

2009年駿河湾地震 (M6.5) 前後の体積ひずみ変化
-状態空間モデリングの適用-

高波鐵夫 (東京大学地震研究所)

**Change of Volumetric Strain before and after the 2009 Suruga-Bay Earthquake
-Application of State-Space Modeling-**

Tetsuo Takanami (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Abstract

The earth's surface is under the continuous influence of a variety of natural forces such as earthquake, wave, wind, tide, air pressure, precipitation and a variety of human induced sources, which create noise when monitoring geodetic strain. Eliminating these noise input from the raw strain data requires proper statistical modeling, for automatic processing of geodetic strain data. In the area of the next anticipated Tokai earthquake, the Japan Meteorological Agency (JMA) continuously monitors strain data by the real time automated processing. As an example, the network of strainmeters has been monitoring short-term slow slip events (SSE) synchronized with nearby low frequency earthquakes and tremors since 2005 (Kobayashi et al., 2006). It is desirable to apply the state space modeling to noisy Tokai strain data in order to detect precursors of the expected Tokai earthquake. The method is based on the general state space modeling, recursive filtering and smoothing algorithms. The first attempt to apply this method to actual strain data was made using data from the 2003 Tokachi-oki earthquake (M8.0) recorded by the Sacks-Evertson strainmeter, which has been operating since 1982 at Urakawa Seismological Observatory (KMU) of Hokkaido University in the southern part of the Hidaka Mountains (Takanami et al., 2009). Here, the same state space modeling is applied to the strain data before and after the 2009 earthquake (M6.5) occurred in Suruga-Bay. Finally, the present study demonstrates the uncommon strain change just before the 2009 Suruga Bay earthquake occurred within the Philippine plate.

1. はじめに

現在、大地震を想定している東海地方では、その前兆現象を検知するための地殻ひずみや地下水位など各種の地殻変動観測が実施されている。しかし、実際の観測記録には、地震や地殻変動に直接関係のない信号も混在しているために大変複雑な記録になっているのが一般的である。従って、このような生記録から微弱な前兆現象を抽出するには適当な統計的前処理が必要である。例えばこの種の信号分離の先駆的研究として、すでに Ishiguro et

al. (1984) や Igarashi and Wakita (1991) などがあり、彼らはベイズ・モデルを用いて地殻変動データに含まれる気圧成分や地球潮汐成分などの信号分離を行っている。とくに地下水位記録から地殻変動を検出する場合は降雨の影響も無視できないが、モデルには降雨の影響が含まれていない。そこで地下水位記録から地震による地下水位変化を抽出するために、松本・他 (1989) と Matsumoto (1992) は非ガウシアン回帰モデルを用いて降雨の影響を分離することを試みた。さらに、Kitagawa and Matsumoto (1996)、Matsumoto and Kitagawa (2003)、Matsumoto et al. (2003) は、気圧、地球潮汐、降雨等による地下水位への影響を同時に分離する状態空間モデルを提案した。ここでは、観測記録に含まれる欠測値や異常値に対して 1 次の非ガウシアン・トレンドモデルによる合理的な補間を行い、滑らかな地下水位変化の抽出を可能にした。その結果、水位の変化が系統的に地震規模と震源距離に依存していることを明らかにした。

ここでは、上記の状態空間モデリングを利用して、東海地方の想定地震震源域で観測された 2009 年駿河湾地震前後の体積ひずみ記録から各種のノイズ成分の分離を試み、地震前のひずみ変化を調べた。

2. 体積ひずみ信号の抽出

2.1 状態空間モデリング

最近、体積ひずみ記録の信号分離のために開発した状態空間モデリングを紹介する。時刻 n での体積ひずみ記録 y_n が、

$$\begin{aligned} y_n &= t_n + P_n + E_n + R_n + S_n + \varepsilon_n \\ \varepsilon_n &\sim N(0, \sigma^2) \end{aligned} \quad (1)$$

と表現できる時系列モデルを考える。ここで、 N はデータ数、 t_n , P_n , E_n , R_n , S_n , および ε_n はトレンド成分、気圧成分、地球潮汐成分、降雨成分、ジャンプ成分、そして観測ノイズである。観測ノイズは平均 0、分散 σ^2 のガウス分布に従うと仮定する。またトレンド成分 t_n はノイズ分布 w_n を伴う 1 次のトレンドモデル (Gómez and Maravall, 1994; Kitagawa and Gersch, 1984)、

$$t_n = t_{n-1} + w_n, \quad w_n \sim N(0, \tau^2) \quad (2)$$

を仮定する。気圧成分 P_n は、 m 次の回帰モデル、

$$P_n = \sum_{i=0}^m a_i p_{n-i} \quad (3)$$

を仮定する。ここで p_n は気圧の観測値、 a_i は回帰係数である。さらに地球潮汐成分 E_n は

$$E_n = \sum_{i=0}^l b_i e_{n-i} \quad (4)$$

となる l 次の回帰モデルを考える。ここで、 e_n は潮汐の観測値、 b_i は回帰係数である。なお

地球潮汐の主な r 個の分調成分に注目したとき、つぎの理論的近似式が用いられる。

$$e_n = \sum_{i=1}^r h_i \sin(\omega_i n + \omega_{0,i}) \quad (5)$$

ここで、 h_i は振幅 (cm)、 ω_i は i -分調成分の角速度 (degree/hour)、 $\omega_{0,i}$ は i -分調成分の角速度の初期値である。実際は、既知 ω_i を与えたとき、(1) の尤度が最大となるように h_i と $\omega_{0,i}$ を求める。

つぎに、体積ひずみに対する降雨の影響を R_n とし、

$$R_n = \sum_{i=1}^k c_i R_{n-i} + \sum_{i=0}^{k-1} d_i r_{n-i}^\rho \quad (6)$$

となる ARMAX モデル (Box and Jenkins, 1976) を考える。ここで、 r_n は降雨の実測値であり、その非線形ファクターを ρ とする (Peng, et al., 2013)。(6) のモデルを状態空間モデルで表現すると、

$$\begin{bmatrix} R_{n,1} \\ R_{n,2} \\ \vdots \\ R_{n,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & 1 & & \\ & c_2 & \ddots & \\ & \vdots & & 1 \\ & c_k & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{n-1,1} \\ R_{n-1,2} \\ \vdots \\ R_{n-1,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_k \end{bmatrix} r_{n-1}^\rho \quad (7)$$

$$R_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{n,1} \\ R_{n,2} \\ \vdots \\ R_{n,k} \end{bmatrix}$$

となる。ここで、 $R_{n,j}$ は

$$\begin{aligned} R_{n,1} &= R_n; \\ R_{n,j} &= \sum_{i=j}^k c_i R_{n+j-i-1} + \sum_{i=j}^k d_i r_{n+j-i-1}^\rho, \quad j=2, \dots, k \end{aligned} \quad (8)$$

である。以上から(1)は、

$$\begin{aligned} X_n &= F X_{n-1} + B r_n + G w_n \\ y_n &= H_n X_n + S_n + \varepsilon_n \end{aligned} \quad (9)$$

と状態空間行列で表現される。これを用いて全体の最適なモデルを求める。

ここで、 X_n, F, B, G, H_n は、

$$\begin{aligned}
Z_n &= \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \\
K_n &= V_{n|n-1} H_n^T / \psi_n \\
\gamma_n &= y_n - H_n X_{n|n-1} - S_n \\
\psi_n &= E\gamma_n^2 = H_n V_{n|n-1} H_n^T + \Phi_n
\end{aligned} \tag{14}$$

である。以上が状態空間アプローチによるモデル表現である。

2.3 モデル・パラメータとモデルの次数の決定

ここで最適なモデル $\hat{X}_n = \{\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_n\}$; $n=1, 2, \dots, N$ のとき、 $(-2) \cdot$ 対数尤度は 1 期先の予測誤差 γ_n とその分散 ψ_n を用いて表現すると、

$$\begin{aligned}
\ell(\theta) &= (-2) \log p(y_N, \dots, y_1 | \theta, \hat{X}_n) \\
&= \sum_{n=1}^N (-2) \log p(y_n | y_{i-1}, \dots, y_1, \theta, \hat{X}_n) \\
&= \sum_{n=1}^N (-2) \log p(\gamma_n | y_{n-1}, \dots, y_1, \theta, \hat{X}_n) \\
&= \sum_{n=1}^N \{\log \hat{\Psi}_n + (\hat{\gamma}_n)^2 / \hat{\Psi}_n\} + 2N \log 2\pi
\end{aligned} \tag{15}$$

なり、パラメータ、 $\theta = (d_0, \dots, d_{k-1}, \alpha_1, \dots, \alpha_k, h_1, \dots, h_r, \omega_{0,1}, \dots, \omega_{0,r}, \sigma^2, \tau^2, \rho, \eta_1, \dots, \eta_{ms})$

は、つぎの最小問題

$$\hat{\theta}, X_{00}, V_{00} = \arg \min \ell(\theta) \tag{16}$$

の解として見積もられる。なお、パラメータ $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ はモデル (6) の AR オペレータである。

モデル (3), (4), (6) の最適な次数、 m, l, k の決定には AIC 最小化法を用いる (Konishi and Kitagawa, 2008)。また AIC は、パラメータの最尤推定値を $\hat{\theta}$ 、モデルの最大対数尤度を $\ell(\hat{\theta})$ 、調整可能なパラメータ数を K とすると、

$$\text{AIC} = -2\ell(\hat{\theta}) + 2K \tag{17}$$

と定義される (Akaike, 1976)。それによれば、AIC が小さいモデルほど、データの持つ情報をよりよく反映していると考えられる。

2.4 欠測値の対処

モデル (10) のパラメータを見積もる前に、体積ひずみ記録や気圧のような共変量記録の欠測については事前に処置する必要がある。ここでは、欠測の前後の時系列データに 1 変量 AR モデルを仮定し、この状態空間モデルに Kitagawa (2010) の平滑化アルゴリズムを適用することによって補間される。

3. 解析結果

前述の状態空間モデルを利用して、2003年十勝沖地震(M8.0)前後のひずみ記録の分離をすでに行った(Takanami et al., 2009)。その時の結果が第1図に示されている。この図から状態空間モデリングによってそれぞれの影響が効果的に分離され、地震後の滑らかなトレンドが、地震後約1ヶ月かけて滑ったゆっくり断層運動であることが示唆された(Takanami et al., 2012)。

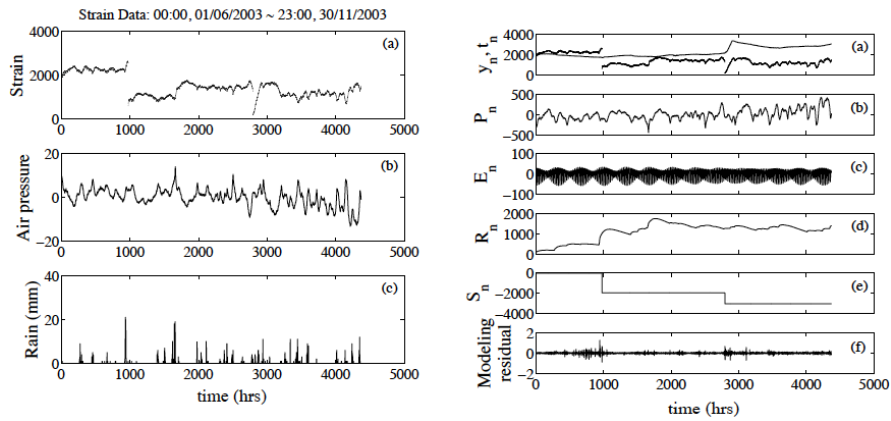


Fig.1 Left: Observation data recorded at Urakawa, Hokkaido, (a) volumetric strain, (b) air pressure, (c) precipitation. Right: Decomposition by state space modeling, (a) raw data with jumps and decomposed trend component (smooth curve), (b) air pressure effect, (c) earth tide effect, (d) precipitation response, (e) level jump component, and (f) model residuals.

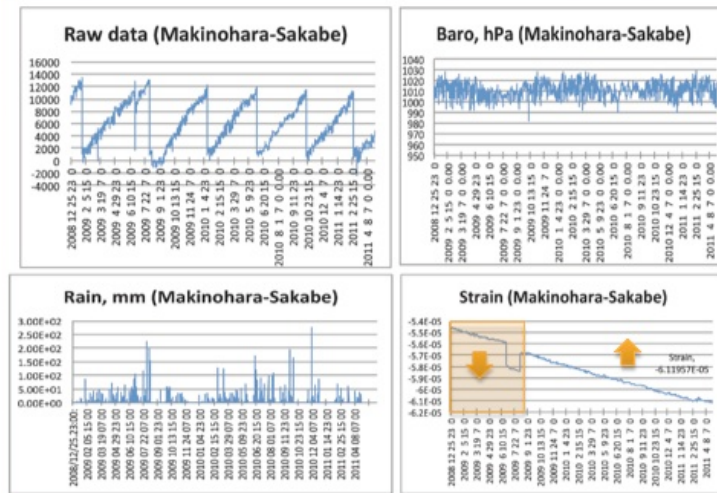


Fig. 2. Observation data recorded at Makinohara, Shizuoka. Raw volumetric strain (upper left), precipitation (lower left), and air pressure (upper right). A time series of strains was obtained through pre-process, downward arrow indicates contraction and observation data in shaded square is used in the state space modeling (lower right).

つぎに、気象庁の静岡県榛原市坂部の観測点(旧名称、榛原)で観測された体積ひずみ、降雨、気圧等の記録を第2図に示す。左上図が観測記録である。この観測点では、200

9年駿河湾地震時の伸びのステップ以外に、地震センサー保護のための安全装置が頻繁に駆動し、リセットが繰り返されている。したがって前もってそれらのステップの補正を施したのち、既述の状態空間モデリングによって抽出したトレンド成分が右下図である。ちなみに地震と同程度の縮みが地震前に認められるが、その原因は今のところ不明である。この観測点ではとくに単調な縮みトレンドが認められる。そこで2009年駿河湾地震の震源域を取り囲む陸上7観測点で観測された2008年12月25日から地震発生直後までの記録に注目して気圧、降雨、潮汐の影響を取り除き、さらに得られたトレンド成分に対してそれぞれの観測点固有の長期的ひずみレートを線形近似で補正した。その最終的結果を第3図に示す。図から、幾つかの注目すべき変化が見出される。たとえば、各観測点は深さ200m前後の浅いセンサー深度であるが、状態空間モデリングによって滑らかな体

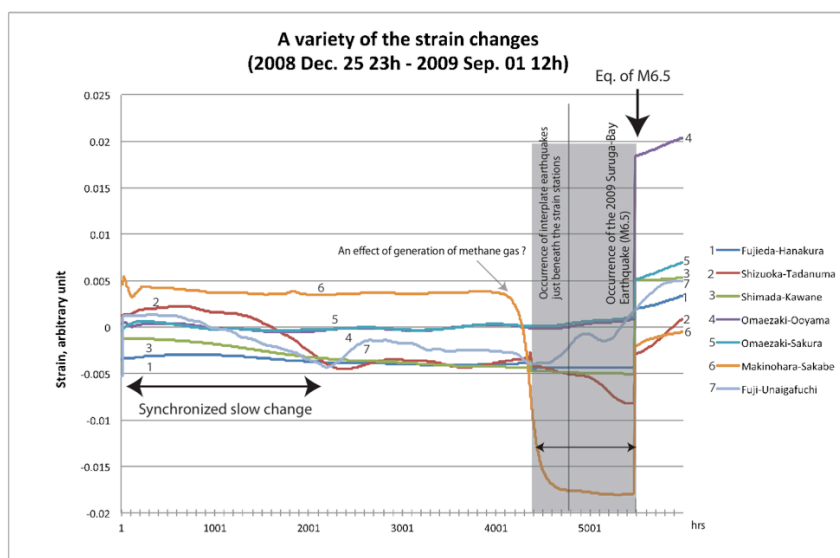


Fig. 3. A various strain changes at selected stations in the Tokai observation network. The downward arrow indicates the time of occurrence of the Suruga-Bay earthquake (M6.5). The all stations locate around the Suruga-Bay. Several stations show synchronized slow strain changes in the beginning of the data. The irregular changes appeared just before the earthquake.

積ひずみ変化が抽出できた。とくに地震前の変化に注目すると、御前崎付近の観測点では急な変化がなく、ほぼ定常的変動を示した。一方、駿河湾に沿った西岸4観測点では、解析データの初期から3ヶ月以上にわたって同期的変動が現われた。また地震直前の1ヶ月半頃からは各点バラバラの非同期変化が現われた。駿河湾に沿った西岸4観測点では御前崎周辺とは異なった非定常な変化を示した。これらの興味深い現象の地学的説明は今後の課題である。

参考文献

Akaike, H., Information theory and an extraction of the maximum likelihood principle, in *the Second International Symposium on Information theory*, eds., B.N. Petrov and F. Csaki, Budapest,

- Akademiai Kiado, 267-281, 1973.
- Anderson, B.D.O., and J.B. Moore, *Optimal Filtering*, New Jersey, Prentice-Hall, 367pp., 1979.
- Box, G.E.P. and G.M. Jenkins, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 2th ed., 575 pp., San Francisco, Holden-Day, 1976.
- Gómez, V., and A. Maravall, Estimation, prediction, and interpolation for nonstationary series with Kalman filter, *Journal of the American Statistical Association*, **89**, 611-624, 1994.
- Igarashi, G., and H. Wakita, Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 4269-4278, 1991.
- Ishiguro, M., M. Sato, Y. Tamura, and M. Ooe, Tidal data analysis, an introduction to BAYTAP, *Proceedings of the Institute of Statistical Mathematics*, **32** (1), 71-85, 1984.
- Kitagawa, G., and W. Gersch, A smoothness prior-state-space modeling of time series with trend and seasonality, *Journal of the American Statistical Association*, **79**, 378-389, 1984.
- Kitagawa, G. and N. Matsumoto, Detection of coseismic changes of underground water level, *Journal of the American Statistical Association*, **91**(434), 521-528, 1996.
- Kitagawa, G., *Introduction to time series modeling*, CRC Press, Chapman & Hall/CRC, 289pp., 2010.
- 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋、ひずみ計により観測された東海地域の短期的スロースリップ(1984~2005年)、地震、第2輯、**59**、19-17、2006.
- Konishi, S., and G. Kitagawa, *Information criteria and Statistical modeling*, New York, Springer, 278pp., 2008.
- 松本則夫・高橋誠・北側源四郎、地震にともなう地下水位変動の定量的な検出法の開発、地質調査所月報、第40巻、第11号、613-623, 1989.
- Matsumoto, N., Regression analysis for anomalous changes of ground water level due to earthquakes, *Geophysical Research Letters*, **19**, 1193-1196, 1992.
- Matsumoto, N., and G. Kitagawa, Extraction of hydrological anomalies related to earthquakes, in *Methods and Applications of Signal Processing in Seismic Network Operations*, Takanami, T. and Kitagawa, G., (eds.), Berlin, Springer-Verlag, 2003.
- Matsumoto, N., E.A. Roeloffs, and G. Kitagawa, Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan-1. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses, *Geophysical Journal International*, **155**, 885-898, 2003.
- Peng, H., G. Kitagawa, T. Takanami, and N. Matsumoto, State-space modeling for seismic signal analysis, *under submission*, 2013.
- Takanami, T., S.I. Sacks, A.T. Linde, A strain event related to aftershock activity following the 2003 Tokachi-oki (M8.0) earthquake, the 2009 AGU Fall Meeting Abstract, G33A-0619, 2009.
- Takanami, T., A.T. Linde, S.I. Sacks, G. Kitagawa, and H. Peng, Modeling of the post-seismic slip of the 2003 Tokachi-oki earthquake M8 off Hokkaido: constraints from volumetric strain, *Earth Planets and Space*, 2012 (Accepted).