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*

森 一司**・高橋朋佑***・岡庭信幸**・柴崎直明****・大内拓哉****

Change in groundwater environment caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake in the southern part of Sendai Plain*

Kazushi MORI**, Tomohiro TAKAHASHI***, Nobuyuki OKANIWA**,
Naoaki SHIBASAKI**** and Takuya OUCHI****

Abstract

Southern part of Sendai Plain was extensively attacked by tsunami caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Continuous observation since 2008 has revealed that the groundwater level rose instantaneously right after the earthquake, and then the tsunami, which occurred about an hour later, involved the succeeding drastic rise. Salinity of groundwater was increased from below 0.7 mS/cm to at most 3 mS/cm, and has not been restored to the state before the earthquake.

Key Words: the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, tsunami, groundwater, salinization, Watari-gun

要 旨

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって、仙台平野南部地域は広範囲に浸水被害を被った。本地域で 2008 年から継続してきた地下水位と水質の観測によれば、地下水位は地震直後に瞬間的に上昇し、やがて約 1 時間後に襲来した津波によってさらに大きく上昇した。地下水の塩分濃度は震災前では概ね 0.7mS/cm 以下であったが、震災後は最大 3 mS/cm 程度まで増加し、8 か月経過した時点でも震災前の状態には回復していない。

キーワード: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 津波, 地下水, 塩水化, 亶理郡

* 地学団体研究会第 65 回総会および日本応用地質学会東北支部第 19 回研究発表会にて一部発表

** 農林水産省東北農政局農村計画部 (〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町 3-3-1)

Tohoku Regional Agricultural Administration Office, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

*** 農林水産省東北農政局農村計画部 (現所属: 農林水産省農林水産技術会議事務局)

present address: Agriculture, Forestry and Fisheries Reserch Council Secretariat

**** 福島大学共生システム理工学類

Fukushima University, Faculty of Symbiotic Systems Science

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、マグニチュード(Mw)9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し、これに伴う津波は東北地方太平洋沿岸の平野部を襲い、甚大な被害をもたらした。仙台平野南部に位置する宮城県亶理郡の津波浸水地域では、浅層地下水の塩水化が広範囲に発生しており、地震から8か月が経過した11月末時点でも営農に支障をきたしている。農林水産省東北農政局農村計画部資源課では農業用地下水調査の一環として2008年度から本地域における浅層地下水の水位・水質を観測していることから、これまでに明らかにになった地下水の環境変化について報告する。

2. 調査地域の概況と津波被災状況

亶理町および山元町の2町から構成される亶理郡は、宮城県東南部の太平洋沿岸部に位置する。総面積は137.69km²で、農地がその約50%を占める農業地帯であり、西側の丘陵地帯では畑作・果樹・畜産が、東側の平野部では稲作および畑地園芸(イチゴ、花卉)が行われており、特にイチゴは東北一の生産量を誇っていた。

しかしながら、2011年3月11日に発生した津波によって、亶理郡全体の約42%、農地全体の約78%が浸水被害を被った(表1)。イチゴの作付面積は亶理郡全体で約96haであったが、イチゴのハウス約82%が津波により全壊、約13%が浸水し、全体の約95%が被災した。

表1 宮城県亶理郡における津波浸水面積
国土地理院(2011)および農林水産省(2011)を編集

Table 1 Tsunami inundation area in the Watari District, Miyagi Prefecture
Modified from Geospatial Information Authority of Japan (2011) and Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2011)

町名	全面積 (km ²)	津波浸水面積(km ²)	平成22年 耕地面積 (ha)	農地の津波 被害推定 面積(ha)	被害田畑別 内訳	
					田(ha)	畑(ha)
亶理町	73.21	35 (47.8%)	3,450	2,711 (78.6%)	2,281	430
山元町	64.48	24 (37.2%)	2,050	1,595 (77.8%)	1,123	472
計	137.69	59 (42.8%)	5,500	4,306 (78.3%)	3,404	902

痕跡等から推定された最大津波高(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2011)は図1のとおりであり、海岸部では10m以上、内陸部でも2mを越えた。しかし常磐自動車道より西側の地域では道路の盛土が防壁となり、津波高は1mを少し越える程度で瓦礫の流入もなく、ほと

図1 津波浸水地域と最大津波高
東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2011)のデータに基づき作成

Fig. 1 Tsunami invasion area and maximum inundation height
Plotted according to the data by The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2011)

んどの民家やイチゴハウスは破壊を免れた。

3. 水文地質

3.1 地形区分と地質

調査地域は、亶理郡のうち阿武隈川の旧河口跡とされる鳥の海（汽水湖）より南側で、南北に細長く逆三角形を呈する沖積平野である（図2）。平野部の標高は1～3mで起伏は少ないが、海岸線に並行して比高1m程度の浜堤が複数列発達しており、集落や畑地（特にイチゴハウス）が分布する。浜堤列と西側の丘陵地の間には後背湿地が広がり、大規模な水田地帯となっている。

地質は鮮新世の竜の口層相当層を不整合で覆って第四紀の砂層・礫層・粘土層が分布し、鮮新統上面の標高は阿武隈川河口部で-80m以下と最も深くなっている。丘陵地が南に向かって海に接近するため基盤標高は次第に浅くなり、福島県境付近で第四紀層はいったん途切れる。東北農政局（1980）によれば、第四紀層中には調査地域一帯に中部粘土層が広く分布し、これを境として第四紀の帯水層は上部不圧帯水層と下部被圧帯水層とに大きく二分される（図3）。

3.2 帯水層

農業用地下水は主として上部不圧帯水層から揚水されており、砂層が主体である。図2に示す深度8～9mの観測孔16か所でのスラグテストから求めた透水係数は $2.7 \times 10^{-3} \sim 2.1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 、幾何平均では $8.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であった。平常時の地下水位はおおよそGL-1m～-2m、水位標高は西側のNo.3, 6, 12で+2m～+3m、東側のNo.5, 10で+0.5m～+0.8mであり、動水勾配はおおむね1/2,000である。

下部の被圧帯水層は砂および砂礫からなり、もともと塩分濃度の高い地下水が賦存することが多いため、地下水利用はほとんどない。鮮新統まで掘削した2か所のボーリング孔において、スラグテストから求めた透水係数は $6.6 \times 10^{-3} \sim 8.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であった。

鮮新統の砂岩層中にも地下水が賦存し、深度70～150mの深井戸による揚水が行われている。深井戸は1960～1970年代に掘削されたものが多

く、近年多くの井戸でケーシングやポンプの改修工事が実施されている。18か所の最近における比湧出量は20～150L/min/m、平均46L/min/mである。

図2 地形区分と観測地点位置図
東北農政局（1980）を編集

Fig. 2 Germorphological map and observation points
Modified from Tohoku Regional Agricultural Administration Office (1980)

図3 模式地質断面図

東北農政局 (1980) による。断面位置は図2中表示

Fig. 3 Schematic geological cross section
According to Tohoku Regional Agricultural Administration Office (1980). Location is shown in Fig. 2

4. 地下水利用

4.1 震災前の農業用地下水の利用状況

農業用の浅井戸分布地帯 (イチゴ農地の分布地帯と一致する) と深井戸の位置図を図4に示す。後述する山元町坂元地区を除き、本地域の地下水利用のほとんどがイチゴのハウス栽培用である。2008年時点で、鳥の海以南の地域には約400戸、総作付面積91.4haのイチゴ農家があり、その約95%で地下水が利用されている。地下水はイチゴの灌漑用のほかに、冬期夜間のハウス暖房用としても利用されている。これは、二重構造になったハウスの内張りビニールに地下水を散水して加温するウォーターカーテン (写真1, 図5) という方法であり、ハウス内の温度を5℃以下に低下させない効果がある。散水後の地下水は近傍の側溝や排水路に排水される場合が多いが、ハウス敷地内で自然浸透させる場合もある。

多くの場合、地下水はハウス敷地内に設置された深度8m未満の浅井戸から揚水されている。しかし、海岸部に県営事業で造成されたイチゴハウス団地 (図4中に大きな区画として表現されている) では、もともと浅層地下水中の塩分濃度が高いため、灌漑用水は西に3kmほど離れた深井戸から送水機場を経てパイプラインにより供給されている。なお、ウォーターカーテン用の地下水は多少塩分濃度が高くとも使用可能なため、海岸部の地域でも浅井戸を利用している場合がほとんどである。

一般的なイチゴハウスは幅4.5m×長さ50m程

図4 鳥の海以南におけるイチゴ農地と農業用井戸の分布

イチゴ農地分布図は JA みやぎ亘理中部営農センター提供

Fig. 4 Distribution of strawberry fields and irrigation wells in the south of Torinoumi
Distribution of strawberry field was provided by Japan Agricultural Co-operatives Miyagi-Watari Central Agricultural Center

度で、かまぼこ型をしたビニール張りのパイプハウスであるが、50m×50m規模の鉄骨製大型ハウスも作られている。大型ハウスは容積が大きいのでウォーターカーテンが利用できず、重油による温風加温機での暖房が専らである。聞き取りによれば、加温機による暖房はウォーターカーテン

写真1 代表的なイチゴハウス
ウォーターカーテンによる暖房のため、ビニールが二重構造となっている

Photo 1 Typical greenhouse for strawberry cultivation. Film is doubled for warming by watercurtain

図5 ウォーターカーテン模式図
冬期夜間に内張りビニールの上から地下水を散水して暖房する仕組み

Fig. 5 Illustration of watercurtain warming
Groundwater is sprayed on inner film for warming during winter night

よりコスト高であるが、大型ハウスにすることによって機械による農作業が可能となるためメリットも大きい。また水道水を利用した高設栽培（地面から約1m程度の高さに栽培槽を設けて栽培する方法で、作業が格段に楽になり必要水量も少なくて済む）を行っている大型ハウスもあるが数は少ない。

以上のように、イチゴ栽培における地下水利用の形態は、ハウスの立地条件や規模および栽培方法によって異なり、大きく6つのタイプに区分される。調査地域である鳥の海以南での各タイプの面積割合は表2のとおりとなっている。

取水施設のほとんどは通称「ブッコミ」と呼ば

表2 イチゴハウスにおける地下水利用の類型区分と面積割合

JA みやぎ亘理中部営農センター提供

Table 2 Classification of groundwater usage for strawberry cultivation and areal ratio
Provided by Japan Agricultural Co-operatives Miyagi-Watari Central Agricultural Center

タイプ	地下水利用形態	面積割合 (%)	備考
A	灌漑、暖房ともに浅井戸による地下水を利用	54.4	内陸部でのパイプハウス
B	灌漑には水道水、暖房には浅井戸による地下水を利用	0.3	内陸部でのパイプハウスで地下水の塩分が高い地域
C	灌漑には浅井戸による地下水、暖房には重油加温機を利用	7.3	大型ハウス
D	灌漑には深井戸からの送水、暖房には浅井戸による地下水を利用	31.7	沿岸部の県営造成地でのパイプハウス
E	灌漑には深井戸からの送水、暖房には重油加温機を利用	2.2	沿岸部の県営造成地での大型ハウス
F	地下水利用なし（灌漑には水道水、暖房には重油加温機を利用）	4.1	高設栽培の大型ハウス

れる深度4～8mの浅井戸であり、先端1～2mにスクリーン加工（有孔管にネットを巻いたものが多い）を施した口径50～75mmの塩ビ管で仕上げられている。作付面積が2,000m²の平均的規模の農家では、通常2～4本の浅井戸を保有しており、それらを連結して1台のポンプにより揚水している。鳥の海以南での浅井戸の総数はイチゴの全体作付面積から1,000～2,000か所と推定される。

海岸部のイチゴハウスに地下水を供給している深井戸は、受益地から離れた内陸部の水田地帯に設置されており、亘理町に4か所、山元町に2か所存在する。また、山元町坂元地区には水田灌漑用に12か所の深井戸が使用されている。これらの深さは70m～150mで、スクリーンは鮮新統中に設けられている。

浅井戸からの年間揚水量を把握するため、平均的規模のイチゴハウス2か所を選定し、超音波流量計（富士電機製ポータフローX）およびイベントロガー（電磁誘導を利用してポンプ電源のON、OFF時刻を自記記録する機器、Onset製HOB0-U9-004）を用いて2年間の連続観測を行った。観測結果を月別に整理した表3に示すように、揚水量はイチゴの生育段階と密接に関連している。すなわち、9月にイチゴ苗の定植が

始まると苗の活着に多くの灌水を必要とし3～4 $\text{m}^3/\text{日}/1,000\text{m}^2$ が揚水されるが、10月に入ると苗が活着するため、あまり多くの水を必要としなくなる。平均気温が5～7℃以下となる12月中下旬～3月中旬にはウォーターカーテンによる夜間暖房が行われるため、このタイプのハウスでは揚水量が35～40 $\text{m}^3/\text{日}/1,000\text{m}^2$ に急増する。6月にイチゴの収穫が終了し株が撤去された後は、育苗期に入るため6～8月の揚水量はわずかとなる。

深井戸からの揚水量についても、亘理町にある吉田浜送水機場において送水ポンプの運転時間を連続観測し、ポンプの単位時間あたり送水量に基づいて算出した。深井戸の水は灌漑用としてのみ利用されているため、単位面積あたりの送水量はウォーターカーテン用を除く浅井戸の揚水量とほぼ同程度であった。

以上の観測結果と表2のタイプ別面積割合に基づき、調査地域全体での浅井戸と深井戸の月別揚水量をまとめると表4のようになり、鳥の海以南のイチゴハウス全体で浅井戸からは年間約286万 m^3 (約80%がウォーターカーテン用)、深井戸からは年間約31万 m^3 が揚水されていると推定される。

上記のほかに、山元町坂元地区(図4参照)に

おいては、水田約290haへの灌漑用水の全量が深井戸12本から供給されている。2か所の深井戸において、灌漑期間中のポンプ運転時間を観測した結果によれば、地区全体の揚水量は約200万 $\text{m}^3/\text{年}$ と推定される。

4.2 震災後の農業用地下水の利用状況

津波により被災したイチゴハウスのうち約15haで営農が再開されたが、後述するように従来から使用していたほとんどの浅井戸が塩水化して使用できなくなった。このため、多くの農家は100L/min程度が自噴している深度150mの深井戸(位置は図4参照、電気伝導度は0.15mS/cm程度で震災後も変化なし)まで、水汲みのためトラックで1日に4～5回の往復を余儀なくされている。ウォーターカーテン用の地下水は、多少塩分が含まれていてもイチゴの株に接触しないように注意すれば問題ないため、12月から本格的に揚水が開始されると思われる。

被災したイチゴ農家のうち8戸は、津波を被らなかった亘理町逢隈小山地区(図1参照)に約5haの農地を確保し、新たに浅井戸約20か所を設置して営農を再開している。また、亘理町、山元町の震災復興計画では、新たにイチゴハウス団地を内陸部に整備する計画があり、水源として深

表3 イチゴハウスにおける月別浅層地下水揚水量
ハウスのタイプは表2参照

Table 3 Monthly shallow groundwater pumping for strawberry greenhouse
Type of strawberry greenhouse is referred to Table 2

単位: $\text{m}^3/\text{日}/1,000\text{m}^2$

地下水利用形態	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
タイプA	37.0	37.0	3.2	3.2	3.2	0.5	0.5	0.5	3.6	1.5	1.5	37.0
タイプC	0.9	0.9	2.9	2.9	2.9	0.5	0.5	0.5	2.9	0.9	0.9	0.9
イチゴ生育段階	果実最盛期					←育苗期間→			*定植	*出荷開始		

表4 調査地域全体の月別農業用地下水利用量

Table 4 Monthly groundwater pumping for strawberry cultivation in overall studied area

単位: 千 m^3

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
浅井戸	878.7	750.3	54.7	53.1	66.2	8.9	9.1	9.1	72.2	40.1	40.1	878.7	2,861.2
深井戸	22.6	20.4	22.6	21.9	22.6	13.1	13.6	13.6	65.6	45.2	21.9	22.6	305.7
合計	901.3	770.7	77.3	75.0	88.8	22.0	22.7	22.7	137.8	85.3	62.0	901.3	3,166.9

井戸も検討されている。

なお、津波の浸水被害を免れたイチゴハウス24戸4.6haは従前どおり浅井戸を利用して栽培を継続している。また、深井戸を水源としている山元町坂元地区においては、下流部以外は津波の影響をほとんど受けることなく、例年どおりの稲作が行われた。

4.3 農業用以外の地下水利用状況

亘理町では、かつて水道用水に深井戸からの地下水が利用されていたが、1990年度から七ヶ宿ダムを水源とする仙南・仙塩広域水道用水が供給されるようになったため、現在は利用されていない。山元町では、上記の広域水道用水から5,500m³/日程度供給されているものの、地下水は現在でも5箇所の深井戸から1日あたり最大3,000m³、年間約110万m³が利用されている（山元町、2011）。

工業用水としては、従業者30人以上の事業所を対象とした地下水使用量は、亘理町が85m³/日、山元町が20m³/日となっており、操業日数を300日とすると亘理郡全体でも年間約3万m³程度である（宮城県、2011a）。

5. 地下水位、水温、および塩分濃度観測結果

5.1 観測方法

2011年11月末時点で地下水観測を行っているのは、前掲した図2に示す20か所の観測孔のうち、No.8を除く19か所である。2008年度に設置した観測孔は深度9～10mで、2m以深に有孔区間を設けたVP50仕上げとしている（ただしNo.14は深度28m、No.15は深度7mで既存孔を流用。No.5は瓦礫置場への搬入道路敷となり2011年12月から観測停止）。震災後に追加設置したNo.16～No.20は深度15mとし、同様に2m以深を有孔区間としたVP50仕上げである。

地下水位と水温は絶対圧式自記水位計（応用地質製S&DLmini）を深度5mに設置して、1時間ごとに記録した。No.4孔には大気圧補正のための気圧計（S&DLmini バロメーター）を併設し、またNo.16～No.20の5孔とNo.1およびNo.4については、電気伝導度も測定できる水位計

（S&DLmini ECメーター）を設置している。これらのうち、No.2、11、13の3孔では水位計が津波によって流亡または孔内に落下して回収不能となり、No.8孔は瓦礫に埋もれて所在不明となってしまったが、その他の観測孔については震災前後の記録を回収することができた。

水質については、2009年5月から月1回の頻度で観測孔から採水し、携帯機器による水温、電気伝導度、pH、ORP、鉄分の測定を実施した。採水は観測孔の深度3mにProactive製12Vバッテリー駆動式小型水中ポンプを挿入し、約100Lを揚水した後で行った。なお100L程度揚水すれば電気伝導度や水温が安定することを事前に確認している。また、100mケーブル付きのCTIサイエンス製電気伝導度計P-102型により、深度1mごとの電気伝導度と水温も測定した。

5.2 地下水位および水温の季節変動

震災前の地下水位は、その変動パターンから灌漑期上昇型と灌漑期非上昇型の2類型に区分される。比較的内陸部に位置し周辺に水田が分布する観測孔では、4月～8月の灌漑期に上昇して一定の水位を保持し、灌漑期が終わると低下するという季節的変動を示していた。この類型に属するのはNo.1、2、3、4、6、7、9、12、14、15であり、代表的なNo.4の水位変動を図6に示す。震災後は灌漑面積が20%にまで減少したため、例年より1ヶ月遅れの灌漑期間中も地下水位が安定せず、降雨によって激しく上下するようになっている。

いっぽう海に近い浜堤部に位置し、周辺に水田が分布しない観測孔では、もともと灌漑期の水位上昇はあまり明瞭ではなかった。この類型に属するのはNo.5、8、10、11であり、代表例としてNo.5の水位変動を図6に示す。地震発生以降、水位が全体的に20cm程度浅くなっており、本地域の地盤沈下量（国土地理院、2011b）とほぼ一致している。地下水位の相対的浅化は海側に位置する観測孔No.10やNo.11でも観測されているが、No.4に代表される内陸側の観測孔では明瞭ではない。

No.4とNo.5の5m深での地下水温の経年変動は図7のとおりである。いずれの孔も5月に

図6 浅層地下水位の季節変動
降水量は AMEDAS 亘理の時間データ

Fig. 6 Seasonal fluctuation of shallow groundwater level
Hourly precipitation data is from AMEDAS Watari

図7 深度5 mにおける地下水温および気温の季節変動
気温は AMEDAS 亘理の時間データ

Fig. 7 Seasonal fluctuation of groundwater temperature at 5 m depth and atmospheric temperature
Hourly atmospheric temperature data is from AMEDAS Watari

12～13℃と最も低く、11月に16～17℃と最も高くなるというパターンを繰り返しており、地震の後もその傾向は変わらない。気温とは103～105日の位相遅れが見られる。No.5孔では津波直後に水温が7℃程度まで急低下したが、温度の低い海水が浸入したためと考えられる。地下水温は地表に近いほど季節的変動幅が大きい、深度8mでは14～15℃で年間を通じてほとんど変化しない。

5.3 地震直後の地下水位変動

震災後に回収できた地下水位データは、前述したように15孔中11孔であった。記録間隔は通常1時間としていたが、No.4とNo.5については2011年1月27日から4月19日まで、記録間隔が5分間となっていたため、地震および津波発生時の詳細な記録が取得できた。図8に示すように、2孔とも地下水位は地震直後（ただし、データが

記録されたのは地震発生から4分後の14時50分）に瞬間的に上昇しており、地震動によって間隙水圧が急上昇したことがうかがえる。No.5孔では地震から約1時間後に最大GL+3.48mまで大きく上昇しているが、これは新聞報道等（例えば河北新報、2011）による津波の襲来時刻にほぼ一致する。その後も約3時間おきに低いピークがいくつか出現しており、津波の後続波に対応するものと考えられるが、相馬港や石巻市鮎川の潮位観測所がいずれも破壊されたため、潮位との対比はできていない。いっぽう内陸側に位置するNo.4孔では地震の約1.5時間後から徐々に上昇を開始し、5.5時間後に最高のGL-0.31mに達し、その後は極めて緩やかに低下したが、震災前の基底水位まで回復するのに約2ヶ月を要している。

5.4 塩分濃度（電気伝導度）

図9に電気伝導度の経年変化、図10に震災前

図8 地震直後の地下水位変動
柴崎ほか (2012) のデータに基づき作成

Fig. 8 Groundwater fluctuation right after the earthquake
Data from Shibasaki et al. (2012)

図9 浅層地下水の電気伝導度の推移

深度3mにポンプを設置し、100L揚水後に採水

Fig. 9 Change of electric conductivity of shallow groundwater
100 litre of groundwater was pumped before measuring

の平均値と2011年7月時点の測定値の分布図を示す。震災前はNo.13とNo.14を除く全ての孔で、おおむねイチゴ灌漑用水の上限とされる0.7 mS/cm(宮城県, 2011b)以下であった。震災後は、津波で浸水しなかったNo.3とNo.6, 浸水が軽微であったNo.12, および浸水域中央部に位置するNo.2を除いて最大3mS/cm程度まで増加し、8か月経過した時点でも震災前の状態には回復していない。なお、No.2は約5,000m²のイチゴ選果場および舗装された駐車場に隣接しており、初期段階での塩水の鉛直浸透が少なかったため、電気伝導度が急増しなかったものと考えられる。しかし、9月以降は周辺の地下水が移動してきたためか、徐々に電気伝導度が上昇して1 mS/cmに近づきつつある。

2011年7月から電気伝導度の自記観測を行っている7か所のうち、No.1とNo.17の記録を図11に示す。センサー設置深度はいずれも5mである。No.1では前述した月1回の採水直後に一時的に低下し、No.17では逆に採水直後に一時的な上昇が見られた。また、9月20日～21日に台

風15号に伴う合計293mmの降雨があり、2か所とも電気伝導度が大きく増加した。採水時の変化については、揚水によって観測孔内の塩分濃度分布が一時的に乱れることが原因と考えられる。降雨時の電気伝導度上昇の原因については、地表に残存する津波堆積物からの塩分溶出や、不飽和帯に保持されていた津波由来塩水の押し出しが考えられる。農家からの聞き取りでも、台風の雨で塩分が薄くなることを期待したが、逆に濃くなってしまったという落胆の声が多かった。

深度1mごとに測定した鉛直方向の電気伝導度の代表的な例を図12に示す。津波浸水域の外に位置するNo.6は、津波の前後でほとんど変化が見られない。浸水域内のNo.1では全深度で最大2 mS/cmまで上昇し、11月時点では1 mS/cm程度まで低下しつつある。海岸に近いNo.13では、震災前の電気伝導度急増深度が6m付近にあったが、震災後は4m付近と約2m程度浅くなっている。この変化は本地域の地盤沈下量(約20cm)だけでは説明できず、おそらく破壊された防潮堤の背後に海と連続する凹地が新たに形成され、海

図10 震災前後での電気伝導度の面的分布
Fig. 10 Areal distribution of electric conductivity before and after the earthquake

水域と観測孔との距離が短くなったことが原因ではないかと考えられる。

地下水の塩水化が長期化している要因としては以下のようなことが考えられる。①塩分を多量に含む粘土質の津波堆積物が浸水域一帯に残存しており、長期間にわたって塩分の供給源となっている、②地下水のかん養源となっている水田への灌漑面積が、例年の20%程度に減少している、③排水路末端部の排水機場が津波によって破壊されたため、慢性的な排水不良が続いている、④もともと動水勾配が極めて小さい地域であり、地下水の流動速度が遅い。これらのうち①～③については、今後農地および農業用施設の復旧が進むこと

図11 電気伝導度と地下水位および降水量
センサーは深度5mに設置

Fig. 11 Electric conductivity, groundwater level and precipitation
Sensor is placed at the depth of 5 m

によって徐々に解消されてゆくと考えられる。④については根本的な解消の見通しはないが、12月から開始されるウォーターカーテンの大量揚水で地下水の流動が促進され、何らかの回復兆候が現れてくる可能性がある。いずれにせよ、今後モニタリングを継続することによって、塩水化が長期化している主要因が明らかになってくるものと考えられる

6. おわりに

平成23年11月末時点で、浅層地下水の塩分濃度は一時期に比べて低下したものの震災前の状態には回復しておらず、イチゴの灌漑に使用可能となるまでには、さらに時間を要する可能性がある。本地域の特産物であるイチゴの生産を本格的に再開し持続させるためには代替水源の確保が急務であり、地元では既存深井戸の活用、新たな深井戸

図 12 震災前後での電気伝導度の鉛直分布

Fig. 12 Vertical profiles of electric conductivity before and after the earthquake

掘削による深層地下水の開発，水道水の利用，塩水淡水化装置の導入等が検討されているが，本格的な対策はこれからという段階である。このため，引き続き地下水のモニタリングを継続して浅層地下水の利用再開についての見通しを明らかにし，有効な対策について検討してゆきたいと考えている。

謝 辞

調査当初からお世話になっている宮城県，亶理町，山元町，亶理土地改良区，JA みやぎ亶理中部営農センター，吉田浜農地管理組合の関係各位，ならびに揚水量観測および観測孔の設置にご協力いただいたイチゴ農家の方々に厚く御礼申し上げますと共に，一日も早い復旧・復興をお祈りする次第である。

参考文献

- 大内拓哉・柴崎直明・森 一司・岡庭信幸 (2011)：仙台平野南部における東日本大震災による地下水への影響，地学団体研究会第 65 回総会（青森）講演要旨・巡検案内書，103。
河北新報 (2011)：2011 年 4 月 3 日 記事，[http://](http://www.47news.jp/47topics/e/203621.php)

www.47news.jp/47topics/e/203621.php (2011.12.1 閲覧)

国土地理院 (2011a)：津波による浸水範囲の面積（概略値）について（第 5 報），<http://www.gsi.go.jp/common/000059939.pdf> (2011.12.1 閲覧)

国土地理院 (2011b)：太平洋沿岸の上下変動量，<http://www.gsi.go.jp/common/000062924.pdf> (2011.12.1 閲覧)

柴崎直明・大内拓哉・佐藤真一・半谷尚之・森 一司・高橋朋佑 (2012)：2011 年東北地方太平洋沖地震による仙台平野南部津波被災地における地下水位変動，地球科学，投稿中。

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2011)：東北地方太平洋沖地震津波情報，土木学会海岸工学委員会ホームページ，<http://www.coastal.jp/tjtj/> (2011.7.19 閲覧)

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，69p。

農林水産省 (2011)：津波により流失や冠水等の被害を受けた農地の推定面積，<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110329-02.pdf> (2011.12.1 閲覧)

宮城県 (2011a)：平成 21 年宮城県の工業，http://www.pref.miyagi.jp/toukei/toukeidata/syoukou/kougou_21K/PDF/21k%20sassyo.pdf (2011.12.11 閲覧)

- 覧)
- 宮城県 (2011b) : 東北地方太平洋沖地震 (3月11日) に伴う園芸作物の技術対策 (第3報). [http://www.pref.miyagi.jp/noenkan/nousansyokuryou/engei-3\(H230404\).pdf](http://www.pref.miyagi.jp/noenkan/nousansyokuryou/engei-3(H230404).pdf) (2011.5.19 閲覧)
- 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結果について. 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・岡庭信幸・柴崎直明・大内拓哉 (2011) : 東北地方太平洋沖地震の津波による浅層地下水の塩水化. 日本応用地質学会東北支部第 19 回研究発表会講演集, 15-16.
- 山元町 (2011) : 山元町水道事業の概要. <http://www.k3.dion.ne.jp/~yama-sui/newpage80.htm> (2011.12.1 閲覧)
- Ouchi, T., Shibasaki, N., Mori, K., and Takahashi, T. (2011) : Mechanism of groundwater flow and simulation analysis of saline water intrusion in southern Sendai Plain, Japan. Fourth International Groundwater Conference (IGWC-2011) on the Climate Change on Groundwater Resources with Special Reference to Hard Rock Terrain, September 27-30, 2011, Yadava College, Madurai, India (受付 : 2011 年 12 月 16 日, 受理 : 2012 年 1 月 18 日)