

ダム流入量データを用いた山地流出の 長期変化傾向の分析

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○星野 剛

気候変動により降雨の二極化（大雨と少雨の激化）、降雪から降雨への変化、融雪の早期化、蒸発散量の増大等が予想されている。これらの影響を受け、降水の流出量やその卓越する時期が変化するなどの水文流出の変化が予想されており、これによる渇水リスクの増大や生物への影響が懸念されている。それらは将来の話ではなく、気温上昇が顕在化している現時点においても降雨や融雪水の流出に何らかの変化が生じていると考えられる。本研究ではダムへの流入量を自然状態の山地流出とみなし、それらのデータを分析することで水資源を構成する重要な要素である山地からの水文流出の変化を調べた。その結果、積雪域においては融雪の早期化に伴う流出の早期化が発生していることが明らかとなった。

キーワード：水資源；山地流出；ダム流入量；気候変動

1. はじめに

気候変動による降雪から降雨への変化、融雪の早期化（例えば¹⁾）、降雨の二極化（大雨の極端化²⁾と少雨の極端化³⁾）、蒸発散量の増大などが予想されている。それらがもたらす水文流出の変化（図-1）は河川流量の年間変動パターンの変化や渇水流量の低下³⁾を招くことが予想されている。これによる渇水リスクの増大や生物への影響が懸念されている。

気候変動による水文流出の変化が既に生じていることも指摘されている。観測データから、気温の上昇による融雪⁴⁾および融雪出水⁵⁾の早期化、年間および季節的な基底流量の変化⁶⁾が見られている。さらに、本州日本海側では、気温の上昇に伴い河川流量の季節性が変化しているとの指摘もある⁷⁾。

山地が多くを占める日本では気候変動により山地流出がどのように変化するかは水資源の管理にとって極めて重要となる。また、日本の水文流出の特徴は地域によって異なるため、気候変動が及ぼす影響も地域性を有することが予想される。本研究では、まず、自然状態の山地流出とみなせるダムへの流入量の観測データを用いて日本全国における山地流出の特徴をクラスター分析によって調べた。次に、それらに対してトレンド分析を実施することで近年の山地流出の変化傾向を流出パターン別に調べた。気候変動データと水文流出モデルを用いた将来予測⁸⁾なども行われているが、本研究は観測データのみから変化傾向を分析するものであることから、気候モデルや水文モデルの不確実性を含まない分析である点を強調しておく。なお、本論文は出版済みの論文の内容をまとめたものであり、詳細は参考文献⁹⁾を参照されたい。

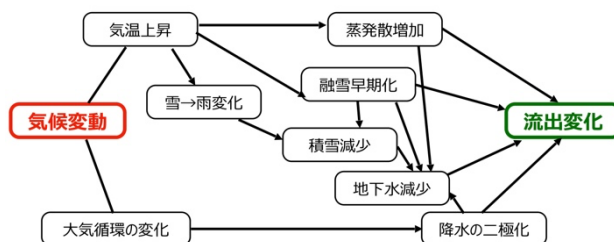


図-1 気候変動に伴う降水と流出の変化

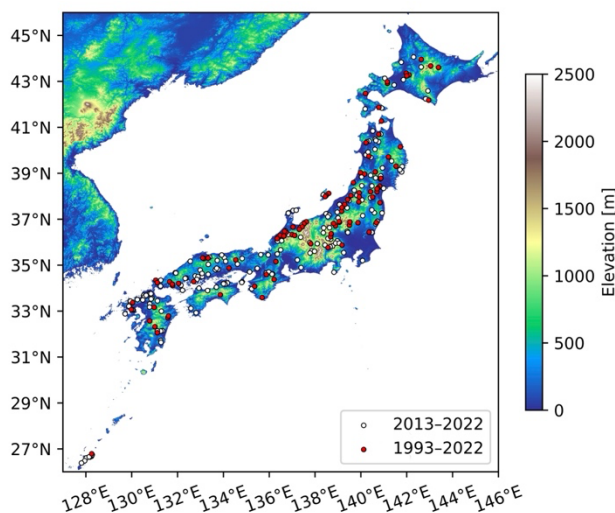


図-2 対象としたダム（参考文献⁹⁾より引用）

白点と赤点はそれぞれ2013年から2022年までの10年間、1993年から2022年までの30年間のデータが使用可能なダム。前者はクラスター分析、後者はトレンド分析に用いた。

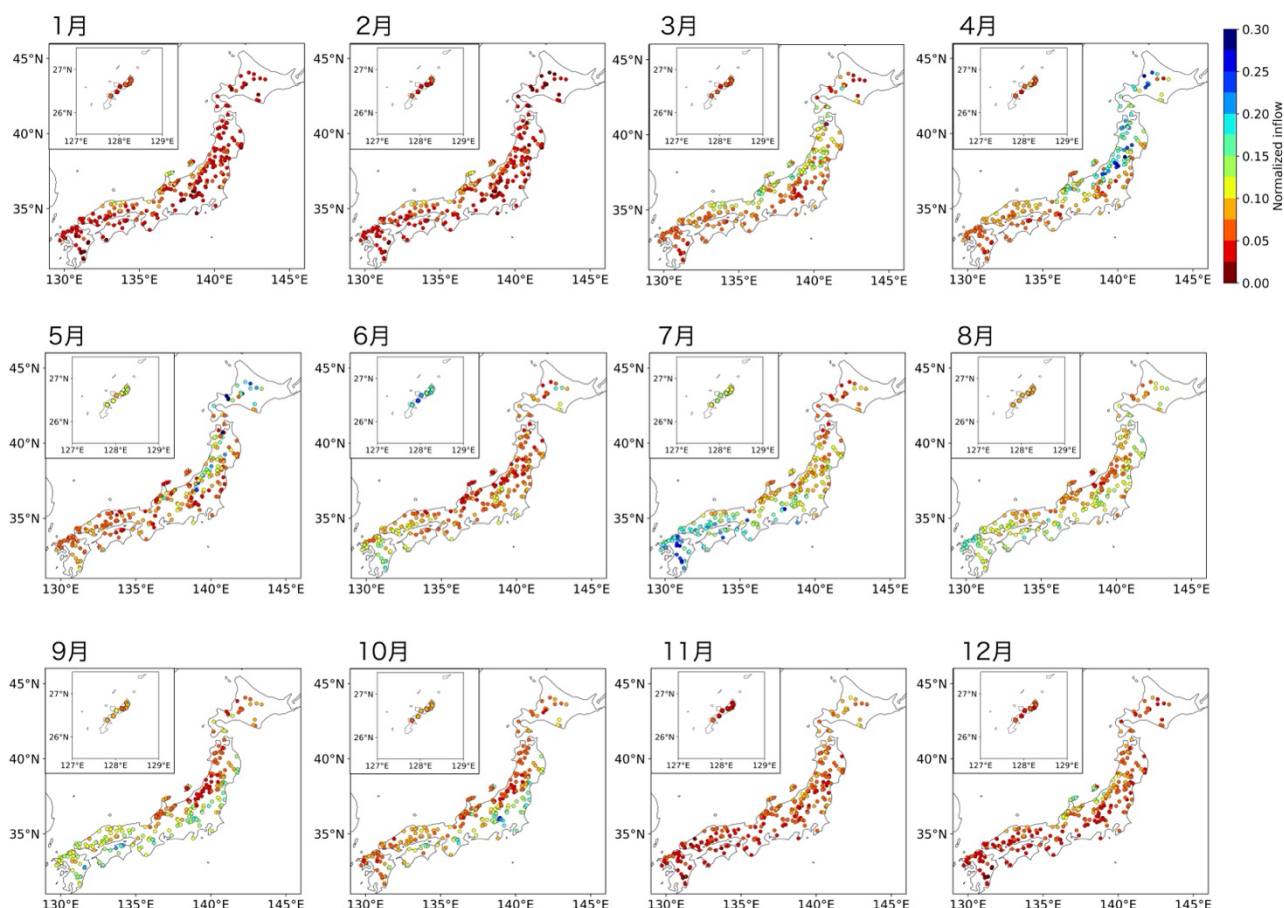


図-3 各月の正規化流入量（参考文献⁸⁾を一部改変）

2. 使用したデータと分析手法

(1) ダム流入量データ

本研究では「ダム諸量データベース」(<https://mudam.nilim.go.jp>)に公開されている国及び水資源機構、都道府県管理ダムの月統計値を使用した。本研究では、自然状態の山地流出によるダム流入量を評価するため上流に他のダムが存在するダムは分析対象から除外した。また、複数の山からの流出の混在を避けるため、集水面積が300 km²を超えるダムは分析の対象から除外した。さらに、工事や観測エラー等の影響を受けたダムを除外するため対象期間（2013～2022年）における月流入量の中央値の0.1倍から10倍の範囲に収まらない月が存在するダムも分析対象から除外した。前述の条件を満たし、2013年から2022年までの期間に欠損のない266のダム（図-2）をクラスター分析に用いた。また、1993年から2022年までの期間に欠測データのない94のダム（図-2）をトレンド分析に用いた。

(2) クラスター分類手法

年間の流入パターンの分類を目的に月流入量データを用いたクラスター分析を実施した。ダム流入量は流域面積の影響を大きく受けることから、流域面積の影響を除外するため正規化ダム流入量を算出した。正規化ダム流入量は各ダムの月流入量を平均年流入量で除すことで求めた。

クラスター分類には階層型クラスター分類を採用した。確率分布の類似性を定量化できる指標であるJensen-Shannon Divergence（JSD）を用いて、二つのダム間の流入パターンの類似性を評価した。この手法により、正規化月流入量の平均値と年ごとのばらつきの双方を考慮した類似性の評価が可能となる。本研究では二つのダム間の各月の正規化月流入量の確率分布に対するJSDを毎月算出し、12か月間のJSDの合計を二つのダムにおける流入パターンの類似性の尺度として用いた。すべての2つのダムの組み合わせに対して類似度を計算することで距離行列を作成し、階層型クラスター分類により分類した。なお、クラスター間の距離の計算にはワード法を採用した。

(3)トレンド分析手法

年流入量と月流入量の変化傾向を調べるためトレ

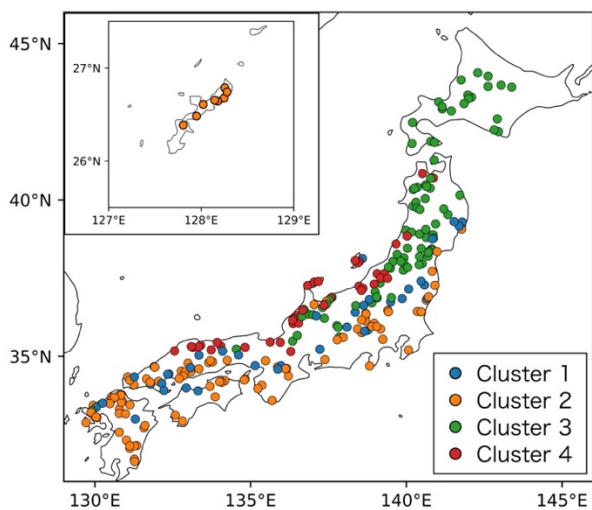


図4 クラスター分類結果 (参考文献⁸⁾ より引用)

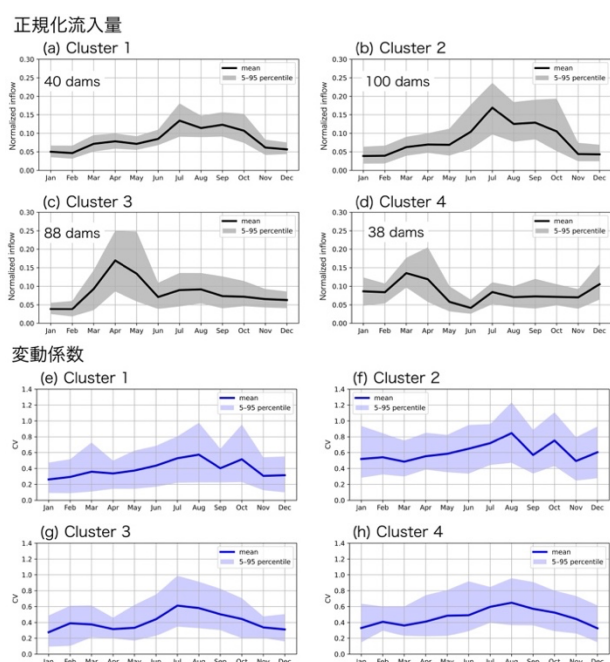


図5 各クラスターの特徴 (参考文献⁸⁾ を一部改変)
上は正規化流入量、下は変動係数を表す。

ド分析を実施した。年流入量および月流入量の変化傾向として、Sen's slopeを算出した。変化量を変化率に変換するため、各ダムにおいて年流入量と月流入量をそれぞれ平均年流入量および平均月流入量で除算した。また、Mann-Kendall検定により変化傾向の統計的有意性を評価した。

3. 分析結果

(1) 山地流出のパターン分類

2013年から2022年までの10年間における流入量データが利用可能な266のダムの各月の正規化流入量を算出し

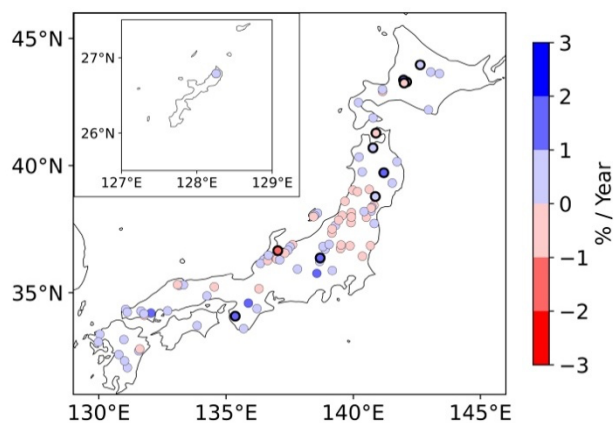


図6 年流入量の変化傾向 (参考文献⁸⁾ より引用)

た(図-3)。正規化流入量に基づきクラスター分類を実施し、4つのクラスターに分類した(図-4)。その結果、流出パターンの地域性が明確となった。クラスター1(40ダム)は本州・四国・九州の内陸側に位置する。クラスター2(100ダム)は本州・四国・九州の太平洋側に位置する。クラスター3(88ダム)は北海道および本州北部の日本海側に位置する。クラスター4(38ダム)は本州の日本海側に位置する。

クラスターごとに流入の卓越する時期は異なる(図-5上)。クラスター1と2は7月に流入量が最大となり、6月から10月までの流入が総流入量に占める割合が大きい。クラスター1と2は正規化流入量の平均値は類似した傾向を有しているが、その年変動の大きさは大きく異なり、クラスター2は全月においてクラスター1より変動係数(CV)が約0.2~0.3大きい(図-5下)。この結果は、夏季の降雨がクラスター1および2のダム流入量の総量に大きく寄与していることを示している。また、太平洋側(クラスター2)のダムは、台風や梅雨などの大雨の有無により流入量が大きく変わるため、流入量のばらつきが大きいと考えられる。クラスター3では4月と5月に流入量が多く、この2ヶ月で年間流入量の約3分の1を占める。クラスター4では3月と4月に流入量が顕著に増加する。クラスター3と4のダムは北海道や本州日本海側に位置し、降雪量が大きく、山地流出に対する融雪の影響は大きい。クラスター3はより北に位置することから、雪解けの開始時期がクラスター4より遅く、クラスター3の地域では降雪の割合がより多いことから、山地流出に占める融雪の割合がクラスター4の地域よりも大きいと考えられる。

年流入量の変動係数(CV)のクラスター平均値は、クラスター1、2、3、4でそれぞれ0.18、0.27、0.16、0.19である。クラスター1の年流入量のCVは2番目に小さく、年間を通じて低いCVとなる。融雪水が年流入量に占める割合が大きいクラスター3および4の地域では、融雪期におけるCVが小さいことから、年流入量が比較的安定

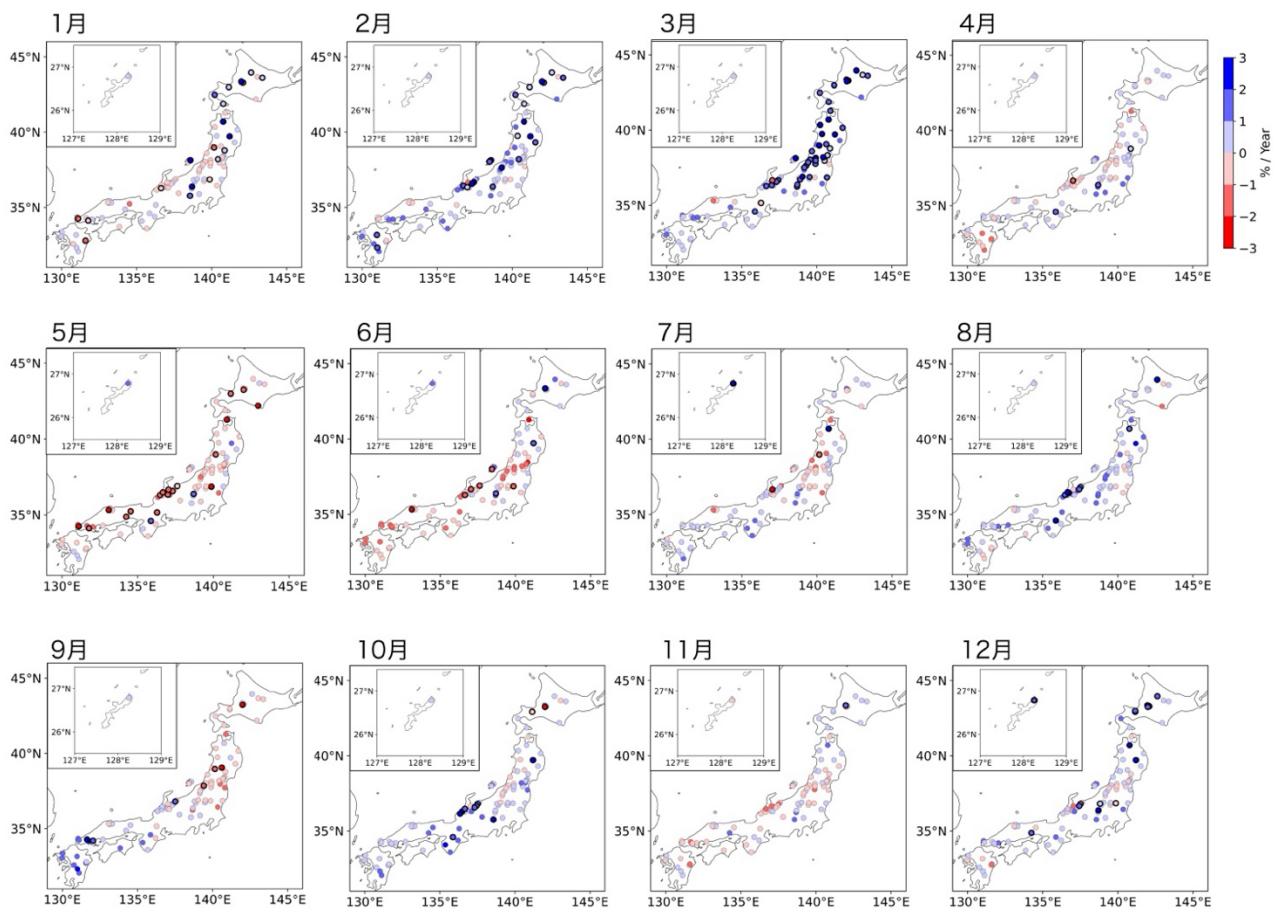


図-7 トレンド分析結果 (参考文献⁸⁾ を一部改変)

太線の丸で示したダムは Mann-Kendall 検定において有意水準 10% の検定において変化傾向が検出されたダムを表す。

する。一方、クラスター2は流入量の大きい夏季のCVが大きい、年流入量のCV自体も大きく全クラスターで最大となる。これらの結果から、年流入量のばらつきの大きいクラスター2の地域（太平洋側地域）においては安定した水資源の確保のために貯水がより重要となる水文的な特徴を有することが示唆される。

(2) 山地流出の変化トレンド

本研究では、1993年から2022年までの期間において欠測のない94のダムを対象に流入量の長期変化傾向を分析した。その結果、年流入量は多くの地点で有意な変化傾向を示さないことがわかった（図-6）。一方で、月流入量には顕著な変化傾向を示す月が存在することがわかった（図-7, 8）。全クラスターにおいて、12月から4月にかけて流入量が増加し、その後5月から6月にかけて減少する傾向が見られた（図-8）。クラスター3では、3月の流入量増加率は約1.5%/年であり、約75%のダムで有意な増加が確認された。同様にクラスター4では、3月の流入量の増加率は約0.3%/年であり、約25%のダムで有意な増加が確認された。クラスター3と4における3月の流入量増加、5月の流入量の減少は、積雪地域における山地の融雪開始時期が早まっていることを示唆している。

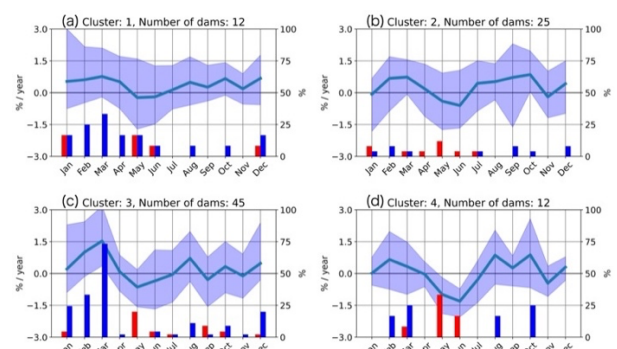
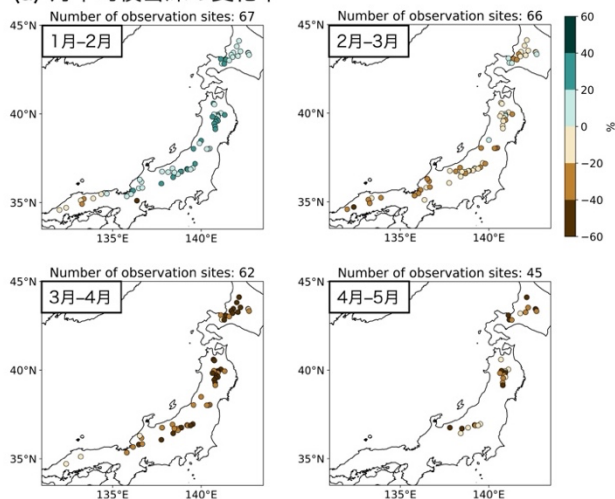


図-8 各クラスターの変化傾向 (参考文献⁸⁾ より引用)

融雪の早期化が生じているかを確認するために「国土交通省 水文水質データベース」 (<https://www1.river.go.jp/>) に公開されている観測積雪深データによる分析を実施した（図-9）。なお、分析手法の詳細は参考文献を参照されたい。融雪の早期化を裏付けるように、日本の山地で観測された積雪データも、融雪期の前半である1月から3月（高緯度では4月）では積雪深の減少幅が増加傾向にあり、3月（高緯度では4月）から5月の減少幅は減る傾向にある。これは1月から3月（高緯度では4月）にかけて融雪が進む（もしくは積雪深の増大が鈍化する）ことを、3月（高緯度では4月）から5月の減少幅の減少傾向

(a) 月平均積雪深の変化率



(b) 変化トレンド

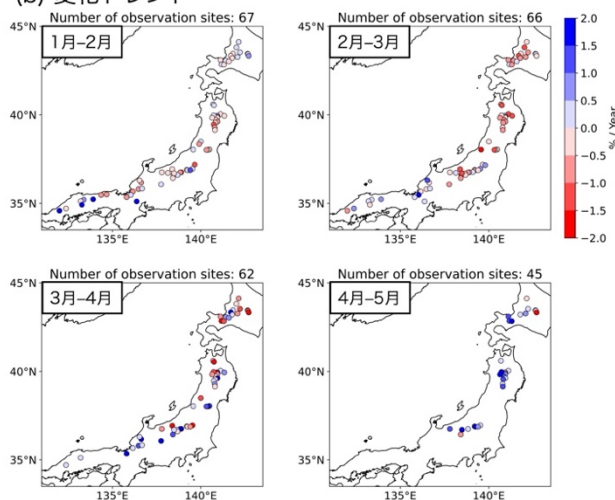


図-9 積雪深の月ごとの変化と変化トレンド（参考文献⁸⁾を一部改変）

は残雪が少なくなり積雪深の変化幅が小さくなることを意味すると考えられ、融雪の早期化の傾向を裏付ける結果である。

4. まとめ

日本の山地流域における流出パターンとその長期的な変化傾向を、ダム流入量の観測データから分析した。クラスター分析の結果、日本における山地流出パターンには明瞭な地域特性が存在することがわかった。また、30年間の観測データを用いたダム流入量のトレンド分析

結果から、年間の総流出量は顕著な変化傾向が見られなかった。一方で、積雪地域の月流出量は顕著な傾向が確認され、多数の地点で3月に流出が増加し、5月に減少する傾向が確認されるなど、雪解けの早期化が進行中であることが示唆された。また、積雪深の観測データからも融雪の早期化を裏付ける変化傾向が確認された。

本研究は、日本の積雪地域において山地流出の卓越時期が現在進行形で変化していることを示しており、同様の傾向はダムのない山地流域でも生じていると考えられる。これらの変化は気候変動により今後さらに進行することが予想されることから、将来の適切な水資源管理のためにはこのような変化を前提条件とした検討が必要になると考えられる。

参考文献

- 1) Kawase H., Murata A., Yamada K., Nakaegawa T., Ito R., Mizuta R., Nosaka M., Watanabe S. and Sasaki H.: Regional characteristics of future changes in snowfall in Japan under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol.17, pp.1-7, 2021.
- 2) Kawase H., Nosaka M., Watanabe S., Yamamoto K., Shimura T., Naka Y., Wu YH., Okachi H., Hoshino T., Ito R., Sugimoto S., Suzuki C., Fukui S., Takemi T., Ishikawa Y., Mori N., Nakakita E., Yamada T.J., Murata A., Nakaegawa T., Takayabu I.: Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol.128, e2023JD038513, 2023.
- 3) 西村宗倫, 高田望, 坂本光司, 嶋谷祐馬, 柴川大雅, 因幡直希, 仲江川敏之, 池淵周一, 竹下哲也: WBC-d4PDF5km(2022)を用いた気候変動による渇水への影響のマクロ的評価, 土木学会論文集 (地球環境), Vol.81, No.27, 25-27035, 2025.
- 4) 亀田貴雄, 桑迫拓哉, 白川龍生: 日本の積雪地域における積雪深および積雪期間の長期変化—1962年から2021年までの60年間における年平均積雪深と年最大積雪深による解析—, 雪氷, Vol.85, No.4, pp.199-222, 2023.
- 5) Yamanaka T., Wakiyama Y. and Suzuki K.: Is snowmelt runoff timing in the Japanese Alps region shifting toward earlier in the year?, *Hydrological Research Letters*, Vol.6, pp.87-91, 2012.
- 6) Chapasa SN., Whitaker AC.: Assessing characteristics and long-term trends in runoff and baseflow index in eastern Japan, *Hydrological Research Letters*, Vol.17, pp.1-8, 2023.
- 7) Shakil A. and Whitaker AC.: Climate change impacts on seasonal runoff in the snowy Japan Sea region of Honshu, Japan, *Hydrological Research Letters*, Vol.19, pp.8-14, 2025.
- 8) Hoshino T.: Annual patterns of mountain runoff and its long-term trends in Japan based on dam inflow data, *Hydrological Research Letters*, Vol.19, pp.149-155, 2025.