

# 地下水汚染調査研究

地下水汚染リスク評価研究の概要.....	433
東北地域太平洋側における地下水汚染広域概査研究.....	435
陸前高田・気仙沼・南相馬および館林における地下水汚染リスク詳査研究.....	457
仙台平野南部沿岸地域における空中電磁・磁気探査.....	469
仙台平野南部沿岸地域における陸上電気・電磁探査およびボーリング調査.....	479
地下水汚染リスク評価解析研究.....	487





## 東北地域太平洋側における地下水汚染広域概査研究 Overview research work of groundwater pollution risk on east coast of Tohoku, Japan

井川怜欧<sup>1\*</sup>・井岡聖一郎<sup>2</sup>・宮越昭暢<sup>1,3</sup>・益田晴恵<sup>4</sup>・中屋眞司<sup>5</sup>・柴崎直明<sup>6</sup>・藪崎志穂<sup>6</sup>・  
柏谷公希<sup>7</sup>・小原直樹<sup>1,8</sup>・内田洋平<sup>1,9</sup>・吉岡真弓<sup>1,9</sup>・光畑裕司<sup>1</sup>・大熊茂雄<sup>1</sup>・上田 匠<sup>1</sup>・丸井敦尚<sup>1</sup>  
Reo Ikawa<sup>1\*</sup>, Seiichiro Ioka<sup>2</sup>, Akinobu Miyakoshi<sup>1,3</sup>, Harue Masuda<sup>4</sup>, Shinji Nakaya<sup>5</sup>,  
Naoaki Shibazaki<sup>6</sup>, Shiho Yabusaki<sup>6</sup>, Koki Kashiwaya<sup>7</sup>, Naoki Kohara<sup>1,8</sup>, Yohei Uchida<sup>1,9</sup>,  
Mauimi Yoshioka<sup>1,9</sup>, Yuji Mitsuhata<sup>1</sup>, Shigeo Okuma<sup>1</sup>, Takumi Ueda<sup>1</sup> and Atsunao Marui<sup>1</sup>,

**Abstract:** To make clear the impact of the Tohoku Earthquake to the groundwater environment by tsunami and an accident of Fukushima Daiichi Nuclear Plant, hydrogeological research were carried out in the east coast of Tohoku. The research project was constructed from groundwater study and geophysical sounding study. Groundwater research are operated in step by step, the first, overview work was operated in whole area by using rivers, springs and existing wells. The next, four points were selected to make a detail work with a drilling holes. And finally, evaluation of groundwater pollution risk were analyzed by groundwater flow simulations. The hydrogeological overview work which have been cooperated by many colleagues from all Japan were described in this section.

**Keywords:** groundwater risk, evaluation, Tohoku Earthquake, east coast of Tohoku, overview

### 1. 概査(概要調査)研究とは

2011年3月の東日本大震災では、浄水に関するインフラ設備への甚大な被害により、長期間、生活用水や飲用水などの供給が滞る事態が発生し、避難生活へ大きな影響を与えた。また被災地の沿岸域では、生活用水や農業用水として用いられていた地下水の津波による塩水化や耕作地における塩害が大きな問題となった。今回のような地震災害に限らず、多くの自然災害における避難生活、あるいはその後の復興において水の確保は重要な課題である。震災後における喫緊の課題として、避難生活に対する飲用水の確保は当然として、伝染病などの二次災害を防止する衛生面の観点から生活用水の確保も大事であり、さらに、被災地における産業復興においても水は欠かさすことのできない重要な存在である。

日本国内では、昭和40年代における地下水の過剰揚水が大規模な地盤沈下を発生させた過去の反省から、国内では地下水に関する様々な規制を設けることにより、極力地下水を使わない方向へ社会をシフトさせてきた。現在でも各種規制や行政による縦割り管理のため地下水の使用は限定されているが、都市域では、規制により上昇した地下水位が地下構造物に影響を与えるなど新たな問題も生じている。一方で、これまでに集積された地下水に関する膨大な知見に基づき、近年では地下水マ

ネージメントあるいは地下水ガバナンスといった、新たな地下水利用の概念が生まれている。このような社会背景からかんがみて、地下水を震災時における非常用水源や後々の産業復興に資する資源として再評価することは非常に重要である。

本調査では、地震による被害の大きかった太平洋側の東北4県(青森・岩手・宮城・福島)の低地・台地・平野において、地下水の採水を行い、津波による塩水化などの現在の地下水環境を正確に把握するとともに、地下水の地球化学データを軸に滞留時間を含む地下水の流動系を明らかにすることにより今後の復興対策や地震災害に有益な地下水データの提供に資することを目的とした。また今回の調査をもとに、今後の地震災害に対する地下水利用の観点からの提言をまとめた。

### 2. 青森県における概要調査研究

#### 2.1 研究目的

東日本大震災に対する地下水のリスクを評価し、今後の災害対策に資する。特に、青森県太平洋岸沿岸域における地下水の放射性セシウム濃度および津波等による地下水の塩水化についての評価を行うことを目的とする。

本報告は「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究 中間報告」に平成25年度以降の調査・研究実施内容を追記したものである

\*Corresponding author

1. 地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, AIST)

2. 弘前大学(Hirosaki University)

3. 現所属：活断層・火山研究部門 (Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST)

4. 大阪市立大学(Osaka City University)

5. 信州大学(Shinsyu University)

6. 福島大学(Fukushima University)

7. 京都大学(Kyoto University)

8. 現所属：日本工営(株) (Nippon Koei Co., Ltd.)

9. 現所属：再生可能エネルギー研究センター (Renewable Energy Research Center, AIST)

## 2. 2 研究対象地域

本調査を行ったのは、青森県の太平洋岸に位置する北から東通村、六ヶ所村、三沢市、東北町、おいらせ町、八戸市、階上町である。調査地点の位置を第1図に示す。なお、○が浅層地下水（深度10m以浅）から採取した地点、□は、深層地下水（深度10m以深）から採取した地点、△が湧水等である。採取した地点において蛇口から採取できた多くは、飲料水ではなく生活用水としての利用であった。また、井戸から直接採取したものは、多くが現在未使用であった。

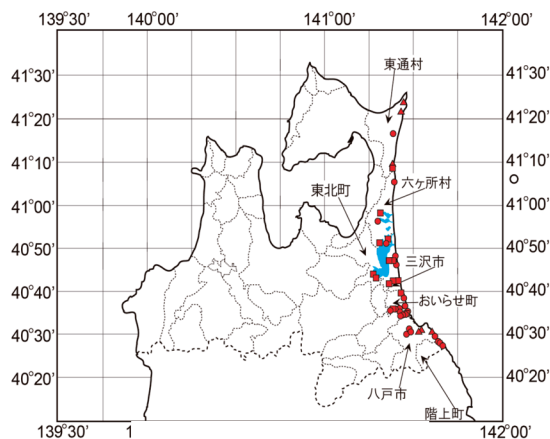


図1 研究対象地域および試料採取地点

第1図 研究対象地域および試料採取地点

Fig.1 Target area for the study, and sampling points.

点、そして、△が湧水等である。採取した地点において蛇口から採取できた多くは、飲料水ではなく生活用水としての利用であった。また、井戸から直接採取したものは、多くが現在未使用であった。

## 2. 3 研究方法

本研究では、青森県太平洋沿岸域に位置する自治体が有する井戸や地域の住民が有する私有の井戸から試料を採取した。採取方法は、蛇口から試料水を採取できる場合は、蛇口から採取し、できない場合は、手作りの地下水採取器により試料水の採取を行った。採取した試料水は、可能な限り採取した当日に実験室に持ち帰りアルカリ度 ( $\text{HCO}_3^-$ ) を測定した。その他の水質分析項目は、後日分析を行った。なお、採取した試料水の水質分析に使用した分析装置を次に示す。

- ・イオンクロマトグラフ (DIONEX 社製 DX-320), 分析項目:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$
- ・ICP (パーキンエルマー社製 Optima 7000DV), 分析項目: Fe, Mn
- ・近赤外線レーザー方式水素・酸素同位体比分析装置 (PICCARO 社製 WS=CRDS 式同位体比アナライザー), 分析項目:  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$
- ・Cs 濃度測定装置 (アナリティックイエナ社製 FD-08Cs100), 分析項目: 放射性 Cs

## 2. 4 結果と考察

本研究の目的の一つである青森県太平洋沿岸域における地下水の放射性セシウム濃度の評価では、採取した試料水はすべて  $10\text{Bq/kg}$  以下 (飲料水基準値以下) であった。これは、放射性セシウムの起源 (福島第一・第二原子力発電所) からの遠距離、風向き、土壌への吸着が影響していると考えられる。

一方、太平洋沿岸域における地下水の津波による塩水化の評価をするために、第2図と第3図に電気伝導度の分布と塩化物イオン濃度の分布を北 (東通村: 上) から南 (階上町: 下) にかけて示した。なお、電気伝導度は、値が高いほど多くの溶存物質 (イオン) を含んでいることを示している。一般的な地下水の電気伝導度は、数  $10\sim 300\ \mu\text{S/cm}$  で、塩化物イオン濃度は数  $10\text{mg/L}$  であることを考えると、数地点において地下水の塩水化が認められた。ただし、聞き取り調査から津波の影響を受けていると考えられる八戸市、おいらせ町以外から採取した試料で電気伝導度や塩化物イオン濃度が高いのは、津波に関係なく揚水等により塩水化が進行している可能性がある。また、本研究で明らかになった八戸市、おいらせ町における電気伝導度や塩化物イオン濃度が高い地点では、井戸のくみあげによる洗浄が実施されておらず高いままになっていると考えられた。

本研究の目的の範囲外ではあるが、第4図に硝酸イオン濃度の分布を北 (東通村: 上) から南 (階上町: 下)

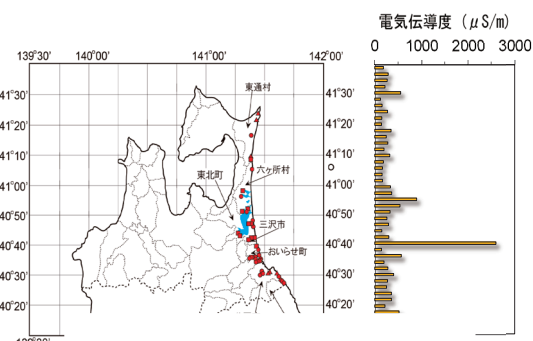


図2 電気伝導度の東通村から階上町にかけての分布

第2図 電気伝導度の分布

Fig.2 Distribution of electric conductivity.

にかけて示した。硝酸イオン濃度の環境基準値は、約  $45\text{mg/L}$  (硝酸性窒素および亜硝酸性窒素で  $10\text{mg/L}$ ) であり、本研究調査地域では、5 地点で基準超過が認められた。この原因については、本研究では明らかではないが、対象地点の詳細な土地利用や採取した水の窒素安定同位体比等の測定により、汚染源の評価が可能になると考えられる。これは、今後の課題である。

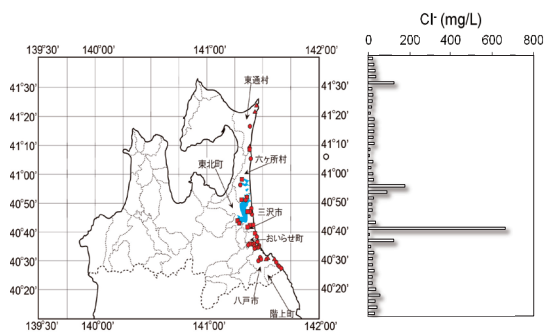
### 3. 岩手県における概要調査研究

#### 3. 1 研究目的

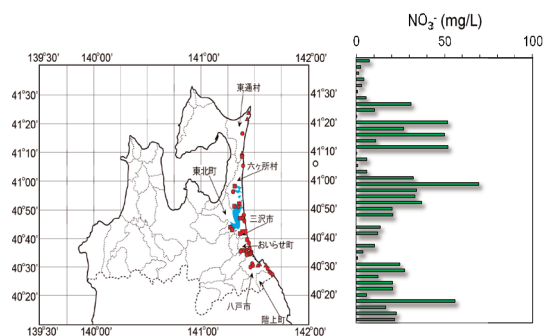
本研究は、東日本大震災において甚大な被害を受けた岩手県沿岸地域の主に飲用水源として用いられている地下水や地表水を対象に水質等の化学分析を行い、災害や汚染に対する地下水の脆弱性の評価に軸を置きながら、対象地域における地下水の流動系や各種汚染状況を確認することにより、現在の地下水環境を正確に把握し、更に今後の復興対策や地下水管理、ならびに地震災害の克服に有益な地下水データの提供に資することを目的としている。

#### 3. 2 研究対象地域の概要

本調査研究の対象地域は、岩手県沿岸地域において主に地下水を飲用水源として用いている9つの市町村(洋野町・久慈市・普代村・田野畑村・岩泉町・宮古市・山田町・大槌町・釜石市・陸前高田市)である。本研究対象地域では全ての市町村において地下水の一部を飲用水源として用いており、山間部では簡易水道の水源として用いている。水源井の深度は5~10m程度のもので大半を占めており、井戸の近傍には河川が存在することから河川からの伏流水である可能性も示唆された。今回、採水に用いた井戸は全て飲用水源であるため、各自治体が行っている検査により飲用水基準を満たしており安全性の評価はすでになされている。したがって本研究では、地下水の起源・流動・水質成因などを考えることで、沿岸地域における各自治体の今後の地下水利用に資す



第3図 塩化物イオン濃度の分布  
Fig.3 Distribution of Cl<sup>-</sup> concentration.

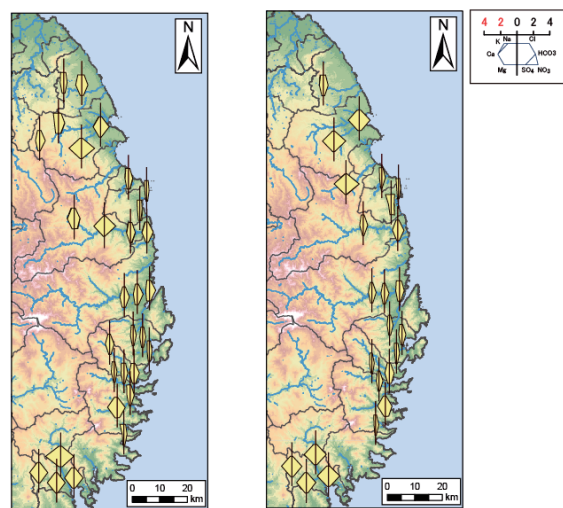


第4図 硝酸イオン濃度の分布  
Fig.4 Distribution of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration.

#### 2. 6 結論

青森県太平洋沿岸域における地下水の放射性Cs濃度および津波等による地下水の塩水化について考察を行った結果、青森県太平洋沿岸域において放射性Csによる汚染は認められなかった(すべて10Bq/kg以下)。また、津波による塩水化は一部で認められた。

また、今回の調査では、厳密には震災前後の比較は困難であった。なぜなら、震災前のデータが、本研究対象地域では殆ど存在しないからである。地下水の採水方法(例えば、採水容器の洗浄方法を含む)から分析方法(分析値の精度の許容範囲などを含む)までを統一した地下水の水質データベースの構築が望まれる。



地下水および湧水

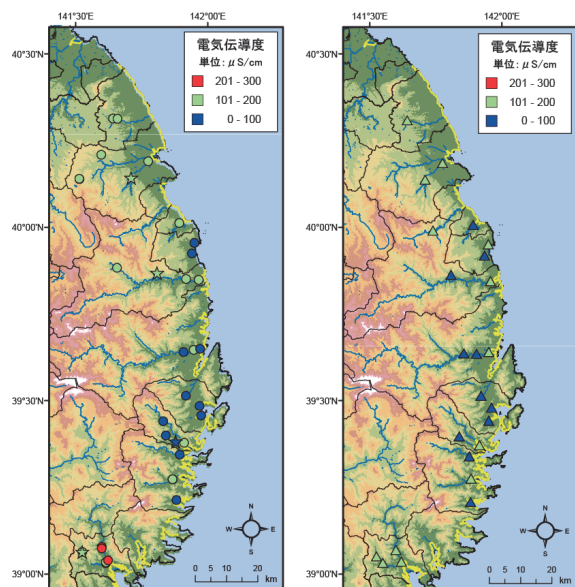
河川水

第5図 岩手県における水質分布(シュレティブダイアグラムによる表示)

Fig.5 Water quality of groundwater, spring water and surface water.



るデータや考察の提供を念頭に置いた。宮古市・釜石市・岩泉町では地下水を観光資源や工業用水として用いているため、国や自治体によるいくつかの地下水管理に関する調査も過去に行われており、自治体における地下水に対する関心も相対的に高く、今回の調査で得られた情報の提供は今後の地下水管理に役立つと考えられる。



地下水および湧水 河川水  
第6図 電気伝導度の分布

Fig.6 Distribution of electric conductivity.

### 3. 3 研究方法

本研究では、2012年9月から10月にかけて岩手県沿岸の9つの市町村の水道水源井および、水源井近傍の河川や湧水から採水を行った。地下水に関しては揚水ポンプを利用できる場所では、数分程度排水を行った後に採水を行った。ポンプによる揚水が難しい一部の施設においては採水容器（ペーラー）を用いて直接採水を行った。河川水や湧水に関しては、全て直接採水を行った。現地では、ポータブルGPSを用いて緯度経度を、EC（電気伝導度）、pH、ORP（酸化還元電位）、DO（溶存酸素濃度）についても簡易測定装置を用いてそれぞれ測定を行った。また、採取した試料の室内分析は、無機溶存イオン（K, Na, Ca, Mg, NH<sub>4</sub>, Li, Cl, SO<sub>4</sub>, Br, HCO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, F, PO<sub>4</sub>）、微量成分元素（Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Ba, Pb）、水素・酸素安定同位体比（δDおよびδ<sup>18</sup>O）、放射性セシウム（<sup>134</sup>Cs+<sup>137</sup>Cs）の測定を行った。

### 3. 4 分析結果および考察

以下、各項目について調査範囲全域について考察を行

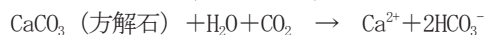
う。なお、放射性セシウムについては全ての地域で検出限界（10Bq/kg）以下であったため以降の議論には用いていない。

第5図に岩手県沿岸地域における地下水と湧水および河川水の水質分布を示す。図中のシュティフダイアグラムの空間分布から、岩手県沿岸地域における地下水と湧水は、山田町や釜石市における一部の地下水を除いてCa-(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>型の水質を示すことがわかった。また、宮古市を境に北部で相対的に溶存イオン濃度が大きい傾向が見て取れる。河川水に関しても、水質や分布傾向は地下水・湧水と同様である。

第6図に岩手県沿岸地域における地下水（●）および湧水（★）と河川水（▲）の電気伝導度（EC）の空間分布を示す。図中の海岸線付近の黄色線は津波の到達範囲を示している。湧水のECには地域的な差が見られないが、地下水のEC値は相対的に北部で高く、南部で低い傾向を示した。河川水に関しても地下水と同様に相対的に北部で高く、南部で低い傾向を示した。EC値は簡易的には水中の溶存物質の総量と見なすことができる。そのため一般的にEC値の大小は、地下水や河川水中の溶存イオン濃度の大小に比例すると見なせる。本研究地域におけるシュティフダイアグラムから見た水質傾向（第5図）とEC値の空間分布傾向（第6図）が一致していることから、本地域における地下水や河川水の水質は、主に流域を構成する岩石、すなわち地質に起因していると考えられる。

主要元素におけるCa（カルシウム）やNa（ナトリウム）、ならびに微量成分元素におけるAs（ヒ素）やCu（銅）などは、主に水との接触による岩石中の鉱物からの溶出が主な起源である。Cl（塩素）は岩石中（鉱物中）にはほとんど存在しないため、一般的には海から潮風によって運ばれてくる風送塩などが起源となる。以上のことを前提とし、調査地域全域の水質分布傾向を確認した。シュティフダイアグラムの形状でも明らかのように（第5図）、Caは河川水と地下水（湧水）の両方において、北部では岩泉町北部と久慈市、南部では陸前高田市で高い傾向が見られた。これらの地域は石灰岩（方解石）を主な地質としているため、以下に示すように石灰岩の溶解によるCaイオンの溶出が相対的に高いCa濃度の要因と考えられる。

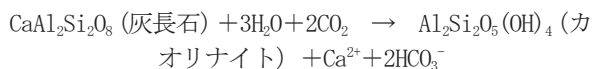
#### <石灰岩（方解石）の溶解>



この反応式は、方解石（石灰岩）が水と二酸化炭素に長時間触れた場合、水の中にCa成分とHCO<sub>3</sub>成分が溶け出すことを表している。第5図におけるシュティフダイアグラムの形状においてもCa成分とHCO<sub>3</sub>成分が突出しており、他の地域と比べてダイアグラムも大きいことから、これらの地域では石灰岩の溶出が生じていると考えられる。

Ca 成分の地下水への溶出は、石灰岩の溶解以外にも生じうる。一般的に地下水の源となる雨水には、ほとんど溶存成分が含まれていない。以下の化学式が示すとおり、雨水が浸透する過程で一緒に地下に取り込まれた二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が周辺の岩石 (鉱物) と反応することにより、地下水への溶存イオン成分の溶出が起こる。

<ケイ酸塩鉱物 (斜長石) の化学的風化>

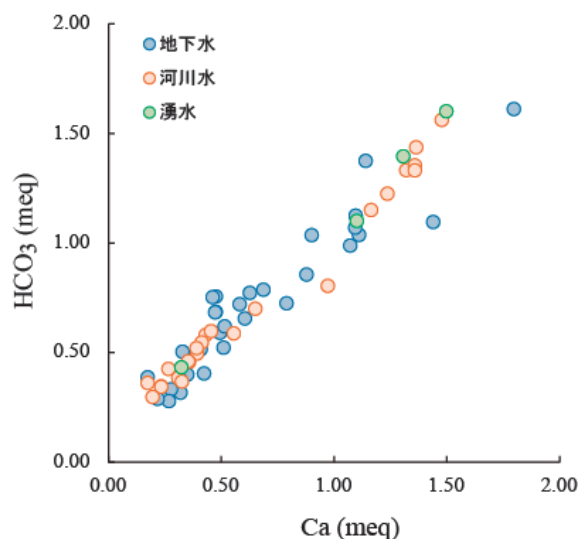


この反応式も、上述した方解石の溶解と同様に、斜長石 (灰長石) が水と二酸化炭素に長時間触れた場合、粘土鉱物 (カオリナイト) が生成され、さらに水の中に Ca 成分と HCO<sub>3</sub> 成分が溶け出すことを表している。今回採取した地下水や河川水における Ca と HCO<sub>3</sub> の相関を見ると、第7図に示すように Ca と HCO<sub>3</sub> は非常に良い相関を持つ。したがって、今回調査した全ての地域でケイ酸塩鉱物の化学的風化が生じており、また一部の地域では石灰岩の溶出が生じていることが明らかとなった。

地下水・湧水および河川水の Na の空間分布を第8図に示す。地下水に関しては、相対的に南部より北部で Na 濃度が高い。南部の比較的濃度の高い地下水が津波の侵入域付近で採取したものであるのに対し、北部では山間部でも相対的に高い値を示すことから、これらは地域を構成している地質に起因していると考えられる。河川水の Na 濃度は、地下水とは対照的に南部では、より河口付近において、そして北部の小流域の河川において高い傾向が見られた。これらは、前述した風送塩や潮汐にともなう海水侵入の影響と想定される。第9図は Cl 濃度の空間分布を示したものである。上述したように Cl は岩石中にほとんど含まれず、直接的に海水などの影響を受けない限り、主に降水 (雨水) の水滴の核となる海塩粒子や風送塩などが起源となる。第10図に採取したサンプル中の Na 濃度と Cl 濃度の関係を示す。現地では海水のサンプリングを行わなかったため、本図には、参考値として Rankama and Sahama (1950) において記載されている海水の Na と Cl 濃度の相関関係を示した。図中の直線は海水の Na と Cl 濃度の比率を表したものであり、本線上に値がプロットされる場合、そのサンプルの Na と Cl 成分の起源は海水 (海塩) であると推察される。本研究地域では、第8図において Na 成分が高い陸前高田市沿岸部の地下水が、直線近くにプロットされることから津波による塩水侵入の影響が完全に除去されていない可能性が示唆される。一方で、濃度にはバラつきがあるものの、大半の地下水は直線よりも下側にプロットされる。これは、海水の Na と Cl の比率よりも Na 成分が大きい、言い換えると水中に海塩によってもたらされる以外の Na 成分が含まれていることを表しており、それらの起源は主に地質だと考えられる。

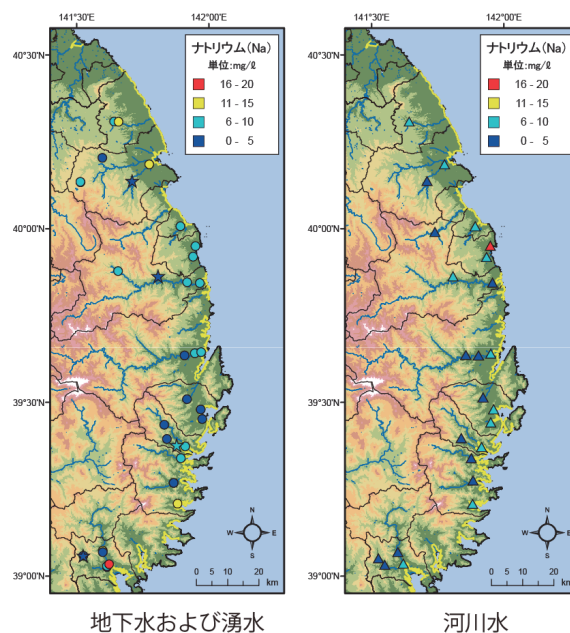
第11図に、As (ヒ素) 濃度の空間分布を示す。As に

ついては、地域的な特徴が見られず、流域の地質に起因した局所的な傾向に限定されている。



第7図 Ca と HCO<sub>3</sub> の関係

Fig.7 Relationship between Ca and HCO<sub>3</sub>.



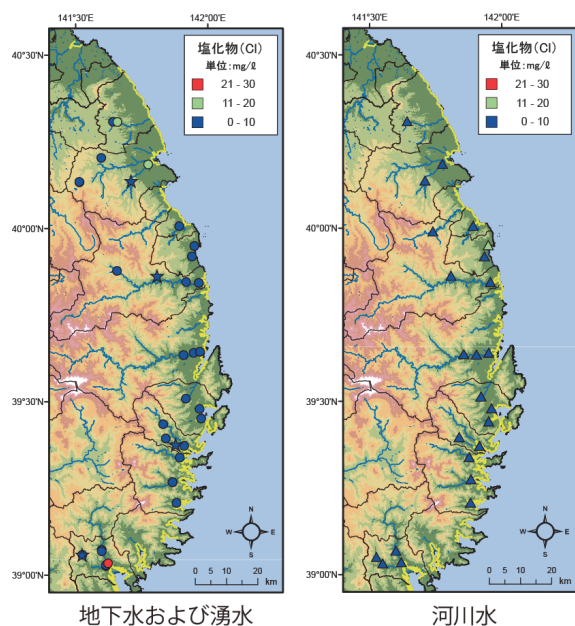
第8図 Na 濃度の分布

Fig.8 Distribution of Na concentration.

3. 5 今後の地下水利用にむけた考察

本調査で訪れた岩手県沿岸部は多くの自治体で地下水を水道水源として利用しており、地下水依存率が調査前に想定していたよりも大きいことを実感した。また自

治体によって度合いは異なるものの、基本的に地下水の保全・管理に対する関心度は高く、岩泉町に代表されるように地下水を観光資源としてではなく、現地の産業（水産業・加工業・製造業）にも大きく活用しており、今後の復興を考える上で地下水管理に資する適切な情報の提供が必要不可欠なものであることが明らかとなった。

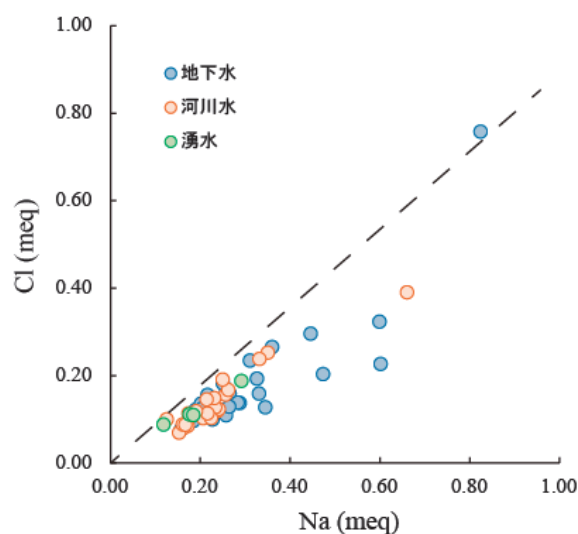


第9図 Cl濃度の分布

Fig.9 Distribution of Cl concentration.

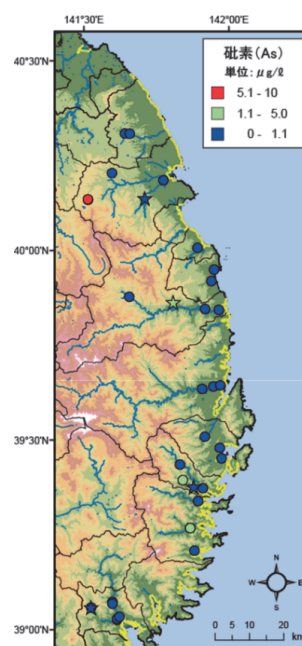
今回の調査では、各自治体の水道水源から飲用基準値（10Bq/kg）以上の放射性セシウムは検出されず、飲用水源として特に問題がないことが示された。また津波によって被災した井戸の大部分は、津波による塩水侵入の影響が見られなかった。このことは、急峻な山地が海側に迫っており、比較的平野部の面積が小さい岩手県沿岸部の地下水流動特性、すなわち地下水流動系が小さく（滞留時間が短く）、流速が速いといった特性を表しており、塩水侵入などの地下水の汚染に対する回復能力が高いことを示している。

一方で、いくつかの課題も明らかとなった。今回被災した井戸の中には、海岸線に近いものも複数見られ、また沿岸部では今後も水産加工工場の再稼働など多くの地下水利用が見込まれるため、過剰揚水による塩水侵入が懸念される。特に大槌町など地下水起源の海底湧水を産業に用いる場合、陸域での過剰揚水は海域への地下水流入を阻害してしまうため、適切な管理が必要と考えられる。また複数の自治体では飲用水源の地下水が、近隣



第10図 Na濃度とCl濃度の関係

Fig.10 Relationship between Na and Cl concentration.



第11図 As濃度の分布

Fig.11 Distribution of As concentration.

河川の伏流水である可能性が示唆された。本稿でも指摘したとおり、河川が近隣の地下水を涵養している場合、河川の汚染＝地下水の汚染となるため、今後注意が必要である。とくに今回の震災では、原発事故により飛散した放射性物質を吸着した山地の落ち葉や表面土壌が、降雨時に河川へと流入し、一時的に関東の河川水のセシウム濃度が上昇する問題が震災直後に生じた。放射性セシウムは土壌への吸着度が大きいため、たとえ伏流水とい



えども、地下水に影響を与えることはほとんどないと考えられるが、今後、今回のような流域外や自治体外からの汚染物質に対する対応として、地下水と河川水との相互関係をより詳細に調べる必要があると考える。

#### 4. 宮城県における概要調査研究（その1：水質全般）

##### 4.1 研究の目的

東日本大震災において甚大な被害を受けた宮城県沿岸地域の地下水や地表水を対象に水質等の化学分析を行い、災害や汚染に対する地下水の脆弱性の評価に軸を置きながら、対象地域における地下水の流動系や各種汚染状況を確認することにより、現在の地下水環境を正確に把握し、更に今後の復興対策や地下水管理、ならびに地震災害の克服に有益な地下水データの提供に資することを目的としている。

##### 4.2 調査内容

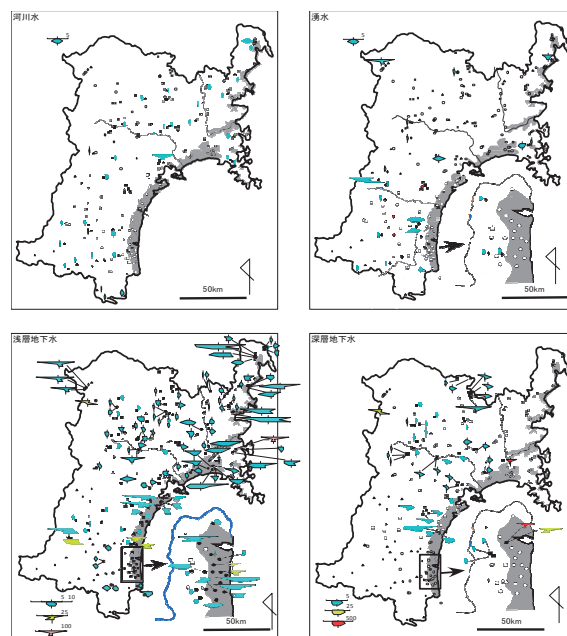
宮城県全域で、2012年3月～11月にかけて、地下水の水質に関する概要調査を行った。分析した試料は、河川水 33、湧水 42、10mより浅い井戸水（便宜的に浅層地下水と呼ぶ）84、10mより深い地下水（深層地下水と呼ぶ）79の合計 238 試料であった（第12図）。現地で水温・電気伝導度・pH・ORP（酸化還元電位）・DO（溶存酸素）を分析した。持ち帰った試料について、主要溶存成分について、アルカリ度・F<sup>-</sup>・Cl<sup>-</sup>・NO<sub>3</sub><sup>-</sup>・N<sup>-</sup>・PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>・Br<sup>-</sup>・SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>・Na<sup>+</sup>・K<sup>+</sup>・Ca<sup>2+</sup>・Mg<sup>2+</sup>を定量した。微量元素はろ過していない試料に酸添加した試料を用いて総濃度をFe・Mn・Cr・Co・Ni・Cu・Zn・As・Se・Sb・Cd・Ba・Pbを分析した。また、水の水素・酸素と硫酸態イオウの安定同位体比と放射性セシウムの分析を行った（第12～16図）。

内陸部の河川水・湧水・浅層地下水は、温泉水を除いては、希薄なCa<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>型の水質を示すものが多かった。地下水の流動性は比較的高く、河川水の水質は基底流出成分によってほぼ決定されていることが明らかであった。深層地下水は、Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>型で、停滞性の水質であったが、丘陵部で得られた試料は低地部のものよりも濃度が低かったことから、滞留時間は丘陵部の方が短いと推定される。水の水素・酸素の同位体比には、海岸からの距離が大きくなるにつれて小さくなる内陸効果が見られる。一方で、近接採取地点では、試料水の分類によらず、似通った安定同位体比を示すことが多いことから、深層地下水であっても、涵養源は比較的近隣の丘陵部にあると推定された。

海岸平野と県北部の沿岸地域の津波浸水域には、海水の混入が見られる。現時点では海水混入が、地下水環境に対する最も深刻な津波被害である。浅層地下水では、

Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>型の地下水に海水が混入しているが、海水の混入率は津波被災地で放棄された井戸を除けば2～3%以内である。海水混入は、硫酸態イオウの同位体比からも確認された。深層地下水にも海水混入が見られることがある。しかし、沿岸部では、もともと20～40m付近に塩水くさびが存在していたと考えられることから、津波の影響がどれだけあるのかは不明である。総鉄・総マンガン濃度が水道水質基準値（それぞれ、0.3mg/Lと0.05mg/L）を超える地下水が、内陸部と沿岸平野の地下水環境が停滞しやすい地域を中心に、全域に存在する。基準値（0.01 mg/L）を超えるヒ素を含有する地下水は15地点で発見された。これらの多くは総鉄・総マンガン濃度も高い傾向がある。津波浸水域の井戸でヒ素の含有量が多い傾向はないが、基準値を超える井戸は複数あった。これらは、津波堆積物を起源とするかもしれない。しかし、海水混入に伴って生じた還元環境がもともと井戸周辺の地質にあった元素の溶出を促進したのかもしれない。その他の元素については、フッ素と鉛が基準値を超える井戸が数地点あったことを除けば、基準値を超える試料はなかった。

宮城県全域の地下水水質は一般的には良好だと言える。緊急用水源として有効利用できるが、そのためには井戸の所在地と地下水水質をデータベースとして整理することが望まれる。



第12図 研究対象地域の水質  
Fig.12 Water quality of the study area.

### 4. 3 今後の地下水利用にむけた考察

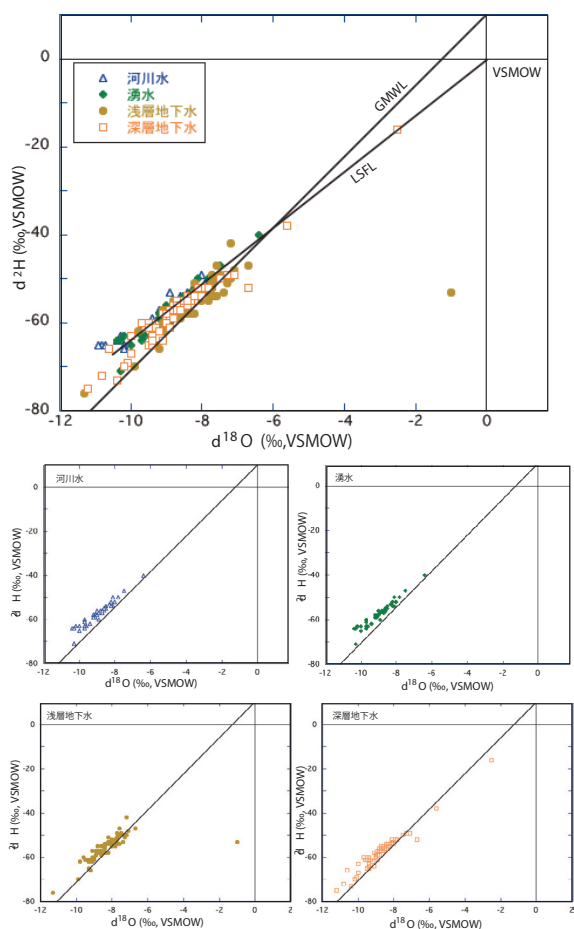
東北大震災の折には、大勢の住民が井戸水を利用したと教えられた。井戸の少ない地域では、昔から知られていた湧水を自動車で汲みに来た人が列をなしていたという。津波の被害はなかった内陸部でも、水道が止まってしまったために、井戸を持っている家庭の水を分け合ったという話は多くあった。そのためか、調査時に井戸所有者を教えてくださいと人がたくさんいた。東松島町で、一つしかない井戸からバケツリレーで水を汲みあげて、ご近所の5家族で風呂を使った家があった。その井戸水は、一時避難していた避難所のトイレを流すのにも使ったそうだ。その井戸の所有者は、水の問題では、「2~3

日常的に井戸水を生活用水として用いている家庭は多くはなく、震災前は庭や自家菜園の散水などの雑用水として主に使われていた。震災時には、これらの井戸水は、飲用に用いた例もあったが、主には生活用水として用いていたようである。

病院などの専用水道は、元々緊急時の水源確保がその敷設理由の一つでもある。また、宮城県内では、水道を大量に使用する大規模な工場が自家水源として井戸を所有していることが多い。さらには、自治体の水道を敷設するのが困難な山間部に工場が立地しているような場合も、井戸を自家水源としていることが多くあった。これらの事業所が持つ井戸はおおむね30mよりは深く、水量が豊富で、水質も良好である。したがって、非常用電源さえ確保できれば、災害時の緊急水源として有効に利用できるであろう。

宮城県の地下水の水質はおおむね良好である。宮城県を調査して、水域環境がきわめて良好であることに改めて感心した。農業地帯であっても、際立った富栄養化などが見られないことは、耕作地を無理に使っていないことの証拠だと思う。これは、大都市の一部を除く日本全体に言えることなのであろう。鉄やマンガンなど、目で見て分かる成分は、沈殿除去して利用すれば問題ないと考えられる。ヒ素や鉛などが基準値を超える場合には飲用には用いることができないが、トイレで流すというような汚染物質がその場に残留しない利用法であれば、利用できる場合もある。井戸所有者が水質を知って、その水質にあった利用をすることが望ましい。

震災時の住民の地下水への依存を知るにつけ、湧水や井戸水が緊急用水源として重要であることが明らかである。使用可能な井戸・湧水の所在地と水質をデータベース化して、政府・自治体が共有すること、可能な限り住民が知ることのできる公開情報とすることで、将来の災害時の水資源として備えることができよう。近年、大阪府や京都市を始め、多くの自治体で、「災害時協力井戸」の登録を進めている。大阪府では、登録した井戸の水質分析を無料でを行い、水質情報の把握も行っている。このような、組織立った地下水管理を進めることが、災害時のインフラを確保するために重要な政策となるであろう。

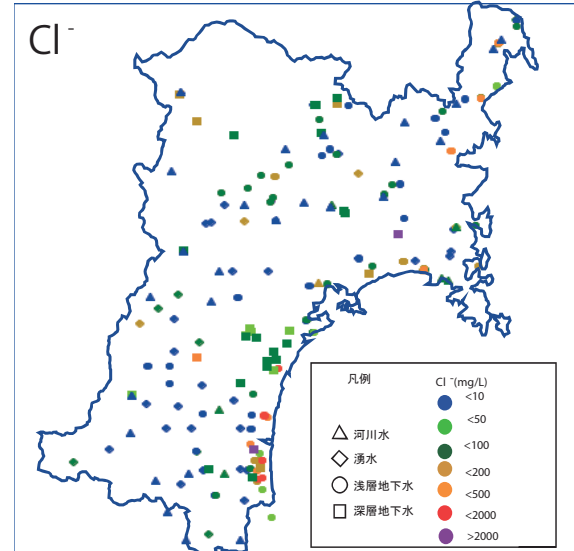
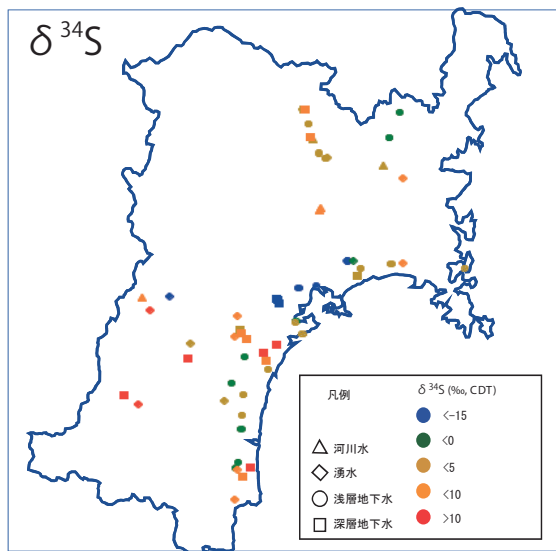
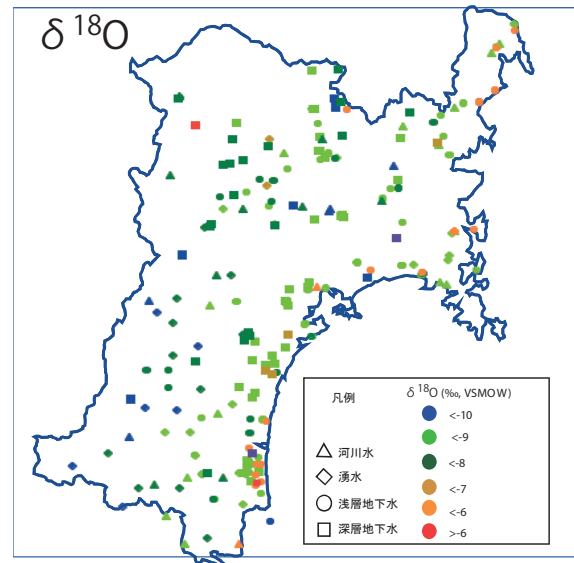
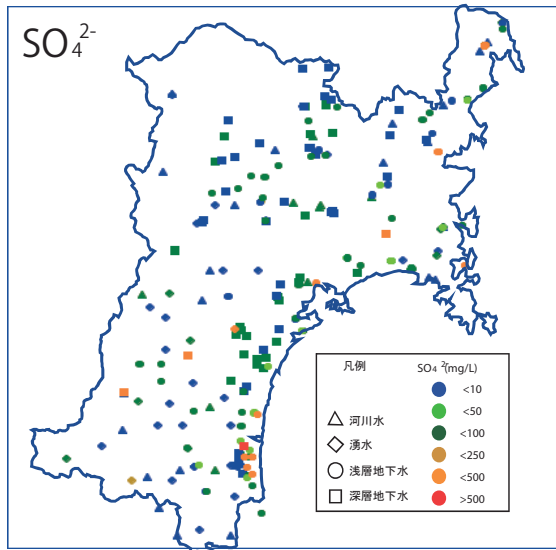


第13図 水素・酸素の安定同位体比

Fig.13 Stable isotope composition of D and <sup>18</sup>O.

日後にトイレで困り、一週間後に風呂が困る」と話していた。飲み水はペットボトルでまかなえるが、トイレは（共用している人数にもよるが）数日後には詰まってどうしようもなくなり、風呂は1週間以上がまんできかないと言う。これは、震災が3月のまだ寒い時期だったからの話で、夏であれば、これだけの時間も持たないだろう。

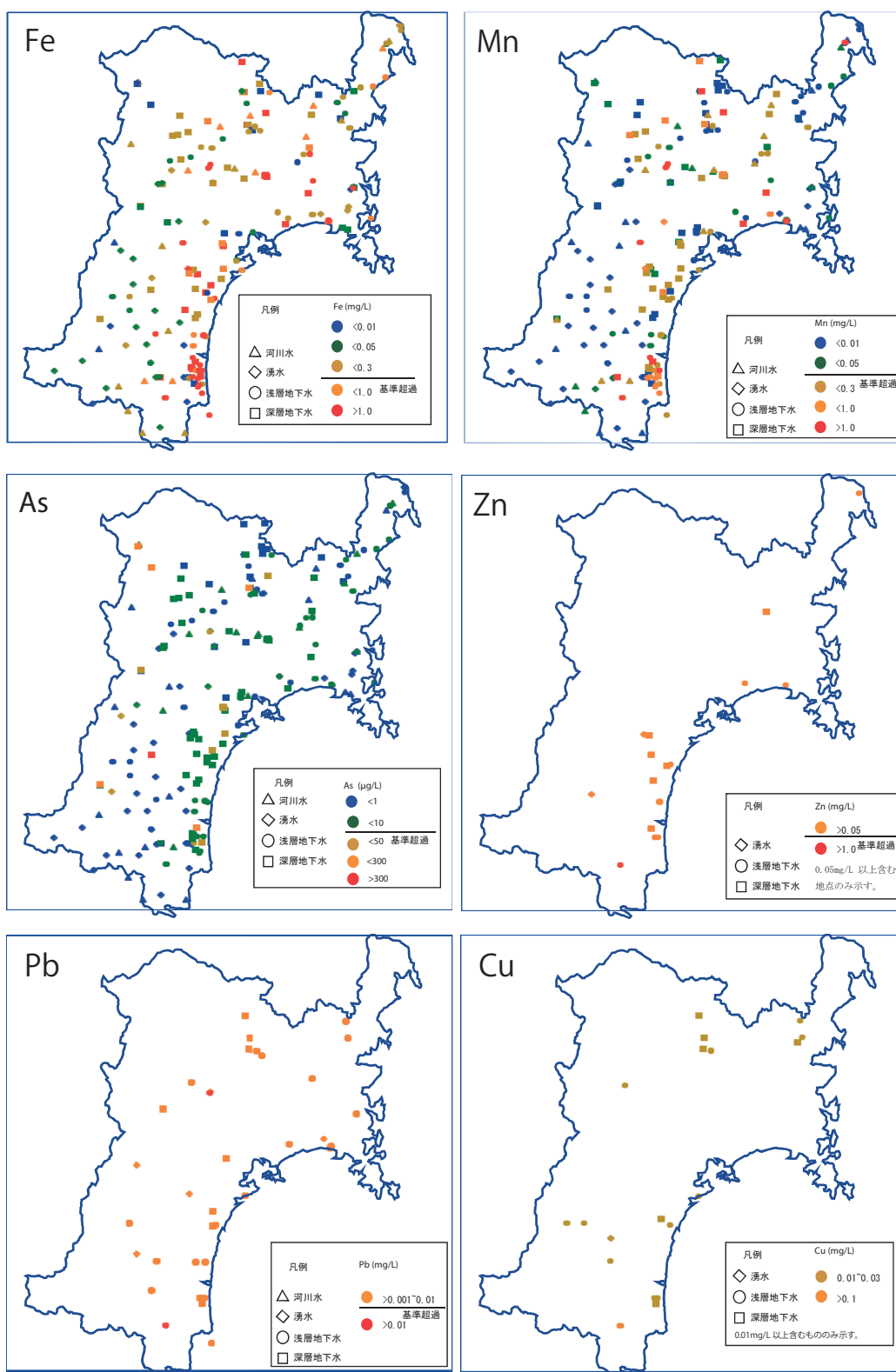




第14図 硫酸イオン濃度と硫酸態イオウの安定同位体比

Fig.14 Distribution of Sulfate and Sulfate isotope.

第15図 酸素安定同位体比と塩素イオン濃度の分布  
Fig.15 Distribution of <sup>18</sup>O and Cl<sup>-</sup> concentration.



第 16 図 微量元素濃度の分布  
Fig.16 Distribution of rare materials.

## 5. 宮城県における概要調査研究（その2：化学トレーサーによる仙台平野の地下水資源調査と汚染ポテンシャル）

### 5. 1 研究の目的

2011年3月11日の東日本大震災からの復興に資する上で、上水道水源となっている地下水の流動系や汚染状況を把握する必要がある。本調査では、被災地である宮城県において、自然トレーサー（水温、環境同位体（ $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ）、年代トレーサー（CFCs, SF<sub>6</sub>）、主要化学成分）を用いて水源となる177箇所の地下水の涵養域とその流動経路、滞留時間の全体像を明らかにし、採水した地下水の滞留時間とDO、硝酸態窒素濃度から試験的に考案した人為汚染ポテンシャル（APP：Anthropogenic Pollution Potential；score 0～100）によって涵養域と経路の脆弱性を推定することを目的とした。

### 5. 2 研究の結果と考察

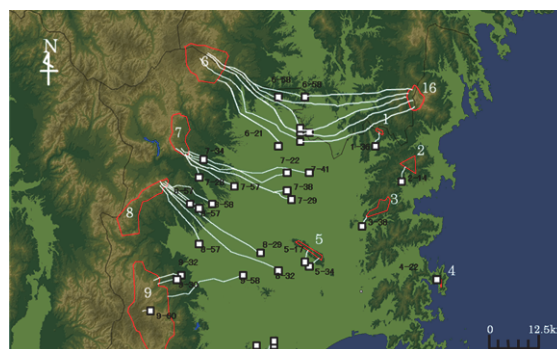
第17～22図をもとに、実施した研究結果は以下のようによまとめられる。

- 1) 深層地下水の滞留時間は10～55年、浅層地下水では0～45年、湧水では0～40年である。仙北平野に比べ仙南平野の地下水の滞留時間はやや長い。
- 2) 酸素と水素の安定同位体比（ $\delta^{18}O$ — $\delta D$ ）の関係（デルタダイアグラム）から、温泉水を含む地下水は、全て天水（雨水）起源であり、太平洋側および日本海側の天水線にまたがった広い範囲にある。両天水線の傾きに比べ、地下水のデルタダイアグラム上の傾きは緩やかで、この地域の地下水の特徴を表している。湧水には内陸効果が現われている。
- 3) 同位体高度効果が認められ、 $\delta^{18}O$ で0.42‰/100m、 $\delta D$ で2.5‰/100mの同位体高度効果を示している。これらの同位体高度効果は中部地域や大阪地域に比べ大きい。
- 4) 酸素と水素の安定同位体比を用いて地下水の涵養域（水源域）および流動経路を推定した結果、64箇所の深井戸について15水源ゾーン、77箇所の浅井戸について24水源ゾーン、36箇所の湧水について23水源ゾーンが同定できた。
- 5) 仙台平野の地下水の涵養域は山形県の県境や海岸近くの丘陵部に多い。
- 6) 調査した全ての地下水で放射性セシウム濃度が厚生労働省の飲用水の基準値（10Bq/kg）以下であり、福島第一原発事故による地下水への影響は極めて小さいと考えられる。
- 7) 汚染ポテンシャルにより汚染リスクが高い地下水涵養域（水源域）は深井戸で涵養域6, 7, 13, 14、浅井戸の涵養域11, 15, 16, 17、湧水では涵養域全般と主に宮城県中央の山間部である。

- 8) 深井戸は全体的に汚染ポテンシャルが低く、汚染されにくい、湧水は汚染ポテンシャルが高く、汚染されやすい。

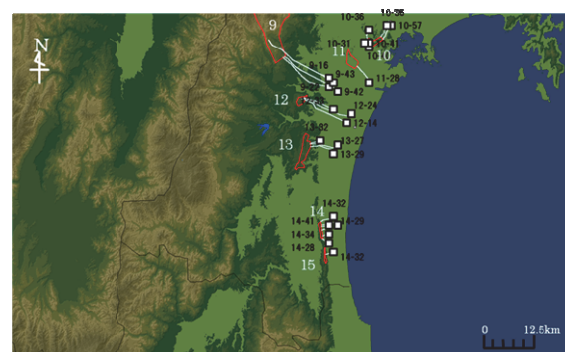
今回の調査では、自然トレーサーを用いることによって仙台平野の地下水の涵養域と流動経路の一部がわかった。試験的に導入した人為汚染ポテンシャルから、井戸とその涵養域、流動経路の汚染に対する脆弱性が推定された。いま、震災復興計画で住居などの高台移転計画があるが、今回の調査結果から汚染ポテンシャルが低い丘陵地へ移転するのが望ましい。仙台平野の地下水資源調査と汚染ポテンシャルによるリスク評価は、震災復興のために必要な調査研究なので今後も継続することが望まれる。

なお、地下水中のセシウムの分析の結果、調査した全ての地下水で放射性セシウム濃度が厚生労働省の飲用水の基準値（10Bq/kg）以下であり、福島第一原発事故による地下水への影響は極めて小さいと考えられる。



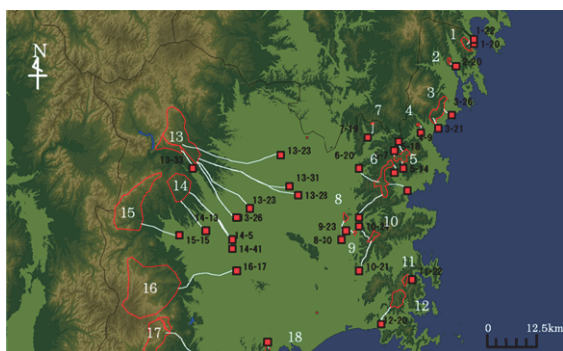
第17a図 深井戸の涵養域、流動経路および滞留時間（仙北平野）。

Fig.17a Deep groundwater condition in Senpoku plane.



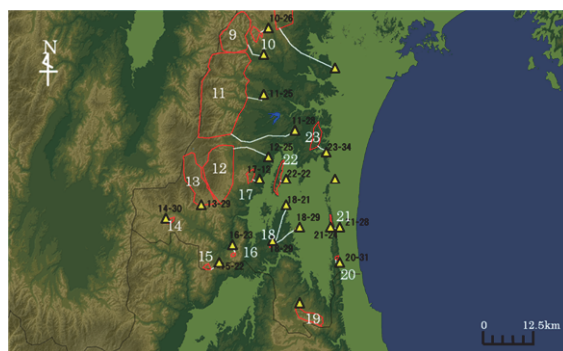
第17b図 深井戸の涵養域、流動経路および滞留時間（仙南平野）。

Fig.17b Deep groundwater condition in Sennan.



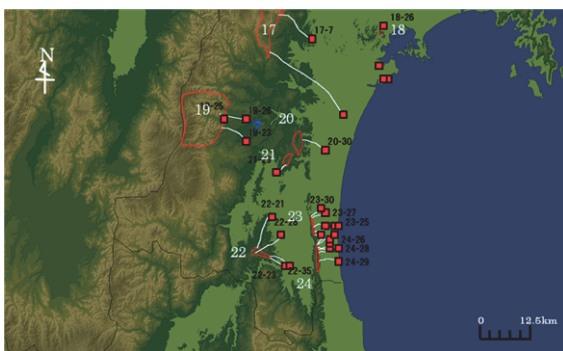
第 18a 図 浅井戸の涵養域, 流動経路および滞留時間 (仙北平野).

Fig.18a Shallow groundwater condition in Senpoku plane.



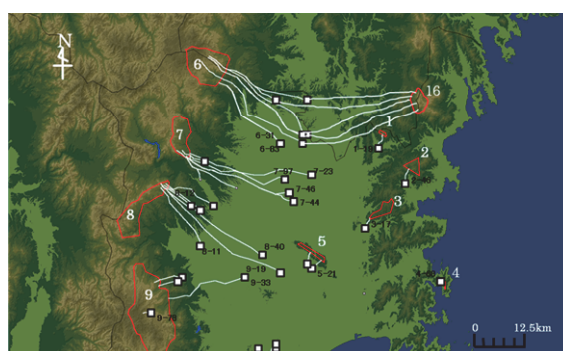
第 19b 図 湧水の涵養域, 流動経路および滞留時間 (仙南平野).

Fig.19b Spring water condition in Sennan plane.



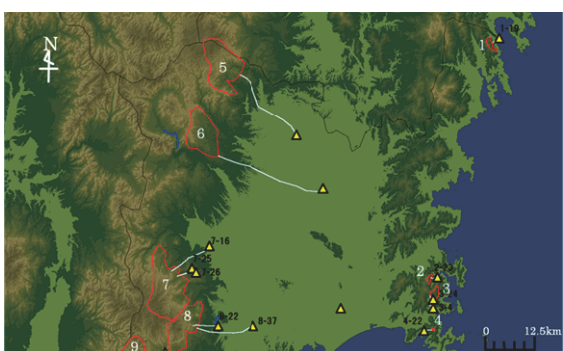
第 18b 図 浅井戸の涵養域, 流動経路および滞留時間 (仙南平野).

Fig.18b Shallow groundwater condition in Sennan plane.



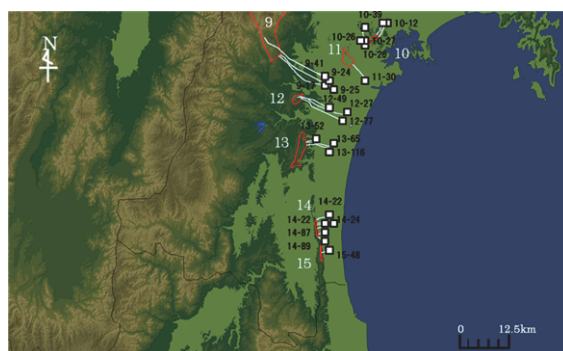
第 20a 図 深井戸の涵養域と APP (仙北平野)

Fig.20a Deep groundwater recharge area and APP in Senpoku plane.



第 19a 図 湧水の涵養域, 流動経路および滞留時間 (仙北平野).

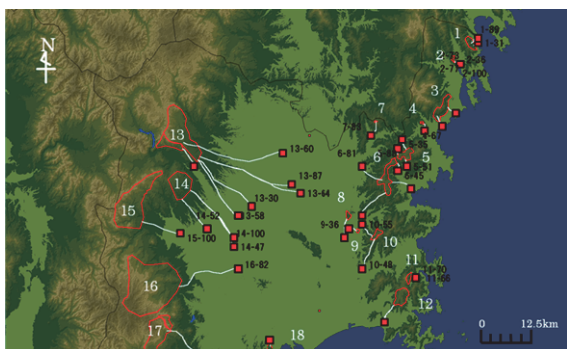
Fig.19a Spring water condition in Senpoku plane.



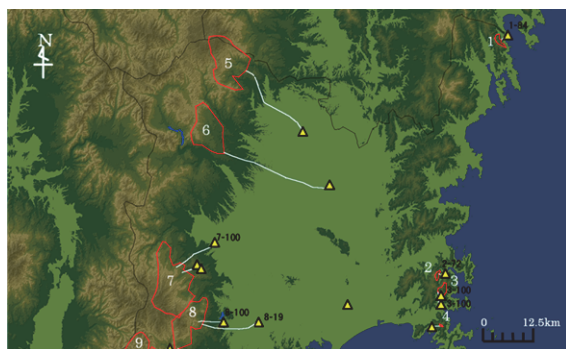
第 20b 図 深井戸の涵養域と APP (仙南平野)

Fig.20b Deep groundwater recharge area and APP in Sennan plane.

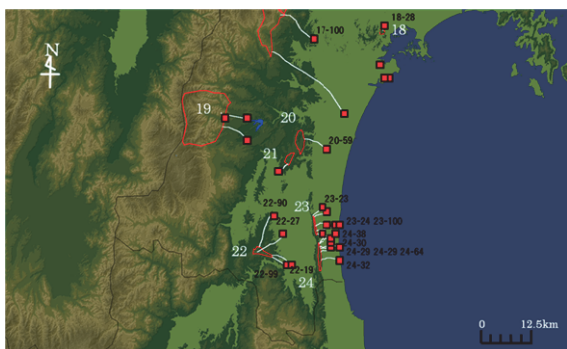




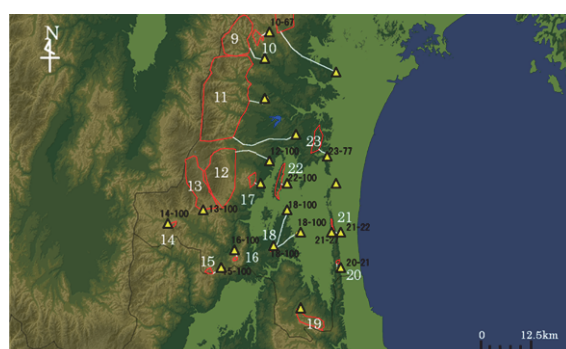
第 21a 図 浅井戸の涵養域と APP (仙北平野)  
 Fig.21a Shallow groundwater recharge area and APP in Senpoku plane.



第 22a 図 湧水の涵養域と APP (仙北平野)  
 Fig.22a Spring water recharge area and APP in Senpoku plane.



第 21b 図 浅井戸の涵養域と APP (仙南平野)  
 Fig.21b Shallow groundwater recharge area and APP in Sennan plane.



第 22b 図 湧水の涵養域と APP (仙南平野)  
 Fig.22b Spring water recharge area and APP in Sennan plane.

## 6. 福島県（北部）における概要調査研究

### 6. 1 研究目的

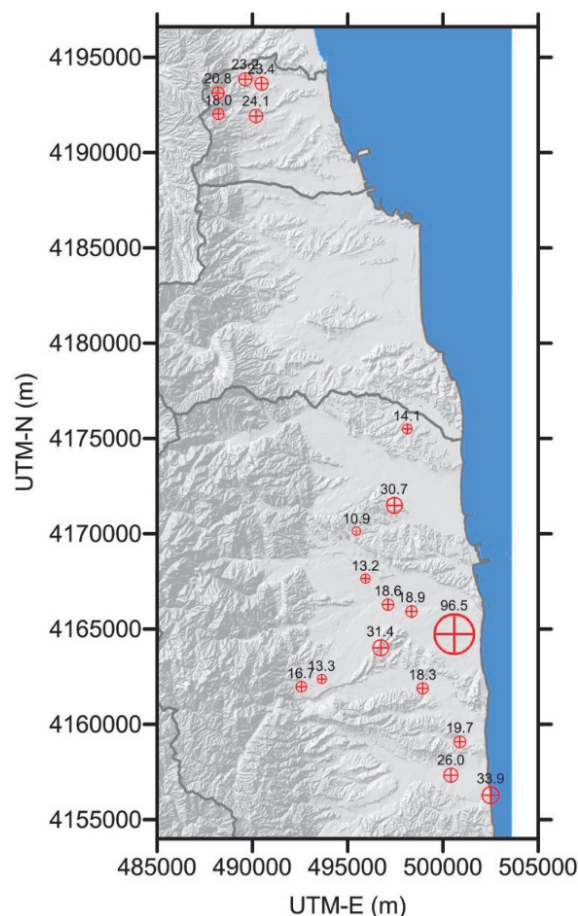
浜通り北部地方の海岸沿いの地域では、2011年3月の東日本大震災による津波で大きな被害を受け、多くの死者・行方不明者が出るとともに、津波および地震による地盤沈下により広大な農地や居住地などが浸水した。また、東京電力福島第一原子力発電所の事故により、原発から北西に向かって高い濃度の放射性物質が放出され、原発から半径20 km圏内に位置する南相馬市南部および西部は、2012年4月に警戒区域や計画的避難地域に指定された。その後、南相馬市では避難指示区域が帰還困難区域（西部）、居住制限区域（西部）、および避難指示解除準備区域（南部および北西部）に再編され、現在に至っている。そこで、福島県浜通り北部地方（福島県新地町、相馬市、南相馬市）において湧水や井戸から地下水を採取して現場水質測定を行うとともに、サンプリングした試料について各種水質分析を行い、震災・原発事故後の地下水の水質についての基礎資料を得ることとした。

### 6. 2 結果および考察

調査された地点の水質分析結果を第23図から第28図に示す。

- 1) 福島県浜通り北部地方（福島県新地町、相馬市、南相馬市）における地下水の流動状態や東日本大震災に関連した地下水汚染の状況を把握し、将来的な地下水環境変化の予測に資する手法の構築を目的として、2012年9月、11月、12月の3時期にかけて、地下水については11箇所、湧水については8箇所の、計19箇所で行った。
- 2) 電気伝導度（EC）は1箇所（No.18地点）の地下水（湧水）でECが96.1 mS/mと比較的高い値を示し、まだ津波による海水の影響が残っていると判断された。しかし、この最大値は海水のECよりもかなり低い値を示すことから、津波の浸水による影響は小さくなっていると判断された。
- 3) 酸化還元電位（ORP）は5~421 mV、pHは6.22~8.46の値を示したが、今回の測定結果では、ORPとpHの間には明瞭な相関関係がみられなかった。
- 4) 室内水質分析結果によると、新地町のサンプルは、いずれもCa-HCO<sub>3</sub>型の水質組成を示すが、南相馬市では、Na-Cl型やNa-HCO<sub>3</sub>型、Ca-SO<sub>4</sub>型など異なる水質組成を有する地下水や湧水があることが明らかになった。このことから、南相馬市では複数の地下水流動系が存在するものと考えられる。
- 5) 南相馬市ではSiO<sub>2</sub>濃度が高い地点があることから、滞留時間の長い地下水があることが示唆された。

- 6) 重金属分析の結果、調査地点で我が国の水道水質基準を超えている項目は、マンガンと鉄である。マンガンは3地点で水道水質基準を超えており、そのうち2地点では952.4 ppb、457.0 ppbとWHOの飲料水水質ガイドライン値である0.4 mg/Lを超えていた。鉄については、3地点で水道水質基準値（0.3 mg/L）を超えていた。
- 7) ヒ素については水道水質基準（0.01 mg/L）を超過する試料はなかったが、1箇所の湧水で7.8 ppbが検出されており、今後の動向に留意する必要がある。
- 8) 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門地下水研究グループによるCs濃度の測定結果によると、調査した19地点の地下水や湧水のサンプルは、全て検出限界（10 Bq/kg）以下であった。Cs濃度に関しては、調査した19地点においては原発事故の影響が認められなかった。
- 9) 津波被災地では住民が戻っておらず、震災前の地下水利用状況や震災後の地下水の状況などについて聞き取ることが不可能であった。津波の被害を受けなか



第23図 電気伝導度の分布

Fig.23 Distribution of electric conductivity.

った地域では、震災時に井戸が涸れたり水が濁ったりしたとの話が聞かれた。また、原発事故による影響への不安や除染に対する不満、井戸水への放射性物質の影響を心配する声などが聞かれた。

- 10) 住民の方々は、今でも不自由で心配の多い生活をしており、使用している井戸水の定期的な水質検査を継続していく必要があると思われる。

なお、原発事故で全域が警戒、計画的避難の両区域に指定され、全町民が避難している浪江町は、2013年4月1日午前0時から、帰還困難、居住制限、避難指示解除準備の3区域に再編された。海岸沿いの地域は避難指示解除準備区域となり、基本的に自由に入ることができるようになった。今後、浪江町の海岸部でも調査が可能となったので、地下水や湧水の調査を検討したい。

- 11) 2013年4月19日に、南相馬市の大甕地盤沈下観測井における揚水試験を視察した際に、浪江町の市街地および請戸地区を訪れた。南相馬市南部や浪江町では、津波被災地では瓦礫や破損した家屋や車、船などがそのままになっているところが多い。こうしたところでは、長期にわたり放置された瓦礫や車などから汚染物質が浸透し、地下水汚染が発生することが懸念される。

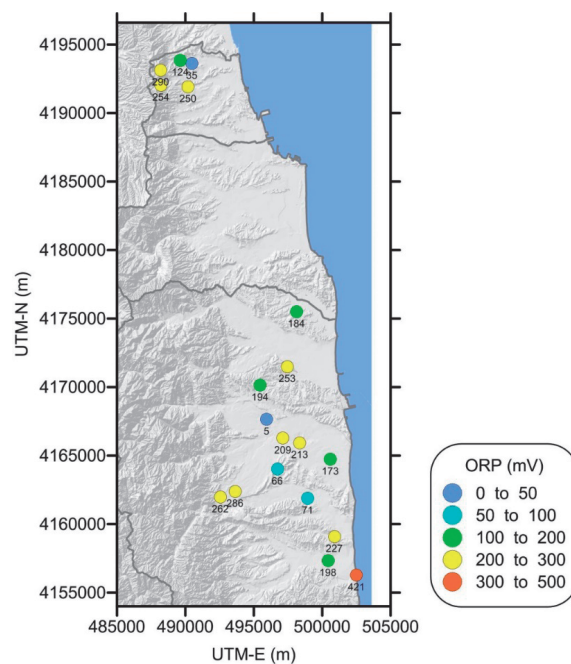
### 6. 3 今後の地下水利用にむけた考察

本調査で訪れた福島県新地町や相馬市、南相馬市では、海岸沿いの津波被災地での被害は甚大で、新地町や相馬市では瓦礫の撤去が行われているものの、南相馬市や浪江町では壊れた家屋がそのままになっていたり、瓦礫の撤去が進んでいなかったりする地域が多い。農地も荒廃し、地震による地盤沈下の影響によると考えられる湛水もいくつかの場所で見られた。こうした地域では、住民が戻っておらず、震災前の地下水利用状況や震災後の地下水の状況などについて聞き取ることが不可能である。

津波の被害を受けなかった地域では、住民の方のお話を聞くことができた地域もあるが、原発事故による影響への不安や除染に対する不満、井戸水への放射性物質の影響を心配する声などが聞かれた。震災時に井戸が涸れたり水が濁ったりしたとの話もあった。住民の方々は、今でも不自由で心配の多い生活をしており、使用している井戸水の定期的な水質検査を継続していく必要があると思われる。

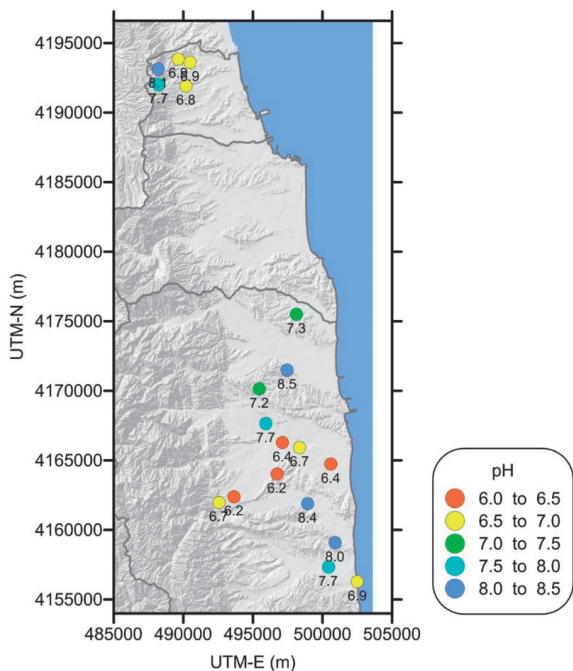
なお、南相馬市では除染対策として民家近くの防風林が伐採されているところがあり、伐採された木はそのまま放置されているところが見られた。また、南相馬市南西部の山沿いに近い地域では放射線量が高くなり、除染が進んでいない地域もある。このような地域の住民は、現在の地下水からは放射性物質が検出されていないと知らされても、今後も安全かどうか分からないという不安が大きいと推測される。

地震や津波、原発事故からの復旧や復興がほとんど進んでいない状況の中で、住民が安心して帰還し生活をするためには、大きな課題が山積している。安全で安心できる水の確保はもちろんのこと、住民がそこで生活できる諸条件を早急に整備していく必要を強く感じた。

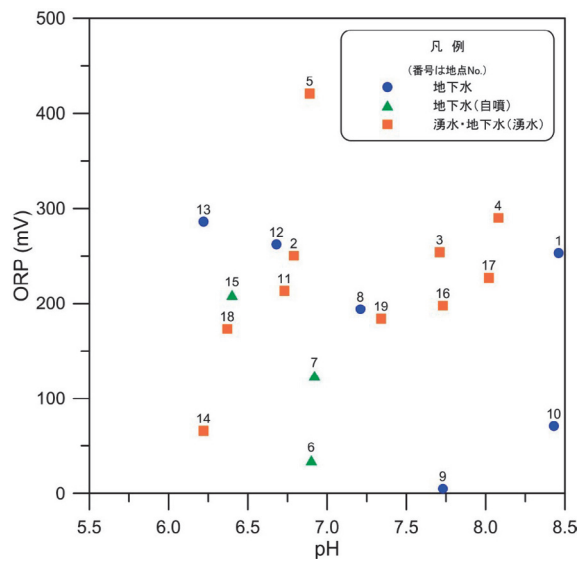


第 24 図 酸化還元電位の分布  
Fig.24 Distribution of ORP.

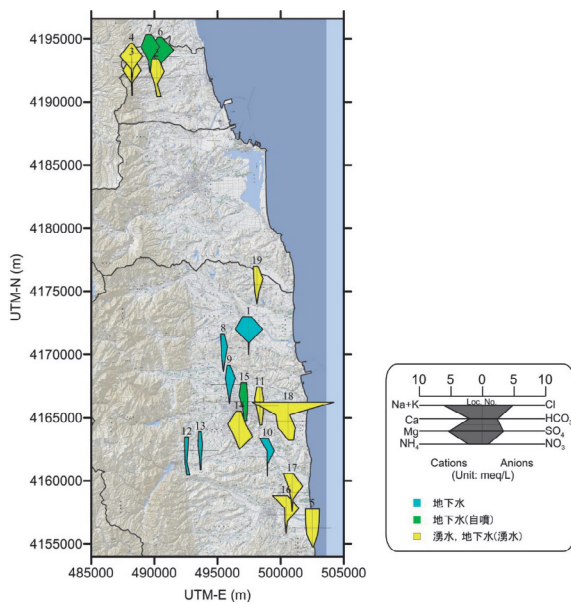




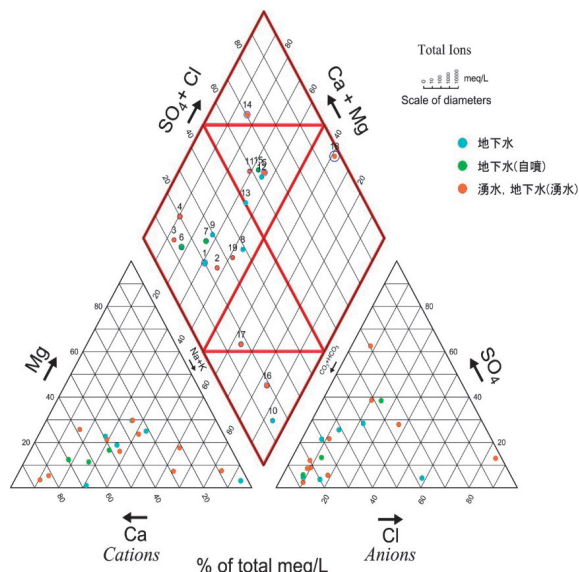
第25図 pHの分布  
Fig.25 Distribution of pH.



第27図 ORPとpHの関係  
Fig.27 Relationship between ORP and pH.



第26図 水質のパターン  
Fig.26 Water quality diagram.



第28図 水質のトリリニアダイアグラム  
Fig.28 Water quality on tri-linear diagram.



## 7. 福島県（南部）における概要調査研究

### 7. 1 研究目的

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、原子炉から漏出した放射性核種、がれきに含まれる重金属、津波による海水の塩分など、人間活動由来あるいは天然の汚染物質が水循環系に負荷された。このような状況の中、一日も早く汚染状況を解明し、安全、安心な生活環境を取り戻すためには、現在の汚染状況を把握し、今後地下水汚染の状況がどのように推移していくのかを推定する必要がある。さらには、将来予想される災害に備えて、災害に強い水資源利用システムを構築することが望ましい。地下水リスク評価研究における主な調査対象は太平洋岸の低地帯とその周辺地域であり、福島県では浜通り地域に該当する。浜通り地域の大熊町には、東北地方太平洋沖地震の地震動と津波によって炉心溶融や水素爆発など一連の事故を起こした東京電力福島第一原子力発電所が位置しており、2012年4月1日の段階で発電所の20km圏内と発電所から北西方向に延びる地域には、警戒区域、帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域、計画的避難区域が設定されており、現在でもこれらの各種制限区域は再編されている。浜通り地域の中央部はこれらの制限区域が存在することから、福島県の調査を担当することとなった福島大学と京都大学はそれぞれ浜通り地域の北部と南部を分担して調査を行うこととした。発電所20km圏は広野町と檜葉町の町境付近にあたるため、京都大学では広野町といわき市で地下水調査を実施した。

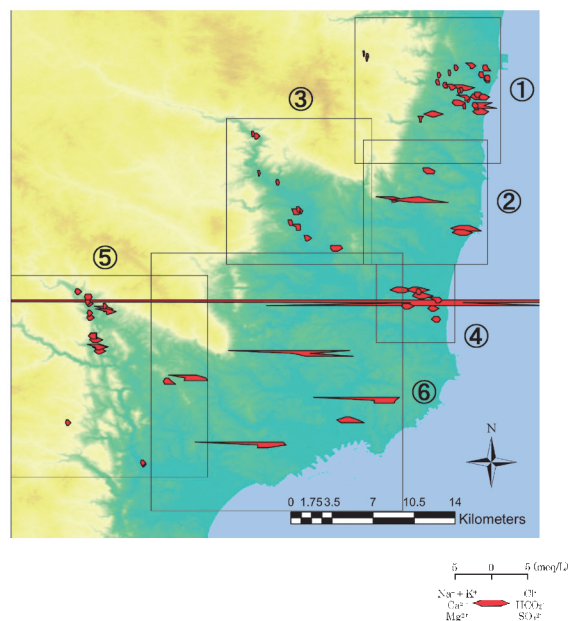
### 7. 2 研究方法

採水調査を行うための情報収集、調査井戸の選定、管理者との調整を2012年4月から開始した。現地調査は、2012年9月（18箇所）、10月（33箇所）、11月（37箇所）の3回実施した。採取した試料の属性は井戸水が73、鉱泉水と温泉水が6、沢水が3、河川水が3である。採水作業では、地下水の利用状況、井戸底深度やストレーナ深度などの井戸構造、周辺の地質などについて管理者から情報収集した上で、GPSで調査位置を記録し、環境放射線（ $\gamma$ 線）モニターによる空間線量率を測定した。また、可能な場合は水位計を用いて井戸底の深度と地下水水位を測定した。井戸のパイプや蛇口などにホースを接続して樹脂製ビーカーに地下水を導き、pH、酸化還元電位（ORP）、電気伝導度（EC）、溶存酸素濃度（DO）を測定した。全ての値が安定した後には値を記録し、一般水質、アルカリ度、重金属、水素酸素同位体比、セシウム、トリチウム、SF<sub>6</sub>、ラドンの各項目の分析に用いる水試料を採取した。ラドンは現地での測定を行い、これ以外の項目は室内で測定した。

### 7. 3 研究結果および考察

第29～31図に分析結果を示す。水素酸素同位体比からも示されたとおり、本年度採取した水試料は1試料を除いて天水起源であった。広野地域の山間部の井戸や、小川地域、遠野地域などでは主要溶存イオン濃度が小さく、ORPやDOから酸化的な地下水が多い。また、小川地域や広野地域の一部の井戸では、ラドン濃度が大きいことが明らかとなり、花崗岩体あるいは花崗岩質岩からなる帯水層に含まれる地下水であると推定された。調査地域の内陸部は阿武隈山地にあたり、前期白亜紀の花崗岩質岩や変成岩が広く分布する。これらの地域では比較的流動性の高い帯水層に含まれる滞留時間の短い地下水を利用しているものと考えられる。

一方、平野部では主要溶存イオン濃度が大きい傾向が



第29図 水質のダイアグラム

Fig.29 Water quality diagram.

認められた。ORP、DOを考慮すると還元的な井戸が多く、そのような地質環境では溶存するFeやMnの濃度も高くなる。山間部に比べると滞留時間の長い帯水層の地下水を採取していると推測される。現在実施しているSF<sub>6</sub>やトリチウムなど滞留時間の推定が可能な環境トレーサの分析結果が得られれば、各地域の地下水流動状態や帯水層の特性について、さらに詳しい知見が得られるものと期待される。

地下水への地震の影響としては、津波で冠水した地域の井戸でECの上昇が確認されたが、その後排水を続けることでECは震災前の値に近づいているとの証言が得られた。また、夏井地域では地殻変動による沈降が生じ

て地下水中の塩分濃度が高くなり、耕作が困難になった箇所があるとのことであった。津波の冠水地域だけでなく、地殻変動の影響を考慮して地下水中、土壌中の塩分の移行、集積の状態を明らかにすることができれば、農地の塩害対策に有用な知見となるものと考えられる。

調査地域は福島第一原子力発電所 20km 圏のすぐ南側にあたるが、本年度採取した水試料からセシウムは検出されず、土壌中の鉱物粒子や有機物によって吸着除去されたものと考えられた。また、明らかに震災に起因すると思われる重金属汚染は認められなかった。

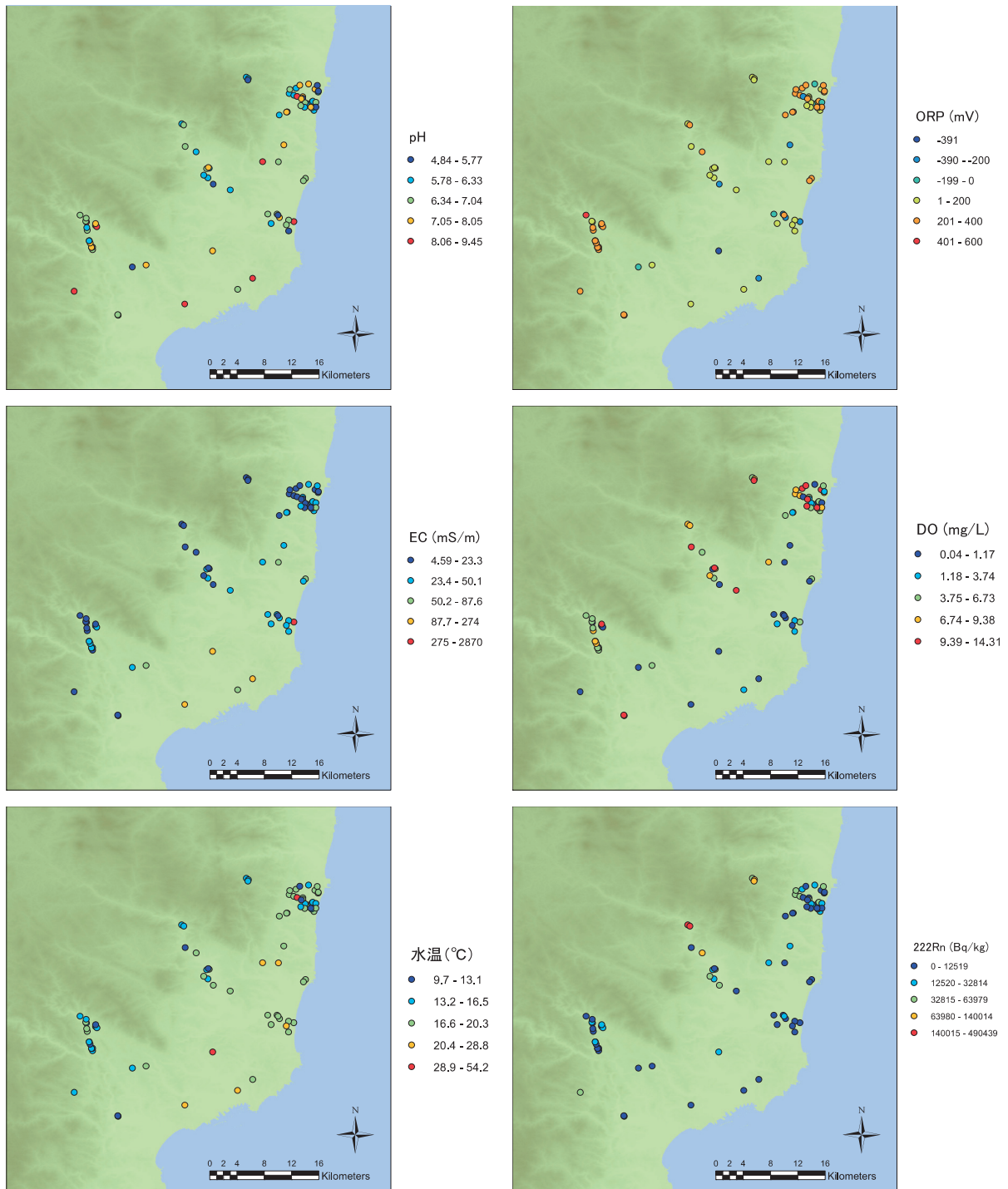
#### 7. 4 今後の地下水利用へむけた考察

いわき市や広野町の山間部では井戸水、沢水、湧水などを生活用水として利用しており、採水試料の分析結果から比較的流動性の高い帯水層の地下水を利用しているものと考えられた。流動的であることでこれらの地域の地下水は溶存イオン濃度が低く、水質が良好であるが、滞留時間が短いため、万が一地表から汚染物質が負荷された場合、地下水の汚染も速やかに拡がることとなる。一方で、平野部には深層地下水を揚水する井戸が存在する。平野部では溶存イオン濃度が大きく、還元的な環境では溶存する Fe や Mn の濃度も高い傾向があるなど水質条件は必ずしも良くないが、深層の地下水は滞留時間が長い可能性が高く、地表からの汚染の影響を受けにくいという利点がある。

このように、水質とともに、地域的な水循環を踏まえた汚染に対する脆弱性 (vulnerability) を評価することが、災害時の地下水リスクを把握し、災害に強い水資源利用システムを実現する上で重要である。調査地域で

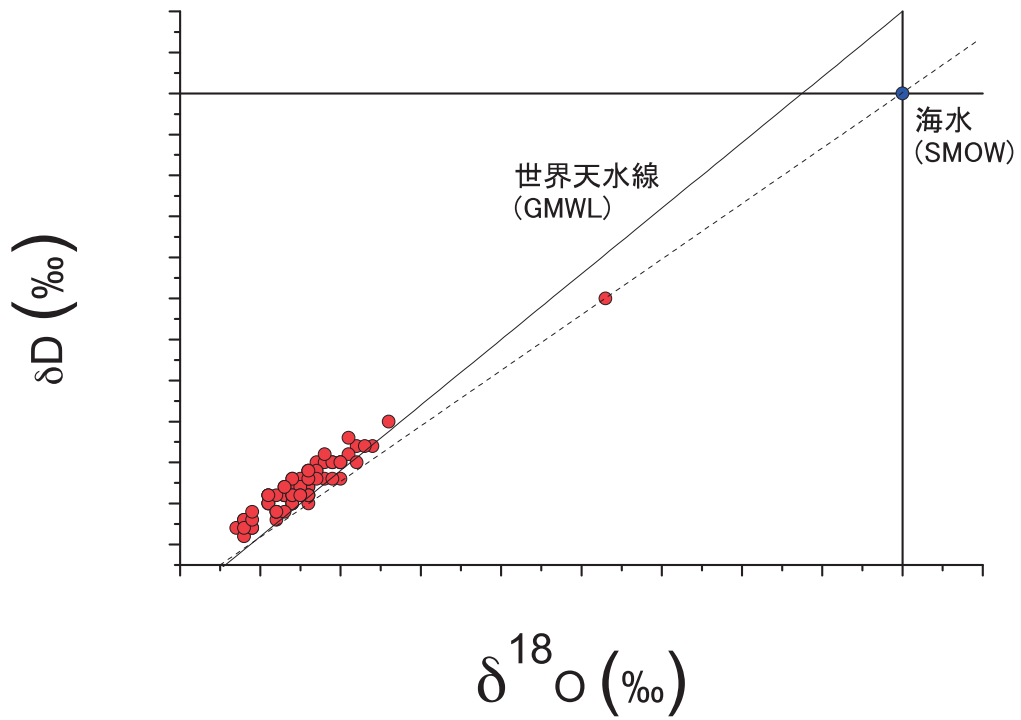
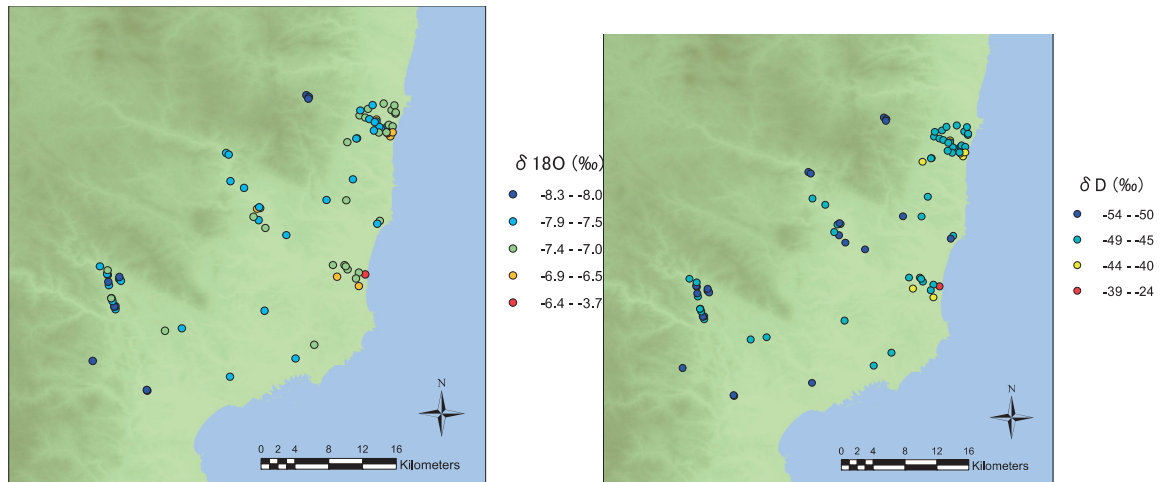
は、地震の後上水の供給が止まり、水道水の代わりに普段は生活用水として使っていない井戸水を使用した、井戸がある地域に他の地域の人が水をもらいに来た、といった証言が得られた。また、水道が整備されている地域では、自治体が井戸の所在について情報を持っていないケースも見受けられた。上水道が整備された地域でも、井戸は水道が利用できなくなった際の重要な代替水源であり、井戸の情報をデータベース化し共有すること、さらには周辺の自治体で相互に共有することが望ましい。その際に、上述のように水質や汚染に対する帯水層の脆弱性についても情報を集めることができれば、災害時により適切な水利用が可能となる。

また、現地調査では、セシウム汚染の現状と今後の長期的なセシウムの移行挙動を心配する声が聞かれた。その一方で、空間線量率の高い環境が日常となってしまう、原発事故の直後ほど放射線を気にしなくなったという声もあった。環境水に関して、これまで以上にセシウムの汚染が進行することは考えにくい、科学的根拠に基づいて生活環境の安全性を判断し、安心した暮らしを送ることができるようにするために、自然環境中でのセシウムの長期的な移行挙動や、調査地域で観測されるようなレベルの放射線量が人体に及ぼす影響を明らかにしていく必要がある。



第30図 水質の分布

Fig.30 Water quality distribution.



第 31 図 水素・酸素の同位体組成  
Fig.31 Isotope composition of D and  $^{18}\text{O}$ .



## 8. 今後の地下水利用と東南海地震にむけての提言

今回の調査において、沿岸域では水道水源や工業用水・農業用水として依然、地下水に対する依存度が大きいことが明らかとなった。また被災地の井戸を所有する住民に対して行った聞き取り調査において最も多かった意見や要望が、災害等の緊急時に所有している井戸の水が飲用水として使えるのかということであった。この質問の多さから災害時における水の確保の重要性を再認識させられた。一方で、この問いに関する回答は非常に難しい。一般的に飲用が可能か否かについては、保健所が行っている水質検査結果をもって判断される。一方で、今回の地下水リスク研究では、あくまで調査対象地域の地下水資源を学術的に評価することを目的としており、飲用の可否を判断するためのものではないため、被災地の個人のニーズとは必ずしも一致しない。しかしながら、被災地の今後の復興には地下水資源調査は必要不可欠であり、将来、再び災害が生じた際の地下水資源の評価の際にも比較対象として現在のデータが得られていることは大きなアドバンテージとなる。以上を踏まえた上で、近い将来に高い確率で起こるとされている東南海地震にむけての提言を以下にまとめる。

### 1) 地震による地下水の水質変化の可能性の把握

地震前には地下水が飲料用に適していたが、地震後も飲料用に適しているかどうかは今のところ明らかとなっていない。飲用を阻害する大きな要因として考えられるのは、津波などによる塩水侵入である。東南海地域では、予想されている津波の浸水範囲に飲用を対象とした緊急の災害用井戸や水道水源井が設置されているか否か、さらに設置されている場合、その地域の塩水侵入に対する帯水層の脆弱性評価などを事前に行っておく必要がある。

### 2) 災害時における積極的な地下水利用を可能にする設備と法令の整備

今回の震災あるいは調査を通じて、国内における地下水の価値を今後見直していく必要を痛感した。現在のところ国内の地下水利用は1950～60年代の地盤沈下をきっかけに制限されており、都市部においてその傾向は顕著である。一方で、地下水利用を過剰に制限しすぎることによる弊害も出てきている。地震などの自然災害の際に「水」は最も重要な物資であり、必要不可欠な存在である。これは飲用に限ったものではなく、衛生面を保つ上でも非常に重要である。東日本大震災や阪神淡路大震災においても、停電により長期間断水が生じ、生活用水を求めて河川や池にバケツやポリ容器を持つ人が列をなしていた現状がある。しかしながら河川や池が周辺にない地域も多々あり、また河川や池があっても安全に水

を得ることができない地域もある。さらに今回のような原発事故が生じた場合、地表水は大気由来の汚染物の影響を直接的に受けてしまう。震災時には、ガソリンなどの燃料不足や道路の損傷により車での移動が制限されることも考えられ、今後の高齢化社会などの社会情勢を考慮しても、身近に手に入る地下水を非常用水源として利用できるように設備と法令の両面から整備しておくことは必須だと考えられる。非常用水源としての井戸は電動ポンプを用いることなく手動ポンプで使用可能な浅井戸である必要があるが、浅層地下水は地表面からの影響を受けやすいため、必ずしも飲用として用いることはできないかもしれない。しかしながら、深井戸では震災などの非常時に集中的に地下水を利用した場合、地下水面の低下や地盤沈下を引き起こす可能性があり、場所によっては問題が生じた場合、回復までに時間を要する可能性もある。一方、浅井戸では上述したように汚染などの問題はあっても、地下水の循環が速く、なにかしらの問題が生じた場合でも長期間を要せず、現状復帰できる可能性がある。

大都市が集中する大規模な平野部では災害時に、山地における沢水や湧水などの自然水の利用が望めないことから、上記のように地下水の価値を、もう一度検討することを真剣に議論すべきであると考えられる。

### 3) 利用用途に応じた地下水資源評価

上述したように災害発生時には、まず始めに生命を守るための飲用水の確保が喫緊の課題である。次に二次災害として最も恐れなければならないことは、不十分な衛生環境から生じる疫病や伝染病である。これらの二次災害を最小限に抑えるためには、排泄物の適切な処理が重要となるが、インフラの使用が見込めないため、衛生面の確保は非常に難しい。今回の震災でも生活用水を求めて池や河川の水をくむ人々の姿が多く確認された。地下水を災害時の非常水源と考えた場合、水質的に飲用には使用できなくても生活用水には十分使用できる場合もある。このように地域の地下水をあらかじめ、利用用途に分けて評価しておくことも災害被害の抑制と素早い復興を成し得るための重要な手段である。

### 4) 土地利用に合わせた地下水リスク評価

地震が発生した際に生じる地下水汚染は、住宅地か、商業地か、工業地か、農地かなど土地利用によっても異なる。災害に対する帯水層の脆弱性と土地利用を合わせて考えることで、より有意義な地下水汚染リスク評価を行うことができるものと考えられる。

### 謝辞

調査を実施するにあたり、各地地元の皆様に心温まるご協力を得ましたことを先ずここに記して感謝申し上げます。突然の訪問にイヤな顔をする事なくご協力いただいただけでなく、震災時の経験を話してくださったり、お茶などでもてなしてくださったり大変暖かい歓迎を受けました。調査が順調に進んだことは、ひとえに地元の方々のご協力の賜物であったと重ねて御礼申し上げます。さらに、各市町村の水道関係の職員の皆様、農業組合、改良区、病院や工場などの事業者の皆様、農林水産省東北農政局の方々の協力のおかげでありました。ここに深く感謝の意を表します。

さらに、現地調査および分析は、信州大学工学部土木工学科の中屋眞司研究室の学生（青木秀斗氏、Phan Ha Hoang Minh さん、新谷 毅氏、平澤 遼氏）および、大

阪市立大学大学院理学研究科の益田晴恵研究室の学生（松山彩華さん、吉本幸平氏、淵田茂司氏、近岡史絵さん、香月雄介氏、渡部薫さん、研究生のEmily Evenさん）の協力の下、実施しました。ご協力に心より感謝申し上げます。

### 文献

K. Rankama and Th. G. Sahama (1950)  
*Geochemistry*. The University of Chicago Press,  
Chicago, 1-912.

## 陸前高田・気仙沼・南相馬および館林における地下水汚染リスク詳査研究 On site research of the risk evaluation for groundwater pollution at Rikuzentakata, Kesen-numa, Minami-souma and Tatebayashi

丸井敦尚<sup>1\*</sup>・森山哲朗<sup>1,2</sup>・平野智章<sup>1</sup>・井川怜欧<sup>1</sup>・小原直樹<sup>1,3</sup>・小野昌彦<sup>1</sup>・町田 功<sup>1</sup>・越谷 賢<sup>1</sup>  
Atsunao Marui<sup>1\*</sup>, Tetsuro Moriyama<sup>1,2</sup>, Tomoaki Hirano<sup>1</sup>, Reo Ikawa<sup>1</sup>, Naoki Kohara<sup>1,3</sup>,  
Masahiko Ono<sup>1</sup>, Isao Machida<sup>1</sup> and Masaru Koshigai<sup>1</sup>

**Abstract:** To make clear the impact of the Tohoku Earthquake to the groundwater environment by tsunami and an accident of Fukushima Daiichi Nuclear Plant, hydrogeological research were carried out in the east coast of Tohoku. The research project was constructed from groundwater study and geophysical sounding study. Groundwater research are operated in step by step, the first, overview work was operated in whole area by using rivers, springs and existing wells. The next, four points were selected to make a detail work with a drilling holes. And finally, evaluation of groundwater pollution risk were analyzed by groundwater flow simulations. The intensive hydrogeological work in some devastated area were described in this section.

**Keywords:** groundwater risk, evaluation, Tohoku Earthquake, east coast of Tohoku, onsite work

### 1. 詳査（詳細調査）研究とは

本調査では、先ず概査（概要調査）によって、地震による被害の大きかった太平洋側の東北4県（青森・岩手・宮城・福島）の沿岸域において、地表水や地下水の採水調査を行い、津波による塩水化や原発事故の影響など現在の地下水環境を正確に把握するとともに、地下水の地球化学データを軸に滞留時間を含む地下水の流動系を明らかにした。概査によってとりわけ被害の大きかった地域や今後の復興における地下水研究の要所となる地域を選定して、ボーリング調査を伴う詳細な地下水流同調査を実施することとなった。

具体的には、津波被害の大きかった岩手県陸前高田市や宮城県気仙沼市、さらには放射能汚染プルームの飛んだ福島県南相馬市や2つに分かれた放射能のプルームの合流点である群馬県館林市を対象に調査井を掘削し、地質試料や地下水試料を採取した。特に陸前高田市と気仙沼市においては津波による地下水塩水化の影響を、南相馬市においては地盤の沈下を伴う地下水流同変化の影響や放射性物質による地下水汚染の影響、館林市においては飛散した放射線汚染物質の影響を把握することに努めた。これらを分析・解析して、地下水流動の状況や汚染の進行状況を分析・確認し、今後汚染が広がるのか否か、あるいは人間による除染が必要か否かなどを判断する材料としている。この詳査研究は、今後の復興対策やさらなる地震災害発生時に有益となるような地下水データの提供に資することを目的とした。また今回の調査をもとに、今後の地震災害に対する地下水利用の観点からの提言をまとめている。

### 2. 陸前高田市および気仙沼市における詳細調査研究

#### 2.1 はじめに

地下水は量・質ともに優れた特性を有し、災害時の水源として有効であることが指摘されてきた（例えば、今後の地下水利用のあり方に関する懇談会，2007；国土交通省，2009）。東北地方太平洋沖地震による震災時においても、地下水は非常用水源として有効に活用された。一方で、津波によっては、井戸の設備損傷だけでなく、井戸水の塩水化が生じて給水再開の障害となった地域がみられた（谷口・中島，2013）。国内外における津波による帯水層の塩水化の報告や研究事例は多く（例えば、Vithanage et al., 2012；Leclerc et al., 2008；杉田，2012；中川ほか，2013），地震・津波による帯水層の塩水化のメカニズムは地盤沈下箇所からの漏水や浸透，地表面からの直接浸透，（開放）井戸からの浸透，塩淡水境界面の移動に分類されている（Vithanage et al., 2012；Leclerc et al., 2008）。ただし、これまでの研究は既設の井戸を対象としたものが多く、井戸のない自然地盤において津波による帯水層の塩水化を直接的に明らかとした事例は少ない。本報では津波に見舞われた岩手県陸前高田市、宮城県気仙沼市において、地震やこれに伴う災害に関わる地下水のリスクを把握し、震災復興・今後の災害対策に資する自然科学情報を取得するため、ボーリング調査・地層抜き取り調査を実施して地質・地下水試料を採取した。そして、各種試験・分析の結果から、津波の浸透した範囲、帯水層の塩水化状況、福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の影響などを考察した。

本報告は「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究 中間報告」に平成25年度以降の調査・研究実施内容を追記したものである

\*Corresponding author

1. 地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, AIST)
2. 現所属：サンコーコンサルタンツ (株) (Sunco Consultants Co., Ltd.)
3. 現所属：日本工営 (株) (Nippon Koei Co., Ltd.)



## 2. 2 調査地の概要

調査地は岩手県と宮城県の間境付近の、陸前高田市高田町・気仙町（以下、陸前高田地区とする）と気仙沼市東みなど町（以下、気仙沼地区とする）に位置する（第1図）。調査地および周辺の地形は、海岸線が屈曲に富み、数多くの湾入と岬が連なるリアス式海岸を特徴とする。北上山地の東斜面を流下して太平洋に注ぐ諸河川は流路長が短く、中・古生界の硬岩からなる斜面を侵食するため、排出土砂量が少なく、河口部の溺れ谷をあまり埋積していない。ただし、久慈湾、宮古湾、大船渡湾、広田湾、気仙沼湾など、比較的流域面積の広い河川の流入する湾奥部には沖積平野が発達しており（小池, 2005）、調査地においては沖積層が30~40m程度の層厚で堆積している（千田ほか, 1984；仙台通商産業局総務部開発業務課, 1983）。原口・岩松（2011）によれば、東北地方太平洋沖地震に伴う津波は河川沿いに数km程度上流まで遡上して、津波浸水高さは陸前高田地区の高田町・気仙町で14m程度、気仙沼地区の東みなど町で5m程度とされる。

## 2. 3 調査の方法

ボーリング調査は、不圧・被圧地下水または基盤岩に賦存する地下水、それぞれを対象とした観測孔を設けるため、陸前高田地区の高田町において3孔（BR-1：深度5m, BR-2：深度17m, BR-3：深度40m）、気仙町において2孔（BR-4：深度10m, BR-5：深度35m）、気仙沼地区の東みなど町において3孔（BK-1：深度10m, BK-2：深度

22m, BK-3：深度40m）の掘削を行った。BR-3, BR-5, BK-3では普通工法によるオールコアリングと孔内物理検層（温度、電気、自然ガンマ線、中性子、密度）を行い、これら以外では全深度でノンコア掘削を行い、VP75塩化ビニール管を挿入して観測孔として仕上げた。地層抜き取り調査は、表層の塩水化の詳細などを把握するため、中田・島崎（1997）に準じて実施した。

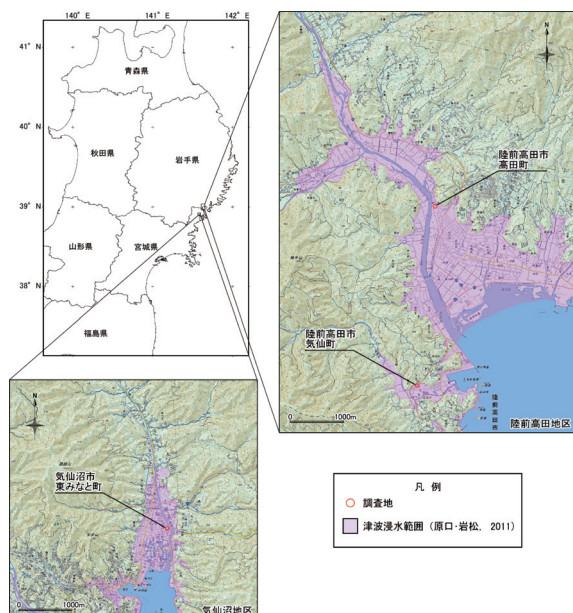
水理試験は、観測孔を仕上げた後に、地盤工学会地盤調査規格・基準委員会（2013）に準拠した多段階揚水試験、定流量連続揚水試験、回復試験を連続して実施した。水理試験の実施中には蛍光染料濃度と多項目水質計（株式会社堀場製作所製 W-22XD）を用いた地化学パラメータ（電気伝導度（EC）、pH、酸化還元電位（ORP）、溶存酸素（DO）、温度）の連続モニタリングを実施した。地下水の採水は、定流量連続揚水試験の後に、連続モニタリングによる地化学パラメータが概ね一定値に収束したこと、および掘削時に掘削水にトレーサーとして混入した蛍光染料濃度が3mg/L程度以下であることを確認して実施した。

ボーリングコアおよび地層抜き取り調査で採取した試料を対象に、JIS規格および地盤工学会基準に準拠した土質試験（土粒子の密度試験、土の含水比試験、土の粒度試験、土の湿潤密度試験）と化学試験（水溶性成分試験、土懸濁液のpH・電気伝導度試験）、JIS規格および環境庁告示に準拠した第二種特定有害物質（Cd, Cr(VI), CN, Hg, Se, Pb, As, F, B）の溶出試験・含有量試験を実施した。また、ボーリングコアから圧縮抽水法（例えば、木方ほか, 1999）によって採取した間隙水を対象にポータブル水質計（株式会社堀場製作所製 Twin pH, Twin Cond）によるEC・pHの測定、地下水試料を対象にJIS規格および環境庁告示に準拠した第二種特定有害物質、地下水年代トレーサー（ $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $\text{SF}_6$ , CFCs）、文部科学省（1992）に準拠した放射性物質（ $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ）の濃度測定を実施した。

## 2. 4 結果と考察

各調査地における帯水層構造を第2図~第4図に、水理地質構造と東北地方太平洋沖地震による地下水への影響を第1表に示す。

陸前高田地区の高田町は、地下水流動系における位置づけは涵養~流動域にあたり、250m圏内の地形勾配は1/10程度である。調査の結果から、細~中粒砂、砂礫および玉石混じり砂礫からなる沖積層と白亜系の花崗岩が分布し、難透水層が挟在しないことが明らかとなった。また、帯水層を流動する地下水の滞留時間は表層部で17年程度、下位の砂礫層で26年程度と推測された。津波の浸透した推定範囲は深度2.8m程度またはこれに深まで浸透した後に洗い出しが生じている可能性があり、福島第一原子力発電所の事故に伴う地下水への影響



第1図 調査位置図

Fig.1 Site map of the study.



は認められなかった。

陸前高田地区の気仙町は、地下水流動系における位置づけは涵養～流動域にあたり、250m 圏内の地形勾配は1/100 程度である。調査の結果から、地質は基底に砂礫を伴う礫混じり砂質シルトを主体とする沖積層と風化した礫岩と泥岩からなるペルム系が分布し、表層は不均質なシルト等からなる難透水層に覆われ、帯水層は沖積層基底の砂礫とペルム系の風化礫岩からなることが明らかとなった。また、帯水層を流動する地下水の滞留時間は20 年程度と推測された。津波の浸透した推定範囲は深度1m 程度までに限られ、福島第一原子力発電所の事故に伴う地下水への影響は認められなかった。

気仙沼地区の東みなど町は、地下水流動系における位置づけは流動～流出域にあたり、250m 圏内の地形勾配は1/1000 程度である。調査結果から、シルト、砂質シルト、中～粗粒砂、砂礫および玉石混じり砂礫からなる第四系と粘板岩と石灰岩からなるペルム系が分布し、帯水層は層厚9m 程度の難透水性の礫混じりシルト層を境として上部と下部の砂礫層からなることが確認された。また、帯水層を流動する地下水の滞留時間は前者で45 年程度、後者で30 年程度と推測された。津波の浸透した推定範囲は深度4.5m 程度であり、福島第一原子力発電所の事故に伴う地下水への影響は認められなかった。

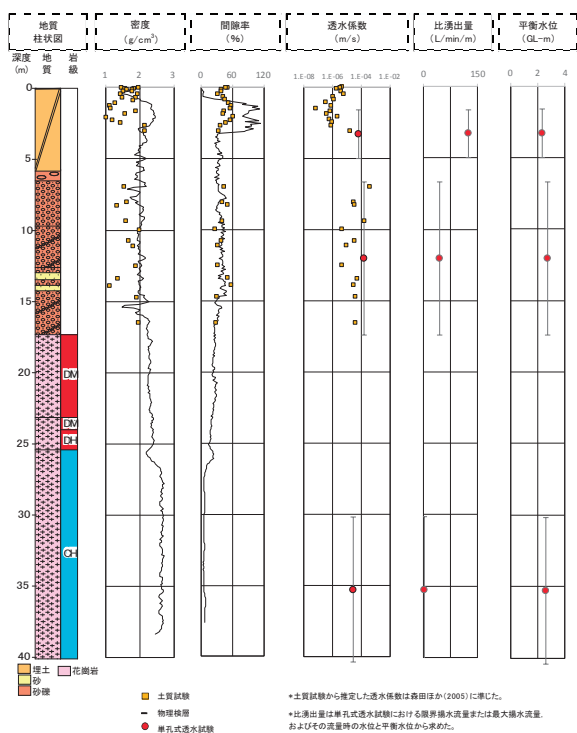
難透水性の地層が分布する陸前高田地区の気仙町と気仙沼地区の東みなど町においては難透水性の地層によって津波の浸透が遮断され、これら以深には影響のおよんでいないことが明らかとなった。難透水性の地層が分布しない陸前高田地区の高田町においては、Na, Cl, Br からは津波の浸透した範囲は深度2.8m 程度であることが推定されるものの、コア間隙水のEC が大きく、より深い深度まで浸透した可能性が考えられる。ただし、地下水のEC は小さな値を示しており、地形条件から導水勾配が他の調査地より大きいこと、地下水年代が新しいことを考慮すると、地下水の流動速度が大きく、洗い出しが顕著に行われている状況にある可能性が考えられる。

調査の結果を踏まえると、地下水におよぶリスクを低減するには、水理地質構造（例えば、難透水性の地層の有無など）や地下水の流動状況を的確に評価するとともに、津波の影響を受け難い井戸構造とすることが必要不可欠と考えられる。また、既設の井戸は津波が帯水層へ達する主要な経路となる可能性が懸念され、井戸の構造や水理地質の記録を再確認するとともに、適宜メンテナンスを行うことも必要と考えられる。なお、推定された地下水の滞留時間（数十年程度）等を考慮すると、福島第一原子力発電所から放出された水溶性の放射性物質（例えば、<sup>3</sup>H や放射性ストロンチウム）が今後に出検される可能性があり、地下水について継続的なモニタリングが求められる。

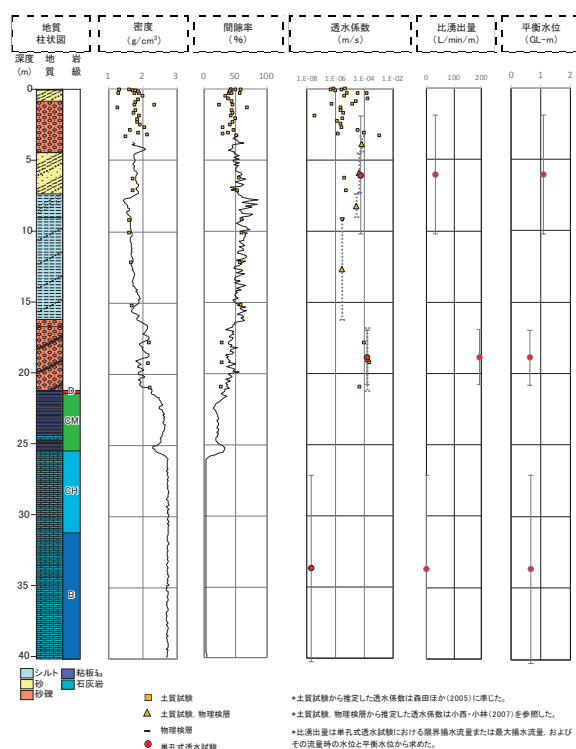
第1表 水理地質構造と帯水層への影響

Table 1 Hydrogeology and impact to aquifer.

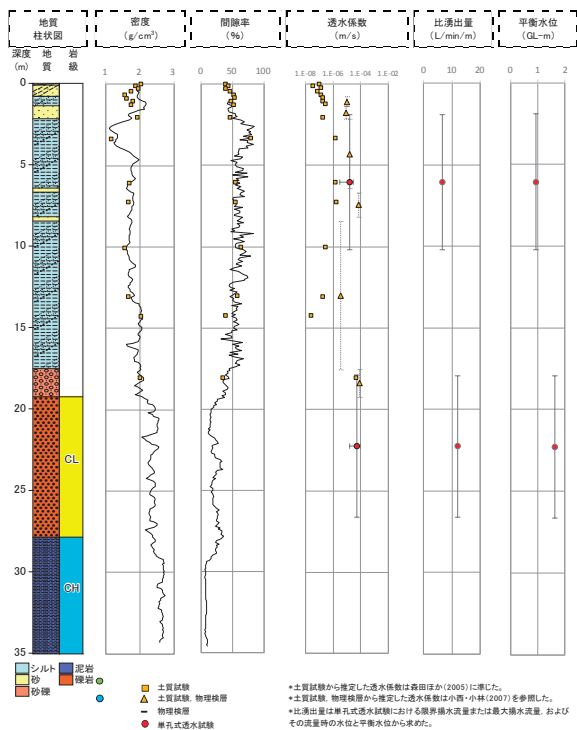
	陸前高田 (気仙町)	陸前高田 (高田町)	気仙沼 (東みなど町)	
地下水流動系における位置	涵養～流動域	涵養～流動域	流動～流出域	
地形勾配 (250m圏内)	1/100	1/10	1/1000	
帯水層の透水性	10 <sup>4</sup> m/s	10 <sup>3</sup> m/s (第1帯水層) 10 <sup>4</sup> m/s (第2帯水層)	10 <sup>3</sup> m/s (第1帯水層) 10 <sup>4</sup> m/s (第2帯水層)	
水理地質の構造	多孔質、単層	多孔質、単層	多孔質、多層	
難透水層の有無	有 (差層に亘く分布)	無	有	
地下水の滞留時間	20年	17年(第1帯水層) 26年(第2帯水層)	45年(第1帯水層) 30年(第2帯水層)	
津波による		有	有	
帯水層への影響	無	(浅層のみ、不明瞭)	(浅層のみ)	
放射性物質による帯水層への影響	無	無	無	



第2図 陸前高田地区高田町における地質と物性値  
Fig.2 Geology and physical property of Takata in Rikuzentakata.



第4図 気仙沼地区における地質と物性値  
Fig.4 Geology and physical property of Kesennnuma.



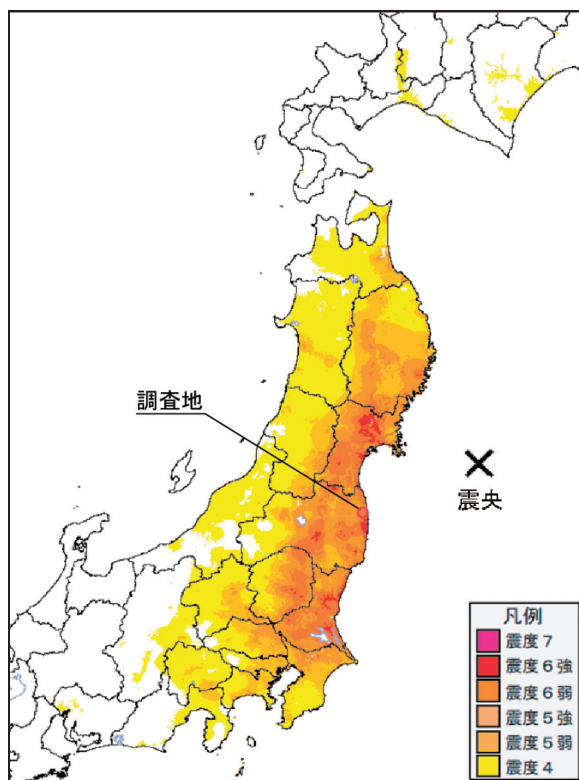
第3図 陸前高田地区気仙町における地質と物性値  
Fig.3 Geology and physical property of Kesencyo in Rikuzentakata.

### 3. 南相馬市における詳細調査研究

#### 3.1 はじめに

東北地方太平洋沖地震（マグニチュード 9.0）では、宮城県栗原市で震度 7、宮城県、福島県、茨城県、栃木県で震度 6 強を観測したほか、北海道から九州地方にかけての広い範囲で震度 6 弱～1 を観測した（気象庁、2012）。東北地方太平洋沖地震による災害は、津波と福島第一原子力発電所の事故によるものが主要を占める（後藤ほか、2011）。一方で河川堤防などの土構造物、新幹線高架橋などの構造物、家屋被害なども多く発生した（例えば、土木学会東日本大震災被害調査団、2011）。

福島県南相馬市は深度 6 弱～強の地震があった地域にあたる（気象庁、2012；第 5 図）。南相馬市原町区では、地盤沈下・地下水観測井による監視が継続されてきたが、東北地方太平洋沖地震に伴って観測機器が破損して観測の継続が不可能となった（南相馬市生活環境課、2013）。そのため、被災した観測井の状況を把握するとともに、観測井の修繕・観測機器の再設置を実施した（第 6 図）。そのうち、本報では被災した観測井の改修・破損状況などについて述べる。

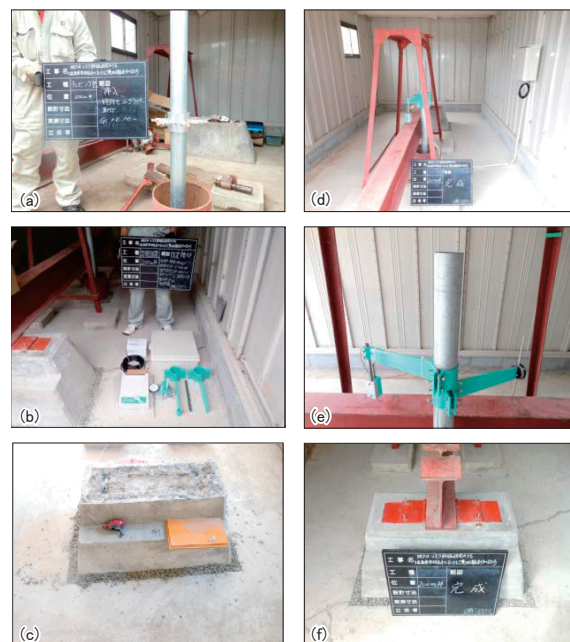


第 5 図 調査位置と震度分布

Fig.5 Site of study and distribution of Shindo.

#### 3.2 調査地の概要

調査地は福島県南相馬市原町区大甕地区に位置し、高度 200m 以下の丘陵・段丘・沖積低地が、阿武隈山地から太平洋に注ぎ込む河川に沿うように東西方向に発達する。地質は、新第三紀鮮新世の大年寺層を基盤として、第四紀中期～後期更新世の段丘堆積物、後期更新世～完新世の沖積層が河川沿いに分布する（久保ほか、1990）。調査地における地盤沈下は、昭和 30 年代から農業地帯である太田川下流の沖積低地を中心に顕在化し、水田・導水路・道路等の不等沈下や地割れ、建築物の倒壊や傾斜、井戸の枯渇などの被害面積約 2,500ha におよぶ被害を生じた（東北農政局計画部、1990）。水準測量による大甕地区における昭和 30 年から平成 8 年までの累計沈下量は約 144cm であり、昭和 49 年以降は鈍くなる傾向にある。調査対象の大甕観測井は昭和 49 年に地盤沈下量と地下水位を観測するために設置されたものであり、200m 井（スクリーン区間：深度 135.5～157.5m）と 30m 井（スクリーン区間：深度 11.0～27.5m）からなる（東北農政局計画部、1990）。大甕観測井では昭和 49 年から昭和 63 年までに 254mm の地盤沈下量を記録しており（東北農政局計画部、1990）、地下水位は昭和 59 年の水源転換を境に 30m 井で 6～8m 程度、200m 井で 12～14m 程度の上昇（地下水位の回復）が認められ、これ以後に大きな水位の変化は認められていない（南相馬市生活環境課、2013）。



第 6 図 地盤沈下観測井の状況

Fig.6 Observation well of land subsidence.

### 3. 3 調査の方法

井戸内では、洗浄前の中水テレビカメラ調査、井戸の洗浄、水理試験、洗浄後の中水テレビカメラ調査、地下水の水質分析を実施し、井戸の破損状況などを把握した。

水中テレビカメラ調査は、ケーシングパイプの内側の付着物の有無、ケーシングパイプ・スクリーン接続箇所 の状況、腐食・破損状況を把握するために、200m 井・30m 井のそれぞれで洗浄前と洗浄後2回の計3回実施した。

井戸の洗浄は、水質分析に影響の少ない機械的洗浄工法（例えば、水井，2008）を実施した。適用した洗浄工法は、ブラッシング・スワビング・特殊ジェッティング洗浄とした。また、井戸の底に堆積した沈殿物を浚渫した。

水理試験は、洗浄作業などによる濁りを排水した後に、地盤工学会（2013）に準じた方法によって、予備揚水試験、段階揚水試験、連続揚水試験、水位回復試験を連続的に実施した。なお、連続揚水試験においては、揚水する地下水の地化学パラメータ（温度、pH、電気伝導度、酸化還元電位）を連続的に測定し概ね一定に収束したと

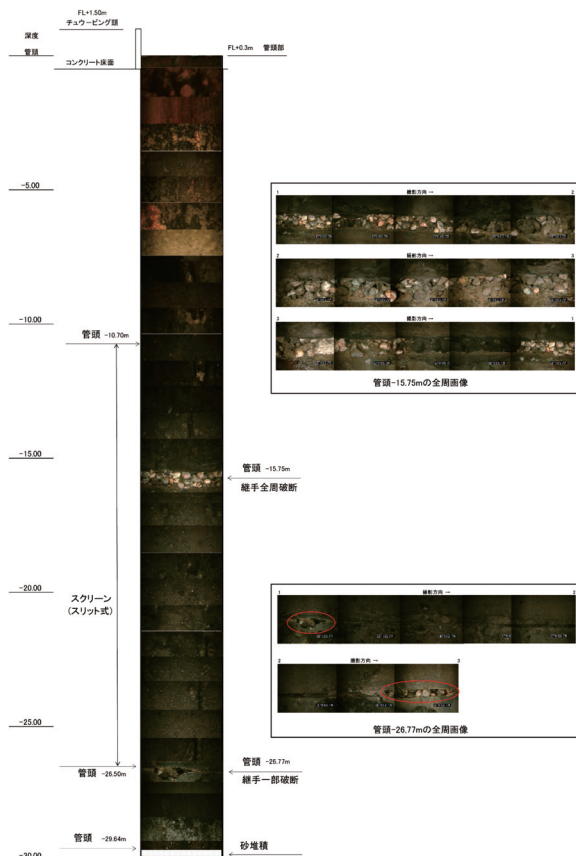
判断された後に、地下水の採水を実施した。採取した地下水に対しては、年代トレーサー（ $^{14}\text{C}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $\text{SF}_6$ 、CFCs）と放射性物質（ $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{131}\text{I}$ ）の分析を実施した。

### 3. 4 結果と考察

水中テレビカメラで確認された 30m 井の破損状況を第7図に示す。井戸の洗浄前では井戸内の水の濁りとともに、孔底付近に砂が堆積（30m 井：厚さ 3m 程度、200m 井：厚さ 2m 程度）していることが確認された。洗浄後では 200m 井では破損が認められなかったものの、30m 井でスクリーン区間のケーシングパイプの継ぎ目の破損が確認された。破損は深度 15.75m と深度 25.77m の2箇所 で生じており、深度 15.75m では全周にわたり開口していた。破損は上下方向の開口を主体としており、著しい地盤沈下の進行していた地域であることも考慮すると、東北地方太平洋沖地震のみで生じた可能性は小さいものと推測される。

水理試験による透水係数は、30m 井（埋没した段丘堆積物を対象）において  $10^{-5}\text{m/s}$  オーダー、200m 井（大年寺層を対象）で  $10^{-6}\text{m/s}$  オーダーであった。中馬ほか（1983）によれば、調査地および周辺における埋没した段丘堆積物の透水係数は  $10^{-4}$  オーダー、大年寺層（中馬ほか（1983）では竜の口層とされる）の透水係数は  $10^{-4}$  オーダーとされ、これらと比較して本報で得られた透水係数は 1~2 オーダー程度小さい値を示した。一般的に井戸は経年劣化に伴い揚水障害が発生するため、改修工事が井戸の寿命を保つために必要とされる（例えば、水井，2008）。大甕観測井では、洗浄前の中水テレビカメラ調査で水の濁りや孔底に砂が堆積していることが確認され、透水係数が小さい値を示した要因としては観測井周囲での目詰まりが推測される。本報では、水質分析に影響を及ぼす可能性があるため、井戸の洗浄に薬品洗浄工法を適用しなかったものの、複数の洗浄工法を併用することが井戸の継続的な利用に有効であることが示唆される。

地下水の滞留時間は 30m 井で 30 年程度、200m 井で 60 年以上であることが推定された。井戸の破損が確認された 30m 井においても著しく新しい滞留時間を示しておらず、破損が地下水に大きな影響（漏水など）を及ぼしていないことが示唆される。また、放射性物質は 30m 井、200m ともに検出下限値未満であり、地下水に福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の影響が及んでいないものと考えられる。



第7図 水中映像

Fig.7 Camera view in the well.



大年ほか(2013)は東日本大震災で地震動と津波の複合被害を受けた井戸の現地調査を行い、井戸の機能喪失が認められないとし、地下水を利用した給水インフラ整備の技術的可能性を示した。本報の結果はこれを支持するものと考えられる。ただし、これまでの震災時には、液状化によって井戸本体の破損(高村・河野, 1996)や井戸の埋没(草野, 1989)が認められており、井戸を活用した給水インフラを整備するにおいては液状化の危険度を考慮することも必要と考えられる。また、既設の井戸は経年劣化による井戸機能の低下が生じている可能性があるため、定期的なメンテナンスが求められる。

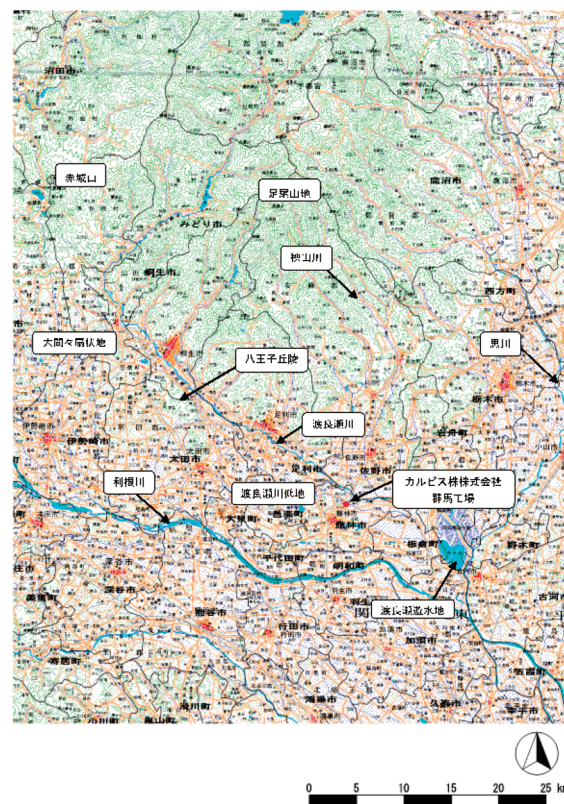
#### 4. 館林市における詳細調査研究

##### 4.1 はじめに

東北地方太平洋沖地震に伴う津波によっては、沿岸域の多くの地域で津波を原因とする塩害が地下水のリスクとして挙げられている(例えば、中川ほか, 2013; 杉田, 2012)。一方で福島県を中心に福島第一原子力発電所の事故を原因とする放射能汚染が問題視されおり、当該研究においても、福島県を中心とした概要調査においてはこれを取り上げた。放射能汚染は事故当時、北西方向に拡大したが、その後の大気の影響を受け、大きく2つのプルームとなって拡大している(例えば、文部科学省, 2014)。ひとつは福島第一原子力発電所から北西に伸びその後福島県中通り地方を南下したもの、もうひとつは太平洋沿岸に沿って南下して関東平野を通り抜けて東京湾に達した後に北上したものである。この2つのプルームは群馬県館林市周辺で合流して、群馬県水上市方向へとさらに北上したことが知られている。館林地区を対象とした詳細調査研究では、放射性物質の地下水に及ぶリスクなどを把握するために、観測井を掘削して地質・地下水試料を採取、各種分析に供するとともに、経時的な地下水観測を行ってきた。また、地下水の流動環境の推定および地下水利用の適正化に資するために広域の地下水流動解析を実施した。

##### 4.2 調査地および周辺の地形・地質の概要

調査地および周辺は、栃木県と群馬県との県境に位置し、渡良瀬川が東西に貫流して、北部には足尾山地の山々がそびえ、この山地の裾野が関東平野に移行するところにある(第8図)。渡良瀬川の支流である飛駒川、野上川、秋山川等がひとつとなり、下流には遊水池がある沖積低地となっている。関東平野をとり囲む山地は、主として固結した先第三紀の地層で形成されている。関東平野には、沈降した先第三紀以降の地層が厚く堆積している。関東平野の地質の層序と構造は、地表の地質調査と各種抗井調査(福田ほか, 1964; 鈴木・小村, 1999



第8図 調査位置

Fig.8 Site of the study.

など)や物理探査(瀧野, 1995 など)によって、その概要が明らかになってきており、新第三系以降の層厚は最大で4,000mを超える(鈴木, 2002 など)。平野を構成する新第三系以降の地層は、房総半島と三浦半島に露出する海成層を模式として、下位から新第三系下部中新統の保田層群、新第三系中部中新統～下部鮮新統の三浦層群、新第三系上部鮮新統～第四系下部更新統の上総層群、第四系中部更新統の下総層群とこれらの相当層に大きく区分されている(角田・堀内, 2005)。また、これらの上位には、丘陵や台地に第四系上部更新統の関東ローーム層が、低地に第四系上部更新統～完新統の沖積層が薄く分布する。

関東平野における主要な帯水層は半固結～未固結状態にある上総層群の相当層以上の地層からなり、中でも下総層群の相当層が非常に有能な帯水層となっている。下総層群の相当層(成田層群, 東京層)は、過去の海水準変動に伴い堆積した扇状地成～浅海成の地層である。岩相は半固結～未固結の砂礫と粘土が繰り返り積み重なる互層からなり、砂礫部に被圧地下水を多く賦存する。台地に分布する段丘堆積物は、地下水の涵養域であるとともに不圧帯水層を形成し、特に扇状地性層からなる部分が良好な帯水層である。沖積層は、下部に砂や礫か

らなる粗粒な堆積物が多く、被圧帯水層を形成しているほか、挟在する砂層が不圧帯水層を形成している。ただし、沖積層の分布・層厚は他の地層に比較して規模が小さく、帯水層としての能力は劣る。

本地域における生活用水、工業用水及び農業用水の水源の多くは古くから地下水に依存しており、今後も地下水利用は増大するものと予想される。現在地下水汲上げによる目立った障害は発生していないが、昭和39年当時存在していた自噴井が全面的に停止している。東京通商産業局総務部開発業務課（1981）によれば、当時の地下水利用状況は工業用水で95,643m<sup>3</sup>/日、かんがい期の農業用水で1,489,597m<sup>3</sup>/日もの取水が行われていたことが記録されている。また、平成22年度地盤変動調査報告によれば、県全体で継続して地盤沈下の傾向が見られ、県東南部地域においては10ミリメートルを超える沈下が確認されている。

#### 4.3 観測井の掘削、水理試験

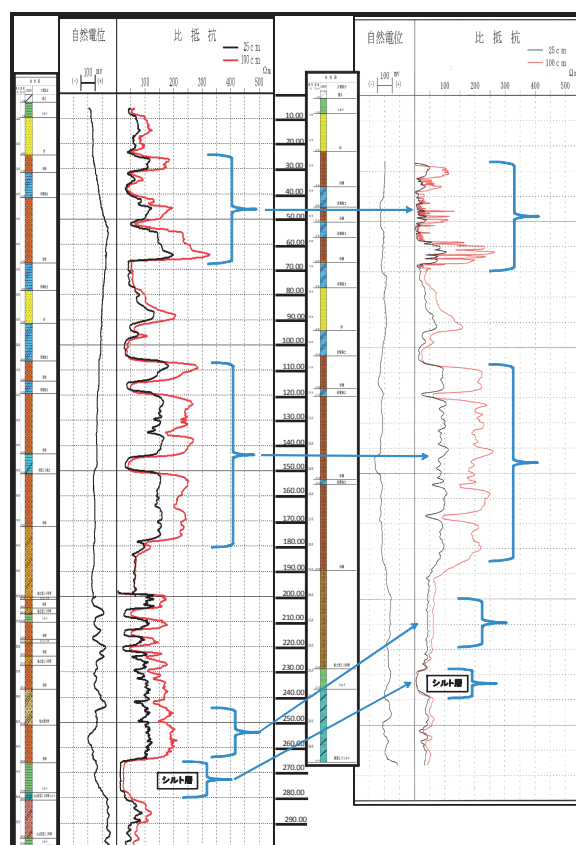
観測井の掘削は、カルピス株式会社群馬工場において、トリコン掘削によるノンコアボーリングを深度200mまで行い、400A-SGP管を深度27mまで、200A-SGP管を深度200mまで挿入して観測井として仕上げた。スクリーン区間は掘削後に裸孔の状態を実施した電気検層の結果に基づき設定した。水理試験は観測井として仕上げた後に、段階揚水試験（最大揚水量200L/min）と回復試験を行い、透水性を把握した。

既設の観測井（DD-1孔）と掘削した観測井（DD-3孔）の比抵抗値の比較を第9図に示す。

DD-3孔の比抵抗値は、5.44～260Ω・mの範囲に分布した。比抵抗値から地質は70～95・95～105・105～190・190～230・230～237・237～266m間に分帯される。比抵抗値が概ね60Ω・m以下の部分は粘土・砂礫混じり粘土層が主体で、比抵抗値が150Ω・m以上の部分が砂礫・礫層で帯水層と推測される。DD-1孔と比較すると、比抵抗値の深度プロファイルは深度200mまで概ね同様の傾向であるが、深度200m以深では差異を示した。差異を示す要因としては、地質状況と地下水の水質が異なる可能性が考えられる。

スクリーンを設置した区間の透水係数は $8 \times 10^{-6}$ m/sであり、一般的な土と比較すると砂-シルト-粘土混合土に相当し（地盤工学会，2004）、透水性は低い程度と判断された。段階揚水試験時に明確な限界揚水量を把握することはできなかったものの、設置した観測井の限界揚水量は少なくとも200L/min以上と推測された。なお、本報では単孔による水理試験であり周囲への影響が把握できていないため、適正揚水量を把握するには観測井を設けた揚水試験を実施する必要がある。

#### 4.4 地下水流動解析



第9図 掘削調査記録

Fig.9 Record of the boring.

カルピス株式会社群馬工場および周辺に流入する地下水の流動環境の推定及び地下水利用の適正化に資するために、同工場が位置する渡良瀬川低地を中心とした文献調査、水質調査、地下水流動解析を実施した。本地域の地下水流動は主に更新統中において活発であることが予想されたため、本解析では主に更新統以浅を中心とした詳細な地下水流動解析を試み、これによって群馬工場に流入する地下水の安全性の評価や適正揚水量などを把握することを目的とした。

#### 4.4.1 文献調査

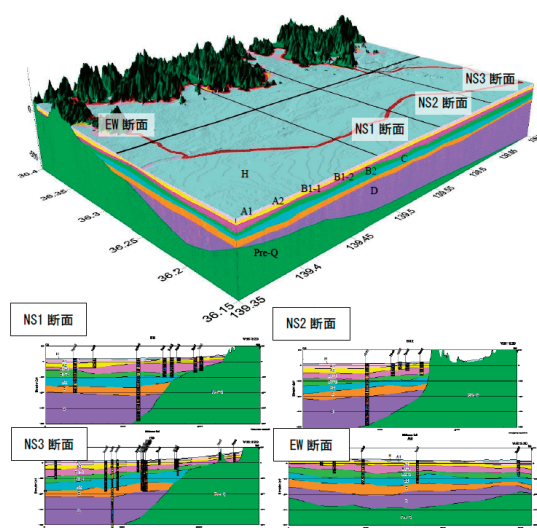
##### (1) 地質構造の解析

関東平野中央部に分布する鮮新～更新統の層序は、露頭がほとんど認められないことから、主にボーリング結果に基づいて区分されてきた（たとえば、森川，1962；新堀ほか，1970；菊池・貝塚，1972；堀口，1988，1994；平社，2008）。そのうち、堀口（1988；1994）は、地盤沈下観測井9孔のコアについて、堆積物が粗粒から細粒へ変化する堆積サイクルに着目するとともに微化石等の各種の分析結果を加味して、地下に分布する鮮新～更新統をA、B1、B2、C1、C2、D層に層序を区分した。その後、平社（2008）は、深度640mまでの25孔のコアを



対象として、堀口（1994）のB1, A層内に明瞭な4つの堆積シーケンスを認識することで下位からB1-2, B1-1, A2, A1に細分し、ボーリング間の層序対比を行って、各層の分布を広域的に示した。

平社（2008）による層序は、砂礫などの粗粒相から泥などの細粒相へ変化する上方細粒化の堆積サイクルを基本として区分されており、本地域の帯水層構造を表現するのに適すると考えられる。そのため、詳細な三次元モデルは、堀口（1994）と平社（2008）に示された本地域に位置するボーリング柱状図を基準として構築した。そして、ノンコア掘削のため地質情報の精度は劣るものの、深部まで記載される深井戸資料（国土庁土地局, 1995; 1997; 国土交通省, 2014; カルピス株式会社, 私信）との対比に基づいた複数の地質断面図を作成・対比することで、第10図に示す各層の三次元地質モデルを構築した。なお、各層は砂礫を基底として泥へと変化する一連の堆積サイクルを基準に区分したが、B1-1層以



第10図 3次元地質構造解析結果

Fig.10 Three dimensional analysis of geology.

上では山地に向かうほど粘土の発達が乏しくなる傾向にあり、特に渡良瀬川上流部では砂礫が主体をなす。

#### (2) 気象資料

地域を代表する気象観測所としては、気象庁館林観測所が挙げられる。館林観測所における1979～2010年の年平均雨量は1,115.6mmであり、8～9月の夏季の雨量が多い。また、年間の気温変動は3.4～25.1℃であり、年平均気温は14.0℃を示す。

#### (3) 井戸台帳の整備

渡良瀬川低地帯を対象として、国土庁土地局国土調査

課が所有する深井戸台帳データ、各自治体により提供を受けたHP公開資料・未公表資料、および本年度現地にて実施した井戸調査結果を取りまとめた井戸台帳を作成した。本井戸台帳には、計77地点（足利市2地点・佐野市36地点・邑楽郡13地点・太田市12地点・館林市14地点（内、カルピス所有井戸7地点））の井戸データが格納されており、位置情報・井戸深度・スクリーン深度・井戸口径・揚水量・地下水位・水理試験結果などの内容が収録されている。このうち18地点の井戸において地下水位の連続観測が行われている。なお、管理番号は今回の解析範囲外に位置する井戸も含めた通し番号で示しており、頭文字のアルファベットはASが足利市、SNが佐野市、OUが邑楽郡、00が太田市、TTが館林市にあたる。

当地域の鮮新統以降の水理地質構造は砂泥層が幾重にも重なる複雑な構造を示すが、全般的に透水性が高く、およそ深度200mまで良好な帯水層が存在する。収集した井戸のスクリーン深度を今回構築した詳細モデルに適用した場合、A1, A2, B1-1, B2, C層では4割前後、B1-2層では1/4の高い割合で取水が行われており、当地域では多深度に帯水層が存在することが裏付けられる。なお、該当する地層まで達していない箇所は灰色カラムで示しており、設置割合計算の母数から除いている。モニタリングが実施された平成16年度より地下水位の大きな変動はなく、安定的な水量が確保されているものと考えられる。また、月別の地下水位変動状況によれば、5～9月に多くの地点で水位低下が見られ、夏季に地下水利用が活発である事が想定される。

#### 4.4.2 水質調査

水質調査は、2012年7月23～24日、7月30～31日の4日間にかけて、表流水・地下水試料を採取した。採取した試料は、地下水22試料、河川水7試料の計29試料であった。試料採取にあたっては、GPS座標、水温、電気伝導度(EC)、pH、溶存酸素(DO)、酸化還元電位(ORP)を現地で測定した。試験室では、水素同位体比( $\delta D$ )、酸素同位体比( $\delta^{18}O$ )、セシウム134及びセシウム137( $^{134}Cs$ 及び $^{137}Cs$ )、炭酸水素イオン( $HCO_3^-$ )、フッ素イオン( $F^-$ )、塩化物イオン( $Cl^-$ )、亜硝酸イオン( $NO_2^-$ )、臭素イオン( $Br^-$ )、硝酸イオン( $NO_3^-$ )、硫酸イオン( $SO_4^{2-}$ )、リン酸イオン( $PO_4^{3-}$ )、リチウムイオン( $Li^+$ )、ナトリウムイオン( $Na^+$ )、カリウムイオン( $K^+$ )、マグネシウムイオン( $Mg^{2+}$ )、カルシウムイオン( $Ca^{2+}$ )を測定した。

今回実施した水質分析結果のうち、河川水、深度50m以浅、深度50～200m、深度200m以深井戸水のヘキサダイアグラムを第11図に示す。なお、放射性セシウムは全ての試料で検出下限値以下であった。

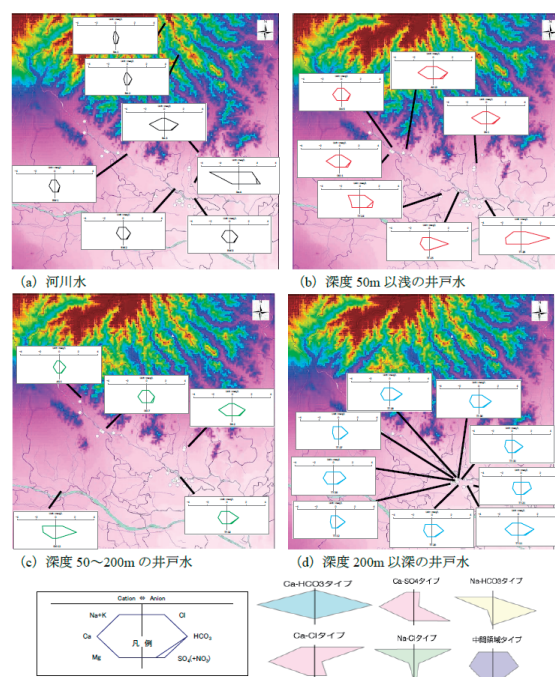
水質は、秋山川の河川水でRA-3, 4などの下流に行くほど、溶存量が増えていく傾向が確認され、この付近で

地下水から河川水への涵養が行われている可能性が考えられる。また、RA-4 はナトリウムや硝酸が高い特性をもち、周辺の間人活動の影響（例えば、農薬の散布など）が考えられる。本地域の地下水は全般的にCa-HCO<sub>3</sub>型の水質特性を持つことがわかった。また、太田市で採取された地下水（00-1, 5）は渡良瀬川上流の河川水（RW-1）と似た傾向の水質特性を持つことから、河川水と地下水の交流関係が活発であることが想定される。TT-24 はナトリウムや硝酸が高い特性をもち、周辺の間人活動の影響が考えられる。深度が深くなるにつれて溶存イオン量の微増がみられるものの、水質組成は概ね似た傾向を示し、浅部から深部にかけての地下水流動が存在する可能性が考えられる。河川水試料の酸素水素同位体比は秋山川、渡良瀬川の両者で上流側に向かうほど軽くなる。また、太田市で採取された地下水特性は渡良瀬川上流(No. 23)、渡良瀬川下流(No. 29)と似た傾向を示し、渡良瀬川の伏流水である可能性が高い。館林市や佐野市で採取した地下水は、両水系の特性を示しており、これらが混合して形成された地下水であることが考えられる。

#### 4. 4. 3 地下水流動解析

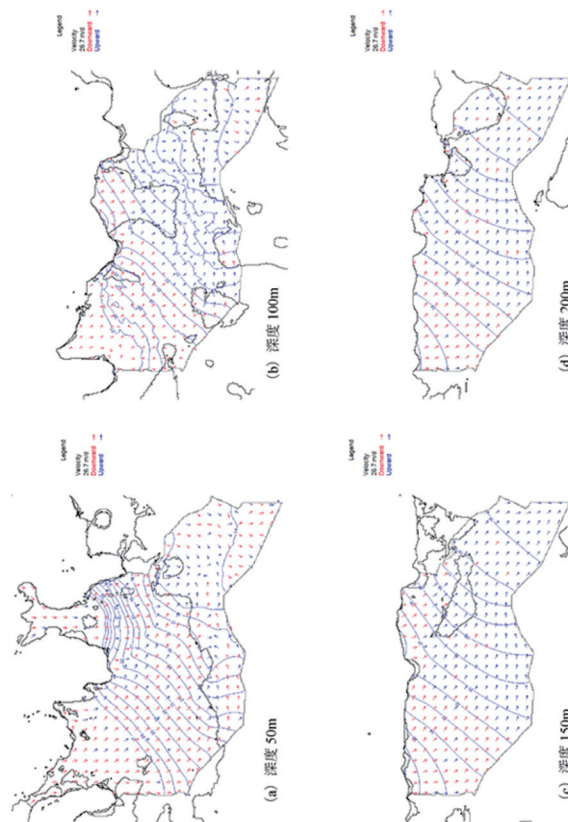
地下水流動解析に用いる解析プログラムは、USGS が開発した三次元有限差分地下水解析モデルであるMODFLOWとした。地下水流動解析の解析範囲（解析面積414.6km<sup>2</sup>、深度方向領域標高131.00～584.00m）は、主要河川および地下水位の尾根部、水理基盤境界（先第四系を水理基盤と仮定）に設定した（第12図）。物性値は地質境界面を基準に解析グリッドの重心位置に各地層の物性値を設定した。地下水流動解析結果に最も影響を与えるパラメータである透水係数は、既往文献を参考に初期値を決定し、観測井戸の自然水位を再現するように試行錯誤的に検証を行った。なお、透水係数の異方性については全ての層で0.1であるものと仮定した。比貯留係数はデータが存在しないため、モデルで一律に1.0×10<sup>-4</sup>/mとした。境界条件は一級河川に相当するセルについては、地表面標高の固定水頭を与えた。モデルの側面と底部については、不透水境界を設定した。東京通商産業局総務部開発業務課(1981)によれば、当地域の有効降雨量は443mm/年(1.21mm/日)であり、本検討ではこの量を地下水涵養量とみなし、モデル上部へ一様に与えた。構築したモデルに、地表面標高にて初期水位を設定し、時間ステップ1日とした上で、10万年間の計算（≒定常解析）を行った。計算結果は概ね収束したことが確認され、定常状態の計算結果を得た。

透水係数の再現解析として12ケースの計算を実施し、最適な解析ケースとして平均二乗誤差が最小となるケース（Case 01）を選定した。深度50m、100m、150m、200mの等水頭及び流向分布を第12図に示す。水頭等高



第11図 水質ダイアグラム

Fig.11 Water quality of the area.



第12図 地下水流動解析の結果

Fig.12 Groundwater flow analysis.



線図は1m間隔で表示されており、赤色の流速ベクトルは鉛直下向き流れ、青色の流速ベクトルは鉛直上向き流れをそれぞれ示している。また、黒色境界は地質境界の外形を示したものであり、深部に行くほど帯水層小さくなることわかる。地下水流動解析によって得られた地下水流速から、群馬工場7井に流入する地下水の軌跡をMODPATH Ver. 5.0のReverse Trackingに基づき算出すると、群馬工場の観測井の涵養標高は、標高約16~52mという位置で涵養されているものと想定された。カルピス1, 2, 5, 7号井で100年を超える長い滞留時間を有する地下水が存在する一方で、カルピス3, 4, 6号井で100年未満の短い滞留時間のものも存在する。また、涵養域も渡良瀬川、名草川、旗川と様々な河川を源とすることがわかり、群馬工場に流入する地下水は様々な経路を経由した地下水が複雑に混合したものであることが考えられた。

地下水流動解析から、群馬工場に流入する地下水の涵養時間は、平均130年程度と推測された。このような地下水流動環境をもつことから、東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故に伴い、環境中に放出された放射性物質による地下水の汚染は、その影響がかなり小さくなることが予想される。ただし、今後も影響を及ぼさないとも限らないため、定期的な水質のモニタリングを継続していく必要が考えられる。本検討は、限られたデータの中で行われた推定であり、現実を忠実に表現しているとまではいかない。現況の更なる把握のためにも、広域的な水文調査等が必要だけでなく、地域の地下水利用状況が正確に把握されることが望ましい。

## 5. 詳査研究のまとめ

研究開始当初、東北地方の太平洋岸では津波による塩害や福島第一原子力発電所の事故を原因とする放射能汚染が進行していると考えていたが、いずれも表層の限られた部分においてだけ汚染が起こっていることがわかってきた。これは東北地方の太平洋岸沿岸域においては第四紀層内に一様に広い範囲で粘土層などの細粒物質層が広がっており、汚染を食い止めていると考えられる。現状では表層部の復旧工事などが行われているため、十分な対策が取れていないところもあるが、今後の本格的な開発に備えて、深層の地下水に汚染を到達させない対策をとる必要がある。

## 謝辞

現地調査を行うにあたり、陸前高田市・気仙沼市・南相馬市・館林市の地元の方々、陸前高田市、気仙沼市、岩手県、宮城県、経済産業省東北経済産業局の関係各位

には大変なご協力をいただきました。とりわけ、カルピス株式会社群馬工場には調査用地のご提供をいただきました。ここに記して深く謝意を表します。

## 文献

- 中馬教允(1983) 福島県原町市の地盤沈下とその対策. 地質学論集, no.23, 67-79.
- 土木学会東日本大震災被害調査団(地震工学委員会)(2011) 緊急地震被害調査報告書(暫定版). <http://committees.jsce.or.jp/report/node/40> (2014年10月8日確認)
- 福田 理・小林才智・民部田喜代四(1964) 関東平野における層序試錐. 石油技術協会誌, **29**, 112-129.
- 後藤浩之・高橋良和・鍬田泰子・高橋章浩・盛川 仁(2011) 地震動による地盤と構造物の被害. 自然災害科学, **30**, 49-53.
- 原口 強・岩松 暉(2011) 東日本大震災津波詳細地図上巻 青森・岩手・宮城. 古今書院, 167p.
- 平社定夫(2008) 関東平野中央部における中-上部更新統の層序および構造運動. 地球科学, **62**, 43-55.
- 堀口萬吉(1988) 関東平野西部地域の地下地質. 日本地質学会関東支部シンポジウム「関東平野の地下地質」講演要旨集, 21-23.
- 堀口萬吉(1994) 関東平野中央部地下地質の概要. 地団研専報, **42**, 1-16.
- 地盤工学会地盤調査規格・基準委員会編(2013) 地盤調査の方法と解説. 1259p., 地盤工学会.
- 木方建造・大山隆弘・馬原保典(1999) 圧密型岩石抽水装置の製作と深部堆積岩への適用. 応用地質, **40**, 250-269.
- 菊池隆男・貝塚爽平(1972) 関東平野地下の成田層群. 日本地質学会第79年学術大会「地盤と地下水に関する公害」検討会資料, 90-110.
- 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, no.133, 481p.
- 小池一之(2005) 2-2 リアス式海岸の発達する三陸海岸(4) 三陸沿岸に発達する沖積平野. 小池一之・田村俊和・鎮西清高・宮城豊彦(編), 日本の地形3 東北, 東京大学出版会, 63-65.
- 国土交通省(2009) 震災時地下水利用指針(案). 42p. 国土交通省土地・水資源局, 水基本調査(地下水調査). <http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/basis/underground/F9/exp.html> (2014年10月8日確認)
- 国土交通省土地局(1995) 地下水マップ-茨城・栃木地域-1:200,000, 183p, 3sheets.
- 国土交通省土地局(1997) 地下水マップ-埼玉・群馬地域-1:150,000, 172p, 3sheets.

- 今後の地下水利用のあり方に関する懇談会（2007）健全な地下水の保全・利用に向けて-「今後の地下水利用のあり方に関する懇談会」報告-。81p.
- 小西千里・小林源裕（2005）土質地盤における物理検層結果を利用した透水係数の推定方法の検討。2005年春季物理探査学会学術講演会講演論文集，62-65.
- 瀧澤文教（1995）首都圏の地下構造。物理探査，**48**，504-518.
- 久保和也・柳沢幸夫・吉岡敏和・山元孝広・滝澤文教（1990）原町及び大甕地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），7 Niigata（35/36），155p.，1 sheet，地質調査所。
- 草野 郁（1989）関東地震における東京低地の液状化履歴。土木学会論文集，406/III-11，213-222.
- Leclerc, J. P., Berger, C., Foulon, A., Sarraute, R. and Gabet, L. (2008) Tsunami impact on shallow groundwater in the Ampara district in Eastern Sri Lanka: Conductivity measurements and qualitative interpretations. *Desalination*, **219**, 126-136.
- 南相馬市生活環境課（2013）南相馬市の環境平成24年版（平成23年度測定結果）。95p.，南相馬市。
- 水井寿則（2008）深井戸の洗浄（改修）。地下水技術，**50**，9-28.
- 文部科学省（1992）ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー（平成4年8月改訂）。放射線測定法シリーズ7，日本分析センター，362p.
- 文部科学省（2014）放射線量等分布マップ拡大サイト／電子国土。http://ramap.jaea.go.jp/map/（2014年10月8日確認）
- 森川六郎（1962）埼玉県南平野の地盤地質。応用地質，**3**，11-19.
- 森田悠紀雄・坪田邦治・西垣 誠・小松 満（2005）粒度分布と間隙率を考慮した土の透水係数の推定方法。土と基礎，**59**，5-7.
- 中川 啓・和田直之・開発一郎・徳永朋祥・近藤昭彦・小野寺真一・林 武司・手計太一・嶋田 純・勝見 武・村田正敏（2013）平成23年東北地方太平洋沖地震の津波による水源地下水への影響について。地下水学会誌，**55**，21-28.
- 中田 高・島崎邦彦（1997）活断層のための地層抜き取り装置（Geo-slicer）。地学雑誌，**106**，59-69.
- 日本工業用水協会（1973）前橋高崎地区および館林邑楽地区地下水調査報告書。92p.
- 岡山県地下水研究会編（2003）実務者のための地下水環境モデリング。技報堂，395p.
- 大年邦雄・原 忠・久保篤規・上野舞子・岩原廣彦・河村恭輔（2013）東日本大震災における井戸被害についての現地調査。地下水学会誌，**55**，13-19.
- 千田 昇・松本秀明・小原真一（1984）陸前高田平野の沖積層と完新世の海水準変化。東北地理，**36**，232-239.
- 仙南通商産業局総務部開発業務課（1983）気仙沼市域地下水利用適正化調査報告。工業用水，no.303，25-61.
- 新堀友行・羽島謙三・成瀬 洋（1970）関東平野の地下地質 第2報 関東平野中央部の洪積層。資源科学研究所彙報，**73**，30-36.
- 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**，25-27.
- 鈴木宏芳（2002）関東平野の地下地質構造。防災科学技術研究所研究報告，**63**，1-19.
- 鈴木宏芳・小村健太郎（1999）関東地域の孔井データ資料集。防災科学技術研究所研究資料，no.191，80p.
- 高村弘毅・河野 忠（1996）淡路島における兵庫県南部地震後の湧水・地下水の挙動。地下水学会誌，**38**，331-338.
- 谷口真人・中島 誠（2013）シンポジウム「震災時の非常用水源としての地下水利用の在り方」。地下水学会誌，**55**，37-64.
- 東北農政局計画部（1990）福島県原町市の地盤沈下状況および将来予測について（原町地区地盤沈下調査報告書）。299p.，8sheets，東北農政局計画部。
- 東京通商産業局総務部開発業務課（1981）栃木県両毛地域地下水利用適正化調査報告，35p.
- 角田史雄・堀内誠治（2005）関東平野の基盤と構成層。日本の地質増補版編集委員会（編），日本の地質増補版，95-108，共立出版。
- Vithanage, M. P., Engesgaard, P., Villholth, K. G. and Jensen, K. H. (2012) The effects of the 2004 tsunami on a coastal aquifer in Sri Lanka. *Groundwater*, **50**, 704-714.

## 仙台平野南部沿岸地域における空中電磁・磁気探査 Airborne EM and magnetic surveys in the southern part of the Sendai Coastal Plain

大熊茂雄<sup>1\*</sup>・上田 匠<sup>2</sup>・光畑裕司<sup>2</sup>・神宮司元治<sup>2</sup>・内田利弘<sup>2,3</sup>・中塚 正<sup>1</sup>  
Shigeo Okuma<sup>1\*</sup>, Takumi Ueda<sup>2</sup>, Yuji Mitsuhata<sup>2</sup>, Motoharu Jinguuji<sup>2</sup>,  
Toshihiro Uchida<sup>2,3</sup> and Tadashi Nakatsuka<sup>1</sup>

**Abstract:** The Geological Survey of Japan, AIST conducted a helicopter-borne EM survey over inundated areas by the tsunami on March 11, 2011 in northeast Japan 15 months after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The purpose of the survey is to map the electrical resistivity of the ground intruded by seawater of the tsunami for its reutilization as farming lands and water assessment of the area.

The survey was flown in June 2012 at an altitude of 60 m above ground with a speed of 50 km/h along survey and traverse lines spaced 100 m and 1,000 m apart, respectively. The airborne EM system (Fugro Airborne Surveys' RESOLVE system) was installed in a bird and towed 30 m below the helicopter. This is a frequency-domain system operated at five frequencies (340 Hz, 1.5, 6.9, 31, 140 kHz) in a horizontal coplanar configuration and at a frequency (3.3 kHz) in a vertical coaxial configuration. A Cesium magnetometer sensor was also installed in between the EM transmitting and receiving coils in the bird and total magnetic intensity was measured at a frequency of 10 Hz.

The survey area is located at the border of Miyagi and Fukushima Prefectures along the Pacific coast in the southern part of the Sendai Plain and is divided into two sub-areas: Watari-Yamamoto-Shinchi area (area A) and Matsukawaura Lagoon area (area B). The observed electromagnetic data were processed and apparent resistivity maps were created for each frequency. As for the apparent resistivity map at a frequency of 140 kHz, low resistivities less than 20  $\Omega\text{m}$  range from close to the coastline up to 4km inland and are edged to the west by high resistivities (64 - 128  $\Omega\text{m}$ ), corresponding to the inundation line as derived from aerial photos by the Geospatial Information Authority of Japan (2011). It is implied that these low resistivities can be associated with the effect of seawater intrusions by the tsunami. As the frequency becomes lower, low resistivities areas (< 8  $\Omega\text{m}$ ) extend to inland, indicating the existence of deep salt water wedges and/or fossil salt water. To verify the results by airborne surveys and confirm the groundwater environment, further studies were conducted with shallow drillings as well as with time-domain EM and high-density electrical surveys on ground.

Aeromagnetic anomalies were processed and reduced onto a smoothed observation surface, using a method in the space domain. However, it turned out that the magnetic data seem to be contaminated by artificial noise probably caused by the survey helicopter. Then, the generalized mis-tie control method was applied to the observed magnetic data and magnetic anomalies were successfully reduced onto a smoothed observation surface. According to the preliminary aeromagnetic anomaly map, magnetic highs lie over Cretaceous granitic rocks which outcrop on the north-trending Wariyama Mountains and were sampled from a hot spring exploration well at northern edge of the Matsukawaura Lagoon. The granitic rocks indicate high magnetic susceptibilities in the order of  $10^{-2}$  (SI) according to the petrophysical database (PB-Rock 21: <https://gbank.gsj.jp/pb-rock21/>). The magnetic highs also extend NE and reach the Pacific coast in the southern Sendai Plain, implying the existence of Cretaceous granitic rocks. It leads to an estimation of shallow basement depths there.

Combination of analyses between resistivity and magnetic data observed by the airborne EM and magnetic survey will bring a better understanding of the subsurface structure from shallow to deep parts of the study area. These information derived from the airborne EM and magnetic survey can be used for planning of reconstruction/recovery of the damaged area by efficient usage of land and underground water resources.

**Keywords:** airborne EM survey, resistivity, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, tsunami, groundwater environment, salt damage

---

本報告は「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究 中間報告」に平成 25 年度以降の調査・研究実施内容を追記したものである

\*Corresponding author

1. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST)

2. 地質資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, AIST)

3. 現所属: 地質分野研究企画室 (Research Planning Office of Geological Survey and Applied Geoscience, AIST)



## 1. はじめに

産総研では、平成 23 年度補正予算「巨大地震・津波災害に伴う複合地質リスク評価」により、東日本大震災に伴う津波、内陸性地震、液状化、土壌・地下水汚染に関する複合リスクを陸域から浅海域にかけて総合的に調査し、被災地の復興計画に役立たせるための研究を実施している。今回、その一環として、津波被災地（第 1 図、宮城県亶理郡亶理町、亶理郡山元町、福島県相馬郡新地町、相馬市）における海水の地下への浸透状況と、その下層にある淡水性地下水の分布をヘリコプターによる空中電磁探査によって調査した (Okuma et al., 2012 ; 大熊・上田, 2013)。

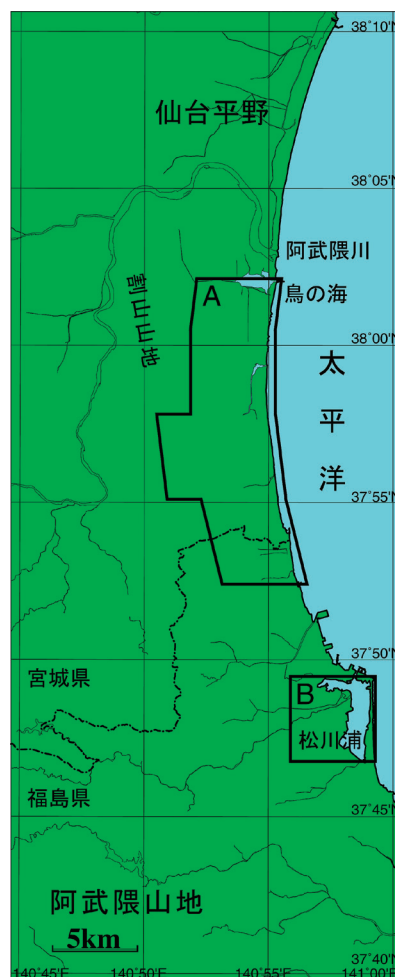
調査した津波被災地では、鮮新世の基盤岩類の上に下部砂層、粘土層、上部砂層が順に堆積し（第 2 図）、上部砂層中には不圧地下水が、下部砂層中には被圧地下水が存在する。この地域は海岸線に近いため通常でも海水の影響を受け、また沿岸部の地下深部では海水の浸入や海水準変動による化石塩水の存在が知られている (奥津, 1977 ; 森・高橋, 2009)。これらに加えて、現在は津波による浸水で地下浅部の不圧地下水が塩水化し問題となっている (森ほか, 2012 ; 東北農政局, 2012)。このため安心して利用できる淡水性地下水を確保できるように、地下水の汚染状況の把握や継続的なモニタリングが求められている。宮城県亶理町や山元町では、稲作のほかイチゴのハウス栽培が盛んであり、イチゴへの散水やビニールハウスの暖房のために淡水性の地下水の確保が喫緊の課題となっている。

本論では、実施した空中電磁探査について説明するとともに、作成された見掛け比抵抗分布図と同断面図から読み取れる比抵抗分布の特徴について報告する。また、同時に測定された地磁気データの処理を行い予備的な空中磁気図を作成したので、磁気異常分布の特徴についても述べる。

## 2. 空中電磁探査

2012 年 6 月に 2011 年津波被災地（仙台平野南部と福島県松川浦地域）における塩水の地下への浸透状況およびその下位の淡水性地下水の分布を把握することを目的として、ヘリコプターによる空中電磁探査（第 3 図）を実施した（第 1 表）。

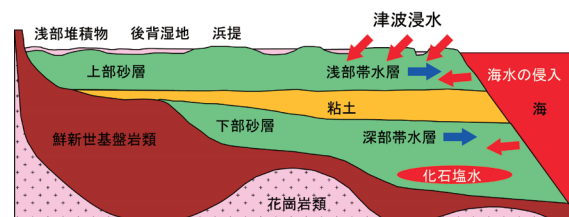
調査では 50km/h で対地 60m の高度上を飛行するヘリコプターから 30m 下方に電磁バードを吊り下げて測定を行った。位置標定は DGPS を使用した。調査では、100m 間隔で設定した東西測線上でバードに収納した 5 周波数 (340 Hz, 1.5, 6.9, 31, 140kHz) の水平コイルと 1 周波数 (3.3 kHz) の鉛直コイルで磁場を送受信し、電



第 1 図 調査範囲図 (大熊・上田, 2013)。

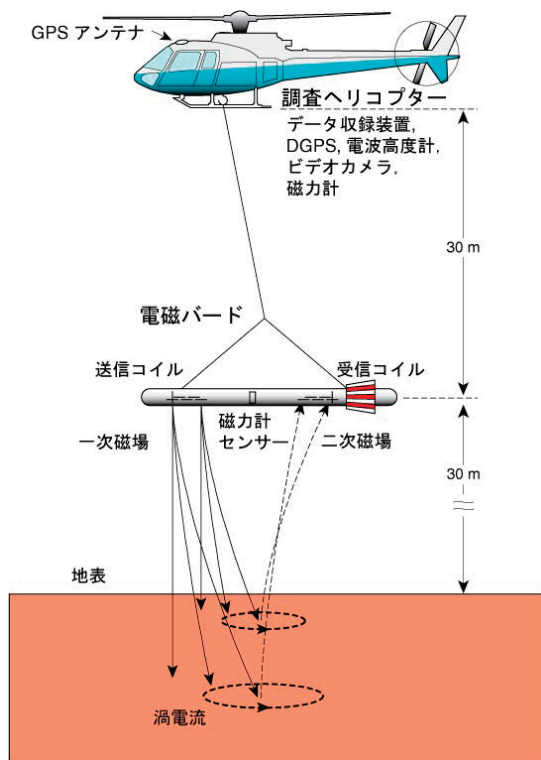
A : 仙台平野南部地域, B : 松川浦地域

Fig.1 Study areas. A: Southern Sendai Plain area, B: Matsukawaura Lagoon area



第 2 図 調査地域の地下水環境概念図 (大熊・上田 (2013) ; 東北農政局 (1980) に加筆修正)

Fig.2 Schematic diagram of the groundwater environment of the study area (Okuma and Ueda (2013); Modified from Tohoku Regional Agricultural Administration Office (1980)).



第3図 空中電磁探査概念図 (大熊・上田 (2013) に加筆修正)

Fig.3 Schematic diagram of the helicopter-borne EM survey system (modified from Okuma and Ueda (2013)).

磁応答データを測定した。また、主測線と交差する方向に交差測線を1km毎に設定して測定を行っている。

調査に際し、人家や病院、学校、仮設住宅、競馬トレンセンなどの直上や送電線、電波塔などの障害物は避けて飛行している。なお、場外臨時ヘリポートとして、山元町の宮城野ゴルフクラブの地震被害により閉鎖しているコースをお借りして使用させていただいた。

### 3. 見掛比抵抗分布図

測定データを処理し、フェーザーダイアグラムに基づいて見掛比抵抗データと見掛測定高度(見掛深度)を周波数毎に作成した。

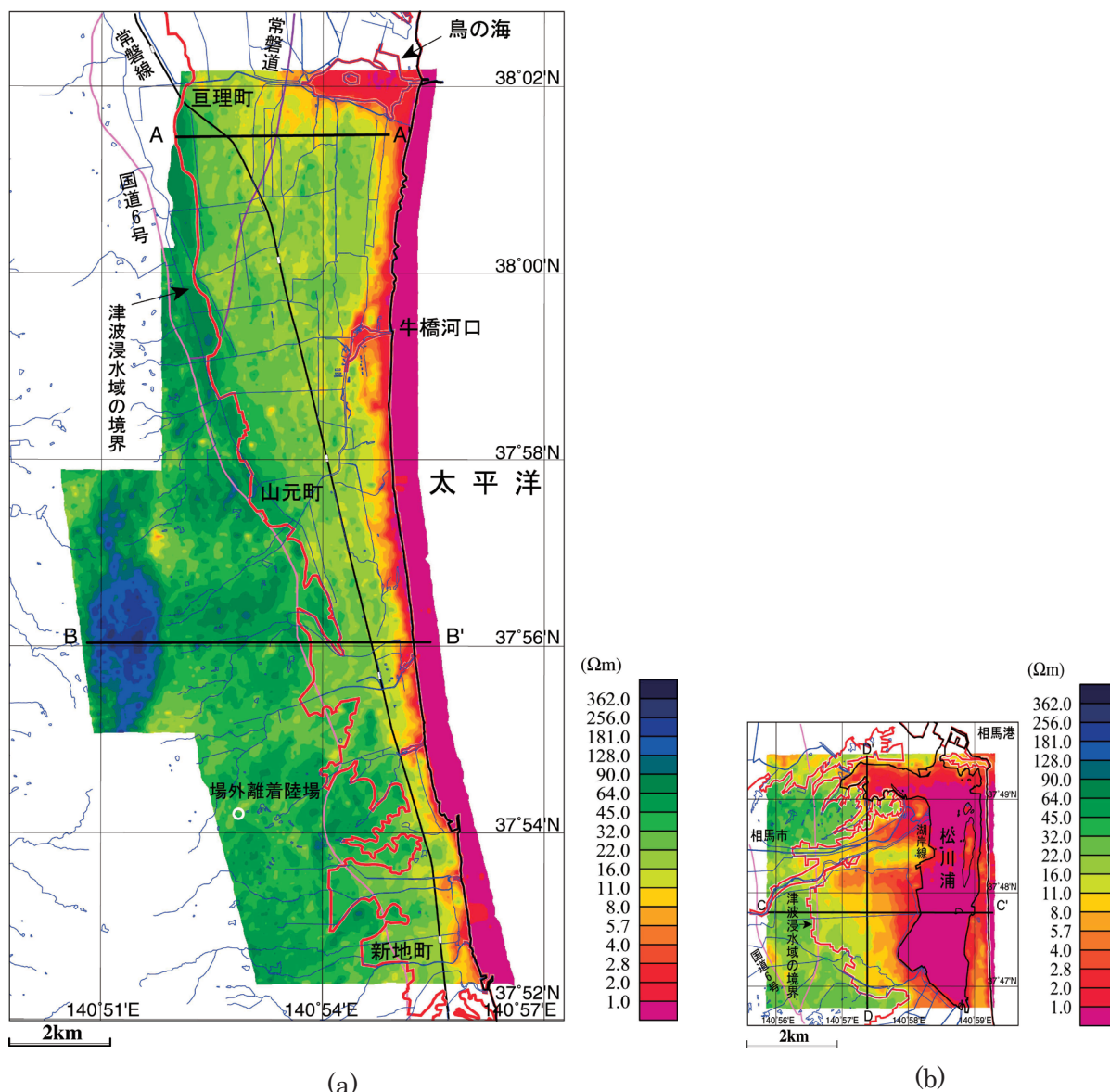
最も高い周波数(140 kHz)の見掛比抵抗分布は地下の浅部(深さ0~5 m程度)での分布に対応し、仙台平野南部(第4(a)図)の海岸線付近では4.0 Ωm以下の非常に低い比抵抗値を示した。この低い比抵抗値は海岸からの海水の浸入のためと考えられる。一方、海岸線から内陸側に向かって数km以下の地域では、20 Ωm以下の低比抵抗層が広く分布し、その分布域の境界は津波浸

第1表 東北地方太平洋沿岸地域空中電磁探査の仕様  
Table 1 Outline of the helicopter-borne EM survey over the tsunami damaged area in the northeastern Tohoku, Japan.

Survey period	June 10 - June 25, 2012
Survey area	Refer to Fig.1
Survey helicopter	AS350B3 (JA6573)
Flight altitude	60 m above terrain
Total flight km	1,404 km
Flight / tie line	E-W (spacing: 100 m) / N-S (spacing: 1,000 m)
Navigation / Flight pass recovery	Visual flight aided by GPS positioning / DGPS
Air base	Temporal heliport at Miyagino Golf Club, Yamamoto Town, Miyagi Pref.
Ground station	Miyagino Golf Club, Yamamoto Town, Miyagi Pref. 37° 54' 13.14" N, 140° 52' 54.3" E, 28.3 m ASL
Survey instruments	<u>In the air</u> Fugro Resolve EM survey system (Horizontal coplanar: 340Hz, 1.5, 6.9, 31, 140 kHz, Vertical coaxial: 3.3 kHz) Data acquisition system: HeliDAS console Airborne magnetometer: Scintrex CS-3 Cesium magnetometer DGPS: Ashtech GPS receiver, Radar altimeter (Honeywell AA-300), Video camera (Panasonic WV-CP464) <u>On ground</u> Ground magnetometer: Scintrex CS-3 Cesium magnetometer GPS receiver: Fugro CF1 data logger
Contractor	Nippon Engineering Consultants Co., Ltd. (flown with Toho Air Service Co., Ltd.)

水域の末端部に良く一致している。これは、津波による海水(比抵抗値 0.25 Ωm)の浸水で土壌や浅部地層(通常は数10 Ωm以上)の比抵抗値が低下したためと考えられる。当該地域の内陸側で行われた地上電気探査の結果(中里ほか, 2011)、津波による海水侵入の影響と考えられる低比抵抗層も局所的には検出されているが、全般的な傾向は不明であった。今回の調査により、その大局的な影響の範囲が明らかとなった(大熊・上田, 2013)。

松川浦地域(第4(b)図)の調査結果でも分布域の境界が津波浸水域の末端部に良く一致しているが、湖岸線より内陸側が4.0 Ωm以下の非常に低い比抵抗を示した。低比抵抗域の範囲は仙台平野南部より広く、この地域では津波による海水が仙台平野南部に比べて、地表に長く滞留していたためと思われる。



第4図 調査地域の見掛け抵抗分布図 (140 kHz) (大熊・上田 (2013) に加筆修正).

A-A', B-B', C-C', D-D' は第5～第7図の断面位置を示す.

Fig.4 Apparent resistivity maps at a frequency of 140 kHz (modified from Okuma and Ueda (2013)).

A-A', B-B', C-C' and D-D' indicate the locations of cross-sections appeared in Figs. 5 – 7.

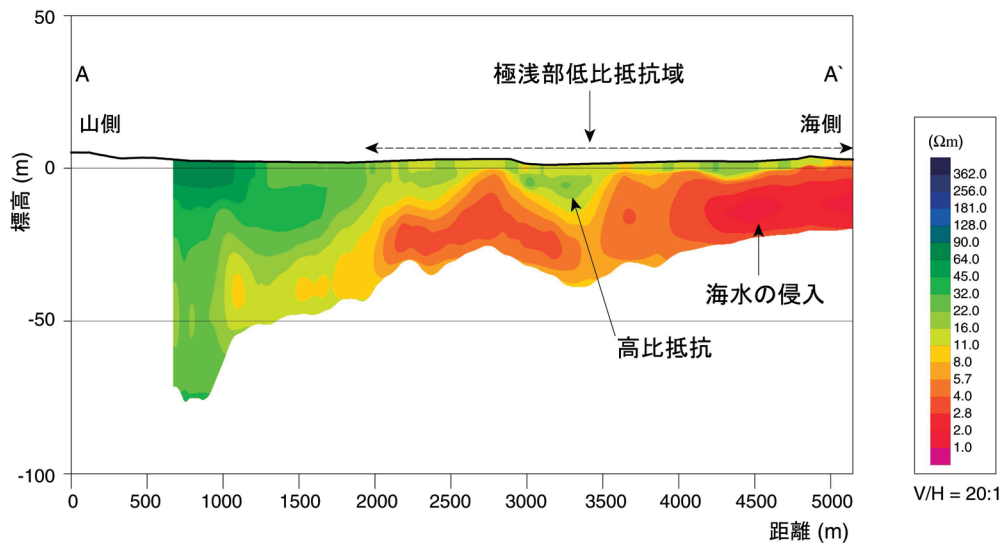
周波数により送信磁場の透過深度が異なるため、水平配置の5周波数の見掛け抵抗データを用いて見掛け抵抗断面図を作成できる。

さて、次に見掛け抵抗断面図の一例として、第5(a)図に鳥の海南方の東西断面図を示す。これによれば、仙台平野南部地域の10~20mより深い地下では、2.0~11.0 Ωmの低抵抗層が海岸線付近から内陸に向かっ

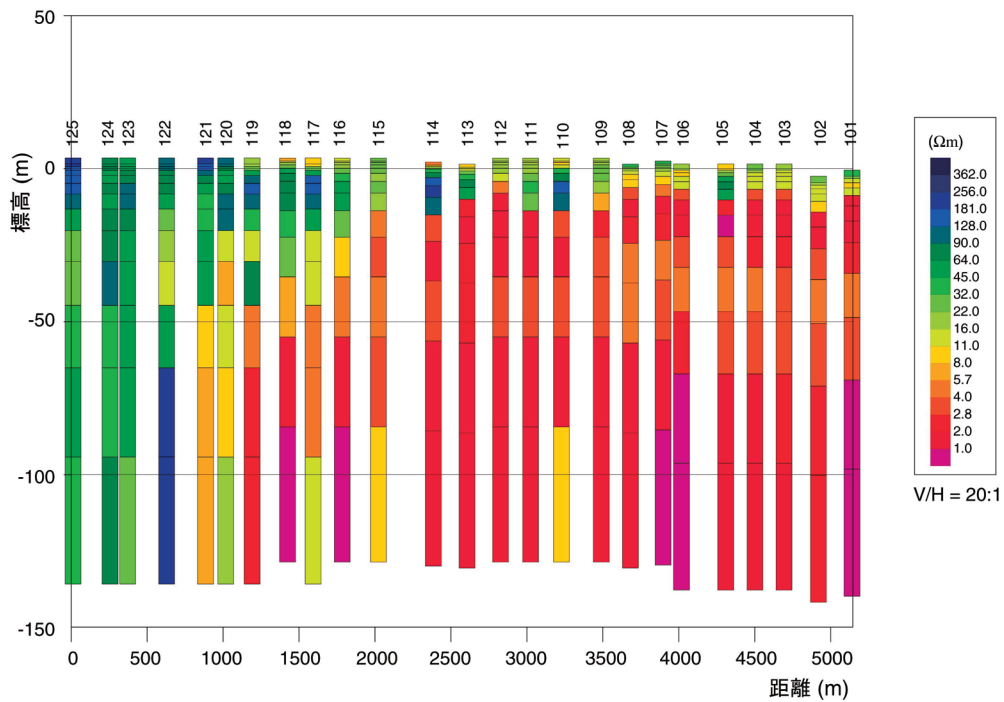
て伸びているが、農業用排水路などでは、さらに深い地下にまで低抵抗層が認められる(大熊ほか, 2013)。これは、海岸から浸入した海水が農業用排水路を通じて地下へ浸透したことによると考えられる(第5(a)図)。

当該地域では、TEM(時間領域電磁探査)法による地上電磁探査が行われており、1次元インバージョンによる比抵抗解析が行われている(上田ほか, 2014)。当該





(a)



(b)

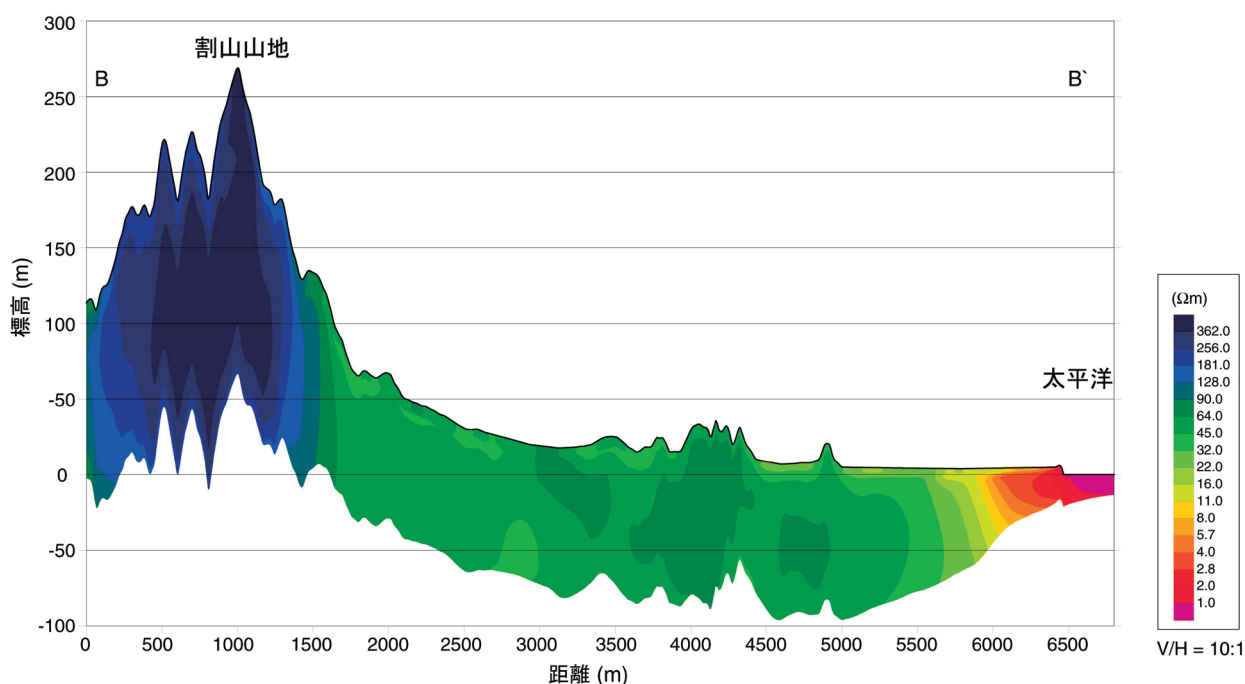
第5図 仙台平野南部地域の比抵抗東西断面図 (1) 第4(a)図のA-A'断面, 縦横比 20:1.

(a) 空中電磁探査による見掛け比抵抗断面図 (140 kHz; 大熊・上田 (2013) に加筆修正), (b) 地上 TEM 探査による比抵抗 1D インバージョン結果 (上田ほか (2014) に加筆修正).

Fig.5 E-W resistivity cross-section in the southern Sendai Plain (1) A-A' profile in the Fig. 4(a). Vertical exaggeration is 20. (a) Apparent resistivity cross-section at a frequency of 140 kHz (Okuma and Ueda, 2013). (b) Resistivity cross-section by 1D inversion of a TEM survey (modified from Ueda et al. (2014)).

の測線に関しこの結果を、柱状図として第5(b)図に示す。TEM法は空中電磁探査よりも探査深度が深く当該地域では100mを超えている。探査深度と調査範囲が重複

しているところで比較すると、両手法による解析結果の比抵抗分布は整合的であることがわかる。例えば地表下5~6m以深に頂部深度を持つ低比抵抗層が海岸線近傍



第6図 仙台平野南部地域の比抵抗東西断面図 (2) 見掛比抵抗断面図 (140 kHz). 第4(a)図のB-B'断面, 縦横比 10:1.  
Fig.6 E-W resistivity cross-section in the southern Sendai Plain (2) Apparent resistivity cross-section at a frequency of 140 kHz. B-B' profile in Fig. 4(a). Vertical exaggeration is 10.

から内陸側に深度を増しながら連続している様子とその起伏がよく対応している, また, その上位の高比抵抗層の分布も整合的である. 空中電磁探査で認められた津波浸水の影響と解釈される極浅部の低比抵抗層は, TEM法の結果でも低比抵抗と解析されている箇所もあるが, かならずしも低比抵抗でない測点もある. これは, 空中電磁探査では一定の周期で連続観測していく (時速50kmで10Hzの測定周期の場合, 水平方向に約1.4m毎に測定) ため水平方向には連続性の良い結果が得られるのに対し, TEM法では現実的に限られた離散的な測点で測定が行われるため, 測点近傍のみの値を代表するためと思われる. これは一部測点で行われた高密度電気探査 (上田ほか, 2014) でも同様と考えられる. なお, これらの断面の妥当性については, 上田ほか (2014) が地上電磁・電気探査のインバージョン結果との詳細な比較検討を行っており詳しくはそちらを参照されたい.

一方, 内陸の丘陵地近傍の地下では, 45 Ωm以上の高比抵抗層が分布し (第6図), 伏在する鮮新世等の基盤岩類に対応すると考えられる. 当該地域では, 100m以深の深井戸内の鮮新世基盤岩中より深層地下水がくみ上げられ農業用水に利用されており (東北農政局, 2012), 新たな井戸の掘削が必要な場合, その候補地の選定にも本データが利用可能であると考えられる.

また, 丘陵地のさらに西方には割山山地があり, こ

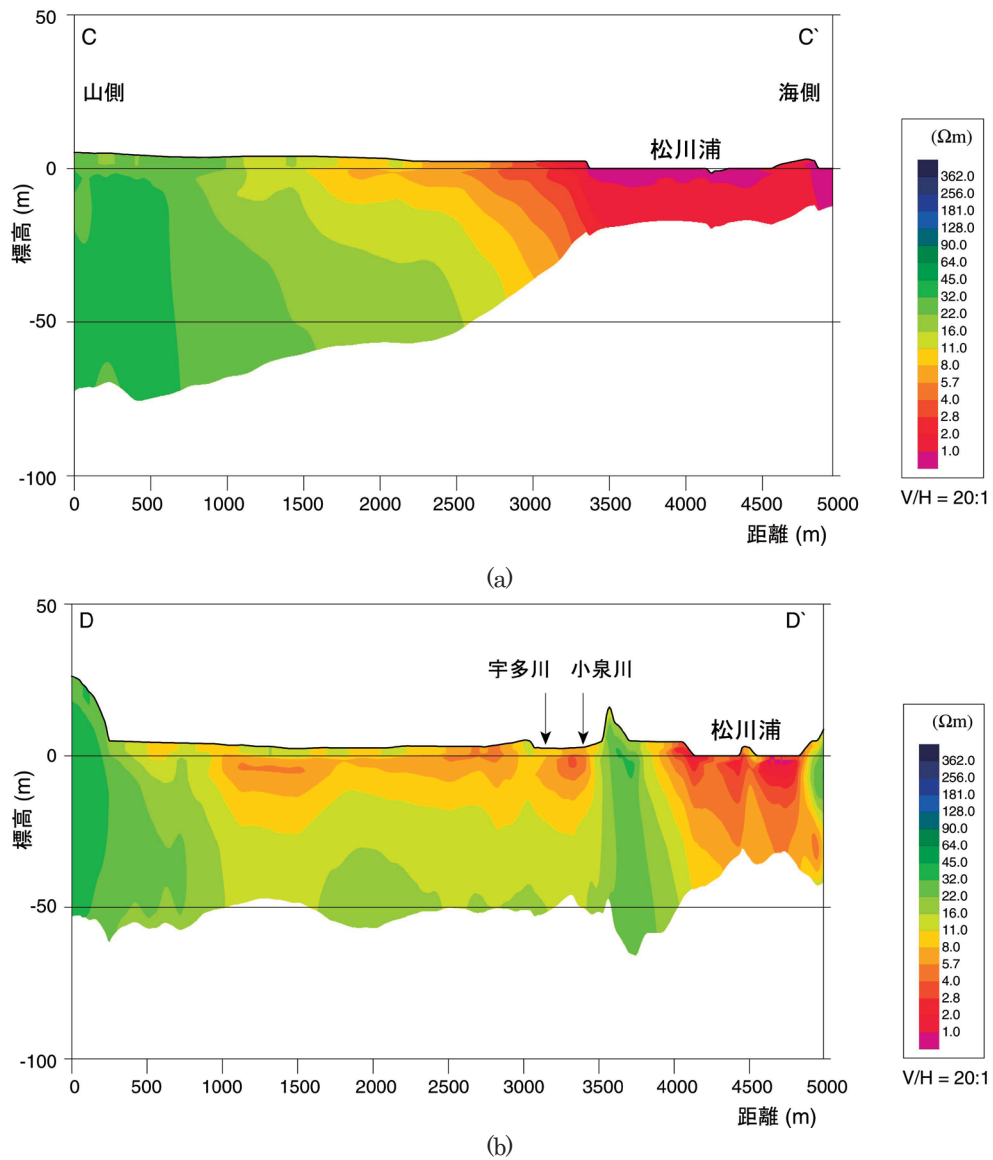
では比抵抗は300 Ωmを超え, 今回の調査地の中でもっとも高い比抵抗を示す. 当該地域には白亜紀花崗岩類の割山庄碎花崗閃緑岩 (藤田ほか, 1988) が露出しており, 高比抵抗はこれらの花崗岩類の分布に対応するものと考えられる.

次に, 松川浦地域の例を示す. 松川浦西方の水田地帯では顕著な低比抵抗域が広がり, 津波が浸水した松川浦に近いほどその値は低く, 低比抵抗層も厚くなる (第7(a)図). また, 南北断面図 (第7(b)図) を参照すると, 5.7 Ωm以下の低比抵抗層が海面下0~5m付近に水平方向に広がっており, 津波浸水により滞留し地下に浸透した海水の影響を示している可能性があるが, 汽水湖の松川浦に面しているため津波浸水とは別に海水の進入を受けているためかもしれない.

評価の結果, それぞれに利点, 欠点が見受けられることから, これらを組み合わせたシステムの構築を目指すこととした.

#### 4. 空中磁気異常図

空中電磁探査の際, 地下の比抵抗分布に対応した電磁応答の測定 (電磁探査) とは別に, 高感度空中磁力計により地磁気全磁力の測定 (磁気探査) も行っている (第3図; Okuma et al., 2013). 電磁探査による可探深度

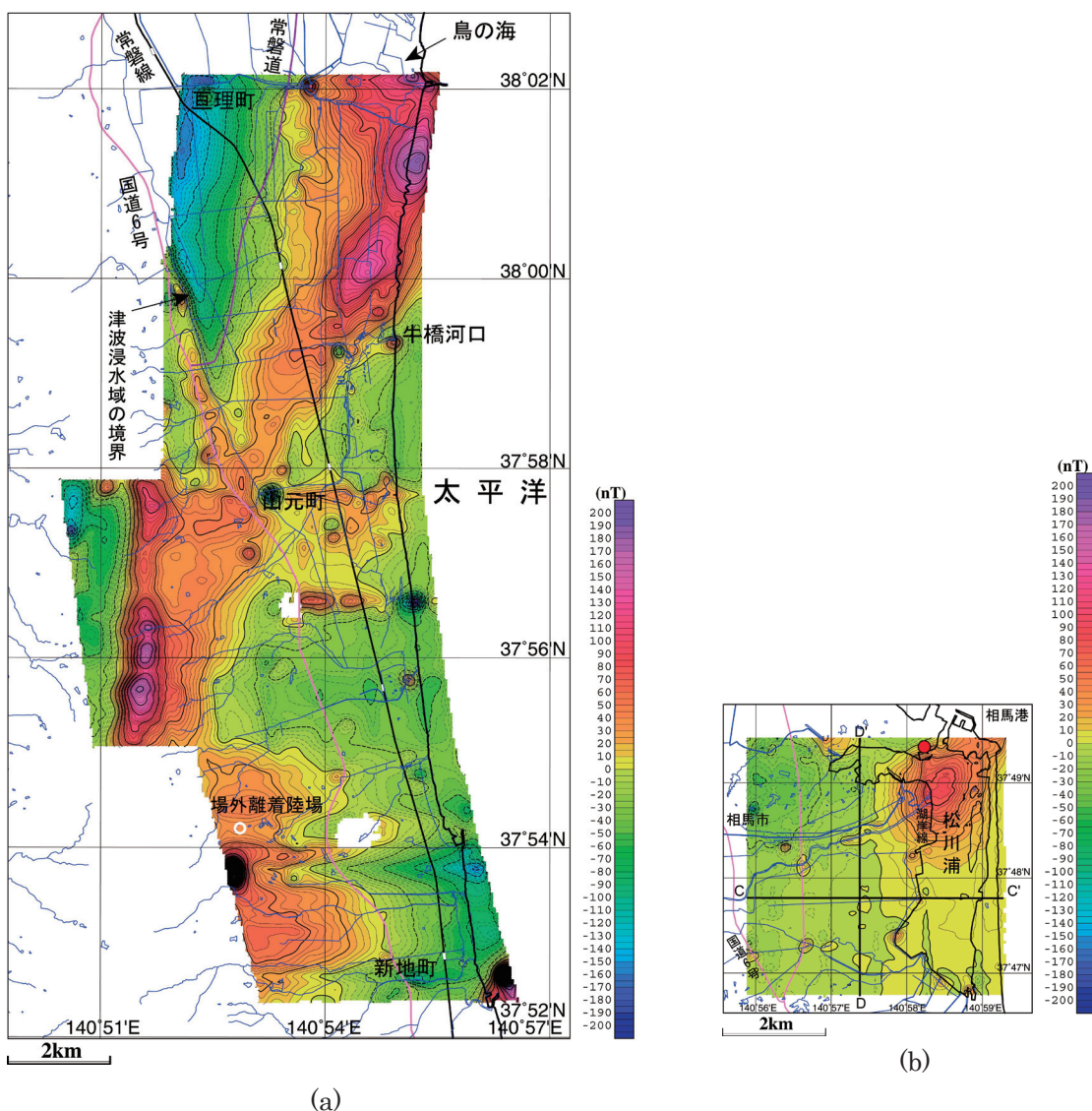


第7図 松川浦地域の見掛比抵抗断面図 (140 kHz), 縦横比 20:1.

(a) 東西断面図 (4(b)図の C-C' 断面), (b) 南北断面図 (4(b)図の D-D' 断面).

Fig.7 Cross-sections of apparent resistivity at a frequency of 140 kHz in the Matsukawaura Lagoon area. Vertical exaggeration is 20. (a) East-West cross-section (C-C' in Fig. 4(b)). (b) North-South cross-section (D-D' in Fig. 4(b)).





第 8 図 調査地域の空中磁気図 (全磁力異常).

(a) 仙台平野南部地域 (Okuma et al., 2013), (b) 松川浦地域, 赤丸は温泉ボーリングの位置を示す.

Fig.8 Aeromagnetic anomaly (total magnetic intensity) maps of the study area. (a) Southern Sendai Plain area (Okuma et al., 2013). (b) Matsukawaura Lagoon area. A red circle denotes the location of hot spring exploration well.

は当該地域において高々100m 程度である一方、磁気探査ではより深部の調査も可能であり、対象とする物性は異なるものの地下構造解釈の点で相補的な利用が見込める。そこで、今回観測した地磁気全磁力データの処理と解析を行ったので、この結果について報告する。

空中磁気探査は電磁バードの中央に収容されたセシウム磁力計センサーにより、空中電磁探査と同様に

10Hz のサンプリング周期で実施された。調査地域には、住宅地や工場、沿岸域の臨時ゴミ集積場、焼却場などがあり、これらに伴う人工的な磁気異常も観測されている。加えて、今回観測磁気データに通常の処理を行ったところ、いわゆる Herringbone effect と呼ばれる矢筈模様の磁気異常が検出された。これは、機体磁気による影響と考えられ、約 20nT 程度の方位誤差が認められた。こ

の誤差は、当該地域が概ね磁気異常の静穏域であることから、決して無視できない大きさである。磁気センサーを収容した電磁バードは機体から 30m 下方につり下げられているものの、使用した機体が比較的磁気ノイズが大きいことで知られている AS350B3 であったため、その影響が地磁気に重畳して観測されたものと考えられる。

機体磁気の影響を軽減するため、日変化補正、IGRF 残差計算を行った後、拡張交点コントロール法 (Nakatsuka and Okuma, 2006) を観測地磁気データに適用し、滑らかな観測面上の全磁力異常図を作成した (Okuma et al., 2013)。この結果、機体磁気による方位誤差の影響が軽減され、以降通常の磁気異常の解析が可能となった。

磁気図を参照すると、仙台平野南部地域では、磁気異常は人工起源と考えられるものを除くと、割山山地の白亜紀花崗岩類露出地域において分布する高磁気異常が顕著である。付近では、高磁化率 ( $10^{-2}$  SI 以上) の花崗岩試料が採取されており (日本列島基盤岩類物性 DB:PB-Rock21)、当該花崗岩が磁気異常源と推定される。一方、沿岸部の鳥の海南方および牛橋河口北方において、長波長の高磁気異常が各々分布する。これらの高磁気異常は帯状に南西方に延び、割山山地の高磁気異常に連続しているように見える。したがって、沿岸部の高磁気異常源としては花崗岩の可能性がある。

一方、松川浦地域では、松川浦の北東端付近において高磁気異常が分布する。当該地域には磁気異常源と考えられる露頭は分布しない。しかし、付近で行われた複数の温泉ボーリング (柳沢ほか, 1996) の結果、深度約 300~350m 付近で花崗岩に到達し (三本杉ほか, 1971; 三本杉, 1975)、松川浦温泉ではボーリングから採取された花崗岩類の磁化率が高い ( $10^{-2}$  SI 以上; PB-Rock21) ことから、当該の花崗岩体が磁気異常源であると推定される。

以上のように、磁気異常の分布から、仙台平野南部地域北部および松川浦地域では海岸線付近の地下深部 (~300m) に深に花崗岩が賦存することが推定され、基盤構造の一翼を担っていることが明らかとなった。

本地域の空中電磁探査では、海岸線に近いため地下浅部が著しく低比抵抗であることから、探査深度が高々地下 80m 程度、地上 TEM 探査 (上田ほか, 2014) でも地下 150m 程度しか見込めないため、より地下深部の構造を知るためには磁気異常データは重要である。

## 5. まとめ

今回、東北地方太平洋沿岸地域の津波被災地で海水の浸透状況を調べる目的で空中電磁探査を実施した。その結果、当該地域では、地下の極浅部に低比抵抗がマッピングされ津波の際に浸水した海水の影響によるものと

解釈された。一方、より深部では侵入した海水の影響と考えられる低比抵抗層が仙台平野南部に分布するが、これらに囲まれた高比抵抗層も分布することが明らかとなった。これらの構造を明らかにするため、その後当該地域で地上電磁探査や高密度電気探査などを実施した。これらのデータと比較検討したところ、比抵抗断面は相互に概ね整合的であった。一方、空中電磁探査の際同時に測定された地磁気データを処理し、予備的な空中磁気図を編集したところ、仙台平野南部地域と松川浦地域の西北端部で高磁気異常が分布することがわかった。割山山地の露頭や松川浦の温泉ボーリングから採取された白亜紀花崗岩類の磁性が高いことから、これらの岩石が磁気異常源であり、当該地域に伏在していることが推定された。これらの地域では、基盤が浅いことを示しており、空中電磁探査で取得された比抵抗データと併せて解釈することにより、浅部から深部までの地下構造を面的に明らかにできるものと考えられる。津波被災地では、震災復旧・復興のための農地や宅地の移転、また常磐線の移転・敷設が進行中であるが、有効な土地利用や地下水利用のため、これらのデータの有効活用を進めていきたい。

## 謝辞

調査の実施に際し、地元宮城県亶理町、山元町、福島県新地町、相馬市に便宜をはかっていただいた。宮城野ゴルフクラブには場外臨時ヘリポートを設置するための敷地をお借りした。調査の立案に際し、BGR (ドイツ連邦地球科学・天然資源研究所) の Uwe Meyer および Annika Steuer 両博士から、BGR が 2005 年にスマトラ島北部で行った空中電磁探査について情報提供していただいた。東海農政局の森 一司氏および (独) 農研機構の中里裕臣氏からは、仙台平野南部地域の地下水環境調査に係わる先行研究についてご教示を受けた。ここに記して、以上の諸機関および方々に感謝の意を表します。

## 文献

- 藤田至則・加納 博・滝沢文教・八島隆一 (1988) 角田地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)、地質調査所, 99p.
- 森 一司・高橋朋佑 (2009) 仙台平野南部地域での VLF 探査による塩水侵入状況調査について。日本応用地質学会平成 21 年度研究発表会講演論文集, 89-90.
- 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.

- Nakatsuka, T., and Okuma, S. (2006) Crossover analysis for the aeromagnetic survey at varying elevations, and its application to extracting temporal magnetic anomaly change. *Butsuri-Tansa (Geophys. Explor.)*, **59**, 449-458.
- 中里裕臣・森 一司・岡庭信幸 (2011) 仙台平野南部の津波被災地における地下水調査のための電気探査. 物理探査学会第 125 回学術講演論文集, 物理探査学会, 37-38.
- 大熊茂雄 (2013) 空中磁気・電磁探査による地質災害調査—噴火活動域及び津波浸水域を例として—. 電気学会電磁界理論研究会資料, *EMT-13-145*, 53-58.
- 大熊茂雄・上田 匠 (2013) 「東日本大震災の津波被災地における海水の地下への浸透状況—ヘリコプターを用いた空中電磁探査で調査—」. 産総研プレス発表,  
[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2013/pr20130214/pr20130214.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130214/pr20130214.html) (2014 年 10 月 8 日確認)
- Okuma, S., Ueda, T., Nakatsuka, T., Mitsuhata, Y., Jinguuji, M., and Uchida, T. (2013) Aeromagnetic anomalies in the inundation area by the tsunami of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, northeast Japan. *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium*, 131-133. doi:10.1190/segj112013-033
- Okuma, S., Ueda, T., Mitsuhata, Y. and Uchida, T. (2012) Helicopter-borne geophysical survey over the areas struck by the tsunami of March 11, 2011, in northeast Japan. *AGU 2012 Fall Meeting*, San Francisco.
- 奥津春生 (1977) 大仙台圏の地盤・地下水. 宝文堂, 319p.
- 三本杉己代治 (1975) 阿武隈山地東縁部相馬市松川浦沿岸に発達する新第三紀層に被覆されている花崗岩体に存在する断層と温泉との関係. 三本杉温泉研究所研究報告, **5**, 5-11.
- 三本杉己代治・三本杉トミ・厚海弘道・光井清森 (1971) 相馬市松川浦地域の温泉開発. 三本杉温泉研究所研究報告, **1**, 1-6.
- 東北農政局 (1980) 宮城県及び岩手県水文地質図集. 東北農政局計画部, 69p.
- 東北農政局 (2012) 地下水盆地地下水制御活用技術確立型「仙台平野南部地区」(H20-H22) 調査報告書. 東北農政局農村計画部資源課, 212p.
- 上田 匠・神宮司元治・井川怜央・大熊茂雄・光畑裕司・内田利弘・丸井敦尚 (2014) 仙台平野南部沿岸地域における陸上電気・電磁探査およびボーリング調査. 地質分野研究企画室編, 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 479-485.
- 柳沢幸夫・山元孝広・坂野靖行・田沢純一・吉岡俊和・久保和也・滝沢文教 (1996) 相馬中村地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 144p.



# 仙台平野南部沿岸地域における陸上電気・電磁探査 およびボーリング調査

## Electric and electromagnetic survey and boring investigation in the southern part of Sendai Coastal Plain

上田 匠<sup>1\*</sup>・神宮司元治<sup>1</sup>・井川怜欧<sup>1</sup>・大熊茂雄<sup>2</sup>・光畑裕司<sup>1</sup>・内田利弘<sup>1,3</sup>・丸井敦尚<sup>1</sup>  
Takumi Ueda<sup>1\*</sup>, Motoharu Jinguuji<sup>1</sup>, Reo Ikawa<sup>1</sup>, Shigeo Okuma<sup>2</sup>,  
Yuji Mitsuhashi<sup>1</sup>, Toshihiro Uchida<sup>1,3</sup> and Atsunao Marui<sup>1</sup>

**Abstract:** The Geological Survey of Japan (GSJ), AIST has conducted electric (direct current, DC) and transient electromagnetic (TEM) surveys to investigate subsurface resistivity structure of the south part of Sendai Plain intruded by seawater of the tsunami on March 11, 2011 in northeast Japan. The purpose of the survey is to confirm the pre-existing result of helicopter-borne EM measurement that was also carried out by GSJ in June 2012. The TEM results show a resistivity distribution to depths of approximately 150 m while the DC measurement estimates detailed 2D resistivity distribution to depth of 20 m. These results show good agreement with the apparent resistivity model of helicopter-borne EM investigation.

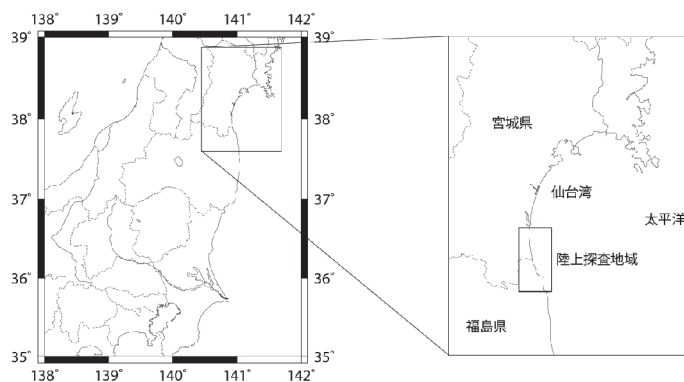
The goal of this survey is to reveal near surface ground water information of this area. In addition to DC and TEM surveys, the ground boring investigation with in-situ electric conductivity (EC) measurement and coring are being conducted. Further interpretation of DC and TEM data using ground boring results is essential and important to present detailed and more accurate estimation of resistivity distribution of the study area.

**Keywords:** resistivity, direct current method, electromagnetic method, transient EM, near surface, geophysics

### 1. 調査目的

産業技術総合研究所は、平成 23 年度補正予算「巨大地震・津波災害に伴う複合地質リスク評価」に基づき、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波、内陸性地震、液状化、土壌・地下水汚染に関する複合的なリスクを陸域から浅海域にかけて総合的に調査し、被災地の復興計画に資する調査研究を実施してきた。本調査は、地下水汚染リスクに関する研究の一環として、物理探査法を用いて津波被災地の地下電気比抵抗(以下比抵抗)および

地下水環境について調査を実施したものである。本研究プロジェクトでは物理探査法を用いた調査として、本稿で報告する陸上での探査に先行して、空中電磁探査法調査が実施され、見掛比抵抗平面図や断面図により調査地域の地下比抵抗構造が推定された(Okuma et al., 2013, 大熊ほか, 2014)。陸上調査では、空中電磁探査法による調査結果を基に、さらに詳細な調査を物理探査(電気・電磁探査)および地盤ボーリングより実施し、より確度の高い地下比抵抗構造の推定を行い、地下水環境を把握することを目的とした。



第 1 図 調査地域  
Fig.1 Study area.

本報告は「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究 中間報告」に平成 25 年度以降の調査・研究実施内容を追記したものである

\*Corresponding author

1. 地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, AIST)
2. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST)
3. 現所属：地質分野研究企画室 (Research Planning Office of Geological Survey and Applied Geoscience, AIST)

## 2. 調査地域について

調査地域は、仙台平野南部太平洋沿岸地域の宮城県南部(亶理郡亶理町・山元町)および福島県北部(相馬郡新地町・相馬市)における 2011 年東北太平洋沖地震に伴う津波浸水域と隣接する津波非浸水域の一部である(第 1 図)。

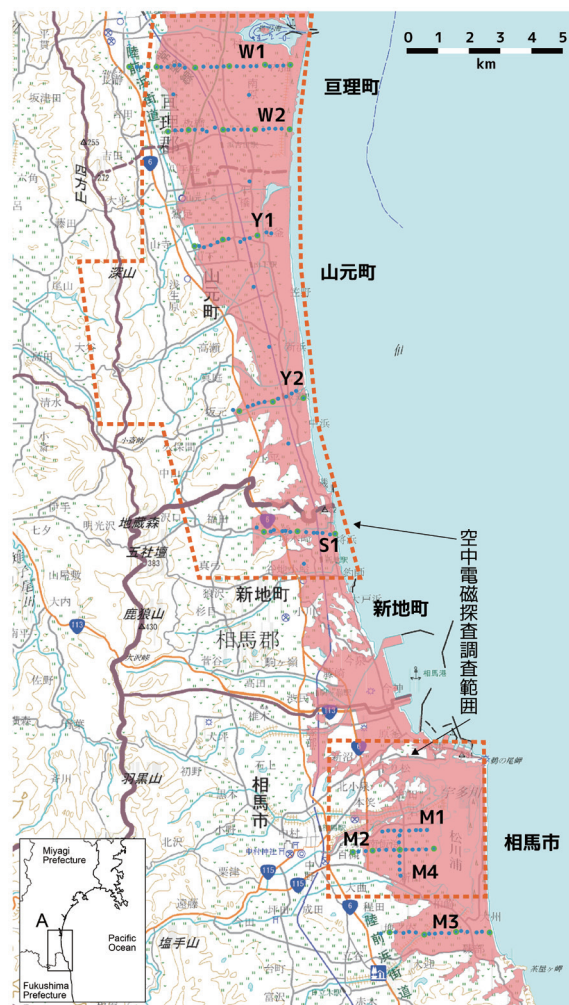
調査地域の多くは、鮮新世の基盤岩類の上に下部砂層、粘土層、上部砂層が順に堆積し、上部砂層中には不圧地下水が、下部砂層中には被圧地下水が存在すると考えられている(森ほか, 2012; 東北農政局, 2012)。また、本地域は海岸線に近いため通常でも海水の影響を受け、また沿岸地域の地下深部では海水の浸入や海水準変動による塩水の存在が知られている(森ほか, 2012; 東北農政局, 2012)。

調査地域一帯は 2011 年東北地方太平洋沖地震によって、海岸線から内陸部数 km にわたって津波が浸入し大きな被害が発生し、復旧・復興作業として一部田畑での除塩作業や一部農地・住宅地の集団移転が進められている一方、農業用取水施設の破損等により現在も農業に支障が出ている地域も存在する。たとえば、宮城県亶理郡亶理町や亶理郡山元町では、イチゴのハウス栽培が盛んであり、散水やビニールハウスの暖房のために淡水性の地下水の確保が課題となっている。また、各自治体の復興計画における農地および住宅地の移転・再編を含む土地利用計画や、JR 東日本常磐線の宮城県山元町一福島県新地町間における移設計画にも地下構造情報は必須となる、このため利用可能な淡水性地下水の確保に加え、地下水の賦存・汚染状況の把握や継続的なモニタリングが求められており、地下比抵抗構造、地下水分布の把握が重要である。

## 3. 実施方法・地点

### 3.1 電気探査

調査地域広域図(第 2 図)に示す各測線において、測点間隔 800m~1000m 程度(第 3 図)で電気探査法(直流比抵抗法)(物理探査学会, 1998, p. 241-265)を実施(計 34 点)した。電気探査法測定装置は McOHM Profiler4 (応用地質(株)製)を用い、電極、専用多芯ケーブルを用いてデータ取得した。各測点において、GPS(水平精度 5m 以下)により決定した点を中心とし、測線長 94m(電極間隔 2m, 48 電極)で測線を展開してウェンナー法とダイポール・ダイポール法の四極法にて測定を行った。測定データは解析ソフトウェア E-tomo(ダイヤコンサルタント(株)製)で逆解析し、2 次元の比抵抗断面図を作成した(第 4 図)。なお、今回の調査では全ての測点において、展開した電極測線(94m)内に高低差 1m 以上の起伏が存在しなかったため、地形を考慮した解析はおこなって



第 2 図 電気・電磁法調査地域広域図。各測線はアルファベット(W: 亶理, Y: 山元, S: 新地, M: 松川浦(相馬市))と数字により測線番号として識別する。(国土地理院 10 万分 1 浸水範囲概況図 14 より、薄赤色が津波浸水域を示す。)

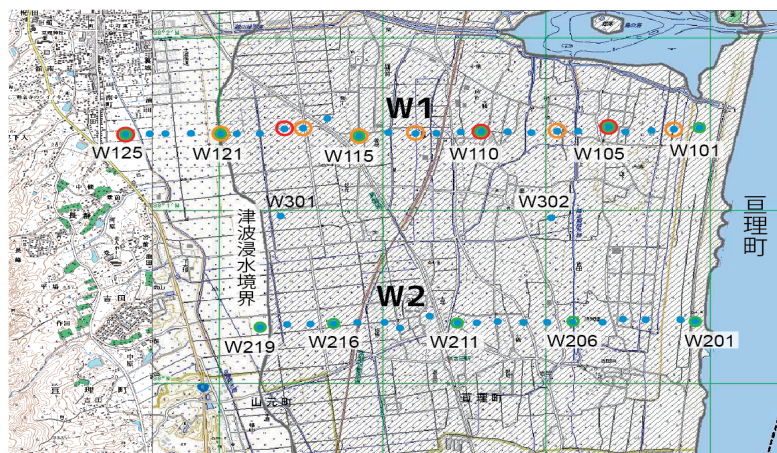
Fig.2 Site location of electric and TEM survey. (W: Watari town, Y: Yamamoto town, S: Shinchi town, M: Matsukawa-ura at Soma city.) (modified from GSI, 2011 : <http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>. Light red region indicates the inundation area of the 2011 Tsunami.)

ない。

### 3.2 電磁探査

第 3 図に示す各測線上を測点間隔 200m 程度で過渡応答電磁探査法(Transient EM 法, TEM 法)を実施(133 点)した。TEM 法では、ループ状に展開した送信電線に電流を流し一次磁場を形成、その後電流を遮断し、一次磁場





第3図 亘理町測線 W1 における電気探査, TEM 法調査測点位置 (青:TEM 法, 緑:電気探査) およびボーリング掘削点 (橙:掘削深度 20m, 赤:掘削深度 30m). (2万5千分1浸水範囲概況図 GSI, 2011: <http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku40014.html> より)

Fig.3 Location of DC and TEM survey sites in the line W1 at Watari town (Blue: TEM, Green: DC). Borehole locations are also shown as orange (drilling depth 20m) and red (drilling depth 30m) dots (based on GSI, 2011: <http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku40014.html>).

を維持しようと大地に発生する誘導電流(渦電流)によって生じる磁場(二次磁場)の応答(過渡応答)を測定する(物理探査学会, 1998, p326-331). 過渡応答は大地の比抵抗に応じて減衰が変化するため, これを測定, 解析することで地下の比抵抗構造を推定できる. 測定装置として Geonics 社製 PROTEM 受信器, PROTEM47 送信器, 専用受信コイル一式を用いてデータ取得作業をおこなった. なお TEM 法では測定する過渡応答として, 二次磁場の減衰とその時間変化(微分)である誘導起電力を測定する方法が一般的であるが, 本調査では後者の誘導起電力を測定した.

調査作業としては, GPS(水平精度 5m 以下)によって決定した各測点を中心として, 簡易測量により 50m 四方の送信ループを展開し, 中心位置に受信コイルを設置した. 取得した過渡応答データは装置付属の専用解析ソフトウェア TemixGL (Interpex 社製)によって逆解析を行い, 一次元の比抵抗構造を推定し, さらにそれらを連続表示して擬似二次元比抵抗断面(第5図)を作成した.

### 3.3 ボーリング調査

前述の各種電気・電磁探査法の測定結果を検証するため, 調査地域の中で最も平野部(主に農地と市街地)が内陸まで広がっており, かつ, 測線の半ばに津波浸水境界が存在する亘理町 W1 測線において 8 箇所(第3図, 橙丸), 宮城県山元町の 1 箇所(牛橋河口付近)で, ジオプロブ社製 6610DT による 20m 掘削と掘削時の導電率測定(四極法)を実施した. また, W1 測線の 4 箇所(第3図, 赤丸)と山元町の 1 箇所(東亜利根ボーリング社製 SP-50 による 30m の地盤ボーリング(全掘削区間でのコ

ア採取率はほぼ 100%)を実施した. コアは採取直後に現地にて 25cm 間隔で四極法による比抵抗測定をおこない密封し保管し, つくばの産総研にて約 5m 間隔でコア間隙水を抽出し, 間隙水導電率・塩素・臭素・硫酸など各種イオン濃度, 酸素および水素同位体比の分析を実施した.

## 4. 結果・考察

TEM 法の 1 次元解析(地下を水平多層構造と仮定した解析)について, 第2図で示した各測線において, それぞれの測線に含まれる測点での結果を連続表示した擬似二次元比抵抗断面図を第5図に示す. また, 電気探査については, 地盤ボーリングを実施した W1 測線上の 6 測点についての 2 次元解析結果を第4図に示す. さらに, W1 測線上の地盤ボーリング 4 箇所のコア表面比抵抗測定, 間隙水比抵抗, 塩素濃度および, 同地点で実施した TEM 法の 1 次元解析結果を合わせて第6図で比較した(なお, 本報告に掲載していないその他の結果については, 今後データベースとして収録, 公開する予定である).

第4~6図に示した電気探査および電磁探査の解析結果は, 先行実施した空中電磁探査により推定されている地下比抵抗構造, すなわち

- ・調査地域北部(亘理町~山元町北部)海岸側は地表近くの浅部(地下数 m)まで低比抵抗層が存在する一方, 内陸に向かうほど低比抵抗領域の上部深度は深くなり, 地表直下の高比抵抗領域が厚くなる.

- ・上記傾向は調査地域北部(亘理町から山元町北部)ほど



顕著であり、この地域では低比抵抗領域が内陸まで広がっている。

・一方、山元町中部以南は、高比抵抗領域が海岸方向に広がっており、低比抵抗領域は海岸から1kmほどにとどまっている

と同様の比抵抗構造を示した。さらに、亶理町の測線W1と山元町の測線Y1の空中電磁探査による見掛比抵抗断面と陸上電磁探査による擬似2次元比抵抗断面(第7図)から、空中電磁探査の探査深度(低比抵抗領域で約30、高比抵抗領域で約80m)までの両手法の結果は概ね一致した傾向を示していることが明らかになった。

また電気・電磁探査法の結果を検証するために実施したボーリングコアの各種測定・分析結果とTEM法の解析結果(第6図)の比較により、TEM法の測定・解析結果とコア比抵抗計測値はよく対応していることも確認できた。例えば電気・電磁探査により推定された低比抵抗領域における間隙水の比抵抗と塩素濃度が逆相関を示している(特に、W105やW110の低比抵抗領域では、間隙水の比抵抗は0.2~0.3 ohm-m程度、塩素濃度は $10^4$  mg/l程度であり、海水由来であると考えられる)ことに加え、コア観察による土質判定も粘土やシルトではなく砂層であることから、既存研究(森ほか, 2012, 中里ほか, 2011, 2012)での「塩水を含む(上部不圧)砂層」との推定が裏付けられたと考えられる。

ただし、空中電磁探査による見掛比抵抗構造(第7図)および逆解析比抵抗構造(例えば、特に地表から数m程度までの低比抵抗領域)と、陸上の電気電磁探査およびボーリングによる各測点での垂直方向の一次元探査結果は、相対的には一致した傾向を示すものの、定量的に明確な対応を見出すことは現時点ではできていない(第6, 7図)。一方で、空中電磁探査および陸上の各種調査から、当該深度に顕著な低比抵抗領域、あるいはボーリングコア分析から塩水と推定される領域も確認されておらず、浸水した津波の影響は地下数mまでにおいてほとんど確認できないと考えられる。また、例えば空中電磁探査結果から推定された、測点W110の深度15m程度までの高比抵抗領域(第5図W1)については、陸上探査の結果も同様の傾向となっており、間隙水分析によるCl濃度は(飲用には適さないものの)淡水であることを示しており、今回の調査で得られた水平および垂直方向の比抵抗情報は、現地での有効な水資源活用を図る上で活用できると考えられる。

以上一連の調査結果から、空中電磁探査から得られた調査地域の浅部(0~50m程度)広域比抵抗構造の推定結果(Okuma et al., 2013, 大熊ほか, 2014)の妥当性が地表からの各種比抵抗法探査およびボーリングにより概ね確認でき、また、空中および陸上の各種探査を組み合わせることが広域探査の効率的な実施に有効であると

わかった。

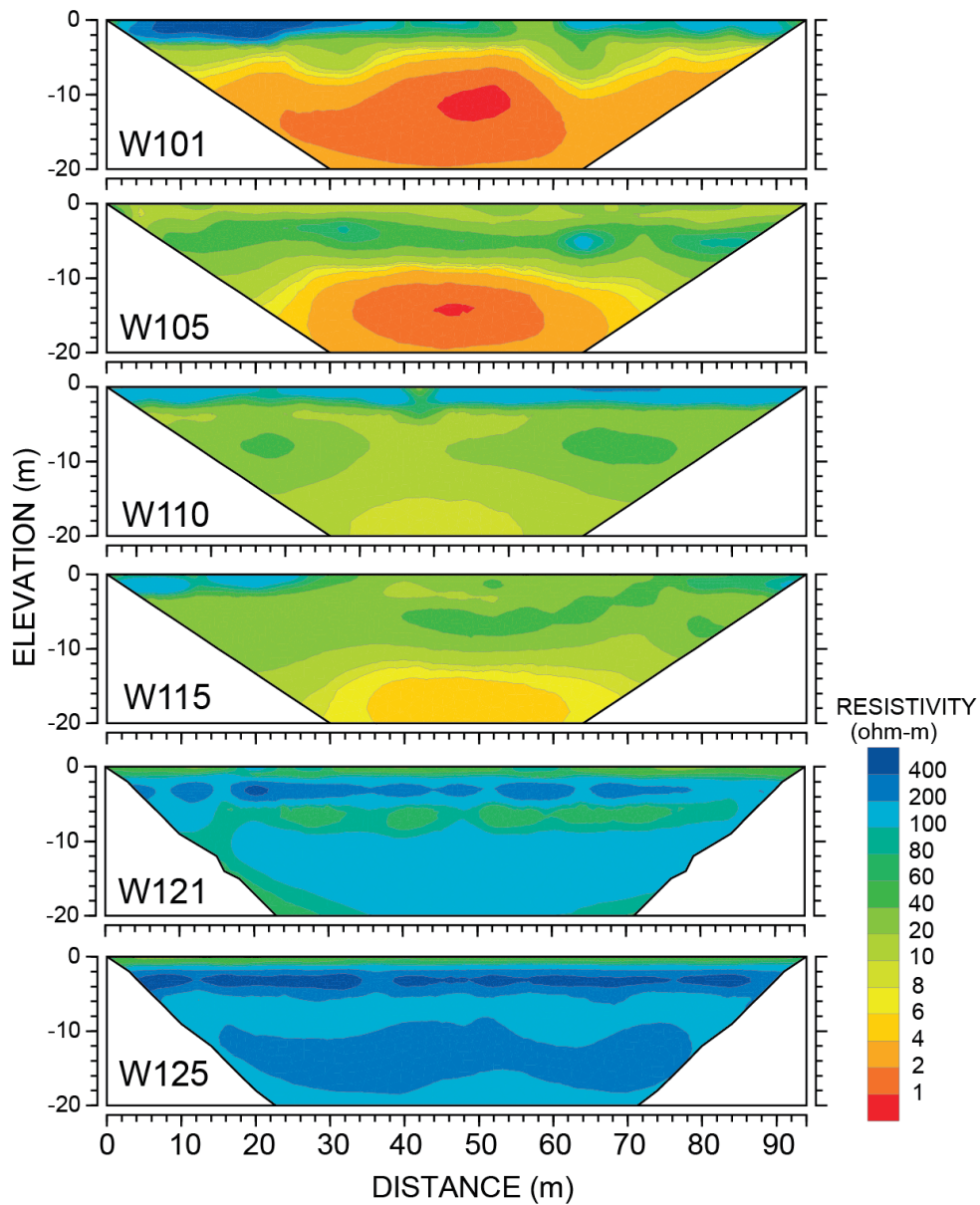
調査地域では住民、自治体、関係諸機関・組織により復興復旧が進んでいるが、農業用水の利用以外にも農地・住宅地移転、宮城県山元町以南の常磐線再敷設など、中長期の地域計画に資する地下比抵抗情報を今後も必要に応じて適宜関連自治体などに提供していきたい。

## 謝辞

調査の実施にあたっては、宮城県亶理町、山元町、福島県新地町、相馬市の関係各位および住民の皆様には様々なご協力を頂きました。東北農政局(現:東海農政局)の森氏、農研機構の中里氏には調査地域における既存研究の紹介など、情報を提供して頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

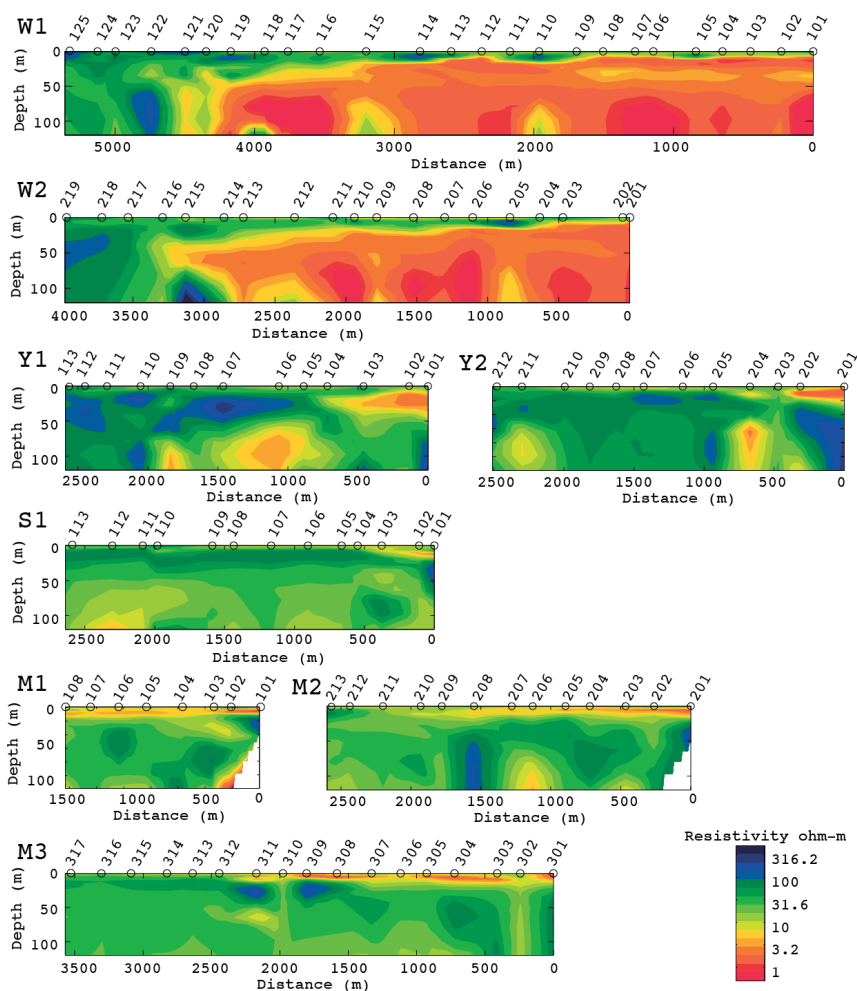
## 文献

- 物理探査学会(1998)物理探査ハンドブック, p241-265, p326-331.
- 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**, 11-23.
- 中里裕臣・森 一司・岡庭信幸 (2011) 仙台平野南部の津波被災地における地下水調査のための電気探査. 物理探査学会第125回学術講演論文集, 37-38.
- 中里裕臣・鈴木尚登 (2012) 仙台平野南部津波被災地における比抵抗モニタリング. 物理探査学会第126回学術講演論文集, 140-141.
- Okuma, S., Ueda, T., Nakatsuka, T., Mitsuhashi, Y., Jinguuji, M., and Uchida, T. (2013) Aeromagnetic anomalies in the inundation area by the tsunami of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, northeast Japan. Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium, 131-133. doi:10.1190/segj112013-033
- 大熊茂雄・上田 匠・光畑裕司・神宮司元治・内田利弘・中塚 正 (2014) 仙台平野南部沿岸地域における空中電磁・磁気探査. 地質分野研究企画室編, 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 469-478.
- 東北農政局 (2012) 地下水盆地地下水制御活用技術確立型「仙台平野南部地区」(H20-H22) 調査報告書. 東北農政局農村計画部資源課, 212p.



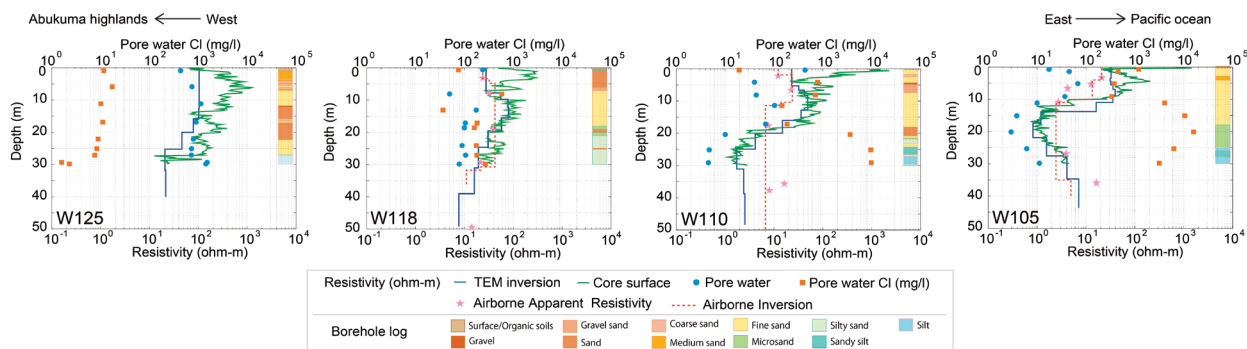
第4図 亙理町測線 W1 における電気探査法 2次元解析結果 (上から W101, W105, W110, W115, W121, W125 番測点)

Fig.4 Resistivity sections estimated by 2D inversion at six sites on line W1 in Watari town (W101, W105, W110, W115, W121, W125, from top panel to bottom).



第5図 TEM法解析結果の東西方向測線比抵抗断面図。亙理町W1, W2, 山元町Y1, Y2, 新地町S1, および相馬市松川浦M1, M2, and M3.

Fig.5 Cross-sections of the resistivity obtained by the TEM survey generated with 1D inversion results at the profile W1, W2, Y1, Y2, S1, M1, M2, and M3.

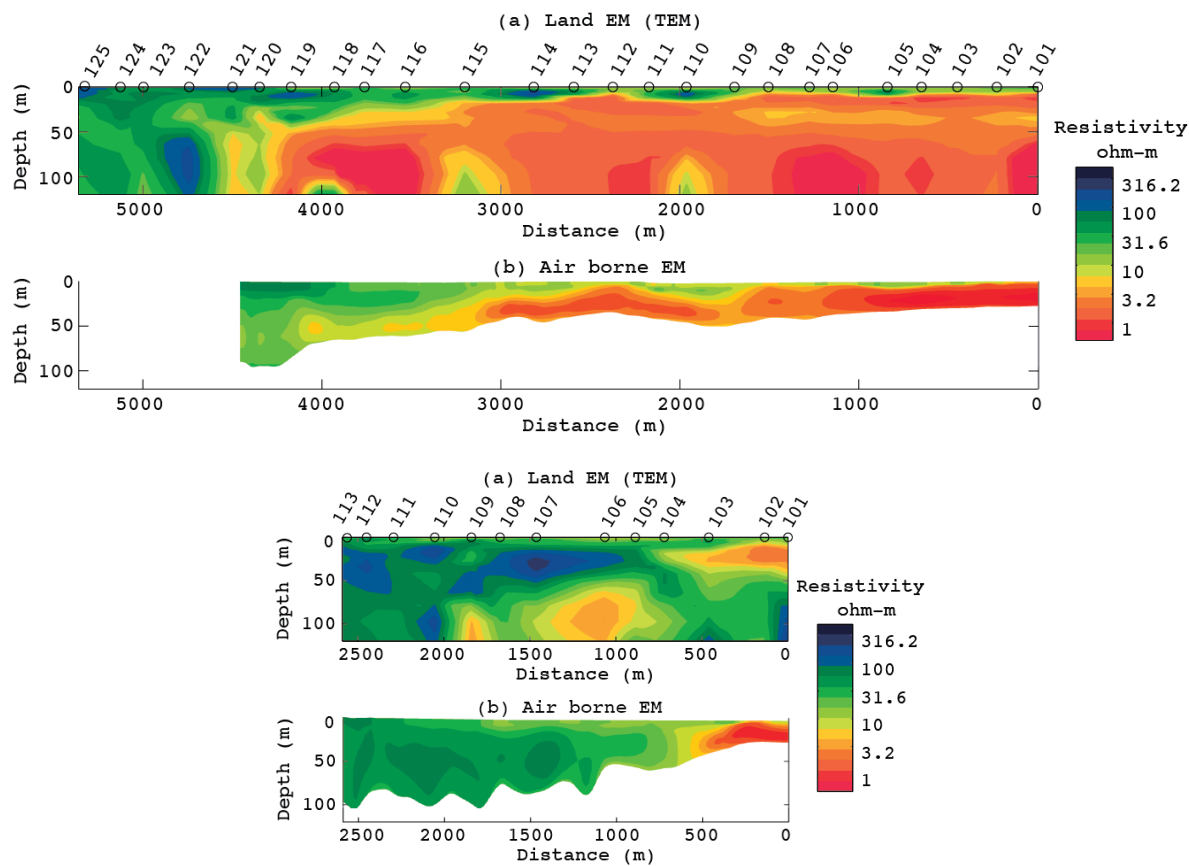


第6図 亙理町測線におけるTEM法解析結果(青線), コア表面(緑線)および間隙水(青点)比抵抗. 間隙水塩素濃度(橙点)および土質柱状図(各グラフ右)を併記.

Fig.6 Vertical profiles for the resistivity of 1D TEM inversion (blue solid line), core surface (green solid line), and pore water (blue dots). Chlorine concentrations in pore water (as orange square dots) and borehole logs are also shown.

Locations of boreholes are shown in Fig.4 as red circle.





第7図 亙理町測線 W1(上)および山元町測線 Y1(下)における (a)TEM 法比抵抗断面図と (b)空中電磁探査法による見掛比抵抗断面(Okuma et al., 2013).

Fig. 7 Cross-section of (a) resistivity by the TEM and (b) apparent resistivity by the airborne EM (Okuma et al., 2013) at profile W1 (top) and Y1 (bottom).



## 地下水汚染リスク評価解析研究 Analytical study on risk evaluation for groundwater pollution

小原直樹<sup>1,2</sup>, 井川怜欧<sup>1</sup>, 森山哲朗<sup>1,3</sup>, 平野智章<sup>1</sup>, 丸井敦尚<sup>1\*</sup>, 小野昌彦<sup>1</sup>, 町田 功<sup>1</sup>, 越谷 賢<sup>1</sup>  
Naoki Kohara<sup>1,2</sup>, Reo Ikawa<sup>1</sup>, Tetsuro Moriyama<sup>1,3</sup>, Tomoaki Hirano<sup>1</sup>, Atsunao Marui<sup>1\*</sup>,  
Masahiko Ono<sup>1</sup>, Isao Machida<sup>1</sup> and Masaru Koshigai<sup>1</sup>

**Abstract:** To make clear the impact of the Tohoku Earthquake to the groundwater environment by tsunami and an accident of Fukushima Daiichi Nuclear Plant, hydrogeological research were carried out in the east coast of Tohoku. The research project was constructed from groundwater study and geophysical sounding study. Groundwater research are operated in step by step, the first, overview work was operated in whole area by using rivers, springs and existing wells. The next, four points were selected to make a detail work with a drilling holes. And finally, evaluation of groundwater pollution risk were analyzed by groundwater flow simulations. The groundwater analysis and evaluation of groundwater risk of pollution were described in this section.

**Keywords:** groundwater risk, evaluation, Tohoku Earthquake, east coast of Tohoku, groundwater analysis

### 1. 地下水汚染リスク評価研究の概要

#### 1.1 研究目的

東日本大震災では、地震や津波、さらには原発事故によって、有害物質や放射性物質が大量に環境中に放出され、国民の健康への悪影響や生活環境の悪化が懸念されている。震災から約2年が経過し、表流水の汚染状況把握には進捗が認められるものの、地下水の汚染の状況やその将来的な挙動は十分に評価されていない。今後の地下水利用や災害対策を講じていく上でも、これまでに集められた地下水情報を一元的に分かりやすく提供することや、地下水流動特性（涵養域、流動方向等）から想定される地下水汚染の可能性を適性に評価することが求められている。本研究では、東北地方東岸地域を対象として、広域的視点から想定される地下水の3次元流動方向や流動速度を概観するとともに、大震災に起因する複合災害が地下水環境に与える汚染リスクについて評価を行うこと、また、これらの活動によって得られた知見をエンドユーザーに分かりやすく提供することを目的とする。

#### 1.2 研究内容

広範囲にわたる地下水汚染リスクを評価するためには、汚染物質の移行に関連する地下水流動系を科学的に評価し、表流水と地下水の相互作用、地下水の質・量、循環速度を把握することが重要である。

本研究では、放射性物質による土壌汚染が確認された地域（北上川、鳴瀬川、最上川、阿賀野川、名取川、阿

武隈川、久慈川、那珂川、利根川、七北田川の各流域に、北上高地、阿武隈高地を加えた12地域）を対象とし、水循環解析及び地下水流動解析を実施して、広域の地下水流動系を捉えた上で放射性物質の摂取可能性について評価する。また、産業技術総合研究所（以下、産総研）が保有する各種データや詳細調査・概要調査で得られた情報、シミュレーション結果が格納されたシステムの構築を行う。

本研究は大きく次の3つのパートに分かれる。第1パートでは、対象地域全体の資料を収集した。この収集・整理された資料は2つに大別され、その一つは水循環解析、地下水流動解析に用いる水文関連資料である。もう一つは、福島第一原発事故により環境に放出された放射性物質（特に放射性セシウム）の環境中での分布および土壌環境中での挙動に関する資料であり、それぞれ後述する当該研究HPに掲載した。

第2パートは広域の数値解析で、前述した業務対象範囲について、その広域における地下水流動をシミュレートすることにより、地下水の3次元流動方向や流動速度を概観することを目的とした。ここではまず、収集した水文関連の資料を用いて水循環解析を行う。さらに、そこで算定された地下水涵養量を地下水流動解析の入力データとすることにより、流域内の地下水流動をモデル化し、汚染物質の流動を評価した。なお、本解析では、いずれもOpen CodeであるSHER（水循環解析モデル）およびMODFLOW（地下水流動解析モデル）を用いること、および解析手法をマニュアル化することにより、再現が可能となるように配慮した。

本報告は「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究 中間報告」に平成25年度以降の調査・研究実施内容を追記したものである

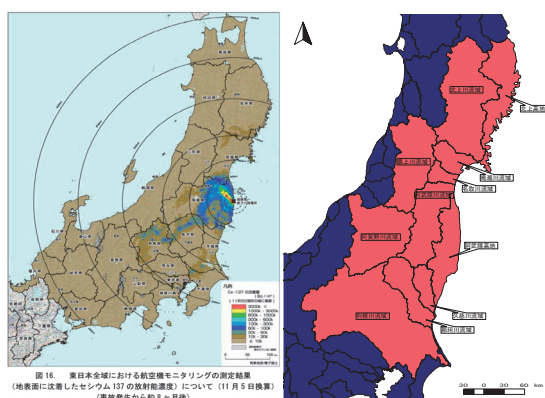
\*Corresponding author

1. 地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, AIST)

2. 現所属：日本工営(株) (Nippon Koei Co., Ltd.)

3. 現所属：サンコーコンサルタンツ(株) (Suncoch Consultants Co., Ltd.)

第3のパートでは、データベース構築を構築した。収集した資料を整理し、データベース化するとともに、将来的に一般の方々に地下水の現状を把握いただくことを目的として、概要調査で実施された地下水水質調査の結果をGoogleMapで閲覧できるシステムを構築した。また、第2パートでモデル化した地下水流動を一般の方々が直感的に把握出来るようにすることを目的とし、これをアニメーション化し、ホームページから確認できるシステムを構築した。



第1図 研究対象流域位置図。左図：文部科学省による第3回航空機モニタリングの測定結果（文部科学省，2011），右図：解析対象範囲

Fig.1 Map of study area. right: area of analysis, left: monitoring by plane (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, 2011).

## 2. 広域地下水リスクシミュレーション

### 2.1 広域数値シミュレーションの目的

放射性物質の土壌への沈着は東北地方東岸地域一帯に広がった。また、表流水を經由した二次・三次濃縮によって、河口付近への汚染被害が報告されている。一方、地下水については、2011年11月に福島県大熊町で2Bq/Lが確認されて以来、その放射性セシウムによる汚染は確認されていない（環境省原子力発電所事故による放射性物質対策における環境放射線等モニタリング結果による）。しかし、低濃度汚染による人体への健康リスクについての一般市民の懸念があり、帯水層への汚染リスクの評価が望まれる。また、今後設置される最終処分場候補地の水理地質学的観点からみた安全性の判断が求められる。

よって、本研究では、広範囲でかつ長期間におよぶ放射性物質の影響評価を目的とし、水循環系を考慮した広域（水系）スケールの地下水流動特性を明らかにする。つまり、「放射性物質が沈着した土壌を通過した地下水

が、移動する範囲」、 「そういった地下水を人間が摂取するリスク」について、広域シミュレーションを用いて推察する。本数値シミュレーションの解析結果の解釈では、放射性物質が地下水に溶け込み、地下水と等速で帯水層中を移流すると仮定している。これは、第2章で示した放射性セシウムの動態を考慮するとやや考えにくい仮定だが、一般市民の安心・安全のため、そのような仮定を引いた。

### 2.2 広域数値シミュレーションの基本構造

水循環の観点から見れば、地表水と地下水は相互に関連するものであるため、両者を連携したモデルの作成が必要となる。今回適用したモデルでは、水循環解析および地下水流動解析の係数設定にあたっては、収集した資料から値を抽出し、一定の範囲内で試行錯誤的にこの係数を変化させることにより、表流水の流量、地下水位をモデル上で再現した。具体的には、水循環解析では、河川流量を検定対象として雨量、蒸発散量、地形、土質、流況等に係るデータを設定し、地下水流動解析では、地下水位、地下水流動量を検定対象として透水係数、貯留係数、層厚等を設定している。降雨から地下水浸透までの地上部の水循環解析の過程は、分割流域ブロック単位の計算である。この計算から地下水浸透量を算出し、地下水流動解析モデルを構成するメッシュ要素単位へ浸透量を均等配分することにより地上部の水収支と地下水流動の計算を連結した。

### 2.3 水循環解析

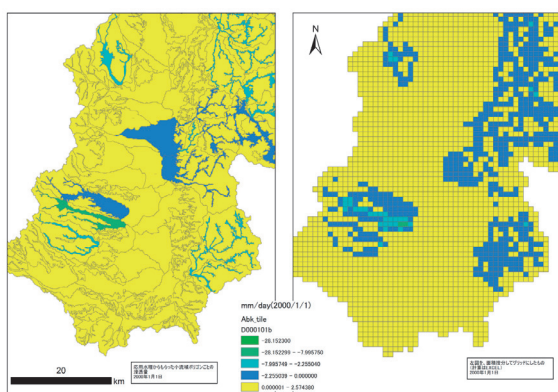
水循環解析では、水循環の素過程である降雨、蒸発散、浸透、地表面流出、中間流出、基底流出、地表面や地下水での貯留、河川流出などの一連の水文過程を時系列でモデル化することができる。水循環モデルは、タンクモデルのように流域情報を一元化してモデル化する集中型モデルと、流域を要素により分割し、それぞれの要素に様々な流域特性を与えてモデル化を行う分布型モデルに大別できる。一般に、集中型モデルは流域全体での降雨の水や汚濁負荷物質の流出等について検討することができるが、流域内の局地的な特性変化や施策の実施効果を空間的に把握し検討することが難しい。このため、コンピューターの処理能力の向上に伴い分布型モデルが構築される事例が多くなっている。

分布型モデルでは、様々な“物理型”流出解析モデルが提案されており、その大部分が方形グリッドを基本としている。本業務で適用したSHERモデルの分割流域ブロックは、一つで数平方キロメートルの大きさを持つため、一般的にグリッドベースのモデルの計算要素と比較して大きい計算単位となる。しかし、山岳地域では1km四方のグリッドでも、平均標高や平均勾配といったモデルパラメータが正確に得られるものではない。SHERモ



デルでは、斜面勾配、地質など水文流出過程の視点で同様とみられるブロック分割を行うことから、その標高、勾配、土地利用、地質パラメータなどの代表性が高くなっており、計算精度は高解像度のグリッド型物理モデルに対して遜色ないとされている。また、SHER モデルは（社）雨水貯留浸透技術協会のホームページからも無料でダウンロードすることができる。以上の理由により、本研究では、解析精度、開発コスト、計算時間を考慮して、SHER モデルを地下水循環モデルとして採用した。

地下水流動解析とのデータの連携は、SHER モデルによって推定された地下水涵養量を GIS における面積按分機能を用いて、小流域ブロックにおける涵養量を地下水流動解析に用いるメッシュに配分した（第2図）。



第2図 SHER モデルから地下水流動モデルへの涵養量の変換（北上川流域の例）

Fig.2 Convert of recharge ratio from SHER model to groundwater flow model (Kitakami Basin).

## 2.4 地下水流動解析

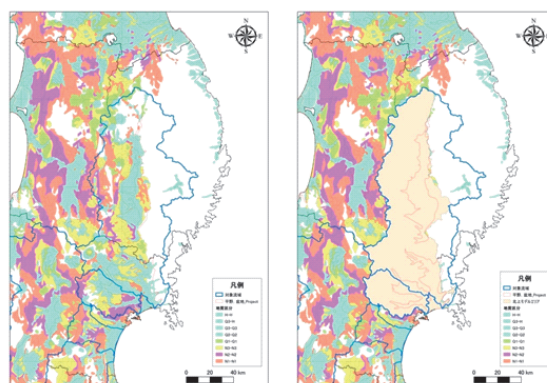
地下水流動解析には、USGS の開発した MODFLOW を用い、River, Drain, GHB, Recharge, Well の各オプションパッケージをメインプログラムに付加してモデルを作成した。

解析領域は、水循環解析で対象とした12地域を地下水盆地としては一体として考えるべき複数の河川流域を一つのモデルエリアとして5つ解析領域に扱った（第1表）。また、これらの5つ解析領域のうち、地下水の浸透がほとんど見込めない基盤（先新第三系）が露頭している部分を外すように設定した。ただし、これら地下水流動モデルから除外した部分についても、そこで浸透し流化した地下水については、地下水モデル外周に内接する水循環モデルのブロックに涵養量をして加算し、水収支のバランスが水循環モデルの結果と齟齬がないように配慮した。

第1表 水循環モデルエリアと地下水流動モデルエリアの関係

Table 1 Relationship between water cycle model and water flow model.

水循環モデルエリア	地下水流動モデルエリア
北上高地	北上エリア（北上平野、石巻平野北部、含む）
北上川流域	
鳴瀬川流域	
七北田川流域	阿武隈エリア（郡山盆地、福島盆地、仙台平野、磐城海岸低地、含む）
名取川流域	
阿武隈川流域	
阿武隈高地	いわきエリア（常磐海岸低地、含む）
最上川流域	最上エリア（長井・米沢盆地、山形盆地、新庄盆地、含む）
阿賀野川流域	会津エリア（会津盆地含む）
久慈川流域	関東エリア（関東平野含む）
那珂川流域	
利根川流域	



第3図 地質と水循環モデルエリア、地下水流動モデルエリアの関係（北上エリアの例）。解析条件は、第2表～第3表のとおりとした。

Fig.3 Area of water cycle model and water flow model.

第2表 解析条件

Table 2 Condition of analysis.

条件	内容	注記
解析範囲	対象領域を包含する十分広い範囲	鉛直方向上面：地表面（+海底面） 鉛直方向下面：帯水層下面
グリッド分割	500m×500m	
レイヤー分割	Q1、Q2、N1、N2、N3の5レイヤー	越谷・丸井（2011）
アプリケーション（解析コード）	Schlumberger Water Service 社製 VisualMODFLOW (MODFLOW)	三次元飽和地下水流動モデル
解析方法	非定常解析	
再現対象	平面地下水位、観測孔水位、地下水流動量	

第3表 解析モデルの設定条件  
Table 3 Condition of analytical model.

条 件	内 容	設 定 方 法
帯水層条件	水理地質構造 物性などの設定	資料調査結果をもとに各層ごとに設定 データがない場合には一般値を設定
揚水条件	揚水井戸（揚水量）から差し引く	
境界条件	固定水頭境界 かん養条件などの設定	海域：標高 0m に排水境界条件 陸域：全域地表面に排水境界条件
初期条件	地表面排水境界条件での 定常解析の収束水位	

キャリブレーションは、既存資料に記載されている地下水位の平面分布、地下水位の時間変動および地下水流動量をキャリブレーションターゲットとして、キャリブレーションを実施した。地下水位の平面分布、地下水流動量は概ね表現され、地下水位の時間変動は平均値レベルでは概ね表現されていることを確認した。

### 2. 5 地下水汚染の将来予測

地下水流動解析の結果にParticle Trackingによって、その地下水流動と等速で汚染物質が移動すると想定した場合の100年分の軌跡を確認した。なお、汚染物質の発生位置は、文部科学省によって実施された放射性物質沈着量調査地点および放射性廃棄物の最終処分候補地とした。

将来予測の結果、先新第三紀の地層が露頭する領域や層厚の薄い新第三紀の地層が露頭する領域では、降雨が浸透しても地下水は流動することなく地表に流出する箇所が多い。阿武隈高地、関東北部などでこの傾向が特に認められ、例えば放射性物質汚染対処特措法において、指定廃棄物の最終処分場候補地となった栃木県矢板市や茨城県高萩市の地点や、いわゆるホットスポットとみられる岩手県一関周辺も、地下水の観点からは、そのような特性がある地点と推定された。

会津盆地や、福島県中通りの福島盆地、郡山盆地では、地下水は、盆地周辺で涵養したのち、数十年のオーダーで滞留し、阿武隈川沿いで流出することが推察された。

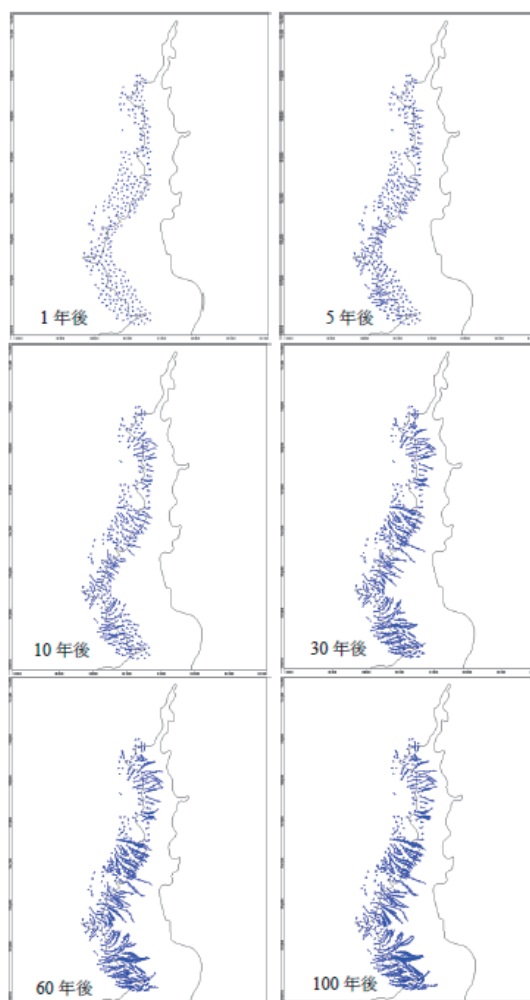
関東平野のうち、放射性セシウムの沈着量が相対的に高い栃木県那須が原地域に涵養した地下水は、周辺の揚水や河川に流出し、箒川以南には、ほとんど流下しないと推察された。また、いわゆるホットスポットである千葉県柏市周辺における地下水は、水涵養後、毎日10cm以下の遅い速度で河川方向へ流動することが推察された。

解析上の課題としては下記の点があげられる。

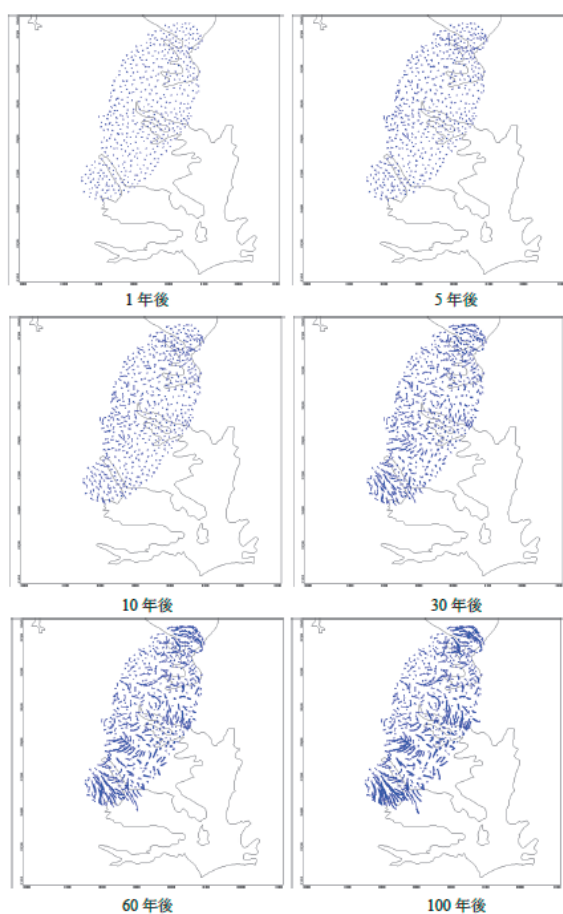
東北地方では、地下水に関する観測結果が、限定されており、この結果、解析に用いる水理定数も一般値を用いることが多くあった。揚水量が十分に集計されていない県も多い。また、地下水位の観測井の無い地下水盆すら存在する状況である。今後、広域的な地下水資源管理

を実施していくうえでは、モニタリング体制の強化が必要と考える。

広域の地下水流動解析を行う上で統一された地質境界である越谷モデルは非常に利便性が高いモデルであり、今回の業務では、解析モデルの地層境界として適用した。一方、例えば関東エリアなどは、第四紀の地層の中でも複雑な砂・粘土の互層構造が発達しており、今回のモデルでは十分に表現できているとは言い難い。今後、詳細なモデル検討を実施する際には、深部地下水の水位変動等も考慮し、帯水層の縦方向の透水係数を設定する必要がある。



第4図 北上盆地（北部）での Particle Tracking 結果  
Fig.4 Particle tracking analysis on Kitakami Basin.



第5図 北上盆地（南部）での Particle Tracking 結果  
Fig.5 Particle tracking analysis on Kitakami Basin.

### 3. 津波リスクシミュレーション

本研究では、東北地方東岸地域のうち津波被害が甚大であった仙台平野を対象として、広域的視点から想定される地下水の三次元的な流動方向や流動速度を概観するとともに、大震災に起因する複合災害が地下水環境に与える汚染リスクについて評価を行った。また、これらの活動によって得られた知見をエンドユーザーに分かりやすく提供することを目的として各種データの GIS 化を行った。さらに、今後想定される東海・東南海地震への備えとして、大規模災害に対する地下水保全や需給体制のあり方に視点を置いた提言を示した。

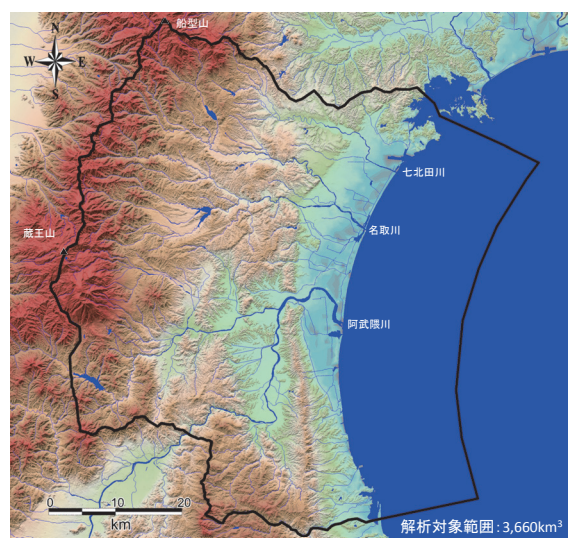
なお、広域の三次元水循環挙動および塩水・汚染物質の挙動を評価には、汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS を使用した。

#### 3. 1 リスク評価対象物質の選定

地下水汚染リスク評価解析で対象とする汚染物質は、津波由来の塩分のほかに、津波堆積物を起源としたヒ素とした。

#### 3. 2 水理地質構造モデルの構築

対象領域は仙台平野全体とその後背山地および近海域を含む約 3,660km<sup>2</sup>とした (第6図)。そして、既往地質資料に基づき、解析領域の三次元水理地質構造モデルを構築した。そのうち、主要河川に対しては、河川整備計画等から河床標高を概略で割り当てた。平面格子の水平解像度は、低地部で 10~20m, 山間部では 500m~3km 程度とし、構築した平面格子は、東西方向に 116 分割、南北方向に 353 分割となった。深度方向の分割数は 31 分割とし、総格子数は 1,259,747 となった。水理地質区分およびパラメータは、帯水層の透水係数の文献値を参考に透水係数の初期値を設定した (第4表)。等価粗度係数は土地利用区分に応じて初期値を与えた。



第6図 解析対象領域（仙台平野）  
Fig.6 Area of analysis (Sendai Plane).

第4表 初期設定物性値

Table 4 Hydraulic conditions of the analysis.

水理地質区分	透水係数(cm/s)	有効間隙率(-)
表土層	$5.0 \times 10^{-2}$	0.4
沖積粘土層	$1.0 \times 10^{-6}$	0.1
沖積砂礫層	$8.0 \times 10^{-3}$	0.3
洪積粘土層	$1.0 \times 10^{-6}$	0.1
洪積砂礫層	$8.0 \times 10^{-3}$	0.3
先第四系基盤岩	$1.0 \times 10^{-6}$	0.1



揚水量は、東北農政局計画部（1980）による地下水盆地別揚水量を参考に設置した。ただし、本件等では先第四系基盤岩からの取水はしていないと仮定した。

積雪・融雪量の算定には、タンクモデルを用いた菅原の手法（菅原，1984）によった。モデルへ与える融雪量の入力は、対象領域をティーセン法によって分割した降水量を用いた。また、気温については、ティーセン法によって分割した気温から、標高による気温減率（ $0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ：理科年表，2004）を考慮した。

解析条件として、側面・底面は閉境界とし、上面は定圧境界とした。海域は水位を0mで固定し、塩分濃度35‰の濃度固定境界に設定した。なお、解析対象領域には阿武隈川上流域が含まれないため、解析対象領域の境界と阿武隈川、白石川の交差する2地点を流入境界に設定し、直近の流量観測所である萩崎・関・八幡の3地点の観測流量から流入量を与えた。

流況再現解析は、まず初期定常解析を行い自然状態の再現した復元を行い、続いて、季節変動を考慮した非定常解析を行い、地表水と地下水の流域の流動特性を再現する。これらの結果と観測結果と照合し検証を行い、本モデルの妥当性を検証した。検証対象は河川流量と地下水位とした。再現解析の結果、沖積砂礫層および洪積砂礫層の透水係数は $5.0 \times 10^{-2}$  (cm/s) と同定され、これら以外のパラメータは初期値が妥当と同定された。

### 3. 3 地下水汚染の将来予測

#### 1) 汚染源分布の設定

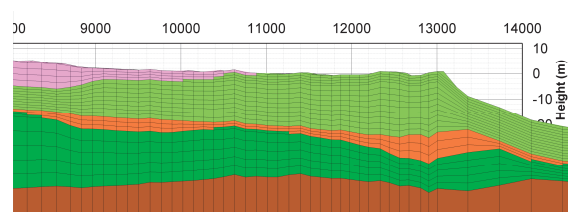
汚染源のモデル化をするにあたって、三次元モデルへの供給方法によってどの程度の差があるかを、事前に二次元断面モデルによって把握した後、将来予測解析を実施する。二次元断面モデルによる試解析では、塩分を考慮した密度流解析を以下の3ケース実施した。

- ・ケース①：津波波形を外力として与えた津波氾濫解析によって地表水が再配置された後に物質移行解析を実施。
- ・ケース②：初期状態は、表土層に水深30cm分の塩分が直接供給された状態とし、物質移行解析を実施。
- ・ケース③：初期状態は、地表面に水深30cm分の海水が直接供給された状態とし、物質移行解析を実施。

断面モデルは、仙台平野における特徴的な勾配の少ない地形である名取川北側の断面を選定した。断面モデルの地質区分を第7図に示す。土木研究所氾濫シミュレーションマニュアル（建設省土木研究所，1996）より、2次元不定流モデルを適用した場合の氾濫解析には、粗度係数の目安として、水田、畑：0.025、宅地：0.04、山林：0.06が示されている。これらを基にケース①では各土地利用種に対して粗度係数を設定した。また、ケー

ス①において与える津波波形は、対象地域の海水位データの入手が困難であったため、近隣地点の観測データで代用し、いわき市小名浜（気象庁）の長期観測データを相馬（気象庁）の最大水位でスケールした疑似波形を津波外力として用いることとした（森ほか，2012）。

濃度観測点および各観測点における塩化物イオン濃度の時系列変化を第8図に示す。海岸線から約700mの



第7図 断面モデル地層区分

Fig.7 geological cross section of the model.

深度5mに観測点①を、海岸線から約1400mの深度5mと25mに観測点②・③を配置した。全観測点においてピークの時期は1年以内となる。

ケース①とケース③の違いは津波氾濫解析を実施しているか否かである。よってケース①では流動場が津波の影響によって変化し、ケース③と比較してピークが早く出ている。またケース②では土壤中に直接塩分を供給しているため、その他のケースと比較して減衰が緩やかになり長く続く。

深い観測点では浅い観測点と比較して減衰が緩やかに長く続き、全ケース共に10年経過後もピークの3分の1程度の塩化物イオンが残る。将来予測解析を実施するにあたっては、塩分の供給方法によって上記の差が出ることを把握した上で、安全側に評価できるケース②の土壤中に直接汚染物質を供給する方法を採用した。

#### 2) 将来予測に用いる気象・土地利用

使用する気象条件は非定常解析で使用した過去10年間(2002年～2011年)の月単位の外力とする。ヒ素化合物に関する予測解析では希薄溶液として扱えるため、現況再現解析結果の流動場を用いた移流分散解析を実施する。

土地利用に関しては、復興整備事業土地利用構想図と解析で使用した2006年土地利用メッシュを比較して土地利用に大きな変化がないことが確認されたため、土地利用の変化は考慮しないこととした。

塩分供給源は、①津波の浸水によって短時間で地下浸透する海水に含まれる塩分、②津波堆積物より浸出して地下浸透する海水に含まれる塩分を考慮し、解析において入力する海水量は、①で推定した海水量と②で推定された津波堆積物層厚に土壌層の間隙率(0.4)を乗じた海水量を足し合わせた海水量に含まれる塩分を土壌層



に初期条件として与えた。

ヒ素化合物の分布領域は、観測値に基づき空間補間した土壌溶出量の推定量から、Spitz (2003) の線形等温式に従いその汚染物質質量を算定し、負荷量として土壌層に初期条件として与えた。

### 3) 将来予測シミュレーション

解析ケースは塩分（ケース A：密度流を考慮，津波到来から 10 年後まで）とヒ素（ケース B：密度流を考慮しない，津波到来から 1 万年後まで）の 2 ケースとした。

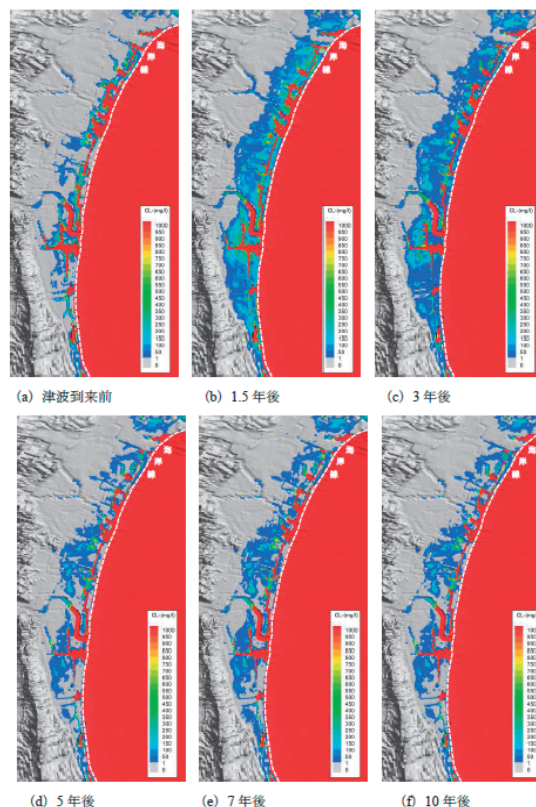
#### 1) ケース A

ケース A の解析結果による深度 5m における塩化物イオン濃度分布の時間変化（津波到来前，1.5 年後，3 年後，5 年後，7 年後，10 年後）を第 9 図に示す。深度 5m では 1.5 年から 3 年でピークとなり，その後減衰する。塩化物イオンの水道水基準値は 200 (mg/L)（厚生労働省，2003a），農業用水基準は 500~700 (mg/L)（長崎県農林技術開発センター，2005）である。10 年後においても平野部では水道水基準を超える部分が残る。これは，沖積砂礫層の上部に沖積粘土層が分布する範囲とおおよそ一致する。沖積粘土層は透水性が低いため，塩水の移動が遅くなり周囲の沖積砂礫層と比較して塩分が滞留しやすい。

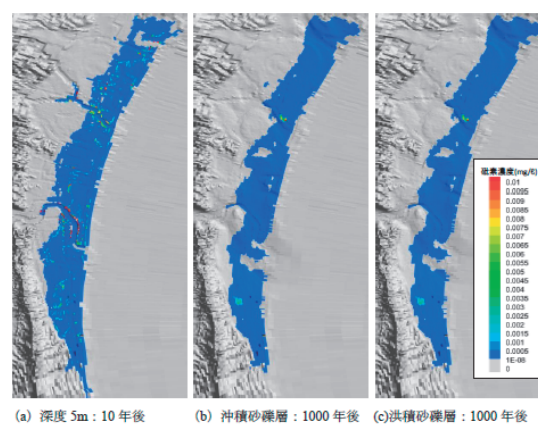
#### 2) ケース B（第 10 図）

深度 5m におけるヒ素濃度の時間変化は 10 年後付近でピークとなり，その後減衰する。ヒ素の水道水基準値は 0.01 (mg/L)（厚生労働省，2003b）である。10 年後には基準値を超える部分が川沿いの湧出域で見られるが，その後はほぼ基準値を下回る結果となった。しかしヒ素は移行時間が非常に長く，微量であるが数万年は土壌中に残留する。

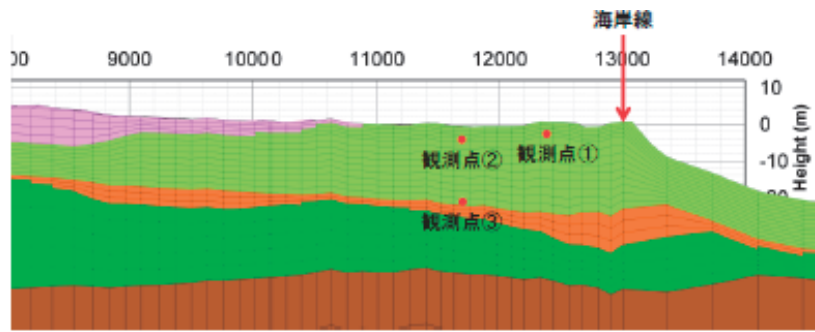
同様に沖積砂礫層と洪積砂礫層におけるヒ素濃度分布の時間変化から，両帯水層においては 100 年後あたりまで汚染は進行していないと見られるが，1 万年後には緩やかに地下水中へ溶出する。ヒ素濃度は基準値を大きく下回るものの，100 年~数万年程度で汚染が緩やかに進行することが分かった。



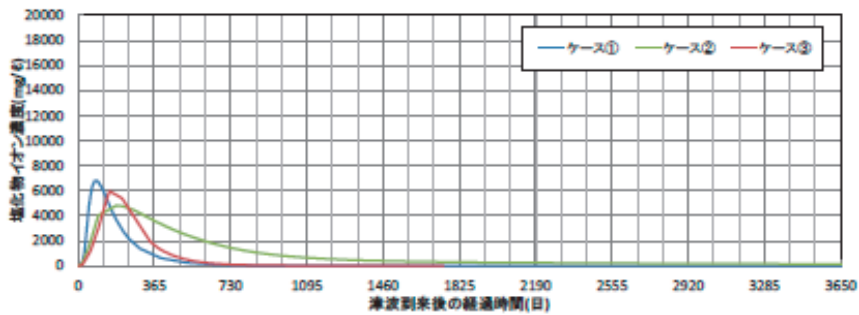
第 9 図 深度 5m の塩化物イオンの濃度分布の予測結果  
Fig.9 Distribution of Cl<sup>-</sup> concentration in 5m depth.



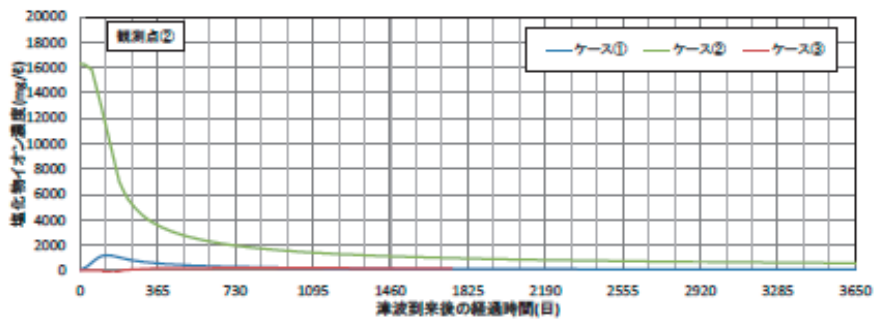
第 10 図 地下水中のピーク時のヒ素濃度の予測結果  
Fig.10 Distribution of a peak As concentration in groundwater.



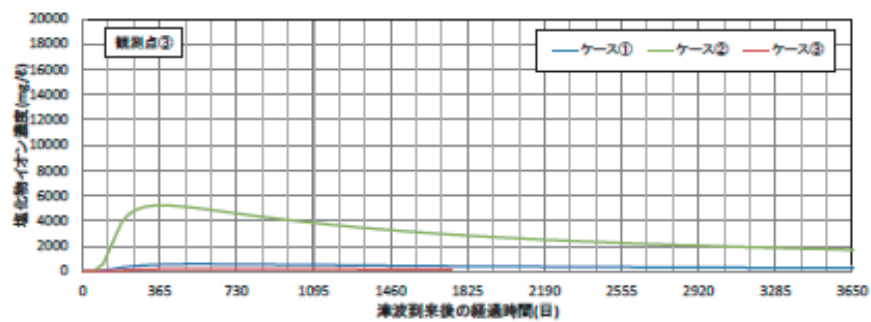
(a) 濃度観測点の位置図



(b) 観測点①における塩化物イオン濃度の時系列変化



(c) 観測点②における塩化物イオン濃度の時系列変化



(d) 観測点③における塩化物イオン濃度の時系列変化

第8図 観測点の位置と各観測点における塩化物イオン濃度の時系列変化

Fig.8 Changes in concentration of Cl ion on the observing point.

## 4. 結論

### 4. 1 広域地下水汚染リスクシミュレーション

放射性物質の挙動に係る既存資料調査の結果から、福島第一原発事故により環境中に放出された放射性物質のうち、<sup>137</sup>Cs が、その放出量が多くかつ半減期が数十年単位であることから、万が一地下水に溶出した場合は、最も人体へ影響を与える危険性の高い物質と判断された。但し、Cs は土壤中の粘土粒子に選択的に吸着・固定されることが、室内試験や実際の環境中での分布からも実証されている。よって、まず文献調査の結果からは、放射性物質の地下水中での長距離移動は非常に考えにくいと推察された。広域数値シミュレーションでは、次のことが推察された。

- ①浅層地下水の流動ベクトルから垂直方向のスカラ値を抜き取るにより、平面2次元における地下水の涵養と流出の過程の表現が可能となった。これにより、例えば放射性物質が沈着したエリアに浸透した水が、地下深くに浸透するか、もしくは直ぐに流出するか、推定することができる。
- ②先新第三紀の地層が露頭する領域や層厚の薄い新第三紀の地層が露頭する領域では、降雨が浸透しても地下水は流動することなく地表に流出する箇所が多い。阿武隈高地、関東北部などでこの傾向が特に認められ、例えば放射性物質汚染対処特措法において、指定廃棄物の最終処分場候補地となった栃木県矢板市や茨城県高萩市の地点や、いわゆるホットスポットとみられる岩手県一関周辺も、地下水の観点からは、そのような特性がある地点と推定された。
- ③福島県中通りの福島盆地、郡山盆地では、地下水は、盆地周辺で涵養された後、数十年のオーダーで滞留し、阿武隈川沿いで流出することが推察された。
- ④関東平野のうち、放射性セシウムの沈着量が相対的に高い栃木県那須が原地域に涵養した地下水は、周辺の揚水や河川に流出し、碓氷川以南には、ほとんど流下しないと推察された。また、いわゆるホットスポットである千葉県柏市周辺においては、降水は、浸透して地下水となった後、毎日10cm以下の遅い速度で河川方向へ流動することが推察された。
- ⑤本業務の過程で、水道用に使用されている井戸の位置は把握できなかったが、環境省による名水百選の湧水、地下水などの多くは、滞留時間が数十年以内の比較的若い水であることが推察された。

### 4. 2 津波汚染リスクシミュレーション

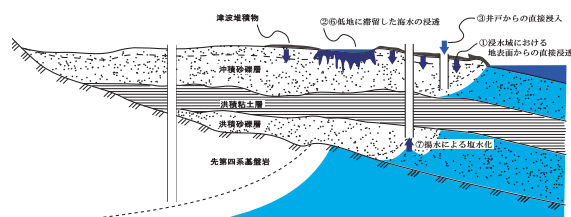
本研究では、津波によって生じる地下水汚染リスクを評価するため、東北地方東岸地域のうち津波被害が甚大であった仙台平野を対象として、既存の水文地質資料に

基づいて地下水を含む広域水循環シミュレーションを実施し、地下水の流動を推定し、地下水中の塩水や汚染物質の将来予測を行った。

水循環を理解するために必要なデータである収集した既存資料は、調査位置、計測値の分布、測定結果の経時変化を閲覧可能にすることで、これまで分散していた情報を一元化して提供することを可能とした。

収集整理したデータに基づき、広域の水循環解析により過去10年間の河川流量、地下水観測データと概ね整合する地下水流動場を再現し、主に平野部で涵養した水が仙台平野の地下水の起源であり、浅い沖積砂礫層では河川へ湧出、洪積砂礫の地下水は海域へ流出していることを示した。塩化物イオンとヒ素を対象とした密度流及び物質移行解析による将来予測の結果、塩化物イオン濃度は沖積砂礫の上部で影響が大きく、津波による1.5~3年でピークの濃度を示したものが減少傾向にあるものの、10年以上その影響が残存する地域がある。ヒ素については、重金属の中では移動しやすいとはいえ、塩化物イオンと異なって土壤に吸着して移動が遅延するため、低濃度ではあるが10年程度で津波の影響が浅層帯水層に現れる、土壤に長期間残留する傾向にある。

このような津波に伴って生じる地下水への塩水の浸入経路は、スマトラ島沖地震による浅層地下水や水供給についての影響をまとめた Villholth ら(2005)の報告において、地下水の塩水化を引き起こすメカニズムとして、①浸水した地表から浸透、②塩水が残存した低地から浸透、③浸水した井戸から浸入、④海岸線の内陸側への移動に伴う塩水くさびの浸入、⑤津波の圧力による淡水レンズの平衡状態の乱れ、⑥沼地、河川からの塩水の浸入、が挙げられている。また、LeClerc ら(2008)は塩水の浸入プロセスとして⑦揚水の影響、も追加した概念



第11図 地下水への塩水浸入経路の概略図

Fig.11 Path of saline water to groundwater.

図を示している。

本研究で対象とした仙台平野でもこのメカニズムは同様であり、仙台平野の代表的な地質断面に塩水浸入経路の概略は第11図のように表すことができる。ここで、海岸線の移動の程度が大きくないこと、一時的な平衡状態の乱れがあった可能性もあるが明確ではないことから、これらについては図示していない。



このような塩水浸入経路のうち、将来想定される南海トラフの巨大地震に伴う大規模災害に備えて我々が対処できるのは、津波が冠水しても井戸に海水が浸入しない構造にすること、災害時においても塩水化を生じさせない適正な井戸利用を推進することだと考える。内閣府(2012)では、南海トラフ巨大地震において10m以上の津波高さが想定される地域が広範囲に推定している。

災害時においても貴重な淡水源である地下水を有効に利用するためにも、災害時に利用できる井戸を十分に確保しておくこと、その井戸が災害時にも損傷しないようにすること、塩水化をさせないようにすることを確実にしておかなければならない。東日本大震災における水道水源の被害は、厚生労働省健康局水道課(2012)によると、津波に伴う水源の塩水障害は、津波の遡上範囲に存在していた浅井戸で最も多い。その半数以上は塩化物イオン濃度が低下するまでに100日の期間取水停止となっていることが報告され、涵養域における海水の地下浸透と井戸内浸入が原因であることが示されている。一方、深井戸については採水層は津波による海水の影響を受けないこと、冠水しても井戸内に海水が浸入しにくい構造となっていることから取水の減量、停止には至っていない。東日本大震災の津波に伴う井戸の被害調査から、全国さく井協会(2012)では災害に強い井戸構造を提案し、大年ら(2013)は、揺れと津波の複合被害を受けた井戸の現地調査により、井戸の機能損失は認められないことから給水インフラとしての活用可能性を示している。

帯水層に海水が浸入すると回復までに50~60年かかるのは、その更新速度が遅いからである(山本, 1994)。今後、災害時においてもこのような沿岸の帯水層を塩水化させることなく適正に利用するためには、本検討で実施したように地域の水循環を把握し、その結果に基づいて地域の淡水の賦存量に応じた適切な揚水量を決定して、利用するための条件や地下水位や揚水量などの制約をあらかじめ明らかにしておくことを提案する。

本研究では、津波による地下水汚染リスクを評価するため、対象地域の水循環の実態を把握し、その流動に伴って変化する地下水中の塩分濃度の影響程度、浄化に要する期間等について整理した。この一連の検討手順や検討結果は、対象地域の復旧復興の基礎資料となるだけでなく、想定される南海トラフ巨大地震において、貴重な淡水源である地下水を災害時においても適正に利用する防災計画の策定に貢献するものと考えられる。

#### 4.3 データベース構築

本件では、データベース構築として、概要調査により収集された水質の情報、地質情報および広域数値シミュレーションの結果を、地下水に通常関連のない一般の方にも、理解しやすいように、ユーザーフレンドリーな形で情報提供するシステムの構築を行った。

本件における地下水流動解析を実施する過程で、直近の揚水量について市町村単位での集計を試みた。岩手県、山形県、福島県などは、通産省により過去に「地下水利用適正化調査」により、地域の地下水利用量が集計されているが、水源の変化、人口の推移があり、その地下水利用量は適正化調査実施時から大きく減少していると推定される地域も認められた。日本の人口が減少し、特に今回の災害や原発事故の影響で、福島県をはじめとする被災県からの人口流出が問題となっている。水道事業者がその事業を継続する限界もあるかもしれない。今回の調査で改めて、地下水が河川水などの表流水と比較し、突発的な汚染事故に対し、その汚染リスクが低いことが浮かび上がってきた。震災が発生した際、その緊急時の生活用水といった短期的スパン、また、人口流出し水道事業が成り立たなくなった際の2次的な水源候補として、今後、地下水に期待される役割は大きく、その広域的な管理が求められている。一方で、地下水の観測は非常に限定的に行われており、しかもその観測結果は散在しているという現状が、今回の業務を通して明らかになった。今後の広域の地下水管理のためには、観測地点の増加とともに、今回作成したデータベースのように、より多くのデータを一元的に管理するシステムが求められている。

#### 文献

- 建設省土木研究所(1996)建設省土木研究所河川部都市河川研究室 土木研究所資料 氾濫シミュレーションマニュアル(案)ーシミュレーションの手引き及び新モデルの検証一。土木研究所資料第3400号。
- 厚生労働省(2003a)水質基準の見直しにおける検討概要(ヒ素)。
- 厚生労働省(2003b)水質基準の見直しにおける検討概要(塩化物イオン)。
- 厚生労働省健康局水道課(2012)東日本大震災水道施設被害状況調査報告書(平成23年度災害査定資料整理版)。http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/houkoku/suidou/121214-1.html(2014年10月8日確認)
- 越谷 賢・丸井敦尚(2012)日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル(第一版)。地質調査総合センター研究資料集, no.564, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- LeClerc, J. P., Berger, C., Foulon, A., Sarraute, R. and Gabet, L. (2008) Tsunami impact on shallow groundwater in the Ampara district in Eastern Sri Lanka: Conductivity measurements and



- qualitative interpretations. *Desalination*, **219**, 126-136.
- 文部科学省 (2011) 文部科学省による第4次航空機モニタリングの測定結果について. 文部科学省報道発表平成23年12月16日, [http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/5000/4901/24/1910\\_1216.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/5000/4901/24/1910_1216.pdf) (2014年10月8日確認)
- 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**, 11-23.
- 内閣府 (2012) 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告) 津波断層モデル編 —津波断層モデルと津波高・浸水域等について—. [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829\\_2nd\\_report01.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_2nd_report01.pdf) (2014年10月8日確認)
- 長崎県農林技術開発センター (2005) 諫早湾干拓初期営農対策の技術指針(平成17年3月) 参考資料. 長崎県農林技術開発センター.
- 大年邦雄・原 忠・久保篤規・上野舞子・岩原廣彦・河村恭輔 (2013) 東日本大震災における井戸被害についての現地調査. 地下水学会誌, **55**, 13-19.
- 理科年表 (2004) 理科年表机上版第77冊. 国立天文台編.
- Spitz, K. S. and Moreno, J. (2003) 実務者のための地下水環境モデリング. 岡山地下水研究会編, 技法堂出版.
- 菅原正巳・尾崎睿子・渡辺一郎・勝山ヨシ子 (1984) タンク・モデル—積雪・融雪モデルを伴った—. 国立防災科学技術センター研究速報.
- 東北農政局計画部 (1980) 宮城県及び岩手県水文地質図集—農業用地下水調査. 宮城県岩手地区調査報告書.
- Villholth, K. G., Amerasinghe, P. H., Jeyakumar, P., Panabokke, C. R., Woolley, O., Weerasinghe, M. D., Amalraj, N., Prathepaan, S. and Büllow, N. (2008) *Groundwater and associated water supply on the east coast of Sri Lanka: A post-tsunami well recovery support initiative and an assessment of groundwater salinity in three areas of Batticaloa and Ampara Districts*. International Water Management Institute, 80p.
- 山本荘毅 (1994) 建築実務に役立つ地下水の話. 建築技術, 243p.
- 全国さく井協会 (2012) 東日本大震災による井戸の被害調査報告書. [http://www.sakusei.or.jp/ido\\_report.pdf](http://www.sakusei.or.jp/ido_report.pdf) (2014年10月8日確認)

