



特別講演 II

スラブ脱水流体由来の温泉
—地球流体化学的手法による研究—

大 沢 信 二¹⁾

(平成 30 年 10 月 31 日受付, 平成 30 年 11 月 12 日受理)

Hot Spring Water Traced Back to Fluid Released
from a Dehydrating Slab

Shinji OHSAWA¹⁾

Abstract

Since 2003, we have begun a geochemical research for hot spring derived from slab-dehydrated fluid and have published results of the research as papers from 2005. In addition, we were working together with researchers in metamorphic petrology and the effort contributed to development of a research theme in the interdisciplinary field and fostering of younger researchers. In a special lecture at the 67th annual meeting of the Japanese Society of Hot Spring Sciences held in September 2018, the author spoke overview our research, and furthermore, he presented two related sub-research subjects which had been introduced by previous oral presentations at several academic conferences. In this paper, the results of the sub-researches including new findings obtained during the preparation process of this oral presentation will be written down.

要 旨

私たちは 2003 年よりスラブ脱水流体由来の温泉の地球流体化学的探索を始め, その研究成果を論文等として公表し (2005 年~2016 年), その一方で, 変成岩岩石学との分野横断研究を行って新たな研究課題の創始と若手研究者の育成にも貢献した. 2018 年 9 月に開催された日本温泉科学会第 67 回大会における特別講演において, これまでの私たちの研究の概要を紹介するとともに, 学会での口頭発表にとどまっている関連の 2 つのサブ研究課題についても発表した. この論文には, 今回の発表の準備過程で手にした新たな知見を含むそのサブ研究の成果を書き留める.

¹⁾京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 〒874-0903 大分県別府市野口原 3088. ¹⁾Beppu Geothermal Research Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Noguchibaru, Beppu, Oita 874-0903, Japan.

キーワード：スラブ脱水流体の温泉，Li-B-Cl 組成，ヨウ素年代，脱水，沈み込み帯物質循環

1. はじめに

近年、沈み込む海洋プレートから発生する深部流体「スラブ脱水流体」が岩石学や地震学といった地球科学の多くの研究分野で共通の重要な研究対象に取り上げられ、そのかたわらで、スラブ脱水流体と温泉の関連性に関する研究が盛んに行われている（例えば、西村，2000a, b；風早ほか，2014；Kusuda *et al.*, 2014）。私たちも、この問題に早くから取り組み（大沢，2001；網田ほか，2005；大沢ほか，2010），中央構造線沿いの高塩分温泉にスラブ脱水流体の混入を認め、温泉水の Li/B 比と温泉直下スラブ上面までの深さの間に線形的な関係があることを見出した（図 1；網田ほか，2014）。また、京都大学の平島崇男教授の研究グループと協同し、沈み込んだ海洋プレートを構成する変成岩中の流体包有物に着目した研究にも着手し（Nishimura *et al.*, 2008），Li/B 比に関する同様な関係の存在を示すデータを入手することに成功した（Yoshida *et al.*, 2011；Yoshida *et al.*, 2015）。

日本温泉科学会第 67 回大会において本論文と同タイトルで講演の機会をいただき、これまでの私たちの研究の取り組みを紹介し、あわせて学会や研究会での口頭発表にとどまっているスラブ脱水流体由来の温泉に関連・関係する下記の研究について発表したが、今回、これらの発表内容を論文化する機会を得たので、今後の当該研究分野の進展に資するために記録としてここに留めることにする。なお、下記 2 つのサブ研究テーマ以前に行った研究の成果については、すでに公表している論文等を参照されたい（大沢，2001；網田ほか，2005；大沢ほか，2010；Ohsawa *et al.*, 2011；酒井ほか，2011；Oue *et al.*, 2011；酒井ほか，2013；大沢，2013；網田ほか，2014；大沢ほか，2015；網田，2016）。

- ・スラブ脱水流体由来の温泉（有馬型熱水）に類似する温泉の Li-B-Cl 組成とその形成プロセス
- ・放射性ヨウ素 (^{129}I) 分析によるスラブ脱水流体由来の温泉水の年代測定とそれから推定される沈み込み帯における深部物質循環・流体移動の時間スケール

2. スラブ脱水流体由来の温泉（有馬型熱水）に類似する温泉の Li-B-Cl 組成とその形成プロセス

スラブ脱水流体由来の温泉のことを、その代表的な温泉である有馬温泉（金泉）の名を冠して「有馬型熱水」と呼ぶことが多いが、私たちはフィリピン海プレートの沈み込みが追える（深発地震を通してスラブが見える）エリアの温泉をターゲットとした研究を、大分平野の調査（網田ほか，2005）をかわきりに、Fitch (1972) が指摘しているような地殻を断裂させている可能性のある地質構造線である中央構造線沿いに行ってきた（網田ほか，2014）。その後、有馬温泉およびその周辺地域のいくつかの温泉を調査する機会を得て、比較的塩分濃度の高い温泉水ならびに付随する遊離ガスを採取し、化学・同位体分析を行ったところ、有馬型熱水と水質（炭酸成分に富んだ Na-Cl 型高塩分水）はよく似ているが同位体的性質（水の δD - $\delta^{18}\text{O}$ 、He 同位体組成など；図 2）の全く異なる鉱泉水が、有馬温泉から 20 km も離れていない吉川温泉に流出していることを発見した（大沢ほか，2015）。吉川温泉の水の同位体組成（ δD - $\delta^{18}\text{O}$ ）が続成脱水流体起源であることを指し示し（図 2 の a, b），その一方で、Li-B-Cl 組成図（図 3 の a）上での位置や付随ガスが CO_2 であるなど変成脱水流体的な地球化学的特徴も有するという一見矛盾する内容が解決すべき課題として残った。

スラブが沈み込んで温度・圧力が増大するとともに、堆積層間隙海水（Na-Cl 型、高塩分）の絞

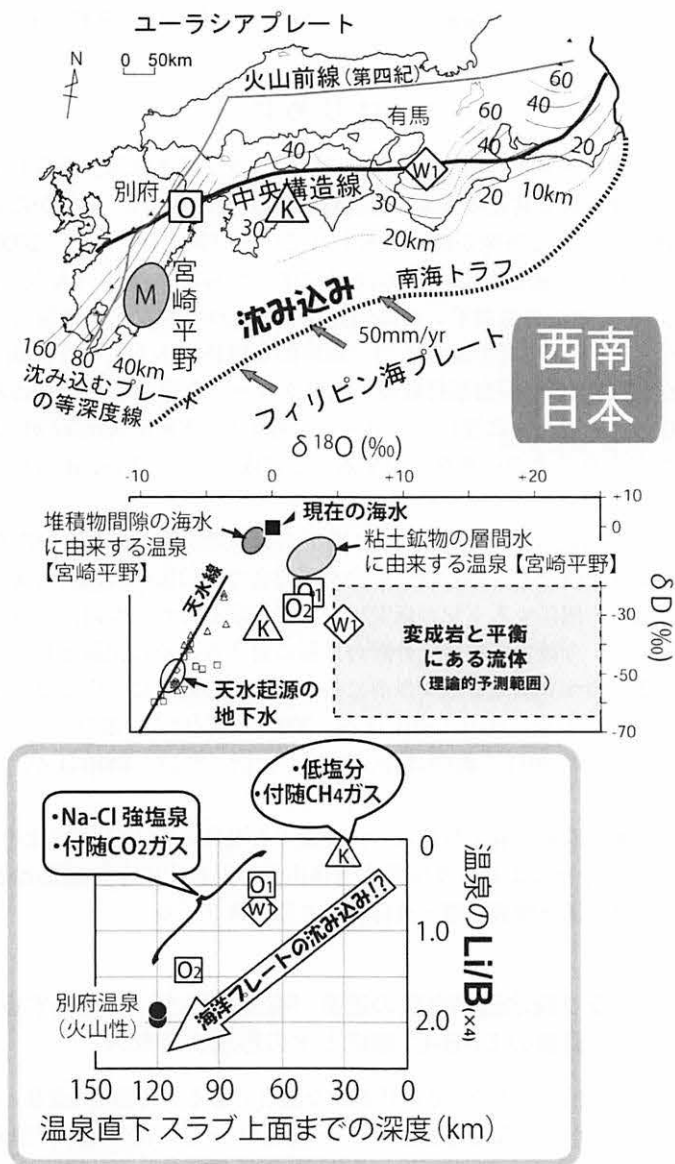


図 1 西南日本に存在するスラブ脱水流体由来の温泉 (O1, O2 : 大分, W1 : 和歌山, K : 高知) の水同位体組成ならびに温泉水の Li/B 比と温泉直下スラブ上面までの深さ

り出し、粘土鉱物層間水 (Na-Cl, HCO₃~Na-HCO₃ 型, 低塩分) の圧搾、変成脱水分解 (Na-Cl, HCO₃ 型, 高塩分) によって流体 (前 2 つが統成脱水流体, 最後者が変成脱水流体) が漸次放出されることを念頭におくと (図 4 の a), すべての脱水流体が放出されずに蓄積される場合、各脱水流体の量比によっては生成する流体の地球化学的性質はスラブ脱水流体のそれ (図 4 の b) と違ったものになってもよいはずであるという考えがうかぶ。そこで、上記 3 種類の脱水流体の蓄積を想定し、それらのモデル温泉水の化学分析データを用いて、混合率を変えて生成する流体の Li-B-Cl 組成を計算してみた。この混合で生じる流体の Li-B-Cl 組成範囲を図 3 の b に表したが、吉川温泉の Li-B-

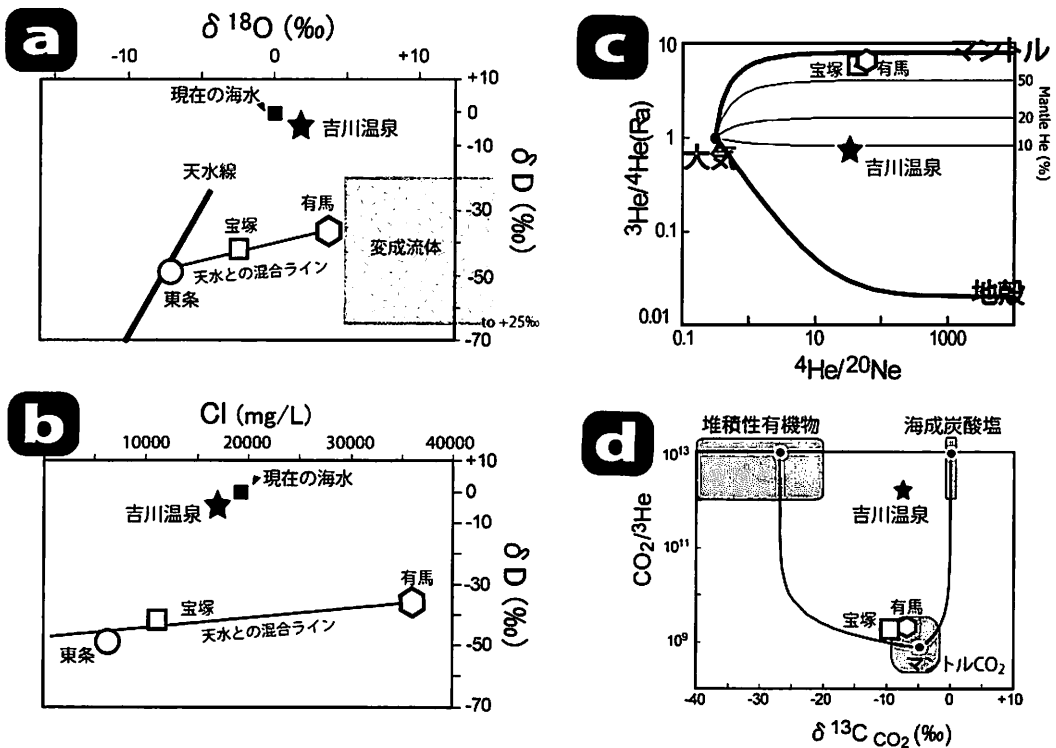


図 2 有馬型の温泉と比較した吉川温泉の (a) 水同位体組成 (δD - $\delta^{18}O$), (b) δD と Cl 濃度の関係, (c) He 同位体組成および (d) $\delta^{13}C$ -CO₂/He 比 (CO₂ の起源). 大沢ほか (2015) の Fig. 4 および Fig. 5 を元に作図.

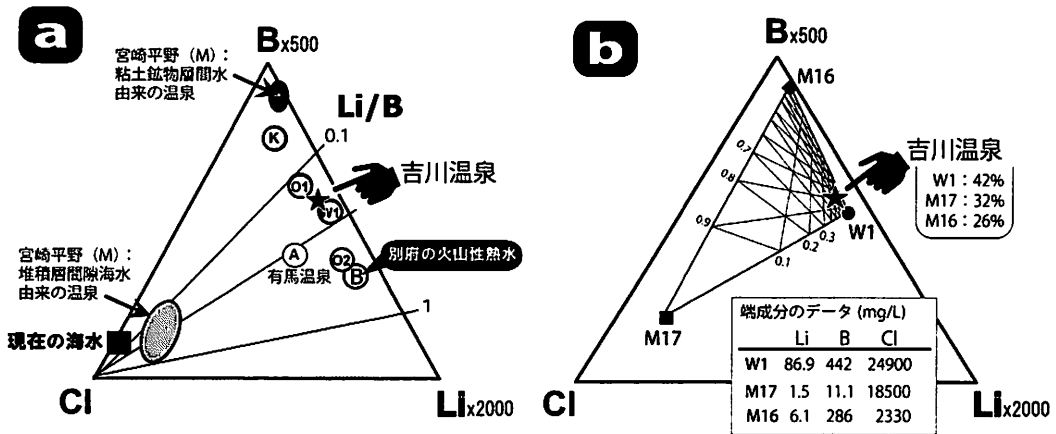


図 3 (a) スラブ脱水流体由来する温泉 (K, W1, O1, O2, A) とそれに類似する吉川温泉の Li-B-Cl 組成, (b) 起源流体 (堆積層間隙海水, 粘土鉱物層間水, 変成脱水流体) のモデル温泉 (M17, M16 と W1) を端成分として混合して生成する流体の Li-B-Cl 組成範囲

Cl 組成は変成脱水流体にほぼ同量の統成脱水流体が加わって生成するという結果が得られた。そのような流体混合率であっても、吉川温泉の Li-B-Cl 組成が変成脱水流体（この場合は W1）のそれとほとんど変わらない位置にプロットされるのは、変成脱水流体の Li, B, Cl 濃度が他の脱水

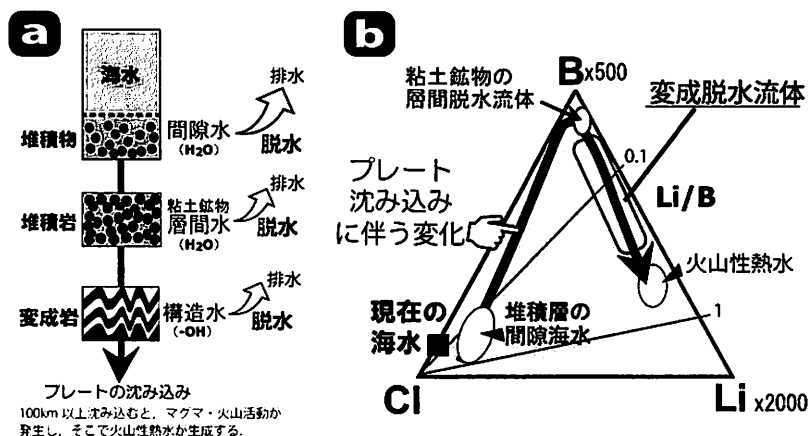


図 4 (a) 海洋プレートの沈み込みにともないプレート最上部の海底堆積物層で起こる脱水過程と、
(b) スラブ脱水流体由来の温泉の地球化学的特性から推定される脱水流体の Li-B-Cl 組成の変化

流体に比べて高いことによる（図 3 の b 内の「端成分のデータ」と記された表を参照）。逐次脱水してくる流体が蓄積しうる地質環境としては、堆積物の埋没過程が進行する深い堆積盆地が考えられ、埋没する堆積物が受ける続成作用で生成する CH_4 はさらに深く埋没して温度が上昇すること（変成作用）によって CO_2 に変化していくことが期待されるので、実際の付随ガスが CO_2 であることも説明できて都合がよい。

3. 放射性ヨウ素 (^{129}I) 分析によるスラブ脱水流体由来の温泉水の年代測定とそれから推定される沈み込み帯における深部物質循環・流体移動の時間スケール

ヨウ素年代測定法を中央構造線沿いのスラブ脱水流体由来の温泉に応用することになったきっかけは、別府温泉の熱水性温泉水 (Na-Cl 型) にこの方法を応用した経験があったからである（大沢, 2006）。再び Rochester 大学（アメリカ合衆国）の Udo Fehn 教授に共同研究を申し出て、大分平野、宮崎平野で採取した多数の温泉（網田ほか, 2005；大沢ほか, 2010）ならびに和歌山のスラブ脱水流体由来の温泉（網田ほか, 2014）について、加速器質量分析計を使ってヨウ素同位体比 ($^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$) を測定した（Tomaru *et al.*, 2007）。ここでは、その論文に記載のデータを使用した解析・考察の結果について述べる。

網田ほか（2014）でスラブ脱水流体由来であると判定した図 1 に記載の大分の O1 と O2、和歌山の W1 の $^{129}\text{I}/\text{I}$ ($\times 10^{-15}$) (^{127}I は安定同位体で、 $^{127}\text{I} \equiv [\text{I}^-]$) は、それぞれ 2260 ± 160 、 800 ± 300 、 250 ± 30 である。1960 年代の核実験によって ^{129}I が大量に環境に加わる前の自然状態の値 (1500×10^{-15}) より高い値の O1 を除き（別日に採取した試料の値も 2390 ± 290 と高く、O1 は人為起源 ^{129}I の汚染を受けやすい温泉井であると判断した。）、O2 と W1 の値を ^{129}I の放射壊変曲線に照らして、ヨウ素年代を算出した。図 5 の a に表されているように、大分 (O2) は 1300 万年、和歌山 (W1) は 3800 万年という年代が得られた。両温泉の ^{129}I のソースと考えられるフィリピン海プレートの沈み込み開始は 1400 万年前で、大分の値はこれより若い年代なので問題ないが、和歌山の値はこれより古いために矛盾がある。

図 5 の b は、フィリピン海プレートの沈み込みにともなう大分平野の温泉の成り立ちを表した中部九州の模式断面図であるが、まず、この図にもとづいて 1300 万年が示す意味を考えてみる。

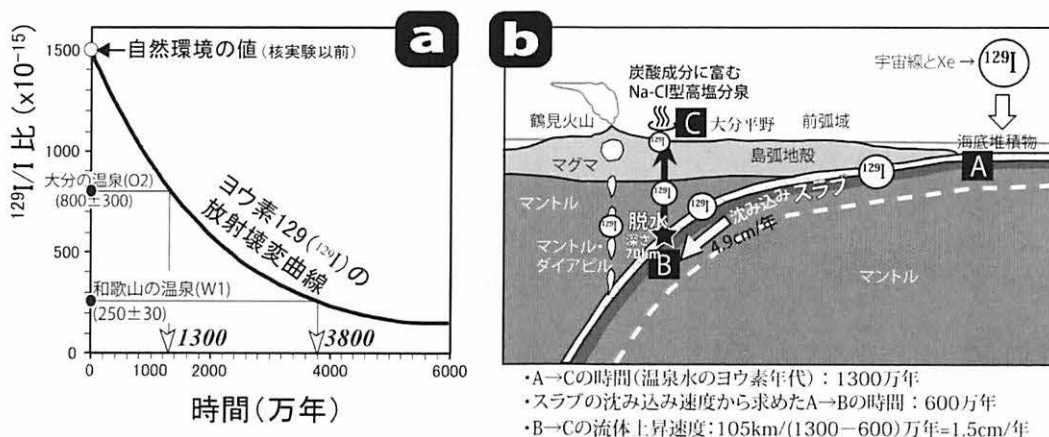


図 5 (a) スラブ脱水流体に由来する温泉 (W1, O2) のヨウ素年代, (b) 九州中部地域の沈み込み帯における深部物質循環・流体移動とそれらの時間スケール

沈み込み開始地点 A から温泉直下の脱水地点 B までスラブの移動に要する時間は、現在の沈み込み速度 (4.9 cm/年) が続いてきたとして、600 万年と見積もられる。温泉 O2 の直下深さ 105 km で発生した脱水流体が地表まで上昇してくるのに要する時間は、(1300-600) 万年となるので、流体の上昇速度は $105 \text{ km} / 700 \text{ 万年} = 1.5 \text{ cm/年}$ となる。より古い年代値が得られた和歌山については、フィリピン海プレートのさらに下方、深さ 400 km に沈み込む太平洋プレート (現在の沈み込み速度 = 6 cm/年) からの脱水を想定すると (このような深さで泥質堆積岩中のトパーズが分解: 小野, 2003), $400 \text{ km} / (3800 - 1400) \text{ 万年} = 1.7 \text{ cm/年}$ となり、大分の場合とほぼ一致する。これらは、中島・鳥海 (1996) によって推測されている地殻深部のクラックによる水の移動速度の 3 cm/年とよく合っている。しかし、海藻に由来する大陸縁の“古い”ヨウ素の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-15}$) は、520, 670, 550 と報告されており (Fehn *et al.*, 2007), 南海トラフの本州沖に供給されている富士川の堆積物 (平, 1990) にこのようなヨウ素が多量に含まれていれば、放射壊変曲線の初期値が変わり、求まる年代は 1300 万年となり、大分の年代と一致する。どちらの解釈が妥当か、今後の検討課題である。

4. おわりに

地球流体化学的手法による私たちのスラブ脱水流体由来の温泉の研究は、文部科学省による「京都大学 21 世紀 COE プログラム: 活地球圏の変動解明」をきっかけに始めた研究である。研究計画立案のベースとなる研究論文はすでに 2001 年に世に出していたが、「島弧に沈み込む海洋プレートから脱水する流体に由来する温泉を探す」というのはっきりした目的をもって 2003 年 11 月に最初の野外調査に出かけているので、今年 (2018 年) でかれこれ 15 年近くが経過したことになる。この間、共同研究をして下さった多くの方々に様々な形で支えられながら何とか研究を続けることができ、研究成果もそれなりに公表することができた。その中で個人的に最も刺激的だった研究は、冒頭に述べた京都大学・平島崇男教授の変成岩研究グループとの分野横断研究であり、研究内容は平島先生が執筆される特別講演 I の論文で紹介されるのでそれを読んでいただくことにし、私からは別の観点からの研究の成果について紹介する。

私たちの変成岩岩石学と地球流体化学の分野横断研究の成果論文のひとつ (Yoshida *et al.*, 2015) には、流体包有物の化学組成を表示するのに水質トリリニアダイアグラムが使われている。これは

当時大学院博士課程の院生であった第一著者の吉田健太氏が自発的に研究に取り入れたことで、この行為そのものが分野横断研究の真の成果だと私個人は思っている。このような分野横断研究の中で育ち・巣立った若手研究者に今後を期待したい。

謝 辞

特別講演の機会をつくって下さった日本温泉科学会第 67 回大会委員長の由佐悠紀京大名誉教授、これまで続けてきたスラブ脱水流体由来の温泉に関する様々な研究で協働された研究仲間、特に京都大学理学研究科の平島崇男教授と秋田大学理工学部の網田和宏氏に感謝申し上げる。

引用文献

- 網田和宏 (2016) : 沈み込むプレートに辿り着く温泉. 「大沢信二, 西村 進編温泉と地球科学—温泉を通して読み解く地球の営み」, pp. 33-71, ナカニシヤ出版, 京都.
- 網田和宏, 大沢信二, 西村光史, 山田 誠, 三島壮智, 風早康平, 森川徳敏, 平島崇男 (2014) : 中央構造線沿いに湧出する高塩分泉の起源—プレート脱水流体起源の可能性についての水文化学的検討—, 日本水文科学会誌, 44, 17-38.
- 網田和宏, 大沢信二, 杜 建国, 山田 誠 (2005) : 大分平野の深部に賦存される有馬型熱水の起源. 温泉科学, 55, 64-77.
- Fehn, U., Moran, J.E., Snyder, G.T., Muramatsu, Y. (2007) : The initial $^{129}\text{I}/\text{I}$ ratio and the presence of 'old' iodine in continental margins. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms*, 259, 496-502.
- Fitch, T.J. (1972) : Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to southeast Asia and the western Pacific. *J. Geophys. Res.*, 77, 4432-4460.
- 風早康平, 高橋正明, 安原正也, 西尾嘉朗, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤 努, 高橋 浩, 北岡豪一, 大沢信二, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本 斉, 堀口桂香, 戸崎裕貴, 切田 司 (2014) : 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴. 日本水文科学会誌, 44, 3-16.
- Kusuda, C., Iwamori, H., Nakamura, H., Kazahaya, K., Morikawa, N. (2014) : Arima hot spring waters as a deep-seated brine from subducting slab. *Earth, Planets and Space*, 66, 1-13.
- 中島善人, 鳥海光弘 (1996) : 地殻深部を水はどう流れるか : クラックの役割. 科学, 66, 873-879.
- Nishimura, K., Amita, K., Ohsawa, S., Kobayashi, T., Takao Hirajima, T. (2008) : Chemical characteristics and trapping P-T conditions of fluid inclusions in quartz veins from the Sanbagawa metamorphic belt, SW Japan. *J. Mineralogical and Petrological Sciences*, 103, 94-99.
- 西村 進 (2000a) : 紀伊半島における前弧火成作用と温泉. 温泉科学, 49, 207-216.
- 西村 進 (2000b) : 四国北部の地質構造と温泉. 温泉科学, 50, 113-119.
- 大沢信二, 網田和宏, 大上和敏, 酒井拓哉, 三島壮智 (2015) : 有馬型熱水と水質のよく似た同位体的性質の異なる高塩分温泉—兵庫県の吉川温泉の例. 温泉科学, 64, 369-379.
- 大沢信二 (2013) : 同位体で探る「化石海水型温泉水」の起源. 「京都大学総合博物館企画展「海」実行委員会編 海は百面相」, pp. 32-33, 京都通信社, 京都.
- Ohsawa, S., Sakai, T., Yamada, M., Mishima, T., Yoshikawa, S., Kagiya, T. (2011) : Dissolved inorganic carbon rich in mantle component of hot spring waters from the Hitoyoshi Basin in a non-volcanic region of central Kyushu, Japan. *J. Hot spring Sci.*, 60, 410-417.
- 大沢信二, 網田和宏, 山田 誠, 風早康平 (2010) : 宮崎平野の大深度温泉井から流出する温泉水

- の地化学特性と成因—温泉起源流体としての続成脱水流体—. 温泉科学, 59, 295-319.
- 大沢信二 (2006) : 別府温泉は何歳か?—別府地熱系の年齢と熱水の起源—. 「大沢信二編 温泉科学の新展開」, pp. 149-172, ナカニシヤ出版, 京都.
- 大沢信二 (2001) : 大分平野に産する深層熱水中の炭酸成分の起源. 大分県温泉調査研究会報告, 52, 21-26.
- 小野重明 (2003) : 水が関係した相転移と部分溶融. 「笠原順三, 鳥海光弘, 川村雄行編 地震発生と水 地球と水のダイナミクス」, pp. 38-54, 東京大学出版会, 東京.
- Oue, K., Ohsawa, S., Yamada, M., Mishima, T., Sakai, T. (2011) : Geochemical Study of Water and Gas from Funagoya Spa in Fukuoka Prefecture, Japan. *J. Hot spring Sci.*, 61, 116-122.
- 酒井拓哉, 大沢信二, 山田 誠, 三島壮智, 大上和敏 (2013) : 温泉水・温泉付随ガスの地球化学データから見た大分県山香温泉の生成機構と温泉起源流体. 温泉科学, 63, 164-183.
- 酒井拓哉, 大沢信二, 山田 誠, 三島壮智, 吉川 慎, 鍵山恒臣, 大上和敏 (2011) : 九州中央部の非火山地域に湧出する温泉の炭酸成分の起源. 温泉科学, 60, 418-433.
- 平 朝彦 (1990) : 日本列島の誕生. 226 p., 岩波書店, 東京.
- Tomaru, H., Ohsawa, S., Amita, K., Lu, Z., Fehn, U. (2007) : Influence of subduction zone settings on the origin of forearc fluids: Halogen concentrations and $^{129}\text{I}/\text{I}$ ratios in waters from Kyushu, Japan. *Applied Geochemistry*, 22, 676-691.
- Yoshida, K., Hirajima, T., Ohsawa, S., Kobayashi, T., Mishima, T., Sengen, Y. (2015) : Geochemical features and relative B-Li-Cl compositions of deep-origin fluids trapped in high-pressure metamorphic rocks. *Lithos*, 226, 50-64.
- Yoshida, K., Sengen, Y., Tsuchiya, S., Minagawa, K., Kobayashi, T., Mishima, T., Ohsawa, S., Hirajima, T. (2011) : Fluid inclusions with high Li/B ratio in a quartz vein from the Besshi area of the Sambagawa metamorphic belt : implications for deep geofluid evolution. *J. Mineralogical and Petrological Sciences*, 106, 164-168.