

2-2 時空間非定常 BPT モデルと北日本太平洋沖沈み込み帯の小繰り返し地震 (1993.7.15-2011.3.10) の解析例 (1)

Nonstationary space-time BPT model, and analysis of repeating earthquakes on the upper surface of the subducting Pacific Plate from July 15, 1993 till March 11, 2011

統計数理研究所
The Institute of Statistical Mathematics
東北大学大学院理学研究科
Graduate School of Science, Tohoku University

地震は断層を動かす応力が蓄積されて閾値に達したときに発生する。開放された応力は再び蓄積され地震を繰り返す。各活断層において発生する大地震の長期予測確率は、このような弾性反撥の仕組みを、図 1 に示すように、一定の速度 λ でクーロン応力の蓄積の増加トレンドに分散 σ^2 摂動を加えたブラウン過程 (Brownian Passage 過程) が上限閾値に達した時にすべりが起きるというモデルのもとで、繰り返す地震の発生間隔が Brownian Passage Time (BPT) 分布であり、これに基づいて長期確率予測が計算される。BPT 分布の発生間隔の平均値は応力の蓄積速度に反比例し、発生間隔のばらつき α は Brownian Passage 過程の摂動の標準偏差 σ に比例する。パラメータ α と σ は周辺の地震からのクーロン応力の変化の頻繁性やサイズを表現する。

この BPT モデルはプレート境界面の周囲から相対的に孤立したアスペリティの同じスポットで起きる中小の繰り返し地震にも優れて適用することができる¹⁾。小繰り返し地震のデータ²⁾ でプレート境界の準静的すべりの加速・減速の時空間変動を時間変化率 $\lambda(t)$ とし非定常な Brownian Passage 過程を考えることができる (図 2)。ここで、繰り返す地震のマグニチュードと発生間隔から Nadeau and Johnson の関係式²⁾ を用いてすべり速度へと変換を行っている。

プレート境界面の各スポットで発生する小繰り返し地震に対し、非定常 BPT 更新過程を拡張して時空間階層ベイズモデル (図 3) を開発し、応力蓄積率の時空間的变化の推定を行った。ここで 3 次元 B-スプライン関数で場所と時間による連続的な応力の変化を表現する。過剰な適合を避けるために、時間変動や空間変動の平滑性について制約を設定し、最適なベイズモデルは ABIC 最小化に従う。

これを北日本太平洋沖のプレート境界で観測された、1987 年から 2011 年までの小繰り返し地震に当てはめた。その結果、これらの前と後の準静的すべり、相対的な固着域など、それぞれの特徴的な時空間変化を捉えている。例えば (1) 1994 年 12 月三陸はるか沖地震 (M7.6) 後、西側余震域ですべりが加速している。(2) 2003 年 9 月十勝沖地震 (M8.0) 後に余効すべりが北東へ拡大して 2004 年 11 月釧路沖地震 (M7.1) の震源南西付近まですべりが加速している³⁾。(3) 2008 年 5 月に茨城県沖地震 (M7.0) があったが、2008 年初めから 2009 年末までの長期間、北関東沖から宮城沖にかけての広範囲ですべり加速が起こっている。(4) 2011 年 3 月東北太平洋沖地震 (M9.0) の震源のやや北側で半年以上前から繰り返す地震が活発化している。また、最大前震である 2011 年 3 月 9 日東北沖 (M7.3) の余震活動も繰り返す地震に含まれている。

提案モデルは、GPS 観測網から離れた沖合の海洋底下におけるプレート境界での、応力

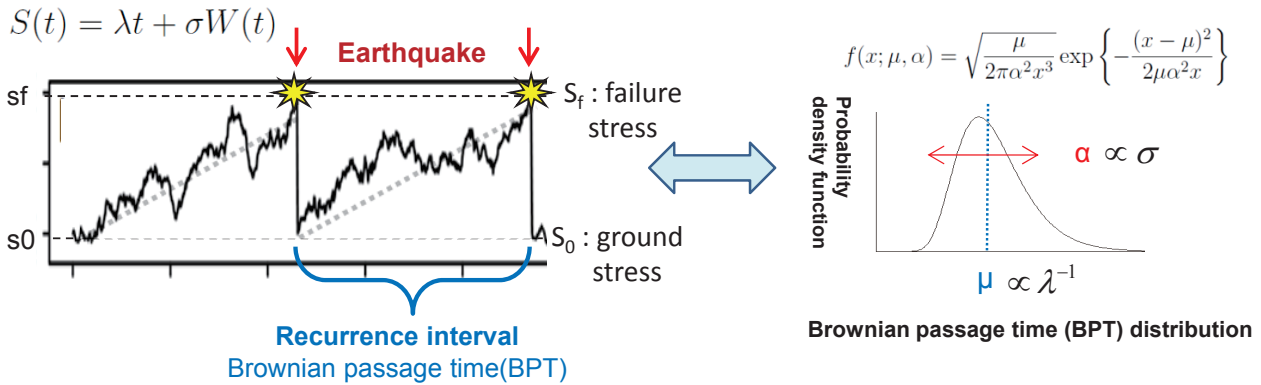
場の変動やプレート間カップリングの可視化とモニタリングに有用であると考えられるが、小繰り返し地震の近傍の大地震による地震時の急激な応力変化と、その前後のゆっくり滑りを分離するという課題がある。

(野村俊一, 内田直希, 尾形良彦)

参考文献

- 1) 野村俊一 (2012) 総合研究大学院大学博士学位論文.
- 2) Nadeau and Johnson (1998) *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **88**, 790-814
- 3) Uchida, N. et al. (2009). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 283, 111-121.

Stationary loading rates λ and dispersions σ



第 1 図. ブラウン到達過程とブラウン到達再帰時間の分布との関係の図示.

Fig. 1. Illustration of the relation between Brownian passage process and Brownian passage time distribution.

Non-stationary loading rates $\lambda(t)$ and dispersions σ

$$dS_t = \lambda_0 \lambda(t) dt + \sigma_0 \sqrt{\lambda(t)} dW_t \iff d\tilde{S}_t = \lambda_0 \tau d\tau + \sigma_0 d\tilde{W}_\tau$$

$$\tau = \Lambda(t) = \int_0^t \lambda(u) du$$

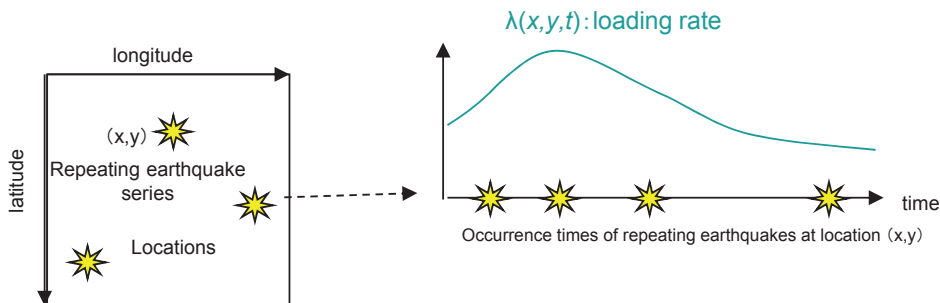
第 2 図. 非定常ブラウン到達過程とブラウン到達再帰時間の分布との関係の図示.

Fig. 2. Relation of nonstationary Brownian passage process to the original Brownian passage time distribution.

Non-stationary Space-Time Model

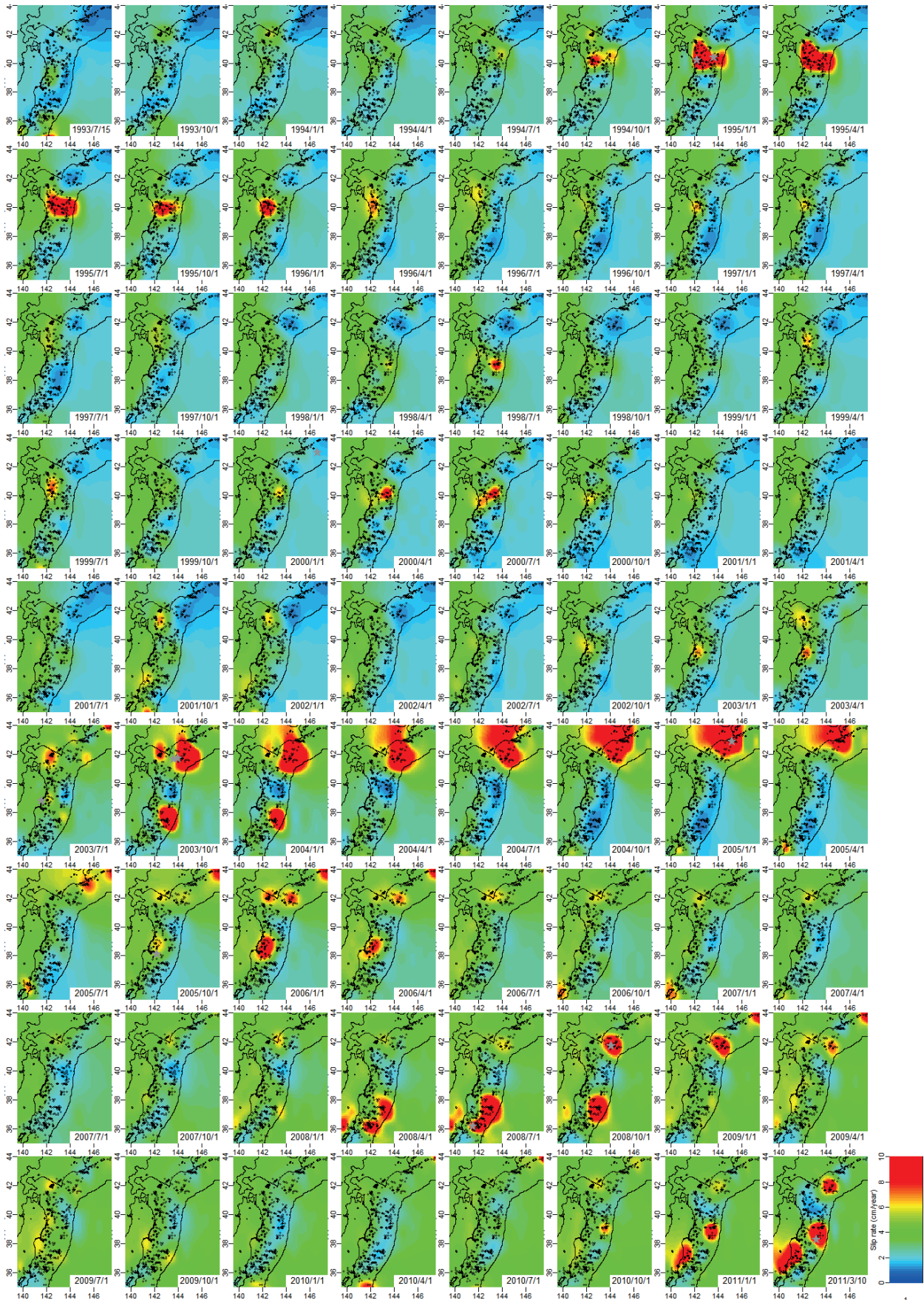
$$dS_t = \lambda_0 \lambda(x, y, t) dt + \sigma_0 \sqrt{\lambda(x, y, t)} dW_t$$

- λ_0 : Background loading rate
- σ_0 : Background perturbation rate
- $\lambda(x, y, t)$: space-time rates relative to the background loading rate λ_0



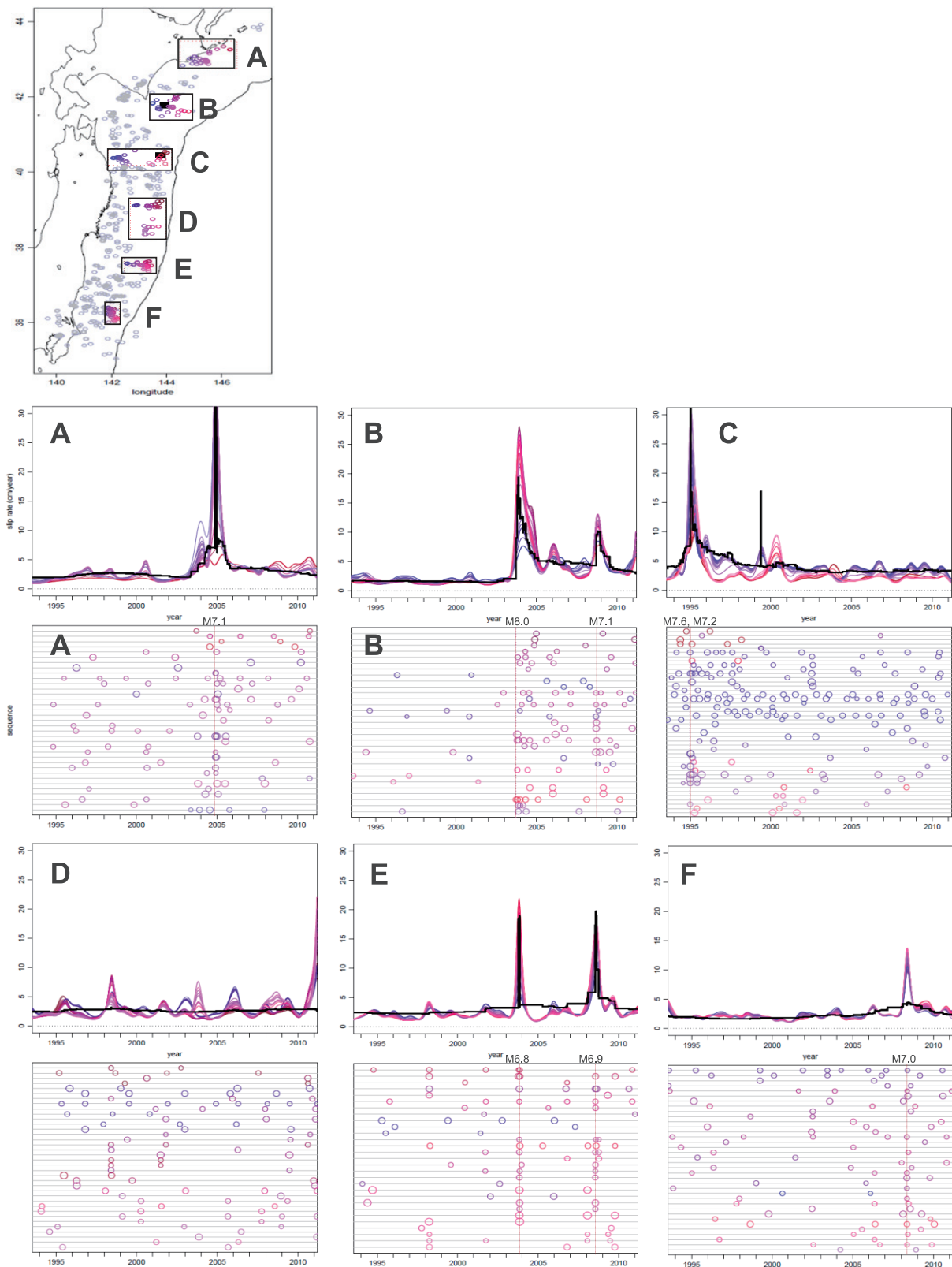
第 3 図. 時空間すべり率関数で特徴づけられる非定常時空間ブラウン到達過程.

Fig. 3. Illustration of the nonstationary space-time Brownian passage time model characterized by the space-time loading rate.



第4図. 1993年7月から2011年東北地方太平洋沖地震までの3ヶ月ごとの時空間ストレス蓄積率のスナップショット. カラーテーブルはすべり速度のcm/年の単位.

Fig. 4. Snapshots of space-time loading rate at every three months from July 1993 till the 2011Tohoku earthquake. Color table in bottom right shows slip-rate with unit of cm/year.



第5図. 赤から青のグラデーションをつけた色の丸印と曲線は左パネルのA-Fの矩形領域内の各繰り返し地震の空間位置でのすべり速度の時間経過と発生時の系列を示す. 黒い関数は各領域内の繰り返し地震時をすべて重ね合わせた系列の発生間隔の逆数に比例したもの.

Fig. 5. Circles and curves wearing gradient color from red to blue indicate time sequence of the repeating events and the time variation of the slip velocity, respectively, at each spatial position of repeating earthquakes in the rectangular regions A-F in the left panel. Black curve represents reciprocal of interval lengths between consecutive occurrence times of the superposed repeating earthquakes in each region.