

カルマンフィルタを用いた断層破壊過程の同定

京都大学防災研究所 正 員 土岐 憲三 佐藤 忠信 清野 純史
 京都大学大学院 学生員 ○市原 和彦

1. まえがき 本研究の目的は、本震・余震記録からインパルス列を分離し、このインパルス列から断層の破壊過程を同定することである。入倉ら¹⁾の方法によれば本震は余震とインパルス列のconvolutionで表現できる。したがって、本震と余震の観測波形からインパルス列を分離することはdeconvolution問題として解くことができる。本研究ではCrump²⁾が爆破地震学の分野で開発したカルマンフィルタを用いた手法を応用し、これに数値的安定性を保証するUD分解フィルタを導入して解析を行なった。対象とした地震は1983年の日本海中部地震であり、室蘭・森・八戸・宮古・秋田・酒田・新潟の7観測点で気象庁1倍強震計により観測された本震と最大余震の観測波形³⁾を用いた。

2. アルゴリズムのための定式化 最大余震の観測波形を $h(k)$ 、インパルス列を $r(j)$ とすると、本震の観測波形 $y(k)$ は次式で表すことができる。

$$y(k) = \sum_{j=0}^k r(j) h(k-j) + v(k) \quad (1)$$

$v(k)$ は観測ノイズである。 $r(j)$ を用いて状態ベクトル x_k を次式のように定義する。

$$x_k = [r(k) \ r(k-1) \cdots \cdots \cdots r(k-L) \ r(k-L+1)]^T \quad (2)$$

ただし、 L は余震の波形のサンプル数である。

更に、 $r(j)$ が自己回帰モデルで表現できるとする。

$$r(k) = \sum_{j=1}^L b_j(k) r(k-j) + u(k-1) \quad (3)$$

ただし、 $b_j(k)$ については $1/L$ とした。結局、この地震波の数学モデルは、次式に示すような離散時間線形確率システムで表現することができる。

$$x_{k+1} = \Phi_{k+1/k} x_k + G u_k \quad y_k = H_k x_k + v_k \quad (4)$$

$$E(u_k) = 0, E(v_k) = 0, E(u_k u_l) = Q(k) \delta_{kl}, E(v_k v_l) = R(k) \delta_{kl}$$

ここに、 x_k は離散時刻 $k\Delta t$ における L 次元状態ベクトル、 y_k は1次元観測ベクトル、 u_k 、 v_k は共に1次元のガウス白色雑音ベクトル、 Φ は $L \times L$ の状態遷移マトリクス G は $L \times 1$ のシステムノイズ係数マトリクス、 H は $L \times 1$ の観測マトリクスである。 Q 、 R はシステムノイズ共分散マトリクス、観測ノイズ共分散マトリクスである。このシステムに対してカルマンフィルタアルゴリズムを逐次解くことにより、インパルス列を求めた。

3. 解析方法 本震と余震のマグニチュードはそれぞれ7.7と7.1であるので、地震モメントの比から、 $n=2$ となる。したがって、本震時の地震動は、本震時の断層面を4つの

小断層面に等分して考える時、各々の小断層面において2回ずつ、計8回の余震が発生したものと等価になる。図-1に余震の震央分布から決定した本震の断層モデルを示す。図-2は本震と余震の補正波形からによって分離されたインパルス列の一例である。このようにして7ヶ所の各観測地点ごとのインパルス列が分離し、これらを用いて本震の断層破壊過程のパラメータを同定した。同定したパラメータは、破壊開始点、破壊速度、波の伝播速度、余震のrise timeの4つである。同定の方法は、まず4つのパラメータを妥当な範囲でそれぞれ独立に変化させ、その全ての組み合わせについて各観測点で理論的に得られるインパルス列を計算する。そして次式で示す評価関数Jを最小にするパラメータの組み合わせを最適値とした。

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Q_{0i} - Q_{ci}|}{Q_{0i}} \quad (5)$$

ここに、 Q_{0i} フィルタリングによって得られたインパルス列、 Q_{ci} は計算によって得られたインパルス列である。ただし、最終的な基準式としては、すべての観測点の相加平均をとっている。この結果を示したものが表-1である。

4.結果と考察 同定の結果、以下の値が得られた。破壊開始点は図-1の(1, 1)、破壊速度は2.4Km/s、波の伝播速度は3.6Km/s、余震のrise timeは2.0秒すなわち本震のrise timeは4.0秒。破壊速度については平沢ら⁴⁾による'2つの主破壊は約50Kmの間隔を有し、発生時刻差は約24秒'から推定される破壊速度ともほぼ一致し、また、rise timeに関しては入倉らがとめた約4.7秒とほぼ一致する。波の伝播速度についても地殻のS波速度3.0~4.5Km/sという条件を満たしている。

参考文献 1)村松・入倉：自然災害科学研究班, No.A-56-3, pp.33-46, 1981 2) Crump : Geophys., vol.39, No.1, 1974 3) 山田・野田・富本：京大防災研究所年報, 第28号B-2, pp.1~29, 1985. 4)平沢ら：自然災害科学総合研究班, pp.17-88, 1981

表-1 同定された最適パラメータ

NO.	破壊開始点	9×9セル	破壊速度	伝播速度	評価基準
1	1 1	2.00	2.40	3.00	0.40222
2	1 1	2.00	2.40	3.50	0.40222
3	1 1	2.00	2.40	3.40	0.40259
4	1 1	2.00	2.40	3.70	0.40200
5	1 1	2.00	2.40	3.00	0.40200
6	1 1	2.00	2.40	3.50	0.40200
7	1 1	2.00	2.50	4.00	0.40272
8	1 1	2.00	2.50	3.00	0.40278
9	1 1	2.00	2.50	3.00	0.40204
10	1 1	2.00	2.50	4.10	0.40205

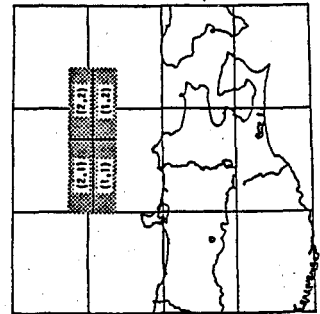
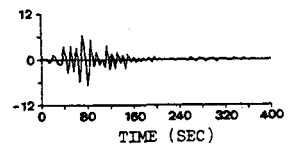
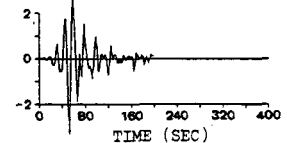


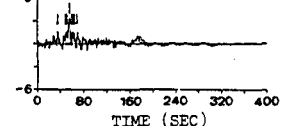
図-1 断層モデルと破壊開始点



(a) 本震補正波形



(b) 余震補正波形



(c) フィルタリングされたインパルス列

図-2 本震・余震記録とフィルタリングされたインパルス列(室蘭・NS)