

人工地震による地下構造調査について

西村 和浩・澤田 麻沙代・中尾 節郎・片尾 浩

はじめに

今回の技術室報告では、技術職員が「人工地震による地下構造調査」の際に、技術支援を行う上での知っておくべきことをまとめました。

すべてを網羅しているわけではありませんが、別途作成したマニュアルを利用する際、技術支援をする際に必要なポイントなどを書いています。もしかすると実際に作業をしなければ重要であると気づかない点があるかもしれませんが、技術支援される際、困った時などに読んでいただけると幸いです。以下では、近年地震予知研究センターで行った観測を例として紹介します。

内容は以下の通りです。

1. 地下構造調査の概要
2. 作業手順
3. 観測機器
4. 観測機器の準備
5. 設置
6. 機材の回収
7. データの回収
8. 得られたデータについて
9. 技術支援の方向性

1. 地下構造調査の概要

地下構造は目視ができないため、地震波の伝わり方を解析することにより調べている。

自然地震を用いた観測では、より深い層の構造を調べることができる。これに対して、起震車や発破(火薬による爆発)などによる人工地震を用いた観測では、人工地震のエネルギーには限界があり、主に地殻とその下のマントル最上部までが解析の対象となるが、震源と観測点を自由に配置することができることにより、観測体制の自由度が大きく、高精度で地下構造を求めることが可能となる。ある測線に沿って 100 台近くの観測機材を設置している。また人工地震による地下構造調査には、主に地下を屈折してきた地震波を用いる屈折法と、地層で反射してきた波を用いる反射法がある。

2. 作業手順

- (ア) 観測のメンバー調整(教員)
- (イ) 観測機材の過不足の確認と購入(技術職員・学生)
- (ウ) 観測機器に用いる電池の購入と、バッテリーの充電(技術職員・学生)
- (エ) 宿と観測機材の置き場所の確保 {宿に観測の主旨を説明。また、公用車やレ

ンタカーなどの予約}

- (オ) 観測機材設置場所の指定(教員)
- (カ) 観測機器の操作方法の確認(観測者全員)
- (キ) 各班が使用するパソコン及び周辺機器 {データロガー付属品コネクター、GPSアダプター等} の整備と設定(技術職員・学生)
- (ク) カシミール 3D への地図のインストールと GPS 測位のテスト(技術職員・学生)
- (ケ) 観測機器に異常がないか確認、異常がある場合対策を講じる(技術職員・学生)
- (コ) 観測機器の仮設定とテスト(技術職員・学生)
- (サ) チェックシートの用意(技術職員・学生)
- (シ) 観測の班分け(技術職員：案を作成、教員：決定)
- (ス) 観測機器の設定(観測者全員)
- (セ) 観測機材の準備と車への積み込み(観測者全員)
- (ソ) 現地での観測機材の積み下ろし(観測者全員)
- (タ) 観測機材の設置(観測者全員)
- (チ) 観測機材の設置状況をチェック(観測者全員)
- (ツ) 観測機材の撤収(観測者全員)
- (テ) 現地での観測機材の積み込み(観測者全員)
- (ト) 観測データと観測点の座標データの吸い上げと整理(観測者全員)
- (ナ) 観測機材の整理と片付け(観測者全員)

3. 観測機器

地震予知研究センターでは、地震波データ収録機器は現在、次の 2 種類を使用。

- ① LS-8200SD(データロガー：**写真 1-1**)、SG820(地震計：6Hz：**写真 1-2**)、GPS アンテナ
 - ② LS-8000SH(データロガー：**写真 2-1**)、L-22D(地震計：2Hz：**写真 2-2**)、GPS アンテナ、充電式外部バッテリー
- ここで、 ①はアルカリ乾電池単Ⅰを 4 本使用して、待機時間 7 日間、観測期



1. LS-8200SD



2. SG820

写真 1 観測機材 1



1. LS-8000SH



2. L-22D

写真 2 観測機材 2

間(サンプリング周波数 250Hz)2 日間使用可能。②は単 II 4 本でも使用可能であるが、電力容量が少ないため、外部バッテリーを使用。

また、①と②はともに白山工業製であるが、①は②に比べてデータロガーと地震計の扱いが容易である(4 と 5 で詳しく述べる)。①の SG820 は扱いが容易であるが約 70 個のうち数個の割合で故障が生じた。メーカーでも修理ができず消耗品扱いとなる。

4. 観測機器の準備

3-①、②ともに、

- (ア) 観測スケジュールの作成
 - (イ) アルマナックの取得
 - (ウ) データロガーにアルマナックの流し込み
 - (エ) データロガーに観測スケジュールの流し込み
- の順に行う。

(但し、アルマナックの取得時に使った電池は交換、バッテリーは再充電)

(ア) 観測スケジュールの作成について

サンプリング周波数、観測点座標、GMT に対するローカルな時刻補正值、TCAL(時刻校正)のスケジュール(指定しなければ、自動挿入される)、観測時間のスケジュールなどを設定する。ここで観測点座標は測線の真ん中付近の座標を設定値とする。衛星補足のために用いる座標であり、半径 100 km 以内の座標を用いることが必要なので、測線が長い場合には複数の座標を用いることがある。

3-①の LS-8200SD では、PC 上で Schedule.csv ファイルを編集する(最終行に改行を入れること)。

3-②では、Assist という LS-8000SH 付属のソフトで作成するが、LS-8000SH の内蔵メモリ全体を指定した Area 数に分割して、TCAL と収録時間を作成するため、スケジュールの作成が複雑である。しかしながら、収録時間を自動

的に計算するため、スケジュール時間内のデータはメモリ容量を超えることなく記録できるという利点がある。

(イ) アルマナックの取得について

アルマナックは衛星から送信される航法メッセージの一部で、15分に1回GPS衛星から送られる概略の軌道情報である。

3-①のLS-8200SDでは、屋外の空の見晴らしの良い場所でGPSアンテナをつなぎ、アルマナック取得用コネクタ(写真3)を地震計接続コネクタに接続し、15分から30分間放置することにより取得できる。3-②のLS-8000SHでは、仮のスケジュールで一度LS-8000SHを起動した後でしか、アルマナックの取得ができないようになっているため、3-①のLS-8200SDのほうが、利便性が良い。

(ウ) データロガーにアルマナックの流し込みと(エ) データロガーに観測スケジュールの流し込みについて

アルマナックとスケジュールの流し込みは、3-①のLS-8200SDでは付属のコンテナに内蔵の接続機器で10台を接続し(写真4)、Assistという付属のソフトで同時に流し込むことができる。これに対して3-②のLS-8000SHでは、1台ずつAssistで流し込まなければいけないため、3-①のLS-8200SDのほうが、利便性が良い。



写真3 アルマナック取得用コネクタ



写真4 LS-8200SD用コンテナ

5. 設置

3名1班(通常、教員・技術職員・学生を一組とする)で1台の車を使用し、観測機器の設置を行う。1班30台設置するとして、天候が良ければ1日から1日半程度で設置する(設置には2日間取っておく)。次のように分担して作業を行う。ただし、班分けは予め案を作成し、教員の下承を得る。

(ア) 地震計・GPSアンテナの設置

(イ) ロガーの設定とチェックシートへの記帳

(ウ) 座標の測位

(ア) 地震計・GPSアンテナの設置について

地震計の設置の仕方は場所によって異なる。

3-①の SG820 はスパイクがついており、地面(土の上)に突き刺すことが多い。粘土質の土壤に刺す場合には地震計が固定されやすく、砂の上は固定されにくい。また、固定されにくい場合は土とコンクリートの間にスパイクを差し込むと固定されやすい。

SG820 は上面に水準器を用いて水準をあわせる。また、設置場所がコンクリートや岩盤上などのスパイクがさせない場合、スパイクを取り外すことができる。このとき、岩盤上を削った上や、コンクリート上を竹箒できれいにし、地面との密着度を上げるために水で湿らせた後、石膏で固めて設置する。石膏は少し柔らかめにしたほうが、地面との密着度が良い(基本は冷えたヨーグルトの固さ程度)。

3-②の L-22D は通常石膏で固めることが多いが、スパイクを装着して地面に差し込むことも可能である。

地震計をスパイクで設置する場合に、地面が固いと差し込みにくいので、予め地面にハンマーでドライバーを打ち込み、その穴にスパイクを差し込むことがある。

主に、3-①を土壤に設置、3-②を岩盤・コンクリート上に設置することが多い。

設置した後、雨などが地震計に直接当たらないように、地震計上に枯葉・草・苔などをのせる。また、ケーブルが動物に引きちぎられないように、草・土などで隠す必要がある。

(イ) ロガーの設定とチェックシートへの記帳について

チェックリストに書かれている手順に従い設置する。まず、GPS アンテナ、地震計の順にロガーに取り付ける。

次に 3-①の LS-8200SD では地震計をつなぐことにより電源が ON となりセルフチェックが始まる。インジケータの LED の緑点滅を確認する(この間に LS-8200SD をビニル袋で包んでおく)。チェック項目は次の通り。

- A) 緑 1 回点滅：スケジュールファイルの確認
- B) 緑 2 回点滅：バッテリー電圧の確認
- C) 緑 3 回点滅：センサの接続状態・傾斜角の確認
- D) 緑 4 回点滅：時刻校正の確認
- E) 緑 5 回点滅：スケジュールファイル(時刻)の確認
- F) 緑長め点灯→消灯：セルフチェック終了

もしエラーがあった場合、LED が赤く点滅するので(上記 A)～E)と同じ回数)、その回数により、おかしいところを訂正した後、LS-8200SD から SG820 のケーブルを抜き差しして再起動する。

また、観測点でチェックを行う際、C)のセンサのチェックでエラーが出ることが多い。SG820 の傾斜によるところがほとんどであるが、SG820 と LS-8200SD との相性による場合、SG820 の不良の場合も見受けられた。

3-②の LS-8000SH では、液晶画面チェック、ロガー電圧チェック、地震計の接続確認(+の確認)、地動確認、時刻校正を行い、観測待機状態にして、

ディスプレイをOFFにする(電力消費量を下げるため)。

ロガー電圧チェックの際、左右に電圧が表示される。右側は、外部電池の電圧、左側は内蔵電池の電圧である。左側に表示された電圧が0Vになっていることがある。この場合、LS-8000SHは経年変化のため内蔵電池が消耗しているので予備機がある場合はLS-8000SHの交換をする。予備機がない場合は、撤収の際に設定値が消えないように充電式外部電池を取り付けたまま回収にする。



写真5 設置された機材

また、3-①と3-②の観測機材を交互に設置するようにすることによって、どちらかの設定がおかしいときにデータが全く収録できない状態を避けている。

最後に機材は注意書きと一緒に45ℓのゴミ袋に入れ設置する。設置状態の例を**写真5**に示す。

(ウ) 座標の測位について

パソコンにGPSモジュールを接続して、カシミール3Dを使用して観測点の座標を測位する。手順は以下のとおりである。

- A) 地図データのインストール(あらかじめ準備しておく)
- B) GPSモジュールの接続
- C) GPSモジュールユーティリティーの設定
- D) カシミール3Dの測地系の設定(WGS84)
- E) カシミール3Dによる測地
- F) データの保存

A) 地図データのインストールについて

国土地理院の1/25000地形図のデータを50mメッシュの標高データに結合して用いる。世界測地系対応の国土地理院の1/25000地形図のデータは、現在のところ、世界測地系のみのデータが入ったもの(水色のラベル)と世界測地系と日本測地系の両方のデータが入ったもの(茶色のラベル)の2種類がある。2種類のうち世界測地系のみのデータが入っている地形図を先に入れないと、パソコンに表示された地形図上でGPSの表示している点が、実際の位置を正確にプロットしない。

C) GPSモジュールユーティリティーの設定について

カシミール3DでGPSナビゲーションの開始をする前に(毎回)、GPSモジュールのユーティリティーでWGS84に設定する必要がある(パソコンに表示された地形図上でGPSの表示している点が、実際の位置を正確にプロットしないため)。

E) カシミール 3D による測地について

GPS で測地した点にプロットしたのち、上書き保存により、毎回測地したデータを保存する必要がある。これは、GPS ユニットがパソコンから外れた場合(しばしば起こる)などに、エラーが生じてデータが失われるためである。

6. 機材の回収

回収は観測点の場所を知っている設置班が行う(1 班あたり 30 台とすると、半日程度で回収)。このとき、観測点の座標測定がまだの場合には、座標を記述する。

チェックシートの手順どおりに回収すればよいが、異常な個所があればその旨を備考欄に記述する。

3-①の LS-8200SD では、異常が無ければ地震計のコネクターを外す際にインジケータが緑に点灯した後、消灯する。異常がある場合、インジケータが赤に点灯して消灯するか、インジケータが点灯しない(バッテリー切れ)。そのため、コネクターを外す際には必ずインジケータを確認する。

また、3-②の LS-8000SH では、手動で 2 回時刻校正するが、かならず 1 回目の補正時刻をチェックシートに記入する。もし大きくずれていた場合には、補正時刻を解析の際に使用する必要がある。バッテリー切れで LS-8000SH の液晶モニターが表示されない場合があるが、その旨をチェックシートに記入する。

7. データの回収

データの回収は以下のように行う。

(ア) LS-8200SD のデータ回収

(イ) LS-8000SH のデータ回収

(ウ) カシミール 3D の座標データ回収

(エ) データバックアップ、座標・機材・データファイルなどの一覧を作成、整理

(ア) LS-8200SD のデータ回収について

コンテナに 10 台を収納してコネクターでつなぎ、コンテナと接続したパソコン上の Assist でデータ回収する。このときのデータは、LS-8200SD のシリアルナンバーと同名のディレクトリに保存される(デフォルト)。

(イ) LS-8000SH のデータ回収について

LS-8000SH を一台ずつパソコンと接続し、パソコン上の Assist でデータ回収する。

(ウ) カシミール 3D の座標データ回収について

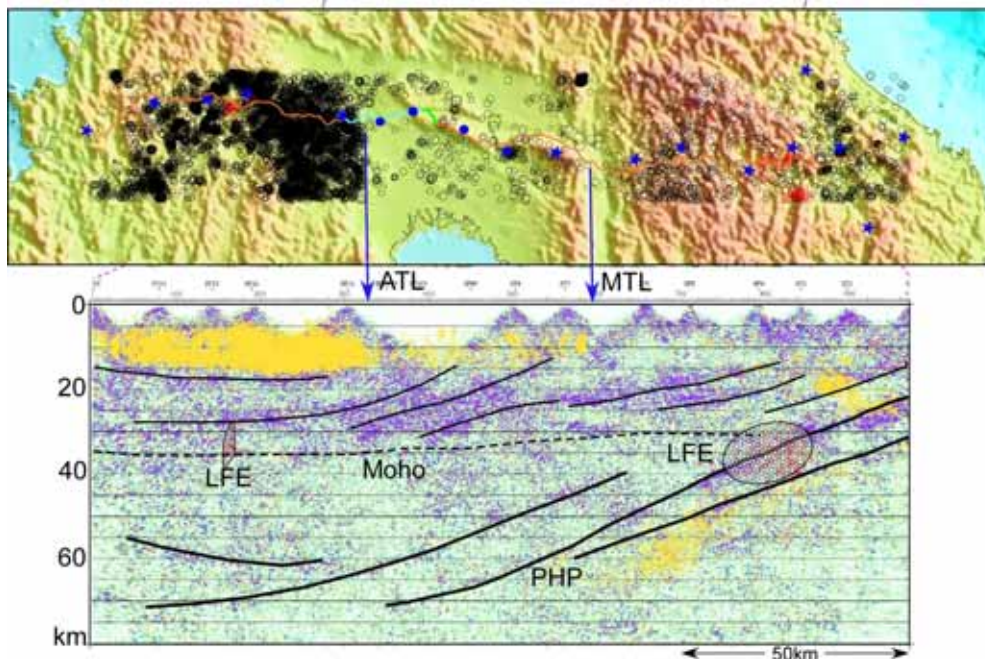
カシミール 3D の座標は、観測点のウェイポイントを GDB ファイルに出力する。そこから、必要に応じてテキストファイルに変換する。

8. 得られたデータについて

こうして得られたデータは、屈折法や反射法により解析され、(P 波)速度構造や反射プロファイルが求められる。その結果を地震活動、地質調査の結果などと比

較検討され、総合的に地下の構造や物性、テクトニクスなどの考察が行われる。

一例として、伊藤他(2007)による2004年の新宮-舞鶴測線(大阪府市, 京都府市, 滋賀県, 奈良県および和歌山県市を含む近畿地方)において実施された地下構造調査の結果の中から、広角反射法による地震波速度構造と地震活動の深さ断面方向の比較を図1に示す。図の左端が舞鶴、右端が新宮である。また、MOHO と書かれた破線はモホ面を、PHP と書かれた実線はフィリピン海プレートに付随する反射面を示し、その様子がよくわかる。



9. 技術支援の方向性

責任者と観測に必要な2-(ア)～(ナ)の作業に担当者を割り振り、その際に研究者(総責任者)の意図を把握して全体のことに采配を振る責任者と担当者が相談の上で円滑に観測が行えるようにする必要がある。そのためには采配を振る責任者は各作業の担当者(技術職員・学生が主に担当)の任命と、作業を行う上での指示、スケジュール管理、作業の確認、相談相手に徹する必要がある。

担当者は、担当した作業の内容を把握し、各作業の実行と、その作業に複数人必要な場合は、各作業を実行する人員の確保と管理をする必要がある。今後は技術職員が責任者の立場で技術支援を行う必要があるのだと思う。

参考文献

伊藤 潔・廣瀬一聖・澁谷拓郎・片尾 浩・梅田康弘・佐藤比呂志・平田 直・伊藤谷生・阿部 進・川中 卓・井川 猛(2007): 近畿地方における地殻および上部マントルの構造と地震活動、京都大学防災研究所年報、50B、pp.275-288、CD-ROM.

謝辞

反射法に関する図を頂いた地震予知研究センター伊藤潔教授に厚く御礼申し上げます。