

ケニア共和国リフト溪谷
地盤開発計画調査報告書

昭和58年1月

国際協力事業団

ケニア共和国リフト溪谷
地熱開発計画調査報告書

JICA LIBRARY



1062651C3

昭和 58 年 1 月

国際協力事業団

国際協力事業団	
受入 期 58.4.22	A07
登録No 1603588	643 MPN

は し が き

日本政府は、ケニア共和国の要請に基づき、リフト渓谷に位置する Eburru 地熱地域における地熱資源量の評価及び将来の地熱発電の可能性に関する調査を行うこととし、その実施を国際協力事業団に委託した。

当事業団は、本島公司氏を団長とする調査団を1979年10月から1982年12月までの間4次にわたり現地に派遣し、ケニア政府をはじめとする関係機関の協力を得て、地質調査、変質帯調査、地化学探査、物理探査を実施し、当該地域における地表面からの地熱ポテンシャル評価を行なった。

本報告書は、その成果を取りまとめたものである。

本報告書が、当該地域において今後実施される予定のボーリング調査、さらには有数の地熱資源国であるケニア共和国における地熱開発の際の一つの指針となれば幸いである。

最後に、調査に際し、多大の協力をいただいたケニア共和国政府、在ケニア日本大使館、外務省並びに通商産業省の関係各位に対し衷心より感謝の意を表するものである。

1983年1月

国際協力事業団

総 裁 有 田 圭 輔

要 約

国際協力事業団は、昭和54年から昭和57年にかけて4回にわたり、地熱探査調査団をケニア共和国に派遣し、リフト溪谷の地熱地帯の調査を実施した。

地熱探査調査団は、リフト溪谷のEburru地熱地帯で地質調査、地化学調査、物理探査を実施した。野外調査は、3回にわたり、合計約5ヶ月間実施した。野外調査の前後に各数ヶ月づつエネルギー省内で、文献調査や調査データの解析や解釈を実施した。

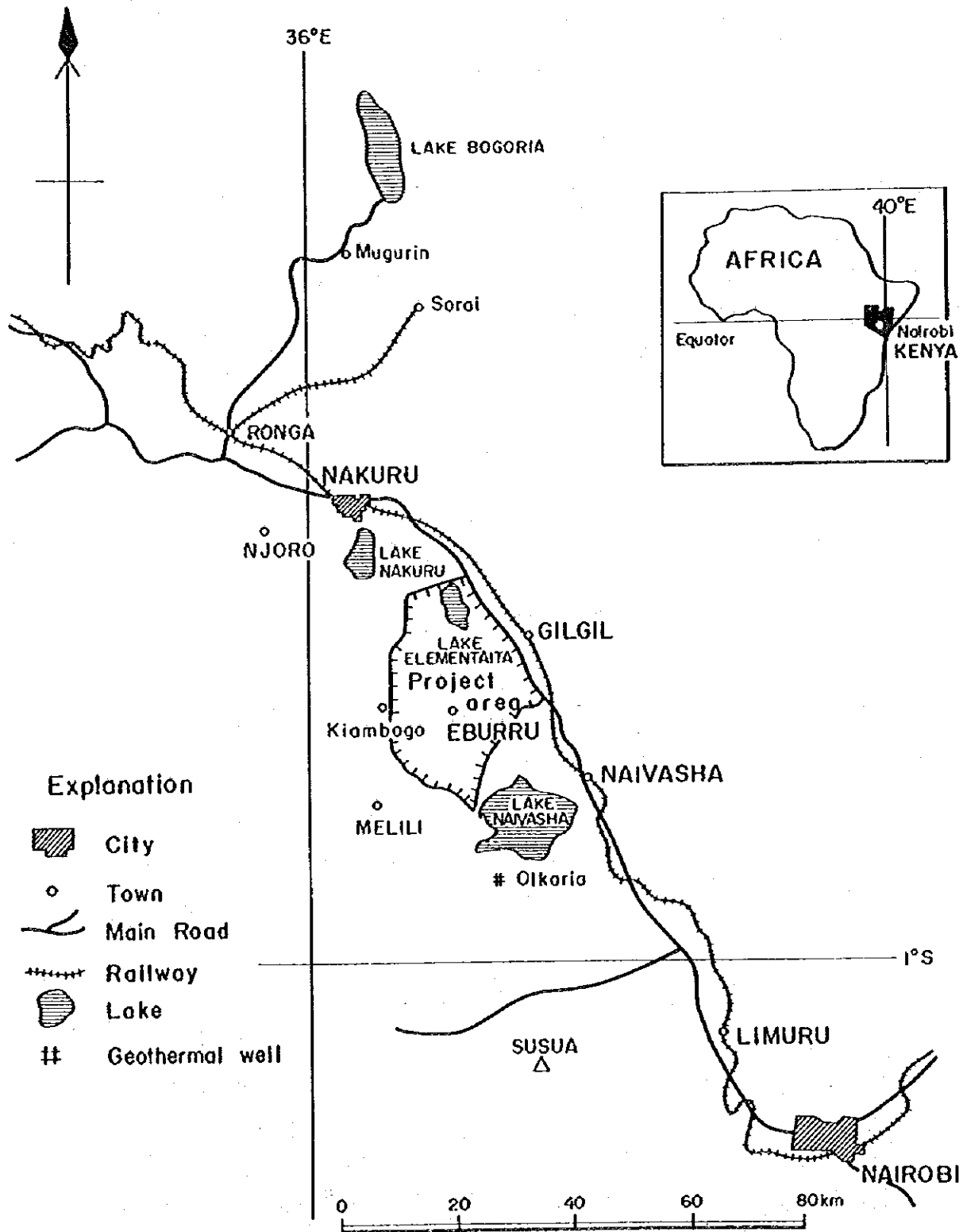
地質調査としては、約100平方キロメートルの地域での地質図作成ならびに岩石の変質帯調査を実施した。

地化学調査は、約30平方キロメートルの地域で16測線沿いに実施した。土壤空気中の水銀濃度および炭酸ガス濃度さらに1m深地温を842点で測定した。842点で土壤試料を採取し、その水銀濃度を分析した。

物理探査は、シュランベルジャー電極配置による垂直電気探査を11測線沿いで、合計81点で実施した。

これら調査結果に基づき、Eburru地熱地帯での今後の調査についての勧告を、本報告書に記した。

Fig. 1 Location of Project Area



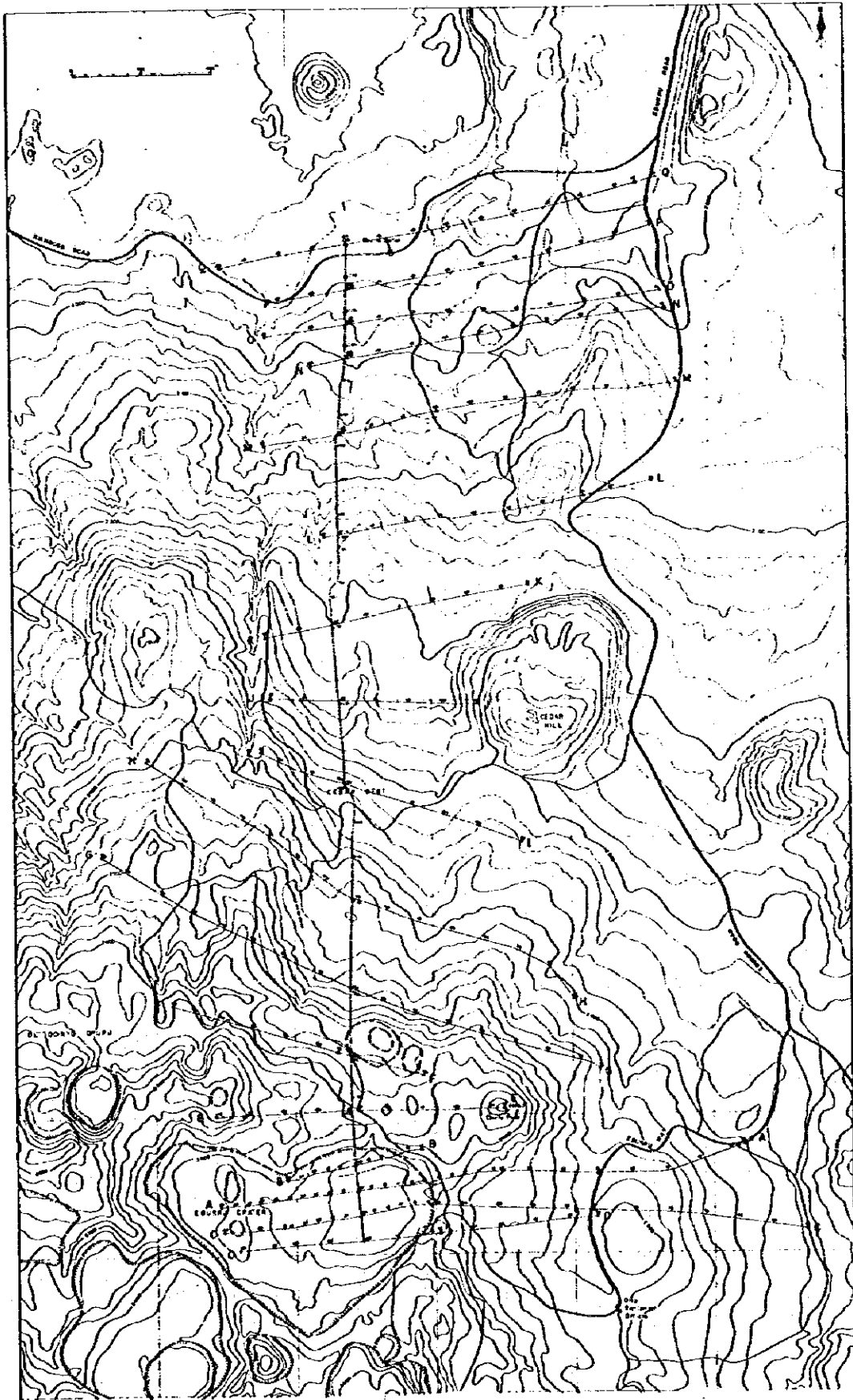


Fig. 2 Location of Project Area

結 論

上記各調査の結果に基づき、主として変質帯調査から、Fig. 5のようなEburru地熱地帯における地熱系の仮説モデルを作成した。地化学調査や物理探査（電気探査）の結果もこの仮説モデルを支持するので、このモデルを作業仮説として使用する。

Eburru地熱系の仮説モデルは次のようなものである。

- a) 熱源はEburru爆裂火口群の下にあり、東方へ伸びている。
- b) 地下水は、Naivasha湖から北へ向けて流れ、本調査地域の下を通る。
- c) Eburru爆裂火口群付近にある地熱徴候は、その下にある熱源によるものである。
- d) Eburru Station付近の地熱徴候は、地下熱水面が浅くなることにより生じたものである。

このように、仮説モデルによればEburru地熱地帯の地熱ポテンシャルは、非常に大きいものであると考える。

地 質 調 査

1. 本調査地域は、リフト溪谷内にある火山より、更新生またはそれ以降に噴出した火山岩類より成る。
2. 地質層序は、時代の新期のものになるに従い、溶結凝灰岩、フォノライトおよびコメンダイト溶岩、Ol Doinyo Opur 降下軽石堆積物、黒曜岩岩脈、Eburru Peak 粗面岩、黒曜岩溶岩流、溶岩円頂丘および砕屑丘、古期Badland 玄武岩、Cedar Hill 溶岩円頂丘、火山灰土壌、Eburru 降下軽石堆積物である。
3. Eburru地熱地帯は、主として、多くの黒曜岩岩脈が貫入していると考えられる Ol Doinyo Opur 降下軽石堆積物より覆われている。
4. 調査地域内には南北方向の断層が発達している。断層沿いには、黒曜岩質溶岩円頂丘や軽石丘、玄武岩質岩滓丘、噴気井、変質帯が形成されている。
5. 現在の地表面は、Eburru-a 降下軽石堆積物（新期）、— b 降下軽石堆積物の2層に覆われている。
6. 調査地域東部に露出している溶結凝灰岩やフォノライトやコメンダイト溶岩流が、地熱地帯の地下に分布しているかは不明である。
7. 本調査地域の東西方向の模式断面図をFig. 3に示す。Ol Doinyo Opur 降下軽石堆積物の厚さおよび、地熱地帯の下に溶結凝灰岩や溶岩流が広く分布しているかを確認することは非常に重要である。

変質帯調査

Eburru 地熱地域の地熱変質帯は、変質鉱物、特に粘土鉱物の組合せに基づいて、以下のように分帯される。

(変質分帯)

- Zone I : 明ばん石帯 (明ばん石, 明ばん, 良結晶カオリナイト, β -クリストバル石, 石英)
- Zone IIa : カオリナイト帯 (良結晶カオリナイト, ペーム石, β -クリストバル石, 石英)
- Zone IIb : カオリナイト帯 (不良結晶カオリナイト, α -クリストバル石, 石英)
- Zone III : モンモリロナイト帯 (モンモリロナイト, カオリン/モンモリロナイト混合層粘土鉱物, ヘロイサイト)

(変質鉱物分布域)

石灰華 (方解石), β -クリストバル石, アロフェン

以上の変質帯分布は、おおむね Ol Doinyo Eburru 火山の爆裂火口群を中心にして、Zone I, Zone IIa, Zone IIb が累帯配列をなしている。すなわち、Eburru 地域では以上のような変質帯の累帯配列から、Zone I を中心とした爆裂火口群地域が地質変質活動の中心的場所であることが推察される。

Zone I および Zone II のような変質帯は、一般的には蒸気卓越型地熱系環境下において生成すると説明されており、Eburru 爆裂火口群地域の地下には高温の蒸気卓越型地熱系資源の賦存していることが期待される。

一方 Ol Doinyo Eburru 火山の北斜面から山麓の Eburru Station にかけて Zone III が南北方向に細長く、かつ広い面積を占め舌状に分布しており、これは Eburru Station の北方で消滅している。このようなモンモリロナイトや方解石を生成するような Zone III の変質帯は、一般に熱水卓越型地熱系環境下によって生成すると言われている。Eburru Station 付近のような低地では地下水面が浅くなるために、このように地表の岩石中にも熱水から析出した方解石を見ることができるものと考えられるが、いずれにしてもこの付近の地下には中性～アルカリ性の熱水卓越型地熱系資源の賦存が期待される。

地化学調査

地化学野外調査の結果、Eburru 地熱地帯は、北部地区、中部地区、南部地区の3つに分けられる。

1. 1 m 深の土壤空気中の炭酸ガス濃度測定の結果、南部地区の Eburru Crater および中部地区の 2 地区は、本調査地域内で、地熱資源のポテンシャルが最も高い。
2. 1 m 深地温測定結果によると、高温部は南部地区、および Eburru Station を含む北部地区の両地区に分布している。
3. 上記の結果は、以下のよう考察する。
 - (a) 南部地区で、地熱ポテンシャルの高い所があると考えられる。特に Eburru Crater 内と Eburru Peak の 500 m 南の 2 箇所地熱ポテンシャルが高いと考えられる。
 - (b) 中部地区での地熱ポテンシャルは、北部地区より高い、さらに地下水面は、北部地区に比べ中部地区の方が深い。
4. 国連のガス地化学専門家の報告によると、蒸気試料中の大気の混入率の分布傾向は、上記第 3 項の (b) の仮説を支持している。上記国連専門家の報告によると、南部地区の浅部貯留層（数 100 m 以浅）からの蒸気試料は、体積比で 0.4 以下の炭酸ガスしか含んでいない。蒸気は良質で、タービンによる発電に使用しうるようなものと考えられる。

物理探査

1. Eburru Crater 地区や Eburru Station 地区では（Eburru Crater 地区に数箇所例外はあるが）、10 m～150 m の薄い高比抵抗層の下に、厚い低比抵抗層（比抵抗は 100 m から 300 m）がある。
2. Eburru Crater 地区で、上記の厚い低比抵抗層の下に高比抵抗層が存在する事が、シュランベルジャー垂直探査で測定された。この基底高比抵抗層の上面までの深さは、測定された所では 500 m～900 m である。しかし多くのシュランベルジャー垂直探査測点では、電流電極間隔の半分（ $AB/2$ ）が 1500 m の場合でも、高比抵抗層の存在する徴候はない。この高比抵抗基底層の比抵抗の値は決定出来なかったが、400 m 以上である。
3. 高比抵抗基底層は次のものである可能性がある。
 - (i) 高比抵抗の基盤結晶質岩石
 - (ii) 中程度の比抵抗の蒸気が充満した地熱貯留層
 しかし、試錐による調査なしで、この高比抵抗基底層の地質的意義を結論づけられない。
4. Eburru Crater の中央でのシュランベルジャー垂直探査では、上記の低比抵抗層は非常に薄い。この低比抵抗層（厚さ 50 m～230 m）の下に比抵抗 1000 m 以上の高比抵抗層がある。このように高比抵抗層が浅部に現われる理由としては次のように考えられる。
 - (i) 変質により、岩石の孔隙率が低下した。
 - (ii) 孔隙を水の替りに蒸気が満している。
 - (iii) 緻密な貫入岩が、この地域に貫入している。

5. Cedar West 地区では、比抵抗の変化は比較的少なく、地表付近の地層の下に数100mの低比抵抗層がある。この低比抵抗層の比抵抗は、本地区中央部の谷状の凹地の中で低く、両側傾斜部で高くなっている。従って、Eburru Crater 地区から Eburru Station 地区に向い、地熱流体は、谷状凹地の中央部の下を流れていると考えられる。

6. Eburru Station 地区では、厚い低比抵抗層の下に高比抵抗の存在を示すような測定値はなかった。従って、地下浅所から厚く地下水（温度はやや高いものと考えられる）があり、その下の基盤層または蒸気に満ちた地層は相当深い（1000m以上）と考える。しかし、垂直電気探査の地質的解釈を行なうには、試錐等による地質情報が増す必要がある。



Fig. 3 Schematic Profile of The Eburru Geothermal Prospect in E-W Direction

勸 告

1. 調査結果に基づき、下記の5箇所での浅部コア試錐を勧める (Fig. 4 参照)。

地点I： 変質帯調査によると、本地点がEburru地熱地帯の中心であると考えられる。垂直電気探査では浅部(100m以内)の所に高比抵抗体がある。さらに炭酸ガスや水銀の濃度および地温も高くなっている。

地点II： 炭酸ガス濃度および地温が高くなっており、地下水面は比較的深いと考えられる。地質的にはOl Doinyo Opurの降下軽石堆積物や縞状黒曜岩およびそれらの下にある岩石を、本試錐により調査する。

地点III： 変質帯調査によると、地点IIIはEburru Station地区で、地熱活動の最も盛んな地点である。噴気活動が盛んで、余り強くはないが、炭酸ガスおよび地温異常が確認されている。地質的には、縞状黒曜岩の厚さや分布その下にある岩石などの情報を得る必要がある。

地点IV： 本地点はEburru Crater周辺とは異なる水系に属する。比抵抗調査によると基底の比較的比抵抗の高い層が、厚い低比抵抗層の下に見られる。重力図によると本地点の西側で重力の変化が大きい。

地点V： 強い地熱徴候があり、炭酸ガスと地温で余り強くないがはっきりした異常がある。比抵抗調査では、比較的薄い高比抵抗層(層厚100m以下)の下に厚い低比抵抗層がある。この低比抵抗層の下の層は、今回の調査では不明である。

地点VI： 地点IIで試錐を実施する場合、地形上試錐機の運搬等に非常な困難が生じる可能性がある。その場合地点IIの替りに本地点VIにて代用しても良い。

2. 浅い調査試錐を実施する際、岩芯試料収集および温度検層を行なう事を勧める。

3. Eburru地熱地帯の地熱ポテンシャルの評価のための、地下の地球科学および工学的なデータを得るため、1000m以上の深度の深部探査井を、上記浅部探査井掘削後に掘削する事を勧める。

4. Naivasha湖からElementeita湖、Nakura-Naivasha道路からリフト溪谷の西端にかけての広域の重力調査をし、地熱構造の巨視的機構を解明する事を勧める。

5. Soysambu農場付近で、ダイポールマッピングにより非常に低い比抵抗が測定されている。この付近を後日調査する事を勧める。

6. 本調査によれば、地熱地帯が周辺地域に拡がっている可能性を示している。従って地熱地帯の拡がりを明らかにするために、周辺地域へ同様な調査を拡げる事を勧める。

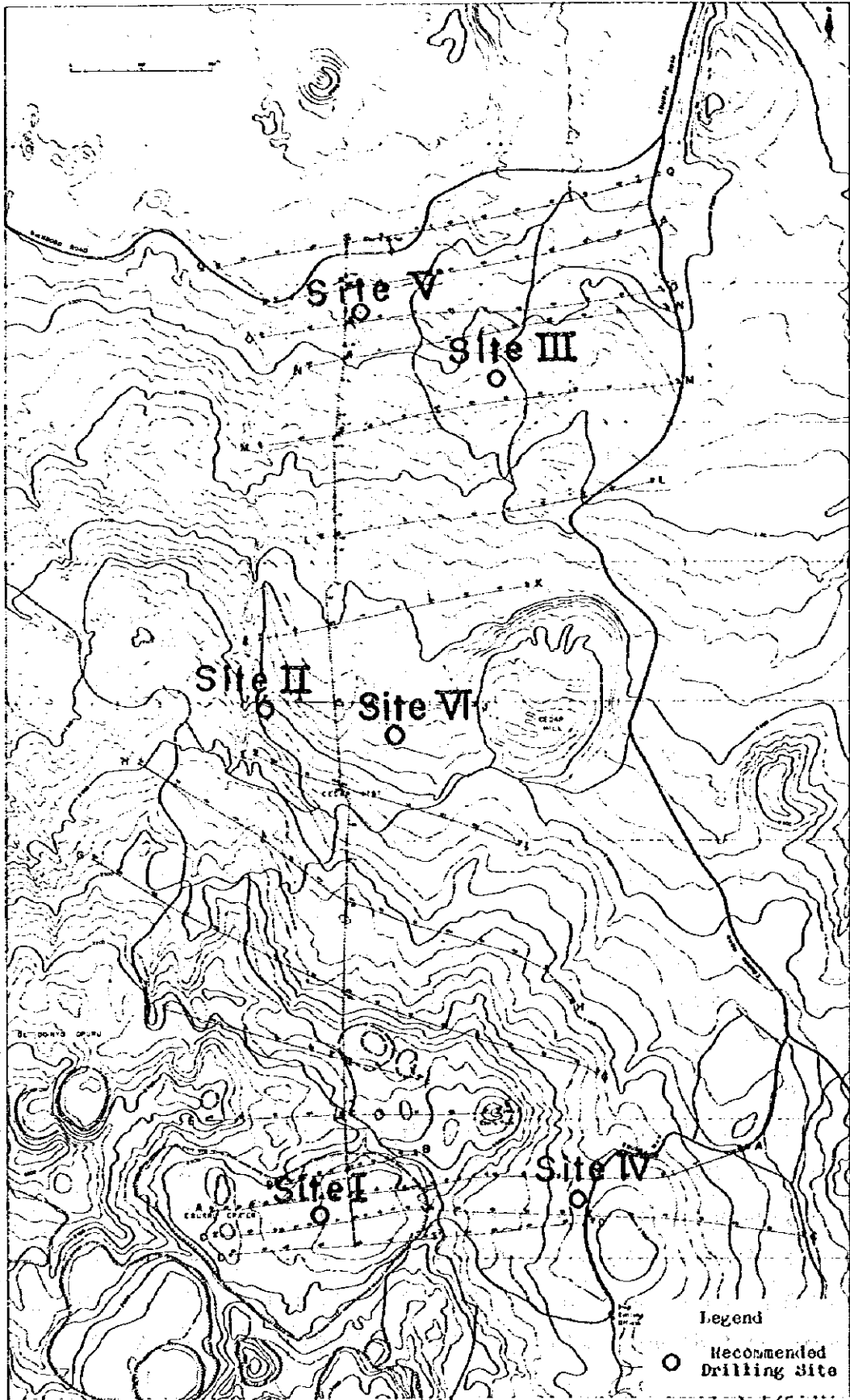
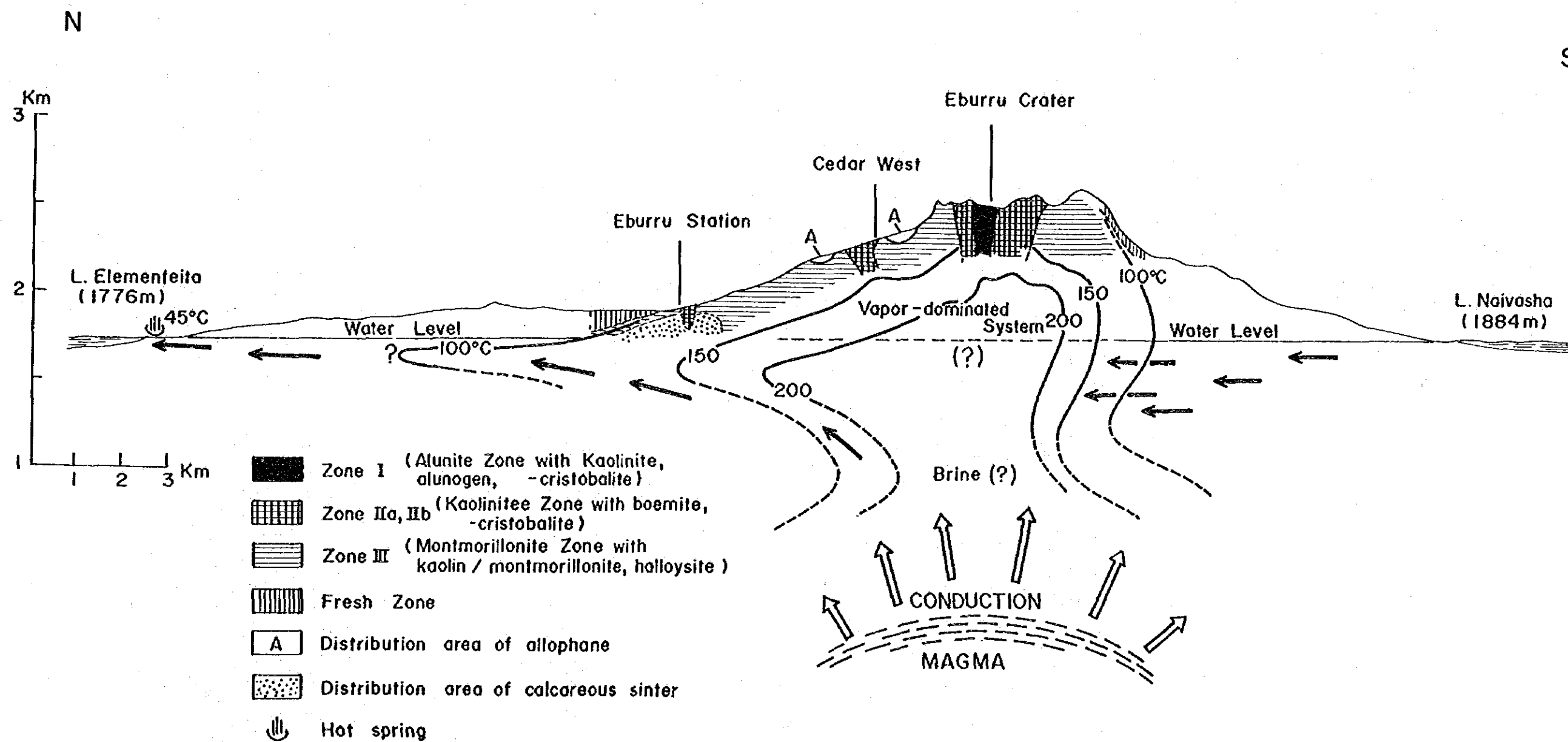


Fig. 4 Recommended Exploratory Drilling Sites

Genetic Model of Eburru Geothermal Area, KENYA



目 次

はしがき	
要 約	
結 論	
動 告	
I 総 論	1
第1章 はじめに	1
1.1 調査目的	1
1.2 調査地域	1
1.3 調査項目	1
1.4 調査団員編成	2
1.5 調査の経緯	3
第2章 調査地域の一般状況	5
2.1 調査地域	5
2.2 地 形	5
2.3 谷	5
2.4 断 層	5
2.5 自然環境	5
2.6 地 名	6
II 地 質 調 査	7
第1章 はじめに	7
第2章 地質概説	7
2.1 地質概説	7
2.2 断 層	7
第3章 地質各説	9
3.1 基 盤	9
3.2 Eburru 火山	10
III 地化学探査	23
第1章 はじめに	23
第2章 調査方法	25
2.1 概 要	25
2.2 測線および測点の設定	25

2.3	測 定	26
2.4	土壤空気中の水銀測定	26
2.5	土壤空気中の炭酸ガス測定	27
2.6	1 m 深地温測定	28
2.7	土壤中の水銀測定	29
2.8	同一測点での繰返し測定	29
第3章	調査結果	33
3.1	概 要	33
3.2	1 m 深地温測定	33
3.3	土壤空気中の炭酸ガス濃度測定	34
3.4	土壤空気中の水銀濃度測定	34
第4章	検 討	35
4.1	1 m 深地温測定	35
4.2	土壤空気中の炭酸ガス濃度測定	35
4.3	土壤空気中の水銀濃度測定	37
IV	物理探査	49
第1章	はじめに	49
1.1	岩石と電気比抵抗	49
1.2	Eburru 地域での電気探査	49
第2章	野外調査	51
2.1	測定装置	51
2.2	野外測定手順	51
2.3	比抵抗の計算	52
2.4	解 析	52
第3章	調査結果	55
第4章	解 析	59
V	変質帯調査	123
第1章	はじめに	123
第2章	調査方法	125
第3章	調査結果	127
3.1	野外調査	127
3.2	変質鉱物分析結果	127
第4章	変質鉱物分布と変質分帯	129
第5章	考察と結論	131

LIST OF FIGURES

- Fig. I and 2 Location of Project Area
- Fig. 3 Schematic Profile of the Eburru Geothermal Prospect in E-W Direction
- Fig. 4 Recommended Exploratory Drilling Sites
- Fig. 5 Genetic Model of Eburru Geothermal Area
- Fig. II-1 Locality Map of Thin Section Samples
- Fig. II-2 Geological Map of the Eburru Prospect
- Fig. II-3 Geological Sequences of the Eburru Geothermal Prospect
- Fig. II-4 Columnar Section of Ol Doinyo Opor Pumice-fall Deposits at Point-39
- Fig. II-5 Distribution of Eburru-a (upper) and Eburru-b (lower) Pumice-fall Deposits (cm)
- Fig. II-6 Eburru Geothermal Prospect, Viewed from North
- Fig. II-7 Ol Doinyo Opor Pumice-fall Deposit at Point-291
- Fig. II-8 Flow Structure of Obsidian Dike at Point-208
- Fig. II-9 Flow Structure of Obsidian Dike at Point-208
- Fig. II-10 Obsidian Dike (D) Intruding to Pumice (P) at Point-175
- Fig. II-11 Eburru-a and -b Pumice-fall Deposits at Point-161
- Fig. III-1 Mercury Spectrometer
- Fig. III-2 Carbon Dioxide Detector
- Fig. III-3 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature in the Eburru Prospect
- Fig. III-4 Histogram of Common Logarithm of CO₂ (%) in Soil Air in the Eburru Prospect
- Fig. III-5 Histogram of Common Logarithm of Hg (ng/l) in Soil Air in the Eburru Prospect
- Fig. III-6 Histogram of Common Logarithm of Hg (ppm) in Soil in the Eburru Prospect
- Fig. III-7 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature in the Southern Area (line A to E)
- Fig. III-8 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature in the Central Area (line F to K)
- Fig. III-9 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature in the Northern Area (line L to Q)
- Fig. III-10 Histogram of Common Logarithm of CO₂ in Soil Air in the Southern Area (line A to E)

- Fig. III-11** Histogram of Common Logarithm of CO₂ in Soil Air in the Central Area (line F to K)
- Fig. III-12** Histogram of Common Logarithm of CO₂ in Soil Air in the Northern Area (line L to Q)
- Fig. IV-1** Schlumberger Electrode Configuration
- Fig. IV-2** Wiring of Equipment
- Fig. IV-3** Distribution of Apparent Resistivities (at AB/2=500m)
- Fig. IV-4** VES Curve and Computer Model
- Fig. IV-5** Apparent Resistivity Sections
- Fig. IV-6** Resistivity Sections

LIST OF TABLES

Table II-1	List of Thin Section Samples	111
Table III-1	Survey Lines and Stations for Geochemical Survey in the Eburru Prospect	112
Table III-2	Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature	113
Table III-3	Histogram of Common Logarithm of CO ₂ Value in % in Soil Air	114
Table III-4	Histogram of Common Logarithm of Hg (ng/l) in Soil Air	115
Table III-5	Histogram of Common Logarithm of Hg (ppm) in Soil	116
Table IV-1	Statistics of Apparent Resistivities at AB/2 = 500m	117
Table IV-2	Resistivity Field Data	118
Table V-1	X-ray Diffraction Data for Altered Rocks	119

LIST OF PLATES

Pl. III-1	Survey Lines and Stations
Pl. III-2	Distribution of 1 Meter Depth Ground Temperature
Pl. III-3	Distribution of Carbon Dioxide Content in Soil Air
Pl. III-4	Distribution of Mercury Content in Soil Air
Pl. III-5	Distribution of Mercury Content in Soil
Pl. III-6	Compiled Geochemical Anomalies
Pl. III-7	Lineament Map of the Prospect
Pl. V-1	Distribution Map of Hot Grounds Detected by IR Survey of the UNDP
Pl. V-2	Zonal Distribution Map of Alteration Zones

第 I 部 總 論

第1章 はじめに

1.1 調査目的

本調査は、ケニア共和国エネルギー省が計画しているリフト渓谷地熱開発計画に関し、過去に実施された調査資料により選定された当面の開発区域である Eburru (エブルー) 地区の地熱資源埋蔵量を調査する目的で実施した。

また調査実施の過程で、ケニア共和国エネルギー省の技術職員の訓練も実施した。

1.2 調査地域 (Fig.1 および Fig.2 参照)

調査地域は、南緯0度39分、東経36度17分にあり、行政区画上では、ケニア共和国 Rift Valley (リフトバレー) 州 Nakuru (ナクル) 県 Naivasha (ナイバシャ) 郡 Eburru 村を中心としている。総面積は約950km²である。実際の野外調査は、主として南北約10km、東西約10kmの約100km²の範囲で実施した。

本調査地域は、ケニア共和国の首都ナイロビの北西約100kmに位置し、ナイロビからウガンダ共和国の首都カンバラに向う最も重要な国道から西へ10km程入った所にあり、ナイロビより自動車で2時間半の道程である。

調査地域はケニア共和国リフト渓谷の内にある湖のうちで、湖面の最も高い淡水湖である Naivasha 湖 (湖面標高1,890m) の北側で、塩水湖である Elementeita 湖 (湖面標高1,776m) や Nakuru 湖 (湖面標高1,758m) の南側にある。

Naivasha 湖の南約10kmには、アフリカ大陸唯一の地熱発電所である Olkaria (オルカリア) 発電所 (定格出力30MW) がある。

1.3 調査項目

(1) 既存資料調査および総合検討

本調査地域に関する既調査資料を収集検討し、調査計画の立案に役立てるとともに、本調査結果の解析に利用した。

(2) 地質調査

約100km²の地域の地質図を作成した。地質図作成に際し70枚の岩石薄片を作成し、顕微鏡下で観察検討した。

また岩石の変質の研究を実施し、45km²の地域の変質鉱物分布図を作成した。分布図作成にあたり、160個の岩石試料を収集し、100個の試料についてX線回折装置によって粘土鉱物を同定した。

(3) 地化学調査

土壤空気中に含まれる揮発性物質 (CO₂, Hg) の分布および 1 m 深の地温を測定し、地下の熱構造および地熱賦存状況につき推定をおこなった。

土壤空気中の水銀濃度測定	1,143 回
土壤空気中の炭酸ガス濃度測定	1,142 回
1 m 深地温測定	1,143 回
土壤試料採取	1,163 個
凝縮水試料採取	8 個

測定は 17 測線上でおこない、原則として 50 m 毎に実施した。測定地域は約 30 km²である。

(4) 物理探査

ジュランベルジャー (Schlumberger) 電極配置による垂直電気探査を実施した。測定点数等は下記のとおりである。

測線総延長	: 33.2 km
測線数	: 12 測線
測定点数	: 81 点

1.4 調査団員編成

調査団は、国際協力事業団派遣の団員および、ケニア共和国エネルギー省派遣の団員によって編成された。団員は下記のとおりである。

日本人団員

本島公司* (団長) (地質/地化学探査)
佐藤良昭* (地質)
佐藤博之* (地質)
馬場健三* (地質/物理探査)
駒井二郎* (物理探査)
下出春吉** (試錐)
水口忠夫** (地化学探査/物理探査)
広渡和緒** (地化学探査)
大屋峻** (物理探査)
金原啓司* (地質)
佐藤功* (物理探査)

ケニア人団員

W. J. Wairegi (Director of Technical Division)
J. K. Kinyariro (Co - Leader) (地化学探査)
J. Barongo (物理探査)
D. K. Kilele (物理探査 Trainee)
C. Wanjie (地化学探査 Trainee)
H. K. Andanbi (地質助手)
F. N. Ibutu (地質助手)
D. Jacea L. (地質助手)
D. Kamau (地質助手)
J. M. Ndolo (地質助手)
P. Mwangi (地質助手 Trainee)

大坪良平^{**} (物理探査)

竹本節男^{***} (調整)

加藤圭一^{***} (調整)

米田和弘^{***} (調整)

* 通商産業省工業技術院地質調査所

** 三井金属資源開発株式会社 (1979年から1982年3月の間は三井金属エンジニアリング株式会社)

*** 国際協力事業団

国際協力事業団の現地調査団は1979年から1982年の間に4回派遣され、合計約5ヶ月にわたり野外調査をおこなった。国際協力事業団より派遣された調査団は下記のとおりである。

Scope of Work 調査団 昭和54年10月22日より11月5日

第1次調査団 昭和54年12月3日より昭和55年3月10日

第2次調査団 昭和55年7月28日より昭和56年2月15日

第3次調査団 昭和57年1月22日より昭和57年3月28日

1.5 調査の経緯

ケニア共和国は、そのエネルギーの約80%を薪炭に依存し、他のエネルギー資源は水力が少しあるのみで非常に乏しい。最近の電力消費量の増大から、新しいエネルギーの開発が渴望されている。

国際連合開発計画 (UNDP) は、リフト渓谷における地熱エネルギー源に着目し、経済技術援助として、1970年から1975年の6年間にわたって地熱資源調査を実施した。この調査の結果、次の3つの開発計画が提案された。

(1) Olkaria (オルカリア) 地区において生産井掘削を継続し、発電の為に十分な蒸気量を得る。

(2) Olkaria 地区の地熱包蔵量を知るための調査ならびに、生産井の位置決定のための小孔径試錐を実施する。

(3) 下記の三地域について、地熱ポテンシャルの情報を得るための概査をおこなう。

① Kedong Valley : Suswa 山から Hells Gate にかけての地域

② Naivasha-Eburru : Oloidien Bay から Lake Elementeita の地域

③ East Molo : Menengai Crater から Lake Hannington (現在は Lake Bogoria と呼ばれている) の地域

UNDPの提案に対し、ケニア政府は天然資源省 (Ministry of Natural Resources) 鉱山地質局 (Mines and Geology Department) に調査を義務づけた。鉱山地質局は上

記(3)の基礎調査に関し、日本国の地熱開発技術を高く評価し、日本政府に対し経済技術援助を要請した。これに対し通商産業省は、対外経済協力の一環として、資源エネルギー研究協力事業予算を要求する一方、国際協力事業団に対する海外開発計画調査委託費のうちエネルギー資源開発計画調査予算を計上し、1979年2月政府間協力調査として事前調査団をケニアに派遣した。本調査はこの事前調査により提示された調査計画に基づき、Eburru地区における地質調査、地化学探査、物理探査を実施した。

本調査対象地域 Eburru 地区は、Olkaria 地熱発電所（アフリカ大陸唯一の地熱発電所で定格出力は30 MWである。）に隣接し、地質条件がOlkaria と類似し、既存資料が効果的に活用できること、将来開発の際には、発電はOlkaria 発電所に集約できることなどの諸点から調査対象地域とし選定された。

なお、1979年11月にケニア共和国政府の機構改革がおこなわれ、エネルギー省が新設され、エネルギーに関する管轄が全てエネルギー省に移り、本調査もエネルギー省の管轄となった。

第2章 調査地域の一般状況

2.1 調査地域

Eburru 地熱地帯は、リフト溪谷にある Naivasha (ナイバシャ) 湖 (標高 1,890 m) の北西約 16 km にある。調査地域は東西および南北それぞれ 10 km あり、その中央に Eburru Peak (標高 2,668 m) がそびえている。

2.2 地形

Eburru Peak の周辺は標高 2,500 m ないし 2,600 m の高地よりなり、大部分は耕地となっている。Eburru Peak から北および東に向って、標高は徐々に下がり、ついにリフト溪谷の谷底部では標高約 2,000 m となっている。しかしながら西に向っては標高は高くなり Ol Doinyo Oporu (オールドイニョオプール) 森林地帯では約 2,800 m となる。地形は比較的なだらかであるが、Eburru Peak では溶岩円頂丘、砕屑丘や爆裂火口によって所々に凹凸がある。爆裂火口の直径は 100 m から 750 m あり、その周縁は変質した軽石堆積物に覆われていることが多い。

Eburru Peak の南西には "カルデラ" と呼ばれる大きな陥没地がある。その直径は東西約 2 km、南北約 1 km である。この陥没地は地質学上のカルデラではなく、複合爆裂火口である。

2.3 谷

本調査地域内の溪谷には豪雨が降った時以外には全く地表水がない。谷の方向は主として南北方向で、リフト溪谷内での主な断層系の方向と関係が深いものと考えられる。これらの谷の多くは狭隘な溪谷を形成し、谷底付近は急峻な高い壁 (高さは 20 m ~ 40 m) をなしている。しかし Eburru Peak、溶岩円頂丘や砕屑丘周辺の谷は、これらの丘から放射状に伸びており、谷は比較的浅く底は広がっている。標高 2,200 m から 2,400 m の軽石堆積物の分布する地域付近で、谷は突然なくなり、これら谷のなくなる地点より上位では、地形は平坦になっている。

2.4 断層

南北方向の断層が本調査地域で卓越している。これらの多くのものは地形によく反映している。断層についての詳細は、第 II 部 "地質" の項で述べる。

2.5 自然環境

調査地域は非常に乾燥しており、雨期 (3 月 ~ 6 月および 11 月頃) 以外には殆んど降雨をみない。調査地域内の住民 (推定 3,000 人) および家畜類の飲料水は、地域内各所にある地下

からの蒸気の凝縮水より得ている。このような地熱の利用法は世界唯一であろう。

農作物としては馬鈴薯・ビール麦・除虫菊・小麦・とうもろこし等が栽培されている。牛、羊、山羊などの牧畜も盛んにおこなわれている。

調査地域の西部は、ユーカリ等の樹木に覆われた森林地帯である。この森林には水牛等の猛獣も多く生息している。これら猛獣類が調査中に現われる事もあるため、調査団には2名のレインジャーが銃を持ち常時同行した。

気温は日中25度位まで上がるが夜は15度前後に下がり、しのぎ易い。しかし午後1時頃には直射日光が強く、特に調査地北部の標高2000m前後の低地では、野外調査を長時間継続するのは困難である。

2.6 地名

Survey of Kenya 発行の5万分の1地形図には、調査地域付近には余り地名が付けられていない。本報告書作成にあたり、地域の説明を簡略化するため、下記のような地名を付けた。

Eburru Peak : 標高2688mの三角点のある山頂

Eburru Station : Kiambogo (キアンボゴ)に至る国道E446沿いで、以前鉄道のEburru 駅のあった付近。

Eburru Crater : Eburru Peak の西にある本地域最大の爆裂火口でその直径は約2kmのもの。

Cedar Hill : Eburru 街道D322沿いで、その西側になる溶岩円頂丘。

Cedar West : Cedar Hill の約1km西方にある小さな集落。

第II部 地質調査

第1章 はじめに

Eburru 地熱地域及びその周辺地域の地質は、ケニア政府によって作成された50,000分の1地形図から拡大した25,000分地形図を使用し、約40日におわたって調査された。岩石薄片はケニア共和国環境・天然資源省鉱山及び地質局と、日本国工業技術院地質調査所によって作成された。岩石薄片の地点と表はII-1図とII-1表にそれぞれ示されている。

第2章 地質概説

2.1 地質概説

調査地域の岩石は、更新世及びそれ以降にリフトバレー底床部に噴出した火山岩類である。それらの大部分は酸性アルカリ岩である。同質の降下火砕堆積物が地域全体に広く分布し、堆積岩類は認められない。

調査地域北東部に露出する溶結凝灰岩は、Eburru 地熱地域の地下にまで存在し、調査地域における最古期(下位)の岩石である。地熱地域は降下軽石堆積物と、それを貫く黒曜岩とからなる。

現地表面には2層の降下軽石堆積物が認められる。その層厚と軽石の粒径とは東に向って減少する。しかし、それらの分布の詳細と噴出した火口との関係は明白でない。

以前の調査者による酸性アルカリ火山岩の命名と鉱物の同定には混乱がみられる。火山岩に含まれる造岩鉱物の一部については Electron microprobe analyser (EPMA) によって分析された。斑晶はサニディン(Or:31-42)、アルベドソン閃石、エニグマタイト、Naに富む鉄ヘデン輝石からなる。石基鉱物はリーベック閃石、エジリン輝石、エジリン及びサニディンである。コメンド岩は斑晶と石基の両方に石英を有する。カトホ閃石(Smith, 1931; Thompson and Dodson, 1963)は未だ同定されていない。地熱地域の地質図はII-2図に示される。

2.2 断層

南北方向の断層がEburru 地熱地域に発達する。それらは完新世に形成された。断層運動の規模は垂直落差と共にむしろ小さい。断層の延長は5-20mの落差をもって約5kmにわたり追跡される。Kianbogo Road 東部におけるE15°Eの走向を示す断層は50mの落差を示す。断層地形は本地域においては明瞭に観察される。

溶岩円頂丘、軽石砕屑丘、玄武岩のスコリア砕屑丘、噴気孔、変質帯などは断層に沿っている。一方、Ceder Hill からEburru Peak 間の溶岩円頂丘の配列からも、断層の存在が予測される。

第3章 地質各説

調査地域の層序はII-3図に要約される。

3.1 基盤

3.1.1 溶結凝灰岩

本岩は調査地域北東隅に70°E, 20°Sの走向傾斜でわずかに分布する。同様の岩石は地質図に示した以外のMasai Gorge北側におけるコメンド岩(Thompson and Dodson, 1963)の下位にある。両者の関係は未だ知られていない。

Eburru地熱地域における最古期(下位)の岩石は溶結凝灰岩であろうと考えられる。溶結凝灰岩とそれに関連した地熱地域下にある非溶結の火砕堆積物の厚さと分布を明らかにすることは、今後の研究にとって極めて重大な問題である。

3.1.2 フォノライト及びコメンド岩溶岩流

本岩はEburru Road東方に分布し、Ol Doinyo Opur Pumicefall Depositsに覆われる。小規模の溶岩台地がMasai Gorge南側とEburru Road-Eburru Way分岐点東側にみられる。断層によって切られるコメンド岩はEburru Road-Kianbogo Way分岐点の東に観察される。

Eburru地熱地域地下のフォノライトとコメンド岩溶岩流を確実に捕捉することが必要である。

3.1.3 Ol Doinyo Opur 降下軽石堆積物

本堆積物は本地域全般に広く分布し、西に向って厚くなる。多くの黒曜石岩脈によって貫かれる(地点175)。本堆積物は降下軽石堆積物、細粒火山灰、凝灰角礫岩の累積からなる。単層の厚さは通常約3mであるが(第II-4図)、地点-175では20m以上に達する(第II-11図)。

軽石は角張っており、最大径15~30cmで、淘汰が良好である。これらの事実は僅かの成層と共に空中降下起源の性状を示すものである。地点-39における本堆積物の柱状図を第II-4図に示す。

本堆積物の分布は調査地域のはるか東、即ち、Eburru-Kianbogo分岐点、鉄道の西の丘陵、Masai Gorge南まで及ぶ。本堆積物はフォノライト及びコメンド岩溶岩流を覆う。本堆積物の厚さは調査地域では2~300mと推定される。浅掘り試錐により可能な限り早急に本堆積物が確認されることが期待される。

3.1.4 黒曜岩岩脈

本岩は地熱地域の地表に点在する。ガラスの流理や気泡と長石斑晶の配列によって良く発達

した流理構造を有している。各所にブチグマチック褶曲構造がみられる。時々、黒色ガラスと淡色ガラスからなる3~5 cmの縞が観察される。流理構造の方向は通常南北であるが、その中のいくつかは50°E, まれに東西, 40~90°の走行傾向を示す。

本岩の産状は、それらが立し、露出するために明らかでない。しかし地点175 (第II-10図)において、黒曜岩が40°W方向に層厚20 m以上で水平な降下軽石堆積物を垂直に貫いている。4 cmの厚さの冷却縁が形成されている。黒曜岩は内側で淡緑色を示し、冷却縁部では黒色ガラスである。このため、Eburru地熱地域の黒曜岩は、Ol Doinyo Opur降下軽石堆積物を貫く岩脈であり、流理構造の方向は岩脈の延長方向を示すものらしい。

3.1.5 Eburru Peak 粗面岩

本岩はEburru Peakを作っている。Thompson and Dodson (1963)は本岩を流紋岩と呼んだ。本岩はCeder HillとEburru Peakを結ぶ南北方向の弱線上に噴出した。南側に熱変質帯が観察される。本岩 Ol Doinyo 降下軽石堆積物に覆われない。

3.1.6 黒曜岩溶岩流

本溶岩流はEburru地熱地域西部(地点-81)でOl Doinyo Opur降下軽石堆積物を覆っており、溶岩流の一部はKiambogo Roadに達している。黒曜岩岩脈とは対照的に、溶岩は水平な流理構造を有している。溶岩流の基底近くは角礫化しているが、上方に向うにつれて塊状緻密になる。

3.2 Eburru 火山

3.2.1 溶岩円頂丘および砕屑錐

Ceder Hillの北西と東とに2箇の溶岩円頂丘がある。2条の南北方向断層が、後者の円頂丘を切っている。砕屑錐が調査地域の南東部に2箇と、中央部に1箇みられる。それらは暗灰色の火山灰、軽石および黒曜岩片からなっている。

3.2.2 古期Badland玄武岩

本岩はかんらん石玄武岩で、Eburru Station地域に分布する。熱変質を受けている。溶岩流出源の位置は、地域北部のスコリア錐であろう。

3.2.3 Ceder Hill 溶岩円頂丘

Ceder Hillは底径1.3 kmの大きな黒曜岩溶岩円頂丘である。溶岩の流動によるよく保存されたグループが円頂丘の表面にみられる。本岩は一部では黒色緻密ガラス、一部では多くの更石結晶からなる。

3.2.4 火山灰質土壌

細粒で赤褐色の火山灰質土壌がEburru地熱地域の大部分を覆っている。

3.2.5 Eburru 降下軽石堆積物

Eburru 地熱地域の現地表面部は、本降下軽石堆積物によって覆われている。2層の堆積物、古期と新期とが認められる。古期のは Eburru-b 降下軽石堆積物、新期のは Eburru-a 降下軽石堆積物と名付けられる。各々の層厚は、東方もしくは Masai Gorge に向って減少する。噴出の中心は Ol Doninyo Opur の爆発火口の1つであろう。それらの層厚を第II-5図に示す。

補遺 主な岩石の鉱物組成と鉱物の化学組成とを以下に示す。

Eburru Pumice-Fall Deposits

Alkali feldspar Or 40-42

Quartz

Arfvedsonite

Aenigmatite

Obsidian dike

Alkali feldspar Or 40-42

Aegirine augite → Aegirine Fe+Mn/Fe+Mn+Ca+Mg 62→91

Arfvedsonite

Aenigmatite

Comendite

Alkali feldspar Or 35-36

Aegirine augite → Aegirine Fe+Mn/Fe+Mn+Ca+Mg 52→93

Arfvedsonite

Aenigmatite

Alkali amphibole(?)

Kenyte

Alkali feldspar Or 31-38 → 33-42

Quartz

Olivine fa 96 → 99

Hedenbergite → Aegirine augite Ca₄₅Mg_{3.5}Fe_{51.5} →
Fe+Mn/Fe+Mn+Ca+Mg 58

Arfvedsonite(rare)

Aenigmatite (rare)

Ilmenite (rare)

→ 斑晶から石基へ

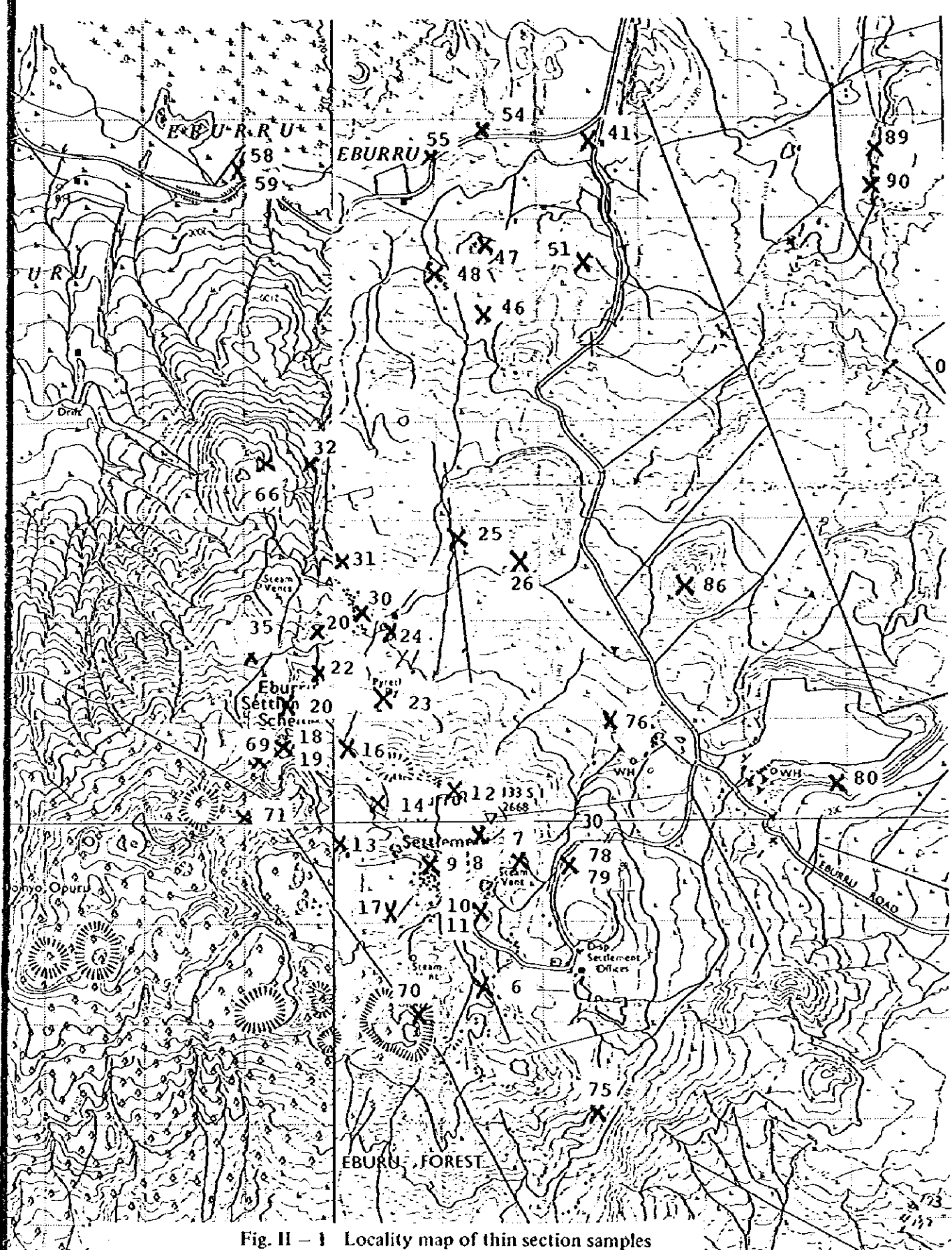


Fig. II - 1 Locality map of thin section samples

Holocene	Eburru Volcano	Eburru-a Pumice-fall Deposit		obsidian faulting
		Eburru-b Pumice-fall Deposit		
		Volcanic soil		
		Cedar Hill Lava Dome	Ci	
		Older Badland Basalt	Bb	
Pleistocene	Basement	Lava dome and cone	Ld	
		Obsidian lava flow	OI	
		Eburru Peak Trachyte	Et	
		Obsidian dike	/	
		OI Doinyo Opur Pumice-fall Deposits		
		Phonolite and comendite lava flow	Vt	
		Welded tuff	Wt	

Fig. II – 3 Geological Sequences of the Eburru Geothermal Prospect

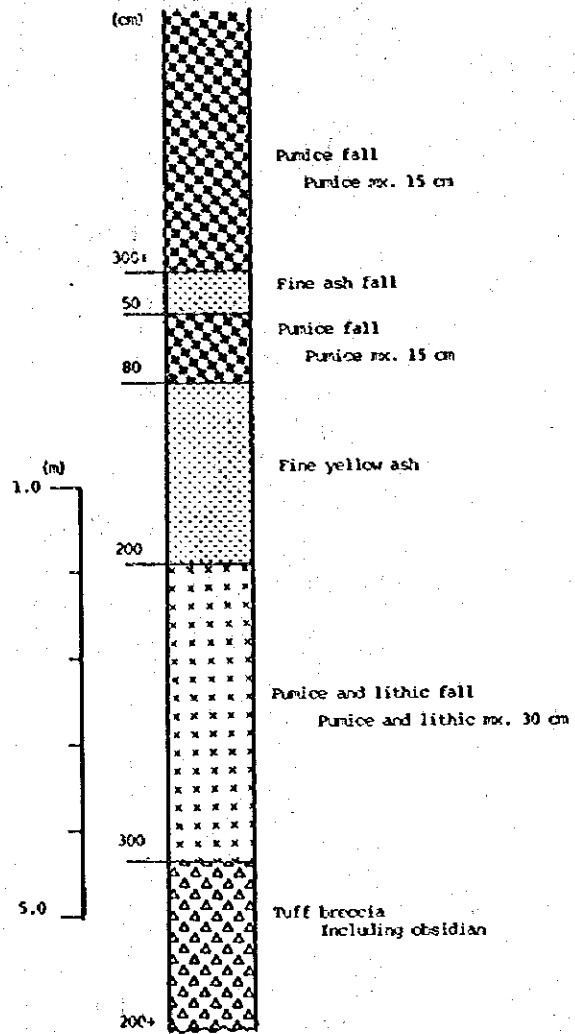


Fig. II - 4 Columnar Section of Ol Doinyo Opur Pumice-fall
Deposits at Point 39

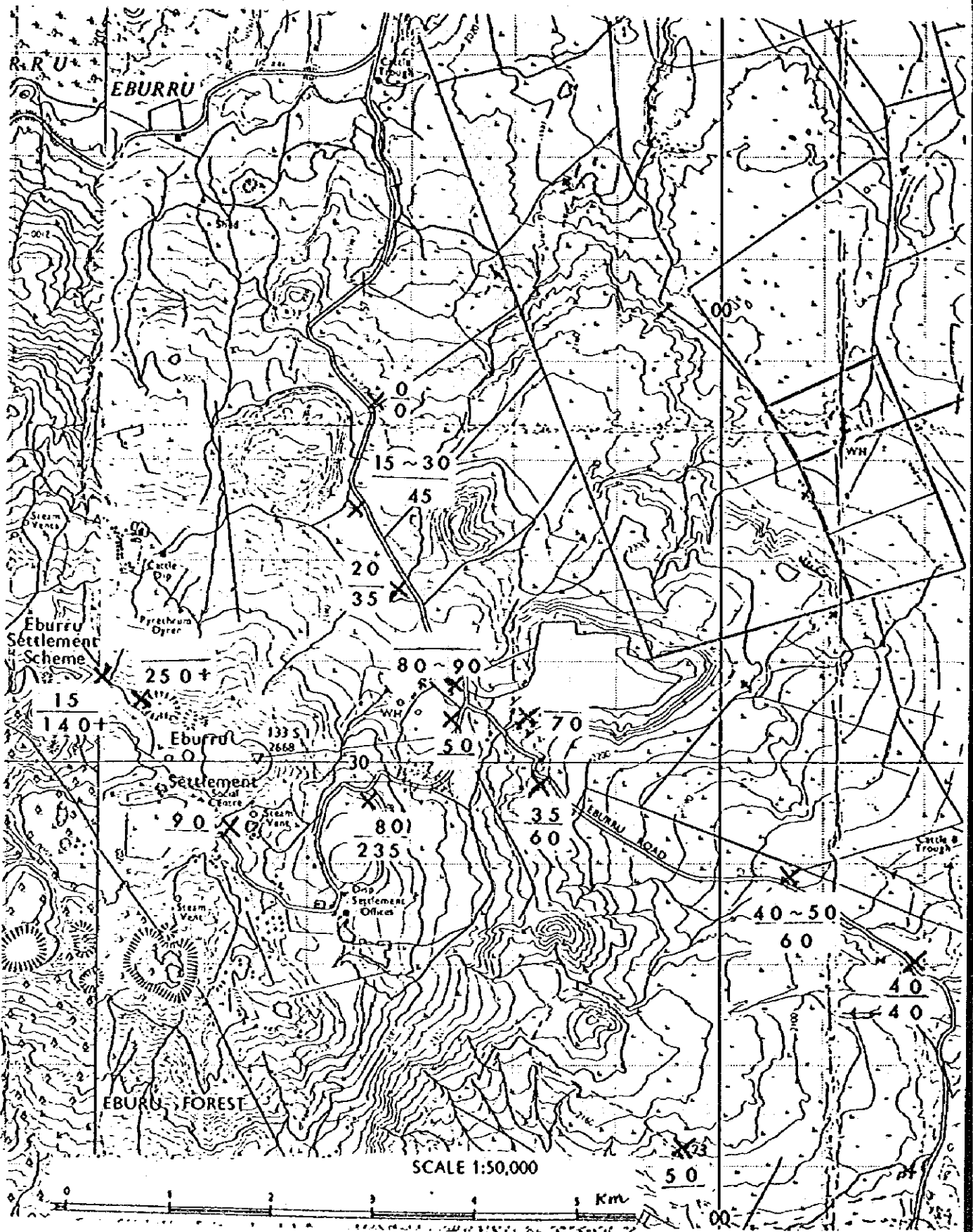


Fig. II -- 5 Distribution of Eburru-a (upper) and Eburru-b (lower)
Pumice-fall Deposits (cm)

Table II -- 1 List of thin section samples

K - 6	Gray blue. Floating rock at kaoline mine south of Eburru Primary School.
7	Black altered. Eburru Peak Trachyte.
8	Tufaceous green rock. Eburru Peak Trachyte.
9	Obsidian.
10	Pumice. Eburru-a.
10'	-- do -- (crushed)
11	Pumice. Overlain by K-10 (Eburru-a).
11'	-- do -- (crushed)
12	Gray rock. Eburru Peak Trachyte.
13	Altered rock at Kaoline mine in north wall of "caldera"
14	Altered rock, gray.
16	Pumice. Eburru-b.
16'	-- do -- (crushed).
17	Obsidian. Dike.
18	Pumice. Eburru-a.
18'	-- do -- (crushed).
19	Pumice. Eburru-b.
19'	-- do -- (crushed).
20	Rhyolite included in Pumice-fall deposits.
22	Pumice. Pumice-fall deposits.
23	Obsidian. Lava dome.
24	Pumice. Cinder cone.
24'	-- do -- Crushed.
25	Obsidian. Cedar Hill.
26	Green compact rock. Lava flow.
30	Obsidian. Flow-structured dike.
31	Welded tuff.
32	Obsidian. Lava.
35	Obsidian. Lava.
41	Comendite. Flow-structured.
42	Basalt. Badland Basalt. South of Lake Elementeita.
46	Green. Flow-structure. Lava flow.

- 47 Green comendite. Flow structure.
- 48 Scoria. Older Badland Basalt.
- 51 Floating rock. Comendite.
- 52 South Masai Gorge. Lava flow.
- 53 North of Masai Gorge. Lava flow.
- 54 Green compact Olivine-augite basalt. Older Badland.
- 55 Olivine-augite basalt. Older Badland Basalt.
- 58 Compact part.
- 59 Flow-structure.
- 66 Obsidian. Lava.
- 69 Comendite.
- 70 Pumice. Ejected from crater.
- 71' Pumice. Ejected from crater.
- 75 Obsidian. Flow structured. Dike.
- 76 Obsidian. Flow structured. Dike.
- 78 Pumice. Eburru-a.
- 79 Pumice. Eburru-b, overlain by K--78.
- 80 Green. Lava flow.
- 83 Green. East of K-83.
- 85 Olivine-bearing comendite. Flow structure, at quarry south of Gilgil.
- 86 Vesicular. Cone.
- 89 Flow structure.
- 90 Welded tuff.
- 95 Welded tuff. east of Naivasha.

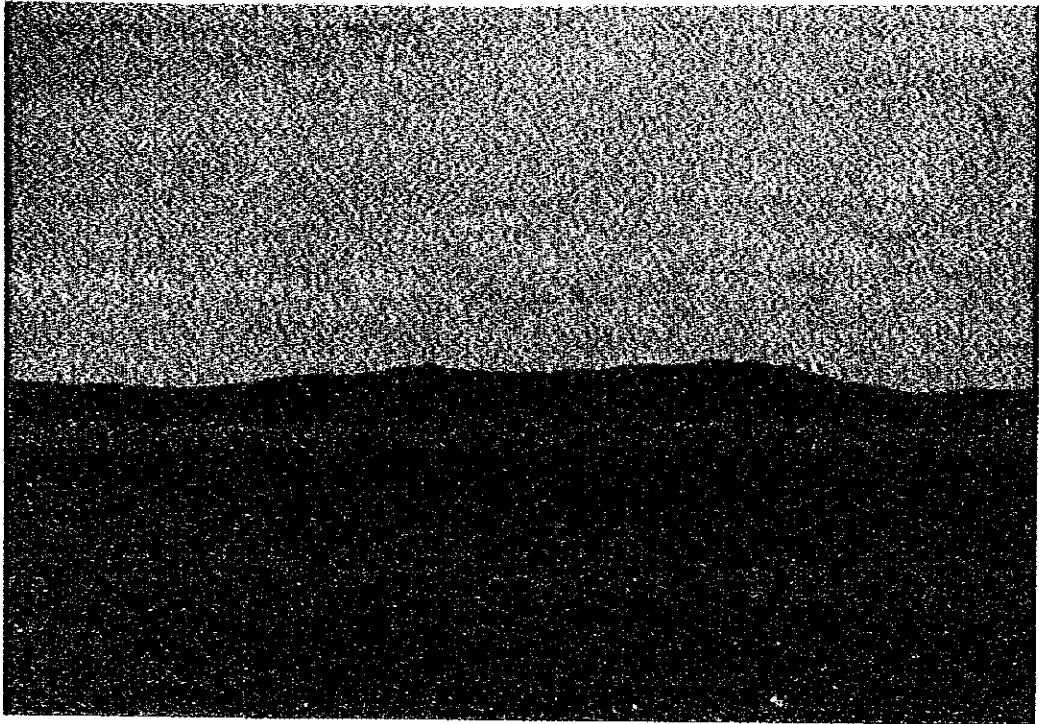


Fig. II - 6 Eburru Geothermal Prospect, Viewed from North.



Fig. II - 7 Ol Doinyo Opor Pumice-fall Deposits at Point -291

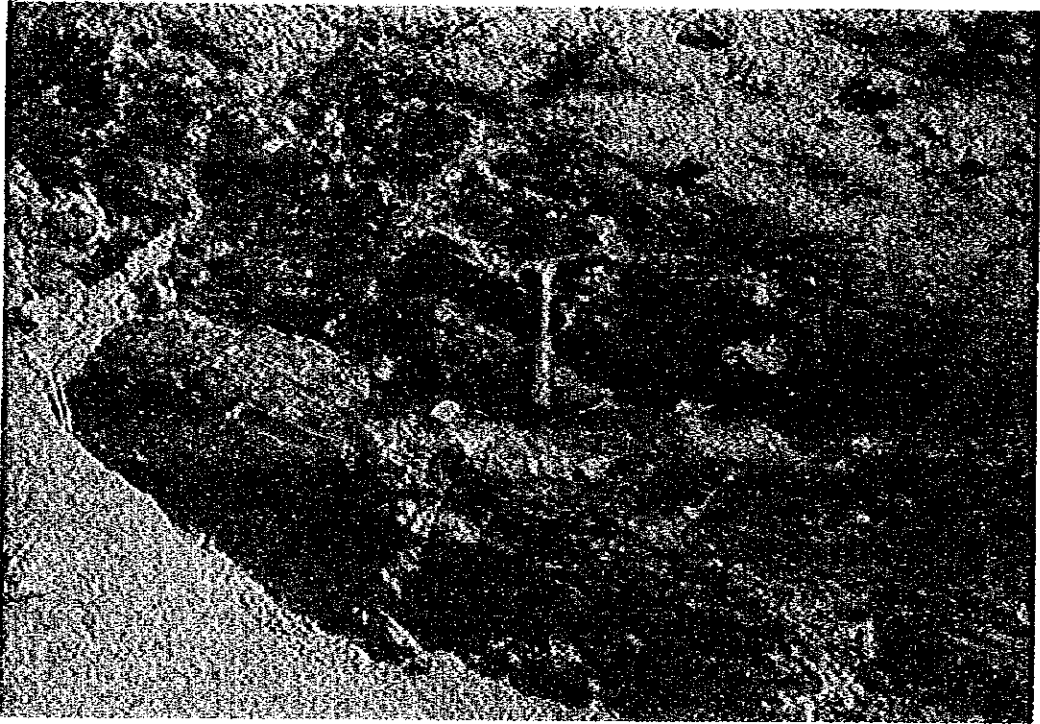


Fig. II - 8 Flow Structure of Obsidian Dike at Point -208.

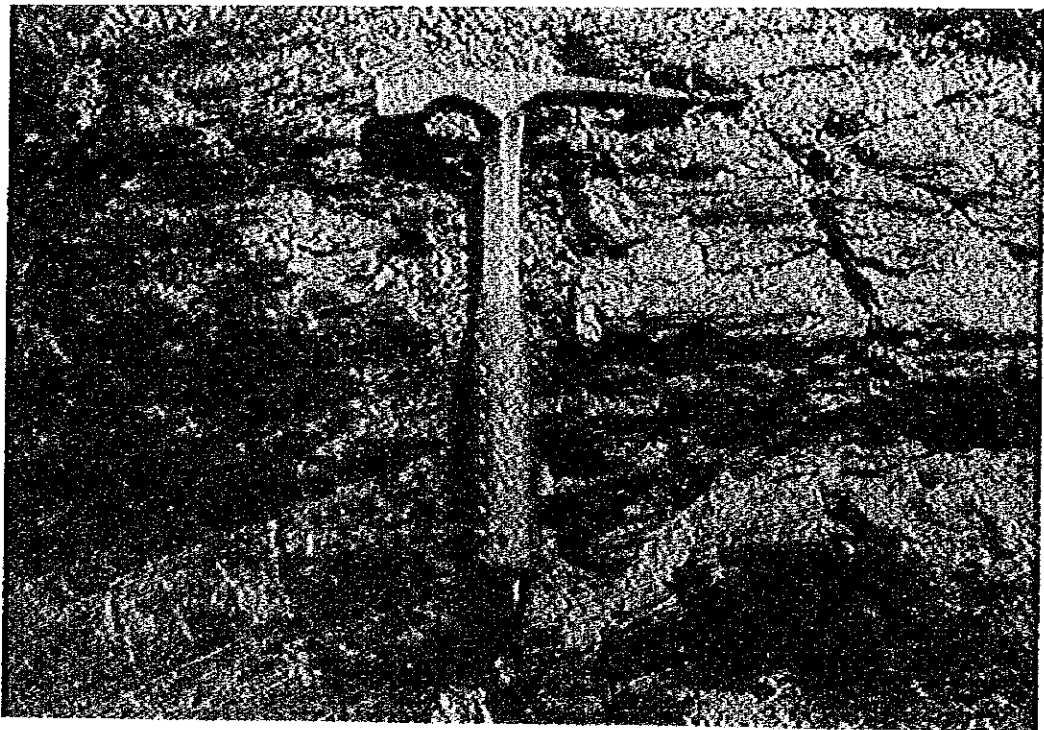


Fig. II - 9 Ditto.

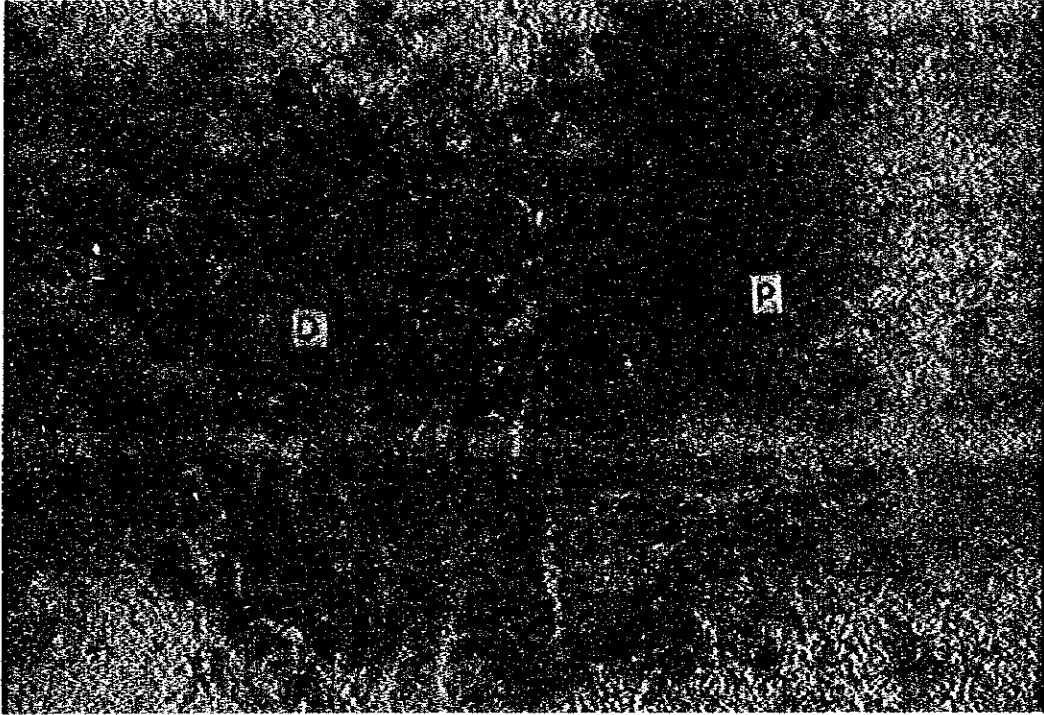


Fig. II - 10 Obsidian Dike (D) Intruding to
Pumice-fall Deposits (P) at Point -175.

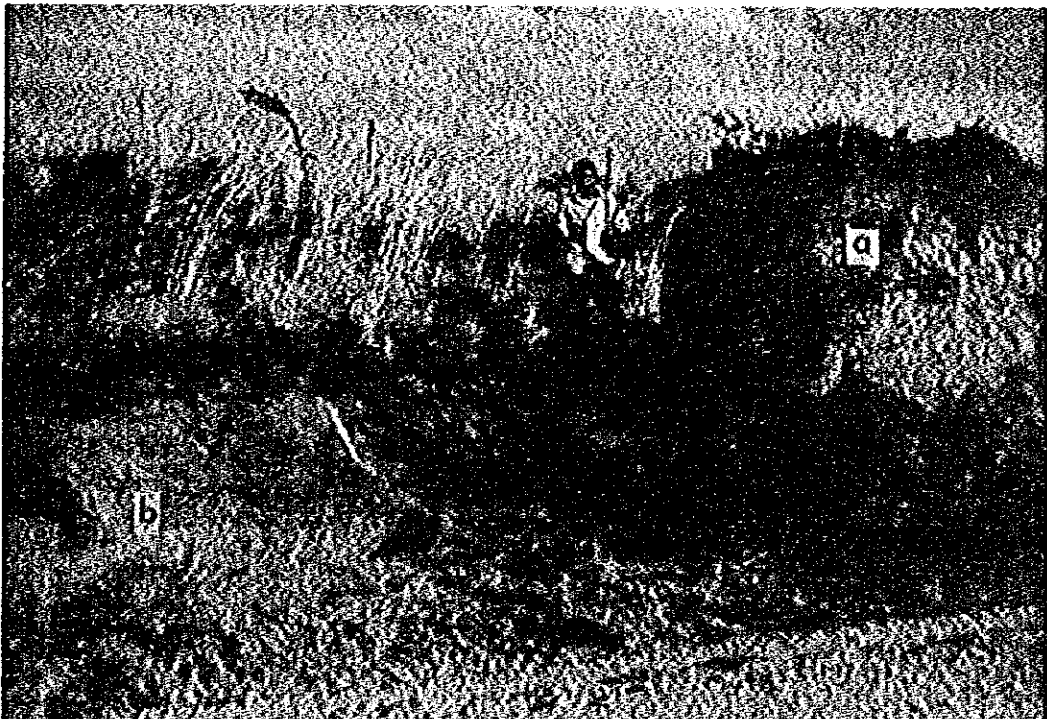


Fig. II - 11 Eburru-a and -b Pumice-fall Deposits at Point -161.

第Ⅲ部 地化学探查

第1章 はじめに

地球化学においては、一般に火成活動環境の下での、炭酸ガスの地化学的挙動は比較的明らかである。無機物より発生した炭酸ガスは火成岩分布地に存在し、地質学的に大規模な場合のみならず局所的な火成活動によっても左右されている。従って、地表下1mの土壤空気中の炭酸ガス量の一般的な分布傾向は、比較的浅い所(数百メートルより浅い所)にある高温熱水溜りの一般的な方向を示す。

さらに、土壤空気中の炭酸ガスの局所的な分布傾向は、場合によっては断層の存在を示す。さらに非常に状況が良い場合には断層の傾斜も炭酸ガスの分布から決められる。JICA調査団は1980年2月の現地調査開始以来土壤空気中の炭酸ガス分布調査をEburru地熱地帯で実施し、良い結果を得ている。

地下1メートルの地温分布と地熱貯溜層の分布間に、良い相関関係がある事が、世界中の多くの地熱地帯で知られている。従って、Eburru地熱地帯での浅部地温分布を調査するべきであるという見地から、JICA調査団は1980年に野外調査を開始した当初より1m深地温の測定を実施して来た。

ケニアのリフト溪谷は世界で最も大きな構造線の1つであり、中新世後期より、深い断層に沿って動いている。

世界的な地質構造について考えると、2つのプレートの境界部にある地熱地帯は、地化学的にいくつかの特徴を持っている。その例としては、水銀やヘリウムの含有量が多いことである。東太平洋ライズの海底堆積物中には水銀の含有量が多く、また海底付近の海水中にはヘリウムの含有量が多くなっている。アメリカ合衆国の西部には多くの地熱地帯があり、水銀含有量が多いことで知られている。このような事実から、地下深部に起る地質現象と水銀やヘリウムの分布に密接な関係がある事がわかる。

上述のような理由で、JICA調査団は水銀の調査を地化学探査の一環とし、その野外調査の初期の段階から使用しており、その結果は目的に充分かなっている。

浅部の地温、土壤空気中の炭酸ガス含有量、土壤空気中の水銀含有量、ならびに土壤中の水銀含有量の間には明確な相関関係が存在していることがわかった。

Eburru地熱地帯には、温泉水の湧出が報告されていないので、本地域では今後ガス地化学調査が実施されることが望まれる。

第2章 調査方法

2.1 概 要

Eburru 地熱地帯では、南北方向に走る大小さまざまな断層が、多くある事が報告されている。したがって、測線はこの一般的な地質構造方向を切るように、ほぼ東西方向に設定した。

昭和54年度に、本調査地域の南部地区で実施した第1次調査では、東西方向の測点間隔は50m以下で、南北方向の測線間隔は300m以下である事が望ましいとの結果を得ている。しかしながら、限られた野外調査期間中に、Eburru 地熱地帯全域で地化学探査を実施するために、野外調査を始めるにあたり、東西方向の測点間隔は50mとし、南北方向の測線間隔は出来るだけ狭くするように決定した。

2.2 測線および測点の設定

測線および測点の設定にあたり、以下の点について検討した。

- 野外調査期間中の調査地域の気象状況
- 調査地域内で使用出来る労働力
- 地形状況
- 植 生
- 猛獣の状況
- 調査期間
- 輸送機関
- 日用民生品の供給
- キャンプの状況

以上の結果、測線および測点はP1. III-1に示すように決定した。Eburru Peak 頂上にある三角点(海拔標高2,668m)を、Eburru 地熱地帯全域の調査の基点とし、地形測量を行った。

最初に南北方向の基線を、調査地ほぼ中央に設定し、これにほぼ直交する方向、すなわちほぼ東西方向に16本の測線を設定した。測線には水平距離50mごとに測点を設けた。測線の方位は、午方式ポケットコンパス(最少読みは1/3度)を用い、距離はグラスファイバーの間縄で測定した。

合計16測線に842測点を設けた。測線総延長は423kmであり、これらの測線で約30kmを測定した(南北約8km, 東西約5km)。

2.3 測 定

測定は以下の手順で行なった。

- i 各測点で1 m深の孔2本削孔した。
- ii 削孔後3分待って、2孔の内の1孔を利用し、土壤空気中の炭酸ガスを測定した。
- iii 他の1孔で、同様に3分後土壤空気中の水銀濃度を測定した。
- iv 上記の各測定後、1つの孔を利用し1 m深地温を測定した。
- v 1 m深の孔底で土壤サンプルを測定した。孔中が乾燥して土壤が孔底から取れない場合1 m深の土壤の代りに地表の土壤を採取した。

2.4 土壤空気中の水銀測定

本調査には、測定の簡便さと、現地での測定能力を考慮し、Scintrex社製水銀分析器HGG-3型器を使用した。

2.4.1 測定装置

水銀原子吸光分析器の仕様は次の通りである。

製 作： Scintrex 社

型 式： HGG-3

感 度： 40×10^{-12} gHg/250ml以上
(0.16mg/l)

電 源： 酸化鉛-シリカゲル型電池6V, 6A·h

本測定器の原理は原子吸光に基づいている。水銀ランプから発する波長244nmの強い光線の、水銀蒸気による吸光の度合を測定するものである。しかしながら、水銀以外のガスの中でも、広い波長にわたる紫外線を強く吸収するものがある。HGG-3型分光計は、水銀分光分析器の使用する周波数帯の外側に、参照用光線を作るゼーマン効果法を使用している。強い磁場を水銀ランプにかけたり止めたりして、水銀発光の波長を254nmと参照波長の間に繰り返し変化させる。電子回路により、2つの波長間での吸光の度合を比較することにより、水銀蒸気のみで感度が高い測定が出来た。

2.4.2 較 正

水銀分析計の校正するために、数個の濃度の解った標準サンプルを作成した。標準サンプルは、飽和した水銀蒸気に空気を混合し作成した。水銀分析計で標準サンプルを測定した所、水銀分析計の読み(m volt)と水銀濃度はほぼ直線になった。校正は繰り返し行ない、その結果は比較的一致した。

2.4.3 野外調査手順

本調査では下記の手順で土壤空気中の水銀濃度を測定した。

- (i) 測定器を暖める。
 - (ii) 径20mmの削孔棒を地下1mに打込む。
 - (iii) 削孔棒を引き抜いた後、プラスチック製の円錐状の栓の付いたパイプを孔にさし込み、円錐状プラスチック栓が、1m深の孔の口をきっちりふたをするようにする。
 - (iv) 水銀分光分析計の操作マニュアルの順に従い操作し、分析計のメーターの最大値をm volt 単位で読む。
- 次の測定点に移動する時、分析計のヒーターは切らず、たえず暖めておいた。

2.5 土壤空気中の炭酸ガス測定

2.5.1 測定装置

Fig.III-2に示す炭酸ガス検知管を使用し測定した。検知管の仕様は下記の通りである。

- 製 作： 光明理化学工業(株)
 型 式： 北川式ガス検知器ST型およびS型送入手
 測定範囲： 1%~10%および1%~20%
 試料体積： 50ccまたは100cc
 送入時間： 30秒および50秒

ガス検知管は野外調査に非常に便利で、小さくて軽い。炭酸ガス濃度は、検知管内の検知剤の変色した長さを検知管の周囲に印刷してある目盛に対し直読出来る。

2.5.2 他のガスの影響

二酸化窒素(NO_2)が1,000ppm以上ある場合、亜硫酸ガス(SO_2)が3,000ppm以上ある場合、または硫化水素が3,000ppm以上ある場合には、検知剤は炭酸ガスの場合と同様な変色を示すので、これら他の妨害ガスが存在しない事を確認してからでない、空気中の炭酸ガス量を決定出来ない。

本調査においては、測点P-105、L-107、L-80および測点A-18付近で、土壤空気中の硫化水素ならびに亜硫酸ガス量の測定を行なった。亜硫酸ガスは何処からも検出されなかった。硫化水素については、測点A-18付近で10ppm検出されたが、他の測点では検出されなかった。

なお二酸化窒素は地熱地帯で殆んど検出された事がないので、測定を行なわなかった。

2.5.3 野外調査手順

野外調査は次の手順により実施した。

- (i) 直径20mmの削孔棒を地表下1mまで打ち込む。
- (ii) 削孔棒を引き抜くとすぐに、ゴム栓の付いた、ビニールチューブを挿入し、ゴム栓で孔の入口をきちんと閉める。

- (iii) 3分後に、検知器のガス採取器をビニールチューブを取り付け、最初にビニールチューブ内に残った外気を取除き、土壤空気がビニールチューブ内に入るようにする。
- (iv) ガス採取器のポンプにより、地下から50mlの土壤空気を採取する。
- (v) 採取した土壤空気を検知管に送入する。検知管内の検知剤は、炭酸ガス濃度に応じて桃色から黄色に変色する。
- (vi) 検知剤の変色した部分としなかった部分の長さの比で、土壤空気中の炭酸ガス濃度(体積百分率)を判定する。

2.6 1m深地温測定

2.6.1 測定装置

測定に使用したサーミスター温度計の仕様は下記のとうりである。

製 作： 宝工業株式会社

型 式： SPD-10型

感 度： $\pm 1\%$

測定範囲： 低： -5°C から 55°C

高： 50°C から 110°C

電 源： 1.5V乾電池

2.6.2 気温変化の影響

気温の日変化が地中どのくらいの深さまで影響をおよぼすかという事は、1m深地温測定にとって重要な事項である。調査開始最初の時点、昭和55年1月30日に、調査地内Eburru Craterで、地表、33cm深、60cm深および93cm深での地温変化を連続的に測定した。午前8時から午後7時の間での93cm深の温度変化は、わずか 0.6°C であり、その間の地表での温度変化は $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ であった。93cm深の温度は特に大きな変化を示していない。さらに33cm深の温度も余り変化しなかった。これらの事から、1m深地温分布は、地下比較的浅所での地温を良く反映していると考えられる(この温度の日変化についての測定結果は昭和55年の「Interim Report」に示してある)。

2.6.3 野外調査手順

1m深温度測定は次のような手順で行なった。

- (i) 前述の土壤空気中ガス濃度測定孔のうちいづれかに、サーミスター感温部を挿入する。
- (ii) 感温部を入れたまま3~4分後に、サーミスターのメーターが安定した読みを示す。この読みが1m深地温である。

2.7 土壌中の水銀測定

土壌空気中の水銀測定の有効性を調べるためおよび、その地域での水銀の濃集を調べるために、1 m 深の土壌または地表の土壌の水銀濃度を測定した。地下1 mの土壌が非常に乾燥しオーガーで土壌採取が出来ない場合には、その測点付近の地表の土壌を採取した。採取した試料はケニア国の鉱山地質局の化学分析室および三井金属鉱業株式会社中央研究所で分析した。

2.8 同一測点での繰返し測定

炭酸ガス濃度測定ならびに1 m 深地温測定を、多くの測点で2度測定した。昭和55年と昭和57年に2度測定を実施した結果の、分散を調べ回帰式を算出した。

炭酸ガスの回帰式は次のとおりである。

$$\text{CO}_2(80) = 0.14157 + 1.44262 \times \text{CO}_2(82)$$

1 m 深地温の回帰式は次のとおりである。

$$\text{Temp}(80) = 1.58546 + 0.93629 \times \text{Temp}(82)$$

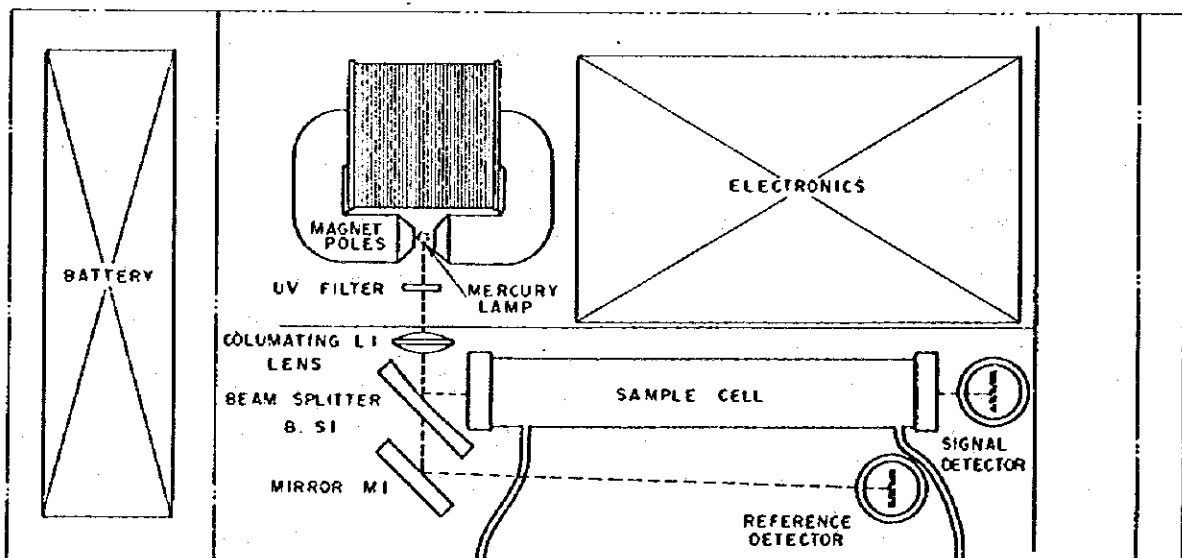
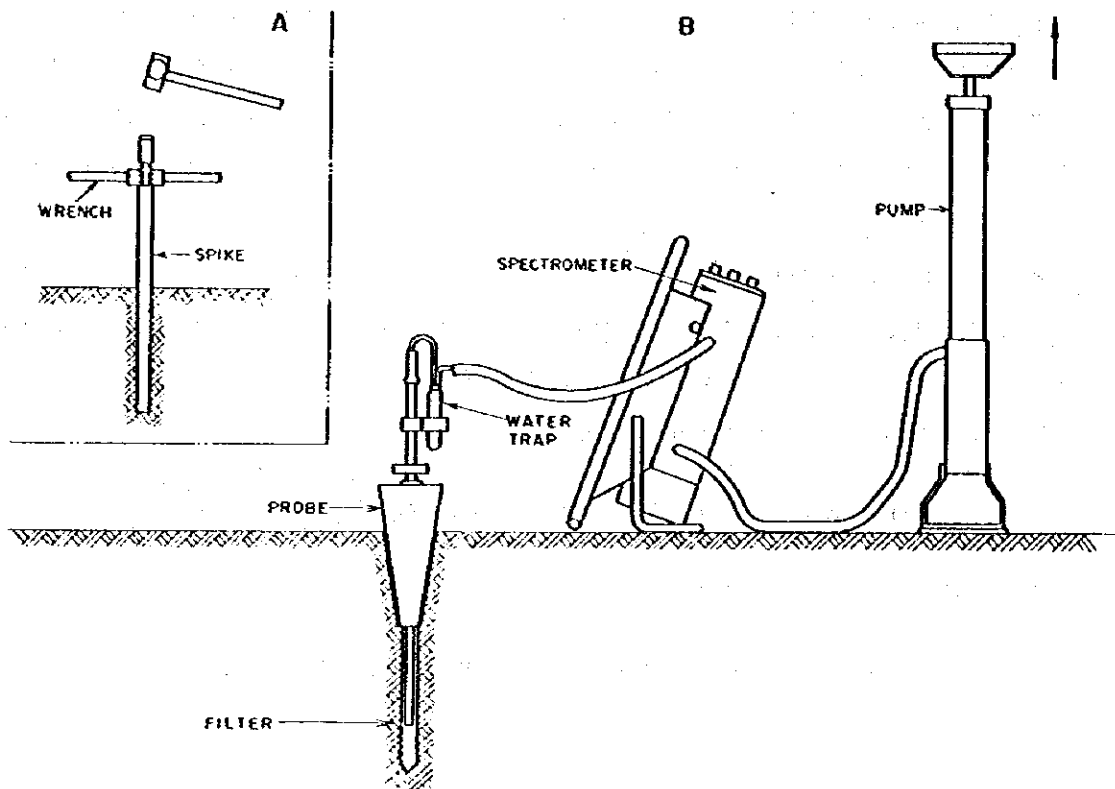
ここに

$\text{CO}_2(80)$, $\text{Temp}(80)$: 昭和55年の測定値

$\text{CO}_2(82)$, $\text{Temp}(82)$: 昭和57年の測定値

全ての値は昭和55年の測定値に変換した。さらに同一測点で2個以上の測定値のある場合は、算術平均を取りその値をそこでの測定値とした。

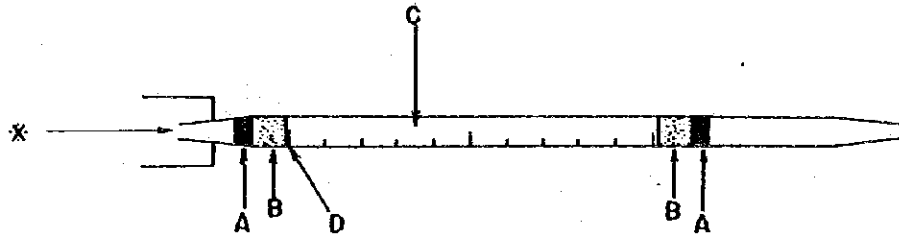
Fig. III - I MERCURY SPECTROMETER
SCINTREX HGG - 3



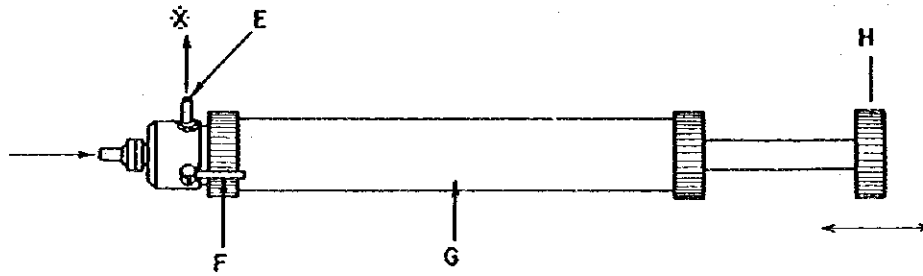
HGG-3 BACKPACK SPECTROMETER

Fig. III -2 Carbon Dioxide Detector

DETECTION TUBE



GAS COLLECTOR



- A stopper
- B glass grains
- C detection reagent (silicagel)
- D scale
- E tube connector
- F three ways valve
- G cylinder
- H piston nob

第 3 章 調査結果

3.1 概 要

昭和55年初頭から昭和57年3月にかけての期間のうち約4ヶ月間にわたり、Eburru地熱地帯で地化学探査を実施した。測点数等はTable III-1に示す。

Table III-1に示すように、北部地区にはLからQの6測線が、南部地区にはAからEの5測線が、中部地区にはFからKの6測線がある。

調査地点に岩石が露出していたりして測定が不可能な点が数点あった。このような場合、1 m深の孔を削孔する事が出来ないため、土壤空気中のガス成分の測定は行なわず、測点付近の土壤サンプリングのみにとどめた。なお1 m深地温も測定しなかった。

測線間隔(N-S方向)は北部地区および南部地区でせまく、中部地区では広がっている。従って中部地区での各測定要素例えば地温や炭酸ガス等は、他の2地区に比べ一般的になる。

3.2 1 m深地温測定

測定測点数は合計827点であった。最低地温は、Eburru Craterの西端標高2,567 mの測点A-29で16.1°Cが測定された。

Eburru Stationの南東約1,500 mにある標高2,036.5 mの測点N-83で、最高地温9.3°Cを測定した。

本調査測点のうち標高が最も高かったのは測点E-140で、標高は2,718 mでEburru Peakの西方約2.2 kmにある。この測点での地温は25.5°Cであり、最低地温ではない。

1 m深地温の地域的分布はPl. III-1に示す。分布図によると明らかに、地温は南北の方向性を持っている。この南北方向の高温部の伸びは、地質リニアメント(断層)の一般的方向と一致している。

高温帯の分布は特に南部地区と北部地区に顕著である。中部地区(測線F~K)では、高温部は西方と中央にある。しかしその温度は、南部や北部地区に比べ低い。

1 m深地温測定結果の、全地域についての頻度分布(ヒストグラム)はFig. III-3に示す。このヒストグラムはTable III-2に基づいて作成したものである。Fig. III-3のヒストグラムから、全地域の1 m深地温分布をわかりやすく図示するには、20°C、30°C、40°C等々等温線を引くのが良い事がわかる。これに基づき全地域の地温分布図Pl. III-2を作成した。測点のうち標高が最も高い点と最も低い点の間の標高差は550 mあり、調査地全域を同一図に編集する場合この標高差に注意する必要がある。標高2,000 m前後の所で標高差が550 mあると、標準大気では4°C弱の気温差がある(US Standard Atmosphere 1976による)。この温度差については次章で検討を加える。

3.3 土壤空气中の炭酸ガス濃度測定

土壤空气中の炭酸ガス濃度の測定点数は827測点であった。しかし測点N-109では、新しい有機物の発酵がはげしく行なわれており、測定した炭酸ガス量は地下からの値とは関係ないと考えられるので、本調査結果としては表示しなかった。従って本報告にあたっては826測点での炭酸ガス測定結果を使用し、土壤空气中炭酸ガス濃度の全体的な分布傾向についてはTable III-3およびPl. III-3に示す。なお全地域での炭酸ガス測定値のヒストグラムはFig. III-4に示す。

炭酸ガスの体積濃度の最低値は0.1%で、この値は多くの測点で測定された。最高値は20%を越えているのは、測点A-220, A-225, B-185およびK-128である。Table III-3やFig. III-4から、炭酸ガス濃度が0.5%以上のものを、地化学的見地から異常値と考える。全測点数と炭酸ガス濃度が0.5%以上の測点との比は4.4:1であり、炭酸ガス濃度1.26%以上と非常に大きな異常を示す測点の数との比は、10.9:1となっている。このように、全測点のうち1/4で炭酸ガス濃度は異常値を示し、1/10の測点で非常に大きな異常を示した。土壤空气中の炭酸ガス濃度の分布と、地表の植生の間には特に関係があるようには思われない。

土壤空气中の炭酸ガスの一般的な傾向は南北方向の伸びを示す。3地域での炭酸ガス濃度の平均値によると南部地域で最大値を示し、北部地域では最小値となっている。標準偏差からは南部地区で値の変化が大きく、中部地区や北部地区では少ない事がわかる。

3.4 土壤空气中の水銀濃度測定

土壤空气中の水銀濃度測定は、1980年1月～2月にかけての第1期、1980年9月～11月にかけての第2期および1982年2月～3月の第3期の3回にわたり測定した。しかし第2期に測定した時の値は、第1期および第2期の測定値に比べ極端に小さく、他のデータとの整合性も悪いので、今回の解析には、第1期および第3期のデータのみを使用した。

土壤空气中の水銀の分布状況はTable III-4およびPl. III-4に、ヒストグラムはFig. III-5に示す。

3分の2以上の測点で水銀濃度は、使用した分光分析計の感度以下、即ち約0.15 ng/l以下であった。本地域内で水銀濃度が最も大きかったのは測点L-83, M-86, P-121で、その値は22.5 ng/lであった。

一般的な分布傾向は南北方向である。南部地区と北部地区での水銀濃度の平均値は、中部地区の値より大きくなっている。

第 4 章 検 討

4.1 1 m 深地温測定

1 m 深地温の各地域についての分布傾向は Table III-2 に示す。これらの資料に基づき、南部地区、中央地区、北部地区それぞれおよび調査地全域での 1 m 深地温の分布を比較すると、次のような事項が指摘出来る。

(1) 低温地域

北部地区（測線 L～Q）：北部地区では 1 m 深地温が 17.5℃以下の測点はなかった。

17.5℃以下の測点数と 17.5℃と 22.5℃の間の測点の数の比は当然最小値 0 となる。

22.5℃から 27.5℃の間の地温を示す測点数は 115 点と全体の 2/5 あり非常に多い。

南部地区（測線 A～E）：17.5℃以下の測点が全測点に占める割合は、本地区が最大である。17.5℃と 22.5℃の地温を示す測点数が最大で、本地区全測点のうち 2/5 である。

中部地区（測線 F～K）：本地区での地温の低い測点の分布状況は、上記の 2 地区の間である。ただし 27.5℃～32.5℃の間の測点数と 22.5℃～27.5℃の間の測点数との比は 0.301 と最小になっている。

このように、低温域で最も多く測定される温度区分の温度が、南部区域で最低で中部区域北部区域と向うに従い高くなっている。この事実は、各区域の平均標高と反比例し、その温度差が約 5℃で標高差が 500 m で、標準大気の場合と似ている。

(2) 高温および中温地域

北部地区では、地温が 42.5℃以上の測点は、90℃以上までほぼ均一に分布している。

しかしながら、中部地区および南部地区では、北部地区と異なり下記のような温度分布をしている。

30℃～70℃ 有り

70℃～80℃ 殆んどなし

80℃～90℃ 有り

一般的に云えば、北部地区での温度測定結果は、中部地区や南部地区での結果と少し異なった分布をしている。

4.2 土壤空気中の炭酸ガス濃度測定

調査地域全域の土壤空気中の炭酸ガス濃度の分布は Table III-3 に示す。Fig. III-10, Fig. III-11 および Fig. III-12 は北部地区、中部地区、南部地区と 3 地区別に作成した炭酸ガス濃度測定結果の頻度分布の図である。炭酸ガス濃度の頻度分布を表わす場合、今回の測定値の分布から、測定値の常用対数の値の分布を取るほうが、本地域の炭酸ガス濃度分布を良

く表わすので、ここでは常用対数値での分布を取った。

中部地区および南部地区では、CO₂濃度が0.5%以上と高い値を示す測定値が多い。各地域ごとの全測点に対するその値は、南部地区で34%、中部地区で23%、北部地区では12%となっている。

一般に、地熱ポテンシャルの高い所では炭酸ガスが多く発生していると云われているので、炭酸ガス濃度の高い地帯は、地熱探査上充分注目する必要がある。一方炭酸ガスは水に良く溶解するので、炭酸ガス発生源から地表まで炭酸ガスの通過する所に、地下水が多くあると、その炭酸ガスの大部分は溶解し、地表まで届かない事も多い。

局所的な炭酸ガスの分布は、その通路である断層（リニアメント）に支配される。本調査地域内の炭酸ガス濃度の高い部分は、南北方向に細く伸び、数本の帯状になっているが、これは深部からの炭酸ガスの供給量の変化または（および）、断層の地表付近でのガスの透過率の相異によると考えられる。

1 m深の地温調査結果と炭酸ガス濃度調査結果を合せ考えると、中部地区では北部地区に比べ、地下水面が深いと推定される。さらに、北部地区ならびに南部地区の地形は、地下水が南から北へ流れていることを示している。

国連専門家（ガス地球化学専門家）の報告を見ると、以下の事項に気付く。

- (1) 南部地区および中部地区の南部においてのみ、大気を混入しない（O₂ = 0%）噴気が存在している。
- (2) 北部地区および中部地区の北部から採取された約20個の噴気試料は、その噴出の強弱にかかわらず、多量の大気を混入している。
- (3) 大気を混入しない噴気中の炭酸ガス濃度は0.1%から0.4%である。

以上の結果から、南部地区ならびに中部地区南部の貯留層から発生する炭酸ガス量は、0.4%以下であると考えられる。さらに、中部地区および南部地区では、比較的浅所（数百メートル前後）の貯留層に、蒸気が貯えられていると考えられる。一方北部地区では、比較的浅所に熱水が貯えられていると考えられる。

北部地区では、大小各種のリニアメント（断層）が土壤空気中の炭酸ガス濃度の分布と良く一致している。中部地区および南部地区では、大規模なリニアメントと炭酸ガス分布は一致している。調査地域全体にわたり、炭酸ガス濃度分布傾向は、南北方向であり同一傾向を示している。

本地域での断層の歴史や、最も新しい地層についての研究を続けることにより、炭酸ガス濃度分布の解釈も明らかになるであろう。

4.3 土壤空气中の水銀濃度測定

調査地全域の土壤空气中の水銀濃度の頻度分布は Table III-4 および Fig. III-5 に示す。頻度分布図によると、全測点中 47 測点のみで、土壤空气中の水銀濃度が 0.625 ng/l となった。他の測点では、水銀分析器の検知感度限界の近いかそれ以下であった。従って、頻度分布図で最も測点数が多かった土壤空气中の水銀濃度は、グラフの最左端即ち最小値の所にある。グラフの右方、即ち濃度が大きくなるに従い、測点数は小さくなる。

添付図 P1. III-4 は調査地全域の、土壤空气中の水銀分布を示す。添付図によると、土壤空气中の水銀量の異常は主に北部地区と南部地区にある。中部地区では、土壤空气中の水銀濃度が 0.7 ng/l 以上となったのは 2 測点のみである。もし 0.2 ng/l 以上の所を土壤空气中の水銀濃度異常と考へても、中部地区では非常に狭い、かぎられた範囲にしか分布しない。

土壤空气中の水銀濃度が高くなる理由としては：

- (1) 地熱活動により、多量の水銀が気化している。
- (2) 地下から水銀を多量に含んだ空気を運搬するような通路がある。
- (3) 水銀蒸気は岩石や粘土に容易に吸着されるので、地下からの水銀に富んだ空気は、岩石の中を長距離にわたり通過していない。さらに粘土等の水銀を良く吸着する物質の間を長距離通過していない。

Eburru 地熱地域の成因モデル (Fig. 5 参照) に従えば、北部地区や南部地区で土壤空气中の水銀濃度が高く、中部地区で低い理由が説明出来る。南部地区の Eburru Crater では熱源が直下にあり、大量の水銀蒸気が熱源で遊離される。

南部地区の Eburru Station 付近では、地下熱水面は地表近く、水銀蒸気は、量は多くないかもしれないが、地表近くで遊離される。

一方、中部地区では、地下熱水面は地表から深く、さらに熱源は直下にはない。従って、土壤空气中の水銀濃度は、北部地区や南部地区に比べはるかに少ない。

Fig. III-3 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature in the Eburru Prospect

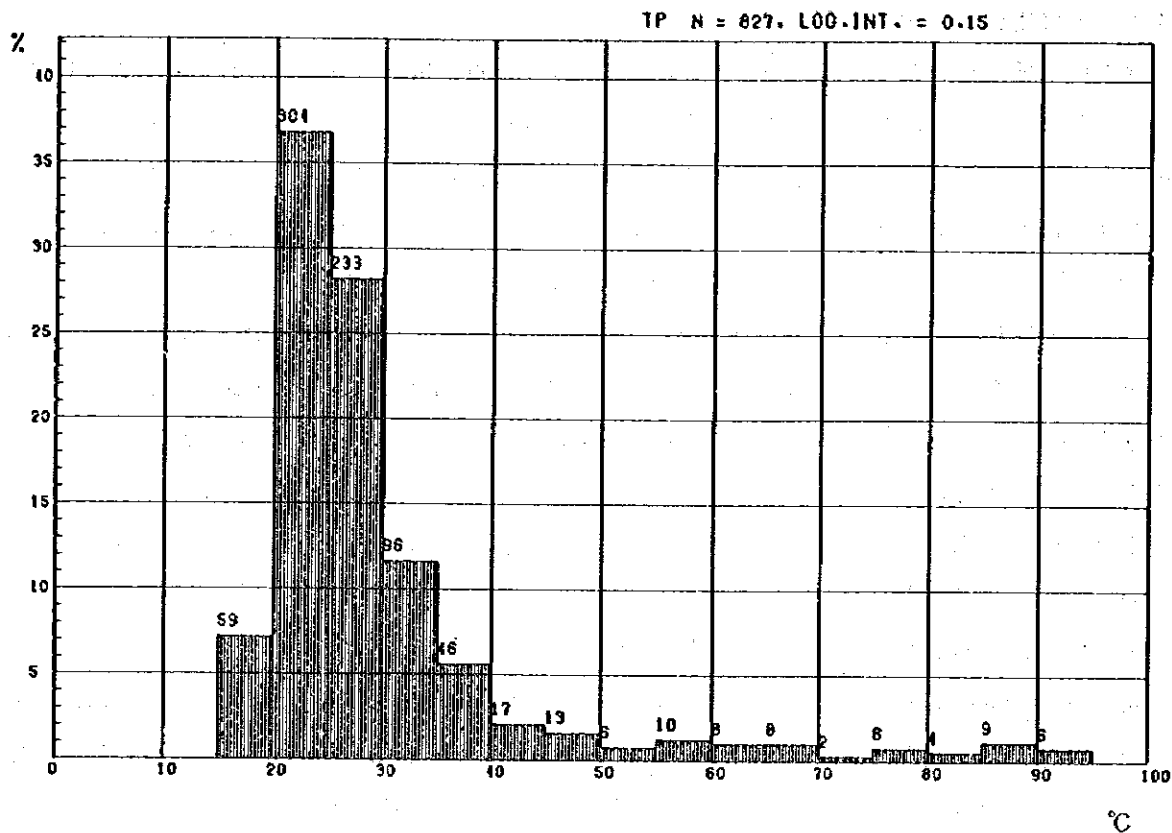


Fig. III-4 Histogram of Common Logarithm of CO₂(%) in Soil Air in the Eburru Prospect

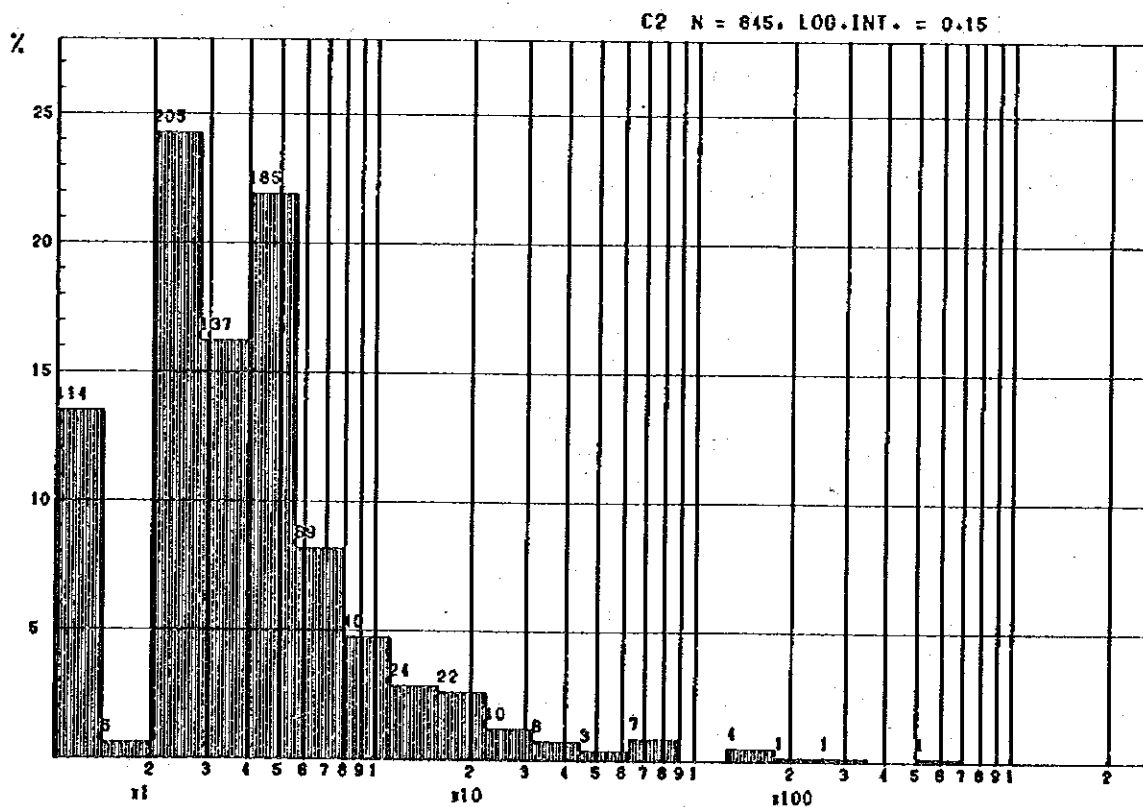


Fig. III-5 Histogram of Common Logarithm of Hg (ng/l) in Soil

Air in the Eburru Prospect

HA N = 439. LOG-INT. = 0.15

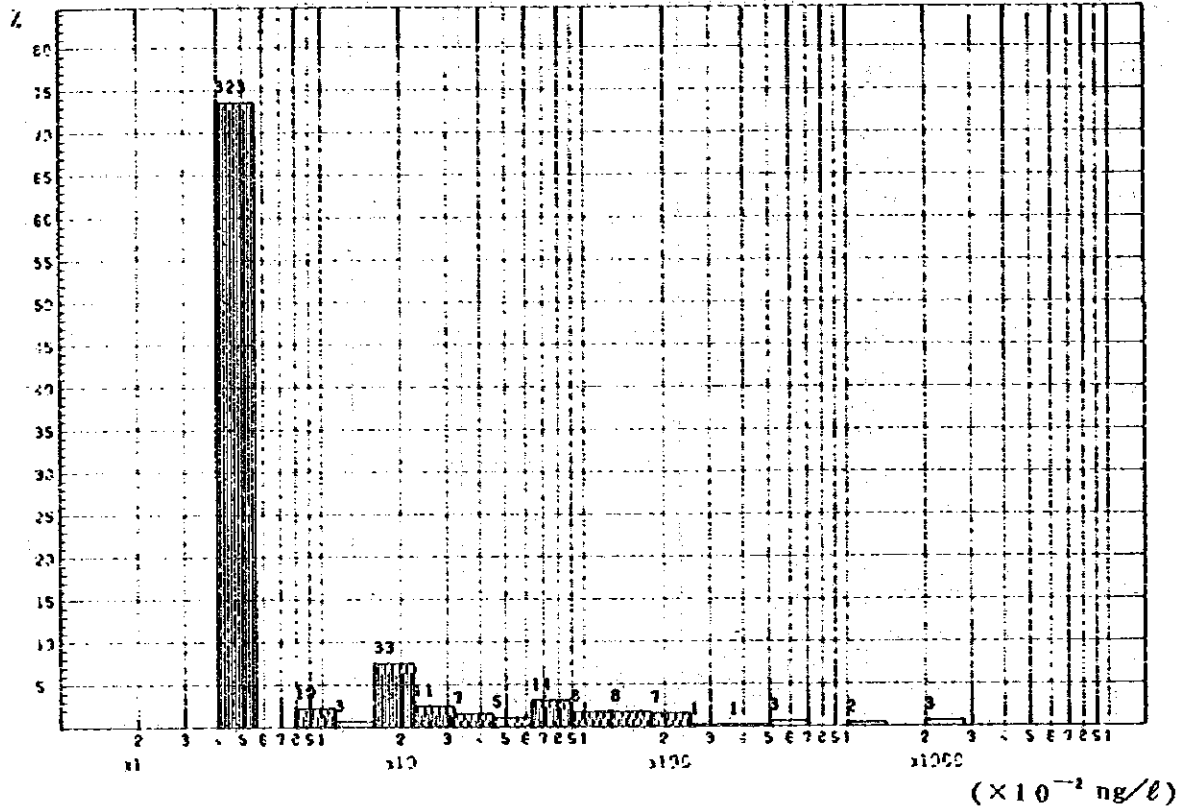


Fig. III-6 Histogram of Common Logarithm of Hg (ppm) in

Soil in the Eburru Prospect

HS N = 439. LOG-INT. = 0.15

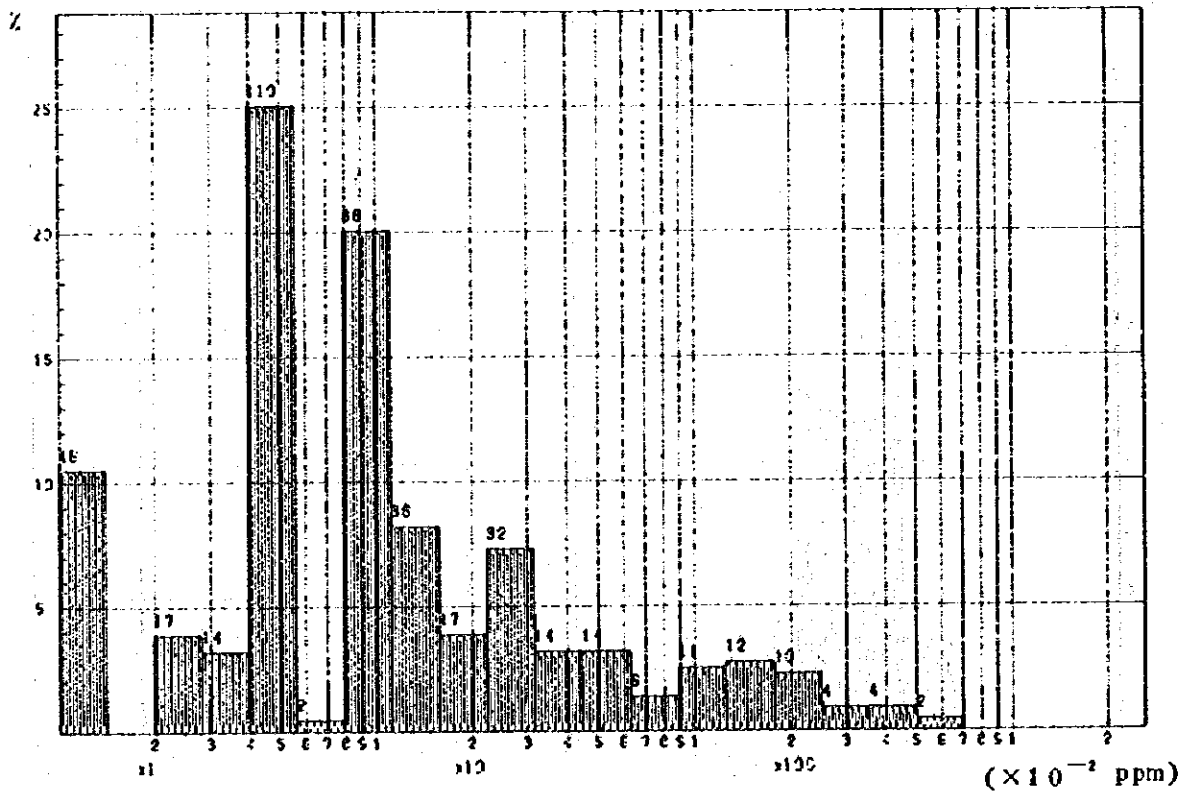


Fig. III-7 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature in the Southern Area (line A to E)

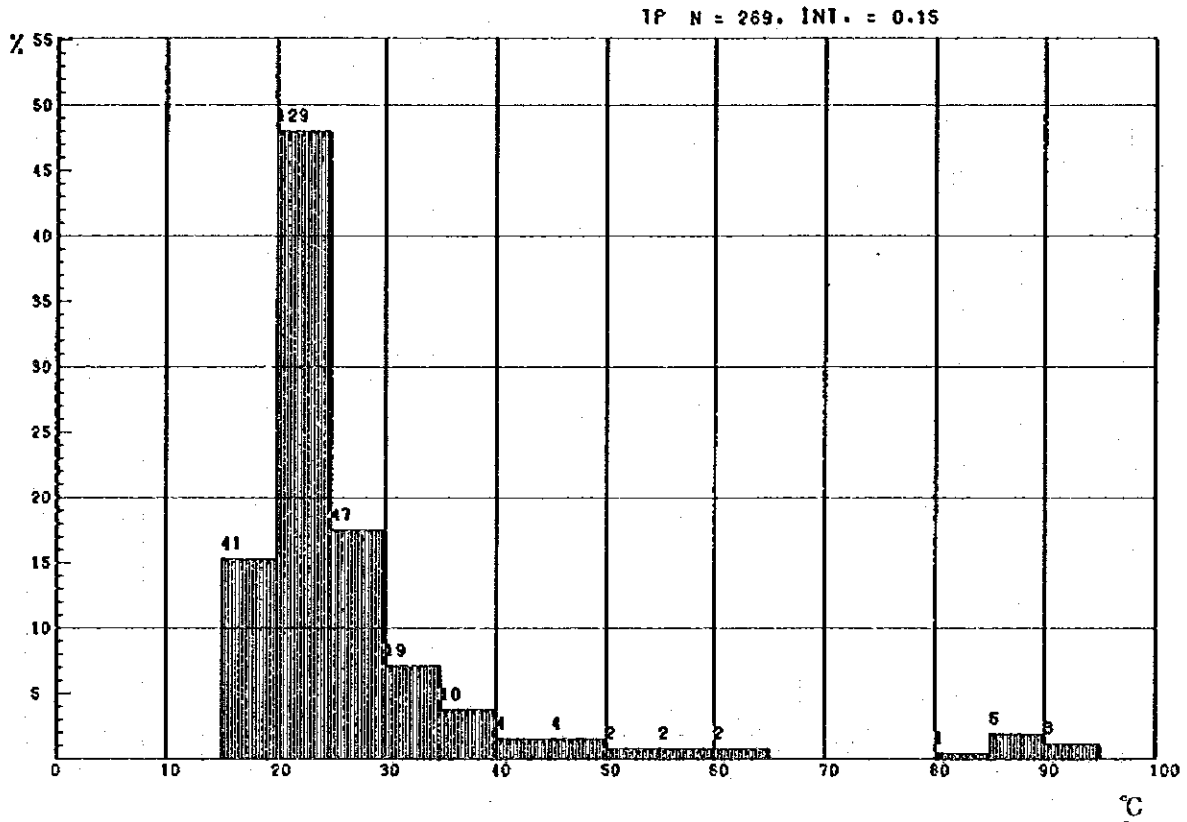


Fig. III-8 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature in the Central Area (line F to K)

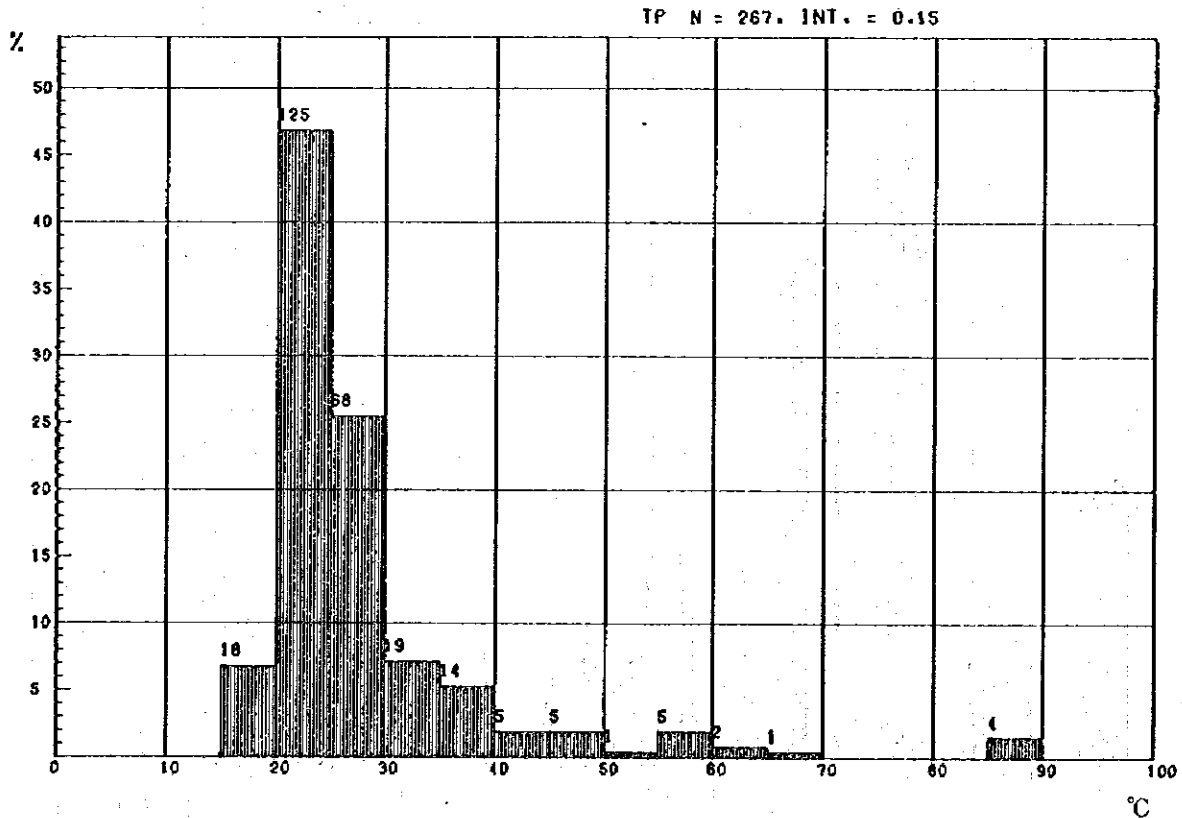


Fig. III-9 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature
in the Northern Area (line L to Q)

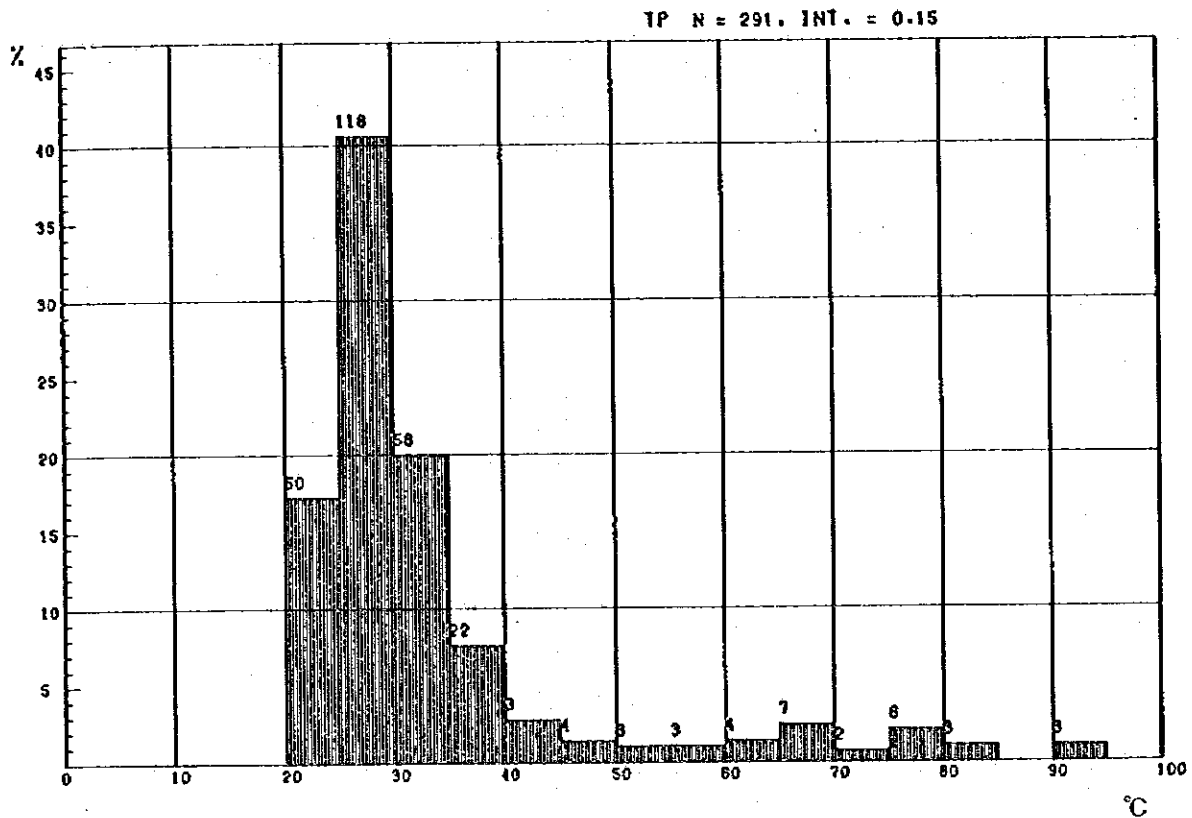


Fig. III-10 Histogram of Common Logarithm of CO₂ in Soil Air
in the Southern Area (line A to E)

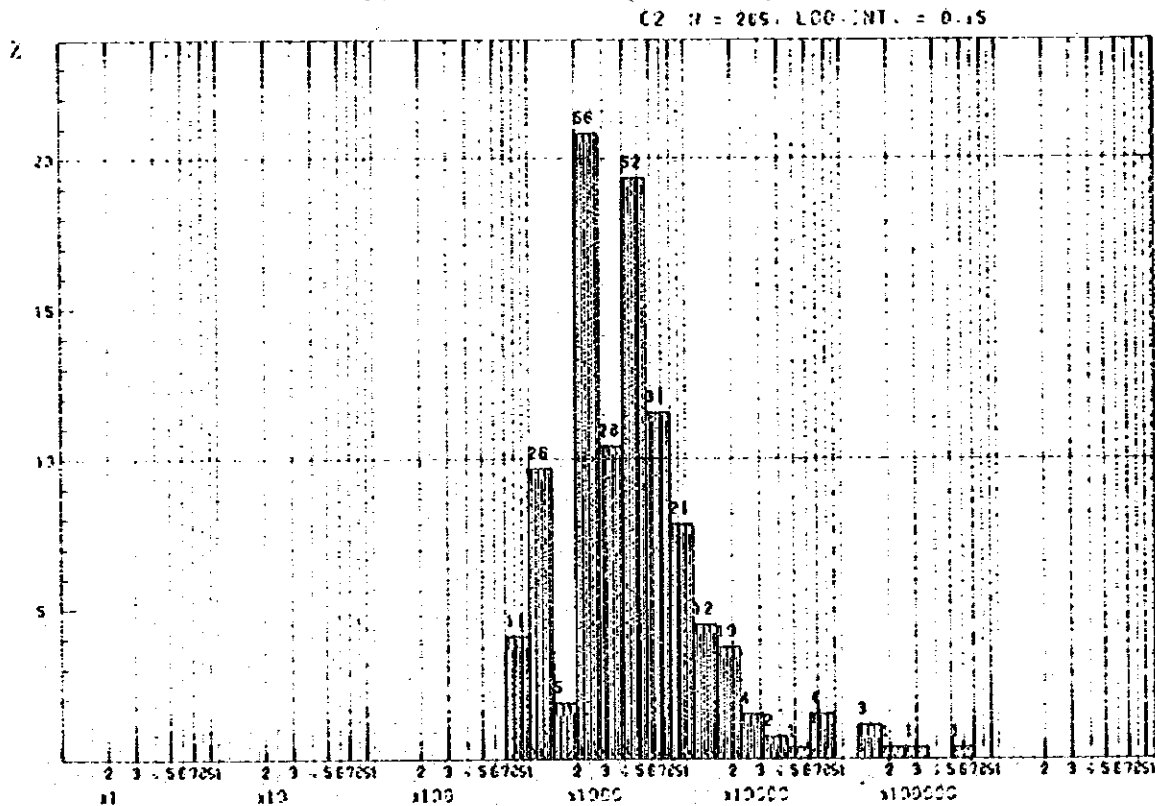


Fig. III-11 Histogram of Common Logarithm of CO₂ in Soil Air
in the Central Area (line F to K)

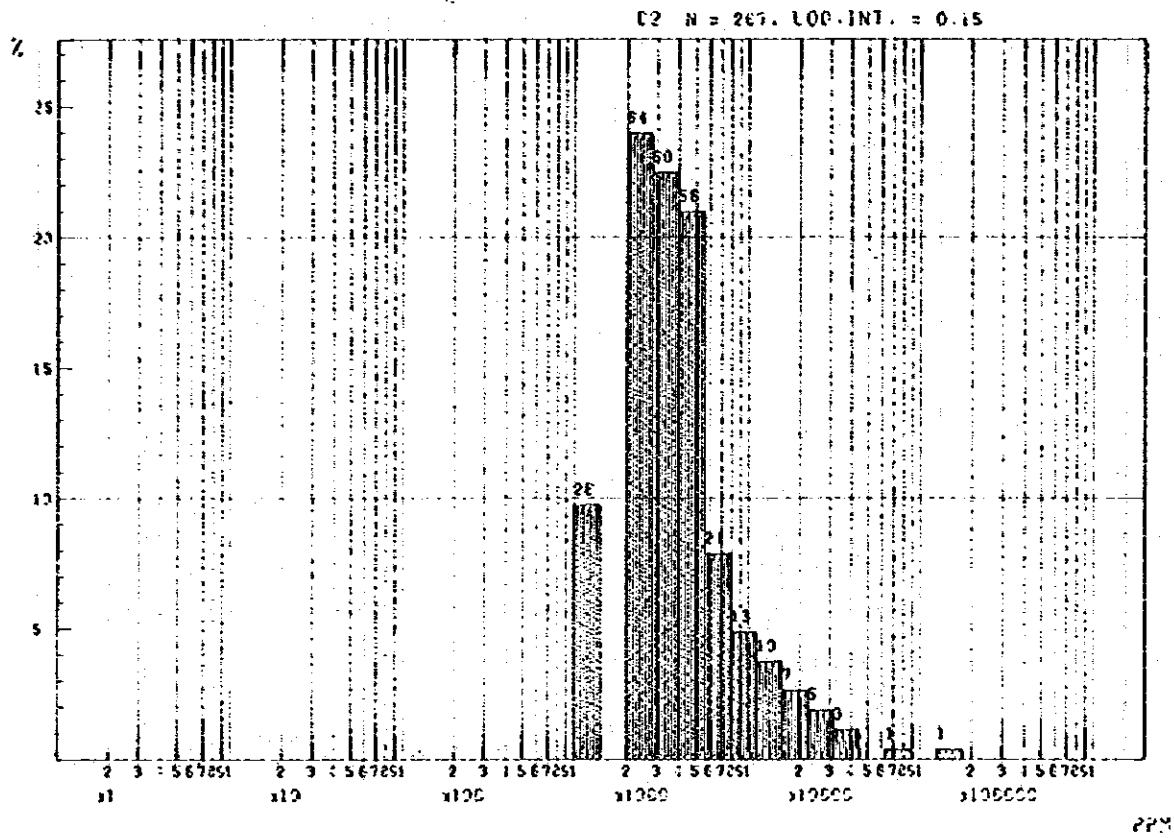


Fig. III-12 Histogram of Common Logarithm of CO₂ in Soil Air
in the Northern Area (line L to Q)

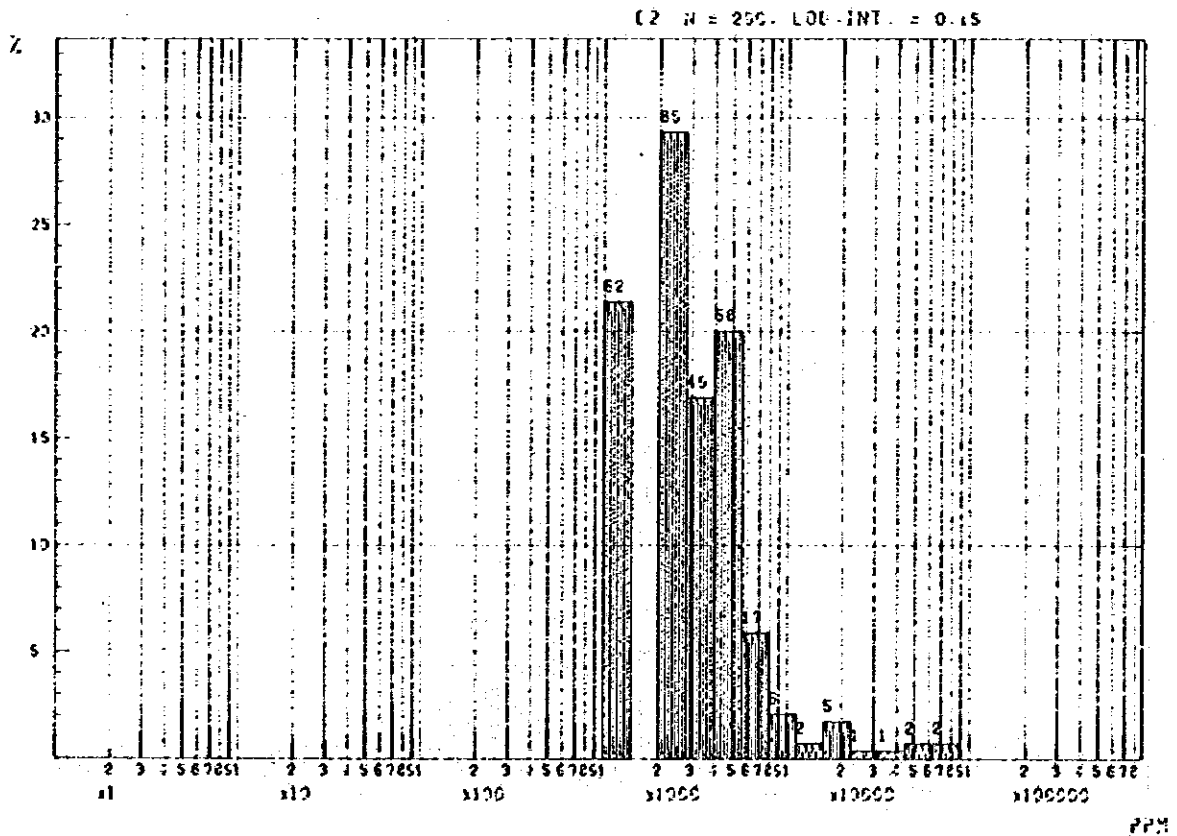


Table III-1 Survey Lines and Stations for Geochemical Survey in Eburnu Prospect

Area	Line	No. of Stations	Line Length (km)	Ground Temp.	CO ₂ in Soil Air	Hg in Soil Air	Hg in Soil	Remarks
Northern Area	A	79	3.9	69	69			
	B	21	1.0	20	20			
	C	96	4.75	85	85			
	D	53	2.6	53	53			
	E	43	2.1	42	42			
Central Area	F	39	1.9	39	39			
	G	79	3.95	70	70			
	H	73	3.6	60	60			
	I	41	2.0	36	36			
	J	32	1.55	26	26			
Southern Area	K	40	1.95	36	36			
	L	49	2.40	37	37			
	M	62	3.05	52	52			
	N	53	2.60	48	47			
	O	59	2.95	47	47			
	P	56	2.75	47	47			
	Q	66	3.25	60	60			
Total		863	42.30	827	826			

Table III-2 Histogram of 1 Meter Depth Ground Temperature

	Southern Area (line A - E)	Central Area (line F - K)	Northern Area (line L - Q)	Whole Area
12.5°C ~ 17.5°C	8	4	0	12
17.5 ~ 22.5	101	69	8	178
22.5 ~ 27.5	84	113	115	312
27.5 ~ 32.5	32	34	84	150
32.5 ~ 37.5	16	16	36	68
37.5 ~ 42.5	6	12	11	29
42.5 ~ 47.5	4	2	6	12
47.5 ~ 52.5	4	5	2	11
52.5 ~ 57.5	3	5	3	11
57.5 ~ 62.5	1	1	3	5
62.5 ~ 67.5	1	1	4	6
67.5 ~ 72.5	0	1	6	7
72.5 ~ 77.5	0	0	5	5
77.5 ~ 82.5	0	0	4	4
82.5 ~ 87.5	1	3	1	5
87.5 ~ 92.5	8	1	2	11
92.5 ~ 97.5	0	0	1	1
Total No.	269	267	291	827
Mean Value	27.6	27.9	33.4	29.7
S.D.*	13.8	11.1	14.1	13.4

* S.D.: Standard Deviation

Table III-3 Histogram of Common Logarithm of CO₂ Value in % in Soil Air

	Southern Area (line A - E)	Central Area (line F - K)	Northern Area (line L - Q)	Whole Area
-1.1 ~ -0.9 (0.079% ~ 0.126%)	37	26	62	125
-0.9 ~ -0.7 (0.126 ~ 0.20)	5	0	0	5
-0.7 ~ -0.5 (0.20 ~ 0.32)	81	124	134	339
-0.5 ~ -0.3 (0.32 ~ 0.50)	55	56	58	169
-0.3 ~ -0.1 (0.50 ~ 0.79)	31	21	17	69
-0.1 ~ 0.1 (0.79 ~ 1.26)	24	13	6	43
0.1 ~ 0.3 (1.26 ~ 2.0)	15	14	4	33
0.3 ~ 0.5 (2.0 ~ 3.2)	8	8	4	20
0.5 ~ 0.7 (3.2 ~ 5.0)	3	3	3	9
0.7 ~ 0.9 (5.0 ~ 7.9)	4	1	2	7
0.9 ~ 1.1 (7.9 ~ 12.6)	0	0	0	0
1.1 ~ 1.3 (12.6 ~ 20)	3	1	0	4
1.3 ~ 1.5 (20 ~ 32)	1	0	0	1
1.5 ~ 1.7 (32 ~ 50)	1	0	0	1
1.7 ~ 1.9 (50 ~ 79)	1	0	0	1
Total No.	269	267	290	826
Mean Value	-0.375 (0.422%)	-0.437 (0.366%)	-0.565 (0.272%)	-0.462 (0.345%)
S.D.*	0.488	0.366	0.348	0.411
A.M.V.**	1.228%	0.599%	0.432%	0.745%

* S.D.: Standard Deviation

** A.M.V.: Algebraic Mean Value

Table III-4. Histogram of Common Logarithm of Hg (ng/l) in Soil Air

	Southern Area (line A - E)	Central Area (line F - K)	Northern Area (line L - Q)	Whole Area
0.079 n.g. ~ 0.126 n.g./l	1	1	8	10
0.126 ~ 0.20	3	0	0	3
0.20 ~ 0.32	16	16	12	44
0.32 ~ 0.50	8	0	2	10
0.50 ~ 0.79	7	1	3	11
0.79 ~ 1.26	6	0	7	13
1.26 ~ 2.0	1	1	7	9
2.0 ~ 3.2	2	1	4	7
3.2 ~ 5.0	0	0	1	1
5.0 ~ 7.9	1	0	2	3
7.9 ~ 12.6	1	0	1	2
12.6 ~ 20	0	0	0	0
20 ~ 32	0	0	3	3
Total No. (A)	46	20	50	116
Mean Value	-0.321 (0.478 ng/l)	-0.574 (0.267 ng/l)	-0.163 (0.687 ng/l)	-0.297 (0.505 ng/l)
S.D.*	0.419	0.373	0.667	0.550
A.M.V.**	0.908	0.475	2.52	1.528
Stations less (B) than sensitivity	96	115	92	303
ratio of (A) and (B)	0.479	0.174	0.543	0.383

* S.D. : Standard Deviation

** A.M.V. : Algebraic Mean Value

Table III-5 Histogram of Common Logarithm of Hg (ppm) in Soil

	Southern Area (line A – E)	Central Area (line F – K)	Northern Area (line L – Q)	Whole Area
0.0079 ppm ~ 0.0126 ppm	1	5	40	46
0.0126 ~ 0.020	0	0	0	0
0.020 ~ 0.032	0	10	21	31
0.032 ~ 0.050	5	38	67	110
0.050 ~ 0.079	0	2	0	2
0.079 ~ 0.126	43	30	15	88
0.126 ~ 0.20	11	20	5	36
0.20 ~ 0.32	20	24	5	49
0.32 ~ 0.50	14	4	1	19
0.50 ~ 0.79	7	3	1	11
0.79 ~ 1.26	15	0	0	15
1.26 ~ 2.0	10	2	3	15
2.0 ~ 3.2	8	0	0	8
3.2 ~ 5.0	6	0	1	7
5.0 ~ 7.9	2	0	0	2
Total No.	142	138	159	439
Mean Value	-0.492 (0.322ppm)	-1.024 (0.0946ppm)	-1.409 (0.0390ppm)	-0.991 (0.102ppm)
S.D.*	0.555	0.401	0.489	0.616
A.M.V.*	0.476 ppm	0.147 ppm	0.114 ppm	0.329 ppm

* S.D. : Standard Deviation

** A.M.V. : Algebraic Mean Value

第IV部 物理探査

第 1 章 はじめに

1.1 岩石と電気比抵抗

岩石とその電気比抵抗の関係については多くの研究がなされている(例えばPerkhomenko, 1967, Keller and Frischknecht, 1966)。ここではKeller and Frischknecht に沿って述べる。

地表付近の岩石の電気伝導は、特殊な例外を除き、岩石中の空隙をうめた水を通して行なわれる。地表付近の岩石の固体部を通る電流が問題となるような場合は、磁鉄鉱、石墨、磁硫鉄鉱などの鉱物が大量に濃集しているような岩石だけである。地下深部では、その上にある地層の重みで岩石の空隙は閉ざされるので、電流はその固体部分を通る。

水を含む岩石について考えると、岩質や地質時代は岩石の空隙との関係が大きく、孔隙水の塩分濃度との関係はあまりない。従って含水岩石の電気伝導度と岩質や地質時代の間には、間接的な関係しかない。

岩石の比抵抗と石油含有層中の含水量の関係について多くの研究がおこなわれた。その結果、砂岩や石灰岩で大むね比抵抗は孔隙率の2乗およびその孔隙の含水比の2乗に反比例している。これらの結果は下記のような実験式(Archieの法則と呼ばれる)で表される。

$$\rho_t = a S_w^{-n} \rho_w \phi^{-m}$$

ここに ρ_t は岩石全体の比抵抗

S_w は岩石孔隙の含水比率

ρ_w は孔隙水の比抵抗

ϕ は岩石の体積比として表わした孔隙率

a, m, n は任意の係数

係数 a は岩石中の孔隙が1つずつ分れている場合は1弱となり、連続している場合は1強となる。指数 m は固化した粒度がととのった岩石で2強となり、固化の進まない粒度がまちな岩石では2弱となる。

水の比抵抗はその塩分濃度上昇ならびに、温度上昇にともない低下する。従って、地熱貯留層のような高温で高塩分の孔隙水のある所での比抵抗は、周囲の母岩に比べ著しく低くなる。

以上のような理由で地下の比抵抗分布が地熱貯留層探査に利用されている。

1.2 Eburru 地域での電気探査

調査地域内で、12測線計33.2km、81測点でシュランベルジャー電極配置による垂直電気探査を実施した。測点間隔は一般に測線沿いに250m毎に配置したが、数測線については

500 m 毎に測定した所もある。測線はリフト溪谷の主な地質構造方向、即ち南北方向に直交するよう、ほぼ東西方向とした。

測点毎の測定は垂直探査方法をとったが、測点間隔が250 m 毎と比較的短いので、測線に沿った比抵抗断面図も作成出来た。

第 2 章 野 外 調 査

物理探査の野外調査は、昭和55年2月、昭和55年10月から11月にかけて、昭和57年2月から3月にかけての3度にわたり実施した。野外調査期間中Eburru 地域は概ね乾燥した状態であったが、時により午後に雨が降った。しかし昭和55年2月および11月には午前中にも雨が降った。そこで調査は雨や雷光さらに強い日射をさけるため、早朝より昼頃まで実施した。

2.1 測定装置

物理探査には下記の装置を使用した。なお昭和56年中に、国際協力事業団よりケニア共和国エネルギー省に同様な物理探査装置一式が寄贈された。昭和57年の調査には、寄贈された装置を使用し、ケニア人カウンターパートの訓練をも併せて実施した。

(i) 発信機

	Yokohama Electronics Lab. Model L5202
Maximum Power	800v, 5A
Frequency	01 Hz to 5 Hz and D. C.
Wave Form	Time Domain and Frequency Domain
Weight	50 Kg

(ii) エンジン発電機

	Shindaiwa Kogyo Model 2400
Output Power	2400 vA
Voltage	100v
Frequency	60 Hz

(iii) 記録計

	Toa Electronics Model EPR-100A
Range	1mv-100v, 16 ranges
Accuracy	0.5% (full scale)
Input Impedance	2M Ω

2.2 野外測定手順

電極配置には垂直電気探査に最も良く使用されるシュランベルジャー電極配置を使用した。シュランベルジャー電極配置では4つの電極を測線上で対称にし、電流電極を外側に、電位電極を内側に設置した。測定深度を深くするには、電位電極位置を変化させずに電流電極位置を

外へ向って対称に移動させる。しかし電流電極間隔に比べ電位電極間隔が小さくなりすぎると、電位電極間の電位差が小さくなり十分な精度で測定出来ない。このような時には電位電極を外へ向って移動させることにより電位電極間隔を拡げ、信号を大きくする。測定時には電流電極間隔と電位電極間隔の比を5対1以下とならないようにした。電位電極を外方向に移動させる時には、各電流電極間隔に対し、2つの電位電極間隔について重複した測定を行なった。このようにする事により電位電極の移動による変化についての較正が行なえる。シュランベルジャー電極配置図はFig. IV-1にあり、その結線方法はFig. IV-2に示す。

2.3 比抵抗の計算

電流値と電位値は2台のペンレコーダーに記入した。野外では測定値を見掛比抵抗値に直し、直前に取った測定値との対比を行なった。キャンプで測定値を記録紙から読み取り次式にもとずき見掛比抵抗を計算した。

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{(AB)^2/2 - (MN)^2/2}{MN} \frac{\Delta V}{I}$$

ここに

ρ_a : 見掛比抵抗 (Ωm)

ΔV : 電位差 (volt)

I : 発信電流 (ampere)

上記の式のうち、幾可係数は次のように定義される。

$$K = \pi \cdot \frac{(AB)^2/2 - (MN)^2/2}{MN}$$

従って、

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

上式で、幾可係数Kは電極配置のみに関係する数値である。

計算した見掛比抵抗 (ρ_a) は電流電極間隔の半分 (普通 $AB/2$ と書く) を横軸とし、両対数方眼紙に記入する。この $AB/2$ に対する ρ_a の曲線を使い比抵抗層の解析を行なった。

2.4 解 析

このようにして集めたシュランベルジャー垂直探査データには、地質的(もっと正確には地

下の電氣的)情報のみならず地形の影響や測定上の精度などが誤差として入ってくるが、この測定上の誤差は、見掛比抵抗値の数パーセント程度であると考えられる。

シュランベルジャー垂直電気探査の解析について数多くの論文がある(例えば Koefoed, 1979, Keller and Frischknecht, 1966)。殆んどの解析方法は水平成層構造を仮定し、結果としていくつかの水平層の比抵抗値およびその厚さを解析している。しかし実際の調査では、水平に成層した構造が厚さ数百メートル、水平方向に数キロメートルも連続しているような、上記水平成層構造の仮定にあてはまるような自然条件はほとんどない。

本調査では、現地にて標準曲線照合法により解析を実施し、水平層と仮定した場合の構造を算出した。この解析結果を、日本国内で電子計算機を使い、再解析した。理論曲線と現場測定結果が良く合致した場合の比抵抗構造を、その測点付近での最良地下構造モデルと考えた。

本解析に使用した標準曲線および補助曲線は、Orellana と Mooney が1966年に発表したものである。

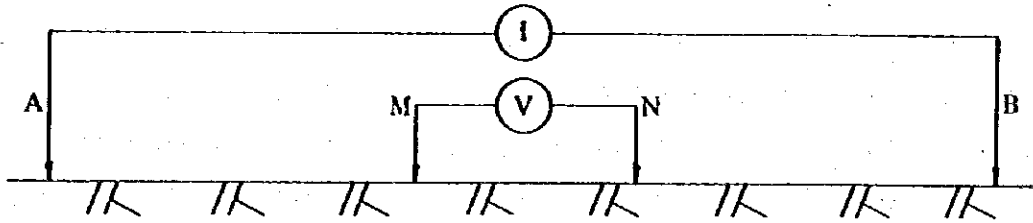


Fig. IV - 1 Schlumberger Electrode Configuration

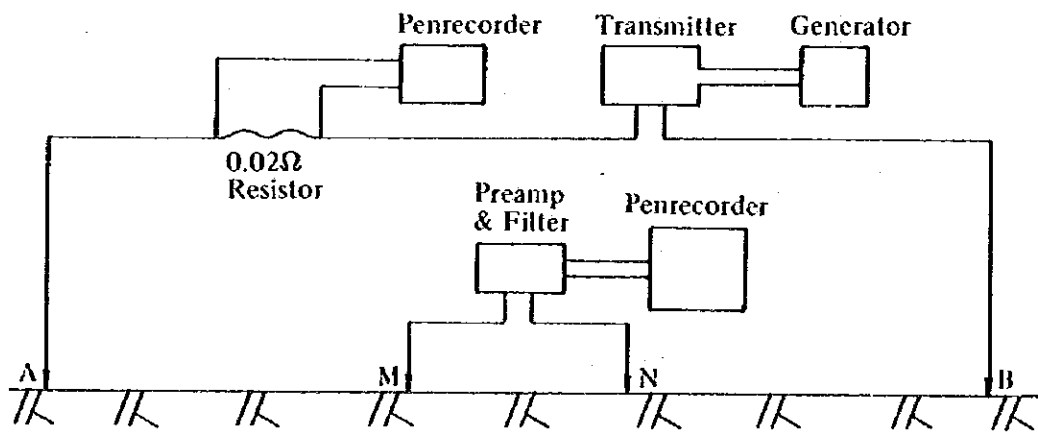


Fig. IV - 2 Wiring of Equipment

第 3 章 調査結果

シュランベルジャー垂直電気探査を A, B, C, D, E, H, I, K, M, O, P および Q の 12 測線において実施した。これらの測線は大別すると次の 3 地域に分けられる。A, B, C, D および E 測線は Eburru Crater 内およびその周辺部（今後 Eburru Crater 地区と呼ぶ）にあり、H, I および K は Eburru Peak の北側斜面（今後 Cedar West 地区と呼ぶ）にあり、M, O, P および Q 測線は Eburru Station 周辺の北部平地（今後 Eburru Station 地区と呼ぶ）にある。これら測線位置は Fig. IV-3 に示す。

Fig. IV-3 は AB/2 が 500 m の場合に測定した見掛比抵抗分布図で、地下数百メートルの比抵抗分布を大まかに示す。Fig. IV-3 で見掛比抵抗が 20 Ωm 以下の所は、I 測線上に小範囲に認められる以外は、調査地域の北と南の両端部に分布している。南端部は Eburru Crater 地区で、見掛比抵抗の分布は比較的複雑である。即ち Eburru Crater の中央に高見掛比抵抗地帯があり、その周辺は低見掛比抵抗帯が卓越し、全体として、東西方向に伸びている。

Eburru Station 地区では見掛比抵抗帯は、リフト溪谷の地質構造の主な方向と同一の南北方向に連なっている。見掛比抵抗が 20 Ωm 以下の地帯と 20 Ωm ~ 30 Ωm の地帯が交互に現われている。AB/2 = 500 m での各測線毎の見掛比抵抗値の幾可平均値および標準偏差値は、M 測線で 33.7 Ωm と 20.2, O 測線で 31.9 Ωm と 16.7, P 測線で 28.0 Ωm と 13.3, および Q 測線で 19.3 Ωm と 4.44 となっている。M, O, P および Q 測線の幾可平均値ならびに標準偏差によると、地下数百メートルでの比抵抗は北に行くに従い低くなるとともに変化にとほしくなっている。

Cedar West 地区に於ては、各測線の東西両端部では見掛比抵抗は高い地帯があり、その中央部では低見掛比抵抗が卓越し、南北方向に延長している。即ち低見掛比抵抗帯は谷状地形の中央部に、その両側部は高見掛比抵抗帯がそれぞれ分布している。

I 測線に沿った見掛比抵抗擬似断面図を作成した (Fig. IV-4 (I)~(II))。これによって、地下比抵抗構造の一般的な傾向が概観出来る。

A 測線沿いの擬似断面によると、Eburru Crater の中央部で高見掛比抵抗帯がもり上っている。火口の外側で見掛比抵抗は低くなっている。A 測線の東端部では、深くなるに従って見掛比抵抗は低くなっている。

C 測線沿いの擬似断面によると、本測線では深くなるに従い見掛比抵抗は低くなる。特に Eburru Crater 周辺部では特に低く 9 Ωm にもなっている。

D 測線沿いで見掛比抵抗が最も低くなるのは、地表から 200 m ~ 500 m の間で、その比抵抗値は 10 Ωm から 20 Ωm である。地表付近では、見掛比抵抗は高くなっている。

E 測線は標高の最も高いところを通過しており、その見掛比抵抗値も他の測線より概して高くなっているが、深くなるに従い低くなっている。本測線での最低の見掛比抵抗値は $21.2 \Omega m$ である。

H 測線の擬似断面では、見掛比抵抗の等値線は比較的水平に近くなっている。見掛比抵抗は深くなるに従い低くなっている。等見掛比抵抗線は、地表付近の岩石の比抵抗のばらつきにより、地表近くでは凸凹している。

I 測線沿いの見掛比抵抗擬似断面によると、測線中央付近で見掛比抵抗は低くなり、両端では高くなっている。

K 測線沿いの見掛比抵抗は、東方および深部に向うに従い低くなっている。

M 測線沿いの見掛比抵抗は、深くなるに従い低くなっている。測点 105 での見掛比抵抗はその両側に比べ高くなっている。測点 105 での最低の見掛比抵抗値は約 $34 \Omega m$ であったが、その両側の測点では $20 \Omega m$ 以下と低くなっている。測点 90 の東では、見掛比抵抗は高くなっている。

O 測線沿いの見掛比抵抗擬似断面は、測点 94 および 99 では、その両側に比べ見掛比抵抗が高くなることを示している。測点 89 および 104 での最低の見掛比抵抗は最深部にあり、その値は $10 \Omega m$ 以下と非常に低くなっている。

P 測線沿いの見掛比抵抗擬似断面によると、低見掛比抵抗帯は測点 100 付近で深くまで伸びており、そこでの見掛比抵抗値は $7.5 \Omega m$ と非常に低くなっている。しかし測点 100 の地表付近の見掛比抵抗値は $100 \Omega m$ 以上と高くなっている。

Q 測線では、 $20 \Omega m$ 以下の低見掛比抵抗帯は測点 100 の西方に伸び、深くなるに従いその値が低くなる。

**Table IV -- 1 Statistics of Apparent Resistivities
at AB/2 = 500 m**

Line	Number of Stations	Mean	Standard Deviation
A	11	37.6 Ω m	27.1
B	1	20.1	—
C	6	17.8	4.60
D	6	16.6	3.13
E	5	36.0	6.20
H	9	29.0	4.74
I	3	96.4	72.7
K	5	34.9	13.0
M	9	33.7	20.2
O	7	31.9	16.7
P	6	28.0	13.3
Q	10	19.3	4.44
All	78	31.9	23.7

