

岩手山における全磁力連続観測

Continuous observation of geomagnetic total field to monitor the activity of Mount Iwate Volcano

水沢測地観測所 藤原 智・濱崎英夫・門脇俊弘

Mizusawa Geodetic Observatory

Satoshi FUJIWARA, Hideo HAMAZAKI and Toshihiro KADOWAKI

要 旨

岩手山の火山活動活発化に伴い、水沢測地観測所では1998年6月25日から岩手山麓に磁力計を設置し、全磁力の連続観測を実施している。これは、火山活動を地磁気変化により監視することを目的としたもので、高度な解析手法を新たに適用することによって、従来得られなかった微小な変化を検出することに成功した。また、これらの地磁気変化は岩手山の火山活動と関連が認められた。

1. はじめに

火山活動はおもに地下のマグマの活動によってもたらされる。このマグマの移動もしくはマグマに熱せられた熱水の移動などによって、地下の岩石が熱せられる現象が発生する。岩石はもともと磁化（磁石としての性質）を持っており、ある一定の温度（キュリー温度）以上に熱せられると、この磁化を失う（熱消磁）。また、いったん熱消磁を受けても、温度が下がることによって、そのときの地球磁場の方向に再度磁化する。地下で起きた熱消磁、再磁化は地表の磁気観測で捉えることが可能であり、伊豆大島、雲仙火山など多くの火山で観測されている。また、マグマの移動などに伴い、膨張、収縮による応力の変化が生じる。この応力の変化は、岩石の磁化の変化をもたらすので（ピエゾ磁気効果）、応力の変化も地磁気観測で捉えることが可能になる。

一般に、地磁気の連続観測値には、地球外部から到来する磁場の影響が含まれており、地球内部の微小な地磁気変化を検出するためには、この地球外部磁場の影響を取り除く必要がある。今回の解析では、水沢測地観測所で高精度で得られている3成分観測値を基準値として利用した「3成分補正法」を新たに採用することで、従来得られなかった微小な地磁気変化を検出することができた。

本稿では、観測機器の設置、観測及び現在までに得られている解析結果について紹介する。

2. 観 測

2.1 選点方針

一般に、火山地域においては地下から上昇してくるマグマによって熱が供給されることで、岩石が持っている

自然残留磁化が熱消磁する現象が多く観測されている。この熱消磁を地表で観測する場合、元々の地磁気にこの変化量が重なって観測される。なお、岩手山付近においては、地磁気の方向は偏角約8度（西偏）、伏角約54度程度であり、自然残留磁化もこの地磁気の方向とほぼ同じ方向に磁化されているとされる。

この熱消磁による全磁力変化は、地表では熱消磁域の北側でプラス、南側でマイナスの変化として現れる。図-1は、地下の熱消磁域をはさむ地表の南北断面上での全磁力変化を数値計算で求めたものである。変化のプラスとマイナスのピークの間隔は、熱消磁域の深さとほぼ同じになるという性質がある。したがって、火山活動による熱消磁を全磁力観測によって観測する場合、その観測点の配置にはこの性質を利用すると効率的である。すなわち、地下10km程度の深部でのマグマ活動を知りたければ、推定マグマ位置の南北それぞれ5km程度離れた位置での観測が有効であるし、火口近くまで迫ったマグマから短期的な直前噴火予知を行うには、火口の南北100mほどの場所に観測点を設置するのがよい。

今回の岩手山の活動は、1998年6月頃は、深さ数kmより深い場所での地震活動が主体であり、地殻変動からも地下10kmほどの場所へマグマが貫入していることがわかっていたために、深部でのマグマの動きを探ることを目的とした。もちろん山頂付近への機器設置も後の活動次第では重要な観測になるが、1998年7月1日からの

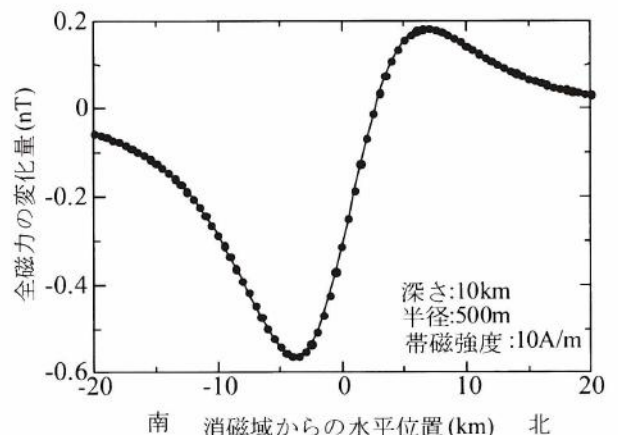


図-1 地下10kmで半径500mの領域が熱消磁したと仮定したときに地表で期待される地磁気変化

山頂方面への入山禁止が確定していた段階では、山頂付近へのアクセスが今後困難になることが予想されたので、山麓部分だけの連続点選点を行った。

2.2 選点と機器設置

火山性地震は1998年3月頃から山頂の西側を震源に急増した。水沢測地観測所に携帯用プロトン磁力計(EG&G Geometrics, G-856X)が2台あり、この2台の磁力計を有効に使用するために、①できるだけ火山性震源域に近く、②震源を南北に挟み、③長期観測のメンテナンス性、④設置、保守時の作業の安全の確保等を考慮して選点を行った。岩手山一帯は十和田八幡平国立公園になっており、国有林も多いため、設置許可を早急に得られる所として南側は、雫石町の国民休暇村岩手山麓地内(雫石測点)、北側は、松尾村にある、岩手県民の森内とした(松尾測点)。両地点とも、林の中である。

観測機器の設置方法は、磁力センサーを塩ビパイプ(高さ1.8m)に固定し、立ち木及び杭に2段4方向にロープで固定した。携帯用プロトン磁力計の電源は通常乾電池使用であるが、長時間使用のため自動車用バッテリーとした。バッテリーとアンプ(計測部)は、センサーから約5m離れた木箱に収納し、シートで覆った。

また、1999年5月に雫石測点の南西側に芳沢測点を追加設置した。

各測点の緯度、経度及び標高は以下の通りである(表-1、図-2)。

表-1 全磁力連続観測点座標

雫石測点	松尾測点	芳沢測点
緯度：39° 49' 10"	39° 53' 30"	39° 48' 58"
経度：140 56 30	140 58 30	140 55 49
標高：820m	550m	710m

2.3 補助観測

本点への人工擾乱の影響を点検するため、各連続観測点より数百m離れた個所に補助点を設けた。また、本点はメンテナンス性の良い場所を選点したため、標高が低く、山頂より遠い場所に設置せざるを得なかった。このため、少しでも岩手山に近い場所のデータ取得のため、網張スキー場リフトの終点から犬倉山周辺に臨時観測点を設けており、こちらも必要時に再度観測を行うこととしている。しかし、連続観測ではないので、観測の頻度は限られる。

2.4 観測とメンテナンス

携帯用プロトン磁力計は約12000個のデータをメモリーに記録できる。したがって毎5分値観測で約40日間の観測データ収録が可能である。また、バッテリーも1ヶ

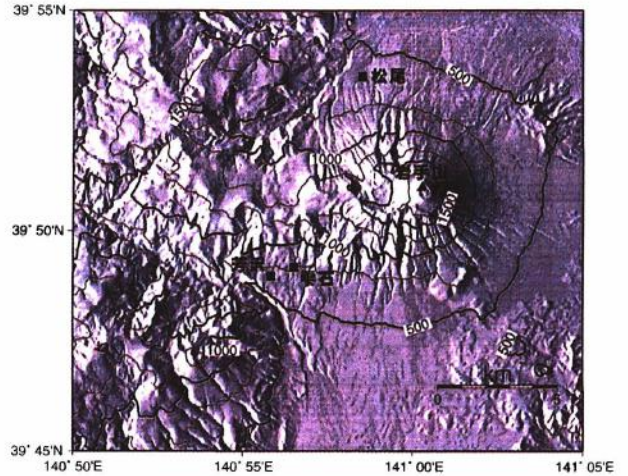


図-2 全磁力連続観測点配置図
250 mごとに等高線を入れてある

月程度の使用には十分余裕がある。データ回収と保守を約1ヶ月ごとに現地に赴き行っているが、できれば、太陽電池と無線等によるリモート観測が望ましい。

夏季は大きなトラブルもなく観測が行われているが、冬季のメンテナンスは積雪が加わるので極めて困難である。実際、2m程度の雪に埋まってしまい、観測点に到達できなくなった。また、センサーを四方から固定していたロープが雪の重みでゆるみ、センサーが傾斜するという事態も発生しており、積雪地での冬季観測には設置方法などに配慮が必要である。1998年の11月に機器が一部故障し、そのまま雪に埋もれたために、翌年5月まで欠測となった。

3. データ解析 (3成分補正)

地球内部現象と関連のない地球外部磁場変化の除去法として従来、一等磁気測量においてはC1補正法が使用されている。C1補正とは、ある時間に基準観測所でも同時に同じ大きさの外部磁場の擾乱があると仮定して、基準観測所のデータを単純に差し引くことで外部磁場を取り除くものである。

しかし、この補正は近似にすぎず、とくに基準観測所から離れるほど、補正が不十分であることが知られている(藤原ほか, 1994)。今回の岩手山の観測においては、2点の観測をお互いに基準としてその差を計測しており、2点間の距離は10kmほどしか離れていない。しかし、この2点同士の単純差を計算したところ、日平均値においても、磁気嵐時に約2 nTの擾乱が残ることが判明した(図-3)。

このように、わずか10kmほどしか離れていない2点間でも全磁力差は大きくばらつき、火山活動に起因する微小な地磁気の変化(1 nT以下)を検出するのに障害となる。たとえば磁気緯度の違いによって、地球外部からの磁場変化が異なることが知られているが(藤原ほか,

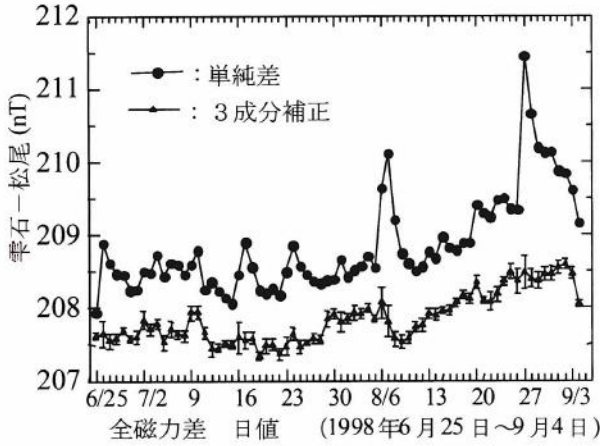


図-3 日ごとの全磁力単純差と3成分補正後の全磁力変化

1994), 今回のように, 10km程度では外部磁場そのものの違いは小さいものと思われる。したがって, 2点での全磁力変化の違いは以下の2点である。

(1) 偏角, 伏角の違いによるもの

地球表面の岩石の磁化の違いなどによって, 地球内部磁場は場所によって違いがあり, 偏角及び伏角の違いなどとなって現れる。このとき, 外部から一様な変化磁場を与えても, 内部磁場と外部変化磁場で合成される観測磁場の大きさは, 内部磁場の異なる点では同じ変化となって現れない(図-4)。

この影響をなくすためには, 偏角, 伏角が同じ場所で観測するとよいが, 実際の選点に当たってはこの条件を満たすことは難しい。

(2) 地下の誘導電流が作る2次磁場によるもの

外部磁場の変化は導体である地球内部に誘導電流を生じさせる。この誘導電流が2次的な磁場を発生させ, もとの磁場と重なって観測される。このとき, 地下の電気抵抗構造の違いによって発生する2次磁場も異なってくる。2次磁場はおもに鉛直(Z)成分に現れる。

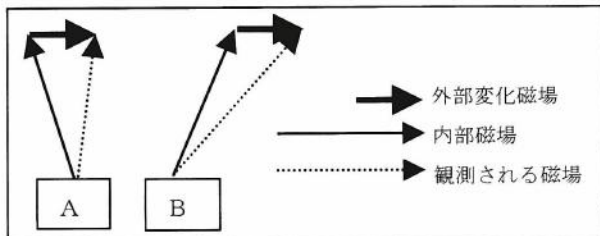


図-4 内部磁場が異なるA, Bの2点に同じ向き, 大きさの外部磁場変化を加えたときに観測される磁場の模式的な例。この図の場合, 同じ外部磁場変化を加えても, A点で磁場(全磁力)は減少, B点では増加として観測される。

これらの影響を取り除くために「3成分補正法」(田中ほか, 1977)を使用する。3成分補正法は以下の式で表される。

$$\Delta F_c = F_1 - F_2 - (aH + bD + cZ + dH' + eD' + f)$$

ここで, ΔF_c は補正後の全磁力差, F_1, F_2 は2点の全磁力, H, D, Z は基準観測点の地磁気3成分, H', D' はその時間微分であり, ΔF_c の時間変化が最小になるように係数 a, b, c, d, e, f を最小二乗法で決定する。ここで a, b, c は上記(1)の偏角, 伏角の違いを補正し, d, e は(2)の誘導分を補正することに相当する。それぞれの係数の大きさは観測点の組み合わせによって異なる。

岩手山の全磁力観測の場合, 2点間ではそれほど離れていないが, もともと火山地帯のため表層の岩石の磁化異常が大きいため a, b, c の係数が大きかった。これに比べ, d, e の影響は十分小さく, 今回は d, e ともに0として扱った。しかし, 他の地域の観測では d, e が無視できないことが報告されている。

さて, この補正を行うにあたって必要となるのが, 観測点での全磁力連続観測値だけではなく, 基準となる観測点での地磁気3成分(H, D, Z)の連続観測値である。この基準の地磁気3成分に誤差があると, 見かけ上の変化を与えてしまう危険性がある。全磁力は, プロトン磁力計という比較的簡単な機器で絶対値が得られるが, 地磁気3成分の安定した値は簡単に得られない。ここでは, 水沢測地観測所で定常的に得られている地磁気3成分の毎分値を使用した。このように近くで観測所の正確な基準値が得られたことがこの補正をより有効にしている。なお, 各係数を決定する時期によっては, 長期的な変動に影響してくるので, なるべく長期的な変動がない区間を使ってあらかじめ係数を決めておくとうい。

図-3に単純差によるものと3成分補正との比較が示してある。また, 最終的な結果を図-5に示す。

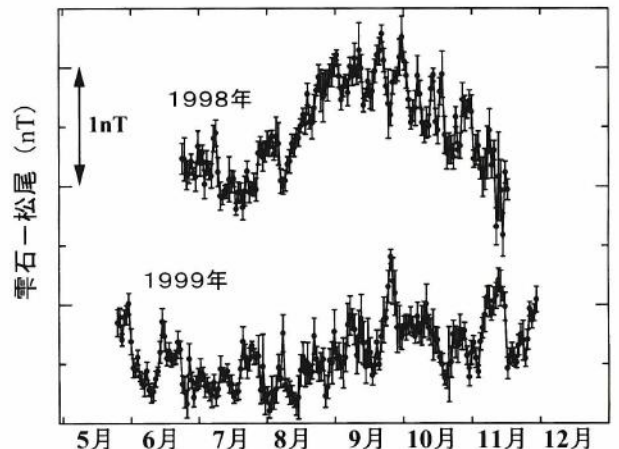


図-5-1 3成分補正後の全磁力差 1998年と1999年の観測分をずらして表示してある測される。

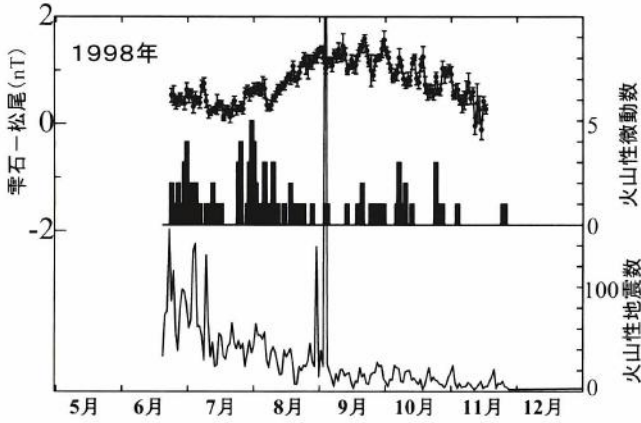


図-5-2 1998年の全磁力差変化と日ごとの火山性微動数, 火山性地震数(東北大学, 気象庁による)

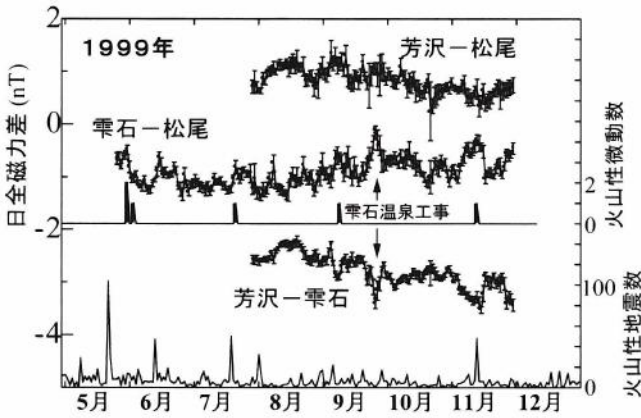


図-5-3 1999年の各観測点間の全磁力差変化と日ごとの火山性微動数, 火山性地震数(東北大学, 気象庁による)

4. 結果の考察

4.1 熱消磁

一般に火山地帯では熱消磁によるものとピエゾ磁気効果による地磁気変化が期待される。まず、熱消磁による地磁気変化をシミュレーションしてみる。藤田・水野(1980)の式を使い、地下の球状の場所の岩石が加熱により磁気を失う場合を考えてみる。地下の岩石は、現在の地球の磁場の向きに、磁化率10A/mで磁化されているものと仮定する(10A/mは玄武岩などのとくに強い磁化を帯びる岩石の場合の値である。観測される磁気変化の絶対値は磁化率と熱消磁域の体積に比例する)。図-1, 6からわかるように、熱消磁地域の北側でプラス, 南側でマイナスの変化が現れ, プラスとマイナスのそれぞれのピークの間隔と熱消磁地域の中心の深さがほぼ同じである。当然のことながら、熱消磁地域の体積が大きいほど、深さが浅いほど、ピークでの地磁気変化は大きくなる。

4.2 ピエゾ磁気効果

岩石に加わる応力を変化させたときに、ピエゾ磁気効果によって磁化が変化し、地磁気の変化として観測される。一般に、圧縮軸の方向の磁化は弱まり、それに直交する方向では強まる。応力分布のパターンによって、地表で観測される地磁気変化の分布は複雑になるが、マグマ溜まりを点圧力源と考え、等方的に膨張もしくは収縮を示すモデルは茂木モデルと呼ばれ、火山活動のシミュレーションによく用いられる(丸い風船が地下で膨らんだり、縮んだりするイメージ)。定性的には、膨張茂木モデルの場合、圧力源の北側でマイナス、圧力源直上から南側でプラスという、熱消磁とはプラスマイナスが南北逆転した分布を示すことが知られている(図-7)。

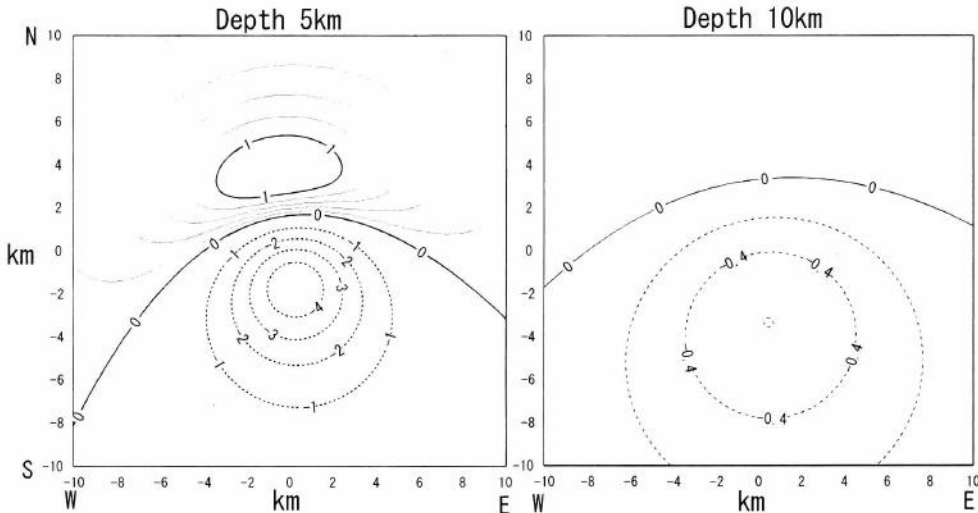
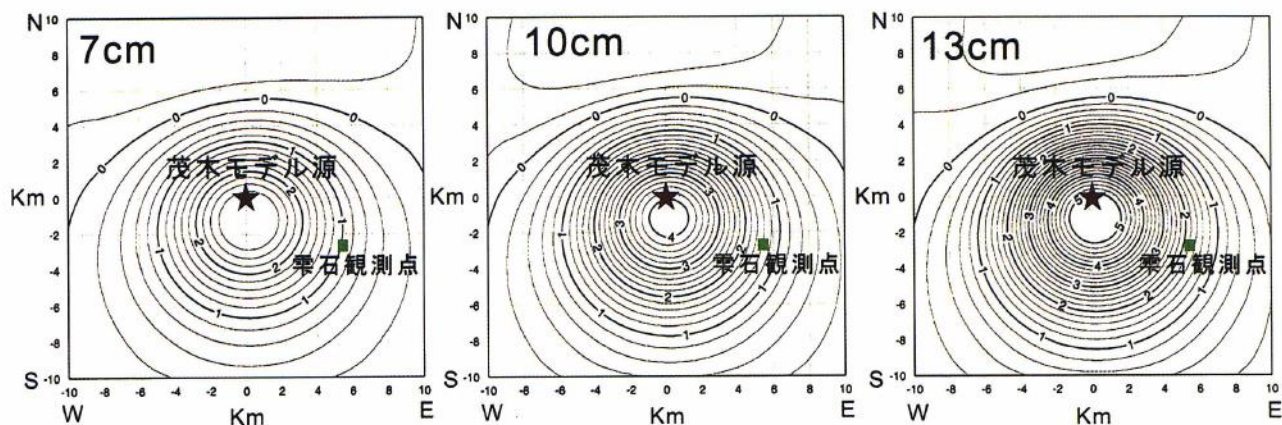


図-6 熱消磁による全磁力変化のモデル
半径500m磁化率10A/mの岩石が図の中心で深さ5km(左図), 10km(右図)で熱により消磁されたとしたとき観測される全磁力変化量分布(nT)



図一七 茂木モデルのピエゾ磁気効果による地表における全磁力変化

Sasai (1991) の解析解 (TYPE II) による。茂木モデルは、深さ 8 km のマグマだまりが等方的に膨張したと仮定している。それぞれの図は、地下の膨張の量を変えており地表の中心で観測される鉛直方向の上昇の量が 7, 10, 13cm となるものを描いている。

4.3 地磁気変化

1998年の地磁気変化のパターンは次の4つの時期に分けられる。

(a) 6月下旬～7月下旬の0.2nTの減少

7月9日,10日を除いて単調に減少している。7月10日にこの時期としては最大規模の火山性微動が発生しており、ステップ状の変化と対応しているように見える。

(b) 7月29日～8月8日の0.4nTのステップ状変化

急に増加し、急に元の値に戻っている。ちょうどこの時期は、火山性微動が多い状態であった。

(c) 8月上旬～9月上旬の0.9nTの増加

期間中最大の増加をしているが、増加傾向が衰えかけて値がピークに達した9月3日頃にM6.1の地震が発生している。

(d) 9月上旬～の1nTの減少

9月3日の地震以降、約1ヶ月ほとんど同じ値であったが、徐々に加速するように値が減少している。短期的には、数日～10日程度で、0.5nT程度の小刻みの変動を示している。

一方、1999年の地磁気変化は1998年ほど大きな長期にわたる変化は見られないが、比較的短周期(1ヶ月以下)の変動が1998年と同様に見られる。なお、1999年9月末の雫石測点の変動は観測点付近で行われた温泉の配管工事による人工的なものであると思われる。また、1999年は地震活動は引き続きあったもののそれほど活発ではなかったが、数回にわたって、地震数が一時的に増加し、火山性微動も同時期に発生しており、それぞれの活動時期が地磁気変化に対応しているように見える。

4.4 地殻変動

(a) GPS連続観測

国土地理院のGPS連続観測によるこの時期の地殻変動観測結果では、雫石測点と松尾測点の付近の距離が南北に広がる地殻変動が1998年はじめ頃から存在しているが、1998年8月以降は徐々に収まり、1999年にはほとんど変化はみられない。この地殻変動は、岩手山の地下深くにマグマが貫入して山体が南北に開いていたことを表していると考えられる。

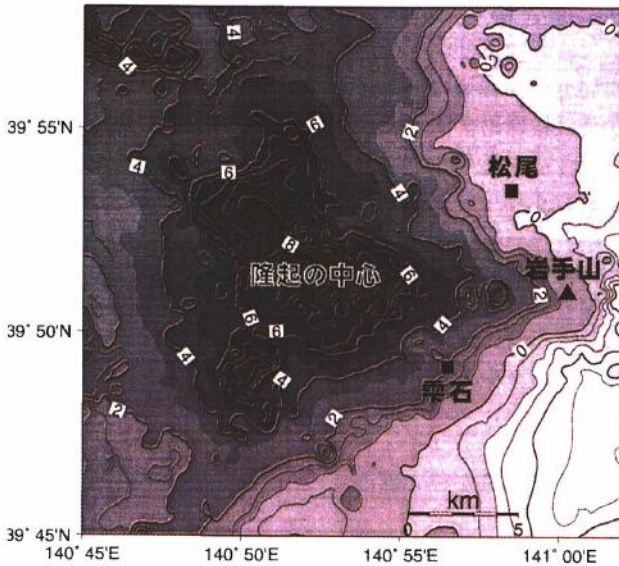
(b) 干渉SAR

合成開口レーダー(SAR)を搭載した人工衛星、ふよう1号(JERS-1)によって得られた地殻変動の面的な分布を図-8に示す。

少しノイズが大きいですが、1998年4月～7月の間で岩手山西部において、鉛直方向に最大約8cmの上昇があった。東西方向への地殻変動とも合わせると、風船が膨らむようなほぼ等方的な地殻変動であった。この干渉SARによる地殻変動の解析により、この変動は、図に示した隆起の中心位置の地下約8kmで球状に膨らむ源(茂木モデル)があったとすると説明できる。GPSなどの他の観測を含めると、1998年9月までの茂木モデルの膨張は地表での上昇に換算して約13cmであった。

4.5 地磁気変化の原因推定

熱消磁のモデルを作成するには、熱消磁域の水平位置、深さ、体積及び地下の磁化率といった複数のパラメーターが必要だが、そのいずれも任意性が大きく、限られた観測値からはパラメーターを特定することができない。ピエゾ磁気効果についても同様である。また、地磁気観測も2～3点しか得られていないので、十分な空間分布を得られておらず、この地磁気観測からは決定的なことは言えないが、以下の可能性が指摘できる。



図一 8 干渉SARによる上向き地殻変動の面的な分布図 (1998年4月～1998年7月) プラスの変動が上昇(隆起; cm)

(1) 1998年8月までの段階(a)(b)及び1999年の複数のステップ状の変化と、火山性微動もしくは火山性地震に関連らしきものが見取れる。

しかし、1998年9月～11月にも同様な形状の数日～10日の小刻みな地磁気変動がみられ、これらの原因については、計測上のノイズなのか真のシグナルなのかについてははっきりとはしていない。ただし、地殻変動にはこのようなステップ状の変動は現れておらず、火山性微動と関連するとすれば、地下のマグマの移動が、火山性微動と熱消磁を発生させたと考えられることができる。

(2) 1998年7月下旬まで(a)と、9月以降(d)のゆっくりとした全磁力の減少(雫石)もしくは増加(松尾)は、岩手山(東側～西部)の熱消磁で説明できる。こうしたゆっくりとした長期的変動は、年周変化(季節変化; 原因は様々)の一部の場合もあるが、翌1999年の同じ測点間の観測結果にはこのような変動が現れていないことから、年周変化ではないと思われる。

(3) 1998年8月(c)の急激な全磁力の増加(雫石)もしくは減少(松尾)は、図一7で示したような岩手山本体近くでのピエゾ磁気効果で説明することができる。干渉SARとGPSの結果より、岩手山西部地下に茂木モデル源を仮定した地殻変動があったことがわかっている。9月までに地表直上では13cmの上昇があり、また4月末～7月は8cm程度であることより、8月から9月までの地表直上の上昇量は7cm程度である。ピエゾ磁気効果によって地磁気変化に期待される量は、図一7より1nTほどである。この変化量は図一

5の地磁気変化を説明する。

しかし、図一5を見る限り、8月の間に急激にこの変化が進行しているが、GPSや干渉SARから判断すると、この地殻変動は6月より継続していて、8月にはその変化は逆に鈍っており、ピエゾ磁気効果が現れるとすれば、8月以前のほうが大きいはずである。また、全体の期間において熱消磁によると思われる地磁気の減少が続いており、8月も熱消磁が続いているとすれば、地磁気を増加させる変化源による変化は1nTより大きかったであろう。したがって、ピエゾ磁気効果が8月以降について図一7の計算以上に大きいことなど、別の原因で地磁気が増加した可能性がある。図一7のピエゾ磁気効果のシミュレーションでは応答係数などを仮定しており、係数を変えることで結果は多少異なるが、8月だけ係数が変わるとすれば、それ以前とは異なったしくみの応力変化があったことになる。

ところで、8月からの地磁気変化の終了時期がちょうど9月3日のM6.1の地震発生に一致しており、この地震との関連が考えられる。この地震は、雫石測点より南側に震源域を持っており、岩手山本体ではなく、震源域への熱供給により熱消磁が発生したことで説明できる。つまり、断層面周辺への熱供給によって断層が滑りやすくなり、M6.1の地震を誘発し、また、熱消磁により地磁気変化をも生じさせたという考えである。もちろん、M6.1の地震発生までの火山性地震の発生状況やGPSの変動を見ても、M6.1の震源域への動きがあったようにはみうけられないので、熱水のようなものが「静かに」熱を供給したことを仮定しなくてはならない。

(4) 1998年9月3日の地震発生直前直後には顕著な地磁気変化は現れていない。東北大学の地磁気観測によれば(三品ほか, 1999)、雫石測点の南約1.5kmで地震発生に伴い0.4nTの地磁気増加が観測された。地震断層による直接的な地磁気変化は、その断層の形状と応力変化によって大きく変わり、今回の場合は断層の北端に近いことから、わずかな距離の差でも変化が大きく違うことが予想されており観測には矛盾はない。したがって、マグニチュード6クラスの地震による直接的な地磁気変化を観測するには、今回のような観測点密度では足りないことがわかる。

(5) 1999年後半の観測では雫石測点の近くに芳沢測点を追加し、松尾測点を含めた3点間の相互の差をとることで地磁気変化の原因となった場所の特定により迫ることができる。図一5-3によれば、芳沢測点の値が緩やかに減少しているが、芳沢測点付近は木がなく太陽直射の影響を受けやすい。したがって、機器の温度ドリフトや地面の温度変化の影響である可能性がある。

1999年では火山活動に同期したステップ状の変化はおもに雫石測点に現れていることがわかる。したがって、これらの短周期の地磁気変化は広範囲にわたるものではなく、山体の深くの広範囲にわたる熱消磁や応力変化は考えにくい。つまり、雫石測点の近傍にその変化源があると考えられる。雫石測点はM6.1の地震断層の北の延長上にあり、そのさらに北には網張元湯(源泉) 犬倉山の谷へと続いている。この特異な場所に地下の火山活動の影響が局所的に現れた可能性がある。また、火山の山体内部は通常でも相当な高温になっており、今回の火山活動活発化以前からすでに熱消磁がかなりの部分で進んでいた可能性も高い。したがって、今回の活動で熱消磁が新たに進んだのは地表近くの局所的な場所であることが考えられ、地磁気変化が広域に一様でないことを説明できる。このことは、(3)のM6.1の地震に関連した変動についてもあてはまるかもしれない。

いずれにせよ、今回の地磁気データの解釈には他データと組み合わせた解析がさらに必要である。

5. まとめ

3成分補正という新たな補正方法を使用し、水沢測地観測所の高精度な補正データを組み込むことによって、今までに検出が困難であった微量な地磁気変化を検出することができた。

2～3点だけの地磁気観測からは決定的な地下現象を記述することはできなかったが、このわずかなデータでも、GPSなどの地殻変動観測結果だけからはわかり得ない、地球内部の現象を示唆する重要な結果を得られたことは特筆すべきことである。岩手山の活動は沈静化しているものの、今後の活動が予測できない状況にあることから、新規の観測点の設置や自動でデータ転送ができるようなシステムをはかり、GPSのように密度の高い連続観測が望まれる。

地殻変動データの解釈にあたっては、地理地殻活動研究センター地殻変動解析室の協力を得ました。ここで感謝いたします。

参考文献

- 藤田尚美・水野浩雄(1980):地震と地磁気,「地震予知I 電磁気学的アプローチ」,学会出版センター,1-50.
- 藤原 智・湊 敏弘・都筑三千夫・中堀義郎(1994):北海道南西沖地震による地磁気変化,国土地理院時報,81,1-7.
- 田中良和・増田秀晴・河村 謙・大地 洗・加藤諄司・馬場広成・吉野登志男:阿蘇火山地域での全磁力測量[1977](1978):阿蘇火山の集中総合観測(第1回1977)報告,31-39.
- Sasai, Y. (1991): Piezomagnetic field associated with the Mogi model revised: Analytic solution for finite source, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 43, 21-64.
- 三品正明・植木貞人・浜口博之(1999):1998年9月3日雫石の地震(M6.1)に伴う地磁気変化,第106回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集, B21-03.