

ブルカノ島での重力調査

杉原 光彦¹⁾・大熊 茂雄²⁾・中野 俊³⁾・古川 竜太³⁾

1. はじめに

イタリアのブルカノ火山は世界で最も有名な火山の一つである。私達はここでオーストリア地質調査所(GBA)との共同研究の一環として重力調査を行ってきた。ブルカノ火山の地質的特徴については古川ほか(2001)を、共同研究の背景については大熊・中塚(2001)を参照していただくとして、ここでは重力調査をめぐる話題を記す。なお、「ブルカノ火山」は複数の火山から成るブルカノ島自体を指す場合と、別名「フォッサ」とも呼ばれる島内中央部にある火砕丘を指す場合があって紛らわしいので、以下では「ブルカノ火山」という用語は使用せず「ブルカノ島」と「フォッサ火砕丘」を使用する。

重力調査は地下構造調査のための最も基本的な地球物理探査法の一つとしてよく行われている。ただし重力調査から直接推定される地下構造とは密度という一つの物性値の分布に過ぎないし、その分布を一意的に推定することも原理的にはできない。こうした非一意性はすべての地球物理的構造調査に共通の問題点で、通常は複数の調査手法を併用して現実的な地下構造モデルを絞り込むことになる(例えば、大久保, 1995)。この解析手続きは協調解析と呼ばれるが、重力調査を地震波速度調査や磁気調査と併せて行われることが多い。今回の共同研究ではオーストリア地質調査所による磁気調査が先行して行われ(大熊・中塚, 2001)、ブルカノ島全域の空中磁気調査に加えて、フォッサ火砕丘では2本の測線を設定して、測定点間隔10mの詳細な地上磁気調査も行われていた。私達の重力調査の目的は、この磁気データとの協調解析に必要な重力データを取得することであった。

調査計画に先だって既存の重力データについて調べた。イタリアでは全土を対象とする重力データベースが構築されており、100万分の1の重力図が公表されている(Morelli, 1990)。ブルカノ島付近については、1980年代に地熱資源調査に関連して行われた地上および海上での重力調査データに基づいて、重力異常図が発表されている(Barberi *et al.*, 1994)。ブルカノ島内での測定点間隔は概ね500m程度であり、抽出された重力異常は1~2kmよりは長い波長のものであった。こうした構造調査とは別に、火山活動監視を目的とする重力モニタリングもブルカノ島では行われている(Berrino, 1995; Berrino *et al.*, 1998)。約30点の観測点では繰り返し精密重力測定が行われているが、これに加えて6地点では重力鉛直勾配も繰り返し測定されている。

既存のデータを参照してみても、私達が必要とする重力データは自前で取得する必要があることがわかった。フォッサ火砕丘近辺での測線調査以外でも十分ではないので、ブルカノ島全域で、できるだけ稠密なデータを取得することを目標にした。

2. 機材準備

重力調査が地下構造調査としてよく行われるのは、密度という最も基本的で分かり易い物理量を反映しているということのほかに、測定作業が比較的容易であるためでもある。必要機材も比較的小さくて軽い。今回重力調査を行うことになったのは、機材はすべて手荷物で運べるので別途輸送費を要しないという予算上の理由もあった。

今回使用した重力計はシントレクスCG3Mであ

キーワード: 重力異常, 重力測定, ブルカノ島

1) 地質調査所 地殻熱部
2) 地質調査所 地殻物理部
3) 地質調査所 地質部

る。これは最近数年間に普及してきた自動重力計で、初心者でも比較的簡単に質の揃ったデータを取得できる。操作自体がかなり自動化されている上に計測値や計測条件が内部メモリに記録されるためである。火山地質専門家として今回の調査に参加した中野・古川は重力計測に関しては全くの初心者であったが、すぐに習熟して地質観察のみならず重力データ取得にも直接的貢献をした。

重力値を評価するためには重力計測点の測位、特に高度の計測も欠かせない。高度計測誤差が1mあれば、重力値の評価の際には0.2~0.3mGalの誤差が生じる。機材や測定方法によっては1cmの精度で高さを計測することも可能であるが、実際には機動性や測定効率も考慮して目的に合った方法を選ぶことになる。今回の調査では手のひらサイズのGPS受信機、マゼランProMARK Xを用い、干渉測位法によって測定点の座標値を評価することにした。測定精度はGPS受信条件にも依存するが、ブルカノ島のように高々数kmの範囲ならば、数分間の受信でも数10cmの測高精度が得られることは経験的に確かめられていた。

結局、用意した重力調査用機材は重力計2台とGPS受信機3台(基地局用1台を含む)、データ転送・処理用PC2台、背負子2個と予備バッテリー及びGPS用乾電池である。2セット用意したのは、機材のトラブルに備えるため、また限られた出張期間(2000年3月22日~4月7日)にできるだけ多くのデータを取得したかったためでもある。しかし機材を揃えてみると予想よりも分量は多く、これに各自の荷物が加わっても果たして全て手荷物扱いとして認められるのだろうかと不安になった。

重力計の機内持ち込み方法については出発当日まで悩んだ。重力計を安定に働かせるには、電源を常時供給する必要がある。重力計センサー部を一定温度に保って温度特性の影響を抑えるためである。電源供給が途絶えると計測値の安定性を回復するまでには日数を要する。シントレクス重力計は密閉式電池を内蔵しており外部電源の供給が無くとも半日程度は維持できる。予備電池を用意しておいて適宜交換すれば、電源供給を維持したまま重力計を運ぶことは不可能ではない。しかし予備電池の航空機客室内への持ち込みは多くの場合安全上の理由から拒絶される。持ち込みが許容さ

れるPC用リチウム電池よりも重力計用電池は安全なはずだから交渉の余地はあるだろうが、予備電池自体の重さが別の負目となる。重力計本体とPCを客室内持ち込みにすると制限重量に余裕は無い。変に目立って、最近耳にすることの多い重力計の持ち込みに関するトラブルを引き起こしたくない。客室内では重力計本体は立てた状態で座席と両足で抑え込むようにしておきたいのだが、客室乗務員によっては、この状態を容認せず、荷物室に預けさせられたり、横倒しにして座席下や棚に収納することを要求されることがあるらしい。結局、今回は無用の混乱を避けるため、航空機での移動中は電源を外した状態で重力計を運ぶことを決断した。内蔵電池を外した瞬間に発する電子音を聞いた時、イタリアでは正常に復帰するだろうかとの不安がよぎった。

3. 出国からブルカノ島到着まで

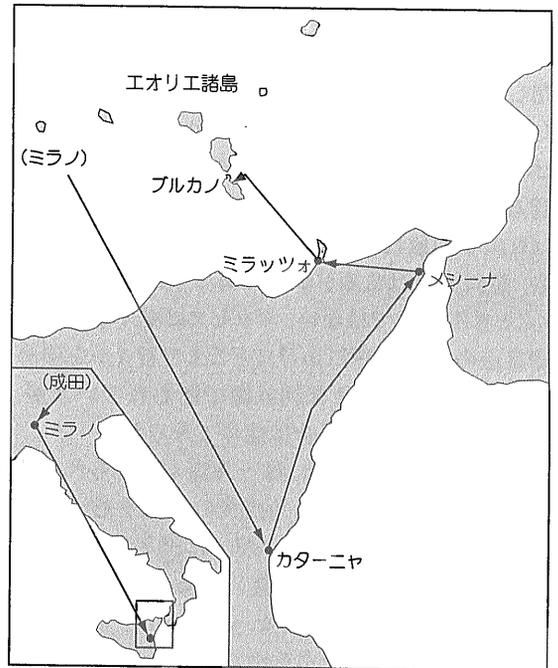
成田空港では手荷物に関して特に問題は生じなかった。チェックインの際、航空会社職員は客室内持込手荷物も含めて計量してしばし考えたあとで「イタリアではどのように判断されるかわかりませんよ」と言いながらも通してくれた。ATAカルネ(一時輸入のための通関手帳)をあらかじめ取得していたので通関手続きはスムーズだった。幸いなことに重力計の機内持込にもクレームは無かった。

ミラノ空港で乗り換えてシチリア島のカタニーヤに向かった。カタニーヤはエトナ火山の麓にある。空港に着く頃には窓の外は暗くなっていた。ちょうど活発になっていたエトナ火山のマグマ噴出を眺めるには好都合だったが、暗さは不安を募らせる。成田で預けた荷物は無事に受け取れるだろうか、カタニーヤのような地方空港では夜でも通関手続きはできるのだろうか。結局どちらの心配も杞憂だった。税関吏は「ああ重力計か」という感じで特に説明を求めることもなかった。彼にガリレオの面影を感じたのは気のせいだったろうか。ちなみに重力の慣用単位Gal(ガル)はガリレオに由来する。カタニーヤのホテルに到着して、まず重力計を電源に接続した。重力計の液晶画面に表示がでて正常動作を確認してほっとした。

ブルカノ島への道のりはなお遠い(第1図)。翌

日、カターニャからは鉄道で海岸線に沿って北上した。シチリア島からイタリア本土への玄関口にあたるメシーナで列車を乗り換えて西に向かい、ミラッツォに到着した。ブルカノ島を含むエオリエ諸島へはここから船で渡るが、港は駅から離れたところにある。観光シーズンをはずれていたため案内所は閉まっていた。初めての旅行者ならば港への行き方がわからずに戸惑ってしまったことだろう。大熊・中塚(2001)の下見のおかげで私達は迷うことなく港に到着した。ところが乗船を予定していた船便はエンジントラブルを理由に欠航となった。しかも別の会社の船便も同じ理由で欠航したのである。恐らくは乗客が少なかったのが便を間引いたのであろう。予期した以上の移動時間を要することになったため、岸壁で重力計のバッテリーを交換した。約3時間の船待ちのあとは順調だった。ブルカノ島の港では滞在中の基地となるアパートの管理人が待っていてくれた。アパートに着いて一通り機材の動作確認をしたところ、すべて正常だった。この間にレンタカーと電話の手配も済んだ。

この時期は観光シーズン直前であったため殆どのホテルやレストランは休業中だった。滞在期間中に徐々に営業開始され、観光客も増えていった。アパートの近くには小さいながらもスーパーマーケットがあり不自由はなかった。アパートは私達4人にとって十分な広さで、シャワー用給湯器のタンク容量が小さいことを除けば快適だった。建物は綺麗とは言い難かったが、調査用基地としては気がね無く作業できてかえって良かった。屋上に上がるとエオリエ諸島の島々がよく見えた。フォッサが



第1図 ブルカノ島への道のり。

迫って見えるもののGPS受信の支障になるほどではなかった。ここにGPSの基地局を設置した。私達の到着から数日後、休暇を兼ねてGBAのロボットが家族とともに到着して隣家に入った。彼は家族との休暇を楽しむ一方で私達の調査も手伝ってくれた。

4. 実際の測定作業

初めは4人全員で車に乗り込んで一緒に島内を回った。手持ちの古い地図を辿って車で行けるところは可能な限り入り、終点や主要な分岐点などでは重力測定とGPS計測を行った。この間、適宜地質観察も行った。夕方宿に戻るとデータ処理を行い、夕食後に全員でその日の測定点のGPS座標を地図と照らし合わせる事が日課となった。こうして数日後には島内の地理(第2図)をほぼ把握した。宿と港がある島の北部には民家と観光施設が密集している。ここから北上すると半島状のブルカネーロ地域に至るが、この緩斜部には別荘が多い。港の南側にそびえるフォッサ火砕丘へは歩いて登るしかないが、麓は平坦で反時計回りにかなり奥まで車で行ける。一方港から島の南端のジェルソ



写真1 三角点での重力計測。サレセノ山頂三角点からフォッサ火砕丘を見下ろす。

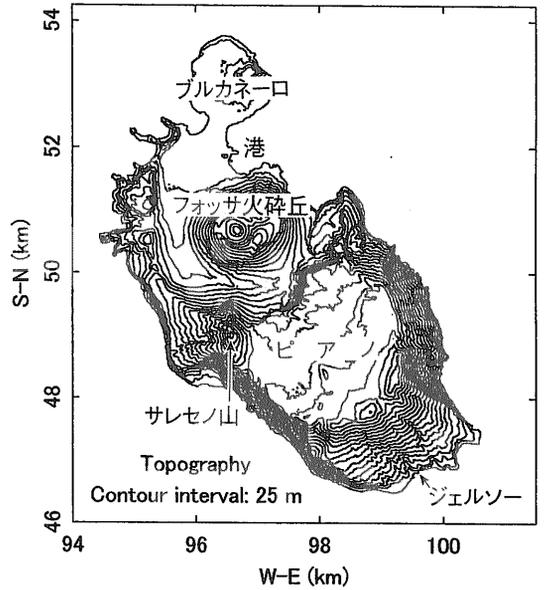
—までは1本の車道が通じている。途中ピアノとよばれる比較的平坦な高地になっていて、民家が点在している。ピアノから東、南、西の3方向の海に向かう急斜面には山羊が放牧されている。港からピアノへの道の途中から西に分岐する2本の道を登ると海岸を見下ろす位置に達する。その先はやはり山羊の放牧地になっている。いずれの放牧地も、急斜面ではあるが歩いて海岸や岬の先端に行くことも不可能ではない。アクセスに要する時間と測定点の価値を秤にかけてどこまで行くかを決めた。放牧地の多くは有刺鉄線で囲われていたが、ゲートが開いている場合は徒歩で入った。

島内の主要なピークには三角点が設けられていた。できるだけ多くの三角点での計測を心がけた(写真1)。これによって宿の屋上に設定したGPS基地局の正確な位置座標を推定することができ、絶対的な位置評定が可能になった。一方、重力値に関しても島内に1箇所ある絶対重力点を探し当て、ここで計測することができたので、各地点の絶対重力値を評価することが可能となった。絶対重力点はピアノ地区の教会の中にあつた。神父さんは常駐しておらず、週に1度ミラツォから通っているようだった。教会の隣家で鍵を保管していることがわかり、事情を言って開けてもらった。絶対重力点の標識はなかったのて、点の記(Berrino, 1995)を参考にして巻尺で位置決めしたあとで測定した。

ロバートの到着を待って、いよいよフォッサ火砕丘の測線調査にとりかかった。まずフォッサ火砕丘に登りロバートに磁気探査の測線位置を教えてもらった後、二手に分かれて各々北西方向と南東方向



写真2 フォッサ火砕丘斜面での重力計測。背景はブルカノ港、ブルカネーロ火山、リバリ島。



第2図 重力測定点位置図。地形は10mメッシュデータに基づく。

に下った。測定点間隔は約30mとした。当初は急斜面で重力計を安定に設置できるだろうか、GPS受信に支障はないだろうかかと危惧していたが、殆ど問題なく1日でフォッサの北西-南東測線を終えることができた(写真2)。翌日はもう一つの磁気探査測線、フォッサ火砕丘山麓の西から南にかけての平地で同様の測線調査を行った。

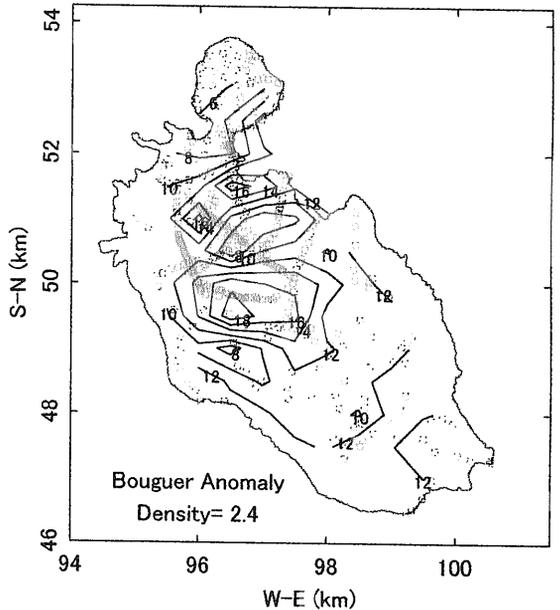
2本の測線調査終了後は、夕食後にその日までの測定点分布を見ながら、翌日の調査方針を決めて重力測定を続けた。最終的に385地点で重力計測を行うことができた(第3図)。

測定期間中、重力計に関しての目立ったトラブルは無かった。一度、測定を始めようとして、背負子から降ろす際に重力計がケースから抜け落ちたことがあった。場所がフォッサ火砕丘のクレータの縁だったのでヒヤリとしたが、転がり落ちず倒立状態で停止した。重力計の測定値には異常は現れず、凶らずもシントレクス重力計の頑健さを確認できた。時計がリセットされてしまったことがあったが、再スタートして問題はなかった。GPS測定も順調だった。データ転送に時間がかかりすぎるのは不満であったがこれは予め覚悟していたことだった。

5. 測定結果

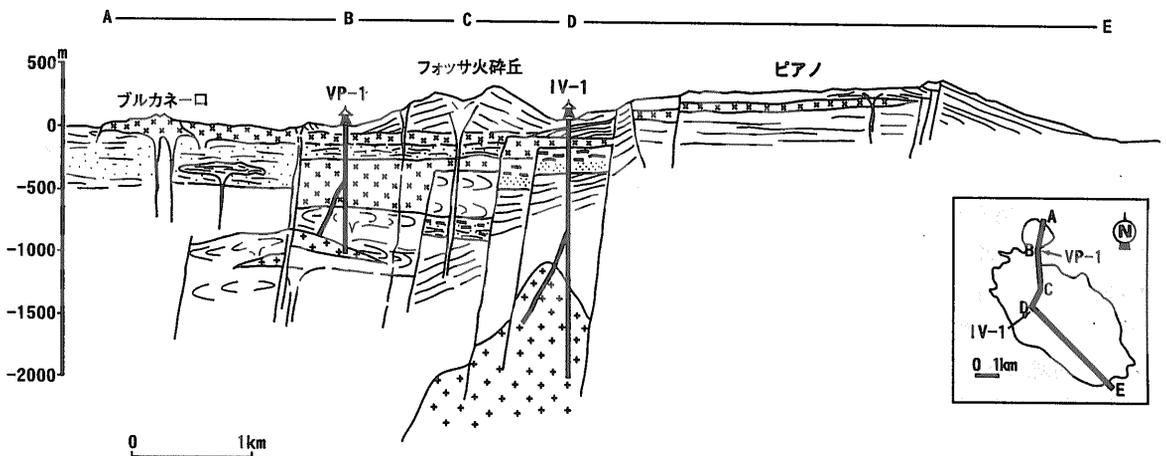
重力データから地下構造を推定するには地形データも必要である。空中写真に基づくブルカノ島の詳細な地形データが作られていることを現地滞在中にロバートから聞いていたので、計測した重力データと位置データを一通り処理したあとは詳細地形データの到着を待った。帰国後数ヶ月たって添付ファイルとして送られてきた地形データは10mメッシュの詳細なものであったが、いくつか不可解な点があった。このデータはその後発表され (Gwinner *et al.*, 2000), 作成者との直接連絡によって疑問点の多くは解消した。しかし、私達のGPS測位結果とは多少の食い違いもある。私達の調査期間はGPS信号にはまだ人為的劣化がなされていたし、地点によっては受信条件が悪かったために局所的に誤差が大きかった可能性はある。こうした誤差の可能性、そして、まだ海底地形データをきちんと評価していない問題点もあるが、今回の測定成果から得られた重力異常の特徴を以下に示す。観測された重力値から測定点高度や地形の影響を除去して重力異常を評価する手順は、駒澤(1998)に従った。

まずブルカノ島全域の重力異常を第3図に示す。Barberi *et al.* (1994) が指摘した特徴、即ち北隣のリパリ島南部からブルカネー口火山地域にかけての低異常、フォッサ火砕丘を中心とする低異常、ピアノの高異常が認められる。地質構造との重力異常の対比のために、2本の坑井データに基づく地質

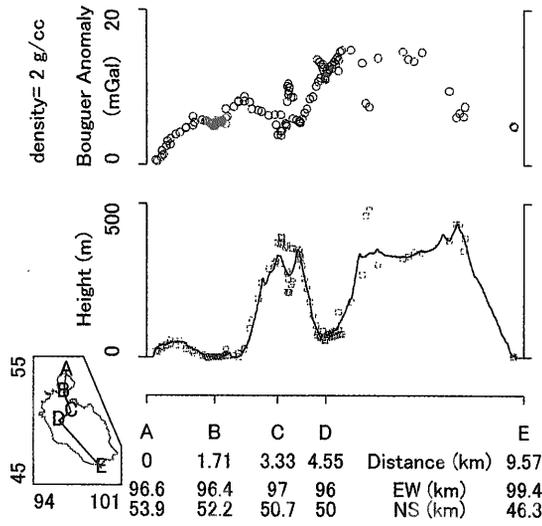


第3図 測定点分布と重力異常分布。

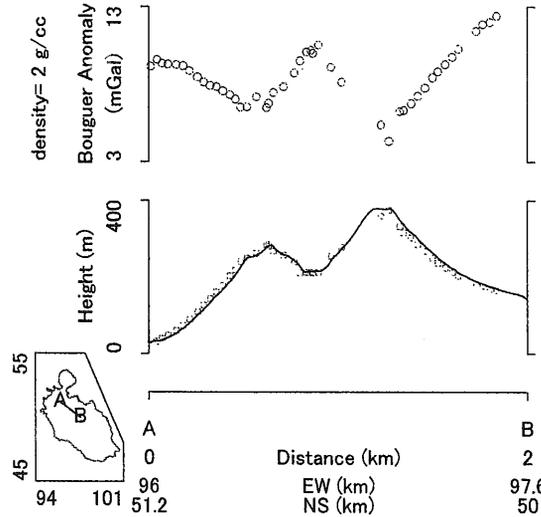
断面モデル (Gioncada and Sbrana, 1991) と共通の測線に沿った重力異常を示す (第5図)。必ずしもこの測線に沿って重力測定したわけではないので測線近傍のデータを測線上に射影した。測線の極く近傍のデータに限定してしまうとデータ数が不十分なためにパターンを認識できなくなる。そこで測線を中心として、ある程度の幅の範囲内のデータを示す必要がある。しかし幅を広げすぎると測線に直交方向の不均質構造の影響によりパターンは不明瞭になる。ここでは試行錯誤により最も見易



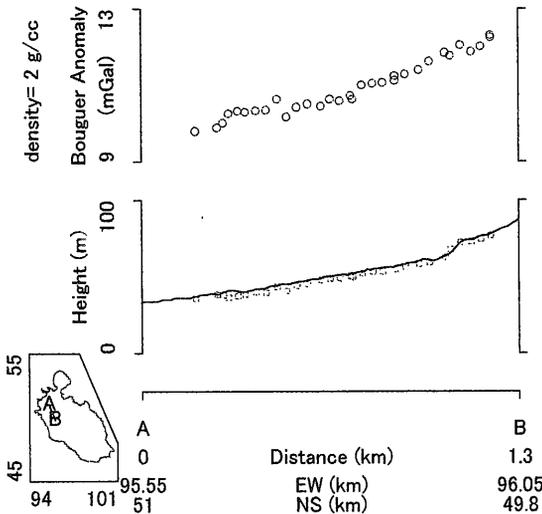
第4図 ブルカノ島の南北縦断測線の地質構造モデル (Gioncada and Sbrana, 1991に基づく)。



第5図 地質構造断面(第4図)と共通の南北縦断測線の重力異常分布.



第6図 フォッサ火砕丘の北西-南東測線の重力異常分布.



第7図 フォッサ火砕丘南西山麓低地での測線の重力異常分布.

いパターンが得られた幅500mの場合について示した。フォッサ火砕丘の低異常、ピアノの高異常は平面図(第3図)と同様に認められるが、フォッサ火砕丘山麓部の低地部分から高重力異常になっている様子が明瞭である。これは坑井で遭遇し、地質断面図にも描かれている貫入岩が高密度物質として高重力異常に寄与しているものと予想される。

第5図の断面図では測線直上にないデータも一緒に表示したためにパターンが不明瞭になる傾向

があった。測定点間隔を密にした測線のデータだけを表示すると何が見えるだろうか？ フォッサ火砕丘山頂を北西-南東方向に横切る測線の重力異常を第6図に示す。フォッサ火砕丘のクレタ底に局所的な高異常が認められるので、クレタ直下の高密度物質の存在が推定できる。フォッサ火砕丘の南西山麓の低地に沿う測線の重力異常を第7図に示す。地形はほぼ平坦であるが、重力異常にはステップ状のパターンが認められる。これは地質断面図(第4図)にも描かれているような断層構造を示唆する。

ここで示した結果は暫定的なものである。現在は私達が重力異常を、GBAが磁気異常を、それぞれ個別に解析している段階であるが、各々の評価が確定したら協調解析も試みて最終的な地下構造モデルを提案することになる。

6. おわりに

調査期間中は機材のトラブルは無く、予定していた作業をほぼ終わることができた。帰路は往路の道順を戻った。ミラツォへの船も予定通り出港し、他のトラブルもなかった。使用済み電池は宿に残してきたのでその分の重量は軽くなったが、岩石サンプルが新たに加わった。荷物の総量は往路よ

り重くなっていたはずだったが、チェックインの際に重量超過を指摘されることはなかった。

ブルカノ島では他にも多くのことを見聞した。そのすべてをここで述べることはできないが、重力モニタリングに関することを最後に書いておこう。私達の重力調査の目的は構造調査であったが、最初に触れたように、ブルカノ島では火山活動監視を目的とする重力モニタリングも行われている。ここで特徴的なのは6地点で重力鉛直勾配測定によるモニタリングも行われていることである。Berrino *et al.* (1998)は1995年には特異な変動があったことを解釈抜きで報告した。適当な位置に単一点源を仮定すると、各地点の変動量は距離との相関があるように見えるのだが、その距離依存性は物理的には説明できそうにない。現地で各測定点を特定することはできなかったがだいたいの状況は把握できた。各地点の環境は大きく異なるので浅層地下水の不均一な挙動が1995年の変動の原因になりうると感じた。帰国後に目にした最新の論文(Berrino, 2000)では果たして浅層地下水の挙動を変動の原因とし、重力鉛直勾配測定の意義を強調していた。その議論自体は特別な説得力があるものでは無かったが、いろいろな方法を試みる著者の意気込みは感じられた。通常重力モニタリング点のうちのいくつかは現地で確認できた。ペンキで書かれた地点番号らしい数字は色あせていて年季を感じた。重力モニタリングは精密測定をひたすら繰り返すというかなり根気のいる作業である。変動が検出されても重力構造解析の場合と同様に一意的な解釈は難しいことが多い。それでも時間変動が検出される可能性は魅力的であるので地道な測定は各地で繰り返され、実際に貴重な信号が検出されることもある。ブルカノ島で目にした重力モニタリング調査の痕跡にはこうした熱意を感じた。重力モニタリングを空中物理探査で行うことはまだ精度に難があり、データを得るためには当面は地道な測定を続けるしかないであろう。一方、GBAが

行ったような空中磁気探査はモニタリングにも適用できる可能性がある。ブルカノ島でのBerrino達の重力モニタリングの結果は今のところ明確な解釈にはつながっていないが、磁気異常モニタリングと合わせて見た時には生きてくるのではないかと思われる。私達の今回の重力調査は直接にはモニタリングを指向したものではなかったが、詳細な不均質構造解析を通して、モニタリングデータの解釈にも貢献するものと思う。

引用文献

- Barberi, F., Gandino, A., Gioncada, A., La Torre, P., Sbrana, A. and Zencuchini, C. (1994) : The deep structure of the Eolian arc (Filicudi-Panarea-Vulcano sector) in light of gravity, magnetic and volcanological data, *JVGR*, 61, p.189-206.
- Berrino, G. (1995) : Absolute gravimetry and gradiometry on active volcanoes of southern Italy, *Boll. Di Geofisica Teorica ed Applicata*, 37, p.132-143.
- Berrino, G. (2000) : Combined gravimetry in the observation of volcanic processes in Southern Italy, *J. Geodynamics*, 30, p.371-388.
- Berrino, G., Riccardi, U., d' Errico, V., La Rocca, A. and Malaspina, S. (1998) : Gravity measurements at Vulcano, *Acta Vulcanologica*, 10, p.130-133.
- 古川竜太・中野 俊・大熊茂雄・杉原光彦 (2001) : クラテールを訪ねて—イタリア・ブルカノ火山の地質調査—, *地質ニュース*, no.559, p.32-40.
- Gioncada, A. and Sbrana, A. (1991) : "La Fossa caldera", Vulcano: inferences from deep drillings, *Acta Vulcanologica*, 1, p.115-125.
- Gwinner, K., Hauber, E., Jaumann, R. and Neukum, G. (2000) : High-resolution, digital photogrammetric mapping: A tool for earth science, *EOS*, 44, p.513-520.
- 駒澤正夫 (1998) : 重力探査, データ処理技術, 物理探査ハンドブック第8章, 物理探査学会.
- Morelli, C. (1990) : Geodesy, Italian research activity (1987-1990) report to IAG, *Boll. Di Geofisica Teorica ed Applicata*, 32, p.317-328.
- 大久保修平 (1995) : 重力のインバージョン, *地学雑誌*, 104, p.1,047-1,062.
- 大熊茂雄・中塚 正 (2001) : オーストリア地質調査所との研究協力—イタリア火山での物理探査—, *地質ニュース*, no.559, p.20-24.

SUGIHARA Mitsuhiro, OKUMA Shigeo, NAKANO Shun and FURUKAWA Ryuta (2001) : Gravimetric measurements at Vulcano.

< 受付 : 2001年1月4日 >