

## 組み合わせ最適化手法を利用した歴史津波の波源推定法 - 1611 年慶長奥州地震の事例 -\*

東北大大学災害科学国際研究所	今井健太郎
東京大学地震研究所	前田 拓人
東北大大学災害科学国際研究所	飯沼 卓史
東北大大学災害科学国際研究所	蝦名 裕一
東北大大学災害科学国際研究所	菅原 大助
東北大大学災害科学国際研究所	今村 文彦
宮城学院女子大学	平川 新

### 1. はじめに

1611 年 12 月 2 日（グレゴリオ歴）に岩手県北部から福島県北部に至る東北地方沿岸域に津波被害をもたらした巨大地震が発生した。岩手県小本や山田町船越などの三陸沿岸の一部では 2011 年東北地方太平洋沖地震に匹敵する規模であったことを示す津波痕跡が残されている（首藤・後藤, 1985 ; 蝦名・高橋, 2014）。

本地震津波に関する史料の再精査（蝦名, 2014）とそれに基づいた現地調査（蝦名・今井, 2014）から、津波被害地域は岩手県北部から福島県中部に至る広範囲であったことが再認識された。このことから、本地震津波の波源域は三陸沖から仙台湾沖まで広がっていた可能性があり、本地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震は、プレート境界面の同一の領域が破壊した繰り返し地震であることが示唆される。

相田（1977）は羽鳥（1975）による推定波源域から、1933 年昭和三陸地震津波タイプの波源断層に準えた波源モデルを提案している。この波源モデルでは三陸沿岸の津波痕跡高を説明することができるが、仙台湾沿岸の津波高はせいぜい 1~2 m であり、仙台湾沿岸部における史料に記された津波痕跡高や津波堆積物の存在（例えば、宍倉ら, 2007）を十分に説明することができないといった課題が存在し、再評価の余地が残されている。

歴史地震・津波の波源推定手法に関する課題もある。潮位記録などが存在する近代以降の地震津波の規模評価には逆解析手法（Satake, 1989）による波源推定が有用である。一方で、歴史地震・津波の波源推定には津波痕跡や地殻変動などの限定的かつ断片的な情報を用いて推定せざるを得ない。相田（1977）は波源断層の断層パラメータを試行錯誤的に変更しながら、計算津波高と津波痕跡高によって規定される幾何平均  $K$ 、幾何標準偏差  $\kappa$  によって最適波源を選択している。この方法だと  $K$  および  $\kappa$  の最適指標を満足する波源を一義的に決定することになり、波源の不均質性の評価や波源規模に関する信頼性評価を行う事は難しい。今井ら（2013）は 2011 年東北地方太平洋沖地震津波を対象として、津波痕跡高とその分布による波源推定から得られる地震規模  $M_w$  と現代観測網によって評価される  $M_w$  の偏差について検討を行った。波

---

\* Paleo tsunami source estimation by using combination optimization algorithm - Case study of The 1611 Keicho earthquake tsunami - by K. Imai, T. Maeda, T. Iinuma, Y. Ebina, D. Sugawara, F. Imamura, and A. Hirakawa.

源長さと同等の津波痕跡分布範囲を有し、波源長さの 5% の間隔で痕跡情報を得られる場合に  $M_w$  との偏差は抑制され、地殻変動の拘束条件を入れることでさらに  $M_w$  の偏差が抑制されることを示した。ただし、単純グリッドサーチによる波源推定は計算負荷が高く、津波痕跡高分布による波源推定に含まれる誤差の定量評価が課題として残されていた。

本研究では、津波痕跡高のみを用いた波源推定に組み合わせ最適化手法を適用し、津波痕跡高を用いた波源推定に含まれる誤差評価を行う。そして、史料の再精査と最新の現地調査結果による 1611 年慶長奥州地震の津波痕跡高とその分布を用いて波源推定を行い、波源像について再検討することを目的とする。

## 2. 1611 年慶長奥州地震の津波痕跡高

蝦名・今井（2014）は、1611 年慶長奥州地震津波について新たな史料の検証とこれまで用いられてきた史料の再精査を実施し、その信頼性や史料成立時の時代背景を考慮した上で、津波痕跡地点を特定し、津波痕跡高の計測を実施した。図-1 に津波痕跡高分布を示す。図中の痕跡高には羽鳥（1975）、都司・上田（1995）、都司ら（2011）、都司ら（2012）による測量値も含まれる。なお、20 m を越える津波痕跡高は、山奈宗真（1903）による 1896 年明治三陸地震津波の際に聞き取り調査で得られた慶長奥州地震を含む過去の巨大津波の伝承に基づく。詳細については蝦名・今井（2014）を参照されたい。

津波痕跡点は、青森県下北半島大沼及び宮城県鮫浦湾における津波堆積物調査結果と史料精査および現地調査に基づく岩手県北部から福島県北部に至る 28 点である。ただし、宮古湾周辺に津波痕跡点が集中しているため、この地点における痕跡高はその平均値と標準偏差を用いて代表させた。そのため、解析に用いた痕跡点は 18 点となる。なお、青森県下北半島大沼における津波堆積物調査結果では、慶長年間と同時代の津波堆積物を確認することができなかつたため、大沿海側の浜堤高（＝湖面標高）を越えないとして津波高を評価し、宮城県鮫浦では津波堆積物が確認された標高値を津波遡上高として取り扱った。

図-1 から、三陸部においては、宮古市を中心として南北に減衰する傾向が確認できる。また、1896 明治三陸地震津波や 1933 年昭和三陸地震津波の痕跡高分布（羽鳥、1975）と異なり、仙台湾沿岸においてもそれほど減衰していない様子がわかる。痕跡点数そのものは極限られるが、この傾向は 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の痕跡高分布と同様である。このことから、本地震の波源断層は三陸沖から仙台湾沖であった可能性が示唆される。これらを踏まえて波源域を Maeda et al. (2011) に倣い、図-2 のように想定した。仮定した地震発生形態としてはプレート境界における深部逆断層と海溝軸付近の浅部逆断層の組み合わせの場合（以下、Case 1）と、

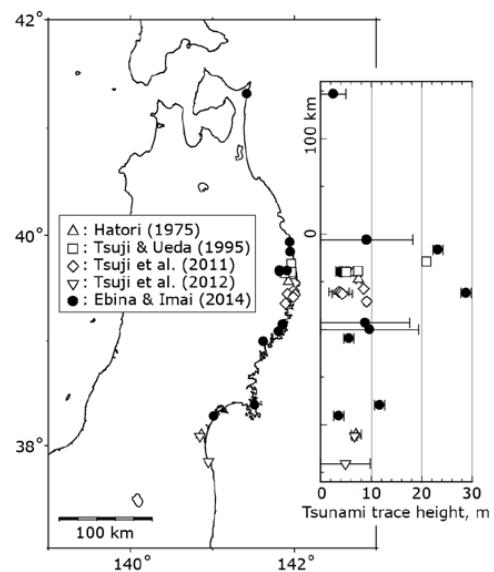


図-1 慶長奥州地震の津波痕跡高分布

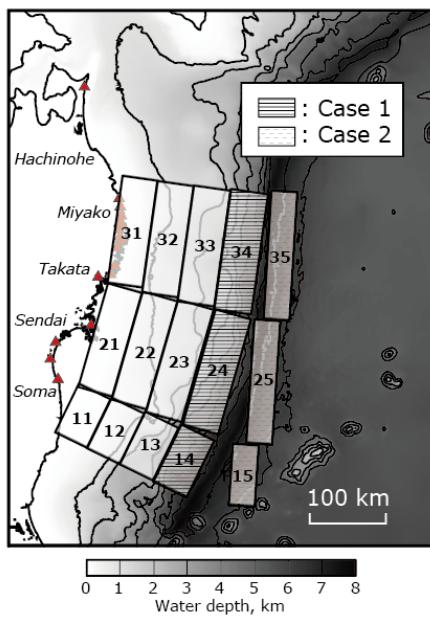


図-2 波源断層の配置

プレート境界面における深部逆断層と海溝軸外縁の西傾斜正断層（以下、Case 2）とした。海溝軸外縁の正断層のメカニズムは Tsuru et al.(1999)による観測結果を参考に設定した。

### 3. 組み合わせ最適化アルゴリズム

組み合せ最適化手法は、厳密解を求めることが難しい問題に対して、その問題の解空間を効率よく探索して高精度な近似解を求める手法である。単純グリッドサーチ法のように、すべての組み合わせを解く方法もあるが、解

く問題によっては膨大な計算量となり、現在の計算機性能では現実的とはいえない。本研究では、組み合せ最適化手法の一つである Sim E アルゴリズム（Kling and Banerjee, 1990）を適用した。Sim E アルゴリズムは、さまざまな組み合せ最適化問題を解くための汎用的な探索手法であり、最適化評価指標を適切に選択することにより、近似的ではあるが精度の高い解を得ることができる。本研究では、津波痕跡高と計算津波高の誤差ノルムを最適化指標とした。

計算津波高については、図-1 に示す計算領域において、空間格子間隔は 135 m、時間間隔は 0.2 s とし、各小断層による津波の Green 関数を線形長波理論に基づいて求めた。各痕跡点近傍（水深約 10 m）における合成波形の最大振幅を計算津波高とした（図-3）。津波痕跡高の誤差ノルムが最小となる波源断層のすべり量分布を Sim E アルゴリズムにより求めた。

1611 年慶長奥州地震津波の痕跡高分布を用いた波源推定を行う前に、本解析手法の適用性と

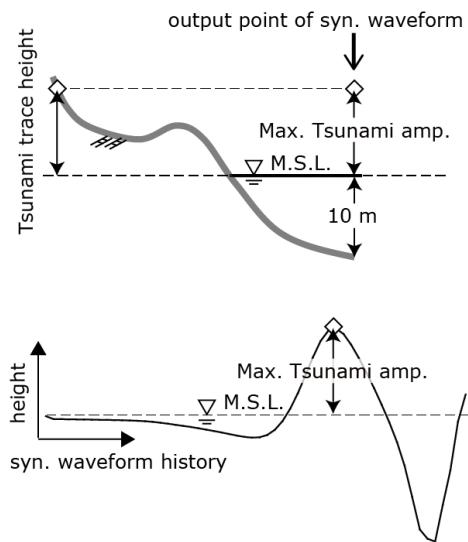


図-3 津波痕跡高と計算津波高の取り扱い

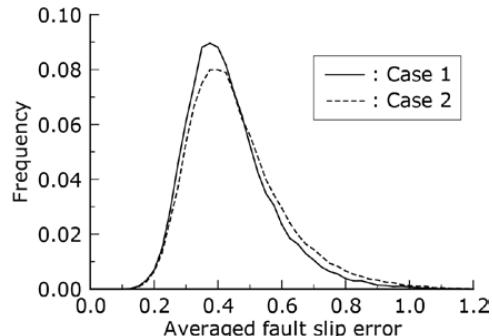


図-4 推定すべり量の平均誤差と発生頻度の関係

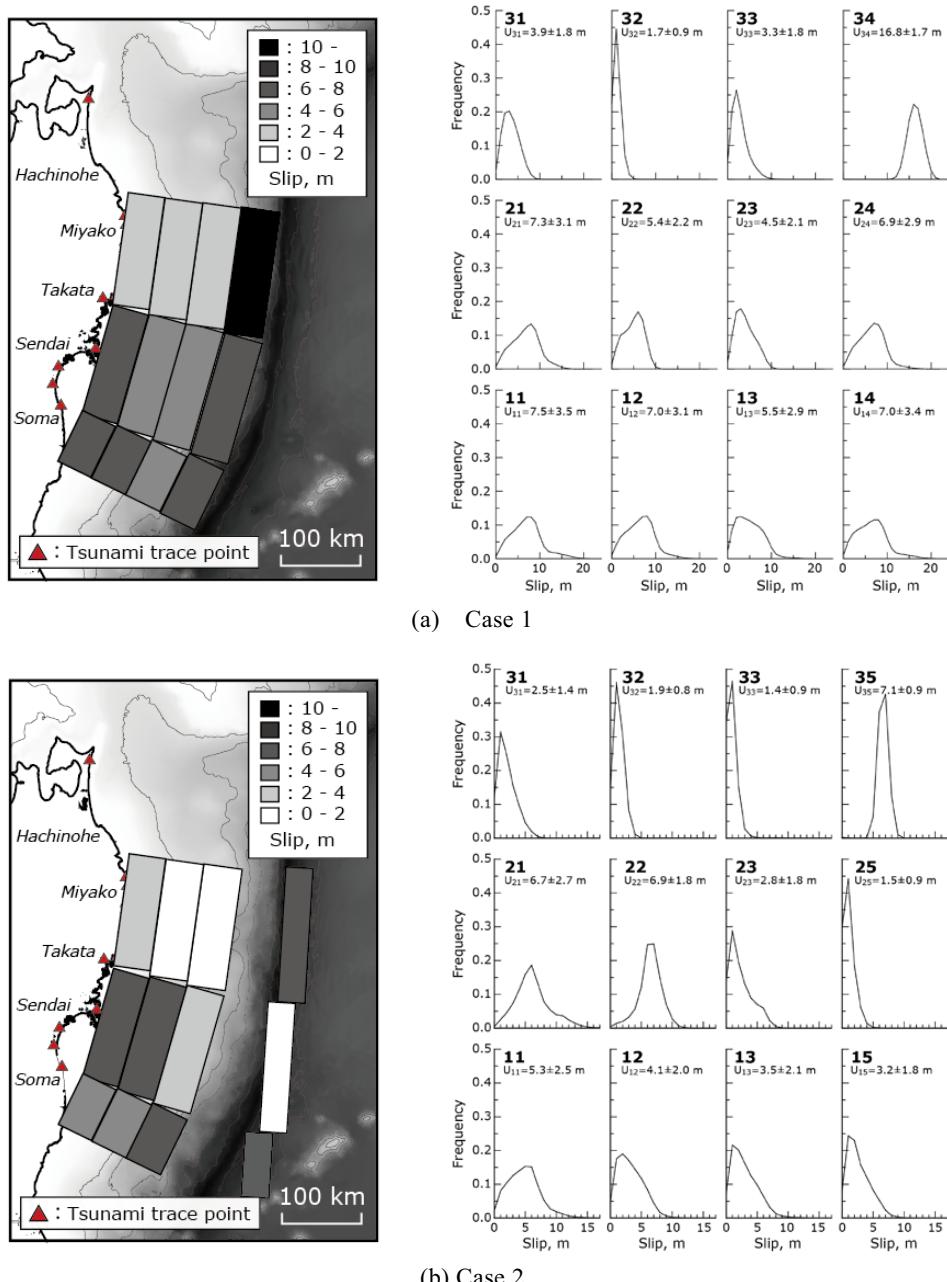


図-5 1611年慶長奥州地震の推定波源

解析結果に含まれる誤差について検討を行った。誤差評価の対象はすべり量分布とし、図-2における各波源断層の初期すべり量を一様乱数により与え、津波痕跡位置における計算津波高を計算する。さらに、図-1に示す各痕跡点に含まれる誤差を一様乱数で計算津波高に与える。この計算津波高を誤差評価における仮想の津波痕跡高として、波源断層のすべり量分布を推定し

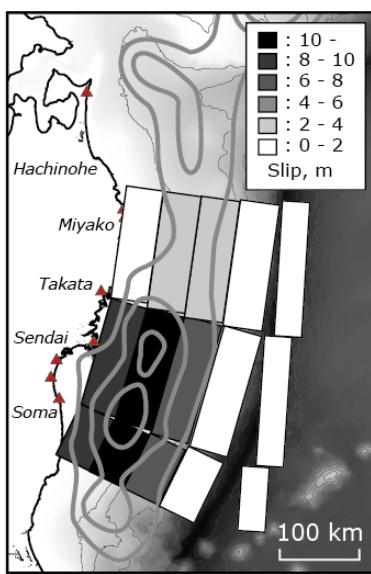


図-6 1454年から1611年の157年間に  
おけるすべり遅れ分布

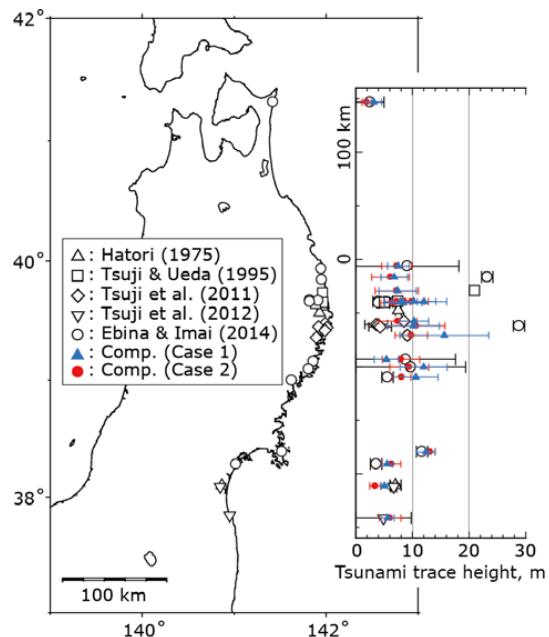


図-7 津波痕跡高と推定波源による計算津波高の比較

た。試行回数は100,000回とし、初期すべり量分布に対する推定すべり量の平均誤差を評価した。図-4に推定すべり量の平均誤差と発生頻度の関係を示す。津波痕跡高分布とそれに含まれる誤差を考慮したとしても、推定される波源断層の平均すべり量誤差は35~40%に収まる。

#### 4. 推定波源とその解釈

図-5に推定波源を示す。津波痕跡高に含まれる誤差を乱数で考慮し100,000回試行による解析結果であり、図中左は平均的な各波源断層のすべり量、右は各断層のすべり量とその頻度分布を示す。両ケースともに、三陸沖の海溝軸付近に非常に大きなすべりが生じており、その頻度分布も鋭い傾向となる。仙台湾沖の深部プレート境界においては、広域にすべりが生じているが、その頻度分布は鈍く平坦な傾向となり、三陸沖の海溝軸付近に比べて信頼性が若干劣ることがわかる。本解析による地震規模は、剛性率を30 GPaとした場合に各々  $M_w$  8.4~8.7となり、従来の波源モデルによる  $M_w$  8.1 (相田, 1977) よりも大きい。これは、本解析で推定した波源域が三陸沖の海溝軸付近だけでなく仙台湾沖に至る広域となったことによる。

行谷・矢田 (2014) は、中世史料の解析から慶長奥州地震以前に発生した東北地方太平洋沿岸に巨大津波をもたらしたイベントとして1454年享徳地震、あるいは1455年康正地震である可能性を示した。本領域におけるプレート境界の歪み蓄積量は3~9 cm/yearと見積もられている (Hashimoto et al., 2009)。図-6に1454年から1611年の157年間におけるすべり遅れ分布を示す。本解析により推定したプレート境界におけるすべり量とその分布は、これらの検討結果と調和的といえる。一方で、海溝軸付近における逆断層や海溝軸外縁における正断層の大きなすべりについては、すべり遅れ分布に基づいて説明することは困難であり、深部逆断層の運動が海溝軸付近の逆断層や海溝軸外縁正断層に与える力学的影響を検討する必要がある。

図-7 に津波痕跡高と推定波源による計算津波高の比較を示す。本研究で推定した各々の波源による津波高は痕跡高と調和的といえるが、20 m 以上の津波痕跡高を説明することはできないため、 $\kappa=1.51\pm0.05$  となる。詳細な空間分解能での氾濫解析による検証が必要と考えられる。

## 5. おわりに

津波痕跡高を用いた波源推定を行うために組み合わせ最適化手法を適用した。津波痕跡高のみを用いた波源推定に含まれる誤差について検討し、1611 年慶長奥州地震津波の痕跡高分布などの本解析条件では、推定滑り量に 30~40% 程度の誤差が含まれることを示し、それらを踏まえて波源推定を行った。さらに、推定波源と固着域の関連性について検討した。

**謝辞：**本研究は H24 および H25 年度東北大学災害科学国際研究所特定プロジェクト研究（課題番号 A-2, 代表：今村文彦）と JSPS 科研費 25350492, 24720290 の助成を受けて実施されました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 蝦名裕一・高橋裕史：『ビスカイノ報告』における 1611 年慶長奥州地震津波の記述について、歴史地震, 29, 195-208, 2014.
- 首藤伸夫・後藤智明：三陸大津波痕跡調査報告 -越喜来湾（三陸町）-, 津波工学研究報告, 2, 46-53, 1985.
- 蝦名裕一：慶長奥州地震津波と復興 四百年前にも大地震と大津波があった, 蕃山房, 69p, 2014.
- 蝦名裕一・今井健太郎：史料や伝承に基づく 1611 年慶長奥州地震の津波痕跡調査, 津波工学研究報告, 31, 139-148, 2014.
- 相田勇：三陸の古い津波のシミュレーション, 地震研究所彙報, 52, 71-101, 1977.
- 羽鳥徳太郎：三陸沖歴史津波の規模と推定波源域, 地震研究所彙報, 50, 397-414, 1975.
- 宍倉正展・澤井裕紀・岡村行信・小松原純子・Than Tin Aung・石山達也・藤原治・藤野滋弘：石巻平野における津波堆積物の分布と年代, 活断層・古地震研究報告, 7, 31-46, 2007.
- Satake,K. : Inversion of tsunami waveforms for the estimation of heterogeneous fault motion of large submarine earthquakes, J.Geophys.Res., 94, 5627-5636, 1989.
- 今井健太郎・堀内滋人・今村文彦：波源推定における津波痕跡高分布の依存性に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69-2, 431-435, 2013.
- 都司嘉宣・上田和枝：慶長 16 年 (1611), 延宝 5 年 (1677), 宝曆 12 年 (1763), 寛政 5 年 (1795), および安政 3 年 (1858) の各三陸地震津波の検証, 歴史地震, 11, 75-106, 1995.
- 都司嘉宣・馬淵幸雄・大家隆行・今村文彦：岩手県を対象とした慶長 16 年三陸地震津波の痕跡調査, 津波工学研究報告, 28, 173-180, 2011.
- 都司嘉宣・今井健太郎・馬淵幸雄・大家隆行・岡田清宏・岩渕洋子・今村文彦：宮城県及び福島県の沿岸での延宝五年(1677)房総及び慶長十六年(1611)三陸地震津波の痕跡調査, 津波工学研究報告, 29, 189-208, 2012.
- 山奈宗真：岩手県沿岸大海嘯取調書, 1903.
- Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara, Significant tsunami observed at the ocean-bottom pressure gauges during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63(7), 803-808, doi:10.5047/eps.2011.06.005, 2011.
- T. Tsuru, J.O. Park, N. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kido, Y. Kaneda, and Y. Kono, Tectonic features of Japan Trench convergent margin off Sanriku, northeastern Japan, revealed by multichannel seismic reflection data, J. Geophys.Res., 105, 16403-16413, 2000.
- Kling, R. M. and P. Banerjee, Optimization by Simulated Evolution with Applications to Standard Cell Placement, Proc. of 27th Design Automation Conference, 20-25, 1990.
- 行谷佑一・矢田俊文：史料に記録された中世における東日本太平洋沿岸の津波, 地震 2, 66-4, 73-82, 2014.
- Hashimoto, C., Noda, A., Sagiya, T., and Matsu'ura, M., Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion, Nature Geoscience 2, 141-144, 2009.