

地球物理学的定点反復観測からみた1970年噴火後の  
秋田駒ヶ岳火山の地熱活動

狐崎長琅\*・村岡 淳\*\*

(2015年4月16日受付, 2015年7月31日受理)

Geothermal Activity of Akita-Komagatake Volcano after the 1970 Eruption  
Observed by Repeated Geophysical Measurements at Fixed Stations

Choro KITSUNEZAKI\* and Atsushi MURAOKA\*\*

Akita-Komagatake volcano straddles the boundary between Akita- and Iwate-prefectures in Japan. Medake, one of its central cones, erupted in 1970–71. The condition of this volcano was monitored by geophysical observations from a few years after the end of the eruption to 2013. Geo-temperature, total magnetic intensity and gravity were repeatedly measured at fixed stations distributed mainly in and around Medake. As the temperature of the 1970-crater decreased after the end of the eruption, the geothermal activity was intensified in the surrounding areas. This geothermal activity was at its peak around the 1977–79 period and decreased gradually to about 1995, and then the geothermal zones almost diminished to a very small area. The activity, however, re-started to intensify in about 2006, and has been extending to the eastern side of Medake to date (2014). The maximum temperature at 1 m depth in the thermal zones is about 95°C, which corresponds to the boiling point of water at the elevation of the site (about 1500 m). Changes of the total magnetic intensity and the gravity were conformable with that of the thermal activity. The gravity increased and decreased with diminishing and intensifying of the geothermal activity, respectively. Model analyses suggest that these variations are due to the change of underground temperature nearly below the boiling point. The change of the magnetic field is considered to be caused by the variation of remnant magnetization, while thermal expansion affects gravity. The related behavior of pore water may also enhance the variation of gravity in some degree.

**Key words:** Akita-Komagatake volcano, geothermal activity, geo-temperature, gravity, total magnetic intensity

## 1. 序

秋田駒ヶ岳の女岳は1970年9月に突如噴火し、翌年1月に終息した。火口自体の冷却と共にその周辺域が次第に高温化し、当時その動向が注目された。その地熱活動も1977–79年頃を最盛期とし、漸次減退し、1995年頃までにはごく一部を除き、平常地温状態となった。しかし、近年2006年頃から女岳の残存高温部から地熱活動の復活の兆しが見られるようになり、2009年以後高温域は女岳山頂域の北東部から女岳の東半域へと次第に拡大し、現在(2014年)に及んでいる(付録A1参照)。

筆者らの一人狐崎は秋田大学在職時(1972–99年)以

後、学内外の人々と連携しつつ、各種観測によりこの火山の動向を見守ってきた。若干の試行後、結局は種目限定の定点反復観測に移行した。長期間維持し得たのは、地温(1975年より)、全磁力(1979年より)、重力(1977年より)の3種目である。筆者らの一人村岡は最盛期の1977年に秋田大学の卒業研究として地熱活動等の実態を調査したが、2008年以後再び本研究に参画し、主として重力観測を推進した。

観測開始以来既に約40年、本観測も区切るべき段階となった。そこで現在の視点で全体的に総括し、今後の参考に供することとする。なお、本研究のその時々成

\* 〒010-0851 秋田市手形字オノ浜 31-5

31-5 Sainohama, Tegata, Akita 010-0851, Japan.

\*\* 〒140-0001 東京都品川区北品川 1-8-20 (第2林ビル)  
総合地質調査株式会社

Sogo Geophysical Exploration Co. Ltd., 1-8-20 Kita-

shinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0001, Japan.

Corresponding author: Choro Kitsunezaki  
e-mail: kitsucho@r5.dion.ne.jp

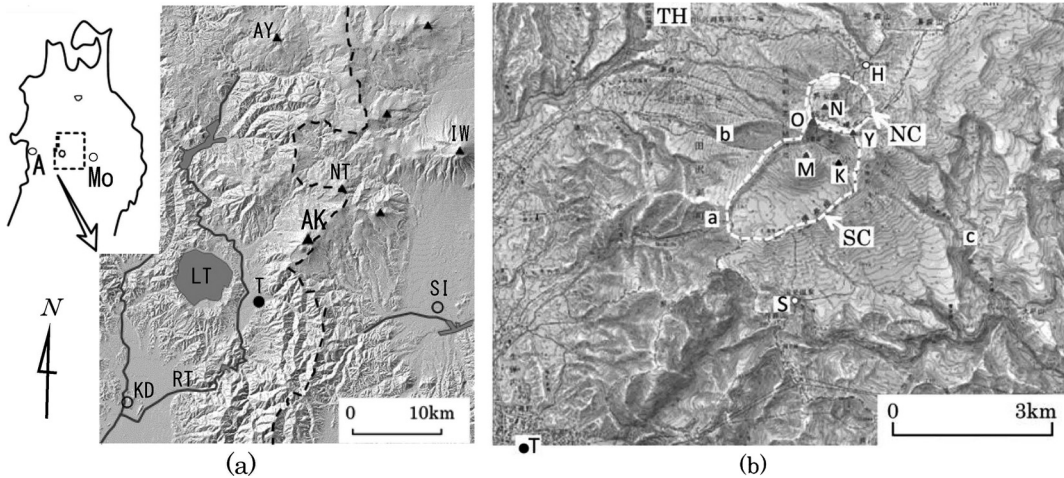


Fig. 1. Location and topography of the Akita-Komagatake volcano.

- (a) Geographical situation. A=Akita, Mo=Morioka.  
 T=Tazawako district (city hall), KD=Kakunodate, SI=Shizukuishi.  
 LT=Lake Tazawa-ko, RT=River Tama-gawa, ---=prefecture boundary.  
 ▲=Volcano: AK=Akita-Komagatake, AY=Akita-Yakeyama, NT=Nyutosan, IW=Iwatesan.
- (b) Topography. NC=North caldera, SC=South caldera. TH=Tazawako-kogen.  
 H=Hachigome, K=Kodake, M=Medake, N=Onamedake, O=Odake,  
 S=Kunimi-onsen, Y=Yokodake, a=Shirataki, b=Mizusawa, c=Arasawa.  
 T=Tazawako district (city hall).

果は、秋田大学などの身近な出版物で適宜報告されている（付録 A2 参照）。

本稿の構成について記す。まず 2 章で本火山の活動史等の概要について記し、3 章で本火山に関わる観測体勢の推移について概観する。それとの関連において、本件研究の主体である定点反復観測の意義についても述べる。その具体的な観測法については 4 章に、観測結果については 5 章に記す。着目対象は女岳域における地熱活動の盛衰で、その直接的指標は地温変化であるが、全磁力や重力もこれと整合的に変化している。その解釈を 6 章に記す。そこでの足場は、磁場変化と重力変化についてのモデル計算である。付随的事項は、7 章の議論と補足で取り上げる。全体的なまとめを 8 章に記す。図の引用資料等は付記で一括説明する。本文の流れからはみ出た補足的事項は付録に記す。個々の詳細も本稿に尽くせない。そこで関連資料への手引きの説明も付録に収録する。

## 2. 秋田駒ヶ岳の立地と活動史の概要

本火山は秋田、岩手両県の県境をなす脊梁山脈中に位置し、仙岩地熱地帯の火山群の南端を占める。その主峰男女岳（標高 1637m）を基点とすると、その西南西約 10

km に田沢湖、東北東約 20 km に岩手山がある。Fig. 1a にその概況を示す。ここでは火山として、生成年代が約 100 万年前よりも新しいもののみ図示した（年代判定は須藤・向山 (1987) に基づく）。Fig. 1b に秋田駒ヶ岳火山付近の地形図を示す。Figs. 1a, b は共通点 T（仙北市役所田沢湖庁舎）で対応づけられる。更に同図 a の AK（秋田駒ヶ岳）は b の最高峰 N（男女岳）に相当する。なお方位が明示されていない場合は、すべて上方を北とする。

Fig. 1b に示すように、本火山は南北二つのカルデラからなる（須藤・石井, 1987, p. 68）。両カルデラ縁が合体する所に男岳（標高 1623m）がある。ただし、北部カルデラについては、複数の凹地形の複合地形と見てカルデラとしない向きもある（藤縄・他, 2004）。本稿では便宜上「」つきで「北部カルデラ」の語を用いる。地形的に明瞭なのは、南部カルデラで、北東-南西方向に長い楕円形（約 3km×約 1.5km）である。単にカルデラといえ、これを指すものとする。1970 年噴火の場であり、本観測の主対象でもある女岳（標高 1513m）は、このカルデラ内の中央火口丘の一つで、男岳のほぼ南方約 500m に位置する。

本火山における 1970 年噴火以前の活動は、1932 年 7 月の水蒸気爆発である（大塚, 1932）。それにより、女岳

の南西側に更に南西方向（カルデラの長軸沿い）約600 mに亘って連なる11個の小火口列が形成された。

1932年以前の活動については確実な歴史記録は存在せず、結局地質学的情報に依存することになる。藤縄・他(2004)によると、本火山の誕生は10万年弱前の成層火山の形成開始に始まる。そして、13000年ほど前には、南部カルデラが形成された。その後しばらくは活動の場は「北部カルデラ」内であったが、2500年前頃から活動の主体は南部カルデラとなった。小岳の形成は2000年前頃に始まるようで、その最終的な活動は1100~1000年前である。女岳も小岳とほぼ同時期に形成されたようである。いずれも玄武岩からなる。ただし、1970年の女岳溶岩は安山岩であった。

本火山全体としての噴出物は多様で、安山岩や玄武岩からなる。本火山南西部の基盤は新第三系で、その主体は堆積岩であるが、火山岩も含む。南部カルデラでの基盤上面の高さはほぼ海拔1000m程度とみられる（周辺域での基盤層の露頭上限と同程度と仮定）。

1100~1000年前（BP）の基準年を通常通り1950年とすると、それは一応AD850~950年となる。その頃秋田県の日本海側では、秋田域が被災した天長地震（830）や鳥海山の噴火（871）が正史に記録されている。しかし当地はなおも関心の及ばぬ奥地であったようである。

現代の秋田駒ヶ岳の活動は約1000年の休眠後の活動のようにも思えるが、実際にはどの程度の活動なら記録に残るかも問題である。動乱の中世には歴史記録は残り難い。しかし、政治的に安定した近世（江戸時代）には、本火山の南側（国見峠）を通り南部-秋田の両藩を結ぶ正規街道も開通しており、1970年程度の噴火が見逃される余地はないが、1932年爆発程度なら、感知されないこともありうる。この爆発自体悪天候中の事象で、発生日時もやや不明確である。事後登山者が発見して話題となり、調査が及んだものである（狐崎, 2013）。登山の習慣が乏しかった近世には見逃されたかもしれない。

### 3. 本火山における観測態勢の推移

#### 3-1 全般的状況

1970年噴火以前には、不活発と見られていた本火山では定常的観測態勢は存在しなかった。1970年噴火の前兆は同年8月29日登山者によって発見された女岳山頂付近の噴気であった。その後地元の町役場や秋田大学など諸機関が現地調査をした。

東北大学は地温分布などの地表調査と共に、9月3日より田沢湖高原の駒草荘で地震観測を開始した。その観測で9月17日早朝爆発地震を検知したが、噴火自体は9月18日夜に確認された。この地震観測には欠測もあっ

たが、噴火が近づくと出現しがちなB型地震や火山性微動は全く出現せず、火山性らしいA型地震が3個だけ検出された（田中, 1971）。

噴火後間もなく、東北大学は地震計を増設し、気象庁も国見温泉などの3地点で地震観測を実施した（気象庁, 1972）。これらの観測では噴火ごとの爆発地震は多数検知されたが、火山性微動は噴火終末期にのみ出現した。A型地震は少なく、総じて爆発地震以外の地震活動はこの火山では不活発であった。

他機関による諸分野の調査も集中したが、臨時的観測態勢は噴火の終息と共に次第に解消された。

噴火終息後の数年間は主として気象庁が随時の現地調査（地表状況の観察や地温、ガス等の測定）により、火山状態の推移を追跡した（気象庁地震課・他, 1975）。火口内の最高地温は噴火終息後漸減しつつも1972年までは400℃以上あったが、1973年には200℃台にまで低下した。その頃から高温域は火口周辺に広がり、火口の北北東約150mの旧火口縁にも新噴気域が出現した。この噴気域は以後次第に拡大した。これがFig. 4のB域である。この新噴気は1972年10月3日岩手県栗石町の山岳パトロールが発見したもので、その通報により3日後秋田地方気象台が踏査した。更にその動向が注目され、翌年にも火山機動観測班が調査した。

以後も異変の通報が現地調査の契機となることがあった。遠望による異変通報は2~4月頃に多い。たまたま晴れ上がった静穏な日、立ち上る噴気が寒冷な外気で凝結し、噴煙のごとく見えることがある。その種の通報を確認するため、狐崎は同僚などと共に積雪期の女岳を調査した（1974年4月18日）。それを契機として本研究が始動した（狐崎, 1977）。

1981-82年には東北大学の地震観測点が本火山周辺域に増設され、本火山付近の震源分布も把握されるようになった。そして1997年頃までには、本火山周辺の地震観測網は一段と整備された。その一部は直接的には岩手火山の研究を目的にしたものであった。

1990年には本火山を対象として、諸大学の協同による集中総合観測が実施された。

気象庁は2003年に本火山周辺に3点の地震観測点を設置した。現在では、各種機関の諸設備を包含したかなり充実した観測網（地震、地殻変動、監視カメラ等）が構築されている。その地震データを取りまとめて気象庁が震源解析をしている。観測網や震源分布の状況は気象庁（2013, p.406-429）に図示されている。地震は本火山の山麓付近で多発しているが、中心域では比較的乏しい。

その他の随時の観測・調査については本論と関わる場合のみ以後適宜言及する。

### 3-2 本研究の立場

3-1 節との関連において本研究の立場について述べる。

女岳の地熱活動最盛期の 1977-78 年には、地震観測網は未整備であった。その頃本研究の一環として、予備的な臨時地震観測もされたが(新井・他, 1979)、定常観測網の整備と共にその必要もなくなった。その後は主軸を種目限定の長期的反復定点観測(地温, 全磁力, 重力等)に移し、一般に欠落しがちな「常時」の状況を追跡した。その際、噴火終息後の現象変化にも、噴火の予兆の手がかりが潜むと仮定した。そして時を経て、近年たまたま再高温化に遭遇した。

長期的監視を本命とする本研究では、定点反復観測を重視した。実際には地温や重力は、ほぼ恒久的に特設された地温管底や重力台上で測定された。それらの具体的な仕様については 4-1 節や 4-3 節に記す。それらの設定・維持はあまり容易ではない。数を増すにも限度があり、選択的な配置とならざるをえない。

長期的定点反復観測であることによって、見えやすくなる事象もある。女岳の近年の再高温化は、一般には地表観察から 2009 年頃に気づかれたものであるが、本観測では 2006 年にその兆しが注目されていた。

また、ある時点の観測に基づく解釈の背後には、通常他にも可能な解が潜んでいる。事象の時間的な推移を追跡することで、その解釈は検証され、また訂正の余地も見えてくる。7-1 節はその具体例である。

定常観測網が格段に整備された現在では、活動予兆の検知も期待される。しかし、長く休眠傾向にあった本火山では実活動についての経験が乏しく、多面的に見守る必要がある。本研究もその一端に寄与しうる。

## 4. 観測方式と観測点

### 4-1 地温

本定点観測は、1975 年の地温(測定)点の設置に始まる(狐崎, 1977)。気温による日変化を避けるため、地表下 1 m 深での測定とした。長期的維持のためステンレス管(地温管: 外径 19 mm, 内径 16 mm)を埋設し、地表下 1.00 m の管底で温度( $T$ )を測るようにした。初期のころ地温管には亜鉛引き鉄管を用いたが(ごく一部はまだ残存)、漸次ステンレス管に取り替えた。地表からの熱擾乱を避けるためには、管材は熱の不良導体である方が望ましいが、耐久性があって機械的に強い手ごろな非金属材料がなく、結局このような材質とした。

数日間以上の連続観測によるテストでは、この方式による地温はほとんど日変化しない。場所によっては 1°C 程度の日変化はありうるが、それは許容誤差とした。外気と通じている溶岩塊中では温度は安定せず、地温点か

ら除外した。温度計としては、当初ガラス管式の最高温度計も用いたが、後ではもっぱらサーミスタ式や白金線式の温度計を用いた。測定の際は、センサーを管底に挿入し 3 分程度以上経過して、指示値が十分安定した所で読み取るようにした。

本方式の地温測定では、実際上日変化は無視できるが、季節的变化はまぬがれない。そこで、年毎の比較においては 8 月後半から 9 月上旬にかけての最高地温期の測定値を用いることにしたが、やむを得ない若干の時期のずれは許容した。同じ季節でも気象条件により地温は年毎に若干変化する。そこで、平常地温の変化を監視するため観測行路の基点(八合目: 海拔約 1307 m)にも、地温点(No. 1)を設け、観測日ごとにその地温も測定した。その地温は、最高温期においても年により 2°C 程度変化するが、着目している地熱活動による変化はもっと大きく、特に補正処理はしていない。

地温点は女岳付近の高温域を主体として、カルデラ縁やその外側、更には山麓にも若干設定された。火山状況によって逐次設置されたため、現在では総数約 100 点に及ぶが、実際には草木の繁茂や表土の浸食、人為的土地改変等により、発見不能となったものも多い。現在掌握下にあるものは全体の半数程度で、重点的に 40 点未満ほどが随時の測定対象となっている。

### 4-2 全磁力

地温管は全長 1.10 m で 0.1 m ほどは地表上に突き出しており、地温管の上端には常時蓋が嵌め込まれている。この(ネジ込み式の)蓋つき状態を管頂として、その直上  $h$  の高さにセンサーの中心を保持し、プロトン磁力計で全磁力を測定した。 $h=2.50$  m が標準であるが、全磁力の鉛直勾配を調べるため、臨時に  $h=2.20$  m の測定を追加したこともあった。後述する気象庁との連携観測では、気象庁方式の  $h=2.00$  m の観測も補助的に実施した。平面的には磁気(測定)点=地温点であり、番号は両者共通である。因みに、地温管の蓋には測点番号(原則として設置順の通し番号)が刻印されている。地温管は非磁性のステンレスであり、地温管によって磁場が乱されることはない。

初期の全磁力測定では、鉄製地温管も残存していた。その際は鉄管を抜き取って十分隔離して測定したが、誤差が許容範囲内( $\pm 5$  nT 程度)であるように、定点保持に配慮した。

全磁力は測点を巡回して観測された。地球磁場は刻々変化する。その時間的な変化(日変化)はある範囲の領域では一定であるとみなせる。一般にこの仮定のもとに、日変化は近傍領域内の固定点における全磁力連続観測データ(モニター)を用いて補正される(狐崎・他、

1989)。このため、初期には本火山の山域内に自前の固定観測点を設置した。後では、約20km離れた東北大学岩手山観測所のデータを利用させてもらった。それが故障の際は国土地理院江刺観測所のデータで代用したこともある。ここは本火山から80kmほど離れており、数nTの誤差が生じるが、実際上あまり支障はなかった。日変化補正済みの全磁力は山腹（八合目付近）の磁気基準点（No. 76）に対する相対全磁力としてひとまず算出された。結局の関心は各点の経年的変化である。このため最終的には各点ごとに、各年の相対全磁力値を観測初年（多くは1979年）値からの差（ $\Delta F$ ）に変換した。 $\Delta F$ は相対全磁力変化であるが、文脈上語意が明解な場合は、これを単に全磁力と略記することがある。

全磁力は2003年までは秋田大学のプロトン磁力計で測定された。それ以後（2006年以後）の測定は気象庁の機器（仙台管区気象台）と実務支援による共同研究として遂行された。その際、連続観測点（モニター点）も基準点付近に設置した。それに不具合があった観測初期には、前記のごとく江刺観測所のデータを借用した。

#### 4-3 重力

経年的重力変化の観測のため、1977年に重力（測定）点を設定した。安定した定点で反復測定する必要があるため、コンクリート台を特設した。地表を掘り込んだ深さ30cmほど（以上）の穴底に礫を敷き、コンクリートを流し込んで作成したものである（狐崎・他、1989）。台面はラコスト重力計1台を乗せる程度の広さ（直径30cm程度）で、地表面よりも若干低い。常時は台面を礫土で覆って保護している。

重力点は山麓の田沢湖町役場（現仙北市田沢湖庁舎：Fig. 1bのT点）の玄関を基準点（A0）として、八合目（A1）から女岳山頂に至る登山道にほぼ沿うように設定された。当初は女岳付近に4点、カルデラ外に3点あったが、1992年に4-4節に記すように更に増設された。行程の都合上増設点は選択的に測定された。

使用された重力計はLaCoste-Romberg社のG型重力計であるが、器体自体は1998年まではG308（秋田大学）で、2008年以後はG579（総合地質調査（株））である。1999年から2007年までは重力観測は中断された。

重力計の読み値はメーカー提供の表を用いて重力値スケールのミリガル値にまず変換される<sup>注1</sup>。そして、器高、潮汐、ドリフトの補正を経て、基準点に対する相対重力値とされるまでの一連の処理は一般の重力探査と同様である（狐崎、2001、p.24-26）。器高は台面からの器

体上面の高さであるが、一般にその変化は小さく、その補正は適宜省略した。重力観測においては、ある基準点から出発し、各点を往路と復路の2度測定し、再び基準点に戻るループ方式を基本とした。所要の補正を経た後の往復測定値の平均値を以って相対重力値とし、平均値からの両値の差の絶対値を誤差とした。この誤差は通常G308では0.01 mGalほどであるが、G579では、その2倍程度かそれ以上とやや大きい。状況によっては往復の測定ができず、一回のみの測定となる場合もあった。

ドリフト補正におけるドリフト勾配は、基準点での往値と復値（器体高・潮汐の補正済みミリガル値）の差を単純に時間差で除して求めた。潮汐補正量は通常通り、地球を剛体と仮定しての理論値に、弾性体としての補正係数（G-factor=1.2）を乗じて求めた（狐崎・他、1989）。

#### 4-4 観測点についての補足

1992年に火山基本図作成のための測量が国土地理院によって実施された。これと連携し本研究企画の一貫として、火山観測用の標石（基点；bench mark）が女岳とその周辺域に設置された。新設点はK1~K9の9点であるが（Kは基点の意）、この基点網は既存の三角点（ $\Delta$ ；横岳）1点も含むので、総計10点からなる。この企画は当時の田沢湖町（現仙北市）の協力を得て実行されたもので、基点上面の銘盤には「田沢湖町」と記されている。その様式は国土地理院の四等三角点に準じており、設置法もそれに倣った。材質は炭素繊維入り強化コンクリート（CFRC）である。ただし、男岳山頂のK9のみ自然石上の銘盤である。基点の位置は火山基本図「秋田駒ヶ岳」（国土地理院、1993）に標高つきの参考点マーク（ $\odot$ ）で記入されている。K1以外の基点の近傍には、付属点として地温点（一部未設）と重力点を特設した。巡回しにくい観測点もあり、通常それらは選択的に測定されている。

Fig. 2に重力点を主体としての山域内の主要測点の分布を示す。八合目はこの図では北端の1（=A1）、C3等の測点群に相当する。ここが登山歩道の始点である。基点付属の重力点（ $\square$ ）はCを冠して呼ばれる。たとえばK2の重力点はC2である。したがって、図上ではC2=C2とみなせる。若干の地温点近傍には、重力点（ $\circ$ ）が併設されている。例えば、No. 11併設の重力点はA11と呼ばれる。Fig. 2では、表記を簡略化し、Aを省略して、単に11と記した。因みにNo. 11は地温点11でもあり、磁気点11でもある。図上では勿論A11=No. 11である。山域内での重力基準点はA1である。その近くの76（=No. 76）は全磁力基準点である。●は磁気点（=地温点）である。この種の測点は多数存在するが、Fig. 2ではNo. 76以外は省略されている。

<sup>注1</sup> この変換値と真値間には、スケール差とよばれるわずかな差が介在する。それは器体ごとに異なり、器体変更に伴う誤差が5-3節で問題とされる。

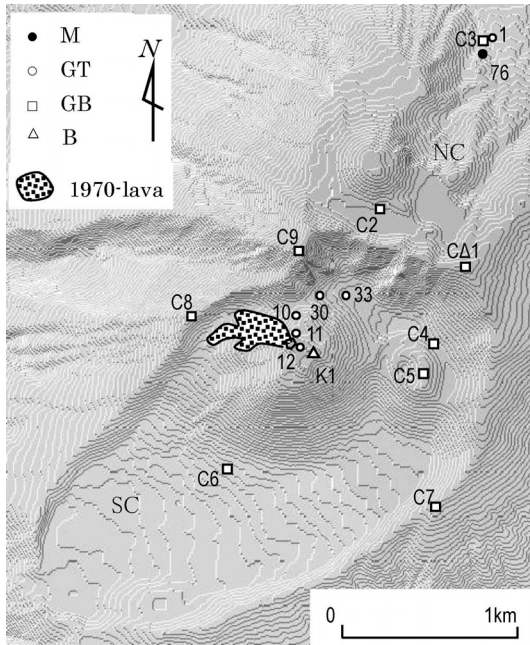


Fig. 2. Gravity stations in the main area of Akita-Komagatake. Some other points are marked for reference.  
 M=the reference point for total magnetic intensity.  
 GT=gravity station coinciding with geo-temperature point.  
 GB=gravity station coinciding with bench mark.  
 B=bench mark.

## 5. 観測結果

### 5-1 カルデラ外の全磁力と温度の変化

Fig. 3 にカルデラ外北部の相対全磁力変化  $\Delta F$  を示す。その左側に測点分布も併示する。それは八合目から阿弥陀池 (K2 はその北岸) に至る登山路沿いであるが、長年月には自然的だけでなく人為的改変も加わり、消失・変容する測点も若干あった。可能な範囲で修復したが、Fig. 3 では問題のある測点は除いた。Fig. 3 において、No. 77 が 1979 → 1988 年間に 20nT ほどのやや大きな変化をしているが (多分 No. 77 の 1979 年値の誤差による)、その後それは他点とほぼ平行にごく緩慢に (約 0.5 nT/yr) 上昇している。

なお、K2 は基点 (標石) を意味し、Fig. 2 では K2=C2 とみなせる。そこでの全磁力は標石上面中心を地温管の管頂とみなして (地温管の場合と同方式で) 測定された。これは正規地温管が喪失したための代替処置であった。

この領域では地温も安定しており、地点間の地温差は 1℃程度である。No. 1 の地温は 16℃ほどであるが、各年の気象条件により 2℃以内ほどの上下がある。

次項で取り上げる女岳域の地温や全磁力の変化に比べ

ると、カルデラ外のそれらは極めて安定している。

### 5-2 女岳域の地温と全磁力の変化

典型的帯域に区分し、女岳域の地温  $T$  と相対全磁力変化  $\Delta F$  の特徴について記す。Fig. 4 に粗破線図みで示すように、女岳山頂域の中央部を C 域、その北側を B 域、更に北側の女岳山麓を F 域とする。各領域の  $T$  と  $\Delta F$  の経年的変化を Fig. 5 に示す。その a1, b1, c1 には C, B, F の各領域の  $T$  を、a2, b2, c2 にはそれぞれの  $\Delta F$  を示す。各域ごとに左と右に、地温と全磁力の変化図 (2013 年まで) を対比している。2011 年からは若干新規の状況も見られるので (それについては本節末で注釈する)、まずは 2010 年までを前提として各域の基本的な特徴を列記する。続いて若干解説的に補足する。

[1] C 域の地温は 1978 年頃までは微増し、最高温となった後、微減から急落に転じ、1995 年頃には概ね平常地温まで低下した。これに対応し、全磁力は観測開始の 1979 年 (ほぼ最高温期) 以後、地温とは逆傾向に上昇し、1998 年頃からはほぼ一定状態となった。この温度変化は女岳のほぼ全体的傾向を代表する。

[2] B 域の地温も 1978 年頃までは微増し、それ以後低落するのは C 域と同様であるが、完全に低下しきらず、一部に高温部が残存した。2000 年にはそこで再高温化の兆しが見られたが、それが B 域の全体傾向として把握されたのは 2006 年からである。以後この再高温化は急速に進行した。1978 年以後の谷型の地温変化とは逆傾向に、全磁力は山型に変化している。その最大変化量は 430nT ほどに達する。

[3] F 域では、最高温期でも地温はあまり高まらず、C 域の地温変化の振幅を縮小したような傾向を示す。ここで特徴的なのは全磁力の変化である<sup>注2</sup>。それは B 域の山型変化に対し、谷型の反転傾向を示す。

上記 [3] では B 域と F 域の正負一對の全磁力変化に注目した。それは、北半球の中緯度帯で地磁気方向に地下物体が磁化した場合の地上の磁気異常の特徴そのものである (狐崎, 2001, p.76)。このことは、B 域付近下の地層の磁化が、温度の下降・上昇により、増加・減少することを示唆する。また、上記 [1], [2] では現象を単純化し、全磁力変化の領域と地温変化の領域は直接対応するかの如く記述したが、それは厳密には正しくなく、少々修正を要する。これらのことについて、以下で更に補足する。

全磁力の経年変化の空間的様相は、結局はある時期の全磁力分布を基準としての全磁力異常に相当する。したがって、それは一般の全磁力異常と同様な空間分布を呈

<sup>注2</sup> F 域の No. 33 は 1998-2007 年間に消滅し、簡易測量で復元された。その間の連結にやや問題を孕む。

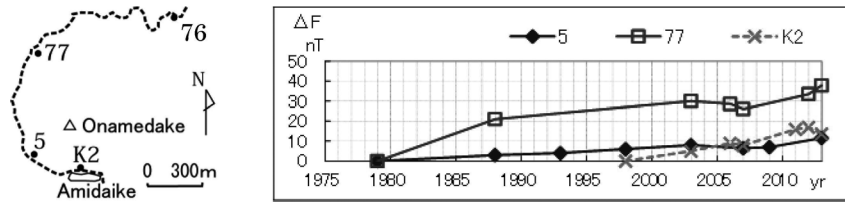


Fig. 3. Change of magnetic field in the outside of the south caldera. The observation points are shown in the left side.  $\Delta F$  = difference of relative total magnetic intensity from its initial value.

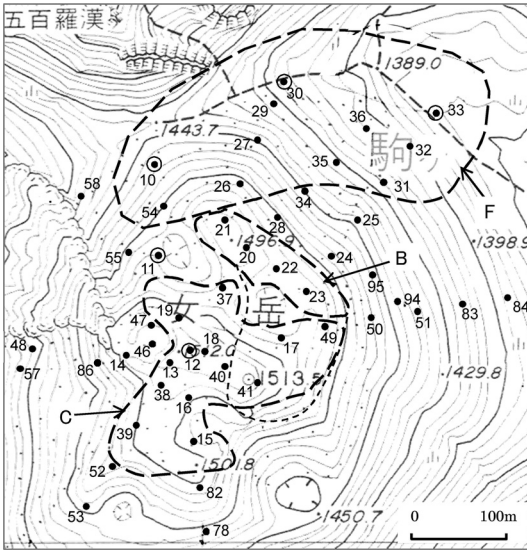


Fig. 4. Observation stations in the Medake area. The zones enclosed with broken lines (B, C and F) are referred to in Fig. 5.

- = observation point for geo-temperature and total magnetic intensity.
- = gravity station coinciding with geo-temperature point.

し、常に南北一対の正負域分布となる。異常磁化源が地球磁場方向に磁化する場合は正磁化とすると、正の全磁力異常は、異常源の直上よりもやや南よりに生じる。正異常の北側にはそれよりも弱い負異常域が現れる。磁化源が浅ければ、正異常の極値は、磁化源の直上近くに生じる。しかし、正異常の裾野は更に南側に広がる。したがって、全磁力変化のB域は、地温変化のB域よりも若干南側(地温変化のC域)にはみ出す。Fig. 4では、これを細破線で示した。したがってFig. 5において、このみだし域の測点は、地温ではC域に、全磁力ではB域に組み込まれている(No. 17, 41, 49等)。

異常磁化源が負に磁化している場合は、そっくり異常磁場の符号が逆転し、南に負、北に正の異常が発生する。

高温化による消磁は負の磁化に相当する。しかも、高温域と全磁力減少域がほぼ一致することは、その磁化源上面がごく浅いことを意味する。このことについては、7-1節で更に検討する。

B域の高温化(あるいは低温化)に対応し、全磁力がB域での減少とF域での増加(あるいはB域での増加とF域での減少)という対の分布をなすことは、磁気異常の性質をよく表している。

詳しくみると冷却過程(1979→1998年間)では、Fig. 5のC域にみる如く、磁場変化は地温変化よりも若干遅れる傾向がある。これは地下の冷却が地表よりも若干遅れることを意味する。

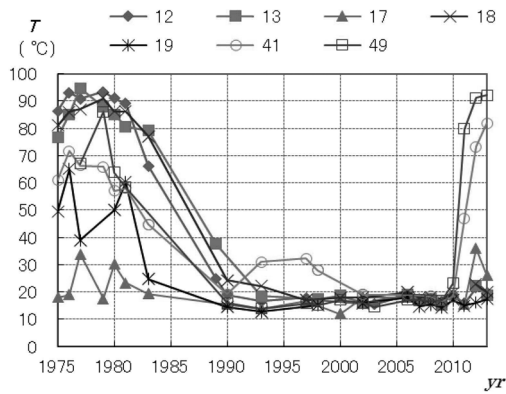
Fig. 5a1ではC域内東側のNo. 49, 41の地温が2011年頃から急に上昇している。これは、再高温化の開始後、女岳の東山腹で新高温域(付録Fig. A1bのHやG)が発生し、それが拡大してここまで波及したためである。このような地熱域分布の推移については、付録A1で補足する。

### 5-3 重力変化

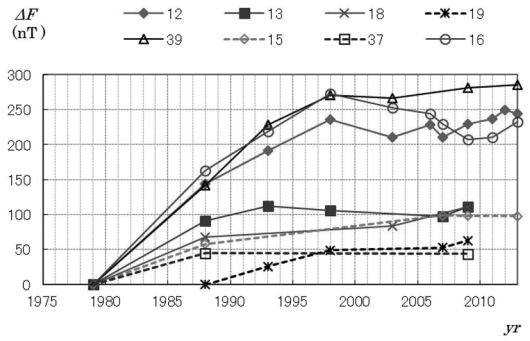
重力測定は、ほぼ最高温期の1977年に開始された。以後測定年間に疎密はあるが、2013年まで継続され、A0とA1を基準とする相対重力が求められている。5-2節で述べた地温や全磁力の変化との関連において、当面は女岳域での重力変化を重視する。標高差等による重力差をできるだけ軽減するため、まずはA1基準の相対重力を取り上げる。因みに、A0(標高約230m)を基準とするA1(標高約1307m)の相対重力は約-219mGalであるのに対して、A1を基準とする女岳山頂のA12(標高約1512m)の相対重力は約-59mGalである。

相対重力の観測初年値からの差を $\Delta g$ とする。 $\Delta g$ は相対重力変化であるが、文脈上語意明解な場合はこれを単に重力と記す。A1基準相対重力についての $\Delta g$ の経年的変化をFig. 6aに示す。観測初年の $\Delta g$ は当然0である。観測初年は多くの点では1977年であるが、1992年の点もある。

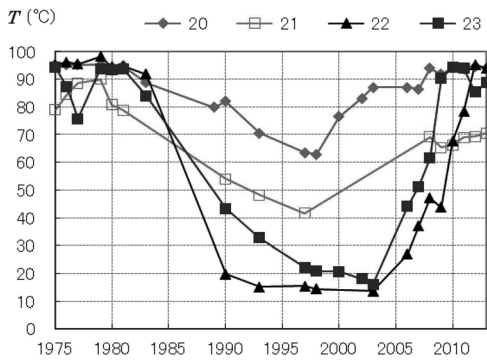
Fig. 6aにおいて、1977年から1998年にかけて女岳域



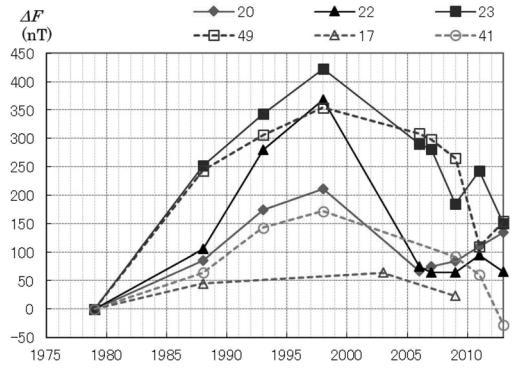
(a1) C-zone



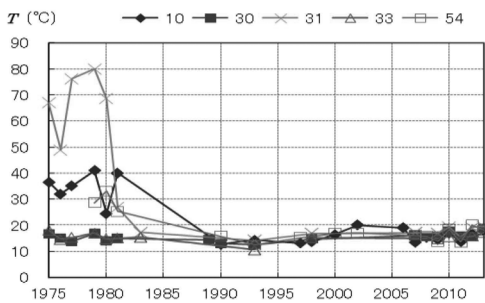
(a2) C-zone



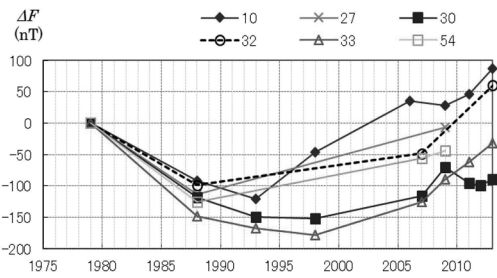
(b1) B-zone



(b2) B-zone



(c1) F-zone



(c2) F-zone

Fig. 5. Changes of geo-temperature and magnetic field in each zone.

$T$ =geo-temperature.  $\Delta F$  is explained in the caption of Fig. 3.

で顕著な系統的変化がみられる。女岳の麓から頂上へ、A30, A10, A11, A12 とたどると、変化の度合いは順次増加する。重力の経年的増加傾向は5-2節で述べた地熱活動の減退傾向と合致する。しばらくの中断後、2008年より重力測定は再開された。これによると、1998年以後女岳の重力は低下傾向にあるが、2008年以後の変化を辿る

とやや不安定である。

2008年以後は既述のように重力計も替わった。ここでのスケール差由来の誤差は検討の結果、Fig. 6aについてはほぼ無視できる程度と一応結論されたが(狐崎・村岡, 2010)、不安は残る。結局、その種の誤差を軽減するには、相対重力値を小さくすることが望ましい。また、



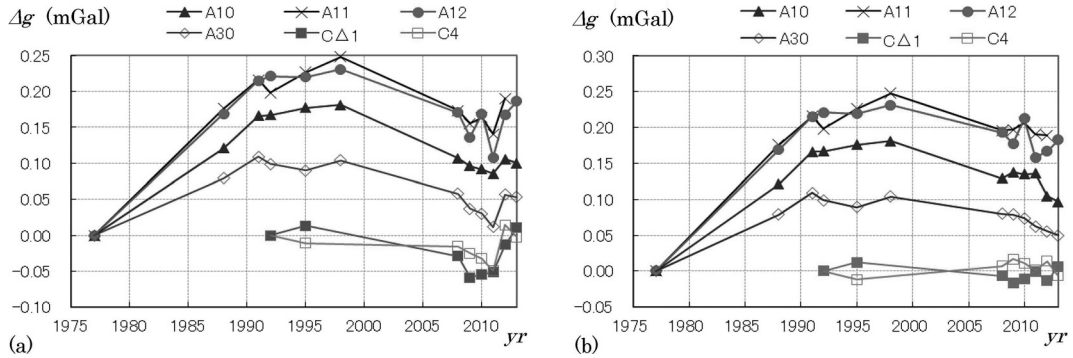


Fig. 6. Change of gravity.  $\Delta g$ =difference of relative gravity from its initial value.  
 (a)  $\Delta g$  referred to A1. (b)  $\Delta g$  referred to the mean value of gravities at C $\Delta$ 1 and C4.

やや広域な地殻変動等の擾乱を避け、女岳域での変化を引き出すためには、重力的に安定している範囲内で、基準点をできるだけ変化域に近接させた方がよい。そのためを試みとして、カルデラ縁のC $\Delta$ 1 (1583 m, -72 mGal)とカルデラ床のC4 (1365 m, -17 mGal)との平均値を基準とする新規の相対重力方式を採用した。ここで、( )内の前値は標高、後値はA1基準相対重力の概略値である。

前記の平均値を[C $\Delta$ 1, C4]と表記すると、新方式の相対重力は各相対重力値から[C $\Delta$ 1, C4]値を差し引いたものである。その際の基準点はC $\Delta$ 1とC4の丁度中間に位置する仮想的な点(1474 m, -44 mGal)となる。[C $\Delta$ 1, C4]基準の女岳域内の相対重力の絶対値は15 mGal未滿と小さくなるため、重力計の器差に由来する系統的な誤差は殆ど解消する。この[C $\Delta$ 1, C4]基準の相対重力についての $\Delta g$ を、Fig. 6bに示す。

C $\Delta$ 1, C4で重力が測定されるようになったのは、1992以後である(1998年は欠測)。この両点で測られていない場合は、[C $\Delta$ 1, C4]基準の $\Delta g$ は、A1基準の $\Delta g$ に等しいと仮定した。したがって、1977-1992年間についてはFig. 6のaとbは全く等しく、1977-1998年間についても両者の差は小さい。Fig. 6bではFig. 6aの2008年以後にみられる不規則な変化も大分減少しており、全体的に妥当なものと思われる。

Fig. 6bによると、女岳山頂のA12では、 $\Delta g$ は1977年以後1998年までに約0.23 mGal増加し、1998年以後2013年までに約0.05 mGal減少した。この重力変化は5-2節で見た地熱活動の推移と対応しており、重力は地熱活動の低下と共に増加し、地熱が高まるにつれ減少している。

## 6. 観測結果の解釈

### 6-1 全磁力変化の解釈

火山での磁場変化は、地球磁場内での温度変化による熱残留磁化の消失や獲得によることが多い。マグマの固化・冷却に伴う(キュリー点以下での)磁化はその典型で、以前は狐崎・他(1989)も女岳の磁場変化全体についてそのような見方をしていた。B域での磁場変化は非常に大きく、しかも狭い領域に集中している。そのため1970年噴火の際、B域下に薄板状のマグマがごく浅部(地表下10~20 m程度)まで貫入し、冷却したとした(狐崎, 1991)。その場合、地表に地割れや火山性ガスの噴出兆候などの異変がありそうであるが、それがなく疑問が残った。そして、一旦殆ど冷却した後に、そこが近年再高温化した。上記の異変や地震もなく、再度マグマが貫入したとすることには無理がある。

本研究と連携した秋田大学卒業研究(多田, 1975, p.29, p.40)によると、1970年溶岩の自然残留磁化(=熱残留磁化)は平均14 A/mで、女岳の全体的磁化約10 A/mとほぼ同程度であった。後者は地表上約2.3 mの全磁力異常分布(実測値)と山体が一様に磁化した場合の計算値との対比により求められた。誘導磁化は自然残留磁化の1/10以下で、当面は無視する。前述の「貫入仮説」ではこの10 A/mほどの磁化変化がそのまま生じるとした。

しかし、その10%ほどの磁化変化(1 A/m程度)なら、地表の温度変化に見合う程度の比較的小幅な地下温度の変化でも生じそうである。そこで1978-1998年間のB域-F域1対の全磁力変化を主対象として、モデル計算により地表上2 mの全磁力異常を算出してみた(狐崎, 2012)。

磁場変化の源をなす磁化体として、B域の地表下ごく浅部を頂面とする高さ220 mほどの台形状立体を設定し

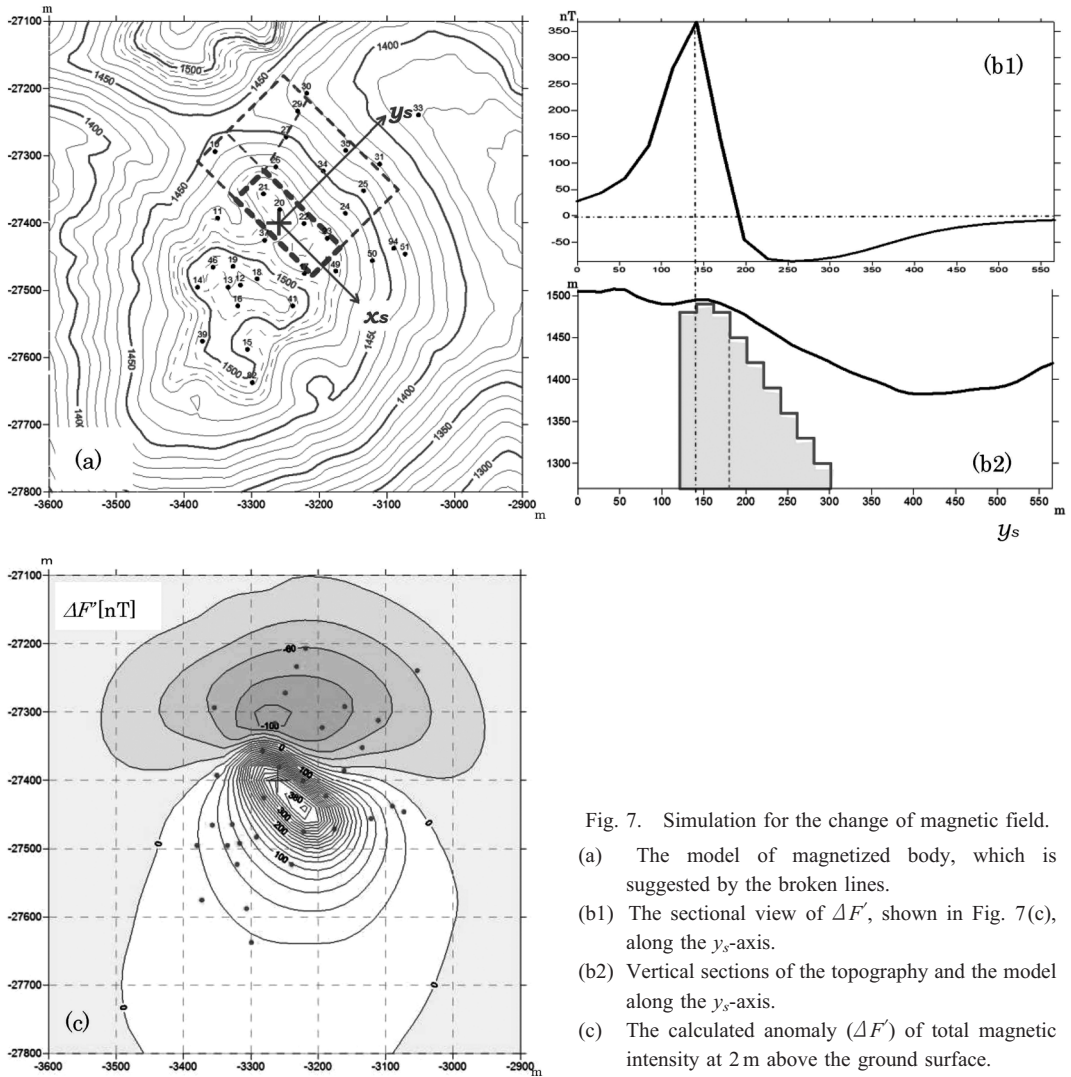


Fig. 7. Simulation for the change of magnetic field.  
 (a) The model of magnetized body, which is suggested by the broken lines.  
 (b1) The sectional view of  $\Delta F'$ , shown in Fig. 7(c), along the  $y_s$ -axis.  
 (b2) Vertical sections of the topography and the model along the  $y_s$ -axis.  
 (c) The calculated anomaly ( $\Delta F'$ ) of total magnetic intensity at 2 m above the ground surface.

た。磁化体は冷却の際の磁化増加に相当する。全磁力変化の正值は狭いB域に強く集中し、負値は広くF域に分布する。この条件を満たすため、磁化体の頂部は狭く浅く、底部は深く広くした。

磁化体モデルの形状を、Fig. 7aの女岳の地形図上に、破線で概念的に示した。頂部（太破線矩形域）は60m×160m、下底（細破線矩形域）は180m×240mでSE方向( $x_s$ )に長い。その標高は地表下数m程度である。その概形を表すため、Fig. 7b2に、NE方向( $y_s$ )の断面（地表と磁化体）を示す。その上図(b1)は同一断面上の全磁力異常分布である。磁化モデル座標( $x_s, y_s$ )の原点は、( $x, y$ ) = (-3260 m, -27400 m)の点で、Figs. 7a, cでは、これを十印で示した。なお、( $x, y$ )は平面直角座標X系

(JGD2000)の座標値であり、東方向を $x$ 、北方向を $y$ とする。Figs. 7a, cの縦横の座標軸値はこの $y, x$ のm単位値である。磁化体モデルは( $x_s, y_s$ )座標系に基づく1辺20mの柱状体の集合である。算出点の格子間隔( $x, y$ )も20mである。標準磁場は偏角=8°(西偏)、伏角=53°とした。磁化体の磁化はこれと同方向で1 A/mの強さを持つとした。磁化体の基本的な形態はFig. 7b2から汲み取れる。各柱状体の高さは地表につき出さない様に調整されたので若干不規則である。その詳細値は狐崎(2012)の表A1に記した。

上記モデルによる全磁力異常( $\Delta F'$ )の分布をFig. 7cに示す。これはほぼB域とF域に相当する正負一対の場からなる。その $y_s$ 軸沿いの断面をFig. 7b1に示した。

正の極値は約400nT、負の極値は約-100nTである。これらはFig. 5における1998年頃のB域、F域の $\Delta F$ に対応する。この全磁力変化の符号を反転すると、減磁期の全磁力変化となる。これは1998頃を基準として的高温期(1979年頃あるいは2013年頃)の $\Delta F$ の変化分に相当する。 $\Delta F$ の正の頂域はB域よりも20~30mほど南西に偏している。このことなどモデルには更に調整の余地があるが、計算結果と観測結果はほぼ調和する。

B域にはC域下の磁化変化の影響も若干及ぶが、C域は非地熱域の旧火口を挟んでB域から隔離されており、その影響は比較的小さいとみて無視した。2011年以後はFig. A1bのG域やH域の高温化が顕著になるが、それらのB域中核部への影響は位置関係からみて無視できる。ただし、G域やH域自体の全磁力変化については、観測が十分及んでおらず、深くは立ち入れない。

多田(1975, p.59-102)は1970年溶岩(安山岩)についての(自然残留磁化)熱消磁試験も実施した。それを再編した熱消磁特性図は狐崎(2007, 2012)に掲示されている。それによると、室温→200℃程度の加熱で、磁化は100℃につき10%ほどの割合で減少する(5試料の平均的傾向)。地球磁場中の冷却では、可逆的に磁化するものと仮定する。そして、女岳の対象領域がこれと類似の磁化特性を持つなら、100℃の温度変化で1A/mほどの磁化変化が生じることになり、全磁力変化の推移を全体的に説明できる。

ただし、女岳は7個ほどの小火口を持つ火砕丘で、その磁氣的構造はまだ十分解明されていない。1970年溶岩の岩質も女岳の主体(玄武岩)とは若干異なる。

噴火終息後、火道に貫入したマグマは火口からの放熱や周囲への伝熱によって次第に冷却し、周辺域は逆に高温化した。したがって、しばらくは火道の磁化と周辺域の消磁とが同時に進行した。C域の火口近傍は両効果の影響を受けた。しかし、全磁力観測開始の1979年頃以後1998年頃までは全体的に冷却過程に入り、火道もC域も磁化が進行し、C域の $\Delta F$ が高まった。その磁化機構は基本的にはB域と同様である。

## 6-2 重力変化の解釈

磁場異常は重力異常よりも短波長成分に富み、局地性が強い。このため磁場変化については、Fig. 7の如く特定域に着目したモデル化も一応許容される。しかし重力変化については、高温域全体として考察の方がふさわしい。

重力変化(Fig. 6)の様相はFig. 5のC域やB域の温度変化の様相と対応する。すなわち低温化と共に重力( $\Delta g$ )は増加し、高温化につれ減少する。特に1977-1998年間については、そのことは明確である。地熱活動と重力変

化をつなぐ機構としては、まず地層の熱膨張効果が考えられる。この問題については、狐崎(2015)が熱膨張モデルを提案し、解析している。以下ではそれに基づいて(a)、(b)2項に分けてその要点を記し、(c)で考察する。

(a) **基本モデル**。熱膨張モデルにおいては、状況を大幅に単純化し、大地を均質等方な半無限弾性体とし、地表を自由面とする。そして、地下のある領域の温度がその外部領域に対して、 $T$ だけ高まったとする。外部領域の温度は常に一定(基準温度)に保持されているとする。温度 $T$ の高温域(熱域)は熱膨張し、地表面も変位する。その鉛直変位を $h$ とする。

熱域を微小な熱膨張要素の集合とみなすと、各要素は各々の外部に対して圧力源として機能する。因みに、その機能は茂木モデル(萩原, 1977; Mogi, 1958)の圧力源球と基本的に同等である。熱域全体による $h$ は各要素による $h$ の総和として求められる。

熱域として半径 $a$ の垂直な円柱域を想定する。(地表面からの)その上面の深さを $D$ 、下面の深さを $D+Z$ とする。円柱域中心軸上の地表点をO点とする。 $D=0$ の場合、O点での $h$ は次式で与えられる:

$$h=2(1+\nu)\alpha aT[1+Z/a-\{1+Z^2/a^2\}^{1/2}] \quad (1)$$

ただし、 $\alpha$ =線膨張率、 $\nu$ =ポアソン比である。

ここで円柱域が下方に無限長( $Z=\infty$ )なら、

$$h=2(1+\nu)\alpha aT \quad (2)$$

重力変化 $\Delta g$ は地表面(つまり重力観測点)の高さの変化による成分(フリーエア効果) $\Delta g_F$ と、それ以外の変化分(質量分布の変化等による) $\Delta g_0$ とからなる:

$$\Delta g=\Delta g_F+\Delta g_0; \Delta g_F=-Fh \quad (3)$$

ここで

$$F=\text{フリーエア係数}=0.3086\text{ mGal/m}, h=\text{隆起量 [m]}$$

である。当面の熱膨張の場合は膨張源内の質量の変化がなく、

$$\Delta g_0=0, \Delta g=\Delta g_F=-Fh \quad (4)$$

重力点は十分配置されておらず、重力変化の面的分布を論じることにはできない。そこで、変化が最も顕著な女岳山頂のA12(A11の変化もこれとはほぼ同等)に着目し、A12を重力変化域の中央点Oとみなす。地熱活動最盛期(Fig. A1a参照)には火道の熱は周辺域に広がっていたはずで、それを等価的に半径 $a$ の垂直円柱状とみなす。重力測定開始の1977年はほぼその時期であった。そして、1998年頃にはほぼ平常地温まで冷却した。この間の

温度変化を  $T$  とする。  $a$  や  $T$  は全高温域を包括した（等価的）実効値である。この前提の下に下記の①のごとくパラメータを仮定し、(2), (4) 式により②の如く  $O$  点での  $h$  と  $\Delta g_F$  を求めた：

$$\textcircled{1} \quad a=200 \text{ m}, T=-100^\circ\text{C}, \alpha=1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}, \nu=0.3$$

$$\textcircled{2} \quad h=-0.52 \text{ m}, \Delta g=\Delta g_F=0.16 \text{ mGal}$$

因みに①の  $T$  は高温→低温の温度変化であるため、特に負値とされている。

**(b) モデルの拡張.** 女岳とその付近は火山砕屑物、溶岩層、貫入岩などからなり、総じて間隙（亀裂を含む）に富むように思われる。間隙は水で満たされていることが多い。狐崎 (2015) は地層全体をごく大まかに間隙率  $\phi$  の均質等方な水飽和多孔質媒質とみなし、間隙水の影響を近似的に見積もった。以下では細部の条件や式過程は省略し、その論理の大局と結果のみ記す。

水飽和多孔質媒質は固体物質で構成された骨格と間隙を満たす流体からなる。以下では当初の前提である弾性体をこの水飽和多孔質媒質に置き換える。その間隙は流通的（開放性）で、このため骨格が歪んでも流体圧は変化せず、骨格は間隙水とは独立に弾性体として挙動すると仮定する。また、温度は水の沸騰点を越えない、と仮定する。結局、(2), (4) 式の  $h$  や  $\Delta g_F$  は、そこでの  $\alpha, \nu$  を骨格の量とみなせば、そのまま成立する。

(4) 式の  $\Delta g_0=0$  は、熱域（圧力源域）内の質量の不変性を前提としたものである。水の体膨張率  $\beta_f$  が骨格の体膨張率  $\beta_b (=3\alpha_b)$  よりも十分大きい場合、余分の膨張分は熱域から流出し、熱域内の質量は減少する。熱域外に流出した水は拡散・冷却し、熱域外は恒常的に基準状態を維持するものと仮定する。この熱域内の質量減少により  $\Delta g_0$  が生じる<sup>注3</sup>：

$$\Delta g_0/\Delta g_F = A(1+B); \quad (5a)$$

$$A = (\pi G \rho_f F) \{ \phi \beta_f / [\alpha_b (1 + \nu_b)] \}; \pi G \rho_f F = 0.0679 \quad (5b)$$

$$B = 2(1 - \phi)(1 - 2\nu_b)\alpha_b / [(1 - \nu_b)\phi\beta_f] \quad (5c)$$

$F$  はフリーエア係数、 $G$  は万有引力定数で、 $\rho_f$  は水の密度 ( $1.00 \text{ g/cm}^3$ ) である。ここでの  $\alpha_b, \nu_b$  は骨格の膨張率とポアソン比であるが、固体物質自体の  $\alpha, \nu$  と等しいと仮定し、前記の①の数値をそのまま用いる。したがって②の  $h$  値や  $\Delta g_F$  値はそのまま通用する。更に、 $\phi =$

<sup>注3</sup> (5a, b, c) 式は、骨格の体積弾性率が構成固体物質のそれよりも十分小さいとしての近似式である。また熱域内では、骨格の膨張と共に拘束圧も強まり、 $\phi$  が変化する。  $B$  はその  $\phi$  変化の影響を表す。

0.15 と仮定し、 $\beta_f = 5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$  (20~100°C 程度の平均) を用いると、

$$A=0.392, B=0.13, \Delta g_0/\Delta g_F = 0.44 \quad (6a)$$

$$\Delta g = \Delta g_F(1 + \Delta g_0/\Delta g_F) = 0.16 \times 1.44 = 0.23 \text{ mGal} \quad (6b)$$

**(c) 補足的考察.** 上記 (6b) 式値は、Fig. 6b における 1998 年頃の A12 の重力変化 0.23 mGal に合致する。しかし理論モデルにおいては、状態はかなり単純化されている。仮定値は概ね常識的であるが、任意性がある。  $\Delta g_0$  を支配する間隙水の実情も不明で、浅部まで帯水という条件も保障しがたい。この種の諸仮定に関わる問題は、狐崎 (2015) で検討されている。それらには  $|\Delta g|$  の減少につながるものもあるが、若干増加の余地を残すものもある。結局、(6b) 式の数値は予察的参考値に留まるが、重力変化の原因としての熱膨張効果の実効性を示唆する。

これまでは、熱域内でも水は液相であることを前提とした。しかし、1977 年段階では火道内はなお高温で、水蒸気が蓄積し低密度の圧力源となるような部分もあったかもしれない。また高温の熱域内では蒸発が強まり、水の質量が減少することもあり得る。これらはいずれも  $\Delta g$  を増幅するように働く。1977-1998 年間（前期）の重力変化には、この種の熱効果も若干加勢しているかもしれない。

1998-2013 年間（後期）の  $\Delta g$  の変化分（絶対値）は、A12 で約 0.05 mGal である。これは前期の約 1/5 である。このことは、2013 年段階での高温域主部が A12 から離れていることや、熱活動自体が 1977 年段階よりも弱いことによるだろう。

## 7. 議論と補足

### 7-1 全磁力異常分布と地温分布の地形的特徴

狐崎・他 (1989) は女岳域の相対全磁力分布図を提示した。岡崎・他 (1990) は、女岳域において地上 3 m で全磁力測定を実施し (1983-85 年)、地球標準磁場を基準とする全磁力異常図を作成した。両者は基本的に類似するが、後者は前者の測点の一部をも含み、更に緻密で領域も広い。ここでは次のような特徴が目立った。

① 全磁力異常の大局的様相は女岳の山頂域から南麓にかけては正で、北麓では負である。これは主として女岳山体の正磁化による局地異常を表す。

② 更に局所的な異常も重なる。特に、Fig. 4 の B 域に相当する狭い領域に強い正異常が見られ、それに隣接する南西側 (B 域と C 域との中間域にほぼ相当) には相対的負異常が見られる。それぞれ  $P_B, N_B$  と仮称する。

岡崎・他 (1990) は上記①については、女岳山体を一

様磁化の円錐台で近似して算出した全磁力異常と、観測異常とを対比して、女岳山体の平均磁化を7 A/mと算定した。これは筆者らが採用している10 A/mよりは小さいが、両者に大差はない。

上記②を説明するため、彼らは $N_B$ 域下に消磁体を想定し、それは1970年噴火の際に貫入した高温岩体を中核とする熱消磁域であるとした。ここは北西-南東に連なる二つの旧火口からなる凹地帯である。上記貫入岩体の上面は深さ10 m程度でごく浅い。この点については筆者らの見解は異なる。そのことについて以下に記す。

岡崎・他(1990)は「狐崎・他(1989)は本論のダイク(貫入岩体)の位置に局所的な全磁力異常の増加を見出した」という趣旨の記述をしているが、それは誤認で、全磁力異常が増加しつつあったところは、既に見たように旧火口縁の $P_B$ 域(B域)そのもので、 $N_B$ 域ではない。なおこれまで、 $N_B$ 域下の旧火口底自体では地熱活動は見られず、その直下浅部に高温体貫入の気配はない。

貫入岩体の論拠には、そこが高重力異常と見られたことも重なる。ここにも若干議論の余地があるが、細部に及び過ぎるので深く立ち入らない。

②の局所異常は結局は浅部磁化の不均質性に起因する。旧火口底は比較的浅い凹地である。深かった原火口が低温時の崩落により二次的に埋積されたとすると、埋積層はランダムな磁化の集積となり、実効的には消磁層を形成し得る。更には、 $P_B$ 域下の磁化が局所的にやや強ければ、それも加勢効果を生む。結局、 $N_B$ 域直下への高温岩体の貫入という仮説は必須ではない。この貫入仮説は、冷却過程の磁場変化を追跡することで検証できるはずのものであるが、本研究の磁気測点は $N_B$ 域では乏しく、その面には対応できない。

これとは別に狐崎・他(1989)や狐崎(1991)でも一旦はB域下浅部へのマグマ貫入を想定したが、現象の推移全体としては矛盾があるため、本稿ではそれを放棄した(6-1節参照)。

一般に、地温は旧火口底(凹地)では低く、旧火口縁では高い。これを次のように解釈する。相対的に低所の旧火口底には、周りの旧火口縁から雨水が流入するし、雪も吹き溜まる。その冷水は透水性の旧火口内に入り込み、比較的深くまで冷却する。その浸透水は深部からの熱で加熱され、熱水や水蒸気となって対流的にその周囲から上昇し、旧火口縁を高温化する。あるいは横に流れ出て、山腹も若干加熱する。

## 7-2 地殻変動データ

重力データは本来標高データを伴うべきである。しかし、山上でのその観測は実際当初は困難であった。その不足を補うため、既存の空中写真から高度変化を読み

取ることも試みた(狐崎・村岡, 2010)。実作業は1989年頃専門会社に委託した。写真上で判読しやすく且つ安定した目標物(大岩塊など)を現地で多数選定し、それについて計測した。結局、使える写真は1973年と1988年の2組だけであった。1973→1988年の高度変化は女岳の麓では殆ど0 mで、女岳山頂域では-0.3~-0.5 mであった。機器上の公称精度は0.15 mで精度は乏しいが、この間に火口周辺では一応0.4 m程度沈降したことになる。噴火終息後は火口周辺では火口の冷却による沈降と周辺域の高温化による隆起とが相殺し、1973年頃から地熱最盛期の1977年頃までは、高度変化はなかったとすると、1977→1988年の沈降も0.4 mほどとなる。これは、6-2節の②の $h$ に基づく1977→1988年間の約0.5 mの沈降とはほぼ調和する。

今では人工衛星技術による地殻変動観測が普及しているが、本稿で特に重視した1980年代以前には、それは実用域に達しなかった。4-4節で述べた基点網において、1993年にGPS測量も試みられたが(中井・他, 1994)、継続できなかった。近年本火山でも気象庁はGPS観測を拡充しており、今後その成果が期待される。

近年干渉SARの活用が成果をあげている。干渉SAR解析は同一衛星・同一軌道のある2時期に撮像されたSARデータの位相差を計算し、その間の地殻変動を検出する技術である。国産のSAR衛星は1992年4月-1998年10月(① JERS-1衛星)と2006年1月-2011年4月(② ALOS衛星)に運用されている。①は女岳での重力変化の停滞期に相当し、不向きである。安藤(2013)は②のデータを用いて、諸火山の変動を解析した。本火山では2007年10月14日-2010年9月6日について解析しているが、ノイズレベルを越える明確な変動は見出されていない。

Takada and Fukushima(2013)は東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日)前後の②のデータを用いて、その地震に伴い顕著な地殻変動が東北の諸火山域で発生したことを示した。それによると本火山の中央域は山麓域(A0付近)に対し、相対的に数cm程度沈降したようであるが、それに直接対応する重力変化は明確には認められなかった。注目すべき重力変化はA0-A1の間域において(ここにも重力点を漸次若干設置した)、2011年7月と2012年7月の観測間で見られたが、この間には重力計の修理という問題も介在し、現象を十分確認できなかった。結局はこの種の由来の不明解な変動をノイズとみなし、その影響を避けるため着目対象を女岳域の重力変化に限定し、基準点も可能な限りこれに近づけた。その結果がFig. 6bである。

## 8. 総括と結論

[1] 本研究では秋田駒ヶ岳において、1970-71年噴火後の火山状態の推移を地球物理的諸観測によって追跡した。主たる足場は定点反復観測であり、1975年から地温、1977年から重力、1979年から全磁力の観測が開始された。観測は2013年までは続行されたが、観測年間隔は状況により一定ではない。

[2] 1971年の噴火終了後、火口の冷却と共にその周辺域が広く高温化した。その地熱活動は1977-78年頃を最盛期として漸次縮小減退し、1995年頃には概ね平常地温となった。しかし、2006年頃より地熱残存部から復活し、地熱域は女岳の東山腹の新規領域に拡張し、現在(2014年)に至っている。この地熱活動と調和的な変化が全磁力や重力においても観測された。それらの変化は温度による地層物質の磁化変化や熱膨張等に由来するものと解釈された。その際の温度変化域は山体の比較的深部から浅部にまで及ぶが、高温期でも温度は概ね水の沸点未満であるとしてほぼ説明できる。結局、女岳域における磁場変化の原因として、(1970年火口以外では)ごく浅部へのマグマの直接的貫入を想定する必要はない。

[3] 噴火終息後の地熱活動の活発化は、火道等に残存したマグマの放熱によるもので、そこには間隙水の対流等が関与したものである。近年の再高温化は、深部からの熱水(気相や液相)の上昇によるようで、直接マグマが上昇・接近した兆候は今の所みられない。この面の監視は一段と整備された観測網に期待されるが、現象がどのように出現するかは本火山では経験則が乏しく必ずしも定かではない。多方面からの重層的監視が必要である。ここでは、本研究の経験も生かされる余地がありそうである。また、従来の異常探知が常にそうであった如く、山になじんだ地元のみも今後なお貴重である。

## 謝 辞

本研究の多くは、狐崎が秋田大学在職中(1972-99)学内外の人々と協働して遂行したものである。その主要部は学内外の出版物で随時報告されているが、秋田大学鉱山学部鉱山地質学科の卒業論文や修士論文に留まっているものもある。本研究ではそれらも参考にした。協力して下さった当時の同僚、学生、院生等関連の方々にはご苦勞をおかけした。当時の同学科教授故乗富一雄先生には懇切に指導していただいた。その頃、田中和夫氏(元弘前大学)には情報交換等のご厚誼を得た。三品正明氏(元東北大学)には岩手山観測所の全磁力データを提供していただいた。岡崎紀俊氏(北海道立総合研究機構・地質研究所)にも当時の関連研究について教えていただいた。

現地観測においては当時の田沢湖町(現仙北市)消防分署長の故田口良平氏に何かとお世話になった。その後任でもあった難波和夫氏は今日まで引き続き支援して下さる共に、自ら地温も測定し、また観測写真も提供して下さった(1995年以後の地温データの多くは同氏の測定による)。なお、1992-93年の地温データは水沢高校地学部から提供された。2006年以後の全磁力観測は、気象庁仙台管区気象台の巻和男氏や越後覚氏等のご配慮で同庁の実務支援による共同研究として実施された。近年の現地観測では長崎康彦氏(現中部電力(株))、加藤努氏((株)ソフテック)、石井英二氏(ジオテックコンサルタンツ(株))等の秋田大学卒業生のご協力を得た。須藤公也氏(Terra Australis Geophysics Pty Ltd)からは英文表現等について貴重な助言を得た。

船木實氏(元国立極地研究所)には岩石試料の磁気試験で、また気象研究所の鬼澤真也氏・安藤忍氏らには別種重力計による現地観測でご面倒をおかけしたが、それらの結果を十分生かすに至らなかった。前記安藤氏にはSARについて、また地質については林信太郎氏(秋田大学)に教えていただいた。植木貞人氏(元東北大学)は地震観測等の情報を提供して下さると共に、ていねいに原稿を閲読して下さった。横山泉先生(元北海道大学)からは本研究の過程でいろいろ貴重なご意見をいただいた。

長期の観測では、仙北市や旧田沢湖町の防災担当者など、多くの方々にお世話になった。一々記名しきれず、関連報告に記名済みのの方々や古い時期の方々、概ね割愛した。それらの方々も含め、改めて皆様のご好意・ご協力に感謝します。査読者(藤田英輔氏と匿名1氏)と編集担当の小園誠史氏の助言により本稿を改善した。記して謝意を表します。

## 引用文献

- 安藤 忍(2013) SAR干渉解析による全国の火山の地殻変動監視と検出された火山性変動。気象研究所技術報告, **69**, 65-88.
- 新井都生・狐崎長琅・長谷川武司(1979) 秋田駒ヶ岳における震学的調査(序報)。東北地域災害科学研究, **15**, 50-53.
- 藤縄明彦・巖崎正幸・本田恭子・長尾明美・和知 剛・林信太郎(2004) 秋田駒ヶ岳火山、後カルデラ活動期における噴火史: 火山体構成噴出物と降下テフラ層の対比。火山, **49**, 333-354.
- 萩原幸男(1977) 伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化。地震研究所彙報, **52**, 301-309.
- 気象庁(1972) 秋田駒ヶ岳噴火活動調査報告(1970年9月-1971年1月)。気象庁技術報告, **79**, 137p.
- 気象庁(2013) 日本活火山総覧(第4版)。気象庁, 1498p.

気象庁地震課・仙台管区気象台・秋田地方気象台・盛岡地方気象台(1975)秋田駒ヶ岳の噴火終息後の表面現象(1971年10月-1975年2月). 験震時報, **40**, 73-80.

狐崎長琅(1977)秋田駒ヶ岳火山における地温観測. 秋田大学鉱山学部地下資源研究施設報告, **44**, 38-52.

狐崎長琅(1991)秋田駒ヶ岳火山, 過去と現在. 秋田大学鉱山学部, 「鉱業博物館」, **23**, 1-27.

狐崎長琅(1996)秋田駒ヶ岳火山1970年噴火の地球物理学的余効現象とその近年の傾向. 東北地域災害科学研究, **32**, 311-320.

狐崎長琅(2001)応用地球物理学の基礎. 古今書院, 297p.

狐崎長琅(2007)秋田駒ヶ岳火山近年の火山状態の推移. 東北地域災害科学研究, **43**, 77-82.

狐崎長琅(2012)秋田駒ヶ岳火山の観測と火山状況. 東北技術だより, **26**, 21-30, 仙台管区気象台.

狐崎長琅(2013)秋田駒ヶ岳火山1932年爆発の体験情報. 東北地域災害科学研究, **49**, 5-10.

狐崎長琅(2015)熱膨張源による地盤変動と重力変化. 物理探査, **68**, 213-224.

狐崎長琅・村岡 淳(1979)秋田駒ヶ岳火山における地温観測(1977-1978年)と放熱量の試算. 秋田大学鉱山学部地下資源研究施設報告, **45**, 158-168.

狐崎長琅・菊池真市(1988)秋田駒ヶ岳における地温観測(1979-1987年)と1970年噴火後の地熱活動についての若干の考察. 秋田大学鉱山学部資源地質学研究施設報告, **53**, 57-68.

狐崎長琅・村岡 淳(2010)秋田駒ヶ岳の地球物理学的観測と近年の火山状況. 秋田大学工学資源学部附属地域防災力研究センター報告, **4**, 19-28.

狐崎長琅・佐藤龍也・多田良平・藤嶋重則・近藤 充・長崎康彦(1989)1970年噴火以後の秋田駒ヶ岳火山における地磁気・重力の変化. 秋田大学鉱山学部資源地質学研究施設報告, **54**, 7-22.

狐崎長琅・村岡 淳・長崎康彦(2009)秋田駒ヶ岳における火山状態監視のための重力観測. 東北地域災害科学研究, **45**, 23-28.

国土地理院(1993)秋田駒ヶ岳(1万分の1火山基本図). 国土地理院.

Mogi, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 99-134.

中井新二・渋谷久志・菊池真市(1994)秋田駒ヶ岳におけるGPS高速静止測量. 東北地域災害科学研究, **30**, 127-131.

岡崎紀俊・田中和夫・三品正明(1990)秋田駒ヶ岳・女岳の構造. *火山*, **35**, 375-388.

大塚弥之助(1932)秋田駒ヶ岳の爆裂. *火山*, 1集, 1巻, 2号, 38-45.

須藤 茂・石井武政(1987)雫石地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 142p.

須藤 茂・向山 栄(1987)仙岩地熱地域北部の火山岩の古磁気と火山活動の推移. 地質調査所報告, **266**, 143-158.

多田良平(1975)秋田駒ヶ岳の磁気測量と岩石磁気について. 秋田大学鉱山学部鉱山地質学科卒業論文, 昭和49年度, 168p(手記).

Takada, Y. and Fukushima, Y. (2013) Volcanic subsidence

triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan. *Nature Geosci.*, doi: 10.1038/ngeo1857.

田中和夫(1971)秋田駒ヶ岳1970-71年の噴火活動の経過1. 1970年噴火に先立つ活動. *火山*, **16**, 107-111.

(編集担当 小園誠史)

## 付記 図に引用した資料等の説明

Fig. 1aとFig. 2の地形図の作成にはカシミールの機能と付属の標高データ(50mメッシュと高密メッシュ)を用いた. Fig. 1bの地形図にはアジア航測(株)公開の赤色立体地図を, Fig. 4とFig. A1の地形図には1/10000火山基本図「秋田駒ヶ岳」(国土地理院)を用いた. Fig. 7aの地形と, Fig. 7cの計算上の地表標高には10mメッシュ火山標高「秋田駒ヶ岳」(国土地理院)を使用した. Figs. 7a, cでのコンター図化には, Sufer8を用いた.

### A. 付録

#### A1. 地熱活動の推移の概況(補足)

本文5章では女岳の主要域について, 現象の時間的な変化を追跡した. しかし, 全体的広域分布については, 表現し尽くせない面もあった. ここではその不足を補うことにする.

地熱活動における特徴的な時期として, 最盛期(1978年頃)とごく近年(2013年頃)に着目し, それぞれの高温域分布の概況をFig. A1のaとbに示す. 高温域の一応の目安としては, 1m深で40~60℃程度以上の所を選んだが, それは厳密ではなく, 噴気の発生, 植物の枯死, 積雪期の融雪等によって全体的に判断した. 高温部も多少まばらに分布するが, ここでは概括して図示した.

Fig. A1aにおいて, I域は1970年火口である. II域とIII域の中核部はFig. 4のC域とB域に相当する. IV域はカルデラ壁である. V域は狭いが, 1970年溶岩流に蓋をされた熱の漏れ出しのようで, 溶岩流底の高温化を示唆する. IV域ではカルデラ壁沿いに伏在するはずの断裂が熱水の上昇路になっているのかもしれない.(詳しくは狐崎・菊池(1988)参照.)

Fig. A1a以後は冷却が進み, 1998年頃には, 高温域は殆ど消え, B域内の微小部(No. 20付近)に点状に残存した. そしてやがてそこから地熱活動は復活し, G域やH域へと飛び地状に波及した. それらが拡大して, B域やC域の東側に接続し, Fig. A1bの状態となった. それぞれ5-2節末で述べたようにFig. 5a1のNo. 49, 41等の地温上昇をもたらした. その間の過程は狐崎・村岡(2010)や狐崎(2012)の類似の図から伺える.

IV域は1992年には平常地温まで冷却し, 以後草木の繁茂や表土の崩落で, 9点あった地温点も探索不能と

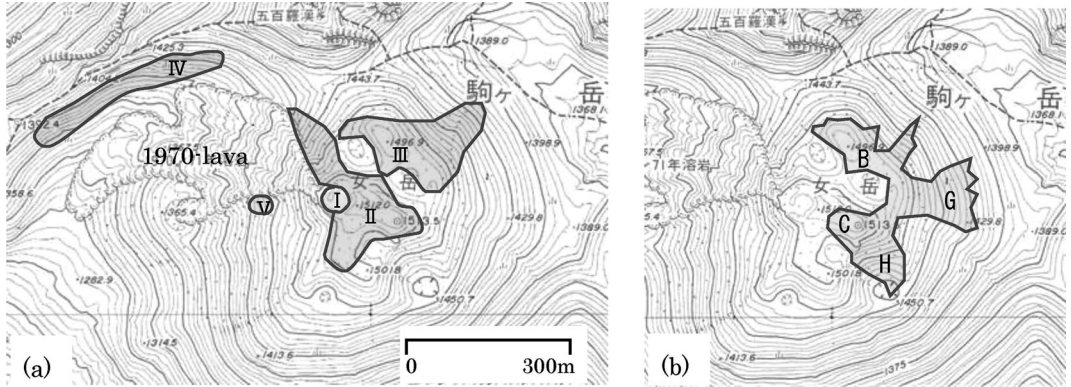


Fig. A1. Geothermal zones in Medake and its surrounding areas at two active stages.

(a) 1977-79, (b) 2013-14.

なったが、再高温化の気配はない。ここは飛び地状に隔離しているため、本文の5、6章では除外されている。

#### A2. 関連資料の説明

[1] 2010年段階における本研究に関する資料一式については、狐崎・村岡(2010)に記載されている。そこには本稿の引用文献に収録されている公刊報告と共に、関連の卒業論文・修士論文や内部的資料も含まれている。また、狐崎・村岡(2010)では既刊報告中の数値等の訂正も掲載している。

[2] 本稿では経年的変化図に重点を置き、具体的な観測値表は省略した。それらの多くは下記のごとく既刊報告に記載されている。1987年以前の地温データは狐崎(1977)、狐崎・村岡(1979)、狐崎・菊池(1988)等に、1988年以前の全磁力データは狐崎・他(1989)に、2008年以前の重力データは狐崎・他(1989)、狐崎(1996)、狐崎・他(2009)等に収録されている。他のデータや関連情報も適当な方法で開示し、今後の参照に供したい。