

寄 書

微弱反射波検出のための高密度  
アレイ地震観測システム

東北大学理学部地震予知・噴火予知観測センター\*

堀内茂木・津村紀子・長谷川 昭

東北大学理学部日本海地域地震火山観測所\*\*

堀 修一郎

東北大学理学部三陸地域地震火山観測所\*\*\*

仁田 交市

An Observation System for a Dense Seismic Array  
Designed for Detecting Weak Reflected Phases  
from Deep Crust

Shigeki HORIUCHI, Noriko TSUMURA,  
Akira HASEGAWA

Observation Center for Prediction of Earthquakes  
and Volcanic Eruptions, Faculty of  
Science, Tohoku University, Aoba,  
Sendai, Miyagi 980, Japan

Syuichiro HORI

Nihonkai Observatory for Earthquakes and  
Volcanoes, Faculty of Science, Tohoku  
University, 1-14-46 Syogunno-minami,  
Akita 011, Japan  
and Kouichi NIDA

Sanriku Observatory for Earthquakes and  
Volcanoes, Faculty of Science, Tohoku  
University, Matsuzaki-cyo, Tono,  
Iwate 028-05, Japan

(Received March 14, 1992;

Accepted May 30, 1992)

§ 1. はじめに

火山の周辺域等で発生する地震の記録には溶融体からの反射波と思われる顕著な位相がみいだされる場合がある。栃木県足尾町周辺 [MIZOUE *et al.* (1982), HORIUCHI *et al.* (1988), 松本・他 (1991)], 長野県西部 [溝上・石桁 (1988), INAMORI *et al.* (1992)], 松代町周辺 [西脇・他 (1989)], 秋田県森吉町周辺 [堀・長谷川 (1991)] に

\* 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉

\*\* 〒011 秋田県秋田市將軍野南1丁目14-46

\*\*\* 〒025-05 岩手県遠野市松崎町駒木

おける観測結果によると、反射面の広がり直径約 10 km にも及んでいる。長谷川・他 (1991), HASEGAWA *et al.* (1991), 堀・長谷川 (1991), INAMORI *et al.* (1992) 等により指摘されているように、震源分布と溶融体の分布とは密接な幾何学的関係があることから、内陸地震の発生機構を知る上でも、地震活動が高い地域の直下の微細構造を調べることは重要である。

ところが、溶融体等からの反射波や変換波の振幅は P 波や S 波のそれに比べ一般にかなり小さく、通常の観測では検出されない場合が多い。また、顕著な位相が観測されてもそれが複数の観測点で同時に検出されなければ、反射点や変換点の位置を決定することはできない。そこで、自然地震や人工地震の P 波や S 波のコーダ波に含まれる微弱な反射波や変換波を検出し、その波の到来方向を調べることを目的とした高密度アレイ観測システムを開発した。

§ 2. 観測システム

東北大学理学部地震予知・噴火予知観測センターでは陸上エアガンによる地下構造探査システムを導入している。このシステムはテイクアウトが 25 m 間隔で長さが 4.8 km の CDP ケーブル、4.5 Hz の地震計約 200 組、48 ch のデータ収録装置から構成されている。データ収録装置は人工震源を用いることを前提として作られているため遅延・トリガー方式の観測を行うことができない。また、記録可能なチャンネル数も 48 と限られている。そこで、ラップトップパソコン (PC386) 4 台を利用した 48 チャンネルのデータ収録装置を 4 組製作し、既存の 4.5 Hz 地震計、CDP ケーブルと組み合わせて、最大 192 チャンネルの高密度アレイ観測システムを開発した。Fig. 1 にこのシステムのハード構成を示す。収録装置は 48 チャンネルの増幅器、A/D 変換器、ラップトップパソコン (PC386)、ストリーマテープ、DC/AC コンバータより構成されており、バッテリー駆動型の収録装置である。

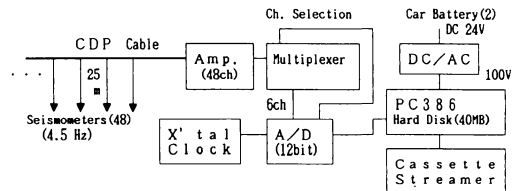


Fig. 1. Block diagram of a 48-channel digital event recording system using CDP cables. Switching of channel is made by connecting digital outputs of the A/D converter to the address of the multiplexer.

観測点間隔が 25 m であることから、増幅器の各チャンネルの利得はどれも同じになるようにした。各チャンネルの利得変更用抵抗は 8 チャンネルのマルチプレクサーに接続されており、3 組のスイッチの組合せで全チャンネルの利得を 8 段階に変えることができる。A/D 変換器の分解能は 12 ビット、チャンネル数は 16 である。堀内・他 (1987) と同様に 8 チャンネルの C-MOS のマルチプレクサーを利用して、6 チャンネル毎に 8 回チャンネル切り換えを行うことにより 1 台の A/D 変換器を用いて 48 チャンネルのデータ収録を行っている。マルチプレクサーのコントロールは A/D 変換器のデジタル出力を用いている。マルチプレクサーを用いる場合にはチャンネル切り換えを行う前のチャンネルとのクロストークによりノイズが混入する恐れがある。そこで、マルチプレクサーの入力に信号とアースとを交互に接続することにより、A/D 変換器の入力を一度アースと接続させてから次のチャンネルに接続するようにした。アナログスイッチは増幅器に組み込まれており、増幅器の入力は 48 チャンネルであるが出力は 6 チャンネルとなっている。増幅器と CDP ケーブル、増幅器とパソコンとの接続はそれぞれ 1 個のコネクターを接続するだけで容易に行なえるようになっている。

トリガー判定には 8 観測点毎に 6 点を選んだ。そして、堀内・他 (1987) と同様にノイズレベルの長時間-短時間平均の比を計算することによりトリガー判定を

行っている。増幅器のドリフトを考慮し、長時間-短時間平均は高域フィルターの出力を用いて計算している。

トリガー判定を 6 点で行う場合にはサンプリング間隔は最大で 200 Hz であり、この場合のデータ収録時間は 28 秒間である。メモリーの容量の制約から、データ収録時間を長くするためにはサンプリング間隔を長くする必要がある。

データ収録には内臓の 40 MB の固定ディスクが用いられており、約 100 個の地震波形データの収録が可能である。収録されたデータは最大容量が 40 MB のストリーマ装置を接続させてコピー可能である。使用したパソコンは 32 ビットの PC386 であり、電源の消費量はやや大きく、1 日の観測に 60 AH のバッテリーが 2 個必要である。

### § 3. 観測記録例

このシステムを用いた自然地震の観測を 1989 年 10 月栃木県日光・足尾町周辺で行った。観測は 48 点の観測を 2 ヶ所で行った。Fig. 2 はこのシステムの 1 観測点で 2 日間に収録された足尾町周辺の自然地震の波形記録を示したものである。図で SxS と書かれている地震について 48 点で観測された波形記録を Fig. 3 に示す。通常行われている観測では Fig. 2 に示すような波形が記録されるわけであるが、このシステムを用いることにより微弱な反射波が極めて明瞭に見出せるようになる。津村・他 (1990) はセンブランスを計算することにより、SxS 波が北西方向から到来しているとの結果を得ている。

Fig. 4 は中禅寺湖の南で行った観測で得られた波形記

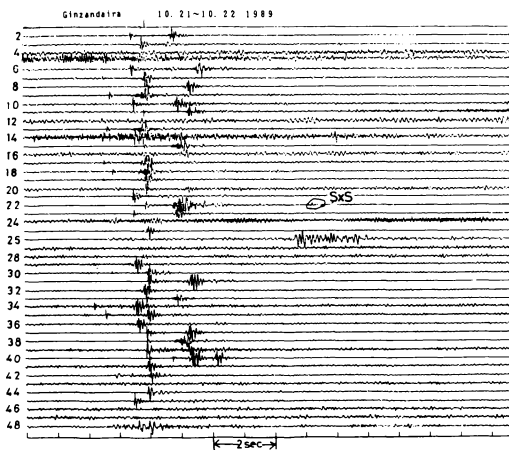


Fig. 2. Seismograms obtained at a station by a two day observation using the present recording system in October, 1989 at Ginzandaira, Ashio, Tochigi Prefecture, the Kanto District.

Seismograms of all channels for the twenty-second event, whose seismogram is indicated by the closed circle with SxS, are shown in Fig. 3.

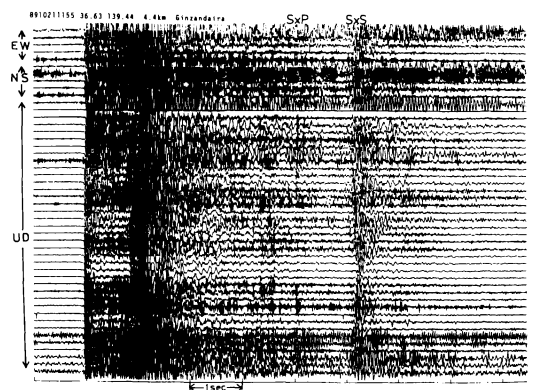


Fig. 3. An example of seismograms for an event obtained by the use of the present recording system, set up at Ginzandaira, Ashio, To-chigi Prefecture. These seismograms are for the twenty-second event in Fig. 2.

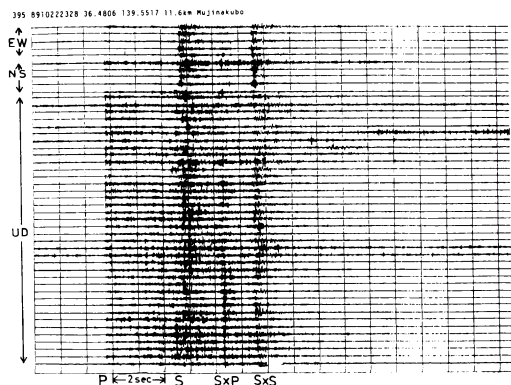


Fig. 4. An example of seismograms for an event obtained by the present recording system, set up at Mujinakubo, Nikko, Tochigi Prefecture on October, 1989.

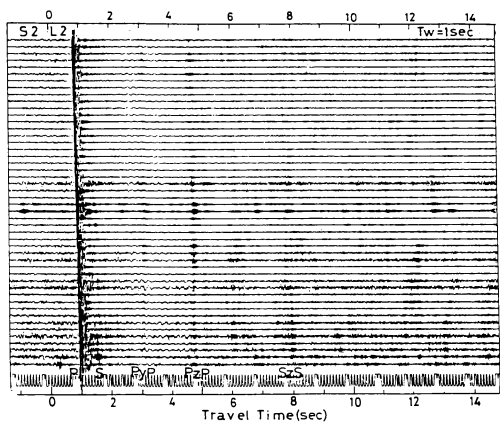


Fig. 5. Seismograms obtained by the present recording system for the S-2 shot of the Kuji-Ishinomaki Seismic Refraction Experiment conducted by the Research Group for Explosion Seismology (1991).

Amplitude of weak phases are magnified by the auto gain control (AGC) correction with time interval of 1 sec.

録である。S波の2.8秒後に溶融体からの反射波と推定される顕著な位相、SxS波が記録されている。MIZOUE *et al.* (1982), HORIUCHI *et al.* (1988), 松本・他(1991)より、SxS波の反射面の深さは10~15 kmと推定されているが、観測されるSxS波の振幅には大きな地域性がある。観測点が僅か25 m~50 mずれるだけでSxS波の振幅は大きく変わっている。短周期の地震波形は観測点直下の影響を非常に強く受けるようである。

爆破地震動研究グループ(1991)は久慈市-石巻を結ぶ東北地方を南北に横切る測線で人工地震の実験を行っている。我々は岩手県川井村でこのシステムを用いた観

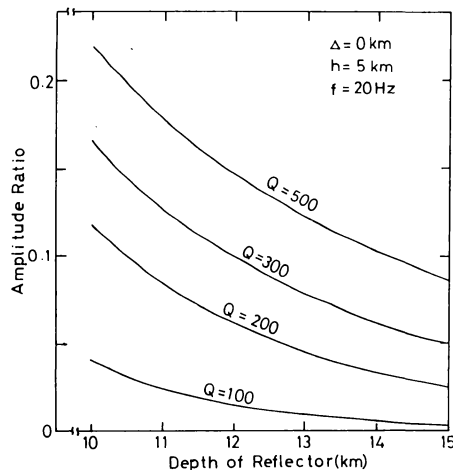


Fig. 6. Theoretical amplitude ratio between direct wave and reflected wave from a reflector having reflection coefficient of 1. Epicentral distance, focal depth and frequency of the seismic wave are assumed to be 0 km, 5 km and 20 Hz, respectively.

測点数が48点の測線を4ヶ所設置し、人工地震の観測を行った。Fig. 5は川井村で行われた人工地震の記録例である。ショット点と観測点との距離は約5 kmであり、記録はウィンドウが1秒のAGC (Auto Gain Control) 補正を行い表示したものである。P波の約4秒後にPzPと書かれている顕著な位相が見られる。堀内・他(1991)はこの位相が北西方向から到来した波であると指摘している。この位相の振幅はP波のその約1/50であるが、高密度アレイ観測を行うことによりこのように小さい振幅の位相も検出することが可能である。

#### § 4. おわりに

パソコンを用いた48チャンネルのアレイ観測システムを4組製作し、このシステムを用いた自然地震や人工地震の観測を行った。その結果、高密度アレイ観測を行うことにより微弱な反射波や変換波の検出が格段に容易になることが示された。

反射係数が大きい速度不連続面が地殻深部に広範囲に存在していたとしても、その速度不連続面からの反射波が通常我々がやっている地震観測で検出されるとは限らない。その原因は、直達波の後に色々な場所で反射・散乱された波が重なり合って到来するからである。Fig. 6は反射係数が1である反射面が震源の直下に存在している場合について、その反射面からの反射波と直達波との振幅比を調べたものである。ただし、発震機構の影響はここでは無視している。震源の深さを5 km, Q=300

とすると、反射係数が極端に大きい層があっても反射面の深さが12 km以深であると振幅比は0.1以下となり、通常の地震観測では反射波の検出が困難になると思われる。このことは、深部地殻構造を調べる場合には微弱な反射波を捉えることを目的とした特別の観測を行うことが大変重要であることを示している。

ここに示した観測システムはA/D変換器の分解能が12ビットであること、消費電力が大きいこと等今後改善すべき点が多い。しかし、地殻深部構造を詳しく調べるためには空間的分解能を高めた観測を行うことが最も重要であると思われる。

### 謝 辞

岩手県川井村における人工地震の観測は爆破地震動研究グループの協力を得て行われた。また、CDPケーブルを用いた観測では下記の方々の御協力を頂いた。北海道大学理学部 岡山宗男、九州大学理学部 鈴木貞臣、弘前大学理学部 佐藤魂夫、小菅正裕、山形大学理学部 長谷見晶子、宇都宮大学教育学部 鈴木将之、伊東明彦、東北大学理学部 海野徳仁、松澤 暢、西澤あずさ、松本 聡、河野俊夫の各氏。ここに記して謝意を表します。

### 文 献

- 爆破地震動研究グループ(発表者:吉井敏尅), 1991, 北上地域における爆破地震動の観測(久慈-石巻測線), 地震学会講演予稿集, No. 2, p. 211.
- HASEGAWA, A., D. ZHAO, S. HORI, A. YAMAMOTO and S. HORIUCHI, 1991, Deep structure of the northeastern Japan arc and its relationship to seismic and volcanic activity, *Nature*, 352, 683-689.
- 長谷川 昭・趙 大鵬・山本 明・堀内茂木, 1991, 地震波からみた東北日本の火山の深部構造と内陸地震の発生機構, *火山*, 36, 197-210.
- 堀 修一郎, 長谷川 昭, 1991, 微小地震反射波から推定される秋田県森吉山直下の地殻深部溶融体, *地震* 2, 44, 39-48.
- 堀内茂木・松澤 暢・長谷川 昭, 1987, パソコンを用いた多チャンネルデジタル記録システム, *地震* 2, 40, 119-122.
- HORIUCHI, S., A. HASEGAWA, A. TAKAGI, A. ITO, M. SUZUKI and H. KAMEYAMA, 1988, Mapping of a melting zone near Mt. Nikko-Shirane in northern Kanto, Japan, as inferred from SxP and SxS reflections, *Tohoku Geophys. J.*, 31, 43-55.
- 堀内茂木・堀 修一郎・河野俊夫・海野徳仁・松澤 暢・松本 聡・津村紀子・仁田交市・長谷川昭, 1991, 高密度アレイ観測による1931年小国地震周辺域の地震波反射体, 地球惑星科学関連学会1991年合同大会共通セッション予稿集, p. 160.
- INAMORI, T., S. HORIUCHI and A. HASEGAWA, 1992, Location of mid-crust reflectors by a reflection method using aftershock waveform data in the focal area of the 1984 Western Nagano Prefecture Earthquake, *J. Phys. Earth*, 40, 379-393.
- MIZOUE, M., I. NAKAMURA and T. YOKOTA, 1982, Mapping of an unusual crustal discontinuity by microearthquake reflections in the earthquake swarm area near Ashio, northern part of Tochigi prefecture, central Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 57, 653-686.
- 溝上 恵・石桁征夫, 1988, 微小地震反射波による長野県西部, 御獄山南山麓における地殻深部溶融体の検出, *月刊地球*, 10, 700-705.
- 松本 聡・長谷川 昭・堀内茂木・海野徳仁・松澤 暢・堀修一郎・河野俊夫・津村紀子・伊東明彦・緒方康浩・木村 亘, 1991, 中禅寺湖周辺域における地殻内反射面の形状の推定(2), 地球惑星科学関連学会講演予稿集, p. 161.
- 西脇 誠・森田裕一・流精樹・柿下 毅・長田芳一・永井直昭, 1989, 松代アレイで観測されたSxS波と反射面の検出, 地震学会講演予稿集, No. 1, 184.
- 津村紀子・堀内茂木・堀修一郎・河野俊夫・長谷川昭・岡山宗夫・井上 純・小林哲夫, 1990, 中禅寺湖周辺域における顕著な地殻内反射面の推定(2)多点アレイ観測による, 地震学会講演予稿集, No. 1, p. 71.