

## 粘弾性を考慮した差分法による三次元波動場計算

## Three-dimensional, finite-difference, viscoelastic seismic modeling

# 林 宏一[1]

# Koichi Hayashi[1]

[1] 応用地質

[1] OYO Corporation

粘弾性を考慮した速度 - 応力のスタガード・グリッド（時間二次、空間四次）に基づく差分法による三次元地震波動場のモデリング手法を開発した。粘弾性波動場計算は、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解く方法を用いた。この方法では、粘弾性のメカニズムを最適化することにより、少ないメモリーと計算量で精度の良いモデリングを行うことができる。地表近傍に起振点・受振点をおいた場合の波動伝播は、波数積分法の結果と良く一致した。これにより、PCのような安価な計算機でも、三次元の粘弾性波動場シミュレーションを行うことが可能となった。

一般に地震波（弾性波）が地表近傍を伝播する場合、地盤の粘性による減衰の影響が大きい。したがって、地表近傍の理論的な地震波伝播を計算する場合、粘性減衰を考慮する必要がある。媒質の非弾性（粘弾性）の性質は通常Q（quality factor）を用いて表現され、スタンダード・リニア・ソリッドと呼ばれるモデルによって説明される。周波数領域の計算手法では、媒質の弾性定数または速度を複素数にすることによって比較的簡単にQを取り込むことができるが、時間領域の計算手法の場合、粘弾性体の構成方程式はコンボリューションの形で表現されるため最近まで困難であった。

しかし、近年Emmerich and Korn(1987)やCarcione et al.(1988)らによって、メモリーバリエブルを用いてコンボリューション計算を避ける方法が提案され、時間領域の計算が可能となった。Blanch et al.(1995)は、少ない数の緩和メカニズムをQが周波数に対して一定となるよう最小二乗法的に最適化することにより、多数の緩和メカニズムを用いるのと同等の計算精度を実現する方法を提案し、Robertsson(1994)はこの方法を波動場の計算用に差分化した。これにより、少ないメモリーと計算量で精度の良いモデリングを行うことが可能となった。筆者はこの方法を用いて三次元粘弾性波動場計算プログラムを作成し、これまでにいくつかの基本的なモデル計算を行ったので、ここに計算例等を示す。

基本となる差分スキームは、速度 - 応力のスタガード・グリッド (Virieux, 1986) であり、時間二次、空間四次近似(Levander, 1988)で計算を行う。地表面以外のモデル境界の計算には、吸収境界条件としてHigdon(1991)を用いた。

Fig.1は、三次元均質媒質中を伝わる平面波（P波）の計算例である。振源波形は中心周波数50HzのRicker waveletとし、50Hz周辺において $Q=10$ となるように緩和メカニズムを調整して計算を行った。弾性定数 $\mu$ に相当するP波伝播速度を1,000m/s（緩和定数（relaxed modulus）MRに相当するP波伝播速度は909.5m/sとなる）、密度は1,000kg/m<sup>3</sup>とした。計算に用いた緩和メカニズムは一つである。Fig.1は、差分法の計算により得られた50m離れた二つの波形から、Qおよび位相速度を計算して解析解と比較して示したものである。使用した周波数（中心周波数50Hz）の周辺では、ほぼ正しいQおよび位相速度が得られていることがわかる。

Fig.2は、三次元均質媒質において、地表面付近を伝わる波動を計算した例である。起振点は地表からの深度5mに位置する爆発振源とし、中心周波数50HzのRicker waveletを振源波形とした。弾性定数 $\mu$ に相当するS波速度は577.35m/s、S波に対するQは10とし、P波速度、密度およびP波に対するQは上記のモデルと同一とした。受振点は、起振点から15mおよび35m離れた地点に設置し、鉛直方向の粒子速度を測定波形とした。計算に用いた緩和メカニズムは一つである。Fig.2に、差分法により計算した波形（実線）を、波数積分法（Bouchon, 1979）により計算した波形と比較して示す。差分法と波数積分法の結果は振幅も含めて良く一致しており、差分法により粘弾性波動場を精度良く計算できたことがわかる。

この手法により、格子数 $150 \times 150 \times 150$ （3,375,000格子）の三次元モデルで、Pentium 500MHzのパーソナル・コンピューター（OSはWindows）を用いて粘弾性波動の計算を行ったところ、1ステップあたりの計算時間（緩和メカニズムが一つの場合）は約17秒であった。したがって例えば1024ステップの計算を行う場合、計算時間は約5時間となる。本手法で三次元粘弾性の計算に必要なメモリーは、緩和メカニズムを一つとした場合、応力6成分、粒子速度3成分、メモリー・バリエブル6成分、P波、S波に対する弾性定数（緩和定数）、密度、およびP波、S波に対する緩和時間の計20成分×格子数である。変数一つあたり4バイトとすれば、格子数 $150 \times 150 \times 150$ のモデルに必要なメモリーは、吸収境界条件の計算を含めても約300MBである。したがって、この程度の大きさのモデルであれば、誰でも入手できる安価な計算機を用いて三次元の粘弾性波動場を計算することが可能である。これによって、防災や物理探査等の一般業務において、差分法による三次元モデリングを、リーズナブルなコストかつ実

用上問題ない精度で行うことが可能になったと考える。

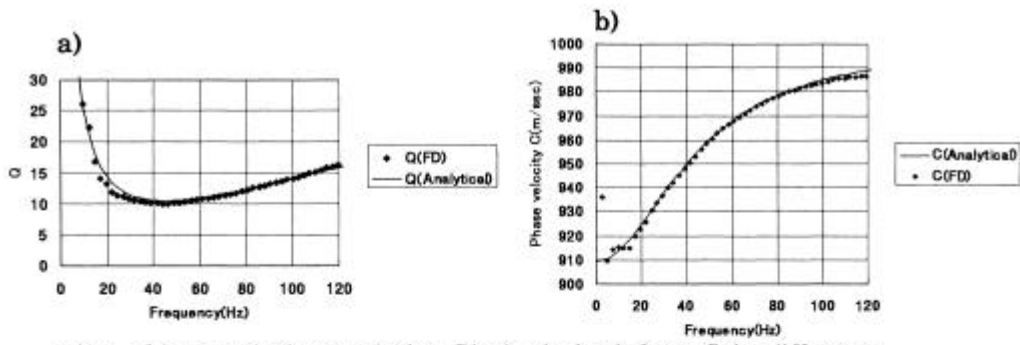


Fig.1.  $Q(\omega)$  and phase velocity  $C(\omega)$  obtained from finite-difference solution in comparison to an analytical solution. Dots : finite-difference solution. Solid line : analytical solution.

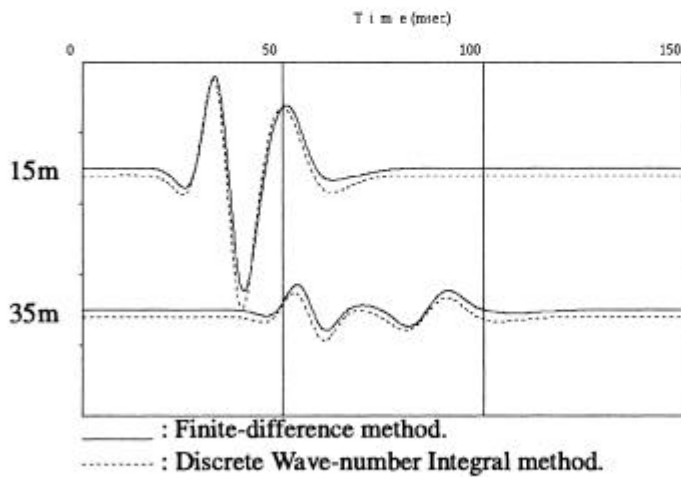


Fig.2. The comparison of finite-difference method and Discrete Wave-number Integral method. Solid line : finite-difference method. Dashed line: discrete wave-number integral method. Particle velocity (vertical component) collected at the receivers located at 15m and 35m from the source are plotted.