

## 水平成層構造媒質における散乱波動場の合成波形：理論とテスト

### Synthetic seismograms in layered media with scatterers: Theory and tests

# 蓬田 清 [1], ラファエル ベニテス [2]

# Kiyoshi Yomogida [1], Rafael Benites [2]

[1] 北大・理・地球惑星, [2] NZ地質核科学研

[1] Earth and Planetary Sci., Hokkaido Univ., [2] IGNS

散乱体（空隙）には点（線）震源、水平境界面には波数分解の表現という折衷した境界積分法を2次SH波について用いた。表面近くに散乱体がある場合以外は、波動場を十分な精度で、しかも計算量も著しく増えずに計算できることをいくつかのモデル計算で示した。均質媒質の場合に比べると、散乱体の数や水平成層構造の複雑さは、計算効率についてはあまり問題でなく、震源から散乱体に対しての射出角、つまり必要な波数領域の範囲が計算量を左右する。得られた波形をみると、これまでの均質媒質で重要だった散乱体間の多重散乱に加えて、散乱波と水平境界面との相互作用が新たに出現している。

著者らは、1998年日本地震学会秋季大会において、水平成層構造媒質中における散乱について、境界積分法を用いた波動場の計算方法を考察した（蓬田、Benites, 1998）。そこでは、

（1）散乱体が存在する層は、従来の均質媒質の場合のように、散乱体の境界面に沿って点（2次元なら線）震源を分布させて、散乱波を表現する。上下の境界面からの寄与は波数分解、すなわち平面波の足し合わせとして表現する。

（2）上側のすべての層については、従来の水平成層構造媒質中の波動場理論、すなわち波数分解して表現する。地表面からこの層の上面までの波動場をPropagator Matrixを用いて計算するが、地表面での変位のみ未知数として、上から下へ一方方向に計算する。

（3）下側の層も（2）と同様にして波数分解で表現する。最下層では下方へ伝播する平面波のみなので、この係数を未知数とする。

（4）散乱体のある層の上面では（1）と（2）、下面では（1）と（3）

で表わされた波動場の変位と応力が波数毎に連続となることが境界条件で、従来の研究と同じ（1）の散乱体表面での適当な境界条件との和を最小二乗法で解いて、未知数のひとつである地表面での変位が求まる。

2次元SH波で空隙を散乱体として定式化し、散乱体を含む層が少数、かつ地表面から比較的遠い場合は計算する波数範囲を限定できるので、効率よく計算できることを予測した。

本研究では、この定式化に基づいて簡単なモデルを使い、計算の安定性、精度、効率性を実際に検討した。水平成層構造に散乱体が存在するモデルについては、正しい波形はわからないので、前回の研究で示した水平成層の境界面にも人工震源を分布させるという、境界積分法の標準形式を適用したものと比較する。この比較によって、計算の効率化も検討できる。なお、震源は常に一番浅い層に置き、簡単のためにSH波についての等方震源とする。

まず初めに、2層構造で上層に空隙が一個あるモデルの計算を行なう。この場合は、震源から平面波が放出され、地表面観測点で空隙から散乱される平面波を観測するとみなすと、震源と観測点ともに空隙に近いので、波数領域（震源からの射出角とみなしてもよい）を大きく取らなくてはならない。そこで、層の境界面に震源を置く方法に比べて、同様な結果を出すためには離散化した波数の数が大きくなるので、だいたい同じような計算量となる。空隙が地表面に近いので、波数が大きいinhomogeneous wave（表面波）の効果もあるので、計算結果の十分な安定性のためにはむしろ不利になる。計算された波形をみると、無限均質媒質中に空隙がある場合の波形と、2層構造での波形との和でだいたい説明できるが、空隙で散乱された波が境界面で反射（順番が逆でもよい）するような、空隙と境界面の相互作用で生じた波群もある。

次に、空隙が下層にある同じモデルを扱う。空隙の位置が深くなると、観測点からも

遠いので、必要な波数領域が前のモデルに比べて格段に小さくなる。しかも、inhomogeneous waveの寄与もずっと小さくなるので、波数領域は、おおまかには震源から波線理論で空隙を覆い、さらに余分に2波長分くらい両側に増やした射出角に対応すれば、十分な精度を得ることがわかった。波形には、やはり空隙の散乱と水平境界面での反射を受けた波が見られる。

続いて、このモデルの下層に空隙を2つ置いたモデルについて計算する。空隙が2つのために必要な波数領域はもし深さが決められると倍くらいにはなるが、深い位置に置けば空隙の数に関係なく波数領域は比較的小さい。得られた波形では空隙間での多重散乱に起因する波が認められる。

最後に、空隙の存在する層の上に、多数の水平層（例えば、5層）があるモデルについて、波形を求める。この場合は、定式化の（2）にある計算がこれまでのモデルに比べて余分にかかる。しかし、必要な波数領域は増えないので、未知数は同じであり、計算量はほとんど変わらない。空隙のないモデルとの比較によって、散乱波の影響が正しく評価できる。また、（2）の計算を予め行なっておけば、空隙の配置、数、大きさなどを変えても（1）と（4）の計算のみ行なえばよいので、散乱体の性質を

観測と比較した同定することも効率よくできる。

このように、散乱体については点（線）震源、水平境界面については波数分解の表現という折衷した境界積分法を用いると、表面近くに散乱体がある場合以外は、多重散乱も水平境界面との相互作用も含めた波動場を十分な精度で、しかも計算量も著しく増えずに計算できることが示された。