

肥後熊本学

タイトル：肥後の温泉科学

要旨（129字）：熊本県には、ほぼ全種類の療養泉（9/10）が存在します。この多彩な温泉群は、海、森林、火山といった自然のハーモニーから生みだされています。科学的視点から、肥後の名湯群形成における自然環境の必然性を考察します。そして、温泉を正しく理解し、自然の恵みに感謝しましょう。

Key Words：温泉の科学（3）、自然環境（3）、天水（2）、熱水循環（2）、療養泉（1）
温泉法（1）

肥後の温泉科学

横瀬久芳

1. はじめに

熊本県には、含よう素泉を除く 10 種類中 9 種類の療養泉が存在しています。しかも、これらの温泉は、熊本市を中心に半径 80 km 圏内に収まり、肥後は温泉天国と言っても過言ではないかもしれません (図 1)。肥後の温泉科学では、そんな多彩な温泉群を科学的に紐解きます。



図 1. 熊本県の温泉施設と泉質の分布

温泉大国日本は古くから“湯治(とうじ)文化”によって健康増進を実践してきました。露天風呂の解放感に浸りながら、ふと“この温泉の効能は?”とか“なんでここに温泉が湧いているのだろう?”と思ったりもします。水道水を温めたシャワーとは違う何か、私たちに遠くの温泉地に誘います。ですが、露天風呂で思いついたこれらの素朴な疑問ですら、実は自然科学、医学、社会学などを総動員して、自然環境と人間活動の関連を考察する必要があります。

2001年に地球環境の保全等を目的として環境省設置法が施行されました。この法律の第四条で「十三 自然公園及び温泉の保護及び整備並びにこれらに関する事業の振興に関すること」とあり、温泉が環境省の管轄だと分かります。しかし、遡ること1948年に、初めて温泉法を制定したのは厚生省であり、数度の改正の後、環境省へ移管され現在に至りま

す。つまり、温泉は、当初医療分野からスタートして、人々の健康と自然現象の調整役を担う環境省にバトンタッチされたのです。温泉法による「温泉の定義」は、さらに「鉱泉分析法指針」によって、様々な基準と実質的な運用に関するガイドラインが定められています。その中で医学的効能を有する療養泉として 10 種類（単純温泉、塩化物泉、炭酸水素塩泉、硫酸塩泉、二酸化炭素泉、含鉄泉、酸性泉、含よう素泉、硫黄泉、放射能泉）が設定されています。

本講義では、多彩な療養泉を産み出す肥後の温泉の凄さを、温泉の特徴や発生メカニズムといった科学的視点から理解することを目的とします。その上で自己の体調に即した、温泉の科学的活用法を考察します。肥後の自然に抱かれながら、肥後の名湯を満喫しましょう。

2. 温泉科学の基本

世界の約 10%の活動的火山が集中している日本は、確かに火山大国です。ですから、暗黙の了解として、火山大国＝温泉大国と考えている人も多いことでしょう。しかし、温泉を生産し続けるためには多量の天水（海水、降雨・雪、河川水、地下水、湖沼水と氷床を含む）が必要不可欠で、熱源となる火山と高降水量は車の両輪となります。

温泉を作り出す水の起源に関しては、水分子を構成する酸素と水素の同位体比が目印として使われています。天水は δ ダイアグラム(図 2)上に幅のある線分 $\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$ （天水線）として現れます。一方、マグマとともに地下深部から地表に運ばれてきた水分子は、同図の島弧マグマやマンツルの領域に示されます。

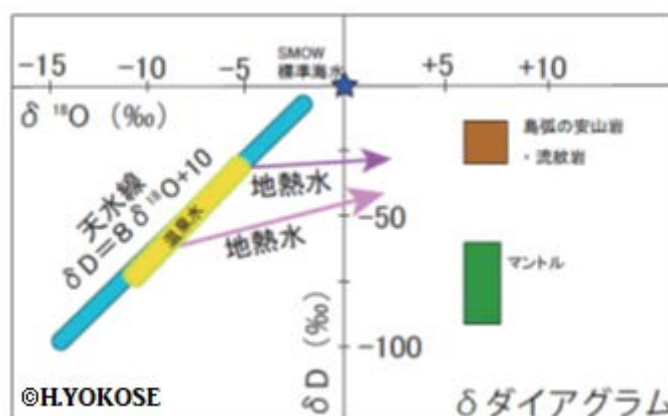


図 2 水の起源に関する H・O 同位体比の模式図

δ ダイアグラム上で温泉水は、概ね天水の領域と重り、大部分が地下水起源であることを物語ります。つまり、世界の年間平均降水量の 4 倍近くに達しする阿蘇山における 3200mm の降水量が、肥後の温泉を支える陰の立役者なのです。

多くの温泉は、主成分として陽イオンには Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} を、また陰イオンには Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- を天水に比べ高濃度で含有しています。この化学成分における多様性を説明するうえで、天水とマグマおよび岩石の相互作用は欠かせません。明治～大正時代に

かけては、温泉療法の先進国であったドイツの泉質に関する科学・医療面の解釈を日本は取り入れました。現在の温泉法や鉱泉分析法指針はこの流れを踏襲しています。そして、温泉は、「地中から湧出する温水、鉱水及び水蒸気その他のガス（炭化水素を主成分とする天然ガスを除く。）で、別表に掲げる温度又は物質を有する物をいう。」（温泉法第2条）と法的に定義され、普段使いの水（常水）とそれ以外（温泉）に区分されています。さらに、鉱泉分析法指針では、地中から湧出する温水および鉱水を鉱泉と再定義し、地上に湧出した時の泉温、液性および浸透圧に応じて区別し、化学組成に基づいた泉質名が規定されています。中でも、温泉医学の経験から効能が期待できる10種類を療養泉として提案されています（鉱泉分析法指針参照）。

熊本県内における温泉データをまとめ、療養泉の定義に照らし合わせると、よう素泉を除く下記9種類の存在（存在していた）が確認でき、それぞれの地域性を確認してみましよう。

単純温泉 (53.0%)：熊本県全域に単純温泉は分布していますが、特に県北部の平山温泉、山鹿温泉そして玉名温泉にアルカリ性単純温泉が集中しています。県南部では日奈久温泉や湯山温泉にも認められます。

硫酸塩泉 (13.1%)：熊本県では阿蘇カルデラ内の北部地域や黒川・小国といった第四紀の火山体近傍に広く分布しています。

硫黄泉 (11.2%)：熊本県では、比較的多い泉質であり、一部第四紀火山である国見山地を作る肥薩火山岩類周辺の湯の鶴温泉や花崗岩などの深成岩周辺部にあたる平山温泉や涌蓋山周辺のわいた温泉郷に分布します。

塩化物泉 (11.2%)：食塩が多く含まれる温泉は、八代海・有明海の周辺に塩濃度が10g/kgを超す高張性温泉が確認出来るほか、山中の温泉地である杖立温泉、黒川温泉、湯前温泉でも認められます。杖立温泉と黒川温泉は、それぞれ第四紀の杖立火山群と涌蓋火山群の分布域になります。

放射能泉 (5.4%)：熊本県北部の花崗岩地帯から湧出する単純温泉で、玉名温泉、平山温泉、山鹿温泉に認められます。花崗岩の分布地域ではありませんが、植木温泉にも一ヶ所存在しています。

炭酸水素塩泉 (3.8%)：菊鹿盆地の南縁辺部にあたる植木温泉や合志川沿いの温泉群、国見山地を構成する第四紀の肥薩火山岩類と人吉盆地の南西境界部、阿蘇カルデラ南東部、そして熊本平野の境界付近など、多数存在します。

二酸化炭素泉 (1%)：熊本県内では、宇土半島の西端と大矢野島の弓ヶ浜温泉や人吉盆地の南限で確認されています。二酸化炭素は、水に対する溶解度が小さいため、弓ヶ浜温泉以外は、全て20℃未満の冷鉱泉として湧出します。泉温50℃の弓ヶ浜温泉は、遊離炭酸ガスが1000ppmで、ほぼ飽和状態にあります。

含鉄泉 (1%)：阿蘇山の夜峰火山の南西の地獄・垂玉温泉と牛深鉱泉から報告されています。どちらもの鉄硫酸塩（緑磐）として含まれています。

酸性泉 (0.3%) : pH3 未満の温泉は、地獄温泉と黒川温泉に存在し、それぞれ夜峰火山と涌蓋火山群地域に対応します。

このように泉質の分布域は、周辺の地質学的区分に対応するようになります。つまり、泉質の差は、地下深部プロセスである温泉(熱水)循環と岩石の化学反応の理解につながり、多彩な泉質の起源に迫れることを暗示します。

3. 火山活動と温泉

温泉は、成因の違いによって火山性温泉と非火山性温泉の二種類に大別されています。熊本県の療養泉は、ほぼ火山活動地域に存在している火山性温泉とみなせます。それは九州の中央部に位置する熊本が、別府一島原地溝帯と呼ばれる火山活動と地震活動が盛んな地域に含まれることと無縁ではありません。

逆に言うと、目立った火山地形の認められない地域は、概して非火山性温泉として認識され、人吉盆地周辺の温泉もそのように考えられることも多いようです。しかし、人吉盆地も鹿児島地溝帯の北縁部と考えられており(小林・矢島、2007)、熊本市周辺の地質構造と類似します。事実、人吉・水俣地方にも、やはり第四紀以降(約260万年以降)に活動した火山地域が分布していて(例えば、横瀬 他、1999)、湯の児温泉、湯の鶴温泉、湯浦温泉、人吉温泉がその近傍に位置付けられます。さらに、目立った火山地形を示さない有明海沿岸の大矢野島や宇土半島にも第四紀以降に活動した新しい火山群が確認されており(横瀬 他、1998)、松島温泉・弓ヶ浜温泉・赤瀬温泉も火山性温泉の可能性が高いと言えます。このように肥後の温泉は、大部分が火山性温泉なのです。



図3 火山性温泉のでき方の模式図 (Giggenbach,1988 を基に作成)

図 3 は、温泉形成の視点から地下浅所に上昇してきたマグマがどのように影響するかを描いてあります。地球深部の高温地帯で発生したマグマは、地表に向かって上昇します。多くの場合、地下数km付近にマグマ溜を形成すると考えられております。しかし、マントルで発生したマグマが全て地上に現れて火山を作る訳ではありません。この上昇してきたマグマが熱源となり、また泉質を左右する化学物質（火山ガス）の供給源となるのです。

既に述べたように、温泉水の原料は天水で、マグマや地下の岩石との反応で泉質という風味が付け加わります。マグマから分離した熱水や火山ガスが天水に吹き込まれ、効率よく天水は加熱されます。加熱され出来上がった温泉（地熱水）は軽くなり、火山体の隙間（断層や割れ目）を上昇していきます。この上昇流が火山体の周囲から天水を引き込み、天水から温泉水への循環サイクルが構築されます。

低温低圧下に置かれたマグマは、過飽和な火山ガス成分（体積比： H_2O , 1000; CO_2 , 50; H_2S , 30; HCl , 10）を分離します。各成分のマグマに対する溶けやすきは、 $\text{HCl} > \text{H}_2\text{O} > \text{SO}_2 > \text{H}_2\text{S} > \text{CO}_2$ の順に変化するため、マグマの上昇とマグマ溜の形成に関連して、各成分の分離は空間的にも時間的にも変化することが容易に想像されます。このようなプロセスを経てマグマの周囲に様々な泉質の温泉が構築されてきます。

3-1 硫黄泉と硫酸塩泉

“温泉＝硫黄の香り”と言う人も多い事でしょう。もともと、硫黄の単体はほとんど匂いませんが、硫化水素（ H_2S ：ゆで卵の匂い）と亜硫酸ガス（ SO_2 ：マッチの焼けるに匂い）の入り混じった匂い（あるいは臭い）を硫黄（湯泡：ユワウ）臭と表現しています。マグマから分離した火山ガス成分が臭いの正体である事が多いのです。



図 4-1 わいた温泉郷山川温泉(硫黄泉)

図 4-2 阿蘇内牧温泉（硫酸塩泉）

温泉水中で硫黄(S)は、 H_2S 、 HS^- 、 S 、 SO_2 、 HSO_4^- 、 SO_4^{2-} など実に6種類もの分子やイオンの形の化学種が存在できます。さらに、過飽和な温泉中では、自然硫黄（S）として存在します。これらの変化は、温泉水の持つ水素イオン濃度や酸化還元電位に大きく左右されます。火山ガスが酸化的天水(火口周辺など)と反応すると、 HSO_4^- や SO_4^{2-} が卓越する硫

酸塩泉となり、還元的天水（火山から離れた深層地下水）なら H_2S や HS^- が含まれる硫黄泉が主体となります。

還元的な地下の環境で安定していた硫黄泉は、浴槽に注がれると空気と触れ合い酸化反応が進みます。その結果、 H_2S や HS^- が酸化されてお風呂の中で硫黄の微粒子が析出し始めます。この微粒子が成長する過程で温泉の色が水色（図 4-1：山川温泉）や緑色（図 4-2：内牧温泉）そして白色などに変化します。これらは、析出粒子による光の散乱及び吸収現象として説明されています。

3-2 炭酸泉・炭酸水素塩泉

二酸化炭素を多く含む泉質には、炭酸水素塩泉や炭酸泉があります。二酸化炭素は、空气中や土壌中にも存在するため、天水中に入り込んだ炭酸ガス ($\text{CO}_2 : \text{gas}$) が溶け込んだ二酸化炭素 ($\text{CO}_2 : \text{aq} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$) に代わり、さらに地中などでは炭酸水素イオン (HCO_3^-) としても存在します。しかし、この化学反応における炭酸ガス濃度はそれほど高くなく、反応によって生成される天水中の HCO_3^- 濃度も 100ppm 未満のことが多いです。

一方、熊本県の温泉に含まれる炭酸ガスと炭酸水素イオン濃度の最大値は、それぞれ 1941ppm（金桁温泉）と 4194ppm（弓ヶ浜温泉）に達します。両地域とも有明海に面した火山地帯です。

温泉水に含まれる高濃度炭酸ガスの研究は、炭酸泉で有名な大分県の長湯温泉、炭酸鉱泉で有名な九重連山東側、そして雲仙火山の周辺地域で盛んに行われています（例えば、大沢・西村，2016）。これらの研究では、炭酸ガスを多量に含有する温泉は、マグマから分離した火山ガスが起源であると推定しています。また、図 5 に示したように、中部九州全域における温泉あるいは火山ガス中の He 同位体比の研究から、温泉水には深部マントル起源の He

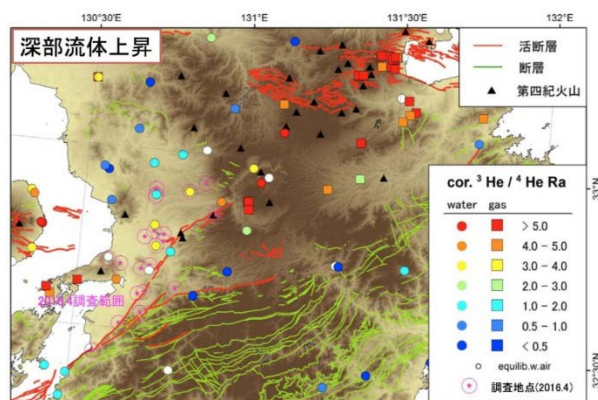


図 5 温泉に含まれる九州中央部の He 同位体比の研究

（産業総合研究所深部流体グループより：<https://unit.aist.go.jp/ievg/crufluid-rg1/kumamoto/kumamoto.html>）

ガスが多く含まれている事を示しています。図 5 より弓ヶ浜温泉や金桁温泉を含め、九重連

山や島原半島とともに高い He 同位体比が示されています。深部マントル起源の希ガスが認められる地域は、まさに別府島原地溝帯と重なっており、熊本の炭酸泉や炭酸水素塩泉が地下深くのプロセスとリンクしている可能性を示唆します。九州山地を隔てた人吉盆地にも炭酸泉や炭酸水素塩泉が存在していますが、二酸化炭素の起源に関するデータはまだ出ていません。しかし、鹿児島地溝帯の北方延長（小林・矢野，2007）と考えるなら同じように深部起源の可能性は高いと言えるでしょう。

地下深くにおける高圧下では、二酸化炭素が天水に多く溶ける事が可能です。そしてそれは、炭酸水素イオンへと変化し、多くのカルシウムイオンが温泉水中に溶け込むことを可能にします。しかし、地表に温泉が湧出すると減圧効果で水溶液中の二酸化炭素が抜けて、炭酸カルシウム (CaCO_3) が析出します（図6）。これは、鍾乳洞で鍾乳石が出来る化学反応と同じで、しばしば温泉地では石灰華や噴泉塔が構築されます。日本各地でそれらは、天然記念物に指定されています。



図6 温泉水による石灰華（うろこ状：スケール、ミニチュア石灰華段）、弓ヶ浜温泉

3-3. 温泉の溶存分量と泉質（塩化物泉と単純温泉）

温泉水中の陰イオンとして塩素イオンを多く含む泉質は塩化物泉と呼ばれます。塩化物泉は、海に近い海岸周辺だけではなく、海と全く関係のない山の中でも湧出します。

海岸周辺の塩化物泉は、体液よりも溶存元素が多い 10000 mg/kg以上の温泉が、熊本県では、把握できた 405 件中 9 件が該当しました（天草下島、芦北・水俣、宇城・八代、熊本平野西）。多くは、1000mを起こす深層ボーリングによって揚湯されています。泉質的に硫酸イオン濃度が低い事から、地下に浸透した現海水ではなく、古い時代に地層や断層破碎帯に蓄えられた海水（化石海水）と考えられます。溶存物質の総量は 31600 mg/kg（海水は約 34000 mg/kg）に達します。また、源泉温度も低く、地下増温率と調和的な非火山性温泉とみなせます。

化石海水の高張性温泉は、火山地帯の温泉と違って天水の循環サイクルがありません。そのため、限られた資源となります。温泉水を汲み上げすぎると上部の地下水が混入して薄ま

る事もあります。化石海水の温泉と類似の効果を期待するなら潮湯（海水を温めたお風呂）も良いでしょう。潮湯は、海水浴と同様に日本では、かつて健康管理の一環として行われていました。

一方、山中の火山近傍に産する塩化物泉は、溶存含有量が海岸周辺に比べ 1/10 程度ですが、泉温は逆に高く、多数の温泉が沸騰泉に近くなります（杖立温泉、わいた温泉郷、黒川温泉）。これは、図 3 に示したように、マグマと最後まで分離せずにいた臨界状態の熱水が岩石と反応して Na^+ や K^+ を溶かし出したと考えられています。一般にケイ素は高温でよく溶けるため、入浴に適した温度まで冷ますと過飽和の石英が微粒子として温泉水内に析出します。この微粒子が太陽光をレイリー散乱させるため、コバルトブルーに染まる露天風呂に変身します（図 7）。



図 7 コバルトブルーの温泉（わいた温泉郷）

成分含有量の観点から、高張性温泉の対局を成す温泉が単純温泉となります。溶存成分が 1000 mg/kg 未満であるものの泉温が 25°C 以上であれば温泉となります。泉質の主要成分だけならまるで家庭のお風呂のように聞こえる事でしょうが、微量成分において全く異なる点があります。

その好例として療養泉である放射能泉や硫黄泉を上げることができます。更に、全国的には、 $\text{pH}9.5$ を超すアルカリ性温泉が極めて珍しい（例えば、浅森 他、2002）のですが、熊本県内には 30 カ所近く存在します。その内 3 カ所は $\text{pH}10$ を超します。このようなアルカリ性の強い温泉を作るには、花崗岩質の岩盤が必要と考えられています（例えば、大沢・西村、2016）。この強アルカリ性の温泉は、熊本県北部に広がる花崗岩地帯や球磨地方の市房山が重要な役割を果たしたとみなせます。また、人吉盆地がかつて湖だったことを忍ばせる単純温泉として、褐色のモール泉が存在します（図 8-1、8-2）。これは、淡水の湖に溜まった植物由来の未分解有機物（フミン）がそのまま温泉に混入することで色が付きます。このように単純温泉の成因は、意外と複雑なのです。



図 8-1 褐色を呈する人吉のモール泉 図 8-2 人吉温泉水の比較（右側がモール泉）

4. 自分にあった温泉入浴法を見つけよう！

入浴という行為は、体を温めたり冷やしたりする物理的变化で発生する生体反応を利用しています。これらは泉質に関わりなく一般適応症という括りで説明されている部分に相当し、温熱作用（HSP70 の上昇、NK 細胞の活性化）、静水圧作用、浮力作用、清浄作用、運動効果やリラックス効果が挙げられます。

泉質に依存するものとして、代表的な例として、高張性温泉、二酸化炭素泉や硫化水素泉が挙げられます。時々、高張性温泉のような高濃度の温泉成分が肌から浸透するとメディアで表現されていますが、皮膚は外界から体液を守る大事な防衛線であり、簡単に浸透することはないと考えられています。しかし、二酸化炭素や硫化水素は例外的存在で、皮膚から浸透して血管拡張作用があります。高張性温泉や硫酸塩泉は、皮膚表面で微細粒子を析出し、保温効果が認められ、新陳代謝に一役買っているとみなされています。

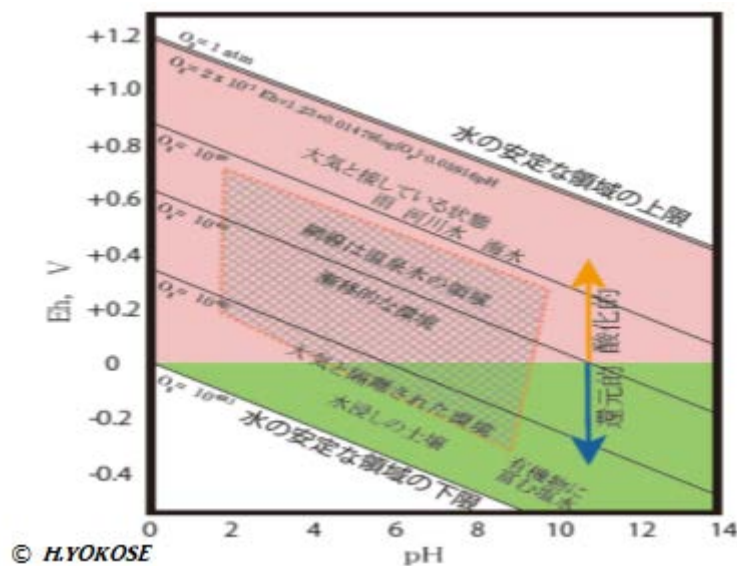


図 9 水素イオン濃度 (pH) と酸化還元電位 (Eh)

火口周辺地域を除いて一般的に温泉は、地下の還元的状況で生産されることが多いため、

湧出直後は入浴時還元剤として人体に作用します。しかし、浴槽に注がれて空気と十分反応したり次亜塩素酸で消毒されたりすることで還元性が損なわれます。そのため湯使用によっては、折角の温泉効果が発揮されない事もあります。そういった意味で、最近では温泉の酸化還元電位（ORP）に注目が集まっています(図 9)。還元環境が体にいい事は、水素水の研究（Ohsawa et al., 2007）でかつて一世を風靡しました。温泉による還元作用は、メラニン生成の抑制効果が期待され美白の湯とも考えられています。そうそう、美肌の湯といえば炭酸水素塩泉やアルカリ性単純温泉は欠かせません。これらの泉質では、温泉と皮脂が化学反応して石鹸成分が形成され（大河内 他, 2007）、これらも美肌に一役買っていると考えられています。

入浴という行為は、基本的に人体と温泉水との化学反応ですから、温泉成分による効能を画一的に評価するのは危険だと考えます。つまり、禁忌症とはいかないまでも、各自の年齢や体調に応じて、オーダーメイドの泉質選択をしては如何でしょうか？体調と泉質のベストマッチングこそが効能をより効果的に活用できると期待されます。そういった意味において、肥後の温泉は選択肢に事欠かない絶好のフィールドとなる事でしょう。

5. まとめ

温泉は、自然現象の微妙なバランスで生み出された大地の恵みです。その恵は、地下資源としての側面を有しており、持続可能な活用には計画的な利用が不可欠となります。高齢化社会が進行する日本にとって温泉資源は、貴重な健康増進の宝だと言えます。肥後の名湯を賢く利用して守っていく事が今後ますます重要になってくるでしょう。

引用文献

- 大沢信二・西村進（編）（2016）：温泉の地球科学—温泉を通して読み解く地球の営み，ナカニシヤ出版，xii, 189p.
- 大河内正一 他（2012）：皮膚のヌルヌル感に及ぼす温泉水の特性，温泉科学，62, 237-250.
- 浅森浩一 他（2002）：日本列島における火山周辺の酸性地下水分布，サイクル機構技法，15, 103-111.
- 小林哲夫・矢野徹（2007）：南九州の地質・地質構造と温泉，温泉科学，57, 11-29.
- 横瀬久芳 他（1999）：別府—島原地溝帯西部域の過去5百万年間に於ける間欠的火山活動，岩鉱，94, 338-348.
- 横瀬久芳 他（1998）：九州南西部矢筈岳火山岩類の K-Ar 年代，岩鉱，93, 151-161.
- Ohsawa et al. (2007): Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals, Nature medicine, 13, 688-694.

推薦図書

- 横瀬久芳（2016）：面積あたり GDP 世界一位のニッポン — 地震と火山が作る日本列島

の実力, 講談社+α新書, 238p.

温泉検定実行委員会(編) (2019) : 日本温泉名人認定試験—温泉検定テキスト, 日本温泉協会, 190p.

Gunter Faure (1991) : Principles and applications of inorganic geochemistry : a comprehensive textbook for geology students, Macmillan, 626p.