

12-NA03

巨大地震発生サイクルシミュレーションの高度化

平原和朗（京都大学大学院理学研究科）

未曾有の東日本大震災を引き起こした 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の発生後 2 年が経過し、この地震について多くのことが分かってきたとは言え、依然この地震の発生機構およびその実態解明の研究が続けられている。日本列島はこの超巨大地震の発生により大きな応力擾乱を受け、2004 年スマトラ沖地震(Mw9.1) に見られるように今後少なくとも 10 年間、地殻活動が高まる可能性が高い。また今世紀前半には次期南海トラフ巨大地震の発生が危惧されている。こういった状況の中、岩石摩擦実験から得られた摩擦則に基づく、地震発生サイクルシミュレーションが行われ、超巨大地震の発生およびその地震サイクルの解明およびその予測に向けた研究が行われている。こういった巨大地震発生サイクルシミュレーションはますます大規模・マルチスケールシミュレーションとなるため、階層型行列 (H-matrix) 法によるコードの省メモリ化・高速化を進めている。昨年は 2011 年東北地方太平洋沖地震サイクルモデルを構築したが、今年度は更に北部領域も含めて、東北地方太平洋沖地震より大きな地震の発生の可能性を検討した。また、各種パラメータを適切に設定することにより、すべり応答関数行列とすべり速度ベクトル積の $O(N^2)$ の計算量から $O(N \log N)$ への高速化可能性を示してきたが、並列化効率に問題があった。そこで、並列化効率をあげる検討を行なっている。更に粘弾性媒質中における地震サイクルシミュレーションの効率化の検討も行なっている。また、大規模不均質弾性構造を扱える効率的な有限要素法の開発を行なった。

1. 研究の目的と意義

2011 年東北地方太平洋沖地震はモーメントマグニチュード (Mw) 9.0 に及ぶ超巨大地震で、未曾有の東日本大震災をもたらした。東北日本では東から太平洋プレートが日本海溝沿いに沈み込み、M7 クラスのアスペリティ (地震間では固着しているが、地震時には大きなすべりを発生する、プレート境界面に位置するパッチ) が存在し、これらが単独で破壊すれば M7 クラスの地震が、複数が連動破壊すれば M8 クラスの地震が発生すると理解されてきたが、M9.0 の超巨大地震が発生することとなった。この地震発生から 1 年 8 ヶ月あまり経過して、この地震について多くのことが分かってきたが、依然その発生機構や今後の余効すべりなどについて更なる研究が必要である。この超巨大地震の発生は、日本列島の応力場に大きな擾乱をもたらし、2004 年スマトラ沖地震 (Mw9.1) に見られるように、今後少なくとも 10 年間はこれまでに経験したことの無い地殻活動が高まる可能性が高い。

また、西南日本にはフィリピン海プレートが沈み込み、今世紀前半中には次期巨大地震の発生が

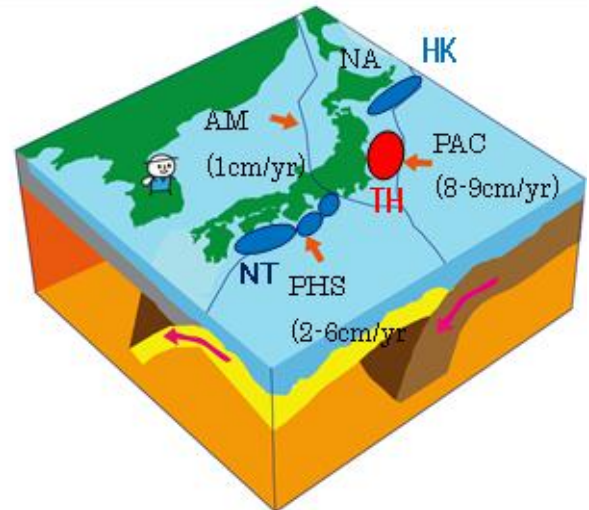


図1 プレート収束域としての日本列島

PAC: 太平洋プレート

PHS: フィリピン海プレート

NA: 北米プレート

AM: アムールプレート

HK: 北海道東岸地震想定震源域

TH: 東北地方太平洋沖地震震源域

NT: 南海トラフ巨大地震想定震源域

危惧されている。2003 年に内閣府から南海トラフ巨大地震についての想定が発表されているが、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受けて、その見直しが行われている（内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会、2011・2012 年）。

実際、日本列島に展開された 1997 年～2000 年までの GPS 観測データの解析からは、北海道～東北沖、および南海トラフ巨大地震震源域で大きな固着領域が推定されていた。このうち、2003 年十勝沖地震 (M8.0) で北海道十勝沖領域が、2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) で宮城沖から福島沖の固着域が破壊された。残っている固着域は、北海道東岸及び南海トラフ巨大地震震源域ということになる（図 1 TH：東北地方太平洋沖地震震源域、HK：北海道東岸想定震源域、NT：南海トラフ巨大地震想定震源域）。今後、日本列島では内陸および海域で地震活動や地殻変動が活発化すると思われる、特にここで示した領域で巨大地震の発生が危惧されることになる、

こういった状況で、岩石実験から得られた摩擦則に基づく地震発生サイクルシミュレーションが行われ、超巨大地震の発生およびそのサイクルを再現する試みがなされようとしている。また今後の日本列島の地殻活動や次期南海トラフ巨大地震の発生予測に向けてますます地震サイクルシミュレーションの重要性が増してきている。しかしながら、通常の M7 クラスの地震に比べ震源域は数百 km に及び、メモリ容量・計算量が大きくなり大規模計算になってくる。そこで、地震サイクルシミュレーションコードの省メモリ化・高速化が必須となってくる。本研究では、これまで、階層型行列 (Hierarchical Matrices: H-matrices) 法を用いて、シミュレーションで繰り返し実行されるすべり応答関数行列とすべり速度欠損ベクトル積の省メモリ化・高速化を図っている。

また、日本列島下に沈み込む太平洋・フィリピン海プレートは大きな不均質構造を作り出しているが、これまでは均質半無限媒質を仮定してシミュレーションを行ってきた。そこで、こういった地球内部構造不均質構造を扱うのに適した大規

模自由度問題に対する効率的な有限要素メッシュ生成法および解法の開発に着手した。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名と研究体制

本研究は、京都大学理学研究科・海洋開発研究機構・東京大学地震研究所・東京大学情報基盤センター・京都大学学術情報メディアセンターからなる、超大規模数値計算系応用分野における、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点公募型共同研究である。

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

本研究は、地震発生サイクルシミュレーションを行う地震学研究者と計算科学の研究者との共同研究である。シミュレーションで繰り返し現れる、すべり応答関数行列とすべり速度ベクトル積に $O(N)$ (オーダー N) の方法として注目されている階層型行列 (H-matrices) 法を用いてコードの省メモリ化・高速化により実際的な不大規模計算が可能になった点は特筆すべき点と言える。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

前回報告にも述べたが、以下に示すように、岩石実験から得られたすべり速度と状態に依存する摩擦構成則に基づき、プレート運動を駆動力とする地震発生サイクルシミュレーションを行なった。半無限均質弾性体を仮定し、その中にプレート境界を設定する。プレート境界を N 個の小さなセル (小断層) に区切ると、各セル i での準静的運動方程式は次のように書ける。

$$\tau_i(t) = -\sum_{j=1}^N K_{ij}(\delta_j(t) - V_{pl,j}t) - \frac{G}{2\beta}V_i(t) \quad (1)$$

ここで、 $\tau_i, V_i, \delta_j, V_{pl,j}, K_{ij}, G, \beta$ は、それぞれ、セル i でのせん断応力、すべり速度、セル j での

すべり、プレート収束速度、セル j での単位すべりによるセル i での応力変化（すべり応答関数）、剛性率、S 波速度である。これと、速度と状態に依存する摩擦則のうち、composite law (Kato and Tullis,2006)

$$\tau_i(t) = \sigma_i \left[\mu_* + \Theta_i(t) - a_i \ln \left\{ V_* / V_i(t) + V_* / V_{st} \right\} \right] \quad (2)$$

$$\frac{d\Theta_i(t)}{dt} = \frac{b_i V_{pl,i}}{L_i} \exp \left[-\frac{\Theta_i(t)}{b_i} \right] \exp \left[-\frac{V_i(t)}{V_c} \right] - \frac{V_i(t)}{L_i} \left[\Theta_i(t) - b_i \ln \left\{ \frac{V_{pl,i}}{V_i(t)} + \frac{V_{pl,i}}{V_{st}} \right\} \right] \quad (3)$$

を連立させて各プレート境界セルにおけるすべりの発展をシミュレートする。実際には、式(1)と(2)を時間で微分し連立させ、速度の時間微分を得て、これを式(4)と連立させて、時間刻み幅可変の Runge-Kutta 法により積分している。式(2)のように摩擦がすべり速度と状態変数（その時間発展は式(3)に従う）との関数となっており、 σ は法線応力で、式(2)の右辺第 2 項は摩擦係数となっている。速度と状態に依存する摩擦構成則と言われる所以である。また、ここで、 a および b (または $A = \sigma a$ および $B = \sigma b$) は、各セル i に与える摩擦特性をコントロールするパラメータで、2つのパラメータの差 ($a-b$ または $A-B$) が正 (負) だと速度強化 (速度弱) を示し、すべり速度が増すと摩擦が増える (減少する)。また、 L は特徴的すべり距離と呼ばれ、大きいほど破壊エネルギーが大きく破壊しにくくなる性質を持っている。これらの摩擦パラメータをプレート境界上に分布させ複雑な地震発生サイクルを再現する。

プレート境界を小さなセルに分割すると書いたが、この分割の影響が地震サイクル計算結果に影響を及ぼさないようにするには、分割サイズ h が、

$$h < h^* = cGL/\sigma(b-a) \quad (4)$$

にとる必要がある (Rice,1993) (ここで、 c は分割するセルの形に依存する定数)。通常用いられているパラメータ範囲では、セルサイズは 1km 以下となる。

式(2)と(3)から分かるように、問題の非線形性による繰り返し計算の必要性に加えて、分割セル

サイズの要請から来る、セル数の多さにより、地震発生サイクルシミュレーションは、多大な計算時間とメモリを要する。式(1)に見られる、すべり応答関数とすべりの行列・ベクトル積

$$\sum_j K_{ij} \left(\delta_j(t) - V_{pl,j} t \right) \quad (5)$$

の部分 (またはその時間微分したもの) の省メモリ化・高速化を開発中である。分割したセルの数を N とすると、これには、 $O(N^2)$ のメモリおよび演算回数を要する。この行列・ベクトル積の演算に H-matrices 法 (Börm et al., 2009) を用いて、 $O(N) \sim O(N \log N)$ となる省メモリ・高速化を開発した (平原・他, 2011a; Ohtani et al., 2011a)。

3-1 北部 1986 年十勝沖震源域を含む超巨大地震発生の可能性検討シミュレーション

昨年度は、開発中の H-matrices 法を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震サイクルシミュレーションを行なった (大谷・他, 2011; Ohtani et al., 2011b)。この地震の震源域は宮城沖から福島沖に及ぶ 500km x 200km といった広域に及ぶが、破壊の北限は釜石沖で、1986 年十勝沖 (M8.0) 震源域に及んでいない。釜石沖では、過去 M7 クラスの地震が発生していず、M5 クラスの地震が繰り返し発生しているパッチをもっている領域で、2011 年東北地方太平洋沖地震の大きな余効すべりが観測されている。

北部震源域では、1986 年 M8 クラスの十勝沖地震震源域に 3 つの M7 クラスアスペリティ (A, B, C) があり、うち 2 つ B, C はそれぞれ数十年間隔で地震が発生しているが、最北の最大アスペリティ A は 1986 年十勝沖地震時にしか破壊が観測されておらず、その際の最大すべり量が 9m 程度で、太平洋プレートの沈み込み速度 9cm/年を考えると、M8 地震の繰り返し間隔は 100 年程度と考えられる。また、この震源域の東の日本海溝沿いでは、1896 年三陸津波地震が発生している (図 2)。津波データの解析からは今回の地震でも遅れて破壊し 17m にも及ぶすべりを生じた可能性が指摘されている。その再現は難しく、今回はこの領域

化することが分かった。この並列化性の劣化は、行分割で各各ノードに割り当て並列化しているため、**H-matrix** 法に特有の低ランクで近似した部分行列のサイズが大きく変化し、各ノード間での積の計算量の負荷バランスが悪いことに起因している。そこで列分割も含めた 2 次元分割を検討した。更に負荷分散を図るためサイクリック 2 次元分割を試みた。その結果 256 コア数でも並列化性能の改善を図ることができた。更に **Open-MP** を用いたノード内並列とノード間並列を行う **MPI** を併用するハイブレッド並列の検討を行なった。

3-3 粘弾性媒質中での地震発生サイクル計算

これまで、弾性媒質を考えてきたが、地殻は弾性的に振舞うが、マントルは粘弾性的に振る舞い、地震後も長期的に応力変化を引き起こす。内陸地震とプレート境界地震の相互作用を含む地震発生サイクルシミュレーションでは、粘弾性媒質中での応力相互作用が重要になる (鹿倉・他, 2012a,b)。

粘弾性媒質中でのすべり応答関数は時間に依存したものになり、式(5)とは異なり、応力はすべり応答関数行列とすべり欠損速度ベクトルとの時間領域でのコンボリューションを含み、

$$\tau_i(t) = \sum_j \int_{-\infty}^t K_{ij}(t-t')(V_j(t') - V_{pl_j}) dt' \quad (6)$$

となり、全セルでの過去のすべり速度の全履歴を必要とし、メモリ量・計算量も弾性媒質に比べ大きくなる。そこで、この部分の省メモリ化・高速化を図った。

具体的には、非弾性減衰を含む弾性波伝播の計算で用いられている、以下のメモリ変数を用いる手法を検討している。粘弾性媒質中でのすべり応答関数は、弾性層およびマクスウェル粘弾性層からなる成層構造または将来的には 3 次元不均質粘弾性有限要素法等により計算することになる。それを以下のような m 個の緩和関数で近似する。

$$K_{ij}(T) = \left[M_{u_{ij}} - \delta M_{ij} \sum_{k=1}^m a_{k_{ij}} (1 - e^{-\omega_{k_{ij}} T}) \right] \quad (7)$$

更に、ここで以下のメモリ変数 $\zeta_{k_{ij}}(t)$ を導入する。

$$\zeta_{k_{ij}}(t) = a_{k_{ij}} \omega_{k_{ij}} \frac{\delta M_{ij}}{M_{U_{ij}}} \int_{-\infty}^t (u_j(t') - V_{pl_j} t') e^{-\omega_{k_{ij}}(t-t')} dt' \quad (8)$$

このメモリ変数は次の 1 階微分方程式を満たす。

$$\frac{d\zeta_{k_{ij}}(t)}{dt} + \omega_{k_{ij}} \zeta_{k_{ij}}(t) = a_{k_{ij}} \omega_{k_{ij}} \frac{\delta M_{ij}}{M_{U_{ij}}} (u_j(t) - V_{pl_j} t) \quad (9)$$

この時、式(6)は、

$$\tau_i(t) = \sum_j \left(M_{U_{ij}} (u_j(t) - V_{pl_j} t) - \sum_{k=1}^m \zeta_{k_{ij}}(t) \right) \quad (10)$$

と書け、時間領域でのコンボリューションは必要なく、弾性応答からメモリ変数の和を引いたものとして表せる。更に式(8)から漸化式

$$\begin{aligned} \zeta_{ij}^k(t_n) &= \alpha_{ij}^k \int_{-\infty}^{t_n} u_j'(t') \exp(-\omega_{k_{ij}}(t_n - t')) dt' \\ &= \zeta_{ij}^k(t_{n-1}) \exp(-\omega_{k_{ij}} \Delta t_n) + \alpha_{ij}^k \int_{t_{n-1}}^{t_n} u_j'(t') \exp(-\omega_{k_{ij}}(t_n - t')) dt' \\ &\approx \zeta_{ij}^k(t_{n-1}) \exp(-\omega_{k_{ij}} \Delta t_n) + \frac{\alpha_{ij}^k \Delta t_n}{2} [u_j'(t_n) + u_j'(t_{n-1}) \exp(-\omega_{k_{ij}} \Delta t_n)] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\alpha_{ij}^k = a_{k_{ij}} \omega_{k_{ij}} \left(\frac{\delta M_{ij}}{M_{U_{ij}}} \right), \quad u_j'(t') = u_j(t) - V_{pl_j} t, \quad \Delta t_n = t_n - t_{n-1} \quad (12)$$

の形が計算となる。実際の計算では式(12)による漸化式を用いたほうが安定することが分かった。

残念ながら、式(10)は **H-matrix** 形式では表せず、高速化が図れないが、当初の弾性体での定式化とほぼ同等の計算量で計算可能である (平原・他, 2012a,b)

3-4 高詳細大規模地殻マントル弾性構造 FEM モデル自動メッシュ生成・多自由度高速解法コードの開発

2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべりや余効すべりの解析に重要な役割を果たす海底地殻変動観測データの解釈には、これまでフラットな地表面を用いた半無限均質弾性体を用いた解析が主流であった。日本海溝近傍で急変する海底地形の影響や沈み込むプレートが作り出す不均質構造を考慮する必要がある。

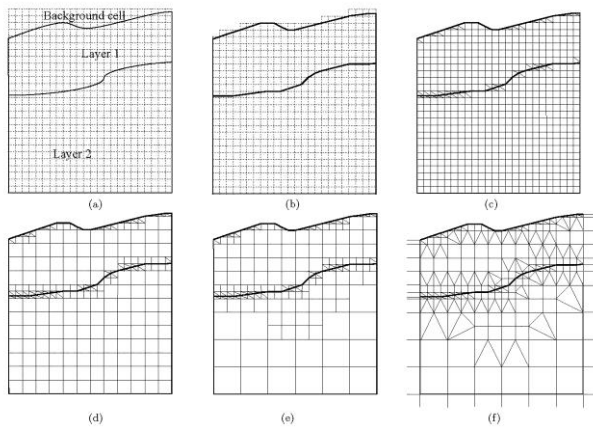


図 4 有限要素自動メッシュ生成手法の概要。(a) モデル化対象領域にバックグラウンド構造格子を被せる。(b) 地表面・境界面をアスペクト比の悪い要素が生成されないようにわずかに近似する。(c) 近似された対象領域に対してバックグラウンド構造格子を用いて四面体要素と立方体要素を生成する。(d) 非効率な立方体要素を八分木構造にしたがって大きくする。(e) 側面・底面付近にある要素をさらに二倍の大きさにする。(f) 大きさの違う要素どうしの中に四面体要素を生成し、メッシュの整合性を保つ。モデルの側面・底面に無限要素を生成する (Ichimura et al., 2012)。

地殻・マントルは基本的に層構造をなしているが、地表も含めて層境界形状が大きく変化している。そこで、こういった大きく層厚が変化する地殻・マントル構造に適した、不均質 FEM メッシュの自動生成コードを開発し、多自由度の FEM 構造モデルを用いた地殻変動計算の高速コードを開発した (Ichimura et al., 2012)。図 4 に自動メッシュ生成の概要を記す。

(2) 当初計画の達成状況について

これまで、半無限弾性媒質中での地震発生サイクルシミュレーションでは、階層型行列を用いてパラメータを適切に選んで、すべり応答関数行列とすべり遅れ速度ベクトル積を $O(N^2)$ から

$O(N \log N)$ の計算量に高速化することに成功した (Ohtani et al., 2011)。

この階層型行列を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震サイクル大規模シミュレーションを実行し、摩擦モデルを構築した。さらに北部領域まで含めた更なる超巨大地震発生の可能性の検討を行った。この問題については一応目的を達したと言える。

地震サイクルシミュレーション部分は MPI でノード間並列計算を行なっているが、コア数 128 以上で並列化性能が劣化してきた。行分割に対応してノードを割り当てていたので、H-matrix の性質に起因して部分行列サイズの大きさが著しく異なり、ノード間での計算負荷バランスが悪く、並列化性能が劣化すると考えられた。そこで、行と列の 2 次元分割を行い負荷バランスの改善を図った。

更に、弾性媒質から粘弾性媒質への拡張を行なった。この場合、応力計算はすべり応答関数行列とすべり欠損速度ベクトルとの時間領域でのコンボリューションとなるため、メモリ変数を導入して計算の効率化を図った。ただ更なる検討が必要である。

粘弾性問題では、メモリ変数を用いた履歴積分を回避する高速計算法の開発を試み、この部分については成功したと言えるが、弾性問題で有効であった H-matrix を適用できる形にならず、大規模問題への対応が問題になってきた。

これまで、半無限均質弾性体を仮定してシミュレーションを行なってきたが、複雑な層境界構造を持つ不均質媒質に対する FEM 自動メッシュ生成および高速計算コードの開発を行なった。

4. 今後の展望

津波堆積物の解析から 869 年貞観地震は今回の東北地方太平洋沖地震と同規模の超巨大地震だった可能性が指摘され、その 18 年後に 887 年仁和南海地震が発生している。このように日本海溝沿いおよび南海トラフ沿い巨大地震は相互作用を及ぼしている可能性があり、列島規模の地震発生サイクルシミュレーションを行う必要がある。また、

東北地方太平洋沖地震前には、地震の規模別頻度分布を表すグーテンベルグ・リヒター則の b 値が変化したことが報告されており、少なくともマグニチュード 5 以上の全てのアスペリティを含むマルチスケール大規模地震サイクルシミュレーションを行う必要がある。そのためには、近似精度の検討を含む H-matrix の更なる効率化を図る必要がある。

粘弾性媒質中での応力計算でメモリ変数を用いた高速化を図ったが、H-matrix が使えなく空間的大規模問題に適用できないなどの欠点を持つことが分かった。時間方向の効率化より空間方向の $O(N^2)$ から $O(N \log N)$ への省メモリ化・高速化の方が効率的である。そこで今後は履歴積分と空間積分を含むすべり応答関数に対して直接 H-matrix 法の適用を検討する必要がある。

不規則形状層境界を持つ不均質地殻・マントル構造に対して効率的なメッシュ生成法及び高速地殻変動計算 FEM コードを開発したので、実際の地殻変動データに適用して不均質構造の影響を評価する必要がある。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

Nakata, R., M. Hyodo and T. Hori, 「Numerical simulation of afterslips and slow slip events that occurred in the same area in Hyuga-nada of southwest Japan」, *Geophys. J. Int.*, 190, 1213-1220, 2012.

Ichimura, T., R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, M. Hori. 「Fast numerical simulation of crustal deformation using a three-dimensional high-fidelity model」, *Geophys. J. Int.*, submitted, 2012.

Ohtani, M., K. Hirahara, M. Hyodo and T. Hori, 「Observed change of the plate coupling before the occurrence of the 2011 giant Tohoku earthquake in Off-Fukushima, close to the rupture initiation area; implication from an earthquake cycle model」, *Geophys.*

Res. Lett., submitted, 2012.

縣亮一郎, 市村強, 兵藤守, 堀高峰, 平原和朗, 堀宗朗, 「震源断層の想定高度化に関する基礎研究 -高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変形解析手法の開発-」, *土木学会論文集*, 投稿中, 2012.

Ichimura, T., R. Agata, T. Hori, K. Hirahara and M. Hori, Fast numerical simulation of crustal deformation using a three-dimensional high-fidelity model, *Geophys. J. Int.*, submitted, 2012.

(2) 国際会議プロシーディングス

無し。

(3) 国際会議発表

Hirahara, K., M. Ohtani, M. Hyodo and T. Hori, 「Quasi-dynamic earthquake cycle models for the 2011 Tohoku giant earthquake」, 33rd General Assembly of ESC, Moscow, Russia, 2012.

Hirahara, K., M. Ohtani, M. Hyodo and T. Hori, 「Earthquake cycle models for the 2011 Tohoku giant earthquake」, 9rd General Assembly of ASC, Ulaanbaatar, Mongolia, 2012.

Agata, R., T. Ichimura, T. Hori, K. Hirahara, and M. Hori, 「Crustal deformation analysis using a 3D FE high-fidelity model with fast computation method and its application to inversion analysis of fault slip in the 2011 Tohoku earthquake」, 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, U. S. A, 2012.

Ohtani M., K. Hirahara, T., Hori, and M. Hyodo, 「Possible occurrence of a giant interplate earthquake in northeast Japan greater than the 2011 Tohoku earthquake」, 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, U. S. A, 2012.

(4) 国内会議発表

平原和朗, 鹿倉洋介, 大谷真紀子, 兵藤守, 堀高峰, 橋間昭徳, 「成層粘弾性媒質中での準動的

地震発生サイクルシミュレーション」、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SSS38-08、幕張、2012a.

大谷真紀子、平原和朗、堀高峰、兵藤守、「福島沖における固着の変化を含む東北地方太平洋沖地震発生サイクルシミュレーション」、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SSS39-P2、幕張、2012a.

鹿倉洋介、深畑幸俊、平原和朗、「プレート運動と地震発生に伴う西南日本内陸活断層の長期的な破壊関数の変化」、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張、2012a.

兵藤守・堀高峰・馬場俊孝、「南海トラフでの地震発生帯の浅部延長ならびに深部延長での地震性すべりの可能性」、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SSS38-P02、幕張、2012a.

中田令子・兵藤守・堀高峰、「日向灘における余効すべりの伝播に誘発されるスロースリップイベントと M7 クラスの地震」、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SSS38-P27、幕張、2012a.

平原和朗・鹿倉洋介・大谷真紀子・兵藤守・堀高峰・橋間昭徳、「漸化型メモリ変数法を用いた粘弾性媒質における地震発生サイクルシミュレーション」、日本地震学会 2012 年秋季大会、P1-66、函館、2012b.

金田義行・平原和朗・古村孝志、「東海、東南海、南海地震連動性評価研究成果」、日本地震学会 2012 年秋季大会、P2-63、函館、2012.

縣亮一郎・市村強・兵藤守・堀高峰・平原和朗・堀宗朗、「高詳細な三次元地殻モデルを用いた地殻変形解析手法の開発とその西南日本への適用」、日本地震学会 2012 年秋季大会、A31-13、函館、2012.

鹿倉洋介・深畑幸俊・平原和朗、「昭和東南海・南海地震後のプレート間固着分布を考慮した西南日本内陸活断層のクーロン破壊関数の長期変化」、日本地震学会 2012 年秋季大会、P1-67、函館、2012b.

大谷真紀子・平原和朗・堀高峰・兵藤守、「2011 年東北地方太平洋沖地震より大きな地震は東北で

発生するか」、日本地震学会 2012 年秋季大会、P2-68、函館、2012b.

堀高峰・宮崎真一・兵藤守・中田令子・金田義行、「プレート境界すべりのアンサンブル予測にもとづくプレート境界地震発生予測システムの構築」、日本地震学会 2012 年秋季大会、A31-06、函館、2012.

兵藤守・中田令子・堀高峰・金田義行、「地震発生予測システムのためのシミュレーションデータベース」、日本地震学会 2012 年秋季大会、A31-11、函館、2012b.

中田令子・兵藤守・堀高峰、「豊後水道～日向灘における地震性／非地震性すべりと南海地震の繰り返し間隔」、日本地震学会 2012 年秋季大会、P2-71、函館、2012b.

(5) その他（特許，プレス発表，著書等）

無し。