

# プレート相互の作用と変形を考慮した地震発生シミュレーション

## Earthquake Simulation Based on the Mutual Deformation of the Interacting Plates

秋田 宏\* 小出 英夫\*\* 神山 眞\* 沢田 康次\*\*\* 千葉 則行\*\*

Hiroshi AKITA\* Hideo KOIDE\*\* Makoto KAMIYAMA\* Yasuji SAWADA\*\*\* Noriyuki CHIBA\*\*

### Abstract

This paper presents a numerical simulation of seismic events based on the 2D tectonic interplate model at subduction zones using a finite element scheme. The model consists of two deformable plates that simulate a seismic coupling between the sea plate and continental plate. This paper places emphasis on the phenomena due to seismic interaction between two elastic plates having a uniform friction coefficient on their boundary surface while past studies dealt with behaviors coupling elastic continental-plate with rigid sea-plate. The boundary conditions of the model are discussed in detail including the deformation of two plates due to gravity and buoyance forces to simulate the generation process of seismic events available to earthquake prediction.

The simulation results are summarized as follows: 1) The subducting sea plate, which was dealt with as rigid material in past studies, should be elastic because of its effect on the seismic slip characteristics on the boundary surface. 2) The tectonic force moving the sea plate should be reasonably set to generate seismic events following the natural manner. 3) The seismic slips on the boundary surface occur locally at a point and spread one after another, not occur all at once on the boundary plane. 4) The material parameters of surrounding material, especially density, are dependent on depth and the dependency is not negligible in the numerical simulation of seismic interplate coupling, contrary to past studies in which the depth-dependent density was ignored. 5) The strain energy of the two plates calculated simultaneously showed behaviors that may be helpful for understanding the seismic events. 6) The so-called pre-slip, which has been indicated prior to large earthquakes in the past, was not detectable so clearly in the present simulation.

### 1. はじめに

地震を予知することは、その被害を小さくし安全を確保する上できわめて重要であるが、日本地震学会は「現時点で地震予知を行うのは非常に困難である」との見解を出している<sup>1)</sup>。しかし、神山を中心とする著者らのグループは、GPS データを詳細に分析し、東北太平洋地震、熊本地震いずれにおいても予兆と考えられるいくつかの地殻変動<sup>2),3)</sup>を検出しており、これから起こる地震に対しても迅速な検出システムを構築することで予知が可能になると考えている。

そこで巨大地震の予兆に関する知見を得る目的で、大陸プレートと海洋プレート間の滑り現象をシミュレーションにより検討することとした。既往のシミュレーシ

ョンに用いられている滑り応答関数<sup>4),5)</sup>では、大陸プレートの変形は考慮されるが、海洋プレートの移動が位置によらず一定速度としているため、海洋プレートを剛体と見なしたことになる。しかし、海洋プレートを弾性体と見なし、大陸プレートとの相互作用と相互変形を考えるのが、より実際の現象に近いと考えられる。海洋プレートを弾性体と考えると、ローラー支点で支えるか、マン托ルの浮力(液圧)で支えるかに始まり、境界条件や関連する多くの項目についての検討が必要になる。本稿は、2つの長方形ブロックの滑りを2次元で解析し、妥当な境界条件等を選定するとともに、その根拠をまとめたものである。さらに海洋プレートを弾性体と見なしたシミュレーションは、剛体と見なした場合に容易に拡張できるので、両方の場合について実施した結果に基づき、両者の相違点および関連するいくつかの知見についても報告する。

2017年10月25日受理

\* 客員研究員 都市マネジメント学科、本学名誉教授

\*\* 教授 都市マネジメント学科

\*\*\* 客員研究員 都市マネジメント学科、本学名誉教授、東北大学名誉教授

## 2. 滑り応答関数の限界

地震発生シミュレーションで一般的に使われる滑り応答関数は、以下に示すように海洋プレートを剛体と仮定してしまうことになる。滑りの開始を境界面のせん断応力と面に垂直な応力との比が摩擦係数を越えるか否かで判定するが、滑り応答関数はせん断応力を求める次式(1)に含まれる。

$$\tau_i = \sum_j K_{ij} (V_p t - u_i) - \frac{G}{2\beta} \frac{du_i}{dt} \quad (1)$$

ここで、大陸プレートは多数の小さなセルに分割されていると考え、 $\tau_i$  : セル*i*のせん断応力、 $K_{ij}$  : 滑り応答関数(セル*j*の単位滑りで生じるセル*i*のせん断応力)、 $V_p$  : 海洋プレートの平均速度、 $t$  : 時間、 $u_i$  : セル*i*の滑り、 $G$  : 剛性率、 $\beta$  : S波速度である。海洋プレートの作用は $V_p$ のみであり、時間と場所によらない定数であるため剛体と同じになり、大陸プレートに対して一定の作用を与えれば、海洋プレート自体をモデル化する必要がない。しかし、大陸プレートとの相互作用により海洋プレート自体も変形すると考えるほうが自然であり、剛体と見なしてその変形を無視することは、特定の限定された現象を表現することになると思われる。そこで、大陸プレート、海洋プレートともに弾性体として両者の相互作用を扱うことにしたが、そのため剛体であれば検討する必要のない多くの項目の検討が必要になる。

## 3. 解析モデル

### 3.1 有限要素モデル

図1が採用した有限要素モデルで、大陸プレート、海洋プレートともに厚さ100km、長さ400kmの長方形で、紙面に垂直な断面から見た2次元解析とし、節点数1212、要素数1000である。この寸法では自重による上下(鉛直)方向の圧力が極めて大きくなり、それに伴い側圧も極めて大きくなるため、平面ひずみを仮定した四角形要素を用いている。プレート間の相互作用を節点どうしの相互作用として扱うため、両プレートの境界面にはそれぞれに対応する節点を設けており、見やすくするために図では両プレートの境界面を離して示している。境界面上のそれぞれ対応する点どうしで相互作用を考慮し、黒丸で表した節点(大陸プレートでは509~603、海洋プレートでは610~704)では鉛直力と水平力が、その他の境界節点では鉛直力のみが働くと仮定する。

### 3.2 支持条件

もし海洋プレートが剛体であれば、下面を支えるのがローラー支点でもマントルからの浮力でも差はないが、弾性体ではローラー支点が垂直方向の変位を拘束して不都合なので、浮力による支持を採用する。マントルからの浮力(液圧)は側面にも側圧として働くため、図1の両プレートは(境界面が接した状態で)プレートと同一密度の液体中に浮かんでいると仮定する。その場合この寸法では液圧を計算する際に、液体の深さによる密度変化

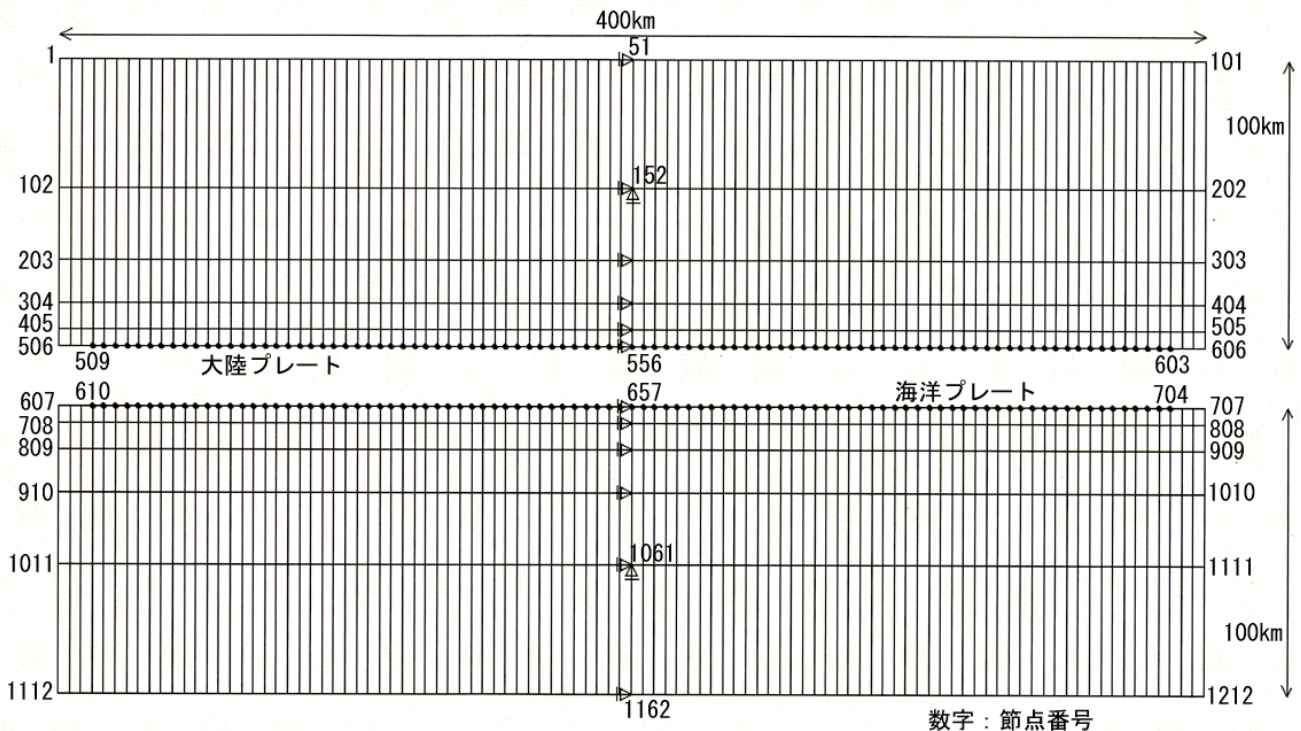


図1 有限要素モデル

が無視できない。実際 200km の深さでは密度の増加が 11%程度になるため、液圧の計算には深さに応じた密度変化を考慮してある。図 1 の支点は自重と液圧のみによる変形を計算するためのもので、左右対称な軸である節点 51~1162 の線上にある。浮力で支えるのであるから、鉛直方向支点 152 および 1061 は不要なように思われるが、解析上不定にならないためには欠くことができない。したがって実際にはこれらの支点が働かない(支点反力が

ゼロになる) ような支点位置を求め、浮力のみで支えた状態を実現するのである。図 2 はその条件で求めた自重と液圧のみによる変形である。鉛直方向の圧力によりプレートの層厚が若干小さくなり、深いほど圧力が大きいため圧縮量も大きく、全体として円弧状に変形していることがわかる。この変形状態を時間ゼロとして海洋プレートの移動を開始するのであるが、後に述べるように移動条件により鉛直支点の位置を変えている。

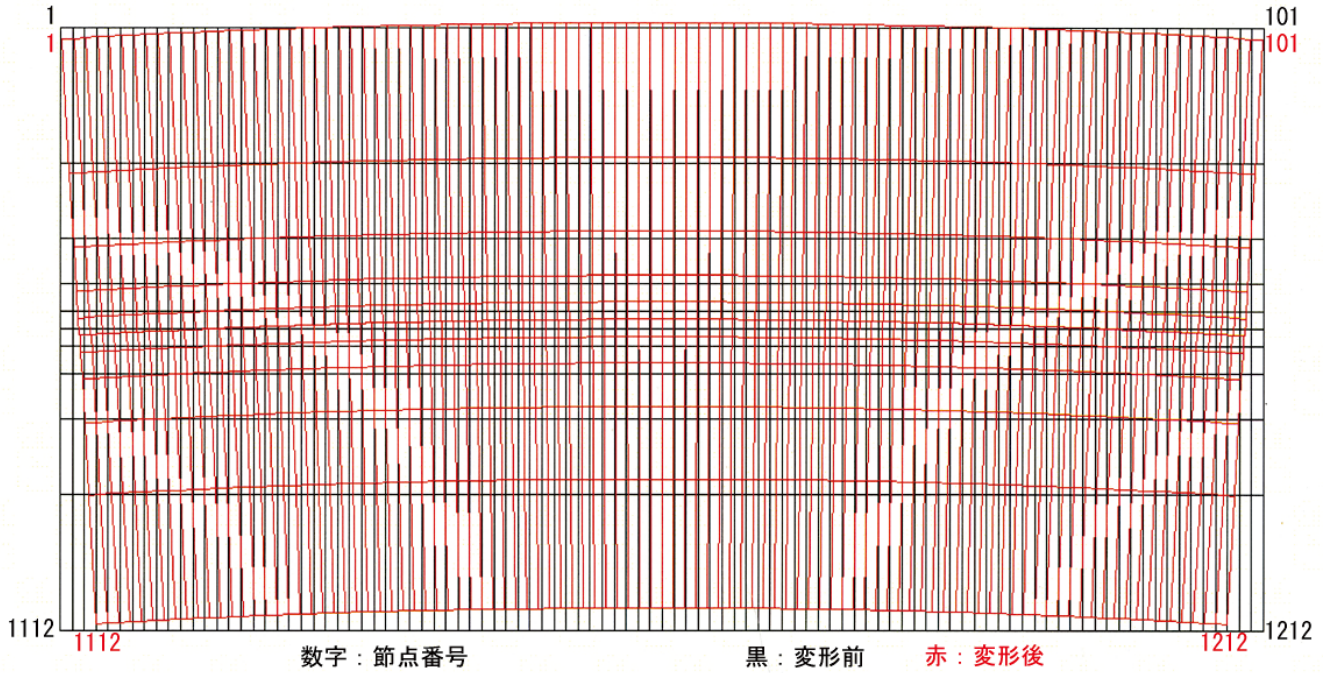


図2 自重と液圧による変形

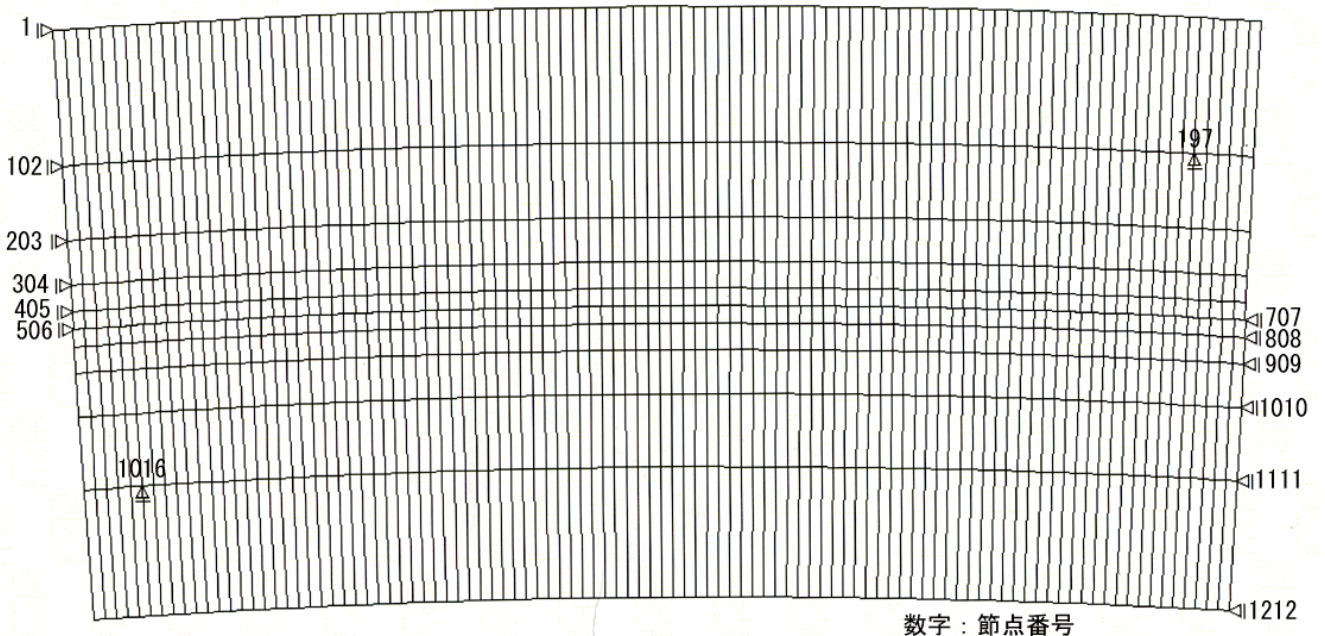


図3 支持条件(ケース1)

3.3 プレーートの移動条件

海洋プレート移動を右から左へ年間 8cm と仮定するが、もし剛体であれば全体が一様に変位するだけで何も問題はない。しかし弾性体と考えた場合は、

(1) ケース1 右から押すすなわち右端 (節点 707~1212) のみで変位を与える (変位指定境界と呼ぶ) 場合

(2) ケース2 左から引張るすなわち左端 (節点 607~1112) のみで変位を与える場合

(3) ケース3 左端・右端両方で変位を与える場合等の条件により応答が変わる。ここでは、どれかに決めるのではなく、それぞれのケースについて解析・比較の対象とする。また、海洋プレートが剛体の場合 (実際にはヤング係数を  $10^8$  倍して実現している) も

(4) ケース4 海洋プレートが剛体の場合として解析・比較の対象とする。

全ケース共通で、大陸プレートは右端が自由境界 (ただし側圧はかかっている)、左端 (節点 1~506) を水平支点として移動を拘束している。図 3 は海洋プレート右端が変位指定境界の場合 (ケース1) で、自重と液圧のみが作

用しプレートの移動が始まる前の状態では支点と同等 (変位がゼロ) になるため、そのように表示している。鉛直方向支点となる節点が図 1 と異なっているが、支点反力をゼロにする計算が収束しやすいようにケースごとに変えたためである。

3.4 鉛直支点の無効化

鉛直支点反力がゼロになる (実際には 8 桁程度小さくする) 位置を求める計算は、2つの支点変位を独立変数、2つの支点反力を従属変数とする 2元連立非線形方程式となるが、解法には線形逆補間法<sup>9)</sup>を2次元に拡張して用いた。ケース4だけは、海洋プレートが剛体であるため移動量が無視できる (相対的に  $10^{-8}$  倍になるため表の範囲ではゼロである) と考え、大陸プレートの支点反力のみをゼロとするため逐次2分法<sup>10)</sup>を用いた。表1がその結果であり、各ケースの支点条件に対して、自重を掛けた後の状態 (図2の変形状態) からの移動量を示している。ケース4の大陸プレートだけが明らかに他と異なり 5km 以上上に移動している。それ以外では、ケース1の海洋プレートの移動量 1.5m が最大であり、全体的に小さな移動量にとどまっている。

表1 鉛直方向支点の移動量

条件	大陸プレート支点	移動量 (km)	海洋プレート支点	移動量 (km)
ケース1 右側変位指定	節点 197	0.000208	節点 1016	0.001528
ケース2 左側変位指定	節点 152	0.000411	節点 1106	-0.001006
ケース3 両側変位指定	節点 197	0.000135	節点 1061	0.000464
ケース4 海洋プレート剛体	節点 152	5.202986	節点 1061	0

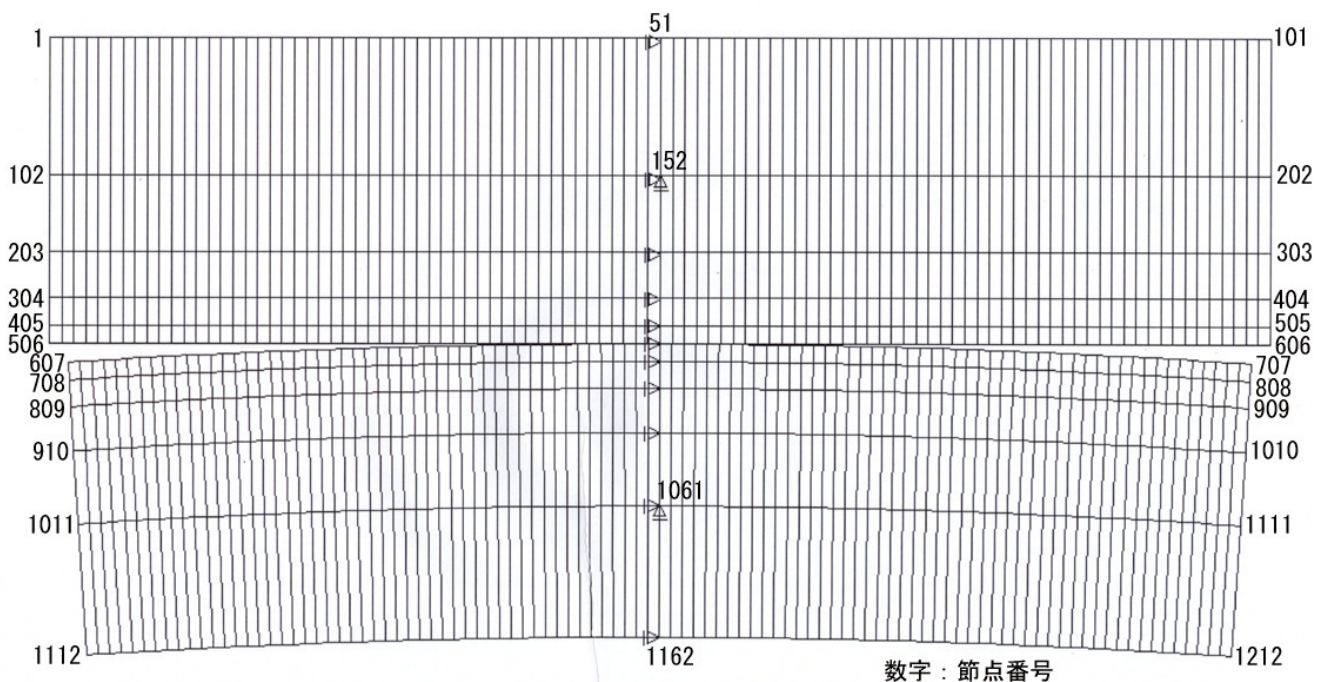


図4 海洋プレートが剛体の場合の解析モデル

### 3.5 海洋プレートが剛体の場合の解析モデル

ケース 4 の計算には若干の工夫が必要になる。海洋プレートが剛体であるから、そのまま自重をかけても変形せず、大陸プレートも水平に支えられた状態での変形となり、他のケースとは異なった状況になるからである。そこで対等の比較にするため、図 4 に示した解析モデルを用いる。すなわち、大陸プレートが図 1 のように水平な状態のままで、海洋プレートは図 2 のように変形した状態を初期座標とする。この状態で自重をかけると、大陸プレートは図 2 と同じように変形し、海洋プレートは図 2 からさらに変形するが、その変形量が  $10^8$  分の 1 であるため無視することができ、結果として全体的な変形が図 2 と同様になるのである。

### 3.6 自重による変形計算時の摩擦係数

自重による変形を計算する場合にも境界面の滑りが起こるが、その際の摩擦係数の選択には配慮が必要である。常識的には物性定数であるから、自重による変形でもプレートの移動による変形でも同じ定数を用いるのが自然である。ところが自重による変形時の滑りの履歴がプレート移動時の滑りに影響を与えることがわかった。たとえば摩擦係数を 0.02 として自重による変形を計算した際、水平力・鉛直力の比がわずかに摩擦係数よりも小さくて滑らなかった節点が、プレートの移動による変形を計算すると真っ先に滑るのである。しかしプレートの移動に先立って自重をかけるのは計算上の都合であり、現実には自重による変形がすでに終わったプレートどうしが相互作用するのであるから、自重による滑りの履歴に従う必然性は無いのである。そこで、自重による変形計算時の摩擦係数を 0.0002 とした結果、水平力・鉛直力の比が

全境界点で 10 桁程度小さくなり、滑りの履歴を實際上無くすることができた。

### 3.7 相互作用力の求め方

両プレートの相互作用は対応する節点どうしが及ぼしあう鉛直力と水平力で考える。もし相互作用力が無ければ、自重と液圧がかかったとき両プレートの変形は、ケース 1 の場合図 5 となる。ここでは区別を容易にするため両プレートの変形状態を異なる色で示している。両プレートは 20km 程度食い込んでいるが、大陸プレートは海洋プレートが支えてくれないために下にたわみ、逆に海洋プレートは大陸プレートを支える必要がないため、浮力による上向きの力が勝り上にたわむのである。すなわち、相互作用力は両プレートの対応する節点どうしの変位を一致させる鉛直力と水平力のペアである。当然のことながら、当該節点どうしが滑る場合には鉛直変位のみ同一とし、すでに滑った節点どうしが再固着した場合は両節点の変位差を保つように定めるのである。

図 6 に大陸プレートの節点 I と海洋プレートの節点 J の相互作用力を具体的に示したが、海洋プレートが大陸プレートに及ぼす鉛直力  $N$  と水平力  $S$ 、大陸プレートが海洋プレートに及ぼす鉛直力  $N'$  と  $S'$  である。実際には両プレートは接しているのであるが、水平力が重ならないように離して描いている。また、図 3 から知られるように境界面は最大で 5% 程度傾くが、計算上それを無視している。したがって、相互作用は鉛直力と水平力で考え、境界面の一致は鉛直変位のみで判定し、水平方向の拘束も支点を傾けることなく水平支点としている。対応する節点間のずれ  $d$  は海洋プレートの移動に従い増加するが、

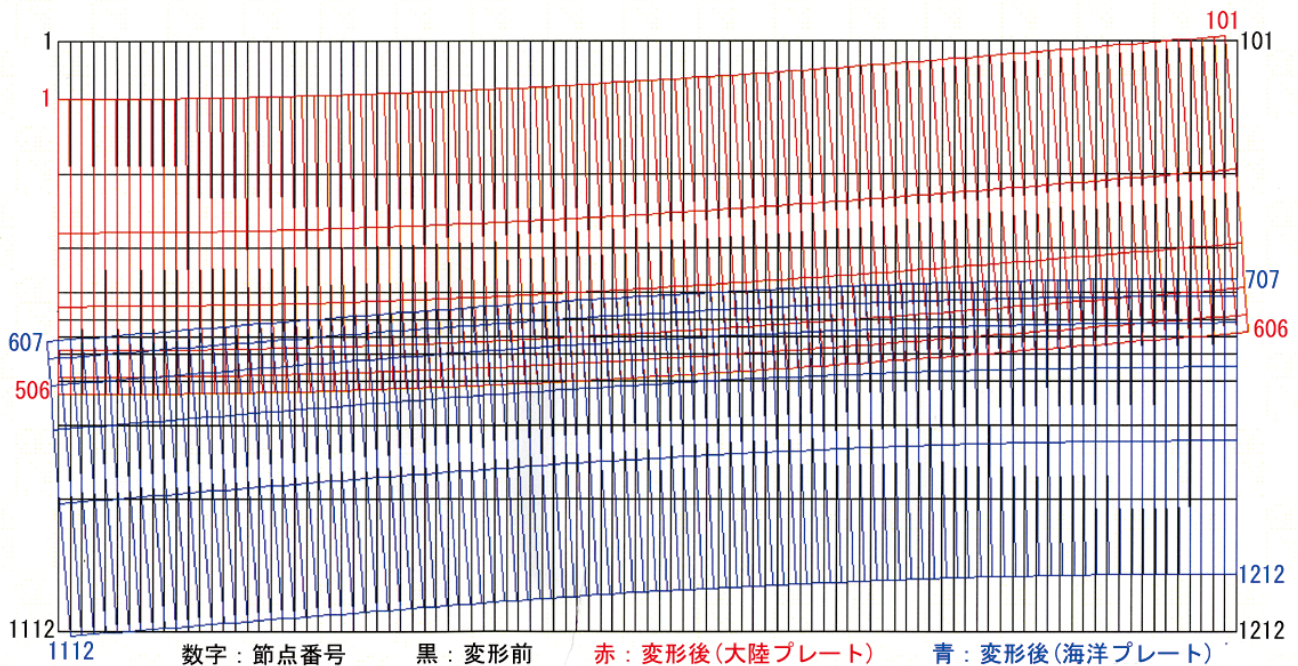


図 5 相互作用前の変形 (ケース 1)

この矛盾を解消する方策は採らず、ずれが隣接節点に到達する 50000 年を解析の限界と考えている。

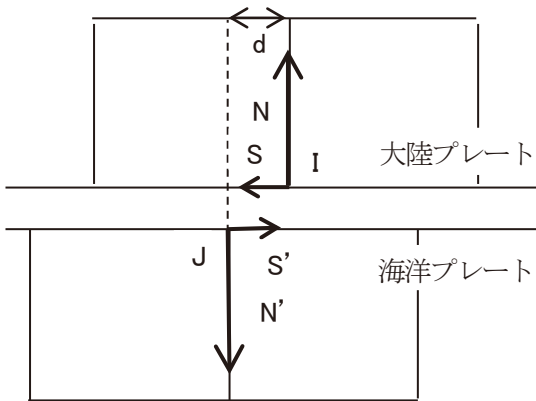


図6 プレート間の相互作用力

### 3.7 使用単位および物性

ここで採用したプレート寸法では扱う数値の桁数の範囲が大きすぎて不便なので、表 2 の単位を用いる。したがって、プレートの物性として花崗岩を想定すると表 3 のようになる。ただし、最大静止摩擦係数は既往のデータに基づいたものではなく、実際の計算で全面滑りが適度な間隔で現れるように選択したものである。

### 3.8 解析内容と精度

海洋プレートの移動開始後は、20 年刻みで 500 回分すなわち 1 万年分の静的時系列解析を基本とした。静的時系列解析とは、各時点ごとの静的釣合いを順次求めてゆくものである。必要に応じ部分的に時間刻みを小さくしたり、1 時点内で滑る順序を調べるなどの解析も行なった。倍精度計算を実施し、各種の収束判定には基本的に  $10^{10}$  分の 1 を用い 10 桁近い精度を保った。実際に扱う変位の最大は 10km のオーダーであり、海洋プレートの移動量は時間きざみによっては  $0.1 \times 10^9$  km のオーダーになるからである。

表2 使用単位

	使用単位
長さ	km
質量	Gg
力	GN

表3 プレートの物性

単位体積質量	$2.65 \times 10^6$ Gg/km <sup>3</sup>
ヤング係数	$5.2 \times 10^7$ GN/km <sup>2</sup>
ポアソン比	0.27
最大静止摩擦係数	0.02

## 4. 解析結果

図 7 はケース 1 について両プレートの 5 断面を取り上げ、20 年きざみで計算した変位を 2000 年ごとに 10000 年分示したものである。右から押しているので、海洋プレート右端 (節点番号 707~1212) は等間隔に移動しているが、大陸プレートから摩擦による抵抗を受けるため、左端に向かうほど、また境界面に近いほど移動量が小さくなっていることがわかる。大陸プレートは左端 (節点番号 1~506) が水平拘束支点なので変位がゼロであり、右側断面に近づくほど滑りによる海洋プレートとのずれが大きくなっている。大陸プレート表面の移動量は境界面よりは小さいが、境界面の水平力による圧縮の影響が確実に表面まで及んでいることもわかる。

図 8 はプレートどうしの滑った点とプレートのひずみエネルギーの時間変動を、ケース 1 に関し海洋プレートの移動開始から 0~10000 年分を示したものである。海洋プレートの右側 (図では時間軸を横にしているため上が右に対応する) から押しており、大陸プレートを左側で止めているため、両側から徐々に滑り始め、滑る範囲が次第に拡大し、中央部が滑ると全面的な滑りに発展することがわかる。ひずみエネルギーは自重による変形分が圧倒的に大きく、プレートの移動に伴う分は 10 万分の 1 程度であるためゼロ点が画面外であり、さらに画面内に収まるようにケースにより倍率も変えているため、値の絶対的な比較は意味が無く相対的な変動の様子を知るのが目的である。海洋プレートの移動に従いエネルギーが増加するが、右側の移動量がすぐには左側まで伝わらず全体として圧縮されることになるためである。エネルギー量は、大陸プレート、海洋プレート、合計の順で大きくなり、図では大小が逆になっているが、変動幅の大きいほうを下に描くようにゼロ点を選んだためである。

図 9 はケース 2 の結果で、海洋プレートを左側から引張っており、なおかつ大陸プレートを左側で止めているので、左側のみが滑り図の範囲で右側はまったく滑っていない。海洋プレートのひずみエネルギーが時間とともに減少しているが、左側の移動がまだ右側まで伝わらないため左側部分は伸ばされることになり、自重による圧縮ひずみが緩和されるからである。一方、大陸プレートは海洋プレートからの水平力で圧縮され続けるため時間とともにエネルギーが増えている。

図 10 はケース 3 の結果である。滑った点の分布は右側がケース 1 に似ており、左側はケース 2 に似ているが、海洋プレートからの作用がケース 1 と 2 の作用を加えたものと考えられることができるからである。結果として全面滑りが両ケースよりも早く現れている。海洋プレートの

エネルギーもケース1の増加とケース2の減少を加えたものと考えられ、両者の中間的な変動を示している。

図11がケース4の結果であるが、滑った点の分布が他のケースとはまるで異なっている。海洋プレートが一樣に移動するため、大陸プレートの移動が拘束されている

左側が早くから滑り始め、全体的には滑りが次第に右側に及んでゆく。大陸プレートのひずみエネルギーは次第に増えるが、海洋プレートは剛体でひずみがゼロなのでひずみエネルギーもゼロである。

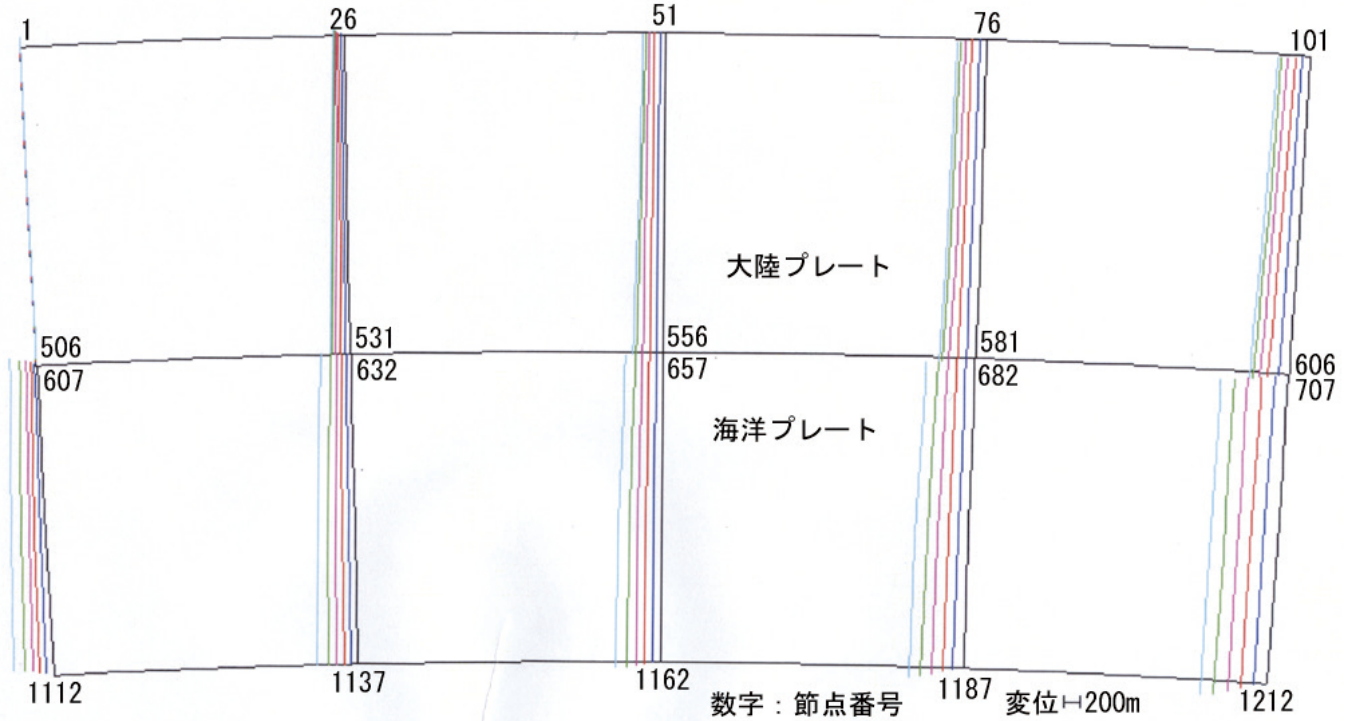


図7 断面内変位 (0~10000年、ケース1)

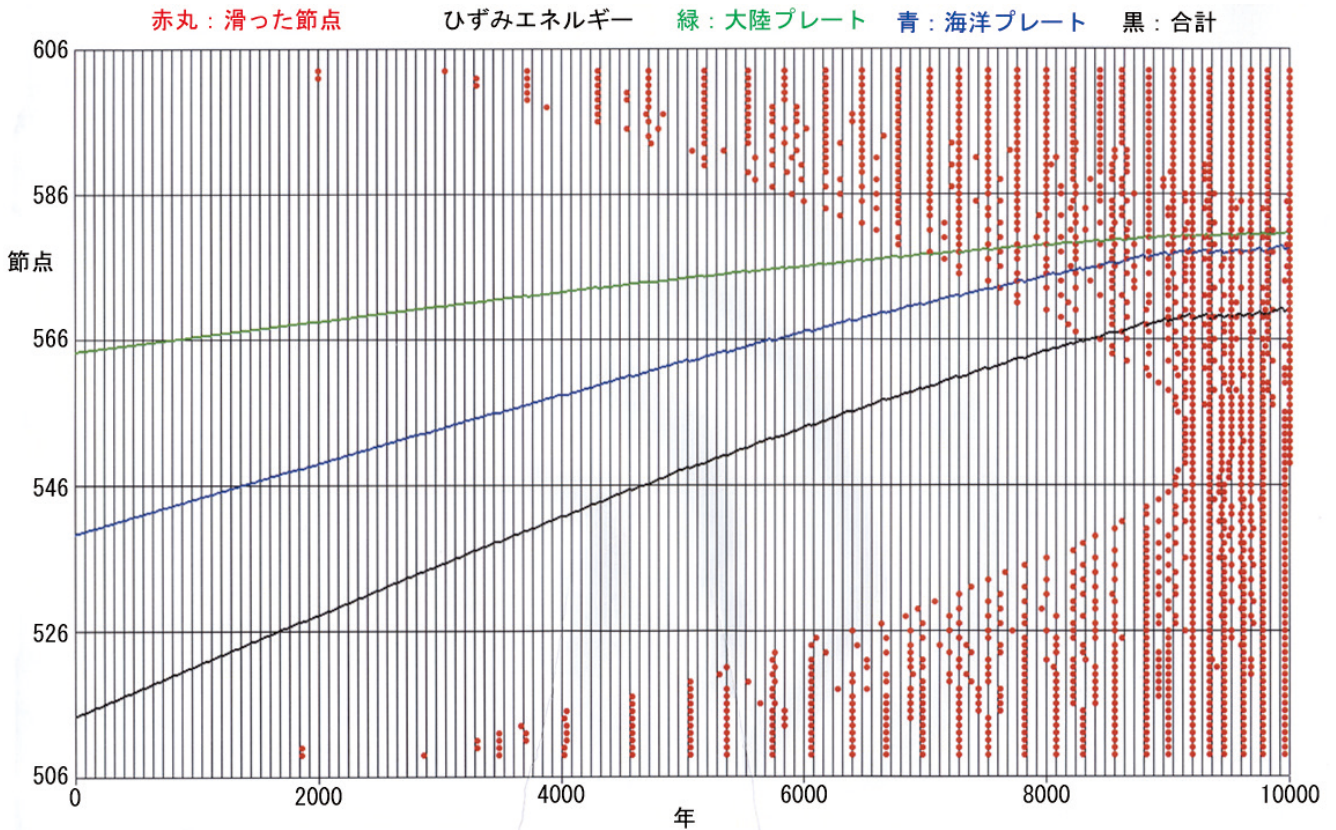


図8 滑った点とひずみエネルギーの時間変動 (0~10000年、ケース1)

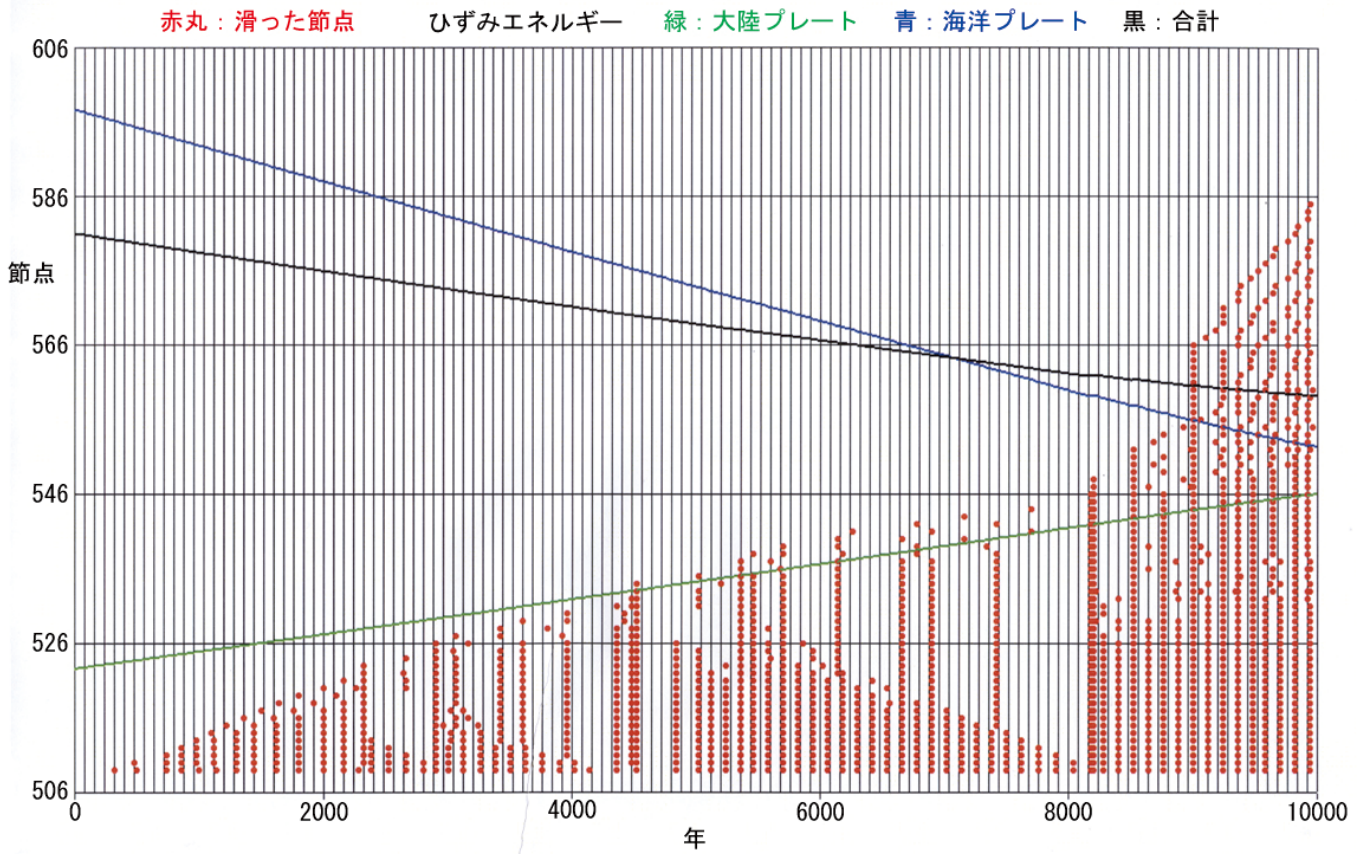


図9 滑った点とひずみエネルギーの時間変動 (0~10000年、ケース2)

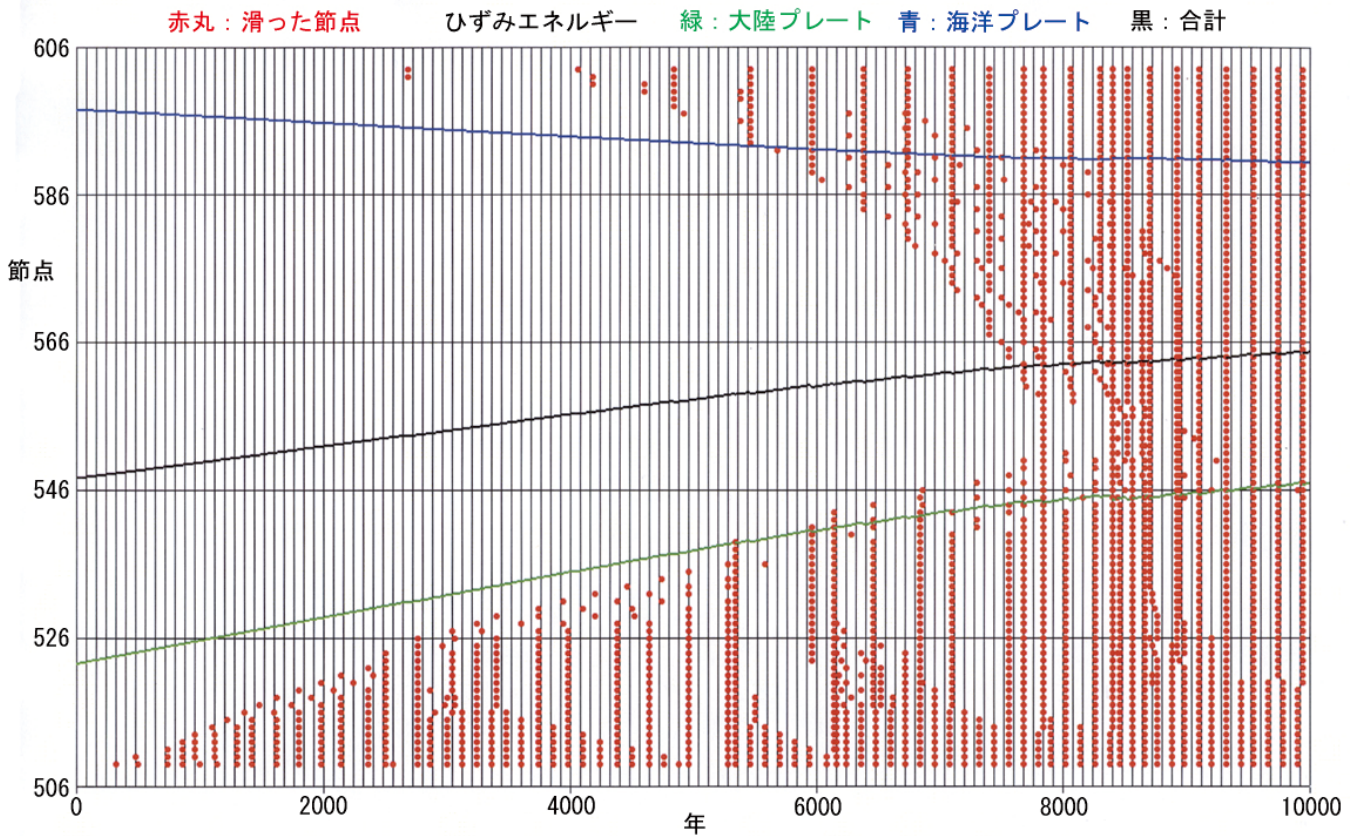


図10 滑った点とひずみエネルギーの時間変動 (0~10000年、ケース3)



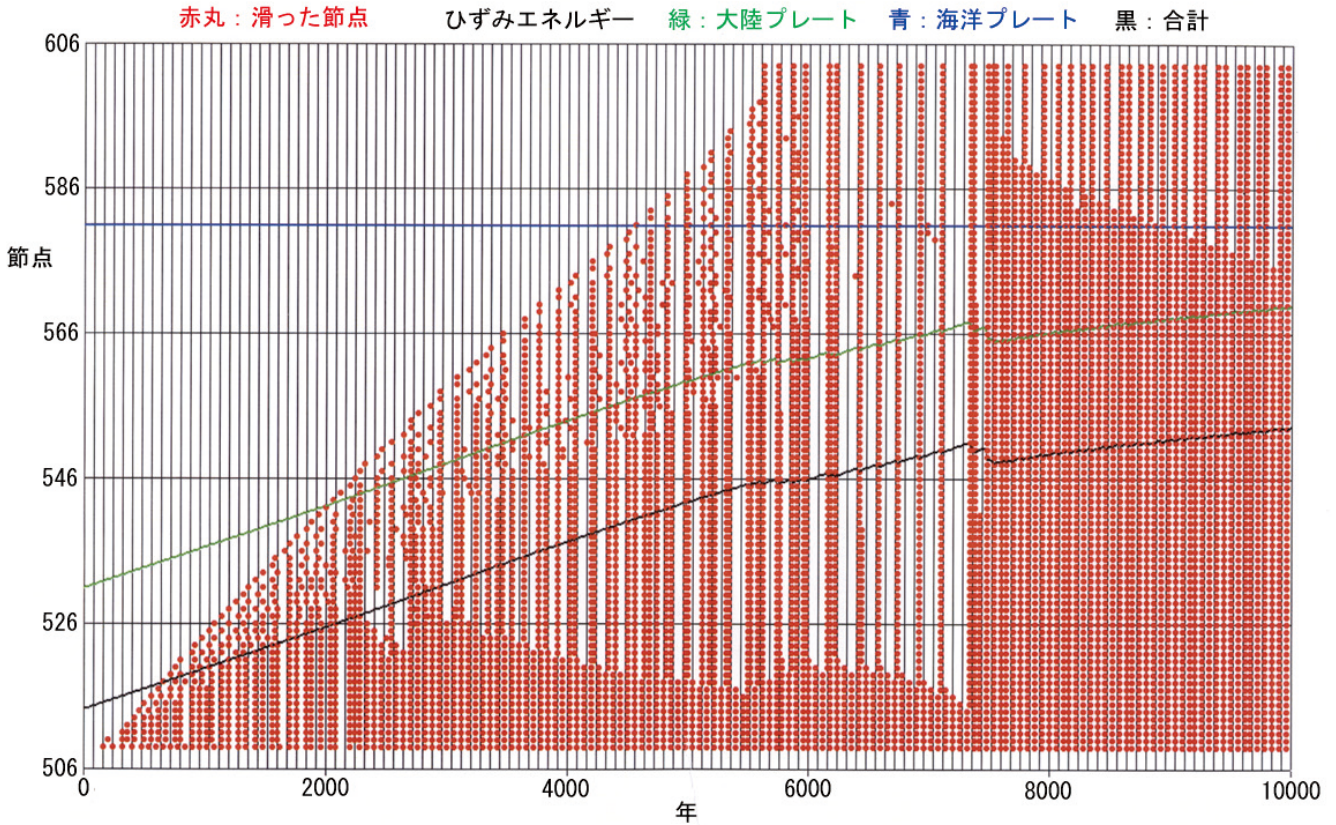


図11 滑った点とひずみエネルギーの時間変動 (0~10000年、ケース4)

図8~11は海洋プレートの移動が始まったばかりの過渡状態であり、現象が落ち着いた後の定常サイクル状態の解析がさらに重要である。図12~15はケース1~4に対応する20000~30000年までの解析結果である。いずれも全面滑りらしいものが頻繁に起こっているが、途中から20年ずれていたり、何点か抜けているものがあり判定には注意が必要である。図12、13、15については上部にv字で全面滑りを示したが、図14ではすべて全面滑りであるためv字を省略してある。図15は、全面滑りの間隔が特に小さいので2~6回続けて起こるグループの先頭のみを示している。図13ではエネルギー変化が明瞭に現れており、同じ全面滑りでもエネルギー変動の大きいものと小さいものがあることが知られる。このような大きいエネルギー変動は他のケースには見られないことから、ケース2に特有の現象と考えられる。また、滑った際に大陸プレートはエネルギーが減少するが、海洋プレートは逆に増加している。前述のように、このケースでは左側からの引張りにより、すでに自重で圧縮されていた海洋プレートが伸ばされてひずみエネルギーが減少し、滑ることで元の圧縮状態に近づくためと考えられる。

図を示していないが、50000年までの計算結果をもとに全面滑りまでの期間と間隔を整理したのが表4である。

ケース1以外は表に示した期間以後はすべて全面滑り状態(全面滑りのみ)になっている。それに対しケース1では中央付近で分かれて滑り、分れる位置が右側に達するのが50万年後と推定され、他のケースとは極端に異なっている。また、もっとも早く全面滑り状態になった図14にその実例が見られるが、全面滑りの間隔が2種類ずつあり、現れ方に規則性も見られることから、適切な時間きざみを採用すれば1種類になる可能性もある。そうなれば定常サイクル状態であり2つの長方形ブロックが単純なスティック・スリップ(固着・滑り)運動を繰り返すことになる。ケース1だけは全面すべりのみの状態を実現していないので、50000年までの範囲で調べたかぎりでは滑り間隔が1種類だけである。以上のようにケース1~4それぞれに滑りの位置、規模、間隔、順序、エネルギー変動などが異なる滑り性状を示している。

表4 全面滑り状態までの期間、間隔

	全面滑り状態までの期間	全面滑り間隔
ケース1	50万年後	120年
ケース2	4万7720年後	140年、160年
ケース3	1万6140年後	120年、140年
ケース4	3万5700年後	60年、80年

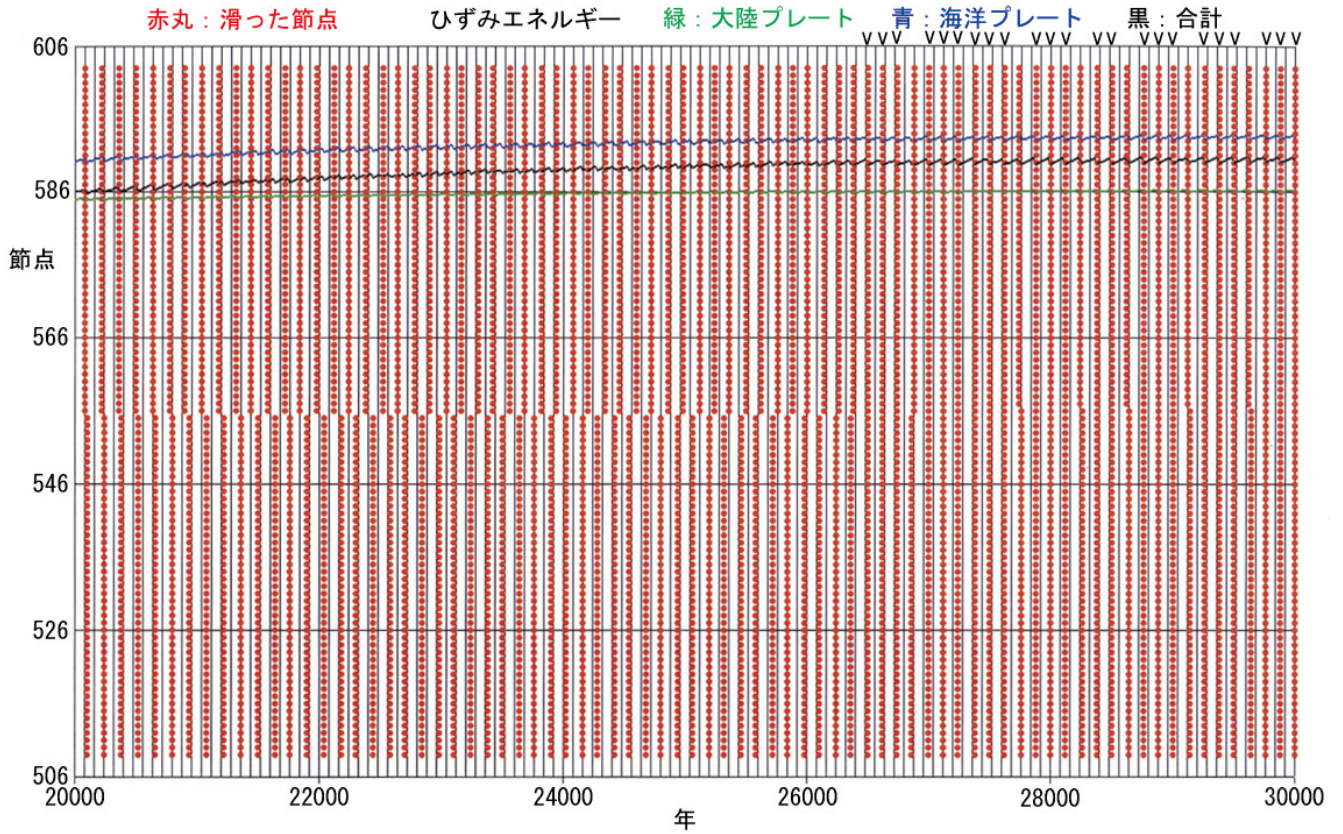


図12 滑った点とひずみエネルギーの時間変動 (20000~30000年、ケース1)

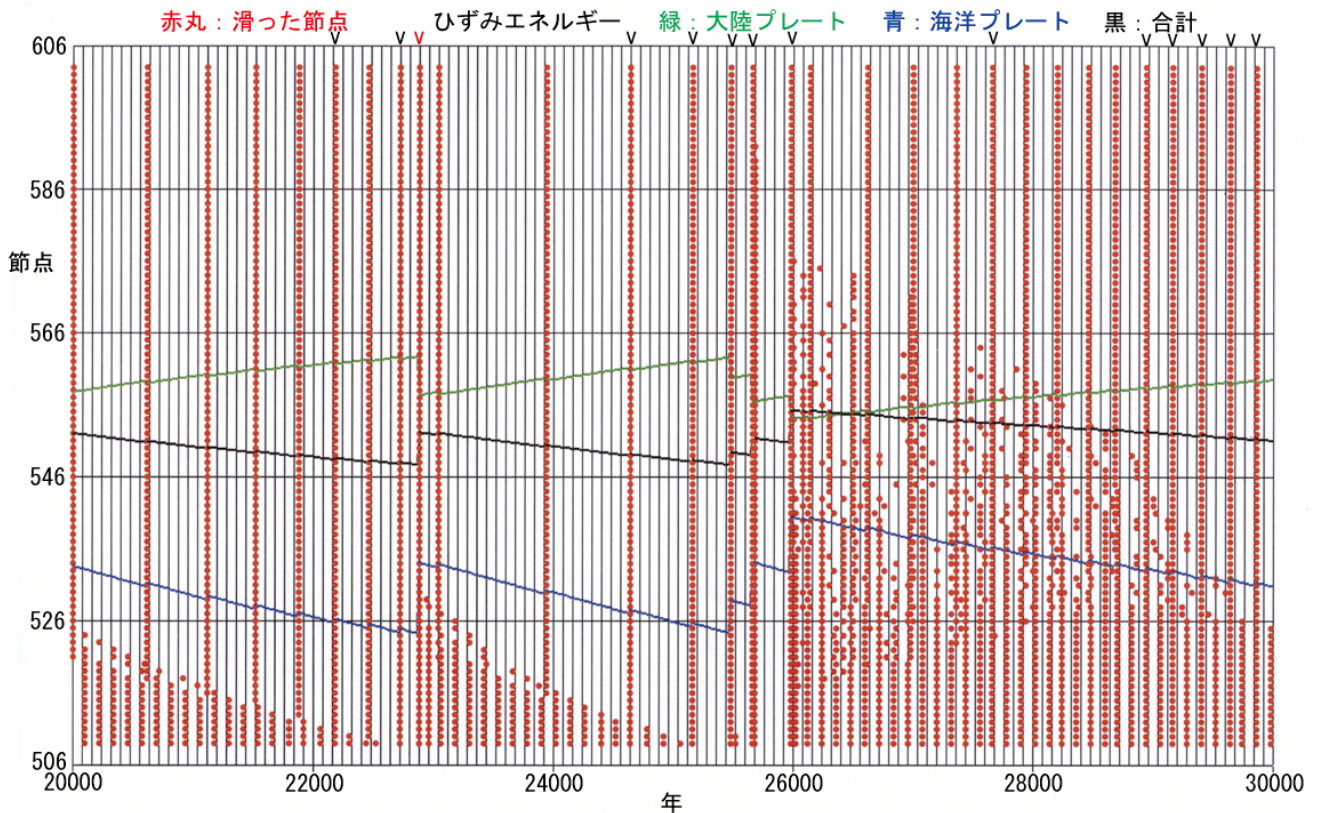


図13 滑った点とひずみエネルギーの時間変動 (20000~30000年、ケース2)

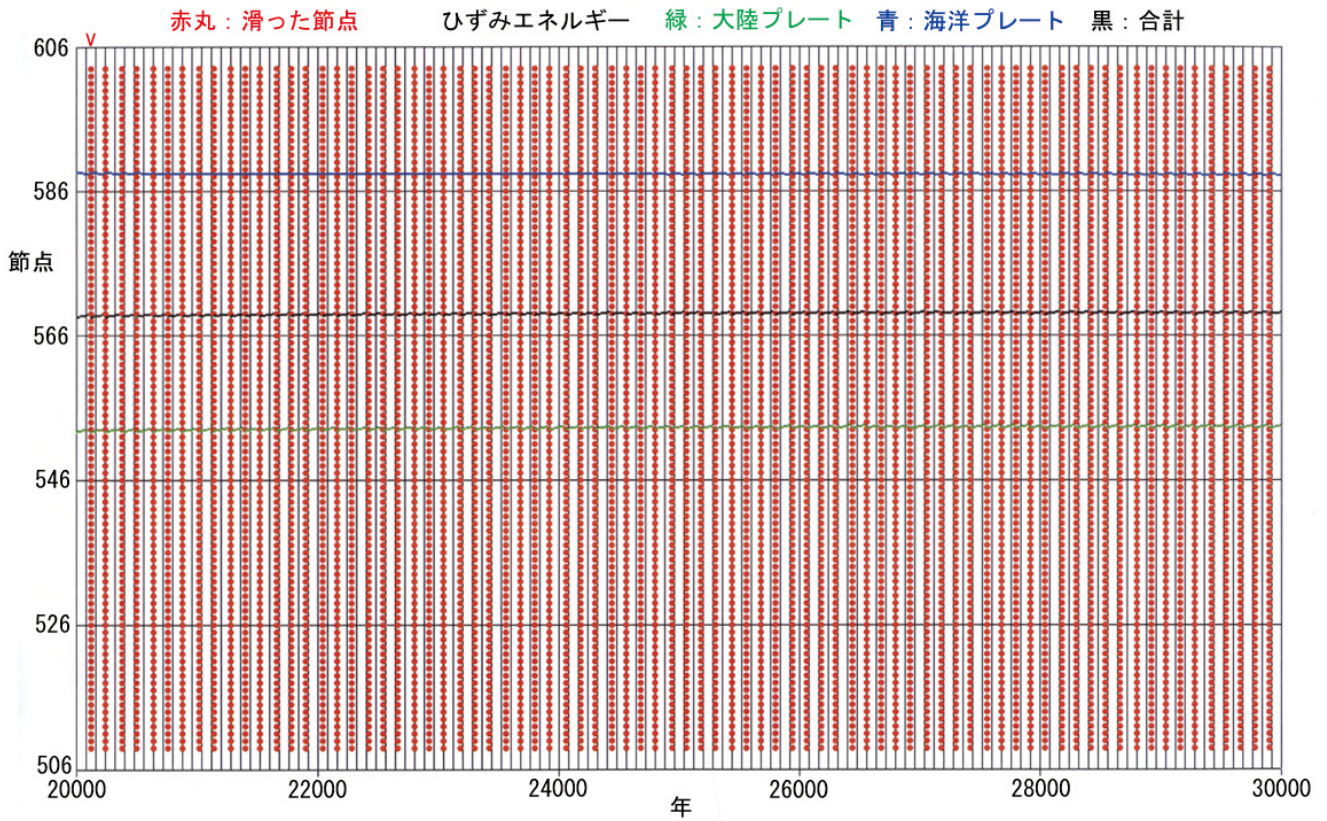


図14 滑った点とひずみエネルギーの時間変動 (20000~30000年、ケース3)

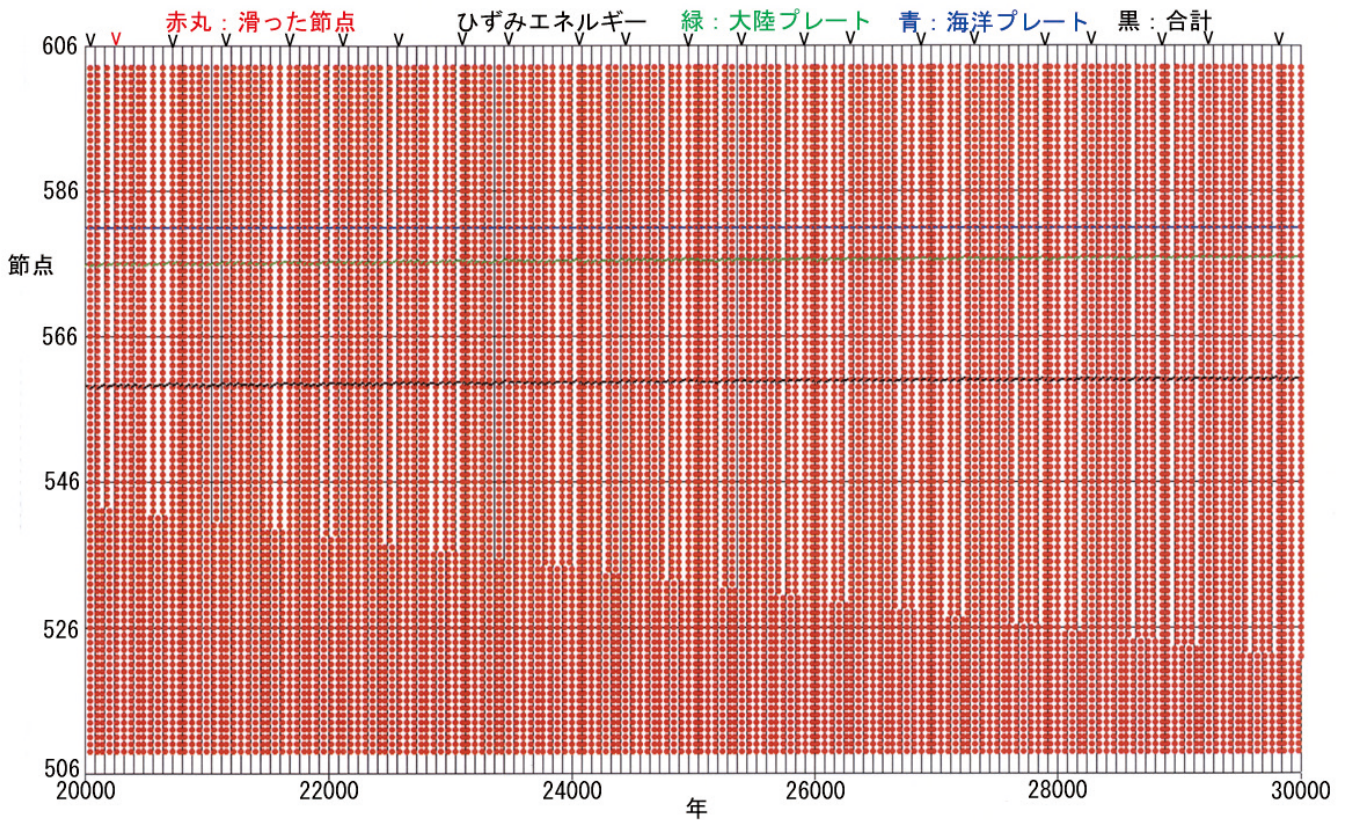


図15 滑った点とひずみエネルギーの時間変動 (20000~30000年、ケース4)

全面滑りを詳しく調べるために、図15で20260年(上部に赤のv字で示した)から5回続けて起こる全面滑りをターゲットとして、20240年以降を1年きざみで計算した結果が図16である。最初の3回は確かに全面滑りであるが、続く2回はそれぞれ2つの部分滑りが20年きざみではまとめられて1つの全面滑りになったものであることがわかる。逆に図15では2つの部分滑りだったものが図16では全面滑りに変わっていたり(20545年、20596年)、滑る年も20年きざみの場合とはだいぶかけ離れている例もある。たとえば、図16で20244年の滑りは図15では16年、20293年のものは27年、20343年のものは37年それぞれ遅くなっており、20年きざみにもかかわらず、ずれが20年を越えるのである。したがって20年きざみで計算した結果である図12~15に基づいた全面すべり、部分滑りの区別は正確でない場合があることが知られた。ここで左側(図では下側)部分に注目すると、滑り間隔の49年が1回、50年が3回、51年が3回と次第に長くなることが何を意味しているのか不明であるが興味深いところである。

図17は前述の全面滑り(図15の赤v)に関して、さらに詳しく調べた結果である。すなわち、図16で20244年(図下の↑)の全面滑りをターゲットにして、20243年から1週間きざみで計算した結果44週目に全面滑りが現れたので、さらに43週から5分きざみで計算した結果2080分(1日と10時間40分)後に全面滑りが現れた。この範囲まで時間きざみを小さくしても、いくつかに別れることがないので本物の全面滑りと考えられる。全面滑りと部分滑りを正確に区別するには、時間きざみを短くすればよいことは明らかであるが、一方で1万年単位の長期の現象を調べることは両立しない。結局20年きざみを基本とし、ターゲットを絞って数例を調べることで対応した。

図を示していないが、全面滑り状態になってからの数回の滑りに対して同様な解析を行なった。全面滑りの真偽を確かめることと滑り間隔(周期)の精度を上げるためである。ケース1以外は、いずれも全面滑りだけであることが確認でき、表5に示すように1年違いの2つの周期が得られた。正確な周期は得られた2つの周期の中間にあり、時間きざみとの関係で端数が繰り上げられるか繰り下げられるかの違いで2つになったと考えられる。周期はケースにより異なり、特にケース4は他の半分程度であるが、海洋プレートが変形しないので応答が速くなるためと考えられる。ケース1は全面滑り状態に達していないので、図12上部にv字で示したような3連続全面滑りをターゲットにした結果、いずれも17年ずれた2つの滑りで全面滑りではないことが知られた。しかも、

その後続く18年ずれた滑りは、20年きざみでも2つのすべりとして区別されているのである。結局20年きざみの解析でケース1に見られた全面滑りはすべて見かけ上のもので、実際には全面滑りは起こっていないと考えられる。

表5 全面滑りの周期

	全面滑り周期
ケース1	不明
ケース2	141年、142年
ケース3	126年、127年
ケース4	63年、64年

以上のようにケース1以外では、全面滑り状態になるとすべて表5に示す間隔での全面滑りのみになり、中間に部分的滑りが無くなるため、大地震を予知するためのプレスリップ(前兆滑り)の存在を確認できなかったことになる。「大地震に先立つプレスリップは必ず起こるのか、起こるとは限らないのか」の論争<sup>7)</sup>にはまだ決着がつかっていないが、本シミュレーションの範囲ではその決着に貢献できる結果が得られなかったわけである。

図18はエネルギー変動の大きい全面滑りの例として、図13における22880年後の滑り(上部に赤vで示した)について滑った順序および滑りによる変位を60回まで示したものである。これらの節点は同時一斉に滑るのではなく、節点510が最初に滑り次々に隣接右節点の滑りを誘発している、すなわち滑りの伝播が認められる。さらに4回遅れて節点509(相互作用の左端)から同方向の滑りが後続し、58回には節点603(相互作用の右端)から逆方向の滑りが発生している。この続きである120回までを図19に示したが、77回に右端から左方向への滑りが発生し、さらに2つ同様の滑りが続いた後、最初に右方向に進んできた滑りが右端で反射し左方向に戻るのが観察される。このような滑りの伝播と反射は岩石の滑り実験<sup>8)</sup>でも観察されたものである。ただし、意外なことに当初右進したのは2波だけであるが、反射等により左進するのは17波(図に示した範囲では12波)に増えるのである。

これらの図には滑りにともなう変位も示しており、初期の滑りによる変位は2m程度で小さいが、右端での反射を契機に急激に大きくなり、最終的には(239回では)80mを越えるのである。もしも動的な解析を行えば一連の滑りの継続時間が知られるが、静的なつりあいの時系列解析では単に滑る順序がわかるだけであるため、図には具体的な時間ではなく滑りの続く回数を示している。いずれにしても、時間きざみ20年に比べれば一瞬のことであり、この間の海洋プレートの移動をゼロと見なしている。

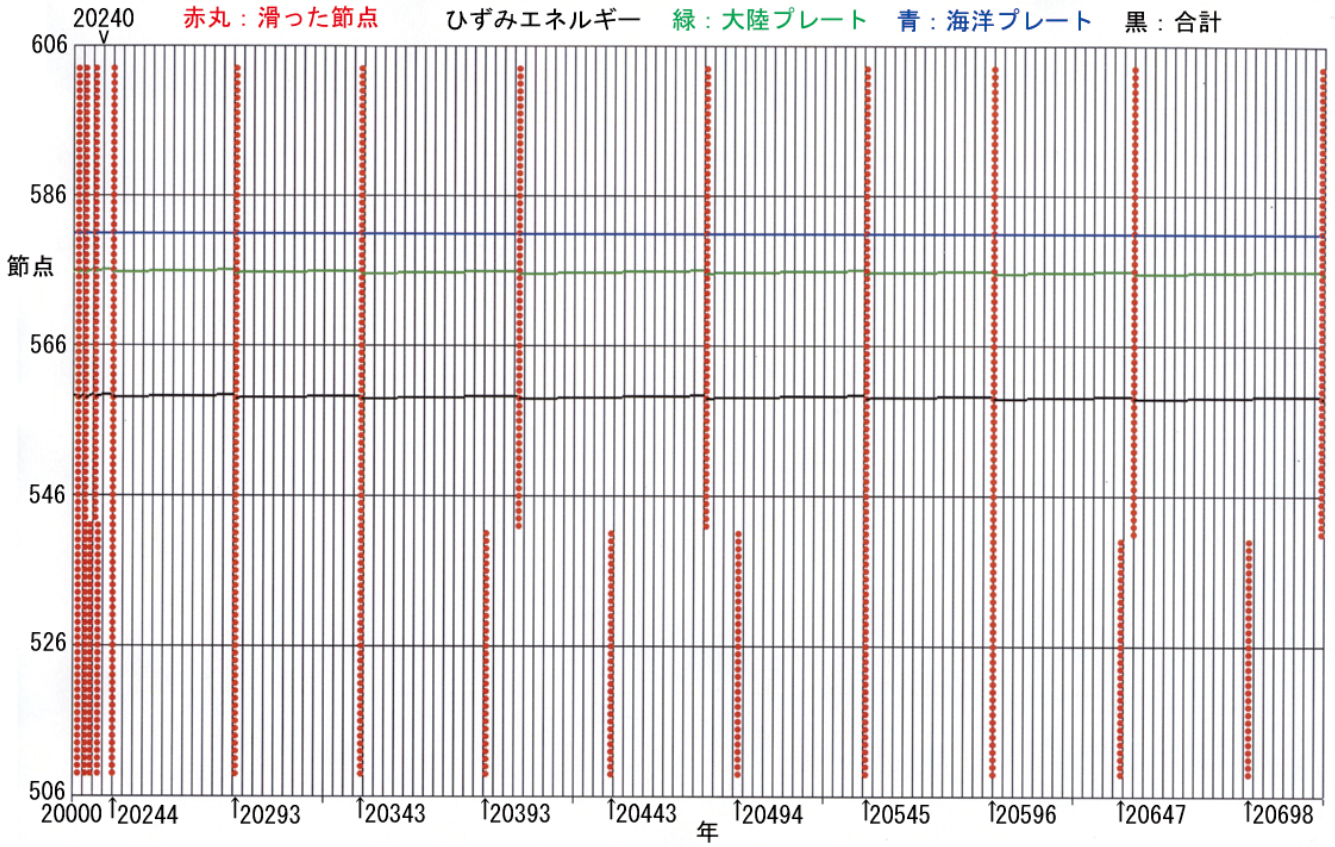


図 16 全面滑りの確認 (1年きざみ、ケース4)

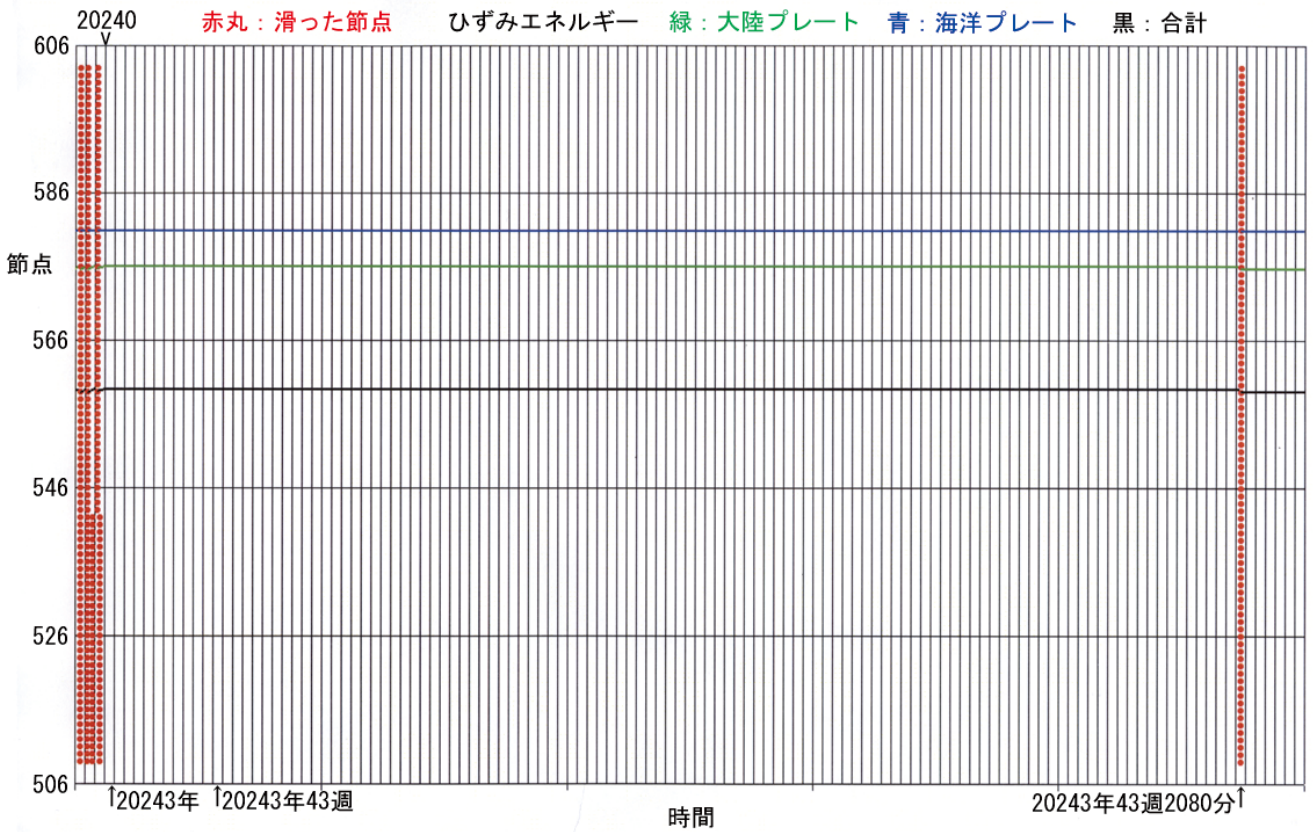


図 17 全面滑りの確認 (1年~1週~5分きざみ、ケース4)

図20は定常サイクルに達した後の全面滑りの例として、図14上部に赤v字で示した20120年の滑りについて、滑った順序および滑りによる変位を示したものである。単純に1波だけが右端から左側に伝播し95回で左端に達して終わりであるが、図には48回までを示している。

滑りによる変位も4m程度と小さくエネルギー変動が小さいことに符合している。ケース2、4も同様であり、定常サイクルに達してからは単純なスティック・スリップになっていることが知られる。

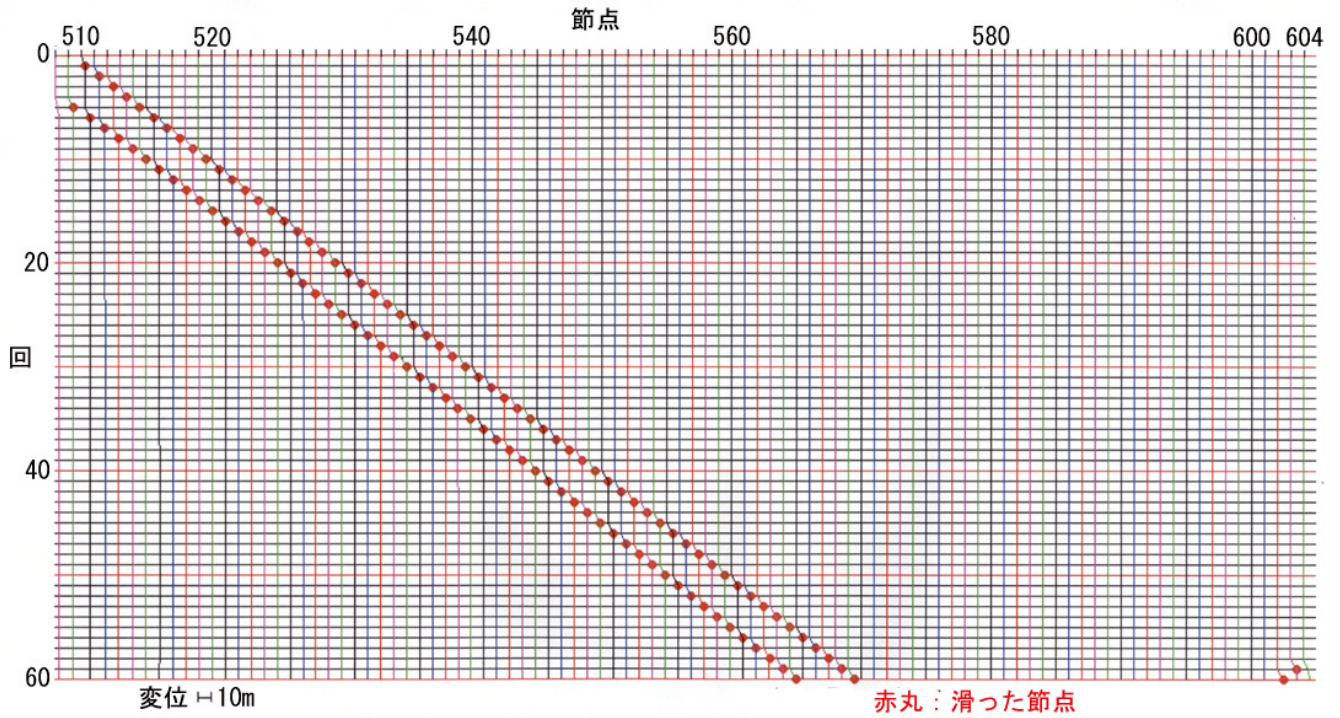


図18 滑りの順序と滑りによる変位 (0~60回、22880年、ケース2)

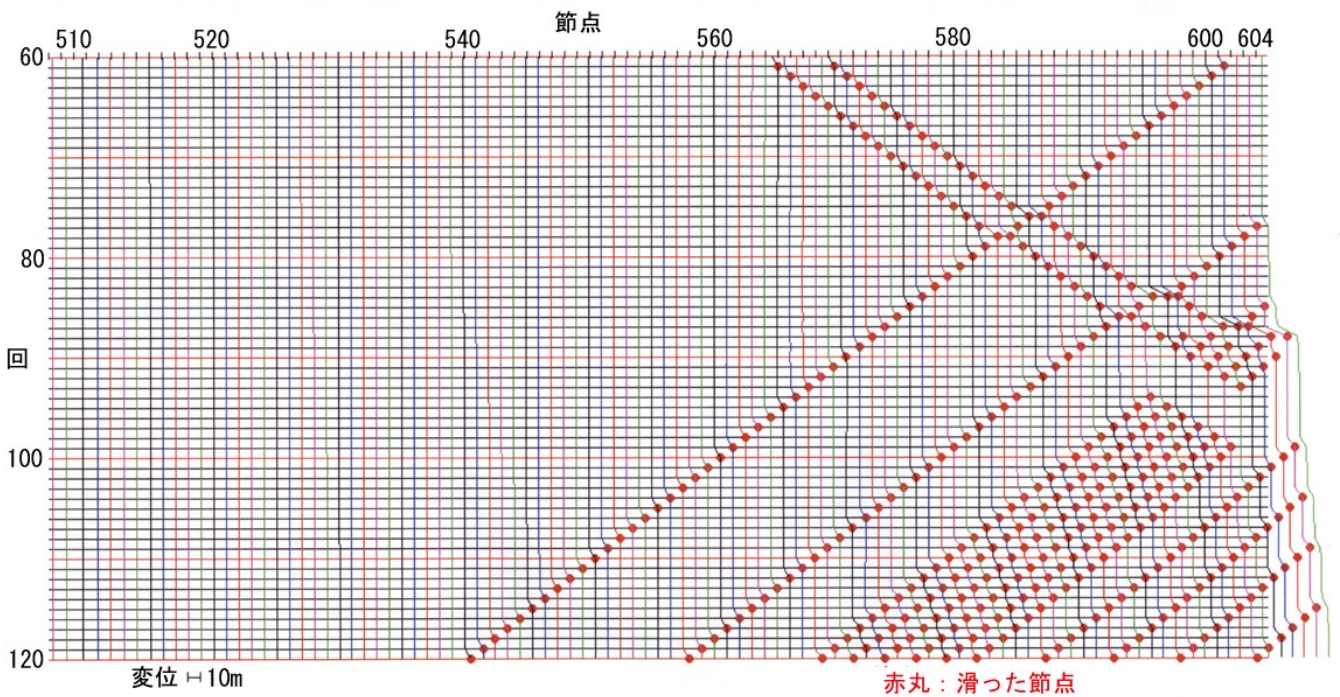


図19 滑りの順序と滑りによる変位 (60~120回、22880年、ケース2)

一方、ケース1では図20のように右端から中央まで滑って止まり、17年間をおいた後、今度は左端から中央まで滑って止まり、107年後にまた始めから繰り返すサイクルになっている。境界面の相互作用力で、水平力対鉛直力の比の分布を調べると、ほぼ対称で平鍋状である。ただし完全な対称ではないため、左右の滑りの時期がずれるものと考えられる。

水平力対鉛直力の比が対称になる理由は、海洋プレートが8cm/年で移動するとき、4cm/年で移動する座標系の中央から見ると、海洋プレート右端が4cm/年で近づき、水平支点で静止している大陸プレート左端も4cm/年で近づくことになるので、逆対称な力学状態となっているからである。これはケース1の移動条件の特色で、他のケースには無い逆対称性である。

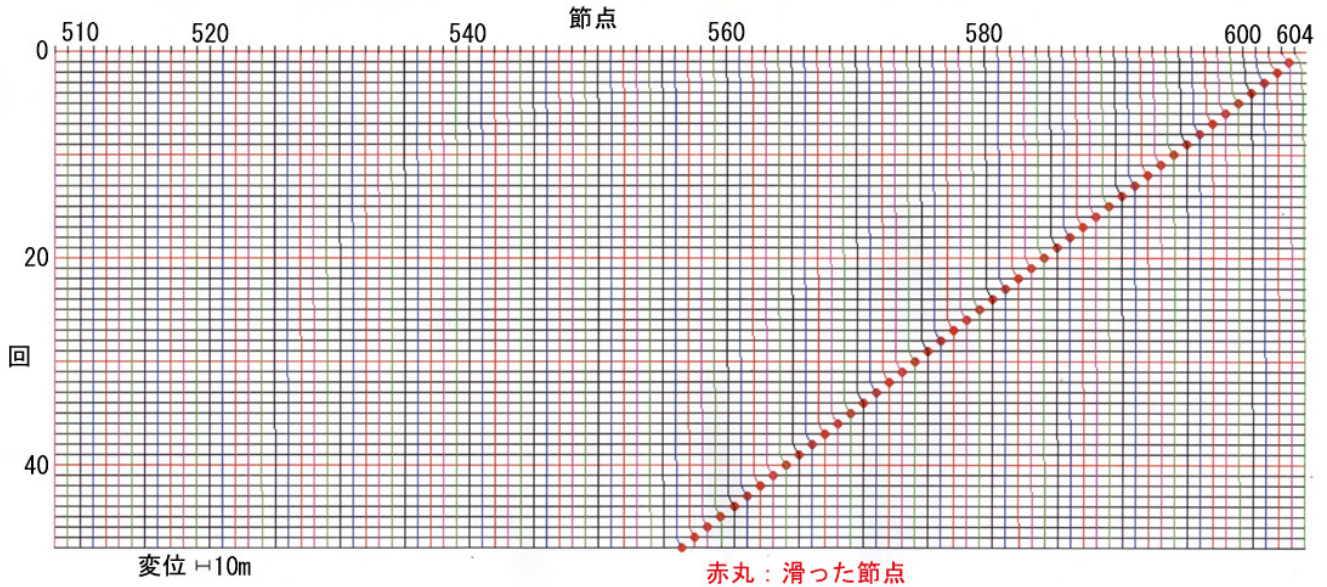


図20 滑りの順序と滑りによる変位 (0~48回、20120年、ケース3)

## 5. まとめ

大陸プレートと海洋プレートとの滑りによる地震発生のシミュレーションを2次元の有限要素モデルにより実行した。主要な着眼点は海洋プレートが弾性体であること、両プレートが相互作用し相互に変形することであり、境界面には一様一定な摩擦係数を用いた。一連の解析から、海洋プレートが剛体か弾性体かの違いや海洋プレートの移動条件により、両プレートの滑り性状が大きく異なること、海洋プレートの移動にともなう過渡状態と定常サイクル状態との滑り性状の違いが明らかになった。得られた結論は以下のようである。

1. 海洋プレートが剛体か弾性体かの違いが滑り性状に及ぼす影響が大きいので、解析には弾性体を用いるべきである。
2. 海洋プレートの移動条件も滑り性状に大きく影響するので、移動条件の合理的な選択が必要である。
3. 滑りは同時一斉に起こるのではなく逐次隣接点に伝播し境界で反射することが確認できた。
4. 現実のプレート寸法では側圧を計算する際周囲媒体の深さによる密度変化が無視できない。
5. 相互作用にともなう両プレートのエネルギー変動

を調べることも滑り現象の理解に役立つ。

6. 既往の観測実績にもかかわらず、本シミュレーションの範囲ではプレスリップの発生を確認できなかった。

**謝辞：**本研究は日本学術振興会科学研究費平成25年度(課題番号25630197)および平成27年度(課題番号15K06190)の助成を受けた研究の一部であることを付記し謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本地震学会：地震予知に対する地震学会の立場, [www.zisin.jp/faq/faq02\\_15.html](http://www.zisin.jp/faq/faq02_15.html)
- 2) M. Kamiyama, H. Koide, Y. Sawada, H. Akita and N. Chiba : Monitoring of Crustal Deformation and its Application to Mitigation of Earthquake Disasters, J. JSCE, Vol.5, No.1, PP.206-225, 2017.
- 3) 神山眞、三神厚、小出英夫、沢田康次、秋田宏、千葉則行:GEONETの地殻変動データを利用した2016年熊本地震の被害解析、土木学会論文集A1, Vol.73, No.4, pp.270-281, 2017.

- 4) 平原和朗：地震発生サイクルシミュレーション、RIST ニュース、No.54, pp.25-32, 2013.
- 5) N. Kato and T. Hirasawa : A Numerical Study on Coupling along Subduction Zones Using a Laboratory-Derived Friction Law, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol.102, pp.51-68, 1997.
- 6) T.R. マッカーラ、三浦功 (訳)、田尾陽一 (訳)：計算機のための数値計算法概論、サイエンス社、P. 319, 1972.
- 7) 茂木清夫：地震予知を考える、岩波新書、P. 254. 1998.
- 8) 大中康譽、山本清彦、乗原保人、平澤朋郎：地震断層モデルとしての固着-すべりの動的過程、地震、Vol. 36, No. 2, pp.53-62, 1983.
- 9) S. Nasuno, A. Kudrolli and J. P. Gollub : Friction in Granular Layers: Hysteresis and Precursors, Physical Review Letters, Vol. 79, No. 5, pp.949-952, 1997.