

## 数値計算による散乱波の角度分布の時間依存性

江本賢太郎（東北大）

### はじめに

地震波のコーダ部分は、様々な到来方向を持つ散乱波によって構成されている [Aki, 1969; Aki & Chouet, 1975]. 様々な方向・場所から到来する散乱波により、コーダ部分では比較的早く P 波と S 波のエネルギー比が安定することが知られている [Shapiro et al., 2000; Paul et al., 2005]. 我々は昨年度研究集会で、直達波到達後すぐに振幅のばらつきがレイリー分布に従うことを示し、初期コーダを構成する散乱波の位相がランダムであることを報告した。また、経過時間とともにコーダ部分のエネルギーは空間的に等方な分布に近づき、拡散方程式で記述することが可能である [Ishimaru, 1997]. P・S 波のエネルギー比の安定に比べて、フラックスが等方的になるには時間がかかることが指摘されている（平均走時の 1.5~2 倍 [Sato et al., 2012], 輸送平均自由時間以上 [Campillo, 2006]). 本研究では、3次元ランダム不均質媒質中を伝播するスカラー波の差分法シミュレーションを行い、アレイ解析により散乱波の到来方向の時間変化を調べる。

### 波形計算

地球シミュレータを用いた 3次元差分法シミュレーションを行う。差分法の精度は、空間 4次、時間 2次とし、媒質サイズは  $x, y, z$  方向に、それぞれ 3840 グリッド、空間刻みは全方向に 80 m、時間刻みは 6 ms とする。媒質は平均速度 4 km/s の一様なランダム不均質媒質とし、ランダム不均質は指数関数型自己相関関数で特徴付けられるとする。（相関距離  $[a]$ , ゆらぎの RMS  $[\varepsilon]$ ) = (1 km, 0.05), (5 km, 0.01), (10 km, 0.05) の 3 パターンを考える。震源は中心に配置し、中心周波数 1.5 Hz の Ricker 波を等方的に放射する。震源距離 25, 50, 75, 100 km に観測点を設置する。各距離において震源を中心とする正十二面体の頂点の位置に等方的に観測点を 20 個配置する。さらに、各観測点のまわりに 3 つの小さな正十二面体で構成されるアレイ観測点を配置する。媒質境界は吸収境界条件 [Cerjan, 1975] とする。経過時間 50 まで計算するために必要な計算時間は、128 ノードを用いた MPI 並列計算 [Furumura & Chen, 2004] で約 50 分である。異なるシードを用い、計 18 個のランダム媒質の実現値で計算を行う。

### 散乱波の角度推定

3次元アレイに FK 解析を適用し、ピーク値から到来方向を推定する。3秒間の時間窓を 1秒ずつずらしながら、経過時間による到来方向の変化を求める。解析例として、図 1 に伝播距離 50 km における到来方向の時間変化を示す。徐々に大きな角度の散乱波が増加する様子がわかる。また、媒質の違いによる顕著な差は見られない。ここで、角度分布は、立体角積分時の  $\sin \theta$  がかった状態で示しているため、0度付近の値は小さくなっている。

図 2 に、ある経過時間における到来方向分布の、一次非等方散乱モデル、輻射伝達方程式、拡散方程式との比較を示す。経過時間とともに小さい角度の散乱波が減り、大きな角度の散乱波が現れ、拡散状態へ近づくことがわかる。この場合、経過時間 40 秒でも、拡散状態は等方分布 ( $\sin \theta$ ) より小さい角度にピークがある。差分法による到来方向の分布は他のモデルと比較して、小さい角度に分布が集中し、大きな角度の散乱波が少ない。これは、FK 解析ではピーク値しか見ていなかったため、ある時刻での散乱波の分布というよりは、卓越した散乱波の到来方向のばらつきを見ているためだと考えられる。また、図は示さないが、他のモデルと比較して差分法による推定では、初動到達後数秒間は震源方向が卓越し、その後大きな角度の到来方向が増加した。

これは、差分法では走時ゆらぎの影響が現れるためだと考えられる。

## 拡散場への移行タイミング

ランダム媒質のパラメータを  $a = 1, 2, \dots, 10$  km,  $\varepsilon = 0.01, 0.02, \dots, 0.1$  と変え、輻射伝達方程式のモンテカルロシミュレーションで角度分布を求める。求めた角度分布と拡散方程式から求められる角度分布の相関係数が 0.8 以上となる時間を示したものが図 3 である。移行するタイミングは、媒質にほとんど依存せず、平均走時の 1.5 倍であることがわかる。

## 結論

ランダム不均質媒質中を伝播するスカラー波の角度分布を、3 次元差分法シミュレーションにより調べた。初動到達後数秒程度は、震源方向が非常に強く、その後大きな角度を持つ散乱波が到達した。この傾向は媒質には依存せず、伝播距離が大きいほどゆるやかであることがわかった。解析時間内では、小さい角度に分布のピークがあり、完全に等方的にはならなかった。様々なランダム媒質における輻射伝達方程式のシミュレーションによると、媒質によらず平均走時の 1.5 倍で角度分布が拡散状態になることがわかった。

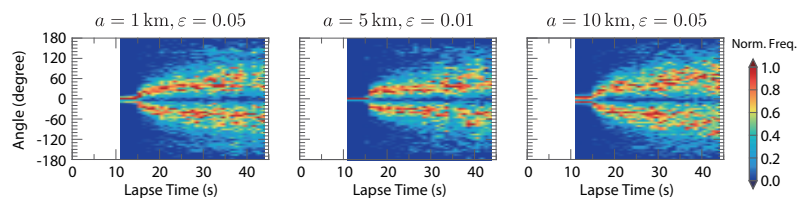


図 1 伝播距離 50 km における角度分布。色は各経過時間で規格化した頻度を表す。

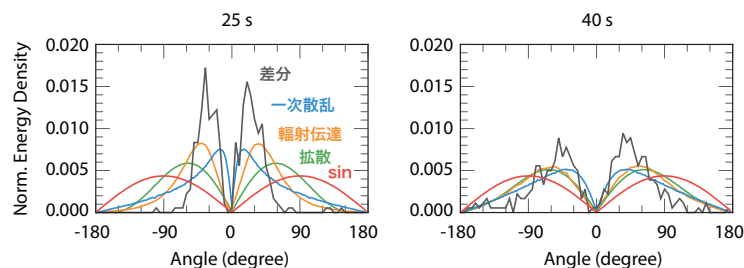


図 2  $a = 1$  km,  $\varepsilon = 0.05$ ,  $r = 75$  km における角度分布の比較。左図（経過時間 25 秒）、右図（経過時間 40 秒）。

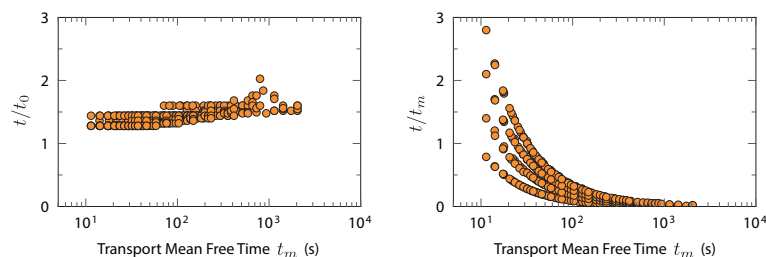


図 3 輻射伝達方程式から求めた角度分布と拡散状態の角度分布の相関が 0.8 以上になる時間 ( $t$ )。  $t_0$  は平均走時であり、  $t_m$  は輸送平均自由時間である。

## 謝辞

理論波形計算には海洋開発研究機構の地球シミュレータ、ランダム媒質作成には地震研究所の EIC を使用させて頂きました。