

エチオピアの温泉

九州大学温泉治療学研究所 古賀 昭人

(昭和46年9月15日受理)

Thermal Springs of Ethiopia

Akito KOGA

Institute of Balneotherapeutics, Kyushu University

1. はじめに

1970年2月から国連による地熱開発計画が実施され、その第1段階としてエチオピア全土における現存温泉の調査が地質学者、水理地質学者および地球化学者のもとに開始された。日本、ニュージーランド、フランス、エチオピアの共同調査である。著者はその地球化学担当として1970年12月から1971年6月まで半年間現地におもむき、その任に当たったが、短期間のこととて全部の分析は終了しえなかった。分析した試料は温泉水およそ300、井戸水や河水50、更に噴気孔ガス10個に達している。

ここ、エチオピアの現地において最も困ったことは、第1に地図がはっきりしていないことであった。詳細な地図はなく、あっても細部になると全くのでたらめであり、温泉の所在すら不確かであった。幸運にもアメリカ空軍の撮った航空写真があり、それを接ぎ合せて大きな地図を作り、これを縮小して地質図なり温泉所在地を記入できたが、現地人の中には温泉を秘密にしてその所在すら明らかにしないのもあった。第2に、よし温泉群が発見されたとしても道路はなく、ために石ころだらけの谷川を車で上下したり熔岩の山を越え岩を踏みくだき、時には砂漠の砂に埋ったり、湿地帯に車輪をとられたり、野獣の群におどかされたり、50°Cの気温に想像を絶するサンプリング行であった。第3に化学分析室の不備があげられる。1970年12月に著者がエチオピアに行った時にはpHメーターすらなく、ガラス器具、試薬類はもとより分析機器、更に分析者の技術および知識はほとんどゼロに近かったのである。

このような状況下で、とにかく第1次の地熱開発がなされたのであり、ともかくエチオピア全土における温泉の調査が強行されたのである。以下、エチオピアの温泉について地球化学的見地からその概況を述べる。

2. エチオピアの温泉

エチオピアは図1に示すように多くの温泉があるが、大別して2つの地帯に集中している。1つは紅海沿いに走る Eritrea-Danakil 低地およびその接続地、他は国土の中央を巾約100Kmで西南方向に走る地溝地帯である。前者は地溝地の西縁およびその接続地を含むものであるが、後者は大地溝地の部分のみならず高原の部分にも延びていて、その位置はちょうどアデ

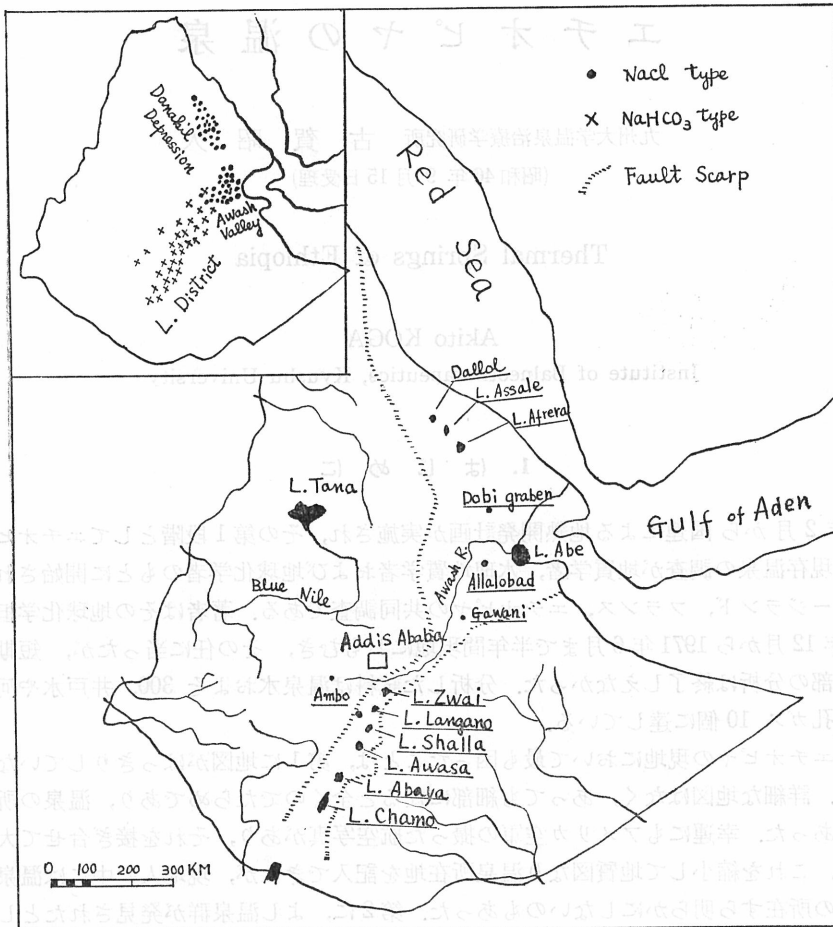


図 1. エチオピアの温泉

ン湾の延長方向に当たっている。このことはアデン湾形成の大構造に関する大地溝帯 (great rift Valley) を意味しており、それはそのままケニアにまで及び数多くの高温泉が存在している。

ここでは便宜上、1) Lake District, 2) Danakil Depression および 3) Awash Valley の3地区に分けてエチオピアの温泉について述べることにする。なお、分析した化学成分は、泉温・湧出量はもとより、pH, Na, K, Li, NH_4 , Ca, Mg, Fe, Mn, F, Cl, Br, I, SO_4 , HCO_3 , CO_3 , HBO_2 , SiO_2 , CO_2 , H_2S などである。

2.1. Lake District

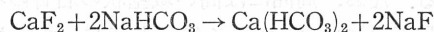
首府アジスアベバから西南の方向にかけて多くの湖が存在するが、Great Rift Valley の中央部にあたる。凡そ $20,000 \text{ Km}^2$ の面積で東と西はエチオピア高原 (平均海拔 $2,500 \text{ m}$ の高度) の急斜面によって囲まれている。

この地区には北から南にかけて Zwai, Langano, Abiata, Shalla, Awasa, Abaya, Chamo

などの湖があり、その周辺には多くの温泉があって湖に流入している。また、多くの断層線が Rift Valley に沿って走っており温泉はそこから湧出している。この地区の最も重要な火山活動はイグニブレイトの爆発であり、低い部分はイグニブレイトによっておおわれている。Rift Valley の床は多くの流紋岩生成物であり、イグニブレイトと時には関係があり、時には無関係の活動である。また大量の軽石や軽石状の tuff も見られる。これら軽石や黒よう石や流紋岩が最後の火山生成物である。更に湖の近くには多くの湖底堆積層が見られる。

さて、この地区の温泉での特長は HCO_3^- が多いことで、すべて $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ であり Ca が極めて少なく Na が多いので重曹泉タイプである(図1参照)。最高は Lake Shalla 周辺のもので 6100 ppm に達するものもある。これは、その地区が湖底堆積層からなっており、重曹を作り易いからだと考えられる。著者はさきに圧力釜を用いてドライアイス・種々の岩石粉末および水から HCO_3^- の生成実験を行ったことがある。これによると、 HCO_3^- の生成濃度は温度の上昇と共に増加したが、カリ長石、輝石安山岩は粘土、とくに腐植土と比べてそう HCO_3^- は生成しなかった。それ故に、温泉水中の HCO_3^- は火成岩よりも堆積層により容易に作られると云えるが、一方、反応溶液のカチオンの分析を行ってみると、低温 (50°C) では $\text{Ca} \gg \text{Na}$ であり、高温 ($140-150^\circ\text{C}$) では逆に $\text{Na} \gg \text{Ca}$ であった。このことは、高温の HCO_3^- タイプの水は一般に NaHCO_3 型 ($\text{Na} \gg \text{Ca}$) であり低温のそれは $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型であると云える。そして重曹は堆積環況下の比較的浅所でしかも比較的高温(およそ 150°C) の所で生成されることが分った。云いかえれば、 HCO_3^- の濃度の高い水は深部水でなく浅層水であると云える。一例として、Lake Shalla 南岸の温泉水の分析を書くと、pH:10.1, Na:4157, K:110, Li:0.5, Ca:2.4, Mg:0.96, Cl:1958, F:150, Br:42.5, I:0.1, SO_4 :22, HBO_2 :10.3, SiO_2 :177, HCO_3^- :5172, CO_3 :898 ppm であり泉温は 96°C であった。このことから $\text{Cl}/(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3)$ のモル比は 0.58 であり極めて低いが、L. Shalla 周辺の温泉はむしろ高い方であり南部の L. Awasa および L. Abaya 周辺は Cl が低いので、その比は 0.06 というほとんど重曹水であった。更に、この地区の温泉水の特長は F の含有量の大きいことであり、上記の温泉も多いけれども、L. Shalla は何と 300 ppm の F を含んでいる。中には $\text{F} > \text{Cl}$ の温泉もあり意外感にかられた。 HCO_3^- が多く、F もまた多いということから、両者間にお互いに関係があるということは容易にうなづかれる。事実、この地区の両者間には正の比例関係があり、 HCO_3^- を含む水が周囲岩石からの溶出に一役買っていることが分る。更に、この地区の岩石—黒よう石中の F の含有量は 2500 ppm であり、たとえばニュージーランドの軽石 440, 黒よう石 400, 流紋岩 300, イグニブレイト 410, 安山岩 190, 玄武岩 180 ppm に比し、凡そ4倍から10倍も含んでいる。

そこで、著者は種々の濃度の NaHCO_3 水を用い、岩石からの F の溶出実験を行った。条件は Rock/ NaHCO_3 溶液比=1:100, 反応時間は2時間、反応温度は 90°C (アヂスアベバの沸とう点—2500 m の高地) である。それによると、この条件下では玄武岩や黒よう石からの F の溶出は少なかったが螢石 (CaF_2) からの溶出は極めて多く、 HCO_3^- が 1230 ppm で F は 100 ppm, 3050 ppm で 200, 6100 ppm で 240 ppm と夫々多量の F が溶出された。この反応式は



のように右辺が可溶性のために反応が進行すると思われ、Lake District の温泉になぜ F が

多いのかの理由が解明された。

エチオピアにおける地熱開発の目的が地熱発電にある所から、地下熱水だまりの高温場所を求めようとするにであったが、熱水系の地下温度を示すインディケーターとして、次のような化学成分が考えられた。すなわち、1) high SiO_2 , 2) low Na/K, low Na/Li, 3) high Cl/total carbonate species, 4) high Na/Ca, 5) low Ca, HCO_3 , 6) low Mg, log Mg/Ca, 7) high Cl/F はすべて高温を意味し、ケイ酸の沈積物がある所は、過去あるいは現在 180°C 以上あることを示し、逆に石灰華の沈積物がある所は地下温度はそう高くないことを示す。

特に SiO_2 濃度は 110°C 以上の場合、石英の溶解度によって規制をうけるので、地下熱水温度の函数となっている。つまり、石英と平衡にあった水の温度を溶解度曲線から計算することができる。これによって、Lake District の温泉の地下温度を計算すると、ほとんど $150\text{--}160^\circ\text{C}$ であり高くはない。このことは Ca や Mg 濃度が極めて低い ($\text{Na} \gg \text{Ca}$) ことから考えられる。

また、Na/K 比もまた温度依存であるが、この地区はこの比が高く Na/Li, Cl/F, Cl/total carbonate species, 更に SiO_2 は沈積物がなく石灰華の沈積物があることなどから、Lake District は必ずしも有望な地熱地域とは断定できない。その上、若干の温泉は水蒸気で加熱された浅所の水であり、噴気孔ガスの分析結果も単なる地表熱に関連があるように見えた。

さらに、この地区の温泉は HCO_3 が極めて多い所から CaCO_3 に対して過飽和であり、いわゆるランゲリヤ指数から云えば、ほとんどの温泉がスケールを形成しやすい型であることが分っている。このことは、ボーリング時におけるトラブルのもととなる。

HBO_2 が少ないのも Lake District に限らず全エチオピア温泉の特長であるが、これは周囲岩石中に B が少ないためだと考えられる。また、河川水や井戸水も HCO_3 が多く、Cl が少なかった。河川水に Cl が少ない ($\text{Cl} < 10 \text{ ppm}$) のは日本と異なり大陸のように海から遠い国の雨水の特長であると考えられる。

2.2. Danakil Depression

Danakil Depression は紅海に沿った砂漠地帯にあり、Dallol (海拔 -200 m)、Lake Asale (-100 m)、Lake Afrera (-50 m) と海面下という低地である。したがって、著者が行った3月ですら気温は 50°C もあり、真夏には 68°C の記録もあるという世界で最も暑い所であり、サンプリングもために想像を絶した。しかし、多くの温泉水は極めて学問的に興味深かった。

A. Dallol

かつての海水が閉じこめられ、これが蒸発 (降水量は年間 60 mm , 蒸発量は 6000 mm) 濃縮されて生じた大塩原に火山活動のために生じた噴出物の固まりといった展開図が見られ、湖上には千枚皿形式の乾固跡があったり、スケートリンクやブラックマウンティンと呼ばれるチョコレート色の丘も存在する。所々に CO_2 を含む温泉水 (大鹹水) や極めて湧出温度の高い (110°C) のもある。特に 110°C の湧出温度をもつものは大変興味深く、これを採水すれば、とたんにローソク状に固化するという固まる温泉である。初めは白色であるが ($\text{pH}=3$)、放置すれば次第に黄色、橙色、褐色に変化していく。2価の Fe の酸化によるものである。Mg が多い MgCl_2 型の成分である。なお、周囲には高い城壁状の石膏の塔や丘があり、オトギの国の城を想起させる。また、最近までは K をとる鉱区も存在していた。

これらの成因としては以下のことが考えられる。前述のように、閉じこめられた海水が濃縮

されたものだが、海水を蒸発していくと最初に CaCO_3 や CaSO_4 が析出する。これが塔を作る。更に濃縮されると固状になり、溶解度および比重の差により種々の鉱物が層状をなして生成される。すなわち、halite (NaCl), Polyhalite ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Sylvite (KCl), Kieserite ($\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Kainite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), Rinneite ($\text{FeCl}_2 \cdot 3\text{KCl} \cdot \text{NaCl}$), Bischofite ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) などである。K や Mg 塩は原液の 1.54% まで減じた時に結晶始めるから、これらが残液に多く、ために固化する温泉みたいに MgCl_2 が多いのがこの地区の特長である。

更に、丘状の地にはイオウ臭ふんふんたるなかに幾つかの酸性泉がある。黄色、橙色、褐色の高さ 2m 強の塔が並び立ち大変カラフルである。これは食塩の固化したものであり、間歇的に極めて酸性 ($\text{pH} < 0.2$) の 102°C の食塩水が吹き出している。初めは無色だが、2価の鉄が酸化されて黄・橙・褐色と変化していく。この酸性は塩酸から来ていると考えられ、大塩原に所々出ている炭酸泉は、地下の CaCO_3 と HCl の反応により生じたものである。

B. Lake Asale

これも brine water であり、周囲の温泉も Cl が $6-28 \text{ g/l}$ という塩水であるが、Ca, Mg 含量から閉じこめられた海水とは断じがたい。

C. Lake Afrera

Lake Afrera は 70 Km^2 の面積をもつ湖だが、凡そ 160 g/l の塩分をもち、海水より5倍近い高塩分をもっている、周囲はすべて砂漠であり湖岸には白い泡が立っている。これに 50°C 前後の温泉水が流れこんでいる。この湖が Dallol のように古代の海水が Danakil Alps の隆起により閉じこめられ蒸発濃縮により生じたという説はどうも考えにくい。なぜなら、この湖水は海水が $\text{Mg} \gg \text{Ca}$ なのに比し $\text{Ca} \gg \text{Mg}$ であり35倍に及ぶ変化が周囲岩石とのイオン交換反応で行われるとは考えられないからである。もし、行われたとすれば周囲岩石は極めて Mg rich になっているはずであり、湖水に流入する温泉水は、すこぶる Mg 飽和であってしかるべきである。しかし現実には Mg は極めて少なく Ca/Mg のモル比は $1.0-40.1$ と $\text{Ca} \gg \text{Mg}$ の温泉が多く、どうしても Closed basin 説を考えざるを得ない。したがって、湖水に流れこんで来る温泉水は salt bed を溶しこんでくると考えられる。たとえば、Lake Afrera の湖岸の白い泡は有機物質だと考えられ、温泉水および湖水の有機物質を定量すると Cl 含量と比例関係があり、これらの温泉水は湖辺の evaporite 中の Cl および堆積層中の有機物質を溶かしこんでいると考えられ、Closed basin 説の一つの処拠となっている。

Lake Afrera に流れこむ数多くの温泉水は南西部および東部沿岸に多いが、溶存物質の含有量には多くの変化があり ($\text{Cl } 1000-32000 \text{ ppm}$)、湖岸の salt bed をとくして来ている他に東部沿岸では深部水の附加を幾分考えることも可能である。しかし、各地区による化学成分比の変化は極めて規則的であり、各地区の salt bed の性質の反映を示しているといえよう。 SiO_2 含量は低く、地下温度も大きいとは考えられない。

D. Dobi graben と Alalobad

Addis Ababa から紅海の Assab へ走る国道に近く Dobi graben と Alalobad がある。この地区がエチオピアで地熱的に最も有望な所である。両者とも NaCl 型であり、Cl 含有量は 700 ppm 前後であるが、両者の違いは次のような点である。すなわち、Alalobad の方が

SiO₂ 大, Na/K 小, HBO₂ 大, Li 大, F 小, NH₄ 大, Ca/Mg 大とすべて Dobi graben より高温であることを示している。事実, 湧出温度も Alalobad は沸とう泉が多く間歇泉もあり, SiO₂ 温度も 200°C 以上を示す。直径 20 m 前後の幾つかのふっとうしている池には siliceous sinter があり高温を裏づけている。また, コロイドケイ酸できれいな乳白色を示しているのもある。アムモニヤが多いのは周辺が湖底堆積物であるためであり特に新しく爆発したような間歇泉に多い。

Dobi graben は湧出温度が比較的低温 (50—70°C), Alalobad 地区の熱水が地下水により稀釈され, その間に化学変化が起きたものと考えられる。

E. Lake Abe 周辺

Awash 川は Abe 湖に流入しているが, この周辺にも温泉が多い。同様に食塩泉タイプであるが, 泉温は低温 SiO₂ 含量もまた低い。

2.3. Awash Valley

この地区は Rift Valley の北東部にあたる所であるが, 中央部を Awash 川が流れている。活火山も多く, 多くの温泉がある。

これらの中心地は Gawani であり, Awash 川に近くて多くの湿地帯に数多くの温泉が湧出している。この地区は Lake District の重曹泉タイプと Danakil Depression 地区の食塩泉タイプの混在点にあたり, 両者が入れ混っている。たとえば, Gawani の比較的高温 (65—85°C) のものはむしろ含重曹食塩泉であるが, 比較的低温 (40—50°C) のものは Cl が少なく重曹泉である。また, Lake District では F の高含量に特色があったが, この地区は北東に行くにつれ F の含有量が減少している (例. L. District で Cl/F=0.35—17.6 であったが Awash Valley では 6—190 となっている)。

また, この地区には首府アデスアベバに近いので入浴用やプールをそなえた温泉地がある。Sodera や Fantale, 更にアデスアベバには Filwoha であり, ホテルがある。すべてアルカリ性の Cl が少ない重曹泉で泉温も 40—60°C である。Addis Ababa 西方の Ambo も有名であり, 炭酸ガスを含んでいるので, mineral water として飲料水に盛んに使われており, エチオピアでは Ambo は mineral water の代名詞とさへなっている。

3. おわりに

以上, かんたんにエチオピアの温泉について述べた。エチオピアの地熱深査において, 前述の如く日本の4倍という面積で僅かに Alalobad 地域のみが地熱発電に有望であるという結論は淋しい感じがするが, 第2次調査についてこの地区は更に詳細に地質学, 地球物理学, 地球化学的に調査されるであろう。また, ドイツの地質調査所はアイストープ調査 (D, ¹⁸O, ³H) を行っており, この結果が明るみに出る日は近い。

更に, 鉱物資源の乏しいエチオピアで, 温泉水中の微量元素の定量により, その地区の鉱物の有無を調べるという調査も残されている。とくに, DalloI 周辺に鉱物資源 (たとえば, マンガン, 銅) が存在する可能性も強く, これからの研究に期待したい。