

2 (3) (3 - 2) 地震破壊過程と強震動

「地震破壊過程と強震動」計画推進部会長 古村孝志
(東京大学大学院情報学環／地震研究所)

地震津波観測データの解析に基づき、大地震の震源破壊過程を詳しく調べることは、大地震の発生過程と強震動の生成過程の理解を深め、将来の大地震の強震動と津波の発生予測の高度化につながる。また、断層面上の大滑り域や強震動生成域の関係や、地震毎の繰り返し性から、これらの領域の周辺の応力状態や断層の強度に関する特徴を知り、地震発生予測に向けた重要な基礎データを得ることができる。さらに、大地震発生直後に観測データを即時解析し、震源域の広がりや破壊過程を正確に求めることにより、強震動の面的広がりを把握し、そして沿岸の津波到達・浸水予測が可能になる。

大地震による強震動と津波の発生を予測し、地震津波災害軽減を目的として、昨年度(平成23年度)に引き続き2011年東北地方太平洋沖地震の強震動、GPS、津波観測データの詳細な解析による、地震前後の地震活動の推移、本震の動的破壊特性、強震動および長周期地震動の生成に関する総合的な研究が進められた。また、M9地震の震源過程の即時解析と、沿岸津波高・浸水域の即時推定に向けた開発研究が進められた。

東北地方太平洋沖地震の動的破壊過程の解析では、M9地震の複雑な破壊成長過程を、4つの階層を持つパッチモデルを用いて説明する試みが行われた。まず、東北地方沖の地震活動からパッチモデルを作成し、断層面上の摩擦パラメータ(Dc)をパッチサイズから設定して、これに3月9日の前震に伴う応力集中を断層面上に与えて動的断層破壊シミュレーションを行い、本震時の断層破壊運動を再現できることが示された(東大理[課題番号:1503]、Ide and Aochi, 2012)。過去に東北地方沖で発生したM7級の地震活動を詳しく調べたところ、1) 1968年十勝沖地震発生後の一ヶ月間のM7級の余震の移動方向、2) 1978年・1981年・2011年の宮城県沖地震の震源移動方向、3) 1938年福島県東方沖の地震発生後の5ヶ月の余震活動の移動方向、のいずれもが東北地方太平洋沖地震の大きな滑り域に向かっていったという解釈が示された。また、これらの地震の余震活動についても、東北地方沖のM7～8級の過去地震の大きな滑りが(アスペリティ)の場所に向かって移動した傾向も確認できた(東北大[課題番号:1211]、内田・松澤, 2012)。こうした大地震の震源移動とその余震の震源移動の特徴は、大地震の発生前後にアスペリティ内部への滑りの浸食が起こっている可能性を意味している。大地震の発生予測可能性を探るために、こうした新たな視点から過去地震の詳細な破壊過程と余震活動の再解析が急務である。

東北地方太平洋沖地震の震源域近傍での海底圧力計データの解析から、3月9日・10日の前震の後、余効滑りが本震の震源方向に向かう進行過程が見えてきた(図1; 東北大[課題番号:1211]、内田・松澤, 2012)。また、強震波形とGPSデータを用いた震源過程解析から、本震から30分後に発生した茨城県沖の地震の断層滑りが、太平洋プレートとフィリピン海プレート境界と、震源域の東側にある海山に挟まれた場所に限定されていることが示され、プレート境界と海山が断層滑りを止めた可能性が議論された(図2; 京大防災研[課題番号:1812])。大地震の発生場所と規模(震源域の広がり)を海底地形やプレート構造などの地理的要因から規定できる可能性がある。

東北地方太平洋沖地震では、厚い堆積層(3000m以上)に覆われた大阪平野において、

周期6.5秒前後の長周期地震動が強く増幅され、湾岸の埋め立て地にある55階建ての大阪府咲島庁舎が最大137cm(片振幅)の大きさを長く揺れたことが問題となった。いっぽう、此花地点での長周期地震動の増幅率は、2004年紀伊半島南東沖地震(M7.4)や2000年鳥取県西部地震(M7.3)と同様に周期3秒と6秒で30~40倍程度であり、特異なものではなく、SH波の多重反射モデルから予測される理論増幅率と良く一致した(東大地震研[課題番号:1424])。全国の強震観測データと大阪平野の高密度強震観測データの解析により、咲島での大きく長い揺れが2つの波群から構成されることが示され、2つ目の波群は濃尾平野で二次的に発生した表面波であることが確認された(京大防災研[課題番号:1812,1813]、Sato, Asano, and Iwata, 2012)。全国強震観測により、平野における長周期地震動の増幅に加え、複雑な伝播経路による増幅と増長メカニズムが明らかになったと言えよう。強震観測データの蓄積と地下構造(堆積層)の理解により、将来の大地震の長周期地震動を事前に高い確度で推定できることも確認された。

M9クラスの巨大地震の規模(M)の即時推定と津波予測の高度化に向け、日本列島の震度の広がりから震源域の広がりを見極める方法や、周期数百秒以上の長周期地震動成分の震幅を用いたMの推定の実用性の検討が進められた。津波警報の迅速な発令に向けて、2~3分以内のMの即時推定を目標に、P波部分を用いて即座にMwを推定する手法や、W-phaseを解析して震源とMをグリッドサーチにより推定する手法が開発され、東北地方太平洋沖地震により検証が行われた(図3; 気象庁[課題番号:7024])。

津波の即時解析に向けた研究では、既存の沖合GPS波浪計や海底ケーブル津波計に加え、海溝軸を越えた沖合に津波観測点を数点増強するだけで、地震発生後20分程度での観測データから波源域の推定と、北海道~房総半島沖の沿岸津波到達予測の精度が大きく向上することが示され、東北地方太平洋沖地震の津波シミュレーションをもとに有効性の検討が行われた(図4; 気象庁[課題番号:7021])。現在の沿岸津波観測点は大地震が発生する海溝(トラフ)側から見て一方向にしか無いため、波源の広がりを正しく推定するためには震源を取り囲むような観測網の増強が有効である。津波は波長が数十~数百キロメートルと長いため、比較的観測点間隔が粗くても津波予測への改善効果は大きい。

津波浸水は沿岸の津波波形が分かれば十分に予測が可能であり、波源の場所や断層パラメータは必ずしも必用ではない。こうした視点から、津波の即時浸水予測の新たな手順が検討された。まず、地震発生直後に津波シミュレーションにより沿岸の津波波形を求め、予め数多く行ないデータベース化された津波浸水シミュレーションの中から、沿岸の津波波形が対応するものを選び出し、その先に起きる津波浸水を予測する。その有効性は、根釧平野での津波浸水シミュレーションにより示された(北大[課題番号:1006])。

大地震の地震動や津波の発生過程の理解と、強震動・津波の事前予測に力を発揮するシミュレーション技術についても大きな進展があった。2008年より本格運用が開始された「京」コンピュータにおいて、最大規模の82,944CPUを用いた地震波伝播の差分法シミュレーションが行われ、2.09PFLOPSの演算性能が得られた。これは、地球シミュレータを用いた従来のシミュレーションの40倍の性能に相当する。京コンピュータを用いて東北地方太平洋沖地震の強震動、水中音波、地殻変動の同時シミュレーションが行われ、釜石沖海底ケーブル津波計データやK-NET強震観測データとシミュレーション結果の比較から、複雑な断層運動に伴う強震動と津波の生成過程の評価が進められた(図5; 東

大地震研 [課題番号：1424]、Maeda et al., 2013)。

地震波計算技術の進展により、不均質な地殻・マントル構造とプレート構造を考慮して求めた3次元グリーン関数により、東北地方太平洋沖地震、1995年兵庫県南部地震の詳細な再解析が行われ、また2003年と1952年十勝沖地震の再解析が進められた(東大地震研 [課題番号：1422]、小林・瀨瀬・三宅・金森、2013)。震源モデルの詳細化には、近地強震計記録の短周期成分を用いた解析が必要になり、3次元的に不均質な地下構造を適切に評価したグリーン関数を用いた震源解析が今後進展するものと思われる。

これまでの課題と今後の展望

地震破壊過程と強震動の高精度即時震源解析と推定に向け、近年の高密度強震観測網とGPS地殻変動観測網、沖合ケーブル津波計など、大地震の強震動と津波をリアルタイムで観測・データ流通システムが整備された。こうした高密度・高精度観測データの解析のために、高速シミュレーション技術を用いた即時震源解析や津波波源域の推定に加え、さらに時間経過とともに入電する新たなデータを用いたデータ同化と逐次予測修正による津波予測の高度化のための研究が大きく前進した。

リアルタイム予測では、予測の時間短縮が最優先課題である。時間のかかる観測データからの震源と波源の推定(逆解析)を待たずに、観測データから直接的に未来の地震・津波波動場の時間発展を予測するような、あらたな予測の考え方が生まれつつある。これは、日本の高密度・高精度観測とデータ同化・高速シミュレーション技術により可能になるものである。また、P波初動部の特性から経験的に地震の震源距離やMを推定する方法など、たとえ震源物理に基づく理論的背景が弱くても、現行の緊急地震速報のように十分に実用的なものもある。即時予測システムの社会実装に向け、こうした経験的手法についても評価し、理論的背景の裏付けによる高度化の手助けとなる研究が必用であろう。

成果リスト

青木重樹, 吉田康宏, 勝間田明男, 干場充之, 2012, 強震動の継続時間から見た平成15年(2003年)十勝沖地震とその最大余震の破壊伝播特性, 地震2, 65, 163-174.

Chen, K., B.L.N. Kennett and T. Furumura, High frequency waves guided by the subducted plates underneath Taiwan and their association with seismic intensity anomalies, J. Geophys. Res., in press, 2012.

郭雨佳・瀨瀬一起, 2012, 三次元グリーン関数を用いた1995年兵庫県南部地震の震源過程の再解析, 日本地震学会講演予稿集2012年秋季大会, P3-59.

Gusman, A. R., Y. Tanioka, S. Sakai, and H. Tsushima, 2012, Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data, Earth and Planetary Science Letters, 341-344, 234-242, doi:10.1016/j.epsl.2012.06.006.

林豊, 対馬弘晃, 平田賢治, 木村一洋, 前田憲二, 2012, 沖合津波観測値からの逆伝播で推定した津波波源域, 気象庁技術報告第133号「平成23年(2011年)東北地方

- 太平洋沖地震調査報告」, 第 I 編 112-114.
- Hayashi, Y., S. Koshimura, and F. Imamura, 2012, Comparison of decay features of the 2006 and 2007 Kuril Island earthquake tsunamis. *Geophys. J. Int.*, 190, 347-357, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05166.x.
- Ide, S., and H. Aochi, 2012, Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, in press.
- Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, 2012, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 117, B07409, doi:10.1029/2012JB009186.
- Iwakiri, K. and M. Hoshihara, 2012, High-Frequency (>10Hz) Content of the Initial Fifty Seconds of Waveforms from the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102, 2232-2238.
- Katsumata, A., H. Ueno, S. Aoki, Y. Yoshida and S. Barrientos, 2013, Rapid magnitude determination from peak amplitudes at local stations, *Earth Planet Space*, submitted.
- 小林広明・瀬瀬一起・三宅弘恵・金森博雄, 2012, 1952年と2003年十勝沖地震の震源過程 (2), 日本地球惑星科学連合 2012年大会, SSS28-P13.
- 久保久彦・浅野公之・岩田知孝, 2012, 2011年3月11日15時15分の茨城県沖地震 (Mw7.9) の震源過程, 日本地震学会 2012年度秋季大会予稿集, A21-08.
- Kubo, H., K. Asano, T. Iwata, and Y. Takehi, 2012, Rupture Processes of the 2011 Tohoku Earthquake and the 2011 Ibaraki-Oki Earthquake, *AGU Fall meeting*, S33A-2509.
- Maeda, T., T. Furumura, S. Noguchi, S. Takemura, S. Sakai, M. Shinohara, K. Iwai and S. J. Lee, Seismic and tsunami wave propagation of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake as inferred from the tsunami-coupled finite difference simulation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, in press, 2013.
- Okada T., Umino, T., Hasegawa A., and Group for the aftershock observations of the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, 2012, Hypocenter distribution and heterogeneous seismic velocity structure in and around the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, NE Japan—Possible seismological evidence for a fluid driven compressional inversion earthquake, *Earth Planets Space*, 64, doi: 10.5047/eps.2012.03.005.
- Oishi, Y., M.D. Piggott, T. Maeda, S.C. Kramer, G.S. Collins, H. Tsushima and T. Furumura, Three-dimensional tsunami propagation simulations using an unstructured mesh finite element, *J. Geophys. Res.*, in press, 2013.
- Padhy, S., S. Takemura, T. Takemoto, T. Maeda and T. Furumura, Spatial and temporal variations in coda attenuation associated with the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku, Japan (Mw 9) Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, in press, 2012.
- Poiata, N., H. Miyake, K. Koketsu, and K. Hikima, 2012a, Strong-motion and

- teleseismic waveform inversions for the source process of the 2003 Bam, Iran, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102, 1477-1496.
- Poiata, N., K. Koketsu, A. Vuan, and H. Miyake, 2012b, Low-frequency and broad-band source models for the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake, *Geophys. J. Int.*, 191, 224-242.
- Romano, F., A. Piatanesi, S. Lorito, N. D'Agostino, K. Hirata, S. Atzoril, Y. Yamazaki & M. Cocco, 2012, Clues from joint inversion of tsunami and geodetic data of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Sci. Rep.* 2, 385; DOI:10.1038/srep00385.
- Sato, K., K. Asano, and T. Iwata, 2012, Long-period Ground Motion Characteristics of the Osaka Sedimentary Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake, *Proc. 15th World Conf. Earthq. Eng.*, Lisbon, Portugal, paper no. 4494.
- Shinohara, M., Y. Machida, T. Yamada, K. Nakahigashi, T. Shinbo, K. Mochizuki, Y. Murai, R. Hino, Y. Ito, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Yakiwara, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, K. Hirata, H. Tsushima, and Takaya Iwasaki, 2013, Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake revealed by ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, in press.
- Suzuki, W., S. Aoi, H. Sekiguchi, and T. Kunugi, 2012, Source rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake derived from the strong-motion records, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1650.
- Takemoto, T., T. Furumura, T. Saito, T. Maeda, and S. Noguchi, Spatial- and Frequency-Dependent Properties of Site Amplification Factors in Japan Derived by the Coda Normalization Method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102, 4, 1462-1476, 2012.
- Takemura, S. and T. Furumura, Scattering of high-frequency P wavefield derived by dense Hi-net array observations in Japan and computer simulations for seismic wave propagations, *Geophys. J. Int.*, in press, 2013.
- 対馬弘晃, 平田賢治, 林 豊, 前田憲二, 尾崎友亮, 2012, 沖合津波観測点配置の違いが逆解析に基づく近地津波予測の精度に与える影響, *土木工学論文集 B2(海岸工学)*, 68(2), I_211-I_215.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, K. Shimamura, and A. Hasegawa, 2012, Source parameters of microearthquakes on an interplate asperity off Kamaishi, NE Japan over two earthquake cycles, *Geophys. J. Int.*, 189, 999-1014.
- Yabe, S., and S. Ide, 2012, Repeating deep tremors on the plate interface beneath Kyushu, southwest Japan, *Earth Planet Space*, in press.
- Yokota, Y., Y. Kawazoe, S. Yun, S. Oki, Y. Aoki, and K. Koketsu, 2012, Joint inversion of teleseismic and InSAR datasets for the rupture process of the 2010 Yushu, China, earthquake, *Earth Planets Space*, 64, 1047-1051.
- 横田裕輔・瀨瀨一起, 2012, 三次元グリーン関数を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震

の震源過程解析，日本地球惑星科学連合 2012 年大会，SSS39-15.