

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06309

研究課題名（和文）沿岸域の地下ダムの持続的利用に向けた地下水水質予測モデルの構築

研究課題名（英文）Groundwater quality modeling toward sustainable use of subsurface dams in coastal areas

研究代表者

吉本 周平（Yoshimoto, Shuhei）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・上級研究員

研究者番号：10435935

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）：琉球石灰岩を帯水層とする地下ダム貯留域の地下水の流れについて、洞窟などの空洞ネットワークを通過する速い地下水の流れ（パイプフロー）が存在し、地下水涵養年代や方解石飽和度に関連する水質によってパイプフローの影響圏にある地下水を判別できることが示された。また、気候変動に伴う降雨パターンの極端化が地下ダム水資源に与える影響を評価するために、パイプフローを考慮した地下ダム水収支モデルを構築した。その結果、海へ直接流出するパイプフロー流出量が増大し、利用可能な水資源の量が減少する可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた地下ダム貯留域の地下水流動状況に関する知見は、地下ダム水資源の水質保全、とりわけ沿岸部に設置された地下ダムの残留塩水の挙動や地下水中の硝酸性窒素の消長に関する理解に資するものであり、地下ダム水資源の保全施策に貢献することが期待される。また、地下ダム水資源への気候変動の影響評価によって、農業用水資源への気候変動影響の全国評価への貢献とともに、今後の地下ダムの水資源管理手法の検討にも役立てられると期待される。

研究成果の概要（英文）：This study revealed the groundwater flow situations in areas where subsurface dams are situated. Water quality indicators for groundwater dating and calcite saturation were found to be applicable to illustrating rapid groundwater flow through conduit networks in aquifers of the Ryukyu limestone and its influencing extents. Based on the findings above, a water budget model considering rapid groundwater flow through the conduit networks was developed to evaluate an impact of concentration of rainfall under the ongoing climate change on water resources of a subsurface dam; upon an assumption of concentrated rainfall, simulation results indicated possible decrease in amount of water recharging the dam.

研究分野：農業農村工学

キーワード：水資源 南西諸島 涵養年代推 カルスト水文学 水文地球化学

## 1. 研究開始当初の背景

南西諸島の琉球石灰岩分布地域では、地下に止水壁を建設して地下水を貯留する地下ダムが建設されている。このうち、沿岸部の地下に止水壁を建設して海水の侵入を防ぎ淡水の地下水を貯留する塩水侵入阻止型の地下ダムでは、建設直後から止水壁のすぐ上流側に塩水(海水)が残存している。琉球石灰岩からなる帯水層には大規模な洞窟などの空洞が発達し、降水時には洞窟ネットワークを通過する地下水の流れ(パイプフロー)が発生して止水壁まで到達して、残留塩水の挙動に影響を与えている。近年の気候変動に伴う極端な豪雨などの気象現象の極端化によって、パイプフローが発生し、残留塩水の短期的な挙動が既設の取水井や水質観測井にまで影響を及ぼす可能性がある。しかし、既往の保全管理対策は、均質な帯水層を仮定したシミュレーションや模型実験による予測に基づいて策定されており、パイプフローは考慮されていない。

## 2. 研究の目的

本課題では、パイプフロー発生に伴う塩水挙動を理解するために、複数の水質指標の観測に基づく地下水モデリング手法を開発する。具体的には、

- 溶存酸素濃度の自記観測によってパイプフロー発生を検知して塩水挙動への影響を推定、
- 六フッ化硫黄など大気由来微量ガス濃度から地下ダム貯留域の地下水循環状況を把握、
- 上記の結果からパイプフローが残留塩水の挙動に影響を与えるメカニズムをモデル化によって、塩水侵入阻止型地下ダムでの地下水の将来的な水質変動の予測方法を提案する。

## 3. 研究の方法

本報告では、沖縄県糸満市の米須地下ダムを対象とした調査の結果について述べる。米須地下ダムは第四紀の琉球層群(琉球石灰岩)を帯水層とし、難透水性の泥岩/砂岩互層の新第三期の島尻層群を水理地質基盤として、断層によって形成されたグラベン構造の地下谷を仕切るように止水壁が海岸沿いに設置されている。止水壁の締め切りは2002年に完了した。

地下ダムの流域や周辺には湧水や洞窟が点在し、止水壁下流の海岸近くの湧水では地下ダム止水壁の設置後も湧水流量の維持のために対策工が施された。貯留域には大規模な空洞(洞窟網)が存在し、これらは海岸沿いの湧水や貯留域にあるドリーネ底の湧水に接続していると推定されている。止水壁沿いの貯留域の深部には止水壁締め切り時に残留した塩水が残存している。

パイプフロー現象が地下ダム貯留域の地下水流動状況に与える影響を調べるために、止水壁沿いにあり止水壁の上流側と下流側で対になっている観測用ボーリング孔8箇所(4対;B1-B8)ならびに地下ダムの流域や周辺にある湧水5カ所(S1-S5)で採水調査を実施した。観測用ボーリング孔での調査は2020年11月に実施し、その時には地下水面が止水壁上端より上にあり、止水壁から越流していたとみられる。採水にはステンレス製の深度別ペーラー(Solinst製 Model 425)を使用し、六フッ化硫黄( $\text{SF}_6$ )と過剰空気(EA)の分析のための試料はアクリル容器を用いて空気に触れないようにガラス瓶に封入した。止水壁の上流側では複数深度で採水した。湧水については2018年から2021年までの調査での結果を参照した。

主要イオン濃度はイオンクロマトグラフ装置(東亜ディーケーケー製ICA-2000)で測定した。重炭酸( $\text{HCO}_3^-$ )はpH 4.8酸消費量(Mアルカリ度)から求めた。電気伝導度(EC)、pH、水温、酸化還元電位、溶存酸素濃度(DO)はポータブルセンサ(東亜ディーケーケー製WM-32EPおよびRM-30P;HACH製HQ30d)を用いて現地で測定した。化学的酸素要求量(COD)は簡易な比色法であるパックテスト(共立理化学研究所製ZAK-COD(D)-2)によって把握した。

地下水の涵養年代については、六フッ化硫黄( $\text{SF}_6$ )の分析結果を溶存窒素( $\text{N}_2$ )の濃度から求められる過剰大気(EA)の量によって補正し、補正後の $\text{SF}_6$ の大気平衡濃度とNOAAの北半球大気濃度を比較することによって推定した。 $\text{SF}_6$ の分析は浅井・辻村(2010)の手順に従い、Purge and Trap法で捕集してECD付きガスクロマトグラフ装置(島津製作所製GC-8A)に導入して測定した。また、EAに関しては、炭酸ガス追い出し法によってTCD付きガスクロマトグラフ装置(島津製作所製GC-8A)で $\text{N}_2$ とArを定量し、 $\text{N}_2$ の値からEA量を推定した。一部の試料について、硝酸イオン( $\text{NO}_3^-$ )の窒素酸素安定同位体比を測定した。試料中の $\text{NO}_3^-$ を脱窒菌法で $\text{N}_2\text{O}$ ガスに還元した後にコンフロー型安定同位体比質量分析計(Thermo Scientific社製Delta plus Advantage)に導入して測定し、 $^{15}\text{N}$ と $^{18}\text{O}$ の値を求めた。貯留域のドリーネの底にある湧水(S3)では自記ロガー(応用地質製S&DL mini、Onset製U24-002およびU26)を設置して水位、電気伝導度(EC)、水温、溶存酸素濃度(DO)を連続観測した。

気候変動に伴う極端な気象現象の頻発化が地下ダム水資源に与える影響を調べるために、パイプフローを考慮した地下ダム水収支モデルを構築した。詳細は吉本ら(2023)参照のこと。

## 4. 研究成果

2020年11月の調査での地下水試料について、主要イオン組成を示すトリリニアダイアグラムを図1に示す。湧水は炭酸塩岩地域において涵養された天水由来の地下水(Hanshaw and Back, 1979)であったといえるが、一方、観測用ボーリング孔の試料は残留塩水の影響を若干受けてい

たとえられる。既知の洞窟経路に近い右岸寄りの観測孔では、左岸寄りの観測孔と比較して推定される滞留時間が短い。この対比は、EC などの他の水質項目の測定結果と整合的である。COD は測定した試料全てで  $2 \text{ mg L}^{-1}$  以下であった。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> のについては、<sup>15</sup>N 値と溶存 N<sub>2</sub> 濃度の間に正の相関はみられず、一方で N<sub>2</sub> 濃度と Ar 濃度は涵養温度が等しい場合の関係に沿った相関を示すことから、COD や DO の結果にも鑑みて、脱窒による地下水中の N<sub>2</sub> 濃度の増加は確認できない程度であり、EA による地下水年代の補正に影響を及ぼさないと考えられた。SF<sub>6</sub> から推定された浸透からの経過時間（滞留時間）は、EA 補正なしで 0-14 年、補正ありで 12-26 年であった。

2018-2020 年の調査での採取試料の方解石飽和度 (SI<sub>c</sub>) と二酸化炭素分圧の対数 (P<sub>CO<sub>2</sub></sub>) の関係を図 2 に示す。一般に、土壤中の CO<sub>2</sub> が浸透水に溶解し、炭酸塩岩と反応することで HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> が地下水に付加される。流動過程で曝気すると P<sub>CO<sub>2</sub></sub> が低下し pH が上昇するため SI<sub>c</sub> が上昇し過飽和となるが、すぐには晶出せず HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度が保存され、SI<sub>c</sub> と  $-\log(P_{CO_2})$  は 1 : 1 の関係で変化する (Peyraube et al., 2012)。上流域の S4 や S5 では概ね 1 : 1 に沿った変化が見られるが、既知の大規模な空洞分布域の S1 や S3 では比較的大きく逸脱している。上流域の湧水は涵養過程の変化の影響が平準化されているが、大規模な空洞を通過する地下水は季節的な、あるいは短期的な涵養過程の変化に影響されやすいと推定される。S3 での自記ロガーでの観測では、2020 年 12 月の地下水流出時には EC と水温が低下して DO が上昇して大気平衡に近づいたが、一方、2021 年 5 月の地下水流出時には EC が上昇して DO が低下した。採取試料の EC と SI<sub>c</sub>、 $-\log(P_{CO_2})$  と関係を踏まえると、2020 年 12 月は洞窟網を通過したパイプフローによるとみられる浸透後まもない地下水が卓越したが、2021 年 5 月には帯水層から押し出された地下水の割合が大きかった可能性がある。DO の変動と EC の変動の関係は明瞭でない。これは、浸透直後の地下水の DO は大気平衡に近いが、地下水中の有機物分解に伴って DO が経時的に消費されるためと考えられる。

これらのように、止水壁沿いでは残留塩水による水質への影響がみられる一方、石灰岩の溶解に関する水質指標によって地下水の流動過程が特徴付けられる可能性が示された。この結果を踏まえて、残留塩水に関連する Na<sup>+</sup> と Cl<sup>-</sup> を除く主要イオン 6 種と pH を特徴量とする階層的クラスタリング (Ward 法) を適用したところ、水質は 2 つのクラスタに大別され、それぞれが海岸沿いの湧水 S1 と S2 に流出する地下水の影響圏に対応すると示唆された。

パイプフローを考慮した地下ダム水収支モデルを構築し、降雨パターンの極端化による地下ダム水資源への影響を検討した。その結果、大きく降雨パターンが極端化する仮定の下では、年によってパイプフローによって地下ダムに貯留されない水の流出が有効降水量の 1 割以上増大すると見積もられた。このことから、降雨の集中化によって、海へ直接流出するパイプフロー流出量が増大し、その影響によって年降水量が変化しない場合でも地下ダム貯留域の地下水位が低下する可能性が示された。

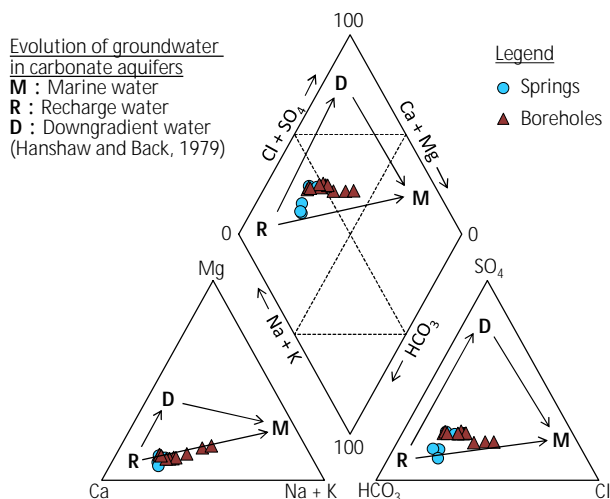


図 1 採取した地下水試料のトリリニアダイアグラム

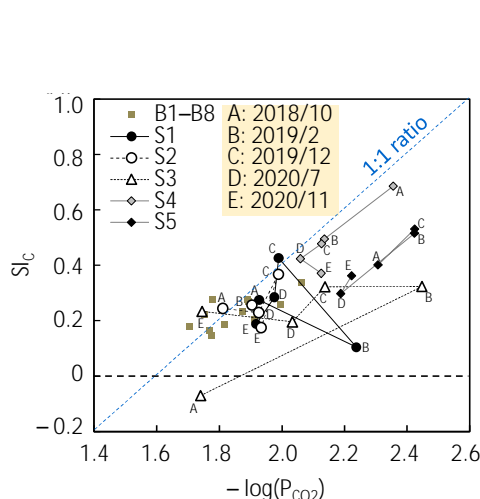


図 2 SI<sub>c</sub> と  $-\log(P_{CO_2})$  の関係

< 引用文献 >

1. 浅井和由、辻村真貴、トレーサーを用いた若い地下水の年代推定法 火山地域の湧水への CFCs 年代推定法の適用、日本水文科学会誌、39(3)、2010、67-78
2. Hanshaw, B.B., W. Back, Major geochemical processes in the evolution of carbonate-aquifer systems. J Hydrol, 43, 1979, 287-312
3. Peyraube, N., Lastennet, R., Denis, A., Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of a karstic massif, using P<sub>CO<sub>2</sub></sub>-SI<sub>c</sub> relationship, J. Hydrol., 430-431, 2012, 13-24
4. 吉本周平、土原健雄、白旗克志、中里裕臣、石田聡、降雨強度の変化が地下ダム水資源に与える影響の評価 洞窟性パイプフローを考慮した水収支モデルによる検討、日本水資源学システム学会誌、28(2)、2023、41-48

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 吉本周平, 土原健雄, 白旗克志, 中里裕臣, 石田聡	4. 巻 28
2. 論文標題 降雨強度の変化が地下ダム水資源に与える影響の評価 洞窟性パイプフローを考慮した水収支モデルによる検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本雨水資源化システム学会誌	6. 最初と最後の頁 41-48
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 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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉本周平, 白旗克志, 土原健雄, 中里裕臣, 石田聡
2. 発表標題 石灰岩溶解に関する水質指標による地下水流動状況の検討：米須地下ダム流域での事例
3. 学会等名 2021年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉本周平, 白旗克志, 土原健雄, 中里裕臣, 石田聡
2. 発表標題 塩水侵入阻止型地下ダムの貯留域における電気伝導度と溶存酸素濃度の鉛直分布の変化
3. 学会等名 第29回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉本周平, 白旗克志, 土原健雄, 浅井和由, 中里裕臣, 石田聡
2. 発表標題 六フッ化硫黄による地下水年代を指標とした地下ダム止水壁付近の地下水流動状況の検討
3. 学会等名 日本地下水学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉本周平, 白旗克志, 土原健雄, 中里裕臣, 石田聡
2. 発表標題 各種水質の測定による琉球石灰岩帯水層のパイプフロー現象の検討
3. 学会等名 2022年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉本周平, 土原健雄, 白旗克志, 福元雄也, 中里裕臣, 唐常源, 石田聡
2. 発表標題 地下ダム止水壁周辺の地下水中の六フッ化硫黄の分布と止水壁健全性評価への適用性
3. 学会等名 第30回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉本周平, 白旗克志, 土原健雄, 中里裕臣
2. 発表標題 水温と溶存酸素の連続観測による琉球石灰岩地域のオールストレナー観測孔での孔内流の有無の検討
3. 学会等名 日本地下水学会2023年春季講演会
4. 発表年 2023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
研究協力者	土原 健雄  (Tsuchihara Takeo)  (30399365)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・上級研究員    (82111)	

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
---------	---------