

## 審査の結果の要旨

氏名 徳田 大輔

### 陸域水循環による全球熱・物質輸送に関する研究

水循環は気候システムの主要な要素として水やエネルギーを地球表層で輸送すると同時に、土砂や栄養塩を陸域から海洋へと運び、海洋生態系に多大な影響を与えるなど、生物地球化学的にも重要な役割を担っている。陸域水循環におけるエネルギー・物質輸送には、河川のみならず途中の湖沼における滞留が大きな影響を与えており、各個の湖沼や河川における水質形成などに関しては世界各地で研究が進められてきたものの、グローバルな動態の把握は観測データの制約などによって極めて限られてきた。

本研究は、河川や湖沼による熱や物質の輸送過程を「水文輸送過程」と名付け、その全球スケールでの定量評価に取り組んだものである。

まず、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の結果が示されている。河川でのエネルギー収支が考慮された数値モデルにより、氾濫によって浅い水体が広がると熱の需要量が増し、水温が上昇する傾向にあり、検証の結果、水温の再現性の向上が明らかとなっている。

さらに第 3 章では、河川と大気との間で鉛直方向に交換されるエネルギーが河川流下によって下流に伝播される量が定量的に推計された。河口から流出する河川水温と海洋再解析データに基づく河口付近の海水温度との比較により、南から北に輸送された温かい河川水による北極海への熱流入量が推計されている。そして、北極海に流入する熱量が過去 50 年間で有意に増加していることを示すのみならず、NASA の海洋モデル ECCO2 に本研究による河川水温推計値を境界条件として与えて河川水が海洋の熱収支や海氷生成に与える影響が評価され、河川水温の考慮によって沿岸部の海氷面積割合が最大 3%程度減少し、上向き鉛直熱フラックスが増加することが示された。一方、北極海全体で沿岸部の海氷が減少していることに起因し、河川が海氷面積を減少させる効果が年々減少していることも明らかとなっている。

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、高解像度地形と湖沼分布の統合データセットの構築手法が提案され、湖沼水面の補完や湖沼内の表面流向の変更を行ったり、ユーザーが任意の湖沼を河道網上に表現したりできるように工夫されている。この統合データセットは貯水池の上流域面積について報告値と比較され、高い再現性が確認されている。

この湖沼統合データセットを利用し、湖沼内の質量、熱量を保存しつつ河川の流出入を考慮した河川水温モデルと湖沼水温モデルの結合も実現された。日本域、北米域でそれぞれ検証を行った結果、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。これは、湖沼内の水平的な不均一性が無視され、特に緯度方向の気候傾度が表現されなかったためだと理解されている。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解釈されている。

第 5 章では、地域スケールの水質モデルの広範なレビューに基づき、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が提案され、進行速度の表式についてはミカエリス-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が明らかにされ、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が示されている。

第 6 章では、こうした知見に基づき、全球で計算可能かつ検証可能な水質モデルが開発された。推計結果はヨーロッパ、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示されている。特に、北米では湖沼における水質の鉛直分布に関しても検証され、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していることが明らかにされている。

さらに陸域からの流出が海洋まで到達する割合が推定され、総窒素、総リンの到達率には大きな空間不均一性があり、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が示唆されている。

このように、本論文は、グローバルな水循環において包括的な取り扱いがされてこなかった水温および水質に関して地点観測に対する検証に十分耐える数値シミュレーションモデルならびに境界条件として不可欠ながら決定的に欠けていた湖沼データベースを構築し、北極海への熱輸送量とその長期変動や総窒

素や総リンの陸上から海洋への到達率について最新の推計値を明らかにしたものであり、人為的影響によって大きく変動しつつある地球システムの気候や物質循環研究の進展にも今後大きく寄与するものと期待される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。