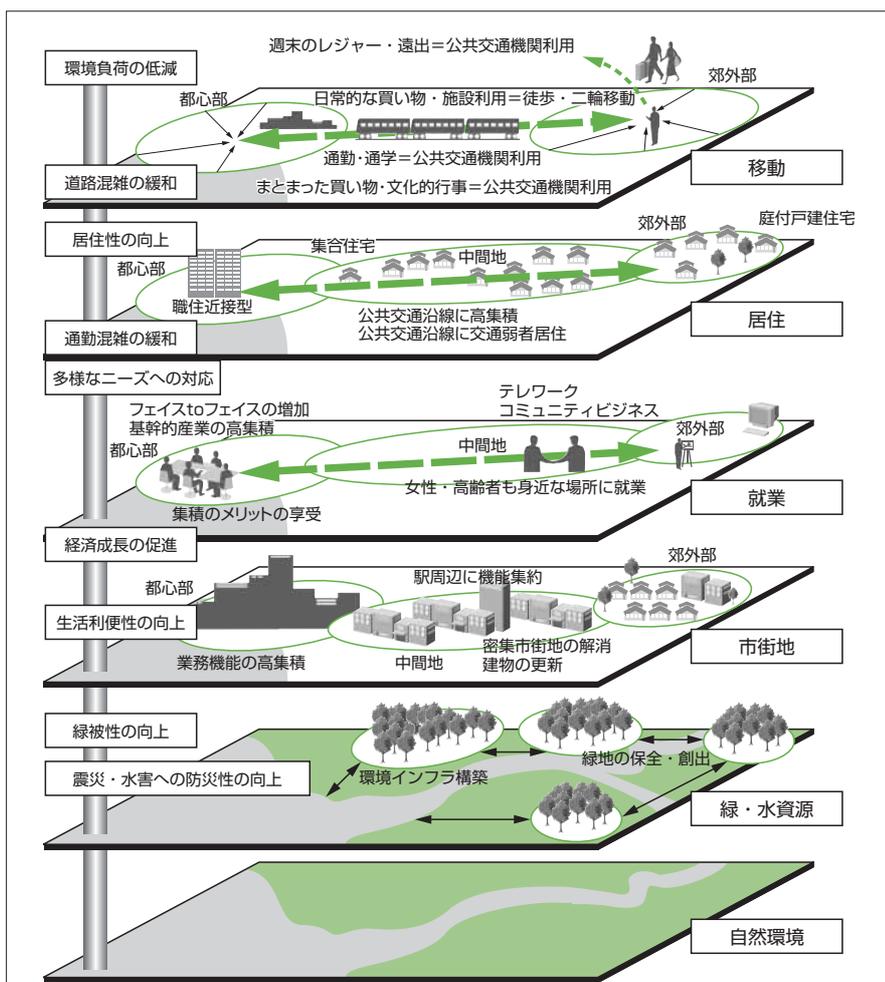
水循環とエネルギー・環境負荷・情報

人工的な水循環には水の移動にエネルギーを使うだけでなく、水質の浄化である浄水や下水処理にも多くのエネルギーを使う。また、水処理設備や機器の製造、更に破棄するためにも多くのコストを必要とし、環境負荷を発生させている。これらの負担を技術で軽減する、持続可能なコンパクトな水処理システムの実現が求められている。

人工的な水循環を効率的に行うためには、水がいつ、どこで、どのような状態にあるかということを知ることが重要。インフラとして確立した上下水道に取り込まれた水についてはかなりリアルタイムに把握できているが、これらの水量は全体の循環量の10%に満たない。

水についての情報を入手するには、情報の入り口であるセンシング技術、それを収集する通信・ネットワーク技術、情報を蓄積するデータベース技術、更には情報の集積から有効な知見をもたらすデータマイニングなど、情報や知識工学などの技術が重要な役割を担う。従来は外乱としてとらえていた気象現象についても解析の技術が確立しつつあり、予測の精度が向上してきている。

生活用水についても従来はファジイや遺伝的アルゴリズムなど、統計的、情報工学的手法からの予測は実用化されていたが、個々人の挙動を直接知ることができればその集積としての水の需要や排出が予測・把握できることになる。気象現象の一部として、大気中にある水、ノンポイントとして地上・地中にある水、集水中の管渠内にある水、水道の配水末端の水、生活圏で循環中の水などの挙動や属性を直接又は間接的に知ることにより、水循環の運用と管理をより効率的で安定したものにする事ができるであろう。



出典：平成14年度大都市圏におけるコンパクトな都市構造のあり方に関する調査(概要) (国土交通省 都市・地域整備局)⁽³⁾

図3 コンパクトな都市圏のイメージ—コンパクトシティとは、エネルギー、資源、環境負荷が小さく、持続可能であることに価値を置く都市作りである。
Image of compact city

要素としては、職住近接・建物の混合利用・複合土地利用といった様々な都市機能の混合化、建物の中高層化による都市の高密度化、はっきりとした都市の境界や独自性を持つことなどが挙げられる。これらのイメージを図3に示す。

日本では、青森市、仙台市、稚内市をはじめとした東北・北海道の都市や神戸市などがコンパクトシティを政策に取り入れている。青森市では、郊外の発展により除雪費用が膨大になり財政を圧迫していることから、郊外の開発を抑制し中心市街地を再開発することで経済的な成果に期待している。国土交通省でもコンパクトシティを目指すためにまちづくり三法(都市計画法, 大規

模小売店舗立地法, 中心市街地活性化法)の改正を検討している。

このような考えは、これからの上下水道インフラのあり方と非常に親和性が高い。水量の増大にブレーキがかかり量より質を求められること、施設の建設・拡大ではなく統合・相互連携による信頼性の確保が求められること、水資源を有効活用するために水を繰り返し活用すること(上水→中水→下水→処理水→上水というサイクル)、エネルギー消費や薬剤消費が少なく環境負荷が小さいことなどが目指すべき姿である。

次世代の水処理技術

欧米では上水道に紫外線殺菌が導入されているが、日本でもクリプトスポリジウム対策(囲み記事参照)などを主眼として紫外線殺菌の有効性が議論され、(社)日本水道協会と(財)水道技術研究センターから活用のガイドラインが発行された。東芝は、既に下水道分野に寿命の長い無電極点灯方式の紫外線ランプを活用した紫外線殺菌システムの納入実績を持っているが、現在は上水に紫外線殺菌を適用するためのリアクタの開発を進めている。現状の紫外線ランプは内部に有害物質である水銀を含むが、将来は水銀レスのランプや高効率な紫外線発光ダイオード(LED)の活用も目指している。

水処理分野では膜やフィルタの活用が注目を集めている。当社も原子力発電所の炉水用として高精度の有機膜技術を持っているが、これにオゾン処理を加えることにより特殊な機能を付加することに成功した。この技術は、温水を加えることで汚れが落ち回復するため、膜の長寿命化を図ることができる。

生活のなかでカスケード的に水を繰り返し使うためには、高分子よりも少し孔径が大きく、流速がかせげるフィルタで水を振り分けたい。当社ではセラミックや金属膜の孔径を任意にコントロールする製造技術の実用化を進めており、新たな用途への活用が期待されている。

このような技術シーズは、いまだ活用されていないが、水循環のあり方を再考する場合に有効なキー技術となる可能性がある。

広域で水・エネルギー・資源を効率的に、たいせつに扱う技術

水循環は非常に広い領域にまたがって繰り返し広げられており、本来は市町村どころか国境すらない。2005年の下水道法改正では、河川流域での環境負荷

を効果的、経済的に低減するため窒素やリンの削減目標量を自治体をまたいで“肩代わり”することや、流域として複数の自治体で雨水排除を協力して行うことを促進するなど、柔軟なシステム構築を進めやすいよう改正された。水循環の中でコントロールできる水量はわずかであるが、決して無視できる量ではなくなっている。そこにマネジメントと意思決定を導入することによって効果的に水を活用し、結果として水とエネルギー、及び資源の全体最適化を図ることができればメリットは大きい。このシステムのイメージを図4に示す。

システムの要件としては、まず広域的に情報を計測し収集することである。近年のIT(情報技術)とネットワーク技術の進展により、十分経済的に実現できるようになってきた。

また、重要なことは行政などの境界を越えてシステムを構築することである。広域的な気象現象の情報を広域

で一元化して相互利用するようなことも想定され、例えば個人生活に影響し、行動を左右するようなイベントや催しの情報を取り込むことも有効であろう。

更に重要なことは、不確定な事象を多く扱う必要からリスクマネジメントの概念を導入し、確率論的にコストとして定量化することであろう。

水循環と環境のためにシステム技術ができること

日本の生活基盤が国内で自己完結できない以上、日本国内に暮らす人にとっても世界規模の水不足は切実な問題である。これらは環境問題として大きなひずみであり、資源やエネルギー問題の一部として考えることもできる。水の効果的活用技術を温室効果ガスの削減技術として認証することができれば、クリーン開発メカニズム(CDM)の一環として日本の温室効果ガス排出

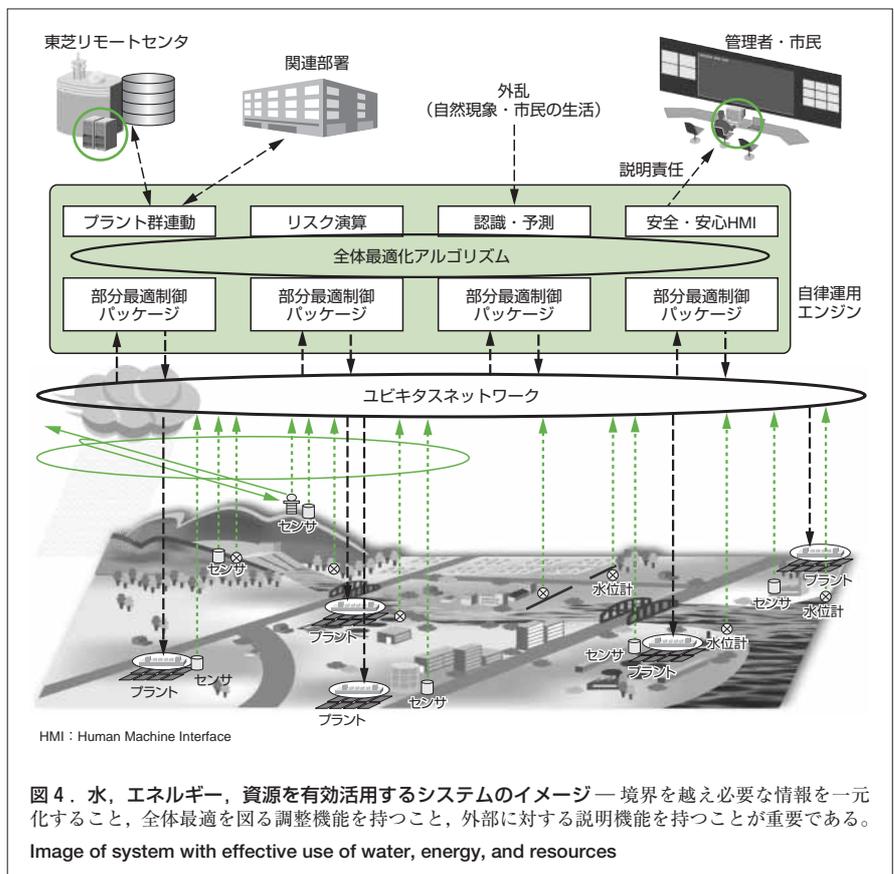


図4. 水、エネルギー、資源を有効活用するシステムのイメージ—境界を越え必要な情報を一元化すること、全体最適を図る調整機能を持つこと、外部に対する説明機能を持つことが重要である。
Image of system with effective use of water, energy, and resources

枠を獲得することも可能であり、また世界に対しても重要な貢献となるであろう。日本は省エネルギー技術では既に世界のトップクラスであるが、水処理技術でも世界を牽引(けんいん)する可能性に期待できよう。

環境保護面では、日本は中国をはじめとするアジア諸国に約30年先んじて“公害問題”を体験して克服し、人口問題面では急激な人口増加を経験する過程で経済的な成功を収め、更には世界に先駆けて人口減少を迎えることが明らかになった。ここで得られた技術やノウハウは、これから都市を造って行こうとするアジア諸国をはじめ積極的に海外に提供すべきであろう。

このような日本の先端技術群を統合し“良いところ取り”で組み合わせて実現するには、国内の多くの官公庁や自治体、更には民間企業各社とのパートナーシップが重要である⁽⁴⁾。当社のシステム技術は、これら先端技術の“接着剤”と

してもおおいに活用できると考えている。様々な専門性を持つ当社のシステム技術者は、多くの場面で貢献できると自負している。これからの展開のなかで、新たな活躍の場を広げていきたい。

文 献

- (1) 国土交通省土地・水資源局水資源部. 平成17年版日本の水資源について.
< <http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/H17/index.html> >, (参照2006-03-02).
- (2) 沖 大幹, ほか. “世界の水危機, 日本の水問題”. 東京大学生産技術研究所 沖・鼎研究室ホームページ.
< <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/Info/Press200207/> >, (参照2006-03-02).
- (3) 国土交通省 都市・地域整備局. 平成14年度大都市圏におけるコンパクトな都市構造のあり方に関する調査(概要).
< http://www.mlit.go.jp/crd/daisei/compact/14compact_report_gaiyou.pdf >, (参照2006-03-02).
- (4) 篠原哲哉, ほか. 民営化をはじめとする上下水道事業の新たなフレームワーク. 東芝レビュー. 59, 5. 2004, p.2-7.



篠原 哲哉
SHINOHARA Tetsuya

社会システム社 水・環境システム事業部 水・環境システム企画部長。上下水道をはじめとする公共分野の企画並びにシステムエンジニアリング業務に従事。電気学会, 環境システム計測制御学会会員。技術士(電気電子部門, 総合技術監理部門)。
Environmental Systems Div.



野口 和彦
NOGUCHI Kazuhiko

社会システム社 東北社会システム営業統括部 東北制御システム技術部課長。上下水道をはじめとする公共分野のシステムエンジニアリング業務に従事。技術士(電気電子部門), エネルギー管理士(電気)。
Electrical & Control Systems Engineering Dept., Tohoku Region