

インドネシア国レンバータ島滞在記 -MT法現地調査-

内田利弘¹⁾

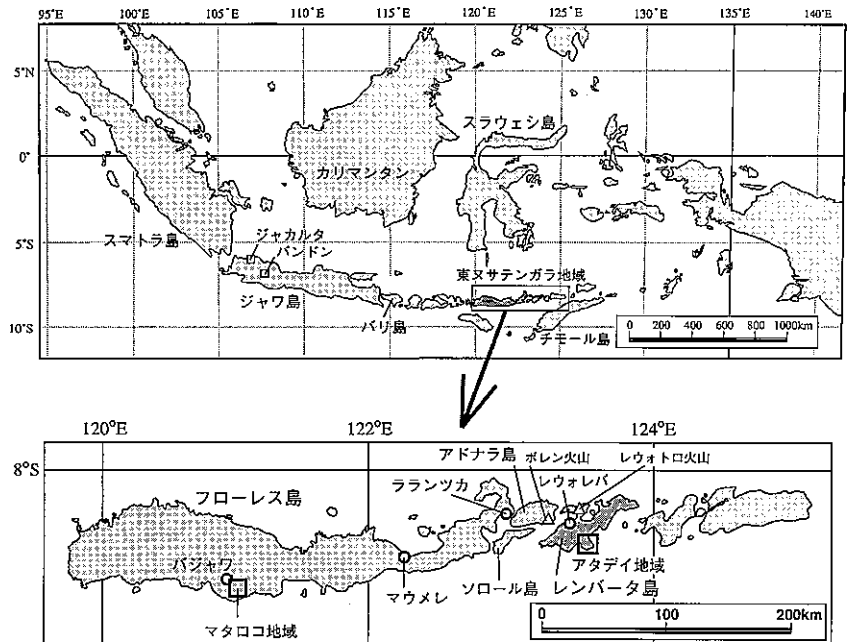
1. はじめに

2001年7月9日朝、快晴の下、満員の乗客と貨物を載せた小型定期船がフローレス島最東端の港町ランツカを出発した。行き先は東に約60km離れたレンバータ島(旧名ロンブレン島)のレウォレバ市、約3時間の短い航海である(第1図)。風はほとんどなく、また、ソロール島とアドナラ島に挟まれた水路を行くので、波は穏やかで船は静かに進んでいく(写真1)。これらの島には多くの火山があり、その山容や熱帯地方の海岸線のおりなす景色は大変美しい。筆者は、インドネシア鉱物資源局(DMRI; 2001年の改組によってインドネシア火山調査所(VSI)から所属が変更された)の3名のスタッフとともに乗船していた。それからの約1ヶ月間、レンバータ島の地熱地域における電磁探査法(MT法)現地調査を無事に行えるかどうか、大きな不安とつかぬ期待を感じながらの船旅であった。

産業技術総合研究所(以下、産総研)は、DMRI及び新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)と協力し、1997年度から5年間にわたりインドネシア東部の離島地域における地熱探査プロジェクト「遠隔離島小規模地熱の探査に関する共同研究」を進めてきた。2001

年度は最終年度であり、それまでに蓄積してきた調査データのとりまとめが主な業務となる。プロジェクトの主調査地はフローレス島の中央部に位置するバジャワ地域マタロコ地区(第1図)であり、これまでの調査結果に基づいてNEDOが浅部調査井を掘削し、2001年1月に豊富な乾燥蒸気の噴出に成功している(例えば、Sueyoshi *et al.*, 2002)。

2001年7月の現地調査は産総研とDMRIの二者の共同で行われた。産総研の調査チームは5名であったが、そのうち4名(村岡洋文、駒沢正夫、浦井稔、安川香澄の各氏)はバジャワ地域における最終調査を行った。筆者はDMRIから、「バジャワ地域で成功裡に行われたMT法調査を、DMRIが



第1図 東ヌサテンガラ地域の位置(上)とその拡大図(下)。レンバータ島アタデイ地域及びフローレス島バジャワ(マタロコ)地域の位置を示す。

1) 産総研 地図資源環境研究部門



写真1 フローレス島ラランツカからレンバータ島レウォレバに向かう小型船。旅客と貨物専用の定期船であるが、特別にお願いして調査チームの車両を載せてもらった。車は船首に縛り付けられている。前方にかすかにレウォトロ火山が見える。

進めている別の地域の調査でも適用し、現地作業の進め方やその適用性を確認したい」という要請を受け、DMRIが次年度に調査井掘削を計画しているレンバータ島アタデイ(Atadei)地熱地域でMT法調査を行うこととなった。アタデイ地域は、本プロジェクトの初年度において、主調査地を選定する際に挙げられた5つの候補地の1つであったが、アクセスが悪いなどの理由で除外された。

二日遡って7月7日、産総研チームは成田を発ってバリ島デンパサールに到着し、DMRIスタッフと合流した。翌朝、一行は小型双発プロペラ機でバリ島デンパサールを発ち、フローレス島東部のマウメレに到着した。デンパサール・マウメレ間のフライトは週に5便であるが、いつも混んでいて、オーバーブッキングされていたり、予約していた便がキャンセルされたりするケースが頻繁にあった。今回もDMRIのスタッフは席を確保できないままバリ島まで来ていたが、幸い当日になって団体客がキャンセルとなったため、急遽席を確保することができた。

調査団の大半はマウメレから西方のバジャワに向けて4台の車で出発した(第1図)。筆者は本隊と別れ(日本人で1人取り残され)、DMRIのスタッフ3名とともに東方のラランツカに向けて出発した。フローレス島より東の小さな離島へは空路はなく、船を使うことになる。ラランツカで1泊した後、上述のように船でレンバータ島に渡り、レウォレバでさら

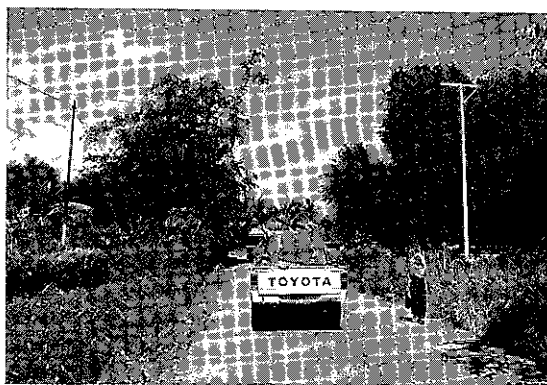


写真2 レウォレバからアタデイ地域に向けて出発。レウォレバの町を出てしばらくすると舗装はなくなり、所々に悪路や急な坂道がある。写真の四駆車にはMT法調査機材一式が積み込まれている。この車は老朽化のため二輪駆動でしか走れず、途中、アタデイ地域を間近にして坂道を上れなくなってしまった。

に1泊して、翌日、アタデイ地域へ移動した。日本を発ってから丸4日をかけて目的地に到着したことになる。幸いレウォレバには、事前に日本からインドネシアに輸送してあった調査機材を載せたDMRIの車(1980年代初めの日本製四駆車)が予定通り待っていてくれた(写真2)。機材はジャカルタで通関された後、まずDMRIのあるバンドンに送られ、その後、DMRIの調査用車両に載せられ、陸路とフェリーを繰り返しながら、はるばるレンバータ島までたどり着いたものである。アタデイ調査チームは最終的に、DMRIのアシャリ、アリフ(物理探査技術者)、カシオ(測量技師)、ダヤット、ママト(運転手)の各氏、及び筆者の6名となった。ただ、アシャリ氏は直前の現場調査(アドナラ島における重力調査)が長引いたため、数日遅れの参加となった。

旧地質調査所は1980年代後半に、金属資源探査に関するインドネシアとの共同研究の下、レンバータ島で地質調査を実施した(村岡, 1989; 宮崎, 1989)。また、本プロジェクトの初年度(1997年)に旧地質調査所から3名が現地予察調査を実施している(村岡ほか, 1998)。それらの文献には、レンバータ島などにおける滞在の苦労話が多く記されている。それ以来年月を経て現地も少しずつ近代化され、車の走れる道路も増え、滞在の苦労は少なくなっているものと思われる。それでも、1ヶ月間にわたりインドネシアの僻地に滞在するのは希な経験

である。以下の章では、現地調査の状況やその間の体験記を中心に記すことにする。

2. アタデイ地域

レンバータ島は面積1,266km²の小島であり、人口は約86,000人である(Aswin *et al.*, 2001)。電力はディーゼル発電機によって供給されているが、その容量は非常に小さく、レウォレバ市周辺と幹線道路沿いの村落を除くと、ほとんどの村落は無電化となっている。調査を行ったアタデイ地域には5,000人程度の人が生活しているものと思われるが、電気は全く通じていない。2000年に行われたDMRIの地質概査によると、アタデイ地域には30,000kWの電力を生産できる地熱資源が存在すると推定されている(Aswin *et al.*, 2001)。レンバータ島には河川がほとんど発達しておらず、水力発電は望めない。現在村落で燃料資源となるのは樹木類だけである。エネルギー源として将来は風力なども可能性があるものの、豊富に賦存する地熱資源を利用することが島民にとって最良の選択ではないかと思う。

アタデイ地域は島の南東部に位置する半島の全域を占める。アタデイ地域の地形陰影図を第2図に示す(口絵1も参照)。半島は全域が第四紀の火山性地層によって覆われていて、東側ほど新しい地層である(Aswin *et al.*, 2001)。地形図でも西側の

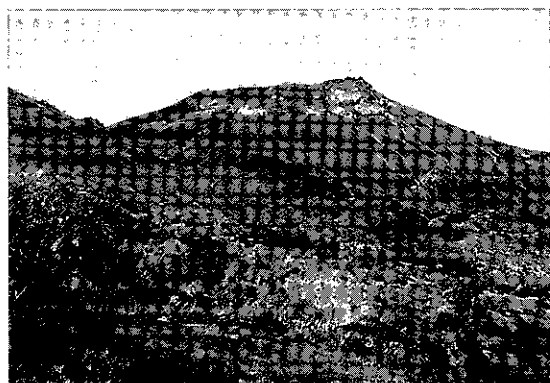
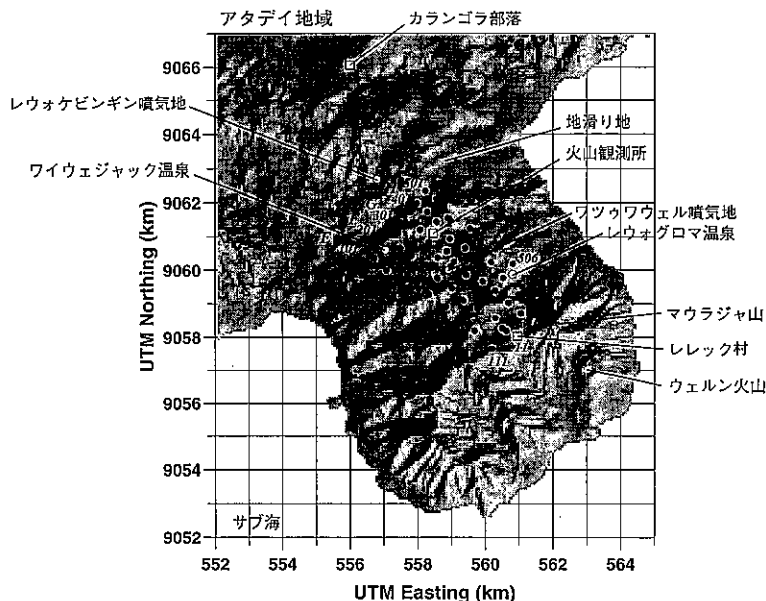


写真3 アタデイ地域東南端に位置するウェルン火山。左側(北西側)の古い火山体の側方から噴火して形成されたと思われる。南東側の海岸にある海底火山ホバートとともに噴火活動を繰り返している。

山地の開析が進んでいることがわかる。半島の東側を北西-南東走向で新しい火山ドームが列をなしており(口絵3)、半島の東岸に向けて溶岩や火山噴出物が流れて、非常に急傾斜になっている。ドーム列の東南端に活火山であるウェルン山がある(写真3、口絵2)。ウェルン山の標高は586mしかなく、半島の中央山地(標高700~900m)より低い。小さなカルデラ状地形を示し、北側のリムにあたる古い山体(マウラジャ山)の標高は1,060mであり、本地域の最高地点となっている。また、正確な位置は確認できなかったが、ウェルン山の南東の海岸には海底火山ホバートがあり、時折噴火してい



第2図
アタデイ地域の地形陰影図とMT法測点。25,000万分の1地形図をデジタル化して約70m格子のDEMデータを作成した。地形の陰影は南東方向に太陽があるものとして作成した。黒丸はMT法の測点位置、白抜き丸は地表微候地を表す。

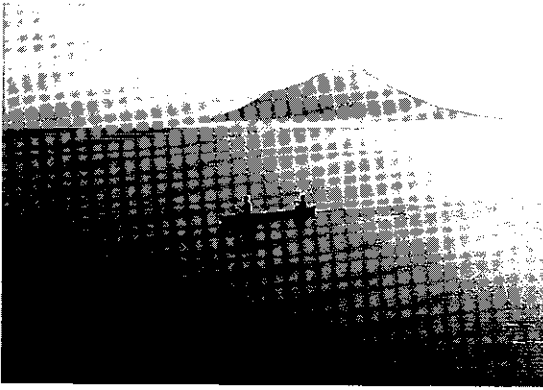


写真4 レウオレバの北方にあるレウオトロ火山。標高は1,423m。常時小さな噴煙を上げている。レウオレバ港から撮影。

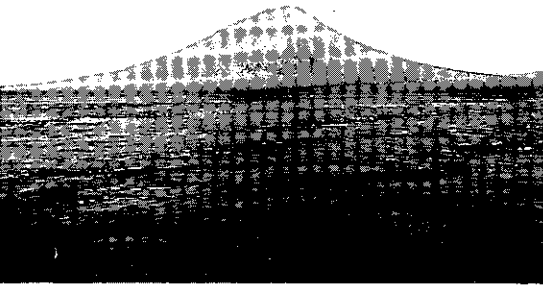


写真5 アドナラ島の東端に位置するボレン火山。標高は1,659m。1983年に噴火の記録がある。帰路のフェリーから撮影。

るとのことである。火山活動は半島の先端に向かって新しくなることがわかる。

ちなみに、調査地域周辺にはウェルン山を含め、3つの活火山がある。1つはレウオレバ市の北方のレウオトロ火山(写真4)、もう1つはアドナラ島東端のボレン火山(写真5)である。レウオトロ火山は常時小さな噴煙を上げている。レウオレバの南の丘陵から、これらの2つの火山が海峡を挟んで横たわる姿を眺望することができる。これら3つの活火山は、VSIが全国で129個指定している重点監視対象の活火山に含まれていて、観測所が設けられ、地震計などによる火山活動の常時モニタリングが行われている。

アタデイ地域にはいくつかの地表徴候地がある。最も活発なものはワツワウェル(Watuwawer)噴



写真6 ワツワウェル噴気地の熱を利用し、ココナツの白い果肉を乾燥させている。ココナツ油の原料となる。

気地である(口絵4~6)。標高は約620mであり、南北約100m、東西約150mの範囲で植生が少ない空き地となっている。DMRIの概査によると、最高温度は98℃、現地の簡易分析によってスメクタイトやカオリナイトなどの粘土鉱物の存在が確認されている。調査期間中は乾季であったため、噴気はわずかしか見られなかったが、地元の女性が熱を利用してココナツ(椰子)の皮を乾燥させていた(写真6)。村の人たちはココナツの実の内側にある白い果肉(油脂)を乾燥させて、街に売りにいく。1kgあたり100ルピア(約1.4円)という安い価格ではあるが、村人たちの貴重な現金収入源になっている。

温泉も数ヶ所確認されているが、今回はワイウエジャック(Waiwejak)とレウオグロマ(Lewogroma)を訪れた(口絵7、写真7、写真8)。アタデイ地域は比較的雨が少なく、特に乾季には地表にほとんど水は見られない。例外はごく小さな沢とこれらの温泉だけである。ワイウエジャック温泉が最大であるが、それでも湧出量はそれほど多くない(約300リットル/分; 村岡ほか(1998))。パイプを10本程度岩盤の中に挿入し、温泉水を流出させている(写真7)。上流(東側)ほど温度が高く約40℃であり、10m程度下流では37℃程度に下がる。それでも近隣の村の水源、洗濯場、水浴び場になっている。レウオグロマの湧出量はずっと小さく、温度も低い(写真8)。両者とも中央山地から少し下がったところに位置し(ワイウエジャックの標高は約450m、レウオグロマは約500m)、地下に浸透して熱せられた天水が山地の側方から流出しているものと思わ



写真7 調査地の北西部に位置するワイウエジャック温泉。最高温度は約40℃で、写真奥のパイプほど高温である。周辺の集落の水源となっている。向こうに見える葦葺きの囲いは水浴びに来た人の更衣場になっている。

れる。村岡ほか(1998)およびAswin *et al.* (2001)によると、調査地の北側にも大規模な変質帯(地滑り地)や噴気地があるとされるが、今回の調査では訪れることはできなかった。

宮崎(1989)や村岡ほか(1998)によると、当時は車で入れるのはアタデイ地域の北方のカランゴラ村(第2図)までであり、彼らはそこからワイウエジャック温泉まで徒歩でアクセスした。現在では、舗装されている区間はわずかであるものの、車が走れるように道が拡幅され、ワイウエジャック村や南のレック村まで、レウォレバからの小型乗り合いバスが通っている。ただ、火山性地層であるため、地形の急峻な所は崖崩れが起きやすく、四輪駆動の車でないと坂道を上れない。カランゴラに近い道路の途中で、舗装の下の岩盤が道幅の半分近くぐり取られた箇所があり、今にも道路が崩落しそうな状態であった。DMRIのカウンターパートは、舗装が壊れて車が一台谷底に落ちるまで当局は補修工事を行わないのではないかと冗談を言っていた。自分たちがその番に当たるのだけはご免被りたいと、いつも恐る恐る通っていた。

筆者が入手した当地域の25,000分の1地形図は1998年に整備されたものである。それ以前は詳細な地形図はなかったものと思われる。第2図はそれをデジタル化して作成したものである。地形図の信頼性はあまり高いとはいえないが、宮崎(1989)や村岡ほか(1998)のときの調査に比べ、状況が格段に向上したのは幸いであった。



写真8 調査地の東部に位置するレウォグロマ温泉。湧水量はワイウエジャック温泉よりかなり少なく、温度も低い。

レウォレバには冷房設備のあるホテルが2軒あり、1軒では冷えたビールを飲ませてくれる。ある週末にレウォレバに下りていったときには、ヨーロッパ人とオーストラリア人の旅行客が宿泊していた。レンバータ島には普通に観光を楽しめるような場所はほとんどないと思われるので、こんな僻地までやってくる西洋人の好奇心の強さに感心させられた。

3. 宿泊施設

調査期間中はVSIの火山観測所に宿泊した(写真9)。観測所は調査地内の北よりに位置し、約6km離れたウェルン火山の地震活動をモニターしている。地震計は1台であり、テレメータで観測所に信号を送っている。観測所ではドラム式記録計に波形を記録し、毎日、火山性微動の数をカウントする。記録紙は毎日交換する必要がある。風が吹いても地震計は揺れるので、風の強い時間帯は記録が真っ黒になり、火山性微動の読みとりは難しくそうであった。

観測所には高出力の無線機があり、バンドンのVSI本部の観測課と直接交信ができる。火山性微動が急激に増加し、噴火の危険性があるときなどは、いつでも本部に通報ができるようになっている。ウェルン火山観測所では、地震計のメンテナンスや記録の整理・連絡のために、レック村の有力者(ガスパル氏)を雇いあげている。今回の調査でも、作業員の雇い上げや水の調達などで色々とお世話



写真9 調査期間中に宿泊したVSIの火山観測所。ウェルン火山を監視している。周囲の集落から離れた林の中に建てられた。

になった。

観測所には寝室が2つある。それ以外に地震計の部屋、食堂、玄関(兼作業室)などがある。調査チームは6名であったが、幸い筆者は小さい方の寝室を1人で与えられた。セメントの土間にベッド1つと物入れ棚1つしかないシンプルな部屋である。残りの5名はもう1つの少しだけ大きな寝室にベッドを3つ並べて、雑魚寝のような状態であった。申し訳なかったが、どうすることもできなかった。普段、観測所にはだれも宿泊しないので、建物自体はあまり掃除などが行き届いていないようである。毎晩、夜中には天井のネズミがうるさく駆け回った。また、2日目の夜には作業室に小さなサソリが1匹迷い込んできたが、家具の後ろに隠れたあと、どこかに消えてしまった。

調査チームのために急遽まかないの女性3名が雇われた。食事と洗濯の世話をしてくれた。出された料理はいつも鶏の唐揚げと目玉焼き、それに、白いご飯であった。レンバータ島ではお米は生産できないので、ご飯は貴重である。現地の人はほとんど食べる機会がないと思われる。台所の裏側にはいつも2~3羽の鶏が繋がれていて、毎日1羽が料理に使われる。それを6人で朝食、弁当、夕食で馳走になる。決して十分な量ではなかったが、現地の住民には考えられない贅沢である。鶏を1羽料理に使うと、順次補充しているようであった。冷蔵庫のない世界ではそれが当然の方法であることを実感した。その他に豆や芋のスープ、バナナ、パパイヤなどが毎日の栄養源となった。また、マラ

リアの予防になるという話で、パパイヤの葉を生のまま食べた。全く味がないので唐辛子と一緒に食べたが、パパイヤの葉が生水で濡れたままだだったので少し下痢気味になってしまった。また、調査の最後に一度だけ山羊を一頭殺して焼き肉をし、現地作業員も招待して小さなパーティーを行った。

鶏や山羊を料理に使うにはまず首を落として殺す必要がある。ちなみに、首を切って落としたり、木の枝を切り払ったりすることをインドネシア語で「ポトン」という。切られた頭や枝が地面に落ちる音に由来しているのではないかと思った。現地の男性は刃渡りが50cm程度の長いナイフ(刀)をいつも持ち歩いていて、木を切ったり、草を払ったり、ココナツの実を割ったり、あるいは土を掘り起こしたりするなど、農作業の様々な用途に使っている。さすがに、鶏のポトンは別の包丁でしているようであった。MT法調査で測定用のケーブルを張るために、下草や時には小木を切り払う必要があり、そんなときには「この木を切ってくれ」という意味で、作業員に「ポトン・カユ・イニ」と言って指示した。カユは木を、イニは「これ」を意味する。

火山観測所に着いた日には、こんな所で1ヶ月も宿泊するのかと悲壮感で一杯であった。ちゃんとした洗面所やシャワーもなく、食堂のすぐ隣にある共同の手動水洗トイレも使いにくかった。しかし、翌日から、日本での生活のスタンダードを捨ててペースを合わせると、少しずつ快適さを感じるようになったのは不思議である。

4. 生活

やはり、いろいろと戸惑いもあった。まず不便を感じたのは電気と水である。電気は2kWの発電機を持ち込んで供給した。確認はしなかったが、普段は観測所用機器のバッテリーの充電に使われているものだと思う。電気は主にMT法測定器のバッテリーの充電とパソコンのために使った。各部屋には10W程度の白熱灯がついていたが、夜になるとパソコンのキーボードも目を凝らして見ないといけなくらい薄暗かった。本を読む気にはなれない。調査期間中、発電機が順調に動いてくれて、ガソリンの補給も問題がなくて幸いであった。ちなみに、ガソリンや食料の調達には、レウオレバの町ま

で40kmの道のりを車で片道2時間かけて行く必要があった。ガソリンスタンドは島内に1ヶ所しかなく、全くの独占営業である。ガソリンは1リットル1,650ルピア(約24円)、軽油は1,100ルピア(約16円)であった。電話局や病院もレウォレバにしかない。調査チームにケガや病気があれば一大事である。我々の2台の調査車両は非常に古くて調子が悪く、度々故障を起こしていたことも、不安の一因であった。結局、DMRIのカウンターパートには何もトラブルはなかったが、筆者は運悪く、調査の半ば頃に森で切り株に脚をひっかけ大きな擦り傷を作ってしまった。生い茂った新しい葉の下に隠れて尖った切り株があり、避けられなかった。幸い、持参した消毒薬と化膿止め処置し、大事には至らなかったが、完治するまでに2週間以上かかってしまった。

また、水は大変貴重であった。調査時期は乾季であったので、1ヶ月の間に雨はほとんど降らなかった。地形が急峻であり、火山性の地質であるため、地表にはほとんど水はなく、村人も生活用水を確保するのに苦労していた。二三の集落では、山間の沢から集落までパイプを引いて貯水タンクに水を溜めていた。そういう集落は幸運である。近くに飲料水となる水のない集落がたくさんあり、遠く離れた湧水箇所(温泉)まで水を汲みに行く必要があった。宿泊した観測所からワイウエジャック温泉までは約2kmであり、筆者らも頻繁に水を汲みに出かけた。また、時々、ガスバル氏の住むレック村にお金を払って水を分けてもらった。それらの水で炊事、洗濯から行水、下の用足しまで行った。時折水が不足し、わずかな水で一日を凌ぐこともあった。水が不足すると一番つらいのはトイレである。DMRIのカウンターパートはトイレットペーパーを使わない。筆者は当然トイレットペーパーを使うので、余計に水が必要であった。水の調達のために我々には車があったのでまだいいが、村の人たちは、大人も子供も大きなポリタンクを担ぎ、長い道のりを歩いての水くみを日課にしていた。

当初、一番心配だったのはマラリアである。海外旅行情報によるとマラリアはインドネシア全域で見られる。調査を行ったレンバータ島やその周辺の島でも多数発生していると聞く。特に高温多湿の地域は危険である。一般のマラリア薬には二通

りのものがある。1つは蚊に刺されてマラリア原虫が体内に入っても発症しにくくするための予防薬(薬物予防)、もう1つは発症したときに飲んで原虫を殺す治療薬(スタンバイ治療)である。一般に両者の併用はできない。予防薬は、普通、マラリア原虫を媒介する蚊に刺される一週間以上前から、毎週1回程度のペースで飲み続ける必要がある。場所によって薬に耐性のあるマラリアが発生しているので、従来の薬では効果がないことがあり、日本で適切な薬を買うことは難しい。さらに、肝臓などに副作用を起こす危険性が高いと言われる。それで、今回は、治療薬を日本で調達して持参した。これも非常に強い薬で、説明書には人によっては致命的な副作用もあると書いてあり、服用には勇気がいる。でも、マラリアを発症してしまったら、飲む以外に方法はない。

本プロジェクトではこれまでフローレス島バジャワ地域で現地調査を行ってきたが、幸いインドネシア人にも日本人にも調査チームでマラリアに罹った人はいない。それはバジャワ地域の平均標高が1,000mであり、気温がやや低かったことによるようである。それに対し、アタデイ地域の平均標高は500~600mとやや低いので危険度が高い。そのため、DMRIのカウンターパートも全員が予防薬を用意していて、調査前にバリ島に集合したときにはすでに飲み始めていることがわかった。日本側は誰も予防薬を飲んでいないので、逆に「どうして薬を飲まないのか」と言われてしまった。バリ島で会った現地在住の日本人の方も、レンバータ島に行くなら予防薬を飲まないといけないと言っていた。レンバータ島には日本からは筆者しか行かないので、ますます不安になりパニックに陥ってしまった。しかし、現地でも予防薬を売っている店は限られており、そう簡単には手に入らない。悩んだ末、結局予防薬は飲まないことにし、運を天にまかせることにした。「なるようにしかならない、気にしないで」という意味をインドネシア語では「ティダ・アパ・アパ」と言う。その言葉をカウンターパートからかけられたが、気分は全くティダ・アパ・アパではなかった。

現地に入ると見ると、やはり蚊はたくさんいた。森の中の測点では、測定器をオペレーションしていると何匹もの蚊が頭のまわりに集まってきた。オペ

レーション中はあまり動けないのでよけられない。そのとき、カウンターパートの一人が、自分は薬を飲んでいるから大丈夫、などと言ったときには無性に腹が立った。また、観測所で行水をしていても(水溜め桶は戸外にある)、ワイウエジャック温泉で水浴びをしても蚊がよってくる。室内では蚊取り線香をつけ、できるだけ虫除けスプレーも使ったが、結局何回か刺された。マラリアを媒介する蚊は、刺しているときにお尻を高くあげるので区別がつけづらい。でも、刺されてしまったら遅いのである。

筆者が日本人でただ一人アタデイ地域に滞在し、マラリアの予防薬を飲んでいないという情報は、フローレス島バジャワ地域で調査を行っているDMRIのスタッフを経由して、バンドンのVSI所長アデ氏の耳にも届いたようである。それで、所長が筆者の健康(多分、精神面も含め)を心配し、観測所の専用無線機を使ってアタデイ調査チームの状況を確かめるメッセージを送ってきた。その時は特に何事もなく調査が進んでいたの、「問題ない」旨の返事を送り返した。普段、所長がそのような形で現地調査チームにメッセージを送ることはほとんどないらしい。非常にありがたい心遣いであった。

マラリアの潜伏期は10日から3週間程度である。調査の3週間目に入っても何の症状も出なかったときには、少しほっとした。そして結局、帰国した後も症状は出なかった。後でわかったことであるが、調査を手伝ってくれた現地の人たちの集落ではもう何年もマラリアは出たことがないらしい。マラリアは豚などの家畜と人間の間で伝染しながら広がる。幸い500m程度の標高でも効果があり、雨が少ないこともあって、マラリアの蔓延を防いでくれているようであった。

嬉しいこともあった。現地の農家の人(マルクス氏)がモケと呼ばれるココナツ酒を毎日差し入れてくれたことである(写真10)。ココナツの花の蕾の先に傷をつけ、その下に竹筒を結わえてぶら下げる。蕾から出てくる樹液を溜めると、半日程度で筒が一杯になる。ココナツの樹液は糖分を含んでいるので、溜まっていく間に自然に発酵して酒になる。毎日夕方になるとマルクス氏が筒1本を持って観測所にやってきた。モケのアルコール分はそれほど高くないが、少し甘酸っぱく大変おいしい。冷蔵庫のない所で飲むま暖かいビールの比ではない。飲



写真10 地元のマルクス氏(中央)が差し入れてくれたモケ(ココナツ酒)。手前の竹筒をココナツの樹に吊して樹液を溜める。右からアシャリ氏、ママト氏、1人とばしてダヤット氏。

料水の確保が難しい現地では、モケは、ココナツの実のジュースと並んで大事な水分補給源である。

マルクス氏はワイウエジャック村の村長をされたことがあり、毎日の水不足が村の大きな悩みであると話されていた。本原稿を書いている気づいたのであるが、宮崎(1989)によると、宮崎芳徳・村岡洋文両氏は1987年の調査のときにワイウエジャック村に1泊し、当時の村長さんのお世話になったという。マルクス氏はその数代後の村長になる。数年前にヨーロッパ人が1人、マルクス氏の家に一週間程度滞在したらしいが、それら以外に外国人がワイウエジャック村を訪れた例はほとんどないらしい。マルクス氏は、早く地熱井を成功させ、是非村に水を供給してほしいと強く要望されていた。そのために今回のMT法調査結果が少しでも役にたてばいいと思う。

5. MT法調査

MT法(magnetotelluric法)は地熱資源探査では標準的な探査法として用いられている。MT法では、磁気圏・電離層の活動や雷放電によって発生する電磁場が大地中に伝って減衰していく現象を利用し、地表の測点で磁場と電場信号を測定することによって、地下の比抵抗構造を調べる。10時間以上の連続した電磁場時系列データから、周波数0.001~300ヘルツの広帯域のスペクトルを計算する。互いに直交する電場と磁場の関係、あるい



写真11 森の中をMT法の測点に向かう調査チーム、測定器一式、磁場センサ3本、ケーブル、バッテリー、スコップ、電極用の水などを分担して運ぶ。2測点分を運ぶこともあり、そのときは大変な負担になる。



写真12 調査地の典型的な風景。ココナツ椰子が生い茂っている。G測線の測点302付近から南のマウラジャ山(中央奥)を望む。その左側に見えるドームの山頂付近に測点407がある(写真13を参照)。

は、磁場成分の互いの関係から、地下の比抵抗構造の情報を得ることができる。本プロジェクトにおいても1999年にフローレス島バジャワ地域で適用し、地熱貯留層に関連する比抵抗構造を得ている(Uchida *et al.*, 2002)。現在市販されている測定装置には、24ビットのA/D変換、GPS時刻信号による多測点同時計測、測定の全自動化、装置の小型化などの改良が加えられ、測定データの信頼性が向上するとともに、山間地や僻地においても現場における測定作業が従来により容易になった。

今回のMT法測定は7月11日から8月3日まで行った。3台の装置を用い、毎日3測点で測定した。測定する電磁場データには、地下の比抵抗構造の情報を含む信号のほかに、人工的な電磁ノイズや風によってセンサが揺れることによるノイズなども含まれている。長時間の測定を行ってノイズの少ない部分だけを使ったり、複数の測点で相関のある信号成分だけを抽出したりする。日本における調査では一般に人工ノイズの少ない夜間に測定を行う。今回も測定は夜間に行うこととした。昼間に新しい3測点の設営を行い、夕方5時から翌朝の8時までの連続測定を行う。データ取得は自動で行われ、データは装置内のフラッシュメモリに蓄えられる。1測点におけるデータは30MB程度になる。翌朝には前夜の測定データをパソコンに吸い上げ、データ処理を行う。品質のいいデータが得られていれば、その測点を撤収し、次の測点に移動する。



写真13 H測線の測点407は火山ドームの頂上付近にあり、測定機材を麓から標高差約200mも担ぎ上げた(筆者はほとんど手ぶらであったが)。設定終了後にマウラジャ山をバックに記念撮影。彼らの後ろは急な崖になっている。後列左から2人目がアリフ氏、6人目がアシャリ氏。

何かのトラブルによってノイズが多かったり、データが取れていなかったりした場合は、もう一晚その測点で測定することになる。

調査地は険しい地形であり、また、車の入れる道は限られているので、山道を歩いて測点まで行くことになる。森の中には、村人が農作業をするために歩く獣道のような細い道が網の目のようにつながっており、我々もそれを使って測点まで行く。測定機材を運んだり、磁場センサを埋める穴を掘ったりするために10名程度の作業員を雇った(写真11~13)。地元の男性の多くは農業(林業)に従事

していて、非常に体力がある。獣道のような山道や、木や草を伐開して作った険しい測線も測定機材やバッテリーを担いだまま平気で登っていく。皆、ビーチサンダルを履いているだけであるが、足を滑らすこともない。傾斜が急な下り坂では裸足になって滑らないようにしていた。筆者やDMRIのスタッフはほとんど荷物を持っていないのに、息を切らせながら着いていくのがやっとならであった。磁場センサは風や温度変化を避けるため、地面に穴を掘って埋める。特に鉛直成分のセンサのためには深さ1.5m弱の細い穴を掘る必要がある。作業員らは黙々と掘り続けて、すぐに穴を完成させてくれた。

電場を測定するには、測点の中心から東西南北の4方向に50m離して電極を設置する。そのために簡単な測量を行う。コンパスと巻き尺を使い、カナン(右)、キリ(左)、ツルス(まっすぐに)、ツング(待て)、スリキッ・ラギ(もう少し)の5単語を駆使して、作業員に指示を出し測量を行った。

日中は気温が高く乾燥しているので、すぐに喉が渇く。そういうときは、あちこちに生えている(植えてある)ココナツの木に作業員が登って実を落とし、果汁を飲ませてくれた。実は度々、測定の準備が終わる頃、「サヤ・チャッペ、サヤ・マウ・ココナツ・ジュース(私は疲れたのでココナツジュースが欲しい)」と、怪しげなインドネシア語でココナツを採ってくるように催促した。皆で1測点につき5-6個の実を消費した。また、畑の芋を掘り起こしてそのまま食べたりした。その場で食べる分であれば、他人の畑から作物を失敬してもいいことになっているという。

今回の調査では、初めごろの測点で磁力センサのケーブルを動物にかじられてしまい、1成分のデータが全く取得できなかった。幸い、トラブルはそれ1回だけだった。念のためではあるが、そのようなトラブルや装置の盗難を避けるため、夜間は測点に2名の見張りを置くことにした。3測点で計6名の作業員が山の中で夜を明かす。彼らは次の日もそのまま働いてくれたが、それほど苦になっていないようであった。現地の人ほとんどがキリスト教徒であり、日曜日は働かない。そのため、日曜の夜は測定を行わず、全員が休息をとることとなった。

測定器が故障した場合は現地ではほとんど修理は不可能である。幸い、測地器本体には一度も故



写真14 測量中のカシオ氏(右)。作業員の持っている長いナイフは、測線に沿って草木を刈り払うために必需品。1999年のフローレス島バジャワ地域におけるMT法調査で現地の人が使っていたナイフは、鉋を一回り大きくして先を尖らせた肉厚のものであったが、レンバータ島のナイフは日本の刀に近い細長い形をしている。

障はなく、順調に測定が行えた。小さなトラブルとして、当初、観測所でのバッテリー充電が不十分であり、測定途中にバッテリーの電圧がダウンすることが度々あった。そのため、充電の効率を上げようとして発電機の出力電圧を無理に上げたところ、日本から持参した2台の充電器のヒューズが飛んでしまった。レウオレバの町でも代替りのヒューズが手に入らず困ったが、アシャリ氏のアイデアで、電線の中の細い銅線1本を代用として結線し、何とかその場をしのいだ。小さなことでも致命的になってしまう危険性があった。

MT法の測点を第2図に示す。基本的に5測線を設定した。最終的に測定できた測点数は48である。後述する3次元解析を想定してグリッド状の測点配置とし、測点間隔は約500mとした。地図上で測点計画を決め、それに従って測量技師カシオ氏が測量をしてくれた(写真14)。測量は地形が急峻であっても構わずに測線に沿ってまっすぐ進んでいく。しかし、MT法の測定には樹木のない平坦な空き地が適しており、そのような所を求めて実際の測点をずらせることにした。とはいえ、森の中にはそんないい場所が見つからない場合が多く、仕方なく多少の傾斜地や植生には目をつぶって、測定場所を決めた。実際の測点位置はGPSによって座標値を得た。その結果、測点の配置は第2図に示すようにグリッド状には並んでいない。



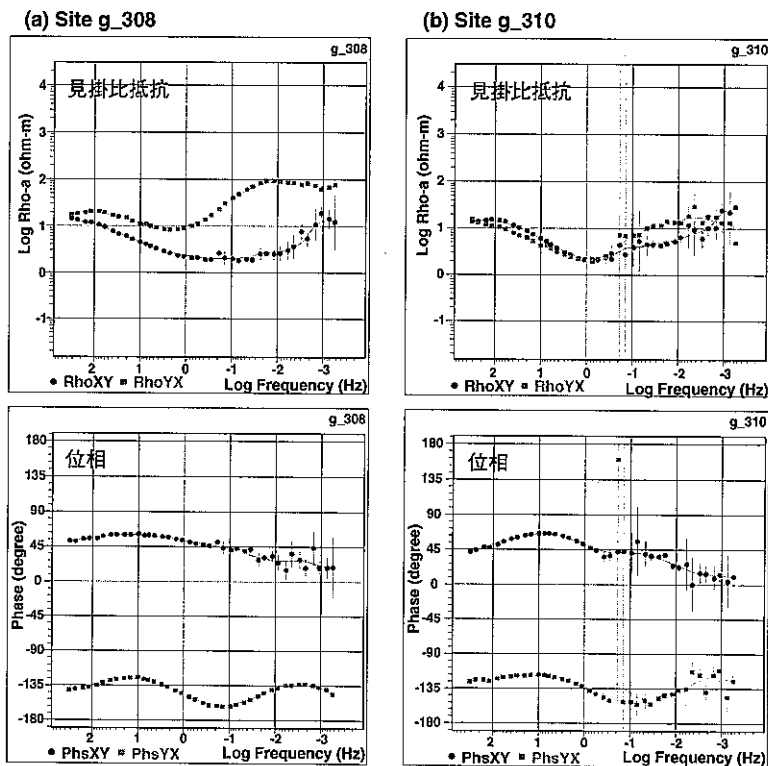
写真15 カランゴラ村でリファレンス用の測点を準備中。
村に近いので、たくさんのギャラリーが集まった。

MT法では、十分離れた2測点で同時に測定を行い、リファレンス処理によって測点固有のノイズを除去する。日本では、普通、調査地から20～100km離れたところにリファレンス点を設ける。今回は、調査の初めに、調査域から約5km離れたカランゴラ村にリファレンス点を設けて、ノイズ除去のテストを行った(写真15)。しかし、幸い調査地には電灯線がなく、人工的なノイズはほとんどなかった

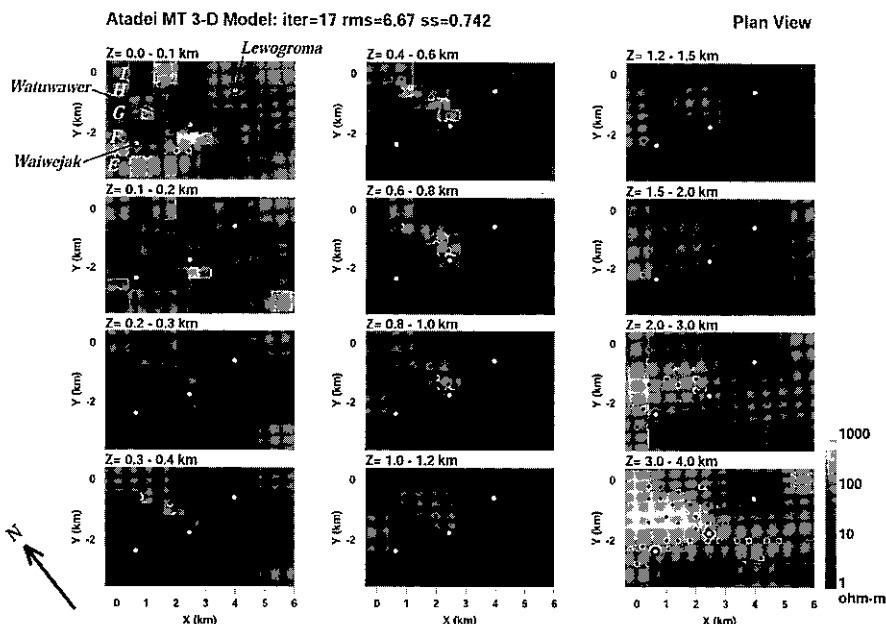
ので、リファレンス処理の効果はわずかであった。そのため、以後は、調査地内の測点間でリファレンス処理を行うことにした。ただ、測点間の距離を2km以上とるようにした。全般に地形が急峻であり、傾斜が10～20度の斜面にセンサやケーブルを配置する測点が多く、また、東の海上からほとんどいつも風が吹き上げてくるため、樹木や地面が揺れ、センサも揺れるので、それに相当する周波数である0.1ヘルツ前後のデータにノイズが入る測点があった。

6. MT法データ解析

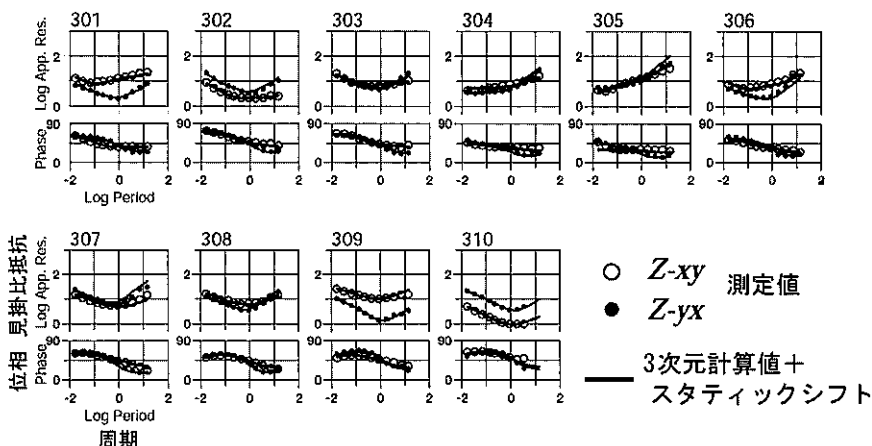
測定データの例を第3図に示す。MT法の見掛比抵抗と位相は方位によって変化する。図では北をx軸としたとき、電場のx軸成分と磁場のy軸成分による見掛比抵抗 ρ_{xy} と位相 ϕ_{xy} 、および、電場のy軸成分と磁場のx軸成分による見掛比抵抗 ρ_{yx} と位相 ϕ_{yx} を、周波数軸に対して表示してある。品質のいい例(第3a図、測点308)と風の影響を受けた例(第3b図、測点310)を示す。測点308の測定値は、0.01ヘルツより低周波でxy成分のデータに



第3図
測定されたデータの例、(a)測点308、および、(b)測点310。見掛比抵抗と位相を周波数に対して表示したもの。北をx軸としたときの2成分の値を表示している。測定誤差を標準偏差の長さのエラーバーで示してある。測点310は風の影響を受けて、周波数0.1ヘルツ付近のデータのエラーバーが非常に大きくなっている。



第4図 3次元インバージョン解析によって得られた比抵抗モデルを深度ごとのスライスで表示したもの。暗色部が低比抵抗、淡色部が高比抵抗を表す。黒丸はMT法測点、白抜き丸は噴気地と温泉の位置を示す。図中の北は左上方向になる。最終的な正規化rms残差は6.67、推定されるスタティックシフトの標準偏差は自然対数領域で0.742となった。



第5図 G測線の各測点について、見掛比抵抗と位相の測定値(丸印)と第4図のモデルから計算される理論値(実線)を示す。実線には求められたスタティックシフト量が含まれている。

短いエラーバーがあるものの、それ以外では測定誤差は小さい。測点310では0.1ヘルツ付近でエラーバーが非常に大きくなっていることがわかる。過半数の測点で第3a図に示すような品質のいいデータが得られた。

地熱探査などにおけるMT法のデータ解析はこれまで2次元構造解析が一般的に行われてきた。しかし、地熱地域は複雑な地質構造を有している

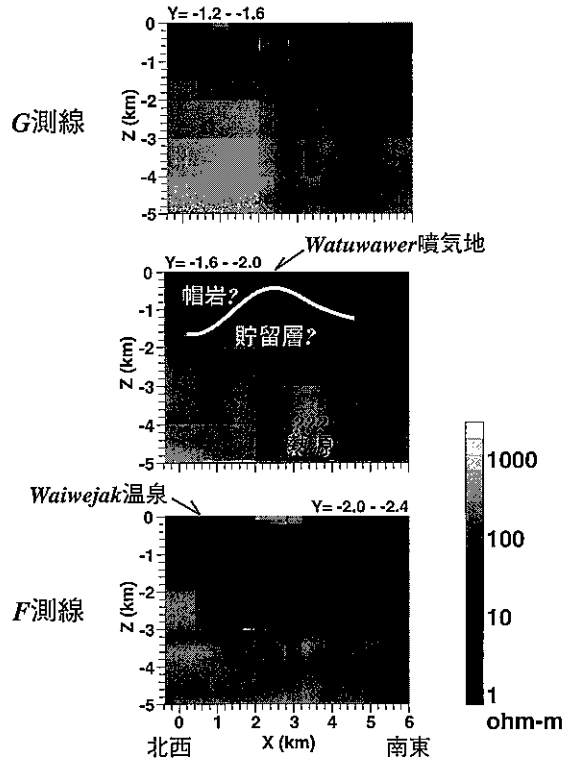
場合が多いので、2次元解析では実際の構造をうまく表現できないことがあった。そのため、3次元構造を正確に求めることのできる解析法の開発が望まれていたが、最近の研究開発によって3次元解析が実用的に行えるレベルに達しつつある(Sasaki, 2001; Uchida et al., 2002)。その解析法を適用し、すべての測点の見掛比抵抗と位相データを用いて3次元構造解析を行った。地下を3次元的に直方

体のブロックの集合体で表現し、測定値をうまく説明するようにそれらのブロックの比抵抗を自動的に求める。

得られた比抵抗モデルを第4図に示す(口絵8も参照)。x軸は128度の方位になっている。モデリングには差分法を用いており、地形は考慮されていない。すべての見掛比抵抗測定値の平均の比抵抗を有する均質大地を初期モデルにし、17回の反復修正(最小二乗法)の結果、正規残差は6.67となった。なお、解析には0.07~60ヘルツの11周波数を用い、測定誤差の最小値を1%と仮定して各データに重みを与えた。測線Gの測点について、測定値とモデルから計算される理論値を第5図に示す。MT法の見掛比抵抗には、測点近傍の微小な比抵抗異常に起因するバイアス(スタティック効果)が含まれていることが多い。このインバージョンではスタティック効果も未知数として求めることができる。例えば、測点309と310は隣り合う測点(約500m離れている)であるが、 ρ_{xy} と ρ_{yx} の大小関係は逆になっている。また、高周波数側(第5図の各図の左側)で2つの見掛比抵抗曲線は0.5桁程度離れているのに対し、位相曲線はそれほど離れていない。これらのことから、見掛比抵抗曲線のずれはスタティック効果によるものであることがわかるが、解析によってそれらのデータを正しく再現できていることがわかる。

3次元構造モデル(第4図)を見ると、表層ではワツウワウエル徴候地とワイウエジャック温泉の近傍に小さな低比抵抗異常が見える。深度100~400mの範囲では、ワツウワウエル徴候地とワイウエジャック温泉を含む広い範囲で顕著な低比抵抗ゾーンを形成していることがわかる。深度400mから1kmの範囲では、ワツウワウエル徴候地の下に高比抵抗異常域が解析され、また、調査域の東南部で低比抵抗層が広く(厚く)分布することがわかる。深さ2km以上の構造の信頼性は調査エリアが狭いこともあり悪いものと思われるが、全般的に高比抵抗を示している。これは低周波数の見掛比抵抗がほとんどの測点で高くなることから、妥当であると言える。

調査エリアの中央部をx軸方向(北西-南東方向)の断面で切ったときの比抵抗分布を第6図に示す。ワツウワウエル徴候地とワイウエジャック温泉をそれぞれ通る断面である。DMRIの調査によると、



第6図 測線FおよびG付近の比抵抗断面図と予備的な解釈。

ワツウワウエル徴候地にはスメクタイトの存在が推定されている。本地域に地熱貯留層が存在し、その上部にスメクタイトを含むキャップ層が存在することを想定すると、ワツウワウエル徴候地の北西側が最もそれに近い比抵抗構造を示しているものと推測される。下部の高比抵抗域は高温の貯留層部に相当するものと考えられる。DMRIの予察的な解釈でも、ワツウワウエル徴候地の下部に貯留層の存在を推定している。また、東の新しい火山ドーム列をもたらしたマグマ活動が地熱貯留層の熱源になっていて、粘土変質帯やワツウワウエルなどの地表徴候を形成しているものと推定している。しかし、貯留層の存在を確認したフローレス島バジャワ(マタロコ)地域の比抵抗構造(Uchida et al., 2002)に比べると、浅部低比抵抗層の規模が小さく、高比抵抗層も浅すぎるきらいがあり、高比抵抗層が本当に貯留層に相当するものなのかを判断することは現状では難しい。調査井の掘削地点を決めるには、さらに追加調査と詳細な解釈を進める必要があると思われる。

7. おわりに

MT法測定は予定したスケジュール通りに終了し、8月4日朝に測定機材の梱包を済ませた。午後には念願であったウェルン火山に登る時間を作ることができた。レック村から往復約5時間の強行軍であったが、山頂における景色は素晴らしい。それには調査が終わったことに対する満足感も含まれていたと思う。夜には作業員が全員観測所に集まってくれ、調査の打ち上げとお別れのパーティーとなった。

8月5日朝、アタデイ地域に別れを告げ、6日早朝にフェリーでフローレス島に渡り、7日には無事にバリ島に戻ることができた。そこまで辿り着けば、後のバリ島から日本への便は信頼できるので、デンパサールの近代的ホテルにチェックインしたときにやっと安堵感を覚えた。

幸運にも、調査機材にほとんどトラブルがなく、当初期待した以上の測点数で、測定を順調に終わることができた。また、いろいろな生活面の不便さやマラリアに対する不安も時とともに薄らいでいき、健康や人間関係に大きな問題は生じなかった。

毎日曜日の午後にはレウォレバの町に下りて、皆自分の家族へ電話を掛け、物資の調達と少しばかりの息抜きをした。ただ、毎回、車にトラブルがあり、観測所に帰り着くのが夜遅くになったり、1台が帰り着けずに途中の集落で夜明かしをしたりすることもあった。そんな時は、インドネシア人の楽観的すぎる判断に感心したものである。また、カウンターパートとは英語で会話をするのであるが、両者とも流暢には話せないのが、うまく意志疎通ができず、気まずい雰囲気になる場面もあった。日本語を話す相手がいないので不満を発散できないでいる筆者の方に原因があったようであった。

それでも調査を順調に終わることができたのは、ゆるやかに日々の生活を送っている村人たちの素

朴さ、よく働いてくれる作業員の陽気さ、それから、DMRIスタッフの深い心遣いによるものであると確信する。深く感謝をしたい。作業員の一人が、最後に記念にと、作業の合間に小さなココナツの実を少しずつ彫って作った杯をお土産にくれたのには感激した。DMRIは今年度に現地での掘削調査を計画している。本調査の結果も参考にして、成功裡に掘削が行われることを期待する。また、将来は地熱水生産にまでつなげて、それによってレンバータ島の人たちの暮らしが少しでも楽になることを願ってやまない。

参考文献

- Aswin, D., Sundhoro, H., Munandar, A., Suparman and Sulaeman, B. (2001): The potential of Atedai geothermal field based on geological, geochemical and geophysical studies, Lombok Island - East Nusa Tenggara, Proc. 5th INAGA Annual Scientific Conference and Exhibitions, Yogyakarta.
- 宮崎芳徳 (1989): 金銀鉱床有望地域発見への現地調査, 地質ニュース, no.424, 27-34.
- 村岡洋文 (1989): 南海の小スンダ列島に地質と金鉱を探る, 地質ニュース, no.424, 35-42.
- 村岡洋文・アズナヴィア ナスティオン・浦井 稔・高橋正明 (1998): インドネシア・日本による「遠隔離島小規模地熱の探査に関する研究協力」の開始, 地質ニュース, no.521, 34-48.
- Sasaki, Y. (2001): Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data, Proceedings 5th SEGJ International Symposium, 185-190.
- Sueyoshi, Y., Matsuda, K., Shimoike, T., Koseki, T., Takahashi, H., Sitorus, K., Simanjuntak, J. and Futagoishi, M. (2002): Exploratory well drilling and discharging test of MT-1 and MT-2 in the Mataloko geothermal field, Flores, Indonesia, Bulletin of Geological Survey of Japan, 53, 307-321.
- Uchida, T., Lee, T. J., Honda, M., Ashari and Andan, A. (2002): 2-D and 3-D interpretation of magnetotelluric data in the Bajawa geothermal field, central Flores, Indonesia, Bulletin of Geological Survey of Japan, 53, 265-283.
- UCHIDA Toshihiro (2002): Episodes during the magnetotelluric field survey in Lembata Island, eastern Indonesia.

< 受付: 2002年7月15日 >