

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

Extreme Extratropical Cyclones in the North  
Atlantic and Arctic Ocean  
--Numerical Analysis of Coastal Impacts and  
Future Threats--

北大西洋と北極海の極端な温帯低気圧による沿岸  
災害

-沿岸への影響と将来変化の数値解析-

申 請 者

Martin	MAELL
マエル	マーティン

建設工学専攻 海岸工学研究

2020年2月

本論文は、気候予測数値モデルを高潮と高波の数値予測に用い、海水流動に関するモデルと風による風波の波浪推算モデルとも併用して、高精度の高潮・高波推算モデルを構築したことを報告している。

審査に当たっては、2019年10月18日に審査委員予定者4名による予備審査会を実施し、専攻内縦覧に付してよい旨の判定を得た。2019年10月21日から11月6日に建設工学専攻における専攻内縦覧を行い、11月7日の専攻会議で博士論文受理の申請が認められた。受理申請を受けて、11月21日に開催された創造理工学研究科運営委員会にて論文が受理された。2020年1月8日に論文の公聴会を行った。公聴会では論文内容の発表の後に、質疑応答が行われた。申請者は、審査委員からの質疑に対して明確に回答を行い、研究内容に対する深い理解と関連分野に関する十分な学識・能力を有することが示された。なお、研究倫理については、博士課程後期学生として単位を取得している。また、論文の類似度判定を行い、問題はなかった。

本論文の内容についての審査結果を以下に述べる。

第1章では、研究の背景と過去の研究文献をまとめて提示し、研究テーマの必要性を述べ、研究の導入を行っている。さらに研究の目的と動機が提示されている。過去の研究および将来環境下での予測研究について分析し、低気圧が将来の沿岸地域にとって破壊的となるかどうかについての定説がないために、さらなる研究の必要があることを述べている。その後、北欧および北極沿岸地域への温帯低気圧の影響を具体的に提示し、これらが沿岸地域にどの程度影響するかについて述べている。最後に、これらの低気圧による潜在的な気候変動の影響を提示して、低気圧がより強くなるかどうかについても見解を述べている。本章では、北大西洋および北極海で温帯低気圧をモデル化するための適切な方法論を提供し、温帯低気圧の不確実性を軽減することを目的にすると述べており、本研究の目的は明確で適切である。

第2章では、温帯低気圧について、その歴史的および将来予測の研究に関する文献調査を行っている。温帯低気圧の影響と深刻度は海岸線の構成やその他の地理的および地質学的要因にも大きく依存しているため、温帯低気圧の観察とその傾向分析では、低気圧の影響が近年に強くなったかどうかを確認することは難しいことを述べている。さらに、北極圏では、過去の観察データが不足しているため、ほとんどの分析研究は衛星データを通じて行われている。一方で、社会経済的潜在的影響は、多くの社会組織にとって重要な知見であるため、温帯低気圧についての将来の気候変動の研究は一般的にはよく行われている。ほとんどの場合、少なくとも海面上昇により、嵐がより顕著な影響を与えることが予想されている。また、北極圏では、海氷の範囲が減少することで大きな変化が予想されている。これにより、低地の沿岸地域は、より長い期間にわたって高潮と風波にさらされ、被害が拡大する傾向にある。本章はこれらの知見を総合的にまとめることにより、問題のありかを適切に指摘している。

第 3 章では、調査領域を示し、この研究で事例として取り上げた極端な暴風雨の事例を示している。事例として考慮した温帯低気圧は、ヨーロッパ諸国で高潮、高波、風、降水によるさまざまな災害を引き起こした最新の極端な事例である。北極の場合には北極海、ボウフォート海、およびタクトヤクトック（クグマリット湾）を含み、カナダのボウフォート港の集落であるタクトヤクトックの沿岸に大きな影響を与える可能性のある暴風雨を選択している。ヨーロッパでは、社会的経済的影響が大きいいため、影響の大きい気象事象はよく知られているが、北極圏では、社会的経済的観点からの関心と影響が小さいため、個々の事象を把握するのは困難が伴う。したがって、北極圏では、過去の暴風雨の影響を理解するためには、利用可能な限られたデータの収集と分析が重要であると指摘している。本章では事例の選択方針が合理的に述べられている。

第 4 章では、研究で使用方法論とデータが詳細に示されている。本研究は数値モデル手法に基づいており、必要な分析のためにさまざまなモデルと地形、気象などのデータセットを使用している。過去の事例の再現計算では、選択した計 5 つの温帯低気圧を気象モデル **Weather Research and Forecasting model (WRF)** を用いて算定し、適切な初期条件および境界条件を使用することにより、適切な精度の算定結果が得られている。気象の再現計算の後に、海洋モデルにおいては、非構造格子海水流動モデルと波浪予測数値モデル (**FVCOM-SWAVE**) および **SWAN** モデルと海洋モデルを組み合わせ合わせたモデルを使用して、それらの結果と現地調査地点での波高と沿岸高潮と比較して、予測の精度を算定している。研究では、大気温度、海面温度、相対湿度の 3 つの主要な気候パラメーターを考慮している。これらの方法は合理的であると認められる。

第 5 章では、研究結果を提示している。各モデルの算定結果およびアンサンブル平均値を示し、考慮される 3 つのパラメーターを変化させるとどの程度の変化が予想されるかを確認している。算定結果として高潮、高波、風、降水量の場所的分布を示し、それらを測定の結果と比較している。北大西洋の将来のシナリオには、**2090 RCP4.5**、**2090 RCP8.5** を用いている。また、北極圏では、**2050 RCP4.5** および **2050RCP8.5** を用いている。北極圏の将来シミュレーションでは、計算領域から海氷が消失した条件で算定し、分析は局所的（ボウフォート海とタクトヤクトック）、および地域的（北極海の大部分）の観点の双方から行っている。いずれも立場が明快である。

第 6 章では、研究結果について詳しく分析している。主な議論は、モデルの予測精度、モデルの限界、および将来の見通しに対する見解である。第 5 章の結果に基づいて、過去の事例の再現計算ではモデルの算定結果は高い精度を示し、本モデルを使用して十分なレベルの信頼性で沿岸過程を将来予測することができることを示した。弱い暴風雨とは対照的に、強い暴風雨はより精度よく捉えられた。モデルでは弱い現象を再現するのが難しいことが解

った。モデルの主な限界は、北極圏でのデータの不足に起因していて、特に結果の検証を困難にしているのは高潮と風波の観測が欠如していることである。将来予測では、最も強い温帯低気圧の事例を将来のシナリオの下で行っている。将来シナリオ RCP8.5 では、変化が顕著であったが、RCP4.5 でもある程度の変化を観察した。特に相対的な海面上昇と結果としての海岸侵食を考慮すると、沿岸コミュニティへの影響はより深刻になる可能性がある。ヨーロッパでは一般にそのような危険に対してよく準備されているが、北極圏では準備が不十分で、すでに変化が起こっているために状況が悪化する可能性がある。本章での検討は十分な考察に基づいていて、妥当である。

第7章は結論であり、本論文で得られた主要な成果を各章ごとにまとめるとともに、さらなる検討の必要性についても言及している。温帯低気圧は、中高緯度のどこでも重大な沿岸危険を引き起こす可能性がある。本研究は、数値モデルにより、それぞれ2090年と2050年までの将来の気候シナリオの下で、北ヨーロッパとカナダの北極圏の個々の極端な温帯低気圧に焦点を当てている。モデルの算定結果は、極端なシナリオ RCP8.5 では、強力な温帯低気圧の事例について、災害が悪化し、沿岸のコミュニティが高潮と波の被害にさらされる可能性があることを示している。

以上を要約すると、本論文は高緯度域での低気圧及び高潮・高波の挙動の将来予測に成功している。これらの研究成果は、これまであまり知見が得られていなかった北極域を含む高緯度地域に於いて、将来の沿岸域の災害への対策を行う上での重要な視点を提示している。したがって、本論文は海岸工学、沿岸域防災の分野に重要な貢献をするものであり、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2020年1月

審査員

（主査） 早稲田大学教授 工学博士（東京大学） 柴山 知也

（副査） 早稲田大学教授 工学博士（名古屋大学） 榊原 豊

（副査） 早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学） 関根 正人

（副査） 早稲田大学教授 博士（工学）（横浜国立大学） Miguel Esteban