

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01370

研究課題名(和文) 動的アイソスケープモデルを用いた水循環成分評価とその多面的展開

研究課題名(英文) Evaluation of Water Cycle Components Using Dynamic Isoscape Models and Its Multifaceted Development

研究代表者

山中 勤 (Yamanaka, Tsutomu)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：80304369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：全球客観解析データを入力とした動的降水アイソスケープモデルを開発するとともに、これと統合可能な各種同位体モデルを構築した。さらに、流域蒸発散、融雪出水、湖沼水収支、及び温泉に関する成分分離への応用を行った。その結果、蒸散/蒸発散比を正確に推定するためには選択効果の適切な考慮が必要であること、融雪出水モデルの高度化と正確な融雪成分推定を行う上で河川水の同位体情報が有効であること、涵養水同位体比の時空間的不均質性が適切に考慮できれば湖沼の蒸発/流入比を高精度に推定可能であること、ならびに天水アイソスケープモデルと地水曲線の使用により地圏水成分の混合割合が正確に評価できることなどが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球上あるいは地球内部の水循環は様々な要素で構成されているが、物理的手段によって直接計測できるものは限られている。そのため、水の安定同位体情報によってそれらを推定するアプローチは大変有望であると言える。本研究によって開発されたモデル群及びそれらから出力されるデータ群は、そうした研究の情報・技術インフラとして貴重である。また、それらの応用上の留意点や改善策を提示した点には学術的価値がある。さらに、これらの適切な利用は水資源や生態系サービスを適切に保全するうえで役立つと考えられ、その社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：We developed a dynamic precipitation isoscape model using global objective analysis data as input and constructed various isotope models that can be integrated with it. Furthermore, we applied these models to component separation in watershed evapotranspiration, snowmelt runoff, lake water balance, and hot springs. As a result, we found that: (1) proper consideration of selection effects is necessary to accurately estimate the transpiration/evapotranspiration ratio; (2) river water isotope information is effective for advancing the snowmelt runoff model and accurately estimating snowmelt components; (3) the spatiotemporal heterogeneity of recharge water isotope ratios must be appropriately considered to accurately estimate the evaporation/inflow ratio of lakes; and (4) the use of a meteoric water isoscape model and a lithospheric water curve allows for the precise evaluation of the mixing ratio of lithospheric water components.

研究分野：水文科学

キーワード：水循環 同位体 トレーサー モデル

## 1. 研究開始当初の背景

降水として大気から陸域に与えられた水の一部は、蒸発散によって大気へと還流する。蒸発散とは植物体内を通過する蒸散成分と通過しない蒸発成分の和であるが、流域あるいはそれ以上の空間スケールではこれらを分離して直接測定することはできない。従来の考え方では蒸発散は水資源の損失に過ぎないが、蒸散は農業生産あるいは生態系維持のためのいわば必要コストであり、単なる損失ではないと考えられようになってきた。また、蒸散は植物による二酸化炭素吸収とも連動しており、水資源管理だけでなく温暖化対策としても蒸発/蒸散比の定量化が必要である。こうした背景から、水の水素・酸素安定同位体比 ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) を用いてこれらの成分を分離する手法が提案され、例えば全球スケールでは蒸散成分が蒸発散の 80-90% を占めるとの推計がなされている (Jasechko et al., 2013, Nature 496: 347-351)。しかし、そのアルゴリズムには改善の余地があり、さらなる高度化が求められている。

蒸発散に限らず、水循環は異なる起源や経路をもつ複数の成分で構成されている。例えば、早春に洪水被害をもたらす融雪出水は、融雪成分だけでなく、融雪期の降水やそれ以前に流域に貯留されていた地下水成分を含む。ダムや湖沼などの地表水体に入ってくる水には地表水成分・地下水成分・降水成分の 3 つがあり、出て行く水には地表水成分・地下水成分・蒸発成分の 3 つがある。また、温泉として湧き出る水には降水を究極の起源とする天水成分と海水・マグマ水・プレート脱水流体等を起源とする非天水成分がある。これらの成分の構成割合に関する知見は、持続可能な水資源・温泉資源管理あるいは水循環の地球温暖化応答の解明を行ううえで貴重である。

地理情報システム (GIS) を駆使したアイソスケープモデルは、そうした様々な水循環成分の同定・定量化において強力なツールとなる。「アイソスケープ」とは同位体景観 (isotope landscape) を意味する造語で (West et al., 2010, 『Isoscapes』, Springer, 487 pp.) 多くの場合定常状態を想定した同位体マップによって可視化される。これまでに数多くの静的アイソスケープモデルが提案され、様々な用途に用いられている。しかしながら、方法論としては未成熟で、また定常状態を仮定しない動的アイソスケープモデルの開発が望まれていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、非定常な同位体景観を再現可能な動的アイソスケープモデルを新たに開発し、水循環を構成する様々な成分の定量的評価を多面的に推進することを目的とする。具体的には、流域蒸発散、融雪出水、湖沼水収支、および温泉を主たるターゲットとして、成分割合の定量化とその手法改善を行う。

## 3. 研究の方法

### 動的アイソスケープモデルの開発

#### 動的降水アイソスケープモデル

入力客観解析データとして JRA55 および ERA5 を用い、10 分の時間解像度で全球の大気水蒸気及び降水の同位体比を計算する動的降水アイソスケープモデルを構築した。その際、海面蒸発の際の同位体分別過程として Craig-Gordon モデル、陸面蒸発散の際の同位体分別として植生指数の全球分布を考慮した 3 段バケツモデルを導入し、また雲底下の雨滴蒸発効果も導入した。検証データとして、関東平野・華北平原・モンゴル平原の東アジア中緯度で内陸傾度を有する 3 地点で取得された日単位・イベント単位降水同位体比データを用いた。

#### 統合動的アイソスケープモデル

動的降水アイソスケープと結合するため、同位体陸面蒸発散モデル、同位体流出モデル、同位体地下水流動モデル、同位体湖沼モデル、及び地圏水同位体進化モデルを開発した。

#### アイソスケープモデルの応用

##### 流域蒸発散

鉛直 1 次元陸面蒸発散過程における同位体分別をより高精度に計算・解析するためのツールとして、同位体 SAVT モデルの改良を行い、中部地方 (菅平・野辺山) 及びカンボジアでの蒸発散・土壌水観測データによって検証した。また、同位体データを用いて蒸散/蒸発比を求める際に重要な同位体シフト量について、蒸発効果だけでなく (降水と蒸発散及びそれらの同位体比の位相差に起因する) 選択効果を制御する因子を検討した。

##### 融雪出水

流域規模の水文過程における同位体変化を評価するため、指数関数型 2 段タンクモデルに同位体過程を導入したモデルの改良を行った。また、同位体 SAVT モデルに積雪・融雪過程を導入した。これを用いて融雪流出時の同位体変化 (特に選択効果) の評価を行った。その際、長野・山梨両県 5 河川における 13 年間のモニタリングデータと富山県の 1 河川におけるモニタリングデータを入力用及び検証用に用いた。

##### 湖沼水収支

蒸発/流入比を推定する同位体湖沼モデルを構築し、中部地方の標高傾度に沿った 8 湖沼にお

ける観測データならびに屈斜路湖における 4 年間のモニタリングデータを用いて検証した。その際、入力データ用に集水域アイソスケイプモデル、また検証用に湖面蒸発モデルを新たに開発した。さらに、群馬県丸沼における湖底湧水の同位体比空間分布を説明するために集水域地下水流動モデルを構築した。

#### 温泉

温泉水中の天水成分と非天水 (= 地圏水) 成分を分離するため、間隙水・粘土鉱物層間水・構造水・鉱物結晶酸素の間の同位体交換を記述した地圏水同位体進化モデルを構築した。このモデルの検証用に、海底間隙水・海底泥火山間隙水・海岸油田塩水・火山噴気凝結水のデータを収集・コンパイルした。また、ダイアグラム上に描かれる進化軌跡として地水曲線を導出した。さらに、降水アイソスケイプモデルと数値標高モデルを用いて天水地下水アイソスケイプモデルを構築した。地圏水成分の同位体組成は、天水成分と温泉水のプロットを通る混合線と地水曲線の交点として求められる。この手法を適用するため、中部地方の計 62 の源泉を対象として採水調査を実施した。

### 4. 研究成果

#### 動的降水アイソスケイプモデル

関東平野では、 $^2\text{H}$  で 17.7‰、 $^{18}\text{O}$  で 1.88‰の RMSE でイベント単位降水同位体比の再現が可能であった (図 1)。しかし、華北平原では約 2 倍、モンゴル平原では約 3 倍の誤差があり、隔海度が大きいほど誤差が拡大する傾向がみられた。このことは、陸面蒸発散のモデル化に未だ不十分な点が残されていることを示唆する。入力データとして JRA55 と ERA5 を比較すると、ERA5 のほうが全体的に誤差は小さかったが、関東平野で特に差異が大きかった。すなわち、客観解析データの精度に対する依存性が臨海部で高く、内陸部で小さいことを意味する。d-excess の時間変動の再現性は  $^2\text{H}$  や  $^{18}\text{O}$  と比較して低かったが、雲底下蒸発のパラメタリゼーションを変えることでやや改善した。以上のことから、現時点では動的降水アイソスケイプモデルの精度は実用十分なものとは言い難いが、相対的な変化傾向はよく反映されているため、実測値と組み合わせて時間解像度の向上と精度向上を両立させることは可能と考えられる。

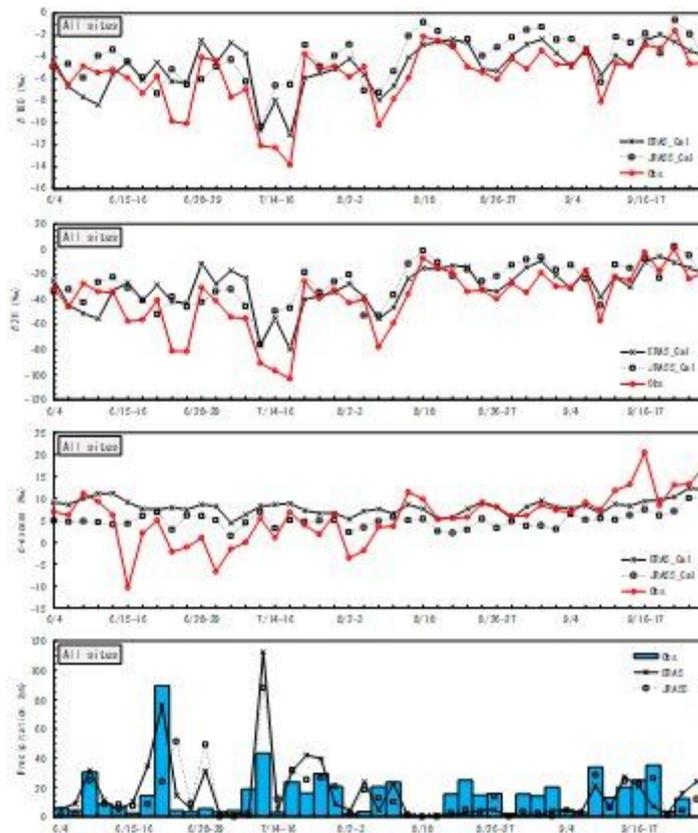


図 1 動的降水アイソスケイプモデルによる降水同位体比変動の再現結果 (関東平野の例)

#### 流域蒸発散

改良された同位体 SAVT モデルの検証として、カンボジアで観測された蒸発散量及び放射・熱収支要素と比較したところ、気孔抵抗が適切に与えられればいずれの要素もかなり良く実測値と一致することが確認された。また、結合水・可動水を分離した計算ルーチンを考案し、土壌水安定同位体比の計算値を野辺山での観測値と比較したところ、分離の有無による変化は堅調でないことが確認された。このモデルを用いて降水浸透水と河川水の値を(涵養標高の違いを補正したうえで)比較したところ、蒸発効果だけでなく、選択効果も無視できないことが明らかと

なった。選択効果は、同位体比の降水量加重平均値の代わりに浸透量加重平均値を用いても解消されず、土壌内の貯留・混合によって深度とともに変化した（図2）。したがって、正確な蒸散/蒸発比を求めるための入力として与える涵養水の同位体比を決定するうえで、同位体 SVAT モデルの使用が不可欠であると言える。また、同位体 SVAT モデルによる蒸散/蒸発比は菅平・野辺山ともに 96-97%程度であるが、選択効果を適切に補正しないと大幅に過小評価されることがあると言える。

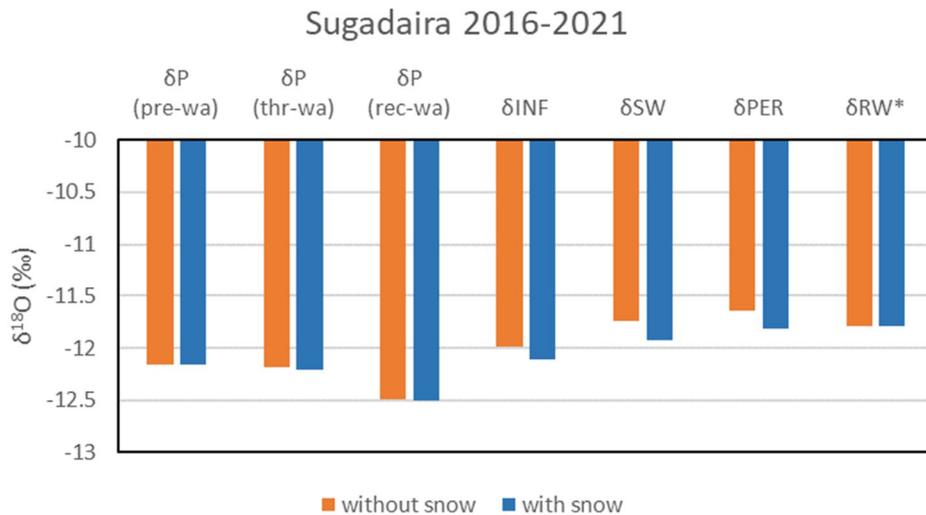


図2 降水（ P；降水量加重平均・樹幹通過雨量加重平均・涵養量加重平均）、浸透水（ INF）、土壌水（ sw）、降下浸透水（ PER）、及び河川水（ RW\*；標高補正済み）の6年間平均安定同位体比

#### 融雪出水

長野・山梨両県5河川における同位体モニタリングデータにもとづき降水-河川水同位体シフトの流域間比較と要因分析を行ったところ、最大積雪深と同位体シフトの間に負の相関関係が認められた。そこで、同位体 SVAT モデルに積雪融雪過程を導入して各種計算条件下の同位体シフト量を計算したところ、積雪融雪過程によって確かに負の同位体シフトが生じる傾向があるものの、土壌中の貯留・混合による同位体シフトと相殺しあうことが明らかとなった。次に、積雪融雪過程を含む同位体 SVAT モデルと同位体流出モデルを結合して、より積雪量が多い富山県井田川流域に適用した。その結果、融雪成分の上昇が季節進行とともに高標高帯で生じていること、またその現象がモデルで再現されている場合には河川水同位体比の再現性も向上することが明らかとなった（図3）。このことは、融雪流出モデルの較正・検証において同位体トレーサーが特に有用であることを示唆している。

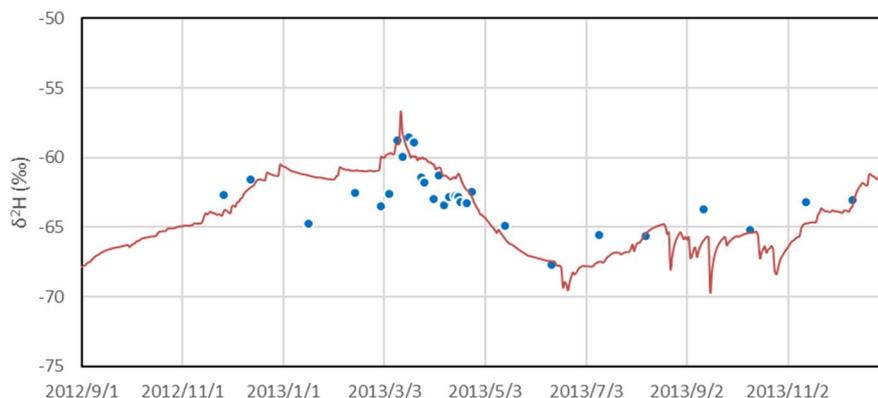


図3 河川水安定同位体比の実測値（青丸）と積雪融雪過程を考慮した同位体流出モデルによる計算値（赤線）の比較

#### 湖沼水収支

中部地方の8湖沼において同位体データから計算された蒸発/流入比は集水域の平均標高と負の相関を示した。しかし、集水域内の降水同位体の時空間的不均質性や選択効果が適切に考慮されていないことによる見かけの相関である可能性も考えられた。そこで、同位体湖沼モデルによる計算値と実測値が一致するように流入水の同位体比を補正したうえで蒸発/流入比を再計算したところ、標高依存性は有意でなくなった。次に、時間的安定性がより高いと想定される屈斜路

湖を対象として全流入河川水の一斉測水調査にもとづき集水域涵養水アイソスケイプモデルを構築し(図4) これと4年間の湖水・降水・河川水モニタリング結果とを組み合わせると蒸発/流入比を推定したところ、15.8%という結果が得られた。この値は、熱収支にもとづく湖面蒸発モデルと流域熱・水収支を組み合わせると得られた値(16.2%)とほぼ一致した。このほか、群馬県丸沼においては湖底湧水の同位体比が河口部東側で低いという特性が認められていたが、流入河川支流の流量観測と集水域地下水流動モデルの適用とによって、集水域平均標高が高い東側支流からの伏没浸透水が河口部東側の湖底で湧き出しているためであることが実証された。

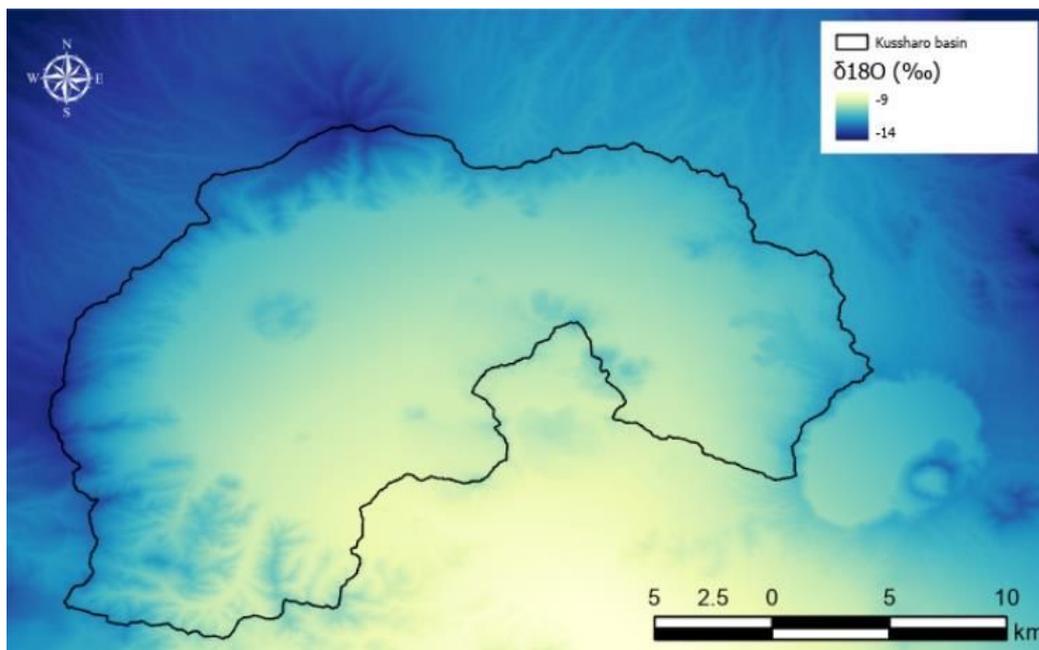


図4 屈斜路湖集水域における涵養水アイソスケイプモデル

### 温泉

新たに開発した地圏水同位体進化モデルにより、海底間隙水・海底泥火山間隙水・海岸油田塩水・火山噴気凝縮水のダイアグラム上での分布特性は進化段階の違いとして合理的に説明できた。つぎに、温泉水の同位体比、天水地下水アイソスケイプモデルによって同定された各温泉の天水成分の同位体比、ならびに地水曲線を用いて、天水成分と地圏水成分の分離を行ったところ、19-95%が地圏水由来であることが示された。また、フィリピン海プレート及び太平洋プレートの沈み込みを想定した同位体進化モデルからの出力と地圏水成分の同位体比の比較から、各温泉中の地圏水の起源がフィリピン海プレート、太平洋プレート、及び第三紀海成層の三種類であることが明らかとなった。

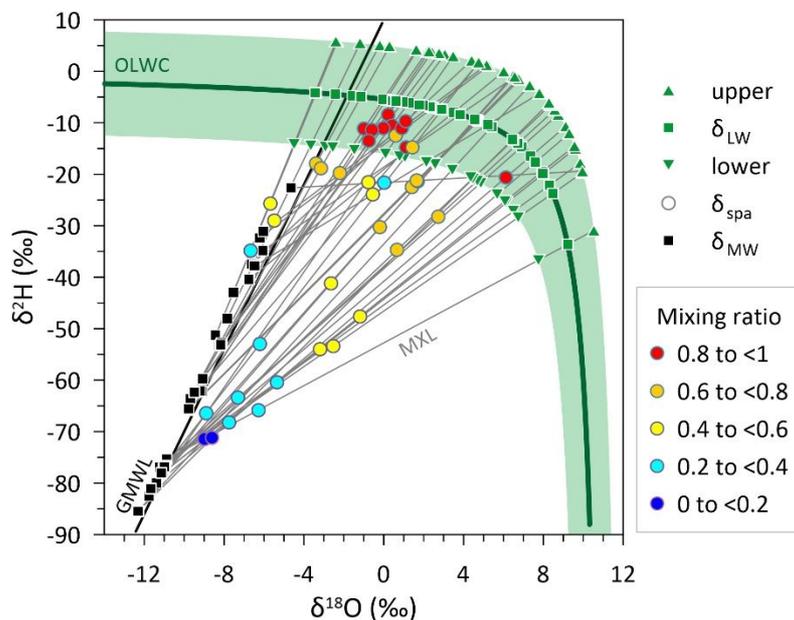


図5 温泉水及びそれらの天水・地圏水成分の同位体比と地圏水の混合割合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 山中 勤・辻村真貴	4. 巻 33
2. 論文標題 滞留時間に関する諸概念と用語法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 水文・水資源学会誌	6. 最初と最後の頁 156 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/jjshwr.33.156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 安達郁哉・山中 勤	4. 巻 50
2. 論文標題 中部地方の温泉に含まれる非天水成分の特徴と成因	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本水文科学会誌	6. 最初と最後の頁 55 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4145/jahs.50.55	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Adachi Ikuya, Yamanaka Tsutomu	4. 巻 628
2. 論文標題 Isotopic evolutionary track of water due to interaction with rocks and its use for tracing water cycle through the lithosphere	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 130589 ~ 130589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydrol.2023.130589	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉沢貴行・山中 勤
2. 発表標題 地下水涵養課程における土壌水の安定同位体比変化
3. 学会等名 日本水文科学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達郁哉・山中 勤
2. 発表標題 中部地方における非天水起源温泉の地理的分布と同位体的特徴
3. 学会等名 日本水文科学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋侑生・山中 勤
2. 発表標題 群馬県丸沼における湖底湧水の湧出様式
3. 学会等名 日本水文科学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 山中 勤	4. 発行年 2020年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 242
3. 書名 環境同位体による水循環トレーシング	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------