

京都大学	博士（総合学術）	氏名	高 博通
論文題目	Contrasting Ecological Responses of Large Japanese Lakes to Climate Change and Human Activities （気候変動と人間活動に対する日本の大型湖沼の対照的な生態応答）		
（論文内容の要旨） 本論文は、気候変動および人間活動が湖沼生態系に及ぼす影響を、全球スケールと地域スケールを往還する研究構成によって明らかにしたものである。とりわけ、全球的・モデルベースの将来影響評価と、地域的・実証的理解との間に存在するスケール間ギャップに着目し、その課題を段階的に明確化・検証することを目的としている。 第1章では、気候変動下における湖沼生態系研究の国際的動向を整理している。従来研究の多くが単一湖沼または限定的地域を対象としており、異なる湖沼タイプ間での比較や、全球スケールの将来影響評価と地域スケールの実証研究を体系的に結びつけた研究が不足している点を指摘した。その上で、本研究が「全球スケールでの包括的評価」と「地域スケールでの詳細な実証分析」を往還させることによって、湖沼生態系に対する気候変動影響を構造的に理解することを研究目的とすることを述べた。 第2章では、本研究で対象とする湖沼および使用データを整理し、解析に用いる手法を体系的に示した。Landsat 衛星データから算出した NDVI を、湖面および沿岸域の表層グリーンネスを表す統合指標として用い、これを湖面水温、TN、TP、クロロフィル a などの長期現地観測データ、流域データ、気候再解析・気候モデルデータと組み合わせる解析枠組みを提示した。NDVI を用いることにより、植物プランクトン、浮遊藻類、沿岸植生などを包括的に捉える手法の妥当性を示した。 第3章では、日本の代表的湖沼である琵琶湖および霞ヶ浦を対象に、長期観測データを用いて近年の湖沼環境変化の基礎的特徴を整理した。水質、クロロフィル a、湖面水温などの長期変動を比較することで、湖沼の形態特性や管理履歴の違いが、生態応答の現れ方に大きな影響を与えていることを明らかにした。 第4章では、将来気候変動が湖沼生態系に及ぼす影響を全球スケールで把握することを目的として、全球気候モデル（GCM）による将来気候シナリオを用い、世界約 50 の代表的湖沼を対象とした数値シミュレーション解析を実施した。解析には、成層を考慮した二層湖沼生態モデル PAMOLARE2L を用い、上層・下層を完全混合層として仮定し、珪藻・藍藻・その他植物プランクトンの3群集と、窒素・リン・COD 物質循環を組み込んだ Monod 型生態モデルを適用した。気温は GCM 出力を直接入力し、降水量変化は流域からの流入量変化として扱う一方、土地利用変化や詳細な流域過程については簡略化した条件で評価を行った。 この全球解析により、将来気候条件下における植物プランクトン群集構成の変化傾向を、湖沼タイプ間で比較可能な形で整理することができた。一方で、成層構造の変化や、流域条件の変化に伴う栄養塩流入の影響を十分に表現できないという方法論的限界も明確となった。とりわけ、流域変化と人為的影響を十分に分離・定量化できない点が、将来影響評価の解釈を制約する重要な課題として浮き彫りとなった。 第5章および第6章では、第4章で明らかとなった評価上の課題、すなわち「流域条件の変化が湖沼生態系に及ぼす影響」を実証的に検証するため、日本を代表する湖沼である琵琶湖および霞ヶ浦を対象とした詳細解析を行った。リモートセ			

ンシングデータ、流域データ、長期現地観測データを統合し、部分最小二乗回帰（PLSR）を用いて、気候要因と人為的要因の相対的重要性を定量的に評価した。

深く成層する琵琶湖北湖では、流域から流入した栄養塩が深水層に蓄積し、短期的には表層生態系への影響が顕在化しにくい一方、長期的には湖全体の富栄養化リスクを高める潜在性を有することが示された。これに対し、浅く混合しやすい霞ヶ浦では、風波や底泥再懸濁による鉛直混合の影響を強く受け、流域変化が即座に植物プランクトン濃度や湖沼状態に反映される特性が明らかとなった。

第7章では、これらの結果を踏まえ、湖沼の物理構造および流域条件が、生態応答の時間スケールと顕在化様式を規定する主要因であることを総合的に議論した。

第8章では、本研究全体を総括し、全球スケールの将来影響評価と地域スケールの実証研究を統合する意義を示すとともに、今後の湖沼管理および将来影響評価手法への示唆を提示した。

以上より、本論文は、全球解析によって顕在化した方法論的課題を、日本の代表的湖沼を対象とした詳細解析によって徹底的に検証した研究であり、気候変動下における湖沼生態系評価の高度化に資するものである。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、気候変動が湖沼生態系に及ぼす影響を、全球スケールの気候モデル(GCM)と湖沼生態モデルを組み合わせた将来予測と、地域スケールにおける実証的解析とを往還させる独自の研究構成によって体系的に解明した陸水学に関する研究成果がまとめられ、評価できる点は次のとおりである。

1. 従来、全球スケールの将来影響評価と、個別湖沼を対象とした実証研究とは、空間・時間スケールの違いから必ずしも十分に接続されてこなかった。本研究は、この両者を単に並列的に扱うのではなく、全球解析によって顕在化した課題を出発点として地域スケールの詳細解析へと展開し、その成果を再び全球的理解へと接続するという往還型の研究設計を採用している点に大きな特徴がある。とりわけ、将来影響評価に内在する方法論的制約を自ら抽出し、その限界を回避・検証するための実証的研究へと論理的に接続しており、個別の解析結果が全体のモデルの検証およびさらなる発展につながる連結性が見出される。
2. 全球気候モデルと湖沼生態モデルを用いた広域解析を通じて、将来の湖沼影響評価における二つの本質的課題、すなわち(1)湖沼成層構造の再現性、(2)流域負荷と湖内水質・生態応答との関係性を明確に整理している点は高く評価できる。著者は、全球解析を単なる将来予測の結果として提示するのではなく、入力条件やモデル構造に由来する不確実性、簡略化の影響、解釈上の制約を明示的に示し、モデルの適用可能性と限界を自覚的に論じている。このように、予測結果そのものだけでなく、予測の成立条件を含めて評価対象とした姿勢は、将来影響評価研究において極めて重要であり、著者が高い研究成熟度と批判的思考能力を有していることを示している。
3. これら二つの課題のうち、とくに「流域負荷と湖内水質・生態応答との関係性」という課題に焦点を絞り、日本を代表する深層湖である琵琶湖と、浅水湖である霞ヶ浦を対象として、リモートセンシングデータと長期現地観測データを統合した詳細解析を行っている点は、本研究の独創的特徴である。通常、この種の課題に対しては、流域・湖沼を結合した物理・化学・生態モデルによる数値シミュレーションが用いられることが多いが、本研究では、あえてモデル化を最小限に抑え、異なるスケールと揺らぎをもつ実観測データを直接比較・解析する逆解析的アプローチを採用している。この選択は、モデル仮定に依存しない形で実データが示す関係性を抽出するという点で方法論的意義が高く、流域変化と湖内応答の結びつきを実証的に捉えるうえで有効である。
4. この手法により、湖沼の物理構造や成層特性の違いが、生態応答の顕在化様式および時間スケールを規定する主要因であることを明確に示した点は、従来研究には見られない重要な成果である。とくに、深層湖では流域からの栄養塩影響が短期的には表層生態系に顕在化しにくい一方で、長期的には湖全体の状態変化を規定する潜在的要因として蓄積されること、これに対して浅水湖では、流域条件の変化が比較的短時間で生態応答として現れることを定量的に示した点は、湖沼タイプに応じた影響評価と管理戦略の必要性を明確に示している。この知見は、将来の湖沼環境管理や適応策の立案に対して、実践的かつ汎用性の高い指針を提供するものである。

以上のように、本論文は、全球スケールの理論的評価、地域スケールの実証的解

析、ならびに両者を統合した総合的考察を高い水準で達成した研究であり、気候変動下における湖沼生態系評価の高度化に大きく貢献するものであり、陸水学における地球観測技術の応用分野の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（総合学術）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和8年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問した結果、合格と認めた。

なお、本論文は京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。