

学位論文審査の要旨および担当者													
学位申請者氏名	Le Ngoc Hieu												
学位論文題名	Improvement of Lake Hydrodynamic Modeling using WRF and Deep Learning Models (領域気象モデル WRF と深層学習を用いた湖沼・貯水池における流動解析の精度向上)												
学位論文審査 担 当 者 (論文審査委員)	<table border="0"> <thead> <tr> <th>(職名)</th> <th>(氏名)</th> <th>(印)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>主査 准教授</td> <td>新谷 哲也</td> <td></td> </tr> <tr> <td>委員 教授</td> <td>横山 勝英</td> <td></td> </tr> <tr> <td>委員 准教授</td> <td>荒井 康裕</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	(職名)	(氏名)	(印)	主査 准教授	新谷 哲也		委員 教授	横山 勝英		委員 准教授	荒井 康裕	
(職名)	(氏名)	(印)											
主査 准教授	新谷 哲也												
委員 教授	横山 勝英												
委員 准教授	荒井 康裕												
<p>(学位論文審査の要旨)</p> <p>本論文では、湖沼・貯水池の水質を決定づける水温と物質輸送予測の高精度化に着目して研究を行った。</p> <p>第1章では、数値流動モデルを用いた水温予測に関する問題点と本研究の方針について述べた。湖沼・貯水池の水温は、太陽からの放射、大気との運動量・熱交換、流入・流出河川によって影響を受ける。その中でも、水面に作用する風応力は、水域全体に流動を引き起こし、乱流混合を伴って水温分布を変化させる。特に、この乱流混合で生成された水面付近の混合層と下層間の水温差で生じる密度境界面は、物質の鉛直輸送を抑制するため、その形成と変動の予測が重要となっている。このように、風の影響が重要であるにもかかわらず、これまで行われた多くの解析では、風を空間的に一様と仮定して進められてきており、風の空間的な非一様性の影響がほとんど無視されてきた。本研究では、風の非一様性による影響を詳細に検討するために、領域気象モデルによって時空間的に変化する湖上風を再現し、数値流動モデルと連結させることで水温と物質輸送の3次元解析を行った。また、風分布の仮定を含め、不確実な境界条件の下で、水温予測精度を向上させる解決策として、深層学習に基づくモデルと数値流動モデルによるハイブリッドモデルを提案した。</p> <p>第2章では、本研究で対象とした湖や貯水池（霞ヶ浦，網走湖，小河内貯水池）に関して説明を行った。また、本研究で用いる数値モデルに関する詳細を述べている。領域気象モデル WRF による気象予測・再現では、LES(Large Eddy Simulation)モデルを導入するとともに、気象観測値に基づいたデータ同化を行うことで、予測精度</p>													

の向上を行った。そして、得られた風の非一様性を定量的に評価するために、空間フィルターに基づく風速・風向の統計的解析を行った。一方の数値流動モデルにおいては、粒子及びトレーサー追跡法を用いて物質輸送に与える非一様性の影響を解析した。ハイブリッドモデルに用いる機械学習モデルは、LSTM(Long Short Term Memory)モデルをベースに作成し、過去の気象と水温分布を入力として未来の水温分布を予測する。

第3章では、霞ヶ浦を対象として、植物プランクトン等を想定した水面付近の物質輸送に与える風の非一様性の影響を解析した。この解析では、風速や風向の空間的な分散係数を求めて非一様性と物質輸送の関係を明らかにした。その結果、強風時には風は空間的に一様風となる傾向であることがわかった。一方、中・低風速時には非一様性が卓越し、物質輸送の形態を変化させることが明らかとなった。また、地形の効果を考察するために、実地形の他に、一定水深の円形を仮定した場合、円形の湖岸に勾配の異なる斜面を設置した場合の解析も行い、その影響を検討した。

第4章では、非一様風が密度境界面の運動（内部波）に与える影響を調べるために、北海道の網走湖を対象に解析を行なった。密度境界面の風に対する応答をスペクトル解析によって分析を行い、密度境界面に励起されるモードが一様風と非一様風では大きく異なり、特に非一様風では、高次モード内部波のエネルギーが増加することが明らかとなった。この解析では、3次元のトレーサー解析も同時に行い、トレーサーは一様風において、非一様風よりも混合が過剰に促進される可能性が明らかとなった。

第5章では、風の空間分布が得られない等、流動モデルに用いる境界条件に不確実性が存在する場合の予測精度の向上を目的として機械学習モデルと数値流動モデルのハイブリッドモデルを提案した。LSTMに基づく機械学習モデルは、過去の気象と水温を入力として学習するため、水面付近の水温の再現性に優れているが、低層の物理プロセスの再現性に弱点がある。一方の流動モデルは、物理的に全体的な流れを再現できるが、境界条件の影響を強く受ける水面近くに誤差を生じやすい。そこで、両者で同時に解析を行い、特定のタイミングでそれぞれの再現性の高い部分を組み合わせる計算を進める手法を開発した。ハイブリッドモデルの性能を検証するために、高解像度でより精密な境界条件を与えた流動計算のみのケースと低解像度で近似的な境界条件を与えたハイブリッドモデルを比較した。その結果、ハイブリッドモデルは前者と同等の精度を示し、境界条件の不確実性や数値計算の誤差を補うことができることが明らかとなった。

第6章は、本研究のまとめと今後の課題を述べている。

以上のことから、本研究は、風の非一様性を再現する気象・流動連結モデルによって、非一様風が湖沼・貯水池の流動・混合に与える影響の定量的な評価を可能とし、さらに流動モデルと機械学習モデルを組み合わせたハイブリッドモデルによって効率と精度を両立した水温予測を実現しており、水工学分野における貢献は大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位を授与するに十分な価値があると認める。

※文字のフォントサイズは12ポイントで統一をお願い致します。