

10 - 3 2023 年 2 月 6 日に発生したトルコ中部地震の余震活動について Aftershock activity of the 6th February 2023 Central Turkey earthquakes

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

1) 2 月 16 日までの余震活動

下限マグニチュード $m_b 4.5$ として、USGS 暫定版カタログ¹⁾の余震データに、ETAS モデルを当てはめた。後述するように 2 月 16 日の余震活動は少数かつ複雑なので、最大余震 M7.5 から 0.01 日の経過時を起点として、それ以前の地震は ETAS モデルの履歴データとし、それ以後で最近までをターゲット期間としてデータをあてはめた²⁾。第 1 図は AIC 値が最小となる ETAS モデルである。余震減衰係数 $p=1.43$ である。本震後 1 週間時点では、この当てはまりが最良である。

2) 2 月 6 日の本震から最大余震までの活動

本震 M7.8 から最大余震 M7.5 までの期間のデータに、ETAS モデルのパラメータに制限をかけた、あらゆる組み合わせで適合度を比較した。ただし、下限 $m_b 4.5$ を考慮して、本震直後 15.4 分 (0.01 日) 以内のデータは ETAS モデルの履歴データとして、それ以後のから最大余震までをターゲット期間としてデータをあてはめた²⁾。まず、全区間を通して同一モデルの場合の最良モデルは、原型大森関数 ($p=1.0$) である。その適合図を第 2 図の左端に与えている。

次に、本震時から 1.1 時間 (0.046 日) の経過時で活動の変化があったとして適合度³⁾を調べたところ、変化点を考慮した 2 段階ポアソン過程モデルが、上述の大森モデルより、AIC を改善している (第 2 図の中央図と左側図)。しかし余震数は十分でなく、後述するように、本震直後からの検出率変化を考慮する必要がある。一応、この変化を相対的静穏化現象であると仮定して、第 3 b 図の時空間プロットを見ると、本震付近より南部での静穏化が見られる。

関連して、本震と最大余震のモーメントテンソル^{4,5)}に基づいて、2 月 16 日中のストレス変化 (第 3 図 c, d, e の ΔCFS) を見た。本震をソースとして最大余震を受け手とすると、第 3 図 c では ΔCFS が負値となる。しかし深さを増やすと ΔCFS は正値になる (第 3 図 d)。さらに注目すべきは最大余震のモーメントテンソル解で、ダブルカップル率が異常に小さく 34% である⁵⁾。この様に非ダブルカップル成分 CLVD が高いことは、断層が複雑な破壊を起こしていることを示しているが、これも深部からの流体貫入によるためであることが示唆される。これらのことから、深部の静的応力と地震動で流体の影響が示唆され、深部でのスロースリップに誘発されて最大余震が起きたと考えられる。この前駆的なスロースリップをソースとして、本震のメカニズム解と同様な余震群を受け手とした ΔCFS 図 (第 3 図 e) によれば、本震の南西部で ΔCFS が負値になり、そこで余震の静穏化 (第 3 図 b) につながったと説明できる。同様な間接的な誘発は、例えば 1997 年 3 月と 5 月の鹿児島県北西部地震や 2004 年中越地震と 2007 年中越沖地震の双子連鎖地震に見られる⁶⁾。なお本報告では近似的な矩形断層のモデリングによるものであるが、USGS は詳細な断層破壊モデルによる、本報告とは異なったクローン応力図から最大余震の直接的な誘発を示唆している⁷⁾。

さらに、USGS より多い余震データ数の、ヨーロッパ地中海地震センター (EMSC) のオンラインデータ⁸⁾から最初の 1 日の特徴を調べた。EMSC カタログでは、通常時はターゲットマグニチュードの M3 前後より小さい地震は無視され編集されていないが、2 月 6 日当日には、検出できた地震を全てリストアップしている様に見える。第 4 図で本震由来の余震群 (黒丸) と最大余震由来の余震群

(灰色丸) に分けて 2 月 6 日のデータの特徴を調べた。まず第 4 図 b2 に見られるように、最大余震後に南側の M-T 図が極端に薄くなっている。すなわち最大余震が起こってから顕著に南側の活動が見掛け上落ちている。そこで検出率(欠測率)モデル⁹⁾を推定し、当日のデータと比べた。検出率モデルのパラメータ変化(第 4 図 c1-3)から計算されたマグニチュード下限を上げていくと、 $M \geq 4.5$ (第 4 図 d2)では、先ほど USGS のデータで解析した第 2 図の変化点付近で可なり欠測している。したがって、相対的静穏化の有意性を確認するためには、本震直後の欠測率を加味した均質データを回復して議論する必要がある。

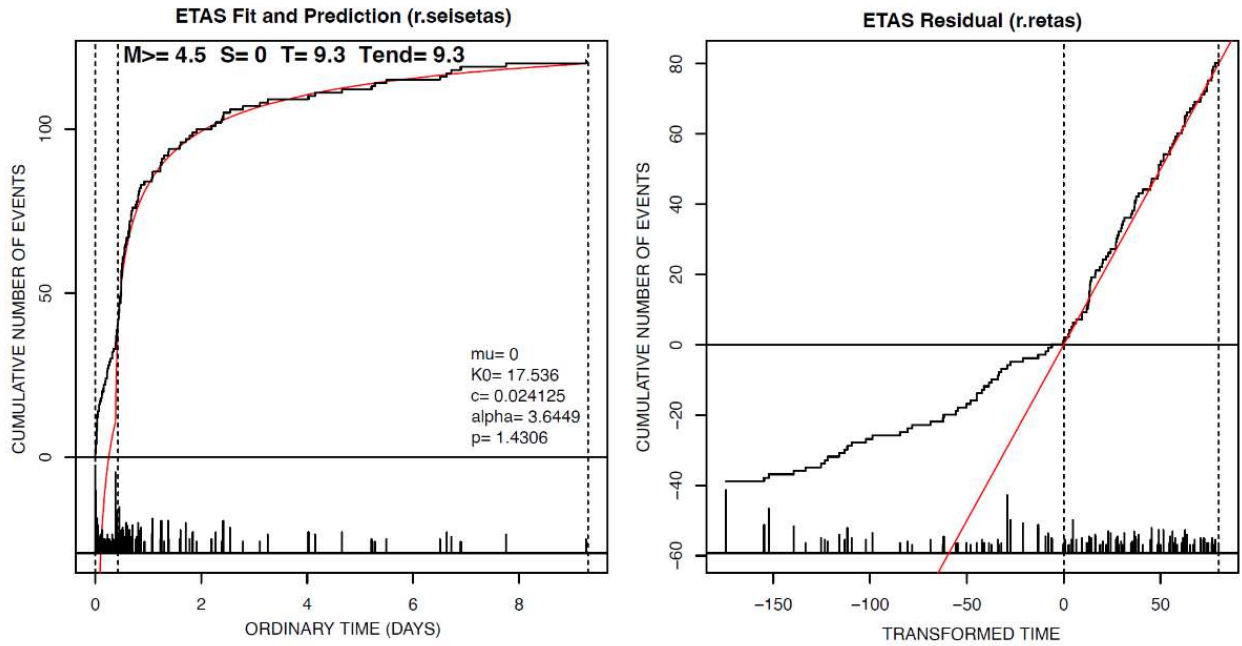
本解析に気象研究所提供の地殻変動解析支援プログラム MICAP-G を使用した。

(尾形良彦, 熊澤貴雄)

参考文献

- 1) USGS (2023) <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>
- 2) Ogata, Y. (2006) SASeis2006, ISM Computer Science Monographs, No.33, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html
- 3) Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S. (2010) *J. Geophys. Res.*, **115**, B10312, <https://doi.org/10.1029/2010JB007567>
- 4) USGS (2023) <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/moment-tensor>
- 5) USGS (2023) <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jlqa/moment-tensor>
- 6) 尾形良彦 (2018) 予知連会報 **79** (7-3), https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/07_03.pdf
- 7) USGS (2023, Feb. 28) <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey2023.html>
- 8) European-Mediterranean Seismological Centre (2023) LASTQUAKE the official EMSC earthquakes app, <https://www.emsc-csem.org/>
- 9) Ogata, Y. and Katsura, K. (1993) *Geophys. J. Int.* **113**, 727-738, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb04663.x>

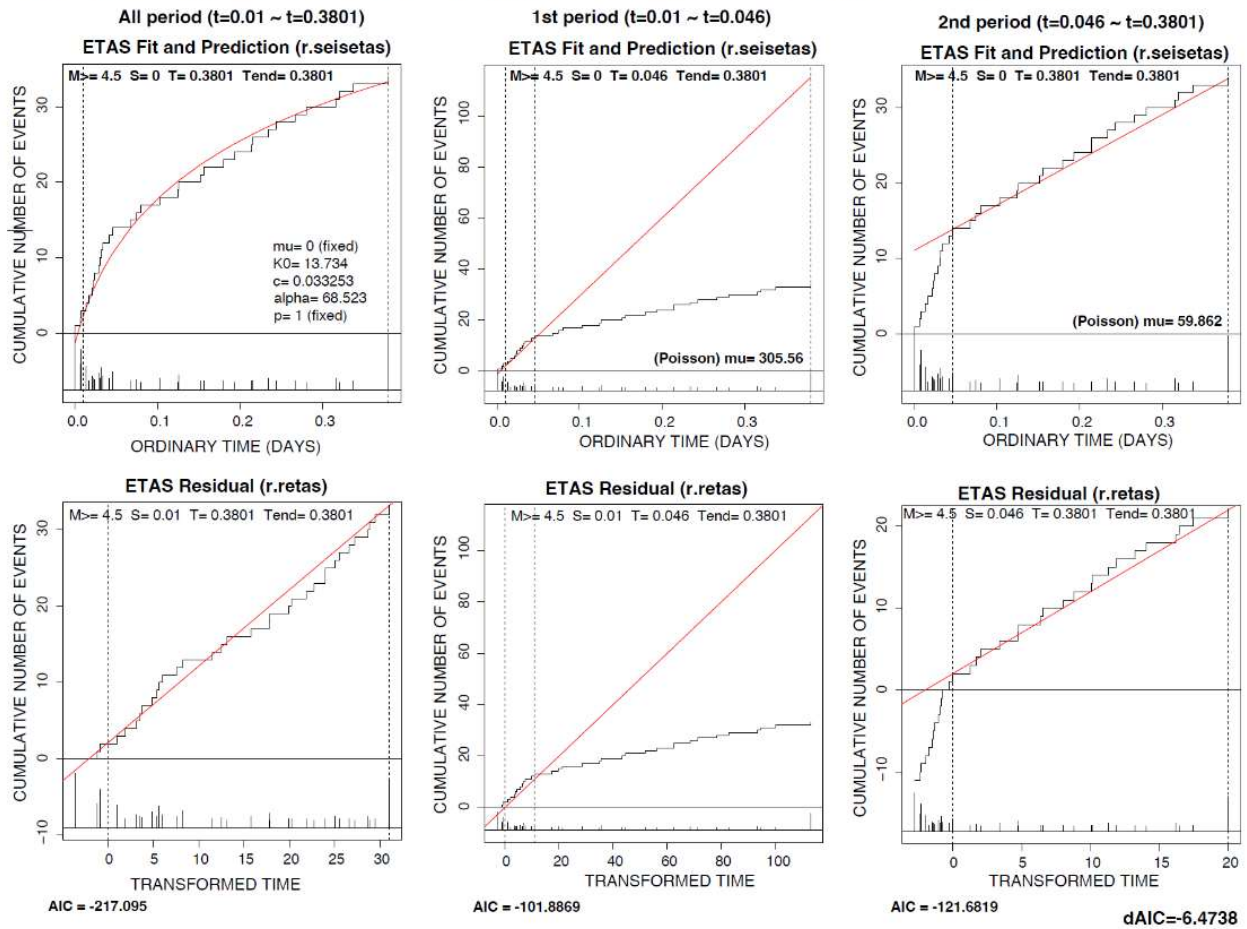
Best ETAS Estimates (From M7.5 to Feb.15, $M_c \geq 4.5$)



第 1 図 最大余震 M7.5 直後から 2 月 16 日までの余震活動の適合図

Fig. 1 Fitted model to the aftershock activity for the period from immediately after the largest aftershock of M7.5 through February 16.

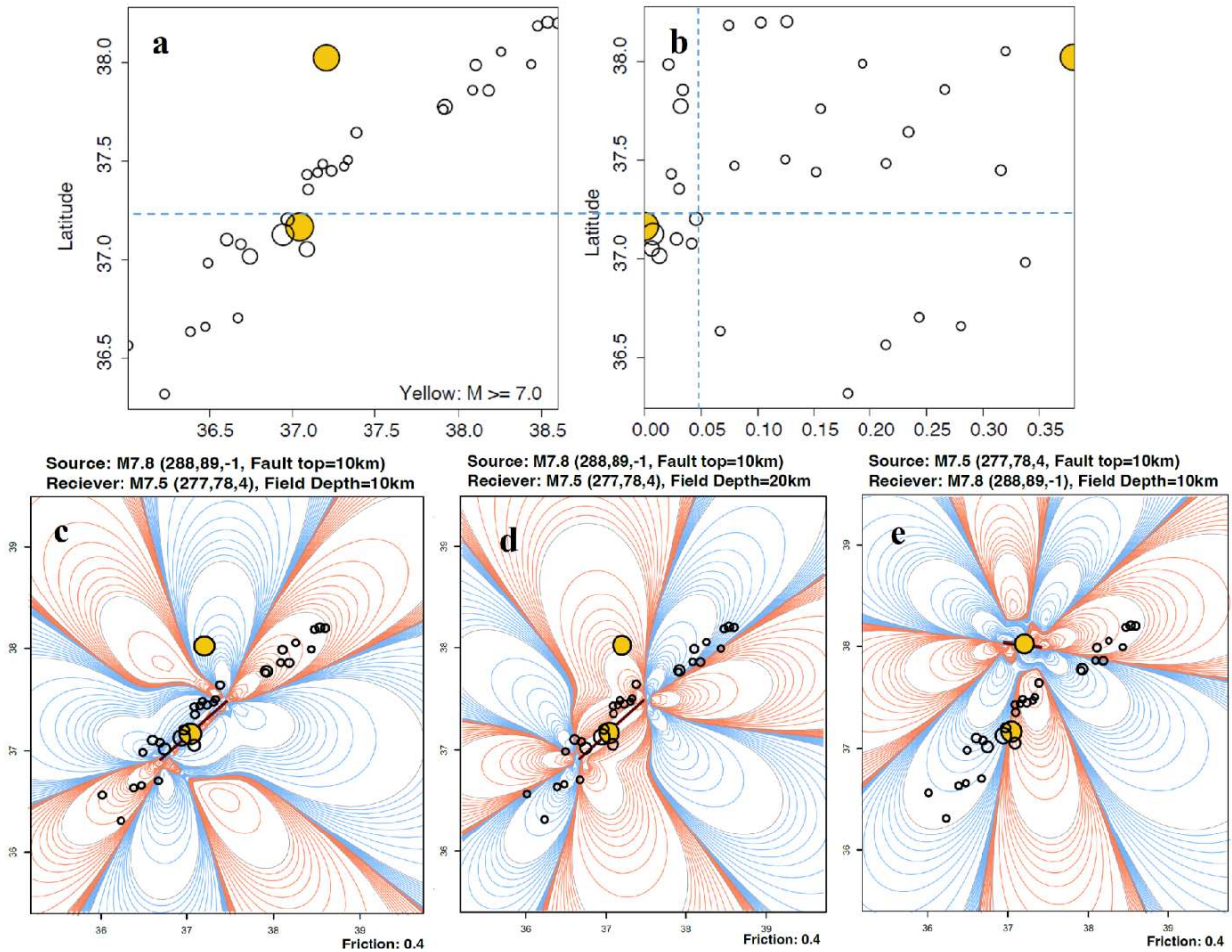
Best ETAS Estimates (From M7.8 to M7.5, Longitude 35~40, Latitude 35~40, Depth 0~40km, $M_c \geq 4.5$)



第 2 図 本震 M7.8 から最大余震 M7.5 までの活動。左端は全区間、中央と右端は変化点を考慮。下段図は上段図の変換時間に対するもの。

Fig. 2 Comparison of the models for the activity from the mainshock of M7.8 to the maximum aftershock of M7.5. The leftmost panel shows of the entire section, and the center and rightmost panels show the model with the change points. The lower figures correspond to the same one with the transformed time in the upper figures, respectively.

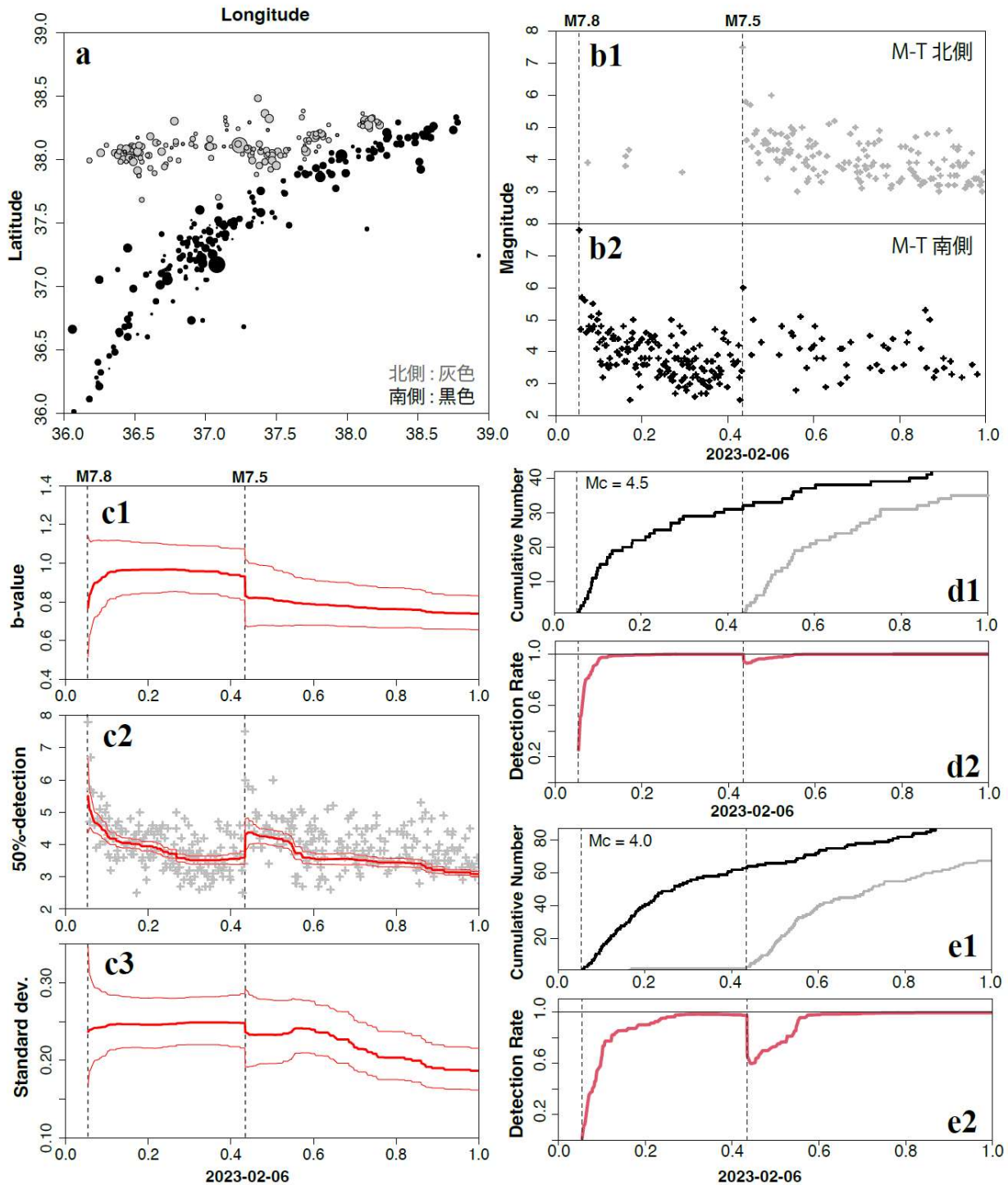
From M7.8 to M7.5 (Depth 0~40km, $M_c \geq 4.5$)



第 3 図 M7.8 の本震から M7.5 の最大余震までの余震活動とせん断応力の変化。 a) 震源地の分布, b) 緯度 v.s. 経過時間, c) 本震震源モデルに対する最大余震の受け皿としての静応力変化, d) 本震震源モデルに対する最大余震の深部延長部の静応力変化, e) 最大余震深部のすべりから本震と同じメカニズム解の余震への静的ストレス変化。

すべて ΔFCS では見かけ摩擦係数 $\mu' = 0.4$ である。シナリオの詳細は本文参照。

Fig. 3 Aftershock activity from the main shock of M7.8 to the maximum aftershock of M7.5 and change in shear stresses. a) Distribution of epicenters; b) latitude v.s. elapsed time; c) static stress change of the maximum aftershock as a receiver relative to the mainshock source model; d) static stress change in the deeper extension of the maximum aftershock relative to the mainshock source model; and e) static stress change from the slip on the deeper extension of the maximum aftershock to the same mechanism solution as the mainshock; all ΔFCS is with the apparent friction coefficient $\mu' = 0.4$. See text for scenario details.



第 4 図 EMSC オンラインデータに基づく 2 月 6 日の検出データの特徴。a) 震央； b1 と b2) M-T 図； c1) b 値； c2) 50% 検出率のマグニチュードの時間経緯； c3) σ 値； いずれも 95% 誤差曲線付き。d1) と d2) $M \geq 4.5$ の余震の累積と検出率の時間経過。e1) と e2) $M \geq 4.0$ の余震の累積と検出率の時間経過。

Fig. 4 Characteristics of February 6 activity data based on EMSC online data. a) epicenters; b1 and b2) M-T plots; c1, c2, and c3) estimated b-values, magnitudes of 50% detection rate, and standard deviations of magnitude detection (all with 95% error curves); d1) and d2) cumulative number and detection rates of $M \geq 4.5$ events; e1) and e2) same as the above but for aftershocks of $M \geq 4.0$.