（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和６年度　海外派遣研究員研究報告書

令和８年６月１９日

日本大学理事長　　殿
日本大学学長　　殿

所　　属　　工学部（工学研究所）
資格・氏名　　教授・朝岡良浩

■本報告書の内容を公表することは，了承しております。
□本報告書の内容を公表することは，差し控えください。
※いずれかにチェックし（■）提出すること

令和　６　年度海外派遣研究員（　中期　）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　中期

２　研究課題

水資源分野の気候変動適応に関する研究

３　派遣期間　　２０２４年　８月２１日　～　２０２５年　３月１５日

４　派　遣　先　　オランダ王国・ボリビア多民族国

５　研究目的

本研究の目的は、欧州が先導する水資源分野の気候変動アセスメント手法を修得し、気候変動への適応策を展開することである。温暖積雪域や熱帯氷河の下流域では、水道供給や灌漑用水が融雪や氷河融解に大きく依存しており、これらの地域は気候変動に対して脆弱である。派遣者はこれまで、流域スケールでの水資源分野における気候変動影響評価に取り組んできたが、本研究では、従来の流域スケールから領域スケールへと拡大することで、複数の流域を統合的に扱い、各流域の水資源の気候変動応答を相対的に把握できる基盤技術とデータベースの構築を目指す。これにより、地球科学分野における水文学的理解の深化とともに、水資源工学的観点から気候変動の適応策が必要となる流域を選定し、効果的な適応策を提案することが期待される。

本研究では、オランダ・ユトレヒト大学 Immerzeel 教授の研究グループに加わり、水文モデル、人工衛星プロダクト、気候・気象再解析データを統合した最新の評価手法を修得する。その上で、温暖積雪域および熱帯氷河域といった領域スケールにおける本手法の適用性を検証する。また、ボリビアサンアンドレス大学ではアンデス高地の領域スケールにおける水資源評価と適応策の社会実装に向けた水文・水資源情報の収集および研究協議を進める。

（ 様式D－２ ）

６　研　究　概　要

①研究の方法

水資源分野において気候変動の適応策を検討する上で、広域の水循環を定量化することが必要となる。世界の山岳都市や日本の北陸・東北地方のように氷河や積雪の融解水に依存する地域では、融雪出水の期間と河川流量が水利用の形態に大きく影響する。特に降雪や融雪は気候変動の影響を受けやすい水循環の要素であり、その空間的偏在性も顕著である。派遣者はこれまでに河川流域単位で水循環・水資源の評価に取り組んできたが、対象領域を領域スケールに拡大することで流域間比較のみならず、地球科学的な水循環に関する議論が可能となる（Immerzeel *et al*., 2020）。特に本研究が想定するアンデス高地の熱帯氷河群と日本の温暖積雪域は世界の氷河域および積雪域の中でも平均気温が高く、地球規模の温暖化に対して脆弱な環境であり、学術面と社会実装の両面において重要性が高い地域である。

本研究は領域スケールの水循環・水資源解析に向けて、水循環モデルに導入するデータベース整備と再現性の検証、水資源評価への展開を目指す。具体的には、以下に示す 3 つの研究項目に取り組む。

(1) ユトレヒト大学および FutureWater が中心となって開発した SPHY model (Spatial Processes in Hydrology model, Terink *et al*., 2015)に、人工衛星プロダクト、気象・気候再解析データ、数値地図情報を組み合わせた水循環評価手法（Immerzeel *et al*., 2012）をアンデス高地の氷河域に適用する。

(2) 水循環解析の結果に基づき、積雪・氷河域で気候変動が水資源に及ぼす影響を評価する手法を確立する。

(3) 領域スケールの水循環・水資源解析への拡大と社会実装に向けた情報収集および協議を行う。

②渡航先での活動内容

(1) Department of Physical Geography, Faculty of Geosciences, Utrecht University

滞在期間：2024 年 8 月 23 日から 2025 年 3 月 3 日

- Immerzeel 教授グループのゼミ、Literature Review、卒論・修論・博士論文審査会への参加
- 領域スケールの水循環データベースの作成、SPHY model のアルゴリズム修得、Monte Carlo Simulation によるテストエリアのパラメータ算定と検証
- アンデス高地および温暖積雪域のダム運用に着目した水資源解析
- 研究成果に関する論文執筆

(2) Institute of Hydraulic and Hydrology, Major University of San Andres

滞在期間：2025 年 3 月 5 日から 2025 年 3 月 12 日

- アンデス高地の水資源運用およびコンフリクトに関する情報収集
- サンアンドレス大学学長および国際連携部長との連携研究に関する協議
- JICA Chair（サンアンドレス大学主催）における、気候変動と氷河水資源に関する招待講演（Keynote Speech）

７　研究結果・成果

・水循環解析

SPHY model に組み込む地理情報データベースとして、氷河域、氷厚、土壌データを整備した。雪氷域データは、氷河インベントリ（Randolph Glacier Inventory version 6.0, Li *et al*., 2021）に登録された氷河を対象とし、Landsat 衛星のデータから算出した NDSI（Normalized Difference Snow Index）を用いて作成した。氷厚データとしては、Millan *et al*. (2020)のグローバルデータセット（解像度 50m）を使用した。土壌水理特性に関するパラメータとしては、HiHydroSoil ver2.0（解像度 1km）の Saturated Hydraulic Conductivity（飽和透水係数）、Wilting Point（萎凋点）、Permanent Wilting Point（永久しおれ点、永久萎凋点）、Field Capacity（圃場容水量）、Saturated Water Content（飽和含水率）を用いた。

次に、SPHY model の融解量計算モジュールについては、雪氷面の表面エネルギー収支の解析に基づき、ステップワイズ法を用いて主要変数を抽出し、特に低緯度帯の気候特性を反映した簡易モデルを作成し、従来の計算方法を改良した。さらに、SPHY model には多くのパラメータが設定されており、これらはユトレヒト大学地球科学部のクラスター計算機 eejit（89 ノード、1 ノードあたり 96CPU と 256GB メモリ）に実装し、モンテカルロシミュレーション（1 ノード使用、500 シミュレーションを 2 セット実施）を行うことで最適なパラメータ群を導出した。氷河下流の複数の水文観測所における河川流量データを用いて検証した結果、季節性を良好に再現できることを確認した。派遣中に研究成果の一部を学術論文として執筆・投稿し、以下２編が国際誌に掲載された。

(1) Yoshihiro Asaoka, Genki Saito, Takeshi Yamazaki, Edson Ramirez, Walter W. Immerzeel, 2025. Energy balance analysis of a tropical glacier in the Andes and identification of key meteorological variables for empirical melt estimates, *Annals of Glaciology*, **66**, e16.
(2) Genki Saito, Yoshihiro Asaoka, Takeshi Yamazaki, Javier Mendoza and Walter W. Immerzeel 2026. Surface energy balance response to the 2014–2016 El Niño at Huayna-Potosí Glacier in the Tropical Andes, *Hydrological Research Letters*, **20**, 82-89.

・水資源解析

上記の水循環シミュレーションの結果に基づき、さらにダム運用に着目してアンデス高地および日本の温暖積雪域の水資源評価を実施した。現状で定められているダムの取水・貯水・放流・アロケーションの規定が、気候変動に伴う水循環の変動下においても維持できるかを評価した。アンデス高地では、氷河の縮小に伴って湿潤期に貯水量が十分に回復せず、渇水となる頻度が増加し、その結果として灌漑用水の取水に影響が生じることを示した。同様に、日本の温暖積雪域では、気候変動により融雪出水の期間が早期化・短縮するため、農業用水を取水する前の時期にダムから下流へ放流する量が増加し、一方で農業用水を取水する期間には十分な用水を確保できない可能性があることを示した。本研究の手法では、各種取水量や取水時期、アロケーショ

ンを感度分析することにより、渇水被害を緩和するダムの運用規定を作成可能である。これらの研究成果を学術論文として執筆しおり、学術誌に投稿予定である。

・研究調整・ネットワーク構築

8 日間のサンアンドレス大学滞在中には、まずサンアンドレス大学で García 学長、Tamayo 国際連携部長、Gutiérrez 工学部長と面会する機会が得られ、ボリビアの水資源管理における気候変動適応策に関する共同研究を中心とした大学間連携および人材交流を進めていくことに合意した。また、大学間協定の締結および大型予算の申請についての要請も受けた。続いて、同大学の水理・水文研究所および化学プロセス研究開発研究所、さらに JICA ボリビア事務所を訪問し、今後の水循環・水資源評価の共同研究の方向性について協議した。ボリビア首都圏の山岳部・農村部・都市圏における水循環と水資源の相互作用の評価を目的として、これまでの山岳域中心のモニタリング体制を拡大することを決定した。3 月 10 日には、サンアンドレス大学工学部で開催された JICA Chair において、「Impact of climate change on water resources management」という題目で熱帯氷河域の水資源における気候変動適応について講演を行った。

・今後の展開

ユトレヒト大学滞在中には、SPHY model を基盤とする水循環・水資源評価をテストエリアで検証し、領域スケールに展開する基盤を整えることができた。対象エリアとしてボリビア・アンデス高地の熱帯氷河群と日本の北陸・東北地方を想定しており、特にボリビアの領域スケールで実施するためのモニタリング体制と連携関係構築の布石を築くことができた。

今後の展開として、Immerzeel 教授グループとの研究連携を継続し、ISIMIP（The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project）が公開する気候モデル出力値を基本とした共通気候シナリオを用いて、SPHY model をアンデス高地の氷河群全域および日本の東北地方に適用し、気候変動下の水循環シミュレーションを実施する。これにより領域スケールの水循環の気候変動影響評価を展開し、流域間比較を通じて水資源が脆弱な流域を相対的に特定し、地域の実情に沿った水資源管理の適応策を作成・提案する予定である。

参考文献

- Immerzeel, W.W., Lutz, A.F. *et al*., 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature* **577**, 364–369.
- Immerzeel, W.W., van Beek, L.P.H. *et al*., 2012. Hydrological response to climate change in a glacierized catchment in the Himalayas. *Climatic Change* **110**, 721–736.
- Terink, W., Lutz, A. F., Simons, G. W. H., Immerzeel, W. W. *et al*., 2015. SPHY v2.0: Spatial Processes in Hydrology. *Geosci. Model Dev.* **8**, 2009–2034.
- Li Y., Li F., Shangguan D., Ding Y., 2021. A new global gridded glacier dataset based on the Randolph Glacier Inventory version 6.0. *Journal of Glaciology* **67**, 773–776.

- Millan, R., Mouginot, J., Rabatel, A. *et al.,* 2023. Ice velocity and thickness of the world’s glaciers. *Nat. Geosci.* **16**, 188.
- Gijs Simons, Reinier Koster, Peter Droogers, 2020. Hihydrosoil v2.0 -high resolution soil maps of global hydraulic properties, FutureWater Report 213.

以　　上