

伊豆半島における地震波のタイムリバーサル Time reversal of seismic waves in Izu peninsula

菊池 年晃^{1*}, 水谷 孝一²

Toshiaki Kikuchi^{1*}, Koichi Mizutani²

¹ 防衛大学, ² 筑波大院・シス情工

¹National Defense Academy, ²Acoust. Lab., Univ. Tsukuba

位相共役波に関する研究は光学の分野において始められたが、電波や超音波の分野へも進展してきた。我々は海洋音響の分野において位相共役波、及びタイムリバーサルの応用に関する研究を行っている。海中に設置した音源から音波パルスを放射して、そのパルスを離れた位置に設置したハイドロホンアレイで受波する。その受波した信号に時間反転処理を施した後に、アレイから再放射すると元の音源位置に収束する音波が形成される。そして音源位置に収束したパルスの波形は始めに放射されたパルスの波形と同一になる。今回は、このタイムリバーサル処理を2009年12月18日に伊豆半島中部で発生した地震波に適用し、震源における振動を求めた。

地震波にタイムリバーサル処理を適用するためには解決しなければならない多くの問題がある。海洋では伝播環境、即ち音速分布は深海域においてさえ正確に把握することができる。また海面から海底に至るまでのアレイも構築できる。更に、多くの伝播モデルも提案されている。一方、地中では詳細な伝播環境の取得が困難で、アレイの素子数が限定され、更に地震計の観測信号の適合性や伝播モデルなどの問題がある。

我々は、タイムリバーサルの適用に最も重要な要因である伝播環境を求めめるために、タイムリバーサルの堅牢性を利用した逆問題法を提案した。そしてその方法で求められた伝播環境において、地震計で観測した信号に時間反転処理を施した信号を再放射して震源近傍における振動を求めた。海洋におけるタイムリバーサルの堅牢性とは、音源からアレイまでの往路の伝播環境とアレイから音源までの復路の伝播環境が変化しても音源への収束性は大きく変化しないことである。また、両者の伝播環境が近づくにつれ音源に形成されるパルスの振幅が増大する。この特性を逆問題的に応用して、伝播環境を求めた。

まず、震源から観測点までの距離に対する伝播時間を求め、その直線の勾配から伝播速度を求めた。P波の伝播速度は5633m/sであった。これらは震源から観測点までの平均速度でありタイムリバーサル処理には不十分である。震源近傍に形成されるタイムリバーサルパルスは、理論的には、震源から観測点までのグリーン関数と観測点から震源までの共役グリーン関数と震源振動のスペクトルとの積で表される。震源から観測点までのグリーン関数と震源振動のスペクトルとの積は観測点で受信した信号に反映される。一方、受信した信号を時間反転した信号と観測点から震源に至る共役グリーン関数との積は震源に形成されるパルスに反映される。しかし、観測点から震源に至るグリーン関数は未知である。そこでタイムリバーサルの堅牢性を利用する。まず、伝播環境を平均速度からなる均一層と仮定して伝播モデルを用いてグリーン関数を求め震源近傍における圧力変動を求めた。ここで伝播モデルには放射型方程式法を用いる。このモデルに対応して、ここではP波のみに対する処理を行う。

震源に近い伊東から距離約30kmの戸田までの12地点で受信した信号にタイムリバーサル処理を行った。海中と異なり地中には地層の不連続や断層も多く存在する。そこで、深度方向と距離方向に速度の不連続層を想定してタイムリバーサル処理を行い震源に形成されるパルスの形状を調べた。形成されたパルスの立ち上がりは、震源に近づくに従って時間軸ゼロに近づいた。即ち、タイムリバーサルの原理が基本的に成立していることが明らかである。しかし、速度構造の変化に対して、タイムリバーサルパルスの系統的な変化は見られなかった。即ち、より詳細な伝播環境の把握が必要である。

海中の音速構造は温度や塩分及び潮流によって変化するが、全海域に対して同一に寄与するのは圧力である。地中の速度構造にも圧力の影響があると仮定して、地表から深度7000mまで伝播速度を単調に増加させる。その速度勾配をパラメータとして伝播環境を変化させ、タイムリバーサルパルスの振幅変化を求めた。速度勾配を0.02から0.20/sまで変化させた結果、パルスの振幅が系統的に変化して、ある勾配で振幅が最大になった。しかし、観測点によって振幅が最大になる勾配に違いが生じた。

韮山の観測点では速度勾配が0.14/sの場合に振幅が最大になった。この速度勾配を持つ伝播環境で、震源から観測点までの伝播経路を求めた結果、震源の深度3800mから水平方向に放射された波は距離17km以遠で観測点に達し、水平より上方に放射された波はそれより近い距離で観測点に達することが分かった。このことから震源と観測点の距離関係によって、伝播環境を更に調整する必要があることが分かった。

この研究では、防災科学技術研究所のHi-netからのデータを利用させていただきました。ここに謝意を表します。

キーワード: タイムリバーサル, 位相共役, 震源振動, 地震波伝播, 水中音響

Keywords: Time reversal, Phase conjugation, hypocenter vibration, Seismic wave propagation, Underwater acoustics