
論 説

Matched Filter 法を用いた 2011 年 東北地方太平洋沖地震直後の小地震の検出

—釜石沖繰り返し地震クラスターへの適用—

東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター* 奥田 貴***・内田直希*
国立研究開発法人防災科学技術研究所** 浅野陽一
現 みずほ証券株式会社***

Detection of Small Earthquakes Using the Matched Filter Method Immediately After the Tohoku-Oki Earthquake

—Application to the Off-Kamaishi Repeating Earthquakes Cluster—

Takashi OKUDA* and Naoki UCHIDA

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University,
Aramaki Aza Aoba 6-6, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8578, Japan

Youichi ASANO

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience,
Tenoudai 3-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0006, Japan

*Now at: Mizuho Securities Co., Ltd.,
Kandasurugadai 4-6, Tiyoda-ku, Tokyo 101-8219, Japan

(Received December 4, 2017; Accepted April 17, 2018; published online on May 28, 2018)

Before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, the Off-Kamaishi M₅ repeating earthquake sequence occurs with a nearly constant recurrence interval of ~5 years. The seismicity in the Kamaishi area becomes active in the later part of their M₅ earthquake cycles. Just after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, however, the recurrence interval has become as short as 9 days and small earthquakes have become undetectable. The decrease of detectability is mainly due to successive occurrence of large aftershocks. It has not been verified that there is no missing event even for the relatively large Off-Kamaishi mainshock sequence ($5 \leq M \leq 6$). In this study, we collect continuous waveform data of the NIED Hi-net and the microearthquake observation network of Tohoku University near the Off-Kamaishi sequence. We used the repeating sequences as template events and applied Matched Filter (MF) method to detect earthquakes for ~1 month period (March 11, 2011 to April 13, 2011) after the Tohoku-Oki earthquake. We detected 25 earthquakes including 18 earthquakes that are not listed in the Japan Meteorological Agency (JMA) catalog. These detected earthquakes are highly likely to be located in the vicinity of the Off-Kamaishi mainshock sequence. Further, we found that the sequences are almost completely detectable from two minutes after the Tohoku-oki earthquake. This enabled us to evaluate immediate afterslip in Off-Kamaishi region from the cumulative slip of the mainshock sequence. The result shows the afterslip amount was 1.0~1.4 m in a period from 1 hour to 34 days after the Tohoku-Oki earthquake. For the post Tohoku-oki smaller events down to M₂, almost all earthquakes occurred in the latter

* 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6番6号

*** 〒101-8219 東京都千代田区神田駿河台4-6

** 〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1

part of the two Off-Kamaishi mainshock earthquake cycles, which is a similar pattern observed before the Tohoku-oki earthquake. The investigation of undetectable time of earthquakes also supports that this tendency is not an artifact. This result indicates that the temporal change of microseismicity is preserved even when the repeating interval is extremely short (10 to 23 days) due to the afterslip of the Tohoku-Oki earthquake and suggests similar process is occurring in the earthquake cycle of the Off-Kamaishi sequence before and after the Tohoku-Oki earthquake.

Key words: Matched Filter Analysis, Off-Kamaishi repeating earthquake, Earthquake cycle, Afterslip, Seismicity

§1. 序 論

一般に地震は複雑で多様な振る舞いを見せるが、地域によっては発生する地震の規模が決まっているという、地震破壊現象の固有性が報告されている。例えばサンアンドレアス断層や東北日本などにおいて、波形の相似性が非常に高い小地震群が発見され、これらはプレート境界面の非地震性すべり域に囲まれた地震性すべり領域が繰り返し破壊することによって生じると考えられてきた [例えば, Ellsworth (1995), Nadeau and Johnson (1998), Matsuzawa *et al.* (2002), Igarashi *et al.* (2003)]. 一方、大地震についても、過去にプレート境界で発生した大規模地震の破壊域が重なることが明らかになってきた [例えば, 永井・他 (2001), Yamanaka and Kikuchi (2003), Murray and Langbein (2006)]. これらの地震・測地観測に基づく研究から、プレート境界面には大小様々な地震性すべり領域が永続性を有しながら存在し、それらが繰り返し破壊されるといったプレート境界型の地震発生モデルが提案されてきた [例えば, Lay and Kanamori (1981), Matsuzawa *et al.* (2004)].

このような繰り返し発生する地震のうち、よく調べられているものとして、岩手県釜石沖の中規模繰り返し地震がある。釜石沖では1957年以降、M4.8前後の繰り返し地震（以下、釜石沖本震、または単に本震と呼ぶ）が約5年半間隔で繰り返し発生しており [Matsuzawa *et al.* (2002)], そのうちの幾つかに関しては地震時の破壊域が重なるなど [Okada *et al.* (2003), Shimamura *et al.* (2011)], 固有性が示唆されている。

しかし、2011年3月11日14時46分に発生した平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（以下では、東北沖地震と呼ぶ）の大きな余効すべり (Fig. 1 (a)) [例えば, Ozawa *et al.* (2012), Sun and Wang (2015), Iinuma *et al.* (2016)] により、釜石沖の中規模繰り返し地震の性質は大きく変化した。釜石沖での余効すべりに関しては例えば以下のような研究がある。Munekane (2012) はキネマティック GPS データから東北沖地震直後の10分間と4時間における余効すべりを推定し、釜石沖での最大すべり量をそれぞれ4.7 cm, 20.5 cm と見積もった。また、

Uchida and Matsuzawa (2013) は、繰り返し地震活動の解析から、釜石沖で地震後3日後から9ヶ月後までの間に1.6 mの余効すべりが生じたと推定した。さらに、余効すべりに伴い、釜石沖の中規模繰り返し地震の地震発生間隔はそれまでの 5.5 ± 0.7 年から最短9日に短縮し、かつ、従来の釜石沖本震のすべり域のおおよそ6倍の広い領域が一度にすべりを起こしたことが報告されている [島村 (2012), Uchida *et al.* (2015)]. これらの現象は、東北沖地震の余効すべりにより、釜石沖で見られた地震の固有性が大きく揺らいだものと解釈することができる。

また、東北沖地震前の釜石沖では、釜石沖本震の破壊域内部で繰り返し地震を含む小地震が4つの群れを形成しながら発生しており、地震性すべり域の階層性が明らかになっている (Fig. 1 (b) 及び (c)) [Uchida *et al.* (2007, 2012)]. さらに、この小地震は釜石沖本震の地震サイクルの後半に活動が活発化する傾向が報告されている (Fig. 2 (a)) [Uchida *et al.* (2012)]. このような小地震活動の活発化は、釜石沖本震のすべり域内における応力集中過程を示している可能性がある。そのため、東北沖地震後に大幅に繰り返し間隔が短縮した時期についても、地震サイクル後半における小地震活動の活発化が見られるかどうかを調べることは、地震発生に至る過程の理解の上で重要である。なお、以下では釜石沖本震と上記の小地震を合わせて「釜石沖地震クラスター」と呼ぶ。

地震サイクル後半における小地震活動の活発化は、気象庁一元化処理震源カタログを見る限り東北沖地震後消失しているように見える (Fig. 2 (b)). しかし、東北沖地震直後のカタログは、他の地震波形の重なりや余震域における震源決定対象とする地震のマグニチュードの下限の上昇、地震被害による欠測等により、それまで震源決定が行われてきた規模の地震でも検出がされていない可能性がある。さらに、前述した Uchida and Matsuzawa (2013) の解析では、地震直後に3日間の未解析期間があるほか、地震の検出漏れにより余効すべりが過小評価されている可能性もある。東北沖地震後の釜石沖地震周辺の地震の検出下限マグニチュード (M_c) については、気象庁カタログの規模別頻度分布をみると、東北沖地震の

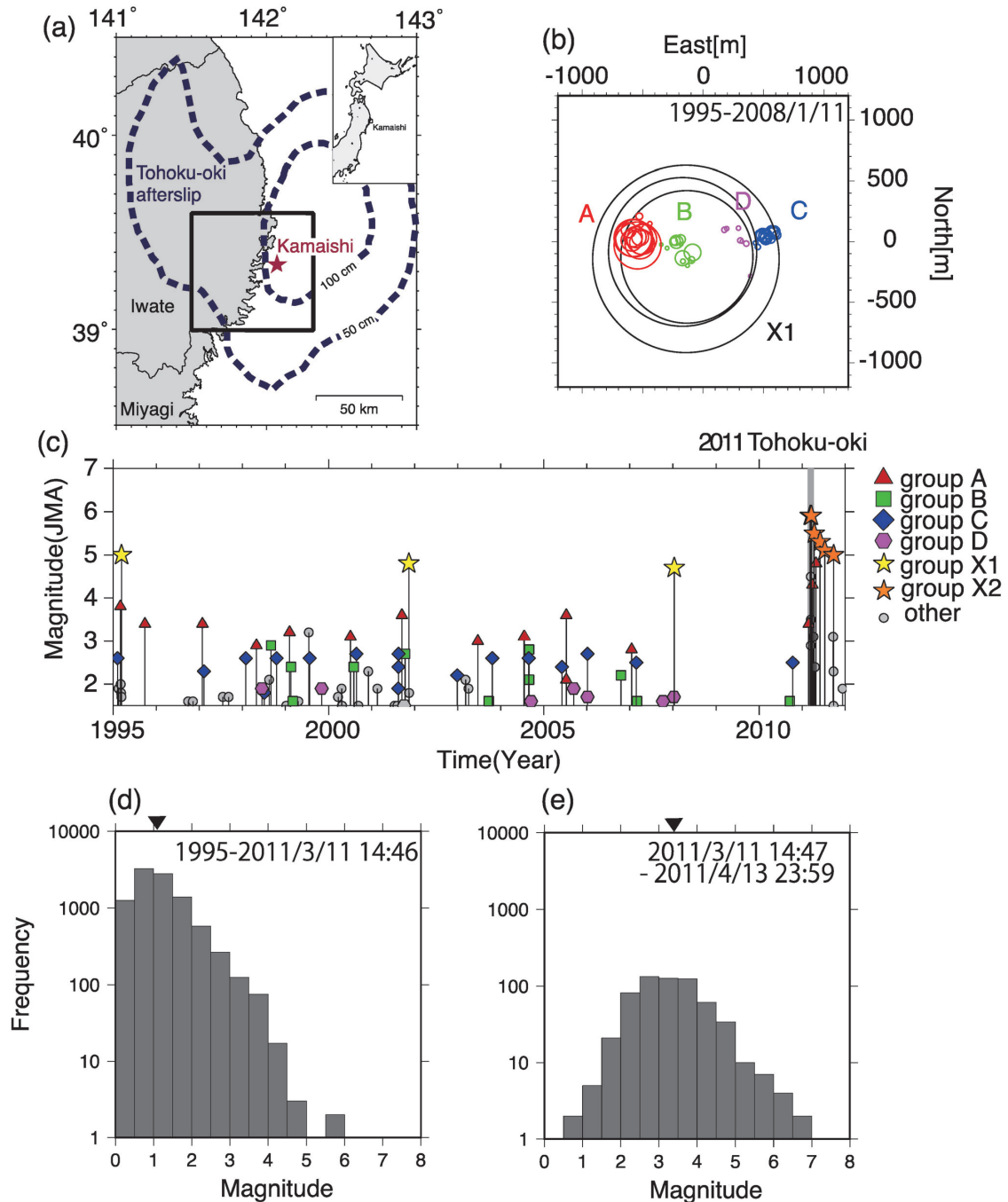


Fig. 1. Seismic activity in the Off-Kamaishi earthquake clusters. (a) Map showing the area of Off-Kamaishi earthquake sequence (red star). The broken contour shows the afterslip distribution during 3 years after the Tohoku-Oki earthquake [Sun and Wang (2015)]. (b) Distribution of the Off-Kamaishi repeating earthquakes after Uchida *et al.* (2012) for the period before the Tohoku-Oki earthquake. The size of circles indicates the approximate slip area assuming a stress drop of 38 MPa [Matsuzawa *et al.* (2002)]. (c) Magnitude-time plot of Off-Kamaishi earthquakes based on the JMA catalogue. Earthquakes are classified by the waveform correlation analysis of Uchida *et al.* (2012) and by the relocation result of Hatakeyama *et al.* (2017) for the period from 1995 to 2001 and 2001 to 2012, respectively. Each symbol is followed by their grouping definitions. (d) Magnitude-frequency distribution of earthquakes (depth; 0-70 km) before the Tohoku-Oki earthquake (1995 to March 11, 2011) in the gray rectangle shown in (a). (e) Magnitude-frequency distribution of earthquakes (depth; 0-70 km) after Tohoku-Oki earthquake (March 11, 2011 to April 13, 2011) in the gray rectangle shown in (a). Triangles indicate the minimum magnitude of completeness in the JMA catalog estimated based on its departure from the linear frequency-magnitude relation [Wiemer and Wyss (2000)].

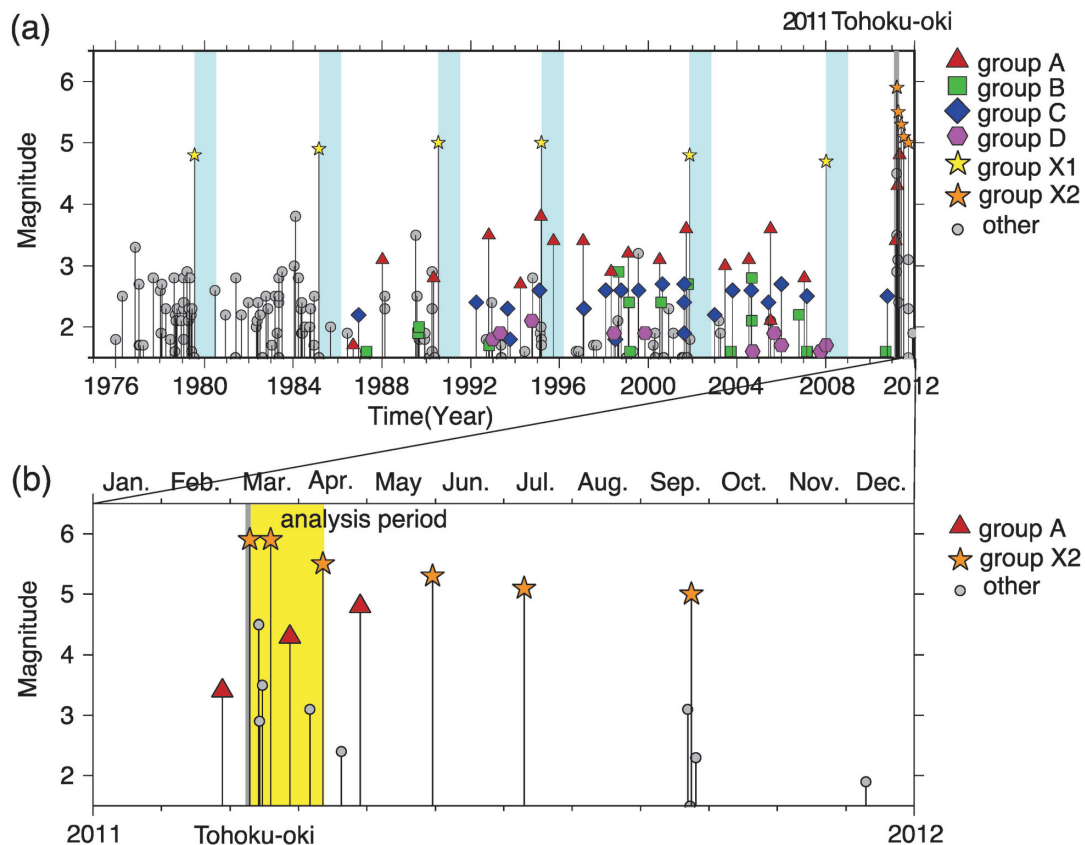


Fig. 2. Seismicity change related to the Off-Kamaishi mainshock sequence (stars). (a) Magnitude-time plot for the period from 1975 to 2014 (the same as Fig. 1 (c) but with 1 year shadings of quiescence periods after each mainshock). (b) Magnitude-time plot for the period from January to December 2011. Analysis period of the present study is shown in yellow.

前は 1.1 程度であったのに対し、地震後 34 日間では 3.2 程度まで上昇していると推定される (Fig. 1 (d) 及び (e)). また、東北沖地震後の期間は、 M_c の時間変化が大きいと考えられるため、釜石沖の本震系列 ($M \sim 5-6$) を含め、東北沖地震直後の釜石沖地震クラスターにおける地震の活動の詳細は明らかではない。

そこで本研究では、連続波形データに Matched Filter 法 [例えば, Gibbons and Ringdal (2006), Shelly *et al.* (2007)] を適用することで、東北沖地震直後の釜石沖における繰り返し地震系列の検出を行い、検出漏れが少ない地震カタログを構築し、ノイズによる検出限界の評価も行う。これらにより東北沖地震直後の釜石沖地震クラスターでの微小地震活動の特性を明らかにするとともに、釜石沖本震の積算すべりに基づく余効すべり量の推定を行う。なお、東北沖地震の前で、釜石沖で発生する最大地震の規模が変化した。ここでは東北沖地震前に発生していた $M4.8$ 前後の地震と、東北沖地震後に発生した $M \sim 5-6$ の両方を本震系列と呼ぶ。

§2. Matched Filter 法を用いた地震検出

2.1 東北沖地震直後の連続波形データ

本研究では、2011 年 3 月 11 日から 2011 年 4 月 13 日の約 1 ヶ月の防災科学技術研究所 Hi-net および東北大学微小地震観測網の連続波形記録を解析した。この期間には 3 つの釜石沖本震が発生したことがこれまで知られている (Fig. 2 (b)) [Uchida *et al.* (2015)]. また、解析期間のうち最初の 3 日間は Uchida and Matsuzawa (2013) の繰り返し地震カタログにおいて、震災による東北大学のデータ収集システムの障害により解析対象外としている時期である。観測点はテンプレートに用いた釜石沖地震の震源に近い、Hi-net 14 点、東北大学 5 点を選び使用した (Fig. 3). 波形データのサンプリング周波数は 100 Hz で、速度型地震計の上下動と水平動の 3 成分記録を用いた。

小地震の検出には震源に近い観測点が重要であるが、東北沖地震により震源域近傍の地震観測網には大きな被害が出た。東北大学の多くの観測点では現地の停電および通信の障害 (およそ 3 日程度) の影響を受けたが、一

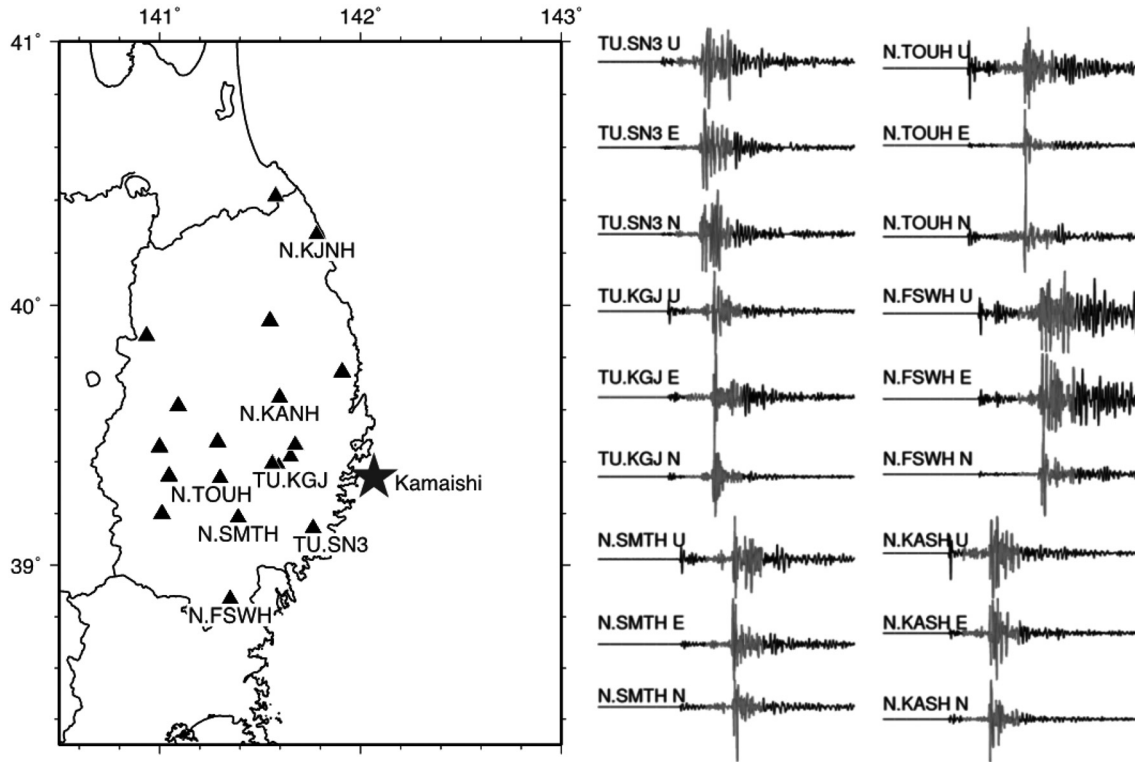


Fig. 3. Example seismograms of a template used in MF method. Triangles in the map show the distribution of stations and a star shows the epicenter of the Off-Kamaishi earthquake sequence. Gray part indicates the 9 s time window starting 3 s before the S wave arrival, which is used as template.

部の観測点ではバッテリーや自家発電機によって、東北沖地震後も継続した連続波形データの現地収録ができた [中山・他 (2013)]. Hi-net では、すべての観測点に最長 22 時間分のバッテリーを備えており、停電後も連続波形記録の現地収録ができた [松原・他 (2012)]. これらの観測点の現地収録データを回収し、東北沖地震および釜石沖地震の震源に近い観測点での巨大地震直後の貴重な観測データを得た.

2.2 Matched Filter 法

Matched Filter 法 (以下 MF 法) とは対象地域の観測網で捉えられた地震波形をテンプレートとして連続波形をスキャンすることで、テンプレートと類似した波形的特徴をもつ地震を検出する方法である [例えば, Gibbons and Ringdal (2006), Shelly *et al.* (2007), 大見 (2015)]. 波形の類似性は、テンプレート波形と連続波形の相互相関関数 (Cross Correlation function; CC) を 1 サンプルごとにずらしながら計算し、計算したすべての観測点の CC の平均である Mean Cross Correlation function (Mean CC) によって評価する (Fig. 4). この Mean CC は、テンプレート地震と震源が近い地震に対して大きな値をとるので、MF 法は繰り返し地震やその極近傍の地震の検出

に効果的であると期待される. そこで以下では、釜石沖における既知の釜石沖地震クラスターの地震波形をテンプレートに用い (Table 1), 東北沖地震直後の連続波形記録に適用する.

2.3 閾値の設定

連続波形とテンプレート波形の Mean CC の最大値が解析期間中の Mean CC の 8σ を超えた地震を、テンプレート地震近傍の地震と見なして検出を行った (Fig. 4). なお、ここで σ は標準偏差を表す. 本解析では、なるべく長期間にわたって波形が利用できる観測点を選定したが (Fig. 3), 東北沖地震直後は震災による影響で波形記録が利用できる観測点が時間帯により変化する. 特に 3 月 12 日の午後は記録が残っておらず、12 時から数時間は解析できない時間帯が存在する. また、テンプレート地震ごとに波形が利用できる観測点異なるため、解析不可能な時間長はテンプレート地震により異なる. 例えば、解析不可能な時間長が最長の小地震で同日の 19 時までの 7 時間、最短の釜石沖本震においても約 30 分存在した. さらに、データが存在していたとしても、解析可能な観測点の数が少ない時間帯も存在する. このような時間帯の Mean CC の例を Fig. 5 に示す. Fig. 5 から、

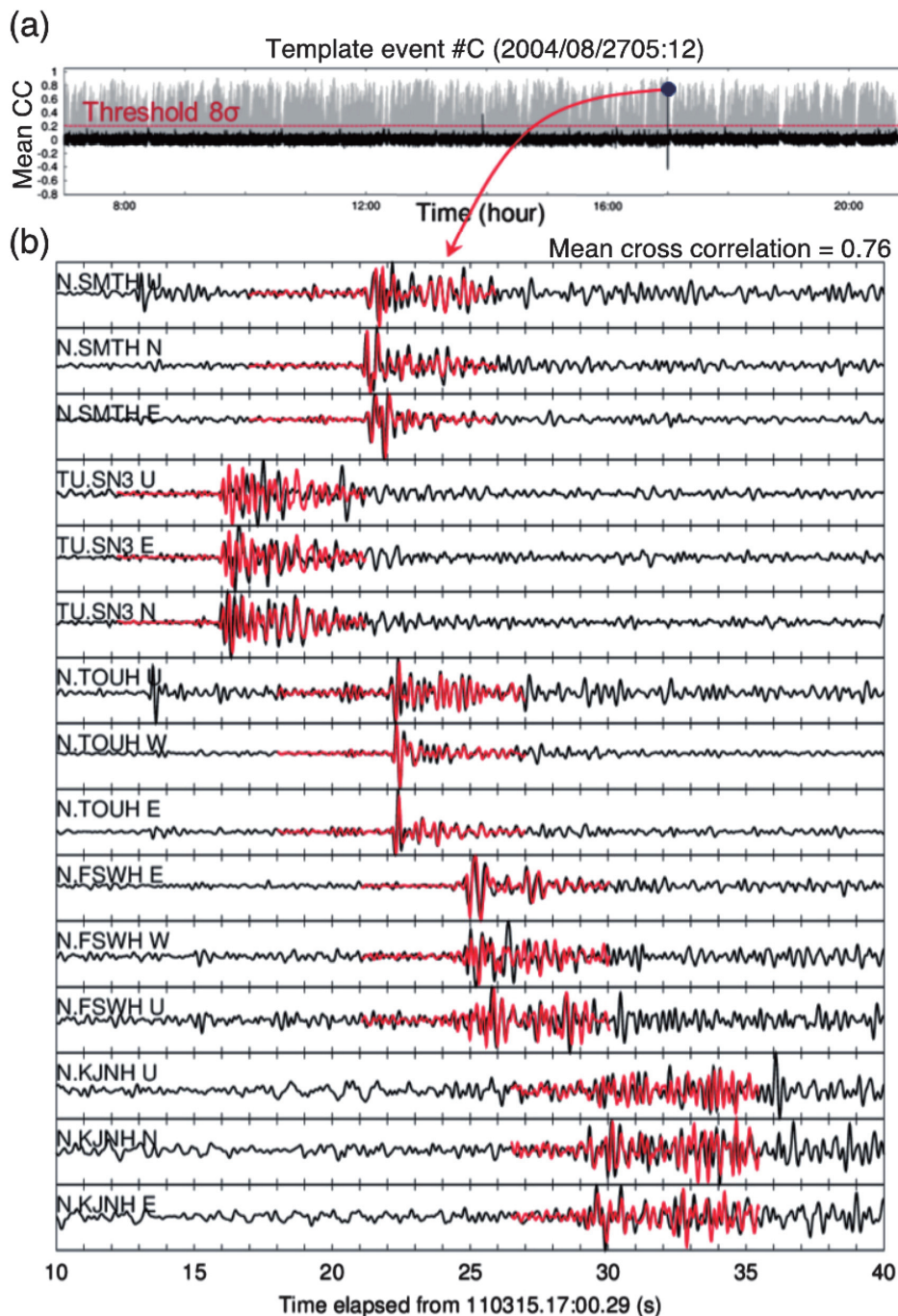


Fig. 4. Example of a detected event by the MF method. (a) Mean CC versus time plot (black line). The value shows the averaged cross-correlation for 15 components in 14 hours from 7:00 on March 15. Gray line indicates Maximum Mean CC, red line indicates the threshold of 8σ . (b) A comparison of continuous waveforms (black lines) and the template waveforms of C31517 in table 1 (red lines). The template waveform is an event in group C. Band-pass filter with a pass-band of 1-4 Hz was applied to the both waveforms.

使用するチャンネル数が少ない時間帯ではノイズ部分の Mean CC が高くなるのがわかる。そこで本研究では、平均を計算したチャンネル数ごとに Mean CC の分布を調べて、それぞれのチャンネル数ごとに Mean CC の 8σ を算出した。このようにして、閾値が 8σ であることは

すべての時間帯で共通であるが、チャンネル数によって異なる閾値を設けた (Fig. 5).

2.4 テンプレートに用いるタイムウィンドウの選定

タイムウィンドウは S 波の到着 3 秒前から S 波の到着 6 秒後までの 9 秒間を使用した (Fig. 3)。このタイム

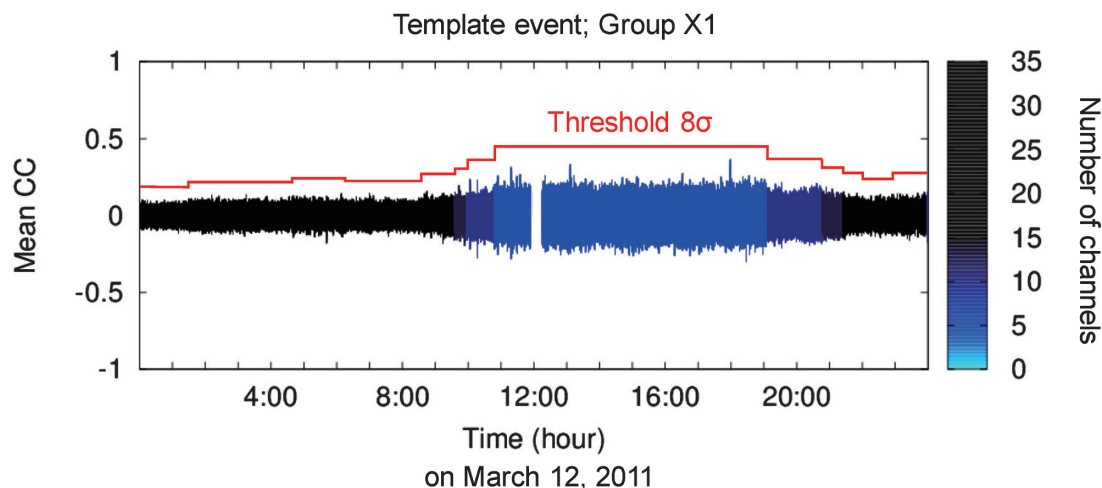


Fig. 5. Example of threshold variation (red line, 8σ) according to the number of data. The color scale shows the number of used channels.

Table 1. List of template earthquakes used for the MF analysis. The origin times, hypocenters and Magnitudes are from the JMA catalog. Groups are those classified by Uchida *et al.* (2012).

Group	Year	Month	Day	Hour	Min.	Sec.	Lon.	Lat.	Dep.	Mag.
A	2004	7	18	4	22	1.87	39.339	142.063	47.67	3.1
B	2004	8	30	14	51	48.75	39.337	142.070	47.46	2.8
C	2004	8	27	5	12	34.9	39.338	142.074	47.55	2.6
D	2008	1	9	10	41	18.5	39.341	142.067	47.15	1.7
X1	2008	1	11	8	0	31.79	39.341	142.067	47.15	4.7
X2	2011	3	20	21	3	47.52	39.344	142.048	47.81	5.9

ウィンドウにP波を含めなかったのは、検出しようとする地震の振幅の小さいP波が他の地震に埋もれてしまい、検出できない可能性があるためである。また、9秒間というタイムウィンドウは他のMF法を使用した研究と比較すると長いウィンドウ長である。例えば、Shelly *et al.* (2007) や Peng and Zhao (2009) は4秒間を、Kato *et al.* (2012) は6秒間をウィンドウ長として採用している。しかし、本研究では観測点数が上記の研究と比較して限定されていることから、比較するデータ数を増やすことにより、偶然相関の値が大きくなる確率が下がり、ノイズ部分のMean CCが低くなる9秒のタイムウィンドウを採用した。

2.5 マグニチュードの推定

検出された地震のうち気象庁一元化処理震源カタログに記載されていないものは、以下の渡辺 (1971) の式を用いてマグニチュード(M)を算出した。

$$0.85M - 2.50 = \log A_v + 1.73 \log r \quad (1)$$

ここで、 A_v (cm/s) は上下動成分の最大振幅、 r (km) は震

源距離を表す。この式は r が200 km以下という条件下で、微小地震のマグニチュードの推定に用いられるものである。

§3. 検出結果とグループ分け

釜石沖地震クラスターの地震をテンプレートに用いることにより、2011年3月11日から4月13日の解析期間中に25個の地震を検出した (Table 2)。用いたテンプレート地震 (Table 1) は、Uchida *et al.* (2012) により分類された4つの小地震のグループ (group A, B, C, D) と釜石沖本震のグループ (group X) のものである。釜石沖本震のグループXに関しては2つの地震をテンプレートとして使用し、東北沖地震前に発生したものをX1、東北沖地震後のものをX2とした。なお、Table 2において、地震X32021 (Xグループの3月20日21時の地震、以下同様の命名規則) をgroup X2のテンプレートとしたため、同じ地震同士のX32021とgroup X2のMean CCは1.0となっている。検出された地震のうち18個は

Table 2. List of detected earthquakes by the MF method. The event name consists of group name and the event month, day and hour. Asterisks indicate earthquakes not listed in the JMA catalog and their magnitudes were calculated using formula (1). The last column shows group name of the event and value in the parenthesis show highest mean CC value. Note that we used event X32021 as template for group X2, so it is natural that Mean CC between group X2 and event X32021 is 1.0.

Name	Year	Mon.	Day	Hour	Min.	Mag.	Group (Highest Mean CC)
X31115	2011	3	11	15	41	5.9	X1 (0.64)
O31513	2011	3	15	13	56	4.5	other
C31517	2011	3	15	17	0	3.2	* C (0.76)
B31600	2011	3	16	0	32	2.9	B (0.88)
O31608	2011	3	16	8	45	3.3	* other
O31713	2011	3	17	13	4	3.1	* other
O31819	2011	3	18	19	8	2.8	* other
C31822	2011	3	18	22	9	3.5	C (0.63)
O31902	2011	3	19	2	57	2.9	* other
D31907	2011	3	19	7	51	3.6	* D (0.87)
O31912	2011	3	19	12	34	2.4	* other
O31916	2011	3	19	16	54	2.6	* other
O32004	2011	3	20	4	20	3.2	* other
O32013	2011	3	20	13	11	2.6	* other
X32021	2011	3	20	21	4	5.9	X1 (0.63), X2 (1.0)
A32908	2011	3	29	8	52	4.3	A (0.62)
A40404a	2011	4	4	4	41	3.3	* A (0.76)
O40404b	2011	4	4	4	45	2.3	* other
O40708	2011	4	7	8	49	3.1	other
O40709	2011	4	7	9	50	2.4	* other
O40820	2011	4	8	20	17	2.5	* other
O41112	2011	4	11	12	42	2.5	* other
O41211	2011	4	12	11	20	2.7	* other
O41216	2011	4	12	16	25	2.4	* other
X41304	2011	4	13	4	38	5.5	X1 (0.61)

2015年2月の時点の気象庁一元化処理震源カタログには記載されていない地震であった。新たに検出された地震の波形例を Fig. 4 に示す。テンプレート地震とすべり域が重なっているかどうかについては、より丁寧な検討が必要なものの、新しく検出した地震は釜石沖の繰り返し地震近傍で発生した地震であると考えられる。MF法で検出された地震のマグニチュードと時間の関係 (MT 図) を Fig. 6 に示す。

MF法で検出された3月11日15時のM5.9の地震 (X31115) は、その規模から釜石沖本震系列の group X に属する地震と考えられる。釜石沖を含む領域で発生した地震について、波形相互相関を用いたダブルディファレンス法により震源再決定を行った Hatakeyama *et al.* (2017) の結果もこの分類を支持する。しかし、group X1 および group X2 との Mean CC の値はいずれも 0.6 程度であり、相関は必ずしも高くない。また、検出された地震の多くはテンプレートを異なるグループに変えても検

出された。これは、テンプレートに選んだものと同じグループだけでなく、テンプレート地震の震源近傍で起きたすべり域が異なる地震についても波形がある程度類似するためと考えられる。そこで、複数のテンプレートで検出された地震については、どのテンプレートと最も相関が高いかを評価し、最も相関が高いグループに属するものと分類した (Fig. 6 (b))。また Mean CC の最大値が 0.6 より低いものは、テンプレートに選んだ繰り返し地震とすべり域が重なっていない可能性を考え、同じグループとはせずに、灰色の丸で表示した。なお、Mean CC が 0.6 以上という基準は上述した地震 X31115 を参考にして定めた。その結果、解析期間の中で、Hatakeyama *et al.* (2017) が震源再決定を行い釜石沖地震クラスター近傍で発生した地震と判定された地震は、本研究による MF 法においてもその全てが検出された。さらに、地震グループの分類の結果についても、同領域での震源再決定に基づく地震グループの分類 [Hatakeyama *et al.*

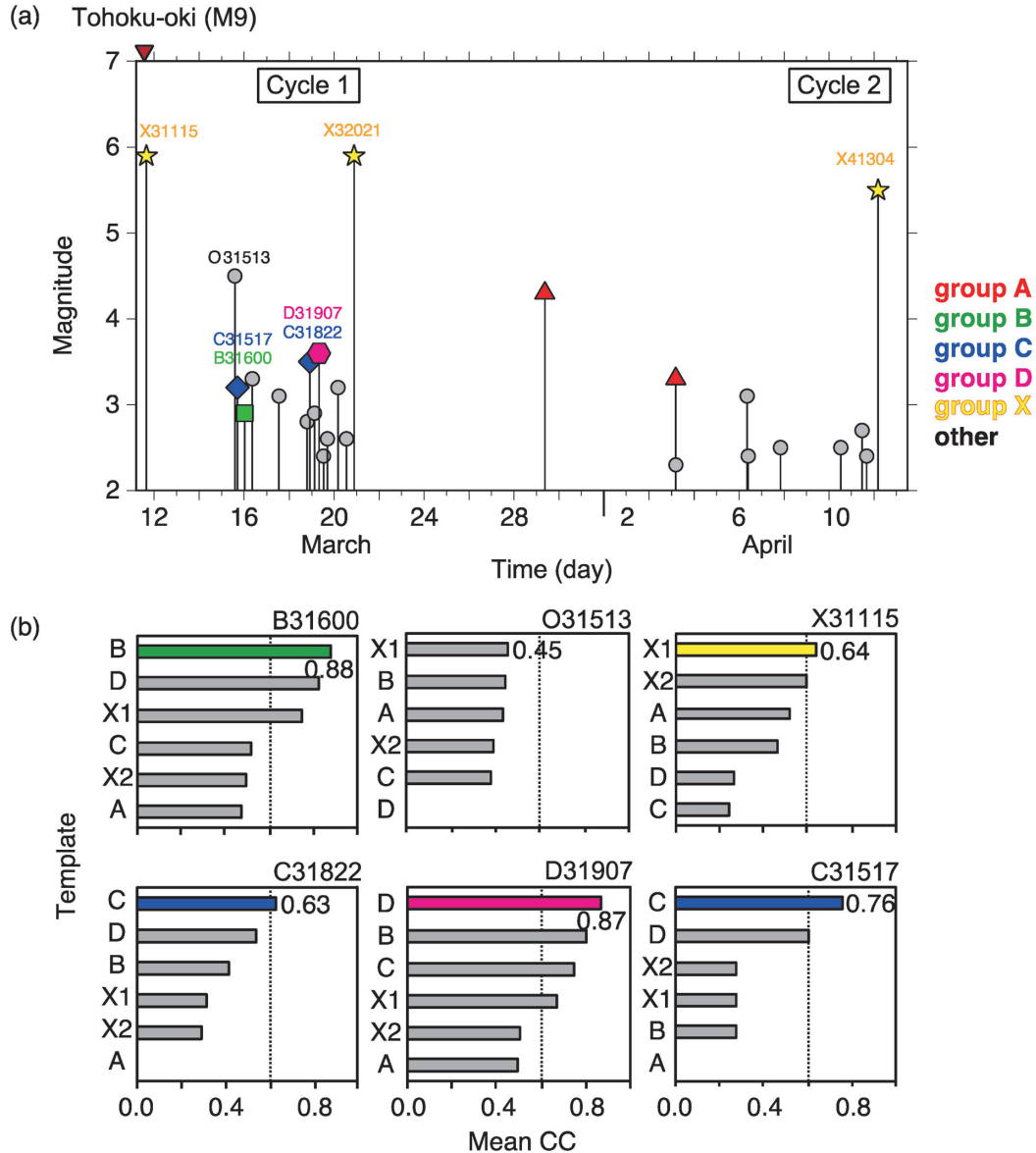


Fig. 6. Detection of the Off-Kamaishi earthquake clusters. The colors and symbols show the groups of A, B, C, D, and X. (a) magnitude-time (MT) plot of the detected earthquakes. Red triangle indicates the date of the Tohoku-Oki earthquake. Event names (alphabets followed by numerals) correspond to the “Name” in Table 2. (b) Examples of Mean CC of detected earthquakes. The detected earthquakes are classified into the same group as the template event with the highest Mean CC greater than 0.6.

(2017), 畠山 (2017)] と本研究の分類の結果は調和的であった。このことは、本研究で行った波形相関に基づく地震グループの分類法が、震源再決定に基づく分類に準ずる妥当性を有することを示す。なお、以下では釜石沖本震について東北沖地震以降最初の地震サイクルである3月11日15時のM5.9の地震(X31115)から3月20日21時のM5.9の地震(X32021)までの期間をCycle 1、X32021から4月13日4時のM5.5の地震(X41304)までの期間をCycle 2と呼ぶ。

§4. 他の地震の波形の重なり等に起因する検出限界の評価

Fig. 6より、Cycle 1, 2ともに前半の地震活動は静穏で、後半に地震活動が活発化しているように見える。しかし、サイクル前半の方が後半に比べ、東北沖地震の余震活動がより活発で観測が不安定なため、サイクル前半の静穏化は検出漏れによるみかけのものである可能性もある。

そこで、MF法による釜石沖の地震の検出限界の時間

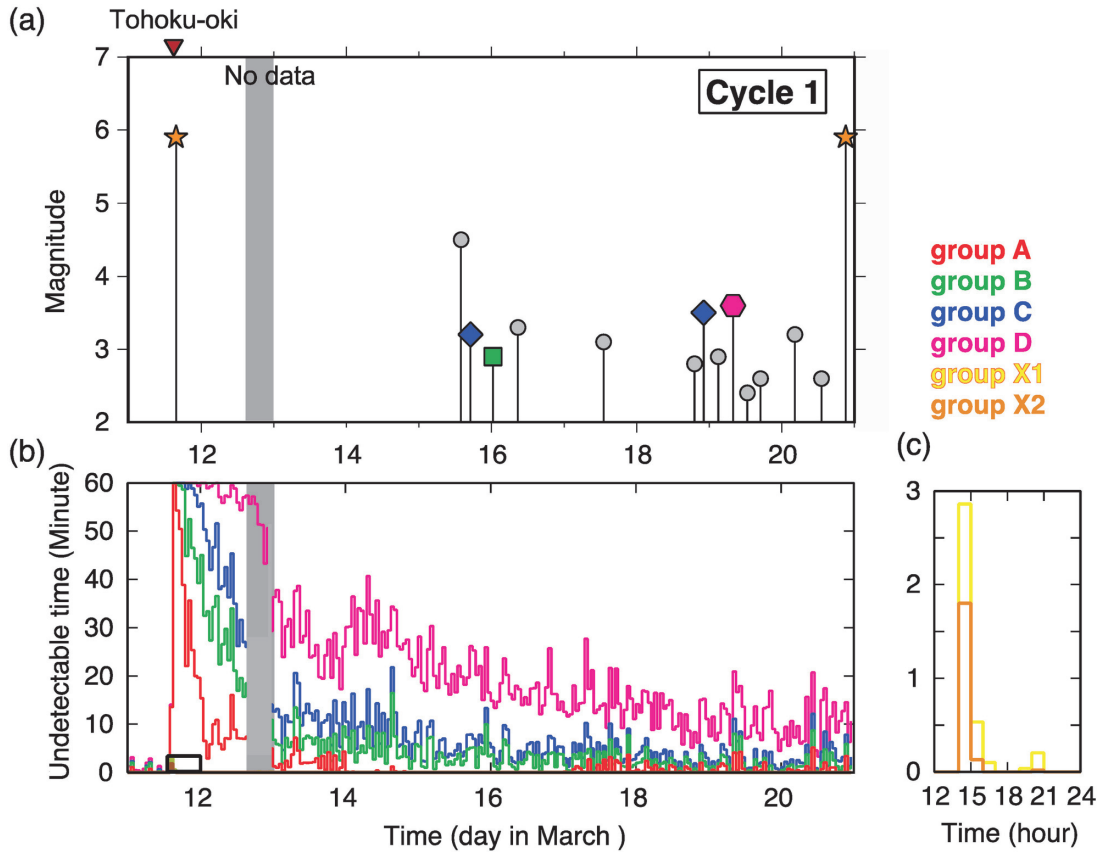


Fig. 7. Seismic activation and quiescence of the Off-Kamaishi region immediately after the Tohoku-Oki earthquake (Cycle 1). (a) Magnitude-time plot of detected earthquakes by MF method. (b) Temporal change of hourly undetectable time period (minutes) for groups A, B, C, D, X1, and X2. (c) Enlarged figure of black rectangle in (b). Dark grey indicates the period of no data. Red triangle indicates the date of the Tohoku-Oki earthquake.

変化を調べ、検出漏れの可能性がどの程度あるのか評価した。具体的には、記録された連続波形にテンプレート波形を足したものと、テンプレート波形との Mean CC の値を求めた。以下では、この値を Maximum Mean CC と定義する。これを地震の検出のプロセスと同様に 1 サンプルごとにずらしながら計算した。この Maximum Mean CC は、計算をした時間帯にテンプレート地震と全く同じ地震が発生していた場合に期待される Mean CC であり、その時間帯のノイズレベルにおいて取りうる Mean CC の最大値と解釈することができる。全くノイズが存在しない場合は 1 となる。そのため、Maximum Mean CC の値が地震の検出に用いる閾値より低い時間帯では、仮にテンプレートと同じ地震が発生していた場合であっても検出できない。本研究では、この Maximum Mean CC が閾値を下回る時間帯がどの程度存在するかを調べ、他の地震等によるノイズに起因する検出限界の評価を試みた (Fig. 7)。

その結果、最も規模の大きな group X については、検

出不可能な時間帯の長さは 2 分間未満であった (Fig. 7 (c))。一方、group A は東北沖地震のおよそ 9 時間後の 3 月 12 日から、group B, C は 3 月 13 日 0 時から、検出可能な時間帯が 1 時間のうち 8 割以上を占めるようになることがわかった (Fig. 7 (b))。つまり、3 月 13 日 0 時以降に釜石沖地震クラスターで地震が発生した場合、最も規模が小さい group D を除けば、多くの時間帯で地震が検出可能といえる。また、group D に関しては検出漏れをしている可能性が他のグループに比べて相対的に高いが、3 月 13 日 0 時以降で検出できない時間は 1 時間のうち 30 分未満である。

§ 5. 東北沖地震直後における釜石沖の地震活動の静穏期と活動期

Fig. 7 (b) より、3 月 13 日 0 時から 3 月 15 日 13 時の期間は地震の検出は十分に可能で、釜石沖地震クラスターで地震がほぼ起きていない静穏期であった可能性が高い。この結果より、東北沖地震直後の釜石沖本震の地

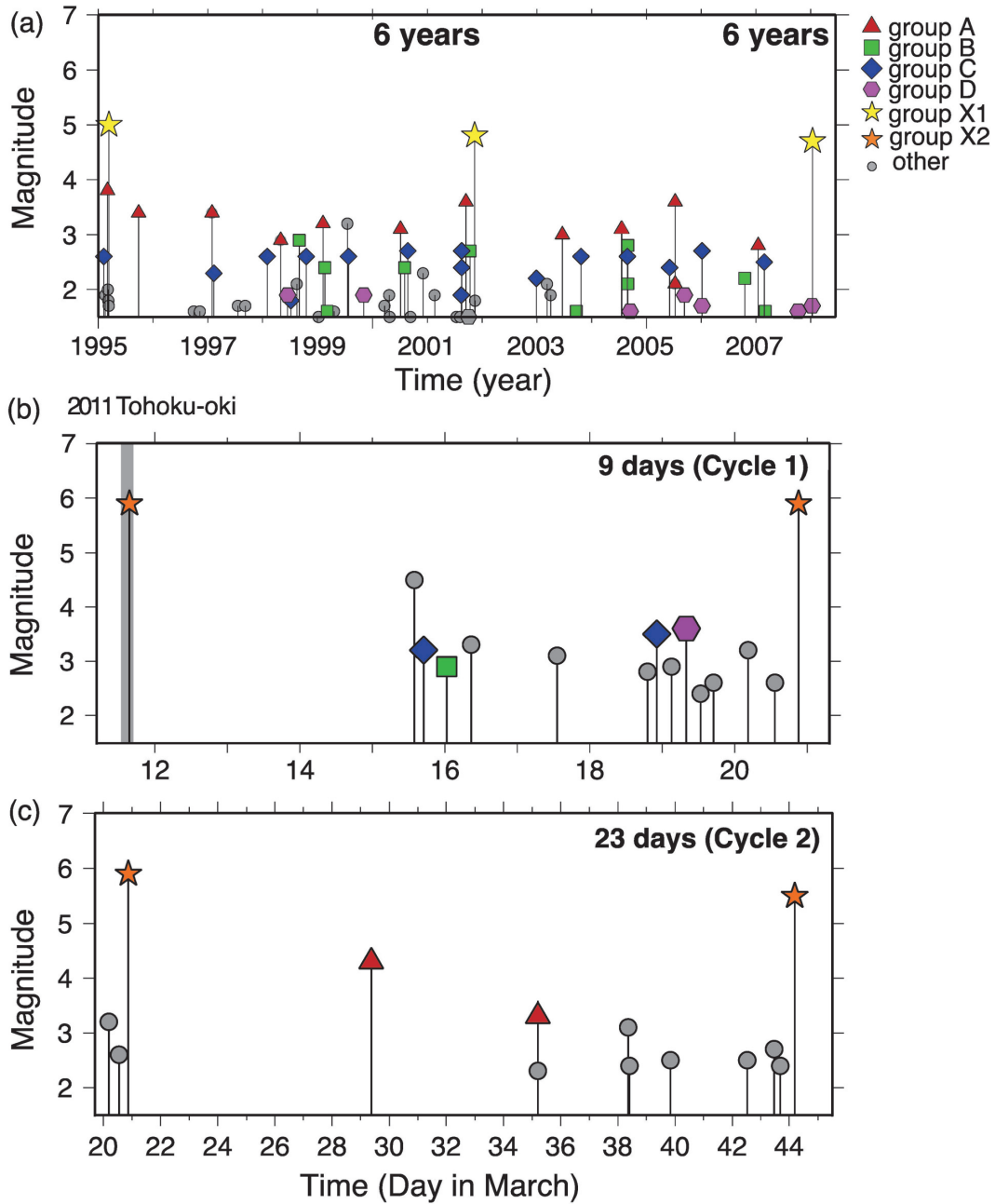


Fig. 8. Magnitude-Time (MT) plots for (a) 1995-2001 earthquake cycle and 2001-2008 earthquake cycle, (b) Cycle 1, and (c) Cycle 2. Horizontal scales are different from (a) to (c).

震サイクル Cycle 1, 2 ともにサイクル前半では地震活動が静穏化して、後半では活発化する傾向があるといえる。類似な地震活動の変化は東北沖地震前の釜石沖の繰り返し地震にも見られる (Fig. 8)。Uchida *et al.* (2012) は 1985 年から 2008 年の間で発生した 5 回の釜石沖本震の発生前に group A, B, C, D の地震活動が活発化し、本震の発生後に地震活動が静穏化していることを示した。しかし、彼らが議論した本震の地震発生間隔は 5~6 年である一方、本研究で調べた地震サイクル Cycle 1, 2 の 1

サイクルは 9 日および 23 日間であり、2 つの現象のタイムスケールは大きく異なる。このように地震発生間隔が大幅に短く、巨大地震の余効すべりが最も大きいような時期においても、釜石沖本震の地震サイクル後半で地震活動が活発化する特徴が保存されていることが明らかとなった。このような発生間隔の長短によらない活動の時間変化の特徴は、釜石沖の小地震の活動が、地震性すべり領域内部での固着度の時間発展という同一の物理過程により生じている可能性が高いことを示す (Fig. 8)。

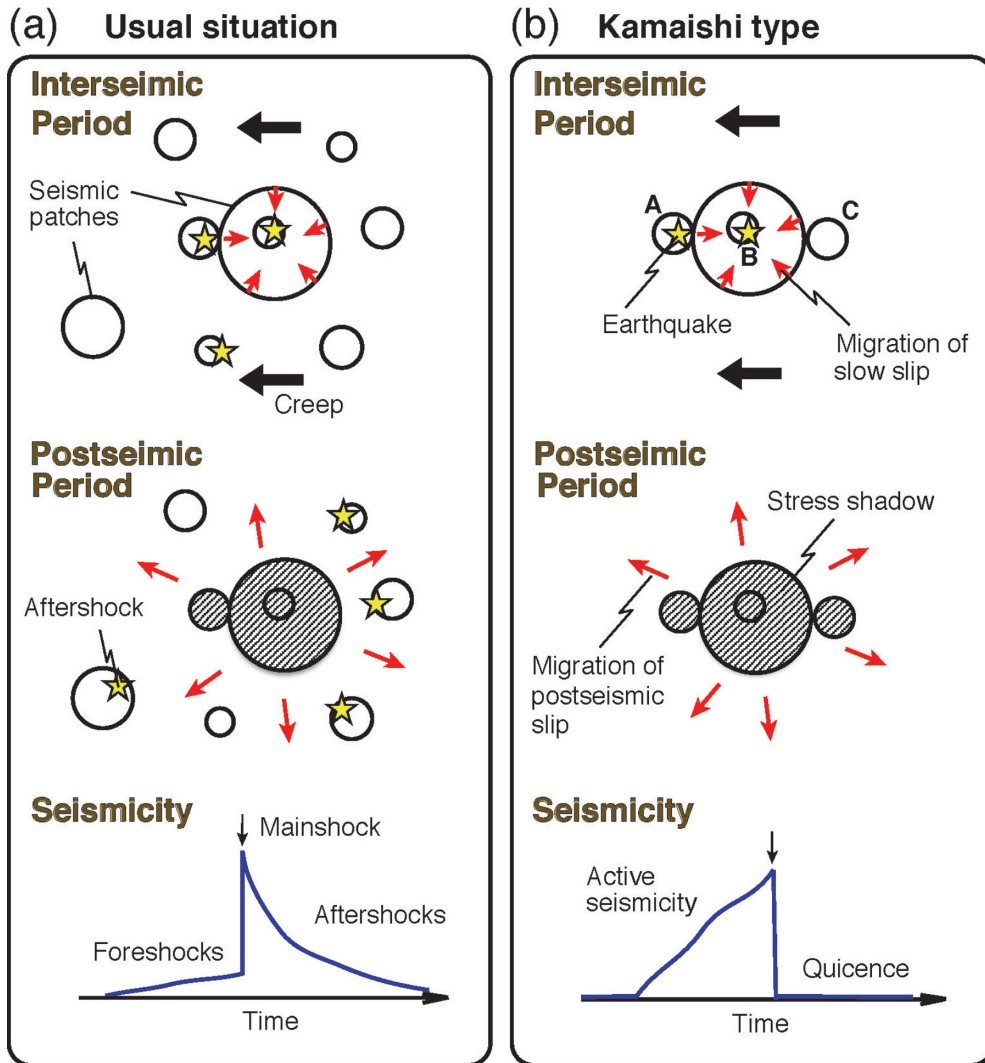


Fig. 9. Schematic models for earthquakes in a creeping fault for (a) usual situation, and (b) Kamaishi type. Top panels show interseismic period for the largest patch. Middle panels show postseismic period for the earthquake at the largest patch. We assumed small patches attached to the largest one slip simultaneously and the coseismic slip areas become stress shadows. Postseismic slip spreads in the surrounding area. Bottom panels show seismicity change related to largest earthquake (mainshock). Both models show interseismic seismicity in the main slip area (top). Aftershocks are limited outside of the slip area and in the case of Kamaishi, no aftershocks occur due to lack of seismic patches in the surrounding area of the main patch (middle). A-C in Figure (b) show groups A-C.

本論文で扱った地震活動の活発化・静穏化と類似な地震活動の特徴は東北沖地震前の釜石沖だけでなく、幾つかの報告事例がある。例えば2011年の東北沖地震の大すべり域内において、地震前にはプレート境界地震が発生していたが、地震後にはプレート境界の地震や繰り返し地震の発生がなくなった [Asano *et al.* (2011), Kato and Igarashi (2012), Uchida and Matsuzawa (2013)]. この現象は釜石沖地震クラスターで見られる地震活動と類似した現象として同じような枠組みで解釈できる。

一般的に、大規模地震の後には活発な余震活動が見られ

る (Fig. 9 (a)) [例えば、宇津 (2001)]. しかし余震のほとんどが、Fig. 9 (a) に示すように地震時のすべり域の外で起きているとすると、釜石沖地震クラスターのように地震性すべり域が孤立している場合 (Fig. 9 (b)) や一般的な場合 (Fig. 9 (a)) でも地震時すべり域内だけを見た場合には、応力が解放されたために余震活動が静穏となることを説明できる (Fig. 9 (b)). なお、Fig. 9 (a) で地震時すべり域内だけを見た場合は、上記の東北沖地震の際の観測に対応する。

また、本震を起こす地震性すべり域は均質なものでは

なく、多くの場合は地震性すべり域の階層的な分布で代表されるような不均質な構造が存在すると考えられる [例えば, Uchida *et al.* (2007), Hori and Miyazaki (2010)]. 例えば釜石沖では、1つの大きな地震性すべり域の中に、複数の小さなすべり域があると解釈できる。このような場合、本震の地震性すべり域への応力集中に伴い、内部や縁辺部の小さな地震性すべり域のみが破壊され、地震サイクル後半の小地震活動の活発化や前震活動を説明することができる (Fig. 9)。これは、余震が見られる一般的な場合 (Fig. 9a) も、釜石沖地震のように周囲に固着域がなく孤立している場合 (Fig. 9b) もともに発生する。つまり、釜石沖で見られた地震活動の特徴は、地震時すべり域のみを見れば一般性があると考えても矛盾しない。すなわち、一般に、その地域の応力状態を支配する最大地震の地震サイクルの間に、地震サイクル後半にそのすべり域内において地震活動が活発で、かつ余震がほとんど存在しないという地震活動の変化が起きている可能性が考えられる。

§ 6. 発生順序および波形相関から推定される地震性すべり領域内での地震間の相互作用

釜石沖本震 X32021 の発生前において、釜石沖本震のすべり域のより外側の地震 group C (C31517, C31822) のあとに内側の地震 group B (B31600), group D (D31907) が起きている (Fig. 1 (b), Fig. 6 (a))。その際に時間遅れがあるため、釜石沖本震の地震性すべり領域内でその外側から内側に向けて非地震性すべりの伝播があったと解釈することが可能である (Fig. 9 (b))。今回観測された時間遅れは 7~11 時間であり、現象のタイムスケールは大きく異なるが、類似な現象は東北沖地震前においても指摘されている [Uchida *et al.* (2012)]。東北沖地震前では、釜石沖地震クラスターにおいて最も西に位置する group A の地震が発生した 50 日以内に group B の地震が発生するパターンが多く観測されており、非地震性すべりの移動によって group B が誘発され地震を起こしている可能性があると考えられている。東北沖地震後については、Fig. 6 において灰色で示した地震の震源が不明瞭であるため、地震活動の発生順序に関して今回の結果から断定することは難しい。しかし、東北沖地震前に指摘されていた発生順序の特徴が東北沖地震直後においても保存されている可能性がある。

また、東北沖地震から 1 時間後に発生した地震 X31115 (M5.9) や B31600 (M2.9), D31907 (M3.6) は複数のプレートとの相関が高い傾向にあった。これらの地震はいずれも東北沖地震前に発生したプレート地震よりも相対的に規模が増加しており、複数のグループのすべり

域が同時に破壊された地震の可能性がある。

§ 7. 東北沖地震直後の釜石沖での余効すべり

本節では、§ 4 で検出不可能な時間帯の長さが最も短いと推定された釜石沖本震 group X の活動履歴から同領域における東北沖地震の余効すべり量を推定する。本研究の MF 法で検出した地震のうちで group X と分類された地震は気象庁一元化処理震源カタログに記載されている地震のみであった。検出限界を調べた結果から、東北沖地震直後の 34 日間に発生した地震の検出漏れの可能性は低く、釜石沖の本震は 3 個と考えられる。釜石沖の繰り返し地震は周囲の非地震性すべり (余効すべり) に追いつくように発生していると考えられるため、これらの地震のすべり量から余効すべり量を推定することができる。東北沖地震から 55 分後に発生した最初の group X の地震 (X31115) について考えると、Hanks and Kanamori (1979) の式によってマグニチュードから変換した地震モーメントに、Nadeau and Johnson (1998) のスケーリング則を適用するとすべり量は 76 cm と評価することができる。しかし、このすべり量のうちの 2008 年の釜石沖の本震から東北沖地震までの期間と東北沖地震以降の 55 分間のそれぞれの期間における歪み蓄積を分離して評価することは難しい。一方、この繰り返し地震 X31115 (M5.9) の後には、X32021 (M5.9), X41304 (M5.5) がそれぞれ発生している。従って X31115 後に発生した釜石沖の本震すべり域でのすべり量は、この 2 つの本震のすべり量の積算を同様に評価することにより、136 cm となる。一方、Uchida *et al.* (2015) によると、これらの繰り返し地震の波形インバージョンによって推定された同期間のすべり量の積算は 99 cm であった。このことから、東北沖地震発生 55 分後から 34 日間の釜石沖周辺の余効すべりは、繰り返し地震の積算すべり量と等しいと考えれば、概ね 1.0-1.4 m と考えられる。

釜石沖周辺の余効すべりについては、繰り返し地震データからは、この領域の平均として東北沖地震から 3 日後から約 9 ヶ月に 1.0 m と推定されている [Uchida and Matsuzawa (2013)]。一方、GPS データからは Sun and Wang (2015) は約 3 年間で 1.0 m 程度、Inuma *et al.* (2016) は約 8 ヶ月間で 0.8 m 程度という値を得ている。すべり量の絶対値については、手法や平均の仕方などによる系統的な誤差が考えられるが、今回の 34 日間で 1.0-1.4 m の余効すべりという推定値は、Munekane (2012) が示したように、東北沖地震発生後の早い段階に大きな余効すべりが生じたことを示す。

§8. 結 論

岩手県釜石沖の繰り返し地震をテンプレートとして使用し、2011年3月11日から4月13日までの34日間の連続波形データに対しMatched Filter法(MF法)を適用した。その結果、25個の地震を検出し、そのうち18個は気象庁一元化カタログに未記載の地震であった。MF法の性質から、これらの地震はM4.8前後の地震の繰り返しで知られていた釜石沖の繰り返し地震の極近傍で発生した地震であると考えられる。また、MF法において検出不可能な時間も合わせて調べることで、東北沖地震から2分後以降、釜石沖の本震の検出漏れはない可能性が高い事がわかり、東北沖地震発生55分後の最初の釜石沖地震本震から34日間の釜石沖地震の近傍での余効すべり量は1.0-1.4mと推定された。さらに、釜石沖本震の地震サイクル後半の小地震活動の活発化という、東北沖地震前の釜石沖において見られた傾向が東北沖地震直後の2つの地震サイクルでも保存されていることがわかった。本研究の結果は東北沖地震の余効すべりが最も大きく、繰り返し間隔が9-23日と極端に短くなっている時期においても、この傾向が保存されていたことを示す。地震サイクルにおける小地震の活動の静穏化・活発化が釜石沖の本震の繰り返し間隔に依存しないという結果は、このような活動が、固着域内部での固着状況の時間発展という同一の物理過程に支配されている可能性を示す。

謝 辞

本研究では、東北沖地震直後の防災科学技術研究所のHi-netおよび東北大学微小地震観測網のデータを使用しました。岩手県での地震観測点の保守に当たられた河野俊夫氏、データ整理にあられた平原聡氏、中山貴史氏をはじめ、地震による被害の中、地震観測の継続・復元に尽力された両機関の職員に感謝いたします。震源情報に関しては、気象庁の一元化震源を使用しました。また、本稿の改善にあたり、東京大学の井出哲教授には有益なご助言を頂きました。2名の匿名の査読者および編集担当委員の高橋努博士による助言は本論文の改訂の上で有益でした。論文中の図の作成には、Wessel and Smith (1998)によるGMT (the Genetic Mapping Tools)を使用しました。記して感謝します。

文 献

Asano, Y., T. Saito, Y. Ito, K. Shiomi, H. Hirose, T. Matsumoto, S. Aoi, S. Hori, and S. Sekiguchi, 2011, Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth

Planets Space, **63**, 669-673, doi:10.5047/eps.2011.06.016.
 Ellsworth, W. L., 1995, Characteristic earthquake and long-term earthquake forecasts: Implications of central California seismicity, in "Urban Disaster Mitigation: The Role of Science and Technology", ed. by F. Y. Cheng and M. S. Sheu, Elsevier, Oxford, 1-14, doi:10.1016/B978-008041920-6/50007-5.
 Gibbons, S. J. and F. Ringdal, 2006, The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation, *Geophys. J. Int.*, **165**, 149-166, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x.
 Hanks, T. C. and H. Kanamori, 1979, A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350, doi:10.1029/JB084iB05p02348.
 Hatakeyama, N., N. Uchida, T. Matsuzawa, and W. Nakamura, 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**, 5160-5180, doi:10.1002/2016JB013914.
 畠山範重, 2016, 小地震解析に基づくプレート境界地震発生域におけるすべり過程の可変性に関する研究, 東北大学大学院理学研究科修士論文, 165 pp.
 Hori, T. and S. Miyazaki, 2010, Hierarchical asperity model for multiscale characteristic earthquakes: A numerical study for the off-Kamaishi earthquake sequence in the NE Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L10304, doi:10.1029/2010GL042669.
 Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2003, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **108**, B5, 2249, doi:10.1029/2002JB001920.
 Iinuma, T., R. Hino, N. Uchida, W. Nakamura, M. Kido, Y. Osada, and S. Miura, 2016, Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake, *Nature Communications*, **7**, 13506, doi:10.1038/ncomms13506.
 Kato, A. and T. Igarashi, 2012, Regional extent of the large coseismic slip zone of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake delineated by on-fault aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L15301, doi:10.1029/2012GL052220.
 Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, **335**, 705-708, doi:10.1126/science.1215141.
 Lay, T. and H. Kanamori, 1981, An asperity model of great earthquake sequences, in "Earthquake Prediction: An International Review" ed. by W. Simpson and P.G. Richards, Maurice Ewing Series **4**, AGU, Washington, D.C., pp. 579-592, doi:10.1029/ME004p0579.
 松原 誠・汐見勝彦・武田哲也・木村尚紀・松本拓己・廣瀬 仁・浅野陽一・齊藤竜彦・松澤孝紀・上野友岳・木村武志・三好崇之・田中佐千子・エネスクボグダン・松林弘智・風神朋枝・針生義勝, 2012, 防災科学技術研究所高感度地震観測網が捉えた2011年東北地方太

- 平洋沖地震—観測記録・被害・対応—, 防災科学技術研究所主要災害調査, **48**, 15–51.
- Matsuzawa, T., T. Igarashi, and A. Hasegawa, 2002, Characteristic small earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1543, doi:10.1029/2001GL014632.
- Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, and A. Hasegawa, 2004, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 803–811, doi:10.1186/BF03353087.
- Munekane, H., 2012, Coseismic and early postseismic slips associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake sequence: EOF analysis of GPS kinematic time series, *Earth Planets Space*, **64**, 1077–1091, doi:10.5047/eps.2012.07.009.
- Murray, J. and J. Langbein, 2006, Slip on the San Andreas Fault at Parkfield, California, over two earthquake cycles, and the implications for seismic hazard, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 4B, S283–S303, doi: 10.1785/0120050820.
- Nadeau, R. and L. R. Johnson, 1998, Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 790–814.
- 永井理子・菊池正幸・山中佳子, 2001, 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究—1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較—, *地震* **2**, **54**, 267–280, doi:10.4294/zisin1948.54.2_267.
- 中山貴史・出町知嗣・平原 聡・鈴木秀市・海田俊輝, 2013, 東北地方太平洋沖地震における東北大学の被害状況と復旧対応, *東京大学地震研究所技術研究報告*, **19**, 18–24.
- Okada, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2003, Comparison of source areas of $M4.8 \pm 0.1$ repeating earthquakes off Kamaishi, NE Japan: Are asperities persistent features? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **213**, 361–374, doi:10.1016/S0012-821X(03)00299-1.
- 大見士朗, 2015, Matched Filter Method による群発地震解析の試み—2013年飛騨山脈穂高岳付近の地震活動の例—, *地震* **2**, **68**, 1–15, doi:10.4294/zisin.68.1.
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire, 2012, Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.*, **117**, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.
- Peng, Z. and P. Zhao, 2009, Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake, *Nature Geoscience*, **2**, 877–881, doi:10.1038/ngeo697.
- Shelly, D. R., G. C. Beroza, and S. Ide, 2007, Non-volcanic tremor and low frequency earthquake swarms, *Nature*, **446**, 305–307, doi:10.1038/nature05666.
- Shimamura, K., T. Matsuzawa, T. Okada, N. Uchida, T. Kono, and A. Hasegawa, 2011, Similarities and Differences in the Rupture Process of the $M \sim 4.8$ Repeating-Earthquake Sequence off Kamaishi, Northeast Japan: Comparison between the 2001 and 2008 Events, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **101**, 2355–2368, doi:10.1785/0120100295.
- 島村浩平, 2012, プレート境界地震の再現性に関する研究, 東北大学大学院理学研究科博士論文, 111 pp.
- Sun, T. and K. Wang, 2015, Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, 1329–1344, doi:10.1002/2014JB011707.
- 宇津徳治, 2001, 地震学 第3版, 共立出版株式会社, 376pp.
- Uchida, N. and T. Matsuzawa, 2013, Pre- and postseismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **374**, 81–91, doi:10.1016/j.epsl.2013.05.021.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, T. Okada, and A. Hasegawa, 2007, Source parameters of a $M4.8$ and its accompanying repeating earthquakes off Kamaishi, NE Japan: Implications for the hierarchical structure of asperities and earthquake cycle, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L20313, doi:10.1029/2007GL031263.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, K. Shimamura, and A. Hasegawa, 2012, Source parameters of microearthquakes on an interplate asperity off Kamaishi, NE Japan over two earthquake cycles, *Geophys. J. Int.*, **189**, 999–1014, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05377.x.
- Uchida, N., K. Shimamura, T. Matsuzawa, and T. Okada, 2015, Postseismic response of repeating earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: Moment increases due to the fast loading rate, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, 259–274, doi:10.1002/2013JB010933.
- 渡辺 晃, 1971, 近地地震のマグニチュード, *地震* **2**, **24**, 189–200, doi:10.4294/zisin1948.24.3_189.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.
- Wiemer, S. and M. Wyss, 2000, Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 859–869, doi:10.1785/0119990114.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2003, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, **55**, e21–e24, doi:10.1186/BF03352479.