

## 2.2 地球規模水循環変動予測

### 2.2.1 地球規模水循環変動予測モデル

#### (1) モデル研究の目標

水循環モデルの目的は、気候の変化や水資源需給の変化などに伴う水循環変動を予測し、これらの変動が人間社会に及ぼす影響を最小化するとともに、持続可能な発展を目指した水管理手法の確立に寄与することにある。さらに人間活動が水循環に及ぼす影響の予測も目指す。

#### (2) 大気モデルと水文モデル

水循環モデルの多くは水に関連する物理過程を数学的に記述し、その数値解をコンピュータで求めることを基本としている。水循環モデルは大きく二つに分けることができる。大気中の水循環モデルすなわち気象・気候の数値モデルと、陸域水文モデルすなわち積雪・土壤水・地下水・河川水等を扱うモデルである。大気モデルは天気予報に使われている数値予報モデルに代表されるように、大気の運動・水蒸気の輸送・雨や雪の降水を再現・予測するモデルである。大気モデルと水文モデルは互いに重複する部分を含みながらも、いままでは互いに独立に研究されることが多かった。大気モデルでは大気運動の主要なエネルギー源である地表面からの顕熱や潜熱を求めるため、土壤水分の予測を含むように設計される。しかし最近まで河川水の予測は含まないのが普通であった。一方で、陸域水文モデルは降水や日射量などの物理量は予測せず、観測値を利用することが多い。大気モデルについては2.2.2、水文モデルについては2.2.3で詳しく述べる。

水循環の変動を予測するためには、大気の水循環モデルと陸水の水循環モデルを結合することが必要であり、そのための研究はやっと最近になって盛んになってきた。両者の結合を阻んでいた理由には、水文と大気の現象の水平規模やモデルの空間分解能の違い、物理過程の時間スケールの違い、数値モデルの予測精度の違いなどがあった。これらの問題は数値モデルの進歩とともに、次第に解決されつつある。

#### (3) 短期の予測と長期の予測

水循環の変動が人間社会に及ぼすプロセスは様々であるが、豪雨による洪水など比較的短時間のプロセスと渇水や水資源の枯渇などの比較的長期のプロセスに分けられる。短期的な予測と長期的な予測に利用される水循環モデルは、基本的にはよく似た構造を持っているが、予測の概念は大きく異なっている。災害を中心とする短期の水循環変動に対応する大気モデルは、数値予報モデルを中心とした「気象モデル」である。数値予報モデルでは観測により得られた初期値をもとに、数時間から十数日先の気象を予測する。たとえば降水がいつ、どこで、どのくらいの量であるかを予測する。台風の進路や豪雨の可能性が予測されれば、すぐに災害防止のための警戒がとられる。これに対して温暖化の予測では、豪雨の起こる時間と場所は予測の対象とはしない。地域の年平均気温、月降水量の長期平均的な年変化、あるいは豪雨の発生頻度などを予測することが目的である。これらの量はすべて気象の統計量である。気象の統計量を予測するモデルは「気候モデル」と呼ばれている。長期の水循環変動

は気象モデルではなく、気候モデルによる予測が適用される。

気象の予報を目的とした数値モデルでは初期値の扱いが重要であり、そのため観測データから初期値を合理的に推定する「データ同化」に力が注がれている。また予報誤差の拡大に対処するため「アンサンブル予報」の手法が用いられる（2.2.2 参照）。一方、気候モデルでは初期値の設定はそれほど重要ではなく、地表面や海面と大気の相互作用やその変動、温室効果ガスの影響を受ける放射過程の変化を把握することが重要である。気候モデルでも、統計量の将来予測の質を向上させるためアンサンブル予報と同様な手法がしばしば適用される。また複数の数値モデルによる予測の統計を取ることで、予測精度の向上を図ることも試みられている。

#### （4）温暖化予測モデルと比べて

水循環モデルとくに大気モデルは温暖化予測の研究で用いられている数値モデルと類似点が多く、共通性がある。しかしながら、相違点も少なくない。まず温暖化研究では長期の変動のモデルすなわち気候モデルを開発・利用するが、水循環では災害の視点から短期の変動も重要であり、気象モデルすなわち数値予報モデルも大きな役割を担っている。また中長期的に見ても、水循環の変動は温暖化の影響だけでなく、自然の変動や地表面の人為的改変の影響を受け、さらには水需要や水災害に対する社会の脆弱性も変化する。水循環予測のための数値モデルはこれらのプロセスを含んでいる必要がある。

水循環変動の予測の基本的な単位は流域である。現実の流域には多様な個性がある。自然変動の特性も異なれば、水利用・土地利用をはじめとする社会との関わりも大きく異なる。たとえば中国の大河川でも揚子江では渇水よりも洪水などの水災害が主要な関心事である。一方で 1990 年代に断流が頻発した黄河では渇水や過度の水利用問題など、水資源に関する関心が高い。また我が国では年降水量には比較的恵まれているものの、地形が急峻でダム容量も小さいため、水循環のサイクルは短く、豪雨がごく短時間のうちに洪水につながる恐れがあり、また無降水日が続くと渇水に悩まされることもある。水循環変動予測のためには、これら多様な流域の個性に着目したモデリングや予測手法の開発が重要である。

#### （5）気候気象予測のダウンスケール

気象・気候の予測は全球を対象とする数値モデルである GCM による。しかしながら GCM は空間解像度に限界があり、2005 年の時点でみると多くの気候モデルとしての GCM は格子間隔にして 300km から 100km 程度である。従って流域や狭い地域の気象や水循環を予測するには十分な分解能・解像度を持っていない。そこで GCM の予測から、より小さい規模の詳細な予測情報を引き出すことが必要となる。この手法は気候モデルのダウンスケールと呼ばれている。ダウンスケールの手法には 3 種類ある。

第一は超高速コンピュータを使って GCM の解像度を向上させる方法である。地球シミュレータセンターでは AFES (AGCM for the Earth Simulator) と呼ばれる水平格子間隔 10km の GCM によるシミュレーションを実施している。また気象研究所では 2.2.2 で紹介するように水平格子間隔 20km 相当の AGCM による温暖化実験を進めている。さらに地球フロンティアでは水平格子間隔を 3.5km にとることも可能な雲解像大気大循環モデルの研究を進めている。また GCM によっては場所により空間分解能を変えることができるように設計されて

いるものもある。これにより相対的に小規模の計算機でも特定地域における高解像度予測が実現できる。

第二の手法は領域モデルによるネスティングにより空間解像度をあげるダウンスケール手法である。水平分解能の高い領域気象・気候モデルの水平境界条件に GCM の予測値を仮定することにより、限られた範囲だけの水平分解能を向上させることができる。しかし領域モデルの内部の予測情報は GCM に伝わらないこと、また2つのモデルを結合するときに様々な問題が生じやすいのが欠点である。気象庁を含むほとんどの予報現業機関では、以前からこの方法により対象地域の高解像度数値予報が実施されている。

残る三番目の手法は統計的なダウンスケールである。狭い地域の気温・降水などの気象要素の変動（観測値）と、観測またはモデルにより再現された大規模な循環場・気圧場との関係を統計的関係式などの形で経験的に求めておいて、モデルによる大規模場の予報結果から狭い範囲の気象や特定地点の気象要素を予報する方法である。天気予報で各地の日最高最低気温を予測するときに、精度を向上させる手段としてよく利用されている。これらの三つの手法を問題により使い分け、あるいは併用して水循環予測に役立てることができる。

#### (6) 非静力学モデルと雲解像モデル

上に述べた領域気象・気候モデルでは水平分解能が概ね 10km より小さくなると支配方程式を変更する必要がある。10km 以下の格子間隔で精度を保てるモデルは基礎方程式の特性から「非静力学モデル」と呼ばれている。

格子間隔がさらに 5km 程度より小さくなると、モデル内の降水の扱いが大きく変わり、しばしば「雲解像モデル」と呼ばれる。格子間隔が大きなモデルでは「積雲対流のパラメタリゼーション」と呼ばれる手法で、降水の有無と量を診断的に計算するのに対し、雲解像モデルでは積乱雲の上昇流を直接シミュレーションすることができ、不確定要素を含む仮定を減らすことができる。

多くの領域モデルは既に非静力学モデルに移行しており、空間分解能によっては雲解像モデルとして機能する。領域モデルは何段も重ねてダウンスケールすることができ、内側の格子点系でのみ雲解像とすることも可能である。このような領域モデルは既に数多く開発され、気象モデルや気候モデルとして多くの実績がある。たとえば米国で開発され世界の多くの研究者が利用している RAMS や MM5、あるいは地球フロンティア・名古屋大学で開発された CReSS、気象庁が予報モデルとして開発し気候モデルとしても活用されている気象庁非静力学モデル、さらには 2.2.2 で紹介する WRF がある。領域モデルだけでなく、GCM もやがては雲解像モデルへの道を進むことになると予想される。上に述べた 3.5km 格子間隔の GCM の試みはすでに雲解像 GCM である。

#### (7) 流出モデルと陸面モデル

水文モデルは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、エネルギー収支を算定するモデルのことである。降水量や放射エネルギーは観測値が使われることも、大気モデルによる計算値が使われることもある。水文モデルは大きく流出モデルと陸面モデルに分けることができる。

陸面モデルは陸面境界条件を算定するために大気モデルに組み込まれることが普通である。

地表面からの顕熱・潜熱フラックスや地表面温度、アルベド、積雪など水収支だけでなく、地表面におけるエネルギー収支に予測の重点がある。陸面モデルにも土壌水分を単純な方法で予測するモデルから、植物の被覆効果や水蒸気発散の気孔抵抗の機構を含むモデル、さらには光合成のメカニズムをモデル化し、熱・水蒸気と二酸化炭素の交換を統一的に扱うモデルまで多くの種類のモデルが提案されている。

流出モデルは雨水や融雪水が土壌を介して河川を流れ下る流出過程を主として扱う。流出モデルは流出現象の理解を助け、過去の現象の再現と将来の予測を可能とし、河川計画に貢献する。多くのモデルが提案されているが、これらは流域全体のパラメータしか持たない集中型流出モデルと、流域を多くの空間要素に分割し土壌浸透能や植生などの物理パラメータの空間的な分布を考慮できる分布型流出モデルに分けられる。分布型流出モデルでは洪水氾濫にともなう水深分布も得られるので、被害との関連が把握しやすい。

#### (8) 我が国における水循環予測に関連する主な数値モデル

巻末に参考として「水循環予測に関連する主な数値モデル」と題するリストを添付した。このリストには我が国で開発の進められている水循環関連の主な数値モデルが列挙されている。モデル研究の現状を概観するとともに、関連する研究や先行する数値モデルを一覧し、研究の将来計画を立案する上での一助にすることを目的として、地球規模水循環変動研究イニシアティブの登録課題担当者および水循環予測モデルプログラムの参加者に呼びかけて、収集整理した情報をまとめたものである。寄せられた情報の中から、基本的にはある程度成果の得られつつある数値モデルを選んで掲載したものであり、必ずしも我が国の水循環モデルを網羅しているわけではないことをお断りしておく。