

昭和 49 年 8 月

原 著

エチオピア・ダロール地区の興味ある温泉

九州大学温泉治療学研究所 古賀昭人・野田徹郎

(昭和 49 年 3 月 3 日受理)

Hot Brine Waters at Dallol in the Danakil Depression, Ethiopia

Akito KOGA and Tetsuro NODA

Institute of Balneotherapeutics, Kyushu University

ABSTRACT

Dallol, in the northern part of the Danakil Depression in Ethiopia, is a flat, salt-encrusted plain. The area, below sea-level elevations as low as 120 meters, occupies a sedimentary basin filled to several thousand meters with evaporites, mostly bedded halite. Minor interbeds of clay shale, gypsum, anhydrite, and a thick bed of potash are also encountered.

From the salt pan, Dallol Dome rises as a notable topographic and geologic feature, composed of salt. On the Dome, several springs are discharging on salt cones, having over 100°C temperatures and very low pHs. The cones are spectacularly tall, brilliantly colored mounds of salt with intervening pools of yellow, orange and blue-green brine. These colors are probably due to the oxidation of ferrous to ferric chloride.

Just east of Black Mountain near Dallol Dome, there is a brine pool, of 110°C temperature and rich in $MgCl_2$. The water sample solidified shortly after collection, indicating supersaturation with salts. X-ray diffraction pattern of the solidified product showed an existence of bishofite ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$).

All Dallol waters are characterized by very high totals of dissolved solids (up to 525 g/kg). Salinity is generally proportional to temperature. They can be grouped into three chemical suites, all of which are strongly chloride; $Mg \gg \Sigma$ other cations; $Na \gg \Sigma$ other cations; and $Na > Ca > K \sim Mg$.

Of all Dallol waters, 2 representative samples (one is the salt-brine water of pH 0.2, and the other is the solidified hot spring water) were analysed in more detail, including trace elements, for a comparison with the solution in the process of continued evaporation of sea water. Thus, it was clarified that the chemical compositions of Dallol waters were one of steps in the concentration process of sea water and were just the reflection of the nature of evaporites around the hot springs.

1. はじめに

Dallol はエチオピアの Danakil 低地の最北端にあり、マイナス 120 m の低地である。かつての海水が Danakil Alps の隆起により閉じこめられ、これが蒸発 (年間降雨量 50 mm 以下、

蒸発量 3000~6000 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山といった風景が展開されており、湖上には千枚皿形式の乾固跡が延々と続いている。中心にドームがあり、その中に幾多の温泉が湧出し周囲には高い城壁状の石膏の丘や塔が連立している。湖上には炭酸ガスを含む温泉 (brine water) が所々にある。

著者の一人 (古賀) は 1971 年 3 月、当地におもむき、これらの温泉を採水分析すると共に、特に興味あると思われる 2 つの温泉 (1 つは pH0.2 の強酸性の brine water, 他は湧出温度は 110°C だが、採水すると、すぐ固化する温泉) を本邦に持ち帰り詳細な分析を行った。また、これら Dallol 温泉水の成因について、海水の濃縮実験結果からこれを解明したので報告する。

2. Dallol の概観

Danakil 低地は図 1 に示すように、紅海から 50~80 km 内陸に入り、長さ 180 km, 幅 60 km の面積があるが、evaporite は北部に多くあり、その低地の 2/3 は近年の熔岩流や湖成層によって占められている。K-塩が Dallol に見出されたのは、少なくとも 70 年前である。1906 年、イタリヤ人が K-塩の deposit を Black Mountain と呼ばれる所で発見した。この deposit は温泉によって作られたものであるが、第一次大戦中採掘され、連合軍の主なカリ原料であった。しかし、大戦後は経済的な理由により中止され、第二次大戦後まで放置された。1949 年、再び Dallol の K, Mg, S がエチオピアの会社により採られるようになり、1954 年以降、大々的に Dallol 地区の deposit の調査がなされた。

Dallol 地区の地質学的解説は Holwerda と Hutchinson (1968) により詳細になされている。すなわち、Dallol は数千メートルに及ぶ沖積層、湖成層や海成層の deposit によって充され

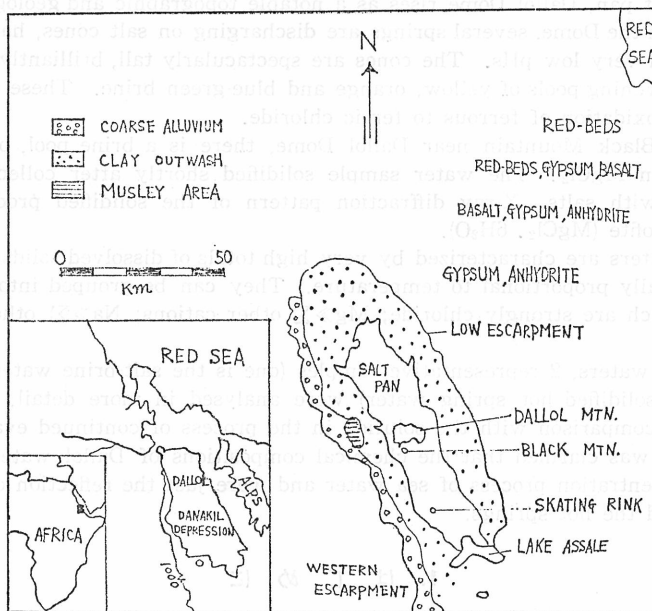


Fig. 1. Location and Topographic and Geological Features, Danakil Depression, Ethiopia (after J. G. Holwerda et al (1968)).

た推積盆地であり、Ralph M. Parsons 会社が掘さくした穴は 1000 m の深度に達しているが殆んど halite と云われている。所々に clay shale, 石膏, anhydrite, K-塩のベッドがある。MgCl₂ や MgSO₄ も所々にあるが evaporite の全体の深度は未知である。恐らく 5~6 km に達するであろう。基盤は海洋性の地殻 (basalt と gabbro) からなっている。

Danakil 低地の中央部分は大塩原であり、その中にドームがある。ドームの南に Black Mountain があり、Asale 湖の真北に Skating Rink と称される所がある。高度はマイナス 120 m 位だが、北、東、西の縁は大体 0 m で、とくに西側は 3000 m 級の山々につながる急峻さを示している。

大塩原内の丘やクレーターなどの地形の変化は、過飽和の温泉から沈積した塩の石筈状の生長によったり、1926 年の爆発による噴出物とか、地下の火成岩の圧力とか塩原内の溶液の移動によるものであろう。温泉やクレーターや丘が塩原に一系列に並んでいるのは、北々西へ走る断層があることを意味している。

Dallol の evaporite は世界的にもっとも新しいものとして知られるものの一つであり、第四紀のものとして信じられている。これらの evaporite は西側に近い方が最も層が厚い。火山岩の貫入や、時々起る爆発的な火山現象もこの盆地の一番深い所に起っている。evaporite ができた温度は 25°C から 55°C の間だろうと云われている。

Dallol の気温は相当に高く、著者らが現地へ行った 3 月初めでも 50°C を示しており、8 月には 68°C の記録があるという世界で最も暑い所である。

3. Dallor 地区の温泉

Dallor 地区から 11 個の温泉水が採取分析されたが、その採水点は図 2 に示す。すなわち、ドームの中心から 3 個 (1, 2, 3), Black Mountain 附近から 4 個 (4, 5, 6, 7), Skating Rink 附近から 1 個 (8), 他に大塩原から 3 個 (9, 10, 11) である。これらの分析結果は表 1 にあげられる。

Springs 1, 2, 3 はドームの中心にある。ドームは Dallol Mountain と呼ばれているが、凡そ長さ 3 km, 幅 2 km の広さがあり、高さは大塩原から 40 m 足らずである。温泉は何れも 100°C 以上で食塩で飽和され、カラフルな高いきれいな塔を作っている。色は黄、橙、褐色、さらに青緑色を呈するものもある。これらは鉄の酸化によるもので、何れも鉄の含有量が高く、貫入した玄武岩質の岩石に由来すると云われている。これらの温泉は 2~3 か月毎に場所を変え、一度噴出が止むと、塩の塔は色を失って、チョコレート色になって了う。近くの丘には native な S があり、SO₂ の臭いも流れ、著者が現地に行った時には、温泉水の極端に低い pH (何れも 1.0 以下) は硫酸によるものと考えたが、表 1 に見るように、これは塩酸によることが判明した。

ドームの南方に Black Mountain がある。これは 1926 年の爆発によるものとされているが、その名の示す通り真黒な塩の固まりで、この色は Mn の化合物によるものとされている。この周辺から 4 個採水されたが、pH は何れも 3 前後で、特長的な点は Mg ≫ Ca であり、SO₄ は極めて少なかった。特に興味あるのは Spring 5 で、1906 年 Tullio Pastori により発見された。過去の記録によれば湧出温度は 130°C とされている。しかし、1971 年の著者らの採水時には 110°C であった。大部分が MgCl₂ で、採水すると途端に固化してロウ状になり固ま

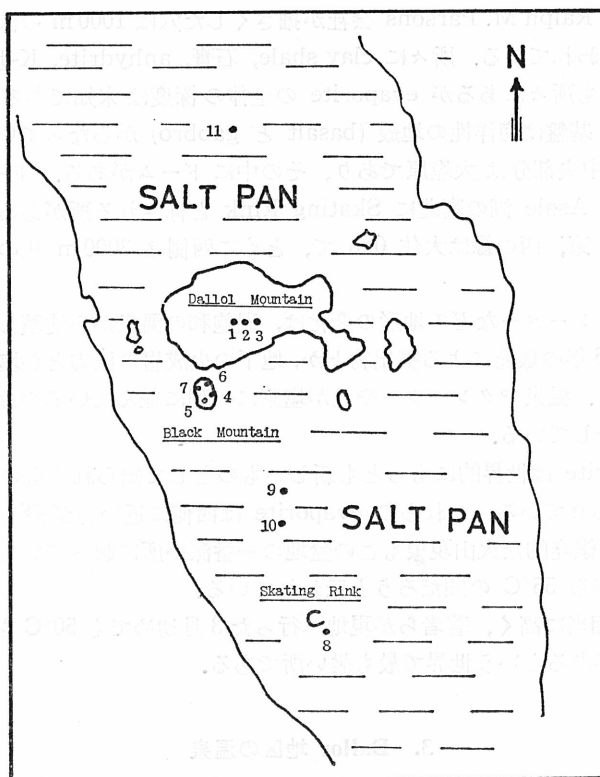


Fig. 2. Sampling Points of Waters at Dallol.

る温泉である。

更に Dallol のドームの南 15 km, 大塩原の真只中に Skating Rink と呼ばれる所がある。直径 90 m, 高さ 15 m のチョコレート色の壁が周りを囲んでいる。その近くに湖面が割れた

Table 1. Chemical Analysis

Spring No.	T	Flow (l/s)	pH	H ₂ S	CO ₂	HCO ₃	CO ₃	NH ₄	Li	K
1	>107.5	0.1	0.5	1.3	0	0	0	n.a.	5.5	3570
2	105	small	<0.5	1.3	0	0	0	n.a.	4.4	2126
3	hot	—	<1.0	1.0	0	0	0	n.a.	7.0	5680
4	41	—	3.5	4.6	0	0	0	n.a.	5.2	559
5	110	2	3.0	n.a.	0	0	0	n.a.	4.1	3600
6	70	nil	<3.0	n.a.	0	0	0	n.a.	8.8	8300
7	hot	—	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	10.0	7640
8	34	nil	n.a.	n.a.	n.a.	69	0	n.a.	3.3	5180
9	cool	—	6.1	0.7	476	146	0	n.a.	3.0	5190
10	cool	—	5.9	0.8	748	147	0	n.a.	4.0	6040
11	30	nil	6.6	0.8	92	85	0	n.a.	0.5	1550

n.a.: not analysed

感じで緑色に見える水があり中性である。Spring 8 であるが、温度は 34°C で NaCl-CaCl_2 系の水である。附近の塩原は千枚皿型式となっており、乾固跡が判然としている。

この他、幾つか温度はないが、Dallol のドームの南方および北方に CO_2 の泡を出している brine water がある。Springs 9, 10, 11 であり、何れも Fe が極めて少ないのに Mn が多い特長がある。これらの CO_2 は地下の炭酸塩と酸性の brine water との反応により生じたものとされている。

総括すると、これら Dallol の温泉水は 30°C から 110°C の範囲で、pH は <0.5 から 8.8 に及んでいる。塩含有量は一般に湧出温度に比例している。そして、これらは3つのタイプに分れ、1) $\text{Mg} \gg \Sigma \text{ other cations}$, 2) $\text{Na} \gg \Sigma \text{ other cations}$ と 3) $\text{Na} > \text{Ca} > \text{K} \sim \text{Mg}$ である。また、特長的なのは高温水に Fe と Mn が多いことで、Fe は 806 から 9410 ppm, Mn は 86 から 386 ppm に達している。

更に特長的なのは Na/K 比であり、0.7 から 106 に及ぶ。なぜ、これら多彩な変化があるかは第5節におけるモデル実験から論ずることとする。

4. Spring 1 と 5 の詳細な分析

前述のように、著者の一人は Dallol の Spring 1 と 5 を日本に持ち帰り、再度詳細な分析を行った。その結果は表2に示される。Spring 5 は固化したもので、着色瓶に封ろうしていたが、次第に上部より酸化して採水時に白色だったものが黄色から橙色へと変じつつあった。なお、表2において、Spring 1 は mg/l で成分を示しているが、Spring 5 は脱水剤(シリカゲル)をおいたデシケーターに移し、分析にはそのつど、ある量を重量測定して用いたので、その結果は mg/kg で表示してある。

エチオピアにおいて測定した表1の Spring 1, 5 と上記分析結果はよく一致しているが、表2にモル比で表わしたように Spring 1 と 5 とは Cl/F 比をのぞき、極めて対称的な溶液であることが分る。すなわち、Spring 1 は強 NaCl 型なのに比し、Spring 5 は強 MgCl_2 型である。Spring 5 は、したがって吸湿性が強いが、X 線回折をとれば Bishofite ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

of Dallol Waters (in ppm).

Na	Ca	Mg	Fe	Mn	F	Cl	SO_4	HBO_2	SiO_2
101000	6740	2910	6170	360	37.5	182700	2971	n.a.	n.a.
110000	1370	1390	7520	171	42	184200	4910	n.a.	n.a.
92500	3440	5260	9410	357	49	184000	3400	n.a.	n.a.
1100	4900	92200	1572	126	2	276000	85	n.a.	n.a.
1945	6280	104000	806	86	20.5	312000	489	n.a.	n.a.
4190	8140	81400	1790	234	4.3	263200	524	n.a.	n.a.
3000	7040	84800	2260	386	6	272000	41	n.a.	n.a.
68300	27780	5240	<0.1	14.6	1.3	170400	218	n.a.	20
69800	21500	6960	<0.1	27	2.8	169800	313	149	28
62600	33200	5820	0.7	17	4	173300	212	261	19
97000	4090	3040	0.1	12.3	<0.5	161500	1220	n.a.	20

Table 2. Chemical Analysis of Dallol Waters (ppm) by Koga and Noda.

	Spring 1	Spring 5		Spring 1	Spring 5
S.G.	1.211	1.41	F ⁻	113	186
pH	0.2	2.0	Br ⁻	86	5600
Na ⁺	108000	2570	I ⁻	17	0
K ⁺	5800	4710	SO ₄ ²⁻	6700	259
Li ⁺	6.4	3.9	PO ₄ ³⁻	25	0
Rb ⁺	4.1	0.5	NO ₃ ⁻	2.9	179
Cs ⁺	0.5	7.5	HBO ₂	404	327
NH ₄ ⁺	197	1041	SiO ₂	120	28
Ca ²⁺	5100	2320	Na/K	31.7	0.93
Mg ²⁺	3550	104600	Na/Ca	36.8	1.93
Sr ²⁺	148	105	Na/Mg	32.2	0.026
Fe ²⁺	6930	510	Ca/Mg	0.87	0.01
Al ³⁺	96	300	Cl/F	1077	1154
Mn ²⁺	395	56	Cl/SO ₄	91	4189
Cl ⁻	225380	401100	Cl/B	690	1508

のラインだけが明りょうに現われた。

固まる温泉は、吉田ら (1968) により北海道十勝岳新々噴火口で 1964 年に発見されたが、Dallol の Spring 5 は、それと同様な固まる温泉である。吉田らによると、十勝岳のものは約 600 g/l に達する多量の物質を含んでおり、60°C で固化してしたが、再加熱すると 100~110°C で完全に液化するという。初めは無色透明であったが、次第に鉄の酸化により黄色状を呈したと記されている。この点は全く Dallol の Spring 5 と同じであるが十勝岳新々噴火口温泉の固まる温泉の X 線回折をとれば、Halotrichite FeAl₂(SO₄)₄·22H₂O, Pickeringite MgAl₂(SO₄)₄·22H₂O, Alunogen Al₂(SO₄)₃·16.5H₂O の 3 種の鉱物の存在が確認されている。すなわち、この温泉は Al, Fe, Mg などと SO₄ イオンとで上記の 3 種の結晶を形成するのに多量の水を結晶水としてとり入れるため、温泉水全部が固化してしたが、塩化物の結晶は確認されていない。

Dallol の Spring 1 は全成分量 326 g/l に及ぶ高含量の食塩泉で、pH は 0.2 の強酸性である。Na/K 比は 31.7 で海水の 37.8 より小さい。Li, Rb, Cs など稀アルカリ元素も僅かながら含有されている。NH₄⁺ の多いのは地下からの加熱蒸気からの供給によるのかも知れない。Ca>Mg で Sr も多い。Fe は強酸性のためか極めて多く、Mn も同様に多いのは Dallol の強酸性泉の特長である。NO₃⁻ は少なかったが PO₄³⁻ は多量濃縮されている。これに反し、Spring 5 は変った組成をもち、pH は 2.0 であったが 524 g/kg の塩含量を有している。K>Na で Na/K 比は 0.93 と極小であり、Cs>Rb のように Cs が多く濃縮されている。また、NH₄⁺ が極めて多く、同様 NO₃⁻ も多いなど、チッ素化合物の濃縮が目立つ。Mg≫Ca で、Spring 1 の Ca/Mg 比が 0.87 に比し、Spring 5 のそれは実に 0.01 と低い。同様に Na/Mg 比も Spring 1 より 1300 倍も小さい。MgCl₂ 型であるが、Br⁻ が多量に濃縮されているのは興味がある。SO₄ の含量も小さく、PO₄³⁻ も Spring 1 と反対に含有されていない。SiO₂ の含量も極めて少なかった。

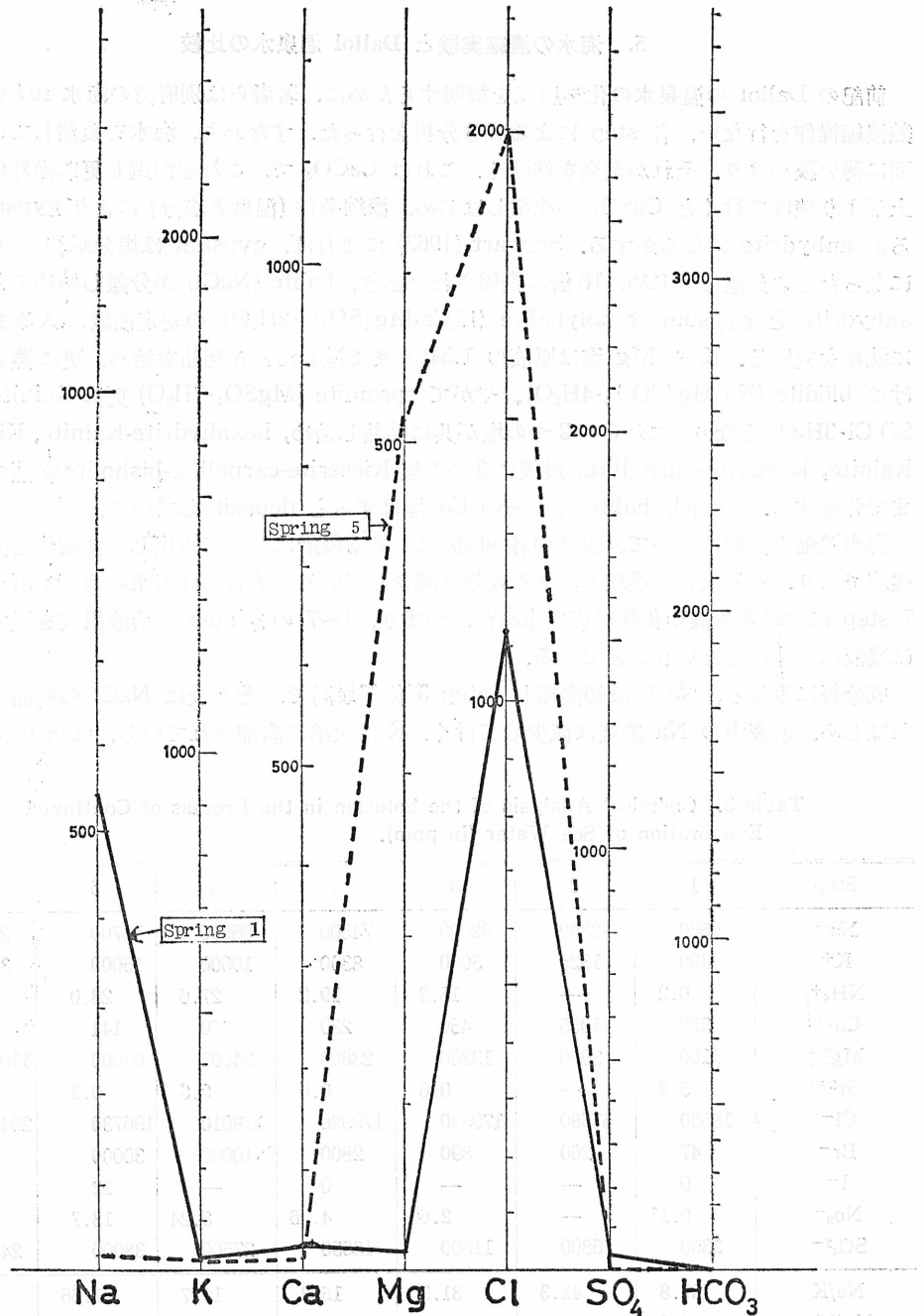


Fig. 3. Main Constituents in Dallol Waters (diluted with 200 times).

図3は Dallol の Spring 1 と 5 の主成分を示す。濃度が高いので、200 倍にうすめたのを書いてあるが、図より Spring 1 は NaCl 型、Spring 5 は MgCl₂ 型と判然としている。

5. 海水の濃縮実験と Dallol 温泉水の比較

前記の Dallol の温泉水の化学組成を解明するために、著者らは別府湾の海水 10l を採り加熱濃縮操作を行ない、各 step による成分分析を行った。すなわち、海水を濃縮していくと表面に薄い膜がはり、それが蒸発を妨げる。これは CaCO_3 で、これを汙過し更に赤外線加熱を上部より続けて行くと CaSO_4 が沈積しはじめ、濃縮条件(温度と塩分)により gypsum になるか anhydrite になるかする。Stewart (1963) によれば、gypsum は塩分が初めの 3.35 倍になったとき分離しはじめ、10 倍に濃縮されたとき、halite (NaCl) が分離し始めるという。anhydrite と gypsum は polyhalite ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) の安定領域に入るまで一緒に沈積を続ける。K や Mg 塩は原液の 1.54% まで減じたとき結晶を始め、更に蒸発がつけば blödite ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、やがて epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 更に Kainite ($\text{KMgSO}_4\text{Cl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) となり、これらの 2 つの塩が共に結晶し始め、hexahydrate-Kainite, Kieserite-Kainite, Kieserite-Carnallite, 最後に 3 つの塩 Kieserite-carnallite-bishofite が蒸発が終るまで分離する。この間、halite や少量の Ca 塩はずっと deposit している。

海水濃縮の実験において、表 3 の各 step は、ある段階において析出した沈積物を汉過した残液であり、ある成分は濃縮し、ある成分は減少している。著者らは海水の濃度を原点とし、7 step における溶液の化学組成を求めた。つまり、1~7 の各 step の溶液組成を経て、遂には残液はなくなるということである。

成分毎にみると、Na は最初濃縮し、step 3 位が最高で、その後は NaCl の結晶として落ちはじめ、溶液中の Na 濃度は減少して行く。K は次第に濃縮されていき、step 6 位まで析

Table 3. Chemical Analysis of the Solution in the Process of Continued Evaporation of Sea Water (in ppm).

Step	1	2	3	4	5	6	7
Na^+	9560	32300	92000	74500	66500	14700	2700
K^+	430	1325	5000	8300	10600	15000	3820
NH_4^+	0.2	—	15.2	19.2	27.6	28.0	136
Ca^{2+}	370	1055	450	280	270	144	100
Mg^{2+}	1100	3900	13200	23600	34000	64000	110000
Sr^{2+}	5.8	—	0.6	0.6	0.6	0.3	0.3
Cl^-	18530	57680	179540	179920	178010	196730	294140
Br^-	47	260	890	2800	10000	30000	0
I^-	0	—	—	0	—	22	—
NO_3^-	0.11	—	2.66	4.96	8.24	13.7	37.2
SO_4^{2-}	2350	6800	11800	18650	27500	38000	24100
Na/K	37.8	41.3	31.3	15.3	10.7	1.66	1.19
Na/Mg	4.6	4.4	3.7	1.7	1.0	0.12	0.01
Ca/Mg	0.21	0.17	0.021	0.007	0.005	0.0013	0.0005
Cl/SO_4	8286	8135	9625	7528	6915	10752	1695
Cl/SO_4	10.7	11.5	20.6	13.0	8.8	7.0	16.5
$\text{Cl}/\text{NO}_3 \times (10)^3$	290	—	117	63	38	25	14

出することなく最後になって沈殿する。NH₄⁺ は濃縮されるだけで、NO₃⁻ も同様な傾向をたどる。Ca は最初の段階で濃縮が起り、原液の3倍位濃縮されたあとはCaCO₃ やCaSO₄ として析出が始まり、あとは次第に減少して行く。これに反し、Mg は濃縮される一方である。Sr も減少をつづける。Cl は一方ではNaCl などの沈積が起っても、溶液の濃度からは増加の一路をたどり、F⁻ も次第に濃縮し最後段階では急上昇する。Br⁻ の増加の割合は甚しいが最終段階では析出して残液にはなくなってう。I⁻ も同様である。SO₄ は6 step まで増加するが最終段階には幾分減少する。

これらの変化を成分間の比で表わすと興味ある結果がえられる。たとえばNa/K 比は2 step において少し増えるが、以後はNaCl の析出と共に急激に減少しはじめ、step 7 におけるNa/K 比は1.19 となった、この点、Dallol の spring 5 の0.93 に似かよっている。Na/Mg 比もNa はNaCl として析出するのに対し、Mg は残液にとどまるので、その比は460 倍の変化をもち、Ca/Mg 比もその変化は極めて大である。Spring 5 のNa/Mg, Ca/Mg 比とstep 7 とを比較してみると、Spring 5 と同じ傾向をもつことが分る。Cl/F 比は海水の濃縮の場合、相当に比は大きい、step 7 でspring 5 のそれに近づく。Cl/SO₄ 比は海水の全濃縮過程を通じてそれ程の変化はないが、spring 5 のSO₄ が極めて少ないのは還元作用が起った結果だと考えられる。Spring 5 にNH₄⁺ やNO₃⁻ が極めて多い事実はstep 7 でこれらが極めて濃縮される事実——たとえば、Cl/NO₃(×10³) 比で20倍以上濃縮されて14まで低下する(spring 5 は3.9)——とよく一致していると云えよう。またspring 5 にBr⁻ が相当濃縮されていたが、これはstep 6 で30000 ppm に及ぶBr⁻ が濃縮されていた事実(step 7 では消失)に近い。

図4は海水を濃縮して行く過程のNa-Ca-Mg の変化を示す。Spring 5 はstep 7 に近い。つまり、Dallol の spring 5 は海水を濃縮して行った場合の最後の残液に近いことを意味している。

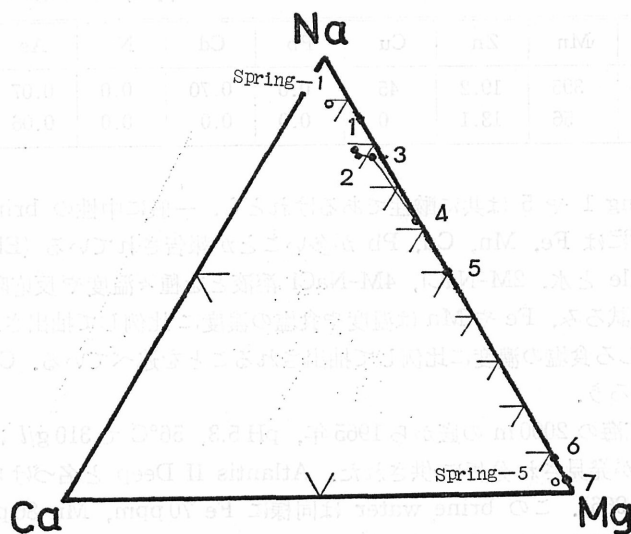


Fig. 4. Variation of Na-Ca-Mg in the Solution in the Process of Continued Evaporation of Sea Water.

以上の結果から Dallol を眺めてみると、海水が閉じこめられ蒸発濃縮が始まり、最初に CaCO_3 や CaSO_4 が析出して、Dallol 地区特有の城壁や塔ができ上がったと考えられ、ついで濃縮が進むと固状になり、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したと考えることができる。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), kiserite ($\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 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 ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) が Dallol に層をなしており、最後の残液が固まる温泉 spring 5 である。

6. Dallol 温泉水の微量元素

著者がエチオピア滞在中にフランスの Bureau de Recherches Geologiques et Minieres (BRGM) Laboratory の求めに応じて、幾つかの代表的なエチオピアの温泉水の微量成分を分析してもらったことがある。この中、Dallol の Spring 1 と 5 の定量結果を表 4 にあげ、一方著者が本邦に持ち帰った試料の分析結果を表 5 に示す。採水日が異なるので両者の定量値は必ずしも完全に一致しないが、傾向はよく一致している。すなわち、Spring 1 は特に Cu, Zn, Hg が多いことで Fe, Mn もまた多い。これに対し Spring 5 は Zn だけが多く含まれているだけで他は少ない。

Table 4. Heavy Elements in Waters at Dallol (in ppm) by BRGM.

	Fe	Mn	Ni	Mo	Cr	Pb	Cu	Zn	Ag	Au	Hg	As
Spring 1	6170	420	<0.5	≤0.5	≤0.1	1	2.3	39.5	≤0.1	≤0.1	12	≤0.1
5	806	150	<0.5	≤0.5	≤0.1	1.3	≤0.5	11.5	≤0.1	≤0.1	≤1	≤0.1

Table 5. Heavy Elements in Waters at Dallol (in ppm) by Koga and Noda.

	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	As	Hg	Ag
Spring 1	6930	395	19.2	45	0.0	0.70	0.0	0.07	3.9	0.0
5	510	56	13.1	0	0.0	0.0	0.0	0.06	0.13	0.0

Dallol の Spring 1 や 5 は共に酸性であるけれども、一般に中性の brine water で H_2S 含量の少ないものには Fe, Mn, Cu, Pb が多いことが報告されている (Ellis, 1968)。彼は andersite や shale と水、2M-NaCl, 4M-NaCl 溶液とを種々温度や反応時間を変えて微量元素の抽出実験を試み、Fe や Mn は温度や食塩の濃度に比例して抽出されること、Cu や Pb は温度よりむしろ食塩の濃度に比例して抽出されることを述べている。Cl と錯イオンを作りやすいからであろう。

Dallol に近い紅海の 2000m の底から 1965 年、pH 5.3, 56°C で 310 g/l に達する高塩含量の brine water が発見され分析に供された。Atlantis II Deep と名づけられるものである (Miller, et al, 1966)。この brine water は同様に Fe 70 ppm, Mn 86 ppm, Zn 3 ppm, Cu 1 ppm を含み、近くに鉄の deposit が存在している。つまり、現在鉱床が紅海の底にできつつあるのである。

このことは、Dallol の brine water 中の高含量の微量成分と決して無縁ではないことを示す。

7. おわりに

エチオピアの Dallol 地区の evaporite は世界でも最も新しいものの一つであり、第四紀のものとして知られているが、火山岩の貫入や時折起る火山作用のため、salt-bed の上昇やら幾つかの温泉が散在する理由となっている。これらの温泉水はすべて高濃度の brine water であり、飽和状態になっているものもある。

著者らは、これらの温泉水の分析と平行に海水の濃縮実験過程における成分の組成の変化から evaporite 生成のメカニズムを知ると共に、湧出している温泉水の組成が海水の濃縮ステップの一つの段階であり、周囲 evaporite の組成の反映であることを解明した。

終りに、国連によるエチオピアの地熱調査で Dallol に同行した Mr. E. F. Lloyd および、種々化学的論議を行った Dr. R. B. Glover, さらにエチオピア鉱山省の職員諸氏に感謝する。

文 献

- 1) Ellis, A. J.: Natural hydrothermal systems and experimental hot-water/rock interaction: Reaction with NaCl solutions and trace metal extraction, *Geochem. et Cosmochim. Acta*, **32**, 1356-1363 (1968).
- 2) Holwerda, J. G., Hutchinson, R. W.: Potash-Bearing Evaporites in the Danakil Area, Ethiopia, *Economic Geology*, **63**, 124-150 (1968).
- 3) Miller, A. R., et al.: Hot brines and recent iron deposits in deeps of the Red Sea, *Geochem. et Cosmochim. Acta*, **30**, 341-359 (1966).
- 4) Stewart, F. H.: Marine evaporites, U.S. Geol. Surv. Prof. paper 440 (1963).
- 5) 吉田稔, 小沢竹二郎, 岩崎岩次, 小坂丈子: 固化する温泉, 十勝岳新々噴火口温泉と温泉固化生成物(温泉の固まり), *温泉科学*, **19**, 1-14 (1968).
- 6) United Nations Ethiopia, Investigation of Geothermal Resources for Power Development, UNDP, p. 330-349 (1971).