

令和元年6月16日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18771

研究課題名(和文)水田流域における農地水利用を考慮した統合型水循環モデルの構築

研究課題名(英文) Water circulation modeling incorporating various agricultural water uses in a paddy-dominant basin

研究代表者

吉岡 有美 (YOSHIOKA, Yumi)

鳥取大学・農学部・助教

研究者番号：40753885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：水田を主体とする扇状地地下水を対象に、斜面崩壊を起因とする河川および用水路における濁水流下を契機とした農地水利用変化が各種地下水涵養源および地下水環境に与える影響を多面的に評価した。河川からの涵養と水田からの涵養の時空間的な変化を評価することができ、これら結果を踏まえて地下水位変動メカニズムの要因を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下水は目に見えないが、重要な水資源である。また、降水、河川水、水田に灌漑された水など地表面の水からの地下水涵養を受けている。水田が多く広がる扇状地内の地下水を対象として、河川および用水路における濁水化が地表面の水からの地下水涵養量に与えた影響評価を通して、地下水位変動のメカニズムについて検討した。

研究成果の概要(英文)：Huge landslide event was occurred in upper basin area and, then, highly-turbid water was observed in the river and irrigation channels. This hydrological event might cause changes in agricultural water use and water circulation. Impacts of the agricultural water use to groundwater sources (river and paddy waters) and groundwater environments were evaluated by hydrological and hydrochemical techniques. It was clarified that spatio-temporal changes in groundwater recharge from paddy fields and groundwater recharge from river through river water - groundwater interaction. These results confirm that mechanisms of groundwater level in paddy dominated alluvial fan.

研究分野：地下水水文学

キーワード：地下水 河川からの涵養 水田からの涵養 地下水位低下 扇状地

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

目に見えない地下での循環している地下水については、地上の水循環系と連続していることを理解し、地下水循環系と地表水循環系が一体となった水循環の理解と管理が重要となる。扇状地では、河床堆積物を通して河川水の地下水への移動、つまり河川水による地下水涵養と地下水の河川水への移動が生じる。また、水田の多面的機能として広く知られるように水田からの地下水涵養が生じる。さらに、降水を加えて、地下水は複数の地表水からの涵養を受ける。そのため、扇状地内の地下水涵養および水循環機構は複雑である。降水・ダム・河川・地下水を用いた放流、取水、配水、灌漑、排水という農地水利用を核とする地表水と地下水を統合して扱い、これら要因の評価を行うツールが必要となる。

2. 研究の目的

2015年5月に上流部で生じた大規模の地すべり性斜面崩壊後、石川県手取川と本河川を灌漑水源とする用水路で濁水が流下し、これと同時期に扇状地内の河川周辺では大規模かつ急激な地下水位低下が確認された。翌年2016年にも4月から大きく低下した。2017年8月頃から灌漑期の水位上昇がみられ、2018年には斜面崩壊前と同程度まで回復した。当初は気候変動による影響評価を考えていたが、この濁水現象後において水田減水深の減少が観測されたことから、この減水深(水田からの地下水涵養)変化を農地水利用の変化として捉えることとした。さらに、河川水の地下水への移動(河川からの地下水涵養)という当該地域の主たる涵養源を検討項目として、これら2つの涵養源からの涵養過程、その量についての時空間的变化が地下水環境(流動や分布)に与える評価を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 概要

地下水位、河川水位、濁度、河川流量、水田浸透量の水文観測データの分析、地下水流動モデルによる解析、水田流域における農地水利用を考慮した統合型水循環モデルの構築においてモデル化のあり方、方針を決定するため、つまりモデルにおける河川や地表面の境界条件設定の合理性評価のために地下水と地表水の酸素・水素安定同位体比の分析を実施した。

(2) 調査地概要

手取川扇状地は、標高90mの鶴来を扇頂として扇状地の半径は約12km、扇面面積191km²である。土地利用については、水田が最も多く約47%、次いで都市域が37%となる。また、水田のうち2割から3割において転作が実施され、結果的に水稲作付水田と転作水田の面積率はそれぞれ37%、10%となる。灌漑期間は4月13日から9月10日となっており、灌漑水は、手取川の河口から17km地点の右岸に設置された白山頭首工で河川水である。右岸域は7つの幹線用水路をもつ七ヶ用水(用水路延長142km)、左岸域は4つの幹線用水路をもつ宮竹用水(用水路延長110km)により、水田用水を配水している。宮竹用水においては、手取川右岸で取水された河川水を逆サイホンを用いて左岸域へ横断して導水される。また、サイホンの吐口部の直下に敷設された宮竹用水沈砂池)において、粒径0.3mm以上の大きい土砂は堆積・除去している(柳井ら、2017)。

(3) 採水調査概要

採水調査は、2016年4月~2018年10月までの期間に、2ヶ月間隔で各調査月の下旬実施した。地下水として浅層地下水と湧水を、地表水として河川水、田面水、降水を採取した浅層地下水については、時期によって若干異なるが、通年的に使用されている官民所有の井戸34地点(G1~G34)、冬期のみ稼働する消雪用井戸5地点(GM1~5)で採取した。湧水については、2点(S1~2)で採取した。また、河川水については、犀川において3地点(RS1~3)、手取川において6地点(RT1~6)、梯川において2点(RK1~2)で採取し、田面水については8地点(P1~8)で採取した。降水については、1ヶ月間隔で採取した。上記に加え、2008年8月、2009年11月、2010年6月、2011年6月に実施された類似調査の結果も考察に用いた。

4. 研究成果

(1) 水文観測データの解析

河川水位と地下水位

河川水位は灌漑期に大量の取水を行う白山頭首工の直下流部の鶴来観測所の値である。2014年以降の手取川河川水位と手取川近傍の観測井戸における地下水変動特性を整理する。図1(c)より、河川水位は春先の融雪出水から梅雨の末期の多雨の影響を受けて上昇することがわかる。また、図1(d)、(e)より、手取川に近い観測井の地下水位は概ね河川水位変動と傾向が一致している。2015年と2016年の低水時の河川水位は、観測基準となっている標高(零点標高)を0mとしたとき、-3.0mから-2.8m程度と低い。最近10年間の手取川河川水位を流況曲線にならって降順に並べて検討した結果、2015年と2016年の水位が他の年と比較して低かったこと、つまり河川流量が減少していたことが明らかになった。

図1(d)(e)に示した扇頂部の手取川に近い観測井戸(W4とW6)での地下水位は、2015年5月初旬から5月末までの1ヶ月間で急激に低下している。とくに、右岸域では低下量は12mに達した。その後も、降水あるいは河川水位に反応して1m程度の水位変動はあるが、水位の低下傾向は11月上旬まで継続した。11月中旬以降に水位は上昇傾向に転じ、12月末には5月

初旬とおよそ同じ水位まで回復した。その後、2016年3月に低下量自体は前年より数m小さいものの、急激な水位低下が生じ、前年と同程度の水位まで低下した。9月中旬は5m前後の大きな水位の上昇と下降があるが、12月から1月の水位は2015年の同時期と比較すると3m程度低い。水位の変動幅の大小があるが、手取川から約3kmの範囲内にある多くの地下水位連続観測井戸において、同様の変化がみられた。その後、2017年3月に地下水位は通常の水位まで回復している。このとき河川水位も上昇している。また、2017年8月に再び、地下水位は大きく上昇し、その後データのある2018年9月までの期間で徐々に水位は上昇し、2018年の間はおよそ斜面崩壊前と同じ範囲となった。

2015年5月においては河川水位が低下していないにもかかわらず地下水位が大きく低下している時期があり、河川水位以外の要因があったと言える。2016年の地下水位低下は河川水位の低下に伴うものであったが、その低下割合は従来よりも大きかった。降水量は例年並みであることから、2015年、2016年の地下水位低下は河川水位や降水量だけでは説明しえない。

手取川に近い地域においても、扇端部に位置するW5、W7では、水位の変動幅は小さいものの、2015年、2016年にはそれ以前と比較して大きな水位変化が生じている。W5では、2014年までの地下水位の変動幅は約1m以内だが、2015年には4m以上、2016年には3m程度水位が低下した(図1(d)(e))。

W2やW3のように扇状地中央部における観測井では、上述した2015年・2016年に、地下水位の低下は認められない(図3(f))。

扇状地北部のW1は手取川から距離が離れており、手取川の水位変動との関連はみられない(図1(g))。冬季には2~4mの周期的な水位低下があり、これは消融雪のための地下水利用の影響と推測できる。

河川水位と河川からの地下水涵養量

手取川における各区間の水収支から正味の交換水量を推定した。湧出を正值、河川水による涵養を負値で表す。16回の調査のうち、2009年6月と12月の2回は丸山ら(2012)、残りの14回は金沢河川国道事務所が実施した調査結果(内部資料)である。2015年以降では河川全体での正味の涵養が1.1 m³/s以下であり、河川水による涵養は少ないといえる。さらに、2015年8月は、河川全体では河川水による涵養より湧出が多いと計算された。

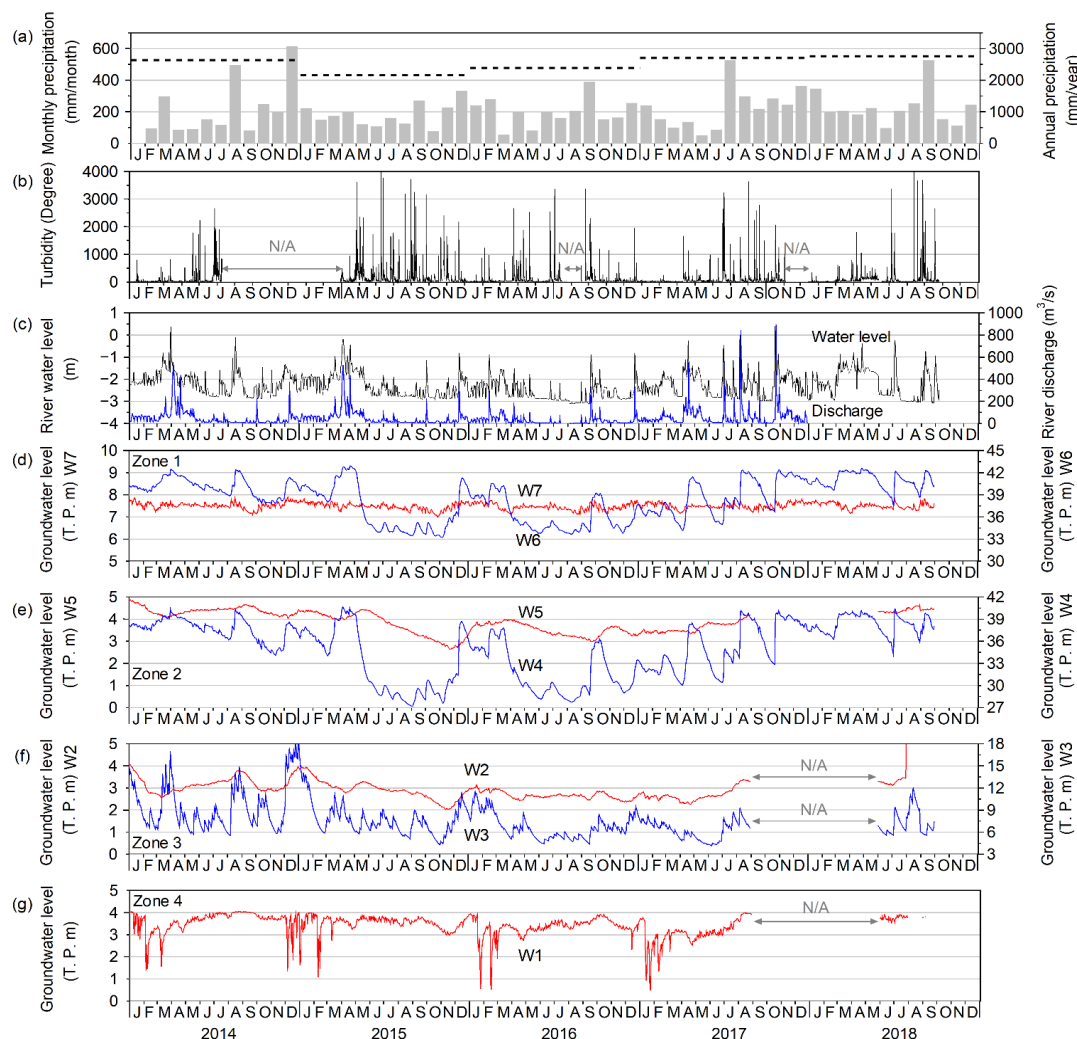


図1 月降水量，年降水量，河川流量，河川水位，地下水位，河川流量の変動

過去の同時流量観測では、伏没量が流量に応じて増大する可能性(尾崎ら,1965;森田ら2008)や、湧水時に伏没量が少なくなる可能性が指摘されている(阪田ら,2012)。河川全体の正味の交換流量と、流量観測実施日における扇頂部鶴来地点の日平均河川水位および河川流量との相関関係を調べた。その結果、河川流量と交換流量には明瞭な相関がみられなかったが(相関係数-0.18)、河川水位と交換流量には相関係数0.58の正の相関が認められた。2015年、2016年は例年に比べ河川水位が低い傾向にあったため、これが手取川から地下水への涵養量が減少した一因になったと推測できる。

(2) 酸素・水素安定同位体比

本研究で得られた $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ のうち、ここでは分布の時間的変動が特徴的と思われる $\delta^{18}\text{O}$ のみに着目して考察を述べる。地下水中の $\delta^{18}\text{O}$ の分布を図2に示す。この図から見受けられる基本的な傾向として、1つ目は手取川沿いでは年間を通じて $\delta^{18}\text{O}$ の値が低く、手取川河川から離れるに従い高くなっていることと、2つ目に手取川から北東部に少し離れたエリア一帯では、2017年10月のような例外はあるものの、どの年も概して6~10月にかけて $\delta^{18}\text{O}$ の値が大きくなっていることの2点が挙げられる。本地域における地下水の降水以外の主たる涵養源は、1)集水域が高標高のため同位体比が低い手取川河川水、2)湛水中に蒸発し、動的分別作用によって同位体比が高くなった田面水、3)蒸発の影響の少ない迅速に浸透した田面水がある。灌漑期においては、上記の1)と2)の2つが主要な涵養源と考えられる。調査期間中における手取川河川水の $\delta^{18}\text{O}$ 値は-11.2~-6.3‰であり、一方、田面水のそれはより大きく最大で-3‰であった。水が地表面で蒸発作用、すなわち動的分別作用を受けると $\delta^{18}\text{O}$ はより大きい値へと変化していくことが知られており、両者における $\delta^{18}\text{O}$ 値の差異は、降水あるいは手取川から取水され水田に供給された水が、湛水中に蒸発作用を受けたことによって生じたものと考えられる。手取川沿いの地下水は、河川からの涵養を安定的に受けており、一方、河川から離れ、地表が水田となっているエリアの地下水では、水田からの涵養がより多くなり、また、その相対的な寄与割合は、湛水管理が行われる灌漑期では高く、非灌漑期では低くなるという時間的変動が起こり得ると考えるのが自然であり、図2はその様子を妥当に表現できているといえる。なお、崩壊前のデータから作成した $\delta^{18}\text{O}$ の分布図と比較したところ、崩壊前後で明確に変化しているような傾向はみられない。

扇状地扇頂から日本海を結ぶ縦断面を3つ設定し、各側線沿いの地下水および手取川河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の違いを検討した。特異な地下水水位がみられた2016年の $\delta^{18}\text{O}$ については、左岸域の河川中流部では9‰前後の値となった。同時期の右岸域および手取川河川水は-10‰前後であるのに対して、左岸域は1‰程度高い。さらに、左岸域では崩壊前よりも高く変化したことがわ

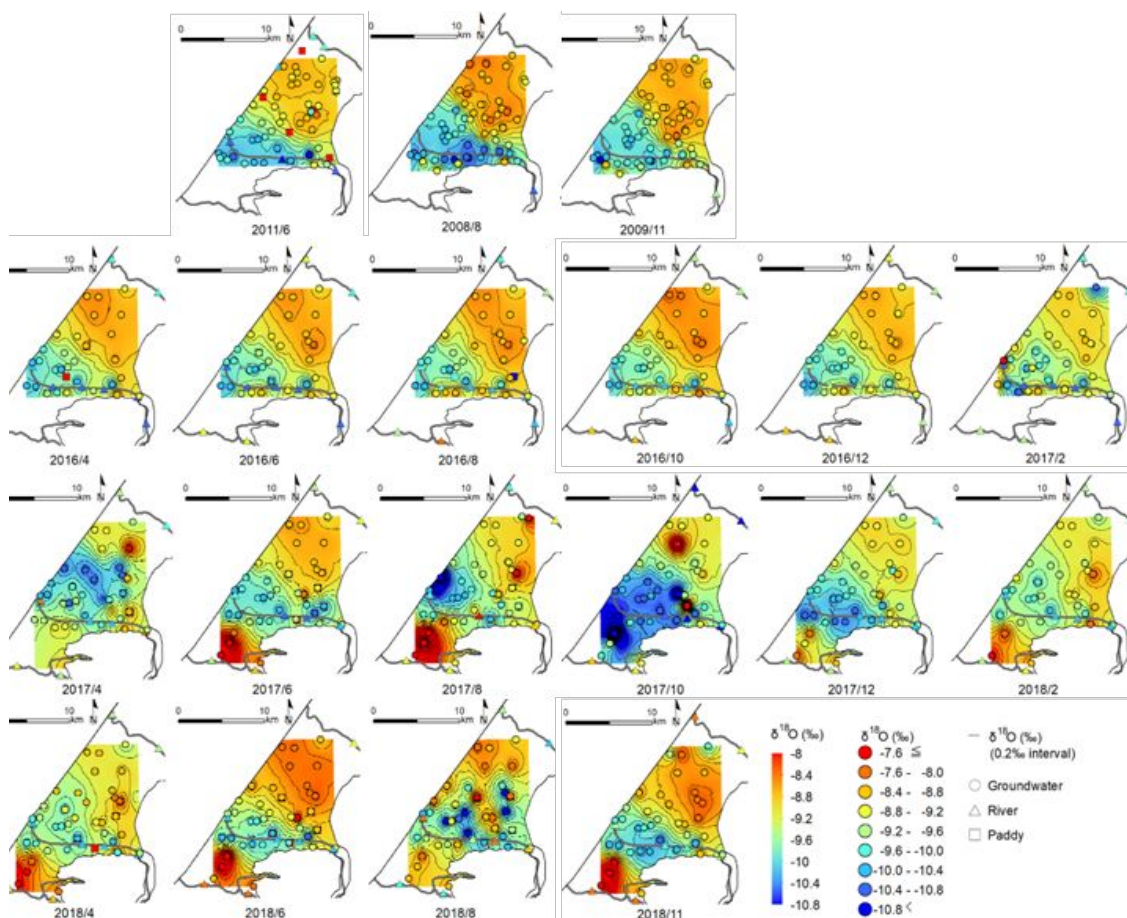


図2 地下水の $\delta^{18}\text{O}$ の分布

かった。2017年および2018年では同一地点でも2%程度の季節変化がみられ、手取川の左岸域と右岸域の地下水での $\delta^{18}\text{O}$ の差異は小さくなった。以上より、2016年左岸域では右岸域とは異なる涵養主体に移行したことが推察される。

田中ら(2017)は、手取川扇状地全体の45地区、計135筆の水田での5月末の中干し前の数日間における水田減水深を測定し、減水深から蒸発蒸発散量を差し引き推定した田面水による涵養について、2014年と2016年の比較検証を行った。左岸域の平均値については、中干し前と中干し後のそれぞれは、2014年に対して77%、62%となり、若干減少した。右岸域では、中干し前と中干し後に59%、74%となり、中干し前の減少割合が大きい。さらに、右岸域は左岸域と比較して、涵養量自体が大きいため、斜面崩壊後の減少量は左岸より大きい。右岸域の扇状部と扇端部での涵養の変化量には有意な差がみられ、涵養の減少量は扇端部で最も大きかった(田中ら, 2017)。原因については、高濁度の用水を水田に灌漑したため、微小な土粒子の沈降、堆積による水田の土壌間隙の目詰まりが原因であると考察している。定量的評価はなされていないものの、左岸域で田面水による涵養の減少量が抑制された要因の一つに前述した水路への入り口に設置された沈砂池の効果があると考えられる。

河川中流域の河川水による涵養が減少すると、同位体比の高い田面水による涵養の寄与が相対的に増加することにつながり、地下水の同位体比は上昇すると推察される。2015年5月以降の灌漑期に、この同位体比の上昇が確認された左岸域では、田面水による涵養の減少が少なかったため、田面水による涵養が河川水による涵養の減少分を全部ではないが補うことになったと考えられる。これは、図2に示したように手取川周辺の地下水位低下量が左岸域で右岸域よりも小さかったことと整合する。一方、右岸域では、河川水による涵養の減少が生じたものの、田面水による涵養の減少量も大きく、河川水による涵養の減少分が補われなかったために、河川水による涵養の地下水への寄与の相対的な程度は大きく低下せず、河川周辺の地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が手取川河川水と類似の変動を示したと考えられる。以上より、左岸域より、河川水と田面水による涵養の減少がともに生じたことが、右岸域で大きな地下水位低下を引き起こしたと考えられる。河川水による涵養の減少が生じたものの、田面水による涵養の減少量も大きく、河川水による涵養の減少分が補われなかったために、河川水による涵養の地下水への寄与の相対的な程度は大きく低下せず、河川周辺の地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が手取川河川水と類似の変動を示したと考えられる。以上より、左岸域より、河川水と田面水による涵養の減少がともに生じたことが、右岸域で大きな地下水位低下を引き起こしたといえ、本地域における地下水位変動メカニズムを明らかにすることができた。

以上のように濁水流下を契機とした、河川からの地下水涵養および水田からの地下水涵養の変化を評価結果については、それぞれの地下水涵養過程のモデル化への発展、またそれによる定量的な評価は課題として残された。

引用文献

- 1) 柳井清治・岡崎正規・瀧本裕士・一恩英二・高瀬恵次(2016)白山源流で発生した地すべりによる濁水が手取川の流域環境に及ぼす影響とその対策。石川県立大学年報：生産・環境・食品：バイオテクノロジーを基礎として, 2015, pp.8-27。
- 2) 辻本哲郎・二俣 秀・萩 慶・鷲見哲也(2005)手取川河道整備課題と関連した扇状地の河道流れと伏流の関係。河川技術論文集, 11, pp.529-534。
- 3) 丸山利輔・能登史和・吉田匡・中村公人・堀野治彦・村島和男・瀧本裕士(2012):手取川扇状地における水収支の分析。水文・水資源学会誌, 25(1), pp.20-29。
- 4) 尾崎次男・岸和男・狛武・横田節也(1965)豊平川扇状地および発寒川扇状地の地下水 - 主として地下水供給量について - 。地質調査所月報, 16(1), pp.1-24。
- 5) 森田賢治・本田敏也・西村友之(2008):手取川の正常流量設定に向けて - 白山と手取川の恵みをつたえるふるさとづくり - 。北陸地方整備局管内技術研究会論文集。
- 6) 田中健二・瀬川 学・藤原洋一・高瀬恵次・丸山利輔・長野峻介(2017)土砂崩壊に伴う高濃度濁水が手取川扇状地水田の地下水涵養機能に与える影響。水文・水資源学会誌, 30(3), pp.173-180。

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計1件)

吉岡有美, 伊藤真帆, 中村公人, 瀧本裕士, 土原健雄: 酸素・水素安定同位体比からみた手取川扇状地の河川水-地下水の交流現象と地下水涵養源, 地下水学会誌, 60(2), 205-221, 2018年(査読有)

[学会発表](計16件)

吉岡有美, 中村公人, 瀧本裕士, 櫻井伸治, 中桐貴生, 堀野治彦, 土原健雄: 斜面崩壊前後の手取川扇状地における8月の地下水涵養機構に関する評価, 平成31年度農業農村工学会大会講演会, 2019年(予定)

中村公人, 錦ありさ, 吉岡有美, 瀧本裕士: 田面水の酸素・水素安定同位体比の非定常モデリング, 平成31年度農業農村工学会大会講演会, 2019年(予定)

吉岡有美, 中村公人, 伊藤真帆, 錦ありさ, 瀧本裕士, 櫻井伸治, 中桐貴生, 堀野治彦: 斜面崩壊後の手取川扇状地における灌漑期 6 月の地下水涵養機構に関する評価, 第 8 回環境同位体学シンポジウム, 2018 年

櫻井伸治, 高林知輝, 中桐貴生, 堀野治彦, 吉岡有美, 中村公人: 微量元素を用いた手取川扇状地内の地下水流動評価の可能性, 平成 30 年度農業農村工学会京都支部研究発表会, 2018 年

Yumi Yoshioka, Kimihito Nakamura, Maho Ito, Hiroshi Takimoto, Shinji Sakurai and Haruhiko Horino: Estimation of change in groundwater recharge sources in response to turbidification of river water by landslide, PAWEES=INWEPF International Conference 2018 in NARA, 2018 年

Yumi Yoshioka, Kimihito Nakamura, Haruhiko Horino: Groundwater flow modeling of a paddy-dominated alluvial fan, Japan, using HYDRUS-1D and MODFLOW, Hydrus workshop 2018, 2018 年

吉岡有美, 中村公人, 伊藤真帆, 瀧本裕士, 土原健雄, 櫻井伸治, 中桐貴生, 堀野治彦: 酸素・水素安定同位体比による河川と水田の手取川扇状地地下水への影響評価, 平成 30 年度農業農村工学会大会講演会, 2018 年

櫻井伸治, 高林知輝, 中桐貴生, 堀野治彦, 吉岡有美, 中村公人: 微量元素を指標とした手取川扇状地における地下水流動評価の可能性, 環境技術学会年次大会, 2018 年

吉岡有美, 中村公人, 伊藤真帆, 瀧本裕士, 櫻井伸治, 堀野治彦: 斜面崩壊後の手取川扇状地における地下水涵養機構の変化に関する評価, 第 7 回環境同位体学シンポジウム, 2017 年

伊藤真帆, 中村公人, 吉岡有美, 瀧本裕士, 川島茂人: 手取川河川近傍の地下水位に及ぼす河川水位の影響, 平成 29 年度農業農村工学会京都支部研究発表会, 2017 年

吉岡有美, 中村公人, 伊藤真帆, 瀧本裕士: 手取川扇状地における Sr の安定同位体比と濃度による地下水涵養機構の検討, 平成 29 年度農業農村工学会京都支部研究発表会, 2017 年

伊藤真帆, 中村公人, 吉岡有美, 瀧本裕士, 川島茂人: 手取川扇状地における地下水位との関係, 平成 29 年度農業農村工学会大会講演会, 2017 年

Yumi Yoshioka, Maho Ito, Kimihito Nakamura, Hiroshi Takimoto, Takeo Tsuchihara: Estimation of the groundwater recharge processes using end-member mixing analysis in a paddy-dominated alluvial fan, Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Japan, 2017 年

吉岡有美, 伊藤真帆, 中村公人, 瀧本裕士, 土原健雄: 扇状地地下水の形成機構評価に向けた環境同位体モニタリング, 日本地下水学会 2017 年春季講演会, 2017 年

伊藤真帆, 吉岡有美, 中村公人, 瀧本裕士, 土原健雄: 濁水現象が河川と浅層地下水との水交換に与える影響の評価, 第 5 回同位体環境学シンポジウム, 2016 年

Yumi Yoshioka, Kimihito Nakamura, Takanori Nakano, Haruhiko Horino, Ki-Cheol Shin: Application of Multiple-indicator to groundwater flow and chemistry study in the alluvial fan, Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016 年, 招待講演

〔その他〕

PAWEES Young Achievement Award 受賞

日本地下水学会研究奨励賞 受賞