

京都大学工学研究科	フェロー	土岐 憲三
京都大学工学研究科	正会員	盛川 仁
京都大学防災研究所	正会員	澤田 純男
京都大学工学部	学生員	○白田 利之

1. はじめに 地震記録に含まれるノイズを除去するにあたって、振幅については各種の手法が提案されているが、位相に関しては未だ確立された手法が存在しない。そこで、本研究では、位相に含まれるノイズの除去を時間ウィンドウをかけることにより行い、さらにその効果を表す指標を群遅延時間スペクトルを用いて定義し、最も効果的なウィンドウを決定するためのアルゴリズム提案をする。

2. 群遅延時間スペクトルの平滑化 位相情報を取り扱うに際して、フーリエ位相の周波数領域での傾きを表す群遅延時間スペクトル $t_{gr}(\omega)$ を用いる。 $t_{gr}(\omega)$ は周波数軸上で大きくばらつくので、その周波数特性を知るために $t_{gr}(\omega)$ の周波数軸上での変化の傾向を適切に表現する必要がある。そこで周波数帯ごとのおおよそのばらつきを表現できるように、平均群遅延時間スペクトル $\mu_{tgr}(\omega)$ 、分散群遅延時間スペクトル $\sigma_{tgr}^2(\omega)$ を導入する。また、解析に用いる波形は発生時刻が三角形分布に従うような確率変数であるインパルス列とインパルス応答関数の合積により作成した信号にノイズを加えて作成した。

3. 位相のノイズ除去法 地震記録にはノイズが含まれており、振幅については、周波数領域で帯域フィルタをかけることによりノイズの除去が可能である。しかし、位相に対して同様の方法を適用しても十分な効果を得ることはできない。図1に見られるようにノイズを含む波形を帯域通過フィルターに通すことにより得られる波形はもとの信号とよく似たものとなるが、 $t_{gr}(\omega)$ は全く異なった性状を示している。

そこで位相に含まれるノイズの除去にあたって、真の信号が存在する部分のみを時間軸上で抽出するという方法をとる。このとき用いるウィンドウは、始点を t_0 とし終点を t_1 とする時間軸上での長方形とする。これにより信号が存在しない部分にあるノイズによる位相成分への寄与を完全に取り除くことができる。

4. ノイズ除去の効果を表す指標の定義 ノイズ除去の効果を定量的に評価するために、これを表す指標を定義する。ノイズによって乱されていない信号 $s(t)$ とこれにノイズを加えた波形 $x(t)$ の $\mu_{tgr}(\omega)$ の違いを

$$\mathfrak{S}_{\mu_0} = \int \frac{(\mu_{tgr(x)}(f) - \mu_{tgr(s)}(f))^2}{f} df$$

とし、区間 $[t_0, t_1]$ の時間ウィンドウによって切り出された波形 $\hat{x}(t; t_0, t_1)$ と信号 $s(t)$ の $\mu_{tgr}(\omega)$ の関係を

$$\mathfrak{S}_{\mu_1}(t_0, t_1) = \int \frac{(\mu_{tgr(\hat{x}; t_0, t_1)}(f) - \mu_{tgr(s)}(f))^2}{f} df$$

と定義する。同様に $\sigma_{tgr}^2(\omega)$ に対しても $\mathfrak{S}_{\sigma_0}$ 、 $\mathfrak{S}_{\sigma_1}(t_0, t_1)$ を定め、そのうえで $t_0 \rightarrow -\infty$ 、 $t_1 \rightarrow +\infty$ としたとき1となるように指標 $\mathfrak{S}_{\mu}$ 、 $\mathfrak{S}_{\sigma}$ を

$$\mathfrak{S}_{\mu}(t_0, t_1) = \frac{\mathfrak{S}_{\mu_1}(t_0, t_1)}{\mathfrak{S}_{\mu_0}} \quad \mathfrak{S}_{\sigma}(t_0, t_1) = \frac{\mathfrak{S}_{\sigma_1}(t_0, t_1)}{\mathfrak{S}_{\sigma_0}}$$

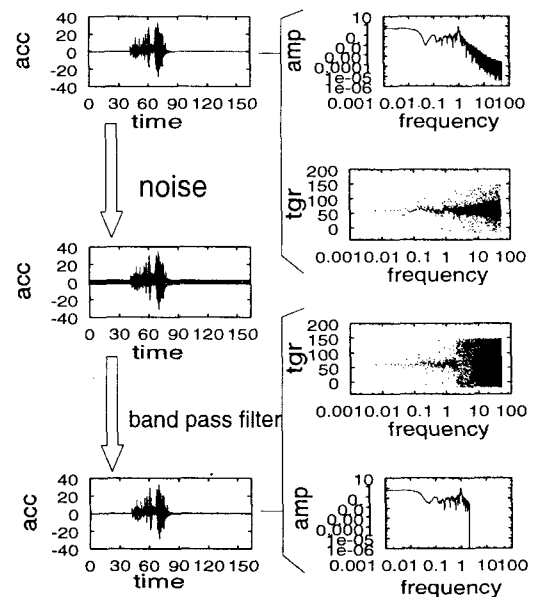


図1: 周波数領域でのノイズ除去

と定義する。このとき、 t_0 、 t_1 が適切な値をとると指標 $\mathfrak{S}_\mu$ 、 $\mathfrak{S}_\sigma$ は最小となる。

5. アルゴリズムの定式化

ノイズを含む時刻歴波形 $x(t)$ は地震動記録に対応するものであり、発震時刻と震源距離がわかれば t_0 のおよその値は決定することができる。そこで本研究では問題を簡単にするために $t_0 = t_1$ として与え、 t_1 のみを決定する問題を扱うことにする。指標 $\mathfrak{S}_\mu$ 、 $\mathfrak{S}_\sigma$ はいずれもノイズを含まない信号 $s(t)$ が既知でなければ定義できない。実際に観測される波形はノイズを含む $x(t)$ であるから $x(t)$ のみから求められるパラメータを用いて効率よく $\mathfrak{S}_\mu$ 、 $\mathfrak{S}_\sigma$ を最小とする $t_1 = t_{1(min)}$ を推定する必要がある。図2にノイズを含む波形 $x(t)$ と、 $\mathfrak{S}_\mu(40, t_1)$ 、 $\mathfrak{S}_\sigma(40, t_1)$ を示す。ここで $t_{1(min)} = 40$ で既知としている。この図より $\mathfrak{S}_\mu$ 、 $\mathfrak{S}_\sigma$ が最小となるのは $t_{1(min)} = 80$ であることがわかる。 $x(t)$ のみから求められるパラメータとしてウインドウ関数をかけることによって失われるエネルギーの総和 $P(t_1) = \int |x(t) - \hat{x}(t; 40, t_1)|^2 dt$ とその傾き $\dot{P}(t_1)$ の2種類を選んで図3に示した。 $P(t_1)$ は $x(t)$ に含まれるノイズの量の影響を受けるので $t_{1(min)}$ の推定には不適切である。そこで $\dot{P}(t_1)$ と $t_{1(min)}$ の関係について調べた。

今 $p_d = \dot{P}(t_1)$ となる時刻 t_1 を t_d として様々な p_d について t_d と $t_{1(min)}$ の関係を図3に示した。図中に複数のプロットがあるのは、インパルス列の本数や、インパルス応答関数の特性を変化させることによって種々の波形に対して $(t_d, t_{1(min)})$ の組を求めたためである。従って t_d と $t_{1(min)}$ の相関が最も高い p_d を決定すれば $t_{1(min)}$ のよい推定値を得ることができると考えた。 t_d と $t_{1(min)}$ の相関の高さは図3のプロットを線形回帰した際の回帰誤差の大小によって判断することとした。図4に p_d の値とそのときの回帰誤差を μ_{tgr} と σ_{tgr}^2 それぞれについて示している。両者がバランスよく小さくなる p_d の値として図中に矢印で示した値 $p_d = 2.1$ を採用し、そのときの回帰係数により

$$t_{1(min)} = 1.08 \times t_d|_{p_d=2.1}$$

として最適なウインドウ関数を決定した。これは、 $P(t_1)$ の傾きが -2.1 となる時刻 $t_d|_{p_d=2.1}$ を求めその値を 1.08 倍した値が $t_{1(min)}$ の最適推定であることを意味している。このようにして決定された $t_{1(min)}$ を用いると全ての場合で $P(t_{1(min)}) < 10\%$ となりエネルギーを大幅に失うことなく、信号 $s(t)$ に対応する部分を抽出できることがわかった。

6. おわりに 今後は、ウインドウ関数の立上りの時刻 t_0 が未知である場合について同様の手法が適応可能であるか検討する。また本手法によって決定されたパラメータの値の一般性と物理的意味づけについても検討を加えていく予定である。

参考文献：[1] 澤田純男・盛川仁・土岐憲三・川崎久仁生：震源インパルス列モデルの位相特性、第3回都市直下地震災害シンポジウム, pp79-80, 1998.

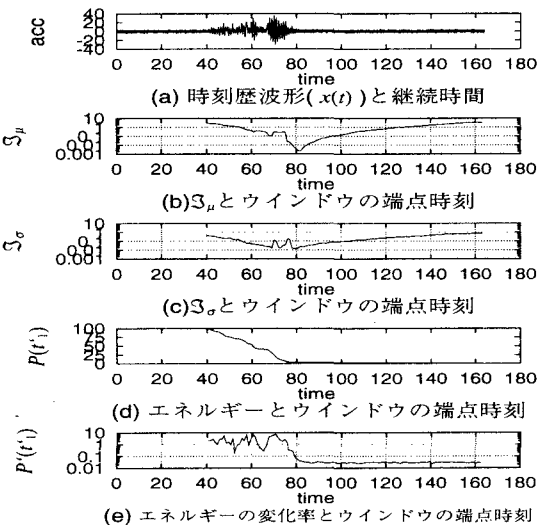


図2: 時刻歴波形と指標の変化

$P(t_1)$ は $x(t)$ に含まれるノイズの量の影響を受けるので $t_{1(min)}$ の推定には不適切である。そこで $\dot{P}(t_1)$ と $t_{1(min)}$ の関係について調べた。

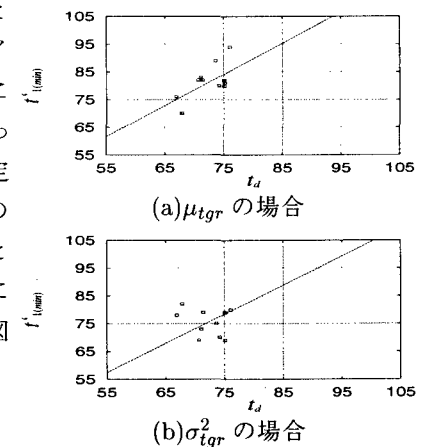


図3: t_d と $t_{1(min)}$ の関係

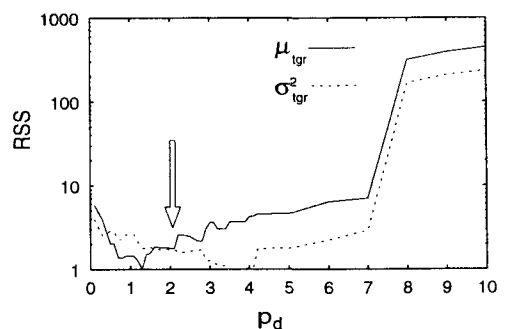


図4: p_d と回帰誤差の関係