

精密制御震源の大深度地下展開とその性能検証

Deep deployment of ACROSS source and its performance assessment

佐伯昌之*・東原紘道**・大竹雄次***

Masayuki SAEKI, Hiromichi HIGASHIHARA and Yuji Otake

* 正会員 工博 東京大学 地震研究所 PD (〒113-0032 東京都文京区弥生1丁目1番1号)

** フェロー会員 工博 東京大学 地震研究所 教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1丁目1番1号)

*** 工博 東京大学 地震研究所 助手 (〒113-0032 東京都文京区弥生1丁目1番1号)

We deployed an artificial source of the new seismic tomography method ACROSS in a deep tunnel. We carried out the micro-tremor measurements in the tunnel and confirmed the calmness of the site in the frequency range of the artificial source. In order to estimate the long-term accuracy of the emitted waves, we continuously drove the source with a constant frequency, and observed the emitted waves for 24 hours. And we evaluated the temporal changes of the measured waves. The fluctuations of the measured waves were about 0.1 % in amplitude and less than 100 micro-seconds in phase. These values seem to be sufficient to observe some temporal changes of the emitted waves due to changes of the ground.

Key Words : harmonic wave, artificial source, deep deployment, seismic tomography

1. はじめに

本研究は、アクロス技術のハードウェア開発に関するものである。我々は、アクロスの実証試験のために、射程 1 km 級の精密制御震源を大深度地下へ設置し、その基本的な性能を検証した。その結果、現有の精密制御震源の性能は、これからの本格的な実証実験において、地盤の状態変化に伴う散乱波の変化を捉える可能性があることが分かったので、本論文において報告する。

まず、本研究の意義を明確にするため、アクロスの基本的なコンセプトについて説明する。アクロス研究の最終的な目的は、地下構造の定常モニタリングであり、大深度地下構造物の周辺岩盤の状態や、断層近傍の不均質構造の状態の変化を監視する問題への適用が考えられる。アクロスの特徴は、精密な調和弾性波を、長期間に渡り連続的に照射することである。そして、地盤の周波数伝達関数を精度よく計測し、その時間変化を精度よく捉えることにある。

従来の地震波トモグラフィ手法では、自然地震や爆破震源等のパルス的な波が用いられてきた。これは、従来の手法が、速度トモグラフィを基礎としたことによる。すなわち、弾性波の伝播時間を計測することにより、伝播区間の平均的な地震波速度を推定するものである¹⁾。しかしながら、センサーの高性能化・高密度アレイ化や、観測システム全体の時刻精度の向上のおかげで、近年では、パルス的な波の到達時刻という情報の他に、より微弱な信号である散乱波や、波の到達時刻の時間的変動が解析できるようになってきた。そして、これらの微弱な信号を解析することにより、地殻

内の不均質構造をより明らかにする試みがなされている²⁾³⁾⁴⁾。

ここで、散乱波やパルス的な波の到達時間の変動といった微弱な信号を高精度に捉えるには、従来の震源の精度は十分ではないと考えられる。そこで、アクロスでは、インパルス伝達関数と数学的に等価な周波数伝達関数を精度よく計測し適切な数学処理を施すことにより、散乱波やパルス的な波の到達時刻の変動といった微弱な信号を精度よく捉えることを試みる。そして、これらの情報から地下構造の定常モニタリングを試みる。

アクロスによる定常モニタリング手法の開発、およびその実証試験を行うために、射程 1 km 級の精密制御震源を地下 500 m の巨大トンネル内に設置した。ここで、精密制御震源を地下の良好な岩盤に設置することが重要である。その根拠は、以下に述べる 2 つの研究成果による。

1 つは、我々が行った波動場のシミュレーションの結果である⁵⁾。精密制御震源を地表面に設置した場合、地表に軟弱層があると大量の表面波を励起し、地下深部での波動場の励起効率が低下する。さらに、大量の表面波の生成は、地下からの反射波や散乱波のノイズになる。地下からの情報を精度よく捉えるには、表面波の生成を抑えるために震源を地下に埋設すべきである。

もう 1 つの根拠は、名古屋大学理学部により行われた実験である。彼等は、実際に精密制御震源を作成し、断層解剖計画⁶⁾の一環として兵庫県淡路島の野島断層の近傍に精密制御震源を設置し、1998 年より観測実験を行っている⁷⁾。彼等の実験では、気温や乾燥・雨などの影響により、精密制御震源により励起された波動が

大きく変化する。彼等は、精密制御震源を路頭した花崗岩の地表面に設置しているのだが、励起された波動の変動には、地表面の風化した花崗岩が大きく影響していると考えられている⁷⁾。

以上の事から、精密制御震源は地下の風化していない良好な岩盤に設置すべきであることが分かったので、我々は、実証試験用の精密制御震源を大深度地下の岩盤に設置した。現場では、我々は、まず常時微動を計測することにより、現場のノイズ環境を調べることから始めた。次に、精密制御震源を設置し、その性能を検証した。その結果、名古屋大学理学部が行った淡路島での実験結果に比べ、精度の面で大幅な改善が見られた。以下に、これを説明する。

2. 実証試験サイトの概要

2.1 試験サイトの位置と地質環境

我々の実証試験サイトは、山梨県大月市にある東京電力が所有する葛野川発電所の巨大地下空洞にある。図-1に、実証試験サイトのおおまかな位置を示す。試験サイトの南東30kmの辺りには山梨県東部地震と呼ばれる地震の巣がある。この地域の地下数十kmの辺りでは、フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込まずに衝突していると考えられている。そして、山梨県東部地震の巣は、この衝突と強い関係があると考えられている⁸⁾。

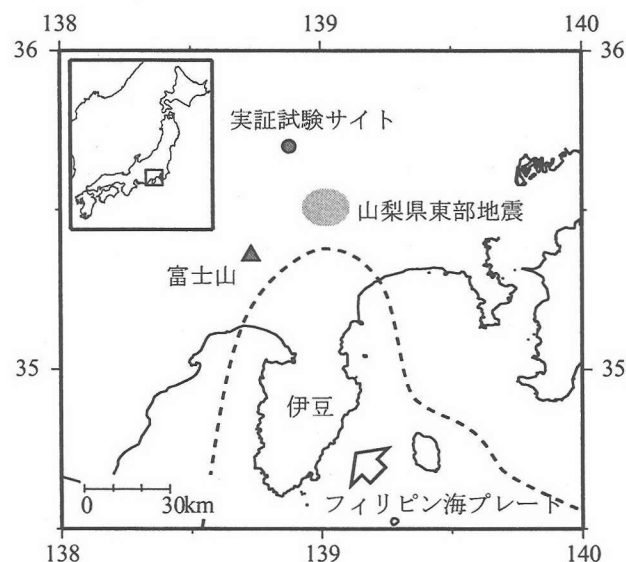


図-1 実験サイトの位置

葛野川発電所が位置する地域は、地質構造区分としては、四万十帯に属する⁹⁾。四万十帯は西南日本の外帯に広く分布しており、白亜紀-古第三紀の半遠洋性の乱泥流性堆積物である。サイトの岩盤は、北急傾斜の砂岩と泥岩の互層となっている。また、葛野川発電所の建設

時に行われた弾性波探査、および岩石試料を用いた各種試験によると、発電所周辺の岩盤の密度は 2.73g/cm^3 、P波速度は 5.7km/s 、S波速度は 3.3km/s である。

2.2 大深度地下空洞の概要

発電所がある大深度地下空洞の概略図を図-2に示す。葛野川発電所は揚水式の発電所で、上側ダムと下側ダムのほぼ中央に位置する。発電所は、地下500mの深さに建設されており、その周囲には、道路のネットワークが張巡らされている。図中、グレーで塗りつぶしてあるトンネルは、発電・揚水用の配水管である。現在、地下空洞内には、精密制御震源を1台、3成分ボアホール型加速度計を3台設置している。

葛野川発電所は、電力調整用の発電所であるため、稼働時間は、主にお昼と夕方の電力需要が高い時と、夜間の揚水時に限られている。そのため、発電所の稼働時間は1日の内で3時間程度となっている。

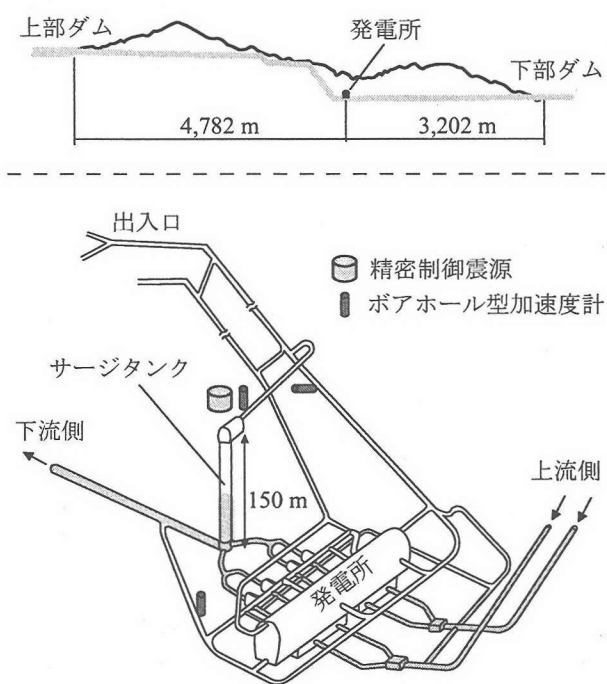


図-2 葛野川発電所の大深度巨大地下空洞の図

3. サイトの振動環境の調査

実証試験では、発電所の稼動に伴う振動がノイズとなるため、発電所の稼動状況やサイトの振動環境を詳細に知っておく必要がある。そこで、我々は地下空洞の各点で常時微動を観測し、サイトのノイズレベルや卓越振動を調べた。また、計測された卓越振動と発電施設の関係について調査した。

3.1 常時微動の観測

常時微動の観測は、図-2の3成分ボアホール型加速度計の設置してある地点において数回行った。センサーは3成分ボアホール型加速度計（勝島製作所）の他に、広帯域地震計 CMG（Gralp）を用いた。データロガーは横河のデジタルオシロスコープを用いた。

図-3に観測波形の一例を示す。図中の波形は、精密制御震源の近傍において、12時間連続観測を行った時の波形のうち、特徴的な部分を取り出したものである。上から順に(a)発電所稼働時、(b)過渡時、(c)静穏時を示す。観測では、サンプリング周波数 500 Hz でデータを取得したが、図中では波形を見やすいように 62.5 Hz のローパスフィルターをかけたものを載せている。図の縦軸は地盤の速度 [m/s] で、横軸は観測開始からの経過時間 [分] である。また、NS、UD 成分の波形は、見やすいように、それぞれ上下方向にシフトしている。

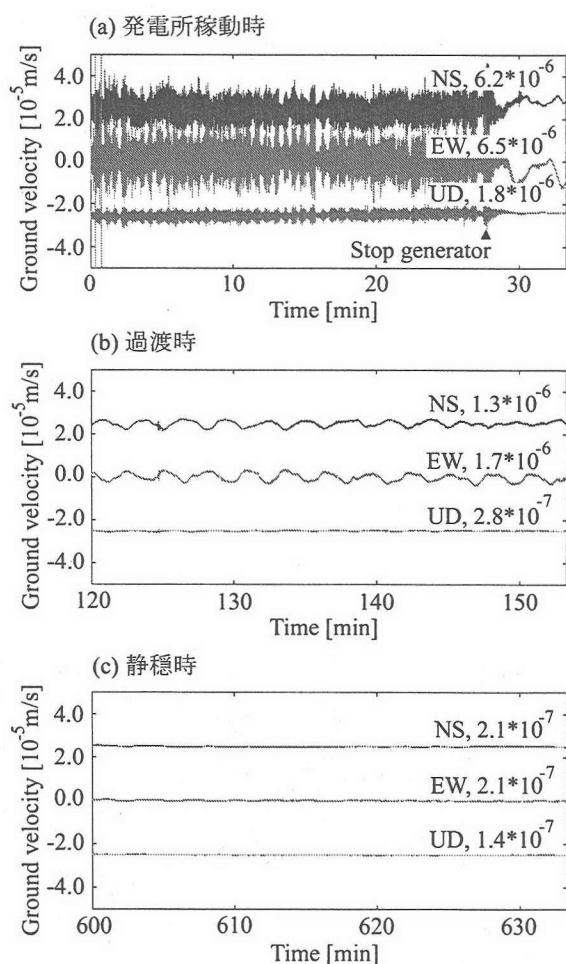


図-3 観測された常時微動の一例

図-3(a)では、観測開始から約28分後に突如、観測波形の振る舞いが大きく変化している様子が見える。この時間は、発電所の運転記録と対応させると、発電の

停止と一致する。発電を停止させると、水車が停止するので、高周波成分の振動は励起されなくなる。また、この時、配水管のゲートを閉めるので、配水管の水の流れが強制的に止められ、下部ダムと発電所のサージタンク内の水が固有振動を起こす。図-3(b)に見られる緩やかな減衰振動は、この水の固有振動により励起されたものである。図-3(c)は、発電所の停止から十分に時間が経過した状態を示す。

3.2 観測波形の周波数解析

次に、ノイズの卓越周波数を見るために、フーリエスペクトルの振幅分布を求めた。計算の手順は次の通りである。

- 1) 観測データから、約 1049 秒（データ数にして 2^{19} 個）のデータを切り出す。
- 2) 汎用の FFT ソフトを使用して、切り出したデータのフーリエスペクトルを計算し、振幅を求める。
- 3) 1) と 2) の操作を、10 秒ほど時間をずらした波形について行う。
- 4) 3) の操作を 10 回程度繰り返し、各スペクトル成分の振幅を平均する。

図-4に、図-3に示した観測波形の NS 成分を用いて計算したフーリエスペクトルの振幅分布を示す。図中、縦軸は地盤の速度を観測時間 T の平方で除した値 [$\text{m/s}/\sqrt{T}$] で、横軸は周波数 [Hz] である。また、図右上の (a)~(c) の記号は、それぞれ図-3の (a)~(c) に対応する。

図-4(a)に示すように、発電所稼働時には、低周波数から高周波数に渡って全体的に振動が大きい。特に、2, 8, 12, 58 Hz 付近には顕著な狭帯域の信号が見られる。これらの内 2, 8, 58 Hz の振動については、発電所の設計段階から発生することが分かっており、発電所稼働時に特有の振動であることが分かっている。

次に、図-4(b)の過渡時のスペクトルを見ると、高周波数成分の振幅が全体的に 2 桁程度低下したことが分かる。振動レベルが低下したことにより、50 と 100 Hz のところに、鮮明な線スペクトルが現れている様子が見える。これは電氣的な要因によるノイズと考えられる。また、低周波数成分を見ると、約 0.006 Hz 付近に振幅の高まりが見える。この周波数は、サージタンク内の水の固有振動数の設計値 169 秒と一致する。

次に、図-4(c)の静穏時のスペクトルを見ると、0.006 Hz のところにあった振幅の高まりが 1 桁以上低下している様子が見える。そして、これに伴い 0.006 Hz から広がるエンベロープも低下している。これにより、0.2 Hz 付近を中心とする振幅の高まりが顕著に見られるようになった。この 0.2 Hz 付近の振動は、海洋の潮汐が原因であることが知られており¹⁰⁾、一般に、振動ノイズの小さいところで観測される。つまり、このサイトの振動レベルが十分に低いことを示している。

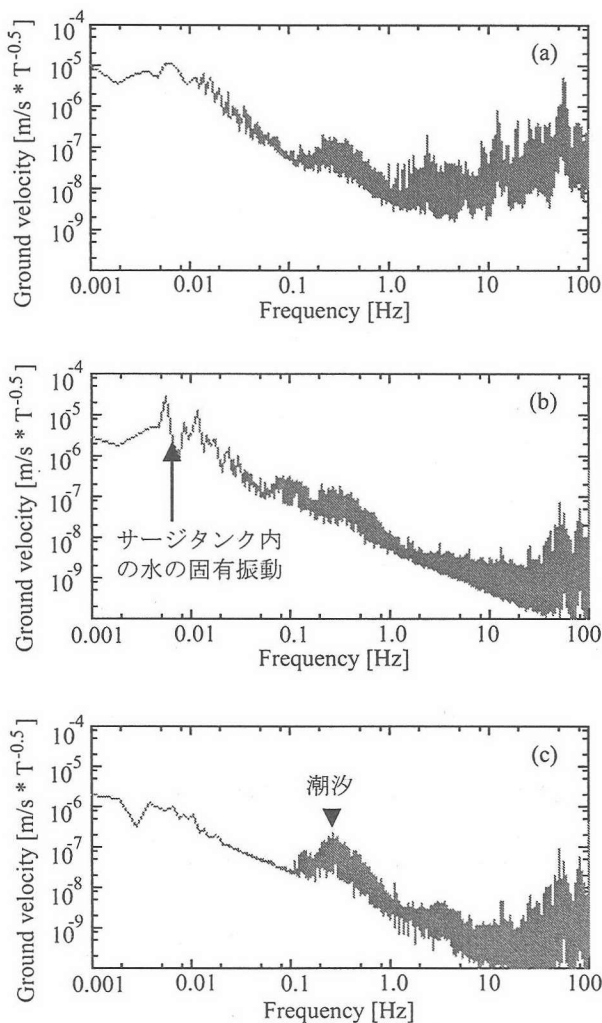


図-4 NS成分のフーリエスペクトルの振幅分布

アクロスの周波数帯域に限ると、静穏時においても12, 25 Hz 付近に狭帯域の信号が見える。現在のところ、この原因である振動源は特定できていない。しかしながら、これらは狭帯域で、周波数も安定していることから、アクロスの信号とは分離可能である。

4. 精密制御震源の設置と作動状況の確認

精密制御震源により励起される波動は、精密制御震源と岩盤との相互作用で決まるため、精密な調和波動を生成するためには、精密制御震源をしっかりと岩盤に固定する必要がある。この節では、精密制御震源の設置法と、設置された精密制御震源の作動状況の確認について説明する。

4.1 精密制御震源の設置

設置した精密制御震源と定着装置の模式図を図-5に示す。精密制御震源の設置では、まず、湧水が少なく岩盤の地質が比較的均質な場所を選定した。そして、周囲

の岩盤にダメージを与えないように注意しながら、円柱状の穴を掘削した。次に、掘削した円柱状の空洞に鋼鉄製のアンカーフレームを入れ、岩盤とアンカーフレームの間に膨張性のコンクリートを充填した。精密制御震源は、アンカーフレームにボルト締めで2つの深さの面で固定している。

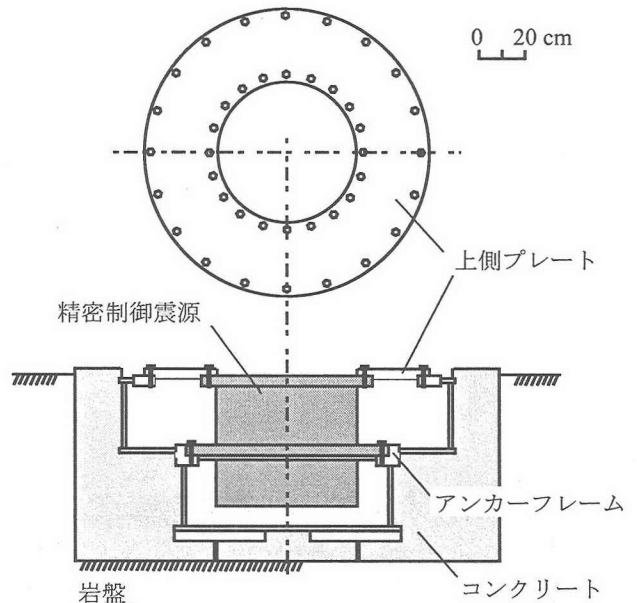


図-5 精密制御震源と定着装置の模式図

実際に設置した精密制御震源の写真を図-6に示す。写真は、震源の斜め上方から撮ったもので、震源と定着装置の上側プレートに加え、モータや、震源を冷却するための油冷却ポンプが写っている。また、上側プレート上面に写っている細い線は、震源の温度を測定するためのセンサ（熱電対）である。

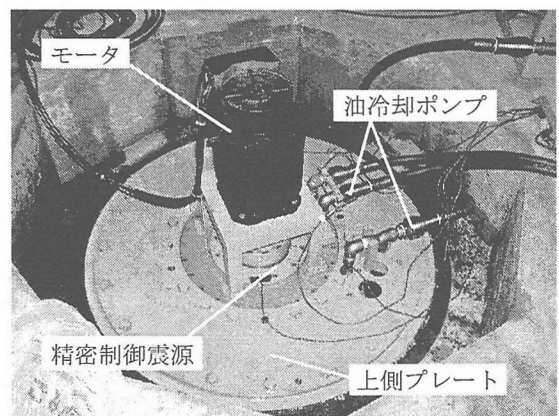


図-6 設置された精密制御震源の写真

4.2 精密制御震源の作動状況の確認

精密制御震源を設置した後、震源が正常に動作することを確認した。確認作業では、まず温度センサを震源の躯体に貼付け、震源が高温にならないことを確認した。また、異常音が発生していないことも同時に確認した。

次に、震源が異常振動を励起していないことを確認するため、加速度計により震源の振動を計測した。

(1) 振動計測に用いた実験装置

図-7に、計測装置の模式図を示す。センサーは震源の近傍に設置したボアホール型3成分加速度計（勝島製作所）と、定着装置の上側プレートに設置した圧電素子型の3成分加速度計（NEC 三栄）を用いた。（以降、それぞれをセンサーK、Nと省略する。）センサーNは、強力両面テープを用いて固定した。

データロガーは横河電機のWE7000を用いた。これに16 bitのADコンバータを搭載し、センサKとNの合わせて6成分を同期してサンプリングした。計測のトリガ信号には、モータのエンコーダが生成するZ相（1 pulse/rotation）の信号を入力した。モータの回転軸と精密制御震源の偏心質量は、同一の軸に固定されている。そして、トリガ信号は偏心質量がある特定の位置に来たときに必ず出力されるので、観測の開始の瞬間には、偏心質量は必ず同じ位置にいる。また、トリガ信号が出力されてからサンプリングが開始するまでの遅れは1 μsec 以下になるようにしてある。

(2) 計測された精密制御震源の振動

図-7の装置を用いて、震源の振動を計測した。計測された波形とそのフーリエスペクトルの振幅分布の一例を図-8に示す。図の時系列波形は、精密制御震源を20 Hzで運転していた時に、それぞれの加速度計で観測されたRadial成分の波形である。縦軸は加速度 [m/s^2]、横軸は時間 [sec] を示す。また、フーリエスペクトルは、約60秒のデータ（データ数 2^{16} 、サンプリング周波数1 kHz）をFFTして得たものである。

図-8に見られる様に、近傍のボアホール型加速度計で計測した波形(a)にはほとんど高調波成分が含まれていないにも関わらず、定着装置の上側プレート上に設置した加速度計で計測した波形(b)には、基本波と同程度の高調波成分が含まれていた。一般に、高調波は構造の非対称性や、材料の非弾性変形により発生する。非弾性変形は定着装置の構造に問題があることを意味する。そこで、高調波の原因を調べるために、センサNを用いて、定着装置の上側プレート上の各点での軌跡を調べた。

図-9に、上側プレート上のある1点で計測したセンサNの軌跡を示す。軌跡を描くための変位データは、加速度波形を離散フーリエ変換し、5~105Hzのバンドパスフィルターをかけて、各周波数成分を $-\omega^2$ で除した後、逆フーリエ変換で時系列波形に戻すことにより

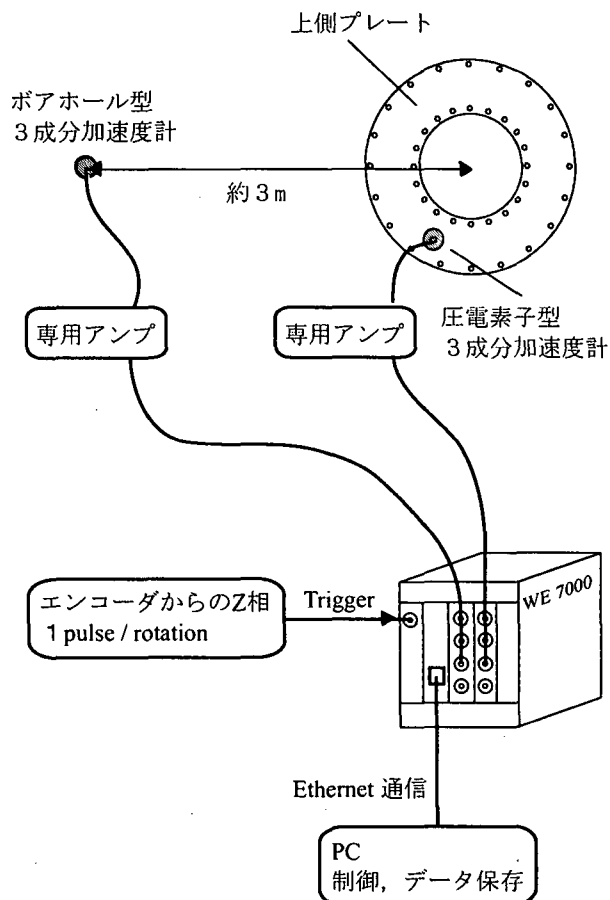


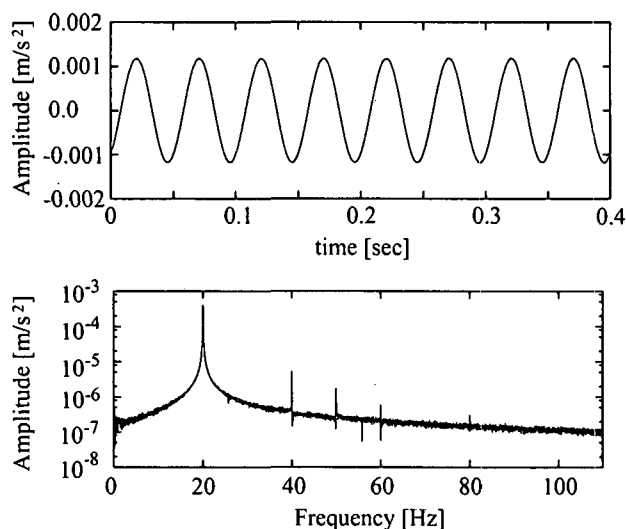
図-7 震源の振動計測に用いた実験装置

作成した。図-9を見ると、軌跡は、真上から見ると卵型を描くことが分かる。また、上側プレート上の様々な点において軌跡を求めたところ、どの点でも同様の軌跡が得られた。

図-9の様な軌跡は、精密制御震源の剛体運動だけでは説明がつかないので、変位には上側プレートの変形による寄与が含まれると考えられた。そこで、変位を震源の剛体運動の寄与と上側プレートの変形の寄与に分解するために、上側プレートの中心が対称の中心となるような2点での観測波形を用いて、その和と差を計算した。図-10に計算に用いた観測点の模式図と、その点で得られた軌跡を示す。計測は点A、B、C、Dの4点で行った。図中央の矢印は、ある瞬間の偏心質量の方向（遠心力の働く方向）を示す。また、各点の軌跡上に示している直線は、偏心質量が矢印の位置にあるときの変位の方向である。

図-11に、観測波形より求めた変形の寄与と剛体運動の寄与の波形を示す。図中、縦軸は変位 [10^{-6}m]、横軸は時間を表す。波形xは、図-10の点BとDのradial方向の波形を用いて計算し、波形yも点AとCにより同様に計算した。グラフの符号は、剛体運動の寄与については正の値が図-10の座標軸の正の方向を表し、

(a) 近傍のボアホール型加速度計における計測波形



(b) 定着装置に設置した加速度計による計測波形

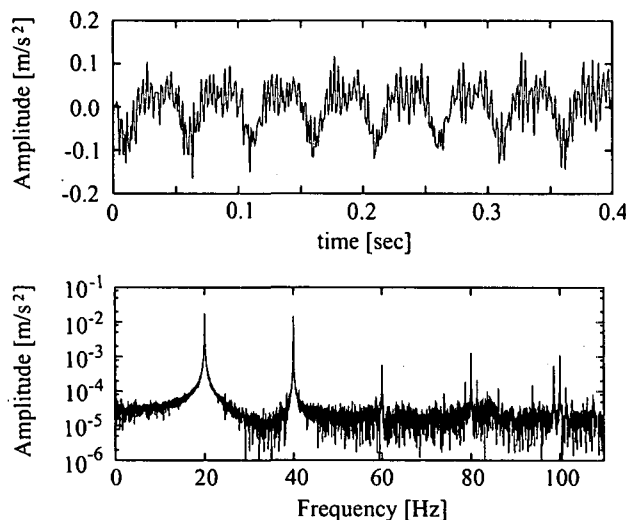


図-8 震源近傍で観測された時系列波形とフーリエスペクトルの振幅分布の一例

変形の寄与については正の値が伸びを、負の値が縮みを表す。

図-11の波形をみると、剛体運動の寄与は、ほぼ20 Hz（震源の回転周波数）で振動していることが分かる。そして、変形の寄与をみると40 Hzで振動している様子が見える。力がA方向に作用する時、変形はy軸方向に伸びx軸方向に縮む。次に、力がB方向に作用すると、変形は逆にy軸方向に縮みx軸方向に伸びる。次に力がC方向に作用すると... このように、力が一回転する間に変形は伸び縮みのパターンを2回繰り返すので、高調波（40 Hz）の波が励起されたと考えられる。また、剛体運動の寄与について軌跡を描くと、ほぼ水平面内で真円を描くことが分かった。

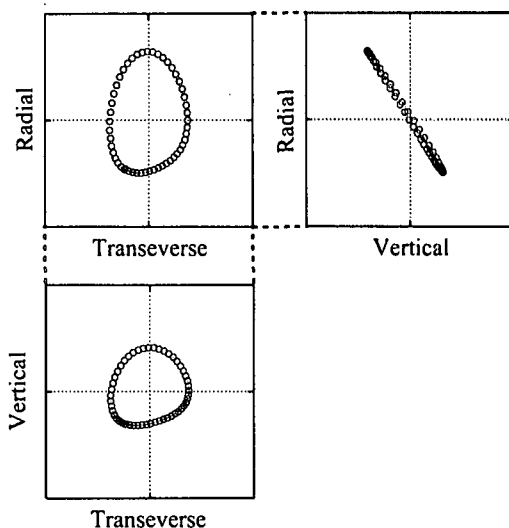


図-9 上側プレートのある点での変位軌道

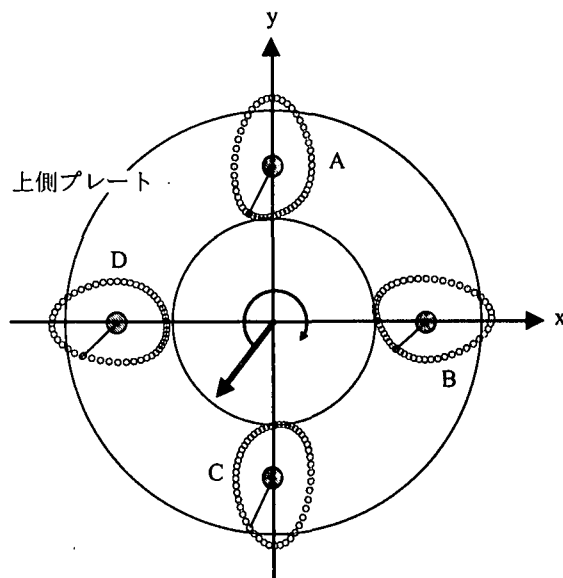


図-10 計算に用いた観測点とその点での軌跡

剛体運動の寄与のフーリエスペクトルを調べたところ、変形として除去されずに残った高調波成分は基本波成分の約1%ほどであることが分かった。センサの設置の精度を考慮すると、この1%の値についてはそれほど信頼できないが、図-8(a)の様に、近傍のボアホール型加速度計の計測データにも高調波が記録されていることから、精密制御震源は若干の高調波を励起していると考えられる。この高調波の原因については、今後さらに調査する予定であるが、当面の観測実験には問題がないと考えられる。

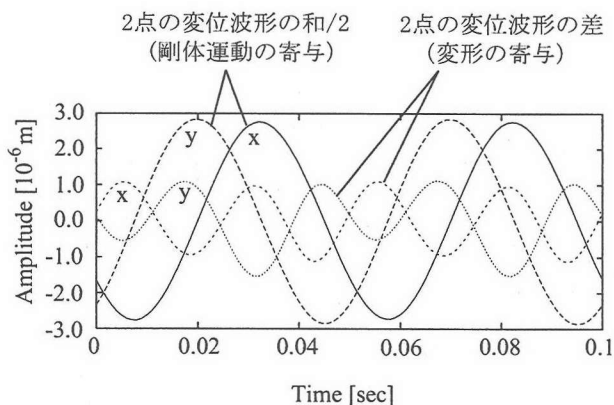


図-11 定着装置の変形成分と剛体運動成分の時系列波形

5. 精密制御震源の時間安定性の検証

最初に述べた様に、地殻内の変動を見るためには、精密制御震源が生成する調和波動は、長期間に渡り変動が小さくなければならない。そのために精密制御震源を地下の良好な岩盤に設置した訳である。そこで、設置した精密制御震源が生成する波動が時間的に安定であることを確かめるために、24 時間連続運転を行い、波動を観測し、そのゆらぎを評価した。

5.1 観測装置とデータ取得法

観測に用いた装置は、小節 4.2.(1) で用いたものと同じである。精密制御震源を一定の周波数 15 Hz で 1 時間ほど暖気運転した後、同じ周波数で 24 時間連続運転を行った。その一方で、震源近傍のボアホール型加速度計を用いて、励起された波動を計測した。サンプリング周波数は 100 Hz とし、トリガは 1 秒間に 1 回かけた。トリガ信号とサンプリングのタイミングの精度については、小節 4.2.(1) で述べた通りである。サンプリングされたデータは自動的にハードディスクに保存され、観測開始から 24 時間が経過した段階で、計測を打ち切った。

5.2 観測データの処理と解釈

得られた波形データの最小単位は 1 秒である。これを 60 回スタッキングし、1 分について 1 データを作成した。これに離散フーリエ変換を施し、精密制御震源の運転周波数である 15 Hz の振幅と位相を求めた。この操作を全データについて行い、24 時間の振幅と位相の変動を時系列でならべた。図-12 に得られた振幅と位相の時間変動を示す。図中、上から 3 つは各成分の振幅の変動のグラフで、下 3 つは位相の変動のグラフである。縦軸は、それぞれ振幅と位相の変動を表し、グラフの縦軸の幅はそれぞれ $2.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ と $100 \mu\text{sec}$ である。横軸は、観測開始からの経過時間 [hours] を示

す。図中、グレーで塗りつぶした時間帯は、発電所が稼動しているためにノイズレベルが高くなった時間を表す。

変動を定量的に評価するため、振幅について標準偏差 σ を平均値 a で除した数値をゆらぎと定義し、この値を計算した。得られた値は、図-12 の各グラフの左上に示してある。これによると、今回設置された精密制御震源の 24 時間のゆらぎは、振幅 0.1% 程度、位相で $100 \mu\text{sec}$ 以下であることが分かった。この値は、名古屋大学理学部が淡路島で行った同様の実験結果（振幅で 10%、位相で 1 msec 程度）と比較して、振幅で 100 倍程度、位相で 10 倍以上も改善している。これにより、精密制御震源を地下に埋設する効果が実証されたと言える。

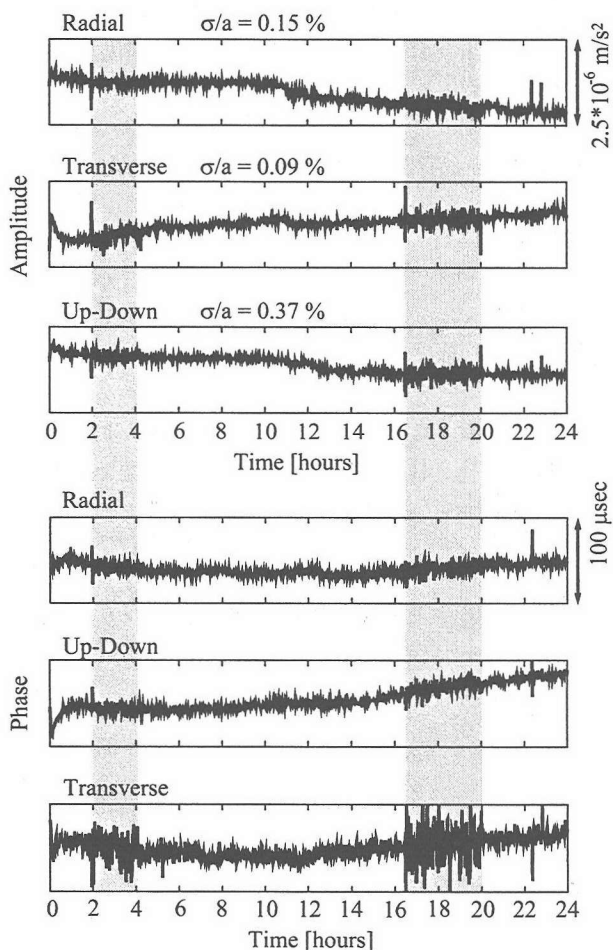


図-12 精密制御震源が生成する波動の振幅と位相の時間変動

6. まとめ

本研究では、アクロス技術の核である精密制御震源を大深度地下に設置し、その性能検証を行った。本研究により得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 実証試験サイトにおいて常時微動を観測すること

で、サイトの振動環境を調べた。これによると、発電施設が稼動していない場合には、アクロスの周波数帯域の振動レベルは $10^{-9} \text{m/s}/\sqrt{T}$ 程度であり、ノイズレベルはかなり低い。そして、発電施設の稼動時間は1日で3時間程度であるので、これからの本格的な観測では、精密制御震源が励起する波動を精度よく観測できる環境にあると言える。

2) 精密制御震源の性能を検証した。特に、励起される調和波動の時間安定性は重要であるので、実験により励起される波動を観測し、その変動を定量的に示した。これによると、波動の24時間の変動は振幅で0.1%程度、位相で100 μsec 以下である。

これからの本格的な観測実験では、まず、精密制御震源から約300 mと約1 kmの遠方に位置する地震計を用いて速度トモグラフィを実施し、地下構造の状態の変化に伴う観測波形の変化が実際に検出できることを確かめる予定である。地下構造の状態を変化させる原因としてよく知られているものに、地球潮汐がある。地球潮汐は、岩盤中のクラックの開閉とそれに伴う間隙水圧の変化を引き起こす¹¹⁾。これにより地盤の状態が変化するため、結果として波動の伝播を変化させると考えられている。実際に、過去に地表付近で行われた同様の実験では、地球潮汐が原因と考えられる弾性波速度の変化が観測されており、その大きさは0.1～0.5%ほどである¹²⁾¹³⁾。

もし仮に、このサイトで同程度の弾性波速度の変化が起こるとすれば、伝播時間の速度変化は300 mと1 kmの観測点において、それぞれ約100と300 μsec となる。この値は、設置された精密制御震源の安定性から考えると十分に観測できる値である。また、この地球潮汐の影響による観測波形の変化が検出できれば、これをリファレンスとして、次には、地盤の季節変動やトンネル内の湧水量の変化に伴う変動を検出することを試みる予定である。

謝辞

東京電力株式会社様には、実験サイトを提供して頂きました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 物理探査ハンドブック, 物理探査学会, 1998
- 2) 堀内茂木・松澤暢・松本聡・津村紀子・長谷川昭・堀修一郎・海野徳仁・河野俊夫・仁田交市・小菅正裕・佐藤魂夫, 高密度アレイ爆破観測による1931年小国地震震源域周辺の地震波散乱体分布, 地震2, **46**, 75-84, 1993
- 3) Matsumoto, S., Obara, K., Yoshimoto, K., Ito, A. and Hasegawa, A., Temporal change in P-wave scatterer distribution associated with the M6.1 earthquake near Iwate volcano, northern Japan, *Geophys. J. Int.*, **145**, 45-58, 2001
- 4) 河村知徳・蔵下英司・篠原雅尚・津村紀子・伊藤谷生・宮内崇裕・佐藤比呂志・井川猛, 活断層周辺における地震波散乱体の検出とその地質学的実態の推定 - 紀伊半島北西部中央構造線を例として -, 地震2, **54**, 233-249, 2001
- 5) 佐伯昌之・東原紘道, 精密制御人工震源の波動場励起力に関する理論的研究, 応用力学論文集, **3**, 679-686, 2000
- 6) 安藤雅孝, 島崎邦彦, 竹村恵二, 総論; 断層解剖計画, 月刊地球/号外, **21**, 1998
- 7) Yamaoka, K., Kunitomo, T., Miyakawa, K., Kobayashi, K. and Kumazawa, M., A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system, *The Island Arc*, **10**, 336-347, 2001
- 8) Ishida, M., Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, **97**, 489-513, 1992
- 9) 東京電力(株) 提供資料
- 10) Lay, T. and Wallace, T. C., *Modern global seismology*, ACADEMIC PRESS, 1995
- 11) 小泉尚嗣ほか, 2001年芸予地震前後の近畿地方およびその周辺における地下水・地殻歪変化, 地震 第2輯, **55**, 119-127, 2002
- 12) Reasenber, P. and Aki, K., A precise, continuous measurement of seismic velocity for monitoring in situ stress, *J. Geophys. Res.*, **79**, 399-406, 1974
- 13) Yukutake, H., Nakajima, T. and Doi, K., In situ measurements of elastic wave velocity in a mine, and the effects of water and stree on their variation, *Tectonophysics*, **149**, 1988

(2003年4月18日受付)