津波被害を受けた湧水の時間経過に伴う水質変化* — 南相馬市沿岸部に位置する湧水の観測例 —

藪崎志穂**

Water quality change of spring water which were influenced by tsunami. — Result of the observation at the coastal area of Minamisoma City —

Shiho YABUSAKI**

要 旨

福島県北部沿岸から内陸部を対象として実施している調査地点の中から、津波の浸水被害を受けた地域の特徴的な2地点の湧水を例として挙げて、時間経過に伴う水質等の変化について示した。両地点のECや水温、溶存成分、安定同位体などの変化の結果、比較的、地下の浅い部分を流動していると思われる湧水では津波の影響が水質にもあらわれていたが、影響は徐々に減少していることが示された。一方、より標高の高い内陸部で涵養されたと予想される滞留時間の長い湧水では津波の被害は殆ど生じておらず、震災以降ほぼ一定した水質組成を示していることが明らかとなった。沿岸域における復興事業などに伴う水質変化などを把握するためにも、継続的な調査が重要であると考えられる。

キーワード：福島県南相馬市、津波、湧水、水質

1. 津波被害の概況

2011年3月11日14時46分、東北地方から関東地方におよぶ広域に甚大な被害をもたらした東北地方太平洋沖地震が発生した。震源位置は三陸沖（宮城県牡鹿半島の東南東沖130 km、北緯38度06.2分、東経142度51.6分、深さ24 km）で、

規模は9.0（モーメントマグニチュード）、最大震度は宮城県栗原市で震度7であった（気象庁、2012）。この地震に伴い、福島県相馬市で9.3 m以上、宮城県石巻市鮎川で8.6 m以上、岩手県大船渡市で15 m以上など、東日本の太平洋沿岸を中心に非常に高い津波が観測されたほか、北海道から鹿児島県にかけての太平洋沿岸や小笠原諸島

* 本稿は2017年7月1日に開催された地下水学会セミナー「津波に伴う地下水影響とその後の回復」で発表した内容を元に、一部データ等を加筆・修正したものである。

** 総合地球環境学研究所 研究基盤国際センター（福島大学客員准教授）（〒603-8047 京都府京都市北区上賀茂本山457番地4）

Research Institute for Humanity and Nature (Fukushima University)

で1 m以上の津波を観測した(気象庁, 2012)。この津波により、家屋の流出や浸水、道路の損壊などの物的被害に加え、多くの人命が失われ、行方不明者や負傷者も多数発生した。

巨大な津波の発生に伴い、大量の土砂・泥状物が沿岸部に堆積した。これらの土砂・泥状物は津波堆積物と呼ばれ、海水由来の塩分濃度の上昇や海底堆積物由来の重金属汚染などが発生し、その処理は災害廃棄物とともに被災地の復旧・復興に向けた大きな課題の一つとなっている(小口ほか, 2013)。津波により巻き上げられた大量の海底堆積物が堆積した沿岸域の土壌中では、ヒ素等の有害無機化合物濃度が上昇したことも報告されている(簡ほか, 2013)。併せて、沿岸域の低地部には海水が浸水し、たとえば南相馬市では沿岸域から2～3 km内陸におよぶ広範囲まで浸水被害が生じた。岩手県、宮城県、福島県を中心に全国では約2万 haの水田が冠水し、その約90%の地域ではその年の水稻の作付が困難となった(永沢ほか, 2016)。2011年4月18日に国土地理院によって発表された資料によると(国土地理院, 2011a)、本津波による青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県および千葉県の6県62市町村の浸水範囲面積の合計は561 km²であった。このうち福島県全体では112 km²で、中でも南相馬市は39 km²(市町村面積に対して10%)であり県内では最も広い範囲に及んでいる。その他の福島県北部沿岸域では、新地町11 km²(同24%)、相馬市29 km²(同15%)、浪江町6 km²(同3%)である。また、平成24年版 防災白書(内閣府, 2012)によると、上記6県における震災に伴う津波の被災農地面積の合計値は21,476haで、このうち福島県では5462haにおよび、(上記6県の)津波被災農地全体の25.4%を占めている。この福島県内の津波被災農地の面積は、同県の浸水面積全体の48.8%に相当しており、農地に大きな被害が及んだことを示している。津波浸水範囲の土地利用別面積の一覧表によると(国土地理院, 2011b)、特に南相馬市では農地等(田・その他の農用地の他に、森林、荒地、ゴルフ場を含む)の浸水の割合は浸水面積全体の79%におよんでおり(新地町と相馬市では各55%、浪江町では66%)、特に同市の沿岸域の低地部分に広く分布する水田に甚大

な被害が及んでいたことが伺える。

津波による浸水被害を受けたこれら沿岸域の低標高地域には、水田を主体とする農用地と共に幾つもの集落が形成されており、生活用として利用する井戸や、農業用の井戸が多数存在していた。その中には、手掘りの浅い掘り抜き井戸や、機械で掘削した相対的に深い井戸があり、中には自噴井も存在している。たとえば、南相馬市原町区(旧原町市)を含む浜通り地方には、大年寺層中まで掘削した「ドンコイショ」と呼ばれる掘り抜き自噴井が多数作られていた(原町市教育委員会文化財課市史編纂室, 2005)。このドンコイショは1955年時点では原町区東部の低地に150以上あったとされているが、農業や工業用として多量の地下水揚水の需要が高まるにつれ姿を消した(中馬・長江, 1991)。原町区では特に被圧地下水を対象とした多量の地下水揚水に伴う地盤沈下が広範囲で発生し、1980年代前半には原町区の低地・段丘地・丘陵地のほぼ全域において地盤沈下の被害が生じた(中馬・長江, 1991)。しかし地盤沈下対策事業によって太田川の上流に横川ダムが完成し、大半の地下水利用をダム利用に変換した結果、地下水位は上昇し、地盤沈下も終息に向かった。2004年の時点で原町区では地盤沈下は生じておらず、また沿岸域の一部の深井戸では再び自噴する場所もあらわれた(原町市教育委員会文化財課市史編纂室, 2005)。その一方で、生活様式の変化に伴い、地表面からの化学肥料や工場排水、家庭排水などの影響を受け、比較的浅い地下水では水質の悪化がみられる地域も増え(原町市教育委員会文化財課市史編纂室, 2005)、こうした様々な要因により民家所有の浅井戸は数を減らしてきた。しかし、沿岸域に近い幾つかの地域には、昔より地域住民が利用していた故事来歴をもつ湧水も分布しており、現在においても湧出が認められるものもある。震災前までは周辺住民の生活用水として使われている水場もあったが、低地に位置するこれらの多くは津波による被害を受け、井戸の損壊や地下水の塩水化などで利用できなくなった場所も多い。津波による地下水の塩水化の事例として、千葉県北東部の旭市(杉田, 2012)や、宮城県仙台平野南部地域(森ほか, 2012)の水質変化が報告されており、福島県沿岸

域でも同様の現象が生じたと考えられる。津波の被害を受けた地下水の水質が時間経過と共にどのように変化してゆくのかを把握することは、沿岸域の復興にも欠かすことのできない喫緊の課題である。著者は2012年より福島県沿岸から内陸部にかけて広域に分布する地下水や湧水を対象として、地下水等の水質の把握や地下水流動および滞留時間の解明に加え、時間経過に伴う水質変化について調査を実施している。本稿では、沿岸域の津波被害を受けた湧水2地点に焦点を当て、2012～2017年における水質変化の特徴について報告する。

2. 観測地点と調査の概要

これまでの調査では、新地町、相馬市、南相馬市、浪江町、大熊町などの福島県北部沿岸域のほかに、これらの地域の地下水の涵養域と予想される同県内陸部の飯舘村、川俣町、伊達市、川内村など、広範囲を対象として地下水や湧水の現地観

測や採水を行っている。このうち、南相馬市の津波被害を受けた地域の数地点については、震災の翌年の2012年から継続的に調査を行い、水質の変化を記録している。本稿では、調査地点の中で特徴的な水質変化を示す2か所の湧水を選定した(図1)。共に、津波が浸水した地域に位置している。Spring-1(原町区の湧水)は、海岸から約1.4 km 内陸部にあり、震災前には民家の入口に位置していたが、津波被害により家屋は流出し、2018年3月時点では水場のみ残されている。湧出した水が周囲3～4 m ほどの小さな湧水池を形成しており、常時水が流れ出している。道路より一段低い場所にあり、水面下の地面から水が湧いているのが確認できる。湧出量は季節によって変化し(約100 mL～3 L/sec)、冬季には相対的に湧出量が減少する傾向がある。Spring-2(小高区の湧水)は、海岸から約1.5 km 内陸に位置し、水田用地の一面で湧出している。規模としては小さいが、年間を通じてほぼ一定の湧出がある(約100 mL/sec)。

周辺の地質の特徴として、南相馬市の地質断面図(図2)によると、沿岸域付近には上部から沖積層(上・中部層)、大年寺層により構成されており、やや内陸部には段丘堆積物が分布している。大年寺層は宮城県から福島県の太平洋沿岸に

図1 東北地方3県の津波浸水エリアと調査地点

Fig. 1 Extraction of tsunami-flooded areas at Iwate, Miyagi and Fukushima prefecture in the 2011 Tohoku earthquake and sampling point

図2 南相馬市の平野部の地質断面図(馬場一雲雀ヶ原—中太田—米々沢—太田川河口を結ぶ)(原町市教育委員会 文化財課市史編纂室 編, 2005)を元に作成)

Fig. 2 Geologic cross section around the center of Minamisoma City (Haramachi-ku)

広く分布する鮮新統仙台層群最上部の海成層であり、浜通り地域の層厚は最大350～430 mで、岩相は下部の砂質岩相 (D1)、中部の泥岩層 (D2)・砂岩泥岩層 (D3) 及び上部の泥岩層 (D4) からなる (柳沢ほか, 2003)。大年寺層は内陸部まで広がっており、特に大年寺層下部には滞留時間が相対的に長い地下水が存在していると考えられる。また、沿岸より約10 kmの位置に双葉断層 (双葉破碎帯) が北北西-南南東方向に走っており、相馬古生層や花崗岩類の分布域と、相馬中生層 (相馬中村層群) や第三系の主分布域とを分けている (原町市教育委員会文化財課市史編纂室, 2005)。

上述した2地点において、2012年11月～2017年10月に複数回の観測および採水を実施した。Spring-1では、①2012年12月23日、②2013年5月6日、③2014年4月10日、④2015年6月2日、⑤2016年11月28日、⑥2016年12月29日、⑦2017年3月17日、⑧2017年8月21日、⑨2017年10月23日に実施した。Spring-2では、①2012年11月29日、②2014年5月29日、③2015年4月5日、④2015年6月2日、⑤2016年11月28日、⑥2017年3月17日に実施した。現地ではEC、pH、水温、ORP、湧出量を測定し、併せて各種分析用の採水を行った。採水した水試料は、採水後速やかに0.22 μm のディスポーザブルシリレンジフィルターでろ過を行い、適宜容器に入れて保管した。また、ICP-MS分析用の試料には、濃硝酸を1%濃度になるように少量添加して保管した。化学分析では、無機溶存イオンはイオンクロマトグラフィー (ICS-3000, Dionex)、微量元素 (51元素) はICP-MS (Agilent 7500)、酸素・水素安定同位体比はCRDS法 (L2130-i, Picarro) を利用し、 HCO_3^- はpH4.8アルカリ度滴定法、Siはモリブデン黄法にてそれぞれ定量した。また、一部の試料については年代測定分析用 (^3H , CFCs, SF_6) の採水も実施した。

3. 湧水の水質変化

図3に湧水2地点のECと主要溶存8成分の水質組成の変化を示した。Spring-1 (原町区湧水) とSpring-2 (小高区湧水) では傾向が大きく異なっ

ており、前者はECの値が大きく変化しているが、後者は概ね一定した値となっている。

まず、Spring-1のECの変化をみると、2012年12月の時点では96.5 mS/mで相対的に高い値を示しているが、値は徐々に低下して、2016年11月以降は30 mS/m以下となり、2017年10月時点では26.6 mS/mまで下がっている。最近でも僅かに低下する傾向が認められるが、2016年11月以降は概ね一定した値となっており、ほぼ収束していると考えられる。Spring-1の水質組成の特徴として、2012年12月ではNa-Cl型が明瞭であり、津波の被害が顕著に表れていた (この時の Na^+ は127.6 mg/L、 Cl^- は約256.5 mg/L、 SO_4^{2-} は53.1 mg/Lであった)。しかしながら、湧水のECの値は海水 (4000～5000 mS/m程度) と比較するとかかなり低く、また震災の発生から時間が経過しているため、海水そのものが残っていたわけではなく、海水が浸水した際に周辺の土壤に吸着した海水の成分 (塩分等) が水の流れと共に湧水に溶出していたと考えられる。その後、降水の発生に伴い徐々に土壤中の塩分が溶出して濃度が低下したことにより、湧水のECも低下したと考えられる。三浦 (2015) によると、相馬市の津波被災農地で自然降雨による除塩効果が高いことが実証されている。また、相馬市沿岸域の津波被害を受けた水田圃場で行われた観測においても、豪雨後の地下水中の塩分濃度が低下することが示されており (中村ほか, 2014)、Spring-1でも同様の現

図3 ECと水質組成の変化

Fig. 3 Temporal variation of EC and water quality of spring water at Spring-1 (Haramachi-ku) and Spring-2 (Odaka-ku) in Minamisoma City

象が生じていると思われる。無機溶存成分についても、2013年以降、 Na^+ と Cl^- 濃度は徐々に低下し、2017年10月では Na^+ は25 mg/L、 Cl^- は15 mg/Lまで低下し、塩分溶出の影響は少なくなっていることがこの結果においても示唆される。一方、 SO_4^{2-} はいずれの時期においても約60 mg/L含まれており、2012年からほぼ変わらず一定量含まれていることになる。2002～2003年に実施された調査において、Spring-1の周辺地域の地下水で SO_4^{2-} や NO_3^- が共に50～60 mg/Lほどのやや高い値を示す地点があることが報告されており（原町市教育委員会文化財課市史編纂室 編, 2005）、Spring-1では SO_4^{2-} や NO_3^- は震災以前からある程度含まれていたことが予想される。 SiO_2 濃度は17～20 mg/Lで、期間中はほぼ一定した値を示している。微量元素については、ホウ素（B）、アルミニウム（Al）、鉄（Fe）、亜鉛（Zn）、バリウム（Ba）が相対的に多く含まれていたが（2012年12月時点でそれぞれ約405 $\mu\text{g/L}$ 、180 $\mu\text{g/L}$ 、54 $\mu\text{g/L}$ 、605 $\mu\text{g/L}$ 、450 $\mu\text{g/L}$ ）、2017年10月ではいずれも減少しており（それぞれ約24 $\mu\text{g/L}$ 、2 $\mu\text{g/L}$ 、0.7 $\mu\text{g/L}$ 、1 $\mu\text{g/L}$ 、36 $\mu\text{g/L}$ ）、ECや一部の無機溶存成分と同様の変動傾向を示している。上記に挙げた元素は海底や河川底質が津波によって堆積したことにより付加された自然由来であると考えられ、濃度も減少していることから、Spring-1では少なくとも2017年10月時点においては化学物質による深刻な汚染は生じていないと言える。pHと水温の変化をみると（図4）、pHは6.2～6.8の間で変動しているが、上昇あるいは下降する傾向は顕著には認められない。水温は13～17℃で変動がやや大きい、これは時期によって湧出量が異なるため、特に湧出量が少ない時期には気温の影響を受けやすいことが水温変動の要因として考えられる。 $\delta^{18}\text{O}$ は-7.7～-7.0‰、 δD は-49～-45‰で、2012年と2013年ではやや低めの値となっているが、その後は概ね一定しており（図5）、EC等に比べて変化が小さいことから、涵養域は概ね一定していると考えられる。

次に、Spring-2のECと水質組成の特徴をみると（図3）、2012年11月～2017年3月までの間、ECの値は約18 mS/mで一定しており、Spring-1と比べて低い値である。水質組成は相対的に滞

留時間が長い水に多く見られる Na-HCO_3 型を示し、組成、濃度共にこちらもほぼ変化がなく安定している。2012年11月の時点においても、ECが相対的に低く、水質組成にも海水の影響が認められないことから、海水浸水の影響は及んでいないと言える。 SiO_2 濃度は62 mg/Lでほぼ一定しており、Spring-1に対して高く、より地中に長く滞留している可能性を示唆している。微量元素については、ホウ素の濃度が30 $\mu\text{g/L}$ でやや高いが、期間中一定した値を示し、その他の元素について

図4 pH、水温の変化
Fig. 4 Temporal variation of pH and water temperature at Spring-1 (Haramachi-ku) and Spring-2 (Odaka-ku) in Minamisoma City

図5 酸素・水素安定同位体比およびd値の変化
Fig. 5 Temporal variation of $\delta^{18}\text{O}$, δD and d-excess at Spring-1 (Haramachi-ku) and Spring-2 (Odaka-ku) in Minamisoma City

は特筆するような濃度は認められず、Spring-1とは傾向が異なる。pHと水温の変化をみると(図4), pHは8前後の値を示し、Spring-1よりも相対的に高い。水温は18.6～18.8℃で季節に関係なくほぼ一定しており、Spring-1と比べて高く、また周辺地域の年平均気温(浪江で12.3℃)よりも高い値となっている。これは地温の影響が及んでいる可能性が高く、地温勾配(約0.03℃/m)を考慮するとおよそ深度200 mほどにあった水が湧出している可能性が考えられる。 $\delta^{18}\text{O}$ は-8.4～-7.6‰, δD は-54～-52‰で概ね一定しており(図5), Spring-1よりも低い値を示す傾向が認められる。

以上の結果から、Spring-1は津波による海水浸水の影響を受けているが、その影響は徐々に少なくなっており、近年では震災以前の水質組成に近付いていることが予想される。また2014年4月と2015年6月の間でECや水質組成の割合が大きく変化していることから、本地域では津波被災後約4年で土壤中から溶出する塩分量が減少したと考えられる。このように津波被害の影響が少なくなった地域がある一方で、三浦(2015)によると宮城県の地下水では津波被災後にECが最大で300 mS/mまで上昇し、徐々に低下傾向にあるが、4年経過した2015年の時点でも農業用水として利用できない地下水が多いことも報告されており(一例として、イチゴ灌漑用水のEC上限は70 mS/m, 塩化物イオンの上限は210 mg/L(宮城県, 2011a, 2011b), 稲作ではECが50 mS/m以上で生育が阻害される(北海道, 1991)), 津波堆積物の残存の状況や地下水の涵養量, 地下水流速などの影響により水質の変化は地域により差があることも事実である。さらに、水質組成や湧出量の変化, 水温, SiO_2 濃度等の結果から、Spring-1は比較的浅い部分を流動し、滞留時間が相対的に短い水であることが予想される。Spring-1については植生調査も行われている。稲葉・岩崎(2016)によると、震災以前にはSpring-1の湧水池底でチャイロカワモズク(*Batrachospermum arcuatum*, 紅藻類, カワモズク属, カワモズク科(佐藤, 2013))の生息が確認されており、震災直後(海水浸水後)には消えてしまったが、震災後しばらくしてから再び生息が確認されたと報

告されている。チャイロカワモズクは環境省のカテゴリーで準絶滅危惧に指定されており、平地の湧泉や湧水の流入する水路の石や壁などの基物に着生する淡水藻類で、塩分濃度が低下したことによりSpring-1でも確認できるようになったと考えられ、津波被災前の植生が戻ってきたことを示す事例のひとつである。Spring-1で撮影した2012年12月(写真1)と2016年12月(写真2)の画像においても、湧水(池)の植生の繁茂の違いは明らかである。その一方で、周辺地域ではセイタカアワダチソウやヒメジョオンなどの外来種

写真1 Spring-1 (原町区湧水) の状況 2012年12月23日撮影

湧水池には水生植物がほとんど確認できない。

Photo 1 Status of Spring-1 on December 23, 2012

写真2 Spring-1 (原町区湧水) の状況 2016年12月29日撮影

湧水池の水面や水底に多くの水生植物が繁茂している。

Photo 2 Status of Spring-1 on December 29, 2016

が増えてきたことも指摘されており(稲葉・岩崎, 2016), 生態系の保全の意味でも今後の状況について注視してゆくことが重要である。なお, Spring-1の周辺地域では, 2016年10月半ばより南相馬市復興工業団地事業のための造成工事が行われており(2019年3月末までの予定), 震災前には水田が広がっていたところに工業団地が建設されることになっている。一帯の環境が震災以前と比べて大きく変化することになるが, 完成予想図をみかぎり, Spring-1の湧水はそのまま残されるようである。津波被害を受けた地域の水質変化を把握する点においても重要な湧水であるため, 今後, 湧水周辺が憩いの場として保全されると共に, 湧水自体も残されてゆくことを願う。

Spring-2については, NaHCO_3 型の水質組成を示し, 水温と pH, SiO_2 濃度が高いことから, 相対的に滞留時間の長い水であると考えられる。また, Spring-2の安定同位体比は相対的に低い値を示しており, この地域の高度効果の影響(藪崎, 2015)を考慮すると, Spring-1よりも300 mほど涵養標高が高く, 内陸部の阿武隈山地周辺で涵養された水である可能性が高い。 ^3H の測定値では, Spring-1は $1.34 \pm 0.09 \text{ Bq/L}$ (2013年5月6日) および $1.05 \pm 0.07 \text{ Bq/L}$ (2014年4月10日) でやや高い値を示す一方(藪崎ほか, 2015: Table 2のS-3に相当), Spring-2は $0.24 \pm 0.12 \text{ Bq/L}$ (2014年5月2日) および $0.28 \pm 0.11 \text{ Bq/L}$ (2015年6月2日) で相対的に低く安定した値を示していることから, Spring-1よりもSpring-2で相対的に滞留時間が長いことが考えられる。また現在, 他の地点も含めて検討中のCFCsや SF_6 の分析結果より, Spring-1の滞留時間はおおよそ10年程度, Spring-2は60～70年程であることが予想されており(藪崎ほか, 未公表データ), 水質や同位体の結果と大きな矛盾がない。これまでに実施した調査において, Spring-2と同様の水質の特徴を示す湧水や地下水(自噴井)が相馬市から南相馬市の沿岸域に分布していることを把握している(藪崎・島野, 2015)。これらの多くは震災時に海水が浸水した地域に位置しているが, いずれも津波の影響は認められていないことから, 災害による地下水汚染の可能性が低い水であると言える。また, 南相馬市の湧水や地下水は地点によって水質組成

や同位体が大きく異なる地点が存在することから, 複数の流動系があることが考えられるが(藪崎・島野, 2015), 詳細については明らかになっていない点が多い。1977年に南相馬市原町区の市街地周辺(雲雀ヶ原周辺)において行われた地下水流動調査によると(原町市教育委員会文化財課市史編纂室, 2005), 不圧地下水は基本的に地形面に沿うように, 山地側の西から沿岸域の東にむかい流下している。一方, 被圧地下水は原町区の市街地に幾つかの地下水面のくぼみができており, この地点に集まるように地下水が流動していた。これは, 被圧地下水の多量の揚水に起因していると考えられるが, 当時より40年ほど経過した現在では地下水揚水量は減少していることから, 被圧地下水の流動も不圧地下水と同じく西から東にむかう流動が卓越していると考えられる。福島県沿岸域の湧水や地下水の涵養域や滞留時間, 地下水流動については他の地点の調査結果も含めて現在検討を行っており, 今後, データを公表してゆく予定である。

4. まとめと今後の課題

本稿では, これまでに調査を行った地点のうち, 津波の浸水被害を受けた地域の特徴的な2地点を例として挙げて, 時間経過に伴う水質変化について示し, 若干の考察を加えた。比較的, 地下の浅い部分を流動していると思われる湧水では津波の影響が水質にもあらわれていたが, 影響は徐々に減少していることが示された。現在行われている復興事業(土地改良なども含む)の影響により水質や湧出量が変化する可能性も考えられ, また今後の地下水利用のためにも, 継続的なモニタリングが必要であろう。また, より標高の高い内陸部で涵養されたと予想される滞留時間の長い湧水では津波の被害は殆ど生じておらず, 震災以降ほぼ一定した水質組成を示していることから, 今後の農業用水などの水資源として有効活用できる可能性が高い。その一方で, 涵養域が阿武隈山地の周辺と予想されることから, 原発事故由来の放射性物質を含んだ水が, たとえば数年～数十年後に沿岸域で湧出する可能性は完全には否定できない。こうしたことから, 滞留時間の長い湧水に

についても継続的な調査が重要である。今後も沿岸域での調査を継続して、湧水や地下水の水質変化や水の滞留時間などに着目し、沿岸域の地下水流動の解明に取り組んでゆきたいと考えている。

謝 辞

福島県沿岸域の調査を行うにあたり、南相馬市博物館元学芸員の稲葉 修氏、ならびに同博物館学芸員の仲川邦広氏には、沿岸域の地下水や湧水に関する貴重な情報や資料をご提供いただきました。また、福島大学共生システム理工学類の黒沢高秀教授には、沿岸域の植生に関する情報提供と湧水調査にご協力いただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。なお、本研究は、平成26～27年度科学研究費補助金（若手（B）, 課題番号：26870070, 代表者：藪崎志穂）、および、平成28～30年度科学研究費補助金（基盤（C）, 課題番号：16K01212, 代表者：藪崎志穂）の補助を受けて実施しております。

参考文献

- 稲葉 修・岩崎真幸 編 (2016)：「被災地の原野に生きる－南相馬市の生き物と人・暮らし－」. 南相馬市博物館, 22p.
- 小口正弘・滝上英孝・遠藤和人・大迫政浩 (2013)：東日本大震災で生じた津波堆積物中の化学物質. 安全工学, 52 (1), 11-18.
- 気象庁 (2012)：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査報告. 気象庁技術報告, 133, 481p.
- 国土地理院 (2011a)：津波による浸水範囲の面積（概略値）について（第5報）. <http://www.gsi.go.jp/common/000059939.pdf> (2018年3月20日閲覧)
- 国土地理院 (2011b)：津波浸水範囲の土地利用別面積について－千葉県等で撮影された空中写真及び3月18日と29日に観測された衛星画像による更新－. <http://www.gsi.go.jp/common/000060371.pdf> (2018年3月20日閲覧)
- 佐藤裕司 (2013)：兵庫県産淡水藻目録. 人と自然, 24, 63-83.
- 杉田 文 (2012)：東北地方太平洋沖地震の津波による千葉県旭市沿岸部における地下水利用と地下水水質への影響. 地下水学会誌, 54 (1), 25-37.
- 簡 梅芳・宮内啓介・井上千弘・北島信行・遠藤銀朗 (2013)：宮城県主要河川沖積平野部の土壌ヒ素濃度と東北地方太平洋沖地震津波の影響. 土木学会論文集 G（環境）, 69 (1), 19-24.
- 中馬教允・長江亮二 (1991)：福島県原町市の地盤沈下対策の効果と今後の地盤環境保全上の課題. 行政社会論集, 3 (2), 57-67.
- 内閣府 (2012)：平成24年版 防災白書. 262p. <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/index.html> (2018年3月20日閲覧)
- 永沢朋子・椎名 勇・八槇 敦 (2016)：津波により冠水した砂質水田における除塩に伴う塩化物イオン及びナトリウムイオンの挙動と交換性陽イオンへの影響. 日本土壌肥科学会誌, 87 (1), 15-21.
- 中村貴彦・藤川智紀・細野 衛・駒村正治 (2014)：津波被害を受けた福島県相馬市水田の土壌物理性と地下水の塩分濃度. 東京農大農学集報, 58 (4), 207-213.
- 原町市教育委員会文化財課市史編纂室編 (2005)：「原町市史第8巻 特別編Ⅰ自然」. 原町市, 887p.
- 北海道 (1991)：水稻の海水混入灌漑水による塩害とその対策. <https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/h03gaiyo/1990061.htm> (2018年3月20日閲覧)
- 三浦憲蔵 (2015)：津波被災農地の除塩対策 16. 東北地域の津波被災農地土壌の除塩対策. 日本土壌肥科学雑誌, 86 (5), 459-462.
- 宮城県 (2011a)：東北地方太平洋沖地震に伴う農作物の技術情報（第1報）. <https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/66555.pdf> (2018年3月20日 閲覧)
- 宮城県 (2011b)：東北地方太平洋沖地震（3月11日）に伴う園芸作物の技術対策（第3報）. <https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/72628.pdf> (2018年3月20日閲覧)
- 森 一司・高橋朋佑・岡庭信幸・柴崎直明・大内拓哉 (2012)：2011年東北地方太平洋沖地震による仙台平野南部地域での地下水環境変化について. 地下水学会誌, 54 (1), 11-23.
- 柳沢幸夫・高橋友啓・長橋良隆・吉田武義・黒川勝己 (2003)：福島県太平洋岸に分布する鮮新統大年寺層のテフラ層－その1. 年代層－. 地質調査研究報告,

54, 351-364.

藪崎志穂 (2015) : 福島県北部沿岸域の河川水の水質と安定同位体高度効果について. 福島大学地域創造, 26 (2), 116-123.

藪崎志穂・島野安雄 (2015) : 福島県北部沿岸域とその周辺地域の名水. 地下水学会誌, 57 (2), 221-236.

藪崎志穂・柴崎直明・高貝慶隆 (2015) : 福島県南相馬市沿岸域の地下水, 湧水の水質とトリチウム濃度について - 2013年に実施した調査結果報告 -. 福島大学地域創造, 27 (1), 37-46.

(受付 : 2018年 3 月 28 日, 受理 : 2018年 4 月 19 日)