

東北地方太平洋沖地震後に宮城県沖に誘発された繰り返し地震活動

(公財)地震予知総合研究振興会 津村建四朗

1. まえがき

三陸沖のやや深い地震(深さ 30-60km)の1998年—2018年の地震活動図(震央分布図と時間円表示図)を作っている過程で、2011年東北地方太平洋沖地震(以下、「東北地方沖地震」と略記する)後に宮城県沖に誘発された極めて特徴的な繰り返し地震活動を検出した。

この活動は、宮城県南三陸町の東方約 30 kmの直径約 1km、深さ約 46-49 kmの極めて小範囲で発生している繰り返し地震で、東北地方沖地震後に活発化し、次第に発生間隔が長くなり、Mが小さくなりながら、2018年現在も継続しており、発生回数は44回に達している。この活動について、繰り返しの規則性から簡単なルールで中期的予測を試みた。

この活動の特徴と中期的予測の試行結果について報告する。

2. 繰り返し地震の検出

以下の研究は、気象庁一元化震源を用い、地震活動解析ソフト“SEIS-PC for Windows”を利用して行った。

図1(A)は、宮城県沖の1998年—2018年の $M \geq 2.0$ 、深さ 30-60kmの地震の震央分布図である。この図では、沖合に面的に活発な活動域が南北に広がっているほか、海岸に近い部分に小範囲に集中している活動域が散在していることが分かる。しかし、この図だけでは、それらがどのような経過で活動したのかは分からない。図1(B)は、同じデータを、時間円表示図として表したものである。この図は、右回りに一周が21年間で、外向きの針の向きが各メッシュ内で発生した地震の発生時期を示し、その長さがMを示している(TC-M図)。この図で、7時の方向に針が出ているメッシュが全域に多く分布しているのは、東北地方沖地震の直後に集中的に発生した余震で、その多くは比較的短期間で収まっている。一方、震央分布図で認められた散在している小区域の活動の多くでは、その後も針が出続けていて、東北地方沖地震後ずっと活動が継続していることが分かる。図3(A)と(B)は、図1の一部を拡大して示したもので、特に注目したのは南三陸町沖約 30 kmの活動域で、図2では、3つの活動域に分かれていることが分かる。

3. 対象とした繰り返し地震活動の特徴

図3(A)は、この活動域付近をさらに拡大した震央分布図で、南北2つの明瞭な活動域とその東側のやや不明瞭な活動域が認められる。図3(B)の時間円表示図では、南北の活動域で繰り返し地震の特徴的なパターンを直感的に認識できる。以下は、このうち最も規則的な活動と認められる北側の活動域(北緯 $38^{\circ} 38'$ 、東経 $141^{\circ} 54'$ 付近)について詳しく調べた。

図3(D)のMT図が繰り返し地震活動の特徴を最もよく示しており、この活動域では、東北地方沖地震前にもM3.1程度の地震が、平均440日位の間隔で繰り返し発生していたことが分かる。東北地方沖地震

後は、図4に示したように2011年4月2日のM3.9の地震に始まり、2018年末までに、M3-4クラスの地震がかなり規則的に、44回繰り返し発生している。Mは、当初は4.0前後であったが、次第に小さくなり、2018年には3.4前後となっている。また、発生間隔は、図3(B)に示すように、当初は約20日くらいであったが、次第に長くなり、2016年から2018年には、約100日となっている。図3(F)は、震源の深さの時間経過であるが、長期間にわたって、46-49kmのきわめて狭い一定の範囲で発生していることが分かる。これは、他の活動域の繰り返し地震にも共通に認められようであって、気象庁一元化震源は、海域においてもすくなくとも繰り返し地震については、きわめて高い(相対)精度を持っていることを示していると思われる。

4. 簡単な地震予測実験

以上のような特徴からこの一連の活動については、ある程度の中期的地震予測(予知)が可能ではないかと考え、次のような簡単なルールで地震予測を試みてみた。

- (1) 発生場所と深さはほとんど変わらないので、次の地震も同じだと考える。
- (2) Mは僅かずつ小さくなる傾向があるが、無視して次の地震のMも同じと考える。
- (3) 発生間隔も少しずつ大きくなっているが、この傾向も無視して、ある地震が発生した時点で、前回からの間隔と同じ間隔で次の地震が発生すると考える。
- (4) さらに、前回からの間隔の代わりに、直前2回の平均間隔で次の地震が発生すると考えた場合も試算した。

地震予知の3要素のうち、場所と規模については、(1)と(2)で十分な精度で予測でき、時期の予測だけが問題となる。

表1は、繰り返し地震の発生の実況とこれらのルールによる時期の予測結果と評価である。ここに、

予測誤差1は、発生日と(3)の方法で予測した予測日との差

予測誤差2は、発生日と(3)の方法で予測した予測日の差と予測間隔の比。(%)

予測誤差3は、発生日と(4)の方法で予測した予測日との差

予測誤差4は、発生日と(4)の方法で予測した予測日の差と予測間隔の比。(%)

である。

また、これらについての評価を次のような基準で行ない、()内の記号で示した。

予測誤差1、予測誤差3については、

的中(◎+○)：誤差が±0-10日 (誤差が±0-5日は◎とした)

中間(△)：誤差が、±11日-20日

不的中(X)：誤差が、±21日以上、

予測誤差2と予測誤差4については、

的中(◎+○)：相対誤差が、±0-20% (誤差が±0-10%は◎とした)

中間(△)：相対誤差が、21-40%

不的中(X)：相対誤差が、40%以上

表1で、予測誤差1でみると、No.27(2014年7月26日)まで(前半)は、予測成績がよく、以降(後半)は予測成績が悪く、著しい違いがあるように見えるので、前半と後半に分けて評価結果の統計を表2に

まとめた。

予測誤差を日数で表した評価（表 1 の誤差 1・評価 1 や表 2 の評価 1）でみると、安定な期間と不安定な期間があり、ある程度の予測ができる期間が続いていても、いつ不的中になるかわからないという地震予測の可能性と困難性の両面を示しているように思われる。

しかし、一つ注意を要するのは、繰り返し間隔が初期の 20 日位から最近の 100 日前後まで約 5 倍も伸びてきていることである。そのため、予測誤差を日数で表すと後半悪く見えている可能性がある。実際、予測誤差日数と予測期間日数の比で評価すると、後半も必ずしも悪くはなく、過去 2 回の平均間隔からの予測では、後半の方が的中率が高くなっている（表 2 の評価 4）。このような予測の評価については、別の多くの繰り返し地震活動についても、同様な試行を行うなど、さらに検討が必要であると考えられる。

5. その他の特徴的な地震活動経過

図 1 や図 2 には、多くの繰り返し地震と推定される小さな活動域が認められる。範囲を今回詳しく調べた活動域のうちのうち付近の 30km x30km 程度の範囲に限っても、図 5 (B) に示したように少なくとも 8 か所で東北地方沖地震後に繰り返し地震活動が活発化したことが分かった。注目されるのは、そのうち、図 5(A) で同じ記号を付した 5 か所では、東北地方沖地震以前にも微弱な繰り返し地震活動が認められることである。

図 6 に、これら 8 か所の活動の M-T 図を示した。今回詳しく解析した活動（ここでは E1 という記号を付けた）は、これらの中でも活発かつ規則的な活動であったことが分かる。

図 3(A) をよく見ると、今回調べた活動域の西側にやや規模の大きい地震の震央が散在していることが分かる。さらに、図 3(B) を見ると、これらの地震は、東北地方沖地震直後に集中的に発生したことを示している。図 7 にこの区域の活動の特徴を通常の解析図で示した。

このように活動様式の全く異なる活動域が隣接していることは注目される。

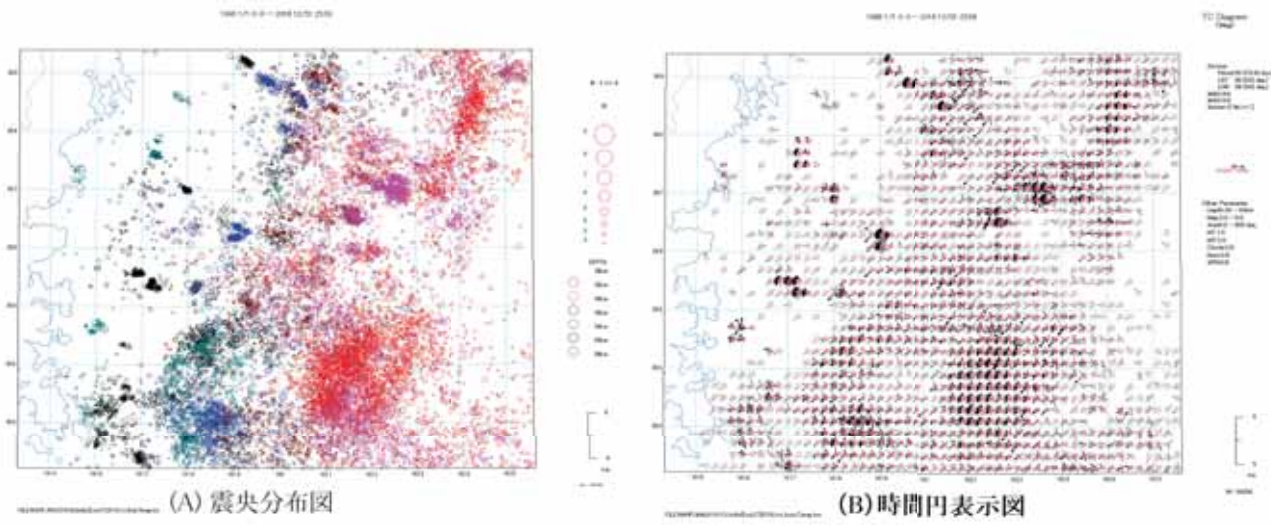
6. 結び

東北地方太平洋沖地震後に宮城県沖に誘発された繰り返し地震活動の一つについて、活動経過を詳しく調べた。その結果明らかになった繰り返しの規則性を仮定した簡単なルールで、中期的地震予測を試行してみた。その結果、2011 年から 2014 年 7 月頃までの前半では、よく的中したが、以降は的中しなくなった。大地震の繰り返しは、はるかに長期間の間隔をおいて起こるので、実際に検証することはできないが、同様なことが起っている可能性を示唆するのかもしれない。

なお、東北地方太平洋沖地震前後の三陸沖の繰り返し地震の活動経過については、既に詳細な研究が行われている（たとえば、Hatakeyama et al., 2017）。しかし、今回の調査結果をみると、なお、未検出の繰り返し地震も多く、いろいろな観点での詳細な研究がさらに必要ではないかと思われる。

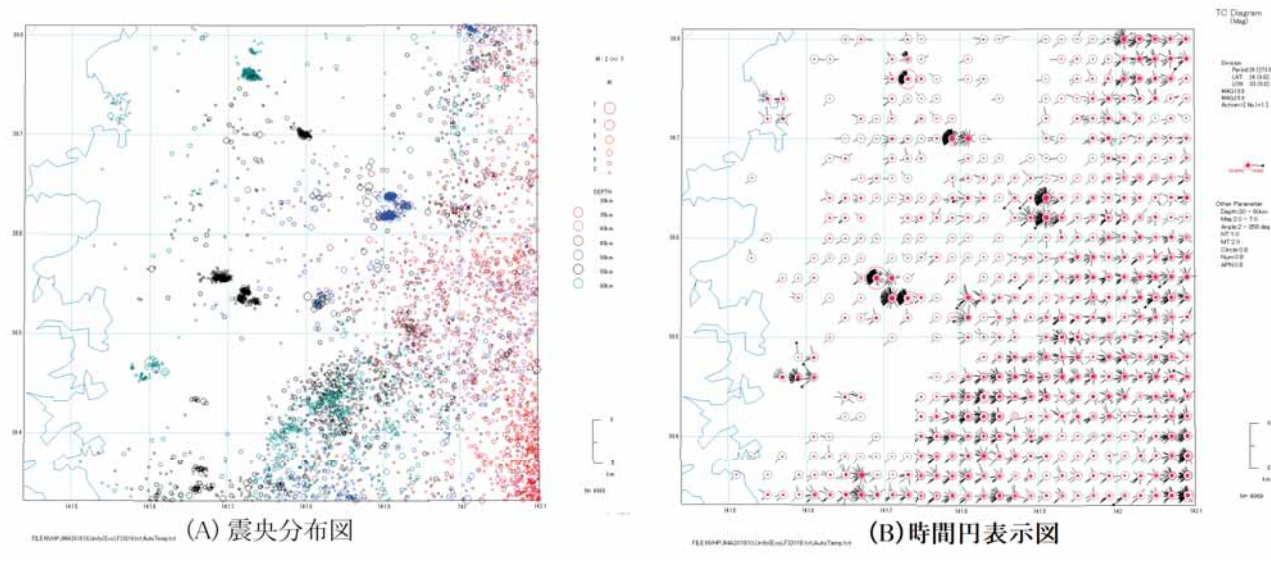
参考文献

Hatakeyama et al., (2017). Emergence and disappearance of interplate repeating earthquakes following the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake: Slip behavior transition between seismic and aseismic depending on the loading rate, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, doi:10.1002/2016JB013914



(1998年～2018年、 $M \geq 2.0$ 、深さ 30-60km)

図 1 宮城県沖の地震活動図



(1998年～2018年、 $M \geq 2.0$ 、深さ 30-60km)

図 2 宮城県沖の地震活動図 (拡大図)

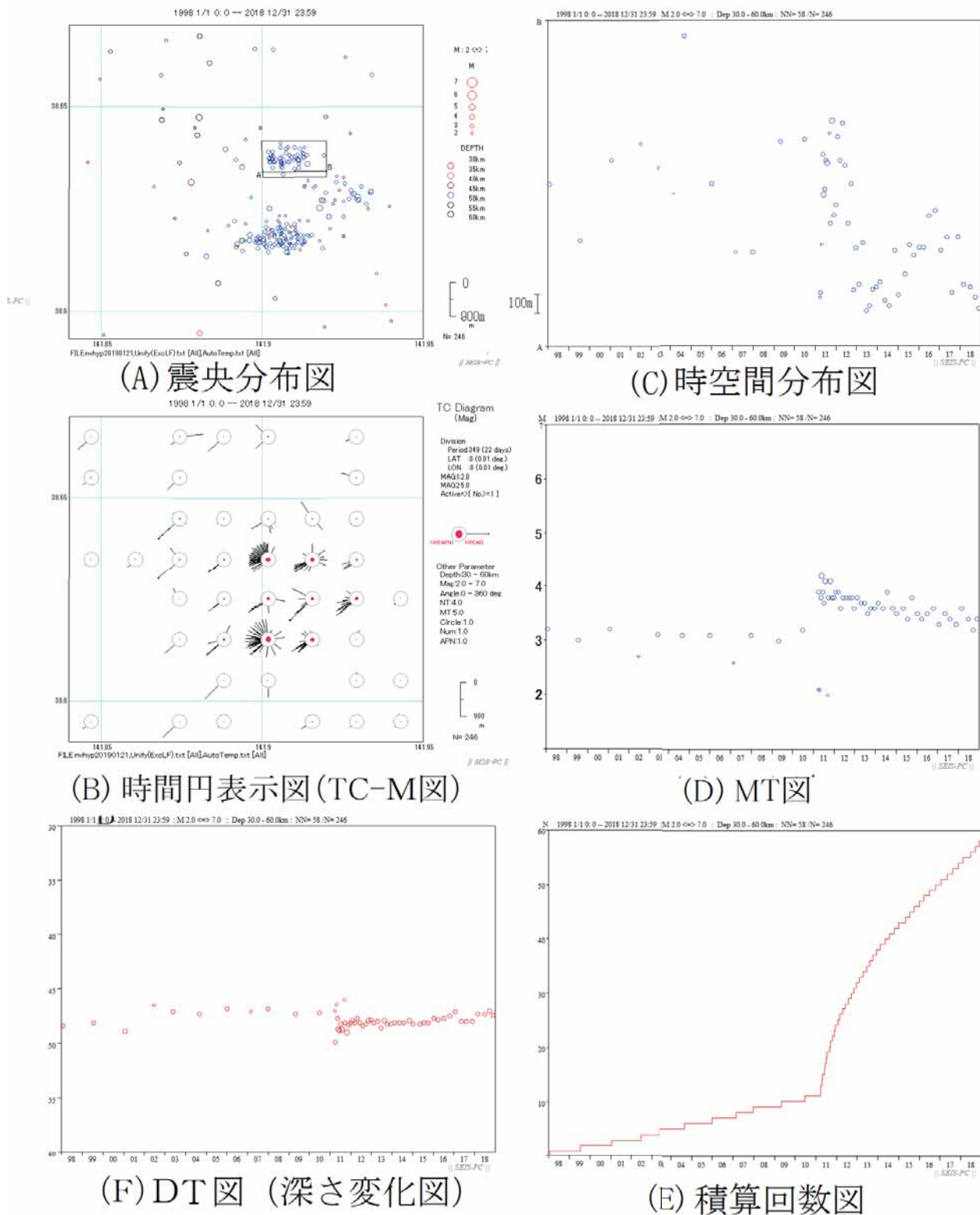


図3 宮城県沖の繰り返し地震活動の解析図

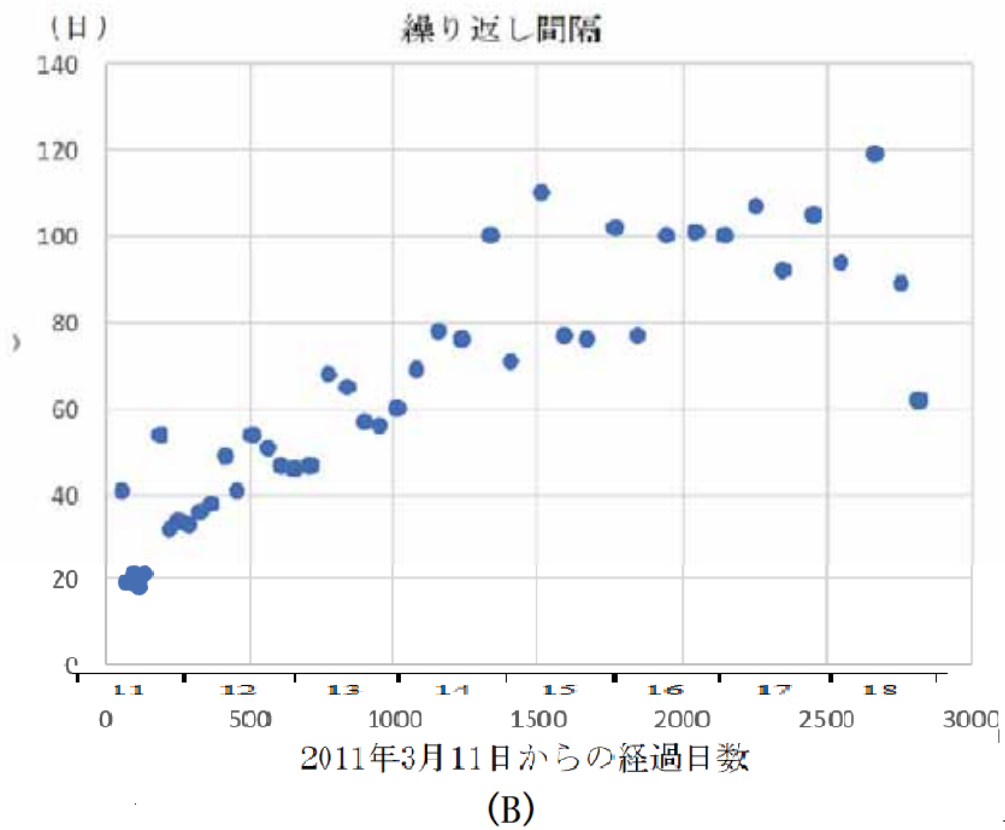
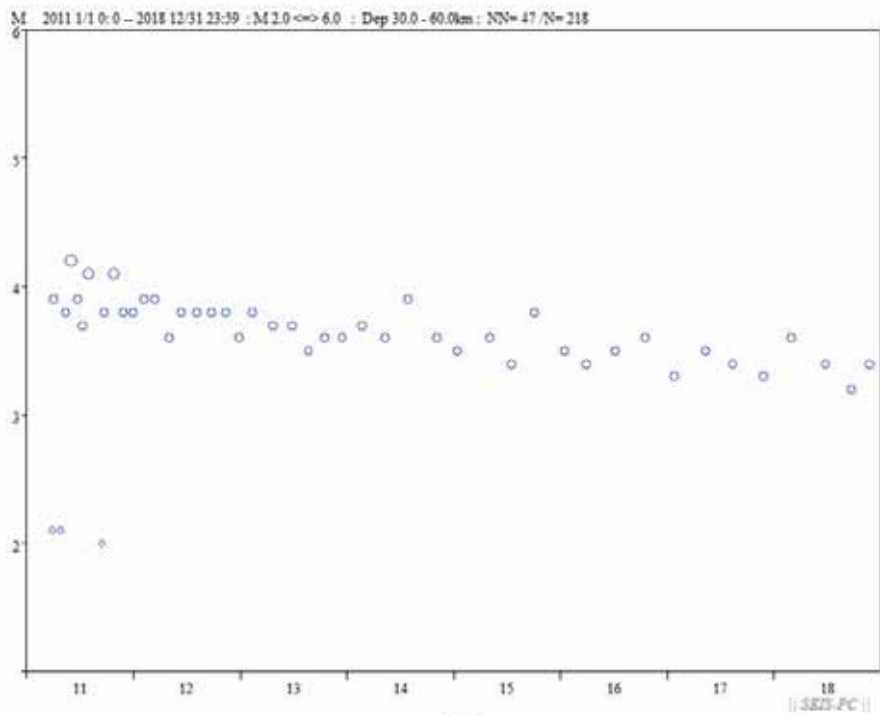


図 4 東北地方沖地震以降の MT 図(A)と発生間隔の変化図(B)

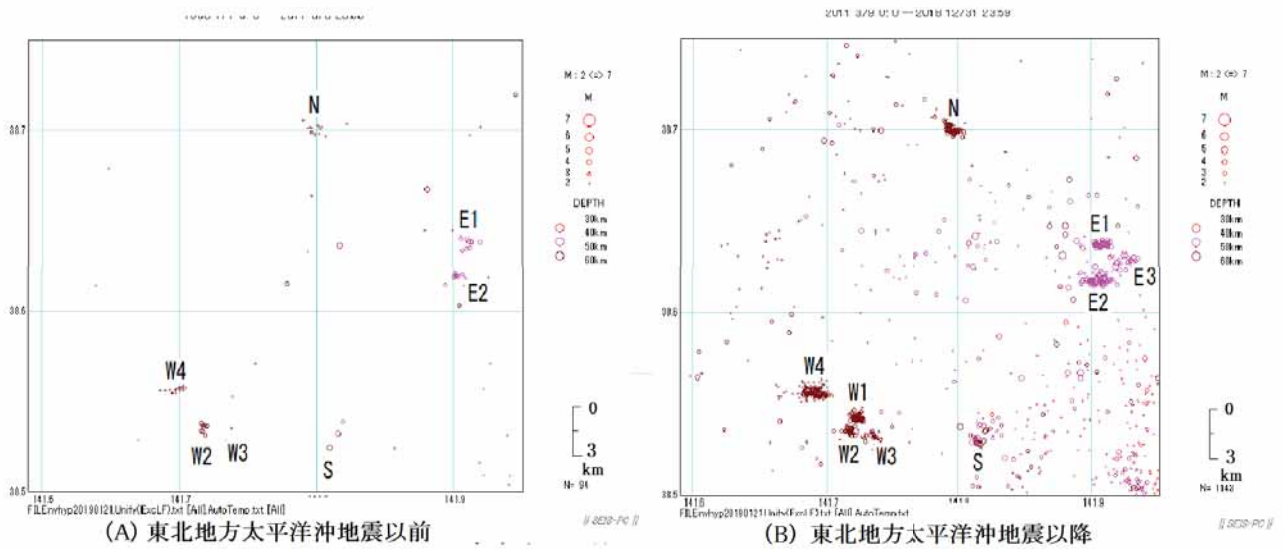


図5 繰り返し地震活動域の分布図

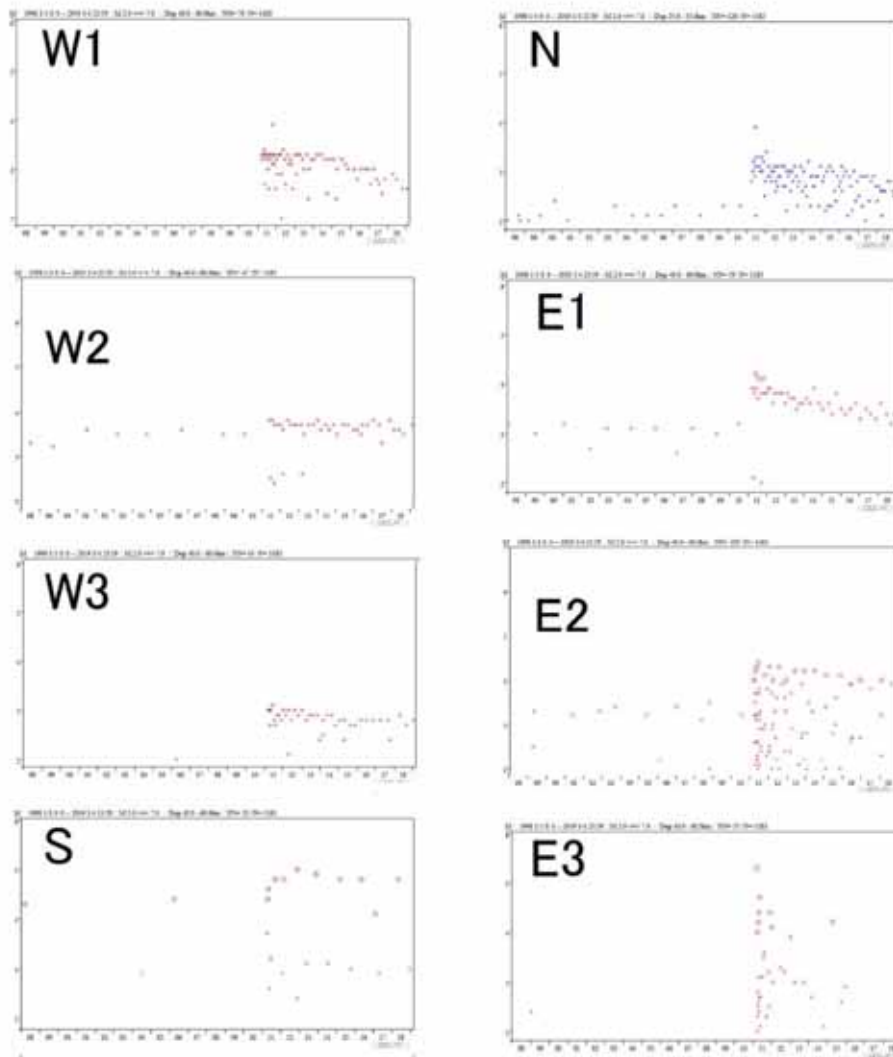


図6 各繰り返し地震活動域のMT図

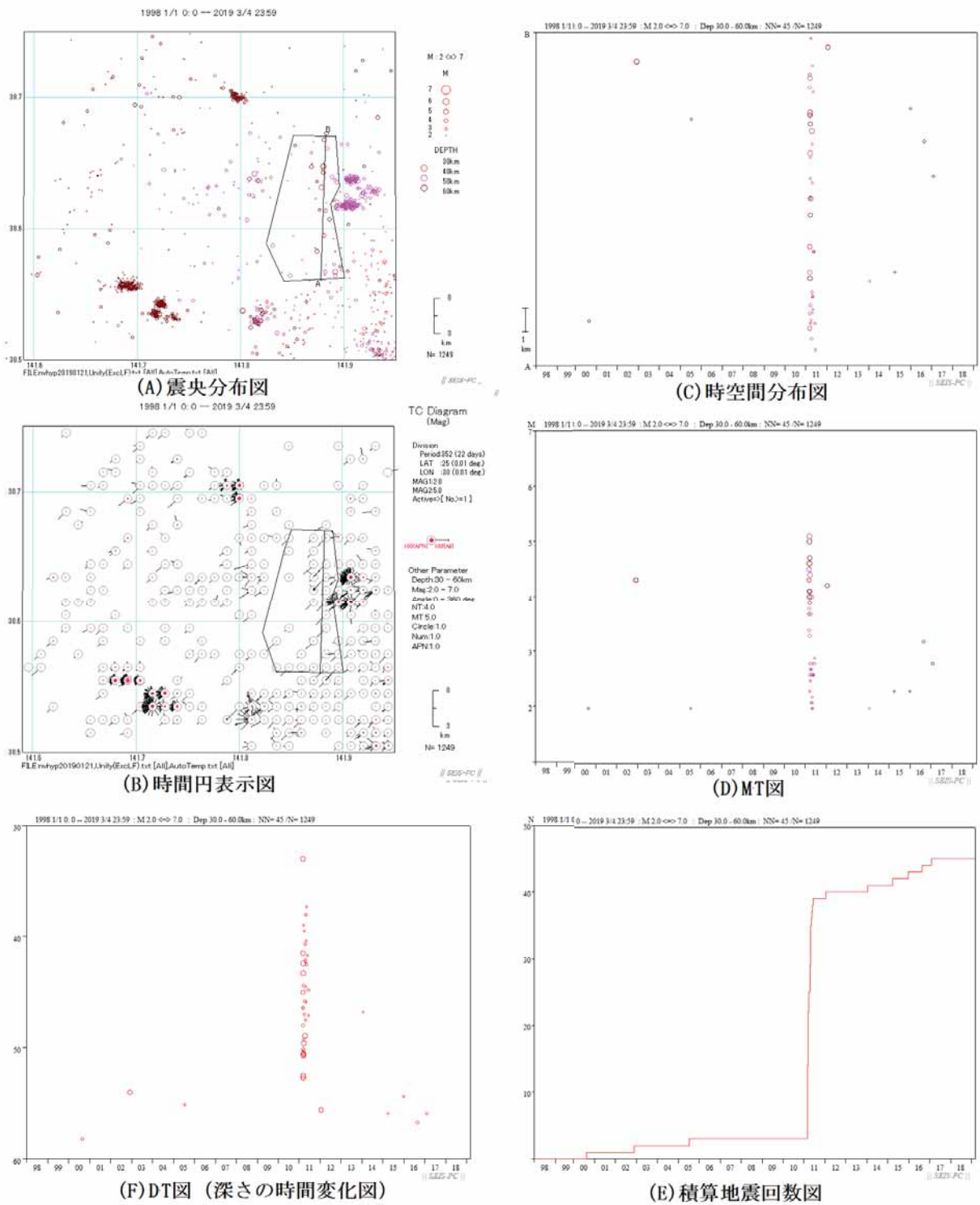


図7 繰り返し地震活動域の西方隣接域の地震活動解析図

表1 宮城県沖の繰り返し地震の震源リストと地震発生時期の予測評価統計表

No.	年月日	時分	北緯	東経	深さ	M	通日	間隔	誤差1	誤差2	誤差3	誤差4	評価1	評価2	評価3	評価4
	1998-01-21	1111	38.635	141.910	48.4	3.2	-4797									
	1999-07-15	1428	38.634	141.906	48.1	3.0	-4257	540								
	2001-01-26	0854	38.635	141.911	48.9	3.2	-3696	561	21	3.9				○		
	2002-06-27	1945	38.639	141.913	46.5	2.7	-3179	517	-44	-7.8	-33.5	-6.1		○		○
	2003-05-23	0138	38.638	141.911	47.1	3.1	-2849	330	-187	-36.2	-209	-38.8		△		△
	2004-09-05	1533	38.640	141.919	47.3	3.1	-2378	471	141	42.7	47.5	11.2		X		○
	2006-01-05	0255	38.640	141.910	46.8	3.1	-1891	487	16	3.4	86.5	21.6		○		△
	2007-03-01	0601	38.641	141.906	47.1	2.6	-1471	420	-67	-13.8	-59	-12.3		○		○
	2007-12-26	1337	38.640	141.906	46.8	3.1	-1171	300	-120	-28.6	-153.5	-33.8		△		△
	2009-05-02	0640	38.639	141.913	47.3	3.0	-678	493	193	64.3	133	36.9		X		△
	2010-06-23	1512	38.638	141.913	47.2	3.2	-261	417	-76	-15.4	20.5	5.2		○		○
1	2011-04-02	0659	38.635	141.903	49.9	3.9	22	283	-134	-32.1	-172	-37.8		△		△
2	2011-05-13	0524	38.640	141.912	47.7	3.8	63	41	-242	-85.5	-309	-88.3		X		X
3	2011-06-01	0853	38.638	141.909	48.7	4.2	82	19	-22	-53.7	-143	-88.3	X	X	X	X
4	2011-06-22	1916	38.637	141.910	48.8	3.9	103	21	2	10.5	-9	-30.0	◎	○	○	△
5	2011-07-10	1121	38.636	141.911	48.2	3.7	121	18	-3	-14.3	-2	-10.0	◎	○	○	◎
6	2011-07-31	2140	38.637	141.911	48.7	4.1	142	21	3	16.7	1.5	7.7	◎	○	○	◎
7	2011-09-23	2208	38.639	141.908	48.1	3.8	196	54	33	157.1	34.5	176.9	X	X	△	X
8	2011-10-25	0637	38.636	141.914	49.0	4.1	228	32	-22	-40.7	-5.5	-14.7	△	X	○	○
9	2011-11-28	0725	38.640	141.908	48.3	3.8	262	34	2	6.3	-9	-20.9	◎	◎	○	△
10	2011-12-31	1929	38.638	141.909	48.1	3.8	295	33	-1	-2.9	0	0.0	◎	◎	◎	◎
11	2012-02-05	2144	38.638	141.913	47.9	3.9	331	36	3	9.1	2.5	7.5	◎	◎	◎	◎
12	2012-03-14	2228	38.637	141.911	48.1	3.9	369	38	2	5.6	3.5	10.1	◎	◎	◎	○
13	2012-05-02	0707	38.638	141.914	47.7	3.6	418	49	11	28.9	12	32.4	△	△	○	△
14	2012-06-12	0715	38.637	141.911	48.1	3.8	459	41	-8	-16.3	-2.5	-5.7	○	○	◎	◎
15	2012-08-05	0505	38.640	141.908	48.4	3.8	513	54	13	31.7	9	20.0	△	△	○	△
16	2012-09-25	0516	38.638	141.910	48.2	3.8	564	51	-3	-5.6	3.5	7.4	◎	◎	◎	◎
17	2012-11-11	1503	38.637	141.903	47.9	3.8	611	47	-4	-7.8	-5.5	-10.5	◎	◎	○	○
18	2012-12-27	0507	38.636	141.906	47.8	3.6	657	46	-1	-2.1	-3	-6.1	◎	◎	◎	◎
19	2013-02-12	1220	38.637	141.904	48.1	3.8	704	47	1	2.2	0.5	1.1	◎	◎	◎	◎
20	2013-04-21	0441	38.635	141.906	48.0	3.7	772	68	21	44.7	21.5	46.2	X	X	X	X
21	2013-06-25	2111	38.639	141.902	48.6	3.7	837	65	-3	-4.4	7.5	13.0	◎	◎	○	○
22	2013-08-21	1759	38.637	141.902	47.9	3.5	894	57	-8	-12.3	-9.5	-14.3	○	○	○	○
23	2013-10-16	0723	38.639	141.903	48.2	3.6	950	56	-1	-1.8	-5	-8.2	◎	◎	◎	◎
24	2013-12-15	0631	38.638	141.904	48.2	3.6	1010	60	4	7.1	3.5	6.2	◎	◎	◎	◎
25	2014-02-22	1202	38.637	141.904	48.1	3.7	1079	69	9	15.0	11	19.0	○	○	△	○
26	2014-05-11	1034	38.637	141.903	48.1	3.6	1157	78	9	13.0	13.5	20.9	○	○	△	△
27	2014-07-26	2224	38.637	141.902	48.1	3.9	1233	76	-2	-2.6	2.5	3.4	◎	◎	◎	◎
28	2014-11-03	1224	38.636	141.906	47.9	3.6	1333	100	24	31.6	23	29.9	X	△	X	△
29	2015-01-13	0324	38.637	141.903	48.2	3.5	1404	71	-29	-29.0	-17	-19.3	X	△	△	○
30	2015-05-03	1858	38.637	141.904	48.2	3.6	1514	110	39	54.9	24.5	28.7	X	X	X	△
31	2015-07-19	1420	38.636	141.906	48.1	3.4	1591	77	-33	-30.0	-13.5	-14.9	X	△	△	○
32	2015-10-03	0829	38.637	141.906	48.1	3.8	1667	76	-1	-1.3	-17.5	-18.7	◎	◎	△	○
33	2016-01-13	2203	38.637	141.906	47.7	3.5	1769	102	26	34.2	25.5	33.3	X	△	X	△
34	2016-03-30	1337	38.637	141.906	47.8	3.4	1846	77	-25	-24.5	-12	-13.5	X	△	△	○
35	2016-07-08	1303	38.637	141.908	47.7	3.5	1946	100	23	29.9	10.5	11.7	X	△	△	○
36	2016-10-17	1146	38.637	141.908	47.5	3.6	2047	101	1	1.0	12.5	14.1	◎	◎	△	○
37	2017-01-25	0044	38.637	141.906	47.1	3.3	2147	100	-1	-1.0	-0.5	-0.5	◎	◎	◎	◎
38	2017-05-12	1335	38.636	141.907	48.0	3.5	2254	107	7	7.0	6.5	6.5	◎	◎	○	◎
39	2017-08-12	2313	38.637	141.903	48.0	3.4	2346	92	-15	-14.0	-11.5	-11.1	△	○	△	○
40	2017-11-25	0554	38.637	141.907	48.0	3.3	2451	105	13	14.1	5.5	5.5	△	○	○	◎
41	2018-02-27	0953	38.637	141.904	47.3	3.6	2545	94	-11	-10.5	-4.5	-4.6	△	○	◎	◎
42	2018-06-26	1355	38.637	141.904	47.3	3.4	2664	119	25	26.6	19.5	19.6	X	○	△	○
43	2018-09-23	1217	38.638	141.903	47.0	3.2	2753	89	-30	-25.2	-17.5	-16.4	X	○	△	○
44	2018-11-24	0136	38.638	141.902	47.4	3.4	2815	62	-27	-30.3	-42	-40.4	X	△	X	X

表2 発生時期の予測評価統計表

評価1			評価2			評価3			評価4		
前半	回数	%	前半	回数	%	前半	回数	%	前半	回数	%
◎+○	19	79	◎+○	19	79	◎+○	20	83	◎+○	17	70
(◎)	15	62	(◎)	12	50	(◎)	10	41	(◎)	11	45
△	3	12	△	2	8	△	3	12	△	5	20
X	2	8	X	3	12	X	1	4	X	2	8
後半	回数	%	後半	回数	%	後半	回数	%	後半	回数	%
◎+○	4	23	◎+○	9	52	◎+○	4	23	◎+○	13	76
(◎)	4	23	(◎)	4	23	(◎)	2	11	(◎)	4	23
△	3	17	△	7	41	△	9	52	△	3	17
X	10	58	X	1	5	X	4	23	X	1	5

(◎)は、◎+○の内数

前半：2011年4月~2014年7月

後半：2014年8月~2018年12月