



原 著

山形県の地質環境と温泉

田 宮 良 一¹⁾

(平成 27 年 4 月 13 日受付, 平成 27 年 5 月 29 日受理)

Geological Environment and the Hot Springs in Yamagata Prefecture

Ryoichi TAMIIYA¹⁾

Abstract

Yamagata Prefecture, occupies a Back-arc side of Northeast Honsyu arc which became an island arc disturbance. Therefore, you are blessed with generating conditions of hot springs, which is closely related to the hydrothermal circulation and magma activity.

The scale and nature of hot springs is restricted to areas of geological environment. Features of geological environment of Yamagata Prefecture, in the transgression era of Middle Miocene, mudstone is thick deposited on the Dewa Mountains, the Ou Mountains like that ejecta of submarine volcano are distributed.

In this paper, by considering the causal relationship between geological environment and the hot springs of cabin. for chloride fountain one of the main hot springs, magma of origin from ① magma of Sekiryou Volcanic chain, ② magma of Moriyosi Volcanic chain, ③ fossil salt water, ④ to four of current seawater.

Key words : Hot springs, volcanic chain, magmatic emanation, mudstone, fossil salt water, submarine eruption, green tuff

要 旨

東北本州弧の背弧側一帯は、新第三紀に始まった島弧変動の活動地域になった結果、天水の涵養と熱水循環、マグマ活動が活発となり、温泉が生成されやすい環境となった。山形県は全域が背弧側を占めており、温泉地は地域に偏在せず所在しているのが特徴である。

県土は、日本海の拡大によって中期中新世には一円が海に覆われ、出羽山地側では泥岩が堆積、奥羽山脈側では海底噴火活動が激化した。後期中新世以降は海退に向かい、堆積盆地は粗粒の碎屑岩や火砕流で埋没された。鮮新世後期から第四紀完新世にかけての火山活動を経て、県土の地質環境が完成した。

本稿では、地質環境と温泉生成の因果関係を検討してみた。主力温泉である塩化物泉については、塩化物イオンの起源から、マグマ発散物に求められる塩化物泉のうち、脊梁火山列由来の

¹⁾元山形県庁 〒990-2402 山形市小立三丁目 2-14. ¹⁾Orijinal Yamagata Prefectural Government, 2-14 Odachi-3tyoume Yamagata-shi, Japan.

硫化水素を伴うのをタイプ 1, 森吉・鳥海火山列の遊離二酸化炭素を含むのをタイプ 2 とした。また、塩素イオンが化石海水に由来するのをタイプ 3, 臨海型をタイプ 4 にそれぞれ分類した。

キーワード：温泉, 火山列, マグマ発散物, 泥岩, 化石海水, 海底噴火, グリーンタフ

1. はじめに

温泉の生成・湧出は地質現象の一種であるから、その有無は土地の地質環境に制約される。したがって、とくに高温泉（本稿では泉温 42℃ 以上の温泉を高温泉とする）の分布には偏りがある。東北本州弧でいえば、背弧側の地域は、新第三紀に始まった島弧変動の主舞台となり多数の火山と温泉地を擁している。なかでも、東北本州弧の主軸をなす奥羽山脈の山麓帯は、本邦有数の高温泉賦存地帯となっている。一方、前弧側の地域は、新第三紀以降、変動が少なかった北上山地と阿武隈山地を控え、火山は存在せず、温泉を自然湧出泉に頼っていた時代には、図 1 に示したように現在のいわき湯本温泉が唯一の高温泉であった。

掘削技術の発達により温泉は露頭がなくとも地下に賦存さえしていれば人為的に採取できるようになった。1980 年代後半からの温泉ブーム以来、温泉空白地で温泉開発が相次いだ。例をあげれば、2007 年～2008 年、特別名勝の松島海岸に泉温 52.2～54.8℃（掘削時ではなく宮城県資料による直近の温度）の松島温泉が誕生した。とはいえ、高温泉の開発に成功した例は、碎屑物が厚く堆積している平地部以外、背弧側が圧倒的に多いといえる。

山形県は、東北本州弧中央部の背弧側に位置し、泉質の多様性と高温泉が特定地域に偏らず分布しているのが特徴である。また、福島県と同様に温泉集落を形成した温泉地が多いことも特徴のひとつに挙げられる。反面、都市化による温泉源涵養環境や温泉地環境が損なわれやすいことが隘路となっている。さらに、細分化された堆積盆地を反映し蔵王以外は温泉源の規模が小さく、鳴子温泉や飯坂温泉のような大型温泉地にはなりにくい宿命を負っている。

今回、機会を得て山形県の地質環境と温泉との因果関係について構想段階も含めて検討してみたのでご批判を仰ぎたい。本来なら、同位体的手法等も含めて考察しなければならないところだが、旧来の地質学的知見から本稿をまとめた。温泉の温度区分は、環境省 (2014) によれば、泉温 42℃ 以上を高温泉、42℃ 未満・35℃ 以上を温泉、35℃ 未満・25℃ 以上を低温泉、25℃ 未満は冷鉱泉としているが、本稿では温泉と低温泉を併せて低温泉とした。また、個々の温泉の泉質および泉温は、山形県環境保健部自然保護課 (1979, 1988) および温泉分析表等より引用した。そのため、最新の資料とは数値が異なる場合があることを断っておきたい。



図 1 東北本州弧の地形区分図・温泉分布図
温泉は、内務省衛生局 (1886) による高温泉 (泉温 42℃ 以上、蔵王温泉のみ 42℃ 以下かだったが付け加えた)。すべて、自然湧出していたと推察される。●：酸性泉、○：その他の温泉を示す。縦線：先第三系分布地、白地：新第三系の分布地、砂模様：平野・盆地を示す。

2. 地形体制

山形県が位置する東北本州弧は、太平洋プレートの沈み込みによる東西圧縮場の影響を受け、図1に示したように太平洋に面した北上・阿武隈山地、北上・阿武隈河谷帯、奥羽脊梁山脈（以下、奥羽山脈と記す）、内陸盆地列、出羽山地、日本海に接する海岸平野と南北方向に伸長した帯状構造を示している。東北本州弧中央付近の日本海側に位置する山形県は帯状構造がより鮮明である。

奥羽山脈は、東北本州弧の脊梁となり延長500kmに達する長大山脈であるが、主軸は馬の背状をなし形態はきわめて単調である。しかし、単調であるが故に山麓帯には深部まで亀裂が通じ、裂隙型の温泉賦存帯が形成されやすい構造を有している。

一方、出羽山地は、地層が幾重にも発達した褶曲により折りたたまれ台形となっている。また、南北方向の断層谷と山地を胴切りする横谷が発達している。出羽山地は全般的に丘陵性地形を示すが、南部に位置する朝日山地及び飯豊山地は峻険な山岳地形を呈している。

東北本州弧に形成された火山は、東から火山フロントとなる青麻一恐火山列、脊梁火山列、森吉火山列および鳥海火山列の4列に区別される（中川ほか、1989）。図1には活火山のみ記したが、山形県の第四紀火山を図2に示した。

火山出現率をもっとも高いのは奥羽山脈の主軸に沿う脊梁火山列である。山形県では、向町・赤倉火山、船形火山、面白火山から雁戸火山にいたる北蔵王火山群、蔵王火山、上山葉山火山および吾妻火山がその一員となっている。出羽山地軸部の東側に位置する肘折火山および白鷹火山は森吉火山列、出羽山地西端に高まった鳥海火山及び軸部を占める月山火山は鳥海火山列にそれぞれ属している。これらの多くは成層火山を構成しているが、向町・赤倉火山および肘折火山はカルデラ（図2にはカルデラとして表記）をなし軽石流を噴出した。蔵王火山、吾妻火山、鳥海火山および肘折火山は活火山である。

奥羽山脈と出羽山地に挟まれた内陸低地帯は、東南東―西北西方向に走る隆起帯（以下、東西隆起帯と記す）によって、北から新庄、尾花沢、山形、上山、長井および米沢盆地に仕切られている。

3. 山形県の自然史と地質環境の成立

山形県土は、新第三紀以降、多様な地質イベントを展開してきた。温泉の生成は現在進行形の地質イベントとして位置付けられるが、過去のできごとにも支配される。そこで温泉要素への関連を加味した山形県の自然史を表1にまとめ、地質時代毎に簡単に特徴を記してみる。また、山形県の地質概念図と泉質毎の温泉分布を図2に示した。表示した温泉地は『やまがたの温泉、2014』（山形県環境エネルギー部みどり自然課、2015）によったが、利用されていない温泉も2・3追加した。泉質は必ずしも同資料によらず成因を優先させた。たとえば、硫黄泉とされている温海温泉、赤湯温泉、小野川温泉は成因を重視し塩化物泉として取り扱った。なお、地質は地層名を使用せずに記した。

3.1 先新第三紀

山形県の新第三系の基盤を構成する岩石は、変成岩類と花崗岩質火成岩（花崗閃緑岩が多いが本稿では花崗岩類と記す）を主とする。花崗岩類は朝日山地及び飯豊山地中核を占め分布範囲は広いが、変成岩は断片的分布に過ぎずその形成史は詳らかでない。

花崗岩類は、60~50Maの年代測定値が多いので白亜紀末期から古第三紀前期にかけて貫入したことを示唆している。花崗岩類をもたらしたマグマは、温泉の熱源にはなり得ないが、岩体に発達

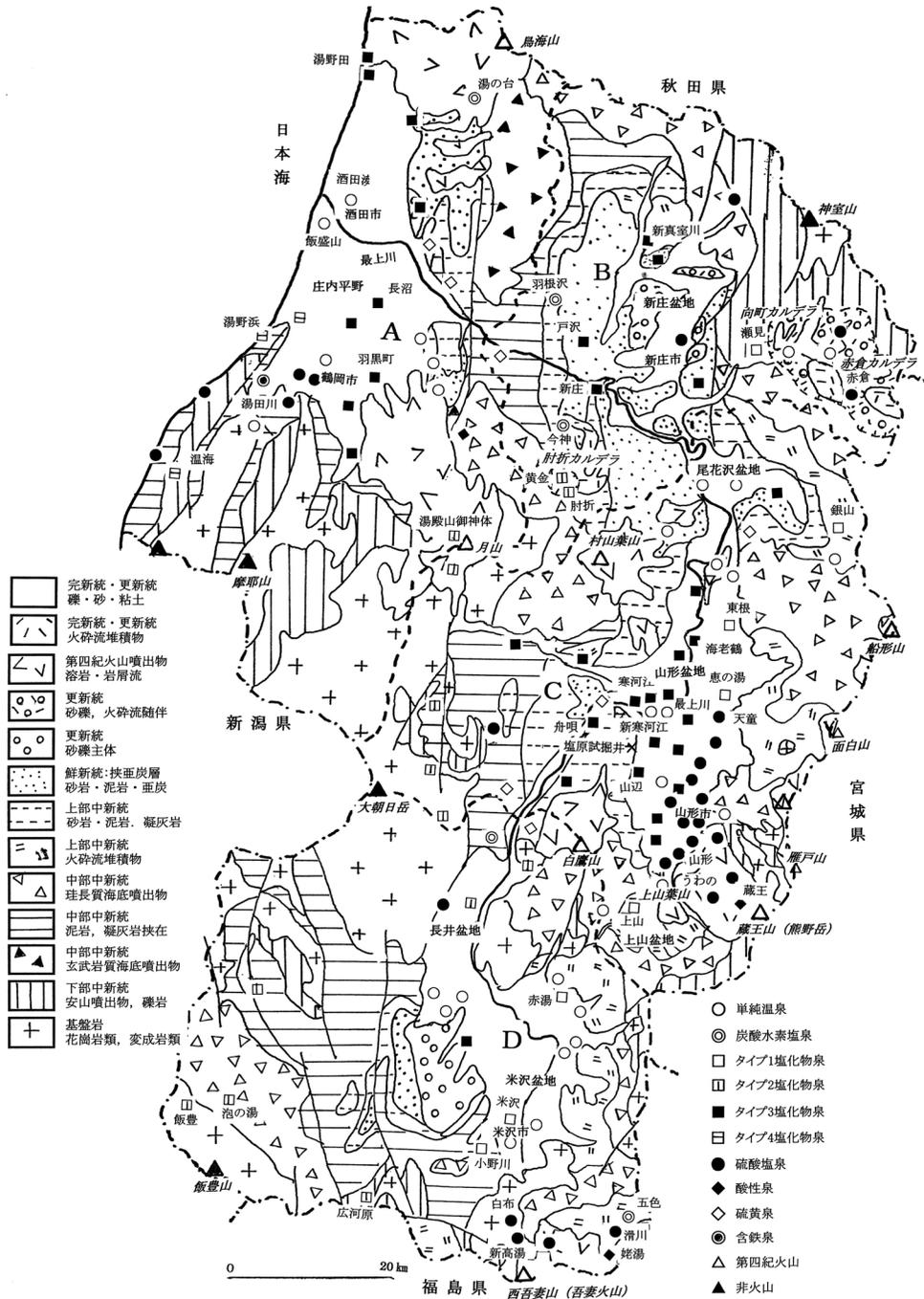


図 2 山形県地質概念図および泉質毎温泉分布図
 葉山火山は、鮮新世末期に形成され第四紀火山ではないが、本図では火山として扱った。
 温泉地名は、本文に記されている温泉地に限って表示した。
 記号の説明 A: 庄内地域, B: 最上地域, C: 村山地域, D: 置賜地域

表 1 山形県自然史一覽

地質時代		年代	イベント等	温泉関連事項
第四紀	完新世	百万年	生活面(沖積面)の仕上げ時代 活火山噴火(鳥海・肘折・蔵王・吾妻) 活断層形成	フミン酸等有機物 H ₂ S、SO ₂ 、CO ₂ 、Cl 温泉湧出経路形成
	更新世	0.01	山脈の隆起と平地の沈降時代 最上川の横谷完成 繰り返す水河期・間水期 平地は碎屑物で埋積 火山形成: 景観・硫黄鉱床 向町・赤倉カルデラ形成	温泉湧出経路形成 低温泉賦存層 熱源と成分供給 低温泉賦存層
新第三紀	鮮新世	2.6	最上・左沢・置賜垂炭田 網状河川の発達 海は庄内平野に退く 村山葉山火山岩類の形成 酸性火山活動 珪砂鉱床の生成	低温泉賦存層 海水→NaCl
		5.3	海退時代: 海域は西に後退 浅海に砂岩・火砕岩堆積 尾花沢付近の海は太平洋側から 奥羽山脈側: カルデラ多発 膨大な火砕流噴出 山寺、高島などに雲形地形 石材供給 カイギユウ、クジラ生息	海水→NaCl 石油天然ガス貯留 化石海水貯留層 NaSO ₄ 含有
	中新世	11.6	主に奥羽山脈側・東西隆起帯 海底火山活動 黒鉱鉱床など金属鉱床胚胎 主に出羽山地以西: 深海化 厚い泥岩堆積 火山活動の影響もあり 玄武岩、田川海岸の景観 ペントナイト・白土鉱床 石油母岩、地すべりの素因 玄武岩マグマの活動 島々には熱帯・亜熱帯植物繁茂	NaSO ₄ ・CaSO ₄ NaCl・NaHCO ₃ CaHCO ₃ 、H ₂ S含有 硫黄冷鉱泉源 石油母岩 HBO ₂ 供給源
		16	日本列島創生時代 日本海側、断層形成と火山活動 西田川炭田形成 田川海岸の岩石海岸 奥羽山脈・出羽山地側 陸上の火山活動 変質した玄武岩・安山岩 酸性火山活動、溶結凝灰岩 山形県新第三系最下部岩石	
先第三紀		23	酸性火山活動、田川酸性岩岸類 花崗岩質深成岩の形成 日本国マイロナイト 中生界・変成岩	花崗岩類の亀裂 温泉賦存帯

注 同一地質の項目では時代の新旧関係は存在しない。

した亀裂を通じ深部から浅所に熱水が上昇し温度勾配を高める役割をはたしている。山形盆地では、花崗岩類が浅い区域の温度勾配が高い傾向にある。また、岩体規模が大きく岩質が均質なためにシャープで直線的な断裂が発達しやすいと考えられる。

3.2 前期中新世

山形県の新第三系最下部の岩石は、23 Ma 頃、陸上の噴火活動に起因する溶結凝灰岩で、小国盆地周辺や庄内海岸の鶴岡市鼠ヶ関付近に露出している。その後、前期中新世末葉から奥羽山脈や出羽山地周辺で陸上噴火活動が激化し安山岩溶岩や火砕岩を噴出した。

庄内地域南部の日本海沿岸域には断裂から発展した堆積盆地が形成され、安山岩質噴火活動による火砕流起源の礫岩が堆積した。噴火活動の静穏期には砂岩や泥岩が堆積し良質な石炭層を介している（西田川炭田）。

3.3 中期中新世

山形県の地質環境は、中期中新世における地質イベントの影響をもっとも色濃く受けている。県土一円は中期中新世にあたたかい海に覆われたが、出羽山地から庄内平野にかけての地域は、深海に沈み玄武岩の活動につづき泥岩が厚く堆積した。一方、奥羽山脈一帯や出羽山地でも東西隆起帯と交差する地域は活発な海底噴火活動の場となり火山噴出物が生成された。泥岩には堆積時の海水が化石海水として残留し、 Cl^- や HCO_3^- 、硫黄種などの供給源となった。海底火山噴出物は、その色相からグリーンタフと称され、 NaSO_4 （芒硝）や CaSO_4 （石膏）に富み、海底で活発だった熱水噴出は石膏鉱床を伴う黒鉱鉱床を胚胎させた。

3.4 後期中新世～鮮新世

後期中新世になると海は出羽山地側に退き、内海や氾濫原に堆積した火砕岩や粗粒の碎屑岩は空隙率が高く温泉賦存層を構成している。この層準の地層はやや深い海に堆積した山形盆地西部では高濃度の化石海水が残留しているが、山形盆地南西縁では浅海または陸上の堆積相となり低温泉に属する単純温泉の賦存層となっている。

奥羽山脈側の各所に巨大カルデラが形成され、噴出した火砕岩の分布地には山形市山寺立石寺境内で代表される雲形景観を示す露岩が発達している。また、各地で石材として利用されてきた。ただし、多孔質だが塊状をなし亀裂が発達しにくい岩質から温泉はほとんど賦存していない。

鮮新世には、米沢盆地西部に置賜亜炭田、山形盆地西部に左沢亜炭田、山形盆地北西部から尾花沢盆地西部を経て新庄盆地南西部一円に最上亜炭田と、海が退いたあとを追って亜炭田が形成された。亜炭田に堆積した礫岩、砂岩、凝灰岩等は固結度が低く空隙に富み、低温泉の賦存層となった。また、末期からは、葉山火山岩類で代表される火山活動が活発化した。

3.5 第四紀

第四紀更新世には、奥羽山脈と出羽山地、そして庄内平野と内陸盆地群が成立した。東西隆起帯で限られた各内陸盆地は構造を異にしている。山形および米沢盆地主部は沈降盆地の性格が強いが、新庄盆地、尾花沢盆地東部、山形盆地西部の寒河江川下流域および上山盆地は丘陵化と段丘化がいちじるしく、浅所に上部中新統や鮮新統の地層が分布し、盆地内に砂礫層や凝灰岩からなる中部更新統の低い丘陵が横たわっている。

山形盆地の盆地底は東部から活断層が発達する西縁に向かって深くなっている。基盤の地質は、東部は中部中新統の海底火山噴出物からなるが、西部は上部中新統及び鮮新統に属する固結度の低

い碎屑岩や火砕岩からなっている。したがって、図2に示したように、盆地東部には硫酸塩泉が、西部には塩化物泉が棲分け的に賦存している。

庄内平野は沈降量が大きく、中部更新統に対比される庄内層群の砂礫層が500m以上の厚さで堆積している。地下構造は、酒田市の最上川河口付近が低重力地帯にあたり、庄内層群の厚さは1000mにもたつする。図3によると、重力異常分布と温度勾配は相関関係にあり、高重力域に掘削された温泉は泉温が高い傾向にある。

更新世は氷河期と間氷期が交互に訪れた時代である。丘陵の山麓帯にみられる赤色風化帯は、多湿温暖だった気候下、碎屑物・岩石から溶脱した鉄やマンガン、アルミニウムが酸化して赤褐色となった化石土壌である。長期間停滞した天水は含鉄泉になりやすい。

火山は、肘折火山以外およそ100万年～60万年前から活動を始めた。蔵王火山および吾妻火山は、活動域を移動させながら現在も噴火現象が継続し活火山とされ、酸性泉が湧出している。肘折火山は1万年前に活動した小型のカルデラを形成した活火山で、高地温帯をなしている。

マグマの一部は火山体形成後も残存しているほか、地表に噴出物を出現させない勢力の軽微なマグマ溜りが潜在している可能性があり、塩化物泉や炭酸水素塩泉の熱源と成分源となっていると推定される。とくに、珪長質マグマはマグマ溜りではげしく発砲し軽石流を放出するが一部は地下に残存しやすい。そのため、肘折カルデラには深度2200m付近に270℃の高温岩体が存在している。

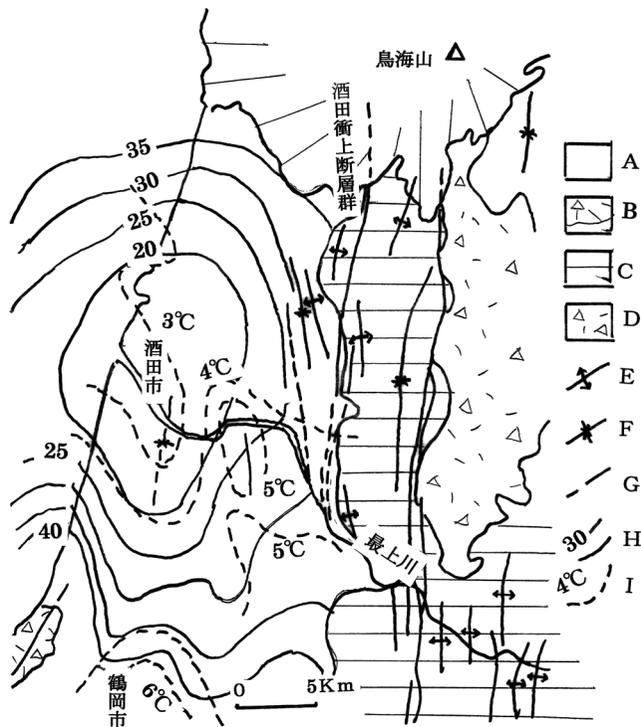


図3 庄内平野地下構造図・地温勾配図（深度100m毎の地下増温）
 田宮（1983）を簡略化（大沢ほか：1979、に筆者が地温勾配を加筆）
 記号の説明 A：第四系，B：鳥海火山噴出物，C：中部中新統泥岩と上位層，
 D：同玄武岩類，E：背斜軸，F：向斜軸，G：断層，H：等重力線（5ミリガル
 間隔），I：等地温勾配線

4. 温泉の生成と地質環境

この項では、温泉と地質環境との因果関係を泉質毎に考察する。浴用に利用されている山形県の温泉地は、2014 年度で 138 個所となっている。泉質別内訳は、単純温泉 34、炭酸水素塩泉 6、塩化物泉 51、硫酸塩泉 26、酸性泉 3、硫黄泉 16、含鉄泉 2 となっている（図 2 の数とは一致しない）。

鳴子温泉などのように温泉賦存帯の規模が大きい場合は複数の泉質の源泉を有するが、山形県の温泉賦存帯は地質的に単調なので多数の泉質を有する温泉地は存在しない。図 4 に塩化物泉を主とし単純温泉、硫酸塩泉および酸性泉の模式的な湧出機構を示した。泉質の定義の説明は省略する。

4.1 単純温泉

単純温泉は、当然ながら天水の循環時間に比べ岩石との反応時間が短い環境下で生成される。つまり、単純温泉は、豊富な間隙水の存在が前提だが、間隙水の滞留時間が熱の供給、被賦存層との化学反応とバランスが保たれている地域に賦存している。

賦存層は、上部中新統の凝灰岩や鮮新統の挟亜炭層であるが、鮮新世の堆積盆地から推移した新庄盆地など丘陵化が明瞭な盆地内に豊富に賦存している。とくに、山形盆地西部を占める最上川河

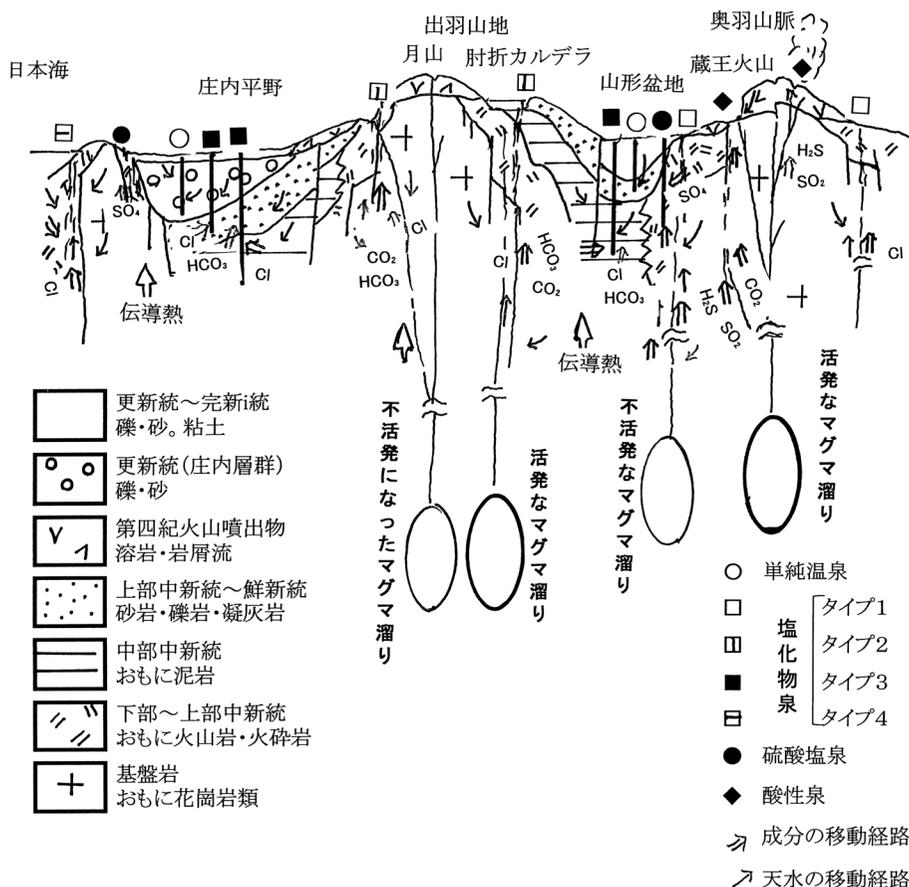


図 4 山形県の温泉模式生成図

岸の沖積地は地温勾配が高く、単純温泉ながら高温の寒河江温泉（1号泉，52.0℃），新寒河江温泉（50.7℃）や成分が希薄な塩化物泉（海老鶴温泉，蒸発残留物 961 mg/kg，49.4℃）が所在している。また、米沢盆地北部の盆地底に発達している花崗岩類の風化帯，上山盆地に分布している上部中新統の凝灰岩にも低温の単純温泉が賦存している。

向町・赤倉カルデラを埋める軽石流の二次堆積物にはきわめて豊富な低温泉が賦存している。庄内平野は、地下 500 m 以上の深度まで中部更新統に属する砂礫層が発達し、低温の単純温泉が大量に賦存している。

4.2 単純二酸化炭素泉

温泉法による単純二酸化炭素泉は肘折カルデラ内に湧出する炭酸泉（遊離 CO₂ 含有量：417.6 mg/kg，7.5℃，黄金温泉で飲泉に利用）のみだが，出羽山地中には遊離 CO₂ を多量に含有する炭酸水素塩泉や塩化物泉が多数所在している。念仏温泉として著名な今神温泉（泉質：炭酸水素塩泉，遊離 CO₂ 含有量：1188 mg，36.5℃，以下，同様に基本泉質，kg 当たりの遊離 CO₂ 含有量，泉温の順で記す），朝日温泉（通称朝日鉱泉，塩化物泉，1956 mg，19.8℃），古寺温泉（通称古寺鉱泉，塩化物泉，1842 mg，8.8℃），湯殿山神社御神体付近の丹生湧泉（温泉法適用外，1320 mg，15.3℃），広河原温泉（塩化物泉，1144 mg，35.5℃，山形県唯一の間欠泉），泡の湯温泉（塩化物泉，1142 mg，41.0℃）が該当する。CO₂ の起源は，火山ガスと可燃性天然ガス同様有機物由来が考えられるが，有機物を含有しない岩相から湧出しているためすべて火山性起源と推定した。

4.3 炭酸水素塩泉

山形県の炭酸水素塩泉はナトリウム—炭酸水素塩泉が主体である。吾妻火山に五色温泉（4号泉，48.9℃），出羽山地中に羽根沢温泉（47.3℃），湯の台温泉（29.3℃）および今神温泉が所在している。

HCO₃⁻ の起源は，可燃性天然ガスをともなう羽根沢温泉および湯の台温泉は化石海水由来と考えられるが，五色温泉は脊梁火山列のマグマ発散物，第四紀の火口湖のすぐ傍らに湧出している今神温泉は，タイプ 2 の塩化物泉同様，森吉・鳥海火山列のマグマ発散物と推定した。

4.4 ナトリウム—塩化物泉（塩化物泉と略称）

塩化物泉の陰イオンの主成分である Cl⁻ の起源は，①現世の海水，②地質時代に地層の間に閉じ込められた化石海水，③マグマ発散物が存在する。また，④花崗岩類など火成岩と天水の反応によっても生成されると考えられる。筆者らは，東北地方に分布する塩化物泉を Cl⁻ の起源から 4 タイプに区別した（Tamiya et al., 1997；田宮，1997）。奥羽山脈西麓に分布するマグマ起源の塩化物泉をタイプ 1，出羽山地山中に所在するマグマ起源の塩化物泉をタイプ 2，化石海水起源の塩化物泉をタイプ 3，日本海に沿い現世の海水起源の温泉をタイプ 4 とした。

Cl⁻ の起源のひとつをマグマ発散物と推定した根拠は，①化石海水の関与が少ない岩石から湧出している温泉が存在すること，②温泉賦存帯の岩質にかなり差異があるにもかかわらず同一地質環境下では成分的に共通していること，③自然湧出していた裂隙泉であることを挙げたい。新潟県の松之山温泉は化石海水型でありながら自然湧出していたが，特殊な地質条件下に賦存しており，本来，自然湧出はしにくいと考えられる。また，天水と火成岩の成分が反応しても Cl⁻ は生成されても大量に湧出するとは考えにくい。なお，Cl⁻ と天水が反応すると塩酸性になるはずだが，中性なのは火成岩中の斜長石，輝石など造岩鉱物中の Na あるいは Ca と反応して中和されたと考えたい。

4.4.1 タイプ 1

おもに奥羽山脈の両翼に沿って湧出している硫化水素をともなう塩化物泉をタイプ 1 とした。山

形県では、北から瀬見温泉 (5 号泉, 68.0℃), 銀山温泉 (3 号泉, 64.0℃), さくらんぼ東根温泉 (15 号泉, 70.0℃, 図 2 には東根温泉と表記), 上山温泉 (2 号泉, 70.2℃), 赤湯温泉 (森の山源泉, 64.3℃) および小野川温泉 (3 号泉, 74.0℃) が該当する。奥羽山脈東翼に分布する宮城県の秋保温泉, 鎌先温泉も同種と考えた。

成因は、図 4 のとおり深部に浸透した天水と脊梁火山列を形成した高温を呈するマグマ発散物の Cl ガスと H₂S が出会って塩化物泉を生成, 有力亀裂を通じて浮力により地上に湧出したと推察した。副成分の SO₄²⁻ は、海底火山噴出物の成分か、マグマ発散物に含まれる SO₂ に由来すると考えられる。賦存形態は、さくらんぼ東根温泉が層状泉であるほかは裂隙泉である。源泉は、さくらんぼ東根温泉を除き自然湧出泉であったが現在はすべて掘削泉に移行している。

タイプ 1 の温泉は、山形県では温泉地の規模が大きく長い歴史を有しその発祥は伝説的である。近代になって開湯した温泉地は、1910 年 (明治 43 年) のさくらんぼ東根温泉, 1921 年 (大正 11 年) ~1954 年 (昭和 29 年) に誕生した上山温泉新湯地区とその南方に位置する河崎温泉, 高松温泉および葉山温泉 (現在はすべて上山温泉に包含されている) がある。近年開発された天童市のラ・フォーレ恵の湯温泉 (96℃ と山形県温泉の最高気温を記録, 図 2 には恵の湯と表記) もタイプ 1 の塩化物泉に属する。米沢市の平安湯米沢温泉は含有成分を吟味せず, 図 2 ではタイプ 1 の塩化物泉に分類した。

4.4.2 タイプ 2

このタイプの温泉は、出羽山地に所在している。肘折カルデラ内には、肘折温泉 (2 号泉, 87.5℃), 黄金温泉 (3 号泉, 68.0℃) および石抱温泉 (泉質は炭酸水素塩泉, 38.3℃, 自然湧出泉) が肘折温泉群として湧出している。また、湯殿山神社の御神体 (53℃, 自然湧出泉), 泡の湯温泉 (41.0℃), 飯豊温泉 (55.0℃, 自然湧出泉) および広河原温泉もタイプ 2 に該当する。福島県西会津に所在する熱塩温泉, 大塩裏磐梯温泉, 大塩温泉 (低温泉) など塩のつく温泉, また、西山温泉も同類と考えられる。Cl⁻ は脊梁火山列より深部にマグマ溜りが形成される森吉火山列および鳥海火山列のマグマ発散物に由来すると推定した (図 4)。

H₂S をほとんど含まず, HCO₃⁻, 遊離 CO₂ に富み, 温泉沈殿物 (石灰華) を発生させる特徴がある。H₂S に乏しいのは, タイプ 1 の場合より深所でガス成分がマグマから発散されるから, H₂S や SO₂ は上昇途中で岩石と反応して消滅するが, 反応性に乏しい CO₂ は残存しやすいと推察される (硫黄分の揮発そのものが少ないことも考えられるが)。なお, 東北地方では稼働された硫黄鉱床や酸性泉はすべて脊梁火山列の活火山にともなっている (例外は鳥海火山列の岩木火山で酸性泉が存在する)。

石灰華の発生は, 温泉に CO₂ を多量に含むと性状は弱酸性となり岩石と反応しやすいが, 地表近くで減圧すると CO₂ は大気中に発散するので溶解能力は減少し CaCO₃ が沈積すると考えたい。

成分組成は次に記すタイプ 3 の塩化物泉と共通点が多い。それは, 花崗岩類や海底火山噴出物を循環して生成されるタイプ 1 の塩化物泉に対し, タイプ 2 の場合は, 泥岩など厚い堆積層を循環することと遊離 CO₂ を多量に含有しているのが原因と考えられる。

4.4.3 タイプ 3

このタイプは化石海水を主成分とする温泉で, いわゆる深層熱水型温泉に属する。陰イオンとしては, Cl⁻ に加え, HCO₃⁻ を多く随伴し泉質はナトリウム一塩化物・炭酸水素塩泉となる場合が多い。

タイプ 3 の塩化物泉の高温泉は, 我が国にロータリー式掘削機が導入された 1910 年代 (明治末期から大正初頭) 以降に開発された。山形県でも石油採取目的の掘削が行われた際, 温泉が湧出したのに端を発している。最上油田では新真室川温泉 (33.5℃), 羽根沢温泉 (泉質は炭酸水素塩泉), 戸沢温泉 (66.5℃), 新庄温泉 (39.1℃, 現在休止), 庄内油田では, 湯の台温泉 (泉質は炭酸水素

塩泉，温泉法適用外掘削井が多数所在），長沼温泉（1948年，1500m掘削時は泉温66℃，1996年に泉温26.3℃に低下，1999年藤島町（現鶴岡市）で再掘削，泉温70.4℃）が該当する。

鳥海火山の山麓には，化石海水由来の油田塩水が湧出していた。庄内北部は温泉不在地域であったため，湯ノ田温泉（24.0℃），湯の台温泉（24.5℃，掘削泉とは別）として古くから浴用に利用されてきた（湯ノ田温泉は1828年開湯）。

1955年に開湯した寒河江温泉は，石油開発目的外では初の深層熱水型の高温泉となった。下って，1980年代後半から，自治体等が競って深度1000m～1500mの大深度温泉掘削に着手した。その結果，図2で示したように，庄内平野をはじめ内陸部の泥岩分布地域に多数のタイプ2の塩化物泉が誕生した。庄内地域の温泉は，低重力域に掘削された酒田湊温泉と飯森山温泉が単純温泉に属するのを除き，溶存物質総量が20000～30000mg/kgときわめて高濃度なのが特徴である。泉温は，酒田湊温泉は39.0℃と低温泉に属するが，高重力域の羽黒町温泉の74.5℃を始め60℃前後と高温の泉温を得ている。

内陸部では，泉温が50℃前後と庄内平野の温泉より低温となっている。第四系が厚い山辺温泉（49.1℃，蒸発残留物9213mg/kg），天童最上川温泉（50℃，蒸発残留物8912mg/kg，図2には最上川と表記）等の蒸発残留物は10000mg/kg以下が多いが，堆積盆地の中央付近に掘削された舟唄温泉は22000mg/kgと多量で泉温も60.6℃と高温を示している。

熱源は，地殻からの熱エネルギー放出によるいわゆる温度勾配に求められると推定される。図3に示したように，沈降量の大きい庄内平野でも通常の温度勾配より（深さ100m当たり3℃上昇）よりかなり高いのは，背弧側はマグマ活動が活発なことで，花崗岩類など基盤が浮き上がっているため亀裂を通じ熱水上昇が促進されるのが要因と考えられる。

特筆すべきことは，山形盆地西部に分布している上部中新統の火山礫凝灰岩の空隙に高濃度の塩化物泉（冷鉱泉～低温泉）が存在していることである。盆地西縁に点在する小塩，平塩，塩原，出塩など塩のつく集落にはすべて塩泉を有し，一部では第二次世界大戦中，製塩も行われたという。山形盆地西縁，中山町塩原地区に東北農政局が1985年に実施した調査井（深さ800m）からは，泉温39.0℃，蒸発残留物20700mg/kgにおよぶナトリウム―塩化物強塩泉を採取した（図2に塩原試掘井として表示）。賦存地層は，上部中新統のデイサイトおよび火砕岩である。

4.4.4 タイプ4

日本海に沿う湯野浜温泉と温海温泉をタイプ4とした。泉温は湯野浜温泉（宝湯1号，60.2℃），温海温泉（1号泉，70.8℃）と高温を有する。Cl⁻の起源は，熱海温泉などと同様，現世の海水かも知れないが，成分的にはH₂Sを含有しタイプ1の温泉と共通していることから，熱源と共にマグマ発散物に由来することも考えられる。

日本海沿岸の近隣には，新潟県に瀬波温泉（3号泉，96.0℃）（新潟県，2010），秋田県男鹿半島に男鹿温泉（男鹿ホテル源泉，51.4℃）（古橋ほか，2008）の高温泉が存在し，共に石灰華を析出しているのが特徴である。

鳥海火山列のマグマは，日本海に沿って寒風火山，目潟火山及び鳥海火山を形成している。また，久六島西方に海底火山の存在が確認されている（吉田，1989）。したがって，第四紀火山分布帯の西縁に当たる火山リアエッジ付近の深層では，熱流量値が高く活発な熱水循環が行われていることが想定される。

4.5 硫酸塩泉

陰イオンはSO₄²⁻を主とするが，陽イオンはNa⁺およびCa²⁺を主成分としそれぞれ芒硝泉，石膏泉と呼ばれていた。山形県には，硫酸塩泉の高温泉は庄内地域の湯田川温泉（43.5℃），最上地域

の赤倉温泉(湯沢屋 2 号, 70.0℃), 置賜地域では吾妻火山中に滑川温泉(52.0℃), 大平温泉(63.0℃), 白布温泉(60.5℃) および新高湯温泉(56.2℃) が所在していた。

村山地域では, 1911 年(明治 44 年)に灌漑用井戸を掘削した際, 温泉が湧出, 翌年開湯した天童温泉(現泉温, 協組 8 号, 69.0℃)が硫酸塩泉の第 1 号となった。さらに 1951 年, 山形温泉(成沢温泉, 48.7℃)が開発されて以来, 図 2 に示したように山形盆地東縁を中心に硫酸塩泉が急増した。1950 年代以前は, 山形市域に所在する温泉は蔵王温泉のみだったが, 現在は 19 を数え山形県の市町村ではもっとも多くの温泉地を所有している。このうち 12 が硫酸塩泉となっている。最高泉温は花崗岩類から採取している山形うわの温泉(図 2 にはうわのと表記)の 64.7℃である。

硫酸塩泉は, 硫酸塩鉱物を含有するグリーンタフを天水が循環して生成されると推定される。ただし, 白布温泉のように花崗岩から湧出している硫酸塩泉や上山温泉の SO_4^{2-} は, マグマ発散物の SO_2 に由来しているのかもしれない。盆地背後の山地, 盆地底にグリーンタフが広く発達している山形市東部は広範囲にわたって硫酸塩泉の賦存帯を形成している。

4.6 酸性泉

東北本州弧の高温の酸性泉は, 森吉火山列に属する岩木火山に伴う嶽温泉以外, すべて脊梁火山列の活火山にともなっている。脊梁火山列では, 恐火山と十和田火山以外, 全活火山に酸性泉が湧出している(図 1)。

蔵王温泉は, 蔵王火山中腹に約 5 万年前(阿子島・山野井, 1985)に形成された爆裂火口底を流下する 4 列の溪流の河床から強酸性の温泉が湧出している。生成機構は, 火口跡へ上昇した高温の SO_2 や H_2S に富む火山ガスが, 火山体表層を流下した溶存酸素に富む伏流水と遭遇して硫酸酸性泉が生成されたと考えたい。最高泉温は上の川源泉の 65.5℃と, 火山性温泉としては格別, 高温ではないが, 湧出量は 8000 l/分と多量なうえ, pH 1.5 と強酸性を示す。玉川温泉のように塩酸酸性でないのは, マグマ活動が衰えていることを反映していると推測される(将来は不明)。蔵王火山の活動の中心は火口湖お釜付近に移っており, 五色岳東側の丸山沢に噴気孔が存在し硫酸酸性泉(pH 2.6, 83℃)が湧出している。

吾妻火山には, 一切経山で噴気活動が観察されるが強酸性泉は存在せず, 福島県側に酸性泉として高湯温泉(pH 2.3 前後, 最高泉温 47.9℃), ぬる湯温泉(pH 2.9, 29.9℃), 山形県側に姥湯温泉(pH 2.4, 53℃)が湧出している。

吾妻火山は, 福島県側の山中に多数の温泉が湧出しているが, 山形県側にも, 炭酸水素塩泉の五色温泉, 硫酸塩泉の滑川温泉, 大平温泉, 白布温泉および新高湯温泉が湧出しており, 山形県でもっとも温泉が集積していた地域である。また, 往時, 大規模に採掘された硫黄やカオリン, また褐鉄鉱など火山作用で生成された鉱床が各種胚胎している。

4.7 硫黄泉

ここでいう硫黄泉は, 火山ガス起源の硫黄泉ではなく, 冷鉱泉としての単純硫黄泉を指す。山形県では, 単純硫黄泉は硫化水素タイプが多く, ほとんどが中期中新世に深海底に堆積した泥岩の亀裂から自然湧出し, pH 値が高くアルカリ性を示している。高温泉が所在していない泥岩地帯では, 皮膚病に特効があるとして浴用に供されてきたが, 現在も, 図 2 に示したように各地で利用されている。硫化水素は, 海水の硫酸イオンから嫌気性の環境下, バクテリア関与によって $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$ 還元で生成される。

おわりに

東北本州弧のなかの山形県の位置付けを強調し、温泉の生成・性状と密接な関わりのある県土の地質環境成立の概要をまとめた。

ひとつの化合物だけで温泉の溶存成分の特徴を表すのは困難（松葉谷，1991）だが，無謀を承知の上でも陰イオンの特徴だけで分類した泉質毎に地質環境との因果関係を探ってみた。

温泉の地球化学的特徴を明らかにするのに必要な成分分析表，ブロックダイアグラム，源泉の地質柱状図は省略したので，地質屋の我田引水の理論に終始したきらいがある。機会があれば，テーマを絞って地質環境と温泉の因果関係を探ってみたい。

謝 辞

本稿を草するにあたり，発表の機会を与えてくださった北海道大学大学院教育研究院教授 大塚吉則氏，中央温泉研究所長 益子 保氏に心からお礼を申し上げる。三川町企画調整課長 黒田浩氏，天童最上川温泉ユピア館長補佐 水戸部正敏氏，医療法人社団斗南会ラ・フォーレ天童のぞみ事務長 古川秀樹氏，山辺温泉保養センター統括理事 渡辺昭一氏，宮城県健康福祉部薬務課薬事温泉班，山形県温泉協会専務理事 吉野妙子氏，荒生博子氏には資料の提供とご教示をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

引用文献

- 阿子島 功，山野井 徹（1985）：蔵王火山西麓の酢川泥流の発生年代。東北地理，37，159-165。
- 古橋恭子，石川 治，松葉谷治，白石建雄，石山大三（2008）：秋田県男鹿半島北岸の湯本断層沿いに産出する石灰華および同位体地球化学的研究。温泉科学，58，3-13。
- 比留川 貴，安藤直行，角 清愛（1977）：日本の主要地熱地域の熱水の化学組成。934頁，地質調査所。
- 堀越 叡（1978）：鉱床生成のメカニズム。現代鉱床学の基礎，32-43，東京大学出版会。
- 伊藤俊方，小松原岳志，佐藤 修（2004）：北部フォサマグナ地域における深層地下水の水質特性。応用地質，45，22-30。
- 神保 恵（1971）：山形県 20 万分の 1 地質図。山形県鉱業課。
- 環境省自然保護局（2014）：鉱泉分析法指針（平成 26 年改定）。163 頁。
- 松葉谷 治（1991）：熱水の地球科学。139 頁。裳華房。
- 内務省衛生局（1886）：日本鉱泉誌（上）。482 頁，竜溪書舎（復刻版）。
- 中川光弘，霜鳥 洋，吉田武義（1986）：青麻一恐火山列：東北日本弧火山フロント。岩鉱，80，471-478。
- 新潟県（2010）：瀬波温泉。70-84，新潟県地域新エネルギービジョン「小規模発電（バイナリー方式）導入の可能性調査」報告書。
- 佐々木 昭（1978）：安定同位体と鉱床。現代鉱床学の基礎，77-95，東京大学出版会。
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構（1989）：昭和 63 年度 全国地熱資源総合調査（第 3 次）広域熱水流動系調査 磐梯地域報告書。223 頁。
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構（1990）：平成元年度全国地熱資源総合調査（第 3 次）広域熱水流動系調査 磐梯地域報告書，要旨。290 頁。
- 玉生志郎（2007）：非火山性の温泉。地質ニュース，634，63-64。
- 玉生志郎（2008）：地下温度分布から見た高温地区を含む広域地域のタイプ分け—東北地方と中国・

- 四国地方の例一. 地質調査所研究報告, 59, 45-52.
- 田宮良一, 神保 恵 (1973): 20 万分の 1 山形県表層地質図. 経済企画庁.
- 田宮良一 (1983): 山形県における深層熱水型温泉の開発利用と賦存状況について. 地熱エネルギー, 24, 9-26.
- 田宮良一 (1989): 御所山 (船形山) 及び向町カルデラ周辺の温泉. 総合学術調査報告書御所山, 108-121, 山形県総合学術調査会.
- 田宮良一 (1997): 東北地方に分布するナトリウム-塩化物泉の成因的考察. 山形応用地質, 17, 1-8.
- 田宮良一, 久間木国男 (1983): 蔵王火山周辺の温泉. 総合学術調査報告書蔵王山, 139-150, 山形県総合学術調査会.
- Tamiya, R., Abiko, H. and Kumaki, K. (1997): The influence of geological structure on the formation of Na-Cl type hot springs in Tohoku district, Japan. Proceedings of The 33 rd Conference SITH Hakone, Kanagawa, Japan, 83-86.
- 東海林辰雄, 田宮良一, 久間木国男, 斎藤貞夫 (1979): 山形県温泉賦存図説明書 (20 万分の 1 賦存図). 49 頁, 山形県環境保健部自然保護課.
- 東北農政局計画部 (1986): 中山地区熱水開発調査報告書. 150 頁.
- 山形県 (1986): やまがたの温泉. 177 頁.
- 山形県温泉協会 (1973): 山形県温泉誌. 541 頁.
- 山形県温泉協会 (2004): 創立 80 年記念, 温泉管理の手引き. 154 頁.
- 山形県環境保健部自然保護課 (1989): 山形県温泉台帳 (源泉台帳) 要覧. 80 頁.
- 山形県環境保健部自然保護課 (1989): 山形県温泉泉質 (源泉毎) 台帳. 73 頁.
- 吉田武義 (1989): 火山. 日本の地質 2 東北地方, 182-194, 共立出版.
- 吉田武義, 中島健一, 長谷川 哲, 佐藤比呂志, 長橋良隆, 木村純一, 田中明子, Prima, Oki Dicky Ardiansyah, 大口健志 (2005): 後期鮮新世, 東北本州弧における火成活動史と地殻・マントル構造. 第四紀研究, 44, 195-216.