

## 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

## Water quality measurement and its interpretation on conduit flow in Ryukyu Limestone aquifer

○吉本周平\*・白旗克志\*・土原健雄\*・中里裕臣\*・石田聡\*\*

YOSHIMOTO Shuhei, SHIRAHATA Katsushi, TSUCHIHARA Takeo, NAKAZATO Hiroomi and ISHIDA Satoshi

## 1. はじめに

将来予測される気候変動に伴う極端化が水資源に与える影響を評価し、必要な対策を講じることは喫緊の課題である。南西諸島に設置されている地下ダム貯留域では、洞窟やドリーネなどのカルスト地形がみられ、大雨時には洞窟を通過する速い地下水の流れ（パイプフロー）が発生する。パイプフローによって流出する地下水の一部は湧水や排水路を通じて貯留域外に排除されるため、今後、降水パターンが変化して豪雨が集中化すれば、地下ダムの貯留に寄与する割合が減少する可能性がある。気候変動影響の予測においてこのような現象を再現する必要があることから、本稿では、地下ダム貯留域の湧水で各種水質を観測し、湧水へのパイプフローの寄与について検討した。

## 2. 研究方法

沖縄県糸満市の米須地下ダム貯留域に位置する湧水（図1のS3）を調査対象とした。S3は豎穴型の湧水で、上流の凹地と洞窟網で接続し（沖縄本島南部農業水利事業所，2005），まとまった降雨時のみ地下水が流出する。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。また、表1の時期に採水し、ポータブル計（東亜ディーケーケー製 WM-32EP）を用いてEC、pH、DOを測定し、持ち帰った試料の主要イオン濃度（ $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ）を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。 $\text{HCO}_3^-$ 濃度はpH4.8酸消費量（Mアルカリ度）から換算した。方解石飽和度（ $SI_c$ ）と二酸化炭素分圧（ $P_{\text{CO}_2}$ ）は次式により求めた：

$$SI_c = \text{pH} + \log(K_2 [\text{Ca}^{2+}] [\text{HCO}_3^-] / K_c), \quad \log(P_{\text{CO}_2}) = -\text{pH} + \log([\text{HCO}_3^-] / K_0 K_1),$$

$K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_c$ は平衡定数で、角括弧で表すイオン活量はイオン濃度から Debye-Hückel 式で求めた。

## 3. 結果と考察

自記ロガーによる測定結果の一部を図2に示す。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、ECは水位ピーク後に緩やかに上昇する一方、DOは地下水流出が起こっている間は大気平衡に近い濃度であった。一方、2021年5月の地下水流出時にはECが上昇してDOが低下したのち、それぞれ不規則な変動を示した。

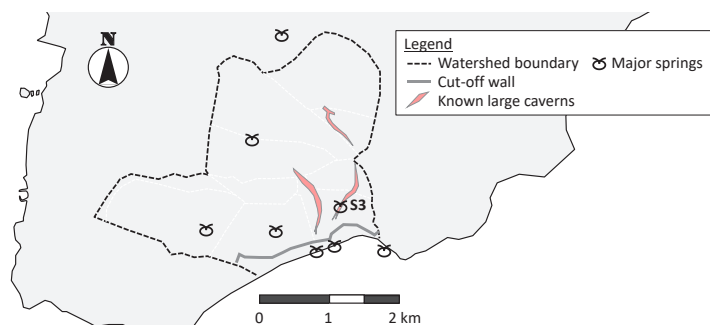


図1：調査地区および採水地点の位置  
Location of the study site and sampling points

No.	Date
A	2018/10/23
B	2019/ 2/21
C	2019/12/11
D	2020/ 7/ 3
E	2020/11/15
F	2021/ 7/ 6
G	2021/ 7/ 9
H	2021/ 9/24

表1：採水日  
Survey dates

\* 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 Institute for Rural Engineering, NARO

\*\* 公益社団法人農業農村工学会事務局 Secretariat of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering  
キーワード：炭酸塩岩、方解石飽和指数、溶存酸素、地下ダム、カルスト水文学、水文地球化学

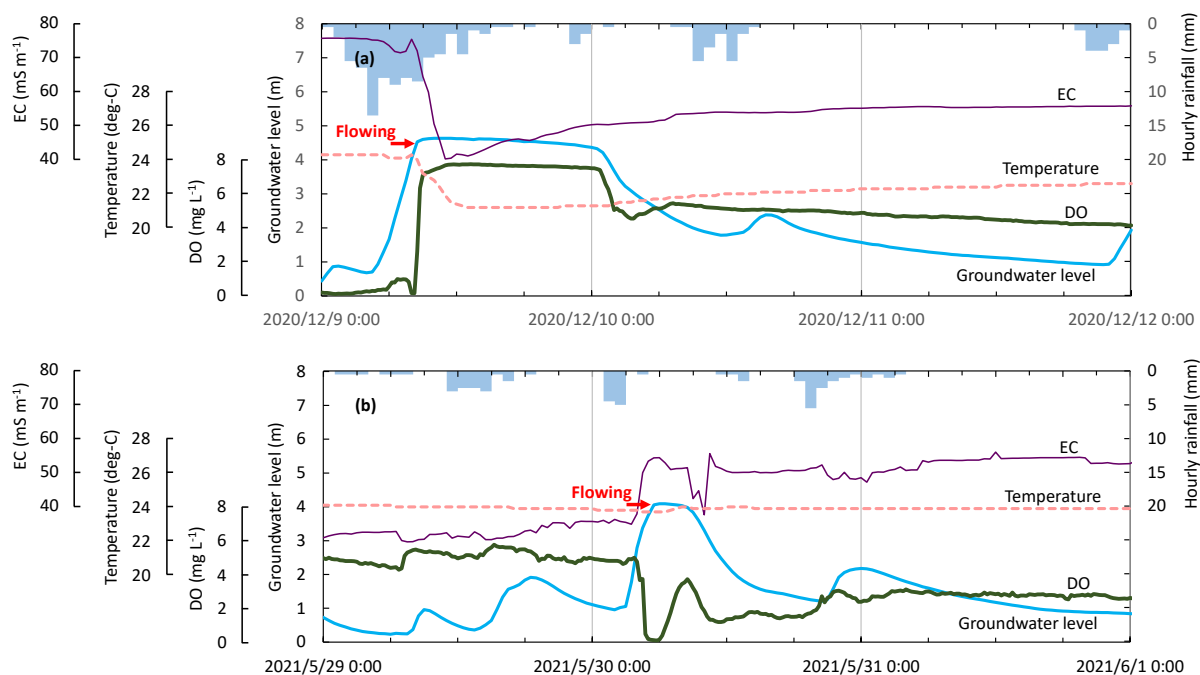


図 2 : 湧水 S3 の水位, EC, 水温, DO, ならびにアメダス系の降水量の変化

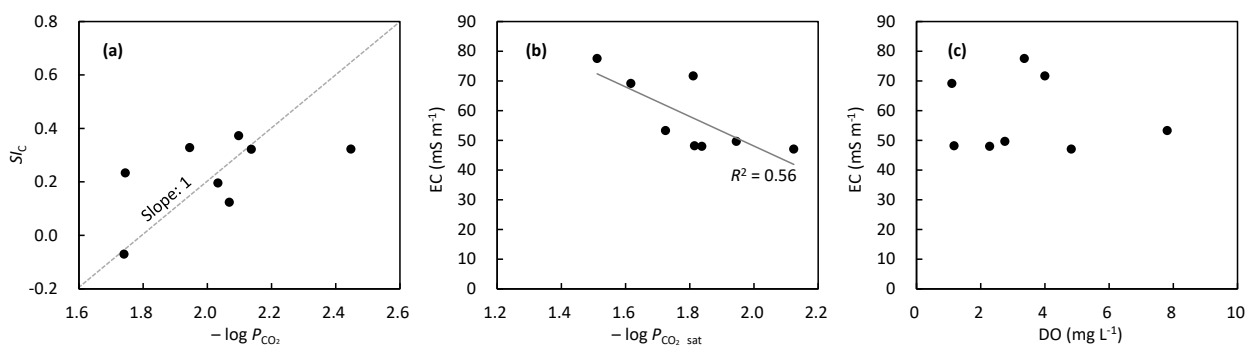


図 3 : 採水試料の (a)  $SI_c$  と  $-\log(PCo_2)$  の関係 ; EC と (b)  $-\log(PCo_{2\_sat})$  ならびに (c) DO の関係

採水試料の  $SI_c$  と  $-\log(PCo_2)$  の関係を図 3 (a) に示す。既報 (吉本ら, 2021) において他の湧水でみられたような傾き 1 の直線関係は確認できない。Minvielle et al. (2015) は、フランス南部の石灰岩帯水層において  $SI_c + \log(PCo_2)$  として示される  $\log(PCo_{2\_sat})$  が帯水層の水分状態を反映していると考え、低水時と降雨後の出水時で流出する地下水の経路が異なることを明らかにした。この知見を踏まえると、S3 での  $\log(PCo_{2\_sat})$  のばらつきは異なる経路の地下水が時期により異なる割合で混合しているためと推察される。採取試料の EC と  $-\log(PCo_{2\_sat})$ , DO の関係を図 3 (b) と (c) に示す。EC と  $-\log(PCo_{2\_sat})$  の負の相関は複数のエンドメンバーの地下水、例えば、速い流れの地下水とマトリックスフロー的な緩慢な地下水との混合によるものとみられる。これらを踏まえると、2020 年 12 月 (図 2 (a)) は浸透後まもない地下水が卓越したが、2021 年 5 月 (図 2 (b)) 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。一方、EC と DO 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。今後、降水時の集中的調査による詳細な現象解明が期待される。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP20K06309)、環境再生保全機構 環境研究総合推進費 (JPMEERF20S11814) の支援を受けた。調査では沖縄本島南部土地改良区の協力を得た。記して感謝申し上げる。

引用文献 1) 沖縄本島南部農業水利事業所 (2006) : 沖縄本島南部農業水利事業一技術誌一, 2) 吉本ら (2021) : 2021 年度 (第 70 回) 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 208-209, 3) Minvielle et al. (2015) : *Environ Earth Sci*, **74**, 7593-7604