

## [共同研究成果]

## 東北地震に伴う固有地震活動の揺らぎから推定された

## 摩擦特性と余効すべり伝播過程

## - A trial estimation of frictional properties and afterslip process on the basis of aperiodicity off Kamaishi just after the 2011 Tohoku Earthquake-

有吉 慶介<sup>\*1</sup>・内田 直希<sup>\*2</sup>・松澤 暢<sup>\*2</sup>・日野 亮太<sup>\*2</sup>・  
長谷川 昭<sup>\*2</sup>・堀 高峰<sup>\*1</sup>・金田 義行<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup>独立行政法人 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

<sup>\*2</sup>東北大学大学院理学研究科附属 地震・噴火予知研究観測センター

<sup>\*3</sup>名古屋大学減災連携研究センター

釜石沖は再来間隔と規模が固有の地震であることが知られていたが、東北地方太平洋沖地震（東北地震）の直後から、それらに大きな揺らぎが生じたことが後の解析で明らかとなった。本研究では、その揺らぎを大規模な数値シミュレーションから再現することにより、釜石沖周辺での摩擦特性および余効すべり伝播方向などの推定を試みる。

## 1. はじめに

釜石沖（図1）では、再来間隔（5.5年）と規模（M4.8）がほぼ固有的に起きていること（図2a）が知られているが、東北地震の直後から、頻発する傾向が診られている（図2b）。

図2bを詳しく診ると、規模の大きな地震だけでなく、小さな地震も発生していることが分かる。規模の大きな地震が発生した要因として、プレート運動の速度が、東北地震による大規模なすべりによって加速された [1] ことなどが挙げられる。一方で、規模の小さな地震が発生する要因として、釜石沖の固有地震震源域の周辺にある複数の小さなアスペリティが壊れたためだという考え [2] もあるが、その場合、なぜ小さなアスペリティがごく限られた時しか起きないのかを説明するのが難しいように思われる。

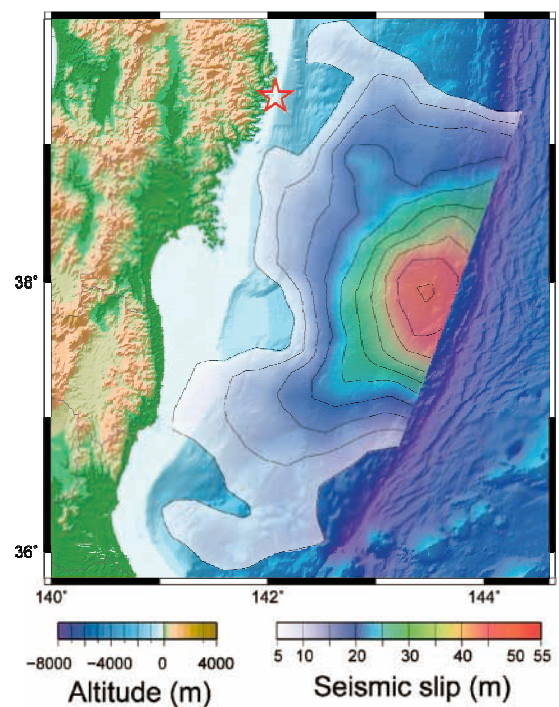


図1. 釜石沖の固有地震の震央（☆）と東北地震のすべり分布 [4] との関係。

そこで本研究では、大規模な余効すべりによる応力擾乱を受ける釜石沖地震について、大規模な数値シミュレーションでモデル化を行い、固有地震が揺らぐ過程を調べると共に、摩擦特性や余効すべりの伝播過程を調べる。

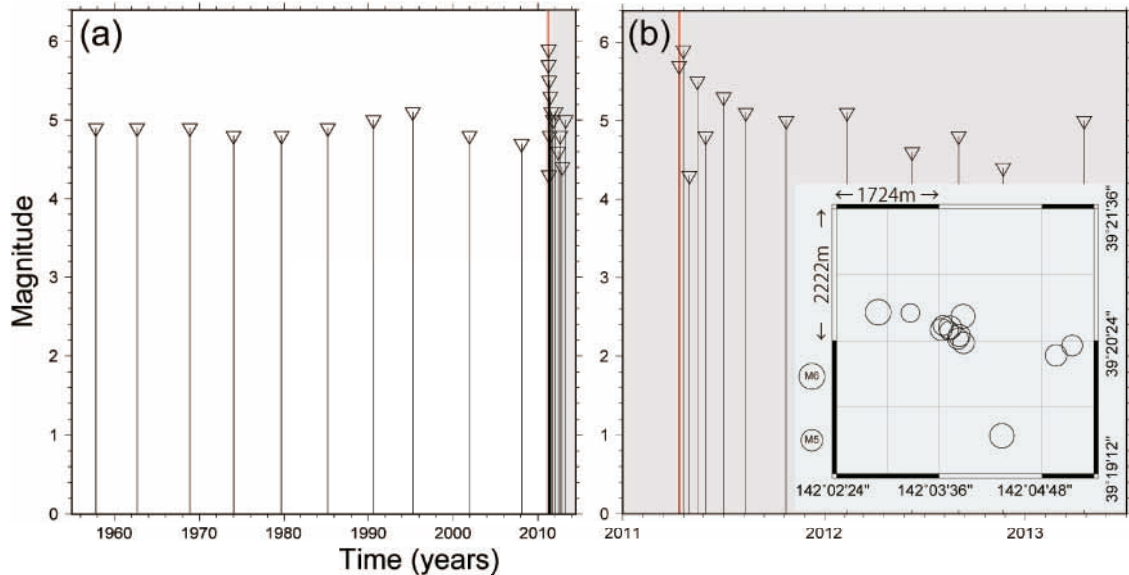


図2. 釜石沖の固有地震の活動履歴. 赤線は東北地震の発生時刻を示し、灰色の時間帯については、(b)で拡大し、震央分布を併記した。

## 2. 固有地震のモデル化

モデル化に当たって、東北地震のような M9 クラスの超巨大地震と釜石沖の M5 クラスの中規模地震を両立させるのは、地震のエネルギー比でおよそ 100 万倍も異なるため、時間・空間分解能の観点から必要な計算量は膨大なものとなる。そこで、本研究では、M7 クラスと M5 クラスの地震を共存させるモデルで代用する。両者の位置関係については、図 1 の情報だけでは設定することが難しいので、本研究では、図 3 のように走行方向に複数の小アスペリティを設定することにした。

プレート境界面では、速度・状態依存摩擦構成則 (aging-law と slip-law) [3] によって生じる摩擦力と断層すべりに伴うせん断応力が準動的に釣り合っている条件を課すことで、地震サイクルを再現した [4]。また、擬似的なすべり伝播を避けるため、周期境界条件は与えておらず、計算領域の外側では、プレート収束速度 ( $V_{pl} = 9 \text{ cm/year}$ ) で動いているものとする。

本研究では、東北大学サイバーサイエンスセンターとの共同研究によって開発された、SX-9 向けに最適化された FFT の計算プログラムコードを使用した。これにより、約 5 年間隔で発生する M4 クラスの地震と 50 年以上の時間間隔で発生する M7 クラスの地震が共存する、高い時空間分解能を有する大規模シミュレーションを実施することが可能となった。

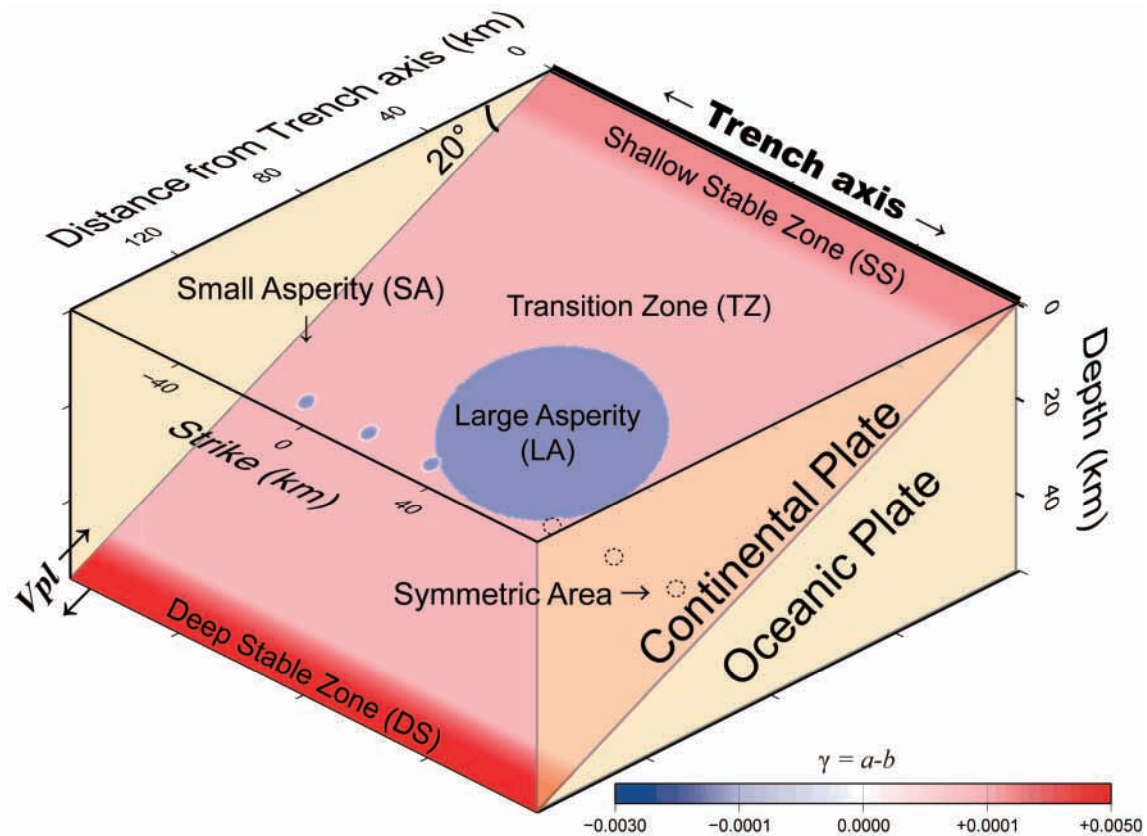


図3. 本研究で想定した沈み込みプレート境界面における摩擦安定性の空間分布図. 暖色系は摩擦安定 (粘性的なすべり特性), 寒色系は摩擦不安定 (固着と地震性すべりの繰り返し) を示す. 大きな円域内 (大アスペリティ) は海溝型巨大地震の震源域に相当し, 小さな円域内 (小アスペリティ) は通常時には固有地震が発生する. 小アスペリティは走行方向に沿って3つ配置したが, 十分な距離があるため, 小アスペリティ同士の相互作用は無視できる.

### 3. 数値シミュレーションから再現された固有地震の揺らぎの特徴

図3において, 大小のアスペリティが共存ではなく, 単独で存在する場合, 固有的な振る舞いをする事が知られているが, 大小アスペリティの再来間隔 ( $T_r, t_r$ ) と規模 ( $M_w, m_w$ ) は,  $(T_r, M_w; t_r, m_w) = (62.9, 7.7; 2.5, 3.8)^{\text{aging}}, (82.5, 7.9; 6.3, 5.3)^{\text{slip}}$  となった.

両者が共存する場合の履歴を図4に示す. この場合, 大アスペリティの巨大地震は固有的な振る舞いのままであるが, 小アスペリティは応力擾乱の影響を受けて揺らいでいることが分かる.

また, この結果から, slip-law では, 大規模な余効すべりが通過しても, 固有地震は活発化するどころか静穏化する傾向がみられることも分かる.

一方で, aging-law は, 地震活動が一時的に頻発しており, 規模についても通常と比べて大きいもの(図 4c①, d)だけでなく, 小さいもの(図 4c②③, e) も発生していることが分かる. そして十分な時間が経過すると, 通常の規模に収束する(図 4c④, f, g). この特徴は, 図 2b の観測結果を概ね再現できているように見える.

図 4e で示された通常よりも小さな地震については, 図 5 で示された余効すべりの伝播方向と合致する. すなわち, 余効すべりの応力擾乱によって, 小アスペリティの部分破壊が促進され, 伝播方向前面側の②が起きた後に, 残りの応力蓄積の解放として後面側の③が起きたと解釈することができる.

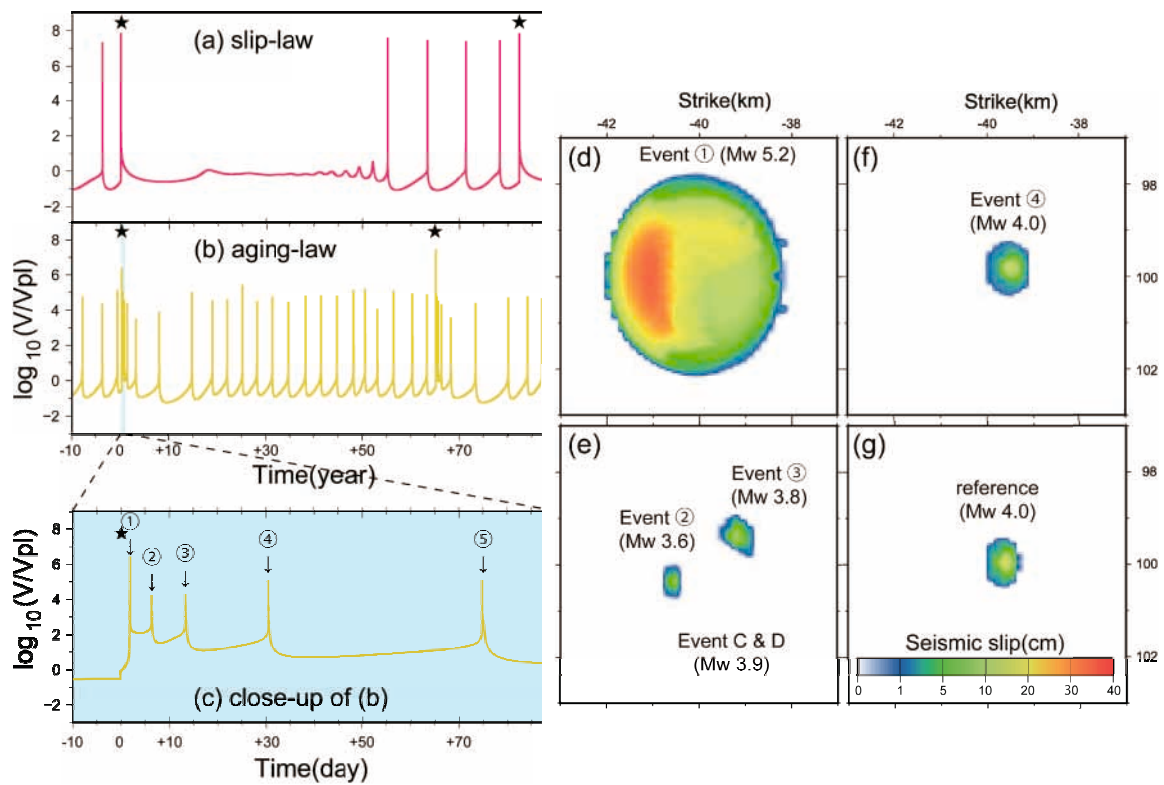


図 4. 小アスペリティが中央に位置する場合の地震速度履歴. ★は大アスペリティで巨大地震が発生した時刻 ( $t=0$ ) を表わす. (b) において, 背景が水色の時間帯は, (c) で拡大し, 各イベントを①~⑤の番号で表記した. (d)~(f) は, ①~④の小アスペリティ域周辺における地震性すべり分布を示す. (g) は, 大アスペリティが固着している期間に小アスペリティで発生する固有地震の一例 (図 5 を参照).



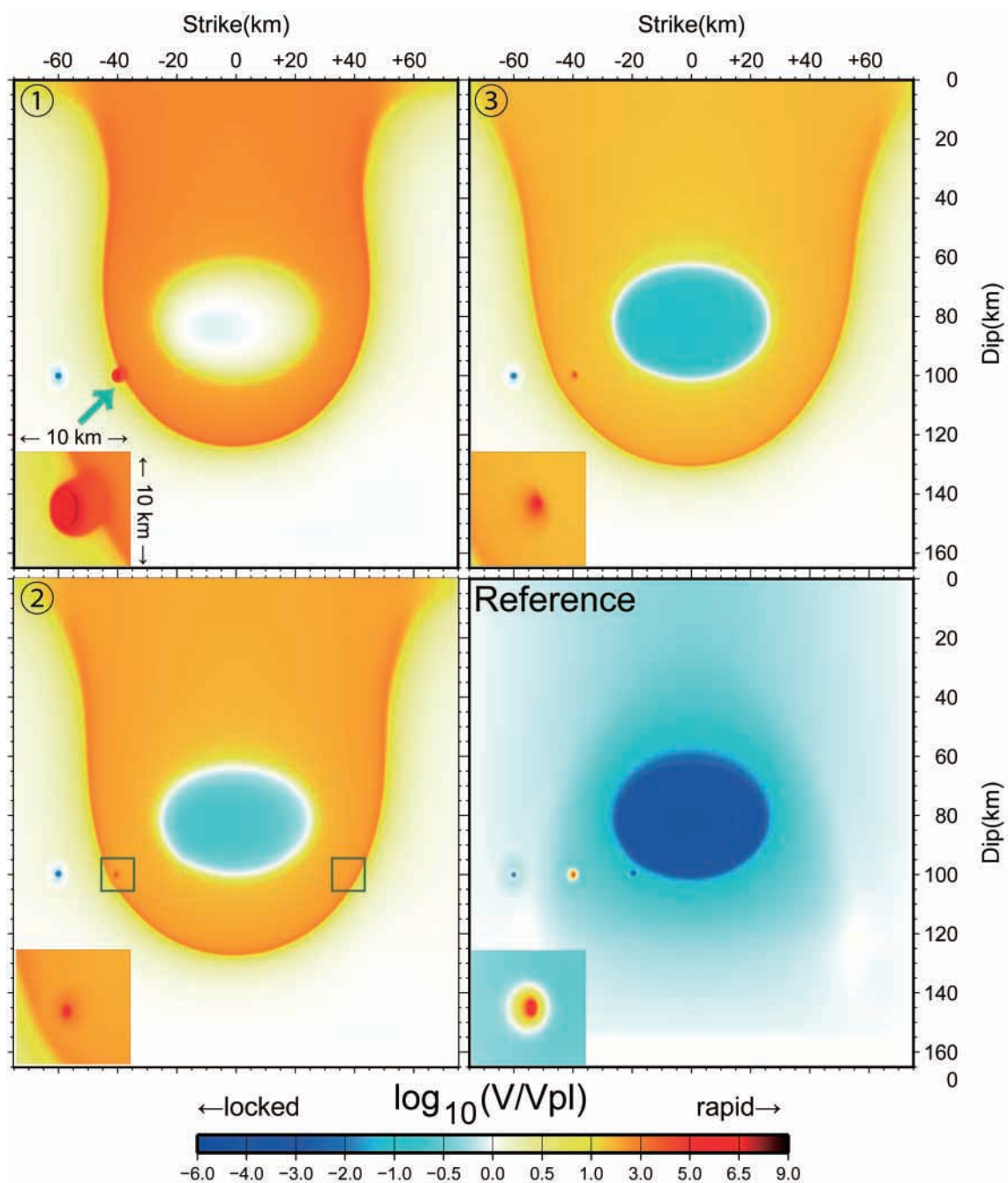


図5. プレート境界面におけるすべり速度のスナップショット. 小アスペリティ周辺の拡大図を左下に示した. 時刻については, 図4cを参照.

#### 4. まとめ: 釜石沖における摩擦特性と余効すべり伝播過程

本研究の数値シミュレーションから示された特徴について, 釜石沖における固有地震の揺らぎに適用することで, 以下のことが結論付けられる.

- (i) 東北地震後に釜石沖で地震活動が一時的に活発化する現象は、摩擦構成則 (aging-law) から説明することが出来る。この場合、小アスペリティが単独であっても再現できるため、通常時の固有地震活動履歴とも整合する。これは、岩石実験とは独立に、摩擦構成則の条件を数値シミュレーションから絞り込むことが出来るアプローチである。
- (ii) 通常よりも小さな規模の地震が起きたのは、余効すべりに伴う応力擾乱によって、小アスペリティ内で部分破壊が生じたためだと考えられる。図 2b より、その震央分布は東南東～西北西方向に揺らいでいることから、釜石沖での東北地震の余効すべり伝播方向は、東南東→西北西であったと推定される。これは、測地観測とは独立した、新しい推定方法であるといえる。

本研究では、M9 クラスと M5 クラスの共存モデルを構築することは出来なかったが、今後さらに、スーパーコンピューターの性能向上や計算アルゴリズムの改良を重ねることで、より現実的な数値シミュレーションを実行することが、今後の課題となろう。

#### 参考文献

- [1] Heki, K. and Y. Mitsui (2013), Accelerated pacific plate subduction following interplate thrust earthquakes at the Japan trench, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **363**, 44-49.
- [2] Ye, L., T. Lay, and H. Kanamori (2012), The Sanriku-Oki low-seismicity region on the northern margin of the great 2011 Tohoku-Oki earthquake rupture, *J. Geophys. Res.*, **117**, B02305.
- [3] Ampuero, J.-P., and A. M. Rubin (2008), Earthquake nucleation on rate and state faults – Aging and slip laws, *J. Geophys. Res.*, **113**, B01302.
- [4] 有吉 慶介・松澤 暢・日野 亮太・長谷川 昭・堀 高峰・中田 令子・金田 義行, 2014. 超低周波地震の活動に基づくプレート間固着の推定, *SENAC* **47(1)**, 29-34.