

## 12-4 2011年東北地方太平洋沖地震—津波観測からの描像と展望

### The 2011 Tohoku earthquake: Imaging and perspectives from tsunami observations

佐竹 健治 (東京大学地震研究所)

Kenji Satake (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

#### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震については、これまで地震波・GPS・津波などのデータを使って断層面上のすべり分布が推定されてきた。これらの結果に共通するのは、震央付近の宮城県牡鹿半島の沖合で大きなすべりが発生したこと(第1図)であるが、いくつか未解決の問題もあった。すべりが最大となるのはプレート境界最浅部の海溝軸付近なのか、やや離れたある程度深い位置なのか? 沿岸の津波高さが、震央よりも約100 kmも北の岩手県沿岸で最大になったのはなぜなのか? 2011年地震のひとつ前の地震とされる869年貞観地震の際にも、海溝軸付近が大きくすべったのか? などである。

#### 2. 観測された津波とインバージョン

2011年津波の沿岸における痕跡高は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによって約5900点で測定され、沿岸での痕跡高が10 mを超える地域が500 km以上、20 mを超える地域も200 kmにわたることが知られている<sup>1)</sup>。また、津波の遡上高は、震央やすべりが最大であった宮城県沖より約100 kmも北の北緯39~40°の岩手県沿岸で最大であった(第1図)。

津波波形は、沿岸の検潮所に加えて、沖合のGPS波浪計(沖合10 km, 水深200 m程度)や深海のケーブル式海底水圧計(沖合40~70 km, 水深1000~1600 m)でも記録された。これらの波浪計や水圧計ではサンプリング間隔が数秒以下と、従来に比べて高い時間分解能で水面変化が記録された。

従来の津波波形インバージョン法<sup>3)</sup>では、断層面上のすべりは同時に発生するとしてその空間分布のみを推定していた。2011年東北地方太平洋沖地震については、波源域近くの沖合で時間分解能の高い津波波形が記録されたことから、マルチウインドウインバージョンによって、すべり分布の空間分布に加えて時間変化も推定することができた<sup>4)</sup>。人工的なデータで分解能を調べた上で、小断層の大きさは50 km四方を基本として、海溝軸付近だけ半分の幅とした。また、各地点における破壊開始時間から30秒ごとの時間変化を調べた。

#### 3. すべりの時空間分布

インバージョン結果(第2図)によると、破壊発生後約2.5分後にプレート境界のやや深部で25 m以上の大きなすべりが、さらに地震発生から約3分後に海溝軸付近で巨大なすべり(最大69 m)が発生した。この巨大なすべりは北へ広がり、海溝軸付近では20 m以上のすべりが地震発生から約4分後に発生した。また、最終的なすべりの空間分布をみると、すべりは海溝軸に向かって大きくなっていった。

長さ550 km, 幅200 kmの断層面上での平均すべり量は9.5 mで、地震モーメントは $4.2 \times 10^{22}$  Nm ( $M_w = 9.0$ )と推定された。震源より北の海溝軸付近ですべりが遅れて発生したことを考慮することによって、波源域北部で観測された津波波形や沿岸での津波高分布を再現することができた(第3図)。

#### 4. 過去の地震断層モデルとの比較

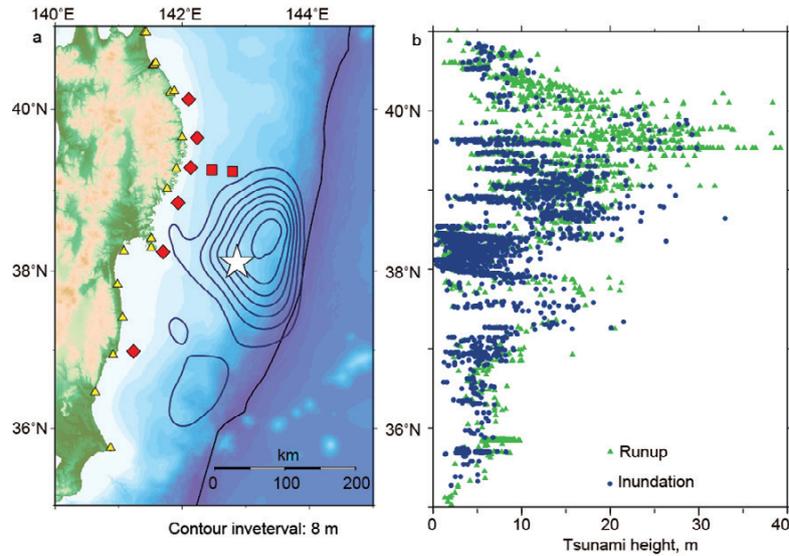
海溝軸付近のプレート境界浅部での大きなすべりは、1896年明治三陸津波地震のモデルとよく似ているが、すべり量や断層の長さは今回の方が大きかった。いっぽう、仙台平野への津波の浸水は、海溝軸付近での大きなすべりでは再現できず、プレート境界深部のすべりが主な原因であることが確認された。これは、869年貞観地震のモデルとしてすでに提出されていたものと同様に、深部のすべりによって長波長の地殻変動を生じ、沿岸での津波が長周期となって浸水しやすくなるためである（第4図）。

#### 5. おわりに

沖合における高時間分解能の津波波形の解析によって、津波を起こした断層面上のすべりの時空間分布を推定することができた。その結果、海溝軸付近のプレート境界浅部で、地震発生（破壊開始）から数分後以降に数十 m のすべりが発生し、それが北へ向かって伸びていったことが明らかになった。三陸沿岸の北緯 39~40°付近で津波の高さが最大となったことは、このような時間遅れによって再現できた。また、貞観地震の際には、少なくともプレート境界深部は2011年と同様に大きくすべったことが確認できたが、海溝軸付近が2011年と同様に大きくすべったかどうかは、仙台・石巻平野の津波堆積物からでは判断できない。これを知るためには三陸沿岸などで津波堆積物などから浸水域や遡上高さを推定する必要がある。また、ここでは津波はプレート間のすべりによって発生したと仮定したが、海溝軸付近での堆積物の効果や非弾性的変位が影響している可能性もある。

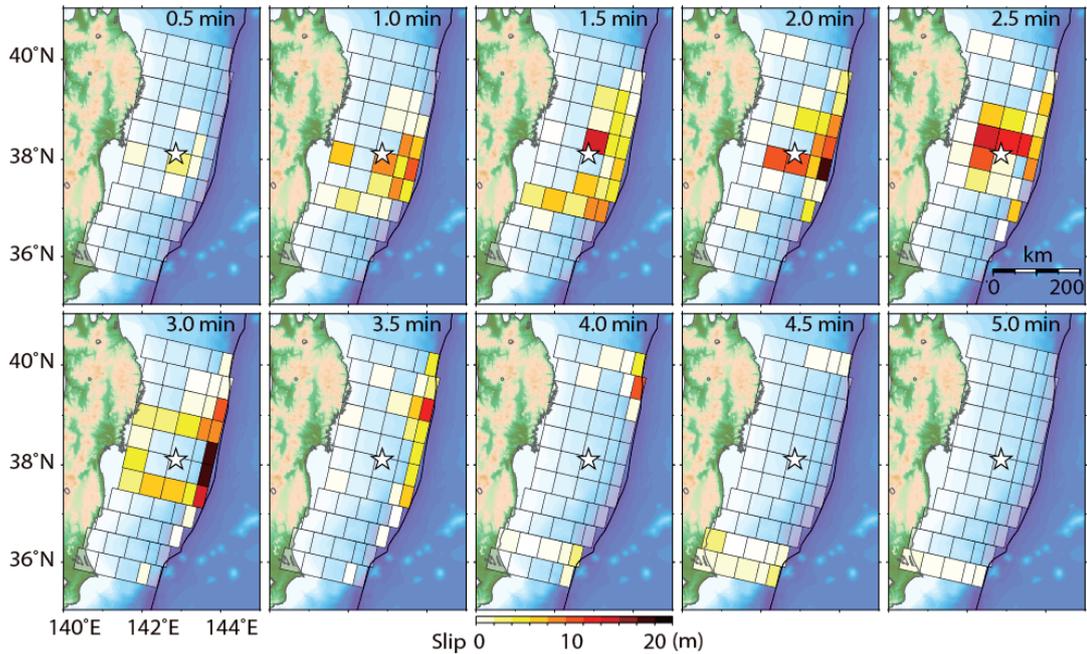
#### 引用文献

- 1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2011). ホームページ <http://www.coastal.jp/ttjt/>
- 2) 国土地理院 (2011). 東北地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報. 86, 184-272.
- 3) Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa (2011), Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets Space*, **63**, 815-820.
- 4) Satake, K., Y. Fujii, T. Harada, and Y. Namegaya (2013). Time and slip distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **103**, 1473-1492.

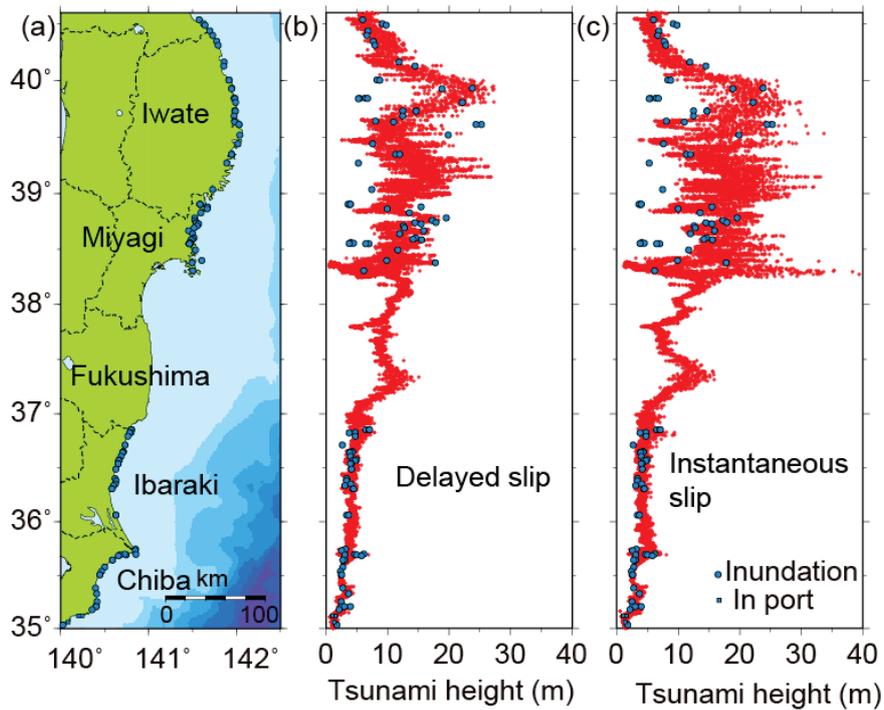


第 1 図. (a) GPS 及び GPS/A データに基づく断層面上のすべり量分布<sup>2)</sup>. 黄色は沿岸の検潮所, 赤は沖合の GPS 波浪計ならびに海底水圧計の位置を示す. (b) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ<sup>1)</sup>による沿岸での津波痕跡高 (遡上高ならびに浸水高).

Figure 1. (a) Slip distribution estimated from GPS and GPS/A data<sup>2)</sup>. Yellow triangles, red diamonds and squares indicate locations of coastal tide gauges, offshore GPS wave gauges and bottom pressure gauges, respectively. (b) Coastal tsunami heights, runup and inundation heights, measured and compiled by the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group<sup>1)</sup>.

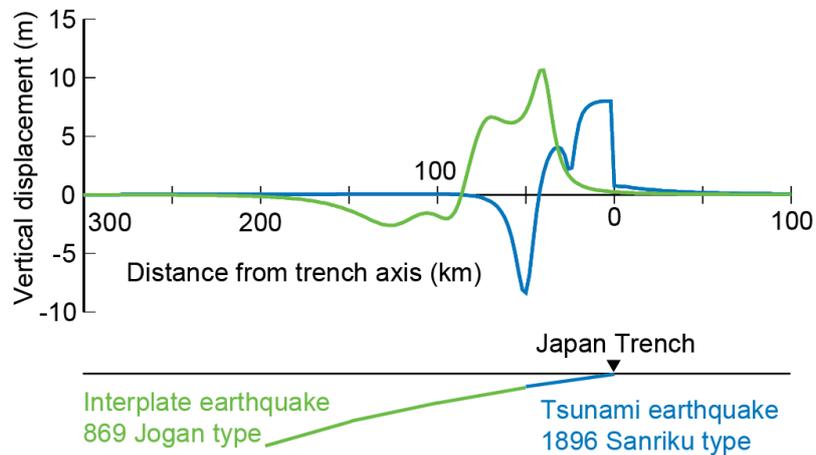


第 2 図. 小断層上におけるすべり量の時空間分布 (時間間隔 30 秒)<sup>4)</sup>. 白星印は震源 (破壊開始点).  
 Figure 2. Snapshot of slip on subfaults at 30 s interval<sup>4)</sup>. The white star represents the epicenter, where the rupture is assumed to start.



第 3 図. 沿岸 (a) における浸水高 (青印) とすべりの時間的変化を考慮したシミュレーションによる沿岸の津波高さ (b), すべりが同時に発生したと仮定したシミュレーション結果 (c) との比較<sup>4)</sup>.

Figure 3. Coastal tsunami heights computed from delayed slip (b) and instantaneous slip (c), compared with the measured tsunami heights (blue symbols) whose locations are shown in (a)<sup>4)</sup>



第 4 図. 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域の断面図 (下は断層面を, 上は鉛直海底変位分布). 2011 年地震は 869 年貞観地震タイプ (緑色) と 1896 年三陸津波地震タイプ (青色) の同時発生であった.

Figure 4. Schematic cross section of the 2011 Tohoku earthquake fault (bottom) and vertical seafloor displacement (top) for the shallow (blue) and deep (green) subfaults.