

### 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は溜瀧・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。

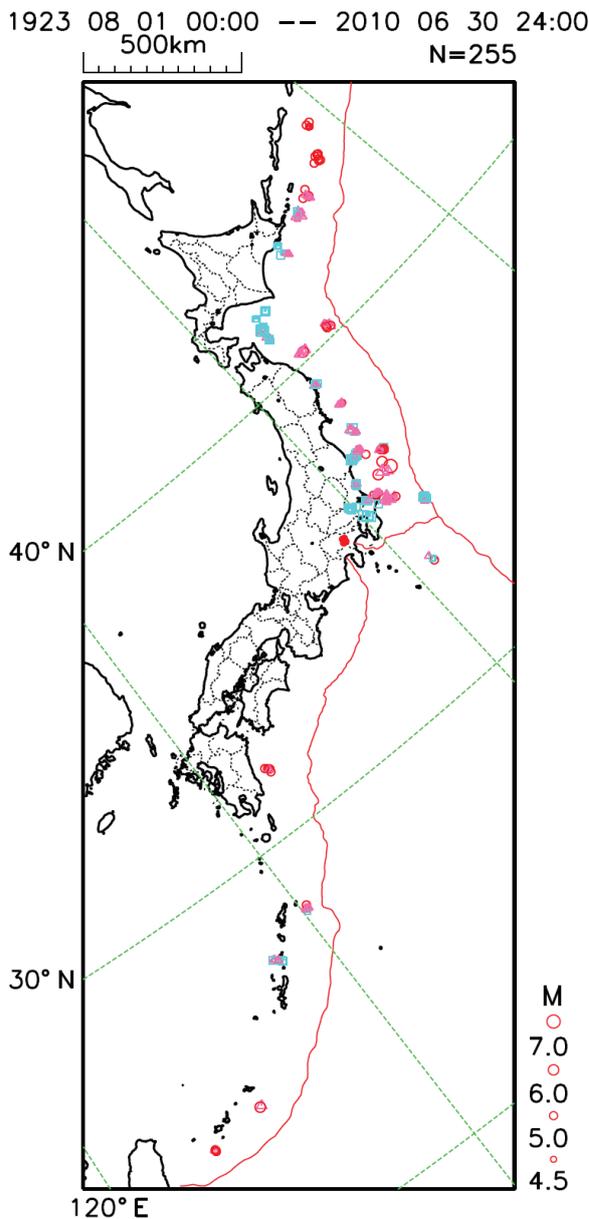


図 3.1 時間的規則性・空間的近接性・規模に基づき検出された相似地震候補。震央プロットの色は震源深さの違いを表す(赤:30kmまで、桃:50kmまで、水色:100kmまで)。

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

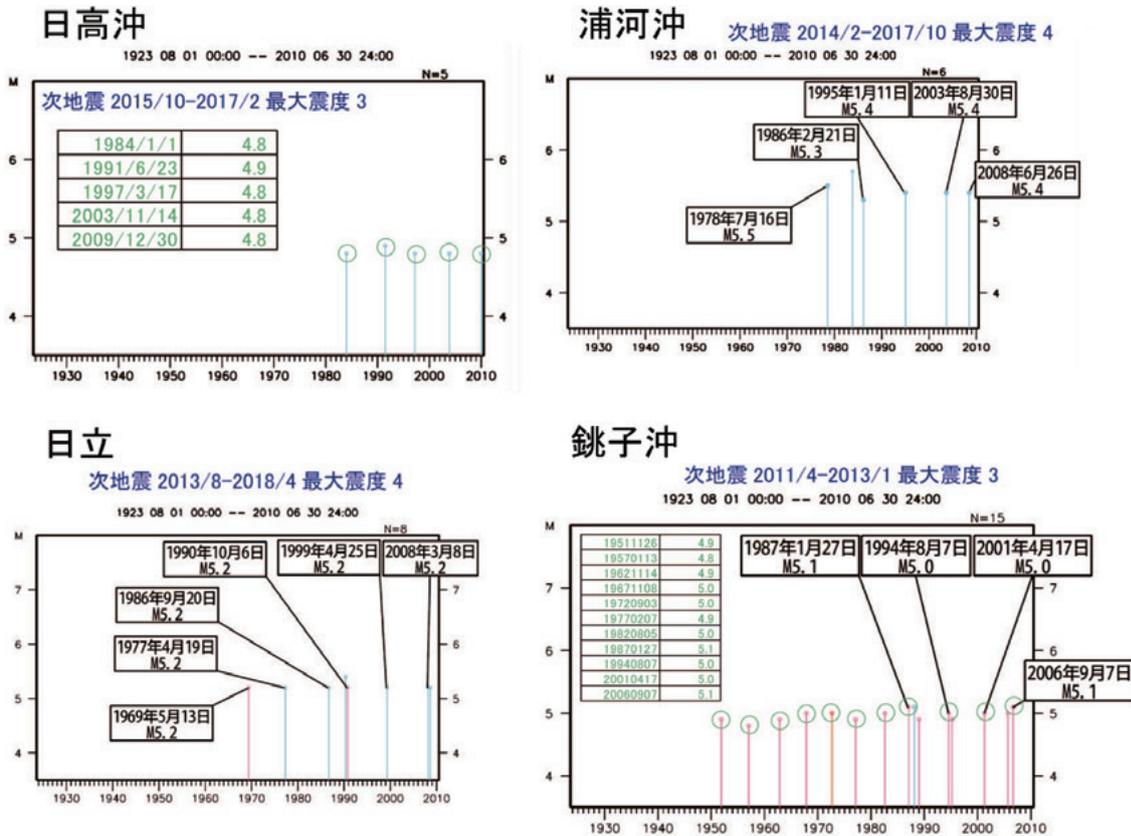


図 3.2 新たに見出された相似地震グループの発生時系列。相似地震とみられる地震には、吹き出しあるいは○をつけている。色は震源深さの違いを表す(図 3.1 と同様)

### 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。

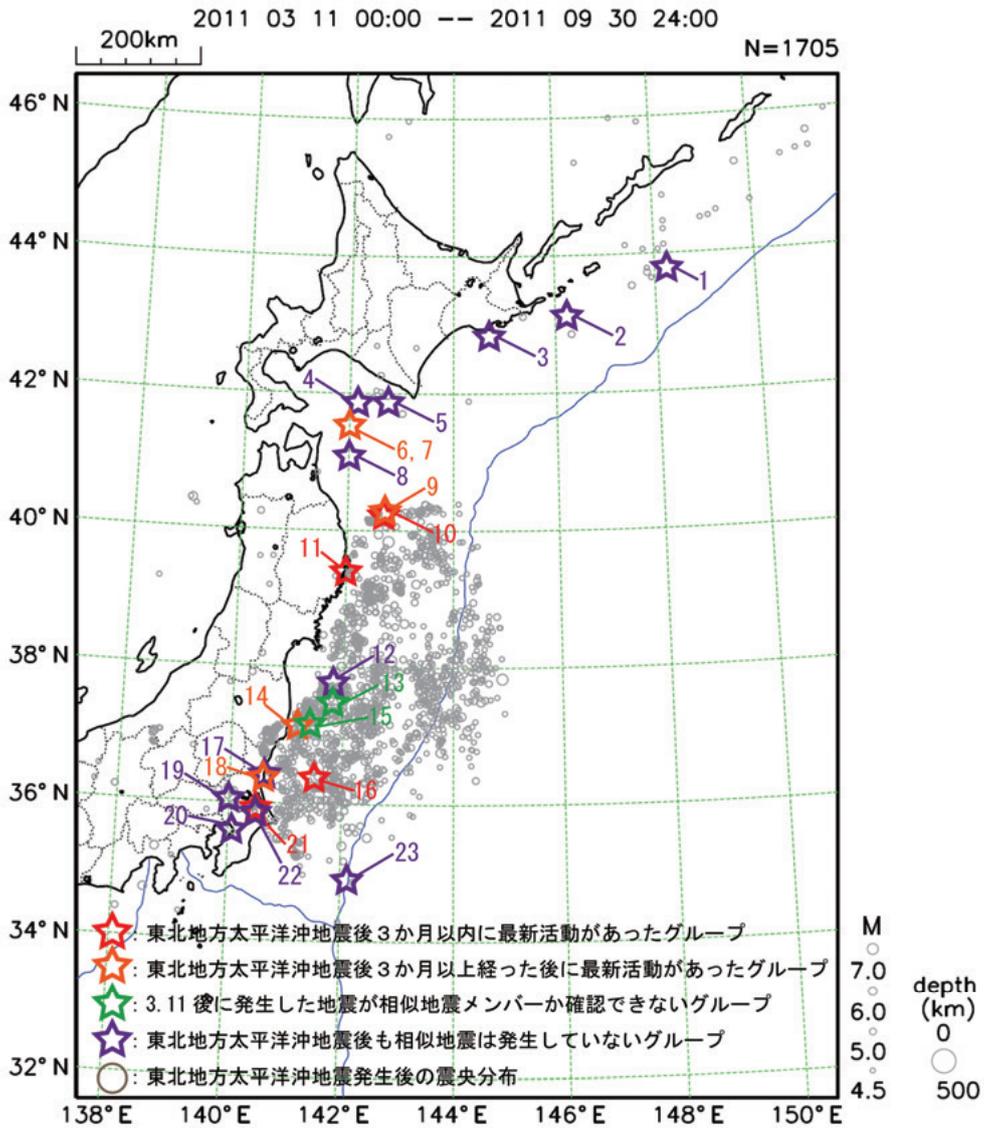
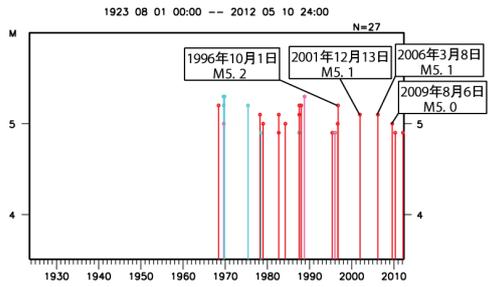


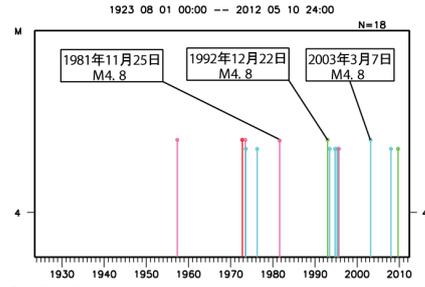
図 3.3 平成 23 年東北地方太平洋沖地震後の相似地震活動の分布図。各グループの番号は図 3.4 と共通である。

### 1. 択捉南方沖



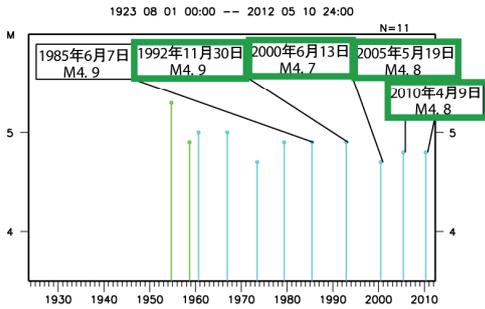
強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。3.11後に地震は発生していないと思われる。

### 2. 歯舞沖 M4.8

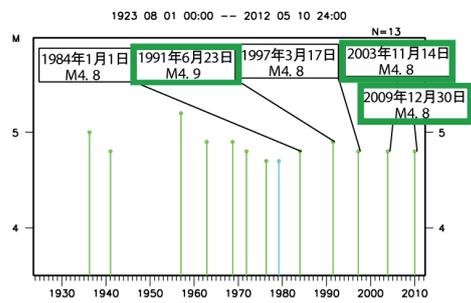


強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。3.11後に地震は発生していないと思われる。

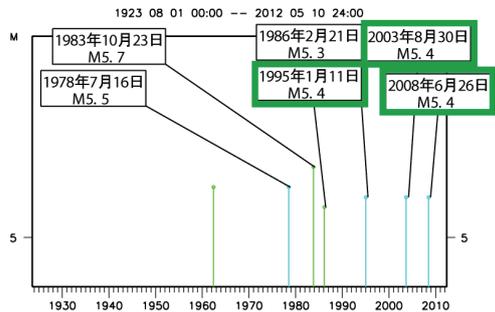
### 3. 厚岸沖



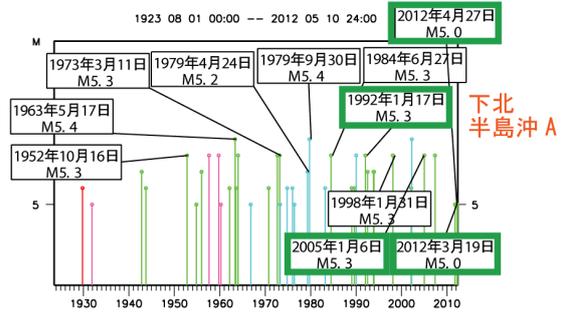
### 4. 日高沖



### 5. 浦河沖

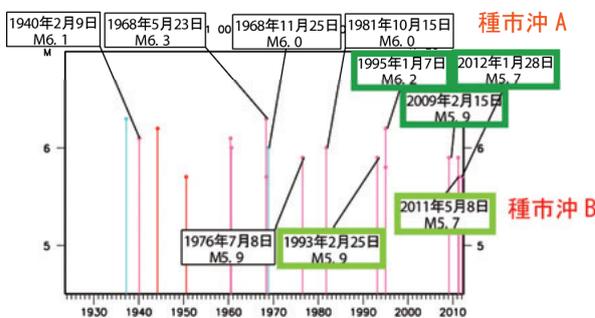


### 6. 7. 下北半島東方沖 A&B



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

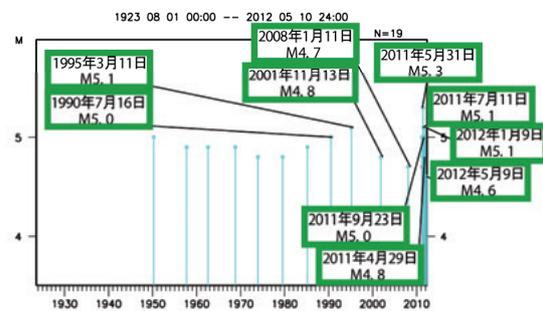
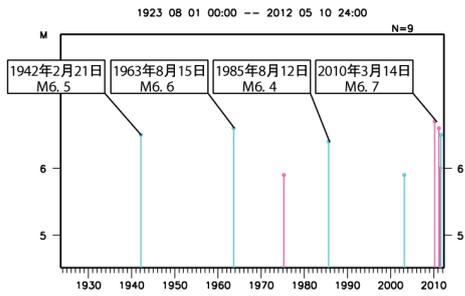


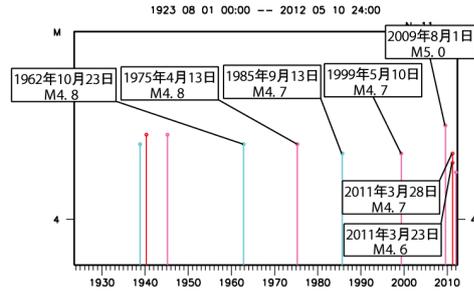
図3.4 平成23年東北地方太平洋沖地震前後の相似地震活動の時系列。黒枠吹き出しは震源カタログ中の地震のうち繰り返して発生しているとみられる地震、緑・黄緑枠はそれらのうちで地震波形の相似性が確認できた地震であることを表す。

## 12. 相馬沖



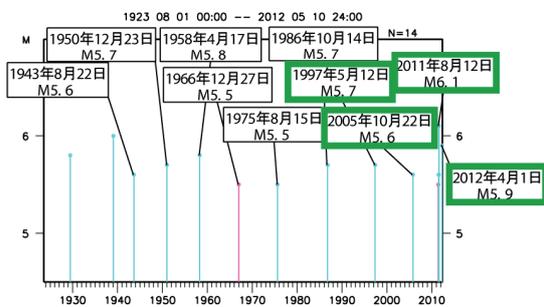
2011年に発生しているものはいずれも2010年のものと比べて相関&コヒーレンスの値が低く、固有地震グループのメンバーではない。

## 13. 南相馬沖

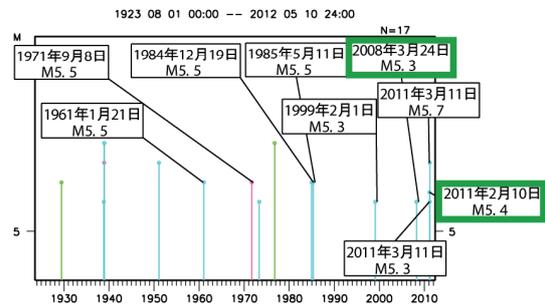


強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。3.11後に地震は発生している。

## 14. いわき沖

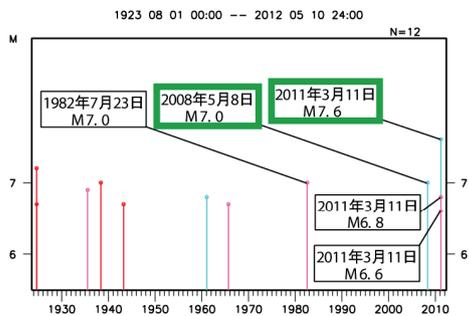


## 15. いわき東方沖



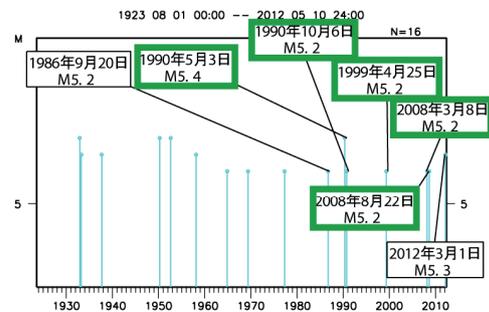
3.11後のイベントは強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。

## 16. 茨城沖



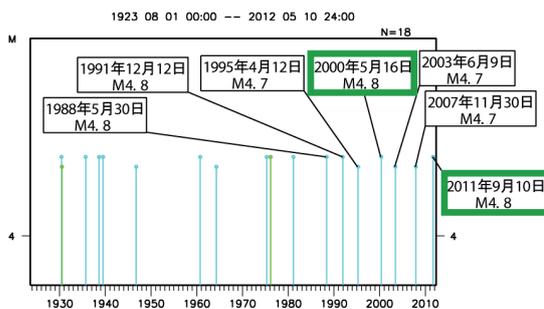
2011年3月11日 M7.6は、2008年イベントに比べて規模が大きい。波形はコヒーレンスのみ高い。2008年の震源域を含む広い領域の滑り？

## 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

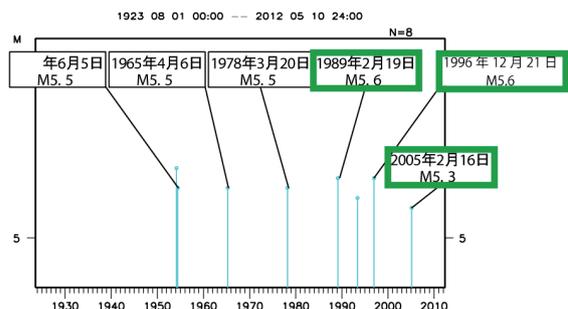
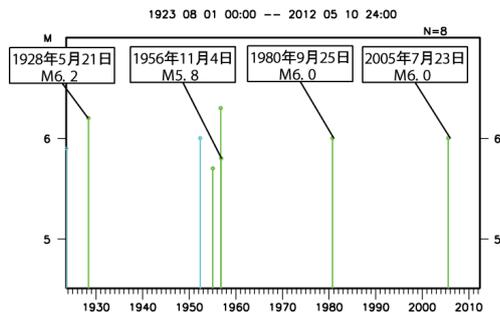


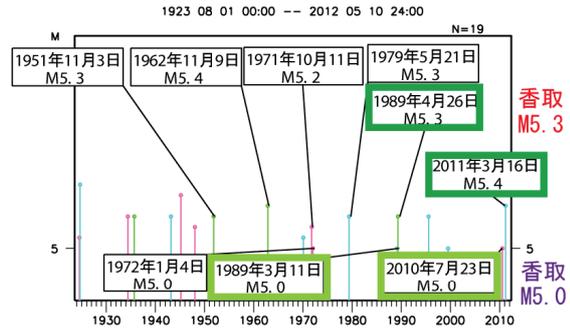
図 3.4 (続き)

## 20. 千葉県北西部



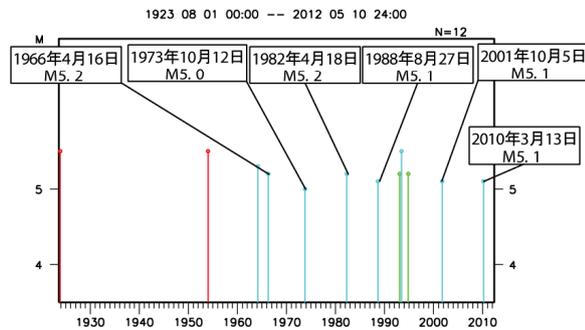
強震波形がなく、相関&コヒーレンスを計算することができない。

## 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.