

精密制御人工震源の波動場励起力に関する理論的研究

Theoretical treatment of the seismic wave field generated by the ACROSS source

佐伯昌之*・東原紘道**

Masayuki SAEKI 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)

**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 been developing artificial seismic sources which generate harmonic wave fields with highly accurate frequency. In this paper, we study the wave fields generated by these sources. We evaluate the effect of embedding the sources in the underground and the efficiency of transformation from electrical energy to seismic wave energy. We also show the ability of a phased array of the sources to control the wave fields.

Key Words : artificial seismic source, underground tomography, elastic wave field

1. はじめに

本研究の目的は、精密制御人工震源の波動場励起力を詳細に調べることである。

我々は、以前より、地殻内の応力集中域を長期間に渡り連続的にトモグラフィする地下探査手法として、ERI-ACROSS の開発研究を行ってきた。ERIはEarthquake Research Instituteの略、ACROSSはAccurately Controlled ROTary Seismic Sourceの略である。ACROSSは、精密制御人工震源により周波数が極めて一定に制御された調和弾性波を地下に放射し、散乱波を観測し、解析することにより、地殻内の応力場を見る。(概要を付録に示す。)

従来より、弾性波を用いた地下探査手法としては自然地震または人工震源を用いるものがあるが、どの手法においても重要なことは、いかに高いS/N比を得るかということである¹⁾。ACROSSは、精密に制御された調和弾性波の利点を最大限に活用し、S/N比を格段に向上させる。

周波数が極めて一定に制御された調和弾性波は、長時間のスタッキングにより、S/N比を向上させることができる。

また、複数の精密制御人工震源をアレイ展開し、各々の震源の位相を制御することにより、調和波動場をコントロールし、S/N比を向上させる。例えば、目標地点に波動エネルギーを集束させ、散乱波を励起する。集束点を移動させることにより、地殻内を走査する。散乱波を励起しやすい振動モードを制御する。

ただし、波動場をコントロールするには、震源アレイの配置、各震源への最適な位相の配分、位相制御により生成される波動場パターンを統一的に扱う理論(これを最適位相配置理論と呼ぶ)の構築が必要となる。

ACROSSでは、以上のことから分かるように、人工震源の周波数の精度が大変に重要になる。また、S/N比に関わる人工震源の重要なパラメータとしては、他に、震源の出力がある。S/N比を向上させるには、震源の出力は大きいほど、周波数精度は高いほど良いが、これらを向上させるには高度な技術が要求される。そのため、震源の出力と周波数精度は、設計パラメータとして精密に決定する必要がある。

以上、最適位相配置理論の構築と人工震源の設計パラメータの決定という2つの研究が必要となる。これらの研究を行うには、精密制御人工震源の波動場励起力を詳細に調べる必要がある。

本研究は、以上のことを目的として、精密制御人工震源が生成する波動場、震源のエネルギー効率、震源アレイにより生成できる波動場について、数値計算により解析する。

2. 水平成層波動場計算アルゴリズム

本研究では、地下構造のモデルとして、水平成層を仮定している。水平成層モデルは、波動場をほぼ解析的に求めることができ、また、その様なモデルとしては最も現実に近いモデルである。

水平成層を仮定した波動場計算アルゴリズムについては、これまで多くの研究がなされており、波動場の定式化も幾つか提案されている²⁾。パイオニア的な研究としては、Harkrider(1964)がHaskellの伝達行列³⁾を用いて波動場の定式化を行っている。この手法は式も分かりやすく簡便であるが、高周波数帯の計算では著しく精度が低下するという欠点がある。この原因は波動の伝播を表す $e^{i\omega d}$ の項にあった。 d は鉛直方向の

伝播距離, ν は鉛直方向の波数であり次式で表される.

$$\nu = \begin{cases} \sqrt{(\omega/c)^2 - k^2}, & k < \omega/c \\ -i\sqrt{k^2 - (\omega/c)^2}, & k > \omega/c \end{cases} \quad (1)$$

ここで, $k \rightarrow \infty$ のとき $e^{i\nu d}$ は発散するため積分核は計算不能となる. しかしながら, 積分核を強引に手計算で解くと (P-SV では 4 元の連立 1 次方程式を解く必要があり, 2 層の問題でも相当に骨が折れる) 発散項は存在せず, $k > \omega/c$ では積分核は単調減少関数となる. これは発散項の係数のキャンセルが原因である. Harkrider の定式化では発散項の係数は数値計算で求めるため, 本来はキャンセルしてゼロになるはずの係数に値が残る. このゼロになるはずの値と発散項の積が「波動として意味を持つ数値」を覆い隠すのである.

ACROSS は 10 ~ 50[Hz] の高周波数帯を用いることから, 上記の手法では波動場の解を精度よく得ることができない. しかし Kennett(1974) は全く異なる方法で定式化を行い, 高周波数帯でも精度よく計算できる手法を提案した. その手法では, 波動を進行波 $e^{-i\nu d}$ (時間依存は $e^{i\omega t}$) のみで表し, これにより発散項とキャンセル構造を取り除くことに成功した.

本研究では, Kennett の手法を用いることにする.

3. 単独 ACROSS 震源による波動場

まず, 単独の精密制御人工震源 (以下, ACROSS 震源と呼ぶ) の波動場励起力について解析する. ここでは半無限均質媒体の地表面に ACROSS 震源が水平面内で回転する場合について説明する. 計算モデルを図-1 に示す. ACROSS 震源は点震源とし, 半無限均質媒体の表面に設置する. 座標系は鉛直下方を正の z 軸とする円筒座標系とする.

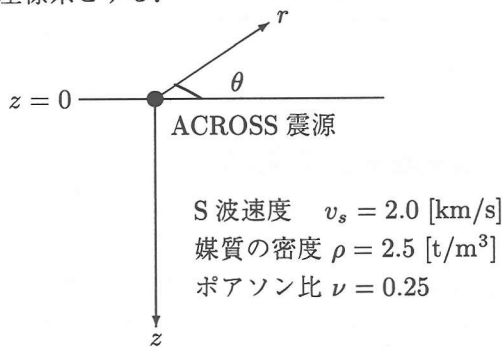


図-1 半無限均質媒体の地表面に ACROSS 震源があるモデル

3.1 放射パターン

ACROSS 震源の波動場は次式のように表される.

$$\begin{aligned} u_r &= u(r, z)e^{i(\omega t - \theta)} \\ u_\theta &= v(r, z)e^{i(\omega t - \theta + \pi/2)} \\ u_z &= w(r, z)e^{i(\omega t - \theta)} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに u_r, u_z は P-SV 波, u_θ は SH 波である. また複素関数 $u(r, z)$, $v(r, z)$, $w(r, z)$ は波動場のパターンを表し, 位相と振幅の情報を持つ. 図-2 に $|u(r, z)|$, $|w(r, z)|$, $|v(r, z)|$ を示す.

図-2 から, SH 波 (v) はどの方向へも等しく波動を放射していることが分かる. 一方 P-SV 波 (u, w) は鉛直下方に強く放射している. また俯角が 80° よりも小さな範囲では波動場に縞模様が見えるが, これは P 波と S 波の干渉により生じるものである.

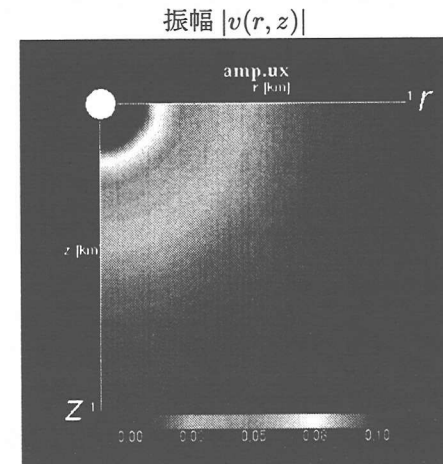
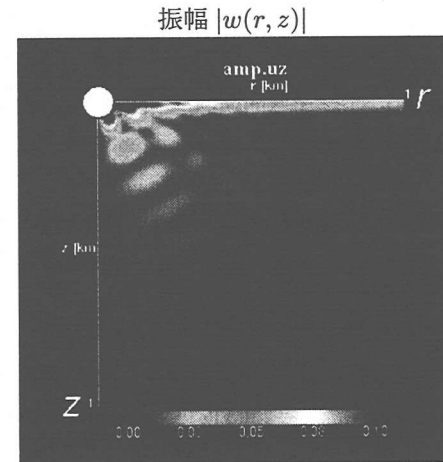
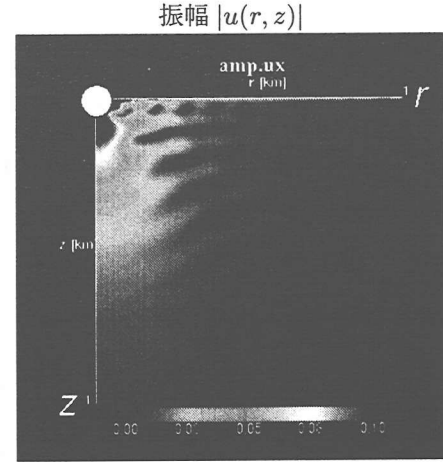


図-2 $|u_r|$, $|u_z|$, $|u_\theta|$ の波動場パターン

3.2 振動モード

俯角が 30°, 60°, 90° の位置での振動モードを図-3 に示す。震源の直下では振動モードは円軌道を描き、その回転方向は、ACROSS 震源の偏心質量の回転と同じ方向である。これは、震源の直下では S 波が卓越していることによる。俯角が 60° においても、ほぼ円軌道を描いていることが分かる。しかし俯角 30° では、P 波の影響が強く楕円軌道になっている。また θ 方向から見た図でも、P 波成分が強いことが分かる。

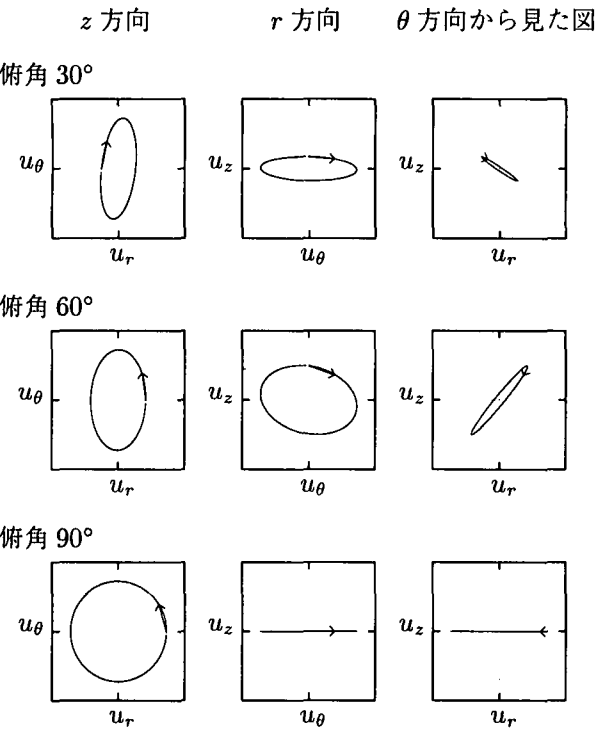


図-3 ACROSS 震源による波動場の振動モード

3.3 ACROSS 震源が励起する波動の振幅

ACROSS 震源は遠心力 $F = mR\omega^2$ を地盤に伝えることで調和波動場を生成する。ここでは、偏心質量 $mR = \text{一定}$ とした場合に、 $f = 50[\text{Hz}]$ で $F = 5[\text{tf}]$ 程度の力を考える。このとき、震源直下 1[km] の位置で励起される変位の振幅を図-4 に示す。図の縦軸は変位の振幅、横軸は ACROSS 震源の回転周波数である。

図中の Q は、 Q 値と呼ばれるもので、これにより波が地盤を伝播するときに生じる塑性減衰を考慮する。 Q 値は大きいほど弾性体に近く、 $Q = 10^4$ では、ほぼ弾性体と考えられる。一般に $v_s = 2.0[\text{km/s}]$ では $Q = 100$ 程度の値が用いられる。

図-4 は、変位により表示しているが、加速度で表すと、周波数 30[Hz] のときで約 $10^{-4}[\text{gal}]$ 程度の振幅が励起されることが分かる。実際には、目標域からの散乱波を観測するので、信号の振幅は $10^{-4}[\text{gal}]$ の何分の 1 になる。

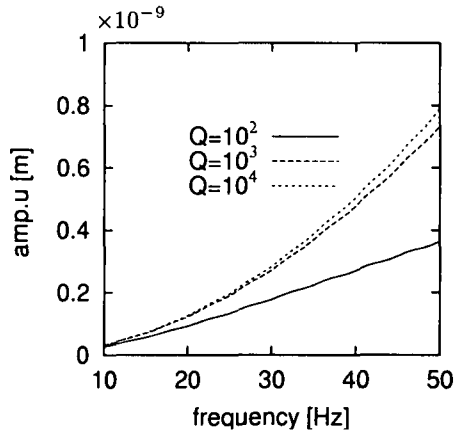


図-4 励起される変位の振幅

4. 震源埋設の効果

ACROSS 震源は、設置工事の都合上、地表面付近に置くことになるが、震源を地表面上に設置すると、地表面軟弱層の影響により、様々な問題が生じることが考えられる。例えば、表面波の生成によるエネルギー効率の低下、地表面の複雑な不均質性によるノイズの生成等である。そこで、我々は ACROSS 震源を地下に埋設することを考えている。ここでは単純な 2 層モデルを用いて震源埋設の効果を定量的に評価する。

4.1 地表面軟弱層の影響

計算モデルは、図-1 の半無限均質媒体の地表面を、薄い軟弱層が覆っている場合を考える。表層の厚さ $d = 20[\text{m}]$ 、 $\rho = 1.8[\text{t/m}^3]$ 、 $\nu = 0.3$ 、 $v_s = 0.8$ または $0.4 [\text{km/s}]$ とする。

ACROSS 震源を地表面に設置した場合に、震源直下 1[km] の位置で励起される変位の振幅を図-5 に示す。図の見方は図-4 と同じである。

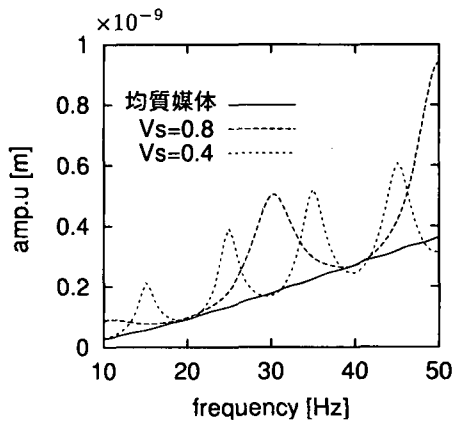


図-5 励起される変位の振幅と地表面軟弱層の関係

図-5 をみると $v_s = 0.8, 0.4 [\text{km/s}]$ とともに、ある周波数において振幅が大きくなっている。これは表層のモードと関係がある。S 波長 λ_s と表層の厚さ d の比を

見ると、次の様な関係がある。

$$\text{振幅大 } d/\lambda_\beta = (2n-1)/4$$

$$\text{振幅小 } d/\lambda_\beta = n/2$$

例えば $v_s = 0.8$ のとき、30[Hz] では $d/\lambda_\beta = 3/4$ である。この関係から、地下で振幅が大きくなるのは表層の固有モードの時であることが分かる。

次に、均質媒体と $v_s = 0.8$ [km/s] の表層がある場合について、ACROSS 震源が1周期の間に放出するエネルギー量を比較する。これを図-6に示す。図中の△は均質媒体において、◇は表層のS波速度が $v_s = 0.8$ [km/s] において、震源を含む閉曲面から放出したエネルギーを計算したものである。また実線は半無限均質媒体上に剛体円板が載っているモデルのコンプライアンス関数⁷⁾から計算したエネルギー放出量である。

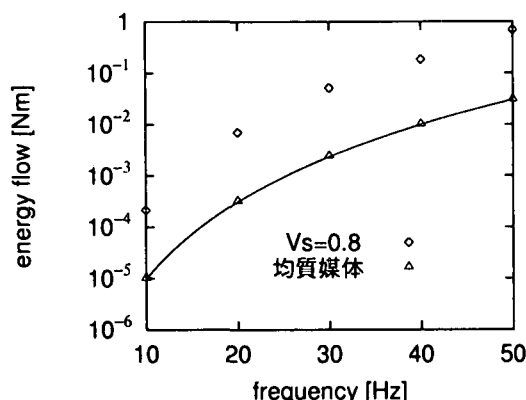


図-6 ACROSS 震源が1周期の間に放出するエネルギー

図-6 から、地表に $v_s = 0.8$ [km/s] の軟弱層がある場合では、均質媒体の場合に比べ約20倍もエネルギーを多く放出している事が分かる。ただし、変位は最大で2.5倍程度であった。

図-5と図-6を見ると、エネルギー放出量と震源直下方向の変位の振幅は必ずしも比例しないことが分かる。例えば $v_s = 0.8$ の場合で、30と40[Hz]を比べると、エネルギーは40[Hz]の時のほうが放出量が多いのに、震源直下方向の変位は30[Hz]の方が大きくなっている。

放出するエネルギーの逸散方向を比較する為に、震源を囲む閉曲面として震源から十分に離れた円柱表面(深さ x km×半径 x km)を考える。このとき側面と底面から放出するエネルギーの割合は次のようになる。

震源の周波数	30[Hz]	40[Hz]
側面から	88.9 %	97.2 %
底面から	11.1 %	2.8 %

30[Hz] は、表層の固有モードに対応する周波数である。これから分かるように、表層の固有モードに対応する周波数付近では、エネルギーは比較的鉛直下方に流れやすい。

4.2 エネルギー効率

$v_s = 0.8$ [km/s] の表層があるモデルでは、震源直下での変位の振幅は、均質媒体のそれと比べて、最大で2.5倍であった。しかし、エネルギー放出量は約20倍にもなっていた。これはエネルギー効率の低下を意味する。そこで震源を埋設して硬い層(半無限層)に設置する場合を考える。

図-7は、前節と同じモデルにおいて震源の深さを変化させたときの震源直下1[km]での変位の振幅である。

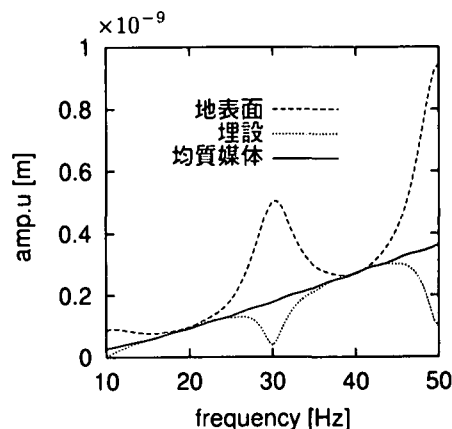


図-7 励起される変位の振幅と震源の深さの関係

図-7から、震源を埋設して硬い層の上面に設置した場合には、均質媒体の地表面に震源を設置した場合とほぼ同程度の振幅が得られることが分かる。ただし、 $f = 10, 30, 50$ [Hz]の表層の固有モードに対応する周波数では、大量の表面波を生成するため地下での振幅は小さくなる。またエネルギー放出量は均質の場合に比べ数%の減少となる。

震源埋設の効果を定量的に評価するため、次式のエネルギー効率という関数を考える。

$$\text{エネルギー効率} = \frac{\text{変位の振幅}}{1 \text{ 秒間当りのエネルギー放出量}}$$

単位は [m/W] である。震源を地表面に設置した場合と地下に埋設した場合のエネルギー効率を図-8に示す。

図-8から、震源を埋設して硬い地盤に設置した方がエネルギー効率が良いことが分かる。単純に考えれば、図-7から、震源を地表面に設置した方が波動場励起力が高いように見える。しかし、ACROSS 震源はモータにより駆動しているため、出力 [W] には制限がある。そのため、我々は、エネルギー効率の良いものを選択する必要がある。

5. エネルギー放出の仕組み

ACROSS 震源は、偏心質量をモータにより回転させ、周波数を一定に制御することで地下に調和波動場を生

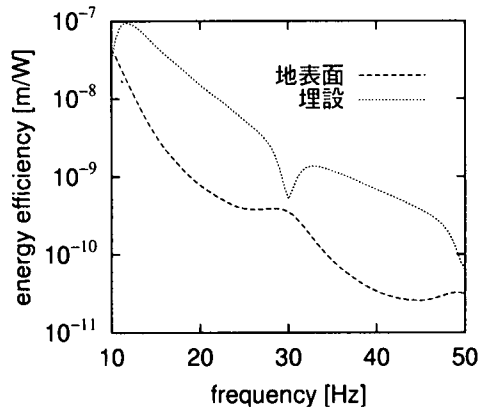


図-8 エネルギー効率の比較

成する。このとき、モータに投入される電気エネルギー量は波動エネルギーの放射と震源の内部損失により決まる。また、ACROSS 震源に要求される波動エネルギーの放射量は、応力場のインバージョンに必要な S/N 比で決まる。つまり、十分な S/N 比を得るためには、どれだけの電気エネルギー投入量が必要か、という問題になる。

ここでは、ACROSS 震源のエネルギー放出の仕組みを明らかにする。

震源のモデルとして、図-9 に偏心質量を一定の回転周波数 ω で回転させたときの地盤の変形と遠心力の関係を示す。

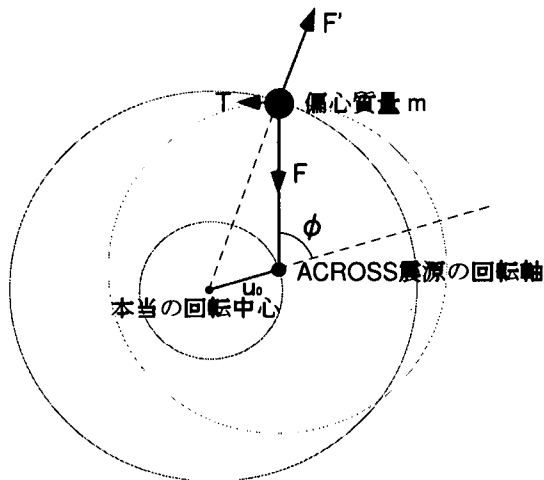


図-9 地盤の変形と遠心力の関係

ACROSS 震源の回転軸は、遠心力 F' が働くと、地盤の変形により u_0 ほど変位し、これを半径とした円軌道を描く。また ACROSS 震源の回転軸に働く力 F と地盤の変形には位相差 ϕ が生じる。これは、震源と地盤の動的相互作用の問題を解くことにより得られる⁷⁾。

震源に対する地盤の位相遅れ ϕ が生じると、モータは、回転周波数 ω を一定に保つために、トルク T を作用

させる。 T の大きさは、偏心質量に働く力の釣り合いにより決まる。また、トルク T のなす仕事は、ACROSS 震源の地盤を変形させる仕事と等しい。

回転軸に働く力と変位の積を時間積分することで、1 周期当たりのエネルギー放出量 E が求まる。

$$E = \int_0^{2\pi/\omega} (F \sin \phi) \times (u_0 \omega dt) = 2\pi F u_0 \sin \phi \quad (3)$$

ここでコンプライアンス関数⁷⁾ $C(a_0)e^{-i\phi}$ を用いると地盤の変形は次式で表される。

$$u_0 = \frac{2-\nu}{8a} C(a_0) \frac{F}{\mu}$$

ここに μ はせん断定数、 a は震源を剛体円板モデルとしたときの半径、 ν はポアソン比、 a_0 は無次元周波数 $a_0 = \omega a / v_s$ である。

また ACROSS の適用を考えると ϕ は小さく、 $\sin \phi \sim \phi$ とすることができ、さらにこの時 $\phi \sim a_0$ の関係がある。以上のことから次式を得る。

$$E \sim \frac{2-\nu}{8} \frac{F^2 \omega}{\mu v_s} \quad (4)$$

6. ACROSS 震源アレイによる波動場

先に述べたとおり、ACROSS は、多数の人工震源をアレイ展開し、各震源の位相を制御する（フェイズドアレイ）ことにより波動場をコントロールする。具体的には、目標域への波動場の集束、目標域の走査、振動モードの制御を行う。

ACROSS 震源によるフェイズドアレイの研究は、塩竈 (1999) が行っている。その研究では、全無限均質弾性体に震源を配置したモデルを用いており、研究の内容は主に、波動場の集束性能と走査性能について議論している。本研究は、塩竈の研究を発展させ、半無限均質弾性体の地表面に ACROSS 震源を配置したモデルを用い、集束性能、走査性能のみならず、振動モードの制御性能についても解析する。

先の研究により得られた主な結論を示す。

- 1) 震源間隔が S 波の半波長 $\lambda_\beta/2$ のとき、波動場の集束性は最も良い。
- 2) 各震源の位相制御により走査は可能である。

6.1 2つの震源によるアレイ

図-10 に2つの ACROSS 震源の配置を示す。座標系は Cartesian 座標系とし、アレイの中心を原点にとる。

震源間隔は $\lambda_\beta/2$ とし、2つの震源を同方向に回転させ、2震源の位相差をゼロとした時の SH 波動場の振幅分布を図-11 に示す。観測線は図-10 に示す円弧であり、縦軸は俯角 ψ 、横軸は u_y 成分の振幅を表す。図中の点

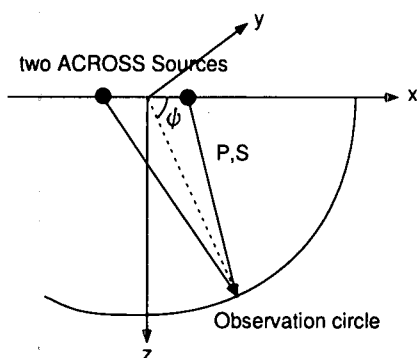


図-10 2つの ACROSS 震源の配置モデル

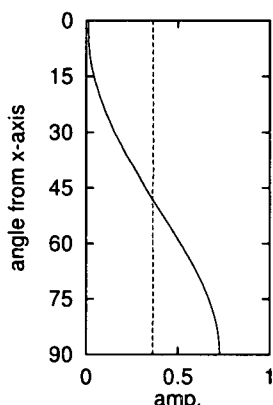


図-11 波動場の振幅分布 (u_y 成分)

線は単独の ACROSS 震源により得られる波動場の振幅分布を表す。

単独の ACROSS 震源による波動場では、 xz 面上の u_y 成分は SH 波である。そのため、波動はどの方向にも等しく放射される。これに対し、震源アレイを組むと、震源直下方向 $\psi = 90^\circ$ では振幅が2倍になり、また地表面付近では振幅はゼロに近づく。これは $\psi = 90^\circ$ 方向では2つの震源の生成する S 波が同位相であり、 $\psi = 0^\circ$ 方向では逆位相であるためである。図-11 の例では、震源直下方向に S 波を集束させていることになる。

震源の位相差を変化させると、各々の震源の生成する S 波が同位相となる方向 ψ が変化するため、集束方向も変化する。また、振動モードは図-3 に示される単一震源によるものと変わらず、その振幅のみが変化する。

次に、2つの震源の回転が逆方向の場合を考える。このときの振動モードを図-12 に示す。

2つの震源を逆回転させる場合では、震源直下方向では、振動モードは直線的な単振動になる。また震源の位相差を制御することにより、振動方向は波線の進行方向に直行する面内において、任意の方向に選ぶことができる。例えば $\psi = 90^\circ$ 方向では、 xy 面内において、任意の方向の直線的な単振動に制御できる。

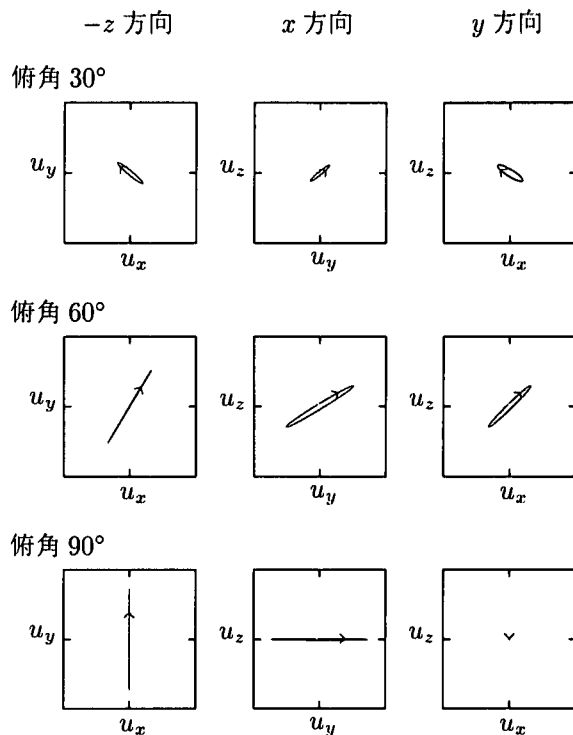


図-12 逆回転する2つの震源による波動場の振動モード

このような波動場の制御ができるのは、俯角 60° 以上の範囲である。この領域では S 波が卓越しており、S 波の干渉を利用して波動場のコントロールが行える。俯角が小さい領域では波動場は非常に複雑であることは図-2 においても確認できる。

6.2 Linear Array による波動の集束性能

波動場のコントロールは、波動の干渉を利用したものであり、「波動を集束させたい地点において、振動させたい方向の成分を持つ入射波を同位相にする」ことにより行う。

図-13 に、10 個の震源を $\lambda_B/2$ 間隔で x 軸上に配置し、 $\psi = 60^\circ$ の方向で S 波が同位相となるよう、各々の震源の位相を制御した場合の波動場 (u_y 成分) を示す。

図から、 $\psi = 60^\circ$ の方向に波動が強く放射されていることが分かる。ただし、目標とする方向以外へも波動が洩れている様子が見える。

波動場の集束性能を表す指標の1つに 1/10 beam width という指標がある。これは波動の集束の鋭さを表す指標で、波動の振幅が最大方向から、最初に振幅が 1/10 になる方向の間の角度を2倍したものである。図-11 を例にすると、振幅が最大方向は $\psi = 90^\circ$ 、振幅がその 1/10 になるのは約 $\psi = 20^\circ$ であるので、1/10 beam width は約 140° となる。図-14 に震源の個数と 1/10 beam width の関係を示す。

図から、震源の個数を増すと 1/10 beam width が小さくなり、波動の集束が鋭くなる様子が分かる。また、震源の間隔を広げた方が鋭さが増すことも分かる。た

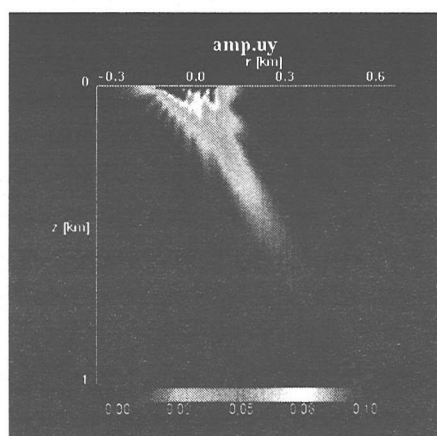


図-13 波動を $\psi = 60^\circ$ へ集束させた場合

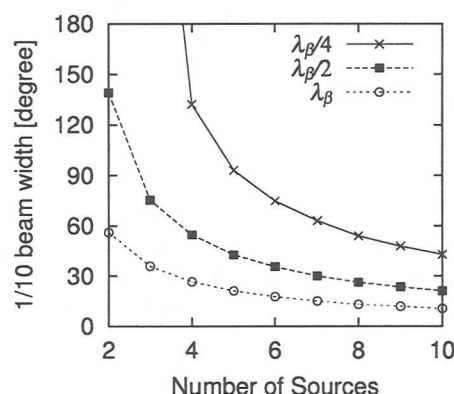


図-14 震源の個数と 1/10 beam width の関係

だし、震源の間隔が $\lambda_\beta/2$ よりも広がると、集束させたい方向への波動は鋭くなる代わりに、それ以外の方向へ洩れる波動が多くなり、逆に集束性能を低下させる。

7. まとめ

本研究では、半無限ないし 2 層構造程度の簡単な地盤モデルを用いて、ACROSS 震源の波動場励起力を調べた。本研究の主な成果を以下に示す。

1. 地表面軟弱層の影響、震源埋設の効果、震源のエネルギー効率を定量的に評価した。
2. ACROSS 震源のエネルギー放射の仕組みを明らかにした。
3. フェイズドアレイによる波動場コントロールの理論を半無限媒体に拡張し、Linear Array により制御できる振動モードを示した。

本研究では、ACROSS 震源の波動場励起力に関して、半無限ないし 2 層構造程度の簡単な地盤モデルを用いてシミュレーションを行った。しかしながら実際の地盤は不均質であり、波動場はさらに複雑なものとなる。エ

ネルギー効率や震源アレイの問題は多層系へと拡張すると異なる問題が発生することが予想されるので、理論の拡張が必要である。

エネルギーの問題では、半無限均質媒体上に 1 つの ACROSS 震源がある場合のみを扱った。この問題はさらに、震源アレイを組んだ時の相互作用や多層系におけるエネルギー放射について研究する必要がある。

震源アレイによる波動場は、Linear Array についてのみ研究した。平面的な広がりを持つ 2 次元アレイはこれからの課題である。

付録 I ACROSS の概要

ACROSS システムは大きく分けて以下の 3 つのシステムから成り立っている；

- 1) 断層周辺の応力集中域へ精密に制御された弾性波を放射する精密制御人工震源アレイ、
- 2) 応力集中域からの散乱波を観測する高感度地震計アレイ、
- 3) 広域にわたる震源・観測アレイを一括管理する通信システム。

図-15 に ACROSS の概念図を示す。

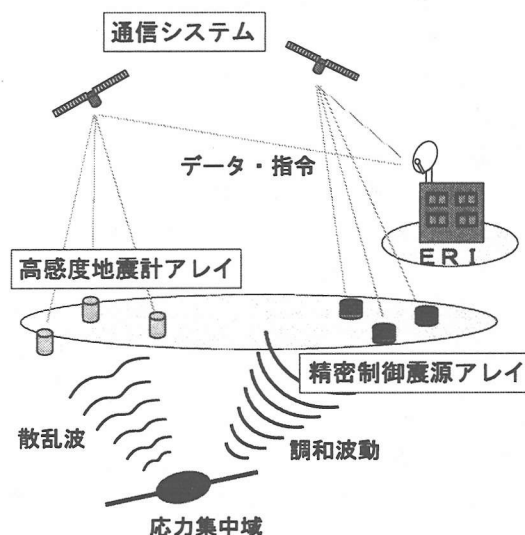


図-15 ACROSS の概念図

ACROSS 震源は、偏心質量を正確に一定の周波数で回転させ、発生する遠心力を地盤に伝えることで、周波数が極めて一定した調和波動場を地下に生成する。運転周波数は 10 ~ 50 [Hz]、出力は数 [tf] 程度である。各々の ACROSS 震源は同一の絶対時刻信号 (GPS 時計) で管理されており、各震源の位相は高精度で制御される (ACROSS 震源の位相精度に影響するものは、GPS の時刻精度、偏心質量の位置決定精度、周波数安定に関する回転精度がある)。

ACROSS 震源のアレイは、各震源の位相を高精度で制御することにより、弾性波動の干渉を利用して波動場を制御する。例えば、目標域へのエネルギーの集束、目標域の走査、散乱波を励起しやすい振動モードの制御を行う。これにより目標とする地域からの信号、目標とする物理現象の信号の検出性能を向上する。

高感度地震計によるサンプリングと ACROSS 震源アレイの位相制御は、GPS 時計により 10^{-6} [sec] の精度で同期する。ACROSS 震源は単位時間当りのエネルギー放出量は小さいが、GPS の時刻精度とコヒーレントな調和波動は、長時間にわたるスタッキングを可能とし、S/N 比を向上させる。また高分解能地震計アレイは、応力集中域からの散乱波の空間分布・指向性を捉えることができる。

上記の様に ACROSS 震源と高分解能地震計は、目標とする領域のサイズに合わせて、広域にアレイ展開される。通信システムは、これらを一括管理するために地震研究所から衛星通信により遠隔操作する。

付録 II ACROSS によるインバージョンの概略

我々は、断層周辺の応力集中域（散乱体）に調和波動を照射し、散乱波を観測し解析することにより応力場をインバージョンする。ここで問題となるのは、地下構造や散乱体をどのようにモデル化するか、ということである。

まず、散乱体のモデル化について考える。断層周辺の応力集中域は、破壊の直前では、非弾性化していると考えられる。また、微細クラックの発生する可能性もある。我々は、この応力集中域を 1 つの散乱体として考え、散乱体に入射する調和波動と散乱波の関係を、できるだけ少ないパラメータで表し、モデル化する。このモデルは室内の岩石実験のデータにより求める。この実験は現在進行中でありモデルはまだ決定していないが、このようなモデルには、散乱波の放射分布（構造と振動モードへの依存）、振幅の減衰、位相のずれ、非弾性による波形の歪み等のパラメータが関与することが考えられる。

地下構造のモデルは、水平成層構造とする。インバージョンでは大量の計算が必要となるため、波動場の計算アルゴリズムは、できるだけ解析的に扱えるものが要求される。解析的に扱えるもので、最も現実に近い地盤モデルは水平成層である。そこで、まず水平成層波動場計算アルゴリズムにより第一次近似のインバージョンを行う。ただし、水平成層モデルで説明がつかない現象については、地盤モデルをさらに不均質を扱える数値モデルへと拡張する必要がある。

次に、インバージョンの手順について簡単に説明する。ACROSS は地震発生が想定される地域へ適用（直

前過程の監視）するので、そのような場所では速度構造はある程度調査されていると考えられる。しかしながら、従来の手法により求められた地下構造モデルでは分解能が低く、そのため、ACROSS 震源アレイによる波動場コントロールに利用できないと考えられる。そこで、ACROSS によって速度構造を修正し、高精度化することが必要となる。ACROSS による速度構造トモグラフィとしては存否ケプストラム法が有効である^{9),10)}。

次に、応力集中域の特定であるが、不均質場での静的 FEM の計算により応力集中域の位置や応力集中の程度は予め求めておく。そして ACROSS 震源のフェイズドアレイにより波動場をコントロールし、応力集中域の特定・絞込みを行う。また、断層周辺では周囲に比べて時間変化が大であれば、連続モニターにより絞込みの精度を向上することができる。

応力集中域が特定されれば、そこへ波動エネルギーを集束させたり、振動モードを変化させることで散乱波の変動を捉える。これにより応力集中域の変動をインバージョンする。これは従来のイベント解析とは異なる、非弾性の現象を捉えるインバージョン手法である。

参考文献

- 1) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，1998。
- 2) 額田 一起，竹中 博士：近地震波の伝播に関する理論，地震，第 42 巻，pp.391~403，1989。
- 3) Haskell, N.A. : The dispersion of surface waves in multilayered media, Bull. Seis. Soc. Am., 43, 17-34.
- 4) Harkrider, D.G. : Surface waves in multilayered elastic media I. Rayleigh and Love waves from buried sources in a multilayered elastic half-space, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.54, No.2, pp.627~679, 1964.
- 5) Kennett, B.L.M. : Reflections, rays and reverberations, Bull. seism. Soc. Am., 64, pp.1685~1696, 1974.
- 6) Kennett, B.L.M. and Kerry, N.J. : Seismic waves in a stratified half space, Geophys. J. R. astr. Soc., 57, pp.557~583, 1979.
- 7) 東原 紘道：半無限弾性体の円板の水平並進振動の直接積分方程式法，土木学会論文集，第 374 号/I-6, pp.523-530, 1986。
- 8) 塩竈 裕三：精密制御回転震源の力学特性と波動場励起力に関する研究，東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤工学専攻 修士論文，1999。
- 9) 熊沢 峰夫，武井 康子：精密制御音波反射による能動的地下構造常時モニタリング手法の研究 その 3 波の到達時刻を少数のフーリエ成分から決定する理論，日本地震学会講演予稿集 1994 年周期大会 B68, pp.160。
- 10) 熊沢 峰夫，武井 康子：ACROSS 信号のイベント解析と存否ケプストラム理論，地球惑星科学関連学会 1995 年合同大会予稿集 F31-14, pp.374。
- 11) 東原 紘道：ACROSS the tide of recession, 月間地球/号外 No.20, 1998。

(2000 年 4 月 21 日 受付)