

## 1. はじめに

疑似点震源モデル<sup>1)</sup>による強震動シミュレーションでは対象地点における地震動のフーリエ振幅とフーリエ位相がそれぞれ評価され、それらを組み合わせてフーリエ逆変換することで地震動の時刻歴波形が生成される。この手順を最も簡単に表現すると次式のようになる。

$$F(\omega) = S(\omega)P(\omega)G(\omega) \frac{O(\omega)}{|O(\omega)|} \quad (1)$$

ここに $F(\omega)$ は対象地点における地震動のフーリエ変換（複素数）、 $S(\omega)$ は震源特性（実数）、 $P(\omega)$ は伝播経路特性（実数）、 $G(\omega)$ はサイト増幅特性（実数）、 $O(\omega)$ は位相特性の評価に用いる中小地震記録のフーリエ変換（複素数）、 $|O(\omega)|$ はその振幅（実数）である。しかしながら、式(1)のフーリエ逆変換は一般的には因果性を満足しない波形となる。ここではこの問題点に対する簡単な対処方法<sup>2)</sup>を紹介する。なお本稿ではある時刻に $t_0$ に対して $t < t_0$ で0となるような波形を因果性を満足する波形と呼ぶ。

## 2. 因果性を満足しない地震波となる原因

まず、式(1)のフーリエ逆変換が因果性を満足しない波形となる原因について考察を行う。

一般にフーリエ解析では時刻歴波形は様々な周波数をもつ正弦波の重ね合わせで表現される。このとき、重ね合わせのもとになる個々の正弦波は因果性を満足しない波であるから、任意の重みを与えて重ね合わせれば、因果性を満足しない波形が得られてしまう。重ね合わせた結果が因果性を満足する波形（ $t < t_0$ で0）となるためには、互いに近接した周波数成分が $0 < t < t_0$ の範囲で打ち消しあうように、各周波数成分の重み（フーリエ係数）は巧妙に設定されていなければならない。一般に地震波のフーリエ振幅スペクトルは細かい山谷（リップル）を有しているが、これは、因果性を有する波形を生成するために必要な、近接した周波数成分間の関係を示したものであると考えられる。このとき、厳密には近接していない周波数成分も関係するが、その影響は大きくない。このことを数値実験で確かめてみることにする。

図-1（上段）に2003年十勝沖地震の余震（2003年9月26日7:20）の際に防災科学技術研究所のKiK-netの観測点TKCH07で観測された加速度波形（NS成分）とそのフーリエスペクトルを示す。加速度波形は因果性を満足するものとなっており、フーリエスペクトルはリップルを有するものとなっている。ここで、フーリエスペクトルの1Hz付近（0.8～1.2Hz）をバンド幅0.5HzのParzenウィンドウで平滑化してフーリエ逆変換すると、図-1（中段）に示すように、始めの部分にノイズを含む加速度波形が得られる。このノイズは拡大図からわかるように平滑化部分に対応する1Hz程度のノイズとなっている。同様に、3Hz付近（2.4～3.6Hz）を平滑化してフーリエ逆変換すると、図-1（下段）に示すように、平滑化部分に対応する3Hz程度のノイズを始めの部分に含む加速度波形が得られる。このように、ある周波数帯で平滑化を行うと、近接した周波数成分間のバランスが崩れて、その周波数帯に対応するノイズが波形の始めの部分に現れる。このことから、フーリエスペクトルのリップルは因果性を満足する地震波を生成する上で重要な役割を果たしていることがわかる。式(1)では、 $O(\omega)$ をそれ自身の振幅 $|O(\omega)|$ で割った時点でスペクトルのリップルが消えてしまっている。また、これに乗じることになる $S(\omega) \times P(\omega) \times G(\omega)$ は周波数に対して比較的滑らかな関数である。なぜなら、一般に $S(\omega)$ は $\omega^{-2}$ モデル<sup>3)</sup>で、 $P(\omega)$ は幾何減衰および非弾性減衰を考慮した式で、それぞれ規定され<sup>例えば</sup><sup>4)</sup>、また、 $G(\omega)$ も一般には平滑化処理により比較的滑らかな関数となっているためである。従って式(1)はリップルを持たない関数であり、これをフーリエ逆変換すると因果性を満足しない波形となる。

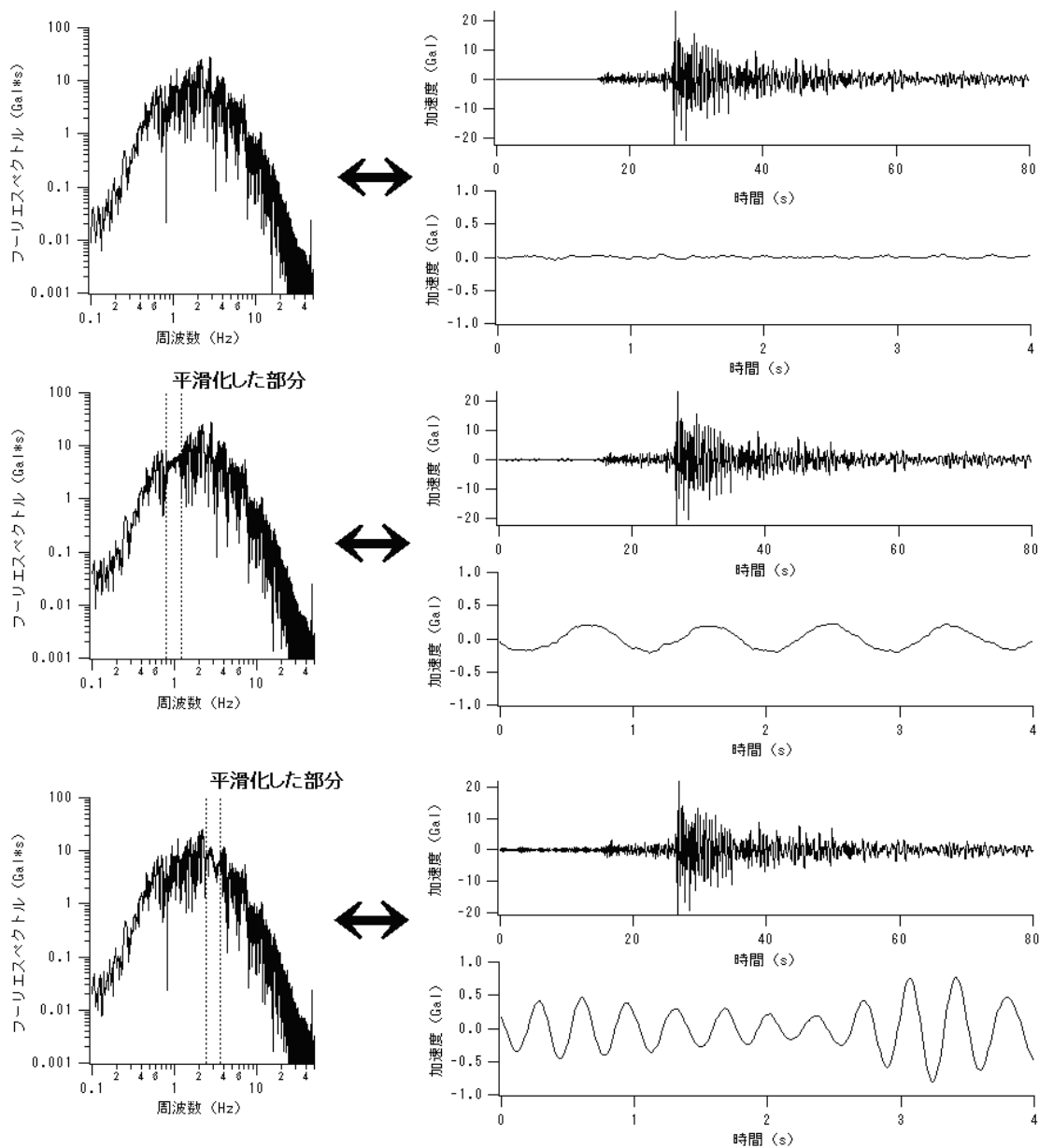


図-1 (上段) 2003年十勝沖地震の余震(2003年9月26日7:20)の際、TKCH07の地表で得られた加速度波形とそのフーリエスペクトル。(中段) 0.8~1.2 Hzの範囲で平滑化を加えたフーリエスペクトルと、対応する加速度波形。(下段) 2.4~3.6 Hzの範囲で平滑化を加えたフーリエスペクトルと、対応する加速度波形。加速度波形については0~4sの拡大図も示している。

### 3. 因果性を満足する地震波を生成する方法

因果性を満足する地震波を生成するためには、式(1)に代わり、次の式(2)を用いればよい。

$$F(\omega) = S(\omega)P(\omega)G(\omega) \frac{O(\omega)}{|O(\omega)|_p} \quad (2)$$

ここに $|O(\omega)|_p$ は中小地震記録のフーリエスペクトルにParzen ウィンドウを適用して平滑化を行ったものである。式(1)との違いは分母が $|O(\omega)|$ から $|O(\omega)|_p$ に変わっていることだけである。 $O(\omega)$ をそれ自身の振幅で割ると $O(\omega)$ に含まれるスペクトルのリップルが消えてしまうが、式(2)では分母が平滑化されているためリップルが残る。また、 $S(\omega) \times P(\omega) \times G(\omega)$ は先に述べたように比較的滑らかな周波数の関数である。従って、これに乗じた後でも、最初に $O(\omega)$ に含まれていたリップルは残ることになる。よって、式(2)をフーリエ逆変換すれば因果性を満足する時刻歴波形が得られる。

以上の方法を2005年7月23日千葉県中部の地震に適用した事例を示す。図-2は同地震を対象に疑似点震源モデル<sup>9)</sup>を用いて防災科学技術研究所のK-NETの観測点TKY007における速度波形を式(1)により計算した結果である。ここでは平均的なラディエーション係数<sup>10)</sup>を用い、また経験的サイト増幅特性<sup>11)</sup>を用いている。この場合、波形の先頭部分に観測には見られないノイズが見られる。図-3は同じ波形を式(2)により計算した結果である(Parzen ウィンドウのバンド幅は0.05Hz)。この場合、問題点は解消され、因果性を満足する波形が得られている。このように、計算手順の一部にスペクトルの平滑化を導入する方法は単純ではあるが有効な方法である。

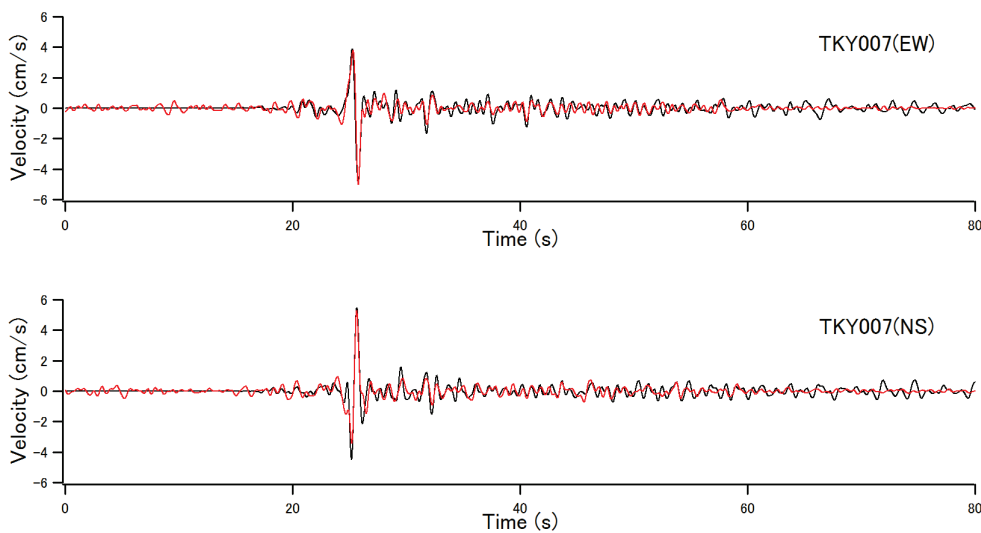


図-2 式(1)による速度波形 (0.2-2Hz) の計算結果 (赤) と観測結果 (黒)

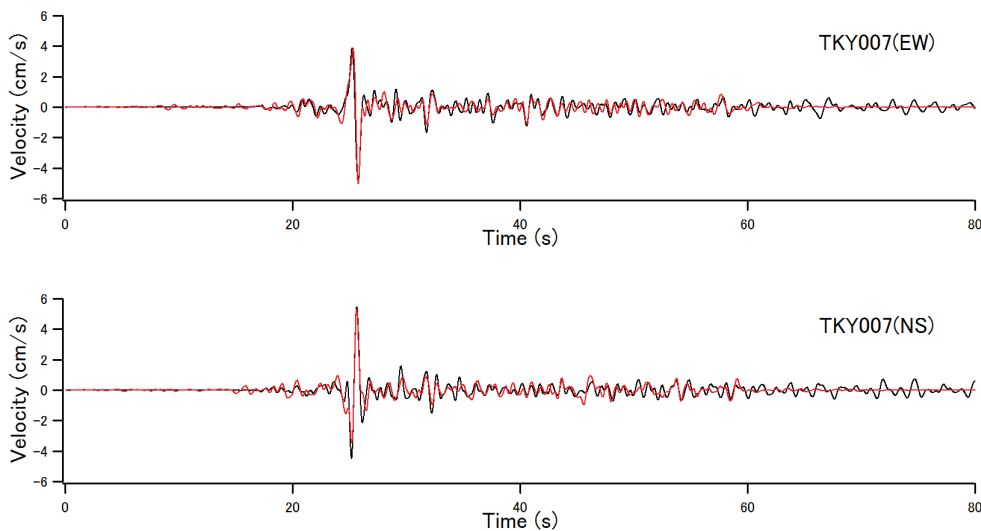


図-3 式(2)による速度波形 (0.2-2Hz) の計算結果 (赤) と観測結果 (黒)

謝辞 防災科学技術研究所の強震記録を利用しています。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 野津厚: 強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試みー疑似点震源モデルによる 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーションー, 地震 2, 第 65 巻, pp.45-68, 2012 年.
- 2) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良ー因果性を満足する地震波の生成ー, 土木学会論文集 A, 第 65 巻, pp.808-813, 2009.
- 3) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 4) Boore, D.M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 5) 長坂陽介・野津厚: 疑似点震源モデルのスラブ内地震への適用性に関する検討ー2005 年千葉県中部の地震を例にー, 港湾空港技術研究所資料, No.1323, 2016.
- 6) 野津厚・長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112, 2005.