

11 - 6 M7 地震と M8 地震のトリガリング効率・ストレスシャドウの違い—トルコ・シリア地震の余震活動

Triggering efficiency and difference in stress shadow between M~7 and M~8 earthquakes revisited by the aftershocks of the Türkiye-Syria earthquake

遠田 晋次 (東北大学災害科学国際研究所)

Shinji Toda (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University)

2023 年 2 月 6 日にトルコ・シリアで発生した大地震では 5 万 6 千人以上の死者、10 万棟以上の家屋倒壊、4 兆円以上の経済的損失を出す未曾有の災害となった。本稿では、同地震による応力変化と広義の余震活動の解析結果を示すとともに、M8 規模の地震による地震のトリガリングとストレスシャドウ (stress shadow) による長期的な地震ハザード変化についての考察を紹介する。なお、本稿中では上記地震をカフラマンマラッシュ地震 (Kahramanmaraş earthquake)、2 月 6 日 1 時 17 分 (UTC) に発生した Mw7.8 地震をパザルジュック地震 (Pazarcık earthquake)、約 9 時間後の 10 時 24 分 (UTC) に発生した Mw7.5 地震をエルビスタン地震 (Elbistan earthquake) と呼ぶ。さらに、前者のマグニチュードを Global CMT にしたがって Mw7.8、後者を Mw7.7 とする。

まず、パザルジュック地震がエルビスタン地震の発生にどのように影響したのかを検討するために、USGS (2024) の有限断層モデルを用いて、エルビスタン地震を引き起こしたチャルダック断層への静的応力変化を計算した。その結果、摩擦係数 $\mu = 0.4$ の場合、震源となった同断層中央部に 1-4 bar の正のクーロン応力変化 (Δ CFF) がもたらされることがわかった。ただし、剪断応力変化と法線応力変化の両成分にわけると、あきらかに法線応力変化が顕著であり (第 1 図)、断層を押さえつける応力の減少 (unclamping stress) が同地震の誘発に作用していることがわかった。測地学インバージョンによる断層モデルを用いた Kobayashi et al. (2024) でも同様の結論が導かれている。

次に、両地震によって周辺の横ずれ断層にかかる Δ CFF を求めた (第 2 図)。 Δ CFF のマッピングに際しては、レシーバ断層 (receiver fault, 影響を受ける断層) として、鉛直左横ずれ断層を周辺の活断層情報 (Emre et al., 2018) をもとに設定した。 Δ CFF 分布を見ると広域にわたってストレスシャドウが生じるのが特徴で、応力増加域はそれぞれの長大な震源断層端延長部に広がる。トルコ防災危機管理庁 (AFAD, 2024) の震源カタログを用いて初期の余震と 2014 年以降の地震活動をプロットすると、ストレスシャドウ中の数箇所地震活動の低下が認められる。一方で、応力増加域では余震活動が顕著であるが、パザルジュック地震震源断層北東延長部で余震が顕著に少ない部分が存在する。そこは、2020 年 M6.8 地震の震源断層にあたり、すでに同地震で顕著に応力低下が生じていたことが想定される。

Δ CFF マップで説明できない震源断層沿いの余震も含めて、カフラマンマラッシュ地震の余震の時系列を解析した。第 3 図に示すように、大森—宇津式の減衰パラメータ p 値は 1.3-1.4 と顕著に高く減衰は速い傾向にある。2014 年以降の常時地震活動レベル (第 3 図緑破線) に戻るまでに 1 ~ 3 年程度となり、余震継続期間もきわめて短いと考えられる。

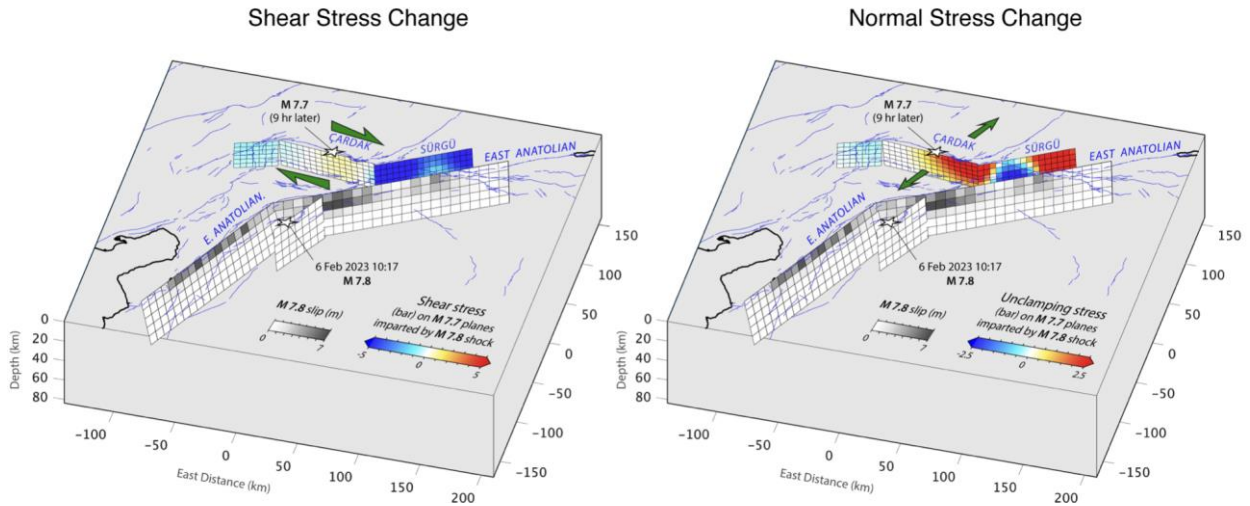
上記の検討のほか、AFAD のメカニズム解情報を用いて節面にかかる Δ CFF を計算するなど、諸計算を行い、Toda and Stein (2020) の手法により、2023 年 8 月 1 日から 1 年間の M5 以上の地震の発生予測を行った。第 4 図は Toda and Stein (2024) 投稿時 (2023 年 7 月) の予測図であり、前向

き予測 (prospective forecast) である。発生率の地域的違いは第 4 図の暖色系の濃淡で示されるが、全体として最大 3 つの $M \geq 5$ 地震を予測していた。その後 1 年間 (2023 年 8 月～2024 年 7 月) に発生した地震を青星印で示すが、発生率が相対的に高く予想されていた Malatya 市周辺に 4 地震が発生した。

このように M8 級の内陸地震の特徴は、地震後のストレスシャドウ域の広がりであり、特に横ずれ断層系にその傾向が強い。そのため、規模の割には全体として余震活動が低調であったり、減衰が速い傾向がある。一方で、断層端から広がる応力増加域 (正の Δ CFF 域) の規模については、M7 級とそれほど変わらない。そのため、地震誘発効率の面では M7 級の内陸地震の方が効率的であるともいえ (Lin and Stein, 2004)、一連の地震活動期には M7 級が続発し、最後に最大規模の地震で終わるというモデルと整合する。

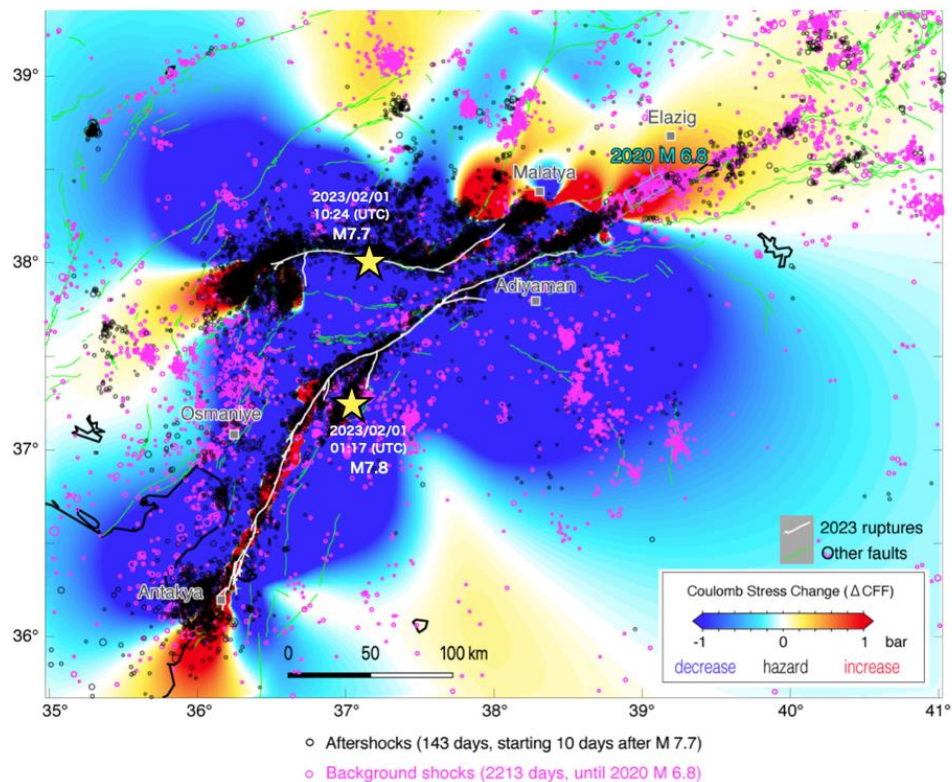
参考文献

- 1) AFAD, Disaster and Emergency Management Authority (2024) Earthquake Catalog, <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>
- 2) Emre, Ö. et al. (2018) Active fault database of Turkey. *Bull. Earthquake Eng.* **16**, 3229–3275, doi: 10.1007/s10518-016-0041-2.
- 3) Kobayashi et al. (2024) Insights on the 2023 Kahramanmaraş Earthquake, Turkey, from InSAR: fault locations, rupture styles and induced deformation, *Geophys. J. Int.*, **236**, 1068-1088.
- 4) Lin, J. and R. S. Stein (2004) Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults, *J. Geophys. Res.*, **109**, doi: 10.1029/2003JB002607.
- 5) Toda, S., and R. S. Stein (2020) Long- and short-term stress interaction of the 2019 Ridgecrest sequence and Coulomb-based earthquake forecasts. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* **110**, 1765–1780.
- 6) Toda, S. and R. S. Stein (2024) The role of stress transfer in rupture nucleation and inhibition in the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, sequence, and a one-year earthquake forecast, *Seismol. Soc. Amer.*, **95**, 596-606.
- 7) USGS Geologic Hazards Science Center and Collaborators (2023). The 2023 Kahramanmaraş, Turkey, Earthquake Sequence (as of February 22, 2023), <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey2023.html>.



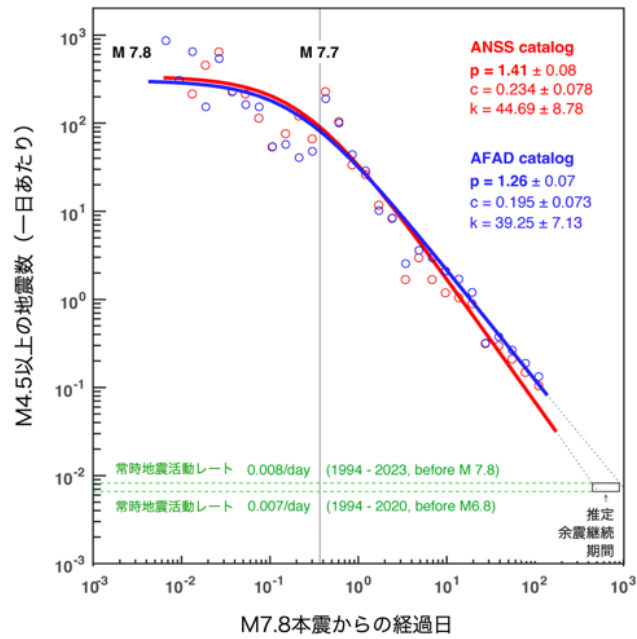
第 1 図 パザルジック地震 (M7.8) によるエルビスタ地震 (M7.7) を引き起こしたチャルダック断層への剪断応力変化 (左) と法線応力変化 (右)

Fig. 1 Static shear stress (left) and normal stress (right) on the Çardak fault that caused the Elbistan earthquake (M7.7) imparted by the first Pazarçık earthquake (M7.8).



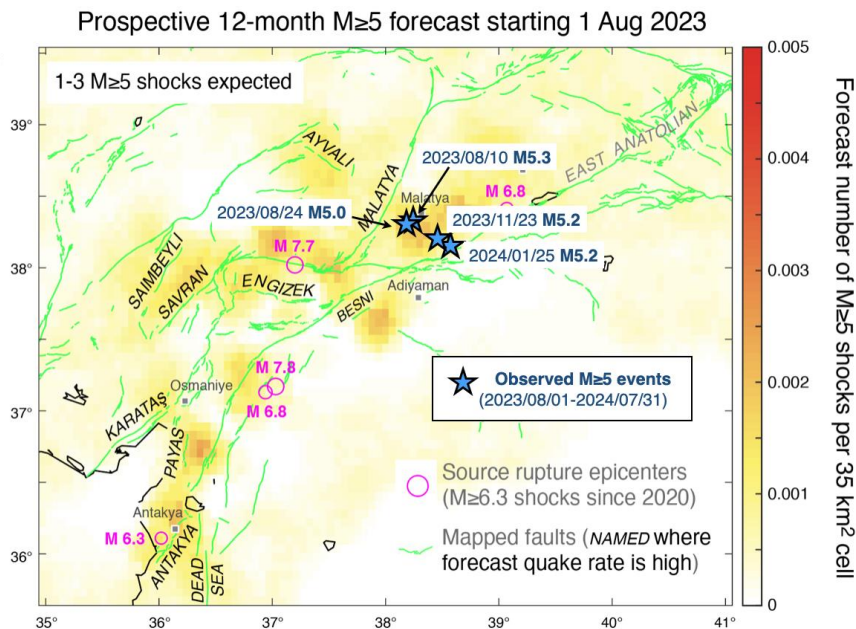
第 2 図 2023 年カフラマンマラッシュ地震 (M7.8, M7.7) による周辺横ずれ断層へのクーロン応力変化と本震前後の地震活動 (黒: 本震後 143 日間, マゼンタ: 2014 年~2020 年 1 月 23 日, M2 以上)。

Fig. 2 Static Coulomb stress imparted to smoothed simplified strike-slip receiver faults by the 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence of M7.8 and M7.7 earthquakes at a depth of 10 km. Black circles are $M \geq 2$ aftershocks occurred during the first 143 days since the largest Feb. 20 M6.3 aftershock whereas the magenta circles are $M \geq 2$ background earthquakes from 2014 to Jan. 23 2020.



第 3 図 M7.8, M7.7 の地表地震断層から 1° 以内 (約 100km) の余震活動の時間減衰. 遅くとも 3 年以内には地震前の地震発生レート (緑水平破線) に戻ると予想される.

Fig. 3 Aftershock decay relative to the background seismicity rate within the 1° -wide areas from the surface rupture of the Kahramanmaraş earthquake. Projected aftershock duration from the graph is shorter than 3 years.



第 4 図 2023 年 8 月からの M5 以上の地震の年間発生予測. マゼンタ円は応力変化計算の震源として使用した地震. 青星印はその後 2024 年 7 月までに観測された M5 以上の地震.

Fig. 4 Distribution of the forecast number of annual $M \geq 5$ earthquakes in and around the Kahramanmaraş earthquake sources starting from August 1st, 2023. The blue stars are observed $M \geq 5$ earthquakes during the prediction period.