

雲仙火山噴火にともなう地磁気変化 (1991-1993)

田中 良和・橋本 武志・増田 秀晴・吉川 慎・大学合同観測班

VOLCANO-MAGNETIC EFFECTS ON THE UNZEN VOLCANO (1991-1993)

By Yoshikazu TANAKA, Takeshi HASHIMOTO, Hideharu MASUDA, Shin YOSHIKAWA
and Joint Group of University for Electromagnetic Research.

Synopsis

The summit eruptions of Unzen volcano started at J and K craters on November 17, 1990, after 198 years quiescence. The volcanic activity intensified at B crater, about 150m west of J, on February 12, 1991, and a new dome was extruded at J on May 20, 1991. Twelve domes were extruded until March 1994. Preceding the major volcanic activity, a geomagnetic change of about 20 nT was detected by repeated surveys at the summit during the period from 1986 to the end of 1990. To elucidate the cause of the geomagnetic change, closely placed and continuous geomagnetic observations with proton magnetometers have been conducted in the vicinity of the summit of the volcano since January 1991. In association with the volcanic activity at B, geomagnetic changes amounting to about 18 and -5 nT were observed at close points in the northern and southern directions of B, respectively, from February to March 1991. During the early stages of the new dome extrusion, large geomagnetic changes of more than 80 nT were observed at several points near J from May 12 to June 3, 1991. The changing rate of about 5 nT/day at mid-May 1991 decreased exponentially to about 0.1 nT/day by the end of 1991. The total change reached more than 160 nT at three points closer than 400 m from J from early March 1991 to the end of June 1992. The relations between the geomagnetic changes and seismic activities or ejection rates of lava dome, resulted that thermal magnetic effect dominated on the Unzen volcano.

1. はじめに

火山活動に伴って地磁気が変化することは、よく知られている。おもに、火山岩の磁化が火山の熱で変化するためと考えられるが、マグマの貫入等により火山岩が歪を受けることによる、ピエゾ磁気効果や流動電位による磁場変化も知られている。地殻の歪は水準測量や傾斜観測あるいは、伸縮、辺長、地形測定などによっても検出できる。また、流動電位は地表での電位測定が可能である。しかし、地下に於ける熱の動きは、僅かな地下水の流動にも影響され、地表面では捉えるすべがない。この意味でも地磁気の観測から地下の熱の動きを捉える事は大切である。近年の伊豆大島^{1),2)}、阿蘇^{3),4)}、草津白根山⁵⁾において、地磁気観測は火山活動の動向を知る上で重要な役割をはたしてきた。

筆者らは、1990年に始まる雲仙岳の火山活動において、活動の初期から山頂部にプロトン磁力計を設置し、地磁気全磁力の連続観測を実施してきた。その結果、ドーム形成期に地獄跡火口の近傍において100nT

を越す火山性磁場変化を観測し、1992 年末までに、さらに、約 100nT におよぶ緩やかな変化を観測している。噴火はすでに 3 年を超えたが、溶岩の噴出はとどまる事なく継続し、地磁気変化の観測からも火口直下の熱消磁が進行している結果が得られている。

1992 年 3 月までに観測された個々のイベントについては観測結果とともに、既に、報告してある⁶⁾。また、1993 年 2 月までの観測結果についても報告済みであるが^{7), 8)}、この報告では、これらの要点をまとめるとともに、1994 年 1 月初旬までの、3 年にわたる雲仙火山に於ける地磁気変化を概観し、特に 1993 年 12 月期の地磁気変化について、火山活動との関連を検討してみた。

2. 火山活動の概要

1992 年春までの雲仙火山の噴火活動の概要は太田ら^{9), 22)}に詳しいが、概要を述べておく。

- ・ 1990 年の夏以後、島原半島西部の深い位置で地震活動が盛んになり、東方の浅い部分に移行した。
- ・ 1990 年 11 月 17 日、普賢岳は九十九島火口および地獄跡火口で噴火した。地獄跡火口では小規模な水蒸気爆発を伴っていたが、九十九島火口では直径数 m の噴気口を形成した程度である。
- ・ 1991 年 2 月の時点で噴気活動は九十九島火口に残留したが、地獄跡火口周辺部では西斜面に、時折、僅かの噴気活動を認めるものの静穏を保っていた。
- ・ 1991 年 2 月 12 日、突如として屏風岩火口が噴火を始めた。目視による確認は 12 日 8 時頃であり、砲台跡に設置された島原地震火山観測所の地震計では、12 日 01 時頃から強い連続微動を観測した。
- ・ 屏風岩火口での噴火は 4 月中旬まで持続した。この噴火は極めて多くの火山灰を噴出させたこと、噴煙の上昇速度からみて、比較的低温であったこと、新鮮な火山ガラスが殆ど含まれていなかったこと等に特徴がある（渡辺私信）。一方、九十九島火口は弱い噴気を残すにとどまり、また、地獄跡火口は表面上、その活動を停止した。
- ・ 1991 年 4 月初旬には地獄跡火口が活動を再開し、水蒸気爆発や、激しい噴煙活動を繰り返した。
- ・ 4 月中旬には火山活動の中心は地獄跡火口に移行し、数度の水蒸気爆発によって、北西向きの火口を形成し、人身大の噴石を 150-200m の位置にまで飛散させた。
- ・ 5 月 13 日未明から、山頂部のごく浅い所で地震や、微動が多発するとともに、5 月 10 日に開始された地質調査所による光波測量により、山頂部が大きく膨らみつつある結果が報告された¹⁸⁾。
- ・ 5 月 17 日には山頂部で東西方向に卓越する地割れが見られ、5 月 20 日には地獄跡火口にドームが出現した。
- ・ その後も、ドームは成長を続け、5 月末には崩落型の火砕流として水無川を流下する。溶岩の流出量は 20-30 万 m³/日程度と推定されている^{16), 19)}。
- ・ 1992 年末までに第 9 溶岩ドームが出現した。
- ・ 1993 年 2 月 2 日に第 10 溶岩ドームが出現。
- ・ 1993 年 3 ~ 4 月には、ドーム北西部が膨張。3 月 17 日に第 11 ドームが出現。
- ・ 1993 年 8 月には山頂部の地震が群発した。
- ・ 1993 年 11 月には山頂部の地震が増加、山体の膨張が観測され、12 月には、ドームの隆起とともに山頂部の南西方向への膨張が著しく、M2 程度の地震が頻発した。
- ・ 1994 年 1 月 15 日には、第 12 溶岩ドームが出現した。

3. 地磁気観測の概要

地表で観測された地磁気変化には、地殻内部に起因する磁場変化に加えて、赤道環電流や、中緯度を中心とする電離層に流れる Sq 電流、極光帯を流れるジェット電流などの、いわゆる外部磁場変化が含まれる。

近接した観測地点では、外部磁場変化の強度は、ほぼ等しいと考えられるから、両者の差を求めることで、この外部磁場を消去できる。しかし、火山地域では、火山岩の磁化などの影響で静磁場の方向や大きさが大幅に異なることがある。この様な場合、外部から一様な変化磁場が加わっても、合成ベクトルの変化量は等しくない。プロトン磁力計はベクトルの大きさしか測定しないので、数 nT の残差を生じることがある。本稿で述べる日値は、 S_q 磁場変化の小さい、夜間 0 時から 4 時までの値について、雲仙の東方、約 73km に位置する京都大学火山研究施設構内のプロトン磁力計を主として用いて化成してある。

火山活動に付随する磁場変化の要因を列記すれば以下の如くである。

- 1) 既存の火山岩の自然残留磁化の温度変化
- 2) ドーム貫入にともなう圧力歪によるピエゾ磁気効果
- 3) 火山灰の生成に伴う火道周辺部での磁性鉱物の消失
- 4) 火口の爆裂にともなう帯磁溶岩の乱雑化にともなう消磁
- 5) 地形変形に伴う帯磁した山体の変形
- 6) 流動電位に伴う地電流の作る磁場
- 7) 火山噴出物の堆積による磁化の影響。

1) の効果を本稿では熱磁気効果と称する。ほとんどの火山岩は、加熱されれば磁化は弱まり、冷却されると磁化は強まる。この性質が熱磁気効果の拠り所である。火山活動に於いて、火道を通じて多量の熱が輸送される。乾燥した緻密な溶岩の熱伝導係数は小さいけれども、溶岩に多数の割れ目が存在し、これらの隙間を火山ガスや熱水が流動できる場合を考慮すれば、熱拡散の時定数は比較的短く、自然残留磁化の温度変化による効果は大きい。

地磁気変化を理解するための一助として、磁気双極子が地表面に作る磁場変化を考察しておく。磁気モーメント M による磁界は、 $K=1/4\pi\mu$ 、座標の原点を M の中心にとれば、MKS 単位系で、

$$H_r = K \cdot 2M \cdot \cos \theta / R^3$$

$$H_\theta = K \cdot M \cdot \sin \theta / R^3 \quad \text{であたえられる。}$$

ここに、 μ は透磁率、 θ は M と観測地点のなす角度、 R は M の中心からの距離、 H_r 、 H_θ は観測地点での磁界の r 、 θ 方向の成分である。

北半球の地下で、火山岩の磁化に変化が生じると、磁化が強まった場合、その南側の地表では地磁気全磁力の増加が観測され、北側では減少が観測される。また、磁化が弱まった場合には、逆の変化となる。雲仙火山のように、山頂部にドームが出現し、観測地点が下方に来る様な場合には、上述の変化は反転する事にも留意すべきである。

多くの場合、火山磁場変化は、源から遠ざかると急速に減衰して観測しにくくなることは、上の式からも明らかであり、観測的にも、すでに筆者らにより明らかにされている³⁾。このことを念頭におき、観測点は配置された。使用した磁力計は蓄電池駆動型の KM622 プロトン磁力計である。

逆問題として、一意的ではないが、地磁気の多点観測から火山活動にともなう地下の消磁の大きさが求められる。もし、平均的な溶岩の帯磁の強さや温度依存性が判れば、直感で捉えやすい体積に換算でき、熱エネルギーについての考察も可能となる。

火山岩の帯磁の様子は、磁気測量などによって推定できる。古くは、依田^{10), 11)}により眉山の帯磁率が 10^{-3} ないし $5.7 \times 10^{-3} \text{ emu}$ と見積られている。半田¹²⁾は雲仙岳の地上磁気測量を行い、磁気異常を説明するために山体の帯磁を考察した。これによると、雲仙岳周辺の平均帯磁は 0.7 A/m 程度であるが、普賢岳は一桁小さく、南と北に 2.5 および 4 A/m 程度のダイクが貫入している可能性のあることを指摘している。また、中塚¹³⁾は 1991 年夏の航空磁気測量に基づいて、雲仙火山の磁化強度を 2.9 A/m ($1 \text{ A/m} =$

10^{-3} emu/cc) 程度と推定した。一方、筆者らは、普賢岳周辺で、数種類の古い溶岩を採集し、その磁性を測定した。交流消磁や加温特性は十分には調べてないが、常温における磁化はおおよそ 4×10^{-3} A/m 程度が得られている。中塚の結果にやや符合しないのは、筆者の資料が密度の大きいものに偏っている可能性がある。本稿では平均の帯磁率を 3 A/m として取り扱う。

4. 地磁気変化の概要と解釈

1992年3月までの観測の経緯および結果は田中ほか^{6), 7), 8)}で報告してあるので要約するにとどめる。

4.1 1990年11月17日の噴火に伴う地磁気変化

1990年11月の時点で、我々は普賢岳の山頂部はもとより、島原半島に於いてさえ、地磁気の連続観測地点を有しない。しかし、1986年の雲仙火山総合集中観測に際して、筆者らは島原半島の中央部に12地点の地磁気繰り返し観測点を整備しておいた。この中の一つに、今回噴火した地獄跡火口の北西約170mに位置する普賢池磁気点があった (Fig. 1のN1地点)。1990年11月の噴火直後の12月と1993年1月に、この磁気点N1で地磁気全磁力の繰り返し観測がなされ、1986年11月と較べて、それぞれ19および16nTの磁場増加が観測された。昼間の繰り返し観測の測定精度は5nT程度が見込まれるが、変化量は明らかに観測誤差を越えていた。観測地点周辺の地形的な擾乱は認められず、地獄跡火口の水蒸気爆発の影響 (1990年11月17日の地獄跡火口での小規模な水蒸気爆発に伴い、整然と磁化していたであろう火口内部の火山岩が、爆発により方向が乱雑化され、全体として消磁と等価の現象を生じた可能性) が懸念された。しかし、火口内部で攪乱された体積は、せいぜい4000m³程度であり、3A/mの磁化強度では、N1地点に於ける磁場変化は4nT程度しか期待できない。このことから、やや深部にまで及ぶ消磁が進行しているものと解釈され、山頂部での地磁気連続観測が開始される契機を与えた。

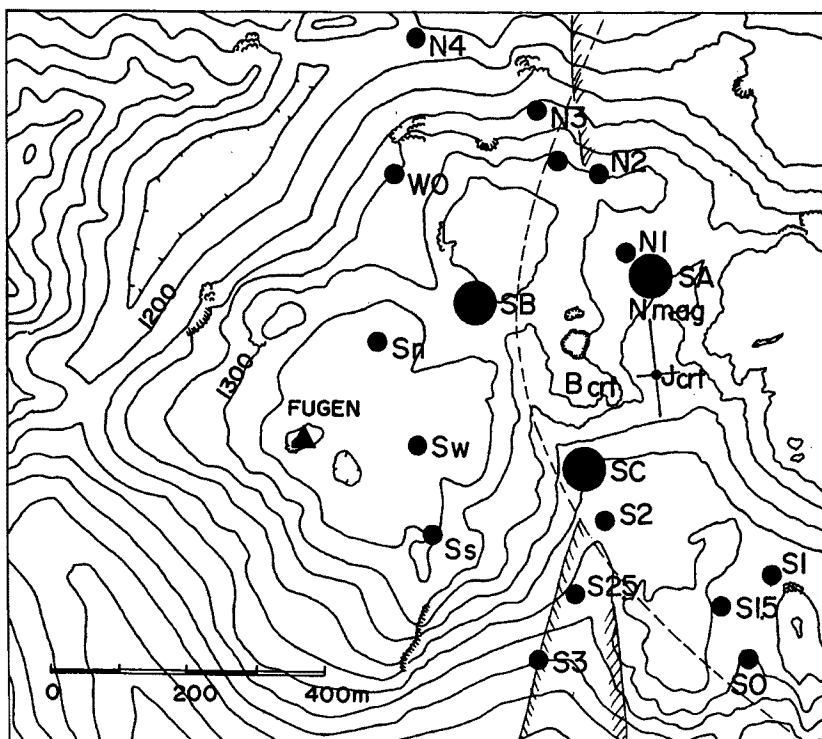


Fig. 1 Locations of geomagnetic observation on the Unzen volcano.

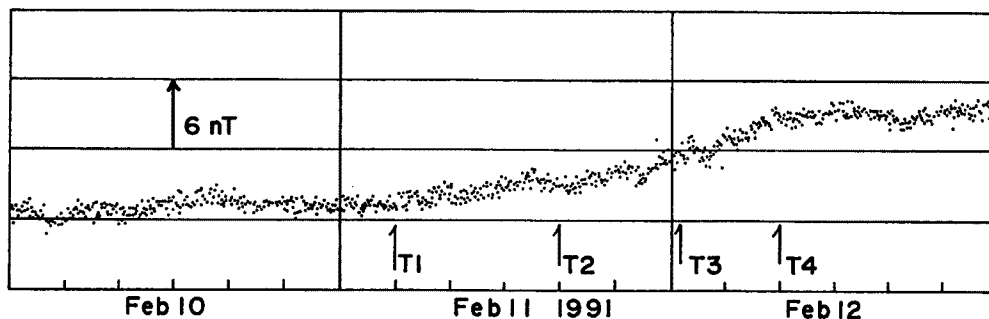


Fig. 2 Precursive geomagnetic changes associated with the eruption at Byobuiwa crater. The data observed at N1 (located about 170m NNE from the B-crater) were corrected with three components reduction method. T1: beginning of anomalous geomagnetic change. T2: evident start of geomagnetic change. T3: start of violent seismic tremor. T4: detection of the eruption.

4.2 山頂部での地磁気連続観測の概要

1991年1月8日からN1とS1地点（九十九島火口の50m南）に磁力計を配置し、連続観測を開始した。その後、噴火地域の拡大を懸念して、1月21日に眉山の西登山口に、1月31日には板底（地獄跡火口の東方、約2Km地点）にも磁力計を設置したが、後者の2地点では、1991年6月の火砕流で観測不能となるまでは、特筆すべき火山性磁場変化は検出されなかった。さらに、3月上旬には、普賢池と風穴の中間のN2地点、風穴近くのN3、竜の馬場南西端のS2、さらに南のS3地点にも磁力計を追加した。また、6月上旬にはS1.5地点を追加し、この地点の地磁気変化が地点S1およびS2に類似することを確認した上で、9月にS2.5地点に移設した。N1地点は1991年4月に普賢池の増水で水没し、地点N2は土石流により流された。観測は、当初、毎分測定で実施し、隔週毎に鉛蓄電池とデータROMの交換を行っていたが、逐次、5分測定に切り替え、また、山頂部の樹木が枯れたために太陽電池を利用するようになった。1992年7月から再開されたN2地点は初期の地点のやや西に位置する。S3は1993年7月に観測地点近傍の侵食崖が発達し、撤退を余儀なくされた。代わりに、S0地点を新設したが、1993年末には、ドーム南部の崩落が激しくなり溶岩に埋没した。また、S2およびS2.5地点は1994年初頭に溶岩の崩落で埋没し、N2は1994年1月にドームの北西方向への崩落が激しくなり撤去を余儀なくされた。この様にして、1994年春には重要な観測地点の多くを失っている。これらの観測地点の配置をFig. 1に示し、1993年末までの一連の磁場変化をFig. 5にまとめて示してある。

4.3 屏風岩火口噴火に伴う地磁気変化

1991年2月12日の屏風岩火口噴火に際して、噴火直前の火山性磁場変化がN1地点で観測された。図2に、この様子を示す。基準点との単純な差では、日変化が消去出来ないため、3成分補正法¹⁴⁾を用い、 $F_{FG} = F_{ASO} + 0.03 \cdot D_{KN} + 0.03 \cdot H_{KN} - 0.04 \cdot Z_{KN}$ が示してある。ここにFは地磁気の全磁力、D、H、Zは偏角、水平分力、鉛直分力の平均値からの変化量である。添字は、普賢、阿蘇、鹿屋での値の意味である。補正係数は1991年1月の観測データに基づき、短周期成分が最小となるように求めた。

磁場の急激な増加が2月11日16時頃に始まり、2月12日8時頃に終了している。砲台跡に設置された島原地震火山観測所の地震計では、12日01時頃から強い連続微動を観測しているが、微動に先だって地磁気変化が出現していることは、注目すべきである。

また、この噴火前後の1～2カ月にわたる磁場変化が図3に示されている。S1地点は屏風岩火口の南東に位置し、北北東のN1地点と逆の地磁気変化をし、また、変化の振幅も異なる事は当然であるが、2月上旬を基準とした両者の変化比が一定ではない。この様に、変化のパターンが異なることは、磁場変化の源が

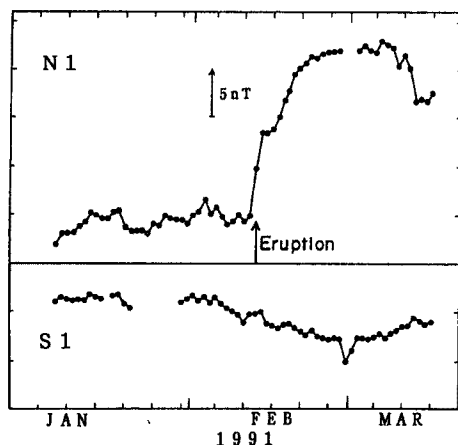


Fig. 3 Geomagnetic changes before and after the eruption at Byobuiwa crater.

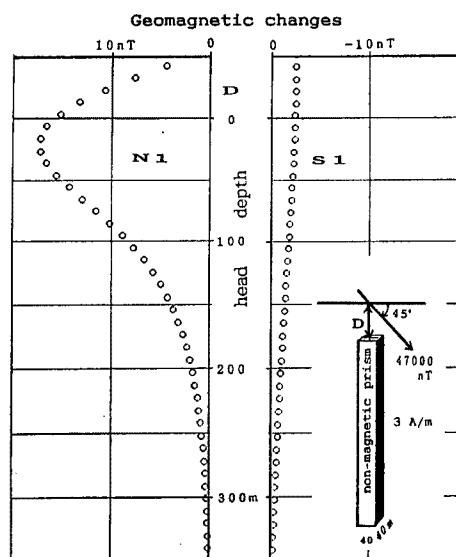


Fig. 4 Calculated magnetic changes when a non-magnetic prism rises up from depths.

移動している事を示唆する。使えるデータがわずか2地点でしかないから、いくつかの解釈が可能であろうが、最も単純な一つの解釈は以下の如くである。屏風岩火口直下の火道が成長し、周辺部の火山岩を破碎し、火山灰として放出しながら上昇したと言うものである。図4に、このモデルに従って、辺長が40mの角柱（ここでは溶岩の貫入ではなく、火山灰として噴出された空隙を想定している）が地下深部から成長してくる場合について、N1及びS1地点で期待される磁場変化を示した。図4の縦軸を時間の経過とみなせば、図3の地磁気変化の概略を説明できる。火道の断面積はN1地点に於ける磁場変化の最大値18nTと、火山岩の磁化の強度を3A/mに仮定して求めている。火道の先端が地表下約250mに到達するまでは、N1やS1地点では有為な磁場変化は観測されない。もし、深さ250mから火道が成長したと仮定すれば、火道破碎に伴う噴出物の体積は40万 m^3 となる。一方、広域の火山灰の分布から推定されたこの時期の噴出物の体積は約100万トンであり²¹⁾、概略一致する。このように考えるなら、屏風岩火口の激しい火山灰噴出活動は、地下250m程度にある帯水層にマグマの先端が到達し、多量の水蒸気を発生させ2月12日の噴火を引き起こしたものと推論される。

4.4 第1ドーム出現前後の地磁気変化

1991年5月20日の第1ドーム出現の時期に符合して、N3で正、S1やS2およびS3で負の磁場変化を観測した（Fig. 5）。S3においては変化量は極めて小さい。地磁気変化はドームから隔たると急速に変化量が小さくなっていることから、磁場変化は火口の比較的浅い部分で進行したことが推定される。

5月14日から24日までの地磁気変化は下記の如くであり、観測地点の座標、および磁場変化量から源の位置と大きさが推定できる。

観測地点	N 3	S 1	S 2	S 3
観測値 nT	65	-34	-46	0
計算値 nT	65.9	-33.1	-46	-2.6

地獄跡火口を原点とした、北、東、下向きの座標を用いると、(133, 56, 99) mの位置に単一の消磁源を置けば、上の計算値が得られ、観測地を概略説明できる。この位置をSAとしてFig. 1に示した。火山岩の

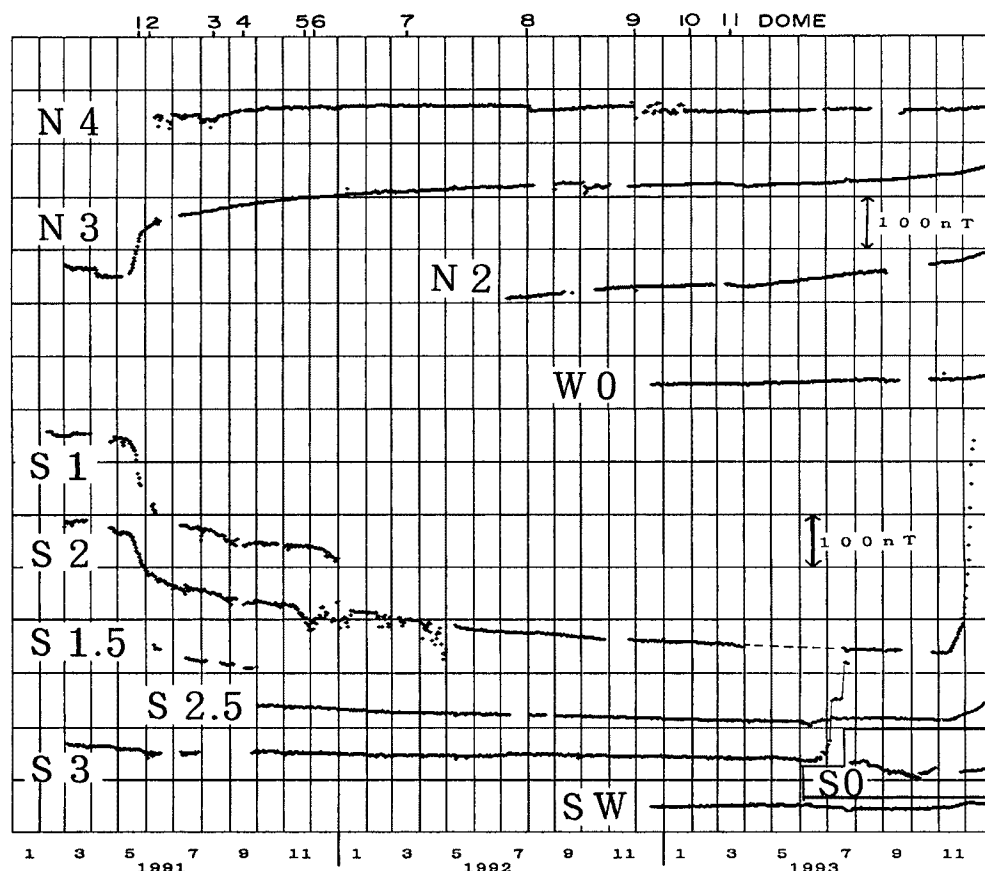


Fig. 5 Geomagnetic changes observed at the summit of Unzen volcano. Mean values from 0h00m to 4h00m were shown.

磁化を 3 A/m とすれば、半径 145 m の球に等価な体積である。火山岩の比熱を 0.5 、温度変化を 200°C とすれば、 $5.4 \times 10^{22} \text{ erg}$ の熱が伝わらねばならない。わずか 11 日の間に、この様に大きな体積の火山岩を熱消磁することはやや困難であろう。この時期に、地獄跡火口を挟んで落差 1 m を越える正断層が生じたこと、大きな山体の膨張を示す地殻変動が観測された¹⁸⁾ こと、などを考えると、第1ドームの貫入に伴って、磁性体である古い火山岩が押し退けられ、非磁性溶岩に置き変わったり、空隙が作られて、熱消磁に等価の地磁気変化を生じた可能性が強い。

4.5 1991年10月から1992年2月の地磁気変化

1991年5月のドーム出現以後、1992年2月までに、第6ドームまでが出現し、断続的ではあるが日量にして $20 \sim 30 \text{ 万 m}^3$ の溶岩噴出が持続した。一方、地磁気変化は、第2ドーム出現の後、1991年7月から1993年7月頃まで、北側の観測地点ではプラス、南側の地点ではマイナスの、比較的緩慢な変化を示した。

特に、1991年10月から1992年2月の期間においては、いずれの地点でも、磁場はほぼ線形に変化しており、原因となる源の位置は動いてないとみなせる。地磁気変化量は $N4$ 、 $N3$ 、 $S2.5$ 、 $S3$ において 100 日につき、それぞれ、 5 、 13 、 -9 、 -6 nT である。源が一点に集約出来るものとして、磁気異常の中心を求めると、地獄跡火口の中心から、北 125 m 、西 300 m 、深さ 220 m （海拔 1030 m ）となる。また、磁化 3 A/m を仮定すると、消磁体積は 260 万 m^3 で、半径 85 m の球の体積に等価である。この位置は、Fig. 1にSBとして示してある。

この変化を熱磁氣的なものと考えれば、先と同じく、温度変化を 200°C 、比熱を 0.5 と仮定すれば $1.1 * 10^{22}\text{erg}$ の熱エネルギーが必要である。100 日間に、この程度の熱が火山岩に伝達する事は、阿蘇火山の例³⁾ (1989 年において 10^{21}erg/月) を見れば十分にありうべきことである。

4. 6 1992 年から 1993 年 10 月までの地磁気変化

1992 年の雲仙岳山頂部における地磁気変化は Fig. 5 では読み取れないから、Fig. 6 に拡大図を示す。データに欠測があり不連続な箇所は、センサーの交換などが行われており、前後で接続して考察されるべきである。1993 年 6 月中旬に、S3 地点で急激な磁場の増加が観測されているが、南東部の谷で激しい侵食が生じた影響である。S2.5 地点にも、この影響が及んでいるものと考えられる。

1992 ~ 1993 年には、第 7 から第 11 ドームまでの 5 つのドームが出現した。地磁気変化を詳細に調べると、1992 年から 1993 年の変化は一様ではなく、1992 年 7 月末や、1993 年 3 月、および、1993 年 11 月に変化率が変わっている。すなわち、1991 年から続いていた地磁気変化は、とくに N4、S2.5、S3 地点で明らかのように、1992 年 4、5 月頃に停止、あるいは、わずかに反転したが、第 8 ドームが出現した 1992 年 8 月から、再び、従来の変化を続けている。また、第 11 ドームが出現した 1993 年 3 月にも類似の変化が N3、N2 や W0 の地点にみられる。このように、一部のドームの出現に対しては、対応する地磁気変化がみられる。しかし、第 7、9、10 ドームの出現の時期には、明瞭に対応する地磁気変化はみられない。

1993 年 3 ~ 4 月にドーム北側の地点においてのみ、4 月初旬に極小を示す湾型変化が観測されている。この振幅は N2 や N3 地点で約 5 nT に達するが、N4 や W0 地点では約 1 nT 程度と小さく、局所的な磁

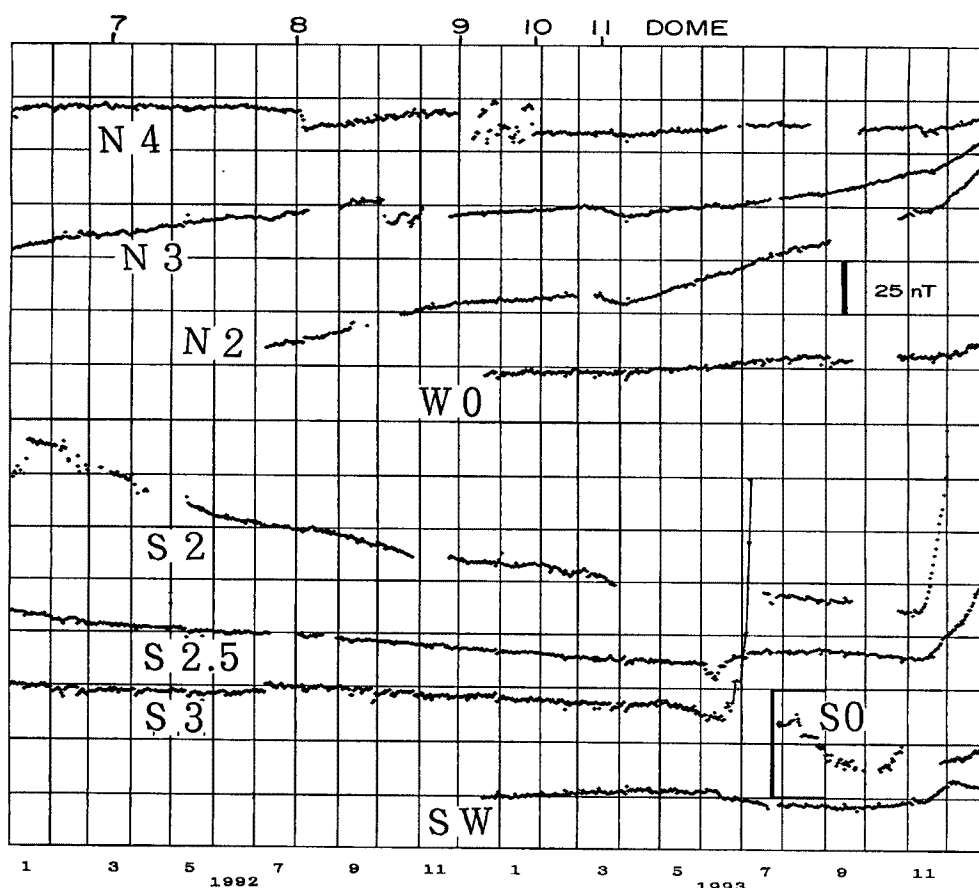


Fig. 6 Expansion of geomagnetic changes observed on Unzen volcano.

場変化である。この地磁気変化の原因はよく判らないが、ドーム北西端のF5（光波測量点）が北西方向に約2m移動したことや、急速に成長した第10溶岩ドームの北西の崩落などの影響であろう。

一連の地磁気変化には、局所的な磁場変化が混在しているらしく、正確な位置決定には成功していないが、1993年7～8月の変化からは、消磁領域の中心は、屏風岩火口の北端、深さ150mあたりと推定される。第8および第11ドームの出現の後、地磁気変化が急峻になり、数カ月以上も、その傾向が持続していることは、熱磁気モデルに従えば、とくに、これらのドームの貫入に際して、多量の熱が地下から貫入したものと考えられる。

4.7 1993年12月の地磁気変化

1993年11月には火口南西部の地殻変動が大きくなり、また、火山性地震が頻発した。これに伴って、地磁気変化はFig. 7に示すように、11月中旬にはS2, S2.5, SW地点での磁場が急激に増加しはじめた。特に、S2地点の変化は大きく、観測不能になる12月12日までに、約400nTにも及んだ。この大きな磁場の増加は、第10ドームのすそ野が南西方向に崩落し、普賢神社の東端および、竜の馬場北部に堆積した影

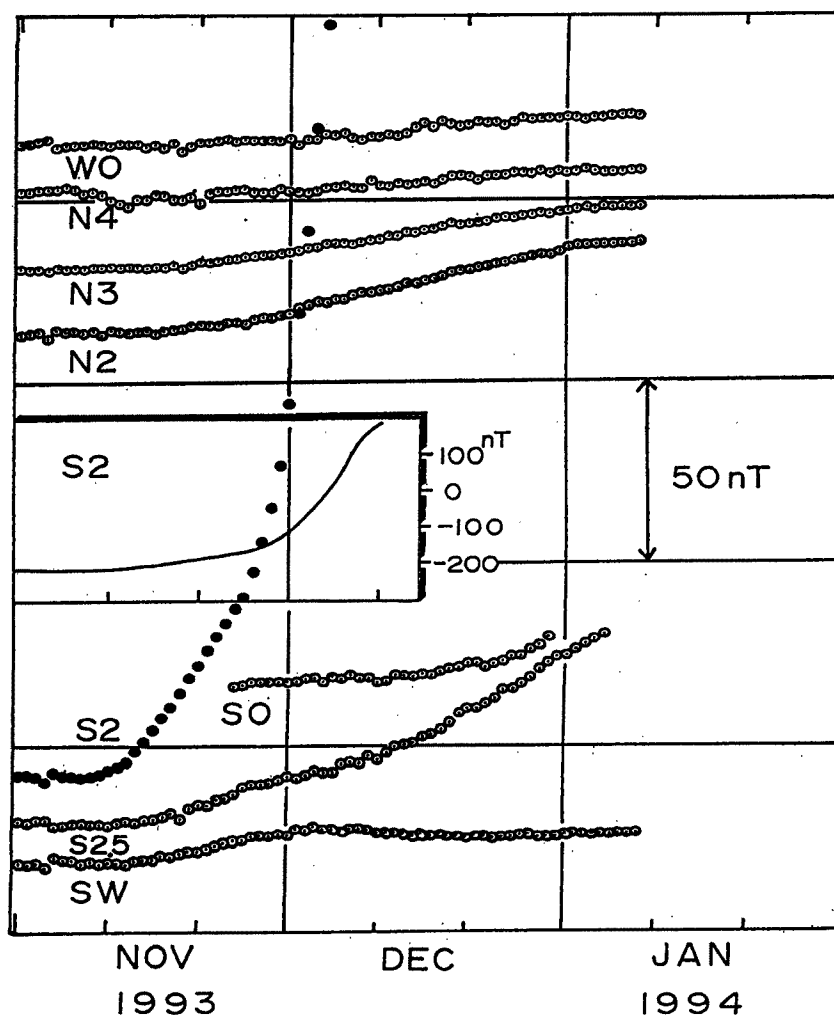


Fig. 7 Geomagnetic changes observed from November 1, 1993 to January 9, 1994.

響に加え、地点S2の直下で発生した逆断層が影響しているものと考えられる。

1993年12月の地磁気変化量は各観測地点で、下表に示す如くである。これらの地磁気変化を説明するには、少なくとも、ドームの北側に消磁、ドームの南側に帯磁の源を必要とする。地獄跡火口を中心とする北、東、下向きの座標を用いると、(−125, −115, −25) m に帯磁源を置き、(89, −204, −109) m に消磁源を置くと、下表の計算値が得られ、観測された地磁気変化をうまく説明できる。これらの位置はFig. 1にSCおよびSBとして示してある。

地点	N4	N3	N2	S2	S2.5	SW	W0
観測値 nT	5	11	18	(300)	33	−3	6.5
計算値 nT	3.6	11	18.2	424	31.3	−3.1	6.7

S2地点での誤差が大きいのが、S2の直下で12月中旬に、北側が約3m隆起する断層を生じ、直後に観測を中断したこともあり、重視すべきではない。

源SCは普賢神社の南で、ドーム南西部が崩落し溶岩が堆積した位置である。地表に接しており、ここに帯磁の中心が求められたことから、以下の事が帰結できる。崩落した古い溶岩ドームは火砕流を発生するほど高温ではないが、磁気的には比較的高温(例えば350度以上)で、十分に帯磁してはいなかった。崩落に伴い1m前後の小さいブロックに破碎され、堆積した時点で急速に冷却されて磁化を獲得した。

一方、ここで求められた負の源、SBの位置は、従来から消磁の進行していた位置に概略等しい。第12ドーム出現(1994年1月)の直前に、この領域で従来にもまして、消磁が進行したと見なせる結果は、第8ドームや第11ドームの出現した時の変化に似ており、新規の熱がSB付近に供給された可能性がある。このことは、1993年11月～12月に地震活動が激しくなったことや、ドームの南西部で地殻変動が激しくなった事実とも整合する。

SBの深さが浅く、空中に飛び出していることは、ソースを2つに限定したことや、観測地点そのものが地形変形に伴って、絶対位置を変えてしまっていることにも起因するであろう。今後の詳細な解析に待たねばならないが、たとえ観測地点の移動量が正確に求められたとしても、3次元的な磁気異常が分からぬ限り、この影響を見積ることは困難である。

5. 地震活動や溶岩噴出量と地磁気変化の関係

今までの考察では磁場変化を火山活動の時間的経過としてたどってきた。ここでは、圧力磁気効果などを考察する上で、地震活動や、溶岩の噴出量との関係を、再度、考察してみる。

5.1 地磁気変化と地震活動

地震活動の最盛期あるいは、その直前には地下の圧力が高まっていると考えてもよい。ピエゾ磁気モデルに従えば、地下の浅い部分に力源がある場合、圧力が高まると、地表の磁場は南側で増加、北側で減少すると考えられる¹⁵⁾。つまり、磁化が増加したと等価の結果になる。

第1ドームの貫入以後、山体のストレスが開放されていると考えるなら、第1ドーム出現以来、一貫して持続している磁化の減少傾向は圧力磁気効果と符合するとの考えは否定できない。しかし、この考えでは噴火直前に大きな磁化の獲得が観測されていない事をうまく説明できない。

Fig. 8に野岳における地震の日別発生回数およびドーム出現の時期を引用した²⁰⁾。

地震の発生回数はドーム出現の時期、あるいは、それにやや先行して活発になっている。あるまとまりの溶岩の流出に先だって、火道に力が加わり、火道周辺の溶岩を破碎することを示しているものと推定される。このような地震活動の消長に対応してピエゾ磁気効果らしき地磁気変化がみられるであろうか。

第1ドームや第2ドーム出現の時期にはドーム近傍での消磁に等価な磁場変化が観測され、第1ドーム出現前後の地震活動は地磁気変化と明瞭な対応がある。しかし、第3、第4ドーム出現の時期にはS1、S2、

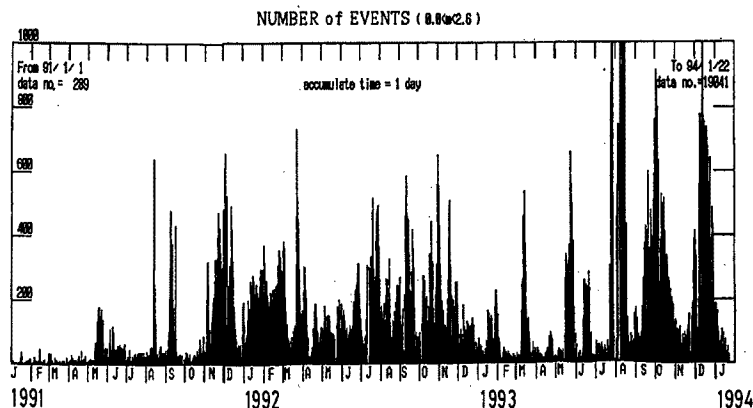


Fig. 8 Daily occurrences of earthquake observed at Nodake which located about 2 km southwest from the active Jigokuato crater.

N 4 地点で、わずかに対応があるようだが、明瞭ではない。また、5, 6, 7, 9 および 10 ドームとの対応は認められない。しかし、第 8 ドーム出現の時期を境に、各観測地点でドーム近傍の消磁が加速されたと等価の地磁気変化が観測されているし、11 ドーム出現の時点で N 2, 3, 4 地点などいくつかの観測地点でやや特異な磁場変化がみられる。

このように、地磁気変化と地震活動の対応は悪く、雲仙火山においては、圧力磁気効果は卓越しているようにはみえない。

5.2 地磁気変化と溶岩噴出量の関係

溶岩の噴出量は火山活動の最も重要な指標の一つである。傾斜変動に含まれる、数分から 1 時間程度の比較的短周期の特徴的な波形の解析から、山科¹⁶⁾は溶岩噴出量を推定している。溶岩は一定のしきい値以下では流動せず、火道内部で圧力が高まり火口方向を押し上げるが、しきい値に達すると流動して地表に到達する。その結果、火口方向の傾斜が下がる。このパルス振幅を積分し、実際に地表で観測された溶岩噴出量で係数を求めておけば日々の溶岩噴出量が求められる。Fig. 9 はこのようにして傾斜変動から推定された溶岩の流出量である。

これによれば、1991 年は日量 20-40 万 m^3 であったものが、1992 年初頭から夏にかけて 10 数万 m^3 に減少し、さらに 10 月から年末にかけては数万 m^3 に減じている。しかし、1993 年 1 月末には 20 万 m^3 に増加し、以後 10 万 m^3 以上の溶岩が継続的に流出している結果が得られている。

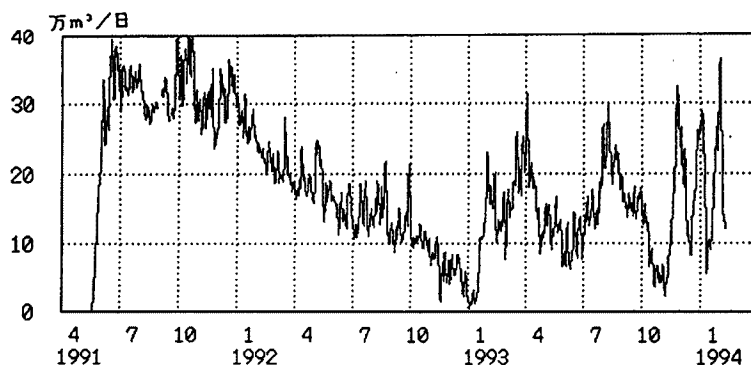


Fig. 9 Trend of extruded lava which is estimated by integration of pulse amplitude in a tilt-meter.

第 1 ドーム出現以来、指数関数的に変化していた地磁気変化は、ほぼ全地点で 1992 年 6 月末に停滞している。溶岩噴出量の変化でも、この時期に 10 数万 m^3 で横ばいとなる。溶岩供給量の減少は熱の供給の減少をも意味するわけで、地磁気変化に関わる火道周辺の火山岩の温度上昇も緩和されると考えられる。この点では両者に類似点が見いだせる。しかし、地磁気変化は 1992 年 8 月（第 8 ドーム出現の時点）には再度、磁化の減少を示しはじめている（南の観測地点で負、北側で正の変化）。地表に出現する溶岩の多寡はマグマ溜りの圧力、火道の形状や粘性などに依存する。1992 年夏から年末まで、溶岩の噴出が減少したが、地磁気変化はこの時期にも磁化の減少を示している。さらに、1993 年 3 月、8 月や 11 月に溶岩噴出量のピークがみられるが、これらに対応する顕著な地磁気変化はみられない。このことから、圧力磁気効果の卓越を示唆する結果は得られていない。

一方、地磁気変化の原因を熱消磁に求めるならば、1992 年の夏以降、火道周辺の地下には、従来にも増して、多くの熱が蓄積されたことを示唆し、溶岩噴出の減少は火道の浅い部分で流出を押さえる機構が働き、余剰の熱が蓄積されつつあったと解釈される。

6. 熱磁気的な立場から

ドームの貫入に伴って地下浅部に多量の熱が輸送されたことは明白である。その多くは溶岩とともに地表に噴出し、一部は火砕流として、観測の系外に去った。また、一部は水蒸気として空中に散逸した。噴煙柱の大きさから推定された熱放出量は 1000M ワット程度である（鍵山私信）。第 1 ドーム貫入以後に観測された一連の磁場変化は、大局的に指数的な変化である。これは、溶岩噴出に伴って輸送された熱が地下で拡散を続けている姿にほかならないであろう。熱磁気変化は火山岩に含まれる磁性鉱物の温度磁気特性に依存している。雲仙の火山岩についても磁性の主役はチタノマグネタイトやマグネタイトが担っていて、前者は約 400℃、後者は 580℃にキュリー温度を持つ。このため、火道近傍の温度がキュリー温度にまで高められると、もはや磁化は減少しなくなる。一方、ドームが冷却されれば、地球磁場の環境で磁化を獲得する。熱拡散が進行し、消磁が進む中で、他方ではドーム表層の帯磁が進行すると言う、やや込み入った事態が生じる。筆者は、この熱拡散は延々と続くものではなく、地下水との相互作用により、かなり限定された領域で生じるものと考えている。つまり、ドライな火山岩とウェットな火山岩の境界が問題となり、ここで大きな気化潜熱を消費するからである。火山活動の衰弱は過熱水蒸気の発生を弱め、地下水の溶岩への接近を容易にする。この結果、熱伝導などで期待されるよりも、ずっと速い速度で帯磁が進行する。例えば、1992 年 6～7 月、あるいは、1992 年 12 月の時点で、多くの地点で磁場変化が停止あるいは、反転した事にもみられる。この性質を利用すれば火道近傍の熱的な状態が把握出来ることになる。

磁場変化を通して見た、今期の雲仙の火山活動において、1991 年 5 月の第 1 ドーム、1992 年 8 月の第 8 ドーム、1993 年 3 月の第 11 ドームそして、第 12 ドーム出現直前の 1993 年 11～12 月において、地下浅部に熱が貯留されたと判断される。

1993 年末の時点でも、磁場変化から推定して、地下の浅い部分で、今も尚、高温の領域が拡大し続けていると考えられる。深部からの熱の供給が止まれば、火道の表層部が完全に閉塞されないかぎり、熱消磁の進行は停止し、帯磁の傾向に転向するものと考えられる。

7. おわりに

1994 年春にまで持続している、一連のドームを中心とした磁化の減少は、1991 年 5 月～6 月の第 1、2 ドームをはじめ、高温の火道から供給され続けている熱による火山岩の消磁であると考えられる。

1994 年春までに 12 のドームが出現したが、地磁気変化からは 1991 年 5 月（1 ドーム）、1992 年 8 月（8 ドーム）、1993 年 3 月（11 ドーム）そして、1993 年 11 月末（12 ドーム）に、地下浅部に顕著な熱が供給

されたと考えられる。

この報告には解析が間に合わなかったが、1993年11月以降、山頂部において顕著な地殻変動が観測された時期に、フラックスゲート型の高感度磁力計を用いて、地磁気3成分の観測が行なわれた。地殻変動や地震活動との比較解析が進めば、圧力磁気効果の存否がより明瞭になるものと期待される。

また、火山活動に伴う流動電位が原因と考えられる顕著な自然電位の変化が観測されている¹⁷⁾。地磁気変化との対応を調べることで、地電流の作り出す磁場の大小も明らかにされるであろう。

ここに得られた知見により、雲仙火山のみならず、普遍的に、火山活動に伴う地磁気変化とはどのようなものか、あるいは、どのような地点で観測することが大切であるか等が明らかになった。

我々の観測は火口の周辺部に限定されていた。火口から、より遠い地点で火山性磁場変化が抽出できれば、深い位置での熱の変化がわかり、長期の火山活動予測に役立つであろう。しかし、今期の雲仙の火山活動でも明らかになったように、地磁気変化は活動領域から離れると急速に減衰し、その信号の検出は困難になる。たとえ超伝導磁力計などが容易に利用出来るようになり、感度や安定性が向上したとしても、火山性磁場の抽出という大きな壁が待ちかまえている。我々は、活火山の火口近傍における地磁気観測の経験に乏しい。わずかな経験においてさえ、火山活動は同じ事を繰り返してくれない。この意味で、地磁気観測は現時点での状態把握には役立つけれど、予測と云った面では今後多くの事例を積み重ねなければならない。

この研究を行なうにあたり、九州大学島原地震火山観測所の太田一也教授はじめ、所員の方々には大変お世話になった。また、京都大学防災研究所の加茂幸介教授には筆者の火山性磁場の研究全般について、長年に渡りご指導を賜った。ここに記して、お礼を申し上げる。

また、この研究の一部は文部省科学研究費、雲仙岳溶岩ドームの形成と崩落に関する総合的観測研究（代表、太田一也）の助成を受けた。

大学合同地磁気観測班の構成は下記の如くである。

行武毅（九州大学理学部）・歌田久司・笹井洋一・上嶋誠・鍵山恒臣・増谷文雄（東京大学地震研究所）・半田 駿（佐賀大学教養）・村上英記（高知大学理学部）・山田功夫（名古屋大学）・三品正明（東北大学）・西田泰典（北海道大学理学部）・茂木 透（九州大学工学部）・下泉政志（北九州職業訓練大学校）・住友則彦・大志万直人（京都大学防災研究所）・本蔵義守（東京工業大学）

参考文献

- 1) Sasai, T., T. Shimomura, Y. Hamano, H. Utada, T. Yoshino, S. Koyama, Y. Ishikawa, I. Nakagawa, Y. Yokoyama, M. Oono, H. Watanabe, T. Yukutake, Y. Tanaka, T. Yamamoto, K. Nakaya, S. Tsunomura, F. Muromatu and R. Murakami: Volcanomagnetic Effect Observed during the 1986 Eruption of Izu-Oshima Volcano. *J. Geophys. Geoelectr.*, Vol. 42, 1990, pp. 291-317.
- 2) Hamano, Y., H. Utada, T. Shimomura, Y. Tanaka, Y. Sasai, I. Nakagawa, Y. Yokoyama, M. Ohno, T. Yoshino, S. Koyama, T. Yukutake, and H. Watanabe: Geomagnetic variations observed after the 1986 eruption of Izu-Oshima Volcano, *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol. 42, 1990, pp. 319-335.
- 3) Tanaka, Y.: Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso volcano, *J. Volcan. Geotherm. Res.*, Vol. 56, 1993, pp. 319-338.
- 4) 田中良和：地磁気変化からみた1989年の阿蘇火山活動，CA 研究会論文集，1990，pp. 127-132.
- 5) 山崎明・中禮正明・角村悟・中島新三郎：草津白根山における全磁力変化の解析：1990年の顕著な全磁力変化と熱消磁モデル，地磁気観測所要報，Vol. 24-2，1992，pp. 53-66.
- 6) 田中良和・大学合同観測班：雲仙火山噴火にともなう地磁気変化（1991年），地磁気観測所技術報

- 告, Vol. 32, 1992, pp.239-248.
- 7) 田中良和・大学合同観測班：雲仙火山噴火にともなう地磁気変化 (1991-92), CA 研究会 1993 年論文集, 1993, pp.206-211.
 - 8) 田中良和・大学合同観測班電磁気グループ：雲仙火山噴火にともなう地磁気変化 (1991), 雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究, 総合研究 (A) 研究成果報告書, 代表太田一也, 1992, pp.87-98.
 - 9) Ohta, K. N. Matsuwo and T. Yanagi: The 1990-1992 Eruption of Unzen Volcano, Unzen Volcano the 1990-1992 Eruption, The Nishinippon & Kyusyu University Press, 1992, pp.34-37.
 - 10) 依田和四郎：島原半島眉山周辺における地磁気異常に就いて, 地球物理, 第 3 巻 1 号, 1939, pp.26-68.
 - 11) 依田和四郎：島原半島眉山周囲の地磁気異常 (Ⅱ) とその長期変化に就いて, 地球物理, 第 9 巻, 第 3 号, 1954, pp.155-202.
 - 12) 半田駿・田中良和・鈴木亮：島原半島の磁気異常, 佐賀大学教養部研究紀要, Vol. 21, 1989, pp.27-37.
 - 13) 中塚正・森尻理恵・牧野雅彦・宮坂聡：雲仙火山周辺の高密度空中磁気探査 (1991 年 8 月), 地磁気観測所技術報告, 第 32 巻特別号, 1992, pp.266-272.
 - 14) 田中良和・増田秀晴・河村謙・大地 洸・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一(1977), 阿蘇火山の集中総合観測 (第 1 回) 報告, 1978, pp.31-39.
 - 15) Sasai, Y.: Piezomagnetic field associated with the Mogi model revisited: Analytic solution for finite spherical source, J. Geomag. Geoelectr., Vol. 43, 1991, pp.21-64.
 - 16) 山科健一郎・井上義弘・清水 洋・松尾綱道：雲仙火山の噴火と傾斜変動, 雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究, 平成 3 年度科学研究費, 総合研究 A 研究成果報告書, 1992, pp.50-59.
 - 17) 橋本武志・田中良和・増田秀晴・歌田久司・鍵山恒臣・増谷文雄：1991 年の雲仙岳における自然電位観測, 地磁気観測所技術報告, Vol. 32, 1992, pp.249-255.
 - 18) 斉藤英二・須藤茂・曾谷龍典・風早康平・川辺禎久・星住英夫・渡辺和明・遠藤秀典：光波測距による雲仙普賢岳の 1991-1992 年噴火時の山体変動観測, 地質調査所月報, Vol. 44, 1993, pp.639-647.
 - 19) 中田節也・大学合同観測班地質グループ：雲仙普賢岳 1991-1992 年噴火で生じた溶岩ドームの推移, 雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究, 平成 3 年度科学研究費総合研究 A, 研究成果報告書, 1992, pp.112-123.
 - 20) 須藤靖明・迫幹雄・増田秀晴・外輝明・山田年広・吉川慎・筒井智樹：雲仙火山野岳における地震観測(2), 平成 4, 5 年度文部省科学研究費総合研究 A, 雲仙岳溶岩ドームの形成と崩落に関する総合的観測研究, 研究報告書, 1994, pp.23-37.
 - 21) 渡辺一徳・星住英夫・池辺伸一郎：雲仙普賢岳 1990 年 11 月～1991 年 5 月の噴火活動, 熊本大学教育学部紀要, 自然科学 41 号, 1992, pp.47-60.
 - 22) 太田一也：1990-1992 年雲仙岳噴火活動, 地質学雑誌, 第 99 巻, 第 10 号, 1993, pp.835-854.