

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18202

研究課題名（和文）自然災害・人為起源インパクトに伴う水質変遷プロセスの可視化

研究課題名（英文）Visualization of water quality transition processes associated with natural disasters and anthropogenic impacts

研究代表者

利部 慎（KAGABU, Makoto）

長崎大学・水産・環境科学総合研究科（環境）・准教授

研究者番号：20608872

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：目に見えない水資源である地下水の汚染問題には自然要因と人為要因があるが、有明海を挟んだ2つの研究地域の湧水群を対象とすることで両要因の多角的な考察が可能となり、環境負荷インパクト後の水質変化のメカニズムを理解することができた。各湧水群において滞留時間推定を行ったところ、いずれも数年～十数年程度の短い滞留時間であり、活発な水循環が形成される両地域において、噴火に伴う土地利用形態の変化と水質変化の呼応性や、地下水汚染に対する施策と効果の顕在化という実データを捉えることに成功した。本研究は、持続的な水利用のあり方に資する成果となり、レジリエントな水環境都市の構築に寄与する研究となったといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

島原湧水群では雲仙普賢岳の噴火前に広域的な水質調査が行われていた。自然災害インパクトを経験した当地域において、水年齢をふまえた地下水流動の推定を通じ影響評価をすることで、水環境の変遷を科学的に裏付けることができた。また、金峰山湧水群では、全国各地で普遍的に顕在化している硝酸性窒素汚染がみられ、果樹園割合と硝酸性窒素濃度の経年変化を解析したところ、両要素の増加傾向が一致した。しかし、2007年に熊本市が「硝酸性窒素削減計画」を策定した以降は両要素の傾向に一致が見られなくなったことから、対策の成果が徐々に顕在化したことが考えられた。こうした成果はレジリエントな環境構築に資するものと言える。

研究成果の概要（英文）：The problem of groundwater contamination, an invisible water resource, involves both natural and anthropogenic factors. Through a multifaceted study of spring waters in two study areas across the Ariake Sea, we were able to understand the mechanism of water quality change after environmental load impact. The residence time of each springs was estimated to be short, ranging from a few years to decades. In both areas, where active water cycles are formed, we succeeded in capturing actual data on the correspondence between changes in land use patterns and water quality changes associated with eruptions, and the manifestation of measures and effects on groundwater contamination. This research contributes to the sustainable use of water and to the construction of a resilient water environment city.

研究分野：水文学

キーワード：島原湧水群 金峰山湧水群 水質データ 年代推定 地下水汚染

1. 研究開始当初の背景

本研究の最大の特徴は、有明海を挟んだ対岸に位置する両地域において、性質の異なる環境負荷インパクト前後での水環境の評価が可能である点である。島原湧水群では、1991年の噴火・火砕流という大きな自然災害インパクトが、金峰山湧水群では、長期的に拡大し続ける果樹園開発という人為起源インパクトがみられる。

近年、大きな自然災害が各地で発生しているが、島原湧水群では1991年の自然災害インパクト前に広域的な水質調査が行われている。島原地域では既に復興作業が完了しており、旧来の水環境都市を再構築する段階にある。自然災害インパクトを経験した当地域において、水年齢をふまえた地下水の水質や起源を高い精度で推定しメカニズムを解明することは、水環境の変遷を科学的に紐解くことに繋がる。一方の金峰山湧水群では、全国各地で普遍的に顕在化している硝酸性窒素汚染の進行が、過去から細かい時間間隔での実測値の蓄積により明らかにされているため、汚染原因と想定される果樹園開発の歴史とともに検討することで、汚染原因の水文科学的な解明や、年代測定を踏まえた将来的な硝酸性窒素濃度の挙動の推定が可能となる。

2. 研究の目的

本研究では島原地域の『自然災害インパクト』と金峰山の『人為起源インパクト』が発生する以前と現在との水質比較を行い、加えて多角的な水文学手法（同位体手法、水年齢手法等）を用いた分析とGIS（地理情報システム）を用いた土地利用解析を実施することで、環境負荷インパクト後の水質変化のメカニズムを高い信頼性を兼ね備えながら可視化することを目的とする。

3. 研究の方法

島原湧水群では、噴火から約25年が経過し復興した現在の広域的な採水調査を、金峰山湧水群では、果樹園が全斜面に分布した現在の広域的な採水調査をそれぞれ実施し、近年における水質分布状況を整理する。同時に過去のインパクト前の水質データを整理することで、長期的な時系列データを作成し水質変遷を捉える。また、CFCs や SF₆ をトレーサーとした湧水年齢の推定や、水の同位体比を用いた涵養標高の推定を行うことで、各湧水群の流動メカニズムの高精度での解明を進める。そして、GISを用いた土地利用解析を行うことで、自然災害や人為的汚染に伴う負荷の実態と、それに呼応する湧水水質の対応を解析する。

4. 研究成果

(1) 島原湧水群について

長崎県島原半島に位置する雲仙岳の噴火が1991年に発生し、この直前・直後に当たる1987～95年に島野（1999）等により島原市内の湧水水質が調査されたが、それ以降、本地域において継続的に広域の水質調査は行われていない。そこで本研究では、噴火直後である1991～95年に分析された湧水を再訪問することで、水質分析の長期的な傾向を読み取りその変化要因を検討することを目的として、噴火直後と噴火から約25年が経過した近年の湧水水質の比較を行った。

① 主要溶存イオンの長期的変化

雲仙岳の噴火前そして噴火後から数年にわたり、島野（1999）により主要溶存イオン分析が行われていたため、本研究で2018年に同様の水質項目を分析することで、長期的な水質変化を捉えることができた。分析結果を基にStiffダイアグラムを作成し、一部の湧水の長期的変化をFig. 1に示す。噴火後のStiffダイアグラムの形状に著しい変化はみられないため、噴火の影響が湧水水質に与えた影響は顕著とは言い切れない。しかし、「折橋」においては、噴火後から硝酸イオン濃度が明らかに低減し始めており、現在では検出限界付近である。この湧水の硝酸イオン濃度の低減要因について、土地利用の状況とともに次節にて考察する。

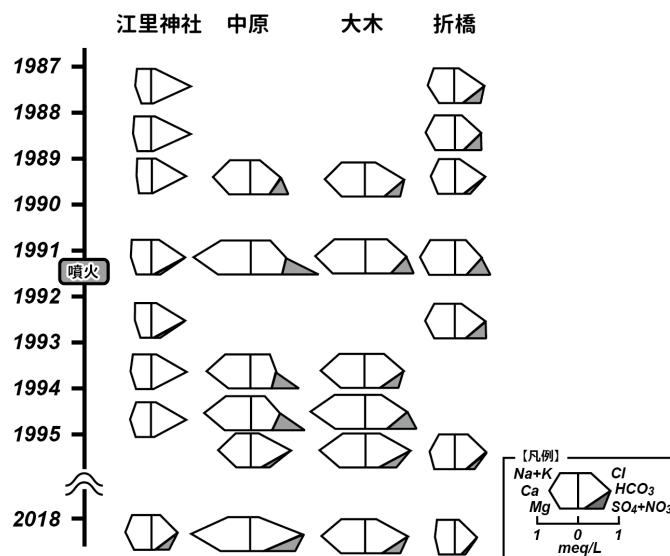


Fig. 1 島原湧水群（一部）の Stiff ダイアグラムの長期的変化（1995年以前は島野（1999）を基に作成）

②自然災害インパクト後の土地利用変化と水質変化

「折橋」の湧水池点と、その上流域における噴火前後の空中写真を Fig. 2 に示す。噴火前（1982年）の空中写真では、湧水の上流域に民家や農地が広がっており、農業活動由来と推察される人為的負荷により、結果的に湧水中に高濃度の硝酸イオンとして検出されていたと考えられる。しかし、噴火後（2015年）の空中写真では、上流域の民家や農地が火砕流等により壊滅的な被害に遭い、一切なくな

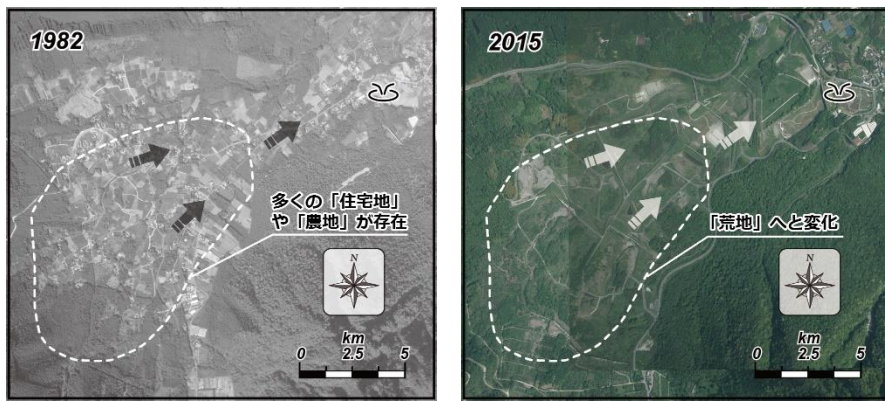


Fig. 2 「折橋」地点上流域の土地利用変化（国土地理院の空中写真閲覧サービスに基づき作成） ※ 図中の矢印は地下水の流動方向を示す

くなったことが分かる。このような自然災害インパクトにより、地表面の土地利用形態には地下水に与える人為起源の影響因子が皆無になったことから、湧水中の硝酸イオン濃度が徐々に低減し、現在では検出されない程度まで低下したものと考えられる。

また、この「折橋」地点において2017年にCFCs（クロロフルオロカーボン類）を用いて年代推定をした結果、平均滞留時間は28年であった。噴火の発生が26年前であったことから、この湧水がピストン流と想定した場合、土地利用形態の変化（人為起源の負荷要因がなくなったこと）と湧水中の硝酸イオン濃度がほぼゼロになったことは、時間スケールでみると整合的といえる。このような、人為起源の地下水への負荷と水質との関係を、年代推定値を含めて総合的に勘案することは、例えば施肥量の低減政策による地下水水質の改善までの時間の推定や、汚染物質の混入の拡散速度の推定に応用できる可能性を秘めているといえる。

(2) 金峰山湧水群について

金峰山湧水群が分布するこの地域は「河内みかん」の産地として有名で、伝統的にみかんが栽培されている地域である。地域特産のみかん栽培で使用される化学肥料が硝酸イオン濃度の主要因であると考えられ、Fig. 3 に示したように2008年までは経年的に硝酸イオン濃度の増加傾向が認められた（2003年以前の濃度については、島野（2000）および津留ほか（2003）を基に作成）。

金峰山におけるみかん栽培面積の広がりや時代別に捉えるために、2万5千分の1の地形図（「伊倉」、「植木」、「肥後船津」、「熊本」）を基に果樹園の平面分布を、大正（15年）、昭和（32～48年）、平成（11年）の3時代に分けて調べた結果、大正時代の果樹園の平面分布（Fig. 4-左）は、金峰山西部から北西部の山麓にのみみられる程度である。昭和時代（Fig. 4-中）に入ると南部から東部地域に果樹園が広がり、さらには高標高地域にも果樹園が点在するようになった。平成時代（Fig. 4-右）には北部にも果樹園がみられるようになり、金峰山一体が果樹園で覆われるような分布となった。このような果樹園の増加傾向は、過去に分析された金峰山湧水群の硝酸イオン濃度の増加傾向と同じである。Fig. 3 中の△印で示した金峰山東側の湧水はいずれも濃度が相対的に低いものの、金峰山西側（○印）や北側（□印）では濃度が高く、長期的に増加傾向にあることが読み取れる。これらの濃度の上昇傾向は、昭和時代から平成時代にかけての果樹園の面積の増加と関係があることが示唆される。しかし、その後の2019年の硝酸イオン濃度は全体的に減少傾向にあり、農用地面積の増加と硝酸性窒素濃度には必ずしも相関性を示すとは限らない結果となった。GISを用いた土地利用割合の解析結果（Fig. 5）においても、2006年以降も果樹園面積の拡大が続い

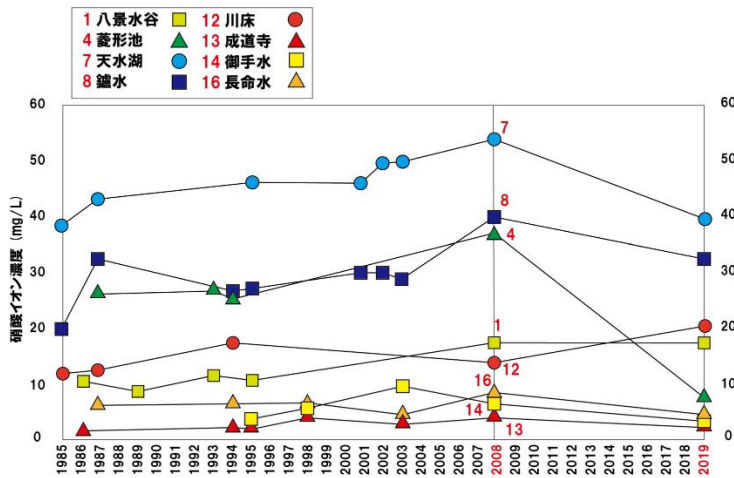


Fig. 3 金峰山湧水群の硝酸イオン濃度の経年変化

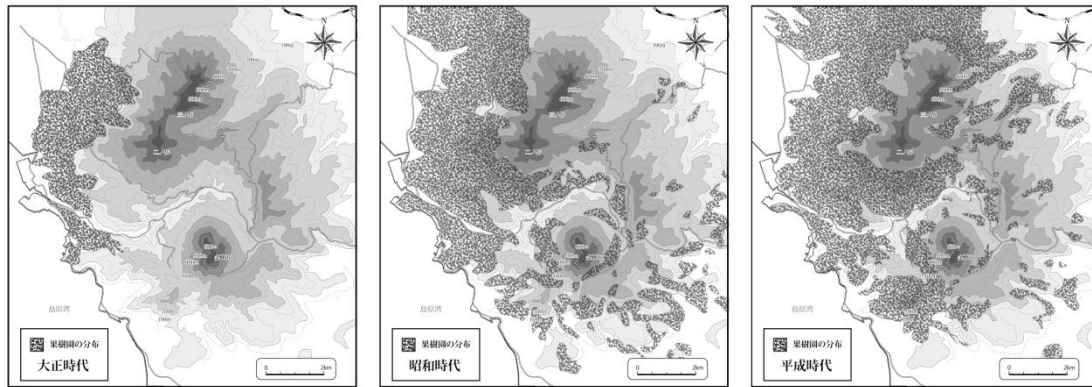


Fig. 4 金峰山における果樹園の分布の変遷

ていることから、湧水の硝酸イオン濃度が低減している理由としては、熊本市が2007年に「熊本市硝酸性窒素削減計画」を策定し、施肥・家畜排泄物・生活排水の発生源対策を中心に推進した成果が徐々に顕在化してきたためと考えられる。

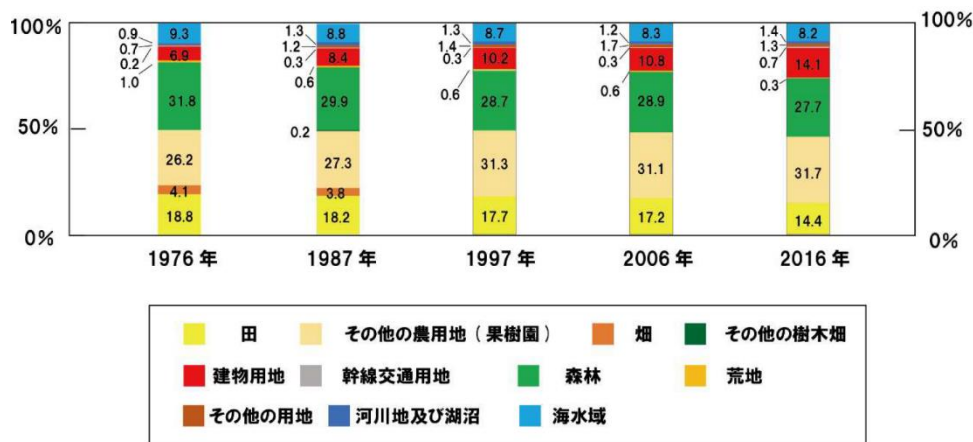


Fig. 5 土地利用割合の解析結果 (1976年～2016年)

(3) まとめ

目に見えない水資源である地下水の汚染問題には、自然要因と人為要因があるが、有明海を挟んだ島原湧水群と金峰山湧水群という2つの研究地域の湧水群を対象に多角的に考察することで、環境負荷インパクト後の水質変化のメカニズムを理解することができた。各湧水群において滞留時間推定を行ったところ、いずれも数年～数十年程度の短い滞留時間であり、活発な水循環が形成される両地域において、噴火に伴う土地利用形態の変化と水質変化の呼应性や、地下水汚染に対する施策と効果の顕在化という実データを捉えることに成功した。本研究は、持続的な水利用のあり方に資する成果となり、レジリエントな水環境都市の構築に寄与する研究となったといえる。特に島原湧水群での事例から言えることとして、地下水の硝酸性窒素汚染の低減に向けて、各自治体で様々な対策が講じられているものの、地表面活動への対策を行ったとしても、その効果が顕在化するまでにタイムラグを有する地下水の特徴から、忍耐強く継続的な施策の実行が難しくなっている自治体もあるかもしれない。また、地域の实情に合わない過度な汚染対策を進めてしまうと、様々なステークホルダー間の連携が乱れ、結果的に地下水汚染が悪化する場合も考えられる。本地域では雲仙普賢岳の噴火という自然災害インパクトにより、被災した地域では人間生活を営むことのできない土地利用形態へと変化し人為的な窒素負荷はなくなった。これはある意味では、硝酸性窒素汚染への最強度の対策に等しいものであるが現実的とは言えない対策である。しかし、自然災害により人為起源の窒素負荷が止まった地域の湧水では、徐々に硝酸性窒素汚染が減衰していることが観測結果から認められた。この事実を踏まえると、目に見えない水資源である地下水を対象にしたレジリエントな社会環境を目指すためには、より精緻な地下水流動機構の解明という研究アプローチと、その研究データに裏付けられた的確な施策の必要性を示すものであり、有益な研究資料と言える。

<引用文献>

- 島野安雄 (1999) : 雲仙火山東麓地域における湧水の水文化的研究. 文星紀要, 11, 3~39.
- 島野安雄 (2000) : 阿蘇火山西麓地域における湧水・河川水の水文化的研究. 文星紀要, 12, 3~36.
- 津留靖尚・末吉栄志・岩永貴代・馬場正憲 (2003) : 熊本の湧水について. 熊本市環境総合研究所報, 11, 39~58.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4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 Yang Heejun, Kagabu Makoto, Okumura Azusa, Shimada Jun, Shibata Tomo, Pinti Daniele L.	4. 巻 31
2. 論文標題 Hydrogeochemical processes and long-term effects of sea-level rise in an uplifted atoll island of Minami-Daito, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology: Regional Studies	6. 最初と最後の頁 100716 ~ 100716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejrh.2020.100716	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 Ishitsuka Kazuya, Tsuji Takeshi, Lin Weiren, Kagabu Makoto, Shimada Jun	4. 巻 72
2. 論文標題 Seasonal and transient surface displacements in the Kumamoto area, Japan, associated with the 2016 Kumamoto earthquake: implications for seismic-induced groundwater level change	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-020-01275-2	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 KAGABU Makoto	4. 巻 61
2. 論文標題 Visit to valuable water springs (126) Valuable water springs in Shimabara Peninsula (Revisit)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Groundwater Hydrology	6. 最初と最後の頁 227 ~ 240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5917/jagh.61.227	査読の有無 無
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 Ide Kiyoshi, Hosono Takahiro, Kagabu Makoto, Fukamizu Keisuke, Tokunaga Takahiro, Shimada Jun	4. 巻 583
2. 論文標題 Changes of groundwater flow systems after the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake deduced by stable isotopic and CFC-12 compositions of natural springs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124551 ~ 124551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydrol.2020.124551	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 Kagabu Makoto, Ide Kiyoshi, Hosono Takahiro, Nakagawa Kei, Shimada Jun	4. 巻 582
2. 論文標題 Describing coseismic groundwater level rise using tank model in volcanic aquifers, Kumamoto, southern Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124464 ~ 124464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2019.124464	査読の有無 無
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 利部 慎	4. 巻 61
2. 論文標題 名水を訪ねて (126) 島原半島の名水 (再訪)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地下水学会誌	6. 最初と最後の頁 225 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Nakagawa Kei, Yu Zhi-Qiang, Berndtsson Ronny, Kagabu Makoto	4. 巻 78
2. 論文標題 Analysis of earthquake-induced groundwater level change using self-organizing maps	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12665-019-8473-z	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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 藤島 恵・浅井和見・長谷川和宏・茂木勝郎・野澤 徹・利部 慎
2. 発表標題 大分県日出町における海底湧水の湧出機構と栄養塩の輸送特性
3. 学会等名 日本地下水学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 利部 慎・嶋田 純・井手 淨・矢野弘道・矢野伸二郎
2. 発表標題 広域地下水流動場での滞留時間分布の実態把握 - 85Kr年代トレーサーを用いた熊本地域での実践 -
3. 学会等名 日本地下水学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古川正修・坂本拓二・土岐直大・松本 翔・工藤圭史・日野泰輔・大西恭秀・利部 慎・高良靖之・福永貴士
2. 発表標題 福岡県うきは市における「地下水マネジメント」への取り組み
3. 学会等名 日本地下水学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto KAGABU, Kei FUJISHIMA
2. 発表標題 Analysis of Water Quality Change and its Factors Before and After Natural Disasters in the Shimabara Springs
3. 学会等名 AOGS 2019 16th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei FUJISHIMA, Makoto KAGABU
2. 発表標題 Impact Analysis of Land Use Change on Spring Water Quality in Fukuoka Area
3. 学会等名 AOGS 2019 16th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 利部 慎
2. 発表標題 島原湧水群における自然災害インパクト後の地下水水質の長期的変化と年代推定の高精度化に向けて
3. 学会等名 日本水文科学会2018年講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto KAGABU, Kiyoshi IDE, Takahiro HOSONO, Kei NAKAGAWA and Jun SHIMADA
2. 発表標題 Tank model analysis of coseismic groundwater-level changes induced by 2016 Kumamoto earthquake
3. 学会等名 45th IAH Congress (IAH2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 公益社団法人 日本地下水学会	4. 発行年 2020年
2. 出版社 成山堂書店	5. 総ページ数 272
3. 書名 地下水・湧水の疑問50 みんなが知りたいシリーズ13	

1. 著者名 嶋田 純、細野 高啓	4. 発行年 2020年
2. 出版社 成文堂	5. 総ページ数 236
3. 書名 巨大地震が地下水環境に与えた影響	

〔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
---------	---------