

ケニア・リフトバレー (3)

地熱地帯をめぐって

金原 啓司 (地殻熱部)

Keiji KIMBARA

1. まえがき

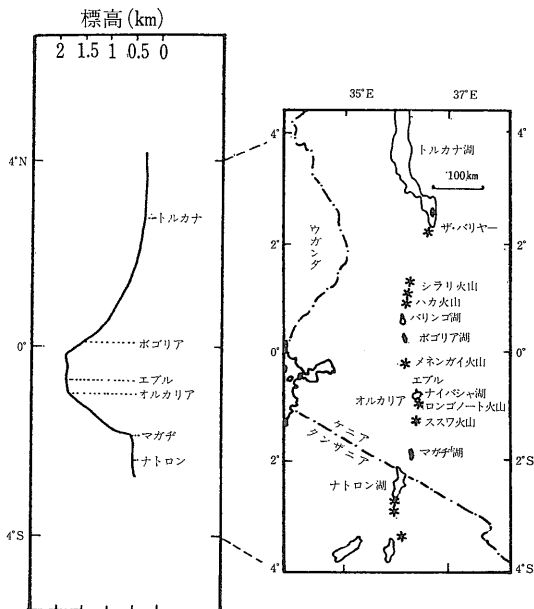
東アフリカ ケニアの大地溝帯(リフトバレー)の地質および火山については これまで2回にわたって紹介されてきた(佐藤1983 1984)。また1981年アフリカ大陸最初の地熱発電所が運開したオルカリア地熱地帯についてもその紹介が行われた(金原 1984)。ここではこのシリーズの最終回としてケニア・リフトバレーの地熱と温泉について紹介することとした。

2. ケニアの地熱資源の概要

ケニアの地熱資源開発の概要についてはすでにNOBLE and OJIAMBO (1975) による紹介がある。ケニアにおける地熱資源の大部分はケニア西部をほぼ南北に縦断するリフトバレー(正確にはグレゴリー・リフトもしくは東部リフト)内に分布している。

ケニア・リフトバレーは 新第三紀中新世に入ってから地殻隆起に引き続き大量のアルカリ岩類が噴出しその後の断層運動により鮮新世にほぼ現在見られるような形が出来あがったものと説明されている(佐藤1984)。そして第四紀に入ってから メネンガイ ロンゴノート スワ火山に見られるように各所で活発なアルカリ岩の火山活動があり その噴出物は リフトバレーを埋めている(第1図参照)。隣国エチオピア タンザニアを含めてリフトバレー内の地熱資源はこのような火山活動と密接な関係を持っており 1970年~1974年にわたり国連開発計画(UNDP)に基づいて 本格的な地熱調査(主に地質 地化学 物理探査など)がハニングトン湖(現ボゴリア湖) エブル(1979年以降国際協力事業団がケニア共和国と協力して地熱調査を実施している) オルカリア(筆者によりすでに紹介済み)の三地域に焦点を絞ってなされた。その成果を基礎にして オルカリアでは1981年アフリカ大陸では最初の地熱発電所が運開している。

ケニアは石油 石炭 金属などの地下資源に恵まれずまた電力については気候上水力に多くを望めないことから 純国産エネルギーである地熱資源を開発し これから電力を得ることは日本以上に期待が大きいものと思われる。以下筆者が現地で見聞したり また文献等で

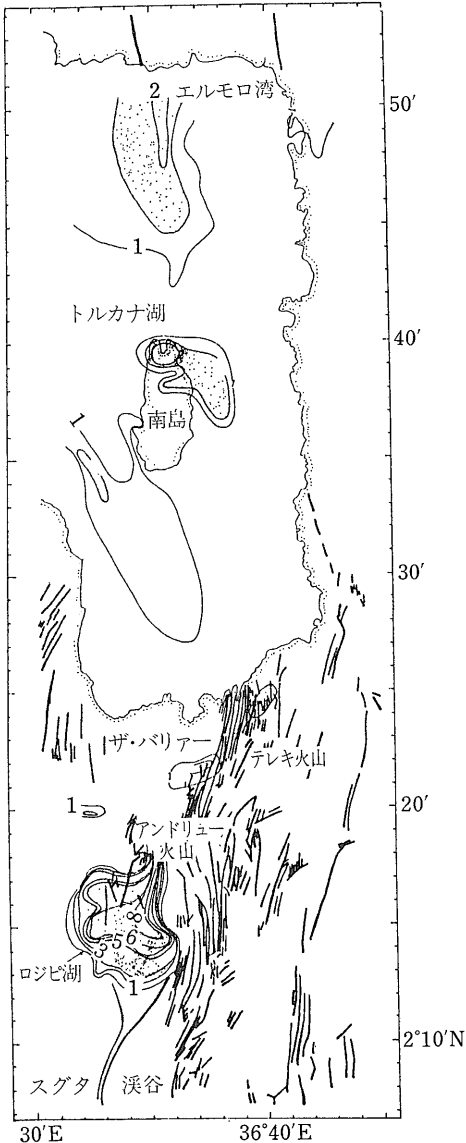


第1図 ケニア・リフトバレー(東部リフト)の火山(*印で示されている) 湖 地熱地帯(右)と湖面標高断面(左)(CRANE and O'CONNELL 1983)

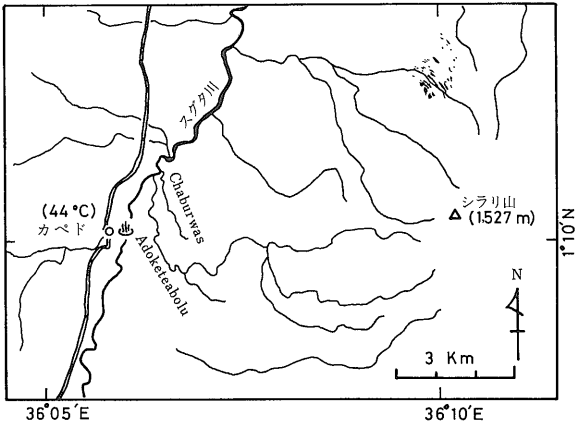
知ることのできたケニア・リフトバレーの地熱事情について北の地域から順に概観することにしよう(以下カタカナ書きにした地名等は正確でない恐れがあるのですべてに原語を付した)。

3. スグタ溪谷(Suguta Valley)

ケニア地質調査所(1970)発行の Minerals of Kenya によれば トルカナ(Turkana)湖(北のオモ(Omo)川を主な流入源とする Na-HCO₃-Cl 型で TDS=2,500ppmの塩水湖 標高 375m)の南約20kmにはアルカリ塩湖湿地帯であるスグタ溪谷(トルカナ湖とスグタ溪谷を分離する火山性リッジをザ・バリヤー(The Barrier)と呼んでいる)があり その北端に温泉と噴気地の記載がある。多分これがケニア・リフトバレー最北端の地熱地帯であろう。トルカナ湖とその南のロジピ(Logipi¹⁾)湖(東西6km 南北5kmで塩水)の間(距離にして約16km)のザ・バリヤーと呼ばれる地域は



第2図 トルカナ湖～スグタ渓谷にかけての断層と赤外線放射温度計によって求められた異常温度の等温線(単位:°C) (CRANE and O'CONNELL 1983)



第3図 カペドの湯滝

ログでは Likaiyu 火山) が配列している (DODSON 1963) (第2図参照)。このうち Nagaramasainia カルデラの南西端よりいくつかの噴気が また過去数百年の間に噴出したことのあるアンドリュウ火山の噴石丘火道より少量の蒸気・硫黄ガスが見られるとのことである。一方世界活火山カタログによればスグタ渓谷にはスグタと呼ばれる硫黄地帯の記載があり その北端に沿って多数の温泉があり またアルカリ塩湖湿地帯の東南端にロキッピ (Lokippi) ガイザーがあると記されている。このガイザーでは温泉沈殿物がよく発達しており 沸とうした熱水が 1.2m 程度の高さまで一定間隔に噴出しているとのことである。最近 CRANE and O'CONNELL (1983) は赤外線放射温度計によって この地域の熱異常分布を調べている。その結果最も地熱活動が活発な地域がロジピ湖(彼らの論文ではルクル湖)とアンドリュウ火山の山麓であり その他がトルカナ湖に浮ぶ火山性の南島 (South Island)¹⁾ であることが判明している (第2図)。

以上述べたようにスグタ渓谷は地熱地帯として注目に値すると思われるが ただ残念なことにケニアルートマップを見ると この付近は道路一本ない辺境の地となっている。

N-S方向の断層運動を強くうけたドーム状の火山地帯であって 北よりテレキ (Teleki) 火山 (噴石丘) Nagaramasainia カルデラ (埋没カルデラとされているが 世界活火山カタログ (RICHARD and NEUMANN 1957) にはその名前はない) アンドリュウ (Andrew) 火山 (成層火山) (世界活火山カタ

4. カペド (Kapedo)

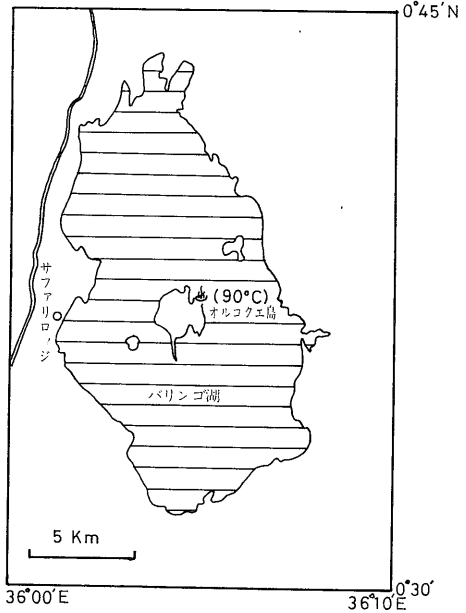
筆者が訪れることのできた最北端の地熱地帯は第3図に示すカペドである。ここは後述するパリンゴ湖からさらに北へ 70km に位置する辺境の部落であり 筆者が

1) Survey of Kenya (1978) 発行の100万分の1ケニアルートマップでは この名称になっているが 別の地図ではルクラ (Lukula) もしくはルクル (Lukulu) と書かれているので 正確な呼称は不明
 2) トルカナ湖には 北島 中央島 南島の3島がある

訪れた1980年12月27日には このような場所にも二人の白人修道女の姿が見られたことは大変な驚きであった。ケニアルートマップによれば この部落までは主要道路（実際は半砂漠の荒地の中を走るすさまじい道路であった）が通じており ここにはHot springs & Hot water fallの記載がある（その北10km には Lorusio hot springs の記載があるが詳細は不明）。東約10km のシラリ（Silali）山（1,527m）（写真1）より端を発し すでに述べたスグタ渓谷をへてトルカナ湖につながるスグタ川に落下する水は湯滝となっており（写真2） 滝つぼ付近で温度が44°C（pH≒9）もあった。 また50,000分の1地形図「Kapedo」によれば スグタ川の支流 Chaburwas と Adoketeabolu は“Hot”という注釈が付けられている（第3図参照）。 正確な湧泉場所は不明であったが シラリ山は Survey of Kenya（1969）発行の300万分の1ケニア地質図に第四紀火山岩類として塗られており また第1図に示す CRANE and O'CONNELL（1983）の火山分布図でも火山とされているので（世界活火山カタログにはその記載はないが 世界の火山（SIMKIN et al. 1981）のリストには掲載されている）多分これに関連した熱源によるものであろう。

6. バリンゴ（Baringo）湖

ナイロビの北約250kmのリフトバレー内には南北20km 東西10km のバリンゴ湖（淡水 971m）が存在している（第4図）。湖には多くのカバが生息しており 西側の湖岸にはサファリロッジが また湖の中央に浮かぶオルコクエ（Olkokwe）島の南端にはキャンプ地があり 外



第4図 バリンゴ湖のオルコクエ温泉

人向けの風光明媚な観光地となっている。 300万分の1ケニア地質図では第三紀火山岩類に塗色されているオルコクエ島の北東端の湖岸の溶岩類の割れ目より温度90°C（pH≒9）の温泉が1ヶ所のみ湧出している（写真3）。湧出熱水の化学分析を行ったところ 第1表に示すように Na-Cl-HCO₃型熱水で T_{Na-K-Ca} 地球化学的溫度（第2表）は210°C（シリカ温度は186°C）の高温を

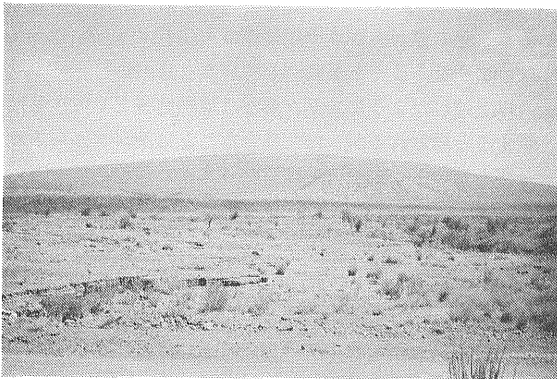


写真1 シラリ火山（1,527m）の遠望
山麓には溶岩ドームらしいものが見られ またすぐ手前には 水平に堆積した湖成層が見える。

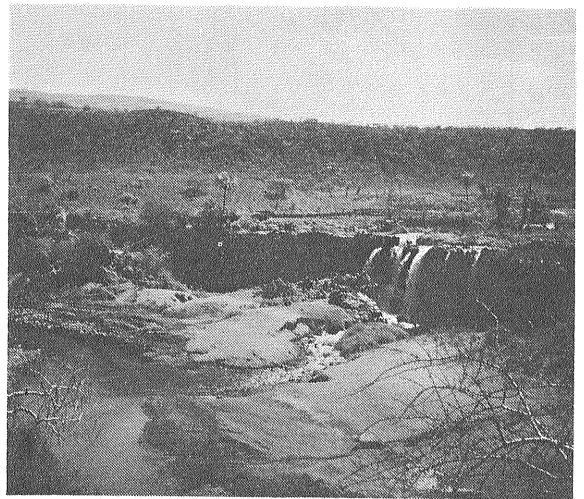


写真2 スグタ川に落下するカペドの湯滝全景

第1表 ケニア・リフトバレー地熱水の化学組成

試料	温度 (°C)	pH	free CO ₂	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	T. S. M.
バリソゴ	90.0	9.07	—	150.00	1,769.58	26.99	273.04	0.56	0.01	975.00	50.00	218.8	2,660.0
ボゴリア(1)*	95.0	9.65	—	4,200.00	4,271.40	79.09	1,436.01	0.34	0.01	6,150.00	137.50	82.0	14,708.0
ボゴリア(2)**	—	9.00	—	180.00	2,806.92	48.39	237.58	0.75	0.40	1,325.00	33.75	81.0	3,338.0
ナイバシヤ湖水	—	8.15	100.55	6.00	198.32	0.00	8.89	20.50	6.25	32.50	19.00	—	—
マガヂ	44.0	9.54	—	9,120.00	5,979.96	206.57	6,754.56	0.44	0.01	13,625.00	181.25	22.6	33,204.0

単位: mg/l (分析者: 技術部化学課 阿部喜久男)

* 第5図のG地点

** 第5図のA地点 (写真5)

第2表 ケニア・リフトバレー地熱水の地球化学的温度

試料	T _{SiO₂} (CONDUCTIVE)°C	T _{SiO₂} (ADIABATIC)°C	T _{Na-K-Ca} °C
バリソゴ	186.2	173.2	210.0 ($\beta=1/3$)
ボゴリア(1)	126.4	123.6	201.9 ($\beta=1/3$)
ボゴリア(2)	125.8	123.0	173.2 ($\beta=1/3$)
マガヂ	68.1	73.1	184.9 ($\beta=1/3$)

計算は TRUESDELL (1975) の式によった

示していることがわかった。この北々東 35km にはパカ (Paka) 火山(1,696m) が存在するもの。ここ以外にバリソゴ湖周辺から温泉が湧出しているという情報は見当たらないので、熱源や地熱地帯の広がりなどについての詳細は不明である。

7. ボゴリア (Bogoria) 湖

以前ハンギントン (Hannington) 湖と呼ばれていたボゴリア湖 (963m) は南北 17km 東西 3km の細長い塩水湖であって、現在ではケニア最大のフラミンゴ生息地

として、観光的にも有名な場所となっている。南半球に位置する首都ナイロビから北々西約 200km の北半球に位置するボゴリア湖に行くためには、途中で赤道を通過することになる (写真4)。第5図に示すように湖の南半分の湖岸一帯からは 90°C 以上の温泉が多数湧出する地熱地帯となっていることから UNDP の調査によりオルカリア エブル地域と並んで有望な地熱地帯とされた所でもある。

McCALL (1967) によれば、この地域は鮮新世~更新世のアルカリ岩類およびそれをおおう第四紀堆積物よりなっている。ここではリフトバレーに平行な南北性の

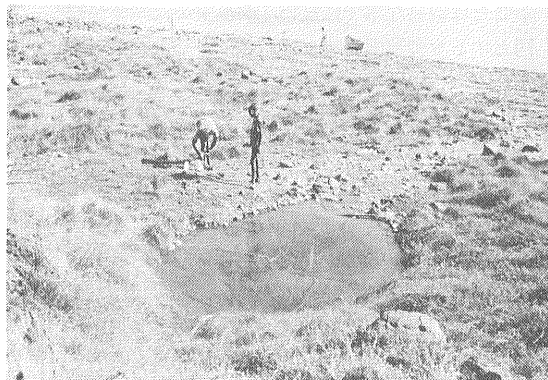


写真3 バリソゴ湖中央に浮ぶオルコクエ島北東端より湧出する温泉

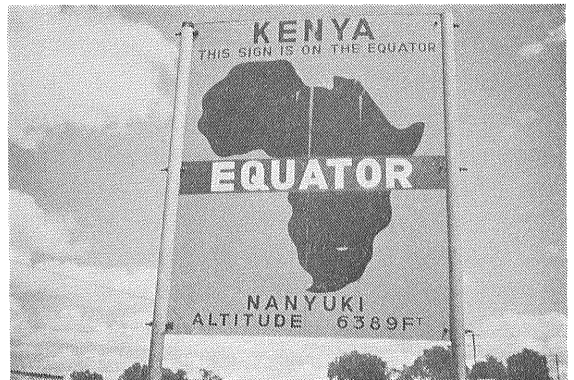
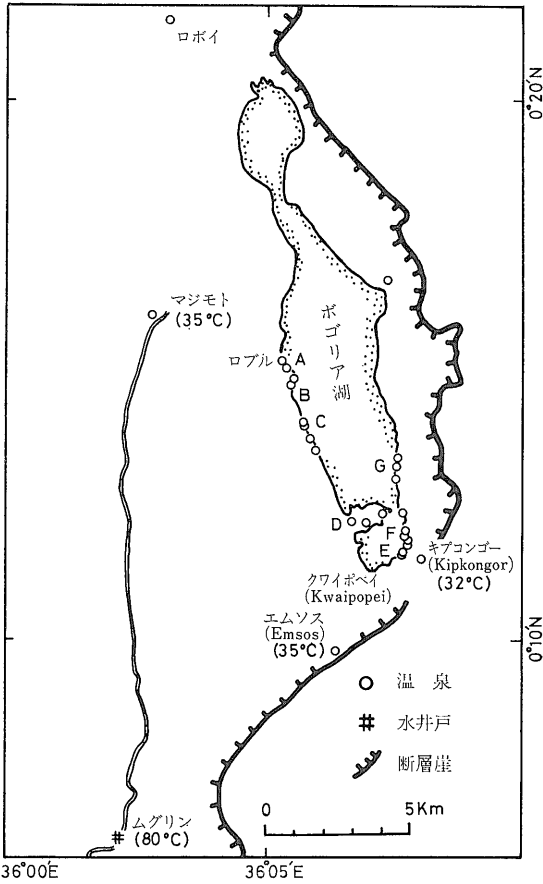


写真4 赤道標識 (ナイロビの北 150km ナニユキにて)



第5図 ボゴリア地熱地帯

A, B, C, D, F, G の各地点とも 90°C 以上の温泉が湧出している。

断層が多数発達しており 湖岸に認められる温泉群はこれらの断層に沿って湧出しているものと思われる。湧出する温泉の多くが 95°C 以上 (pH≒9~10) の沸とう泉であり 第1表の化学分析値はこれらの熱水が Na-Cl-HCO₃ タイプで その地球化学的溫度 (第2表) が T_{Na-K-Ca} で170~200°C 程度 (ただしシリカ溫度は約125°C) であることを示している。

ボゴリア湖西岸のロブル (Loburu) (第5図B地点) には間欠泉 (1982年11月27日に現地を訪れた時は活動を停止していたが それ以前に訪れた当所佐藤博之地質部長によれば6~8分間隔に約30秒間 3m程度の高さの噴泉が見られたとのことである) と多くの沸とう泉 (写真5) があり 多数のフラミンゴを背景とした風景は圧巻である。話はそれだが このロブルの西約 5km にマジモト (Maji Moto) という地名がある (第5図)。これはスワヒリ語で温 (Moto) 水 (Maji) を意味し UNDP の未公表資料によれば ここから pH=7.3 35°C (T_{Na-K-Ca} は 197°C) の温泉が記



写真5 ボゴリア湖西岸ロブルの沸とう泉 (第5図A地点) 右手後方には湖水に浮ぶフラミンゴが見える。

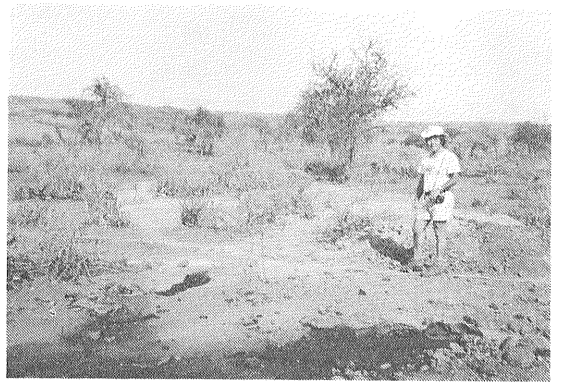


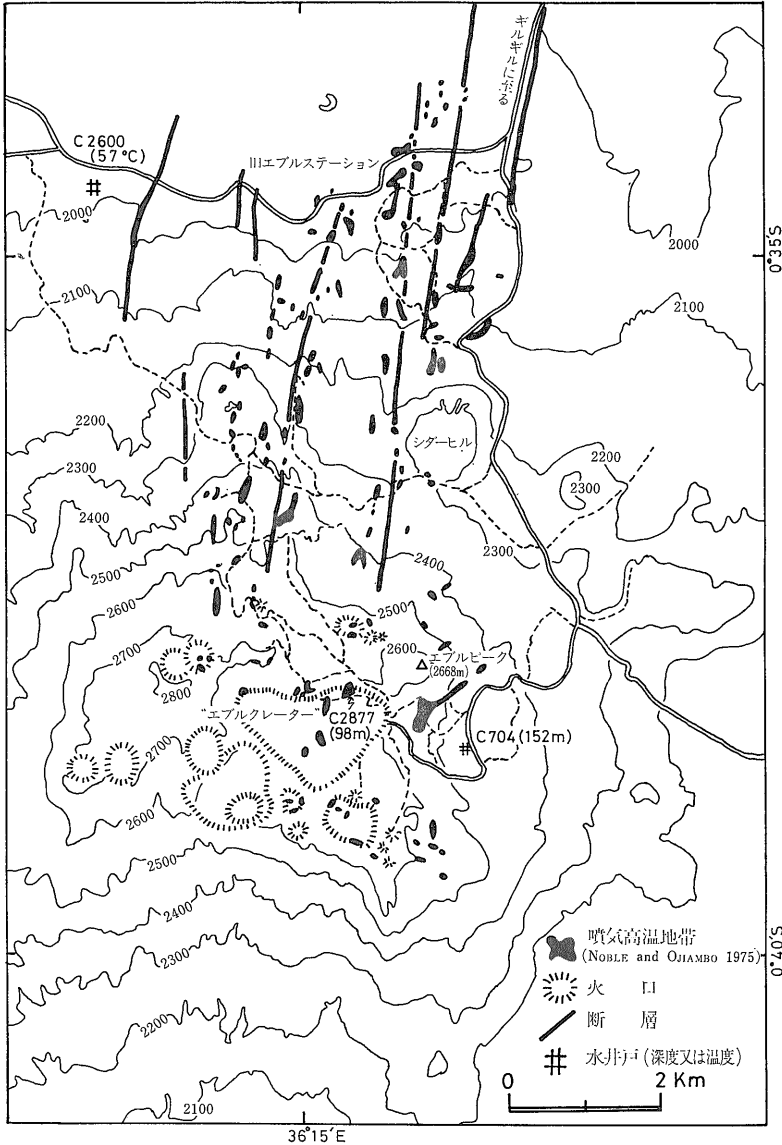
写真6 ムグリンの飲料水を目的としたボーリングの現場跡

載されている。またこの北約 10km のロボイ (Loboi) (第5図参照) にも温泉が湧出しており 我々が見学した時には付近の子供達が水浴をしていた。

乾燥気候に近いフトバレーでは 生活用水を確保することは容易な事ではない。ケニアでは水資源開発を専門とする水資源開発省 (Ministry of Water Development) がある。バリンゴ湖の南々西約 20km のムグリン (Mugurin) (5図参照) で 200m のボーリング (坑井番号 C4787) をした所 80°C の温泉が 1m³/時湧出したとの情報が水資源開発省より入ったので 1980年12月26日にこの現場を訪問してみたが 飲料水に適さないとのこと (さしずめ日本では温泉源として大いに活用されるところであるが) すでに廃坑にされていた (写真6)。

8. メネンガイ ナクル (Menengai Nakuru)

ナイロビの北々西約 140km に位置するナクルはナイ



第6図 エブル地熱地帯
標高は100m 間隔の等高線で示してある。

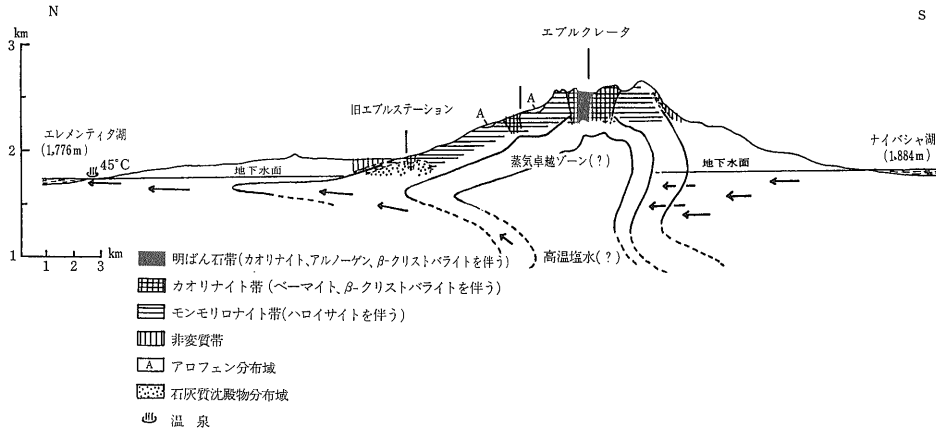
ロビ モンバサに次ぐケニア第3の都市であり このすぐ裏手(北)には東西 10 km 南北 11 km のカルデラメネンガイクレータ (Menengai Crater) が広がっている。メネンガイ火山についてはすでに本ニュース (佐藤 1984) でわしく述べられているが McCALL (1967) および世界活火山カタログによれば 1936~1948年にカルデラ内で60~90°C の噴気が4ヶ所認められたほか カルデラの北7km の Ol Punyats 駅近くで掘削された井戸 (坑井131とC 1066) からは メネンガイ火山の熱源に関連すると考えられる蒸気が噴出したとの記録が残されている。また未公表の UNDP 資料によればメネンガイ周辺から南のナクル湖 (塩水 1,758m) にかけて pH 7~8 で 30°C

1985年 5月号

前後 (T_{Na-K-Ca} では 190~200°C 前後) の温度を示す水井戸が数多く存在している。現在この地域では本格的な地熱探査が全く行われていないが 以上述べたことから地熱資源のポテンシャルは大変高いかもしれない。

9. エブル (Eburru)

エブルは首都ナイロビの北 100km のリフトバレー内に位置し 世界活火山カタログでは複合火山に分類されるエブル火山の北斜面に発達する変質帯を伴う噴気活動の活発な地熱地帯である (第6図)。ここは国際協力事業団 (JICA) がケニア共和国と協力して 1979年より



第7図 エブル地熱地域の概念モデル
断面図には想像される水流動方向(矢印)と温度パターンを示してある。

「リフト渓谷地熱開発計画調査」を実施中の場所でもあり筆者も調査団の一員としてこの地域の地熱変質帯調査を行った。

エブル地域の標高を見ると 後述する“エブルクレータ”のすぐ北西に約2,830mの最高峰があり 北東のエブルピークが2,668m 北山麓の旧エブルステーション付近が1,950m そして南のナイバシャ(Naivasha)湖(淡水でその組成は第1表に示してある)が1,884mとなっている。つまりエブル火山はリフトバレーの底から900m程度の高さを有する火山ということになる。

エブル火山の地質についてはすでに佐藤(1984)による詳しい解説がある。有史の噴火記録はないが第6図に示すようにエブルピーク西および南西側には直径200~500mの火口が10以上東西方向に密集して配列している。このうち最大のものはエブルピーク西南にある東西2km 南北1.3kmのハート型をした火口であり(日本の調査団はこれを“エブルクレータ”と呼んでいた)ここが地熱徴候の最も活発な場所となっている。

UNDPによる赤外線熱映像調査などによれば(NOBLE and OJIAMBO 1975) 火口から北斜面にかけて160ヶ所以上の噴気と変質帯を伴う地熱徴候地(噴気高温地帯)³⁾がリフトバレーに平行に発達する断層群に沿って確認されている(第6図参照)。同じくUNDP調査によって得られた未公表の噴気ガス分析結果は エブルピークの西および南西の地域が地熱活動の中心であることを示している。さらに同調査による重力調査結果によれば東西に配列する火口群に顕著な低重力異常域が認められると同

時に ここから北の旧エブルステーションにかけて細長く発達する南北性の低重力異常域が認められている(NOBLE and OJIAMBO 1975)。

すでに述べたように地表で見られる地熱活動はエブルクレータ付近が最も活発であって 変質帯調査結果によれば ここでは中心よりカオリナイト アルノーゲン β-クリストバライトを伴う明ばん石帯 ベーマイト β-クリストバライトを伴うカオリナイト帯およびモンモロナイト帯が果帯配列している(第7図参照)。北側の旧エブルステーション付近では 活発な地表地熱徴候とともにスコリア 溶岩の空隙を充填して一種の温泉沈殿物であろうと解釈した石灰華(方解石)が特徴的に認められた。多分これは第7図に示すように 地下水面が地表に近かったことと熱水の温度が低下したために生成したものと考えている。このような地表の地熱徴候地も旧エブルステーションの北側で消滅しているが 第6図に示すように旧エブルステーションの西3.5kmには 水温57°Cの水井戸(C2600)があり さらにその北エレメンティタ(Elmenteita)湖(塩水1,776m)の南端には45°Cの温泉湧出が認められていることから 地下での地熱地帯の広がりはいくともここまで考えることができよう。なおエブル地熱地域の熱源(マグマだまり)は変質帯の形状および火口の位置等から 火口密集域の地下深所に想定するのが最も合理的であろう。

ところで以上述べてきたように エブル火山の北斜面では活発な地熱徴候が見られるものの その南斜面ではこれまでのところ地熱徴候の存在は報告されていないの

3) 乾燥気候のために温泉と呼べるようなものは全く存在せず かつ噴気も早朝もしくは降雨の時以外はその存在を確認することは容易でない。

で 一見奇妙な印象を受ける。多分これは第7図の概念モデルにも示すように ケニア・リフトバレー内でも最も高い場所に位置するナイバシヤ湖から 北のエレメンティタ湖に向かって流れる地下水流が途中のエブル火山の熱源により暖められ ここでは高温地熱貯留層を形成するとともに 熱水は次第に温度を低下させながら旧エブルステーションの下を通過し やがてエレメンティタ湖まで到達し こで 45°C の温泉として湧出しているのであろうと考えると 上に述べた地熱徴候の非対称分布が合理的説明できるのではないであろうか (UNDP の報告書においてもエブル地域ではここに述べたと同様の地下水の流れがあるであろうことが述べられている)。ただしこのように考えなければならない科学的根拠は現在のところ 何もない。

雨量の少ないエブルでは (年間平均降雨量約 750mm) 地熱蒸気の凝縮水がこの付近の住民に貴重な生活用水を提供しており (写真7) また地熱を利用した除虫菊乾燥場もあるなど まさに地熱の直接利用が現実になされていると言って良い。さらにエブルクレータ周辺のカオリンを主とする地熱変質帯粘土は窯業原料資源としても活用されている (写真8)。

10. オルカリア (Olkaria)

エブル地熱地帯の南々東約 30km にはオルカリア地熱地帯があり UNDP の調査により開発最優先地域とされた所である。世界活火山カタログによれば軽石丘に分類されるオレンギングナイ (Orengingnai) 火山内にオルカリア地熱地帯は位置しており 真東にはリフトバレー随一の眺望を誇るロンゴノート (Longonot) 火山が位置している。オルカリアについてはすでに筆者 (1984) が

簡単に紹介したが その際十分な紹介をすることができなかった地下地質を BROWNE (1984) が また地熱モデルを GRANT and WHITTOME (1981) が発表していることが判明したので 補遺としてここでその紹介を行いたい。

第8図に示すように オルカリアの地下地質は水平方向に発達する流紋岩 粗面岩 玄武岩などの溶岩および同質の火砕岩類薄層よりなっている。550m 以深での変質帯分布は地層境界や割れ目に沿って流体が横方向に流れていることを示している (BROWNE 1984)。また多分東西断面と考えられる第9図の地熱モデルによればオルカリアでは地下深部より沸とう熱水 (まだその存在は確認されていない) が上昇している (上昇域は低比抵抗帯域に一致している)。この沸とう熱水は上昇域においてやがて側方に流動し 右側 (東側) では図に見られるような上下の熱水卓越ゾーンにはさまれた蒸気卓越ゾーンを有する地熱貯留層を形成している (このあたりの地表が現在の開発地域に相当)。そしてオルカリアで現在の蒸気生産ゾーン下部の熱水卓越ゾーンに認められる温度の逆転現象は実はこの側方流動によるものであろうと説明されている (GRANT and WHITTOME 1981)。

11. ロンゴノート (Longonot) 火山とススワ (Susuwa) 火山

オルカリアの真東にはロンゴノート火山 (成層火山) が またナイロビの西北西 50km にはススワ火山 (直径 10km 以上のカルデラを有する成層火山) がリフトバレー内に雄大な姿を誇っている。世界活火山カタログによれば両火山とも有史の噴火記録はないが 噴気活動があったとの報告は多い。なお両火山については佐藤 (1984) による詳細な解説がある。



写真7 エブル地区の住民は 蒸気凝縮水より生活用水を確保している (写真は簡易型の凝縮水造成器)。

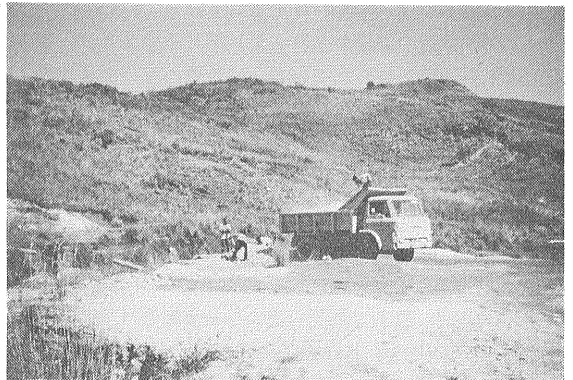
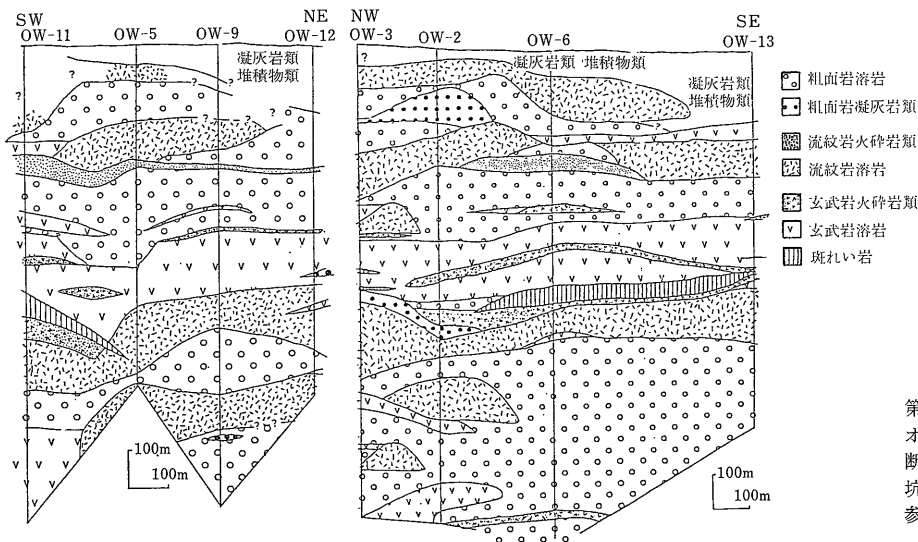


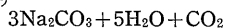
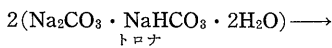
写真8 エブルピーク (2,668m 後方右上) 直下のカオリナイトを主体とする地熱変質帯からは 窯業原料の採掘が不定期に行われている。



第8図
オルカリア地熱地帯の地質断面図 (BROWNE 1984)
坑井位置は金原 (1984) を参照のこと。

13. マガヂ (Magadi) 湖

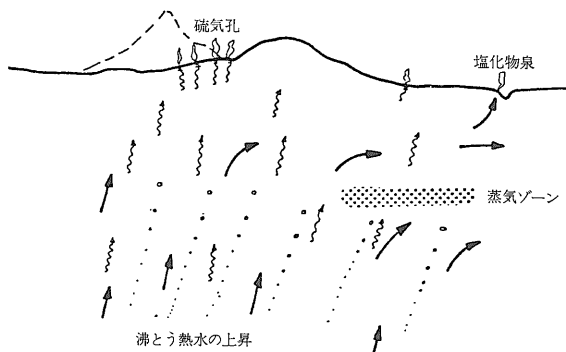
ナイロビの南々西約100km タンザニアとの国境近くにトロナ (Trona) と呼ばれる天然の重碳酸ソーダ石 ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 産地として有名なマガヂ湖 (塩水 579m) がある。トロナはリフトバレー内に見られる他の塩湖と同様に 周辺に分布するアルカリ火山岩類から風化 溶脱された成分が 内陸乾燥気候下の閉鎖的環境の湖において蒸発をくり返すことによって生じたものであって これは焼くことによって次のような反応でソーダ灰となる。



ソーダ灰 蒸気 炭酸ガス

ソーダ灰については吉田(1980) による詳しい紹介があるが マガヂソーダ会社ではガラス原料となるソーダ灰のほかに通常の塩 (NaCl) を生産している (写真9)。

マガヂ湖周辺の湖岸からは 第10図に示すように 20以上の温泉湧出が知られている。目標のない広大な平坦地で温泉湧出場所を見つけ出すことは容易ではなかったが 第10図に示す No. 13 もしくは14地点 (写真10) と No. 15 もしくは No. 16 地点の温泉を尋ねることができた。前者は $40\sim 45^\circ\text{C}$ また後者は 41°C pH はいずれも $9\sim 10$ の温泉であった。第1表には前者の温泉の化学分析値⁴⁾を示すが これによれば $\text{pH}=9.5$ の $\text{Na}-\text{Cl}-\text{HCO}_3$ 型の熱水であり そのシリカ温度は 70°C 前後であった (第2表)。BAKER (1958) はこれらの温泉はア



第9図 オルカリア地熱地域の概念モデル (GRANT and WHITTO-ME 1981)

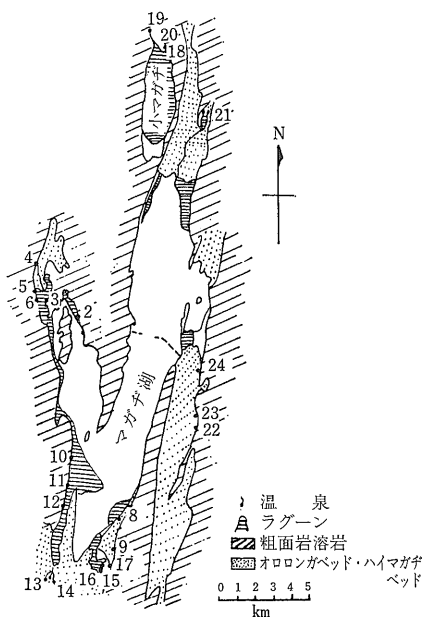
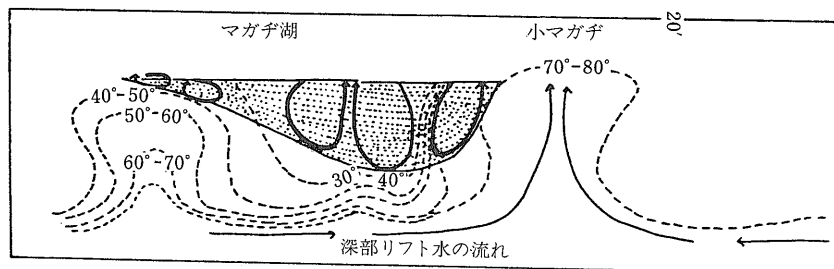
断面位置は示されていないが 左 (西) の破線の高い山が Elkariani 山 ($2,434\text{m}$) 右 (東) の塩化物泉の地形的凹部が Hell's Gate であろう (金原 1984参照)。



写真9 マガヂソーダ会社のトロナ精製工場

4) 写真10に示すように湧泉のみのサンプリングは困難であり 厳密には湖水も含んだサンプルの分析値であるので 第2表に示した地球化学的溫度は単なる参考値として見ていただきたい。

第11図 マガヂ湖の熱水循環パターンと温度断面モデル (CRANE 1981)



第10図 マガヂ湖周辺の温泉 (BAKER 1958)

ルカリ性の地下水が地下深部の火成岩体と接触し 暖められることにより地表に湧出したのであろうと説明している. なお最近 CRANE (1981) が示したマガヂ湖の断面モデル (第11図) によれば マガヂ湖の北部および小マガヂ (Little Magadi) に湧出する 70~80°C の高温泉は深部循環熱水であり またマガヂ湖南部に湧出する30~50°C の低温泉は浅部循環水であると説明されている.

話は地熱から少し横道に逸れるが マガヂ湖周辺の地質は下位より更新世下部のオロロンガベッド (Olorong Beds) (火山灰 凝灰質シルト 粘土) 更新世中部のチャートシリーズ (Chert Series) (チャート 粘土 石灰岩) 更新世上部~現世のハイマガヂベッド (High Magadi Beds) (シルト 粘土) (写真11) そして現世のエバポライトシリーズ (Evaporite Series) を含む堆積物よりなっている (BAKER 1958). EUGSTER (1980) はBAKER (1958) によるチャートシリーズは古期チャート (オロロンガベッドの一部) と新期チャート (ハイマガヂベッドの一部) に分類されると述べている (写真12). マガヂ湖では このような堆積物とアルカリ塩水との反応により 珍しいアルカリ珪酸塩鉱物をはじめとして 様々な自生鉱物が生じている.



写真10 マガヂ湖南端 (第10図の No. 13 もしくは No. 14 の地点) より湧出する温泉 (40~45°C pH=9~10) ぬるぬるした感触で とても温泉気分など味わうことはできなかった.



写真11 ハイマガヂベッドの凝灰質シルト岩 (Erioniteに 富む).

第3表 ケニア・リフトバレー地熱地帯からの放熱量 (CRANE and O'CONNELL 1983)

地域	面積 (km ²)	空中熱赤外放熱量 (MW)	温泉流出放熱量 (MW)
トルカナ	1,683	2,181 ± 450	803* ± 161
ボゴリア	31	353 ± 71	130 ± 26
エブル	166	7,444* ± 1,489	2,740 ± 548
オルカリア	89	6,268* ± 1,254	2,313 ± 462
マガヂ	487	902 ± 180	332 ± 66

計 17,148 ± 3,444 6,318 ± 1,263

* マガヂでの空中熱赤外放熱量/温泉流出放熱量 (=2.7) に基づいて計算された値

アルカリ珪酸塩鉱物としては天然に5種類知られているが Natrosilite (Na₂Si₂O₅) を除いて他はすべて粘土鉱物に近縁な層状構造を持つ含水 Na—珪酸塩鉱物である。このうち次の3種類が活発な蒸発をくり返すマガヂ湖においてこれまでに発見されており やがて第4番目の Na—珪酸塩 (Kanemite NaHSi₃O₅ · 3H₂O) も発見される可能性があるとされている (EUGSTER 1980)。

- Magadiite NaSi₇O₁₃ (OH)₃ · 3H₂O } ハイマガヂベ
 - Kenyaite NaSi₁₁O_{20.5}(OH)₈ · H₂O } ッド
 - Makatite NaSi₂O₃ (OH)₃ · H₂O } エバポライト
- シリーズ

Magadiite と Makatite は堆積過程でトロナ中に閉じ込められたアルカリ塩水より結晶化したものと考えられており (SHEPPARD and GUDE 1970) そして High Magadi Beds では希薄な水の作用で Magadiite から Na が溶脱された結果層状チャート (“マガヂタイプ” チャートと呼ばれている) が生成したものと説明されている。また Kenyaite はこの Magadiite → チャート転移の際の中間的産物と考えられている。なお Magadiite → Kenyaite → Quartz の変化は最近合成実験によっても確か

められている (BENKE and LAGALY 1983)。

オロロンガベッドから現世堆積物にいたる湖成堆積物中に 塩水と火山性物質などの反応により次のような自生鉱物が生じている (EUGSTER 1980)。

珪酸塩鉱物 (沸石類)

Erionite Clinoptilolite Chabazite Phillipsite

このうち Erionite はマガヂ湖では最も一般的な沸石であって 粗面岩質ガラスと塩水の反応によって生じている。Clinoptilolite はオロロンガベッドに豊富に産するが Chabazite と Phillipsite は少ない。

非珪酸塩鉱物

Gaylussite (Na₂CO₃ · CaCO₃ · 5H₂O) Fluorite (CaF₂)

Gaylussite と Fluorite は最も一般的な自生非珪酸塩鉱物である。このうち Gaylussite はアルカリ塩水とカルシウムの反応により生じているものと説明されている。また Fluorite は F を多量 (最大 2,000mg/kg) に含む塩水とカルシウムの反応により生じているものと説明されている。

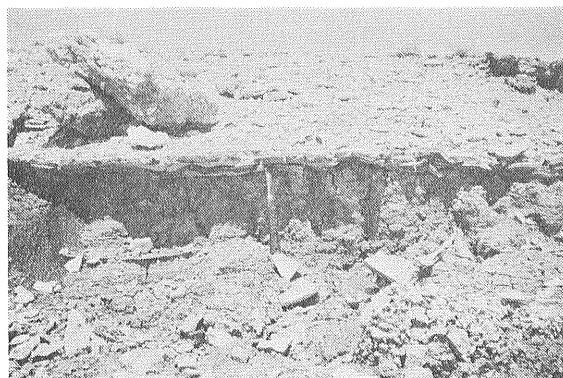


写真12 層状チャート (写真中央) オロロンガチャートか?

Na-Al-珪酸塩ゲル

これはアルカリ性温泉と粗面岩岩屑との反応により生ずるものと考えられている。

14. おわりに

若い火山帯に位置するケニア・リフトバレーは地熱地帯としては大変有望であると考えられる。しかしながら以上述べてきたように一部地域を除いては本格的な地熱調査が全くなされていないので資源の実態はほとんどわかっていないと言っても良いであろう。

最近 CRANE and O'CONNELL (1983) によって報告されたケニア・リフトバレーのトルカナ ボゴリア エブルオルカリア マガヂの各地熱地帯の放熱量調査結果によれば 空中熱赤外調査による総放熱量は $17,148 \pm 3,444$ MW また温泉流出から推定した総放熱量は $6,318 \pm 1,263$ MW という値が得られている(第3表)。表でもわかるようにこのうちエブルとオルカリアは他の地域に比較して数倍以上の大きい値を示している。ちなみに日本列島全体の温泉放熱量は 16×10^{10} cal/min (11,160 MW) (日本地熱調査会 1970) もしくは $85,356 \times 10^6$ cal/min (5,960 MW) (角 1977) と見積られているので放熱量のみから見れば上記の値はほぼこれに匹敵することになる。

ケニア・リフトバレーの壮大な景観とそこに点在する火山湖そしてサバンナに住む野生動物の群は自然を相手にする我々に夢とロマンを大いにかきたててくれるに違いない。しかしながら最近マスコミ等によってしばしば報道されているように現実のケニアを含むアフリカ諸国はこのような恵まれた大自然とは裏腹にかんばつと飢に大変苦しんでおり我々が抱く夢とロマンには遠程いものが感じられるようである。このような状況下においてケニアにおける地熱開発がどの程度の効果を及ぼすのかは定かではないがケニアにおける地熱事情が本文によって若干でも理解していただければ幸いであると思いつつ筆をおきたい。

最後に筆者にケニア訪問の機会を与えていただいた国際協力事業団(JICA)と現地でお世話をいただいた三井金属資源開発(株)の関係者皆様および熱水の化学分析をしていただいた当所技術部阿部喜久男技官に厚くお礼申し上げます。

文 献

BAKER, B. H. (1958) The geology of the Magadi area. Geol. Surv. Kenya, Report No. 42, 81 p.
 BENKE, K. and LAGALY, G. (1983) Kenyaite-synthesis and

properties. Amer. Mineral., 68, 818-826
 BROWNE, P. R. L. (1984) Subsurface stratigraphy and hydrothermal alteration of the eastern section of the Olkaria geothermal field, Kenya. Proc. 6th N. Z. Geothermal Workshop, 33-42
 CRANE, K. (1981) Thermal variations in the Gregory Rift of southern Kenya (?). Tectonophysics, 74, 239-262
 CRANE, K. and O'CONNELL, S. (1983) The distribution and implications of heat flow from the Gregory Rift in Kenya. Tectonophysics, 94, 253-275
 DODSON, R. G. (1963) The geology of the South Horr area. Geol. Surv. Kenya, Report No. 60, 53 p.
 EUGSTER, H. P. (1980) Lake Magadi, Kenya, and its precursors. Chapter 15 in Developments in Sedimentology, 28, 195-232, Elsevier, Amsterdam.
 GRANT, M. A. and WHITTOME, A. J. (1981) Hydrology of Olkaria geothermal field. Proc. 3rd N. Z. Geothermal Workshop, 125-129.
 金原啓司(1984) ケニア オルカリア地熱地帯 地質ニュース No. 353, 63-72
 MCCALL, G. J. H. (1967) The Geology of the Nakuru-Thomson's falls-Lake Hannington area. Geol. Surv. Kenya, Report No. 78, 122 p.
 日本地熱調査会(1970) 日本の地熱資源, p. 102
 NOBLE, J. W. and OJIAMBO, S. B. (1975) Geothermal exploration in Kenya. 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 1, 189-204
 RICHARD, J. J. and NEUMANN, VON P. M. (1957) Catalogue of the active volcanoes and solfatara fields of Africa and the Red Sea.
 佐藤博之(1983) ケニア・リフトバレー(1) 地質ニュース No. 344, 32-45
 佐藤博之(1984) ケニア・リフトバレー(2) 地質ニュース No. 354, 38-51
 SHEPPARD, R. A. and GUDE, A. J. (1970) Makatite, a new hydrous sodium silicate mineral from Lake Magadi, Kenya. Amer. Mineral., 55, 358-366
 SIMKIN, T., SIEBERT, L., McCLELLAND, L., BRIDGE, D., NEWHALL, C. and LATTE, J. H. (1981) Volcanos of the World. 232 p., Hutchinson Ross Publishing Co.
 角 清愛(1977) 日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係。地調月報, 28, 277-325
 TRUESDELL, A. H. (1975) Summary of section III: Geochemical techniques in exploration. 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 1, Iiii-Ixxix
 吉田国夫(1980) ケニアのマガヂ灰。セラミックス, 15, 50-54