

我が国における爆薬を震源とした人工地震の観測

一ノ瀬 洋一郎*

Explosion Seismic Observations in Japan

Yoichiro ICHINOSE*

はじめに

人工地震を用いる探査には屈折法と反射法がある。屈折法は、主に爆薬を震源としてほぼ一直線に沢山の地震計を配置し、屈折してくる波の伝わり方を調べて地下の構造を推定する。反射法は、主に震源として起震車を使い、震源と観測点を次々と移動させて、魚群探知機で魚の分布を調べるように地中で反射してくる波を調べて地下の様子を探る。ここでは主に屈折法探査に関して述べてみたい。

人工地震、観測変遷の概観

初期の地殻構造の研究は主に自然地震の地震波の解析によって行われ、モホロビッチによる 1909 年のモホロビッチ不連続面の発見 (Mohorovičić, 1910) などある程度成果を上げてはいたが、自然地震では震源位置、時間決定の誤差が根本的な問題であった。1947 年、ユトランド半島付け根にあるドイツ軍の要塞であったヘリゴランド島において、独軍の残火薬処理 (25,000 ton) と要塞破壊を兼ねて 7,000 ton の爆破が行なわれ、これを利用した人工地震観測が主にヨーロッパにおいて組織的に行われた (Mintrop, 1949; 爆破地震動研究グループ, 1952)。これ以降、人工地震による調査が盛んになり、地殻構造に関する知識は質量ともに大きく変化した (図 1)。

我国においての人工地震による大規模な地下構造探査は、ヘリゴランド島爆破の 3 年後、1950 年秋に岩手県石淵ダム建設に伴う薬量 57 ton の爆破を利用したのが最初である (Research Group for Explosion Seismology, 1951; 爆破地震動研究グループ, 1951; Matuzawa, 1959)。これを機に、全国の大学、研究機関の地殻構造研究に関係してきた研究者が集まり、大規模な構造探査を行なうのを目的

に「爆破地震動研究グループ」が結成された。このグループは、数回の人工地震探査でそれまでの自然地震を使用して決めた地殻構造モデルを一変させた。初期の頃は専ら砕石爆破などを利用してしたが、1955 年頃から各大学、研究機関等が予算処置を講じて自前の爆破震源を行うことができるようになり、これにより逆測線の観測がより可能になって、人工地震の特徴を活かした調査ができるようになった。当時の観測は、器材の数も少なく、観測点間隔は 10~20 km 位であった。観測器材は電源として AC 100 V を必要とし、非常に大きく、重く、取り扱いもかなり難しかった。1964 年から国際地球内部開発計画 (UMP) (Research Group for Explosion Seismology, 1966; 爆破地震動研究グループ, 1970; Aoki *et al.*, 1972; Okada *et al.*, 1973), 1972 年からは国際地球ダイナミクス計画 (GDP) の一環として太平洋や日本海で海中爆破を含む規模の大きな調査が行われるようになり (爆破地震動研究グループ, 1975; Okada *et al.* 1978; Okada *et al.* 1979; Research Group for Explosion Seismology, 1977; Yoshii *et al.*, 1981), 観測も急速に近代化されていった。1979 年からは地震予知研究における地下構造調査の重要性が認められ、我々のグループもその後は地震予知計画の一環として毎年大規模な調査を行ってきた。国内の人工地震による地殻構造探査の多くは、殆どが上述の爆破地震動研究グループが中心となり行われてきたものである。それに伴う地震計、観測機器の開発にも微小地震のグループと協力し大きく貢献をしてきた。1960 年頃までは換振器には既存のものを流用していたため、ちょっとした衝撃でバネが折れることが多々あった。1 Hz の地震計で、小形で軽いと言われていたものでも 10 kg を超す重さがあり、増幅器等も真空管式であった。地震動の記録は電磁オシログラフで取るために、事前に振幅、到達時刻を想定しておき、その時刻にスイッチを入れてプロマイド紙に直接焼き付けて記録する一発勝負と言うものであった。電磁オシログラフも重さが 20 kg を超す重量物であり、増幅器などは殆ど手造りであった。

2002 年 8 月 30 日受付, 2002 年 10 月 28 日受理.

* 東京大学地震研究所地震予知研究推進センター.

* Earthquake Prediction Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

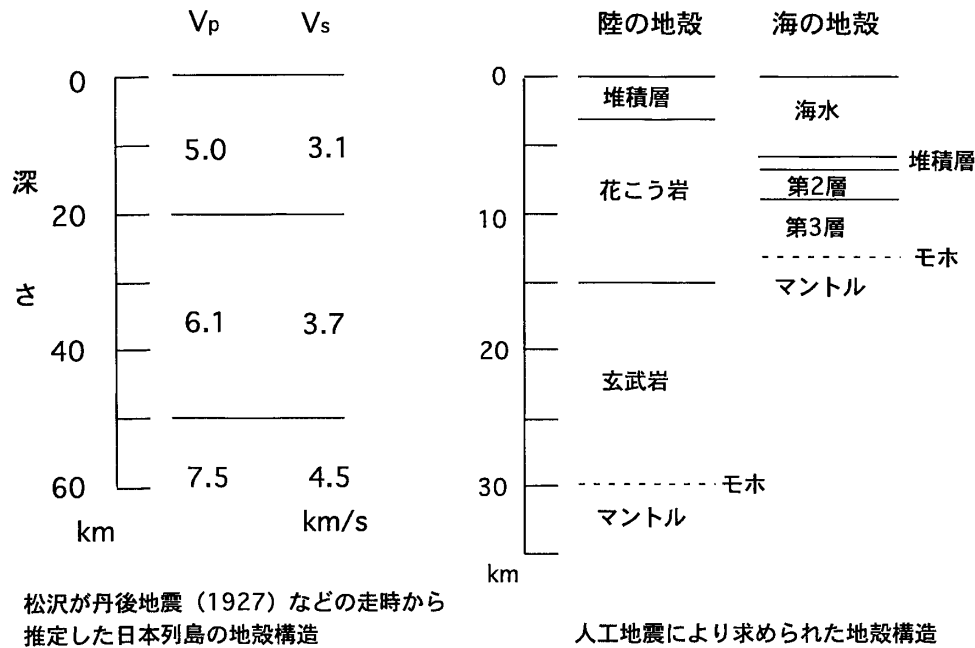


図 1. 自然地震と人工地震により求めた地殻構造の比較（爆破地震動研究グループホームページより）

また、プロマイドを現像する写真現像関係の器材も観測現場まで同時に持っていった。

地球内部開発計画がスタートした1964年の頃から、増幅器などはトランジスタ化され、記録装置もオープンリールのデータレコーダが導入された。また、時刻はこれまでは郵政省電波研究所周波数標準部が発する短波放送の日本標準時報（2.5, 5, 10, 15 MHzの搬送波に600, 1,000, 1,600 Hzの変調波を乗せ時刻を送った。符合J.J.Y.）に頼っていたが、この頃から持ち運びに便利な小形の水晶時計が開発され、出回り始めた。しかしレコーダ、時計とも大変高価で、爆破地震動研究グループで揃えることができたのはわずか10数組であった。1970年代になると、集積回路が容易に使用できるようになり、各大学で安価で特徴ある記録システムが競って開発され、観測に参加できる研究機関の裾野を広げるきっかけとなった（吉井他、1979）。1980年代の半ば頃から、小形、軽量のコンピューターいわゆるパソコンが急激に普及し、それに伴いデジタル方式の記録装置が普及し始め、記録の質は格段に向上した。初期の探査の観測点数は10数点であったが、最近の観測では300点を超すに至っている（東海中部陸域地震探査研究グループ、2001）。

震源用爆薬と発破方法

爆薬は、初期の頃は碎石発破に頼っていたために、碎石発破用の爆薬、火工品（雷管、導火線、導爆線など、火薬類を使用した加工品）を使用するということが、ショットタイム精度の確定などに苦労があったようである。自前の

爆破を行うようになった時にも、既存の爆薬を使用した際に経験不足から様々なトラブルがあったが、その後火薬メーカー等による研究も進み、地震探査用の耐水性、耐圧性に優れた爆薬が開発され、また火薬の装填方法も研究されてより扱い易くなった。初期の震源とした碎石発破の爆薬には、塩素系爆薬のカーリット（スウェーデンのカーリソンが発明。ちなみにこれを実用化しているのは日本だけ）が使用された。現在の碎石発破では、アンホ（肥料の硝安と灯油を混合したもの）、スラリー爆薬、ダイナマイトが主として使われる。碎石発破の観測では、アンホやスラリー爆薬を使用した場合にS波が比較の出易いようである。これは発破の方法と爆速に原因があると思われる。碎石発破の方法には、爆薬を一斉に爆発させる斉発と時間差をつけて爆発させる段発とがある。段発は爆発間隔が0.25 sec.と0.025 sec.の二通りが主である。これらの時間差は電気雷管の延時装置で決まる。ちなみに爆薬の爆速は、アンホ：約3,000 m/sec.、スラリー：3,500～5,500 m/s、深海用特殊新桐ダイナマイト6,500～7,000 m/sである。ダイナマイトは耐水性、耐圧性、耐熱性、爆速などの性質の違いにより、松、桜、桐、榎、梅、桂などの樹木の名が使われる。

人工地震の爆破方法は斉発であり、爆薬は耐水性、耐圧性に優れている深海用特殊新桐ダイナマイトを使用する。雷管は瞬発の地震探査用電気雷管を使用する。陸上の地震探査では、直系10数cm、深さ70m程の縦孔を掘削して孔の直径に合わせて形成した爆薬を装填する。また爆発エネルギーの振動エネルギーへの変換効率を上げるためと、石などの飛散による事故を防ぐために水または砂を孔

口まで充填する。起爆する方法には、安全な場所まで電線を張り発破器のスイッチを入れる有線方式と、電波により起爆する無線発破方式がある。

1980年代までの海上爆破探査方法には、陸上の場合と同じく電気雷管式と導火線式（投込み式）があった。電気雷管式は、防舷ブイのような大形のブイに爆薬を吊るして船まで電線を引き、船上で発破スイッチを入れるのであるが、電線が沈まないよう電線に浮力材をつけるのが大変な作業である。投込み方式は、船速を一定に保って導火線に点火して投下していく方法で、薬量が多いとブイに吊るす場合もある。導火線の燃焼速度は1cm/sec.であり、薬量（ダイナマイトの比重：1.45）によって爆発エネルギーの有効な水深が異なるので、導火線はその薬量に合った長さに切断し、工業用雷管を装着する。現在では電気発破が主流

となっている。

ショットマーク

人工地震では、爆破時刻、爆破点及び観測点位置の精度の高さが要求される。爆破時刻、つまりショットマークをとる方法は、1) 爆発させる親ダイの雷管と直列に雷管を結線し、その雷管に電圧を掛けた導線を巻き、破裂した瞬間に導線が切断され、電圧がゼロになった時刻を記録する方法、2) 発破器からの誘導電流を記録する方法、3) 発破孔の中に感振器を入れる方法、などがある（図2）。誘導電流を記録するためには、1/1,000 sec.の動きを記録できる装置が必要である。また、発破孔に感振器を入れる方法は碎石発破を利用する時などに有効である。碎石発破などに使用される雷管は遅延装置があり、その精度も地震探査の精

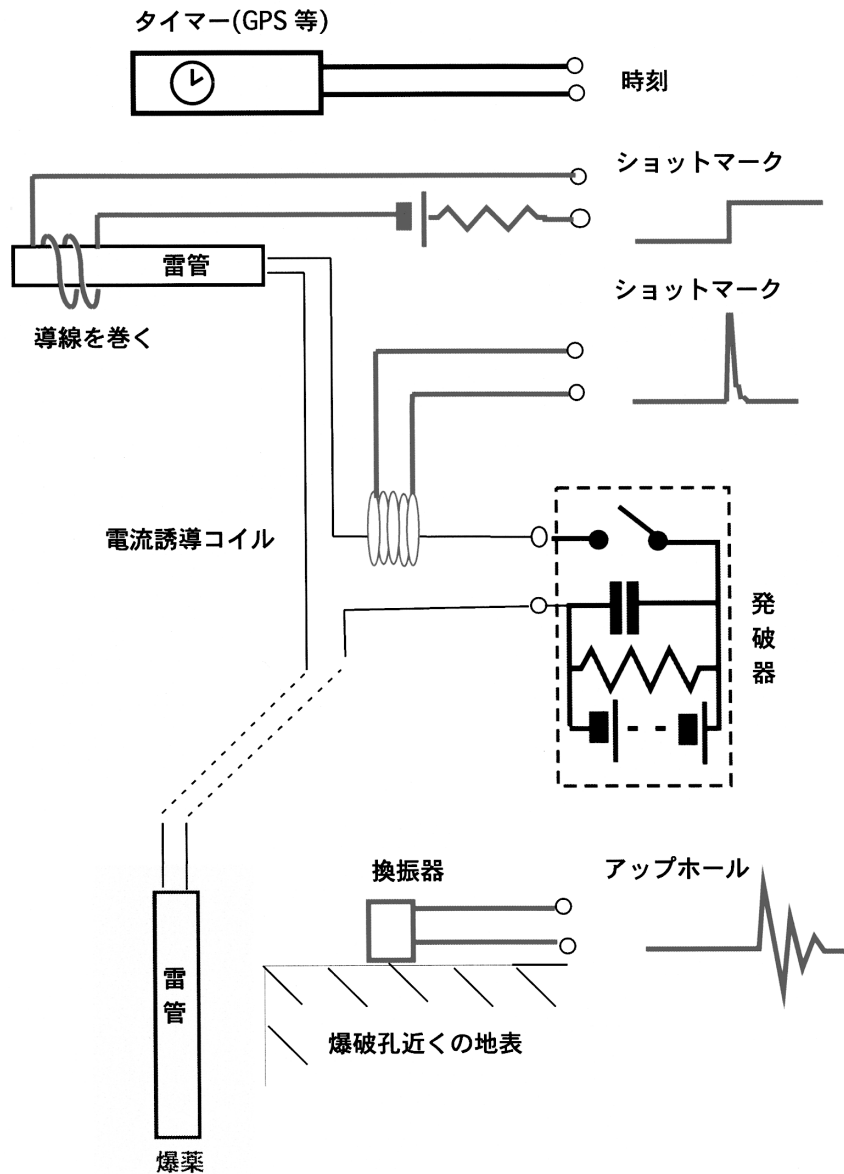


図 2. ショットマークおよびアップホールの取り方の概念図

度から見るとかなり不十分なためである。海上での投げ込み式の爆破のショットタイムは、爆発の直達波が到達した時刻から爆薬を投下した時刻を引き、これに船速を乗じると爆薬までの距離が分かる。また海中の音速は約 1,500 m/sec. であるから、その距離を海中音速で割ると時間が分かる。直達波の時刻から、この時間と、爆薬の深度 (m) を海中音速で割った時間を引けば、発破時刻が計算できる。

位置に関しては、今でこそ GPS で簡単に出来るようになったが、それ以前の実験は観測点の数も少なく間隔距離も長かったため、三角点からの測量や 1/25,000 の地図から緯度、経度、標高を求めた。また海上においては、電波航法一種の双曲線航法と言われる、二つの固定局から発信される同期した長波の電波を信号特異性に分類し測定して、時間差測定方式のロランや位相差測定方式のデッカなどで位置決めをした。

おわりに

以上のように、人工地震による探査は海陸ともに行われており、今後ますます重要になると思われる。ここには記さなかったが、バイプロサイスや海でのエアガンなどの方法も盛んになり、いろいろな成果が出ている。

謝辞：査読者にはていねいに原稿を見ていただき、誤りの指摘や多くの有益なコメントをいただきました。

文 献

- Aoki, H., T. Tada, Y. Sasaki, T. Ooida, I. Muramatsu, H. Shimamura and I. Furuya, 1972, Crustal structure in the profile across central Japan as derived from explosion seismic observations, *J. Phys. Earth*, **20**, 197-223.
- 爆破地震動研究グループ, 1951, 石淵爆破地震動観測による東北地方の地殻上層の構造, 爆破地震動研究グループ会報, **2**, 3-4.
- 爆破地震動研究グループ, 1952, 爆破地震による地殻構造研究の展望, 地球科学, **7**, 1-18.
- 爆破地震動研究グループ, 1970, 海底地震計による爆破の観測, 地震研究所彙報, **48**, 1145-1153.
- 爆破地震動研究グループ, 1975, 海中大爆破による東北日本の上部マントルの地域性, 海洋科学, **7**, 672-677.
- Matuzawa, T., 1959, On the crustal structure in north-east Japan by explosion seismic observations, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37**, 123-154.
- Mintrop, L., 1949, On the stratification of the earth's crust according to seismic studies of a large explosion and of earthquakes, *Geophysics*, **14**, 321-336.
- Mohorovičić, A., Potores od 8 X 1909, 1910, *Godishje Izvjesce Zagrebackog Meteoroloskog Opservatorija za godinu 1909*, **9**, 56 pp., Zagreb, Yugoslavia.
- Okada, H., S. Suzuki, T. Moriya, and S. Asano, 1973, Crustal structure in the profile across the southern part of Hokkaido, Japan, as derived from explosion seismic observation, *J. Phys. Earth*, **21**, 329-354.
- Okada, H., T. Moriya, T. Masuda, T. Hasegawa, S. Asano, K. Kasahara, A. Ikami, H. Aoki, Y. Sasaki, N. Hurokawa and K. Matsumura, 1978, Velocity anisotropy in the Sea of Japan as revealed by big explosions, *J. Phys. Earth*, **26**, Suppl., S491-S502.
- Okada, H., S. Asano, T. Yoshii, A. Ikami, S. Suzuki, T. Hasegawa, K. Yamamoto, K. Ito and K. Hamada, 1979, Regionality of the upper mantle around northeastern Japan as derived by big explosion at sea, I. SEIHA-1 explosion experiment, *J. Phys. Earth*, **27**, Suppl., S15-S32.
- Research Group for Explosion Seismology, 1951, Explosion-Seismic Observations in North-eastern Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **29**, 97-105.
- Research Group for Explosion Seismology, 1966, Crustal Structure in the Western Part of Japan Derived from the Observation of the First and Second Kurayosi and the Hanabusa Explosions. Part 1. Observation of Seismic Waves Generated by the First and Second Kurayosi and the Hanabusa Explosions, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **44**, 89-107.
- Research Group for Explosion Seismology, 1977, Regionality of the upper mantle around northeastern Japan as derived from explosion seismic observations and its seismological implication, *Tectonophysics*, **37**, 117-130.
- 東海中部陸域地震探査研究グループ, 2001, 東海中部地方における陸域深部地殻構造探査, 日本地震学会講演予稿集, 2001 年秋季大会, C37.
- Yoshii, T., H. Okada, S. Asano, K. Ito, T. Hasegawa, A. Ikami, T. Moriya, S. Suzuki and K. Hamada, 1981, Regionality of the upper mantle around northeastern Japan as revealed by big explosions at sea, II. SEIHA-2 and SEIHA-3 experiment, *J. Phys. Earth*, **29**, 201-220.
- 吉井敏尅・一ノ瀬洋一郎・坂守, 1979, 簡単な FM 録音方式地震観測システム, 地震, **32**, 363-365.