

沿岸域の地下水の水質と安定同位体比から見えてくる 水質形成の仕組み

— 仙台市宮城野区の調査事例の紹介 —

藪 崎 志 穂
(総合地球環境学研究所)

1. はじめに

“海の水は塩辛い”。海で泳いだことのある人はもちろん、海にほとんど行ったことが無い人にとっても、これは公然の事実でしょう。波打ち際に広がる砂浜の砂を掘ってしみ出てくる水も、もちろん塩辛い海の水です（ただし、ある特定の場所では、海岸の砂浜から真水が湧くこともあります）。それでは、海岸近くの土地に井戸を掘った場合、その水はどんな味がするのでしょうか。砂浜と同じく、塩辛いのでしょうか。それとも、普段私たちが飲んでいる水道水のように、無味なののでしょうか。

私たちは宮城県仙台市宮城野区の海岸近くに位置する新浜地区^{しんはま}という場所にある複数の井戸を調査し、水質の特徴について調べました。この一帯は、今から約 11 年前の 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の津波による浸水被害を受けた場所です。七北田川^{ななきたがわ}と名取川^{なとりがわ}に囲まれた新浜地区の近くの海岸には約 10 km におよび砂浜が広がり、夏には海水浴場として利用され沢山の人々で賑わっていました。海岸の近くには多くの住宅が建てられており、また、江戸時代はじめてから建設された運河（貞山堀）に沿うように松林が広がっていました（図 1）。しかし、大地震の後に発生した津波によって、住宅や電柱、海岸沿いにあった砂防林などが流され、道路が損壊し、畑や水田にも海水がかぶり、住民の方々は長い間よその場所で避難生活を送っていました。その後、長い時間をかけて、損壊した建物や道路、



図 1. 貞山堀と松林（仙台市若林区荒浜海岸付近、2011 年 1 月 4 日撮影）

堤防などの修復が行われ、現在は元の場所に戻り生活をしている住民が多くいます。

新浜地区では、震災前から自家用の井戸を持っている家が多く、生活用水や家庭菜園、洗車などに利用されていました。津波によって破損してしまった井戸もありましたが、その後、新しく作り直すなどして、震災後も井戸水を利用されている方が多くいます。これらの井戸の水質を測定することで、2011 年の津波による塩水化の有無や、この周辺地域の本来の地下水の水質について知ることができます。更に水の安定同位体比や CFCs¹⁾、SF₆²⁾ などの分析を行うことで、水の涵養域や滞留時間について把握することができると考えられます。なお、涵養とは降水が地表面から地下に浸透し帯水層（地下水）に水が供給されることを意味しており、涵養域とは涵養が生じる場所のことを指しています。また、滞留時間とは降

水が地下に浸透して帯水層（地下水）に達したときを^{ゼロ}とし、地下水が地中を流動して、ある場所に到達するまでにかかった時間のことです。簡単に言えば水の年齢に相当します。これらの情報は、今後の持続的な地下水利用を行うためにも重要な情報です。なお、水質組成図や滞留時間推定法に関しては3章の「地下水流動研究におけるマルチトレーサーの活用法」でも紹介していますので、ご参考にしてください。

本研究では仙台市宮城野区の沿岸に近い集落の井戸（浅井戸1か所、深井戸5か所）と水路を対象として調査を行い、それぞれの水質の特徴や季節変化、水質形成について明らかにすることを目的として調査や採水を行いました。調査地点の位置図を図2に、調査地点の概要を表1に示しました。なお、地下水等の現地調査は2018年12月から毎月実施しており、現地ではEC（電気伝導率）、pH、水温を測定しています。無機溶存成分や微

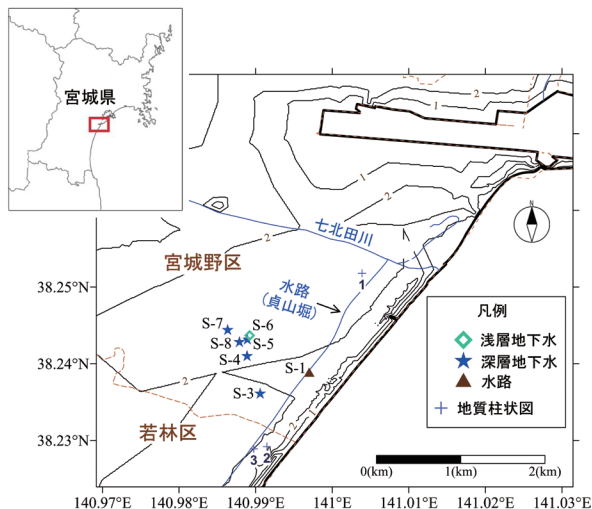


図2. 調査地点の位置図

表1. 調査地点の概要

地点 No	緯度 °N	経度 °E	標高 m (a.s.l.)	種別	井戸深度 m
S-1	38.236	140.995	2.3	運河	—
S-3	38.236	140.991	0.9	深井戸	30.0
S-4	38.241	140.989	0.9	深井戸	28.0
S-5	38.243	140.989	1.0	深井戸	30.0
S-6	38.244	140.989	1.1	浅井戸	3.1
S-7	38.244	140.986	1.0	深井戸	30.0
S-8	38.243	140.988	1.3	深井戸	34.0

量元素、安定同位体の分析用として、250 mL 容器に水試料を採取しました。また、滞留時間推定のための CFCs や SF₆ 分析用の採水も 2019 年 1 月に実施しました。本稿では特に 2018 年 12 月～2019 年 12 月に実施した調査結果について紹介します。

2. 無機溶存成分の特徴

採水した地下水および水路の水試料について、陰イオン (F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻) と陽イオン (Li⁺, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) はイオンクロマトグラフ (ICS-3000 または ICS-6000)、HCO₃⁻ は pH4.8 アルカリ度滴定法を用いて分析しました。これらの分析結果を利用して、2019 年 9 月～12 月に採水した試料の水質組成図（シュティフダイアグラム）を作成しました（図3）。シュティフダイアグラムは水質組成の特徴や溶存成分量を一目で把握することができ、複数地点の比較もしやすいという利点があります。

水路（S-1）の水質組成は Na-Cl 型で溶存成分量は多く、海水の水質に近い特徴を有しています。しかしながら、水路の溶存成分量は海水よりも少なく（海水の 1/10～1/2 ほど）、時期によって濃度が変わるため、河川水や降水（場合によっては浅層の地下水も含む）と混合していることが伺えます。

浅層地下水（S-6）は (Na+Ca)-HCO₃ 型を示し、溶存成分量は水路や深層地下水と比較して相対的に少ないです。この結果から、少なくとも調査時においては、2011 年の津波による塩水化の影響は生じていないことが明らかです。また、時期によって水質組成（特に溶存成分量）が変化しており、例えば図3では 2019 年 9 月と 10 月の間で変化しています。2019 年 10 月には非常に多くの降水があり、気象庁の AMeDAS データ (<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>) によると、仙台の観測地点で 644.5 mm（観測史上 1 位）、名取の観測地点で 555.0 mm（同 1 位）を記録しています。S-6 の井戸深度は 3.1 m と浅いため、多量に降っ

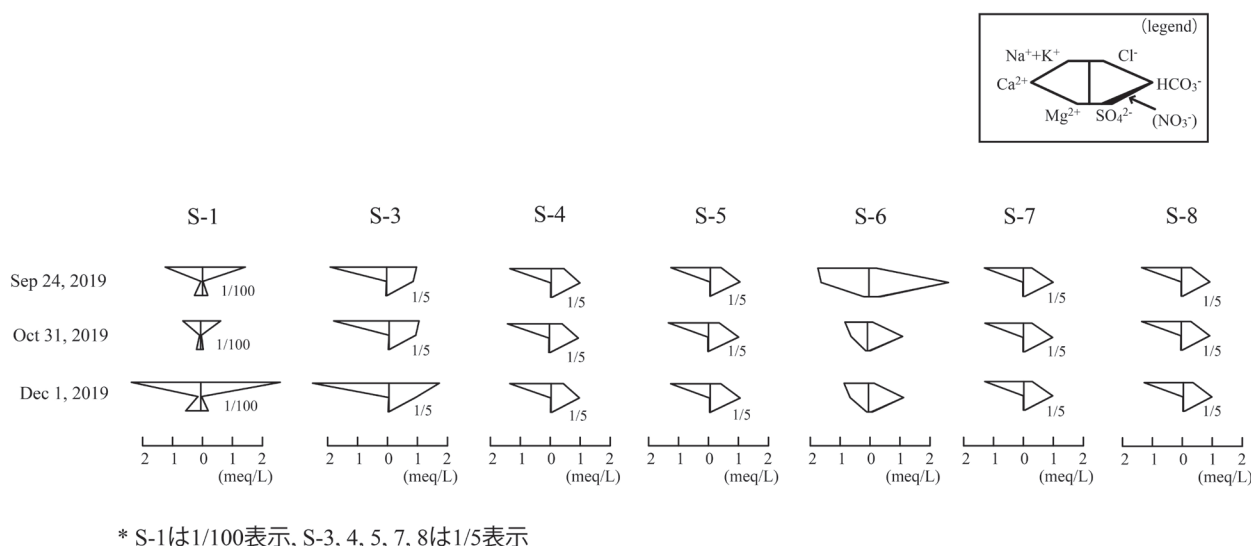


図 3. 水質組成図

た雨水の浸透の影響を受けて地下水の水質が変化したと考えられます。10月のシュティフダイアグラムの成分量は9月と比べて減少している点においても、降水の混合による希釈の結果として矛盾がありません。

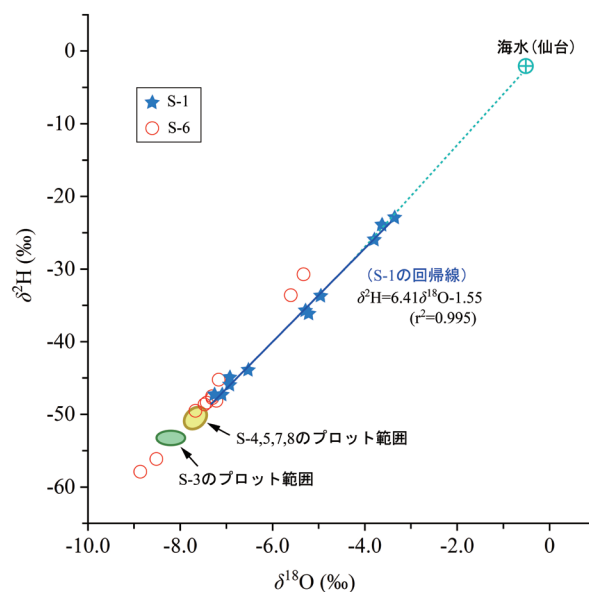
深層地下水では2種類の水質組成が認められます。S-4、5、7、8の4地点ではNa-HCO₃型であるのに対し、S-3ではNa-(Cl+HCO₃)型となっており、他の深層地下水よりもCl⁻(塩化物イオン)濃度が高くなっています。S-3は他の井戸よりも沿岸近くに位置する井戸のため、海水、あるいは海塩の影響が水質に影響を与えていることが予想されます。また、深層地下水の水質はいずれの地点もほぼ一定しており、Na⁺とHCO₃⁻濃度が相対的に高い水質組成を示すことから、降水の影響は受けず、比較的長い滞留時間を有していることがわかりました。

3. 酸素と水素の安定同位体比の特徴

各地点の酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) と水素安定同位体比 ($\delta^2\text{H}$) を CRDS 法 (Picarro L2130-i) により測定し、結果を用いて δ -diagram を作成しました (図 4)。この図には、S-1 ~ S-8 のデータのほかに、参考として調査対象地域の近傍で採取した海水の同位体比もプロットしています。

水路 (S-1) や浅層地下水 (S-6) の同位体比は

溶存成分量と同様に変動が大きく、降水の影響を受けていると考えられます。S-1 の回帰線は $\delta^2\text{H} = 6.41\delta^{18}\text{O} - 0.155$ ($r^2=0.995$) となっており、この回帰線の延長線上に海水がプロットされています。従って、 δ -diagram の結果においても S-1 は海水との混合があることを示唆しています。また、S-1 の同位体比の変動が大きいのは、降水の影響に加え、時期により水路の水に混入する海水の量 (割合) が大きく変化していることに起因していると考えられます。海水の同位体比は相対的に高いため ($\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ とともに約 0‰)、即ち、海水の量が多くなると、水路の同位体比は相対的に


 図 4. δ -diagram

高い値を示すことになります。一方、降水の同位体比は降水イベントによって異なるため、その時々降水同位体比の影響を受けて浅層地下水の同位体比は上昇または低下することになります。

深層地下水（S-4、5、7、8）の同位体比はほぼ同じ値となっていますが、S-3 は他の地点よりも若干低くなっています。酸素と水素の安定同位体比が異なる要因として、他の水塊との混入や蒸発の影響などがありますが、涵養域の標高の違いもその一つです。一般的に、涵養域の標高が高いと地下水の同位体比は低くなりますので（同位体の高度効果）、S-3 は他の地点よりも涵養域の標高が高いことが予想されます。

また、「2. 無機溶存成分の特徴」で説明した S-3 の水質形成要因では、海水や海塩の影響がおよんでいるのではないかと推察しましたが、仮に地下水に海水が混入した場合には、海水の同位体比は地下水よりも相対的に高い値であるため、地下水の同位体比も高い値を示すことになります。ところが、上述したように、S-3 の同位体比は他の深層地下水の地点よりもやや低い値を示しており、この結果から S-3 の地下水に海水自体が混入している可能性は低くなります。そのため、海水の混入ではなく、海塩が混入して Cl^- 濃度が高くなっている可能性が高いと考えられます。では、この海塩の起源は何であるのか、という疑問が残ります。先行研究によると、この地域には地下に化石海水があることが報告されており（内田ほか、2005）、こうした化石海水が地層中の鉱物等に吸着し、その成分（海塩）が地下水に溶出することで、地下水の Cl^- 濃度が高くなる説明がつけます。しかしながら、この要因についてはまだ不明瞭であるため、他の分析データを用いるなどして、今後も検討を進めてゆきます。

4. 地下水の滞留時間

持続可能な地下水利用をおこなうためには、地下水の滞留時間（涵養されてから流出するまでの時間の長さ）を把握することが重要となってきました。

滞留時間を推定するためには幾つかの方法がありますが、本研究では地下水の CFCs と SF_6 の濃度を測定して、過去の大気中の CFCs と SF_6 濃度と比較することで地下水の滞留時間を推定する方法を利用しました。2019 年 1 月に深井戸 4 地点で採取した水試料について CFCs と SF_6 の分析を実施し、モデルを用いて検討した結果、これらの深井戸の滞留時間の推定値は 70 年前後であることがわかりました。この結果は、深層地下水の水質組成の特徴とも矛盾がありません。

5. 今後の研究の展開について

溶存成分と酸素・水素の安定同位体比の測定結果から、仙台市宮城野区の沿岸付近の浅層地下水と深層地下水の水質の特徴や、地下水と海水および降水との関係を明らかにし、水質形成について把握することができました。沿岸に近い深層地下水の水質には海塩の影響がおよんでいる可能性が認められましたが、浅層地下水および深層地下水ともに 2011 年の津波による塩水化は生じていないことも把握できました。

本稿では仙台市宮城野区の海岸近くに位置する民家井戸の調査結果を中心に紹介しましたが、本調査地点の近く（沿岸域）に新たに設置した深度の異なる 3 か所の観測井の調査も 2020 年 2 月から開始しており、海水と地下水の相互作用について考察を進めています。また、溶存成分や水同位体比に加え、ストロンチウムの同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 等の測定も行い、複数のトレーサーを利用して、仙台市沿岸域の水質形成や地下水の涵養域、地下水流動について更に検討する予定です。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤（A）、課題番号：18H04146、研究代表者：黒沢高秀 福島大学教授）の助成を受けて実施しています。調査では福島大学 柴崎研究室の学生さんに調査・採水を行っていただきました。また、井戸の調査については、新浜地区の住民の皆さまに快くご協力

いただきました。沿岸近くのビオトープ井戸の調査では、東北学院大学 教養学部の平吹喜彦教授に大変お世話になりました。ここに記して、深く御礼申し上げます。

注釈

- 1) クロロフルオロカーボン類(Chlorofluorocarbons)といい、CFC-11、CFC-12、CFC-113 などがあります。冷却剤や洗浄剤などの工業用として 1930 年代に人工的に生成された有機化合物で、化学的に極めて安定な性質を持つため、放出された CFCs は大気中に蓄積されました。年代によって大気中の CFCs 濃度が異なるため、水中の CFCs 濃度を測定して、過去の大気中の濃度と比較することにより、水が涵養された年代を推定することができます。
- 2) 六フッ化硫黄(Sulfur hexafluoride)のことで、電気や電子機器などの縁ガスとして 1960 年代から利用されている気体です。化学的に非常に安定な性質を持っており、大気中の濃度は現在も増加しています。CFCs と同様に、水中の SF₆ 濃度を測定して、過去の大気中の濃度と比較することにより、水が涵養された年代を推定することができます。CFCs と比較して、より新しい水（滞留時間が 10 年よりも短い水）の年代推定が可能です。

文献

Yabusaki S, Yamamoto R, Shibasaki N (2022) Seasonal variation in groundwater quality revealed by the multi-tracer near the coastal area of Sendai, Japan. Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources., 35 (3), 192-201.

<https://doi.org/10.3178/jjshwr.35.192>

内田洋平・安川香澄・天満則夫・大谷具幸・森康二 (2005) 仙台平野における地下温度構造に関する研究 その 1. 3 次元地下水流動・熱輸送広域モデルの構築. 日本地熱学会誌, 27 (2), 115-130.

<https://doi.org/10.11367/grsj1979.27.115>

著者情報



藪崎志穂 筑波大学大学院博士課程生命環境科学研究科を修了。2016 年 4 月より総合地球環境学研究所に所属。専門は同位体水文学、地下水学。各地の降水の同位体長期観測や、地下水・湧水の水質の特徴把握、福島県や仙台市の沿岸域の地下水調査、忍野村の地下水流動観測などを行っています。

(2022 年 3 月 31 日掲載)

(2023 年 3 月 31 日改版)