原 著 [Original article]

平成28年熊本地震による地下水水質への影響

川越保徳^{1,*}・古閑仁美²・末永雄一³・濱 武英¹・伊藤紘晃¹

Influence of the 2016 Kumamoto earthquake on groundwater quality

Yasunori KAWAGOSHI^{1,*}, Hitomi KOGA², Yuichi SUENAGA³, Takehide HAMA¹ and Hiroaki ITO¹

Abstract

We investigated the influence of the 2016 Kumamoto earthquake on groundwater quality at 12 sampling points in the area near its seismic centre. We statistically evaluated the difference in the measured values of each water-quality index before and after the earthquake based on bi-weekly or monthly monitoring data for three years across the earthquake area. We also visualised water-quality characteristics using a hexa-diagram (Stiff diagram) and statistically evaluated differences before and after the earthquake using non-hierarchical cluster analysis. The results showed that there was not a large variation in water-quality characteristics as represented by the hexa-diagram shape. However, statistical analysis showed a significant difference at nine sampling points, suggesting earthquake influence on groundwater quality. In addition, it is possible that the influence of the earthquake appeared later in a groundwater-discharge area. On the other hand, no topographic relationship between the location of the sampling points and seismic centre or the fault was shown; thus, it is likely that groundwater quality varied at arbitrary points within the study area where slip on the fault was observed.

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, groundwater, quality, dissolved components, statistical evaluation

摘 要

平成28年熊本地震の震源に近い地域の12地点において、地震による地下水水質への影響を明らかにした。筆者らが行ってきた地震前後の約3年間における隔週～月毎の水質モニタリングの結果から、地震前後における各水質成分データの差を統計的に評価し、水質の特徴と変化をヘキサダイアグラムで視覚化するとともに非階層的クラスター分析にて評価した。その結果、ヘキサダイアグラムの形が大きく変わるほどの変化は認められないものの、計9地点の地下水において地震前後で水質に有意な差があると判定され、地震による影響の可能性が示唆された。また、地下水湧水域では影響が数ヶ月遅れて現れた可能性が考えられた。一方、水質が変化したと判断された地点と震源地や断層などとの地理的な関係は

¹⁾ 熊本大学くまもと水循環・減災研究教育センター 〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39-1 Center for Water Cycle, Marine Environment and Disaster Management, Kurokami 2-39-1, Tyuo-ku, Kumamoto, 860-8555, Japan

²⁾ 公益財団法人くまもと地下水財団 〒860-0801 熊本市中央区安政町8-16 Kumamoto Groundwater Foundation, Anseimachi 8-16, Tyuo-ku, Kumamoto, 860-0801, Japan

³⁾ パシフィックコンサルタンツ株式会社 〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目22番地 Pacific Consultants Co., LTD., Kanda-Nishikicho 22-3, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8462, Japan

^{*)} 連絡先：川越保徳 Corresponding author: Yasunori Kawagoshi, Email: goshi@kumamoto-u.ac.jp

見いだせず、地震によって水平・鉛直方向にずれが生じた範囲の任意の地点において地下水水質の変化が生じた可能性が示された。

キーワード：平成28年熊本地震，地下水，水質，溶存成分，統計的評価

(2017年9月14日受付：2018年1月30日受理)

1. はじめに

平成28年熊本地震は、同年4月14日夜と16日深夜に震度7の激しい揺れが立て続けに起こり、その後も震度6弱以上の余震が7回発生するという、わが国観測史上初となる大規模地震であった。本地震は大分県から熊本県に連なる布田川断層や日奈久断層などの活断層が横ずれを生じたことによる内陸型地震であり(国土地理院, 2016; 矢来ら, 2016), Mj (気象庁マグニチュード) 6.5の前震後にそれを上回る内陸型地震が起こったケースも観測史上初めてのことであり、まさに想定外の地震となった(気象庁, 2016)。余震を含む一連の地震は益城町や南阿蘇村等に甚大な被害をもたらした。熊本県においては直接死50人を含めて225人の方が亡くなっている(熊本日日新聞, 2016a)。気象庁では、震源断層である布田川断層帯周辺で、水平方向、鉛直方向ともに数十cm以上の大きなずれや変動を観測しており(国土地理院, 2016)、本地震は阿蘇から有明海・八代海に亘る広い地域の地殻構造に変化をもたらしていることから、地上での斜面崩壊や岩屑なだれ等の発生(宮縁, 2016)にとどまらず、地下水帯水層を含む地質構造にも少なからず影響を及ぼした可能性がある(市川, 2017)。

熊本市とその近郊は飲用水の100%を地下水に依存する地下水都市圏であり(富家ら, 2011)、震災による地下水への影響が懸念された。16日の本震直後には、熊本市民の水がめとも言える湧水域にある水前寺成就苑(水前寺公園)の湧水が枯れ、阿蘇市では長年、枯れていた湧水が再び湧き出す等の現象がみられた(市川, 2017; 熊本日日新聞, 2016b)。一方、熊本では地下水を主要水源にしていることもあって地質構造や地下水流動等に関する知見や情報が比較的充実しており、熊本地震は地震と地質構造や地下水との関係を明らかにするための貴重な機会とも言える。

筆者らは、地震の約2年前(2014年5月)から、熊本市とその近郊地域の地下水を隔週、もしくは一ヶ月毎に定期的に採取し、水質と自然環境条件や人為的条件との関係を明らかにするとともに、長期的な水質変動を明ら

かにすべく調査を継続してきた。本研究では、地震から約1年が経過した時点において、これまでに得られた地震前後の地下水水質データを比較、解析し、熊本地震による当該地域の地下水水質への影響を明らかにするとともに、地震と地下水水質との関係について考察した。

2. 調査・研究方法

2.1 熊本地震について

熊本地震は、2016年4月14日21時26分にMj 6.5、震源深さ12.6 kmで震度7の最大前震、同月16日1時25分にMj 7.3、震源深さ13.1 kmで震度7の本震、およびその後2週間の間に2000回を超える余震を記録したわが国未曾有の大地震である。本地震は、布田川断層帯と日奈久断層帯にある活断層が震源断層となり、連動して横ずれ(水平方向)と縦ずれ(鉛直方向)を生じて引き起こされた内陸型地震とされる(気象庁, 2016)。気象庁は、前震で布田川断層帯の北側で最大1 m以上の沈降と東向きの変動、南側で最大30 cm以上の隆起と50 cm以上の西向きの変動(気象庁, 2016)を、本震では、長陽村で水平方向に98 cm、鉛直方向に24 cmの変動を観測しており(国土地理院, 2016)、地下の地質、地盤構造に大きな影響を及ぼした可能性がある。

2.2 採水地点と採水期間

Fig. 1に、採水地点の位置と調査対象地域における地下水流動の概略を示す(熊本県・熊本市, 2005)。本地域の地質構造は、数十～数万年前に起こった計4回の阿蘇山の噴火による火砕流の堆積層によって特徴付けられ、先阿蘇火山岩を基盤岩にそれらが数万年の間隔をおいて堆積している。これらの火砕流堆積物は亀裂が多い構造を有することから、優れた地下水帯水層や貯留層を形成している(熊本県・熊本市, 2005)。また、本地域における主な地下水流動は、阿蘇カルデラの西麓に広がる台地部から南西に亘る流れとされ、特に阿蘇から有明海に流れる白川の中流域は、熊本市などの湧水域にとって重要な涵養域となっている。さらに、本地域北側に位置する植木台地や菊池台地からの地下水流動が加わって湧水域

Fig. 1. Location of sampling points and schematic of groundwater flow. (Arrows indicate typical groundwater flow in this area)

図1. 採水地点および調査地域における地下水流動の概要。

の地下に広がる礫川溶岩層に集まり、巨大な地下水盆を形成しているとされる（熊本県・熊本市，2005）。

採水地点と井戸の深度などの情報をTable 1に示す。これらの井戸では、第二帯水層と称される（熊本県・熊本市，2005）比較的深い帯水層の地下水を汲み上げており、本地域の飲用水の多くは同帯水層から取水されている。採水期間は基本的に2014年5月から2017年3月までであるが、採水地点によっては、ポンプの不調等で採水不可の場合や地震後の取水再開時期が異なるため採水回数は異なっている。

2.3 水質分析

本研究では、4種類の陽イオン（ Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ）と3種類の陰イオン（ Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ）、総アル

カリ度（Alk）、電気伝導率（EC）の測定値を対象として検討を行った。測定は、上水試験方法に準じて行い、イオン成分はイオンクロマトグラフ法にて分析した。イオンクロマトグラフの標準試料は和光純薬工業（株）の陰イオン混合標準液と陽イオン混合標準液を各々超純水にて希釈して作成した。陰イオンクロマトグラフにはMetrohm（メトローム）社の761 Compact ICを用い、陽イオンクロマトグラフには、Dionex（ダイオネクス）（現 Thermo Fisher（サーモフィッシャー））社の IC20 Ion Chromatographを使用した。なお、分析およびクロマトグラム処理などの作業は同じ測定者が行っており、測定者の違いに起因する誤差は最小限に抑えた。

2.4 データの解析

測定データの解析にあたっては統計的手法を適用した。地震前後での平均値の差の検定は、片側5%の棄却率でF検定を行って等分散性を評価し、t検定もしくはWelchのt検定を行った。しかし、採水地点や水質成分によっては季節変動や降雨量などの影響を受ける可能性があり、必ずしも正規分布を保証できないため、本研究では、母集団の分布によらない標本差の検定法として、ノンパラメトリック手法であるMann-Whitney検定（Mann and Whitney, 1947）とBrunner-Munzel検定（Brunner and Munzel, 2000）を合わせて行った。また、水質を特徴付けるとともに地震前後での差違を統計的に評価するため、非階層型クラスター分析であるK-平均法（MacQueen, 1967）を用いた。地震前と地震後のデータを各々1群と

Table 1. Sampling point location and well depth.

表1. 地下水採水地点が位置する市町村と井戸の標高および深度。

Well No.	City	Elevation (m)	Well depth (m)
1	Kikuchi	102	100
2	Kikuchi	97	150
3	Koshi	81	150
4	Kikuyo	135	143
5	Ozu	184	180
6	Kikuyo	75	100
7	Kumamoto	67	146
8	Kumamoto	92	103
9	Mashiki	168	201
10	Mashiki	146	131
11	Kumamoto	8	47.5
12	Kumamoto	5	141

みなし、クラスター（群）数は2と設定した。分析の結果、誤った群に帰属される割合を（1）式に示す誤分類率(CER)として計算した。また、地震前に測定されたデータが地震後のクラスター（群）に分類された割合(RNBA)と、反対に地震後に測定されたデータが地震前のクラスター（群）に分類された割合(RNAB)を各々（2）式と（3）式にて計算し、これらの値にて地震前後で水質の特徴が変化したか否かを評価した。なお、以上の統計処理には、データ（統計）解析環境 R（ver.3.3.3）（The R Foundation, 2017）を用いた。

$$\text{CER}(\%) = 100 \times (\text{地震後のクラスターに分類された地震前の測定データ数} + \text{地震前のクラスターに分類された地震後の測定データ数}) / (\text{全データ数})$$

・・・(1)

$$\text{RNBA}(\%) = 100 \times (\text{地震後のクラスターに分類された地震前の測定データ数}) / (\text{地震前のデータ数})$$

・・・(2)

$$\text{RNAB}(\%) = 100 \times (\text{地震前のクラスターに分類された地震後の測定データ数}) / (\text{地震後のデータ数})$$

・・・(3)

3. 結果と考察

地震による地下水水質への影響については国内外でいくつかの報告事例があり、地下水水質や地下ガス成分の僅かな変化による地殻変動や地震の発生に予知に関する研究がなされている（細野, 1968; King et al., 1981; Li et al., 1984; 奥澤・塚原, 2002）。地震による地下水水質への影響は、主には地震動によって地質構造に発生する縦横の“ずれ”が帯水層にも影響を及ぼし、地下水流動、すなわち流路や流量、流入水組成・割合、流動方向などが変化することによって考えられる。例えば2004年の新潟県中越地震では、地下水温の異常上昇と電気伝導率の上昇が観測され、断層や断裂による透水性の変化による地下深部からの高温地下水の上昇と帯水層への流入が可能性として示されている（佐藤ら, 2005）。また、1995年の兵庫県南部地震では、地下水中のSr同位体比に異常が認められ、岩石などの亀裂発生による帯水層間相互の地下水流入、流出が原因と考えられた（井上ら, 2000）。一方、2011年の東北地方太平洋沖地震では、地震による直接的な影響よりも津波による影響が大きく、地下水への海水流入による塩水化が報告されている（杉田, 2012; 森ら, 2012; 中川ら, 2014）。今回の熊本

地震に関しても、地震前後において深層地下水中のヘリウム同位体比に変化がみられ（Sano et al., 2016）、亀裂の発生による地下水流動と水質への影響が推定される。また、地震の直後には、水前寺公園の湧水池が枯れ（市川, 2017）、阿蘇地域での湧泉の減少や復活がみられたことから（熊本日日新聞, 2016）、少なくとも一時的には、帯水層内圧力や地下水流動が地震による影響を受けたことは間違いない。地下水は水理構造や流動を直接見ることはできず観測も容易ではないため、地震と地下水との関係を明らかにするにあたっては測定可能なデータを可能な限り収集、蓄積し、それらを多角的に解析することが基本となる。そのような意味においては、今回の熊本地震では地震による地下水や地下水水質への影響に関する貴重なデータが得られたといえる。以下、地震前後での地下水水質の変化、および地震による水質への影響について考察する。

3.1 地震前後における水質の大きな変化の有無

本研究で対象とした計12地点の井戸は、地点No.11を除いて80 m以上の深さを有しており、水道水などの飲用水と同じ深度レベルの深井戸である。また、熊本県は地下水が主要な飲用水源で地下水水質への市民の関心も高い。したがって、まずは、地震によって水質が大きく変化したか否かを水質成分などの科学的なデータにもとづいて分かり易く示すことが社会的意義として重要である。これには、水質の特徴が図の大きさと形で表現でき、その変化を直感的にとらえることができるヘキサダイアグラムを用いた。Fig. 2に、各地下水の地震前後での各成分の平均値をヘキサダイアグラムにて示す。ここで、重炭酸イオン（ HCO_3^- ）濃度については、総アルカリ度が重炭酸イオンによるものとして換算した。また、陽イオンと陰イオンのバランスを計算した結果、全試料について $1.68 \pm 1.1\%$ の誤差範囲におさまっており、妥当な測定値が得られているとみなした。なお、図中の実線は地震前の、点線は地震後の結果を表している。Fig. 2で明らかなように、全ての採水地点においてヘキサダイアグラムの形が大きく変わったものや、地震前後で横軸のスケールを変えなければならないほど成分量が増減したものは無い。すなわち、本研究で対象とした地点の地下水においては、地震の前後でヘキサダイアグラムの形状を見て明確に判断できるほど大きな水質の変化があったとの判断は難しいとするのが妥当と考えられる。

3.2 地震前後における水質変化の有無と熊本地震との関係について

次に、地震の前後で水質は変化しなかったのか、地

Fig. 2. Stiff (hexa) diagram of the groundwater at each sampling point. Solid-line and dot-line indicate the connecting line of averaged measurement values before and after earthquake, respectively.

図2. 各採水地点における地下水試料のヘキサダイアグラム。実線は地震前における測定値の平均値、破線は地震後の平均値を示す。

震は地下水に影響しなかったのかというレベルで議論する。Fig. 2のヘキサダイアグラムで認められる地震前後の変化や差をより詳細かつ客観的に評価するため、各水質成分の変化に関しては地震前後での最小値もしくは最大値を比較するとともに、統計的手法により地震前後の標本（測定値）の検定を行った。これらの結果をTable 2に示す。Table 2においては、地震前後を通じての最大値や最小値が地震後に得られたものを太字で示した。また、地震前後の差の検定については、片側1% ($p < 0.01$)の基準で有意（差がある）と判定されたものは“**”，5% ($p < 0.05$)で有意と判定されたものは“*”で表した。さらに、ヘキサダイアグラムの形に相当する水質の特徴の変化については、非階層的クラスター分析（K-平均法）を用いて定量的に評価することとした。Table 3に、データ数、およびK-平均法で得られた誤分類率（CER）等の結果を示す。一方、これらの統計的手法では水質の変化が現れる時期や期間の“ずれ”は分からないため、各

地点における水質成分の経時変化をFig. 3に示した。採水頻度や回数が異なるのは地下水を管理する自治体の状況やスケジュールの都合のためであり、地震後の採水についても、地点No.1～3と地点No.11, 12は2016年10月時から、地点No.4～6は6月時から、その他の地点では5月時から採水、分析を再開した。なお、各図に示した縦破線は4月16日の本震発生時を示している。以下、各地点の水質の変化と地震による影響について考察する。

Table 3に示すように、No.1, No.3, No.9の3地点については誤分類率（CER）が0となり、地震前と地震後のデータが正しく二つのクラスターに分類されたことが分かる。この結果はTable 2に示した各水質データの検定結果とも整合性がある。特に地点No.1と地点No.9では全ての水質成分で地震後に最小値や最大値がみられており、平均値などの差も統計的に有意と判定される成分が多い。さらにFig. 3から明らかなように、これら地点の

Table 2. Statistical values for water quality index regarding the difference between before and after earthquake. (T(W): T or Welch test, MW: Mann-Whitney test, BM: Brunner-Munzel test)

表2. 地震前後における各地下水試料の水質測定値の統計値.

Well No.	Index	Min. value (mgL ⁻¹)		Max. value (mgL ⁻¹)		Ave. value (mgL ⁻¹)		T(W)	MW	BM
		before	after	before	after	before	after			
1	Na ⁺	7.04	6.45	7.42	6.83	7.19	6.61	**	**	**
	K ⁺	3.52	2.96	3.92	3.22	3.68	3.08	**	**	**
	Mg ²⁺	4.10	3.52	4.47	4.09	4.28	3.72	**	**	**
	Ca ²⁺	12.4	10.5	14.2	12.5	13.1	11.2	*	**	**
	Cl ⁻	3.36	3.19	4.08	3.27	3.62	3.24	**	**	**
	NO ₃ ⁻	1.37	1.26	1.65	1.37	1.50	1.32	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	5.15	4.58	6.19	4.82	5.56	4.67	**	**	**
	Alc.	52	50	56	52	53.8	50.7	**	**	**
	EC	139	135	162	144	151.5	141	**	**	**
2	Na ⁺	8.96	10.0	10.4	10.4	9.60	10.2		**	**
	K ⁺	3.87	4.22	4.54	4.53	4.21	4.37			
	Mg ²⁺	5.40	6.10	7.12	6.68	5.98	6.68			*
	Ca ²⁺	14.7	15.9	19.2	17.6	16.2	17.1			
	Cl ⁻	6.73	8.67	8.49	9.36	7.67	9.07	**	**	**
	NO ₃ ⁻	4.18	6.41	5.81	6.69	4.68	6.35	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	4.31	4.28	7.27	6.87	5.09	6.40			
	Alc.	48	62	60	66	53.5	63.5	**	*	
	EC	178	200	220	230	192.6	220.0		**	**
3	Na ⁺	10.8	11.6	11.4	12.0	11.2	11.7	**	**	**
	K ⁺	4.67	4.66	5.10	5.04	4.85	4.89			
	Mg ²⁺	6.22	6.61	6.60	7.19	6.43	6.82	**	**	**
	Ca ²⁺	16.6	17.4	18.4	18.6	17.2	17.7	**	**	**
	Cl ⁻	7.13	7.90	8.04	8.25	7.43	8.12	**	**	**
	NO ₃ ⁻	4.55	5.20	5.01	5.66	4.81	5.49	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	4.79	5.78	5.47	6.22	5.07	6.05	**	**	**
	Alc.	58	67	68	72	65.4	69.3	**		
	EC	198	210	220	220	191.7	191.7	**	**	**
4	Na ⁺	8.19	8.32	9.53	9.43	8.69	8.69	**	*	
	K ⁺	3.96	4.13	4.67	4.50	4.24	4.24		*	*
	Mg ²⁺	6.24	6.82	7.12	7.43	6.67	6.67	**	**	**
	Ca ²⁺	13.8	15.2	16.2	16.35	15.0	15.0	**	**	**
	Cl ⁻	6.28	6.99	8.13	7.68	6.62	6.62	**	**	**
	NO ₃ ⁻	3.36	3.77	4.15	4.44	3.71	3.71	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	5.47	5.33	6.19	6.51	5.73	5.73			
	Alc.	58	64	66	72	60.4	60.4	**	**	**
	EC	180	200	200	210	191.7	191.7	**	**	**
5	Na ⁺	6.64	6.20	7.81	7.28	6.90	6.83			
	K ⁺	3.2	2.99	3.84	3.36	3.37	3.22	**	**	
	Mg ²⁺	5.31	5.38	6.19	5.92	5.70	5.62			
	Ca ²⁺	10.5	10.5	13.3	11.6	11.4	10.9			
	Cl ⁻	3.95	3.80	5.27	4.70	4.47	4.21			
	NO ₃ ⁻	1.68	1.50	2.44	2.16	2.13	1.76	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	4.67	6.66	7.35	8.14	5.54	7.53	**	**	**
	Alc.	48	48	52	58	49.3	53.4	**		
	EC	140	150	170	170	152.4	157.9			
6	Na ⁺	10.28	10.07	11.46	11.58	10.66	10.99		*	
	K ⁺	4.46	4.46	5.21	4.89	4.63	4.70			
	Mg ²⁺	5.84	6.05	6.69	6.54	6.07	6.38	**	**	**
	Ca ²⁺	16.75	17.56	18.81	18.54	17.55	17.95		*	**
	Cl ⁻	6.72	7.66	7.87	8.06	7.05	7.82	**	**	**
	NO ₃ ⁻	4.00	4.38	4.44	5.08	4.13	4.86	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	4.96	5.66	5.94	6.12	5.38	5.92	**	**	**
	Alc.	60	66	68	72	65.1	69.3	**	**	*
	EC	199	200	210	220	200.4	211.3	**	**	**

平成28年熊本地震による地下水水質への影響

Well No.	Index	Min. value (mgL ⁻¹)		Max. value (mgL ⁻¹)		Ave. value (mgL ⁻¹)		T(W)	MW	BM
		before	after	before	after	before	after			
7	Na ⁺	10.9	11.3	14.4	12.2	12.3	11.7	**		
	K ⁺	4.57	4.55	5.26	4.94	4.87	4.78			
	Mg ²⁺	6.30	6.44	7.30	7.19	6.55	6.76	**	**	**
	Ca ²⁺	17.1	18	20.3	19.5	18.3	18.6			
	Cl ⁻	7.06	7.59	8.16	8.54	7.54	7.93	**	**	**
	NO ₃ ⁻	3.88	4.11	4.59	5.47	4.24	4.87	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	5.83	6.16	6.42	7.68	6.13	6.63	**	**	**
	Alc.	64	68	74	78	68.9	74.0	**	**	**
8	EC	200	210	240	240	209.2	221.1	**	**	**
	Na ⁺	10.8	11.0	12.4	12.9	11.9	12.1		**	**
	K ⁺	4.29	4.28	5.03	4.91	4.73	4.71			
	Mg ²⁺	7.75	8.34	8.99	8.90	8.48	8.68	**	**	**
	Ca ²⁺	18.3	19.4	21.3	21.1	19.8	20.1			
	Cl ⁻	9.21	9.12	10.78	10.00	9.78	9.49	**	**	**
	NO ₃ ⁻	4.96	4.99	6.55	6.44	5.26	5.46		**	
	SO ₄ ²⁻	6.1	17.3	23.2	24.8	19.5	19.9			
9	Alc.	62	62	100	72	66.5	67.0			
	EC	230	240	250	270	231.9	249.5	**	**	**
	Na ⁺	11.7	13.2	12.8	14.1	12.3	13.7	**	**	**
	K ⁺	3.90	4.10	4.33	4.53	4.16	4.23			
	Mg ²⁺	8.51	10.0	10.1	10.6	9.39	10.3	**	**	**
	Ca ²⁺	15.6	17.8	18.4	19.3	17.2	18.5	**	**	**
	Cl ⁻	7.50	8.80	8.20	9.13	7.76	9.01	**	**	**
	NO ₃ ⁻	2.03	2.40	2.56	2.70	2.22	2.55	**	**	**
10	SO ₄ ²⁻	27.5	39.2	38.3	41.2	33.7	40.3	**	**	**
	Alc.	54	56	60	66	57.5	61.2			
	EC	210	250	260	270	229.5	260.0	**	**	**
	Na ⁺	9.35	9.23	12.3	10.2	10.0	9.63			
	K ⁺	4.11	5.46	7.18	6.09	5.91	5.77			
	Mg ²⁺	5.63	5.74	9.20	8.39	7.56	6.93			
	Ca ²⁺	12.7	12.3	19.4	18.8	17.0	15.3			
	Cl ⁻	6.99	7.54	10.06	10.2	9.12	8.83			
11	NO ₃ ⁻	3.66	3.7	4.78	4.68	4.32	4.20			
	SO ₄ ²⁻	6.14	7.35	8.75	8.07	7.52	7.73			
	Alc.	52.00	52.00	72.00	78	63.9	65.2			
	EC	196.00	199.00	240.00	230	213.0	217.0			
	Na ⁺	11.61	11.14	12.39	12.65	12.05	12.19	**	**	**
	K ⁺	4.33	4.06	4.85	5.19	4.57	4.43			
	Mg ²⁺	8.49	8.57	9.35	9.27	8.98	8.85	**	**	**
	Ca ²⁺	16.1	16.2	19.4	17.9	17.4	16.9	**	**	**
12	Cl ⁻	8.68	8.58	10.17	9.20	9.14	8.80	**	**	**
	NO ₃ ⁻	3.08	3.16	3.48	3.53	3.24	3.31	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	25.7	24.3	30.6	27.5	28.7	25.6	**	**	**
	Alc.	50	58	74	68	60.6	62.9	**	**	**
	EC	200	210	250	250	224.8	230.4	**	**	**
	Na ⁺	11.4	11.0	12.2	12.6	11.9	12.0			
	K ⁺	4.44	4.10	4.91	4.69	4.62	4.53			
	Mg ²⁺	8.72	8.81	9.13	9.48	8.88	9.01		*	*
13	Ca ²⁺	15.4	15.6	16.5	16.5	16.0	16.1			
	Cl ⁻	7.04	7.16	8.31	8.05	7.35	7.83	**	**	**
	NO ₃ ⁻	2.01	2.01	2.14	2.20	2.06	2.15	**	**	**
	SO ₄ ²⁻	29.3	29.9	32.2	34.9	30.4	32.8	**	**	**
	Alc.	52	56	60	62	56.8	59.6	**	**	**
	EC	200	220	230	250	217.5	231.1	**	**	**

地震後の測定値に大きな変動はなく、異常値や急な上昇・下降などの現象もみられない。すなわち、平均値は地震後の測定値のレベルを反映しているとみなせる。以上か

ら、これらの3地点の地下水は地震による影響を受けて地震後に水質が変化した可能性が非常に高いと判断する。

次に、地点No.6と地点No.12の誤分類率は各々3.0、5.7

平成28年熊本地震による地下水水質への影響

Fig. 3 Time course of water-quality constituents in groundwater sample at each sampling point. Dot-line indicates the time when earthquake occurred. $\blacktriangle$: SO_4^{2-} , $\blacklozenge$: Cl^- , $\blacksquare$: NO_3^- , $\triangle$: Mg^{2+} , $\diamond$: Na^+ , $\square$: K^+ , $\circ$: Ca^{2+} , $+$: Alkalinity, $\times$: EC.

図3 各採水地点における地下水水質の経時変化。破線は地震の発生日時を示す。 $\blacktriangle$: SO_4^{2-} , $\blacklozenge$: Cl^- , $\blacksquare$: NO_3^- , $\triangle$: Mg^{2+} , $\diamond$: Na^+ , $\square$: K^+ , $\circ$: Ca^{2+} , $+$: Alkalinity, $\times$: EC.

Table 3. Evaluation of the difference between the data before and after earthquake by *K*-means method.表3. 地震前後で地下水水質が変化したか否かに関する *K*-平均法による評価.

Well No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TNS	18	21	26	33	33	33	35	95	25	24	95	35
NSBE	13	10	20	21	21	23	22	42	20	16	65	24
NSAE	5	11	6	12	12	10	13	53	5	8	30	11
CER	0	28.6	0	9.1	9.1	3.0	11.4	37.9	0	37.5	20.0	5.7
RNBA	0	37.5	0	12.5	12.5	4.2	12.5	45.8	0	31.6	18.1	4.2
RNAB	0	0	0	0	0	0	9.1	13.0	0	60.0	26.1	9.1

TNS: total number of samples

NSBE: number of samples collected before earthquake

NSAE: number of samples collected after earthquake

CER: classification error rate

RNBA: rate of the number of samples collected after earthquake which judged as the samples collected before earthquake

RNAB: rate of the number of samples collected before earthquake which judged as the samples collected after earthquake

と低く (Table 3), Table 2に示すように多くの成分で地震後に最小値, 最大値が認められ, かつ平均値などの差も有意と判定される成分が多い。また, Fig. 3において地震後の測定値に大きな変動などはみられないことから, これらの2地点についても地震によって水質が変化した可能性が高いと判断する。

誤分類率が10%未満となった地点No.4と地点No.5では, 地震後のデータが地震前のデータとして誤分類される率 (RNAB) がともに0であった。しかし, 地震前後の平均値などの差に関しては, Table 2に示すように, 地点No.4では有意と判定される成分が多いのに対し, 地点No.5では少ないことが分かる。また, Fig. 3より, 地点No.4では平均値の差が有意と判定された硝酸, 塩素イオン, アルカリ度等の濃度が地震後に顕著に上昇していることから, これら成分の濃度は変化したと判断するのが妥当と考えられ, 地震による影響も否定できない。一方, 地点No.5では, Fig. 3から明らかなように, 2015年の7月以降, 陰イオン等の濃度が規則的 (周期的) に大きく変化しており, 地震前後で濃度のレベルに明確な差があるとは言い難い。さらに, 地点No.5において地震前のデータが地震後に誤分類されたのは陰イオン濃度の変動が大きい2015年7月以降の測定データであった。すなわち, クラスタ分析は, 水質成分の濃度が比較的安定していた2015年7月以前と以降を2群に分類した可能性が高い。以上から, 地点No.5では地震の前後で水質が変化したと判断するのは難しいと考えられる。

誤分類率が10~30%であった地点No.2, 7, 11についても水質の変化や地震による影響を評価するのは難しい。地点No.7では, Table 2に示すように塩素, 硝酸イオン, アルカリ度の最大値が地震後にみられ, 地震前後での平均値などの差も有意と判定された。これは, Fig. 3に示

すように, 地震後にそれら成分の濃度が上昇し, その後も概ね同じ濃度レベルで安定していたことを反映している。一方, 地点No.11ではナトリウムやカリウムイオンで最小値と最大値がともに地震後にみられたが, これは, Fig. 3に示すようにナトリウムイオンは地震後の5月と6月の試料で測定値が大きく変動し, カリウムイオンやアルカリ度でも地震後に変動が大きくなったことによる。また, 多くの成分で地震前後での平均値などの差が有意と判定された。これも地点No.7と同様, 地震後に成分の濃度レベルが変化した可能性があるが, Fig. 3に示すように, 上記成分の濃度レベルは地震の約4ヶ月後に変化していることが分かる。すなわち, 地点No.11においては, 地震による地下水水質への影響が遅れて生じた可能性が示唆され, 同様の結果は地点No.12でも認められる (Fig. 3)。これらの理由については, 採水地点と地震によって実際に影響を受けた地点との距離など位置的な関係が考えられ, 次節で取り上げたい。地点No.2に関しては, 誤分類率は28.6%と高いものの地震後データの誤分類率は0となった。また, 塩素と硝酸イオン, アルカリ度, ECについては地震後に最大値がみられた。さらに, それら成分の平均値などの差も有意と判定され (Table 2), 地震後に濃度のレベルが上昇していることが分かる (Fig. 3)。以上から, 地点No.7, 11, 2の3地点については, 地震前後での水質変化と地震による影響を否定はできないと判断するのが妥当と考えられる。中でも, 地点No.11に関しては地震による水質への影響が遅れて現れた可能性が考えられる。

最後に, 誤分類率が30%を超えた地点No.8と地点No.10については, Table 2, Fig. 3のいずれの結果から, 地震による水質への影響があったと判断するのは難しい。ただし, 地点No.10については, Fig. 3で明らかなように,

水質の変動が大きいため地震前後の差が評価できないとするのが妥当である。

以上、地震の前後で水質が変化すると判断する地下水が複数みられたが、水質成分の変動要因は個々で異なる可能性があり、全てを同じ理由で説明するのは困難と考えられる。ただ、あくまで推論の域は出ないものの、井戸で取水している帯水層には異なる水質を有する複数の地下水流入が想定され、地震による流入流路が狭窄、拡大などの影響を受けて流入量に変化を生じ、帯水層における流入水の割合が変化し得る可能性が考えられる。今後、地震前後における地下水位や流動に関する知見などが明らかにされ次第、水質の変化と照らし合わせて解析を進める必要があると考えている。

3.3 震源地や断層および採水地点の位置と水質変化との関係

熊本地震では、気象庁の基準点において水平方向、鉛直方向ともに大きなずれが観測されており、長陽（阿蘇カルデラ内）基準点で水平20 cmと鉛直24 cm、菊池基準点で水平45 cmと鉛直5 cm、城南基準点で水平19 cmと鉛直1 cm程度となっている（国土地理院, 2016）。すなわち、地下水流動や水質に関して、断層などとの位置関係によって影響の大小が現れた可能性があるため、震源地や断層と採水地点との位置と水質の変化と関係性を

検討した。

Fig. 4に、地震による影響で水質が変化し得る可能性が高いと判断される地点No.1, 3, 9を（◎）、可能性がある判断される地点No.6と12を（○）、地震前後での水質の変化と地震による影響を否定できないと判断される地点No.2, 4, 7, 11を（△）、水質が変化し得るとは判断し難い地点No.5, 8, 10を（⊗）にて、活断層（宮縁, 2016）、震源、および地震による横ずれ、縦ずれ等の地殻変動を観測している気象庁の4カ所の観測地点（基準点）とともに示す。Fig. 4で示すように、布田川断層に近い採水地点には、地点No.9と10が、日奈久断層や震源に近い採水地点には地点No.11と12がある。また、地点No.6と7は別の活断層に近いことが分かる。しかし、本研究においては、これらの地点で特に大きく水質が変化し得るといった断層や震源地と距離が近いことによる特異的な結果は得られなかった。すなわち、地震によって地下構造が影響を受けたと推定される地域においては断層や震源との距離にかかわらず、複数箇所の地下水について水質変動が生じた可能性が示された。

一方、上述したように地点No.12では本震の約2ヶ月後、地点No.11では約4ヶ月後に陰イオンなどで顕著な濃度レベルの上昇がみられ、地震の発生から数ヶ月遅れての水質の変化が示唆された。これについては、Fig. 1に示

Fig. 4. Sampling points and distribution of active faults. Jaggy lines indicate active faults. Stars and squares show the locations of epicenters and the observation points by meteorological bureau, respectively.

図4. 採水地点と断層等の位置関係の概要。ジャギーラインは断層を示す。星印は震度7を記録した2回の地震の震源地を、正方形は気象庁の観測地点を示す。

したように地点No.12と11が地下水の湧水域である(熊本県・熊本市, 2005; 富家ら, 2011)ことから, 地下水涵養域や上流域で起こった水質の変化が遅れて現れた可能性が考えられ, 興味深い結果と言える。今後, 調査研究を継続する上で注意してみていく必要があろう。

4. 結論

本研究では, 熊本地震前後の約3年間に亘る地下水水質モニタリングの結果から, 地震の前後における水質変化の有無を明らかにするとともに, 地震による地下水水質への影響について考察し, 以下の結論を得た。

- 1) 地震の影響が推定される地域の計12地点における地震前後での地下水水質について, ヘキサダイアグラムの形状を見て明確に判断できるほど大きな水質の変化があったとの判断は難しいことが分かった。
- 2) 地震の前後における水質成分や水質の特徴に関する変化を統計的手法にて比較した結果, 9地点の地下水で有意な差があると判定され, 地震による影響は否定できないことが分かった。
- 3) 地下水湧水域にある地点では, 水質の変化が地震後数ヶ月を経て現れた可能性が示唆された。
- 4) 地下水水質の変化と震源や断層などとの明確な位置的關係は見いだせず, むしろ地震による地下構造への影響が及んだ地域全体において水質の変化が生じた可能性が示された。

謝辞

本研究の遂行には, 熊本市上下水道局, 益城町, 大津町, 菊池市, 合志市の関係各位より多大なるご協力を賜りました。また, 本研究の一部は, 公益財団法人くまもと地下水財団「熊本地域地下水質調査研究事業」, および熊本大学「熊本復興支援プロジェクト」の援助を受けて行われました。ここに記して深く感謝申し上げます。

文 献

Brunner E, Munzel U (2000): The Nonparametric Behrens-Fisher Problem: Asymptotic Theory and a Small-Sample Approximation. *Biometrical Journal*, 42: 17-25.

細野義純 (1968): 松代群発地震に際し観察された地下水位の異状と水質の変化について. *地質学雑誌*, 74: 569-581.

市川勉 (2017): 熊本地震による地下水への影響. *水循環貯留と浸透*, 103: 9-13.

井上睦夫・杉本幸司・中村昇・小村和久 (2000): 1995年兵庫県南部地震前後における神戸地下水中のSr同位体比および親石元素組成の変化. *地球化学*, 34: 91-101.

King CY, Evans WC, Presser T, Husk RH (1981): Anomalous chemical changes in well waters and possible relation to earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 8: 425-428.

気象庁 平成28年熊本地震に関する情報. <<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>> Accessed 10 July 2017

国土地理院 (2016): 平成28年熊本地震予知連絡会会報第96巻: 557-589.

熊本県・熊本市 (2005): 熊本地域地下水保全対策調査報告書.

熊本日日新聞 (2016a): (2016年5月時点) .

熊本日日新聞 (2016b): (2016年年9月4日時点) .

Li G, Jiang F, Wang J, Zhang P (1984): Preliminary results of seismogeochemical research in China. *Pure and Applied Geophysics*, 122: 218-230.

MacQueen J (1967): Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. *Proc. Fifth Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob.*, 1: 281-297.

Mann HB, Whitney DR (1947): On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18: 50-60.

宮縁育夫 (2016): 平成28年 (2016年) 熊本地震によって南阿蘇村周辺域で発生した斜面災害. *地学雑誌*, 125(3): 421-429.

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.

中川啓・和田直之・高辻俊宏・朝倉宏・小林寛・徳永朋祥 (2014): 東北太平洋沖地震による津波被害を受けた南三陸町における地下水・河川水・土壌調査. *地下水学会誌*, 56: 107-119.

奥澤保・塚原弘昭 (2002): 松代群発地震に湧出する地下水の直下地震にともなう化学成分変化. *温泉科学*, 51: 147-163.

Sano Y, Yakahata N, Kagoshima T, Shibata T, Onoue T, Zhao D (2016): Groundwater helium anomaly reflects strain change during the 2016 Kumamoto earthquake in Southwest Japan. *Scientific Reports*, 6: 1-7.

- 佐藤早苗・氏原英敏・豊島剛志・小林健太・渡部直喜・大川直樹・和田幸永・小河原孝彦・播磨雄太・小泉尚嗣（2005）：2004年新潟県中越地震に伴う地下水温・水質の異常．新潟大学災害研究所年報，27: 41-56.
- 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: 25-37.
- The R Foundation The R Project for Statistical Computing.
<https://www.r-project.org/index.html>. Accessed 1 July 2017
- 富家和男・糸満尚貴・松山賢司・柿本竜治・川越保徳（2011）：熊本都市域における地下水中硝酸性窒素濃度の現状と地理情報システムおよび窒素安定同位体分析による窒素負荷要因の解明．日本水環境学会誌，34: 1-9.
- 矢来博司・小林知勝・森下遊・藤原智・檜山洋平・川元智司・上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅（2016）：熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル．国土地理院時報，128: 169-176.