

南極昭和基地周辺における地下構造調査と地震観測

伊藤 潔 (元京都大学教授)・金尾政紀 (1989 年卒)

1. はじめに

南極観測における人工地震による地下構造調査と自然地震観測について、京大関係者の貢献について述べる。ただし、南極観測は全日本的な立場で実施されているので、京大の貢献だけを取りあげるとは考えたこともなかった。従って、観測の概略について記述し、具体的な貢献については最後にまとめて述べる。地震観測および地下構造調査について、京大関係者が数多く参加してきたことは、別表でもわかるとおりである。

2. 南極昭和基地付近における人工地震による地下構造調査

2-1. 1979-1981

本格的な人工地震による地殻構造調査は 1979-1981 年にかけて、第 20 次夏隊、第 21 次越冬隊および 22 次夏隊によって初めて実施された。当時、南極大陸の構造調査は米国籍の地下 10km まで程度の多点における調査、ソ連隊の 2 カ所におけるモホ面までの調査結果であった。ただし、ソ連隊の調査は片側測線から推定した速度断面だけが公表されており、詳細はわからないものであった。南極大陸における地震探査測線を設定しての本格的な地殻全体の構造調査は最初であった。

この地下構造調査は、爆薬を用いる屈折法調査で、深さ 30-40km のモホ面までの構造を求めるとを目的とするものであった。そのために、300km 程度の測線が必要である。当時の輸送力や人員の能力を考慮して、10km 程度の間隔で観測点を設置し約 30 点の観測点を配置することにした。20 次夏隊ではその準備として、海中爆破と氷床孔中でのそれぞれ 1t および 560kg の爆破を大陸氷床上 5km 間隔 10 点の観測によって、予備実験として実施した。発破点は大陸上の測線の一端と測線を延長した海中で、最遠点は 120km 程度であった。海中の爆破は十分最遠点まで届いたが、氷床中の爆破は 50km は十分届いたものの効きが悪かった。これらの結果、実施が可能なのはわかったが、測線が内陸に延びることで、ほとんどの事柄について計画の修正が必要であることも分かった。

21 次越冬隊で本格的な実験を準備し、大幅に計画変更をして実施した。使用する火薬の量が観測船「ふじ」の火薬庫では 1 回では運べないので、22 次隊が残りを運んで越冬開けに合同で続きの実験を実施することになった。測線は氷厚や重力などの測定もある昭和基地からみずほ基地まで約 270km にした。このルートでは過去にトラバース測量がなされており、同じ点を用いれば位置決定が十分でない場合も一応の結果が出ることもあった。実際には後述の衛星測位によって、トラバース位置の再測ができ、氷床流動のデータも得られた。

実験のためには、震源としての爆薬、その装填のための孔の掘削機と掘削方法、観測のため地震計とレコーダの輸送と設置方法、1/100 精度の刻時精度の維持のための機材と方法、観測点の位置決めなどが新たな検討課題になった。また、それぞれの機器が低温下において少数で正常に稼働するようにしなければならなかった。雪が固まっていく南極氷床では表面付近は密度が小さいので、爆破の効きが悪く、波の減衰も大きいので地震計を 10m 程度の深さに埋設する計画を立てた。アースがとれないので静電気によるノイズの影響などもわかっていなかった。これらすべてを、越冬中に予備実験を実施し、実際の実施日程に収まる程度に工夫することにして、種々の機器を準備した。レコーダは最低でも

1 ヶ月弱は連続記録できるものが必要であり、利用可能なものはアナログ直接記録方式、オープンリールのテープレコーダだけであったので、特注して製作した。電源には亜鉛燃料電池を用い注水することで稼働させた。レコーダは観測船への積み込み直前に完成し、越冬中に調整することになった。刻時に関しては、測線を3つに分け、高精度の時計3台を用い、基地からの無線連絡でこれらのマスター時計を較正し、その時計で観測点の時計を較正する方法で計画した。しかし、直前に、NNSS (Navy Navigation Satellite System) の時刻信号ができることがわかり、この機器を急遽購入して用いることにした。この機器は位置決定も可能で、天測で求める予定の観測点位置をも決定することができた。位置決定のためには太陽での天測の訓練まで行ったが、結局衛星による時代の到来は予想以上に早かった。GPSに比べると精度は悪いが、100m以下の誤差で位置の決定が可能であった。

実際の実験は4度にわたって実施し、爆破は大小のものを17回行った。5、6月に基地のあるオングル島で0.9kmおよび5.2km程度の測線で陸上での機器のテスト、陸上および海中での発破を実施し、基地周辺の構造の調査を実施した。7月に大陸上で10km程度の氷床上での実験を行った。この際、発破深度と薬量を変えたときの効きの関連や地震計埋設震度と静電気の影響、その際の波動の減衰なども調べた。その結果、地震計の埋設の効果は労力に比べてほとんどないことも分かった。10月から11月にかけて270kmの測線上に27点の観測点を設置し、薬量1、0、1.4tの2発の発破を行い、越冬明けの1月に海中爆破2.9tによる実験を行い無事終了した。100mおよび140mの発破孔の掘削には1週間程度を要した。この実験によって、大陸の構造が求められ、モホの深さなどの基本的な南極の構造が得られた。南極縁辺部では地表付近のP波速度は6.1-6.2km/sと日本より速く、40km程度の深さにモホ面が存在することも分かった。

2.2. 2000年(41次)2002年(43次)

上記の実験後、数回南極における構造調査の計画がなされ、到達困難域での観測のためのペネトレータ地震計の開発なども実施されたが、これらの計画は実現できなかった。上記の実験から約20年後の2000年と2002年によく次の人工地震による地下構造調査が実施された。20年間の機器の進歩は急速で、観測機器は非常に取り扱いが簡単になっていた。ただし、実施のための環境評価は厳しく、その対応が大変だった。その結果、陸上での火薬使用は可能になったが、海中の発破はできなかった。

屈折法に広角反射法を加えることによって、前回の調査で顕著な波として観測されていた地殻内の反射波をも利用して構造を求めることにした。みずほ高原を、ほぼ直交する2測線について実施することになった。これらの方向はそれぞれ調査地域の地質構造に平行および直交方向になっている。測線は180および160kmと前回より短くなったが、観測点間隔を1kmとすることで、反射波を効率よくとらえることができた。41次の測線はみずほ基地へのルート上であり、21次の測線の一部であるが高密度の観測が実施された。43次の測線は直交方向で新たにルート工作が必要であり、42次隊の一部を依頼した。観測点はそれぞれ160点で前回の5倍以上になった。発破についても41次では600kg7発、250kgを2発、43次では700kgを7発、200kgを1発実施した。これはスチーム噴出式掘削ドリルによって、3.25m/時という速度で直径35~40cmの発破孔の掘削が可能になったことが大きい。35-40mの発破孔を実働24-29時間で掘削できた。発破孔も大きくして、孔に雪を入れてふさぐことで浅くても効率よい爆破ができることが分かった。観測には16ビット4chのレコーダを用いて、タイマー起動により発破時刻に合わせて起動した。また、GPSによって全レコーダが3msec程度の精度で同期できる高精度の刻時を得ることができた。このように機器の進歩などにより、夏隊で実施することができた。また、2測線を

1年空けて41次と43次で実施することによって、データの解析後に次を実施することができ、種々の改良が可能になり、より効率的な実験ができた。

43次の測線では氷床の厚さが分からないので、アイスレーダーによる氷厚の測線も実施された。この結果と爆破の走時による解析結果とはよく一致することが分かった。両測線において、より詳細な地殻上層部の速度構造のイメージが得られたが、同時に氷床の速度構造も得られた。また、重力測定も測線上で実施された。

その後、大規模な調査は実施されていないが、オングル島内で小規模な反射法の実験が2007年と2010年に夏隊で実施されている。これは将来本格的な反射法探査を大陸で実施するための予備実験である。詳細な地下構造調査には反射法が有効だと考えられるからである。

3. 南極昭和基地および周辺における自然地震観測

昭和基地における地震観測はIGY(International Polar Year)の観測計画の基で進められ、3次隊によって1959年に開始された。最初はHES(萩原式電磁地震計)の上下動一成分によるもので、5次隊では水平動が追加され3成分になった。これは固有周期1秒の速度計でガルバノメータが地震計に直結されており、光学的に拡大されて35mmのフィルムに記録される。南極観測の中断後1966年に7次隊によって同じ地震計で観測が再開され、さらに第8次隊からは、長周期のPress-Ewing型の地震計が設置された。この地震計はWWSSN(World-Wide Seismic Standard Seismic Network)で広く用いられ、ソ連(ロシア)や東欧を除く世界中に広く設置されたものである。地震計が固有周期15秒、ガルバノメータが20秒であるため、不安定になり保守には大変な労力を要した。また、記録はHESと同じ光学式フィルム記録、WWSSNの大きなプロマイドとは違っていた。ただし、記録の現像に暗室を必要とした。このため観測時も赤色光以外の光を遮断する暗室の観測室を必要とする。1970年代には1-2年おきに地震の専門家が越冬して保守に当たるとともに、機器の改良がなされた。このようにして長期間これらの観測が維持され、数少ない南半球の地震記録が継続的に得られ、地震学的な種々の解析に大きな貢献をしてきている。その後、1980年にはPELESが持ち込まれ、長周期の観測も充実したが、同時に地震の自動処理とデジタル収録が開始された。さらに、1989年にSTS-1が設置され、PCによるデジタル収録ができるようになり、長周期の地震観測も安定して精度が向上した。

地震観測は初期には露岩上に設置された箱状の観測室で実施され、箱の上からふたを開けて出入りするというようなものであった。しかし、1970年に基地南方にある蜂の巣山の麓に半地下の観測室が建設され、感度が向上した。データはケーブルで約800m離れた基地で記録され、1979年に新たに地学棟が建設されてそこで記録されるようになった。この地震計室でも夏期には融雪水やその水の凍結などによって地震計が傾くなどの問題もあった。冬期は入り口が雪で覆われるために観測室に入るだけでも大変な労力を要した。1996年には新地震計室が、最初の地震計が設置された付近の露岩上に建設され、翌年には地震計が移設された。これによって、短周期および長周期の地震観測が安定して実施されるようになった。最近では観測室内の温度管理も強化され、STSのドリフトが減少し、さらに安定した記録が得られている。

初期の記録は光学式であった。1973年には長周期はペン書き記録に交換され、その後、1980年からは長周期はPELESに交換され、ミニコンによる自動処理が開始され、データとともに処理結果が収録されるようになった。ただし、モニターとしてのペン書き記録は継続された。これらの収録、伝送システムは1989-2002年の間に地震の専門家(地物の他分野も含む)が毎年越冬することによって改良されていった。1994年にはIT技術の発展に

より、インマルサット通信衛星を用いた地震波形データの UUCP(Unix to Unix Copy)による伝送が極地研との間で開始された。さらに、2004 年にはインテルサットによる通信が確立され、昭和基地の記録装置への遠隔ログイン・コマンド操作が可能になった。同時にネットワークカメラサーバーによるリモート監視も可能になり、機器の状況をモニターすることも可能になった。これは現地における保守を劇的に容易にした。

計測データは験震表の形で印刷公表されているが、記録紙のデータも画像化された。これらは、デジタル収録のデータとともに、共同研究者に提供されている。地震波形が衛星回線を通じて日本にもテレメータされるようになったため、スマトラ地震など大地震のデータは準リアルタイムで利用可能になった。

4. 京大関係者の貢献

京大関係者は上記の調査に大きく貢献している。最初の人工地震による構造調査には伊藤が参加した。2 度目の調査では金尾を中心に計画・実施され村上、筒井、戸田などが活躍した。2010 年の反射法の実験は竹本が実施している。

地震観測を昭和基地で最初に本格的に開始したのは江頭だった。江頭は 9 次隊で、神沼(東大)とともに長周期地震計の設置も行っている。1968 年の本格的な地震観測開始以来、1-2 年おきに地震の専門家が越冬して観測に従事し、無線テレメータの実験やオングル島内でのトリパタイト地震観測、みずほ基地での地震観測などを実施した。これらの多くは東京大地震研究所の職員によって実施された。しかし、1986 年から 2005 年まで 20 次にわたる観測隊のうち、京大の地球物理関係者が 20 人以上も越冬観測に従事し、14 人以上が地震観測の保守・改良を担当している。長周期地震計 STS-1 型を 1989 年に持ち込んだのは村上、その観測の整備とデジタルデータの処理・インターネットによる伝送などは金尾を中心として、村上、根岸、東野、中西、土井、岩野、吉井、坂中などによってなされている。1989 年の STS 観測開始以来、約 15 年間は上記の京大関係者を含めて、毎年地球物理研究者が越冬し、システムの改良を行った。金尾はこれの指導的役割を果たしてきている。

また、1987 年に赤松によって、大陸のとつつき岬、ラングホブでと東オングル島を結ぶテレメータ観測が開始された。これは昭和基地付近における観測網による最初の地震観測で、市川などによって 3 年間維持された。その結果、活動度の低い昭和基地周辺での地震活動の様子が分かった。その後、1995 年からはこの観測網は根岸、金尾によって長周期地震計による観測が実施されて、昭和基地付近の地震研究だけでなく、南極大陸を含むグローバルな観測データとして役立つようになった。なお、これらの観測隊員を送り出すためには、多くの京大関係者の尽力があった。

参考文献

- 伊藤・他, 1983, 南極資料 79, 107-133,
- 宮町・他, 2001, 南極資料 45, 101-147 ; 2003, 南極資料 47, 32-71.
- 金尾・他, 1999, 南極資料 43, 16-43 ; 2006, 南極資料 50, 287-303.