



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Algal Blooms as Marine Ecosystem Risk: Forecasting Spread and Biogeochemical Stress [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	王, 浩炯
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15694号
Issue Date	2023-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91238
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Wang_Haojiong_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学) 氏名 王 浩炯

審査担当者 主 査 教 授 大鐘 武雄
副 査 教 授 齊藤 晋聖
副 査 教 授 西村 寿彦
副 査 准教授 Matteo Convertino (清華大学深セン国際大学院)

学位論文題名

Algal Blooms as Marine Ecosystem Risk: Forecasting Spread and Biogeochemical Stress
(海洋生態系リスクとしての藻類の爆発的増殖: 拡散と生物地球化学的ストレスの予測)

藻類の増殖は複雑な生態学的課題の一つであり、水生生態系と人間の福祉に重要な影響を与えている。従来の藻類の増殖を理解し予測するための方法では、これらのイベントを駆動する変数と環境要因の複雑な相互作用を捉えることが難しい。そのため、これらの制約に打ち勝つ革新的なアプローチを見つける必要がある。この論文では、因果ネットワーク推論とグラフニューラルネットワークを統合することで、このギャップを埋めることを目的としている。ここで導入された新しい因果推論モデルは、変数間の情報の流れを定量化するために輸送エントロピーの差を利用することで、藻類の増殖のダイナミクスを効果的にモデル化している。このアプローチは、一方向の輸送エントロピー差をグラフニューラルネットワークと組み合わせることでさらに充実させ、藻類の増殖の時間系列予測を容易にする。この研究の重要性は、因果推論ネットワークの情報ダイナミクス、構造、機能的な特徴を分析する能力にある。これらの分析により、環境の変化に対する藻類の空間的な動的応答を特定することが可能となる。さらに、因果関係（輸送エントロピー差）をグラフニューラルネットワークの構築に組み込んだことも新規点である。この設計により、高次元データの情報冗長性を軽減し、変数の接続を強化している。また、輸送エントロピー差から導かれた事前因果知識を活用することで、重要な変数を独立して特定する必要がなくなり、予測の精度が向上する。以上のように、本研究は複数の要因を持つ複雑なシステムの効果的な予測と推論を実現し、対象となる予防的なアプローチと対策の提案に寄与している。以降では各章の概要を示す。

第1章では、特に海洋環境において生態系内で起こる変化を示す兆候について議論する。この章では、有害な藻類の増殖を海洋生態系のダイナミクスの変化を反映する微小宇宙として研究する意味について焦点を当てている。また、生態系の潜在的なリスクを評価する際に多因子の関係を考慮する必要性を説きながら、生態系の複雑さについて述べている。

第2章では、因果推論と因果関係ベースのニューラルネットワークモデルを用いて藻類の増殖を予測することに焦点を当て、CHL-a (Chlorophyll a) 指標を対象とした検討を行っている。因果推論モデルは、CHL-a 観測期間中の影響力のある観測点とその相互関係を特定できる。本研究では、特定の影響力のある観測点での急激で長期間にわたる増殖のトリガーやリスク指標を調査した。さらに、因果関係に基づくグラフニューラルネットワークは、空間的な相関に頼らずに CHL-a の地理的な分

布を効果的に予測できた。

第3章では、2005年のフロリダ湾での有害な藻類の増殖に因果推論モデリングを適用している。モデルの正確性は、実際のイベントの空間的な進行と比較することによって検証されている。本研究では、異なる観測点での水質への増殖の影響を定量化し、制御策を提案した。また、イベント前後の生態系の安定性を評価し、生態系の自己調整能力を明らかにした。

第4章では、提案された因果推論メソッドと因果関係に基づくグラフニューラルネットワークの包括的な評価が行われている。本研究では、CHL-aのダイナミクス、他の環境要因、および生態系のリスクを分析した。予測的な生物地球化学ネットワークが作成されたことにより、藻類の増殖と関連するリスクを理解することができた。その結果、輸送エントロピーを使用したフラッシュ増殖の予測精度が改善され、アウトブレイクのための重要なCHL-aのしきい値の同定ができた。また、生態系の脆弱性と生物地球化学的な混乱による生態系の崩壊の可能性を示したとともに、増殖パターンの変化と環境への影響を明らかにした。

第5章では、これまでの章をまとめ、提案された因果推論および因果関係に基づくグラフニューラルネットワークについて総括している。

これを要するに、著者は、輸送エントロピー差を新たに導入した因果ネットワーク推論を生み出しただけでなく、グラフニューラルネットワークにも適用することで、有害な藻類の増殖リスク評価と高精度な予測を可能とした。これらの概念は、医学、社会ネットワーク、および脳科学など、従来の手法では正しくモデル化できなかった複雑なシナリオにも適用可能であり、様々な複雑系の解析に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学 博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。