

磁気シールドルームによる低磁場環境下での 岩石残留磁化測定システムについて

味喜 大介

MAGNETICALLY SHIELDED ROOM AND INSTRUMENTS FOR PALEOMAGNETIC MEASUREMENTS

By Daisuke MIKI

Synopsis

A magnetically shielded room (MSR) for paleomagnetic and rock magnetic experiments was constructed at Sakurajima Volcanological Observatory. The remaining dc magnetic field is less than 50 nT, one thousand of shielding factor with regard to the geomagnetic field, at inside the MSR. The MSR is surrounded by two layers of permalloy plate, and has no tight door and maze-like walls. Instruments for paleomagnetic measurements were installed in the MSR with taking special care for the disturbing magnetic field created by the instruments themselves. This MSR and instruments may produce very low noise environment for paleomagnetic experiments.

1. は じ め に

古地磁気学的研究では岩石試料の微弱な残留磁化の測定が基本的な作業であるが、地磁気や実験室内で発生する磁氣的ノイズが測定・実験結果に無視できない影響を与えることがわかっている。例えば段階消磁実験では、磁力計などの測定機と消磁装置の間を試料を頻繁に移動させることが必要であり、その際に地磁気などの磁氣的ノイズによって試料が粘性残留磁化などの二次的磁化に汚染され、測定に正確さを欠いたり、実験が失敗に終わることが時折起こっていた。このような問題を避けるため、諸外国では磁気シールドルーム内で測定・実験が行われてきた¹⁾。

桜島火山観測所では、火山活動史の解明や、火山帯形成の tectonic な背景を探るため、古地磁気学的手法の応用を意図した。そのための実験環境の整備のため磁気シールドルームの建設を計画し、1994年8月には桜島火山観測所に磁気シールドルームが完成した。その後各種の装置を磁気シールドルーム内に設置して低磁気ノイズ環境下で測定・実験が行えるようになった。本稿ではこの低磁場環境下での岩石残留磁化測定システムについて紹介する。

2. 磁気シールドルーム

2.1 磁気シールドルームの概要

古地磁気学的な測定・実験の際に二次的な残留磁化の原因となる磁氣的ノイズとして問題になるのは主

に直流磁場である。段階熱消磁実験が高い消磁レベルに進んだ際など試料の残留磁化が小さくなる実験段階では、試料によっては数 100 nT の直流磁場でも二次的な粘性残留磁化獲得の原因となるおそれがある。交流磁場は特に強くない限りさほど問題にならないと考えられる。そこで、桜島火山観測所の磁気シールドルームでは室内の残存直流磁場を 100 nT 以下とすることを設計仕様とした。

桜島火山観測所に完成した磁気シールドルームの平面図を Fig. 1 に示す。室内の寸法は幅 2.4 m、奥行 3.0 m、高さ 2.4 m の直方体である。磁気シールド効果は、壁・床・天井をパーマロイやケイ素鋼などの高透磁率金属製の磁気シールド層で覆うことで実現される。桜島火山観測所の磁気シールドルームの壁・床・天井にはすべて 2 層の磁気シールド層が施された。シールド材には 1 mm 厚の日本鋼管(株)製パーマロイ薄板が用いられた。このパーマロイ薄板は、切断や曲げ、穴あけなどの加工後に 1,100°C で磁気焼鈍されたもので、初比透磁率は 100,000 以上、保磁力 $1\mu\text{T}$ (0.01 Oe) 以下と優れた磁気特性をもつ。磁気シールド層には、この 1 mm 厚パーマロイ板が、外層に 2 枚重ね、内層に 3 枚重ねで用いられている。外層と内層の層間隔は約 20 cm で、各層はアルミニウム合金製の骨材と厚板で支持されている。シールドルームがアルミニウム合金製の支持材で囲まれていることによって、比較的高周波の交流磁場や電磁波に対するシールド効果も期待できる。

桜島火山観測所の磁気シールドルームの構造上の最大の特徴は密閉式の扉をもたない開口型になっていることである。密閉扉式のほうが磁気シールド効果を得やすいが、人の出入りの容易さや実験機器のためのケーブル類の引き込み方法の自由度など「使い勝手のよさ」の点で有利な開口式を採用した。開口式の場合、開口部を外部磁場に対して垂直の方向に配置することによって開口部からの磁場の侵入が最小になる。また、Fig. 1 に示すように開口部の外側をさらに磁気シールド層で囲むことによって、単純な開口式の場合のような出入口付近からの室内への磁場の侵入を抑えるようにした。

なお、桜島火山観測所の磁気シールドルームには通路部入口(南端)に、前述のパーマロイ板 2 枚重ねの磁気シールド層をもつスライド扉を設けた。後で述べるようにこのスライド扉を閉鎖することによって、磁気シールド室内の残存磁場がさらに小さくなる。その他、入り口の反対側にあたる、磁気シールド

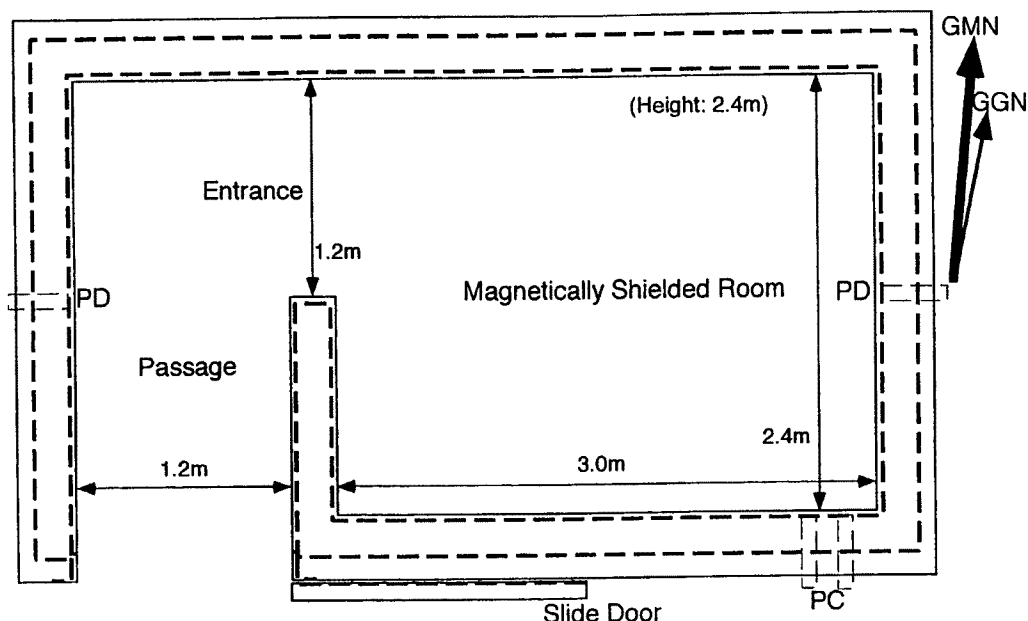


Fig. 1. A plain view of the magnetically shielded room (MSR) constructed at Sakurajima Volcanological Observatory. PC, PD: penetrating hole for cables and the demagnetizing coil, respectively.

ルーム南東の角にケーブル類の引き込み用に 8 cm 径の貫通孔を 2 個設けた。他に消磁用と空調用の貫通孔があり、合計 5 ヶ所の貫通孔には、貫通孔からの磁場の侵入を防ぐためにそれぞれ個別に磁気シールドが施されている。

桜島火山観測所は桜島島内に位置し、日常的に降灰にさらされている。新鮮な火山灰に含まれる亜硫酸ガスなどは磁気シールド材の性能を著しく低下させる腐蝕・酸化の原因となるため、磁気シールド材が直接露出することを極力避ける必要がある。そこで、壁および天井はビニールクロス張り、床はビニールシート仕上げとした。明るい色調の室内は開口式のため閉塞感が緩和されることとともに、狭い室内で長時間の作業をする者の心理的負担を軽くする効果もある。火山灰粒子は実験機器にも悪影響をおよぼし、また、測定試料の磁気的汚染の原因にもなる。そこで、シールドルーム内から外への空気の流れによって室内への火山灰粒子の侵入を抑える効果をねらって、シールドルーム内の空調は吹き出し口のみとした。空調用貫通孔は 30 cm 径でシールドルーム天井の中央部に 1 ヶ所設けられている。

磁気シールドルームを継続して使用していると、地磁気などの外部磁場による残留磁化の獲得や機械的歪の蓄積などのために磁気シールド材のシールド性能が徐々に低下する。このような場合にシールド性能を回復させる方法として交流消磁が有効であることが知られており、国内でも適用例が報告されている²⁾。桜島火山観測所の磁気シールドルームには、必要なときに交流消磁が容易に行えるように、Fig. 2 のようにシールドルームの東西の壁に消磁作業用貫通孔を設け、交流消磁装置一式を常備している。交流消磁装置は消磁コイル、電源ユニット、木製架台からなる。45 ターンの消磁コイルは消磁用貫通孔を利用してシールドルーム中央を東西に貫通するように設置する。設置作業を容易にするために、消磁コイルは 45 ターン全てが一束になっており消磁用貫通孔に一度に通すことができる。消磁用電源ユニットは可変トランスと共振コンデンサからなり、100 V 商用電源を用いて最大約 10 A の電流を消磁コイルに流すことができる。

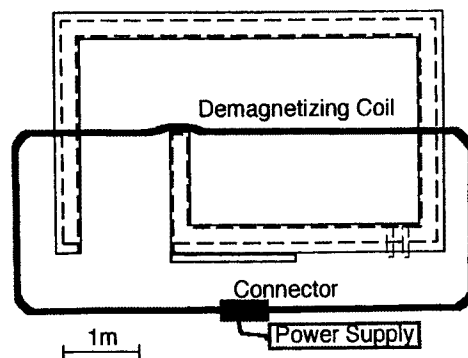


Fig. 2. Arrangement of the demagnetizing coil.

2.2 磁気シールド効果

Fig. 3 に磁気シールドルーム完成直後に測定したシールドルーム内の残存直流磁場の分布を示す。測定はシールドルーム内および通路部の合計 21 点で、床から 60 cm・120 cm・180 cm の 3 つの高さについて、スライド扉を開放した状態と閉鎖した状態でそれぞれ行った。測定に使用した磁力計は Applied Physics Systems 社製 3 軸フラックスゲート磁力計 APS-520 A で、シールドルーム内では 0.1 nT、通路部では 1 nT または 10 nT の分解能で測定した。なお、桜島火山観測所周辺の地磁気の強さは約 47 μ T、伏角は約 45° である。

スライド扉を開放したときの残存直流磁場はシールドルーム内では数 nT から最大でも 50 nT で、外部磁場（地磁気）に対するシールド率にすると 1000 分の 1 以上である。貫通孔からの磁場の侵入は特に認められない。通路部の残存直流磁場は出入り口付近の約 4,000 nT から奥に向かって小さくなり、シールドルーム入口付近では約 150 nT になる。

スライド扉を閉鎖すると、シールドルーム内の残存直流磁場はおおむね 5 nT～20 nT で均一になる。シールドルーム入口開口部からの磁場の侵入が小さくなり、シールドルーム全体として残存直流磁場はスライド扉を開放した場合より小さくなっていることがわかる。通路部でも残存直流磁場がスライド扉を開放したときの約 3 分の 1 に減少した。通路部の奥側では 100 nT 以下となり、シールドルーム内に準じる

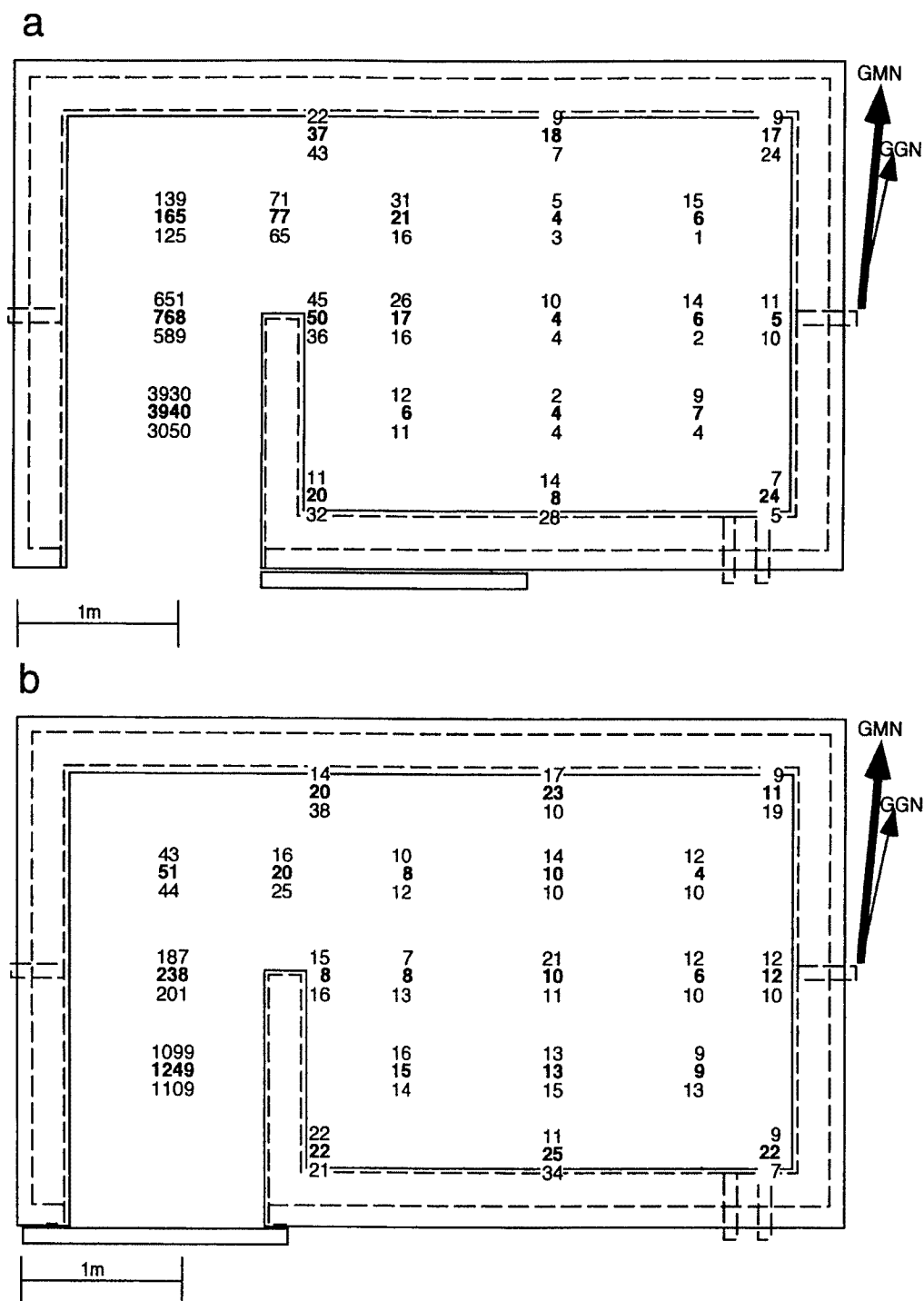


Fig. 3. Remaining dc magnetic field inside the MSR when the slide door is opened (a) and closed (b).

Numbers are field strength (nT); location of numbers indicate measuring points, and, upper, middle, and lower rows indicate height of the measurement: 0.6, 1.2 and 1.8 m from the floor, respectively. Arrows indicate directions of geomagnetic north (GMN) and geographical north (GGN).

低磁場空間として利用することができる。

なお、シールドルームが完成してから8ヶ月を経ても交流消磁が必要になるような顕著なシールド性能の低下は認められない。

3. 測定・実験機器

3.1 測定・実験機器の概要

磁気シールドルーム内で古地磁気学的な測定・実験を行うための機器として、2台のスピナー型岩石磁力計、2台の熱消磁装置、交流消磁装置、初期帯磁率計、およびフラックスゲート磁力計を設置した。

- (1) スピナー型岩石磁力計は夏原技研製 SMM-85 と Schonstedt Instruments 社製 SSM-2A の2台であるが、SMM-85 はモーターその他の部品によるシールドルーム内の磁氣的擾乱を抑えるため現在改造中である。SSM-2A はフル・スケール 10^{-3} Am^2 から 10^{-8} Am^2 までの残留磁化を測定することができる。また、 $50 \mu\text{T}$ の直流磁場を発生して帯磁率の異方性を測定することができる。
- (2) 熱消磁装置は夏原技研製 TDS-1 と TDE-91 が各々1台で、いずれも無誘導型電気炉を用いて同時に6個の試料を最高 800°C まで加熱することができる。到達加熱温度の確度は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内、試料周辺の温度勾配は $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内である。これらの熱消磁装置は試料に熱残留磁化を付加することができるように直流磁場発生用のソレノイドコイルを備えている。熱消磁実験は1回の試料の加熱・冷却に2時間程度を要するが、2台の熱消磁装置を同時に平行して稼働させることで作業能率の向上を図ることができる。
- (3) 交流消磁装置(夏原技研製 DEM-8602)は試料を3軸回転させながら最大交流磁場強度(ピーク値) 200 mT までの交流消磁が可能で、交流磁場発生用コイルと平行な軸をもつ直流磁場発生用コイルを用いて試料に非履歴残留磁化を付加することもできる。また、交流磁場発生用コイルに直流電流を流すことで最大 150 mT の直流磁場を発生することができる。
- (4) 初期帯磁率計は Bartington Instruments 社製 MS-2 シリーズで、標準サイズの試料用とボーリング・コア試料用センサーおよび温度変化測定用センサーを保有している。MS-2 による初期帯磁率測定のみを磁気シールドルーム内で行うことによる利点はほとんどないが、熱消磁実験の際に加熱による試料の化学変化を監視する目的で初期帯磁率測定を行うために、標準サイズ用センサーのみをシールドルーム内に設置した。
- (5) Applied Physics Systems 社製3軸フラックスゲート磁力計 APS-520A は、最小分解能 0.03 nT で、 250 Hz 以下でほぼフラットな周波数特性をもつ。この磁力計は主に他の測定・実験機器の校正やシールドルーム内の残存磁場測定など実験環境の維持・向上のために用いている。
- (6) その他に、岩石試料用とは別に、交流消磁用コントローラーおよび電源ユニット一式とさまざまな形状のソレノイドコイルを用意している。これは、直流磁場を発生する実験を行った後にしばしば起こる実験機器の帯磁を消去するためや、消磁済の工具・治具などを一旦シールドルーム外に持ち出した後に再度消磁するために用いる。また、試料が予期しない外部磁場にさらされるのを防ぐために実験中の試料の一時的な保管用にパーマロイ製磁気シールドケースを備えた。

岩石磁力計と熱消磁装置および交流消磁装置の試料位置周辺はそれぞれ個別に多層のパーマロイ製磁気シールドが施され、磁気シールドルーム内に設置した後の試料周辺の残存直流磁場は 2 nT 以下と極めて小さい。これらの磁気シールドは、残留磁化の付加実験などの際に装置内部に発生させる磁場を装置の外部に洩らさないために、磁気シールドされていない実験室で使用する場合と同等のものとした。

これらの装置を用いて、通常の段階消磁実験に加えて、熱残留磁化・非履歴残留磁化・等温残留磁化の獲得実験や初期帯磁率およびその異方性の測定を行うことができる。また、これらの組み合わせにより、Thellier and Thellier の方法³⁾や Shaw の方法⁴⁾による古地球磁場強度の測定やいわゆる Lowrie-Fuller

テスト⁵⁾など各種の測定・実験を磁気シールドルーム内で行うことができる。

3.2 測定・実験機器の磁気シールドルームへの設置

Fig. 4 に測定・実験機器の磁気シールドルーム内での配置を示す。配置の計画にあたって、既に述べた残存直流磁場測定の結果をふまえて、機器間で試料を移動するとき（例えば消磁装置から岩石磁力計など）の経路など試料を扱う空間がなるべく低磁場になるようにすること、また、冷却開始直後には数百℃になる熱消磁装置の冷却風が速やかに排出されること、および、シールドルーム消磁用コイルの経路を機器が妨げないことを条件として考慮した。

加えて、測定・実験機器を磁気シールドルーム内に設置する際には、機器自身を作る磁場によって低磁場環境が損なわれないよう配慮する必要がある。測定・実験機器を作る磁場の主な原因となるのは、機器に含まれる部品のうちモーターなど永久磁石を使用したものやスチール製の機器ケースやネジ類などの強い残留磁化をもつ部品、交流消磁装置などの機器内部で発生する磁場の機器外部への洩れ、また機器の作動電流などである。このような磁気ノイズを防ぐために、機器の設置作業にあたっては機器周辺の各部で磁場測定を行って磁気ノイズの発生源を調べ、以下に述べるような対策をとった。

- (1) 消磁装置の制御ユニットや電源ユニット、初期帯磁率の温度変化測定用センサーなどの磁気シールドルーム内に置く必要のない部品・装置はシールドルーム外に設置した。磁気シールドルーム内外の装置間を結ぶケーブル類は入口開口または貫通孔を経由して接続した。交流消磁装置の制御ユニット上にあったスイッチ類は、頻繁に操作する必要があるため、制御ユニットを改造してスイッチ類のみを磁気シールドルーム内に設置した。
- (2) 磁気シールドルーム内の機器を構成するケースやネジ類などの強磁性物質が用いられている部品について、取り去ることが可能なものはすべて取り去り、交換可能なものは真鍮やステンレスなど非磁性材料製のものに交換した。さらに、取り去ることも交換することも不可能な部品は原則として交流消磁

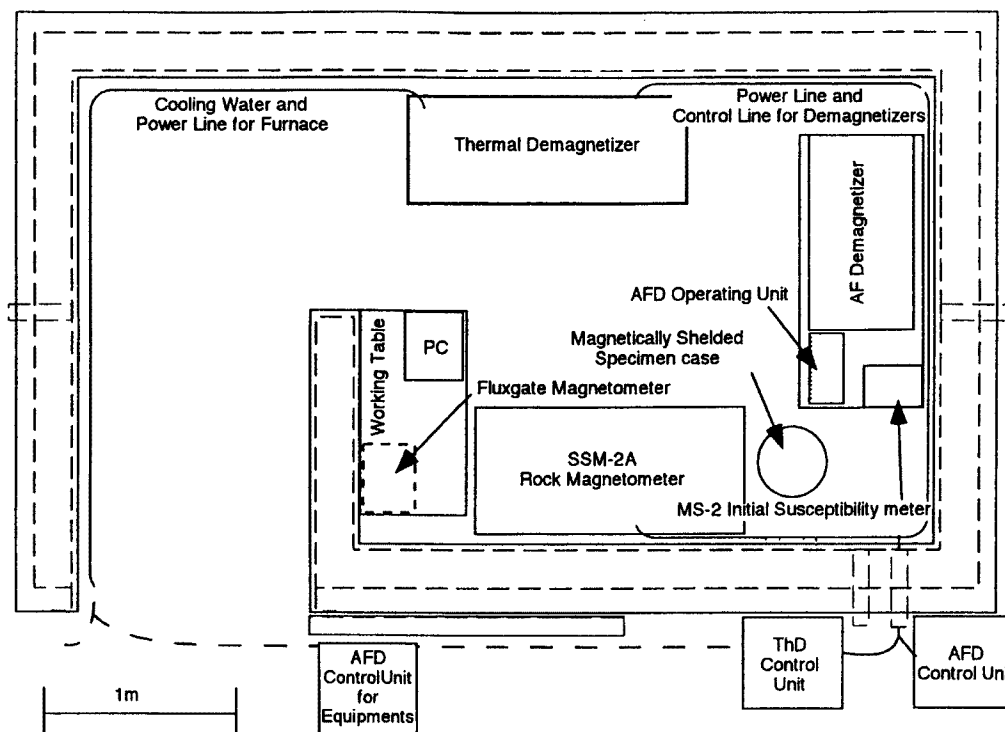


Fig. 4. Arrangement of the instruments in the MSR.

行って残留磁化をできるだけ小さくするようにした。また、シールドルーム内で使用するドライバーなどの工具類も交流消磁を行った。ネジ1本でさえもそのごく近くに数千 nT の磁場をつくることがあったが、交流消磁によって部品から 5 cm 程度離れれば 20 nT 以下にまで小さくなった。サイズの大きい部品の交流消磁作業は、スライド扉を閉鎖してできる通路部の低磁場空間を利用して行った。通常の鉄製品は最大振幅 50 mT（ピーク値）程度の交流消磁で十分な消磁が可能である。その他、機器の台や作業卓は全て非磁性材料（木）製とした。

- (3) 岩石磁力計を制御するためのパーソナルコンピュータは、プラスチックを多用し、液晶ディスプレイを備えたノートタイプのを上述のように部品の撤去や交流消磁を行って用いているが、やはり大きな磁気ノイズの原因となる。また、岩石磁力計や交流消磁装置のモーターなどの永久磁石を使用した部品はその性能が低下するおそれがあるため交流消磁を行うことはできない。これらのコンピュータやモーターなどの機器は磁場の発生源としては磁気モーメントとみなすことができるので機器からの距離が離れていれば影響はごく小さいが、機器の周辺 10 から 30 cm 程度までの範囲では残存直流磁場が 100 nT 以上になる。この対策としてこれらの機器・部品を個別にパーマロイ製シールドケースで覆うことを計画しているが、現在のところはノイズとなる磁場の強い範囲に試料をおかないように特に注意して測定・実験を行っている。また、フラックスゲート磁力計の本体などは、試料を扱う空間から距離を離して設置することで機器自身の作る磁場の影響を避けている。
- (4) 交流消磁装置は消磁コイル内で交流消磁実験の際に最大 200 mT（ピーク値）の交流磁場、等温残留磁化獲得実験の際に最大 150 mT の直流磁場と強い磁場を発生するため、消磁コイルを覆う磁気シールドケースの外部に磁場の洩れが発生する。最大の磁場を発生したときにシールドケース外部にもれる磁場の大きさは、消磁コイルの軸に直交する方向に 1 m 離れた場所で最大 200 nT 程度である。上述のパーソナル・コンピュータの場合のようにシールドケースを用いてこの磁場の洩れを防ぐには相当大きなシールドケースが必要になり、実験室内の空間の有効利用や費用の観点からみて現実的とはいえない。幸い、交流消磁装置の最大発生磁場を発生する時間は短いので、その間は試料一時保管用のシールドケースや個別にシールドされた他の機器の内部に試料をおくことで対応している。機器内部で磁場を発生する装置のうち、交流消磁装置以外の装置は内部で発生する磁場が 100 μ T 程度と比較的小さく、それぞれ個別の磁気シールドケースの効果で問題になるような外部への磁場の洩れはない。
- (5) シールドルーム内で使用する機器の電源電流や作動電流による磁気ノイズへの対策として、シールドルーム内で使用する電線は機器内部の一部を除いてツイスト・ペア線を使用した。その際、岩石磁力計の電源など比較的電流の小さいものには市販のキャブタイヤ線やツイスト・ペア・シールド線を用い、交流消磁装置の消磁コイルに流す電流など大電流が流れる電線には特に強くより合わせた自作のものを用いた。また、シールドルームの床に壁に沿うように電線の経路をとることで、試料を扱う空間から十分な距離をとるようにした。このため、試料を扱う空間での電流による磁気ノイズは直流・交流（60 Hz）共に数 nT 以下と無視できるレベルまで小さくなっている。

以上のような作業によって、測定・実験中に試料を移動させる経路や試料の一時保管の場所などを 50 nT 以下の低磁場にすることができた。また、個別の磁気シールドケースの試料挿入口付近での磁場の増大も認められず、結局、シールドルーム内の残存直流磁場は測定・実験機器を設置する前とほぼ同等になり、直流残存磁場が地磁気の約 1000 分の 1 という実験環境を実現することができた。このような低磁場環境下で実際に測定・実験を行う際の留意事項として、既に述べたパーソナルコンピュータやモーター周辺または交流消磁装置で強い磁場を発生している場合のように局所的または一時的にノイズとなる磁場が大きくなる時の試料の取り扱いや、また、腕時計やベルトのバックル、磁気カード類などの室内で作業する人間が身につけているものが磁気シールドルーム内で発生する磁気ノイズの原因になるため測定・実験の際にはこれらをシールドルーム内に持ち込まないようにする、などがある。

4. 磁気シールドルームの効果

4.1 試料の磁氣的汚染の低減

磁気シールドルーム内で測定・実験を行うことによって、試料が磁氣的ノイズに起因する予期しない粘性残留磁化や非履歴残留磁化を獲得することを避けることができ、試料の自然残留磁化の段階消磁実験に対するふるまいがより明確になる、などの効果が期待できる。しかし、実験室内の磁氣的ノイズによって試料が受ける二次的磁化の獲得などの影響の程度は試料中の磁性鉱物の種類や量などによって大きく異なるため、これを定量的に評価することは難しい。

Fig. 5 に磁気シールドルーム内で行った自然残留磁化 (NRM) の段階消磁実験および古地磁気強度測定の結果の例を示す。試料は桜島の文明溶岩である。古地磁気強度測定は Coe⁷⁾ の改良によるテリエ法³⁾で行った。最小自乗近似に使用するデータの選択などデータの取り扱い方法は Coe 他⁸⁾の手順に従い、加熱による化学変化を監視するために行った初期帯磁率測定の結果を併せて考慮した。段階消磁実験 (Fig. 5 a) では、交流消磁・熱消磁共に NRM が消磁レベルが高くなるのにしたがって方向を変えずに減衰する (図上で原点に向かって直線的に変化する) ことが段階交流消磁の 100 mT 以上や段階熱消磁の 400°C 以上の高い消磁レベルでも明瞭に認められる。テリエ法による古地磁気強度測定でも最小自乗近似に使用した区間の直線性は極めて高く、この試料から求められた古地磁気強度の誤差も小さい (Fig. 5 b)。

1 個の試料の測定結果が直ちに過去の地磁気の方位・強度を表すとはいえないが、交流消磁と熱消磁で見られる NRM の方位が東偏約 11° で伏角約 44° と共通で、いずれの消磁方法に対しても安定なことから、試料の NRM は溶岩の冷却時に獲得された初生的なものである可能性が高い。段階熱消磁実験では 300°C 付近と 550°C 付近に NRM の unblocking が認められ、試料の NRM は主に溶岩噴出時の高温酸化をあまり受けていないチタン磁鉄鉱によって担われていると考えられる。テリエ法による古地磁気強度測定では、部分熱残留磁化の再獲得実験 (PTRM check) や初期帯磁率測定の結果から 300°C をこえる加熱段階で加熱による化学変化が顕著にみられ、また、段階消磁実験の結果などから 140°C 以下の区間は溶岩噴出後に獲得された二次的磁化の影響を蒙っていると考えられる。このため、これらを除いた 160°C ~ 300°C の区間のデータを直線近似に使用した。得られた古地磁気強度の値 ($47.2 \pm 0.6 \mu\text{T}$) は Tanaka⁹⁾ が求めたもの ($51.9 \pm 4.0 \mu\text{T}$) に比べてやや小さいが誤差の範囲で一致する。

通常の実験室で段階消磁実験を行った際に時折みられた、高い消磁レベルでの残留磁化の不規則な挙動はシールドルーム内で測定・実験を行うようになってからはみられない。試料が異なるので全てが実験環境の向上による結果であるとは言えないが、磁気シールドルームによる低磁気ノイズ環境の効果が出ていると思われる。テリエ法による古地磁気強度測定では、一連の実験のなかで部分熱残留磁化付加の際に印加する直流磁場の強度など実験条件の再現性を確保することが高精度の測定を行うために不可欠で、また、実験室内で付加された粘性残留磁化などの予期しない二次的磁化による誤差の影響は一般の古地磁気方位測定の場合より深刻である。テリエ法のような高精度が要求される実験には特に好適な実験環境になっている。

4.2 岩石磁力計のノイズ・レベルについて

磁気シールドルーム内で測定・実験を行うことの顕著な効果として、岩石磁力計の S/N 比が向上したことがわかった。シールドルームへの設置後、SSM-2 A スピナー磁力計の校正を行い、その結果から併せてノイズ・レベルを評価した。校正では、既知の電流を校正コイルに流したものを標準試料として繰り返し測定して行った。一回の測定には約 5 秒間のデータを平均化した。SSM-2 A の感度は試料とセンサーの間の距離およびセンサー信号の増幅率 (3 段階) によって決まり、S/N 比は主にセンサー信号の増幅率とデータを平均化する時間に依存する。増幅率最大で行った 300 回の測定の標準偏差はフルスケールの 0.7% になった。これは試料をセンサーに最も近づけて測定した場合 $7 \times 10^{-11} \text{ Am}^2$ に相当する。SSM-2

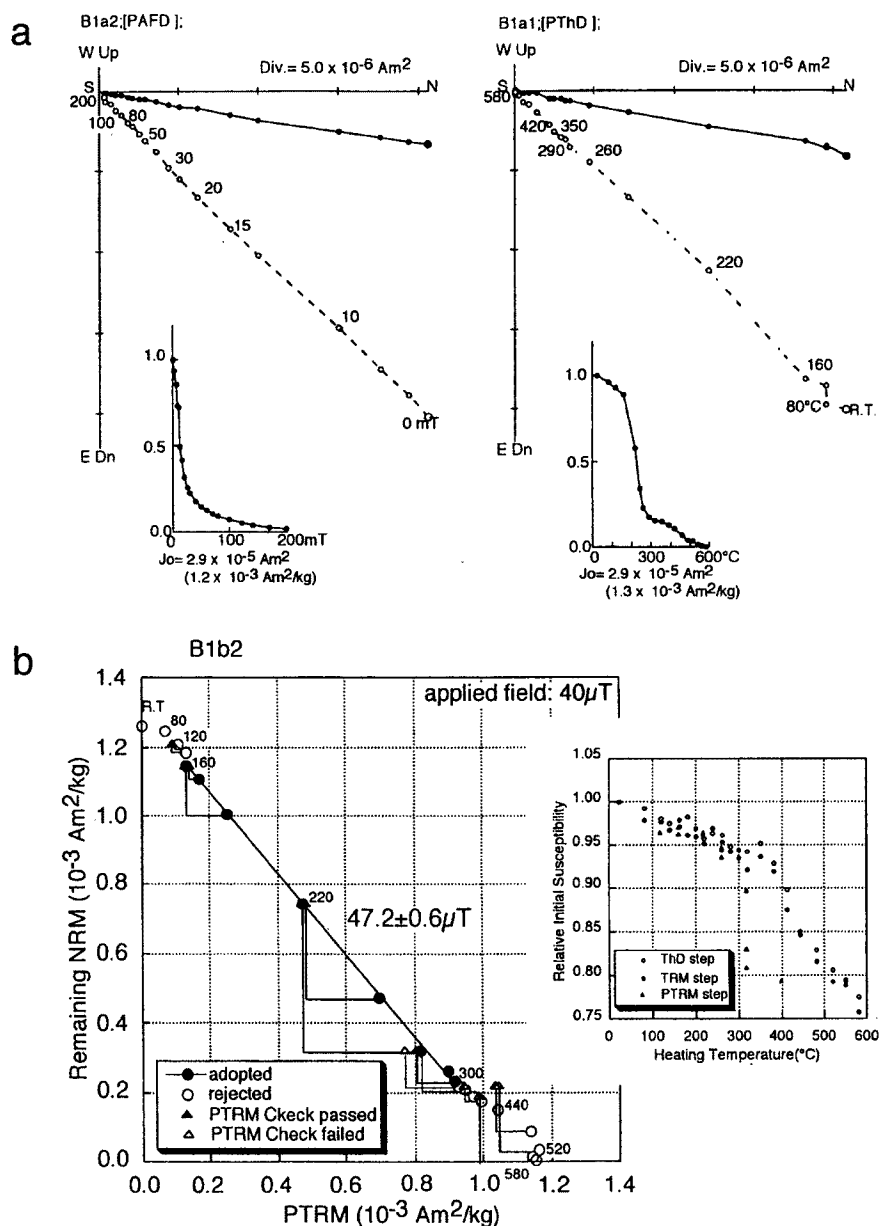


Fig. 5. The results of paleomagnetic experiments on one sample of Sakurajima lava.
 a: Results of progressive demagnetization experiments of natural remanent magnetization (NRM) plotted on Zijderveld diagrams.⁶⁾ Closed circles and lines are horizontal projection, and, open circles and dashed lines are vertical projection. Relative change of strength of NRMs are also indicated.
 b: A result of peleointensity measurement by using Thellier' s method. Left diagram: NRM-TRM diagram. Open and closed circles are rejected and adopted data points from the linear regression procedure, triangles and L-shaped lines indicate PTRM checks, and numbers are heating temperature.
 Right diagram: relative initial susceptibility value at each heating step of Thellier's experiment.

A の取り扱い説明書¹⁰⁾には同機のノイズ・レベルは約 90 秒の平均化を行った場合の標準偏差が $5 \times 10^{-11} \text{ Am}^2$ と記載されている。同説明書に記載の平均化の時間とノイズ・レベルの関係から、磁気シールドルーム内で約 90 秒の平均化を行って測定した場合のノイズ・レベルは $2 \times 10^{-11} \text{ Am}^2$ 程度になると考えられ、 $1 \times 10^{-9} \text{ Am}^2$ 程度の試料の残留磁化を確度数%で測定できることになる。実際の試料の測定の際には 1 回の測定で試料を 6 回置き換えて測定するため、平均化の時間を約 90 秒にしたときには 1 個の試料を 1 回測定するために約 12 分を要する。段階消磁実験では複数の試料を同時に処理しながら試料 1 個あたり 10～20 回の消磁・残留磁化測定を行うのが通常で、1 回の測定に要する時間が十数分というのは実験の効率を考えたとき実用的な限界である。比較的残留磁化強度の大きい火山岩でも段階消磁実験の高い消磁レベルではしばしば残留磁化強度が 10^{-9} Am^2 のオーダーにまで減衰するが、磁力計の S/N 比の向上によってこのような場合でも十分な精度を維持したまま測定することが可能になった。また、 10^{-8} Am^2 のオーダーより大きい残留磁化を測定する時は 1 回の測定を 3～5 分（平均化の時間にして約 5～20 秒）で完了することができる。磁気シールドルーム内に設置することで岩石磁力計のノイズ・レベルが減少した理由としては、センサーが検知する磁氣的ノイズや、電磁気ノイズによって磁力計のアナログ回路に誘導される電氣的ノイズが減少したことが考えられる。

5. お わ り に

これまで述べてきたように、桜島火山観測所の磁気シールドルームは人の出入りや機器配置の自由度の点で有利な開口式の構造をもち、そのシールド性能は地磁気に対して 1000 分の 1 以下を達成することができた。また、測定・実験機器自身が作る磁気ノイズを防ぐため、機器をシールドルーム内外に別けて設置する、部品の交換および交流消磁を行う、などの対策をとった。最終的にシールドルーム内の試料を扱う空間では機器を設置する前とほぼ同等の低磁場環境を実現することができた。この低ノイズの実験環境の効果として、測定・実験の高精度化や実験の「歩留まり」の向上が期待できる。また、岩石磁力計の S/N 比が向上したこともわかった。

謝 辞

京都大学防災研究所の加茂幸介名誉教授、また、京都大学施設部や防災研究所事務部のスタッフの方々および桜島火山観測所の高山鐵朗技官には、磁気シールドルーム設置を計画している段階からその実現に向けて多大なご尽力をいただきました。京都大学理学研究科の鳥居雅之助教授からは磁気シールドルームの構造や実験機器の仕様などについて多くの有益なご助言を得ました。また、(株)夏原技研の夏原信義氏には、測定・実験機器の設置に伴う機器の改造や消磁の作業の際にご助言・ご協力をいただきました。磁気シールドルーム内の残存磁場測定は日本鋼管 (株) の加藤満氏をはじめ現地スタッフの方々に手伝っていただきました。これらの方々に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Scott, G. R. and C. Frohlich : Large Volume, Magnetically Shielded Room-A New Design and Material, in Magnetite Biomineralization in Organisms-A New Biomagnetism, J. L. Kirschvink, D. S. Jones and B. J. MacFadden eds., Plenum Press, New York, 1985, pp. 197 - 220.
- 2) 石川 登・葛西直子・茅根一夫・樋口正法・賀戸 久・小柳正男：電総研磁気シールドルームの消磁効果, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J 73 -A, 1990, pp. 1447 - 1450.
- 3) Thellier, E. and O. Thellier, Sur l'intensité du Champ Magnétique Terrestre Dans le Passé

Historique et Géologique, Ann. Geophys., Vol. 15, 1959, pp. 285 – 376.

- 4) Shaw, J. : A New Method of Determining the Magnitude of the Palaeomagnetic Field Application to Five Historic Lavas and Five Archaeological Samples, Geophys. J. R. Astro. Soc, Vol. 39, 1974, pp. 133 – 141.
- 5) Lowrie, W. and M. Fuller : On the Alternating Field Demagnetization Characteristics of Multidomain Thermoremanent Magnetization in Magnetite, J. Geophys. Res., Vol. 76, 1971, pp. 6339 – 6449.
- 6) Zijderveld, J. D. A. : 'A. C. Demagnetization of Rocks : Analysis of Results', in Method of Paleomagnetism, D. W. Collinson and K. M. Creer eds., Elsevier, New York, 1967, pp. 254 – 286.
- 7) Coe, R. S. : Paleo-intensities of the Earth's Magnetic Field Determined from Tertiary and Quaternary Rocks, J. Geophys. Res., Vol. 72, 1967, pp. 3247 – 3262.
- 8) Coe, R. S., S. Grommé and E. A. Mankinen, Geomagnetic Paleointensities from Radiocarbon-dated Lava Flows on Hawaii and the Question of the Pacific Nondipole Low, J. Geophys. Res., Vol. 83, 1978, pp. 1740 – 1756.
- 9) Tanaka, H. : Paleointensities of the Geomagnetic Field Determined from Recent Four Lava Flows of Sakurajima Volcano, West Japan ; J. Geomag. Geoelectr., Vol. 32, 1980, pp. 171 – 179.
- 10) Schonstedt Instrument Company : Instruction Manual of SSM-2 and SSM-2 A Spinner Magnetometers, Schonstedt Instrument Company, Reston, 1992.