

## 温泉の地質構造規制

—温泉はどんなところに、どんな状態にあるか—

岡山大学名誉教授

杉山 隆二

Geologic Structure Control of Thermal Springs

—Geologic Location and Condition in Existence of Thermal Springs—

Ryuji SUGIYAMA

Professor Emeritus of Okayama University

先にお話された初田先生は、京都の三高の私の大先輩であります。地質学分野から2人、それも私の様な野人でへそ曲りの地質屋がお話するのは如何かと思ひ辞退致しました。しかし、鳥居会長から『どうしてもやれ!』と厳命がありました。野人でへそ曲りの温泉地質談義をお聞き頂きます。

温泉といえば、火山ということになります。私も大学の講義の「一般地質」で、鉱床学の権威の故加藤武夫先生から、そう教えて頂きました。そして、温泉は火山熱に関係するものと信じていました。ご紹介頂きました様に、大学を卒業して、満鉄調査部地質調査所に奉職し、満洲・朝鮮の大陸を歩きました。そうすると、瀋陽(奉天)・鞍山の南方に有名な湯崗子温泉というのがあり、大島良雄先生が「温泉」に紹介されたこともあります。また、熱河に参りました時の、錦県の近くの興城温泉にしましても、鴨綠江河口安東の北方五龍背温泉などにしましても、みな火山とは全く関係がありません。しかし、それらは共通して、古い片麻岩や片岩をも含め白亜紀層より古い地質のところを貫いている、加里長石に富む白っぽいペグマタイト質花崗岩のところがあります。その花崗岩を『千山花崗岩』と呼んでいました。朝鮮では、北朝鮮の羅津・清津の西方に朱乙温泉がありますが、同様に、古い花崗片麻岩を白っぽい花崗岩が貫いているところがあります。朝鮮の中程の金剛山付近にも温泉がありますが、この「金剛山花崗岩」も同質のものです。南の方では、釜山の近くに東萊温泉があり、蠟石鉱床を伴っていますが、ここは「佛国寺統」という中生代白亜紀のうち最も新しい地層を貫く、矢張り白っぽいペグマタイト質の「佛国寺花崗岩」のところがあります。これらの花崗岩は中生代白亜紀末の貫入とされていますが、私はもっと新しい新生代の古第三紀の貫入と考えています。

日本に帰って来てあちこち歩きましたが、「広島花崗岩」というのがあります。その中にはいろいろの種類のもが入っていますが、その主体は大陸のものと同じ様な加里長石に富む「優白ペグマタイト質花崗岩」であります。勝光山蠟石鉱床などを伴っているのも、大陸のものに似ています。同じ様な花崗岩は各地にあります。だから、日本にも大陸と同様に、火山に関係のない温泉もあるのではないかと考えていました。

座長から紹介されました様に、昭和24年に、創設の新制新潟大学理学部地質学教室に参りました。田舎の駅弁大学ですから、地方サービスで県下の温泉をあちこち診断しました。先程、伊東先生が当学会の例会開催地を列挙されましたが、昭和31年7月に新潟県松之山温泉で第9回大会がありました。私はまだ学会員でなかったのですが、特別講演を頼まれました。「新潟県下の温泉の湧出機構について」という標題でした。丁度その頃、新潟大地質教室では、県下の20万分の1地質図を作成しており、私に取り纏めをしていました。それまで、花崗岩類は地質図には赤一色で塗色されていました。それを、古期の花崗岩類(美川花崗閃緑岩類)、新期の花崗岩類(草水・小川花崗岩類)、およびそれらが混じった花崗岩類(斑状花崗岩類)の3つに区分しました。また、新第三紀中新世後期の谷川岳石英閃緑岩類も区別しました。この様に岩石類を区分した地質図が私の手元で出来上がった時でした。それと新潟県下の温泉分布図とを重ね合わせてみました。妙高火山・焼山火山に関係する温泉を除くと、他の温泉分布は、2つの新生代の酸性～中性で半深成～深成の火成岩貫入岩体の分布領域にぴったりと合致しました。その一つは、斑状花崗岩類をも含めた新期の花崗岩類であり、他の1つは、谷川岳石英閃緑岩類です。特別講演の最後に、温泉が火山のほかに、貫入岩体に関係しているものが多いことを付け加えて話しました。

表1を見て頂きます。古生代と中生代との間に、基性～超基性の火成岩貫入岩体が著しい地殻変動に伴って貫入して来ます。そして、それに遅れて、即ち、三疊紀とジュラ紀との境目辺りの時代の、1億数千万年位前の頃に花崗岩類(花崗閃緑岩類)の貫入があります。この花崗岩には、どうも温泉が付きません。中生代と新生代との間にも、矢張り激しい地殻変動に伴って、基性～超基性の火成岩貫入岩体があり、それに遅れて、古第三紀の初期、即ち、暁新世と始新世との境目辺りに、新期の優白ペグマタイト質花崗岩類が貫入して来ています。これには、先に述べた「広島花崗岩」とか、山陰の人形峠ウラン鉱床に関係のある「小鴨花崗岩」とか、新潟県下の「草水・小川花崗岩」とか、或いは岐阜県の矢張り土岐ウラン鉱床に関係のある「苗木・上松花崗岩」とか、各地にあり、これらは加里長石に富む優白ペグマタイト質で、大陸のものと同様でよく似ています。そして、それらに温泉が付き、岩石の年代決定をしますと、少しはバラつきますが、概ね6000万年位前となります。私はこの花崗岩を「新期花崗岩」または「6千万年花崗岩」と呼んでいます。温泉に関係のあるもう1つは、新第三紀中新世後期で、1千数百万年位前に貫入し、上越国境の谷川岳を作っている石英閃緑岩類などであり、これは非常に岩相が変わり易く、あるところでは玢岩類になったり、或いはプロピライトになったりしています。しかし、主体は石英閃緑岩で、これにも亦多くの温泉が付き、伊豆や九州では、金の鉱床を伴って来ます。これら2つの新生代の酸性～中性で、半深成～深成岩貫入岩体が温泉の熱源として重要です。

さき程申しました学会の特別講演の終りに、この話をしました。しかし、当時の温泉地質関係の方々からは、受け容れて頂けませんで、ある方からは、『矢張り温泉は火山だよ!』と決めつけられ、鼻であしらわれた次第でありました。大分後になって、今、座長をして頂いている中央温研の佐藤幸二さんが、群馬県の四万温泉を調査しておられ、『新しい火山でなく、谷川岳石英閃緑岩が熱源ではないか』と話され、私の見方を初めて理解して頂いたので、その時大変喜んだ次第でございます。

最近では、地熱関係の人達の間では、『高温貫入岩体』という言葉があります。『高温』というのに一寸私は引っ掛りますが、それを熱源として考えるのは常識になっています。世の中変わったもので、恐らく、私が軽蔑された苦渋などご存知なく、常識的に熱源として『高温貫入岩体』を考えております。

高温岩体と言いますが、岩石は高温であっても、岩石の熱伝導度が極めて小さいので、動いて

表 1 地質時代別貫入岩体の侵入時期

地質時代		深成岩～半深成岩の貫入貫入岩体	
新生代	第四紀	現世 ——(1万年位前)——	
		更新世 ——(2百万年位前)——	
	新第三紀	鮮新世 ——(1千万年位前)——	
		後期中新世 石英閃緑岩類(石英閃緑岩～玢岩) (1300～1100万年位前)——	
		中期中新世	
	前期中新世		
	古第三紀	漸新世	
		始新世 花崗岩類(優白・ベグマタイト質花崗岩) (6000万年位前)	
		暁新世 基性～超基性火成岩類を伴う地殻変動 (7000万年位前)	
中生代	白亜紀		
	ジュラ紀	花崗閃緑岩類(1億数千万年位前)	
	三疊紀	基性～超基性火成岩類を伴う地殻変動 (2億年位前)——	
古生代	二疊紀～石炭紀	[いわゆる秩父古生層]	

いる冷水を温めて呉れません。貫入岩体は割目に富んでいるので、水はあってもその水が動いては、次々と水を温めることは出来ません。恰度、風呂の水が沸く様に、停滞水がその割目の中に貯留されていなければなりません。停滞貯溜水であることが、温泉には極めて重要な問題であります。恐らく、温泉地の地下には、可成り大きな熱対流系の停滞水の溜り、**温泉水溜り**があって、そこから温泉がまた停滞水中を熱対流で上がって来ると考えています。

図1を見て下さい。酸性の火成岩岩漿は粘性に富んでいるが、基性の火成岩岩漿は流動性に富んでいます。従って、基性の火成岩岩漿は割目に沿って上がって来ても、その後横から押されると、岩漿は絞り出され、割目は塞がってしまいます。それに対して、酸性の火成岩岩漿は粘性に富むので、上がって来た口が広く、産状ももっこりした形をしています。新しい火山を見て、外輪山の基性のものは、裾野をひいて成層火山を作っていますが、中央火口丘や寄生火山の酸性

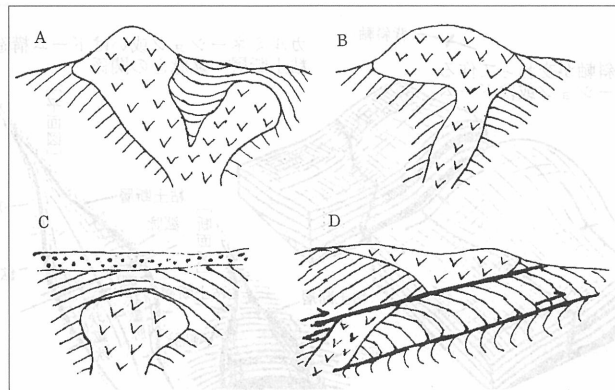


図1 酸・中性火成岩貫入岩体の産状 (推定断面図)

のものは、粘性があるので、もっこりした釣鐘状をしています。そして、その脚部が地下深いところまで及んでいます。酸性貫入岩体は概ね(図1のA, B, C)の様な形をしているものと推察しています。中生代の花崗閃緑岩類に温泉がつかないのは、(図1 D)の様に、中生代末の激しい地殻変動の横ずれ断層によって、岩体の脚が切られて、地下深部の熱のあるところと遮断されているのではないかと考えています。従って、古い花崗岩のところでも、脚切りのないところでは、温泉がついてもよいのではないかと考えています。

温泉の地質構造規制の第一の熱源については、この様に考えています。この様な粘性に富む貫入岩体が貫入しているところでは、周囲の地層が引き摺る様に持ち上げられ、盛り上げられ、盛り上がったドーム状構造を作っているのが一般であります。大きな岩体のところでは、周囲が隆起し、或いは陸化しています。表1の花崗岩貫入岩体の時期は、地史の中での隆起・陸化の時期に当たっています。規模は大きいもの小さいものいろいろありますが、この様に、地層が盛り上がったドーム状のところ貫入岩体が一般に貫入して来ています。

新潟県の長岡市の東方に、東山油田・東山背斜があります。帝国石油(株)の依頼で、その火山層序・地質構造の調査をしました。その東山背斜に沿って、石油が溜っているところと、溜っていないところがありました。その石油が溜っているところは、背斜のうちでもドーム状に盛り上がったところです。鞍部(サドル)のところには、石油は溜っていません。それで、「その盛り上がりはどうして出来たか」と、石油関係の方に聞きましたところ、『それは背斜軸が波打っているからだ』と教えられました。何故背斜軸が波打つか納得出来ないので、私なりの解析をしました。そして、2つ以上の背斜と背斜とが交わったところ、そこが盛り上がっていることが判りました。水面に2つ石を投げ込むと、その2点を中心に波が拡がって行き、その波の高いところと高いところが交わったところが干渉して、2倍の高さになります。それと同じ様で、非常に面白いと思いました。石油の方では、この盛り上がりを**カルミネーション(culmination)**と呼んでいます。

私は、新潟油田の調査もしましたが、その前からグリーン・タフ地域の調査をし、金・銀・銅・鉛・亜鉛などの熱水鉱床・鉱脈の調査もしていました。特に、古河鉱業(株)の秋田県阿仁鉱山の精査を頼まれ、坑内外の地質調査に入り浸っていました。それで、そのカルミネーションの概念を鉱山の方に持ち込みました。阿仁鉱山を調査していますと、旧坑鉱床も、当時稼行中の鉱床も、みな背斜の交わりの盛り上がりのカルミネーションのところにあることが判りました。図2にブロック・ダイアグラム式にカルミネーションを示しました。カルミネーション部が盛り上がると、その両翼にずれが出来、断層を生じます。この様な両翼に出来るのを共役(conjugate)断層と呼ん

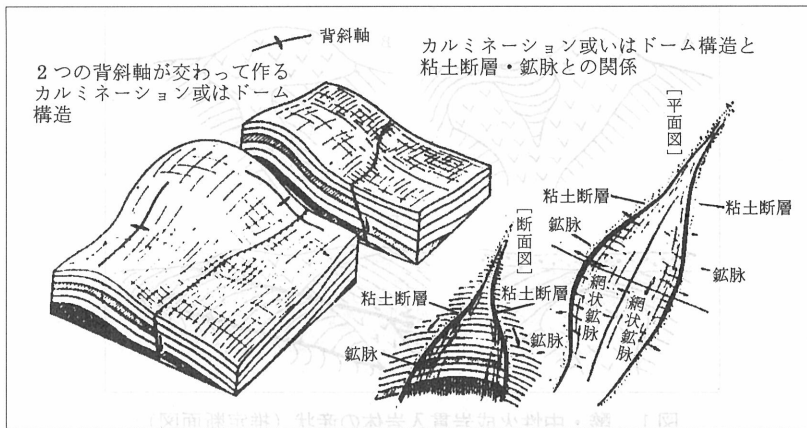


図2 カルミネーションと共役断層・共役鉱脈

でいます。断層は粘土化します。カルミネーションのところから熱水鉱液が上がって来ます。この粘土断層に堰き止められて、その内側に共役鉱脈が出来ます。そして、その共役鉱脈の間には、細脈が網目状にあったり、鉱石鉱物がバラバラ細かく散らばって鉱染(impregnation)状になっています。つまり、カルミネーションの地下深部から鉱液が上がって来たという地質構造規制が判りました。これは占めたとはい、鉱区内外域について、種々の方法で調査して、背斜構造を求めました。そして、背斜軸の交わるところで、まだ掘っていないところを探掘して、私のこの考え方で新鉱床の発見もしました。戦後の当時、**鉱床の地質構造規制**ということが、アメリカ進駐軍から輸入され流行し、各鉱山でもこれによって随分沢山新鉱体が発見されました。私のカルミネーションの地質構造規制は、可成りその初期のものでした。

これらの調査に引き続いて、それらと共に温泉の調査も始めました。私は、「温泉は熱水鉱液の低温延長の連続である」という考えを持ち、熱水鉱床と同様に、**温泉も亦地質構造規制を受けている**として、同様の見方で温泉を調査して行きました。そうすると、温泉も確かに背斜の交わったカルミネーションのところに出て来ます。温泉の場合には、そこから溢れ出して、向斜部に溜っていることも多いですが、それはその地下深部から来たものではありません。鉱床でも、人形峠のウラン鉱床などは、背斜に近いところから溢出した鉱液が、向斜に向ったチャンネル部に流れ込んで、沈澱しています。花崗岩体の中でも割目をよく調べますと、割目面が背斜状になり、そのカルミネーション状になった部分から温泉が上がって来ます。温泉の湧出条件として、熱源に次いで、**褶曲構造、即ち、カルミネーション構造**を考えることが重要であり、これが第二の地質構造規制であると考えています。

地質構造といえば、褶曲と断層とです。次が断層であります。私は、昭和10年東大での卒業論文が「中央構造線」であって、それに沿う「鹿塩片麻岩」という圧砕岩様の岩石の研究をしました。それ以来、断層に血の道をあげて来ました。『断層というのは破碎帯であり、水道であり、それが水脈・温泉脈である』という見方があります。大体土木屋さんでは100%、地質屋さんでも50%以上の人達がそう思っています。しかし、私はへそ曲りで、それは誤っていると主張して来ました。主な断層は、岩石が破碎されるから、その周囲の透水層とか、割目に富む岩石よりも、細粒化されて水が透り難くなります。即ち、透水度が小さくなり、従って、断層の上流側に水が溜り、断層上流側の水位が下流側のそれよりも高くなります(図3)。断層は一般に粘土化しています。普通の地下浅所での風化ならば、カオリンやイライトが出来ます。しかし、断層粘土はモンモリロナイトです。モンモリロナイトの生成条件は、一つには海水中です。もう一つは温泉変質

か熱水変質です。そして、もう一つが停滞水中です。断層粘土がモンモリロナイトであるということは、断層の粘土化が停滞水中で行われたことを物語っています。地すべり地の迂り粘土もモンモリロナイトで、私はこれも亦停滞水中で生じたものと考えています。断層は粘土化すると、ますます水を透さない不透水層になります。そして、不透水壁の地下ダムのような役割を果たします。断層は地下水を堰き止め山側(上流側)と下流側とで水位の段差を生じます。そして、断層の山側の停滞水のところを、温泉は対流によって上昇して来るのです。若し、堰き止め断層がなく、この水が流れておれば、温泉も下流の方に流れ去ってしまいます。停滞水があればこそ、風呂の水が沸く様に、温かくなって上がって来るのです。

温泉はしばしば一直線上に並んでいます(図4)。それで、その間とか、延長上で探掘する例がよくあります。しかし、その半分程は失敗しています。これは、断層が温泉脈でなく、温泉水を堰き止めているからです。温泉脈は時に断層に平行しているものもありますが、概ねは斜交しています。

次に、その断層について、山側に傾いているか、下流側に傾いているかが問題です(図5)。温泉の湧出地点や湯徴地付近から掘って失敗している例がしばしば認められます。私は、松本市の信州大学理学部にもおり、浅間温泉付近をも調査しました。顕著な断層はみな山側に傾いています。そして、その断層に沿った山側から温泉が湧出していました。温泉が湧出している断層から山側は、地形がやや急傾斜になるので、その源泉付近あるいはそれよりやや下流で新しい温泉ボーリングをしていました。従って、みな断層裏側を掘っている訳です。勿論、ボーリング坑井から揚湯するので、湯量は増加します。しかし、断層から溢れた落ち零れ水を採湯しているので、泉温は下がり、泉質も薄くなっています。この様に、断層が地下水を堰き止めているということを、地質構造規制の第三の条件と考えています。そして、断層、即ち、**堰き止め粘土断層**と、山側の温泉脈になる**開いた割目(open fissure)**とを区別して考えることが、温泉探査にとって極めて重要であります。

熱源の問題、即ち、貫入岩体の問題、背斜が交わって作るカルミネーションの問題、および堰き止め断層の問題とそれに附随する開いた割目について、と3つの地質構造規制の条件について

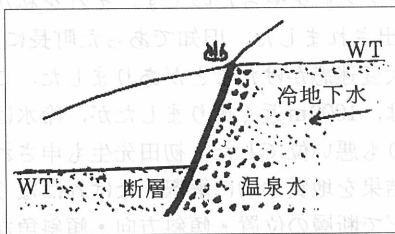


図3 温泉湧出の概念図(断面図)

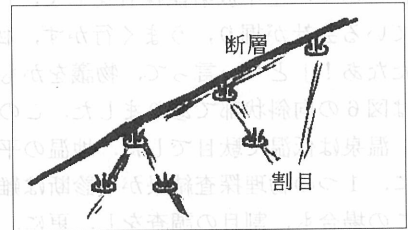


図4 温泉と断層・割目(平面図)

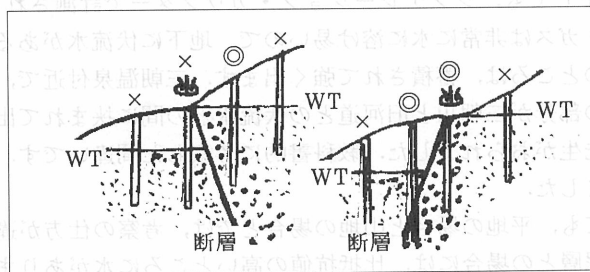


図5 湯徴地からの掘削の失敗・成功例(断面図)

話しました。従来、私はせいぜい地下200~500m位までの温泉を調査し、探査して来て、前に述べた3つの地質構造規制の条件を考え、それを種々の物理探査法や地化学探査法で確めてやってきました。そこには、些か名人芸的なところもありますが、地質学的にも極めて興味深いものでした。ところが、先程もお話がありましたが、地下の平均増温率は100mで3℃位であります。だから、1000m掘れば、30℃増温し、地表近い地下水温度が15℃だから、45℃になる。どこを掘っても、温泉が出ると豪語している人もおります。それに、竹下1億円バラ撒きがあり、あっちこっち温泉を掘るブームになり、市町村役場に行くと、温泉掘削業者や地質調査業者の営業がうようよしています。この様に、1000m掘れば温泉が出ると言っているのは素人の井戸屋さんばかりでなく、県の温泉審議会委員をやっている大学の先生の中にもおられ、失敗したらボーリングの掘り方が悪いと逃げている方が可成り沢山おられます。しかし、そうは問屋が許して呉れるものではなく、先程初田先生も話されました様に、水が無い場合、水があってもあり過ぎて温度が上がらない場合などがあります。矢張り地質構造規制をよく考察した上で、掘削することが必要です。電気探査は浅いところしか判らないので、深く掘る場合には、磁気探査がよいと思います。しかし、これは1千万円近くも費用がかかるので、地熱の方で盛んに使っていますが、温泉探査には残念ながら使い難いのです。ところで、同じ様に高価なのですが、百発百中とNHKなどで宣伝している空中放射能探査は、案外行われています。たまに当たっているかも判りませんが、失敗例も沢山あります。理論的にも承服出来ませんが、1つの物理探査法で、地質調査もせずに、掘削地点が選定される筈はなく、賛成しかねています。

ここに失敗の一例を挙げます。私は鳥取県三朝温泉の岡山大学付置温泉研究所に7年間おりましたが、原子燃料公社(現在の動力炉・核燃料開発事業団)と共に、人形峠・三朝一帯の地質調査をしました。ウラン探査と共に、花崗岩・温泉について調査・研究しました。三朝温泉付近は、前に述べた「小鴨花崗岩」よりなっており、それが盛り上がっています。その花崗岩を被っている三朝層群も、東西に流れる三朝川の北側では北に、南側では南に傾斜していて、三朝川に沿う背斜構造をしています。花崗岩中の割目構造を調査しましたが、図6に概念的に示します様に、三朝温泉のところは背斜状部に当たっております。これに対して、先年、三朝温泉と谷一つ隔てたところで、空中放射能探査をして、『ここ掘れワンワン』をやったのです。それを私が顧問をしている会社が掘り、うまく行かず、私も引っぱり出されました。旧知であった町長に、「騙されたなあ!」とつい言って、物議をかもし、会社に大変迷惑かけたことがありました。この選定点は図6の向斜状部でありました。この様なところは、1000m近く掘りましたが、冷水は集まるが、温泉は低温で駄目でした。地温の平均増温率よりも悪い位でした。初田先生も申しされました様に、1つの物理探査結果から診断は難しく、その結果を地質学的に解釈しなければなりません。この場合も、割目の調査をし、更に、電気探査などで断層の位置・傾斜方向・傾斜角などを確認して、掘削すべきであったことを痛感しました。

放射能探査につきましても、シンチレーション・カウンターで計測されるのは、ラドン(Rn)の $\gamma$ 線です。ラドン・ガスは非常に水に溶解易いので、地下に伏流水があると、その上に上がって来ません。停滞水のところは、蓄積されて強く出ます。三朝温泉付近で、放射能強度等値曲線図を描いて、高い値の部分が三朝川と旧河道との伏流水との間に挟まれて出るところから、そこに湯脈を推定された先生がおられました。教科書的に考察した間違いです。私は、伏流水の探査に放射能探査を使いました。

電気探査にしましても、平地の場合と山地の場合とでは、考察の仕方が違って来ます。平地の軟らかい礫・砂層と泥層との場合には、比抵抗値の高いところに水があります。山地では、古い硬い岩石なので、高い比抵抗値が、岩石中の割目の水の多少によって低比抵抗値になります。地

