

2.2.3 水文モデル

(1) 水循環モデルにおける水文モデル

地球表層をめぐる水循環のモデリングにおいて、水循環を含めた大気の流れを担当しているのが大気モデル、海洋の循環を担当している海洋モデルに対して陸上での水の流れを担当するのが水文モデルである。しかしながら、大気大循環モデルでは、大気下部の境界条件として陸面との摩擦による運動量の変化、陸上での太陽エネルギー等の反射量や陸面が大気をどのくらい直接暖めるか、あるいはどのくらいの蒸発や葉からの蒸散があるか、といった量を知ることが計算上必要であり、それらの量は大気条件によって変化するので、両方が影響を及ぼしあいながら変化していく様子（フィードバック）を考慮しつつ将来変化を算定するのが、特に数週間～数ヶ月以上先の気候状態について算定する場合には必須であり、なんらかの形で水文モデルが「大気」大循環モデルに組み込まれていることが多い。

大気にとっては海洋も下部境界条件として重要であるが、大気に影響を及ぼすような空間スケールに関しては海洋表面の状態量である海面水温などの時間的变化は比較的小さいこと、また、陸面に比べると空間的不均一性が小さく曲がりなりにもグローバルな観測値が推定されてきていること、一方で海洋循環の計算負荷は大気よりも一般に大きいことなどから、過去の再現計算等に関しては海洋上の条件を観測値や気候値などで与え、大気と海洋とを同時に計算（カップリング）しない場合も多い。これに対し、陸面に関しては、主要な状態量である地表面温度や土壌水分量、積雪水量等に関する精度の良いグローバルな観測値や推定値もなく、反面、海洋に比べると計算負荷も圧倒的に少ないため、大気モデルと切り離されずに用いられるのが普通である。その様に、大気モデルの一部として開発されてきた水文モデルは陸面モデル（land surface model）あるいは、大気モデルの中の雲と降水過程や放射過程と同様に陸面スキーム（land surface scheme）と呼ばれる。

一方で、陸上の水循環研究において、大気モデルを意識せずに開発されてきた水文モデルも数多くある。本来水文学は、陸上の水循環に限らず、化学的過程、生物や人間活動との相互作用を含めて地球上の水の物理的循環の全体を扱う学問であるが、狭義には、雨水や融雪水が土にしみ込んで川を流れ下る流出過程を指すことが多く、水文モデルといえば、多くの学問分野でその流出過程のモデルのことを意味する。ここでは陸面モデルと区別するために、そうしたモデルを流出モデルと呼ぶことにする。陸面モデルでは、どちらかといえばエネルギー収支を精確に算定するため水収支を算定する、という立場であるのに対し、流出モデルでは、水の量の推定（再現）精度向上に重点が置かれる。水の質に着目するモデルもあるが、それらは水質モデル、と呼ばれて、逆に、量的な再現に研究の主眼が置かれない場合も多い。ただし、水の量の時間変動の再現精度が良くても、流出モデル内での物理過程の表現が適切であったかどうかの判断は難しいため、溶存化学物質や、水の安定同位対比などによっても流出モデルの適否を判断しようという研究は昔から盛んである。ただし、水の質と量を同時に表現するモデルになると、質に関する過程のモデル化の適否も加わり、さらに質に関する初期条件、境界条件なども適切に与えないとモデルの不確実性を増すだけになる恐れもある。

地下水は土壌水分と共に流出過程に重大な影響を与えている。しかし、地下水の流れを物理的基礎式に基づいてその3次元あるいは2次元的な流れを数値的に解くモデルは地下水モデルと呼ばれ、水文モデルでは、地下水を陽に表現するにしても各格子における地下水位と

いう 1 パラメータで簡易に表現されている場合が多い。

地下水の他にも、通常の陸面モデルや流出モデルの範疇では取り扱われない陸上の水循環過程もいくつかある。第一は湖である。地球規模の水循環モデルでは大きな湖は閉鎖している海洋として取り扱われることが多く、水平方向の流動は考慮されず、単層あるいはごく少数の水の層に分割されて、エネルギー収支のみが考慮されるのが普通である。ただし、空間解像度の高い大気モデルによって湖が複数の升目で表現され、湖周辺の気象状況が湖面水温に敏感な場合には、水温の鉛直成層が詳細に算定されたり、湖モデルとして湖の水収支が考慮されたりする場合もある。

また、降雪が生じる地域用に適用される水文モデルでは何らかの形で積雪～融雪過程が表現されるが、氷河上でのエネルギーや水の収支、あるいは氷河の流動を表現するモデルは氷河モデルとして、水文モデルとは別途開発利用されるのが普通である。

まとめると、水文モデルとは、観測、もしくは大気モデルによって計算される降水量や地表面に到達する下向きの放射エネルギーによって、陸面での水循環と水収支、エネルギー収支がどうなるかを算定するモデルのことである。河川水温の予測目的以外では、陸面での水循環に伴うエネルギー循環が議論されることはあまりない。

いずれにせよ、水文モデルの大きな特徴は、水の流れを扱っているにも関わらず、運動量の移流を考慮しない点にある。これは、地下水の流れを筆頭に、土壤中の流れ、あるいは樹木中の流れも、摩擦の影響が大きく、圧力勾配等の外力とある流速に対応した摩擦がほぼつりあった状態で現象が推移しているとみなしても良い場合が水文モデルでは多い、ということである。これはとりもなおさず、流れの境界条件、場の状態を知ることが水文モデルでは非常に大事だ、ということに繋がっている。

なお、河道流下計算では運動量の移流が考慮される場合もあるが、そうしたモデルは河道流下モデルと呼ばれて水文モデルとはやはり一線が画される場合が多い。

以下では水文モデルを大きく流出モデルと陸面モデルにわけて紹介する。

(2) 流出モデル

流出モデルでは、河川計画等のためにピーク流量を求める経験的手法や、観測値をリアルタイムで用いて予測誤差を修正する確率過程的手法と区別するため、物理的モデルであるかどうかはまず議論されることがある。物理数学的基礎式に立脚しているかどうかで物理的モデルかどうか判断されることもあるが、基本的な物理法則を破っていないモデルが物理的流出モデルであると呼ぶのが適切であろう。たとえば、質量や運動量、エネルギーなどの保存則、万有引力の法則などに反するモデルはあまり物理的であるとは言えない。現実には、流出モデル中で使用されるパラメータに一般性がある場合に物理的であると呼ばれることが多い。実験室内や野外で厳密に測定できるパラメータには一般性があると考えられるし、経験的にしか求められない場合でも、流域ごとに大きく異なることがなく、流域のサイズや土地被覆、地質などから推定できる場合には一般性があると考えられる。

ちなみに、物理モデル (physical model) とは、室内の実験室で用いる縮尺模型を差すのが本来である。“物理法則”を計算機の中で数値的に模擬することの多い物理的流出モデルと異なり、制御も難しいがこちらは発見的な研究ができるかも知れない。

では、流出モデルで何ができるのだろうか?それは、流出現象の理解、また(河川)計画に

必要な流量、そして過去の再現と将来の予測である。それは、古典的な流出モデルでも最新の流出モデルでも基本的には同じである。

伝統的な流出モデルは、主に河川洪水計画あるいは実時間洪水予測のために構築、利用されてきた。特定の洪水のみを対象とする場合が多く、その場合豪雨データから数日間のみの流量を算定することになり、降水のうち蒸発や浸透などになる分は降雨損失としてあらかじめ観測降水量から差し引いて、残りの有効降雨を入力として与えることになる。

中小都市河川、下水道設計などに用いられる合理式は、洪水到達時間内に降った雨水がすべて一定速度で基準点に集まってくるとしたらどの程度になるか、という考え方が基本となっている。洪水のハイドログラフではなく、ピーク流量だけが推定される点に工学的特色がある。

単位図法は 1932 年に Sherman らによって提案された流出モデルである。単位図法のアイデアは、降水強度に比例する流出ハイドログラフ (unit hydrograph) が存在すると仮定し、降水強度の時間変化をパルス列とみなして、それに対応する unit hydrograph の畳み込み積分によって流出量が表現できるというものである。現実の観測データから、各流域固有の unit hydrograph を求める必要があり、unit hydrograph 中に負の値が生じたりする問題が生じることもある。unit hydrograph は物理的には集水域内の各地点からの到達時間遅れを表現していると考えられるが、線形応答であるという点に違和感を覚える研究者が多い様である。

貯留関数法は、現在国土交通省の現場で非常に一般的に利用されている。貯留関数法のアイデアは、流出高は流域に蓄えられている貯水量の一価関数で表されると考え、これに、質量保存 (連続) の式を連立させて解く。遮断や浸透による損失は当初から考慮せず、有効降雨と呼ばれる洪水流出に直接寄与する分を入力として用いる。パラメータの設定によっては線形モデルとなるが、一般には洪水ごとに観測流量と雨量から 2 つのパラメータを定めることが行われ、また、計算が容易であることから実時間予測などにもしばしば利用される。

等価粗度法では、まず、流域を長方形斜面であると考え、斜面方向に水深が変化する流れが生じて洪水をもたらすと考えて運動方程式を Kinematic wave 方程式で表す。流速が水深のべき関数で与えられるとすると、有効降雨が時間的に一定な場合には特性曲線法と呼ばれる手法で解析的に解くことが可能であったため、計算機が自由に利用可能となる以前から用いられてきた。また、河川水の河道流下も全く同じ形の方程式で表現することができるので、水理学的な美しさもあって Kinematic Wave で洪水をシミュレートする研究が数多くなされてきた。現在では流域を複数の長方形流域に分割し、数値計算によって解くことが行われている。土地変更の影響などは流速式で利用されている粗度の変化として表現することができる。

タンクモデルは菅原正己が考えたもので、線形のタンクを縦列に並べ、さらにタンクの底だけでなく、それぞれのタンクのある高さにも適宜流出孔を設けて流出現象の非線形性を表現したものである。初期には、実際に実験室内でタンクにみたてた容器を置いて水を入れて実験をしたりもしたが、最近ではもちろん計算機で数値計算される。流出孔の高さや係数は試行錯誤で決定されるが、自動化や、決定のための指針も提供されている。

イメージの湧きやすさや数学的な単純さなどから世界でも広く用いられ、各種の工夫を施したタンクモデルが提案されているが、流出係数や孔の高さ、タンクの高さなどのパラメータの一般性に対する不信から、物理的流出モデルではないと見なされることもある。

Kinematic wave 法にせよ、タンクモデルにせよ、解析的にも解く事ができる数式で表されるかどうかは別にして、流域を平板斜面の集合と考えるか、いくつかの穴あきタンクの塊だと考えるか、という違いだけで、どちらも特徴的な物理的なイメージがある。しかもどちらも物理法則に反しないという意味で、どちらも物理的モデルであると言って良いであろう。また、多くの流出モデルは両者いずれかに立脚していることが多い。

しかし、(斜面における) 土壌中の水の移動に関し、実験室内で確かめられる様なより厳密な物理的方程式に立脚して水の移動をシミュレートしたい、という機運が 1970 年代以降高まってきた。そうした場合には、河川流域を正方形メッシュや三角形要素、サブ流域などに区切って、その要素ごとに土壌浸透能や植生分布などの物理パラメータを当てはめて計算することになるので、そうしたモデルの多くは分布型と呼ばれる。これに対し、流域全体(平均)のパラメータしか持たない流出モデルは集中型 (lumped) と呼ばれる。

分布型流出モデル自体は必ずしも物理的であることを意味しないが、通常は浸透・流下方程式、植生過程、地下水などについてそれぞれ物理数学的方程式をたて、それらを数値的に解くことが行われる。必要な物理パラメータはリモートセンシングや地図などから得られる情報に基づいて決定され、地形はもちろん数値地図 (Digital Elevation Map; DEM) から構築される。分布型流出モデルを有効に利用するためには入力である降水量や太陽放射なども面的に与える必要がある。

分布型流出モデルは、パラメータや入力データの推定、準備などに手間がかかる上、物理パラメータは必ずしも面的に得られないことが多いのが問題点である。計算時間も膨大であるが、10 万km²程度の流域なら現実的にシミュレーションをすることも可能となっている。また、分布型流出モデルでは洪水氾濫に伴う水深分布なども再現するようのできる。被害推定や浸水地図作成、あるいは治水/浸透施設構築に伴うそうした被害の軽減などをシミュレートすることができるのは今日的に非常にメリットが大きい。降雨分布の移動が考慮できる点も長所の一つである。

計算機の発展がどんどん進むとしても、効率性を考えると、分布型流出モデルや大気用の地表面モデルではある程度大きなグリッドで流域を区切って計算することになる。しかし、そうしたある程度の大きさを持つ領域内では、

- ・ 土地被覆、植生、土壌など地表面パラメータの分布 (同じ単位面積内での土地被覆の不均一性)
- ・ 同じ土壌タイプ・植生被覆内での浸透能の違い (“同一”土地区分内での不均一性)
- ・ 降水量や放射量の不均一性 (外力データの不均一性)

などが現実には存在する。こうした不均一性をいかに扱っていくかが自然科学的な水文学では一つの課題であり、すでにいくつかの提案はなされているが今後まだまだ検討の余地がある。

地形に起因する不均一性の取り扱いに関して、水文学分野からのアプローチとしてもっとも成功を収めつつあるのが TOPOMODEL (a TOPography based hydrological MODEL) である (Beven 1979)。このモデルは、流域をグリッドに分割した際の、各グリッドにおける地形指標を傾斜と集水面積、浸透能により定義し、さらに透水係数が深さとともに指数的に減少していくことを仮定することによって、例えば流域全体の平均土壌水分量と、各ピクセルの土壌水分量とが、流域平均の地形指標と、平均土壌水分減少にともなう平均透水係数

減少を示す唯一のパラメータとで解析的に表現される様なしくみとなっている。土壌からの流出に関しても同様に流域平均土壌水分量の一意関数として表現されている。

TOPMODEL が世界では最近広く使われるようになった背景として、デジタル標高データやリモートセンシングによる表層土壌タイプ等に関する流域内の分布パラメータが細かい空間スケールで得られる様になったため、従来手作業で行なわれてきた地形指標の算出が自動的にこなせる様になってきたことがあげられる。しかし何よりも、流域平均土壌水分量と各ピクセルの土壌水分量が結び付けられ、これによって流域内の土壌水分量の分布を考慮しつつ物理的機構を反映して流出量や蒸発量の算定などに結び付けることができる点が多くの水文学者に受け入れられた長所であると考えられる。

いずれにせよ、均質な地表面特性（植生・土壌）を持つ流域内に不均一を引き起こす主要因は地形であり、また逆に、地形は比較的長期間変化しないため、地形情報を巧みに利用した TOPMODEL の有用性は高い。

一方で、次に述べる陸面モデルに不均一性を導入する手法もある。陸面モデルは気候変動などを予測する大気大循環モデルに利用されるため、グリッドサイズが 50km~300km 程度四方と大きく、グリッド内の不均一性を考慮する必要性は高い。グリッド内に混在する代表的な土地被覆（利用）数種類ごとに水循環、エネルギー循環を算定し、その面積平均をそのグリッドからの蒸発量等とするモザイク法（Koster 1992）等が主流である。また、外力のグリッド内不均一性については、特に降水量の影響が顕著なので、大気大循環モデル等で区別して表現されている対流性の降水と層状性の降水とで、後者はグリッド内に均等に降るが、前者については例えばグリッド内の 10%の面積に集中して降る、等の取り扱いをされることが多い。同じ土壌タイプでも地形等により生じる不均一性の取り扱いについては、上記 TOPMODEL 的メカニズムを考慮することなどが検討されている。

（3）陸面モデル

陸面モデルは大気モデルの一部として陸面過程を表現するために開発利用されてきたモデルである。大気が必要な下部境界条件は、上向き放射量、運動量フラックス（摩擦）、直接最下層の空気を暖める顕熱フラックス、そして蒸発散量などであり、陸面モデルは大気から放射、気温、湿度、風、降水量など（陸面モデルの外力と呼ばれる）を与えられて、温度や含水量などの陸面モデルの内部変数に応じてそれらの水やエネルギーを配分し、放射、運動量、顕熱、潜熱、そして場合によってはCO₂などのフラックスとして大気下端に輸送される量を算定する。

現在でも使われている陸面モデルは大きくバケツモデル、生物物理 (Biophysical) モデル、生物化学 (Biochemical) モデルの三つの種類に分けることができる (Entekhabi 1995, Sellers et al., 1997)。

バケツモデルは 1960 年代に開発されたもので (Manabe et al., 1969)、単純でありながらもパラメータが極めて少ないため良く使われている。しかし、植物被覆面の特徴は無視されているという問題がある。

生物物理モデルは 1980 年代に開発されたもので植物被覆面を表すための単純なスキームが含まれており、Simple Biosphere Model (SiB; Sellers et al., 1986) や Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS; Dickinson et al., 1984) 等がこれに含まれる。これ

らはバケツモデルに比べて植物被覆面の熱フラックスがより現実的に表現されているため、GCM に SiB を結合し、全地球規模のシミュレーションを行なった結果、バケツモデルを使用した GCM よりも高い精度で地球規模の諸現象を予測することができるようになったとされる (Sato et al., 1989)。

生物化学モデルの最新スキームである Simple Biosphere Model 2 (SiB2; Sellers et al., 1996) は、植物群落による二酸化炭素と水の伝達過程 (陸面から大気) をより現実的に現すための光合成・気孔抵抗スキームが含まれており、植生の季節変化を考慮するため人工衛星データ (normalized difference vegetation index: NDVI) を利用していることに特徴がある。さらに、陸面と土壌中の水文学的水循環と、雪面における融雪過程をより現実的に表現している。上記のような新たなスキームが組み込まれている SiB2 を GCM と結合することで、より正確な地球規模の諸現象を予測することが期待されている。

陸面モデルは GCM に組み込んで使うのみならず、グローバルなエネルギー・水収支や物質循環の算定、野外観測データの品質管理、衛星データからの地表面水文量推定などにも使われ始めており、そういう意味からも、広く研究者が陸面モデルを理解して利用できる環境が望まれていると考えられる。

現在は気候気象分野の陸面モデル (LSM) と水文分野の流出モデル (HM) とは乖離しているが、近い将来両者は統合されて、地表面での水循環、エネルギー循環、植生過程などを統合して取り扱うモデルとなると期待している。植生における光合成や放射過程のみならず、窒素等の物質循環、あるいは植生の成長や長期の気候変動に伴う植物種の変遷等も数値モデル化しようとしている LSM は一方で流出に関わる水文過程が他のプロセスと比べて充分適切にモデル化されているとは言いにくい状況にある。他方、HM では、分布型流出モデルでも、エネルギー循環に関する取り扱いは不十分で、植生の取り扱い方などにも改良の余地がある。LSM の水文過程を改良して、流出解析にも利用できる様にする方が、HM を改良して大気数値モデルの下部境界条件用モデルとしても利用できる様にするよりも適切であると個人的には思われる。

実際、大陸河川の月単位の流量推定といったスケールでは、LSM の一種である SiB2 で 1 度グリッドごとの流出量を推定し、単純な河川流路網で河道流下計算を行なうことによって特にパラメータのチューニングなしに河川流量推定が可能であることが示されている (Oki et al., 1999)。

今後は、どのくらい細かい空間スケール、時間スケールでの水文流出解析用にそうした LSM を適用可能であるかどうかを調べるとともに、平均気温と降水量、等、比較的入手が容易である観測値だけに基づいても水収支を算定可能な HM に対して、毎時の下向き放射量や湿度等、必ずしも面的に得ることが容易ではない観測値を必要とする LSM に対し、どの程度適切に外力データを準備できるかどうか等の研究も必要である (Oki et al., 1997)。

もちろん、HM を LSM に近づける研究もあり、その中でももっとも成功しているのは VIC (variable infiltration capacity) モデル (Xu et al., 1994) であろう。VIC は、中国で開発された Xinanjiang (新安河) モデルにアイデアを得、流域内の浸透量分布を、TOPMODEL の様に地形情報に基づいて与えるのではなく、ごく少数のパラメータでアприオリに与えてしまう点に特徴がある。具体的には、流域の中における最大浸透能の分布を簡単な式で与え、表層が飽和していなくても表面流出が生じる仕組みを表現している。その他は既存の LSM や

HM で利用されているような遮断蒸発量、地下水流出、積雪過程等の要素モデルを組み合わせ、HM としても LSM としても利用可能なモデルとして現在でも開発が続けられている。

いずれにせよ、気象・気候と水文に植物生理・生態学を加えたこの分野は世界的にみても現在急激に発展しつつあり、そこで得られた成果は、地球温暖化の予測やその環境・水資源への影響予測のみならず、チューニング用実測データが不足している河川に対する流量予測等、工学的応用にも役立つと期待されている。

(4) 分布型水文モデル

概念モデルとしてまったく新規というわけではなくとも、計算機技術の発展に伴い、流出モデル、陸面モデルともに変革を遂げている面がある。ひとつには、大きな河川流域をサブ流域や格子で区切り、そうした細かい部分に流出モデル、あるいは陸面モデルを適用して流出量を算定し、河川網情報と河道流下モデルを適用することによって大河川、大流域の流量を算定する、いわゆる分布型モデルの開発がそれにあたる。大気の運動方程式を解いたり、斜面土壌内の水の流下過程を解いたりする場合には、元となる方程式系と区切る解像度との兼ね合いで、表現できる物理過程が変わってくるが、そうした分布型モデルにおいては、**representative elementary area** といった概念が検討されているものの、少なくとも、物理過程や方程式系の制約で空間解像度が決められているわけではなく、むしろ、計算機資源や降水量などの外力、あるいは土壌パラメータや土地被覆情報といったモデル計算に必要な情報の制約によって決められていることが多い。空間解像度のみを細かくしても結果に大差がなければよいと判断されたり、土地利用変化が流出に及ぼす影響といったモデルの目的が達成されれば良い、と考えたりされているのが現実的であろう。

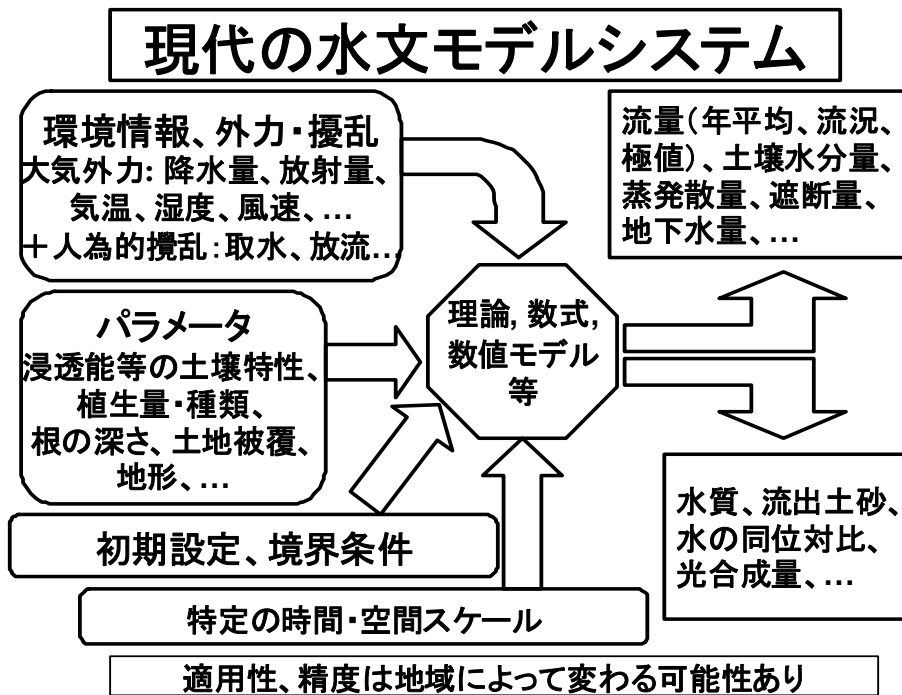
学問的には、現在そうして半ば恣意的あるいは経験的に決められているいわば”水文現象の空間的基本単位”を定めることも、大きなチャレンジであると考えられる。

複数のモデルを組み合わせるとより現実に近づいてよいシミュレーションが可能になる、という幻想をいだくことは珍しくないが、逆に、例えば、分布型モデルの様に、流出モデルと、河道流下モデルを組み合わせた場合、流出のみを検証することが容易ではないので、最終的にシミュレートされた流量に不具合がある場合、どちらのモデルに瑕疵があるのか判然としない、という難しさもある。地下水をモデルで陽に表現している場合も含め、できるだけ、各部分で検証可能なようにシステムとしてのモデルを構築することが必要だと考えられ、また、そうした検証が可能な観測を考案することもモデル研究のブレイクスルーにつながる事が期待される。

(5) システムとしての水文モデル

モデルは、モデル単体では動作しない。初期条件、操作可能な内部パラメータ、外側からモデルに与えられる擾乱や外力、などが不可欠である【図 1】。

従来の流出モデルにおいて、洪水流の再現精度を向上させるためにパラメータの最適化を行うということは、操作可能な内部パラメータを（工夫しつつ）様々に変化させてもっとも適合度の良いものを選ぶという作業であるし、洪水や渇水の予測は初期値ならびに今後の降水量等の外力等を与えてモデルの振る舞いを得るという作業である。広い意味での水文モデリングシステムという概念には、いかにしてこうした初期値、パラメータ、外力の適切な値



【図1】外力、パラメータ、初期・境界条件を含めた水文モデルシステムの概要

を準備しモデルに与えるか、も含まれるのである。そういう意味でいうと、必要な外力が大気モデルからすべて提供されるという前提で開発が進められてきた陸面モデルに対し、流出モデルでは、必ずしも観測が十分ではない地域に対しても必要に迫られて答えが欲しいという場合にも、降水量と気温のみ、といった限られた情報から水収支、あるいはエネルギー収支さえも推定できる様な研究が蓄積されている。それらを経験式だと切り捨てるのではなく、シンプルな関係に隠された物理的メカニズムを探ることや、うまく利用して観測の少なさを補う研究も今後は意義深いものと思われる。

また、数値実験による結果は実際の観測結果とつき合わされ、モデルと観測の両者の誤差が考慮されつつ比較検証され、モデル化における仮説設定が妥当であったかが吟味されて、結果として現象の理解や外界挙動の定量的な振る舞いが把握されることになる。ここで、水文モデルを数値モデルや物理モデルなどそのコアの部分だけではなく、【図1】の様なシステムとして捉えると、水文モデルシステムが自然の観察結果をうまく説明できなかつたり、定量的な精度が悪かつたりする場合には、狭義の水文モデル部分だけではなく、外力、パラメータ、あるいは初期条件や境界条件が不適切ではなかったかを疑う必要があるし、そもそも、仮定した概念モデルが、対象とする時間空間スケール、水文気候学的な地域に適用可能であったかどうかを吟味する必要もある。さらには、抽象概念の数式への記述までは良くとも、具体的な数値水文モデル作成の際に、意図しない過程が離散化によって組み込まれてしまう場合もありうることに留意すべきであろう。

(6) これからの水文モデル

さて、まず、今後の流出モデルはどうなっていくのであろうか。従来は、とにかく、ある確率規模の豪雨が生じた際に、どの程度の洪水が生じるのかを算定することが工学的な流出

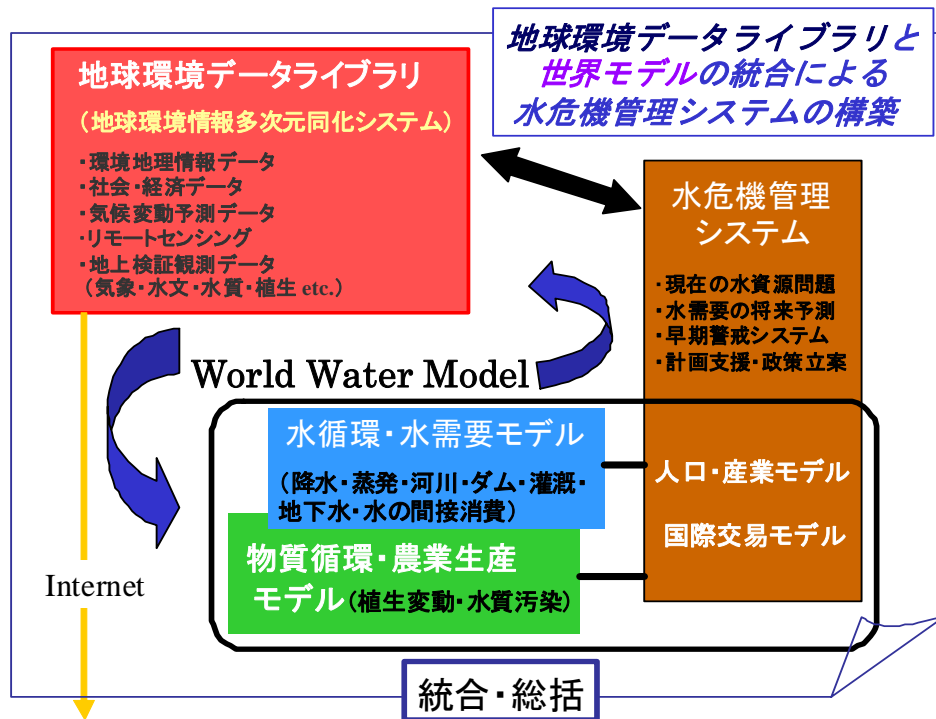
モデルに課せられた目的であった。また、観測データが雨量と流量しかなく、流域の土地被覆など面的情報は実質上利用できなかった。これに対し、リモートセンシング技術の発達と、大量のデータを処理し、膨大な数値計算も以前に比べると飛躍的に容易にできるようになった現在、従来の流出モデルに固執するのは怠慢というものである。

繰り返しになるが、モデルを構築するというのは、何か表現したい現象があって、それに対して重要だと考えられる部分のみを自然界から抽出するということである。では、これから考えた場合、何を流出モデルで表現したいのであろうか。

- ・ 洪水：もちろん洪水シミュレーションと予測の重要性は変わらない。しかし、流域の土地利用変化や開発に伴う流出過程の変化をきちんと表現できること、あるいは、洪水調整池など治水施設の効果を取り込むことができることが重要である。
- ・ 低水：洪水はあっても年に数回、数日である。しかし、河川環境の重要性が強く認識され、その保全が国家事業の対象となっている現在、普段の河川流況を適切に表現できる必要がある。これには水の量だけではなく、質の問題も重要である。
- ・ 蒸発・蒸散：従来の流出モデルは大気からの降水を入力として流量を計算するだけであった。これに対し、天気予報や温暖化予測などに用いられている大気の数値モデルには、陸面に於ける水やエネルギーの交換を表現するサブモデル（陸面モデル）が組み込まれている。当然そのサブモデルでも河川流出は取り扱われているが、河川流量が計算されるようになったのはつい最近である。この目的のためには、地表面が受け取った太陽エネルギーがどのように配分されて大気に返っていくかに主な焦点がある。
- ・ 地形：地形と流出過程にはもちろん緊密な関係があり、その表現、再現、も非常に興味深い。
- ・ 物質輸送：河川は水とともに土砂や栄養素を海へと運んで地球環境に対して非常に重要な役割を果たしている。流域内でのそうした物質の発生と移動を的確に表現することが今後の地球環境変化を考える上で必須である。

これらは流出モデル、あるいは陸面モデルも含めたこれからの水文モデルで表現され、実現されていくことであろう。また、【図1】の様に、水文モデルシステムとしてとらえると、外力として重大な変化が予想されるものがあれば、それを予測することも水文モデルシステムの一部であると言える。実際には個々の学問分野のモデルを利用するにせよ、例えば50年後の水需給を推定するためには、人口増減、経済発展、産業・エネルギー構造の変化、もしくは日々の天気の変り変わり、気候の年々変動、異常気象、さらには地球温暖化等に起因する水循環の変化を推定することが必要であり、そうしたモデルや、データベースとの連携が水文モデルシステムには重要である【図2】。

洪水や渇水を含む河川流量、土壌水分等の陸面水収支などが水文モデルによって算定されると、水災害（洪水・渇水）や土砂災害のリスク、水質変化、生態系への影響、影響を最小に軽減するために必要な水管理施策などに関する情報が提供可能となる一方で、水文モデルが大気モデルあるいは気候モデルと結合する様になると、砂漠緑化や灌漑農業、大規模な分水導水、あるいは貯水池建設といった人間活動が陸面の水循環を変化させ、大気へのフラックスが変化することによって降水量を含む水循環が変化するという大気陸面相互作用についても今後よりの確に予測することが可能となるに違いない。



【図2】物質循環モデルや水需要モデル、農業生産モデルなど人間活動に関連したモデルやデータベースと結びついた水管理モデルシステム概念の例

現在の水文モデルをめぐる状況の特徴は、その学際性にある。環境（生態系）、防災、資源、保健衛生（健康）といった分野の予測・環境アセスメントのために必要な水循環に関する情報を提供することが求められているし、逆に、そうした他分野の予測・環境アセスメント結果を利用して、それらの変化が将来の水循環、水資源需給に及ぼす影響を事前に把握し、対応策を提言することが期待されている。農業分野との協働としては、単に食料生産に必要な水の量という視点だけではなく、人為起源の窒素負荷も含めた窒素循環を水循環と共に水文モデルで取り扱う方向での挑戦が必要だろうし、地形と水循環との相互作用を記述できる水文地形モデルの構築は、科学的に興味深いのみならず、防災上も極めて有用であると思われる。また、受動的な水循環トレーサーとして、（安定）同位体の循環も水質と併せて水文モデルで取り扱われるようになることが、単に量だけではなく、経路やプロセスといった高次の視点での水文モデルの精度検証に役立つものと期待される。

(7) 今後の水文モデル研究

水文モデル研究の今後の動向としては、前節で述べた水文流出モデルと陸面モデルの融合、学際的な取り組みによる気象、農業、生態系、健康、人口、国際交易といった関連他分野におけるモデル開発研究との交流以外に、技術的な面での大きな革新が期待される。それは、計算機の計算能力のさらなる増大による対象範囲の拡大と空間解像度の増大である。また、通信技術、地球環境観測技術の増大に伴う、取り扱うことのできる水循環の場や水循環そのものに関する観測データの飛躍的な増大である。これらを有効に利用するためには多様なデータのアーカイブシステムや統合的利用システムの構築、モデルと観測データの融合であるデータ同化の推進、さらには得られたデータから有用な情報を見つけ出すデータマイニング、

あるいは必要な水循環情報が検索できる情報ライブラリ、そして、情報を統合して知識に、知識を統合して叡智にできる人材の育成が必要である。また、得られた結果をわかりやすく的確に表現し、研究者と水文モデルの受益者との間のコミュニケーションを支援する表示・表現システムもますます重要となり、そうした情報基盤には、地理情報システムあるいは空間情報システムの発達に寄与するであろう。一方、GEWEX/GAME や CEOP 等を通じて少しずつ実現されつつある水文モデル（システム）の検証データの定期的かつ準リアルタイムでの収集も維持拡大される必要があり、特に現在情報共有の国際的な仕組みすら未整備な社会経済情報に関して今後努力されねばならないだろう。

さらに、水文モデル（システム）研究が今後喫緊に取り組まなければならない課題のひとつに、【図2】に示した様な水循環予測、水危機予測を準実時間で行い、日々観測データで検証して水文モデルシステム全体の精度向上を図る取り組みである。日々の天気予報によって、大気モデルの精度、効率が着実に進歩しているのと同様、水文モデルが目指す社会への貢献を念頭に置いたシステムの構築によって水文モデルシステム全体の精度ならびに効率の向上が期待できる。そうした構築は研究者ではなく日常業務としてそうした任務に当たっている行政官庁に任せるべきだ、という意見もあるだろうが、研究者がプロトタイプを作り、新しいアイデアを試せる情報基盤を作って置き、折に触れてその成果を現業に生かす仕組みを作っておくことが国家的な利益に繋がるものと考えられる。

そうした仕組みによって期待される水文モデルの予測精度は観測と同程度にまで向上し、流量等の水文観測データの同化手法も開発される様になるに違いない。そうした場合には、気候予測で用いられている様な不確実性の表現も大きな研究開発課題となると思われる。

また、水循環の見方や概念モデル化に関しては従来の学術論文による情報発信といった形態で容易にその研究成果を共有することができたが、モデルの構築以降に関しては、概念モデルを具現化した数値計算プログラム等がないと厳密な意味での追試がしにくくなっている。一方で、水文に限らず、モデルを開発すること自体の価値のみならず、それが広く使われることの価値が認められる様になり、水文モデルも開発者が隠匿して優位性を保つ時代から、共同で使う時代へとますます変化していくことだろう。多数の目に触れて、様々な場面に応用されることは、数値モデルの不具合を浮き彫りにして修正する機会が増えることにもつながり、特定の数値モデルだけになることはモデルそのものに起因する不確実性を測る上からはマイナスであるので、常に新たな水文モデルが開発され、広められていくことは大事であるが、いくつかの水文モデルが広く用いられる様になることは研究コミュニティにとっても、社会にとってもメリットが多いと考えられる。

最後に、今後ますます水文モデルシステムは大規模な情報水文学（hydroinformatics）の様相を帯びてくるものと思われるが、これまでの水文学の発展は、むしろ、限られた情報に基づきながらも、経験式や他の学問分野の知識を援用しつつ、なんとか答えを導きだしていた点にある気がする。榎根勇博士は、そうした不確実な情報に基づいて現象を把握理解しモデル化することにより、それがまた現場での観測等にフィードバックされて観測精度が上がって不確実性が少し減り、といった具合に徐々に理解が進む様子を「泥水で皿を洗う」と表現している。すべてがわかっている場合には、何の工夫も不要であり、むしろ情報に制約があるときほど研究はおもしろい。従って、何かが足りないからと言って、水文モデルシステム研究から逃げるのではなく、そういう場面でこそ果敢にチャレンジすることが大事である

う。また、計算機の能力が上がるにつれ、水文モデルをより精緻に現実に近づけようとする努力も払われることと思われる。しかし、現実に見受けられる全ての過程をなんでもかんでも考慮して複雑化することが必ずしも予測精度の向上に繋がる保障はなく、まして、理解の促進にとってはマイナスであることが多い。モデルというものは現実の自然とは異なるものであり、普遍的な取り扱いがあるわけではなく、もしその様に見えたとしたらそれは単に模倣的モデル開発が多くなされているだけであるということを経験し、目的に応じて適切な水文モデルが開発されることが今後ますます期待される。