

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 Geochemical indices on limestone dissolution to understand groundwater flow in Komesu basin

○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

南西諸島に設置されている地下ダムについて、将来予測される気候変動下での水資源の保全や止水壁機能の評価のために、地下水流動状況を把握して数値モデルを構築することが必要である。

大規模な空洞を伴う琉球石灰岩帯水層での複雑な地下水流動を理解するための有力な手段として地下水中に存在する溶存物質をトレーサと捉えて流動過程を特定する方法がある。本稿では、主要な溶存イオンの濃度から推定される方解石飽和度 (SI_C) と二酸化炭素分圧 (P_{CO_2}) を中心に水質を整理し、地下ダム流域内の湧水や止水壁周辺の地下水をもたらす流動過程について検討した。

2. 研究方法

沖縄県糸満市の米須地下ダムを調査対象とした。図1に示される地点で表1の時期に採取した試料の水質分析結果について検討した。試料の電気伝導度 (EC), pH, 水温は現地ポータブル計 (東亜ディーケーケー製 WM-32EP) を用いて測定した。主要イオン濃度 (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 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。 HCO_3^- 濃度は pH 4.8 酸消費量 (M アルカリ度) から換算した。 SI_C と P_{CO_2} は次式により求めた：

$$SI_C = pH + \log(K_2 [Ca^{2+}] [HCO_3^-] / K_C), \quad P_{CO_2} = -pH + \log([HCO_3^-] / K_0 K_1),$$

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

採取試料の Cl^- 濃度と EC の関係を図2に示す。これらは互いに単調増加の関係にあるが、止水壁沿いの観測孔 (図1の B1-B8) では勾配が小さく、貯留域内の残留塩水による影響が示唆される。

採取試料の SI_C と P_{CO_2} の関係を図3に示す。一般に、土壌中の CO_2 が浸透水に溶解込み、炭酸塩岩と反応することで HCO_3^- が地下水に付加される。土壌中の CO_2 は生物活動によって供給され、これは夏期に高い傾向がある (例えば Hess and White, 1993)。また、まとまった降水時にはバイパス流の発生によって HCO_3^- 濃度が低下することもある (例えば Stroj et al., 2020)。一方、流動過程で曝気すると P_{CO_2} が低下し pH が上昇するため SI_C が上昇し過飽和となるが、すぐには晶出せず HCO_3^- 濃度が保存され、 SI_C 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

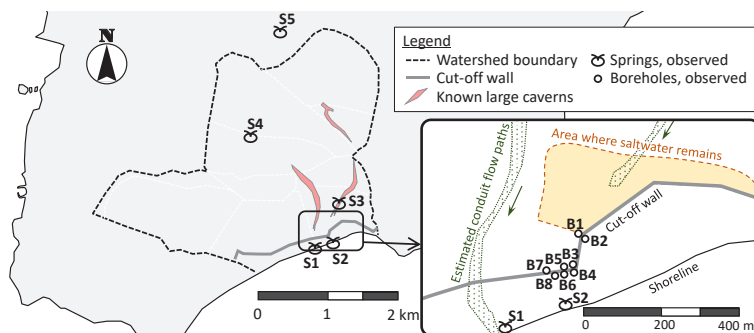


図1：調査地区および採水地点の位置
Location of the study site and sampling points

No.	Date	Objects
A	2018/10/23-25	Springs
B	2019/ 2/20-21	Springs
C	2019/12/11-12	Springs
D	2020/ 7/ 3	Springs
E	2020/11/10-15	Springs, Boreholes

表1：調査日と検討対象
Survey dates and objects

* 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
キーワード：炭酸塩岩, 方解石飽和指数, 地下ダム, カルスト水文学, 水文地球化学

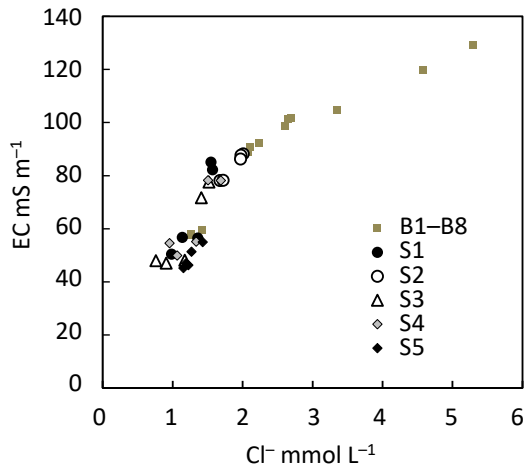


図 2 : 採取試料の Cl⁻濃度と EC の関係

Relationship between Cl⁻ concentration and EC of samples

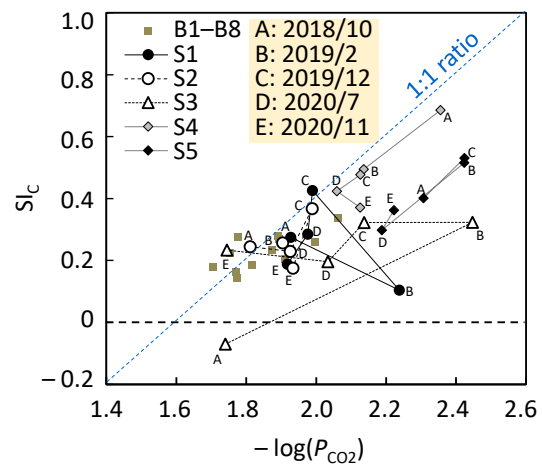


図 3 : 採取試料の SI_c と P_{CO₂} の関係

Relationship between SI_c and P_{CO₂} of samples

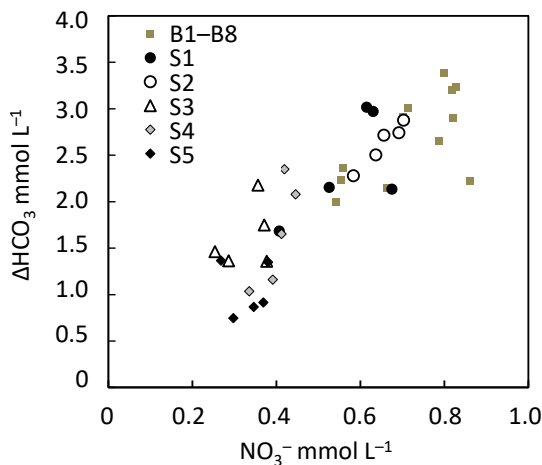


図 4 : 採取試料の NO₃⁻ と ΔHCO₃⁻ の関係

Relationship between concentrations of NO₃⁻ and ΔHCO₃⁻

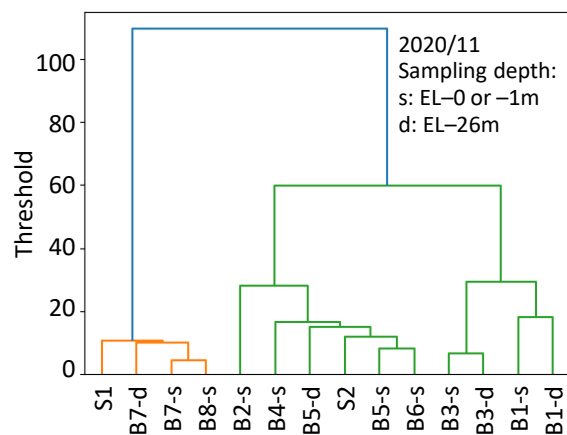


図 5 : 止水壁沿いの地下水質のデンドログラム

Dendrogram of ionic composition for samples along dam axis

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。

石灰岩の溶解が土壌 CO₂ のみによって発生するならば、地下水中の HCO₃⁻ は Mg²⁺ と Ca²⁺ の和の 2 倍とモル濃度で等しい。一方、涵養域の負荷源で発生した窒素の硝化も石灰岩を溶解させるが、生成される強酸の陰イオン (NO₃⁻ や SO₄²⁻) が HCO₃⁻ を追い出す。Mg²⁺ と Ca²⁺ の和の 2 倍と HCO₃⁻ の差 (ΔHCO₃⁻ と表す) がこの HCO₃⁻ 損失に相当する (例えば Perrin et al., 2008)。採取試料の NO₃⁻ と ΔHCO₃⁻ の関係を図 4 に示す。これらの正の相関によって硝化に伴う水質の変化が確認される。

このように、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。このため、止水壁沿いの地下水流れを検討するために、残留塩水に関連する Na⁺ と Cl⁻ 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。デンドログラムを図 5 に示す。水質は 2 つのクラスターに大別され、それぞれが 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る。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP15K07657)、クリタ水・環境科学振興財団 国内研究助成 (19E065)、環境再生保全機構 環境研究総合推進費 (JPMEERF20S11814)、生研支援センター イノベーション創出強化研究推進事業 (02012B) 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ます。

引用文献 1) Hess and White (1993) : *Appl. Geochem.*, **8**(2), 189–204, 2) Stroj et al. (2020) : *Water*, **12**(9), 2442, 3) Peyraube et al. (2012) : *J. Hydrol.*, **430–431**, 13–24, 4) Perrin et al. (2008) : *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**(13), 3105–3123