



Title	屈斜路カルデラにおける磁気測量
Author(s)	西田, 泰典; NISHIDA, Yasunori
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 49, 11-21
Issue Date	1987-03-30
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.49.11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14154
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p11-21.pdf



屈斜路カルデラにおける磁気測量

西田 泰典

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和61年11月25日受理)

Geomagnetic Survey on Kuttyaro Caldera

By Yasunori NISHIDA

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received November 25, 1986)

Shipborne and ground magnetic surveys were conducted using a proton precession magnetometer on kuttyaro caldera, Hokkaido, Japan. Modeling of the noticeable magnetic anomalies indicates the presence of caldera deposits filling a basement depression. The proposed diameter of the depression is considerably smaller than that of the caldera deduced from gravity anomalies. The depression deduced from the magnetic anomalies is maldistributed at the eastern part of the caldera. Although the origin of such structural discrepancy is not clear, it must be an important condition to be answered when we study the mechanism of Kuttyaro caldera formation. No significant magnetic anomaly that suggests the existence of a big magma reservoir was observed.

Dipole like magnetic anomalies of short wavelength were observed on Lake Kuttyaro. The anomalies are thought to be originated from sunken intrusive rocks.

I. はじめに

カルデラ形成機構に関しては幾つかの学説がある。大噴火に伴って一部または全部が空になった巨大なマグマ溜り中に、その天井部分が陥没することにより形成されるとする説は良く知られている(例えば WILLIAMS, 1942)。又同じ陥没説でもマグマの貫入により水平引張応力場が生じ、放射状および環状の構造の断裂が発達した結果陥没地形が形成されるとする説もある(FUJITA, 1972; KOIDE and BHATTACHARJI, 1975)。これはカルデラの外形が必ずしも円又は楕円型をしている場合ばかりでなく、多角型をしている例がしばしば認められることを根拠の一部としている。

一方 YOKOYAMA (1963, 1981) は火山爆発に伴って形成された巨大な火口を、その噴出物で埋め戻した結果生じるものであると主張している。この説ではいわば、巨大な火口の別名がカルデラであると言い直すことも可能である(必ずしも一回の大噴火でカルデラが形成される必要はなく、近接する幾つかの火口の複合体の場合も含まれる)。後2説の場合には必ずしも巨大なマグマ溜りの存在をカルデラ直下の浅い所に仮定する必要はない。

いずれの説が正しいのか、又カルデラ毎にその形成機構が異なるのか等を明らかにすることは火山学上重要な問題である。そのためには地球物理学的、地質学的、さらには試錐調査のデータの集積を行い、地下構造を明らかにすることが必要である。

火山地域は一般に様々な磁気的性質を持つ岩石で構成されており、又岩石の磁性の強さは温度条件に強

く依存しているため、磁気測量は火山地域の地下構造を知る上で適している。著者はプロトン磁力計を用いた全磁力測定を屈斜路カルデラ周辺で行ったのでここに報告する。本観測結果をもって、カルデラ形成機構が解明されたわけでは無いが、それを考察する上で一つの大きな制約条件を与えるものと信ずる。

II. 地質学的背景

屈斜路カルデラ付近は新第3紀の地層が基盤をなしており、尾札部層およびそれより下位のイクルシベ層で構成されている(勝井, 1962)。新エネルギー総合開発機構(1985)による、カルデラ南西縁での試錐調査では、イクルシベ層は変朽安山岩、流紋岩、安山岩、火砕岩等で構成されている。一方尾札部層には安山岩質火砕岩・溶岩を主体とし、凝灰質角礫岩、凝灰質砂岩、凝灰岩および溶結凝灰岩などを伴う累層が発達しており、イクルシベ層に見られる程変質を受けていない。

そのような場に形成された屈斜路カルデラの現地形に現われているカルデラ径は、東西26 km、南北20 kmにおよぶ巨大なものである。カルデラ底には面積77.5 km²を有する屈斜路湖が存在する。湖の水深はほぼ40~50 mであるが、最深部は湖の中央にはなく、和琴半島の北東部にあつて深さ118 mに及んでいる(Fig. 2)。本カルデラは更新世後期に何回かの大規模な石英安山岩質火砕流の噴出に伴って生じた火山性凹地であり、その最終噴火は約3万年前に起つたと考えられる(勝井, 1958)。

カルデラ形成後、中央部に安山岩の溶岩、スコリアからなるアトサヌプリ火山が生じ、1万数千~2万年後に石英安山岩質の火砕流を噴出して小カルデラを作っている。又これと前後して屈斜路カルデラ内には大小10数個の溶岩円頂丘が形成されている。

III. 地磁気測量

屈斜路カルデラにおける最初の磁気測量は1938年弟子屈地震(例えば津屋, 1938)後に加藤(1938)およびKATO(1940)によってなされている。アスカニア磁力計を用いた鉛直成分の測定を、主に屈斜路湖南岸付近から美留和にかけて行っている。磁気異常は、北西-南東に延びた断層(Fig. 1)に沿って、正負対になって伸長しているように見えることから、その断層沿いに貫入してきた薄いシート状のマグマがその異常をもたらし、ひいては1938年の地震の原因となつたと推定している。

その後屈斜路、摩周、阿寒等のカルデラを含む領域で航空磁気測量が、1964年米国地質調査所の手で行われている(森・横山, 1967)。しかし、この調査は対象域が広範なため、屈斜路カルデラの構造に起因すると思われる異常は詳細にはわかりにくい。

著者は更に詳しい磁気異常分布を知る目的で、プロトン磁力計を用いた全磁力測定を行った。Fig. 1に示される如く、陸上部では約300点で測定を行っている。なるべく測点分布が均等になるよう心がけるとともに、1938年弟子屈地震断層付近は特に測点分布を密にしている。

湖上でもモーターボートを用いて延べ130 kmにのぼる測線上で測定を行い、陸上部の測定と併せてほぼカルデラ全域を覆うことが出来た。航路はFig. 2に示す。本観測では、湖上での測定位置決定は極めて簡便な方法を採用した。すなわちボートを目標点に対し出来るだけ等速度で直進させるとともに、等時間間隔で測定を行って測点を航路上に配分している。ほぼ南北に走る測線が大部分であるが、風や湖流の影響で必ずしも予定通りの航路上で測定されている訳ではない。そこで、それらを横切るような測線を何本かもうけ、位置の決定精度をあらく見積つた。その結果、誤差数10 m以内で位置が決定されているものと思われる。なお北海道立地下資源調査所(未公表)でも冬期氷上で何点かの磁気測量を行つており(Fig. 2の黒丸)、その値も参考にさせていただいた。

そのようにして得られた磁気異常図をFig. 3に示す。測定値に対する地磁気日変化やより短周期の外部磁場擾乱の補正は、約50 km北北西にある気象庁地磁気観測所女満別支所のデータをお借りして行っている。火山地域では地磁気基準値を設定することがむづかしい。Fig. 3の磁気異常図は、全測定値の平均48,

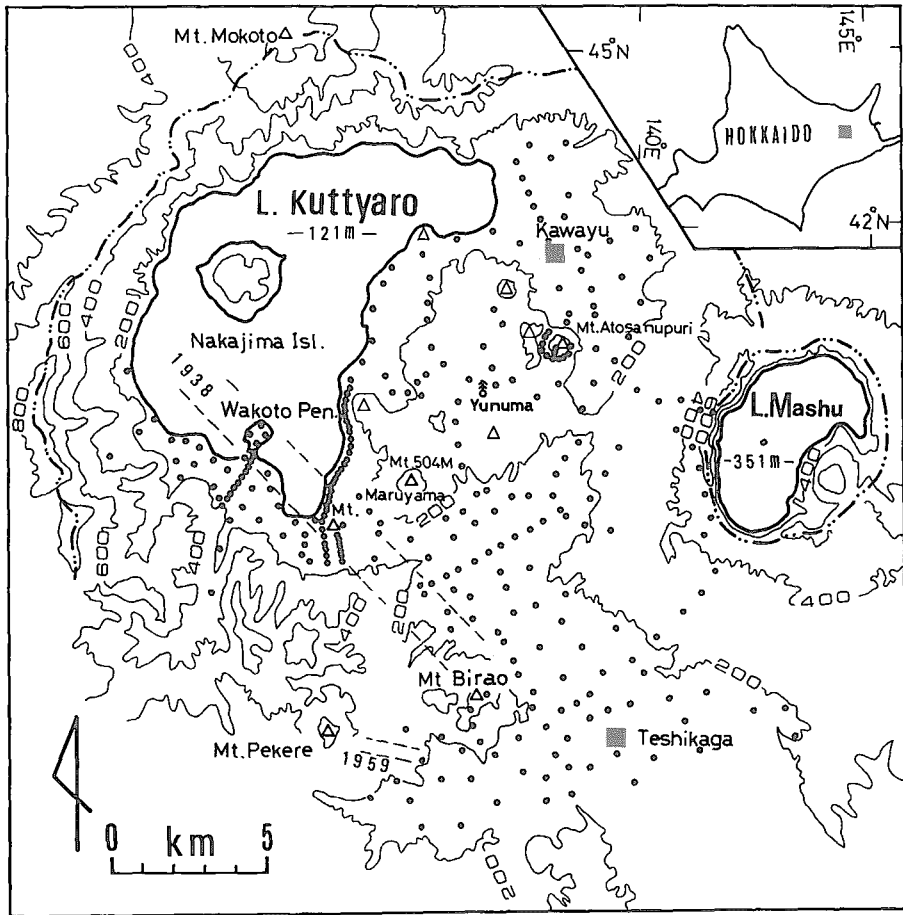


Fig. 1. Topographic map of KuttYRO caldera and magnetic stations on land. Contours in meters. Faults associated with the 1938 and 1959 earthquakes are also shown by dashed lines. Dots-dashed curve shows the topographic caldera rim.

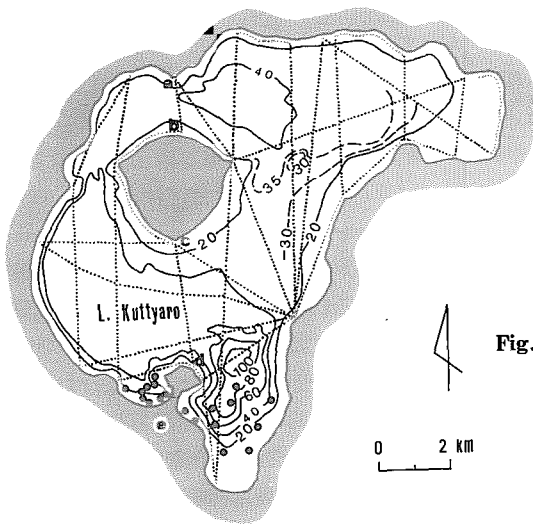


Fig. 2. Tracklines of the shipborne magnetic survey and the depth of the water in meters. Solid circles show the magnetic stations established by Hokkaido Geological Survey (unpublished).

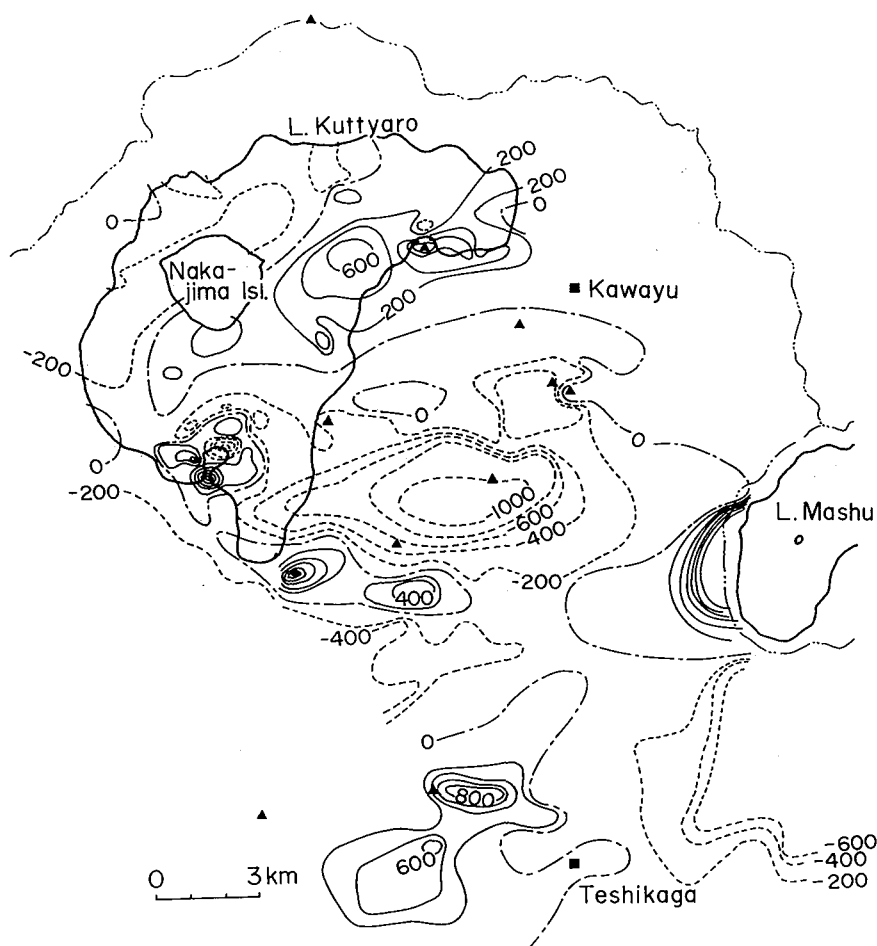


Fig. 3. Distribution of the total force intensity of the magnetic field in nT. Solid and dashed contours represent the positive and the negative anomalies relative to 48,860 nT, respectively. Contour interval is 200 nT.

860 nT を基準とし、それに相対的な値として示されている。

IV. データ解釈

IV-1. 長波長磁気異常成分

磁気異常は長・短波長の成分が重ね合わさり、かなり複雑な様子を示している。そこでこれらの異常を平滑化することにより、カルデラ規模の異常を抽出することにする。移動平均方式を用い、平均操作のサンプリング範囲を 1.5 km とし求められたものが Fig. 4 である。それをみると、カルデラ南部の 504 M (リシリ山)、397 M (オプタテシュケ山) 付近に分布する負異常と、北部の 195 M (ニフシオヤコツ山) から砂湯の沖合いに張り出している正異常が対になって現われていることが特徴である。このような異常の現れ方は、地下に逆帯磁した物質が存在するか、周辺の基盤より相対的に弱く正帯磁した物質の存在を示唆する。カルデラそのものは更新世に形成されたものであり、逆帯磁した物質の存在は考えにくい。従って後者の可能性を考える方が妥当である。

次に異常の原因となる物質の深さや規模が問題となる。そこでまず概略を推定するため、簡単なモデル

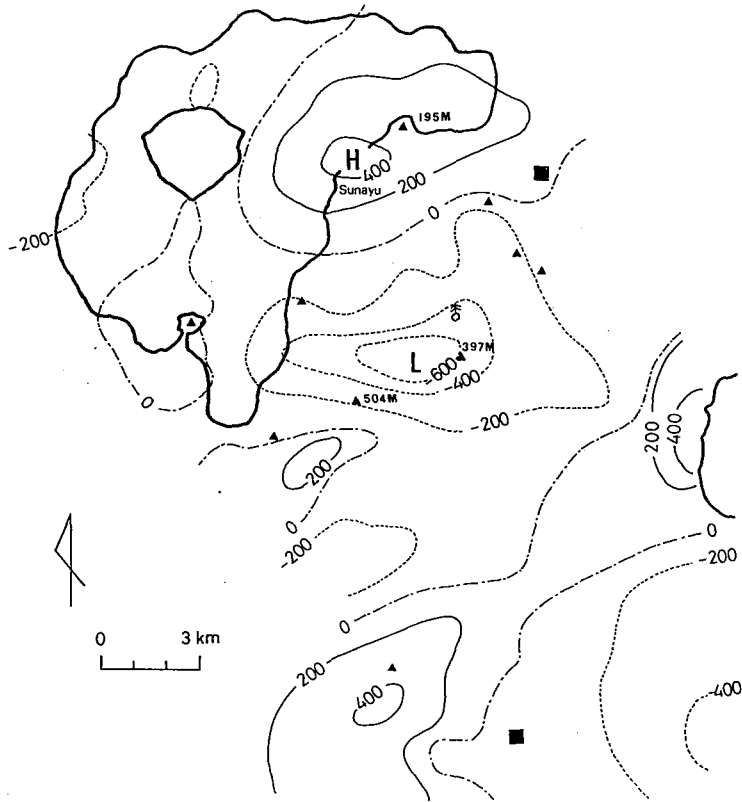


Fig. 4. Distribution of smoothed magnetic anomalies. Contour interval is 200 nT.

計算を行った (Fig. 5). 図の a, b は相対的に強帯磁の基盤の落ち込み構造を弱帯磁物質で埋めている場合や、基盤の比較的浅い部分が熱水等のために変質し、帯磁が弱められた場合を想定し、その場合に地表で期待される磁気異常を計算したものである。c はそれよりやや深い場所に無帯磁の高温マグマ溜りが存在するような場合に相当する。相対的な帯磁の強さ (ΔJ) を 1 A/m とし、伏角を屈斜路カルデラ付近の 57° として得られたものであるが、実際の計算は -57° の伏角を持つ逆帯磁した倒立円錐台(a), 円柱(b), 球(c)についてなされている。

これらの結果からわかることは、1) a, b 両方とも正負の磁気異常のピークが、ほぼ基盤の落ち込み縁に分布する；2) a, b を比べると、正負とも異常の振巾は落ち込み角の急な場合 (b の場合) の方が大きい；3) 落ち込みの底面の平坦部が多いほど (b の場合) 中央部分での異常の空間的勾配は小さく、又異常値は零に近い；4) 球状物質 (c の場合) による異常は相対的にゆるやかな空間勾配を示し、a, b の場合と比べて正負の異常のピークの外側ではかなりすそを引く；5) c の場合正と負の異常のピーク値に大きな違いがある、という 5 点である。なお、逆帯磁した倒立円錐台による磁気異常を平面的に見たものが Fig. 6 であるが、正負の異常のピークが縁に沿ってまわり込んでいることがわかる。

Fig. 4 の磁気異常図、そしてその南北断面図 (Fig. 7 上) をみると、異常が外側へあまりすそを引いていないことに加え、正負の異常のピーク値にあまり顕著な差が認められないことが特徴である。これらの事実は、モデル計算から導き出された特徴のうち 4) と 5) に反している。従って、観測された長波長磁気異常の原因は比較的表層近くで求めなければならないことになる。

磁気異常の原因を基盤の落ち込み構造とそれを埋めるカルデラ堆積物の分布に求めることは有力な解釈

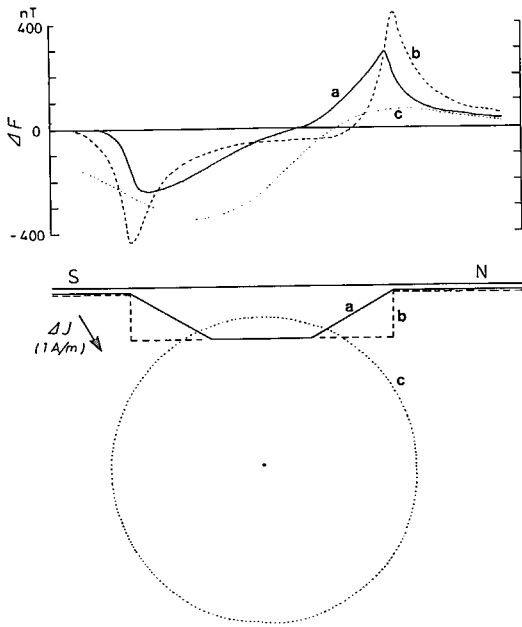


Fig. 5. Model calculations of total force intensity of the magnetic field. Strongly magnetized crust is partly replaced by weakly or non magnetized (a) inverted cone, (b) circular cylinder, and (c) sphere. Difference of magnetization (ΔJ) is given as 1 A/m.

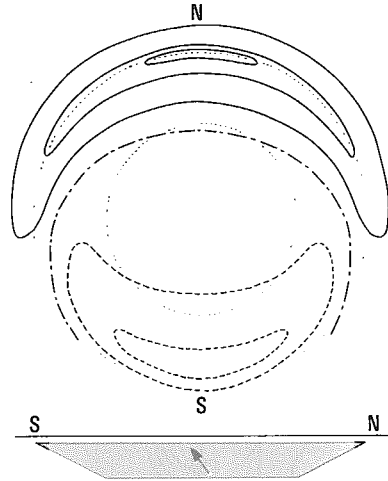


Fig. 6. Total force intensity of the magnetic field on the surface of a reversely magnetized inverted cone. Solid and dashed contours represent the positive and the negative anomalies, respectively.

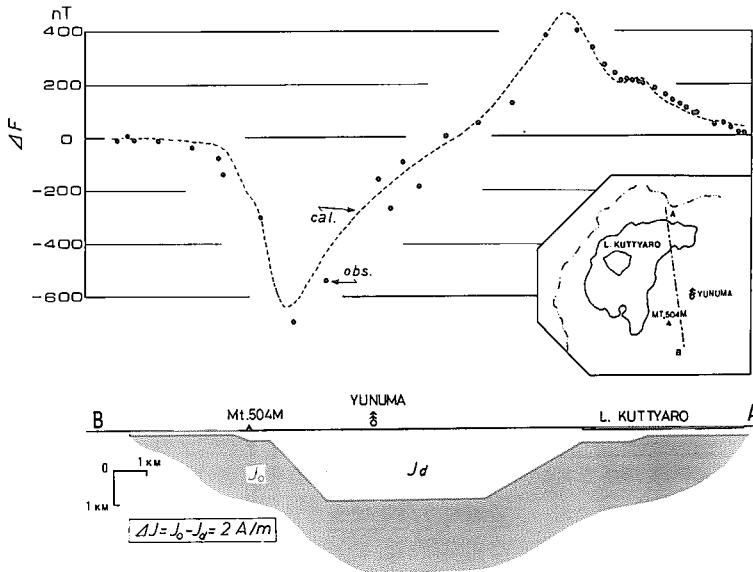


Fig. 7. Magnetic anomalies and model structure of Kuttuyaro caldera along the A–B profile. Dashed curve represents the calculated anomalies while the solid circles represent the observed anomalies.

のしかたの1つであろう。カルデラ内に低重力異常 (YOKOYAMA, 1958) が分布することから考えても妥当なものと思われる。

磁気異常の定量的議論を行う際問題となるのは、岩石の帯磁の強さ分布である。電源開発株式会社の手で、カルデラ内湯沼 (Fig. 1) で堀削された 1000 m の試錐芯の測定によると、カルデラ堆積物の帯磁率は 1.3×10^{-2} SI 単位程度である (西田・横山, 1965)。更に新エネルギー総合開発機構 (1985) の手による数本の試錐芯のデータによると、深さ毎にかなりバラつきがあるものの、カルデラ堆積物で 1.3×10^{-2} SI 単位、基盤岩とみなされる中新世尾札部層で 2.5×10^{-2} SI 単位という平均値が得られている。尾札部層より下位に分布するイクルシベ層は 1.3×10^{-2} SI 単位と、尾札部層より低い値を示す。自然残留磁気は、西田・横山 (1965) のデータによりカルデラ堆積物の値として $0.1 \sim 1$ A/m と求められているが、尾札部層、イクルシベ層については得られていない。以上のデータから、やや強い帯磁率を持つ尾札部層の落ち込み構造をカルデラ堆積物で埋めているモデルをもって観測された磁気異常を解釈することは不自然ではない。

尾札部層の自然残留磁気の強さが未定であるので問題が残るが、尾札部層とカルデラ堆積物の帯磁の強さ (誘導磁化成分と残留磁化成分の和) の差 (ΔJ) を 2 A/m と仮定して行ったモデル計算の結果が Fig. 7 で示される。計算は A-B 測線を横切る 2 次元構造を仮定して行われている。それによると基盤は南側で約 50° 、北側で約 30° の角度をもって傾斜しており、南側で急である。又堆積層の厚さは最大 2 km と見積られる。むしろこの層厚そのものは帯磁のコントラストに強く依存しており、例えば強いコントラストを仮定すればそれだけ層厚は薄くなる。しかし基盤の落ち込み縁の位置や、南側の方が急斜面であるという傾向はさほど変りはない。

IV-2. 短波長磁気異常成分

ここでは特に、詳しい地質調査の不可能な湖水域の短波長異常成分に注目する。観測値から長波長異常

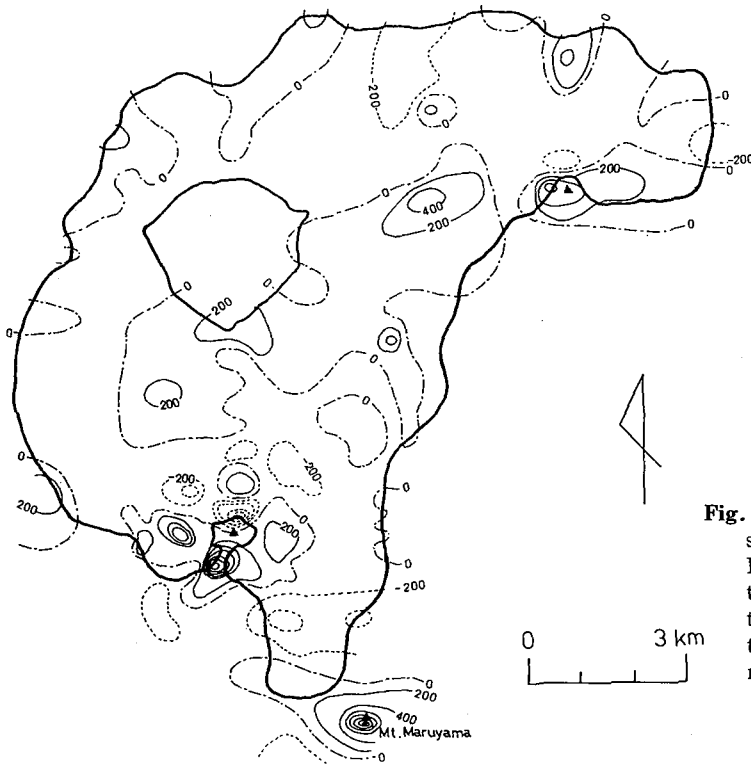


Fig. 8. Magnetic anomalies of short wavelength on Lake Kuttyaro. Solid and dashed contours represent the positive and the negative anomalies, respectively. Contour interval is 200 nT.

成分を差し引いた結果が Fig. 8 である。これを見ると、正負の異常が南北に対になった双極子型の異常が幾つか分布していることがわかる。これらは湖底下に潜在する貫入岩体の存在を示唆している。更に詳しくみるため、一例として a~e 測線 (Fig. 2) に沿った磁気異常分布を Fig. 9 に示す。和琴半島およびそのすぐ北側に顕著な磁気異常が観測されている。

異常の原因を円柱状貫入岩体によると近似して行った計算結果も同様に Fig. 9 に示される。この付近には、その他半島の東側および西側の異常も含めて計 4 つの双極子型異常が密集しており、火山活動の激しかったことを想像させる。このことは、屈斜路湖の水深の最深部が湖の中央になく、和琴半島のすぐ北東

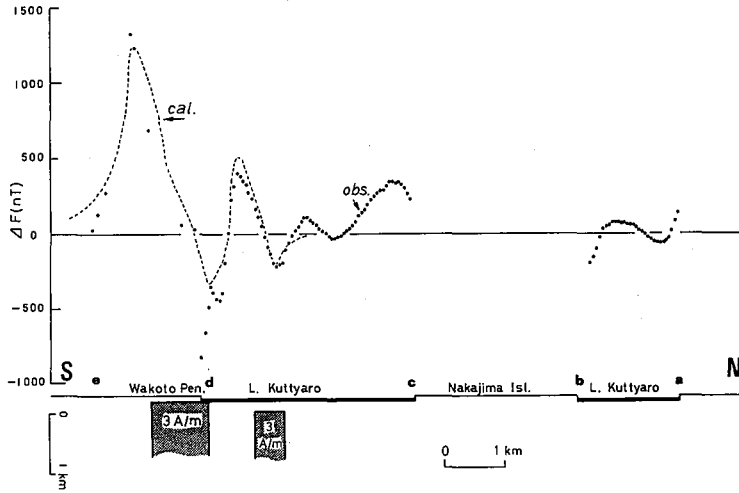


Fig. 9. Observed and calculated magnetic anomalies along the a~e profile shown in Fig. 2.

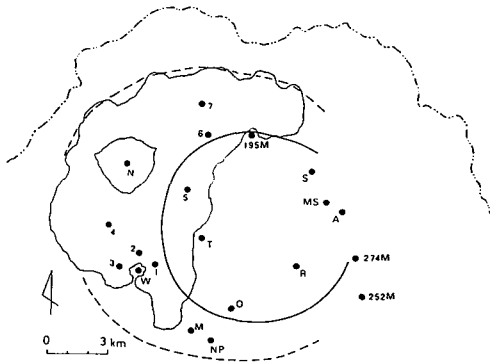


Fig. 10. Distribution of the sunken intrusive rocks (1~7) and the lave domes on land. Solid curve represents the caldera rim deduced from the magnetic anomalies while dashed one represents that deduced from the gravity anomalies. Dots-dashed curve shows the topographic caldera rim. N : Naka-jima, W : Wakoto, M : Maruyama, NP : Nupuriondo, O : Optateshuke, T : Tosamoshibe, R : Rishiri, S : Sawanchisap, MS : Makuwanchisap, A : Atosanupuri.

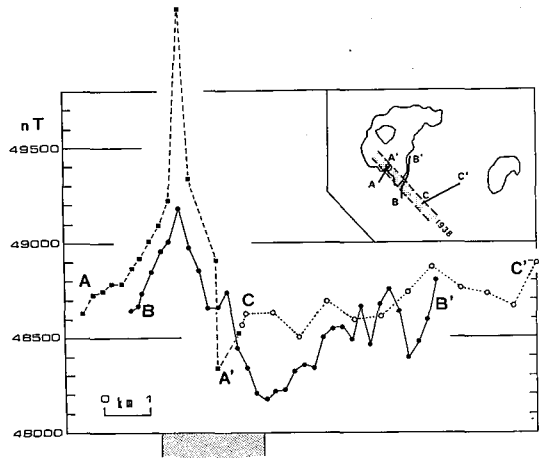


Fig. 11. Magnetic anomalies along the A-A', B-B', and C-C' profiles across a fault associated with the 1938 Teshikaga earthquake.

側に位置していることと矛盾しない。

地質調査 (例えば勝井, 1962) から得られた陸上部での溶岩円頂丘の分布および磁気異常から推定された湖底下貫入岩体の分布 (1~7) を示したものが Fig. 10 である。その分布は直径約 10 km 以内の限られた領域にあり、中央部は比較的疎であるように見える。

勝井 (1962) によると、和琴 (Fig. 10 の W), 252 M, 中島(N)の3 溶岩円頂丘は更新世に、又更新世から完新世にかけては丸山(M), ヌプリオンド(NP), 274 M, 195 M, トサモシベ(T), オブタテシユケ(O)が、そして最も新しく完新世にはリシリ(R), サワンチサブ(S), マクワンチサブ(MS), アトサヌプリ(A)が形成されている。

次章で述べる磁気カルデラ縁 (Fig. 10 の実線) を境界にして、更新世の3 円頂丘は全て外側に、更一完新世の円頂丘はその内外に別れて分布している。更に、完新世の新しい円頂丘はその内側に分布しているように見える。磁気カルデラの外側と内側の円頂丘は各々不完全環状に分布しているとみなすことも出来る。この分布形態にもとづいて考えると、湖底貫入岩体は更新世もしくは更一完新世境界に貫入してきたものと推測される。

1938 年弟子屈地震の断層に直交するような測線を3本設定し、比較的密な測定を行った (Fig. 11)。A-A' および B-B' 測線上で、断層付近に顕著な異常がみられる。一方 C-C' 測線では、地形上の制約から断層を完全に横切することは出来なかったが、特に顕著な異常は観測されない。

先に述べたように、加藤 (1938) は断層沿いに正負の異常が対をなして、細長く伸長しているとみなし、シート状マグマの貫入にその原因、ひいては地震の原因を求めている。しかし、今回湖上のデータも含めた磁気異常分布をみると必ずしもそうはなっていない (Fig. 3)。陸上のヌプリオンド(NP), 丸山(M), 和琴(W), そして湖底の1~4の貫入岩体のほぼ直線的配列が、断層と位置的に一致していることから、個々の溶岩円頂丘に起因する異常が繋がったものと見る方が妥当であろう。

この地震断層は次章で示すように、カルデラ境界と位置的に略一致している。従って、1938年の地震はかなりの程度カルデラ構造に規定されて発生したものと思われる。

V. 議 論

YOKOYAMA (1958) によって陸上および湖上 (氷上) での重力測定が行われている。その後追加されたデータも含めたブーゲー異常図を Fig. 12 に示すが、同心円状の負の異常が 45 mgal にものぼっていることが特徴である。この異常を、ロート状に分布する低密度カルデラ堆積物によると解釈し、基盤との密度差を 0.3 g/cc と仮定すると、堆積物の層厚は最大 4 km となる (YOKOYAMA, 1958)。

一方新エネルギー総合開発機構 (1985) の試錐芯密度測定結果では、各層の平均値として、第4系は 1.7 g/cc、尾札部層は 2.0 g/

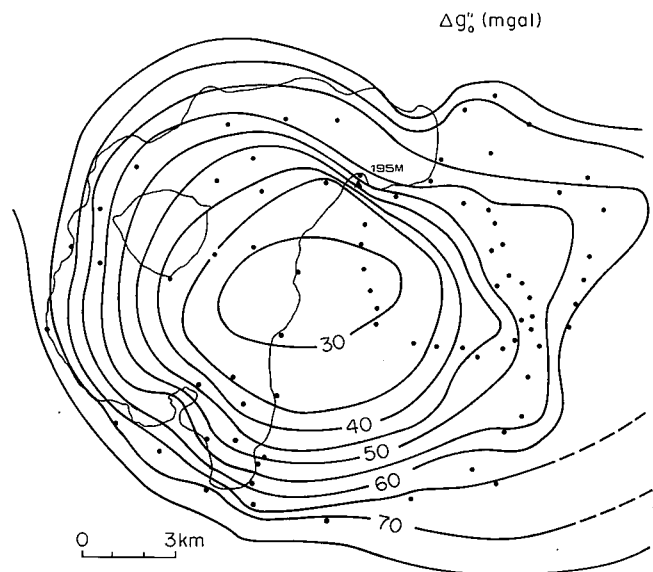


Fig. 12. Distribution of Bouguer anomalies in mgal on Kuttyaro caldera (after YOKOYAMA, 1958).

cc, 更にその下位のイクルシベ層は 2.6 g/cc という値が得られている。第 4 系と尾札部層の密度差より、イクルシベ層とその上位層との密度差の方がかなり大きいことを根拠に、大きい負の重力異常が主にイクルシベ層の落ち込み構造によると解釈して得た、イクル

シベ層上面の分布が Fig. 13 の G である (新エネルギー総合開発機構, 1985)。この場合、イクルシベ層より上位の地層の密度を一樣なものとして解析されている。この構造は、地磁気解析を行った測線 (Fig. 7) と同じ測線に沿った断面図で、先ほどの磁氣的構造 (M) と同時に示されている。この測線は低重力異常の中心部を通過していないため、基盤最深部は約 2 km と見積られている。

もし、重・磁力解析結果が完全に正しいものとすれば、G と M の間に挟まれた部分が尾札部層の分布を現すことになる。しかし、重力解析では第 4 系と尾札部層の間の密度差を無視していることや、仮定された帯磁の強さや密度差がカルデラ内に一樣に適応出来るかどうかなどの問題があり、境界面の深さについては任意性が残る。

むしろここで興味深いことは、重力異常から推定されるカルデラの大きさが、磁気異常からのそれより大きいことである。更に、重力基盤上面が 2 段階の落ち込み構造をしていて、磁気基盤の落ち込みは、その内側のそれにほぼ一致していることも興味深い。特に 195 M 山 (ニフシオヤコツ山) 付近の重力コンターは極めて密になっており (Fig. 12)、そこはまさに磁気基盤の落ち込み縁と一致している。従って、少なくともこの付近には、重・磁力異常とともに現われるような地下構造の境界が存在すると思われる。

Fig. 6 のモデル計算を参考にして描いた磁気カルデラ縁の大略を実線で、重力異常から推定されるカルデラ縁を破線で示したものが Fig. 10 である。二点鎖線で示される現地地形上のカルデラ縁は浸食や地すべり等による見掛けのものと思われるが、重力異常からのカルデラ径は磁気カルデラのそれより大きく、又磁気カルデラは重力カルデラ内の東側に偏在している。

重・磁力探査結果から得られた構造の違いが、一連の主カルデラ形成期の構造を直接反映しているものなのか、にわかには判定出来ない。重力異常にあらわれる主カルデラ内に、新たなカルデラ形成が行われ、ここで得られた磁気カルデラがそれを示している可能性もある。磁気カルデラは、位置的にみてアトサヌプリカルデラ (第 II 章および勝井, 1962) に相当するものかも知れないが、地質調査から推定されたアトサヌプリカルデラより、径が 2 倍以上大きく、難点がある。カルデラ直下に巨大なマグマ溜りの存在を積極的に主張する磁気異常が得られなかった事実も含めて、今後、今迄述べてきた知見を制約条件とするようなカルデラ形成機構の研究が重要となる。

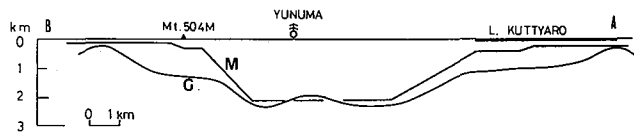


Fig. 13. Model structure along the A-B profile shown in Fig. 7. M represents the upper surface of the magnetic basement (Present study) while G represents that of gravimetric basement proposed by NEDO (1985).

VI. あとがき

屈斜路カルデラにおける磁気測量結果から次のことが明らかにされた。1) 長波長の異常は基盤、特に尾札部層の落ち込み構造、およびそれを埋めたカルデラ堆積物の分布によるものと解釈される。2) 落ち込みは南側で急であり、北側で緩い。3) 磁気異常から得られたカルデラ径は、重力異常からのそれより小さく、又前者の中心は後者のそれより東に偏している。4) カルデラ直下に巨大なマグマ溜りの存在を積極的に主張するような磁気異常は観測されない。5) 屈斜路湖上では幾つかの双極子型をした短波長の異常が観測されるが、これらは湖底下に貫入岩体の存在を示唆する。

謝辞 横山泉先生には、カルデラ形成に関する著者の目を開いていただいたと同時に、それについて様々な御教示を賜りました。記して謝意を表します。

観測の際、御協力をいただいた北海道大学工学部浦上晃一、東京大学地震研究所渡辺秀文、そして北海道大学有珠火山観測所前川徳光の諸氏に感謝します。湖上観測に際しては、ボートの使用について釧路開発建設部のお世話になりました。更に女満別地磁気観測所からは観測期間中の全磁力データを、又北海道地下資源調査所からは未公表のデータを提供いただきました。以上の機関および直接お世話下さった職員の方々に厚くお礼申し上げます。

なお、計算には北海道大学大型計算機センターの HITAC M-200H を使用した。

文 献

- FUJITA, Y., 1972. The law of generation and development of the Green Tuff Orogenesis. *Pacific Geology*, 5, 89-116.
- 加藤愛雄, 1938. 昭和13年5月29日の北海道屈斜路湖岸に発せる強震について. 地震 I, 10, 1-13.
- KATO, Y., 1940. Investigation of the changes in the earth's magnetic field accompanying earthquakes or volcanic eruptions. 2nd Report : On the strong earthquake of May 29th 1938, which occurred near Kuttyaro Lake, Hokkaido. *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., Ser. I*, 29, 315-328.
- 勝井義雄, 1958. 阿寒・屈斜路火山群. 地球科学, 39, 19-29.
- 勝井義雄, 1962. 5万分の1地質図幅「屈斜路湖」及び同説明書. 北海道開発庁, 42 p.
- KOIDE, H. and S. BHATTACHARJI, 1975. Formation of fractures around magmatic intrusions and their role in ore location. *Econ. Geol.*, 70, 781-799.
- 森 俊雄・横山 泉, 1967. 北海道東部の磁気異常 (序報). 北大地球物理学研究報告, 17, 15-21.
- 西田泰典・横山 泉, 1965. 屈斜路カルデラ内のボーリング・コアの物理的諸性質について. 北大地球物理学研究報告, 14, 53-58.
- 新エネルギー総合開発機構 (NEDO), 1985. 地熱開発促進調査報告書 No. 6, 弟子屈西部地域. 新エネルギー財団, 554 p.
- 津屋弘達, 1938. 昭和13年5月29日屈斜路地震調査報告. 地震 I, 10, 285-313.
- WILLIAMS, H., 1942. The geology of Crater Lake National Park, Oregon, with a reconnaissance of the Cascade Range southward to Mount Shasta. *Carnegie Inst. Washington Publ.*, 540, 1-162.
- YOKOYAMA, I., 1958. Gravity survey on Kuttyaro caldera lake. *J. Phys. Earth*, 6, 75-79.
- YOKOYAMA, I., 1963. Structure of caldera and gravity anomaly. *Bull. Volcanol.*, 26, 67-72.
- YOKOYAMA, I., 1981. A geophysical interpretation of the 1883 Krakatau eruption. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 9, 359-378.