

大規模地震の続発事例にみられる発生間隔の統計的特徴

Statistical Features of Interval Time Distribution of Succeeding Large Earthquakes

案浦 理¹, 武田 清史², 前田 憲二²

Satoshi ANNOURA, Kiyoshi TAKEDA and Kenji MAEDA

(Received September 22, 2017: Accepted March 30, 2018)

1 はじめに

大規模地震発生後の地震活動の見通しについての情報は、地震後の救援活動や避難計画などの応急対策やその後の防災対策を実施する上できわめて重要な情報のひとつである。特に、1944年の昭和東南海地震（マグニチュード（M）7.9）や1854年の安政東海地震（M8.4）など南海トラフの東側の領域で先に大規模地震が発生した後に、時間を置いて隣接する西側の南海領域で大規模地震が発生するといった場合のように、先に発生した地震後に隣接領域で続発する大規模地震の可能性についての見通しの情報は重要である（本文中で使用する「隣接」の定義は3章）。

また、M7クラスの地震が発生した後に近接領域で大規模地震が発生する可能性の見通しの情報も同様に重要である（本文中で使用する「近接」の定義は3章）。このような大規模地震の続発の可能性を調べる手段としては、地震発生の物理過程から理論的にその可能性を探る方法が考えられるが、残念ながら現時点では、そういった情報を高い確度で得るほどには地震発生メカニズムの理解は進んでいない。従って、過去に発生した大規模地震の続発の実例から統計的な傾向を知ることが、上記の情報を得るための現実的な手法である。また、国内だけの事例ではその事例数は限られるため、海外の事例も含めた多数の事例調査が必要である。そこで、本報告では、大規模地震の続発事例の統計的性質を調べるため、全世界で発生したM8あるいは7以上の地震発生後に同程度あるいはそれ以上の規模の地震が発生した

続発地震の事例を調査し、その統計的性質、特に続発地震発生までの経過時間について調査した。なお、本調査は中央防災会議の防災対策推進検討会議「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」の下に設置された「南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会」の報告書（内閣府，2017）に掲載されている全世界の大規模地震の続発事例について、内閣府の了解を得て、その発生間隔の統計的特徴を詳細に整理したものである。本稿では、続発事例の震央分布（図2および図6）と先行地震と続発地震のMの差および距離の特徴（図3, 4, 7, 8）に関して新たに記述するとともに、これ以外については内閣府の報告書（内閣府，2017）と同じ内容を詳細に示すこととした。このため、本調査結果を引用する場合は、同報告書（内閣府，2017）も同時に引用すべきであることに留意する必要がある。

2 データ

本解析では、1900年～2013年の期間の地震についてはISC-GEMの震源カタログ（Version 4.0）を以下のホームページからダウンロードして用いた。

<http://www.isc.ac.uk/iscgem/download.php>

なお、補遺（Supplement）データは使用していない。

2014年～2016年6月の期間の地震については、USGSが編集した震源カタログを以下のホームページからダウンロード（2017年7月27日実施）して用いた。

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

ダウンロードにあたっては、Mと期間のみを指定し、

¹ 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department
現所属: 地震火山部管理課, Administration Division, Seismology and Volcanology Department

² 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department

イベントタイプは地震と指定して検索を行った。

以上の震源データを一度気象庁震源フォーマット (http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/data/format/hypfmt_j.html) に変換した後にマージし、1900 年から 2016 年 6 月までの $M \geq 7.0$ の震源を選び、以下の解析に用いた。気象庁震源フォーマットに変換した時点で、 M は有効桁が小数点第 1 位までとなるよう四捨五入された値を用いていることに注意する必要がある。また、以下の解析において震源の深さについては制限を付けなかった。

3 解析手法および結果

続発事例の解析にあたっては、以下の 2 つのタイプの事例に分けて、それぞれ大規模地震等の発生から続発地震発生までの経過時間の統計解析を行った。

- 1) 隣接領域で大規模地震が続発した事例（割れ残り型）
- 2) 比較的規模の大きな地震の後に近接領域で同規模以上の地震が発生した事例（前震－本震型）

1) は過去の南海トラフ沿い大規模地震の例のように、東側の領域で $M8$ クラスの大規模地震が発生した後に西側で $M8$ クラスの大規模地震が続発するような場合を想定した、いわゆる「割れ残り型」の事例であり、2) は $M7$ クラスの地震発生後、同程度以

上の規模の地震が発生するような場合を想定した、「前震－本震型」の事例である。ここでの、「隣接」、「近接」とは、内閣府（2017）の報告に沿って、最初の地震からの震央距離が $50 \sim 500 \text{ km}$ の場合、震央距離が $0 \sim 50 \text{ km}$ の場合とそれぞれ定義した。これら 2 つのタイプの続発事例について、そのイメージを理解しやすくするための概念図を図 1 に示す。

以下では、それぞれの事例の解析手法と結果を述べる。なお、海溝沿いや内陸といったテクトニックな地震発生場の違いや、逆断層型や正断層型といった断層運動の型（メカニズム解）の違いにより、個々の地震の続発性も影響を受けることが想定される。しかし、内閣府（2017）の報告を参考に、これら（特に古い地震）の地震発生場や断層運動の型を厳密に区別することは難しいことと、できるだけ多くのデータを用いることによって続発性の概略の特徴を明らかにすることを第一義としたため、今回の解析ではこれらの影響については考慮しなかった。

3.1 隣接領域で大規模地震が続発した事例（割れ残り型）

内閣府（2017）の報告に基づき、以下の条件で最初の大規模地震および続発地震を抽出した。

最初の大規模地震の抽出条件： $M \geq 8.0$

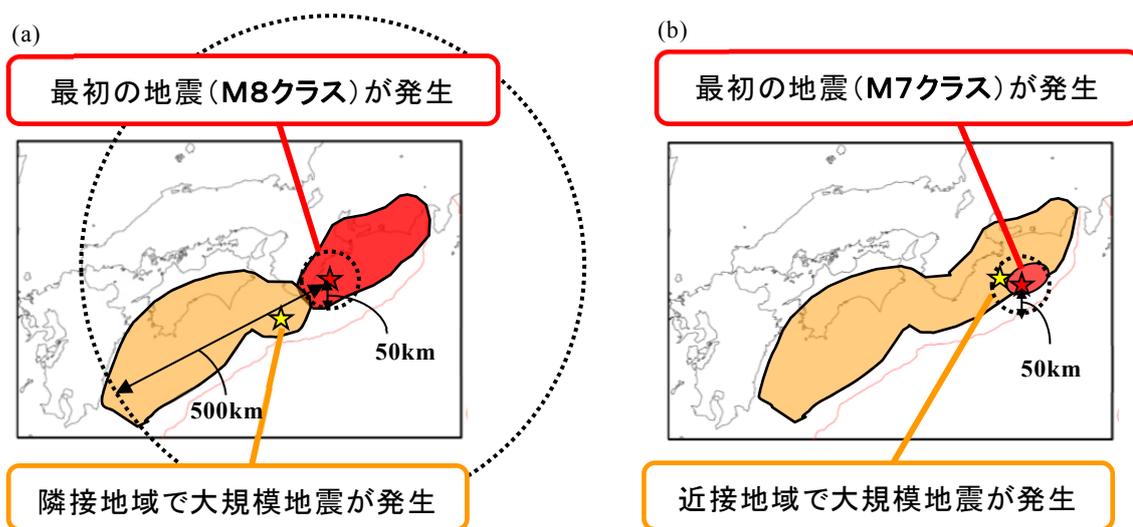


図 1 続発事例の 2 つのタイプの概念図。(a)： $M8$ クラスの地震が最初に発生し(赤色領域)、その後、隣接地域（震央距離 $50 \sim 500 \text{ km}$ ）で大規模地震(黄色領域)が発生するタイプの事例。☆印はそれぞれの地震の震央。(b)： $M7$ クラスの地震が最初に発生し(赤色領域)、その後、近接地域（震央距離 50 km 以内）で大規模地震(黄色領域)が発生するタイプの事例。なお、本図は内閣府（2017）の報告の地震抽出条件をイメージ化したものである。

続発地震の抽出条件：

- ・ $50 \text{ km} \leq \Delta D \leq 500 \text{ km}$
- ・ $-1.0 \leq \Delta M \leq 1.0$
- ・ $\Delta T \leq 3 \text{ 年 (1095 日)}$

ここで、 ΔD は最初の地震と続発地震の震央距離、 ΔM は（続発した地震の M ） - （最初の地震の M ）、 ΔT は最初の地震から続発地震発生までの経過時間である。 ΔD の計算にあたっては、地球を半径 6371 km の真球と仮定して球面三角法で算出した。M7.0 の平均的な余震域の長径 (Utsu, 1961) は約 50 km である。M8.0 以上の地震の余震域はさらに広大なものとなるが、「 $50 \text{ km} \leq \Delta D$ 」の条件は最初の大規

模地震の近傍に発生した余震を続発地震の抽出から除外する一定の効果を持たせたものと見なすこともできる。なお、結果的に ΔM が 1.0 を超える事例はなく、 ΔM の上限を設定しない場合も、抽出結果は変わらなかった。また、最初の地震に対して複数の続発地震がある場合は、一連の地震活動だけで複数の事例数として取り扱うことになるため、今回は単純化のため、最初の続発地震のみを対象とした。上記の条件を満たす地震を抽出した結果、最初の大規模地震の総数は 96 個、そのうち 1 個以上の続発地震を伴った地震は 38 個であった。これらの地震の震央分布を図 2 に、最初の地震と最初の続発地震の 38

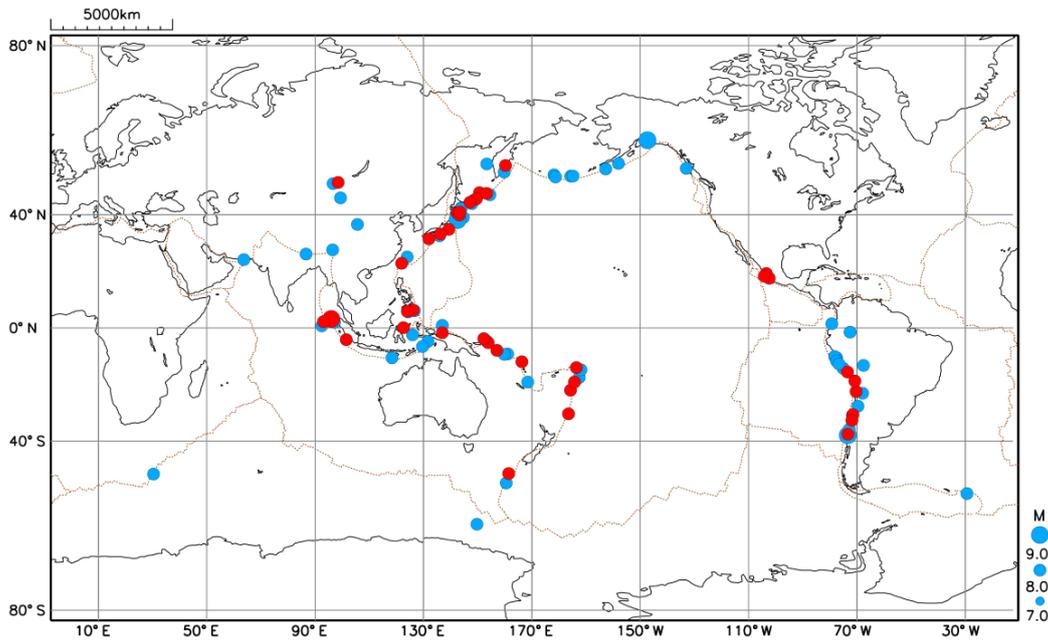


図 2 1900 年から 2016 年 6 月までの期間に発生した $M \geq 8.0$ の地震 96 個のうち、その地震との M の差が ± 1.0 以内で震央距離が 50km 以上 500km 以下の地震が 3 年以内に続発した 38 個の地震（●）と続発しなかった 58 個の地震（●）の震央分布図。

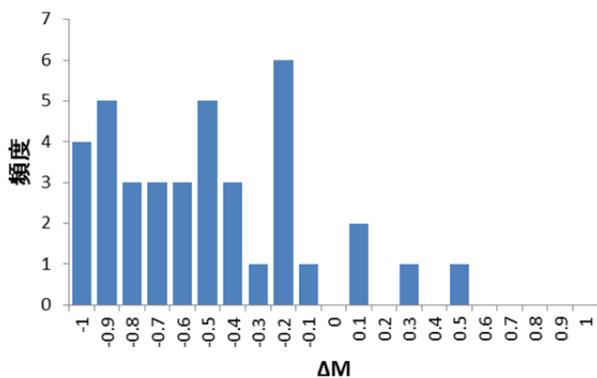


図 3 最初の地震 ($M \geq 8.0$) と続発地震との M の差 (ΔM) のヒストグラム

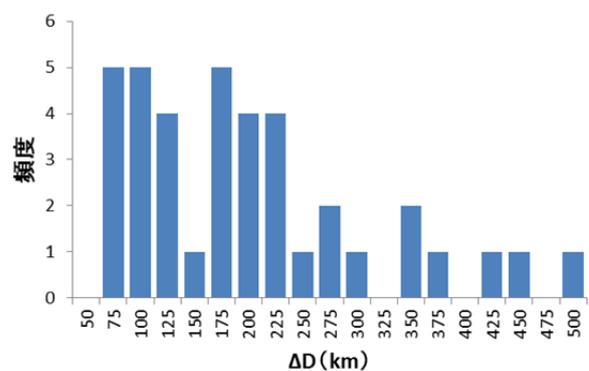


図 4 最初の地震 ($M \geq 8.0$) と続発地震との震央距離 (ΔD) のヒストグラム。

表 1 1900 年から 2016 年 6 月までの期間に発生した $M \geq 8.0$ の地震のうち、その地震発生後、その地震との M の差が ± 1.0 以内で震央距離が 50km 以上 500km 以下の地震が 3 年以内に続発した 38 事例の地震リスト。左側が最初の地震、右側が続発地震。続発地震は最初の地震のみ抽出し、最初の地震との M の差 (ΔM)、発生時刻の差 (ΔT)、震央距離 (ΔD) も記載した。地震発生時刻は日本時間、緯度、経度のマイナス値はそれぞれ南緯、西経であることを表す。なお、本表は内閣府 (2017) の報告と同一の条件で抽出された結果を示したものであり、当該報告と同一の内容の一部を再掲したものである。

最初の地震									続発地震									差			
番号	年	月	日	時	分	緯度	経度	深さ (km)	Mw	年	月	日	時	分	緯度	経度	深さ (km)	Mw	ΔM	ΔT (日)	ΔD (km)
1	1905	7	9	18	40	49.709	98.483	15	8.3	1905	7	23	11	46	49.369	96.610	15	8.0	-0.3	13.7	140
2	1914	5	26	23	22	-1.829	136.943	15	8.1	1916	1	13	15	18	-3.196	135.731	25	7.1	-1.0	596.7	203
3	1917	5	2	3	26	-31.080	-176.461	15	8.2	1919	4	17	20	22	-30.418	-178.110	35	7.2	-1.0	715.7	174
4	1917	6	26	14	49	-14.739	-173.562	15	8.0	1919	4	30	16	17	-18.352	-172.515	25	8.1	0.1	673.1	417
5	1918	9	8	2	16	46.737	150.653	15	8.1	1918	11	8	13	38	44.893	151.896	15	7.8	-0.3	61.5	227
6	1920	6	5	13	21	23.688	121.954	20	8.2	1922	9	2	4	16	24.218	121.937	20	7.6	-0.6	818.6	59
7	1923	2	4	1	1	54.418	160.250	15	8.4	1923	2	24	16	34	55.466	163.237	15	7.4	-1.0	20.6	224
8	1923	9	1	11	58	35.274	139.344	15	8.1	1923	9	2	11	46	34.985	139.928	15	7.9	-0.2	1.0	62
9	1924	4	15	1	20	6.625	126.167	15	8.1	1924	8	30	12	4	8.892	126.937	15	7.2	-0.9	137.4	266
10	1931	3	9	12	49	40.582	142.472	35	8.0	1933	3	3	2	30	39.093	144.684	15	8.5	0.5	724.6	251
11	1932	6	3	19	36	20.063	-103.454	15	8.1	1932	6	18	19	12	19.235	-104.238	15	7.8	-0.3	15.0	123
12	1939	12	22	6	0	0.084	122.601	35	8.1	1941	11	9	8	37	0.731	122.835	35	7.4	-0.7	688.1	77
13	1941	11	19	1	46	32.126	131.996	35	8.0	1942	3	22	8	20	29.170	130.870	25	7.0	-1.0	123.3	346
14	1943	4	7	1	7	-31.357	-71.503	35	8.1	1944	1	16	8	49	-31.496	-68.491	15	7.2	-0.9	284.3	286
15	1944	12	7	13	35	33.730	136.200	15	8.1	1946	12	21	4	19	33.123	135.905	15	8.3	0.2	743.6	73
16	1960	3	21	2	7	39.869	143.228	15	8.0	1961	1	16	16	20	36.121	141.758	30	7.2	-0.8	301.6	436
17	1960	5	21	19	2	-37.824	-73.353	25	8.1	1960	11	1	17	45	-38.467	-75.031	20	7.4	-0.7	163.9	163
18	1963	10	13	14	17	44.872	149.483	35	8.5	1963	10	20	9	53	44.726	150.547	28	7.8	-0.7	6.8	86
19	1968	5	16	9	49	40.860	143.435	30	8.2	1968	5	16	19	39	41.430	142.864	25	7.9	-0.3	0.4	79
20	1971	7	14	15	11	-5.524	153.850	40	8.0	1971	7	26	10	23	-4.817	153.172	40	8.1	0.1	11.8	109
21	1976	8	17	1	11	6.175	124.047	20	8.0	1976	8	17	13	19	7.174	123.048	21	7.1	-0.9	0.5	157
22	1977	6	22	21	8	-22.888	-175.708	55	8.0	1977	10	10	20	53	-25.994	-175.402	14	7.3	-0.7	110.0	347
23	1985	3	4	7	47	-33.257	-71.858	35	8.0	1985	4	9	10	57	-34.084	-71.551	45	7.1	-0.9	36.1	96
24	1985	9	19	22	17	18.345	-102.386	20	8.0	1985	9	21	10	37	17.821	-101.621	30	7.5	-0.5	1.5	100
25	1994	10	4	22	23	43.851	147.167	30	8.3	1994	10	9	16	55	43.911	147.820	35	7.3	-1.0	4.8	53
26	1995	7	30	14	11	-23.349	-70.323	46	8.0	1997	1	23	11	15	-22.034	-65.711	275	7.1	-0.9	542.9	495
27	1995	10	10	0	35	19.081	-104.177	40	8.0	1997	1	12	5	28	18.117	-102.867	40	7.1	-0.9	460.2	175
28	2000	11	16	13	54	-4.011	152.254	30	8.0	2000	11	16	16	42	-5.195	153.139	32	7.8	-0.2	0.1	164
29	2001	6	24	5	33	-16.358	-73.482	32	8.4	2001	7	7	18	38	-17.495	-71.757	10	7.6	-0.8	13.5	223
30	2004	12	23	23	59	-49.769	161.445	10	8.1	2007	9	30	14	23	-49.359	164.046	10	7.4	-0.7	1010.6	193
31	2004	12	26	9	58	3.331	95.952	30	9.0	2005	3	29	1	9	2.092	97.154	30	8.6	-0.4	92.6	192
32	2006	5	4	0	26	-19.969	-174.265	15	8.0	2009	3	20	3	17	-23.134	-174.581	40	7.6	-0.4	1051.1	353
33	2006	11	15	20	14	46.517	153.319	31	8.3	2007	1	13	13	23	46.083	154.509	6	8.1	-0.2	58.7	103
34	2007	4	2	5	39	-8.389	157.092	15	8.1	2007	4	2	5	47	-7.209	155.915	20	7.5	-0.6	0.0	184
35	2007	9	12	20	10	-4.407	101.502	34	8.5	2007	9	13	8	49	-2.572	100.761	35	7.9	-0.6	0.5	220
36	2009	10	8	7	18	-12.607	166.309	40	8.0	2009	10	8	8	13	-13.110	166.403	41	7.4	-0.6	0.0	57
37	2012	4	11	17	38	2.273	93.051	20	8.6	2012	4	11	19	43	0.754	92.420	20	8.3	-0.3	0.1	183
38	2014	4	2	8	46	-19.610	-70.769	25	8.2	2014	4	3	11	43	-20.571	-70.493	22	7.7	-0.5	1.1	111

組の地震リストを表 1 に示す。表 1 をみると、日本付近では 1944 年と 1946 年の昭和東南海・南海地震、1923 年の大正関東地震とその余震、1968 年の十勝沖地震とその余震などが含まれていることがわかる。また、このリストから $M \geq 8.0$ の大規模地震のうち約 40% (=38/96) の割合で、3 年以内に隣接地域で最初の地震の規模 (M) ± 1.0 の規模の地震が引き続いて発生しているといえる。なお、図 2 から、先に述べたように抽出された地震には海溝型地震以外の地震も含まれていることがわかる。

抽出された続発地震について、 ΔM のヒストグラムを作成したものが図 3 である。この図から、 ΔM が正、すなわち最初の地震より大きな地震は 4 例し

かないことがわかる。このことから、抽出された事例の特徴には本震—余震系列の性質が含まれている可能性があることに留意する必要がある。 ΔM が負の範囲においては、 ΔM が小さいほど頻度が多い傾向がみられるが、地震の規模別頻度分布における Gutenberg-Richter の法則 (Gutenberg and Richter, 1944) から予想されるほど顕著ではない。これは事例数が少ないことに起因するのかもしれない。また、抽出された続発地震の ΔD のヒストグラム (抽出の条件から $\Delta D < 50$ km のデータは含まれないことに注意) を図 4 に示す。この図から震央距離に近いほど続発地震が発生しやすい傾向があることがわかる。

次に、最初の地震と続発地震の発生時間差、つま

り経過時間を集計し、そのヒストグラムおよび積算個数を表したものが図5である。この図には、発生時間差の頻度分布が、単位時間あたりの余震発生数の時間変化の近似式として知られる以下の大森・宇津式（改良大森式）（Utsu, 1961）

$$\lambda(t) = K(t+c)^{-p} \quad (1)$$

に従うと仮定した場合の積算フィッティング曲線（図5(a), (b)の赤線）とそのパラメータ値(図5(a)), および大森・宇津式近似による日別度数の時間変化

(図5(c), (d)の黄破線)も示した。ここで、 λ は単位時間当たりの地震発生数、 t は地震発生からの経過時間、 K, c, p は分布の形状を決めるパラメータである。パラメータ値の推定にあたっては、地震検索・地震活動解析ツール REASA（明田川・他, 2007; 伊藤・明田川, 2007）を用いた。本解析の前提として、すべての $M \geq 8.0$ の大規模地震の続発地震は同じ確率分布に従って発生すると仮定し、個々の事例の続発地震の経過時間を寄せ集めた分布は、一つの事例の続発地震の確率分布と同等の分布を示す、と考えた。重ねあわせによる同様の解析手法を適用した例としては、Jones (1985), Maeda (1999), Gasperini et al.

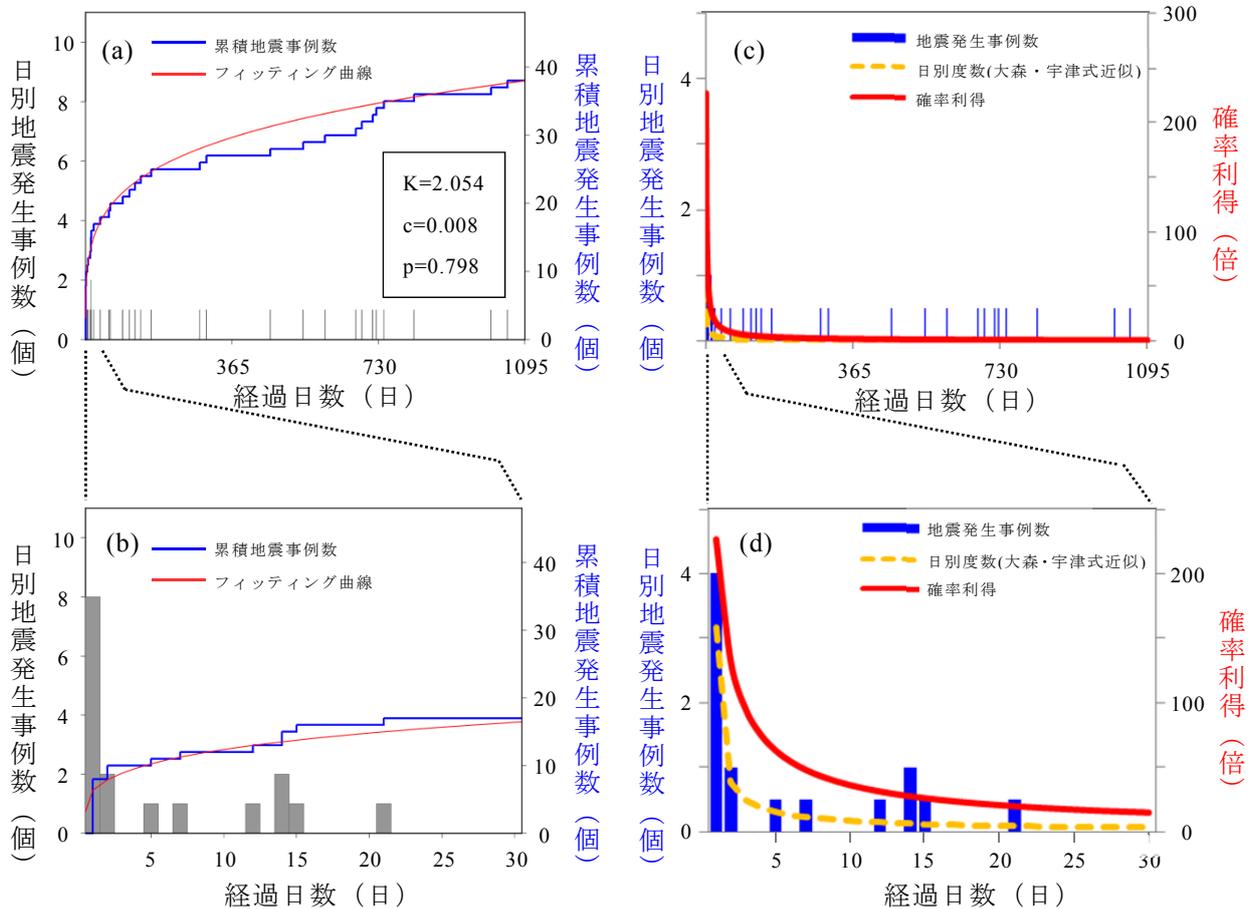


図5 $M \geq 8.0$ の地震発生後に、 M の差が ± 1.0 以内の続発地震が発生するまでの経過時間の頻度分布と、その分布の大森・宇津式による近似の適合度および確率利得を示す図。(a): 最初の地震発生から3年後までの期間における続発地震の日別発生事例数(灰)とその積算(青), および大森・宇津式近似による積算曲線(赤)。(b): (a)の最初の30日間を拡大した図。(c): 最初の地震発生から3年後までの期間における続発地震の日別発生事例数(青)と大森・宇津式近似による日別度数分布曲線(黄)。また、最初の地震から2年経過した後の1年間(731~1095日)における続発地震の発生事例数を基準とした場合の相対的な発生頻度、すなわち確率利得を大森・宇津式近似で表現した場合の曲線(赤)も示す。(d): (c)の最初の30日間を拡大した図。なお、本図は内閣府(2017)の報告から引用したもの(一部改変)であり、本図の引用に当たっては当該報告の原図を引用のこと。

(2016) などがある。この図から、続発地震の発生頻度は最初の地震の発生直後が高く、その後は時間とともに急速に低下し、低下傾向は時間経過とともに緩やかになるという傾向がみられ、その傾向は大森・宇津式に概ね適合していることがわかる。個別の期間でみると、続発地震を伴わない場合を含めた全大規模地震 96 個のうち隣接領域で大規模地震が続発する割合は、防災上の初動対応の目安となる最初の 3 日間で特に高く約 10% (=10/96)、その後 4 日目～7 日目が約 2% (=2/96)、8 日目～30 日目が約 5% (=5/96) となっている。

図 5 の日別地震発生事例数は続発地震を伴った 38 事例を寄せ集めた頻度分布であるが、 $M \geq 8.0$ の大規模地震発生後の 1 事例あたり、かつ 1 日あたりの続発地震の発生頻度に換算するには、縦軸を続発地震が発生しない場合も含めた $M \geq 8.0$ の総地震数である 96 で割ればよい。しかしこの場合、1 日あたりの発生頻度は高くても 0.1 個を下回り、続発地震発生時の緊迫度が伝わりにくい。そこで、基準となる特定の期間の発生頻度（本解析では最初の地震から 2 年経過した後の 1 年間（731～1095 日）の 1 日あたりの平均発生頻度）に対する相対的な発生頻度をここでは確率利得と定義し、その時間変化を図 5(c), (d) に追記した（図中の赤線）。なお、基準期間の発生頻度は元データからでなく、フィッティングした大森・宇津式から求めた。確率利得は一般的には平常時の特定の規模以上の地震の発生確率に対する、注目した事象が発生した場合の条件付地震発生確率の比で表現される（例えば Aki (1981)）。しかし、本解析では、対象とした続発地震の規模は最初の地震の規模の ± 1.0 以内であって特定の規模以上の地震を対象としているのではなく、特定の条件を満たす事象を対象としているため、平常時の事象の発生頻度の定義は困難であることに注意する必要がある。また、図 5(c), (d) に示した大森・宇津式近似による日別度数のグラフ（黄破線）と、同じパラメータを用いた大森・宇津式近似による確率利得のグラフ（赤線）の形が一致しない理由は、前者は日別データのヒストグラムと大森・宇津式のフィッティングを示すために、密度分布のグラフではなく、密度分布を 1 日ごとに積分した値で示しており、後者は、密度分布そのものを 1 日あたりの基準発生頻度で割って確率利得として示したからである。図 5(c), (d) の

確率利得のグラフから、確率利得は地震直後から 3 日程度は約 100 倍以上ときわめて高く、以降 1 週間程度は約 50 倍以上、2 週間程度は約 30 倍以上と依然として高い状態にあるといえる。さらに、約 3 週間を超えると確率利得は地震発生直後の約 200 倍の 1/10 である約 20 倍以下となり、2 カ月経過した時点では約 10 倍以下となる。

3.2 比較的規模の大きな地震の後に近接領域で同規模以上の地震が発生した事例（前震－本震型）

内閣府（2017）の報告を基に、以下の条件で最初の地震と続発地震を抽出した。

最初の地震の条件： $M \geq 7.0$

続発地震の抽出条件：

- ・ $\Delta D \leq 50 \text{ km}$
- ・ $\Delta M \geq 0.0$
- ・ $\Delta T \leq 3 \text{ 年 (1095 日)}$

ΔD , ΔM , ΔT の意味は 3.1 節と同様である。

また、最初の地震に対して、複数の続発地震がある場合は、最初の続発地震のみを抽出し、一度ペアとして抽出された両方の地震は、以降の検索では最初の地震および続発地震の候補から除外した手順も 3.1 節と同様である。なお、余震を除く操作は行っていないので、続発した地震が最初の地震より前に発生した地震の余震である場合も含まれ得ることに注意する必要がある。

上記の条件を満たす地震を抽出した結果、最初の $M7.0$ 以上の地震の総数は 1368 個、そのうち 1 個以上の同規模以上の続発地震を伴った地震は 56 個であった。これらの地震の震央分布を図 6 に、最初の地震と続発した同規模以上の地震の 56 組の地震リストを表 2 に示す。日本付近で発生した地震としては、1963 年の択捉島沖の地震、1969 年・1970 年の日向灘の地震、2004 年の三重県南東沖の地震、「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」などがリストに含まれていることがわかる。このリストから、 $M \geq 7.0$ の地震のうち約 4% (=56/1368) が 3 年以内に近接領域で同規模以上の地震が引き続いて発生しているといえる。抽出された続発地震の ΔM の分布について、そのヒストグラムを図 7 に、 ΔD のヒストグラムを図 8 に示す。 ΔM の分布は、割れ残り型の場合と同様に、 ΔM が小さい地震ほど多く発生している傾向がみられるが、その傾向は割れ残り

型の場合より顕著である。 ΔD の分布からは、ごく近傍（図では約 12 km 程度以内）の続発地震の発生はまれであるが、その範囲を除くと距離による依存性はあまりないように見受けられる。しかし、距離が近いほど探索される面積が狭くなっていることを考慮すると、単位面積あたりでは距離が近いほど続発地震発生の頻度が高い傾向にあることが示唆される。

次に、3.1 節と同様に経過時間を集計し、そのヒストグラム、積算個数、続発地震発生の確率利得などを表したものが図 9 である。この図には割れ残り

型の場合と同様に大森・宇津式近似による積算フィッティング曲線（図 9(a), (b) の赤線）とそのパラメータ値（図 9(a)）、および日別度数（図 9(c), (d) の黄破線）と確率利得（図 9(c), (d) の赤線）の時間変化も示した。

これらの図から、前震一本震型の続発地震についても、時間変化の概略は大森・宇津式に適合することがわかる。個別の期間をみると、続発地震を伴わない場合を含めた全ての M7.0 以上の地震 1368 個のうち、最初の地震が発生した後に、同規模以上の地震が近接領域で発生する割合は 7 日以内に約 2% (=

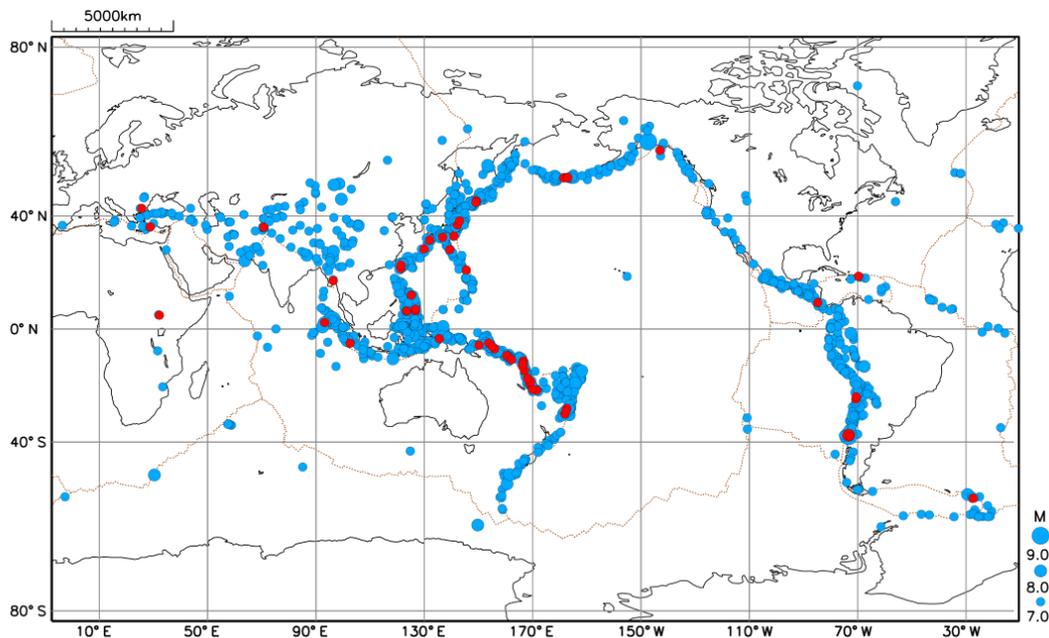


図 6 1900 年から 2016 年 6 月までの期間に発生した $M \geq 7.0$ の地震 1368 個のうち、その地震と同規模以上で震央距離が 50km 以内の地震が 3 年以内に続発した 56 個の地震（●）と続発しなかった 1312 個の地震（●）の震央分布図。

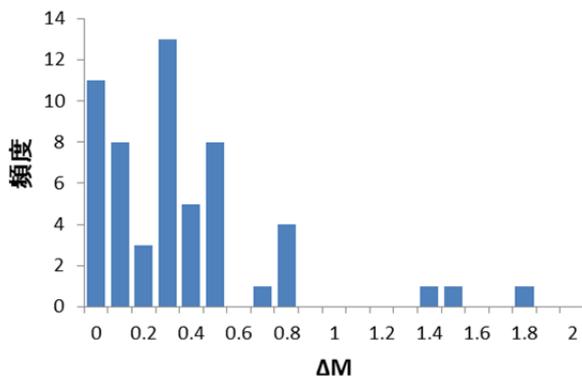


図 7 最初の地震 ($M \geq 7.0$) と続発地震との M の差 (ΔM) のヒストグラム。

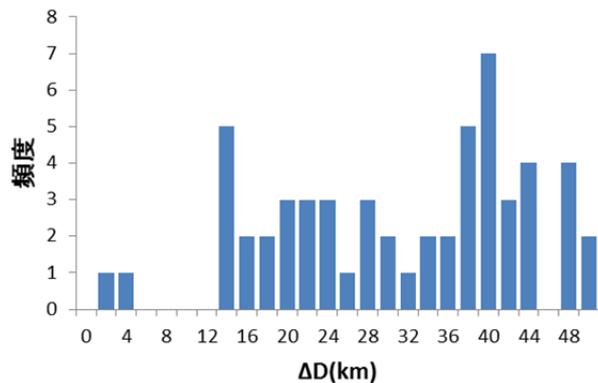


図 8 最初の地震 ($M \geq 7.0$) と続発地震との震央距離 (ΔD) のヒストグラム。

表 2 1900 年から 2016 年 6 月までの期間に発生した $M \geq 7.0$ の地震のうち、その地震発生後、その地震と同規模以上で震央距離が 50 km 以内の地震が 3 年以内に続発した 56 事例の地震リスト。左側が最初の地震、右側が続発地震。続発地震は最初の地震のみ抽出し、最初の地震との M の差 (ΔM)、発生時刻の差 (ΔT)、震央距離 (ΔD) も記載した。その他の説明は表 1 と同様。なお、本表は内閣府 (2017) の報告と同一の条件で抽出された結果を示したものであり、当該報告と同一の内容を再掲したものである。

番号	最初の地震								続発地震								差				
	年	月	日	時	分	緯度	経度	深さ (km)	Mw	年	月	日	時	分	緯度	経度	深さ (km)	Mw	ΔM	ΔT (日)	ΔD (km)
1	1923	11	4	1	19	29.102	129.950	35	7.0	1923	11	6	6	28	28.926	130.311	35	7.2	0.2	2.2	40
2	1928	4	14	17	59	42.366	25.642	10	7.1	1928	4	19	4	22	42.363	25.126	15	7.1	0.0	4.4	42
3	1929	7	5	23	19	51.461	-178.165	35	7.0	1929	7	8	6	23	51.426	-177.790	35	7.3	0.3	2.3	26
4	1930	5	5	22	46	17.883	96.397	35	7.4	1930	12	4	3	51	18.235	96.348	10	7.6	0.2	212.2	39
5	1931	2	10	15	34	-5.355	102.586	35	7.1	1931	9	25	14	59	-5.437	102.274	35	7.4	0.3	227.0	36
6	1935	9	4	10	37	22.331	121.284	15	7.1	1936	8	22	15	51	21.963	121.240	15	7.1	0.0	353.2	41
7	1938	5	30	23	29	-19.990	168.780	35	7.0	1939	4	6	1	42	-19.924	169.055	30	7.1	0.1	310.1	30
8	1938	11	5	19	50	37.147	142.241	35	7.7	1938	11	6	17	53	37.382	142.305	30	7.7	0.0	0.9	27
9	1945	12	8	10	4	-6.063	150.180	55	7.1	1945	12	29	2	48	-5.808	150.080	60	7.5	0.4	20.7	30
10	1946	8	8	22	28	19.514	-69.638	15	7.0	1948	4	22	5	22	19.260	-69.716	15	7.1	0.1	622.3	29
11	1947	6	14	5	24	21.774	145.474	35	7.0	1947	6	19	16	34	21.570	145.469	35	7.2	0.2	5.5	23
12	1951	10	22	6	34	23.487	121.400	25	7.5	1951	11	25	3	50	23.092	121.214	30	7.8	0.3	33.9	48
13	1957	3	11	23	55	51.339	-178.602	25	7.0	1957	3	16	11	34	51.419	-178.870	25	7.2	0.2	4.5	21
14	1957	3	12	20	45	51.481	-177.243	20	7.1	1957	3	14	23	47	51.196	-176.733	25	7.1	0.0	2.1	48
15	1957	4	25	4	10	36.493	28.829	35	7.1	1957	4	25	11	25	36.405	28.699	35	7.3	0.2	0.3	15
16	1960	5	21	19	2	-37.824	-73.353	25	8.1	1960	5	23	3	56	-38.061	-73.039	25	8.6	0.5	1.4	38
17	1960	6	20	11	1	-38.154	-72.917	25	7.0	1962	2	14	15	36	-37.845	-72.885	30	7.1	0.1	604.2	34
18	1961	9	8	20	26	-56.332	-27.345	101	7.1	1964	5	26	19	59	-56.323	-27.655	125	7.8	0.7	991.0	19
19	1963	10	12	20	27	44.647	149.225	38	7.0	1963	10	13	14	17	44.872	149.483	35	8.5	1.5	0.7	32
20	1965	2	24	7	11	-25.633	-70.679	35	7.0	1966	12	28	17	18	-25.494	-70.550	25	7.7	0.7	672.4	20
21	1965	8	11	12	40	-15.449	166.980	25	7.2	1965	8	12	7	31	-15.861	167.092	30	7.6	0.4	0.8	47
22	1967	12	25	10	23	-5.208	153.742	35	7.2	1968	2	12	14	44	-5.420	153.368	30	7.3	0.1	49.2	48
23	1968	5	20	16	13	-30.799	-178.110	55	7.0	1968	7	25	16	23	-30.725	-178.217	45	7.3	0.3	66.0	13
24	1969	4	21	16	19	32.150	131.938	39	7.0	1970	7	26	7	41	32.053	131.782	45	7.0	0.0	460.6	18
25	1970	1	10	21	7	6.785	126.682	40	7.2	1972	12	2	9	19	6.405	126.640	60	8.0	0.8	1056.5	43
26	1971	2	7	11	29	51.409	-176.974	29	7.0	1971	5	2	15	8	51.396	-177.318	24	7.0	0.0	84.2	24
27	1971	11	21	14	57	-11.857	166.557	113	7.1	1972	2	15	8	29	-11.481	166.339	102	7.4	0.3	85.7	48
28	1972	2	29	18	23	33.453	140.929	60	7.2	1972	12	4	19	16	33.362	140.827	55	7.4	0.2	279.0	14
29	1974	2	1	8	30	-7.459	155.940	30	7.3	1974	2	1	12	12	-7.285	155.653	30	7.4	0.1	0.2	37
30	1976	1	1	10	29	-28.918	-177.344	43	7.3	1976	1	15	1	47	-28.914	-177.354	45	7.9	0.6	13.6	1
31	1976	1	21	19	5	44.597	149.197	41	7.2	1978	3	23	12	15	44.688	148.723	35	7.6	0.4	791.7	39
32	1976	3	24	13	46	-29.860	-177.763	55	7.0	1976	5	5	13	52	-29.838	-177.739	40	7.0	0.0	42.0	3
33	1977	4	21	8	42	-9.932	160.359	30	7.2	1977	4	21	13	24	-9.961	160.723	30	7.3	0.1	0.2	40
34	1978	3	23	9	31	44.207	148.982	35	7.0	1978	3	25	4	47	44.208	148.759	13	7.5	0.5	1.8	18
35	1978	11	5	7	29	-11.424	162.143	30	7.0	1978	11	6	7	2	-11.137	162.225	30	7.0	0.0	1.0	33
36	1980	3	9	7	12	-22.595	171.459	15	7.2	1981	7	6	12	8	-22.227	171.578	30	7.6	0.4	484.2	43
37	1980	7	9	8	19	-12.528	166.399	45	7.5	1980	7	18	4	42	-12.532	166.039	30	7.7	0.2	8.8	39
38	1980	10	25	16	0	-22.161	169.957	20	7.1	1980	10	25	20	0	-21.886	169.724	30	7.5	0.4	0.2	39
39	1983	12	31	8	52	36.396	70.682	213	7.4	1985	7	29	16	54	36.120	70.911	99	7.4	0.0	576.3	37
40	1985	11	28	12	49	-13.938	166.251	20	7.0	1985	12	21	10	13	-13.887	166.612	25	7.1	0.1	22.9	39
41	1987	11	17	17	46	58.731	-143.046	15	7.2	1987	12	1	4	23	58.828	-142.613	15	7.9	0.7	13.4	27
42	1988	1	19	16	30	-24.832	-70.523	30	7.0	1988	2	5	23	1	-24.722	-70.485	36	7.2	0.2	17.3	13
43	1990	3	25	22	16	9.786	-84.756	25	7.1	1990	3	25	22	22	9.907	-84.753	20	7.3	0.2	0.0	13
44	1990	5	20	11	22	5.149	32.181	15	7.1	1990	5	25	5	0	5.307	31.892	15	7.1	0.0	4.7	37
45	1990	8	13	6	25	-19.468	169.256	165	7.0	1992	10	12	4	24	-19.186	168.984	136	7.4	0.4	790.9	42
46	1992	5	17	18	49	7.369	126.644	25	7.1	1992	5	17	19	15	7.202	126.725	30	7.2	0.1	0.0	21
47	1995	5	5	12	53	12.563	125.213	24	7.0	1996	6	12	3	22	12.712	125.220	32	7.1	0.1	403.6	17
48	1998	8	20	15	40	28.889	139.385	435	7.1	2000	8	6	16	27	28.866	139.614	410	7.3	0.2	717.0	22
49	2004	2	6	6	5	-3.643	135.524	23	7.0	2004	11	26	11	25	-3.657	135.408	24	7.1	0.1	294.2	13
50	2004	9	5	19	7	33.077	136.795	23	7.2	2004	9	5	23	57	33.230	137.155	14	7.4	0.2	0.2	38
51	2009	10	8	7	3	-13.037	166.431	37	7.6	2009	10	8	7	18	-12.607	166.309	40	8.0	0.4	0.0	50
52	2010	7	24	7	8	6.716	123.480	605	7.3	2010	7	24	7	51	6.412	123.596	580	7.7	0.4	0.0	36
53	2011	3	9	11	45	38.433	142.987	28	7.3	2011	3	11	14	46	38.285	142.546	20	9.1	1.8	2.1	42
54	2011	8	21	1	55	-18.270	168.103	30	7.1	2011	8	21	3	19	-18.306	168.236	30	7.1	0.0	0.1	15
55	2012	1	11	3	37	2.420	93.215	20	7.2	2012	4	11	17	38	2.273	93.051	20	8.6	1.4	91.6	24
56	2014	4	11	16	7	-6.586	155.049	61	7.1	2014	4	19	22	28	-6.755	155.024	43	7.5	0.4	8.3	19

24/1368), その後 8 日目~30 日目で約 0.5% (=7/1368) であるとわかる (図 9(b), (d)). 割れ残り型に比べ数

値が小さいのは, 前震一本震型は探索した空間領域が狭くなっているのに加え, 割れ残り型は先に述べ

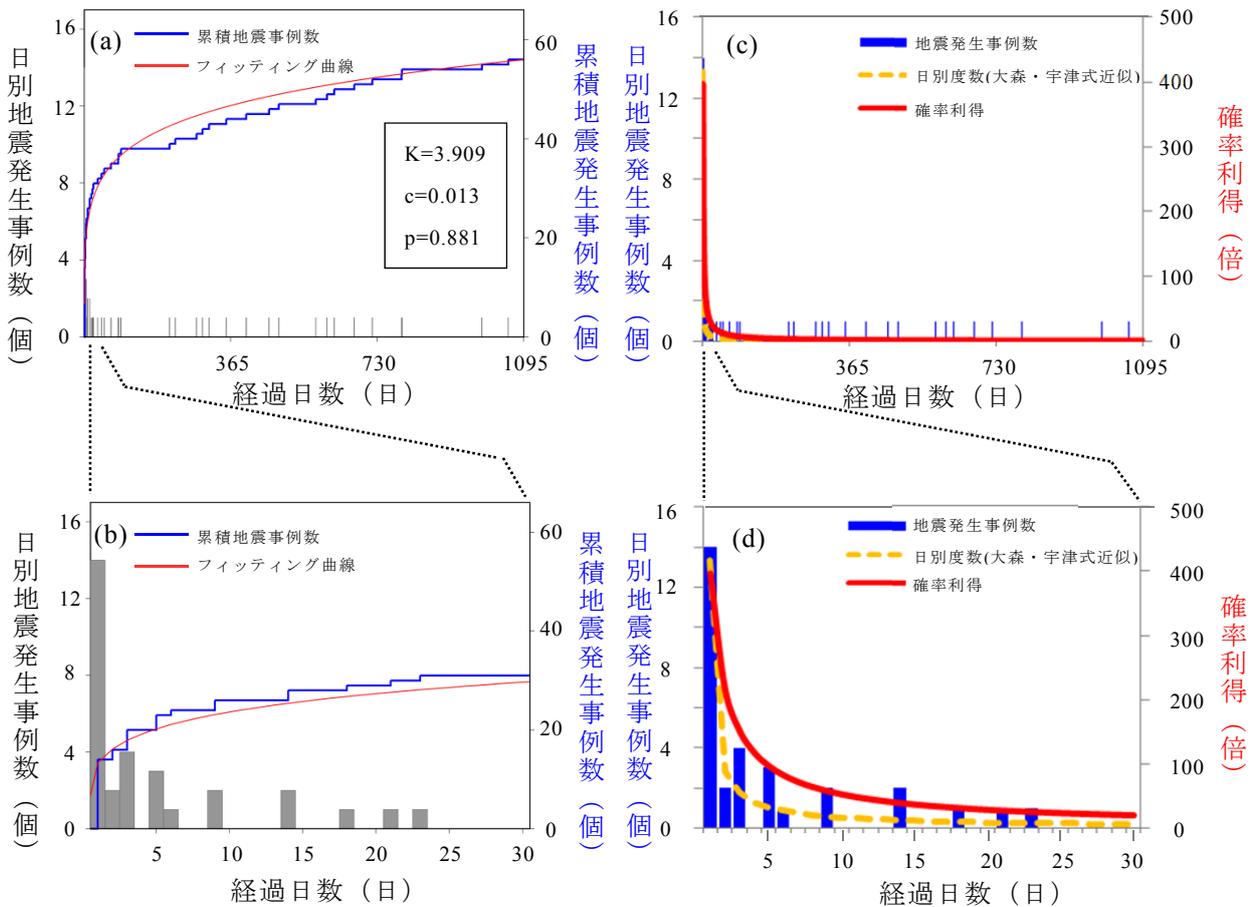


図 9 M \geq 7.0 の地震発生後に、その地震と同規模以上の続発地震が発生するまでの経過時間の頻度分布と、その分布の大森・宇津式による近似の適合度および確率利得を示す図．凡例は図 5 と同様．なお、本図は内閣府（2017）の報告から引用したもの（一部改変）であり、本図の引用に当たっては当該報告の原図を引用のこと．

たように続発地震に最初の地震より規模の小さい地震が多く含まれているが、前震一本震型には最初の地震より規模の小さな地震は基本的には含まれないことによると考えられる。

また、割れ残り型の場合と同様に、前震一本震型の地震が発生する可能性を、最初の地震から 2 年経過した後の 1 年間（731～1095 日）の平均発生頻度を基準とした場合の相対的な発生頻度、すなわち確率利得として表した（図 9(c), (d) の赤線）．その時間変化をみると、確率利得は地震直後から 1 週間程度は約 70 倍以上と高く、2 週間程度は 40 倍以上となっている．さらに、約 2 週間を超えると、地震発生直後の約 400 倍の 1/10 である約 40 倍以下となり、約 2 カ月を超えると 10 倍以下となることがわかる．

4 まとめと課題

M8 以上の地震が発生した後に隣接領域で再び同程度の規模の地震が発生した事例（割れ残り型）、および M7 以上の地震が発生した後に近接領域で同規模以上の地震が発生した事例（前震一本震型）について、全世界で発生した地震のカタログを基に、主に発生間隔に関する統計的調査を行った．その結果、前者のタイプの場合、M8 以上の地震発生後、3 日以内に続発地震が発生した割合は約 10%、4 日目～7 日目では約 2%であり、後者のタイプでは、M7 以上の地震発生後、7 日以内に続発地震が発生した事例は約 2%、3 年以内では約 4%であることがわかった．また、続発地震発生の時間分布は大森・宇津式に概ね適合していることがわかり、その式を基に確率利得の時間変化を算出した．

既往研究では、プレート収束速度やスラブのベンディング角といったテクトニック的な要素が、地震発生の様式に影響を与えていることが示されている (Ide, 2013; Nishikawa and Ide, 2015 など)。今後の課題として、地震のテクトニックな発生場の違いが大規模地震の続発性にどう影響するか明らかにする必要がある。また、断層運動の型 (メカニズム解) と続発性の関係性についても今後検討していく必要があるだろう。加えて、今回の続発地震の抽出では、例えば、地震間の距離については震央距離しか考慮しなかったが、より厳密に隣接領域の続発性を議論するためには地震の破壊領域を考慮した解析が必要であるなど、その抽出条件についてもさらに検討・検証等を行っていく必要がある。

謝辞

本解析には ISC-GEM および USGS による震源カタログを使用させて頂きました。論文中の図の作成には、一部 GMT (Wessel and Smith, 1998) および hypdsp (横山, 1997) を使用しました。また、匿名の査読者の方には本稿を改善するために有益な助言をいただきました。記して感謝致します。

文献

- 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.
- 伊藤秀美・明田川保 (2007): 余震活動解析プログラムの改良, 験震時報, **70**, 15-28.
- 内閣府 (2017): 南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性について (報告), http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/tyosabukai_wg/pdf/h290825honbun.pdf, (参照日: 2017年8月25日) .
- 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.
- Aki, K. (1981): A probabilistic synthesis of precursory phenomena, Earthquake Prediction (eds. D. W. Simpson and P. G. Richards), Maurice Ewing Series, **4**, 566-574, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Gasperini, P., L. Barbara, and G. Vannucci (2016): Relative frequencies of seismic main shocks after strong shocks in Italy, Geophys. J. Int., **207**, 150-159.

- Gutenberg, B. and C. F. Richter (1944): Frequency of earthquakes in California, Bull. Seism. Soc. Am., **34**, 185-188.
- Ide, S. (2013): The proportionality between relative plate velocity and seismicity in subduction zones, Nat. Geosci. **6**, 780-784, doi:10.1038/ngeo1901.
- Jones, L. M. (1985): Foreshocks and time-dependent earthquake hazard assessment in southern California, Bull. Seism. Soc. Am., **75**, 1669-1680.
- Maeda, K. (1999): Time Distribution of Immediate Foreshocks Obtained by a Stacking Method, Pure Appl. Geophys. **155**, 381-394.
- Nishikawa, T. and S. Ide (2015): Background seismicity rate at subduction zones linked to slab-bending-related hydration, Geophys. Res. Lett. **42**, 7081-7089, doi:10.1002/2015GL064578.
- Utsu, T. (1961): A statistical study on the occurrence of aftershocks, Geophys. Mag., **30**, 521-605.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998): New, Improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS trans. AGU, **79**, 579.

(編集担当 上野寛)