大分県竹田市に位置する湧水の科学的特徴及び 災害時における代替え水源としての有用性

横田恭平*

The characteristics of science and the usability of water supply in a disaster for the spring waters at Taketa City in Oita

Kyohei YOKOTA*

Abstract

This study aims to evaluate the effective for the alternative water in a disaster and the characteristics of hydrologic science for 3 spring waters and 1 spring waters as reference in Oita. The study term was 2013 to 2017 including Kumamoto earthquake and Aso eruption in 2016. According to the tri-liner diagram and hexane diagram, the dissolved component had shown annual flections. There samples were met the standard in the water experimental index of emergency for an earthquake of disaster. Therefore it could not confirm the impact of earthquake disaster. pH and $\text{NO}_3\text{-N}$ in Aso eruption shown the impact. There were possible that a required amount of discharge covered for a few hours in an emergency of earthquake disaster. Therefore the 3 spring waters are useful for alternative water when a disaster occurs.

Key Words: spring water, water quality, earthquake disaster, eruption, water use

要 旨

本研究では、大分県の小津留湧水、桑畑湧水、葛路谷湧水と比較対象の河宇田湧水（名水百選）を対象に、長期的な水文科学的な特徴と災害時における代替え水源としての有用性を評価した。対象期間には、2016年の熊本地震（震災）と同年の阿蘇山噴火（噴火）を含む。湧水の溶存成分は、湧水で異なり、年間を通して変化を示した。震災等の非常時における水質試験項目は、すべての湧水で判断基準を満たした。その中で、震災の影響はなかったが、噴火の影響は pH と $\text{NO}_3\text{-N}$ で確認できた。湧水の湧出量は、非常時において、数時間で必要量（3 or 16 L/人・日）を賄うことができる量であった。よって3つの湧水は、災害時における代替え水源として有用といえる。

キーワード: 湧水、水質、震災、噴火、水利用

* 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科（〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77）
National Institute of Technology, Wakayama College Civil Engineering

1. 背景および目的

湧水は、外的要因によって水質が大きく変化することが知られており、畑地や家畜の飼育場といった汚染源がある場合は、飲用水としては適さない（山本ほか，2003）。また震災などの影響においても同様で、地震の揺れなどにより土壌成分や土壌そのものが湧水に混ざり、水利用に適さない水質に変化する。2016年の熊本地震においては地下水に土壌が混ざり、一時的に水が利用できなくなるといった現象が発生した（環境省，2016）。このように湧水の水質が変化する要因は、突発的なものも含め数多くある。湧水の利用は年間を通して行われるため、常に飲用水の水質基準を超過しないことが求められる。

環境省により1985年（昭和60年）と2008年（平成20年）に名水百選が選定され、大分県からも選定がなされた（環境省，2018）。その後、日本各地で大規模な地震や類を見ない豪雨など、水環境に影響を与えうる様々な災害が発生した。また、元号の変更によって水周りの物理・化学的な部分のみならず、政治・社会的環境も変化している。昭和と平成の名水百選の選定方法として調査対象となった項目は、水質や水量のみではなく、親水性やその水の利用や保全活動も含まれる（環境省，2015）。

そこで本研究では、大分県の親水性やその水の利用や保全活動が行われている3つの湧水（小津留湧水、桑畑湧水、葛路谷湧水）を対象に、長期的な水文科学的な特徴を把握し、そして災害時における代替え水源としての有用性を評価することを目的とした。3つの湧水と比較するため、昭和の名水百選に選定された竹田湧水群である河宇田湧水を用いる。長期的な水文科学的な特徴を把握するため、トリリニアダイヤグラム、ヘキサダイヤグラムを用いる。災害時における代替え水源としての有用性の指標としては、震災等の非常時における水質試験に用いられる項目を用いる。本来であれば水道法、環境基本法及び土壌汚染対策法に記されている基準の達成度を検討すべきであるが、本研究では災害時に飲料水として最低限確保すべき水質項目について検討することとした（厚生労働省，2018）。最後に湧水の湧出量を算定

し、非常時の利用の検討を行う。

2. 対象とした湧水の概要

図1に研究対象地を示す。対象とした湧水は、大分県竹田市の河宇田湧水、小津留湧水、桑畑湧水、葛路谷湧水の4つとした。河宇田湧水を含め、小津留湧水、桑畑湧水、葛路谷湧水は、水汲み場として整備されており、多くの利用者がいることから、親水性があり、保全活動がなされている。また桑畑湧水、葛路谷湧水の近隣では九重山が臨み、芹川が健やかに流れ、温泉による湯気があちらこちらで立ち込めている景色は、景観や秘境地として見ごたえのある場所である。これらの湧水がある竹田市では、気象庁によると、2016年の熊本地震時に震度5強を2回、震度5弱を1回観測された（2016年4月14日～4月18日の期間）。また同年の10月には、湧水地点から25～35km離れた阿蘇山が噴火した。

3. 調査期間及び実験方法

調査期間は2013年1月～2017年10月とし、調査の頻度は、月に1回程度とした。

pH、EC、水温は現地において、ポータブル計測器（東亜ディーケーケー社製：HM-30P、RM-20P、堀場製作所社製：D-24）を用いて測定した。

採水した試料は、実験室に持ち帰り、イオンクロマトグラフ（ダイオネクス社製：ICS-1000）と

図1 研究対象地

Fig. 1 Locations of survey point

ICP 発光分光分析（島津製作所製：ICPS-8100）にて成分の分析を行った。イオンクロマトグラフ法の前処理として $0.45\mu\text{m}$ のフィルターを用いてろ過を行った。ICP 発光分光分析の前処理として、濃硝酸を約1%になるように添加後、1日静置してから上記と同じフィルターを用いてろ過を実施後に、分析を行った。

大腸菌分析として、大腸菌・大腸菌群用のXM-G寒天培地「ニッスイ」を用い、商品に記載されている使用方法を参考に実験を行った。その方法は、XM-G寒天培地「ニッスイ」39.3gを超純水1000mLに加え、 121°C で15分間高圧蒸気滅菌にて完全に培地を溶解し、シャーレに約16mLずつ分注し乾燥させた。乾燥したシャーレに対象となる試料を1mLに加え、コンラージ棒で均等にし、温度 37°C で22時間の培養を行った後に、生菌数をカウントした。

試料中の HCO_3^- （炭酸水素イオン）濃度は、0.02Nの硫酸により、終点のpH4.8まで滴定に要した量から算出して求めた。

4. 長期的な水文科学的な特徴

本研究では、まずは湧水の一般的な特徴を把握するため、トリリニアダイアグラムとヘキサダイアグラムの結果を用いる。その特徴を把握後、災害時に満たすべき水質について検討を行う。

4.1 トリリニアダイアグラム

図2がトリリニアダイアグラムの結果である。トリリニアダイアグラムの対象成分は、一般的に主要な溶存成分となっている。示した結果は、期間内に調査したすべてのデータである。4つの湧水はすべてアルカリ土類炭酸塩型に属し、地下水の種類としては河川水・浅層地下水に分類される（水収支研究グループ、1993）。また、4つの湧水のトリリニアダイアグラム内の位置は、若干の違いがあり、異なる。小津留湧水と葛路谷湧水は近い位置にあるが、厳密には異なり、下が小津留湧水で上が葛路谷湧水である。河宇田湧水と桑畑湧水についても近い位置にあるが、若干ながら異なり、左が河宇田湧水で右が桑畑湧水である。さらに同じ湧水においても位置にばらつきがあることから、水質の構成は年間を通して異なる。

よって4つの湧水はすべてアルカリ土類炭酸塩型に属するが、詳細を確認するとそれぞれの水質の構成が異なることが分かった。また同じ湧水においても、年間を通して水質の構成が同じではないことが分かった。

4.2 ヘキサダイアグラム

図3は、ヘキサダイアグラムの結果である。作図にあたり、期間内に調査したすべてのデータを平均した値を基に行った。すべての湧水は大きさが異なるものの、ほぼ同じ形を示している。主に

図2 各湧水のトリリニアダイアグラムの結果

Fig. 2 Distributions in tri-linear diagram for the spring waters

HCO_3^- の当量が高く、陽イオンより陰イオンの当量が高い結果となっている。当量が最も高い湧水は、桑畑湧水であり、この当量は河宇田湧水よりも高い結果である。小津留湧水と葛路谷湧水の当量は、河宇田湧水より低い結果であり、ほぼ同じ当量である。

5. 震災等の非常時における水質試験に用いられる項目

本研究では、日本水道協会が発行している震災等の非常時における水質試験方法（上水試験方法－別冊）に記載されている井戸水等由来の飲料水に記載の水質項目を基に検討を行った（日本水道協会, 2012）。それによると、井戸水等由来の飲料水については、検討の順番として①外観、②臭気、③濁度、④大腸菌、⑤味・外観となる。これら5つの項目については、1つでも基準を満たさない場合は飲用が不適と判断される。次に必要に応じてpH値・電気伝導度・水温を確認し、参考のため硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）・マンガン（Mn）を確認し、基準を満たさない場合は飲用が不可と判断される。

5.1 外観・臭気・濁度

対象とした湧水の外観・臭気は、水質基準で規定されている判断基準を常に満たしていたと思われる。次に濁度については、目視によって判断基準の超過の有無を確認した。目視での確認方法は、現地にて試料を白い容器に移し、濁りがないかを確認した。濁度は、一般的に判断基準の2度を超えると若干の濁りが確認される。調査の結果、対象とした湧水は年間を通して濁りがなかったため、基準を満たしていると考えられる。

5.2 大腸菌

表1に各湧水の大腸菌の検出結果を示した。採水は2017年9月21日に行い、培地への設置は調査

表1 各湧水の大腸菌の検出結果
Table 1 Results of coliform bacillus contained in the spring waters

河宇田湧水 1	小津留湧水 1	桑畑湧水 1	葛路谷湧水 1
検出なし	検出なし	検出なし	検出なし
河宇田湧水 2	小津留湧水 2	桑畑湧水 2	葛路谷湧水 2
検出なし	検出なし	検出なし	検出なし

図3 各湧水のヘキサダイアグラムの結果

Fig. 3 Results of Hexa diagram for the spring waters

日に行った。同じ湧水について2個の試験体を作成し、大腸菌の確認を行った。結果として、すべての湧水で大腸菌を確認することができなかったが、偶然として検出されなかった可能性がある。よって、2017年9月21日の湧水については、判断基準の「検出されないこと」を満たしている。

5.3 pH, 電気伝導度, 水温

pHの判断基準は、5.8～8.6と規定されている。このpHの範囲から外れる場合は、異常水の混入のおそれがある（日本水道協会, 2012）。図4に対象とした湧水の2013～2017年のpHの結果を示す。対象とした期間においては、常に判断基準内に収まる結果となった。桑畑湧水の多くは6.8を示し、その他の3つの湧水は7.2～7.7と若干ながらアルカリ性側に傾いていることが分かった。2016年4月の熊本地震の直後においても、特に大きなpHの変化はなかった。阿蘇山の噴火の前後においては、桑畑湧水のpHが8.0を超えた。10月9日以降のpHは、ほぼ平年の値を示したことから、阿蘇山の噴火が湧水に何らかの影響を与えた可能性がある。

電気伝導度（EC）の判断基準は、異常がないこととなっている。それは、周辺の水よりも大きな値の場合は汚染のおそれがあるとされ、10mS/m以下は良好、40mS/mは概ね良好、40mS/mを超えると不可となっている（日本水道協会,

2012）。図5に電気伝導度の結果を示す。小津留湧水と葛路谷湧水は、年間を通して常に10mS/m以下であるため、電気伝導度の値としては良好と位置付けられる。河宇田湧水と桑畑湧水については、10mS/mを常を超えるが40mS/m以下であることからやや良好といえる。桑畑湧水の年間の変動幅は、他の湧水と比較して大きく、およそ8mS/mとなっている。河宇田湧水の変動幅は、およそ3mS/mと桑畑湧水ほどではない。震災後と噴火後の値は、これまでの年間変化から見ると、特に目立った変化を示していない。小津留湧水と葛路谷湧水の電気伝導度についても、震災と噴火後も含め、年間変化が少なく、安定していることが分かる。

図6, 7に水温と気温の結果を示す。図7の気温の結果は、湧水の湧出地点である竹田市の気象観測所で観測されているデータを使用した。気温を示す理由として、気温が湧水の水温に与える影響を確認するためである（気象庁, 2018）。湧水の水温は、毎年ほぼ同じ傾向を示し、気温が低くなる1月に低く14℃前後まで減少する。また気温が高い7, 8月の湧水の水温は、17℃前後まで上昇する。葛路谷湧水は、12月頃に12℃まで水温が低くなる。これらの湧水は、一般的な深井戸の湧水と異なり、大気の気温の影響により水温が変化している。しかしながら、年間の気温の変化に対する湧水の水温の変化は小さい結果となった。震災後と噴火後においても、水温の傾向は変化しな

図4 各湧水のpHの結果

Fig. 4 Fluctuations of pH contained in the spring waters including the term of Kumamoto earthquake and Aso eruption in 2016

図5 各湧水のECの結果

Fig. 5 Fluctuations of EC (Electrical Conductivity) for the spring waters including the term of Kumamoto earthquake and Aso eruption in 2016

かった。

5.4 硝酸態窒素, マンガン

硝酸態窒素やマンガンの濃度の確認は、主に参考のために実施されるもので、汚染の恐れがある井戸水では高い値になる。硝酸態窒素の判断基準は10mg/Lで、マンガンは0.05mg/Lとなっている。

図8に硝酸態窒素濃度の年間変化を示す。硝酸態窒素の濃度は、すべての湧水で判断基準を満たしている。その中で、小津留湧水と葛路谷湧水は、年間を通して濃度に大きな変化はなかった。

図6 各湧水の水温の結果

Fig. 6 Fluctuations of water temperature for the spring waters including the term of Kumamoto earthquake and Aso eruption in 2016

図7 竹田観測所における月平均気温の結果

Fig. 7 Fluctuations in monthly mean air temperature from 2013 to 2017 except April 2014 and March 2015 at Taketa observatory

河宇田湧水に関しては、観測開始の2013～2014年まで徐々に濃度が減少し、2015年1月にふたたび濃度が上昇し、また徐々に濃度が減少する。2016年10月に大きく濃度が減少するが、その後は濃度が増加に転じ、本研究で対象とした終点の2017年の10月まで増加し続ける。桑畑湧水も同様の傾向を示すが、河宇田湧水と異なる点は、2016年10月に濃度が大きく減少した傾向が桑畑湧水では確認できないことである。桑畑湧水は、2015年1月～2017年6月頃まで濃度が減少し、その後は増加に転じる。よって、河宇田湧水は、噴火によって何らかの影響を受けた可能性があるが、その他の小津留湧水、桑畑湧水、葛路谷湧水については、震災と噴火の影響を確認することができなかった。

表2にマンガンの測定結果を示す。マンガンについては、常に定量下限値以下の濃度であった

図8 各湧水の NO₃-Nの結果

Fig. 8 Fluctuations of Nitrate ion contained in the spring waters including the term of Kumamoto earthquake and Aso eruption in 2016

表2 各湧水の Mn の結果

Table 2 Results of Mn concentration contained in the spring waters

Mn (mg/L)	河宇田 湧水	小津留 湧水	桑畑 湧水	葛路谷 湧水
平均	0.000	0.000	0.000	0.000
最大値	0.000	0.000	0.000	0.000
最小値	0.000	0.000	0.000	0.000

め、震災時と噴火時においても水質として特に問題がない結果となった。

5.5 味

数回、湧水の湧出地点において飲用したが、味には特に問題がなかった。また、湧水を飲用水として利用している方に聞き込みを行ったが、これまでの湧水の利用の中で、味に問題があったという話を聞くことができなかった。

5.6 震災時と噴火時の水質について

これまで示した通り、震災等の非常時における水質項目について、2016年4月の震災後は、特に大きな水質変化を示さなかった。このことから、震度5強程度であれば、湧水の水質に影響はなかったと推察される。2016年10月の阿蘇山噴火時に、pHと $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が変化する湧水があったため、若干ながら噴火の影響を受けている可能性がある。しかしながら噴火前後において、pHや $\text{NO}_3\text{-N}$ を含めそれ以外の水質が判断基準の範囲内であることから、噴火時においても、湧水の利用は可能である。

6. 対象とした湧水の水量とその利用方法について

湧水の水量は、管などから湧出させている湧水の場合、1Lマスにどの程度の時間で満水になるのかを調査し求め、堰などの越流によって湧出させている湧水の場合、越流部分の一部の流量を先ほどと同じく1Lマスにて測定し、1Lマスの幅と越流部分の長さを基に求めた。

表3、4に対象とした湧水の湧出水量を示す。湧水のなかで最も流量が多いのは、河宇田湧水であった。河宇田湧水には水を汲むことができる施設がある一方、多くは河川水として流されている。そこで河宇田湧水の全体の水量と水を汲むことができる施設から湧出する水量とに分けて示した。河宇田湧水の汲むことができる水量のみで他の3つの湧水と比較すると、最も流量が多いのが小津留湧水で、最も少ないのが葛路谷湧水となる。一般に炊事や洗濯などで通常時は家庭で1人・1日あたり200Lの水を利用す

るとされている。国土交通省水資源部の調べによると2011年の生活用水使用量は289Lになっているが、本研究では200Lを採用する(国土交通省, 2018)。災害時に最低限必要な水量は、東京都水道局によると3Lであると考えられている(国土交通省, 2007)。また、阪神・淡路震災時の被災市民の実績使用水量によると、発災から3日までの必要な最低限の水量は、16Lと報告されている(国土交通省, 2007)。各湧水の1日の湧出量と一人あたりの必要流量との計算から、小津留湧水は9.2千人(通常時)、610.1千人(災害時・3L)、114.4千人(災害時・16L)が水を確保できることとなる。最も流量が少ない葛路谷湧水は、0.2千人(通常時)・14.6千人(災

表3 3つの湧水の湧出流量及び利用可能人口
Table 3 The yield and the available populations on 200L, 3L and 16L per person for three spring waters

	単位	小津留 湧水	桑畑 湧水	葛路谷 湧水
流量	L/day	1,830,356	386,963	43,910
利用可能人口 (通常時・200L)	千人	9.2	1.9	0.2
利用可能人口 (災害時・3L)	千人	610.1	129.0	14.6
利用可能人口 (災害時・16L)	千人	114.4	24.2	2.7

表4 河宇田湧水の湧出流量及び利用可能人口
Table 4 The yield and the available populations on 200L, 3L and 16L per person for Kawauda spring waters

	単位	河宇田湧水 (全体)	河宇田湧水 (汲める場所のみ)
流量	L/day	76,314,647	262,162
利用可能人口 (通常時・200L)	千人	381.6	1.3
利用可能人口 (災害時・3L)	千人	25,438.2	87.4
利用可能人口 (災害時・16L)	千人	4,770.0	16.4

害時・3L)・2.7千人(災害時・16L)となる。湧水がある竹田市の平成28年の人口は22.7千人であることから、災害時に必要な流量が湧出しており、小津留湧水に関しては0.8時間(災害時・3L)・4.8時間(災害時・16L)で竹田市の人口分の流量を得ることができる計算となる。また竹田市は高齢化が深刻な地区のため薬を飲む方が多く、また薬によっては軟水で薬を飲む必要がある。葛路谷湧水は、硬度が平均で23.78mg/Lと軟水の分類に属する。桑畑湧水は、硬度が77.85mg/Lで中程度の軟水であることから、近距離にありながら葛路谷湧水とは異なる水質である。よって必要に応じて使い分けが可能で、これは竹田湧水群では確認できなかった特異性である。

7. まとめ

本研究では、大分県の3つの湧水(小津留湧水、桑畑湧水、葛路谷湧水)を対象に、まずは長期的な水文科学的な特徴を把握し、そして災害時における代替え水源としての有用性を評価することを目的とした。対象期間を2013～2017年とし、2016年の熊本地震(震災)と同年の阿蘇山噴火(噴火)が発生した期間を含む。対象とした湧水は、親水性を持つ湧水である。また比較対象のため名水百選に選ばれた河宇田湧水を選定した。トリリニアダイヤグラムより、3つの湧水の水質の構成は、詳細に確認すると、若干ながら異なるが、河宇田湧水と同じアルカリ土類炭酸塩型であった。また同じ湧水でも水質の構成が年間を通して異なることが分かった。ヘキサダイヤグラムの結果より、すべての湧水の大きさ(当量)は異なるものの、形状についてはほぼ同じであった。それは、小津留湧水と葛路谷湧水が河宇田湧水より当量が低く、桑畑湧水はそれより高い当量であった。震災等の非常時における水質試験項目について、3つの湧水は、河宇田湧水と同様かそれより優れている場合があった。特に3つの湧水の硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)は、河宇田湧水より濃度が低い結果となった。震災後の水質結果より、例年の傾向とほぼ同じであったことから、震災の影響はなかったと推察される。阿蘇山の噴火の影響については、

pHと $\text{NO}_3\text{-N}$ で確認することができた。湧水の湧出量は、災害時において、湧水のある竹田市の人口分を十分に確保できる量であった(人口22.7千人で利用量が3 or 16L/人・日とした場合)。その湧出量は、小津留湧水のみでも0.8時間程度で災害時に必要な量を賄うことができ(3L/人・日の場合)、災害時において水確保の観点から優れた湧水であると言える。小津留湧水は、4つの湧水の中で湧出量が最も多く、硬度が30mg/Lを下回る軟水であることから、軟水が必要な場合には大変優れた湧水である。同様に葛路谷湧水についても、硬度が30mg/Lを下回る湧水であるが、4つの湧水の中で湧出量が最も少ない結果となった。桑畑湧水は、この葛路谷湧水の近くに位置し、4つの湧水の中で2番目に湧出量が多く、ヘキサダイヤグラムの結果より当量が最も高いことから、葛路谷湧水と必要に応じて使い分けができる。葛路谷湧水と桑畑湧水の関係は、竹田湧水群では確認できなかった特異性である。

以上のことから、多くの方に利用されている今回の3つの湧水について、長期的な水質変化より判断すると、名水百選に選定された河宇田湧水と比較して同等かそれより優れていることが分かった。また災害時の代替え水源としても、水質や湧出量から検討を行った結果、有用性があることが分かった。

参考文献

- 環境省 (2015) : 名水百選30周年記念・名水百選選抜総選挙. <http://www.env.go.jp/water/meisui/H27senkyo/>. (2018.01.18閲覧)
- 環境省 (2016) : 平成28年熊本地震による阿蘇地域の牧野、草原及び湧水・温泉への被害状況等調査結果について(お知らせ). http://kyushu.env.go.jp/pre_2016/28_1.html. (2018.01.18閲覧)
- 環境省 (2018) : 水環境総合情報サイト. <https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/>. (2018.01.18閲覧)
- 気象庁 (2018) : 過去の気象データ検索. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>. (2018.01.18閲覧)
- 厚生労働省 (2018) : 水質基準項目と基準値(51項目). <http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/>

- topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/kijunchi.html.
(2018.01.18閲覧)
- 国土交通省 (2007) : 緊急時水循環機能障害リスク検討委員会報告書. <http://www.mlit.go.jp/common/000132572.pdf>, 6p.
- 国土交通省 (2018) : 日本の水資源. http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/c_actual/actual03.html. (2018.01.18閲覧)
- 日本水道協会 (2012) : 震災等の非常時における水質試験方法 (上水試験方法 - 別冊). 25p・35p.
- 水収支研究グループ (1993) : 地下水資源・環境論—その理論と実践. 共立出版, 152-154.
- 山本浩一・小林卓也・橘 治国 (2003) : 北海道中央部における湧水涵養域の農業活動が湧水水質に及ぼす影響. 環境工学論文集, 40, 489-500.
- (受付: 2018年6月14日, 受理: 2018年12月27日)