

## 10 - 6 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率 (2024)

## Probability of moderate repeating earthquakes within one and three years from 1 January 2024

気象庁気象研究所

Meteorological Research Institute, JMA

日本各地で波形がよく似た地震（相似地震）が観測されている。その多くはプレート境界で発生しており、プレート間の定常的なすべりと密接な関係があると考えられている。気象研究所は中規模の繰り返し地震（相似地震）について発生状況を取りまとめ<sup>1)</sup>、その後も相関係数とコヒーレンスを用いて調査を継続している<sup>2)</sup>。前回報告した期間<sup>3)</sup>以降（2023 年 1 月から 2023 年 12 月末まで）の発生状況を報告する。そして、ここで整理した地震系列について、岡田・他（2007）<sup>4)</sup>のベイズ統計対数正規分布モデルを使い、2024 年 1 月 1 日を予測日として、今後 1 年及び 3 年以内の発生確率予測を行っている。なお、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等による余効変動の影響は考慮していない。平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震によりイベント間間隔が不均等な系列（No.18, 20, 21, 22, 26, 28）については、平均強度関数を冪関数とし、時間変換後のイベント間間隔が逆ガウス分布に従う非定常更新過程モデル<sup>5)</sup>を使い、2024 年 1 月 1 日を予測日として、今後 1 年及び 3 年以内の発生確率予測を行った。本報告は、地震活動評価の高度化を目的として実施しているものであり、気象庁が別途実施している宮古島近海等の繰り返し地震の報告における目的・手法とは異なるものである。

今期間（2023 年 1 月～2023 年 12 月）に発生したものを含めて、地震が 3 個以上の地震系列は 56 系列ある（第 1 表）。各系列の地震発生状況を第 1 図に示す。この 56 系列のうち、今期間は 6 系列で新たに発生した（第 1 表と第 1 図の No. 3, 5, 8, 22, 33, 34, 第 2 図の□印）。なお、今期間に発生して 3 個以上となった系列はない。第 1 図を見ると岩手県沖と福島県沖については、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（赤色縦線）以降、発生間隔が短くなっていることがわかる。これは、同地震の余効変動による影響と考えられている<sup>6) 7)</sup>。余効変動は減衰しつつあるため、今後徐々に元の発生間隔へ戻っていくと思われる。

2024 年 1 月 1 日時点のベイズ統計対数正規分布モデルによる発生確率予測で、今後 1 年以内の発生確率が 50% 以上の地震系列は、岩手県沖（No.21, M4.1, 1.4 年）、福島県沖の 2 系列（No.26, M4.9, 1.2 年と No.28, M4.8, 1.9 年）、茨城県北部（No.29, M4.2, 1.9 年）、宮古島近海（No.54, M4.4, 2.1 年）の 5 系列ある（第 1 表, 第 2 図）。また、非定常更新過程モデルによる発生確率予測で、今後 1 年以内の発生確率が 50% 以上の地震系列は、岩手県沖（No.21）と福島県沖（No.26）の 2 系列ある（第 3 図）。前回提出の資料<sup>3)</sup>で、2023 年 1 月 1 日時点のベイズ統計対数正規分布モデルによる発生確率予測を 56 系列について行っており、1 年予測の予測期間は終了している。平均対数尤度と Brier スコアの指標<sup>8)</sup>による 1 年予測の成績は、平均対数尤度は -0.304, Brier スコアは 0.094 であった。系列数の少ない状況での結果ではあるが、指数分布モデルで予測した成績（平均対数尤度 -0.345, Brier スコア 0.100）と比べると、平均対数尤度と Brier スコアともに良い。予測期間内に発生した系列で予測確率 50% 以上は 1 系列（No.33）で、平均対数尤度と Brier スコア共に非常に悪い成績は 8 系列（No.1, 3, 5, 8, 21, 22, 26, 34）あった。また、非定常更新過程モデルで予測した 6 系列の 1 年予測の予測期間も終了している。平均対数尤度は -0.345, Brier ス

コア 0.027 で、同じ 6 系列で求まる系列ベイズ統計対数正規分布モデルの予測成績（平均対数尤度 - 0.500, Brier スコア 0.174）と比べると、平均対数尤度と Brier スコアともに非定常更新過程モデルが良い。予測期間内に発生した系列は 1 系列（No.28）であった。

#### 謝辞

本資料は、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及び気象庁のデータを用いて作成している。また、2016 年熊本地震合同観測グループのオンライン臨時観測点（河原、熊野座）、2022 年能登半島における合同地震観測グループによるオンライン臨時観測点（よしが浦温泉、飯田小学校）、米国大学間地震学研究連合（IRIS）の観測点（台北、玉峰、寧安橋、玉里、台東）のデータを用いて作成している。非定常更新過程モデルの発生確率計算に早稲田大学の野村俊一先生提供のソースコードを使用させて頂きました。本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20K11722 の助成を受けて行いました。一部の図の作成に GMT(Generic Mapping Tool[Wessel,P., and W.H.F.Smith, New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, vol.79 (47), pp.579, 1998]) を使用しました。

(田中昌之)

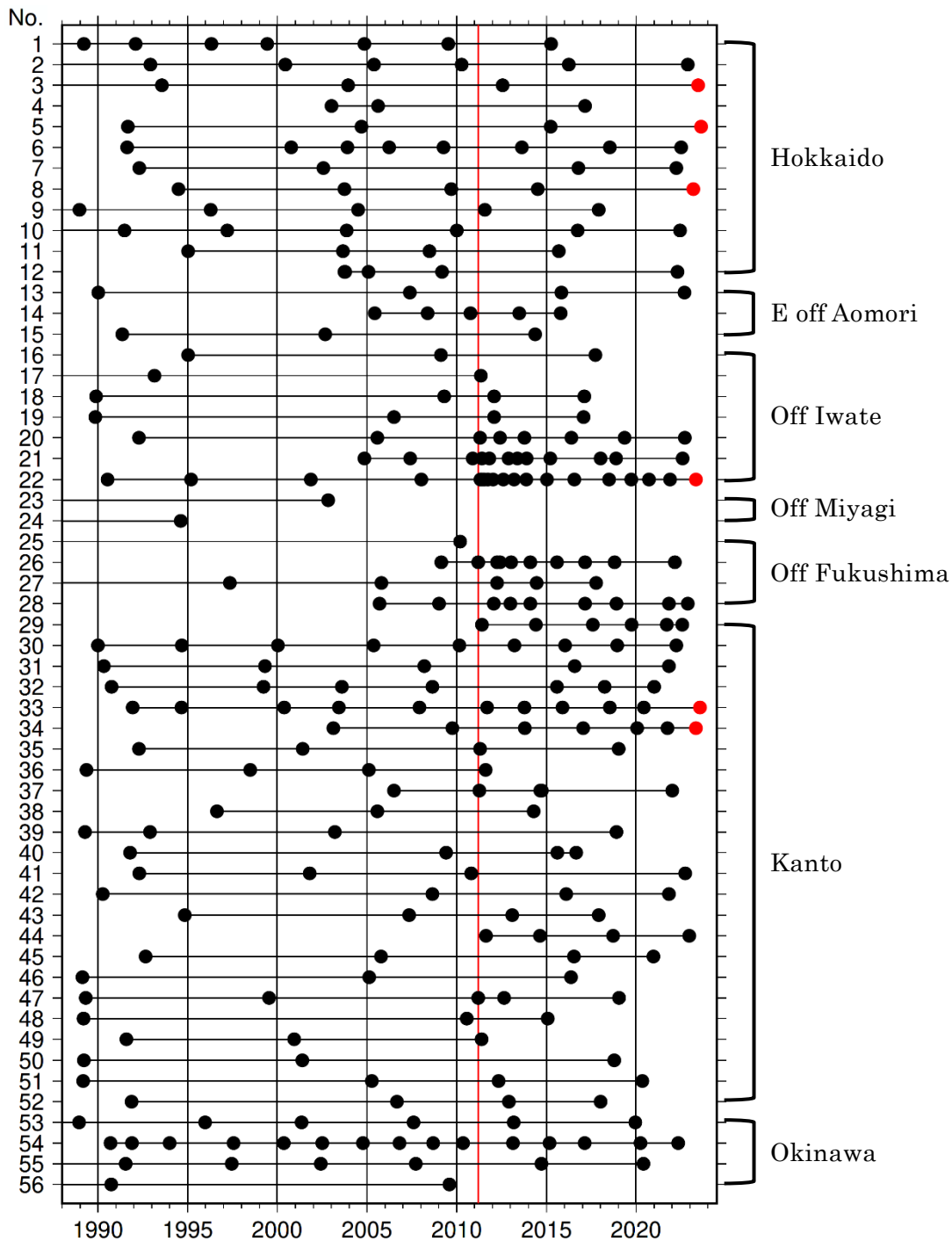
#### 参考文献

- 1) 地震火山研究部, 地震火山部, 気象大学校, 札幌管区气象台, 仙台管区气象台, 大阪管区气象台, 福岡管区气象台, 沖縄气象台, 日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究, *気象研究所技術報告*, **72**, pp.144, 2014.
- 2) 気象庁気象研究所, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2017), *連絡会報*, **98**, 437-442, 2017.
- 3) 気象庁気象研究所, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2023), *第 238 回地震予知連絡会連絡会報*, 2023.
- 4) 岡田正実・他, 地震長期発生確率予測に使用する更新過程対数正規分布モデルのパラメータ事前分布, *地震*, **60**, 85-100, 2007.
- 5) 野村俊一・田中昌之, 余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測, *統計数理*, **69**(2), 239-543, 2021.
- 6) 東北大学大学院理学研究科, 小繰り返し地震から推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域周辺の準静的すべり, *連絡会報*, **86**, 3-44, 2011.
- 7) 気象庁, 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の余震域周辺における相似地震活動, *連絡会報*, **87**, 3-4, 2012.
- 8) 田中昌之・他, 繰り返し回数の少ない繰り返し地震系列に対する長期的地震発生確率予測の成績と検証, *地震*, **70**, 195-213, 2018.

## 第 1 表 中規模相似地震系列リスト

Table 1 List of the moderate repeating earthquake sequence and probabilities of the event occurrence within one year and three years from 1 January 2024 calculated with the lognormal distribution model with Bayesian approach. Seismic intensity is the JMA seismic intensity scale. For series where the earthquake occurred in 2023, No., Last event, and Probability of 1-year forecast for 2023/1/1 are shown in red text.

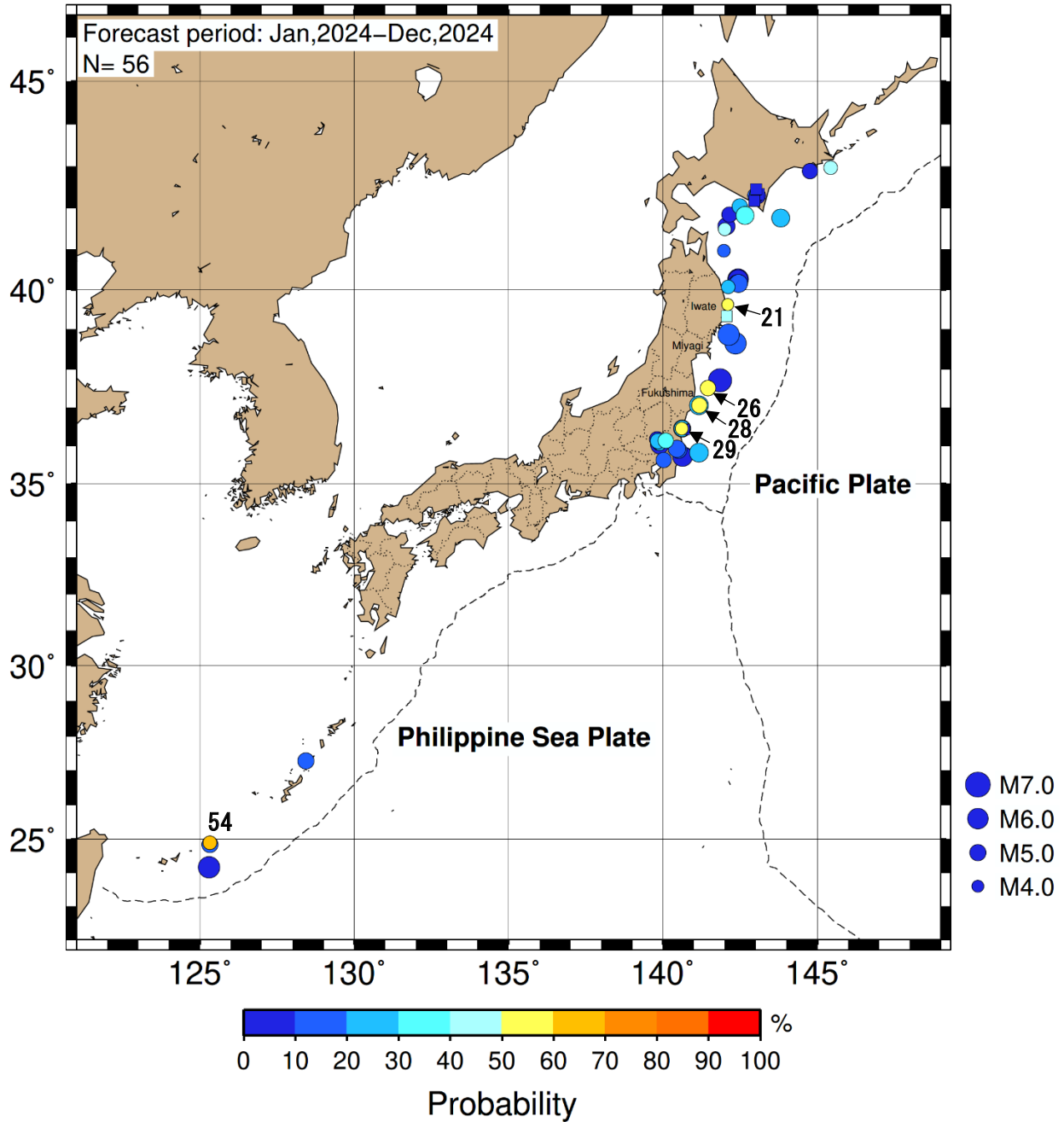
No.	Latitude	Longitude	Depth (km)	First event	Last event	Repeat count	Mean magnitude	Maximum seismic intensity	Interval (year)			Probability (%)		
									Ave.	Short.	Long.	2024/1/1		2023/1/1
1	42.974	145.435	47	1979/05/11 06:02	2015/04/06 13:58	9	4.4	2 ~ 3	4.5	2.9	5.7	49.6	84.7	52.5
2	42.890	144.762	57	1954/09/17 20:52	2022/11/20 18:17	12	4.9	2 ~ 4	6.1	4.9	7.5	0.0	4.3	0.0
3	42.458	143.019	68	1969/11/07 17:06	2023/06/19 13:50	6	5.0	3 ~ 4	10.7	8.6	13.0	0.0	0.1	23.1
4	42.349	143.049	52	2003/01/07 03:27	2017/02/27 18:10	3	4.7	3 ~ 3	7.1	2.6	11.5	20.1	47.5	20.3
5	42.338	143.104	55	1991/09/02 12:03	2023/08/19 03:33	4	5.1	3 ~ 3	10.6	8.4	13.0	0.0	0.5	9.0
6	42.309	142.992	56	1991/08/16 23:16	2022/07/05 17:52	8	4.8	3 ~ 4	4.4	2.3	9.1	11.8	59.5	1.7
7	42.305	143.060	55	1992/04/20 05:36	2022/03/27 08:15	4	5.0	3 ~ 4	10.0	5.5	14.2	0.9	7.7	0.3
8	42.182	142.964	53	1994/07/02 07:43	2023/03/11 05:12	5	4.9	4 ~ 4	7.2	4.8	9.2	0.2	5.9	32.2
9	42.044	142.484	68	1973/08/18 11:08	2017/12/02 05:48	7	4.9	3 ~ 3	7.4	6.4	8.6	27.6	73.2	16.2
10	41.853	142.161	69	1957/01/06 14:15	2022/06/10 11:14	13	4.8	2 ~ 3	5.3	2.9	7.5	1.7	32.7	0.1
11	41.827	142.653	56	1995/01/11 16:48	2015/09/12 22:38	4	5.4	3 ~ 4	6.9	4.8	8.6	32.3	68.3	31.3
12	41.767	143.810	38	2003/09/26 05:10	2022/04/24 17:16	5	5.5	3 ~ 3	4.6	0.0	13.1	22.6	46.1	30.9
13	41.567	142.064	62	1990/01/07 22:28	2022/09/13 09:51	4	5.2	3 ~ 4	10.9	6.9	17.4	0.4	4.1	0.1
14	41.491	142.005	64	2005/06/03 01:32	2015/10/18 09:47	5	4.2	2 ~ 3	2.6	2.3	2.9	42.6	76.4	48.1
15	40.971	141.979	59	1991/05/13 12:24	2014/05/19 21:02	3	4.3	3 ~ 3	11.5	11.3	11.7	14.8	42.6	12.0
16	40.266	142.433	36	1995/01/07 11:36	2017/09/27 05:22	3	6.1	3 ~ 4	11.4	8.6	14.1	7.0	26.3	4.6
17	40.251	142.436	30	1960/08/13 16:11	2011/05/08 05:52	4	5.9	3 ~ 4	16.6	15.0	18.2	8.2	27.0	6.4
18	40.165	142.385	36	1989/11/21 13:47	2017/02/12 22:36	4	5.0	3 ~ 3	9.1	2.8	19.4	16.1	40.3	15.9
19	40.162	142.441	37	1989/11/06 17:56	2017/01/26 17:06	4	5.5	3 ~ 4	9.1	5.0	16.7	17.5	45.3	15.8
20	40.073	142.116	48	1992/04/17 09:43	2022/09/20 09:06	8	4.4	3 ~ 4	4.4	1.1	13.3	24.3	62.4	11.0
21	39.634	142.105	48	2004/11/05 13:45	2022/08/08 09:46	12	4.1	3 ~ 3	1.6	0.4	3.7	56.6	88.0	55.1
22	39.338	142.073	49	1990/07/16 21:35	2023/05/05 21:24	19	4.8	3 ~ 4	1.8	0.1	6.7	48.9	79.4	43.8
23	38.876	142.133	47	1940/11/20 00:01	2002/11/03 12:37	5	6.3	3 ~ 5-	15.5	13.0	19.0	19.7	47.8	19.7
24	38.656	142.355	35	1937/01/07 15:11	1994/08/14 18:06	5	6.3	3 ~ 4	14.0	11.7	16.0	16.0	39.5	16.4
25	37.704	141.853	45	1942/02/21 16:07	2010/03/14 17:08	4	6.6	4 ~ 5-	22.5	21.0	24.6	3.0	11.3	2.3
26	37.512	141.455	48	2009/02/17 09:12	2022/02/26 08:32	10	4.9	3 ~ 4	1.5	0.2	3.3	55.3	86.6	60.2
27	37.067	141.162	53	1929/06/24 11:04	2017/10/06 23:56	13	5.7	3 ~ 5-	7.1	2.2	11.2	22.5	55.7	19.8
28	37.065	141.183	50	2005/09/11 05:06	2022/11/21 05:19	9	4.8	3 ~ 5-	2.1	0.9	3.3	51.1	91.7	14.7
29	36.459	140.606	56	2011/05/28 11:13	2022/07/29 08:03	6	4.2	3 ~ 3	2.3	0.9	3.2	54.2	92.0	22.5
30	36.458	140.580	56	1990/01/01 18:03	2022/04/02 16:27	9	4.4	3 ~ 4	4.0	2.8	5.4	12.9	73.1	1.1
31	36.451	140.614	58	1990/05/03 16:45	2021/11/01 06:14	5	5.3	4 ~ 5-	7.9	5.3	9.0	1.0	12.2	0.2
32	36.451	140.616	56	1990/10/06 23:33	2020/12/30 09:35	7	5.1	4 ~ 4	5.1	2.6	8.5	24.7	66.8	13.7
33	36.436	140.693	52	1991/12/12 11:27	2023/07/22 10:52	11	4.8	3 ~ 4	3.2	1.9	5.7	3.0	65.6	52.0
34	36.429	140.647	54	2003/02/14 10:54	2023/05/01 05:04	7	4.2	3 ~ 4	3.4	1.6	6.6	12.1	66.3	16.9
35	36.171	139.814	56	1992/04/14 12:03	2019/01/14 13:23	4	4.9	4 ~ 4	8.9	7.7	9.9	7.2	33.4	3.3
36	36.138	140.091	68	1989/05/09 02:51	2011/08/15 15:26	4	4.8	3 ~ 4	7.4	6.5	9.1	30.0	63.3	31.4
37	36.137	140.023	49	2006/07/06 15:17	2022/01/05 21:34	5	3.9	3 ~ 3	3.9	0.1	7.3	22.3	46.6	27.9
38	36.128	139.846	52	1996/08/16 01:03	2014/04/18 07:53	3	4.8	3 ~ 4	8.9	8.7	9.0	25.2	58.9	23.4
39	36.084	139.875	52	1989/04/12 04:41	2018/11/27 08:33	4	4.8	3 ~ 4	9.9	3.6	15.7	11.6	34.7	9.2
40	36.083	139.894	50	1991/10/19 08:31	2016/08/27 22:46	4	4.2	3 ~ 4	8.3	1.0	17.6	13.7	33.9	14.4
41	36.081	139.864	49	1992/04/23 01:21	2022/09/30 14:58	4	4.4	3 ~ 4	10.1	9.0	11.9	0.1	1.4	0.0
42	36.058	139.915	47	1990/04/09 00:52	2021/10/28 09:55	4	4.6	3 ~ 4	10.5	5.7	18.4	2.1	12.5	0.8
43	36.056	139.896	47	1994/11/04 19:06	2017/12/02 00:12	4	4.5	3 ~ 4	7.7	4.8	12.5	21.3	54.5	17.8
44	36.051	139.797	78	2011/08/17 09:23	2022/12/16 09:25	4	4.3	3 ~ 4	3.8	3.0	4.2	4.7	59.4	0.3
45	36.048	139.945	48	1992/08/27 13:09	2020/12/17 16:42	4	4.9	3 ~ 4	9.4	4.4	13.1	4.6	21.5	2.2
46	36.031	139.894	48	1989/02/19 21:27	2016/05/16 21:23	3	5.5	4 ~ 5-	13.6	11.3	16.0	5.4	20.4	3.7
47	35.921	140.449	56	1989/04/26 02:18	2019/01/18 21:46	5	5.2	3 ~ 4	7.4	1.4	11.7	17.1	43.1	16.3
48	35.889	140.509	39	1989/03/11 16:12	2015/01/26 07:20	3	5.0	3 ~ 5-	12.9	4.5	21.4	11.3	30.5	10.9
49	35.818	141.158	38	1991/08/06 23:49	2011/05/20 09:46	3	5.7	3 ~ 4	9.9	9.3	10.5	23.4	54.4	23.2
50	35.746	140.693	50	1989/03/18 01:37	2018/10/12 13:15	3	5.2	3 ~ 4	14.8	12.2	17.4	1.4	6.9	0.8
51	35.718	140.635	51	1989/03/06 23:39	2020/05/04 22:07	4	5.9	4 ~ 5+	10.4	7.1	16.1	3.4	17.3	1.6
52	35.631	140.022	75	1991/11/19 17:24	2018/01/06 00:54	4	4.8	4 ~ 4	8.7	5.1	14.8	16.7	46.2	13.5
53	27.289	128.434	47	1968/12/08 18:08	2019/12/18 08:35	9	5.1	2 ~ 4	6.4	5.4	7.5	14.2	65.7	3.6
54	24.898	125.322	42	1990/09/10 19:08	2022/05/04 12:53	15	4.4	1 ~ 3	2.3	1.2	3.6	69.2	98.9	17.9
55	24.841	125.319	43	1966/07/11 07:04	2020/05/27 18:19	10	5.1	2 ~ 4	6.0	5.0	7.0	11.7	66.8	2.0
56	24.169	125.297	41	1966/07/11 01:12	2009/08/05 09:17	3	6.2	3 ~ 4	21.5	18.9	24.0	4.9	16.3	4.1



※左の番号は第 1 表の No. に対応。  
 ※赤縦線は平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の発生時。  
 ※赤丸印は前回予測期間内に発生した地震または発生で繰り返し地震 3 個以上となった系列。  
 ※収集条件によっては波形データが未収録の場合もあり、相似地震が漏れている場合がある。

第 1 図 中規模相似地震活動経過図 (~ 2023 年 12 月末)

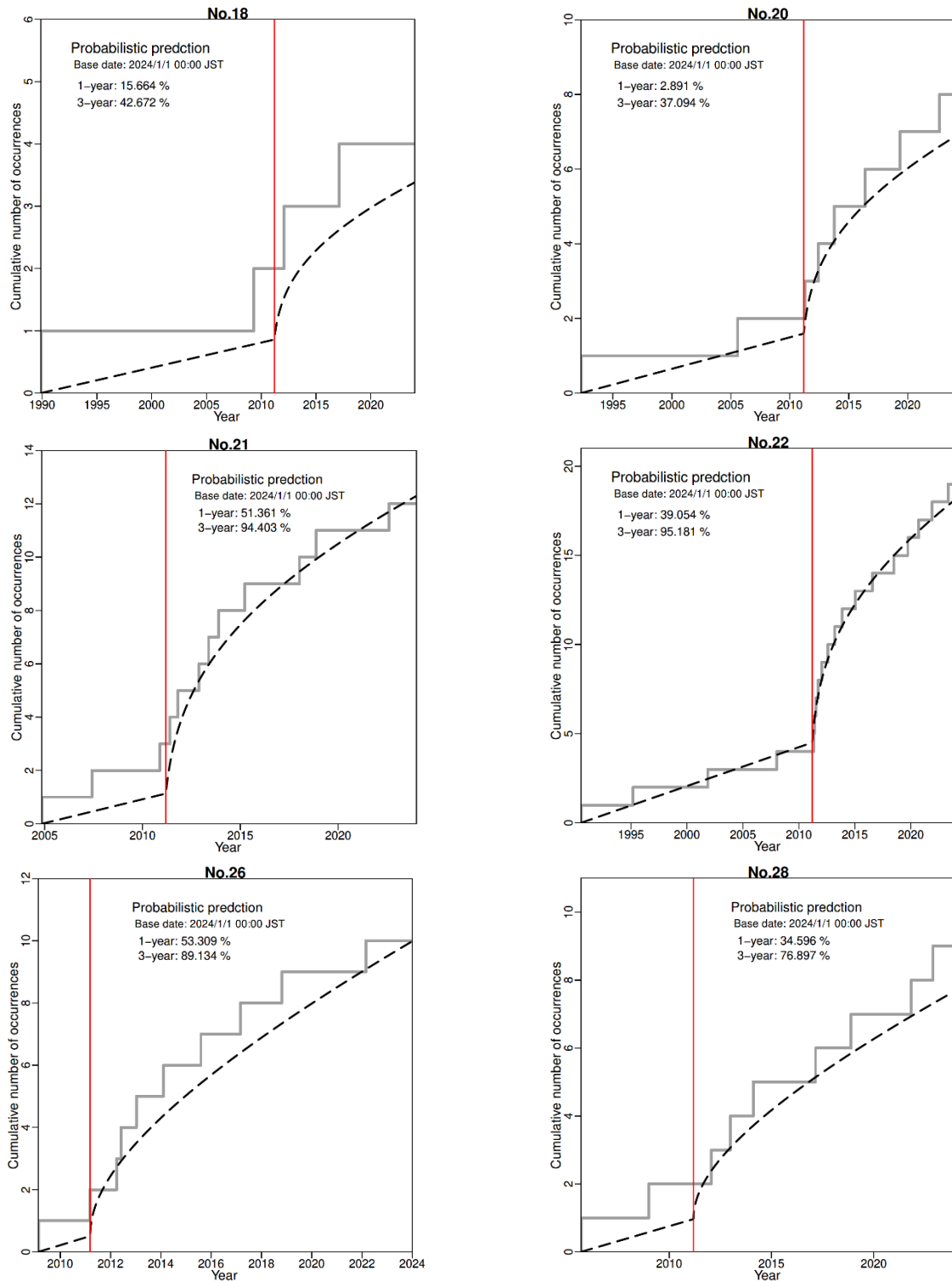
Fig. 1 Time diagrams of repeating earthquakes for the period from October 1988 to December 2023. The red vertical line indicates the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The red marks and horizontal lines denote the newly added events or sequence in this report.



※図中の番号は 1 年確率 50%以上のもので第 1 表の No. に対応。

第 2 図 ベイズ統計対数正規分布モデルによる 2024 年 1 月から 1 年以内の発生確率

Fig. 2 Probability of moderate repeating earthquakes for the period from January 2024 to December 2024 by the lognormal distribution model with Bayesian approach. The circles and square marks indicate the epicenter of the repeated earthquake, the color of the mark indicates the occurrence probability of the next earthquake, and the size indicates the average of the earthquake's magnitude. Square marks indicate that an earthquake occurred between January 2023 and December 2023.



第 3 図 非定常更新過程モデルによる 2024 年 1 月から 1 年以内の発生確率

Fig. 3 Probability of moderate repeating earthquakes for the period from January 2024 to December 2024 by the nonstationary renewal process model that incorporates the aftershock-triggering effect of nearby large earthquakes as a relative change in the loading rate. The red vertical line indicates the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.