

ニュージーランド ホワイト島火山 微小地震観測記

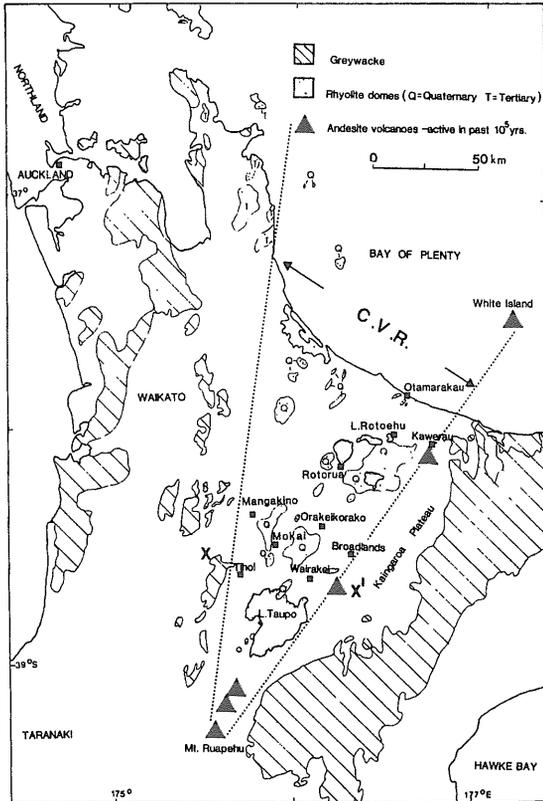
西 祐司¹⁾・杉原光彦¹⁾

1. はじめに

ホワイト島火山—絶えず噴煙を吐き出し、活発に活動を続けるこの火山島は、ニュージーランド北島の北方約50 km に浮かび、タウポ火山帯の北端に位置する無人島である(第1図, 写真1)。ホワイト島火山の活動は、ヨーロッパ人がニュージーランドを見つけるはるか以前にニュージーランドに移り住



写真1 南側から見たホワイト島火山の全景
1992年2月19日 ホワイト島に接近中のヘリコプターより撮影。翌日, 2,000 m 上空まで噴煙を吹き上げる噴火を起こす。



第1図 ニュージーランド北島の地質概略図とホワイト島火山(Stern (1986)より)
斜線部が基盤と言われる Greywacke
山マークは最近10万年以内に活動した安山岩質の火山
C. V. R.: Central Volcanic Region

んだマオリの人々の伝説にも登場する。マオリの人々が Whakaari と呼ぶこの島を「白い島」と名付けたのはかのキャプテン・クックである。1769年10月31日に航海を続けてきたクック達はこの島を目にし、翌日に「常に我々にそのように見えたので「白い島」と名付けた」とのことである(Luke, 1959)。19世紀から多くの ash eruption の記録があり、ニュージーランド科学産業研究省(Department of Scientific and Industrial Research:以後 DSIR と略記)とビクトリア大学による継続的なモニタリングが1967年から行われ、1976年からは地震計が一台設置されて、テレメータにより地震活動がとらえられている(Clark and Cole, 1989)。また、この活発な火山に対する科学掘削計画も計画され、本誌でもその姿が口絵を飾ると共に、火山活動と掘削計画の紹介がされている(Giggenbach 他, 1991; 玉生, 1991)。

我々二人は、1992年の1月から3月にかけてニュージーランドに滞在し、この魅力ある火山島において DSIR と共同で微小地震観測を行う機会を得た。その概要と観測道中記(?)を紹介する。

1) 地質調査所 地殻熱部

キーワード: ニュージーランド, ホワイト島, 火山, 微小地震

2. ニュージーランドへ

1992年1月19日20時30分に成田空港を出発したニュージーランド航空034便は翌日の10時15分、予定よりやや早くオークランド国際空港に到着した。真冬の太陽に慣れた目には、南半球の真夏の日差しは強く感じられたが、湿度が少ないせいか余り暑さは感じない。ニュージーランドと日本との時差は3時間だが、ニュージーランドがサマー・タイムを採用するこの時期には時差は4時間に広がっている。10時間半の機上の旅でしっかりと睡眠をとれた杉原は、移動時間で緩和されたためか時差に特に違和感を感じることはなく早速日本への最初の便りを書く。しかし、1時間も眠れなかった西にとっては、眠い目をこすりながらのニュージーランド第1日目となった。

オークランド国際空港では、DSIRの共同研究者の一人、スチーブン・シャープン氏が出迎えてくれた。彼は1988年、1990年3月と2度来日し、特に昨年地質調査所に3週間滞在して今回の観測の基本的な打ち合わせをしている。彼からまず聞かされたのは、3日前にホワイト島で比較的大きい噴火があり新聞でも報道された、ということであった。昨年12月から活発な火山活動があることを聞いてはいたが、噴火地震を記録するチャンスを逃したことを大変残念に思った。それ以上の大きなものまで含め何回もの噴火を記録することになったわけだが…。

空港から我々が滞在期間中ベースにするタウポまでの約400 kmは、スチーブンの運転するDSIRの車で移動した。彼が所属するDSIR地熱研究所のあるワイラケイはタウポ市から約10 kmのところにある。車はいすゞのTROOPERという名の四輪駆動車、日本でいうBIGHORNである。この後、ホワイト島への機材輸送、ワイラケイとタウポとの移動等のために、DSIRはこの車をほとんど我々専用として使わせてくれた。

車窓から眺めたニュージーランドの北島は、日本に非常に似ているという印象を受けた。南島の氷河の造った地形や、大陸のどこまでも続く荒涼とした砂漠とは違い、所々に山があり、緑も多い。左側通行で日本車が多いこともあり“外国に来た”という実感がなかなかわかない。スチーブンは日本語の通

信教育を受けていて、車内では片言の日本語三分の一、片言の英語三分の二で会話する。英語力にかなり？マークのつく我々にも、彼の明確な発音は分かりやすい。日本語を習っていることもあり、我々がわからない表現を日本語的に言い直してくれたり、否定疑問に対して我々がYes/Noを逆に答えることがあることもよく知っている。出発前の準備の疲れも重なり、車中で眠気に襲われ始めた我々を見て、スチーブンは「日本人は自動車でも列車でもよく眠れるようだが何故か？」と不思議がる。我々にとっては当然のようなことだっただけに答に窮する。彼も日本を旅行してから、車中で眠れるようになったとのことであった。

のどかな牧場の羊達をながめる美しい景色が続いた後、ライオライトの火山性ドームのいくつかの側を抜ける。ドームも牧草に覆われ、まるで阿蘇の近くを走っているようだと感じているうちに、ワイラケイの地熱発電所が見えた。DSIR地熱研究所に到着したのは夕方5時頃であった。我々は地震計、総延長3 kmのケーブル、データ記録装置等の大量の観測機材(梱包を含め約800 kg)のほとんどをあらかじめスチーブンあてに送り、データのダウンロードや解析に使うパーソナル・コンピュータと消耗品類を携行品(これも100 kgを突破)として輸送した。送付した機材がDSIRの倉庫に無事到着しており、木箱を開けてもほぼ外観上は問題ないことを確認して一安心した。この後、タウポ市内のモーターに居を定めた。このモーターは、他の場所にあるDSIRのメンバーがワイラケイの地熱研究所に来た場合の定宿とのことであった。

3. 観測計画と準備

到着翌日の21日、スチーブンに研究所の中を案内してもらい、研究所の方々に紹介される。ここは、DSIRの地熱・火山関係の地域・地質センターというような研究所であり、全員で20人程度の小じんまりとした構成である。地質・地球物理部門の人の他、化学部門の人も配属されており、三棟ある建物の一棟はWorksが使っている。ニュージーランドは、国土面積が日本の約7割であるが、人口は約300万人しかいない。さらに地熱研究所は、タウポの町から約10 kmも離れている。このため、研究

所の建物は全館平屋建てで、広大な敷地に悠々と建てられている。各研究者が広い個室を持ち、観測機器の調整等をする作業室もたくさんある。さらに立派な厨房用具一式とビリヤードまで置いた広々としたカフェテリアがあり、ここに新着雑誌の開架棚もある。昼食時はもちろん午前と午後のティー・タイムには皆がここに集まり、食事やお茶をとりながら互いに話し、最新論文に目を通す。広い庭には芝生が青々としている。研究所はワイカト川の流れる幅広い谷やワイラケイ地熱発電所の建物を見おろす位置にあり、風景もよく素晴らしい環境である。地熱研究所では我々二人のために、十分広い(つくばで観測機器の整備をしている部屋よりも大きい)部屋を一室用意していただいた。

この日は、今回の微小地震観測のもう一人の共同研究者、ブラッドリー・スコット氏もロトルアにある DSIR 火山研究所からワイラケイに来て、彼らの観測機器の準備をしていた。我々も早速、荷物を開梱して倉庫から運び出し、全ての機材が無事輸送されていたかの確認にとりかかった。晴れて気持ちの良い日だったので外の広々とした芝生の上で作業した。明るい日差し、気持ち良い風、素晴らしい風景の中、鳥の声に囲まれての作業は大変快適であった(写真2)。

双方の作業が一段落した段階で、当面の予定についての打合せとなる。これまでのホワイト島での微小地震調査の主なものは、

- (1) 常設の無線テレメータ観測点 WIZ での1成分連続記録をもとにした地震の分類と地震活動の把握(Latter 他, 1989)

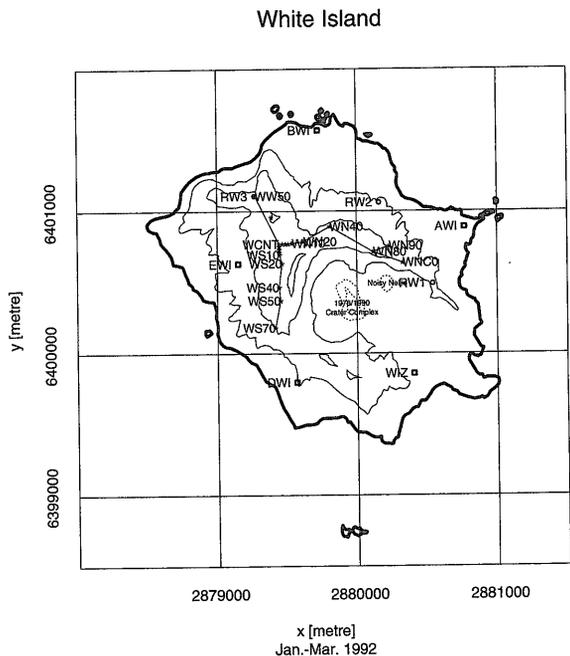


写真2 DSIR ワイラケイ地熱研究所の庭での観測機器準備作業

- (2) 5台のトリガー式ペンレコーダによる一昼夜の観測とこの期間に発生した1個のA型地震と5個のB型地震の震源位置推定(Sherburn and Scott, 1988)
- (3) 2台の3成分デジタル記録計による1昼夜観測で得られたB型地震のスペクトルの特徴の考察(Sherburn and Scott, 1992 投稿中)

である。従って、多数の地震計を設置した本格的な長期間の微小地震調査は今回が初めてとなる。昨年のスチーブンと DSIR ホワイト島研究グループ長であるブルース・ホートン氏の来日、FAX 等で連絡を取り合って、あらかじめ基本的な観測方針は決めてあったので、まずこれを確認した(第2図)。スチーブンとブラッドは、これらの観測地点候補点のいくつかについて既に見学してきている。

各々の持つ記録装置の特性を生かし、機材の設置場所が決められた。ラジオ時報での時刻同期が容易な DSIR の観測システムは、ホワイト島内で可能な限り離れた位置に設置する。これに対し、取扱いの容易なケーブル・システムを持ち、高精度の時刻同期が可能な我々の観測システムは、ホワイト島の山頂部に記録計を集中させ、クレータを囲むように配置した地震計との間をケーブルでつなぎ、多チャ



第2図 ホワイト島における微小地震観測点配置

ンネル記録計として用いる。通常の微小地震のように初動が明瞭には存在しないB型・E型等の地震、火山性微動等の解析も考え、特に山頂部では観測点を密に配置した。また、解析の上で基本となる速度構造を推定するために、クレータ内で常時微動観測を行うことも予定していた。

観測点配置と双方の観測機材概要についての確認の次は、観測機器設置のスケジュールを決めた。我々は、日本から輸送した機材の開梱・調整・準備等に約1週間が必要と推測していた。しかし、現地実際に立ったことのない我々としてはできるだけ早い機会に一度ホワイト島に行きたいという希望をあらかじめ伝えていた。このため、天候の良さそうな1月23日と24日に早々とホワイト島へ行くようブラッドが手配をしていた。この2日間でDSIRの観測システムは設置してしまい、我々の機材についても可能な限りの量を輸送してしまいたい、というのが彼らの意向であった。滞在期間中のできるだけ長い期間のデータをとりたいため、我々も1月23日観測開始をめざして準備を進めることとした。準備期間は2日間しか残されていない…!!

現地調達を予定していた機材の内、太陽電池とバッテリー類の多くはDSIRから提供していただくことになった。とりあえず不足するバッテリーとケーブル固定用のベグをタウポの町へ買いに行く。この後、芝生の上で地震計、プリアンプ及び記録装置の動作確認を続けた。長い時間の野外作業での強い日差しを心配してか、初対面にも関わらず妻は帽子と日焼け止めクリームを貸して下さった方もいて、ニュージーランドの人々の暖かさに感動した。

小さなトラブルは少々あったが、2日間の準備で機材のほとんどを正常に動作させることができ、1月23日を迎えた。

4. ホワイト島への第一歩

ホワイト島はニュージーランド北島の北東岸から約50 km、ブレンティ湾に浮かぶ直径2 kmほどの無人島である。1885年から硫黄の採掘が行われて硫黄工場もあったのだが、1914年に地滑りをきっかけとした火山泥流で工場が破壊されて死者を出した後は、再建されていない(Luke, 1959)。火山活動が継続し、腐食性の火山ガスも多い。飲料水の確保が難しく、植生も極めて少ない。このため、島内

での宿泊は困難であり、北島からヘリコプタまたは船で往復することとなる。もちろん定期便はなく、どちらを利用するにしても気象条件に大きく左右され、島に行けない日も多い。渡航可能な確率、往復に必要なチャーター料等はどちらも似たようなものであったため、島内に観測点を配置する機動性と時間の点で圧倒的に有利なヘリコプタを利用した。

最も近いファカタネ空港からホワイト島までは約50 kmであり、ヘリコプタでは約20分かかる。タウポからこの空港までの約200 kmは車で移動する。タウポやロトルアにも空港があり、そこから飛べばより短い時間で楽にホワイト島に着くが、限られた予算の中で飛行回数を増やすためには、1飛行あたりのヘリコプタ経費を少しでも安くするこのような方法が必要であった。この時は、2日間連続でホワイト島に行くためとスチープンがブラッドのオフィスで作業する必要があるとのことで、前日の夕方うちにワイラケイを出発して中間地点となるロトルアに宿をとった。

ロトルアからファカタネへは国道30号線を通って約1時間の距離にある。途中いくつかの湖の湖岸を通ったり原生林の横を通ったり変化に富んだ風景の中を走る(後日ここを自ら運転することになった時には、ニュージーランドの人々のように高速でカーブに突入することができず苦勞した)。急カーブや坂道を越えていくと前方に台形の山が見えてくる。これが、エジカム山。平野の中に入ってファカタネに近づくくと果樹園の向こうに古墳のような山が見える。これがホエール島。エジカム山、ホエール島、ホワイト島はタウポ火山地帯の北東部に一列に並ぶ安山岩の火山で、北東端のホワイト島だけが活火山である。この南西方向の延長上のナラホエ山とルアペフ山は最近噴火している。ホワイト島からルアペフ山までの新しい安山岩質火山の列はタウポ火山地帯の東側の境界線にあたる(第1図)。

ファカタネ空港は、オークランドとの間に定員十数人のプロペラ機による1日3便の定期便があるだけの小さい空港だ。空港には地元の新聞記者がやってきて、ニュージーランドと日本との間で開始された共同研究について先に着いたブラッドに取材していた。観測機材を前に4人でポーズをとらされて写真を撮られる。インタビューを受ける練習をしておくように、とスチープンが手紙に書いていたが

我々は単なる冗談と解釈していた…。新聞記者が帰ってしばらくすると、フカタネ市街の方からエンジン音が近づいてきた。ヒューイ社製の卵型の機体を持つ小型ジェット・ヘリコプタだった。一見非常に小型に見えるこの機体は、前にパイロットを含み三人、後ろに三人乗れ、1トンの重量を持ち上げられるという。ただし、荷物用のトランク(英国系の英語ではboot)がないため、運搬する機材が多い場合は後部座席を荷物室にする。今回のフライト予定は次のようなものであった。まず、最初のフライトでDSIRの二人が前に乗り、後部座席にDSIRの観測機材を乗せて島内の2箇所に降ろす。ヘリコプタは空港に引き返して、我々二人と残りの機材を乗せて、我々の記録装置設置予定地点(第2図のWCNT)に運ぶ。さらに、我々と我々の機材を降ろしたヘリコプタは、空港までの往復の間に作業を終えたDSIRの二人を別の2箇所に運ぶ。これらの島内での飛行が終わると、ヘリコプタは我々を降ろした場所に戻りエンジンを止める。この日は午後別に別の予約が入っているため、12時半には我々4人を乗せて島を離れて1時までには空港に戻るということだった。

スチーブンとブラッドの二人を乗せてヘリコプタが飛び去ったあと、我々は非常着水時用のオレンジ色の防寒着と救命胴衣を身につけてヘリコプターの帰りを待った。幸い天候は晴、無風であったが、我々は二人ともヘリコプターは初めてということで多少の不安があった。「ヘリコプターは下降気流に出くわすと時には数百mも急激に高度が下がる。昔、空中磁気探査にヘリコプターを使っていた頃は、入所した地球物理系の新人はまず一度ヘリコプターに乗せられて使いものになるかをテストしたものだ」。真偽はわからないが、先輩から聞かされた話を思い出す。

待つこと1時間弱、ついに我々が飛ぶときがきた。想像以上に滑らかな離陸と安定した飛行により、不安はすぐに消えた。空港を飛び立つと目の前に前方後円墳(もしくはひょっこりひょうたん島?)のような形をしたホエール島が迫る。その向こうの海面にはもやのようなものがかかって真っ白になっている。そのもやの上空にぽっかりと白い雲が浮かんでいた。近づいていくとその雲は噴煙の頂部らしく、その真下にホワイト島があった。この日はほぼ

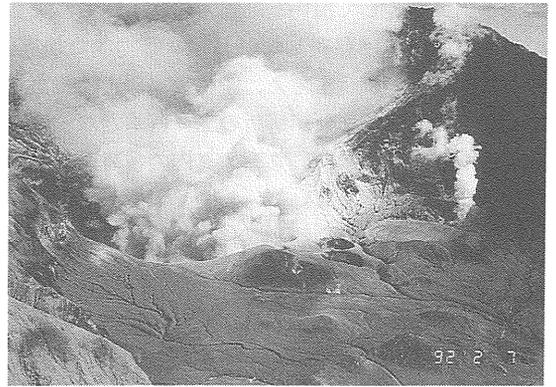


写真3 ヘリコプターからみたホワイト島火山の火口
火口右側の噴気はNoisy Nellieと呼ばれる噴気口。撮影は1992年2月7日

無風であったため、火口から上がった噴煙は島のすぐ上に留まっており、その周囲に灰を降らせていた。島に近づくと、風を確かめるためにゆっくりと島の周囲を回る。リムを越えるように東側へ回って行くと、もうもうと噴煙を上げる火口が見える(写真3)。こうして上から見るとやはり外側の斜面は傾斜がきつい。ケーブルが予定通り引けるだろうか?不安が頭をよぎる。突然機体が大きくパンクながら目の前に島が迫る。いよいよ着陸である。着陸地点は鞍部に当たり予想よりかなり広々としていた。地面に近づくと機体を左右にゆすりながら地表の灰を吹き飛ばし、少し離れて舞上がった灰を避ける。このようなことを数度繰り返して地表をきれいにした後、ヘリコプタはホワイト島に着陸した。

最初の一步を踏む降ろす時、子供の頃見た月面に降りた宇宙飛行士の映像が脳裏をよぎった。実際に歩いてみると最近降りつもった火山灰が柔らかく足を受けとめてくれる。しかし、感動に浸っている時間はない。すぐに我々の観測機材を降ろす。手前側の荷物を降ろし終わり、ヘリコプタの後ろ側を回って反対側に移動しようとした時、何かを感じて足を止めた。よく見るとヘリコプタの機体後部にはタービンの排気口があり、高温高圧の排気が噴射されている。間一髪、危ないところであった。

ヘリコプターの離着陸地点から少し離れた所に記録装置の設置拠点を定め、観測機材を運び記録装置にバッテリーをつなぐ。降灰がひどく、動作確認用の液晶表示板がすぐに見えにくくなる。一応無事に動作することを確認した頃、スチーブンとブラッド

がヘリコプタで戻ってきた。すぐにスチープンの先導の下、北側斜面に向けてケーブルを引き始めた。記録計設置点からなるべく直線状になるように、また、崩壊の危険を考えて、初めはクレータリムを避け山腹部にケーブルを延ばした。平坦な部分を過ぎて北斜面に入ると大きな石がごろごろしている部分、深いガレーを横切る部分が多く、急に歩行スピードが落ちた。ケーブルは100 m 巻きであり、これを次々と接続していく。200 m や400 m の接続部はちょうど大きい岩が重なっている場所の真下であり、ケーブルのコネクタを接続している間は気持ちのいいものではなかった。また、リムに近いほどガレーは浅く歩きやすい。そのため、その後のケーブルルートは徐々にクレータリムに近づいていった(写真4)。

この日は、北側斜面の測線の500 m 分のケーブルと地震計2台を設置して記録を開始したらもう島を離れる時間となっていた。再び赤いフライト・スーツに身を包み、ヘリコプタで帰路につく。短い時間だったが、降灰がひどく目がゴロゴロとした感じで痛い。ヘリコプタの風防ガラスも灰で汚れ視界が悪かった。少し吸い込んだ火山灰のせいか、のどが渴いたので帰路、道沿いの店に寄り、特大アイスクリームを買って食べた。以後、ホワイト島からの帰路のアイスクリームは恒例となった。ロトルアの火山研究所に戻ったところ、秘書のマーガレットさんが“special smell of White Island”と顔をしかめた。衣服にはすっかりホワイト島の独特にお

いがしみつき、洗っても洗ってもとれなかった。また、目だけではなく、口や耳の中まで灰が入っており、シャワーを浴びてもなかなかすっきりとしなかった。

5. 観測システムについて

観測機器の設置、テープ交換と保守、測量、そして機材の撤収等のために、ホワイト島行きは合計10回に達した。我々の観測網は、島での滞在時間、機材の状況、それまで収録したデータの状況等に応じて段階的に整備していった(第3図)。最終的に落ちついた観測網が第2図に示したもので、この配置で最後の2週間の観測を行っている。全体として、ほぼ当初計画通りのデータを収録できた。

我々の観測システムについて少し説明を加えよう。

地震計：マークプロダクツ社製 L4C 上下動地震計と L-4C-3D 3成分地震計を用いた。通常の微小地震観測では、地震計設置点に適したしっかりとした岩体を探すことが基本である。しかし、ホワイト島は大量の灰を吹き上げるタイプの噴火を繰り返しており、地表面はすべて火山噴出物で厚く覆われている。当然のことながらしっかりとした岩体は露出していない。また、石膏などを地震計固定に使おうとすると、水までもヘリコプタで運搬する必要がある。このため、郷に入っては郷に従えとの格言により設置方法は DSIR の方法に倣った。すなわち、3成分地震計は約50 cm 四方の穴を掘ってコンクリートパネルを敷き踏み固めた上に地震計を置き、あとは火山灰で埋め戻してしまう。上下動地震計は穴を掘って埋めてしまう。設置の際には地震計をビニール袋で包んでから埋めることにより腐食を避ける。結果的には、この島のような条件においては簡単な割には有効な設置法であった。

プリアンプ：地震計の出力する微弱な地震波形信号をケーブルで長距離伝送するために、プリアンプ(前置増幅機)を使用する。これまでの国内調査では、地質調査所の微小地震グループの一員である当舎利行氏が設計した自作プリアンプを主に使ってきた。今までの野外調査の経験から、回路設計についてはほぼ問題はなくなっている。しかし、アンプ容器としては、手軽に入手でき加工も簡単な一般家庭

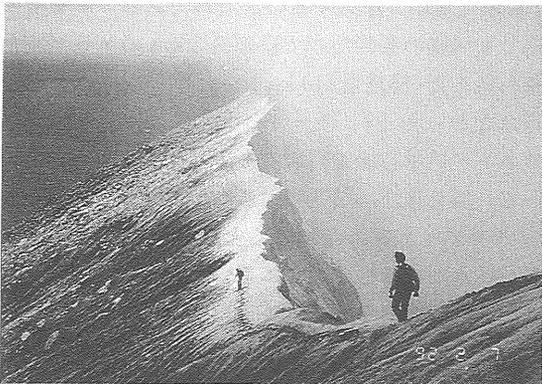
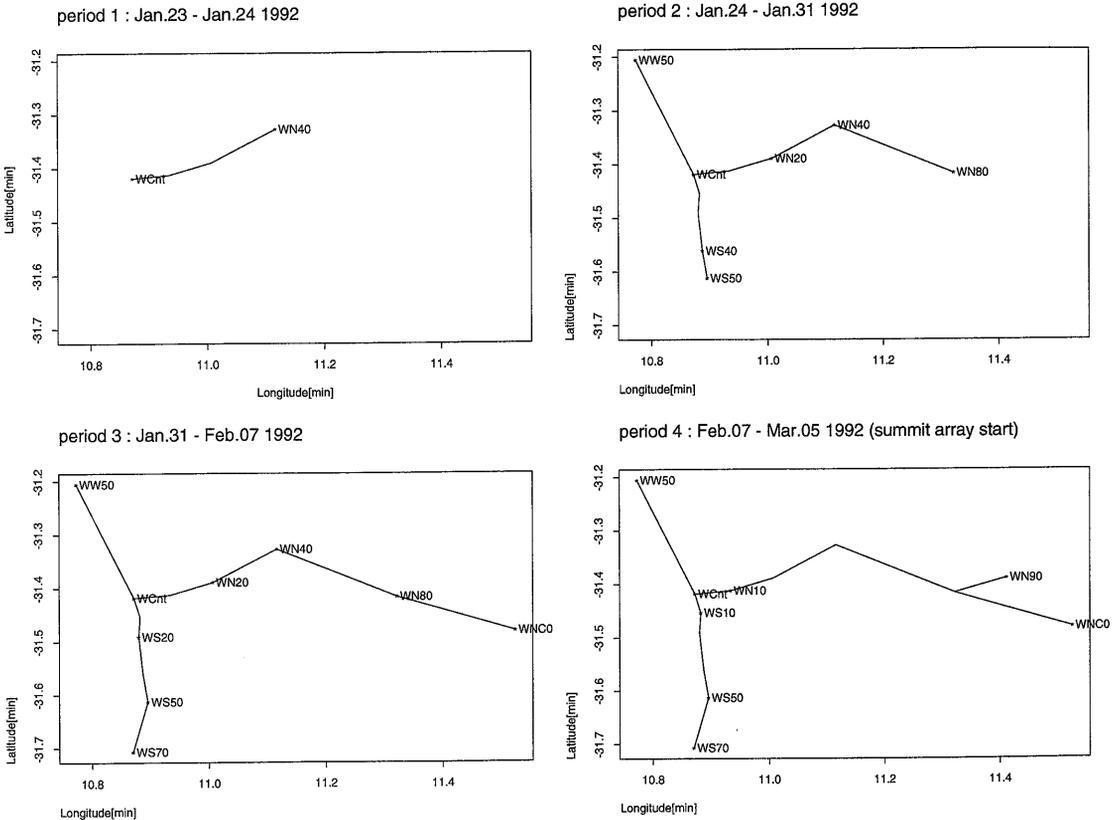


写真4 北側斜面のクレータリム沿いを行く。
右側の断崖の下が噴煙を上げ続ける火口。1月23日に設置したWN40点は写真左端付近。写真中央に見えるのがスチープン・シャーバン氏。



第3図 観測期間内の観測点の変更

向けの食品保存用プラスチックケースを使うことが多かった。しかし、ケーブルの引き出し部等の防水性を確保することが難しく、また輸送中にバッテリーが中で動き、乾電池と回路をつなぐ電線が切れたりするトラブルもあった。しかし、国内ではビニール袋をかぶせ、樹木などを頼りに固定して水の浸入を防いだり、現場に到着してから乾電池と回路を接続する等の工夫により使いこなしてきた。しかし、ホワイト島では、植物も生えていない急斜面に設置するため地面に埋める可能性が高く、防水・防触に配慮しなければならない。また、島内での作業時間は限られているため、できるだけ現場での作業を減らす必要があった。このため、自然電位測定用の電極や海底地震計用のタイマー容器等を参考に塩ビ管を使った新しいケースを作った。蓋はネジをきって間にOリングを入れ防水構造とした。実際の製作には地質調査所の試作課の協力を仰ぎ、素晴らしいケースを使うことができた。これは大成功であり、設置・回収も容易で、観測期間中プリアンプに関す

るトラブルは全くなかった。

ケーブル：我々は地熱地域での微小地震観測を行う場合、通常数キロメートル程度の範囲内に地震計を多数配置している。この程度の距離では、時刻精度を考慮すればケーブルを用いて地震計からの信号を1箇所を集めて記録するのが有利である。ホワイト島でも同様の条件なので総延長3 kmのケーブルを持ち込んだ(総重量240 kg：これ以上を運送する予算はなかった!)。ケーブルは100 m長、5対のツイストペア単芯線で両端には防水コネクタがついている。持ち運び、展開に手ごろな大きさ重さで、分岐ケーブルと組み合わせると自由自在に展開できる。これまでの観測経験に基づいて作ったもので非常に機動性のあるケーブル・システムである。これがホワイト島でも威力を発揮した。観測中のトラブルは皆無であったし、展開に応じた地震計の接続変更、撤収作業も速やかにできた。ケーブル使用に伴う一般的な問題は、人間の活動、獣害、ノイズの混入等である。日本国内では、10 m近くのケーブ

ルを牛に食べられたり、ウサギ・ネズミにケーブルを寸断されたこともある。ホワイト島では、敷設したケーブルは降り積もる火山灰によって自然に埋設されていき、また、ケーブルの敵である人・ウシ・ウサギ・ネズミ等がいらないという好条件もあり断線することもなかった。唯一の気がかりは海岸近くに群棲するカツオドリ達であったが彼らの関心はもっぱら海面にあり、島内で見かけることはなかった。ノイズ源となる都市なども近辺になく、ホワイト島はケーブル観測のためにある場所のようにさえ感じられた。これがニュージーランド本土での観測であれば、ウシ・ウサギ・ネズミに加えてヒツジ・オポッサムという強敵がいるのでケーブル利用には特別な配慮が必要であっただろう。

記録装置：我々の記録装置は、主に地熱地域での微小地震観測を中心に改良を進めてきた DTC-7000 型である(写真5)。広域的な地震観測、地熱地帯における高密度・高精度な観測、屈折法探査への応用等の多用途に使える記録装置である。1台の記録装置で6成分までの入力信号を16ビットのデジタル・データとして記録する。隣接して設置した場合には各記録計の時刻及びトリガーの同期をとることが可能であり、多成分記録計としての使用が可能である。外部のラジオからの JJY/NHK 時報等の信号及び他の時計からの時刻信号と内蔵時計との時刻誤差測定機能も持っている。ホワイト島では、記録装置3台を接続して時刻もトリガーも同期させた18チャンネルの記録計として使用した。

日本の地熱地帯で観測をするときには、屋内や軒先などの比較的条件の良い場所に設置し、高精度時

計を使う必要から商用電源を用いることが多い。腐食性のガスもある完全な吹きさらしの野外に何台もの記録装置を置き、バッテリーで長期間動作させることは我々には初めての体験であった。また、太陽電池の本格的な使用も初めての経験であった。観測期間中には、想定しないトラブルでバッテリーが上がり、記録計の交換が必要となったこともあった。島に設置した記録計のコネクタは、すぐに腐食がはじまって灰がこびりついた。

DSIR の観測システム：DSIR 側の観測点に使用した地震記録装置は、EARSS (Equipment for the Automatic Recording of Seismic Signals) というニュージーランド国内全体規模の地震観測用に開発された装置である(写真6)。この装置は、3成分の地震波形信号のトリガー記録が可能である。トリガー方式として、周波数領域の2つのバンドにてトリガー判別をしていることが特徴的である。全国規模で展開したときの時刻精度を保証するために、ラジオの時報信号から自らの時計の誤差を計測する機能を持つ。今回使用したのは、このようなナショナル EARSS と呼ばれるテレメトリー観測点用の記録装置を余震観測用にポータブル化したものである。地震計1台に対して記録装置1台を組合せる使い方が標準的であり、我々のようにケーブルを接続しての使用は想定していないようである。彼らは、5台の EARSS (1台は常設のテレメトリー点である WIZ 用でロトルアまでテレメトリーされた信号を記録)の他に、波形から読み取った初動到達時刻等のデータのみを記録する RATS という記録装置も3台使用した(EARSS について詳しくは Glendhill



写真5 地質調査所の地震データ記録装置



写真6 DSIR の EARSS 地震データ記録装置

他, 1991).

時刻同期: 我々のデータと EARSS で記録したデータとの時刻同期をとるため, 我々の記録計の1台には, ラジオの時報信号から正時にパルスを発生させる回路を接続し, この信号と記録装置の時計との時刻差を計測してデータ中に書き込むようにした. スチープンから EARSS の時報判別部分の回路図とニュージーランドのラジオ時報を録音したテープを送ってもらい, 基本的にはこれと同一の回路を作って, 日本でテストしていった. これらの作業は, 記録装置を製造しているコロンビア貿易の松原忠泰氏の協力を仰いだ. 日本の NHK 等の時報は, 毎時59分57秒から3回440 Hz の短い音がして, 正時(00分00秒)に880 Hz の長い音がする. つまり, ピッピッピビーという時報の高い音のビーが正時である. また, 通常この間は他の音声は重ならない. ニュージーランドの放送では, 59分55秒から日本の時報よりやや高い1000 Hz の短い音5つの後に同じ1000 Hz の長い音が鳴って正時を示す. つまり, ピビビビビビーと6回鳴る. この間, 番組が中断されず続いていることも多い. また正時以外に時報が鳴ったり, 人間の声(女性の声は1000 Hz 付近にピークを持つ場合が多い)や音楽等を時報と勘違いしてしまうことも多い. このため, EARSS では時報の来る前後以外は回路の電源が切れる仕組みとなっていた. 我々がこれを知ったのは観測開始後であったため, 現地で対応する余裕はなかった. このため時報以外での誤作動も多かったが, これらは容易に判別できるため, 2月7日以降のデータについては10ミリ秒の精度で時刻差を測定できたと思う. この時刻精度は記録計の時計の安定度(仕様上は 10^{-7})と放送時刻の安定度, 電波伝播の安定度のすべての影響を含んでいるが, この程度が限界かと思う. これ以上の精度を要求するならばやはりケーブルで接続して同期をとらなければならない.

測量及び座標系: 短い滞在時間のうちに効率的に地震計の位置を求めるために, 測量には2つの方式を用いた. 記録計周辺の高密度に配置した観測点については, DSIR のセオドライトとジオディメータを用いて山頂部の三角点から見通しのきく範囲で直接位置を求めた(写真7). これらの機材の提供, 座標計算は Peter Otway さんのお世話になった. 見通しのきかない遠くの点の位置を求めるためには,

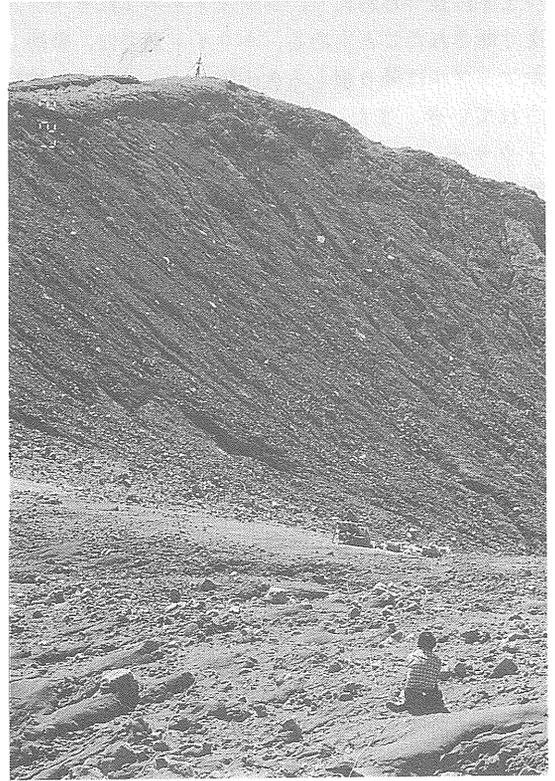


写真7 ジオディメータを使った測量(WS05点)
山頂の三角形の台が三角点で, その下でブラッドリー・スコット氏がジオディメータとセオドライトを操作している
手前は地震計設置点にレーザ・リフレクタを構える杉原. その奥に太陽電池板と記録装置が見える.



写真8 GPS を使った測量(WN90点)
左手前に見える円筒がブリアンプでその脇に垂直に地面に立つケーブルの先が地震計. その奥の背負子に積んでいるのが GPS 装置. 一番上に人工衛星からの電波を受信するためのアンテナが置いてある.

日本から持ち込んだ測位用 GPS を使用した(写真 8)。ニュージーランドの座標系は New Zealand Geodetic Datum 1949 と呼ばれるもので、GPS による WGS84 座標への変換には、DSIR ウェリントンからワイラケイにたまたま出張していた G. Caldwell 氏のプログラムを利用させていただいた。

6. 滞在中の噴火

1月25日の噴火

我々は1月23日に続いて24日にもホワイト島へ行き、観測機器の設置を行ない、24日より実用規模の観測網での記録を開始した。25日、26日は週末にあたり、到着以来の忙しい毎日で疲れた体を休めた。27日の朝食時に、テレビのニュース(実際は画面は1チャンネルのシンボル・マークを表示しているだけで、内容はラジオのニュースと同じなのだが…)から、ホワイト島、ヘリコプタ、噴火…と気になる言葉が流れてくる。ラジオのニュースを無意識に聞き取るまでのヒヤリング能力のない我々がハッと注意し始めた時には次のニュースとなっていた。ワイラケイに行く前に新聞を買ってみると、25日の午後2時45分頃に噴火があり、4人の観光客を乗せて同島に着陸していたヘリコプタの上に25mmの厚さの降灰があり離陸できなくなった、とのニュースであった。パイロットの名はロバート・フレミング。この2日間ホワイト島に行ったヘリコプタであった。新聞にはブラッドのコメントも載っていた。

後日パイロット本人から聞いたところ、観光客を連れてクレータを歩いていたところ突如噴火が起こったとのことであった。すぐさま肩の上に15mm程の火山灰が積もったが火山灰のみを吹き上げるタイプの噴火であり、ヘルメット、ガス・マスクを用意してあったので観光客を落ちつかせることをまず心がけたという。ヘリコプタにも厚く灰が積もり、そのまま飛び立つことはタービン等の破損につながるため、ロトルアから救援のヘリコプタを呼んだという。彼のヘリコプタは、救援機に吊り下げもらい北島に戻ったが、一部の部品を交換する必要が生じ、部品調達のため二週間ほど使えなくなった。

この時の行動でもわかるように、ロバート・フレミング氏は信頼感のもてるパイロットであった。

DSIR のメンバーは、ホワイト島へ行く時に彼以外のパイロットを使いたがらない。我々も2度ほど他のパイロットで飛ぶことになったが、彼の操縦が最も滑らかで安心感が持てた。慎重かつ大胆な飛行はホワイト島へのフライト300回以上という経験を感じさせた。親指を立てて片目をつむり OK のサインを出す姿は今も記憶に残る。

我々としては、噴火のデータがうまく記録できたかとても気になり、すぐさまテープを回収したいところであったが、天候の関係等もあり、1月31日まで待つこととなった。回収してきたテープからデータをパソコンに転送し記録を見ると見事に記録できている。我々は観測で期待していたデータの一つを早々と手にいれることができた。この後の2月3日にも噴火があり、新聞に小さな記事が出た。

2月20日の噴火

ホワイト島では、噴火により吹き上げられた火山灰の多くは火口周辺に降り、時間と共にまた火口を塞いで水蒸気などのガスを蓄積させまた噴火を起こす。また、リムの内側に降った雨は、逃げ場がないためにほとんど火口へ流れ込む。このため、ニュージーランドに来てからも、何回かの噴火が報告されていたが雨の数日後であることが多かった。

我々は、2月19日にクレータ内で常時微動の移動観測を行っていた(写真9)。写真1でも判るように、この日は火口からは大量の灰が吹き上げられている上に風向きが最悪で、クレータ内の降灰がひどく作業ははかどらなかった。週末に一部で洪水になったほどの大雨があった後だったのでもうそろそろ噴火があるのではないかとブラッドが移動観測に向かう我々を脅かしていた。

翌20日、19日の作業結果を連絡しようとブラッドに電話して噴火があったことを知った。その日の夜のTVの全国ニュースでも報道され、翌日の新聞では1面トップで報道された。冬季オリンピック女子回転競技でニュージーランドの選手が銀メダルを獲得したニュースと同等以上の破格の扱いだった。小さいながら日本の一部の新聞にも記事が載った。これには特別な事情もあった。噴火の瞬間の目撃者が70人以上もいたのである。前日ロトルアで行われた火山防災関係シンポジウムの巡検の一行だった。しかも4人はクレータの中、噴火口から200mの地点にいた。防災関係者70人をのせた船もホ

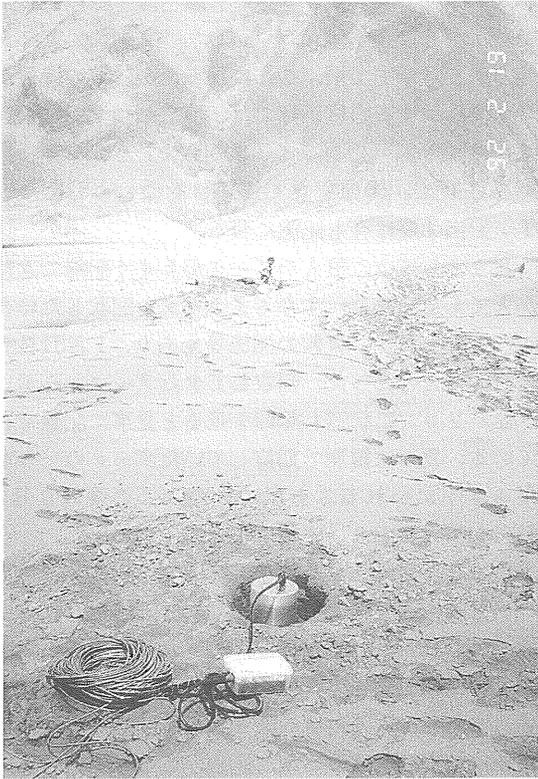


写真9 ホワイト島サブクレーター内における常時微動観測
手前に見える円筒が3成分地震計。箱はプリアンプ。写真奥の人影の点が隣接した地震計設置点。

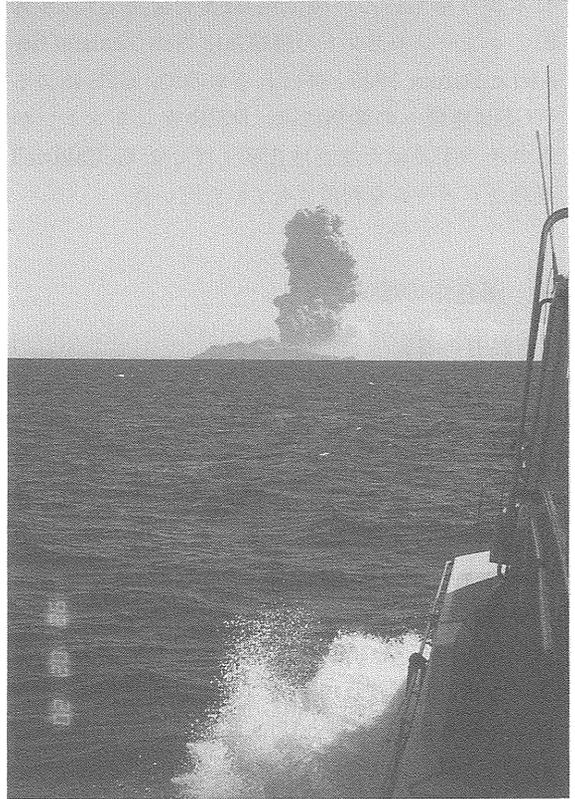
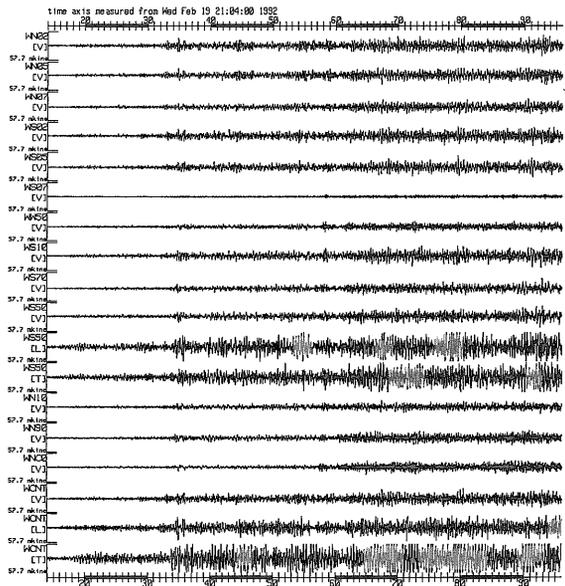


写真10 海上から見た1992年2月20日のホワイト島火山の噴火
DSIRのI. A. Nairn氏撮影

ワイト島へ向かっていた。噴火が起きたとき、船は島の10 km 手前まで来ていた(写真10)。ちょうど視野に大きく島の姿がはいる地点で乗客も島に注目している時だ。この時すでに4人はヘリコプターで島に到着し、クレータに向かって歩いていた。この4人の中の1人は火山地質学者のホートンさんであった。彼は当日の巡検案内者で、ホワイト島の噴火活動についての論文(Houghton and Nairn, 1991)を国際火山学会誌に発表したばかりのホワイト島火山の火山地質の第一人者だ。突然2000-3000 m まで吹き上がる噴煙を目の当たりにした驚き、4人の安否が確認されるまでの心配の大きさは想像に難くない。しかも船には数人の報道関係者も同乗していた。このことが記事の取扱いを大きいものにした。実際ここ2-3年で最大規模の噴火だった。我々の記録計は噴火開始直前から10分間のデータを記録していた(第4図)。



第4図 1992年2月20日の噴火時の地震データ

第1表 ニュージーランド滞在期間前後のホワイト島火山の噴火活動

DATE	TIME [D.T.]	WIZ	DTC	boat	comment
Jan 17	09:32	○	-	○	ash fall at Whakatane
21	03:12	○	-		
23					start recording
25	14:38	○	○		helicopter trapped
31	21:06	○			
31	21:17	○			
Feb 1	12:54	○	△		
1	18:09	○	△		
4	07:36	○	○	○	photo
4	13:16	○	△		
5	07:37		-	○	
14	08:18	○	-		
20	10:04	○	○	○	observed by BFH and party about 200 m above crater rim 2000 m eruption column along Bay of Plenty, many observer
22	13:26	○	△		
24	02:33	○	△		
28	13:57	○	△		
	20:34	○	○		
29	07:37	○			
	07:54	○	△		
	09:01	○	△		
	12:54	○			
	14:14	○	△		
	21:39	○	△		
	23:14	○			
Mar 1	08:47	○	○	○	
3	18:56	○	-		
4	15:27	○	-		
5	14:15	○	-		remove recording system
6	19:13	○	-		
7	07:05	○	-		
13	12:45	○	-		
15	13:48	○	-		

WIZ : DSIR Rotorua にテレメータされた WIZ 点の記録で E-type と判別

DTC : ○ GSJ recording system で長時間レコード

△ GSJ recording system で短時間レコード

- Recorder stopped (Tape end etc.)

boat : ホワイト島周辺のヨット/ボートでの目撃

WIZ, boat は, DSIR MONTHLY REPORT : WIZ 92/01, 92/02 を参照

7. 観測によって得られたデータ

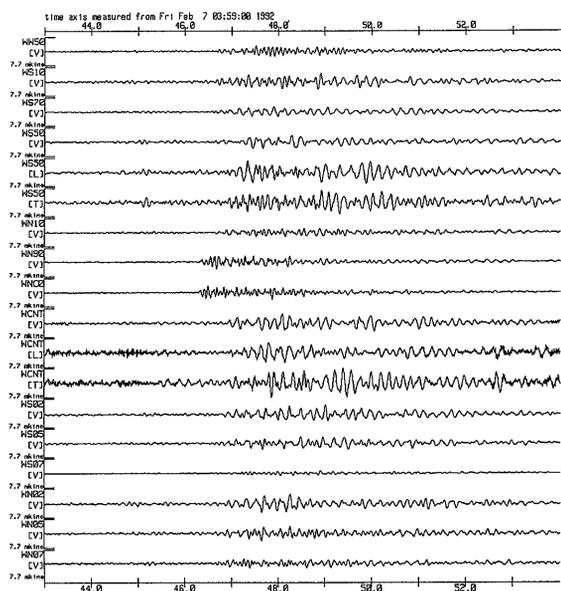
様々なタイプの地震記録

ホワイト島で発生する地震については、テレメータ観測点の記録をもとに、火山地域でよく認められるように A 型地震(構造的な通常の地震に似た地震)、B 型地震(火山地域特有の長周期地震)、E 型地震(噴火に伴う地震)の他、A 型と B 型の中間的な周波数成分を持つ C 型地震及び極微小地震の群発した microearthquake とに分類がなされている(Latter 他, 1989). 今回の観測ではこのすべてのタイプの地震を記録することができた。

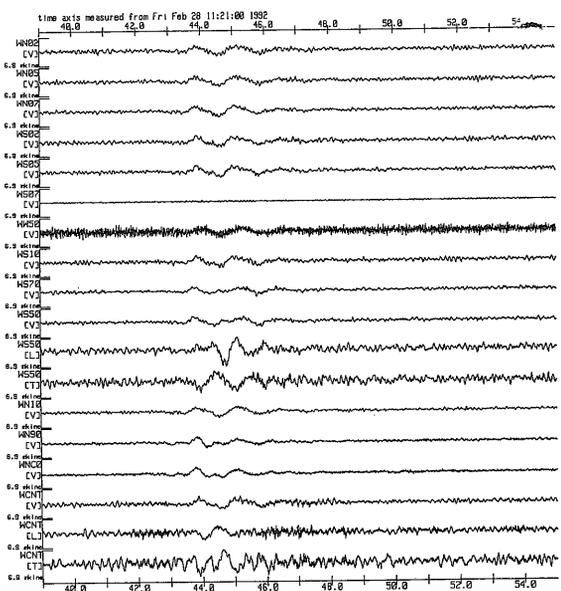
噴火の一部については前に記したが、このほかにもいくつかの噴火地震を記録した(第1表)。ホワイト島は無人島であるため、すべての噴火が把握されているわけではない。表に目撃者のあった噴火との対応を示す。噴火自体いくつかのバリエーションがある。例えば 2 月 20 日以降の噴火ではかなりの火山弾が放出されている。その時の地震記録が第 4 図であるが、噴火地震としては初動が明瞭である。

A 型地震は、比較的通常の地震と似た第 5 図のような地震である。卓越周波数は 5 Hz 程度から 20 Hz 程度と高く、観測点毎に波形・振幅がかなり異なる。観測記録を見た限り、第 2 図の WNC0, WN90 等の火口に近い観測点に最も早く波が到達している地震が多かった。この 2 観測点では波形も単純なパルス的なものが多い。これに対して、WCNT 等の山頂部では後続波が加わり、より複雑な波形となっている。全体に S 波は不明瞭ではあるが、初動分布・波形等を考慮するとこれは通常の断層タイプの震源を持つ地震と解釈できる。

B 型地震は火山特有の地震であり、日本でも各地の火山で注目を集めている。ホワイト島においても時々非常に典型的な B 型地震が発生する。第 6 図は我々が観測した記録例である。観測点全てで似たような波形・振幅で記録され、ホワイト島全体がブルブルと震えたような地震である。高周波成分を落としてみるとその特徴はさらに明らかになる。スチープン等の解析例だと、そのスペクトルは明瞭に二つのピークを持つことがあり、発生メカニズムを考える上で興味深い。第 6 図の地震も、1 Hz 付近の周波数が卓越しているが、2 Hz 付近にもピークを



第5図 記録したA型地震の例



第6図 記録したB型地震の例

持っている。今回は、時刻精度の良いデータが記録できたので、従来よりも少しその正体に近づけるかも知れない。

A型地震とB型地震は数は少ないながら一応今までに震源決定されたことがあった。しかしC型地震とmicroearthquake(第7図)については波形が複雑で従来のアナログデータや少数の観測点では

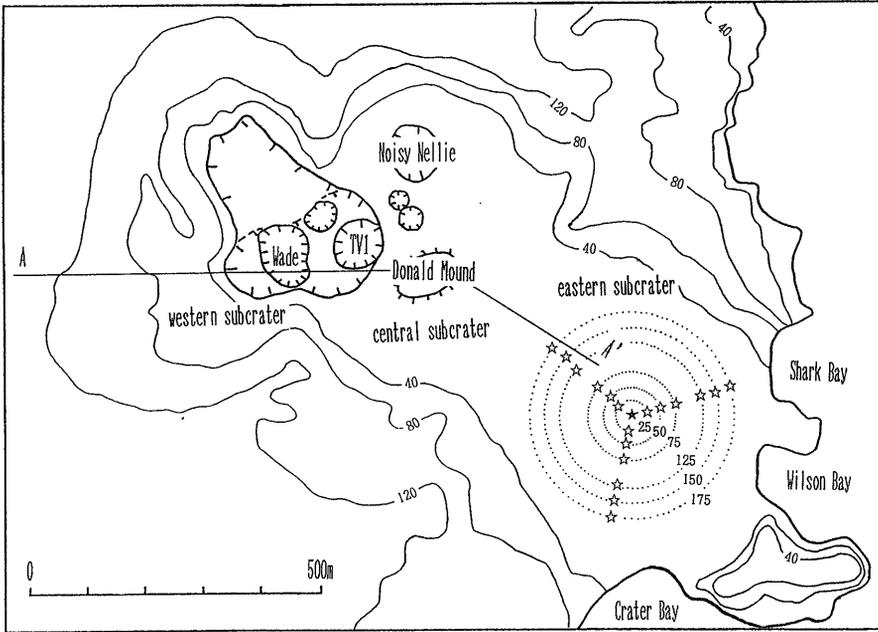
解析が困難であった。今回の観測によって、その実態に迫れることを期待している。microearthquakeについては、いくつかの観測点では極めて明瞭なパルス状の記録を示すことがある。従ってこの地震の正体はA型地震と同様な断層タイプの地震ではないかと想像される。

現段階までの解析作業中で、試しにいくつかの地震について我々のデータだけから粗い解析を行ってみると、現在の火口及びそのやや東側の Noisy Nellie と呼ばれる噴気口の周辺に震源が求まった(第8図)。また、2月20日の噴火、B型地震等について、山頂部に設置した小規模のアレイにより記録したデータから地震波の到来方向を解析してみたところ、やはり火口方向から波がきていることを示す結果を得ている。このようなアレイのデータも用いてより多くの地震について解析し、また日本・ニュージーランド双方のデータを用いてより信頼度を上げて行ったときに、データ全体から何が見えてくるか、今後の解析が楽しみである。

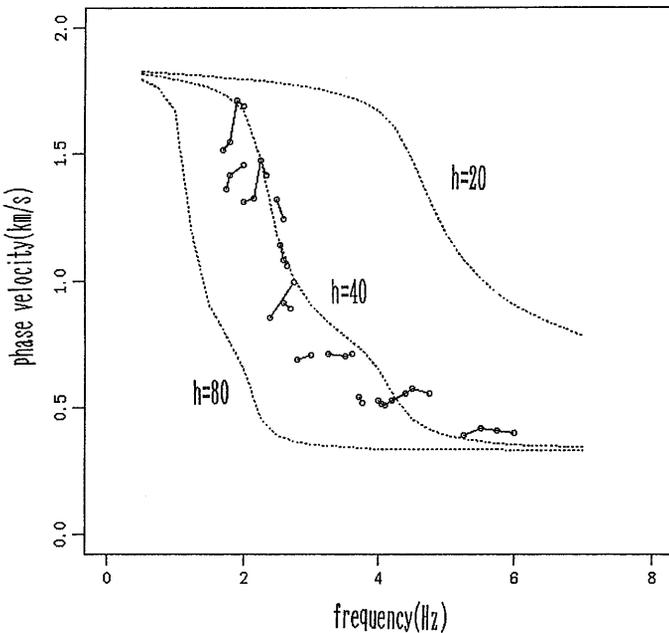
常時微動の移動観測

地震調査に対する期待の一つは地下構造を推定する手がかりとしてであろう。地震波速度構造の推定は非常に興味ある課題だ。震源位置決定のためにもおおよその速度構造モデルが必要になる。ホワイト島地域では残念ながら人工震源の記録は得られていない。すぐ近くの岩礁がニュージーランド軍の演習場になっているので爆弾の爆裂音を震源として利用できないかという話もあった。実際1月24日には我々の作業中数機の空軍機がホワイト島のすぐ近くの岩礁を標的にしてミサイル射撃演習をしていた。スチーブンはこれで僕たちは空軍の50%を見たことになるかと冗談を言っていた。ブラッドは山頂まで登って見学していたが命中率が悪いと嘆いていたので震源としては不適當かもしれない。

今回の観測では、速度構造についての手がかりを得るために、常時微動による空間自己相関法を試みた。この方法はAki(1957)で初めに示され、最近ではハワイのキラウエア・イキ火口近くで半径50mの半円内に100個もの地震計を並べた極めて高密度のアレイ・データにも適用している(Ferrazzini and Aki, 1991)。この方法の魅力は最低4台の地震計でも計測できるということである(岡田ほか, 1990)。観測波形から空間自己相関計数を計算して



第9図
サブクレーター内における移動観測：
移動観測点位置図



第10図
サブクレーター内における移動観測：
周波数と位相速度の分散関係

最後に、今回の観測のためにお世話になったニュージーランド・日本の方々から心からお礼を言いたい。特に、ワイラケイの電気技師であるデブさん、総務のドンさん、ダイアンさん。そして、何よりも共同研究者として以上に我々を迎えてくれたスチーブンとブラッドに感謝したい。

[なお、本観測は平成2年度科学技術振興調整費

個別重要国際共同研究により行われた。また、DSIRは1992年7月のニュージーランド政府の組織改革により再編され、その地球科学部門はGNS (Institute of Geological and Nuclear Sciences) という機関になっている。]

文 献

Aki, K. (1957): Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 35, 415-456.

Clark, R. H. and Cole, J. W. (1989): Volcanic monitoring and surveillance at White Island before the 1976-82 eruption sequence. *New Zealand Geol. Surv. Bull. no. 103*, 9-11.

Ferrazzini, V. and Aki, K. (1991): Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremor and gas-piston events observed by a near-source array. *J. Geophys. Res.*, 96, 6199-6209.

Gledhill, K. R., Randall, M. J. and Chadwick, M. P. (1991): The EARSS Digital Seismograph: System Description and Field Trials. *Bull. Seis. Soc. America*, 81, 1380-1390.

Giggenbach, W. F., 佐藤 興平, Hedenquist, J. W. (1991): ニュージーランド White Island のマグマ-熱水系. *地質ニュース*第438号, 1-4.

Houghton, B. F. and Nairn, I. A. ed. (1989): The 1976-82 eruption sequence at White Island volcano (Whakaari), Bay of Plenty, New Zealand. *New Zealand Geol. Surv. Bull. no. 103*, 139p.

Houghton, B. F. and Nairn, I. A. (1991): The 1976-1982 Strombolian and phreatomagmatic eruptions of White Island, New Zealand: eruptive and depositional mechanism at a 'wet' volcano. *Bull. Volcanology*, 54, 25-49.

Latter, J. H., Scott, B. J. and Dibble, R. R. (1989): Seismic activity associated with the 1976-82 eruption sequence at White Island volcano. *New Zealand Geol. Surv. Bull. no. 103*, 85-106.

Luke, J. (1959): History. White Island, New Zealand D. S. I. R. Bull. 127, 14-24.

岡田廣・松島健・森谷武男・笹谷努(1990): 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法. *物理探査*, vol. 43, 402-417.

Sherburn, S. and Scott, B. J. (1988): A Short-term Microearthquake Survey on White Island Volcano. *Research Report No. 215*, Geophysics Division, D. S. I. R. 16p.

Sherburn, S. and Scott, B. J. (1992): B-type Volcanic Earthquakes at White Island. (準備中).

Stern, T. A. (1986): Geophysical Study of the Upper Crust Within the Central Volcanic Region, New Zealand. *Late Cenozoic Volcanism in New Zealand*, The Royal Soc. New Zealand Bull. 23, 92-111.

玉生 志郎(1991): ニュージーランド ホワイト島の火山活動と科学掘削計画について. *地質ニュース*第438号, 52-56.

NISHI Yuji and SUGIHARA Mituhiko (1992): Observing microearthquakes at White Island Volcano, New Zealand

〈受付: 1992年5月29日〉

地学と切手

ニュージーランド北島の
ホワイトテレスとピンクテレス

ロトルア・カルデラの東南現在ロトマハナ湖のところに、1886年以前ピンクテレス、ホワイトテレスと呼ばれる温泉沈澱物のテーブルがあった。

一般に温泉水から沈澱したものをシンターと言われるが、普通は珪酸(SiO₂)である。珪酸は温泉水からの晶出速度が大変早く、純度が高いと白色のオパールとなる。不純物、たとえば黄鉄鉱が混ると暗灰色となり、第二酸化鉄が入るとピンクとなる。

ロトマハナ湖の場所は、かつては広い谷間であり、その一部に古ロトマハナ、ロトマカリリの2つの沼があった。古ロトマハナの北東岸にホワイトテレスがあり、1~8フィートの段があって全体で80フィートの高さ、純白のシンターからなり、頂部には間欠泉があった。3エーカーの広さがあったという。

一方ピンクテレスは古ロトマハナの西岸にあっ



て、湖面から60フィートの高さがあり、プラットフォームの広さは100×100ヤード、全体にサーモンピンクカラーを示していたと言われる。

1886年6月10日早朝数時間にわたったタラウェア火山の噴火は、主に玄武岩質のスコリアの噴出であり、北東-南西方向の8 kmにわたる山体の地割れにクレターが生じ、南西の古ロトマハナに達した。そこでマグマは地表水と反応して横なぐりの爆風を生じ、約100人が死亡した。この時にホワイトテレスは埋没し、ピンクテレスは吹きとばされた。

9Pは1898年発行のピンクテレス、1Pは1900年発行のホワイトテレスの切手である。ホワイトテレスは1898年にも4P切手が発行された。(P.Q.)