

物性不均質性・不確かさを考慮した信頼性の高い数値計算・パラメータ推定による固着すべり・推移予測・地震津波ハザード予測の統合的研究

堀 高峰 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

堀高峰^{*1}, 縣亮一郎^{*2}, 有吉慶介^{*1}, 安藤亮輔^{*3}, 飯沼卓史^{*1}, 伊田明弘^{*4}, 西本昌^{*5}, 山本優^{*5}, Raymundo Omar Plata Martinez^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター, ^{*2} 海洋研究開発機構海域地震火山部門 地震発生帯研究センター, ^{*3} 東京大学大学院 理学系研究科, ^{*4} 海洋研究開発機構付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター, ^{*5} 大成建設 技術センター

キーワード: プレート間固着、長期的スロースリップ、地下構造の不確かさ、地震の動的破壊過程シミュレーション、超低周波地震、階層型行列、長周期地震動

1. はじめに

地震津波予測研究開発センターでは、陸・海域の地震波・地殻変動観測データを用いたプレート境界断層すべりの現状把握・推移予測と、推移予測から得られる地震断層シナリオに基づく地震・津波ハザード予測を行うための研究を推進している。本課題では、ES4を活用した地下構造・断層摩擦パラメータの不均質性の導入や多数モデル計算による不確かさの考慮により、ハザード予測への適用に足る信頼性の高い数値シミュレーション・パラメータ推定手法の構築することを目指す。関係する各計算コンポーネントについて、以下のような点に着目して研究を進めてきた。

A. 現状把握: (I) 3次元不均質地殻構造モデル・実観測データを用いた日本海溝域・南海トラフ域の断層すべりの時空間変化の推定を進める。(II) 多数モデルの導入によりすべり分布・地下構造等の不確かさを考慮した断層すべり推定手法の実データへの適用を進める。

B. 推移予測: 地震サイクル計算と観測データを同化した推移予測のため、探索対象である空間的に不均質な断層摩擦パラメータの候補を理論解析に基づき絞り込むことを目指したシミュレーション等を実施する。

C. 地震ハザード予測: 地震動計算のための大規模有限要素計算プログラム・E-wave FEMの開発を、数値解析リポジトリの1つの柱であるサイト地震動評価のために進めている。ユーザ候補の建築系企業の研究者・実務者と共同で、3次元不均質な地下構造を考慮した、海溝型巨大地震に対する長周期地震動計算をE-wave FEM[1][2][3]を用いて行い、実用性を検証する。

本稿では、「A. 現状把握」、「B. 推移予測」、「C. 地震ハザード予測」について、該当年度に得られた成果について、それぞれ2・3、4・5・6、7章で報告する。

2. 断層面上のすべり分布を従来よりも柔軟に推定するためのリバーシブルジャンプ・マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた解析手法の南海トラフ沈み込み帯への適用 (A. 現状把握)

Tomita et al. (2021) [4]が開発した、リバーシブルジャンプ・マルコフ連鎖モンテカルロ法 (Rj-MCMC法) を用いて地殻変動観測データから固着・すべり分布を推定

する逆解析手法を、南海トラフ沈み込み帯に適用して、沈み込むフィリピン海プレートと陸側のプレートとのすべり遅れ (固着強度) の分布を、その確率分布や異なる観測手法で得られたデータ間の相対的な重みを含めて推定した[5] (図1左)。解析に必要な計算量は大きいですが、ES4CPUを40ノード用いたところ、4時間程度で計算を終了することができた。

本手法を用いることで、従来の最小二乗法では検討することのできなかつた、ガウス分布に従わない推定誤差を評価することが可能となった (図1右)。こうした結果は、浅部プレート境界でのすべり遅れの推定値がどれほど確実なのかをより詳しく検討するのに重要であり、南海トラフゆっくりすべり断層観測監視計画によって設置されていく連続観測点で得られる地殻変動データによって、プレート間固着状態の現状把握の確からしさがどのように増すのかを定量的に評価することが可能であることを示すものである。

3. 地下構造の不確かさのアンサンブルモデリングに基づく豊後水道長期的スロースリップのすべり分布推定 (A. 現状把握)

発生期間が長くすべり量が多いスロー地震として知られる長期的スロースリップ (L-SSE) について、測地データを使ってすべり分布を推定する場合、通常は前もって地下構造モデルを仮定する必要がある。しかし、地下構造の情報は本質的に不確かを伴う。この不確かさは、モデル予測誤差という形で、すべり逆解析の結果に無視できない影響を及ぼしうる。Agata et al. (2021) [6]は、「不確かな地下構造」を多数の地下構造モデルからなるアンサンブルによりそのまま表現することで、「一つの地下構造モデル」を仮定することによるモデル予測誤差の影響を軽減した新しいすべり推定手法を提案した。本課題において、この手法を適用して測地データに基づく豊後水道の2010・2018年L-SSEのすべり分布を推定した[7]。

断層すべりに対するGNSS観測点での地殻変動を計算する際に、対象領域の地下構造を仮定する必要がある。1,000通りのプレート形状モデルと半無限均質媒質の弾性パラメータを同時に地殻変動計算に取り入れることで地下構造の不確かさを考慮し、「一つの地下構造モデル」の仮定に伴う誤差を低減した。すべりパラメータは、レブ

リカ交換モンテカルロ法[8] (REMC) を用いたベイズ推定により、確率的に推定した。32 並列の REMC を 500,000 ステップ実行し、各ステップでは 1,000 通りの地下構造モデルに対応する地殻変動の応答計算をすることとなった。この解析に必要な計算量は小さくないが、ES4GPU に搭載される NVIDIA A100 GPU を 16 台使用したところ、解析を 1 時間程度で終了することができた。

結果として、南北方向に狭い領域にすべり量の大きな領域が集中する分布が得られた (図 2)。このすべり分布が、既往手法による結果と比べて、周辺領域のスロー地震活動とより整合的であることを確認した。既往のすべり分布推定手法においては、各誤差要因に基づく推定の不安定性を軽減するために経験的な拘束をすべり分布パラメータに与えるのが一般的だが、地下構造モデルの選択による誤差を低減したことによって、経験的拘束の推定結果への悪影響を軽減しつつ、測地的データではなく地震学的観測データに基づく他のスロー地震活動に関する知見と整合的なすべり分布を得ることにつながったと考えられる。

4. 動的地震破壊過程計算プログラムの VE 最適化および性能分析 (B. 推移予測)

地震時の動的破壊過程をシミュレートするために、高速領域分割境界要素法 (FDP-BIEM) を用いた動的破壊計算アルゴリズムを開発している。本アルゴリズムには、密行列ベクトル積の演算が含まれており、数値計算コストが高くなっている。従来 CPU を用いて実行していた本アルゴリズムを、ES4 に搭載されたベクトルエンジン (VE) を用いた高速演算が可能となるように最適化の作業を行い、性能を分析した。

最適化の対象は、畳み込み (密行列ベクトル積) と積分核計算の二つの関数である。表 1 に、それぞれの関数に行った最適化内容をまとめる。事前の分析によって、ループ長が短かったり、関数の階層が深すぎたりするなど、主たる関数において自動ベクトル化が働いていないことが明らかとなったので、それらに対する最適化が今回の作業内容の中心となった。

次に最適化作業を行ったコードの性能評価を実施した。畳み込み関数の演算の実行時間を計測した結果を図 1 に示す。ここでは、36000 要素のモデルについて、ES4VE28 ノード (224VE、1,792 コア) を用いた。計測の結果、ロープ分割や分岐の除去等によるベクトル化の促進、多重ループの順序入れ替えによるベクトル長の伸長およびループ融合の最適化を実施することにより、畳み込み関数全体の実行時間は 1,661.0 秒から 135.4 秒に短縮したことが確認された。

図 3 に、積分核事前計算関数の最適化の結果を示す。事前準備およびベクトル化の最適化を実施することにより、積分核事前計算関数の実行時間は 2,241.5 秒から 34.4 秒に短縮した。この関数は、階層が深く自動インライン展開が機能していなかったが、上位の 2 層分のみをインライン展開することで、可読性を犠牲にすることなく最適化

された。

最後に、ES4VE 最適化を行ったコードと ES4CPU 向けプログラムとの性能比較を行った結果を表 2 に示す。ここでは、数値負荷の特に大きな畳み込み関数について示す。表から分かるように、最適化前ではベクトル化が機能していなかったために、CPU よりも実行時間が 8 倍程度と遅くなっていたものが、最適化後には CPU と比較して 0.64 倍となる高速化が達成されたことが確認された。なお、この達成率はハードウェア特性から期待される性能を完全には引き出せていない。それは、行列ベクトル積におけるメモリアクセスがアルゴリズムの特性上、ランダムアクセスに近いものとなっており、またデータが大きくキャッシュに乗りきらないことが関係していると考えられる。一方で、ES4VP は ES4CPU よりメモリ搭載量が大きく、今回の最適化でこのメモリ空間を活用できるようになったというメリットも新たに生まれた。

5. 推移予測に向けた伝播速度理論式の数値実験による検証 (B. 推移予測)

近年、スロー地震の一つである余効すべりについて、その伝播速度を摩擦特性および応力場の関数として理論的に記述することに成功した [9]。これにより、岩石実験から推定される摩擦特性、地震波形から解析した応力降下量、地質調査による間隙圧、といった観測量を入力値として、前震→本震あるいは本震→余震となる際に、その時間差がどの程度になるのかを、推移予測から事前に推定することが可能となることを意味する。

今年度は、この理論式をさらに拡張すべく、余効すべりだけでなく、時間スケールがもっと短い超低周波地震の連鎖破壊現象への適用 [10] について、地球シミュレータを用いた大規模数値シミュレーションを行うことで検証を行った。具体的には、沈み込みプレート境界面上に海溝型巨大地震とその深部側に超低周波地震の震源域が走行方向に並んだアスペリティモデルに対して、速度・状態依存摩擦構成則を適用し、摩擦力和断層すべりに伴うせん断応力が準静的に釣り合う条件を約 90 万の計算メッシュごとに課すことで、ルンゲクッタ法による時間積分を計算する。1 つのモデルに対して数百年の地震サイクルを計算する際に、ES4VE 百ノード時間程度の計算資源を要した。これにより、超低周波地震の破壊過程を高い時空間分解能かつ長期間に渡って捉えることが可能となった。

本研究では、ある時刻から間隙圧が増加した場合についてシミュレートし、その後の超低周波地震の特性変化に注目して調べた。その結果、間隙圧が超低周波地震の震源域を取り囲んで増加すると、応力降下量が減少することが分かった。これは、間隙圧の上昇は流体移動に伴って局所的な領域に限定されていることを示唆するものである。この考察より、連鎖破壊過程は、超低周波地震の震源域では地震性破壊を起こし、隣の震源域まですべりが伝播する過程を流体移動を伴う余効すべりとして記述すると、地震規模と継続時間の関係を示すスケーリング則を満たしつつ、伝播速度を摩擦特性・応力場から定量的に説

明できる新たなモデルを提唱した [11]。

6. 階層型行列・ベクトル積計算の最新 CPU アーキテクチャ向け最適化 (B. 推移予測)

積分方程式法は、地震サイクル計算や断層の動的破壊シミュレーションなどで広く用いられている計算手法である。従来の積分方程式法では密行列・ベクトル計算が計算時間の多くを占めていた。階層型行列法は、この密行列に対する近似手法であり、積分方程式法に基づくシミュレーションの実施に必要な計算メモリ量および計算時間を大幅に低減させることができる。

本研究では、最新 CPU アーキテクチャを用いた計算ノード (AMD EPYC, Fujitsu A64FX, Intel Xeon Cascade Lake) で、階層型行列・ベクトル積計算を効率的に行うための手法を検討した [12]。階層型行列・ベクトル積はメモリ律速な計算であり、メモリ帯域を出来る限り多く使用する計算パターンが最適と言える。近年、計算ノードに複数の CPU およびメモリが配されるようになり、CPU のマルチコア化やメモリ構造の階層化が進むなどし、計算ノードの計算性能を引き出すには様々な技法を駆使する必要がある。本研究で提案した最適化では、メモリアクセスを効率化する階層型行列データの保存法、複数ベクトルを同一ベクトルへ書き込みを行う際に競合を回避する手法、スレッド間負荷分散法、部分行列ブロッキングおよび部分行列の並び替えによるキャッシュ効率の向上化手法などを階層型行列・ベクトル積計算に適用した。性能評価指標として密行列・ベクトル積計算 (DGEMV) を採用した場合、提案手法で最適化した階層型行列・ベクトル積計算の FLOPS は、全種類の CPU ノードで DGEMV の 85%~100% の性能を達成した。図 5 は、9 つの行列データを用いて ES 4 で数値実験を行った結果である。最適化前 (0: Baseline) は、DGEMV の 60% 程度の計算速度であったが、適当な最適化ルーチンを用いれば DGEMV と同程度の計算速度を達成していることが分かる。

7. 大規模有限要素地震動計算プログラム・E-wave FEM を用いた千島海溝沿いの巨大地震における長周期地震動評価 (C. 地震ハザード予測)

本課題では、大規模有限要素法に基づく地震動計算プログラム・E-wave FEM [1][2][3] の社会実装を目指し、民間企業と連携した長周期地震動の評価事例の蓄積を進めている。その一例として、千島海溝沿いの巨大地震を対象とした長周期地震動評価に関する取り組み [13] について紹介する。

今後発生が懸念される千島海溝沿いの巨大地震では、長周期地震動による札幌の超高層建築物や免震建築物、苫小牧の石油タンク等の固有周期が長い建築物への影響が大きいと考えられる。そのため、当該地域での長周期地震動の評価が重要である。また、震源特性は不確実性を有しており、その選択により予測結果に大きなばらつきが生じる。そのため、多様な地震発生シナリオを考慮した検討が必要である。そこで、震源特性の不確実性を考慮した

複数の震源モデルを構築し、ばらつきの大きさや各震源特性が長周期地震動に与える影響を分析した。現実的な地盤構造における地震動を 3 次元有限要素法により評価するため、3 次元不均質地盤構造の四面体二次要素メッシュ (約 14.7 億節点、10.8 億要素) を用いた。メッシュを生成し、並列計算用に領域分割するために、ES4GPU1 ノードを合計 4 時間用いた。有限要素法による地震動計算にはスーパーコンピュータ「富岳」を用いた。

図 6 に設定した震源モデルを示す。4 ケースのアスペリティ設定と 7 ケースの破壊開始点を設定し、合計 28 ケースの震源モデルを考慮した。図 7 に、擬似速度応答スペクトル (EW 成分・周期 5 秒) の平均値とばらつきの大きさの空間分布を示す。平均値は堆積層が厚い地域 (図 6 赤線参照) で大きくなっているが、ばらつきはそれとは必ずしも対応しない複雑な分布となっている。さらに、地震動のばらつきが建築物に与える影響を確認するため、計算された地震動を入力として、建物モデルを用いた応答解析を行った。長周期地震動の強さは一部ケースで現行の基準を上回っており、震源モデルの選択が地震動強さや建物応答に大きなばらつきを及ぼすことが分かった。超高層建築物等の設計にあたり、このようなばらつきに配慮が必要となる可能性が示された。

謝辞

本研究の一部 (FEM による地震動計算) は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「大規模数値シミュレーションによる地震発生から地震動・地盤増幅評価までの統合的予測システムの構築とその社会実装」(課題 ID: hp210171, hp220171) の一環として実施されたものです。また、本計算の一部は、スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け、実施しました。さらに、本研究の一部 (固着強度分布推定) は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われました。

文献

- [1] Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., “A hybrid multiresolution meshing technique for finite element three dimensional earthquake ground motion modelling in basins including topography”, *Geophysical Journal International*, Volume 177, Issue 3, 1221-1232, (2009).
- [2] Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Shizawa, Y., & Kobayashi, H., “Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF × 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation”, *SC' 14*, (2014).
- [3] Ichimura, T., Fujita, K., Quinay, P. E. B., Madgedara, L., Hori, M., Tanaka, S. et al., “Implicit nonlinear wave simulation with 1.08 T DOF and 0.270 T unstructured finite elements to enhance comprehensive earthquake simulation”, *SC' 15*,

(2015).

[4] Tomita, F., Iinuma, T., Agata, R., & Hori, T. (2021). Development of a trans-dimensional fault slip inversion for geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020991. <https://doi.org/10.1029/2020JB020991>

[5] Plata-Martínez, R. O., Iinuma, T., Tomita, F., Nishimura, T., Agata, R., & Hori, T. (2022). Slip deficit rate and slow earthquake distribution at the Nankai Trough. Abstract T32D-0157 presented at 2022 Fall Meeting, AGU, Chicago, 12-16 Dec.

[6] Agata, R., Kasahara, A., & Yagi, Y. (2021). A Bayesian inference framework for fault slip distributions based on ensemble modelling of the uncertainty of underground structure: with a focus on uncertain fault dip. *Geophysical Journal International*, 225(2), 1392-1411.

[7] Agata, R., Nakata, R., Kasahara, A., Yagi, Y., Seshimo, Y., Yoshioka, S., & Iinuma, T. (2022). Bayesian Multi-Model Estimation of Fault Slip Distribution for Slow Slip Events in Southwest Japan: Effects of Prior Constraints and Uncertain Underground Structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(8), e2021JB023712.

[8] Swendsen, R. H., & Wang, J. S. (1986). Replica Monte Carlo simulation of spin-glasses. *Physical review letters*, 57(21), 2607.

[9] Ariyoshi K, Ampuero J-P, Bürgmann R, Matsuzawa T, Hasegawa A, Hino R, Hori T (2019) Quantitative relationship between aseismic slip propagation speed and frictional properties. *Tectonophysics* 767:128151. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.06.021>.

[10] Ariyoshi K, Matsuzawa, T, Ampuero J-P, Nakata R, Hori T, Kaneda Y, Hasegawa A (2012) Migration process of very low-frequency events based on a chain-reaction model and its application to the detection of preseismic slip for megathrust earthquakes. *Earth Planets Space* 64(8):693-702. <https://doi.org/10.5047/eps.2010.09.003>

[11] Ariyoshi K (2022). Extension of Aseismic Slip Propagation Theory to Slow Earthquake Migration. *J Geophys Res: Solid Earth* 127:e2021JB023800. <https://doi.org/10.1029/2021JB023800>

[12] Hoshino, T., Ida, A. & Hanawa T. (2022). Optimizations of H-matrix-vector Multiplication for Modern Multi-core Processors, 2022 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER), pp. 462-472, doi: 10.1109/CLUSTER51413.2022.00056

[13] 西本、谷、山本、縣、堀、「多様なシナリオを考慮した地震動評価と建物応答解析-千島海溝沿いの巨大地震を対象とした検討」、大成建設技術センター報、No55、12 (2022).

表 1. 最適化の対象関数および最適化内容

対象関数	最適化内容
畳み込み	ベクトル長伸長、ループ融合、行列ベクトル積マクロへの書き換え
積分核事前計算	インライン展開、ベクトル長伸長、ループ分割

表 2. 畳み込み関数の実行時間比

計算機	ソースコード	実行時間 [秒]	ES4CPU との実行時間比
ES4CPU	最適化前	210.1	1.00
ES4VE	最適化前	1,661.0	7.91
ES4VE	最適化後	135.4	0.64

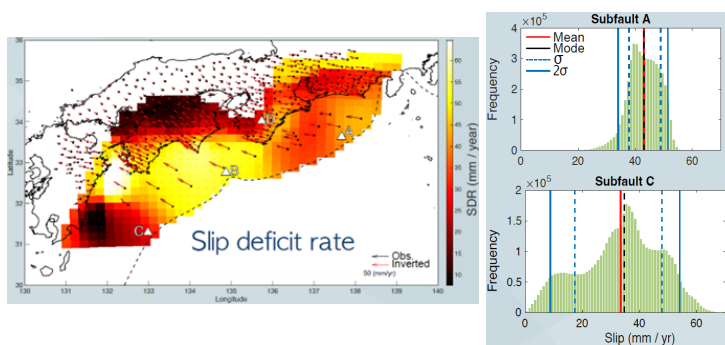


図1. (上) 本研究で得られた南海トラフ沈み込み帯におけるプレート間のすべり遅れの平均値の空間分布。黒と赤の矢印は各観測点における観測変位速度と推定結果から計算された変位速度 (下) 左図中の点A及びCにおけるすべり遅れ量の推定値の頻度分布。

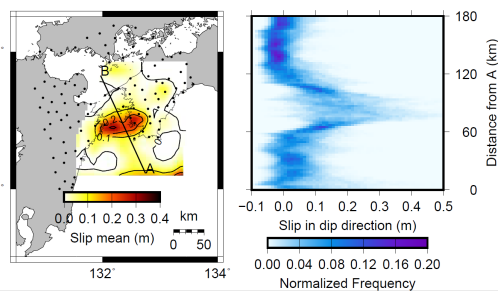


図2. (左) 本研究で得られた2010年豊後水道L-SSEのすべり分布の確率分布の平均値。黒点は解析に用いた観測点の位置を示す。(右) 左図AB線上でのすべり量の正規化した頻度分布。

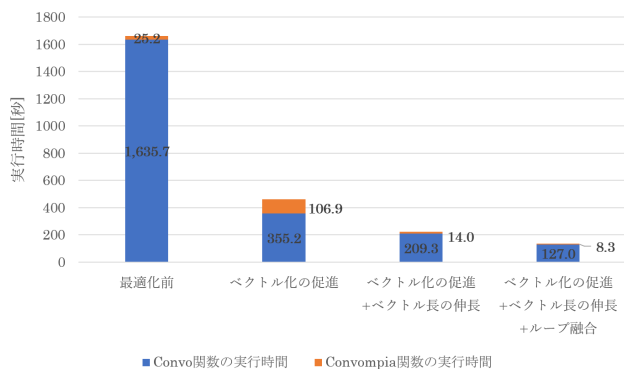


図3. 最適化実施による畳み込み関数の実行時間。畳み込み実施部分 (Convo 関数), MPI 処理部 (Convompia 関数) に分けて示す。

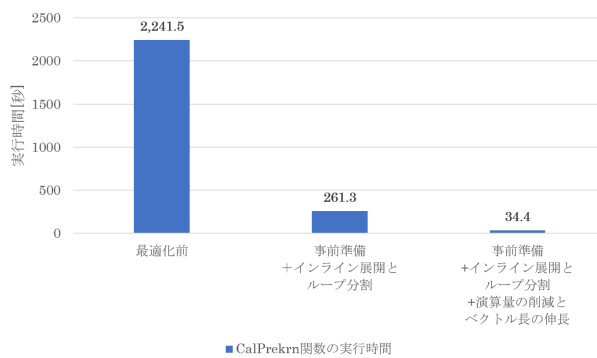


図4. 最適化実施による CalPrekrn 関数の実行時間。

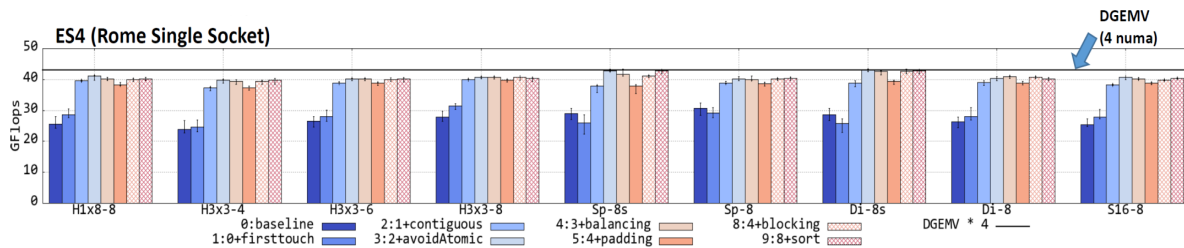


図5. 9つの行列データ (H1x8-8~S16-8) に対して、階層型行列・ベクトル積ルーチンの最適化前 (0:baseline) と7つの最適化ルーチンを用いて計算速度[flops]を測定した結果。

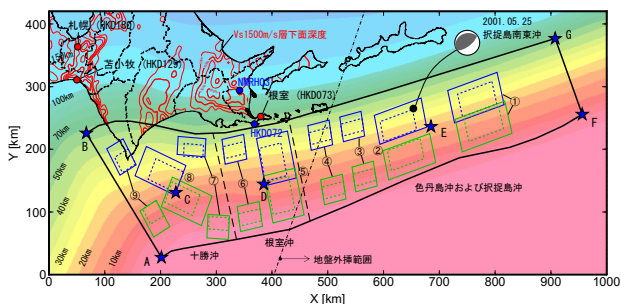


図6. 地盤モデル・震源モデル。青実線、青細線、線実線、緑細線の四角は4ケースのアスペリティ配置パターン、A-Fの星印は7ケースの破壊開始点を示す。

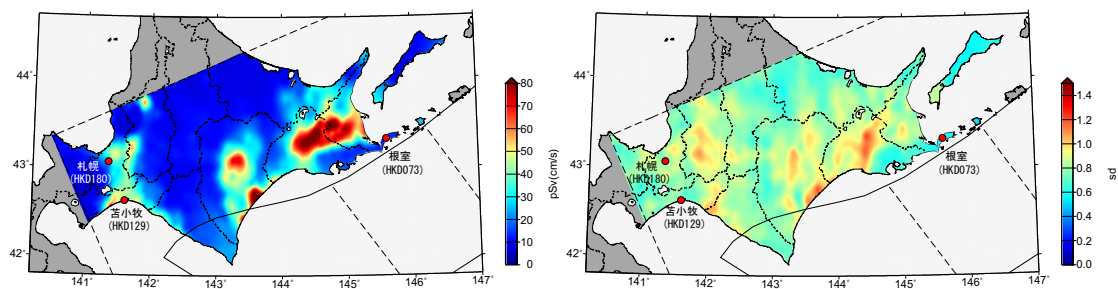


図7. 擬似速度応答スペクトル (EW成分・周期5秒) の平均値 (左) と標準偏差 (右) の空間分布。