SQUID磁束計を用いた桜島火山での地磁気計測

Measurements of Geomagnetic Field Caused by the Volcanic Activity of Mount Sakurajima Using a SQUID Magnetometer

鎌田清孝・土井俊哉^{*}・尾形久直^{**}・賀戸 久^{**}・湯ノ口万友^{***}・白樂善則^{*}

鹿児島工業高等専門学校電子制御工学科, 鹿児島県始良郡隼人町真孝 1460-1 (☎899-5102)

^{*}鹿児島大学工学部電気電子工学科, 鹿児島市郡元 1-21-40 (☎890-0065)

^{**}金沢工業大学, 先端電子技術応用研究所, 金沢市天池町 3 (☎920-1331)

^{***}鹿児島大学工学部生体工学科, 鹿児島市郡元 1-21-40 (☎890-0065)

K. Kamata, T. Doi^{*}, H. Ogata^{**}, H. Kado^{**}, K. Yunokuchi^{***}, Y. Hakuraku^{*}
Kagoshima National College of Technology, 1460-1 Shinkou, Hayato, Aira-gun, Kagoshima 899-5102

^{*}Department of Electrical and Electronics Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065

^{**}Kanazawa Institute of Technology Applied Electronics Laboratory, 3 Amaike, Kanazawa 920-1331

^{***}Department of Bioengineering Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065

(1999年10月28日受理, 2000年1月25日採録)

Environmental magnetic noises change with time influence biomagnetic measurements. There are two types: artificial magnetic noises, and those caused by natural fields. For example, the former are caused by the movement of objects composed of magnetic materials, such as cars or trains, elevators, and fan-pumps of air conditioners. on the other hand, the latter are caused by natural fields, such as volcanoes or solar wind. The magnitude of geomagnetism is about 10^{-4} T, and that of movements of cars or trains, elevators, and fan-pumps of air conditioners are $10^{-6} \sim 10^{-10}$ T. By contrast, the magnitude of magnetoencephalogram or magnetocardiogram is $10^{-12} \sim 10^{-14}$ T. Although they are, very weak, environmental magnetic noises cannot be ignored. we measured the temporal vertical component of geomagnetic changes with a SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) magnetometer in the vicinity of the crater of the Mount Sakurajima volcano for about 40 days. taken, By comparing our data taken by SQUID with the data of by the magnetic observatory of the Japan Meteorological Agency, we confirmed that our data are convincing. The influence of magnetic fluctuation caused by volcanoes on biomagnetic measurement is also discussed.

Key words: biomagnetic measurement, SQUID, geomagnetism

1. はじめに

時間的に変動する環境磁気ノイズは, 生体磁気計測のような微弱磁界の測定に大きく影響を与える。それには, 人工的な磁気ノイズと, 自然界で起きるものと二種類が考えられる。人工的なものの要因としては, 主に電車, エレベータ・自動車等の磁性体の移動や, 電子機器等のファン・ポンプ等の都市ノイズが挙げられる。一方, 自然界では, 火山や太陽風等により生ずる磁気ノイズが考えられる。その環境磁気ノイズの大きさは, 地磁気が約 10^{-4} T で, 電車, エレベータ, トラック等の磁性体の移動, 電子機器等

のファン・ポンプ等は, $10^{-6} \sim 10^{-10}$ T である。それに対して, 心磁界や脳磁界等の体から発生する磁界の大きさは $10^{-12} \sim 10^{-14}$ T と非常に微弱なので, これらの環境磁気ノイズの存在は無視できない。我々は, 以前に電車^{1)~4)}やエレベータ・自動車^{5)~7)}等の磁性体の移動に起因する磁気ノイズについて報告した。本研究は, 自然界の磁気ノイズについて報告する。鹿児島は活火山を有した世界的にもまれな立地条件を有している。その桜島の火山に伴う定量的な磁気現象を報告した例はみられない。そこで, 火山活動に伴う地磁気変動を高感度のSQUID装置を用いて測定した。同時に, 気象庁地磁気観測所のデータとの相関をとり比較検討することによって, SQUID測定の有効性を確認した。これらの結果, 火山に伴う磁気変動の生体磁気計測への影響について検討する。

2. 計測・解析装置の構成

Fig.1に我々が開発した地磁気計測システムの計測⁸⁾・制御装置を示す。また, Fig.2に, SQUIDセンサを納めたFRPデュアの写真を示す。SQUIDプローブは, 直径40mm, 1ターンのマグネットメーター型を有するピックアップコイルにより地磁気の鉛直成分及び水平2成分の変化を観測できる。このSQUIDプローブを, ScT社製のGFRP製デュア(液体ヘリウム30ℓ容量)に納めて使用する。SQUIDは準平面型ジョセフソン・ジャンクションのrf SQUIDを用いており, rf SQUIDとしてのノイズは, $3.1 \times 10^4 \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$, 入力電流感度は $0.05 \mu\text{A} / \phi_0$ である。ただし, ϕ_0 は磁束量子 ($2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$) である。

したがって, 最小磁束密度分解能は, $\pm 1 \text{pT}$ ($\approx 0.001 \gamma$) 以下である。また, SQUIDセンサのインプットコイルとピックアップコイルとの間に並列に真ちゅう製のシャント抵抗を取り付け, 高周波環境磁気ノイズを低減させるなどの工夫を行っている。Fig.3に測定システムのブロック図⁹⁾を示す。SQUIDプローブで検出された地磁気の変動信号は, rfヘッドとBT社製のコントロールユニット及び自作のアナログフィルタを通して $\pm 10 \text{V}$ の範囲で出力される。このとき, rfバイアス周波数は 19.0MHz , 変調周波数は 150kHz とした。感度設定は, 1, 10, 100の倍率ができ, 例えば,

Fig. 1 Overall view of SQUID magnetometer control system.

Fig. 2 Overall view of GFRP dewar with SQUID sensor.

Fig. 3 Block diagram of measurement system.

感度設定が最高感度の100倍であれば、 $\pm 10V$ の最大出力は、 $\pm 0.287nT$ に相当することになる。測定に要求される最大検出磁場は、測定対象によってことなるが、桜島火山に対して $\pm 3nT$ 程度であると予測された。そこで、通常感度設定値は、10倍とした。

地磁気変化の解析可能な最高周波数の目標値を10Hz程度とした。アナログフィルタとしては、ローパスフィルタ(24Hz)とノッチフィルタ(60Hz)を用いた。フィルタリング後の信号は、12bitにA/D変換した後、コンピュータのディスプレイにリアルタイムで波形表示した。データの記録には光磁気ディスク(両面600MB)を用いて行った。データの取り込みは、通常20ms毎(サンプリング周波数:50Hz)で行った。

3. 桜島での地磁気変化と解析

我々は、鹿児島県桜島町にある鹿児島大学理学部桜島火山観測所で1991年10月中旬から11月下旬までの約40日間にわたって、地磁気の連続計測を行った。Fig.4に桜島火山観測所および気象庁地磁気観測所(北海道女満別、茨城県柿岡、鹿児島県鹿屋)の位置を地図に示す。

Fig. 4 Map of Mount Sakurajima showing location of volcanic crater and that of observatory.

3.1 桜島爆発を含む7日間の地磁気変化の測定

Fig.5に、1991年10月21日から10月27日(地方時)までの7日間の桜島火山観測所でのSQUID磁束計(精度 $10^{-12}T$)により測定された鉛直成分の連続地磁気変化および、気象庁地磁気観測所より提供いただいた鹿屋分室でのフラックスゲート磁力計(精度 $10^{-9}T$)により測定された地磁気変動波形も示す。この7日間の期間に、23日23時12分と27日17時29分に噴煙高さ2000m以上、最大振幅約 $15\mu m$ 以上、爆発音大、体感空振大の大規模な爆発(Fig.5のL)があり、また23日午後16時39分、18時56分、22時45分、27日午前7時8分に噴煙高さ1000m以上、最大振幅約 $10\mu m$ 、爆発音小、体感空振中の比較的小規模な爆発(Fig.5のS)が観測された。

桜島と気象庁鹿屋分室での二つの波形変化を比較するとその変化量の絶対値は異なるものの、ほぼ波形は一致している。また、Fig.5には示していないが、桜島から離れるにつれて(気象庁柿岡、女満別分室)波形は幾分か異なっている。また、各々の一日の地磁気の変動幅は約100nTであった。

Fig.5 Geomagnetic field signals at Sakurajima on SQUID sensor output and at Kanoya on flux-gate magnetometer output between Oct. 21 and 27

Fig. 6 Geomagnetic field signals including the large, abrupt changes generated by a magnetic storm caused by a solar flare

3.2 磁気嵐の影響

Fig.6 に桜島および、気象庁地磁気観測所鹿屋、柿岡、女満別での28日から29日の地磁気の変動を示す。Fig.6 に示すように28日の18時30分（世界時では28日9時30分）頃から桜島での地磁気の変動が急に激しくなっている。続いて、29日1時頃に最大約130nTの非常に大きな変化が突然起こっている。それから約10

時間微弱な変動が継続した後、29日12時頃より通常レベルにゆっくりと回復している。この現象、は気象庁地磁気観測所の鹿屋分室、柿岡、女満別でも同様に観測されており、磁気嵐に起因するものと思われる。磁気嵐は太陽面における爆発現象（フレアと呼ぶ）などに伴って起こる約100nT(100γ)¹⁰⁾程度の不規則で非常に大きい変化である。その継続時間は数日から十数日ほどである。一般に水平分力に顕著に現れ、鉛直成分や偏角はあまりはつきりしない。しかしながら、Fig.6 に示すように観測された鉛直成分においても急に増加し（急始という）、しばらくその状態が続く（初相という）が、間もなく急激に減少し（主相という）、その後ゆっくりと元のレベルに回復していく（回復相という）のがよく分かる。このように、主相における急激な変化に対しては生体磁気計測のような微弱な計測に大きな影響を与えられると考えられる。

磁気嵐の原因はまだ完全に解明されたわけではないが、一般に磁石となっている地球の磁気圏に太陽風が吹きつけ、地球の周りの磁力線の収縮・膨張を生じさせ、この磁場効果により地表での磁場が大きく変化するとされている。SQUID 磁束計により桜島で測定したこれらのデータが有効であるか確かめるために、気象庁地磁気観測所の地磁気変動値の相関係数をとった。Table.1 にSQUID 磁束計により桜島で測定した地磁気の変動値とフラックスゲート磁力計により各々の気象庁地磁気観測所（鹿屋、柿岡、女満別）との相関係数を示す。それぞれ鹿屋、柿岡、女満別の1日のデータの平均値を0とし、各々の測定したデータとの相関係数を求めた。桜島と鹿屋では数十kmしか離れていないせい、柿岡、女満別と比べ相関は高かった。また、桜島から離れるに従って相関は低くなる傾向がみられた。従って、鹿屋と桜島でのデータの相関性が高いことから、SQUID による地磁気変動の測定は有効性が高いと言える。従って、SQUID による地磁気の変化は感度よく測定できたといえる。

3.3 爆発直前直後の地磁気変化

Fig.7 は観測期間中の27日17時29分の爆発前後のSQUID

センサの信号の拡大波形の一例である。上から順に爆発1時間前、爆発直前、爆発直後、爆発1時間後のものである。爆発の1時間前、直前、1時間後は、ほぼ同じような波形であり、最大約80pT、最小約10pTの振幅で、比較的正弦波的な信号波形である。火山の爆発前の地磁気変化は最大80pTであり、この値は脳磁界の大きさの数pTに比べると、数十倍の大きさであり、生体磁気計測にとっては雑音となる。また、主相における急激な変化(100nT)は、脳磁界の1万倍の大きさであり、生体磁気計測にとって十分な雑音となる。このように、桜島火山の活動は、生体磁気計測のような微弱な計測に大きな影響を与えたと考えられる。Fig.7には示さないが、爆発の24時間前後も振幅は多少異なるが同様の変動波形が観測された。ところが、爆発の直後は振幅の大きさはほぼ同じであるが、周期が2倍近く長くなっている全く異なった波形が現れている。

Table.1 Coefficient of correlation between the magnetic noise data of Mount Sakurajima and magnetic noise data at each measurement point.

Measurement point	Time	Kanoya	Kakioka	Memanbetsu
Sakurajima	21	0.78	0.65	0.57
	22	0.95	0.95	0.85
	23	0.93	0.89	0.70
	24	0.84	0.89	0.54
	25	0.86	0.02	0.29
	26	0.89	0.64	0.23
	Magnetic storm	0.84	0.75	0.75

4. 結論

桜島火山による生体磁気計測への影響を調べることを目的として、独自に開発したSQUID磁束計を用いた地磁気計測システムで、実際に桜島における地磁気変動の観測を約40日間にわたって行った。そのデータの有効性を確かめるため、気象庁地磁気観測所のデータとの相関係数をとり検討した。また、測定したデータより、生体磁気計測に影響を及ぼすか検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

桜島で鉛直成分の地磁気変動を観測した結果、日変化や磁気嵐などに起因する大きな地磁気変化を確認できた。また爆発前後の地磁気の微小変動を解析した結果、爆発直後に一時的に通常と異なった波形を観測した。磁気嵐の主相のような急激な地磁気の変化時や、桜島爆発前後においては、生体磁気計測にとっては、十分に影響を及ぼすことが示唆される。今後、これらのデータを周波数解析、および時間・周波数解析等をし、周波数レベルでの生体磁気計測への影響および自然界の磁気雑音の定量的な影響を明確にしたい。また、今回用いたSQUID装置のピックアップコイルは、1ターンのコイルを用いたため、ノイズに影響を

受けやすい。今後は、2次微分形のピックアップコイルを有するDC-SQUIDを用いた計測を行って、今回の結果と比較したい。最後に、本研究を進めるに当たり、ご協力を頂いた九州大学理学部の北村泰一教授、第一工業大学の犬串哲彌教授に深く感謝致します。

Fig. 7 Geomagnetic field signals at Mount Sakurajima before and after an eruption of volcano during the period of observation.

文 献

- 1) 松葉博則、藤巻則雄、宮内哲: 日本応用磁気学会誌, 10, 1(1996).
- 2) 山崎慶太・小谷誠・内川義則: 日本応用磁気学会誌, 15, 597(1992).
- 3) 山崎慶太、湯ノ口万友、鎌田清孝、内川義則: 日本生体磁気学会誌, 10, 29(1997).
- 4) 鎌田清孝、湯ノ口万友、山崎慶太、藤原耕二、中瀬知哉、内川義則、小林宏一郎: 日本応用磁気学会誌, 22, 749(1998).
- 5) 鎌田清孝、湯ノ口万友、山崎慶太、藤原耕二、高橋則雄: 電気学会マグネティクス研究会, MAG-98-145(1998).
- 6) 鎌田清孝、湯ノ口万友、山崎慶太、藤原耕二: 電気学会全国大会講演論文集, 420(1999).
- 7) 鎌田清孝、湯ノ口万友、山崎慶太、中瀬知哉、藤原耕二、高橋則雄: 日本応用磁気学会誌, 23, 1509(1999).
- 8) 白樂善則、廣濱泰人、仁田幸治他: 低温工学, 27, 166(1992).
- 9) 原宏: 超伝導エレクトロニクス, オーム社, 東京(1985).
- 10) 上出洋介: オーロラと磁気嵐, 東京大学出版会, 東京(1982).