

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06301

研究課題名（和文）津波により塩水化した地下水の回復メカニズムの解明とその回復傾向の予測

研究課題名（英文）Interpretation of recovery process and estimation of recovery trend of tsunami-induced salinized groundwater

研究代表者

土原 健雄（Tsuchihara, Takeo）

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：30399365

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）：津波被災により地下水が塩水化したモデル地域において地下水中の複数の環境トレーサー（主要イオン、水素・酸素安定同位体比、六フッ化硫黄）をモニタリングし、その分布特性を明らかにするとともに、地点によって涵養源別の寄与度、地下水の滞留時間、残留塩水の状況が異なることを示した。このことから、適用した複数の環境トレーサーが、地下水の涵養プロセス・涵養源の分類、津波による塩水化からの回復過程の違いを検討する上で有用であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境トレーサーを指標とした調査により塩水化した地下水の再淡水化への回復状況は同地域内でも一様ではなく、異なる涵養源の寄与度、地下水流動実態によりその回復過程が異なることを示した。ここで用いた指標および調査手法は、津波被災地域での営農再開に向けた地下水利用計画立案の検討時に活用できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Field observation in a tsunami-induced salinized coastal aquifer using multiple environmental tracers (such as major ions, stable isotope ratios of hydrogen and oxygen, and sulfur hexafluoride) revealed the differences in contribution of recharge sources to the aquifer, groundwater residence time, and residual saline groundwater. The results showed that the application of these environmental tracers can provide information to help understand a groundwater recharge process, a classification of recharge sources, and a difference in recovery process from tsunami salinization.

研究分野：地下水水文学

キーワード：津波 地下水 塩水化 水素・酸素安定同位体比 溶存ガス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の被災地域では、津波の浸水により広範囲の浅層地下水が塩水化した。震災後、降水や水田涵養等により、塩水の上に新たな淡水域が形成される形で地下水は回復（再淡水化）しつつあるが、地下水の利用再開には至っていない地点も多い。モデル調査地ではイチゴ栽培が盛んに行われているが、代替水源として水道水が使われるなど、農家にとって経済的に不利な状況が続いている。今後の地下水利用再開には、回復に要する期間の見通しが必要となるが、一方で地下水の回復メカニズムが未解明であり、営農再開に向けた懸案事項となっている。モデル調査地での予備調査によれば、回復している淡水層の厚さは津波の浸水深さ・海岸からの距離と無関係であり、淡水層の形成は不均質に進行している。既存の調査手法や研究は、電気伝導度の観測や物理探査による塩水化や回復状況の実態把握を主目的としており、被災地においてもその成果は得られている。しかしながら、再淡水化への回復メカニズムの解明には至っていない。淡水層の形成には、降水の浸透、水田からの灌漑水の浸透（水田涵養）、内陸側からの地下水流動といった複数の要因が考えられ、それらの混合により地下水の再淡水化が生じているといえる（図1）。本研究では、複数の環境トレーサーを用いて、淡水の回復メカニズムを明らかにし、回復傾向を把握することに焦点を当てる。

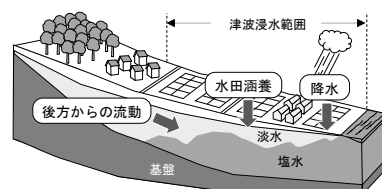


図1 複数の涵養源からの寄与による地下水の回復の模式図

2. 研究の目的

本研究では、複数の環境トレーサー（マルチトレーサー）を用いて、津波によって塩水化した地下水が複数の涵養源によって淡水へ回復するメカニズムを解明し、その回復傾向を把握することを目的とする。特性が異なる複数の環境トレーサーを現地において観測し、淡水層の涵養源の分類と各涵養源の寄与度の推定、地下水の年代測定に基づく淡水回復速度の推定、それらの結果に基づいて地下水の回復メカニズムの解明および回復傾向の把握を行う。

3. 研究の方法

2011年の東日本大震災における津波による浸水で地下水に塩水化が生じた宮城県亘理町・山元町の沿岸域を対象地として選定した（図2）。当地区の既存観測孔より地下水表面直下の浅層地下水を定期的に採取するとともに、涵養源の一つである降水の採取、田面水の採取も併せて実施した。また、比較のために電気伝導度（EC）が高く海水の影響があると考えられる深部の地下水の採取も一部の地点で実施した。主な調査期間は2019～2021年であるが、2017年からの先行調査の結果も含めて検討を行った。採取した試料の主要イオン濃度、水素・酸素安定同位体比（ $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ）、六フッ化硫黄（ $\text{SF}_6$ ）濃度をそれぞれイオンクロマトグラフ（東亜 DKK 社製、ICA2000）、水同位体分析計（Piccaro 社製、L2120-i および L2140-i）、ECD 検出器付ガスクロマトグラフ（島津製作所社製、GC-8A）により測定した。重炭酸イオン（ $\text{HCO}_3^-$ ）濃度は、滴定法による pH4.8 アルカリ度から換算して求めた。 $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  は複数の涵養源の分類、主要イオン濃度は津波被災後に残留している塩水や化石塩水の影響の評価、 $\text{SF}_6$  濃度は地下水の滞留時間の推定の指標として用いた。

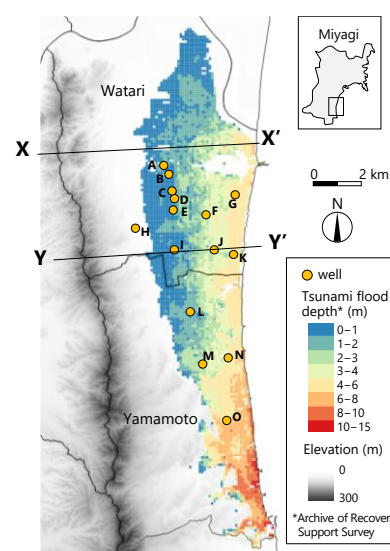


図2 地下水観測孔位置図

4. 研究成果

(1) 塩水化からの回復状況と各指標の空間分布特性の把握

図3に地下水の深度別 EC 分布の例を示す。各年複数回（2～4回）測定した結果の平均値を示しており、EC が徐々に低下し、淡水層が厚くなっていく傾向が見られたが、相対的に淡水層が厚く経年的に EC が大きく変化しない地点も見られた。図4に地下水の  $\delta^{18}\text{O}$ , d 値（ $=\delta^2\text{H}-8\delta^{18}\text{O}$ ）、塩化物イオン濃度（ $\text{Cl}^-$ ）、 $\text{SF}_6$  より推定された滞留時間の空間分布を示す。同じ地域内であっても地下水中の各指標の値は異なることが明らかとなった。北部の地下水の  $\text{Cl}^-$  濃度

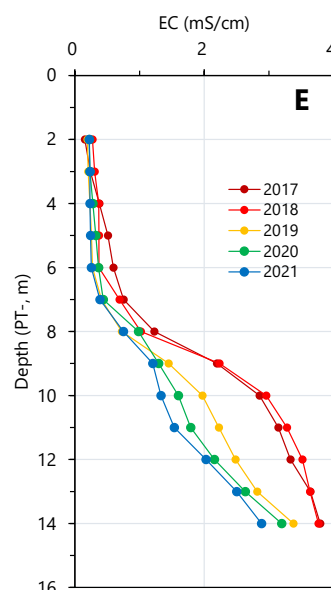


図3 深度別 EC 分布

が高く、d 値が高い。地下水の滞留時間は 17~33 年であり、北部の地下水の滞留時間が長い傾向にある。本地域の動水勾配は約 1/2000、透水係数は  $2.7 \times 10^{-5} \sim 2.1 \times 10^{-4} \text{m/s}$  と報告されており、ダルシー則を仮定した場合の流速は 0.4~3.3m/year となり、地下水の流動性は小さいといえる。津波の浸水の影響を受けていない内陸側の地点 H の滞留時間は 31 年であった。一方で沿岸域側ではそれよりも滞留時間が短い地下水が多くみられることが明らかとなった。

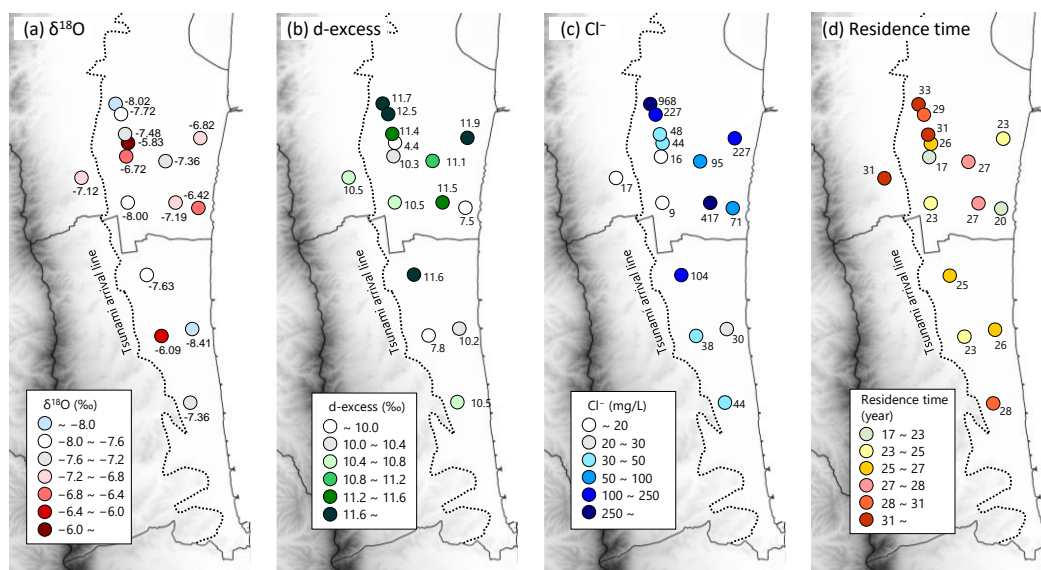


図4 地下水の (a)  $\delta^{18}\text{O}$ , (b) d 値, (c) 塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) 濃度, (d) 滞留時間の分布 (2020 年 9 月)

(2) 環境トレーサーを用いた地下水の涵養源の寄与の違いと塩水化からの回復傾向の把握

$\delta^2\text{H}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  の関係において、本地域で採取された降水の天水線 (LMWL) が傾き 7.35 であるのに対し、蒸発の影響を強く受ける田面水 (PWEL) の傾きは 4.88 と小さく、本地域の地下水は LMWL と PWEL の間に分布している (図 5)。これらの結果は降水と水田からの灌漑水の浸透は同位体比によって区別できること、本地域の地下水が降水と水田からの灌漑水の浸透の両方の影響を受けていることを示している。地下水の同位体比は地点によって異なる値を示した。海水の同位体比を 0‰ と仮定すると、海水の混入率が高いほど同位体比が大きくなるが、塩化物イオン濃度が高い地点ほど同位体比が高いとはいえない (図 5)。このことから、地下水の同位体比の差異は海水の混入によってのみ生じているのではなく、涵養源の寄与の違いが影響しているといえる。水田からの涵養の影響が大きいほど同位体比は上昇して PWEL に近づき d 値は低下する。一方、降水の浸透の影響が相対的に大きいほど同位体比は LMWL に近づき d 値は上昇すると考えられる。

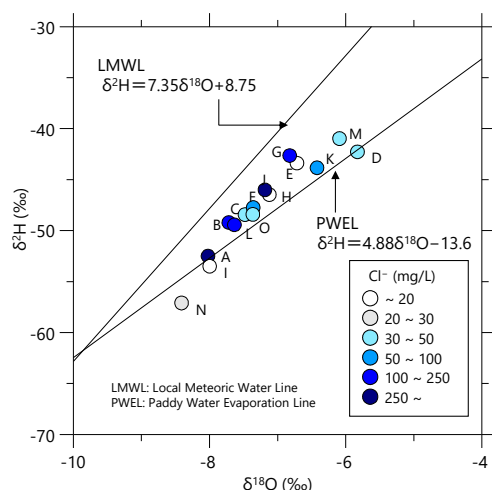


図5 地下水の  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ,  $\text{Cl}^-$  濃度の関係

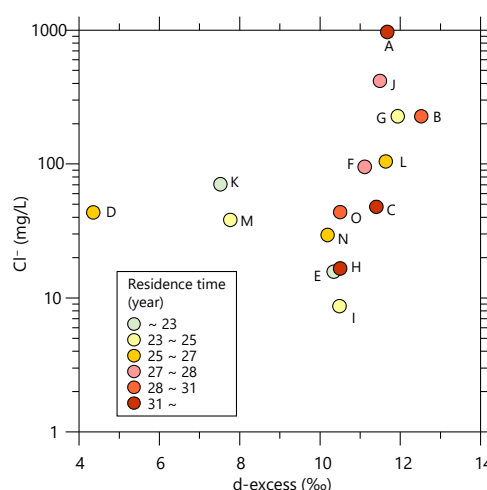


図6 地下水の d 値,  $\text{Cl}^-$  濃度, 滞留時間の関係

地下水の d 値,  $\text{Cl}^-$  濃度, 滞留時間の関係を図 6 に示す。大気中の  $\text{SF}_6$  濃度は単調増加しており、直近の降水や灌漑用水の浸透の影響が大きいほど地下水中の  $\text{SF}_6$  濃度は増加し、みかけの滞留時間は小さくすると推定される。津波の影響がなかった地点 H は、 $\text{Cl}^-$  濃度が低く、d 値は 10.5‰ である。d 値・塩分濃度が低く、滞留時間の短い地点 (D, K, M) は、淡水層回復によって水田か

らの涵養の影響が相対的に大きいと考えられる。一方、塩分濃度が依然高く、滞留時間が長い地点（例えば、A, B）は回復までに時間を要すると考えられる。

### (3) 降水浸透の影響と化石塩水の影響

図7に二時期の深度別のEC分布、図8に海岸線に直交する二つの横断面における地下水の滞留時間およびヘキサダイアグラムを示す。2020年8月の調査前1週間にはほぼ無降雨の状態であったが、2021年9月の調査前には3日間で合計37mmの降雨があった。2020年と比較して2021年の浅部地下水のECが低下しており、降水の浸透が影響していると考えられた。2021年の調査結果においては、一部の地点を除き、浅部の滞留時間が短く、深部の滞留時間が長い。また、浅部地下水の滞留時間は、2020年測定時より短くなっている地点が多い。これらの結果も浅部地下水への調査前の降水の浸透の影響を示唆しているといえる。さらに、浅部地下水のd値は、2021年は2020年よりも低い値を示した。降水のd値は、夏季に低く、冬季に高い周期的な変動を示しており、2021年9月の地下水のd値低下には夏季の降水の影響が伺える。採水の前日には、観測孔から約100Lの揚水を行い、孔内水をいったん排水していることから、調査前の降水が観測孔に直接侵入し残留していたとは考え難い。揚水後に降水由来の低ECの水が流動層を通じて選択的に孔内に戻った可能性は排除できないものの、地盤に浸透した降水が浅部地下水の淡水層形成に寄与していることを複数の水質項目が示唆している。

浅部地下水の水質組成はCa-HCO<sub>3</sub>型~Na-Cl型であり、一部の地下水では海水の影響が残留することがわかる。深部地下水の水質組成はNa-Cl型であり、塩水の影響が相対的に大きい(図8)。J地点の深部地下水(管頭-25m)のCl<sup>-</sup>濃度は12012mg/Lと高いにも関わらず、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は43mg/Lと極めて低い値を示した。これは、例えばG地点の深部地下水(管頭-9m)のCl<sup>-</sup>濃度が5311mg/L、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が851mg/Lであることと比較して、かなり低いSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度であるといえる。さらに、J地点の深部地下水にはメタンガス(24cc/mL、参考値)の混入が確認された。このことから、J地点の深部地下水は硫酸還元が進行する還元状態にあるといえ、より古い海水(化石塩水)が影響していると考えられた。これらの結果は、本地域の水質、塩水化からの回復状況を検討する際には、津波時に浸透して残留する海水と深部の化石塩水とを区別する必要があることを示している。以上の他に、複数の環境トレーサーの測定結果を機械学習により分類し地下水の特徴を整理する方法、SF<sub>6</sub>分析のための省力的な地下水採取方法についてもとりまとめた。

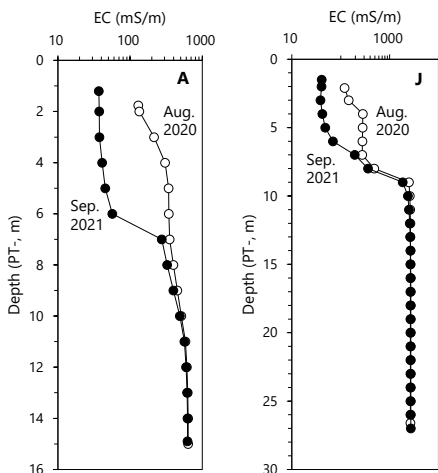


図7 調査前の降雨の有無による深度別 EC 分布の違い

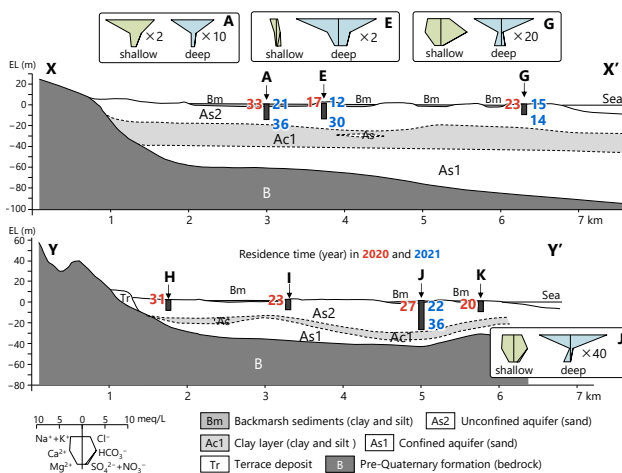


図8 滞留時間およびヘキサダイアグラムの分布

これらの成果より、本研究で用いられた複数の環境トレーサーは、津波の浸水により塩水化した沿岸地下水の涵養源の分類、その寄与度の差異、塩水化からの回復過程・回復傾向を把握する上で有用であることを明らかにした。ここで用いた指標および調査手法は、津波被災地域での営農再開に向けた地下水利用計画立案の検討時に活用できると考えられる。

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 1件）

1. 著者名 Tsuchihara, T., Shirahata, K., Ishida, S., Yoshimoto, S.	4. 巻 12(1)
2. 論文標題 Application of a self-organizing map of isotopic and chemical data for the identification of groundwater recharge sources in Nasunogahara alluvial fan, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/w12010278	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tsuchihara, T., Shirahata, K., Yoshimoto, S., Ishida, S., Nakazato, H.
2. 発表標題 Dating groundwater with sulfur hexafluoride (SF6) using a simple, rapid sampling method
3. 学会等名 46th Annual Congress of International Association of Hydrogeologists（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土原健雄，白旗克志，吉本周平，中里裕臣，石田 聡
2. 発表標題 球化学的調査による津波により塩水化した沿岸地下水の回復要因の検討
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 土原健雄，白旗克志，吉本周平，中里裕臣，石田 聡
2. 発表標題 津波により塩水化した帯水層への涵養プロセス検討における環境トレーサーの適用
3. 学会等名 2022年度農業農村工学会大会講演
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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