

# 火山と温泉

東京都立大学名誉教授

野口 喜三雄

## Volcanoes and Hot Springs

Kimio NOGUCHI

Professor Emeritus of Tokyo Metropolitan University

温泉は一般に火山地方に多く、火山の残餘活動とせられ、山頂に近い処に酸性泉があり、遠い処に中性、アルカリ性泉が存在するとせられている。

私が柴田雄次、木村健二郎両先生の下で火山の研究を始めたのは昭和8年4月で今から53年前になります。当時火山研究者は外国でもそうであったが、岩漿の揮発物質に興味を持っており、私が柴田先生から仰せつかった問題もやはり熔岩の揮発物質や岩石を真空中で熱した場合放出されるガスを検べることであった。

この研究が複雑な装置を使い非常に骨の折れる研究であったが、一方当時浅間山が盛んに噴火しており、噴火活動と浅間山付近一帯の湧水やガスとの関係有無を研究することも始めました。そんなわけで熔岩中のガスの研究には手が廻りにくくなり、本日計らずも座長をお願いすることになった信大の掛川一夫先生が当時大学院学生でこの研究を引受けて下さった事をここに厚く御礼申し上げます。

## I 火山

### a) 浅間山

浅間山は海拔2542mで、第一外輪山黒斑山、第二外輪山前掛山、中央火口丘釜山からなる安山岩質火山であるが、広大なる裾野を有し、湧水やガスと火山活動との関係を検することは容易でなかった。

噴火口からは $H_2O$ 、 $HCl$ 、 $SO_2$ 、 $H_2S$ 、 $CO_2$ 、 $H_3BO_3$  其他を含む火山ガスが多量に噴出している。これらがもし水と接触すれば当然強酸性水を生じる筈であるが山頂には水は全くない。

噴火口から僅か300mの距離にある前掛山頂の噴気孔から放出されるガスは44℃の水蒸気の外に少量の $CO_2$ を含むにすぎない<sup>1)</sup>。

昭和11年7月21日午前9時50分に浅間山の中噴火があり、同月22日午後9時24分と23日午前1時30分に大噴火があった。著者は危険を犯して22日正午頃火山館主小山金重氏と共に山頂に登り、前掛山噴気孔を調査したるに43℃を示し、水蒸気の噴出は極めて僅かであり、 $H_2S$ 、 $SO_2$ 、 $HCl$ 等は何れもなく、 $CO_2$ を少量含むに過ぎなかった。即ち浅間山が沈静状態にあった昭和8年7、8月の測定値53℃よりむしろ低い値を示した。従ってこの噴気は雨水が地中へ浸透して地熱で温

められて噴出したもので浅間山の噴火活動とは直接関係ないことが明らかになった，このような噴気を著者は腰抜け噴気と名づけることにした。

山頂から2 kmの距離にある地獄谷には低温ではあるが， $H_2S$ ， $CO_2$ を含む火山ガスが多量に噴出している<sup>1)</sup>。これは第一外輪山黒斑山の活動の名残りとしてされている。

昭和24年夏西条八束学士(現在名古屋大学教授)が火山館に滞在して地獄谷ガスを分析した際前夜地獄谷に入って火山ガスで死んだ野兎を発見した。(写真2 参照)

地獄谷には $H_2S$ を含む強酸性水(pH 2.7, Cl 4 mg/l,  $SO_4$  494mg/l 其他)が湧出している。この酸性水は火山ガス中の $H_2S$ が地表面で空気で酸化されて硫酸を生じ，これが周囲の岩石をとかし，これに浅い地下水が混合して湧出したものと推定される。多量の降雨の際にはpH 1.2の水が湧出した。このことは地獄谷の砂の浸出水のpHが1.2を示すことから容易に理解される<sup>2,3)</sup>。

地獄谷から4 km下流には蛇掘川端湧水橋の傍ら(浅間館下)がある。これは冷泉であるがpH 5.9を示し多量の $CO_2$ ， $Fe(HCO_3)_2$ を含んでいる<sup>4)</sup>。これが蛇掘川へ流入するため川水はここで著しく褐色に混濁している。この混濁は鉱泉中の $Fe(HCO_3)_2$ が加水分解し，且空気で酸化されて生じた $Fe(OH)_3$ に起因する。

地獄谷に噴出している $H_2S$ ， $CO_2$ を含む火山ガスが地中で更に岩石と反応すると $H_2S$ の方が $CO_2$ より先に消失して $CO_2$ が後に残る。即ち更にlater stageの火山ガスが4 km下流に噴出しているものと推定される。水中の鉄分は炭酸が岩石を犯した結果岩石から水中へ溶出したものであろう。地獄谷においてもガス噴出地の中心から遠ざかるに従って $H_2S/CO_2$ 比が減少することが判明した。又浅間館下湧水と類似の鉄鉱泉が地獄谷にも存在する。

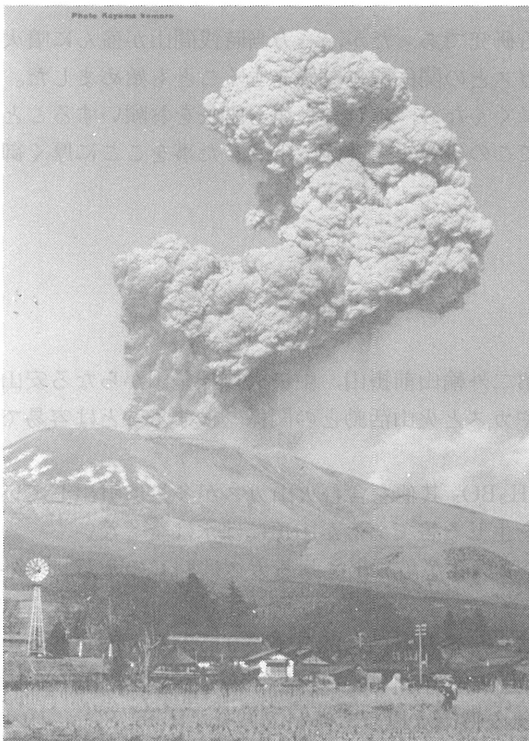


Photo. 1 浅間山噴火(昭和33年12月5日)



Photo. 2 地獄谷硫気孔で死んだ兎と  
西条八束学士

浅間山の噴火活動と湧水やガスとの関係を検すると、地獄谷の湧水及びガスのみ浅間山の噴火活動と若干関係があるようであつたが、顕著なものではなかつた。そんなわけで愈危険を犯して噴火口から出る火山ガスを直接調査することにした。調査に当っては多数の孔を有する箱を作り、これに濃いKOH溶液を入れたガラス製の皿を入れ、これを火口縁の東西南北の四地点に設置し、噴火口から放出される火山ガスの酸性成分を吸収させ一週間乃至10日に一回吸収液を取換えて分析することにした。地獄谷の2地点にも同じ装置を設置してガスを検した。

昭和33年11月10日の大噴火の際には同年8月頃から次第にS化合物及びCl<sup>-</sup>量が著しく増加し遂に11月10日の大噴火となつた。(Fig.1,2参照)<sup>5)</sup>

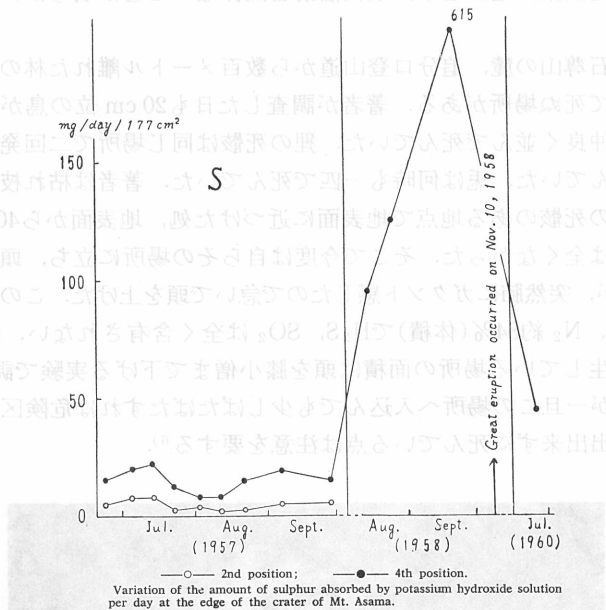


Fig. 1 浅間山噴火口ガス

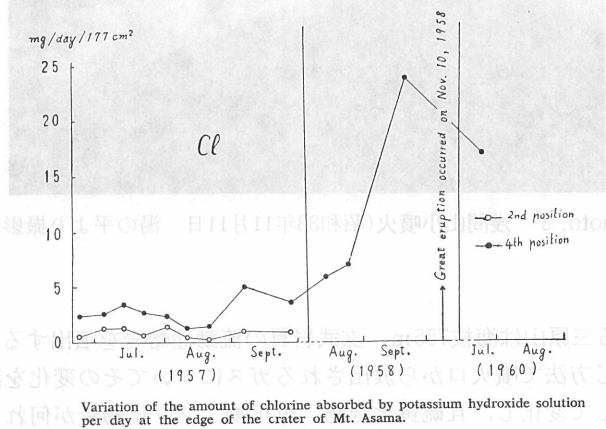


Fig. 2 浅間山噴火口ガス

この大噴火では火口から2800m、石尊山の麓に大火山弾の落下で直径10m、深さ4mの大穴をつくり、火口から4000mの小浅間山頂に直径3mの穴をあけた。又この大爆発に依って起った爆風で追分、中軽井沢、旧軽井沢、峰の茶屋方面の浅間山に面した窓ガラスは全部破損した。尚長野県旧制野沢中学出身者に依ると浅間山から20km離れた野沢町でも浅間山大爆発で窓ガラスが破損する由である。

著者はこの大爆発の直前即ち7時間前神谷宏学士(現在名古屋工大教授)、中村恵亮氏(現在小諸町ひしや本店主人)と共に浅間山火口縁に立っていた。この時噴煙は非常に少なかったが火口底は煙で全く見えない。鳴動もなく極めて静かであったが、頻りに地震を感じた。

尚地獄谷に噴出する火山ガスは噴火口ガスと同じ方法で調査した結果この大爆発が近づいても硫黄化合物及び二酸化炭素が増加せず、噴火活動と関係ないことが明らかになった<sup>5)</sup>。

#### [狸地獄]

浅間山の寄生火山石尊山の麓、追分口登山道から数百メートル離れた林の中の小さい空地にしばしば鳥や兎が入って死ぬ場所がある。著者が調査した日も20cm位の鳥が幾羽も死んでいた。また大きな狸が2匹仲良く並んで死んでいた。狸の死骸は同じ場所で二回発見したが、二回とも二匹仲良く並んで死んでいた。兎は何時も一匹で死んでいた。著者は枯れ枝を集めてこれに点火して炎を作り、動物の死骸のある地点で地表面に近づけた処、地表面から40cmの高さで突然火が消えた。この時風は全くなかった。そこで今度は自らその場所に立ち、頭を下げ膝小僧まで下げた処無臭であるが、突然肺にガクント感じたので急いで頭を上げた。このガスを分析した処O<sub>2</sub>約6%、CO<sub>2</sub>約10%、N<sub>2</sub>約84%(体積)でH<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>は全く含有されない。動物は窒息死したものである。ガスが発生している場所の面積は頭を膝小僧まで下げる実験で調べた処10m<sup>2</sup>ほどであった。従って動物が一旦この場所へ入込んででも少しばたばたすれば危険区域から脱出できる筈であった。それが脱出出来ずに死んでいる点は注意を要する<sup>6)</sup>。

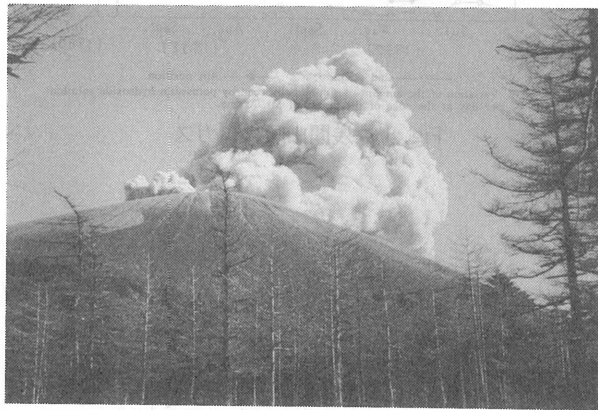
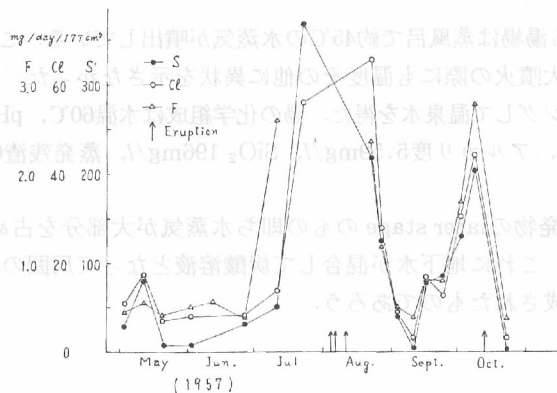


Photo. 3 浅間山小噴火(昭和33年11月11日 湯の平より撮影)

#### b) 三原山

大島の中央に聳える三原山は海拔755m、玄武岩質の流動性熔岩を噴出することで著名である。昭和32年浅間山と同じ方法で噴火口から放出されるガスについてその変化を調べたるに火口縁の3地点ともほぼ平行して変化し、且硫黄化合物、塩化物、フッ化物量が何れも噴火の10日ほど前から急激に増加した。従ってガスに依る噴火の予知が可能であることが判明した<sup>5)</sup>。(Fig.3 参照)



Variation of the amounts of fluorine, chlorine and sulphur absorbed by potassium hydroxide solution per day at the 1st position.

Fig. 3 三原山噴火口ガス

[発光現象]

昭和33年灼熱熔岩が火口底に露出して盛んに噴火していた頃夜3分位の間隔でパッと噴火口内が瞬間的に非常に明るくなる現象が繰返し起った。多分水素などの可燃性ガスが燃えるのではないかと思われた。但しこの場合音響は伴っていない。昭和15年三宅島噴火の際現地を視察された坪井忠二博士が何か可燃性のものが燃えるようだと言われた事と関連しているかも知れない。

[火映現象]

灼熱熔岩が火口底に露出すると熔岩の赤い色が噴煙に反映して夜赤くなる現象である。浅間山でも火口底に灼熱熔岩が露出すると火映現象が現れる。

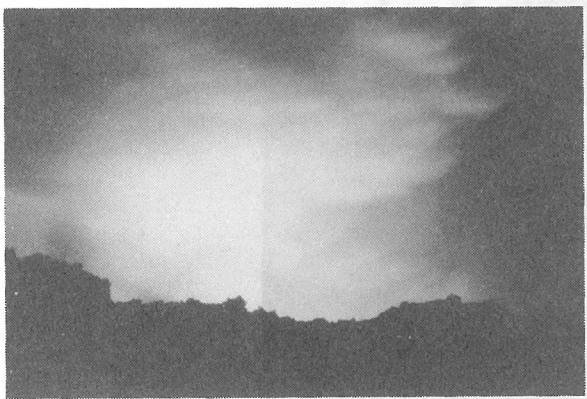


Photo. 4 三原山の火映現象(昭和33年)

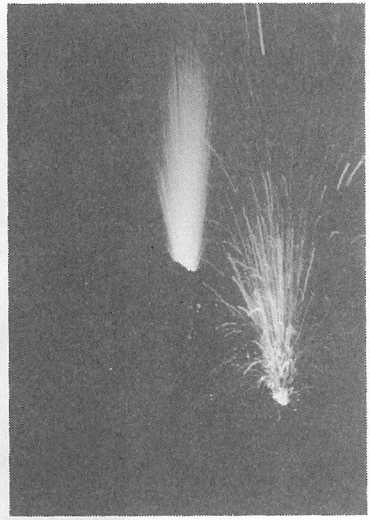


Photo. 5 三原山噴火  
2つの噴孔から同時に約2分の間隔で吹き上げた。赤い点は地面へ落下した火山弾である。(昭和49年5月19日大島警察署員能登谷氏撮影)

### [大島の温泉]

三原山の中腹に位する湯場は蒸風呂で約45℃の水蒸気が噴出している。この蒸気は無臭である。昭和25, 26年の三原山大噴火の際にも温度その他に異状を示さなかった。この付近で大島温泉ホテルが深さ290mボーリングして温泉水を得た。湯の化学組成は水温60℃, pH 6.4, Cl 24mg/l, SO<sub>4</sub> 25mg/l, HSO<sub>2</sub> 12mg/l, アルカリ度5.59mg/l, SiO<sub>2</sub> 196mg/l, 蒸発残渣680mg/lその他である<sup>7)</sup>。

この場合は岩漿の揮発物のlater stageのもの即ち水蒸気が大部分を占め少量のCO<sub>2</sub>を含んだ気体が深部から上昇し、これに地下水が混合して炭酸溶液となって周囲の岩石を犯し、炭酸塩、珪酸に富む温泉水が形成されたものであろう。

### c) 白根山

白根山は、老年期の火山とされている。山頂には強酸性の火口湖があることは良く知られている。時に小噴火が起るが、これは何れもガス圧で地表付近の岩石を四方に放出するに過ぎない。

### d) 阿蘇山

昭和32年の阿蘇山の噴火をPhoto. 6に示す。火口底に火山灰が多量に堆積していることが良くわかる。木材が燃える時の炎と殆ど同じような炎が火口底から立昇っているのを目撃したことがある。

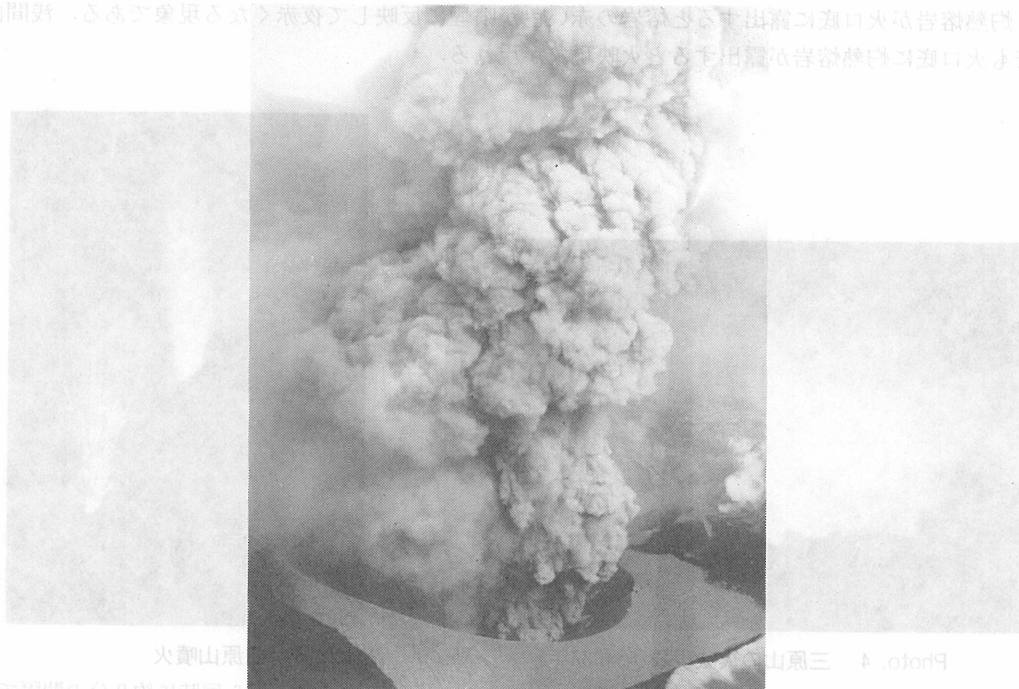


Photo. 6 阿蘇山の噴火(昭和32年)

阿蘇山では大雨の際しばしば火口底に水が溜り一時的に火口湖を生じる。Photo. 7は昭和26

年7月27日著者が撮影した阿蘇山の火口湖を示す。これは7月19日に大雨あり、噴火口内に水が溜って池になり、水面から湯気が立昇っている。この池は大雨の後10日位存在して消える由である。

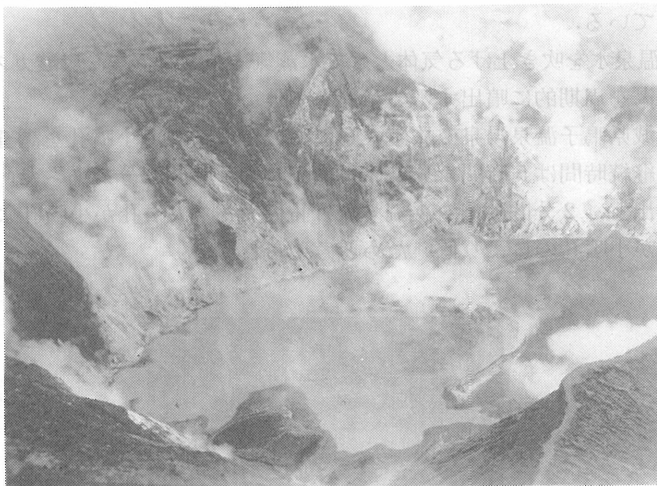


Photo. 7 阿蘇山の火口湖(昭和26年7月27日撮影)

阿蘇山の火山灰はかなり火山ガスの腐蝕を受け粘土化しているようである。かつて阿蘇山へ登った折火口内下段まで下りて火山灰を採取し、これを東大へ送った処数日後に届いた荷物を開いて驚いた事に火山灰はこちこちに堅く固まっていた。これが人工セメントのヒントとなったのかも知れない。

#### e) Etna火山

Etna火山はイタリアのSicily島にある活火山で海拔10868 ft.である。著者はCataniaからタクシーと乗合ジープをのり継いで山頂近くまで行き300mほど歩いて山頂に到着した。2～3分の周期で小噴火を続けていた。山頂には見張人がおり見物人が火口へ近づくのを禁じていた。(写真8参照)



Photo. 8 Etna火山の小噴火(昭和45年秋)  
2～3分の周期で噴火していた。この人物は見張人である。

## II 温 泉

### a) 間欠泉

火山の噴火現象と良く似た自然現象が間欠泉の噴騰である。何れも液体を気体で周期的に吹き上げる点で類似している。

間欠泉の場合は温泉水を吹き上げる気体として水蒸気，メタンガス，炭酸ガスの3種類がある。その中水蒸気で熱湯を周期的に噴出するのが最も多い。

昭和11年4月宮城県鳴子温泉湯泉楼旅館中庭にあった大噴孔，小噴孔を調査したのが最初である。小噴孔の噴出継続時間は5時間1分，休止継続時間2時間35分であった。大噴孔は小噴孔より常に1分先に噴出し，2分間噴出を継続すれば止んだ<sup>8)</sup>。大噴孔が小噴孔より常に先に噴騰したのは大噴孔の口が小噴孔の口より低いためと考えられる。

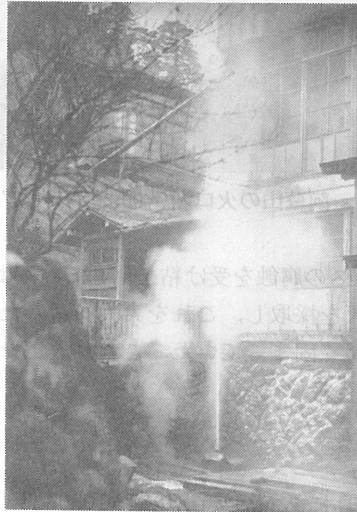


Photo. 9 鳴子温泉湯泉楼間欠泉小噴火の噴騰

高さ約10m 左に少量湯気が出ているのが大噴孔 (類巻8頁)

然し一方小噴孔にゴムホースを挿入して口で吹いて上水を出し深部の熱い水を呼ぶと噴騰が誘発される。小噴孔が噴騰を開始するや否や約1m離れた隣の大噴孔中の水が小噴孔の方へ吸込まれて低下し，間もなく大噴孔中の水柱圧と地中の空隙又は空洞中の水蒸気圧との釣合が破れて大噴孔の噴騰が開始された。

小噴孔から噴出する湯を時間の経過に従って採水し分析したるに $\text{Cl}^-$ 含量と $\text{SO}_4$ 含量が逆に変化した。従って $\text{Cl}^-$ に富む熱水と $\text{SO}_4$ に富む浅い地下水とが混合することによって間欠泉を生じることが明らかになった<sup>8)</sup>。このことは又噴孔中の湯の化学成分の垂直分布を検べて確認した。噴騰機構については地中の空隙又は空洞中の地下水を熱水と熱水から分離した水蒸気との混合物で熱して遂に沸騰点に達すればその蒸気圧で空隙から地表へ通ずる通路の水を押し上げ遂に空洞中の水蒸気圧が地表へ通ずる通路の水柱圧に打ち勝った瞬間噴騰が開始される。そして噴騰を継続することに依って空隙又は空洞中の温度が低下し，遂にその水蒸気圧が地下水圧に負けるとその瞬間地下水が空隙又は空洞中へ突入して噴騰は休止し間もなく地中の空隙は地下水で充満する。



小噴孔にゴムホースを挿入して口で吹いて噴騰を誘発する方法で、休止時間を(1) 26時間13分、(2) 5時間33分、(3) 1時間21分、(4) 13分と休止時間を変えて噴騰させると休止時間の短いほど長く噴騰することが判明した。

又噴出する湯を浴槽へ導いて水量を測定した処噴騰の始めから終わりまではほぼ一定であった。従って地下水が予め適度に熱せられていると熱水との混合が順調に進行し、いくらでも長く噴騰するようである<sup>8)</sup>。このような例が大雨の際しばしば起こった熱海間欠泉や、鳴子町の湯泉楼間欠泉の長湧きの現象であり、休止することなく噴騰を続ける新潟県瀬波温泉や伊豆の峰温泉の噴騰であらう。

ここには間欠泉の噴騰に伴う化学組成の変化の例として鬼首の宮沢間欠泉を第4図にあげる。

宮沢間欠泉は昭和14年の観測に依れば大噴騰と小噴騰があり、噴騰の高さは大噴騰は20m、小噴騰は10mである。大噴騰の周期は22時間10分、噴出継続時間は1時間42分、小噴騰は大噴騰に先駆して19回ほど起り、噴出継続時間は15~20分、休止時間は10~20分である<sup>8)</sup>。尚間欠泉は日本の間欠泉ばかりでなく、米国のYellowstone Parkの間欠泉やニュージーランドのWhakarewarewaの間欠泉についても調査し類似の結果が得られた<sup>9)</sup>。

Yellowstone Parkの最も著名なOld Faithful Geyserは噴騰の高さ35~52m、噴騰継続時間は4分、休止時間66.3分である。その噴騰中の組成の変化を第5図に示す<sup>9)</sup>。

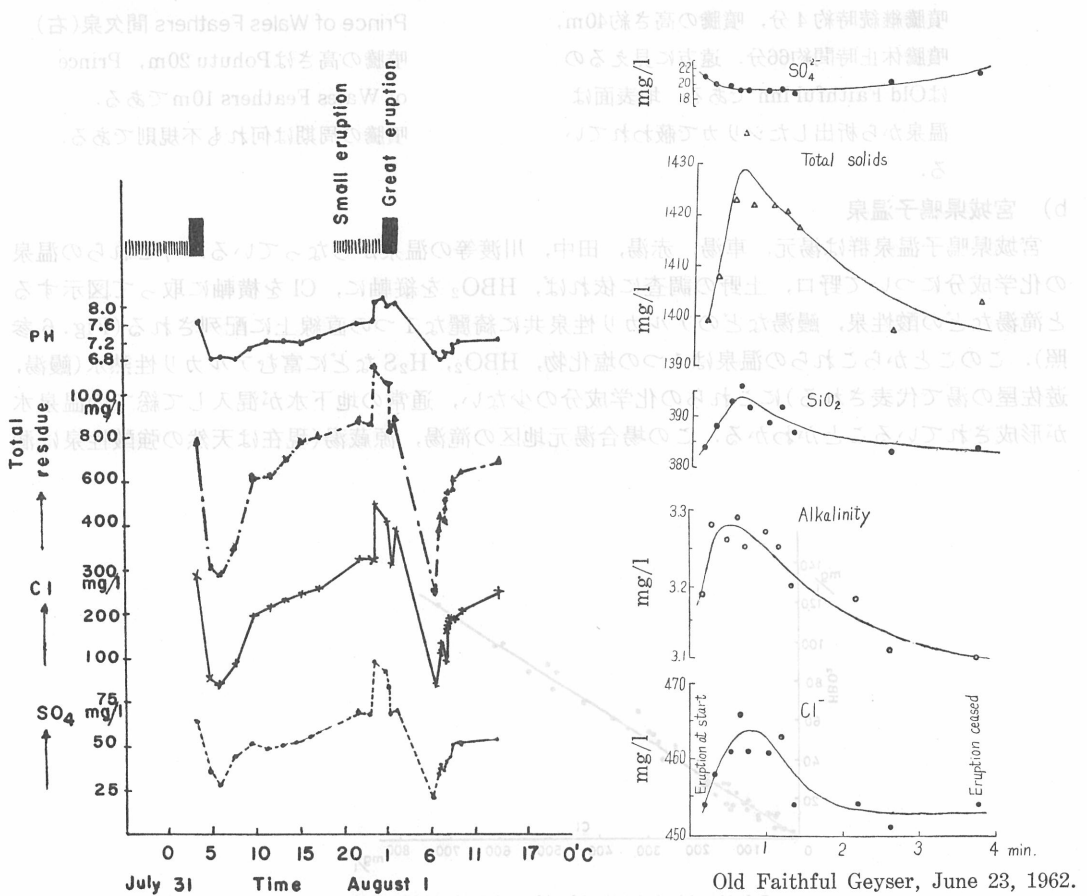


Fig. 4 鬼首宮沢間欠泉

Fig. 5

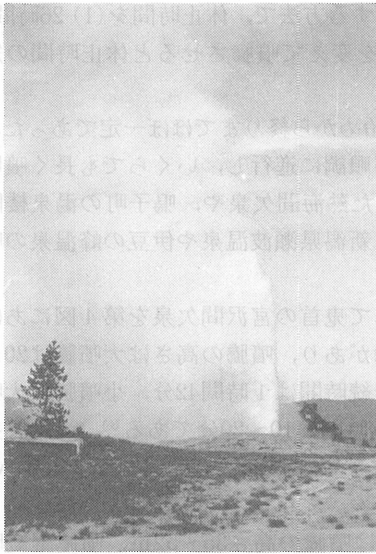


Photo. 10 Old Faithful Geyser の噴騰  
噴騰継続時約4分、噴騰の高さ約40m、  
噴騰休止時間約66分。遠方に見えるの  
はOld Faithful Innである。地表面は  
温泉から析出したシリカで蔽われている。

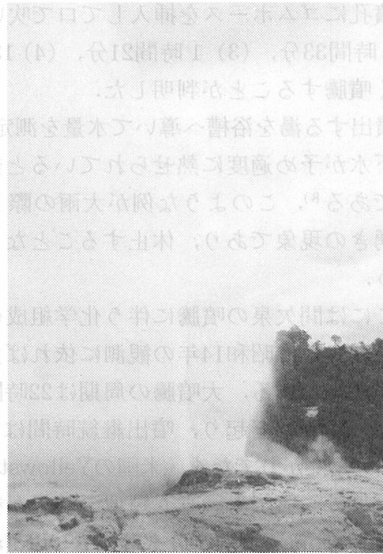


Photo. 11 Whakarewarewa のPohutu間欠泉(左)と  
Prince of Wales Feathers 間欠泉(右)  
噴騰の高さはPohutu 20m、Prince  
of Wales Feathers 10mである。  
噴騰の周期は何れも不規則である。

b) 宮城県鳴子温泉

宮城県鳴子温泉群は湯元、車湯、赤湯、田中、川渡等の温泉からなっている。今これらの温泉の化学成分について野口、上野の調査に依れば、 $\text{HBO}_2$  を縦軸に、 $\text{Cl}$  を横軸に取って図示すると滝湯などの酸性泉、鰻湯などのアルカリ性泉共に綺麗な1つの直線上に配列される(Fig. 6 参照)。このことからこれらの温泉は1つの塩化物、 $\text{HBO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ などに富むアルカリ性熱水(鰻湯、遊佐屋の湯で代表される)にこれらの化学成分の少ない、通常の地下水が混入して総ての温泉水が形成されていることがわかる。この場合湯元地区の滝湯、源蔵湯(現在は天然の強酸性泉は酒

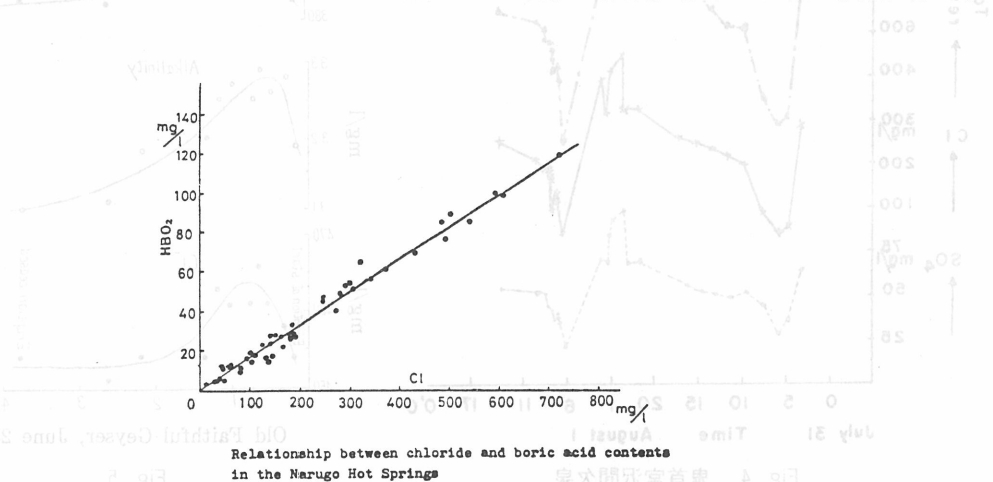


Fig. 6 鳴子温泉

については塩化物、硼酸、硫化水素などを含むアルカリ性熱水が深部から上昇し、地表面に近づくとも圧力の低下に依り沸騰し、溶存する $H_2S$ の一部が酸化して上昇し、これが空気で酸化されて硫酸を生じ、この硫酸が浅い地下水にとけて湧出したものと推定される。かく考察すると鳴子町の酸性泉は二次的生成物である。

地形的には湯元地区の酸性泉はアルカリ性泉、鰻湯などから僅か10数mの距離に過ぎないが、アルカリ性泉より常に高処に存在する。

実際に滝湯付近でボーリングして土壌の浸出水のpHを検すると地表面で4.0、深さ2mで最も酸性強く1.4、11mでは9.1でアルカリ性を示した。尚この場合土壌の表面に付着しているCu、Znを検するとCuはpH 2.3に大きい極大値があり、次いで7に小さい極大値があるが、ZnはpH 7付近に大きい極大値を示した<sup>10)</sup>。

尚川渡温泉では $H_2S$ が検出されるが、車湯、赤湯、田中等の温泉水では $H_2S$ が検出されない。この事については熱水が地中を上昇する際岩石との反応で消失したものと考えられる。

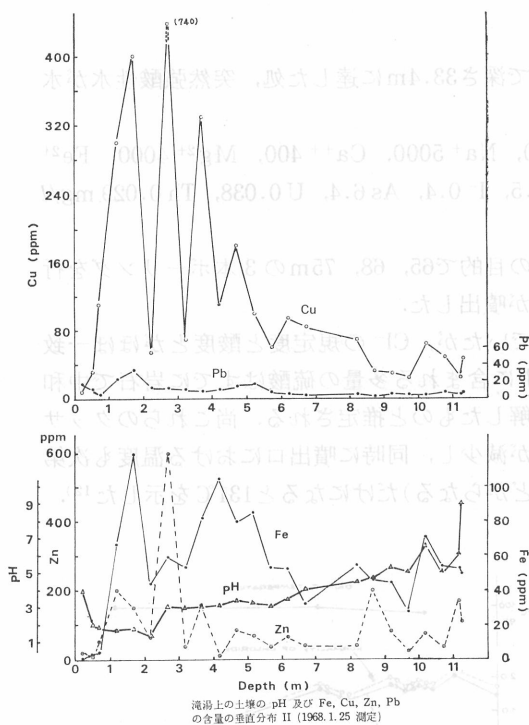


Fig. 7 鳴子温泉

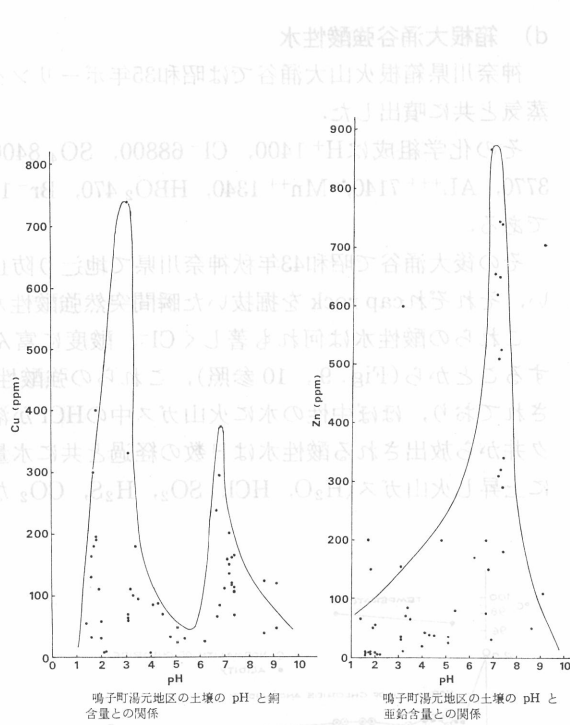


Fig. 8 鳴子温泉

c) 秋田県玉川温泉

(1) 大吹

秋田県玉川温泉大吹はpH 1.3、Cl 2382mg/l、 $SO_4$  1128mg/lを示し<sup>11)</sup>、明らかに塩酸酸性の温泉である。この温泉の成因については次のように考えられる。

$H_2O$ 、HCl、 $SO_2$ 、 $H_2S$ 、 $CO_2$ などを含む火山ガスが深部から上昇し、これが上昇途中一部凝縮すると共に地下水と混合して強酸性水となって周囲の岩石を大いに腐蝕し、岩石中の金属元素をとかして後、地表面に湧出したものが大吹の湯と想像される。大吹の湯のNa、Kの含量が比

較的少なく、且つNa/K比が岩石のNa/K比に近いことから深部はガス体で上昇しているものと想像される。尚SO<sub>4</sub>については地表面付近でH<sub>2</sub>Sなどから空気に依る酸化で生成され、これが地下水に溶けて混入することが考えられる。

(2) 大吹より上流の酸性泉

地形的に大吹より上流に位する酸性温泉水は何れも多量のSO<sub>4</sub>を含有するが、Cl含量は極めて少なく、数mg/lに過ぎない。これらの成因については大吹を形成する酸性熱水が地表面に近づいた時圧力の低下で沸騰し、同時に比較的揮発し易く、水に対する溶解度があまり大きくない成分即ちH<sub>2</sub>Sなどが一部揮発するであらう。この気化したH<sub>2</sub>SなどのS化合物は空気で酸化されて硫酸を生じ、これに地表水或いは浅い地下水が混合して湧出したものと想像される。この際始めの酸性熱水の中のHClは水に対する溶解度が著しく大きいので気化しないであらう。このことは上野精一博士の実験に依れば大吹の湯を採取し、これを少量蒸発した場合蒸溜液にCl<sup>-</sup>は含まれていないことが立証されている。即ちHClを含んだ熱水と平衡状態にある気体にはCl<sup>-</sup>は含まれていないのである。

d) 箱根大涌谷強酸性水

神奈川県箱根火山大涌谷では昭和35年ボーリングで深さ33.4mに達した処、突然強酸性水が水蒸気と共に噴出した。

その化学組成はH<sup>+</sup> 1400, Cl<sup>-</sup> 68800, SO<sub>4</sub> 84000, Na<sup>+</sup> 5000, Ca<sup>++</sup> 400, Mg<sup>2+</sup> 4000, Fe<sup>2+</sup> 3770, AL<sup>+++</sup> 7140, Mn<sup>++</sup> 1340, HBO<sub>2</sub> 470, Br<sup>-</sup> 13.5, I<sup>-</sup> 0.4, As 6.4, U 0.038, Th 0.029 mg/lである。

その後大涌谷で昭和43年秋神奈川県で地汙り防止の目的で65, 68, 75mの3本ボーリングを行い、それぞれcap rockを掘抜いた瞬間突然強酸性水が噴出した。

これらの酸性水は何れも著しくCl<sup>-</sup>、酸度に富んでいたが、Cl<sup>-</sup>の規定度と酸度とがほぼ一致することから(Fig. 9, 10参照)、これらの強酸性水に含まれる多量の硫酸はすでに岩石で中和されており、ほぼ中性の水に火山ガス中のHClが溶解したものと推定される。尚これらのクッサク井から放出される酸性水は日数の経過と共に水量が減少し、同時に噴出口における温度も次第に上昇し火山ガス(H<sub>2</sub>O, HCl, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> などからなる)だけになると131℃を示した<sup>12)</sup>。

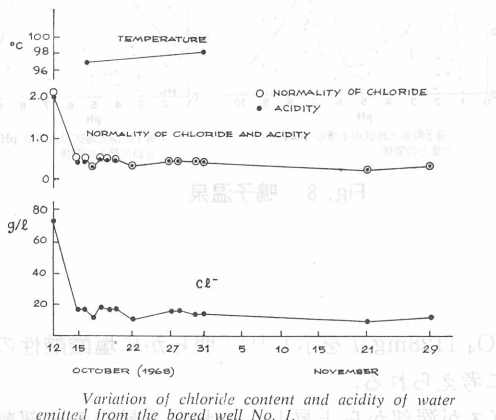


Fig. 9 箱根大涌谷強酸性水

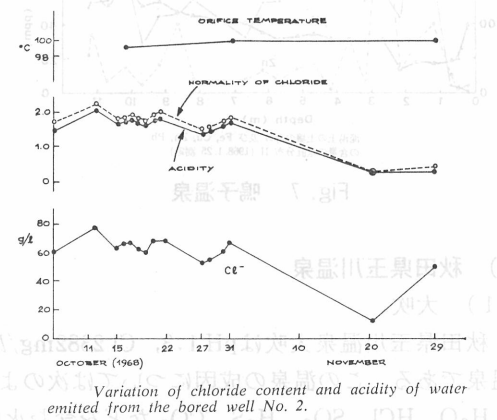


Fig. 10 箱根大涌谷強酸性水

従ってこの強酸性熱水の成因については、深處で少量の中性の地下水と多量の火山ガスとが接触した場合は火山ガスの組成に殆ど変化を及ぼすことなく平衡状態に達するであろう。このような場合には著しく塩酸に富んだ水溶液が生じる。

上野精一博士の実験に依れば大涌谷の掘サク井から出る130℃の噴気のHCl濃度と等しいHCl濃度の蒸気と平衡状態にある水のHCl濃度はCl<sup>-</sup> 70g/lを示し、掘サク井から採取した水のHCl濃度とはほぼ等しいことが判明した。Cl<sup>-</sup>の規定度と酸度がほぼ等しいことから地下水中に含まれる多量の硫酸はすでに中和されているものと考えられる。

実際に大涌谷の噴気地帯の土壌の浸出水のpHは最小値<sup>13)</sup> 1.9、沢水は2.2を示した。これらの水はCl<sup>-</sup>は極めて少ないが著しく硫酸に富んでいる。これらの硫酸は何れも噴気中に含まれるH<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>が空気で酸化されて生じた硫酸である。雨水がこれらの酸性土壌と接触して硫酸をとかして後地中へ浸透した場合高温のため容易に岩石で中和されるようである。このことは大涌谷の斜面に水平ボーリングして得られる温泉水が何れも中性に近いことから容易に理解される。

箱根火山の温泉の成因についてはアルカリ性熱水が本態で酸性泉はそれから揮発して生じた二次的生成物とする意見がある。

箱根湯の花沢の酸性泉弘法湯、権現湯(現在は何れも乱掘のため涸渇してない)は共に硫酸酸性の温泉でSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は著しく多いが、Cl<sup>-</sup>は2 mgに過ぎない。この酸性泉の成因についてはアルカリ性熱水中の硫化水素の一部が気化して上り、空気で酸化されて硫酸を生じ、これに浅い地下水が混入して湧出した二次的酸性泉で鳴子の滝湯型に属するであろう。然し大涌谷のボーリング井から噴出した強酸性水は深部で塩化物に富むアルカリ性熱水に硫酸が作用して塩化水素が発生するとする意見には賛成出来ない。その理由は大涌谷の地表面で多量に生成される硫酸は地表水或いは地下水とけて地中へ浸透すると高熱のため周囲の岩石で容易に中和されることは大涌谷に水平ボーリングで得た湯が何れも中性に近いことから明らかで、地中の深部に高温の遊離硫酸が多量に存在することは不可能であろう。著者は次のように考えている。

大涌谷のボーリング井から噴出するガスはH<sub>2</sub>O、HCl、SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>等を含み、三原山や浅間山の噴火口から放出されるものと類似のものと考えられる。従って箱根火山の場合は岩漿の揮発物が大涌谷に放出されており、これが本態であって深部でこれから分岐したものがその周囲にあり、それが上昇途中地下水と混合して一旦酸性水となり、岩石と充分反応して遂にアルカリ性に転じたものが湯の花沢付近の熱水であり、これからH<sub>2</sub>Sが一部気化して空気で酸化されて硫酸を生じ、これに浅い地下水が混合して湧出したものが酸性泉弘法湯、権現湯であると考えられる。これらの酸性泉は何れも著しく硫酸に富んでいるが塩化物は2 mg/lに過ぎない。かく考察すると箱根の場合は活火山と鳴子温泉型即ち瀧沼火山との中間に位する。そしてH<sub>2</sub>Sを含まないアルカリ性泉である宮の下、塔の沢、湯本などの温泉は箱根における最も末期の温泉であらう。

尤も瀧沼火山の火口湖瀧沼は水温14.6℃、pH 1.9、SO<sub>4</sub> 1011 mg/lであるが、Cl<sup>-</sup>は5 mg/lに過ぎない<sup>10)</sup>。この酸性水は鳴子温泉の本態をなす塩化物、硼酸、H<sub>2</sub>Sなどを含むアルカリ性熱水から沸騰に依ってH<sub>2</sub>Sの一部が揮発し、地表面付近で空気で酸化されて硫酸を生じ、これが地表水と混合して生じた二次的酸性水と考えることが出来るが、然し瀧沼の縁には噴気もあり、もしここにボーリングした場合大涌谷と類似のH<sub>2</sub>O、HCl、SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>などを含む火山ガスが噴出しない保証はない。大涌谷でさえ天然に存在する酸性泉は何れもCl<sup>-</sup>含量極めて少なく、硫酸に富んでいる。大涌谷の茶店がゆで卵を作るに使用している酸性の溜水や噴気は何れも殆どCl<sup>-</sup>を含んでいないのである。

このことについては次のように考えられる。H<sub>2</sub>O、HCl、SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>等を含む火山ガスが深部から上昇し、浅所でcap rockで遮断された場合、その僅かの間隙からガスの一部が上昇

し、これが浅い地下水に遭遇すると溶解度の大きい塩化水素は完全に吸収されて気体からなくなり、水蒸気、 $H_2S$ 、 $CO_2$  などからなる気体のみ地表面まで達するであらう。この $H_2S$ が空気中で酸化されて硫酸を生じ、これに浅い地下水又は地表水が混合して硫酸酸性水が生成される。

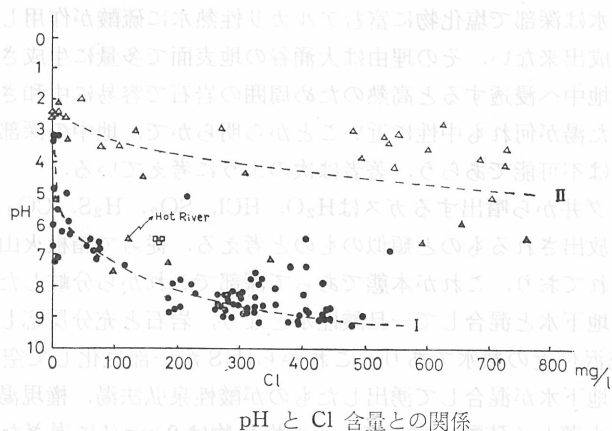
### e) Yellowstone Parkの温泉

米国のYellowstone National Parkは非常に広大なる面積を有するが、多数の間欠泉が存在するほか巨大なる温泉析出物で世界的に良く知られている。高温の温泉はLone Star, West Thumb, Upper Geyser Basin, Midway Geyser Basin, Lower Geyser Basin, Norris Geyser Basin等に多い。

GeyserとしてはOld Taithfulが最も有名であり見物人が群集している。この間欠泉は噴騰の高さ約40m、66分に1回、4分間ほど熱湯を吹き上げるが、非常に規則正しく噴騰する点で有名である。このことは近くに他の間欠泉や温泉がないことが大きい原因かも知れない。

ニュージーランドのWhakarewarewaの間欠泉の場合はPrince of Wales Feathers, Pohutu, Te Horu, Waikoroahi, Mahanga等が非常に接近して一直線に並んでいるためか、互いに影響し合い噴騰が非常に不規則である。

Yellowstone Parkにはアルカリ性泉、酸性泉など種々雑多な温泉が存在するがClを横軸に、pHを縦軸に取って提示するとFig.11となる<sup>14)</sup>。



- Upper Geyser Basin, Midway Geyser Basin, Lower Geyser Basin の温泉
- △ Norris Geyser Basin の温泉
- Mammoth Hot Springs

Fig.11 Yellowstone Parkの温泉

Norris Geyser Basinの温泉はUpper Geyser Basin, Midway Geyser Basin, Lower Geyser Basinの温泉と比較すると何れもClに比してpHの値が小さい方へずれている。即ち酸性が高まっている。その上Clが減少すると酸性が高まることを示している。Norris Geyser Basinの酸性泉は水温 $56^{\circ}C$ 、pH 2.1、Cl 11 mg/l、 $SO_4$  790 mg/lが示すように硫酸酸性である。

Clを横軸に取り、Brを縦軸に取って図示するとUpper Geyser Basin, Midway Geyser Basin, Lower Geyser Basin, Norris Geyser Basin, Mammoth Hot Springs, Calcite Springs, Crater Hills等の温泉はすべて綺麗な一直線上に配列されている<sup>14)</sup> (Fig.12参照)。このことはYellowstone Parkのすべての温泉は一つの熱水に地下水が種々の割合に混入して生成されていることを示している。

と考える。ここでは $H_2S$ を含んだ塩化物に富むアルカリ性の熱水が地下深处から上昇し、地表

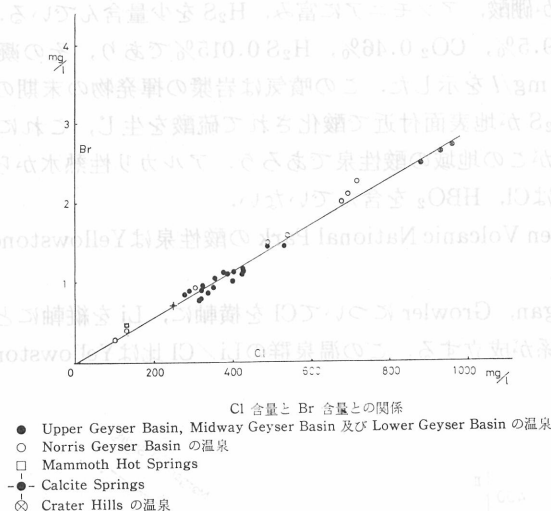


Fig. 12 Yellowstone Park の温泉

に近づくとも圧力の低下で沸騰を起し、水蒸気と共に $H_2S$ の一部が揮発し、これが空気中で酸化されて硫酸を生じ、これに地表水又は浅い地下水が混入して生じたものがYellow Parkの酸性泉であろう。実際に近接した酸性泉とアルカリ性泉とを相互に比較すると酸性泉はアルカリ性泉より殆ど常に $Cl^-$ が少なく、 $SO_4^{2-}$ が多い。

かくしてYellowstone Parkの酸性泉は二次的生成物で鳴子温泉の滝湯型に属する<sup>14)</sup>。

尚又ニュージーランドのWhakarewarewaの温泉も著者らの調査に依れば $H_2S$ を含む塩化物に富むアルカリ性熱水が本態で酸性泉はアルカリ性泉より地形的に常に上方にあり、二次的生成物で滝湯型に属する。

E. T. Allen 及び A. L. Day<sup>15)</sup>はYellowstoneの間欠泉は地中の空洞中の地下水をsuperheated steamで熱して間欠泉を生じるとし、又温泉水に含まれるmagmatic waterの含量を求めるのに $138^{\circ}C$ の蒸気を100% magmaticとしてこれで $5^{\circ}C$ の地下水を熱してYellowstoneの沸点 $93^{\circ}C$ の湯を作ったとして計算すると13.4%となるとしている<sup>15)</sup>。然し著者の意見では、Yellowstoneの間欠泉は地中の空隙又は空洞中の地下水を熱水とsteamとの混合物で熱して間欠泉を生じる。この場合の蒸気は深部から上昇する熱水が地表へ近づくとも圧力の低下に依り沸騰が起こる。その結果生じた蒸気である。従ってA. L. Day等の考えとは根本的に異なる。

Day等に依ると $138^{\circ}C$ はYellowstone National Parkにおける地表面でのsteamの最高温度とされているが、著者らの調査では地表面にはこのような高温の噴気は見出せなかった。Bore-holeの中ではこのような高い温度が存在する。

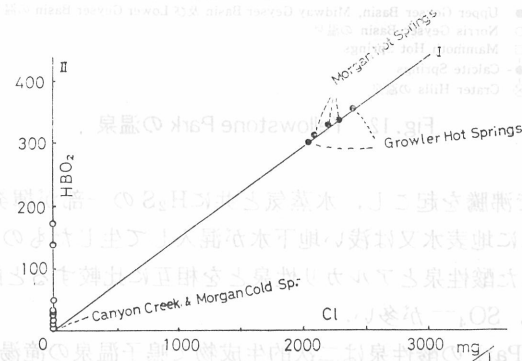
#### f) Lassen Volcanic National Park の温泉

米国California州の活火山Lassen Peakは海拔10,457ftであるが、山頂には約 $30^{\circ}C$ の無臭の水蒸気孔があるに過ぎない。その周辺にはBumpas Hell, Little Hot Springs Valley, Sulphur Works, Devils Kitchen等の酸性泉があり、そしてはるかに低い山麓にはMorgan, Growlerの弱アルカリ性泉が存在する。

温泉中に含まれるCl<sup>-</sup>とHBO<sub>2</sub>との関係をFig.13に示した。酸性泉とアルカリ性泉とでは明らかに別の直線上に配列されている。酸性泉は何れも高温でClは2～3 mg/lに過ぎないが、著しくSO<sub>4</sub>に富んでいるほか硼酸、アンモニアに富み、H<sub>2</sub>Sを少量含んでいる。Bumpass Hellの150℃の噴気の組成はH<sub>2</sub>O 99.5%, CO<sub>2</sub> 0.46%, H<sub>2</sub>S 0.015%であり、その凝縮水はH<sub>2</sub>S 58.3, NH<sub>4</sub> 2.3, HBO<sub>2</sub> 1.6, Cl 0 mg/lを示した。この噴気は岩漿の揮発物の末期のものとして推定される。このガス中に含まれるH<sub>2</sub>Sが地表面付近で酸化されて硫酸を生じ、これに地表水或は浅い地下水が混入して生じたものがこの地域の酸性泉であろう。アルカリ性熱水から沸騰して揮発した気体から生じた酸性泉の場合はCl, HBO<sub>2</sub>を含んでいない。

かく考察するとLassen Volcanic National Parkの酸性泉はYellowstone National Parkの酸性泉とは本質的に異なる。

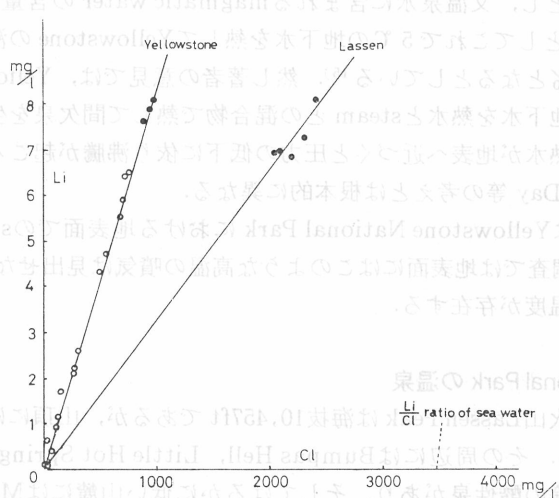
又アルカリ性泉Morgan, GrowlerについてClを横軸に、Liを縦軸にとって図示するとFig.14に示す如く正の直線関係が成立する。この温泉群のLi/Cl比はYellowstone Parkの温泉のLi/Cl比とは異なる。



Lassen Peak 附近の温泉の Cl 含量と HBO<sub>2</sub> 含量の関係

- Morgan 及 Growler の温泉
- Bumpass Hell, Little Hot Springs Valley, Sulphur Works 及び Devils Kitchen の温泉

Fig. 13 Lassen Park の温泉



Lassen Peak 附近の温泉と Yellowstone の温泉並に海水についての Li/Cl 比の比較

Fig. 14



## g) Hot Springs

米国のArkansas州のHot Springsは63℃, pH 7.4のアルカリ性単純泉で放射能泉である。固形物総量は280 mg/lに過ぎない。化学成分としてはCaとHCO<sub>3</sub>が比較的多い。温泉水に伴うガスはN<sub>2</sub> 97.6%, CO<sub>2</sub> 2.4%, O<sub>2</sub> 0.0 Vol%である。44個の源泉中2個だけ展示用に保存して他は湧出した温泉水を合併してタンクに溜め、一定温度に冷したもの(水を入れずに外側から水で冷す)を各bath houseへ供給している。

Display Sp. No.1及びNo.2の源泉をphoto.12に示す。No.1は巾50 cm, 奥行1 m, 洞穴内の水深75 cm, 水温58.2℃, pH 7.4, Rn 0.63×10<sup>-9</sup> curie/l, 湧水量30.5 l/min.

No.2は直径120cmの浅い皿状, 洞穴内の水深20cm, 水温54.7℃, pH 7.6, Rn 13.8×10<sup>-9</sup> curie/l, 湧水量40.6 l/min.



Photo.12 Hot Springs of Arkansas Display Springs

右洞穴がNo.1, 左洞穴がNo.2である。湧出した湯は合流してこの道路の下を流れて放流されている。

これらのDisplay Springsから湧出した湯は利用せずそのまま放流している。

この温泉の成因については次のように考えられる。

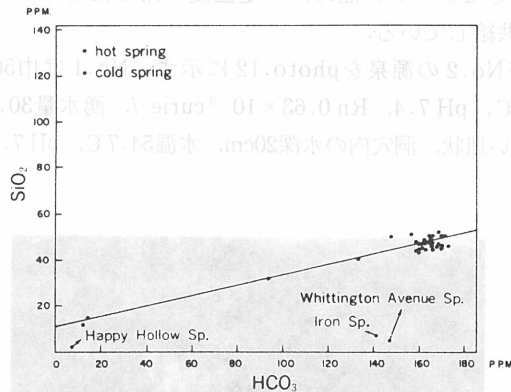
岩漿の揮発物質の最も末期の状態即ち水蒸気が大部分を占めCO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>が少量含まれ, O<sub>2</sub>は含まれていない。又塩化水素やH<sub>2</sub>Sのような硫黄化合物も含まれていない。このような気体が深部から上昇し, これが地下水と混合して炭酸を含んだ熱水を形成する。この熱水中の遊離炭酸がその周囲の岩石と反応して炭酸塩に富む熱水を生じ, これが上昇途中地下水と種々の割合に混合して各源泉の温泉水が形成されていることは各成分相互の間に正の直線関係が成立することから容易に理解される。

この温泉では二酸化マンガンを主成分とする黒色沈澱物が源泉から集積タンクへ湯を導くパイプ中に析出し, 白色の石灰華が集湯タンクからbath houseへ送るパイプ, 並びにbath houseから湯を川へ放流するパイプ中に析出する由である。この場合ラジウムは先に析出する二酸化マンガンの方が後から析出する石灰華より遙かに多い。恐らくマンガンは重炭酸塩として温泉水中に存在し, 湯が空気に触れると酸化されて二酸化マンガンとして沈澱し, これにラジウムが共沈するのであろう。

二つのDisplay Springsのうち温度の低いNo.2の方が温度の高いNo.1より, 著しくラドン含量が大きい。

水中のラドンの根源については大雨が降るとNo.2のラドン量は著しく増加することから浅処でtufa(温泉沈澱物で主成分はCaCO<sub>3</sub>)の中に蓄積したラドンが溶出するものと考え<sup>16)</sup>。

尚又Hot Springsの温泉はbicarbonate, silica, ラドンに富んでいるが、これに近接して存在する冷泉Iron SpringやWhittington Avenue Springはbicarbonate, ラドンに富んでいるが, silicaに乏しい(Fig.15参照)。この事は岩石中のsilicaは炭酸溶液で犯された場合、冷水より熱水にとけ易いことを示している。



Relation between silica and bicarbonate contents

Fig. 15 Hot Springs

最後にこの研究は東京大学、東京都立大学、東邦大学において協力いただいた多数の方々、及び浅間山、三原山で危険を犯して協力下さった現地の方々の努力の賜物で、ここに記して深く感謝する。

## 文 献

- 1) 野口：日化59 帙 902 (1938).
- 2) 野口：日化59 帙1225 (1938).
- 3) 野口：日化59 帙1341 (1938).
- 4) 野口：日化56 帙1495 (1935).
- 5) K. Noguchi and H. Kamiya : Bulletin Volcanologique, Organe de L'Association de Volcanologie Tome XXVI 367 (1963).
- 6) 野口：信濃教育第1076号 昭和51年7月号 19頁.
- 7) 相川, 野口, 今橋：温泉科学29巻, 204 (1978).
- 8) 野口, 福島：日化61帙677 (1940). 野口：温泉科学1巻1 (昭16).
- 9) K. Noguchi and J. Nix : Proceedings of the Japan Academy Vol. 39, No. 6, 370 (1963).
- 10) K. Aikawa, K. Noguchi and E. F. Lloyd : 温泉科学, 34巻, 73 (1984).
- 11) K. Noguchi and F. Miyazawa : Proceedings International Symposium on Water-Rock Interaction 202 (1976).
- 野口, 宮沢：温泉科学23巻139 (1972).
- 野口, 中川：温泉科学19巻40 (1968).

- 12) K. Noguchi, T. Goto, S. Ueno and M. Imahashi : Geothermics (1970) Special Issue 2 U. N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa 1970 Vol. 2, Part 1 561.
- 13) 野口, 相川 : 東邦大学教養紀要 6 号32 (1974).
- 14) 野口 : 温泉科学23巻54 (1972).
- 15) E. T. Allen and A. L. Day : Hot Springs of the Yellowstone National Park 40, 217 (1935).
- 16) K. Noguchi : 温泉科学33巻77 (1982).
- K. Noguchi : 温泉科学33巻83 (1982).

温泉研究センター(株)

野口 隆志

Recent Study on the Chemistry of Hot Springs  
 —— The Change of Chemical Components and  
 the Deterioration of Hot Spring Resources ——

YASUO KANBARI  
 Hot Spring Research Center

1. ま と め

温泉はもとより自然のままの状態で利用した方がよいものであるが、近年の温泉地では、温泉の化学組成が、温泉の発熱地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。温泉の化学組成が、温泉の湧出地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。温泉の化学組成が、温泉の湧出地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。

温泉の化学組成が、温泉の湧出地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。温泉の化学組成が、温泉の湧出地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。温泉の化学組成が、温泉の湧出地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。

2. 温泉の化学組成

温泉の化学組成が、温泉の湧出地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。温泉の化学組成が、温泉の湧出地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。温泉の化学組成が、温泉の湧出地帯から温泉の湧出地帯まで、温泉の成分が変化していることが、温泉の化学組成の調査から明らかになっている。