

高速ウェーブレット解析による地震動の非定常パワースペクトルの評価

ダイキ(株)

正 谷崎 浩

鳥取大学工学部

正 野田 茂

新潟大学工学部

菊池久和

東電設計(株)耐震技術部

正 安中 正

1. はじめに

我々の回りには時系列変化を伴う現象が数多く見られる。このような現象を分析し、異常診断などを実施することは工学的にも重要なことである。例えば、地震動は不規則な変動をする非定常過程である。その非定常スペクトルの算出法は必ずしも統一されておらず、種々の研究が実施されている¹⁾。ここでは、信号処理の分野で注目されているウェーブレット変換の高速処理法を地震波の非定常スペクトル解析に適用し、その有効性を検討する。

2. 高速ウェーブレット解析

ウェーブレット変換は時系列データとウェーブレット関数系とのたたみ込み演算で表される。時間および周波数軸上で局在する基本ウェーブレットを選び、それにスケール変換と時間シフトを施すことで、ウェーブレット関数が得られる。ウェーブレット変換は、その性質からして、フーリエ変換と違い、突発性の時系列解析に適した時間-周波数解析法である。

同一のスケールで時間シフトを行ったウェーブレット関数に対応する展開係数はFIRフィルタの出力に一致する。この結果を利用すると、ウェーブレット解析を高速に実施することができる。そのため、時系列データをリアルタイムに処理することが可能である。ここでは著者の一人が提案した方法²⁾を用いる。

FIRフィルタは、周波数サンプリングフィルタ(図1)を用いると、得られる。このフィルタは、零点を実現するくし形フィルタと極を実現する共振器により、構成される。 Δt をサンプリング周期とすると、このフィルタのインパルス応答 $h(n\Delta t)$ は、 $0 \leq n \leq N-1$ に対し、

$$h(n\Delta t) = A \sum_{i=0}^M H_i \exp\left(jn\Delta t \frac{2\pi}{N} k_i\right) \quad (1)$$

その他のとき、0となる。ここで、 n 、 N 、 M と k_i は整数である。 N はくし形フィルタの遅延器数、 k_i は基本フィルタの極配置を決定する周波数、 H_i は k_i に対応する共振器の係数、 M は共振器の数、 A は乗算係数である。

インパルス応答 $h(n\Delta t)$ をウェーブレット関数 $\psi(n\Delta t)$ と一致させれば、周波数サンプリングフィルタの出力 $y(n\Delta t)$ は式(2)で表せる。これは、スケールが1で、時間シフトが $n\Delta t$ であるウェーブレット関数の展開係数に対応する。

$$y(n\Delta t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \psi((i-n)\Delta t) z(i\Delta t) \quad (2)$$

ここに、 $z(i\Delta t)$ は地震データである。

異なるスケールのウェーブレット関数を実現するフィルタは、 N と A を変更することにより、式(2)の基本フィルタから導出される。

くし形フィルタの遅延器数 N に対し、 $a_i = N_i/N$ のスケールに対するフィルタを考える。この場合、 N_i の遅延器数に対する乗算回数は $A_i = \sqrt{N/N_i}$ となる。図1の周波数サンプリングフィルタの性質より、複数のスケールに対するウェーブレット関数の展開係数は、図2のプロセッサによって、並列的に求められる。ここに、 R_i のブロックは、スケール a_i のウェーブレット関数をインパルス応答として実現するための共振器(図1)を意味する。

3. 数値計算例および考察

図3に示す地震加速度波形(1940年のImperial Valley地震時におけるEl Centro地点でのNS成分)の非定常スペクトルを分析する。基本ウェーブレット関数としては、式(3)に示すように、時間-周波数軸上での広がり最小となるGabor関数($\omega_0 = 2\pi$)を用いる。

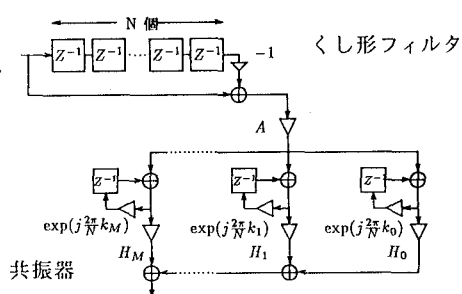


図1 周波数サンプリングフィルタ

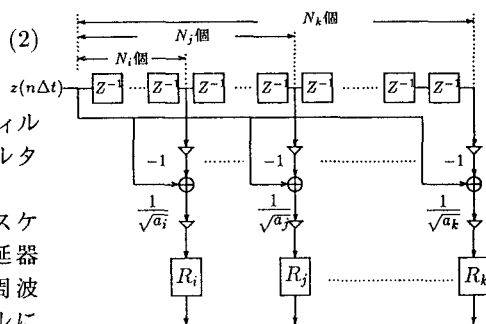


図2 高速ウェーブレット変換プロセッサ

$$g(t; \omega_0) = \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) \exp(j\omega_0 t) \quad (3)$$

窓掛けフーリエ変換の時間一周波数分解能は、周波数によらず、一定である。これに対し、ウェーブレット変換の時間分解能は、高周波ほど、向上する。逆に、周波数分解能は、低周波ほど、向上する。これを近似的に実現するのが亀田による非定常スペクトルの算出法¹⁾である。

図4は Evolutionary power spectra である。同図より、時系列データの約2～15秒付近において、約2.5Hz以下の周波数におけるスペクトルの特徴的な変動を捉えていることがわかる。しかし、高周波になれば、観測記録の強度変化に追従するように、非定常パワースペクトルの時間的変動は見られない。これは、フィルタの過渡特性と狭帯域性を同時に満足することが容易でないためと考えられる。

ウェーブレット解析においては、 $N = 128$ および $M = 10$ とした。Gabor 関数をフーリエ変換し、 k_i と H_i を求めた。スケールは $a_i = (10\sqrt{2})^i$ ($i = -30 \sim 20$) とした。遅延器数 N_i は、 $a_i N$ の整数化により、近似した。

ウェーブレット変換によるスペクトルを示したのが図5である。図4に比べ、高周波での周波数分解能は劣化していない。2～5秒における強震部は1～2Hzの成分によって構成されている。ウェーブレット変換は、周波数が高くなるにつれて、時間分解能が向上する。そのため、周波数ごとのスペクトルの挙動だけでなく、時間的挙動、例えば各種の波動の発生時刻などを捉え易いということが、図5より、読みとれる。これらの点は図4の結果と異なる特徴である。

4. あとがき

強震時に構造物のアクティブコントロールを時々刻々行うことを考えると、地震動特性をリアルタイムに評価することが必要になる。そこで、本研究では、地震動のオンライン解析のため、高速ウェーブレット変換を適用した。その結果は次のようにまとめられる。

- 1) ウェーブレット変換によると、時間および周波数領域での時系列データの特徴を定量的に分析できる。
- 2) 本方法を地震動の非定常スペクトル解析に適用すれば、各波動の識別を容易に行える可能性がある。
- 3) 高速ウェーブレット変換は、リアルタイムの地震動解析法として、強力な手法になり得る。

参考文献

- 1) 亀田弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察、土木学会論文報告集、第235号、pp.55～62、1975年3月。
- 2) Kikuchi, H., Nakashizuka, M., Watanabe, H., Watanabe, S., and Tomisawa, N.: Fast wavelet transform and its application to detecting detonation, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E75-A, No. 8, pp. 980～987, August 1992.

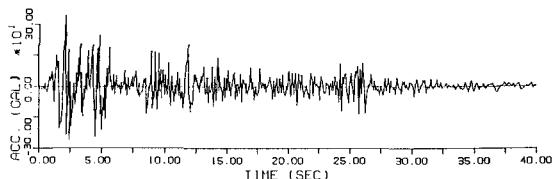


図3 El Centro NS 成分の加速度記録

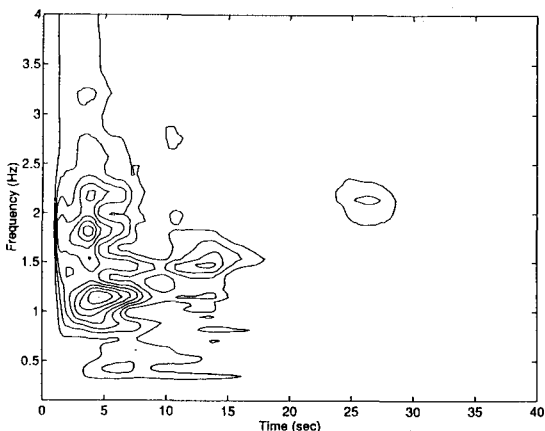


図4 Evolutionary power spectra

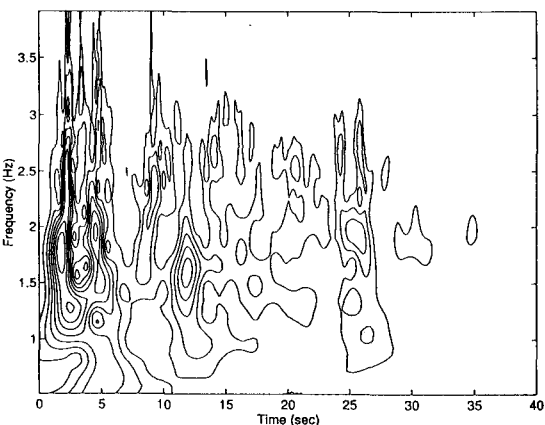


図5 高速ウェーブレット変換によるスペクトル