



解 説

大陸縫合帯 (Suture Zone) の温泉 (1)

—アルジェリアのアトラス山脈の温泉—

西 村 進¹⁾

(平成 24 年 3 月 12 日受付, 平成 24 年 6 月 6 日受理)

Hot Springs along Suture Zone (1)

—Hot Springs along Atlas Mountain Range, Algeria—

Susumu NISHIMURA¹⁾

Abstract

There are some hot springs in the non-volcanic area belong to the subduction zone, as Nanki-Shirahama and Arima hot springs and also some hot springs belong to the suture zones, such as Atlas mountain range in Algeria, Zagros and Albortz mountain ranges in Iran and the Maizuru belt in Japan.

This paper is firstly discussed on the occurrence of hot springs along Atlas mountain ranges of the youngest suture zone between these three suture zones. This mountain range is found on the southern side of Mediterranean Sea. Twenty three hot springs along Atlas Tellian mountain range has been surveyed and discussed.

These hot springs have some characteristics, as follows :

- ① These non-volcanic hot springs are belong the seismic belt ;
- ② these springs have broad temperatures ranging from 18 to 96°C, and various types of mineral springs, and
- ③ these springs contain many kinds of chemical elements in rich amounts with high content of free CO₂.

Key words : Non-volcanic hot springs, Suture zone, Algeria, Atlas mountain ranges, Seismic belt

要 旨

非火山性の南紀白浜や有馬温泉のような島弧の沈み込みスラブと関係のある温泉がある。その他に大陸縫合帯に密に分布していないが非火山性の温泉が、アルジェリアのアトラス山脈、イランのザクロス山脈、アルボルツ山脈や日本の舞鶴帯に見られる。これらの年代の異なる三

¹⁾ 特定非営利活動法人 シンクタンク京都自然史研究所 〒606-8305 京都市左京区吉田河原町 14, 近畿地方発明センター内, ¹⁾ NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, Kinki-chiho Hatsumei Center, Yoshida-Kawaramachi 14, Sakyo-ku, Kyoto 606-8305, Japan. E-mail tkinh-1@isis.ocn.ne.jp, TEL 075-761-2526, FAX 075-761-2544.

縫合帯の温泉がある。

本稿では、ユーラシア大陸とアフリカ大陸の間に現在発達している縫合帯の南縁のアルジェリアの前アトラス (Atlas Tellian) 山脈沿いに湧出する温泉について報告する。

その特徴は①非火山性でありながら、縫合帯の狭い帯状の地震帯に自噴泉が分布する、②沸騰泉から冷鉱泉がみられ、多種の泉質をもつ、③主要イオン組成は非常に多様で含有量も多いが、泉温に関係なく遊離炭酸を多く含有し、熱水との関連が推察できる。

キーワード：非火山性温泉、縫合帯、アルジェリア、アトラス山脈、地震帯

1. はじめに

1973年3月から6月にかけて、アトラス造山帯、ユーラシアとアフリカ大陸の縫合帯の南側のアルジェリアの前アトラス (Atlas Tellian) 褶曲帯の中間の凹地ほぼ中央のエルアスナムを中心に、(株)内外コンサルタントがセメント工場の立地の可能性についての調査をアルジェリアの依頼で実施した。その内外コンサルタントの駐在員の後輩を通じて、別の課題「エルアスナム地域の灌漑用の地下水の調査」がアルジェリアの水資源公社 (SNWC : Societe Nationale des Wateriaus de Construction) から、調査依頼が著者のもとにあった (Naigai Consultant Co. Ltd., 1974)。

調査手段としては、地質調査 (一部ボーリング調査を含む)、堆積盆の基盤の構造を知るための重力測定や、地下水の存在を知るために比抵抗測定を行った。その調査には、アルジェリア水資源公社から2名の助手、ランドローバ1台と運転手がつき、通訳として、フランスに留学中の日本の学生1名を雇い行った。現地を訪れるにあたっては、調査報酬としては高額であったが、実は外貨に換えられないアルジェリア・ディナールと、ビジネスクラスの航空券が付与された。ただし、週2日の休暇は、すべて自分の研究のために使って良いとの条件であった。そこで、首都アルジェからサハラ沙漠の入り口の街ラグアットまでの縫合帯であるアトラス山脈の前アトラス (Atlas Tellian) ならびに後アトラス (Atlas Saharien) を横断して、アトラス山脈の構造を重力測定で調査をした。

その前アトラスの北の褶曲軸の北側の衝上断層沿いに自噴状態かそれに近い状態で湧出している温泉を見て回った。その際、アルジェの本屋の倉庫でフランス時代の貴重な文献、地図を手に入れることができた。その中に、温泉の情報も収集することができた (Guigue, 1940, 1947)。主に土、日の休暇を利用して、これらの温泉を尋ね、現地調査をし、採湯した試料は、エルアスナムに持ち帰り SNWC で分析した。

非火山性の岩盤の割れ目から温泉が湧出している例として大陸の縫合帯がある。縫合帯については丸山 (1993) が次のようにまとめている。「超大陸は4億年程度の周期で10個程度の大陸塊に分裂・発散したのち、再び集合して超大陸を造る。大陸が衝突融合すると2つの大陸の間には、下降のプレート収束境界が存在する。それは現在、海洋プレートの破片であるとされるオフィオライト帯となっていることが多い。」そのオフィオライトと大陸の境界には、その構造が形成された地質年代が若いほど、温泉の最高温度が高く、古いほど低くなるが、いずれも溶存成分が多い特徴をもつ。また、たとえ湯量が少なくても長年安定して湧出している。インドのヒマラヤの主スラスト (Main Central Thrust : MCT) 沿いに温泉の湧出を見てきたが、手持ちのデータは少ない。また、ブータンにも温泉の存在を知ったが、このシリーズで紹介するのは、ある程度まとまったデータをもつ、アルジェリアのアトラス山脈の北端 (地中海をトラップしてユーラシア大陸とアフリカ大陸の現在も変動している縫合帯)、イランの縫合帯 (漸新世～中新世の活動)、西日本の舞鶴帯 (上部三畳系の断層活動) の3つの縫合帯の温泉とした。縫合帯は大陸移動の最終的な場所であり、地殻・マントルの活動帯の最終の段階の場所に熱水の湧水がみられる。プレートテクトニクスとの関連性を示す。縫合の時代が古くなるとどのように変化していくかの様子が議論できる。これらの総合的

な検討は、最後の西日本の舞鶴帯の温泉の紹介のあとにまとめてしたい。

2. アトラス山脈の地質構造

アルジェリアは日本の6.3倍の面積をもつが、アルジェリアの地中海に面するアトラス山脈の地域は日本の0.6倍程度である。地中海をトラップしてユーラシア大陸とアフリカ大陸が縫合 (suture) している地中海の南縁に面した前アトラス (Atlas Tellian) の東西性背斜の山脈、向斜堆積盆さらに東西の背斜の後アトラス山脈 (Atlas Saharien) が見られる。さらに、この山脈の南はサハラ沙漠の安定大陸地塊に続く (Fig. 1)。後アトラスは中新世の海成層、浅海性層、内海性層で、前アトラスは白亜紀の海成層、内海成層が基盤でそれを漸新世、中新世層で覆う。堆積層は炭酸カルシウムを多く含み、後アトラスにかかると岩塩が所々で採取されている。乾燥しており、河川水や伏流水は硬水である。

前アトラス山脈の中間の小さな向斜のくぼ地の地下水の調査がこの時の調査の主目的であったが、滞在していたエルアスナムの町は、この東西の窪地に蛇行した枯れ川 Oued Sly (フランス語で枯れ川のことを Oued と言う) が流れ、アルジェリアがフランスの州であったときは、地名がマ

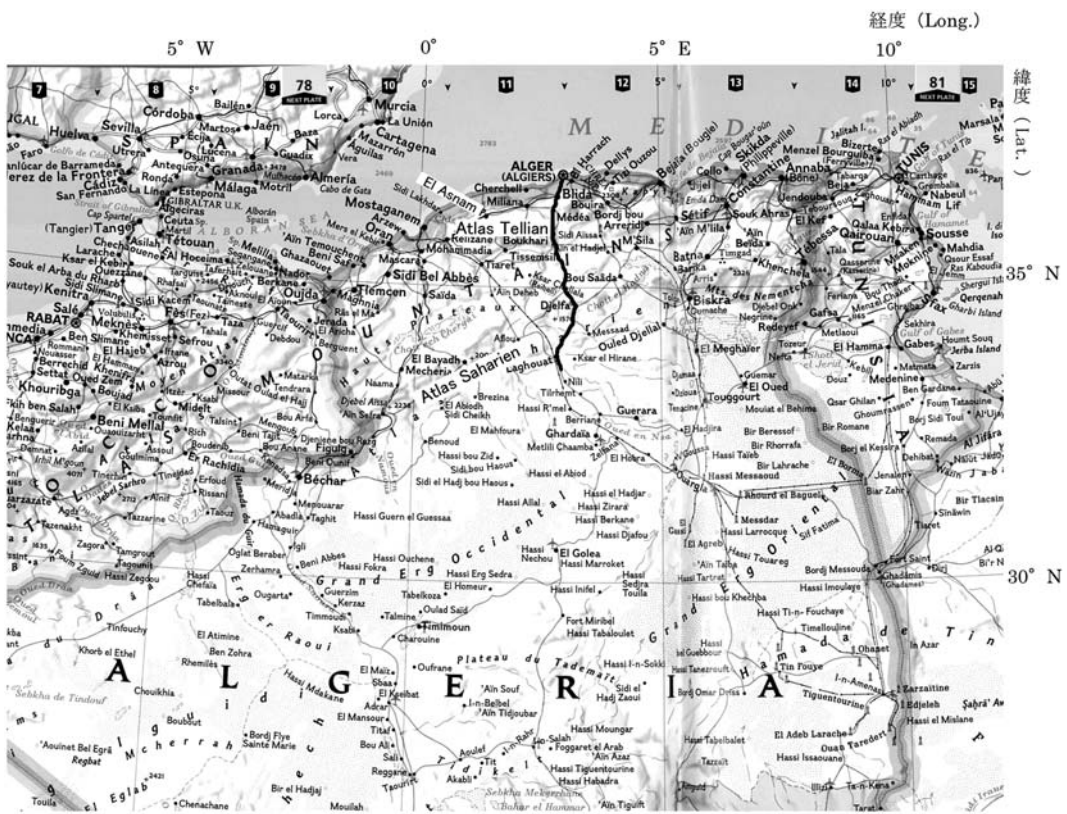
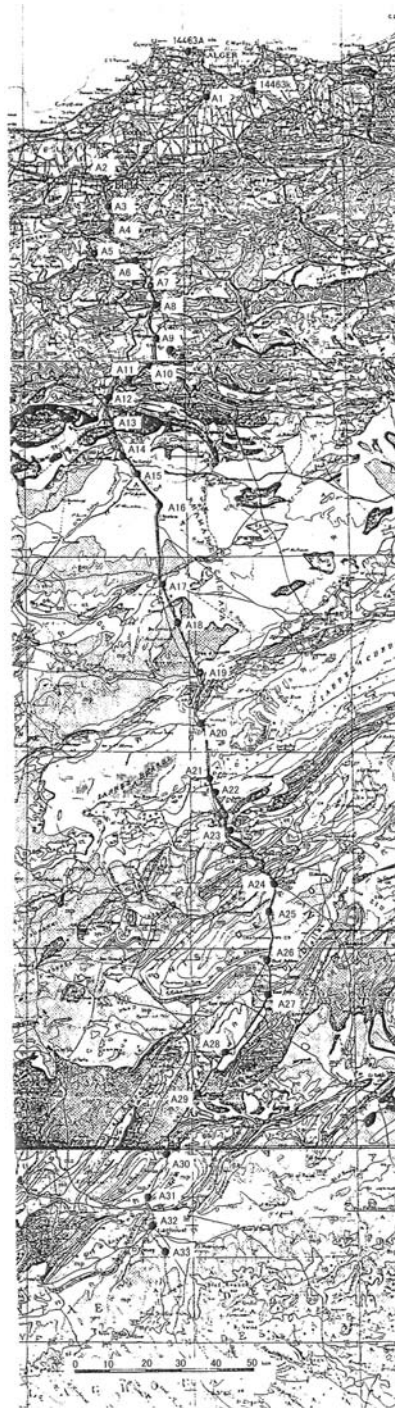


Fig. 1 Geographical map of northern part of Algeria with localities of El Asnam and gravity measurement line (Alger to south by black color rute) (Nishimura, 1974).

図 1 アルジェリア北部の地形図。それにエルアスナムの位置とアトラス山脈を横切る重力測定ルート (アルジェから南下する黒色のルート) (西村, 1974)。



Station No.	Locality
14463A	Buzaréah
A 1	SNWC
14463K	Air-port
A 2	Chiffa
A 3	Tennfas
A 4	Kef Mkaif
A 5	Media
A 6	Loverdo
A 7	Dj Serane
A 8	Berrouaghia
A 9	Brazza
A 10	El Bergia
A 11	Moudjebeur
A 12	Boghari
A 13	Kef Sidi Attallah
A 14	Bge
A 15	Bougzoul
A 16	Daiel el Kerfa
A 17	Koudiat es Siada
A 18	Hasi el Oucif
A 19	Puits Sans Eau
A 20	Hassi Bahbah
A 21	El Mesrane
A 22	Sidi Ben Mechichi
A 23	Ain Mabad
A 24	Djelfa
A 25	Ben
A 26	Oued Seddeur
A 27	Ain el Ibel
A 28	Mokta el Dust
A 29	Sidi Makhlouf
A 30	Det Guerarel Hamra
A 31	Le Chapeau de Gendarme
A 32	Laghout
A 33	Ras Bedden

Fig. 2 Distribution of gravity measurement stations from Alger to Laghout at front of Sahara Desert (A1 ~ A33) with locality name.

図 2 重力測点 (A1~A33) とその地名. アルジェからアトラス山脈を南北に横切りサハラ沙漠の入り口のラグアットに至る.

ルコフと付けられていたが独立戦争後に地名が変えられた。このように多くの地名が変わっているところが多いので、フランス時代の温泉名もたどることが難しい。ただ、フランス時代に作られた地形図は海岸線に近いところは1/25,000、後アトラス (Atlas Saharien) あたりは1/50,000、沙漠に近づくとも1/75,000の印刷のきれいな色刷りであった。アルジェリア全体を購入したが、1980年にエルアスナムで大きい地震があった際に、日本からの調査隊にお貸ししたが、その後、かえってこない経緯があり、残念ながらそのコピーしか手元にない。重力調査の測点図はその地図のコピーを使用したものである (Fig. 2)。

この両山脈の北側斜面に、所々雁行しているが、東西の走向の大きな断層が走る。この断層沿いに時々非常に大きな被害地震をもたらしている (例えば Fig. 3)。しかし、アトラス山脈では、第四紀の火山活動はみとめられない。

その地下構造を調べるために重力測定を1973年3月~5月に行った。その中のひとつはアルジェから南に沙漠に入るところまで南北断面の測定である。この測定から、測点の標高とブーゲ異常の関係を Fig. 4に示す。この重力測定の結果からは、前アトラスの北側と後アトラスの北側の衝上断層のところでは、地殻均衡が成り立っていないことが明瞭で、この縫合帯が現在も活動中であることを示している (Fig. 5)。

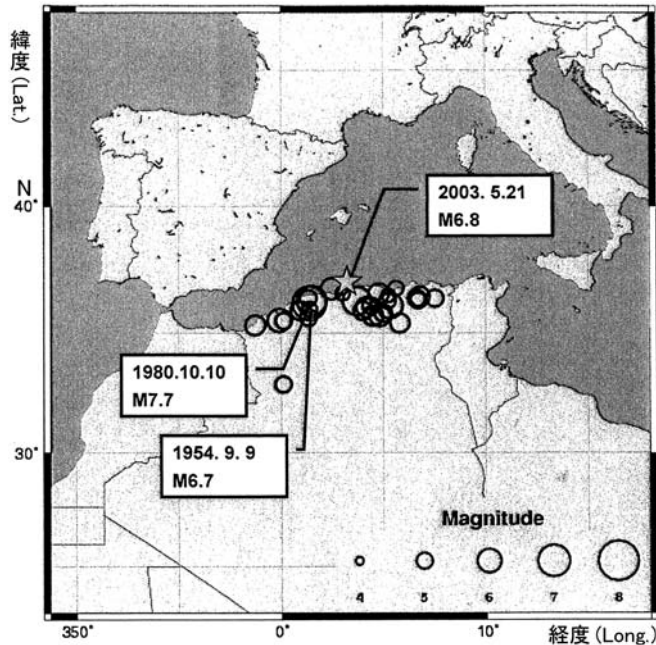


Fig. 3 Distribution of epicenter (1700-2003) in Algeria, with a big earthquake (May 21, 2002) (Saito *et al.*, 2003).

図3 アルジェリアの被害地震の震央分布 (1700-2003)。斎藤ら (2003) による2003年5月21日の地震を書き加えた。

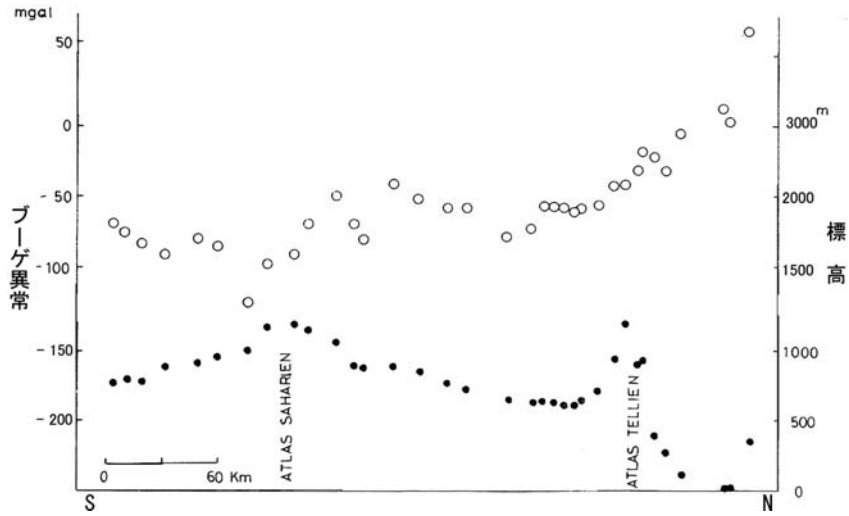


Fig. 4 Altitude (●) and Bouger anomaly (○) projected points of gravity measurements on the 3°E meridian plane. There are non-isostasy at the north sides of Atlas Tellien and Atlas Saharien (Nishimura, 1974).
 図 4 東経 3 度の子午面状に投影した重力測点 (Fig. 2 参照) の標高 (●) とブーゲ異常. 特に前アトラスと後アトラスの測点では, 地殻均衡が成り立っていない (西村, 1974).

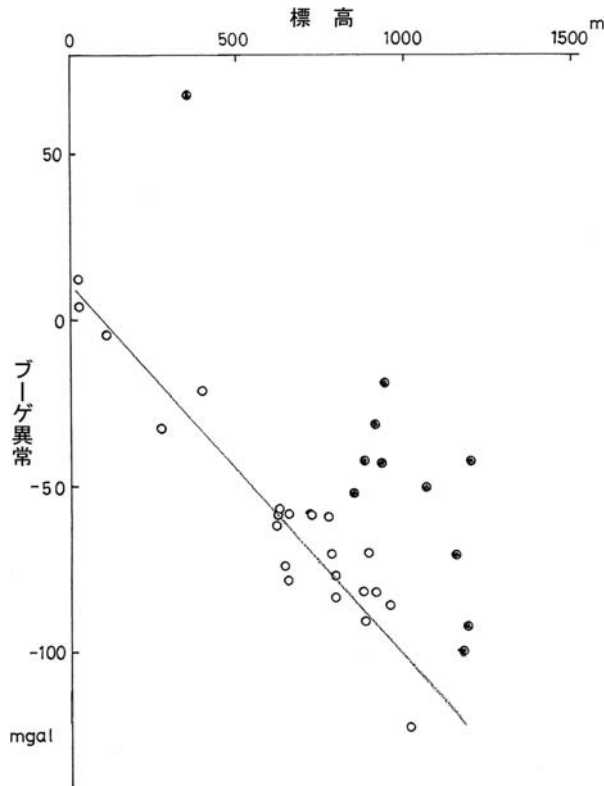


Fig. 5 Relation between altitude and Buger anomaly of the measurement points. ● Black circle shows non-isostatic anomaly (Nishimura, 1974).
 図 5 測点の標高とブーゲ異常. 直線から離れている●の値は地殻均衡が成りたっていない部分を示す (西村, 1974).

Table 1 Hot springs along the Atlas mountain range of suture zone in Algeria.

表 1 アルジェリアのアトラス山脈沿いの温泉.

No.	Name	Temp. (°C)	Evapo. Res. (180°C g/l)	Free CO ₂ mg/l	H ₂ S mg/l	Chemical component (mg/l)							
						Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	SiO ₃
1	S. Leblanc	24	1.61	563		293	110	183	57.9	237.8	52.5	653	12.3
2	Takitount	21.7	2.21	712.8		615	6.0	213	36.8	152.6	55	1084	21.2
3	Ben-Haroun	19	3.312	2820		693	11.8	463	56.2	550.2	618	888	31.6
4	H. Bou-Hanifa	65	1.314	540		251	30	170	36.8	372.7	81.3	330	47.5
5	Ain N'Sour	18	0.288	5.5		10.3	4.2	59.2	24.1	19.5	30.2	132	12.1
6	Sidi-M'Cid	29	0.778	38.41		90.4	9.3	138	40.1	145.5	93.2	240	20.2
7	Le Hamma	34	0.729	48.88		74.2	2.9	131.2	42	120.7	104.8	233	20.2
8	Dj. Lekhal (Ain Tinn)	31.5	0.553	19.8		25.6	5.05	110.7	32	39	158.4	159	23.6
9	O. Hammimime	46.5	2.391	114		103	13.6	503	85.9	78.1	136.7	200	39.9
10	H. Guergour	44.3	3.521	74.7		348	10.3	601	92.5	482.8	168.2	167	46.3
11	H. Righa	54	2.466	71.5		214	15	477	31.2	337.2	107.5	161	55.8
12	H. Melouane	39.5	29.422	83.09		10260	120	833	79.2	1585.1	192.2	325	31.6
13	H. Bou-Hadijar	70	3.516	706.2		845	56.6	330	49.7	1608	53.9	463	75.8
14	H. Bradaa	28	0.371			15.4	trace	89.6	23.5	27.6	47.9	154	12.6
15	H. Boughara	45	0.405	44.5		52.8	5.2	59.2	31.8	56.8	18.9	167	13.2
16	H. Meskoutine	96	1.466	206.8	6.8	205	46.8	202	37.4	327	382	183	83.9
17	H. Ksenna	52	5.466	114	58	1774	37	160.1	69.4	258.4	66.5	156	20.7
18	H. Bou-Sellam	45	1.399	44	8.5	208	10.6	187.3	42.8	28.4	45.6	120	51.7
19	Nazereg (Ouled Khaled)	49	1.833	259.6	5.78	314	18.5	240	45.6	415.3	59.8	150	50.9
20	A. Mentila	33	59.522	440	159.8	21500	143.8	970	233	3301.5	360.1	30.6	26.5
21	H. Zaïd	39.5	1.017	176	13.6	167	15.9	163	35.6	333.7	47.7	228	23.2
22	H. Tassa	40.6	1.992	957.6	6.8	410	26.2	284	36.3	724.2	25.1	451	25.2
23	H. El-Biban	80	15.435	880	14.9	5122	60.8	572	95.7	827.9	100.2	200	85.1

3. アルジェリアの温泉

アルプス造山運動の活動時期の地質構造は Wunderlich (1969) によりまとめられている。その地質構造図に、1973 年の調査でたどることのできた 23 温泉の分布を示す (Fig. 6)。フランスの一つの州であった頃には、自噴状態で利用されていた泉源は Guigue (1940, 1947) によると 33 カ所知られていた。

前アトラス山脈より南部には温泉は見つかっていない。アトラス山脈の地震活動の盛んなところ (とくに、地殻均衡の成りたっていないところ) に温泉が見つかっている。これらの温泉は自然に湧出していたものを利用できるように手を入れた程度の湧出状態である。当時から、外国人の出入りは自由ではなく、アルジェリアの要請による他はビザの取得が難しかった。測定器の通関も難しく、空港で持ち込みをおさえられたのち翌日になり搬入できた (西村, 1973a, b)。試料の持ち出しは論外であり、試料の分析をエル・アスナムの SNWC で、主として比色、重量法でおこなったが、それ以上の分析は無理であった。

アトラス山脈沿いの温泉・鉱泉から得られたデータを Table 1 に示す。試料番号 15~23 は硫化水素臭がきつかった。その点からこれらは、硫化水素泉 (Eaux Sulfurees) に分類される。泉温は 96℃~18℃の泉源が見られる。25℃以上の温泉は前アトラス山脈の全般に分布するが、25℃未満の

Table 2 Classification using chemical quality of hot springs in Algeria.

表 2 アルジェリアの温泉の泉質による分類.

調べたアルジェリアの温泉の泉質分類	ナトリウム・炭酸水素塩・冷鉱泉	アルカリ性・単純低温泉	アルカリ性・単純温泉	カルシウム・硫酸塩・高温泉	ナトリウム・塩化物・温泉	ナトリウム・塩化物・高温泉	アルカリ性・単純冷鉱泉	アルカリ性・単純高温泉	ナトリウム・塩化物・低温泉	カルシウム・塩化物・温泉
Groupes de griffons étudiés se classent ainsi :										
FACIÈS ALCALIN										
bicarbonatées sodiques	1, 2									
sulfatée sodique	3									
FACIÈS TERREUX										
bicarbonatées calciques		6, 8	7			4	5			
sulfatées calciques				9, 10, 11	12					
chlorurées						13			14	
Eaux SULFURÉES										
sulfurées sodique								15		
Sulfurées calciques				16, 18, 19		17			20	
chlorosulfurées						23				21, 22

* 表中の数字は Table 1 の No. に対応する。

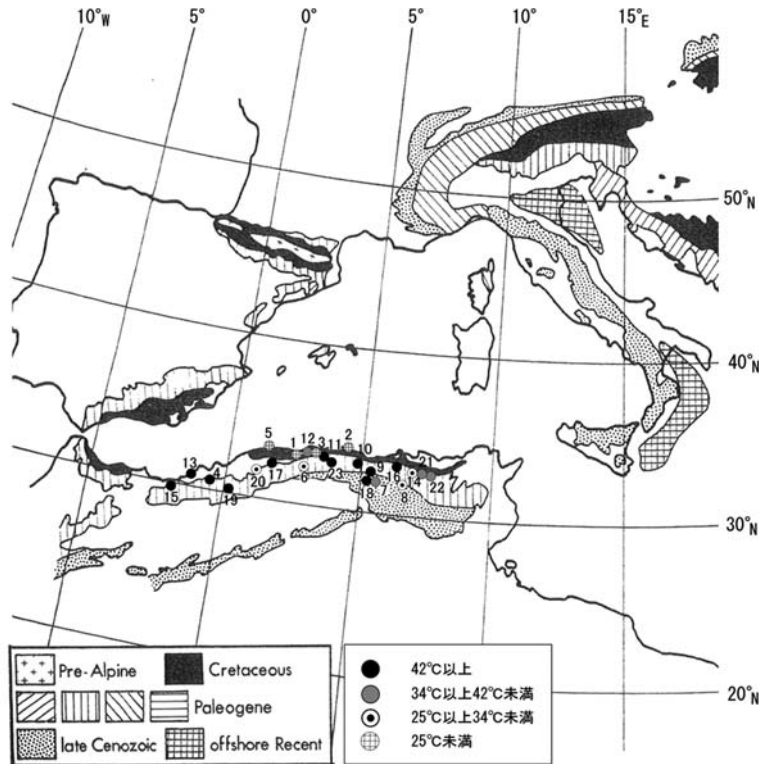


Fig. 6 Distribution of hot springs on the map of locality and its age of folding in the Alpines system (Wunderlich, 1969).

図 6 アルジェリアの温泉の位置. 背景はアルプス造山運動の褶曲の分布とその年代 (Wunderlich, 1969).

冷鉱泉は、地中海海岸にのみ分布する (Fig. 6). 蒸発残査は温泉全般に多い. 温泉の番号はフランスの温泉の分類によって付けている (Table 2). これを、我が国における分類に対応させて Table 2 に示した. 調査対象とした温泉は、成分組成から、アルカリ性泉 (Facies Alcalin), 重炭酸土類泉 (Facies Terreux), 硫化水素泉 (Facies Sulfurees) に分類できる.

主要イオン組成を示すトリリニアダイアグラム・プロットは特定の領域に集まっておらず、色々な特徴の温泉が存在することを示し、地域による分類は出来ない (Fig. 7). 溶存イオン濃度間の相関について検討した結果、 Na^+ と Cl^- の間に相関が認められた (Fig. 8). その他のイオン濃度間には単一の相関関係は認められなかった. また、 SO_4^{2-} と Cl^- および 1 価の陽イオン ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) の間に正の相関が認められるグループと、 SO_4^{2-} 濃度に比べて、 Cl^- や $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ の濃度は高くないグループに分類できる (Fig. 9, Fig. 10) が、地質や地質構造により分布が異なることはなく、下部の沈み込みのスラブとその上部に存在していたマントルの物質の関与の違いを反映した特徴によると思われる. また、遊離炭酸は地中海の海岸沿いの温泉に特徴的に含まれるが、前アトラスに湧出する温度の高い温泉にも多く含まれる (Fig. 11).

これらの特徴は、大陸縫合帯の温泉に通じるものであり、大陸縫合帯は沈み込み帯が発達して最終的に沈み込みのスラブが変成してオフィオライトとして残った部分 (たとえば Wunderlich, 1969; Smith and Woodcock, 1982) であり、いろんな特殊な岩種の集合体であり、そこに含まれる熱水

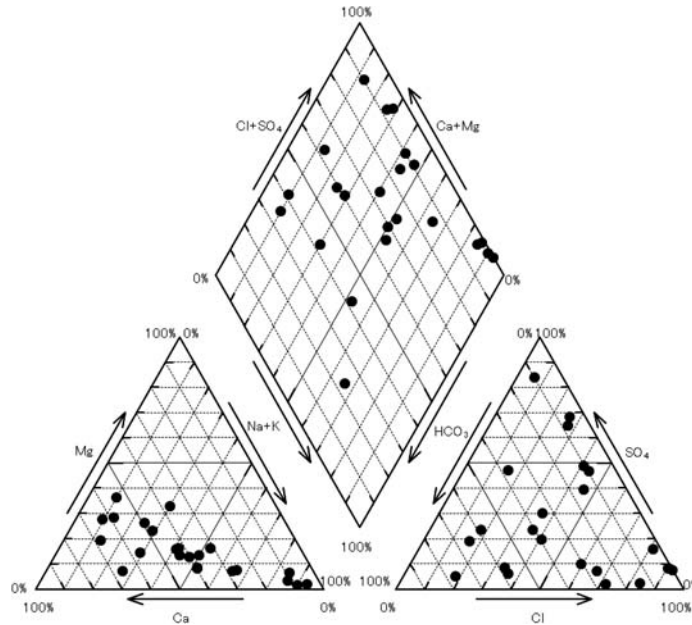


Fig. 7 Trilinear diagram of chemical components in hot springs, Algeria.

図 7 アルジェリアの温泉水のトリリニアダイアグラム.

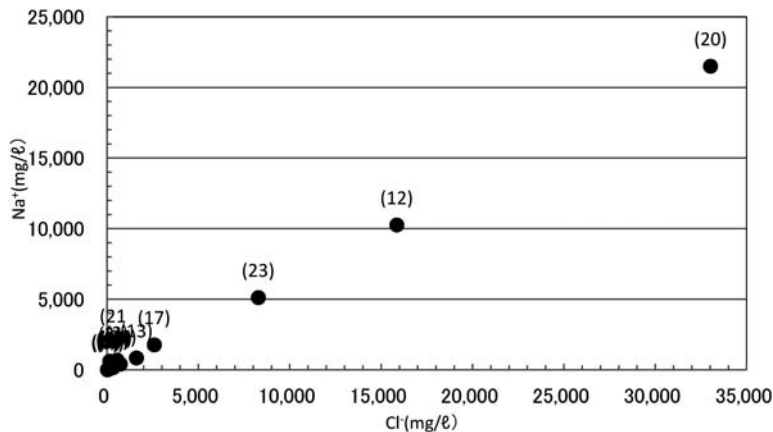


Fig. 8 Relation between Na ion and Cl ion contents of hot springs in Algeria.

図 8 アルジェリアの温泉水のナトリウムイオンと塩化物イオンの関係.

の名残りが海水や地下水と混合して湧出している特徴を表しているものと見られる。

4. ま と め

アトラス山脈の生成に伴う褶曲地帯は地中海の縫合帯ができつつある若い構造である。そのため、この地帯では地殻均衡が成り立っておらず、被害地震も多発生する。特に前アトラスの北側斜面は急傾斜の褶曲構造であるが、これに沿い、分布密度はあまり高くないが、点々と温泉が湧出し

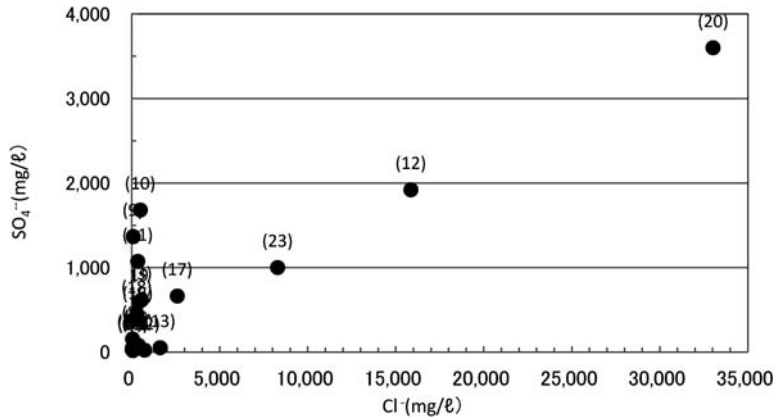


Fig. 9 Relation between Cl ion and SO₄ ion contents of hot springs in Algeria.

図 9 アルジェリアの温泉水の塩化物イオンと硫酸イオンの関係。

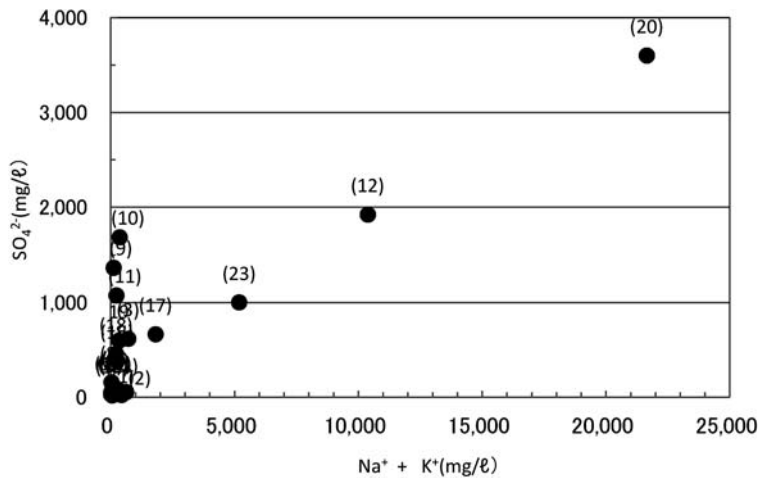


Fig. 10 Relation between alkaline metal ions (Na+K) and SO₄ ion contents of hot springs in Algeria.

図 10 アルジェリアの温泉水のアルカリ金属（ナトリウム+カリウム）イオンと硫酸イオンの関係。

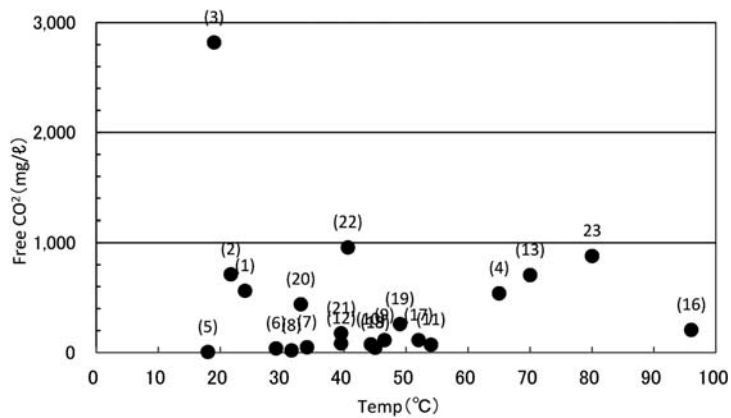


Fig. 11 Relation between water temperature and free CO₂ contents of hot springs in Algeria.

図 11 アルジェリアの温泉温度と遊離炭酸の関係。

ている。一方、後アトラスおよびその南の高原（プラットホーム）ではほとんど地震も起こらないし、温泉も存在しない。

調査対象とした温泉の温度は、地中海に最も近い部分に 25℃ 以下の炭酸鉱泉が見られるが、他は、高温泉から冷鉱泉まで多様である。一般に含有成分が多く、また、二酸化炭素を含むものが多い。泉質も多岐にわたっているが、地理的な分布による差はほとんど見出せなかった。

引用文献

- Guigue, S. (1940) : Les Sources Thermo-Minérales de L'Algerie, Étude Géochimique (Tome 1), Bulletin du Service de la Carte Géologie Appliquée, Alger.
- Guigue, S. (1947) : Les Sources Thermo-Minérales de L'Algerie, Étude Géochimique (Tome 2), Bulletin du Service de la Carte Géologie Appliquée, Alger.
- 丸山茂徳 (1993) : 46 億年地球は何をしてきたか? 地球を丸ごと考える②, 134 p., 岩波書店, 東京.
- Naigai Consultant Co. Ltd. (1974) : Rapport Comprehensif sur Recherches Geologiques des Matieres Premieres de Ciment El Asnam, Algerie, 1 (Géologie, Hydrogéologie et Exploitation), 東京.
- 西村 進 (1973a) : アルジェリア紀行 (1). 地理, 20 (5), 120-126.
- 西村 進 (1973b) : アルジェリア紀行 (2). 地理, 20 (6), 73-78.
- 西村 進 (1974) : アルジェリアでの重力測定. 九十九地学, 9, 10-20.
- 斎藤大樹, 犬飼瑞郎, Bourzam, A. (2003) : 2003 年 5 月 21 日アルジェリア地震の被害概要. 建築研究所国際地震工学部ホームページ (<http://iisee.kenken.go.jp>)
- Smith, A.G. and Woodcock, N.H. (1982) : Tectonic Syntheses of the Alpine-Mediterranean Region : A Review. ed. Breckhemer *et al.*, in : Alpine-Mediterranean Geodynamics, Geodynamic Series, Vol. 7, 15-38.
- Wunderlich, H.G. (1969) : Aufgaben und Ziele vergleichender aktuotektonischer Forschung : Schwereverteilung und rezente Orogenese in Mediterrangebiet. Z. Dtsh. Geol. Ges., 118, 266-284.