

阿蘇火山における地磁気変化について (1991~2000年)

橋本武志*・田中良和*・宇津木充*

*京都大学大学院理学研究科

要旨

阿蘇中岳火口周辺で 1991~2000 年に観測された地磁気変化について、種々の観測量、とりわけ微動および表面活動との対応に注目して考察した。Tanaka (1993) が 1980~1990 年の活動期に注目して提唱した「熱消帯磁モデル」は、その後も基本的に有効である。微動振幅の増大は、物質と熱の輸送に深い関係があることが示唆され、火口直下の温度は、表層の物理状態に大きな影響を受けることが示された。

キーワード：地磁気，熱消磁，火山，阿蘇

1. はじめに

阿蘇中岳では、1989 年以来、プロトン磁力計を用いた火口近傍における地磁気全磁力の連続観測が行われている。1989 年から 1990 年にかけて中岳は活動期を迎えたが、Tanaka (1993) は、このときの地磁気変化を用いてその噴火機構について考察した。それによれば、火口近傍の地磁気変化は、基本的に熱による消帯磁モデルで説明でき、そのソースは火口直下数百 m と極めて浅いことを見いだした。さらに、中岳では、熱の蓄積と放出を制御する地表近くの物理状態が、噴火機構を考える上で重要であると主張した。Tanaka (1993) の成果により、地磁気変化を地下浅部の熱的状態の監視に利用できる可能性が開けたが、火山活動の指標の一つとして地磁気変化を実用的に利用するにはさらなる事例の蓄積と検証が必要である。そこで、本稿では、まず 1991 年から 2000 年にかけて得られた地磁気変化について、火山性微動、湯だまり温度等の観測量、および土砂噴出等の表面活動との関係に着目しつつ、現象の記述を中心にまとめる。次に、それぞれの現象間の因果関係に注意して、地磁気変化が捉えている現象の実体について考察し、Tanaka (1993) の提唱した考え方が引き続き有効かどうかを検討する。

2. 観測と使用したデータの概要

中岳周辺における各観測点の配置を Fig. 1 に示す。地磁気全磁力の連続観測点は、北から C3, C1, S0, W1 の 4 点である。プロトン磁力計によって毎分もしくは毎 5 分の計測が行われている。

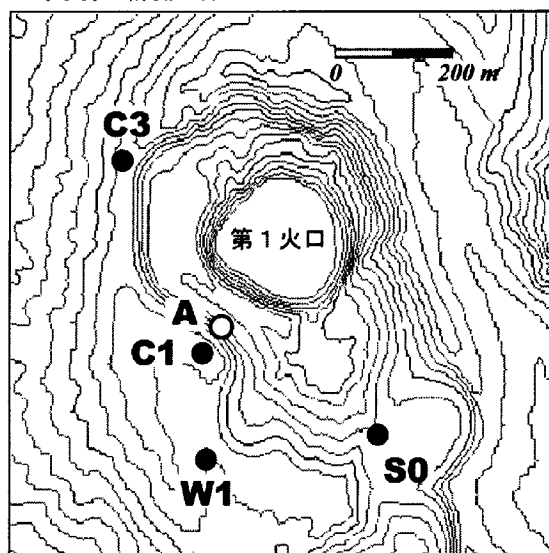


Fig. 1 Location map of geomagnetic observations (Kyoto Univ.) and thermometry (JMA) around the crater of Aso.

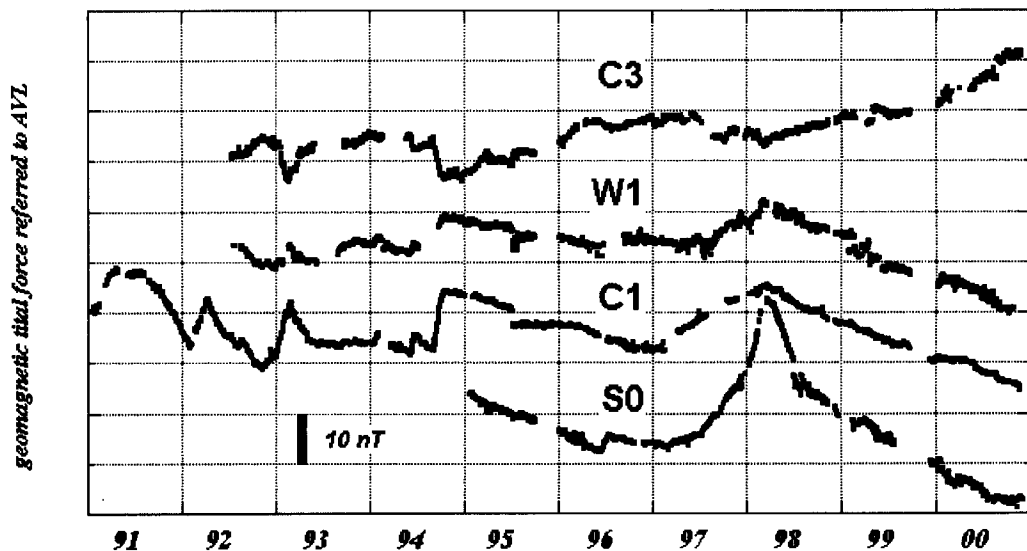


Fig. 2 Changes of geomagnetic total force observed around the crater of Aso during the period of 1991-2000. Daily averages using midnight data (00h-04h) are plotted. The reference data for reduction is obtained at Aso Volcanological Laboratory.

Fig. 2 に、1991 年から 2000 年までの地磁気全磁力変化を示す。ここでは、日変化等の地磁気変化を除去するために、京都大学火山研究センター（火口から約 7km 西方）における全磁力値との単純差を取り、夜間（0 時から 4 時）の平均値を日毎にプロットしている。

次に、最も長期に亘って安定してデータが取得されており、かつ変化の特徴をよく表している C1 観測点のデータで地磁気変化を代表させて、他の観測量と比較した図を Fig. 3 に示す。火山性微動の振幅は、京都大学火山研究センターの砂千里 (SUN) 観測点（第 1 火口から約 1 km 南）の地震計記録から日平均値として算出されたものである。ここでは、代表的なものとして周波数 3.1Hz の帯域を表示した。孤立型微動の発生回数は、気象庁阿蘇山測候所の観測によるもので、0.5 μm 以上の振幅を有する孤立型微動の月別回数を表す。なお、気象庁では、土砂噴出に伴う地動は「特殊微動」として分類されており、ここに示した孤立型微動の回数には反映されていない。孤立型微動は、通常継続時間が短いので、よほど高い頻度で発生しない限り日平均振幅の変化としては表れてこない。湯だまり温度は、気象庁が不定期に赤外放射温度計を用いて現地観測しているもので、Fig. 1 の A 点から湯だまり表面の最高温度を遠隔測定したものである。温度計の特性上、観測点と測定対象を結ぶパスが火口からの噴気に遮られた場合、温

度が実際より低く測定される。Fig. 3 を見ると、湯温の測定値には 10℃ 程度のばらつきがあることがわかるが、これは湯気による誤差が含まれているためであろう。したがって、実際の湯温は、ばらつきの上限よりやや高いところにあると思われる。本稿では長期的な時間変化のみに着目し、温度の絶対値については議論しない。湯だまり量の推移は、火山噴火予知連絡会の報告書、気象庁発表の定期火山情報および須藤 (1995) を参考にして作成した。雨量データには阿蘇山測候所で記録された日別降水量を用いた。

3. 地磁気変化の特徴

Tanaka (1993) により、火山活動に起因する地磁気変化のソースは、近年活動を続けている第 1 火口直下数百 m の深さにあることが明らかになっている。ソースより北側と南側で相補的な地磁気変化が観測されており、地磁気変化の源は等価的に単一の磁気双極子の消長で近似できる。Fig. 2 から明らかなように、1991 年以降のデータについても C3 観測点が北型、それ以外の観測点では南型の相補的な変化を示しており、第 1 火口直下に等価的な磁気双極子の変動源があると考えて良い。

Tanaka (1993) が提唱した熱消帯磁モデルがその後のデータに対しても引き続き有効かどうかを検証する前に、その要点をまとめておく。1989～1990 年の

活動期の考察を通じていくつかの重要なことが明らかになった。とりわけ重要なのは、火孔（火口底に開いた pit crater を阿蘇火山ではこのように呼称している）の開閉、土砂噴出、湯だまりの有無など表面現象の変化に対して、地磁気が迅速に反応するという事実であった。地磁気変化が地下浅部の温度変化によるものだとすると、このような速い温度変化は伝導のみによる熱輸送では説明できない。このことから、火口直下の地下浅部では地下水あるいは火山性流体の移動を伴った効率的な熱輸送が行われていることが主張された。また、地磁気変化の変曲点では、しばしば火山性微動の活動に急変がみられることも、熱輸送に流体が関与していることを示唆するものとして注目された。また、

事実関係を大まかに整理してみると、火孔の開閉、土砂噴出、微動の増大などの諸現象は、磁化の増加、すなわち地下浅部の冷却を促す働きがあり、逆に、火孔の開閉、湯だまりの形成、微動の停止などの諸現象は、磁化の消失、すなわち地下浅部の加熱をもたらしているように見えた。これらの洞察から、Tanaka (1993) は、火口底のごく表層の物理状態が中岳の蓄・放熱過程を支配しているのではないかと推測した。ただし、上に述べた地磁気と諸現象との対応には表層の状態変化では説明できない例外もあり、例えば 892 火孔が開閉したあとは熱消磁が継続した。このように、表面現象で説明が付かないことについては、今のところ、深部からの熱供給量の変化にその原因が帰せられている。

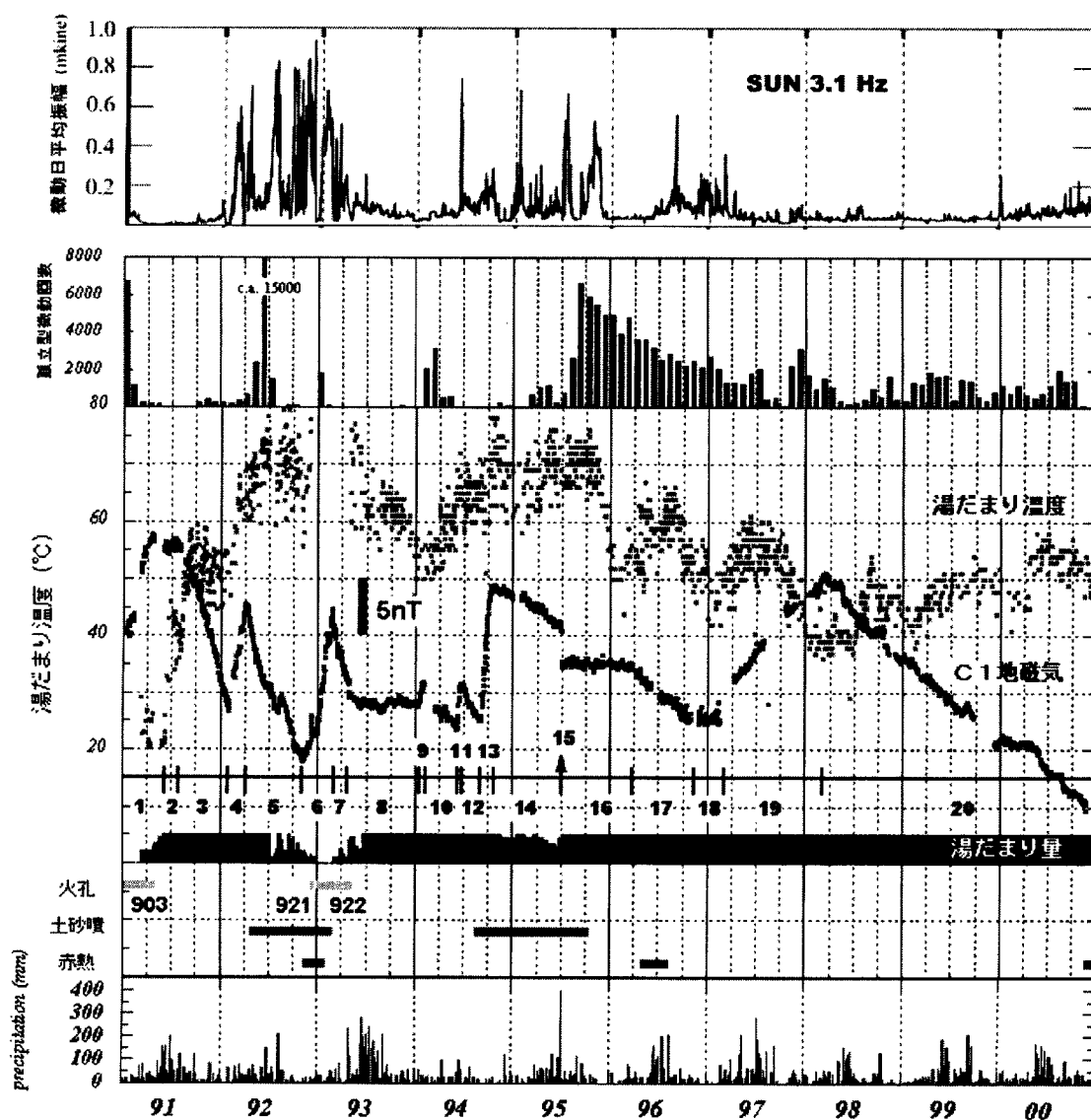


Fig. 3 Geomagnetic change compared with amplitude variation of tremors (daily mean), monthly number of isolated tremors, temperature and water level of the crater lake, and daily precipitation. Periods of vent-opening, intense mud eruptions, and incandescence are also indicated with bars.

Table 1 Description of characteristics of the activity. First and second columns show the period, divided with attention to geomagnetic changes. The third indicates geomagnetic changes. Symbols ▲, ▽, and — denote magnetization, demagnetization, and stagnant period, respectively. The fourth and the fifth show features of the daily-mean amplitude of tremors (Kyoto Univ.) and the number of isolated tremors (JMA), respectively. The sixth and the seventh describe general conditions of the crater and the temperature of the crater lake, respectively. The eighth shows a characteristic event coincident with the beginning of each period. In the rightmost column possible physical process are shown.

区分	時期	地磁気	微動振幅	孤立型微動回数	火口概況	湯だまり温度	開始時に対応する 特徴的な現象	推測し得る物理過程
1	(1990. Sep.) ～ 1991. Apr.	▲	(‘90 年 9～12 月に 高レベル。) ‘91 年 1 月以降は急激 に低下。	‘91 年 1 月までは 非常に多いが、 それ以降は急激 に減少。	‘90 年 9 月に 901 火 孔が開孔。11 月に 902 火孔、12 月に 903 火孔が開孔。火 炎、赤熱噴石。 ‘91 年 3 月で 903 火 孔が消滅。湯だまり が形成され始める。	‘91 年 3 月まで は湯だまりな し。その後湯 だまりの成長 とともに温度 は急上昇。	901 火孔の開孔。	901, 902, 903 火孔の開孔で放熱 が進み、地下浅部で冷却帯磁。
2	1991. Apr. ～ 1991. Jul.	—	ほとんどゼロ。	極めて少ない。	湯だまりが徐々に 成長。‘89 年からの 活動が終息して最 も静穏な時期に 入った。6 月に極小 規模の土砂噴出。	湯だまりの成 長と共に急上 昇。	湯だまりの形成 (903 火孔の水 没)。	903 火孔の閉塞によって放熱が 減少、深部からの熱供給とバラ ンスした。このことから、903 火孔による放熱効果が失われ たことは、湯だまりの成長と温 度上昇に伴う放熱の増加より も大きかったことがわかる。
3	1991. Jul. ～ 1992. Jan.	▽	低レベルながら緩 やかに増大。その 後‘92 年 1 月にほと んどゼロになった。	少ない。	全面湯だまりで静 穏。	50℃程度で停 滞～僅かに減 少。	特筆すべきものな し(緩慢な変化で 開始時期が明瞭で ない)。	深部からの熱供給が何らかの 原因で増加したため、湯だまり からの放熱が追いつかなくな り、地下浅部で温度が上昇し た。
4	1992. Feb. 2 ～ 1992. Apr. 10	▲	1 月下旬に急増。2 月にピークを迎え る。	少ない。	全面湯だまりで表 面活動は低調。	急上昇。3 月に は 60℃を超え る。	微動振幅の急増。	微動振幅の増大に伴って熱が 放出され、湯だまり温度が上昇 すると共に、地下浅部では冷却 が進行した。

Table 1 Continued from the previous page.

区分	時期	地磁気	微動振幅	孤立型微動回数	火口概況	湯だまり温度	開始時に対応する特徴的な現象	推測し得る物理過程
5	1992. Apr. 10 ～ 1992. Nov. 5 頃	▽	3月下旬に急増した がすぐに減衰。4～5 月、8月は低レベル。 6～7月、9～11月に レベルが高くなっ た。4月以降の微動 には土砂噴出に伴 う振動が含まれて いると思われる。	4月から増え始 め、6月にピー クを迎える。8 月以降、ほとん どなくなる。	4月下旬から小規模 な土砂噴出が発生 し始め、徐々に大規 模に。湯だまりは 徐々に減少し始め る。	70℃前後を維 持。	孤立型微動の漸 増。	3月下旬の微動振幅の増加に呼 応して消磁が始まった。この時 点で深部からの熱供給量が増 え、4月以後の土砂噴出・湯だ まりの減少へと進行した。
6	1992. Nov. 5 頃 ～ 1993. Feb. 25	▲	'92年11月は10年 間で最も高いレベ ル。12月上旬に急減 したが、12月26日 の922火孔開口と共 に再び急増。	'93年1月に急 増した。	12月4日に921火 孔が、12月26日に 922火孔が相次いで 開口。ストロンボリ 式噴火。噴煙・火山 灰多量。	湯だまりは12 月初旬に消 滅。火炎も観 測される。	火孔の開口に先立 つ大規模な土砂噴 出活動。	921, 922火孔の開口に先立つ大 規模な土砂噴出活動で熱放出 が進み、火口直下は冷却傾向に 転じた。921火孔の開口に伴っ ても小規模な帯磁イベントが見 られる。922火孔開口以後は 冷却がさらに急速に進行した。
7	1993. Feb. 25 ～ 1993. Apr. 28	▽	2月20～25日に急 増。その後低レベ ル。	ほとんどなし。	1月末から湯だまり が回復し始める。3 月初旬には922火 孔の活動は一段落。	70℃程度から 低下傾向。	2/25の微動停止。	2/25の微動停止によって放熱 が減少した。
8	1993. Apr. 28 ～ 1994. Jan. 19	—	低レベル。'93年4 月28日に小ピーク 有り。	ほとんど発生し ていない。	922火孔は4/21に水 没。その後、全面湯 だまり。4/28-29大 雨(測候所で約 320mm)。6月中旬 に小規模な土砂噴 出があった。	70℃から55℃ 程度まで低 下。	4/28-29の豪雨。	4/28以降、深部からの熱供給が 減少したため、それまでの消磁 傾向が終わり、平衡状態に入っ た。豪雨で大量の土砂が火口に 流入すると共に、湯だまりが成 長したことが直接の原因とな っている。
9	1994. Jan. 19 ～ 1994. Feb. 初旬	▲	極めて低レベル。	ほとんど発生し ていない。	全面湯だまり。静 穏。	50℃近くまで 低下。	特筆すべきものな し。	原因不明。

Table 1 Continued from the previous page.

区分	時期	地磁気	微動振幅	孤立型微動回数	火口概況	湯だまり温度	開始時に対応する特徴的な現象	推測し得る物理過程
10	1994. Feb. 初旬 ～ 1994. Jun. 7	▽	低レベル。2月にステップ状の小さな増加がある。	2月に急増。	全面湯だまり。3月末に第1火口南壁直下で噴湯を確認。噴湯の始まりと共に白濁。5月には小規模な土砂噴出が確認される。	上昇に転じる。	孤立型微動の急増。	深部からの熱供給が増加したため火口直下で温度上昇。孤立型微動の増加と関係がある可能性あり。噴湯によって湯だまりへも熱が輸送されている。
11	1994. Jun. 7 ～ 1994. Jun. 17-20 頃	▲	6月7日未明から急増（土砂噴出に伴う可能性大）。その後一旦下がる。	6月からほとんど観測されなくなった。	全面湯だまり。湯だまりの中で噴湯が始まった。この期間、雨が多い。	60℃を超えて上昇中。	微動振幅の急増。	土砂噴出（未確認）と噴湯によって放熱が促進され、火口直下は冷却した。湯だまりに熱が移動した形。
12	1994. Jun. 17-20 頃 ～ 1994. Sep. 6	▽	中レベル。6月20日、大振幅の連続微動発生。	ほとんどない。	全面湯だまり。静穏に推移。噴湯さか	60～65℃の範囲で上昇。	不明瞭。	土砂噴出活動（未確認）が衰えたため、放熱が減少し、徐々に蓄熱過程に入った。
13	1994. Sep. 6 ～ 1994. Oct. 中旬	▲	9/6以降増大（土砂噴出に起因するものと思われる）。	ほとんどない。	全面湯だまり。9/11～10/17の期間、激しい土砂噴出活動。	65℃程度を維持。	土砂噴出。	激しい土砂噴出活動によって火口直下の冷却が急速に進行した。
14	1994. Oct. 中旬 ～ 1995. Jul.2	▽	'94年10月中旬から12月初旬まで一旦減少。'94年12月と'95年1月、2月、3月、4月、5月、6月に小規模な急増イベントあり。	ほとんどない。	'94年11月下旬から湯だまりは徐々に減少。'95年5月には6割に。ここで激しい土砂噴出は一段落したが、'95年4月までは断続的に発生。4～7月は土砂噴出なし。6月の大雨で湯だまりは急速に回復。	65～70℃前後を維持。	特筆すべきものなし（緩慢な変化で開始時期が明確でない）。	土砂噴出と湯だまりの蒸発による放熱が、深部からの熱供給に追いつかず、火口直下で加熱が進行した。熱供給が増えた原因は不明。
15	1995. Jul. 2	ステップ状の消磁。	空振を伴う大振幅の微動発生。	ほとんどない。	ほぼ全面湯だまり。	70℃前後。	03:46の土砂噴出。	大規模な土砂噴出により火口底が短時間に破壊・攪拌され、消磁と等価な現象が発生した。

Table 1 Continued from the previous page.

区分	時期	地磁気	微動振幅	孤立型微動回数	火口概況	湯だまり温度	開始時に対応する特徴的な現象	推測し得る物理過程
16	1995. Jul.2 ～ 1996. Apr. 頃	—	‘95 年 7 月は微動高レベル。8 月は低調。9 月初旬に中レベルまで増大, 10 初旬にも増大, 11 月末までは高レベル。それ以後は低レベル。	‘95 年 8 月以降急増。	7/2.4 に空振を伴う土砂噴出。この期間の豪雨で全面湯だまりに。その後 10 月末にかけて断続的に土砂噴出が発生。	‘95 年 11 月頃までは 70℃前後を維持。その後‘96 年初頭に掛けて急速に低下。50℃程度に。	7/2 の土砂噴出とそれに続く 7/3 の豪雨。	7/2 の土砂噴出開始によって、熱放出のレベルが上がりが、深部からの熱供給とバランスした。豪雨で火口底の状態が大きく変化した可能性あり。
17	1996. Apr. 頃 ～ 1996. Nov. 頃	▽	‘96 年 6 月以降急増。8 7 月にさらに急増。8 月をピークに中レベルに下がる。	徐々に減少しているが依然として多い。	全面湯だまり。4 月から 7 月にかけて南壁で赤熱。7 月末に小規模なものは土砂噴出はない。6 月以降噴湯あり。	60℃前後まで上昇。	赤熱の開始。	地下浅部への熱供給が増えたことで、湯だまり温度が上昇し、赤熱も発生した。赤熱が終息してもなお消磁が進んだことは、火口直下に熱が蓄積されていることを示す。
18	1996. Nov. 頃 ～ 1997. Feb. 末	—	‘96 年 11 月下旬に急増。以後中レベルから徐々に低下。	徐々に少なくなっている。	全面湯だまり。静穏。	50℃前後まで低下。	微動振幅の急増。	顕著な表面活動はないが、微動に関連して熱放出が行われた可能性はある。
19	1997. Feb. 末 ～ 1998. Mar. 10-15 の間	▲	‘97 年 2 月末に急増。3 月初旬まで中レベル。以後低調。‘97 年 11 月に小さな急増あり。	徐々に減少。‘97 年 10 月には一旦ほとんどもなくなったがその後急増。	全面湯だまり。‘97 年 11 月に南壁直下から断続的に小規模な土砂噴出。	前半は 55℃程度まで上昇。‘97 年 9 月頃から急速に低下して 40℃まで。	微動振幅の急増。	‘96 年末から‘97 年初頭にかけての一連の微動増大に伴って放熱がさらに進んだ。
20	1998. Mar. 10-15 の間 ～ 2000. Dec.	▽	‘99 年末まで低調。2000 年 1 月に急増イベント。それ以降は徐々に増大, 2000 年末には中レベルに。	増減を繰り返しつつ中程度のレベル。	全面湯だまり。2000 年 11 月以降は南壁直下噴気地帯で赤熱が続く。噴湯現象ほぼ常時あり。	徐々に上昇。2000 年には 50℃前後まで回復。	特筆すべきものなし。	‘98 年 3 月頃に何らかの理由で火口直下への熱供給が増加した。

さて、Fig. 2 および Fig. 3 に示した最近 10 年間の地磁気変化を概観すると、3 つの明瞭な特徴が認められる。第 1 の特徴は、地磁気変化がほぼ折れ線で近似できることである。この特徴から、直線的な変化をしている期間にはある現象が一定の速度で進行しており、変曲点付近では何らかの突発的な変化が発生していることが想像される。したがって、地磁気の変曲点で期間を区分して、区分期間毎の物理的状態を考察するという取り扱いが有効であると思われる。また、ある区分期間とそれに続く区分期間の境界に何らかの特徴的な現象が発生しているならば、それを詳しく考察することで、物理状態（特に熱放出過程）の遷移がどのような機構で起こるのかについて手がかりが得られるであろう。2 つめの特徴は、地磁気変化がある範囲内で増減を繰り返していることである。このことは、地下で起こっている現象が非可逆性のものではないことを示唆している。3 番目の特徴は、1995 年頃を境にして、それ以前と以後を比較すると、地磁気の時間変化率が顕著に異なっていることである。この原因は今のところ明らかでないが、少なくとも表面活動で見る限り、1991~1995 年は、1989~1990 年の活動期に引き続く余波的な活動の時期であったのに対して、1995 年以降は全面湯だまりの状態が続いて極めて静穏な期間であったという違いがある。著者らは、地磁気変化の時間変化率は、地下浅部の熱が地表に輸送される仕組みと深く関わっていると考えているが、この問題に最終的な決着をつけるためには、火口湖を含む系の熱と物質の収支問題を定量的に取り扱う必要がある。これは本稿の範囲を超えるのでここでは議論しない。

本節では、作業仮説として Tanaka (1993) の考え方を一旦受け入れる。1991~2000 年の観測データを地磁気の変曲点によって 20 の区分期間に分け、各期間で観測された現象がこの作業仮説に基づいて自己矛盾なく説明できるかどうかを検証していく。各区分期間について、Fig. 3 から読み取れる現象の特徴を Table 1 にまとめた。区間のオンセットに対して特徴的にみられる現象があればそれも併せて記述してある。「地磁気」の欄には、帯磁を「▲」、消磁を「▽」、停滞を「—」の記号で表した。「火口概況」欄には、噴火予知連絡会報告書、気象庁の定期火山情報、および須藤 (1995) を参考にして、湯だまり量・土砂噴出・赤熱などの表面現象を記述した。また、現象の確認のため必要に応じて京都大学火山研究センターで取得された地動の連続煤書き記録も参照した。「推測し得る物理過程」の欄には、観測事実から現象の因果関係を推理し、熱消帯磁モデルに基づいて解釈される物理過程を記述した。

3.1 帯磁期の特徴

地磁気変化からみて帯磁、すなわち地下浅部の冷却が進行していると考えられる時期は、Fig. 3 および Table 1 によれば、第 1, 4, 6, 8, 9, 11, 13, 16, 18, 19 の 10 の区分期間である（第 8, 16, 18 期は停滞期であるが、それ以前が消磁期であるので相対的に帯磁傾向に変化したとみなす）。このうち、区分期間の始まりにみられた現象に着目すると、火孔の開口(1)、微動振幅の急増(4, 11, 18, 19)、土砂噴出(6, 13, 16)、大雨(8)、特になし(9)となっている。火孔の開口や土砂噴出の際には微動振幅の増大が伴うので、これらをも併せて微動の増大という分類にすると、10 例中 8 例でその開始時に微動振幅の急増が観測されたことになる。また、帯磁が進行している期間を通じて、噴煙、土砂が断続的に噴出し、微動振幅が高いレベルにある場合が多い。これらの事実は、微動振幅の急増と、火口直下の冷却開始との間に何らかの因果関係があることを想像させる。著書らは、帯磁のオンセットに振幅が急増するタイプの微動は、火孔の開口や土砂噴出と同様、物質と熱の輸送に関わりがあるのではなかろうかと推測している。その根拠のひとつとして、これらの微動振幅の急増期には、それに引き続いて湯だまりの温度が上昇しているという事実がある。これは、微動の実体となっているなんらかの力学過程に伴って地下の熱が（おそらく物質の輸送という形態で）湯だまりに注入された痕跡ではないかと考えられる。

ところで、微動振幅の急増は、帯磁期のオンセット以外にも頻繁に認められ、微動振幅が変化しても地磁気には明瞭な影響が認められないこともしばしばある。これは、平均振幅の変化として表れる微動の物理的実体には様々なものがあり、平均振幅の時間変化にはそれらが混在しているために、微動振幅のみからそれらを区別することが困難であることを示唆している。逆に、地磁気変化に注目しながら微動を分類・吟味することで、その発生機構を区別できる可能性があるのではなかろうか。

孤立型微動回数に関しては、各期間のオンセットに対応する急変は認められなかった。地磁気変化から見る限り、阿蘇火山で観測される孤立型微動は、地下浅部の冷却（地表への熱放出）に直接関与する現象ではないようである。

3.2 消磁期の特徴

地磁気変化からみて消磁、すなわち地下浅部の加熱が進行していると考えられる区分期間は、第 2, 3, 5, 7, 10, 12, 14, 17, 20 の計 9 例である（第 2 期は停滞期

であるが、前の区分区間が帯磁期であるので相対的に消磁に転向したとみなす)。このうち、区分期間の始まりに着目すると、湯だまりの形成(2)、微動の停止(7)、孤立型微動の増加(5, 10)、赤熱の開始(17)、明瞭なイベントなし(3, 12, 14, 20)となっている。消磁期には、湯だまりが形成されて表面的には静穏な状態であることが多いのが特徴である。また、帯磁期の場合と異なり、消磁期の始まりは緩やかな変化をしていることが多く、明瞭な開始イベントが対応付けられないことが多いのも特徴といえる。これらのことは、消磁期が、それ以前の土砂噴出や微動などの活動が終息するにつれて徐々に始まることを意味しているのかもしれない。

孤立型微動の増加が消磁期の始まりに対応している例が2つある。逆に、消磁期のオンセットに対応する微動振幅の急増イベントは見つかっていない。これらのことから、孤立型微動は深部から浅部（地磁気変化のソースが推定されている深度）への熱供給に関係があり、微動平均振幅の増大は浅部から地表への熱放出と関係があると考えられることもできるが、事例が少なく推測の域を出ない。1999年以前の変化をみると、C1観測点の全磁力値があるレベルまで減少すると土砂噴出や微動などが発生して冷却期に移移する傾向があるように思われる。このことは、中岳の火口直下に蓄積することができる熱エネルギーには上限があり、そのレベルを超えたとんらかの形でエネルギー放出が行われてきたことを示唆している。しかし、2000年に入ってからはいくまでの最低レベルを下回って消磁が続いており、地下浅部ではこれまでになく加熱が進行しているのではないかと推測される。何故、これまでのように冷却期に移移しないのか原因はわからないが、2000年11月以降、第1火口南壁で赤熱現象が継続していることから、地下浅部で温度が上昇していることは間違いないようである。

3.3 豪雨が原因となった例

第8期（1993年4月28日～1994年1月）の変化は、豪雨が端緒となったという点で特異である。このイベントは、阿蘇中岳の活動形態において本質的な問題を含んでいると考えられるので少し詳しく紹介しておく。

第7期と第8期におけるC1観測点の地磁気変化を詳しく見ると、1993年4月28日午後から29日未明にかけて約3ナノテスラの磁場低下が認められる（Fig. 2の日値プロットでは小さなギャップが生じているように見える）。時間スケールを拡大して、W1およびC3における変化と併せて表示したものをFig.

4に示す（火山研究センターの観測値で化成済み）。それによると、C3観測点には対応する変化が見られず、W1観測点には見られる。W1とC1は200m足らずの距離で近接しており、両者の変化が逆向きであることは、この変化の源が極めて局所的なものであることを示唆している。阿蘇山測候所の観測によると、4月28日から29日にかけては約320mmの雨が集中的に降っていたことがわかっており、これ以前にはしばらく多量の降雨はなかった。この豪雨を契機に、それまで1989～1990年の活動期にC1観測点付近に厚く堆積していた火山灰層が地すべりを起こし、W1方向へ流れ下ったと考えると、磁化物体の移動によってC1とW1に起こったステップ状の変化を定性的に説明できる。

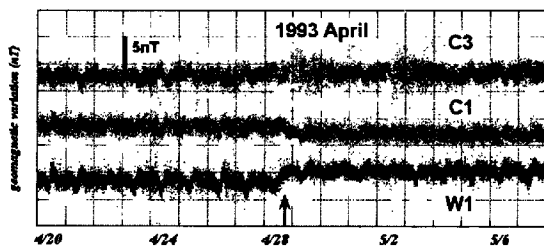


Fig. 4 Geomagnetic changes between the period 7 and 8, triggered by hard precipitation on April 28, 1993. Data were sampled at every minute and were reduced to Aso Volcanological Laboratory.

Fig. 3に示された微動振幅は、この時期低レベルで推移しているが、当日の煤書き記録によると、28日から29日にかけては連続微動が発生している。つまり、ここで起こったことの因果関係をまとめると、「集中的な豪雨によって、火口周辺ではそれまでに堆積していた火山灰が一挙に流れ、一部は火口に流入した。これに伴って、地磁気には一部の観測点で局所的なギャップが記録され、連続微動も発生した」と解釈することができよう。このとき観測された連続微動は、豪雨による地すべりか火口壁の崩壊による振動であった可能性が高く、本質的な現象は、「豪雨による土砂の火口への流入」であったと思われる。興味深いのは、この事件を契機に、それまでの消磁傾向が止まり、地磁気が停滞期に入ったことである。大量の土砂の流入によって火口底が完全に閉塞されてしまい、地下浅部の物質輸送が停止してしまったと解釈することもできるが、これは想像の域を出ない。しかし、豪雨が原因となって地磁気変化の傾向が完全に変わってしまったことは確かであり、このことは、ごく表層の現象が、火口からの熱

放出過程に決定的に影響を与える可能性を示した
ものとして注目される。

3.4 土砂噴出に伴うステップ状の変化

第15期(1995年7月2日)には、特殊な地磁気変化が観測されている。Fig. 3では1995年7月2日にC1観測点の全磁力値が突然約5ナノテスラ減少したように見えるが、時間軸を拡大して他の観測点とも併せてプロットしてみるとわかるように、この現象はおよそ1時間ほどかけて進行したものである(Fig. 5を参照)。この変化は、4つの連続観測点すべてに認められ、しかもC3観測点で増加、それ以外で減少していることから、その源は第1火口直下の磁化消失であると推測される。各観測点の変化量の大小関係から推測して、ソースの水平位置は、湯だまりの西の部分であろうと思われる。また、変化は7月2日午前3時45分頃から始まっているように見える。地震計と空振計の記録から、このときに強い土砂噴出が発生していたことが推定されており、その開始時刻は午前3時46分と報告されている。磁場観測のサンプリング速度(毎5分)とノイズを考慮すると、地磁気のステップは、この土砂噴出と同時に発生したものと考えて差し支えない。

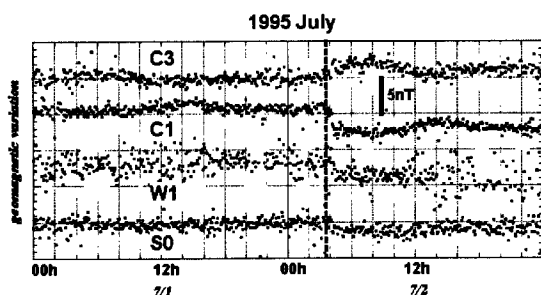


Fig. 5 Geomagnetic changes observed on July 1 and 2, 1995. Data sampled at every 5 minutes are plotted, being reduced to Aso Volcanological Laboratory.

このときに観測された連続微動は、通常の土砂噴出に伴うものと比較して継続時間が長いのが特徴である。また、空振を伴っているので、土砂噴出の規模はかなり大きかったと考えられる。しかしながら、観測された変化量に相当する磁化が1時間程度の間に熱で消失したとは考えにくい。ここでは、大規模な土砂噴出によって火口底の帯磁物質が攪拌され、磁化方向がランダム化されたことで巨視的には磁化が消失した可能性を指摘しておく。なお、この土砂噴出活動はこれ以後数日間継続した。

また、このイベントを含む6月20日から7月6日の期間に、阿蘇山は合計801mmの集中的な豪雨(阿

蘇山測候所)に見舞われた。特に、7月3日には集中して雨が降り、401mmを記録している。従って、この期間には雨水と共に相当量の土砂が火口に流入したことが想像できる。7月2日から3日にかけて観測された一連の空振を伴う大振幅の連続微動(土砂噴出)は、もともとこの豪雨が背景にあり、土砂が雨とともに火口に流れ込んで噴出口を塞いだことで地下浅部の圧力が増加し、爆発的に土砂を噴き上げたとも考えることもできるのではないだろうか。

注目すべきことは、このイベントを境にして、地磁気と孤立型微動の長期的な傾向に顕著な変化が見られたことである。まず、地磁気はそれまでの消磁傾向が止まって停滞期に遷移した。また、先述のように、地磁気の時間変化率はこのイベントを境に大幅に小さくなった。孤立型微動はこのイベントの後急増しており、それ以前と比べると長期的に見て回数が多い状態が2000年まで継続している。また、森(2000)によれば、この時期から、高周波と低周波の振動が引き続いて起こるハイブリッド型のイベントが発生するようになり、1997年後半以後は周期約15秒の長周期イベント(LPT)がこれに伴うようになってきたことが指摘されている。以上のことを総合すると、7月2日のイベントとその背景にある豪雨は、単に土砂を噴出しただけでなく、火口直下の物理状態を変化させ、熱放出の機構に大きな影響を与える事件であった可能性が高い。それまでの消磁傾向が停滞に移行したことは、前節で述べた豪雨に伴う変化の例と共通しており、集中豪雨が中岳の活動状況に影響を与えた可能性をここでも指摘することができる。

4. まとめ

前章の考察から、1991~2000年の地磁気変化に対して、多くの場合熱消磁モデルで矛盾は生じておらず、Tanaka (1993) が提唱した考え方は基本的に有効であると思われる。本稿では、新たな試みとして、地磁気変化を、微動振幅および孤立型微動回数との詳細な比較で検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 帯磁期の開始は、ほとんどの場合に明瞭なオンセットが認められ、それには微動振幅の急増、土砂噴出、火口の開口などが対応していることが多い。したがって、帯磁期オンセットに対応する微動振幅の急増は、顕著な表面活動を伴わないものも含めて地下浅部から地表への物質と熱の輸送に深い関わりがある可能性が高い。
- (2) 孤立型微動回数の増加は、帯磁期のオンセットと

は明瞭な相関が認められない。逆に、消磁の開始期には孤立型微動が増加する傾向が 2 つの例で確認された。

- (3) 消磁期のオンセットに対応して微動振幅が増大する例も 2 例確認された。
- (4) 地磁気の転向とは無関係な微動振幅の増大はしばしば認められる。
- (5) 豪雨に伴う土砂の流入が、火口底の状態を変化させ、熱放出過程に大きな影響を及ぼすこともあり得る。
- (6) 1995 年 7 月 2 日の土砂噴出にともなって、火口直下の力学的状態が大きく変化し、熱放出の機構が変わった可能性がある。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、微動振幅のデータを提供し議論に加わっていただいた京都大学理学研究科の須藤靖明助教授と、観測の維持にあたってこれら火山研究センターのメンバーに感謝申し上げます。また、湯だまり温度と水位、降水量および孤立型微

動のデータを提供いただいた気象庁阿蘇山測候所に深く感謝申し上げます。地磁気観測の維持にあたっては、元火山研究センター技官の増田秀晴氏および元非常勤研究員（現秋田大学）の坂中伸也氏の努力によるところが大きい。以上の方々に敬意と感謝を表したい。

参考文献

- 気象庁 (1989-2001): 火山噴火予知連絡会会報.
- 気象庁 (1989-2001): 定期火山情報.
- 須藤靖明 (1995): 火山噴火予知連絡会 20 年のあゆみ 気象庁編集, pp. 150-160.
- 森健彦 (2000): 静穏期の阿蘇火山で発生する短周期火山性微動 HB-tremor の震源メカニズム, 京都大学博士論文.
- Tanaka, Y. (1993): Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 56, 319-338.

Geomagnetic variation observed at Aso Volcano during the past ten years (1991-2000)

Takeshi HASHIMOTO*, Yoshikazu TANAKA* and Mitsuru UTSUGI*

*Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

We investigated geomagnetic changes observed around the active crater of Nakadake, Aso Volcano during the period of 1991-2000 with special attention to tremors and superficial activities of the volcano. The idea of de/re-magnetization due to shallow heat transfer proposed by Tanaka (1993) has been proved to be valid also to the recent data. It has been suggested that an onset of magnetization period frequently coincides with a tremor burst. It is proposed that the condition of the crater bottom severely affects the heat transfer system at shallow part.

Keywords: geomagnetic field, thermal demagnetization, volcano, Aso