

## 南海トラフ地震の発生サイクルからみた徳島県付近の地震活動の特徴

### Characteristics of Seismic Activity around Tokushima Prefecture from the Viewpoint of the Nankai Trough Earthquake Occurrence Cycle

明田川保<sup>1</sup>, 柏原冴妃<sup>1</sup>, 井上颯太<sup>2</sup>

AKETAGAWA Tamotsu<sup>1</sup>, KASHIHARA Saki<sup>1</sup>, and INOUE Sota<sup>2</sup>

(Received December 23, 2020; Accepted July 8, 2021)

#### 1 はじめに

駿河湾から四国沖にかけての南海トラフ沿いで発生するいわゆる南海トラフ地震は、地震調査研究推進本部の長期評価によればおよそ 90 年から 150 年程度の間隔をもって繰り返し発生しており、2020 年現在、1946 年昭和南海地震を最後に 75 年ほど経過している。そして、気象庁における近代観測による地震カタログは、現在 1919 年からおよそ 102 年分あり、上記繰り返し期間の最短の年数を超える長さのデータを有している。つまり、データ期間の途中で 1944 年昭和東南海地震・1946 年昭和南海地震(以下 2 地震をまとめて、昭和の南海トラフ地震と言う)を挟んで、その約 26 年前からおおよそ 1 サイクル分、あるいはそれに近い期間に相当するデータがあり、現在は昭和の南海トラフ地震発生前と同様な時期にあたるか、そうした時期に差し掛かる段階にある可能性が高い。

徳島県の位置する四国東部とそこから南海トラフ軸方向の海域に延長した領域(以下、あわせて四国東部域と言う)は、1946 年昭和南海地震の震源である紀伊半島沖に隣接し、その震源域にも一部が含まれるが、そこにはマグニチュード(M)7 級以上の大地震は、気象庁の地震カタログの期間内には知られていない。地殻内やフィリピン海プレート内における定常的な地震活動も低調であり、例えば和歌山県内に見られるいわゆる地震の巣のような活動域もない。しかし、言い換えれば、南海トラフ地震の震源近傍におけるバックグラウンド的な地震活動データを長期間にわたって得やすい場所であるとも言える。

徳島地方気象台では徳島県付近の地震活動について地域防災の観点から調査を行ってきた。それは気象庁の一組織として担当する徳島県内に影響する地震についての知見を深めるためであるが、上記の観点から四国東部域の地震活動の特徴を明らかにすれば次の南海トラフ地震に向けた何らかの知見を得られるかもしれないとの考えもある。

そこで、本稿では統計的な手法を中心に用いて、南海トラフ地震の震源に隣接した場所としての四国東部域のおよそ 100 年にわたる地震活動を分析した結果をまとめる。本稿の構成は以下のとおりである。第 2 節では、やや規模の大きな地震活動を中心に、南海トラフ地震の発生サイクルを踏まえて、その長期的な地震活動の変化をみる。第 3 節では、現在の地震活動の状況を深部低周波地震活動と関連付けて考察する。第 4 節では、前節までの結果を踏まえて今後四国東部域において発生が懸念される M6 クラスの地震の過去事例として、昭和の南海トラフ地震発生前の最大規模地震である 1923 年 12 月 5 日の土佐湾の地震(M6.3)について考察する。そして、第 5 節に上記をまとめて四国東部域における地震活動を総括する。

#### 2 長期的な地震活動の特徴

##### 2.1 調査領域及び期間

ここでは、1919 年から 100 年以上にわたる四国東部域の長期的な地震活動をみる。西南日本においては、南海トラフ地震の発生前後に M7 級の地殻内地震が増えると言われており、既往研究において物理的背景の

<sup>1</sup> 徳島地方気象台, Tokushima Meteorological Office

<sup>2</sup> 大阪管区気象台, Osaka Regional Meteorological Headquarters

考察が行われ、統計的な有意性が示されてきた（例えば Hori and Oike, 1996 ; 堀, 2002）。しかし、前述のとおり、四国東部域ではそうした大地震はデータを有する期間に発生していない。そこで、ここではグーテンベルク・リヒター則（GR 則）に基づく  $b$  値の比較など簡単な統計的手法を用いて、四国東部域における M7 級よりも小さな地震活動にも南海トラフ地震発生前の活発化が見出されるかを調べる。

本稿において四国東部域とする領域の範囲を図 1 に示す。実線と点線の領域があるが、本節で用いるのは実線の領域である。領域は単純な矩形とし、北側と東側の境界を淡路島の野島断層沿いの活動や和歌山県の定常的な活動を含まないように設定した。西側と南側については、愛媛県、高知県、土佐湾付近に散見される M4 以上の地震や、古い震源データの精度やデータ数の確保を考慮して、西側を高知市まで含む程度、南側を南海トラフ軸に近い M4 以上の地震を含む程度とやや広めの設定とした。一方、点線の矩形は、四国東部域に明瞭なクラスターとして存在する深部低周波地震活動と、一般地震（深部低周波地震以外の地震）

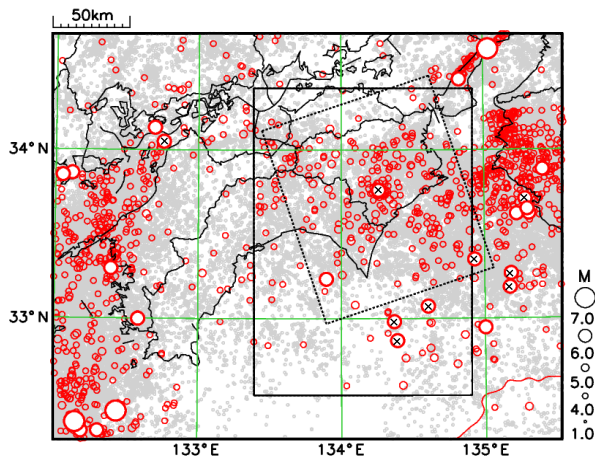


図 1 徳島県付近の震央分布（1919 年 1 月～2020 年 8 月、深さ 0～80km）と A 領域（実線の矩形）及び B 領域（点線の矩形；第 3 節参照）。

灰色のプロットは M1.0 以上 M4.0 未満、赤色のプロットは M4.0 以上の震央を表す。M6.0 以上の震央については白抜きで表示し、そのうち昭和の南海トラフ地震発生以後 1955 年までに発生したものには×印を付した。

の活動との関係性を調査するために設定した領域で、第 3 節で用いる。以降、四国東部域と言う場合はこれら 2 領域を総称し、個別には前者を A 領域、後者を B 領域と呼ぶ。なお、B 領域の境界の考え方については第 3 節で改めて述べる。

長期にわたる A 領域の地震活動を  $b$  値の比較によって見るにあたり、それを求める期間を①1919 年 1 月～1944 年 11 月（昭和の南海トラフ地震発生前まで）、②1944 年 12 月～1997 年 9 月（昭和の南海トラフ地震発生から一元化業務\* 開始前まで）、そして、③1997 年 10 月～2020 年 8 月（一元化業務開始以降）の 3 つに分けた。各期間のデータを言葉で表現すれば、①南海トラフ地震発生前、②南海トラフ地震発生後、③次の南海トラフ地震の発生前、といったイメージになる。

## 2.2 $b$ 値の比較

図 2 に A 領域における①②③各期間の  $b$  値解析結果を示す。 $b$  値の決定には最尤法を用いた。一般に震源データは古くなるほど網羅的に観測可能な  $M$  の下限が大きくなる。したがって、解析に用いたデータの  $M$  下限値が期間によって異なることに留意が必要だが、結果は各期間を通して 0.80～0.85 と概ね同程度の値になった。期間①については古い程データが不完全

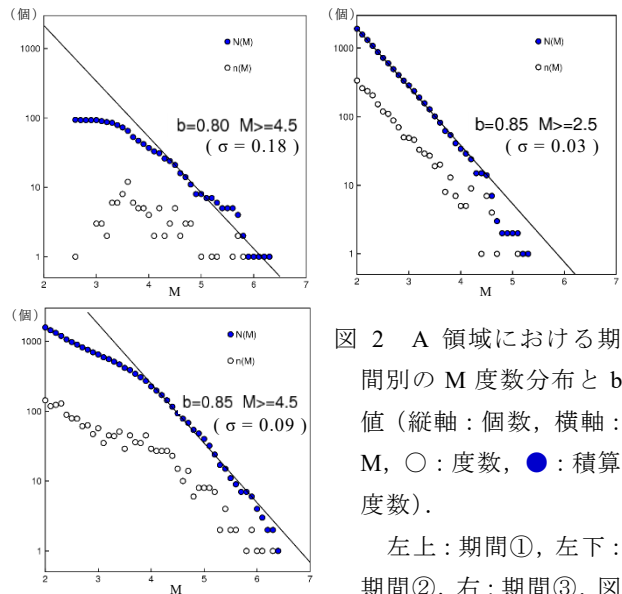


図 2 A 領域における期間別の  $M$  度数分布と  $b$  値（縦軸：個数，横軸： $M$ ，○：度数，●：積算度数）。

左上：期間①，左下：期間②，右：期間③。図中に  $b$  値と  $M$  下限及び標準誤差 ( $\sigma$ ) を表記。

\* 一元化業務とは、大学や関係機関の観測データを気象庁に集約し、震源計算等データ処理を気象庁が文部科学省と協力して一元的に行う業務で 1997 年 10 月から開始された。これにより気象庁の震源カタログは質、量ともに大幅に改善した。

であるのを踏まえて 1920 年以降にすると 1919 年の次は 1923 年 11 月までデータがなく、 $b$  値は 0.84 (標準誤差  $\sigma = 0.19$ ) になる。よって、期間①はやや不安定ではあるが、A 領域での昭和の南海トラフ地震を挟む概ね 1 サイクルに相当する長期的な地震活動は、 $b$  値が概ね 0.85 程度で推移しており、大きな質的变化はない。

しかし、ここで我々が注目したいのは規模の大きな地震の数と GR 則との合い具合である。結果を詳細に見ると、期間③の結果は M4.5 付近からそれ以上の規模の地震の積算度数が  $b$  値に見合う回数になっておらず、GR 則に従わず上に凸の形で減少している。こうした分布は  $b$  値解析においてしばしばみられ、地震活動の地域性を表す可能性もあるが、ここで指摘しておきたいのは期間①、②の結果が M6 程度の大きな地震まで全体的に同程度の  $b$  値で GR 則に則っていることである。試しに期間③について M 下限 4.5 で  $b$  値を求めると 2.25 ( $\sigma = 0.60$ ) となり、標準誤差を加味してもなお期間①、②とは明らかに異なる結果が得られる。つまり、昭和の南海トラフ地震前の状況がもし再現されるとすれば、現在は M4.5 以上の地震が足らない状況であり、今後 GR 則に見合うように増えてくるはずである。

### 2.3 活発化の有意性

前項の結果は、昭和の南海トラフ地震前に比べて現在の M4.5 以上の地震活動が静穏化しており、次の南海トラフ地震の前の状況にこれから推移していく段階である可能性を示唆するが、ここでは、先に述べたとおり南海トラフ地震前の活発化の観点から、期間③の M4.5 以上の地震活動を基準として期間①の活動がどの程度活発だったといえるかを明田川・伊藤 (2008) の方法を用いて確認した。この方法は、余震や群発的な群を成す活動を取り除いたバックグラウンド的地震活動が、発生率  $\nu$  (あるいは平均発生間隔  $1/\nu$ ) のポアソン過程とみなせるなら、ある期間  $\Delta t$  において発生する地震回数  $n$  は期待値  $\nu\Delta t$  のポアソン分布に従う性質を利用して、地震回数  $n$  以上 (あるいは以下) となる確率をポアソン分布から見積もる。

まず、ポアソン過程を前提とするため、期間①、③の M4.5 以上の地震活動データそれぞれについて、帰無仮説 (ポアソン過程である) が有意水準 5% で棄却されないことをコルモゴロフ・スミルノフ検定で確認

した。念のため、余震や群発活動など代表する地震と従属関係にあるデータを除去し独立事象とみなせるデータのみを残す作業を、一定期間・距離内で発生した地震同士を紐づける、いわゆるリンク法によるデクラスター処理でも行った。クラスタリングパラメータは、M6 を超える程度の本震-余震活動と震源域の大きさを想定し、 $\Delta t: 10$  日、 $\Delta r: 30\text{km}$  とした。なお、A 領域内ではこの作業を行っても結果的に地震の数は減らず、処理前後とも期間①は 21 回、期間③は 14 回だった。平均発生間隔に置き換えると、期間①が 431.2 日、期間③が 577.4 日となる。

これを前述の方法で比較する。すなわち、現状における平均発生間隔 577.4 日のポアソン過程を基準としたとき、平均発生間隔 431.2 日の事象が、ポアソン分布においてどの程度の確率で発生しうるかを調べた。その結果は、発生確率 12% 程度となった。通常、統計的有意性を言うには有意水準 1% や 5% が用いられる。上記の結果はそうした点ではゆらぎの範囲内であるが、昭和の南海トラフ地震発生前の M4.5 以上の地震活動は現在よりもやや活発だったと言って良いだろう。すなわち、さらに年月を経過し、次の南海トラフ地震の発生が近づいていく過程で、GR 則から期待される数より少ない期間③の状態が今後解消されていく可能性、つまり、M4.5 以上の地震活動が増えていく可能性がある。

## 3 最近の地震活動の特徴

### 3.1 調査趣旨と方法

次に本節では、最近の地震活動について考察する。ここでは我々は短期的ゆっくりすべりと同期して発生する深部低周波地震に着目する。それは 2018 年 3 月 22 日から低周波地震の解析に Matched Filter 法 (以下、MF 法) による自動処理が採用されたことによる。森脇 (2017) は、一般地震より微弱で検知しにくかった西南日本の深部低周波地震の震源決定数が MF 法によって従来の 2 倍に増加し、さらに、それまでには知られていなかった小規模なクラスターも新たに多数確認されたと報告している。つまり、地震活動から見たプレート境界の状態監視能力の向上が直截的に述べられている。そこで、我々は B 領域内に明瞭なクラスターとして存在する深部低周波地震の活動を利用して、それから逆に短期的ゆっくりすべりの発生 (あるいはそれに相当する状況) を定義し、その状況下とそ

うでない状況下において地震活動に何らかの違いや変化が見られないかを調べた。その目的は、前節の指摘どおり M4.5 以上の地震が今後増えていく可能性があるとするれば、それはどういったときにより発生しやすいかを探れないかということである。

図 3 に B 領域と深部低周波地震の震央分布を示す。B 領域は四国東部域の深部低周波地震のクラスターを囲むように設定し、フィリピン海プレートの進行方向を意識して北西-南東方向に傾けた。東側の境界の考え方は A 領域と同様である。西側の境界は愛媛県側の深部低周波地震活動のクラスターとの境を南海トラフ軸方向に延長した。南側を南海トラフ軸付近まで延ばさなかったのは、深部低周波地震活動と一般地震の関係を見るうえで、徳島県内に大きな震度をもたらすであろう地震に特に注目したいためであるが、期間が短くデータが少ないため海域まで延ばして M 下限が大きくなるのを避けたためでもある。

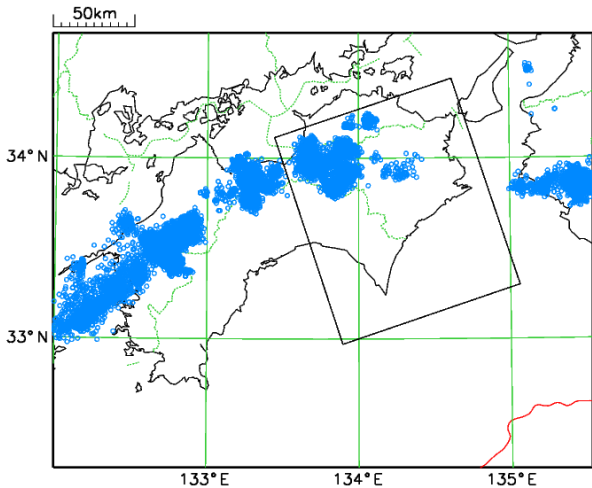


図 3 徳島県付近の深部低周波地震活動（2018 年 3 月 22 日～2020 年 8 月 31 日）と B 領域。

### 3.2 短期的ゆっくりすべり発生期間の定義

図 4 は、MF 法採用以降の B 領域の深部低周波地震について、発生間隔の長いものからの累積度数分布である。もし深部低周波地震が独立事象であるならば、発生間隔は指数分布に従うはずであり、図中の累積度数分布は直線状になると考えられる。しかし、間隔が 1 日程度よりも短い部分では、破線で示した補助的な直線から明らかに外れており、深部低周波地震が短期的ゆっくりすべりと同期して連続的に発生している

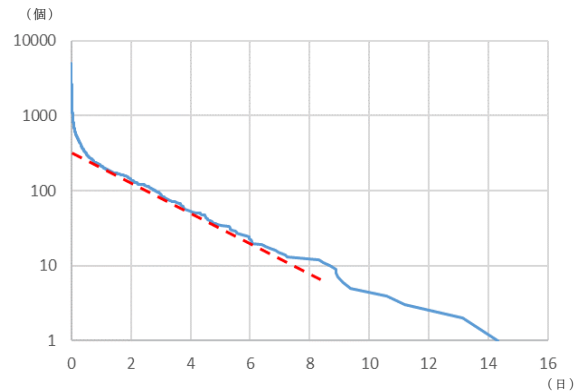


図 4 B 領域内における深部低周波地震（2018 年 3 月 22 日～2020 年 8 月 31 日）の発生時間間隔の累積度数分布（縦軸：個数，横軸：日）。赤い破線は補助的に引いた直線である。

ことを示している。一方で、1 日を超えるものはほぼ独立事象を示す分布をしており、異なる短期的ゆっくりすべり事象に従属するために間隔のあいたものや、一般地震やノイズの誤検知といったものが多いと考えられ、1 回の短期的ゆっくりすべり事象に同期して発生した一連の低周波地震とみなすのは不適當である。そこで、我々は、1 日以内に連続したものを同一の短期的ゆっくりすべり事象に属するものとし、その先頭イベントの震源時から末尾イベントの震源時までの期間を短期的ゆっくりすべりの発生に相当する期間と定義した。

この定義によりゆっくりすべりが発生していると考えられる期間とそうでない期間に分類した結果を図 5 に示す。図 5 の上図は単純に定義の成立したところを青い帯で示し、それ以外を白い帯として示している。白い帯の部分は少なくとも低周波地震が連続して発生しておらず、我々の定義上短期的ゆっくりすべり

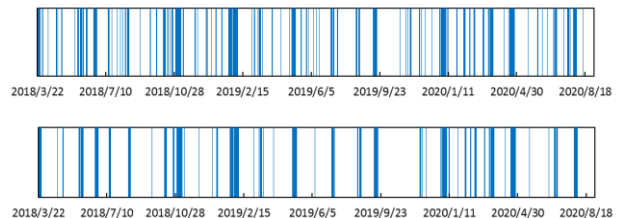


図 5 短期的ゆっくりすべりの発生に相当する期間の抽出結果（上図の白い帯部分が「通常期間」、下図の青い帯部分が「すべり期間」にそれぞれ相当する）。

の発生していない期間と言えることから、以下この白い帯部分を「通常期間」と呼ぶ。一方、青い帯の期間は長短さまざまであるが、個々の期間内に連続した低周波地震が少ない場合は、期間としてもごく短いものがほとんどであり、短期的ゆっくりすべりと同期したとするには明確さを欠く。このため、低周波地震が2~9個の期間についてはあえて除外し、短期的ゆっくりすべりの発生とみなす期間を低周波地震が10個以上連続した期間のみとした。図5の下図の青い帯がその結果を示しており、以下それを「すべり期間」と呼ぶ。なお、すべり期間は55の期間が抽出され、期間の最短は0.05日(1.3時間)、最長は9.15日、平均は2.73日である。それは現在の知見として得られている短期的ゆっくりすべりの継続期間(数日から1週間程度)と大きく異ならない。

### 3.3 通常期間とすべり期間における地震活動の違い

前項のとおり決定したすべり期間と通常期間に従い、それぞれの期間内に発生したB領域内の一般地震を分類した。なお、発震機構解など必要な情報が不足しているため、ここでは地震の種類(地殻内地震、プレート境界地震、プレート内地震)による区別を行っていないが、震源の深さ20kmを境に深さによる違いに関してb値等の違いを比べてみた。また、結果には、

表1 B領域における一般地震の期間毎の発生数(2018年3月22日~2020年8月31日)。括弧内の数値は単位時間(日)あたりの発生数。

	時間長(日)	地震数(M1.0以上)		
		すべて	深さ20km以浅	20kmより深い
通常期間	698.97	994 (1.42)	530 (0.76)	464 (0.66)
すべり期間	150.15	200 (1.33)	113 (0.75)	87 (0.58)
顕著すべり期間	72.96	98 (1.34)	49 (0.67)	49 (0.67)

表2 B領域における一般地震の期間毎のb値(データ期間:2018年3月22日~2020年8月31日)。括弧内の数値は標準誤差(σ)。

	b値(M1.0下限)		
	すべて	深さ20km以浅	20kmより深い
通常期間	0.93 (0.03)	1.04 (0.04)	0.83 (0.04)
すべり期間	1.02 (0.07)	1.25 (0.12)	0.82 (0.09)
顕著すべり期間	1.09 (0.11)	1.53 (0.22)	0.85 (0.12)

すべり期間のうち低周波地震数が100個以上の期間に限定した場合を併せて示した(以後これを便宜的に、顕著すべり期間と呼ぶ)。

表1に各期間に発生した地震数をまとめた。地震のM下限は1.0である。また、括弧内の数値は単位時間(日)あたりの発生数である。ある程度の多寡がみられるが、全体に大きな違いはなく、通常期間とすべり期間の地震発生数に $\chi^2$ 検定による有意差はない。

表2は各期間のb値である。これもM下限は1.0である。表2をみてまず気づくのは、最近2年半程度の一般地震全体(表中「すべて」と表現した部分)についてのb値がすべり期間で1.02、通常期間で0.93と、第2節で得られた長期的な期間を通してほぼ一定の0.85に対して大きいことである。つまり、最近の地震活動の大きい地震の相対的割合がより一層減少している状況に見える。これは2018年3月22日から2020年8月31日までの期間のA領域におけるb値を第2節と同条件(M下限2.5)で求めてみても0.90( $\sigma=0.11$ )となることから、四国東部域における傾向と言える。

また、一般地震全体のすべり期間のb値(1.02)が通常期間のそれ(0.93)よりも0.1程度大きいのは、すべり期間は通常期間に比べて相対的に規模の大きな地震が発生しにくい可能性を示唆する。そして、顕著

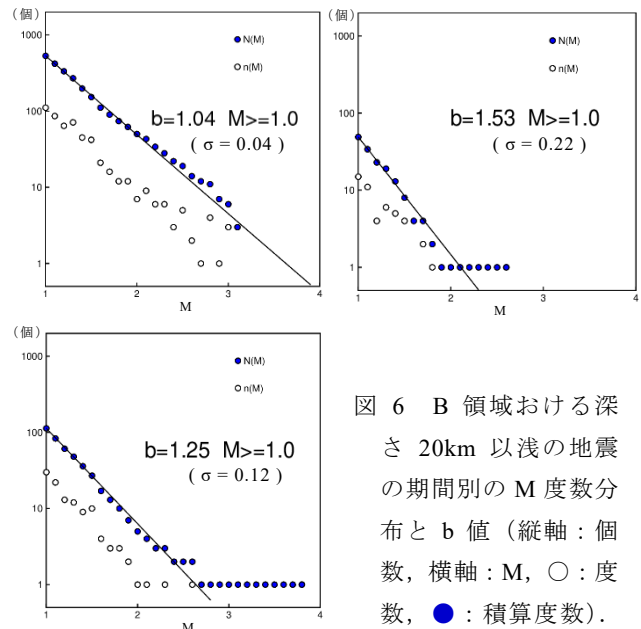


図6 B領域における深さ20km以浅の地震の期間別のM度数分布とb値(縦軸:個数,横軸:M,○:度数,●:積算度数)。

左上:通常期間,左下:すべり期間,右:顕著すべり期間。図中にb値とM下限及び標準誤差(σ)を表記。

すべり期間の  $b$  値は 1.09 とさらに大きく、それと整合的である。しかし、これらの差異に関して赤池情報量規準 (AIC) の比較により検定 (宇津, 1999) したところ  $b$  値に有意な差異はなかった。ただし、震源の深さで分けた場合には、深さ 20km 以浅の地震に顕著な結果がみられた。通常期間の  $b$  値 1.04 とすべり期間の  $b$  値 1.25 の間には AIC 比較における差異の有意性は得られなかったが、顕著すべり期間の  $b$  値 1.53 は、通常期間と比べて有意水準 5% で有意な差がある。つまり、短期的ゆっくりすべりは、徳島県に大きな震度をもたらす可能性のより高い地殻内の地震活動に抑制的な影響を与える。図 6 に深さ 20km 以浅の地震についての結果の図を示す。すべり期間、顕著すべり期間の最大の地震の  $M$  が直線の右側にあるのは若干気になる。地震活動としては  $M$  の大きな地震が起きにくくなっている状況が示されたものの、今後も注意深く見ていきたい。

#### 4 1923 年 12 月 5 日の土佐湾の地震

##### 4.1 四国東部域における M6.0 以上の地震

前節までに我々は四国東部域で今後 M4.5 以上の地震が増加する可能性があるものの、現状は静穏化が一層進んでいることを示した。それがいつ活発化に転ずるかはわからないが、ここでは今後どのような地震が発生するのかを考えてみたい。図 1 に示したとおり四国東部域には M6.0 以上の地震が 6 事例 (A 領域に 5 事例、B 領域のみに属する 1 事例) ある。そのうち海域の 4 事例と陸域の 1 事例の計 5 事例は昭和の南海トラフ地震の余震的な活動と言えるもので 1947 年から 1955 年までの間に起こっている。海域の 4 事例は震源の深さに現在と同等な精度がないので明確ではないが、プレート境界地震の可能性が高いと考えるのが妥当だろう。しかし、陸域の事例である 1955 年 7 月 27 日の徳島県南部の地震 (M6.4) は、徳島県の山間部に震央があり、当時の気象台等の観測による最大震度は 4 であるが、日本被害地震総覧 (宇佐美他, 2013) には震央付近で山崖くずれが随所に生じ死者 (1 人) もでたこと、余震活動が活発だったことなどが記載されており、浅い地殻内地震を支持する状況が明らかである。つまり、四国東部域には地殻内の浅い M6 級の地震が発生した事実のあることをまずは知っておくべきであり、これと同様な地震が徳島県直下で発生した場合、県内で震度 6 弱以上を観測する可能性もある。

一方で、これら 5 事例は応力場の状態がおそらく現在とは異なる南海トラフ地震後であったことも記憶にとどめておくべきだろう。

では、残りの 1 事例はなにか。それは昭和の南海トラフ地震のおよそ 20 年前、つまり現在の状況に似た時期に発生した 1923 年 12 月 5 日の土佐湾の地震 (M6.3) である。今後規模の大きな地震が増えてくる可能性があるとするれば、昭和の南海トラフ地震前に実際に発生した最大規模の地震の素性をできる限り知っておくのは重要であり、四国東部域において 1955 年以後 70 年近く M6.0 以上の地震が発生していない事実を踏まえて、以下この地震について考察する。

##### 4.2 観測データと当時の報道

この地震 (以下、土佐湾の地震と言う) の震源計算に用いられた検測値データ (地震波形の P 相, S 相, 最大振幅に基づく観測点  $M$  など) を表 3 に整理した。帯広, 鹿児島, さらに台北といった観測点があり、規模の大きな地震だったことがわかる。P 相は国内では 08 時 40 分から 45 分にかけてで、台北では 49 分とかなり幅がある。S 相は 41 分から 46 分程度で読まれている。また、当時の時計の絶対的精度が悪く、震源は 10 観測点程度の S-P 時間を使って決められており、その残差も小さいとは言いがたい。一方、最大振幅による観測点  $M$  は、明らかに桁を誤ったと思われる宇和島の 7.7 を除けば、震源に近い徳島から遠方の帯広や鹿児島まで方角に偏りなく概ね M6 を超える程度の値となっており、震央位置の少々の水平移動で結果が大きく変わる様子はない。観測された揺れについては気象要覧 (中央気象台, 1924) に以下の記載がある。

「此の地震は五日八時四十分頃土佐湾東部に発現せしものにして四国, 中国, 近畿の全部, 九州北部及朝鮮釜山に迄感覚あり, 且つ遠く甲府, 沼津に於いても緩慢なる微震を感じり。震央付近なる高知県下に於いては強震を感じ人々屋外に飛出す程になりしも被害はなかりき。」

データとして残された震度は、徳島が最大で強震 (弱き方) (震度 4 相当), 高知, 岡山, 室戸, 呉, 多度津が弱震 (震度 3 相当) だった。

以上からは、震源精度には問題があるものの、徳島県付近で発生した地震であることにほとんど疑いなく、また、M6 級であるのも事実に見えるが、徳島の震度 4 は良いとしても、現状において深さ 16km とされ

表 3 土佐湾の地震の検測記録と S-P 時間の走時残差及び観測点 M.

震源計算には彦根までのデータが使われており、最終的には○を付した S-P 時間データにより震源が決定されている。

観測点	震度	相名	時分	秒	相名	時分	秒	S-P時間残差(秒)	震源計算への使用	観測点M
室戸岬	3	EP	8:44	5						
高知	3	EP	8:40	0						
新居浜	3	EP	8:40	53						
徳島	4	EP	8:41	30	ES	8:41	41	-2.4	○	6.1
多度津	3	EP	8:40	49	ES	8:41	3	0.2	○	
四阪島		EP	8:40	35						
松山	2	EP	8:41	39.5	ES	8:41	49.6	-4.6	○	
宇和島	1	EP	8:41	31.2						7.7
岡山旧	3	EP	8:40	52.1	ES	8:41	10.6	0.1	○	6.3
和歌山	1	EP	8:40	50	ES	8:41	10	1.2	○	
呉	3	EP	8:41	20	ES	8:41	39	-0.5	○	6.5
潮岬	2	EP	8:40	38.5	ES	8:40	56	-2.8	○	5.7
広島江波	2	EP	8:40	52.5	ES	8:41	17.5	3.7	○	6.4
神戸		P	8:40	54	S	8:41	18	1.1	○	6.2
大阪		P	8:40	57	S	8:41	28	6.2		6.7
榑原八木	1	EP	8:40	54	ES	8:41	24	4.6	○	
浜田	1	EP	8:41	7	ES	8:41	44	9.1		
京都		EP	8:41	2	ES	8:42	39.2			6.2
津松村	2	EP	8:41	0.8	ES	8:41	46.2	13.3		
彦根	1	P	8:40	56.5	S	8:41	25.6	-5.2		6.4
境港	2	EP	8:41	31	ES	8:41	38			7.3
下関名池		EP	8:41	28	ES	8:41	53			6.4
熊本	1	EP	8:41	15	ES	8:41	53			6.5
福岡		EP	8:41	27	ES	8:42	2			5.9
佐賀		EP	8:44	3.8	ES	8:44	33.9			
名古屋		P	8:41	9	S	8:42	8			6.3
岐阜		P	8:41	15.4	S	8:42	7.5			6.0
鹿児島		EP	8:40	22	ES	8:41	26			6.5
福井		EP	8:41	12						
長崎		P	8:41	11	S	8:41	33			5.9
長崎		EP	8:41	11	ES	8:41	33			5.8
浜松		EP	8:41	5	ES	8:41	50			5.7
釧原		EP	8:41	7.4	ES	8:41	53.4			6.2
飯田		P	8:41	10.5	S	8:41	58			6.5
金沢		EP	8:41	13						
高山		EP	8:40	16	ES	8:41	21.5			
伏木		EP	8:41	39	ES	8:42	30			6.4
釜山		EP	8:41	51	ES	8:42	34			6.3
松本		P	8:41	23	S	8:42	39			6.3
沼津	1	P	8:41	33	S	8:42	22			6.3
甲府	1	EP	8:41	44	ES	8:42	37			6.4
長野		IP	8:41	7	S	8:42	37			6.6
高田		P	8:41	58.3	S	8:43	15.3			6.7
前橋		P	8:41	53.1	S	8:42	45.7			6.3
熊谷		P	8:41	57.3	S	8:43	4.3			6.3
水戸		P	8:42	23	S	8:42	30			6.4
新潟		EP	8:42	33.1	ES	8:43	52.1			7.1
函館		EP	8:42	32						
大連		EP	8:45	14	ES	8:45	51			
帯広旧		EP	8:45	0	ES	8:46	12			6.2
台北		EP	8:49	0						

ている震源により近い高知については、言葉による「高知で強震」との表現と観測結果としての高知、室戸などの震度3には少々疑問が残る。

地震調査研究推進本部の文献データベース (<http://www.herpl.adepl.or.jp/>) にある新聞切り抜き画像に以下の記載があった。大正12年12月6日付東京日日新聞によれば、「五日午前八時四十八分ごろ台南に近来稀れな強震あり同時刻関西地方一帯にも強震があった」とある。これを信じるなら、台北の49分のP相はおそらく土佐湾の地震によるものではない。そして、各観測点のS相の発現時は前述のとおり08時48分よりも2分～8分程度前で読まれているが、S相以降に最大振幅が読み取られているとすれば、そこに台湾の地震の波が重なっている可能性を俄かに否定しきれない。もしそうだとすればM計算に影響を与えている可能性を生む。その記事には、実際に「徳島 五分二十二秒に亘る水平動の地震あり強震の弱」といった規模に見合わない長い揺れの記述もあるのである。

### 4.3 地震観測波形の検証

上記を受け、我々は地震波形記録を確認した。徳島地方気象台には当時の地震記象記録がなかったため、気象庁所蔵の地震記象紙を文部科学省及び(公財)地震予知総合研究振興会が高解像度スキャンし、デジタル画像化した地震調査研究推進本部の地震記象紙検索システム (<http://www.susu.adepl.or.jp/>) をあたったところ、当該日の気象庁所有の記象紙は、東京(N, Ob), 前橋(Oc), 飯田(N), 高山(Oc), 岐阜(I, Oc), 奈良(K), 洲本(C), 神戸(Oa, Ob, W), 豊岡(K), 広島(Oc), 長崎(Oa, Ob), 鹿児島(Oc)の12箇所があった。括弧内はC:中央気象台式簡単微動計, I:今村式強震計, K:簡単微動計, N:中村式簡単微動計, Oa:大森式地動計, Ob:大森式微動計, Oc:大森式簡単微動計, W:ウィーヘルト式地震計である。

図7に徳島に比較的近い洲本(C)と神戸(Oa)の記録の一部を示す。Cは倍率20~40倍、振り子の錘の重量15~18kg、周期3~4秒程度、制振度は少な目の2~3、Oaは倍率20倍位、振り子の錘の重量10~15kg、周期は長く20~30秒である。地震計の特性等については以下も含めて濱田(2000)による。なお、震源計算に用いられた検測値データには洲本の読み取り値はなく、神戸はS-P時間が24秒である。

洲本の記録は5分間を超える程度あり、報道にあつ

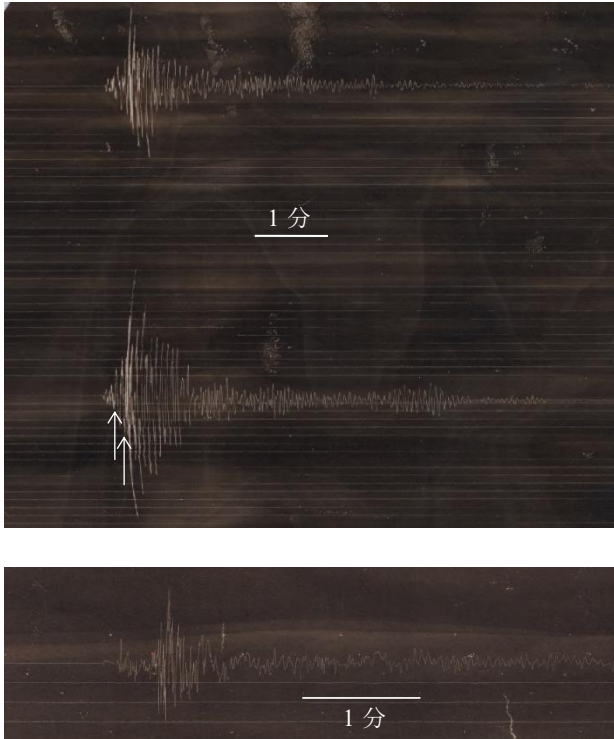


図 7 土佐湾の地震の波形記録.

上：洲本（中央気象台式簡単微動計，EW・NS 成分〔分別不能〕），下：神戸（大森式地動計 NS 成分）．洲本の記録にある矢印は，S 相とみなして読み取った位置を示す．

た徳島での 5 分を超える地震というのもおそらく地震計記録の長さであろう．記事に水平動の地震とあるのは，当時の簡単微動計が水平 2 成分記録であり，徳島には Oc(倍率 30~50 倍，振り子の錘の重量 12~15kg，周期 4~10 秒程度)があったこととも整合する．また，台湾の地震の波形らしき記録は見当たらない．神戸の記録は，固有周期の長い Oa であり，P 相付近から比較的長周期の波動を記録しているが，明らかに別地震と認識できる記録が混入している様子はなく，これにも台湾からの地震波らしき波形は見られない．他の記録にもそれらしきものは見当たらなかった．

以上から類推すると，この地震の M は，近い時刻に台湾で顕著な地震が発生していたとしても，現存する範囲の波形記録に重なりを示唆するものは見当たらず，その影響で過大評価されている可能性は低い．そして，前述のとおりほぼ日本全域の観測点 M がいずれも 6 程度となる計算結果を得ている状況から，概ね信頼できる．

一方，震央位置はどうか．図 7 の洲本の波形にある

2 本の矢印は，我々が S 相とみなして読み取った位置で，前は周期の異なるやや振幅の大きな波が見え始めた位置，後は最大の振幅の波の直前を意識した．得られた S-P 時間はおよそ 10 秒と 18 秒であった．これを気象庁で使用している走時表 JMA2001(上野他，2002)に当てはめると，震源の深さ 10km で震央距離が 80km~160km 程度，深さ 40km でもほぼ同じである．震央距離が 160km あれば，洲本から現在の震央位置である室戸岬の西側に達するが，我々は図 7 の後の矢印部分で S 相到達とみるより，それよりも前に既に到達しているとみるのが妥当と考えている．そして，波形を確認できてはいないが，最大震度を観測している徳島の検測値データの S-P 時間(11 秒)も現在の震央からの走時に対して 2 秒以上短い．つまり，震央は大幅にずれないにしても，徳島県県南や紀伊水道側など，現在位置よりも徳島に近い可能性がある．

#### 4.4 震度分布の比較による震源の深さの考察

続いて土佐湾の地震の震源の深さについて考察する．ここでは浅い地震なのかそうではないのかに論点を置き，土佐湾の地震の震度分布を，地殻内地震とフィリピン海プレート内地震(以下，プレート内地震と言う)のそれと比較する．図 8 は上から順に，土佐湾の地震(図中①)，徳島県付近で発生した同規模程度の地殻内地震(同②)，そして同じくプレート内地震(同③)のそれぞれ震度分布である．最下段の 2015 年の地震(同④)は，規模はひとまわり小さいが最近発生した規模の大きい地殻内地震の例として示した．作図は気象庁ホームページの震度データベース(<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/>)による．②については 4.1 項で述べたとおり地殻内地震であるのはほぼ確かである．③については震央が四国東部域からは若干外れるが，プレート内地震であることが最も確からしいものとして選んだ．四国東部域には②の他にも M6 級の地震はいくつかあるが，これも 4.1 項で述べたとおり，いずれも昭和の南海トラフ地震から 10 年程度以内に発生したものであり，おそらくプレート境界地震の可能性が高いと考えてここでの検討から外した．

前項の考察に従えば，土佐湾の地震の震央位置は②に近いのかもしれない．そうした観点から震度分布を比較してみたい．地殻内地震である②は近畿地方まで比較的きれいな同心円状の等震度線を引けるのが図 8



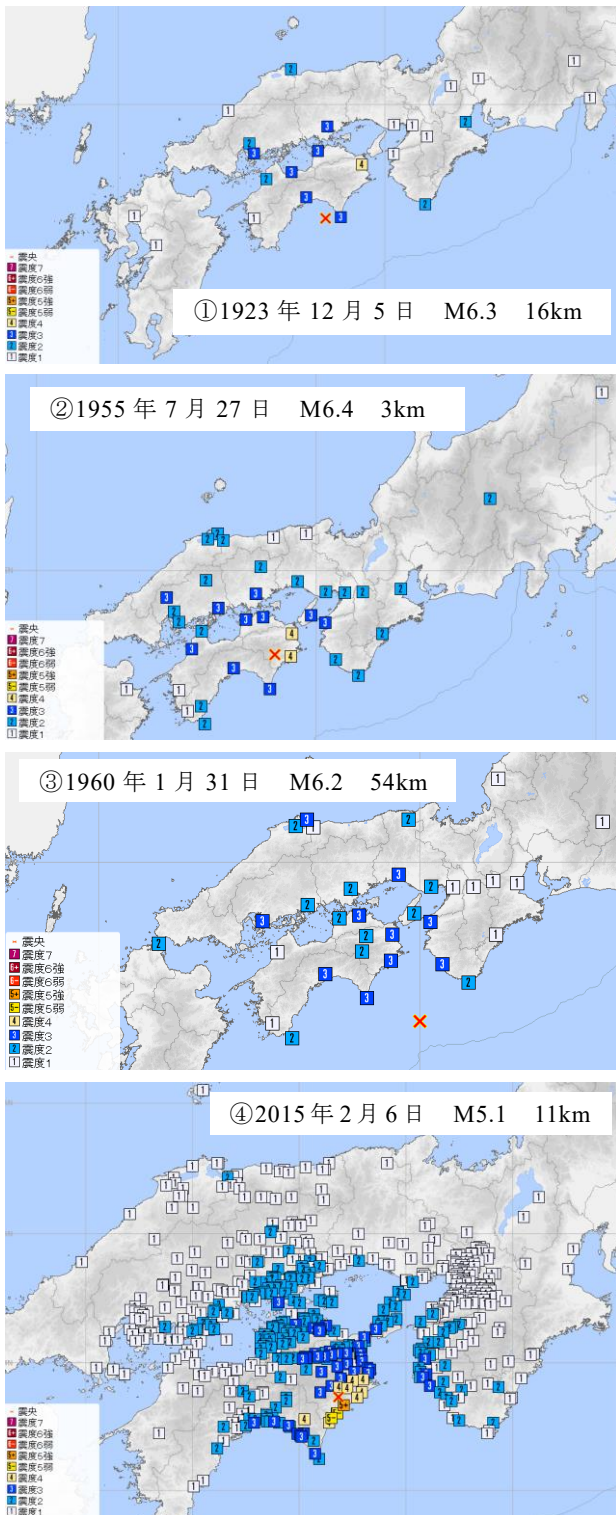


図 8 徳島県付近における過去の主要な地震の震度分布。

上から①土佐湾の地震，②近傍の地殻内地震，③同プレート内地震，④最近発生した顕著な地殻内地震。

から見て取れる．それは震度計が密にある④の震度分布においても概ね同様である．それに対し，③には同心円状の震度分布は見られず，深さ 54km が正確でないとしてもプレート内地震であると認めるならば，その上面を効率よく伝わった波が中国地方にまで大きな揺れをもたらしているようにも見える．そして，①の震度分布は②ではなく③に似ている．

また，もうひとつの特徴として，③では地震波が紀伊水道や紀伊半島の下を通過して伝わる大阪周辺の震度が小さく，西側に比べて減衰が顕著だが，それと似た傾向がやはり①の分布に見られる． Hirose et al.

(2008) によれば，フィリピン海プレートは紀伊水道から西の四国付近では概ね低角度で中国地方に向かって沈み込んでいるが，紀伊水道付近から東でその等深線を大きく南に屈曲させ急傾斜となっており，大阪付近のプレート上面の形状は谷地形の最深部にあたる．また，有馬温泉のようなスラブ起源水を含んだ深層地下水，温泉水の分布が，兵庫県南部及び大阪府南部に顕著にみられる (風早, 2014)．近畿地方のこうした特徴的な構造や地殻下部における熱水活動がプレート内地震の地震波の効率的な伝播を妨げる要因になっているのかもしれない．もちろんそれは推測にすぎないし，①の最大震度である徳島の震度 4 がどの程度正しく，また，震央位置との最短距離を代表するのも不明であるが，前項及び本項で述べてきた事をより良く説明するのは，土佐湾の地震が地殻内地震よりも深いプレート内地震だった場合であると思われる．

## 5 まとめ

1946 年昭和南海地震の震源に隣接する四国東部域の地震活動について，気象庁の持つ 100 年以上にわたる震源データを用いて調査した．その結果，まず次の二つの事柄が示された．

1. 昭和の南海トラフ地震を挟む 1919 年から 2020 年までの 100 年超の長期間における A 領域の地震活動の  $b$  値は，概ね 0.85 程度で推移している．それは，昭和の南海トラフ地震の 26 年前から南海トラフ地震の 1 サイクル程度に相当する期間，四国東部域のバックグラウンド的地震活動に質的な変化がないことを示している．

2. 上記解析結果を詳細にみると，昭和の南海トラフ地震前の期間と，後の期間は，M6 程度まで GR 則に

見合う数の地震が発生しているのに対し、次の南海トラフ地震の前の期間とも言える最近（1997 年 10 月～2021 年 8 月）の地震活動は、M4.5 以上の地震が少ない。つまり、今後 M4.5 以上の地震が増えてくる可能性がある。

上記結果を受け、MF 法採用以降の地震活動を用いて最近の状況について考察を進めた結果、さらに以下の二つの事柄が示された。

3. MF 法が採用された 2018 年 3 月 22 日以降の四国東部域における地震活動の  $b$  値は 1. に示した長期的な  $b$  値に比べて大きく、相対的に規模の大きな地震が起きにくい状況がさらに進んでいるように見える。

4. MF 法によって検知能力が大幅に向上した低周波地震のデータを用いて、短期的ゆっくりすべりが発生している期間とそうでない期間を定義し、B 領域の一般地震の活動を期間別に分けてみたところ、前者の地震活動の  $b$  値は後者のそれに比べて大きい。この傾向は深さ 20km 以浅のデータに有意差をもってより顕著である。すなわち、短期的ゆっくりすべりは徳島県に大きな震度をもたらす可能性の高い地殻内の浅い地震活動に抑制的な影響を及ぼしている。

また、以上の結果から今後規模の大きな地震が増える可能性を踏まえて、四国東部域における昭和の南海トラフ地震前に発生した最大規模地震である土佐湾の地震を調査した結果、以下の事柄が推論された。

5. 土佐湾の地震は現状のカatalogでは地殻内の地震とされており、今後こうした地震が陸域、あるいはそれに近いところで発生すれば徳島県内で震度 6 弱程度の揺れになる可能性があるが、この地震は M6 級であるのはおそらく間違いないものの、地殻内地震よりも深いプレート内地震だった可能性が高い。

徳島地方気象台では、地震活動のリアルタイムの監視をしていないため、気象庁本庁及び大阪管区気象台の地震津波現業が日々更新する地震観測データをモニターしつつ次の南海トラフ地震の発生を待ち受けることになる。その際、徳島県付近の地震活動が今後どう推移していくかをある程度予測できれば、それは徳島県の防災にとって重要な知見となる。今回の調査

結果からは、四国東部域の地震活動の長期的な地域特性、それを踏まえた現在の状況、また、今後の可能性として規模の大きな地震の増加と、それがどういった状況下で起きやすいか（起きにくい）といった知見を得た。また、昭和の南海トラフ地震のおよそ 20 年前、つまり現在と似た状況下で発生した M6 級の地震である土佐湾の地震はプレート内地震だった可能性が高いこともわかった。今後もこうした調査を継続し、四国東部域の地震活動に関する知見を深めつつ次の南海トラフ地震に備えていきたい。

## 謝辞

本稿の作成にあたっては、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、国立研究開発法人海洋研究開発機構、公益財団法人地震予知総合研究振興会、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、2016 年熊本地震合同観測グループ、米国大学間地震学研究連合（IRIS）及び気象庁の地震波形を気象庁と文部科学省が協力して処理した一元化震源カATALOGを使用し、解析には気象庁地震火山部開発の地震活動解析ツール（横山、1997、明田川他、2007、明田川、2018）を使用しました。また、匿名の査読者からの助言は、本稿の改善にたいへん役立ちました。記して感謝します。

## 文献

- 明田川保 (2018): X Window System を用いた地震検索・地震活動解析プログラム (REASA) の開発 (その 2), 験震時報, **82**: 2.
- 明田川保・伊藤秀美 (2008): 静穏化・活発化の定量的評価への取り組みー地震活動評価のための静穏化・活発化検出プログラムの開発, 験震時報, **71**, 93-102.
- 明田川保・伊藤秀美・弘瀬冬樹 (2007): X Window System を用いた地震検索・地震活動解析プログラム (REASA) の開発, 験震時報, **70**, 51-66.
- 上野寛・島山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生 (2002): 気象庁の震源決定方法の改善ー浅部速度構造と重み関数の改良ー, 験震時報, **65**, 123-134.
- 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子 (2013): 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 367-368.

- 宇津徳治 (1999): 地震活動総説, 東京大学出版会, 528-530.
- 風早康平 (2014): 西南日本における温泉水の成因について: スラブ起源深部流体の特徴と分布, 温泉科学, **64**, 282-288.
- 中央気象台 (1924): 補遺 地震ノ部十二月, 気象要覧, **296**, 50-63.
- 濱田信生 (2000): 地震計の写真に見る気象庁の地震観測の歴史, 験震時報, **63**, 93-112.
- 堀高峰 (2002): 巨大地震発生域周辺の地震活動に見られる静穏期から活動期への移り変わり, 地学雑誌, **111** (2), 192-199.
- 森脇健 (2017): Matched Filter法を用いた西南日本の深部低周波地震の自動検出, 験震時報, **81**: 3.
- 横山博文 (1997): X ウィンドウシステムを用いた地震活動解析プログラム, 験震時報, **60**, 37-51.
- Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa (2008): Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, **113**, B09315, doi:10.1029/2007JB005274.
- Hori, T. and K. Oike (1996): A Statistical Model of Temporal Variation of Seismicity in the Inner Zone of Southwest Japan Related to the Great Interplate Earthquakes along the Nankai Trough, *Journal of Physics of the Earth*, **44**, 349-356.

(編集担当 高嶺 透)