

逐次データ同化によるプレート境界固着・すべりの推移予測実験

課題責任者

堀 高峰 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

著者

中田 令子 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

堀 高峰 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

日本海溝でのプレート境界での固着・すべりの逐次推移予測の準備として、日本海溝域の巨大地震発生サイクルシミュレーションを行い、2011年東北地方太平洋沖地震前後に観測された特徴のある程度再現するシナリオを見出した。それら多数のシナリオにもとづく、次のM7クラスの宮城県沖地震が発生するまでの間隔は、M9クラスの地震発生前の再来間隔よりも短くなる場合が多いことを指摘した。本研究では、3次元のプレート形状を用いて、M9クラスの地震だけでなく、M7クラスの地震（前震・最大余震を含む）や余効すべりを半定量的に再現可能であることを示した。今後は、これらのシミュレーション結果と観測データを用いて、逐次推移予測の試行実験を行っていきたいと考えている。

キーワード：地震発生サイクル, 東北地方太平洋沖地震, 宮城県沖地震, 再来間隔

1. はじめに

将来、地震・津波による大きな被害が発生すると想定されている南海トラフや、2011年東北地方太平洋沖地震後の余震等が懸念される日本海溝を主な対象として、定期的な海陸地殻変動のモニタリングとデータ解析を実施するとともに、巨大地震の発生に向けたプレート境界での固着・すべりの逐次推移予測のための逐次データ同化プログラムの開発を行っている。本課題では、地殻変動データのインバージョンによってプレート境界の固着・すべりの時空間変化を推定する解析と、その解析結果とシミュレーション結果との差を小さくするようにシミュレーションのパラメータや初期値を修正する手法の開発を行うとともに、逐次推移予測のための準備として地震発生サイクルの数値シミュレーションを行った。

以下では、日本海溝での逐次推移予測の準備として行った、東北地方太平洋沖地震前後を対象とした地震発生サイクルの数値シミュレーションについて報告する。なお、本報告書の内容の多くは、Nakata et al. [1] で報告済みである。

2. 東北地方太平洋沖地震と宮城県沖地震

東北地方の日本海溝沿いの地域で2011年3月11日に発生したマグニチュード(M)9.0の地震(東北地方太平洋沖地震:本震)では、過去のM7前後の地震の震源域も含め、広範囲に破壊が及んだ。宮城県沖では1978年の宮城県沖地震のようなM7.4の地震が、30~40年の再来間隔で繰り返し発生している。これらの地震によるすべり量は3~4mと推定されている[2]。本震時のすべり量は、過去に単独でM7クラスの宮城県沖地震が発生した時よりも大きな値(5~20m)が推定されている[e.g.,3,4]。

過去の宮城県沖地震震源域内のすべり量の収支だけに着目すると、少なくともこれまでの再来間隔と同程度の年数が経過するまでは、同規模の地震は発生しないと考えられる。しかし、2011年の本震時には、過去の宮城県

沖地震震源域を含めた広い領域で大きくすべっているため、単純な問題ではない可能性も考えられる。実際、地震調査研究推進本部は、2016年1月の時点で、この場所での今後30年以内のM7.4前後の地震発生確率を「不明」としている(2011年1月の時点ではM7.5前後の30年以内の地震発生確率は99%であった)。そこで、宮城県沖での地震発生準備過程として、今後どのように応力の蓄積・解放が進むかを調べた。

3. 手法

数値計算ではOhtani et al. [5]と同様の手法と、構造探査にもとづいた3次元のプレート形状[6]を用いた。モデル領域は走向方向に480km、深さ方向は7-77kmの範囲である。このプレート境界面を、走向方向の長さが1、3、9kmの要素を組み合わせてN(=127,367)個に離散化した。N個の要素それぞれに摩擦条件(A, B, L)を与え、以下の3式から導出される連立微分方程式を、時間刻み幅可変のRunge-Kutta法[7]で時間積分する。

$$\frac{d\tau_{ij}}{dt} = \sum_j K_{ij}(V_j - V_{pl,j}) - \eta \frac{dV_i}{dt} \quad (1)$$

$$V_i = V^* \exp\left[\frac{\tau_i - (\tau_{s,i} + \Delta\tau_{si})}{A_i}\right] \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta\tau_{si}}{dt} = \frac{B_i}{L_i/V^*} \exp\left(-\frac{\Delta\tau_{si}}{B_i}\right) - B_i \frac{V_i}{L_i} \quad (3)$$

式(1)はプレートの相対運動に起因する要素jのすべりによる要素iのすべり方向の応力 τ の時間変化を表す。 K_{ij} はすべり応答関数で、要素jの単位すべりによる要素iでの静的せん断応力変化である。 V はすべり速度、 V_{pl} はプレートの相対運動速度(8.4cm/yr)である。 η は地震波の放射

によるエネルギーの減衰を近似するダンピング係数 [8] で、本研究では $1.0G/2\beta$ または $0.3G/2\beta$ とした [9]。前者の場合は、M9 クラスの破壊に 10 分以上かかっていたが、後者の場合、M9 クラスの地震の破壊に要する時間が 5 分程度まで短くなり、観測値 [3, 4] と比較できるようになった。なお、 G は剛性率 (30GPa)、 β は S 波速度 (3.27km/s) である。

式 (2) は断層の構成則 [10] である。 V^* は任意のすべり速度 (V_{pl})、 τ_s^* は V^* で定常すべりをしているときの基準摩擦強度、 $\Delta\tau_s$ は基準摩擦強度からの変化である。 $A(=a\sigma)$ と $B(=b\sigma)$ はすべり速度変化とすべりに対する摩擦係数の変化を表す。 $A-B < 0$ の部分はすべり速度弱化であり、条件次第で不安定すべりを起こす。 L は特徴的すべり量であり、 L が小さいと高速すべりを起こしやすく、大きいとゆっくりすべる。強度の時間発展則には式 (3) のように aging law [11, 12] を用いた。 A 、 B 、 L は、時間変化しないと仮定した。

4. 結果と議論

約 190 モデルで計算を行った中で、観測された特徴を最も良く再現していた場合について紹介する。図 1 のように、M9 クラスの地震のすべり域となる宮城県沖浅部では、走向方向に 150km 長・深さ 8-22km の範囲にわたって、 $L=0.20m$ 、 $A-B=-0.181MPa$ を仮定した。この値は、周囲 ($L=0.30m$ 、 $A-B=-0.10MPa$) よりもやや不安定な摩擦条件である。過去の M7 クラスの地震の震源域は、半径約 20km の円で近似し、さらに不安定な摩擦条件 (例えば宮城県沖地震震源域では半径 23km、 $L=0.021m$ 、 $A-B=-0.285 MPa$) を仮定した。

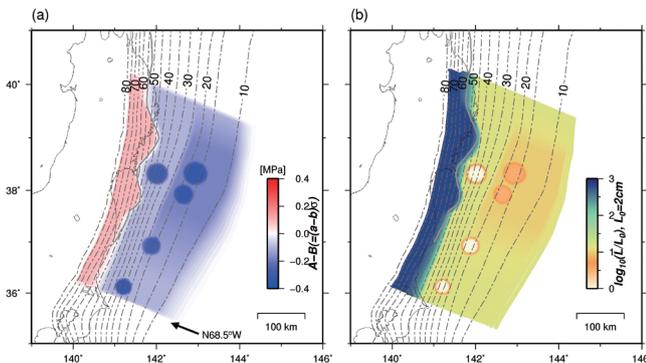


図 1 仮定した摩擦パラメータの空間分布 [[1] を修正]。(a) $A - B$ (MPa)。(b) 特徴的すべり量 L 。

約 2000 年分の計算を行い、1 回目の M9 クラスの地震が発生する数百年前から、2 回目の M9 クラスの地震が発生するまでの期間を解析した。図 1 の摩擦条件で計算した場合、M9.1 の地震の繰り返し間隔は 772 年、最大すべり量は 62m であった。宮城県沖には破壊開始から 1 分後には破壊が伝播し、すべり量は 10 ~ 20m に達した (図 2)。本震後 3 年間の余効すべりは宮城県沖で 2m 以下であった (図 2 青線)。宮城県沖では M7.1 ~ 7.4 の地震が 26 ~ 91 年間で繰り返し発生していた (図 3)。

これらの特徴に加え、福島県沖や茨城県沖で M7 前後の地震が数十年で繰り返す様子や、本震時の福島県沖で

のすべり量、茨城県沖での最大余震の発生、本震の余効すべり分布など、本震前~本震直後の挙動も、観測と概ね一致したシミュレーション結果が得られた。

この結果では、M9.1 の地震後に、宮城県沖での M7 クラスの地震の静穏化は見られず、M9.1 の地震の 18 年後に、M7.2 の地震が宮城県沖で発生した。つまり、M9 クラスの地震が起きる前の繰り返し間隔より短いタイミングで、次の宮城県沖地震が発生していた (図 3)。これは、M9 クラス地震の余効すべりによって宮城県沖での応力蓄積率が早かったためであると考えられる。

さらに、図 1 を基に少し値をばらつかせた摩擦パラメータセットを仮定して多数のモデルで計算したときにも同様の特徴が得られた。得られたシナリオを詳しく解析したところ、同様の特徴をある程度再現できた 121 シナリオのうち 80% 以上のシナリオで、M9 クラスの地震が発

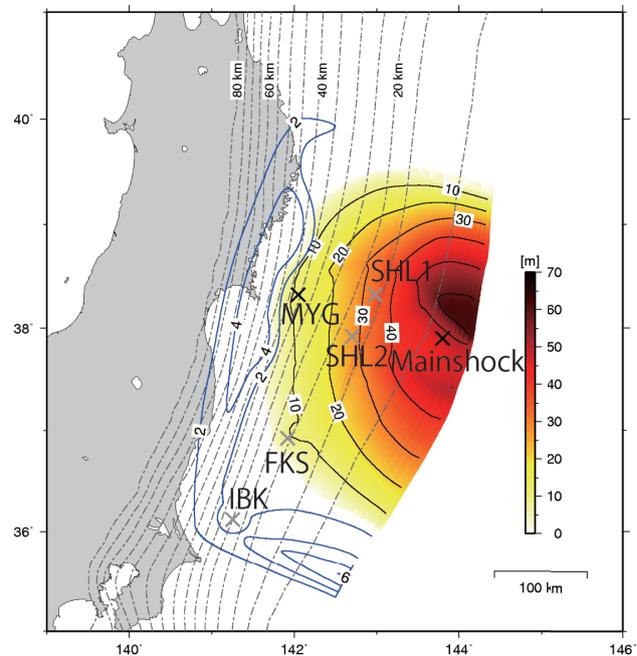


図 2 図 1 の摩擦条件で行った数値シミュレーションで得られた M9.1 地震のすべり (カラー) と余効すべり (コンター) 分布 [[1] を修正]。

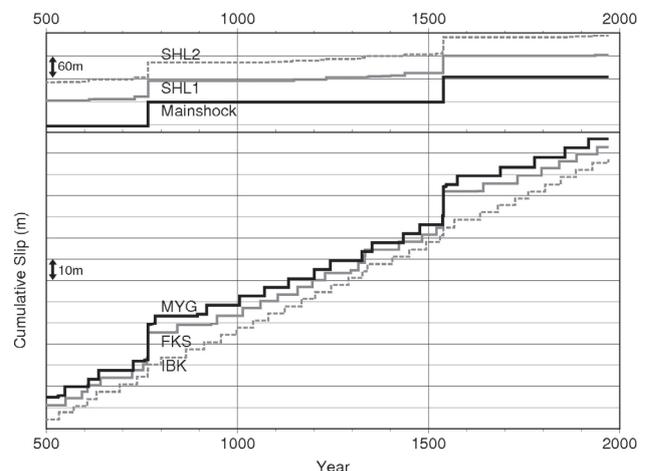


図 3 図 2 の × 印における累積すべりの時間変化 [1]。

生してから次の宮城県沖地震 (M7.1 ~ 7.4) が発生するまでの時間間隔は、M9クラスの地震発生前の平均再来間隔と同じかそれよりも短くなっていた (図4)。

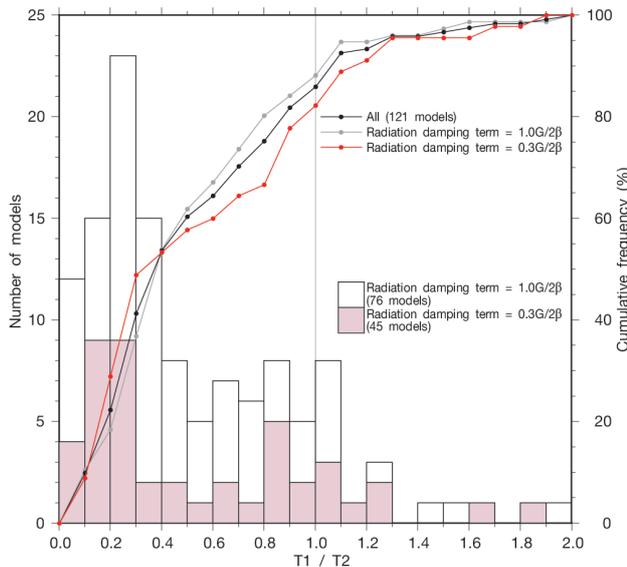


図4 M9クラスの地震後の宮城県沖地震の発生間隔 (T1) と、M9クラスの地震前に起きていたM7クラスの宮城県沖地震の平均再来間隔 (T2) との比 [1]。ヒストグラムはT1/T2=0.1毎のモデルの数、折れ線グラフは累積頻度 (%) を示す。ヒストグラムの赤色と白色、折れ線グラフの赤色と灰色は、数値シミュレーションの際に仮定した条件の一つ (地震波の放射によるエネルギーの減衰を近似するダンピング係数 η) が異なることを意味している。

5. 今後の発展

本課題では、日本海溝での逐次推移予測の準備として、2011年東北地方太平洋沖地震前後を対象とした地震発生サイクルの数値シミュレーションを行い、プレート境界面上のすべりが、半定量的に再現可能であることを示した。これは、多様な地震発生シナリオを検討するうえで重要な知見となる。

今後は、これらのシミュレーション結果と観測データを用いて、逐次推移予測の試行実験を行うとともに、摩擦パラメータをデータに合うように調整する手法の大規模計算対応を進める。これが実現すれば、事前予測できていなかった振る舞いをデータが示しても、それに追従して、推移を予測することが可能となると期待される。

謝辞

数値計算には地球シミュレータを使用しました。文部科学省による委託業務「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の一環として行われました。

文献

- [1] Nakata, R., Hori, T., Hyodo, M., and Ariyoshi, K., “Possible scenarios for occurrence of M~7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation”, *Scientific Reports*, 6, 25704, doi:10.1038/srep25704 (2016).
- [2] Yamanaka, Y. and Kikuchi, M. “Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data”, *J. Geophys. Res.* 109, 10.1029/2003JB002683 (2004).
- [3] Yagi, Y. and Fukahata, Y. “Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release”, *Geophys. Res. Lett.* 38, 10.1029/2011GL048701 (2011).
- [4] Ide, S., Baltay, A. and Beroza, G. C. “Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake”, *Science* 332, 1426, 10.1126/science.1207020 (2011).
- [5] Ohtani M., Hirahara, K., Hori, T. and Hyodo, M., “Observed change in plate coupling close to the rupture initiation area before the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake: Implications from an earthquake cycle model”, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1899-1906, doi:10.1002/2013GL058751 (2014).
- [6] Baba, T., Ito, A., Kaneda, Y., Hayakawa, T. and Furumura, T., “3-D seismic wave velocity structures in the Nankai and Japan Trench subduction zones derived from marine seismic surveys”, paper presented at Japan Geoscience Union, S111-006 (2006).
- [7] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. in *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing* (Vol. 1 of Fortran Numerical Recipes). Cambridge University Press (1996).
- [8] Rice, J. R. “Spatio-temporal complexity of slip on a fault”, *J. Geophys. Res.* 98, 9885-9907, 10.1029/93JB00191 (1993).
- [9] Thomas, M. Y., Lapusta, N., Noda, H., and Avouac, J.-P. “Quasi-dynamic versus fully dynamic simulations of earthquakes and aseismic slip with and without enhanced coseismic weakening”, *J. Geophys. Res.* 119, 1986-2004, 10.1002/2013JB010615 (2014).
- [10] Nakatani, M., “Conceptual and physical clarification of rate and state friction: Frictional sliding as a thermally activated rheology”, *J. Geophys. Res.*, 106(B7), 13347-13380, doi: 10.1029/2000JB900453 (2001).
- [11] Dieterich, J. H., “Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations”, *J. Geophys. Res.*, 84, B5, 2161-2168, doi: 10.1029/JB084iB05p02161 (1979).
- [12] Ruina, A., “Slip instability and state variable friction laws”, *J. Geophys. Res.*, 88 (B12), 10359-10370, doi: 10.1029/JB088iB12p10359 (1983).

Numerical Simulations of Earthquake Generation Cycles along the Japan Trench

Project Representative

Takane Hori R & D Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Ryoko Nakata R & D Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Takane Hori R & D Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In preparation for sequential assimilation of crustal deformation data due to slip on the plate interface, we conducted numerical simulations of earthquake generation cycles by using realistic three-dimensional (3D) geometry of the subducting Pacific Plate along the Japan Trench. As a result, we generally reproduced important characteristics such as the recurrence of M~7 Miyagi-ken-Oki earthquakes, coseismic slip distribution of the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake (also, the foreshock, the largest aftershock), and the afterslip by using realistic numerical simulation.

Keywords: Earthquake generation cycle, Tohoku-Oki earthquake, Miyagi-ken-Oki earthquake, recurrence interval

1. Introduction

We are developing a program for data assimilation method to be aimed at slip on the subducting plate interface. Here, we briefly report on numerical simulations of earthquake generation cycles along the Japan Trench [1] to prepare for sequential assimilation of crustal deformation data due to slip on the plate interface.

In response to subduction of the Pacific Plate beneath northeast Japan, M7.1–7.4 earthquakes have occurred with recurrence intervals of approximately 30–40 years off the east coast of Miyagi Prefecture. These earthquakes referred to as Miyagi-ken-Oki earthquakes, and their maximum seismic slips were less than 3 m.

A M9.0 earthquake occurred along the Japan Trench, on 2011. The source regions of past Miyagi-ken-Oki earthquakes ruptured again during the M9.0 earthquake, with coseismic slip in the Miyagi-ken-Oki segment estimated to be approximately 5–15 m. These slips are larger than that of past Miyagi-ken-Oki earthquakes.

If we consider only cumulative slip in the Miyagi-ken-Oki segment, we may expect that the Miyagi-ken-Oki earthquake will not occur for at least the past recurrence interval. However, after the M~9 earthquake, spatiotemporal development of stress accumulation and release as preparation process of the next Miyagi-ken-Oki earthquake may be different from that of past observations. In this study, we reproduce the observational characteristics prior to, during, and following the M~9 earthquake by using numerical simulation to discuss the time interval to the next Miyagi-ken-Oki earthquake.

2. Methods

Seismic and aseismic events were modeled to represent the release of slip deficit or backslip that accumulates during interseismic period. We discretized the three-dimensional subducting plate into small subfaults (total 127,367 subfaults). The model area is 480 km along the strike, and 7–77 km in the depth range. Length of subfaults in the strike direction (N21.5°E) varied with depth or strike and ranged from 1.0 km to 9.0 km. Frictional parameters A, B, and L on each subfaults are mathematical fitting parameters, which were assumed to be constant over the earthquake cycle in our simulations.

Space-time variations in slip velocity are assumed to be an unstable slip with a frictional interface. We used a fault constitutive law [2] that determines the slip rate for a given stress and a value of strength. The parameter A ($= a\sigma$) controls the slip increase rate at which the stress reaches the strength. In addition, we used an aging law [3, 4], which can be considered as an evolution law for strength change, which varies depending on the prior slip history. The parameters B ($= b\sigma$) and L control strength recovery and slip weakening. Differential equations for slip rate and strength were solved with an adaptive time step fifth-order Runge-Kutta algorithm [5].

3. Results

To reproduce a shorter coseismic propagation time during the M~9 earthquake, we used the seismic radiation damping term [6] of $0.3G/2\beta$, G is the rigidity (30 GPa); and β is the shear wave speed (3.27 km/s). We assumed that the frictional heterogeneity for the M~9 source area at the shallower part was slightly stronger (L = 0.20 m, A–B = -0.181 MPa) than the surrounding area (L = 0.30 m, A–B = -0.10 MPa) over a wide range of 150

km long along the strike and 8–22 km in depth, and we used circular patches as the past sources of the M~7 earthquakes (Fig. 1).

We calculated spatiotemporal development of slips on the plate interface during 2,000 years in the simulation. The coseismic slips in the Miyagi-ken-Oki segment during the M~9 earthquake was approximately 10–20 m. M7.1–7.4 earthquakes occurred in the Miyagi-ken-Oki circular patch during interseismic periods of M~9 earthquakes with maximum coseismic slips of 3–5 m and the average recurrence interval of 54 years.

We reproduced observational characteristics both M~9 and M~7 earthquakes by using numerical simulation. In our future study, we will conduct a data assimilation of crustal displacement data by using these simulations.

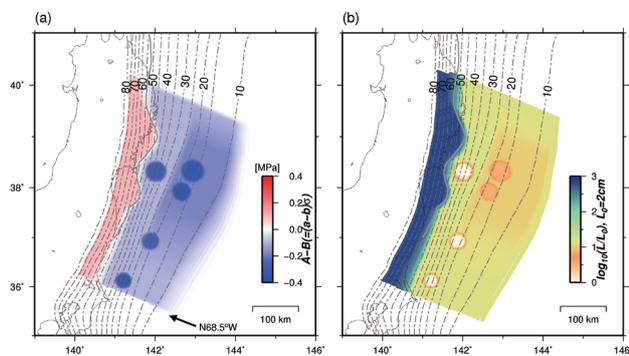


Fig. 1 Spatial distribution of frictional parameters [Modified from Nakata et al. [1]]. (a) A–B (MPa). Contours indicate depth (km) to the upper surface of the descending plate. (b) Characteristic slip distance (L).

Acknowledgement

This work was supported partly by the project “Research project for compound disaster mitigation on the great earthquakes and tsunamis around the Nankai trough region” of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan. Computational resources of the Earth Simulator provided by JAMSTEC was used for all simulations.

References

- [1] Nakata, R., Hori, T., Hyodo, M., and Ariyoshi, K., “Possible scenarios for occurrence of M~7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation”, *Scientific Reports*, 6, 25704, doi:10.1038/srep25704 (2016).
- [2] Nakatani, M., “Conceptual and physical clarification of rate and state friction: Frictional sliding as a thermally activated rheology”, *J. Geophys. Res.*, 106(B7), 13347-13380, doi: 10.1029/2000JB900453 (2001).
- [3] Dieterich, J. H., “Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations”, *J. Geophys. Res.*, 84, B5, 2161-2168, doi: 10.1029/JB084iB05p02161 (1979).
- [4] Ruina, A., “Slip instability and state variable friction laws”, *J. Geophys. Res.*, 88 (B12), 10359-10370, doi: 10.1029/JB088iB12p10359 (1983).
- [5] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P. in *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing* (Vol. 1 of Fortran Numerical Recipes). Cambridge University Press (1996).
- [6] Rice, J. R. “Spatio-temporal complexity of slip on a fault”, *J. Geophys. Res.* 98, 9885-9907, 10.1029/93JB00191 (1993).

