

核磁力計による桜島磁場観測(1)

田 中 良 和

OBSERVATIONS OF GEOMAGNETIC TOTAL INTENSITY WITH A PROTON PRECESSION MAGNETOMETER ON SAKURAZIMA (1)

By *Yoshikazu TANAKA*

Synopsis

The observations of geomagnetic total intensity have been conducted with a proton precession magnetometer since January 1975 at Kurokami on Sakurajima volcanic island. The data were analyzed with reference to Kanoya Geomagnetic Observatory which was situated 25 km southeast of Sakurajima. The following results are obtained.

Bay type geomagnetic disturbances which have the period of 1 to 2 hours were smaller than about 2γ those at Kanoya. In the case of longer period, the changes at Kurokami were smaller than the Kanoya changes at night, though the Kurokami changes were equal or a bit great in daytime.

The differences of the daily mean values at night-time between the two stations were nearly equal, though the $1-2\gamma$ undulatory fluctuations of the period of 10 to 40 days were seen. Then the values of geomagnetic survey on Sakurajima which are reduced to Kanoya will include the error of the amounts of $2-3\gamma$ nonlocal geomagnetic changes.

Remarkable local geomagnetic changes have not been found out at Kurokami in connection with the volcanic activities of Sakurajima in the duration of January to October in 1975.

1. ま え が き

一般に玄武岩質溶岩や安山岩質溶岩はマグネタイトやチタン磁鉄鉱など磁性鉱物を含んでいて、冷却時に地球磁場によって磁化され、自然残留磁気を持っている。火山岩がキュリー温度を境にして、それ以上に熱せられれば、磁性は消失し、冷えれば磁性を回復する。また火山岩に圧力を加えれば圧力軸方向に帯磁率は減少し、それと直角の方向で増加する物性も知られている。こういったことから火山活動や地震活動に関連して、地球磁場の局所変動が期待される。過去においても玄武岩質火山の伊豆大島では、火山活動に関連して $30'$ におよぶ伏角の変化や、約 $4'$ に達する偏角変化が観測されている^{1), 2), 3)}。桜島のような安山岩質火山では玄武岩質火山に比べ帯磁率は一桁小さいが、桜島の南部、古里における繰返し測量によって、1965年から1974年までに約 $3'$ の伏角異常減少が観測され⁴⁾、この異常は地下溶岩の熱消磁現象によるものと考えられている⁵⁾。また火山岩磁化の圧力効果の例としては松代群発地震の際の震度 IV を越える地震と、 10γ 程度の磁場垂直分力変化の相関が知られている⁶⁾。

ある地点の磁場永年変化を求めるには、磁力計を一定点に固定して連続観測する方法と、測点のみを定めておいて、ときどき磁力計を設置して再測定する方法がある。前者は信頼度は高くなるが多数点にわたり設置する事が困難であるため、通常一台の可搬型磁力計でサンプリング的に測る後者の方法が多く用いられる。この場合、磁力計設置時の測点のわずかな違いが問題となることがあり、測定点周辺の磁気勾配の小さいことが要求される。しかし、もっと問題になるのは、測定が個々の時刻にいくら正確に求められたとしても、火山活動や地震活動に伴って発生した磁場の変化以外に、永久磁場の永年変化、日変化、季節変化あるいは

磁気嵐等の非周期的変化, 人工磁場による擾乱, 測定点近傍の土石の移動や, 地形変化による影響が含まれていて, これをいかに除去するかが有意な変化検出の鍵となる。

この中, 永久磁場の永年変化は日本付近では $-16 \sim -24 \gamma$ /年程度でかなり広領域にわたって一様な変化を示し, 南北方向に100km離れている地点では 1γ /年程度の差異を生じる事が知られている^{7), 8)}。

また日変化にあっては, 昼間側半球の中緯度に電流中心を持ち, 地方時的に変化する電離層電流が主成分で, 数 10γ 程度の変化をする。この電離層電流は刻々とその形や強さを変え, 移動方向も日々変わっているし, 加えて極冠電流や赤道環電流等, より遠方からの変化が重なっている⁹⁾。従って地方時差を補正して他点と比較してもこの影響は完全には除けないし, また変化は正弦波的ではないから一日平均値を求めたとしても充分ではない。そこで通常, 静穏日変化振巾の小さくなる夜間値を用いてこれを回避している。また, 磁気嵐等, 非周期的変化は日本付近ではほぼ同時的な変化をするが, 短周期項を多く含み, 地下構造や周辺の海流等の電磁誘導の影響, あるいは電離層電流の非一様性のため, 数十km観測点が離れると数 γ 程度の異なる変化をすることが知られている。

また上に述べた変化以外に長期的な赤道環電流の影響が知られていて, 日平均値に対して磁気緯度に応じた D_{st} 補正や⁷⁾ 重加差平均¹⁰⁾ 等を求めればこの影響を小さくする事が可能である。

桜島周辺で磁気測量がなされた場合, 南東25kmにある気象庁鹿屋地磁気観測所を基準点として局所磁場変化を求めるのが通例である。この論文では桜島火山活動に伴う全磁力異常検出の第一段階として, 黒神における定常観測と, 鹿屋の比較から, 実験的に上に述べた様な非局所的擾乱磁場がどの程度まで除去できるかを調べた。第4章以後には今後の観測の指針として熱消磁モデルによる全磁力変化と高精度の核磁力計について述べた。

2. 桜島黒神における全磁力連続観測と鹿屋の比較

桜島地域で地磁気測量を実施するには鹿屋地磁気観測所を比較点として利用できるが前に述べた様な非局所的磁場変化補正の問題があり, 桜島と鹿屋でどの程度まで同じ磁場変化であるかを調べ, 短日時の測定による誤差と, 永年変化を調べておく必要がある。1975年春の桜島総合調査の磁気測量は島内9点, 桜島島外周辺10点 (Fig. 1 参照) の磁気点が整備され地上150cmの高さで GEONIX プロトン磁力計により全磁力測定がなされ結果はすでに報告した¹¹⁾。この測量を機会にプロトン磁力計を黒神に設置し, 桜島固有の磁場変化の傾向を調べてみた。

2.1 観 測

Fig. 1 に桜島周辺の全磁力測定点(黒丸印) および鹿屋地磁気観測所の位置を示した。図中の数字は次の測定点である。1; 白浜1, 2; 白浜2, 3; 西道, 4; 武, 5; 湯ノ平, 6; 野尻, 7; 古里, 8; 有村。

黒神観測点は京都大学防災研究所桜島火山観測所の黒神観測室構内で, 現在盛んに噴煙・爆発活動を続けている桜島南岳の東方4.2kmに位置する。黒神に設置した核磁力計は筆者の製作によるもので単一測定精度は $\pm 2 \gamma$ 程度であるが, 10回計測の平均では $\pm 1 \gamma$ の精度をもつ。1分, 5分, 10分毎のいずれかで自動計測でき, 1γ 単位でデジタルプリンターに時刻とともに印字出力する形式である¹²⁾。

桜島は全般に露出溶岩が多く, 地表近くの磁気勾配が大きい。黒神測点4m四方の磁気傾度を120cm, 150cm, 180cmの高さで調べたが, いずれの高さでも北西～南東方向に傾度が強く, 150cm高さで $20 \gamma/m$ に達する。磁力計センサー部は地上高150cmに直径6cmの塩化ビニルパイプで支え, 銅線ステータで周囲4カ所に止めてあるから高さ方向の変化は極めて少ない。水平面内では2cm程動く事があり得るが, この誤差は最大 0.4γ である。

黒神での観測は1975年1月から3月12日まで10分毎になされ, 3月13日から20日の総合調査による地磁気測量期間は1分毎の計測がなされた。後述の短周期の磁場解析はこの間の1分毎の資料を用いている。3月20日以降は少しでも精度を高めるため直接周期を計測する方式に改造し(5章参照)5分毎の観測がなされている。

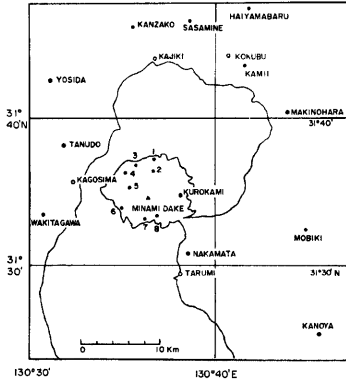


Fig. 1. Location map of stations where geomagnetic surveys were conducted by means of a proton precession magnetometer (closed circles). Stations 1~8 are called 1: Shirahama 1, 2: Shiratama 2, 3: Saïdo, 4: Take, 5: Yunohira, 6: Nojiri, 7: Furusato, 8: Arimura, respectively.

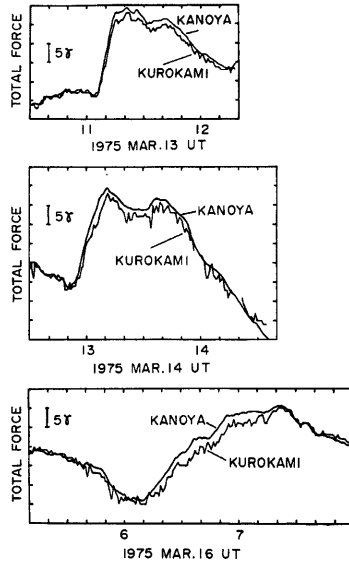


Fig. 2. Examples of geomagnetic total force observed at Kurokami and Kanoya at the time of Bay type geomagnetic disturbances.

気象庁鹿屋地磁気観測所では光学式変化計に加えて、最小単位 0.1γ の核磁力計で1分毎の連続観測がなされている。

2.2 1~2時間の短周期変化について

鹿屋と黒神の地磁気全磁力変化は通常位相・振巾とも良く一致した変化をするが、急峻な湾型変化の際、桜島では振巾の小さい事が多い。Fig. 2 は1975年3月13日、14日、16日の地磁気湾型変化の時の観測例である。図では振巾差を見やすくするため、湾型変化の生じる前に黒神、鹿屋の全磁力平均値が一致する様に重ね合わせて示してある。数分周期の差異は主に黒神に設置された磁力計のノイズである。13日11時頃の例では、 20γ 程度の全磁力変化に対して黒神では約 2γ 振巾が小さい事がわかる。この様な傾向は同時刻に臨時観測されていた桜島西部の有村観測点でも同様であった。さらに、150 km 北の阿蘇火山研究所では 5γ 程小さい変化であった。この様な例は14日以外にもしばしば見受けられる。また16日6時から7時頃の例では、より緩やかな変化の場合に、桜島では鹿屋に比べて振巾はあまり違わないのに上昇部分で大きく位相が異なり $3\sim 4\gamma$ に達する差異を生じている。この様な現象を生じる原因は地下の電気伝導度層の違いによる電磁誘導か、電離層電流の不均一性によるか、あるいはその両者が作用している事が考えられるが、観測装置の精度の制約からこれらの分離はできなかった。

ともあれ、こういった変化磁場が生じている場合に移動磁気測量がなされると、たとえ1時間程度の測定がなされたとしても25km離れた鹿屋の値で化行を行なうと $2\sim 4\gamma$ の誤差を生じる危険がある。

2.3 日変化程度の差異について

日変化についてはいわゆる S_q 変化が良く知られている。しかし1分毎の観測をしていた3月13日から20日の間は典型的な日変化がみられなかったので、この期間の全磁力値の10分平均と190分走平均を求めて長

周期項を調べた例が Fig. 3 である。Fig. 3 上部は鹿屋の平均値で下部は黒神と鹿屋の全磁力差を求めたものである。鹿屋の1～2時間周期の変動に対して、差の変化に類似の逆相変化が出ている部分は前節で述べた変化に対応する。190分走平均は変化曲線中央を通る緩やかな曲線で示されていて、夜間部分については鹿屋の変化に対して差が逆相であって黒神の変化が1割程鹿屋に比べ小さい事を示している。しかし昼間の部分では逆に、やや同相である様にみえる。この傾向を見やすくするため3時間から12時間のバンドパスフィルターを通して3月14日から18日について鹿屋の全磁力値との差を調べた。Fig. 4 最上部は鹿屋の資料を B. P. F. にかけてのもので下3行は黒神と鹿屋の差を示したものである。差については鹿屋の変化を1.0, 0.94, 0.88倍して黒神から差し引いてある。単純差は $C=1.0$ に対応する。この場合には、真夜中前後の部分は鹿屋の磁場変化と両地点の差変化は逆相を示し、黒神の振巾変化の小さい事が判る。そして $C=0.88$,

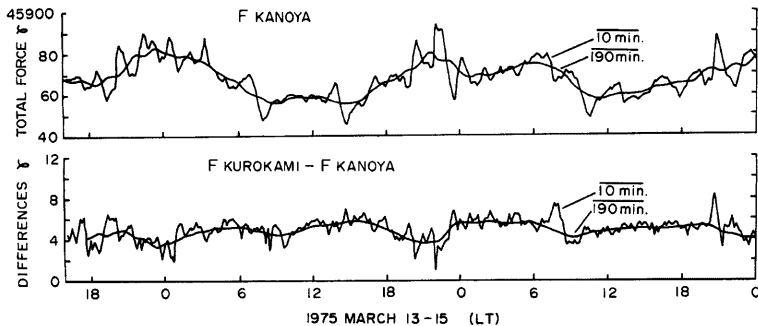


Fig. 3. Variations of geomagnetic total force at Kanoya (upper part) and the differences of total field at Kurokami from those at Kanoya (lower part). Ten minutes mean values and running mean values in 190 minutes are shown.

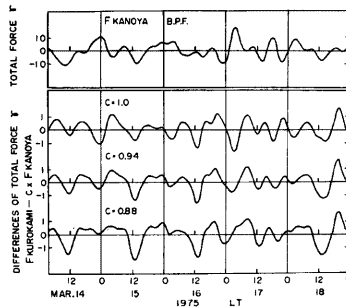


Fig. 4. Variations of geomagnetic total force at Kanoya through 3-12 hours band pass filter (uppermost) and the weighted differences of those between Kurokami and Kanoya (lower part).

0.94の重加差をとると夜間部の地点差は小さくなる。ところがこのようにすると昼間の変化部分が大半にずれる。この事は昼間の部分では黒神の変化が鹿屋よりいくぶん大きい事を示す。これは、昼間の変化は主に S_q 電流系による日本上空に電流中心を持つ渦電流で生じているが、夜間の変化の成因は極冠電流系や赤道

環電流系等に依存しているという違いがあり、単なる電磁誘導によるものでなく、源の非一様に原因があると考えられる。

更に資料に12時間のローパスフィルターをかけて調べると Fig. 5 の様に3月15日から3月18日の間では鹿屋全磁力の 10γ 程の数日変化に対して、黒神との差は逆相に 1.5γ 程変化している。これはやはり黒神の変化量が小さい事を示すものである。この傾向が直流項まで及ぶか否かはより長期の観測値の比較が必要となるので次節で検討する。

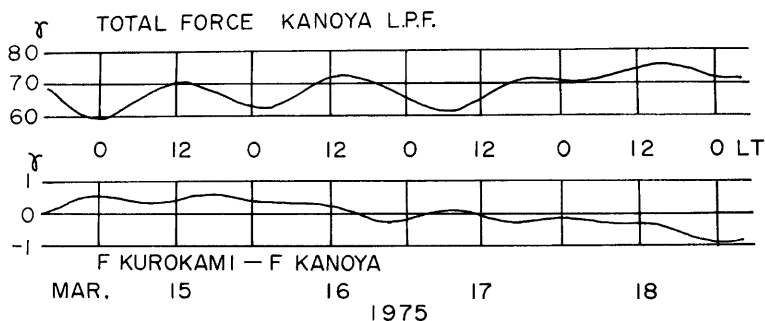


Fig. 5. Variations of geomagnetic total force at Kanoya through 12 hours low pass filter (upper part) and the differences of those between Kurokami and Kanoya (lower part).

2.4 夜間平均値でみた鹿屋・黒神の全磁力変化

数カ月にわたる変化の傾向を夜間22時 LT から04時までの6時間平均値により調べてみた。Fig. 6 は1975年1月1日から3月31日の期間の夜間平均値を横軸に鹿屋、縦軸に黒神値をとって示したものである。鹿屋の値は変化計から読取り計算された気象庁の速報による全磁力値である。鹿屋・黒神の全磁力値は勾配1の直線に良くのり、最小自乗法で定めた勾配は0.998である。勾配を1.0とした場合も0.998とした場合も直線からのずれの標準偏差は 0.88γ であるから、充分長周期にあっては両地点での振巾に違いがないとみてよい。これは鹿屋・桜島の25 km 程度の距離においては 1γ 精度の比較をする場合、重加差を施す必要のない事を意味する。6時間の平均値を用いても標準偏差が 0.88γ と大きいのは Fig. 7 中央部に示された鹿屋と黒神の日毎の夜間平均値差の変化から判る様に、周期数日から1カ月をこえる振巾 2γ 程の波動変化が存在するためである。

以上を要約すれば、

振巾 20γ 程度の1~2時間短周期変化では桜島の変化が鹿屋に比べて 2γ 程小さい事が多い。5~6時間周期の変化になると夜間に生じる変化では同じく一割程桜島の変化が小さいが、昼間の変化では逆に桜島が少し大きい傾向があった。より長周期の直流的ともいえる変化分については振巾に平均的な差異はなかったが、1~

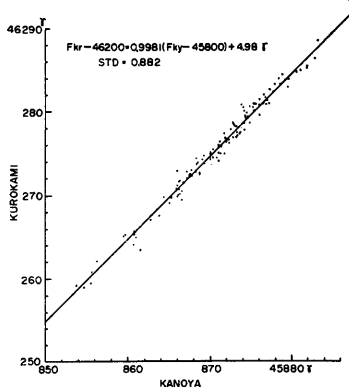


Fig. 6. Relationship of daily mean values at night-time of the geomagnetic total force observed at Kanoya and Kurokami during January 1 to March 31, 1975.

2γ の差が数日から1カ月以上にわたり存在する事が判った。

爆発や地震がない限り、数日のうちに地下の温度や圧力が大きく変わることは考えにくく、これらは外部磁場擾乱に原因を持つと考えられる。

従って鹿屋を基準として桜島で短日時の磁気測量を実施して、単純差による化成を行なった場合には数 γ の誤差を生じうると考えねばならない。しかし、これらの差異を生じる原因と量をより高密度の多点連続観測により明確にし、補正法を研究すれば化成誤差を 1γ 以内に押える事は困難ではなさそうである。

3. 黒神の夜間全磁力平均値の経時変化

Fig. 7 に1975年1月1日から10月31日までの黒神で観測された全磁力値の中、夜間22時から04時までの6時間平均値と、鹿屋地磁気観測所変化計による同時刻の全磁力値との差を時間変化として図示した。桜島の活動状況の目安として同図下部に1日あたりの火山爆発回数を示してある。

1975年1月から10月まで、黒神の磁力計は同じ条件で動作していない。停電で欠測を生じたり、アースがとれず S/N が悪くなって欠測した事もある。3月20日からは少しでも精度を高めるために5分毎の計測とし、磁力計も直接周期を計測する方式に変えた。5月中旬と6月下旬に測定値が抜けているが、装置の不調でノイズが多く除外してある。また6月26日にセンサー部の資料水を交換した時、階段状の変化を生じているが、ずれの原因は不明である。

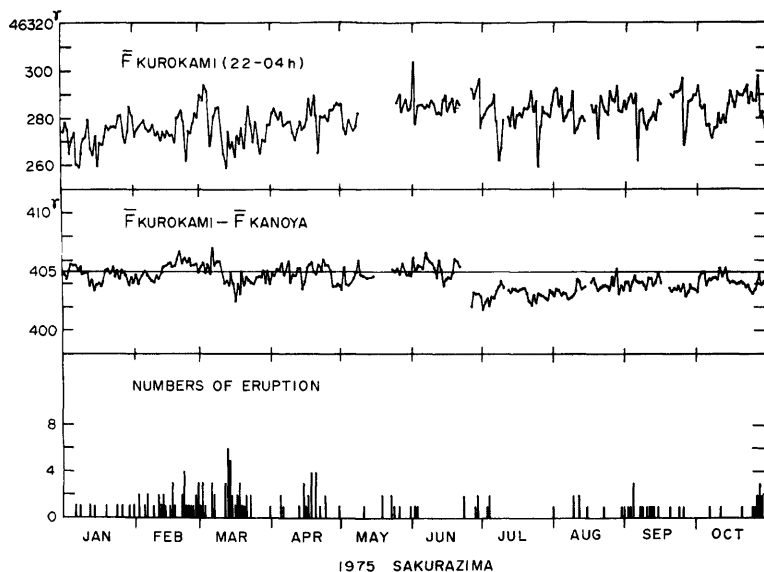


Fig. 7. Variations of daily mean values at night-time of geomagnetic total force observed at Kurokami (upper part) and the differences of those from the values of Kanoya (middle part). Daily numbers of eruptions of Sakurazima volcano are shown in the lower part.

鹿屋が地殻内部原因による磁場変化を受けていないと考えれば、Fig. 7 中央部に示された差は黒神固有の磁場変化異常を示す事になる。黒神と鹿屋は $405\gamma \pm 1\gamma$ の差があって日々の分散に加えて10日から40日の

比較的長周期の変化が $1\sim 2\gamma$ の振巾で存在している。

3 月期に桜島はかなり頻繁に小爆発をくり返し、活動は盛んであったが、この間の 2γ に及ぶ磁場異常は、先にも述べた様に測定器の誤差のみならず、比較地点差に外部擾乱磁場の影響が含まれ、単純差を求めただけでは $1\sim 2\gamma$ 以内の変化を議論できないので、直ちに火山活動と結びつけて考察する事はさしつかえる。

結局、1975 年 1 月から 10 月の間では $\pm 1\gamma$ を越える顕著な局所磁場の変化は黒神では観測されなかった。けれども、この事は自作の磁力計によっても充分安定な観測が可能である事を裏付けていて、現在のシステムでも 5γ 程度の局所磁場異常が生じたとすれば充分検出可能である事を示す。

4. 熱消磁による地表面全磁力異常

桜島地域の静磁場異常は航空磁気測量によって求められ、島の南部地域は正の異常に、北部は負の異常として現われている¹³⁾。これは桜島山体が概略 $10^{-8}\text{e. m. u./cc}$ 程度の正帯磁をしている事で説明される。従って地下の数 100°C より温度の低かった所がマグマ上昇等により、キュリー温度をこすとその残留磁気を消失し、静磁場異常をひきおこす。この量がどの位になるかを知っておく事は観測点設置や、解析の精度を考える上で重要である。類似の計算はすでに横山²⁾や力武等¹⁴⁾によってなされているが最も簡単な場合として球形部の消磁の例を示す。

球形部の一様消磁の場合は消磁中心に置かれた微小ダイポール場と等価で、その大きさは熱異常体積と帯磁率との積に比例する。帯磁率 $10^{-8}\text{e. m. u./cc}$ 、消磁半径 780m の場合 $2\times 10^{13}\text{e. m. u.}$ の磁気モーメントと

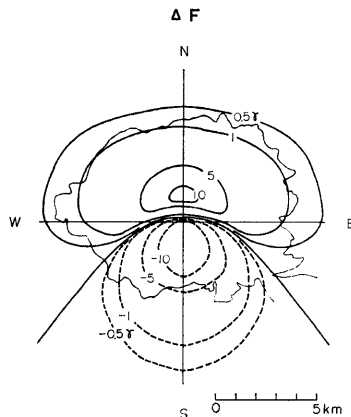


Fig. 8. The anomaly of geomagnetic total intensity caused by a small dipole demagnetization which is situated at the depth of 2 km under the Minami-Dake. It is assumed that the direction of magnetic moment amount of $2\times 10^{13}\text{e. m. u.}$, lies in the magnetic meridian plane and that its inclination agrees with the geomagnetic dip which is taken as 47° . The surrounding total force is assumed as 46800γ .

なり、 2km^3 の火山岩の温度を 300°C 変えるのに必要な熱エネルギーは概略 10^{25}erg である。周囲の地球磁場を伏角 47° 、全磁力 46800γ として、桜島南岳の直下 2km 深さに中心をもつ場合の地表面全磁力異常を示せば Fig. 8 の様になる。この場合、島の南部には最大約 30γ の減磁、島の北部では約 15γ の増磁が現われる。しかし桜島は地形が急峻な上に、噴石の危険があって山腹に立入って観測を行うわけにはゆかない。現実には海岸沿いに測点を設けざるを得ないから、この場合、島の南では 5γ 、その他の部分では約 1γ の異常

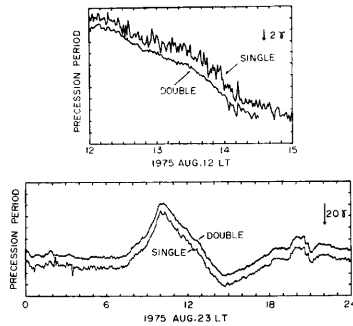


Fig. 10. Comparisons of geomagnetic total force measured with a single head type proton magnetometer and a large double head type magnetometer.

いけれども大型ヘッドを用いた場合の S/N が一桁程良くなっている事は明らかである。8月12日の部分拡大図で見て判る様に大型センサーを用いる事により単一精度 $\pm 0.3\gamma$, 10 回計測平均で 0.1γ の精度を得ることができた。

6. お わ り に

熱消帯磁や圧力効果によって期待される全磁力変化は一般に南北地点で大きい。またその変化は両地点で逆相であろうと考えられる。そこで桜島の南北両地点と黒神点で連続測定を実施すれば火口を中心とする火山活動に伴う熱的あるいは圧力的変化を検出する事ができるであろう。1 γ 程度の細部にわたっての化成を行なおうとするには、まず、磁力計の精度が良くなければならない。これについてはすでに筆者によって改造された大型ヘッドを用いた周期測定型核磁力計を用いる事ができる。つぎに桜島外部にも安定な磁力計を2カ所設置し、地点差に擾乱を生じる原因と補正の方法を研究してゆけば1 γ の局所変化までは充分検知しうる様になるであろう。

本稿を終るにあたって桜島磁場観測に際し、装置の製作から設置、そして記録の維持に至るまで多大の御援助、御指導を載いた加茂幸介教授・石原和弘助手はじめ桜島火山観測所の方々に厚く御礼を申し上げます。また東京大学地震研究所・行武毅助教授はじめ地磁気観測所・柳原一夫、大島汎海、栗原忠雄諸氏には地磁気資料を戴いたり機器の検定等で大変お世話になった。京都大学理学部久保寺章教授には有意義な議論をもらった。ここに記してこれらの方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Rikitake, T. and I. Yokoyama: Volcanic activity and changes in geomagnetism, J. Geophys. Res., Vol. 60, 1955, pp. 165-172.
- 2) Yokoyama, I.: Geomagnetic studies of volcano Mihara, the 7th paper, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 34, 1956, pp. 21-32.
- 3) 行武 毅・萩原幸男：火山の磁気，火山，第10巻，1965，pp. 100-109.
- 4) 大島汎海：桜島古里における地磁気伏角の永年変化について，福岡管区研究会誌（気象庁），35，1974，pp. 131-133.
- 5) 地磁気観測所：桜島の地磁気変化，火山噴火予知連絡会会報，No. 3, 1975, pp. 40-44.
- 6) 大中康督・木下 肇：火山岩の磁化の圧力効果——地震予知への応用・その(2)——，火山，Vol. 13, 1968, pp. 12-20.

- 7) Fujita, N: Secular change of the geomagnetic total force in Japan for 1970. 0., J. Geomag. Geoelectr., 25, 1973, pp. 181-194.
- 8) 住友則彦: 地磁気永年変化の局地的異常の検出法について, 九十九地学, 8, 1973, pp. 22-31.
- 9) Mori, T. and T. Yoshino: Local difference in variations of the geomagnetic total intensity in Japan., Bull. Earthq. Res. Inst., 48, 1970, pp. 893-922.
- 10) Rikitake, T., Y. Yamazaki, Y. Hagiwara, K. Kawada, M. Sawada, Y. Sasai and T. Yoshino: Geomagnetic and Geoelectric Studies of the Matsushiro Earthquake Swarm (2)., Bull. Earthq. Res. Inst., 44, 1966, 409-418.
- 11) 行武 毅・柳原一夫・大島汎海・栗原忠雄・田中良和: 桜島およびその周辺地域での全磁力測量, 桜島火山の総合調査報告 (昭和49年12月~昭和50年3月), 自然災害特別研究報告書, 1975, pp. 43-49.
- 12) 田中良和・増田秀晴・鈴木 亮・前田 坦: 地学教育用プロトン磁力計の試作, 地学教育, 28, 1975, pp. 179-190.
- 13) 松崎卓一・歌代慎吉: 鹿児島湾周辺の地磁気異常について, 水路部研究報告, 991, 1966, pp. 23-25.
- 14) Rikitake, T. and Y. Hagiwara: Magnetic anomaly over a magnetized circular cone., Bull. Earthq. Res. Inst., 43, 1965, 509-527.
- 15) Yukutake, T. and H. Tachinaka: Geomagnetic variation associated with stress change within a semi-infinite elastic earth caused by a cylindrical force source., Bull. Earthq. Res. Inst., 45, 1967, pp. 785-798.