

調和弾性波トモグラフィにおける周波数精度と分解能の定量的分析

Quantitative analysis on relationship between accuracy of the frequency and resolution of the seismic harmonic wave tomography method

佐伯昌之*・曾維健**・東原紘道***

Masayuki SAEKI, Weijian ZENG and Hiromichi HIGASHIHARA

* 学生会員 工修 東京大学 工学系研究科 社会基盤工学専攻 (〒113-0032 東京都文京区弥生1丁目1番1号)

** 学生会員 工修 東京大学 工学系研究科 社会基盤工学専攻 (〒113-0032 東京都文京区弥生1丁目1番1号)

*** 正会員 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)

We have developed a seismic harmonic wave tomography method for underground structure. The objective of this paper is to quantitatively show the resolution of our method. As an example, we try to estimate the depth of a reflective boundary in a full space model. We apply the sompi-cepstrum method to this problem, by which we can estimate arrival times of pulses from finite observational data in frequency domain. We show the energy efficiency of two controls of our source. One is the usual control in which our source emits one frequency component wave at one time. The other is FM control in which the source emits many frequency components at the same period of time. We show the FM method is not efficient. We investigate the effect of the accuracy of frequency of harmonic waves on resolution of our method. The frequency accuracy of our source is shown to be high enough at this stage. The results of this paper might be a good reference to our future experimental study.

Key Words : tomography, harmonic wave, resolution, artificial source

1. はじめに

我々は、以前より、調和弾性波を用いた地下探査手法を開発している¹⁾²⁾。本手法の目的は、地下の速度構造を高分解能で推定すること、また、地殻内の応力集中場の変動を捉えることである。そのために、コヒーレントな調和弾性波を地下構造に照射し、その散乱波を長期間に渡り連続的に観測し、解析する。

これまでに、本手法を構成する各要素については研究してきたが、手法全体としての分解能は未だ明示していない。我々のほかにも、他の研究機関³⁾において、調和弾性波を用いた同様の手法が研究開発されているが、著者の知る限り分解能は明示されていない。

しかしながら、手法を開発する場合には、分解能を定量的に評価し、手法を構成する各要素の分解能への影響を調べる必要がある。そして、分解能の上限を決めている要素を実験や数値解析により、つきとめる必要がある。例えば、本手法では、調和弾性波の周波数精度が重要であると考えられるが、この調和弾性波を励起する精密制御人工震源の周波数精度が十分であるかどうかは、現段階では明らかでない。上述の理由から、まず現段階における分解能を明示することは、重要であると考えられる。

本研究では、簡単な数値モデルを用いた数値解析ではあるが、これにより本手法の分解能を明示すること

を試みる。手順としては、まず、観測波形から地下構造を推定する手法や、精密制御人工震源の制御方法について、定量的に考察する。そして、調和弾性波の周波数精度と本手法により得られる分解能の関係を定量的に示す。また、精密制御人工震源の試作1号機を用いた実験から、調和弾性波の周波数精度を求め、これを解析と比較する。

2. 本論文での分解能の定義

本論文では、地下に水平な反射面がある場合に、本手法でその反射面の深さを推定することを試みる。以下に、数値モデルと分解能の定義を述べる。

2.1 数値モデル

数値モデルとして、反射面をもつ全無限媒体に、精密制御人工震源を1つ設置する場合を考える。図-1に、数値モデルを示す。

精密制御人工震源は円柱座標系 (r, θ, z) の原点に置き、震源の回転軸は z 軸と一致させる。図中、 V_p は P 波速度、 V_s は S 波速度、 ρ は媒質の密度、 d は反射面の深さである。

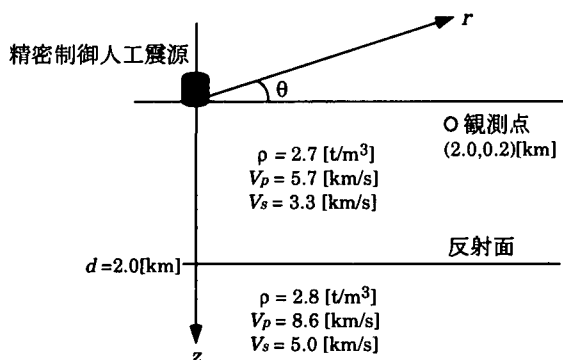


図-1 反射面をもつ全無限媒体のモデル

2.2 問題の設定

精密制御人工震源の鉛直下方に水平な反射面があるが、その深さが分からない状況を考える。また、媒体の物性値も未知とする。

ノイズは観測ノイズのみを考慮する。観測ノイズは、完全にホワイトとし、その標準偏差は $10.0 [\mu\text{kine}]$ とする。この値は、ボアホール中に設置した地震計により観測されるノイズレベルに相当する。

精密制御人工震源は、偏心質量 $MR [\text{kgm}]$ を一定の周波数 ω で回転して遠心力 $F_0 = MR\omega^2$ を発生させ、それを地盤に伝えて調和波動を励起する。本論文では、 $MR = 1.41 [\text{kgm}]$ とする。このとき、 $30 [\text{Hz}]$ で約 $50 [\text{kN}]$ の力を発生する。

以上の状況において、観測波形から反射面の深さ d を推定する。また、分解能を定量的に評価するために、この推定値の標準偏差を分解能と定義する。

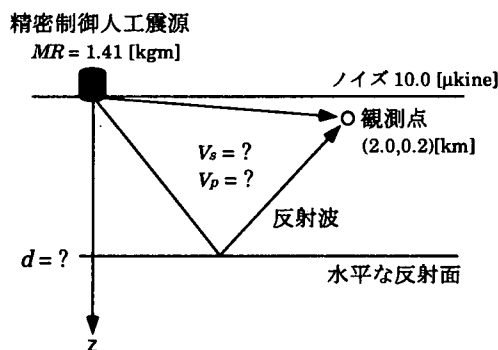


図-2 問題の設定

3. 分解能を大きく左右する要素

本手法において、速度構造を推定する場合に、分解能を大きく左右する要素について説明する。まず、要素は大きくハードとソフトに分けられる。また、ソフトはさらに観測手法と解析手法に分けることができる。

この分類に従って、分解能を大きく左右する要素を図-3に整理する。

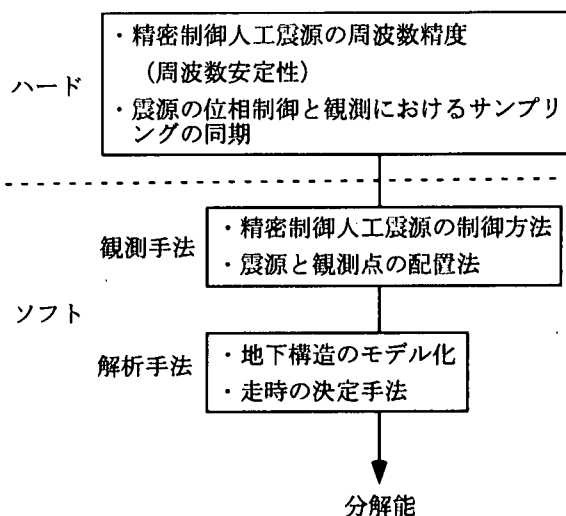


図-3 分解能を決定する要素

ハードにおいて、図-3に示す2項目が重要となるのは、観測波形をスタッキングするためである。Signal/Noise比を向上するには、観測波形を長時間スタッキングする必要があるが、このとき震源の周波数精度や観測におけるサンプリングとの同期の精度が低いと、観測波形を歪めてしまう。精密制御人工震源に要求される周波数精度を評価することは、この論文の1つの目的である。以下のシミュレーションでは、まず、この震源の周波数精度は完全に正確であると仮定する。また、震源の位相制御と観測におけるサンプリングの同期も完全に正確であるとする。

観測手法について説明する。精密制御人工震源の制御方法とは、多数の周波数成分を観測する場合における、各周波数成分の観測方法である。例えば、FM (Frequency Modulation) 制御するのと、一定の周波数で制御して段階的に多成分を観測するのでは、どちらが効率的かという問題を扱う。また、観測する周波数成分の数や、周波数帯の幅についても議論する。震源と観測点の配置法は、今回の未知数の少ない問題では、あまり重要ではないが、地下構造が全く未知である現実の場合には重要となる。

解析手法について、説明する。本手法において、観測される波形データは、周波数領域において狭帯域の離散データである。このデータ集合から、地下構造を推定する場合、2つの方法が考えられる。1つは、地下構造を仮定して、その計算結果と観測データを比較して、誤差が最小になるようにパラメータを決定する方法である。もう1つは、時間領域において、イベント波の走時を求め、走時から速度構造を推定する手法である。今回は、後者の走時を求める方法を用いて地下構造を推定する。周波数領域において狭帯域の離散デー

タから走時を精度よく決定する手法としては、存否ケプストラム⁴⁾が提案されている。

実際には、図-3に示した矢印のように、ハードがソフトを制限し、ソフトにより分解能が制限される。しかし、今回のシミュレーションでは、目標とする分解能から遡って、精密制御人工震源に必要な周波数精度を定量的に評価する。

4. 解析手法～走時の決定

ここでは、まず、存否ケプストラムについて簡単に説明する。その後、この手法を用いて、イベント波の走時を決定し、その推定誤差を評価する。図-2に示されるモデルでは、イベント波は、パルス的な震源を仮定した場合、震源から直接伝播した波と、反射面からの反射波になる。

4.1 存否ケプストラムのモデル化

存否ケプストラムは、時間領域での波形を、パルス形状イベントの列としてモデル化する。例えば、入力をDiracのデルタ関数 $\delta(t)$ とし、伝播の過程で波が減衰しないとすると、時間領域の観測波形 $f(t)$ は次式によりモデル化される。

$$f(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta(t - q_i) \quad (1)$$

ここに、 n は観測されるパルスの数、 α_i は i 番目のパルスの振幅、 q_i はパルスの到達時間である。

式(1)を時間 t についてフーリエ変換すると、式(2)を得る。

$$F(\omega) = \sum_{i=1}^n \alpha_i e^{-i\omega q_i} \quad (2)$$

式(2)のように、時間領域におけるパルス列は、周波数領域ではSin波の重ね合わせとして表される。存否ケプストラムは、観測波形を、周波数領域においてSin波の重ね合わせとしてモデル化し、狭帯域の離散データから、パラメータ α_i 、 q_i を最小二乗法により推定する。

また、波動の伝播による減衰は、媒質の速度を複素数にすることで対応する。このとき、時間領域のパルス形状の列は式(3)でモデル化される。

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{i\alpha_i}{t - q_i} \quad (3)$$

4.2 走時の推定

まず、観測条件について説明する。全観測時間長を T_s 、観測する周波数成分の数を N_s 、隣合う周波数成分の間隔を df 、観測する周波数帯の中心周波数を f_0 と

する。この時、1つの周波数成分における観測時間は $T_f = T_s/N_s$ となる。

df は、存否ケプストラムにおいて、推定できる走時の最大値 $T_{max} = 1/2df$ を与える。この仕組みは、離散フーリエ変換と同じである。今回の計算では、反射面の深さを未知としているので、余裕をとって $df = 0.2$ [Hz]とする。

中心周波数は、 $f_0 = 20$ [Hz]を用いる。 f_0 は、高いほど震源の力 F_0 が大きくなるため、Signal/Noise比が高くなる。また、用いる波長も短くなるため、構造に対して敏感になる。

図-4に、 $T_s = 24$ [時間]、 $N_s = 21$ とした時の、観測波形 u_θ から推定される走時をプロットする。図中、縦軸は推定された振幅 α_i 、横軸は走時 q_i である。また、プロットされている点が多数あるのは、式(2)のモデル化において、パルスの数 n の値を $n = 5 \sim 10$ とし、このとき推定された (α_i, q_i) の組を全てプロットしているからである。

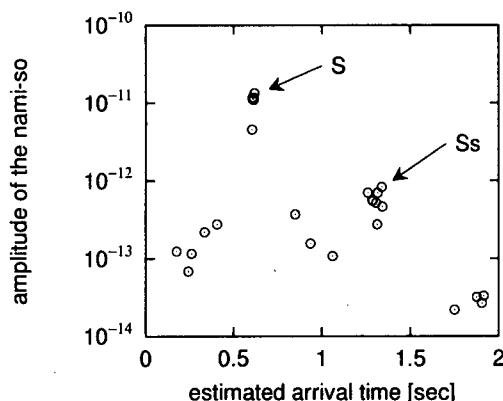


図-4 走時を決定する例

図-4をみると、0.6 [sec]と1.3 [sec]辺りに推定値が集中している事が分かる。精密制御人工震源が放射する波動のradiation patternから、これらの走時は、震源から直接伝播したS波と、反射面で反射して伝播したSs波であることが考えられる。

この観測波形に対する走時は、図-4で得られた走時の推定値に対して、振幅と走時のウィンドウをかけ、取り出した (α_i, q_i) の走時を平均することで求める。ここでは、次のウィンドウを用いた。

$$\begin{aligned} S: & 0.5 \leq q \leq 0.7, \quad 5 \times 10^{-12} \leq \alpha \leq 5 \times 10^{-10} \\ Ss: & 1.0 \leq q \leq 1.6, \quad 1 \times 10^{-13} \leq \alpha \leq 1 \times 10^{-11} \end{aligned}$$

4.3 走時の推定誤差

次に、モンテカルロシミュレーションにより走時の推定誤差を求める。試行回数は10000回とし、観測波形を作り、それぞれの観測波形から走時を求める。モ

モンテカルロシミュレーションによる、推定された走時の平均値と標準偏差を以下に示す。

走時	平均値 [sec]	標準偏差 [sec]
S 波	0.6096	0.00649
Ss 波	1.2909	0.13041

S 波について、推定された走時の確率密度を図-5に示す。図中、縦軸は確率密度、横軸は推定された S 波の走時である。また、曲線は上記の平均値と標準偏差を用いた場合の正規分布を表す。

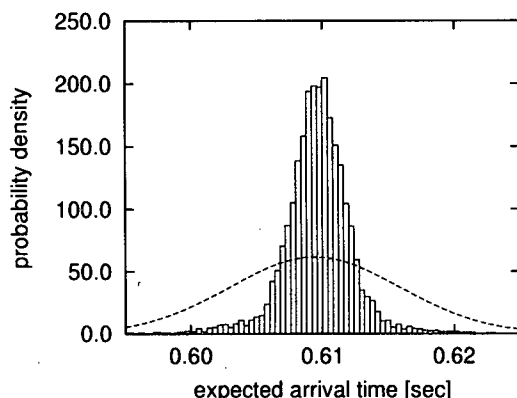


図-5 モンテカルロシミュレーションによる走時の頻度分布

走時の推定値の確率密度は、正規分布に近い形はしているが、平均値への集中の度合いが異なる。存否ケプストラムを用いる場合、推定される (α_i, q_i) の値が精度よく求まる場合と、比較的大きくはずれる場合がある。この大ききはずれた走時の推定値の影響により、標準偏差の値は比較的大きくなる。そのため、確率密度は正規分布よりも平均値で鋭くなる。ただし、影響を定量的に評価するには、なんらかの指標が必要であるので、以下のシミュレーションにおいても、推定値の標準偏差を指標として用いる。

次に、図-1のモデルより、波の伝播距離を計算し、これを波速で除すことで、走時の理論値を求め、この値と推定誤差（標準偏差）を比較する。これによると、24時間の観測では、走時の誤差は以下ようになる。

走時	理論値 [sec]	誤差 [%]
S 波	0.60908	2.3
Ss 波	1.30127	10.3

4.4 観測する周波数成分の数 N_s の影響

次に、観測する周波数成分の数 N_s を変化させたときの、推定誤差の変化を見る。方法は、ある N_s を固定して、上述のモンテカルロシミュレーションにより走時の推定値の標準偏差を求め、それを推定誤差とする。 $N_s = 11 \sim 41$ とした時の推定誤差の変化を図-6に

示す。図中、縦軸は推定された走時の標準偏差、横軸は観測する周波数成分の数 N_s である。

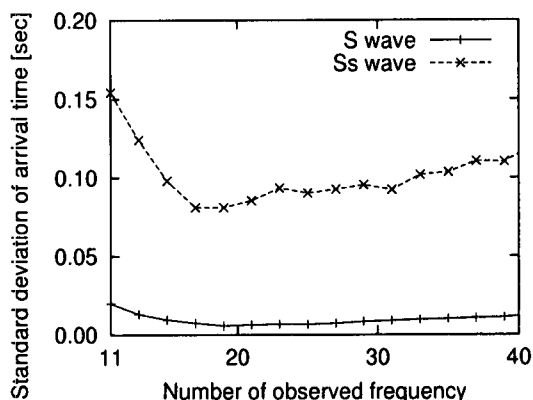


図-6 周波数成分の数 N_s と推定誤差の関係

図-6 より、S 波は $N_s = 21$ 程度がもっとも推定誤差が小さくなる。Ss 波は、 $N_s = 17$ で最も誤差が小さくなる。観測する周波数成分を多くすると、観測する周波数帯の幅は広がるが、その一方で、1つの周波数成分の観測時間が減少してしまい、Signal/Noise比が低下する。図-6 から、以下の計算では、 $N_s = 21$ を用いることにする。このとき、観測する周波数帯の幅は 4.0 [Hz] となる。

5. 精密制御人工震源の制御方法

名古屋大学理学部では、精密制御人工震源を FM (Frequency Modulation) 制御することにより、1度に多数の周波数成分を観測することができるシステムを開発している³⁾。一方では、一定の周波数で精密制御人工震源を制御し、段階的に周波数を変えて多成分を観測する方法もある。ここでは、まず FM 制御について簡単に説明し、その後、どちらの手法が効率的かを定量的に評価する。

5.1 FM 制御について

精密制御人工震源の周波数 $f(t)$ を式 (4) のように Sin 関数により変調する。

$$f(t) = f_0 + \Delta f \sin(2\pi f_m t) - \frac{\Delta f}{c} \sin(4\pi f_m t) \quad (4)$$

ここに、 f_0 は変調の中心周波数、 Δf は変調の片振幅、 f_m は変調周波数である。また、右辺の第 2 項は、精密制御人工震源の駆動力であるモータの追従性を向上させるために加えられている。 c は、その補正係数である。

精密制御人工震源は、周波数が一定の場合、その震源関数は $SF(t) = MR\omega^2 e^{i\omega t}$ と表すことができる。しかし、式 (4) により変調すると、震源関数は次式で表

される。

$$SF(t) = MR \omega(t)^2 \text{Exp} \left[i \int_0^t \omega(s) ds \right] \quad (5)$$

ここに、 $\omega(t) = 2\pi f(t)$ である。

前章までの結果を踏まえ、ここでは変調の片振幅を $\Delta f = 2.2$ [Hz]、中心周波数を $f_0 = 20.0$ [Hz] とする。また、観測する周波数の間隔を $df = 0.2$ [Hz] とするには、変調周波数は $f_m = 0.2$ [Hz] とすればよい。このようにして、24時間観測し、それをフーリエ変換すると、図-7を得る。図中、縦軸は観測した速度波形 u_θ の振幅、横軸は周波数である。

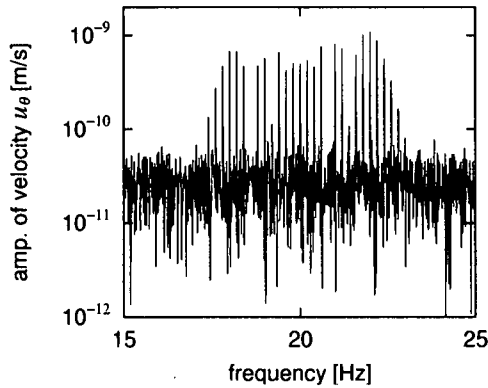


図-7 観測波形のフーリエ変換

図-7をみると、調和波動の信号が $f_0 = 20.0$ [Hz] を中心に、 $df = 0.2$ [Hz] 間隔で分布している様子が分かる。しかし、調和波動の信号は、周波数成分によって、その振幅が大きく異なる。存否ケプストラムを用いる場合、周波数領域の離散データは等間隔 df で並んでいる必要がある。そのため、FM制御により離散データを観測する場合には、Signal/Noise比の大きく異なるデータ集合を用いて走時を推定することになる。

図-8に、観測時間 T_o を変化させた時の、走時の推定誤差の変化を示す。図中、縦軸は走時の推定誤差 [sec]、横軸は観測時間 [日] である。

5.2 一定の周波数での制御について

精密制御人工震源を一定の周波数で制御する方法は、前章（解析手法）で述べた。ただし、実際の現場では、ある周波数から次の周波数に移行する場合には、震源の回転周波数が安定するまでに時間がかかる。今回は、この時間を $t_a = 120$ [sec] として、観測時間長 T_o と推定誤差の関係を調べる。このとき、1つの周波数成分における観測時間は $T_f = T_o/N_s - t_a$ となる。図-9に、 T_o と推定誤差の関係を示す。図中、縦軸は走時の推定誤差 [sec]、横軸は観測時間 [日] である。

図-9において、S波の走時の推定誤差の曲線は、ほぼ $1/\sqrt{T_o}$ に比例する。これは、観測ノイズが完全にホ

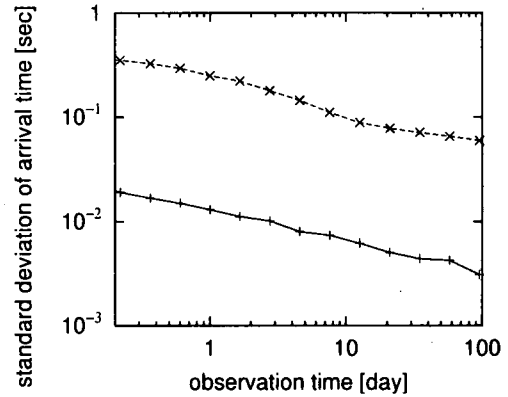


図-8 FM制御による観測時間長 T_o と走時の推定誤差の関係

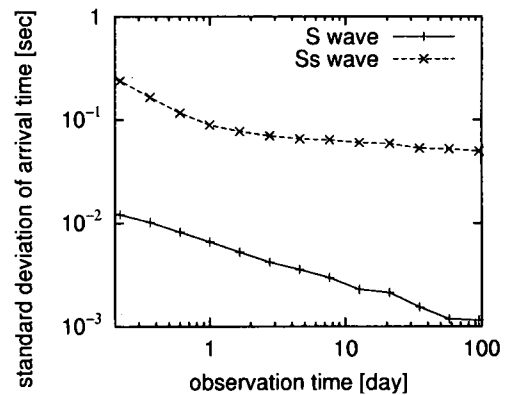


図-9 一定の周波数での制御による観測時間 T_o と走時の推定誤差の関係

ワイトを仮定する場合、Signal/Noise比が $\sqrt{T_o}$ に比例して増加することによる。

5.3 制御方法の比較

ここでは、2つの制御方法により得られた推定誤差を比較する。図-10に推定誤差を比較したものを示す。図中、縦軸は、一定の周波数で制御した場合の推定誤差をFM制御により得られた推定誤差で除し、パーセントで表示したものである。横軸は、観測時間長 T_o である。

図-10から、 T_o の変化と推定誤差の比較との明瞭な関係を見出すことは難しい。しかし、両者の制御方法を比較すると、精密制御人工震源を一定の周波数で制御し、段階的に多成分を観測する方が推定精度で30%程度効率が良いことがわかる。これは、FM制御する場合には、推定に用いる周波数成分以外の周波数成分にも波動エネルギーを分散させているためである。図-7に示されている観測波形の場合は、約17%のエネルギーが無駄に消費されている。また、FM制御の場合は、周波数成分によってS/N比が大きく異なることも、走時

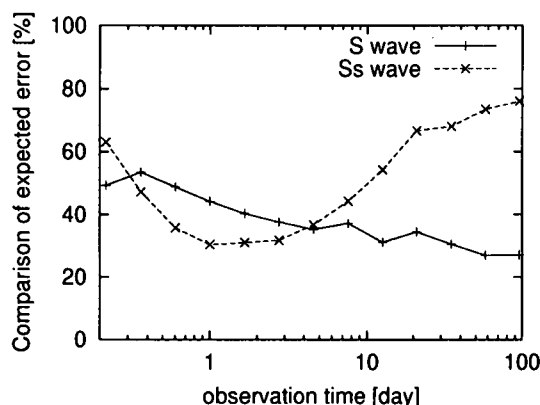


図-10 2つの制御方法により得られる推定誤差の比較

の推定誤差を大きくしている原因と考えられる。

6. 調和波動の周波数精度と分解能の関係

ここでは、精密制御人工震源の周波数精度の実験と、その結果について説明し、生成される調和波動の周波数精度と分解能について議論する。実験は、東京大学地震研究所の地下実験室に設置してある、精密制御人工震源の試作1号機を用いて行った。

6.1 測定方法

精密制御人工震源の周波数精度の測定に用いた装置の概念図を、図-11に示す。

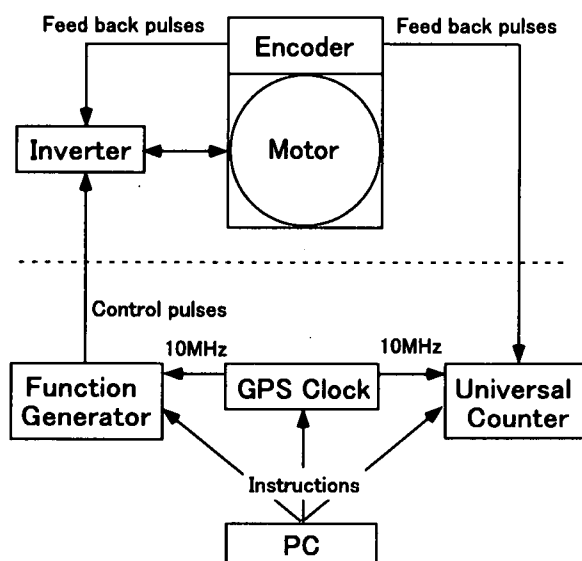


図-11 周波数精度を測定する装置の概念図

図-11において、点線の上側が精密制御人工震源の駆動力であるモータと、それを制御するインバータ、エンコーダである。モータに備え付けられているエンコー

ダは、モータが一回転する間に2000の方形パルスを生成する。この方形パルスは、モータの回転速度の情報を表す。インバータは、この方形パルスをフィードバック信号として用い、モータの回転速度を制御する。精密制御人工震源の偏心質量は、モータにより回転されているので、震源の回転周波数を測定するには、このエンコーダの制御信号を用いるのが良い。そこで、ユニバーサルカウンタにより、エンコーダからの方形パルス列の数を測定する。ただし、正確に測定するには、モータを制御するインバータとユニバーサルカウンタは、同じ時計を持っている必要がある。ここでは、1つのGPS時計から、10MHzの信号をファンクションジェネレータとユニバーサルカウンタへ送る。そして、インバータはファンクションジェネレータから送られる制御信号を用いて、モータを制御する。ファンクションジェネレータ、ユニバーサルカウンタ、GPS時計の状態はPCにより制御する。

6.2 精密制御人工震源の周波数精度

上述の測定装置を用いて、精密制御人工震源の周波数の時刻歴を計測した。精密制御人工震源の周波数を10 [Hz]とした時、回転周波数の平均値は10.0001 [Hz]、標準偏差は0.00226 [Hz]となった。図-12に、このときの回転周波数の確率密度を示す。図中、縦軸は精密制御人工震源の回転周波数の確率密度、横軸は回転周波数である。また、点線は上述の平均値と標準偏差を用いた正規分布である。

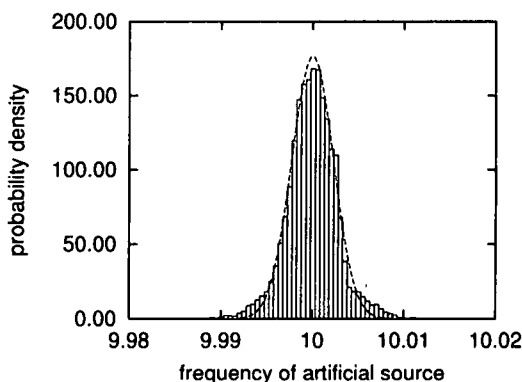


図-12 精密制御人工震源の回転周波数分布

図から、精密制御人工震源の回転周波数は、正規分布に従うことが分かる。また、この実験では、周波数の精度は約0.0226%であった。

室内における精密制御人工震源の試作1号機を用いた実験により、震源の回転周波数の標準偏差（ノイズの大きさ）や、震源の回転周波数が正規分布に従うことが分かった。ただし、標準偏差の値については、室内の実験結果よりも実際の現場の結果の方が大きいことが予想される。それは、精密制御人工震源が偏心質

量を回転させるとき、モータのトルクが仕事をするが、このトルクは震源の力と地盤の固さの比の関数として表されるからである。現場の震源を設置する地盤は、実験室内の固定装置よりも柔らかい。

6.3 周波数精度と分解能の関係

(1) 誤差のモデル化

実験により、精密制御人工震源により励起される調和波の周波数の誤差は、目的とする周波数を平均（中心）とする正規分布に従うことが分かった。また、インバータは、偏心質量の位相が、GPS 時計から得られる正確な位相と一致するように、モータのトルクを制御する。以上のことから、調和波の位相 $\phi(t)$ を次式によりモデル化する。

$$\phi(t_{i+1}) = \phi(t_i) + 2\pi\Delta t(f_o + R(t_i)),$$

$$\begin{cases} R > 0, & \text{if } \bar{\phi}(t_i) - \phi(t_i) < 0 \\ R < 0, & \text{if } \bar{\phi}(t_i) - \phi(t_i) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 Δt は離散化した時間の増分、 f_o は調和波の中心周波数、 $R(t_i)$ は標準偏差を σ_f 、平均を 0 とする乱数を用いて作成した関数であり、調和波の位相が 2π 増加する毎に変化する。 $\bar{\phi}(t_i)$ は時間 t_i における正確な位相である。

式 (6) は、調和波の位相が、正確な位相よりも進んでいけば、中心周波数 f_o に負の乱数を加え、位相が遅れていけば、正の乱数を加えることを表す。乱数の符号を、式 (6) のように変化させても、乱数は正規分布に従う事が確かめられる。これにより、位相が、正確な位相を中心として揺らぐモデルを作成する。また、以降の議論では、乱数の標準偏差 σ_f と、調和波の中心周波数 f_o の比 σ_f/f_o を、調和波の周波数精度と呼ぶ。

式 (6) の位相を、次式の震源関数に代入することにより、調和波を生成する。

$$SF(t) = MRw(t)^2 e^{i\phi(t)} \quad (7)$$

(2) 誤差を持つ調和波の性質

調和波の中心周波数 f_o と標準偏差 σ_f を固定し、式 (7) により、時刻歴データをつくる。この時刻歴データをフーリエ変換することにより、調和波の振幅を求める。求めた振幅は、誤差に依存するので、1000 回の試行計算により、振幅の平均値と標準偏差を求める。

図-13 に、調和波の周波数精度 σ_f/f_o と振幅の平均値の関係を示す。また、図-14 に、 σ_f/f_o と振幅の標準偏差の関係を示す。図-13 において、横軸は周波数精度 σ_f/f_o [%]、縦軸は振幅の平均値で、誤差無しの場合における振幅で正規化している。同様に、図-14 におい

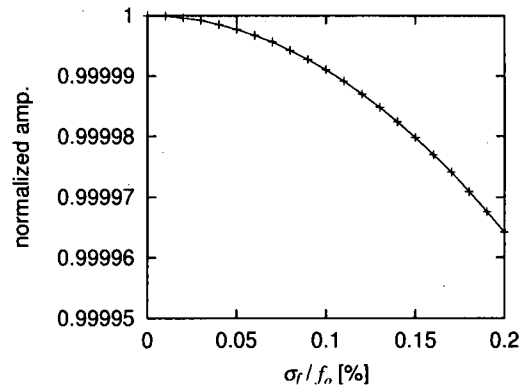


図-13 周波数精度と振幅の関係

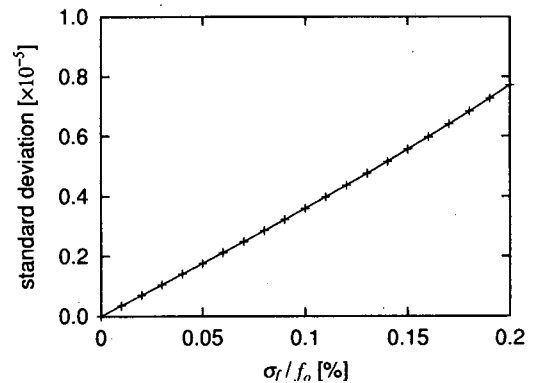


図-14 周波数精度と振幅のゆらぎの関係

て、横軸は周波数精度、縦軸は振幅の標準偏差である。

図-13, 14 を見ると、周波数精度が低下するに従い、周波数 f_o の振幅が小さくなり、振幅の標準偏差が大きくなる様子が見える。しかしながら、振幅の減少率と標準偏差は比較的小さな値である。正規化された振幅の標準偏差の値は、観測波形における S/N 比を表すので、仮に震源の周波数精度が 0.2% であれば、観測波形の S/N 比は約 10^5 になることを意味する。震源の周波数誤差による影響は、観測におけるグランドノイズよりも十分に小さいと言える。

図-15 に、 $\sigma_f/f_o = 0.2$ [%] とした時の、スタッキング回数と振幅の標準偏差の関係を示す。図中、縦軸は振幅の標準偏差、横軸はスタッキング回数である。図-15 から、スタッキング回数 N が増加するに従い、調和波の振幅の標準偏差は $\propto 1/\sqrt{N}$ で減少することが分かる。これは、精密制御人工震源の周波数精度は、分解能に対して上限を与えないことを意味する。

以上の議論から、精密制御人工震源の周波数精度は、現段階において十分であると言える。

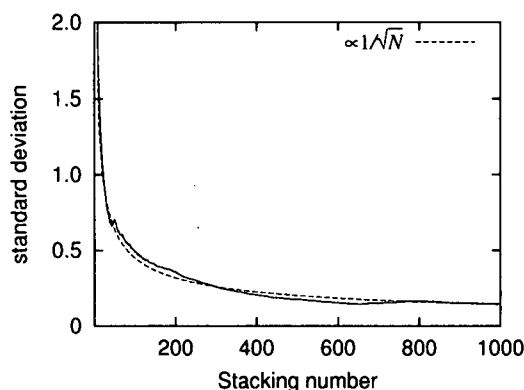


図-15 観測時間長と振幅の標準偏差の関係

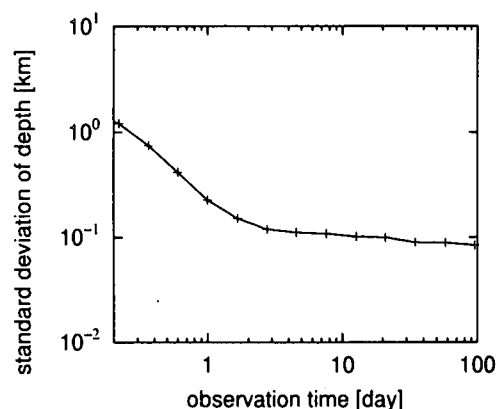


図-16 反射面の深さを同定する分解能と観測時間の関係

7. 反射面の深さを同定する分解能

ここでは、これまでの内容を総合して、反射面の深さを同定する分解能を求める。走時の推定手法から、観測する周波数成分については、 $f_0 = 20.0$ [Hz]、 $df = 0.2$ [Hz]、 $N_s = 21$ とする。また、観測手法から、精密制御人工震源は一定の周波数で制御し、段階的に多成分を観測することにする。また、調和波動の周波数誤差は、 $\sigma_f/f_0 = 0.2$ [%] の場合を考える。

7.1 反射面の深さ d の推定方法

ここでは、反射面の深さを推定するのに、まず震源から直接伝播する S 波の走時から、構造の S 波速度 V_s を求め、次に、その V_s と Ss 波の走時を用いて、反射面の深さ d を推定する。

7.2 分解能の評価

図-16 に、反射面の深さを同定する分解能と観測時間 T_o の関係を示す。ここで、分解能は、推定された反射面の深さの標準偏差と定義している。図中、縦軸が反射面の深さを同定する分解能、横軸が観測時間 T_o である。

8. まとめ

本論文では、精密制御人工震源の鉛直下方に、水平な反射面がある問題を仮定して、簡単な数値計算モデルにより、その反射面の深さを推定する分解能を定量的に評価した。

その過程では、解析手法、観測方法、精密制御人工震源の性能について議論した。走時を決定する解析手法においては、存否ケプストラムを用いる場合に適した周波数領域のデータ集合を示した。

観測手法においては、精密制御人工震源を FM 制御する場合と、震源を一定の周波数で制御し段階的に多成分を観測する場合では、どちらが効率が良いかを定

量的に示した。また、観測時間 T_o と走時の推定誤差の関係を示した。

室内における、精密制御人工震源の試作 1 号機を用いた回転周波数の測定試験では、震源の回転周波数は正規分布に従うことが示された。また、精密制御人工震源により生成される調和波動の周波数精度は、現段階においては、十分な精度であることを示した。

参考文献

- 1) 東原 紘道：ACROSS the tide of recession, 月間地球/号外 No.20, 1998.
- 2) 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, Vol.3, pp.679-686, 2000
- 3) 山岡 耕春, 宮川 幸治, 国友 孝洋, 小林 和典：淡路島野島断層における ACROSS 実験, 月刊地球 / 号外 No.21, 1998
- 4) M.Kumazawa, Y.Imanishi, Y.Fukao, M.Furumoto and A.Yamamoto: A theory of spectral analysis based on the characteristic property of a linear dynamic system, Geophys.J.Int.101, pp.613-630, 1990

(2001 年 4 月 20 日 受付)