



## 海溝型巨大地震予測の考え方と今後の方向性

堀, 高峰

---

**(Citation)**

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 20:168-172

**(Issue Date)**

2016-03

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCOI)**

<https://doi.org/10.24546/81011518>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011518>



# 海溝型巨大地震予測の考え方と今後の方向性

## Concept and future direction of forecasting procedure for plate boundary earthquakes

堀 高峰<sup>1)</sup>  
Takane Hori

概要：海溝型巨大地震の予測を、その発生原因であるプレート境界の固着・すべりの状態のモニタリングとその後の推移から予測する考え方を紹介する。固着・すべりの状態は、観測可能な地表変位データからある程度推定することができるため、リアルタイムに得られる地表変位データと、あらかじめ計算しておく多数のプレート境界でのすべりの時空間変化のシミュレーション結果から求める地表変位との残差で、各シミュレーション結果がどれだけ観測データに近いかの尤度を求め、その尤度に応じて結果の重みづけをする。この手法を南海トラフの巨大地震に対して適用した数値実験の例を紹介するとともに、今後の方向性を示す。

キーワード：地震発生予測・プレート境界・摩擦則

### 1. はじめに

地震の予測は、地震がいつ・どこで・どのくらいの規模で発生するかを推定することである。現在日本で国が公表している予測は、どこでどのくらいの規模で地震が起こるかはある程度決まっており、それがある程度周期的に発生するという仮定のもとで、対象とする領域での地震の履歴をデータとして、今後数十年以内に対象とする地震の発生する確率を算出している（地震調査委員会, 2001）。これは、地震が発生した結果にもとづいた予測なので、地震の発生する原因となる状況に変化が生じると予測ができなくなってしまう。実際、宮城県沖では、マグニチュード（以下M）9の2011年東北地方太平洋沖地震が発生するまで、30年前後の間隔でM7クラスの地震が繰り返し発生していたが、その領域では「余震活動や余効変動が続いているため、今後の発生確率を予測することは難しく、宮城県沖で繰り返し発生する地震の確率は不明である」としている（地震調査委員会, 2011）。一方、我々にとって身近な予測である天気予報に出てくる降水確率は、過去に雨が降った結果そのものを使って予測している訳ではなく、雨が降る原因となる気圧や水蒸気量などを観測し、そのデータと、それらの観測される物理量がしたがう方程式にもとづいて、雨の原因となる状態の推移を予測し、それと同様な状態のもとで過去に雨が降った確率を算出している。本小論で紹介する地震の予測は、基本的な発想はこれと同様で、地震発生の原因となる状態の推移を予測しようとするものである（Hori et al., 2014）。ここでは、沈み込むプレートとその上にのったプレートとの境界で発生する海溝型巨大地震を対象とする。この場合、様々な近似や仮定をしているものの、地震発生の原因となる状態の推移を記述する方程式やそこに出てくる物理量を観測データと結びつける観測方程式が存在する。本小論では、地震の原因にもとづく予測の基本的な考え方・用いる方程式・予測の適用例を紹介するとともに、今後これをどのように発展させていく必要があるかについて述べる。

### 2. 予測の考え方

日本列島の下にはプレートが複数沈み込んでおり、陸を載せたプレートと沈み込むプレートとの境界で、繰り返し巨大地震が発生している。プレート境界の一部が固着して周囲よりもすべり遅れることで固着している面に働く応力が増加し、応力がその時点での面の強度を超えると、すべり遅れを解消するようすべりを発生させる。そのすべりが十分高速であれば、周囲に弾性波が伝播することになる。この高速なすべりが地震であり、伝播する弾性波が地震波である。したがって、地震発生の原因となる状態の推移というのは、プレート境界での固着やすべりの状態の推移ということになる。これを次節で示すようにプレート境界面での摩擦すべりで記述するが、その推移予測をするためには、地下のプレート境界での固着やすべりの状態を観測可能な量と結びつけることが必要となる。現在では、地表での変位をGNSSで精密に測ることで、それが

可能となっている。図-1 に示したように、地震間に周囲よりもすべり遅れていた場所が、過去に起きた津波の波源と重なるとともに、東北地方太平洋沖地震のすべり分布とも重なることがわかる (Hashimoto et al., 2012)。ここで、すべり遅れている場所が繰り返して地震を発生させるが、いつも同じ広がり地震が発生する訳ではないことは、予測の難しさを端的に示している。しかし、観測データから、地震の原因となる状態をモニタリングすることがある程度可能であることは注目に値する。

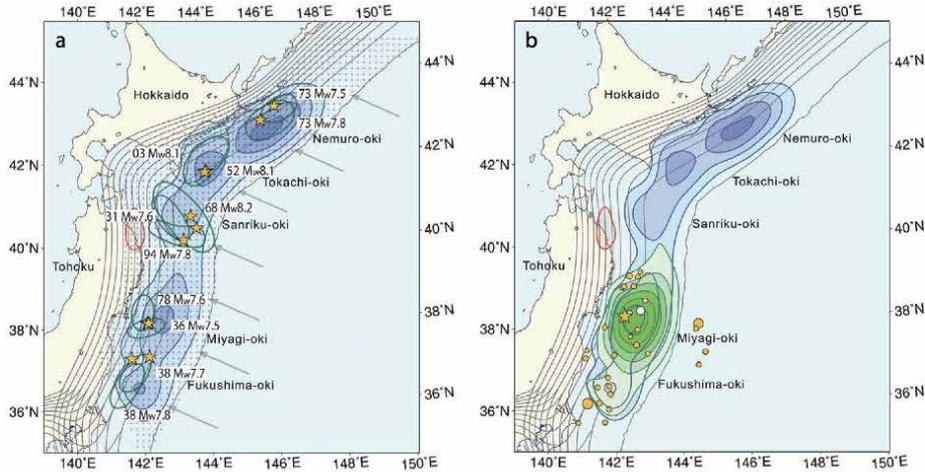


図-1 (a)青のコンタ (3cm/年) がすべり遅れ率の分布、緑の楕円は津波波源域。(b)すべり遅れ率は(a)と同じで、それに東北地方太平洋沖地震の際のすべり分布のコンタ (4m) を重ねた (Hashimoto et al., 2012)。

このような地表変位の観測データと、次節で示す地震の繰り返しのシミュレーション結果から計算される地表変位は直接比較することが可能であるため、我々は図-2 に模式的に示したような考え方で地震の発生予測を行おうとしている。すなわち、リアルタイムに観測から得られる地表変位のデータと、あらかじめ計算しておく多数のプレート境界での同着・すべりの時空間変化のシミュレーション結果から求める地表変位との残差で、各シミュレーションのシナリオがどれだけ観測データに近いかの尤度を求め、その尤度に応じて各シナリオに重みづけをする。そして、その後の推移を、多数のアンサンブルの重みつき平均などで推定する。これは、逐次データ同化手法の一種である。

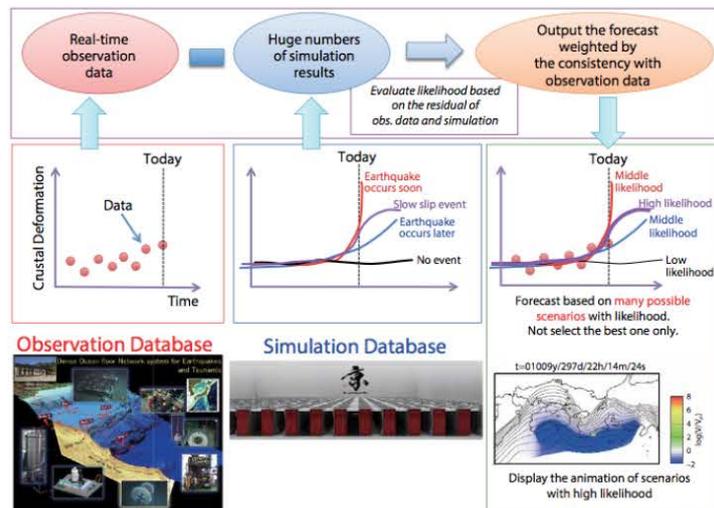


図-2 予測の考え方の模式図。

### 3. 海溝型巨大地震の力学モデル

プレート境界面でのすべり遅れの蓄積と解消によって生じる地震の繰り返し発生は、与えられたプレート間相対速度のもとで、(1) すべり遅れやその解消による剪断応力の増減、(2) 応力と強度とすべりの関係 (構成関係)、(3) 強度の変化 (強度発展則) を規定した連立方程式で記述される (堀, 2009)。

プレート境界面上のすべりの時空間変化によって生じる面上での応力 (すべりの向きの剪断応力) の変化

は、次のように書ける。

$$\frac{d\tau_i}{dt} = \sum_j K_{ij} (V_j - V_{pl}) + \frac{G}{2\beta} \frac{dV_i}{dt} \quad (1)$$

ただし、面上で一様なすべり速度をもつ小断層でプレート境界面を離散化しており、媒質が半無限均質弾性体でかつ動的な応力変化をすべり応答関数には含めず、定常すべりによる応力変化を無視した近似をしている。 $\tau_i$ と $V_i$ は小断層 $i$ にかかる剪断応力とすべり速度、 $K_{ij}$ は小断層 $i$ での単位すべりによる小断層 $j$ での静的な応力変化を与えるすべり応答関数、 $V_{pl}$ 、 $G$ 、 $\beta$ はプレート間相対速度、剛性率、S波速度を表す。ここでは岩石実験にもとづいて導入された摩擦則であるすべり速度・状態依存摩擦則(例えば Kato and Tullis, 2001)を用いる。

$$V = V_* \exp\left[\frac{\tau - (\tau_{s*} + \Delta\tau_s)}{A}\right] \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta\tau_s}{dt} = \frac{B}{L/V_*} \left[ \exp\left(-\frac{\Delta\tau_s}{B}\right) \exp\left(-\frac{V}{V_c}\right) - \frac{V}{V_*} \left\{ \frac{\Delta\tau_s}{B} + \ln\left(\frac{V}{V_*}\right) \right\} \right] \quad (3)$$

$V$ はすべり速度、 $\tau_s = \tau_{s*} + \Delta\tau_s$ は面の強度を表し、 $V_*$ は任意の基準速度(ここではプレート間相対速度)とする。 $V_c$ は第1項と第2項の切り替わりを決めるパラメータであり、以下では $10^{-8}$ m/sとする(Kato and Tullis, 2001)。ここで、第1項は時間の対数に比例した強度の回復を表し、第2項はすべりに伴う強度の低下(すべり弱化)を表す(Nakatani, 2001)。そして $A$ 、 $B$ 、 $L$ が強度変化の特性を決めるパラメータである。これで、プレート境界面の形状と相対速度の境界条件、モデルを規定するパラメータを与えれば、与えられた初期条件のもとでの地震発生サイクルの数値シミュレーションを行うことができる。図-3は、西南日本とその下に沈み込むフィリピン海プレートとの境界で繰り返し発生する南海トラフの巨大地震のシミュレーションの例である(Hyodo et al., 2016)。

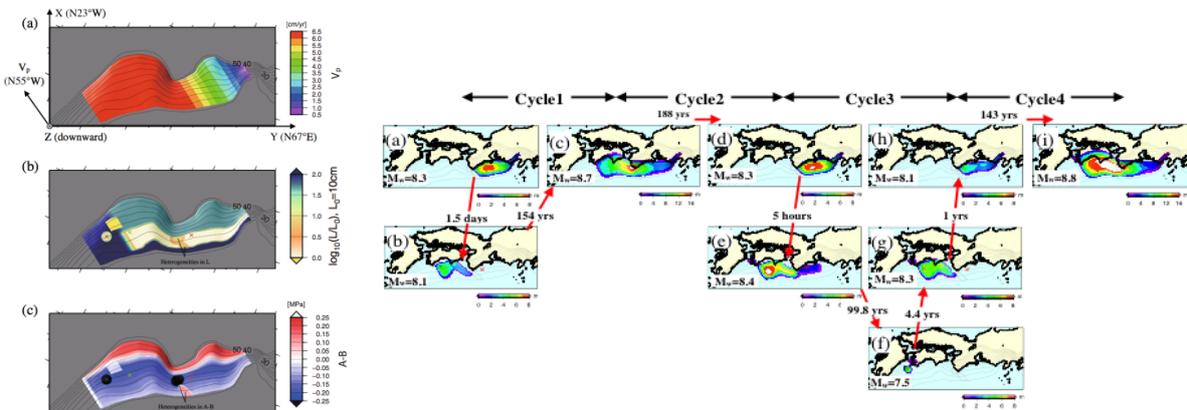


図-3 左：(a) プレート間相対速度分布、(b)  $L$ の分布、(c)  $A-B$ の分布。

右：地震時のすべり分布と規模、地震間の発生間隔。

#### 4. 予測手法の適用例

ここでは予測手法の適用例として、南海トラフの地震を対象とした数値実験の結果を示す(Hori et al., 2014)。南海トラフの地震は、紀伊半島を境に東と西でわかれて発生することが多く、M8クラスの巨大地震が、1日程度から数年の間隔をあけて発生するので、M8クラスが1つ起きた後、次がいつ発生するかが防災上非常に問題になる。南海トラフの地震のシミュレーションでは、紀伊半島の東で地震が起きた後、次に西で起きるまでの間、余効すべり(地震波を出さないゆっくりしたすべり)が伝播するが、そのすべりによって生じる海底面での変位の仕方が、発生間隔に応じて異なる。そのため、海底面での変位がリアルタイムに観測できれば、前述の手法を使ってその後の推移(いつ次のM8クラスが起きるかを含めて)が予測できる可能性がある。海底面の変位は、DONETと呼ばれる海底ケーブルネットワークの水圧計で実際にリアルタイムに観測することが現在では可能となっている。図-4に示したように、ノイズを与えた模擬観測データと、多数のシミュレーション結果とを比較することで、データが増えるにつれて重みが増え、真の発生間隔に近いシナリオが選ばれていき、重みつき平均としての発生間隔の推定値が真の値に近づいていくことが示され

た。これは理想的な場合ではあるが、こうした予測を将来行いたいと考えている。

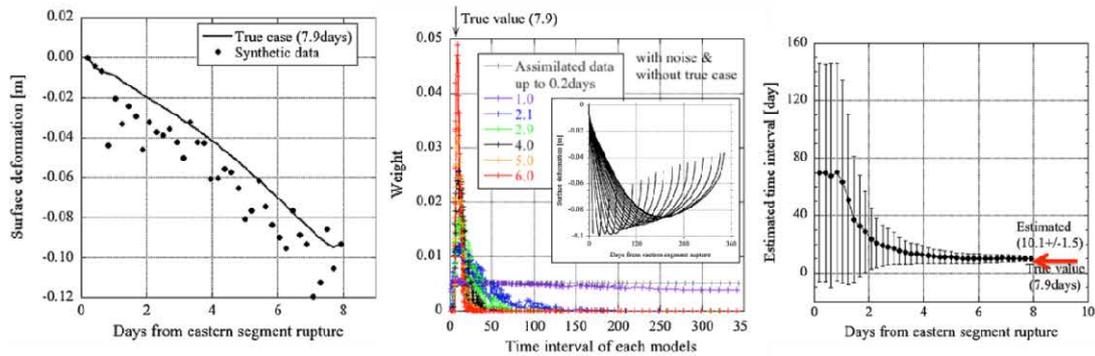


図-4 左：真の場合の海底変位（実線）と現実に近いノイズを加えた模擬データ（点）。中央：データが増えていった際の重みの変化。中の図は多数のシミュレーションによる海底変位。右：次の地震までの発生間隔の重みつき平均と標準偏差（Hori et al., 2014）。

## 5. 今後の課題と方向性

課題は、観測・シミュレーション・予測手法いずれもある。観測では、海底変位のリアルタイム観測が DONET で可能と述べたが、これは紀伊半島～四国沖の一部であり、かつ上下変位のみである。東海から九州にかけての全域、さらには、日本海溝や相模トラフ等に観測網を展開することが必要である。また、水平変位の連続リアルタイム観測の実現も重要な課題である（現状ではオフラインで年数回程度）。シミュレーションでは、半無限均質弾性体のモデルを、地形やプレートの沈み込みなど 3 次元不均質構造で粘弾性応答を取り入れたモデルにすることが必要である。最近、超大規模有限要素法での計算が実現したため (Ichimura et al., 2015)、これを用いた不均質構造での地震発生サイクルシミュレーションの実現が期待される。予測手法については、あらかじめ用意したシナリオだけでは限界があるので、観測データに合わせてパラメタや初期値を修正する手法（例えば、アンサンブルカルマンフィルタ）の導入が必要である。これらは、今回紹介した予測の考え方のもとでの課題であるが、予測を少しでも確かなものにするためには、地表変位以外のデータ（例えば、地震活動度の変化）を活用することや、プレート境界でのすべり以外の先行現象のモデル化（例えば、せん断帯形成前の不安定化）などの研究を進めることも重要な課題である。

## 参考文献

- 堀 高峰：プレート境界地震の規模と発生間隔変化のメカニズム，地震 2, 61, S391-S402, 2009.
- Hashimoto, C., A. Noda, and M. Matsu'ura: The  $M_w$  9.0 northeast Japan earthquake: Total rupture of a basement asperity. *Geophys. J. Int.*, 189:1-5, 10.1111/j.1365-246X.2011.05368.x, 2012.
- Hori, T., M. Hyodo, S. Miyazaki, Y. Kaneda: Numerical forecasting of the time interval between successive M8 earthquakes along the Nankai Trough, southwest Japan, using ocean bottom cable network data, *Marine Geophys. Res.*, DOI 10.1007/s11001-014-9226-8, 2014.
- Hyodo, M., T. Hori, Y. Kaneda, 2016, A possible scenario for earlier occurrence of the next Nankai earthquake due to triggering by an earthquake at Iiyuga-nada, off southwest Japan, *Earth Planets Space*, 68:6 DOI 10.1186/s40623-016-0384-6, 2016.
- Ichimura et al., Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, (SC15)*, 2015.
- 地震調査委員会，長期的な地震発生確率の評価手法について，2013
- 地震調査委員会，三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(第二版)について，2011
- Kato, N., T.E. Tullis: A composite rate- and state-dependent law for rock friction. *Geophys Res Lett* 28:1103-1106, 2001.
- Nakatani, Conceptual and physical clarification of rate and state friction: frictional sliding as a thermally activated rheology. *J Geophys Res* 106:13347-13380, 2001

著者：1) 堀 高峰，海洋研究開発機構，主任研究員

# Concept and future direction of forecasting procedure for plate boundary earthquakes

Takane Hori

## Abstract

A forecasting procedure is proposed for plate boundary earthquakes in subduction zones. It is based on spatio-temporal variation in slip velocity on the plate interface, which causes interplate earthquakes. To overcome difficulties in forecasting earthquake generation resulting from uncertainty both in the physical model and in the observation data, we introduce a type of sequential data assimilation. In this method, we compare observed crustal deformation data to simulations of several great interplate earthquake generation cycles. We introduce numerical test of sequential assimilation using surface deformation calculated from earthquake generation cycle simulations along the Nankai Trough and discuss future direction of forecasting.

©2016 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.