12 - 4 SSE 後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの評価: ヒクランギ巨大地震への適用

## Simple Physical Model for the Probability of a Subduction-Zone Earthquake Following Slow Slip Events and Earthquakes: Application to the Hikurangi Megathrust, New Zealand

堀 高峰(海洋研究開発機構)・金子 善宏(京都大学大学院理学研究科)
HORI Takane (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology),
KANEKO Yoshihiro (Kyoto University)

2016年11月14日にニュージーランド南島北端付近でKaikoura地震(Mw7.8)が発生した(第 1図a). この地震の後,Hikurangi沈み込み帯のプレート境界で,余効すべりが発生するとともに, 隣接する固着域の周辺でスロースリップイベント(SSE)も複数発生した(第1図b). この固着域は, プレート境界巨大地震の想定震源域であり,これらの余効すべりやSSEによって,大地震の発生 する可能性が普段よりも高まっていることを,GNSサイエンスがニュージーランド政府に対して 報告した.政府は,固着域を含む地域(NZ中部)で大地震が起こる可能性がどのくらいあるのか を確率を用いて定量化するようにGNSサイエンスに対して要請した. この要請を受けて,GNSサ イエンスは世界各国の地震関係の専門家にヒアリングを行うとともに,ワークショップを通して Expert elicitationを実施した<sup>1)</sup>. 第2図に確率を定量的に評価する対象領域と,専門家に対する問い を示している. この問いに対して様々な地震統計モデルによる回答が提出されたが,物理的なモデ ルでも同様な推定ができないか?との意見を受けて行われた解析<sup>2)</sup>の概要を,今回の重点検討課題 のテーマである地震発生予測のための物理モデルの例として,以下で紹介する.

物理モデルでの確率評価の対象は、マグニチュード(M)7.8以上の海溝型巨大地震に限定した (なお、地震統計モデルでは 7.0 以上やプレート境界以外の地震も対象となっている). 確率評価は 以下の3つの手順に従って行った.(1) Kaikoura 地震や SSE による,対象巨大地震震源域での応力 変化の推定(第3図).(2)100万年を超える模擬地震カタログの生成(第4図).(3)(1)で推定した 応力擾乱の模擬カタログでの応力変化への適用と,模擬カタログでの巨大地震の発生確率の評価(第 5 図). 第 3 図 a から第 3 図 d は, Kaikoura 地震や SSE による応力変化の空間分布の推定結果を示す. 巨大地震震源域での応力変化は、震源域全体(第3図の黒枠内)での平均値に加えて、より大きな 応力変化が生じている深部 20km(第3図の紫点線枠内)での平均値も用いた.これらの応力変化 の時間変化が第3図e・fに示されている.緑線で示されたすべり欠損による応力蓄積の値は、模 擬カタログ生成時の仮定にもとづいている.第4図に、模擬地震カタログ生成のために仮定した応 力降下量や規模別頻度分布の例と、模擬地震カタログに対応する震源域での応力の時間変化などを 示した.カタログ生成にあたっては,地震によるモーメント解放率を,すべり欠損率から求まるモー メント欠損率とバランスさせるとともに、応力蓄積率は応力降下量の総和を再来間隔の総和で割っ た値で一定とした.こうして生成した模擬カタログに対して,第4図dの赤線で示すタイミングで(1) で推定した応力擾乱を与えた.この擾乱によるその後の応力変化のシナリオは第4図eに示された 3つが想定される(シナリオ1:1年以内などには誘発されない.2:Kaikoura 地震で誘発.3:数ヶ 月以内に SSE による応力変化で誘発される). こうして,応力擾乱によって発生時期が変化を受け たカタログを生成できる.

仮定する応力降下量などのパラメータを変えたそれぞれのカタログにもとづいて、応力擾乱後の1 年毎の地震発生確率を評価した結果を第5図に示す.応力擾乱直後の1年間に数%の発生確率を 示しており、これは擾乱がなかった場合の数倍の発生確率になっている.この確率は、応力擾乱を 加えた上での1年間の応力変化率の、地震時の応力降下量に対する比に相当することがわかった. 最終的に、このモデルから推定された M7.8以上の海溝型巨大地震の発生確率は、Kaikoura 地震後 の1年間で、それ以前の確率の1.3-18倍に増加するという結果が得られた.一方で、発生確率の 絶対値は 0.6-7% と小さい値にとどまった.

物理モデルから得られた結果は、様々な地震統計モデルの結果のばらつきの範囲内に収まった. こうした確率評価を定量的に行う際、政策判断に用いる観点で重要なことは、尤もらしい1つの結 果を出すことよりも、物理的に「あり得ない」範囲を検討した上で、あり得る上限と下限を示すこ とである.その意味では、今回仮定した物理モデル以外の様々なモデルで、こうした評価を近い将来、 準リアルタイムで行うことが望ましい.また、日本では地震の確率評価がわかりにくいということ がよく言われるが、ニュージーランドのカイコウラ地震の場合のように、定量的な値でないと政策 判断に使えず、また、他分野の専門家も地震学の知見を活用することが困難であるということから、 確率評価が求められる.このことは、地震学の知見を防災等に活用する際に重要な観点になると考 える.

(堀 高峰・金子 善宏)HORI Takane・KANEKO Yoshihiro

参考文献

- 1) Gerstenberger, et al. (2017), Published Report to New Zealand Natural Hazards Platform.
- 2) Kaneko et al. (2018), Geophys. Res. Lett., 45, 3932-3941, https://doi.org/10.1029/2018GL077641.
- 3) Wallace et al.(2012), J. Geophys. Res., 117, B02405, https://doi.org/10.1029/2011JB008640.
- 4) Wallace et al. (2018), Geophys. Res. Lett., 45, 4710–4718, https://doi.org/10.1002/2018GL077385.



- 第1図 (a)GPS データから推定された Hikurangi プレート境界でのすべり欠損率の分布(Wallace et al., 2012<sup>3)</sup>).緑のコンタで過去のスロースリップイベント(SSE)の分布を示す.黒の矢印は太平洋プレートに対する上盤プレートの相対速度を示す.緑の星印は Kaikoura 地震の震央.赤線と白線は、2016 年 Kaikoura 地震と 1885 年 Waipara 地震の断層トレースをそれぞれ示す.(b)GPS と InSAR データから時間依存インバージョンで推定された Kaikoura 地震後 1 年間の Hikurangi 沈み込みプレート境界での総すべり量をカラーコンタで示す(Wallace et al., 2018<sup>4</sup>). 点線のコンタは沈み込みプレート境界面の等深度線(km)であり,緑線はKaikoura 地震の断層トレース.(Kaneko et al., 2018<sup>2</sup>)より).
- Fig. 1 (a) Map of slip-deficit rate on the Hikurangi plate interface estimated from GPS (Global Positioning System) data (Wallace et al., 2012<sup>3</sup>). Past slow slip events (SSEs) are shown by the green contours. Black arrows indicate motion of the overriding plate relative to the Pacific plate. Green star shows the Kaikoura quake epicenter. Red and white lines show fault traces ruptured during the 2016 Kaikoura and 1855 Wairarapa earthquakes, respectively. (b) Total slip on the Hikurangi subduction interface over the year following the Kaikoura earthquake (yellow to hot colors) estimated from time-dependent inversions of GPS and InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) data (Wallace et al., 2018<sup>4</sup>). Dashed contours indicate depth (in kilometers) to subduction interface. (After Kaneko et al., 2018<sup>2</sup>).)



**Q1:** What is the probability of occurrence of a magnitude 7.8 earthquake or larger with hypocentre in the region of interest and shallower than 40 km within **one year** from 15 November 2017?

10%\_\_\_\_\_50%\_\_\_\_90%\_\_\_\_\_

**Q2:** What is the probability of occurrence of a magnitude 7.8 earthquake or larger with hypocentre in the region of interest and shallower than 40 km within **ten years** from 15 November 2017?

10%\_\_\_\_\_50%\_\_\_\_90%\_\_\_\_\_

**Q3:** What is the probability of occurrence of a magnitude M7 or larger earthquake with hypocentre in the region of interest and shallower than 40 km within **one year** from 15 November 2017?

10%\_\_\_\_\_50%\_\_\_\_90%\_\_\_\_\_

**Q4:** What is the probability of occurrence of a magnitude M7 or larger earthquake with hypocentre in the region of interest and shallower than 40 km within **ten years** from 15 November 2017?

10%\_\_\_\_\_50%\_\_\_\_90%\_\_\_\_\_

## 第2図 赤枠が確率評価対象領域。青枠は GeoNet Kaikoura 余震予測領域。専門家に問われた4つの問い. (Gerstenberger et al., 2017<sup>1)</sup> より).

Fig. 2 The elicitation region in red as compared to the GeoNet Kaikoura aftershock forecast region in blue. Followings are the four elicitation questions as asked to the experts. (After Gerstenberger et al., 2017<sup>1</sup>)



- 第3図 様々な原因による Hikurangi 巨大地震想定震源域(黒線枠内)でのせん断応力変化. (a)Mw7.8 Kaikoura 地震, (b)Kaikoura 地震後1年間のプレート境界での余効すべり, (c)Kapiti スロースリップイベント(SSE), (d) 東海岸 SSE. 黒線枠内は固着域(Wallace et al., 2012<sup>3)</sup>)に対応. 紫点線の四角枠は, 固着域の深部で幅20kmの領域を示す.ここではkaikoura 地震ならびにKapiti SSE による応力変化が大きい. 応力変化のカラースケールは, ±10kPa で飽和させている. (e) と(f) はそれぞれ, 黒枠内と紫枠内での応力の平均値の時間発展を示している. 黒線("Total")は, (a)-(d) に加えてプレート境界でのすべり欠損による応力蓄積をすべて合わせた応力変化である. (e) と(f) は縦軸のスケールが異なることに注意. (Kaneko et al., 2018<sup>2)</sup> より)
- Fig. 3 Shear stress changes on the Hikurangi megathrust induced from (a) the Mw7.8 Kaikoura earthquake, (b) afterslip on the subduction interface over the 1 year following the Kaikoura earthquake, (c) Kapiti slow slip event (SSE), and (d) East Coast SSE. A region inside the black rectangle corresponds to the locked portion of the megathrust (Wallace et al.,  $2012^{3}$ ). The purple dashed rectangle corresponds to a downdip locked region of 20-km width where the shear stress changes from the Kaikoura earthquake and Kapiti SSE are large. The color scale is saturated at  $\pm 10$  kPa. Time evolution of mean stress changes over (e) the entire locked portion indicated by the black rectangle and (f) the downdip, purple rectangle region. The "total" (in black) corresponds to the sum of transient stress changes from all nearby tectonic sources (i.e., the Kaikoura earthquake and SSEs). Note that the scale of the vertical axes is different. (After Kaneko et al.,  $2018^{2}$ .)



- 第4図 想定地震の震源パラメータと地震時系列の模擬カタログ.(a) 想定地震の応力降下量の分布.(b) b 値を 1.0, 最大マグニチュード(M<sub>max</sub>)を8.6とした場合のグーテンベルク・リヒターの規模と発生頻度の関係.図は, M<sub>max</sub>の地震1回に対する他の規模の地震の発生率を示している.(c) グーテンベルク・リヒターの関係と Hikurangi 巨大地震震源域でのすべり欠損率から導かれる地震再来間隔 t,の分布.図に示した例では、t,の 最小・最大が M=7.8・8.6 に対応している.(d) 地震時系列の模擬カタログの例を, Hikurangi 巨大地震震源 域の固着部分での応力の時間発展で表している.Δσは地震時の応力降下量であり,t,は再来間隔.赤線は, 近傍でのすべてのテクトニックな原因(第3図 e) による応力の擾乱Δτに対応している.応力擾乱は t<sub>pert</sub> 年間隔で模擬カタログに与えているが,想定地震の発生から160年以内の場合は取り除いている.(e) 応力 擾乱後に起こりうる3つのシナリオの模式図.黒線は(d)の応力変化の拡大であり,赤線が応力擾乱後の せん断応力の発展の仕方を示している.(Kaneko et al., 2018<sup>2</sup> より)
- Fig. 4 Earthquake source parameters and synthetic earthquake-time catalogue. (a) Stress drop distribution of earthquakes of interest. (b) Gutenberg-Richter frequency-size relation with b = 1.0 and  $M_{max} = 8.6$ . Earthquake rate relative to that of  $M_{max}$  (assumed to be 1 for illustration) is shown. (c) Time interval required for stress accumulation t, derived from the Gutenberg-Richter relation and a geodetic slip-deficit rate on the Hikurangi megathrust. In this example, the minimum and maximum t, correspond to M = 7.8 and 8.6 events, respectively. (d) An example of synthetic earthquake-time catalogue represented by stress evolution on the locked portion of the Hikurangi megathrust.  $\Delta \sigma$  is the stress drop of earthquakes and t, is the interevent time. Each red line corresponds to total time-dependent stress perturbation  $\Delta \tau$  from all nearby tectonic sources (shown in Fig. 3e), exaggerated for illustration. The stress perturbation is applied to the synthetic catalogue every  $t_{pert}$  years. (e) Sketch illustrating three possible scenarios following stress evolution. The black curve is a zoom in of the sawtooth shown in Figure 3d. The red curve shows shear stress evolution following the time-dependent stress perturbation. (After Kaneko et al., 2018<sup>2</sup>).)



- 第5図 Kaikoura 地震とSSE後に M≥7.8の海溝型巨大地震が発生する1年毎の確率の推定結果.平均応力降下量 Δσや滑り欠損率 V<sub>pl</sub> などを変えた結果.各点は模擬カタログの 50 ケースに対する平均値,縦の線は標準 偏差を示す.黒線は固着域全体での応力変化の平均の場合,赤線は深部 20km での平均の場合,青線は応 力変化を考慮しないバックグラウンドの1年確率の値.(a)平均応力降下量 2MPa,すべり欠損率 2cm/年, 最大マグニチュード 8.6.(b)平均応力降下量 2MPa,すべり欠損率 1cm/年,最大マグニチュード 8.6.(c) 平均応力降下量 1MPa,すべり欠損率 2cm/年,最大マグニチュード 8.6.(d)平均応力降下量 2MPa,すべ り欠損率 2cm/年,最大マグニチュード 9.0.(Kaneko et al., 2018<sup>2)</sup>を改変)
- Fig. 5 (a–c) Annual probability of a  $M \ge 7.8$  megathrust earthquake following the Kaikoura earthquake and slow slip events for representative cases with different mean stress drop  $\Delta \sigma$  or slip-deficit rate  $V_{pl}$ . Each dot corresponds to mean probability over 50 random realizations of synthetic earthquake-time catalogue, with the vertical line representing the standard deviation. For each panel, three cases are shown: annual probabilities for the mean stress perturbation  $\Delta \tau$ over the entire locked portion (in black) and for  $\Delta \tau$  over the 20-km downdip region (in red) and background annual probability (in blue). (d) The same as Figure 4a except that  $M_{max} = 9.0$ . (Modified from Kaneko et al., 2018<sup>2</sup>).)