

発展途上国の研究者向け短期研修に適した地震解析システムの整備 —エクアドル共和国の火山研究者を迎えて—

熊谷博之*・林 能成*†

Development of a Seismic Data Analysis System for a Short-term Training for Researchers from Developing Countries —Case of an Ecuadorian Volcano Researcher—

Hiroyuki KUMAGAI* and Yoshinari HAYASHI*†

Abstract

We developed a seismic data analysis system using a personal computer with the Linux operating system. This system is easy to be set up and cost effective, and therefore is quite useful for earthquake and volcano researchers in developing countries. In this paper, we outline this system and its application to the training course organized by the Japan International Cooperation Agency (JICA) for an Ecuadorian volcano researcher. Our training course was very successful, resulting in that one of the authors was welcomed to Ecuador after that. From the experience during this visit, we underscore the importance of continuous cares of a trainee after a training course.

Key words : Seismic data analysis, Linux, Developing country, Training course, Ecuador, Tungurahua Volcano

はじめに

近年、日本の多くの研究機関では、海外への研究者の派遣や外国人研究者の招聘などの国際交流を積極的に推進している。このような国際交流事業の中でも、発展途上国の研究者に対する技術研修は様々な分野でその人数や機会が拡大している。とりわけ地震・火山噴火といった自然災害に関する分野は、日本がこれまでも同種の災害を多数経験し多くのノウハウを蓄積していることや、世界的にみても数多くの研究者・技術者を擁していることから、わが国が行う技術研修には国際的に大きな期待が寄せられている。一方、多くの開発途上国では、社会基盤整備が遅れているために、自然災害に起因して非常に大きな物的・人的損失が発生する事例が多い。そのことが円滑な経済発展の障害となっているため、防災に関わる研究者や技術者の養

成・強化が強く望まれている。

独立行政法人防災科学技術研究所（以下、防災科研）は、国際協力事業団（JICA）が行う海外への技術移転事業に協力しており、これまでも講師の派遣や研修生の受け入れなどを積極的に行っている。平成 13 年度には、JICA 集団研修「自然災害防災研究コース」による研修を行った。この研修は平成 11 年度に続いて第 2 回目のもので、平成 13 年 11 月 12 日から平成 14 年 2 月 23 日までの約 3 ケ月間にわたって行われた。研修には、エクアドル・ペルー・トルコの 3 カ国から各 2 名ずつの研究者が参加した。この研修では 3 ケ月の研修期間中、研修生は JICA の筑波国際センターに滞在し、ほぼ毎日防災科研に通って個別のテーマについての研修を受けるという体制をとった。そのため、講義主体の研修に較べて個々の研修生の希望や、研修生の出身国の情勢に合わせた研修を行うことができる。しかしながら研修担当者と研修生が事前に交流があるわけではないため、研修前に希望や研究経歴を聞いて、細かいカリキュラムを詰めることは難しい。そのため研修の具体的な内容やそれに使用するデータなどは、実際に研修を進める中で研修生と対話して詳細を決めていく形とならざるを得ず、

2002 年 8 月 30 日受付, 2002 年 10 月 18 日受理.

* (独)防災科学技術研究所固体地球研究部門.

† 現 株式会社先端力学シミュレーション研究所.

* Solid Earth Science Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

† Now at ASTOM R&D Co. Ltd.

研修カリキュラムやそれに使用する装置などは柔軟性と即時対応性を持ったものが望ましい。また防災科研は研修専門機関ではないので、研修担当者は業務を抱えた中で研修を担当することとなるため、研修業務に裂く時間には自ずと限界がある。研修においてもっとも重要なことは研修生とコミュニケーションを図ることであり、そこに時間をかけるためには研修に使う装置のセットアップなどではできるだけ簡潔に行う必要がある。

本論文では、上記研修において実際にエクアドルからの火山研究者のために整備したコンピューターシステム及び研修カリキュラムの概要を報告する。またこの研修は研修生・研修担当者の双方にとって実りのあるものとなり、良好な人間関係を築くことができたことから、後日、著者の一人（熊谷）が実際にエクアドルを訪問して現地の火山研究の実状を視察する機会を得ることができた。そこで現地状況についても触れ、今後の技術研修のありかたについても述べる。

システム整備

上で述べたように研修に使用する機材には柔軟性と即時対応性が求められる。またセットアップする側にとっては、なるべく手間のかからない、普段使用しているものであるとありがたい。そして研修生にとっては研修で学んだことが自国に帰ってすぐに役立てることができるものが望ましい。近年、汎用品のパソコン（PC）は発展途上国といえども首都クラスの都市ならば普通に購入することができるようになったが、Sun などの本格的なワークステーションをそれらの国で購入することや、税関を通して持ち込むことにはかなりの困難を伴う。このことから、研修用の機材に使用するハードウェアには一般的な IBM-PC を選定した。

次に OS であるが、最近の地震学の研究では、解析に使用するソフトの多くが UNIX 上で開発されており、今回の

研修に際してもそれらのソフトを使用することを考えたため、PC-UNIX の 1 つである Redhat Linux 7.1 を選定した。一方、発展途上国の研究機関では解析に使用するソフトが Windows 上で開発されたものの場合も多く、研修の中で彼らが使い慣れたツールを使う可能性もあることから、こちらにも対応する必要があると考えた。そこでこの研修用のシステムは Linux と Windows Me のデュアルブートとしてセットアップした。なお 3 ヶ月間の研修期間に自国の研究者仲間などと電子メールでコミュニケーションをとるためにも、彼らの使い慣れている Windows をインストールする必要があると考えた。

ハードウェアに汎用品の IBM-PC を採用し、OS に Linux 及び Windows を用いるという組み合わせはベトナム社会主義共和国に解析システムを導入した際にも使用されており（林・森田，2001）、実績面からも安心である。またネットワークにも簡単に接続できるため、研修に使用するデータをインターネット経由で自国から ftp などを用いてダウンロードすることができ、更にプリンターなどの外部出力装置について防災科研内に設置されているものを共用できるという利点もある。

ハードウェア及び OS の整備にあたっては、このシステムが主に外国人が使用するものであることを念頭におき、日本語表示を排除するように努めた。キーボードはキーボードに日本語表示のない US-104 キーボードを指定した。Redhat 7.1 は複数言語対応になっているので、英語（USA）が標準設定の言語となるように設定し、あわせてスペイン語（エクアドルの公用語）と日本語も表示可能とした。また Windows については「英語版」と指定して購入した。ディスプレイの画面調整用の表示についても、納入され次第、英語表示となるように設定を確認した。英語版の OS やキーボードはパソコンショップに在庫がない場合も多く、通常のパソコンを購入する場合よりも納入に時間がかかった。急ぎの場合には注意が必要な事柄であろう。

表 1. 整備した解析システムの概要

	部品名	仕様
パソコン本体	CPU	ペンティアム 4 1.8GHz
	メモリ	SDRAM 512MB
	HD ドライブ	IDE 40GB×2
	CD ROM ドライブ	52 倍速読み取り専用
	LAN カード	100BASE TX
	キーボード	US-104 Keyboard
	マウス	3 ボタンマウス
OS		Redhat Linux 7.1
		Windows Me （英語版）
ディスプレイ		17 インチ液晶（三菱電機 RDT171M）

以上のハードウェア及び OS の設定に加え、このシステムは研修の開始に合わせ即座に使用できるように準備したため、地震学解析のごく基本的なツールもあらかじめインストールした。グラフ、地図等を書くためには GMT (Wessel and Smith, 1995) を入れ、また基本的な解析ツールである SAC (Goldstein *et al.*, 2002) や、震源決定支援ソフト WIN (卜部・東田, 1992) もインストールした。これらのソフトは研修生自らでもインストールできるように、必要なパッケージなどを別途用意してインストールの手順についての研修も行った。これ以外の解析に必要なソフトは、研修生との打合せをして、詳細な研修内容が決定してからインストール及び設定することとした。表 1 は今回整備した解析システムをまとめたものである。このシステムを一式用意するのに必要な金額は約 20 万円で済み、大変経済的に研修に必要なシステムを整備することができた。

研修課題およびその成果の概要

著者らの担当となった研修生 Marco Rivera 氏は、エクアドルの国家防災局に所属している若手研究者である (図 1)。沈み込み帯に位置するエクアドルでは、日本と同様に



図 1. 本システムを用いた防災科研での研修風景。右が Marco Rivera 氏。

地震・火山に関連した災害が多く発生しており、その災害軽減は国家的課題である。エクアドルは、太平洋岸に沿った海岸部、中央部の高地、さらに東部のアマゾン地域に大きく分けられ、中央部の高地には、大小あわせて 50 を超える火山がある。その中にトゥングラワ、コトパクス、グアグアピチンチャなど、現在も活動的な火山が存在する (図 2)。Rivera 氏が所属する国家防災局 (Dirección Nacional de Defensa Civil) はエクアドルで最大の防災機関であり、平時の災害軽減への取り組みおよび災害時における住民への情報伝達・避難指示に関し責務を負っている。エクアド

ルの地震及び火山のモニタリングは、国立理工科大学地球物理研究所 (Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional) によって主に地震計のネットワークを用いて行われており、そのデータに基づき国家防災局の判断がなされるという仕組みとなっている。

今回の研修では、Rivera 氏の希望により、地震データの解析に基づく火山現象の理解と災害軽減に関する研修を行うこととなった。その目的は、地球物理研究所で取得されている地震データのより高度な解析とその災害軽減への利用である。この研修では単に技術の習得のみではなく、近年の火山地震学・測地学の成果に基づく火山現象の新たな見方を学習することも目的とした。技術的には、GMT, SAC, WIN といった基本解析ツールの使い方の習得、震源決定、フーリエおよび窓法 (例えば Kumazawa *et al.*, 1990) による地震波形のスペクトル解析の研修を行った。これらに必要なプログラムは、シェルスクリプトを用いて極力ルーチン化するとともに、地図のみでなく波形やスペクトルの表示などにもすべて GMT および SAC のコマンドを用いたシェルスクリプトを作成した。シェルスクリプトに関しては雛型をこちらで用意し、それらを研修生により適宜修正・応用できるようにした。このような一貫したシェルを用いた作業は UNIX システムの理解にも効果的である。さらに火山の最新の見方に関しては、近年火山分野の研究で進んでいる広帯域地震計を用いた稠密観測とその成果、火山で発生する振動現象の物理モデル、さらには GPS・傾斜計を用いた火山観測とその有用性に関する文献学習および個別セミナーを行った。さらに研修の後半には阿蘇にある京都大学理学研究科地球熱学研究施設火山研究センターと桜島にある京都大学防災研究所火山活動研究センター (桜島火山観測所) を訪れ、日本における火山観測の実際とその防災への利用に関する現地研修を行った。特に桜島での傾斜計・伸縮計を用いた噴火直前予知システムは Rivera 氏にとって印象的のようであった。

本研修期間中に解析の対象としたのは、トゥングラワ火山の地震計ネットワークで観測された低周波地震である。トゥングラワ火山はエクアドルの中央部に位置し、山頂の標高が海拔 5,000 m を超える安山岩質火山である (例えば Hall *et al.*, 1999) (図 3)。この火山では 1999 年の 10 月より噴火活動が活発となり、現在も活発な状態が続いている。この火山の麓には観光地としても有名な温泉地 (パニョス) があり、2 万人以上の人々が暮らしている。過去の噴火では大規模な火砕流も発生しており、その噴火災害軽減は大きな課題である。トゥングラワ火山には固有周期 1 Hz の上下動地震計を設置した 9 つの観測点があり、波形データは地球物理研究所までテレメータされている。この火山の地震計ネットワークでは、数多くの火山テクトニック地震や低周波地震が噴火活動に伴って観測されている。

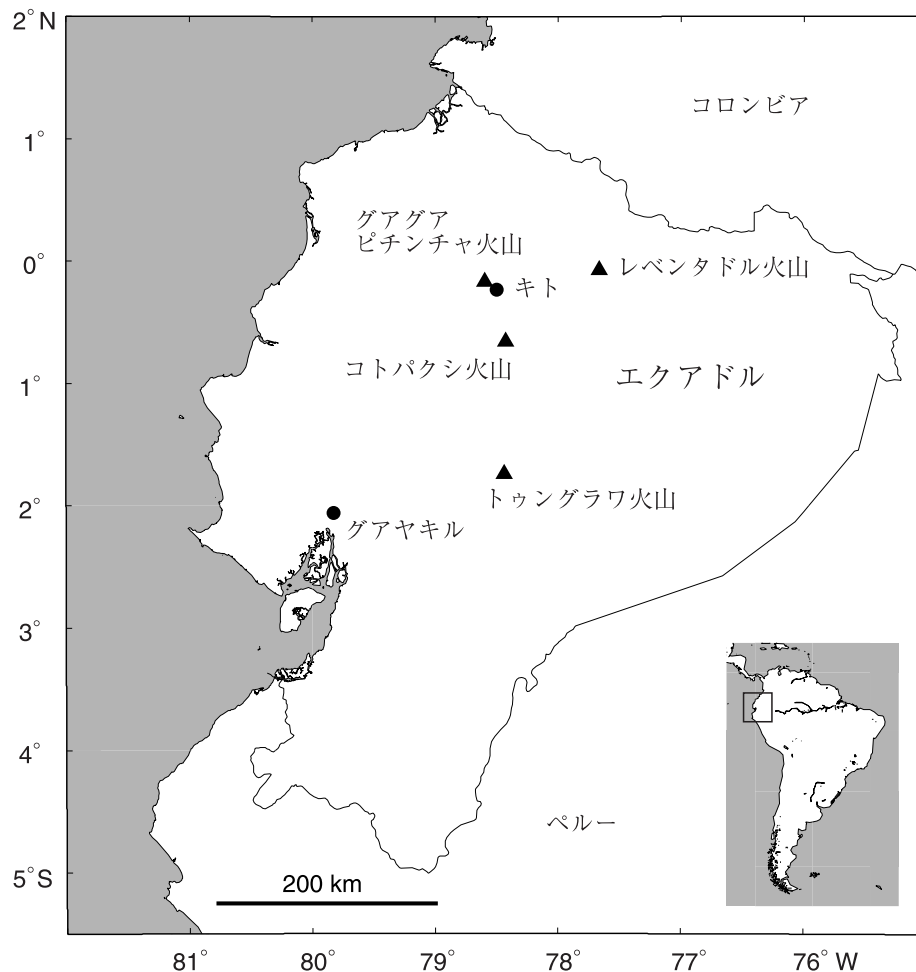


図 2. エクアドルの地図。首都のキトの人口は約 157 万人。グアヤキルの方が人口は多く約 207 万人。キトは赤道直下ではあるが、標高が 2,800 m あるため月平均気温が約 14℃ と一定していて、一年を通して気候は温暖である。トゥングラワ (5,023 m)、コトパクシ (5,897 m)、レベントドル (3,562 m) およびグアグアピチンチャ (4,675 m) はエクアドルの主要な活動的火山。他に大小合わせ 50 を越える火山がある。



図 3. トゥングラワ火山。安山岩質の成層火山で山頂の標高は海拔 5,023 m。1999 年 10 月より噴火活動が活発化している。

その中には、長時間にわたって単色的に減衰振動を続ける特異な波形の特徴をもつ低周波地震が見つかった(図 4)。本研修では 2001 年 12 月に発生したこの地震の波形解

析とその発生メカニズムの解釈を課題とした。波形データは地球物理研究所のトゥングラワ火山の担当者である Indira Molina 氏から電子メールの添付ファイルとして転送してもらった。波形データはフォーマット変換の容易さを考え、テキストファイルでの転送を依頼した。これによりフォーマット変換に関して大きなトラブルは生じなかった。それらのデータについて、初動を用いた震源決定、さらにフーリエ変換および存否法を用いたスペクトル解析を行った。その結果、震央は火口の近傍に決まり、また深さは火口から数百メートルと決まった。またスペクトル解析の結果、卓越周波数はおよそ 2 Hz で、振動の減衰の程度をあらわす Q 値はおよそ 200 と非常に高い値を示すことが分かった。クラック形状を仮定した共鳴体振動モデルに基づくと(例えば Kumagai and Chouet, 2000)、このような高い Q 値を示す振動は、共鳴体内部に火山灰を含んだガスが存在すると解釈でき、この振動が火道内部での噴火準備過程に伴って発生している可能性が指摘できた。低周波地震の解析は、それにより噴火現象の理解を深めるとも

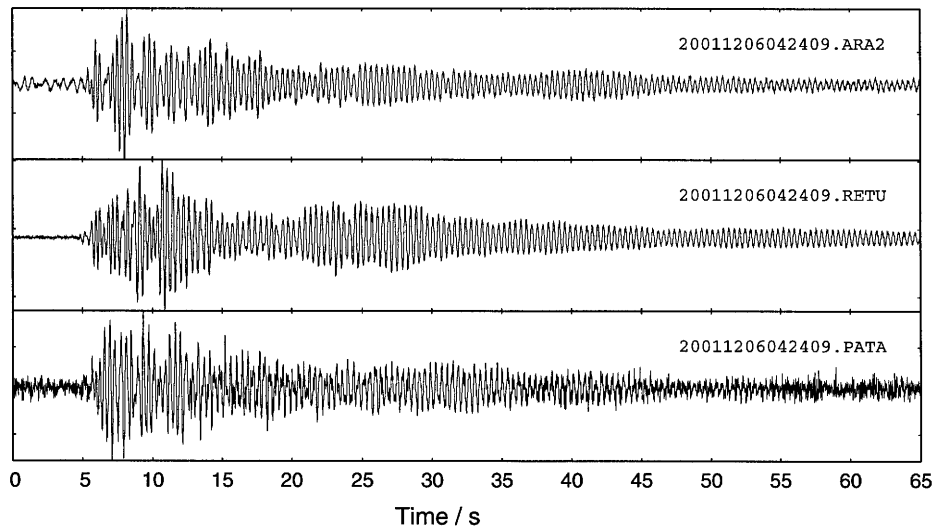


図 4. 2001 年 12 月 6 日にトゥングラワ火山で発生した低周波地震の観測波形（Rivera, 2002 を改変、データはエクアドル国立理工科大学地球物理研究所による）。

に、噴火予測にも貢献するポテンシャルがあるとの結論に至った。

研修の最後には防災科研で成果の発表会を行うとともに、英文の研修レポートを作成した。それは、Technical Report, Group Training Course in Natural Disaster Mitigation 2001 (Rivera, 2002) として JICA に保存されている。帰国にあたり、解析に用いたプログラムやデータは、Linux 上で tar ファイルとして一つにまとめた後、Windows 上で CD に焼き、持ち帰ってもらった。

現地における研修のフォローアップ

帰国後、Rivera 氏は、彼の研修成果に関するセミナーを国家防災局と地球物理研究所で行った。そこでは低周波地震の解釈に対して批判的な意見も含め多くの反響を呼んだ。Rivera 氏からの積極的な勧誘と地球物理研究所所長の Hugo Yepes 氏からの誘いもあり、筆者の一人である熊谷が 2002 年 6 月下旬から 7 月上旬にかけての 2 週間、エクアドルを訪問した。この訪問の目的は、現地のデータ解析環境と地震観測点の視察を行うこととともに、研修のフォローアップと研修成果を共同研究として発展させることにあった。今回の訪問では主に地球物理研究所に滞在した（図 5）。

地球物理研究所でのルーチン的なデータの解析には PC + Windows を用いたシステムを用いており、Sun などのワークステーションは一台も存在しなかった。そこで今回の訪問ではまず PC-UNIX のインストールから始めた。Linux としては研究所にあった Mandrake (Redhat6 に準拠したシステム) を用いた。Linux のインストールの後、Rivera 氏が研修後に持ち帰った CD から、ファイルの



図 5. (上) エクアドル国立理工科大学地球物理研究所の人々。(下) 研究所内部の様子。PC を用いた収録システムを用いて地震データの解析を行っている。写真奥にはすず紙を用いたドラム記録装置が見える。

展開を行った。パスの設定は必要としたものの、GMT、SAC等の基本解析ツールや独自の解析プログラムなどもすべてコンパイルなしに正常に動作した。これは標準的なシステムを使うメリットであり、現地での作業を大幅に軽減した。ただし、研究所にはポストスクリプト対応のネットワークプリンターがなく、結果の出力に関してはローカルプリンターを使うこととなった。

この研究所では、20代から30代前半の若い研究者が火山活動や地震活動のモニタリングの担当者となって活躍している。Yepes 所長からの要請もあり、このような若い研究者に、PC-UNIXに導入した基本解析ツールや存否法の原理およびプログラムの使い方に関する講習を行った。さらに地球物理研究所と国家防災局の研究者を交えて、低周波地震のモデリングとその応用に関するセミナーを開催した。草津白根火山においても、トウングラワ火山で発生している低周波地震と同様の単色減衰振動的な特徴を持つ低周波地震が観測されている。このセミナーの内容はその解釈に関する内容であったため、参加者の興味を引き活発な議論がなされた。

トウングラワ火山の担当者である Molina 氏とともに、トウングラワ火山の地震波形連続データを詳細に調べた結果、単色減衰振動的な低周波地震は過去の噴火活動に伴っても数多く観測されていることが分かった。Yepes 所長らと協議した結果、まずはこれらの既存の短周期地震データの解析から始め、将来的にはトウングラワ火山での広帯域地震計の設置などを視野に入れた共同研究を進めてはどうかということになった。またコトパクシなどの他の活動的火山でも類似の地震が観測されており、これらについても共同研究の対象とすることになった。さらに研究支援の可能性を探るために、Yepes 所長らとともに現地の日本大使館およびエクアドル外務省を訪問した。エクアドル外務省に勤務する JICA 専門家の田上 実氏からは、JICA の技術協力プロジェクトへの申し込みを勧められ、すでに地球物理研究所からプロポーザルが提出されている。トウングラワ火山の地震波形データについては、CD に保存し日本に持ち帰った。現在電子メールでのやりとりをしながら、それらのデータの解析をエクアドルと日本とで分担し進めている最中である。

ま と め

3ヶ月という短期の研修においては、効果的かつ効率的にカリキュラムをこなす必要があり、また研修の性格上その成果が自国で活かせるものでなくてはならない。このような観点からは、PC+Linux のシステムの利用は極めて有効であることが今回の経験からも分かった。このシステムは世界標準である上に安価に揃えることができ、自国へ戻ってもそのまま使えるという大きなメリットを持ってい

る。また汎用ソフトウェアだけでなく、地震学の基本解析ソフトウェアの多くが Linux 対応となっており、さらに近年の目覚ましい PC の基本性能の向上と合わせ、このシステムでかなり高度な解析までこなすことが可能となっている。今回のように自国で PC+Windows しか使用経験がない状況においても、比較的容易に UNIX 環境を整えることができ、発展途上国においては特に有効と言えるだろう。

しかしながら、研修者が初心者の場合、短期の研修の期間だけでは UNIX システムに精通することは無理があることも事実である。今回の場合も、現地で稼働している UNIX システムが無かったため Rivera 氏自身によるセットアップはできず、熊谷が訪問するまで、持ち帰った CD のファイルは解凍されないままであった。研修の成果を自国で活かすためには、その後のフォローアップが重要であることを示している。また日本では一般的に使われているネットワークプリンターも現地では高価なため購入できず、これについてはローカルプリンターをつなぐなど別途対応する必要があった。このような自国の状況を研修前に事前に把握し、それにあったシステム整備と研修カリキュラムを立てるための方策も必要であろう。

今回の研修では、指導員の専門分野と研修生の研修希望内容とが一致したため、十分にコミュニケーションをはかれるとともに、上述のようなシステム整備に関する工夫もうまく機能し、研修は成功だったと言えるだろう。またその後のフォローアップにより、研修成果を共同研究へと発展させることもできた。研修生の指導は現実的には非常に大変であり、場合によっては一日中ほとんどつきっきりで指導しなければならないこともある。そのような中にあり、研修生と指導員双方で実りある研修にするためには、やはり適切な課題の選択が重要なポイントとなろう。高価な機器等に依存した課題やあまりにレベルの高い課題の設定であると、研修生が自国でその成果を活かすことは困難となるし、課題のレベルが低すぎると指導員の思い入れがなくなってしまう。また単に研修期間のみで終わらせるのではなく、その後のフォローアップが非常に重要であることも分かった。このような継続的なケアにより研修の成果が自国で活かされ、災害軽減に役立つことによって真の意味での国際貢献となるのであろう。

謝 辞：京都大学の須藤靖明助教授および井口正人助教授には阿蘇及び桜島の研修の対応を快く引き受けて頂いた。(財)日本国際協力センター筑波支所の大村寿美研修監理員には円滑な研修の遂行上特にお世話になった。また地震研究所の阿部勝征教授による査読は原稿の改善に役立った。これらの方々に深く感謝します。熊谷のエクアドルの訪問は、(独)防災科学研究所固体地球研究部門平成 14 年度部門長裁量費のサポートによる。

文 献

- Goldstein, P., D. Dodge and M. Firpo, 2002, "SAC2000 : Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, UCRL-JC-135963, Invited contribution to the IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology.
- Hall, M.L., C. Robin, B. Beate, P. Mothes and M. Monzier, 1999, Tungurahua Volcano, Ecuador : structure, eruptive history and hazards, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **91**, 1-12.
- 林 能成・森田裕一, 2001, 海半球ネットワーク海外共同観測のための地震解析システムの導入ーベトナム社会主義共和国における例ー, *震研技報*, **7**, 52-57.
- Kumagai, H. and B.A. Chouet, 2000, Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids, *J. Geophys. Res.*, **105**, 25493-25512.
- Kumazawa, M., Y. Imanishi, Y. Fukao, M. Furumoto, and A. Yamamoto, 1990, A theory of spectral analysis based on the characteristic property of a linear dynamic system, *Geophys. J. Int.*, **101**, 613-630.
- Rivera, M., 2002, Analyses of long-period events in Tungurahua Volcano, Technical Report, Group Training Course in Natural Disaster Mitigation 2001.
- ト部 卓・東田進也, 1992, WIN-微小地震観測波形検出支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), *地震学会講演予稿集*, **2**, 311.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1995, New version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **76**, 329.