

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ることができ、これらの知見は地震発生予測に向けた重要な基礎データとなる。さらに、大地震発生直後に観測データの即時解析により、震源域の広がりや破壊過程を正確に推定し、強震動の面的広がりを把握し、沿岸の津波到達・浸水予測を行う手法を、地震津波解析技術、データ流通技術、高速計算技術を駆使して開発することが、災害軽減に向け重要である。こうした目的に向けて、平成23年度は2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程解析に基づく強震動と巨大津波生成過程の解明と、本巨大地震の震源過程の即時解析、そして沿岸津波高と浸水域の即時推定に向けた解析手法の開発研究が進められた。

東北地方太平洋沖地震の震源過程解析では、日本の高密度強震観測網で捉えられた強震波形記録や、GPS地殻変動観測データ、遠地実体波記録を統合的に用いたインバージョンにより詳細な検討が行われた(東大地震研[課題番号:1422], Koketsu et al., 2011)。その結果、震源の破壊開始点付近で20~30 m以上の大きな滑りが確認されるなど、これまで日本海溝で存在が分かっていた複数の震源域のアスペリティが複合的に破壊した地震ではなかったことが示された。また、津波波形解析からは、海溝寄りの浅部プレート境界で55mを越える超大滑りが推定され、強震動の生成域と津波(海底地殻変動)生成域が異なることが明らかとなった。また、遠地実体波を用いた経験的グリーン関数法に基づく震源解析からは、プレート境界深部の陸寄りの場所から、数Hz以上の高周波数地震動が強く放射され、また海溝寄りの浅部プレート境界付近では過剰滑りを起こした結果大きな滑りが発生するとともに、ここからは1 Hz程度以下の低周波数地震動が強く放射されたことが示された(東大[課題番号:1503], Ide et al., 2011)。同様に、近地強震記録を用いた経験的グリーン関数解析に基づく解析結果からも、陸寄りの深部プレート境界上に強震動(高周波数地震動)生成域が確認され、その場所は宮城県沖地震や茨城県沖地震などの従来知られていたM7級地震のアスペリティに対応する可能性が示された(京大防災研[課題番号:1812; Asano and Iwata, 2012])。

東北地方太平洋沖地震前から繰り返し観測されていた釜石沖の小繰り返し地震(M4.7程度)が、地震後に地震規模が拡大(M4.9~5.9程度)、発生間隔も短くなっていることが報告された。その原因として、小繰り返し地震の発生域周辺は条件付き安定滑り領域にあたり、地震の余効滑りにより効力状態が攪乱された可能性が指摘された(東北大[課題番号:1211])。

異なる断層面の破壊の乗り移りと断層の連動破壊は、連動型巨大地震の発生原因を探るための重要な課題である。2000年鳥取県西部地震と2009年駿河湾地震について、近地P波記録を用いた破壊伝播のイメージングが行われ、破壊の乗り移り過程と高周波数地震動の放射のメカニズムが提唱された(九大[課題番号:2204])。

巨大地震の規模(M)の即時推定と津波予測等の高精度化に向けて、全国の強震観測記録から強震域の広がりを見る考え方、強震動の継続時間から震源域の広がりやMを推定する方法、周期数百秒以上の長周期成分を使った巨大地震のM推定等について、東北地方太平洋沖地震(M9)と十勝沖地震等のM8

級地震の観測データを用いた有効性の検討が行われた（気象庁 [課題番号：7024]）。全国強震観測記録を用いた即時震源過程解析の実用化に向け、強震波形データを自動収集して、F-netやHi-net即時震源メカニズム解（AQUA）を初期値として、強震波形インバージョンを自動で行うシステム整備が昨年度に継続して進められた。今年度は、自動推定された震源モデルを用いて遠地実体波を計算、観測記録との比較から解析結果の検証を行うなどシステムが強化された（防災科研[課題番号：3013]）。

津波の即時解析に向けた研究として、東北地方太平洋沖地震の沖合GPS波浪計や海底ケーブル津波計記録の、津波第一波の山の部分を逆伝搬させ、津波波源域を即時に推定する手法の有効性が示された（気象庁[課題番号：7021]）。近地広帯域地震計記録のW-phaseインバージョンにより断層パラメータを推定し、断層サイズと滑り量を地震のスケーリング則から見積り、津波シミュレーションにより沿岸の津波高と津波遡上域の推定をリアルタイムに行うほか、時間経過とともに新たなデータを取り入ながら予測を修正実施する手法が検討された（北大 [課題番号：1006]）。また、GPSと沖合津波計を併合した津波予測システムとして、まず陸上のリアルタイムGPS観測データ解析から初期断層モデルと震源域直上の初期海面変動を推定し、次に沖合津波観測データを用いて震源モデルの修正と沿岸津波の予測修正を逐次的に行う手法の有効性も提唱された（東北大 [課題番号：1212]）。

海溝型巨大地震による強震動、水中音波、地殻変動、そして津波の全てを統一的に再現することのできる地震-津波同時シミュレーション法を新たに開発し、地球シミュレータ等のスパコンを用いた高速計算により、東北地方太平洋沖地震の強震動と津波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に記録された二段階の津波成長過程と断層運動の関係が検討された（図1；東大地震研 [課題番号：1424], Maeda et al., 2011）。

これまでの課題と今後の展望

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とにより、即時震源解析や津波波源域の推定だけでなく、更に時間経過とともに入電する新たなデータを用いた予測の逐次修正を行うための環境が大きく進化した。こうしたリアルタイム観測と高速計算システムの活用により、大地震の即時震源解析と強震域・被害域の広がり の把握、沿岸への津波の到来及び浸水域の予測技術が大きく進み、地震津波防災情報の提供に向けて大きく貢献することが期待できる。こうした実用化直前の技術については、防災機関等と連携して社会実装に向けた更なる実用化研究が望まれる。

東北地方太平洋沖地震の震源解析により推定された大滑り域及び巨大津波発生域は、これまで知られていたM7~8級の地震の大滑り域（アスペリティ）とは異なることがわかり、既知のアスペリティ領域は本地震時の強震動（大加速度）生成域となった可能性が示された。こうした大地震の階層性や巨大地震のスケーリング則、そして巨大地震の震源モデルの考え方（レシピ）について再検討が必要である。また、頻度の高いM7~8級の地震が繰り返し発生する場において、東北地方太平洋沖地震のように、頻度は低いが甚大な災害を引き起こすM9地震が発生するという地震発生サイクルの複雑さも改めて認識された。こうした巨大地震の発生は通常地震発生サイクルの中でどのような条件により起きるのか、また、日本海溝や他の沈み込み帯における最大限の地震規模とその頻度をどのように考えるかについて検討が必要である。

こうした課題は、本部会の震源過程解析に基づく研究にとどまらず、予知研究全体の共通の重要かつ緊急の課題であり、そのためには地震観測や地震発生シミュレーションなど、多面的な検討が必要である。議論を部会に閉じることなく、部会を横断する短期プロジェクトの立ち上げと、時間をかけない1~2年以内の集中した議論と、課題解決に向けた今後の研究の方向性付けの検討が必要であ

ろう。

引用文献

- Asano, K. and T. Iwata (2011). Strong Ground Motion Generation during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, AGU 2011 Fall meeting, U42A-03.
- Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza (2011), Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 332, 1426-1429.
- Koketsu, K., Y. Yokota, N. Nishimura, Y. Yagi, S. Miyazaki, K. Satake, Y. Fujii, H. Miyake, Y. Yamanaka, S. Sakai, and T. Okada, 2011, A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310, 480-487.
- Maeda, T., T. Furumura, S. Noguchi, S. Takemura, K. Iwai, S.-J. Lee, S. Sakai, and M. Shinohara, A unified numerical simulation of seismic ground motion, ocean acoustics, coseismic deformations and tsunamis of 2011 Tohoku earthquake, AGU Fall meeting 2011, San Francisco, December 2011.

参考文献

- Aochi, H., S. Ide (2011), Conceptual multi-scale dynamic rupture model for the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planets and Space*, 63, 761-765, 2011.
- Furumura, T., S. Takemura, S. Noguchi, T. Takemoto, T. Maeda, K. Iwai, and S. Padhy, Strong Ground Motions from the 2011 Off- the Pacific- Coast- of- Tohoku, Japan (Mw=9.0) Earthquake Obtained from a Dense Nation-wide Seismic Network, *Landslides*, 8, 3, 333-338, 2011.
- Gusman, A. R., Y. Tanioka, and T. Takahashi, Numerical experiment and a case study of sediment transport simulation of the 2004 Indian Ocean tsunami in Lhok Nga, Banda Aceh, Indonesia, *Earth Planet Space*, 2012, in press.
- Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza (2011), Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 332, 1426-1429.
- Ide, S. (2012), Variety and spatial heterogeneity of tectonic tremor worldwide, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JB008840, in press.
- Inazu, D. and R. Hino, Temperature correction and usefulness of ocean-bottom pressure data from cabled seafloor observatories around Japan for analyses of tsunamis, ocean tides, and low-frequency geophysical phenomena, *Earth Planets Space*, 63, 1133-1149, 2012.
- Koketsu, K., and Y. Yokota, 2011, Supercycles along the Japan Trench and foreseeability of the 2011 Tohoku earthquake, 2011 AGU Fall Meeting, Abstract U33C-03.
- Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara, Significant slip on shallow portion of the fault to develop significant tsunami of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planet and Science, Earth Planets Space*, 63, doi:10.5047/eps.2011.06.005, 2011.
- Maeda, T., K. Obara, T. Furumura, and T. Saito, Interference of long-period seismic wavefield observed by dense Hi-net array in Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2011JB008464, 2011.
- Maeda, T., and T. Furumura, FDM Simulation of Seismic Waves, Ocean Acoustic Waves, and Tsunamis Based on Tsunami-Coupled Equations of Motion, *Pure Appl. Geophys.*, accepted, 2011.
- Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiatek, T. Igarashi, and K. Plenkens, Twenty thousand aftershocks of a very small (M2) earthquake and their relation to the mainshock rupture and geological structures, *Bull. Seism. Soc.*

- Am., 101(5), 2399-2407, doi: 10.1785/0120100346, 2011.
- Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura, FDM simulation of an anomalous later phase from the Japan Trench subduction zone earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, accepted, 2011.
- Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Inuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, N. Umino, Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake (Mw 9.0), *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JB008750, 2012.
- Saito, T., Y. Ito, D. Inazu, and R. Hino, Tsunami source of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Japan: Inversion analysis based on dispersive tsunami simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G19, doi:1029/2011GL049089, 2011.
- Shimamura, K., T. Matsuzawa, T. Okada, N. Uchida, T. Kono, and A. Hasegawa, Similarities and Differences in the Rupture Process of the M~4.8 Repeating-Earthquake Sequence off Kamaishi, Northeast Japan: Comparison between the 2001 and 2008 Events, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(5), 2355-2368, 2011.
- Shinohara, M., T. Yamada, K. Nakahigashi, S. Sakai, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Ito, R. Azuma, Y. Kaiho, T. No, H. Shiobara, R. Hino, Y. Murai, H. Yakiwara, T. Sato, Y. Machida, T. Shinbo, T. Isse, H. Miyamachi, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaneda, K. Hirata, S. Yoshikawa, K. Obara, T. Iwasaki, and N. Hirata, 2011, Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, in press.
- Suzuki, W., S. Aoi, H. Sekiguchi, and T. Kunugi, Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki mega-thrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G16, 2011.
- Takemoto, T., T. Furumura, T. Saito, T. Maeda, and S. Noguchi, 2012, Spatial- and frequency-dependent properties of site amplification factors in Japan derived by the coda normalization method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, accepted.
- Tanioka, Y., and A.R. Gusman, Slip distribution of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *The 7th Taiwan-Japan Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation in 2011 – Typhoon MORAKOT & 311 Earthquake in Japan*, ed. C. Shieh, published DPRC, NCKU, 1-9, 2011.
- Tsushima H., K. Hirata, Y. Hayashi, Y. Tanioka, K. Kimura, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa, R. Hino, and K. Maeda, Near-field tsunami forecasting using offshore tsunami data from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 821-826, 2011.
- Tsushima, T., R. Hino, Y. Tanioka, F. Imamura, and H. Fujimoto, Tsunami waveform inversion incorporating permanent seafloor deformation and its application to tsunami forecasting, *J. Geophys. Res.*, 2012, in press.
- Utada, H., H. Shimizu, T. Ogawa, T. Maeda, T. Furumura, T. Yamamoto, N. Yamazaki, Y. Yoshitake, and S. Nagamach, Geomagnetic field changes in response to the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 10.1016/j.epsl.2011.09.036, 2011.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, K. Shimamura, and A. Hasegawa, Source parameters of microearthquakes on an interplate asperity off Kamaishi, NE Japan over two earthquake cycles, *Geophys. J. Int.*, 2012, in press.
- Uchida, N., and T. Matsuzawa, Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data, *Earth Planets Space*, 63 (No. 7), 675-679, doi:10.5047/eps.2011.07.006, 2011
- Yoshida, Y., H. Ueno, D. Muto, and S. Aoki, 2011, Source process of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku

earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data, *Earth Planets Space*, Vol. 63 (No. 7), pp. 565-569.

Yokota, Y., K. Koketsu, Y. Fujii, K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara and T. Kanazawa, 2011, Joint inversion of strong motion, teleseismic, geodetic, and tsunami datasets for the rupture process of the 2011 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G21, doi:10.1029/2011GL050098.

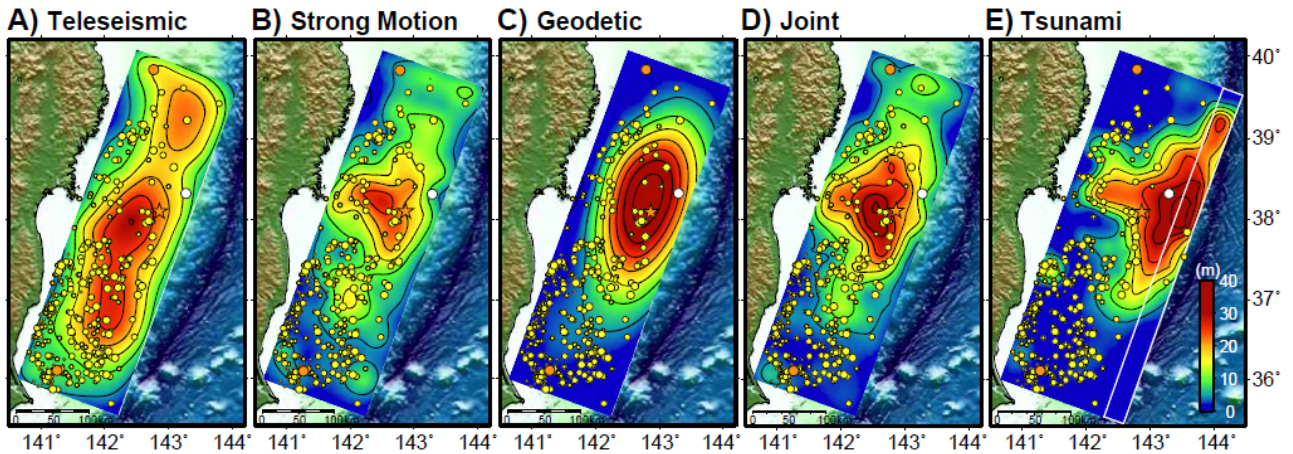


図1. 2011年東北地方太平洋沖地震の統合震源モデル (Koketsu et al., 2011)。

左から(A) 遠地, (B) 強震, (C) 測地, (D) 遠地・強震・測地ジョイント, (E) 津波の震源インバージョン (東大地震研[課題番号:1422], Koketsu et al., 2011)。

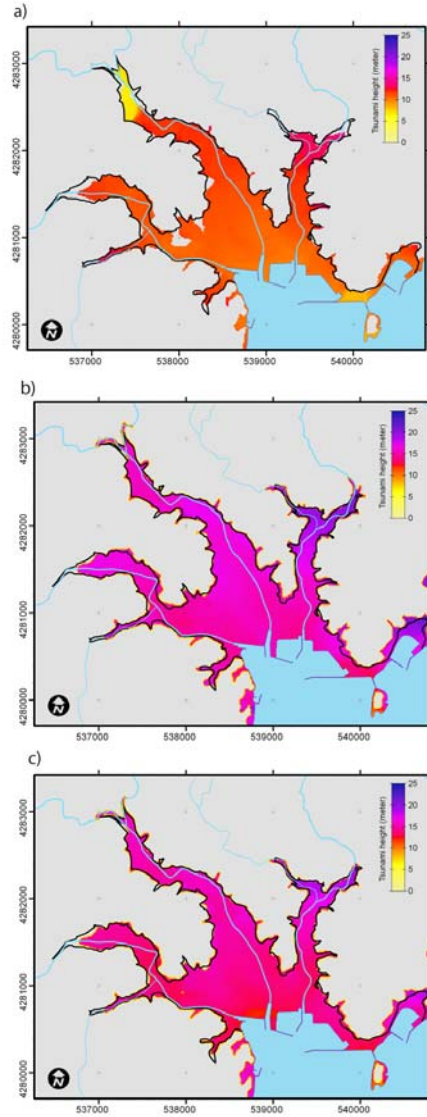


図2 南三陸町での津波遡上予測結果。上段) 地震発生から5分間の地震波形から推定された断層モデルから計算された津波遡上域と津波高。中段) 地震発生から10分間の地震波形から推定された断層モデルから計算された津波遡上域と津波高。下段) 遠地波形も含めた断層モデルから計算された津波遡上域と津波高。太線は東北地方太平洋沖地震の津波遡上域(北大[課題番号:1006])。

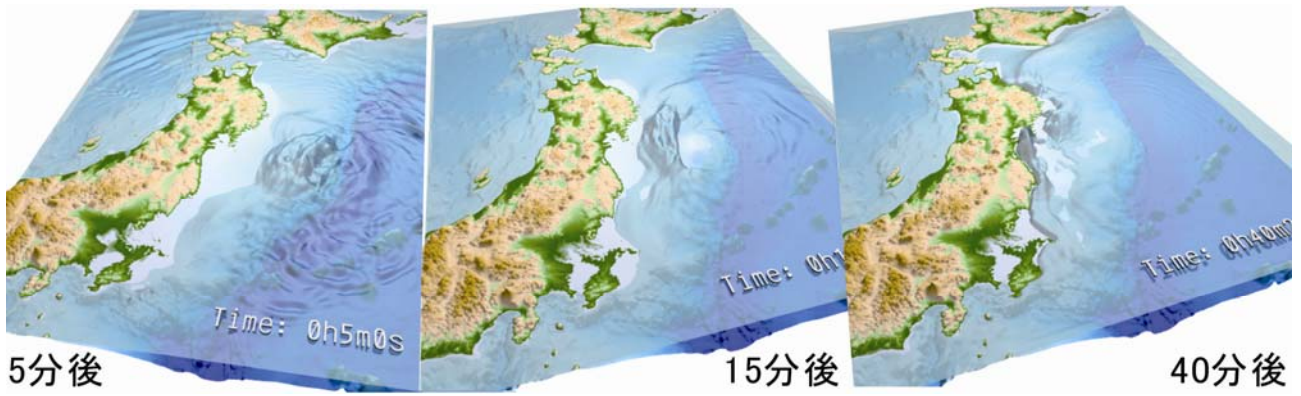


図3 東北地方太平洋沖地震の地震—津波同時シミュレーション
 地震発生から5分、15分、40分後の地震動（海中音波）、海底地殻変動、津波の発生伝播の様子（東大地震研 [課題番号：1424]）。