

第 372 回地震調査委員会資料

京都府南部の群発地震活動に関する報告

- 地震活動 2022 年 3 月～5 月、及び M4 地震続発事例 (2～5 ページ)
- 地震活動 静穏化 (6～7 ページ)
- 地震活動 ETAS による地震活動の異常性の評価、b 値 (8～9 ページ)
- 変位・ひずみ速度場 全国版 (10～12 ページ)
- 変位・ひずみ速度場 京都西山断層帯周辺 (13～14 ページ)

2022年5月13日

京都大学防災研究所

京都府南部の地震（2022年3～5月）

京都府南部では2022年3月31日M4.4の発生後約1か月間に、4月25日M4.2、4月30日M4.1、5月2日M4.4と、M4を超える地震が3月31日M4.4の震源から3km以内で続発している。4月25日M4.2以外の地震は約1km以内という狭い範囲に集中して発生している。大地震の余震を除けば、M4クラスの地震が狭い範囲で続発することは珍しいため、近畿地方中北部において、同様の例がないかどうかを調べてみた。図1に示した領域において、1976年以降に発生したM4以上の地震の中で震源精度が良いと考えられるもの52個について、発生後約1か月間の地震活動について詳しく調べた。阿武山テレメーター微小地震観測網(黒磯・渡辺, 1978)による精度の良い震源分布が得られている1976年から1999年までは阿武山観測網のデータ、2000年以降は気象庁の一元化震源データ(一部は速報値)を用いた。図1は、一元化カタログによるもので、黒丸・赤丸が調べた地震の震央、赤丸が最初の地震から約1か月以内に2.5km以内においてM4クラスの地震が発生した地震群であり、図2に最初の地震から約1か月間の震源分布と時系列を示した。

図2.1は2022年の京都府南部の地震活動である。4月30日M4.1と5月2日M4.4は、3月31日M4.4の直後の活動域の端付近で発生し、それらの直後の活動は、それまでの活動域から外側へ大きくは広がっておらず、むしろ以前の活動域内に多く発生しているように見える。図2.2は、1999年2月12日M4.0と3月12日M4.1に伴う活動である。3月12日M4.1は南東側の隣接領域を破壊したように見える。図2.3は、兵庫県南部地震の約2か月前に発生した1994年11月の猪名川群発地震活動である。11月9日M4.2の約4時間後に11月10日M4.2が発生しており、両者の震源はほぼ同じ位置に決まっている。11月10日M4.2発生以前の活動は最初の震源の東側に限られるのに対して、11月10日M4.2後の活動は広い範囲に及んでいる。1つ目が活動域の東側を、2つ目が西側を破壊した可能性が考えられるが、11月10日M4.2発生前の活動域はM4.2の割には500m程度以内と非常に小さいため、これらの活動は破壊域を十分に反映しておらず、2つのM4クラスが同じ領域を破壊した可能性も考えられる。2つの地震の間隔が短いことと、および、阿武山微小地震観測網における大きめの地震の震源決定精度の問題のため、より詳しく解析する必要がある。また、1か月間の地震活動はバースト的に起こっている。図2.4は、2008年8月8日M4.2と8月30日M4.2に伴う活動である。この2つの震源も非常に近接した位置に決定され、それぞれの直後の活動域はほぼ重なっている。

以上から、近畿地方中北部において、大地震の余震以外において、時空間的にM4クラスの地震が近接して発生する場合に、隣接領域を破壊する場合と、それまでの破壊域と同じところを再び破壊していると推定される場合の2とおりある可能性が見えてきた。猪名川群発地震活動はどちらの可能性もあるが、2008年8月の活動と同じく同一の領域を破壊したとすると、これらの活動においては2つ目までの間隔が短いため、周囲からの応力載荷が間に合うとは思えず、流体による強度低下により引き起こされた可能性が高いと推定される。1999年2月と3月の活動は、1つめの地震による応力集中のために2つめの地震が発生したものと考えられる。2022年の京都府南部の地震活動については、4月25日M4.2以外の2つの地震については、1つめの活動域の端付近で発生しているが、直後の活

動域が最初の地震とオーバーラップしているようにも見える。ただし、5月2日 M4.4 の直後の活動は共役方向に伸びているようにも見えるため、これらが同じ領域を破壊したかどうかはさらに検討する必要がある。

謝辞：気象庁一元化震源データを使用させていただきました。

(文責 飯尾)

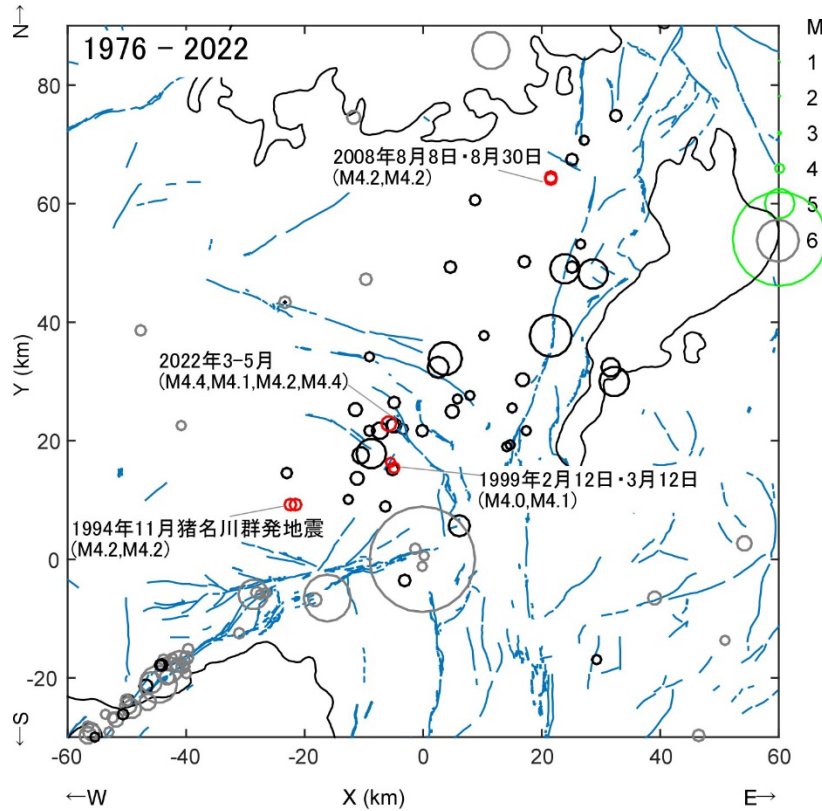


図1 近畿地方中北部における1976年から2022年3月までのM4以上の震央分布(一元化震源データによる)。丸の大きさはMから推定される断層の長さに比例。

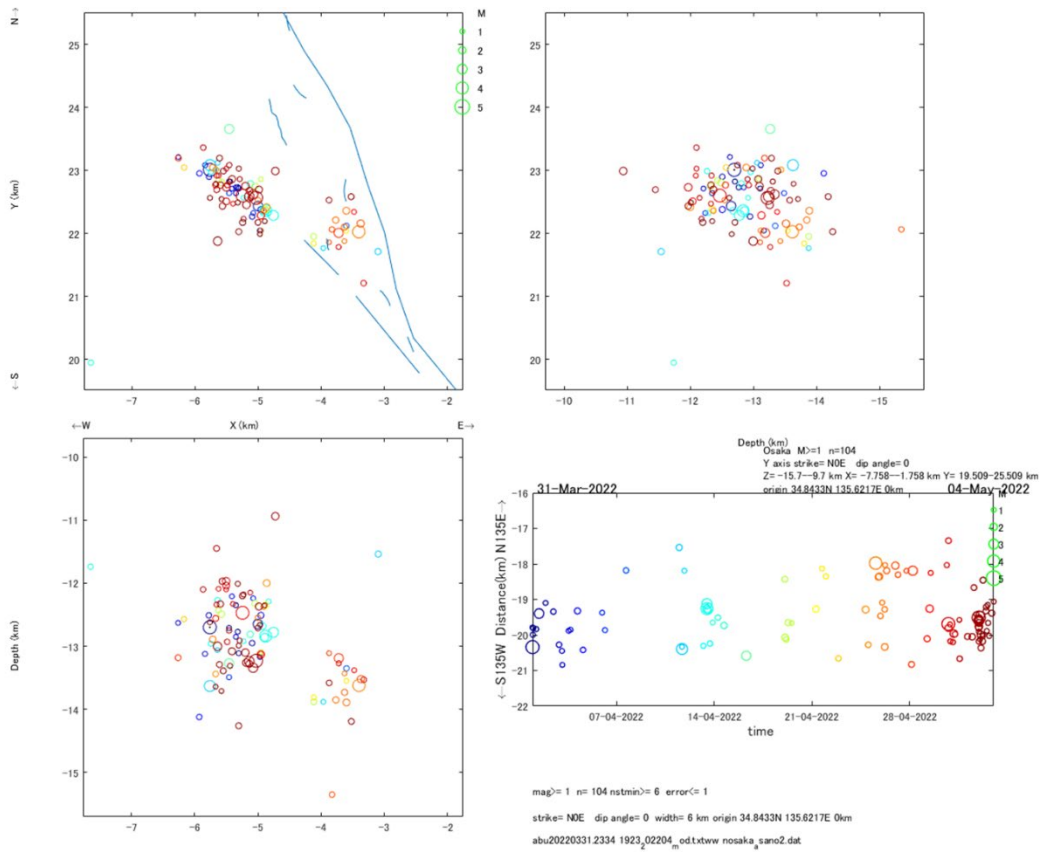


図 2.1 2022 年の京都府南部の地震活動。左上：震央分布、左下：東西断面図、右上：南北断面図、右下：時系列(縦軸は NW-SE 方向の震源位置)。発生時を色で示している。

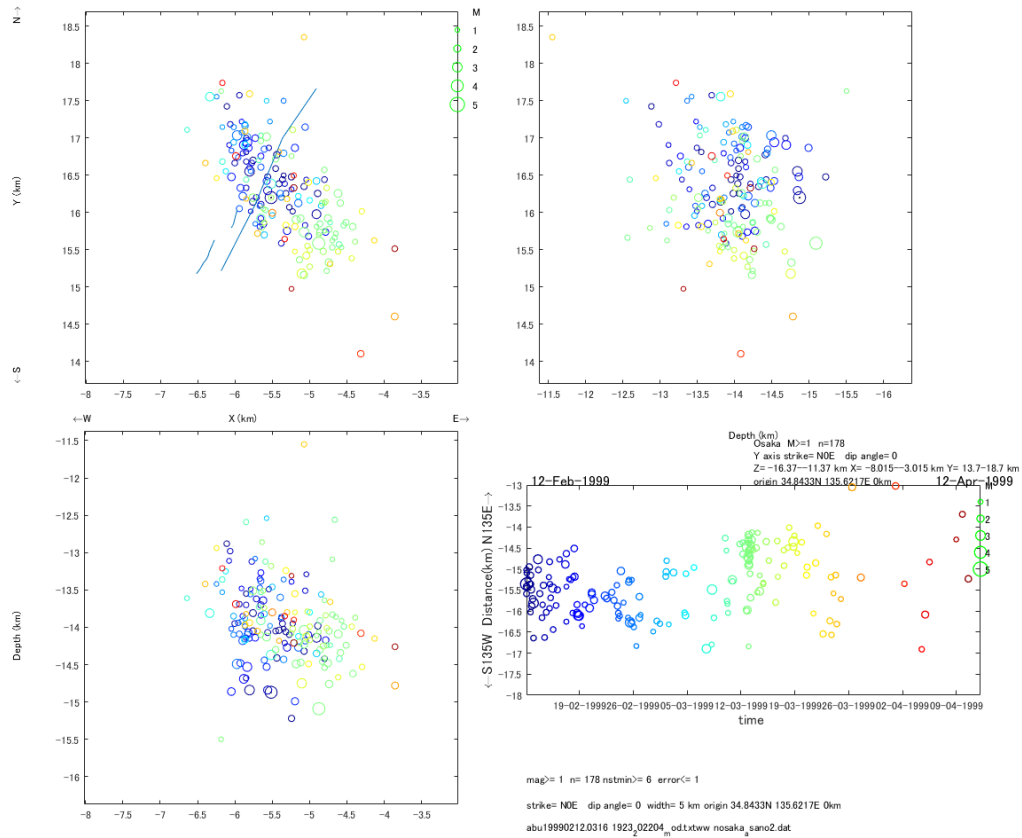


図 2.2 1999 年 2 月 12 日～3 月 12 日の地震活動(M4.0,M4.1)。

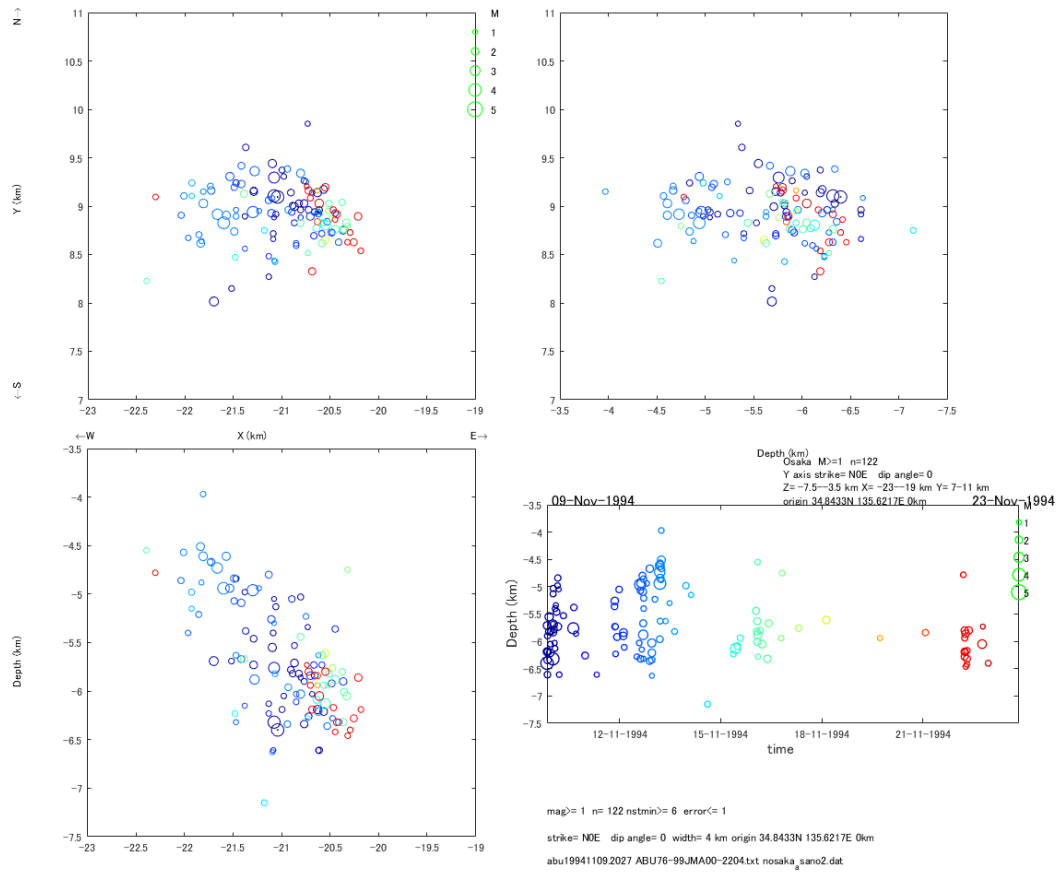


図 2.3 1994 年 11 月の猪名川群発地震活動(M4.2,M4.2)。時系列の縦軸は震源の深さ。

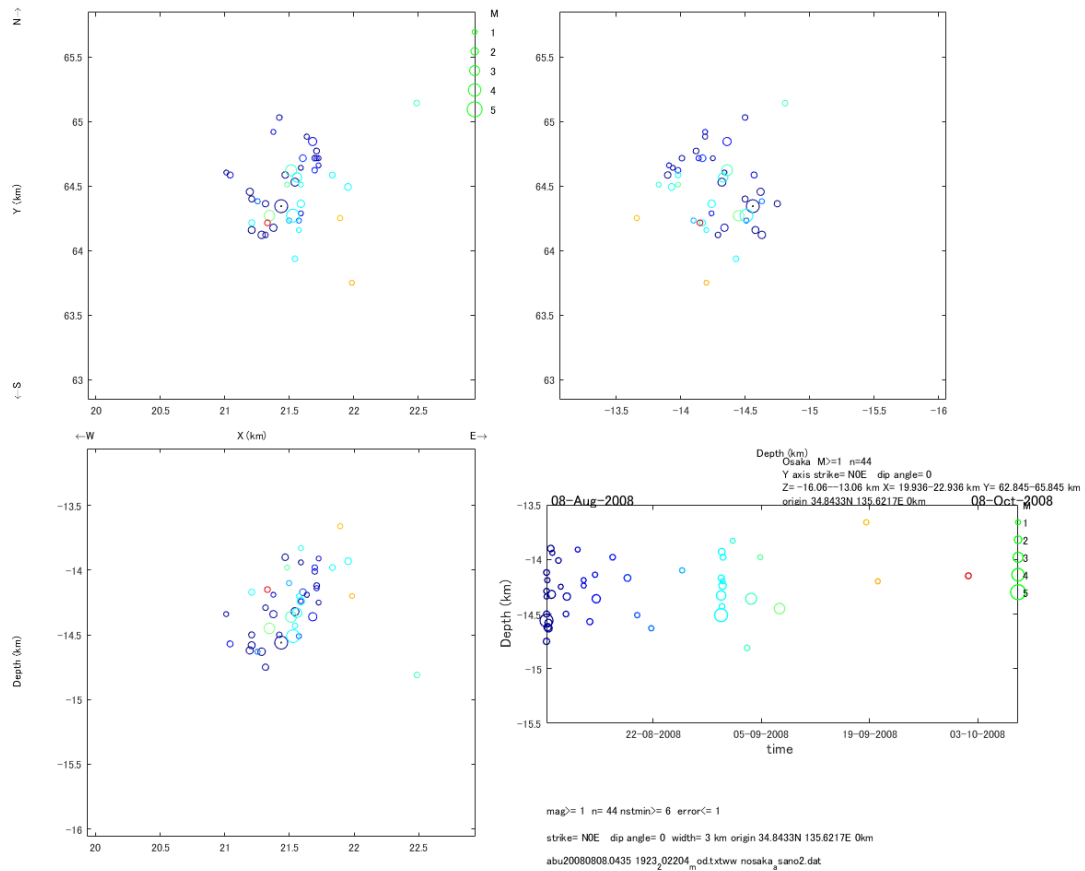


図 2.4 2008 年 8 月 8 日と 8 月 30 日に伴う地震活動 (M4.2,M4.2)。時系列の縦軸は震源の深さ。

今回の一連の M4 級地震の周辺 20km 四方の領域で、本年 1 月頃から地震発生数が顕著に低下する「静穏化」が起きていた。発生数だけでなく、2~3 月は M2 級もほとんど起きていない。
 北摂・丹波地域の微小地震活動極めて定常的なため、積算発生回数のグラフは右上がりのほぼ直線状になりるのが普通である。本年 1 月初めから発生レートが低下し、3 月末の M4 級発生までその低レートが維持されたため、グラフは直線が突然折れ曲がっているようになるという顕著な特徴を呈する。亀岡盆地周辺域では、過去に M4 以上の地震が多数発生しているが、同様の静穏化がみられるのは、1987 年 M5.0 や 1999 年の M4.0 の前など少数の例しか無い。

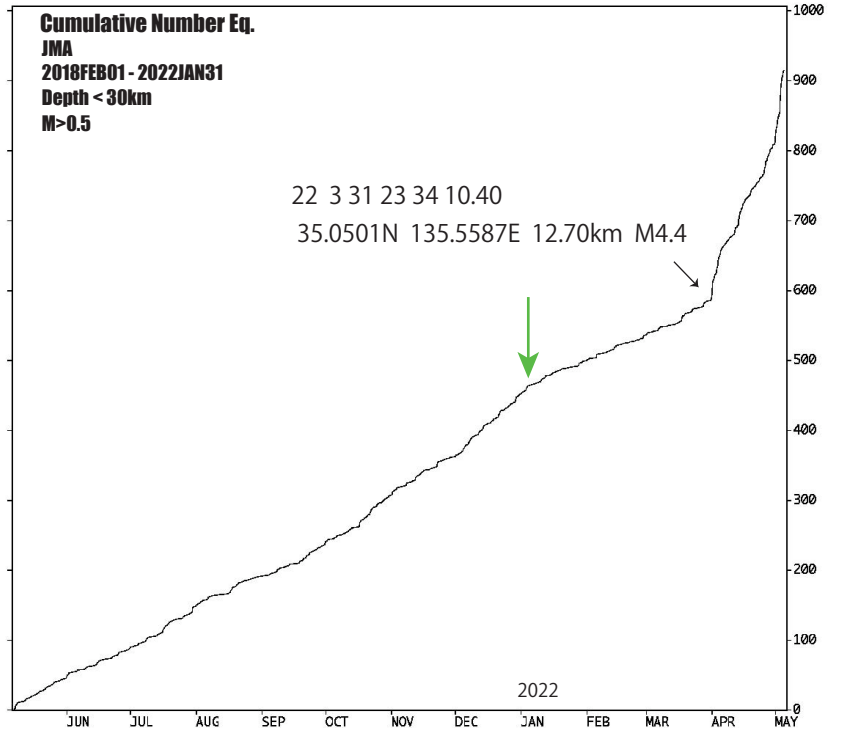
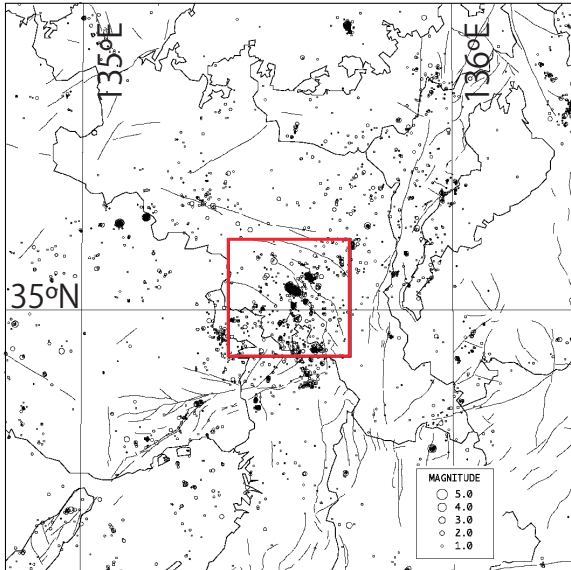


図 1 (上)：近畿地方中北部の微小地震分布
 2021.05.06-2022.05.05, Depth<30km, M>0.5

図 2 (右上)：図 1 中央の赤い正方形 (20km 四方) 領域内の積算発生数. 『静穏化』の始まりを見とりの矢印で示す.

図 3 (右下)：同じく MT 図. 一連の M4 発生前の本年 1~3 月は活動が極めて低調だった。(気象庁一元化震源 (速報) カタログによる)

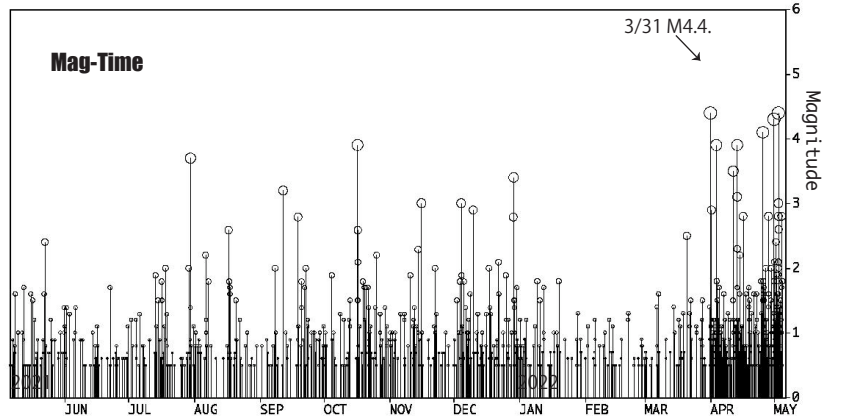


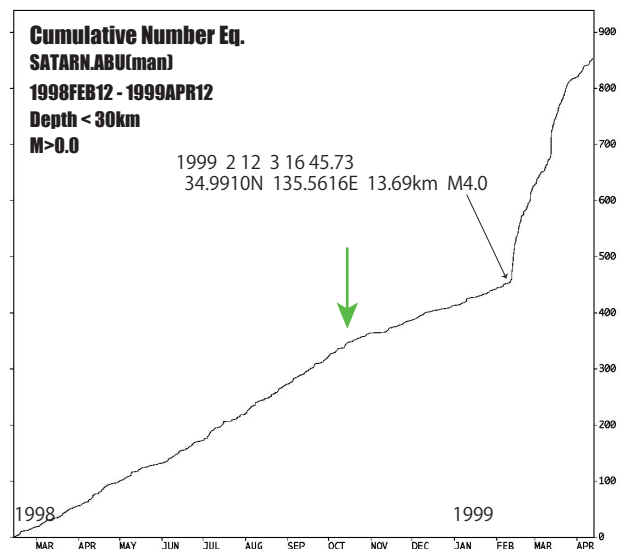
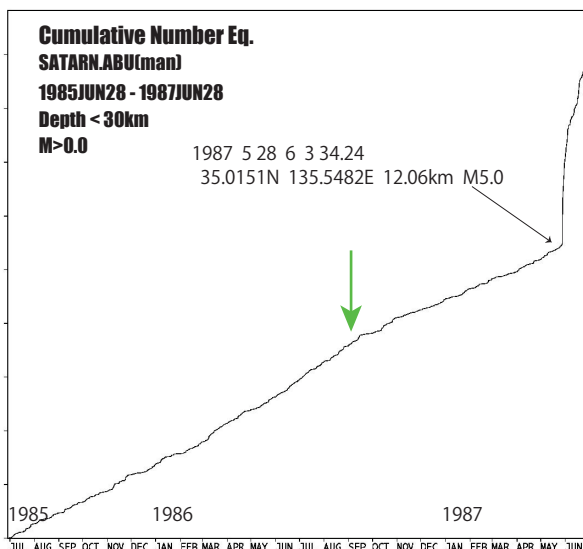
図 4 (下左)：1987 年 5 月 28 日 M5.0 の周り 20km 四方の領域における積算発生数.

1985.06.28-1987.06.28, Depth<30km, M>0.0

図 5 (下右)：1999 年 2 月 12 日 M4.0 の周り 20km 四方の領域における積算発生数.

1998.02.12-1999.04.12, Depth<30km, M>0.0

(京都大学防災研究所阿武山系観測網再験測データによる)



1994年猪名川群発地震

北摂・丹波地域の「群発」といえば、兵庫県南部地震前に兵庫県猪名川町付近で発生した「猪名川群発地震」が想起される。1994年11月9日のM4.0を皮切りに、深さ5km付近と浅いこともあって有感地震が相次ぎ、関西では大きな関心を集めた。

2022.5.13 京都大学防災研究所地震予知研究センター

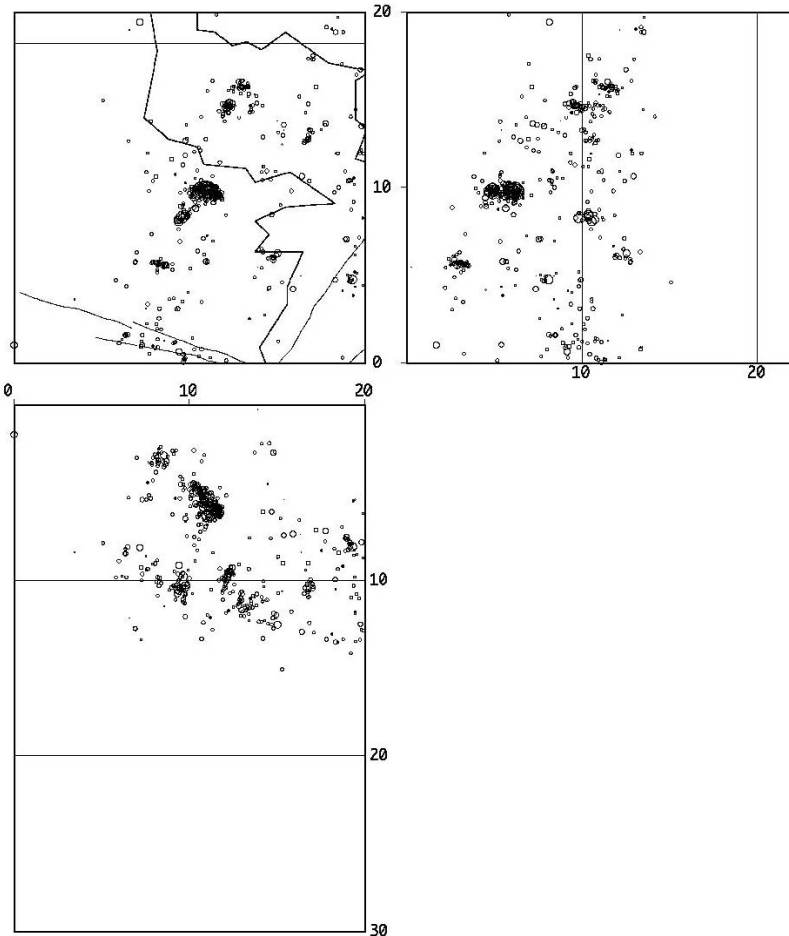
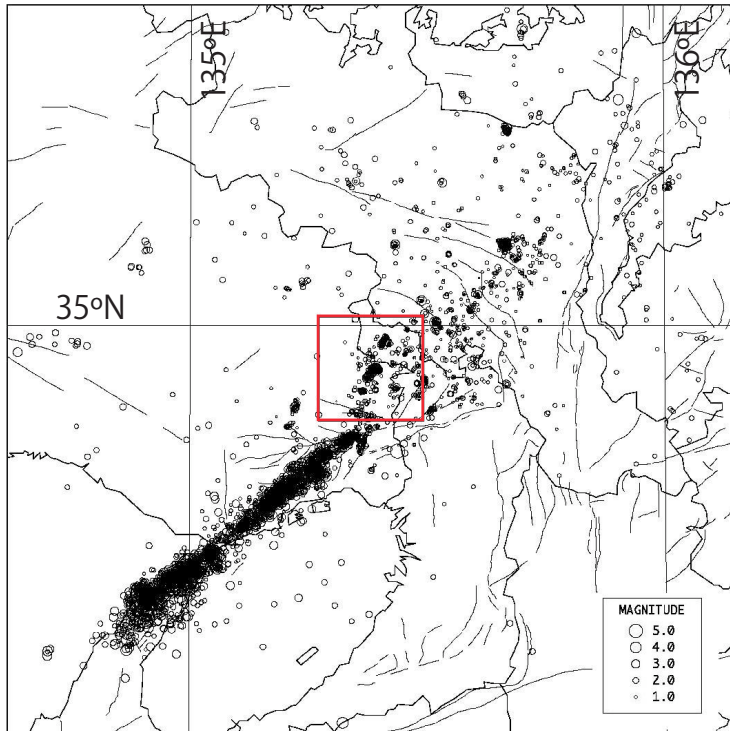


図1 (上)：近畿地方中北部の微小地震分布
1994.01.01-1995.01.31, Depth<30km, M>0.0

京都大学防災研究所阿武山系観測網再験測データによる。

図2 (右)：図1中央の赤い正方形(20km四方)領域内の震央分布および南北/東西断面。

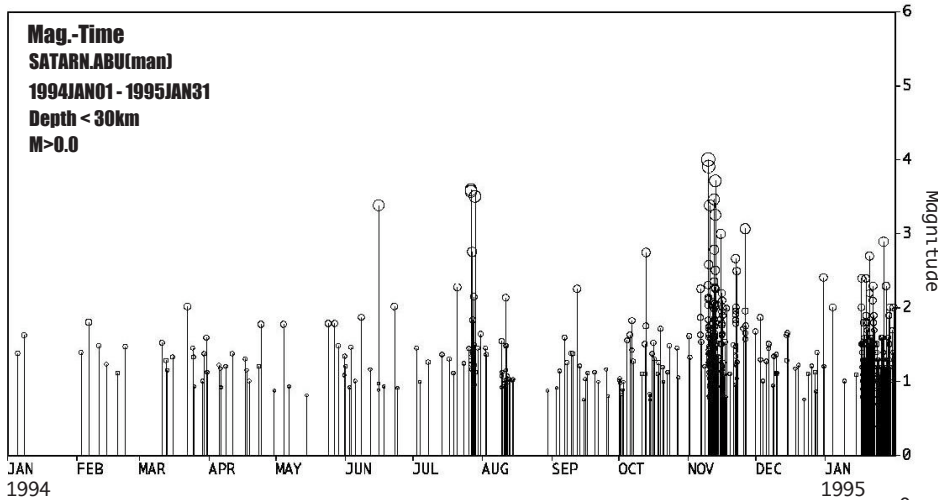


図3 (上)：図1中央の正方形領域内のMT図

11月の群発活動の前、7月末にほぼ同じ場所の深さ10km付近で小群発活動(最大M3.6)があった。兵庫県南部地震の直後には浅いもので深さ3km付近のやや広域の活発な活動があった。

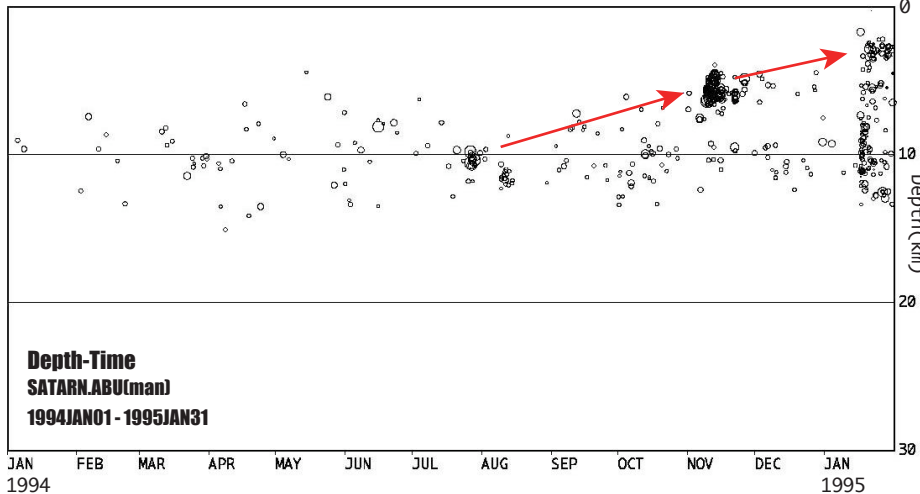


図4 (下)：同じく、深さの時間変化
7月の群発、11月の群発、兵庫県南部地震後の活動と、徐々に浅くなってきているのが注目され、流体の上昇した可能性について議論された。

1994.01.01-1995.01.31, Depth<30km, M>0.0.
京都大学防災研究所阿武山系観測網再験測データによる。

ETAS モデルを用いた京都府周辺における地震活動の異常性の評価と 亀岡市周辺のグーテンベルグ・リヒター則の b 値について

ETAS モデル(Ogata, 1988)を用いて京都府周辺(図 1 左)における地震活動の異常性の評価を行った。ETAS モデルは、定常なレートでランダムに発生する背景地震活動とその余震活動によって地震活動を表現するモデルで、地震活動の標準的な統計モデルである。解析期間は、2002 年 5 月 11 日から 2022 年 5 月 10 日とした。まず、解析期間内の気象庁一元化震源(暫定値を含む)の $M \geq 3$ の地震に対して、ETAS モデルのパラメータを最尤法で推定した。つぎに、観測された地震発生頻度以上の地震発生頻度を ETAS モデルで再現できる確率を計算した。この確率が低いほど、地震活動の異常性が高い(異常な活発化)と言える。確率の計算には、西川・西村(2019)の手法を用いた。手法の詳細は下記の web ページを参照されたい。

<https://sites.google.com/site/tomoakinishikawahomepage/home/今日の地震活動>

結果は以下の通りである。2022 年 3 月 13 日から 5 月 10 日(現在)にかけて、 $M \geq 3$ の地震活動の異常な活発化が認められた(図1右)。3 月 13 日から 5 月 2 日の地震活動については、特に異常性が高く、ETAS モデルで再現できる確率は 0.07%であった。これらの結果は、2022 年 3 月 13 日から 5 月 10 日の地震活動が、ETAS モデルがモデル化する本震・余震の連鎖では説明できないことを示す。

加えて、上記の異常な地震活動の活発化が確認された京都府亀岡市周辺(図 2 左)の規模別頻度分布を調べた(図 2 右)。この際、2022 年 1 月 1 日から 2022 年 5 月 8 日の気象庁一元化震源(暫定値を含む)の $M \geq 1$ 以上の地震を用いた。作図には TSEIS(鶴岡, 1997)を使用した。この規模別頻度分布から最尤法を用いてグーテンベルグ・リヒター則の b 値を計算(Aki, 1965)すると、 $b = 0.74 \pm 0.06$ であった。この際、 b 値の計算に使用する下限マグニチュードは $M = 1$ とした。この b 値($b = 0.74$)は、当該地域における長期的な b 値($b = 0.91 \pm 0.02$)と比べて低い。ここで、長期的な b 値は、2018 年大阪北部地震とその余震の影響を除くため、2001 年 1 月 1 日から 2017 年 12 月 31 日までの $M \geq 1$ 以上の地震を用いて計算した。また、図 2 右を見ると、 $M2.3$ より大きなマグニチュードでは $b = 0.74$ の直線(青実線)に比べて、データ(赤丸)が上側に外れている。これは、グーテンベルグ・リヒター則($b = 0.74$)から期待されるよりも、多くの地震が発生したことを示す。 $M2.3$ 以上の地震のみを使って b 値を計算すると、 $b = 0.41$ となり、 b 値はさらに低下する。

以上の ETAS モデルと規模別頻度分布の解析から、(1)2022 年 3 月から 5 月(現在)にかけて、京都府亀岡市周辺で $M \geq 3$ の地震活動の異常な活発化が発生していたこと及び(2)この活動の b 値は同地域の長期的な b 値と比べて低いことの 2 点が明らかとなった。

謝辞: 本解析には気象庁一元化震源(暫定値を含む)を使用しました。作図には TSEIS(鶴岡, 1997)を使用しました。記して感謝申し上げます。

ETAS parameters: alpha, c, K, p, mu

1.869200, 0.006268, 0.006147, 1.000000, 0.014867

Number of events since May 2002

166

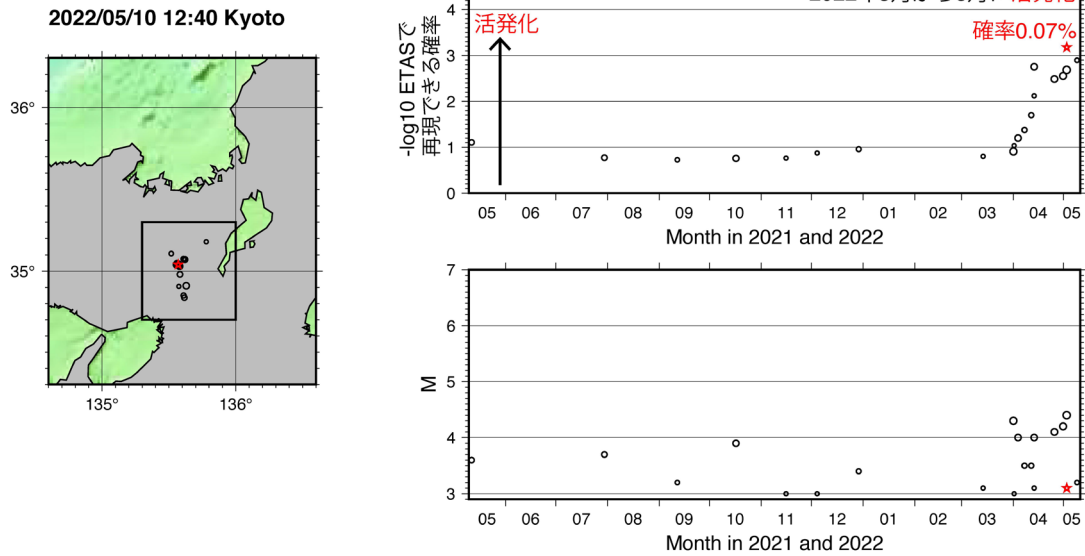


図1. 左図は2021年5月11日から2022年5月10日までの $M \geq 3$ の震央分布。黒丸が震央。赤星は ETAS モデルで再現できる確率が 0.1%以下の地震の震央。黒い実線は解析領域を示す。右上図は ETAS モデルで再現できる確率の推移。右下図は M-T ダイアグラム。

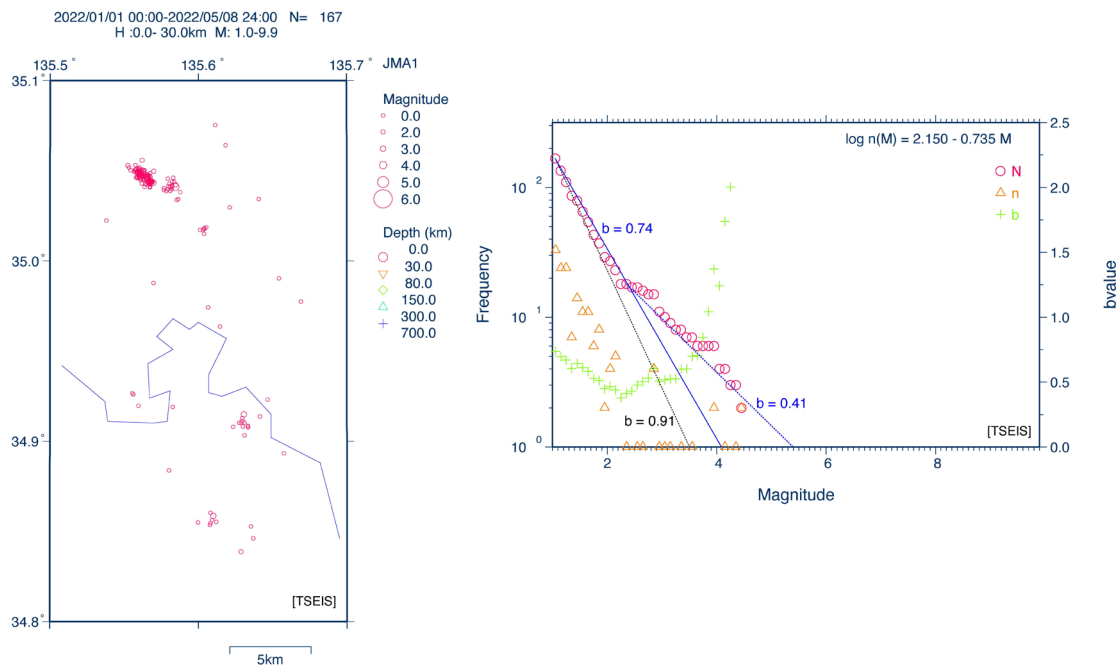


図2. 左図は京都府亀岡市周辺の2022年1月1日から5月8日の震央分布 ($M \geq 1$)。右図はその規模別頻度分布。

日本全国の時間変化付き歪み速度場（2017年10月～2020年9月）

Okazaki et al. (2021)の方法を用いて、GNSSによって得られた変位速度データを平滑化条件付きの基底関数展開により補間することで変位速度場を求めた（深畑ほか，2022）。グリーン関数が δ 関数の場合のインバージョン解析（回帰分析）に相当し、先験条件（平滑化条件）とデータの重みはABIC最小の規準により求めた。得られた変位速度場を適当に微分することにより、歪み速度場が得られる。

群発地震が発生している亀岡周辺は、新潟神戸歪み集中帯に位置し、全期間を通じて 10^{-7} [yr⁻¹] を越えるやや速い歪み速度が得られている。東西～東南東－西北西の圧縮が主で、それと直交する方向に弱い伸張が認められる。2017年－2020年の期間では、亀岡の断層を挟んで東西で顕著に異なる歪み速度が得られているが、それは大きな誤差を持つ観測点のデータ（後述）が解析に含まれてしまっているためと考えられる。

[文献]

深畑幸俊・岡崎智久・西村卓也，2022，GNSSデータに基づく日本列島の歪み速度場と島弧間および島弧内変動，地学雑誌，印刷中

Okazaki, T., Fukahata, Y. & Nishimura, T. 2021. Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC, *Earth Planets Space*, 73:153, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01474-5>.

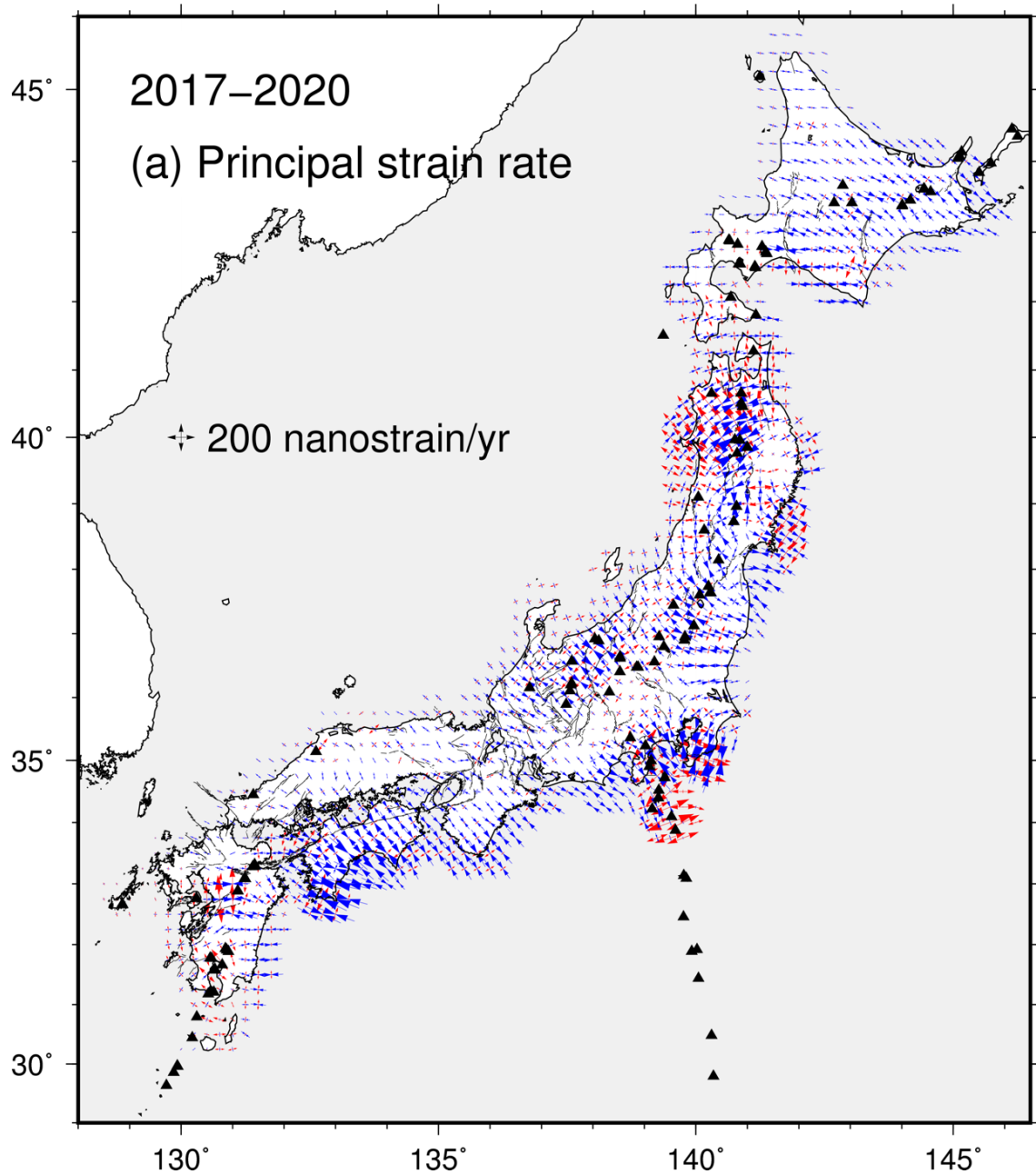
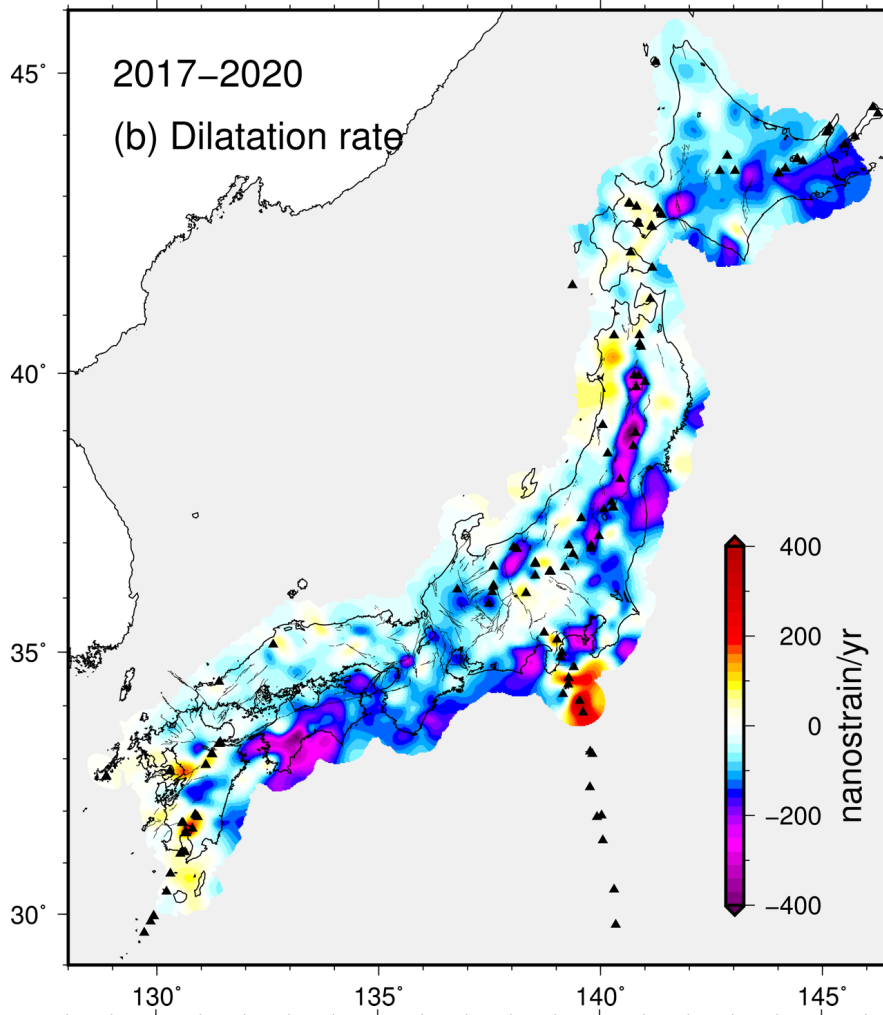


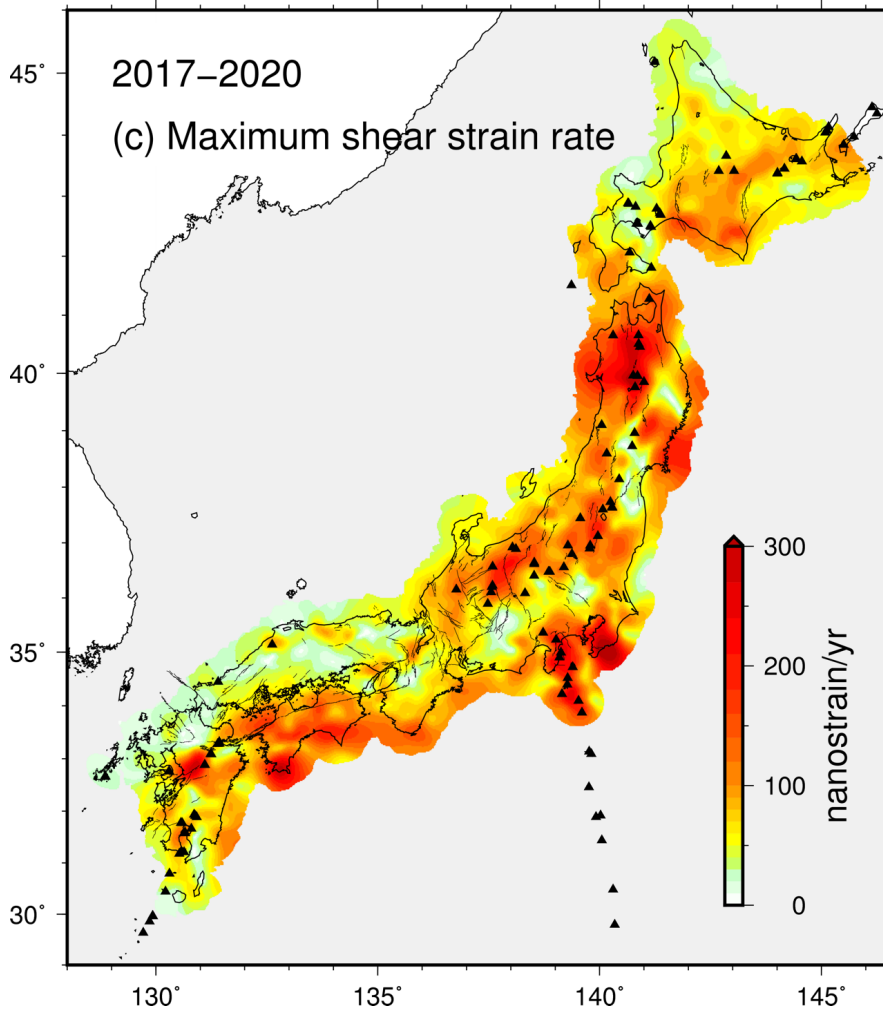
図1. 2017年10月1日から2020年9月30日のGNSS速度データから推定した日本列島の歪み速度。黒細線は活断層（地震調査研究推進本部, 2022）、黒三角は活火山（気象庁, 2013）をそれぞれ表す。(a) 歪み速度主軸の方向と大きさ。青と赤の矢印はそれぞれ短縮および伸張の速度を表す。(b) 面積歪み速度。マイナス（青色）が収縮、プラス（赤色）が膨張を表す。(c) 最大剪断歪み速度。

(図は次ページに続く)

☒ 1 (b)



☒ 1 (c)



京都西山断層帯付近の変位・ひずみ速度 (2019年12月-2021年11月)

京都大学防災研究所地震予知研究センターでは、京都府、大阪府及び兵庫県に、11ヶ所のGNSS連続観測点を設置しており、京都市埋蔵文化財研究所からも5ヶ所のデータの提供を受けて、地殻変動の観測を行なっている。これらの観測点と国土地理院GEONET観測点の2019年12月から2021年までの平均的な変位速度ベクトルを図1に、Okazaki et al.(2021)の手法で計算した歪み速度の分布を図2に示す。京都府南部の観測点周辺の植生の影響を受けていると思われる2観測点を除けば、南側の観測点ほど西向きの変動が大きく、有馬-高槻断層帯の右横ずれの変形が読み取れるが、京都西山断層帯付近で大きな変化は見られない(図1)。ひずみ速度場(図2)を見ると、この地域では、西北西-東南東方向の短縮変形が卓越しており、琵琶湖から大阪湾にかけて特にひずみ速度の大きな場所が広がっている。3月以降の亀岡市付近の地震はその辺縁部で発生している。

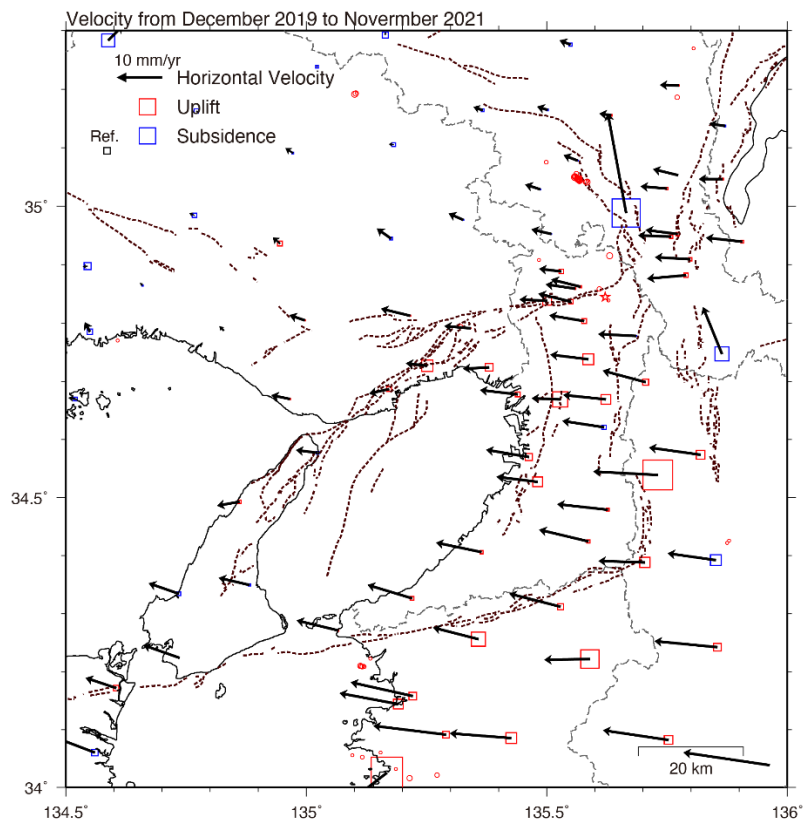


図1 2019年12月から2021年11月までの平均速度ベクトル。赤茶点線は主要活断層(地震調査委員会, 2022)。赤丸は2022年3月1日から5月8日までのM2以上の気象庁一元化震源を表示した。赤星は、2018年大阪府北部地震の震央。

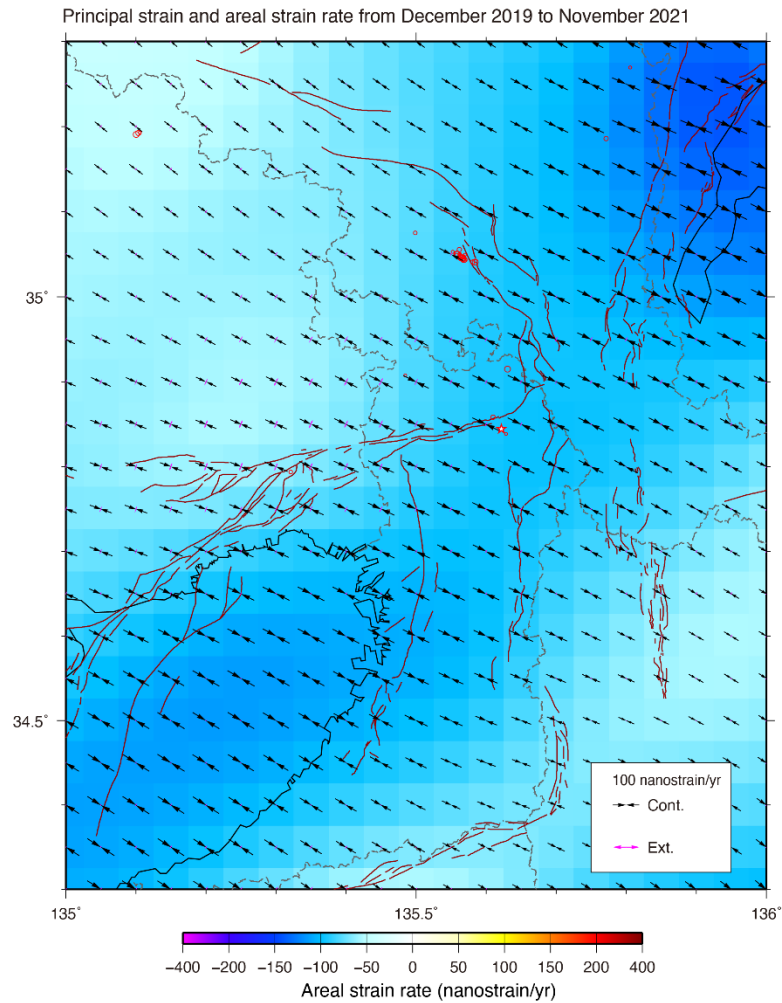


図2 Okazaki et al(2021)の手法で計算した主ひずみ速度分布. カラースケールは面積ひずみ速度を表す. ひずみ速度の計算には京都府南部の周辺と傾向の異なる2観測点のデータは除外した. 赤茶点線は主要活断層(地震調査委員会, 2022). 赤丸は2022年3月1日から5月8日までのM2以上の気象庁一元化震源を表示した. 赤星は, 2018年大阪府北部地震の震央.