

都市における水の利用とその循環システム

松尾 友矩

1. 水の使われ方の整理

人間が水を利用するという内容の必ずしも単純ではない。人間が利用し得る水の存在は、水がそこに存在することに意味のある場合と水が一定量ずつ供給され流れさっていくことに意味のある場合がある。前者は湖沼、運河、さらには河川を存在せしめる上で必要とされる水であり、いわばストック的な資源にアナロジーされる。後者は各種の用水とも呼ばれる水の利用に関わる場合で、フロー的な資源にアナロジーされる。

ストック的な水資源にあっては、水位を維持することがそれを利用する上で重要なこととなるが水質についてはそれぞれの置かれている状況により要求されるレベルは異なっていく。たとえば透明度を売り物とするような湖沼にあっては飲料水以上の水質が要求される。一般的には、ストック的な水資源は、一度使ってしまうとその回復には大変に長い時間を要することになる。一方、フロー的な水資源の利用は〇〇用水という呼び方をされる場合が多い。しかし、そこでどのような水の特性を使っているのかは実に多様であり、その多様さを正当に把握していくことが水利用を考えるさいの出発点になるともいえる。以下においては、いささか古典的な分類法になるかもしれないが各水利用の特徴を整理していく[1]。

農業用水：わが国独特の水稲栽培の手法（湛水栽培）を支える水田用水を考えてみる。この方法は水をいろいろな目的に利用し、最小の労力で最大の収穫を上げようとする伝統的な方法である。そこでは用水は単に水稲の生育、生理作用に直接必要とする水量（この量自体は草地、林地からの蒸発散に比べて特に大きいものではない）をはるかに上まわった水量として要求される。この水田用水の大部分は、雑草の繁茂の抑制、冷害や風害からの防御など間接的な水利用である。そして、その消費のされ方は、水を水田での浸透水として分散してしまう形で

消費するものである。

工業用水：工業用水統計によれば、①ボイラー用水、②原料用水、③製品処理および洗浄用水、④冷却用水、⑤温調用水、その他用水（この中には工場内での従業員の飲用水、雑用水等が含まれる）の6つの用途に分けられている。

水そのものを製品の原料として使う割合は全淡水使用量の数パーセントであり、他のほとんどが冷却用、洗浄用として使われている。これら後者の水利用にあっては、水のもつ特性の中でも“比熱が大きく熱交換に有利である”、“ものを溶かす容量が大きい”、“安価に大量に入手できる”等の要素を利用する形のものである。この場合には利用された水には廃棄物（汚染物質または余熱）が添加されていることになり、水資源は水質的な意味において消費される。一方、水の存在のし方としては比較的分散しないですむ使い方の場合が多い。

都市用水（上水道用水）：上水道から給水を受ける都市活動としては、一般の家庭生活のみならず、お風呂屋さん、食堂、事業所・官公庁等のビル、学校、プールなどのほか、工業活動も含まれる。家庭生活において使われる水（家庭用水）もその内容は、飲料用、炊事、洗濯、湯浴、水洗便所といった直接人間生活にかかわるもののほか、庭への散水、クーラー用水、洗車用水といった用途への需要も増大している。しかし、そこで要求される水質レベルは最上質のものだけではないことは当然である。

都市用水は基本的には廃棄物を添加される形で消費されるが、もう1つの要素として、少数の浄水場から送り出された水が、都市の広範囲に分散した形で排出されるという形でも消費される。このように都市域に広く分散して排出された水を集める機能を持つものが下水道施設である。再度集中化し水量を確保するという意味で下水道は重要な都市基盤施設として評価されよう。

水辺用水：河川維持用水、リクリエーション用水、修景用水などと呼ばれていた水利用を総括する概念のものである。水辺に関する関心は最近とみに高くなってお

まつお ともり 東京大学 工学部 都市工学科

〒113 文京区本郷7-3-1

り、各種のウォーターフロント開発も実現の運びとなっている。またヨーロッパ都市に見られるような泉を中心とした広場の構成などもその中に含まれよう。ここでの水の利用は、水の存在自体に価値を求めるものとなるが、その水の存在を保障するためには水量を確保する上において他の水利用と競合することになる。

2. 循環利用、再利用の構造

水の使われ方は、廃棄物、廃熱を添加されるか、分散された状態になってしまうことであった。そして水は自然の循環によって供給されるパターンを基本としている。しかし、増大する水利用に対しては、自然の循環を越えて、人工的な循環、多段階的な再利用の構造を組み込むことが必要になってきている。

人工的な循環は、添加された廃棄物、廃熱を除去あるいは放散させるという広義の処理のシステムと分散してしまった水をもう一度集めて元へ戻すシステムから構成される。処理するシステムの具体的な内容は、除去する対象と要求される水質レベルによって異なってくる。廃熱の除去のためにはクーリングタワーが使われる。一方廃棄物については、有機物を対象とするか、窒素・リンのような栄養塩類を対象とするのか、あるいは病原菌・ウイルス、色度、臭気さらには溶解性塩分までをも対象にするかによって必要とされる処理方式が選択される。

集めるシステムと戻すシステムは考える循環の目的、規模によって考える要素が変わってくる。工場廃水にあっては各プロセスによって排出される物質も大きく変化するので、処理の効率化のためにはプロセスごとに分けて集める方が良い場合もある。たとえば重金属や有害物質も含む場合は循環系から除くことも重要である。生活系の排水においても、新しいビルなどでは、建設時に排水についても用水についてそれぞれ2重の系統となるように配管されるなら、いろいろな循環システムが工夫されるであろう。2重配管を設置する場合は誤接続に対する注意も重要である。戻すシステムにあっては用水利用の時間的不均一に対応するための調整池も必要となる。

3. 循環利用における水質要求と水量バランス

循環利用の内容は、同一用途への循環と他用途への再

表1 下水処理水の再生水の用途別水質基準 [3]

	項目	水洗用水	散水用水	修景用水 ^{*1}
基準水質	大腸菌群数 (個/mℓ)	10 以下	検出されないこと	検出されないこと
	残留塩素(結合) (mg/ℓ)	保持されて ^{*2} いること	0.4 以上	—
目標水質	外観	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
	濁度 (度)	—	—	10 以下
	BOD (mg/ℓ)	—	—	10 以下
	臭気	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
	pH	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6

*1 修景用水とは、住宅団地等において人工的につくられた池、壁泉、小川等に利用する水をいう。

*2 衛生上必要な措置として塩素消毒を行なうが、その場合、使用場所に最も近い受水槽付近等における再利用水が残留塩素を保持するように努めること。

利用の2つに分けられる。循環利用の趣旨からすれば、同一用途内で循環系が完結するのが理想である。添加される廃物が熱であるような場合には、クーリングタワーを介して、ほぼ理想的な形で循環利用がされる。しかし添加されるものが物質である場合は、同一用途への循環利用は事実上むずかしい。それは添加された物質を除く方が熱を放散させるためよりはるかに費用がかかるということに起因している。他用途へ再利用していく場合には、水質要求と水量バランスが取れていることが必要である。

現実的には、上水道で供給される最良質の水を一度使い、次に水質レベルが高くなってすむ他の用途へ再利用していくシステムが採用される。この水質レベルの高くない水を供給する水道は中水道とか雑用水利用と呼ばれている [2]。下水処理水を再利用するさいの現行水質基準 [3] は表1 のようである。東京都における下水処理水を水源とする再利用の例としては、中央卸売市場(芝浦)の床洗浄用、新幹線客車等の車両洗浄用、江東地区への工業用水、新宿副都心水リサイクル、等が実績を挙げている [4]。これらはいずれも下水処理場へ集められた水を再利用するもので広域循環方式と呼ばれる。再利用される水量は戻ってくる下水量に比べればごくわずかである。中水道普及のネックは戻すシステムにあることがわかる。

ビル用水等においてどれだけの水を再利用水でまかなえるかは、そこでの用途別の水使用構成が問題となる。

表 2 建物種類別の用途別使用水量割合 [5]

用途	水洗トイレ	厨房・食堂	冷房	その他
事務所	31%	18%	34%	17%
官公庁	36	20	6	38
店舗	26	40	21	13
学校	60	9	0	31
病院	28	14	13	45

表 2、表 3 にはビル用水、家庭用水の用途別使用比率が示される [5], [6]。水洗用水、冷房用水、散水用等が再利用水の対象となる。ビル用水においては、60%程度までの節水効果が期待される。ビル用水等にあつては、戻すシステムの簡素化の点から単独の建築物内で処理施設を持って循環利用を行なうケースが多い。この方式は個別循環方式と呼ばれ、再利用水の利用数としては全体の60%を占めている。広域循環方式 (37%) と個別循環方式の中間規模のものとして、1つの再生処理施設から複数の建物に供給する地区循環方式 (3%) がある [5]。なお、個別循環方式の確立は、下水道への水量負荷を軽減させる効果も併せ持っていることは評価される。

個別循環方式における雑用水利用施設の建設費および維持管理費は税金等も含めた総コストとして、水 1 m³ 当たりで、1,000円から2,100円と試算されている。規模が大きくなるほど安くなっているが、それでも上・下水道料金と比較して割高となっている。1つの原因として施設の稼働率が年間47%と低いことが挙げられている [5]。しかし、これら循環利用のシステムは、単に用水費の経済性のためというだけでなく、水量の絶対的な潤渇 (渴水) に対する備えという機能を持っているわけである。非常時に対する安全性の保障という計量しにくい効用も忘れてはならない。近年においては、税制、低利融資、容積率の緩和といった再利用施設の推進措置も講じられている [3]。

もう1つの再利用のシステムは、いちど自然の系である河川へ戻し、下流域で再利用するケースである。このシステムは自然の中での多段的再利用システムでもあるが、下流側での利用を考えた上で、上流側で十分に排水処理を行なうことを社会システムとして持つことは重要である。このように見れば、上流都市の下水処理水を農業用水として再利用することも積極的に検討すべきことに含まれる。農業利用のためには窒素成分のコントロールが要請される [7]。

また、自然の系へ戻すこと自体を水辺用水への再利用として積極的に評価することも行なわれる。都市の中に

表 3 家庭用水の使用目的別構成比の例 [6]

炊事	洗濯	風呂	水洗便所	その他
26%	24%	20%	22%	8%

「うるおい」や「やすらぎ」を求め、水辺の効用を期待するものである。東京の上水源として全量使われてしまい空堀になっていた野火止用水と玉川上水に上流地区の下水処理水を流す計画が実現している [4]。しかし、臭気対策が課題となっている。

都市下水の再利用の1つとして、下水の水温と大気気との温度差を利用して、ヒートポンプを動かす方法が検討されている。冬期には暖房用温水を夏期には冷房用冷水を得る方式が「アーバンヒート」の呼称の下で東京都の下水処理場で導入されている [8]。

都市で使われた水のゆくえを追う形でその再利用のあり方を述べてきたが、それらをパターン化して分類していくと図 1 のような関係として整理される。もちろんこの他にも積雪の多い地域での融雪用としての利用などの試みがなされている。水の持つ、水質、水温、水量、流送力、といった各側面をどのように活かし、調整していくかによって「再利用」の内容はさらに多様化していくことが予想される。

4. 都市内雨水の有効利用

都市内における水利用の水源について、ここまでは、河川上流部でダム等により貯水され、あるいは湧水として補給され流下してきた表流水を水源とした上水道による給水を想定してきた。この水源は逆昇れば河川上流部に降った雨を集めたものである。そこで雨は下流部にも都市にも降ることを考えれば、この雨も貴重な水資源であることがわかる。最大の問題は集めにくいことにある。

この都市域に降る雨を有効に利用できないかということが近年次の2つの側面において注目されてきている。1つは雨水を貯めて雑用水として利用するためでもありもう1つは都市内河川の洪水防止の目的から雨水を貯めること自体の重要性が指摘されるようになったことである。後者の側面は、河川流域における総合治水計画の中で透水性舗装などの浸透施設と貯留施設の整備を内容とする流出抑制型下水道の推進として注目されている。地域によっては都市雨水貯留施設整備融資制度が適用され東京ドームもその対象とされているといわれる [9]。

このように治水の面からも雨水貯留への要請は大きい

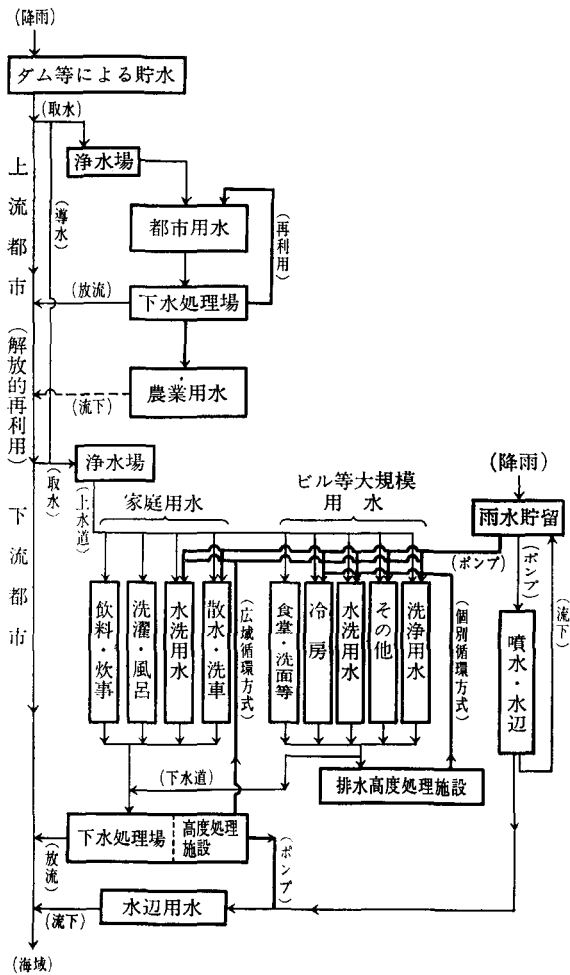


図 1 都市における水循環システムの概念図

が、前述のように貴重な水源としての意味も大きい。利水を目的とする貯留槽では建物の屋根部分から集めるものが多い。水質も比較的良好で、特別の処理を行わない場合でも雑用水としては十分に利用可能である。その用途としては、水洗用水、散水、消防用水、冷却用水、洗車用水などが挙げられる。また非常時の飲料水として考えられているケースもある。

雨水貯留施設の利用率は、年降雨と貯留容量および使用水量によって決まる。また雨水利用のコストは、貯留槽ならびにポンプ・配管類の償却経費が大きなウェイトを占める。現行では水道料金並みといわれ、コスト面からのメリットはそれほど大きくない。しかし、治水面への効果、上水水源へ与える余裕等を考えれば、より積極的な対応が望まれるところである。一方、住宅団地等では、太陽光を使ったソーラーシステムを動力源として、

太陽が照る時だけ作動する噴水や、小川を配置する試みも行なわれている[10]。

5. おわりに

水は自然の循環過程にしたがって、無限に補給されるが、その速度、密度は人間活動の集中する都市にとっては、いまやまったく不十分なものとなっている。高密度にかつ高速に水を消費する都市活動を維持するためにはいくつもの人工的な水循環のシステムを必要としていることはすでに述べてきたとおりである。

これらのシステムを数学モデルに組み、経済性などを指標として最適解を求めるというテーマはオペレーションズ・リサーチの格好の題材とも思える。筆者は不幸にして、定式化して示し得ず、単に状況を記述するだけに終わってしまった。このことは編集者の意図とはそぐわない内容となってしまっている可能性を危惧させる。

参考文献

- [1] 松尾友矩：“用水資源”，化学工学，Vol. 38, No. 4, pp. 275-281 (1974)
- [2] 国土庁：“日本の水資源”，pp. 45-51(1986)
- [3] 建設省：“日本の下水道”，p. 230 (1987)
- [4] 佐藤浩他：“下水処理水を利用した清流復活事業について”，第3回水資源に関するシンポジウム，pp. 121-126 (1987)
- [5] 加藤 昭他：“雑用水利用に関する最近の動向”，[4]と同一文献，pp. 143-148
- [6] 日本水道協会：“水道のあらまし”，p. 142 (1987)
- [7] 佐藤和明他：“下水処理水の 水田灌漑への再利用”，[4]と同一文献，pp. 131-136
- [8] 岩崎臣良他：“下水処理水熱利用システム”，[4]と同一文献，pp. 195-200
- [9] 吉本俊裕他：“都市域における雨水利用の実態”，[4]と同一文献，pp. 173-178
- [10] 熊谷純一郎他：“住宅団地における水の循環利用について”，[4]と同一文献，pp. 149-154