

アンサンブルカルマンフィルタを用いた長期的スロースリップ断層域での 摩擦特性およびすべり発展の推定手法の開発 — 数値実験 —

平原和朗(京都大学名誉教授・理化学研究所・香川大学)
錦織健人(協立電機)

海溝型巨大地震の震源域の浅部・深部で発生するスロー地震は外部応力に敏感で、海溝型巨大地震サイクルをモニターする応力計として働く (Obara & Kato, 2016)。従って、次期海溝型地震発生予測の上からも、スロー地震発生域での摩擦特性推定、およびすべり発展予測は重要な課題といえる。ここでは、長期的スロースリップイベント (LSSE) に焦点を絞り議論する。

これまで GNSS データの逆解析により LSSE 断層域でのすべり分布が求められているが、これは言わば運動学的解析であり、物理モデルに基づいておらず、物理的には許されないすべり分布が得られている可能性がある。また、岩石実験から得られた速度状態依存摩擦 (RSF) 則を用いて、LSSE のシミュレーション研究も行われている。この場合は、摩擦パラメータを試行錯誤的に求めて LSSE を再現しており、観測データからどの程度パラメータが拘束されているか、客観的な信頼性がない。こういった二つの LSSE 研究はこれまで全く独立に行われてきた。一方、大気海洋分野では、データ解析と物理モデルに基づくシミュレーション研究を融合した、データ同化という手法が開発されており、この手法を用いて、例えば、数値気象予報が行われている。

錦織・平原 (2017) は、豊後水道 LSSE を想定して、リアルタイム解析を意識して、逐次データ同化の一手法であるアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を GNSS データに適用して、LSSE 発生域でのすべり発展と RSF 則の摩擦パラメータを推定する数値 (双子) 実験を行った。更に、錦織・平原 (2018) は、豊後水道 LSSE の浅部に位置する南海地震固着域の影響を考慮する定式化を行っている。こういった数値 (双子) 実験による EnKF を用いた LSSE での摩擦特性およびすべり発展予測 (データ同化) システム構築の現状を紹介する。

EnKFによるLSSE発生域の摩擦特性およびすべり発展推定に関する数値実験

平原和朗⁽¹⁾⁽²⁾、錦織健人⁽³⁾
⁽¹⁾理研 AIPセンター ⁽²⁾香川大学
⁽³⁾(株)協立電機

2019年1月24日
 平成30年度第2回地殻活動研究委員会@瑞浪国際地科学交流館

1

長期的スロースリップイベント (LSSE)

すべり速度: ~ 10 cm/y
 継続時間: 月 ~ 年
 繰り返し間隔: ~ 年

- 巨大地震震源域下部延長域に発生
・応力擾乱に敏感
- ↓
- 巨大地震震源域の固着状態を知る
応力計として機能 (Obara&Kato,2016)
- ↓
- LSSE域での摩擦特性およびすべり発展のリアルタイム推定

[Obara and Kato (2016)]

2

データ同化を用いたLSSE断層域での摩擦特性・すべり発展のリアルタイム推定

逐次データ同化 (大気・海洋分野で開発)

摩擦構成則に基づく数値シミュレーションによるLSSE再現

$$x^{t+\Delta t} = M(x^t)$$

×パラメータ試行錯誤的設定

+

GNSSデータの運動学的逆解析によるすべり分布

$$y_o^t = Hx^t$$

×物理過程を考慮していない

LSSE断層域における摩擦特性・すべり発展のリアルタイム推定

3

本研究の目的

データ同化によるLSSE域の摩擦特性・すべり発展のリアルタイム推定システムの構築

↓

模擬データ解析による数値実験 (双子実験) による手法の適用性検証

Simulated observed data

Ensemble Kalman Filter (EnKF)

Estimated values

Comparison

LSSE model

4

SSEデータの逐次データ同化システム開発状況

奥田・他 (2014~2016)

◎八重山 SSE
 (繰り返し間隔~0.5年, 継続時間~1カ月)
 ・継続時間が短い→急激な更新: 数値不安定
 ・島嶼地域 → 疎な観測点

↓

錦織・平原(2016~2018)

◎豊後水道LSSE域へ
 ・結果への初期Enメンバーの強い影響
 ↓
 初期Enメンバーを広いパラメータ空間から構成
 ・南海トラフ巨大地震震源固着域の存在
 豊後水道LSSEの活動をコントロール
 ↓
 固着域を考慮した定式化

[modification from Heki and Kataoka (2008)]

5

豊後水道LSSE

予知連 (気象研)

- 特徴的時間スケール
 - ・繰り返し間隔~7年
 - ・すべり継続時間 ~ 1年
- 発生域
 - ・南海地震震源域下部延長
 - ・ほぼ同じすべり領域の繰り返し

GEONET observations around Bungo Ch.

Slip distributions of Bungo LSSEs

1997, 2003 (1st), 2003 (2nd), 2010

豊後水道 LSSE域でのすべり分布およびPHSプレートの沈み込みによるすべり遅れ分布 [Yoshioka et al. (2015)]

6

データ同化 : 線形最小分散推定

真値: x_t モデル予測値: x_f + 観測値: $x_o \rightarrow x_t$ の推定値(解析値): x_a

$x_f = x_t + \varepsilon_f, \quad x_o = x_t + \varepsilon_o$

$\langle \varepsilon_f \rangle = \langle \varepsilon_o \rangle = 0, \langle \varepsilon_f \varepsilon_o \rangle = 0, \langle \varepsilon_f^2 \rangle = \sigma_f^2, \langle \varepsilon_o^2 \rangle = \sigma_o^2$

$x_a = \alpha_f x_f + \alpha_o x_o = (1 - \alpha_o)x_f + \alpha_o x_o = x_f + \alpha_o(x_o - x_f)$

$\sigma_a^2 = \langle (x_o - x_f)^2 \rangle = \alpha_o^2 \sigma_o^2 + (1 - \alpha_o)^2 \sigma_f^2$

$\partial \sigma_a^2 / \partial \alpha_o = 2\alpha_o \sigma_o^2 - 2(1 - \alpha_o) \sigma_f^2 = 0$

$\rightarrow \alpha_o = \sigma_f^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_o^2)$

$x_a = x_f + \frac{\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_o^2} (x_o - x_f)$

$\sigma_a^2 = \sigma_f^2 \sigma_o^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_o^2)$

$= (1 - \alpha_o) \sigma_f^2$

$1 / \sigma_a^2 = 1 / \sigma_f^2 + 1 / \sigma_o^2$

7

カルマンフィルタ

X : スカラー $\rightarrow X$ (状態)ベクトル

$x_o = x_f + \alpha_o(x_o - x_f) \quad x'_a = x'_f + K(y'_o - Hx'_f)$

σ_a^2 : 最小化 y'_o : 観測データ H : 観測演算子

$\partial \sigma_a^2 / \partial \alpha_o = 0 \quad \rightarrow \alpha_o = \sigma_f^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_o^2)$

$x_a = x_f + \frac{\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_o^2} (x_o - x_f)$

$\sigma_a^2 = \sigma_f^2 \sigma_o^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_o^2) = (1 - \alpha_o) \sigma_f^2$

$1 / \sigma_a^2 = 1 / \sigma_f^2 + 1 / \sigma_o^2$

K : カルマンゲイン

$P'_a = \langle (x'_a - x'_f)(x'_a - x'_f)^T \rangle$

$tr(P'_a)$: 最小化

$\partial tr(P'_a) / \partial K = 0 \quad \rightarrow K' = P'_f H^T (HP'_f H^T + R')^{-1}$

$x'_a = x'_f + K'(y'_o - Hx'_f)$

$P'_a = (1 - K'H)P'_f$

$x'^{t+\Delta t} = M(x'_a) + \varepsilon'_t$: 時間発展

8

カルマンフィルタ \rightarrow アンサンブルカルマンフィルタ

[Evensen (1994)]

$x'_f = M(x'^{t-\Delta t}) \rightarrow m$ 個のアンサンブルメンバー $x'^{(i)}_f (i=1 \dots m)$

$\rightarrow M$ 線形のみ P_f 計算可能 $x'^{(i)}_f = M(x'^{t-\Delta t(i)}_f) + \varepsilon'_s(i)$

非線形 \times $y'_o(i) = Hx'^{(i)}_f + \varepsilon'_o(i)$

$x'_a = x'_f + K(y'_o - Hx'_f)$

$P'_a = \langle (x'_a - x'_f)(x'_a - x'_f)^T \rangle$

$tr(P'_a)$: 最小化

$\partial tr(P'_a) / \partial K = 0$

$\rightarrow K' = P'_f H^T (HP'_f H^T + R')^{-1}$

$x'_a = x'_f + K'(y'_o - Hx'_f)$

$P'_a = (1 - K'H)P'_f$

$x'^{(i)}_f = (1/m) \sum_{i=1}^m x'^{(i)}_f$

$\varepsilon'_f(i) = x'^{(i)}_f - x'_f$

$P'_f = 1 / (m-1) \sum_{i=1}^m \varepsilon'_f(i) \varepsilon'^T_f(i)$

$R' = 1 / (m-1) \sum_{i=1}^m \varepsilon'_o(i) \varepsilon'^T_o(i)$

$K' = P'_f H^T (HP'_f H^T + R')^{-1}$

$x'^{(i)}_a = x'^{(i)}_f + K'(y'_o + \varepsilon'_o(i) - Hx'^{(i)}_f)$

$y'_o + \varepsilon'_o(i)$: 擾乱付き観測

9

アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF)

[Evensen (1994)]

状態空間 x

観測空間 y

Time

解析値 $\{x'^{(i)}_t\}_{i=1}^m$

予測値 $\{x'^{(i)}_{t-1}\}_{i=1}^m$

観測 y'_o

インバージョン(Update) $x'^{(i)}_t = x'^{(i)}_{t-1} + K_t(y'_o + \varepsilon'_o(i) - Hx'^{(i)}_{t-1})$

予測値分散・共分散行列 $P'_f \sim \sum_{i=1}^m \varepsilon'_f(i) \varepsilon'^T_f(i) / (m-1)$

観測誤差共分散行列: R

カルマンゲイン $K_t = P'_f H^T (HP'_f H^T + R)^{-1}$

予測観測値共分散行列 $HP'_f H^T$

10

南海地震震源域における固着の影響

モデル I

モデル II

固着域の影響により

- LSSE断層域での応力変化
- 経年的観測変位速度

\rightarrow 要: 考慮

すべり遅れ分布

Yoshioka et al.(2015)

11

豊後水道LSSEモデル I・II

-- 南海地震固着域を含む --

Eqs. for slip vel. on cell i

Frictional Parameters

- $A = 100$ [kPa]
- $B = 135$ [kPa] (inside of patch)
- $B = 30$ [kPa] (outside of patch)
- $L = 22$ [mm]

Shear stress due to slip & locked region

$\tau_i = \sum_j K_{ij}(u_j - v_{sl} t) + K_i(u_{lock} - v_{sl} t) - \frac{G}{2c} v_i$

Rate and state friction law

$\tau_i = \tau_o + A_i \ln \frac{v_i}{v_o} + B_i \ln \frac{v_o \theta_i}{L_i}$

$\frac{d\theta_i}{dt} = 1 - \frac{v_i \theta_i}{L_i}$

[Dieterich, 1979; Ruina, 1983]

予測 $x'^{(i)}_t = M(x'^{(i)}_{t-1})$

τ_i : shear stress A, B, L : frictional parameters

u_i : slip K_{ij} : slip response func.

v_i : slip vel. v_{sl} : convergence rate

v_{lock} : slip vel. G : rigidity

θ_i : state var. c : S-wave velocity

\sim subscript means cell No.

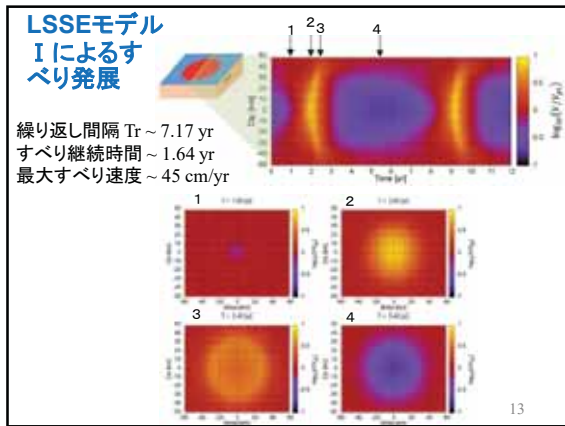
Setting of locked region

size: 360 km \times 40 km

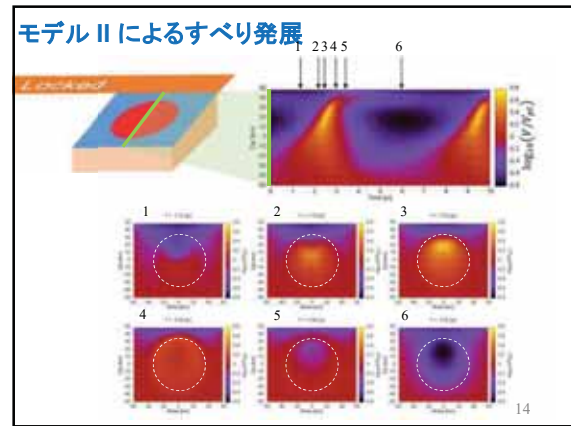
dip: 5° $v_{pl} = 6.5$ cm/yr

Slip deficit rate: 6.0 cm/yr

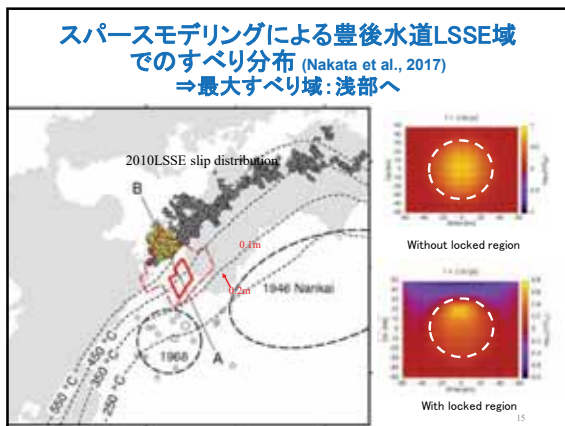
12



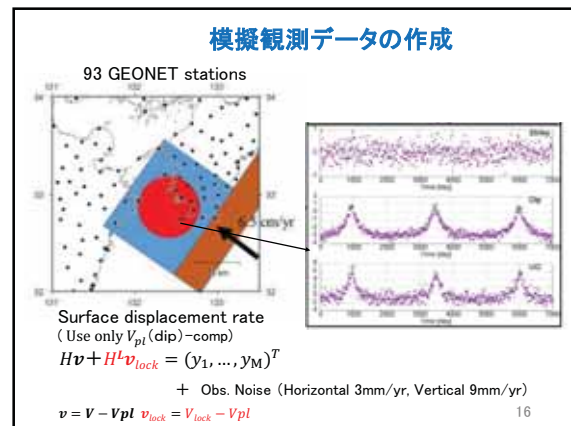
13



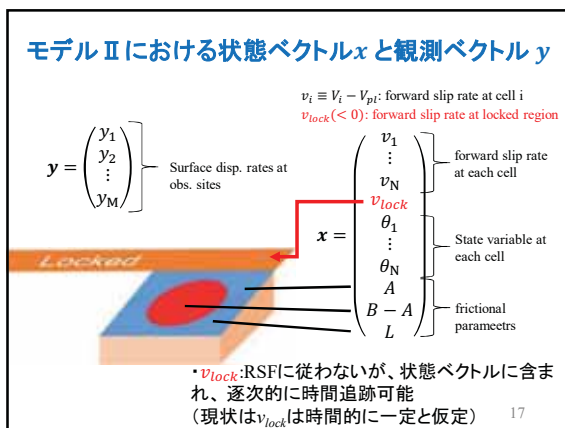
14



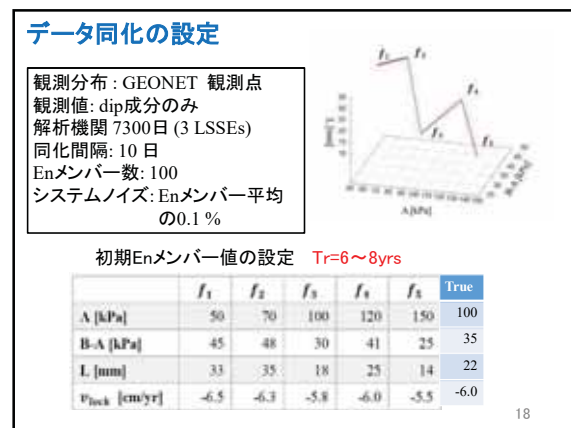
15



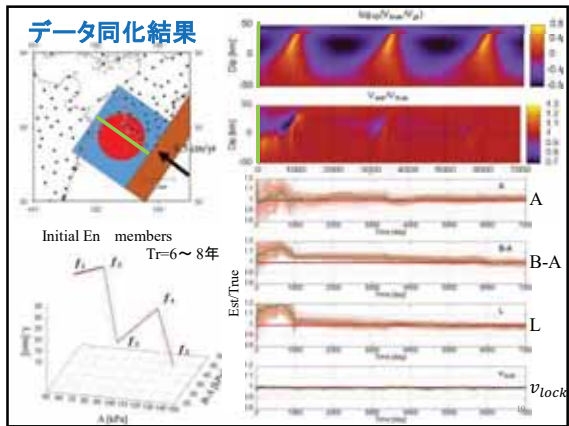
16



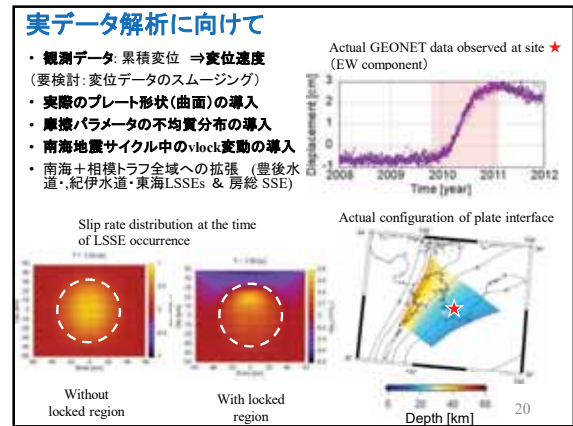
17



18



19



20

