

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.72

# Survey of moderate repeating earthquakes in Japan

BY

Seismology and Volcanology Research Department of MRI,  
Seismology and Volcanology Department, Meteorological College,  
Sapporo Regional Headquarters, Sendai Regional Headquarters,  
Osaka Regional Headquarters, Fukuoka Regional Headquarters,  
and Okinawa Regional Headquarters

気象研究所技術報告

第 72 号

日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究

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



気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

March 2014

# METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Established in 1946

Director-General: Mr. Akihide Segami  
Senior Director for Research Affairs: Dr. Masao Mikami  
Senior Director for Research Coordination: Dr. Masaomi Nakamura

Forecast Research Department	Director: Dr. Kazuo Saito
Climate Research Department	Director: Dr. Tadashi Tsuyuki
Typhoon Research Department	Director: Mr. Shingo Yamada
Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department	Director: Dr. Fumiaki Fujibe
Meteorological Satellite and Observation System Research Department	Director: Dr. Satoru Tsunomura
Seismology and Volcanology Research Department	Director: Dr. Takashi Yokota
Oceanography and Geochemistry Research Department	Director: Dr. Masafumi Kamachi

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan

## TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Editor-in-chief: Kazuo Saito

Editors: Kazuyo Murazaki Masayoshi Ishii Akiyoshi Wada  
Makoto Deushi Tetsu Sakai Shigeki Aoki  
Hideyuki Nakano  
Managing Editors: Takashi Inoue, Emiko Tahakashi

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute (MRI) since 1978 as a medium for the publication of technical report including methods, data and results of research, or comprehensive report compiled from published papers. The works described in the *Technical Reports of the MRI* have been performed as part of the research programs of MRI.

---

©2014 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of reports in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from reports in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of reports in this journal require written permission from the MRI.

In exception of this requirement, personal uses for research, study or educational purposes do not require permission from the MRI, provided that the source is acknowledged.

Survey of moderate repeating earthquakes in Japan

BY

Seismology and Volcanology Research Department of MRI,  
Seismology and Volcanology Department, Meteorological College,  
Sapporo Regional Headquarters, Sendai Regional Headquarters,  
Osaka Regional Headquarters, Fukuoka Regional Headquarters,  
and Okinawa Regional Headquarters

気象研究所技術報告

第 72 号

日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究

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

気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN



## 序

平成23年(2011年)3月11日、東日本などに甚大な被害をもたらした東北地方太平洋沖地震(M9)が起きた。このような超巨大地震は、その発生が極めて稀で、発生間隔は明らかになっていないが、プレートの沈み込みに伴い1000年或いはそれ以上の間隔で繰り返し発生する可能性があることが指摘されている。

20世紀後半地震観測網の整備が進んで以来、日本各地で波形が非常によく似た地震の観測が報告されるようになった。波形が非常によく似た地震は「相似地震」と呼ばれており、このような現象は、ほぼ同じ場所でほぼ同じ規模のほぼ同じメカニズムの地震が発生した場合に観測される現象である。東北地方太平洋沖地震の震源域においても、その発生前に、多くの相似地震が観測されている。これらは、プレート運動に伴い同じ断層固着域においてほぼ同程度の規模で断層すべりが繰り返し発生することによるもので、一定の繰り返し間隔を示す場合も少なくない。これら地震の規模(すべり量)と発生間隔を解析することにより、相似地震が発生している領域のプレートのすべり速度を推定することができる。

このことから、近年、繰り返し発生する相似地震の解析がプレート運動のモニタリングの有効な手段のひとつとして、注目されるようになってきた。特に、このような相似地震が、一定期間で繰り返し発生していることに注目し、地震の発生時期の予測と検証に関する研究が行われている。このような地震のうち、発生間隔が短く比較的小規模の相似地震の発生状況については大学等の調査によって詳細が明らかにされている。しかし、社会的な影響を及ぼす可能性のある中規模の相似地震に関しては東北地方と沖縄地方で観測例が報告されているのみであり、国内のその他の地域では調査自体がまだ不十分な状況にあり、震源が陸域に近い場合には軽微ではあるが被害をもたらす可能性のある規模以上の相似地震に関する系統的な調査が望まれていた。

被害をもたらす可能性のある地震として、マグニチュード(M)5以上の地震に注目すると、このような地震は全国で年間100~200個程度発生しており、これら地震を対象として相似地震の発生の実態を把握するためには、各地域の地震活動について把握している気象官署ならびに関係機関と協力した総合的な調査が必要不可欠である。

このため、気象研究所は、地震火山部、気象大学校、各管区气象台ならびに沖縄气象台と共同で、平成23、24年度の2ヶ年にわたり地方共同研究「日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究」を実施した。その調査研究の結果、北海道地方においてM5クラスの複数の相似地震系列が見いだされたばかりでなく、東北地方においてはM6クラスの相似地震系列も認められた。そして関東、九州、沖縄の各地方においても多数の中規模以下の相似地震系列が確認された。調査期間が限られていたことから今後新たな相似地震系列が発見される可能性が残されており、本報告が今後の研究の参考になれば幸いである。最後に、本調査にかかわりご協力を頂いた各大学等研究機関および気象庁各担当部署の関係者各位に謝意を表す。

気象研究所 地震火山研究部長

横 田 崇

## 概 要

本報告は、地方共同研究「日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究」（平成 23 年～24 年度、研究代表：地震火山研究部第 2 研究室長 勝間田明男）において得られた成果をまとめたものである。この研究は、地震火山研究部が地震火山部、気象大学校、各管区气象台、沖縄气象台と共同で実施したものである。第 1 章では、相似地震に関する基本的概念について述べるとともに、これまでに行われてきた関連する調査・研究と基本的な調査方針について記述する。第 2 章では、地震火山部等によって行われたデジタル加速度強震記録に基づく日本全国の相似地震の調査結果について述べる。この調査の結果 72 グループの地震系列が繰り返し相似地震の可能性のあるものとして抽出された。第 3 章では、気象大学校等により実施された震源カタログに基づいて繰り返して発生した地震を抽出した結果について述べる。ほぼ同じ規模で周期的に起きている地震群を取り出した後、地震波形に基づき相似性を確認している。新たに中規模の相似地震 4 グループが見出された。第 4 章では、地震火山研究部が東北大学と共同で行った、相似地震の規則的な繰り返し発生に基づく発生予測実験の結果について記述する。M4 クラスまでの小規模の相似地震の系列ごとに 1 年間に発生する確率を事前に計算し、事後にその予測結果に関する評価を行った。第 5 章では、地域ごとの相似地震の発生状況について記述する。ここでは、デジタル記録以前の地震記象に調査対象を広げて相似地震の繰り返し状況をたどっている。5.1 節では、札幌管区气象台が北海道大学と共同で調査した北海道南方沖等で繰り返し発生している相似地震について記述する。十勝地方南部・釧路沖・浦河沖の系列について記象紙を含め可能な限り遡って調査した。とくに釧路沖の系列については、1954 年以後 10 回の相似地震の繰り返し発生が確認された。5.2 節では、仙台管区气象台等による東北地方の相似地震の調査結果について記述する。おもに種市沖、気仙沼沖、相馬沖、原町沖、いわき沖の相似地震の発生状況について調査を行った。これらの地震はマグニチュード 6 クラスの繰り返し相似地震のグループを形成していることが判明した。5.3 節では、大阪管区气象台によって行われた近畿・中国・四国における繰り返し相似地震に関する調査結果を記述する。比較的規模の小さな地震も含めて調査を行ったが、結果として繰り返し発生する相似地震は確認されなかった。5.4 節では、福岡管区气象台によって行われた日向灘における調査結果を記述する。この地域では複数の小規模の相似地震の系列が確認された。5.5 節では、沖縄气象台が行った沖縄本島周辺の相似地震に関する調査結果を記述する。すでに報告のあるマグニチュード 3～5 クラスの複数の系列の相似地震について幾つかの繰り返し発生が確認された。

## Summary

This report presents the results of the research project “Survey of moderate repeating earthquakes in Japan,” which was conducted by Seismology and Volcanology Research Department of MRI, Seismology and Volcanology Department, Meteorological College, Sapporo Regional Headquarters, Sendai Regional Headquarters, Osaka Regional Headquarters, Fukuoka Regional Headquarters, and Okinawa Regional Headquarters, in FY 2011 and 2012. Chapter 1 reviews the previous research on repeating earthquakes and describes the survey methods. Chapter 2 presents repeating earthquakes detected with seismic wave coherency of digital strong motion data. Seventy-two groups were identified as possible repeating earthquakes. Chapter 3 presents the result of a repeating-earthquake survey based on the seismic catalog. Candidates for repeating earthquakes were selected based on the periodic occurrence of events. Four new groups of repeating earthquakes were found. Chapter 4 presents the results of earthquake-forecast tests of repeating earthquakes. Occurrences of repeating earthquakes in one-year periods were forecast beforehand and were assessed after the periods. Chapter 5 consists of reports of regional surveys of repeating earthquakes. Section 5.1 presents a report by Sapporo Regional Headquarters on repeating earthquakes in southern Tokachi, off Kushiro, and off Urakawa. Ten recurrences since 1954 were seen for a group off Kushiro. Section 5.2 presents a report by Sendai Regional Headquarters on the earthquakes around the Pacific plate boundary off Tohoku district. Earthquakes off Taneichi, Kesen’numa, Souma, Haramachi, and Iwaki were recognized as magnitude 6 class repeating earthquakes. Section 5.3 is a report by Osaka Regional Headquarters about the earthquakes in Kinki, Chugoku, and Shikoku districts; no candidate repeating earthquakes were found in these areas. Section 5.4 presents the results from Fukuoka Regional Headquarters on repeating earthquakes beneath the Hyuganada Sea. Some groups of earthquakes were identified as repeating earthquakes. Section 5.5 is a report by Okinawa Regional Headquarters on repeating earthquakes near Okinawa Main Island. Groups of magnitude 3 to 5 class repeating earthquakes were recognized.

## 目 次

第1章 繰り返し相似地震について	1
第2章 全国を対象とした客観的な相似地震の抽出	5
第3章 規則的な発生間隔に基づく相似地震の抽出	17
第4章 相似地震の予測実験	26
第5章 日本各地の繰り返し相似地震の発生状況調査	40
5.1 北海道地方の繰り返し相似地震	40
5.2 東北地方太平洋沖の繰り返し相似地震	85
5.3 近畿・中国・四国地方の繰り返し相似地震	108
5.4 九州地方の繰り返し相似地震	121
5.5 沖縄地方の繰り返し相似地震	126

## 第 1 章 繰り返し相似地震について

勝間田明男（気象研究所地震火山研究部）・吉川澄夫（地磁気観測所）

所属は平成 24 年度当時

### 1.1 はじめに

20世紀後半に地震観測網が飛躍的に整備されるようになるにつれて日本各地で波形のよく似た地震（相似地震）の存在が知られるようになり、その発生機構に関する議論もなされるようになった（例えば、辻浦，1979；水越・森谷，1980）。このような相似地震の発生原因の理解はあまり進展してこなかったが、近年、プレート境界で発生している相似地震について、デジタルデータを用いた効率的かつ客観的な解析がなされるようになったことにより、プレート境界における相似地震が小固着域の繰り返しすべりによって発生すると解釈されるようになった（Matsuzawa *et al.*，2002）。

相似地震の概念を図1.1に示す。これは沈み込むプレートのイメージを描いている。色がついている部分が固着域であり、地震発生のパテンシャルを有する場所である。色のついていない部分が非固着域であり、通常状態ではプレートの動きにつれて定常的に非地震性すべりを生じているとされる場所である。個々の相似地震を起こしている場所はそれぞれ固着域であり、プレート運動すなわち周辺の非固着域の非地震性すべりにつれて、応力が蓄積し地震発生に至ると考えられている。固着域の大きさが発生する地震の規模を決め、大きな固着域は大きな地震を発生させ、小さな固着域は小さな地震を発生させる。そのため、震源の位置や大きさがほぼ同じ地震がほぼ一定の時間間隔で繰り返し発生し、それが相似地震として観測されると考えられる。

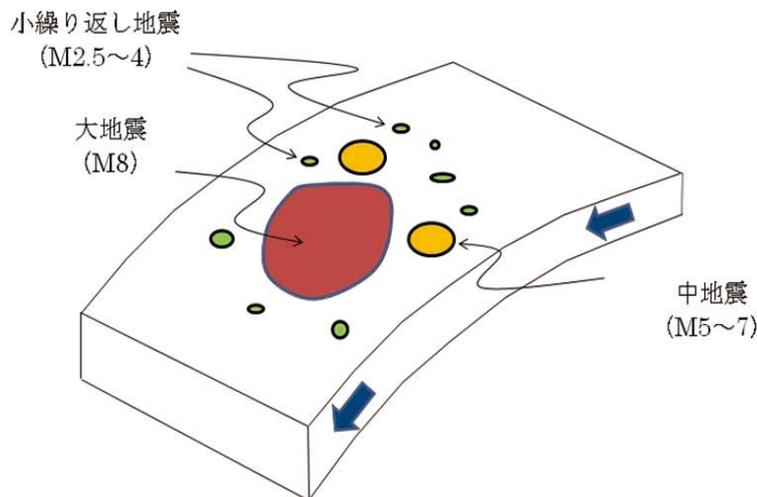


図1.1 相似地震の震源の概念図。

また、相似地震の発生状況は、その周辺の非固着域のプレート間定常すべり速度に依存していると考えられるので、その発生様式からプレート間の固着状態や周辺のすべり速度が推定されている（例えば、Nadeau and Johnson，1998；Matsuzawa *et al.*，2002）。地震の規模が同じ程度の相似地震を比べた場合、相似地震の発生間隔が短ければプレート間すべりが速く、発生間隔が長ければプレート間すべりが遅いとみられる。相似地震の発生している場所付近に関するプレート運動の情報が得られるので空間分解能が高く、GNSSデータによる固着状態の推定では十分な信頼性を得ることが困難な海溝軸付近の固着状態の情報が得られる利点がある（例えば、Uchida *et al.*，2003）。但し、このプレー

ト間すべり速度の推定は地震の発生に依存することから、南海トラフ沿いのプレート境界のように、地震の発生頻度が低い地域では情報が得られない。

なお、相似地震に関連して、「固有地震」、「繰り返し地震」など似た意味を表す用語がある。溜瀧・他(2010)などにも解説があるが、「固有地震」は「特定の断層で発生する最大規模の地震は、ほぼ同じ大きさの地震が繰り返し発生する」という概念(Schwartz and Coppersmith, 1984)に基づくものであるのに対し、「相似地震」は狭義の意味では観測波形の相似性に注目した表現である。また「繰り返し地震」は発生間隔の規則性に注目した表現となっている。ここでは、「繰り返し相似地震」として、震源が同一でほぼ同じ発生間隔で繰り返す波形が相似な地震の発生状況を把握することとしている。

## 1.2 調査方針

近年デジタルデータが蓄積されるようになって以降、比較的小規模な相似地震に関する調査が大学や研究機関により盛んになされており、詳細な解析が進んでいる(Igarashi *et al.*, 2003; Uchida *et al.*, 2003; Okada *et al.*, 2003; Uchida *et al.*, 2004; Uchida *et al.*, 2005; Matsubara *et al.*, 2005; Kimura *et al.*, 2006; Uchida *et al.*, 2007)。これに対して、M5以上の中規模の繰り返し相似地震については、Matsuzawa *et al.* (2002)をはじめとした一連の研究や長谷川・他(2005)、溜瀧・他(2010)、気象庁地震予知情報課(2010)、中村・他(2010)などの調査はあるものの、全国的には十分に調査が進んでいるとは言えない。このような中規模の相似地震については発生間隔が長くなることから、デジタル記録以前の地震記象紙を保有する気象官署も含めた調査が望まれてきた。

調査にあたっては、デジタル地震波形の相似性に基づいて溜瀧・他(2011)によって抽出された地震のグループについて、地震活動経過図(M-T図)等を使って時間を遡って活動を調査する方法等が用いられている。デジタル記録に基づいた相似地震に関する調査については、本報告書の第2章に記述されている。鎌谷・勝間田(2010)の発生間隔の規則性に注目して震源カタログを用いて候補を抽出する手法も用いられている。発生間隔の規則性に注目した候補の抽出については本報告書の第3章に記されている。抽出された候補については、デジタル地震記録やマイクロフィルム保管されている地震記象紙を用いて波形の相似性を確認する。発生間隔の規則性や地震波形の相似性が確認された地震グループについては、岡田(2009)の小標本論に基づいて次の地震の発生時期を計算している。相似地震の発生時期の算出には、長谷川嘉臣技官(大阪管区気象台(平成24年度当時))が作成した地震長期発生確率計算ツール(L-cat)が用いられている。

なお、相似地震は発生の規則性から、「規模」・「時間」・「場所」の3要素を併せた発生予測が可能であることから、新たな相似地震系列の発掘が進むことにより、統計的評価を含めて予測可能性のある地震を増やすことにつながると考えられる。一般的にM5以上の地震が内陸や沿岸付近で発生すれば人家や構造物に被害をもたらす可能性があるため、この予測結果が防災面で貢献できることが考えられる。現在のところ相似地震以外の地震が圧倒的に多いことから、一般的な注意喚起につながることは困難な面もあるが、「予測可能」な地震数の拡大に結びつくことは少なからず有意義な成果と言えよう。

## 謝辞

マイクロフィルム利用環境の改善において、地震火山部関係官の尽力を得た。

## 参考文献

長谷川安秀・橋本徹夫・草野富士雄・吉川一光・大西星司, 2005: 東北地方における中規模地震の固有地震的地震活動の検出, *地震*2, 58, 67-70.

- Igarashi, T., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, 2003: Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JB001920.
- 鎌谷紀子・勝間田明男, 2010: 全国の中規模固有地震活動( $M \geq 4.5$ )検出の試み, *日本地震学会秋季大会講演予稿集*, P02-32.
- Kimura, H., K. Kasahara, T. Igarashi, and N. Hirata, 2006: Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: A new plate configuration revealed by interplate aseismic slips, *Tectonophysics*, **417**, 101-118, doi:10.1016/j.tecto.2005.06.013.
- 気象庁地震予知情報課, 2010: 中～大規模の繰り返し地震についての規則性と不規則性, *地震予知連絡会報*, **83**, 613-632.
- Matsubara, M., Y. Yagi, and K. Obara, 2005: Plate boundary slip associated with the 2003 Off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08316, doi:10.1029/2004GL022310.
- 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.
- 水越育郎・森谷武男, 1980: 有珠山群発地震の広帯域・広ダイナミックレンジ観測—相似地震とその断層運動の平滑化—, *地震*, **33**, 479-491.
- Nadeau, R. M. 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.
- 中村雅基・今村翔太・溜淵功史・山田安之・高木康伸・石垣祐三・前田憲二・岡田正実, 2010: 全国で見つかったいくつかの固有地震的地震活動, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, SSS013-P05.
- 岡田正実, 2009: 繰り返し地震および余震の確率予測, *地震*, **61**, 特集号, S143-S153.
- 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.
- Schwartz, D. P. and K. J. Coppersmith, 1984: Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones, *J. Geophys. Res.*, **89**, 5681-5698.
- 溜淵功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2010: 宮古島近海における固有地震活動, *地震*, **62**, 193-207.
- 溜淵功史・中村雅基・山田安之, 2011: 全国を対象とした客観的な相似地震の抽出, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, SSS026-P02.
- 辻浦賢, 1979: 地震波形の相似性からみた前震と群発地震の違いについて(序報), *地震研究所彙報*, **54**, 309-315.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, T. Igarashi, and A. Hasegawa, 2003: Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL017452.
- Uchida, N., A. Hasegawa, T. Matsuzawa, and T. Igarashi, 2004: Pre- and post-seismic slow slip on the plate boundary off Sanriku, NE Japan associated with three interplate earthquakes as estimated from small repeating earthquake data, *Tectonophysics*, **385**, 1-15, doi:10.1016/j.tecto.2004.04.015.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, 2005: Recurrence intervals of characteristic  $M4.8 \pm 0.1$  earthquakes off-Kamaishi, NE Japan—Comparison with creep rate estimated from small repeating earthquake data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 155-165, doi:10.1016/j.epsl.2005.01.022,
- 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.

## 第 2 章 全国を対象とした客観的な相似地震の抽出

溜瀧功史（地震火山部地震予知情報課）・中村雅基・山田安之（地震火山部地震津波監視課）

### 2.1 はじめに

同程度の規模の地震が準周期的に繰り返し発生する相似地震は、その周期性から発生時期や規模を中長期的にある程度予測できると考えられる数少ない地震である。気象庁では、このような同程度の規模の地震が準周期的に発生する活動を見出すために、同一観測点において観測波形が酷似する相似地震の抽出を行ってきた（気象庁地震予知情報課、2010、中村・他、2010）。具体的には、釧路沖（M4.9；佐鯉・他、2012）、種市沖（M6.1 と M6.0；気象庁地震予知情報課・他、2009）、いわき沖（M5.7；気象庁地震予知情報課・他、2009）、沖永良部島西方沖（M5.3 と M5.2；気象庁沖縄気象台・他、2009、溜瀧・他、2009）、宮古島近海（M5.1；溜瀧・他、2010）など、全国各地でこのような地震群を抽出した。

一方で、①気象庁が保有する津波地震早期検知網のデジタルデータは 1994 年 10 月以降のみであること、②短周期速度計では、規模が大きな地震での振り切れや、1Hz より長周期側は測定範囲外であり、コヒーレンスの計算が困難であること、③コヒーレンスを計算する際の帯域がグループごとに任意であること、④波形の収集・解析する地震の選択など全てが手作業であること、といった理由から、必ずしも客観的かつ網羅的に調査してこなかった。

そこで、本報告では 1988 年 10 月以降全国に展開された 87 型強震計および 95 型震度計の加速度波形を用いることで継続的な調査が可能であることに着目し、全国を対象とした網羅的な相似地震の検出を試みたので報告する。

### 2.2 解析データ

本報告では、1988 年 10 月からデジタルデータが存在する 87 型強震計および 95 型震度計の加速度波形を用いて調査を行った。これらの加速度波形を使うメリットは、1Hz より長周期側の波形を見ることができると、1988 年 10 月以降の比較的長期間にわたって全国の広い範囲でデジタル波形記録が存在している点である。デメリットは、概ね震度 3 以上の地震に対してのみ波形を蓄積しており、規模の小さな地震や陸地から離れた海域の地震を検出できない点である。また、1997 年 4 月～1999 年 3 月までは震度 4 以上を観測した場合にのみ収集するなど、震度 3 以上の地震についても必ずしも全て収集されているとは言えない。なお、解析する際には、ノイズの影響をできるだけ減らすために、震度 2 相当以上を観測した波形のみを利用した。使用したデータについて表 2.1 にまとめた。

表 2.1 使用したデータ

	サンプリング	測定範囲	観測期間	備考
87 型強震計	50Hz	0.1～10Hz	1988 年 10 月～ 1997 年 3 月	概ね震度 2 以上の観測点を収集。
95 型震度計	100Hz	DC～41Hz	1997 年 4 月～	1997 年 4 月～1999 年 3 月は最大震度 4 以上を観測した場合に震度 3 以上の観測点を収集。 1999 年 4 月～2004 年 12 月は震度 3 以上の観測点を収集。 2005 年 1 月以降は最大震度 3 以上を観測した場合に震度 2 以上の観測点を収集。

### 2.3 手法

本調査では、コヒーレンスを用いて相似地震を抽出した。ここではコヒーレンスを (1) 式のように定義した。

$$Coh = \sqrt{CPS / P_1 P_2}, \quad (1)$$

ただし、 $Coh$  はコヒーレンス、 $CPS$  はクロスパワースペクトル、 $P_1, P_2$  はそれぞれの波形のパワースペクトルである。

これまで行ってきた手動解析の経験から、地震の規模に応じてコヒーレンスが高い帯域が異なることが分かってきた (図 2.1)。そこで、マグニチュードと高いコヒーレンスが得られる帯域になんらかの相関関係がないか事前調査を行った。事前調査の手順は以下の通りである。まず、理論 P 波到達時の 1 秒前から 40 秒間の加速度波形を用いて、0.1~10Hz の帯域でコヒーレンスを網羅的に計算し、コヒーレンス値が最大となる周波数帯を求めた。その際、計算する帯域の上限 ( $f_{upper}$ ) は、計算する帯域の下限 ( $f_{lower}$ ) の 4 倍とした (すなわち、 $f_{upper} = 4f_{lower}$ )。これは、 $2f_{lower}$  を対象周波数と考えた場合、その倍から半分の周波数帯でコヒーレンスが高いことを意味する。

その結果、3 成分全てでコヒーレンスの最大値が 0.95 以上となった 803 ペアの波形について、比較対象のうち小さいほうのマグニチュード ( $M$ ) とコヒーレンスが高い周波数帯域の関係をプロットし (図 2.2)、M3~M6 の範囲のデータを用いて、 $M$  毎の平均値から最小二乗法による近似直線を求めると (2) 式が得られた。

$$\log f_{lower} = \log a - bM. \quad (\text{ただし, } a=22.4, b=0.86.) \quad (2)$$

これは、具体的には、M4.0 では 0.7~2.8Hz、M5.0 では 0.3~1.2Hz、M6.0 では 0.12~0.5Hz の帯域で計算することを意味する。

この事前調査で得られた (2) 式を基に、理論 P 波到達時の 1 秒前から 40 秒間の波形を用い、各成分 (NS、EW、UD) のコヒーレンスを計算した。この際、地震間の震央距離が 50km 以内の地震のみ比較をした。ただし、理論 P 波到達時には若干の誤差があることから、理論走時の前後 2 秒を 1 サンプルずつずらしながらコヒーレンスを計算し、その最大値を出力の結果とした。コヒーレンスは各成分、各観測点に対して求められる値である。そのため、まずそれぞれの観測点について、3 成分 (NS、EW、UD) の中央値を、観測点を代表するコヒーレンスとした。次に、各観測点で得られた観測点コヒーレンスの中央値を、イベント間を代表するコヒーレンスとして求めた。イベント間コヒーレンス値が 0.95 を超えた場合に、相似地震のペアと見なした。

これらの相似地震ペアからグループ分けをする際、各相似地震のペアを結んだダイアグラムは多角形とその対角線で結ばれた形になること (図 2.3 (a)) が望ましいが、場合によっては、一部が欠けた形になったり、多角形に別の地震が付随した形になったりする場合がある (図 2.3 (b)、(c))。多角形の一部が欠けるパターンは、観測点の移設等によって観測点の不連続が生じるために相似地震とする基準に満たない場合が含まれると考えられる。一方、多角形に別の地震が付随した形となるパターンには、相似地震として検出するパラメータが不適切であるために、異なるグループの地震が混在してしまったり、あるいは一つのグループの地震であるにもかかわらず相似地震ではないとみなしてしまったりする場合があると考えられる。このような場合、どこまでを一つのグループとして扱うかの基準が曖昧であり、不適切なグループが作られる可能性が高い。

そこで、これらの相似地震のペアを効率的にグループ化する方法として、クラスター分析を用いることにした。クラスター分析は、コヒーレンス値 (各地震間の類似度) を距離 (ユークリッド距離) に変換して、最もユークリッド距離に近いものを 1 つのグループ (クラスター) として次々に結合していくデータマイニング手法のひとつである。下記に簡単にクラスター分析の手法について記述する。

まず、コヒーレンスからユークリッド距離を求める。本稿では (3) 式を用いた。

$$d_{ij}^2 = 2(1 - Coh_{ij}), \quad (3)$$

ここで、 $d_{ij}$ 、 $Coh_{ij}$ はそれぞれ  $i$  番目と  $j$  番目の地震のユークリッド距離、イベント間コヒーレンスである。すなわち、コヒーレンス値が大きいほど、ユークリッド距離は 0 に近い値となる。なお、(3) 式は本来、相関係数からユークリッド距離を求める式なので、コヒーレンス値を相関係数と同等に扱っていることに注意が必要である。

次に、ユークリッド距離が最も近いクラスターを結合して、1 つのクラスターとする。ここで、クラスター a とクラスター b が結合されてクラスター c が作られるとする。 $d_{ab}$  を、クラスター a とクラスター b が結合される前の各クラスター間の距離としたとき、結合後のクラスター c とクラスター x ( $x \neq a, x \neq b$ ) との距離  $d_{xc}$  は (4) 式で表される。

$$d_{xc}^2 = ((n_x + n_a)d_{xa}^2 + (n_x + n_b)d_{xb}^2 - n_x d_{ab}^2) / (n_x + n_c), \quad (4)$$

ここで、 $n_a$  はクラスター a に含まれる地震数、 $n_b, n_c, n_x$  も同様である。なお、(4) 式はウォード法と呼ばれている。

上記手法を繰り返すことによって、ユークリッド距離が最も近いクラスターを結合していく。最終的にはクラスターが 1 つになるまで処理を行えるが、ユークリッド距離の最短が、ある閾値を越えた場合に処理を終了させることとした。調査におけるクラスターを結合するユークリッド距離の閾値は、(3) 式において  $Coh=0.95$  を代入した値をとることとした。すなわち、「2 つのクラスター間のコヒーレンス値」が 0.95 に満たないとき、その 2 つのクラスターは結合しない。

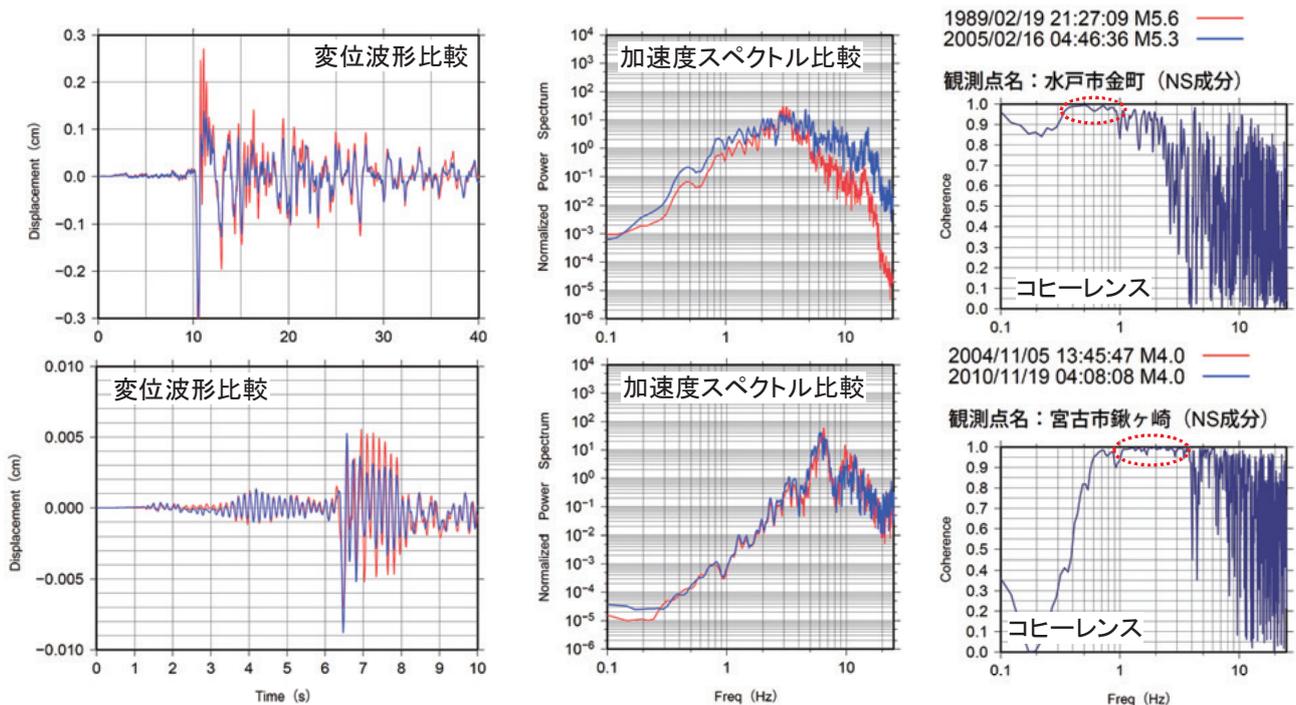


図 2.1 相似地震の波形例 (上段：茨城県南部の地震、下段：岩手県沖の地震)

赤色の破線で囲った帯域でコヒーレンスが 0.95 を超えている。上段の事例では 0.3~1Hz の帯域でコヒーレンスが高く、下段の事例では 1~4Hz の帯域でコヒーレンスが高い。

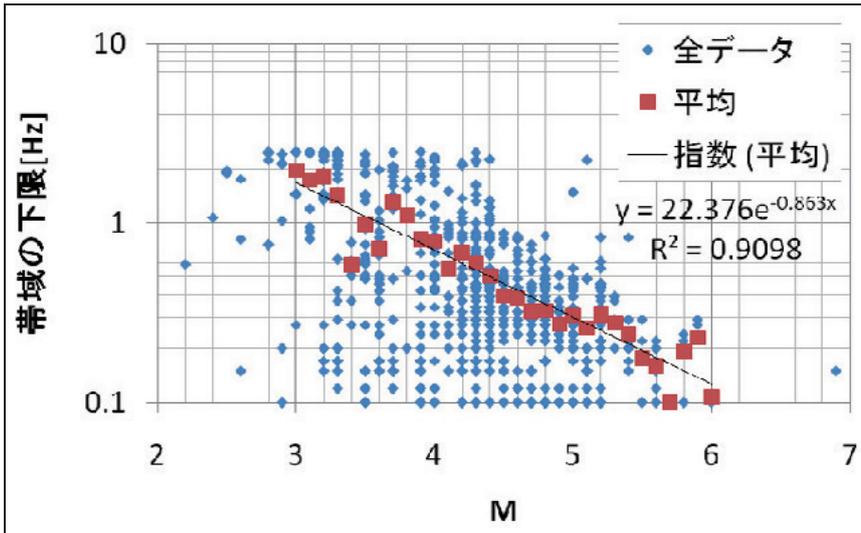


図 2.2 計算する帯域と M の関係。

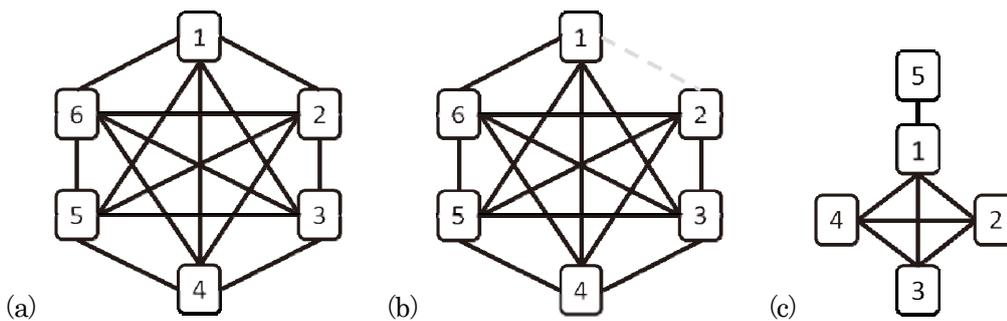


図 2.3 相似地震グループの模式図。

黒線は相似地震であることを示す。それぞれの数字は各地震に与えた便宜上の番号。

(a) 全てのペアで相似地震と見なせる場合、(b) 一部のペアで相似地震と見なせない場合 (1-2)、(c) 一部のペアでのみ相似地震と見なされる場合 (1-5)。

## 2.4 結果

今回抽出された相似地震は、138 グループ 326 イベントであった。そのうち、データの連続性が保証できない最大震度 3 未満の地震が含まれる 41 グループや、群発地震など時間的に近接して発生した 25 グループを除くと、72 グループが同一アスペリティの破壊による繰り返し地震の可能性のある相似地震として抽出された(Appendix 1)。震源カタログ上では規模に差があるグループ (ID70 等) も含むが、それらのコヒーレンスは高く相似地震のペアと見なされた。同一アスペリティの破壊による繰り返し地震であるとするれば、M と発生間隔から年平均すべり量を推定することができる。そこで、一元化震源の M を用いて、すべり量の推定を行った。地震のすべり量( $d$ )の推定には、モーメントマグニチュード( $M_w$ )と地震モーメント( $M_0$ )の Hanks and Kanamori (1979)による関係式

$$\log(M_0) = 1.5M_w + 16.1, \quad (5)$$

及び、地震モーメントとすべり量の関係式(Nadeau and Johnson, 1998)

$$\log(d) = -2.36 + 0.17 \log(M_0), \quad (6)$$

を用いた。ここで、 $M_w$  はモーメントマグニチュードであるが、近似的に一元化震源の M を代用して計算した。ま

た、得られた積算すべり量と経過時間から、最小二乗法を用いて、グループごとに年平均すべり量を見積もった。推定された年平均すべり量分布を図 2.4 と Appendix 2 に示す。また、相似地震の震央分布図及び地震活動経過図 (M-T 図) の一部拡大したものを図 2.5 に示す。

既知の中規模繰り返し地震 (例えば、Matsuzawa et al. (2002)、佐鯉・他(2012)など) についても、デジタル記録が現存している期間については相似地震として検出された。また、最大震度 5 強を含む、M4~M6 クラスの相似地震が日本全国にわたって検出された。

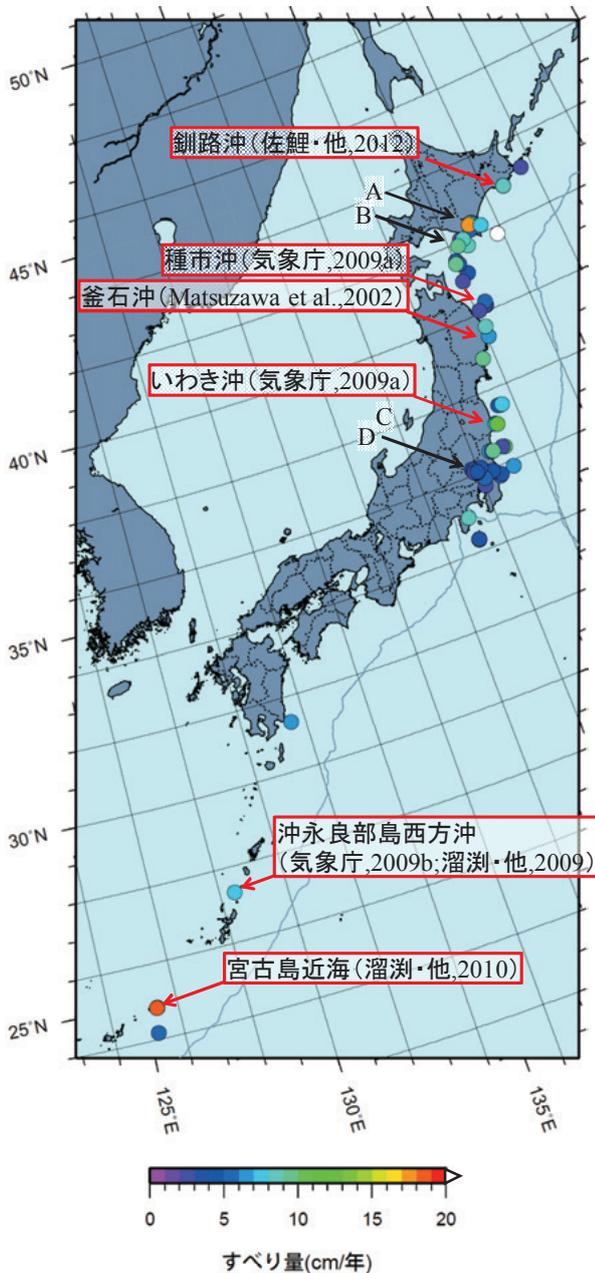


図 2.4 検出された相似地震の分布と推定された年平均すべり量。

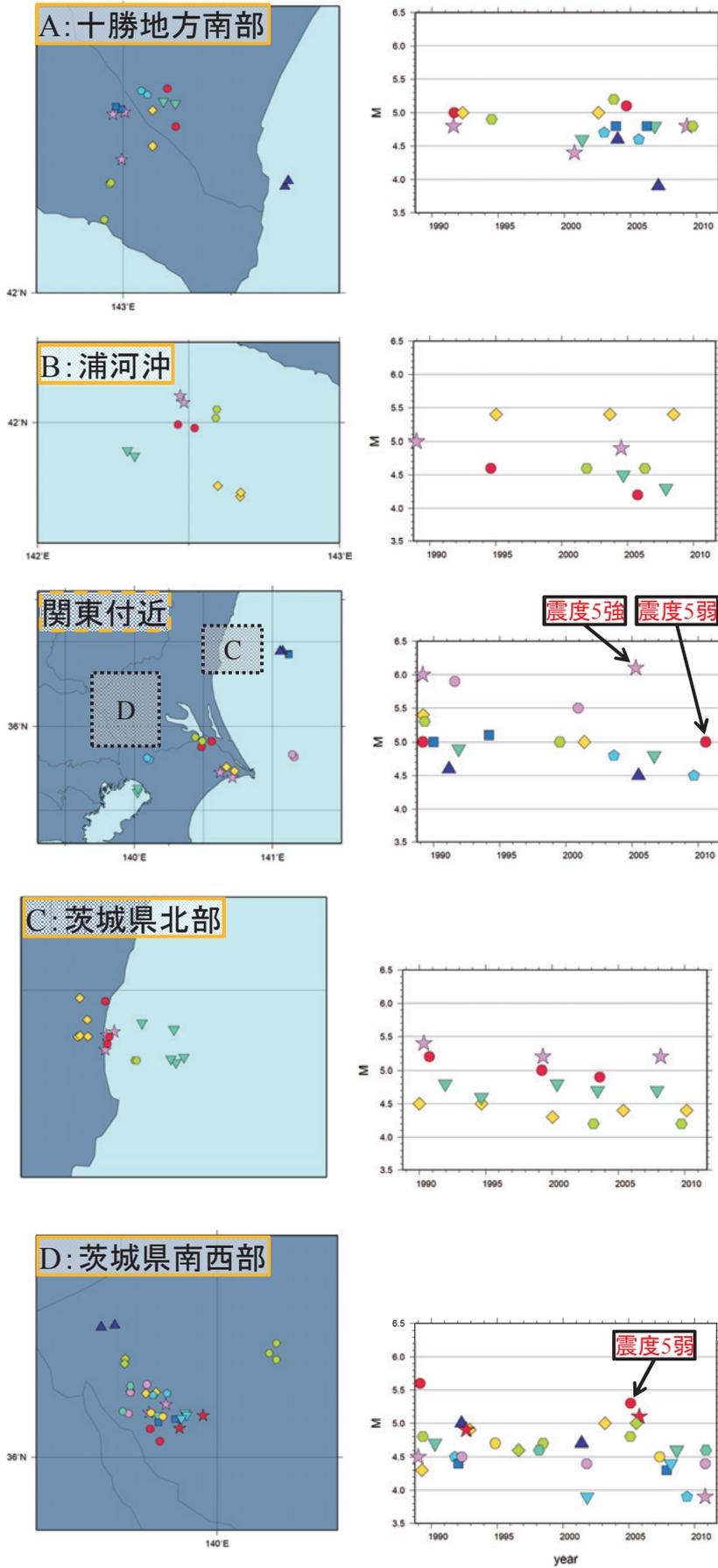


図 2.5 震央分布図および地震活動経過図 (同色, 同シンボルの地震がそれぞれ相似)。

## 2.5 議論

推定された相似地震グループの特徴は以下の通りである。ほとんどのグループは低角逆断層の発震機構で、北海道から関東の日本海溝沿いのプレート境界に分布している。特に、浦河沖や最大震度 5 弱の地震を含む千葉県北東部など、集中して相似地震活動が見られる地域がある。このように、全国を網羅的に探索したことによって、アスペリティの分布に偏りがあることが明らかになった。また、M から推定されるすべり量の平均は、プレートが沈み込む相対速度と概ね調和的である。したがって、プレート境界上にある同じアスペリティ（固着域）が繰り返し破壊されることによって、相似地震が発生しているものと解釈できる。プレート境界ではこれまで、①南海トラフ沿いなどの M8 クラスの繰り返し地震、②東北地方や関東地方では M2~4 クラスの相似地震に注目されていたが、本研究ではその中間の規模にあたる M4~6 クラスの中規模相似地震を多数検出することができた。

しかしながら、時間的に近接して発生した地震でも一部相似地震として抽出された例がある。これらの地震が同じアスペリティを繰り返し破壊する繰り返し地震であるかについては、震源再解析等、別の側面からのアプローチによって確認する必要がある。

今回、最大震度 5 強の地震を含むいくつかの相似地震が検出されたが、これらの地震は規模の小さな地震に比べ発生間隔が比較的長期間となる。1988 年 10 月以降のデジタル化された加速度波形だけでは期間、観測点数ともにサンプルが少なく、必ずしも信頼度の高い結果が得られるとは限らない。これまでに気象庁が抽出してきた上記の地震群（気象庁, 2010、中村・他, 2010）も今回抽出されているが、これら以外の地震についても個別に過去にさかのぼって波形の調査をすることができれば、M5~6 クラスの繰り返し地震の検出につながるものと期待される。

## 謝辞

本調査には、独立行政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、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データ及を利用して気象庁が文部科学省と協力して求めた一元化震源を使わせていただきました。

## 参考文献

- Hanks, T. C. and H. Kanamori, 1979: A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- 気象庁地震予知情報課・気象庁仙台管区气象台・気象庁気象研究所, 2009: 東北地方（福島県いわき沖・岩手県種市沖）の固有地震（周期的な相似地震）, *地震予知連絡会会報*, **82**, 84-90.
- 気象庁地震予知情報課, 2010: 中～大規模の繰り返し地震についての規則性と不規則性, *地震予知連絡会報*, **83**, 613-632.
- 気象庁沖縄气象台・気象庁地震予知情報課・気象庁気象研究所, 2009: 沖縄本島近海（国頭村東方沖・沖永良部島西方沖）の固有地震（繰り返し地震）, *地震予知連絡会会報*, **82**, 417-422.
- Matsuzawa, T., T. Igarashi, A. Hasegawa, 2002: Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1543, doi:10.1029/2001GL014632.
- Nadeau, R. M. 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.
- 中村雅基・今村翔太・溜渕功史・山田安之・高木康伸・石垣祐三・前田憲二・岡田正実, 2010: 全国で見つかったいくつかの固有地震的地震活動, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, SSS013-P05.

- 佐鯉央教・松山輝雄・平山達也・山崎一郎・山本剛靖・一柳昌義・高橋浩晃, 2012: 釧路沖の中規模繰り返し地震活動, *地震*, **65**, 151-161.
- 溜渕功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2009: 琉球弧で見つかったいくつかの固有地震的地震活動, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, S149-P005.
- 溜渕功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2010: 宮古島近海における固有地震活動, *地震*, **62**, 193-207.

Appendix 1 相似地震のグループ

ID	発生時刻	M	震央地名
1	1989/03/06 23:39	6.0	NEAR CHOSHI CITY
	2005/04/11 07:22	6.1	
2	1989/03/11 16:12	5.0	SOUTHERN IBARAKI PREF
	2010/07/23 06:06	5.0	NORTHERN CHIBA PREF
3	1989/03/18 01:37	5.4	NEAR CHOSHI CITY
	2001/05/25 15:55	5.0	
4	1989/04/26 02:18	5.3	SOUTHERN IBARAKI PREF
	1999/07/15 07:56	5.0	
5	1991/11/19 17:24	4.9	CENTRAL CHIBA PREF
	2006/08/31 17:18	4.8	
6	2003/08/18 18:59	4.8	NORTHERN CHIBA PREF
	2009/09/04 11:30	4.5	
7	1988/12/21 19:53	5.0	S OFF URAKAWA
	2004/07/04 21:31	4.9	
8	1990/01/07 22:28	5.3	E OFF AOMORI PREF
	2007/05/19 00:59	5.3	
9	1991/08/16 23:16	4.8	HIDAKA MOUNTAINS REGION
	2000/10/07 08:19	4.4	
	2009/04/05 17:00	4.8	
10	1991/09/02 12:03	5.0	HIDAKA MOUNTAINS REGION
	2004/09/10 13:22	5.1	
11	1992/04/20 05:36	5.0	HIDAKA MOUNTAINS REGION
	2002/07/28 20:31	5.0	
12	1994/07/02 07:43	4.9	HIDAKA REGION
	2003/09/28 07:23	5.2	
	2009/09/08 01:24	4.8	
13	1994/08/16 00:13	4.6	S OFF URAKAWA
	2005/10/03 16:26	4.2	
14	1995/01/11 16:48	5.4	S OFF URAKAWA
	2003/08/30 19:06	5.4	
	2008/06/26 08:37	5.4	
15	2001/05/08 06:27	4.6	HIDAKA MOUNTAINS REGION
	2006/11/01 23:21	4.8	
16	2003/01/07 03:27	4.7	HIDAKA MOUNTAINS REGION
	2005/08/16 08:29	4.6	
17	2003/11/24 18:48	4.8	HIDAKA MOUNTAINS REGION
	2006/03/25 07:16	4.8	
18	2001/11/21 19:25	4.6	S OFF URAKAWA
	2006/04/26 23:10	4.6	
19	1995/09/20 06:05	5.2	E OFF AOMORI PREF
	2008/08/09 00:53	5.4	
20	1992/11/30 09:20	4.9	OFF NEMURO PENINSULA
	2000/06/13 01:54	4.7	
21	1988/12/28 18:02	4.5	SW IBARAKI PREF
	2010/10/14 14:29	3.9	
22	1989/02/19 21:27	5.6	SW IBARAKI PREF
	2005/02/16 04:46	5.3	
23	1989/04/12 04:41	4.3	SW IBARAKI PREF
	1992/11/28 09:46	4.9	
	2003/03/13 12:12	5.0	
24	1989/05/09 02:51	4.8	SW IBARAKI PREF
	1998/06/24 23:52	4.7	
	2005/02/08 11:29	4.8	
25	1990/04/09 00:52	4.7	SW IBARAKI PREF
	2008/08/20 15:13	4.6	
26	1990/05/03 16:45	5.4	NORTHERN IBARAKI PREF
	1999/04/25 21:27	5.2	
	2008/03/08 01:54	5.2	

ID	発生時刻	M	震央地名
27	1990/10/06 23:33	5.2	NORTHERN IBARAKI PREF
	1999/03/26 08:31	5.0	
	2003/08/04 20:57	4.9	
28	1991/10/19 08:31	4.5	SW IBARAKI PREF
	2009/05/29 14:39	3.9	
29	1992/01/17 02:39	4.4	SW IBARAKI PREF
	2007/11/11 19:48	4.3	
30	1992/04/14 12:03	5.0	SW IBARAKI PREF
	2001/05/31 08:59	4.7	
31	1992/04/23 01:21	4.5	SW IBARAKI PREF
	2001/10/18 06:30	4.4	
	2010/10/24 13:50	4.4	
32	1992/08/27 13:09	4.9	SW IBARAKI PREF
	2005/10/16 16:05	5.1	
33	1994/11/04 19:06	4.7	SW IBARAKI PREF
	2007/05/08 21:01	4.5	
34	1996/08/16 01:03	4.6	SW IBARAKI PREF
	2005/07/28 19:15	5.0	
35	1998/03/08 13:46	4.6	SW IBARAKI PREF
	2010/11/05 19:14	4.6	
36	1990/01/01 18:03	4.5	NORTHERN IBARAKI PREF
	1994/09/06 19:00	4.5	
	2000/01/12 11:09	4.3	
	2005/05/14 00:14	4.4	
	2010/02/22 18:52	4.4	
37	2001/11/02 07:43	3.9	SW IBARAKI PREF
	2008/03/09 06:13	4.4	
38	2003/02/14 10:54	4.2	NORTHERN IBARAKI PREF
	2009/10/01 19:43	4.2	
39	1989/12/22 09:32	5.0	E OFF IBARAKI PREF
	1994/03/09 19:02	5.1	
40	1991/02/28 07:32	4.6	E OFF IBARAKI PREF
	2005/06/24 22:08	4.5	
41	1991/08/06 23:49	5.9	NEAR CHOSHI CITY
	2000/12/05 01:47	5.5	
42	1991/12/12 11:27	4.8	NORTHERN IBARAKI PREF
	1994/08/30 01:55	4.6	
	2000/05/16 19:40	4.8	
	2003/06/09 18:59	4.7	
	2007/11/30 18:36	4.7	
43	1993/07/17 23:39	4.9	E OFF FUKUSHIMA PREF
	2010/09/30 21:47	4.8	
44	1997/05/12 07:59	5.7	E OFF FUKUSHIMA PREF
	2005/10/22 22:12	5.6	
45	2005/09/11 05:06	4.5	E OFF FUKUSHIMA PREF
	2009/01/03 16:13	4.8	
46	1991/05/13 12:24	4.4	E OFF AOMORI PREF
	2002/09/03 07:24	4.3	
47	1992/07/12 20:08	6.3	E OFF AOMORI PREF
	2010/09/13 14:47	5.8	
48	2003/09/26 05:10	5.8	SE OFF TOKACHI
	2003/10/12 03:26	5.5	
	2005/01/31 18:39	5.4	
	2009/03/07 23:33	5.4	
49	2000/11/16 18:31	5.2	E OFF FUKUSHIMA PREF
	2010/06/01 13:49	4.8	
50	1989/11/06 17:56	5.5	NE OFF IWATE PREF
	2006/07/06 02:08	5.4	

ID	発生時刻	M	震央地名
51	1989/11/21 13:47	5.1	NE OFF IWATE PREF
	2009/04/25 22:54	5.0	
52	1995/01/07 11:36	6.2	NE OFF IWATE PREF
	2009/02/15 18:24	5.9	
53	1992/04/17 09:43	4.6	NE OFF IWATE PREF
	2005/07/30 17:49	4.4	
54	2001/11/13 16:45	4.8	E OFF IWATE PREF
	2008/01/11 08:00	4.7	
55	1993/06/03 03:19	4.5	E OFF IZU PENINSULA
	1996/10/16 22:58	4.3	
56	2003/07/18 12:32	4.6	NORTHERN MIYAGI PREF
	2006/08/17 12:45	4.3	
57	1991/12/17 13:23	5.1	OFF NEMURO PENINSULA
	2010/11/19 13:01	4.8	
58	1991/07/17 00:30	5.0	NEAR MIYAKOJIMA ISLAND
	1997/06/19 19:05	5.1	
	2002/06/05 02:20	5.2	
	2007/09/22 17:00	5.1	
59	2006/10/26 22:59	4.5	NEAR MIYAKOJIMA ISLAND
	2008/09/10 13:37	4.5	
	2010/05/11 02:14	4.4	
60	1994/04/30 12:28	6.0	SE OFF OSUMI PEN
	2005/05/31 11:04	5.8	
61	1990/10/01 04:05	6.1	NEAR MIYAKOJIMA ISLAND
	2009/08/05 09:17	6.5	
62	2001/05/07 23:32	5.1	NEAR OKINAWAJIMA ISLAND
	2007/08/09 00:19	5.1	
63	2001/09/06 10:40	4.3	E OFF FUKUSHIMA PREF
	2008/12/04 17:29	4.4	
64	2004/06/27 04:43	4.8	E OFF FUKUSHIMA PREF
	2010/02/21 09:56	4.8	
65	2004/01/13 05:12	4.6	SE OFF TOKACHI
	2007/02/06 02:44	3.9	
66	2004/09/05 03:25	4.5	S OFF URAKAWA
	2007/11/27 19:22	4.3	
67	2005/06/03 01:32	4.3	E OFF AOMORI PREF
	2008/05/14 03:00	4.2	
68	2005/05/19 01:33	4.8	OFF NEMURO PENINSULA
	2010/04/09 03:41	4.8	
69	2004/11/05 13:45	4.0	E OFF IWATE PREF
	2007/05/29 07:36	4.0	
	2010/11/19 04:08	4.0	
70	2000/08/03 18:04	5.0	NEAR NIIJIMA ISLAND
	2006/07/09 18:11	2.9	
71	2000/08/19 09:55	2.8	NEAR NIIJIMA ISLAND
	2005/07/12 07:34	2.6	
72	2000/09/24 23:14	1.9	NEAR NIIJIMA ISLAND
	2002/03/30 07:12	2.3	
	2005/07/16 13:48	2.5	

Appendix 2 各相似地震グループの発生間隔と推定年平均すべり量

ID	回数	平均M	震度		発生間隔(年)			年平均すべり量 (cm/年)	最近発生した地震			
			最大	最小	平均	最短	最長		発生時間	緯度	経度	深さ
1	2	6.1	5+	5	16.1			5.32	2005/04/11	35.73	140.62	51.5
2	2	5.0	5-	3	21.4			2.10	2010/07/23	35.88	140.49	35.0
3	2	5.2	3	3	12.2			3.68	2001/05/25	35.76	140.67	47.2
4	2	5.2	3	3	10.2			4.39	1999/07/15	35.94	140.44	49.6
5	2	4.9	4	4	14.8			2.70	2006/08/31	35.63	140.02	75.6
6	2	4.7	3	3	6.1			5.53	2009/09/04	35.81	140.09	67.2
7	2	5.0	3	3	15.5			2.72	2004/07/04	42.05	142.48	61.5
8	2	5.3	4	3	17.4			3.08	2007/05/19	41.56	142.05	67.5
9	3	4.7	3	3	8.8	8.5	9.1	4.04	2009/04/05	42.32	143.00	54.4
10	2	5.1	3	3	13.0			3.65	2004/09/10	42.36	143.10	51.3
11	2	5.0	3	3	10.3			4.37	2002/07/28	42.32	143.07	51.7
12	3	5.0	4	4	7.6	6.0	9.2	5.91	2009/09/08	42.19	142.97	51.1
13	2	4.4	3	3	11.1			2.52	2005/10/03	41.99	142.52	64.9
14	3	5.4	4	3	6.7	4.8	8.6	8.22	2008/06/26	41.83	142.67	55.0
15	2	4.7	4	3	5.5			7.28	2006/11/01	42.33	143.12	48.5
16	2	4.7	3	3	2.6			13.62	2005/08/16	42.35	143.04	50.8
17	2	4.8	3	3	2.3			17.11	2006/03/25	42.32	142.98	51.0
18	2	4.6	3	3	4.4			8.01	2006/04/26	42.03	142.59	60.7
19	2	5.3	3	3	12.9			4.40	2008/08/09	41.14	142.28	51.5
20	2	4.8	4	3	7.5			4.99	2000/06/13	42.91	144.72	58.9
21	2	4.2	3	3	21.8			1.08	2010/10/14	36.06	139.89	44.6
22	2	5.5	5-	4	16.0			3.35	2005/02/16	36.04	139.89	46.2
23	3	4.7	4	3	7.0	3.6	10.3	5.85	2003/03/13	36.09	139.86	47.3
24	3	4.8	4	3	7.9	6.6	9.1	4.87	2005/02/08	36.14	140.09	67.0
25	2	4.7	4	3	18.4			1.93	2008/08/20	36.06	139.90	45.1
26	3	5.3	4	4	8.9	8.9	9.0	5.65	2008/03/08	36.45	140.61	57.0
27	3	5.0	4	4	6.4	4.4	8.5	6.59	2003/08/04	36.44	140.61	58.1
28	2	4.2	4	3	17.6			1.34	2009/05/29	36.08	139.89	47.3
29	2	4.4	3	3	15.8			1.88	2007/11/11	36.05	139.90	44.1
30	2	4.9	4	4	9.1			4.12	2001/05/31	36.18	139.81	55.6
31	3	4.4	3	3	9.3	9.0	9.5	3.41	2010/10/24	36.06	139.85	44.6
32	2	5.0	4	3	13.1			3.62	2005/10/16	36.04	139.94	47.1
33	2	4.6	3	3	12.5			2.68	2007/05/08	36.06	139.89	46.3
34	2	4.8	4	3	9.0			5.02	2005/07/28	36.13	139.85	51.1
35	2	4.6	4	4	12.7			2.80	2010/11/05	36.06	139.84	45.1
36	5	4.4	3	3	5.0	4.7	5.4	6.15	2010/02/22	36.45	140.58	56.5
37	2	4.2	3	3	6.4			4.97	2008/03/09	36.06	139.95	47.1
38	2	4.2	3	3	6.6			4.23	2009/10/01	36.43	140.65	54.4
39	2	5.1	3	3	4.2			11.30	1994/03/09	36.43	141.12	39.8
40	2	4.6	3	3	14.3			2.34	2005/06/24	36.44	141.05	46.4
41	2	5.7	4	3	9.3			6.45	2000/12/05	35.83	141.14	34.9
42	5	4.7	4	3	4.0	2.7	5.7	9.23	2007/11/30	36.43	140.70	52.9
43	2	4.9	3	3	17.2			2.32	2010/09/30	37.08	141.12	51.4
44	2	5.7	4	4	8.5			7.56	2005/10/22	37.08	141.12	52.0
45	2	4.7	4	3	3.3			12.05	2009/01/03	37.06	141.17	50.5
46	2	4.4	3	3	11.3			2.63	2002/09/03	40.98	142.00	57.7
47	2	6.1	4	4	18.2			3.95	2010/09/13	41.46	142.12	63.2
48	4	5.5	3	3	1.8	0.0	4.1	25.61	2009/03/07	41.80	143.82	39.1
49	2	5.0	4	3	9.5			4.18	2010/06/01	37.51	141.54	45.4
50	2	5.5	3	3	16.7			3.41	2006/07/06	40.15	142.43	35.8
51	2	5.1	3	3	19.4			2.31	2009/04/25	40.16	142.38	36.7
52	2	6.1	4	3	14.1			5.40	2009/02/15	40.25	142.42	36.0
53	2	4.5	3	3	13.3			2.38	2005/07/30	40.08	142.12	47.5
54	2	4.8	3	3	6.2			6.11	2008/01/11	39.34	142.07	47.2
55	2	4.4	4	4	3.4			8.82	1996/10/16	34.98	139.12	4.1
56	2	4.5	3	3	3.1			9.65	2006/08/17	38.84	141.59	74.7
57	2	5.0	4	3	18.9			2.11	2010/11/19	43.17	145.60	53.3
58	4	5.1	4	3	5.4	5.0	5.9	9.09	2007/09/22	24.84	125.40	48.2
59	3	4.5	3	3	1.8	1.7	1.9	18.35	2010/05/11	24.82	125.38	49.6
60	2	5.9	4	4	11.1			6.48	2005/05/31	31.31	131.55	28.6
61	2	6.3	4	3	18.9			5.75	2009/08/05	24.18	125.26	22.0
62	2	5.1	4	4	6.3			7.61	2007/08/09	27.31	128.44	44.4
63	2	4.4	3	3	7.2			4.35	2008/12/04	37.51	141.44	48.8
64	2	4.8	3	3	5.7			7.06	2010/02/21	37.51	141.57	44.8
65	2	4.3	3	3	3.1			7.67	2007/02/06	42.20	143.38	40.9
66	2	4.4	3	3	3.2			9.23	2007/11/27	41.92	142.32	72.5
67	2	4.3	3	3	3.0			9.52	2008/05/14	41.49	142.00	62.7
68	2	4.8	4	4	4.9			8.16	2010/04/09	42.92	144.72	57.3
69	3	4.0	3	3	3.0	2.6	3.5	8.20	2010/11/19	39.63	142.10	48.3
70	2	4.0	5-	4	5.9			2.21	2006/07/09	34.33	139.17	5.8
71	2	2.7	4	4	4.9			2.24	2005/07/12	34.32	139.18	5.6
72	3	2.2	3	3	2.4	1.5	3.3	3.91	2005/07/16	34.33	139.18	3.7

### 第3章 規則的な発生間隔に基づく相似地震の抽出

鎌谷紀子(気象大学校)・勝間田明男(気象研究所地震火山研究部)

所属は平成24年度当時

#### 3.1 はじめに

繰り返し相似地震は、「ほぼ同じ大きさ、ほぼ同じ繰り返し間隔で、ほぼ同じ領域を破壊する地震」とされている。これらは、発生時期や規模をある程度予測できる地震であるため、その検出は地震防災に大いに役立つと考えられる。このような相似地震検出の鍵となるのは、時を経て発生する地震の時間的規則性・空間的近接性・規模および地震波形の相似性である。

M5前後の中規模の相似地震については、最大震度が4以上になる場合もあるなど社会的に影響があるにも関わらず、検出例が少ない。それは、繰り返し間隔がある程度長いこと、新しい地震データ(デジタルデータ)のみで簡便に確認することができず、古い地震資料にまで遡る必要があることなどが理由である。本章では全国を対象とした中規模相似地震の検出を試みる。さらに、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震は中規模の相似地震が比較的多く発生している東北地方太平洋側で発生した地震であり、その前後の固有地震の発生状況の変化があるかどうかは非常に関心が持たれることから、この問題について調査を行いその結果を示す。

#### 3.2 全国を対象とした中規模相似地震の検出

解析は、日本周辺で1923年8月1日～2010年6月30日に発生したM4.5以上の地震について行った。まず、気象庁一元化震源の1つ1つの地震について、緯度経度の差6分以内、深さの差20km以内、マグニチュードの差0.4以内の地震グループを取り出すことにより、空間的および規模的に近接しているものを抽出した。その後、発生時期順に並べて時間的に隣り合う3つのイベントを順次取り出し、1番目と2番目及び2番目と3番目の地震の発生間隔の差が5年以内のものを抽出することにより、時間的規則性を持つ単独クラスターを検出した。群発地震や余震を除くため、地震発生間隔が2年以内のものは除いた。検出された相似地震候補の各領域の地震活動は、気象庁一元化震源に戻って震央分布図および地震活動経過図で活動状況を確認した。検出された相似地震候補グループ内の各地震について、気象庁の87型電磁式強震計(1988年10月～1997年3月)および95型計測震度計(1996年10月～)の地震波形を取得し、相関係数とコヒーレンスを算出した。

上記の手法のうち、時間的規則性・空間的近接性・規模に基づき検出された相似地震候補グループは36個(図3.1)であり、それらの中で、地震波形があり相関係数とコヒーレンスが計算できる地震グループは16個であった。これらの地震グループにおいて、「1観測点以上のどれか1成分以上で、相関係数が0.8以上かつコヒーレンスが0.8以上」もしくは「1観測点以上のどれか1成分以上でコヒーレンスが0.9以上」というものを調べたところ、厚岸沖M4.8・日高沖M4.8・浦河沖M5.4・種市沖M5.9・釜石沖M4.7・いわき沖M5.6・日立M5.2・つくばM5.3・銚子沖M5.0・沖永良部島西方沖AグループM5.1・宮古島南方沖M6.5の11個が該当した(Mは最新活動の気象庁マグニチュード)。本報告の第2章と第5章で記載されているように、厚岸沖M4.8は佐鯉・他(2010)による相関係数の報告があり、種市沖M5.9といわき沖M5.6に関しては長谷川・他(2005)による指摘と気象庁地震予知情報課・他(2009)による解析結果がある。また、釜石沖M4.7はMatsuzawa *et al.* (2002)による解析結果があり、つくばM5.3は気象庁地震予知情報課(2010)、沖永良部島西方沖AグループM5.1は溜渕・他(2009)、宮古島南方沖M6.5は中村・他(2010)の報告がある。以下では、これらのように詳細な解析がなされていない、日高沖M4.8・浦河沖M5.4・日立M5.2・銚子沖M5.0について述べる(図3.2)。

日高沖M4.8の最新活動は2009/12/30であり、その震源位置は北緯41度50.3分、東経142度12.2分、深さ72kmで最大震

度3である。この地震グループ内の、波形が得られなかった地震も相似地震であると仮定すると、平均活動間隔は6.5年となる。また、岡田(2004, 2009)および岡田・他(2007)による小標本論とベイズ統計対数正規分布モデルを使用して、2011/1/1を基準とした今後10年以内の発生確率を算出したところ92~99%となり、次の地震が70%の確率で発生すると予測される期間は2014/9~2018/10となった。同様に、浦河沖M5.4の最新活動は2008/6/26、北緯41度49.5分、東経142度40.4分、深さ55kmで最大震度4、平均活動間隔は7.5年、10年確率84~86%、70%期間は2012/9~2020/10となった。日立M5.2の最新活動は2008/8/22、北緯36度26.5分、東経140度36.9分、深さ56kmで最大震度4、平均活動間隔は7.9年、10年確率84~87%、70%期間は2013/1~2021/4であり、銚子沖M5.0の最新活動は2001/4/17、北緯35度37.0分、東経141度5.3分、深さは38kmで最大震度3、平均活動間隔は11.2年、10年確率84~94%、70%期間は基準日~2016/12と算出された。これらの活動について、表3.1に最新活動での最大震度と地震発生予測を示した。

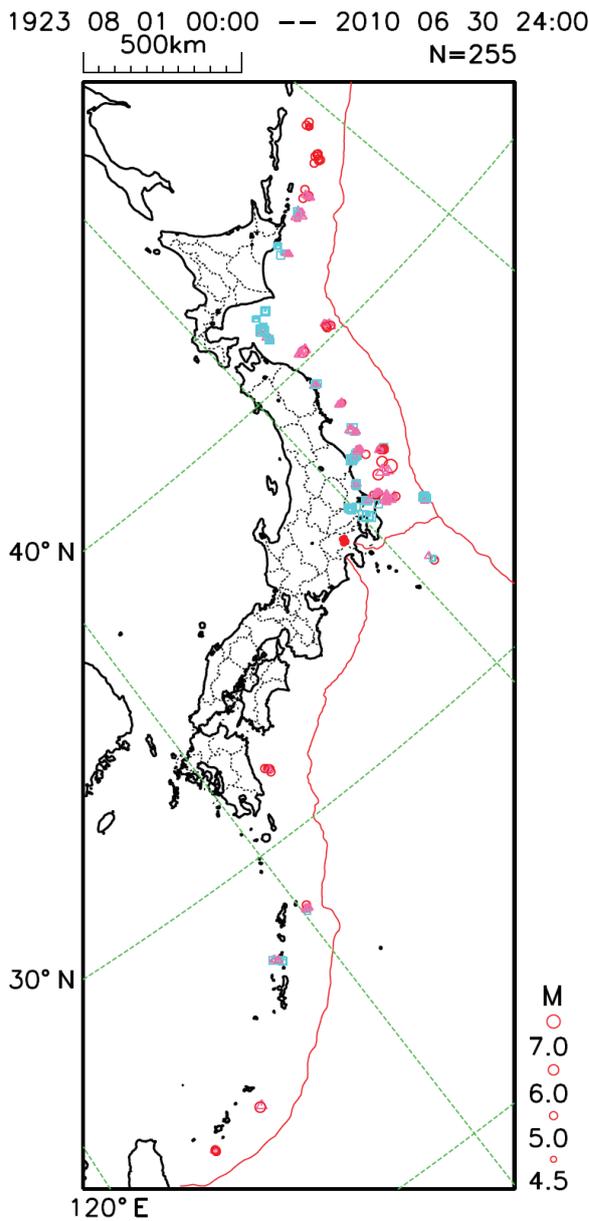


図 3.1 時間的規則性・空間的近接性・規模に基づき検出された相似地震候補。震央プロットの色は震源深さの違いを表す(赤:30kmまで、桃:50kmまで、水色:100kmまで)。

表 3.1 新たに見出された相似地震グループ。最新活動での最大震度、今後 10 年以内に発生する確率および次の地震が 70%の確率で発生すると予測される期間を示す（確率算出の基準日は 2011/1/1）。

固有地震グループと最大震度	10 年確率	70%期間
日高沖 M4.8 最大震度 3	92-99%	2014/9-2018/10
浦河沖 M5.4 最大震度 4	84-86%	2012/9-2020/10
日立 M5.2 最大震度 4	84-87%	2013/1-2021/4
銚子沖 M5.0 最大震度 3	84-94%	基準日-2016/16

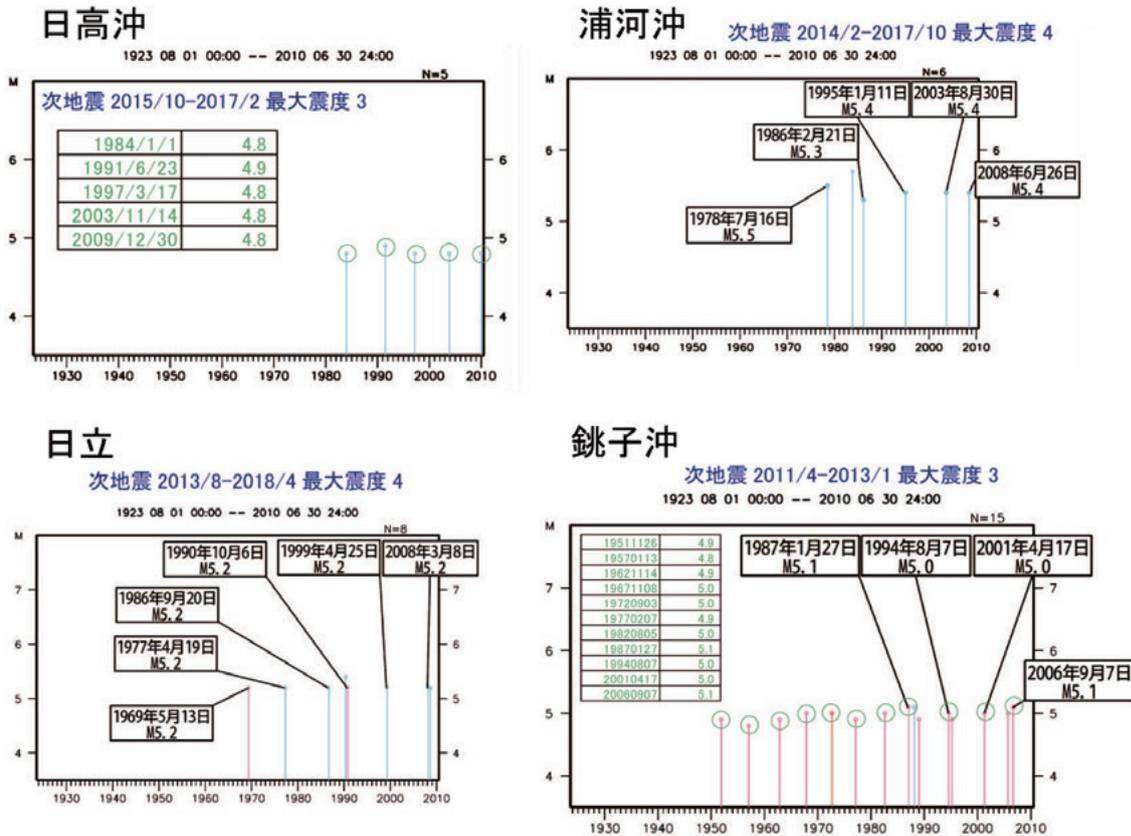


図 3.2 新たに見出された相似地震グループの発生時系列。相似地震とみられる地震には、吹き出しあるいは○をつけている。色は震源深さの違いを表す(図 3.1 と同様)

### 3.3 平成 23 年東北地方太平洋沖地震後の相似地震の活動

平成23年東北地方太平洋沖地震後の相似地震の発生状況について調査した。まず、前節と同様の方法で繰り返し地震活動グループを抽出する。なお、平成23年東北地方太平洋沖地震発生後、気象庁は震源決定する余震に下限（マグニチュード3）を設けているが、ここで対象としているマグニチュード5クラスの地震については震源決定対象である。但し、本震発生直後に関しては、規模が大きくても震源決定できていない地震がある可能性は排除しきれない。

東北地方太平洋沖地震発生前の1つ1つの地震について、緯度経度の差6分以内、深さの差20km以内、マグニチュー

ドの差0.4以内の地震グループを取り出した後、グループ内で時間的に隣り合う3つのイベントを順次取り出し、1番目と2番目及び2番目と3番目の地震の発生間隔の差が5年以内のものを抽出する。群発地震や余震を除くため、地震発生間隔が2年以内のものは除く。検出された繰り返し地震候補の各領域の地震活動は、気象庁一元化震源に戻って震央分布図およびMT図で活動状況を確認する。こうして検出した繰り返し地震活動グループのうち東日本のものについて、東北地方太平洋沖地震発生後から2012年5月12日までの間に新たな繰り返し地震候補が発生しているかどうか、気象庁一元化震源においてグループ抽出基準に準じて同規模・近接地域発生地震を調べた。その後、繰り返し地震候補について計測震度計の地震波形を取得し、グループ内の他地震との相関係数およびコヒーレンスを算出した。地震波形が取得できたもののうち、「1観測点以上のどれか1成分以上で、相関係数が0.8以上かつコヒーレンスが0.8以上」もしくは「1観測点以上のどれか1成分以上でコヒーレンスが0.9以上」というものを繰り返し相似地震が発生しているとみなした。これらの条件を満たしていても、震源決定精度が向上した近年発生した地震同士の震源位置がかなり離れていたり、相関係数やコヒーレンスが数字上高くても、振動時間中の最初と終わりの部分を取り上げて計算された値であったりする場合もあることから、見た目地震波形が似ていないとみなせるものは排除した。

図3.3は、検出された相似地震活動グループ（グループ内の複数以上の地震波形が存在せず、相関係数およびコヒーレンスが計算できないものも含む）を☆で示したものである。図3.4は各グループのMT図であり、地震波形により相関係数およびコヒーレンスから相似地震と確認できたものについて吹き出しを緑で囲ってある。

東北地方太平洋沖地震の震源域にあるか、震源域に極めて近いと考えられる相似地震グループである相馬沖(図3.3及び図3.4において番号12)、南相馬沖(図3.3及び図3.4において番号13)、いわき東方沖(図3.3及び図3.4において番号15)では、東北地方太平洋沖地震後に相似地震が発生していない。これらのグループでは前回の発生から時間があまり経過していないものの東北地方太平洋沖地震の余震域に含まれており、本震発生時にこれらの相似地震の震源域も同時に滑り歪が解消した可能性も高いと考えられる。その周囲の、東北地方太平洋沖地震の震源域に近い相似地震活動グループでは、最新活動が発生しているものが多い。これらは本来の発生時期よりも早いタイミングで発生しているものが多く、東北地方太平洋沖地震に誘発されたと考えられる。一方、厚岸沖や日高沖など、震源域から離れている地震グループでは相似地震の候補が発生していない。また、日立M4.8(図3.3及び図3.4において番号18)や種市沖A(図3.3及び図3.4において番号9)など、震源域に近くても本来の発生時期まで時間的余裕があるグループは、東北地方太平洋沖地震直後には最新活動を発生させていなかったが、半年～1年ほど経過した後に最新活動を発生させている。東北地方太平洋沖地震直後に、日立M4.8や種市沖Aの地震が発生したにも関わらず検知されていないという可能性を排除することはできないものの、これらの地震が発生していないとするならば、上記の事柄より、大地震に誘発される相似地震は、大地震の震源域に近い、あるいは歪が十分蓄積されている必要があると考えられる。

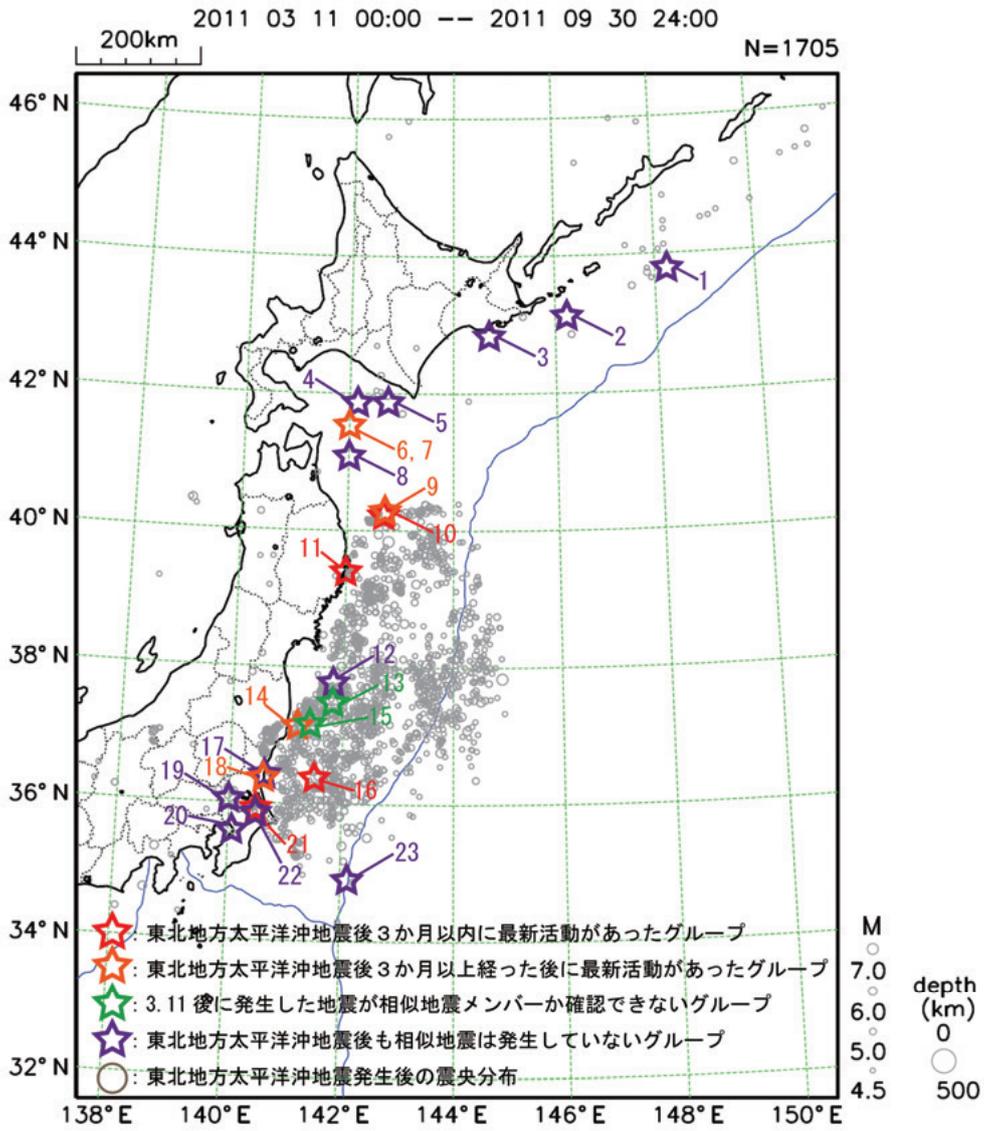
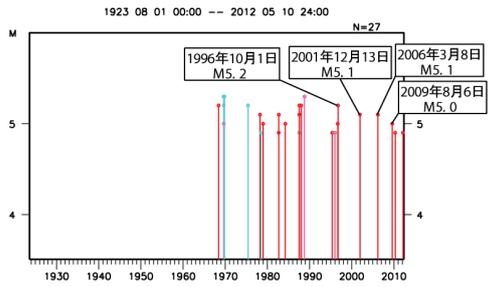


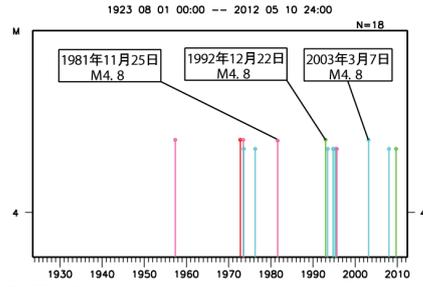
図 3.3 平成 23 年東北地方太平洋沖地震後の相似地震活動の分布図。各グループの番号は図 3.4 と共通である。

### 1. 択捉南方沖



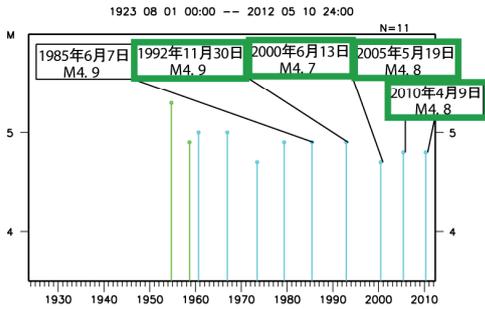
強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。3.11後に地震は発生していないと思われる。

### 2. 歯舞沖 M4.8

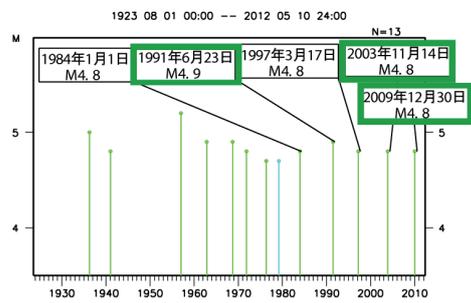


強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。3.11後に地震は発生していないと思われる。

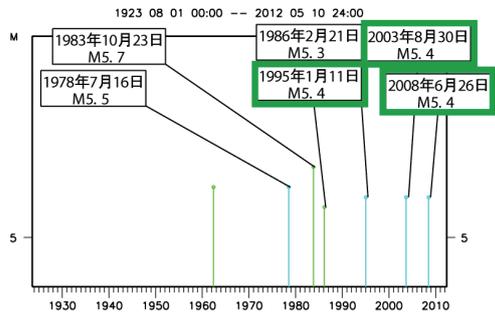
### 3. 厚岸沖



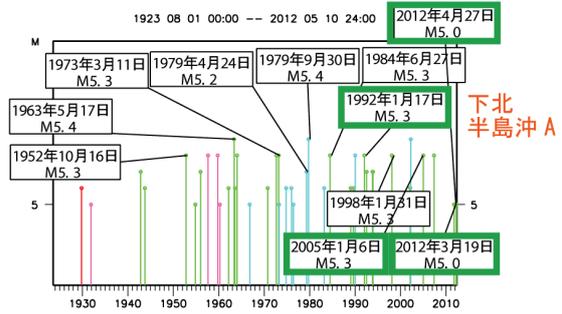
### 4. 日高沖



### 5. 浦河沖

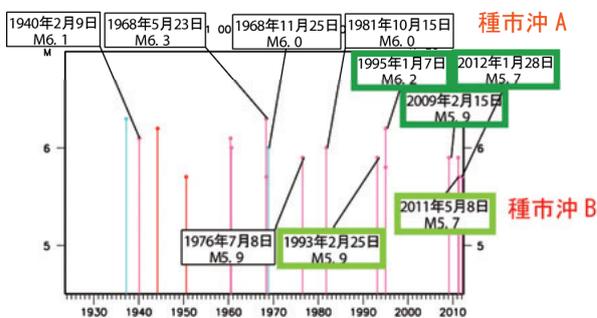


### 6. 7. 下北半島東方沖 A&B



下北半島Bは、2002年4月4日 M5.4、2007年5月19日 M5.3、2011年10月7日 M5.0。

### 9. 10. 種市沖 A&種市沖 B



上吹き出しは種市沖A、下は種市沖B。

### 11. 釜石沖

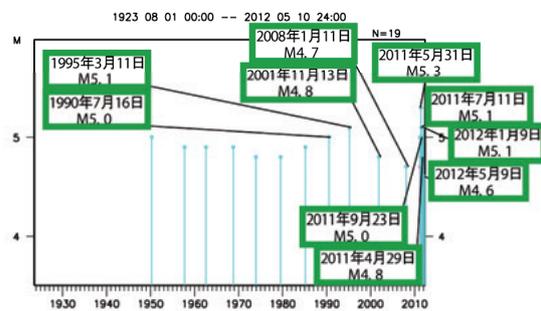
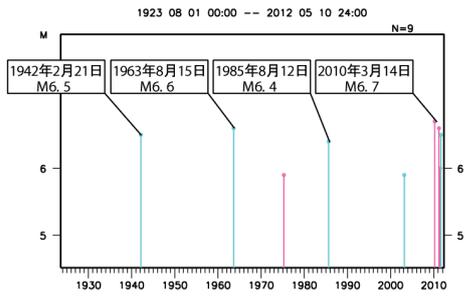


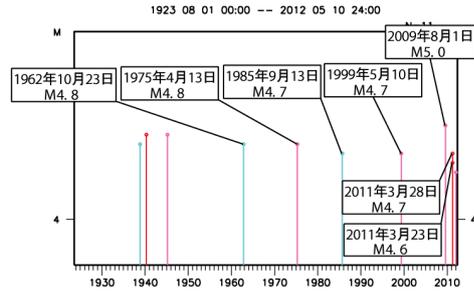
図3.4 平成23年東北地方太平洋沖地震前後の相似地震活動の時系列。黒枠吹き出しは震源カタログ中の地震のうち繰り返して発生しているとみられる地震、緑・黄緑枠はそれらのうちで地震波形の相似性が確認できた地震であることを表す。

## 12. 相馬沖



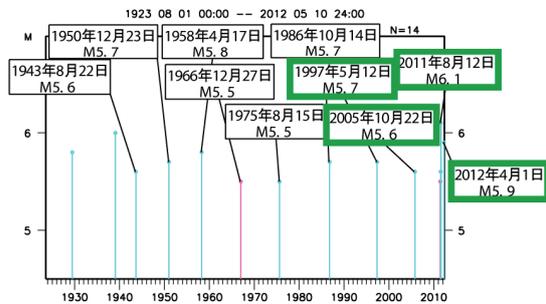
2011年に発生しているものはいずれも2010年のものと比べて相関&コヒーレンスの値が低く、固有地震グループのメンバーではない。

## 13. 南相馬沖

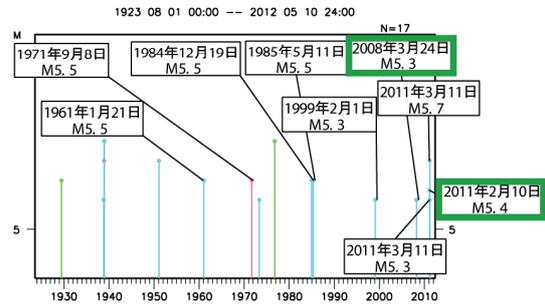


強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。3.11後に地震は発生している。

## 14. いわき沖

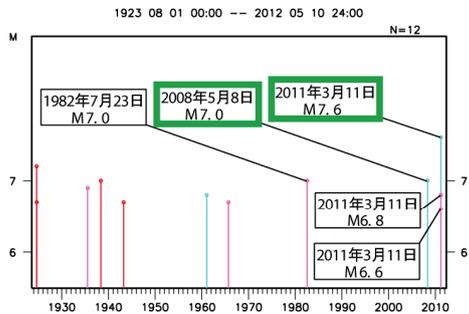


## 15. いわき東方沖



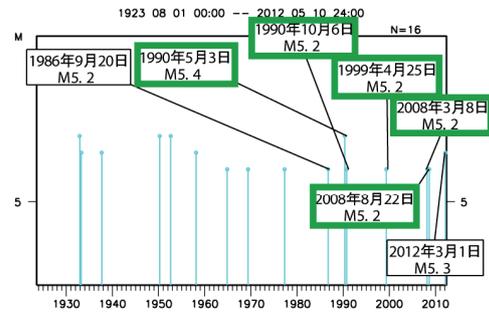
3.11後のイベントは強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。

## 16. 茨城沖



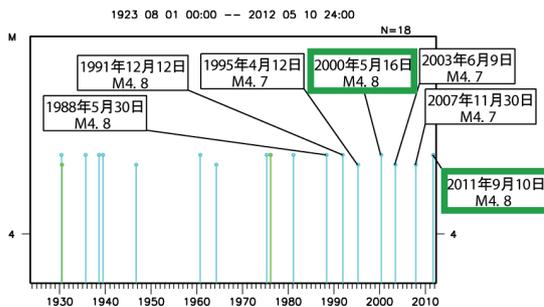
2011年3月11日 M7.6は、2008年イベントに比べて規模が大きい。波形はコヒーレンスのみ高い。2008年の震源域を含む広い領域の滑り？

## 17. 日立 M5.2



2012年3月1日に発生しているものは相関&コヒーレンスの値があまり高くなく、固有地震グループのメンバーではないと考えられる。

## 18. 日立 M4.8



## 19. つくば

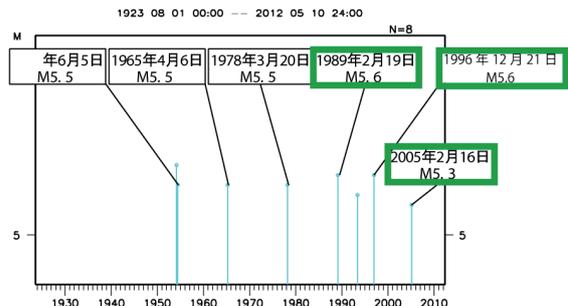
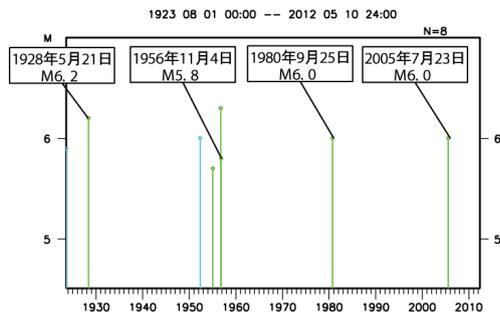


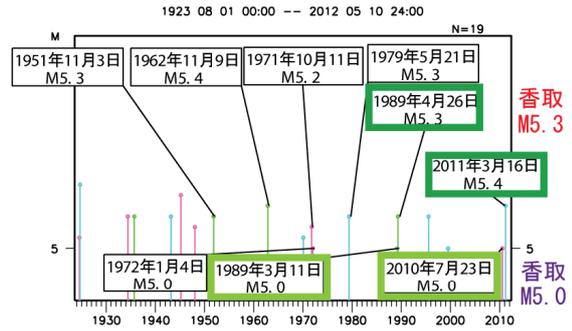
図 3.4 (続き)

## 20. 千葉県北西部



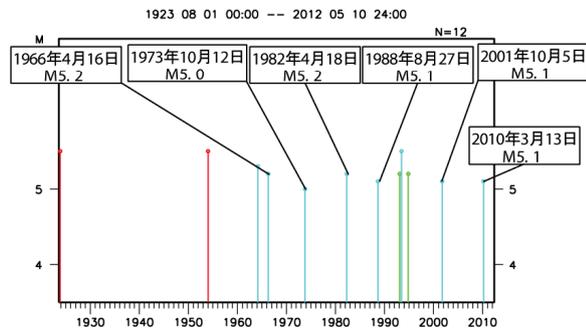
強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。

## 21. 22. 香取 M5.3 & 香取 M5.0



2011年3月16日に香取 M5.3 グループの固有地震が発生した。香取 M5.0 グループは最新活動が2010年7月と最近のせいか、3.11後に地震が発生してはいない。

## 23. 千葉県東方沖



強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。3.11後に地震は発生していない。

図 3.4 (続き)

**謝辞**：本研究には、独立行政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、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データ、および平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震大学合同観測グループの臨時観測点（大和、滝沢村青少年交流の家、栗原瀬峰、一関花泉、宮古茂市、金華山臨時）のデータを利用して気象庁が求めた一元化震源を使わせていただきました。関係の皆様方に深く感謝申し上げます。気象庁地震火山部地震津波監視課の浦谷純平様には、強震波形データの入手にご協力いただきました。また、気象庁地震火山部地震予知情報課の溜瀨功史様、中村雅基様他、資料班の皆様への解析データを参照させていただきました。ここに記して深く感謝いたします。

### 参考文献

長谷川安秀・橋本徹夫・草野富士雄・吉川一光・大西星司, 2005: 東北地方における中規模地震の固有地震的地震活動の検出, *地震*, 58, 67-70.

気象庁地震予知情報課・気象庁仙台管区气象台・気象庁気象研究所, 2009: 東北地方（福島県いわき沖・岩手県種市

- 沖)の固有地震(周期的な相似地震), *地震予知連絡会会報*, **82**, 84-90.
- 気象庁地震予知情報課, 2010: 中～大規模の繰り返し地震についての規則性と不規則性, *地震予知連絡会報*, **83**, 613-632.
- Matsuzawa, T., T. Igarashi, A. Hasegawa, 2002: Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1543, doi:10.1029/2001GL014632.
- 中村雅基・今村 翔太・溜渕功史・山田安之・高木康伸・石垣祐三・前田憲二・岡田正実, 2010: 全国で見つかったいくつかの固有地震的地震活動, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, SSS013-P05.
- 岡田正実, 2004: 対数正規分布モデルによる地震長期発生確率の計算—宮城県沖地震の再検討—, *地震 2*, **56**, 327-336.
- 岡田正実・高山博之・弘瀬冬樹・内田直希, 2007: 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 2*, **60**, 85-100.
- 岡田正実, 2009: 繰り返し地震および余震の確率予測, *地震 2*, **61**, 特集号, S143-S153.
- 佐鯉央教・松山輝雄・平山達也・山崎一郎・山本剛靖・一柳昌義・高橋浩晃, 2010: 釧路沖の中規模繰り返し地震活動, *日本地震学会講演予稿集秋季大会*, D11-06.
- 溜渕功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2009: 琉球弧で見つかったいくつかの固有地震的地震活動, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, S149-P005.
- 溜渕功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2010: 宮古島近海における固有地震活動, *地震 2*, **62**, 193-207.

## 第 4 章 相似地震の予測実験

本項の論文は、出版社及び著者からの転載許可を受けて掲載している。

(Okada, M., N. Uchida, and S. Aoki, 2012: Statistical forecasts and tests for small interplate repeating earthquakes along the Japan Trench, *Earth, Planets and Space*, **64**, 703-715)

## Statistical forecasts and tests for small interplate repeating earthquakes along the Japan Trench

Masami Okada<sup>1</sup>, Naoki Uchida<sup>2</sup>, and Shigeki Aoki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Meteorological Research Institute, Nagamine 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan*

<sup>2</sup>*Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, Aza-Aoba 6-6, Aramaki, Aoba, Sendai 980-8578, Japan*

(Received July 2, 2010; Revised February 2, 2011; Accepted February 17, 2011; Online published xxxx xx, 2011)

Earthquake predictability is a fundamental problem of seismology. Using a sophisticated model, a Bayesian approach with lognormal distribution on the renewal process, we theoretically formulated a method to calculate the conditional probability of a forthcoming recurrent event and forecast the probabilities of small interplate repeating earthquakes along the Japan Trench. The numbers of forecast sequences for 12 months were 93 for July 2006 to June 2007, 127 for 2008, 145 for 2009, and 163 for 2010. Forecasts except for 2006–07 were posted on a web site for impartial testing. Consistencies of the probabilities with catalog data of two early experiments were so good that they were statistically accepted. However, the 2009 forecasts were rejected by the statistical tests, mainly due to a large slow slip event on the plate boundary triggered by two events with  $M$  7.0 and  $M$  6.9. All 365 forecasts of the three experiments were statistically accepted by consistency tests. Comparison tests and the relative/receiver operating characteristic confirm that our model has significantly higher performance in probabilistic forecast than the exponential distribution model on the Poisson process. Therefore, we conclude that the occurrence of microrepeaters is statistically dependent on elapsed time since the last event and is not random in time.

**Key words:** Earthquake predictability, small repeating earthquake, probabilistic forecast, test of forecast, interplate earthquake.

### 1. Introduction

Earthquake periodicity and seismic gaps have been used for long-term forecasts of large earthquakes in various regions (e.g., Imamura, 1928; Sykes, 1971; Kelleher, 1972; Kelleher *et al.*, 1973; McCann *et al.*, 1979; Working Group on California Earthquake Probabilities (WGCEP), 1988, 1990, 1995, 2003; Nishenko, 1991; Earthquake Research Committee (ERC), 2001; Matsuzawa *et al.*, 2002; Field, 2007; Field *et al.*, 2009). McCann *et al.* (1979) gave forecasts for specified ranked categories of earthquake potentials for most of the Pacific Rim. Nishenko (1991) presented the first global probabilities of either large or great interplate earthquakes in 97 segments of simple plate boundaries around the circum-Pacific region during the next 5, 10, and 20 years, in terms of conditional probability based on elapsed time since the last event and mean recurrence time with a lognormal distribution model. Rigorous tests of Nishenko's forecasts were conducted by Kagan and Jackson (1995) for 5 years and by Rong *et al.* (2003) for 10 years by using the seismic catalogs of the Preliminary Determination of Epicenters (PDE) of the U.S. Geological Survey and the Harvard Centroid Moment Tensor (CMT). They statistically rejected Nishenko's forecasts with the number test

(N-test), the likelihood test (L-test), and the likelihood ratio test (R-test). The predicted events in both periods were too numerous to result from random variation. As reasons for failure, they suggested biasing of the estimated earthquake rate and excluding effects of open intervals before the first event and after the last event.

Davis *et al.* (1989) indicated that parameter uncertainties affect seismic potential estimates strongly for some distributions (e.g., the lognormal) and weakly for the Poisson distribution. The method used by Nishenko is too crude to reflect the parameter estimation errors derived from the small number of samples on the probabilities. Official forecasts by WGCEP and ERC have not yet been tested statistically, as the forecast periods are not yet over.

In this paper, we study the predictability of recurrent earthquakes, applying sophisticated methods based on the Bayesian approach or small sample theory with lognormal distribution. The small repeating earthquakes (SREs) used in this study occur on the plate boundary in the same condition for large interplate earthquakes. The SRE data is much more suitable than large recurrent event data for experiments of prospective probabilistic forecasts for three reasons: (1) events are objectively qualified and accurate in time; (2) the recurrence intervals are short; and (3) the catalog of events is compiled based on a stable observation network and contains many sequences to test forecasts statistically.

More than 1000 characteristic sequences or clusters of

Copyright © The Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS); The Seismological Society of Japan; The Volcanological Society of Japan; The Geodetic Society of Japan; The Japanese Society for Planetary Sciences; TERRAPUB.

Table 1. Probability distributions.

Name & Symbol	Probability density function	Remarks
normal $N(\mu, \sigma^2)$	$f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$	$\mu$ : mean $\sigma^2$ : variance
log-normal $LN(\mu, \sigma^2)$	$f_{LN}(t) = \frac{1}{t\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$	mean = $\exp(\mu + \sigma^2/2)$
t $t(m)$	$f_t(x) = \frac{\Gamma((m+1)/2)}{\sqrt{m\pi}\Gamma(m/2)} (1+x^2/m)^{-\frac{m+1}{2}}$	$m$ : degree of freedom
exponential $e(\sigma)$	$f_e(t) = \frac{1}{\sigma} \exp(-\frac{t}{\sigma})$	$\sigma$ : mean
inverse gamma $\Gamma_R(\phi, \zeta)$	$f_R(y) = \frac{1}{\zeta\Gamma(\phi)} \left(\frac{\zeta}{y}\right)^{\phi+1} \exp\left(-\frac{\zeta}{y}\right)$	$\phi$ : shape $\zeta$ : scale mean = $\zeta/(\phi-1)$
Brownian passage time $BPT(\mu, \alpha)$	$f_{BPT}(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu\alpha^2 t}\right\}$	mean = $\mu$ , variance = $(\mu\alpha)^2$

SREs with nearly identical waveform have been found near the east coast of NE Japan since 1984 (36.5–41.5 deg. N) or 1993 (41.5–43.5 deg. N and 34.5–36.5 deg. N) (Igarashi *et al.*, 2003; Uchida *et al.*, 2003). These repeaters in a cluster are assumed to occur on the same small asperity surrounded by an aseismic creeping zone on the plate boundary. The forecast bin specifying an event may be smaller in volume of location and in focal mechanism, but the magnitude range for a sequence may be larger than those for Regional Earthquake Likelihood Models (RELM) by Schorlemmer *et al.* (2007) and for the Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP, Jordan, 2006). We estimated the probabilities for repeaters in the forecast period of a year using a Bayesian model with lognormal distribution. There were 93 sequences for July 2006 to June 2007, 127 for 2008, 145 for 2009, and 163 for 2010 that were selected for the forecast. The repeaters occurred from 1993 until the forecast time were used to calculate the forecast probability. The forecast sequences consisted of five events or more. With the exception of the results of the first experiment (2006–2007), those probabilities were posted on a web site for impartial forecast and testing.

Comparing forecasts with a seismic catalog on repeater data, we tested probabilities with not only N- and L-tests but also with the test of Brier score (Brier, 1950). We pay attention to whether the next qualifying event in the sequence will occur in the forecast period or not, regardless the event timing within the forecast period. Alternative forecasts were computed with the lognormal distribution model based on the small sample theory and the exponential distribution model based on the Poisson process. The three models were compared using the R-test and the test of difference in Brier scores.

## 2. Theory

We assume that  $(n+1)$  events of a sequence have occurred, separated by  $n$  time intervals  $T_i$ , and that the time elapsed since the last event is  $T_p$ . The unknown recurrence interval from the last event to the upcoming one is denoted as  $T_{n+1}$ .

In the lognormal distribution model on a renewal process, the common logarithms of recurrence interval,  $X_i = \ln(T_i)$ ,

follow a normal distribution,  $N(\mu, \sigma^2)$ . Symbols and probability density functions (PDFs) of some distributions are listed in Table 1. The sample mean,  $\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i$ , and sample variance,  $s^2 = (1/n) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ , are determined from observed data at the forecasting time ( $T_p$ ).

If population parameters are known, it is very easy to calculate the probability,  $P_q(T_p, T_p + \Delta T)$ , for the event in the forecast period with the conditional probability,

$$P_q(T_p, T_p + \Delta T) = \frac{F_N(x_f; \mu, \sigma^2) - F_N(x_p; \mu, \sigma^2)}{1 - F_N(x_p; \mu, \sigma^2)}, \quad (1)$$

where  $F_N$  is the cumulative distribution function (CDF) of a normal distribution,  $\Delta T$  is the length of the forecast period,  $x_p = \ln(T_p)$ , and  $x_f = \ln(T_p + \Delta T)$ . However, it is actually very difficult to find the accurate parameters for a population from small samples, and it is better to regard them as unknown parameters.

### 2.1 Bayesian approach

Maximum likelihood estimates may be biased when there are few samples and a wide range of values are consistent with the observation (Davis *et al.*, 1989). We will not determine the parameters with the maximum likelihood method or the least square method. Instead, we directly estimate the conditional probabilities,  $P_q$ , in Eq. (1) by the Bayesian approach.

The likelihood function including the open-ended interval is given as

$$L(\mu, \sigma^2) = (1 - F_N(x_p; \mu, \sigma^2)) \prod_{i=1}^n f_N(x_i; \mu, \sigma^2). \quad (2)$$

According to Bayes' theorem, the PDF for parameters,  $h(\mu, \sigma^2)$ , is given as

$$h(\mu, \sigma^2 | x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\pi(\mu, \sigma^2) L(\mu, \sigma^2)}{\int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \pi(\mu, \sigma^2) L(\mu, \sigma^2) d\mu d\sigma^2}, \quad (3)$$

where  $\pi(\mu, \sigma^2)$  is the prior distribution for parameters. Here,  $P_q$  is not a specified value but a random variable. The CDF for  $P_q$  is given as

$$F_p(p; T, \Delta T) = \iint_S h(\mu, \sigma^2) d\mu d\sigma^2,$$

$$S = \left\{ (\mu, \sigma^2) \left| \frac{F_N(x_f; \mu, \sigma^2) - F_N(x_p; \mu, \sigma^2)}{1 - F_N(x_p; \mu, \sigma^2)} \leq p \right. \right\},$$

Where  $0 \leq p \leq 1$ . Integration of this formula is remarkably complicated; thus, we use the average of conditional probability,  $\bar{P}_q$ , as the probability of a qualifying event, written as

$$\begin{aligned} \bar{P}_q &= \int_{\sigma^2=0}^{\infty} \int_{\mu=-\infty}^{\infty} \frac{F_N(x_f; \mu, \sigma^2) - F_N(x_p; \mu, \sigma^2)}{1 - F_N(x_p; \mu, \sigma^2)} \\ &\quad \times h(\mu, \sigma^2) d\mu d\sigma^2 \\ &= \frac{\int_{u=x_p}^{x_f} \int_{\sigma^2=0}^{\infty} \int_{\mu=-\infty}^{\infty} W(\mu, \sigma^2, u) d\mu d\sigma^2 du}{\int_{u=x_p}^{\infty} \int_{\sigma^2=0}^{\infty} \int_{\mu=-\infty}^{\infty} W(\mu, \sigma^2, u) d\mu d\sigma^2 du}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$W = \pi(\mu, \sigma^2) f_N(u; \mu, \sigma^2) \left( \prod_{i=1}^n f_N(x_i; \mu, \sigma^2) \right). \quad (5)$$

Let us consider here the prior distribution. We adopted the uniform prior distribution for parameter  $\mu$  since it varies in an infinite interval,  $-\infty < \mu < \infty$ . For  $\sigma^2$  varying in a semi-infinite interval,  $0 < \sigma^2 < \infty$ , two types were studied. One is a natural conjugate prior distribution, inverse gamma,  $\Gamma_R(\phi, \zeta)$ , and the other is the non-informative prior distribution, inverse of  $\sigma^2$ , proposed by Jeffreys (1961). Parameter  $\phi$  indicates shape and  $\zeta$  indicates scale for inverse gamma.

By using an inverse gamma prior distribution, Eq. (5) is written as

$$\begin{aligned} W &= \frac{\zeta^\phi}{\sqrt{n+1} (\sqrt{2\pi})^n} \frac{\Gamma\left(\frac{n+2\phi}{2}\right)}{\Gamma(\phi)} \times J^{-\frac{n+2\phi}{2}} \\ &\quad \times f_R\left(\sigma^2; \frac{n+2\phi}{2}, J\right) \times f_N\left(\mu; \frac{u+n\bar{x}}{n+1}, \frac{\sigma^2}{n+1}\right) \\ J &= \frac{n(u-\bar{x})^2 + (n+1)(n\sigma^2 + 2\zeta)}{2(n+1)}. \end{aligned}$$

As terms of  $f_N$  and  $f_R$  are PDFs of the normal and inverse gamma distributions, they become unity with integration of  $\mu$  and  $\sigma^2$  over the whole interval. The probability,  $\bar{P}_q$ , in Eq. (4) is finally given as

$$\begin{aligned} \bar{P}_q &= \frac{F_t(z_f; n+2\phi-1) - F_t(z_p; n+2\phi-1)}{1 - F_t(z_p; n+2\phi-1)} \\ z_p &= \sqrt{n(n+2\phi-1)/(n+1)(n\sigma^2 + 2\zeta)} (x_p - \bar{x}) \quad (6) \\ z_f &= \sqrt{n(n+2\phi-1)/(n+1)(n\sigma^2 + 2\zeta)} (x_f - \bar{x}). \end{aligned}$$

This formula means that the variable  $\sqrt{n(n+2\phi-1)/(n+1)(n\sigma^2 + 2\zeta)}(X - \bar{x})$  follows  $t$ -distribution with  $n+2\phi-1$  degrees of freedom, and conditional probability is given by Eq. (1) for this variable.

For the prior distribution of  $(\sigma^2)^{-m}$  for  $\sigma^2$ ,  $\bar{P}_q$  is calculated as

$$\bar{P}_q = \frac{F_t(z_f; n+2m-3) - F_t(z_p; n+2m-3)}{1 - F_t(z_p; n+2m-3)}$$

$$\begin{aligned} z_p &= \sqrt{(n+2m-3)/(n+1)} (x_p - \bar{x}) / s \quad (7) \\ z_f &= \sqrt{(n+2m-3)/(n+1)} (x_f - \bar{x}) / s. \end{aligned}$$

Jeffreys' non-informative prior distribution corresponds to  $m=1$  (Jeffreys, 1961), and we expect that the variable of  $\sqrt{(n-1)/(n+1)}(X_{n+1} - \bar{x})/s$  obeys  $t$ -distribution with  $n-1$  degrees of freedom.

## 2.2 Small sample theory

Suppose  $n+1$  random variables  $X_i = \ln(T_i)$ ,  $i = 1, \dots, n+1$  obey a normal distribution  $N(\mu, \sigma^2)$  and take the variables for mean and variance of  $n$  variables,  $\bar{X} = (1/n) \sum_{i=1}^n X_i$  and  $S^2 = (1/n) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ . The following properties are well-known in statistics (e.g., Wilks, 1962).

- (1) The variable  $D = X_{n+1} - \bar{X}$  follows  $N(0, (n+1)\sigma^2/n)$ .
- (2) The variable  $nS^2/\sigma^2$  follows a chi-squared distribution with  $n-1$  degrees of freedom.
- (3) The variable  $\{D/\sqrt{(n+1)\sigma^2/n}\}/\sqrt{nS^2/(n-1)\sigma^2} = \sqrt{(n-1)/(n+1)}(X_{n+1} - \bar{X})/S$  follows a  $t$ -distribution with  $n-1$  degrees of freedom.

At forecasting time, we have  $n$  data, and the mean and variance of samples,  $\bar{x}$  and  $s^2$ , corresponding to  $\bar{X}$  and  $S^2$ , can be calculated. Thus, we naturally expect that the variable  $\sqrt{(n-1)/(n+1)}(X_{n+1} - \bar{x})/s$  follows a  $t$ -distribution with  $n-1$  degrees of freedom. Therefore, the probability based on the small sample theory (exact sampling theory) is calculated by the Bayesian approach with Jeffreys' non-informative prior distribution.

## 2.3 Exponential distribution model

If the event occurs uniformly and randomly, the probability of an event does not depend on the elapsed time since the last event, and the recurrence interval between successive events is distributed exponentially. Conditional probability is given by  $P_q(T_p, T_p + \Delta T) = 1 - \exp(-\Delta T/\bar{t})$ , where  $\bar{t}$  is the average of observed recurrence intervals.

## 3. Small Repeating Earthquakes

It has been pointed out that SREs are caused by the repeated rupture of small asperities within the creeping zone of a fault plane (e.g., Nadeau *et al.*, 1995; Igarashi *et al.*, 2003; Uchida *et al.*, 2003). We use the waveform similarity of earthquakes with a magnitude of 2.5 or larger to identify repeaters in the subduction zone between the Japan Trench and the east coast of NE Japan. Maximum magnitude is practically about 5 mainly owing to the employed waveform similarity threshold that is applicable for small earthquakes. The SRE was objectively selected by the threshold of waveform coherence in a 40-second waveform that contains both  $P$  and  $S$  phases. Details of the methods for identifying SRE and for compiling the SRE catalog are described by Uchida *et al.* (2009).

SREs are more suitable for the prospective forecasts than previous studies (e.g., Nishenko, 1991), because the events are objectively identified, the occurrence times are accurate, the recurrence intervals are much shorter, and many sequences have been found. We applied three criteria for SRE sequences for forecasting: (1) five or more events occurred from 1993 until the forecast time, (2) the averaged

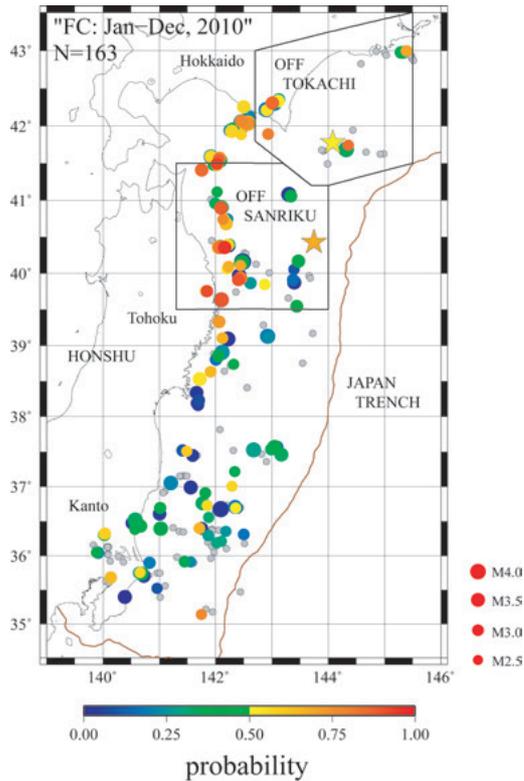


Fig. 1. Distribution of the SRE clusters. The colored symbols indicate sequences of the 2010 forecast, but the gray ones are not used, due to the criteria discussed in the main text. The area of “OFF TOKACHI” denotes the possible aftershock area for the 2003 Off Tokachi earthquake (September 26, 2003,  $M$  8.0), and that of “OFF SANRIKU” denotes the possible aftershock area for the 1994 Off Sanriku earthquake (December 28, 1994,  $M$  7.6). The stars denote the epicenters of the main shocks.

magnitude is 2.75 or larger and less than 4.5, and (3) the number of possible aftershocks of the 2003 Off Tokachi earthquake (September 26, 2003;  $M$  8.0) and the 1994 Off Sanriku earthquake (December 28, 1994;  $M$  7.6) are less than one third of the events in the sequence. Aftershock activity includes many SREs (Uchida *et al.*, 2003, 2009; Chen *et al.*, 2010), but the physical conditions for the earthquake occurrence for the period are thought to be complicated and unstable due to the existence of afterslip or stress interactions. We regarded SREs as possible aftershocks that occurred in the areas of “Off Tokachi” in the period from the main shock through March 31, 2005 and “Off Sanriku” in the period from the main shock through January 31, 1996 (Fig. 1). These three criteria were chosen considering the stability of seismic observation, the lower magnitude limit of clear waveform records for offshore events, and the influence of nearby earthquakes that cause changes in the loading rate. In this study, small repeaters are thought to occur by the same process as large interplate earthquakes. Exclusion of aftershocks can exclude repeaters under the strong effect of nearby much larger earthquake that is not expected for large earthquakes.

Ninety-three sequences satisfied the above criteria for the forecast on July 1, 2006; 127 for that on January 1, 2008; 145 for that on January 1, 2009; and 163 for that

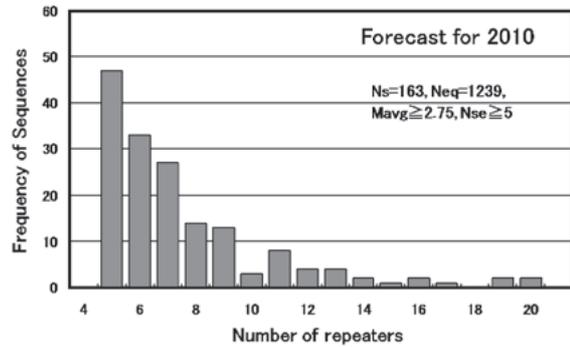


Fig. 2. Frequency distribution of the number of repeaters in each sequence used in the 2010 forecasts.  $N_s$  and  $N_{eq}$  are the numbers of all forecast sequences and all SREs in the forecast sequences.  $M_{avg}$  is the sequence averaged magnitude and  $N_{se}$  is the number of SREs in a forecast sequence.

on January 1, 2010. Figure 1 presents the distribution of SRE clusters having four or more events from 1993 to 2009 with an average of  $M$  2.5 or larger. Clusters with colored symbols (except small gray symbols) were used for the 2010 forecast. The SREs are distributed in the subduction zone off Kanto to Hokkaido. The averaged magnitudes of forecast sequences are between 2.75 and 4.26. Figure 2 presents the frequency distribution of the number of events in each sequence for the 2010 forecast. Two-thirds of the 163 sequences have seven SREs or less, which is fairly small for statistical estimation of probability. The range of averaged sequence recurrence interval is from 0.83 to 3.84 years and the coefficient of variations, ratio of standard deviation to averaged interval, is 0.47 in average and less than 0.5 for about 60 percents of sequences for 2010.

#### 4. Forecasts and Observations

We tried to estimate the probabilities of SRE sequences on the plate boundary along the Japan Trench. Their locations are indicated in Fig. 1. The fundamental values of forecasts (e.g., the number of sequences) are listed in Table 2. The prospective forecast probabilities for one year were posted on the web site<sup>1</sup> in July of 2008, April of 2009, and March of 2010 for impartial testing.

We used the following three models for calculating probabilities and statistical testing.

**LN-Bayes:** A Bayesian approach for lognormal distribution of the recurrence interval with an inverse gamma prior distribution. The probability forecast by this model is given by Eq. (6). The parameters of inverse gamma were  $\phi = 2.5$  and  $\zeta = 0.44$  (Okada *et al.*, 2007) for the two earlier trials. They were changed to  $\phi = 1.5$  and  $\zeta = 0.15$  for the two later trials, based on the R-test result for the 2008 probabilities calculated by LN-Bayes and by LN-SST. Determination of these parameters is briefly explained in Appendix.

**LN-SST:** Lognormal distribution model based on the small sample theory. The probability forecast by this model

<sup>1</sup><http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/~uchida/kenkyuu/souji-yosoku/souji-kakuritsu-e.html>

Table 2. Fundamental values of forecasts and consistency scores of the probabilities for 12 months.

		Forecast period				Total
		2006.7–07.6	2008.1–08.12	2009.1–09.12	2010.1–10.12	
Forecast sequences		93	127	145	163	528
Qualifying events		51	56	70		177
Analysis for forecast						
Data period		1993/1–06/6	1993/1–07/12	1993/1–08/12	1993/1–09/12	
SREs		671	912	1075	1239	
Model		Score/Verification				
LN-Bayes	$E(N)$	41.4 UD	56.1 AC	61.2 AC		158.7 UD
	MLL	-0.519 AC	-0.531 AC	-0.647 RJ		-0.574 AC
	BS	0.177 AC	0.178 AC	0.228 RJ		0.197 AC
LN-SST	$E(N)$	39.4 RJ	53.7 AC	58.0 UD		151.1 RJ
	MLL	-0.526 AC	-0.497 AC	-0.678 RJ		-0.576 UD
	BS	0.182 AC	0.167 AC	0.235 RJ		0.198 RJ
Exp	$E(N)$	39.7 UD	49.9 AC	55.4 RJ		145.0 RJ
	MLL	-0.669 AC	-0.638 AC	-0.696 UD		-0.669 AC
	BS	0.238 AC	0.223 AC	0.251 UD		0.238 AC

Remarks:  $E(N)$  is the expectation of sequences with qualifying events, MLL is the mean log-likelihood score, and BS is the Brier score. Here, AC indicates that the score is accepted by N-, L-, or BS-test at a significance level of 0.95; RJ indicates that it is rejected at the 0.99 level; and UD indicates that it is rejected at the 0.95 level but accepted at the 0.99 level.

is given by Eq. (7). This is an alternative model to determine consistency with LN-Bayes.

**EXP:** Exponential distribution model based on the Poisson process. The probability of an event is independent of the elapsed time since the last event. This is the alternative model to compare with the two time-dependent models, LN-Bayes and LN-SST.

The prospective probabilities for SREs in 2008 are indicated in Fig. 3(a), and qualifying events are indicated in Fig. 3(b). The red circles denote earthquake occurrence, and the blue circles represent the non-occurrence of earthquake. There are many sequences with high probability near the east coast of northern Honshu, Japan, and most of them included qualifying events during the forecast period. There is a gap of SRE sequences southeast off Hokkaido, since we removed the clusters in which one-third or more events are regarded as possible aftershock of the 2003 Off Tokachi earthquake and the 1994 Off Sanriku earthquake, as explained earlier.

For 2009 forecasts (Fig. 4), as many as 23 qualifying repeaters occurred to the south of 38°N, which is remarkably more than the number expected from prospective probabilities (17.1) for the region. In this area, the rate of SRE sequences with low probability increased in the 2010 forecasts (Fig. 1), because probability just after an earthquake in a sequence is low for the lognormal distribution based on the renewal process.

## 5. Forecast Verification

Three tests (N-, L-, and R-tests) were applied by Kagan and Jackson (1995) and Rong *et al.* (2003) to the probabilistic forecasts by Nishenko (1991). Those tests are a fundamental procedure to evaluate the rates of earthquakes forecast by various models submitted to the Regional Earthquake Likelihood Models Center (Schorlemmer *et al.*, 2007). Moreover, we use different verification methods presented by Jolliffe and Stephenson (2003) for the probabilistic forecasts of binary events. In the following sections, we assume that events are independent from seismic activities in other clusters.

### 5.1 Reliability and resolution

We examined the reliability and resolution of the forecasts by the LN-Bayes, LN-SST, and EXP models. Those forecasts are divided into ten classes depending on the probability. Figure 5 depicts resulting frequencies and probabilities that are summed for the three 12-month forecasts from 2006 to 2009. The total expectation of events (gray bars) and the observed number of qualifying SREs (black bars) are comparable for the three models.

The reliability (Rel) and resolution (Res) are defined as follows (Toth *et al.*, 2003);

$$\text{Rel} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \{n_k (\hat{p}_k - \bar{c}_k)^2\}$$

$$\text{Res} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \{n_k (\hat{c}_k - \bar{c})^2\},$$

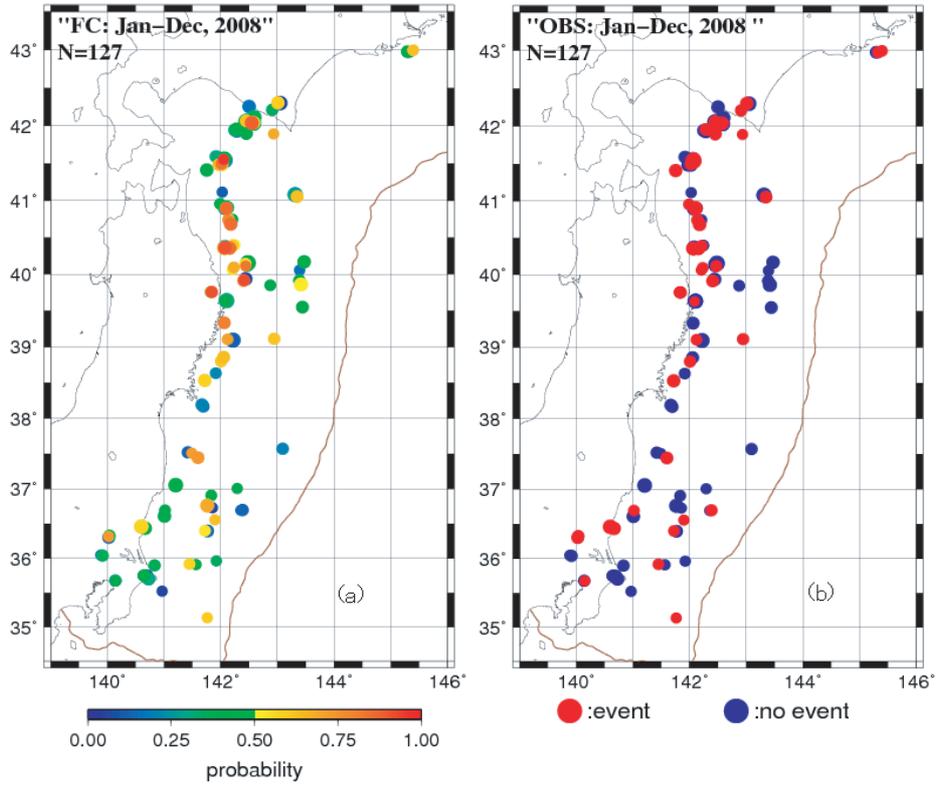


Fig. 3. (a) Prospective forecast probabilities for 127 SRE sequences in 2008. The circles denote the locations of the sequences, and the color indicates the probability. (b) Distribution of SRE sequences with a qualifying event (red) and without an event (blue) in 2008. FC is the period of forecast.

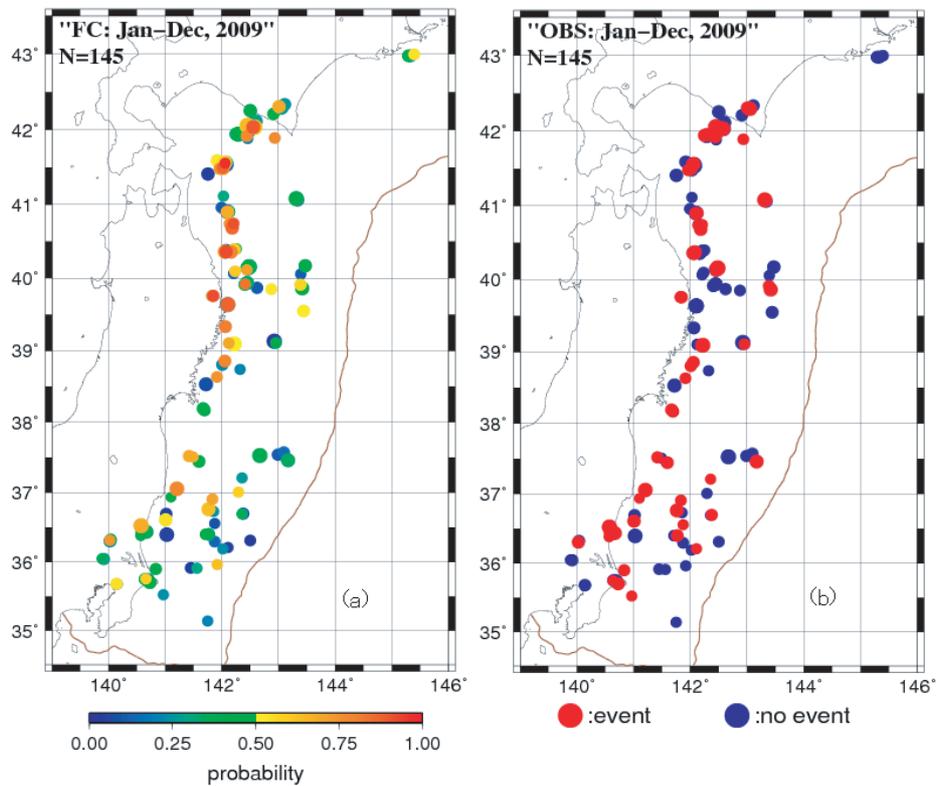


Fig. 4. (a) Prospective forecast probabilities for 145 SRE sequences in 2009. (b) Distribution of SRE sequences with an event (red) and without an event (blue) in 2009.

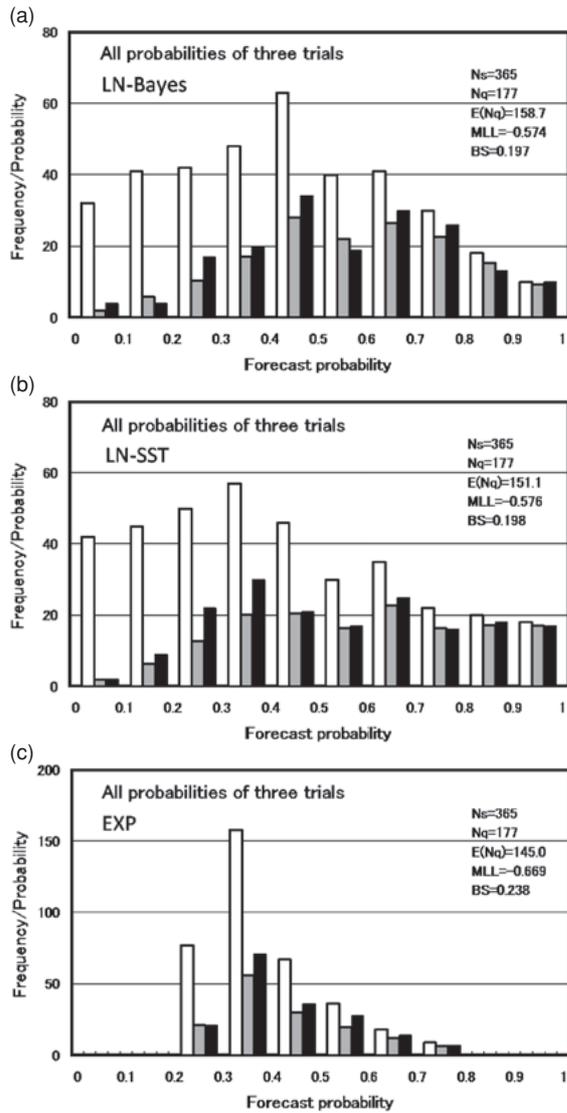


Fig. 5. Frequencies of forecast sequences (left white bars), the expected number of sequences filled with qualifying events (the sum of forecast probabilities, central gray bars), and the actual number of observed qualifying events (right black bars) for every 10% range of probabilities for three trials (forecast period: 2006–2007, 2008, and 2009) for the LN-Bayes (top), the LN-SST (middle), and the EXP (bottom) models.  $N_s$ : the number of all forecast sequences,  $N_q$ : the number of all sequences filled with qualifying event,  $E(N_q)$ : sum of all probabilities (expectation of  $N_q$ ), MLL: mean of log-likelihood, and BS: Brier score.

where  $K$  is the number of classes, and  $n_k$ ,  $\hat{p}_k$ , and  $\hat{c}_k$  are the number of forecasts, the averaged probability and the rate of event occurrence for  $k$ -th class, respectively, and  $\bar{c}$  is event occurrence rate for all forecasts. The smaller the reliability is, the better the forecast is. And the larger the resolution is, the better the forecast is. The resolution is independent of reliability.

The values of reliability are 0.00091 for LN-Bayes, 0.00105 for LN-SST, and 0.0019 for EXP. And the resolutions are 0.0590 for LN-Bayes, 0.0616 for LN-SST, and 0.0254 for EXP. These results indicate that forecast probabilities by those models are not so biased and that their re-

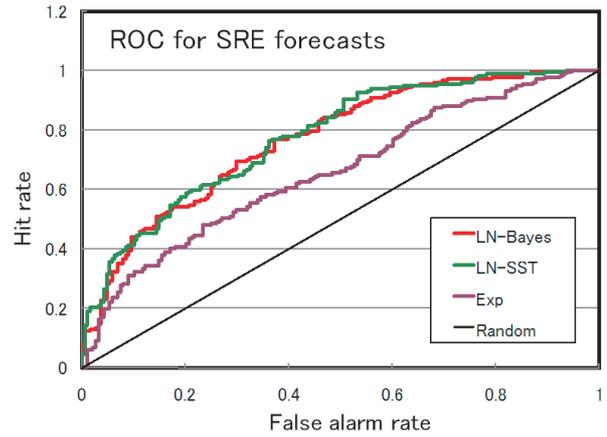


Fig. 6. ROC curves for all probabilistic forecasts (i.e., 365 forecasts) produced by the three models in the trials of 2006–2007, 2008, and 2009. The black diagonal line indicates the forecasts by random distribution, the purple curve denotes those by the EXP model, the green curve denotes those by the LN-SST model, and the red curve denotes those by the LN-Bayes model.

liability may be fairly good. The forecast by the LN-Bayes model is slightly better in reliability but worse in resolution than those by the LN-SST model. The gray bars in the top panel in Fig. 5 are slightly more consistent with the black ones and are more concentrated than those in the middle panel. The EXP model is much lower in resolution than others, as shown in bottom panel in Fig. 5 the probabilities are apt to gather in some ranges.

### 5.2 Relative/Receiver Operating Characteristic

The Relative/Receiver Operating Characteristic (ROC) is a signal detection curve over a range of different probability decision thresholds (e.g., Jolliffe and Stephenson, 2003). Suppose that we issue an alarm for every case of probability higher than the threshold. The hit rate is the ratio of the number of hit alarms and all SRE sequences with a qualifying event, and the false alarm rate is the ratio of the number of false alarms and all sequences without a qualifying event. Both rates increase from 0 to 1 as the threshold probability changes from 1 to 0. In Fig. 6, the horizontal axis indicates the false alarm rate, and the vertical axis indicates the hit rate for the three 12-month forecasts from 2006 to 2009. The curve located in the upper left zone indicates better forecasts, and that near the diagonal line corresponds to random forecasts. This figure confirms that forecasts by the EXP model are better than random forecasts, as the model uses information on the average of observed recurrence interval. The LN-Bayes and LN-SST models are comparable in predictability and are remarkably better than the EXP model.

### 5.3 Consistency test

We use three scores and related tests, based on the total number of qualifying events (N-test), the likelihood score (L-test), and the Brier score (BS-test) (Brier, 1950). For the consistency test, the score of observation data is compared with the theoretical score distribution that is computed from the forecast probabilities. Those scores and the test results are summarized in Table 2.

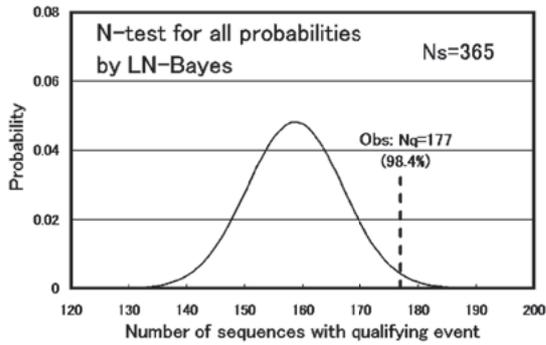


Fig. 7. N-test for 365 forecasts of three trials by the LN-Bayes model. The black curve indicates the theoretical distribution of the frequency of qualifying events calculated from forecast probabilities, and the vertical dashed line indicates the observed frequency of qualifying events.  $N_s$  is the number of forecast sequences and  $N_q$  is the number of sequences filled with qualifying event in the forecast period.

The theoretical distribution of the frequency of sequences with qualifying event,  $N_q$  is numerically calculated with the iteration formula

$$\Pr(N_q^{n+1} = k) = p_{n+1} \Pr(N_q^n = k - 1) + (1 - p_{n+1}) \Pr(N_q^n = k),$$

where  $p_{n+1}$  is the probability of the qualifying event of the  $(n + 1)$ -th forecast, and  $\Pr(N_q^{n+1} = k)$  is the probability for  $k$  of  $n + 1$  sequences to include qualifying events.

Scores of log-likelihood, LL, and Brier, BS, for  $n$  forecasts for binary events are given as

$$\text{LL} = \sum_{i=1}^n \{c_i \ln(p_i) + (1 - c_i) \ln(1 - p_i)\}$$

$$\text{BS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - c_i)^2$$

where  $p_i$  is the forecast probability that the  $i$ -th sequence will include a qualifying event;  $c_i$  is equal to 1 if the event occurs, and is zero otherwise.

The theoretical distribution of LL is also numerically calculated with the iteration formula

$$\Pr(\text{LL}^{n+1} = x_{j,n} + x_{i,n+1}) = p(x_{i,n+1}) \Pr(\text{LL}^n = x_{j,n}),$$

where  $i = 1$  corresponds to a qualifying event,  $i = 0$  to otherwise, and  $j = 0, 1, \dots, j_{\max}$ ,  $x_{0,n+1} = \ln(1 - p_{n+1})$ , and  $x_{1,n+1} = \ln(p_{n+1})$ . The number of score values,  $j_{\max}$ , for  $n$  forecasts may rapidly increase as fast as  $2^n$ . When  $x_{j,n}$  and  $x_{k,n}$  are equal or very close to each other and their probabilities are very small, we replace them by a weighted mean of two,  $x_{l,n}$ , to decrease the number:

$$x_{l,n} = (x_{j,n} \Pr(x_{j,n}) + x_{k,n} \Pr(x_{k,n})) / (\Pr(x_{j,n}) + \Pr(x_{k,n}))$$

$$\Pr(x_{l,n}) = \Pr(x_{j,n}) + \Pr(x_{k,n}).$$

The theoretical distribution of BS is numerically calculated by a similar procedure for the LL score.

The expected frequency (number of events) of 56.1 for 2008 determined by the Bayesian model is very close to

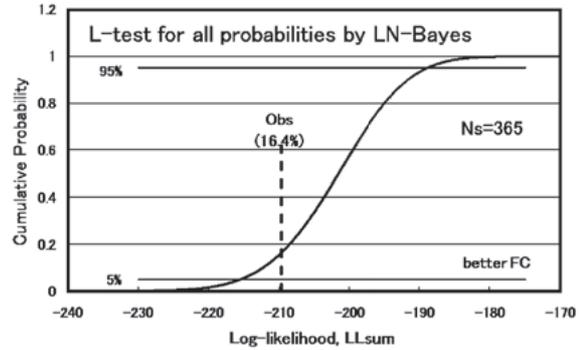


Fig. 8. L-test for 365 forecast probabilities of three trials produced by the LN-Bayes model. The curved line denotes the theoretical distribution of the total log-likelihood, LL, and the vertical dashed line denotes its observed score. The horizontal lines indicate the points of 0.05 and 0.95 of the cumulative probability used for testing.  $N_s$  is the number of forecasts.

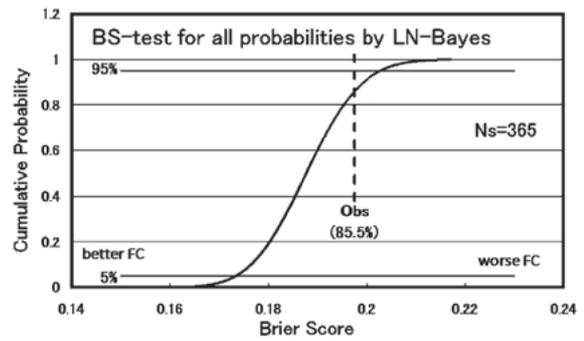


Fig. 9. Results of the BS-test for 365 forecasts of three trials from 2006 to 2009 by the LN-Bayes model. The curved line indicates the theoretical distribution of the BS score, BS, and the vertical dashed line denotes that of its observed one.  $N_s$  is the number of forecasts.

that of observed qualifying events (56), but is somewhat smaller than the actual frequency for other periods. The other two models estimated a smaller number than the LN-Bayes model. Figure 7 presents an example of the N-test, which compares the theoretical distribution for the 365 forecasts of the three trials with the observed frequency (177 qualifying events, vertical dashed line). The observed number corresponds to 0.984 in theoretical CDF. This result means that the expected number,  $E(N)$ , is too small to accept those forecasts, and they are rejected statistically at a significance level of 0.95 but accepted at a level of 0.99.

Examples of the L-test and BS-test are depicted in Figs. 8 and 9 for the forecasts of three experiments from 2006 to 2009, respectively. Our probabilities are accepted at the 0.95 significance level. We denote the mean of log-likelihood for a single forecast with MLL ( $= \text{LL}/n$ ). For better forecasts, the scores of LL and MLL are larger, while the BS score is smaller. The result of the test with the MLL score is the same as that of the L-test. The MLL and BS scores produced by the LN-Bayes model, listed in Table 2 for three trials, are close to those produced by the LN-SST model and are remarkably better than those by the EXP

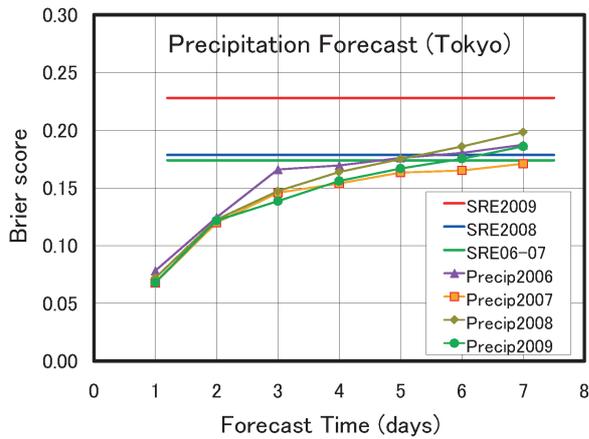


Fig. 10. Brier scores for the forecasts for SREs (horizontal lines) and for the probability precipitation forecasts at Tokyo (lines with symbols) produced by the Japan Meteorological Agency. The horizontal axis is the lead time of weather forecasts in days.

model. The scores for the 2009 forecasts are somewhat worse than the former two trials (Table 2).

The scores of MLL and BS may be used to compare the forecasts with those in a different number or type. For example, Fig. 10 compares our forecasts for SREs with those for precipitation at Tokyo produced by the Japan Meteorological Agency. Their precipitation forecast is similar to ours if we replace earthquake with precipitation. The forecast is the probability of rain (earthquake) and the result is whether it rained (earthquake occurred) or not. The scores of SRE forecasts for 2006–2007 and 2008 were comparable to those for precipitation several day forecasts, but the 2009 forecasts were worse than the weather forecasts.

#### 5.4 Comparison test

We statistically compare the forecasting model (H1) and the alternative model (H0) by the R-test, which is based on the differences in LL, and the dBS-test, which is based on the differences in BS. Theoretical score distributions used for these tests are numerically computed by a procedure similar to that applied for LL.

Figure 11 presents the results of the R-test for the LN-Bayes model (H1) and the EXP model (H0) for 365 forecasts of three trials from 2006 to 2009. If H0 is correct, the difference of the log-likelihood,  $R = LH1 - LH0$ , is theoretically distributed as the blue curve. However, it does not fit the observed value of  $R = 34.5$ , therefore, H0 (EXP model) is statistically rejected. In contrast, the theoretical distribution for H1 fits the observed value; thus, H1 is statistically accepted. Hence, the forecast model H1 is considered to be significantly better than the alternative model H0 at a significance level of 0.95.

The results of the R-test for the LN-Bayes model (H1) and the LN-SST model (H0) are depicted in Fig. 12. Both models are rejected at a significance level of 0.95 but accepted at a level of 0.99. Figure 13 presents the result of the dBS-test, in which the LN-Bayes model is statistically better than the LN-SST model, though the difference in scores is very small.

All results of R- and dBS-tests for the three trials are

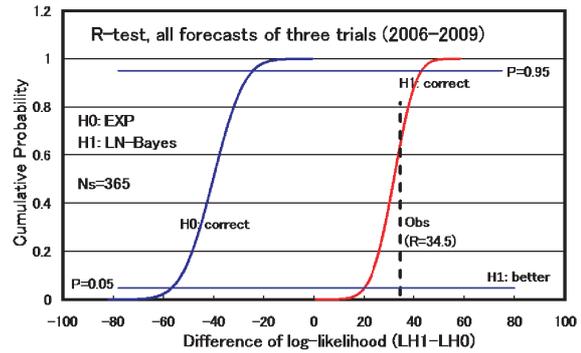


Fig. 11. R-test for the LN-Bayes model (H1) and the EXP model (H0).  $N_s$  is the number of forecast sequences.

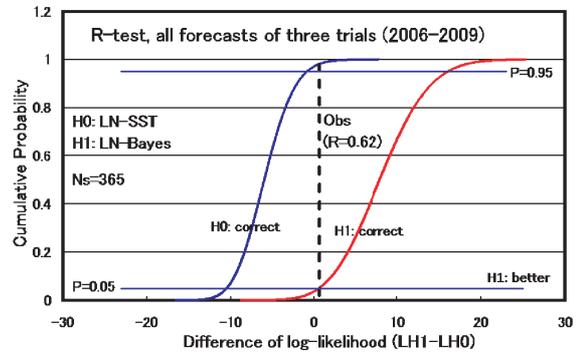


Fig. 12. R-test for the LN-Bayes model (H1) and the LN-SST model (H0).  $N_s$  is the number of forecast sequences.

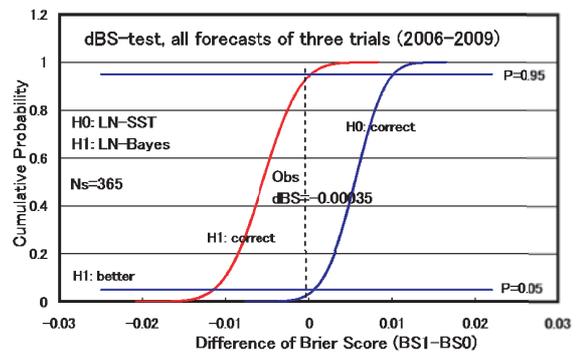


Fig. 13. dBS-test for the LN-Bayes model (H1) and LN-SST model (H0).  $N_s$  is the number of forecast sequences.

summarized in Table 3. Here, AC indicates that the score is accepted by N-, L-, or BS-test at a significance level of 0.95; RJ indicates that it is rejected at the 0.99 level; and UD indicates that it is rejected at the 0.95 level but accepted at the 0.99 level. As a whole, the EXP model is quite significantly worse than the other two models.

## 6. Discussion

To evaluate the prospective forecasts, we consider the following four sets of forecasts: (1) 93 probabilities for the

Table 3. Scores of  $R$  ( $= LL1-LL0$ ) and  $dBS$  ( $= BS1-BS0$ ) and results of tests for forecast probabilities for 12 months.

Forecast model, H1	Alternative model, H0	Forecast period			
		2006.7-07.6	2008.1-08.12	2009.1-09.12	Total
R-test					
LN-Bayes	EXP	13.9	13.5	7.09	34.5
		AC-RJ	AC-RJ	AC-RJ	AC-RJ
LN-SST	EXP	13.2	17.9	2.72	33.9
		AC-RJ	AC-RJ	RJ-RJ	AC-RJ
LN-Bayes	LN-SST	0.640	-4.39	4.39	0.618
		AC-AC	RJ-AC	AC-RJ	UD-UD
dBS-test					
LN-Bayes	EXP	-0.0609	-0.0458	-0.0230	-0.0406
		AC-RJ	AC-RJ	AC-RJ	AC-RJ
LN-SST	EXP	-0.0558	-0.567	-0.158	-0.0402
		AC-RJ	AC-RJ	UD-RJ	AC-RJ
LN-Bayes	LN-SST	-0.0051	0.0109	-0.0072	-0.00035
		AC-UD	RJ-AC	AC-RJ	AC-UD

Here, AC, RJ, and UD are the same as those in Table 2. The ones on the left side indicate the results for models H1, and those on the right side indicate the results for model H0.

first trial (July 2006 to June 2007), (2) 127 probabilities for the second trial (2008), (3) 145 probabilities for the third trial (2009), and (4) 365 combined probabilities for all three trials. The results of the fourth trial (2010) are not available for evaluation because the forecast period was not over at the time of the submission of this paper. Among these sets, (1), (2), and (4) were accepted by consistency tests, the L-test, and the BS-test (Table 2). However, the forecasts of (3) were rejected statistically, as we will discuss later.

The recurrence interval itself is important for forecast. If the interval is less than the forecast period, the probability for the repeater is inevitably high. The ROC in Fig. 6 shows that the EXP model based on Poisson process taking the averaged sequence recurrence interval into account is better than the random forecast. Results of R- and dBStests (Fig. 11 and Table 3) indicate that the LN-Bayes and LN-SST models dependent on elapsed time since the last event are significantly better than the EXP model. The ROC curves depicted in Fig. 6 also suggest that these models have much higher performance than the EXP model for estimating probabilities (Figs. 5 and 6 and Tables 2 and 3). Therefore, the repeaters on the plate boundary along the Japan Trench are significantly dependent on elapsed time since the last event and are not random in time. However, it is presumed that the inverse gamma prior distribution used in the LN-Bayes model is slightly more effective for forecast repeaters, since the differences between the consistency scores of the LN-Bayes and the LN-SST models are very small.

Missing event, especially last one, has significant effect on the forecast probability for the relevant sequence. We collected the SRE by comparing waveform of events recorded at the same station which were listed in the catalog maintained by the Japan Meteorological Agency for 2.5 or larger in magnitude. Nanjo *et al.* (2010) estimated that the completeness magnitude,  $M_c$ , for recent event was 1.5 or smaller in the coastal zone and between 2.0 and 2.5 in the offing area near Japan Trench.  $M_c$  before the deployment of modern dense observation network in 2002 for

the northeastern Japan was about 0.5 larger than the recent one. The ratio of signal to noise is smaller for the events in the distant offing than the coastal zone and the fluctuation of noise level also affect the detectability of the small repeating earthquake. Therefore we assume that some older events near the Japan Trench might be missed from our SRE catalog. However the most sequences in coastal zone seem to be nearly complete and our results are considered to be in high quality as a whole as shown in the data quality estimation at off Sanriku region (Uchida *et al.*, 2005).

The forecasts by Nishenko (1991) for large characteristic interplate earthquakes around the circum-Pacific region were rigorously tested by Kagan and Jackson (1995) and Rong *et al.* (2003), and were statistically rejected. They suggested two reasons, the biasing of rate and the effects of excluding open intervals. We also assume that the model in the previous study is too crude for the small number of data. The SRE and the models employed in this study can adequately deal with these problems. The SRE selected on the basis of waveform similarity excludes bias by the selection of sequence; the models using the Bayesian approach and small sample theory adapt fairly well to small samples and the open-ended interval. We also suggest that the common variance parameter,  $\sigma = 0.215$ , used by Nishenko is probably too small. In our Bayesian model, the mean of prior distribution for  $\sigma^2$  is close to 0.3, and the expectation of  $\sigma$  exceeds 0.215 for most sequences.

As the SREs occur in the same geophysical condition for the large/great interplate earthquakes, it is likely that our method is applicable for those recurrent events. A preliminary prior distribution for large events has been proposed by Okada *et al.* (2007). However it is fairly difficult to test the prospective forecasts for the large/great earthquake due to much longer time interval and small number of recurrent events for each sequence. Moreover we have to pay attention to the uncertainty and errors of old data derived from historical documents or geological surveys. Therefore it might be fruitful to perform the prospective forecast experiments for the moderate recurrent earthquakes with 4

to 7 in magnitude recorded with seismological instruments and to test them with observation data in advance of the experiment for large events.

Next we discuss why the consistency tests rejected our forecasts of 2009. The distribution patterns of clusters in Figs. 1, 3, and 4 in the northern part are somewhat different from those in the southern part. The SRE sequences are crowded near the coast in the northern part and widely distributed in the southern part. In the northern part to the north of 38°N, the score of MLL is  $-0.614$  and that of BS is  $0.218$  for 97 sequences of the 2009 forecasts, and the expected number of qualifying events of 44.1 is close to the observation of 47. In the southern part, for 48 sequences the score of MLL is as bad as  $-0.715$  and that of BS is as bad as  $0.247$ . Furthermore, the expected number of 17.1 is considerably smaller than the observed 23. Consistency scores for the southern part are considerably worse than those for the northern part.

We assume that worse results in consistency for the southern part are due to a large and long-term slow slip event that is not considered in the present model. In 2008,  $M 7.0$  and  $M 6.9$  interplate earthquakes occurred on the plate boundary of the southern part of the study area (Fig. 14). The Geographical Survey Institute (2010) estimated from GPS observation that the  $M 7.0$  earthquake on May 8, 2008, had triggered a wide and long-term aseismic slip in this district corresponding to 6 to 12 cm/year (Fig. 14). The afterslip area was much wider than the co-seismic slip area of the  $M 7.0$  event, 25 km  $\times$  25 km (Nagoya University, 2008) and the foreshock and aftershock area extended 40 km  $\times$  90 km. Co-seismic slip was estimated to be 1.7 m in maximum. This is one of the largest earthquakes in the last 80 years in the rectangle part drawn with a red dotted line in Fig. 14. Mishina *et al.* (2009) observed a strain change related to the afterslip of the  $M 6.9$  earthquake on July 19, 2008, using a coastal borehole strain meter. Uchida *et al.* (2008) applied cumulative slip analysis for SRE sequences and suggested that the aseismic slip was about 3 cm/year before the  $M 7.0$  event and accelerated in a 300 km-long region near the Japan Trench, which encompasses both the  $M 7.0$  and  $M 6.9$  earthquakes. Therefore, we assume that the slow slip in the large area must be related to the high activities of SREs as well as the occurrence of several  $M 6+$  earthquakes in that part.

We also must pay more attention to regional differences and clustering of SRE activities. The frequency of qualifying events within every six months from 1993 to 2009 is 36.0 on average for the 163 sequences used for the 2010 forecasts, and their variance is 68.9, which is much larger than that of Poisson distribution with a mean of 36.0. It is plausible that some variation in SRE activity is caused by the coherent occurrence of repeaters among characteristic sequences, the effects of which are neglected in our models not only for forecast but also testing.

The Brownian Passage Time (BPT) distribution model is frequently used for recurrence interval as a physically based model (e.g., Ellsworth *et al.*, 1999; ERC, 2001; Matthews *et al.*, 2002; WGCEP, 2003). Matthews *et al.* (2002) discuss the characteristic of Brownian relaxation oscillator and BPT distribution in detail and show the physical interpreta-

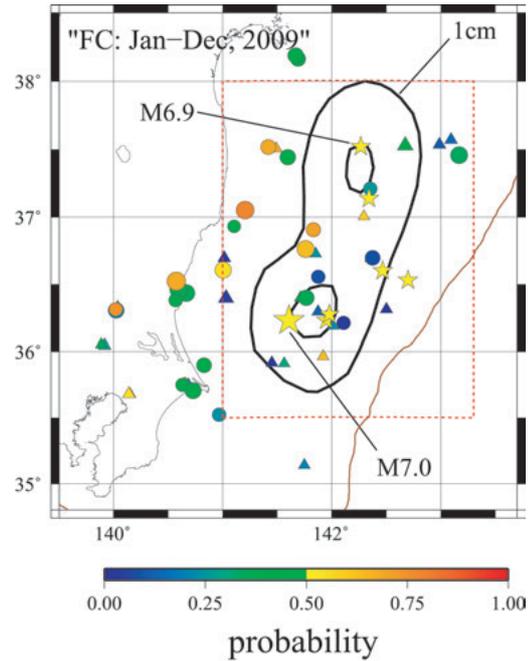


Fig. 14. Activities of SRE in the southern part in 2009. The circles indicate that the qualifying SRE occurred in the forecast period of 2009, and the triangles indicate that none occurred in 2009. The stars denote large earthquakes of  $M 6.0$  and larger. The black contour lines indicate the main slip part from January 19 through March 19, 2009, estimated from GPS observation (Geographical Survey Institute, 2010). The 2008 Off Ibaraki earthquake of  $M 7.0$  is one of the largest events in the rectangle part drawn with the red dotted line.

tion of parameters and the effect of stepwise stress change on recurrence time. But it was rather difficult for us to apply Bayes' theorem to this distribution. We tried to estimate probabilities, using parameters determined by the maximum likelihood method from the observed data. We failed to obtain the conditional probabilities for some sequences. In several sequences, the open interval from the last event was so long that the CDF was abnormally high. When the sequence contained a doublet (earthquakes with very short interval), the parameters could not be determined by using likelihood with an open-ended interval denoted by Eq. (2). In one case, we could not calculate CDF for a BPT distribution due to an overflow in computation. The BPT distribution may be suitable for forecast based on the declustered data. We also tried to forecast probabilities with other distributions for the recurrence interval (e.g., Weibull and gamma on the large sample theory); however, the probability for some sequences could not be computed normally, due to the difficulties mentioned above. The probabilities by these models exclusive of abnormal cases were worse than those by LN-Bayes and LN-SST. Therefore, we did not use those distributions in present study, just lognormal and exponential distributions, for forecasting probabilities.

## 7. Conclusion

We theoretically formulated a method to calculate the conditional probability of a forthcoming recurrent event, using the Bayesian approach of a lognormal distribution model with the uniform prior distribution for the mean of

the logarithm of recurrence interval and inverse gamma for its variance (LN-Bayes), and the model on the small sample theory (LN-SST). The probabilities forecast by both models are given by simple equations including  $t$ -distribution function.

The probabilities forecast by the LN-Bayes model for SREs in the subduction zone along the Japan Trench are estimated for 12 months in 2006–07, 2008, and 2009. The results indicate that all forecasts except that for 2009 were so good that they passed the N- L- and BS-tests statistically. The 2009 forecasts were rejected by the L- and BS-tests, probably due to a large and long-term afterslip event on the plate boundary triggered by  $M \sim 7$  earthquakes in 2008. The MLL and BS scores of the SRE forecasts of two former experiments were comparable to those for precipitation several day forecasts at Tokyo, but the 2009 SRE forecasts were worse than the weather forecasts.

Comparison tests, the R-test and dBS-test, for all 365 forecasts in the three experiments indicate that the LN-Bayes model based on the renewal process had significantly higher performance than the EXP model based on the Poisson process. The ROC curve also indicates that the LN-Bayes model is remarkably better than the EXP model. Therefore, we conclude that the SREs on the plate boundary are statistically dependent on elapsed time since the last event and are not random in time. However, we assume that the inverse gamma prior distribution for variance used in the LN-Bayes model is slightly more effective than the LN-SST model, although the consistency scores of our experiments are fairly close for the two models.

**Acknowledgments.** We are indebted to two anonymous referees for helpful comments to suggest many improvements in the content and presentation of this report. We thank the members of the Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, for valuable discussions and suggestions. We are especially grateful to Prof. T. Matsuzawa, Drs. K. Nanjo, and H. Tsuruoka for their kind encouragement. The digital waveform data from the seismic stations of Hokkaido University, Tohoku University, and University of Tokyo were used in compiling the SRE catalog. We used the software coded by Mr. H. Takayama, which uses the GMT program package developed by Wessel and Smith (1995). The first author has been staying at the Meteorological Research Institute as a guest researcher and was helped by many members, especially Drs. Y. Hayashi, K. Maeda, A. Katsumata, M. Hoshiba, and S. Yoshikawa.

### Appendix A. Parameters in Inverse Gamma Prior Distribution $\Gamma_R(\phi, \zeta)$ for $\sigma^2$

The parameters of inverse gamma were given by Okada *et al.* (2007). We briefly mention here how to determine these parameters from observation data.

Suppose  $n$  random variables  $X_i = \ln(T_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  obey a normal distribution  $N(\mu, \sigma^2)$  and take the variables for mean of  $n$  variables and sum of squared residual from mean,  $\bar{X} = (1/n) \sum_{i=1}^n X_i$  and  $Y = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ , respectively. The variable  $Y/\sigma^2$  follows a chi-squared distribution with  $n-1$  degrees of freedom (e.g., Wilks, 1962) and  $Y$  obeys a gamma distribution  $\Gamma((n-1)/2, 2\sigma^2)$ . Therefore the PDF of  $Y$  with a prior of  $\pi(\sigma^2)$  is given as

$$f(y; n | \pi(\sigma^2)) = \int_0^\infty f_\Gamma(y, (n-1)/2, 2\sigma^2) \pi(\sigma^2) d\sigma^2$$

If we adopt an inverse gamma prior distribution  $\Gamma_R(\phi, \zeta)$  for  $\sigma^2$ , the PDF for unbiased variance  $V = Y/(n-1)$  is written as follow;

$$f(v; n | \Gamma_R(\phi, \zeta)) = \left(\frac{n-1}{2}\right)^{\frac{n-1}{2}} \frac{\Gamma\left(\frac{n+2\phi-1}{2}\right)}{\zeta \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \Gamma(\phi)} \times \left(\frac{v}{\zeta}\right)^{\frac{n-3}{2}} \left\{1 + \frac{(n-1)v}{2\zeta}\right\}^{-\frac{n+2\phi-1}{2}}.$$

Since the likelihood for  $Q$  sequences is defined as

$$L = \prod_{i=1}^Q f(v_i; n_i | \Gamma_R(\phi, \zeta))$$

where  $v_i$  of  $x_i = \ln(T_i)$  and  $n_i$  are unbiased variance and the number of time interval data for the  $i$ -th sequence, respectively. Using the sequence unbiased variances of observed  $x_i = \ln(T_i)$  for many repeater sequences, we can estimate values of the parameters,  $\phi$  and  $\zeta$ , in inverse gamma prior distribution with a conventional maximum likelihood method.

### References

- Brier, G. W., Verification of forecasts expressed in terms of probability, *Month. Weather Rev.*, **78**, 1–3, 1950.
- Chen, K. H., R. Buergermann, R. M. Nadeau, T. Chen, and N. Lapusta, Postseismic variations in seismic moment and recurrence interval of repeating earthquakes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **299**, 118–125, doi:10.1016/j.epsl.2010.08.027, 2010.
- Davis, P. M., D. D. Jackson, and Y. Y. Kagan, The longer it has been since the last earthquake, the longer the expected time till the next?, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **79**, 1439–1456, 1989.
- Earthquake Research Committee, Regarding methods for evaluating long-term probability of earthquake occurrence, 48 pp, 2001 (in Japanese).
- Ellsworth, W. L., M. V. Matthews, R. M. Nadeau, S. P. Nishenko, P. A. Reasenber, and R. W. Simpson, A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities, *U.S. Geol. Surv., Open-File Rept.*, 99-522, <http://geopubs.wr.usgs.gov/openfile/of99-522/of99-522.pdf>, 1999.
- Field, E. H., A summary of previous working groups on California earthquake probabilities, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **97**, 1033–1053, doi:10.1785/0120060048, 2007.
- Field, E. H., T. E. Dawson, K. R. Felzer, A. D. Frankel, V. Gupta, T. H. Jordan, T. Parsons, M. D. Petersen, R. S. Stein, R. J. Weldon II, and C. J. Wills, Uniform California earthquake rupture forecast, version 2 (UCERF 2), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**, 2053–2107, doi:10.1785/0120080049, 2009.
- Geographical Survey Institute, Crustal movements in the Tohoku district, *Rep. Coord. Comm. Earthq. Predict.*, **83**, 59–81, 2010 (in Japanese).
- Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **108**(B5), 2249, doi:10.1029/2002JB001920, 2003.
- Imamura, A., On the seismic activity of central Japan, *Jpn. J. Astron. Geophys.*, **6**, 119–137, 1928.
- Jeffreys, H., *Theory of Probability*, third ed., 459 pp, Oxford Univ. Press, 1961.
- Jolliffe, I. T. and D. B. Stephenson, eds., *Forecast Verification*, 240 pp, Chichester, England, John Wiley & Sons, 2003.
- Jordan, T. H., Earthquake predictability, brick by brick, *Seismol. Res. Lett.*, **77**, 3–6, 2006.
- Kagan, Y. Y. and D. D. Jackson, New seismic gap hypothesis: five years after, *J. Geophys. Res.*, **100**, 3943–3959, 1995.
- Kelleher, J. A., Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions, *J. Geophys. Res.*, **77**, 2087–2103, 1972.
- Kelleher, J., L. Sykes, and J. Oliver, Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2547–2585, 1973.

- Matsuzawa, T., T. Igarashi, and A. Hasegawa, Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 11, doi:10.1029/2001GL014632, 2002.
- Matthews, M. V., W. L. Ellsworth, and P. A. Reasenber, A Brownian model for recurrent earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 2233–2250, 2002.
- McCann, W. R., S. P. Nishenko, L. R. Sykes, and J. Krause, Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries, *Pure Appl. Geophys.*, **117**, 1082–1147, 1979.
- Mishina, M., K. Tachibana, and S. Miura, Postseismic deformation associated with off Fukushima earthquakes as inferred data of borehole strainmeters, *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, **72**, 287–298, 2009 (in Japanese with English abstract).
- Nadeau, R. M., W. Foxall, and T. V. McEvilly, Clustering and periodic recurrence of microearthquakes on the San Andreas fault at Parkfield, California, *Science*, **267**, 503–507, 1995.
- Nagoya University, Source process of Off-Ibaraki earthquake on May 8, 2008 (Mj6.4, 7.0), *Rep. Coord. Comm. Earthq. Predict.*, **80**, 108–110, 2008 (in Japanese).
- Nanjo, K. Z., T. Ishibe, H. Tsuruoka, D. Schorlemmer, Y. Ishigaki, and N. Hirata, Analysis of the completeness magnitude and seismic network coverage of Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **100**(6), 3261–3268, doi: 10.1785/0120100077, 2010.
- Nishenko, S. P., Circum-Pacific seismic potential: 1989–1999, *Pure Appl. Geophys.*, **135**, 169–259, 1991.
- Okada, M., H. Takayama, F. Hirose, and N. Uchida, A prior distribution of the parameters in the renewal model with lognormal distribution used for estimating the probability of recurrent earthquakes, *Zisin 2*, **60**, 85–100, 2007 (in Japanese with English abstract).
- Rong, Y., D. D. Jackson, and Y. Y. Kagan, Seismic gaps and earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **108**, 2471, doi:10.1029/2002JB002334, 2003.
- Schorlemmer, D., M. C. Gerstenberger, S. Wiemer, D. D. Jackson, and D. A. Rhodes, Earthquake likelihood model testing, *Seismol. Res. Lett.*, **78**, 17–29, 2007.
- Sykes, L. R., Aftershock zone of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians, *J. Geophys. Res.*, **76**, 8021–8041, 1971.
- Toth, Z., O. Talagrand, G. Candille, and Y. Zhu, Probability and ensemble forecasts, in *Forecast Verification, a Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, edited by Jolliffe and Stephenson, 137–163, John Wiley & Sons, 2003.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1801, doi:10.1029/2003GL017452, 2003.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, Recurrence intervals of characteristic M4.8+/-0.1 earthquakes off Kamaishi, NE Japan—Comparison with creep rate estimated from small repeating earthquake data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 155–165, 2005.
- Uchida, N., M. Mishina, and T. Matsuzawa, Afterslip of the 2008 off Ibaraki (M7.0) and off Fukushima (M6.9) earthquakes estimated from small repeating earthquakes, ASC meeting, Tsukuba, November, 2008, Program & Abstracts, X-038, 210, 2008.
- Uchida, N., J. Nakajima, A. Hasegawa, and T. Matsuzawa, What controls interplate coupling?: Evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **283**, 111–121, doi:10.1016/j.epsl.2009.04.003, 2009.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, New version of the generic mapping tools released, *Eos Trans. AGU*, **76**(33), 329, 1995.
- Wilks, S. S., *Mathematical Statistics*, 644 pp, John Wiley & Sons, 1962.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault, *U.S. Geol. Surv., Open-File Rept.*, 88-398, 1988.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, Probabilities of large earthquakes in the San Francisco bay region, California, *U.S. Geol. Surv.*, Circular 1053, 51 pp, 1990.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **85**, 379–439, 1995.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, Earthquake probabilities in the San Francisco bay region: 2002-2031, *U.S. Geol. Surv., Open-File Rept.*, 03-214, <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-214/>, 2003.

---

M. Okada (e-mail: mokada@mri-jma.go.jp), N. Uchida, and S. Aoki

## 第 5 章 日本各地の繰り返し相似地震の発生状況調査

### 5.1 北海道地方の繰り返し相似地震

菅ノ又淳一・齋藤祥司・松山輝雄・太田良久・菅原政志・平山達也・松島功・高橋賢二・

大山浩明(札幌管区気象台技術部)・山本剛靖・佐鯉央教(気象庁地震火山部)

所属は平成 24 年度当時

#### 5.1.1 はじめに

札幌管区気象台は気象研究所との地方共同研究「日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究」として平成 23、24 年度の 2 ヶ年計画で北海道周辺の繰り返し相似地震(以下「繰り返し地震」という)の調査を行った。

調査は、溜渕・他(2011)により求められた「日本周辺における相似地震の可能性の高い地震グループの分布図」(図 5.1.1)で得られている北海道周辺の地震グループが繰り返し地震であるかどうかを過去の波形記録(マイクロフィルムや記象紙)等に遡って確認する方法で行った。

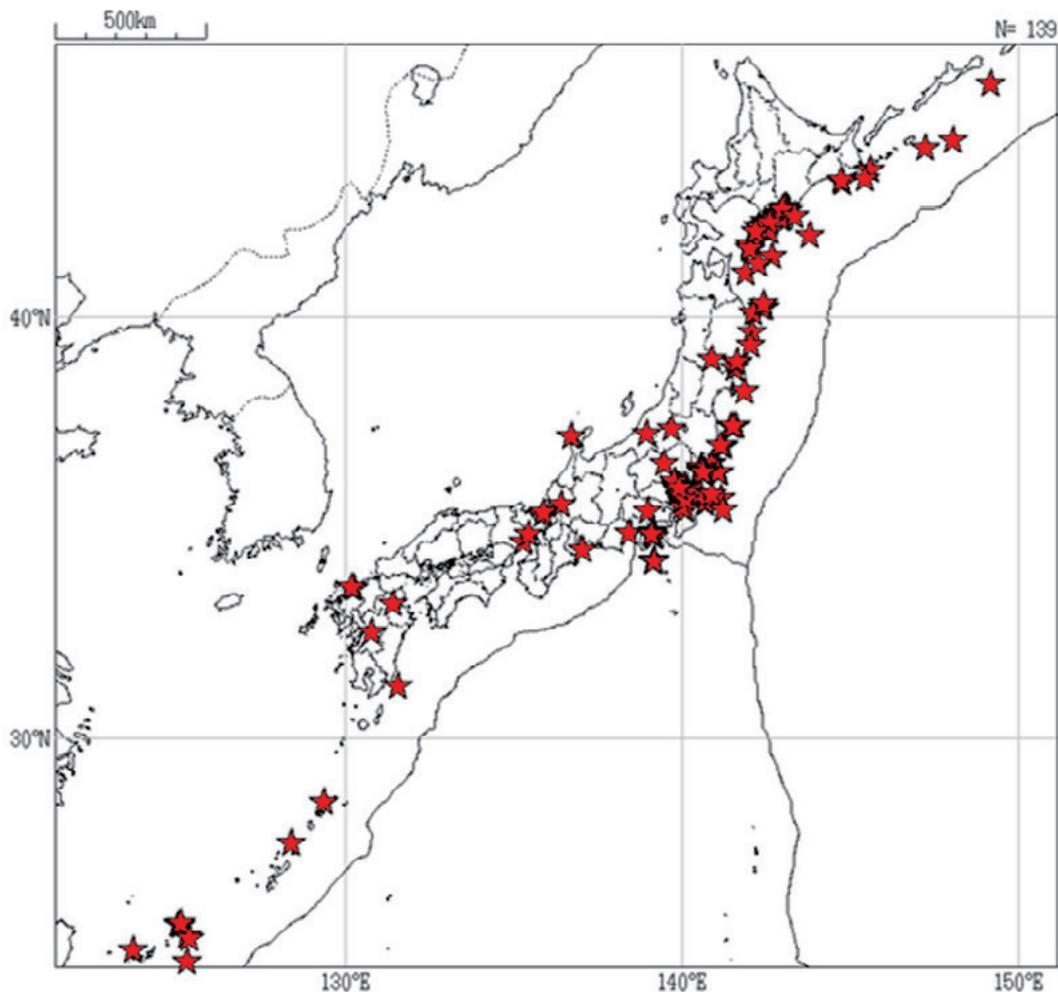


図 5.1.1 87 型電磁式強震計及び計測震度計記録の波形相関から相似地震の可能性の高いものを抽出したグループ (139 グループ; 溜渕・他, 2011) の分布図。

5.1.2 解析方法

調査は、図5.1.1の「日本周辺における相似地震の可能性の高い地震グループの分布図」の中にプレート境界以外の地震グループが含まれていることから、北海道周辺の地震グループそれぞれについて、波形の重ね合わせ（図5.1.2）や波形相関（表5.1.1）を再度求めて相似性の再確認を行うことから始めた。

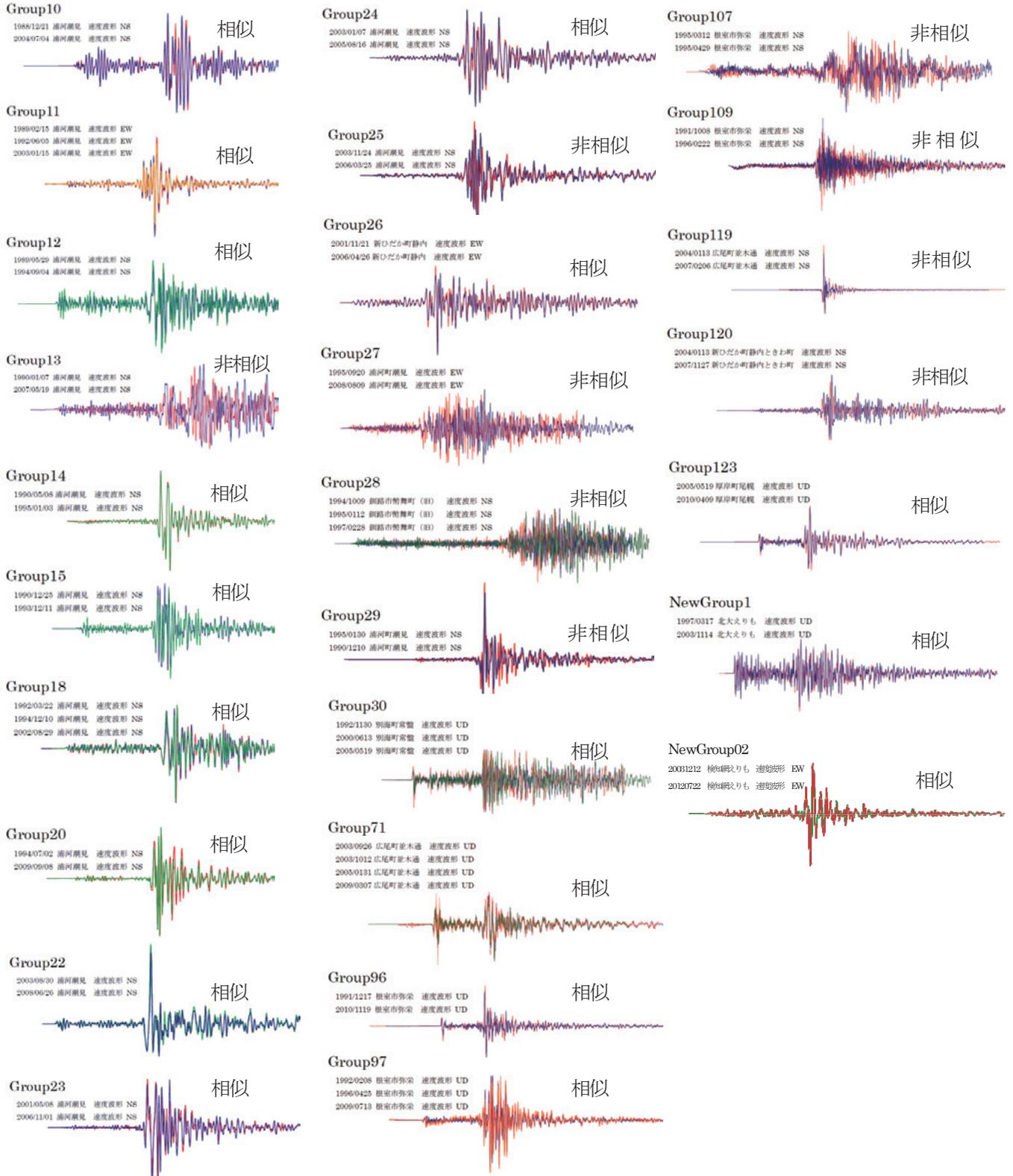


図 5.1.2 デジタル波形の重ね合わせによる比較 (87 型電磁式強震計、計測震度計の加速度データを用いた速度波形を示す。「えりも」は、速度型センサーの波形を示す。色の違いは異なる地震であることを表す。

表5.1.1 北海道周辺の27グループの地震の相似性を確認した表。

Group	No	地震			観測点	見だ目の相似性	波形相関(0.95未満を赤字で区別)									
		年月日	時分	M			成分	速度	変位	速度	変位	速度	変位			
10	1	2004年07月04日	21時31分	4.9	浦河町潮見	1,2,3は相似	40秒間	N/S	0.991	0.990	0.986	0.985	0.993	0.991		
	2	1988年12月21日	19時53分	5.0			下0.3Hz	E/W	1と2	0.940	0.939	0.951	0.950	2と3	0.991	0.987
	3	2011年07月26日	7時38分	4.8			上1.2Hz	U/D		0.997	0.984	0.993	0.992		0.993	0.978
11	1	2003年01月15日	18時02分	4.3	浦河町潮見	1と3と4は相似 非相似	40秒間	N/S	0.984	0.982	0.980	0.963	0.985	0.981		
	2	1995年09月27日	08時43分	4.3			下0.3Hz	E/W	1と2	0.930	0.929	0.956	0.901	1と4	0.949	0.945
	3	1992年06月05日	21時52分	4.5			上1.2Hz	U/D		0.939	0.728	0.959	0.925		0.970	0.969
	4	1989年02月15日	09時05分	4.6			40秒間	N/S	2と3	0.986	0.989	0.985	0.989	2と4	0.990	0.987
12	1	1994年09月04日	21時29分	4.5	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.996	0.992	0.976	0.975	0.978	0.936		
	2	1989年05月29日	17時29分	4.7			下0.3Hz	E/W	1と2	0.994	0.973	0.963	0.932		0.974	0.922
13	1	2007年05月19日	00時59分	5.3	浦河町潮見	非相似	40秒間	N/S	0.960	0.961						
	2	1990年01月07日	22時28分	5.3			下0.3Hz	E/W	1と2	0.976	0.977					
							上1.2Hz	U/D		0.980	0.981					
14	1	1995年01月03日	13時42分	4.3	浦河町潮見	1と3は相似 非相似	40秒間	N/S	0.956	0.912	0.957	0.902	0.962	0.965		
	2	1991年09月02日	13時38分	4.4			下0.3Hz	E/W	1と2	0.977	0.958	0.984	0.942	2と3	0.967	0.936
	3	1990年05月08日	07時19分	4.5			上1.2Hz	U/D		0.853	0.816	0.938	0.952		0.880	0.856
15	1	1993年12月11日	08時15分	4.9	浦河町潮見	1と2は相似 非相似	40秒間	N/S	0.993	0.993	0.988	0.987	0.986	0.984		
	2	1990年12月25日	06時09分	4.9			下0.3Hz	E/W	1と2	0.991	0.990	0.983	0.985	2と3	0.992	0.987
	3	1990年07月30日	09時01分	4.8			上1.2Hz	U/D		0.981	0.956	0.967	0.962		0.979	0.959
18	1	2002年08月29日	21時19分	4.7	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.989	0.987	0.990	0.991	0.997	0.991		
	2	1994年12月10日	07時48分	4.7			下0.3Hz	E/W	1と2	0.977	0.973	0.982	0.974	2と3	0.995	0.983
	3	1992年03月02日	18時04分	4.8			上1.2Hz	U/D		0.986	0.986	0.994	0.986		0.978	0.978
20	1	2009年09月08日	12時42分	4.8	浦河町潮見	1と3は相似 非相似	40秒間	N/S	0.985	0.985	0.998	0.999	0.986	0.987		
	2	2003年09月28日	07時23分	5.2			下0.3Hz	E/W	1と2	0.991	0.990	0.998	0.995	2と3	0.989	0.982
	3	1994年07月02日	07時43分	4.9			上1.2Hz	U/D		0.995	0.996	0.994	0.796		0.989	0.776
22	1	2008年06月26日	08時37分	5.4	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.998	0.997	0.986	0.986	0.989	0.989		
	2	2003年08月30日	19時06分	5.4			下0.3Hz	E/W	1と2	0.994	0.994	0.976	0.976	2と3	0.985	0.985
	3	1995年01月11日	16時48分	5.4			上1.2Hz	U/D		0.994	0.995	0.991	0.988		0.994	0.975
23	1	2006年11月01日	23時21分	4.8	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.998	0.997						
	2	2001年05月08日	06時27分	4.6			下0.3Hz	E/W	1と2	0.986	0.986					
24	1	2005年08月16日	08時29分	4.6	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.997	0.995						
	2	2003年01月07日	03時27分	4.7			下0.3Hz	E/W	1と2	0.983	0.997					
25	1	2006年03月25日	07時16分	4.8	浦河町潮見	若干異なる	40秒間	N/S	0.987	0.987						
	2	2003年11月24日	18時48分	4.8			下0.3Hz	E/W	1と2	0.988	0.988					
							上1.2Hz	U/D		0.988	0.986					
26	1	2006年04月26日	23時10分	4.6	新ひだか町静内	相似	40秒間	N/S	0.998	0.998						
	2	2001年11月21日	19時25分	4.6			下0.3Hz	E/W	1と2	0.999	0.999					
27	1	2008年8月9日	0時53分	5.2	浦河町潮見	非相似	40秒間	N/S	0.824	0.824						
	2	1995年9月20日	6時05分	5.4			下0.3Hz	E/W	1と2	0.834	0.838					
							上1.2Hz	U/D		0.795	0.796					
28	1	1994年10月9日	21時24分	6.4	釧路市幣舞町(旧)	非相似	40秒間	N/S	0.729	0.724	0.752	0.710	0.771	0.771		
	2	1995年1月12日	19時26分	6.2			下0.1Hz	E/W	1と2	0.834	0.741	0.831	0.673	2と3	0.789	0.789
	3	1997年2月28日	20時32分	6.6			上0.5Hz	U/D		0.651	0.644	0.692	0.688		0.634	0.634
29	1	1990年1月30日	12時15分	5.7	根室市弥栄	非相似	40秒間	N/S	0.969	0.970						
	2	1990年12月10日	16時27分	5.4			下0.3Hz	E/W	1と2	0.987	0.983					
30	1	1992年11月30日	9時20分	5.1	別海町常盤	相似	40秒間	N/S	0.980	0.981						
	2	2000年6月13日	1時54分	4.9			下0.3Hz	E/W	1と2	0.997	0.997					
							上1.2Hz	U/D		0.978	0.979					
71	1	2003年10月12日	3時26分	5.9	広尾町並木通	相似	40秒間	N/S	0.999	0.999	0.998	0.998	0.998	0.998		
	2	2005年1月31日	18時39分	5.9			下0.1Hz	E/W	1と2	0.999	0.999	0.991	0.988	2と3	0.994	0.992
	3	2009年3月7日	23時33分	5.7			上0.5Hz	U/D		0.999	0.999	0.999	0.999		0.999	0.999
96	1	1991年12月17日	13時23分	5.7	根室市弥栄	相似	40秒間	N/S	0.993	0.994						
	2	2010年11月19日	13時01分	5.4			下0.3Hz	E/W	1と2	0.997	0.995					
97	1	1992年2月8日	11時15分	4.4	根室市弥栄	相似	40秒間	N/S	0.988	0.951	0.982	0.981	0.994	0.937		
	2	1996年4月25日	10時57分	4.2			下1.0Hz	E/W	1と2	0.987	0.947	0.986	0.932	2と3	0.996	0.988
	3	2009年7月13日	4時28分	4.4			上4.0Hz	U/D		0.980	0.950	0.980	0.947		0.994	0.889
107	1	1995年3月12日	0時21分	6.2	根室市弥栄	非相似	40秒間	N/S	0.917	0.935						
	2	1995年4月29日	2時08分	6.4			下0.1Hz	E/W	1と2	0.819	0.822					
109	1	1991年10月8日	12時31分	6.1	根室市弥栄	非相似	40秒間	N/S	0.581	0.663						
	2	1996年2月22日	23時59分	6.2			下0.1Hz	E/W	1と2	0.720	0.715					
							上0.5Hz	U/D		0.710	0.731					
119	1	2004年1月13日	5時12分	4.6	広尾町並木通	非相似	40秒間	N/S	0.997	0.996						
	2	2007年2月6日	2時44分	3.9			下0.3Hz	E/W	1と2	0.986	0.980					
120	1	2004年9月5日	3時25分	4.6	静内町ときわ	非相似	40秒間	N/S	0.988	0.987						
	2	2007年11月27日	19時22分	4.5			下0.3Hz	E/W	1と2	0.984	0.983					
							上1.2Hz	U/D		0.985	0.985					
123	1	2005年5月19日	1時33分	5.2	厚岸町尾幌	相似	40秒間	N/S	0.998	0.998						
	2	2010年4月9日	3時41分	5.1			下0.3Hz	E/W	1と2	0.999	0.999					
New Group 01	1	1991年6月23日	20時38分	4.9	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.995	0.995						
	2	2009年12月30日	4時23分	4.8			下0.3Hz	E/W	1と2	0.989	0.981					
New Group 02	1	2003年12月12日	10時46分	5.0	えりも	相似	40秒間	N/S	0.985							
	2	2012年7月22日	13時41分	5.1			下0.3Hz	E/W	1と2	0.993						

\*:グループ10~123は図5.1.1の地震グループのうち、北海道周辺で相似地震として確認されたグループである。また、NewGroup01,02は札幌管区気象台で独自に発見したグループである。

この結果、表5.1.1にある北海道周辺の27地震グループのうち、16地震グループと札幌管区気象台で独自に発見した2つの地震グループが相似地震であると確認された(表5.1.1、図5.1.3参照)。次に、この18地震グループのうち、過去の波形データ(マイクロフィルム)が多く残っている、6地震グループ(図5.1.3のオレンジ色のグループ)について、以下の方法により繰り返し地震であるか否かの調査を行った。

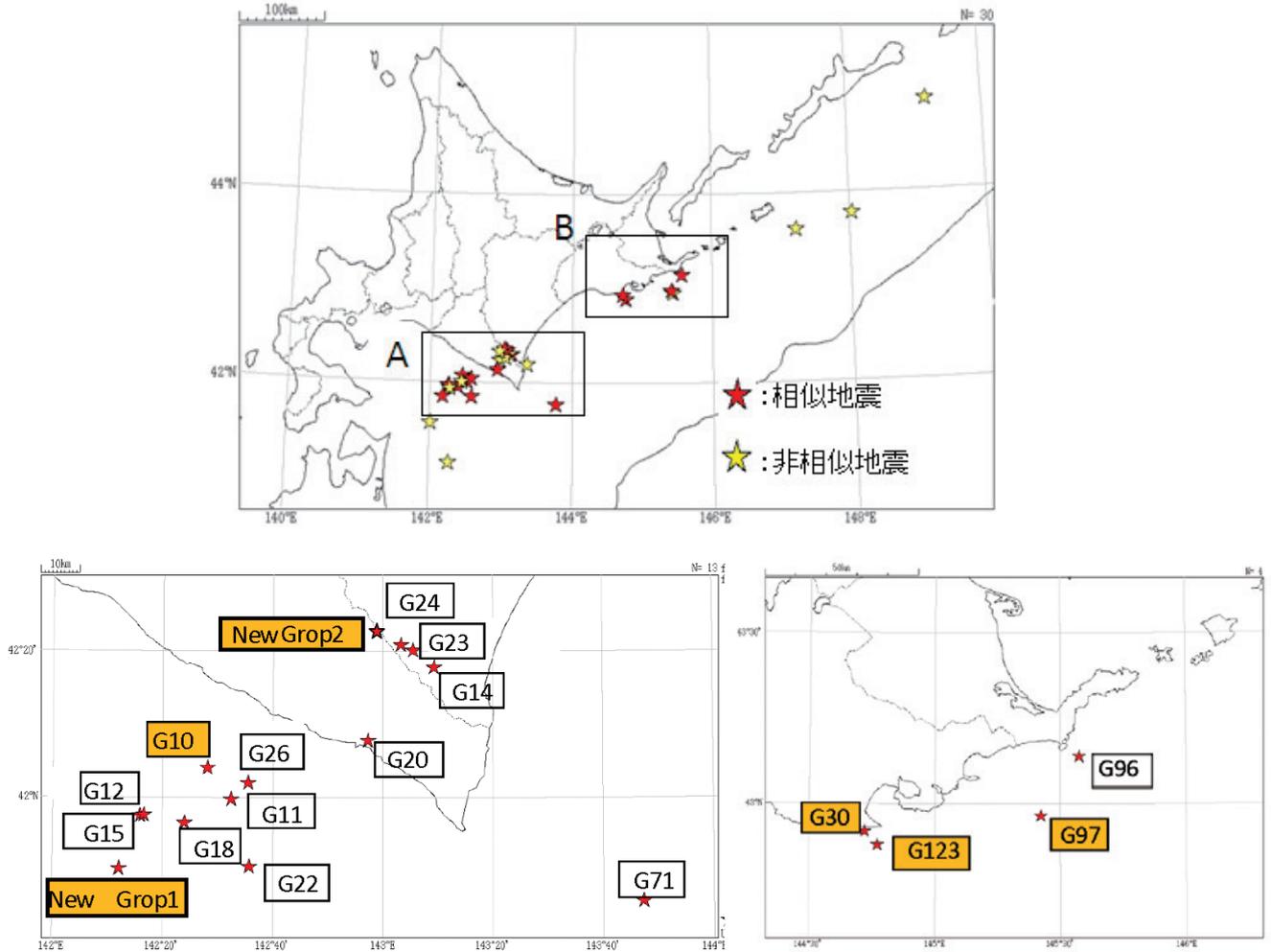


図 5.1.3 北海道周辺で地震波形の相似性が認められたグループの配置図(オレンジ色は今回の調査対象グループ)。

- (1) 各地震グループにおける最新の地震の震央を中心に半径約10kmの領域を設定し、その領域内における過去地震の地震活動経過図(M-T図)から、規模と発生間隔が同程度の地震を抽出する。
- (2) 抽出した地震の波形(デジタル波形やアナログ波形)の重ね合わせや波形の特徴の比較、或いは波形相関(P波付近から40秒間の波形データを用い、0.3~1.2Hzのバンドパスフィルター処理を施した波形データを使用)を求め、抽出した地震の相似性を確認する。

なお、波形の確認には、同一観測点、同一地震計による長期間の記録が必要であるが、長期間に渡り観測条件が同一な観測点がないため、複数の観測点で共通する地震を含めて比較することで長期間に渡る地震波形の相似性を確認する。

- (3) (1)で抽出した地震の震源を観測点限定により再評価し、震源の纏まり具合を確認する。

ただし、年代により観測点の配置が変わっているため、抽出したすべての地震を同じ観測点の組み合わせ(使

用する相も同一) で評価できないことから共通の観測点で計算できる期間を分け、それぞれの期間に同一の地震が含まれるようにして震源の纏まり具合を確認する。

- (4) 抽出した地震の発震機構解或いは初動分布の相似性を確認する。
- (5) (1) から (4) の結果で繰り返し地震であることの同定を行う。繰り返し地震と同定した地震グループについては地震の発生間隔とすべり量(Nadeau and Johnson, 1998)から平均滑り速度を推定し、その平均滑り速度がその周辺の平均的なプレートの滑り量と整合していることを確認すると共に、その地震グループにおける次回の地震発生年月を大阪管区気象台地震火山課作成のL-CAT (地震長期発生確率計算ツール) を用いて推定する。

5.1.3 浦河沖 1 (NewGroup01)

5.1.3.1 同系列と思われる地震の抽出

表5.1.1で確認したNewGroup01付近の震央分布図と領域 a 内の地震活動経過図(図5.1.4)から、1997年3月17日と2003年11月14日の地震と規模および発生間隔が同程度で、プレート境界付近で発生したと思われる11地震を抽出した(表5.1.2)。なお、抽出した期間は53型、54型普通地震計が整備され始めた1954年以降とした。

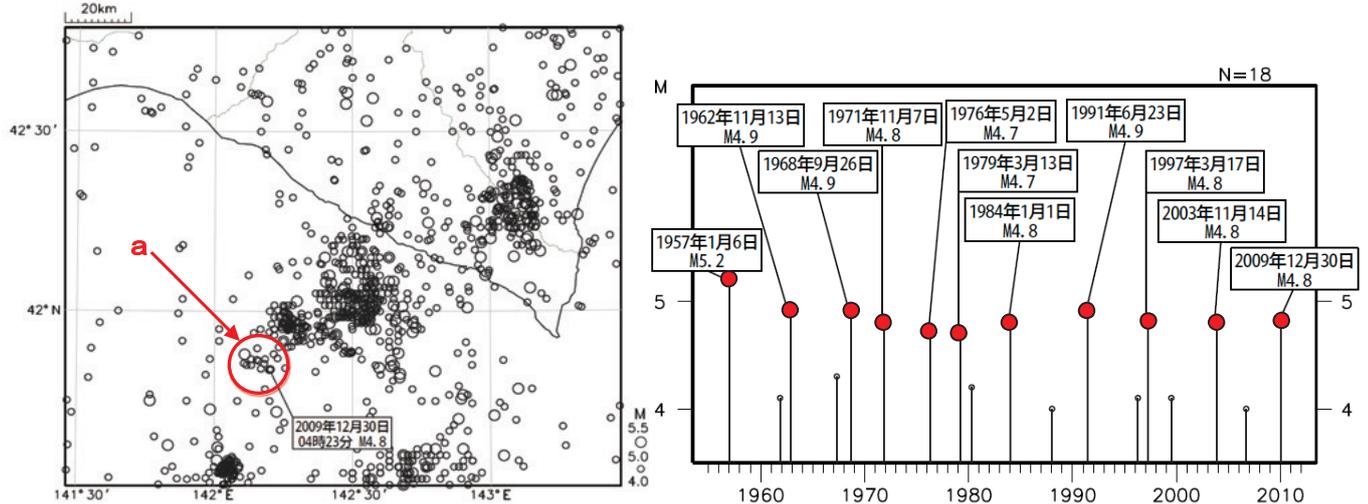


図 5.1.4 震央分布図と領域 a 内の地震の発生状況 (M-T 図)。1954 年 1 月 1 日～2012 年 6 月 30 日、深さ 0～100km、4.0 ≤ M ≤ 5.5。

表5.1.2 相似性の確認対象とした地震 (浦河沖 1)。

番号	発生日時	M	深さ (km)	番号	発生日時	M	深さ (km)
1	1957/01/06 14:15	5.2	69	7	1984/01/01 11:22	4.8	69
2	1962/11/13 17:54	4.9	78	8	1991/06/23 20:38	4.9	66
3	1968/09/26 06:36	4.9	80	9	1997/03/17 18:23	4.8	66
4	1971/11/07 16:51	4.8	70	10	2003/11/14 07:39	4.8	70
5	1976/05/02 04:34	4.7	70	11	2009/12/30 04:23	4.8	72
6	1979/03/13 12:35	4.7	60				

5.1.3.2 波形の比較

選択した 11 地震の相似性を確認するため、デジタル波形データ及びアナログ波形記録の比較を行った。

(1) デジタル波形データの比較

気象庁のデジタル波形記録は、1988 年以降のものが利用可能であるが、観測点の移設等により波形比較ができない地震がある。このことから気象庁の波形データで相似性を確認できない地震については、北海道大学から波形データの提供を受け、波形の重ね合わせや波形相関を求め相似性の確認を行った(図 5.1.5)。この結果、2009 年、2003 年、1997 年及び 1991 年の地震波形が相似であることが確認された。

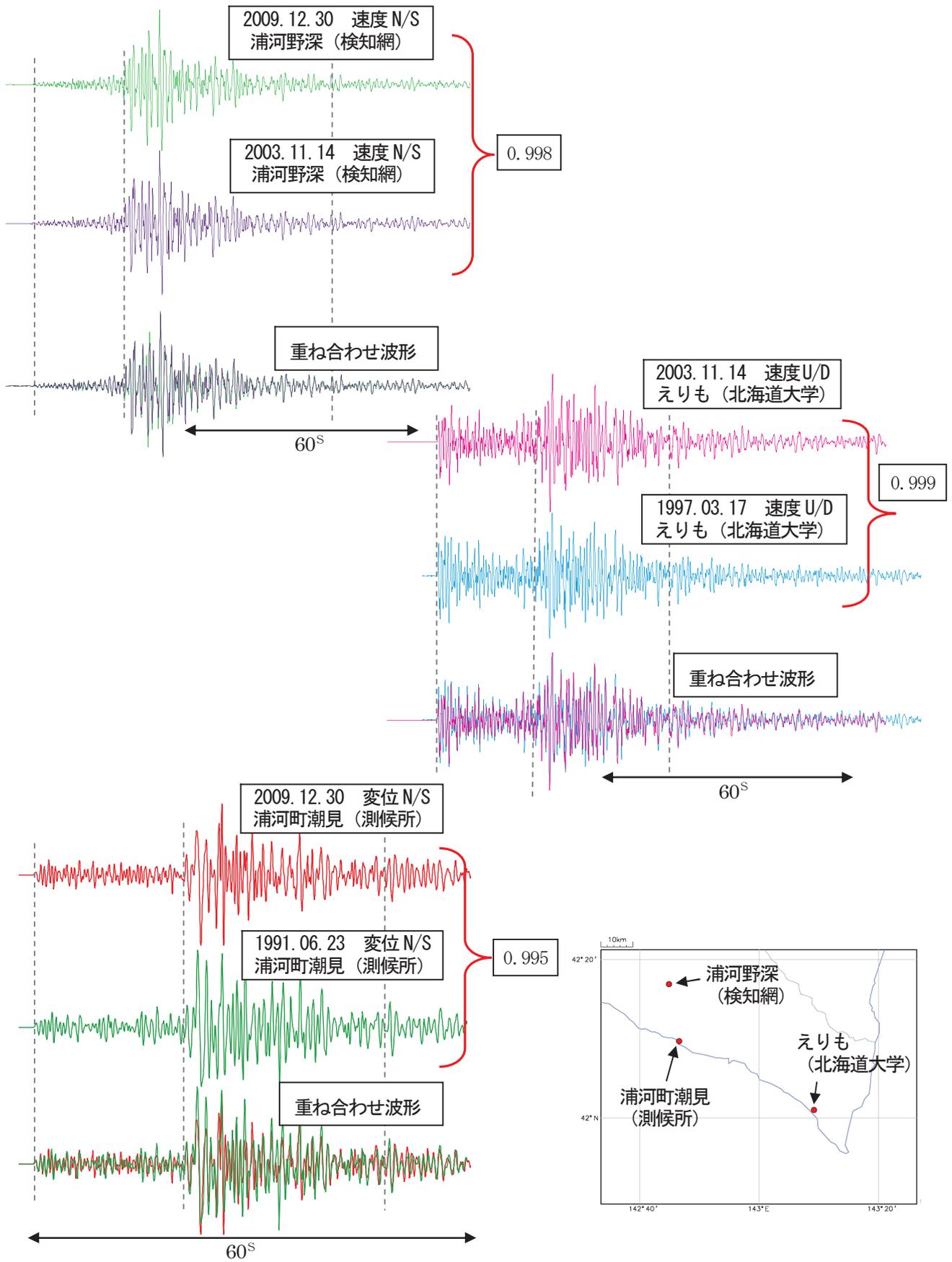


図 5.1.5 地震波形 (デジタルデータを再現) の比較。数値は波形のコヒーレンスを表す。破線は比較のための補助線である。

(2) アナログ記録の比較

デジタル波形の無い1991年から1968年までの6地震については、浦河測候所の59型電磁地震計記録の特徴(図5.1.6)から、また1968年から1957年までの3地震については、帯広測候所の53型又は54C型普通地震計記録の特徴(図5.1.7)から地震波形が相似であることを目視により確認した。

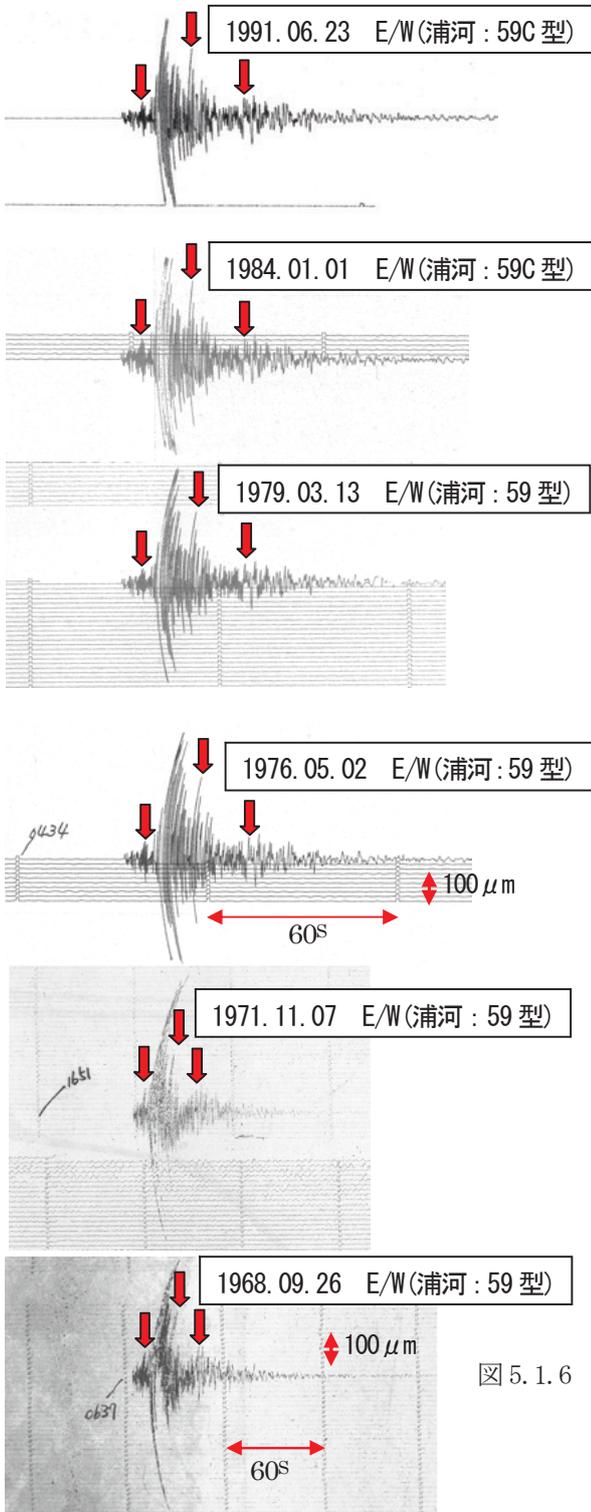


図 5.1.6 地震波形 (マイクロフィルムから再現) の比較。【浦河測候所: 59 型電磁地震計】矢印は特徴的な位相を示す。

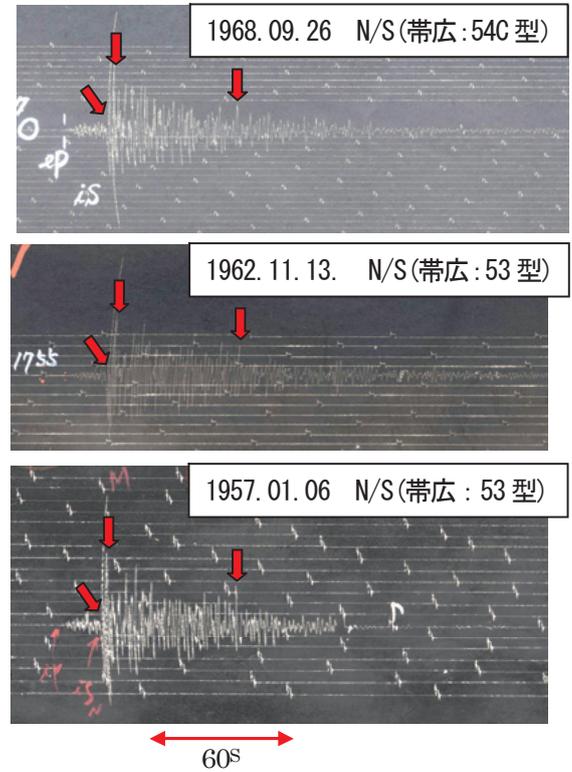


図 5.1.7 地震波形 (マイクロフィルムから再現) の比較。  
【帯広測候所: 53 型/54C 型普通地震計】矢印は特徴的な位相を示す。

(3) 比較結果

デジタル波形記録とアナログ波形記録の相似性の確認結果から選択した11地震はすべて相似であることを確認した(表5.1.3)。

表5.1.3 各観測点の記録から相似地震と認められた地震(浦河沖1)。色つきのセルは複数観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

地点(種別) 地震発生日時	浦河測候所 (59型) アナログ記録	帯広測候所 (53/54C型) アナログ記録	浦河測候所 (強震データ) デジタル記録	浦河野深 (検知網) デジタル記録	えりも (北海道大学) デジタル記録
1957/01/06 14:15	—	○	—	—	—
1962/11/13 17:54	—	○	—	—	—
1968/09/26 06:36	○	○	—	—	—
1971/11/07 16:51	○	—	—	—	—
1976/05/02 04:34	○	—	—	—	—
1979/03/13 12:35	○	—	—	—	—
1984/01/01 11:22	○	—	—	—	—
1991/06/23 20:38	○	—	○	—	—
1997/03/17 18:23	—	—	—	—	○
2003/11/14 07:39	—	—	—	○	○
2009/12/30 04:23	—	—	○	○	—

○:各観測点において相似と認められた地震      —:記録なし

### 5.1.3.3 震源再計算による震源の精査

表5.1.2の11地震の震源について観測点限定を行い再決定した。ただし、11地震全てを同じ観測点で評価できないことから、二つの期間に分け、それぞれの期間では共通の観測点を用い、また二つの期間に同一地震（1979年、1984年、1991年）が含まれるよう再計算を行った。その結果、東西約10kmに分布していた震源は、それぞれほぼ同一場所に纏まった。このことから11地震はほぼ同一場所で発生したものと考えられる（図5.1.8、図5.1.9）。なお、図中のカタログ震源とは気象庁震源カタログあるいは一元化处理震源カタログに掲載されている震源を指す。

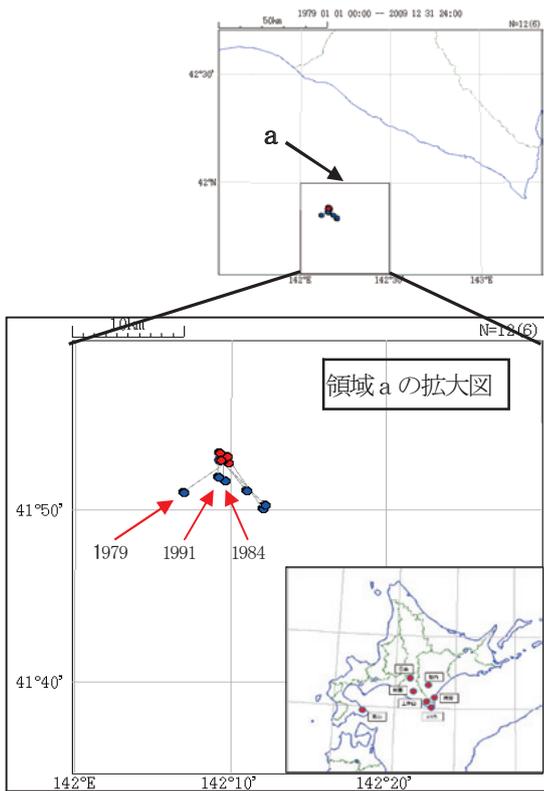


図 5.1.8 使用した観測点と、観測点限定による再計算震源（1979～2009 年の 6 地震：北海道大学の検測値を使用）。●：カタログ震源 ●：再計算後。赤矢印は図 5.1.9 と共通の地震を示す。

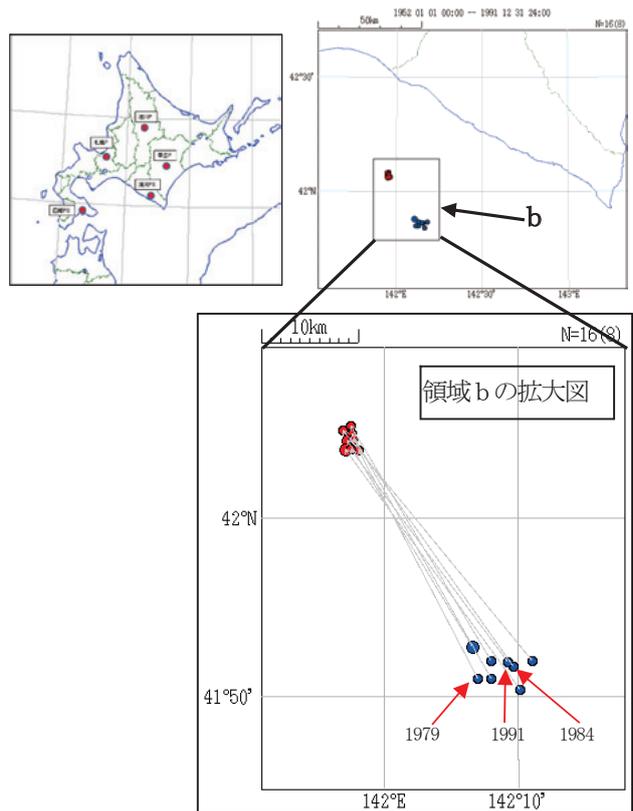


図 5.1.9 使用した観測点と観測点限定による再計算震源（1957～1991 年の 8 地震：気象官署の検測値を使用）。※旭川の P 相を一部精査 ●：カタログ震源 ●：再計算後。赤矢印は図 5.1.8 と共通の地震を示す。

### 5.1.3.4 発震機構解及びP波初動分布

表5.1.2の11地震のうち、発震機構解及びP波初動分布のデータがあるものを図5.1.10に示す。2009年、2003年及び1997年の地震は発震機構解が求まっており、同じ型の地震と考えられる。また、他の6地震についても初動の分布から発震機構解が求まっている地震とほぼ同様の型の地震と推測される。

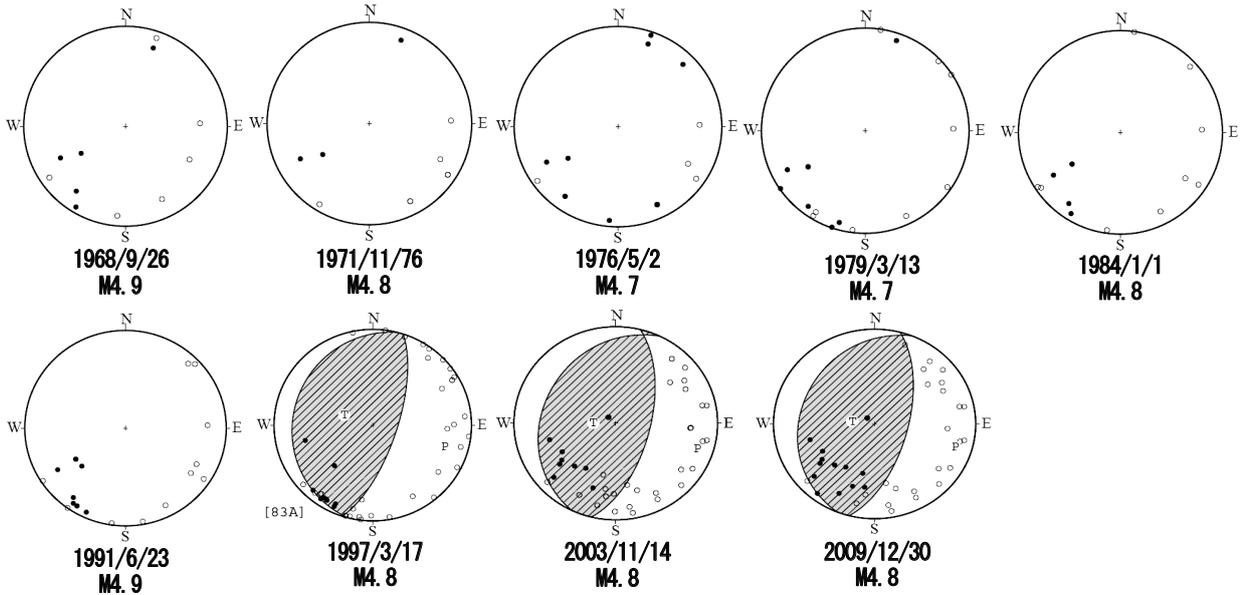


図5.1.10 発震機構及びP波初動分布。

5.1.3.5 平均滑り速度の推定と次回の発生予測

地震波形比較、震源再計算による震源の精査、発震機構解及びP波初動分布から図5.1.4で抽出した11地震は繰り返し地震であると同定した(表5.1.4)。

この地震グループの地震発生間隔と各地震の推定すべり量(Nadeau and Johnson, 1998)から平均滑り速度7.7cm/年(図5.1.11)を得た。この値は、これらの地震が発生している付近の太平洋プレートの平均的な速度(8cmから10cm)と調和的である。

なお、図5.1.12に繰り返し地震の地震活動経過図と発生間隔を、次回の発生予測を表5.1.5に示す。次回の発生予測は小標本論対数正規分布を用いる方法(岡田, 2009)によった。

表5.1.4 同定された繰り返し相似地震とその確認結果。

種別 日時	地震波形	震源再計算	発震機構解	P波初動分布
1957/01/06 14:15	○	○		
1962/11/13 17:54	○	○		
1968/09/26 06:36	○	○		○
1971/11/07 16:51	○	○		○
1976/05/02 04:34	○	○		○
1979/03/13 12:35	○	○		○
1984/01/01 11:22	○	○		○
1991/06/23 20:38	○	○		○
1997/03/17 18:23	○	○	○	○
2003/11/14 07:39	○	○	○	○
2009/12/30 04:23	○	○	○	○

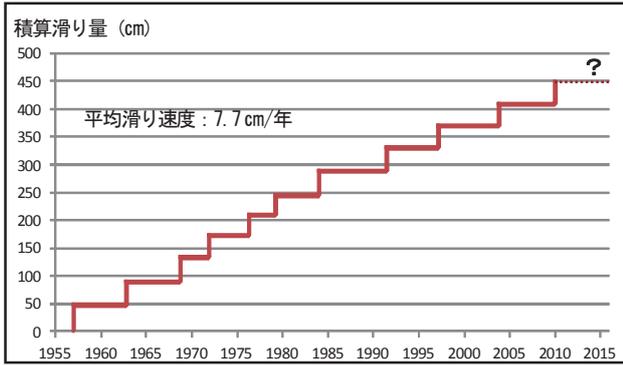


図 5. 1. 11 積算滑り量と平均滑り速度。

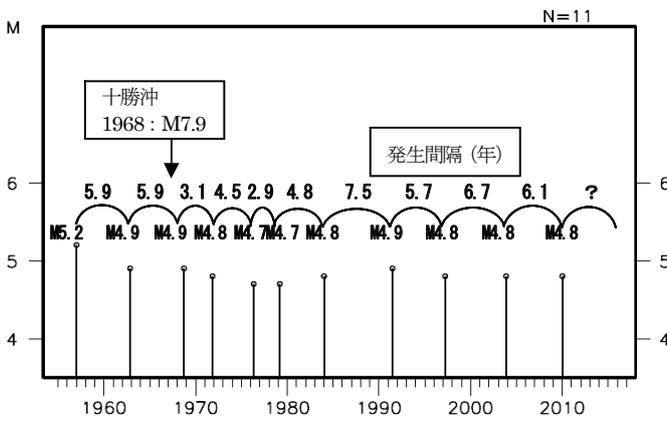


図 5. 1. 12 繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔。

表5.1.5 繰り返し間隔と次回の予測。

平均M : 4.8
繰り返し間隔 最短 : 2.9年
最長 : 7.5年
平均 : 5.3年
(標準偏差 1.41)
次回の予測
2015年3月±21ヶ月
3年以内の発生確率 : 63.6%
(予測モデル : 小標本論対数正規分布、 2012.11.1基準、70%の確率)

5.1.4 浦河沖 2 (Group10)

5.1.4.1 同系列と思われる地震の抽出

表5.1.1 で確認したGroup10付近の震央分布図 (図5.1.13) と領域a内の地震活動経過図から、2011年7月26日と2004年7月4日および1988年12月21日の地震と規模も発生間隔も同程度で、プレート境界付近で発生したと思われる9地震を抽出した (表5.1.6)。なお、抽出する期間は53型、54型普通地震計が整備され始めた1954年以降とした。

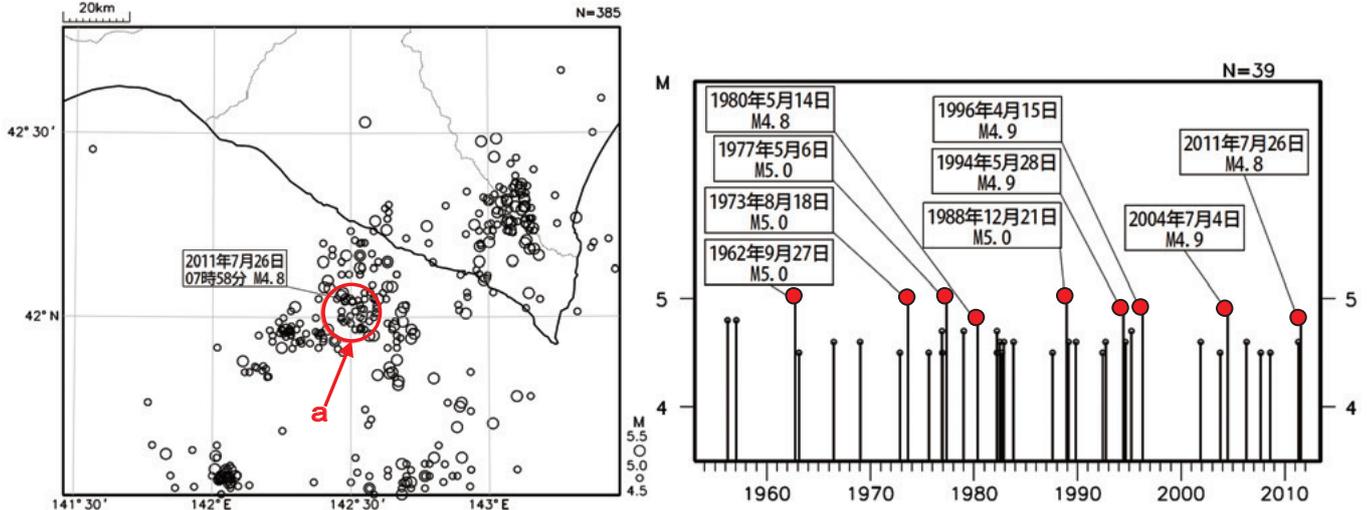


図 5.1.13 震央分布図と領域 a 内の地震の発生状況 (M-T 図)。1954 年 1 月 1 日～2012 年 6 月 30 日、深さ 0～75km、 $4.5 \leq M \leq 5.5$ 。

表5.1.6 相似性の確認対象とした地震 (浦河沖 2)。

番号	発生日時	M	深さ (km)	番号	発生日時	M	深さ (km)
1	1962/09/27 18:18	5.0	70	6	1994/05/28 10:21	4.9	62
2	1973/08/18 11:08	5.0	70	7	1996/04/15 06:44	4.9	66
3	1977/05/06 07:14	5.0	70	8	2004/07/04 21:31	4.9	62
4	1980/05/14 17:07	4.8	70	9	2011/07/26 07:58	4.8	67
5	1988/12/21 19:53	5.0	74				

5.1.4.2 波形の比較

選択した9地震の相似性を確認するため、デジタル波形データ及びアナログ波形記録の比較を行った。

(1) デジタル波形データの比較

気象庁のデジタル波形記録は、1988年以降のものが利用可能であるが、観測場所の移設等により波形比較ができない地震がある。このことから気象庁のデジタル波形記録で相似性を確認できない地震については、北海道大学から波形記録の提供を受け、波形の重ね合わせや波形相関を求め相似性の確認を行った (図 5.1.14)。

この結果、2011年、2004年、1996年及び1988年の地震波形の相似性が確認された。

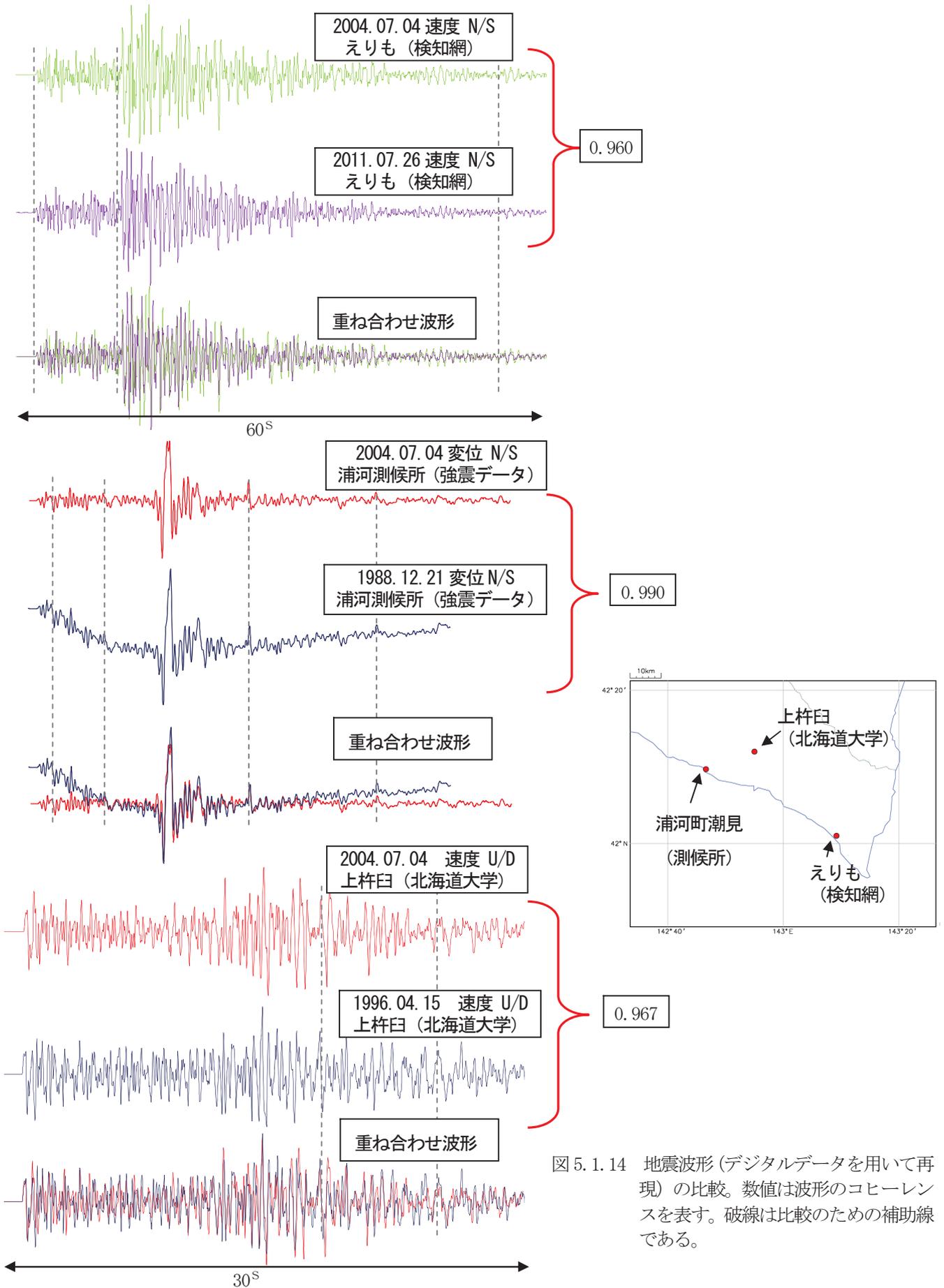


図 5.1.14 地震波形 (デジタルデータを用いて再現) の比較。数値は波形のコヒーレンスを表す。破線は比較のための補助線である。

(2) アナログ記録の比較

デジタル波形の無い 1988 年、1980 年及び 1973 年の 3 地震と 1988 年、1980 年の 2 地震については、それぞれ浦河測候所及び帯広測候所の 59 型電磁地震計による記録の特徴 (図 5.1.15) から、地震波形が相似であることを確認した。

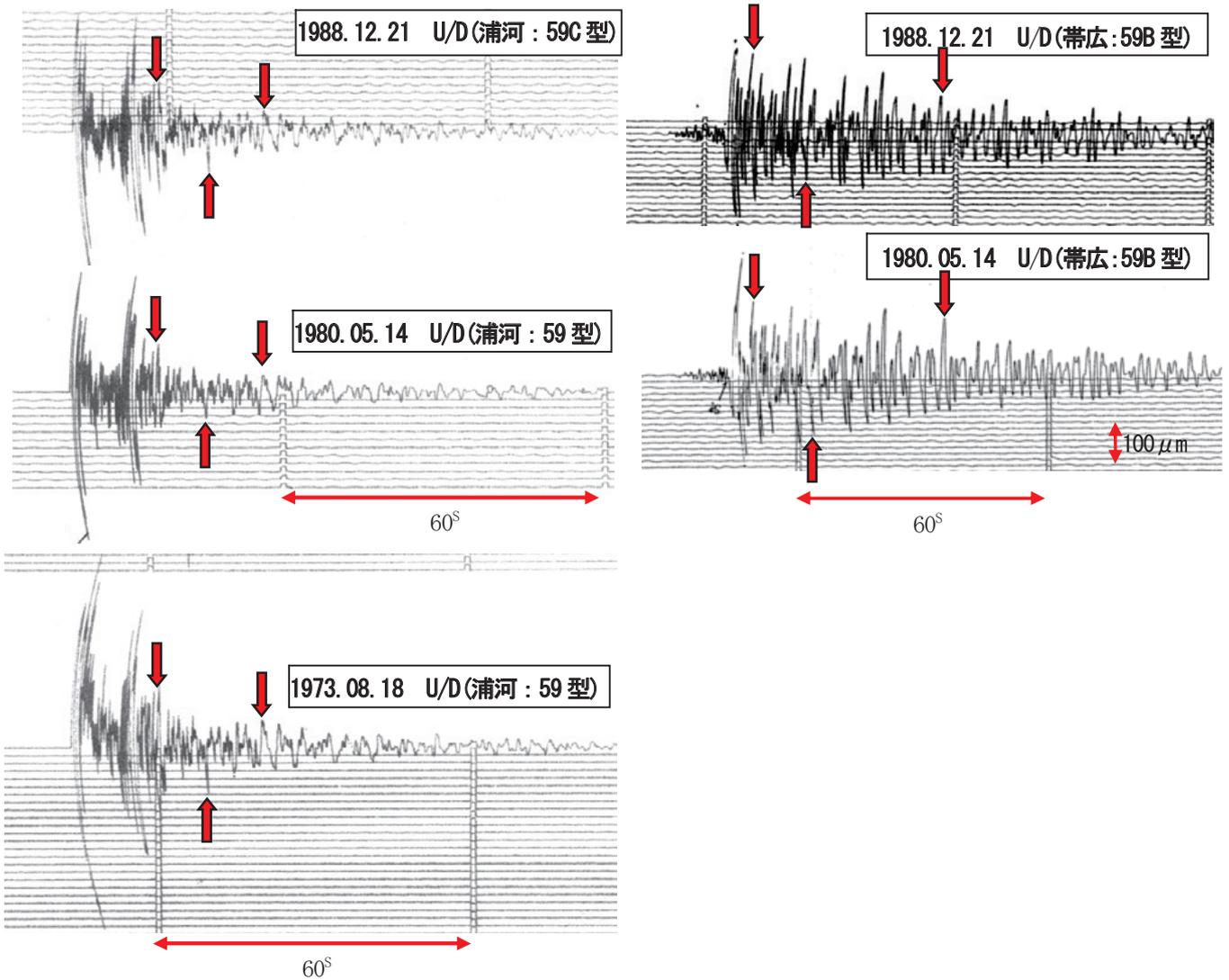


図 5.1.15 地震波形 (マイクロフィルムから再現) の比較  
矢印は特徴的な位相を示す。

(3) 比較結果

デジタル波形記録とアナログ波形記録の相似性の確認結果から選択した 9 地震のうち 6 地震が相似であることを確認した (表 5.1.7)。

表 5.1.7 各観測点の記録から相似地震と認められた地震 (浦河沖 2)。色つきのセルは 3 観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

地点 (種別) 日 時	浦河測候所 (59 型) アナログ記録	帯広測候所 (53/54C 型) アナログ記録	浦河測候所 (強震データ) デジタル記録	えりも (検知網) デジタル記録	上杵臼 (北海道大学) デジタル記録
1962/09/27 18:18	—	—	—	—	—
1973/08/18 11:08	○	—	—	—	—
1977/05/06 07:14	×	—	—	—	—
1980/05/14 17:07	○	●	—	—	—
1988/12/21 19:53	○	●	●	—	—
1994/05/08 10:21	×	—	—	—	—
1996/04/15 06:44	—	—	—	—	●
2004/07/04 21:31	—	—	●	●	●
2011/07/26 07:58	—	—	—	●	—

○ : 各観測点において相似と認められた地震 × : 相似と認められない地震 — : 記録なし

5.1.4.3 震源再計算による震源の精査

表 5.1.6 の 9 地震の震源について観測点限定を行い再決定した。ただし、9 地震全てを同じ観測点で評価できないことから、二つの期間に分け、二つの期間のそれぞれには同じ観測点を用い、二つの期間に同一地震 (1988 年) が含まれるよう再計算を行った。その結果、1988 年以降の 5 地震では、1994 年の地震を除く 4 地震が、震央、深さ共にほぼ同一の場所に纏まった (図 5.1.16)。また、1988 年以前の 5 地震では、1962 年及び 1977 年の地震を除く 3 地震がほぼ同一場所に纏まった (図 5.1.17)。このことから 6 地震はほぼ同一場所で発生したものと考えられる。

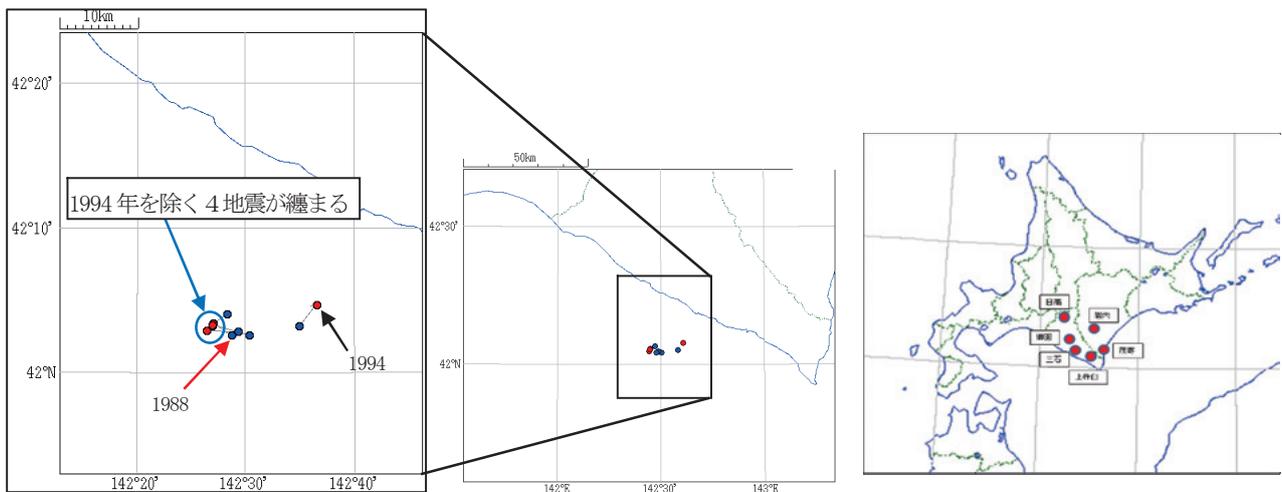


図 5.1.16 使用した観測点と観測点限定による再計算震源 (1988~2011 年の 5 地震 : 北海道大学の 6 点の P 相を使用)。

● : カタログ震源 ● : 再計算後。赤矢印は図 5.1.17 と共通の地震を示す。

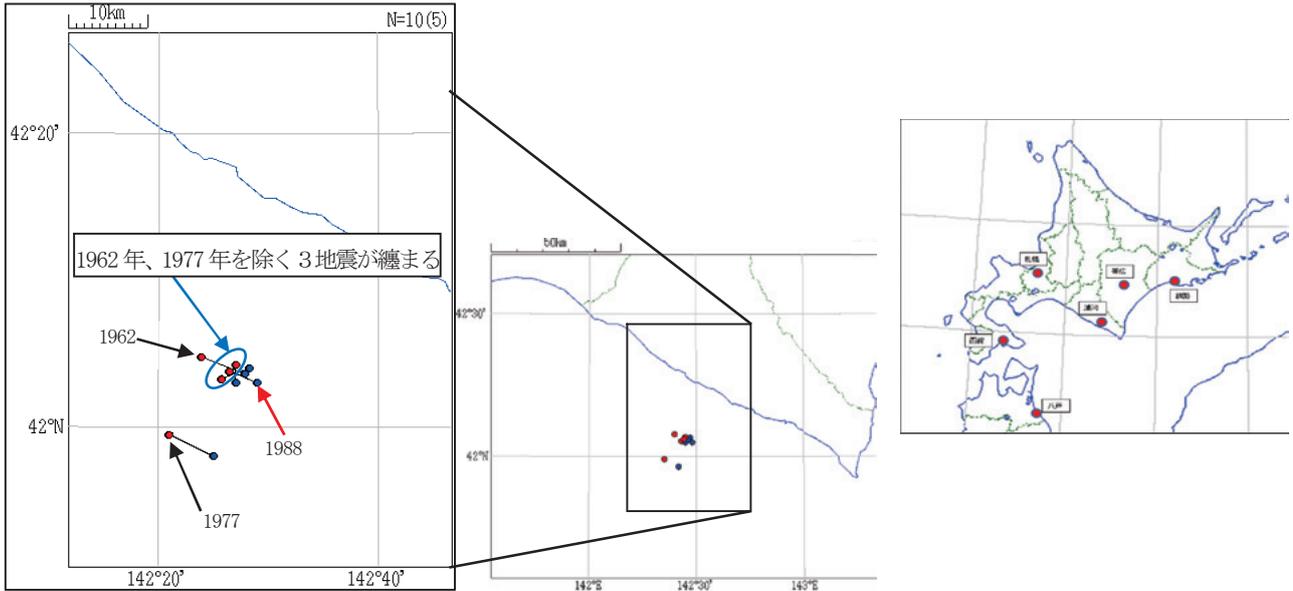


図 5. 1. 17 観測点の限定による震源再計算 (1962~1988 年の 5 地震 : 気象庁観測点 6 点の P 相使用)。● : カタログ震源 ● : 再計算後。赤矢印は図 5. 1. 16 と共通の地震を示す。

#### 5. 1. 4. 4 発震機構解及びP波初動分布

図5. 1. 13から選択した9地震のうち、発震機構解及びP波初動分布のデータがあるものを図5. 1. 18に示す。2011年、2004年及び1996年の地震は発震機構解が求まっており、同じ型のプレート境界で発生した地震と考えられる。また、他の5地震についても初動分布は発震機構解の求まっている地震と同様の型の地震と矛盾はしない。

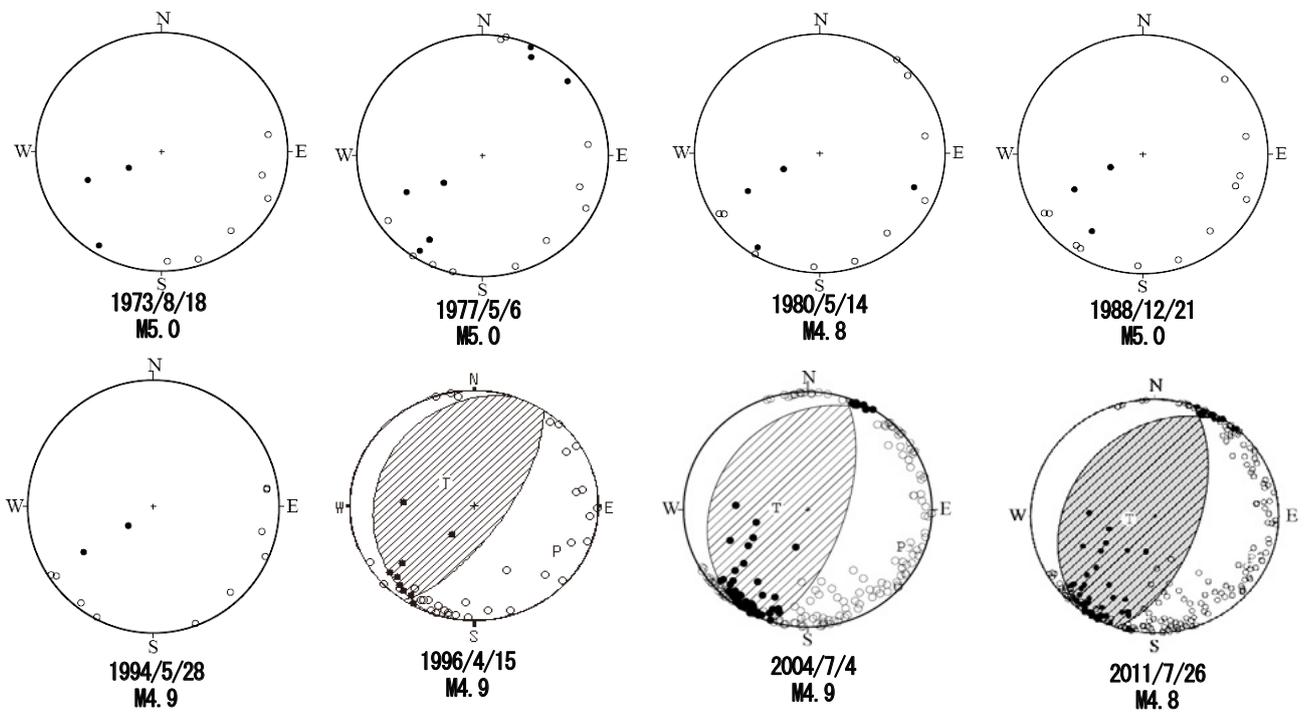


図 5. 1. 18 発震機構解及びP波初動分布。

5.1.4.5 平均滑り速度の推定と次回の発生予測

地震波形の相似性、震源の纏まり具合、発震機構解及びP波初動分布の類似性から、図5.1.13 で抽出した9地震のうち6地震は繰り返し地震であると同定した(表5.1.8)。

この地震グループの地震発生間隔と各地震の推定すべり量から平均滑り速度5.5cm/年(図5.1.19)を得た。この値は、これらの地震が発生している付近の太平洋プレートの平均的な速度(8cmから10cm)と調和的である。なお、図5.1.20に繰り返し地震の地震活動経過図と発生間隔を、次回の発生予測を表5.1.9に示す。

表5.1.8 同定された繰り返し相似地震とその確認結果。色つきのセルは複数観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

種別 日時	地震波形	震源再計算	発震機構解	P波初動分布
1962/09/27 18:18	—	×	—	—
1973/08/18 11:08	○	○	—	○
1977/05/06 07:14	×	×	—	○
1980/05/14 17:07	○	○	—	○
1988/12/21 19:53	○	○	—	○
1994/05/28 10:21	×	×	—	○
1996/04/15 06:44	○	○	○	○
2004/07/04 21:31	○	○	○	○
2011/07/26 07:58	○	○	○	○

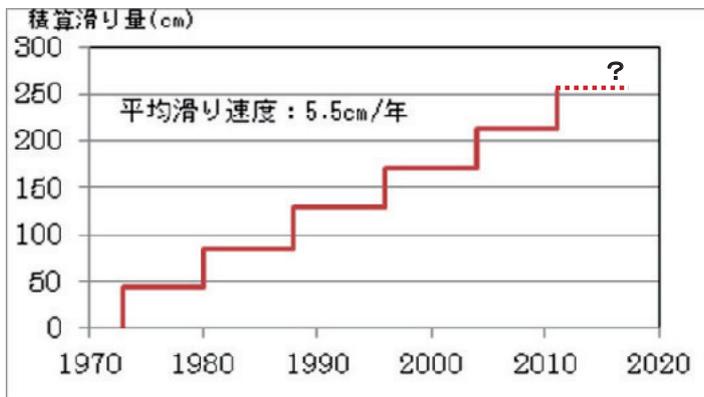


図 5.1.19 積算滑り量と平均滑り速度。

表5.1.9 繰り返し間隔と次回の予測。

平均M : 4.9
繰り返し間隔 最短 : 6.7年
最長 : 8.6年
平均 : 7.6年
(標準偏差 0.71)
次回の予測
2019年3月±12ヶ月
3年以内の発生確率 : 0.4%
(予測モデル : 小標本論対数正規分布、 2012.11.1基準、70%の確率)

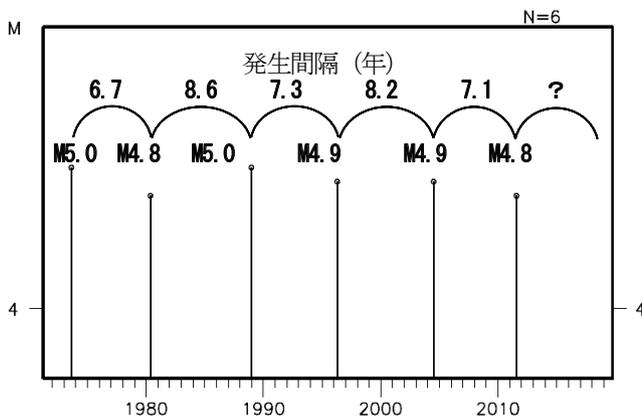


図 5.1.20 繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔。

5.1.5 十勝地方南部 (NewGroup02)

5.1.5.1 同系列と思われる地震の抽出

表5.1.1で確認したNewGroup02震央分布図(図5.1.21)と領域a内の地震活動経過図から、2003年12月12日と2012年7月22日の地震と規模および発生間隔が同程度で、プレート境界付近で発生したと思われる11地震を抽出した(表5.1.10)。なお、抽出する期間は59型電磁式地震計が整備され始めた1963年以降とした。

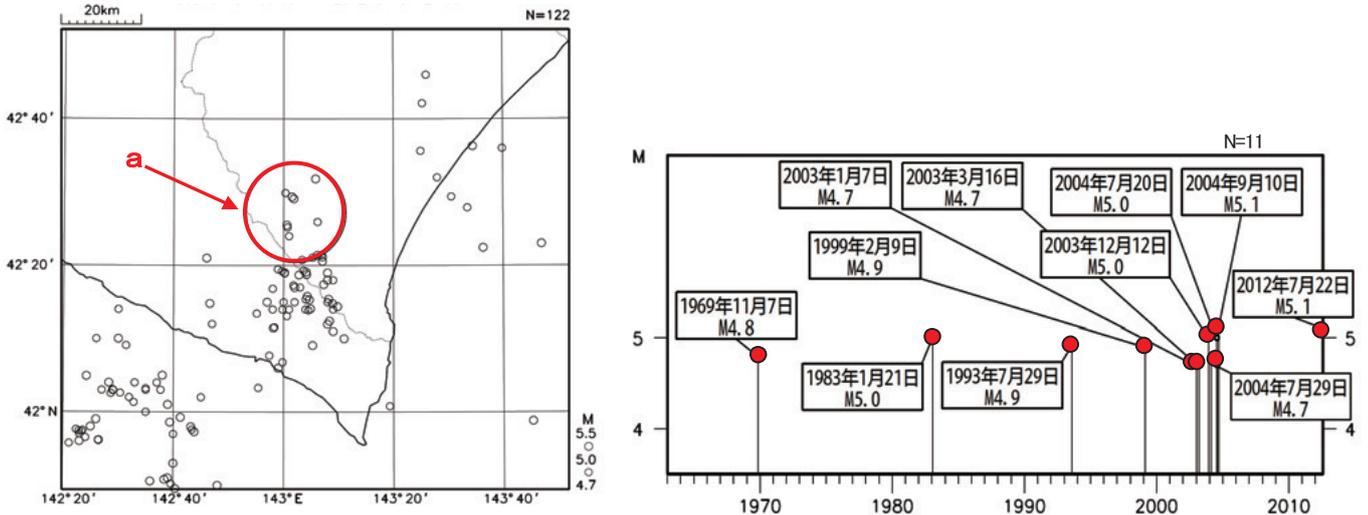


図 5.1.21 震央分布図と領域a内の地震の発生状況 (M-T 図)。1963年1月1日～2012年7月31日、深さ 50～100km、 $4.7 \leq M \leq 5.5$ 。

表5.1.10 相似性の確認対象とした地震 (十勝地方南部)。

番号	発生日時	M	深さ (km)	番号	発生日時	M	深さ (km)
1	1969/11/07 07:06	4.8	80	7	2003/12/12 10:46	5.0	59
2	1983/01/21 19:25	5.0	76	8	2004/07/20 05:58	5.0	98
3	1993/07/29 23:53	4.9	77	9	2004/07/29 13:08	4.7	50
4	1999/02/09 09:19	4.9	52	10	2004/09/10 13:22	5.1	51
5	2003/01/07 03:27	4.7	52	11	2012/07/22 13:41	5.1	61
6	2003/03/16 14:35	4.7	100				

5.1.5.2 波形の比較

選択した 11 地震の相似性を確認するため、デジタル波形データ及びアナログ波形記録の比較を行った。

(1) デジタル波形データの比較

気象庁の地震デジタル波形データは、1988年以降のものが利用可能であるが、観測場所の移動や波形の再現ができない地震がある。このことから気象庁の波形データで相似性を確認できない地震については、北海道大学から波形データの提供を受け、波形の重ね合わせや波形相関を求め相似性の確認を行った(図5.1.22)。この結果、2012年、2003年12月及び1993年の地震波形が相似であることが確認された。

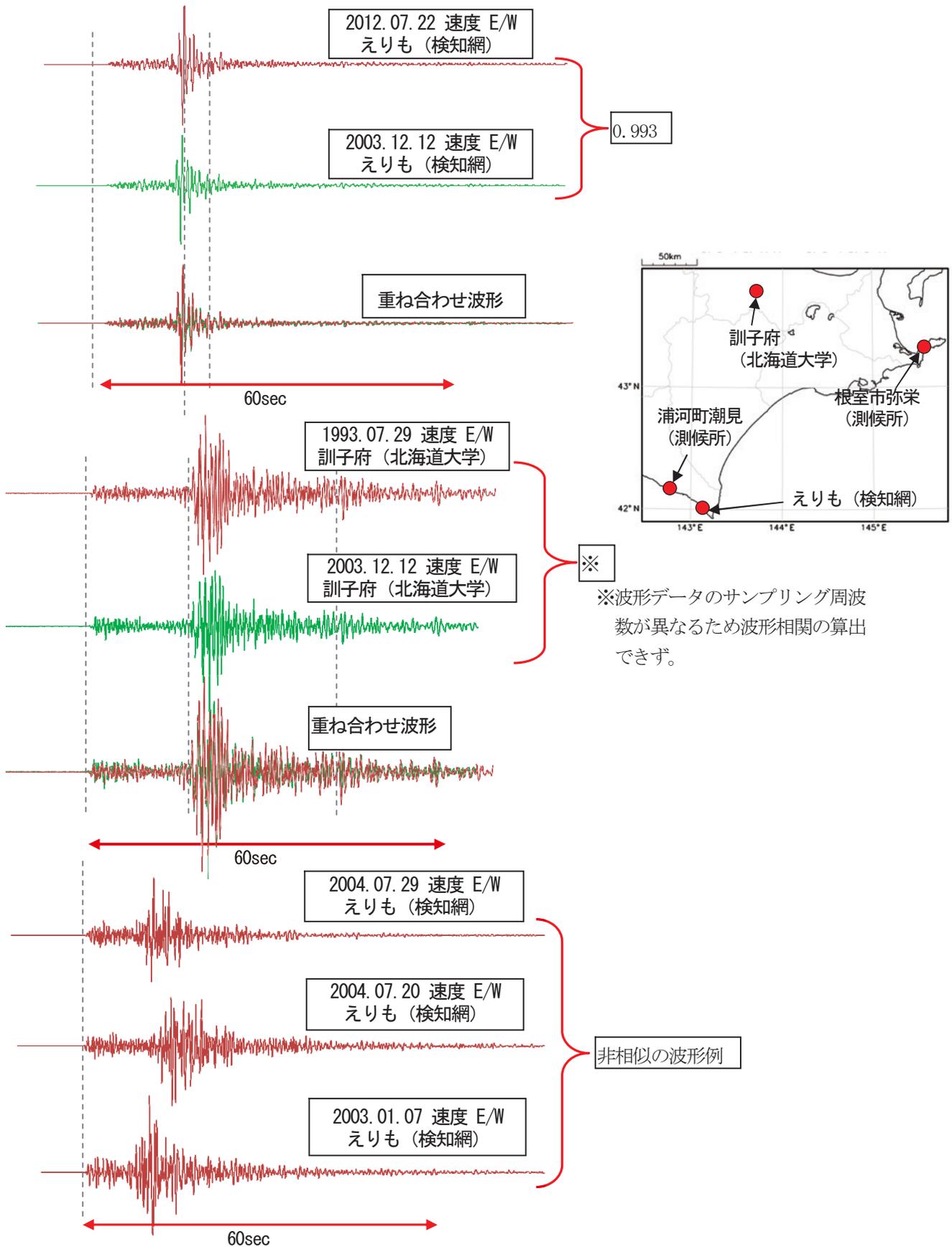


図 5.1.22 地震波形 (デジタルデータを再現) の比較。数値は波形のコヒーレンスを表す。破線は比較のための補助線である。

(2) アナログ記録の比較

デジタル波形の無い 1993 年、1983 年及び 1969 年の 3 地震については、浦河測候所及び根室測候所の 59 型電磁式地震計記録の特徴から、図 5.1.23 に示すとおり、地震波形が相似であることを確認した。

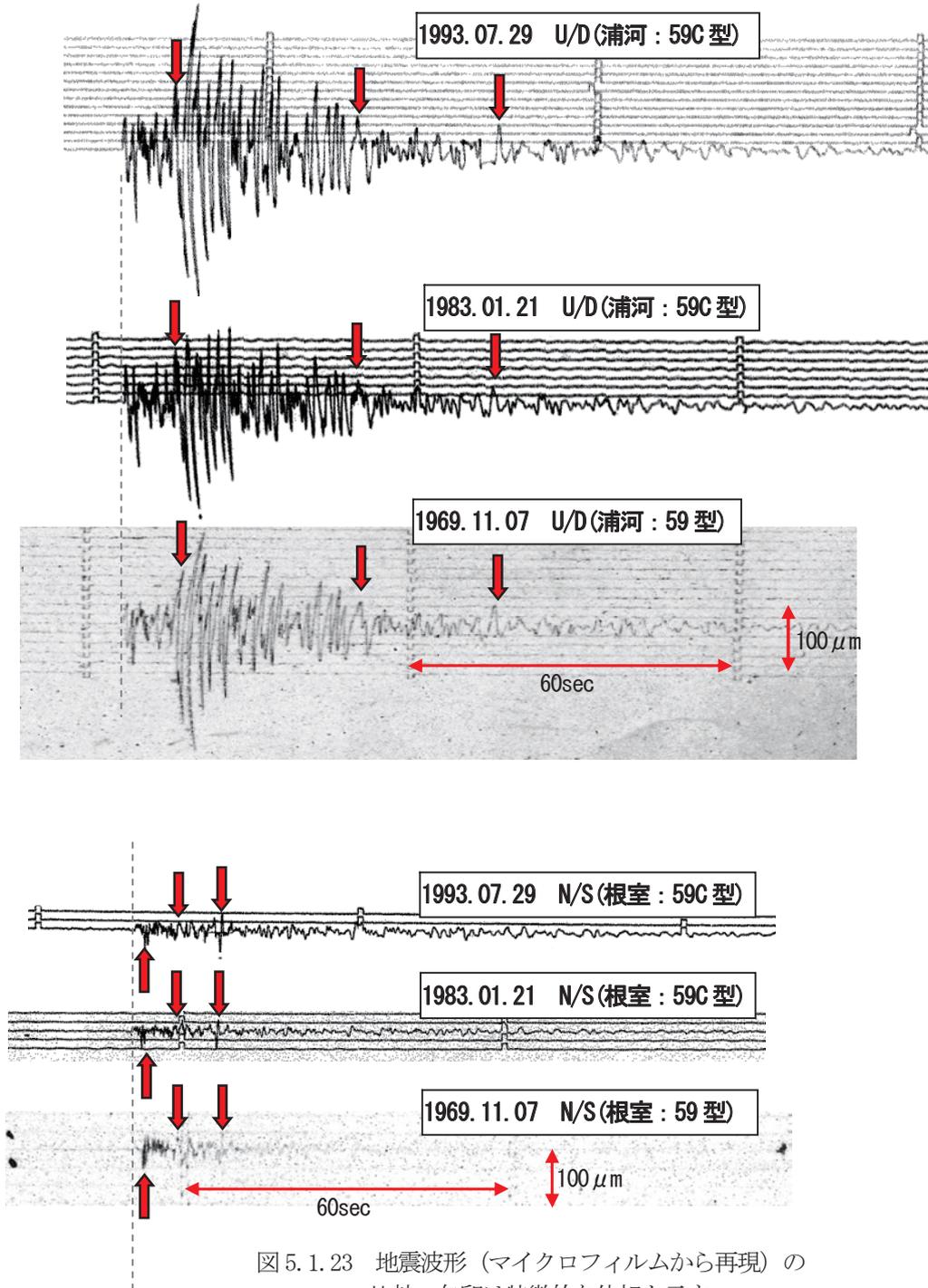


図 5.1.23 地震波形（マイクロフィルムから再現）の比較。矢印は特徴的な位相を示す。

(3) 比較結果

デジタル波形記録とアナログ波形記録の相似性の確認結果から選択した11地震のうち5地震が相似であることを確認した（表5.1.11）。

表5. 1. 11 各観測点の記録から相似地震と認められた地震（十勝地方南部）。色つきのセルはデジタル記録の観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

地点 (種別) 日 時	浦河測候所 (59/59C 型) アナログ記録	根室測候所 (59/59C 型) アナログ記録	えりも (検知網) デジタル記録	訓子府 (北海道大学) デジタル記録
1969/11/07 17:06	○	○	—	—
1983/01/21 19:25	○	○	—	—
1993/07/29 23:53	○	○	—	○
1999/02/09 09:19	—	—	×	—
2003/01/07 03:27	—	—	×	—
2003/03/16 14:35	—	—	×	—
2003/12/12 10:46	—	—	○	○
2004/07/20 05:58	—	—	×	—
2004/07/29 13:08	—	—	×	—
2004/09/10 13:22	—	—	×	—
2012 07 22 13:41	—	—	○	—

○：各観測点において相似と認められた地震 ×：相似と認められない地震 —：記録なし

### 5. 1. 5. 3 震源再計算による震源の精査

表5. 1. 10の11地震の震源について、観測点限定等を行い再決定した。ただし、11個の地震全てを同じ観測点で評価できないことから、二つの期間に分け、それぞれの期間には同じ観測点を用い、二つの期間に同一の地震（1993年）が含まれるよう再計算を行った。その結果、1993年以降の9地震では、2012年7月22日、2003年12月12日及び1993年7月29日の地震が、震央、深さ共にほぼ同一の場所に纏まった（図5. 1. 24）。また、1993年以前の3地震は半径約5km以内に纏まった（図5. 1. 25）ことから、5地震はほぼ同一場所で発生したものと考えられる。

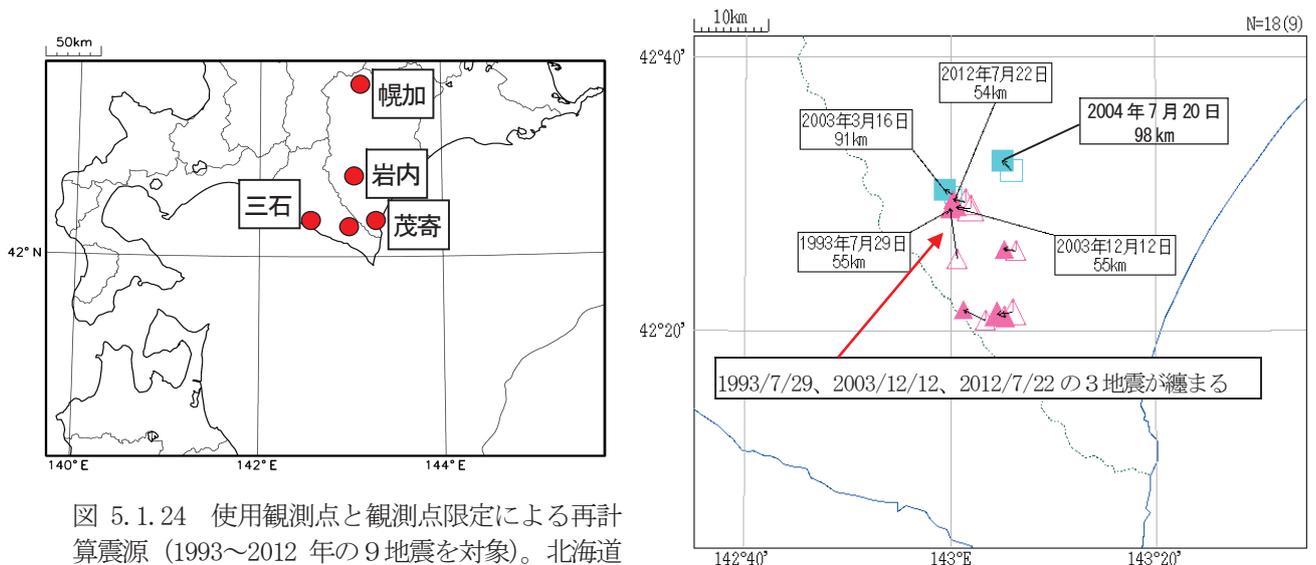


図 5. 1. 24 使用観測点と観測点限定による再計算震源（1993～2012 年の 9 地震を対象）。北海道大学観測点の P 相 6 点と S 相 1 点を使用。△：カタログ震源 ▲：再計算後。

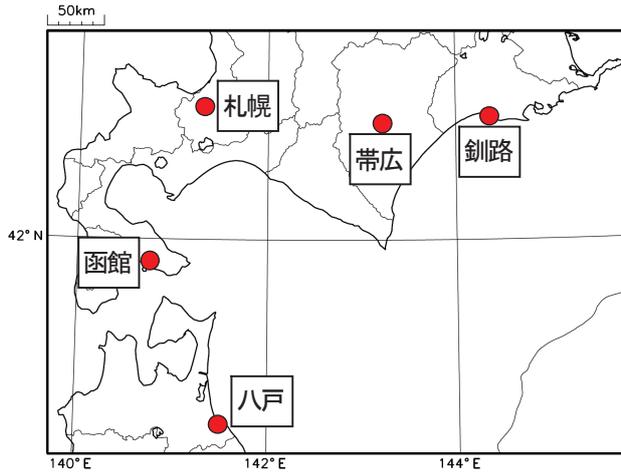
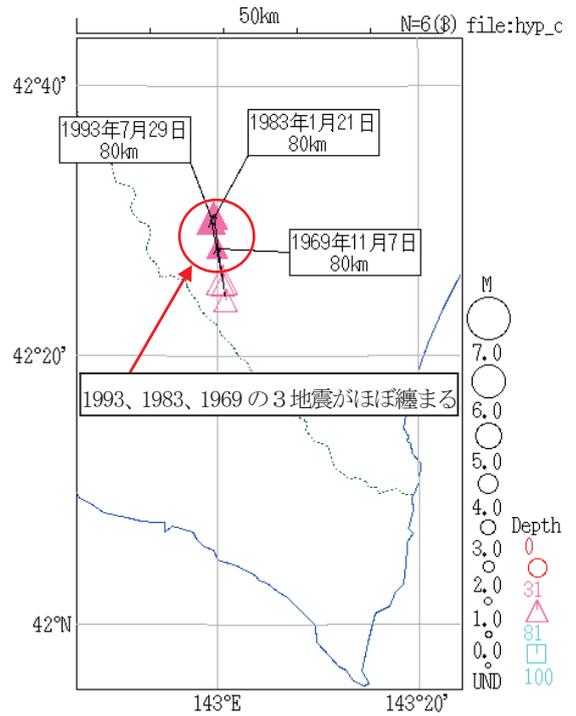


図 5. 1. 25 使用観測点と観測点限定による再計算震源 (1969~1993 年の 3 地震を対象)。気象庁観測点 5 点の P 相と帯広の S 相を使用。△: カタログ震源 ▲: 再計算後



5. 1. 5. 4 発震機構解及びP波初動分布

表5. 1. 10の11地震のうち、発震機構解及びP波初動分布のデータがあるものを図5. 1. 26に示す。2012年から1993年7月29日までの地震は発震機構解が求まっており、2004年の地震を除く 4 地震は同じ型のプレート境界で発生した地震と考えられる。また、1983年及び1969年の地震も初動の分布からプレート境界で発生した地震と推測される。

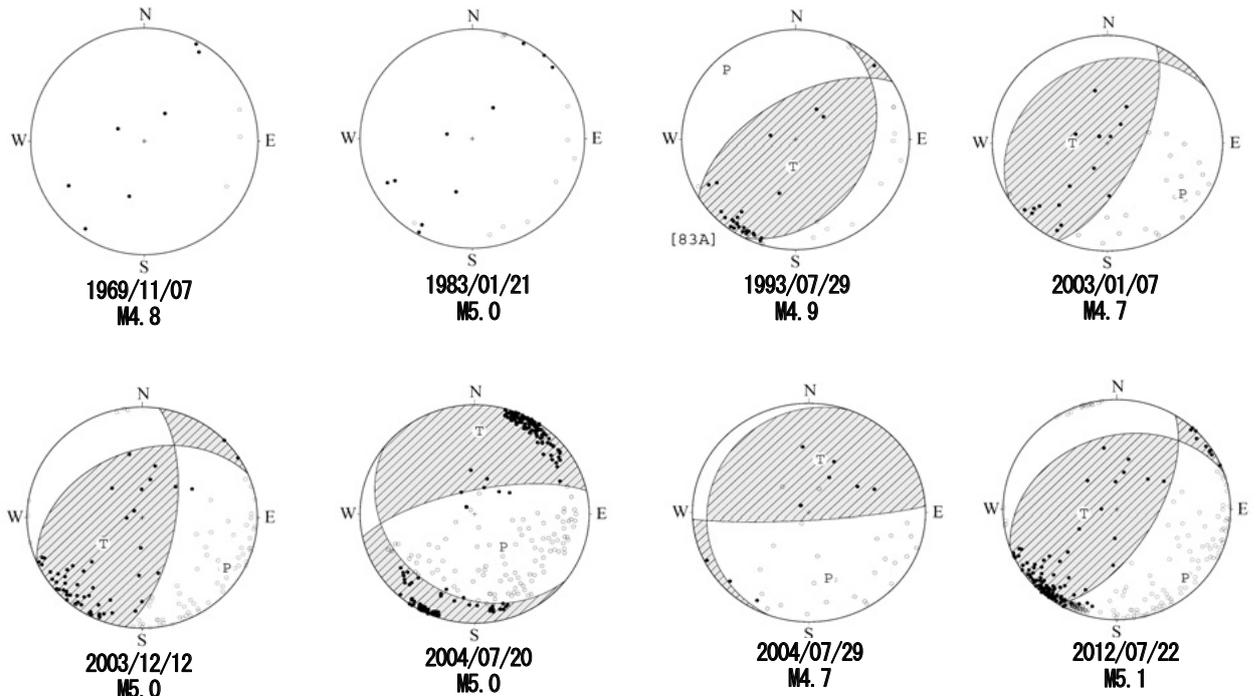


図 5. 1. 26 発震機構解及びP波初動分布。

5.1.5.5 平均滑り速度の推定と次回の発生予測

地震波形比較、震源再計算による震源の精査、発震機構解及びP波初動分布から図5.1.21で抽出した11地震のうち5地震は繰り返し地震であると同定した(表5.1.12)。この地震グループの地震発生間隔と各地震の推定すべり量から平均滑り速度4.4cm/年を得た(図5.1.27)。なお、図5.1.28に繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔を示す。また、次回の発生予測を表5.1.13に示す。

表5.1.12 同定された繰り返し相似地震とその確認結果。色つきのセルは地震波形比較・震源再計算を含む複数の手段によって確認できたことを表す。

種別 日時	地震波形	震源再計算	発震機構	P波初動分布
1969/11/07 17:06	○	○	—	○
1983/01/21 19:25	○	○	—	○
1993/07/29 23:53	○	○	○	○
2003/01/07 03:27	×	×	○	○
2003/03/16 14:35	×	×	—	—
2003/12/12 10:46	○	○	○	○
2004/07/20 05:58	×	×	×	×
2004/07/29 13:08	×	×	×	×
2004/09/10 13:22	×	×	—	—
2012/07/22 13:41	○	○	○	○

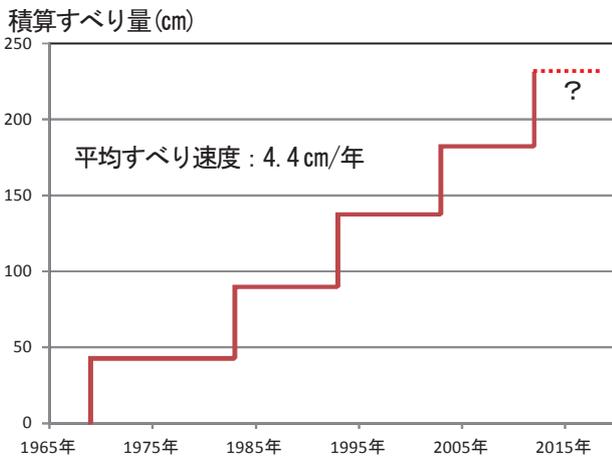


図 5.1.27 積算滑り量と平均滑り速度。

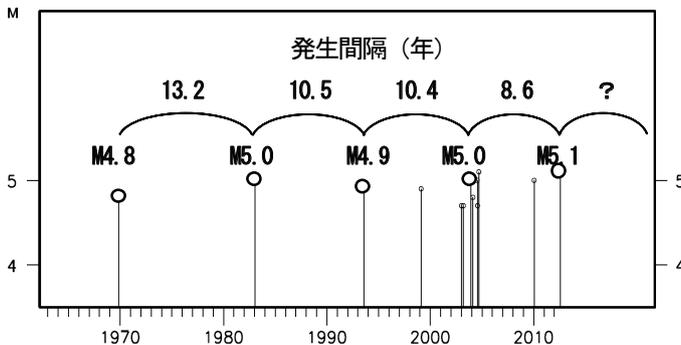


図 5.1.28 繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔。

表5.1.13 繰り返し間隔と次回の予測。

平均M : 5.0
繰り返し間隔 最短 : 8.6年、 最長 : 13.2年、 平均 : 10.7年 (標準偏差 1.64)
次回の予測 : 2023年6月±32ヶ月
3年以内の発生確率 : 0.5%
(予測モデル : 小標本論対数正規分布、 2012.11.1基準、70%の確率)

5.1.6. 釧路沖 1 (Group30、123)

本項の論文は、日本地震学会からの転載許可を受けて掲載している。

(佐鯉央教・松山輝雄・平山達也・山崎一郎・山本剛靖・一柳昌義・高橋浩晃, 2012 : 釧路沖の中規模繰り返し地震活動, *地震*2, **65**, 151-161)

## 釧路沖の中規模繰り返し地震活動

気象庁札幌管区気象台\* 佐鯉央教<sup>†</sup>・松山輝雄  
平山達也・山崎一郎  
山本剛靖<sup>†</sup>

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター\*\* 一柳昌義・高橋浩晃

### Moderate Repeating Earthquakes off Kushiro, Eastern Hokkaido, Japan

Hisayuki SAKOI<sup>†</sup>, Teruo MATSUYAMA, Tatsuya HIRAYAMA,  
Ichiro YAMAZAKI and Takeyasu YAMAMOTO<sup>†</sup>

Sapporo District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency,  
Kita 2, Nishi 18, Chuo-ku, Sapporo 060-0002, Japan

Masayoshi ICHIYANAGI and Hiroaki TAKAHASHI

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University,  
Kita 10, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

(Received June 29, 2012; Accepted September 7, 2012)

We identified 10 moderate sized repeating earthquakes from 1954 to 2010 off Kushiro region, eastern Hokkaido, Japan, by careful visual and quantitative inspections of waveform data. Relocated hypocenters calculated by reconfirmed arrival time data indicated that these earthquakes occurred at the same location on the interface between the subducting Pacific plate and the overriding plate. Reanalysis of focal mechanisms of recent three events showed approximately the same solution. These facts strongly suggested recurrent rupturing of an asperity. Average magnitude and average recurrence interval were  $M4.9$  and  $6.2 \pm 0.88$  years, respectively. Estimated average slip rate was  $6.5 \text{ cm/year}$ , which is equivalent to an interplate coupling ratio of 78-86%. The next earthquake is expected to occur in a period between May 2015 and July 2017 with a 70% probability based on the small sampling theory with a lognormal distribution model. Recurrent interval tended to shorten when large earthquakes occurred in the surrounding region. This might suggest recurrence interval is probably affected by the stress disturbance due to coseismic and postseismic slip on the plate interface.

Key words: Repeating earthquake, Waveform similarity, Recurrence interval, Off Kushiro, Hokkaido

#### §1. はじめに

近年、プレート沈み込み境界における地震発生メカニズムに関する様々な仮説が提唱されてきている [松澤 (2009)]. たとえば, Matsuzawa *et al.* (2004) は沈み込み境界には準静的すべり域に囲まれた大小様々な大きさのアスペリティが存在し, 準静的すべり域における非地震

性すべりの進行がアスペリティの破壊を引き起こしているという仮説を提唱した.

この仮説の構築の基になったのは, 釜石沖で見いだされた特徴的な地震活動である. Matsuzawa *et al.* (2002) は, 釜石沖で  $M4.9$  前後の地震が繰り返し発生していること, その累積すべり量がプレート間相対すべり量とほぼ同じ程度になることなどから, この地震系列が準静的すべり域に囲まれた小さなアスペリティで繰り返し発生していることを示した. なお, このように特定のアスペリティが繰り返し破壊して発生する地震 (repeating earth-

\* 〒060-0002 札幌市中央区北2条西18丁目

\*\* 〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

<sup>†</sup> 現所属: 気象庁地震火山部

〒100-8122 東京都千代田区大手町1-3-4

quake) に対して松澤 (2001) は「繰り返し地震」の語を当てており、本稿でもこれに倣って、以降「繰り返し地震」の語を用いることにする。

Igarashi *et al.* (2003) は、東北日本の太平洋側において、波形の相関性が高い地震の組み合わせを抽出することでマグニチュード ( $M$ ) 3.0~4.6 の小規模な繰り返し地震を多数検出した。そして、これらの地震がより大きな地震のアスペリティを避けて分布していることを示した。また、小繰り返し地震の発生頻度の変化がプレート境界の非地震性すべり速度の変化を反映していることを指摘した。

$M4.5$ ~ $7.0$  の中規模地震について波形の相似性を網羅的に調査することによって繰り返し地震を抽出することは、内田・他 (2010a) により比較する2つの地震のうち小さい地震のコーナー周波数付近の相関値をみることで抽出する手法が提案されている。しかし、小繰り返し地震に比べて繰り返し間隔が長くなるのに対してデジタル波形が利用できる期間に限られるため、アナログ波形まで利用し個々の地震活動に着目して行われてきたのが現状である。たとえば、溜瀧・他 (2010) は沖縄地方の宮古島近海で  $M5.1$  前後の繰り返し地震を見いだした。この系列を含めた沖縄地方や東北地方、関東地方の中規模繰り返し地震系列について気象庁地震予知情報課 (2009) が報告している。検知能力からみれば、小繰り返し地震は大学の微小地震観測網の地震波形データが利用可能な1980年代ぐらいまでしか遡れないのに対し、中規模繰り返し地震はそれ以前にまで遡れることが期待される。気象庁震源カタログにおける地震の検知能力は、たとえば千島海溝から日本海溝にかけての海域で1960年代まで  $M4.5$  は確保できている [太田・他 (2002), Katsumata (2011)]。このことから、中規模繰り返し地震を見いだすことは、より長期間のプレート沈み込みの履歴を明らかにする可能性がある点で重要である。

北海道太平洋側の沖合では千島海溝から太平洋プレートが沈み込んでいて、 $M8$  前後の巨大地震が十勝沖 (1952年及び2003年) や根室沖 (1973年) で発生している。また、2003年の十勝沖地震の後にゆっくりすべりの発生がGPSによって観測される [Ozawa *et al.* (2004)] など、多様な沈み込み様式を示している地域である。この地域では、Matsubara *et al.* (2005) や Uchida *et al.* (2009) により小繰り返し地震の時空間分布が調べられているが、中規模繰り返し地震については未発見であった。

われわれは、この地域のうち釧路沖で  $M4.9$  程度の中規模地震が繰り返し発生していることを見いだした。そして、地震波形の相似性に関する検討と震源の再決定を

行って、これらの地震が繰り返し地震であることを確認した。本稿ではそれらの解析の詳細について報告する。

## §2. 繰り返し地震の同定

### 2.1 地震の概要と繰り返し地震の抽出

2010年4月9日3時41分に釧路沖 (釧路町知方学<sup>ちほまなひ</sup>の南方沖約3km) の深さ57kmで  $M4.8$  の地震 (最大震度4) が発生した。この地震は、Fig. 1 (a) が示すように「平成15年 (2003年) 十勝沖地震」 ( $M8.0$ ) と「1973年6月17日根室半島沖地震」 ( $M7.4$ ) の2つの地震の余震域に挟まれた場所で発生した。更に、この挟まれた領域において、2004年11月29日に  $M7.1$  の地震が発生しているが、その余震域からも西側に外れており、今回の地震は周辺の規模が大きい地震の余震域から外れている場所で発生した。

気象庁では、1997年10月から大学等の関係機関から提供された地震観測データを併せて一元的に処理することにより、高精度の震源の決定が可能となった (地域地震情報センター業務: 以下、一元化)。この一元化以降の気象庁震源カタログの震源分布を見ると、今回の地震の震源とほぼ同一の場所で、2000年6月13日と2005年5月19日に同規模の地震が発生している。これらの地震のP波初動分布と発震機構解をFig. 1 (b) に示す。P波初動の読み取り値の有無によって解の節面が違ってしまふことを回避するため、P波初動の読み取り値は3個の地震に共通した観測点網 (気象庁及び大学) のみに限定して節面を決定した。得られた発震機構は、非常によく似た初動分布と節面を持つ西北西-東南東方向に圧力軸を持つ低角逆断層型であり、この地域で発生する太平洋プレートと陸のプレート境界で発生する地震の典型的な型であった。

また、これら3個の地震は約5年間隔で発生しており (Fig. 1 (c)), 繰り返し地震である可能性があると考えられた。そこで、一元化以前の期間についても、気象庁震源カタログを用いてこの場所での繰り返し地震の有無について調査を行った。

Fig. 2 に1954年6月から1997年9月までの深さ30~90km,  $M4.5$ ~ $5.5$  の地震の震央分布を示す。さらに、一元化以降で繰り返し地震である可能性のある3個の地震の震央を逆三角印で示している。地震を抽出する期間は、気象庁が53型地震計を北海道東部で整備し始めた1954年6月以降とした。1997年10月の一元化以前では、観測点数が少なく震源位置の誤差は大きいと推測される。よって、繰り返し地震の候補を抽出する領域を2010年の震央付近を含む厚岸湾より約15km沖合を中心に半径20km以内 (Fig. 2 の円内) に設定した。深さ

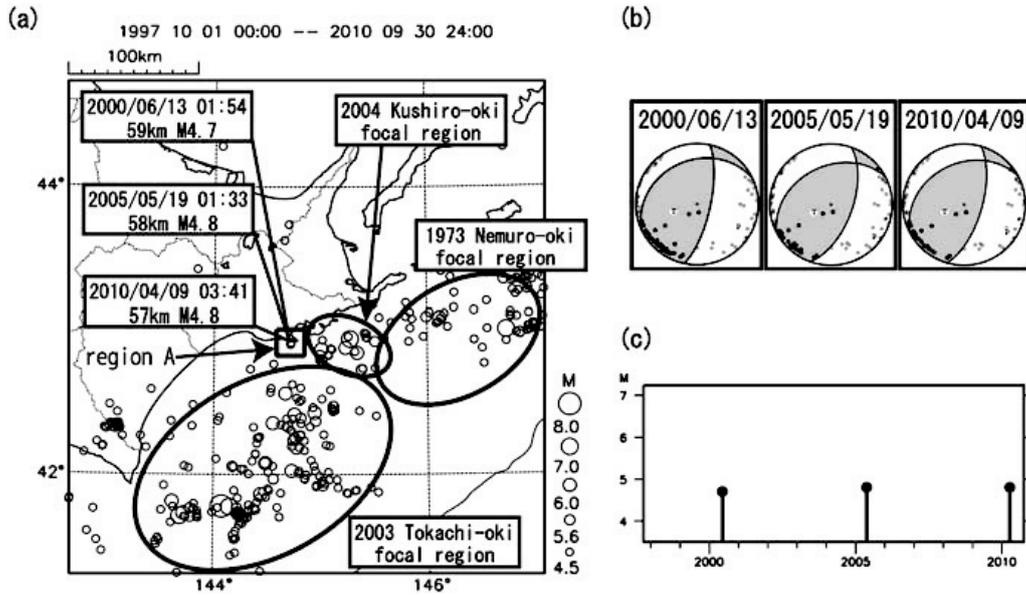


Fig. 1. (a) Seismic activities in the eastern Hokkaido and the surrounding region. Open circles denote epicenters in the period from October 1997 to September 2010 ( $M \geq 4.5$ , depth  $\leq 70$  km). Thick ellipses denote the focal regions of 1973 Nemuro-oki, 2003 Tokachi-oki and 2004 Kushiro-oki earthquakes. (b) Focal mechanism solutions of three earthquakes in the 'region A' by P-wave first motion polarity data. (c) Magnitude-Time diagram of the three earthquakes.

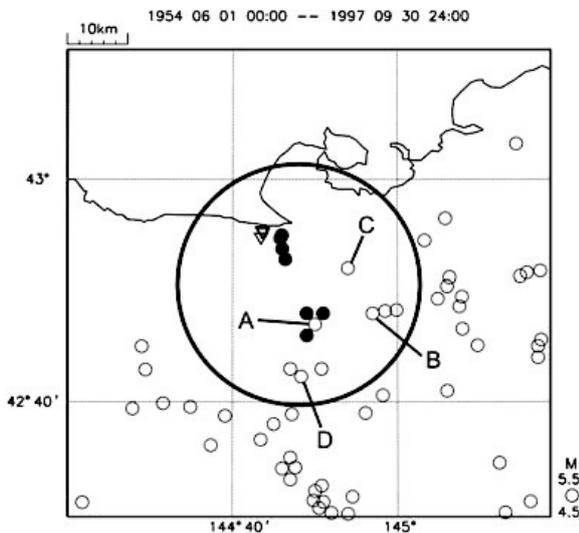


Fig. 2. Distribution of epicenters off Kushiro in the period from June 1954 to September 1997 ( $4.5 \leq M \leq 5.5$ ,  $30 \text{ km} \leq \text{depth} \leq 90 \text{ km}$ ). Large thick circle denotes the repeating earthquake study area. Solid circles denote identified repeating earthquakes. Epicenters labeled A-D are non-repeating earthquakes records of which are shown in Fig. 5 (b)-(c). Inverted triangles show repeating earthquakes after October 1997.

さらに、地震の規模の範囲は  $M4.5 \sim M5.5$  とした。調査対象として抽出された地震の発生年月日を Table 1 に示す。これらの地震について波形の相似性から繰り返し地震を選別した。次節に波形相似性の詳細について述べる。

### 2.2 波形相似性の確認

繰り返し地震は同一アスペリティの破壊と考えられており、お互いの地震波形が似ていることが大きな特徴である。そこで、それぞれの地震波形について、波形の相似性を調査し、繰り返し地震の同定を行った。

1954年6月から現在まで、同一場所かつ同一の地震計で継続して観測を続けている地点は無い。そのため、複数地震で共通する観測点の波形を比較し、その結果をつなぎ合わせることで地震波形の相似性を評価した。

デジタル波形がある地震 (1992年～) については、相関係数を計算し、波形の相似性を定量的に評価した。

Fig. 3 に一元化以降の 2000年, 2005年, 2010年の地震の気象庁観測点の根室豊里 (TOYOSA), 羅臼 (RAUSU), 十勝忠類 (CHURUI) と北海道大学観測点の浦幌 (HU.URH), 訓子府 (HU.KNP) における上下動成分変位波形とその相関係数を示す。これら 3個の地震の波形を比較すると、波形の細かい部分まで相互によく似ており、更に相関係数が 0.95 程度と非常に高く、繰り返し地震と判断される。また、水平動の波形についても同様に高い相関係数を得た。

の範囲は、一元化以降の震源の深さが 57~59 km であることからその前後約 30 km とした。

一元化以前を含む 1992 年以降の 4 個の地震に対して、

Table 1. Data set used for the identification of repeating earthquakes. Double circles and circles denote digital and analogue data of repeating earthquake, respectively. Mark 'X' denotes analog data of non-repeating earthquake.

	REDC (JMA, Hokkaido Univ.)	HU.OKS (UD vel.)	KUSHIR (Type 59)	NEMURO (Type 59 or 61)	OBIHIR (Type 53 or 54C)
1954/09/17					○
1958/09/14					×
1960/09/03					○
1961/08/10					×
1962/01/22					×
1966/12/12				○	○
1969/02/17				×	
1973/06/16			○	○	
1979/05/17				○	
1979/08/03			×	×	
1980/07/14				×	
1985/06/07			○	○	
1986/07/07			×	×	
1991/04/24				×	
1992/11/30		◎	○	○	
2000/06/13	◎	◎			
2005/05/19	◎	◎			
2010/04/09	◎	◎			

北海道大学奥尻青苗 (HU.OKS) 観測点のみが同一地震計のデジタル波形を記録している。この観測点は震源から遠く離れているため、波形記録の脈動が大きく S/N 比が低い。そこで 1 Hz のハイパスフィルターを処理した変位波形に対して相関係数を計算し、0.90 程度と高い値を得た (Fig. 4)。

以上の解析により、デジタル記録が残る 1992 年以降の 4 個の地震に対しては、波形間に高い相関係数が得られていることから繰り返し地震であると考えられる。

1992 年より前の地震の波形については、マイクロフィルムのアナログ記録となる。アナログ記録では、相関係数のような定量的な評価が難しい。そこで、波形の全体的な相似の他、波形の中にある特徴的なフェイズの時間差の比較から相似性を検証した。

Fig. 5 (a) に旧釧路地方気象台 (KUSHIR) の 59 型地震

計の上下動成分変位波形を示す。各地震の波形は全体的な比較からは相互によく似ている。特に、特徴的なフェイズ (Fig. 5 中の丸、四角及び逆三角印) の振幅の大小関係が非常に似ている。また、これらの特徴的なフェイズの時間差がほぼ同一であることから、これらの地震は繰り返し地震である可能性が非常に高い。同様の波形比較を根室測候所 (NEMURO) の 59 型上下動成分変位波形、61 型東西動成分変位波形に対しても行った (Fig. 5 (b))。59 型の比較において、丸印を付けたパルス状の変位や逆三角印を付けた鋸歯状の変位などの特徴が良く似ており、61 型の比較においても、最大振幅付近が E 側に大きく片寄って振れる点などの特徴が酷似している。また、特徴的なフェイズの時間差もほぼ同一であった。1966 年以前の地震に対しては、帯広測候所 (OBIHIR) の 53 型、54C 型上下動成分変位波形のみが波形比較に

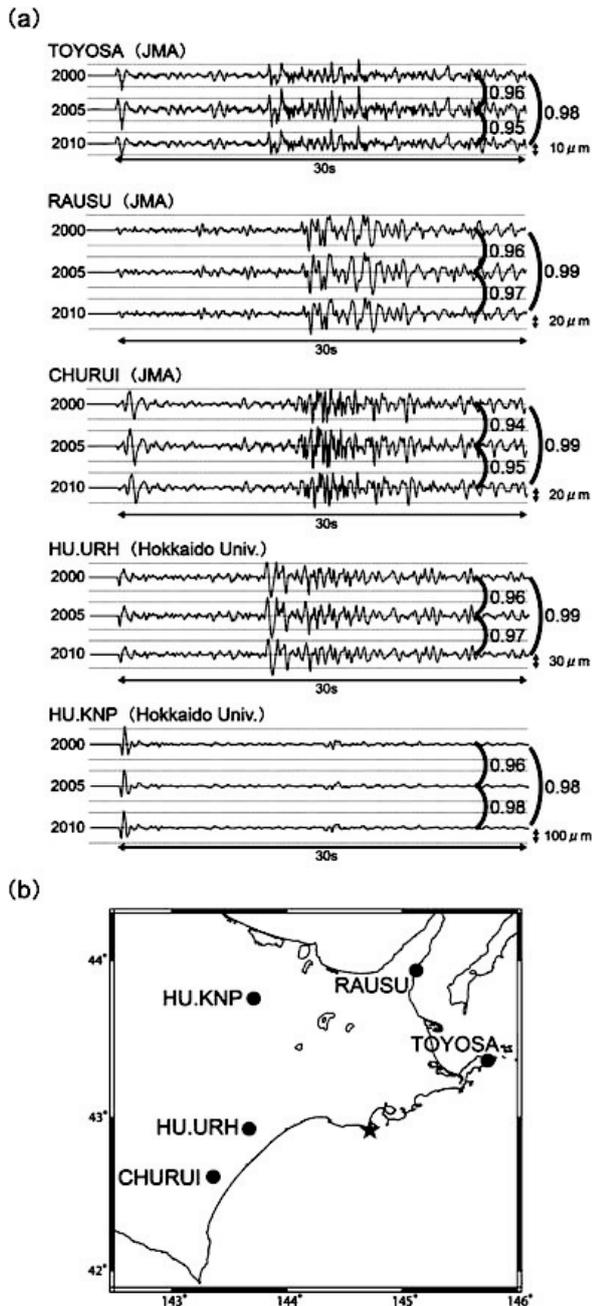


Fig. 3. (a) Original displacement waveforms (the UD component) of the repeating earthquakes in 2000, 2005 and 2010 observed at five stations. The correlation coefficient of each pair of waveforms is indicated on the right side. (b) Locations of the five observation stations. The star denotes the epicenter of the repeating earthquakes.

耐えうる記録を残している (Fig. 5 (c)). 旧釧路地方気象台および根室測候所の記録と比較すると、波形の相似性の議論は難しいものの、特徴的なフェイズの時間差はほぼ同一であり、これらの地震も繰り返し地震であると判断した。

繰り返し地震と判断した地震の震央を Fig. 2 に黒丸

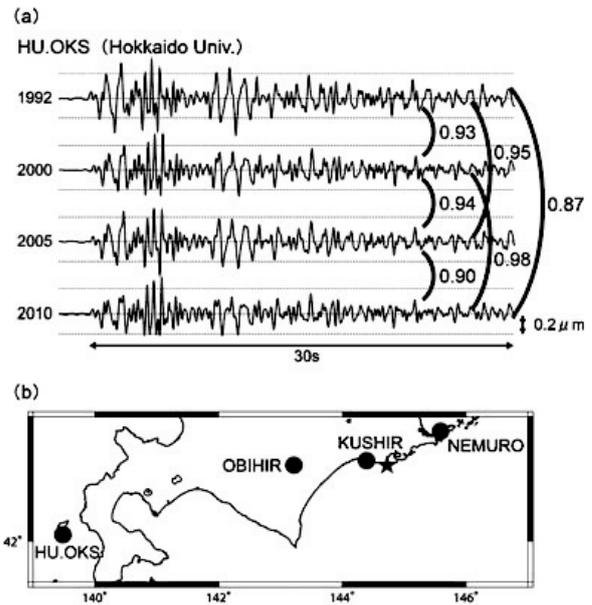


Fig. 4. (a) Filtered displacement waveforms (the UD component) of the repeating earthquakes in 1992, 2000, 2005 and 2010 observed at the Hokkaido University Okushiri Aonae (HU.OKS) station. The correlation coefficient of each pair of waveforms is indicated on the right side. (b) Locations of the observation station in (a) and Fig. 5 (a)-(c). The solid star denotes the epicenter of the repeating earthquakes.

印で示すとともに、発生年月日および比較調査項目の対応結果を Table 1 に示す。各観測点における地震どうしの波形が似ている結果をすべてつなぎ合わせることで、波形の相似性の高い 1954 年 6 月以降の 10 個の地震は繰り返し地震と判断できた。

一方、波形に相似性がなく、繰り返し地震ではないと判断した地震のうち、Fig. 2 に A~D を付した 4 個の地震について波形の例を示す。A (1958 年) では、繰り返し地震には丸印を付けた位置からいくつか見られる U 側へ飛び出るようなピークが見られず、また、逆三角印が付いた位置から始まる振幅の大きな波形の細かい形状が異なる (Fig. 5 (c)). B (1980 年) では、繰り返し地震の波形の最大振幅 (四角印) とその前後のピーク (丸及び逆三角印) の組み合わせという特徴的な形状が出ていない (Fig. 5 (b)). また、C (1969 年) では、振幅が小さい上に繰り返し地震の波形の特徴である E 側に片寄った振動をしていない (Fig. 5 (b)). D (1991 年) では、振幅が大きい上に最大振幅部分の波形が繰り返し地震の波形と全く異なっている (Fig. 5 (b)). これら以外の地震についても、C や D と同様に、振幅や全体の形状が全く異なっていた。以上のように、繰り返し地震ではない地震波形は明らかに波形の特徴に違いがあることがわか

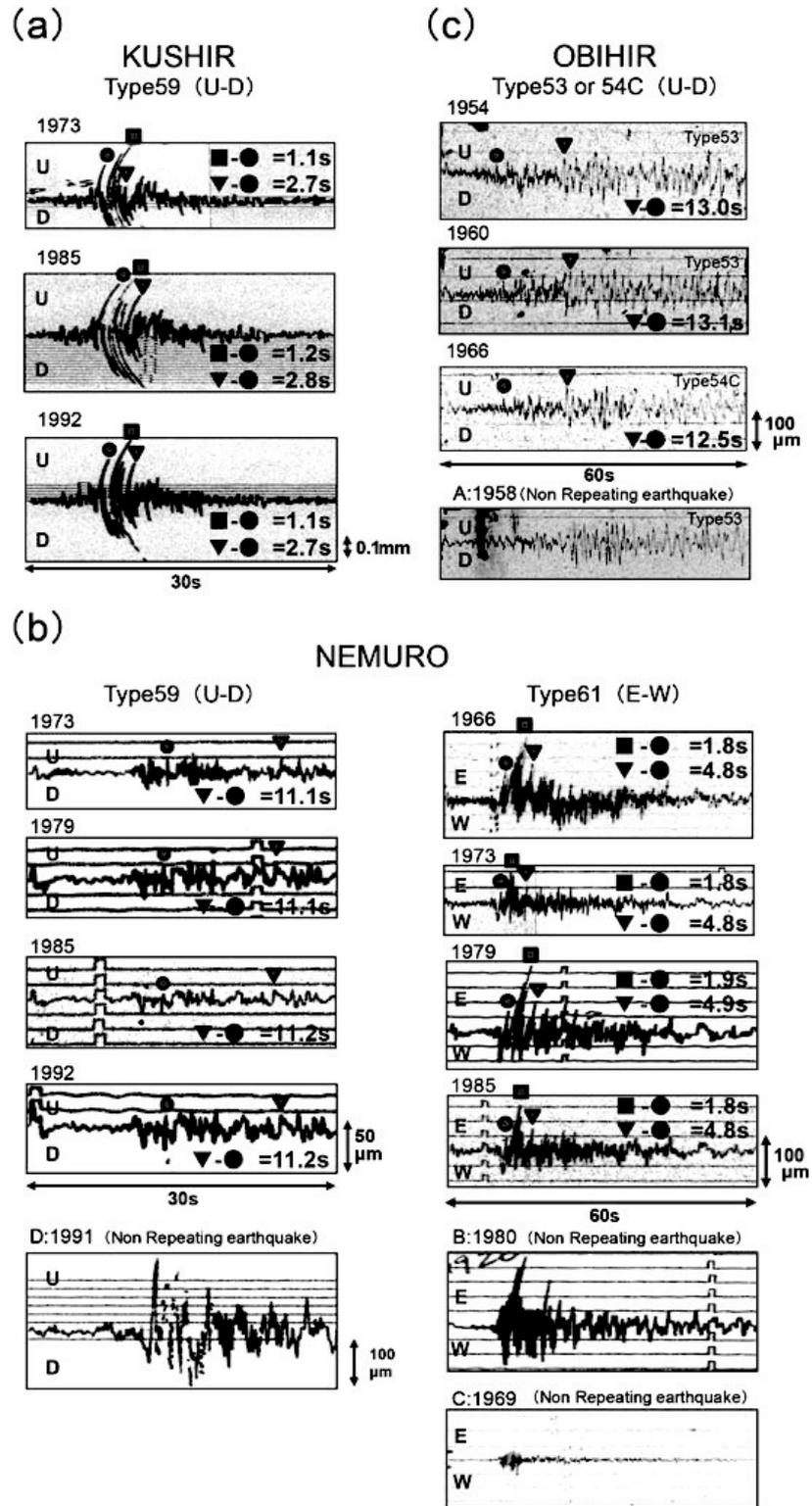


Fig. 5. Records of repeating and non-repeating earthquakes. (a) Seismograms (the UD component) observed by the type 59 seismograph at the JMA Kushiro Local Meteorological Observatory (before move) (KUSHIR). (b) Seismograms observed by the type 59 (the UD component) or type 61 (the EW component) seismograph at the JMA Nemuro Weather Station (NEMURO). (c) Seismograms (the UD component) observed by the type 53 or 54C seismograph at the JMA Obihiro Weather Station (OBIHIR). Circles, inverted triangles and squares denote their characteristic phases.

り、釧路沖で発生した繰り返し地震の検出は波形の相似性を用いることによって可能であることが示された。

§ 3. 繰り返し地震の震源再計算

波形の相似性から抽出した 10 個の繰り返し地震の震央分布図を Fig. 2 に示す。M5 程度の地震の震源断層の大きさは 2~3km 程度であり、繰り返し地震が同一のアスペリティで発生しているとすれば、震源位置もこの程度の範囲ではほぼ同一であることが必要である。観測点が増えて震源の決定精度が高まった一元化以降の 3 個の地震 (Fig. 2 の逆三角印) については、震源位置はほぼ同じ位置に決定されている。しかし、一元化以前の 7 個の地震 (Fig. 2 の黒丸印) のうち 4 個の震央は一元化以降の震央から約 3~6km 東から南東に、3 個の震央は約 17km 東南東に離れている。つまり、気象庁震源カタログにおいて、繰り返し地震として抽出した 10 個の地震の震央は 3 つの領域に分かれて分布している。

この震央分布のばらつきは震源計算に使用する観測点の相違や相の読み取り誤差による結果と考えられる。特に観測点が気象官署のみの時期の震源は、1 つの観測点での位相の読み間違いや相の有無が震源位置に大きく影響することが懸念される。そこで、マイクロフィルムによる地震波形を見返し、各地震の相の読み取り位置が一致しているかどうかを精査し、場合によっては相の読み直しを行った。更に、震源計算に使用する観測点及び相を限定した震源再計算を行うことで、観測点の組み合わせの違いによる系統的誤差の無い、震源の相対位置関係を求めた。なお、震源計算には気象庁が一元化業務で使用しているプログラム [浜田・他 (1983)], 走時表は JMA 2001 [上野・他 (2002)] を使用した。

Fig. 6 (a) に一元化 (1997 年 10 月) 以前の 1954 年から 1992 年の 7 個の地震について、震源再計算に使用した観測点を示す。古い時期の波形記録は分解能が良くないために読み取りが不正確な相を外した結果、観測点を限定して震源決定に使用した相は 7 個の地震全てに対して同じ 6 観測点 8 要素 (P 相 3 点) となった。観測点は震源を囲むように分布している。Fig. 6 (b) に観測点限定による震源再計算結果を示す。気象庁震源カタログでは 10km 以上離れて 2 つの領域に分かれていた震央分布は、再計算によりその広がりが明瞭に小さくなり、直径 5km 程度の範囲内に収まった。深さは、最も古い 1954 年の地震が他よりも約 10km 深く求まることを除き、6km の範囲内に収まった。この程度の震源の広がりは、得られた震源の緯経度誤差が 1~6km 程度となったこと、震源決定に使用した観測点の分布が粗いこと、及び当時の波形記録からの相の読み取り精度を考慮する

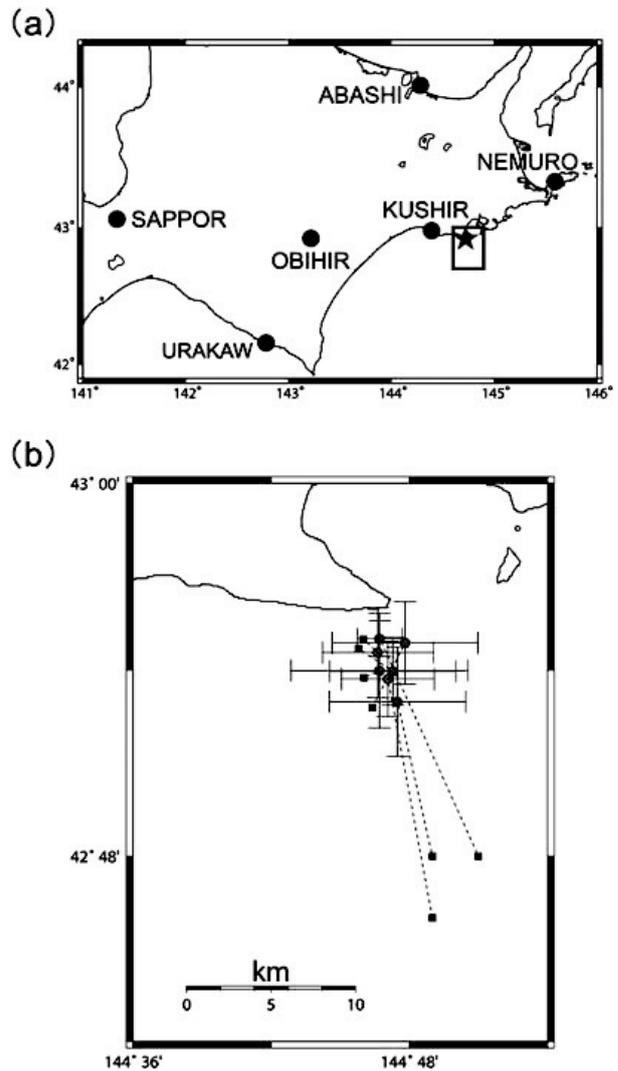


Fig. 6. Result of hypocenter relocation of seven repeating earthquakes in 1954-1992 based on the waveforms observed at six JMA stations. (a) Location of the observation stations used for the relocation. Rectangle expresses the area shown in Fig. 6 (b). (b) Location of the epicenters. Circles: relocated epicenters. Squares: JMA catalog epicenters. Bars: error ranges of the latitude and longitude directions.

と充分許容範囲であり、これら 7 個の地震は同一場所で発生したと判断してよいと考えられる。

同様に 1985 年から 2010 年の 5 個の地震については、北海道大学が継続して観測をしている観測点を使用して観測点を限定した震源再計算を行った。Fig. 7 (a) に震源再計算に使用した観測点分布を、Fig. 7 (b) に震源再計算結果を示す。使用した観測点は震源を囲むように選択した 6 点である。これらの地震の北海道大学の波形記録では、S 相部分が振りきれて不明瞭なものが含まれる。よって、相の読み取りが確実であると推測される P 相

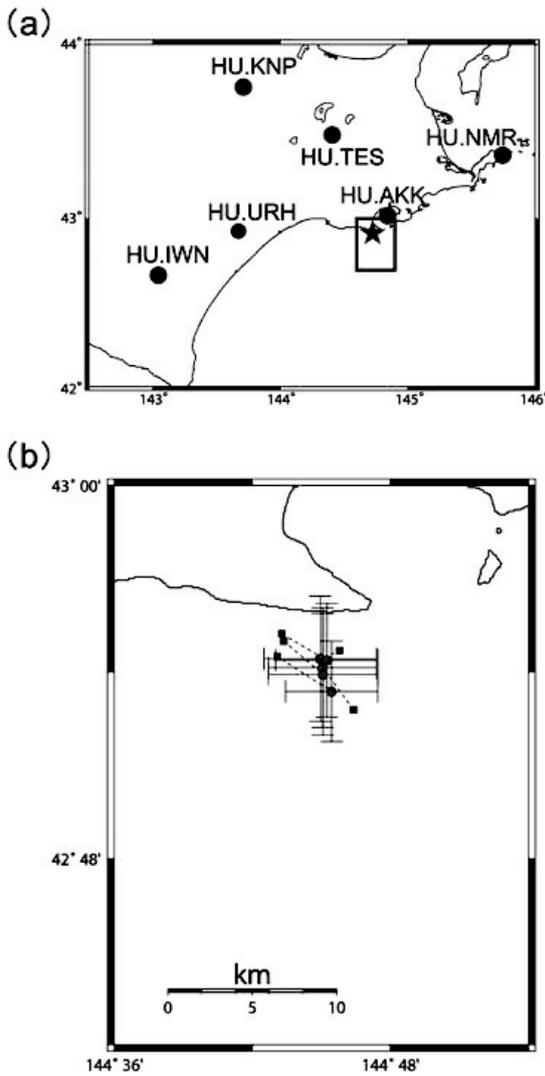


Fig. 7. Result of hypocenter relocation of five repeating earthquakes in 1985–2010 based on the waveforms observed at the Hokkaido University stations. (a) Location of the observation stations used for the relocation. Rectangle expresses the area shown in Fig. 7 (b). (b) Location of the epicenters. Circles: relocated epicenters. Squares: JMA catalog epicenters. Bars: error ranges of the latitude and longitude directions.

のみを用いて震源再計算を行った。その結果、一元化前後で分かれて分布していた震源は、1 km 以内に収まった深さ方向も含めて、ほぼ1箇所に集まり、これらの5個の地震は同一場所で発生したと判断できる。

以上2つの観測点限定による震源再計算結果では、共に1985年と1992年の地震が共通している。従って、2つの震源再計算結果より、繰り返し地震として抽出した10個の地震は震源位置においてほぼ同じ場所で発生していると考えられ、繰り返し地震が同一のアスペリティで発生している可能性を強く示す結果となった。

#### §4. 議 論

相関係数による波形相似性の確認、及び観測点限定による震源再計算を行った結果、釧路沖では中規模の繰り返し地震が1954年6月以降10個発生していることが明らかになった。この地震の繰り返し間隔はFig. 8に示すように、最短が4.9年、最長が7.5年で平均は6.2年(標準偏差0.88年)であった。

気象庁震源カタログに掲載されている地震の規模(マグニチュード,  $M$ )は、適用された計算方法が地震によって異なる。また、本研究で行った震源再計算により震源位置が大きく変化したものがある。そこで、10個の地震すべてが変位  $M$  計算式[勝間田(2004)]を用いた結果に統一されるよう再計算した。このとき、観測点数が少ない古い地震では1つの観測点の有無で  $M$  の値が見かけ上異なる可能性がある。そこで、一元化以前の7個の地震については、全ての地震で共通して変位振幅の読み取り値がある5観測点(釧路, 根室, 網走, 浦河, 札幌)の平均値とすることで観測点の有無によるばらつきの無い変位  $M$  を求めた。一元化以降の3個の地震については、観測網が大きく変わったため前述した5観測点の変位記録は無いが、変位振幅の読み取り観測点が多く、観測点の有無による影響が軽減されていると判断して、全ての観測点の平均値を変位  $M$  とした。

釧路沖の繰り返し地震活動経過を縦軸にマグニチュード、横軸に時間をとってFig. 8に示す。 $M$  は4.7~5.1の範囲で、平均規模は  $M$ 4.9であった。ほぼ同じ平均規模( $M$ 4.9)である釜石沖の繰り返し地震系列の繰り返し間隔は平均5.6年(最短4.7年、最長6.7年)、標準偏差0.67年[内田・他(2010b)]である。また、宮古島近海の地震( $M$ 5.1)では平均5.9年(最短5.0年、最長6.9年)、標準偏差0.73年[溜淵・他(2010)]であり、他地域で発生した中規模繰り返し地震活動と比較して、ばらつきの程度に大きな違いはない。

次に、この繰り返し地震系列のすべり量を推定した。Uchida *et al.* (2003) や溜淵・他(2010)に倣い、モーメントマグニチュード( $M_w$ )と地震モーメント( $M_0$ )の変換にはHanks and Kanamori (1979)の式

$$\log(M_0) = 1.5M_w + 16.1 \quad (1)$$

を、地震モーメントからすべり量への変換にはNadeau and Johnson (1998)の式

$$\log(d) = -2.36 + 0.17\log(M_0) \quad (2)$$

を用いた。ただし、再計算した変位  $M$  をモーメントマグニチュードとみなして計算に使用した。結果をFig. 9に示す。平均すべり速度は6.5 cm/年となった。一方、千島海溝における太平洋プレートと陸側プレートに対する相対すべり速度は、7.6 cm/年[Sella *et al.* (2002)], あ

釧路沖の中規模繰り返し地震活動

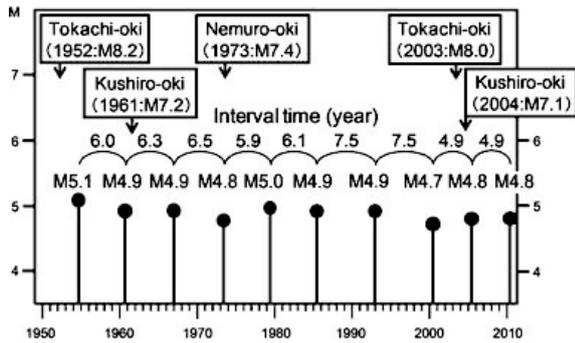


Fig. 8. Magnitude-Time diagram of repeating earthquakes and their interval times. The large scale earthquakes (over  $M7.0$ ) occurring around the area of repeating earthquakes are also shown on the diagram.

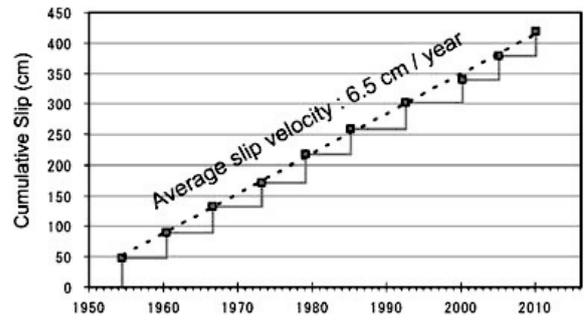


Fig. 9. Cumulative slip amount and estimated average slip rate of repeating earthquakes.

るいは 8.3cm/年 [Wei and Seno (1998)] などと推定されているので、カップリング率は 78~86% と 100% をやや下回る程度となり、求められた平均すべり速度は概ね妥当な値であると考えられる。

また、発生間隔から、次の繰り返し地震の発生確率を計算した。計算には、少ない繰り返し地震数から適切に評価することができる更新過程小標本論対数正規分布モデル [岡田 (2009)] を用いた。基準日を 2011 年 1 月 1 日とすると、次の地震は 2015 年 5 月から 2017 年 7 月までの間に 70% の確率で発生するという結果が得られた。ただし、これは過去の発生履歴から統計的に求めた確率であり、次に検討するように準静的すべり速度の変化など外的要因が加わった場合には変わりうる値であると考えられる。

繰り返し地震の規模が毎回ほぼ同じで、アスペリティ周辺の準静的すべり域におけるすべり速度が一定であれば、発生間隔はほぼ一定になるはずである。釜石沖の繰り返し地震は平均 5.6 年の発生間隔に対して 1 年程度のゆらぎがあるが、平均より短くなった時期は近傍で群発地震が発生した時期に対応しており、その際には周辺での小繰り返し地震の発生頻度も増加していたことが示されている [Uchida *et al.* (2005)]。釧路沖の場合も発生間隔は 4.9 年から 7.5 年とばらつくが、特に最近 2 回 (2000 年-2005 年、及び 2005 年-2010 年) の発生間隔はいずれも 4.9 年と短い。十勝沖から根室沖にかけての領域における  $M7.0$  以上の地震の発生時を Fig. 8 の上部に示す。2003 年 9 月には「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」( $M8.0$ )、2004 年 11 月には釧路沖の地震 ( $M7.1$ ) が発生している。GPS 観測データから、2003 年の十勝沖地震の後からその震源域周辺でゆっくりすべりが発生したことが明らかにされ [Ozawa *et al.* (2004)]、そのゆっくりす

べり領域が釧路・根室地方直下のやや深い部分に拡大して 2004 年の釧路沖の地震の発生を促進した可能性が指摘されている [Murakami *et al.* (2006)]。さらに、「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」の震源域周辺で余効変動が継続することに加えて 2004 年の釧路沖の地震の後にも約 1 年間、その震源域周辺でゆっくりすべりが発生した [水藤・小沢 (2006)]。Matsubara *et al.* (2005) と Uchida *et al.* (2009) は、北海道の太平洋側における小繰り返し地震活動の時間経過を調べ、2003 年の十勝沖地震や 2004 年の釧路沖の地震によって小繰り返し地震の発生頻度が高くなったことを示し、その原因は、ゆっくりすべりによるすべり速度の加速のためだと結論づけた。このように、十勝沖から根室沖にかけての領域は、大地震の発生による地震性すべりだけではなく、それに関連して震源域の周辺でゆっくりすべりが長期にわたって進行している場である可能性がある。釧路沖の中規模繰り返し地震の震源は「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」と 2004 年の釧路沖の地震の震源域の中間のゆっくりすべり領域の中にあり、定常的なすべりに加えてゆっくりすべりの影響を受けた結果、最近の発生間隔が短くなった可能性が考えられる。逆に 1980 年代から 1990 年代にかけては繰り返し地震の発生間隔は 7.5 年と長かったが、この時期には  $M6.5$  以上の地震は周辺で発生していない。これら繰り返し間隔の長短がいずれも活動域周辺の大地震の発生状況と相関していることは、それが繰り返し間隔に影響している可能性を強く示唆する。

しかし、1952 年の十勝沖の地震 ( $M8.2$ )、1961 年の釧路沖の地震 ( $M7.2$ )、そして「1973 年 6 月 17 日根室半島沖地震」( $M7.4$ ) が発生した 1950 年代から 1970 年代にかけての発生間隔は約 6 年で、2000 年以降の発生間隔 4.9 年ほど短くない。このことは、1952 年と 2003 年の十勝沖地震が繰り返し発生している同じ型の海溝型巨大地震であるとすれば、一見、前項で推定した繰り返し間隔の長短と大地震の発生との関係に反することのように思え

る。しかし、2003年の地震が1952年の地震の単純な繰り返しではなかった、すなわち、1952年の地震後には2003年の地震後と同じ程度の規模のゆっくりすべりが発生しなかったとすれば説明できるであろう。1952年と2003年の2つの十勝沖地震の震源域は、地震波や津波を用いて比較されている。地震波形から求めた震源域は2つの地震でほぼ同じ[Yamanaka and Kikuchi (2003)]であるが、津波から求めた震源域は異なり、2003年よりも1952年が東側に広がっている[Tanioka *et al.* (2004), Satake *et al.* (2006)]。また、根室沖の地震についても、津波のデータに基づいて1973年の地震より1894年の地震の方が震源域が東西に広がった可能性があり、千島海溝南端部における地震時すべり分布の多様性が指摘されている[Tanioka *et al.* (2007), Hirata *et al.* (2009)]。このように、地震時すべりを見ただけでも、釧路沖を含む十勝沖から根室沖にかけての地域の沈み込み様式は単純ではない。ゆっくりすべりの履歴については、GPSや小繰り返し地震活動といった最近数十年のデータ蓄積しかない観測項目に依るしかなく、それ以前の履歴は明らかではない。したがって、現時点で確証は得られないが、沈み込み様式の多様性を考えると1952年の地震後に2003年の地震後と同じ程度の規模のゆっくりすべりが発生しなかった可能性は十分に考えられる。今後、周辺で別の中規模繰り返し地震系列が見つかりその発生間隔を過去にさかのぼって調べることができれば、より長期間にわたるゆっくりすべりの履歴を明らかにできるであろう。

## §5. ま と め

北海道東部の釧路沖で一元化(1997年10月)以降にほぼ同一場所、同一発震機構、M5程度とほぼ同一規模で高い相関係数を持つ3個の地震が約5年間隔で発生し、繰り返し地震の可能性が高いことが明らかになった。

そこで、1954年6月以降の波形記録を用いてこの領域周辺における繰り返し地震の抽出を行った。繰り返し地震の同定には波形の相似を用い、デジタル波形には相関係数から定量的に相似を評価し、アナログ波形には全体的な波形の形状の他、複数の特徴的なフェイズの時間差の比較から相似を評価した。その結果、1954年6月以降2010年9月までに10個の繰り返し地震を見出すことができた。

また、観測点限定による震源再計算を行い、10個の地震がほぼ同一場所で発生していることを確認した。これは、繰り返し地震が同じアスペリティで発生している可能性が高いことを支持する。

釧路沖の10個の中規模繰り返し地震活動は、平均6.2

年(標準偏差0.88年)間隔で発生し、地震の平均規模はM4.9であった。これら平均繰り返し間隔と地震の平均規模の値は他地域における中規模繰り返し地震活動と比較しても大きな差はない。また、この繰り返し地震系列のすべり量を推定した結果、平均すべり速度は6.5cm/年となり、それより求められるプレート間カップリング率は78~86%である。

繰り返し地震の発生間隔は最短で4.9年、最長で7.5年とバラツキがある。釧路沖の中規模繰り返し地震の震源は「平成15年(2003年)十勝沖地震」と2004年の釧路沖の地震の震源域の間に存在し、定常的なすべりに加えて周辺の大規模地震の余効すべりやゆっくりすべりが繰り返し地震発生間隔に影響を及ぼしている可能性がある。

今後、北海道東部周辺の小・中規模繰り返し地震の解析を積み重ねることで、大地震後のゆっくりすべり履歴等や準静的すべり等のプレート境界の地震発生メカニズムの解明に繋がると期待される。

## 謝 辞

2名の匿名査読者からの意見は、本稿の改善に大変有益であった。ここに記して感謝申し上げる。

## 文 献

- 浜田信生・吉田明夫・橋本春次, 1983, 気象庁震源計算プログラムの改良(1980年伊豆半島東方沖の地震活動と松代群発地震の震源分布の再調査), 験震時報, **48**, 35-55.
- Hanks, T.C. and H. Kanamori, 1979, A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- Hirata, K., K. Satake, Y. Tanioka, and Y. Hasegawa, 2009, Variable tsunami sources and seismic gaps in the southernmost Kuril trench: A review, *Pure Appl. Geophys.*, **166**, 77-96.
- 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.
- 勝間田明男, 2004, 気象庁変位マグニチュードの改訂, 験震時報, **67**, 1-10.
- Katsumata, K., 2011, A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake ( $M=9.0$ ), *Earth Planets Space*, **63**, 709-712.
- 気象庁地震予知情報課, 2009, 中~大規模の繰り返し地震についての規則性と不規則性, 地震予知連絡会会報, **83**, 613-632.
- Matsubara, M., Y. Yagi, and K. Obara, 2005, Plate boundary slip associated with the 2003 Off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08316, doi:10.1029/2004GL

022310.  
 松澤 暢, 2001, 地震予知の戦略と展望, 地学雑誌, **110**, 771-783.  
 松澤 暢, 2009, プレート境界地震とアスペリティ・モデル, 地震 2, **61**, S347-S355.  
 Matsuzawa, T., T. Igarashi, and A. Hasegawa, 2002, Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, Geophys. Res. Lett., **29** (11), 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 and Space, **56**, 803-811.  
 Murakami, M., H. Suito, S. Ozawa, and M. Kaidzu, 2006, Earthquake triggering by migrating slow slip initiated by  $M8$  earthquake along Kuril trench, Japan, Geophys. Res. Lett., **33**, L09306, doi:10.1029/2006GL025967.  
 Nadeau, R.M. 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.  
 太田健治・藤原義寿・前田憲二, 2002, 気象庁の地震検知能力の時間空間的变化, 験震時報, **65**, 111-122.  
 岡田正実, 2009, 繰り返し地震および余震の確率予測, 地震 2, **61**, S143-S153.  
 Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire, and Y. Hatanaka, 2004, Coseismic and postseismic crustal deformation after the  $M_w$  8 Tokachi-oki earthquake in Japan, Earth Planets Space, **56**, 675-680.  
 Satake, K., K. Hirata, S. Yamaki, and Y. Tanioka, 2006, Re-estimation of tsunami source of the 1952 Tokachi-oki earthquake, Earth Planets Space, **58**, 535-542.  
 Sella, G.F., T.H. Dixon, and A. Mao, 2002, REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy, J. Geophys. Res., **107** (B4), 2081, doi:10.1029/2000JB000033.  
 水藤 尚・小沢慎三郎, 2006, 2004 年釧路沖の地震以降の北海道東部の地殻変動と余効すべり, 国土地理院時報, **110**, 91-94.  
 溜瀨功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2010, 宮古島近海における固有地震活動, 地震 2, **62**, 193-207.  
 Tanioka, Y., K. Hirata, R. Hino, and T. Kanazawa, 2004, Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion, Earth Planets Space, **56**, 373-376.  
 Tanioka, Y., K. Satake, and K. Hirata, 2007, Recurrence of recent large earthquake along the southernmost Kurile-Kamchatka subduction zone, Geophys. Monograph, **172**, 145-152.  
 Uchida, N., T. Matsuzawa, T. Igarashi, and A. Hasegawa, 2003, Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, Geophys. Res. Lett., **30**, doi:10.1029/2003GL017452.  
 Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, 2005, Recurrence intervals of characteristic  $M4.8 \pm 0.1$  earthquakes off-Kamaishi, NE Japan - Comparison with creep rate estimated from small repeating earthquake data, Earth Planet. Sci. Lett., **233**, 155-165.  
 Uchida, N., S. Yui, S. Miura, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, Y. Motoya, and M. Kasahara, 2009, Quasi-static slip on the plate boundary associated with the 2003  $M8.0$  Tokachi-oki and 2004  $M7.1$  off-Kushiro earthquakes, Japan, Gondwana Research, **16**, 527-533.  
 内田直希・松澤 暢・島村浩平・長谷川 昭, 2010a, 釜石沖  $M4.9$  繰り返し地震のアスペリティにおける 2 つの地震サイクルにわたる地震活動様式, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SSS011-12.  
 内田直希・松澤 暢・長谷川 昭, 2010b, 東北日本の中規模繰り返し地震の分布とそのアスペリティでの特徴的地震活動, 日本地震学会講演予稿集 2010 年度秋季大会, 256.  
 上野 寛・畠山信一・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—浅部速度構造と重み関数の改良—, 験震時報, **65**, 123-134.  
 Wei, D.-P. and T. Seno, 1998, Determination of the Amurian plate motion in mantle dynamics and plate interactions in East Asia, Geodyn. Ser. v. 27, edited by M. F. J. Flower *et al.*, AGU, Washington D.C., 419 pp.  
 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.

5.1.7 釧路沖 2 (Group97)

5.1.7.1 同系列と思われる地震の抽出

表5.1.1で確認したGroup97付近の震央分布図と領域 a 内の地震活動経過図 (図5.1.29) から1992年2月8日、1996年4月25日と2009年7月13日の地震と規模及び発生間隔が同程度で、プレート境界付近で発生したと思われる24地震を抽出した表5.1.14)。なお、抽出した期間は、釧路地方気象台及び根室測候所の59型電磁式地震計記録で検証可能な1973年以降とした。

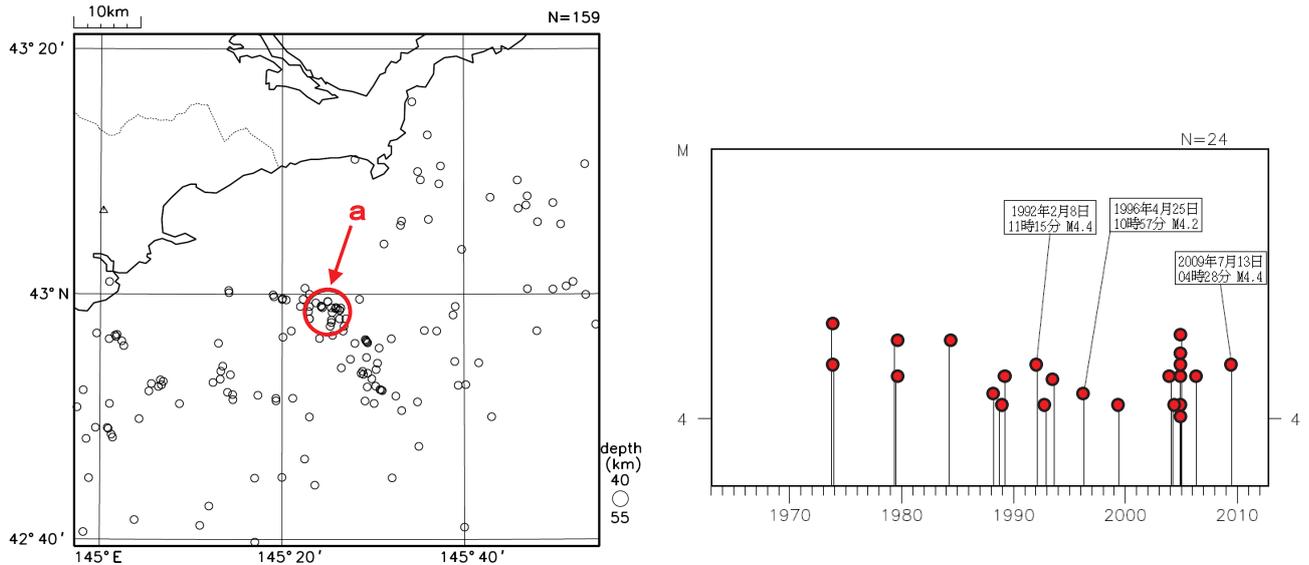


図 5.1.29 震央分布図と領域 a 内の地震の発生状況 (M-T 図)。1963 年 1 月 1 日～2012 年 9 月 30 日、深さ 40～55km、 $4.0 \leq M \leq 4.7$ 。

表5.1.14 相似性の確認対象とした地震 (釧路沖 2)。

番号	発生日時	M	深さ	番号	発生日時	M	深さ	番号	発生日時	M	深さ (km)
1	1973/10/02	4.7	40	9	1992/02/08	4.4	44	17	2004/11/29	4.5	47
2	1973/11/30	4.4	40	10	1992/12/06	4.1	44	18	2004/11/29	4.1	48
3	1979/05/11	4.6	50	11	1993/08/20	4.3	43	19	2004/12/02	4.1	47
4	1979/06/21	4.3	50	12	1996/04/25	4.2	48	20	2004/12/23	4.0	48
5	1984/04/14	4.6	46	13	1999/06/06	4.1	49	21	2005/01/17	4.4	47
6	1988/04/02	4.2	45	14	2004/02/15	4.3	47	22	2005/01/17	4.6	46
7	1988/09/14	4.1	45	15	2004/03/31	4.1	48	23	2006/04/29	4.3	47
8	1989/03/23	4.3	44	16	2004/11/09	4.3	48	24	2009/07/13	4.4	47

5.1.7.2 波形の比較

選択した 24 地震の相似性を確認するため、デジタル波形データ及びアナログ波形記録の比較を行った。

(1) デジタル波形データの比較

気象庁の地震デジタル波形データは、1988 年以降のものが利用可能で、波形の重ね合わせや波形相関を求めて相似性の確認を行った (図 5.1.30)。

この結果、2009 年、2004 年 11 月 9 日、1999 年、1996 年及び 1992 年 2 月の地震波形が相似であることが確認され

た。

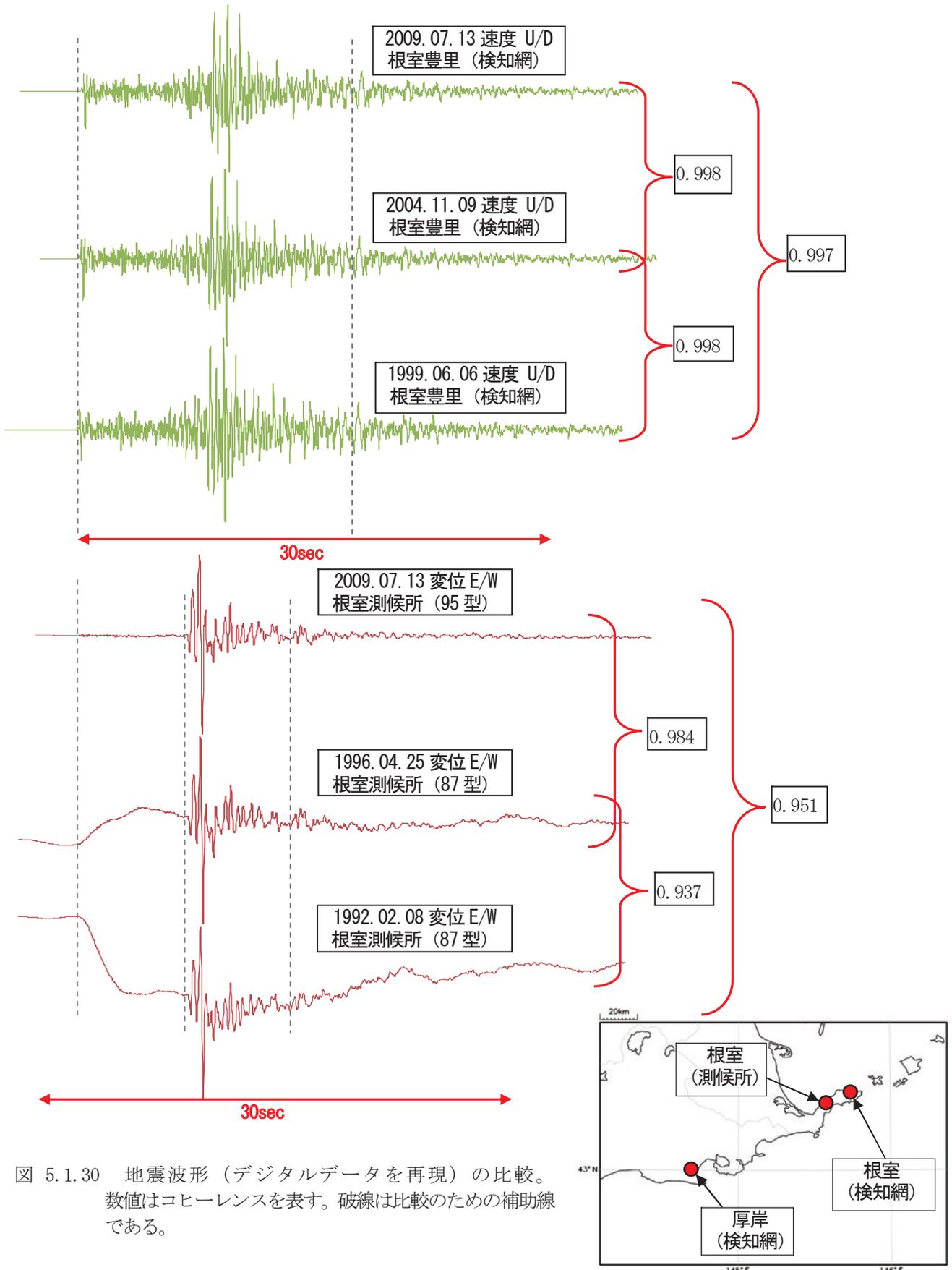


図 5.1.30 地震波形 (デジタルデータを再現) の比較。  
数値はコヒーレンスを表す。破線は比較のための補助線  
である。

(2) アナログ記録の比較

デジタル波形の無い1992年から1979年の4地震については、根室測候所の59C型、59型電磁式地震計記録の特徴(図5.1.31)から、地震波形が相似であることを確認した。

(3) 比較結果

デジタル波形記録とアナログ波形の相似性の確認結果から選択した24地震のうち8地震が相似であることを確認した(表5.1.15)。

表5.1.15 各観測点の記録から相似地震と認められた地震(釧路沖2)。色つきのセルは複数観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

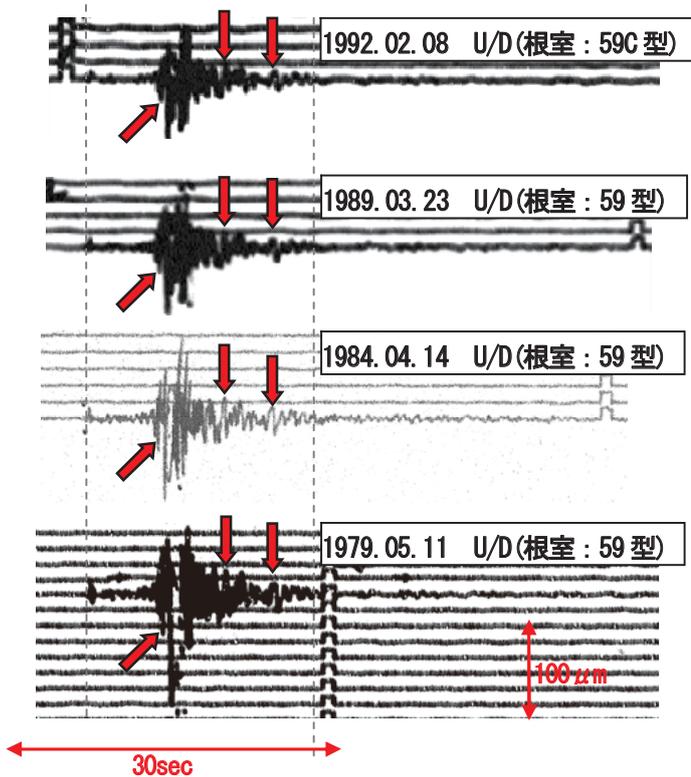


図 5.1.31 地震波形(マイクロフィルムから再現)の比較。矢印は特徴的な位相を示す。

地点(種別) 日 時	根室測候所 (59/59C型) アナログ記録	根室測候所 (強震データ) デジタル記録	根室豊里 (検知網) デジタル記録
1973/10/02 17:29	×	—	—
1973/11/30 02:19	×	—	—
1979/05/11 16:02	○	—	—
1979/06/21 17:23	×	—	—
1984/04/14 15:03	○	—	—
1988/04/02 05:07	×	—	—
1988/09/14 21:27	×	—	—
1989/03/23 04:22	○	—	—
1992/02/08 11:15	○	●	—
1992/12/06 01:31	×	—	—
1993/08/20 07:01	×	—	—
1996/04/25 10:57	—	●	—
1999/06/06 06:45	—	—	●
2004/02/15 20:09	—	—	×
2004/03/31 01:28	—	—	×
2004/11/09 03:34	—	—	●
2004/11/29 04:02	—	—	×
2004/11/29 13:05	—	—	×
2004/12/02 12:56	—	—	×
2004/12/23 19:27	—	—	×
2005/01/17 16:36	—	—	×
2005/01/17 16:36	—	—	×
2006/04/29 00:37	—	—	×
2009/07/13 04:28	—	●	●

○ : 各観測点において相似と認められた地震  
 × : 相似と認められない地震 — : 記録なし

5.1.7.3 震源再計算による震源の精査

表5.1.14の24地震の震源について観測点限定を行い再決定した。ただし、24地震全てを同じ観測点で評価できないことから、期間を三つに分け、それぞれの期間には同じ観測点を用い、連続した二つの期間に同一地震(1999年と1992年)が含まれるよう再計算を行った。

それぞれの組み合わせにおいて、波形の相似性が認められた地震については、震源がほぼ同一の場所に纏まった (図 5.1.32、図5.1.33、図5.1.34)。

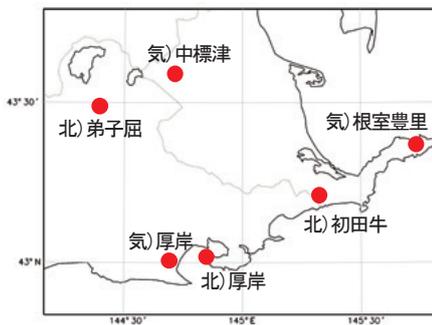


図 5.1.32 観測点の限定による震源再計算 (1999~2009 年の 12 地震を対象)。北海道大学観測点 2 点の P 相、1 点の S 相、気象庁観測点 2 点の P S 相、1 点の S 相を使用。△: カタログ震源 ▲: 再計算後

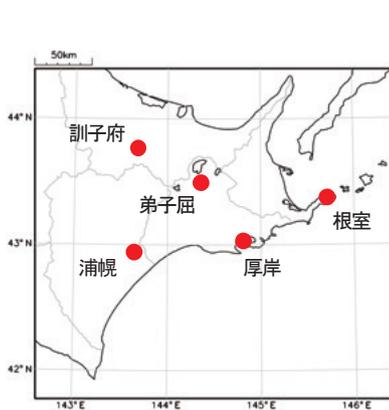
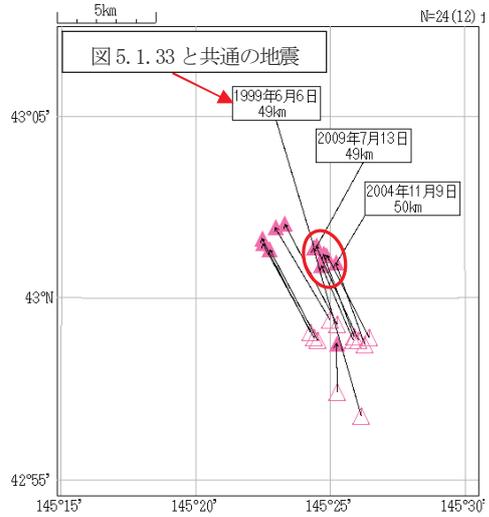


図 5.1.33 観測点の限定による震源再計算 (1992.2.8、1996、1999 年の 3 地震を対象)。北海道大学観測点の 5 点の P 相を使用。△: カタログ震源 ▲: 再計算後。

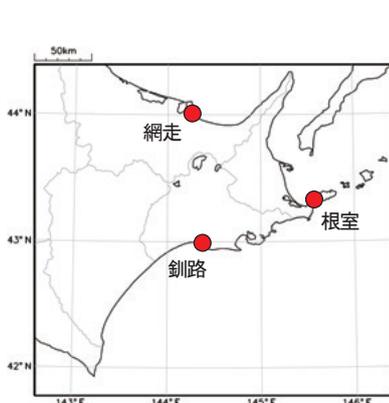
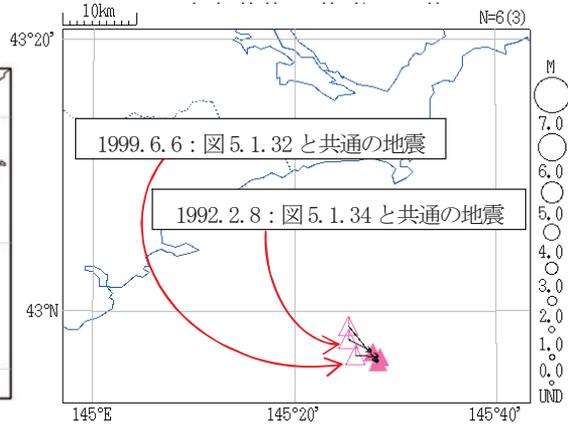
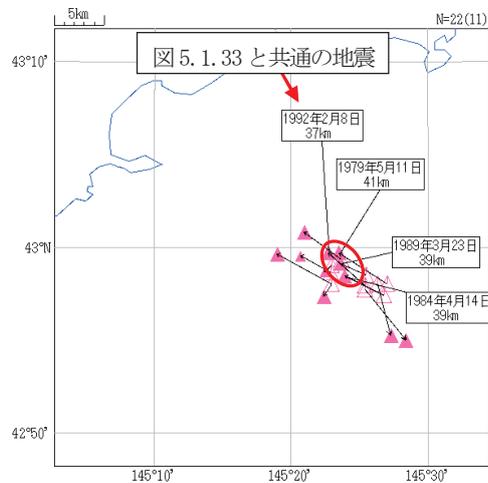


図 5.1.34 観測点の限定による震源再計算 (1973~1993 年の 11 地震を対象)。気象庁観測点 2 点の P S 相と 1 点の P 相を使用。△: カタログ震源 ▲: 再計算後



5.1.7.4 発震機構解及びP波初動分布

表5.1.14の24地震のうち地震波形の相似性が認められた8地震については発震機構解が求まっているものはなかったが、P波初動分布から2009年、2004年及び1999年以降の3地震については、P波初動分布に類似性が認められる(図5.1.35)。

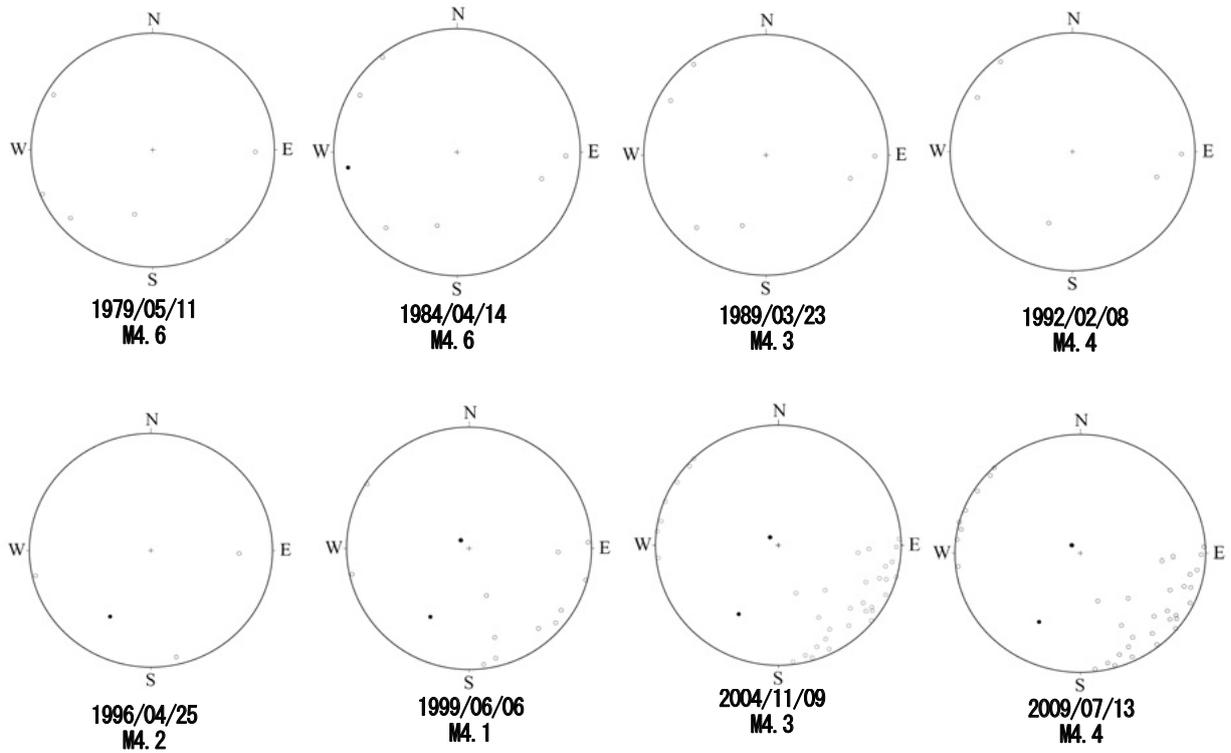


図 5.1.35 P波初動分布。

5.1.7.5 平均滑り速度の推定と次回の発生予測

地震波形比較、震源再計算による震源の精査、P波初動分布から図5.1.29から抽出した24地震のうち8地震は繰り返し地震であると同定した(表5.1.16)。この地震グループの地震発生間隔と各地震の推定すべり量から平均滑り速度5.1cm/年(図5.1.36)を得た。

なお、図5.1.37に繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔を、次回の発生予測を表5.1.17に示す。

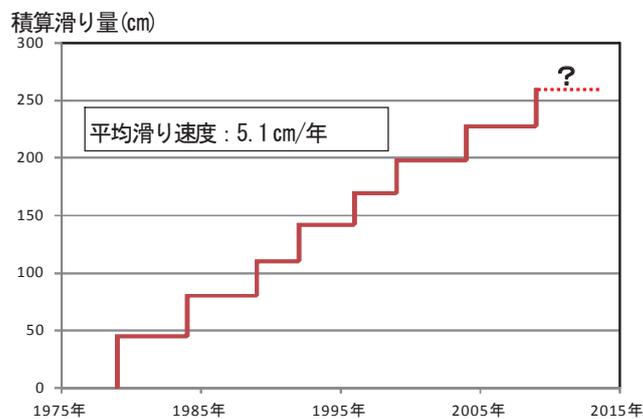


図 5.1.36 積算滑り量と平均滑り速度。

表5. 1. 16 同定された繰り返し相似地震とその確認結果。色つきセルは相似地震であることが確認できたイベントを表す。P波初動分布の△は、発震機構を確認するにはデータが不十分であることを表す。

種別 日時	地震波形	震源再計算	P波初動分布
1973/10/02 17:29	×	×	—
1973/11/30 02:19	×	×	—
1979/05/11 16:02	○	○	△
1979/06/21 17:23	×	○	—
1984/04/14 15:03	○	○	△
1988/04/02 05:07	×	×	—
1988/09/14 21:27	×	×	—
1989/03/23 04:22	○	○	△
1992/02/08 11:15	○	○	△
1992/12/06 01:31	×	×	—
1993/08/20 07:01	×	×	—
1996/04/25 10:57	○	○	△
1999/06/06 06:45	○	○	○
2004/02/15 20:09	×	×	—
2004/03/31 01:28	×	×	—
2004/11/09 03:34	○	○	○
2004/11/29 04:02	×	○	—
2004/11/29 13:05	×	×	—
2004/12/02 12:56	×	○	—
2004/12/23 19:27	×	×	—
2005/01/17 16:36①	×	○	—
2005/01/17 16:36②	×	×	—
2006/04/29 00:37	×	×	—
2009/07/13 04:28	○	○	○

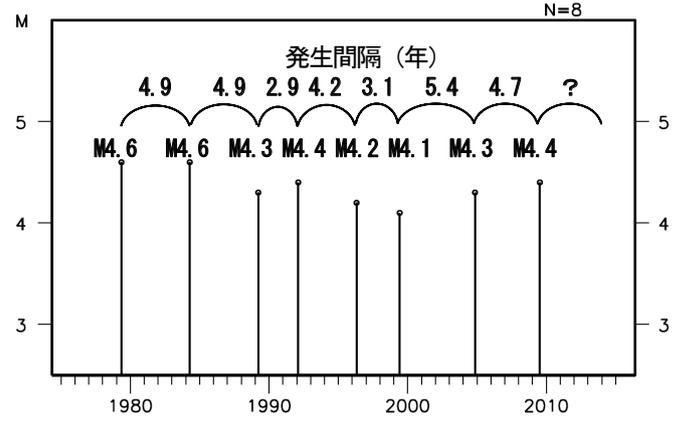


図 5. 1. 37 繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔。

表5. 1. 17 繰り返し間隔と次回の予測

平均M : 4.4
繰り返し間隔 最短 : 2.9年
最長 : 5.4年
平均 : 4.3年
(標準偏差 0.90)
次回の予測
2013年8月±12ヶ月
3年以内の発生確率 : 87.6%
(予測モデル : 小標本論対数正規分布、
2012. 11. 1 基準、70%の確率)

5.1.7.6 参考

釧路沖 2 (Group97) の繰り返し相似地震の発生場所は、2004年11月29日に発生した釧路沖の地震 (M7.1) の余震域にあたり、この地震とはほぼ同じ場所で発生した1961年8月12日の地震 (M7.2) と地震波形、検潮記録、震度分布、余震活動が類似していることが平成16年11月の地震・火山月報 (防災編) で報告されている。

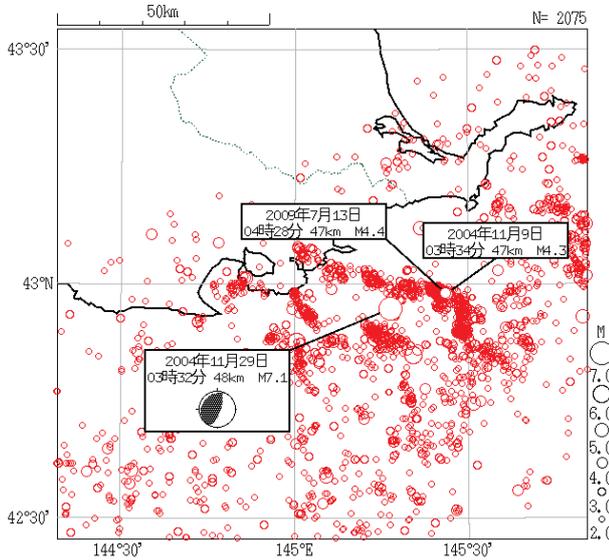


図 5.1.38 震央分布図。2004 年 11 月～2012 年 10 月、深さ 0～80km、 $M \geq 2.0$ 。

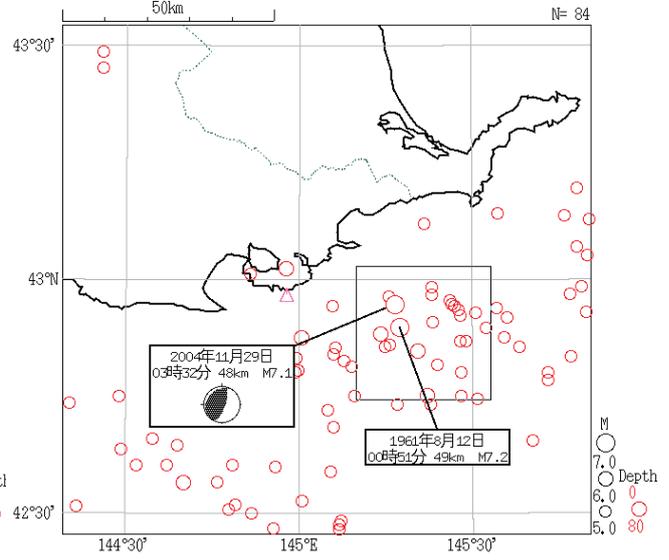


図 5.1.39 震央分布図。1961 年 1 月～2012 年 10 月、深さ 0～80km、 $M \geq 5.0$ 。

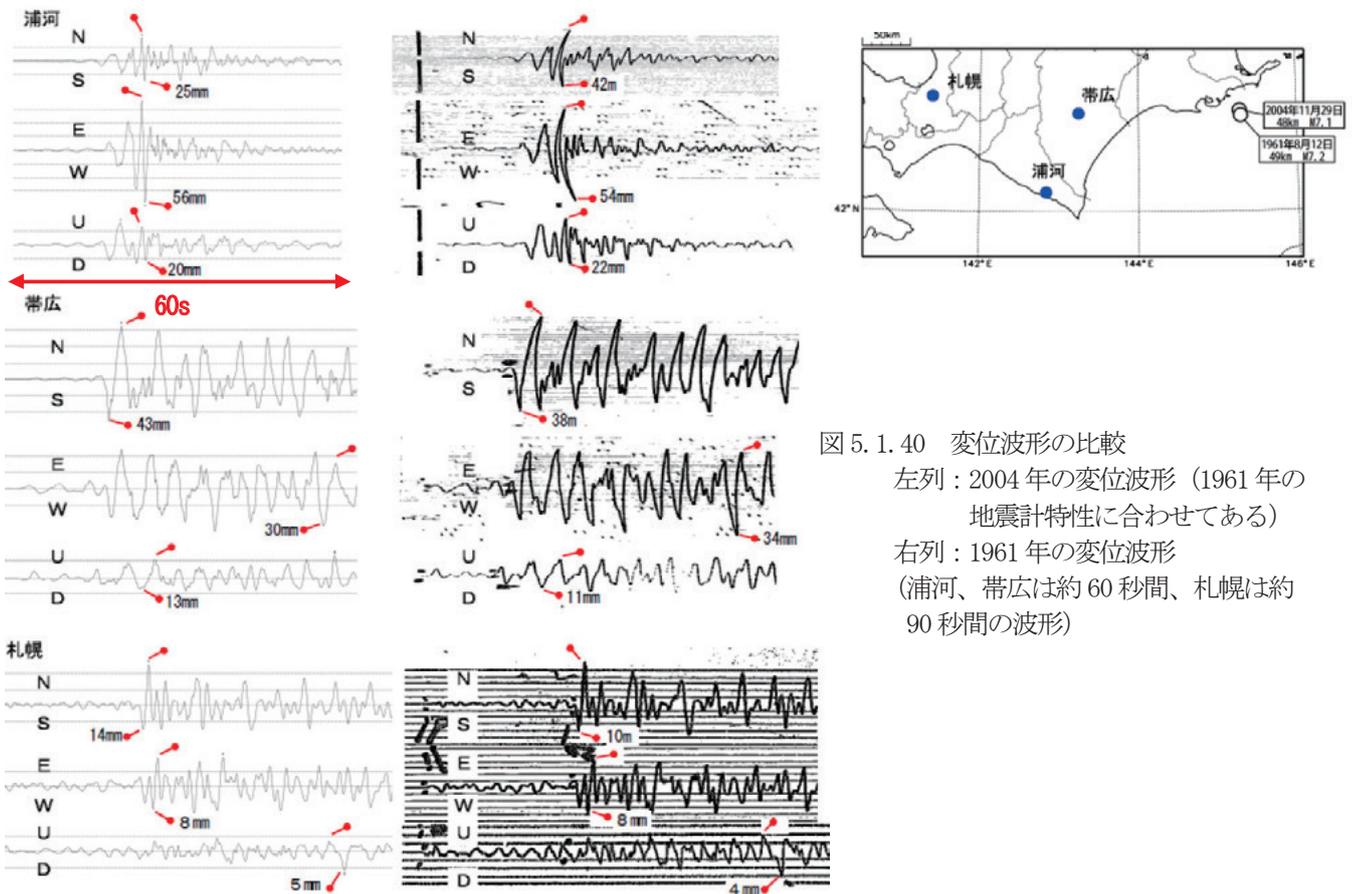


図 5.1.40 変位波形の比較  
 左列：2004 年の変位波形 (1961 年の地震計特性に合わせてある)  
 右列：1961 年の変位波形  
 (浦河、帯広は約 60 秒間、札幌は約 90 秒間の波形)

5.1.8 結果

以上の結果、調査した5グループ全てが繰り返し地震であることがわかった。各グループにおける次回の地震発生年月を岡田(2009)に基づいて予測し、その結果を表5.1.18に示す。また、今回確認できた繰り返し相似地震は、過去の大地震のアスペリティの陸側に分布していることが確認できた(図5.1.41)。

表5.1.18 各繰り返し相似地震の繰り返し間隔、次回の発生予測等。

	繰り返し回数	平均 M	繰り返し間隔 (年)				最新発生日からの経過年数	予 測		平均滑り速度 (cm/年)
			最短	最長	平均	標準偏差		次回の発生 (70%確率)	3年以内の発生確率	
①浦河沖1 NewGroup01 2009/12/30 04:23 M4.8	11	4.8	2.9	7.5	5.3	1.41	2.84	2015年3月 ±21ヶ月	63.6%	7.7
②浦河沖2 Group10 2011/07/26 07:58 M4.8	6	4.9	6.7	8.6	7.6	0.71	1.27	2019年3月 ±12ヶ月	0.4%	5.5
③十勝地方南部 NewGroup02	5	5.0	8.6	13.2	10.7	1.64	0.28	2023年6月 ±32ヶ月	0.5%	4.4
④釧路沖1 Group30, 123 2010/04/09 03:41 M4.8	10	4.9	4.9	7.5	6.2	0.88	2.56	2016年6月 ±13ヶ月	28.8%	6.5
⑤釧路沖2 Group97 2009/07/13 04:28 M4.4	8	4.4	2.9	5.4	4.3	0.90	3.30	2013年8月 ±12	87.6%	5.1

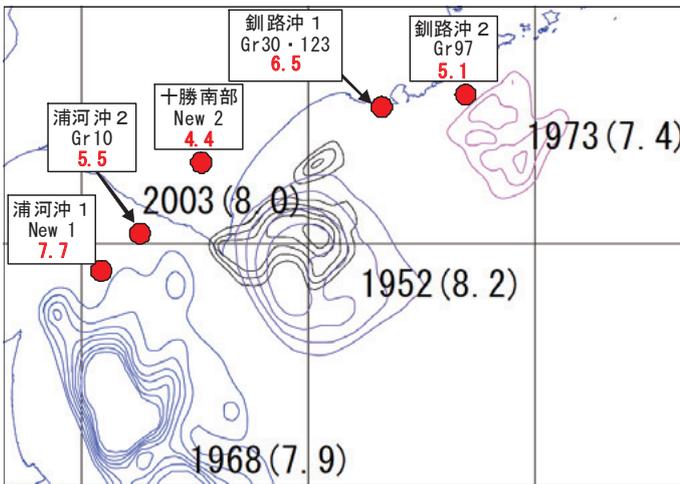


図5.1.41 繰り返し相似地震の分布(●)。  
赤数字: 本調査による各繰り返し相似地震の平均滑り速度。  
コンターは、中央防災会議日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会(2006)の資料によるアスペリティの分布を示す。

謝辞

本調査には、独立行政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、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データ及を利用して気象庁が文部科学省と協力して求めた一元化震源を使わせていただきました。地震の相似性の確認にあたり、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センターから地震波形のデジタルデータの提供と震源精査には検測値を使用させて頂きました。確認できた繰り返し相似地震から次回の発生予測を算出するにあたり、大阪管区気象台地震火山課(長谷川嘉臣氏)作成のL-CAT(地震長期発生確率計算ツール)を使用しました。記して感謝します。

参考文献

- 中央防災会議, 2006: アスペリティ分布・波源域分布, 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会報告, 参考資料 1-9.
- Nadeau, R. M. 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.
- 岡田正実, 2009: 繰り返し地震および余震の確率予測, *地震* **2**, **61**, 特集号, S143-S153.
- 溜渕功治・中村雅基・山田安之, 2011: 全国を対象とした客観的な相似地震の抽出, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, SSS026-P02.

## 5.2 東北地方太平洋沖の繰り返し相似地震

高齋祥孝・下川淳・長谷川安秀・太田健治(仙台管区気象台地震火山課地方共同研究G)・  
 溜瀧功史(気象庁地震予知情報課)・草野富二雄(仙台管区気象台地震火山課地方共同研究G)  
 所属は平成 24 年度当時

### 5.2.1 はじめに

仙台管区気象台は気象研究所との地方共同研究「日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究」として平成 23、24 年度の 2 ヶ年計画で東北地方周辺の繰り返し相似地震の調査を行った。

繰り返し相似地震については長谷川・他(2005)が、地震活動から東北地方沖の太平洋プレート境界付近で発生する中規模の繰り返し地震活動を 11 ヶ所(東北地方分では 9 か所)を検出している(図 5.2.1)。これら検出した繰り返し地震の波形を収集し解析を行ったが、2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生し、M5 クラス以上の地震が多発したことから、本研究では M6 程度の繰り返し地震について調査を行い、取りまとめた。

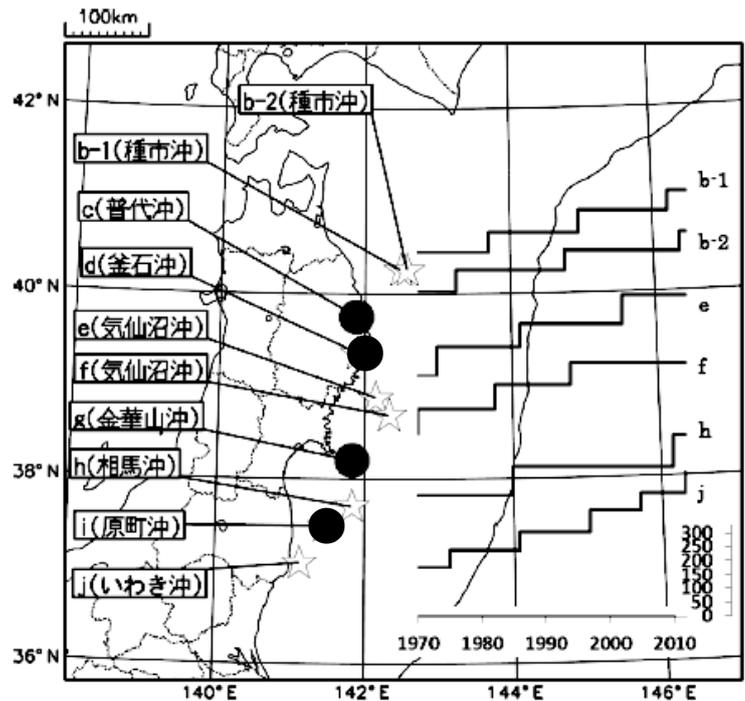


図 5.2.1 繰り返し相似地震活動の領域とすべり量 (cm)。b～j は長谷川・他(2005)が地震活動から検出した繰り返し地震活動の領域。☆は M6 程度の繰り返し地震で調査を行った領域、●は M5 程度の地震で波形が不明瞭かつ東北地方太平洋沖地震の余震活動多発のため調査を見送った領域を示す。

### 5.2.2 データ

波形比較を行った地震のリストを表 5.2.1 に示す。このリストは長谷川・他(2005)が地震活動からクラスタ抽出を行った結果を元にしたもので、M6 程度の繰り返し地震と考えられていたものである。波形比較は 1951 年(51 型機械式強震計展開以降)から行った。1960 年から 1994 年までの地震については 59 型地震計(100 倍、変位)及び機械式強震計(1 倍、変位)の地震波形(マイクロフィルム)の画像を使用した。また、1995 年以降については 95 型計測震度計で観測したデジタル波形を 59 型地震計相当に変換した。調査は 2012 年 4 月までの期間について行った。特性の違う地震計の波形比較を行うには、59 型地震計及び機械式強震計の波形を 95 型計測震度計の波形に合わせるために円弧補正を行って比較すれば詳細な比較ができるが、今回は行っていない。また、波形比較を行う観測点を選ぶ場合は、震源から各方向に存在するもの全てで行うのが理想であるが、実際は官署の移転や地震計の変更等が行われているため、できるだけ調査期間内に地震計の移設等を行っていない気象官署の地震波形を使用した。このほか、それぞれの繰り返し相似地震の発生確率の計算は地震長期発生確率計算ツール(L-CAT:長谷川嘉臣氏作成)を使用した。

表 5.2.1 東北地方太平洋沖の繰り返し相似地震（M6 程度）の発生リスト。

領域名	年	月	日	年月日	年月日2	間隔[年]	Mj	Mw※
種市沖b(b-1)	1968	11	25	1968.90	1968/11/25		6.0	
	1981	10	15	1981.79	1981/10/15	12.9	6.0	5.7
	1995	1	7	1995.02	1995/1/7	13.2	6.2	6.0
	2009	2	15	2009.13	2009/2/15	14.1	5.9	5.7
種市沖b(b-2)	1960	8	13	1960.62	1960/8/13		6.0	
	1976	7	8	1976.52	1976/7/8	15.9	5.9	
	1993	2	25	1993.15	1993/2/25	16.6	5.9	5.7
	2011	5	8	2011.35	2011/5/8	18.2	5.7	5.7
気仙沼沖e	1940	11	20	1940.89	1940/11/20		6.6	
	1954	11	19	1954.88	1954/11/19	14.0	6.1	
	1973	11	19	1973.88	1973/11/19	19.0	6.4	
	1986	12	1	1986.92	1986/12/1	13.0	6.0	6.0
	2002	11	3	2002.84	2002/11/3	15.9	6.3	6.4
気仙沼沖f	1937	1	7	1937.02	1937/1/7		6.4	
	1953	12	7	1953.93	1953/12/7	16.9	6.4	
	1970	9	14	1970.70	1970/9/14	16.8	6.2	
	1982	6	1	1982.42	1982/6/1	11.7	6.2	6.1
	1994	8	14	1994.62	1994/8/14	12.2	6.0	5.9
相馬沖h	1942	2	21	1942.14	1942/2/21		6.5	
	1963	8	15	1963.62	1963/8/15	21.5	6.6	
	1985	8	12	1985.61	1985/8/12	22.0	6.4	6.4
	2010	3	14	2010.20	2010/3/14	24.6	6.7	6.5
いわき沖j	1929	6	24	1929.48	1929/6/24		5.8	
	1939	1	24	1939.07	1939/1/24	9.6	6.0	
	1943	8	22	1943.64	1943/8/22	4.6	5.6	
	1950	12	23	1950.98	1950/12/23	7.3	5.7	
	1958	4	17	1958.29	1958/4/17	7.3	5.8	
	1966	12	27	1966.99	1966/12/27	8.7	5.5	
	1975	8	15	1975.62	1975/8/15	8.6	5.5	
	1986	10	14	1986.79	1986/10/14	11.2	5.7	5.6
	1997	5	12	1997.36	1997/5/12	10.6	5.7	5.9
	2005	10	22	2005.81	2005/10/22	8.4	5.6	5.5
2012	4	1	2012.25	2012/4/1	6.4	5.9	5.8	

※MwはGloal CMT Projectによる

5.2.3. 各領域の資料

5.2.3.1 領域b-1（種市沖）の繰り返し相似地震

領域b-1（種市沖）のプレート境界では、M6.0程度の地震が約14年間隔で発生しており（表5.2.1及び図5.2.2、図5.2.3）、それぞれの地震波形もよく似ている（図5.2.4）。これらの地震はプレート境界上に存在する同じアスペリティの破壊により繰り返し地震が発生していると考えられる。

また、領域b-1（種市沖）近傍では、「平成6年(1994年)三陸はるか沖地震」(M7.6)の最大余震（1995年1月7日、M7.2）が発生しているほか、別の繰り返し地震（領域b-2）が発生しているにもかかわらず、⑦2009年2月15日の地震（M5.9）は発生間隔を大きく乱されることなく発生しているように見える。

領域b-1（種市沖）のM6程度の繰り返し相似地震の波形比較を大船渡観測点で行った結果を図5.2.4に示す。それぞれの波形はよく似ている。

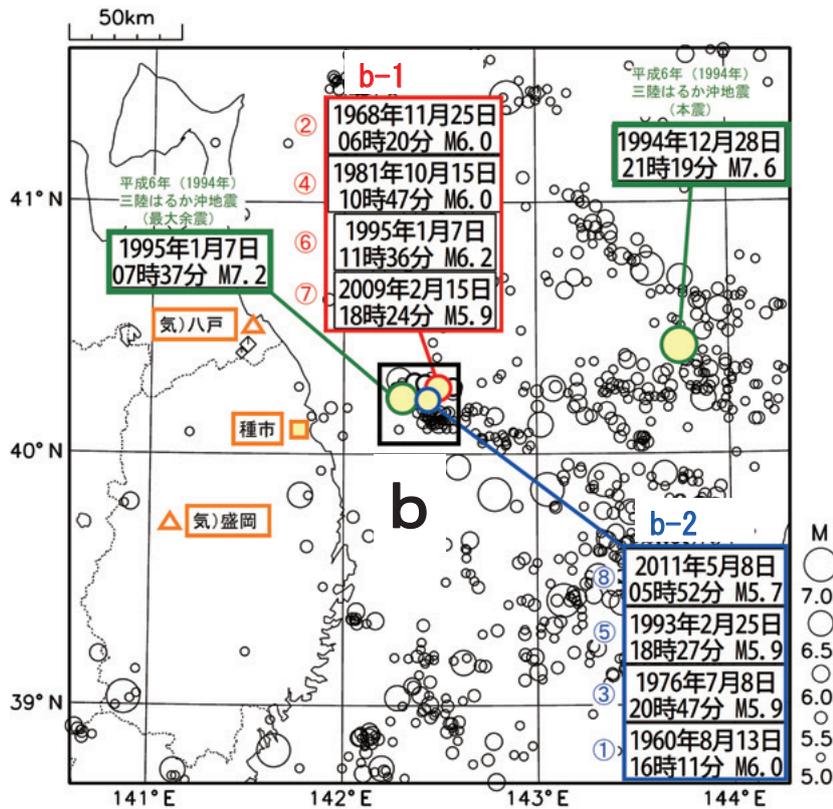


図5.2.2 震央分布図(1960年以降、深さ0~90km、M5.0以上)。

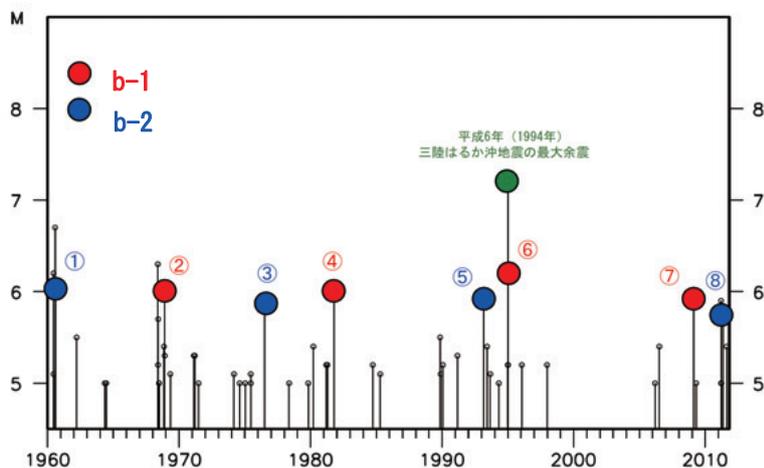


図5.2.3 上図の領域b内の地震活動経過図（規模別）。

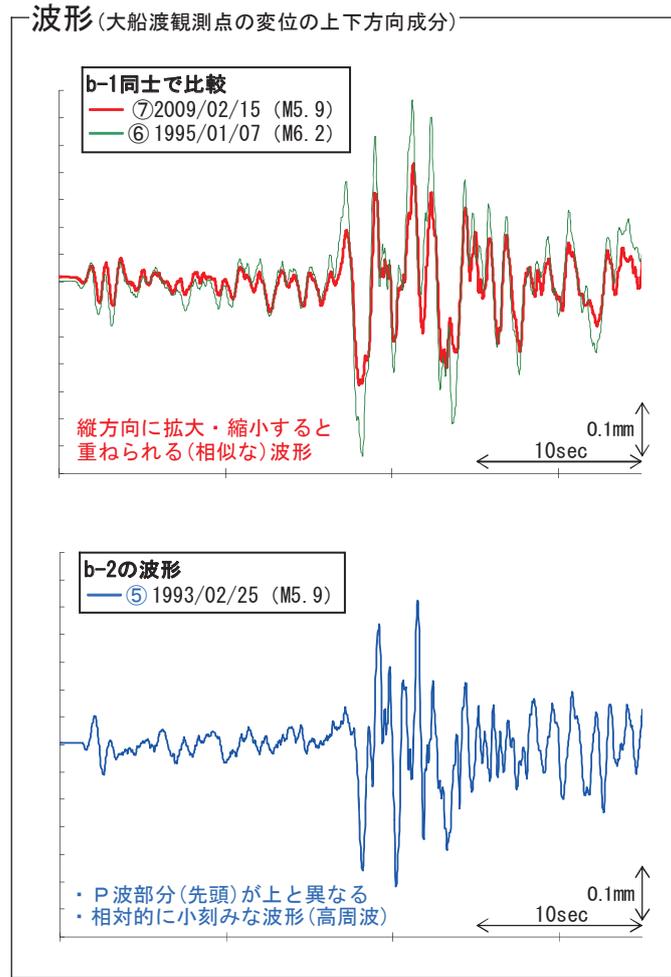


図5.2.4 種市沖 b-1 の波形比較 (大船渡観測点、上下成分)。

種市沖b-1のM6程度の繰り返し相似地震の震度分布比較を行った結果を図5.2.5に示す。震度観測点は移転の少ない気象官署で比較した。あわせて発震機構解も図中に示した。それぞれの震度分布を見ると、ややばらつきは見られるものの、概ね震度分布の傾向は良く似ている。

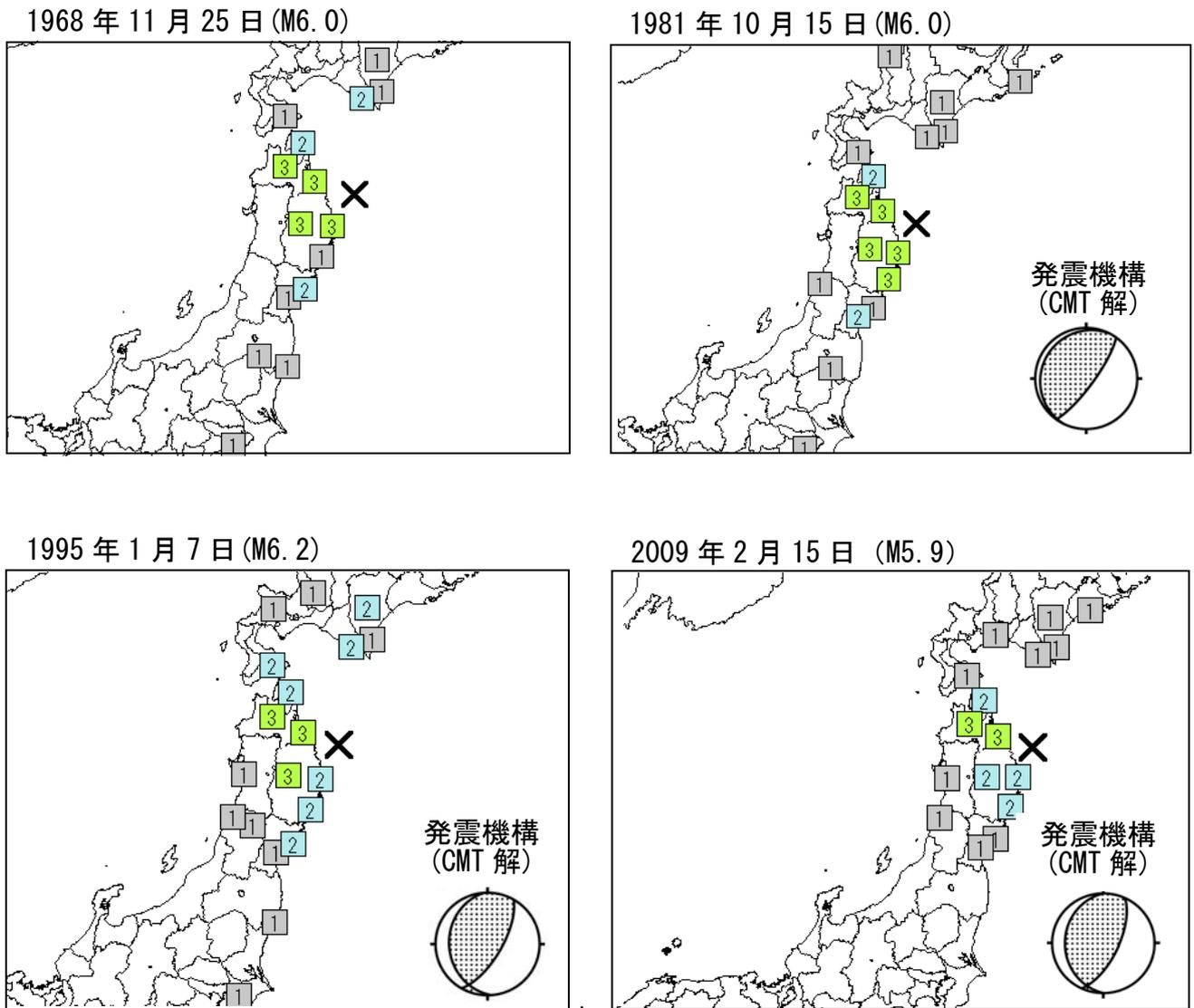


図5.2.5 種市沖b-1の地震の震度分布比較(気象官署)と発震機構解。震度は1996年以前は体感、2009年は計測震度計による。また、発震機構(CMT解)はGlobal CMT Projectによる。

5.2.3.2 領域b-2（種市沖）の繰り返し相似地震

領域b-2（種市沖）ではM5.9程度の地震が約17年間隔で発生している（表5.2.1及び図5.2.2, 図5.2.3）。図5.2.6に八戸、図5.2.7に盛岡の波形を比較した結果を示す。それぞれの波形はよく似ている。なお、b-2の領域の近傍では、「平成6年(1994年)三陸はるか沖地震」(M7.6)の最大余震（1995年1月7日、M7.2）が発生しているほか、別の繰り返し地震（b-1）が発生している（5.2.3.1節の種市沖b-1を参照）。

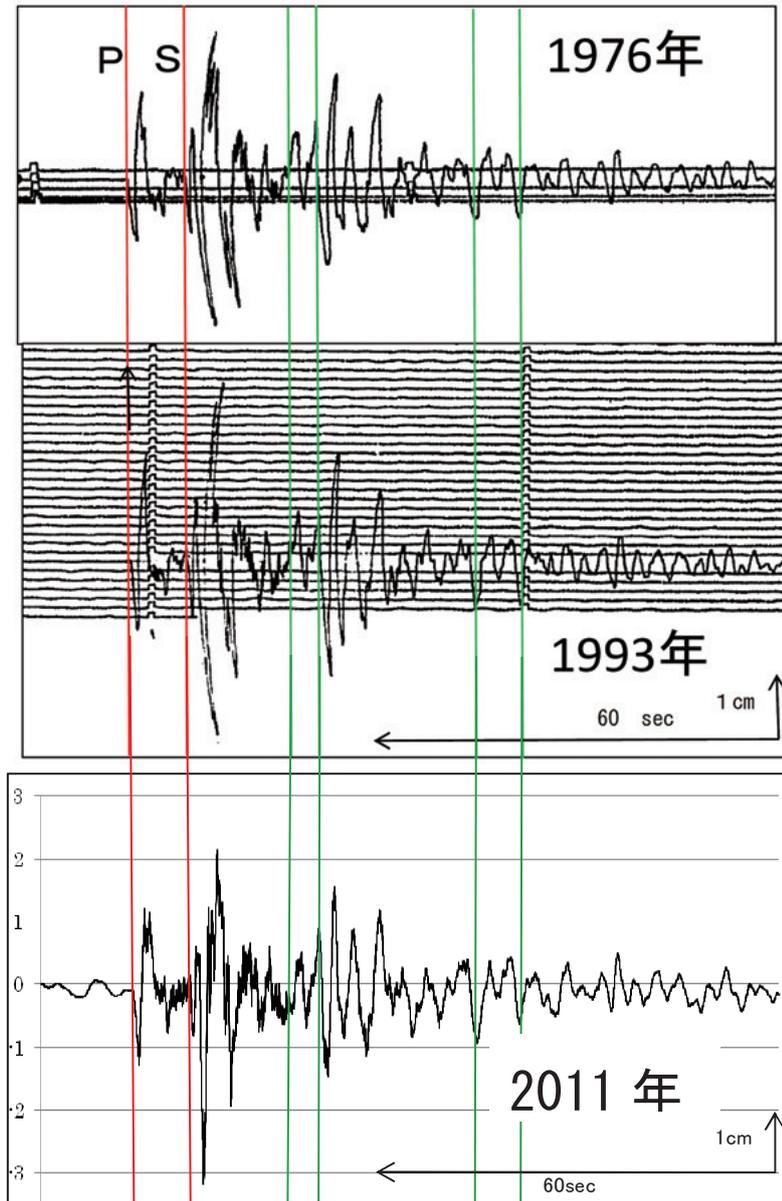


図5.2.6 八戸の地震計記録（上下成分）。1976年と1993年の地震波形は59型地震計（100倍）、2011年の波形は95型計測震度計で観測したデジタル記録を59型地震計相当に変換したものを表示した。位相の比較のために補助線を引いている。

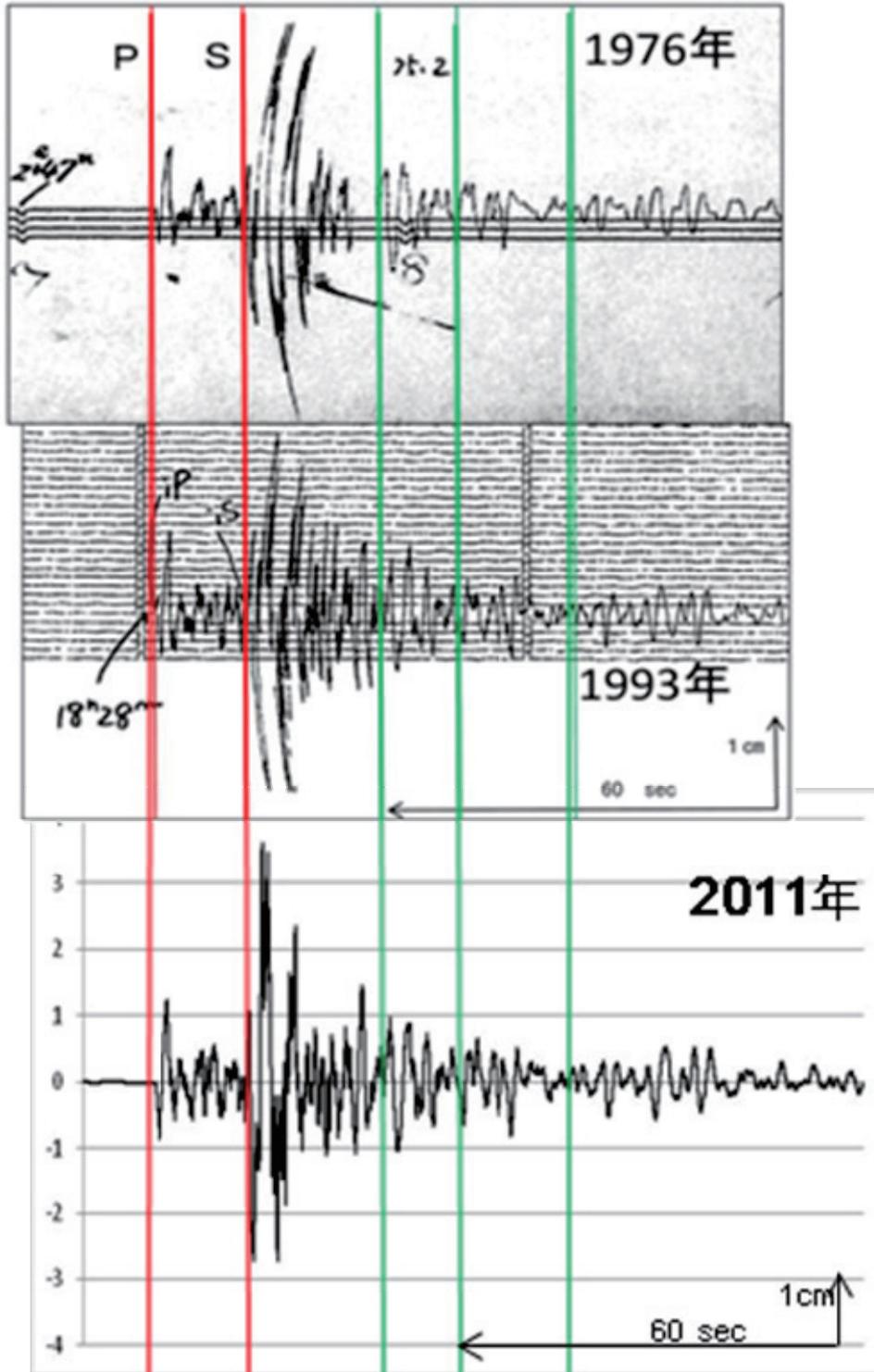


図5.2.7 盛岡の地震計記録（上下成分）。1976年と1993年の地震波形は59型地震計（100倍）、2011年の波形は95型計測震度計で観測したデジタル記録を59型地震計相当に変換したものを表示した。位相の比較のために補助線を引いている。

種市沖b-2のM6程度の繰り返し相似地震の震度分布比較を行った結果を図5.2.8に示す。震度観測点は移転の少ない気象官署で比較した。あわせて発震機構解も図中に示した。それぞれの震度分布を見ると、ややばらつきは見られるものの、概ね震度分布の傾向は良く似ている。

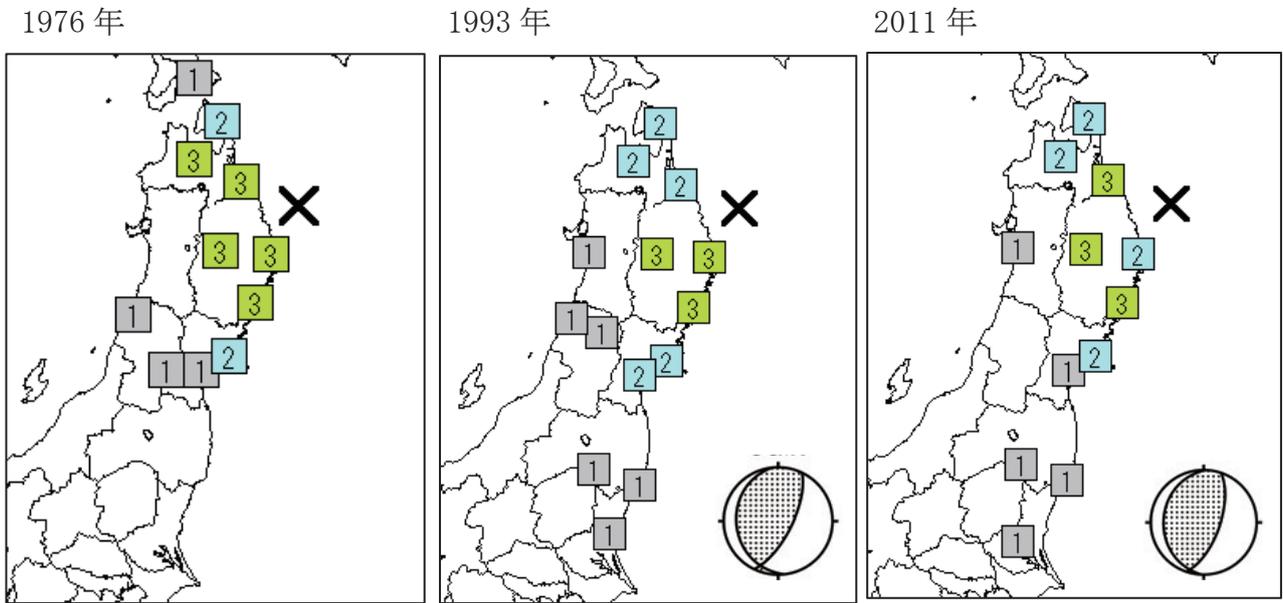


図5.2.8 種市沖b-2の繰り返し相似地震の震度分布比較（気象官署）と発震機構解。震度は1976年と1993年は体感、2011年は計測震度計による。発震機構解（CMT解）はGlobal CMT Projectによる。

5.2.3.3 領域 e (気仙沼沖) の繰り返し相似地震

気仙沼沖の領域 e では、M6.3 程度の地震が約 16 年の間隔で発生している (表 5.2.1 及び図 5.2.9, 図 5.2.10)。

図 5.2.10 には上図の矩形領域内の地震活動経過図を示した。地震が発生した順に番号を付してある。

①から⑤の地震は繰り返し相似地震と考えられるものを示している。波形比較は地震記録が直近で明瞭な③④⑤の地震について行った。図 5.2.11 に波形比較を、図 5.2.12 に気象官署の震度分布の比較を示している。これらの資料から、気仙沼沖の領域 e で発生したこれらの地震は繰り返し相似地震と考えられる。

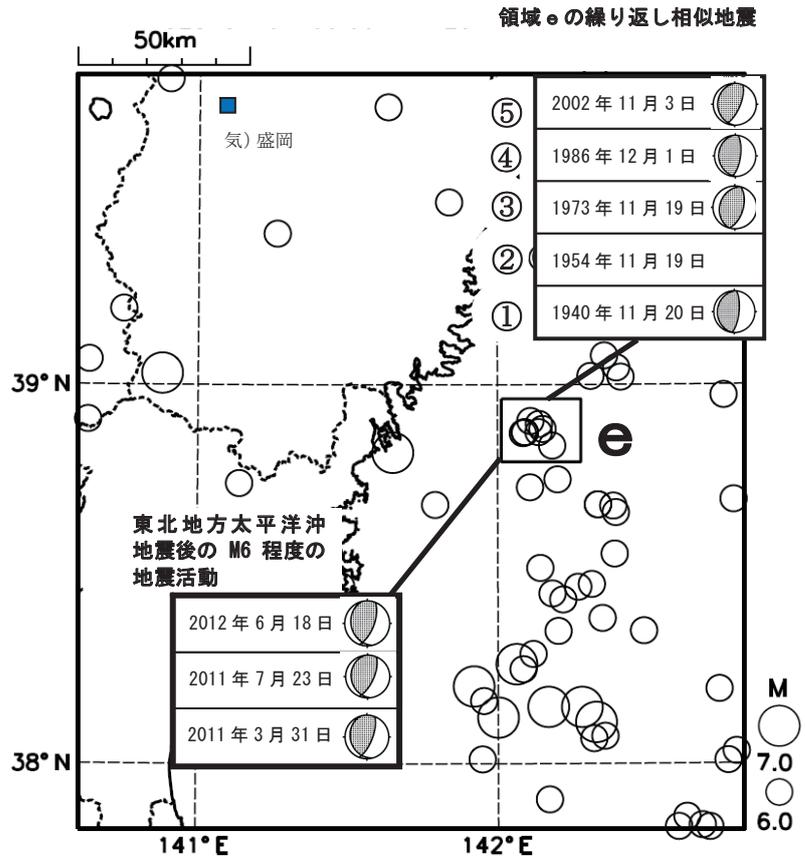


図 5.2.9 震央分布図 (1923 年以降、深さ 0~100km、M≥6.0)。1970 年以前の発震機構解は Ichikawa (1971) による。

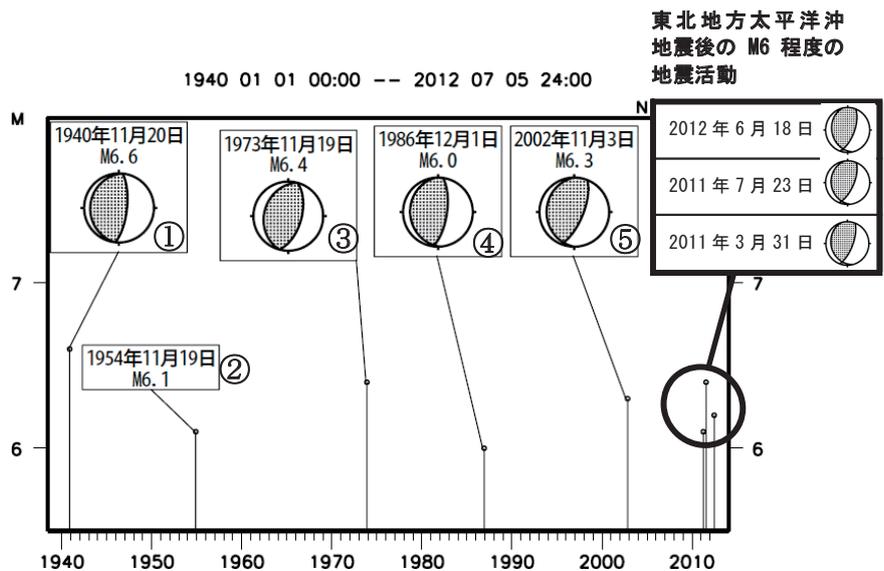


図 5.2.10 上図の領域 e 内の地震活動経過図 (規模別)

図5.2.11に領域e（気仙沼沖）の1973年、1986年、2002年の盛岡観測点の上下成分の変位波形の比較図を示す。1973年、1986年の波形は59型地震計の地震波形（マイクロフィルム）の画像を、2002年の波形は95型計測震度計のデジタル波形を59型地震計相当に変換したものをを用いた。なお、水平2成分は振り切れており、波形を比較するのは困難であった。上下成分の波形を比較すると波形は良く似ている。このことから領域eの地震は相似地震である可能性が高い。なお、盛岡の1954年、1973年、1986年の52型強震計の波形ははっきりせず、比較困難であった。

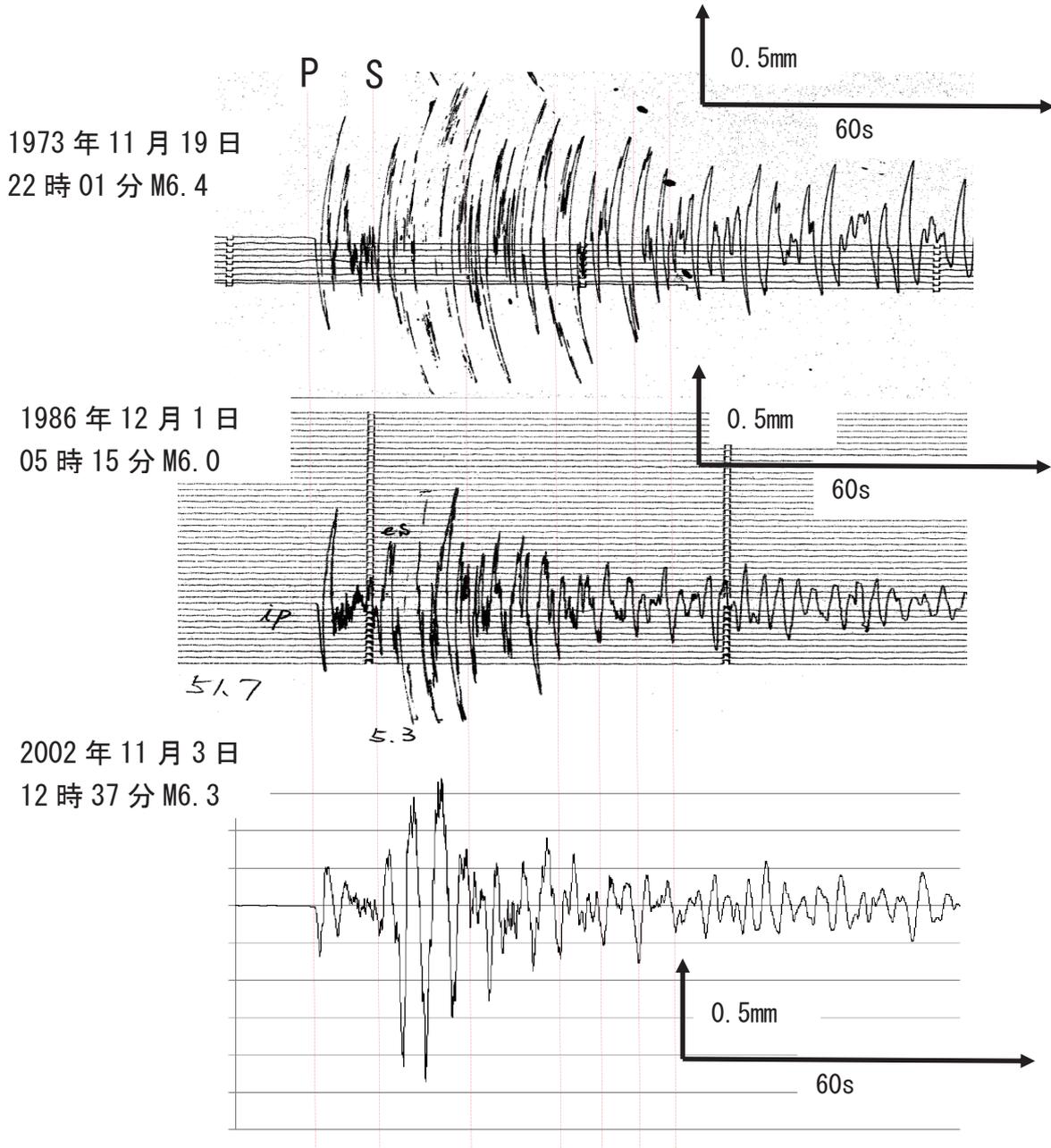
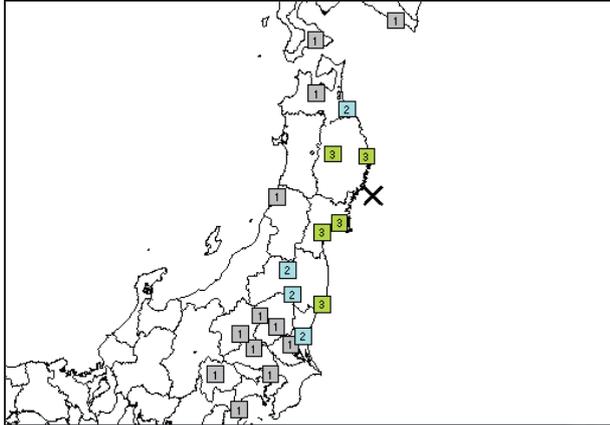


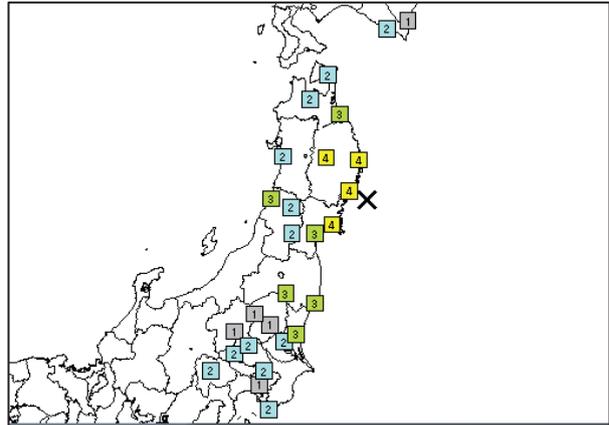
図5.2.11 盛岡の地震計記録（上下成分）。1973年と1986年は59型地震計、2002年の波形は95型計測震度計で観測したデジタル波形を59型地震計相当に変換したものを示す。位相の比較のために補助線を引いている。1973年の地震は振り切れているため明瞭ではないが、これらの波形を比較すると波形は良く似ている。

領域 e (気仙沼沖) の M6 程度の繰り返し相似地震の震度分布比較を行った結果を 5.2.12 に示す。震度観測点は移転の少ない気象官署で比較した。あわせて発震機構解も図中に示した。それぞれの震度分布を見ると、ややばらつきは見られるものの、概ね震度分布の傾向は良く似ている。

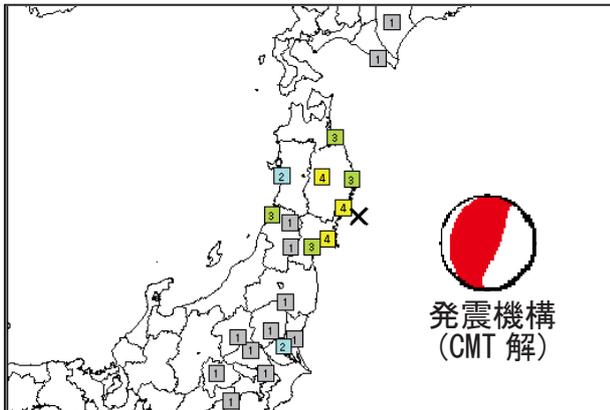
1954 年 11 月 19 日 (M6.1)



1973 年 11 月 19 日 (M6.4)



1986 年 12 月 1 日 (M6.0)



2002 年 11 月 3 日 (M6.3)

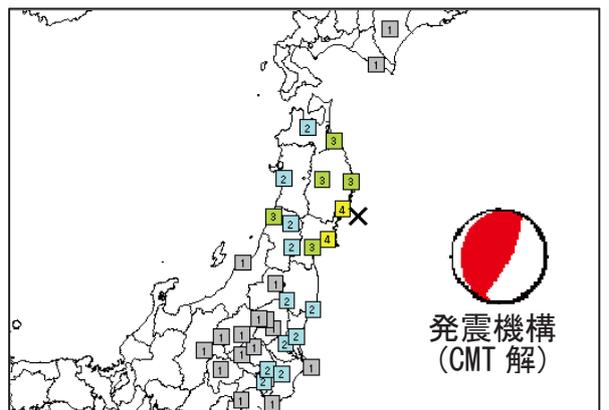


図5.2.12 領域 e の繰り返し相似地震の震度分布比較 (気象官署) と発震機構解。震度は1996年以前は体感での観測である。発震機構はGlobal CMT Projectによる。

領域 e 付近では2011年東北地方太平洋沖地震後にM6程度の規模の地震が3回発生しており（図5.2.9）、相似地震が促進されている可能性も考え、調査を行った。これらの波形と繰り返し相似地震と考えられる2002年11月3日（M6.3）の波形を比較したものを図5.2.13に示す。東北地方太平洋沖地震の余震と繰り返し相似地震と考えられる地震の波形は似ていない。なお、それぞれの余震の波形は良く似ている。

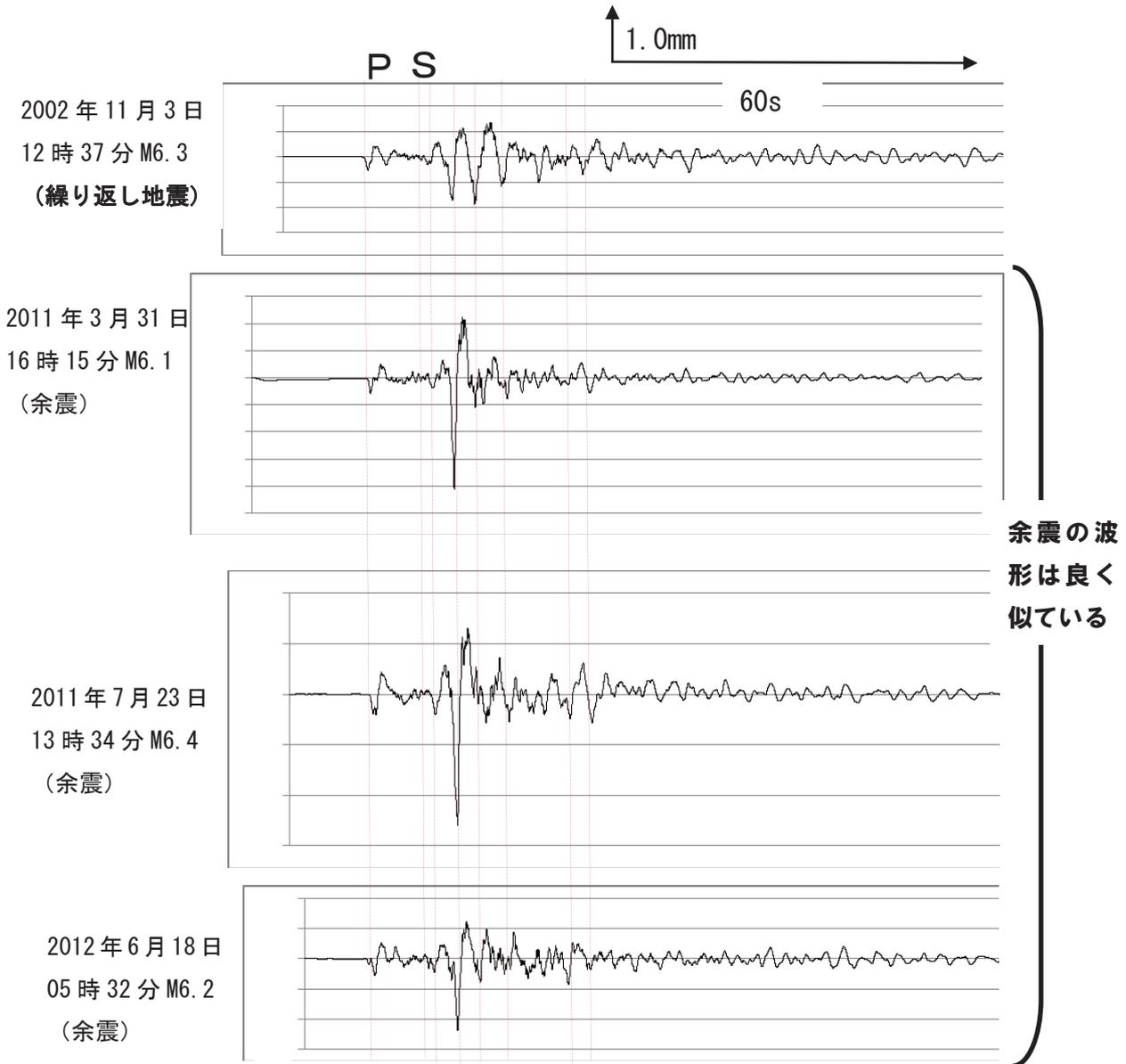


図5.2.13 盛岡の地震計記録（上下成分）。波形はいずれも95型計測震度計のデジタル波形を59型地震計相当に変換したものをを用いている。位相の比較のために補助線を引いている。

5.2.3.4 領域 f (気仙沼沖) の繰り返し相似地震

領域 f (気仙沼沖) の過去の活動を見ると、M6.2程度の地震が平均して14年の間隔で繰り返し発生している (表5.2.1及び図5.2.14、図5.2.15)。

石巻測候所の59型の上下動の波形比較を行った結果を図5.2.16に、気象官署の震度分布を図5.2.17に示す。それぞれの波形は位相やコーダなどが似ており、震度分布の傾向も概ね似ていることから、繰り返し相似地震と考えられる。

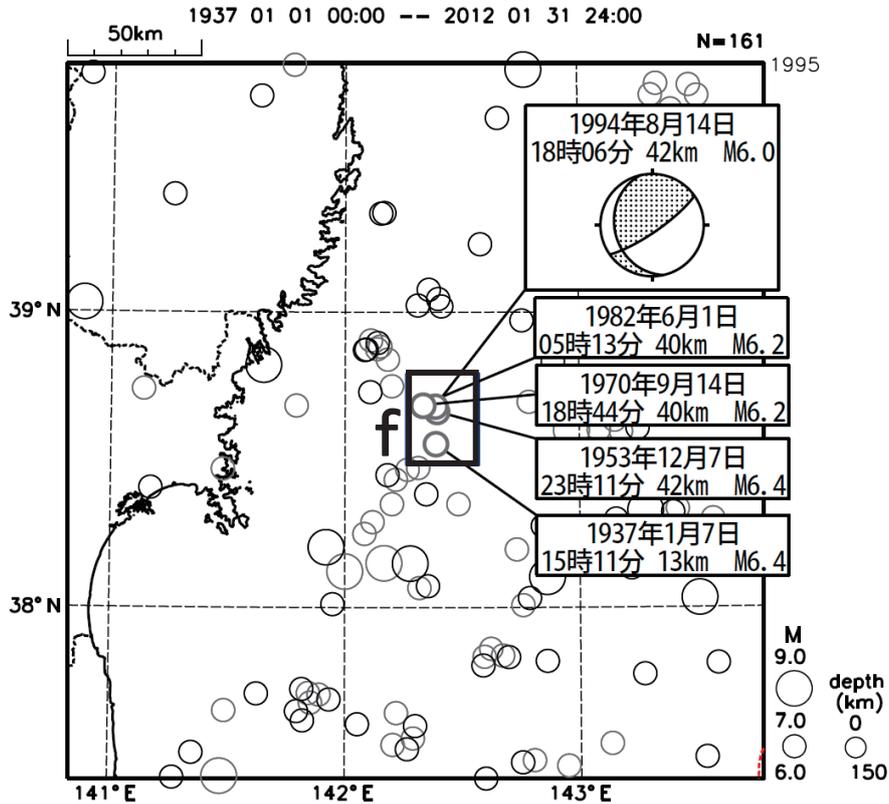


図 5.2.14 震央分布図 (1937 年以降、深さ 0~150km、M $\geq$ 6.0)。

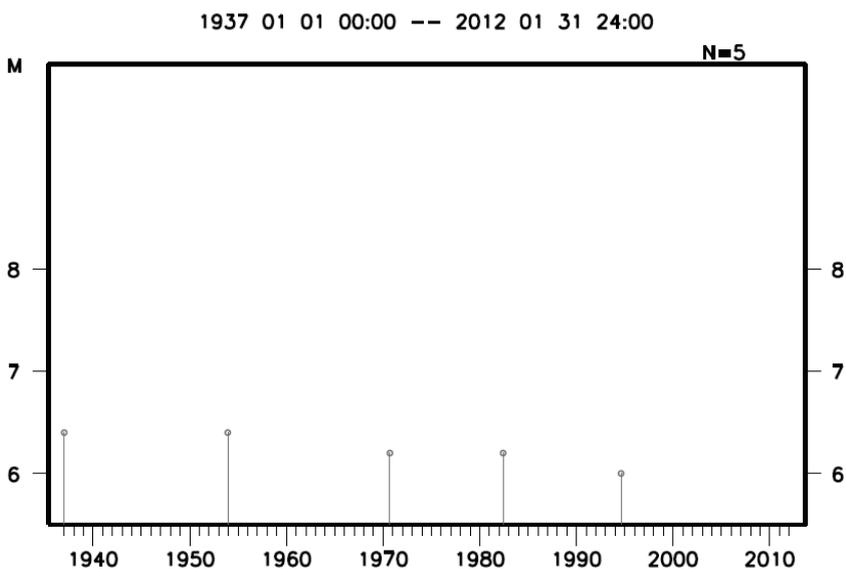
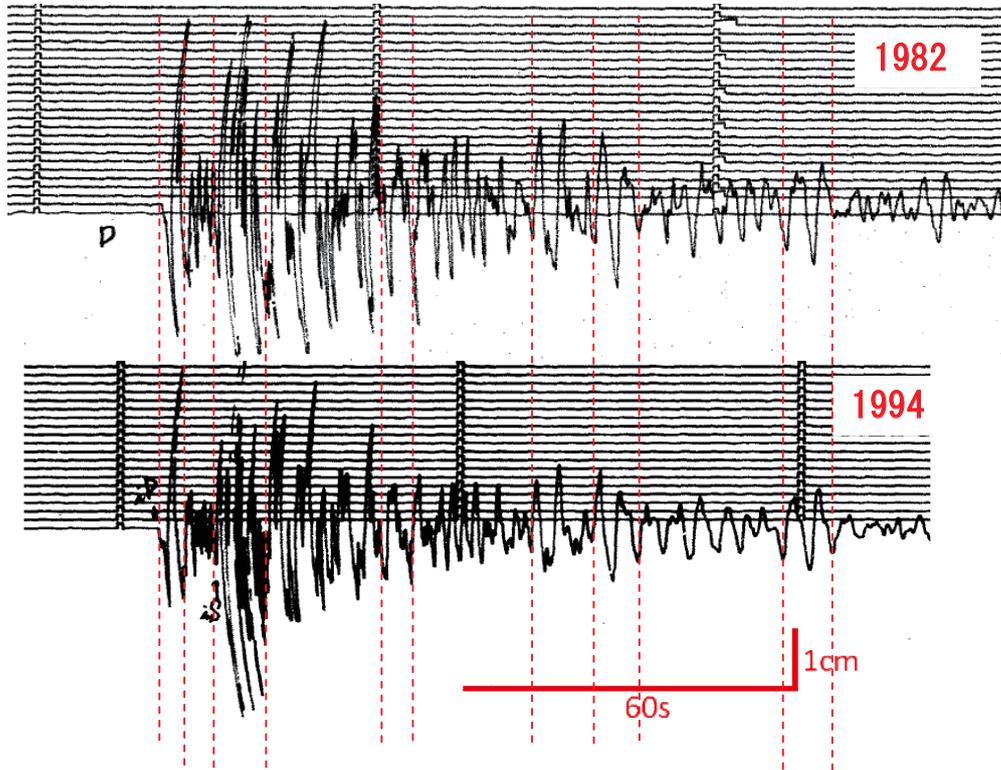


図 5.2.15 図 5.2.14 の領域 f 内の地震活動経過図 (規模別)。

領域 f (気仙沼沖) の地震波形について、石巻測候所の59型電磁式地震計の上下動及び南北動の波形比較を行った結果を図5.2.16に示す。1982年より古い波形については明瞭でなく、比較が難しかったため掲載できなかった。1982年と1994年の波形を比較すると、概ね位相やコーダなどから似ているように見える。

石巻 59 型電磁式 UD 成分



石巻 59 型電磁式 NS 成分

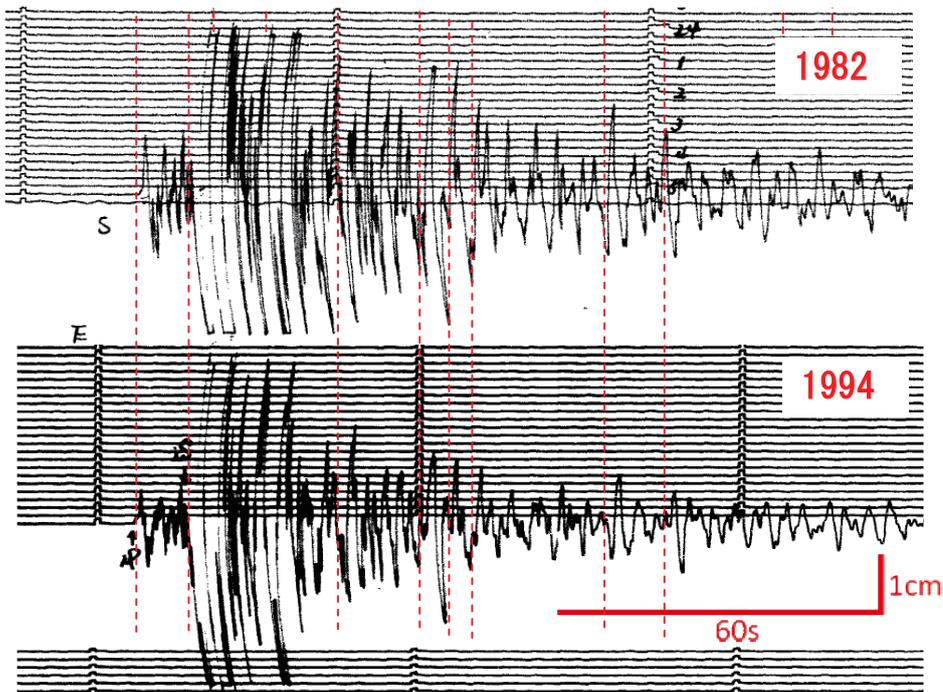


図5.2.16 石巻の59型地震計記録（上下動及び南北動）。位相の比較のために補助線を引いている。

領域 f (気仙沼沖) の M6 程度の繰り返し相似地震の震度分布比較を行った結果を図 5.2.17 に示す。震度観測点は移転の少ない気象官署で比較した。あわせて発震機構解も図中に示した。それぞれの震度分布を見ると、ややばらつきは見られるものの、概ね震度分布の傾向は良く似ている。

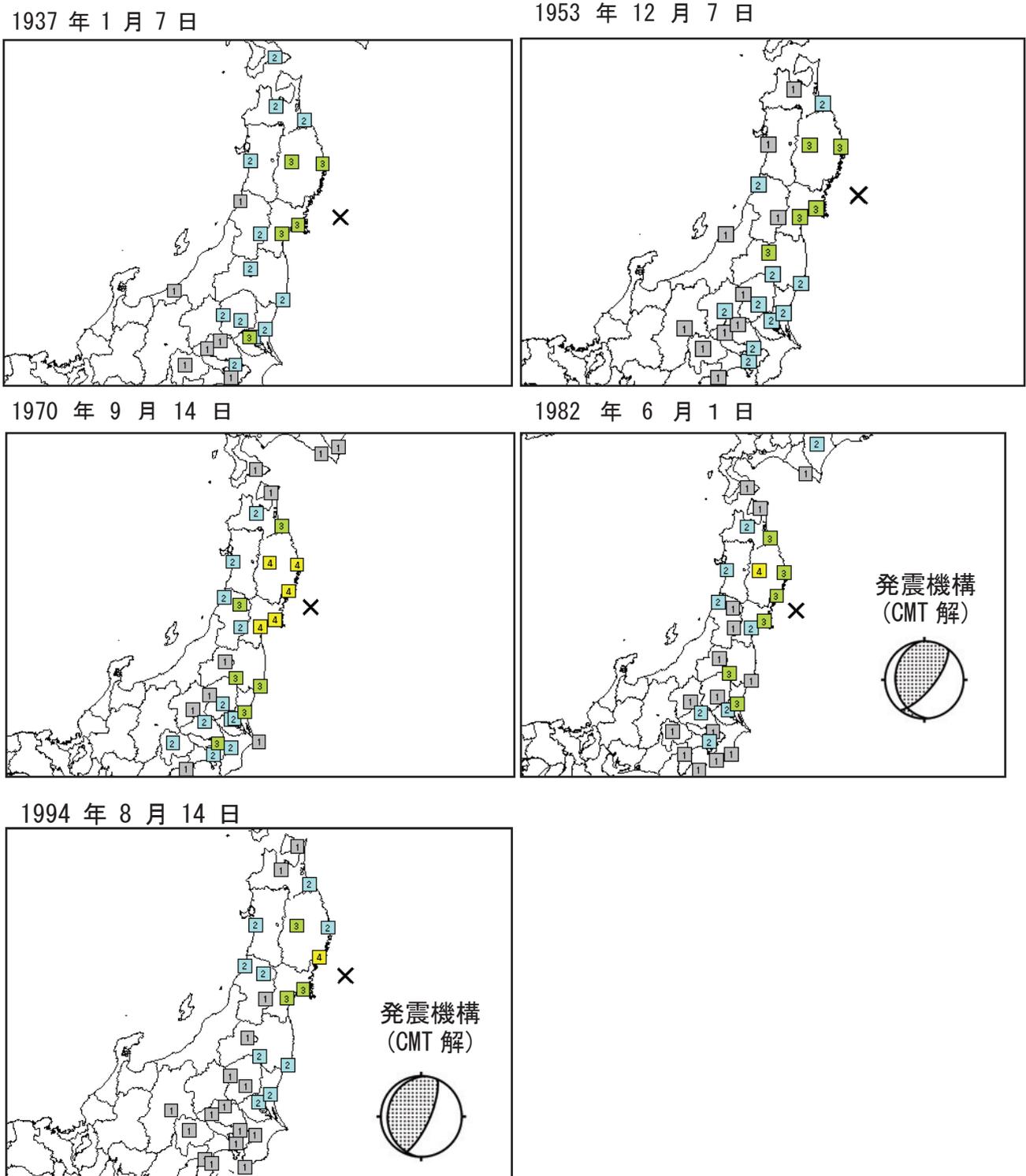


図5.2.17 領域f(気仙沼沖)のM6程度の地震の震度分布比較(気象官署)と発震機構解。震度は1996年以前は体感での観測である。発震機構はGlobal CMT Projectによる。

5.2.3.5 領域 h (相馬沖) の繰り返し相似地震

領域 h (相馬沖) の過去の活動を見ると, M6.5 程度の地震が約 23 年の間隔で発生している (表 5.2.1)。図 5.2.18, 図 5.2.19 に領域 h (相馬沖) で発生した M6 クラスの地震活動を示す。また, 領域 h の M6 程度の地震について, 仙台観測点で観測した波形を図 5.2.20 に示す。1963 年及び 1985 年の地震については気象庁機械式強震計 (1 倍) の記録を, 2010 年の記録は 95 型震度計加速度データに機械式強震計相当のフィルター処理を施したものを示した。今回の地震の波形は 1963 年及び 1985 年の地震波形と比べて位相はよく似ている。これらの地震の気象官署で観測した震度分布を図 5.2.21 に示す。ややばらつきは見られるものの, 震度分布の傾向は似ている。

なお, 2010 年 3 月 14 日の M6.7 の地震は 1923 年以降で最大規模であった。この直前の地震は 1985 年 8 月 12 日 (M6.4) に発生しており, 約 24.5 年経過していた。2010 年の地震は地震発生間隔が平均よりも長く, 規模も若干大きかったことから, slip predictable 的な活動であったことが示唆される。

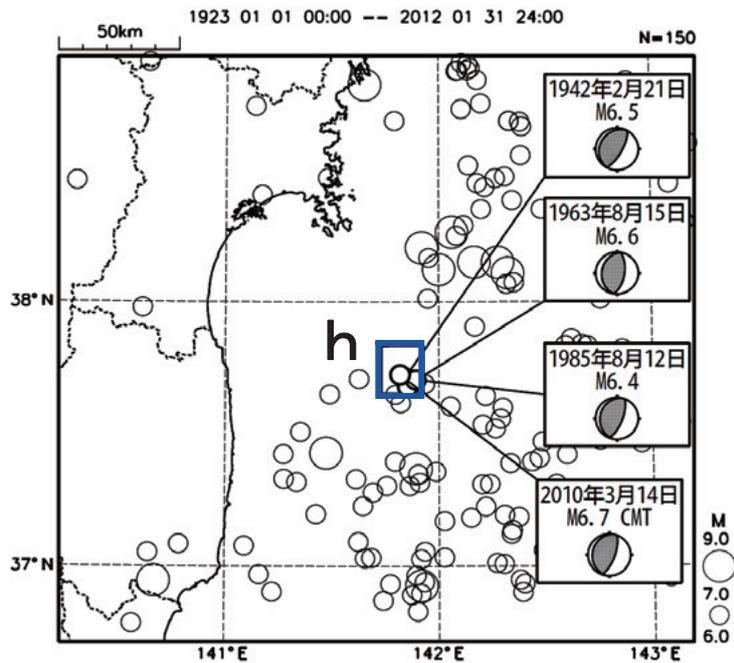


図 5.2.18 震央分布図 (1937 年以降、深さ 0~150km、M≥6.0)。

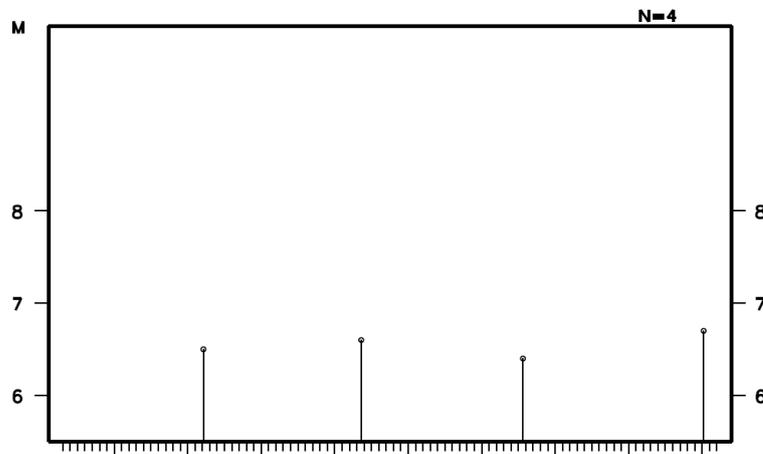


図 5.2.19 図 5.2.18 の領域 h 内の地震活動図 (規模別)。

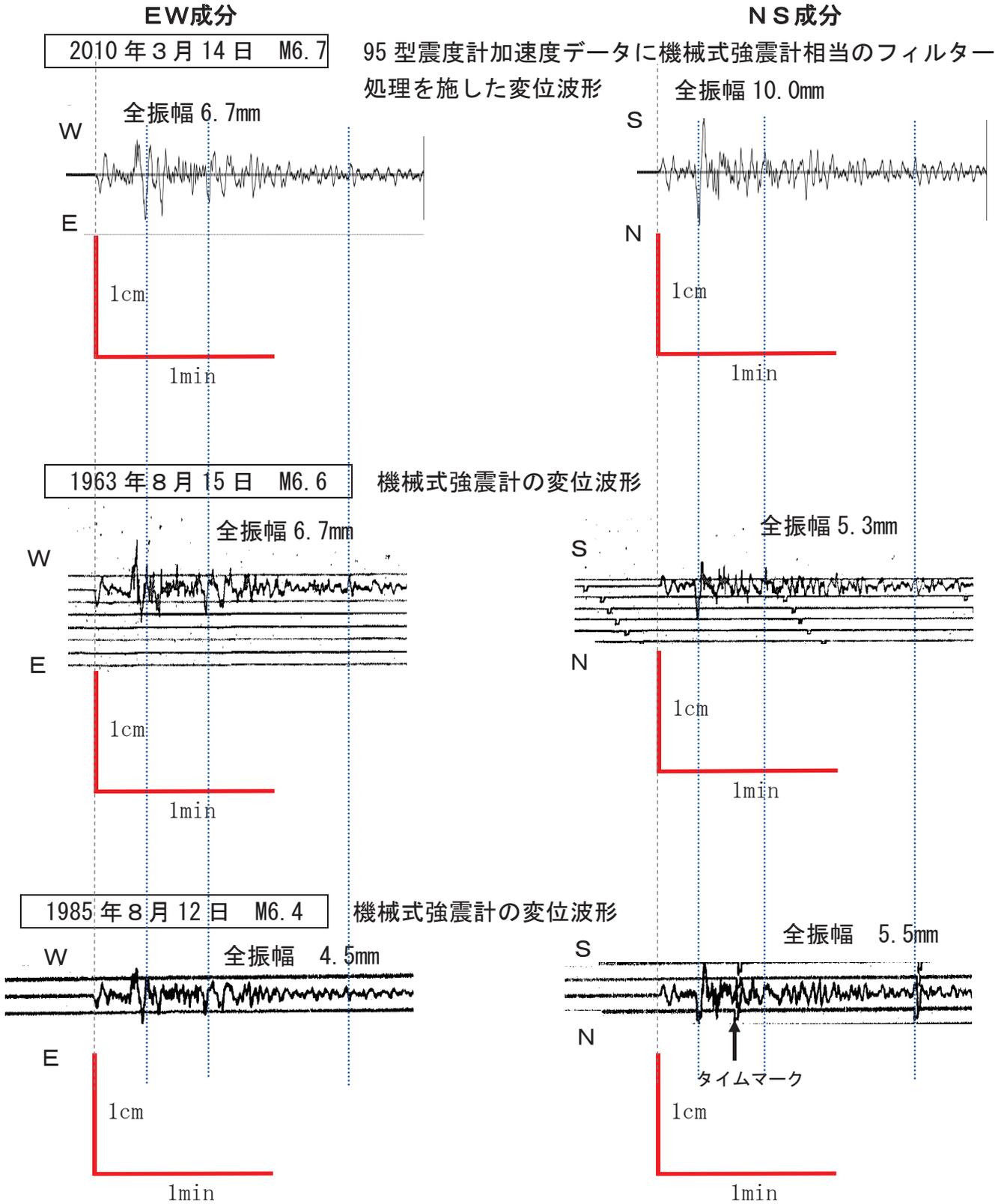


図5.2.20 仙台で観測した領域h（相馬沖）の強震波形記録（東西動及び南北動）。位相の比較のために補助線を引いている。

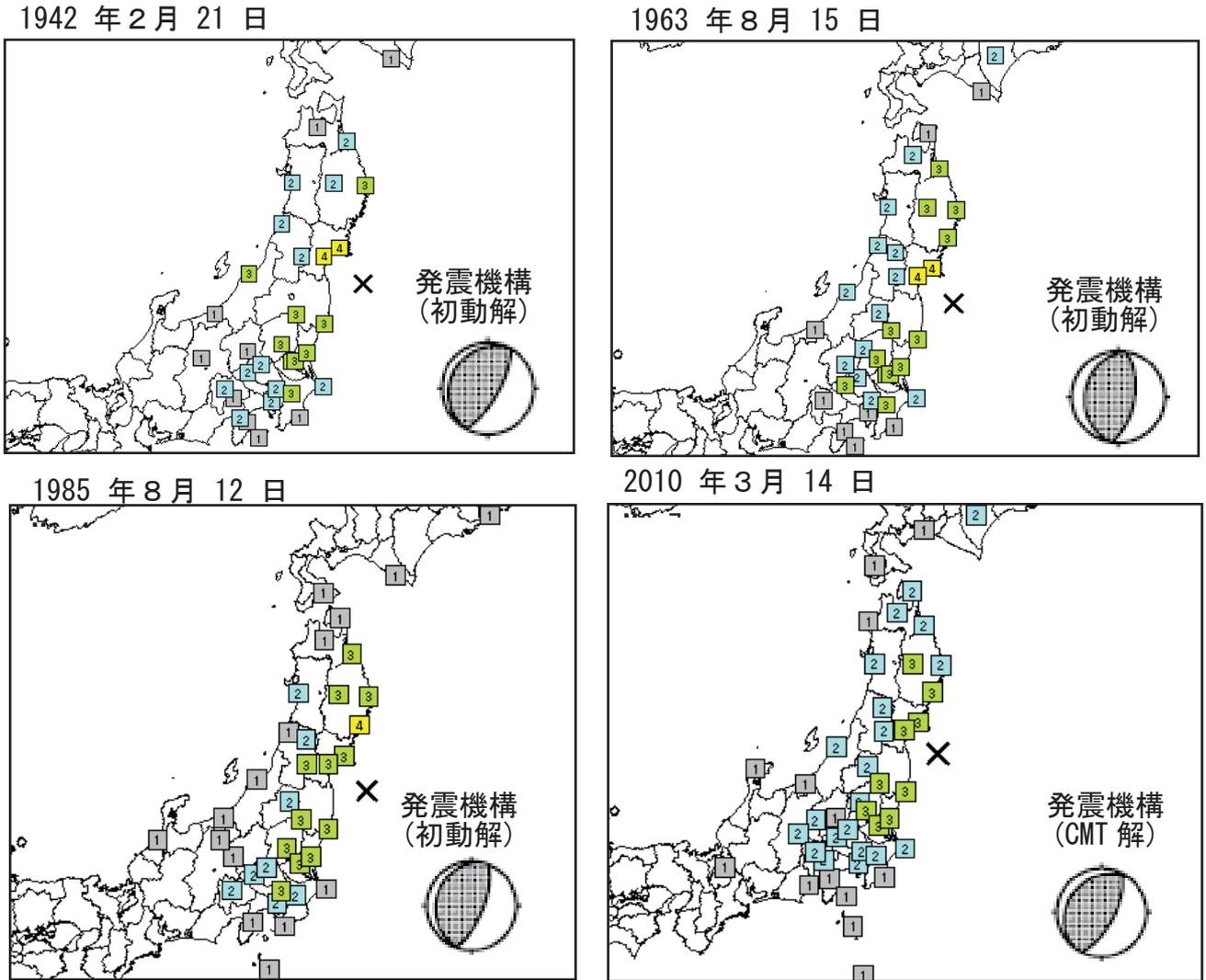


図5.2.21 領域h (相馬沖)のM6程度の地震の震度分布比較 (気象官署)と発震機構解。1996年以前の震度は体感の観測である。発震機構解のうち、1942年と1963年はIchikawa(1971)、2010年のCMT解はGlobal CMT Projectによる。

5.2.3.6 領域 j (いわき沖) の繰り返し相似地震

領域 j (いわき沖) では、M5.7程度 of 互いに波形がよく似た地震が約 8 年間隔で繰り返し発生している (①1958年 4月17日 M5.8、②1966年 12月27日 M5.5、③1975年 8月15日 M5.5、④1986年 10月14日 M5.7、⑤1997年 5月12日 M5.7、⑥2005年 10月22日 M5.6、⑦2012年 4月1日 M5.9) (図5.2.22、図5.2.23、図5.2.24)。また、これらの地震の震度分布を見ると概ね揺れの傾向は似ている (図5.2.26)。

波形のデジタル記録が存在する⑤以降で、波形の類似性 (コヒーレンス値) を計算すると、⑤-⑥は0.99、⑤-⑦は0.98、⑥-⑦は0.96と極めて高い値が得られた (図5.2.25左)。コヒーレンスを計算する際の帯域は、Mに応じて変更しており、M6クラスでは0.12~0.5Hzの帯域で計算している。波形の類似性からみて、⑦の地震はこれまでに観測されていた繰り返し地震と同じアスペリティが破壊されたと考えられる。

なお、⑦の地震は、前回⑥2005年 10月22日の M5.6 の地震から 6.4 年経過して発生しており、これまで観測されていた発生間隔よりも短い。また、地震の規模もこれまでよりも大きいことから、「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」の影響を受けて地震の発生が早まったり、規模が大きくなったりしている可能性がある。

なお、2011年 7月 8日に発生した M5.6 (最大震度 4) の地震は、今回の地震の近傍で発生したが、波形は似ておらず (図5.2.25右)、発震機構 (CMT解) も異なる。

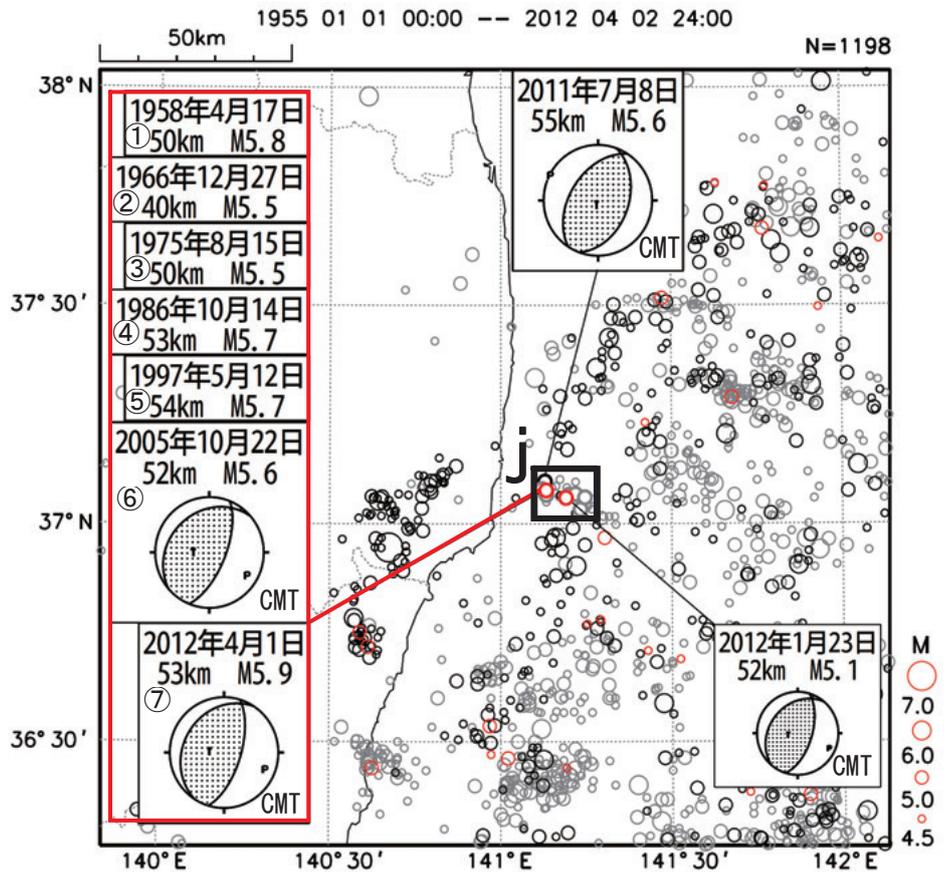


図 5.2.22 震央分布図 (1937 年以降、深さ 0~90km、M $\geq$ 4.5)。東北地方太平洋沖地震以降濃く表示、2012 年以降を赤色で表示している。

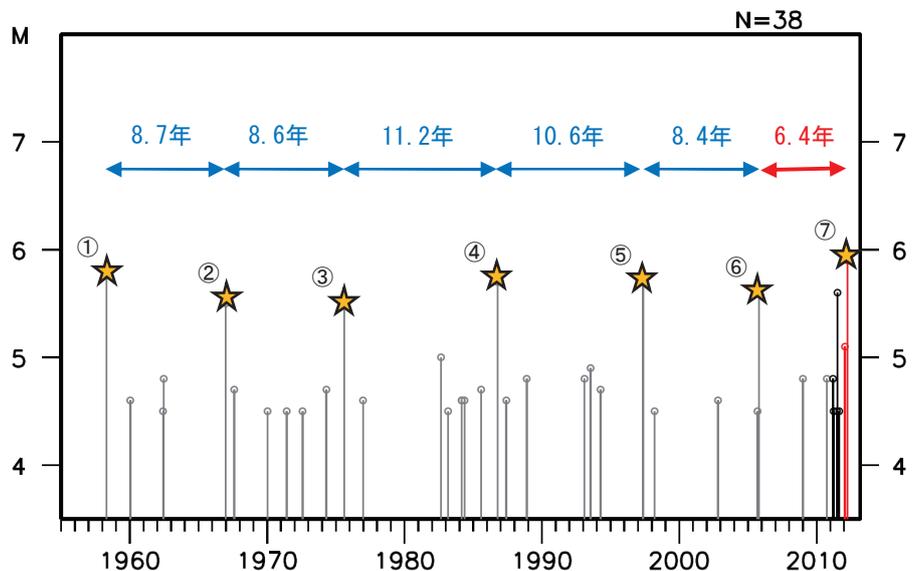


図 5.2.23 図 5.2.22 の領域 j 内の地震活動計数 (規模別)。

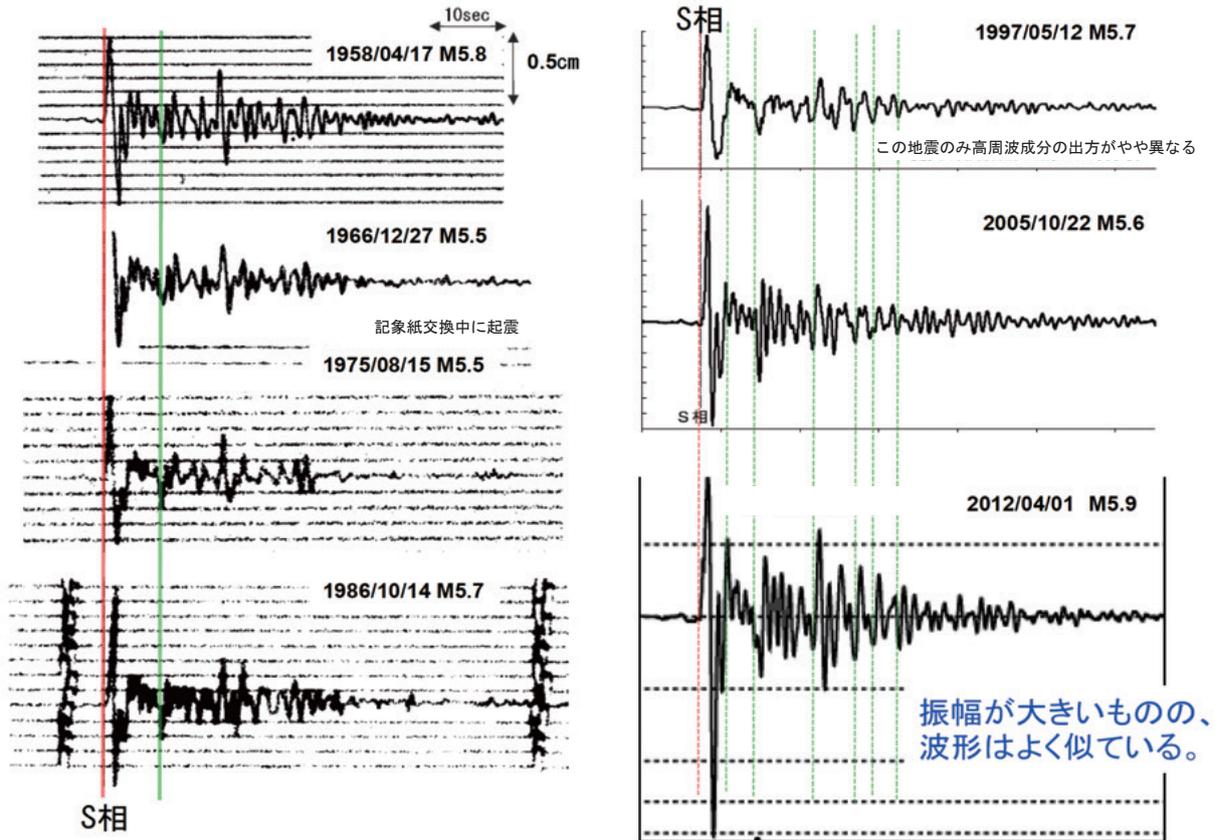


図 5.2.24 領域 j (いわき沖) の変位波形 (小名浜、東西成分)。1986 年以前は一倍強震計、1997 年以降は 95 型計測震度計のデジタル波形を 59 型地震計相当に変換したものをを用いている。位相の比較のために補助線を引いている。波形から繰り返し地震と考えられる。

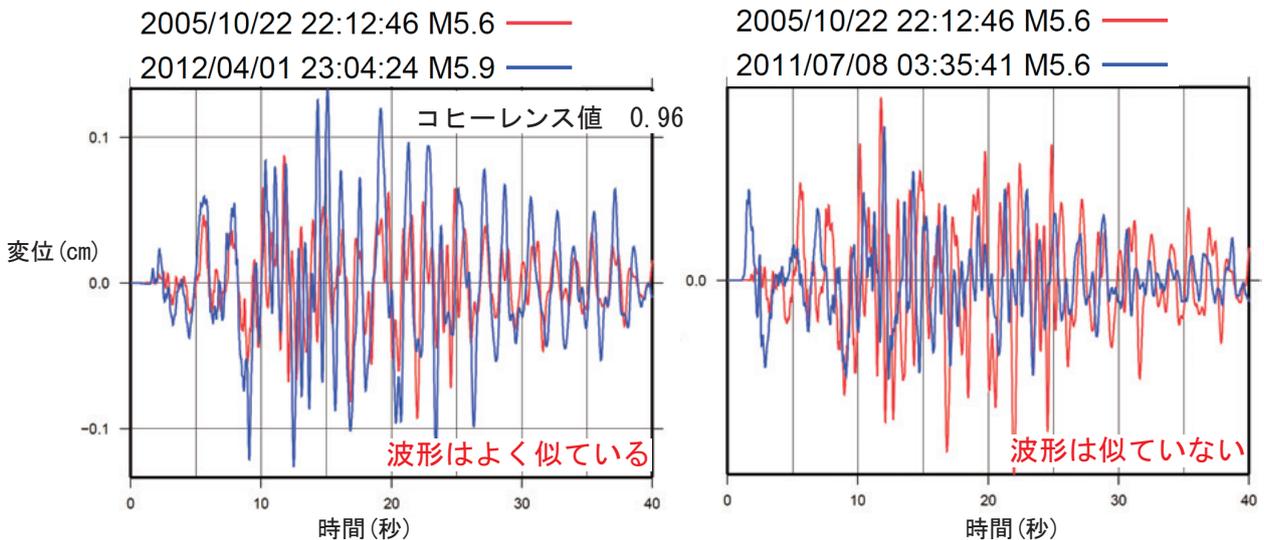
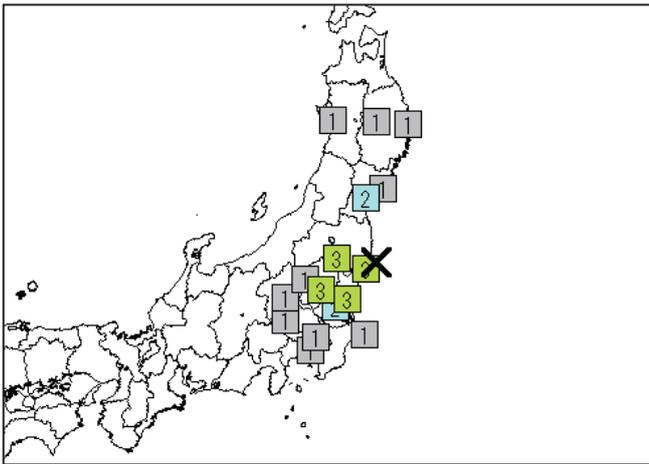
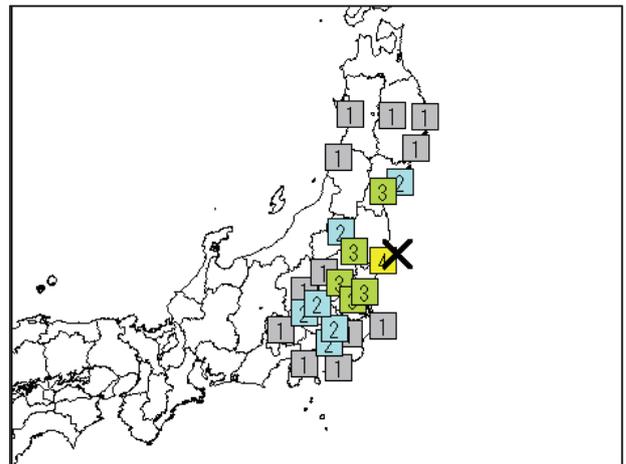


図5.2.25 領域j (いわき沖) の強震波形の比較 (小名浜、上下動成分)。波形の類似性 (コヒーレンス値) を計算すると、2005年と2012年は0.96と極めて高い値が得られた (左)。なお、2011年7月8日に発生したM5.6の地震は2012年の地震の近傍で発生したが、波形は似ていない (右)。

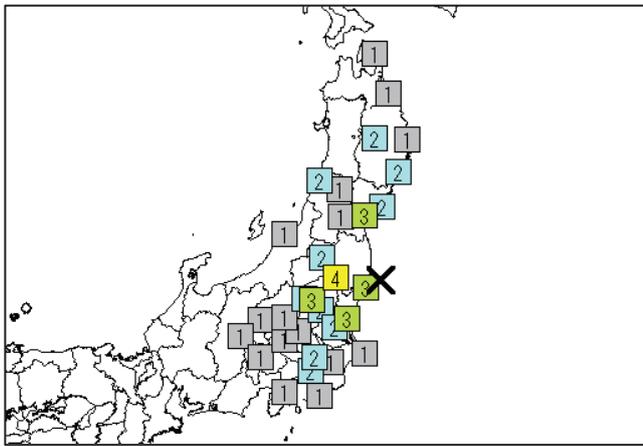
1975年8月15日 M5.5



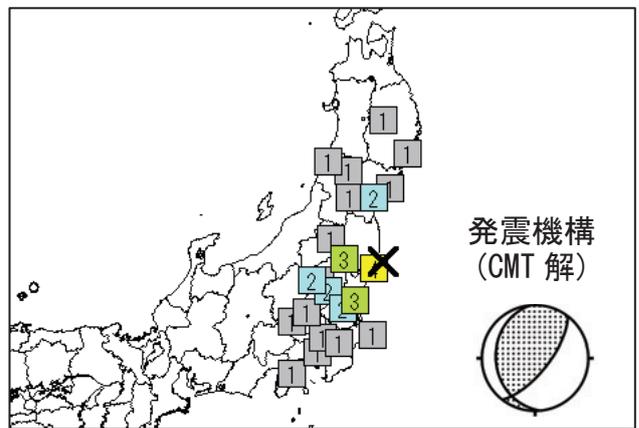
1986年10月14日 M5.7



1997年5月12日 M5.7



2005年10月22日 M5.6



2012年4月1日 M5.9

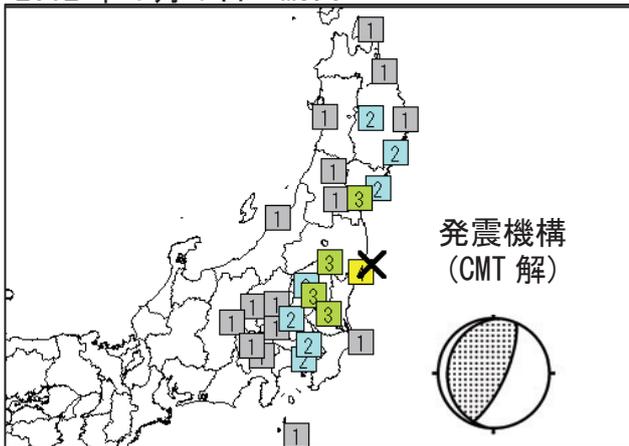


図5.2.26 領域j (いわき沖) のM6程度の地震の震度分布比較 (気象官署) と発震機構解。震度は1996年以前は体感での観測である。発震機構はGlobal CMT Projectによる。

5.2.4. 東北地方太平洋沖のM6 程度の繰り返し相似地震

長谷川・他 (2005) が繰り返し相似地震と考えたM6 程度の地震 (図 5.2.1 の領域 b-1、b-2、e、f、h、j) の波形を調査した結果、それぞれの領域の波形は相似性があり、振幅もほぼ同程度であることから、繰り返し相似地震であると考えられる。繰り返し間隔と 2012 年 10 月 1 日現在の経過時間及び今後 5 年以内の発生確率を求めたものを表 5.2.2 に示す。また、表 5.2.1 に M6 程度の繰り返し相似地震のリストを示している。

このほか、それぞれの領域の繰り返し相似地震の活動から、各領域のすべり量を計算した結果を図 5.2.1 及び表 5.2.2 に示す。なお、すべり量の計算方法は次の手順で行った。

①モーメントマグニチュード  $M_w$  から地震モーメント  $M_0$  への変換式 (Hanks and Kanamori, 1979)

$$\log(M_0) = 1.5M_w + 16.1$$

ただし、気象庁変位  $M$  をモーメントマグニチュードとみなして計算に使用

②地震モーメントからすべり量  $d$  への変換式 (Nadeau and Johnson, 1998)

$$\log(d) = -2.36 + 0.171\log(M_0)$$

年平均すべり量は太平洋プレートと陸域プレートの相対変位の速さを表している。表 5.2.2 から、各領域の年平均すべり量はプレートの沈み込みにほぼ見合う量 (概ね 6 cm 前後) であることがわかる。なお、領域 b-2 (種市沖) 及び領域 h (相馬沖) では、他の領域に比べて発生間隔が長く、年平均すべり量が小さいが、このことは、それぞれの領域の繰り返し相似地震活動が、プレート間カップリングなどの領域ごとの特徴を反映している可能性を示唆している。

このほか、繰り返し相似地震の調査領域は東北地方太平洋沖地震の余震域内にあり、今回の調査領域で M6 程度の余震が数多く発生している。領域 e (気仙沼沖) の繰り返し相似地震と東北地方太平洋沖地震の M6 程度の余震波形の相似性を確認したところ、位相に違いが見られた。このことから東北地方太平洋沖地震の余震は繰り返し相似地震のアスペリティと異なる場所で発生していると考えられる。

表 5.2.2 東北地方太平洋沖の繰り返し相似地震 (M6 程度) の発生間隔、2012 年 10 月 1 日時点における経過時間と発生確率 (以上、L-CAT で計算)、平均すべり量。

	領域	平均M	発生間隔 (年)	標準偏差 (年)	経過時間 (年)	今後5年以内に 地震が発生する 確率(%、参考)	年平均すべり量 (cm)
b(b-1)	種市沖	6.0	13.81	0.86	3.6	3.0	5.4
b(b-2)	種市沖	5.9	16.80	0.85	1.4	0.0	3.9
e	気仙沼沖	6.3	15.50	2.28	9.9	46.3	6.3
f	気仙沼沖	6.2	14.41	2.45	18.1	87.9	6.8
h	相馬沖	6.5	22.70	1.36	2.6	0.0	4.4
j	いわき沖	5.7	8.28	1.86	0.5	5.4	7.4

### 5.2.5. まとめ

長谷川・他 (2005) が繰り返し相似地震として示した領域のM6程度の中規模地震をマイクロフィルム及びデジタル波形と比較しながら評価を行った結果、これらはすべて繰り返し相似地震である可能性が高いと考えられる。また、これらの各領域の積算すべり量を計算した結果をみると、概ねプレートの沈み込みにほぼ見合う量であった。全国を見ると、繰り返し相似地震的活動は東北地方太平洋沖のほか、北海道太平洋沖、日向灘、沖縄本島近海で確認されている。なお、近畿・中国・四国については確認されていない (勝間田・他、2012)。

中規模繰り返し相似地震的活動は東北地方太平洋沖地震発生以降も乱されることなく、淡々と発生しているように見えることは興味深い。これら中規模繰り返し相似地震発生の際は最大震度4から5弱程度の揺れが考えられ、防災活動等に有効活用できることから、今後も繰り返し相似地震の監視及び調査を継続していく必要がある。

### 謝辞

本調査には、独立行政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、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データ及を利用して気象庁が文部科学省と協力して求めた一元化震源を使わせていただきました。本庁火山課の高木康伸係長と札幌管区気象台地震火山課の菅ノ又淳一技官には技術的情報を、大阪管区気象台地震火山課の長谷川嘉臣技官にはL-CATについてご指導頂きました。ここに記して感謝いたします。

### 参考文献

- Hanks, T. C. and H. Kanamori, 1979: A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- 長谷川安秀・橋本徹夫・草野富士雄・吉川一光・大西星司、2005: 東北地方における中規模地震の固有地震的地震活動の検出, *地震*, **58**, 67-70.
- Ichikawa, M., 1971: Reanalyses of mechanism of earthquakes which occurred in and near Japan, and statistical studies on the nodal plane solutions obtained, 1926-1968, *Geophys. Mag.*, **35**, 207-274.
- 勝間田明男・菅ノ又淳一・高橋賢二・平山達也・大山浩明・松島功・太田良久・菅原政志・松山輝雄・齋藤祥司・高齋祥孝・下川淳・長谷川安秀・太田健治・草野富二雄・長谷川嘉臣・植村英明・古謝秀和・城間康司・川門義治・佐鯉央教・山本剛靖・溜渕功史・鎌谷紀子・岡田正実, 2012: 日本各地域の中規模繰り返し相似地震の調査, *日本地震学会秋季大会予稿集*, P3-18.
- Nadeau, R. M. and L. R. Johnson, 1998: Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameter for small repeating earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 790-814.

### 5.3 近畿・中国・四国地方の繰り返し相似地震

長谷川嘉臣・森田裕貴・廣田伸之・小原久典・山崎智紀（大阪管区気象台地震火山課）

所属は平成 24 年度当時

#### 5.3.1 はじめに

同じ場所が繰り返し破壊されることで発生する同程度の規模の地震のうち、同一観測点での観測波形が相似な地震を繰り返し相似地震といい、釜石沖 (e. g., Matsuzawa *et al.*, 2002) や宮古島近海(溜淵・他, 2010) など日本各地で検出されている。繰り返し相似地震の発生状況を調査することで、以下のようなことに貢献できる可能性がある。

- ・繰り返し相似地震のうち被害をもたらす可能性のある地震の分布や地域的特徴の把握
- ・プレート境界の固着状態やプレートの移動速度変化、他の巨大地震への影響の把握
- ・検出した繰り返し相似地震のデータを用いた統計学的地震発生予測

我々は、近畿・中国・四国地方における繰り返し相似地震の発生状況について調査を行った。本節では、その調査結果について報告する。

#### 5.3.2 調査方法

1923 年 8 月～2012 年 1 月に近畿・中国・四国地方及びその周辺で発生した M3.0 以上の地震に対し、鎌谷・勝間田 (2010, 2011) 及び鎌谷・他 (2011) の手法を、内陸地殻内地震以外の地震ではフィリピン海プレートの沈み込み速度 (Wei and Seno, 1998、Miyazaki and Heki, 2001) を考慮するように改変したものを適用して、繰り返し相似地震候補となる地震グループの抽出を試みた。

まず、緯度経度の差 2 分以内、深さの差 10km 以内、マグニチュードの差 0.5 以内の空間的に近接した地震グループを抽出した後、グループ内で時間的に隣り合う 3 つのイベントを順次取り出し、それらのマグニチュードの平均  $M_{av}$  と発生間隔の平均  $T_{av}$  を求めた。内陸地殻内地震については、発生時期順に並べて時間的に隣り合う 3 つのイベントを順次取り出し、1 番目と 2 番目及び 2 番目と 3 番目の地震の発生間隔と  $T_{av}$  との差が 1 年以内、1 番目と 2 番目及び 2 番目と 3 番目の地震の発生間隔の差が 1 年以内、1 番目と 2 番目及び 3 番目の地震のマグニチュードと  $M_{av}$  との差が 0.5 以内のものを抽出することにより、時間的規則性を持つ地震グループを抽出した。内陸地殻内地震以外の地震については、 $M_{av}$  と Hanks and Kanamori (1979) によるマグニチュードと地震モーメントの関係式、Nadeau and Johnson (1998) による地震モーメントとすべり量の関係式及び南海トラフにおけるフィリピン海プレートの沈み込み速度 (4.9～6.3cm/年; Wei and Seno, 1998、6.2～6.9cm/年; Miyazaki and Heki, 2001) から、マグニチュード  $M_{av}$  の地震の発生間隔の最小推定値  $T_{min}$  と最大推定値  $T_{max}$  を求め、1 番目 と 2 番目及び 2 番目と 3 番目の地震の発生間隔が  $T_{min}-t_1 \sim T_{max}+t_2$  の範囲にあり、かつ  $T_{av}$  との差が 1 年以内、1 番目と 2 番目及び 3 番目の地震のマグニチュードと  $M_{av}$  との差が 0.5 以内のものを抽出することにより、時間的規則性を持つ地震グループを抽出した。ここで、 $t_1$  及び  $t_2$  はプレートの沈み込み速度の揺らぎを補正する係数である。なお、群発地震や余震を除くため、地震発生間隔が半年以内のものは除いた。抽出された地震は、気象庁一元化震源に基づいて震央分布と地震活動経過を確認し、繰り返し相似地震である可能性があるかと判断できたものを繰り返し相似地震の候補とした。最後に、繰り返し相似地震の候補の速度波形を用いてコヒーレンス (波形の類似度) を溜淵・他 (2011) に従って計算し、0.9 以上となるものを繰り返し相似地震とすることとした。以上の流れをフローチャートにしたものを図 5.3.1 に示す。

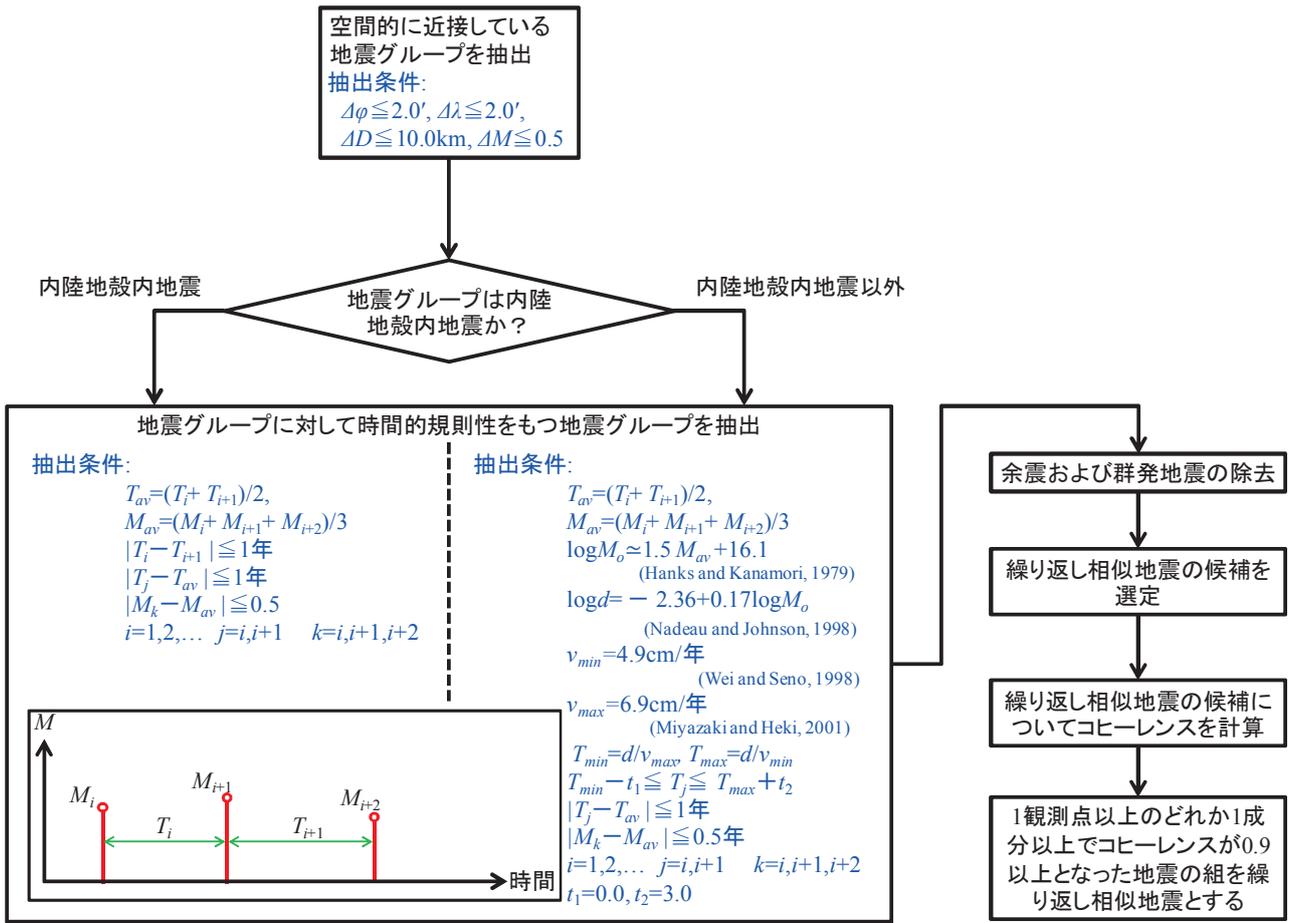


図 5.3.1 調査方法のフローチャート。ここで  $\phi$  は経度、 $\lambda$  は緯度、 $D$  は震源深さ、 $M_o$  は地震モーメント、 $M$  はマグニチュード、 $T$  は地震の発生間隔、 $d$  はすべり量、 $v$  はすべり速度を表す。

### 5.3.3 調査結果

繰り返し相似地震候補として 16 個の地震グループが抽出された。これらは全て M5.0 未満の地震であった。

#### 5.3.3.1 和歌山県から四国沖にかけての地震活動

和歌山県から四国沖にかけての地震活動については、図5.3.2に示す5つの地震グループ（グループa～e）が繰り返し相似地震候補として抽出された。各地震グループの地震活動経過図を図5.3.3～図5.3.7に示す。各地震グループについて、同一観測点の地震波形のコヒーレンス計算を試みた。グループa, c, eについては、観測点の移設などにより比較可能な地震波形データが不十分であったため、同一観測点の地震波形のコヒーレンス計算を行うことが出来なかった。グループb, dについては複数の観測点で地震波形のコヒーレンス計算を行ったが、いずれも0.9を下回っており、地震波形の相似性は見られなかった（もっともコヒーレンスが高かった例を図5.3.8及び図5.3.9に示す）。以上のことから、少なくともグループb, dは、繰り返し相似地震ではなかったと考えられる。

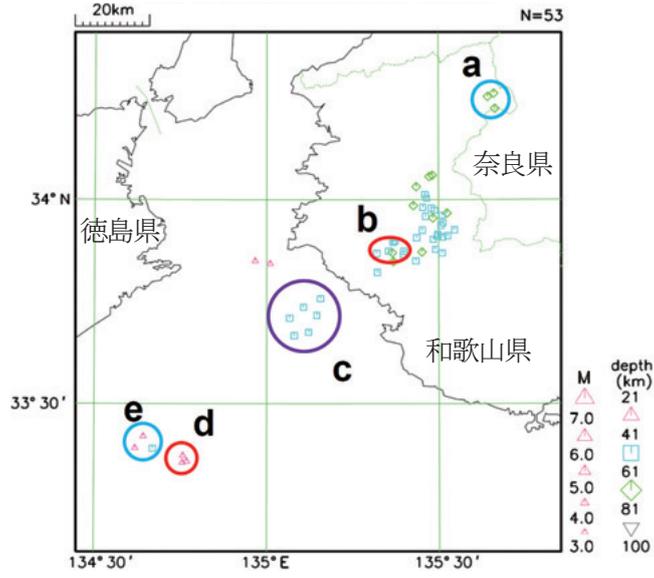


図5. 3. 2 和歌山県から四国沖で繰り返し相似地震候補として抽出された地震グループ (震央分布図)。

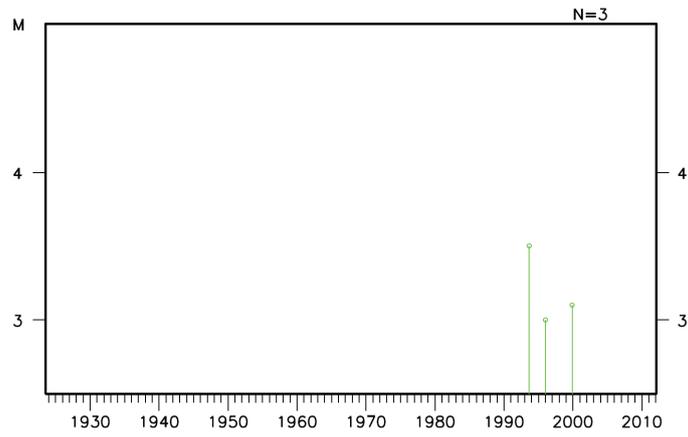


図5. 3. 3 図5. 3. 2中のグループaの地震活動経過図 (M-T図)。

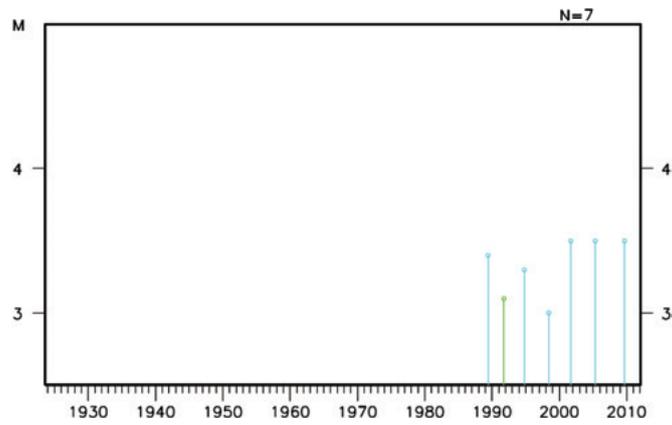


図5. 3. 4 図5. 3. 2中のグループbの地震活動経過図 (M-T図)。

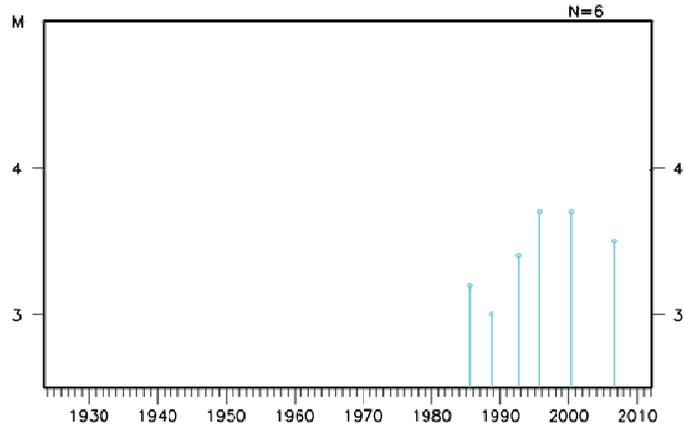


図5.3.5 図5.3.2中のグループcの地震活動経過図 (M-T図)。



図5.3.6 図5.3.2中のグループdの地震活動経過図 (M-T図)。

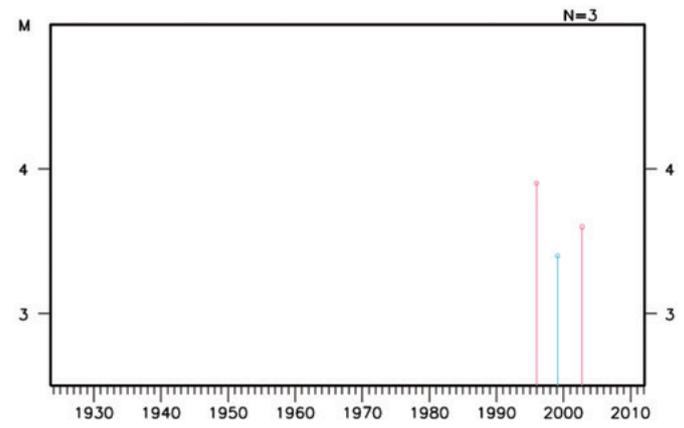


図5.3.7 図5.3.2中のグループeの地震活動経過図 (M-T図)。

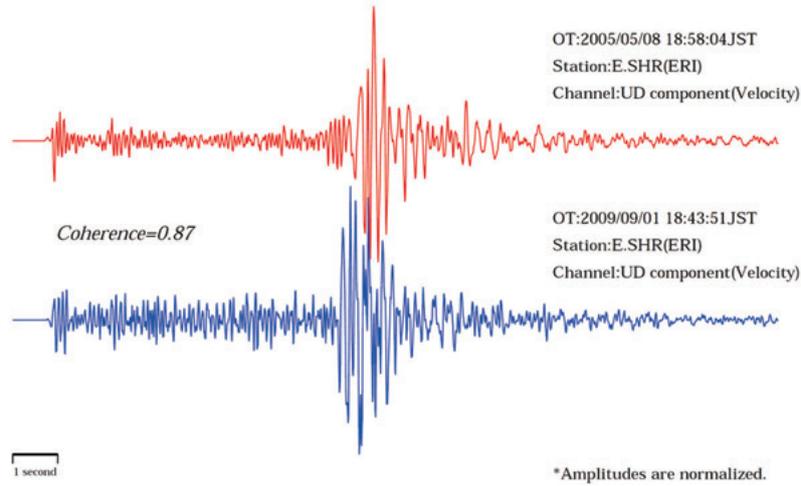


図5.3.8 図5.3.2中のグループbの地震波形比較の一例。初動方向やS波の様相が異なっており、波形の相似性は見られなかった。コヒーレンスは0.87であった。

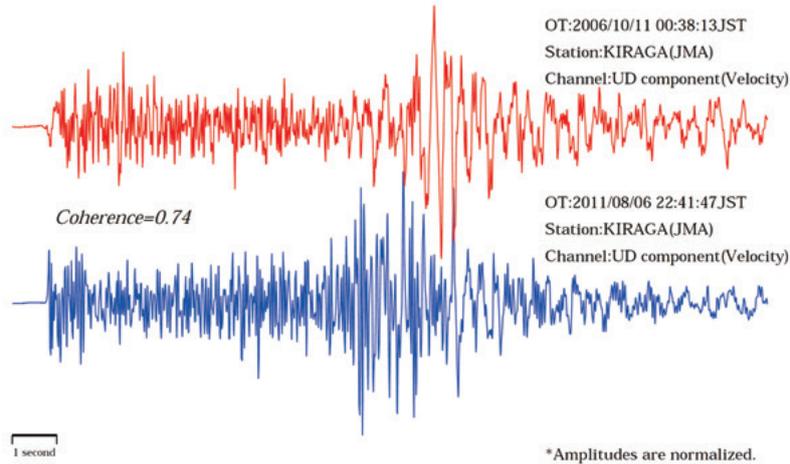


図5.3.9 図5.3.2中のグループdの地震波形比較の一例。図5.3.8と同様に初動方向とS波の様相が異なっており、波形の相似性は見られなかった。コヒーレンスは0.74であった。

### 5.3.3.2 伊予灘から豊後水道にかけての地震活動

伊予灘から豊後水道にかけての地震活動については、図 5.3.10 に示す6つの地震グループ（グループ f~k）が繰り返し相似地震候補として抽出された。各地震グループの地震活動経過図を図 5.3.11~図 5.3.16 に示す。各地震グループについて、同一観測点の地震波形のコヒーレンス計算を試みたが、観測点の移設などにより比較可能な地震波形データが不十分であったため、同一観測点の地震波形のコヒーレンス計算を行うことが出来なかった。

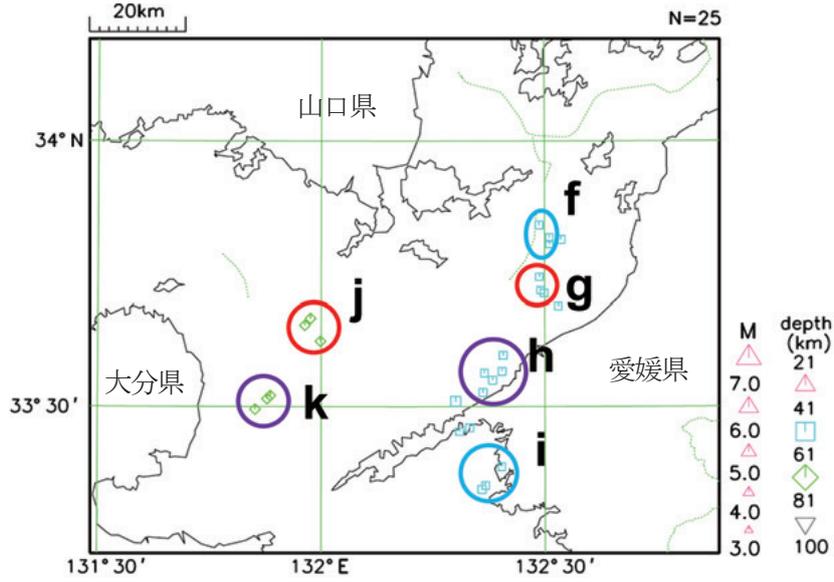


図5.3.10 伊予灘から豊後水道で繰り返し相似地震候補として抽出された地震グループ（震央分布図）。

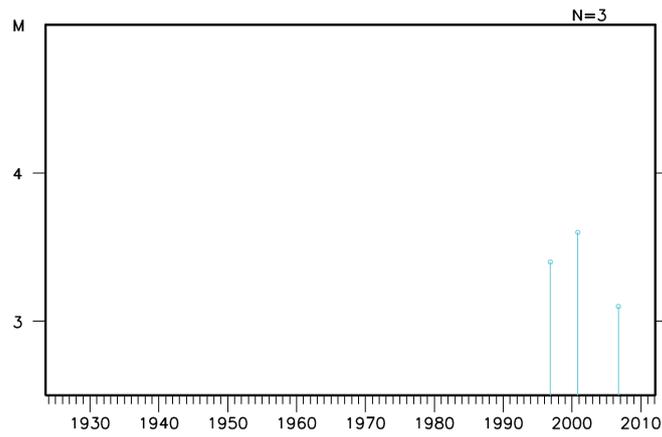


図 5.3.11 図 5.3.10 中のグループ f の地震活動経過図 (M-T 図)。

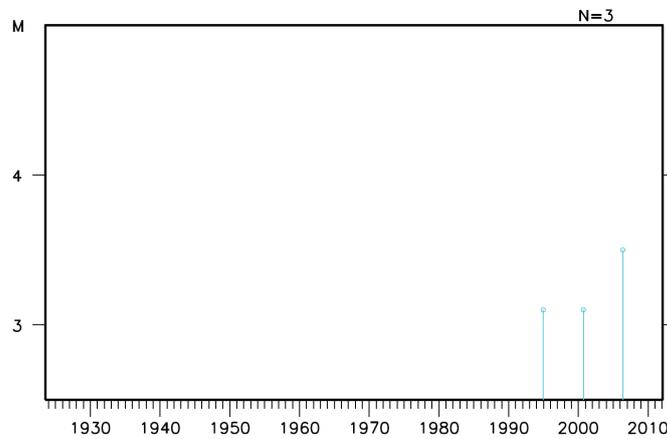


図 5.3.12 図 5.3.10 中のグループ g の地震活動経過図 (M-T 図)。

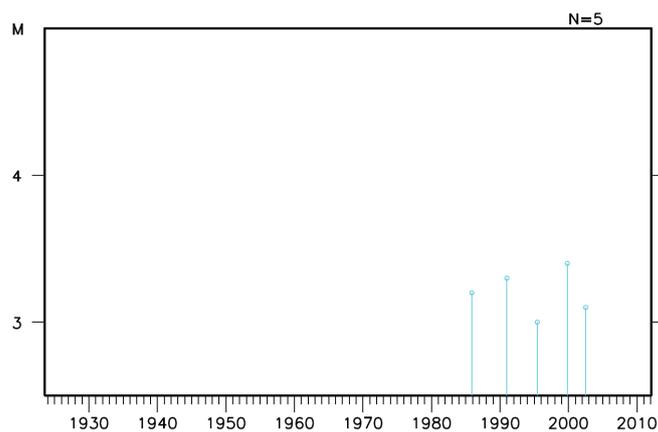


図 5.3.13 図 5.3.10 中のグループ h の地震活動経過図 (M-T 図)。

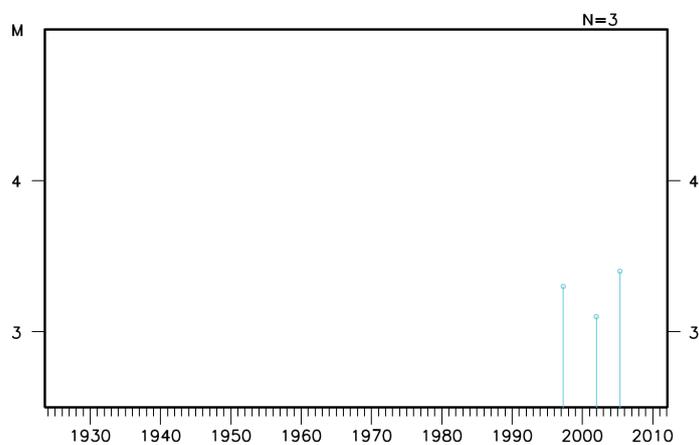


図 5.3.14 図 5.3.10 中のグループ i の地震活動経過図 (M-T 図)。

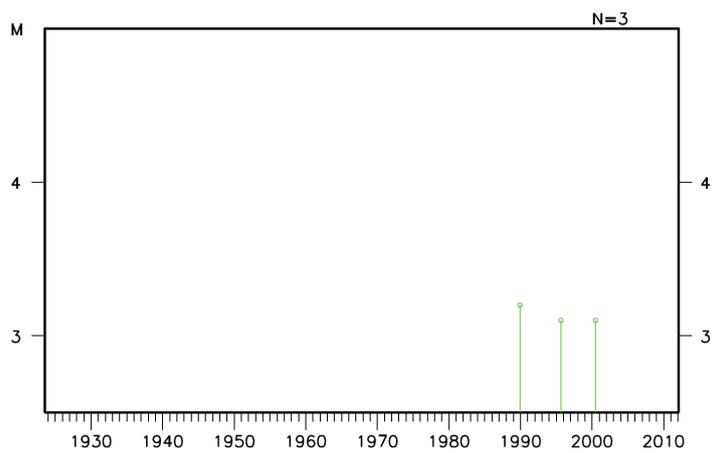


図 5.3.15 図 5.3.10 中のグループ j の地震活動経過図 (M-T 図)。

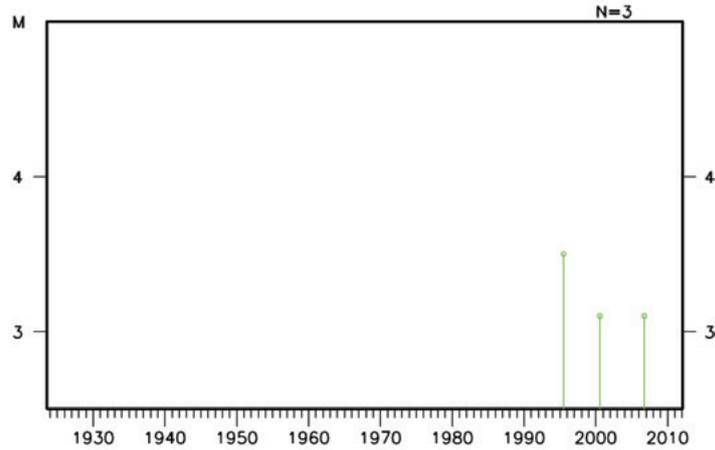


図5.3.16 図5.3.10中のグループkの地震活動経過図(M-T図)。

### 5.3.3.3 滋賀県から大阪府にかけての地震活動

滋賀県から大阪府にかけての地震活動については、図5.3.17に示す4つの地震グループ(グループ1~o)が繰り返し相似地震候補として抽出された。各地震グループの地震活動経過図を図5.3.18~図5.3.21に示す。各地震グループについて、同一観測点の地震波形のコヒーレンス計算を試みた。グループ1, n, oについては、観測点の移設などにより比較可能な地震波形データが不十分であったため、同一観測点の地震波形のコヒーレンス計算を行うことが出来なかった。グループmについては複数の観測点で地震波形のコヒーレンス計算を行ったが、いずれも0.9を下回っており、地震波形の相似性は見られなかった(もっともコヒーレンスが高かった例を図5.3.22に示す)。以上のことから、少なくともグループmは、繰り返し相似地震ではなかったと考えられる。

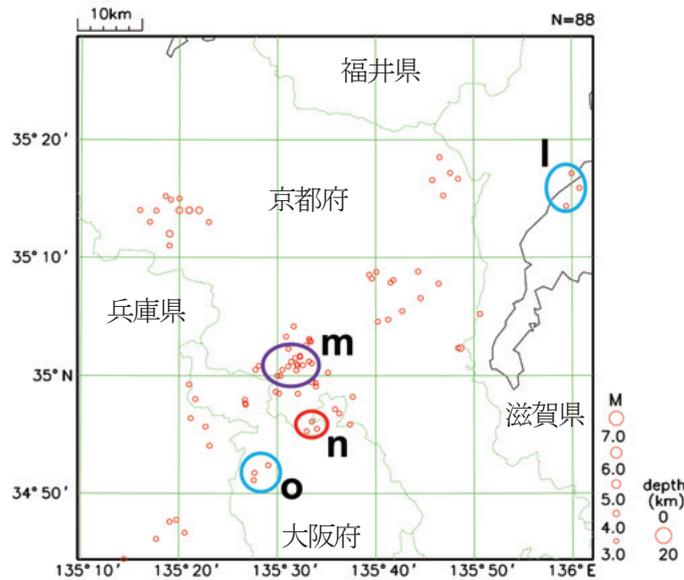


図5.3.17 滋賀県から大阪府で繰り返し相似地震候補として抽出された地震グループ(震央分布図)。

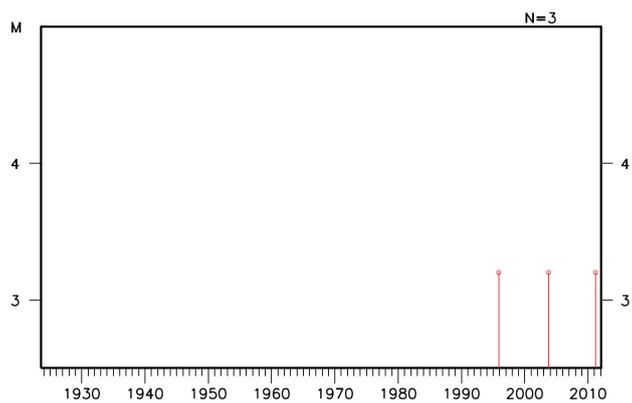


図 5.3.18 図 5.3.17 中のグループ 1 の地震活動経過図 (M-T 図)。

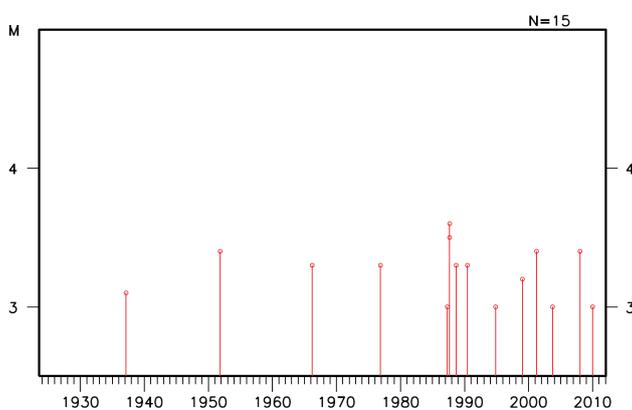


図 5.3.19 図 5.3.17 中のグループ m の地震活動経過図 (M-T 図)。

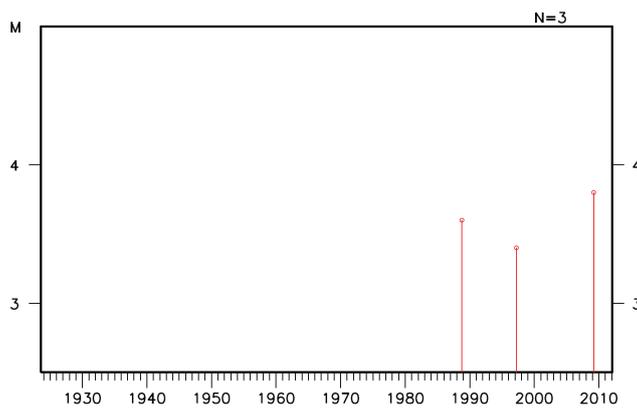


図 5.3.20 図 5.3.17 中のグループ n の地震活動経過図 (M-T 図)。

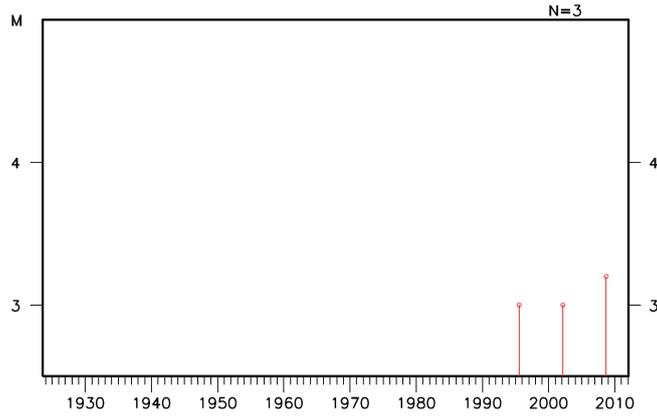


図 5. 3. 21 図 5. 3. 17 中のグループ o の地震活動経過図 (M-T 図)。

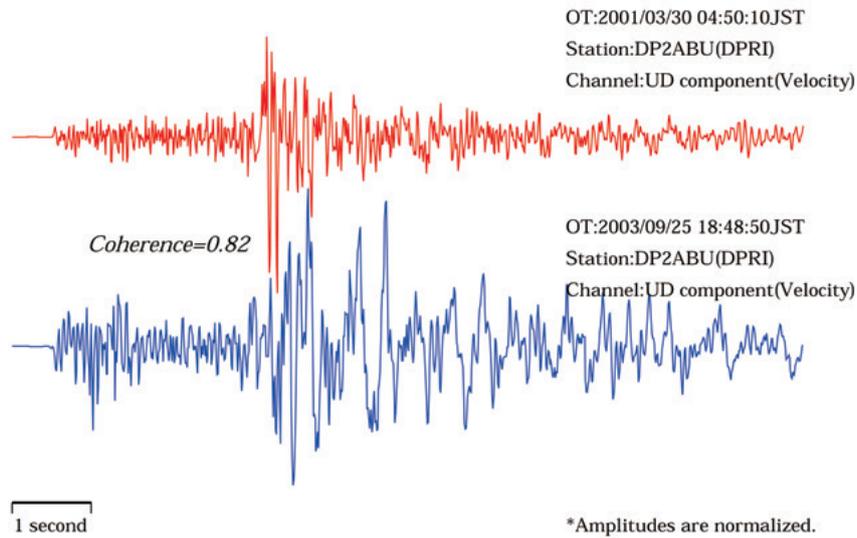


図5. 3. 22 図5. 3. 17中のグループmの地震波形比較の一例。初動方向とS波の様相が異なっており、波形の相似性は見られなかった。コヒーレンスは0.82であった。

#### 5. 3. 3. 4 広島県北部の地震活動

広島県北部の地震活動については、図 5. 3. 23 に示す 1 つの地震グループ (グループ p) が繰り返し相似地震候補として抽出された。各地震グループの地震活動経過図を図 5. 3. 24 に示す。この地震グループについて、同一観測点の地震波形のコヒーレンス計算を試みたが、観測点の移設などにより比較可能な地震波形データが不十分であったため、同一観測点の地震波形のコヒーレンス計算を行うことが出来なかった。

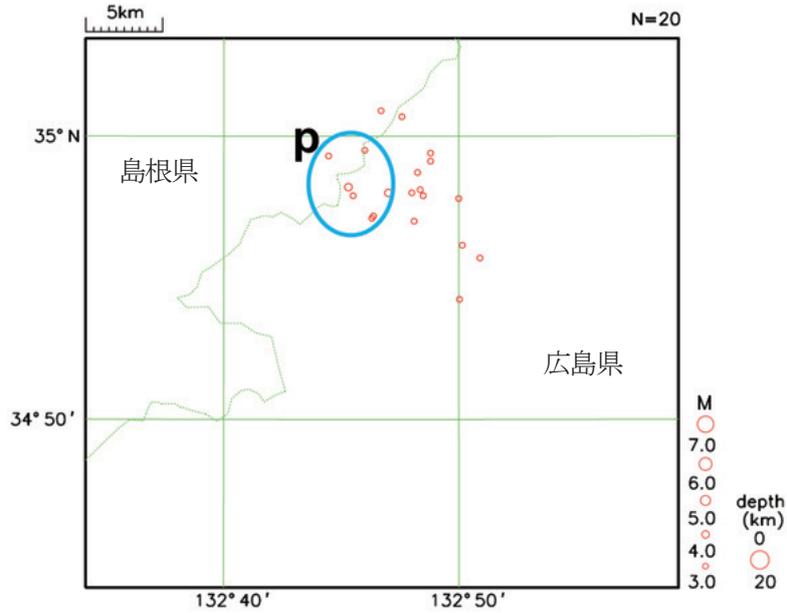


図5. 3. 23 広島県北部で繰り返し相似地震候補として抽出された地震グループ (震央分布図)。

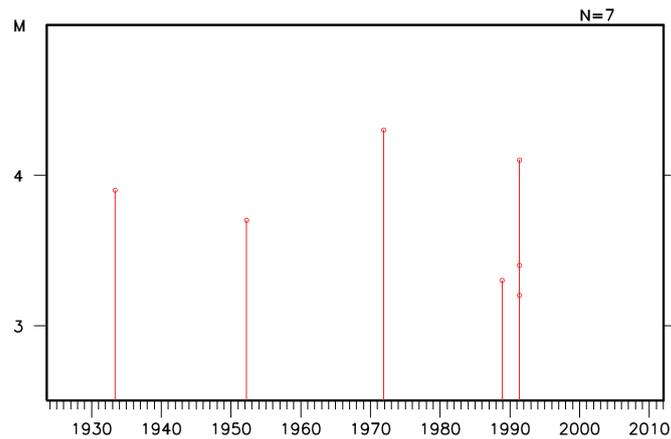


図 5. 3. 24 図 5. 3. 23 中のグループ p の地震活動経過図 (M-T 図)。

### 5. 3. 3. 5 マイクロフィルム記録の検証

5. 3. 3. 1~5. 3. 3. 4において、波形の相似性の検証にはコヒーレンスを計算できるデジタル記録を用いた。デジタル記録は最近のごく限られた期間しか現存していないため、過去の観測波形に遡って調査するためには、マイクロフィルム記録を確認する必要がある。今回抽出した 16 個の地震グループについて、マイクロフィルム記録の確認を試みたところ、ほとんどのマイクロフィルム記録は判読が不可能であったり、または現存しなかったりした。図 5. 3. 25 には今回抽出した地震グループのうち、グループ b に属する地震のマイクロフィルム記録の一例を示す。NS 成分の 02:41 のタイムスタンプ付近にわずかに波形らしいものが見えるが、ほとんど読めないことが分かる。

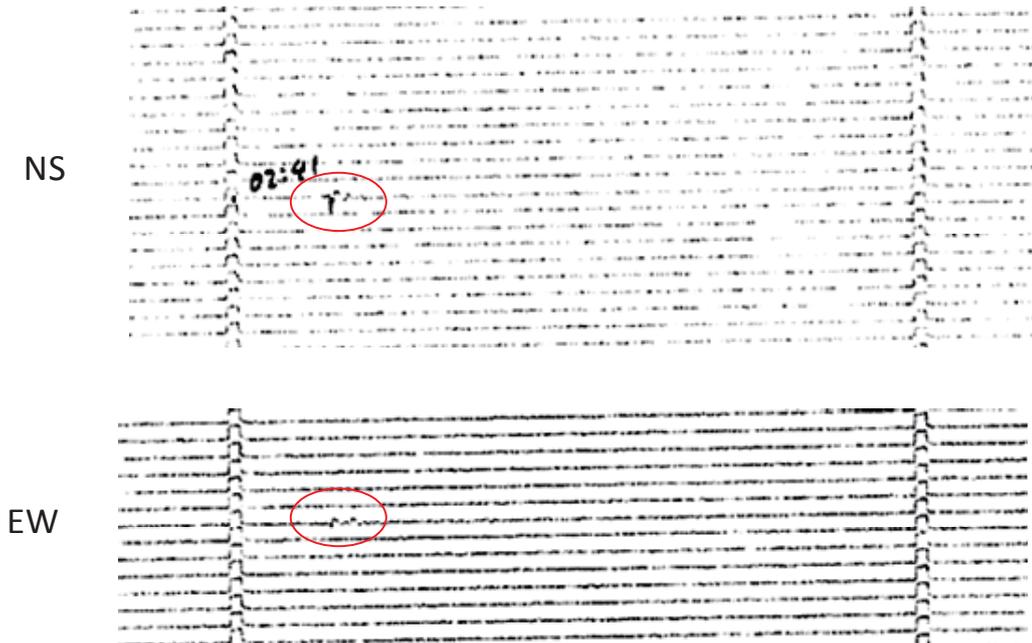


図 5.3.25 図 5.3.2 中のグループ b に属する地震 (1994/10/24 02:40 M3.3) の和歌山観測点におけるマイクロフィルム記録 (水平動成分)。地震記録は赤丸にて示す。

#### 5.3.4 まとめ

1923年8月～2012年1月に近畿・中国・四国地方及びその周辺で発生したM3.0以上の地震に対して、繰り返し相似地震候補となる地震グループを抽出し、その観測波形の相似性を検証することで、繰り返し相似地震の発生状況を調査した。その結果、繰り返し相似地震候補として16個の地震グループが抽出されたが、これらのグループに属する全ての地震がM5.0未満であり、13個の地震グループでは観測波形の相似性を検証できなかった。残り3つの地震グループでは、波形の相似性は見られなかった。また、マイクロフィルム記録はほとんどが判読できないか、現存しなかった。したがって、今回の調査では近畿・中国・四国地方において繰り返し相似地震を見出すことはできなかった。

#### 謝辞

本調査には、独立行政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、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データ及びを利用して気象庁が文部科学省と協力して求めた一元化震源及び独立行政法人防災科学技術研究所、東京大学、京都大学による地震観測波形データを使わせていただきました。繰り返し相似地震候補の地震グループの抽出には、気象研究所地震火山研究部勝間田明男 第二研究室長と気象大学校 鎌谷紀子 講師が作成されたプログラムを改変して使用させていただきました。また、コヒーレンスの計算には、地震火山部地震津波監視課 山田安之 緊急地震速報技術開発係長が作成されたプログラムを使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。

#### 参考文献

- Hanks, T. C. and H. Kanamori, 1979: A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.  
 鎌谷紀子・勝間田明男, 2010: 全国の中規模固有地震活動(M $\geq$ 4.5)検出の試み, *日本地震学会秋季大会講演予稿集*, P02-32.

- 鎌谷紀子・勝間田明男, 2011: 東北地方太平洋沖地震後の中規模固有地震活動, *日本地震学会秋季大会講演予稿集*, P3-08.
- 鎌谷紀子・岡田正実・勝間田明男, 2011: 全国の中規模固有地震活動の検出, *日本地球惑星科学連合大会講演予稿集*, SSS025-03.
- 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.
- Miyazaki, S. and K. Heki, 2001: Crustal velocity field of Southwest Japan: Subduction and arc-arc collision, *J. Geophys. Res.*, **106**, 4305-4326.
- Nadeau, R. M. 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.
- 溜渕功史・中村雅基・山田安之, 2011: 全国を対象とした客観的な相似地震の抽出, *日本地球惑星科学連合大会講演予稿集*, SSS026-P02.
- 溜渕功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2010: 宮古島近海における固有地震活動, *地震*, **62**, 193-207.
- Wei, D and T. Seno, 1998: Determination of the Amurian plate motion, Mantle dynamics and plate interactions in east Asia, *Geodynam Ser.*, Vol. 27, ed. M. F. J. Flower, S. L. Chung, C. H. Lo, and T. Y. Lee, AGU, Washington D. C., 337-346.

## 5.4 九州地方の繰り返し相似地震

植村英明(福岡管区気象台 地震火山課)

### 5.4.1 はじめに

福岡管区気象台は気象研究所との地方共同研究「日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究」として福岡管内の繰り返し相似地震の調査を平成23～24年度の2年計画で行なってきたので報告する。なお、同地域の小規模相似地震については、Yamashita *et al.* (2012)による報告があるが、ここでは規則的繰り返し発生に注目して別途中規模地震を含めた繰り返し相似地震の抽出を試みた。

### 5.4.2 繰り返し相似地震とは

繰り返し相似地震とは、ほぼ同じ規模の地震が、ほぼ同じ繰り返し間隔、同じ場所で発生する地震のことである。相似地震や固有地震などとも呼ばれており、観測される地震波形は互いによく似ている特徴がある。繰り返し地震は、同一の固着域(アスペリティ)において同じ大きさの歪解放を繰り返し発生していると考えられている(五十嵐, 2002)。

繰り返し相似地震の調査を行うことにより以下の事などに貢献できる可能性がある。

- ・繰り返し相似地震のうち被害をもたらす可能性のある地震の分布や地域的特徴の把握
- ・プレート境界のアスペリティ分布やプレートの移動速度変化・他の巨大地震への影響の把握
- ・検出した繰り返し地震、相似地震のデータを用いた統計学的地震発生予測

### 5.4.3 デジタルデータを用いた繰り返し相似地震の調査対象・調査方法

2001年1月から2012年9月までに日向灘で発生したM3.0以上の地震を対象に、ほぼ同じ震源で繰り返し発生している地震を抽出し、波形の相似を比較した。調査には気象庁が保有する津波地震早期検知網観測点の地震波形を使用した。

鎌谷・勝間田(2010)に基づいた長谷川(2012)の手法を用いて地震を抽出した。その際に緯度・経度の差は0.05度以内、深さの差は20km以内、マグニ

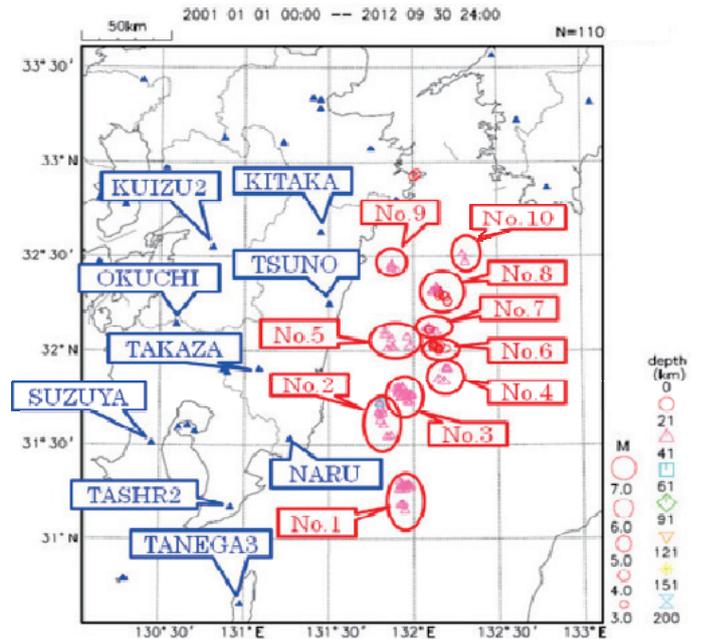


図 5.4.1 繰り返し地震の震央分布図と観測点配置。

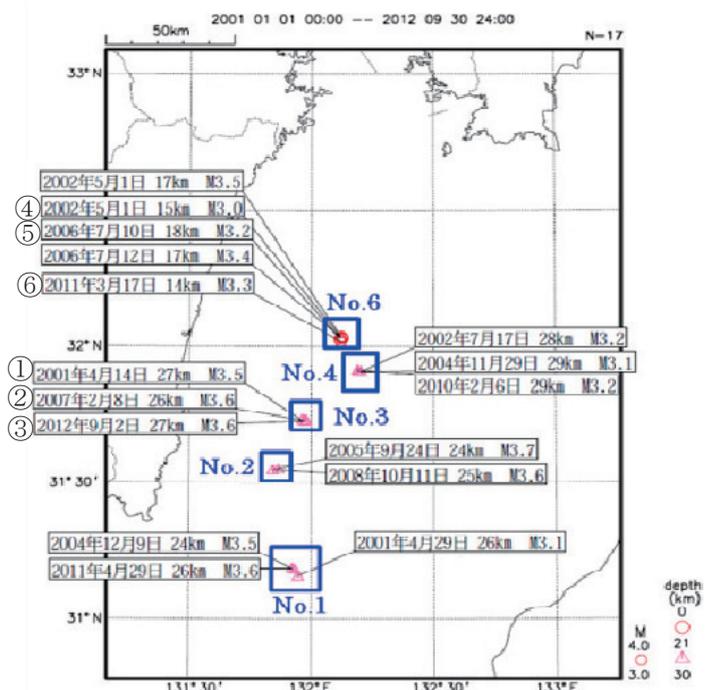


図 5.4.2 コヒーレンス 0.95 以上の地震の震央分布

チュードの差は 0.4 以内とした。抽出された地震をエリア毎に選別 (図 5.4.1) し、エリア毎の地震について波形のコヒーレンスが 0.95 以上 (過去の調査からこの数値以上であれば、相似地震と考えられる) のイベントを抽出した (図 5.4.2)。

#### 5.4.4 デジタルデータを用いた繰り返し相似地震の調査結果

抽出された地震で、繰り返しの発生間隔及び地震波形の相似性などから、定期的に繰り返している相似地震と考えられる事例はエリア No.3 と No.6 のイベントであった。

エリア No.3 は波形の相関も高く (図 5.4.3)、M-T 図 (図 5.4.4) で見ても、発生間隔は①-②が 5.83 年、②-③が 5.67 年となっている。

エリア No.6 も波形の相関は高く (図 5.4.5)、M-T 図 (図 5.4.6) で見ても、発生間隔は④-⑤が 4.17 年、⑤-⑥が 4.83 年となっている。

どちらのエリアについても波形の相関は高く、エリア毎の発生間隔もほぼ同じであることから、繰り返し相似地震と考えられる。

#### 5.4.5 デジタルデータを用いた繰り返し相似地震調査の考察

今回の調査では、2 つの領域で繰り返し相似地震と思われるイベントが抽出できた。また、調査を行う中で、当初今回の調査期間は本年 8 月までとしていたが、エリア No.3 の発生間隔から③の地震の発生がある程度予測できたので、調査期間を延長した所、9 月に発生した③の地震を検出できたことや、波形が酷似した地震の存在を確認できたことは、非常に有益であった。しかし、今回の調査では事例数が少なく、今後も長期にわたる調査の継続が必要と考える。

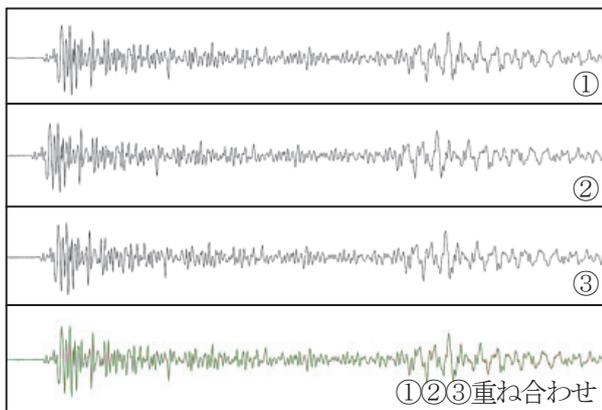


図 5.4.3 エリア No.3 の地震の OKUCHI の波形。

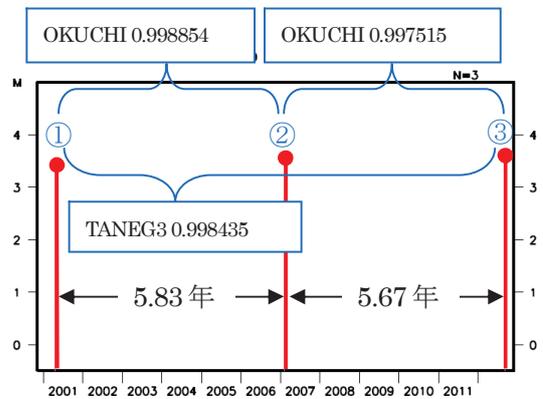


図 5.4.4 エリア No.3 の地震活動経過図とイベント毎の波形のコヒーレンスの最大値。

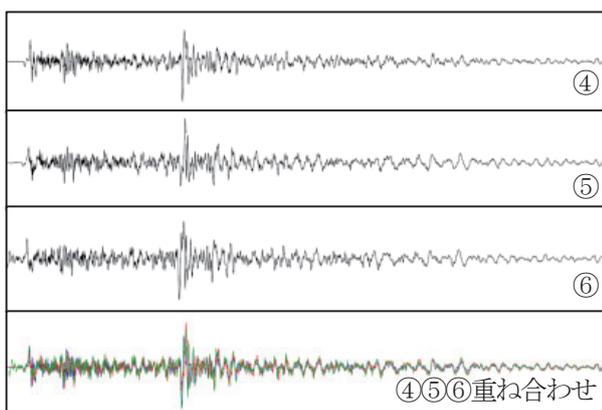


図 5.4.5 エリア No.6 の地震の TSUNO の波形。

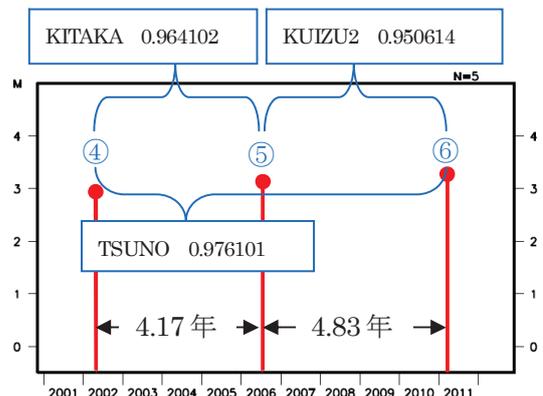


図 5.4.6 エリア No.6 の地震活動経過図とイベント毎の波形のコヒーレンスの最大値。

5.4.6 マイクロフィルムを用いた繰り返し相似地震の調査対象・調査方法

今回の調査ではマイクロフィルムによる繰り返し相似地震の調査も行ったので合わせて報告する。

1923 年から 2011 年までに日向灘で発生した M5.0 以上の地震を対象に、ほぼ同じ震源域で繰り返し発生している地震 (図 5.4.7) を長谷川(2012)の手法を用いて抽出し、59 型地震計 (100 倍) の地震波形 (マイクロフィルム) の画像により波形比較を行った。調査には日向灘海域に近い宮崎地方気象台と延岡測候所の地震波形を使用した。

なお、マイクロフィルム記録は、宮崎が 1972 年から 1994 年まで、延岡が 1975 年から 1994 年までである。抽出した地震を領域 A と領域 B に分けて領域内で地震波形の比較を行った (図 5.4.8、地震活動経過図)。抽出した事例の中で、波形の比較が可能な事例は領域 A が 4 事例、領域 B が 4 事例であった。1994 年以降に発生した地震とは比較を行っていない。

5.4.7 マイクロフィルムを用いた繰り返し相似地震調査の考察とまとめ

図 5.4.9 から図 5.4.11 に抽出した事例の波形を示す。領域 A の波形 (図 5.4.9、図 5.4.10) は①1972 年 6 月 22 日 M5.4、②1974 年 1 月 11 日 M5.1、③1981 年 11 月 19 日 M5.2、④1982 年 3 月 6 日 M5.5 の宮崎、延岡の波形である。宮崎の波形は振り切れていたため、コーダ部分で比較を行った。領域 B の波形 (図 5.4.11) は⑤1982 年 3 月 8 日 M5.4、⑥1984 年 9 月 11 日 M5.1、⑦1987 年 4 月 12 日 M5.1、⑧1994 年 6 月 12 日 M5.1 の延岡の波形である。宮崎の波形は領域 A と同様に振りきれていたため掲載していない。

複雑な波形なので、時間軸、振幅を伸ばして比較を行ったが、どの事例についても特徴的な波形の相似は見られなかった。

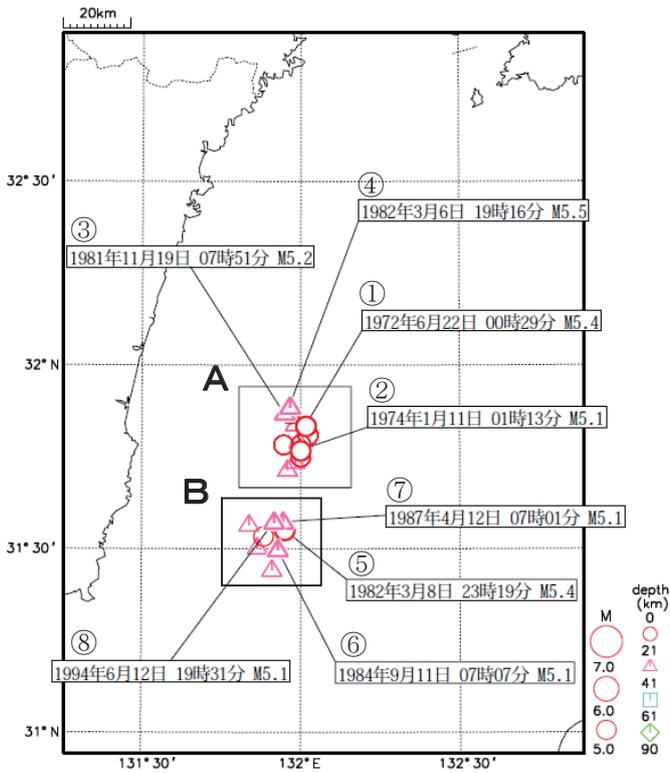


図 5.4.7 震央分布図。(1923 年以降、深さ 0~90km、M5.0 以上)

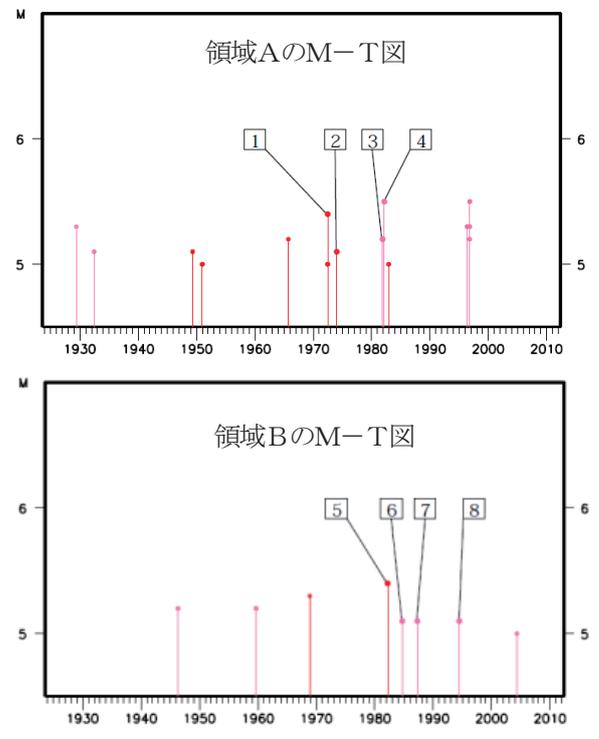


図 5.4.8 地震活動経過図 (M-T 図)。

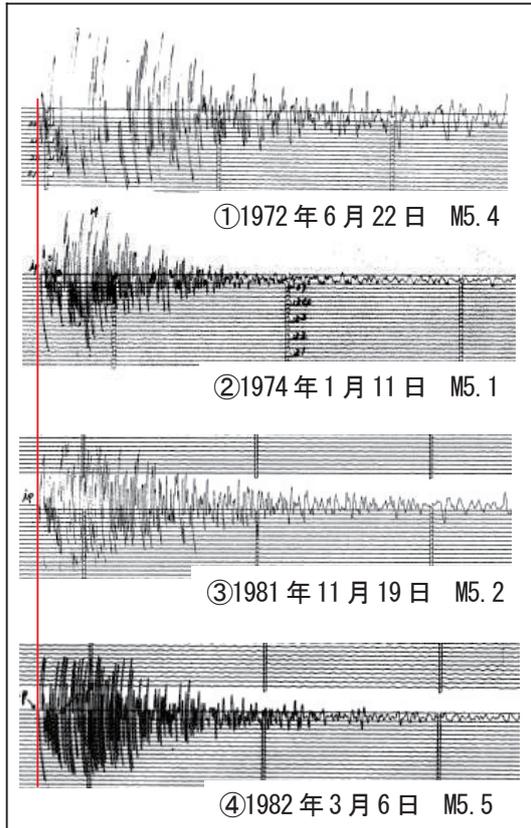


図5.4.9 領域Aの波形(宮崎 N-S)。赤補助線はP波到着時を示す。

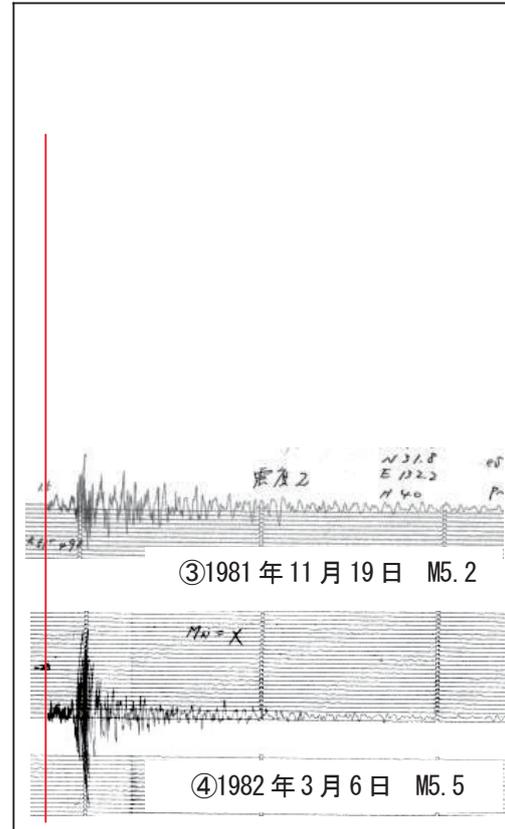


図5.4.10 領域Aの波形(延岡 U-D)。赤補助線はP波到着時を示す。

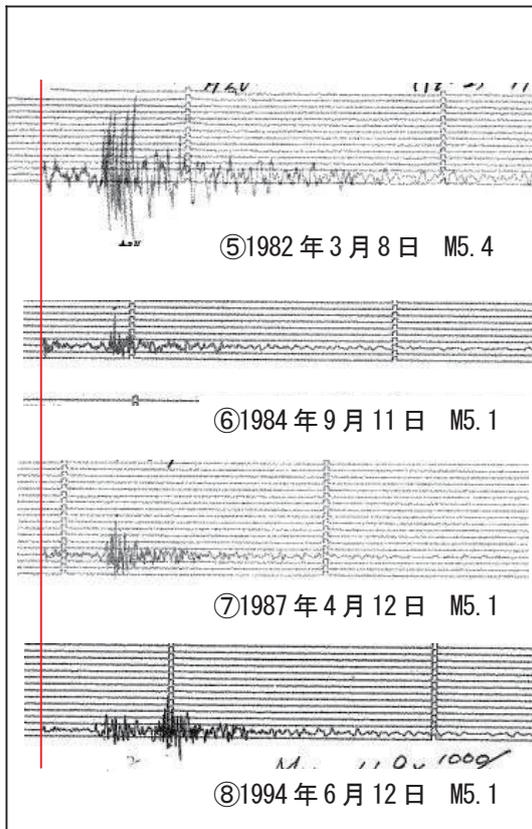


図5.4.11 領域Bの波形(延岡 N-S)。赤補助線はP波到着時を示す。

## 謝辞

本調査には、独立行政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、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データ及を利用して気象庁が文部科学省と協力して求めた一元化震源を使わせていただきました。また、本調査には、気象研究所 勝間田明男氏、気象大学校 鎌谷紀子氏、大阪管区気象台 長谷川嘉臣氏が作成されたプログラムを、波形のコーヒーレンスの計算には、気象庁地震火山部地震津波監視課 山田安之氏が作成されたプログラムを使用させていただきました。記して感謝いたします。

## 参考文献

長谷川嘉臣, 2012: 近畿・中国・四国地方における繰り返し相似地震の調査, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, SSS28-P11.

五十嵐俊博, 2002: 三陸沖の固有地震的地震活動, *なるふる*, **31**, 2-3.

鎌谷紀子・勝間田明男, 2010: 全国の中規模固有地震活動 ( $M \geq 4.5$ ) 検出の試み, *日本地震学会秋季大会講演予稿集*, P02-32.

Yamashita, Y., H. Shimizu, and K. Goto, 2012: Small repeating earthquake activity, interplate quasi-static slip, and interplate coupling in the Hyuga-nada, southwestern Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L08304, doi:10.1029/2012GL051476.

## 5.5 沖縄地方の繰り返し相似地震

城間康司・古謝秀和・川門義治（沖縄気象台地震火山課）

所属は平成 24 年度当時

### 5.5.1 沖縄地方における繰り返し地震の概要

沖縄地方においては、2009 年以降に溜洩らによって繰り返し地震の調査(溜洩, 2008; 溜洩・他, 2009; 溜洩・他, 2010; 溜洩・他, 2011)が行われ、4つの領域で10グループが見つかっている。今回は、前回の調査から後に発生した沖縄本島近海、宮古島近海、沖縄本島近海（沖永良部西方沖）の3つの領域での繰り返し地震を抽出し、波形データの比較やBPT分布モデルを用いた次地震の発生予測(岡田, 2009)を行った。なお、これまでに沖縄地方において確認されている相似地震については、5.5.5項においてまとめて表に示しておく。

地震波形の相関はコヒーレンス値（ここで、コヒーレンス値とは、複数の波の振幅と位相の間に一定の関係があり、波形の似ている度合いを数値化したもの）を算出して、客観的に評価する。コヒーレンス値を算出する場合は、気象庁カタログのP相の検測値の0.5秒前から40秒間の速度波形を用いて計算し、その中でコヒーレンス値が約0.95以上となる観測点が2点以上となる地震を繰り返し地震とした。

### 5.5.2 沖縄本島近海で発生する3グループの繰り返し相似地震

沖縄本島近海(国頭村の東約20km)のプレート境界では、以下の3グループの地震が定期的に繰り返しを発生している。① M4.0程度の地震（グループX）、② M3.1程度の地震（グループA）、③ M2.8程度の地震（グループB）。

前回の調査で70%の確率で発生すると予測された各グループ毎の期間〔グループX：2011年12月～2012年5月、グループA：2012年10月～2013年1月、グループB：2012年4月～10月〕を基に新たな地震が発生していないか抽出調査を行ったところ、ほぼ予測どおり繰り返し活動が発生していることが確認された(図5.5.1)。

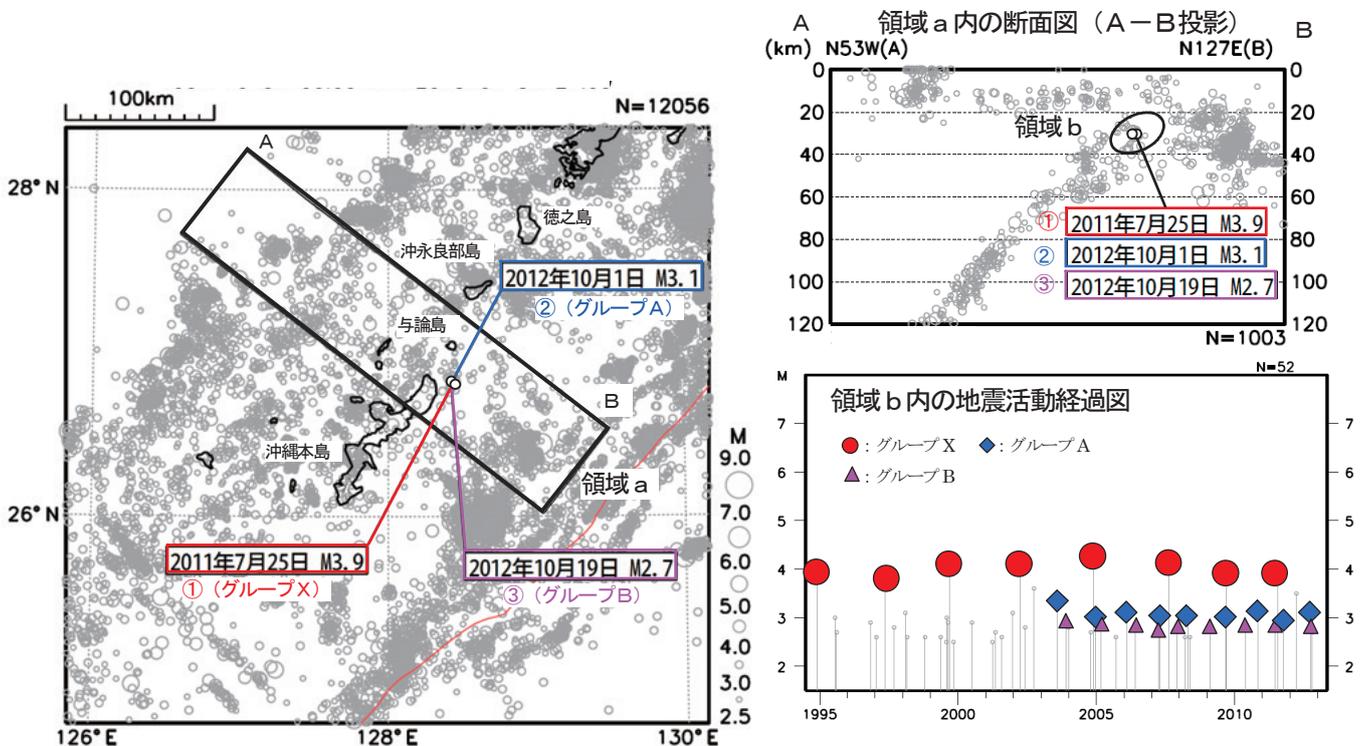


図 5.5.1 沖縄本島近海の震央分布図と領域 a 内の断面図および領域 b 内の地震活動経過図(1994 年 10 月 1 日～2013 年 1 月 31 日、深さ 0～120km、 $M \geq 2.5$ )。

#### 5.5.2.1 波形の比較

各グループの地震波形について、デジタル波形データを用いた目視比較と、コヒーレンス値による相似性の検証を

行った。また、各地震間のコヒーレンス値を求め、別グループとの比較検証も行っている。1994年以前の過去地震については、地震の規模が小さく、アナログ波形記録での確認が困難であったため検証を行っていない。

(1) デジタル波形データの比較

各グループの地震波形を目視にて見比べると、それぞれの波形に表れる特徴的な部分が、同一グループであれば相互によく似ているのが確認できる (図5.5.2)。また、各イベント間のコヒーレンス値を比較すると、同一グループ内でのコヒーレンス値は0.98以上となり、他グループと比較した場合のコヒーレンス値 (0.80~0.87) と比べて明らかに高い値となった (表5.5.1)。このことから、グループは互いに独立である事が明らかとなっている。

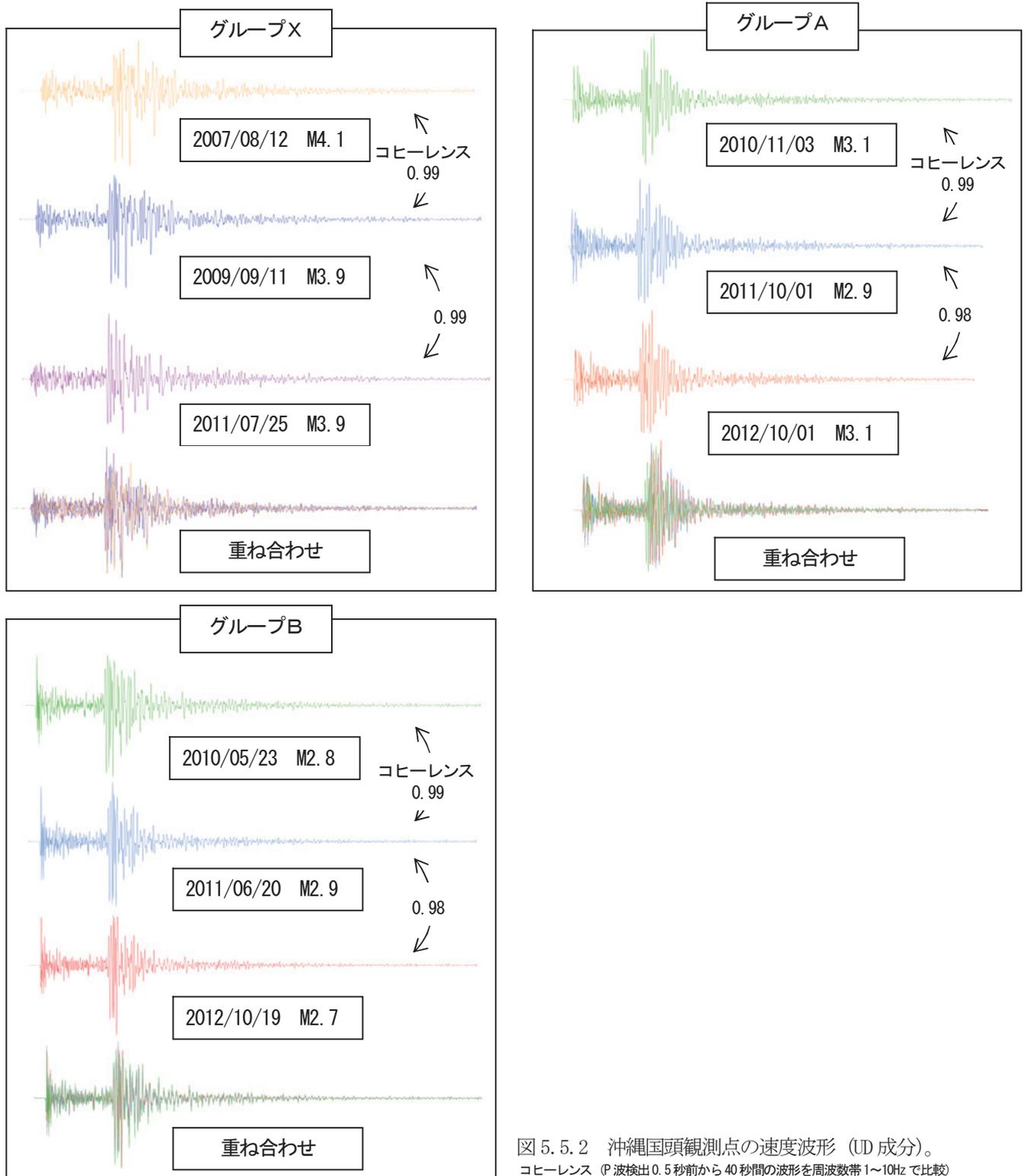


図 5.5.2 沖縄国頭観測点の速度波形 (UD 成分)。コヒーレンス (P 波検出 0.5 秒前から 40 秒間の波形を周波数帯 1~10Hz で比較)

表 5.5.1 各イベント間のコヒーレンス値。

			[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
グループX	[1]	2004/11/26	0.99	0.99	0.99	0.82	0.82	0.82	0.82	0.85	0.85	0.85	0.85	
	[2]	2007/08/12	0.99	0.99	0.99	0.81	0.81	0.81	0.81	0.84	0.84	0.84	0.84	
	[3]	2009/09/11	0.99	0.99	0.99	0.80	0.79	0.80	0.80	0.84	0.84	0.85	0.84	
	[4]	2011/07/25	0.99	0.99	0.99	0.81	0.81	0.81	0.81	0.84	0.83	0.84	0.84	
グループA	[5]	2009/09/02	0.82	0.81	0.80	0.81	0.99	0.99	0.98	0.86	0.86	0.86	0.87	
	[6]	2010/11/03	0.82	0.81	0.79	0.81	0.99	0.99	0.99	0.85	0.86	0.87	0.87	
	[7]	2011/10/01	0.82	0.81	0.80	0.81	0.99	0.99	0.98	0.85	0.85	0.86	0.87	
	[8]	2012/10/01	0.82	0.81	0.80	0.81	0.98	0.99	0.98	0.86	0.87	0.87	0.87	
グループB	[9]	2009/02/05	0.85	0.84	0.84	0.84	0.86	0.85	0.85	0.86	0.98	0.98	0.98	
	[10]	2010/05/23	0.85	0.84	0.84	0.83	0.86	0.86	0.85	0.87	0.98	0.99	0.98	
	[11]	2011/06/20	0.85	0.84	0.85	0.84	0.86	0.87	0.86	0.87	0.98	0.99	0.99	
	[12]	2012/10/19	0.85	0.84	0.84	0.84	0.87	0.87	0.87	0.87	0.98	0.98	0.99	

5.5.2.2 次回地震の発生予測

過去の地震の発生間隔からBPT分布モデルを用いて、次回の地震が発生すると予測される期間について計算を行うと、グループB (M2.8程度、無感) の地震が2013年8月～2014年2月までの間に70%の確率で発生すると予測される。また同様にグループX (M4.0程度、震度2程度) の地震は、2013年8月～2014年4月の間に、グループA (M3.1程度、震度1程度) の地震は、2013年9月～2014年1月の間に70%の確率で次回の地震が発生すると予測される (表5.5.2)。

表 5.5.2 沖縄本島近海の繰り返し地震グループと次地震の発生予測。

	マグニチュード	過去の地震で観測された震度	今まで観測された回数	発生間隔 平均(今までの最短～最長)	最近発生した地震	最近の地震からの経過時間*	次の地震が70%の確率で発生すると予測される期間
●	グループX	M4.0程度 震度2程度	8回 (1994年以降)	2.4年(1.9～2.7年)	2011年7月25日	1.5年	2013年8月～2014年4月
◆	グループA	M3.1程度 震度1程度	9回 (2003年以降)	1.1年(0.9～1.4年)	2012年10月1日	0.3年	2013年9月～2014年1月
▲	グループB	M2.8程度 無感	9回 (2003年以降)	1.1年(0.7～1.3年)	2012年10月19日	0.3年	2013年8月～2014年2月

\*2013年1月31日現在

5.5.3 宮古島近海で発生する4グループの繰り返し相似地震

宮古島近海（宮古島の東約5km）のプレート境界では、以下の4グループの地震が規則的に繰り返し発生している。  
 ① M5.1程度の地震（グループX）、② M4.4程度の地震（グループA）、③ M4.2程度の地震（グループB）、④ M4.0程度の地震（グループC）。

前回の調査で70%の確率で発生すると予測された各グループ毎の期間〔グループX：2012年11月～2014年4月（未発生）、グループA：2010年1月～2012年3月、グループB：2011年7月～2012年1月、グループC：2011年3月～9月〕を基に新たな地震が発生していないか抽出調査を行ったところ、ほぼ予測どおり繰り返し活動が発生していることが確認された（図5.5.3）。

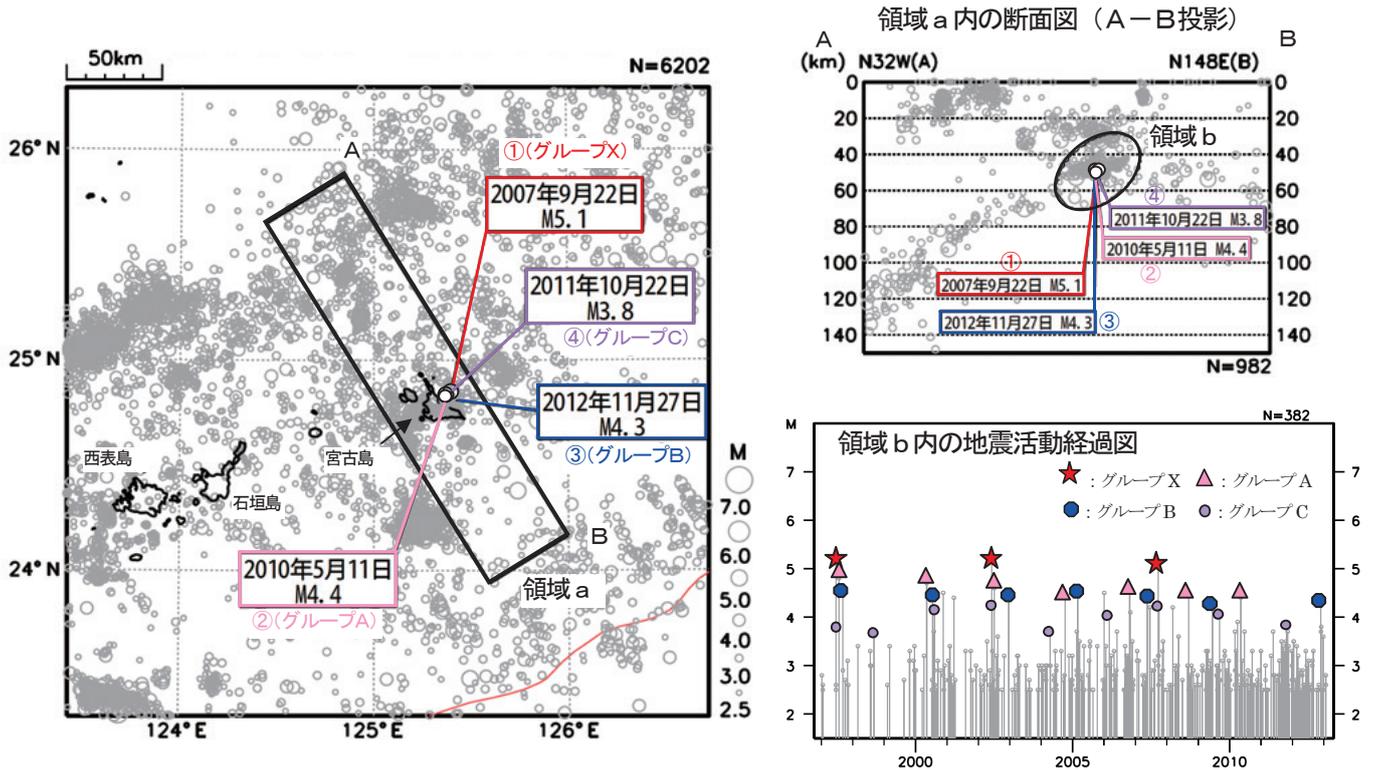


図 5.5.3 宮古島近海の震央分布図と領域 a 内の断面図、領域 b 内の地震活動経過図（1997 年 1 月 1 日～2013 年 1 月 31 日、深さ 0～150km、 $M \geq 2.5$ ）。

5.5.3.1 波形の比較

各グループの地震波形について、デジタル波形データを用いた目視比較とコヒーレンス値による相似性の検証を行った。また、各地震間のコヒーレンス値を求め、別グループとの比較検証を行った。グループXの地震については、アナログ波形記録での目視比較も行った。

(1) デジタル波形データの比較

各グループの地震波形を沖縄城辺観測点におけるデジタル波形データを用いて比較をした。目視による比較では、それぞれの波形に表れる特徴的な部分が、同一グループであれば相互によく似ているのがわかる（図 5.5.4）。また、各イベント間のコヒーレンス値を比較したところ、同一グループ内でのコヒーレンス値が約 0.95 以上となり、他グループと比較した場合のコヒーレンス値（0.68～0.91）に比べ明らかに高い値となった（表 5.5.3）。このことから同一震源付近にある4つのグループについて、各グループは互いに独立である事が明らかである。特に、グループAおよびグループCについては、同一グループ内でのコヒーレンス値が 0.99 となり相関が非常に高い地震グループである。

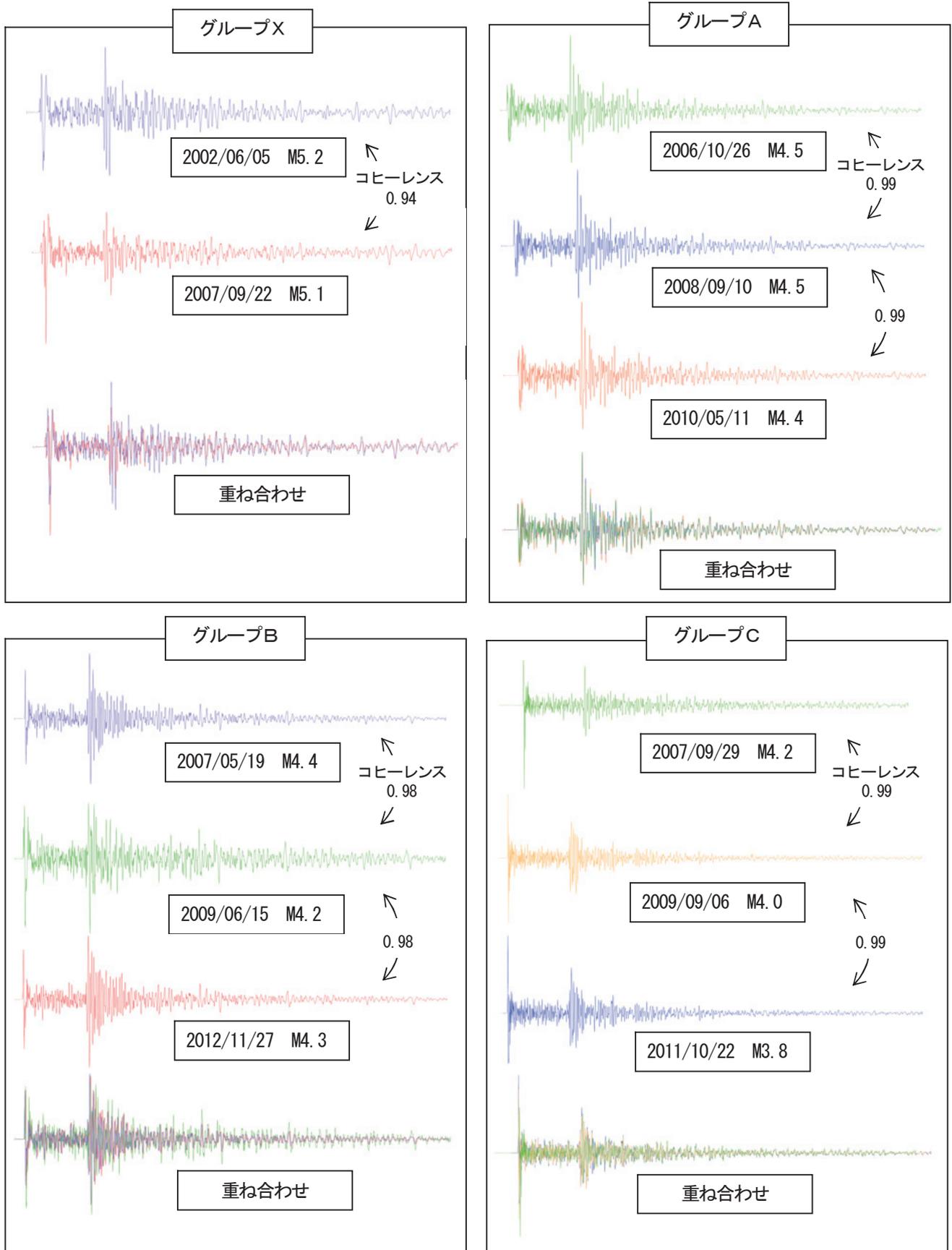


図 5.5.4 沖縄城辺観測点の速度波形 (UD 成分)。  
コヒーレンス (P 波検出 0.5 秒前から 40 秒間の波形を周波数帯 1~3Hz で比較)

表 5.5.3 各イベント間のコヒーレンス値。

		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
グループX	[1] 2002/06/05		0.94	0.68	0.69	0.68	0.74	0.73	0.74	0.81	0.82	0.81
	[2] 2007/09/22	0.94		0.67	0.68	0.67	0.73	0.72	0.72	0.81	0.79	0.79
グループA	[3] 2006/10/26	0.68	0.67		0.99	0.99	0.90	0.89	0.91	0.70	0.70	0.70
	[4] 2008/09/10	0.69	0.68	0.99		0.99	0.90	0.89	0.91	0.70	0.70	0.70
	[5] 2010/05/11	0.68	0.67	0.99	0.99		0.90	0.88	0.90	0.69	0.69	0.69
グループB	[6] 2007/05/19	0.74	0.73	0.90	0.90	0.90		0.98	0.99	0.80	0.80	0.80
	[7] 2009/06/15	0.73	0.72	0.89	0.89	0.88	0.98		0.98	0.80	0.80	0.80
	[8] 2012/11/27	0.74	0.72	0.91	0.91	0.90	0.99	0.98		0.80	0.80	0.80
グループC	[9] 2007/09/29	0.81	0.81	0.70	0.70	0.69	0.80	0.80	0.80		0.99	0.99
	[10] 2009/09/06	0.82	0.79	0.70	0.70	0.69	0.80	0.80	0.80	0.99		0.99
	[11] 2011/10/22	0.81	0.79	0.70	0.70	0.69	0.80	0.80	0.80	0.99	0.99	

(2) アナログ波形記録の比較

マイクロフィルム記録が保存されているグループX付近の地震のうち、繰り返し地震の可能性のある地震として確認されている地震の波形の比較を行った。調査には、震源に近い宮古島地方気象台の59型地震計の波形を用いた。

グループXでは、繰り返し地震の可能性のある地震としてこれまでに8つの地震が確認されている(図5.5.5)。震央分布図で震源にばらつきが見られるが、当時の震源決定精度が低かった事によるものと考えられる。

各イベントの地震波形を見ると、波形に表れる位相の特徴的な部分がよく似ているのが確認できる(図5.5.6)。

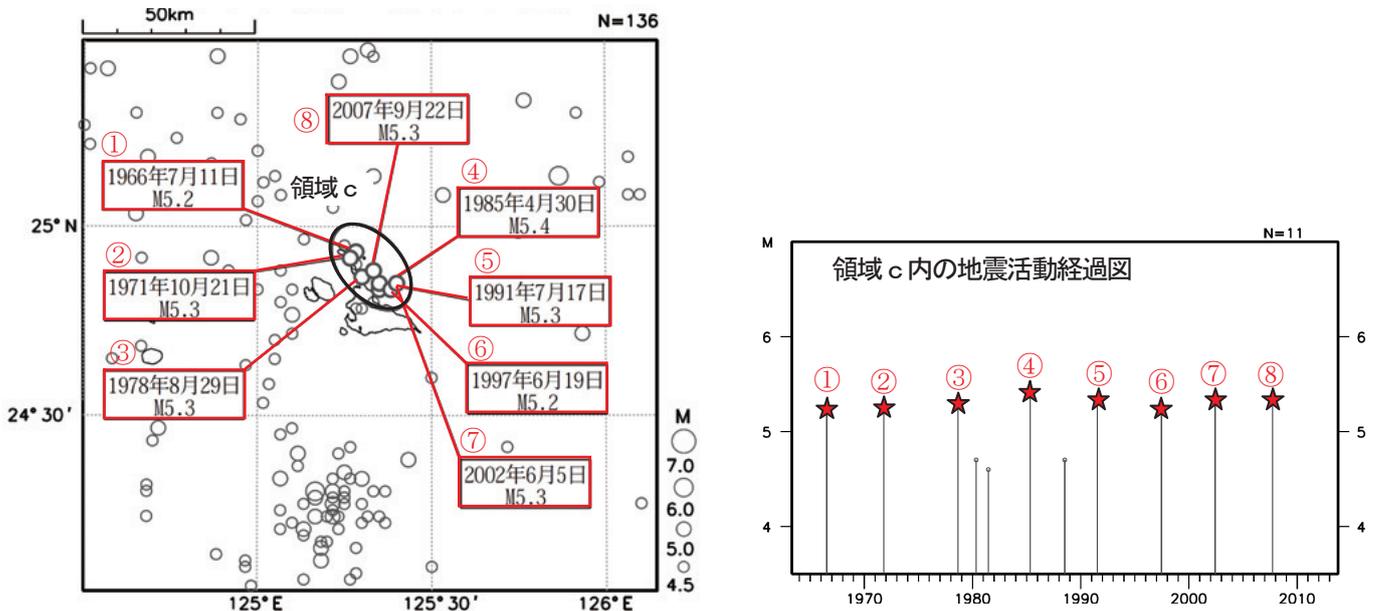


図 5.5.5 宮古島近海の震央分布図と領域c内の地震活動経過図

(1964年1月1日～2013年1月31日、深さ0～100km、M≥4.5)。

ISC震源 (Mは実体波マグニチュードmb) を表示

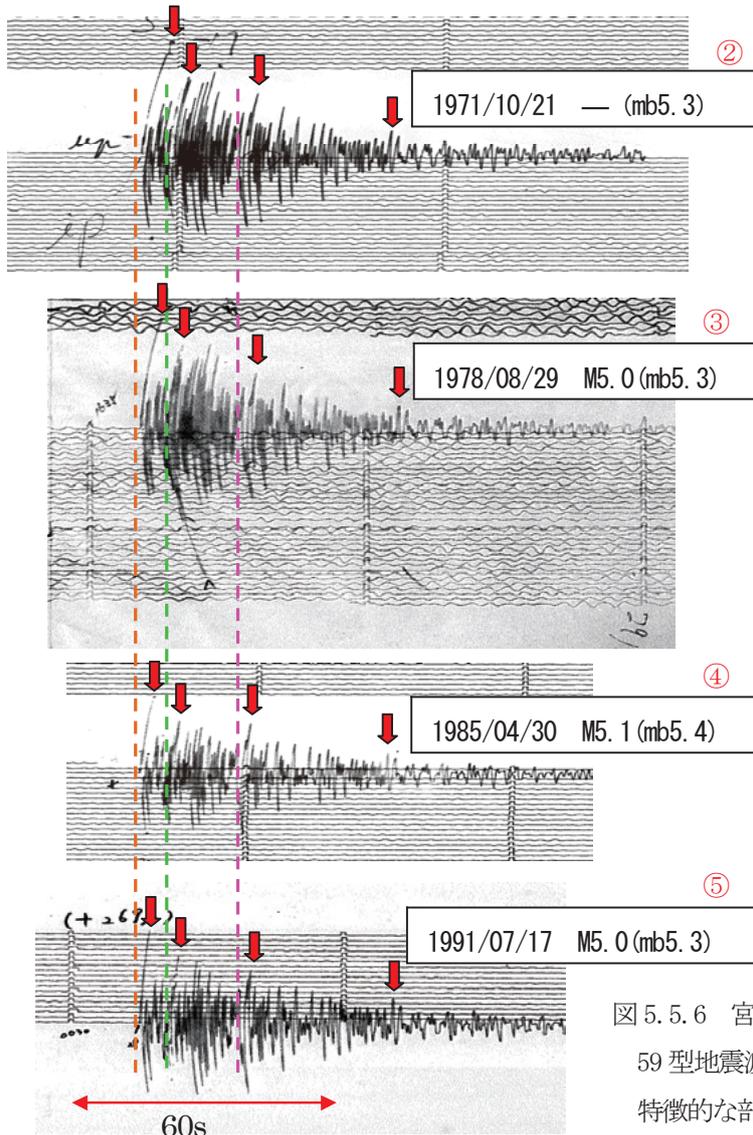


図 5.5.6 宮古島近海（グループX）の地震。

59型地震波形（UD成分）を示す。

特徴的な部分を矢印(↓)で示す。

括弧内はISCカタログによる実体波マグニチュード。

※1966年7月11日、1997年6月19日の地震はマイクロフィルムの記録なし。

### 5.5.3.2 次回地震の発生予測

過去の地震の発生間隔からBPT分布モデルを用いて、次回の地震が発生すると予測される期間について計算を行った。その結果、グループA（M4.4程度、震度3程度）は、評価計算日（2013年1月31日）から70%の確率で2013年3月までの間に次回の地震が発生すると予測される。また同様にグループX（M4.4程度、震度4～3程度）の地震が2014年4月までの間に、グループB（M4.2程度、震度3～2程度）の地震が2014年12月から2015年10月までの間に、グループC（M4.0程度、震度2程度）の地震が2013年4月～2013年11月までの間に70%の確率で次回の地震が発生すると考えられる（表5.5.4）。

表 5.5.4 宮古島近海の繰り返し地震グループと次地震の発生予測。

	マグニチュード	過去の地震で観測された震度	今まで観測された回数	発生間隔 平均(今までの最短～最長)	最近発生した地震	最近の地震からの経過時間*	次の地震が70%の確率で発生すると予測される期間
★	グループX M5.1程度	震度4～3	8回 (1964年以降)	5.9年(5.0～6.9年)	2007年9月22日	5.4年	現時点～2014年4月
△	グループA M4.4程度	震度3程度	10回 (1990年以降)	2.2年(1.2～3.6年)	2010年5月11日	2.7年	現時点～2013年3月
●	グループB M4.2程度	震度3～2	10回 (1990年以降)	2.5年(2.0～3.5年)	2012年11月27日	0.2年	2014年12月～2015年10月
○	グループC M4.0程度	震度2程度	9回 (1997年以降)	1.8年(1.3～2.1年)	2011年10月22日	1.3年	2013年4月～2013年11月

\*2013年1月31日現在

5.5.4 沖縄本島近海（沖永良部島西方沖）で発生する2グループの繰り返し相似地震

沖縄本島近海（沖永良部島西方沖）のプレート境界では、以下の2グループの地震が規則的に繰り返し発生している。

- ① M5.1程度の地震（グループA）、② M5.0程度の地震（グループB）。

前回の調査で70%の確率で発生すると予測された期間〔グループA：2013年6月～2015年1月（未発生）、グループB：2011年5月～2013年1月〕を基に、新たな地震が発生していないか抽出調査を行ったところ、予測通り繰り返し活動が発生していることが確認された（図5.5.7）。

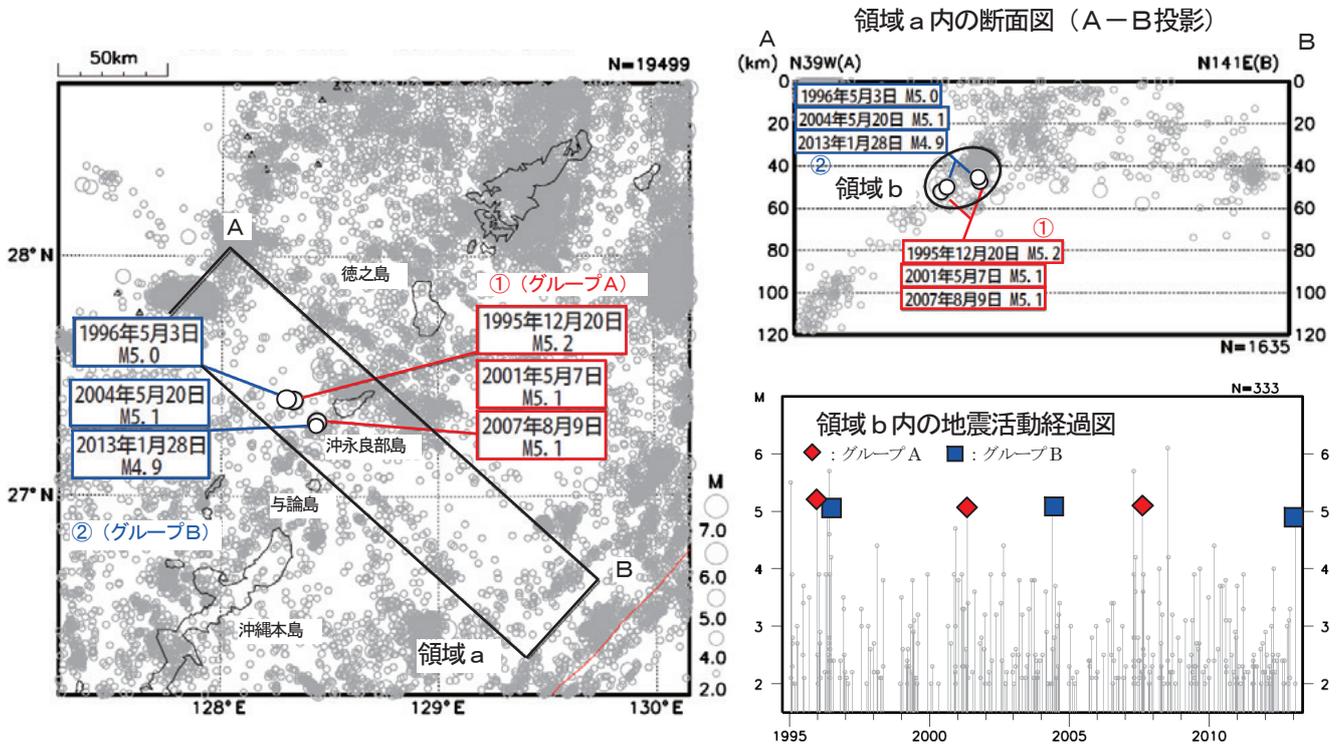


図 5.5.7 沖縄本島近海（沖永良部島西方沖）の震央分布図と領域 a 内の断面図、領域 b 内の地震活動経過図

(1995 年 1 月 1 日～2013 年 1 月 31 日、深さ 0～120km、M≥2.0)。

注：2000 年以前は観測点数が少なく震源決定精度が低かった為、最近の震源から外れて求まっている

5.5.4.1 波形の比較

各グループの地震波形について、デジタル波形データを用いた目視比較とコヒーレンス値による相似性の検証を行った。また、各地震間のコヒーレンス値を求め、別グループとの比較検証を行った。さらに、各グループの地震についてアナログ波形記録での目視比較も行った。

(1) デジタル波形データの比較

グループBにおける地震波形を沖縄国頭観測点におけるデジタル波形データを用いて比較をした。目視による比較では、相似性をはっきり確認することはできなかった。しかし、周波数帯域を限定しフィルタ処理してコヒーレンス値を求めると、0.97 という値が得られ、相似性が確認できた（図 5.5.8）。

グループAのデジタル波形データについては、1 イベントのみしか地震波形の描画が得られず、比較対象となる波形を1 イベントのみ表示した。

また、各イベント間のコヒーレンス値を比較したところ、Bグループではコヒーレンス値が約 0.95 以上となり、Aグループと比較した場合のコヒーレンス値 (0.79～0.81) に比べ明らかに高い値となった（表 5.5.5）。このことから同一震源付近にある2グループについて、互いに独立したグループである事が確認できた。

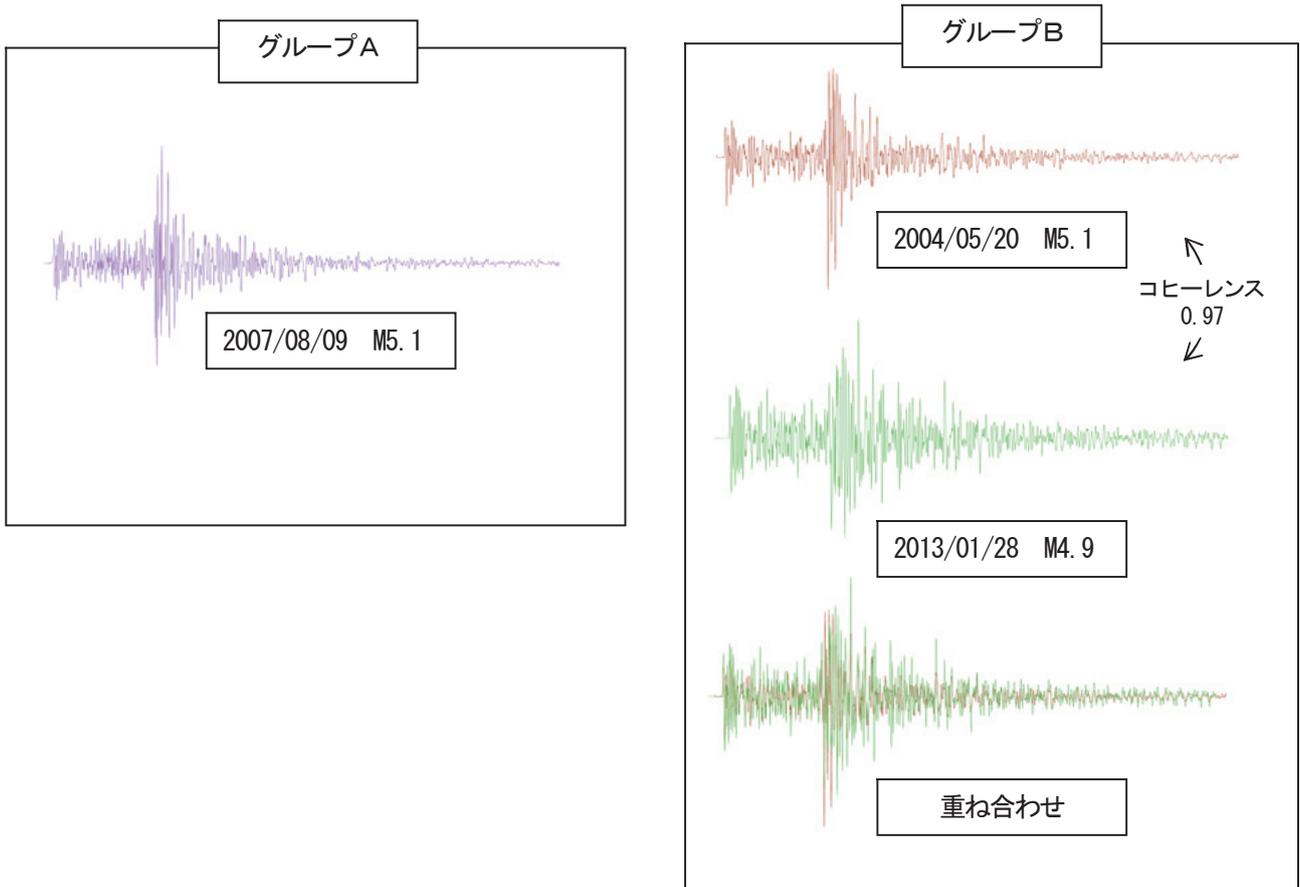


図 5.5.8 沖縄国頭観測点の速度波形 (UD 成分)。  
 コヒーレンス (P 波検出 0.5 秒前から 40 秒間の波形を周波数帯 0.3~1.2Hz で比較)

表 5.5.5 各イベント間のコヒーレンス値。

			[1]	[2]	[3]
グループA	[1]	2007/08/09		0.81	0.79
グループB	[2]	2004/05/20	0.81		0.97
	[3]	2013/01/28	0.79	0.97	

(2) アナログ波形記録の比較

マイクロフィルム記録が保存されている資料を用いて、繰り返し地震の可能性のある地震として確認されている地震の波形の比較を行った。調査には、沖縄気象台（那覇観測点）の59型地震計の波形を用いた。

本領域では、これまでにグループA、グループBともに、繰り返し地震の可能性のある地震として、それぞれ7つの地震が確認されている（図5.5.9）。震央分布図で震源にばらつきが見られるが、当時の震源決定精度が低かった事によるものと考えられる。

同一グループの地震波形を見ると、波形に表れる位相の特徴的な部分がいくつか似ていることが確認できる（図5.5.10）（図5.5.11）。2グループの波形を見比べると、振幅や位相の出かたに違いが見られる。グループAは、グループBに比べ地震波の周期のやや長い揺れが後半で長く続き、振幅が極大となる部分が後半にも現れているのがわかる。

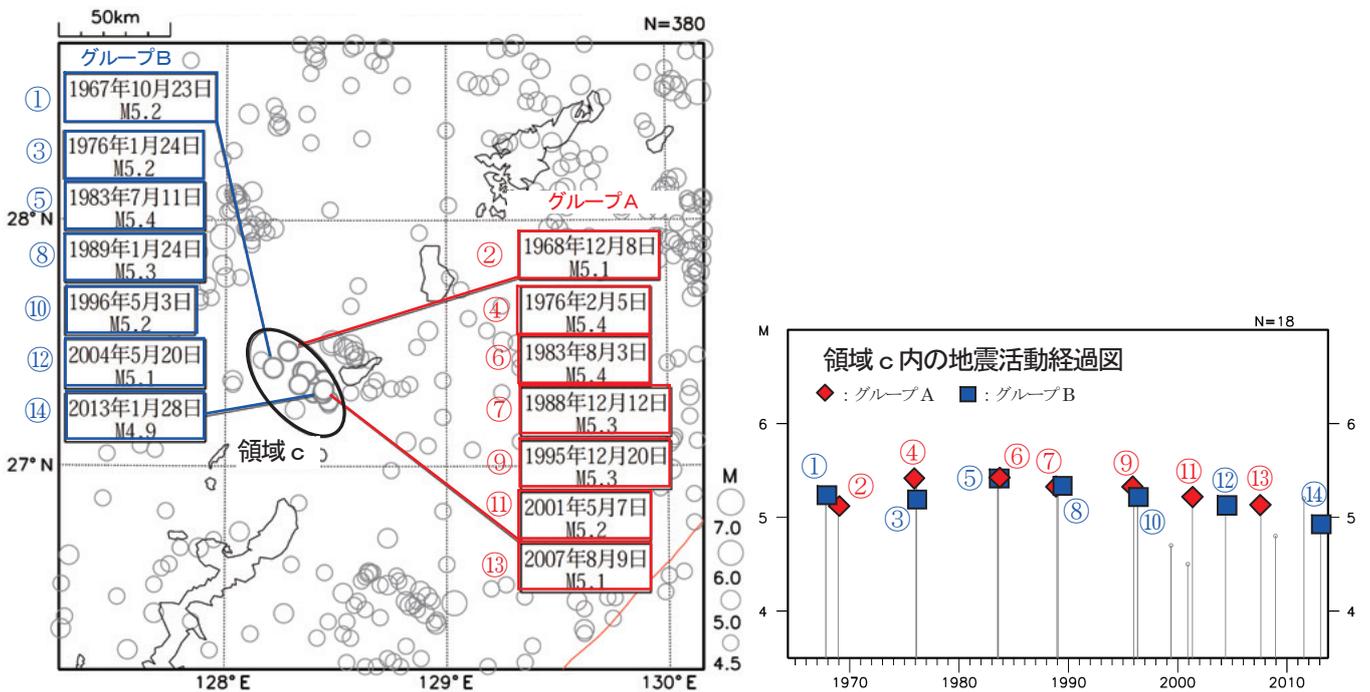


図 5.5.9 沖縄本島近海（沖永良部島西方沖）の震央分布図と領域c内の地震活動経過図

（1965年1月1日～2013年1月31日、深さ0～100km、 $M \geq 4.5$ ）。

2003年以前の地震はISC震源（Mは実体波マグニチュードm）2004年以降の地震は気象庁震源を表示

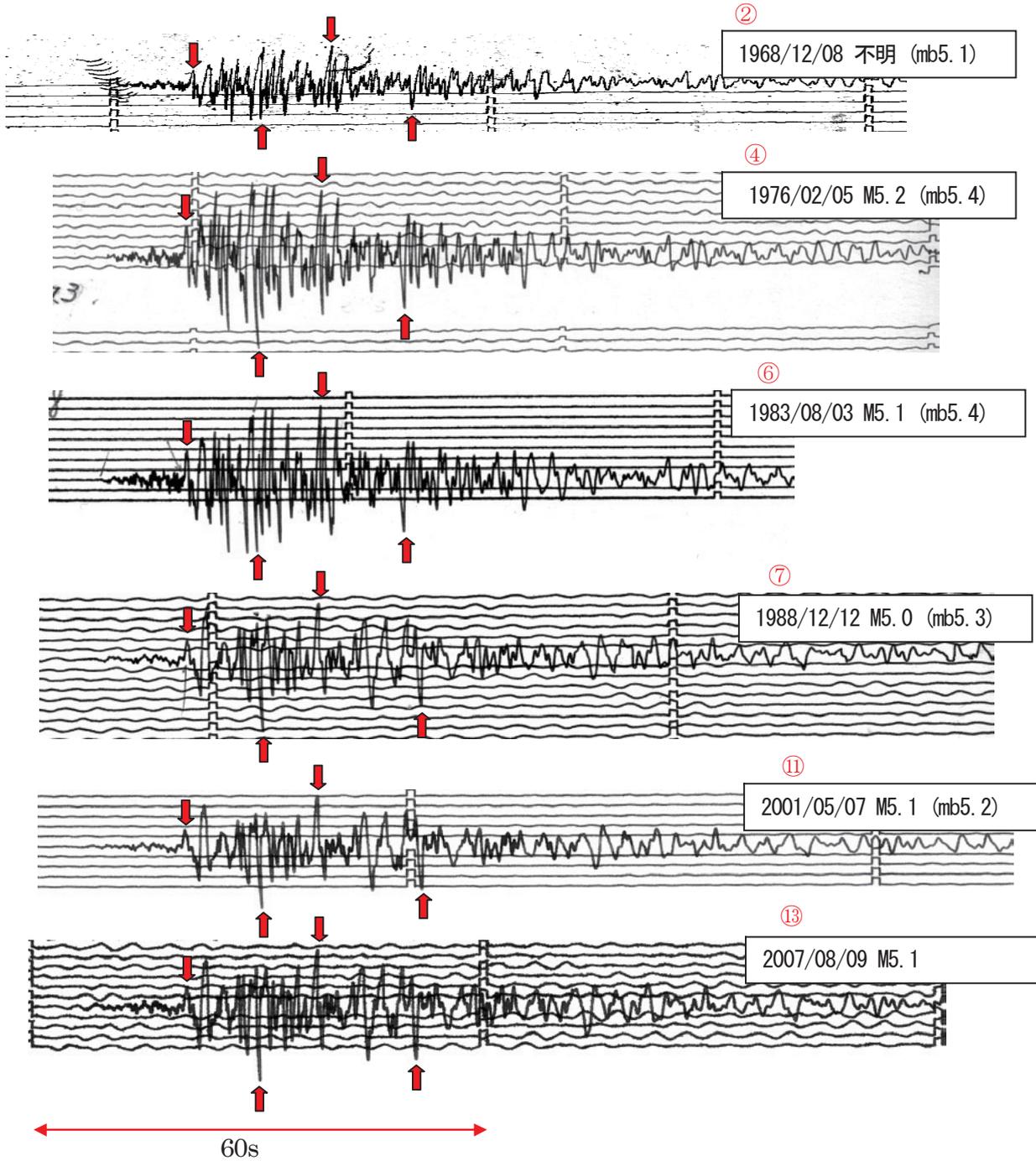


図 5.5.10 沖縄本島近海（沖永良部島西方沖）の地震（グループA）。

59型地震波形（EW成分）を示す。

特徴的な部分を矢印(↓)で示す。

括弧内はISCカタログによる実体波マグニチュードである。

※1992年～96年まで59型地震計は欠測。

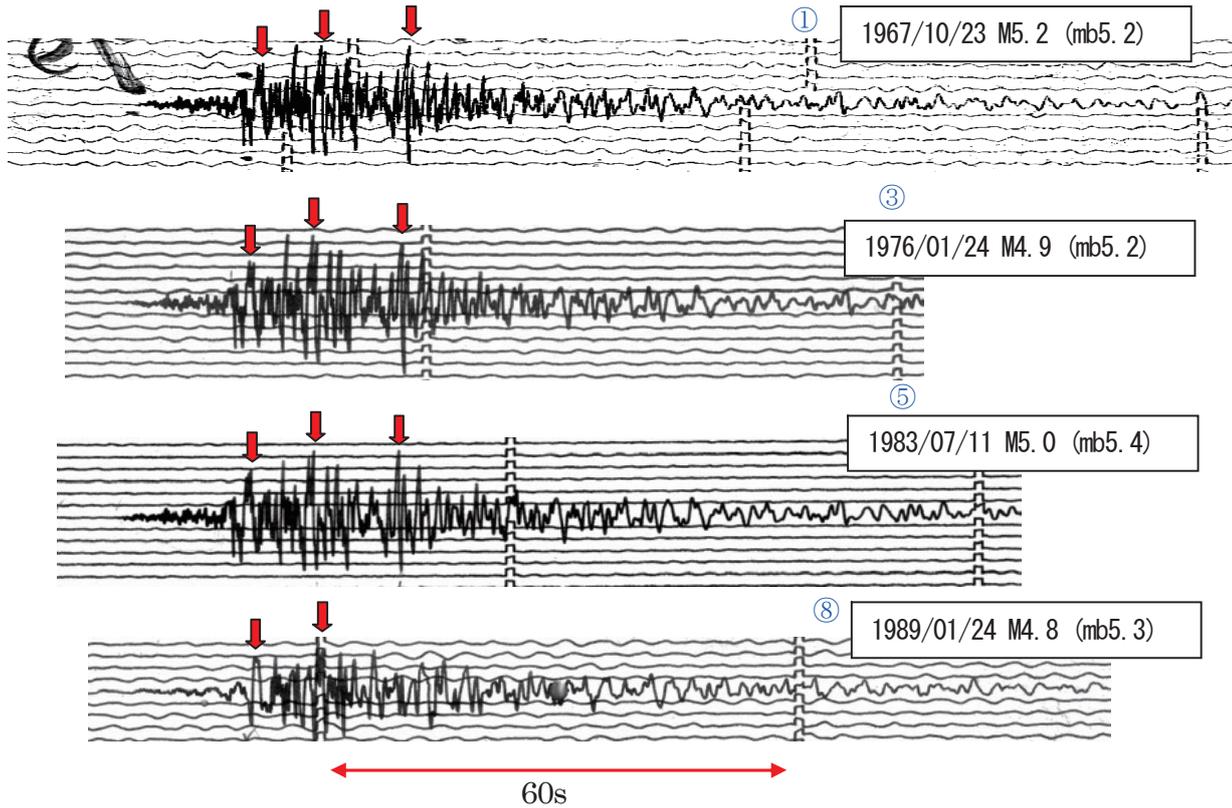


図 5.5.11 沖縄本島近海（沖永良部島西方沖）の地震（グループB）。

59型地震波形（EW成分）を示す。

特徴的な部分を矢印(↓)で示す。

括弧内はISCカタログによる実体波マグニチュードを示す。

※1992年～96年まで59型地震計は欠測、2004年5月20日の東西成分はインク切れのため読み取れず。

#### 5.5.4.2 次回地震の発生予測

過去の地震の発生間隔からBPT分布モデルを用いて、次回の地震が発生すると予測される期間について計算を行うと、グループA（M5.1程度、震度4程度）は2013年6月から2015年1月までの間に70%の確率で次回の地震が発生すると予測される。また、同様にグループB（M5.0程度、震度4程度）の次回の地震が2019年6月～2021年10月までの間に発生すると考えられる（表5.5.6）。

表 5.5.6 沖縄本島近海（沖永良部島西方沖）の繰り返し地震グループと次地震の発生予測。

	マグニチュード <sup>注</sup>	過去の地震で観測された震度	今まで観測された回数 (1965年以降)	発生間隔 平均(今までの最短～最長)	最近発生した地震	最近の地震からの経過時間	次の地震が70%の確率で発生すると予測される期間*
◆ グループA	M5.1程度	震度4程度	7回	6.4年(5.4～7.5年)	2007年8月9日	5.5年	2013年6月～2015年1月
■ グループB	M5.0程度	震度4程度	7回	7.5年(5.5～8.7年)	2013年1月28日	0.0年	2019年6月～2021年10月

<sup>注</sup>マグニチュードはJMAカタログによる

\*2013年1月31日現在

#### 5.5.5 沖縄地方で確認された繰り返し相似地震

沖縄地方において確認されている4つの領域での10グループの繰り返し地震について、これまでの発生リストを示す（表5.5.7）。

表 5.5.7 沖縄地方で確認された繰り返し地震の発生リスト。

沖縄本島近海								
グループX			グループA			グループB		
年月日	M	発生 間隔(年)	年月日	M	発生 間隔(年)	年月日	M	発生 間隔(年)
1994年11月30日	M3.9		2003年08月05日	M3.2		2003年12月29日	M2.8	
1997年05月16日	M3.8	2.5	2004年12月16日	M3.0	1.4	2005年03月01日	M2.8	1.2
1999年09月08日	M4.1	2.3	2006年02月06日	M3.1	1.1	2006年05月26日	M2.8	1.2
2002年04月02日	M4.1	2.6	2007年04月16日	M3.0	1.2	2007年04月04日	M2.7	0.9
2004年11月26日	M4.2	2.7	2008年04月27日	M3.0	1.0	2007年12月03日	M2.7	0.7
2007年08月12日	M4.1	2.7	2009年09月02日	M3.0	1.4	2009年02月05日	M2.8	1.2
2009年09月11日	M3.9	2.1	2010年11月03日	M3.1	1.2	2010年05月23日	M2.8	1.3
2011年07月25日	M3.9	1.9	2011年10月01日	M2.9	0.9	2011年06月20日	M2.9	1.1
			2012年10月01日	M3.1	1.0	2012年10月19日	M2.7	1.3
沖縄本島近海(沖永良部島西方沖)								
グループA			グループB					
年月日	M	発生 間隔(年)	年月日	M	発生 間隔(年)			
1968年12月08日	(mb5.1)		1967年10月23日	M5.2(mb5.2)				
1976年02月05日	M5.2(mb5.4)	7.2	1976年01月24日	M4.9(mb5.2)	8.3			
1983年08月03日	M5.1(mb5.4)	7.5	1983年07月11日	M5.0(mb5.4)	7.5			
1988年12月12日	M5.0(mb5.3)	5.4	1989年01月24日	M4.8(mb5.3)	5.5			
1995年12月20日	M5.2(mb5.3)	7.0	1996年05月03日	M5.0(mb5.2)	7.3			
2001年05月07日	M5.1(mb5.2)	5.4	2004年05月20日	M5.1	8.1			
2007年08月09日	M5.1	6.3	2013年01月28日	M4.9	8.7			
宮古島近海								
グループX			グループA			グループB		
年月日	M	発生 間隔(年)	年月日	M	発生 間隔(年)	年月日	M	発生 間隔(年)
1966年07月11日	(mb5.2)		1990年09月10日	M4.0(mb4.3)		1990年09月18日	M3.6(mb4.4)	
1971年10月21日	(mb5.3)	5.3	1991年11月24日	M3.6	1.2	1992年12月07日	M3.5	2.2
1978年08月29日	M5.0(mb5.3)	6.9	1993年12月29日	M3.9(mb4.4)	2.1	1994年12月15日	M4.2	2.0
1985年04月30日	M5.1(mb5.4)	6.7	1997年07月24日	M4.8	3.6	1997年09月07日	M4.5	2.7
1991年07月17日	M5.0(mb5.3)	6.2	2000年05月09日	M4.7	2.8	2000年07月16日	M4.4	2.9
1997年06月19日	M5.1(mb5.2)	5.9	2002年07月05日	M4.6	2.2	2002年12月20日	M4.4	2.4
2002年06月05日	M5.2(mb5.3)	5.0	2004年10月06日	M4.5	2.3	2005年03月01日	M4.5	2.2
2007年09月22日	M5.1	5.3	2006年10月26日	M4.5	2.1	2007年05月19日	M4.4	2.2
			2008年09月10日	M4.5	1.9	2009年06月15日	M4.2	2.1
			2010年05月11日	M4.4	1.7	2012年11月27日	M4.3	3.5
グループC								
1997年06月03日	M3.6							
1998年09月04日	M3.6	1.3						
2000年08月07日	M4.1	1.9						
2002年06月07日	M4.2	1.8						
2004年04月13日	M3.7	1.9						
2006年03月02日	M4.0	1.9						
2007年09月29日	M4.2	1.6						
2009年09月06日	M4.0	1.9						
2011年10月22日	M3.8	2.1						
宮古島近海(宮古島南方沖)								
年月日	M	発生 間隔(年)						
1966年07月11日	(mb5.8)							
1990年10月01日	M6.1(mb5.9)	24.2						
2009年08月05日	M6.5(mb5.9)	18.9						

括弧内はISCカタログによる実体波マグニチュード

## 謝辞

本調査には、独立行政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、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データ及を利用して気象庁が文部科学省と協力して求めた一元化震源を使わせていただきました。

## 参考文献

- 岡田正実、2009: 繰り返し地震および余震の確率予測, *地震* 2, **61**, 特集号, S143-S153.
- 溜渕功史, 2008: 宮古島近海の固有地震的地震活動, *沖縄管内気象研究会誌* **37**, 68-70.
- 溜渕功史・中村雅基・山田安之, 2011: 全国を対象とした客観的な相似地震の抽出, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, SSS026-P02.
- 溜渕功史・仰木淳平・神谷晃・上地清市・山田安之・中村雅基・前田憲二・岡田正美・高木康伸・石垣祐三, 2009: 沖縄地方の固有的な地震に関する研究, *沖縄管内気象研究会誌*, **38**, 42-44.
- 溜渕功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2010: 宮古島近海における固有地震活動, *地震* 2, **62**, 193-207.

気象研究所技術報告一覧表

- 第 1 号 バックグラウンド大気汚染の測定法の開発 (地球規模大気汚染特別研究班, 1978)  
Development of Monitoring Techniques for Global Background Air Pollution. (MRI Special Research Group on Global Atmospheric Pollution, 1978)
- 第 2 号 主要活火山の地殻変動並びに地熱状態の調査研究 (地震火山研究部, 1979)  
Investigation of Ground Movement and Geothermal State of Main Active Volcanoes in Japan. (Seismology and Volcanology Research Division, 1979)
- 第 3 号 筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設 (花房龍男, 藤谷徳之助, 伴野登, 魚津博, 1979)  
On the Meteorological Tower and Its Observational System at Tsukuba Science City. (T. Hanafusa, T. Fujitani, N. Banno, and H. Uozu, 1979)
- 第 4 号 海底地震常時観測システムの開発 (地震火山研究部, 1980)  
Permanent Ocean—Bottom Seismograph Observation System. (Seismology and Volcanology Research Division, 1980)
- 第 5 号 本州南方海域水温図—400m (又は 500m) 深と 1,000m 深— (1934—1943 年及び 1954—1980 年) (海洋研究部, 1981)  
Horizontal Distribution of Temperature in 400m (or 500m) and 1,000m Depth in Sea South of Honshu, Japan and Western—North Pacific Ocean from 1934 to 1943 and from 1954 to 1980. (Oceanographical Research Division, 1981)
- 第 6 号 成層圏オゾンの破壊につながる大気成分及び紫外日射の観測 (高層物理研究部, 1982)  
Observations of the Atmospheric Constituents Related to the Stratospheric ozone Depletion and the Ultraviolet Radiation. (Upper Atmosphere Physics Research Division, 1982)
- 第 7 号 83 型強震計の開発 (地震火山研究部, 1983)  
Strong—Motion Seismograph Model 83 for the Japan Meteorological Agency Network. (Seismology and Volcanology Research Division, 1983)
- 第 8 号 大気中における雪片の融解現象に関する研究 (物理気象研究部, 1984)  
The Study of Melting of Snowflakes in the Atmosphere. (Physical Meteorology Research Division, 1984)
- 第 9 号 御前崎南方沖における海底水圧観測 (地震火山研究部・海洋研究部, 1984)  
Bottom Pressure Observation South off Omaezaki, Central Honsyu. (Seismology and Volcanology Research Division and Oceanographical Research Division, 1984)
- 第 10 号 日本付近の低気圧の統計 (予報研究部, 1984)  
Statistics on Cyclones around Japan. (Forecast Research Division, 1984)
- 第 11 号 局地風と大気汚染質の輸送に関する研究 (応用気象研究部, 1984)  
Observations and Numerical Experiments on Local Circulation and Medium—Range Transport of Air Pollutions. (Applied Meteorology Research Division, 1984)
- 第 12 号 火山活動監視手法に関する研究 (地震火山研究部, 1984)  
Investigation on the Techniques for Volcanic Activity Surveillance. (Seismology and Volcanology Research Division, 1984)
- 第 13 号 気象研究所大気大循環モデル— I (MRI・GCM— I) (予報研究部, 1984)  
A Description of the MRI Atmospheric General Circulation Model (The MRI・GCM— I). (Forecast Research Division, 1984)
- 第 14 号 台風の構造の変化と移動に関する研究—台風 7916 の一生— (台風研究部, 1985)  
A Study on the Changes of the Three - Dimensional Structure and the Movement Speed of the Typhoon through its Life Time. (Typhoon Research Division, 1985)
- 第 15 号 波浪推算モデル MRI と MRI— II の相互比較研究—計算結果図集— (海洋気象研究部, 1985)  
An Intercomparison Study between the Wave Models MRI and MRI— II — A Compilation of Results — (Oceanographical Research Division, 1985)
- 第 16 号 地震予知に関する実験的及び理論的研究 (地震火山研究部, 1985)  
Study on Earthquake Prediction by Geophysical Method. (Seismology and Volcanology Research Division, 1985)
- 第 17 号 北半球地上月平均気温偏差図 (予報研究部, 1986)  
Maps of Monthly Mean Surface Temperature Anomalies over the Northern Hemisphere for 1891—1981. (Forecast Research Division, 1986)
- 第 18 号 中層大気の研究 (高層物理研究部, 気象衛星研究部, 予報研究部, 地磁気観測所, 1986)  
Studies of the Middle Atmosphere. (Upper Atmosphere Physics Research Division, Meteorological Satellite Research Division, Forecast Research Division, MRI and the Magnetic Observatory, 1986)
- 第 19 号 ドップラーレーダによる気象・海象の研究 (気象衛星研究部・台風研究部・予報研究部・応用気象研究部・海洋研究部, 1986)  
Studies on Meteorological and Sea Surface Phenomena by Doppler Radar. (Meteorological Satellite Research Division, Typhoon Research Division, Forecast Research Division, Applied Meteorology Research Division, and Oceanographical Research Division, 1986)
- 第 20 号 気象研究所対流圏大気大循環モデル (MRI・GCM— I) による 12 年間分の積分 (予報研究部, 1986)  
Mean Statistics of the Tropospheric MRI・GCM— I based on 12—year Integration. (Forecast Research Division, 1986)
- 第 21 号 宇宙線中間子強度 1983—1986 (高層物理研究部, 1987)  
Multi—Directional Cosmic Ray Meson Intensity 1983—1986. (Upper Atmosphere Physics Research Division, 1987)

- 第 22 号 静止気象衛星「ひまわり」画像の噴火噴煙データに基づく噴火活動の解析に関する研究 (地震火山研究部, 1987)  
Study on Analysis of Volcanic Eruptions based on Eruption Cloud Image Data obtained by the Geostationary Meteorological satellite (GMS). (Seismology and Volcanology Research Division, 1987)
- 第 23 号 オホーツク海海洋気候図 (篠原吉雄, 四竈信行, 1988)  
Marine Climatological Atlas of the sea of Okhotsk. (Y. Shinohara and N. Shikama, 1988)
- 第 24 号 海洋大循環モデルを用いた風の応力異常に対する太平洋の応答実験 (海洋研究部, 1989)  
Response Experiment of Pacific Ocean to Anomalous Wind Stress with Ocean General Circulation Model. (Oceanographical Research Division, 1989)
- 第 25 号 太平洋における海洋諸要素の季節平均分布 (海洋研究部, 1989)  
Seasonal Mean Distribution of Sea Properties in the Pacific. (Oceanographical Research Division, 1989)
- 第 26 号 地震前兆現象のデータベース (地震火山研究部, 1990)  
Database of Earthquake Precursors. (Seismology and Volcanology Research Division, 1990)
- 第 27 号 沖縄地方における梅雨期の降水システムの特性 (台風研究部, 1991)  
Characteristics of Precipitation Systems During the Baiu Season in the Okinawa Area. (Typhoon Research Division, 1991)
- 第 28 号 気象研究所・予報研究部で開発された非静水圧モデル (猪川元興・斉藤和雄, 1991)  
Description of a Nonhydrostatic Model Developed at the Forecast Research Department of the MRI. (M. Ikawa and K. Saito, 1991)
- 第 29 号 雲の放射過程に関する総合的研究 (気候研究部・物理気象研究部・応用気象研究部・気象衛星・観測システム研究部・台風研究部, 1992)  
A Synthetic Study on Cloud-Radiation Processes. (Climate Research Department, Physical Meteorology Research Department, Applied Meteorology Research Department, Meteorological Satellite and Observation System Research Department, and Typhoon Research Department, 1992)
- 第 30 号 大気と海洋・地表とのエネルギー交換過程に関する研究 (三上正男・遠藤昌宏・新野 宏・山崎孝治, 1992)  
Studies of Energy Exchange Processes between the Ocean-Ground Surface and Atmosphere. (M. Mikami, M. Endoh, H. Niino, and K. Yamazaki, 1992)
- 第 31 号 降水日の出現頻度からみた日本の季節推移-30 年間の日降水量資料に基づく統計- (秋山孝子, 1993)  
Seasonal Transition in Japan, as Revealed by Appearance Frequency of Precipitating-Days. - Statistics of Daily Precipitation Data During 30 Years- (T. Akiyama, 1993)
- 第 32 号 直下型地震予知に関する観測的研究 (地震火山研究部, 1994)  
Observational Study on the Prediction of Disastrous Intraplate Earthquakes. (Seismology and Volcanology Research Department, 1994)
- 第 33 号 各種気象観測機器による比較観測 (気象衛星・観測システム研究部, 1994)  
Intercomparisons of Meteorological Observation Instruments. (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, 1994)
- 第 34 号 硫黄酸化物の長距離輸送モデルと東アジア地域への適用 (応用気象研究部, 1995)  
The Long-Range Transport Model of Sulfur Oxides and Its Application to the East Asian Region. (Applied Meteorology Research Department, 1995)
- 第 35 号 ウインドプロファイラーによる気象の観測法の研究 (気象衛星・観測システム研究部, 1995)  
Studies on Wind Profiler Techniques for the Measurements of Winds. (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, 1995)
- 第 36 号 降水・落下塵中の人工放射性核種の分析法及びその地球化学的研究 (地球化学研究部, 1996)  
Geochemical Studies and Analytical Methods of Anthropogenic Radionuclides in Fallout Samples. (Geochemical Research Department, 1996)
- 第 37 号 大気と海洋の地球化学的研究 (1995 年及び 1996 年) (地球化学研究部, 1998)  
Geochemical Study of the Atmosphere and Ocean in 1995 and 1996. (Geochemical Research Department, 1998)
- 第 38 号 鉛直 2 次元非線形問題 (金久博忠, 1999)  
Vertically 2-dimensional Nonlinear Problem (H. Kanehisa, 1999)
- 第 39 号 客観的予報技術の研究 (予報研究部, 2000)  
Study on the Objective Forecasting Techniques (Forecast Research Department, 2000)
- 第 40 号 南関東地域における応力場と地震活動予測に関する研究 (地震火山研究部, 2000)  
Study on Stress Field and Forecast of Seismic Activity in the Kanto Region (Seismology and Volcanology Research Department, 2000)
- 第 41 号 電量滴定法による海水中の全炭酸濃度の高精度分析および大気中の二酸化炭素と海水中の全炭酸の放射性炭素同位体比の測定 (石井雅男・吉川久幸・松枝秀和, 2000)  
Coulometric Precise Analysis of Total Inorganic Carbon in Seawater and Measurements of Radiocarbon for the Carbon Dioxide in the Atmosphere and for the Total Inorganic Carbon in Seawater (I. Masao, H. Y. Inoue and H. Matsueda, 2000)
- 第 42 号 気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル (斉藤和雄・加藤輝之・永戸久喜・室井ちあし, 2001)  
Documentation of the Meteorological Research Institute / Numerical Prediction Division Unified Nonhydrostatic Model (Kazuo Saito, Teruyuki Kato, Hisaki Eito and Chiashi Muroi, 2001)
- 第 43 号 大気および海水中のクロロフルオロカーボン類の精密測定と気象研究所クロロフルオロカーボン類標準ガスの確立 (時枝隆之・井上(吉川)久幸, 2004)  
Precise measurements of atmospheric and oceanic chlorofluorocarbons and MRI chlorofluorocarbons calibration scale

- (Takayuki Tokieda and Hisayuki Y. Inoue, 2004)
- 第 44 号 PostScript コードを生成する描画ツール"PLOTIPS"マニュアル (加藤輝之, 2004)  
Documentation of "PLOTIPS": Outputting Tools for PostScript Code (Teruyuki Kato, 2004)
- 第 45 号 気象庁及び気象研究所における二酸化炭素の長期観測に使用された標準ガスのスケールとその安定性の再評価に関する調査・研究 (松枝秀和・須田一人・西岡佐喜子・平野礼朗・澤 庸介・坪井一寛・堤 之智・神谷ひとみ・根本和宏・長井秀樹・吉田雅司・岩野園城・山本 治・森下秀昭・鎌田匡俊・和田 晃, 2004)  
Re-evaluation for scale and stability of CO<sub>2</sub> standard gases used as long-term observations at the Japan Meteorological Agency and the Meteorological Research Institute (Hidekazu Matsueda, Kazuto Suda, Sakiko Nishioka, Toshirou Hirano, Yousuke, Sawa, Kazuhiro Tuboi, Tsutumi, Hitomi Kamiya, Kazuhiro Nemoto, Hideki Nagai, Masashi Yoshida, Sonoki Iwano, Osamu Yamamoto, Hideaki Morishita, Kamata, Akira Wada, 2004)
- 第 46 号 地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究 (地震火山研究部, 2005)  
A Study to Improve Accuracy of Forecasting the Tokai Earthquake by Modeling the Generation Processes (Seismology and Volcanology Research Department, 2005)
- 第 47 号 気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) 解説 (海洋研究部, 2005)  
Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Manual (Oceanographical Research Department, 2005)
- 第 48 号 日本海降雪雲の降水機構と人工調節の可能性に関する研究 (物理気象研究部・予報研究部, 2005)  
Study of Precipitation Mechanisms in Snow Clouds over the Sea of Japan and Feasibility of Their Modification by Seeding (Physical Meteorology Research Department, Forecast Research Department, 2005)
- 第 49 号 2004 年日本上陸台風の概要と環境場 (台風研究部, 2006)  
Summary of Landfalling Typhoons in Japan, 2004 (Typhoon Research Department, 2006)
- 第 50 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2003 年国際共同実験報告 (青山道夫, 2006)  
2003 Intercomparison Exercise for Reference Material for Nutrients in Seawater in a Seawater Matrix (Michio Aoyama, 2006)
- 第 51 号 大気および海水中の超微量六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)の測定手法の高度化と SF<sub>6</sub> 標準ガスの長期安定性の評価 (時枝隆之、石井雅男、斉藤 秀、緑川 貴, 2007)  
Highly developed precise analysis of atmospheric and oceanic sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) and evaluation of SF<sub>6</sub> standard gas stability (Takayuki Tokieda, Masao Ishii, Shu Saito and Takashi Midorikawa, 2007)
- 第 52 号 地球温暖化による東北地方の気候変化に関する研究 (仙台管区气象台、環境・応用気象研究部, 2008)  
Study of Climate Change over Tohoku District due to Global Warming (Sendai District Meteorological Observatory, Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department, 2008)
- 第 53 号 火山活動評価手法の開発研究 (地震火山研究部, 2008)  
Studies on Evaluation Method of Volcanic Activity (Seismology and Volcanology Research Department, 2008)
- 第 54 号 日本における活性炭冷却捕集およびガスクロ分離による気体計数システムによる <sup>85</sup>Kr の測定システムの構築および 1995 年から 2006 年の測定結果 (青山道夫, 藤井憲治, 廣瀬勝己, 五十嵐康人, 磯貝啓介, 新田 済, Hartmut Sartorius, Clemens Schlosser, Wolfgang Weiss, 2008)  
Establishment of a cold charcoal trap-gas chromatography-gas counting system for <sup>85</sup>Kr measurements in Japan and results from 1995 to 2006 (Michio Aoyama, Kenji Fujii, Katsumi Hirose, Yasuhito Igarashi, Keisuke Isogai, Wataru Nitta, Hartmut Sartorius, Clemens Schlosser, Wolfgang Weiss, 2008)
- 第 55 号 長期係留による 4 種類の流速計観測結果の比較 (中野俊也, 石崎 廣, 四竈信行, 2008)  
Comparison of Data from Four Current Meters Obtained by Long-Term Deep-Sea Moorings (Toshiya Nakano, Hiroshi Ishizaki and Nobuyuki Shikama, 2008)
- 第 56 号 CMIP3 マルチモデルアンサンブル平均を利用した将来の海面水温・海水分布の推定 (水田 亮, 足立恭将, 行本誠史, 楠 昌司, 2008)  
Estimation of the Future Distribution of Sea Surface Temperature and Sea Ice Using the CMIP3 Multi-model Ensemble Mean (Ryo Mizuta, Yukimasa Adachi, Seiji Yukimoto and Shoji Kusunoki, 2008)
- 第 57 号 閉流路中のフローセルを用いた分光光度法自動分析装置による海水の高精度 pH<sub>T</sub> 測定 (斉藤 秀, 石井雅男, 緑川 貴, 井上 (吉川) 久幸, 2008)  
Precise Spectrophotometric Measurement of Seawater pH<sub>T</sub> with an Automated Apparatus using a Flow Cell in a Closed Circuit (Shu Saito, Masao Ishii, Takashi Midorikawa and Hisayuki Y. Inoue, 2008)
- 第 58 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2006 年国際共同実験報告 (青山道夫, J. Barwell-Clarke, S. Becker, M. Blum, Braga E.S., S. C. Coverly, E. Czobik, I. Dahllöf, M. Dai, G. O'Donnell, C. Engelke, Gwo-Ching Gong, Gi-Hoon Hong, D. J. Hydes, Ming-Ming Jin, 葛西広海, R. Kerouel, 清本容子, M. Knockaert, N. Kress, K. A. Kroglund, 熊谷正光, S. Leterme, Yarong Li, 増田真次, 宮尾 孝, T. Moutin, 村田昌彦, 永井直樹, G. Nausch, A. Nybakk, M. K. Ngirchechol, 小川浩史, J. van Ooijen, 太田秀和, J. Pan, C. Payne, O. Pierre-Duplessix, M. Pujo-Pay, T. Raabe, 齊藤一浩, 佐藤憲一郎, C. Schmidt, M. Schuett, T. M. Shammon, J. Sun, T. Tanhua, L. White, E.M.S. Woodward, P. Worsfold, P. Yeats, 芳村 毅, A. Youénou, Jia-Zhong Zhang, 2008)  
2006 Inter-laboratory Comparison Study for Reference Material for Nutrients in Seawater (M. Aoyama, J. Barwell-Clarke, S. Becker, M. Blum, Braga E. S., S. C. Coverly, E. Czobik, I. Dahllöf, M. H. Dai, G. O. Donnell, C. Engelke, G. C. Gong, Gi-Hoon Hong, D. J. Hydes, M. M. Jin, H. Kasai, R. Kerouel, Y. Kiyomono, M. Knockaert, N. Kress, K. A. Kroglund, M. Kumagai, S. Leterme, Yarong Li, S. Masuda, T. Miyao, T. Moutin, A. Murata, N. Nagai, G. Nausch, M. K. Ngirchechol, A. Nybakk, H. Ogawa, J. van Ooijen, H. Ota, J. M. Pan, C. Payne, O. Pierre-Duplessix, M. Pujo-Pay, T. Raabe, K. Saito, K. Sato, C. Schmidt, M. Schuett, T. M. Shammon, J. Sun, T. Tanhua, L. White, E.M.S. Woodward, P. Worsfold, P. Yeats, T.

- Yoshimura, A. Youéno, J. Z. Zhang, 2008)
- 第 59 号 気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)第 3 版解説(辻野博之, 本井達夫, 石川一郎, 平原幹俊, 中野英之, 山中吾郎, 安田珠幾, 石崎廣(気象研究所海洋研究部), 2010)  
Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Version 3 (Hiroyuki Tsujino, Tatsuo Motoi, Ichiro Ishikawa, Mikitoshi Hirabara, Hideyuki Nakano, Goro Yamanaka, Tamaki Yasuda, and Hiroshi Ishizaki (Oceanographic Research Department), 2010)
- 第 60 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2008 年国際共同実験報告(青山道夫, Carol Anstey, Janet Barwell-Clarke, François Baurand, Susan Becker, Marguerite Blum, Stephen C. Coverly, Edward Czobik, Florence D' amico, Ingela Dahllöf, Minhan Dai, Judy Dobson, Magali Duval, Clemens Engelke, Gwo-Ching Gong, Olivier Grosso, 平山篤史, 井上博敬, 石田雄三, David J. Hydes, 葛西広海, Roger Kerouel, Marc Knockaert, Nurit Kress, Katherine A. Kroglund, 熊谷正光, Sophie C. Leterme, Claire Mahaffey, 光田均, Pascal Morin, Thierry Moutin, Dominique Munaron, 村田昌彦, Günther Nausch, 小川浩史, Jan van Ooijen, Jianming Pan, Georges Paradis, Chris Payne, Olivier Pierre-Duplessix, Gary Prove, Patrick Raimbault, Malcolm Rose, 齊藤一浩, 齊藤宏明, 佐藤憲一郎, Cristopher Schmidt, Monika Schütt, Theresa M. Shammon, Solveig Olafsdottir, Jun Sun, Toste Tanhua, Sieglinde Weigelt-Krenz, Linda White, E. Malcolm. S. Woodward, Paul Worsfold, 芳村毅, Agnès Youéno, Jia-Zhong Zhang, 2010)  
2008 Inter-laboratory Comparison Study of a Reference Material for Nutrients in Seawater(青山道夫, Carol Anstey, Janet Barwell-Clarke, François Baurand, Susan Becker, Marguerite Blum, Stephen C. Coverly, Edward Czobik, Florence D' amico, Ingela Dahllöf, Minhan Dai, Judy Dobson, Magali Duval, Clemens Engelke, Gwo-Ching Gong, Olivier Grosso, 平山篤史, 井上博敬, 石田雄三, David J. Hydes, 葛西広海, Roger Kerouel, Marc Knockaert, Nurit Kress, Katherine A. Kroglund, 熊谷正光, Sophie C. Leterme, Claire Mahaffey, 光田均, Pascal Morin, Thierry Moutin, Dominique Munaron, 村田昌彦, Günther Nausch, 小川浩史, Jan van Ooijen, Jianming Pan, Georges Paradis, Chris Payne, Olivier Pierre-Duplessix, Gary Prove, Patrick Raimbault, Malcolm Rose, 齊藤一浩, 齊藤宏明, 佐藤憲一郎, Cristopher Schmidt, Monika Schütt, Theresa M. Shammon, Solveig Olafsdottir, Jun Sun, Toste Tanhua, Sieglinde Weigelt-Krenz, Linda White, E. Malcolm. S. Woodward, Paul Worsfold, 芳村毅, Agnès Youéno, Jia-Zhong Zhang, 2010)
- 第 61 号 強雨をもたらす線状降水帯の形成機構等の解明及び降水強度・移動速度の予測に関する研究(大阪管区気象台・彦根地方気象台・京都地方気象台・奈良地方気象台・和歌山地方気象台・神戸海洋気象台・松江地方気象台・鳥取地方気象台・舞鶴海洋気象台・広島地方気象台・徳島地方気象台・予報研究部, 2010)  
Studies on formation process of line-shaped rainfall systems and predictability of rainfall intensity and moving speed (Osaka District Meteorological Observatory, Hikone Local Meteorological Observatory, Kyoto Local Meteorological Observatory, Nara Local Meteorological Observatory, Wakayama Local Meteorological Observatory, Kobe Marine Observatory, Matsue Local Meteorological Observatory, Tottori Local Meteorological Observatory, Maizuru Marine Observatory, Hiroshima Local Meteorological Observatory, Tokushima Local Meteorological Observatory AND Forecast Research Department, 2010)
- 第 62 号 WWRP 北京オリンピック 2008 予報実証/研究開発プロジェクト(齊藤和雄, 國井勝, 原昌弘, 瀬古弘, 原旅人, 山口宗彦, 三好建正, 黄偉健, 2010)  
WWRP Beijing Olympics 2008 Forecast Demonstration/Research and Development Project (B08FDP/RDP) (Kazuo Saito, Masaru Kunii, Masahiro Hara, Hiromu Seko, Tabito Hara, Munehiko Yamaguchi, Takemasa Miyoshi and Wai-kin Wong, 2010)
- 第 63 号 東海地震の予測精度向上及び東南海・南海地震の発生準備過程の研究(地震火山研究部, 2011)  
Improvement in prediction accuracy for the Tokai earthquake and research of the preparation process of the Tonankai and the Nankai earthquakes (Seismology and Volcanology Research Department, 2011)
- 第 64 号 気象研究所地球システムモデル第 1 版 (MRI-ESM1) —モデルの記述—(行本誠史, 吉村裕正, 保坂征宏, 坂見智法, 辻野博之, 平原幹俊, 田中泰宙, 出牛真, 小畑淳, 中野英之, 足立恭将, 新藤永樹, 鯨将吉, 尾瀬智昭, 鬼頭昭雄, 2011)  
Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) — Model Description — (Seiji Yukimoto, Hiromasa Yoshimura, Masahiro Hosaka, Tomonori Sakami, Hiroyuki Tsujino, Mikitoshi Hirabara, Taichu Y. Tanaka, Makoto Deushi, Atsushi Obata, Hideyuki Nakano, Yukimasa Adachi, Eiki Shindo, Shoukichi Yabu, Tomoaki Ose and Akio Kitoh, 2011)
- 第 65 号 東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究(齊藤和雄, 黒田徹, 林修吾, 瀬古弘, 國井勝, 小司禎教, 上野充, 川畑拓矢, 余田成男, 大塚成徳, Nurjanna Joko Trilaksono, 許智揚, 古関俊也, Le Duc, Kieu Thi Xin, 黄偉健, Krushna Chandra Gouda, 2011)  
International Research for Prevention and Mitigation of Meteorological Disasters in Southeast Asia (Kazuo Saito, Tohru Kuroda, Syugo Hayashi, Hiromu Seko, Masaru Kunii, Yoshinori Shoji, Mitsuru Ueno, Takuya Kawabata, Shigeo Yoden, Shigenori Otsuka, Nurjanna Joko Trilaksono, Tieh-Yong Koh, Syunya Koseki, Le Duc, Kieu Thi Xin, Wai-Kin Wong and Krushna Chandra Gouda, 2011)
- 第 66 号 太平洋における大気-海洋間二酸化炭素フラックス推定手法(杉本裕之, 平石直孝, 石井雅男, 緑川貴, 2012)  
A method for estimating the sea-air CO<sub>2</sub> flux in the Pacific Ocean (Hiroyuki Sugimoto, Naotaka Hiraishi, Masao Ishii and Takashi Midorikawa, 2012)
- 第 67 号 太平洋における大気-海洋間二酸化炭素フラックス推定手法(坪井一寛, 松枝秀和, 澤庸介, 丹羽洋介, 中村雅道, 久保池大輔, 岩坪昇平, 齊藤和幸, 花宮義和, 辻健太郎, 大森英裕, 西秀紘, 2012)  
Development of a flask sampling and its high-precision measuring system for greenhouse gases observations using a cargo aircraft C-130H (Kazuhiro Tsuboi, Hidekazu Matsueda, Yousuke Sawa, Yosuke Niwa Masamichi Nakamura, Daisuke

- 第 68 号 Kuboike, Shohei Iwatsubo, Kazuyuki Saito Yoshikazu Hanamiya, Kentaro Tsuji, Hidehiro Ohmori, Hidehiro Nishi, 2012)  
国際シンポジウム 電子顕微鏡を用いたエアロゾル研究 (五十嵐康人, Weijun Li, Peter.R.Buseck, 岡田菊雄, 張代洲, 足立光司, 藤谷雄二, 嶋寺光, 五藤大輔, 三井千珠, 野島雅, 大島長, 松井仁志, 石元裕史, 松木篤, Pradeep Khatri, 中山智喜, 向井将平, 大石乾詞, 間山憲仁, 坂本哲夫, 直江寛明, 財前祐二, 塩流水洋樹, 田中泰宙, 梶野瑞王, 2013)  
International Symposium on Aerosol Studies Explored by Electron Microscopy (Yasuhito Igarashi, Weijun Li, Peter. R. Buseck, Kikuo Okada, Daizhou Zhang, Kouji Adachi, Yuji Fujitani, Hikari Shimadera, Daisuke Goto, Chizu Mitsui, Masashi Nojima, Naga Oshima, Hitoshi Matsui, Hiroshi Ishimoto, Atsushi Matsuki, Pradeep Khatri, Tomoki Nakayama, Shohei Mukai, Kenji Ohishi, Norihito Mayama, Tetsuo Sakamoto, Hiroaki Naoe, Yuji Zaizen, Hiroki Shiozuru, Taichu Y. Tanaka and Mizuo Kajino, 2013)
- 第 69 号 マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究 (地震火山研究部, 2013)  
Development of Quantitative Detection Techniques of Magma Activity and Improvement of Evaluation of Volcanic Activity Level (Seismology and Volcanology Research Department, MRI, 2013)
- 第 70 号 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による津波高の現地調査報告 (林豊, 前田憲二, 対馬弘晃, 岡田正實, 木村一洋, 岩切一宏, 2013)  
Reports on Field Surveys of Tsunami Heights from the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Yutaka Hayashi, Kenji Maeda, Hiroaki Tsushima, Masami Okada, Kazuhiro Kimura and Kazuhiro Iwakiri, 2013)
- 第 71 号 気候研究のための気象研究所アンサンブル予測システムの概要とその応用 (藪将吉, 水田亮, 吉村裕正, 黒田友二, 向川均, 2014)  
Meteorological Research Institute Ensemble Prediction System (MRI-EPS) for climate research - Outline and its applications - (Shoukichi Yabu, Ryo Mizuta, Hiromasa Yoshimura, Yuhji Kuroda, and Hitoshi Mukougawa, 2014)

# 気 象 研 究 所

1946 (昭和21) 年 設 立

所 長：瀬 上 哲 秀  
研究総務官：三 上 正 男  
研究調整官：中 村 誠 臣

予 報 研 究 部	部 長：理 博 齊 藤 和 雄
気 候 研 究 部	部 長：理 博 露 木 義
台 風 研 究 部	部 長：山 田 眞 吾
環 境・応 用 気 象 研 究 部	部 長：理 博 藤 部 文 昭
気 象 衛 星・観 測 シ ス テ ム 研 究 部	部 長：理 博 角 村 悟
地 震 火 山 研 究 部	部 長：理 博 横 田 崇
海 洋・地 球 化 学 研 究 部	部 長：工 博 蒲 地 政 文

## 気 象 研 究 所 技 術 報 告

編 集 委 員 長：齊 藤 和 雄

編 集 委 員：村 崎 万 代 石 井 正 好 和 田 章 義  
出 牛 真 酒 井 哲 青 木 重 樹  
中 野 英 之  
事 務 局：井 上 卓 高 橋 恵 美 子

気象研究所技術報告は、1978（昭和53）年の初刊以来、気象研究所が必要の都度発行する刊行物であり、気象研究所の研究計画に基づき実施した研究に関する手法、データ、結果等についてのまとめ、または、すでに公表した研究論文類をとりまとめ総合的報告としたものを掲載する。

本紙に掲載された報告の著作権は気象研究所に帰属する。本紙に掲載された報告を引用する場合は、出所を明示すれば気象研究所の許諾を必要としない。本紙に掲載された報告の全部又は一部を複製、転載、翻訳、あるいはその他に利用する場合は気象研究所の許諾を得なければならない。個人が研究、学習、教育に使用する場合は、出所を明示すれば気象研究所の許諾を必要としない。

気 象 研 究 所 技 術 報 告 ISSN 0386-4049  
第 72 号

平成 26 年 3 月 発 行

編 集 兼  
発 行 者

気 象 研 究 所

〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1  
TEL(029)853-8535

印 刷 者

朝日印刷株式会社 つくば支社  
〒305-8519 茨城県つくば市東2-11-15  
TEL(029)851-1188