

異なる格子サイズを用いた差分法による地形を考慮した粘弾性波動場モデリング Variable grid, finite-difference, viscoelastic seismic modeling including surface topography

林 宏一[1]
Koichi Hayashi[1]

[1] 応用地質
[1] OYO Corporation

地形を考慮した差分法による二次元粘弾性波動場のモデリング手法を開発した。地表付近の地震波の伝播は、複雑な速度構造、地表地形、粘弾性減衰等の影響により大変複雑である。これらの影響を考慮した地震波動場モデリングを行うために、速度 - 応力のスタガード・グリッド(時間二次、空間四次)を基本とし、複雑な地形に対する境界条件、スタンダード・リニアソリッドを用いた粘弾性モデリング、および地表付近のグリッドサイズを小さくするバリエブル・グリッド手法を導入した差分法を開発した。本手法を用いる事により、複雑な地形および地下構造であっても、一波長あたり10グリッドで理論波形を計算する事が可能となった。

地震学や物理探査において、差分法による理論波動場計算は地下を伝わる地震波動を理解する上で重要なツールである。しかし地表近傍の波動伝播は、複雑でコントラストの大きい速度構造、地表地形、粘性減衰等の影響を大きく受けるため、これまでの差分法では正確に計算することは困難であった。そこで筆者は、複雑な地表地形を安定かつ正確に計算できる境界条件を開発し、これを粘弾性波動場計算に組み込み、さらに計算効率を上げるために異なる格子サイズを用いる方法を導入した(Hayashi and Burns, 1999)。

任意の形状の自由表面(地表)を計算する手法としては、イメージ法を複雑な地表地形にも適用できるように一般化したもの(Robertsson, 1996)を改良した。イメージ法は、自由表面上において応力テンソルのうち、せん断応力と表面に直交する垂直応力がゼロとなるように計算するものである。スタガード・グリッドにおいて、自由表面を垂直応力上に設定すると、せん断応力は自由表面上に位置しないので、直接これをゼロとすることはできない。そこで、粒子速度を計算する際、空中の応力を固体中の応力の対称な値にすること(イメージング)により、自由表面条件を満足させる。この方法は理論的に強固であり精度や安定性に関する基準も十分検討されている。しかし、複雑な地形に適用する場合、イメージングを垂直方向と水平方向の2回にわけて計算する必要があり、計算がやや複雑になる。

別のアプローチとしては、空中の地震波伝播速度(P波およびS波)をゼロとして計算する方法がある(Graves, 1996)。この方法はバキューム法等と呼ばれており、地形を考慮するために特別な計算を必要としない点で扱いやすい。しかし、この方法は精度が悪くまた計算も不安定であることが知られている。

バキューム法の計算の単純さを生かしつつ、イメージ法と同等の計算精度を実現するために、筆者は両者を組み合わせることを試みた。この方法では、応力テンソルはイメージ法と同様に自由表面上においてせん断応力と表面に直交する垂直応力がゼロとなるように計算するが、粒子速度に対してはバキューム法と同様に特別な計算は行わない。空中の粒子速度および応力テンソルはゼロとする。提案した手法の有効性を調べるために、三手法(イメージ法、バキューム法、提案した手法)の計算精度を数値実験により比較した。Fig.1にモデルおよび計算結果を示す。この数値実験の結果、提案した手法が最も精度が良く、一波長あたりのグリッド数が20から40で十分精度の良い結果が得られることがわかった。

粘弾性波動場の計算は、スタンダード・リニア・ソリッド(SLS)に基づき、Qが周波数に対して一定だと仮定し、メモリー・バリエブルを用いて速度 - 応力スタガード・グリッドの差分法により解く方法を用いた(Robertsson et al., 1994; Blanch et al., 1995)。この方法の特長は、計算に必要なメモリー量が、弾性波動計算の場合に比べてそれほど大きくなることである。

一般に速度 - 応力スタガード・グリッド(時間二次、空間四次)で必要とされる一波長あたりのグリッド数は10であるから、上記の自由表面条件を用いた場合、通常の計算(平坦な地表の場合)に比べてグリッド・サイズを小さくする必要がある。また、均一のグリッド・サイズを用いて速度コントラストの大きいモデルを計算する場合、グリッド・サイズは最も低速度の場所に合わせる必要があるため、モデルの大部分の場所では必要以上に小さいグリッド・サイズで計算を行わなければいけない。これは、きわめて非効率であり、モデルのサイズを制限してしまう。この問題の一つの解決策は、モデルの場所によってグリッド・サイズを変えることである(バリエブル・グリッド法)。地表付近や低速度の場所にのみ、小さいグリッドサイズを用いる事により、効率的に計算を行なうことができる。そこで、筆者は上記の自由表面の計算にバリエブル・グリッド法を適用した。

提案するバリエブル・グリッド法では、通常のグリッドに対して1/3のサイズのグリッドを地表近傍の計算

に用いる。計算を安定させるために、通常のグリッド・サイズの成分を細かいグリッドの計算結果で置き換える際に、周囲の細かいグリッドの値を平均もしくは加重平均により考慮することにした。

このバリエブル・グリッド法を、前述の地形を考慮した数値実験に適用した。Fig. 2 にモデルと細かいグリッドの範囲、および計算結果を示す。数値実験の結果、バリエブル・グリッド法を併用することにより、速度 - 応力スタガード・グリッド（時間二次、空間四次）を用いて、1 波長あたりのグリッド数を 10 とすれば、複雑な地形に対しても精度良く計算できることがわかった。

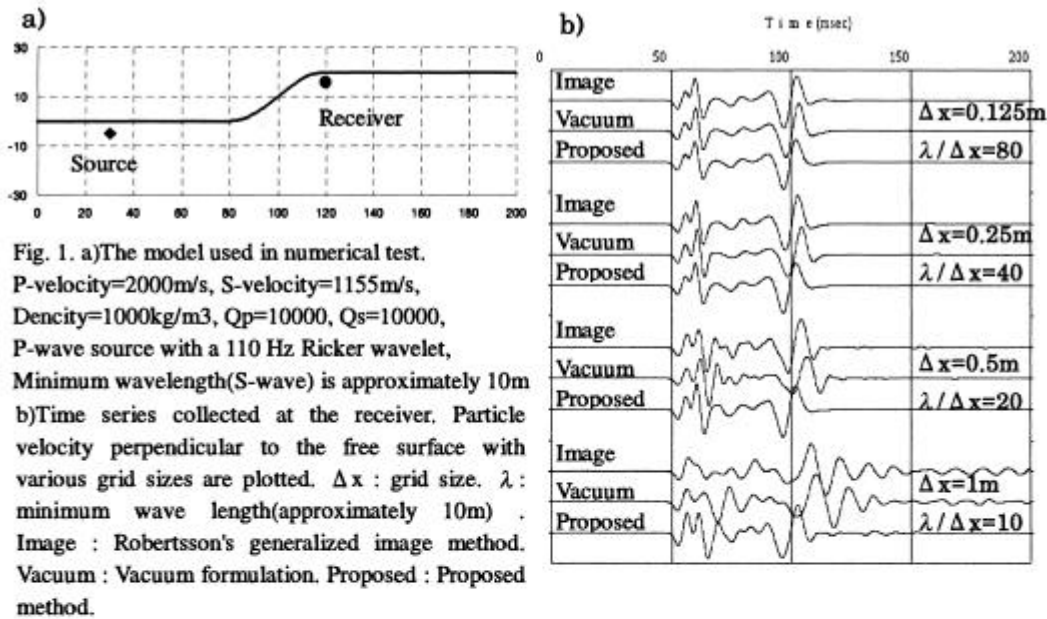


Fig. 1. a) The model used in numerical test. P-velocity=2000m/s, S-velocity=1155m/s, Density=1000kg/m³, Q_p=10000, Q_s=10000, P-wave source with a 110 Hz Ricker wavelet, Minimum wavelength(S-wave) is approximately 10m b) Time series collected at the receiver. Particle velocity perpendicular to the free surface with various grid sizes are plotted. Δx : grid size. λ : minimum wave length (approximately 10m). Image: Robertsson's generalized image method. Vacuum: Vacuum formulation. Proposed: Proposed method.

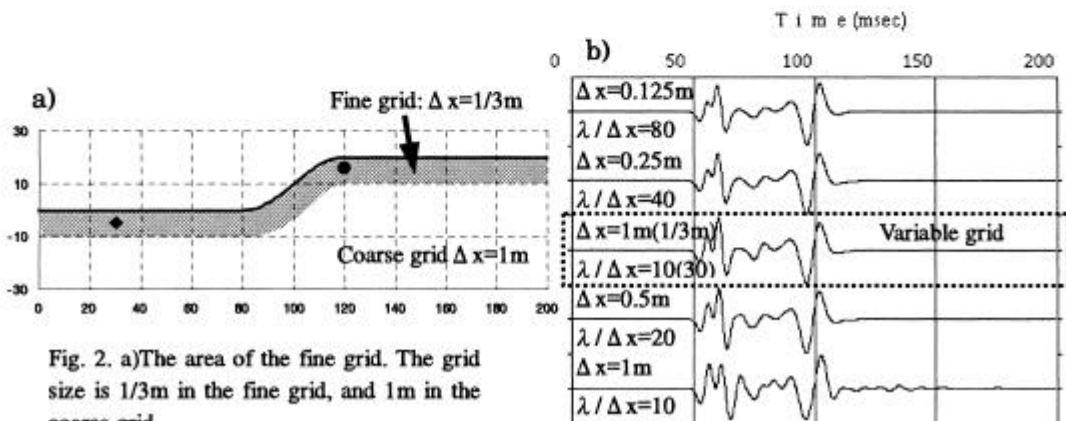


Fig. 2. a) The area of the fine grid. The grid size is 1/3m in the fine grid, and 1m in the coarse grid.

b) The comparison of the waveform calculated by proposed method with the various grid sizes.