

論文の内容の要旨

論文題目 陸域水循環による全球熱・物質輸送に関する研究

Study on global energy and material transport through terrestrial hydrological cycles

氏 名 徳田 大輔

地球上の大気や陸面に存在する水は循環し、その時空間分布を刻一刻と変化させている。それと同時に、水は熱や物質を輸送する媒介として機能する。陸面から流出した水は一定の水温と物質を含んでいる。また人間活動に伴う排水には多量の栄養塩が含まれており、河川の水質に無視できない影響を与える。下流への流下過程では大気との熱交換や水中での化学変化、生物活動の作用を受けながら、エネルギー状態や物質含有量を変化させる。またその過程では、湖沼における長時間の滞留や鉛直不均一性にも影響されている。こうして水が海洋に到達するまでの輸送過程は、陸面での気候的な特徴や人間活動の影響を海洋まで伝播する経路として捉えることができる。しかしそれら全てが海洋まで到達する訳ではなく、一部は大気への放出として、一部は水底への堆積として失われると同時に、有機態無機態間の変化などその存在形態を大きく変えている。

本研究では、この様な河川と湖沼による熱や物質の輸送過程を「水文輸送過程」と呼び、その全球スケールでの定量評価を目的とする。こと物質の水文輸送過程が海洋に与える影響については、河口部での流量と物質濃度観測を通じて古くから研究が蓄積されてきた（但し熱の輸送量はこれだけでは不十分である）。これら地点観測データを全球規模に外挿することを基本的なアイデアとして、多くのモデルが開発されてきた。しかしヨーロッパの複数流域を対象に物質収支を計算するモデルの比較実験を行うプロジェクト EUROHARPでは、大きな不確実性を有する過程として、この水文輸送過程が指摘されている。即ち多くのモデルでは、陸面から水域への物質排出など他過程における不確実性を、河口部での観測データと整合するような水文輸送過程のチューニングに吸収させているのである。

本研究ではこの状況を改善するために、湖沼表現の高度化、そして水文輸送過程の拘束条件の充実といった、2つの方策に注力する。これまでの水文輸送モデルでは、湖沼は滞留時間の長い河川として捉えられてきた。しかし、湖沼では温度成層の形成をはじめとした、河川とは異なる鉛直不均一な動態が支配的になる。これらを河川との流出入を考慮しながら表現する必要がある。また、仮に大気への放出量や水底への堆積量といった水域全体での物質収支が把握できれば、水文輸送過程を拘束でき、陸面からの排出量の有する不確実性を逆に特定できる。しかしこの様な広域観測を行うことは困難であるため、本研究では物質の形態を区別した地点観測データと比較可能なモデルを開発する。例えば、陸面から

流出する無機態窒素はほぼ全てがアンモニウムイオンであるが、水中から大気へ窒素ガスが放出される脱窒という過程には硝酸イオンが関わっている。このように同じ元素であっても、その形態によって物質動態に果たす役割は大きく異なる。これらの地点観測データと直接的に比較可能なモデルの開発は、水文輸送過程の拘束に大きく資するであろう。現在多くの広域水文輸送モデルでは、この様な物質の形態変化を考慮しないが、その知見は地域スケールの水質モデルに蓄積されている。多数の地域モデルを比較することで、全球スケールで適用可能な物質動態スキームの抽出を目指す。

以上の背景を踏まえて、本論文は以下の通り構成される。まず全球河川水温モデルを開発し、その検証を行う（第2章）。質量、熱量保存則から水文熱輸送量を定義した上で、モデル出力を用いてそれを全球スケールで定量評価する（第3章）。次に、河川と湖沼による水文輸送過程を明示的に表現することを目的に既存の全球河道網に湖沼を導入した後、それを用いて既存の河川水温モデルと湖沼水温モデルを結合し、観測データからその結合モデルを検証する（第4章）。その後地域スケールの水質モデルが表現する物質動態を比較し、地域ごとのキャリブレーションの必要が少なく全球スケールに適用できる物質動態スキームを抽出する（第5章）。それを元に河川・湖沼物質動態モデルを開発し、世界各地で検証を行う（第6章）。以下、各章の要旨を順にまとめる。

第2章では、氾濫を考慮した全球河川水温モデルの開発と検証を行う。氾濫という現象は河道水深の減少と水面面積の増加という2つの観点から捉えることができ、それらは河川の熱収支において異なる影響を有する。本モデルは高緯度から低緯度にかけて全球で検証され、水温の季節変動を良好に再現すること、また氾濫の考慮が主に水温の上昇へ寄与して水温再現性を向上させることが確認された。

第3章ではまず、地点観測データだけでは水文熱輸送の推計に不十分である理由を説明し、質量、熱量保存則からその定義を行った。次に河川水温モデルがその課題を解決できることを示し、鉛直の熱交換が下流へ不可逆に輸送される量を定量評価した。また海洋再解析データを併用し、河口から流出する河川水温と直近の海水温度を比較することで、北極海を取り巻く高緯度河川では、南から北に温かい水が輸送されていることを明らかにした。その河川水は沿岸の熱収支でも無視できない影響を有することを指摘した後で、北極海に流入する熱量は過去50年間で有意に増加していることを示した。更にNASAの海洋モデルECCO2に本研究の出力した河川水温データを入力し、河川が海洋の熱収支や海氷生成に与える影響を評価した。

第4章では、全球河道網データセットにおいて湖沼を明示的に表現するために、高解像度地形データセットと湖沼分布データセットをマージした上で、全球モデル計算に適用するためのアップスケール手法を提案した。このマージでは、湖沼水面の補完や湖沼内の表面流向の変更を行い、ユーザーが任意の湖沼を河道網上に表現できるようにしている。この様に構築されたデータセットは貯水池の上流域面積の報告値と比較され、高い相関があることが確認された。更に上記で開発したデータセットを用いて、既存の河川水温モデルと湖沼水温モデルを結合した。本研究では陸面から海洋までの水文輸送の表現を目的として

いるため、湖沼内の質量、熱量を保存しながら河川の流出入を考慮する特徴がある。これを日本域、北米域でそれぞれ検証を行った。中小湖沼では、水深10m程度までの水面付近の水温を良く再現する一方で、五大湖など大湖沼では、水温の過大評価、結氷期間の過小評価傾向が確認された。本モデルでは湖沼内の水平不均一性を無視しており、特に緯度方向の気候傾度が表現されなかったためだと考えられる。また湖沼の大きさに関わらず、多くの湖沼で深い部分での水温の季節変動の大きさが過小評価されていた。これも水平不均一性の簡略化に影響されていると考えられるが、湖沼面積が水深に応じて一定とした仮定もその一因であると考えられる。

第5章では、地域スケールの水質モデルを多数収集し、それらを状態変数の定義や支配方程式から比較した。本研究では、状態変数を大きく生物、非生有機物、無機物の3つに分類して記述する。化学的に定義できるためモデル間の差が小さいのは無機物であり、次いで生物の差が小さい。一方で非生有機物については、粒子態や溶存態といった存在形態による定義や、酸素要求量をはじめとする機能に基づいた定義など、その扱いは様々であった。本研究では、生物と非生有機物、非生有機物と無機物の間における過程に着目して、全球スケールで適用可能な非生有機物の定義を提案した。次にそれら過程の進行速度の表式について、光合成や硝化といった過程を取り上げて比較した。その結果、多くの表式はミカエリス-メンテン式やアレニウス式といった基本的な式に分解されること、化学量論的な関係は多くのモデルで共通していることなどを明らかにした。またモデル間を比較することで、水質モデルの簡略化手法について5つの類型があることを示した。

第6章では、前章で抽出された知見を元に、全球で計算可能かつ検証可能な水質モデルを開発し、その検証を行った。本モデルは植物プランクトンをはじめとする10の状態変数を有し、物質の沈降や脱窒といったモデル系外との相互作用も含んでいる。本モデルはヨーロッパ、ロシア、タイ、北米といった4つの地域において、一律のパラメータセットを用いて適用、検証され、硝酸イオンを過大評価する地点があるものの、溶存酸素やアンモニウムイオンを含めた広範な水質項目について、観測値を良好に再現することが分かった。更に北米では湖沼における水質の鉛直分布についても検証を行った。各流域における物質収支解析の結果、陸域からの負荷量に加えて、加水分解や硝化といった物質の存在形態の変化が大きく物質収支に寄与することが明らかになった。またこのモデルを用いて、陸域からの流出量が海洋まで到達する割合の推定を行った。総窒素、総リンに関する海洋までの到達率には大きな空間不均一性があるという結果は、陸域の物質収支を議論する際には流下中の物質動態の考慮が不可欠であること、またその進行速度は河川水温に強く依存している可能性があることを示唆している。

第7章では、本論文における主要な結論を要約すると共に、今後の研究の方向性について議論する。