

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	流域システムにおける河川水温予測モデルの開発
氏 名(Name)	福丸 大智
気候変動が急速に進展する今日，治水・利水・環境のバランスの取れた流域管理を実現するには，流域スケールの高精度な河川水温予測と流域の水・熱収支の理解が極めて重要である．本研究では，流域網羅的な河川水温モニタリングを実施するとともに，それを活用しつつ深層学習と物理モデルに基づく流域一貫の河川水温予測モデルを開発した．さらに，深層学習モデルと物理モデルの精度比較を実施し，気候変動下における河川水温の将来予測に対する各種モデルの有用性と課題について考察するとともに，気候変動が流域システムにおける河川水温に及ぼす影響評価まで実施した． まず，河川水温の連続モニタリングは，中国地方の5つの一級水系(佐波川，高津川，太田川，江の川，高梁川)を対象に流域網羅的な多地点で実施した．その結果，高津川における河川水温の変動は地下水との熱交換による影響を受けていることや，佐波川，江の川および高梁川の本川におけるダム下流地点で夏季の河川水温が他の地点と比較して低くなることが明らかになった．これらの地点では，気温と水温の散布図がループ状のヒステリシスが顕著であり，この特性の大きさを比較することで地下水との熱交換やダムが河川水温に及ぼす影響度合いを定量可能になることが示された． 次に，深層学習モデルに関して，これまで流域一貫の河川水温を予測可能なモデルの開発事例はなかったため，流域内多地点の水温を同時予測可能なモデルの開発と高度化に関する検討を実施した．高津川流域を対象に，気温のみを入力に与える条件下で単一地点の水温を地点別に予測するモデルと流域内全地点の水温を同時予測可能なモデルの比較をした結果，流域内全地点の水温を同時予測するモデルが高精度であった．次に，入力層のデータの種類に関する検討として，中国地方の5つの一級水系を対象に，気温のみを入力する場合と気温に加えて雨量も入力する場合の2条件でモデルを比較した結果，気温のみの入力では6～8月の出水時期の水温を最大で5℃程度過大評価したのに対し，雨量を用いると2℃程度に低減した． そして，物理モデルに関して，高精度な水温予測と正しい水・熱収支の理解には地下水流とその熱輸送の考慮が重要であることから，降雨流出氾濫(Rainfall-Runoff-Inundation: RRI)モデルと準三次元地下水流動モデルを融合し，河川の熱収支式を実装することで，地表水と地下水を統合した流域水・熱収支一体解析モデルを開発した．高津川における精度検証の結果，河川流量は平水時・出水時ともに高精度であり，Nash係数がほとんどの流量観測地点で0.9以上であった．また，ピーク流量誤差は地下水流を考慮していない場合のモデルと比較して20%軽減し，平水流量の誤差率も約50%軽減した．次に，河川水温に関して，本モデルは年全体の水温を高精度に予測した．特に，本川の精度は極めて高く，地下水との熱交換を考慮していないモデルでは冬季の平均水温の誤差が地点全体で2℃以上過小評価していたのに対し，新たに開発したモデルでは1℃以下に低減した．そして，水収支の検討として，本川下流における集水域全体の直接流出量と地下水流出量のバランスを各月で比較した結果，月積算雨量が200mm以下の時期は地下水流出量が総流出量の60%以上であったのに対し，月積算降水量が300mmを超えるような出水時期は直接流出量が80%以上と支配的になることが明らかとなった．さらに，水温観測地点における熱収支を検討したところ，冬季は地下水との熱	

様式7号（第12条，第31条関係）

（様式7号）（Format No.7）日本語版

交換項が水温を温める方向に働いていることを確認し，特に本川上流は 40%程度と大きいことが明らかとなった．また，流域熱収支の分析結果より，高津川の水温は流域全体として地下水による熱交換による影響を受けていることや，その影響度合いは支川の集水域別で異なる傾向を明らかにした．

最後に，深層学習モデルと物理モデルの精度を比較した結果，6～8月の夏季を除く季節においては，流域内のほとんどの水温観測地点で深層学習モデルの方が高精度であった．ただし，6～8月の高水温の時系列はほとんどの地点で物理モデルの方が高精度であったことに加え，地下水との熱交換の影響を強く受けるような地点においても物理モデルが高精度であった．d4PDF の 2℃ 上昇，4℃ 上昇実験から得られる気温，雨量を各種モデルに入力して河川水温の将来予測を実施した結果，年全体的には深層学習モデルと物理モデルで同様の傾向が得られた．その一方で，夏季の気温が 30℃ 以上と高温の時期では深層学習モデルの予測水温が頭打ちになる傾向や，河川流量の将来変化が水温上昇に与える影響が夏季において物理的に整合性の低い結果になり，深層学習モデルに課題が生じることが明らかになった．物理モデルの結果を基に気候変動が流域全体の河川水温に及ぼす影響を検討したところ，夏季の水温が 28℃ 以上になる区間が現況期間や 2℃ 上昇実験では存在しなかったのに対し，4℃ 上昇実験では下流域全体に拡大した．また，冬季の水温は現況期間では流域全体で 9℃ 以下であったのに対し，2℃ 上昇実験では多くの領域で 9℃ 以上の値をとり，4℃ 上昇実験では 11℃ 以上になることが予測された．

以上のように，本研究では深層学習モデルと物理モデルを用いて流域システムにおける高精度な河川水温予測と水・熱収支の理解を実現したほか，両モデルの有用性や課題を明確にしつつ，気候変動が流域システムにおける河川水温に及ぼす影響を定量的に評価した．

（和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度）
（about 800 words）

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Development of river temperature prediction model in basin system
氏 名(Name)	FUKUMARU Daichi
In the context of rapidly progressing climate change, realizing balanced basin management that integrates flood control, water utilization, and environmental conservation requires highly accurate basin-wide river temperature prediction and an understanding of basin-scale water and heat balances. In this study, we conducted continuous river temperature monitoring and developed basin-wide river temperature prediction models using deep learning and physical models. Furthermore, we compared their predictive performance, discussed their usefulness and limitations for future projections under climate change, and evaluated climate change impacts on river temperature within basin systems. First of all, continuous river temperature monitoring was conducted at multiple points in the five first class river basins (the Saba River, Takatsu River, Ota River, Gonokawa River, and Takahashi River) in the Chugoku Region, Japan. As a result, we clarified that river temperatures in the Takatsu River are influenced by heat exchange with groundwater, and that summer river temperatures at downstream dams on the main channels of the Saba River, the Gonokawa River and the Takahashi River are lower compared to other locations. Significant hysteresis was observed at these locations, causing the air and river temperature scatter plots to form loops. By comparing the magnitude of this characteristic, we can quantify the extent of heat exchange with groundwater and the impact of dams on river water temperatures. Next, regarding deep learning model, since there had been no previous development cases capable of predicting river temperatures consistently across entire basin, we conducted developing and enhancing models capable of simultaneously predicting river temperatures at multiple points within a basin. We compared a model predicting river temperature at a single point for each location with a model predicting river temperature simultaneously at all points within the basin, both using only air temperature as input in the Takatsu River. The results showed that the model predicting river temperature simultaneously at all points within the basin was more accurate. Next, we compared the model under two conditions for five first class river basins in the Chugoku Region, using only air temperature or both air temperature and rainfall as inputs. As a result, using only air temperature as input led to an overestimation of river temperature of up to approximately 5 °C during the flood season (June–August), whereas using rainfall reduced this overestimation to around 2 °C. Second, regarding the physical model, considering groundwater flow and its heat transport is crucial for realizing accurate river temperature predictions and correctly understanding the water and heat balance. Therefore, we developed “Basin-scale water and heat balance model integrating surface and groundwater” by integrating a Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model with a quasi-three-dimensional groundwater flow model and implementing a river thermal balance equation. Accuracy verification on the Takatsu River indicates that river discharge is highly accurate during both normal and flood conditions, with the Nash coefficient exceeding 0.9 at	

most flow observation points. Furthermore, the error in peak discharge was reduced by 20% compared to a model that did not consider the groundwater flow, and the error rate for normal flow was also reduced by approximately 50%. Next, regarding river temperature, this model predicted river temperatures with high accuracy for the entire year. The accuracy of the main river is extremely high. In fact, models that do not consider heat exchange with groundwater underestimated the average winter river temperature by more than 2°C, but the developed model reduced this error to less than 1°C. As an analysis of the water balance, we compared the balance between direct runoff and groundwater runoff discharge for the entire basin area in the lower reaches of the main river each month. Water balance analysis indicated that groundwater discharge accounted for over 60% of total runoff during low-rainfall periods (<200 mm month⁻¹), whereas direct runoff dominated (>80%) during high-rainfall periods (>300 mm month⁻¹). Heat balance analysis indicated that groundwater heat exchange acts to raise river water temperatures during winter, contributing approximately 40% in the upper main channel. Furthermore, analysis of the basin heat balance indicated that the river temperature of the Takatsu River is influenced by heat exchange with groundwater, and that the extent of this influence varies by tributary basin.

Finally, a comparison of the deep learning and physical models indicated that except for the summer season (June–August), the deep learning model achieved higher accuracy at most observation sites. However, the physical model performed better for high summer river temperatures and at sites strongly influenced by groundwater. Future predictions using air temperature and rainfall from the d4PDF 2-degree and 4-degree rise experiments indicated similar annual trends for both models, while the deep learning model exhibited saturation under extremely high summer air temperatures (>30 °C) and physically inconsistent responses to future discharge changes. Based on the physical model, river reaches exceeding 28 °C expanded across the downstream basin under the 4-degree rise experiment, and winter water temperatures increased basin-wide, exceeding 11 °C in the 4-degree rise experiment.

Therefore, this study realized highly accurate river temperature prediction and understanding of water and heat balance within basin systems using deep learning and physical models. Furthermore, while clarifying the usefulness and limitations of both models, it also achieved an assessment of the impact of climate change on river temperatures within basin systems.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	福丸 大智
審 査 委 員	主 査：赤松 良久
	副 査：朝位 孝二
	副 査：鈴木 素之
	副 査：榊原 弘之
	副 査：山本 浩一
論 文 題 目	流域システムにおける河川水温予測モデルの開発 (Development of river temperature prediction model in basin system)

【論文審査の結果及び最終試験の結果】

気候変動が急速に進展する今日、治水・利水・環境のバランスの取れた流域管理を実現するには、流域スケールの高精度な河川水温予測と流域の水・熱収支の理解が極めて重要である。本研究では、流域網羅的な河川水温モニタリングを実施するとともに、それを活用しつつ深層学習と物理モデルに基づく流域一貫の河川水温予測モデルを開発した。さらに、深層学習モデルと物理モデルの精度比較を実施し、気候変動下における河川水温の将来予測に対する各種モデルの有用性と課題について考察するとともに、気候変動が流域システムにおける河川水温に及ぼす影響評価まで実施した。

まず、河川水温の連続モニタリングは、中国地方の 5 つの一級水系(佐波川、高津川、太田川、江の川、高梁川)を対象に流域網羅的に実施した。その結果、高津川における河川水温の変動は地下水との熱交換による影響を受けていることや、佐波川、江の川および高梁川の本川におけるダム下流地点で夏季の河川水温が他の地点と比較して低くなることが明らかになった。また、気温に対する水温の上昇には特に河床勾配や標高、小起伏丘陵地、扇状地性低地、小起伏山地のような地形的な特徴量の寄与が大きいことを明らかにしたほか、気温と水温の散布図がループを描くヒステリシス特性に着目することで地下水との熱交換やダムが水温に及ぼす影響を定量的に評価した。

次に、深層学習モデルに関して、これまで流域一貫の河川水温を予測可能なモデルの開発事例はなかったため、流域内多地点の水温を同時予測可能なモデルの開発と高度化に関する検討を実施した。高津川流域を対象に、気温のみを入力に与える条件下で単一地点の水温を地点別に予測するモデルと流域内全地点の水温を同時予測可能なモデルの比較をした結果、流域内全地点の水温を同時予測するモデルが高精度であった。次に、入力層のデータの種類に関する検討として、中国地方の 5 つの一級水系を対象に、気温のみを入力する場合と気温に加えて雨量も入力する場合の 2 条件を比較した結果、気温のみの入力では 6～8 月の出水時期の水温を 5℃ 程度過大評価したのに対し、雨量を用いると 2℃ 程度に低減した。

さらに、物理モデルに関して、高精度な水温予測と正しい水・熱収支の理解には地下水流とその熱輸送の考慮が重要であることから、降雨流出氾濫(Rainfall-Runoff-Inundation: RRI)モデルと準三次元地下水流動モデルを融合し、河川の熱収支式を実装することで、地表水と地下水を統合した流域水・熱収支一体解析モデルを開発した。高津川における精度検証の結果、河川流量は平水時・出水時ともに高精度であり、ピーク流量誤差は地下水流を考慮していない場合のモデルと比較して 20%軽減し、平水流量の誤差率も約 50%軽減した。次に、河川

(様式 9 号)

水温に関して、本川の精度は極めて高精度に予測した。地下水との熱交換を考慮していないモデルでは冬季の平均水温の誤差が地点全体で 2°C 以上過小評価していたのに対し、新たに開発したモデルでは 1°C 以下に低減した。そして、水収支の検討として、本川下流における集水域全体の直接流出量と地下水流出量のバランスを各月で比較した結果、月積算雨量が 200mm 以下の時期は地下水流出量が総流出量の 60% 以上であったのに対し、月積算降水量が 300mm を超えるような出水時期は直接流出量が 80% 以上と支配的になることが明らかとなった。さらに、水温観測地点における熱収支を検討したところ、冬季は地下水との熱交換項が水温上昇に寄与し、特に本川上流は 40% 程度と大きいことが明らかとなった。また、流域熱収支の分析結果より、高津川の水温は流域全体として地下水による熱交換による影響を受けていることや、その影響度合いは支川の集水域別で異なることを明らかにした。

最後に、深層学習モデルと物理モデルの精度を比較した結果、6～8 月の夏季を除く季節においては、流域内のほとんどの水温観測地点で深層学習モデルの方が高精度であった。ただし、6～8 月の高水温の時系列はほとんどの地点で物理モデルの方が高精度であったことに加え、地下水との熱交換の影響を強く受けるような地点においても物理モデルが高精度であった。d4PDF の 2°C 上昇、 4°C 上昇実験から得られる気温、雨量を各種モデルに入力して河川水温の将来予測を実施した結果、年全体的には深層学習モデルと物理モデルで同様の傾向が得られた。その一方で、夏季の気温が 30°C 以上と高温の時期では深層学習モデルの予測水温が頭打ちになる傾向や、河川流量の将来変化が水温上昇に与える影響が夏季において物理的に整合性の低い結果になり、深層学習モデルに課題が認められた。物理モデルの結果を基に気候変動が流域全体の河川水温に及ぼす影響を検討したところ、夏季の水温が 28°C 以上になる区間が現況期間や 2°C 上昇実験では存在しなかったのに対し、 4°C 上昇実験では下流域全体に拡大した。また、冬季の水温は現況期間では流域全体で 9°C 以下であったのに対し、 2°C 上昇実験では多くの領域で 9°C 以上の値をとり、 4°C 上昇実験では 11°C 以上になることが予測された。

以上のように、深層学習モデルと物理モデルを用いて流域システムにおける高精度な河川水温予測と水・熱収支の理解を実現したほか、両モデルの有用性や課題を明確にしつつ、気候変動が流域システムにおける河川水温に及ぼす影響を定量的に評価した。

公聴会においては、本研究で開発した物理モデルの基礎方程式の詳細事項、全国規模でのモデルの展開、各種水温予測モデルの位置づけや融合の可能性に関して説明が求められた。いずれの質問に対しても適切な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は以下の通りである。

【関連論文（査読のある雑誌等）計 5 編】

- (1) 著者氏名 : 福丸大智, 赤松良久, 新谷哲也, 藤井晴香
論文題目 : 深層学習を用いた流域内多地点における河川水位・流量予測モデルの開発
学術雑誌名 : 土木学会論文集 B1 (水工学)
巻、号、頁 : 77 巻, 2 号, I_1231-I_1236 頁
発行年月 : 2021 年 12 月発行
- (2) 著者氏名 : 福丸大智, 滝山路人, 宮平秀明, 赤松良久
論文題目 : 深層学習を用いた流域一貫の河川水温予測に関する基礎的検討
学術雑誌名 : 河川技術論文集
巻、号、頁 : 第 28 巻, 193-198 頁
発行年月 : 2022 年 6 月発行
- (3) 著者氏名 : 福丸大智, 赤松良久, 滝山路人, 渡部哲史, 宮平秀明, 宮園誠二
論文題目 : 深層学習を用いた気候変動が流域スケールの河川水温に及ぼす影響に関する検討
学術雑誌名 : 土木学会論文集 B1 (水工学)
巻、号、頁 : 第 78 巻, 2 号, I_925 I_930 頁
発行年月 : 2022 年 11 月発行

(様式 9 号)

(4)著者氏名 : 福丸大智, 赤松良久, 新谷哲也

論文題目 : 深層学習を用いた中小河川流域一貫の水位予測手法の高度化に関する研究

学術雑誌名 : 土木学会論文集

巻、号、頁 : 第 79 巻, 8 号, 論文 ID : 22-00234

発行年月 : 2023 年 8 月発行

(5)著者氏名 : 福丸大智, 赤松良久

論文題目 : 深層学習を用いた流域一貫の河川水温予測モデルの高度化に関する検討

学術雑誌名 : 土木学会論文集 特集号(水工学)

巻、号、頁 : 第 81 巻, 16 号, 論文 ID : 24-16058

発行年月 : 2025 年 2 月発行