

東道後温泉組成の時系列変化—地殻変動との対応関係の検討—

Secular variation of East-Dogo hot spring, Ehime Prefecture, Japan –Relation to crustal condition–

日野 愛奈¹ 佐野 栄² 堀 利栄¹

Aina Hino¹, Sakae Sano², Rie S. Hori¹

¹愛媛大学大学院理工学研究科数理物質科学専攻地球進化学コース

¹Department of Earth Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

²愛媛大学教育学部地学

²Earth Science Laboratory, Faculty of Education, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

Abstract

The East-Dogo hot spring is one of the non-volcanic and alkaline simple springs located within the Inner Zone of Southwest Japan, same as the Dogo hot spring. A local legend suggests that this hot spring welled out just after the Nankai earthquake in 1854. Therefore, it is considered that the spring is sensitive to the change of crustal stress.

Daily investigation to measure pH level and temperature of spring source of the East-Dogo hot spring, and sampling of spring water for ICP-MS analysis have been carried out from May 9, 2012 to April 30, 2013. The water-temperature has changed within the range from 29.9 °C to 44.5 °C, having 40.5 °C in the average during the period investigated. Secular change of pH values is detected, which is not seasonal variation, and showing episodic increasing and decreasing trends. As a result of a comparison between pH values and the other values such as climatic factors and spring temperatures, there is no clear correlation between the pH values and any other values.

A preliminary study of a comparison between pH values and crustal condition reveals that there is a relationship to the activity of deep low-frequency microearthquakes in the East Kyushu-Shikoku region. These microearthquakes seem to occur after the drop of the pH level of the hot spring. As a result of ICP-MS analysis, there is a negative correlation (coefficient value ≤ -0.5) between pH values and contents of Sr and Ba in spring water. When alkalinity rises, the Sr and Ba contents decrease, while alkalinity drops, the contents of these elements increase. This tendency could be explained by a reaction between the crustal material and fluid in underground. However, further examination and research are required to clarify the mechanism of these relationships.

Key words: East-Dogo hot spring, pH value, deep low-frequency microearthquakes

1. はじめに

温泉水の湧出量や泉温が地震の影響を受け変化するという事象は過去に度々観測されてきた。愛媛県では南海地震の影響によって道後温泉の湧出が一時的に止まる現象が何度か発生している。南海地震は歴史資料に残るだけでも現在まで少なくとも9回発生したと記録されており、特に江戸時代以降は信頼度の高い資料が残されている。それによると1707

年の宝永南海地震や1854年の安政南海大地震、そして1946年の昭和南海地震の時にも道後温泉の湧出が停止したと記録されている(佐藤ほか, 2005 [1])。

また、2012年3月11日の東北地方太平洋沖地震(M9.0)の発生後にも西日本において温泉や地下水に異変が確認された。産業技術総合研究所活断層・地震研究センターの研究報告によると、活断層・地震研究センターが東海・

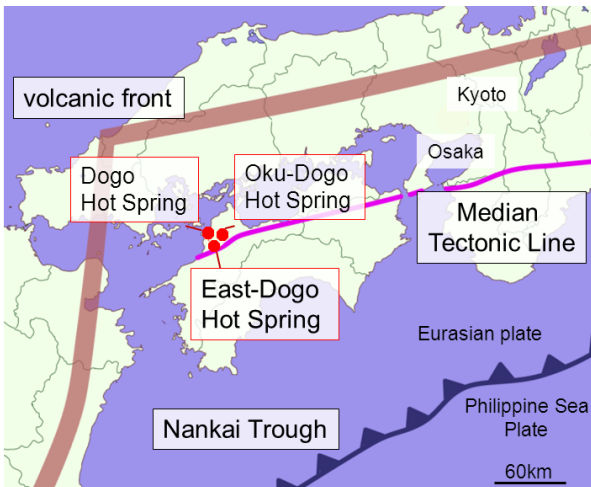


Fig 1. Map showing the locations of East-Dogo hot spring, Dogo hot spring, and Oku-Dogo hot spring. Quarterly volcanic front and Median Tectonic Line are also shown for comparison.

図 1. 東道後温泉, 及び道後温泉, 奥道後温泉の位置. 比較のために火山フロントと中央構造線の位置を示す.

近畿・四国を中心に保有している地下水位観測点 52 地点の観測井 87 本中, 地震発生後 1 日の内に水位の上昇が認められた観測井は 18 本, 水位の低下が認められた観測井は 57 本, 変化無しとされた観測井は 12 本である(北川・小泉, 2011 [2]). なお, 水位の上昇が認められた観測井の内, 最大の数値を示したのは愛媛県の奥道後温泉である.

奥道後温泉について地震との関係を示唆する研究が過去になされている. 勢川(1990 [3])は 1986~1989 年の 4 年間の観測結果から奥道後温泉の自噴井において湧出量及び遊離・溶存ガス組成に季節変化があることを示したうえで, それぞれに地震と対応した変化があることについて論じている. また湧出量と溶存ガスの H_2/Ar 比について, 地震後の変化だけではなく数年及び数か月にわたる地震の予兆現象が存在することも論じている. また, 前田(1992 [4])は先に述べた H_2/Ar 比だけでなく He/Ar 比と N_2/Ar 比にも地震の前兆現象が見られるとしている.

本研究の調査地域である東道後温泉は奥道後温泉と同じく西日本内帯の火山フロントよ

り南に位置する非火山性温泉の一つであり(図 1), 1854 年の安政南海大地震によって湧出したとされる(高橋, 2012 [5]). 東道後温泉は, アルカリ性単純泉であることや, Na^+ や Ca^{2+} , HCO_3^- が主成分として含まれている事など道後温泉との共通点が多く, 位置関係も比較的近い温泉群であること(図 2), そして南海地震によって湧出した経緯などから, 我々は東道後温泉も地震に反応し変化を示す可能性があるかと推測した. そこで, まずは地震との対応を検討するに足るデータを集めることが必要であると考え, 東道後温泉の源泉について長期にわたる定期観測を行った. 温泉水中の主成分である Na^+ や Ca^{2+} , HCO_3^- の含有量変化を簡易的に検討するために, 現地 pH 値を泉温, 気温, 湿度と共に測定した. また, 採水し持ち帰った温泉水の微量元素組成分析を行った.

2. 調査地域

道後および東道後温泉周辺の地質は図 2 に示したように, 基盤の領家帯花崗岩類, 和泉層群の砂岩層, そして沖積層で構成される. 本地域の和泉層群は主に砂岩及び頁岩の互層よりなっている. その走向は $N 50^\circ E$ であって傾斜は $40^\circ \sim 50^\circ SE$ である. 沖積層は平地をなし粘土及び砂礫からなる. 道後温泉付近の領家帯花崗岩類は黒雲母花崗岩に分類され, 丘陵地を構成し, 道後山, 冠山ならびに湯月城跡の間に介在する沖積層の基盤をなしている. 道後温泉はこの花崗岩の亀裂中から湧出し, 上部にある沖積層に上昇して地表にまで自然湧出するものと考えられている(高津, 1957 [6]). 東道後温泉は, さらに南部の和泉層群を基盤とする沖積層上に位置する. 和泉層群下部には領家帯花崗岩類が不整合を介して分布しており, 東道後温泉も同様に花崗岩中の亀裂より上昇, 地表に達していると考えられる.

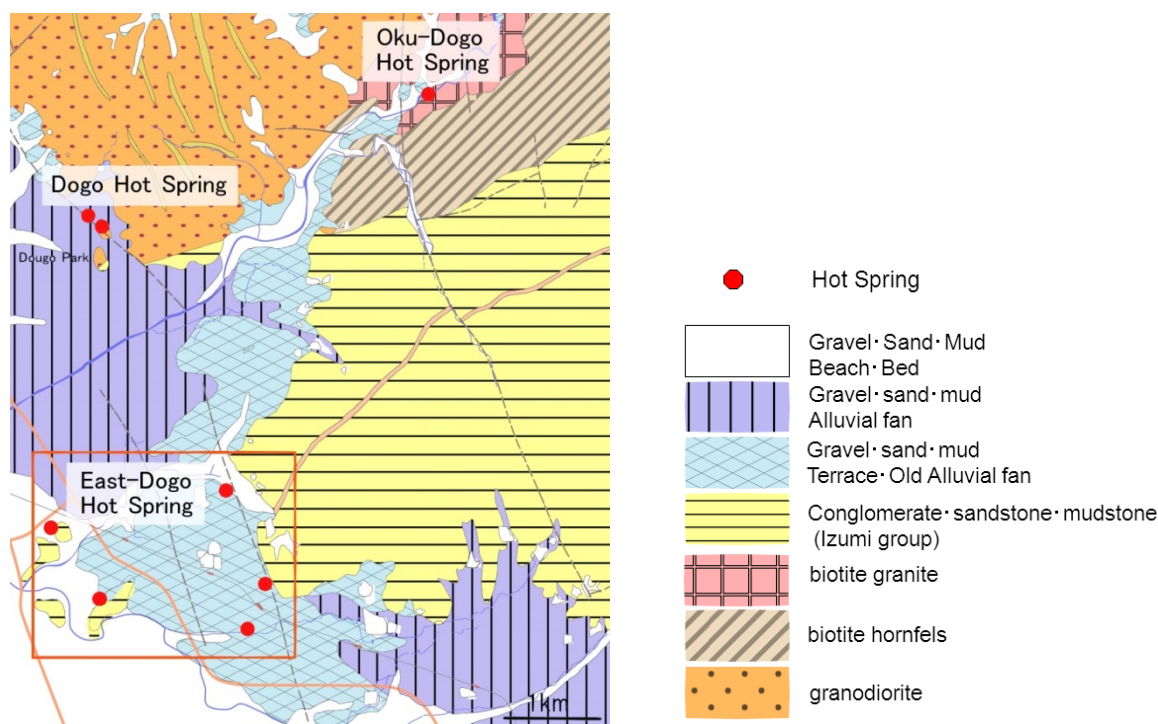


Fig 2. Geologic map of East-Dogo hot spring, Dogo hot spring and Oku-Dogo hot spring area showing locations of source wells. Map modified after Ehime Chigaku-kai Matsuyama-shibu and Matsuyama Chigaku-kai (1979 [7]).

図 2. 東道後温泉及び道後温泉, 奥道後温泉周辺の地質図. 地質図は愛媛地学会松山市部・松山地学会(1979 [7])を引用・改変.

東道後温泉の温泉施設に利用される源泉 5 か所の内, 1 か所の源泉(以下源泉 a と表記する)について長期観測を行った. 源泉 a は主要イオンとして Na^+ を 169.5 mg/L, Cl^- を 101.1 mg/L, HCO_3^- を 189.8 mg/L 含むアルカリ性単純温泉で, 微量のラドンを含有するのが特徴である.

3. 連続観測

3.1 観測の手法

本研究では, 源泉 a を対象に現地へ赴き pH 値, 泉温, 気温, 湿度の観測及び採水を 2012 年 5 月 9 日から 2013 年 8 月 30 日まで 1 日毎に行った. 観測時刻は全て午前 8 時 30 分である. 観測に使用した機器は pH メーター

(HORIBA 製 D-53S), 及び気温・湿度計(EMPEX 製 TD-1872)である. 計器の校正は 1 週間から 1 ヶ月に 1 度の間隔で行った.

3.2 定期観測結果

定期観測結果から, 源泉 a の pH と泉温, 気温, 湿度, 気圧, 降水量との相関係数を表 1 に示す.

また, 源泉 a の 2012 年 5 月 9 日から 2013 年 4 月 30 日までの 1 日毎の観測結果を示す(図 3). 泉温は上記期間中, 40.5°C を平均として, 突発的な泉温の上昇および下降の値も含めると最大値が 44.5°C , 最小値が 29.9°C 範囲で変化しているのが観測された. 長期的にみると気温の変化($5\sim 30^\circ\text{C}$)の影響をわずかに受けており, 夏場は高く, 冬場は低いという季節

に対応した変化を示していることが分かった。時折 1, 2 日間のみ前後の値と比べ 4 °C ほど低下または上昇する突発的な変化が観測された。観測期間中で突発的な低下が見られたのは 2012 年 8 月 14 日, 10 月 8 日, 10 月 9 日, 10 月 15 日, 11 月 24 日, 12 月 10 日, 2013 年 1 月 27 日, 2 月 14 日, 2 月 18 日, 4 月 23 日の計 10 回であり, 突発的な短期上昇が見られたのは 2012 年 8 月 25 日である。

pH については平均 9.10 ± 0.11 ($1\sigma, n = 358$) と観測期間全体を通して変化幅は小さいものの, 測定器の誤差範囲 (± 0.01) を超えた変動を示しているのが明らかになった。今回検出された pH 変動は周期的なものではなく, 季節に関係なく上昇, または下降のトレンドを持つ事が明らかとなった。

本研究では pH 値が低下して上昇するまでを一つのサイクルとして, 観測期間を以下の 5 つの区間にわけた(図 3)。2012 年 5 月 9 日から 6 月 1 日にかけて pH 値の下降と 6 月 2 日から 7 月 5 日にかけて pH 値の上昇を一つのサイクルとして<区間 1>とした。以下同様に, 2012 年 7 月 6 日から 8 月 29 日までの下降と 8 月 30 日から 9 月 30 日までの上昇を<区間 2>, 2012 年 10 月 1 日から 11 日にかけて値が低下してから同年 12 月 26 日から 2013 年 1 月 11 日にかけて値が上昇するまでを<区間 3>, 2013 年 1 月 12 日から 15 日にかけて値が低下してから 2 月 28 日から 3 月 3 日にかけて値が上昇するまでを<区間 4>, 3 月 4 日以降を<区間 5>とした。以下, 各区間の特徴を述べる。

区間 1. 2012 年 5 月 9 日から 5 月 31 日にかけて pH 値は 9.25 から 0.24 低下した。6 月 1 日には 8.84 と際立って低い値が観測された。その後 6 月 2 日から 7 月 5 日にかけて 9.06 から 0.13 の上昇が観測された。

区間 2. 7 月 6 日から 8 月 24 日にかけて pH 値は 9.10 ± 0.04 の値を保持し, 大きな変化は見られなかったが, 8 月 25 日に著しい低下が観測された。8 月 24 日の pH 値は 9.10 を示したのに対し, 25 日は 8.51, 再び 26 日で 9.13 を示した。観測上一日の内に pH 値が 0.59 下がり, また一日で 0.63 上昇したことになる。観測期間中最も短時間で最も大きな変化を示した事例である。8 月 26 日以降 9 月 30 日までは再び 9.10 ± 0.05 の値を保持した後, 緩やかな上昇傾向を示し, 突発的な大きな変化は観測されなかった。

区間 3. 10 月 1 日から 12 月 27 日にかけて, <区間 2>では平均 9.10 だった pH 値が平均 8.95 に下がる変化が観測された。また変化の幅も激しくなり, 標準偏差を取ると先の期間では 0.04 だったがこの期間では 0.08 と 2 倍になっている。10 月 30 日から 11 月 1 日の間, 8.81, 8.84, 8.78, さらに 12 月 26 日には 8.69 と著しく低い

Table 1. Correlation coefficients between pH vs. hot spring water temperature, air temperature, humidity, atmospheric pressure and precipitation.

表 1. pH と泉温, 気温, 湿度, 気圧, 降水量との相関係数.

Coefficient of correlation	Hot Spring temperature	Air temperature	humidity	atmospheric pressure	precipitation
pH value	0.21	0.39	0.10	-0.36	0.13

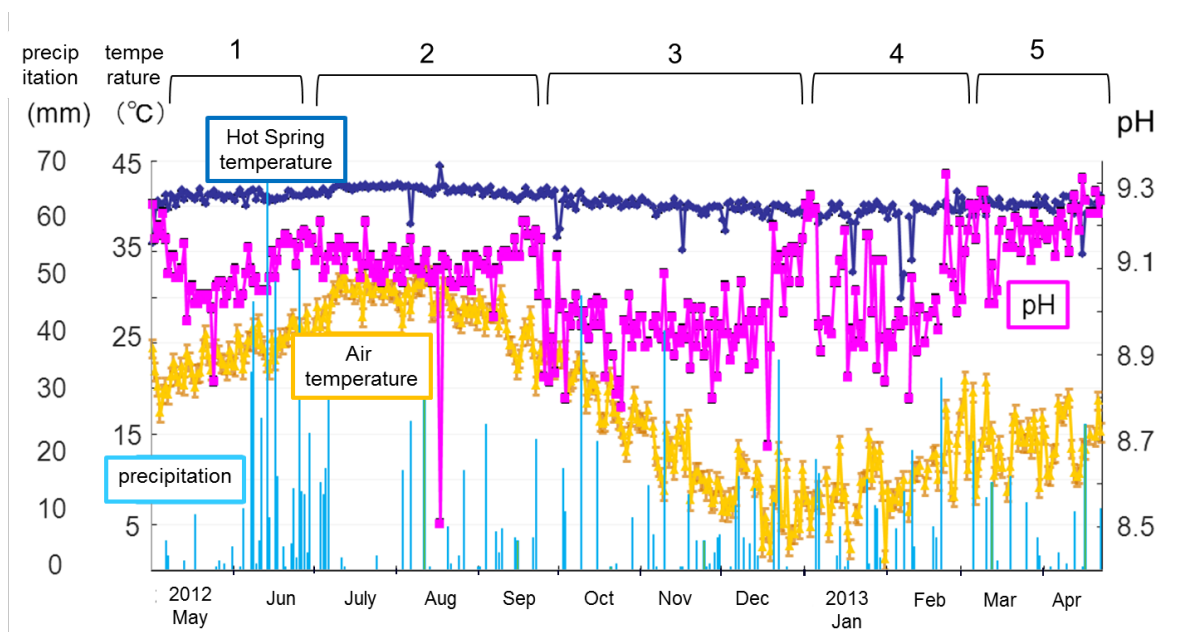


Fig 3. Secular change of temperature and pH values of source well <a> in the East-Dogo hot spring, and air temperature and precipitation during the study period from May 9, 2012, to April 30, 2013. Blue polygonal line : hot spring temperature. Yellow polygonal line : air temperature. Pink polygonal line : pH value. Blue bar graph : precipitation. Five periods described in the text are indicated in this figure.

図 3. 2012 年 5 月 9 日から 2013 年 4 月 30 日における東道後温泉の源泉 a についての pH 値、泉温及び現地気温の時系列変化. 青色の折れ線グラフが泉温, ピンク色の折れ線グラフが pH 値, 黄色の折れ線グラフが気温, 青色の棒グラフがその日の合計降水量をそれぞれ示す. 上部のかぎ括弧 1~5 は定期観測結果での期間区分 1~5 を示している. なお, 線の途切れている期間はデータの採取が出来なかった期間にあたる.

pH 値が観測された. 12 月 28 日の pH 値は 27 日の 8.92 から 0.28 上昇し 9.20 を示した.

区間 4. 2013 年 1 月 12 日以降, 2 月 4 日までの平均値は 9.07, 標準偏差は 0.11 と pH 値の変動が<区間 3>より大きくなっている. 2013 年 3 月 3 日の pH 値は 2 日の 9.10 から 0.22 上昇し 9.32 を示した. また 3 月 3 日に 9.32 という観測期間中最も高い pH 値を観測した.

区間 5. 3 月 4 日以降, 4 月 30 日までの値の平均値は, 2012 年 12 月 28 日から 2013 年 3 月 2 日までの平均値 9.04

と比べ 0.15 上昇し 9.19 を示している. 区間全体を通して上昇の傾向が見られ, 3 月 4 日から 4 月 30 日にかけて 9.19 から 9.26 まで上昇した. 3 月 19 日から 22 日の間は前後の期間に比べ 0.2 ほど低い pH 値が観測された.

4. 微量元素分析

4.1 手法

温泉水の微量元素分析は愛媛大学総合科学研究支援センターに設置されている誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS, VARIAN 製 820-MS)を用いて行った. 分析した元素は Li,

Al, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Cd, Cs, Ba, Pb の 17 元素である。ただし Se に関しては使用した ICP-MS の仕様上、正確な値の測定が困難であったため、実際の元素の変化を反映したものではない可能性が高い。本研究では、調査期間中の pH 値変動の激しい期間に採集した水試料について ICP-MS 分析をおこなった。分析を行った温泉水は、2012 年 5 月 9 日から 7 月 15 日まで、2012 年 8 月 22 日から 9 月 15 日まで、2012 年 10

月の 1 日毎の試料、加えて 10 月 10 日から 11 日にかけての 1 時間毎の試料の計 152 試料である。

ICP-MS 分析は、標準溶液に SPEX 社製多元素混合溶液を用い、外部検量線法により行った。また、機器のドリフト補正に対し Rh を内標準として添加した。作成した検量線は標準試料 NIST-SRM1643e を用いてその確からしさを確認した。

Table 2. Trace element compositions (average, standard deviation, maximum and minimum) of the East-Dogo hot spring water collected from the ‘source a’ together with correlation coefficients against with the hot spring water temperature and pH values. These data were obtained from the samples collected daily from May 9 to July 15, 2012.

表 2. 2012 年 5 月 9 日から 7 月 15 日まで 1 日毎の試料の微量元素分析結果と、観測された泉温と pH 値、各元素の微量分析結果と泉温及び pH 値との相関係数。

Element	Average (ppb)	σ	MAX (ppb)	MIN (ppb)	correlation	
					coefficients with hot spring temperature	correlation coefficients with pH
Li	254.1	8.2	270.2	206.4	-0.3	-0.4
Al	31.4	3.8	37.9	20.3	0.1	0.2
V	0.5	0.2	0.8	0.1	-0.1	-0.4
Cr	1.5	0.7	5.6	0.5	-0.1	-0.2
Mn	0.4	0.4	3.6	0.2	0.0	0.2
Ni	1.2	1.3	9.7	0.3	-0.2	0.0
Cu	0.8	0.2	1.5	0.6	0.1	-0.3
Zn	3.4	4.3	31.7	0.7	0.2	-0.1
Ga	2.00	0.1	2.5	1.9	-0.2	0.0
As	1.1	0.2	1.4	0.6	0.1	0.4
Se	23.7	15.8	52.6	4.1	0.2	0.3
Rb	2.0	0.1	2.2	1.3	0.1	0.3
Sr	38.7	1.1	46.8	37.9	0.0	-0.5
Cs	0.4	0.1	0.5	0.2	0.2	0.3
Ba	7.3	0.9	14.4	6.8	-0.1	-0.5
Pb	0.1	0.0	0.3	0.1	-0.1	-0.3

4.2 結果

本稿では分析した試料のうち、最も長期間の結果である2012年5月9日から7月15日までの分析結果について述べる。試料の分析結果を表2及び図4に示す。

5月9日から7月15日の試料の微量元素分析結果では、温泉水にはLiが最も多く含有され平均値254.1 ppbを示す。続いてSrの平均値38.7 ppb, Alの平均値31.4 ppb, Seの平均

値23.7 ppbの順で含まれていることがわかった。族や含有量の値に関わらず、似た時系列変化を示す元素が数種見られた。一例としてVとBaが挙げられる(図4c, f)。族や含有量に違いがあるもののどちらも6月12日に値が低下している。また、Sr, Baの2元素含有量とpH値の間には負の相関(相関係数-0.5, 表2)がある事が分かった。さらに、AsとpH値の間には正の相関(相関係数0.4, 表2)がある事が分かった。

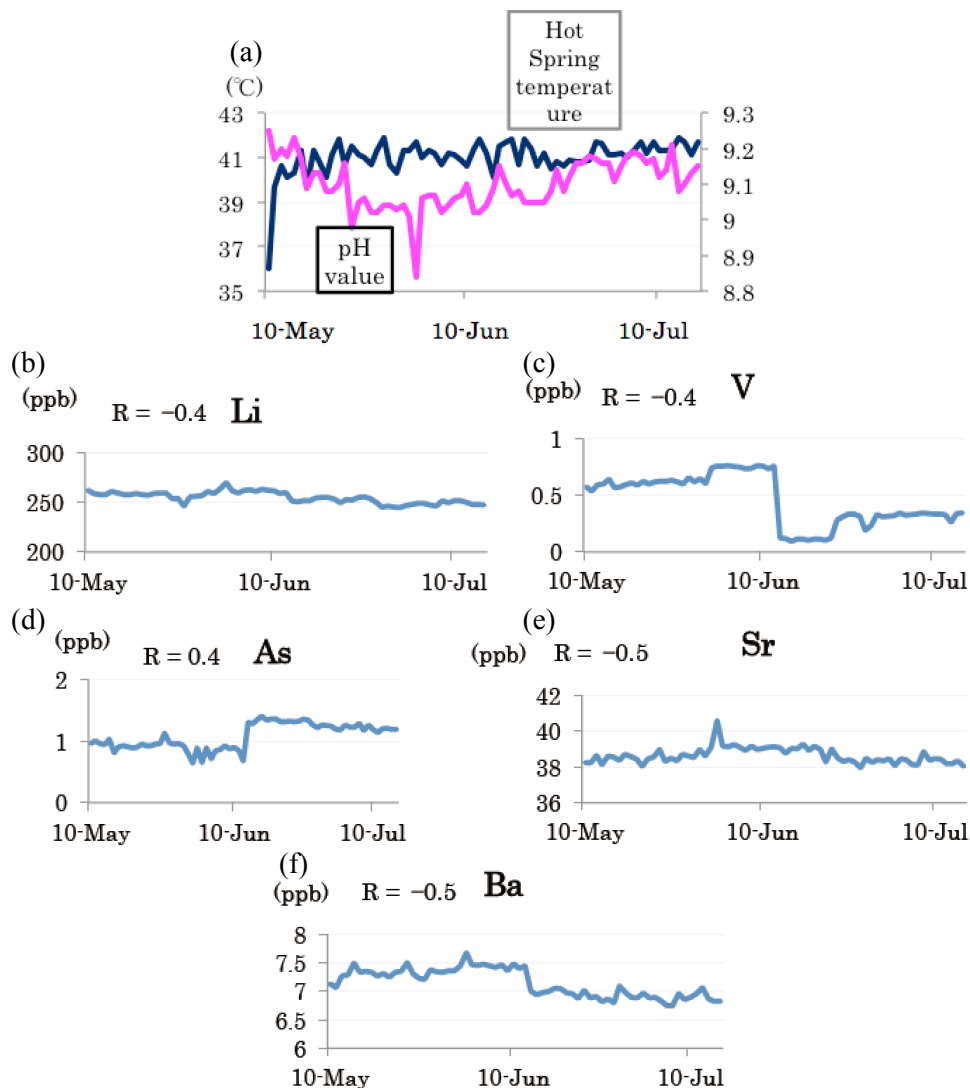


Fig 4. Chronological change of temperature and pH levels (a), and trace element contents (ppb) (b-f) from May 9 to July 15, 2012. The elements extracted have more than 0.4 or -0.4 coefficient value.

図4. 2012年5月9日から7月15日までの泉温及びpH値(a), 微量元素含有量(b-f)の時系列変化。時系列変化のグラフはpHとの相関係数が0.4以上または-0.4以下のものを抜粋。

5. SiZer 解析

5.1 手法

時系列データが統計的に有意に増加・減少しているかを判別するため、SiZer 解析 (Significant Zero crossings of the derivatives : 微分値が有意にゼロ交差しているかを判別する手法 ; Marron and Chaudhuri, 1998 [8]) を用いた。SiZer 解析は、ある時間幅のデータとその後の同時間幅のデータが統計的に有意に増加/減少したかを検証すると同時に、解析する時間幅を変えることで、異なる時間スケールの変動を同時に検討することが可能である。よって、短期的な変動から長期的な変動まで、それぞれの変動が有意か否かを同時に判定することが出来る。SiZer 解析図では横軸が時系列、縦軸が変動の時間スケール、青い部分が有意な増加、赤い部分が有意な減少を示す。SiZer 解析の場合、問題になるのは時系列データのサンプリング間隔の不確定性であるが、本研究では 1 日毎の等間隔データであるため問題ない。

5.2 結果

2012 年 5 月～2013 年 4 月間の源泉 a の pH 値の変動について前述の SiZer 解析を行ったところ、図 5 のようになった。時間スケールは、10 を底としたログスケールで表されているため、1 のラインが 10 日、2 のラインが 100 日の時間スケールであることを示している。

50 日以下の比較的短い時間スケールで見た場合、2012 年 5 月 9 日～7 月 11 日間の下降及び上昇が最も顕著な変化であることが分かる。また 10 月 2 日～10 月 11 日間の下降、12 月 26 日～1 月 11 日間の上昇、1 月 11 日～1 月 25 日間の下降、2 月 17 日～3 月 16 日間の上昇の変化が有意なものであると解析された。8 月は数十日以上スケールで見れば緩やかに低下していると解析された。また数日間の短い変化として、9 月 14 日～9 月 24 日間の上昇、10 月 25 日～11 月 4 日間の下降及び上昇、3 月 9 日～3 月 14 日間の上昇及び下降が有意であると解析された。一方で 100 日以上比較的長い時間スケールで見た場合、全体的な下降と

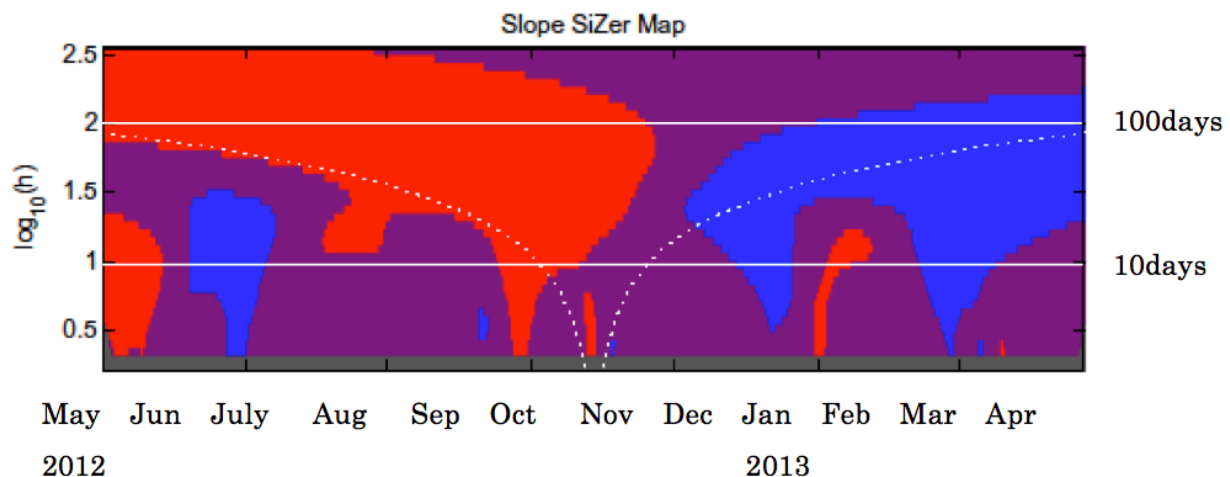


Fig 5. Result of SiZer analysis on the pH values of the ‘source a’ during the study period from May 9, 2012 to April 30, 2013. The vertical axis expresses time scale, which indicates 1 = 10 days and 2 = 100 days. The red parts show significantly negative, and blue ones significantly positive, purple ones not significantly.

図 5. 2012 年 5 月から 2013 年 4 月間の源泉 a の pH 値変化についてのサイザー解析の結果。縦軸は時間スケールを表し 1 のラインで 10 日、2 のラインで 100 日のスケールの解析結果を表している。また赤は有意な下降、青は有意な上昇のトレンドであることを示している。

上昇のトレンドが11月を境に切り替わっていると解析された。

6. pH 値と地下変動の対応についての検討

本研究の当初の目的は、温泉の化学組成変化による地殻内応力場の変化(言い換えれば、地震など)の予知の可能性を探ることであった。本研究では、源泉 a における pH 値の変化と四国周辺の地震及び低周波微動の発生時期を比較した(図 6)。このうち震源図及び発生時

期の図(図 6 a, b, c-1)は産業技術総合研究所 well web により作成した。pH 変化と地震及び深部低周波微動の発生時期の対応関係を、連続観測結果で定義した 5 つの区間毎に見ると、次のような事がわかった。

<区間 1> 5月9日から6月1日にかけての pH 値の低下期間中、5月25日4時28分伊予灘の地下 70 km 地点で M4.1 の地震が発生、また同日から6月3日にかけて四国西部から東部に渡る大規模な深部低周波微動が群発していた。深部低周波微動群の発生時期は当区間の pH 値が最も低い時期に対応する。

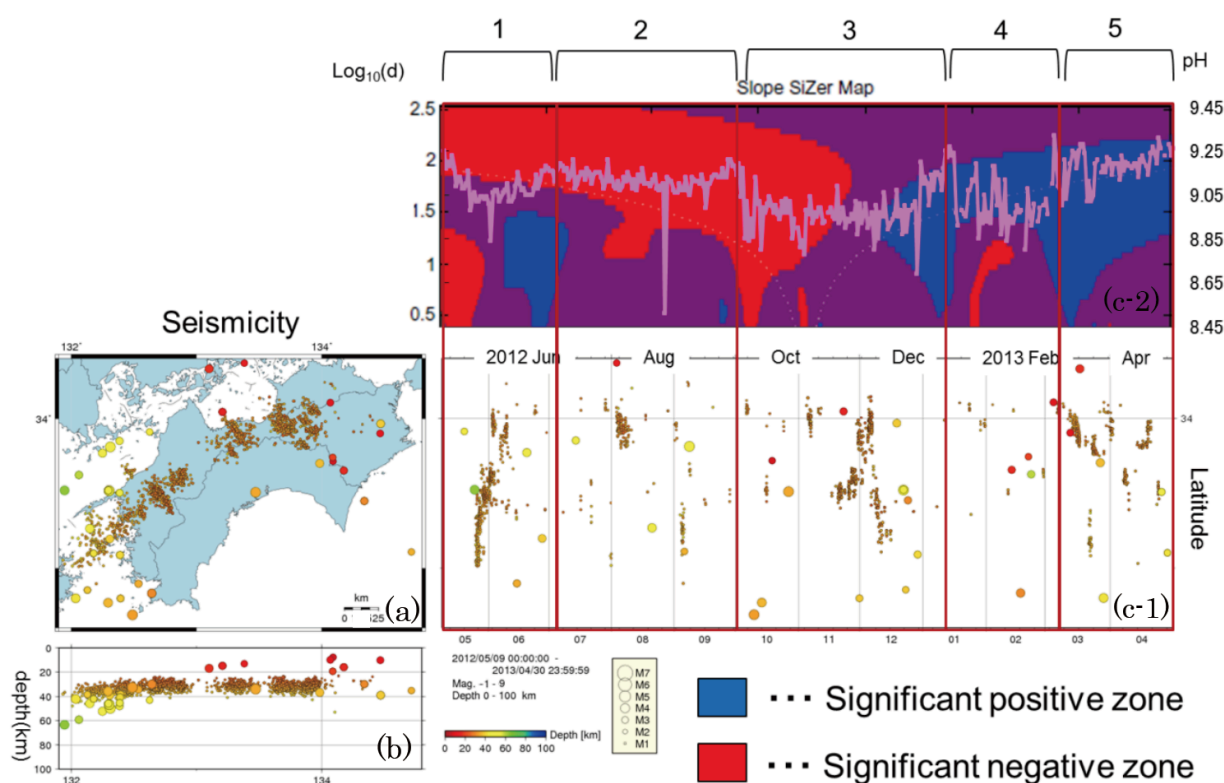


Fig 6. Comparison between the secular change of pH values of East-Dogo hot spring water ('source a') and seismicity occurred in the same period around the Shikoku area, Japan. (a): Seismicity map. (b): Depth of seismicity. (c-1): Secular change of latitude of seismicity. Size of circles in these figures represents magnitude. (c-2): Result of SiZer analysis on the pH values (Fig. 4) together with secular change of pH values (pink lines, Fig. 3).

図 6. 2012年5月9日から2013年4月30日間の、源泉 a における pH 値の時系列変化と四国周辺の地震及び深部低周波微動の発生時期を比較したもの。四国周辺の有感地震及び深部低周波微動の(a)は震央位置、(b)は発生深度、(c-1)は発生時期を示す。(c-1)の縦軸は(a)の緯度に対応している。(c-2)は源泉 a の pH 値の時系列変化とその SiZer 解析結果である。なお、地震の震源及び発生時期の図は産業技術総合研究所 well web で作成したものである。

<区間 2> 8 月 4 日から 8 日にかけて四国東部のみの小規模な深部低周波微動が発生しているが、その時期 pH 値に目立った変化は見られなかった。8 月 21 日に豊後水道の地下 50 km で M3.6 の地震が発生した後、8 月 25 日に pH 値の低下が見られた。さらに、9 月 8 日 10 時 41 分に伊予灘の地下 50 km 地点で M4.4 の地震が発生している。

<区間 3> 10 月から 12 月にかけて pH 値は低い値を示した。10 月には深度 30 km 以深かつ M4 以上の地震が、14 日に伊予灘で、26 日に日向灘で、27 日に高知県中部で発生しており、12 月には深度 50 km 以深かつ M3.5 以上の地震が、2 日に伊予灘で、22 日に伊予灘で発生していた。さらに 11 月 18 日から 12 月 16 日にかけて大規模な深部低周波微動が群発していた。

<区間 4> 2013 年 1 月の上旬から 2 月の下旬にかけては pH 値が低く、他の区間に比べて値のばらつきが大きい。区間中、深部低周波微動は見られなかったものの 2 月 17 日に深さ 30 km で M3.7 の地震が高知西部で、また 2 月 22 日に深さ 60 km で M3.5 の地震が伊予灘で発生している。

<区間 5> 3 月 12 日から 24 日にかけて、そして 4 月 7 日から 8 日にかけて小規模な深部低周波微動群が発生していた。また深度 10 km 以深かつ M3.1 以上の地震が、3 月 5 日に徳島北部で、17 日に瀬戸内中部で、27 日に高知東部で発生していた。3 月中の pH 値は前区間に似てばらつきが大きい。3 月 5 日から 11 日の間の pH 値は平均 9.10 であったが、12 日から 18 日の間は平均 9.24 と比較的高い値が観測され、翌日の 19 日から 22 日の間は平均 9.05 と再び低い値が観測された。

前述のように pH 値の低下時期と地震の発生及び大規模な深部低周波微動の群発時期とはほぼ一致していることが見て取れた。つまり、温泉水の pH 値の低下が見られた後に深部低周波微動が発生する、または低周波微動が発

生しないときは地震が発生するという図式が見て取れる。

SiZer 解析結果との比較 (図 6) を見ると、数十日の時間スケールで有意な下降のトレンドが見られると解析される期間の後に深部低周波微動が発生しているように見える(区間 1, 2, 3)。特に区間 1 と区間 3 で発生しているような広範囲に及ぶ深部低周波微動群は、数十日の時間スケールでの有意な下降から上昇にトレンドが変化する時期に発生しているように見える。

7. 考察

7.1 泉温および pH 値の変動について

源泉 a の pH 値は泉温、湿度、気圧、降水量のいずれの値とも明確な相関関係をもたないことが表 1 から読み取れる。すなわち地表環境の変化は観測を行った源泉の pH 値には影響しないと言える。ただし、泉温と気温は微妙ながら相関関係が見られる。これは、源泉 a では一度タンクに溜まった温泉水を観測しているために、気温変動の影響を多少ながら受けていると考えられる。しかし、タンク内の温泉水は数時間で入れ替わるため 1 日以上タイムスケールでの変化を反映していると言える。また、気温の変化率に対し泉温の変化率は非常に小さいことから、泉温の値は地下環境の条件に支配されるところが大きいものと考えられる。

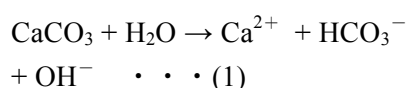
pH 値と泉温の観測と同時に気温と湿度も観測を行っているが、泉温が多少気温の影響を受け上昇と低下を示す程度で pH 値の変化とはほとんど相関は見られなかった。また図 3 の棒グラフは各日 1 日の合計降水量を表したものであるが、降水との相関も見られなかった。梅雨期の降雨の影響が遅れて表れる可能性はあったが、8 月 25 日の pH 値低下の変化は降雨の期間と量を考えるとあまりに短期間の出

来事であるためこの変化が降雨の影響であるとは考えにくい。10月以降のpH値の低下も梅雨期の降雨の影響と考えるには間隔が空きすぎている。また、気圧の変化もpH値の変化とは相関が低いことが表1から明らかである。よって泉温、気温、湿度、降雨、気圧のいずれもpH値にはほとんど影響を与えていないと言える。

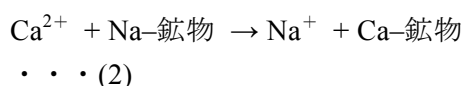
一方でpH値が低下傾向から上昇傾向に転じる時期に大規模な深部低周波微動が発生しているという関係が見て取れた(例：図6の区間1)。深部低周波微動の発生には地殻内流体の存在も関連していることが小原(2007 [9])により示されている。今回観察された対応関係は上記の地殻内流体が温泉水に関与した結果と考えることも可能である。

7.2 pH値と微量元素組成

一般に、アルカリ性温泉の温泉水のpH値が上昇する原因の一つは地下の岩石との反応にあるとされ(真木ほか, 1994 [10]), 反応過程の第一段階として岩石から地下水にCaCO₃が溶け出す事が示されている(1)。



岩石中にゼオライトや粘土鉱物が含まれている場合、(1)式の反応を経てCa²⁺を含んでいる温泉水がその岩石に接触すると陽イオン交換反応により、多くの場合Ca²⁺はNa⁺と入れ替わり、温泉水はNa-HCO₃型に変化していくことになる(2)。



上記のイオン交換反応により温泉水からCaが取り除かれるため、取り除かれた分を補うように岩石中から新たにCaが溶け出すことが可能になる。NaHCO₃の溶解度はCaCO₃と比べ桁違いに大きいため(1)と(2)の反応が同時に組み合わさって起こると温泉水中にはNaHCO₃が一方向的に増加していくことになる。NaHCO₃はアルカリ性を示すため、(1)と(2)の反応が活発であればあるほど温泉水はアルカリ性になり、pH値は上がっていく。

Caと同族元素であるSr及びBaは化学的に同様な挙動を示すことが知られている。今回測定されたSr及びBaの分析結果の時系列変化は、pH値の時系列変化と負の相関を示している。これはCaもpH値の時系列変化と負の相関を示すことを示唆しており、先に述べたpH値の上昇メカニズムと調和的である。

以上の解釈と、先述した地震との対応関係から、pH値が低下傾向から上昇傾向に転じる時期に深部低周波微動群が発生する事象について、図7に示すような仮説を立てた。

強い地殻応力が加わり地盤が圧縮されている時期は、地殻内流体が押し出されるため地下での(1)と(2)式の反応が十分に進まず、温泉水中のNa含有量は減り、Ca、Sr、Baの含有量は増え、結果として温泉水のpH値は低下するものと考えられる。これに対し、地盤が圧縮されていない時期は、地下での(1)と(2)式の反応が進むため、温泉水中のNa含有量は増え、Ca、Sr、Baの含有量は減り、結果として温泉水のpH値は上昇するものと考えられる。以上の仮説が正しければ、pH値の低下時期は、測定地域周辺の地殻応力が強まっていると言う事ができるかもしれない。

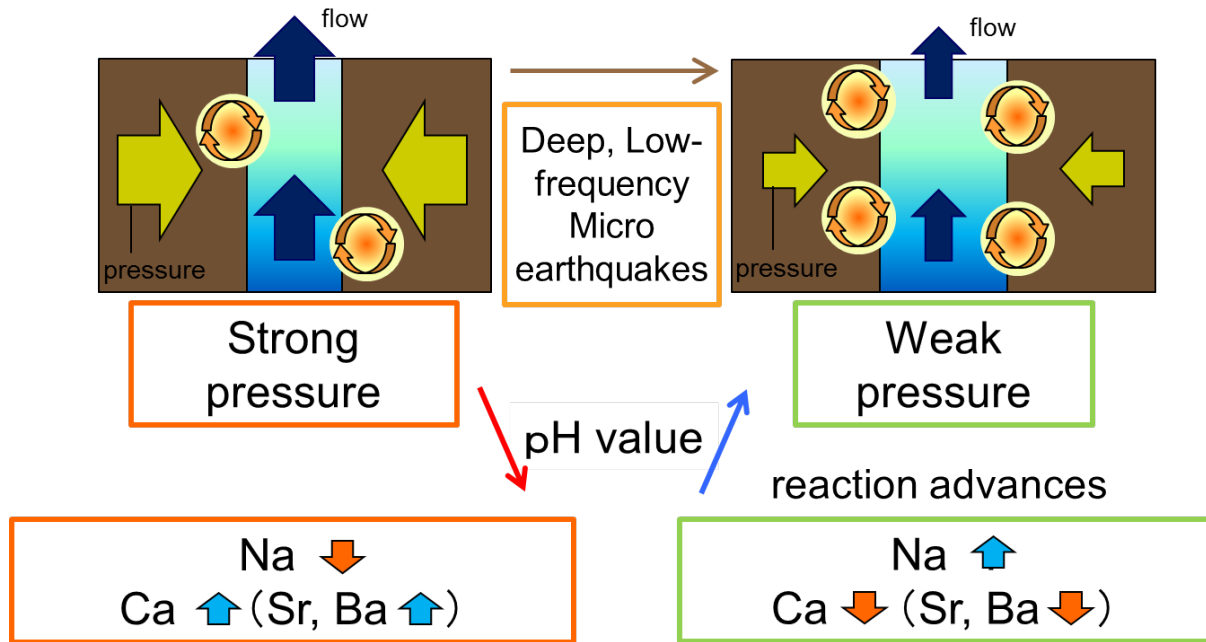


Fig 7. A model for the pH value of hot spring water and crustal condition including fluid chemical compositions.

図 7. 調査地域近くの地殻内圧力と温泉水の pH 値，及び深部低周波微動との関係。

8. まとめ

松山平野東部東道後温泉の源泉 a において 269 日間にわたり pH 値と泉温の観測を行った。その結果，泉温は 2012 年 5 月 9 日から 2013 年 1 月 30 日まで 41 °C を平均とし，気温の影響によりわずかながら夏に高く冬に低い傾向があることが分かった。pH 値は不規則な変化を示しながらも，値が数週間かけて低下し，その後数週間かけて上昇するというサイクルを繰り返していることが明らかになった。今回の観測期間中では，5 月初旬から 6 月末，7 月初旬から 9 月末，10 月初旬から 12 月末，1 月初旬から 2 月末と 4 回のサイクルを確認できた。pH 値と泉温，湿度，気圧，降水量との関係を検討したが，いずれのデータとも明確な相関は見られなかった。

ICP-MS を用いた温泉成分の微量元素組成分析の結果，源泉 a においては Li の含有量が他元素に比べ高い値を示すことが分かった。

また，pH 値と Sr, Ba 含有量の間にも負の相関があることが分かった。

温泉の化学組成の時系列変化と地殻変動との対応関係について検討したところ，測定を行った源泉の pH 値が低下傾向から上昇傾向に転じる時期に，深部低周波微動群が発生するという事象を 2 回確認した(図 6 の区間 1, 3)。このメカニズムについては未だ仮説の域を出ておらず，今後も研究を続ける必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり，そらととも株式会社の方々には源泉調査の許可を頂いた。特に同社の三好賢一氏には源泉調査に同行して頂くとともに多数の貴重な情報を提供して頂いた。論文作成および SiZer 分析に関して池田昌之博士（現 静岡大学理学部）に多数の助言を頂いた。また，愛媛大学大学院理工学研究科山本明彦教授をはじめとする愛媛大学の教

授並びに博士、院生の方々にはゼミ等を通して当研究について様々な助言・コメントを頂いた。以上の企業及び個人の方々に謝意を表する。

引用文献

- [1] 佐藤 努・小泉尚嗣・中林憲一, 2005, 昭和南海地震で湯峯温泉の湧出は止まったのか?, 地質ニュース, **609**, 31–42.
- [2] 北川有一・小泉尚嗣, 2011, 東北地方太平洋沖地震(M9.0)後一日間での地下水位・地下水圧・自噴量変化, 活断層・古地震研究報告, **11**, 309–318.
- [3] 勢川真樹, 1990, 奥道後自噴井における地震地球化学観測, 愛媛大学理学部地球科学科卒業論文, pp. 46.
- [4] 前田 晃, 1992, 地下水に伴う遊離ガス・溶存ガスの組織変化の相互関係と経年変化: 奥道後自噴井における観測, 愛媛大学理学部地球科学科卒業論文, pp. 40.
- [5] 高橋治郎, 2012, 三輪田米山日記にみる安政の東海・南海地震, 愛媛大学教育学部紀要, **59**, 187–190.
- [6] 高津寿雄, 1957, 道後温泉の研究, 第 10 回日本温泉科学学会特別講演総説.
- [7] 愛媛地学会松山市部・松山地学会, 1979, 松山市付近の地質図, トモエヤ出版.
- [8] Marron, J. S. and Chaudhuri, P., 1998, When is a feature really there? The SiZer approach, in Firooz. A., ed., Automatic target recognition VII: Photo-optic and Industrial Engineering Proceedings, **3371**, 306–312.
- [9] 小原一成, 2007, スロー地震と水, 地学雑誌, **116(1)**, 114–132.
- [10] 真木 強・石丸尚志・田頭和恵・大野智也佳, 1994, 温泉の地球化学的考察 道後温泉の pH 値決定因子と化学成分の起源について, 温泉科学, **44**, 236–247.