

自然界における水循環

榎根 勇

1. はじめに

自然界における水の循環を水文循環 (hydrological cycle) という。この水文循環にかかわる物理的、化学的、生物的諸現象を研究する科学が水文科学である。従来の水文学 (hydrology) は、理学サイドでは自然地理学の、また工学サイドでは土木工学の一分科と、それぞれ考えられてきたようである。同一の対象に異なるサイドから接近を試みることは、学問発達の初期の段階では珍しいことではない。特に、水や建築のように、人間生活と切っても切れない関係にあり、文明の発達の初期段階で技術の主流を占めていた分野では、例外なく工学は科学の先駆者であった。占星術が天文学を経て宇宙科学へと、また観天望気が気象学を経て大気科学へと進化してきたように、現在、水の科学も進化をつづけていると考えてよからう。

水文循環はさまざまな分岐と連結を繰り返すきわめて複雑なシステムである。このシステムには初めも終りも存在せず、その循環は太陽放射と重力をエネルギー源として、閉じた系を構成している。この系は、水の循環に伴って熱と物質も輸送する。そして地球上のあらゆる生物は、この水のフラックスの時・空間分布に適應するかたちで、その生存を維持している。

水利用とは、この水文循環システムの中へ水利用システムをはめ込み、そのことにより便益をひき出すことにほかならない。文明の初期の段階では、このはめ込みは経験のみにもとづいて行なわれた。そして水に関する科学技術的知識の集積によって、より合理的なはめ込みが可能になったと一般に考えられている。しかし水文循環の人為による改変は、必然的にそれに依存していた生態系をはじめとする自然界の変化をひき起こす。水資源開発と自然環境の変化はトレード・オフの関係にある。トレード・オフが可能であるか否かはともかくとしても、

当然、水資源を開発するさいには、その最適戦略は何かが問題になる。そのためには敵を知らなくてはならない。すなわち水文循環に関する科学的理解が、適正な水資源開発を行なうための不可欠の条件となる。しかしわが国では、あまりにも水に恵まれすぎていたためか、水文循環を科学の対象と考える人はつい最近まできわめて少なかった。

水文循環に対する科学的アプローチは、次に述べるように、システムのアプローチとプロセス的アプローチに大別できる。

2. システム的アプローチ

水文循環のシステムの表現の一例が図1である。この図では、流域への入力としての降水と、そこからの出力としての流出および蒸発散を結ぶプロセスが、系統的に表現されている。もちろん図2のような別の表現方法も可能である。この図も意識している対象は流域であるが、液体の水の流れと水蒸気の流れが区別して示してある点と、流れが部位によっては一方方向性ではない点が図1と違っている。図1の著者はカナダ人、図2の著者はオーストラリア人である。乾燥地域では気相の水の流れの重要性が相対的に増し、それに伴って土壌中の上向きの水の流れの重要性も、湿潤地域に比べると増す。両図には、寒冷地域と乾燥地域の水文循環の差異が無意識のうちに反映されていると考えることもできよう。

図2は、水文循環を11のサブシステム (貯留) の組合せで表現しており、流域内で生起する主要な水文プロセスの記述には十分である。これら各々のサブシステムについて、次の水収支式 (質量保存則) が成立する。

$$p(t) - q(t) = \frac{d}{dt} V(t) \quad (1)$$

ここに、 $p(t)$ は入力、 $q(t)$ は出力、 $V(t)$ は貯留されている水の体積である。

水収支式は普通は、日、月、年などの有限時間について積分される。またサブシステム群をまとめて考えることにより、サブシステム間の水の交流を無視することも

できる。たとえば1年のように、水収支期間を長くすれば、入・出力に比して貯留量の変化量は小さくなり第1近似では、無視することが可能になる。

水収支期間を長くすることの欠点は、水循環プロセスの動的側面が失われることである。水循環の特性を表わす指標の1つに平均滞留時間 (T_r) がある。定常システムでは T_r は次式で表現される。

$$T_r = \bar{V} / \bar{q} \quad (2)$$

ここに、 \bar{V} は平均水貯留量、 \bar{q} は平均出力である。傾斜した陸地の水の平均滞留時間は表1のようである。

水文循環を系統的に考えることの利点の1つは予測にある。あるシステムを考え、

そのシステムの入力と出力の時系列がともに既知であるとする。この場合、そのシステムを方程式群で記述し、過去の入力と出力とをつなぐことのできるパラメータ群を決定できれば、新しい入力に対応する出力の予測が可能になる。数学的には、パラメータは逆問題として求めることもできる。このようにして決められたパラメータを含む方程式群はモデルと呼ばれる。しかしモデルは現

実世界 (real world) そのものではない。現実世界をみる人の立場、目的、理解の程度などに応じて、同一の現象に対してさまざまなモデルがありうる。かつて世界中で月産何個とまでいわれた流出モデルの開発競争がそれを証明している。

自然現象の理解という立場に立つと、システム・モデルの構築は中途半端な感じをまぬかれない。底の底まで

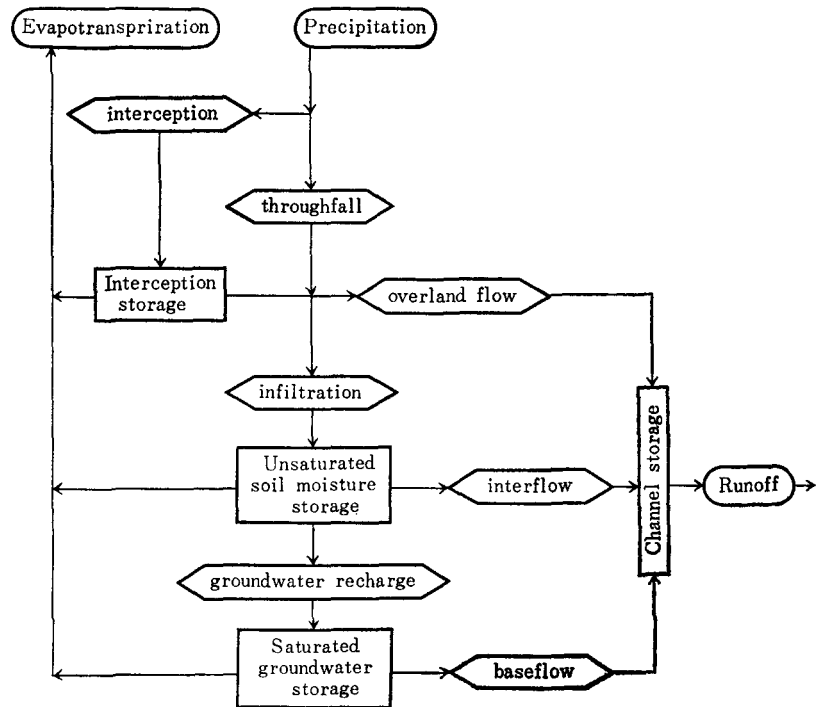


図1 水文循環の系統的表現 (Freeze, 1974)

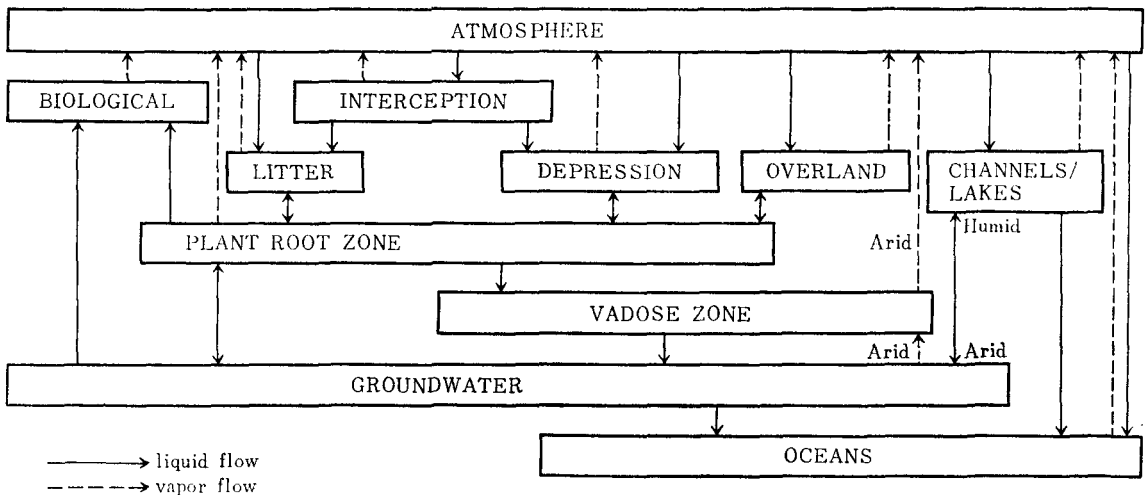


図2 流域内の水の流れの系統的表現 (Chapman, 1986)

表 1 傾斜した土地における水の滞留時間
(Chapman, 1986)

	水深(mm)	平均滞留時間	水平移動距離
大気	25	8~10日	—
遮断	0.04~5	<数時間	<数m
落葉層	2~7	1~4週間	<数m
植物	5~50	時間~日	<数m
窪地	0.2~40	分~時間	<数m
地表流	1~10	3~30分	0.5~50m
水流と河川	3	週	1~100km
植物の根帯	5~500	1~4週間	10~100mm
土壌水帯	10~10 ⁴	数年	—
地下水	10 ⁴ ~10 ⁵	日~10 ⁶ 年	—
湖沼と貯水池	—	月~年	—
海洋	3.7×10 ⁶	28年	—

きわめつくすことを目標とする研究本来の立場に立つと、研究対象は水文循環のプロセスそのものでなければならぬ。

3. プロセス的アプローチ

プロセス的アプローチの目的は、水の流れの物理法則にもとづく定量的記述である。流出現象を例にとると、システムのアプローチでは、そのシステムからの出力としての流量の時系列予測が問題となるが、プロセス的アプローチでは、流出してくる水がどのような経路を経て、どれだけの時間かけて流れてきたかが問題にされる。蒸発散でも、流域から失われる水蒸気の総量が問題であることのほかに、それがどのような時・空間分布で失われるかも問題にされる。つまり、プロセス的アプローチでは、水文循環のメカニズムを問題にする。そのことにより、システムのアプローチではせいぜいグレイ・ボックスの段階で止まっていたシステムの理解を、透明な箱にまで近づける(ように努力する)。

システムのアプローチの最大の長所は、それに成功すれば、水の流れに熱や物質の流れをのせることができる点にある。わが国では、水資源問題はすでに量から質へ変化している。環境中の特定地点を特定時間に通過する水の質をあるレベル以上に保つにはどうすればよいか?これが環境問題の基本である。その解決には、水文循環へのプロセス的アプローチが不可欠である。現在、世界の水文研究の中心はphysically-based process-orientedな研究へと移っている。

プロセス的研究は、当然のことであるが、単純な系から複雑な系へとその対象を変化させてきた。地下水を例

にとると、均質・等方性・定常系から不均質・異方性・非定常系へと変化してきた。その変化につれて、初期の単純な系では有効であった数学的システム解析技法の適用も、次第にむずかしくなってきた。たとえば帯水層のパラメータ群を求める逆問題を考えてみると、前者の単純な系では完全に解けるが、後者の複雑な系では解けない。数学的技法を高度化してそれを可能にしようとしても、その系の入・出力である、涵養量や揚水量あるいは系の状態を表わす地下水位などの基礎データの精度が不十分であるため、実際には解けない。

そのためのプロセス的アプローチでは、現状では、もっぱら観測にもとづく実証的研究が中心になっている。水資源問題や環境問題に対処するためには、プロセス的アプローチで得られた成果がシステム構築にフィードバックされ、新たなモデルの開発へと進むことが必要になるのではなからうか。

4. 蒸発散の役割

流域単位の入・出力システム解析では、蒸発散は大気への水損失として扱われる。流域から流出する水だけが水資源開発の対象であるとする、

$$\text{有効水資源量} = \text{降水量} - \text{蒸発散量} \quad (3)$$

となる。この有効水資源量(仮にこう呼んでみた)を水資源賦存量と呼ぶ場合もあるようであるが、賦存という言葉は日本語としていかにもあいまいである。

式(3)の考えに立つと、有効水資源量を増やすには、降水量を増加させるか、蒸発散量を減少させるしかない。前者の方法として人工降雨があるが、いまだその効果については、評価が定まっているとはいえず、乾燥地域では“水蒸気の所有権”について、風上側の地域と風下側の地域との間で争いが生じているとも聞く。

蒸発散量についてはすでに長年の研究によって、森林を草地などの他の植生に変えれば、年間に100~200mm程度の減少が、すなわち有効水資源量の増加が生じることが明らかになっている。水利用税(?)だったかが問題になったとき、森林は果たして水源を涵養しているのかと問題にされたのはそのためである。乾燥地域では、植生を減少させて有効水資源量を増やすことを水のharvestingと呼んでいる。

しかし、蒸発散については、それを水損失と呼ぶべきか否かについて十分に考えてみる必要がある。式(3)を認めれば確かに蒸発散は損失であるが、蒸散は植物生理の不可欠の条件である。国土に森林の存在が不可欠だと

すれば、蒸散もまた国土保全に不可欠の水利用である。ここで式(3)の有効水資源量という表現がおかしいことが明らかになる。

前述した水利用の本質を思いだしていただきたい。それは、水文循環システムに水利用システムをはめ込み、そのことにより便益を引き出すことである。森林によって何らかの便益が得られているとすれば、森林から蒸散も水利用の一形態ということになる。森林の存在そのものが、人工林・天然林を問わず、人間の生存にとって不可欠なものであるとしたら、森林からの蒸散もまた不可欠なものである。それを“水利用”と呼ぶか“水必要量”と呼ぶかはこれからの問題である。

5. 貯留システムとしての地下水と氷雪

わが国では、総水利用量に対する地下水の比率は16～17%だったと記憶している。地下水の果たしている役割は低いようにみえる。しかし、これはあくまで水利用を、利水システムによって水文循環から“もぎとった水”に限定して用いた場合の話である。蒸発散についての議論で明らかのように、森林からの蒸散が、国土保全のために不可欠な水の流れだと認めれば、それもまた森林のための水利用ということになる。

かつて筆者は、水利用の新分類として、1次的水利用、2次的水利用、3次的水利用という分類法を提案したことがある(梶根, 1977)。1次的水利用とは、水文循環の過程にある水をそのまま利用する方式で、舟運、水産、レクリエーションなどを含む。2次的水利用とは、たとえばわが国の水田灌漑のように、取水には施設を必要とするが、利用後の水は未処理のまま自然界にもどす方式をいい、水力発電、溜池での養殖、半人工的なレクリエーション施設などがこれに当たる。この方式の水利用では、水は利用される過程で水文循環とつながる。3次的水利用は、水文循環から水をもぎとる水利用方式で、工業用水や都市用水がこれに当たる。利用後の水はエントロピーが増大している(環境水に比べて水質が悪化している)から、未処理のまま環境中に放出すると深刻な環境汚染が生ずる。

このような分類に従うと、森林は1次的水利用の典型である。一昨年あたりから、国土庁は水資源白書で“環境用水”という言葉を用いはじめた。その説明を昭和62年度水資源白書から引用しておこう(国土庁, 1987)。

“親水性、良好な景観、レクリエーション空間の保全・創出または動植物および歴史的文化的遺産の保護・保

存等の観点から、人工的に水を流したり、蓄えたり、浄化することが望まれるようになり、その具体化が各地で推進され約300件に達する事業が行なわれてきている。このように水をめぐる環境を新たに創造したり、保全または改善することで、水は、われわれに潤いとやすらぎを与え、情操を育くませる場を与えてくれる。このような目的に使われる水を総称して「環境用水」という。

環境用水は、生活用水、工業用水および農業用水と異なった性格を有する用水であるが、これらの用水を開発・供給および利用するさい、その用水の本来目的とともにその環境機能が発揮されることが多い。

わが国でも1次的水利用や2次的水利用に伴う環境維持機能について関心が持たれたことの証である。

河川は、基本的には線的な排水・輸送システムであり水の貯留機能はわずしかもたない。これに対して、地下水と氷雪は大きな面的な広がり大きな水貯留機能をもつシステムである。1次的、2次的水利用や、環境用水を考える場合には、地下水や氷雪は河川以上に重要な水資源となる。これまで地下水利用は地盤沈下の張本人であり、氷雪は災害のもとと考えられる傾向があった。しかし今日の立場に立って考えなおしてみると、地下水も、そして氷雪も、ともに貴重な水資源である。そして、これらの水については、発想の転換によってこれまでと異なる利用が可能になると考えられる。そのとき、水文循環に関するプロセス的理解がこれまで以上になるはずである。

参考文献

- 梶根 勇(1977): 水資源——水を知り、自然を知る。日本の科学と技術, No.187, 16—20.
- 梶根 勇(1980): 水文学。大明堂, 272p.
- 国土庁長官官房水資源部編(1987): 日本の水資源——その開発、保全と利用の現状。——大蔵省印刷局, 250p.
- Chapman, T. G. (1986): Comparative hydrology ——Philosophy and analytical approach. 17p. (MS).
- Freeze, R. A. (1974): Streamflow generation. Rev. Geophys. Space Physics, 12, 627—647.