

プレート間滑りの地震発生シミュレーションにおける新手法

New Analytical Procedure for the Simulation of Inter-Plate Slip Events

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

In recent years, disastrous earthquakes have occurred worldwide repeatedly causing serious damages to human beings. This situation enhances the importance of earthquake prediction because of its availability to the mitigation against disasters. In order to gain some precursory insights to huge earthquakes, the authors have been carrying out various numerical analyses to simulate a seismic coupling between the sea plate and continental plate. The numerical model consists of two deformable plates that interact dynamically with each other under the tectonic forces. This paper particularly discusses some problematic points related with such plate dynamics and derives a scheme to resolve the problems presenting simulation results reasonable to the real phenomena.

The concluding remarks are summarized as follows: 1) The constant time-step of simulation, which is generally used in the time-domain analyses, is irrational because it restricts slips artificially on the boundary. Instead of the constant time-step, the time-step used in the analysis of plate dynamics must be arbitrary so as to satisfy the slip mechanism proceeding dependently on both of time and spatial position on the plate boundary. 2) The dynamic friction peculiar to the plate boundary must be distinguished from the viscous attenuation of plate bodies because they play their own roles differently affecting motions and slips of plates. 3) When the so-called over-damping phenomenon happens under the spatially interactive dynamics between the plate bodies, the plate motions attenuate slowly depending on the viscous damping coefficient. 4) The asperity on the boundary surface play an important role in proceeding slips of plates. It controls greatly the slip mechanism of plate so as to increase the time interval and space area of plate slips. 5) The pre-slip phenomena of plate, which were found prior to the past huge earthquakes, have not yet been detected within the present simulations of plate dynamics.

1. はじめに

近年甚大悲惨な被害をもたらす大地震が頻発しており、地震予知の必要性がますます高まっている。著者らのグループではGPSデータの解析を通じた地震予知の可能性を追求してきたが^{1), 2)}、その一環としてシミュレーションにより地震予知に資する知見を得ることを目的として、プレート間滑りを対象とした解析を行ってきた³⁾。文

献3)では、大陸プレートと海洋プレート相互の変形と作用を取り入れることを特色とし、動的解析を行わず静的つり合いの時系列解析（運動の経過を無視し各時点の静的つり合いのみ解析する）によった。しかしながら、滑りを開始した後のプレートの挙動を詳しく調べるには、運動方程式に基づき個々の点の運動を記述できる動的解析によるのが正当である。本稿では動的解析を行なう場合に実際に出会う問題点について論じ、解決法や解決法選択の根拠を具体的に示した。特に解析の時間間隔を一定にするのではなく、次に滑る時点特定しながら進める手法を開発し、それに基づいたシミュレーション結果を報告した。

2018年11月28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

*** 本学名誉教授、東北大学名誉教授

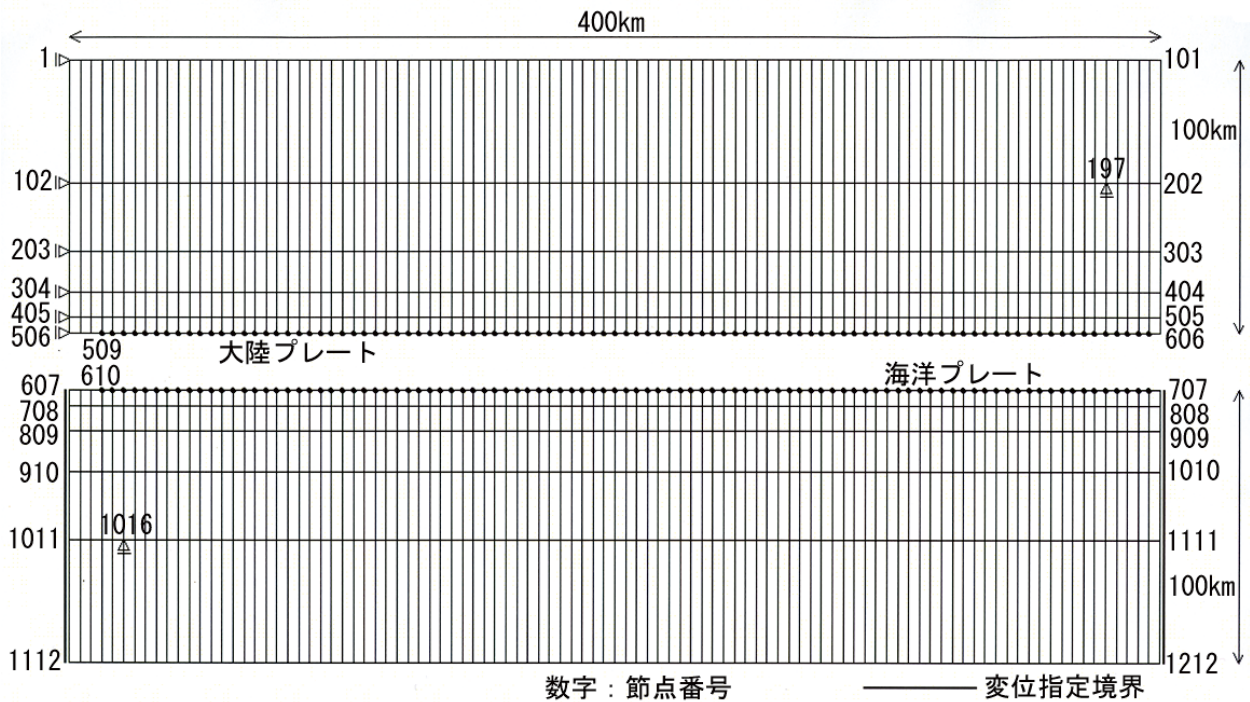


図1 有限要素モデル

2. 解析モデル

2.1 有限要素モデル

図1が採用した有限要素モデルであり、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、紙面に平行な断面内での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に対応する節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509~605、海洋プレートでは610~706)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。

2.2 支持条件

海洋プレートを固定した支点で支えるのではなくマントルからの浮力で支えられるものと仮定する。側面にもプレート自体あるいはマントルからの圧力が働くため、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考える。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が無視できない。実際200kmの深さでは密度の増加が14%程度になるため、後に2.5に示すように液圧の計算には深さに応じた密度変化を考慮してある。浮力で支えるのであるから、鉛直方向

支点197および1016は不要のように思われるが、解析上不定にならないためには欠くことができない。したがって後に2.6に示すように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。

2.3 プレートの移動条件

海洋プレートの移動を右から左へ年間8cmと仮定するが、変位指定境界(変位を与える節点)を右端(節点707~1212)と左端(節点607~1112)とする。図1には境界に添った太線で変位指定境界を表わしている。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)を水平方向支点として移動を拘束する。

2.4 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1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2のようになる。

表1 使用単位

	使用単位
長さ	km
質量	Gg
力	GN

表2 プレートの物性

単位体積質量	$2.65 \times 10^6 \text{Gg/km}^3$
ヤング係数	$5.2 \times 10^7 \text{GN/km}^2$
ポアソン比	0.27

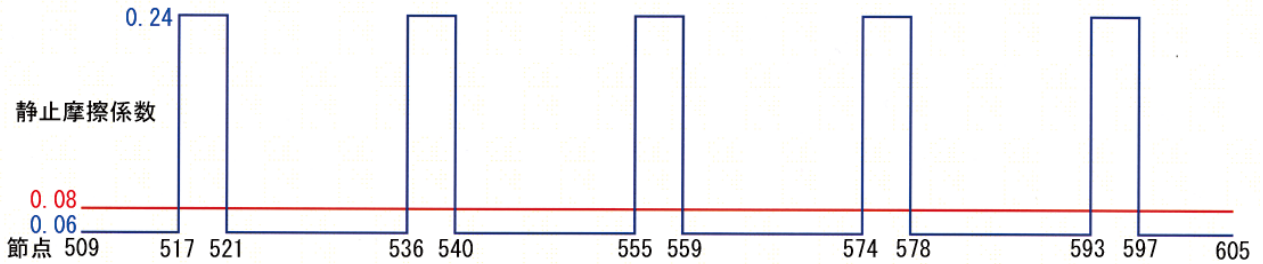


図2 静止摩擦係数の境界面内分布

2.5 摩擦係数

図2および表3に示したが、境界面における静止摩擦係数が一様一定の場合(赤線)と、等間隔に等大の5つのアスペリティ(周囲よりも固着の強い領域)を想定し、摩擦係数を一般部の4倍と仮定した場合(青線)を解析の対象とした。これらの値は既往の研究データに基づいたものではなく、実際の計算で滑りが適度な間隔で現れるように選択したものである。動摩擦係数を常に静止摩擦係数の0.7倍に固定した。また、動摩擦と粘性減衰については次章で詳しく論ずる。

表3 静止摩擦係数

境界面上で一様な場合	0.08	
アスペリティを設けた場合	アスペリティ部	一般部
	0.24	0.06

2.6 深さによる密度変化を考慮した液圧

深さhの関数である密度ρ(h)を用いればhでの液圧P(h)は

$$P = \int_0^h \rho g dh \dots\dots\dots(1)$$

で表わされ、gは重力加速度である。マントルを液体とみなしているが、2次元平面ひずみ状態に対応させるため、上下左右のみ等方等圧のPを受け、紙面に垂直な方向の変位がゼロになる条件から、上下左右の軸方向ひずみεは

$$\epsilon = \frac{\rho g h}{E} \{1 - \nu(1 + 2\nu)\} \dots\dots\dots(2)$$

となり、Eはヤング係数、νはポアソン比である。ρを第1近似とすれば第2近似ρ'は

$$\rho' = \frac{\rho}{(1 - \epsilon^2)} \dots\dots\dots(3)$$

となり、繰返し計算により近似度を上げればよい。

実際には深さ220kmまでを10m間隔で22000個に分割し、(1)式の積分を深さ10mまでは台形則⁴⁾、それ以深をシンプソン則⁴⁾により求め、10回の繰返しで14桁まで一致させることができた。単調にわずかだけ増加する関数を十分細かい分

割で数値積分したので当然の結果といえるが、さらに5m間隔で44000個に分割した計算も行ない、正解に収束していることを確認した。

当該計算値を基に任意の深さの液圧を、深さ10mまでは線形補間公式⁴⁾で、それ以深は上下それぞれ2点ずつの4点を用いたラグランジュ補間公式⁴⁾で算出した。確認のため、誤差が大きくなる深さ200.005kmを対象にして、4点を用いたニュートンの前進差分公式⁵⁾による結果と比較したが14桁まで一致していた。このように一見不必要と思われるほどの精度を保持しているのは、後に50μm程度の変位量やプレート移動量を問題にする必要があるためである。

2.7 両プレートの相互作用力

海洋プレートの移動量は、与えられた時点に対して左右両側面で指定されるが、その他の節点および大陸プレートの各節点は境界面の相互作用を通じて変形し、つり合った位置に止まる。もし相互作用力が無ければ、自重とマントルからの浮力および側圧により両プレートは図3のように変形する。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、見やすくするために変位の倍率を座標に対して0.013倍としている。計算値では海洋プレートの節点607が大陸プレートの節点506に対して2470km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。境界面上の対応する節点どうしの相互作用力は、当該両節点の変位を一致させる水平および鉛直力として定まる。当然のことながら、過去の滑りにより両節点の位置がずれている場合は、ずれた位置に一致させるわけである。このような相互作用力は以下の手順で算出できる。

境界面上で相互作用する節点97点(大陸プレートだけで数える)に対して、それぞれ水平および鉛直方向の変位と作用力を対象とし、各節点2成分で計194成分からなる変位差ベクトルU(対応する節点どうしで海洋プレートと大陸プレートの変位差)と作用力ベクトルFを考える。図4

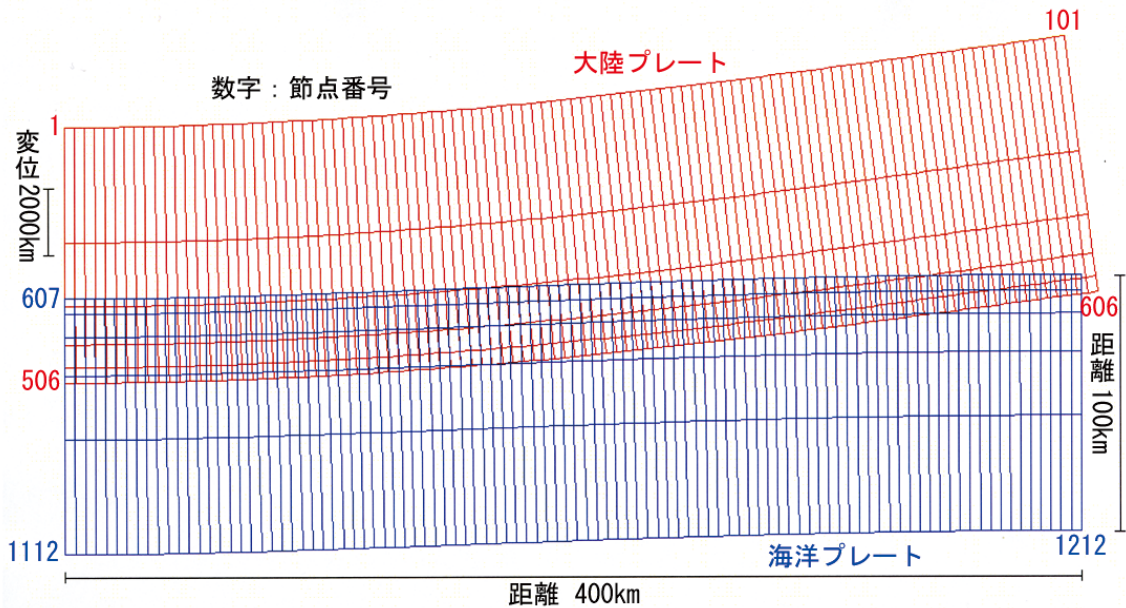


図3 相互作用前の変形

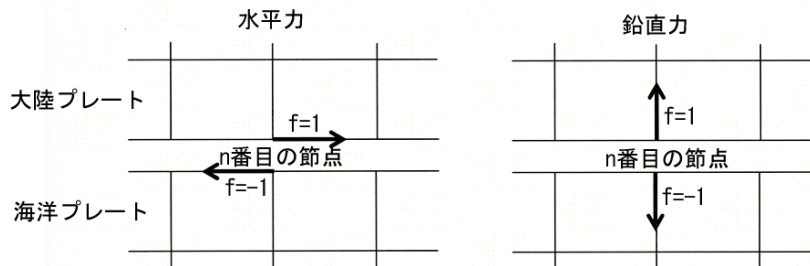


図4 相互作用力算出の一過程

に示すように、両プレートの対応する節点 n (節点 509 から 1 と数える) に単位の力 $f=1$ をそれぞれ反対方向に作用させたときに生じる対応節点の変位差ベクトル \mathbf{U} を作る。194×194 の正方マトリクス $[\mathbf{H}]$ で、前述の水平力で生じた変位差ベクトルを $2n-1$ 行の成分に、鉛直力で生じた変位差ベクトルを $2n$ 行の成分とすれば、3 者の関係式は

$$\mathbf{U} = [\mathbf{H}]\mathbf{F} \dots\dots\dots(4)$$

である。ここで

$$\mathbf{F} = [\mathbf{H}]^{-1}\mathbf{U} \dots\dots\dots(5)$$

と書きなおせば、 \mathbf{F} は変位差 \mathbf{U} を実現する作用力であり、逆に両プレートの変位差が \mathbf{U} のとき \mathbf{F} を反対方向に作用させれば、両プレートの対応する節点の変位差がゼロになるわけである。

同法では通常一度の計算で直接正解が得られるが、この問題では変位の差があまりにも大きいので、2 回の反復計算が必要になる。最初の計算で変位の差が 13 桁ほど小さくなるが、倍精度実数の桁数に近く実質的な正解を与えている。収束の限界をわずかに小さい $0.1 \mu\text{m}$ に設定しているため、もう一度計算を繰り返し誤差 $0.001 \sim 0.00001 \mu\text{m}$ の範囲で解を出している。はるかに余

裕を持って収束の条件を満たしているのである。

2.8 鉛直支点の無効化

鉛直支点反力をゼロにする (実際には 10 桁程度小さくする) 支点位置を求める計算にも、前節と同様な方法が適用できる。ただし、ここでは 2×2 の正方マトリクスで、支点をそれぞれ単位量変位させたときの反力から $[\mathbf{H}]^{-1}$ に相当するマトリクスを作り、 $[\mathbf{H}]$ を計算すれば支点反力をゼロにする支点変位が(4)式から算出できるわけである。

一般に反力をゼロにする支点位置は、 $[\mathbf{H}]^{-1}$ 相当マトリクスを求めるために初期値として選ぶ支点位置により異なる。したがって、最終値と一致するような初期値 (まったく移動しなくとも反力がゼロになる支点位置) をあらかじめ求めておく必要があり、10 数回の繰り返し計算で収束させることができる。さらに、同最終値は両プレートの相互作用点を全点固着とした場合と、全点滑りとした場合でも異なる。本解析では滑りをすべて動的解析で求めるため、相互作用力を全点固着で計算する必要があり、全点固着で得られた最終値をあらためて初期値として海洋プレート移動開始後の解析に用いる。

2.9 動的解析の方法

滑りが始まった後の動的解析には、無条件安定なニューマークのβ法⁶⁾で、β=1/6を用いた。同法の手順は、時点 n での変位ベクトル u_n と \dot{u}_n から時点 n+1 の

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{1}{m}(f - R - d - c\dot{u}_n) \quad \dots\dots\dots(6)$$

を求め

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{s}{2}(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$u_{n+1} = u_n + \dot{u}_n s + \frac{s^2}{6}(2\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) \quad \dots\dots(8)$$

から(6)式に戻り収束するまで繰返すのである。ここで、f、m、c、d、R、s はそれぞれ外力、質量、粘性減衰率、動摩擦係数、周囲の節点から受ける力、時間きざみである。(6)式に u は直接現れていないが、R に反映されている。

3. 解析上の問題点

3.1 解析の時間間隔

滑りに起因する現象を解析するのに、動的解析によるか静的つり合いの時系列解析によるかにかかわらず、一定の時間間隔で解析するのが普通である^{3), 7), 8)}。しかし、それでは正確な解が得ら

れないことが簡単な例で確認できる。たとえば1年きざみで解析して96年目に起こる滑りは、10年きざみで解析すると100年目に滑ることになり、4年間拘束された後の滑りを調べたことになる。滑る条件が整い次第速やかに滑らせるためには、時間きざみを小さく採れば良いのであるが、一方で万年単位の現象を調べるには困難がある。

そこで、無条件に等時間間隔で解析するのではなく、次に滑る時点特定し、滑る時点のみ解析する方法を採用する。ここで、 R_x および R_y を相互作用する節点のそれぞれ水平および鉛直反力、 f_r を静止摩擦係数とすれば、

$$Y = R_x/R_y - f_r = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる時点が滑る時点である。海洋プレートが一定速度で移動するとき、Y はマイナスからプラスに向かう単調増加関数となるため、はさみ打ち法で容易にゼロになる時点を求めることができる。ただし、次に滑る時点が数日後か100年以上先かは予測できないので、適当な初期値を調べるため約20日、40日、80日と倍増しながらYがプラスになる時点を求めれば、必ずゼロ点をはさむ2時点が得られるので好都合である。当然のことながら、相互作用する節点97点の中で常に最大のYを選びながら進める必要がある。さらに3時点が $t_n < t_{n+2} < t_{n+1}$ となったときゼロ点が t_n 、 t_{n+2} 間にあれば、

$$t_{n+3} = (t_{n+2} + t_n)/2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

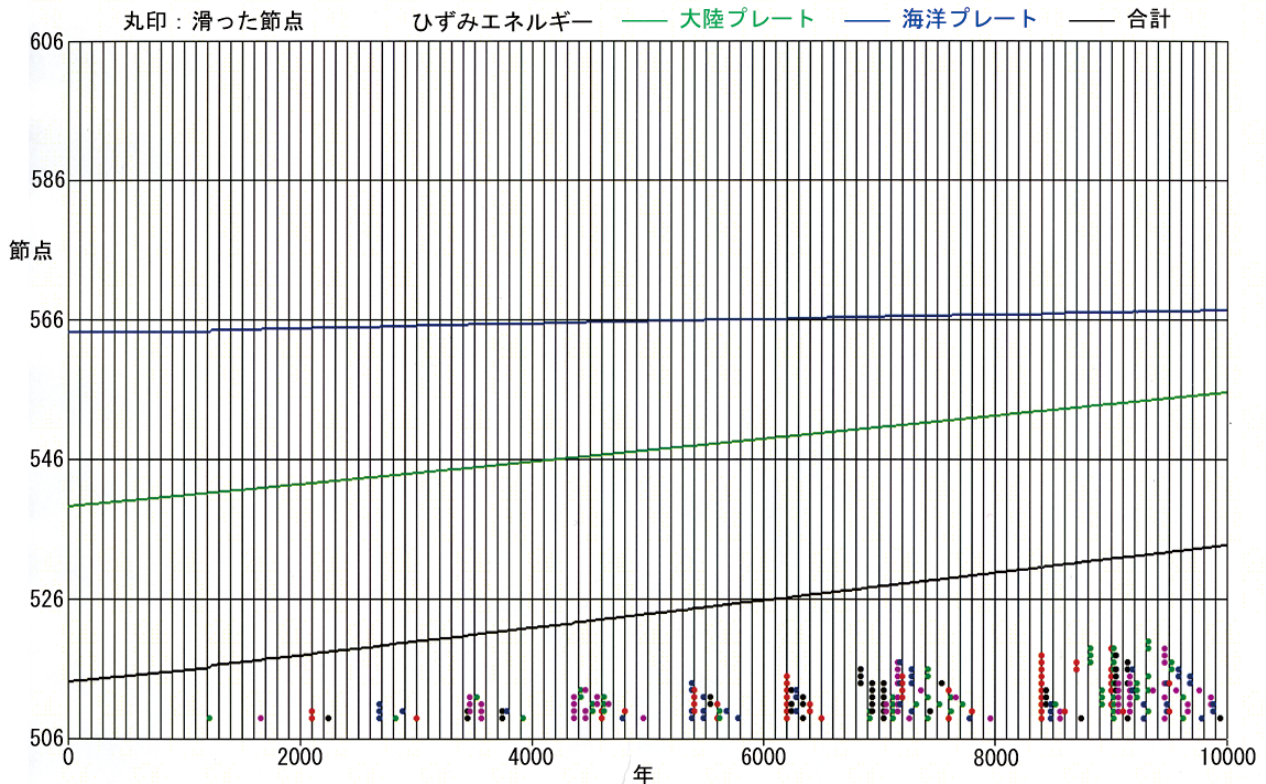


図5 滑り点の変遷 (解析時間間隔20年、0年~10000年)

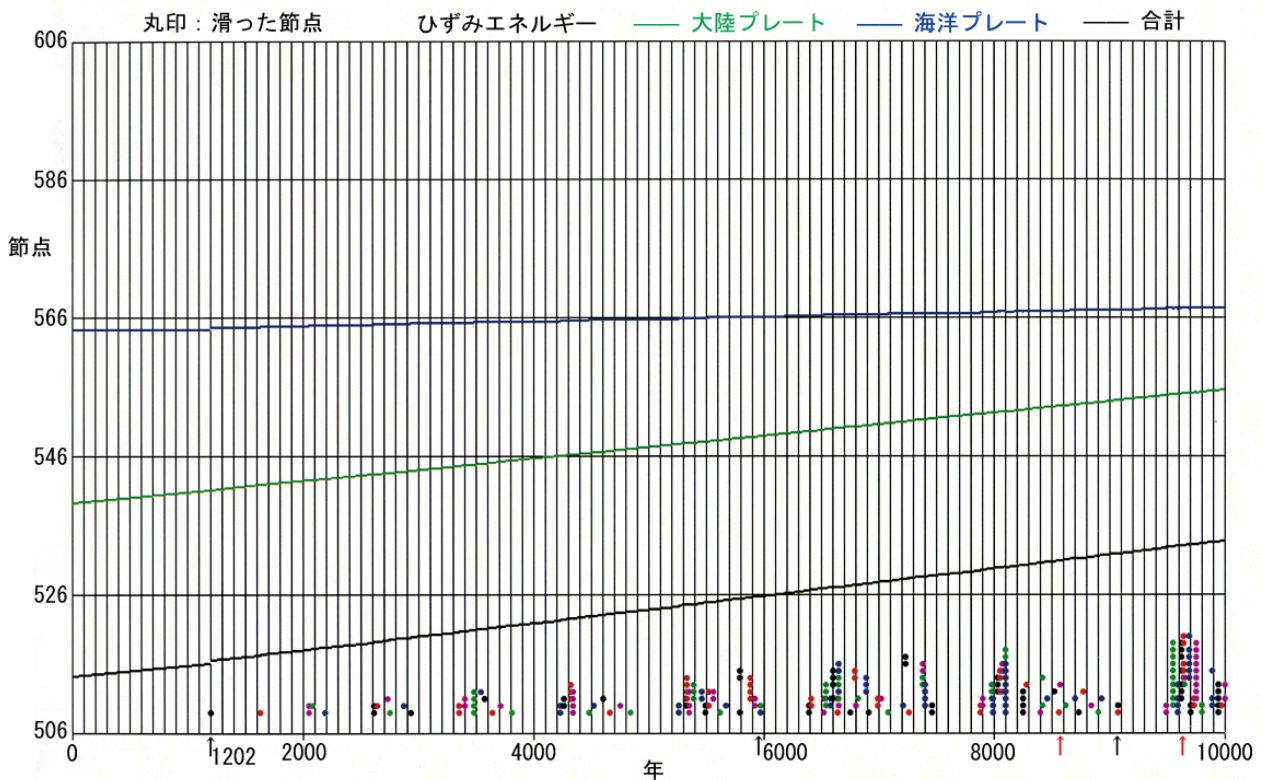


図6 滑り点の変遷 (静止摩擦係数一定、0年~10000年)

とすることで、ゼロ点をはさみながら同時に両時点間隔を小さくできる。たとえば100年間で0.04増加する、きわめて緩やかな増加関数のゼロ点を求めるのに、この方法で両時点の間隔を1/1600年(約5.5時間)まで小さくでき、これが滑る時点の計算誤差である。この間の海洋プレートの移動量は $50\mu\text{m}$ であり、自重による変形の最大変位10.8kmと対比すると10桁程度の有効数字が要求されることがわかる。

海洋プレートの移動開始から10000年分について境界面上の滑った節点の変遷を、一定の20年間隔で解析した場合を図5に、前もって滑る時点を計算しその時点で解析した場合を図6に示した。ここでは時間的に近接した滑りを確認しやすいように、5色の範囲で滑った回ごとに色を変えて示している。一見両者に明瞭な差はないように思われるが、図6に黒矢印↑で示した同時点で異なる色の滑り、赤矢印↑で示した1ドットずれた滑りは、当然のことながら図5にはあり得ない。なぜならば、10000年を1000ドットで表わしているため、20年きざみでは2ドット以上離れた滑りだけを観測するためである。図6でも10年未満の近接した滑りは重なってしまい識別できないので、計算値から直接調べたところ、この範囲では11回あってその値は10年の間に満遍なく分布しており、最短は1年と271日であった。

このように、中間の滑りを捕捉できないこと、人為的に何らかの期間拘束した後の滑りを観測

してしまうことから、等時間間隔での解析は不適當であり、あらかじめ滑る時点を特定する必要があることが明らかとなった。

だからといって、滑る時点のみ解析するのでは、滑りによる変位量やエネルギーの変化が計算できず不便である。したがって実際の計算手順は以下ようになった。

- 1) 次に滑る時点を計算
- 2) 計算した時点から1/800年分前に戻り静的解析
- 3) 計算した時点に戻り動的解析
- 4) 同時点で支点反力をゼロにするための支点移動

この支点移動は、海洋プレートの移動と滑りにより支点反力が絶対値で次第に増加するために、滑った都度ゼロに戻すものである。

図5、6には両プレートのひずみエネルギーおよびそれらの合計の変動も描いている。ただし、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程度になり、ゼロ点が画面外にあるため、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。全般的には時間とともに(海洋プレートの移動とともに)エネルギーが増加している。意外なことであるが、黒矢印で示した1202年(計算上は1202年237日と6時間であるが以下年数のみ表わす)の滑りでは、海洋プレートのエネルギーが増加しているのが認められ

る。これは海洋プレート左端の移動が周囲からの抵抗を受けるために左端近傍を引張ることになり、自重と液圧で生じた圧縮ひずみを低下させるのが原因である。左端側のエネルギー低下と右端側のエネルギー増加がほぼ相殺するため、この間の海洋プレートのエネルギー変化はゼロに近い。滑りにより引張ひずみが緩和されることが、わずかながら既存の圧縮ひずみを増加させ、ひずみエネルギーを増加させたのである。このように滑りによってエネルギーが増加する現象は、文献3)に述べたプレート移動条件のケース2 (左端のみで引張る場合) で、いっそう顕著に現れている。

3.2 動摩擦係数と粘性減衰率

プレート境界面上の節点どうしの相互作用に関して、水平力と鉛直力の比率が最大静止摩擦係数を超えるまでは、両節点 (大陸プレートと海洋プレートの対応する点) は同じ位置にいる (固着している) が、超えた瞬間から運動が始まり (滑り始め)、その挙動は運動方程式(6)で記述される。動摩擦は境界面上の節点にのみ、それが滑るときには必ず働くものである。一方粘性減衰率は、プレート構成物質の粘弾性の性質に由来しており、境界面に限らずプレート内の全節点に働くもので、これが無ければ一度起こった振動が減衰することなく永久に続いてしまう。したがって、この両者は省略することができず、きちんと区別して使い分ける必要がある。

この両者の働きを調べるために、図6に↑で示した1202年の滑りに対する節点509の変位と速度の時間的変化を表わしたのが図7と8である。特に図7は意図的に静止摩擦も動摩擦もゼロとした場合の例で、摩擦力の働きを理解する上で比較の対象となるものである。ここで、粘性減衰率を3種類採用し、初期の変化を詳しく見るために、時間軸を滑り開始から2秒まで0.1秒間隔、続く4秒までを0.2秒間隔で、さらに20秒までを1秒間隔でと次第に粗くしている。節点509は節点610に固着して左 (マイナス) 方向に引きずられた状態であった (節点610から見れば節点509により右方向に引きずられた状態であった) が、当該両節点の相互作用力 (水平力で固着を維持する力) が静止摩擦力を越えたために滑りだし、周囲の節点との相互作用により平衡位置に向かって動き出す。節点509は右に移動し、粘性減衰率 (単位は 10^8Gg/s) が1.3の場合は平衡位置を通り過ぎてから戻り、減衰振動しながら平衡位置に近づく。7.3の場合は、平衡位置を通り過ぎることなく近づき、過減衰の現象を示す。速度は右向きでゼロから次第に大きくなり、変位が平衡位置を越えるとマイナスの加速度を生じるので減少に転じ、左向きになった後減衰振動しながらゼロに収束するか、過減衰の場合はそのままゼロに収束する。摩擦を考慮した例である図8では、速度が一度大きくなってから減少するが、ゼロを超えて反対

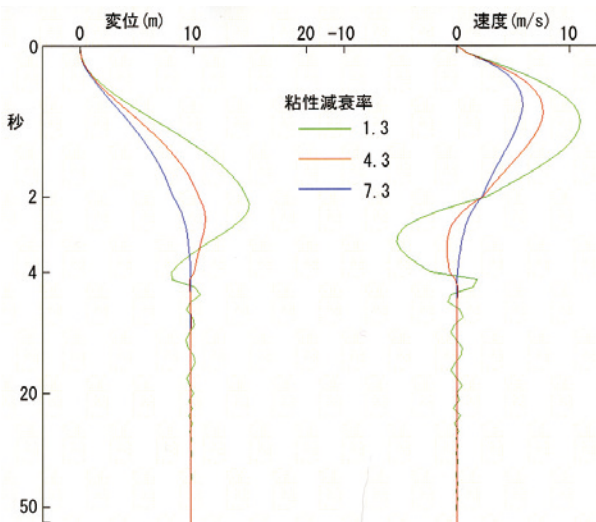


図7 粘性減衰の影響 (摩擦なし)

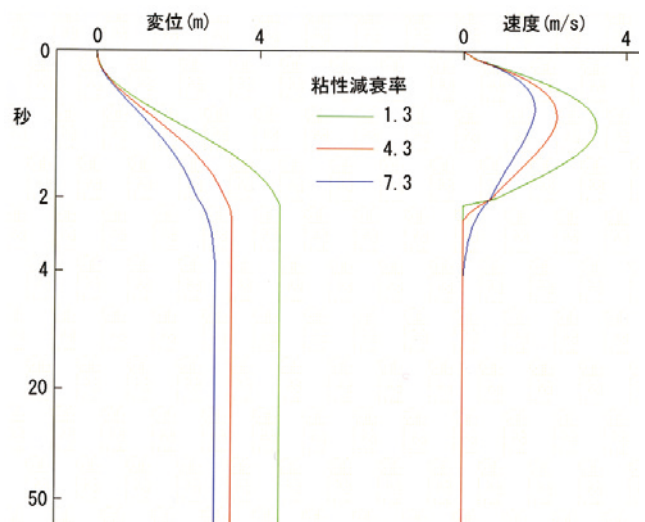


図8 粘性減衰の影響 (摩擦あり)

表4 粘性減衰の影響に関する計算値

	摩擦なし			摩擦あり		
粘性減衰率 ($\times 10^8 \text{Gg/s}$)	1.3	4.3	7.3	1.3	4.3	7.3
振動収束までのステップ数	3229	1743	2586	2708	1209	1679
速度最大節点の交代数	921	326	287	505	191	27

向きになることなくゼロに落ちてしまう。なぜなら速度がゼロになった（静止した）後は、再び節点 610 との相互作用力が最大静止摩擦力を越えない限り動かないからである。図 7 と異なり、平衡位置は粘性減衰率により異なっているが、動摩擦が常に速度と反対方向に働き、一面粘性減衰と同じ効果を持つので、トータルで小さい方が速度がゼロになるまでに動く距離が大きくなるためである。動摩擦係数を静止摩擦係数の 70%としたことは、運動を起こす力の 30%だけが有効なわけであるが、平衡に達するまでの移動量は粘性減衰率 4.3 の場合図 7 の約 10m に対して約 3m であり、まさに 30%程度になっている。

図では把握できない性質を調べるために、表 4 に振動の収束に関連する数値を示した。ここで収束の判定を全節点の速度が $10 \mu\text{m/s}$ を下回った状態と定めている。採用した粘性減衰率 3 種に対しては、1.3 から 4.3 に増加すると収束までに要するステップ数が減少するが、7.3 に増加すると再び増加している。初めのうちは粘性減衰率の大きい方が速く減衰するが、速度が cm/s のオーダーよりも小さくなると逆転が起こるのである。この常識に反する結果の原因を究明するために、速度最大の節点の入れ替わり数（交代数）を調べた。この場合境界面上の節点で動くのは 509 と 610 だけであるがプレート内部の節点に次々に動きが伝播する、いわゆる連成振動が起こるため、振動の収束を判定するには常に全体を対象に速度最大の節点を調べる必要があり、同時に速度最大の節点が何度入れ替わったかを調べることもできる。速度最大の節点が入れ替わった数が大きいことは、連成振動がよく伝わり多くの節点が動くことを示している。表の範囲で粘性減衰率が 7.3 の場合 4.3 よりも振動継続時間が長い（収束までのステップ数が多い）にもかかわらず、入れ替わり数が小さくなっている。逆の見方をすれば、振動の伝わる範囲が広く、運動エネルギーが広く行き回り、多くの節点で減衰効果を受けることが、全体として振動の減衰を速くしていると思われる。結果として、この範囲では粘性減衰率が大きいと逆に振動の減衰が遅くなるのである。

3.3 動的解析の時間きざみ

滑り開始後の運動を時刻暦で調べるには、一定の時間きざみを用いるのが普通で、収束条件と安定条件から最大の時間きざみが制約される。本解析の場合 1 秒程度が限界であるが、それよりも小さい 0.2 秒と 0.5 秒を候補とした。一般的には時間きざみの大きい方がステップ数が減って有利であるが、ニューマークの β 法を用いた場合、次時点の加速度推定時の収束に要する回数が、0.2 秒の 2、3 回に対し 0.5 秒では 10 回程度に増える

ため、結局 0.2 秒が有利であることがわかった。

3.4 解析上の各種誤差

表 4 に各種の計算打ち切り判定に用いた限界値すなわち計算誤差をまとめて示す。イ、ロの項目は一度だけの計算で済むことと 10 回以下の繰返しで達成できるため、倍精度計算の限界まで求めている。この 2 つはいずれも相対誤差で示した。ハは一万年分の解析で数千回必要な計算であるが一度につき 2 回の繰返しで済むことと、プレート変位計算の土台となる数値であるため、ここまで精度を上げている。ニは数 100 回の計算で済み、それぞれが 10 回程度の繰返しで達成できるのでここまで求めている。ホ、ヘは一度の滑りに対して千数百回、一万年分の解析に対しては数 100 万回の計算となり、打ち切り限界を一桁小さくするためには計算量を数十パーセント増やす必要があるため、この程度に抑えている。

ある滑りの後、次に滑る時点を予測する際の許容誤差として 1/1600 年を採用したが、表のトに示したようにその間の海洋プレートの移動量に換算すると $50 \mu\text{m}$ ($5 \times 10^{-8}\text{km}$) となる。イ～への各種誤差は、この計算に差支えないように設定したものである。

表 5 各種の誤差

イ	周囲液体の深さに応じた密度変化	1×10^{-13}
ロ	深さに応じた液圧	1×10^{-13}
ハ	プレート境界の節点変位	$1 \times 10^{-15}\text{km}$
ニ	支点反力をゼロにする支点変位	$1 \times 10^{-12}\text{km}$
ホ	ニューマークの β 法の加速度	$1 \times 10^{-9}\text{km/s}^2$
ヘ	振動収束判定時の速度	$1 \times 10^{-8}\text{km/s}$
ト	次に滑る時点の予測値(距離換算)	$5 \times 10^{-8}\text{km}$

4. 解析結果

実際には、動的解析の時間きざみに 0.2 秒、粘性減衰率に $1.3 \times 10^8 \text{Gg/s}$ を採用している。図 9 はアスペリティを設けた場合の解析例で、右側に Asp. と表示した緑色の線で 5 つのアスペリティの範囲を示してある。境界面に一様一定な静止摩擦係数を採用した例である図 6 との共通点は、滑りがプレートの左側（図では下側）から始まっていることである。これは大陸プレートの左側が水平方向の移動を拘束する支点なので、その影響を強く受けるためである。

海洋プレートの移動開始から、図 6 の 4000 年までと図 9 の 3000 年までは時間間隔の違いはあるが、きわめて類似した滑りパターンであり、アスペリティの影響がまだ現れていない。この滑りパターンは、数 100 年から 1000 年にわたる挙動であるが、前震（プレスリップ）、本震（最大滑り）、余震、静穏期と続く地震挙動と類似しているように見える。全体的に図 9 の方が滑り時間間

隔が小さいのは、一般部の静止摩擦係数が 0.06 で、
図 6 の場合の 0.08 よりも小さいためである。

図 9 の範囲では 7 回 (図下に ↑ 印で示した)、
滑りがアスペリティを越えられずに直前で止ま

っているが、まさにアスペリティの効果である。
続く 10000 年から 20000 年を示す図 10 では、10810
年 (図下の ↑ 印) にアスペリティ部の 1 節点が滑り、
13168 年にはアスペリティ自体は滑らないが

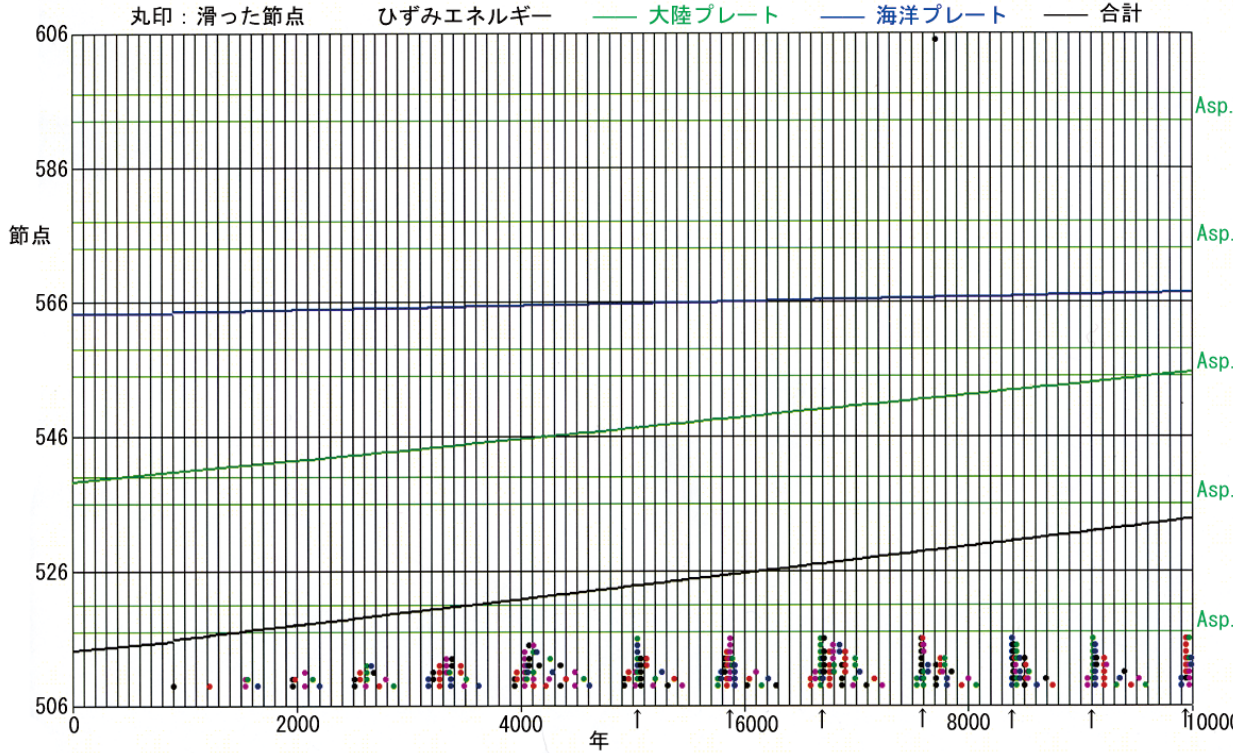


図 9 滑り点の変遷 (アスペリティがある場合、0 年～10000 年)

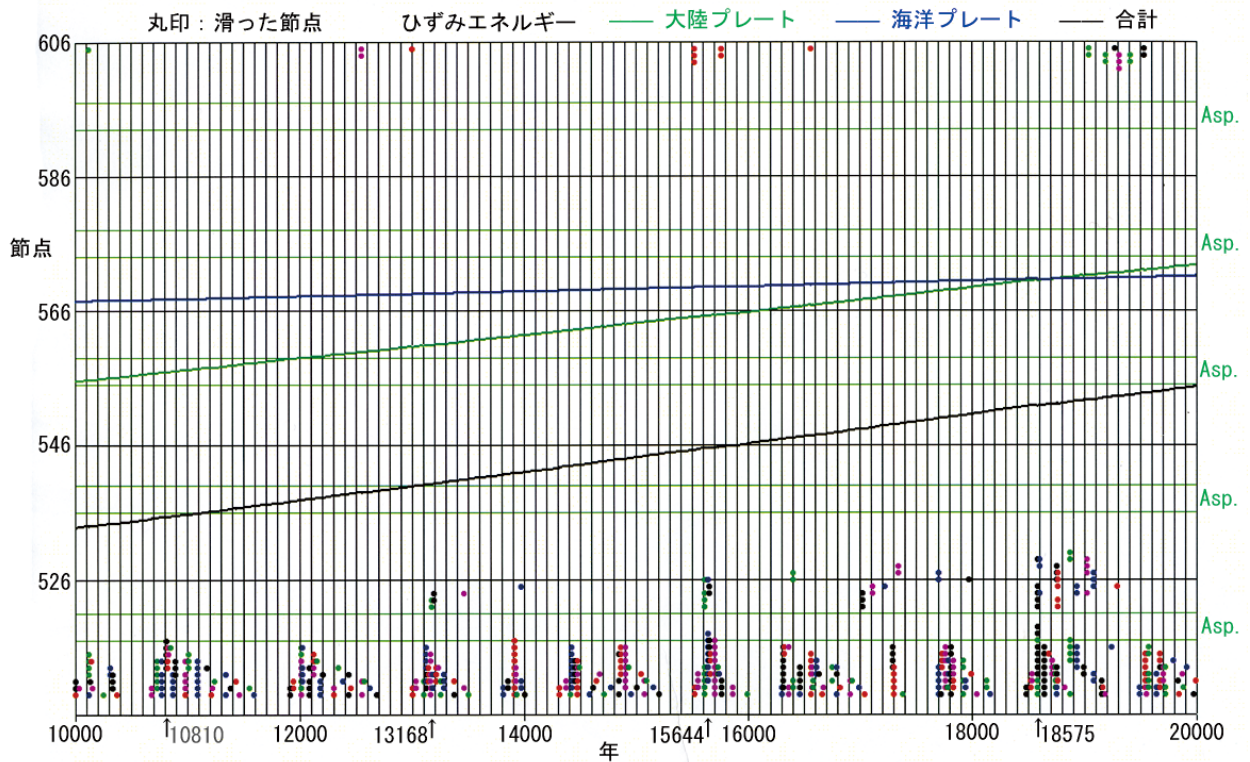


図 10 滑り点の変遷 (アスペリティがある場合、10000 年～20000 年)

アスペリティを越えた部分に滑りが及び、さらに 15644 年にはアスペリティ部の 2 節点、18575 年には 3 節点と滑る範囲が段階的に増えて行くのが認められる。この後当該アスペリティを含み次のアスペリティまでの範囲が同時に滑る展開となるが 20000 年より先のことであり図を示していない。ここで興味深いのは、単純な定数の摩擦係数を用いているにもかかわらず、アスペリティ部の滑りが段階的に進み、あたかも一度滑った点が滑りやすくなる（摩擦係数が状態変数である）ような現象が見られることである。

図 11 が静止摩擦係数一様な場合の 40000 年から 50000 年までの例である。滑りが中央部まで達しているが、採用した静止摩擦係数 0.08 ではまだ全面滑りが現れていない。ひずみエネルギーも増加し続けており、定常サイクルに至っていないことがわかる。時間的に近接した滑りが多数見られるばかりでなく、同一時点で違う色の滑りが混在している例も多数ある。これには 2 種類あり、滑った時点の時間差が 10 年以内で、ずれが 1 ドット未満になったため重なった場合と、滑りの後に行なった支点移動が原因で再び滑る場合である。この支点移動は実際には連続的に起こって常に支点反力がゼロになっていると思われるが、本解析では人為的に滑った機会にゼロに戻しているわけである。50000 年の間で一度の支点移動量は 50m から 1m の範囲で、時間の経過に従い小さくなっている。また、図で約 41400 年から 46500 年

にわたる巨大なスケールで前震、本震、余震、静穏期のサイクルに類似したものが見られる。中間の図を示していないが、図 6 に見られるサイクルが次第に大きくなって、ここまで成長したと考えることができる。

図 12 は同じ時期のアスペリティがある場合であり、全面滑りには達せず、左から 2 つのアスペリティを貫通した滑りがあるものの、3 番目を越えられない状態である。1 点から数点の範囲で散発的な滑りが多数認められるが、前述のサイクルは明瞭ではない。時間的に近接した滑りが多数見られるが、この範囲での最短滑り間隔が 1 年程度であり、数日の例を見つけれなかったので、大地震の予兆となるプレスリップは検出できなかったと結論づけた。

図 13 は、図 11 に↑で示した 47374 年の滑りの動的解析結果を 8 秒 (40 ステップ) まで示したものである。滑りによる振動が減衰するまでに 1800 ステップを要しているが、境界面の滑りは 40 ステップ以内で終わっているのである。すなわちプレート内部の節点どうしで、エネルギーを交換しながら長く振動し続けるのである。このようなエネルギー交換は境界面の節点どうしにも見られる。図では節点 557 が最初に滑って水平力を負担しなくなったために、隣の節点 556 も続いて滑り、遅れて節点 555 が滑り、かなり遅れて節点 554 も滑っている。また、滑って止まった点が再び滑ったり、滑りと止まりを交替している (エネルギー

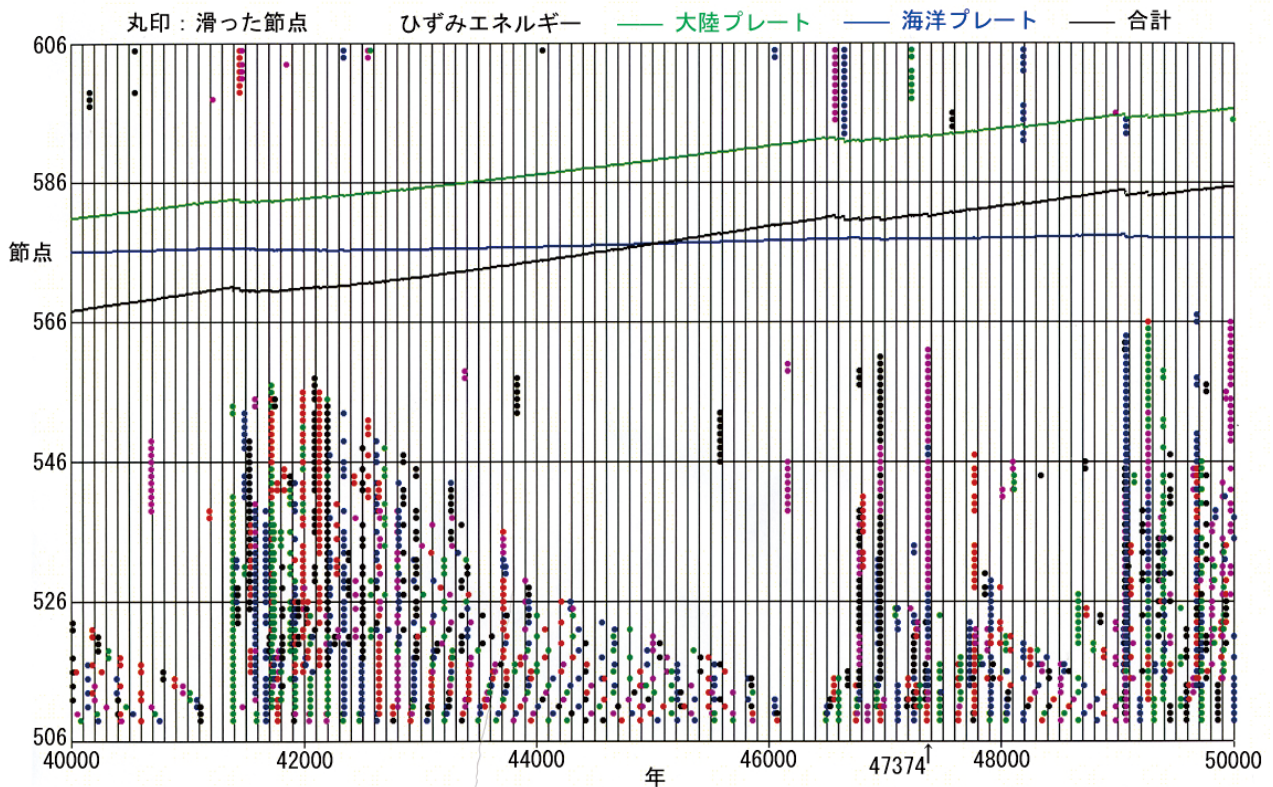


図 11 滑り点の変遷 (静止摩擦係数一定、40000 年～50000 年)

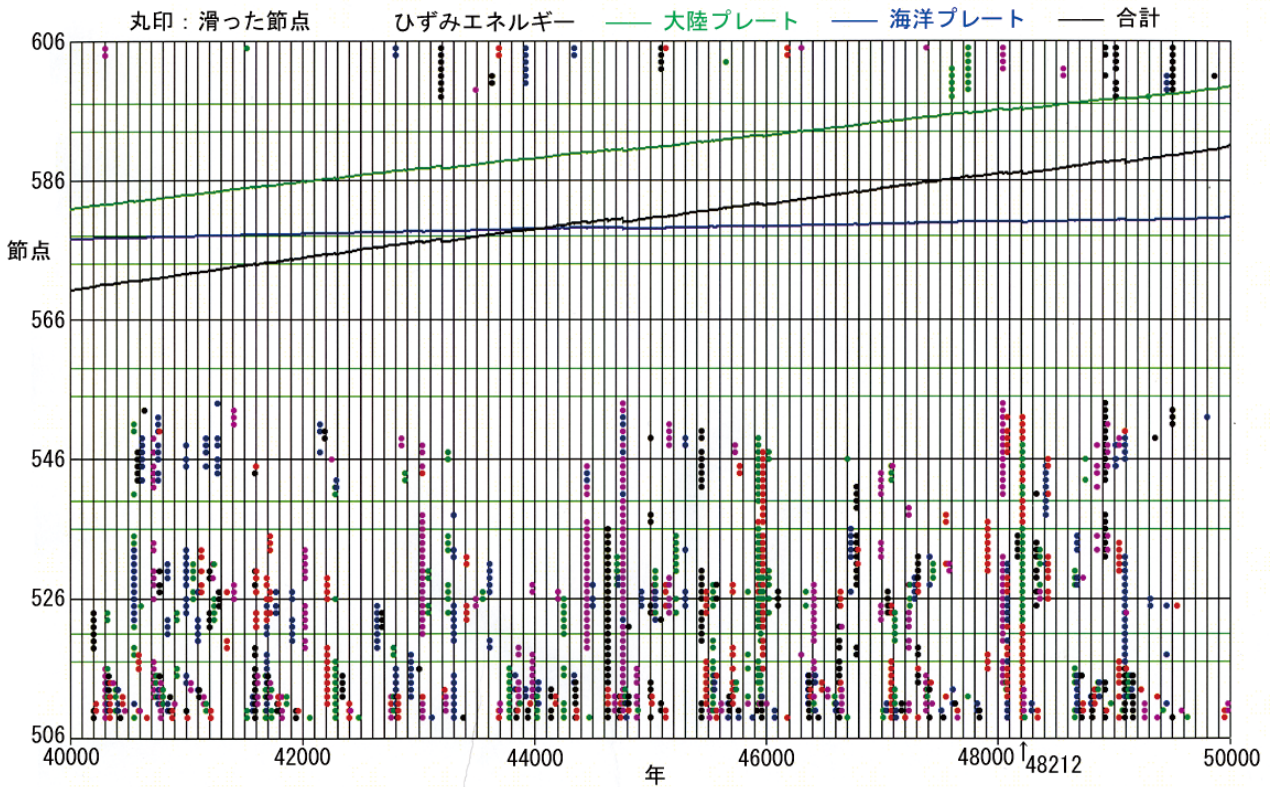


図 12 滑り点の変遷 (アスペリティがある場合、40000 年～50000 年)

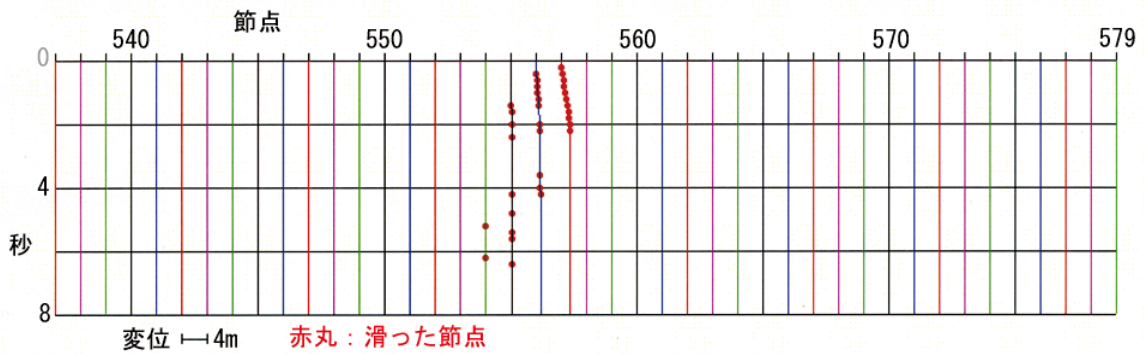


図 13 滑り点の運動 (静止摩擦係数一定、47374 年)

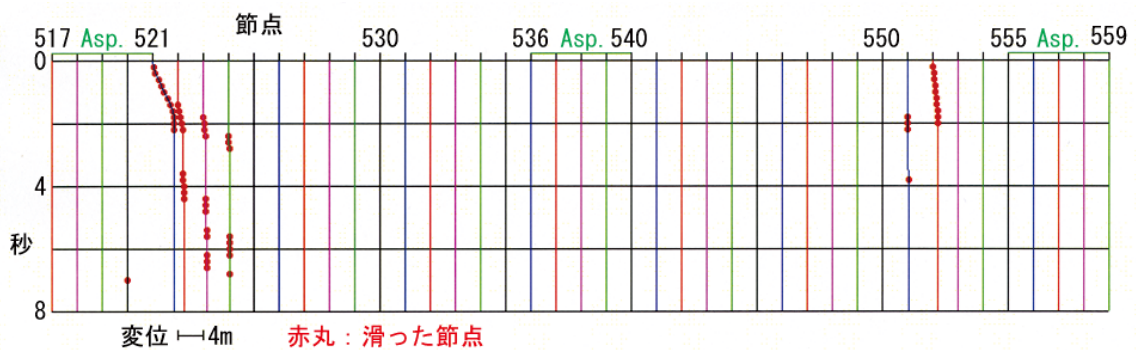


図 14 滑り点の運動 (アスペリティがある場合、48212 年)

を交換している) のも見られる。このような振動の連成は静的なつりあい解析では調べることができない。ここでは4点だけ滑っているが、このような一連の滑りを何回か繰り返して、最終的に

多くの節点が滑っているのである。この滑りで最初に滑った節点 557 の変位量は 2m 弱であるが、続いて滑った点の変位量は相対的に小さい。

図 14 はアスペリティがある場合の同様な例で

あり、図 12 に↑で示した 48212 年の滑りの結果である。アスペリティの範囲を緑線と Asp. の表示で表してある。アスペリティの右端である節点 521 が最初に滑り、隣接 4 節点やプレート内部の節点とエネルギー交換しているのは前例と同様である。この例では一般部の節点 552 も同時に滑り始めている。アスペリティ部は静止摩擦係数が一般部の 4 倍であるため、滑りによる変位量も大きく節点 521 では 4m 程度になっている。

5. まとめ

地震発生シミュレーションにおいて、滑り開始後の挙動を正確に知るために動的解析を行なう前提で、いくつかの問題点を指摘するとともに新しい解析手法を確立し、同法に基づく解析結果を報告した。この過程で得られた結論は以下である。

1. 滑り現象のシミュレーションでは、等時間間隔で解析すると滑りを解析時点まで抑制することになるため不適當である。したがって、常に次に滑る時点を前もって特定し、その時点に合わせて解析を進めるべきである。
2. 動摩擦と粘性減衰はそれぞれ作用する範囲と対象が異なるので、明確に区別して扱うべきである。
3. 連成振動がある場合、過減衰に近い領域では粘性減衰率が大きいほど振動の減衰が遅くなる。
4. 境界面にアスペリティーを設けると滑りが集約され、一様一定な静止摩擦係数を採用した場合に比べて、滑りの時間間隔も滑る領域も大きくなる。

5. 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大地震に先行する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) 神山眞、杉戸真太、久世益充：地殻変動にみる 3.11 巨大地震の予兆、土木学会誌、Vol. 97, No. 3, pp.119-123, 2012
- 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, A, pp.1-20, 2017.
- 3) 秋田宏、小出英夫、神山眞、沢田康次、千葉則行：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、東北工業大学紀要、理工学編、No. 38, pp.27-42, 2018.
- 4) 高田勝、春海佳三郎：数値計算の手順と実際、コロナ社、P. 252, 1984.
- 5) 小門純一、八田夏夫：数値計算法の基礎と応用、森北出版、P.313, 1988.
- 6) 河島佑男：動的応答解析、コンピュータによる構造工学講座、II -4-A、倍風館、P. 174, 1972.
- 7) 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.
- 8) 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.