

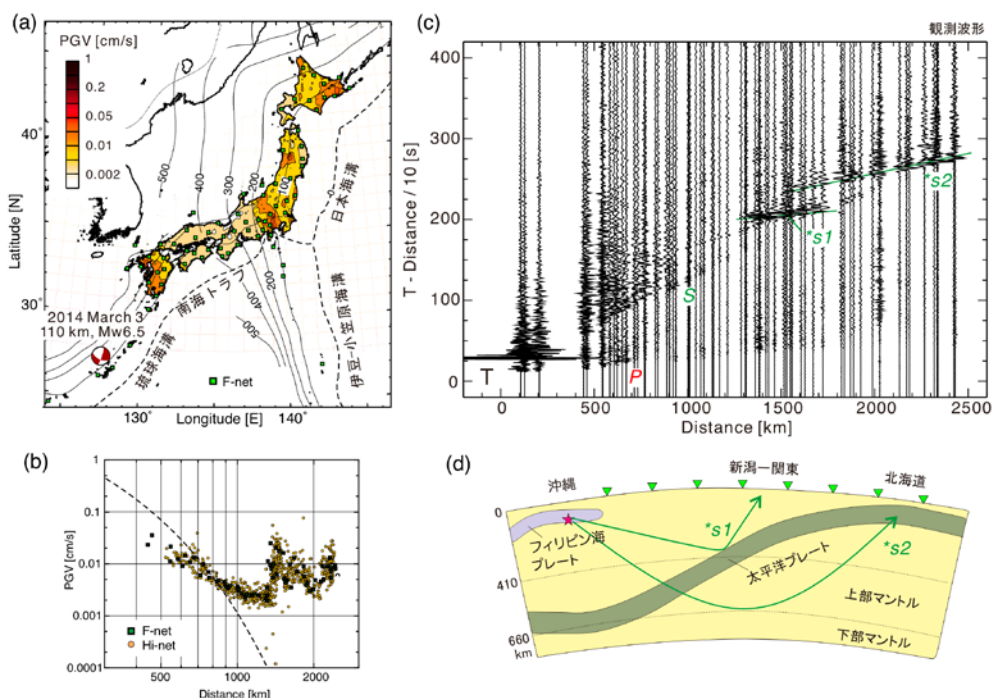
琉球海溝の地震による日本列島の特異な震度分布—地震波伝播シミュレーション (OpenSWPC) による再現

古村 孝志

東京大学地震研究所

1. はじめに

日本海溝～伊豆一小笠原海溝から太平洋プレートが、そして南海トラフ～琉球海溝からフィリピン海プレートが沈み込む日本周辺では、世界の大地震の1割が起きている。一般に、地震の揺れは震源からの距離とともに急激に弱まる。ところが、琉球海溝に沈み込むフィリピン海プレートで地震が起ると、震源から1500～2000 km離れた中部日本（新潟～関東）と北海道東部に強い揺れが起きることが、近年の高密度地震観測により発見された[1]。日本海溝に沈み込む太平洋プレートの地震において、揺れが冷えた固いプレート内部を伝わった結果、関東～北海道の太平洋岸で震度が大きくなる現象は「異常震域」として知られているが、この発見は別の波動現象である。Wisteria-o スパコンによる地震波伝播シミュレーションに基づいて、日本列島の特異な揺れの生成メカニズムを評価した。



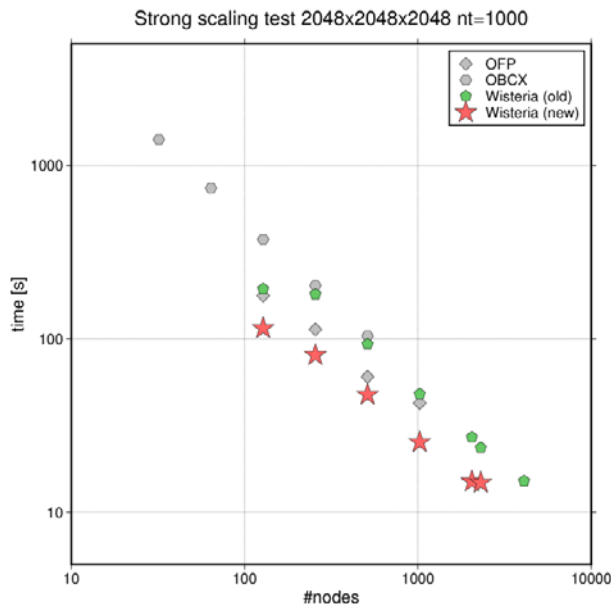
第1図：琉球海溝のやや深発地震に見られる日本列島の特異な揺れ分布

- (a) 琉球海溝に沈み込むフィリピン海プレートで起きた、やや深発地震 (110 km, Mw6.5) における日本列島の揺れ分布 (最大地動速度; PGV) と太平洋プレートの等深度線 (100 km 間隔)、(b) PGV の距離減衰と経験的な距離減衰曲線 (点線) の比較、(c) F-net のレコードセクションに見られる大振幅の S 反射波 (*s1, *s2)、(d) 太平洋プレート上面と上部マントル/下部マントル境界での S 反射波の生成メカニズムの模式図。

2. 海洋プレート上面でのS波反射による日本列島の特異な震度分布

図1aは、2014年3月に沖縄本島北部の深さ110キロで発生したMw6.5の地震の揺れの大きさを、日本列島の1400カ所に設置されたHi-net地震観測網[2]の波形データを用いて示したものである。この地震は、琉球海溝に沈み込むフィリピン海プレート内部で発生し、震源に近い沖縄本島で最大震度4の揺れを観測した。一般に、地震の揺れは震源距離とともに急激に弱まるが、この地震において中部日本、東北、北海道では九州よりも大きな揺れが観測された。こうした日本列島における特異な揺れ分布は、琉球海溝沿いの喜界島～台湾周辺のやや深発地震（深さ>30 km）でいつも見られる現象である。浅い地震や九州よりの地震では見られないことから、やわらかい地盤の影響ではなく、震源から観測点至る経路にそった深部の地下構造が原因と考えられる。

日本列島のF-net広帯域地震観測網[3]の波形データを震源距離の順に並べたレコードセクションを作ると、震源距離1500 km付近の中部日本において、S波の到着後に見かけ速度が速い（すなわち、震源距離に因らずほぼ同時刻に到着する）大きな揺れの到来が確認できる。速い見かけ速度より、この揺れは地下300～400 kmに沈み込んだ太平洋プレートの上面で反射し、ほぼ鉛直に昇ってきたS波と推察される（図1d）。また、震源距離2000 kmを超える北海道では、もう一つの見かけ速度の速い、地下深部から昇ってきた反射S波と見られる揺れが確認できる。そして、揺れの到着時刻より地下660 kmの上部マントル/下部マントル境界で反射したS波の可能性が推察される。



第2図：地震波伝播シミュレーションコードOpenSWPC[4]の並列性能

地震波伝播シミュレーションコード（OpenSWPC）の並列性能（計算サイズ2048×2048×2048格子、1000タイムステップ計算に要する時間）を各種計算機（OFFP: Oakforest-PACS, OBCX: Oarkbridge-CX, Wisteria: Wisteria-o）で測定。並列化数（ノード数）と計算時間のストロングスケーリングを評価。Wisteriaについては、計算ノードにおけるMPIプロセスの配置と通信を変えた2つのパターン（old/new）を比較。

3. OpenSWPCによる地震波伝播シミュレーション

琉球海溝のやや深発地震において、日本列島に特異な揺れ分布が生じる現象を、地震波伝播シミュレーションにより評価した。日本列島下の地下構造モデル（堆積層、地殻、マントル、プレートの弾性定数と減衰定数）を離散化し、震源から放射された揺れが各格子点を伝わる過程を、地震波伝播の基礎方程式（運動方程式、応力-ひずみ構成方程式）の差分法（FDM）計算により評価した。強い揺れを起こす高周波数（>数Hz）地震動の波長は、地震波の伝播速度が遅い地表付近では短く（数百～数十メートル程度）、FDM 計算に用いる数十メートル程度の細かな格子サイズが必要である。このため、日本列島規模の地震動シミュレーションには、数十 TB のメモリと大規模な並列計算が必要である。

地震波伝播シミュレーションのオープンコード OpenSWPC[4]は、大規模並列計算を目的として開発され、東大情報基盤センターの Wisteria/BDEC-01 や Oakbridge-CX など最適化された最新版（Ver5.2）が GitHub から公開されている¹。OpenSWPC には日本列島の地下構造コミュニティモデル（JIVSM; [5]）の組み込み機能や計算結果の可視化ツールが用意され、計算手順の概要とコンパイルから実行までの流れを解説したオンラインドキュメント²が整備されている。

図2は、OpenSWPC の並列化性能（ストロングスケーリング）を Oakforest-PACS, Oakbridge-CX, Wisteria/BDEC-01（Wisteria-o）において測定したものである。FDM 計算の並列化は、水平（ x, z ）方向の2次元領域分割に基づいており、MPIによる隣接間通信が行われる。テストを行った2048³格子規模のシミュレーションでは、32～4096ノードの並列計算においてほぼ直線的な速度上昇が確認できた。Wisteria-oの利用開始直後には、以前のシステム（Oakforest-PACS）と同程度の性能しか得られなかったが（図2緑マーク）、ノード当たりのMPIプロセス数の見直しにより2倍の高速化が得られた（赤★）。Wisteria-oのA64FXプロセッサは、4つのコアメモリグループ（13コア×4）で構成されており、プロセッサ当たり4MPIプロセスを配置して12スレッド計算を行った場合に、MPI1プロセス×48スレッド計算よりも演算効率が高くなる。また、2次元領域分割を意識して、2次元メッシュ構造にMPIプロセスと通信を配置するようにJob文とrankmapを設定することで、10%の速度向上が得られた。

4. 琉球海溝の地震の地震波伝播シミュレーション

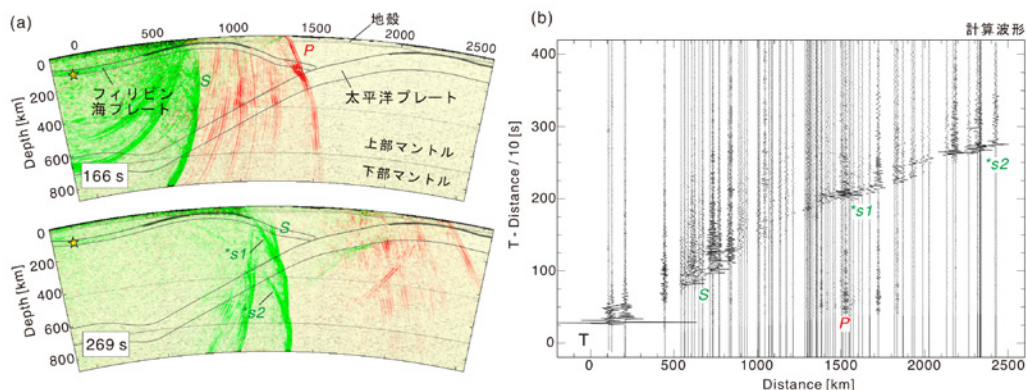
地震波伝播シミュレーションを行った領域は、沖縄～北海道に至る水平2,688 km×960 km、深さ880 km範囲であり、これを0.25 kmの格子間隔で離散化して地下構造の物性値を与えた。ここではS波速度が1.6 km/s以上の堆積層を評価し、計算の都合上、これよりS波速度が遅い（軟らかい）表層地盤は組み込んでいない。この計算条件において、最大周波数4 Hzまでの地震波の伝播を評価した。80,000タイムステップによる660秒間の地震波伝播の計算には、18 TBのメモリとWisteria-oの2048ノードで122分を要した。

沖縄～北海道の地下断面における地震波伝播のスナップショット（地震発生から166、269秒後）と、F-net観測点における計算波形のレコードセクションを図3に示す。沖縄本島下に沈み込むフィリピン海プレートの地震から放射されたS波が、三重～京都の地下400 kmに沈み込む太平洋プレートの上面で反射し（図3a; *s1）、中部日本に強い揺れを起こす過程が確認できる。

¹ <https://github.com/tktmyd/OpenSWPC>

² <https://tktmyd.github.io/OpenSWPC/ja/>

レコードセクションには、観測データで確認されたように見かけ速度が速く大振幅の反射S波が再現された。また、太平洋プレートを貫いたS波は屈折して伝播方向を変え、深さ660 kmの上部マントル/下部マントル境界に広角で入射することで全反射を起こし(図3b; *s2)これが北海道に強い揺れを作り出す過程も確認できた。すなわち、日本列島の深部に沈み込む太平洋プレートがS波の反射と屈折を起こしたことで、日本列島に特異な揺れ分布を起こしたことがシミュレーションから確認できた。



第3図：琉球海溝の地震の3次元FDMシミュレーション結果

- (a) 沖縄から北海道にかけて南西―北東方向の断面での波動場スナップショット(赤がP波、緑がS波を表す)、
 (b) F-net 観測点での計算波形のレコードセクション。太平洋プレート(PAC)上面でのS反射(*s1)と上部マントル/下部マントル境界でのS反射(*s2)をマーク(図1cの観測波形と比較せよ)。

4.1 沈み込んだ太平洋プレートは断裂しているか？

太平洋プレートが沈み込む日本海溝と伊豆一小笠原海溝は、関東の沖合で緩やかに折れ曲がっている(図1a参照)。このため、沈み込んだプレートがそれぞれ西北西と西南西へと進むことで、プレートの接合部が引き延ばされることが考えられる。地震波の到達時刻から地球内部の速度構造を推定する地震波トモグラフィ(断層撮影)解析の結果を見ると、太平洋プレートが沈み込んだ中部日本～日本海下の400キロ以深において、太平洋プレートの存在を示す高速度の像が消えており、太平洋プレートが切れているか、あるいは解析の解像度の問題か議論が続いている。

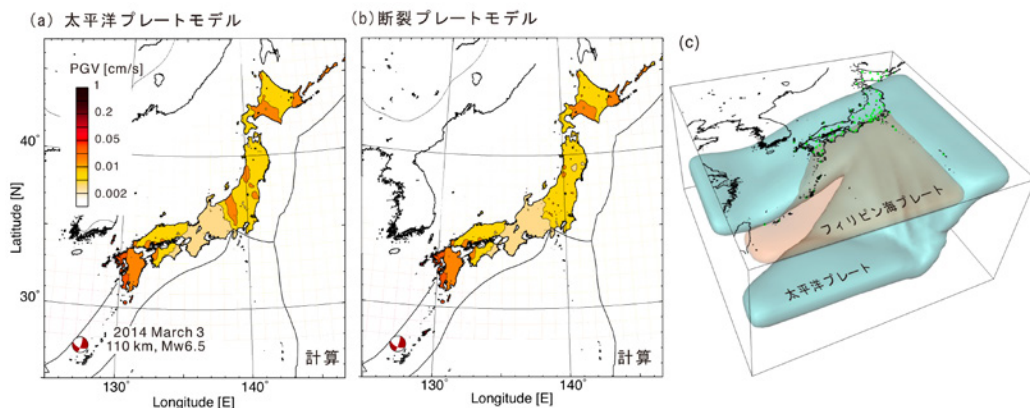
もし、太平洋プレートがこの位置で切れているならば、上で議論したプレート上面でのS波の反射や、プレートを通過する際の屈折現象は起きず、琉球海溝のやや深発地震で見られる中部日本や北海道の大きな揺れは発生しない(図4b)。このことから、日本列島下に沈み込んだ太平洋プレートは引き伸ばされ薄化していたとしても、完全には断裂して消失してはいないと結論づけられる。

4.2 1911年喜界島地震は深いor浅い地震か？

琉球海溝で発生した有史以来最大級の地震である1911年喜界島地震(M8.0)は、その位置と深さが良く分かっていない。これまで、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う深い(100-250 km)地震と一般に考えられてきたが、地震観測データの再解析や津波の伝承に基づき、浅い地震の可能性も議論されている[6]。沖縄諸島周辺では、過去100年にM8級の巨大地震は起きておら

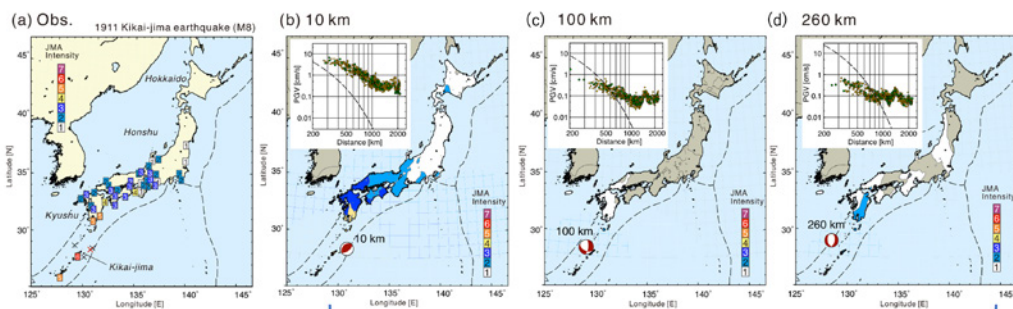
ず、海と陸の浅いプレート境界にひずみが溜まらない場所なのか、あるいは津波を伴う巨大地震が起きうる場所かを判断する上で、1911年喜界島地震の深さは重要な指標である。

そこで、喜界島を震源とする深さ10、100、260 kmの地震について、近年の中小地震の活動を参考に震源断層モデルを用意し、OpenSWPCによりM8.0規模の地震の地震波伝播シミュレーションを行い震度分布を求めた(図5)。結果、図1に示した琉球海溝のやや深発地震と同様に、震源が深い(260キロ)地震では中部日本と東北に大きな震度の飛び地が現れた。一方、浅い(10キロ)地震では、九州～関東～東北の広範囲が有感(≧震度1)となり、震度は距離とともに単調に低下した。1911年喜界島地震の震度分布は深さ10 kmの地震のものに整合する。



第4図: 琉球海溝のやや深発地震による地動分布の計算結果の比較

(a) 太平洋プレートモデルによるFDM計算結果(最大地動分布)、(b) 中部日本～日本海下にかけて太平洋プレートが断裂したモデルによる計算結果、(c) 断裂プレートモデルの模式図。



第5図: 1911年喜界島地震(M8)による震度分布とシミュレーション結果の比較

(a) 1911年喜界島地震における震度分布、(b)-(d) 深さ10、100、260 kmの地震による震度分布(FDMシミュレーション結果)と最大地動の距離減衰特性。

5. まとめ

琉球海溝のやや深発地震において、日本列島に特異な震度分布が現れる現象を、Wisteria-o スパコンを用いた地震波伝播シミュレーションから確認した。近年の日本列島の高密度地震観測で確認される特徴的な波動現象と、高性能スパコンを用いた地震波伝播シミュレーションから、地球深部構造を推定し、そして過去と未来の大地震の揺れと被害を予測して災害軽減への貢献が期

待できる。

謝 辞

本研究では、Wisteria/BDEC-01 の大規模 HPC チャレンジの援助を受けました。富士通株式会社及び東京大学情報基盤センターより OpenSWPC の性能チューニングに関してアドバイスをいただきました。防災科学技術研究所の Hi-net, F-net 観測網による地震波形データを使用しました。

参 考 文 献

- [1] Furumura, T. and BLN Kennett: “Distinctive seismic reflections from the subducting Pacific slab for earthquakes in the Ryukyu arc”, *Geophysical Journal of International*, 233 (2), 1213-1228, 2022.
- [2] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2019b: “NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience”, doi:10.17598/NIED.0003.
- [3] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2019b: “NIED F-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience”, doi:10.17598/NIED.0005.
- [4] Maeda, T., S. Takemura and T. Furumura: “OpenSWPC: An open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media”, *Earth Planets Space*, 69, 102, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0687-2>, 2017.
- [5] Koketsu, K., Miyake, H. & Suzuki, H.: “Japan Integrated Velocity Structure Model Version 1”, In: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 24-28 September, Paper 1773, 2012.
- [6] 後藤 和彦: “1911 年に喜界島近海で発生した巨大地震の震源位置の再評価”, *地震*, 2, 65, 231-242, <https://doi.org/10.4294/zisin.65.231>, 2013.