

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 1 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H02957

研究課題名(和文) 同位体トレーサーと数値モデルの複合利用による山岳流域水収支評価の高精度化

研究課題名(英文) High-precision evaluation of mountainous catchment water balance by combined use of isotopic tracers and numerical models

研究代表者

山中 勤 (Yamanaka, Tsutomu)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：80304369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：中部山岳地域を中心として、降水・河川水の安定同位体モニタリングを実施した。また、土壌水・湖水・湧水・温泉水についても広域調査を実施した。これらのデータと気象・水文観測データをもとに、流域水収支・同位体収支各項の時空間平均値を各種数値モデルを援用して推定し、流域降水量と越境地下水流量を推定した。その結果、降水量推定値とレーダーアメダス解析雨量は良い一致を示す一方、気候値メッシュデータは山岳域の降水量を過小評価する傾向があることが判明した。また、一般的な河川流域では越境地下水流出量が降水量の2.2～5.5%であり、流域平均標高が低い大流域ほど大きくなる傾向を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国をはじめとして、山岳地域に主たる水源を求める国は多い。しかしながら、山岳域では降水量観測地点が疎であることにより水収支評価の精度が低く、流域界を横切る地下水流の存在や程度についても十分な検討がなされてこなかった。そこで本研究では、同位体トレーサーと数値モデルを融合させたアルゴリズムを開発し、降水量と越境地下水流量の定量的評価を可能とした。結果として、越境地下水流量は他の水収支項と比較して軽微であったが、未知の物理量を科学的根拠をもって示せたことには価値があり、山岳降水量観測値の信頼性評価がなされたことも重要である。また、新たに構築された方法論は今後の水循環トレーシングの基盤となり得る。

研究成果の概要(英文)：Stable isotopic monitoring for precipitation and river water was made over mountainous region mainly in the central Japan, with regional survey for soil water, lake water, cold and hot springs. Based on these data set and meteorological/horological data, each term of catchment water and isotope budgets were estimated by spatiotemporal averaging using various types of numerical models. As a result, estimated precipitation was in good agreement with Radar-AMEDAS data, although Climate Mesh data were underestimated. In common catchments, groundwater flow across the divide accounts for 2.2-5.5% of precipitation and tends to be greater in large catchments with lower mean elevation.

研究分野：水文科学

キーワード：流域水収支 山岳 同位体トレーサー 数値モデル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 世界規模で見た場合、淡水資源の約 80%は山岳に源を発している。我が国においても広大な面積(国土全体の約 73%)と相対的に多い降水量を有する山岳地域は水源涵養域として保全の対象とされることが多い。しかしながら、標高 1000 m 以上の高標高域における通年降水量観測地点は日本全体でも 10 点に満たず、山地源流部における降水量算定には大きな不確定性が存在する。そのため、山岳域を含む流域の水収支評価を行うと、流出量が降水量を上回るという有り得ない結果が得られることもある。他方で、このような水収支評価の問題点の一つに、流域界設定の不確定性がある。通常、流域界の設定は標高データ、すなわち地形をもとにして行われるが、地質構造によっては実際の流域(あるいは地下水の流域)と地形上の流域(すなわち地表水の流域)とが異なることがある。このような問題は一般の流域水収支では考慮されることがなく、特に人間社会との関わりが深い低地の都市部を含んだ大規模流域に関してその弊害が顕著であると予想される。このような過大あるいは過小に評価された降水や地形上の流域界を横切る地下水流(以下、越境地下水流)は、水資源の過大評価・過小評価のどちらにも結びつく可能性があるが、いずれにしても現状では認知不能な水であり、隠された水資源とも言える。

(2) 山岳域の降水量観測については降雨レーダーの高度化と設置台数の増加により今後徐々に改善されてゆくものと思われるが、現段階では山岳部への設置はほとんどなく、また設置されたとしても山体による遮蔽などで部分的な欠測が免れない。また、越境地下水流は小規模な試験流域で研究が行われているが、水資源管理上重要なメソスケール以上の流域を対象とした研究はほぼ皆無である。そのため、山岳が卓越する大流域における水収支を高精度に評価する方法論の確立が求められていた。

(3) 水の水素・酸素安定同位体は水循環を追跡するための最良のトレーサーであり、近年では数値モデルの検証手段として様々な分野で用いられている。また、世界中の湖沼における同位体データを用いて陸面からの蒸発と蒸散の割合を評価する研究などが行われ、物理的手段による直接観測が困難な水収支成分を定量化できるものとして注目を集めた。この手法は水収支と同位体収支の 2 つの式を連立させ 2 つの未知数である蒸発量と蒸散量を評価するものであるが、同様のアプローチは未知数を異なる変数とした場合にも適用可能である。すなわち、降水量と越境地下水流量(流入の場合は負値)を未知数として、これを求めることも原理的には可能なはずである。しかしながら、水同位体比は時空間的に変動性が高く、流域での収支を計算するうえで適切な時空間平均値を用いる必要がある。そのため同位体トレーサー単独ではなく、数値モデルと融合させたアプローチが有望であろうと考えられた。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、同位体トレーサーと数値モデルを融合させた手法によって、山岳部を含む流域における降水量と越境地下水流量を高精度に定量化し、水収支評価の高精度化を図ることを目的とする。

(2) 具体的には、3000 m 級の高山帯を含む富士川流域と千曲川流域を対象として、標高や地質構造などに依存する空間的不均質性を考慮しつつ、水・同位体循環モデルによる時空間平均化と水・同位体収支の評価を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 流域における水収支式と同位体収支式は次のように表される。

$$P - I - E - T - R_r - R_g = \Delta S$$

$$(P - I)\delta_p - E\delta_E - T\delta_T - R_r\delta_{R_r} - R_g\delta_{R_g} = \Delta(S\delta_S)$$

ここで、 $P$ は降水量、 $I$ は遮断量、 $E$ は蒸発量、 $T$ は蒸散量、 $R_r$ は河川流出量、 $R_g$ は越境地下水流量、 $S$ は流域貯留量であり、 $\Delta$ は変化量、 $\delta$ は水素あるいは酸素の安定同位体組成(下付き添え字は各水収支項に対応)を示す。年単位もしくはそれ以上の時間スケールで考える場合、フラックスの大きさに比べて貯留量の変化量は 2 オーダー以上小さくなるため、両式ともに右辺はゼロと仮定できる。 $I$ は流域内の土地利用・土地被覆を考慮して  $P$  の関数とすることができる。 $E$  と  $T$  は流域内の不均質性を考慮して数値モデルによって推定する。 $R_r$  は国土交通省による観測値を用いることができる。したがって、各要素の同位体組成(すなわち  $\delta_p$ 、 $\delta_E$ 、 $\delta_T$ 、 $\delta_{R_r}$ 、 $\delta_{R_g}$ ) が適切に与えられれば、両式を連立させることで  $P$  と  $R_g$  を推定することができる。しかしながら、それらの値が適切でなければ、 $P$  と  $R_g$  の推定値は大きな誤差を含むことになる。そこで、数値モデルをうまく活用しながら、適切な時空間平均法を模索した。

(2) 現地調査としては、まず  $\delta_p$  と  $\delta_{R_r}$  の実測値を得るため、富士川流域と千曲川流域において 2010 年から実施している同位体モニタリングを継続し、過去の取得データと併せて解析に供した。また、 $\delta_E$  と  $\delta_T$  を推定する一助として土壌水同位体組成( $\delta_{SW}$ )の調査も実施した。そのほか、越境地下水流の寄与が大きいと予想される火山地域や地滑り地域における湧水・温泉水・湖沼水等の広域サンプリングを補完的に行った。

#### 4. 研究成果

(1) まず、 $P$ の流域平均値を求めるため、16地点における複数年(2~5年)の月別値から計算した降水量加重年平均値について重回帰分析を行い、アイソスケープモデルを導出した(論文)。このモデルは、他の研究者らによる過去の観測データをも比較的高い精度で再現することができ(図1)、蒸発濃縮や選択効果を加味すれば土壌水や河川水の同位体データとも整合的であることが確認された。ただし、日本海側におけるd-excess( $=\delta^2\text{H}-8\times\delta^{18}\text{O}$ )の再現性に難があったため、日本海沿岸5地点で新たに観測(ただし1年間)を追加し、そのデータを加えてモデルの微修正を行った(論文)。これらのモデルは $P$ の短期間変動を再現することはできないが、定常状態の水・同位体収支を評価する本研究のような目的においては極めて有力なツールとなる。実際、滞留時間の長い温泉水(ただし、純粋天水起源のみ)の同位体組成の再現にも成功した(論文)。

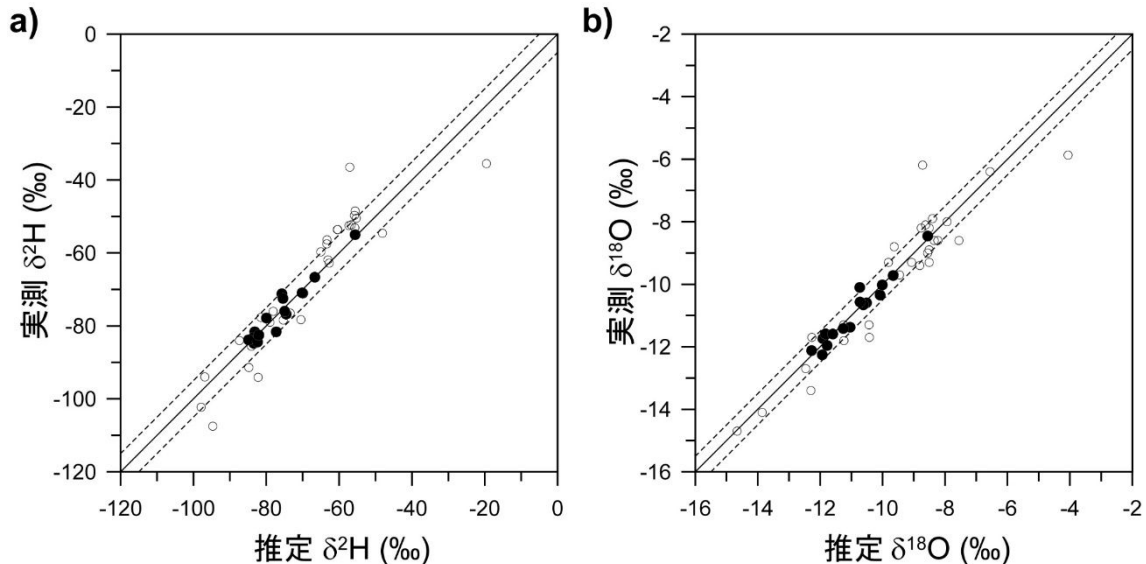


図1 アイソスケープモデルによる降水同位体組成の推定値と実測値の比較(○はモデルの導出に用いたデータ、●は独立した先行研究のデータ)

(2)  $E$ は気象データや表層の $S_{10}$ をインプットとするCraig-Gordonモデルによって算出される。 $T$ は深度ごとに異なる $S_{10}$ を根系吸水量で加重平均した値となる。本研究では、Craig-Gordonモデルや根系吸水モデルを組み込んだ水・同位体循環モデル(isoRHEA)を新たに開発し(論文)、適切な時空間平均値を得るための問題点を検討した。まずCraig-Gordonモデルで用いられる動的分別パラメータ( $M/n$ )については従来通り0.5程度とすることにより $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の双方の誤差を最小化できることが明らかとなった。また、湖沼の水・同位体収支モデルによる湖水の推定値と実測値を比較することにより、モデル入力とする相対湿度データとしては気象台による観測値を標高補正すれば十分であることを確認した。そして、比較的密な植生で被覆された土地においては土壌水の同位体濃縮ならびに $E$ の変化は顕著でないことを明らかにした。したがって、一般的な山岳流域においては簡便な推定でも十分であると判断された。一方、 $T$ の季節変化の再現精度は根系吸水密度プロファイルの再現性に依存するが(論文)、年間平均としてみた場合は $S_{10}$ との差は有意でなく、また $S_{10}$ の深度間の差も(表層部を除けば)かなり小さいことが判明した。したがって、時間平均化については大きな問題は生じないが、空間平均化にあたっては植被率などの影響を受ける(論文)。そこで、多地点における $S_{10}$ の年間平均値をもとにアイソスケープモデルを構築し、各流域内の空間平均値を求める方法を採用した。ただし、植被率が大きな一般的な山岳流域では、 $P$ と $S_{10}$ の差を一定とする仮定も概ね妥当であることが確認された(論文)。

(3)  $R_r$ については、1ヶ月単位の観測値を元にした年間平均値推定の誤差をブートストラップ法によって評価し、河川流量変動の有無によって生ずる誤差が同位体分析の誤差と同程度でしかないことを明らかにした。また、河川水そのものが流域内でフラックス加重平均されたものであるため、 $R_r$ は空間平均化する必要もない。したがって、集約型の流出モデルと降水同位体データを用いて、 $R_r$ の時間変化を良好に再現することが可能である(論文)。なお、本研究では $R_g$ が $R_r$ に近似的に等しいと仮定した。この仮定は、流域境界全体として地下水の流出が生じている場合に有効であるが、一部のみ越境地下水流が生じている場合に少なからぬバイアスを生じる可能性がある。そこで、ある程度の変化を想定して感度分析を行った(結果は後述)。

(4) 以上の検討を経て各水収支要素の値を確定し、5つの流域(A~E)において流域降水量と越境地下水流量の算定を行った。図2に表されるように、降水量の推定値はレーダーアメダスによる流域平均降水量とほぼ一致した。一方、気候値メッシュデータによる流域平均値は流域Dを除いて明らかに過小評価されていた。このことから、レーダー観測やアメダス観測による補正の難しい地形性降雪が卓越するような流域を除けば、山岳流域であってもレーダーアメダス解析雨量データセットによって正確な水収支評価が可能であると結論付けられる。また、本研究に着手する以前に水収支を試算した際には残差として得られた蒸発散量が以上に小さいという傾向が得られていたが、これは気候値メッシュデータを用いていたことに原因があったと言える。

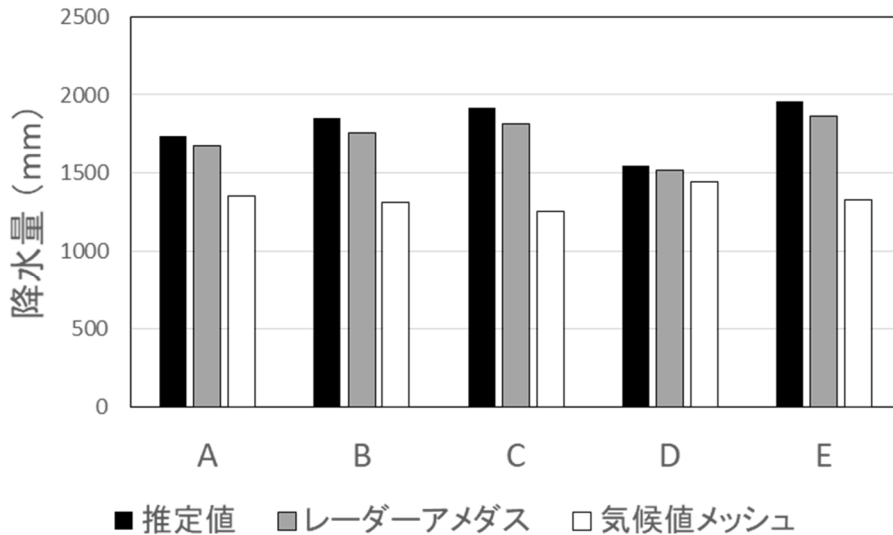


図2 流域平均降水量の推定値と実測値（レーダーアメダスおよび気候値メッシュ）の比較

(5) 流域面積で平均化された越境地下水流量の推定値は34~106 mm/年であり、流域平均標高が低い流域ほど流出量が大きくなる傾向が認められた(図3)。これは、流域平均標高の低い大流域ほど、起伏が小さく帯水層も厚い平野部に位置する流域界が多くなるためと考えられる。実際には、流出が多い流域と流入が多い流域のどちらもが存在するはずであるが、平野部のみの小流域では流入超過になる可能性が高いこと、また沿岸部では海底での地下水流出が存在することなどを考えあわせると、図3に表された結果は一定の合理性を持つと考えられる。なお、 $R_g$ に±1%の誤差があったとすると $R_g$ の誤差は±10 mm程度となるが、流域水収支の誤差としては極めて軽微である。また、 $R_g$ 自体が降水量の2.2~5.5%でしかなく、当初危惧されたほど大きな量ではなかった。

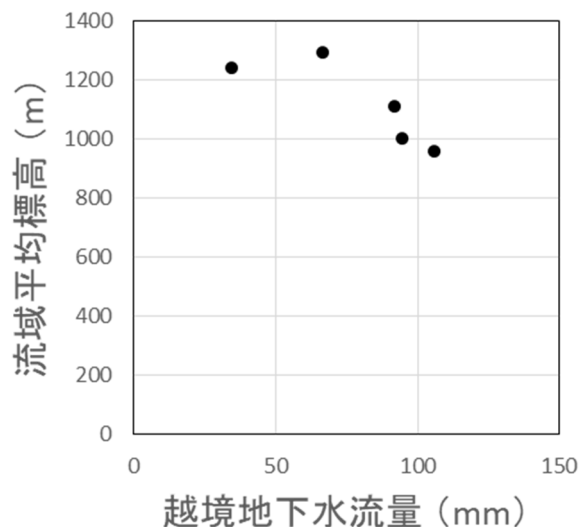


図3 流域平均越境地下水流量の推定値と流域平均標高の関係

(6) 図3に示された越境地下水量は一般的な山岳河川流域に関するものであるが、火山地域や地滑り地域において広域地下水流動系の末端に位置する湧水・温泉・湖沼などでは特異的に越境地下水の寄与が大きいという可能性が残る。そこで、多数のサンプルの同位体分析を行い、その涵養標高推定値と流域平均標高を比較したところ、流域外からの越境地下水流入あるいは流域外への越境地下水流出が示唆されたのは野沢温泉や白駒池などごく少数にとどまり、流域界を越えた地下水流はそうした地域でも希少なケースであることが明らかとなった。

(7) 以上の結果を総合すると、山岳流域水収支の評価を行う上で最も重要なのは降水量観測の精度向上であり、現時点ではレーダーアメダス解析雨量を用いるのが最善であると言える。また、一般的な山岳流域における越境地下水流量は降水量の数%でしかなく、越境地下水が卓越するケースはかなり稀であると結論付けられる。

(8) 本研究では、同位体トレーサーと数値モデルを融合させたアプローチを発展させたが、その副次的な成果として以下の貴重な知見が得られた。

- ・ 長期平均同位体高度効果は山体の位置や斜面方位に依存せず、ほぼ一定の値をとる。(論文 )
- ・ 長野-山梨両県では98%の住民が標高1000 m以下に居住しているが、利用している上水道水源の90%以上は標高1000 m以上で涵養されている。(論文 )
- ・ 温泉水に含まれる非天水成分は海水と岩石の間の同位体平衡作用によって作られたものであり、海洋プレートの沈み深度が大きい地域ほど平衡が進んだ水が生成されている。(論文 )
- ・ 根系吸水密度プロファイルと根密度プロファイルは相似形ではない。(論文 )
- ・ 植生遷移の進行によって先行種の浅層根の吸水機能が衰えることにより、侵入種との間の水源分化が達成される。(論文 )
- ・ 標高が高くなるほど蒸発散に占める蒸散の割合が低下する。(論文 )
- ・ 流域での滞留時間の指標である平均通過時間は降雨状況によって大きく変化し、その長期平均値は地下水貯留量の大きな流域で長くなる。(論文 )
- ・ 極端な洪水流出時を除けば、同位体データのみで較正した流出モデルによって河川流量を予測することが可能である。(論文 )

#### < 成果論文 >

Yamanaka, T., Y. Makino, Y. Wakiyama, K. Kishi, K. Maruyama, M. Kano, W. Ma and K. Suzuki (2015): How reliable are modeled precipitation isoscapes over a high-relief mountainous region? *Hydrological Research Letters*, **9**, 118-124.

Yamanaka, T. and Y. Yamada (2017): Regional assessment of recharge elevation of tap water sources using the isoscape approach. *Mountain Research and Development*, **37**, 198 - 205.

安達郁哉・山中 勤 (2020): 中部地方の温泉に含まれる非天水成分の特徴と成因. 日本水文科学会誌, **50**, 印刷中.

Yamanaka, T., T. Kimura, X. Sun, H. Kato and Y. Onda (2017): Comparing root water uptake profile estimations from an isotope-calibrated mechanistic model and a mixing model. *Hydrological Research Letters*, **11**, 161 - 167.

Yamanaka, T. (2018): Root functional change achieves water source separation under vegetation succession. *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.1985.

Yamanaka, T. and R. Sato (2017): Elevational dependence of catchment-scale evapotranspiration partitioning as revealed by water stable isotopes. American Geophysics Union 2017 Fall Meeting, New Orleans, USA, 11-15 December.

Ma, W. and T. Yamanaka (2016): Factors controlling inter-catchment variation of mean transit time with consideration of temporal variability. *Journal of Hydrology*, **534**, 193-204.

Yamanaka, T. and W. Ma (2017): Runoff prediction in a poorly gauged basin using isotope-calibrated models. *Journal of Hydrology*, **544**, 567-574.

山中 勤・鈴木啓助・脇山義史・岸 和央・牧野裕紀・丸山浩輔・加納正也・馬 文超・正木大祐・杉山昌典・山川陽祐・吉竹晋平 (2016): 山岳域の同位体マッピング: 現状と展望. 日本水文科学会誌, **46**, 73 - 86.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamanaka Tsutomu	4. 巻 11
2. 論文標題 Root functional change achieves water source separation under vegetation succession	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Ecohydrology	6. 最初と最後の頁 e1985 ~ e1985
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/eco.1985	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 -
1. 著者名 Yamanaka Tsutomu, Ma Wenchao	4. 巻 544
2. 論文標題 Runoff prediction in a poorly gauged basin using isotope-calibrated models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 567 ~ 574
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jhydrol.2016.12.005	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 Yamanaka Tsutomu, Yamada Yuki	4. 巻 37
2. 論文標題 Regional assessment of recharge elevation of tap water sources using the isoscape approach	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mountain Research and Development	6. 最初と最後の頁 198-205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00066.1	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 Yamanaka Tsutomu, Kimura Takeo, Sun Xingchao, Kato Hiroaki, Yuichi Onda	4. 巻 11
2. 論文標題 Comparing root water uptake profile estimations from an isotope-calibrated mechanistic model and a mixing model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Hydrological Research Letters	6. 最初と最後の頁 161~167
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3178/hrl.11.161	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 該当する

1. 著者名 山中 勤、鈴木啓助、脇山義史、岸 和央、牧野裕紀、丸山浩輔、加納正也、馬 文超、正木大祐、杉山昌典、山川陽祐、吉竹晋平	4. 巻 46
2. 論文標題 山岳域の同位体マッピング：現状と展望	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本水文科学会誌	6. 最初と最後の頁 73-86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4145/jahs.46.73	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 Yamanaka, T., Y. Makino, Y. Wakiyama, K. Kishi, K. Maruyama, M. Kano, W. Ma and K. Suzuki	4. 巻 9
2. 論文標題 How reliable are modeled precipitation isoscapes over a high-relief mountainous region?	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Hydrological Research Letters	6. 最初と最後の頁 118-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/hrl.9.118	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 Ma Wenchao, Yamanaka Tsutomu	4. 巻 534
2. 論文標題 Factors controlling inter-catchment variation of mean transit time with consideration of temporal variability	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 193 ~ 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2015.12.061	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2件(うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Tsutomu Yamanaka
2. 発表標題 Synergy between isotope tracers and numerical modelling: Is it useful?
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamanaka Tsutomu, Sato Rei
2. 発表標題 Elevational dependence of catchment-scale evapotranspiration partitioning as revealed by water stable isotopes
3. 学会等名 American Geophysics Union 2017 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----