

大地震後の地震活動の見通しに関する情報 のあり方

平成28年8月19日

地震調査研究推進本部
地震調査委員会

目次

1. はじめに	1
2. 従来の余震確率評価手法に基づく余震の見通しの発表履歴とその課題.....	2
(1) 発表履歴	2
(2) 課題.....	2
ア これまでの課題への対処.....	2
イ 熊本地震において明らかとなった課題.....	3
3. 新しい「大地震後の地震活動の見通しに関する情報」の考え方	3
(1) 概要	3
(2) 観測結果に応じた柔軟な運用	4
4. 情報の内容.....	4
(1) 情報発表基準	4
(2) 余震を含めた地震活動に関する呼びかけ（地震発生直後～）	4
ア 地震発生直後～1週間程度の呼びかけ.....	4
イ 発生場所等に応じた想定すべき地震の規模	5
ウ 地震回数の多寡の情報の付加.....	8
エ 最大震度5弱以上となる可能性が高い期間の情報の付加	8
オ 群発的な地震活動の場合の呼びかけ	9
(3) 活断層等に考慮した呼びかけ（地震発生直後～）	9
ア 周辺の活断層等への言及.....	9
イ 活断層等での地震活動状況への言及	9
ウ 地震動予測地図の提示	10
エ 地震調査委員会による評価を踏まえた呼びかけ	10
(4) より大きな地震への注意喚起の付加（b値が安定して求まる頃～）	10
(5) 余震確率の評価手法に基づいた数値的見通しの付加（1週間後～）	11
ア Gutenberg・Richterの式と大森・宇津公式の組み合わせ.....	11
イ ETASモデルによる地震発生時系列の推定及び余震確率の推定	14
ウ 情報に使用するモデル	15
エ 余震確率を用いた防災上の呼びかけ	16
(6) 情報発表終了時の呼びかけ	16
(7) 余震による被害の拡大が懸念されない場合等.....	17
(8) 地震活動状況に変化があった場合.....	17
ア 当初の大きな地震よりもさらに大きな地震が発生した場合.....	18
イ 当初の地震活動域から近接した場所で大きな地震が発生した場合	18

(9) 防災上の呼びかけにおける注意点.....	18
ア 震度で呼びかけ	18
イ 「地震」という言葉を使用	18
ウ 震源位置と揺れの大きさ.....	19
5. 大地震後の地震活動の見通しに関する情報を利用する上での留意事項...	19
6. 今後に向けて	19
参考文献	22
参考資料	26
図表集.....	29
別添	55

1. はじめに

我が国のような地震国においては、地震の発生予測が、近代的な科学技術を取り入れた明治以降から現在まで、変わらず求められ続けてきている。現在の科学技術では、地震の直前予知は困難であるものの、これまで蓄積されてきた地震学の知見のうち、発生した大地震の余震活動については、確立された経験式を用いて余震確率を計算することはできる。これらの地震学の知見を防災上の呼びかけに生かしていくことは、有用であると考えられる。そこで、科学的に実施可能なことの一つとして、地震調査研究推進本部地震調査委員会（以下「地震調査委員会」という。）発足の3年後の平成10年に「余震の確率評価手法について」（地震調査委員会，1998）において余震確率評価手法を取りまとめた。

しかし、平成28年（2016年）熊本地震（以下「熊本地震」という。）においては、4月14日にマグニチュード（M）6.5の地震が日奈久断層帯で発生し、16日に近接する布田川断層帯を主な破壊域としたM7.3の地震が発生し、時間経過とともに当初の地震活動域が大きく拡大したことから、本震－余震型（一連の地震活動において、最初に発生した地震が最大規模である地震発生様式）の地震活動のみを対象とする余震確率評価手法（地震調査委員会，1998）を適用することができなくなった。熊本地震が我々に再認識させたのは、大地震発生直後に、その地震活動が本震－余震型であるかどうかを見極めることは難しいという事実であり、また、防災上の呼びかけについて考える場合、余震確率評価手法（地震調査委員会，1998）のように本震－余震型の地震活動のみを対象とするだけでは、社会の要望に応えるには不十分であるということであった。

そこで、平成10年に取りまとめた余震確率評価手法（地震調査委員会，1998）を生かしつつも、余震確率だけでなく、地震調査委員会がこれまでに行ってきた活断層や海溝型地震の長期評価、さらに、これまでの観測結果から整理された過去の地震活動（以下「過去事例」という。）やその地域特性についての知見を生かすことにより、様々な事例に対応できる防災上の呼びかけを実現するための「大地震後の地震活動の見通しに関する情報」の指針を策定すべく、地震調査委員会の「地震活動の予測的な評価手法検討小委員会」において検討を行った。この過去事例においては、実質的な注意喚起の期間を見据えて、地震活動の関連性を数ヶ月程度の視野で検討している。また、検討にあたっては、地震学的な観点による技術的検討だけでなく、得られた地震活動の見通しを、どのような内容、表現で伝えれば、災害時に住民へ正しく伝わるかなどの社会科学的な観点での検討もあわせて行うなど、幅広い検討を行った。

本報告書はその検討結果を報告するものであり、今後、我が国において発生する大地震に引き続く地震活動における被害の軽減を、切に願うものである。

2. 従来の余震確率評価手法に基づく余震の見通しの発表履歴とその課題

(1) 発表履歴

平成 10 年に地震調査委員会が余震確率評価手法（地震調査委員会，1998）を取りまとめた後、初めて余震確率が発表されたのは、1998 年 9 月の岩手県内陸北部の M6.2 の地震であった。これ以降、熊本地震まで、上記手法に基づき、余震活動の見通しとして、気象庁による余震確率の発表がなされてきた（表 1）。

なお、様々な地震活動の特徴を抽出し、災害情報における社会科学的研究成果をも踏まえて、上記の余震確率評価手法や、今回の大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方について、科学的な検討を行うのが地震調査委員会であり、その結果に基づき情報を発表するのが気象庁である（図 1）。

(2) 課題

大きな被害を伴う地震が発生した場合、そのほとんどが余震を伴う。余震活動は、本震による恐怖が冷めやらない住民にとっては大きな不安であり、「今後の余震の見通し」を示すことが望まれている（総理府，1995）。地震学の現状においては、「今後の余震の見通し」が含む、大きな余震がいつ発生するのか、どのくらい揺れるのか、余震はいつ収まるのか等の事項の全てに明確に答えることはできない。しかし、科学的に評価できる内容については、積極的に評価を実施し発表すべきであるということが地震調査委員会の基本的な考え方であり、このことは「余震の確率評価手法について」（地震調査委員会，1998）をとりまとめた平成 10 年当時から変わらない。

科学的に評価できるものは評価し、それを発表すべきであるという考え方の下、これまで大地震後の地震活動の見通しが発表されてきた。しかし、本来、見通しを推測する手法の一つに過ぎない余震確率評価手法（地震調査委員会，1998）を用いて算出された余震確率の公表が、地震活動の見通しについての防災上の呼びかけの全てであるかのごとくになってしまっていたことが、熊本地震に際しての問題の一つであったと捉えることができる。

ア これまでの課題への対処

平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震では、M6.8 の本震をはじめとして、M5～6 クラスの余震が活動開始の 1 週間で 18 個も発生し、それらの規模の大きな余震の発生前後で余震確率の推計に必要なパラメータが変動したため、余震活動の盛衰を後追いする形で余震確率が激しく上下した。

これらを踏まえ、気象庁は、余震に関する情報の発表の仕方について検討し、以下①～④の改善策をとった（気象庁，2005）。

①可能な限り、マグニチュードではなく震度で説明する。

②確率値の発表頻度は、余震活動の揺らぎを考慮し、活動当初は 3 日間おき、

その後は1週間おきとする。

③震度6弱以上及び震度5弱以上に相当する余震の、3日間の余震発生確率が10%未満になると、それぞれに対応する余震に関する情報の提供を終了する。

④余震の発生が多い地震か否かを示すため、過去の事例と比較できる資料を参考資料として提示する（平成17年以降、余震の回数積算図等を提示）。

イ 熊本地震において明らかとなった課題

熊本地震の際、余震確率の発表について、以下の点が課題となった。

- 最初の大きな地震（M6.5）を本震とみなし余震確率を発表したが、翌々日には、より大きな地震（M7.3）が発生した。内陸地殻内で発生するM6.4以上の地震については、それを本震とみるとした平成10年の余震確率評価手法（地震調査委員会、1998）の本震－余震型の判定条件が妥当でなくなったこと。
- 「余震」という言葉を用いたために、より大きな地震、あるいは、より強い揺れは発生しないというイメージを情報の受け手に与えた可能性があること。
- 余震確率の値（確率値）が、通常生活の感覚からすると、かなり低い確率であると受け取られ、安心情報であると受け取られた可能性があること。

地震活動の予測的な評価手法検討小委員会においては、上記アの対処を包含しつつ、イの問題点にも対処するため、今回の検討を行った。

3. 新しい「大地震後の地震活動の見通しに関する情報」の考え方

（1）概要

従来の余震確率評価手法（地震調査委員会、1998）は、地震活動の見通しを評価するための一手段であった。今回検討を行ったのは、余震確率の評価手法のみではなく、過去の地震活動等にも基づく「大地震後の地震活動の見通し」を踏まえた防災上の呼びかけの指針であり、この防災上の呼びかけを「大地震後の地震活動の見通しに関する情報」と呼ぶ。

新しい情報は、余震を含めた地震活動に関する呼びかけに加えて、周辺の活断層等に考慮した呼びかけを含めることが適当である。

余震を含めた地震活動に関する呼びかけは、発生した大地震の震源付近での地震活動の見通しについて述べるものである。大きな地震の発生直後には本震－余震型であるかどうかの見極めが困難であることに鑑み、本震－余震型を前提とした余震確率の評価手法ではなく、地震調査委員会がこれまでに行ってきた活断層や海溝型地震の長期評価、さらに、地震学においてこれまでに積み上げてきた過去事例や地震活動の地域特性についての知見を活かした地震活動の見通しを、大地震直後の防災に資する呼びかけとして

発表していくことが適当である。

また、周辺の活断層等に考慮した呼びかけは、大地震の震源域近傍に地震調査委員会が長期評価を行っている活断層や海溝型地震の想定震源域（以下「活断層等」という。）が存在する場合、それらの活断層等についての注意が必要であることを呼びかけるものである。平成7年（1995年）兵庫県南部地震以降、地震調査委員会は、活断層や海溝型地震の長期評価を行ってきた。それらの成果は、日頃からの防災啓発だけでなく、大地震発生後の防災上の呼びかけにも生かしていくことが有用であるため、平成10年の余震確率評価手法（地震調査委員会，1998）では考慮されていなかった事項であるが、当初の地震活動域に隣接した活断層が動いた熊本地震の事例も踏まえ、本情報に含めることが適当である。

大きな地震発生から1週間程度以降は、上記の防災上の呼びかけに付加する形で、余震確率の評価手法に基づく数値的な確率予測を発表していくことが適当である。

（2）観測結果に応じた柔軟な運用

上記（1）で述べた、防災に資する呼びかけは、活発な地震活動が続いている等といった地震活動の観測結果を的確に示しつつ行うことが重要である。

以下の4.において、指針となるよう呼びかけの内容について述べるが、具体的な内容については観測によって把握した実際の地震活動状況によって、柔軟に対応することが望ましい。

4. 情報の内容

（1）情報発表基準

この情報は、防災に資する呼びかけを行うものであることから、情報発表の目安は、最大震度5弱以上が観測された場合、もしくは、最大震度4以下ではあるが地震が多発する場合など、防災上必要と認める場合とすることが適切である。

（2）余震を含めた地震活動に関する呼びかけ（地震発生直後～）

ア 地震発生直後～1週間程度の呼びかけ

救命活動等を行う応急対策期間に該当する標記期間（地震発生直後～1週間程度）においては、余震確率よりも、最大でどの程度の揺れを想定すべきかが最も求められる情報と考えられる。

また、大きな地震発生直後に本震—余震型か否かを見極めることは困難であるため、余震確率の評価手法ではなく、過去事例及び地域特性についての知見に基づく呼びかけを実施することが適当である。

期間を「1週間程度」とする根拠は、大地震後、大きい余震（場合によっては最初の

地震を超える規模の地震)は、最初の大きな地震発生後約1週間程度のうちに発生することが多い傾向があることである。表2及び表3は、気象庁(2005)による表に加筆したものであり、内陸、沿岸及び海域で発生した、規模の大きな地震の後の地震活動の推移を調査したものである。これらの表から、内陸及び沿岸の場合はM5.0以上、海域の場合はM6.0以上となる規模の大きな余震(場合によっては最初の地震を超える規模の地震(表4-1、4-2、4-3参照))が頻繁に発生するのは、最初の規模の大きな地震発生後の1週間程度であることがわかる。

また、規模の大きな地震発生から1週間程度の時間が経過しなければ、余震確率の算出に必要なパラメータが安定しない(1日程度で安定する K 値及び b 値を除く。 K 値及び b 値については、4.(5)ア参照。)。余震確率の計算方法については後述するが、その計算に使用するパラメータである p 値(4.(5)ア参照)等は、図2や図3で示すように、最初の規模の大きな地震発生直後は時間経過とともに大きく変化する。

以上のことから、この期間中の、余震を含めた地震活動に関する呼びかけは、過去事例及び地域特性に基づき、想定すべき最大の規模の地震や警戒すべき期間等について言及した内容とすることが適当である。

マグニチュードがある程度以下の場合や、余震を含めた地震活動が活発ではない場合は、適宜、1週間程度という期間を2~3日程度に短縮することが適当である。

また、上記で述べた大地震発生直後の1週間の中でも、最初の2~3日程度は規模の大きな地震が発生することが特に多いため、その間は、その旨を注意喚起すべきである。図4は、1990年から2010年に日本付近で発生した、余震活動を伴った主な地震(内陸地殻内M6.0以上、海域M7.0以上)について、最大余震が発生するまでの経過日数を表したものである。図の右側に示したヒストグラムは、本震発生後0~3日の間に最大余震が発生するケースが多いことを示している。そこで、大地震発生直後から2~3日程度は、図4のような資料を適宜示しつつ、規模の大きな地震が引き続き発生しやすい状況にある点について、特に注意が必要であることを呼びかけに付加することが望ましい。

イ 発生場所等に応じた想定すべき地震の規模

想定すべき地震の規模や地震の被害は、地震の発生場所によって異なるため、防災上の呼びかけについては、その発生場所に応じて変えることが適切である。以下では、発生場所を「内陸」、「海域」、「深部」に分類し、また、「内陸」は「内陸地殻内」と「内陸マントル上部」に細分して対応を検討する。

(ア) 内陸地殻内の地震の場合

内陸の地殻内で規模の大きな地震が発生した場合は、最初の大きな地震と同程度の規模の地震に注意が必要であるとした上で、まれに、より大きな地震が発生する可能性もあることに留意するよう注意喚起を行うことが適当である。

内陸地殻内の範囲は、図5で示した点線内の領域の、深さ30km以浅とする。図5の中の灰色の領域は、松代及び伊豆半島東方沖から伊豆諸島であり、過去事例より、群発的な地震活動が発生する領域とした。これらの領域内で発生した地震に関しては内陸地殻内に含めることとするが、最初の大きな地震と同程度またはそれ以上の地震が発生しやすい地域であることを注意喚起することが適当である。

平成10年の余震確率評価手法（地震調査委員会，1998）では、内陸の地殻内の場合、第四紀火山から30km以内は規模が近い地震が起りやすい性質があり、特に前震－本震－余震型となる地震活動は第四紀火山から20km以内であることが多いとされていた。この考えを踏襲するならば、第四紀火山から20km以内を、同規模の地震が続けて発生しやすい領域（続発領域）と設定し、最初の大きな地震と同程度もしくはそれ以上の規模の地震の発生を想定することが適当ということになる。

しかし、表4-1及び図6-1で示すように、1923年から2016年6月に内陸地殻内で発生したM5.0以上の地震（松代及び伊豆半島東方沖から伊豆諸島の群発的な活動が発生する地域で発生した地震を除く）のうち、規模が近い地震が続発した事例について調べたところ、第四紀火山から20km以内という続発領域を設定した場合、その続発領域とそれ以外の地域で地震が続発する確率が同じであるという仮説は、危険率1%（「規模が近い」の定義を、最初の地震の規模と後続する地震の規模の差がM0.3以内とした場合）及び3%（同0.5以内）で棄却できないことがわかった。続発領域とそれ以外の地域で有意に差があるとは言えないこと、また、第四紀火山からの距離が近い場合は規模の近い地震が続発しやすいという物理的背景が明確でないことから、内陸地殻内では第四紀火山からの距離のみに基づいた「続発領域」は設定しないことが適当である。

一方、最初の大きな地震よりもさらに規模の大きな地震が発生した事例は、表5で示す通り、少なかった。すなわち、1923年から2016年6月に、深さ30km以浅の内陸地殻内で発生したM5.0以上の地震（余震除去後）は563個であり、そのうち、前に発生した地震より規模の大きな地震が発生した事例は35個であることから、その割合は6%であり、さらに、海外事例（図7）では、深さ30km以浅でM6.5以上の地震が発生した場合、その後により大きな地震が発生した事例の割合は2.2%（2048個のうち45個）であった。これらの割合からは、最初の大きな地震よりもさらに規模の大きな地震が発生することは、頻繁に発生する事象とは言えないことから、呼びかけでは、まれに本震より規模の大きな地震が発生することもありうる、と留意を呼びかけることが適当である。

なお、周辺で過去に、最初に発生した大きな地震と規模の近い地震が続発した事例が発生している場合（表4-1及び図6-1）は、それらの過去事例も踏まえた注意喚起を行うことが適当である。また、（ウ）で述べるように、検証に耐えうる形で続発領域を設定できる場合は、内陸地殻内の地震についても続発領域を設定し、それを呼びかけに反映させるのが適当である。

(イ) 内陸マントル上部の地震の場合

表4-2及び図6-2に示すように、深さ30kmより深く、80km以浅の場所（以下、内陸マントル上部とする。）で発生したM5.0以上の地震のうち、最初の大きな地震より規模の大きな地震が発生した事例は559個のうち3個で0.5%と少なく、ほとんどの場合は、後続の地震の規模は最初の大きな地震の規模より小さい。このことから、規模の大きな地震が内陸マントル上部で発生した場合は、最初の大きな地震と同程度の規模の地震の発生を念頭に置いた注意喚起を行うことが適当である。

(ウ) 海域の地震の場合

平成10年の余震確率評価手法（地震調査委員会、1998）では、三陸沖及び択捉沖の一部については、同規模の地震が続けて起こりやすい領域が統発領域として設定されていた（図6-3の海域の地図中の、多角形で区切った部分）。

このように統発領域を設定することに合理性があるかを検証するため、1923年から2016年6月に海域（内陸地殻内の領域外で、深さ80km以浅）で発生したM6.0以上の地震のうち、規模に近い地震が続発した事例について調べた。その結果、統発領域内とそれ以外の地域で地震が続発する確率が同じであるという仮説は、危険率1%未満で棄却できることがわかった（表4-3及び図6-3）。このことから、統発領域とそれ以外の地域では、規模の近い地震の続発性に有意に差があると言えるため、海域については統発領域を設定し、その内外で呼びかけを変えることが適当である。

規模の大きな地震が海域の統発領域で発生した場合は、最初の大きな地震と同程度の規模の地震に注意が必要であるとともに、それ以上の規模の地震が発生する可能性も念頭に置いた注意喚起を行うことが適当である。また、海域の統発領域外で発生した地震の場合は、最初の大きな地震と同程度の規模の地震を念頭に置いた注意喚起を行うことが適当である。

統発領域の設定の根拠となるデータは随時更新し、その修正結果を呼びかけに反映させるのが適当である。

なお、周辺で過去に、最初に発生した大きな地震と規模の近い地震が続発した事例が発生している場合（表4-3及び図6-3）は、それらの過去事例も踏まえた注意喚起を行うことが適当である。

(エ) 深部の地震の場合

深さ80kmより深い場所で発生した地震（以下「深部の地震」という。）の場合は、図8に示すように最大震度5弱以上が観測された例は少なく、その中でも、引き続いての地震活動が活発な例や、最初の大きな地震よりも規模の大きな地震が発生した例はまれである。このことから、深部の地震の場合は、最初の大きな地震と同程度の規模の地震の発生を想定することが適当である。

(オ) 想定される最大規模の地震が発生した場合

内陸ではM8程度、海域ではM9程度を超える規模の地震が発生した場合、引き続いてそれ以上の規模の地震が発生することは考えにくい。また、周辺の活断層等で想定されている規模以上の地震が発生した場合は、それ以上の規模の地震が発生する可能性は低いと考えられる。これらのことから、これ以上規模の大きな地震は発生しないと思われる規模（内陸ではM8以上、海域ではM9以上、又は周辺の活断層等で想定されている規模以上）の地震が発生した場合は、その地震よりもマグニチュードが1程度小さい規模の地震の発生を想定することが適当である。

ウ 地震回数の多寡の情報の付加

情報の受け手にとって、一連の地震活動における地震回数が過去事例と比較してどの程度多いのか少ないのかは、関心が高いと考えられる。過去事例と比較した回数積算グラフを見ることにより、情報の受け手は、過去に発生した地震の後の地震活動がどのようなであったかを学ぶことができ、余震活動に関する知識と理解の向上に資することができる。このため、地震発生から数時間後以降は、適宜、最初の大きな地震に伴う一連の地震回数について、回数積算グラフにより過去事例と比較し、その地震に伴う地震回数がどの程度多いのか少ないのかという地震回数の多寡をわかりやすく示すことが適当である。その際、例えばM5.0以上といった、やや規模の大きな地震の回数積算の比較グラフも適宜示すことが適当である。

また、図9に示すように、地震回数の多寡を示すK値は、大地震発生後約1日後には安定して求められることが多いため、K値を目安に地震回数の多寡を推測し、呼びかけに生かしていくことが適当である。

エ 最大震度5弱以上となる可能性が高い期間の情報の付加

防災情報として、強い揺れを伴う地震の発生確率が高い期間の情報は有用であることから、最大震度5弱以上となる可能性が高い期間について情報に付加することが適当である。この場合、当該規模の地震が1週間に1回程度もしくはそれ以下の頻度でしか発生しないのであれば、地震活動は収まってきたと感ずるであろうことから、余震確率算出に必要なパラメータがある程度安定したら、大きな地震発生から1週間以内であっても、最大震度5弱程度に相当する規模（内陸地殻内であれば、多くはM5程度）以上の地震が今後3日以内に発生する確率が30%を切るまでの日数を計算し、今後その日数程度までは最大震度5弱以上となる地震が発生する可能性が高いという情報を、適宜付加することが適当である。

オ 群発的な地震活動の場合の呼びかけ

群発的な地震活動とは、同程度の規模の地震がいくつも連発するものを言う。群発的な地震活動については、過去事例を踏まえて、当分注意が必要であると呼びかけるのが適当である。地震活動が収まってきた場合は、当初よりも地震活動は収まってきたが、現状程度の地震活動は当分続くと呼びかけることが適当である。なお、地震活動の状況から、ある時期以降について余震確率の評価手法が適用できると考えられる場合は、群発的な地震活動でない地震活動と同様に、余震確率の評価手法に基づいた呼びかけを行うことが適当である。

群発的な地震活動かどうかは、周辺で過去に群発的な地震活動があったかどうかという地域特性や、実際の地震活動状況を見て判断する。なお、ETASモデル（後述）のパラメータである α が小さければ、群発的な地震活動である傾向が強いと考えられる（図10）ことから、 α が安定的に求まる状況であれば、 α の値を参考にすることが適当である。

（3）活断層等に考慮した呼びかけ（地震発生直後～）

ア 周辺の活断層等への言及

活断層や海溝型地震の想定震源域で大きな地震が発生する可能性は否定できないため、地震活動域の周辺に、地震調査委員会が長期評価を公表している活断層や海溝型地震の想定震源域があれば、地震活動に関する呼びかけと併せて、周辺の活断層等についてその存在を示すことが適当である。

1930年の北伊豆地震（図11-1）、平成28年（2016年）熊本地震（図11-2）、2008年の茨城県沖の地震（図11-3）のように、大きな地震の後、近くの活断層等が活動してより大きな地震が発生し、当初の地震活動域が広がった例がある。一方、2005年の福岡県西方沖の地震（図11-4）や2004年の釧路沖の地震（図11-5）のように、より大きい地震は発生せず、地震活動域が広がらなかった例もある。活断層等に考慮した呼びかけを行う場合は、これらの過去事例を両方併記することにより、実際に地震活動が拡大するかどうかを予測することは困難であるということを示す必要がある。その際、活断層等の活動の予測可能性の現状について、適切に解説するように留意する。

どの程度距離が近いものに言及するかについては、発生した地震の発震機構及び活断層等までの距離で判断する。このとき、活断層等の断層面の傾き方向や傾斜角を勘案し、地震活動域が活断層等の断層面に重なっているかどうかを目安とすることが適当である。

イ 活断層等での地震活動状況への言及

地震活動域の周辺にある活断層等において、大きな地震発生以前より地震活動が活発になっている場合は、平常よりも注意をすべき状況であると考えられる。周辺の活断層等の存在について言及するとともに、そこでの地震活動状況について観測結果を述べる

ことが適当であることから、上記アで示した活断層等周辺の地震活動が、平常より活発になっているかどうかについて言及することが適当である。

ウ 地震動予測地図の提示

特に内陸の活断層に言及する際は、断層地表トレース（線状の狭い領域）上のみが危険であるという誤解を招かないようにする必要がある。防災上の呼びかけを行う際は、地震調査委員会が公表する当該活断層についての震源断層を特定した地震動予測地図等を示し、当該活断層等で想定されている地震が発生した場合に予想される震度分布を示すのが適当である。その際は、破壊開始点の位置や局所的な地盤の影響によって、予想される震度よりも大きな揺れになる可能性もあることを併せて説明する必要がある。

エ 地震調査委員会による評価を踏まえた呼びかけ

地震活動域の周辺の活断層等との関係や、活断層等の割れ残りの有無、及び地殻変動の状況等については、地震調査委員会が行う評価の結果に基づき、活断層等に考慮した呼びかけを行うのが適当である。

（４）より大きな地震への注意喚起の付加（ b 値が安定して求まる頃～）

後から発生した地震の方が規模が大きかった場合、地震学では、後から発生した規模の大きな地震を本震、それより前に発生していた地震を前震と呼ぶ。ある地震活動について、それが前震であるかどうかを本震が発生する前に判断することは、現在の地震学では困難である。しかし、前震活動について、それ以外の地震活動とは異なる何らかの傾向を定量的に示すことができるのであれば、それを用いて、ある地震活動が、後続する、より規模の大きな地震の前震である可能性について注意を促すことができる。そこで、1997年10月以降の主な地震活動の、前震活動を伴ったものとそうでないものについて、改良大森公式（宇津，1957、Utsu，1961）の p 値及びGutenberg - Richterの式（Gutenberg and Richter，1941）（以下「G-R式」という。）の b 値を調査した結果を表6及び図12に示す。なお、改良大森公式については、近年、大森・宇津公式と呼ばれていることから、本報告書においても、大森・宇津公式と言う。 p 値については、前震活動とそれ以外の地震活動で、明らかな違いは見られなかった。 b 値についても明らかな違いは見られなかったが、 b 値が0.6より小さい場合については、4事例中3例が前震活動であることがわかった。このことを勘案すると、 b 値が安定して求まり、その値が0.6より小さい場合は、前震活動である可能性を考慮して、最初に発生した大きな地震と同程度もしくはそれ以上の規模の地震の発生に注意が必要であることを、呼びかけに付加することが適当である。

この場合、より規模の大きな地震が発生する可能性があると考えられることから、以下（５）以降の余震確率の評価手法に基づいた見直しを行うことは適当ではない。しか

し、 b 値が0.6より小さいまま、その地震活動自体が減衰していった場合は、他の地震活動と同様の基準（以下（6）参照）を目安に、情報の発表を終了してもよいと考えられる。

なお、前震活動である可能性を考慮する b 値の基準については、今後、データを蓄積していくことにより、見直すこともあり得る。

（5）余震確率の評価手法に基づいた数値的見通しの付加（1週間後～）

大地震発生から1週間程度以降の防災上の呼びかけには、上記（2）及び（3）の呼びかけに、余震確率の評価手法に基づいた数値的見通しを付加することが適当である。

余震確率の計算には、余震確率評価手法（地震調査委員会，1998）で規定されていた、G-R式と大森・宇津公式の組み合わせによる評価手法を使用するだけでなく、ETASモデルによる余震確率も計算し、より実際の地震活動を再現している方の余震確率を用いることが適当である。

ア Gutenberg - Richter の式と大森・宇津公式の組み合わせ

この項の内容は、地震調査委員会（1998）と同義であり、詳細はそちらを参照されたい。以下にその内容を要約する。

余震活動の特徴を把握するモデルとして、大森・宇津公式が知られている。余震活動は時間とともに単調に減少していく。定量的には、単位時間当たりの余震数 $\nu(t)$ は、 K 、 c 、 p をパラメータとして

$$\nu(t) = \frac{K}{(t+c)^p} \quad (1)$$

と表される。ここで t は本震発生時を起点とした経過時間である。(1)は大森・宇津公式と呼ばれる。 $p=1$ の場合は単に、大森公式（大森，1894）と呼ばれる。 K は余震の活発さを表す。 p は時間減衰の程度を表し、通常1またはそれよりやや大きい値をとる。 c は本震発生直後の複雑な様相を適当に丸め込む役割を演じ、通常0.1日以下である。

一方、大きい地震ほど発生頻度は低く、地震の規模（ M ）が大きくなるにつれて、その頻度は指数関数的に減少することが知られている。この経験法則をGutenberg - Richterの法則（Gutenberg and Richter, 1941）（以下「G-R則」という。）という。規模が M の地震数を $n(M)$ とすると

$$\log n(M) = a - bM \quad (2)$$

または

$$n(M) = 10^{a-bM} \quad (3)$$

である（G-R式）。ここで、 \log は常用対数を表す。 a 、 b は地震活動ごとに求まる定数で

あり、 a は地震活動全体の活発さを表すパラメータである。また、 b は全余震中の小さい地震と大きい地震の数の比と関係が深く、それが大きいことは大粒の地震が相対的に少ないことを意味している。ただし、本震－余震系列において、本震はこの関係から外れて大きなほうに位置する場合が多い。

大森・宇津公式を用いると統計的にある時点の余震の発生確率を求めることができる。大森・宇津公式はある一定以上の大きさの余震の発生時刻が必要である。実際の地震観測においては、 M が小さくなるにつれ、地震を検知することが困難になり、その検知下限を M_{th} とし、通常これ以上の M の地震を扱う。余震の起こり方はそれ以前の余震の起こり方に依存しないと仮定すると、余震の発生は非定常ポアソン過程に従う (Lomnitz and Hax, 1966)。この場合、大森・宇津公式は、単位時間を十分に小さく取ることにより、余震発生確率と解釈できる。これを式で表現すると、時間 $t \sim t + dt$ の間に余震が発生する確率 $\lambda(t)dt$ は

$$\lambda(t)dt = \frac{K}{(t+c)^p} dt \quad (4)$$

と表される。実際の余震活動における K 、 c 、 p を求めるためには最尤法を用いる。この場合の対数尤度関数 $\ln L$ は以下の式で与えられ (Ogata, 1983)、これを最大とする K 、 c 、 p の値 (最尤推定値) を求めればよい。

$$\begin{aligned} \ln L(K, p, c) &= \sum_{i=1}^N \ln \lambda(t_i) - \int_{T_1}^{T_2} \lambda(t) dt \\ &= N \ln K - p \sum_{i=1}^N \ln(t_i + c) - KA(T_1, T_2) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 N は、本震後の経過時間 $T_1 \sim T_2$ までに観測された余震数であり、 $t_i (i = 1, 2, \dots, N)$ は、各余震の発生時刻である。また、 $A(T_1, T_2)$ は、大森・宇津公式の時間積分の $1/K$ である。

$$A(T_1, T_2) = \begin{cases} \frac{(T_2 + c)^{1-p} - (T_1 + c)^{1-p}}{1-p} & (p \neq 1) \\ \ln(T_2 + c) - \ln(T_1 + c) & (p = 1) \end{cases} \quad (6)$$

上式である時刻 ($T_1 \sim T_2$) の余震発生回数の予測を得ることができる。さらに G-R 式と大

森・宇津公式とを組み合わせると、ある M 以上の余震発生を確率的に評価することができる (Ogata, 1983, Reasenberg and Jones, 1989, 阿部, 1991, 阿部, 1994, 細野・吉田, 1992)。

G-R式を M_{th} を用いて以下のように変形すると、

$$\begin{aligned} n(M) &= 10^{-b(M-M_{th})} n(M_{th}) \\ &= n(M_{th}) \exp\{-\beta(M - M_{th})\} \end{aligned} \quad (7)$$

となり、 $(M - M_{th})$ が指数分布をしていることがわかる。ここで、 $\beta = b \ln 10$ である。確率密度関数に翻訳するには、 $n(M)$ を M について M_{th} から ∞ まで積分したときに 1 に規格化されるように

$$f(M) = \beta \exp\{-\beta(M - M_{th})\} \quad (8)$$

とする。

時間 $t \sim t + dt$ の間に発生する余震が、 M についてはG-R則に従って分配されているとすると、 $t \sim t + dt$ の間に $M \sim M + dM$ の地震が発生する確率 $\lambda(M, t)dMdt$ は、(8)を用いて

$$\lambda(M, t)dMdt = \beta \exp\{-\beta(M - M_{th})\} \frac{K}{(t + c)^p} dMdt \quad (9)$$

で与えられる。 $t \sim t + dt$ の間に M 以上の余震が発生する確率 $\Lambda(M, t)dt$ は(9)をマグニチュードについて M から ∞ まで積分して

$$\begin{aligned} \Lambda(M, t)dt &= dt \int_M^{\infty} \lambda(x, t)dx \\ &= \exp\{-\beta(M - M_{th})\} \frac{K}{(t + c)^p} dt \end{aligned} \quad (10)$$

また、指数 μ のポアソン分布の期待値は μ であるという性質を利用すると、 T_1 から T_2 までの間における M 以上の余震回数の期待値 (発生予測数) $N(T_1, T_2)$ は、大森・宇津公式の時間積分(6)を用いて

$$N(T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} \Lambda(M, s)ds = K \exp\{-\beta(M - M_{th})\} A(T_1, T_2) \quad (11)$$

で与えられる。さらに、本震後の経過時間 T_1 から T_2 までの間に M 以上の余震が1回以

上発生する確率 Q は、{全事象 M 以上の余震が発生しない確率}で与えられ、ポアソン分布の公式を用いて

$$\begin{aligned}
 Q &= 1 - \exp\left\{-\int_{T_1}^{T_2} \Lambda(M, s) ds\right\} = 1 - \exp\{-N(T_1, T_2)\} \\
 &= 1 - \exp[-K \exp\{-\beta(M - M_{th})\} A(T_1, T_2)] \\
 &= \begin{cases} 1 - \exp\left[\frac{-Ke^{-\beta(M-M_{th})}}{1-p} \left\{\frac{1}{(T_2+c)^{p-1}} - \frac{1}{(T_1+c)^{p-1}}\right\}\right] & (p \neq 1) \\ 1 - \exp[-Ke^{-\beta(M-M_{th})} \{\ln(T_2+c) - \ln(T_1+c)\}] & (p = 1) \end{cases} \quad (12)
 \end{aligned}$$

と表せる。(11)が余震の発生予測数、(12)が余震発生確率を計算する式となる。

(12)は条件に合う余震がちょうど1回発生する確率ではなく、1回以上発生する確率を表していることに注意しなければならない。

イ ETAS モデルによる地震発生時系列の推定及び余震確率の推定

ETASモデルを用いた予測手法は複数提案されているが、ここでは最も基本的な方法を述べる。

ETASモデルではある時刻 t までの地震積算回数 $\Lambda(t)$ は、以下の式で与えられる。

$$\Lambda(t) = \mu(t - t_0) + K \sum_{t_i < t} \exp\{\alpha(M_i - M_{th})\} \{c^{1-p} - (t - t_i + c)^{1-p}\} / (p - 1) \quad (13)$$

ここで、 M_{th} は対象とする地震の M の下限、 t_0 は解析起点の時刻、 t_i と M_i はそれぞれ $t_0 \sim t$ までの期間に発生した M_{th} 以上の地震の発生時刻と M である。(13)式の右辺第2項での和は t より前に発生した地震による影響をすべて足しあわせることを意味している。推定すべきパラメータは、活発さの程度を表す K 、発生した地震の M の効率を表す α 、時間軸の調整をする c 、時間的減衰を表す p 、定常の地震発生強度を表す μ の5個である。パラメータ μ は、大地震発生後の短い期間における推定値は、過大な値をとることがある。このため、大地震の発生していない期間における推定値も参照する。特に定常的な活動がほとんどない場合は、 $\mu = 0$ に固定する方法もある。これらパラメータの推定には最尤法を用いる。

まず、地震発生シミュレーション(モンテカルロ法による見本過程の生成)方法を述べる。ある時刻を t とし、そこから微少な時間 dt が経過した状態を考える。この微小期間に地震が発生する確率は、 $\Lambda(t)$ を時間で微分した強度関数 $\lambda(t)$ を用いて、 $\lambda(t)dt$ で与えられる。ここで、 ξ を $[0, 1]$ の値を取る一様乱数とすると、 $\xi \leq \lambda(t)dt$ の場合に地震を発生させることにより、見本過程のシミュレーションが可能になる。

次に M の配分について述べる。発生した地震の規模 X は分布関数 F に従う、すなわち $\text{Prob}(X \leq x) = F(x)$ とする。このような X は先ほどの一様乱数 ξ を用いて $X = F^{-1}(\xi)$ とすることにより得られる。

M 分布関数は、G-R分布、切断G-R分布（宇津, 1978等）等があるが、G-R分布の場合、規模の上限が無い場合、不自然に大きな M の地震が発生して、地震が発生し続ける現象が起きる事がある。この現象は、 b 値が小さい場合に顕著であり、 dt を十分に小さくすることによりある程度抑えられるが、完全に防ぐことは困難である。そこで、 M の上限(M_{up})のある分布関数を用いることで解を安定させることが適当である。切断G-R分布の場合、密度関数は

$$f_T(x) = \left(\frac{\beta}{C_T}\right) \exp\{-\beta(x - M_{th})\} \quad M_{th} \leq x < M_{up} \quad (14)$$

分布関数は

$$F_T(x) = [1 - \exp\{-\beta(x - M_{th})\}]/C_T \quad (15)$$

である。 C_T は規格化のための定数で

$$C_T = 1 - \exp\{-\beta(M_{up} - M_{th})\} \quad (16)$$

F_T の逆関数は

$$F_T^{-1}(x) = M_{th} - (1/\beta)\log(1 - C_T x) \quad (17)$$

を用いる。ここで、 $\beta = b \ln 10$ である。

上述のようなシミュレーションを観測期間（学習期間）以降、必要とする期間（予測期間）継続し、何通りかの見本を作成したのち、その見本群を統計処理することで、地震発生時系列及び余震確率を評価することができる（石垣, 2006, 2009）。

ウ 情報に使用するモデル

大森・宇津公式とETASにおいて、それぞれがどれだけ適切に地震活動を表現できているかは情報量基準AIC（Akaike, 1974）で判断できる。前者は、単一の大森・宇津公式だけでなく、大森・宇津公式を拡張して本震の余震活動と高々2～3の二次余震系列の活動を重ね合わせたモデル（Ogata, 1983, 宇津, 1999）など、活動の様相に応じてモデルを構築し、比較することができる。確率評価の数値はAIC最小のモデルを用いるが、各種モデルによる結果を比較することにより、相互のモデルの妥当性を確認することができる。

また、ETASモデルによるシミュレーションで特筆すべきは、予測値のばらつきが評価できることである。具体的には、二次余震が顕著なタイプとそうではない場合に予測がそれぞれの程度の幅を持っているのかを評価することができる（図13）ので、特に予

測幅が大きい場合は、その旨を情報に加味することができる。

エ 余震確率を用いた防災上の呼びかけ

(ア) 倍率で表現

上記ア～ウの方法で計算した余震確率を用いて呼びかけを行う場合、確率の値（パーセンテージ）のまま発表せず、平常時の確率等との比（倍率）で表現することが望ましい。余震確率は大地震が発生した際にのみ発表されるものであり、降水確率のように日常的に発表されるものではないため、自らの経験に基づき、発表された確率値を行動基準として活用するのは困難である。例えば、余震確率を30%と発表しても、その確率値がどの程度高いものなのか、あるいは低いものなのか、情報の受け手が即座に判断することは難しい。そこで、被災地の住民自らが体験した事実との比較により表現とすることで、より防災行動に結びつけられるようにするため、余震確率を計算した上で、(1) 最大震度がある値以上になる地震の発生確率は、当初の何分の1程度になったこと、(2) しかし、その確率は依然として平常時の約何倍であり注意が必要であること、を伝えることが適当である。また、地震活動が収まってきた状況を情報の受け手に的確に伝えるためには、このような倍率を定期的に発表することが必要である。

ここで、「当初」とは、大地震発生後の3日間とすることが適当である。また、平常時の約何倍と言う場合は、例えば、100倍程度までは数字を概数として、100倍を超える場合は「相当高い」等の定性的な表現を用いるなど、受け取る住民の感覚等を考慮し、伝わりやすい内容となるよう工夫して発表することが望ましい。

(イ) 最大震度4程度の地震の継続日数の情報を付加

情報の受け手は、被害を及ぼすほどではないがほとんどの人が驚く程度の揺れ、すなわち震度4程度の揺れを伴う地震の発生がいつまで続くのか、ということに関心があると考えられる。最大震度4程度に相当する規模（内陸地殻内であれば、多くはM3～4程度）の地震の3日間での余震確率が30%を切る日数を元に、今後その日数程度の間は、1週間に1回程度の頻度で最大震度4程度の地震が発生する可能性があるという情報を適宜付加するのが適当である。

計算上、日数が極めて長期になる可能性もある。そのような場合には、この情報を付加しないことも適宜判断する必要がある。

(6) 情報発表終了時の呼びかけ

一連の情報の発表を終了する目安は、概ね最大震度5弱程度の揺れを伴う地震が、1ヶ月に1回程度の発生に相当する、3日間での余震確率が10%を下回る日とすることが適当である。

その際の呼びかけは、上記(5)エ(ア)と同様、確率値そのものではなく倍率で行

うことが適当であり、(1)依然として、平常時の約何倍であることに留意が必要であること、(2)しかし、最大震度がある値(例：最大震度5弱)以上になる地震の発生確率は、当初の何分の1程度と低くなったこと、を伝えることが適当である。また、平常時の約何倍と言う場合、上記(5)エ(ア)と同様、受け取る住民の感覚等を考慮し、伝わりやすい内容となるよう工夫して発表することが望ましい。

また、上記(5)エ(イ)と同様、最大震度4程度に相当する規模(内陸地殻内であれば、多くはM3～4程度)の地震の3日間での余震確率が30%を切る日数を元に、今後その日数日程度は、1週間に1回程度、最大震度4程度の地震が発生する可能性があるという情報を適宜付加するのが適当である。

また、情報発表の終了が安心情報と捉えられることのないように配慮し、最大震度5弱程度以上になる地震の発生確率は低くなったが、現状程度の地震活動は当分続くことを述べた上で、日本中どこでも地震発生可能性があることを呼びかけ、日頃からの備えを促す表現を適宜付加することが適当である。

(7) 余震による被害の拡大が懸念されない場合等

上記4.(1)の情報発表基準に従って情報発表する場合でも、発生した地震の規模がある程度以下の場合や、余震による被害の拡大が懸念されない場合や住民が不安に感じるような地震活動が発生していない場合等、情報発表を短期間で終了し、余震確率の評価手法に基づいた数値的見通しを発表する段階まで情報発表を継続する必要のない場合もあると考えられる。

平成10年の余震確率評価手法(地震調査委員会、1998)では、適用する対象地震にマグニチュードによる閾値を設けており、内陸地殻内の地震はM5.5以上、内陸マントル上部の地震はM6.0以上、そして海域の地震はM6.5以上としていた。本報告書においても、これらのマグニチュードの閾値を踏襲する。

また、余震による被害の拡大が懸念される場合等の具体例は、以下のとおりである。

- ア 本震による被害が大きい場合(最大震度6弱以上が目安)。
- イ 本震による被害範囲が広いことが考えられる場合(震度5弱の範囲が広いことが目安)。
- ウ 最大震度1以上の地震が多く発生している場合。

(8) 地震活動状況に変化があった場合

情報発表後、地震活動状況に変化があった場合は、以下のように対処するのが適当である。

ア 当初の大きな地震よりもさらに大きな地震が発生した場合

地震活動域で、当初の大きな地震よりもさらに大きな地震が発生した場合は、最大の地震を対象に、本情報発表の手順の最初に戻って、あらためて情報発表を行っていくのが適当である。

イ 当初の地震活動域から近接した場所で大きな地震が発生した場合

当初の地震活動域の近傍で大きな地震が発生した場合は、余震確率の評価手法の適用可否や、地震活動域の分割の仕方について地震調査委員会が評価し、その評価に基づいて情報発表を行うのが望ましい。

地震調査委員会が、地震活動域を分割して扱うことにより情報発表を行っていくことが適当と評価した場合は、各地震活動域について個別に本情報発表手法を適用することが望ましい。その場合、いつの時点から余震確率の評価手法に基づいた見通しを付加すべきかについては、その地震活動域で最大の地震が発生してからの経過日数を目安とすることが適当である。

(9) 防災上の呼びかけにおける注意点

上記(1)～(8)で述べてきた情報の具体的な内容に関して、実際の運用時には以下ア～ウに配慮することが望ましい。

ア 震度で呼びかけ

情報の受け手である被災地の住民等にとっては、地震の規模を表すマグニチュードではなく、揺れの大きさを表す震度で説明をした方が、その後の防災行動につなげやすいと考えられることから、防災上の呼びかけにはマグニチュードに対応する震度の値を使用することが望ましい。また、必要に応じて、マグニチュードも補足することが考えられる。

イ 「地震」という言葉を使用

「余震」という言葉は、最初の地震よりも規模の大きな地震は発生しないという印象を与えることから、呼びかけにおいては、不用意に「余震」という言葉を使うのではなく、「地震」という言葉を使用することが望ましい。地震学においては、顕著な前震活動がある場合を除き、最初に発生した大きな地震を「本震」、その後に引き続いて発生する規模の小さい地震を「余震」と呼ぶ。しかし、大地震が発生した後、その地震よりも規模の大きな地震が発生する可能性があり、そのような地震が発生するかどうかを確実に予知することはできない。そこで、呼びかけにおいては、さらに規模の大きな地震についての注意を怠ることのないよう、「地震」という言葉が使用されるべきである。

ウ 震源位置と揺れの大きさ

最初の大きな地震の震源とは異なる場所で、ある程度以上の規模の地震が発生することもある。その場合、後続の地震の震源に近い地域では、最初の大きな地震と同等かそれよりも大きな揺れに見舞われることがある。このことを勘案し、震源の位置によっては最初に発生した大きな地震と同等かそれよりも揺れが大きくなる場所もあることを、呼びかけに適宜付加することが適当である。

5. 大地震後の地震活動の見通しに関する情報を利用する上での留意事項

本報告書は、現在までの地震学上の知見に基づくものであるが、ここで示されている各種の基準や地震活動の予測に関する法則も、基本的には過去事例の知見に基づく経験則の範疇に含まれるものである。過去事例の知見に基づく限り、今回の熊本地震のような稀有な事例に対して完全に対処することは困難であり、本報告書で整理された見通しの予測手法にも、少なからず不確定性や未知の適用限界があることをあらかじめ認識しておくことが重要である。

本報告書においては、現在までの地震学の知見に基づく予測手法のもつ不確定性も考慮した上で、大地震発生後、それぞれのタイミングで、科学的知見に基づいてどこまでのことに言及できるか、そして、それを誤解のないように伝えるにはどのようにしたら良いのかということについて検討した結果をとりまとめた。また、災害時の情報伝達の観点から、補足説明の多過ぎる情報は伝わらないことや、客観的な数字で表される情報を予備知識のない状態で正しく伝えることは困難であること等、社会科学的な要素も考慮した。

ここでまとめた指針は、大地震後の地震活動の見通しを伝えるための標準的な事項である。実際の地震活動は、場所により、また、発生状況により個々の特徴を持っているため、ここでまとめられた事項を基本としつつ、それぞれの活動の特徴にあわせた対応を行うことが必要である。

また、災害時にこれらの地震活動の見通しに関する情報を住民に正しく理解してもらうためには、本報告書でまとめた情報の内容や伝達方法の工夫のほかに、情報を受ける側の基礎知識に負うところも大きいと考えられる。したがって、本報告書に基づき、今後、地震調査研究推進本部及び気象庁によって、地震活動の見通しに関する情報の内容について事前に広く国民に周知し、地震活動に関するリテラシーの向上を図ることが、新しい情報の被害軽減効果を向上させるために不可欠である。

6. 今後に向けて

地震調査研究推進本部では、地震学等の科学的知見の限界を踏まえつつも、地震災害

軽減のために、それぞれの時点での科学的成果に基づき言及できることを、国民に還元して防災に役立てていくことを活動の方針としている。この方針に基づき、地震活動の短期的な予測については、平成10年に「余震の確率評価手法について」（地震調査委員会, 1998）をとりまとめた。

熊本地震の発生により、このたび、報告書を見直すこととなったが、それぞれの時点での科学的成果に基づき言及できることを、国民に還元して防災に役立てていくという基本方針は変わっていない。

今回の「地震活動の予測的評価手法検討小委員会」の審議過程においては、被災者が必要とする情報を、科学的根拠に基づき、より詳細かつ短時間に提供できないかどうかの検討を行った。その結果、以下のような項目について、現時点で防災情報として提供するには時期尚早ではあるが、被災者や災害対応のニーズを考慮すれば、将来提供されるようになることが望ましいとされた。

- ・大地震発生直後から、想定される強い揺れの見通しや継続期間を提供すること。
- ・大地震後の震源域およびその周辺の地震発生確率や予測最大震度の空間分布を示すこと。
- ・大地震の隣接断層への影響の定量的な評価。

これらを実現するには、例えば地震直後からリアルタイムで詳細に地震活動を把握する必要がある。阪神・淡路大震災以降の基盤的地震観測網の整備や情報通信技術の飛躍的な向上により、日本全国の地震観測データが、ほぼリアルタイムで入手できるようになった。また、自動的震源決定処理システムの高度化が進められており、大規模な地震直後の余震活動状況の把握に多大な貢献をしている。しかし、現時点ではなお、大規模な地震直後は、直前の大きな地震による揺れや多発する余震活動により地震活動の検知漏れが多く、余震の確率評価を行うための震源データとしての完全性には問題があると考えられている。しかし、このような課題に対しても、自動震源決定の技術の高度化の他に統計学の見地からアプローチとして、小規模な地震の検出漏れを予測するモデルを構築し、地震直後から余震確率評価に必要なパラメータを安定して求める試みが行われ、一定の成果が提示されつつある（例えば、Omi et al., 2013; 2016）。また、そもそも震源データに依存せず、観測波形の形状変化から短期的な余震活動推移に必要なパラメータを抽出する試みも始まっている（例えば、Lippiello et al., 2016）。

前述の各項目については今後の検討課題となるが、上記のように既に具体的な検討が進められている分野もある。地震という現象の解明、観測網の高密度化、観測技術の進歩、地盤情報等の高度化等、それぞれの分野の進歩に応じて、実現可能なものから、将来、その成果が国民に還元されるべきものである。

地震調査研究推進本部では、引き続き、地震活動の見通しに関する情報の改善につい

て検討を継続していく。

参考文献

- 阿部勝征 (1991): 余震の確率予報, 地震 2, 44, p.145-146.
- 阿部勝征 (1994): 余震の確率予報 (訂正), 地震 2, 47, p.239.
- Akaike, H. (1974): A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. Autom. Control, AC-19, p.716-723.
- 明田川保 (2008): 日本付近で発生した陸域 M6.0 以上と海域 M7.0 以上の地震の余震活動について, 験震時報, 71, p.19-33.
- 明田川保, 福満修一郎 (2011): 震度 5 弱を観測するなどの顕著な地震が前震であった事例について, 験震時報, 74, p.17-28.
- 明田川保・伊藤秀美・弘瀬冬樹 (2007): X Window System を用いた地震検索・地震活動解析プログラム (REASA) の開発, 験震時報, 70, p.51-66.
- Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- Gutenberg, B. and C. F. Richter (1941): Seismicity of the Earth, The Geological Society of America, 34, 131p.
- 細野耕司・吉田明夫 (1992): 余震活動の予報, 気象研究所研究報告, 42, p.145-155.
- 石垣祐三 (2006): ETAS モデルを用いた地震活動の短期確率評価, 験震時報, 69, p.135-154.
- 石垣祐三 (2009): 全国を対象とした地震活動監視のための解析手法について—M7.0 における余震活動予測を通して—, 験震時報, 72, p.1-25.
- 伊藤秀美・明田川保 (2007): 余震活動解析プログラムの改良, 験震時報, 70, p.15-28.
- 地震調査研究推進本部事務局 (2011): 日本における被害地震の発生頻度に関する統計的分析について, <http://jishin.go.jp/main/oshirase/higaijishin1105.pdf>, (参照 2016-7-19).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1998): 余震の確率評価手法について, 69p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2003): 日本海東縁部の地震活動の長期評価, 62p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2004): 日向灘および南西諸島海溝周辺の地震活動の長期評価, 57p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2004): 千島海溝沿いの地震活動の長期評価 (第二版), 81p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2011): 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価 (第二版), p.3-173.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013): 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版), 94p.

- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2014): 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価 (第二版), 81p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016): 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の評価, http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf, (参照 2016-7-19).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016): 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の評価 (地震調査委員長見解), http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_4.pdf, (参照 2016-7-19).
- 気象庁 (2005): 余震に関する情報のあり方について—余震発生確率の取り扱いを中心として—, <http://www.jma.go.jp/jma/press/0502/14a/yoshinkakuritsu.pdf>, (参照 2016-7-19).
- Lippiello E., A. Cirillo, G. Godano, E. Papadimitriou and V. Karakostas (2016): Real-time forecast of aftershocks from a single seismic station signal. *Geophys. Res. Lett.*, 43, p.6252-6258.
- Lomnitz, C. and A. Hax (1966): Clustering in aftershock sequences, *American Geophysical Union Geophys.*, Monograph 10, p.502-508.
- Matsu'ura, R. S. (1986): Precursory Quiescence and Recovery of Aftershock Activities before Some Large Aftershocks, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo, 61, p.1-65.
- 松浦律子 (1995): 大森公式から 1 世紀—余震減衰に関する研究, *地震ジャーナル*, 19, p.33-44.
- 中野 俊・西来邦章・宝田晋治・星住英夫・石塚吉浩・伊藤順一・川邊禎久・及川輝樹・古川竜太・下司信夫・石塚 治・山元孝広・岸本清行 (2013): 日本の火山 (第 3 版), 地質調査総合センター.
- Ogata, Y. (1983): Estimation of the Parameters in the Modified Omori Formula for Aftershock Frequencies by the Maximum Likelihood Procedure, *J. Phys. Earth*, 31, p.115-24.
- Ogata, Y. (1986): Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Mathematical Seismology*, 1, p.228-281, *Inst. Statist. Math.*
- Ogata, Y. (1988): Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J. Am. Stat. Assoc.*, 83, p.9-27.
- Ogata, Y. (1989): Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis, *Tectonophysics*, 169, p.159-174.
- Ogata, Y. (1992): Detection of precursory relative quiescence before great

- earthquakes through a statistical model, *J. Geophys. Res.*, 97, p.19845-19871.
- Ogata, Y. (1994): Seismological application of statistical methods for point-process modeling, in *Proceedings of the first US/Japan conference on Frontiers of Statistical Modeling*, ed. H. Bozdogan, p.37-163, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Ogata, Y. and K. Shimazaki (1984): Transition from aftershock to normal activity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 74, p.1757-1765.
- Ogata, Y. and H. Tsuruoka (2016): Statistical monitoring of aftershock sequences: a case study of the 2015 Mw7.8 Gorkha, Nepal, earthquake, *Earth, Planets and Space*, 68:44, doi: 10.1186/s40623-016-0410-8.
- Omi, T., Y. Ogata, Y. Hirata and K. Aihara (2013): Forecasting large aftershocks within one day after the main shock, *Scientific Reports* 3, 2218.
- Omi, T., Y. Ogata, K. Shiomi, B. Enescu, K. Sawazaki and K. Aihara (2016): Automatic aftershock forecasting: A forecast test of aftershocks using the real-time data in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.* (in press).
- 大森房吉 (1894): 余震について, 震災豫防調査會報告, 2, p.103-39.
- Reasenber, P.A. and L.M. Jones (1989): Earthquake hazard after a mainshock in California, *Science*, 243, p.1173-1176.
- 清野政明・吉田明夫・小高俊一 (1995): 内陸地震の発生と火山地域との関係について, 地球惑星科学関連学会予稿集, p.291.
- 静岡県地震対策課 (1993): 東海地震の発生に伴う余震活動の特性とその対応に関する基礎調査, 135p.
- 総理府 (1995): 地震に関する世論調査, 33p.
- Storchak, D.A., D. Di Giacomo, I. Bondár, E. R. Engdahl, J. Harris, W.H.K. Lee, A. Villaseñor and P. Bormann (2013): Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009), *Seism. Res. Lett.*, 84, 5, p.810-815, doi: 10.1785/0220130034.
- 塚越利光・細野耕司・若山晶彦・吉川一光・伊藤秀美・吉田明夫 (2000): 余震活動確率予測の実践, 験震時報, 63, p.49-74.
- 宇津徳治 (1957): 地震のマグニチュードと余震の起こりかた, *地震* 2, 10, p.35-45.
- 宇津徳治 (1978): 地震のマグニチュード分布式のパラメータ推定, *地震* 2, 31, p.367-382.
- 宇津徳治 (1999): 地震活動総説, 876p., 東京大学出版会.
- Utsu, T. (1961): A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys. Mag.*, 30, p.521-605.

- Utsu, T. (1969): Aftershocks and earthquake statistics (1) - Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interrelations-, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., VII, p.129-95.
- Utsu, T. (1970): Aftershocks and earthquake statistics (2), J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7, 3, p.197-266.
- Utsu, T., Y. Ogata and R. S. Matsu'ura (1995): The Centenary of the Omori Formula for a Decay Law of Aftershock Activity, J. Phys. Earth, 43, p.1-33.

注：参考文献には、本文中では引用していないが、本委員会での検討に使用したものを
含めている。

参考資料

平成 21 年 8 月 10 日
地震調査研究推進本部
地震調査委員会

地震活動の予測的な評価手法検討小委員会の設置について

1. 設置趣旨

地震調査委員会における現状評価の高度化に資することを目的とし、過去の地震活動から特徴の抽出・整理を進めるとともに、地震活動の推移・見通しについての評価手法を検討するために、本委員会の下に地震活動の予測的な評価手法検討小委員会を設置する。

2. 審議事項

- (1) 地震活動の特徴の抽出
- (2) 抽出結果の整理・評価に基づく地震活動の予測的な評価手法の検討
- (3) その他

3. 構成員等

- (1) 小委員会を構成する委員及び専門委員については、地震調査委員会委員長が別途定める。
- (2) 委員長は、小委員会の構成員の中から主査を指名する。
- (3) 主査は、小委員会に専門家を招へいし、意見を聴取することができる。

地震調査研究推進本部 地震調査委員会
地震活動の予測的な評価手法検討小委員会 構成員
(平成 28 年 8 月 現在)

(主 査)

山岡 耕春 国立大学法人名古屋大学大学院環境学研究科教授

(委 員)

飯尾 能久 国立大学法人京都大学防災研究所教授
今給黎哲郎 国土地理院企画部地理空間情報国際標準分析官
勝俣 啓 国立大学法人北海道大学大学院理学研究院准教授
汐見 勝彦 国立研究開発法人防災科学技術研究所地震津波防災研究部門
副部門長
清水 洋 国立大学法人九州大学大学院理学研究院教授
中森 広道 日本大学文理学部教授
平田 直 国立大学法人東京大学地震研究所教授
前田 憲二 気象庁気象研究所地震津波研究部長
松澤 暢 国立大学法人東北大学大学院理学研究科教授
宮澤 理稔 国立大学法人京都大学防災研究所准教授
矢守 克也 国立大学法人京都大学防災研究所教授
吉田 明夫 国立大学法人静岡大学防災総合センター客員教授

地震活動の予測的な評価手法検討小委員会検討状況

平成 28 年 6 月 13 日

第 7 回地震活動の予測的な評価手法検討小委員会

平成 28 年 6 月 28 日

第 8 回地震活動の予測的な評価手法検討小委員会

平成 28 年 7 月 19 日

第 9 回地震活動の予測的な評価手法検討小委員会

平成 28 年 8 月 2 日

第 10 回地震活動の予測的な評価手法検討小委員会

図表集

表1. 余震に関する情報を発表した地震

年月日	地震名または震央地名	本震M (震度)	最大 余震M	経過時 間(日)	確率発表期間
1998年9月3日	岩手県内陸北部	6.2 (6弱)	4.3	0.0	9/4
2000年10月6日	鳥取県西部地震	7.3 (6強)	5.6	2.0	10/6~10/13
2003年5月26日	宮城県沖	7.1 (6弱)	4.9/4.9	0.0/14.9	5/26 ~ 6/4
2003年7月26日	宮城県北部	6.4 (6強)	5.5	0.4	7/26 ~ 8/5
2003年9月26日	十勝沖地震	8.0 (6弱)	7.1	0.1	9/26 ~ 12/26
2004年10月23日	新潟県中越地震	6.8 (7)	6.5	0.0	10/24 ~ 12/16
2005年3月20日	福岡県西方沖	7.0 (6弱)	5.8	30.8	3/21 ~ 3/24
2005年8月16日	宮城県沖	7.2 (6弱)	4.7	26.7	8/17(1報のみ)
2007年3月25日	能登半島地震	6.9 (6強)	5.3/5.3	0.4/0.9	3/26 ~ 4/11
2007年7月16日	新潟県中越沖地震	6.8 (6強)	5.8	0.2	7/17 ~ 7/23
2008年6月14日	岩手・宮城内陸地震	7.2 (6強)	5.7	0.0	6/15 ~ 7/10
2009年8月11日	駿河湾	6.5 (6弱)	4.5	2.5	8/12(1報のみ)
2011年3月11日	東北地方太平洋沖地震	9.0(7)	7.6	0.0	3/13~4/21
2014年11月22日	長野県北部	6.7(6弱)	4.5	0.0	11/24~12/1
2016年4月14日	熊本地震	6.5(7)	6.4	0.1	4/15(1報のみ)

(注)経過時間(日)は、本震発生後、最大余震発生までの日数

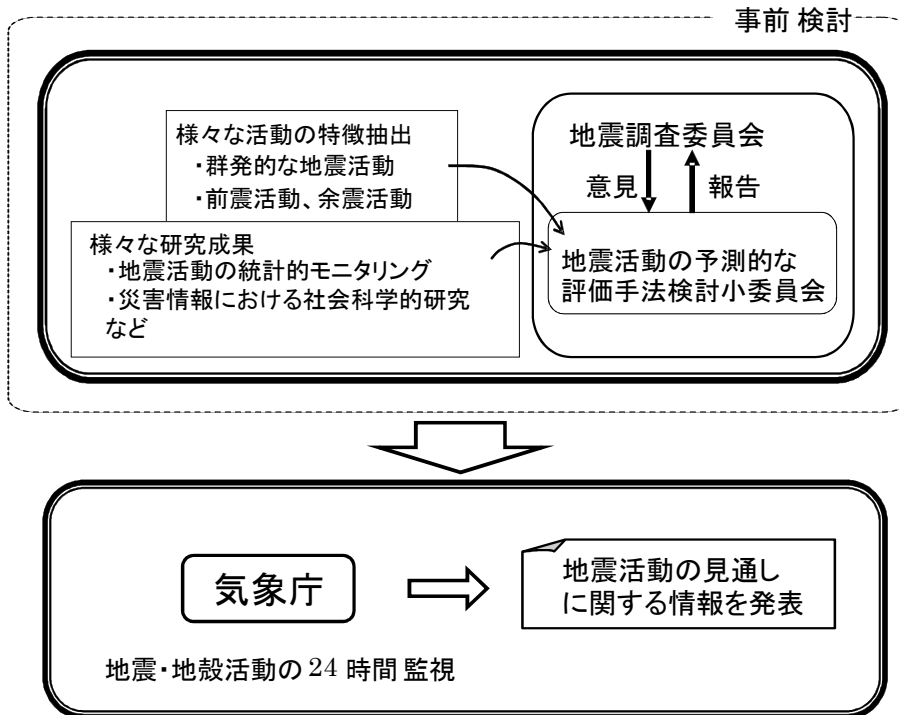


図1. 地震活動の見通しに関する情報の検討体制および発表体制

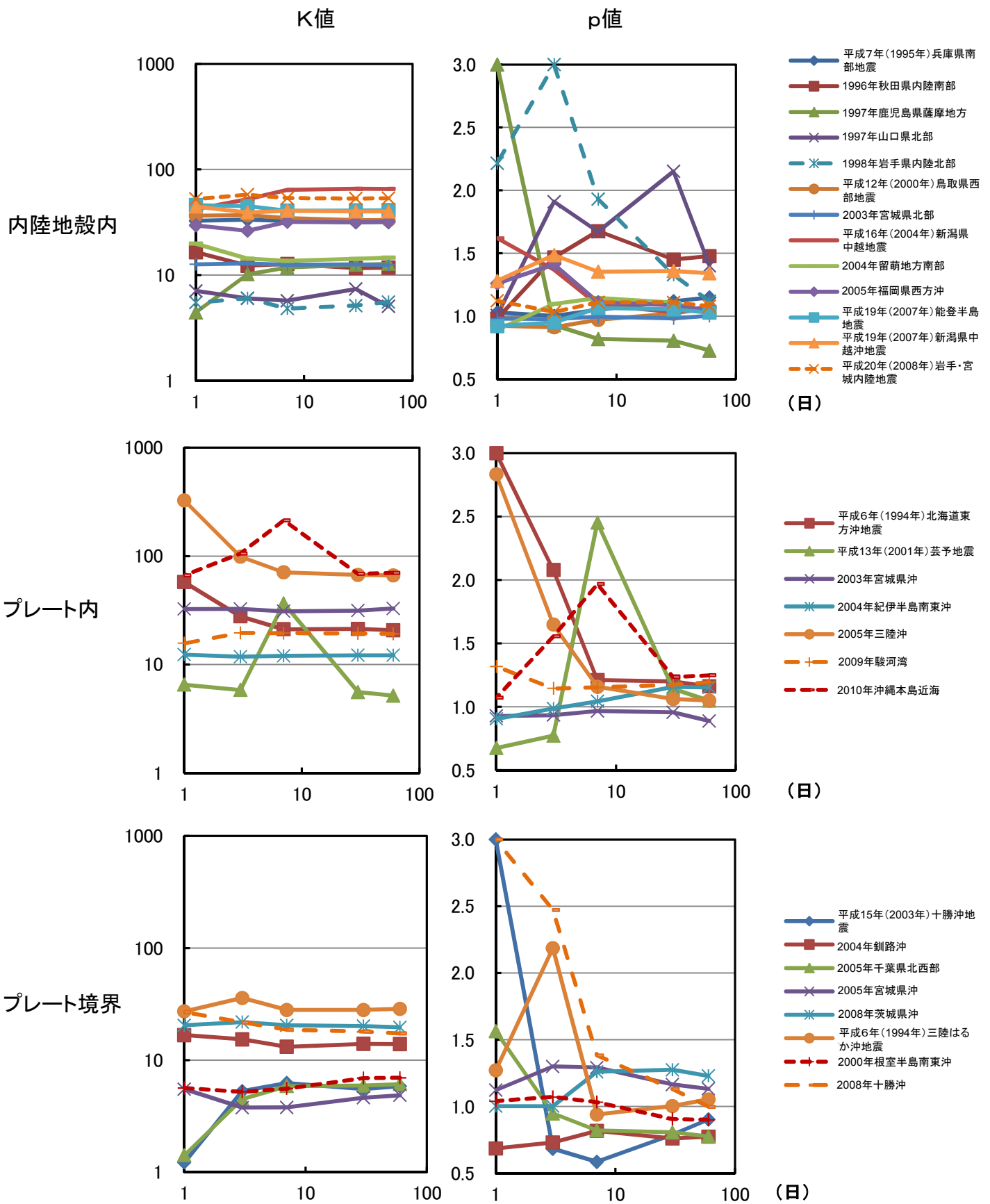
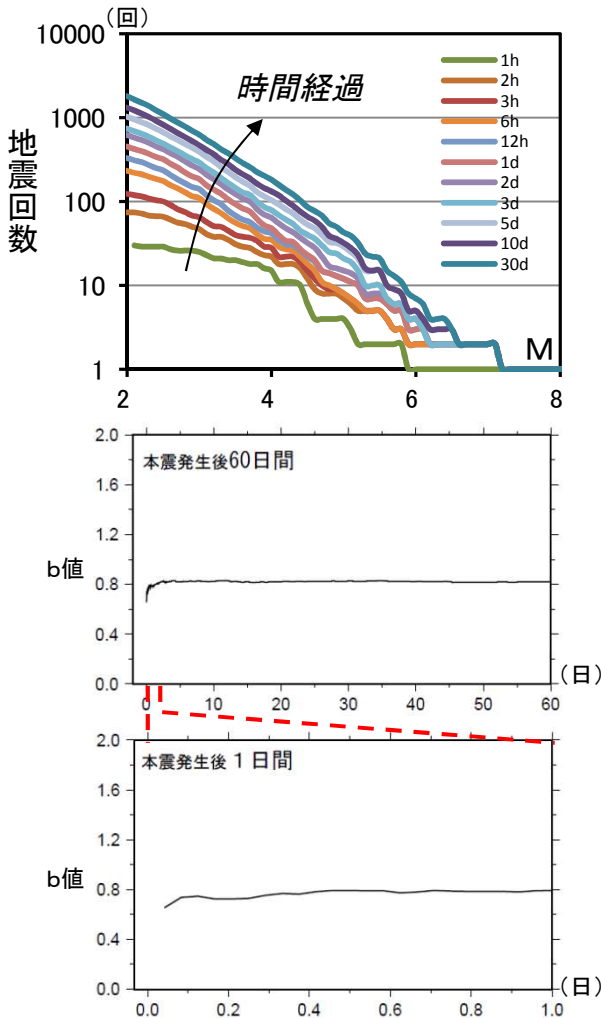


図2. 余震活動パラメータ(K値、p値)の時間変化

1980年～2010年に発生した日本周辺の主な地震の余震活動について、大森・宇津公式にあてはめて求めた、K値、p値の時間変化を地震の発生場所別(内陸地殻内、プレート内、プレート境界)に示した

平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の
b値変化



平成15年(2003年)十勝沖地震の
b値変化

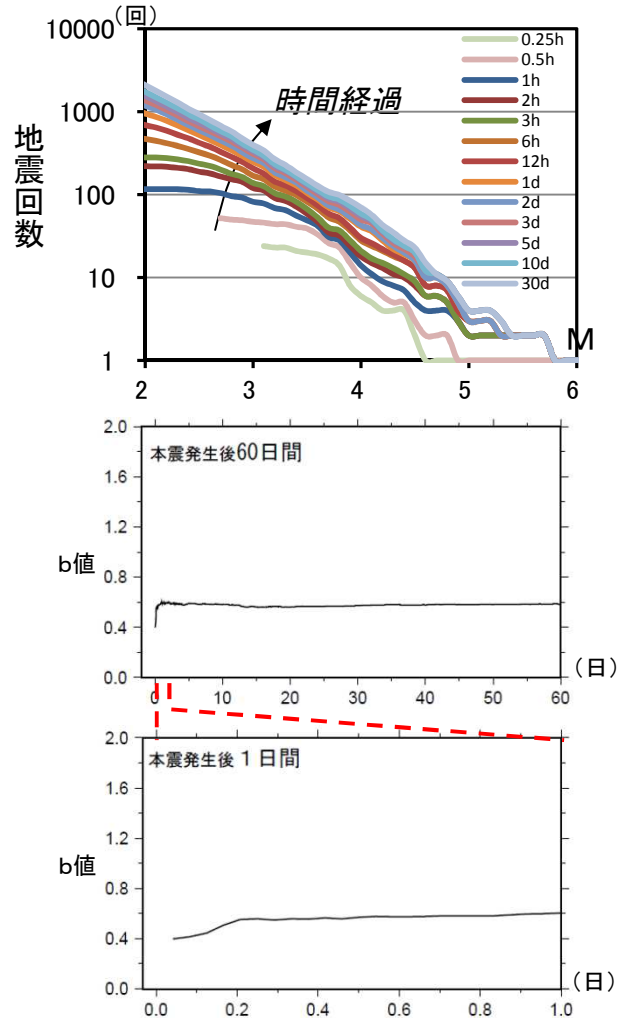


図3. 余震活動パラメータ(b値)の時間変化

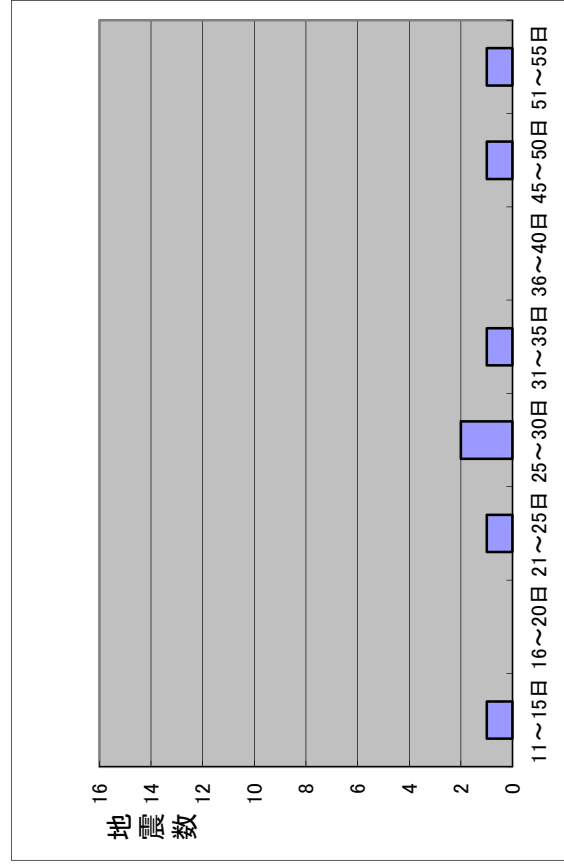
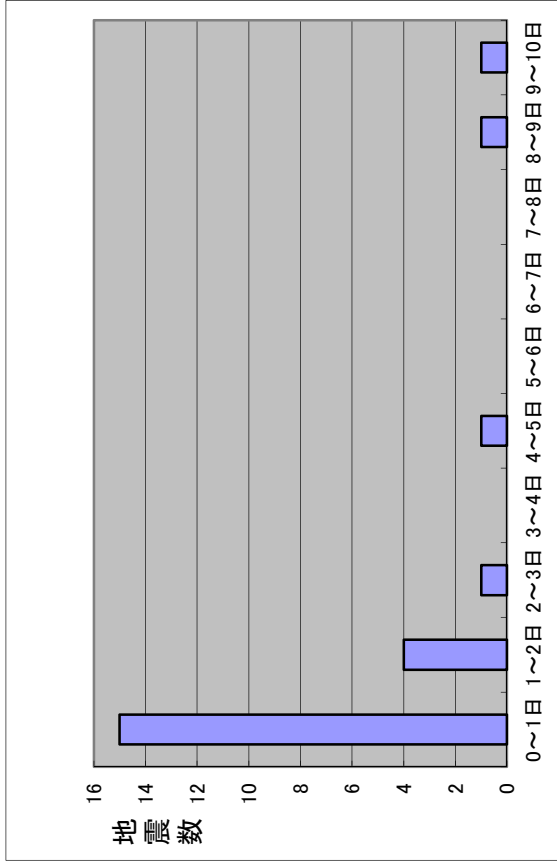
左:平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震

右:平成15年(2003年)十勝沖地震

【 上段 】 地震の規模(マグニチュード:M)別にM大→小へ地震回数を積算した曲線について、本震発生からの経過時間毎に求めたものを色分けで示す。

【中・下段】 上記から求めたb値の時間変化

左記30地震における最大余震発生までの日数の分布



年月日	地震名(震央地名)	本震M	最大余震M	本震と最大余震のMの差	本震と最大余震の時間差T(日)
1991年10月28日	周防灘	6.0	3.6	2.4	0.002
1993年7月12日	北海道南西沖地震	7.8	6.3	1.5	27
1994年10月4日	北海道東方沖地震	8.2	7.3	0.9	5
1994年12月28日	三陸はるか沖地震	7.6	7.2	0.4	10
1995年1月17日	兵庫県南部地震	7.3	5.4	1.9	0.003
1996年8月11日	秋田県内陸南部	6.1	5.8	0.3	0.21
1997年3月26日	鹿児島県薩摩地方	6.6	6.4	0.2	48
1997年6月25日	山口県北部	6.6	4.3	2.3	0.28
1998年9月3日	岩手県内陸北部	6.2	4.3	1.9	0.008
2000年1月28日	根室半島南東沖	7.0	4.3	2.7	25
2000年10月6日	鳥取県西部地震	7.3	5.6	1.7	2
2001年3月24日	芸予地震	6.7	5.2	1.5	1.6
2003年5月26日	宮城県沖	7.1	4.9	2.2	0.26
2003年7月26日	宮城県北部	6.4	5.5	0.9	0.4
2003年9月26日	十勝沖地震	8.0	7.1	0.9	0.05
2004年9月5日	紀伊半島南東沖	7.4	6.5	0.9	1.35
2004年10月23日	新潟県中越地震	6.8	6.5	0.3	0.03
2004年11月29日	釧路沖	7.1	6.9	0.2	8.8
2004年12月14日	留萌支庁南部	6.1	4.8	1.3	0.12
2005年3月20日	福岡県西方沖	7.0	5.8	1.2	31
2005年7月23日	千葉県西北部	6.0	4.7	1.3	27
2005年8月16日	宮城県沖	7.2	4.7	2.5	14
2005年11月15日	三陸沖	7.2	4.9	2.3	54.9
2007年3月25日	能登半島地震	6.9	5.3	1.6	0.35
2007年7月16日	新潟県中越沖地震	6.8	5.8	1.0	0.23
2008年5月8日	茨城県沖	7.0	5.8	1.2	1.27
2008年6月14日	岩手・宮城内陸地震	7.2	5.7	1.5	0.025
2008年9月11日	十勝沖	7.1	5.7	1.4	0.008
2009年8月11日	駿河湾	6.5	4.5	2.0	2.54
2010年2月27日	沖繩本島近海	7.2	5.4	1.8	0.66

明田川(2008)に基づき、日本付近で1990～2010年に発生した内陸地殻内のM6.0以上と海域のM7.0以上の本震とみなせる地震について、本震及び最大余震のMと発生時間差を示した

図4. 主な地震(1990～2010年)における最大余震発生までの日数

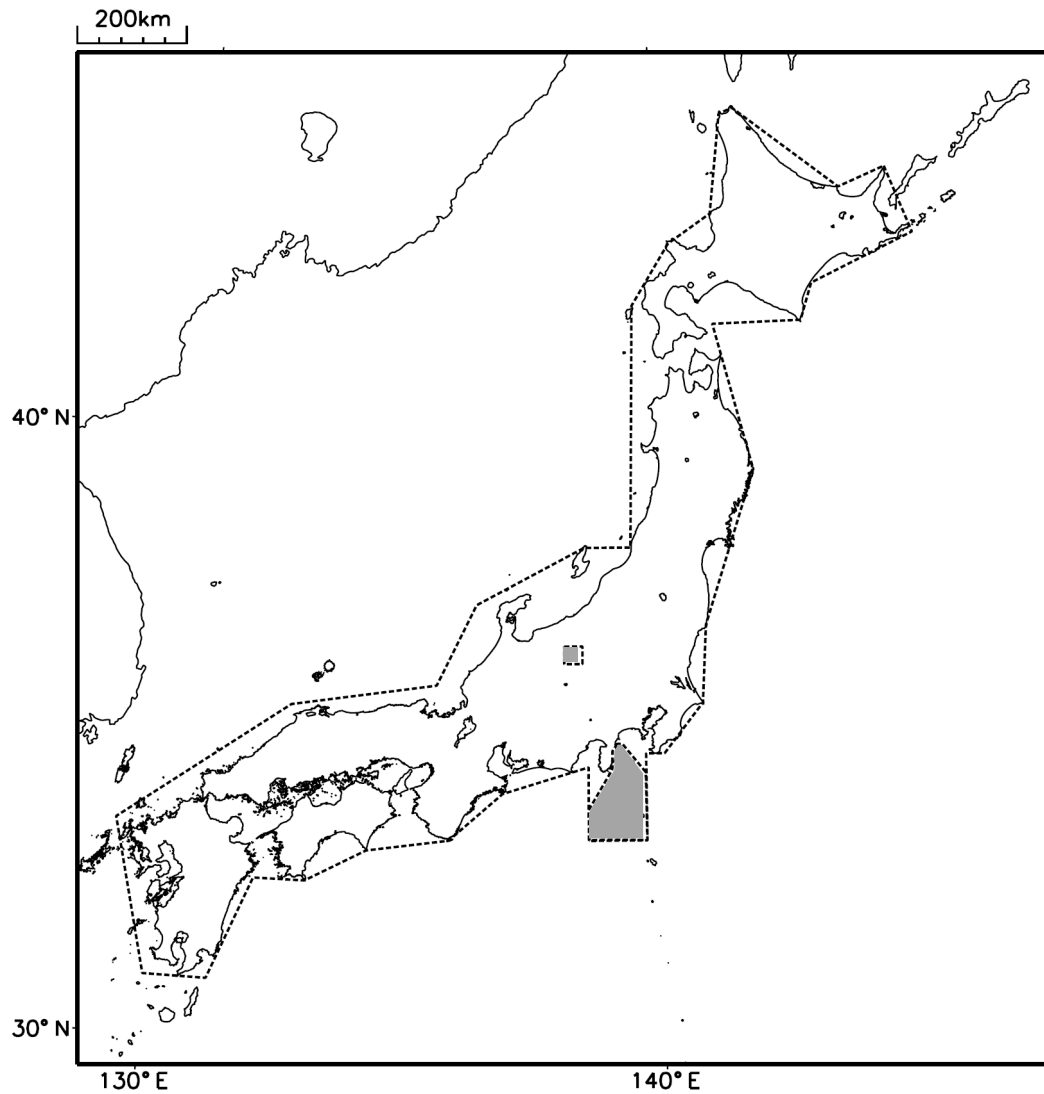


図5. 内陸と定義した領域

地震調査委員会(1998)の図11に準じている。ただし、平成 19 年(2007 年)能登半島地震と平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震の余震域を含むように見直した。

内陸領域内の灰色で塗りつぶした範囲は、明田川・福満(2011)において過去の活動がほぼ群発地震と特定できる所であるため、群発型発生領域と定義された領域。

表4-1. 規模が近い地震が続発した事例(内陸地殻内)

内陸地殻内の地震(M \geq 5.0、30km以浅、1923年~2016年6月、図5の「群発型発生領域」を除く)について、図6-1に示す方法により、地震発生から30日以内に、最初の地震とのMの差が0.5以下の地震(Mが上回るものを含む)が発生した事例を抽出した。青字はMの差が0.3以下の事例。

最初の地震の発生年月日	最初の地震の震央地名	最初の地震のM(Mf)	後続の地震M(Mf-M \leq 0.5)	Mf-M \leq 0.3	地震間の期間差	前震一本震型	最初の地震と第四紀火山との距離			最初の地震と活断層との距離【地震調査研究推進本部事務局(2011)で関係が指摘されたもの】※斜体は主要活断層・地域評価対象活断層ではないもの	最初の地震と活断層との距離【10km以内にあるものを抽出】
							20km以内	21~30km	31km以上		
1925/7/4	鳥取県西部	5.7	5.4	○	4時間		○			-	-
1930/10/17	石川県西方沖	5.3	6.3	○	3分	○			42	-	福井平野東縁断層帯 主部4km
1930/11/25	静岡県伊豆地方	5.1	4.6 7.3	○	44分 11時間	○	○			北伊豆断層帯3km	-
1930/12/20	広島県北部	6.1	5.9	○	22時間		○			-	-
1931/12/21	熊本県天草・芦北地方	5.5	5.6 5.8	○	1.3日 4.8日	○		○		-	日奈久断層帯 日奈久区間9km
1935/7/24	鳥取県中部	5.4	5.2	○	1分		○			-	鹿野-吉岡断層4km 岩坪断層6km
1937/7/4	新潟県上越地方	5.3	5.0	○	4分		○			-	-
1939/5/1	秋田県沿岸北部	6.8	6.7 6.5	○	1分 10時間		○			-	-
1943/3/4	鳥取県東部	6.2	5.7 6.2 5.9	○	21分 9時間 8.2日		○			鹿野-吉岡断層4km	雨滝-釜戸断層3km 岩坪断層10km
1945/1/11	愛知県東部	5.6	5.7 6.8 6.4	○	4時間 1.7日 5.5日	○			105	深溝断層1-3km	-
1947/1/16	徳島県南部	5.6	5.1		9時間				160	-	-
1947/5/9	大分県西部	5.5	5.1		1.3日		○			-	西山断層帯 嘉麻峠区間7km
1949/8/10	京都府南部	5.1	4.6		17時間				62	-	-
1949/12/26	栃木県北部	6.2	6.4	○	7分	○	○			-	-
1951/8/2	新潟県上越地方	5.0	4.5		2.1日		○			-	-
1953/6/8	島根県東部	5.0	4.5		6.9日		○			-	-
1954/5/8	島根県東部	5.2	5.4	○	8.2日	○	○			-	-
1959/1/22	釧路支庁中南部	5.6	6.3 6.1	○	8.5日 8.6日	○	○			-	-
1961/8/19	富山県東部	5.0	4.5		3分		○			-	跡津川断層帯9km
1963/3/31	島根県西部	5.1	5.0	○	2時間		○			-	-
1965/8/31	釧路地方北部	5.1	5.0	○	15分		○			-	-
1968/2/21	宮崎県南部山沿い	5.7	6.1 5.6	○	1時間 1.4日	○	○			-	-
1968/8/18	京都府南部	5.6	5.1		55秒				43	-	三峠・京都西山断層帯 三峠断層0km 三峠・京都西山断層帯 京都西山断層帯6km 三峠・京都西山断層帯 上林川断層10km 長野盆地西縁断層帯 飯山-千曲区間5km
1968/9/21	長野県北部	5.3	4.8		1時間		○			-	-
1975/1/22	熊本県阿蘇地方	5.5	6.1	○	1.4日	○	○			-	-
1978/5/16	青森県東方沖	5.8	5.8	○	48分				47	-	-
1982/3/21	浦河沖 (昭和57年浦河沖地震)	5.0	7.1	○	3時間	○			123	-	-
1983/10/31	鳥取県中部	6.2	5.7		3分		○			-	鹿野-吉岡断層10km
1984/5/30	兵庫県南西部	5.6	5.1		23分				42	-	山崎断層帯 主部 北西部0km
1984/8/6	橘湾	5.0	5.7	○	1分	○	○			-	雲仙断層群 北部1km
1986/5/26	岩手県内陸北部	5.0	4.5		11分		○			-	-
1988/9/29	埼玉県南部	5.1	4.7		9時間				56	-	立川断層帯4km 越生断層9km
1989/10/27	鳥取県西部	5.3	5.5	○	5.9日	○	○			-	日南湖断層5km
1990/11/21	鳥取県西部	5.1	4.8 5.2 5.1	○	1分 2.3日 10.4日	○	○			-	日南湖断層4km
1990/12/7	新潟県中越地方	5.4	5.3 4.9	○	2分 3時間		○			-	-
1996/8/11	秋田県内陸南部	6.1	5.6 5.8	○	41分 4時間		○			-	-
1999/2/26	秋田県沖	5.3	5.0	○	1分					-	庄内平野東縁断層帯 北部10km
2003/7/26	宮城県中部	5.6	6.4	○	7時間	○			35	-	-
2004/10/23	新潟県中越地方 (平成16年新潟県中越地震)	6.8	6.3 6.5	○	7分 38分			○		六日町断層帯 北部7km	長岡平野西縁断層帯10km
2011/2/27	岐阜県飛騨地方	5.0	5.5	○	3時間	○	○			-	高山・大原断層帯 高山断層帯6km
2016/4/14	熊本県熊本地方 (平成28年熊本地震)	6.5	6.4 7.3	○	2時間 1.1日	○	○			布田川断層帯 布田川区間4km	布田川断層帯 宇土区間2km 日奈久断層帯 高野-白幡区間1km

- 抽出された最初の地震(Mf-M \leq 0.3の29個)のうち、第四紀火山から20km以内で発生した地震は22個(76%)、同30km以内で発生した地震は24個(83%)。
- 抽出された最初の地震(Mf-M \leq 0.5の41個)のうち、第四紀火山から20km以内で発生した地震は29個(71%)、同30km以内で発生した地震は31個(76%)。

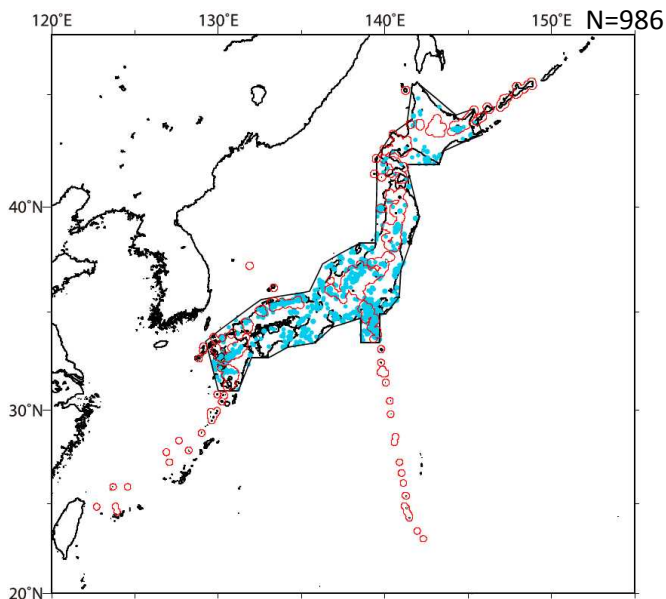
規模の近い地震の抽出方法

以下に示す明田川・福満(2011)の前震-本震型活動の抽出手法を準用し、前震として抽出される最初の地震の規模(M: マグニチュード)とMの差が0.5以下の地震(後続の地震のMが最初の地震のMを上回るものも含む)を抽出した。

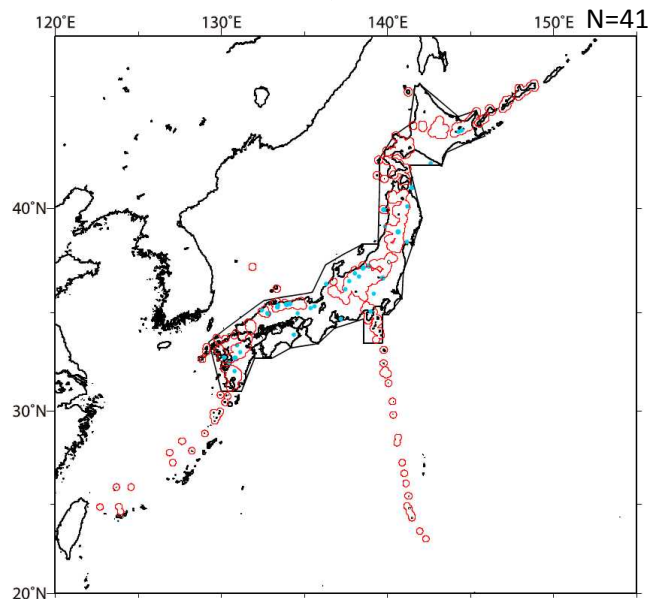
1. 前震・本震対象となる地震の抽出
気象庁震源カタログ(1923年1月以降)から、指定の領域内、規模(M)、震源深さのデータを抽出。
2. 余震の除去
 1. で抽出された地震のうち、以下の条件1~3で余震と定義された地震を除去。
 - ・地震Aを本震と仮定した場合、
 - 【条件1】 地震AのマグニチュードMから得られる平均的な余震域の長径L(km)以内
 $\text{Log}(L)=0.5M-1.8$ (Utsu, 1961)
 - 【条件2】 地震Aのマグニチュードより小さい
 - 【条件3】 地震AのマグニチュードMに依存する以下の期間内に発生したもの
 $M < 5.5 \rightarrow 30$ 日以内 $5.5 \leq M < 6.0 \rightarrow 60$ 日以内 $6.0 \leq M < 6.5 \rightarrow 90$ 日以内
 $6.5 \leq M < 7.0 \rightarrow 150$ 日以内 $7.0 \leq M < 7.5 \rightarrow 240$ 日以内 $7.5 \leq M \rightarrow 360$ 日以内
3. 前震と本震の抽出
 2. で抽出された地震のうち、以下の条件4~6で抽出された地震を前震・本震のペアとする。
 - ・地震Aを本震と仮定した場合、
 - 【条件4】 条件1で示すL(km)以内(ただし、Lは50kmを最大とする)
 - 【条件5】 地震Aのマグニチュード以下
 - 【条件6】 地震Aとの発生間隔 $\rightarrow 30$ 日以内

- ・1923年以降、M5.0以上の地震(深さ30km以浅、余震除去後)は55%(310個/563個)が第四紀火山から20km以内で発生している。
- ・このうち規模が近い地震($M_f - M \leq 0.3$ 、同規模以上を含む)が続発したものは7.1%(22個/310個)であり、その他の地域における割合2.8%(7個/253個)と確率が同じであるという仮説は危険率1%で棄却できない。
- ・このうち規模が近い地震($M_f - M \leq 0.5$ 、同規模以上を含む)が続発したものは9.4%(29個/310個)であり、その他の地域における割合4.7%(12個/253個)と確率が同じであるという仮説は危険率3%で棄却できない。

内陸地殻内の全地震の震央分布図
($M \geq 5.0$ 、30km以浅、1923年~2016年6月)



上記の条件で抽出された
規模が近い地震が続発した事例



赤円は、第四紀火山(中野ほか, 2013)から20kmの範囲を示す。
日本列島を囲む多角形は「内陸」の範囲を表す。

図6-1. 規模が近い地震が続発した事例(内陸地殻内)

表4-2. 規模が近い地震が続発した事例(内陸マントル上部)

内陸マントル上部の地震(M \geq 5.0、31~80km、1923年~2016年6月)について、図6-1と同じ方法で抽出。
 青字はMの差が0.3以下の事例。

最初の地震の 発生日	最初の地震の 震央地名	最初の 地震の M(Mf)	後続の 地震M (Mf-M \leq 0.5)	Mf-M \leq 0.3	地震間の期間差	前震一 本震型	最初の地震付近の地震本部長期評 価対象海溝型地震	備考
1935/6/21	茨城県南部	5.2	5.0	○	26.9日		相模トラフ沿い	
1943/1/20	茨城県南部	5.3	5.0	○	4分		相模トラフ沿い	
1959/2/18	日高地方東部	5.2	4.8		3.3日		-	
1965/4/6	茨城県南部	5.5	5.1		6.4日		相模トラフ沿い	
1973/11/25	和歌山県北部	5.9	5.7	○	4時間		南海トラフ	
1983/12/30	千葉県東方沖	5.5	5.2	○	2時間		相模トラフ沿い	
1985/1/6	和歌山県北部	5.8	5.5	○	58秒		-	
1987/6/30	茨城県南部	5.1	4.9	○	11.8日		相模トラフ沿い	
1990/8/23	千葉県北東部	5.5	5.2	○	2時間		相模トラフ沿い	
2012/4/29	千葉県北東部	5.5	5.8	○	4.6日	○	相模トラフ沿い	PAC-PHS境界
2012/8/22	十勝地方南部	5.2	6.1	○	3.5日	○	-	PAC-陸境界付近
2012/9/14	千葉県北東部	5.1	5.1	○	28.5日		相模トラフ沿い	PHS-陸境界付近
2013/11/3	茨城県南部	5.1	5.5	○	6.7日	○	相模トラフ沿い	PAC-PHS境界
2013/12/21	千葉県東方沖	5.5	5.5	○	6.9日		相模トラフ沿い	PAC-PHS境界

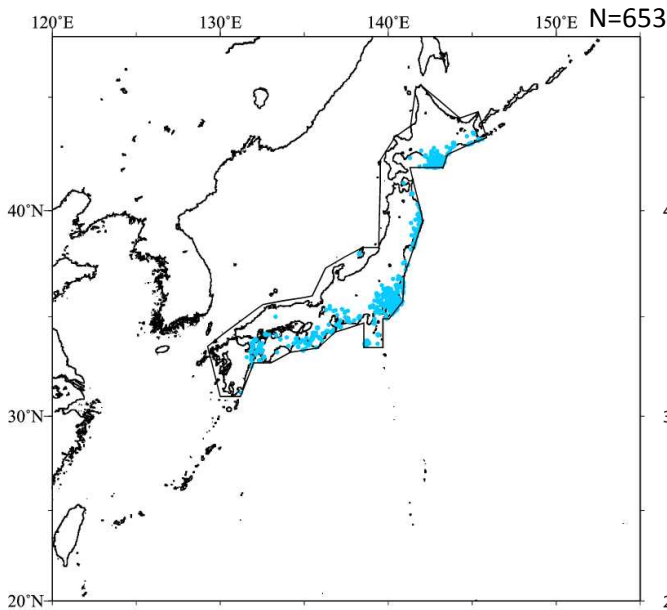
(陸: 陸のプレート、PAC: 太平洋プレート、PHS: フィリピン海プレート)

・M \geq 5.0の地震の場合

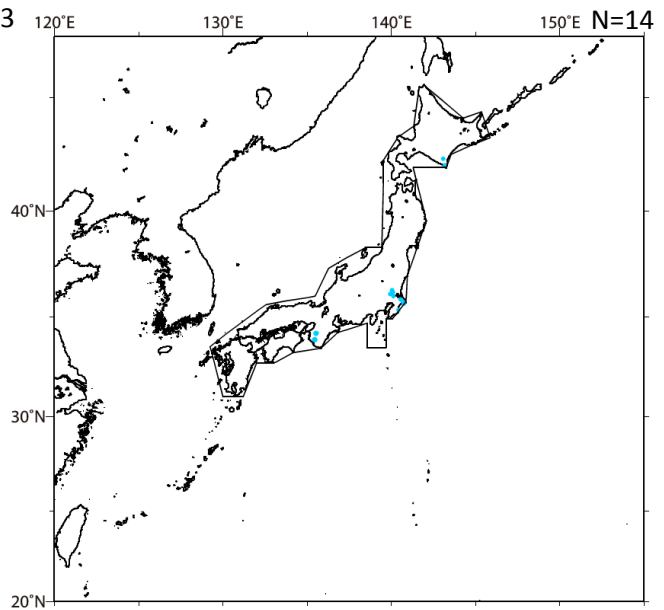
図6-1で示した抽出方法2. の余震除去後の地震は559個。このうち、より大きな規模の地震が発生したのは3例(M5.5 \rightarrow M5.8、M5.2 \rightarrow M6.1、M5.1 \rightarrow M5.5)で0.5%(3個/559個)。

最初の地震と後続の地震の規模が近い事例(Mf-M \leq 0.3、同規模以上を含む)は2.1%(12個/559個)。
 最初の地震と後続の地震の規模が近い事例(Mf-M \leq 0.5、同規模以上を含む)は2.5%(14個/559個)。

内陸マントル上部の全地震の震央分布図
 (M \geq 5.0、31km~80km、1923年~2016年6月)



上記の条件で抽出された
 規模が近い地震が続発した事例



日本列島を囲む多角形は「内陸」の範囲を表す。

図6-2. 規模が近い地震が続発した事例(内陸マントル上部)

表4-3. 規模が近い地震が続発した事例(海域)

海域の地震(M \geq 6.0、80km以内、1923年~2016年6月)について、図6-1と同じ方法で抽出。

青字はMの差が0.3以下の事例。下線は同一の地震。

最初の地震の発生年月日	最初の地震の震央地名	最初の地震のM(Mf)	後続の地震M(Mf-M \leq 0.5)	Mf-M \leq 0.3	地震間の期間差	前震一本震型	最初の地震と続発領域の位置		最初の地震付近の地震本部長期評価対象海溝型地震	左記の長期評価で予想したM
							領域内	領域外		
1923/5/26	千葉県東方沖	6.2	6.1	○	5.1日	○		○	茨城県沖	6.9~7.6、繰り返し発生するプレート間地震:6.7~7.2
			7.1	○	6.6日					
			6.8	○	6.7日					
1923/11/4	奄美大島北東沖	6.7	6.6	○	3.1日			○	南西諸島周辺の浅発地震	—
1923/11/19	与那国島近海	6.4	6.2	○	3.4日			○	与那国島周辺	7.8程度
1924/5/31	茨城県沖	6.1	6.4	○	1分	○		○	茨城県沖~三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
			6.1	○	25分					
1924/8/15	茨城県沖	7.2	6.7		10.8日			○	茨城県沖	6.9~7.6、繰り返し発生するプレート間地震:6.7~7.2
1928/5/29	三陸沖	6.5	6.6	○	3.9日	○	○		三陸沖中部~三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
1930/12/16	台湾付近	6.0	6.8	○	5.9日	○		○	—	—
1931/6/23	茨城県沖	6.0	6.4	○	37秒	○		○	茨城県沖	6.9~7.6、繰り返し発生するプレート間地震:6.7~7.2
1933/1/4	三陸沖	6.2	6.8	○	3.5日	○	○		三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
1933/7/9	択捉島南東沖	6.1	6.7	○	2時間	○	○		択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1938/11/5	福島県沖	7.5	7.4	○	1.0日			○	福島県沖	7.4前後(複数の地震が続発する)
1938/12/7	三陸沖	6.3	6.3	○	6.2日			○	三陸沖南部海溝寄り	7.9程度、繰り返し発生する地震以外の地震:7.2~7.6
			6.1	○	11.3日					
			5.8		13.0日					
1941/3/12	三陸沖	6.2	6.1	○	7時間			○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
1943/3/14	茨城県沖	6.1	6.3	○	43分	○		○	茨城県沖	6.9~7.6、繰り返し発生するプレート間地震:6.7~7.2
			6.7	○	28.1日					
			6.2	○	29.3日					
1943/6/13	青森県東方沖	7.1	6.6		2.2日			○	三陸沖北部	8.0前後(Mt8.2前後)、繰り返し発生する地震以外の地震:7.1~7.6
1946/12/22	北海道東方沖	6.2	5.9		6.5日			○	色丹島沖	7.8前後(Mw8.2前後)、ひとわり小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1948/5/12	宮城県沖	6.6	6.1		24分			○	三陸沖南部海溝寄り	7.9程度、繰り返し発生する地震以外の地震:7.2~7.6
1952/10/26	三陸沖	6.0	6.2	○	4時間	○		○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0 正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
			5.9	○	7時間					
			5.8	○	8時間					
1952/10/26	三陸沖	6.0	6.2	○	1時間	○		○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0 正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
			6.2	○	1.7日					
1952/10/27	三陸沖	6.5	6.2	○	1.6日			○	三陸沖中部~三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
1952/10/27	三陸沖	6.3	6.4	○	7時間	○		○	三陸沖中部	—
			5.9		1.9日					
1955/5/1	三陸沖	6.4	6.1	○	4時間			○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
1958/4/8	三陸沖	6.5	6.2	○	33分			○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0 正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
			6.0		2.7日					
			6.3	○	3.3日					
1961/1/16	茨城県沖	6.8	6.4		3時間			○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0 正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
			6.5	○	4時間					
			6.5	○	8時間					
1961/2/13	北海道東方沖	6.4	6.3	○	2.5日			○	色丹島沖	7.8前後(Mw8.2前後)、ひとわり小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1961/4/26	択捉島南東沖	6.0	5.5		4.1日			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1962/4/12	三陸沖	6.8	6.4		13.6日			○	三陸沖南部海溝寄り	7.9程度、繰り返し発生する地震以外の地震:7.2~7.6
1964/5/7	秋田県沖	6.9	6.5		12時間			○	青森県西方沖	7.7前後

表4-3. (つづき)

最初の地震の発生年月日	最初の地震の震央地名	最初の地震のM (Mf)	後続の地震M (Mf-M ≤ 0.5)	Mf-M ≤ 0.3	地震間の期間差	前震一本震型	最初の地震と続発領域の位置		最初の地震付近の地震本部長期評価対象海溝型地震	左記の長期評価で予想したM
							領域内	領域外		
1964/7/24	千島列島	6.3	5.9		8時間			○	—	—
1964/10/16	択捉島南東沖	6.0	5.6		59分			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1965/3/17	青森県東方沖	6.4	6.4	○	12.8日			○	三陸沖北部	8.0前後(Mt8.2前後)、繰り返し発生する地震以外の地震: 7.1~7.6
1965/9/18	茨城県沖	6.6	6.2		5.2日			○	茨城県沖	6.9~7.6、繰り返し発生するプレート間地震: 6.7~7.2
1967/3/19	千島列島	6.3	5.8		1.4日			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
			5.8		1.4日					
			5.9		6.8日					
			5.9		13.0日					
1968/5/21	千島列島	6.3	6.0	○	11時間			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
			5.8		9.3日					
1970/5/28	三陸沖	6.2	6.0	○	3時間			○	三陸沖北部	8.0前後(Mt8.2前後)、繰り返し発生する地震以外の地震: 7.1~7.6
			5.8		4時間					
1971/9/6	サハリン西方沖	6.9	6.6	○	2.7日			○	—	—
1974/10/10	青森県東方沖	6.2	6.4	○	8分	○	○		三陸沖北部	8.0前後(Mt8.2前後)、繰り返し発生する地震以外の地震: 7.1~7.6
1974/10/12	三陸沖	6.2	5.9	○	2.3日			○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
1975/6/10	北海道東方沖	7.0	6.5		3.2日			○	色丹島沖	7.8前後(Mw8.2前後)、ひとまわり小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1976/1/21	択捉島南東沖	6.5	6.0		17分			○	色丹島沖	7.8前後(Mw8.2前後)、ひとまわり小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1976/12/15	奄美大島近海	6.0	5.5		3時間			○	南西諸島周辺の浅発地震	—
1978/3/22	択捉島南東沖	6.5	6.6	○	20時間			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
			6.7	○	23時間					
			7.3	○	2.8日					
1980/3/3	沖縄本島北西沖	6.7	6.3		6.0日			○	南西諸島周辺の浅発地震	—
1981/1/18	三陸沖	6.1	5.9	○	2時間			○	三陸沖南部海溝寄り	7.9程度、繰り返し発生する地震以外の地震: 7.2~7.6
			6.1	○	8時間					
			7.0	○	8時間					
			6.6	○	4.4日					
1984/12/18	択捉島南東沖	6.0	5.6		22.6日			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1987/2/6	福島県沖	6.4	6.7	○	52分	○	○		福島県沖	7.4前後(複数の地震が続発する)
1989/10/27	三陸沖	6.2	6.1	○	8時間			○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0 正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
			6.0	○	2.4日					
			6.5	○	2.5日					
1991/12/7	千島列島	6.0	5.8	○	5.7日			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
			5.8	○	18.3日					
1991/12/8	千島列島	6.0	5.8	○	12時間			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
			5.7	○	14時間					
			5.6	○	6.0日					
			6.3	○	6.1日					
			6.1	○	7.8日					
			6.4	○	11.4日					
1991/12/13	千島列島	6.3	6.3	○	16時間			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
			6.3	○	17時間					
			6.4	○	17時間					
1992/7/16	三陸沖	6.1	5.8	○	2.3日			○	三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6~9.0 正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
			6.9	○	2.3日					
			6.9	○	2.3日					
			6.4	○	2.4日					
1994/5/23	与那国島近海	6.1	5.6		48分			○	与那国島周辺	7.8程度
			5.9	○	9時間					
			6.6	○	22時間					
1994/8/14	千島列島	6.2	5.8		4.1日			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
			5.8		16.2日					
1994/8/18	千島列島	6.4	6.3	○	10.5日			○	択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1995/10/18	奄美大島近海	6.9	6.5		13時間			○	南西諸島周辺の浅発地震	—
			6.7	○	16時間					

表4-3. (つづき)

最初の地震の 発生年月日	最初の地震の 震央地名	最初の地震のM (Mf)	後続の地震 M(Mf-M M≤0.5)	Mf-M≤ 0.3	地震間の 期間差	前震- 本震型	最初の地震と続 発領域の位置		最初の地震付近の地震本部長期評価 対象海溝型地震	左記の長期評価で予想したM
							領域内	領域外		
1995/12/1	千島列島	6.4	7.3 7.0	○ ○	2.8日 2.8日	○	○		択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1995/12/30	三陸沖	6.5	6.2	○	6分		○		三陸沖北部～三陸沖北部から房総沖 の海溝寄り	・8.0前後(Mt8.2前後)、繰り返し発生する地震以外の地震: 7.1～7.6 ・津波地震: Mt8.6～9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
1996/1/7	千島列島	6.0	5.7	○	11分		○		択捉島沖	8.1前後(Mw8.5前後)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1程度(Mw7.7程度)
1996/3/5	台湾付近	6.6	6.1		2時間		○		—	—
1998/4/30	鳥島近海	6.1	5.7		8.2日		○		—	—
2001/8/18	沖縄本島近海	6.4	5.9		2.2日		○		南西諸島周辺の浅発地震	—
2003/12/24	沖縄本島北西沖	6.0	5.5		39分		○		南西諸島周辺の浅発地震	—
2004/9/5	三重県南東沖	7.1	7.4	○	4時間	○	○		南海トラフ(潮岬～大王崎)	M8～M9クラス
2004/11/29	釧路沖	7.1	6.9	○	7.8日		○		根室沖	7.9程度(十勝沖と連動: 8.3程度)、ひと回り小さいプレート間地震: 7.1前後
2006/9/28	千島列島	6.0	6.8	○	2.7日	○	○		—	—
			6.6	○	3.3日					
			6.3	○	15.5日					
2006/12/26	台湾付近	6.9	7.2	○	7分	○	○		—	—
2007/4/20	宮古島北西沖	6.3	6.7	○	1時間	○	○		南西諸島周辺の浅発地震	—
2007/8/1	沖縄本島北西沖	6.1	6.3	○	6.3日	○	○		南西諸島周辺の浅発地震	—
2008/5/8	茨城県沖	6.4	6.3	○	14分		○		茨城県沖～三陸沖北部から房総沖の 海溝寄り	・6.9～7.6、繰り返し発生するプレート間地震: 6.7～7.2 ・津波地震: Mt8.6～9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
2008/12/20	関東東方沖	6.6	6.2		22時間		○		三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6～9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
2009/4/7	千島列島	6.7	6.5	○	11.6日		○		—	—
2009/8/17	石垣島近海	6.7	6.6	○	10時間		○		南西諸島周辺の浅発地震	—
2009/9/29	沖縄本島北西沖	6.1	5.7		1.1日		○		南西諸島周辺の浅発地震	—
2011/3/9	三陸沖	7.3	6.8		18時間	○	○		三陸沖南部海溝寄り～三陸沖北部から 房総沖の海溝寄り	・7.9程度、繰り返し発生する地震以外の地震: 7.2～7.6 ・津波地震: Mt8.6～9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
			9.0	○	2.1日					
2013/4/2	三陸沖	6.2	5.7		7時間		○		三陸沖北部から房総沖の海溝寄り	津波地震: Mt8.6～9.0、正断層型: 8.2前後(Mt8.3前後)
2014/10/11	青森県東方沖	6.1	5.6		2時間		○		三陸沖北部	8.0前後(Mt8.2前後)、繰り返し発生する地震以外の地震: 7.1～7.6
2015/2/17	三陸沖	6.9	6.5		3.2日		○		三陸沖北部	8.0前後(Mt8.2前後)、繰り返し発生する地震以外の地震: 7.1～7.6
			6.4		4.5日					
2015/4/20	与那国島近海	6.8	6.4		10時間		○		与那国島周辺	7.8程度
2016/5/12	台湾付近	6.5	6.4	○	1時間		○		—	—

M7.0以上の地震の場合

後により大きな地震がおきた事例は、以下の2例。

2004年9月5日三重県南東沖M7.1 (→4時間後→) 9月5日三重県南東沖M7.4

2011年3月9日三陸沖M7.3 (→ 2日後 →) 3月11日三陸沖M9.0(東北地方太平洋沖地震)

M6.0以上の地震の場合

図6-1で示した抽出方法2. の余震除去後の地震は816個。このうち、最初の地震と後続の地震の規模が近い事例($M_f - M \leq 0.3$ 、同規模以上を含む)は6.4%(53個/816個)。最初の地震と後続の地震の規模が近い事例($M_f - M \leq 0.5$ 、同規模以上を含む)は9.7%(79個/816個)。M6.0以上は続発領域内で28.7%(234個/816個)が発生しており、最初の地震と後続の地震の規模が近い事例が続発領域内で発生した割合は、

$M_f - M \leq 0.3$ で57%(30個/53個)、 $M_f - M \leq 0.5$ で57%(45個/79個)

これらについて、続発領域内における規模が近い地震が起こる割合、

$M_f - M \leq 0.3$ で13%(30個/234個)、 $M_f - M \leq 0.5$ で19%(45個/234個)

はそれぞれ、続発領域外における規模が近い地震が起こる割合、

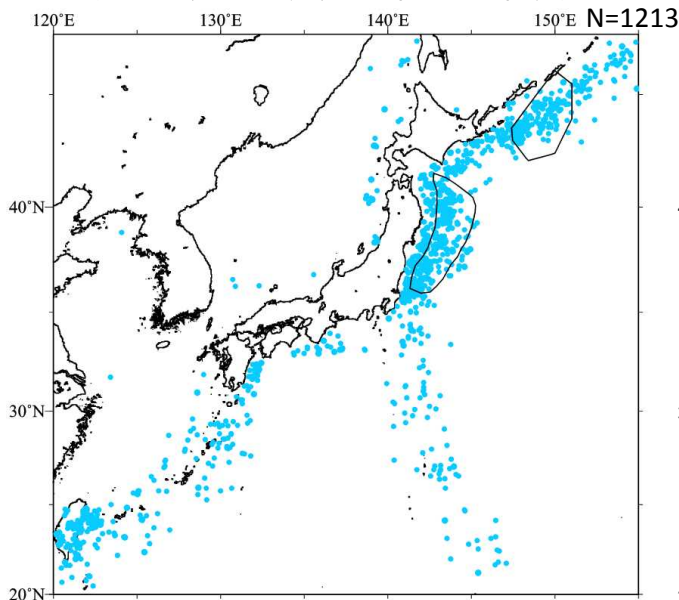
$M_f - M \leq 0.3$ で4.0%(23個/582個)、 $M_f - M \leq 0.5$ で5.8%(34個/582個)

よりも有意に高い(それぞれの地域の確率が同じである仮説は、危険率1%未満で棄却できる)。

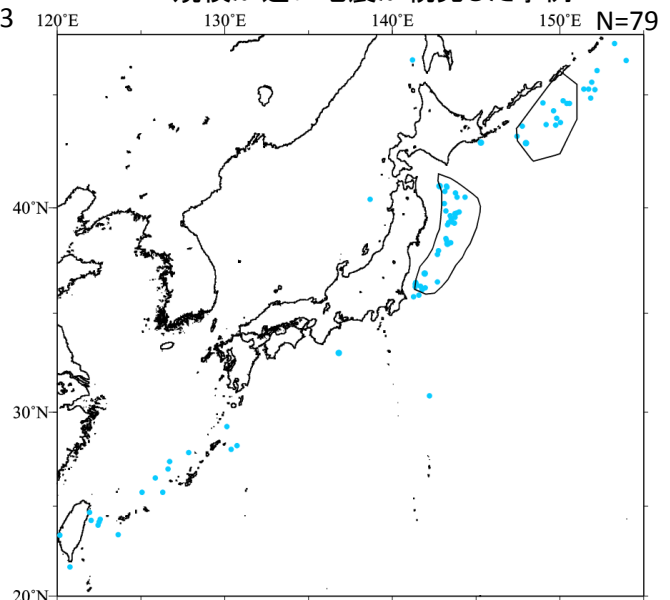
また、前震一本震型の活動が続発領域内で発生した割合は56%(15個/27個)であり、続発領域内における前震一本震型の活動が起こる割合6.4%(15個/234個)は、続発領域外における前震一本震型の活動が起こる割合2.1%(12個/582個)よりも有意に高い(それぞれの地域の確率が同じである仮説は、危険率1%未満で棄却できる)。

海域の全地震の震央分布図

($M \geq 6.0$ 、80km以浅、1923年~2016年6月)



上記の条件で抽出された 規模が近い地震が続発した事例



択捉島沖と三陸沖の多角形は、地震調査研究推進本部地震調査委員会(1998)の「続発領域」を示す。

図6-3. 規模が近い地震が続発した事例(海域)

表5. 内陸地殻内(30km以浅)の地震における前震一本震型の事例の割合

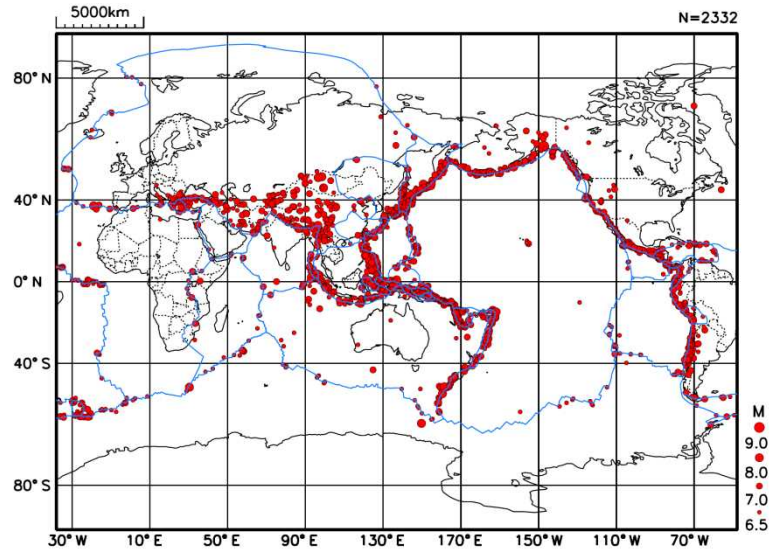
前震及び本震の抽出は、図6-1で示した方法による。

「群発領域」は、明田川・福満(2011)における「群発型発生領域」(長野県北部の小領域(いわゆる松代群発地震の発生領域)と伊豆半島東方沖から伊豆諸島にかけての領域)を指し、前震及び本震の「全て」はこの領域を含めて抽出されたもの。「群発領域除外」は表4-1の「前震一本震型」の事例。

	個数	①に 対する 割合	②に 対する 割合	第四紀火山との距離							
				20km以内		21~30km		30km以内		31km以上	
				個数	割合	個数	割合	個数	割合	個数	割合
内陸30km以浅 M5.0以上(①)	986	100%	—	574	58%	84	9%	658	67%	328	33%
前震判定対象地震 (①から余震除去後=②)	563	57%	100%	310	55%	51	9%	361	64%	202	36%
本震(全て)	35	4%	6%	29	83%	2	6%	31	89%	4	11%
本震(群発領域除外)	16	2%	3%	11	69%	1	6%	12	75%	4	25%

震央分布図(1900年～2016年6月、 $M \geq 6.5$ 、30km以浅)

ISCJEMカタログ(1900～2009年)、USGSによる震源(2010年～)を使用。青線はプレート境界の位置を表す。

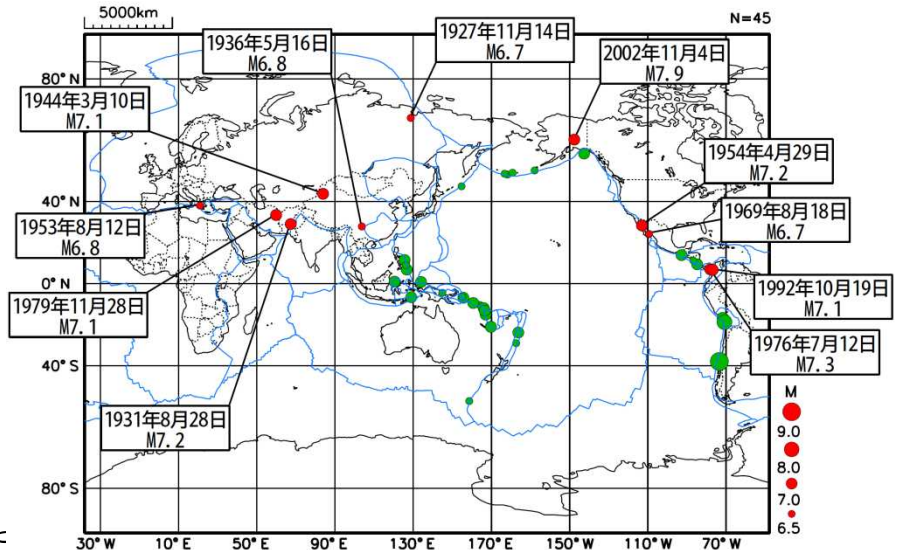


本震として抽出された地震(30km以浅)※の震央分布

上図のうち、余震除去後(図6-1抽出方法2. 参照)の地震数は2048個。このうち、前震-本震型の本震として抽出された地震(図6-1 抽出方法3. 参照)の割合は2.2%(45個/2048個)。

右図の赤は下表に示す、内陸等で発生した地震。緑はそれ以外の地震。

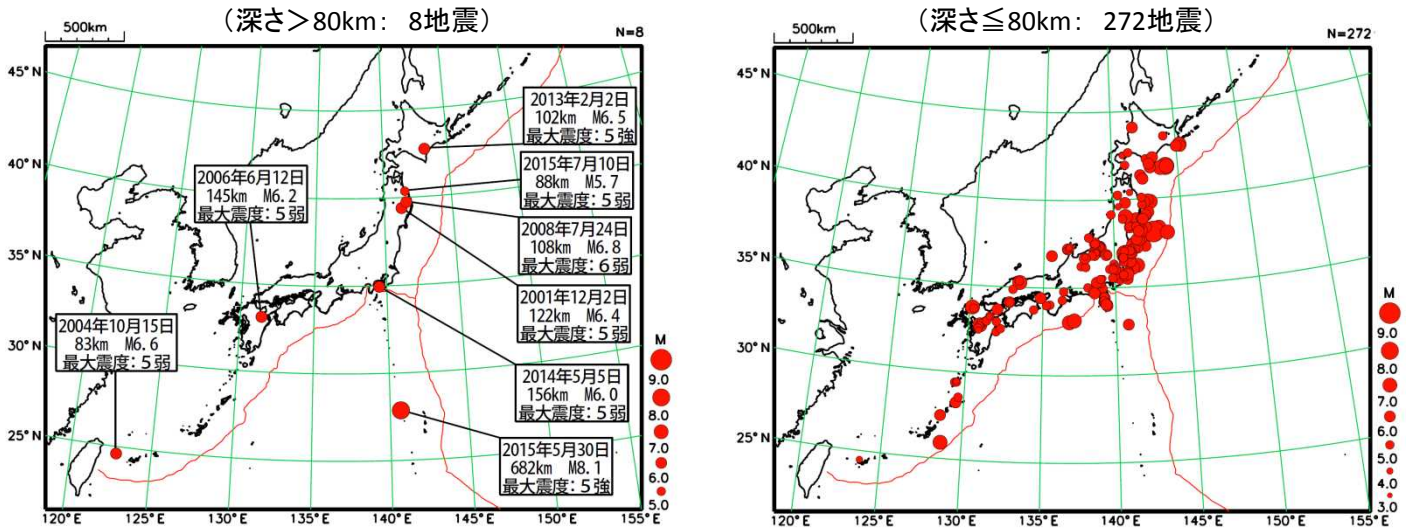
※日本付近で抽出されたものは除外した



本震年月日	本震震央地名	本震M	前震の発生時期 (本震までの期間)	前震M	近隣のプレート境界等 (Bird, P. (2003) による)
1927/11/14	ロシア・シベリア	6.7	4時間前	6.5	ユーラシア・北米(トランスフォーム断層)
1931/8/28	パキスタン	7.2	2.7日前	6.8	インド・ユーラシア(収束境界 またはトランスフォーム断層)
1936/5/16	中国・四川省	6.8	19.3日前	6.7	—
1944/3/10	新疆ウイグル自治区北部	7.1	9分前	6.9	—
1953/8/12	ギリシャ	6.8	1.2日前	6.5	エーゲ海・ユーラシア(リフト境界) エーゲ海・アフリカ(沈み込み境界)
1954/4/29	カリフォルニア湾	7.2	45分前	6.6	北米・太平洋(トランスフォーム断層)
1969/8/18	カリフォルニア湾	6.7	1分前	6.5	北米・太平洋(トランスフォーム断層)
1976/7/12	パナマ・コロンビア国境	7.3	3時間前	6.8	パナマ・北アンデス(トランスフォーム断層) ナスカ・北アンデス(沈み込み境界)
1979/11/28	イラン北部	7.1	13.6日前	6.6	—
1992/10/19	コロンビア北部	7.1	1.3日前	6.6	—
2002/11/4	アラスカ中部	7.9	11.4日前	6.6	—

図7. 海外でさらに規模の大きな地震が発生した事例(30km以浅)

1997年10月以降、最大震度5弱以上を観測した地震の震央分布図



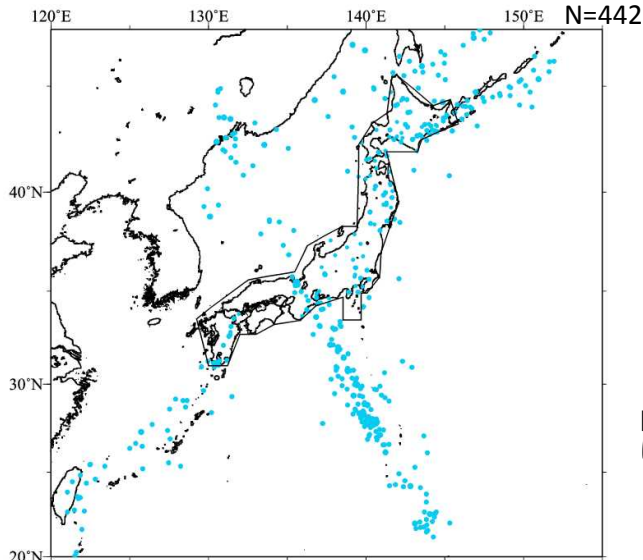
規模が近い地震が続発した事例(深部)

深部の地震 ($M \geq 5.5$ (内陸) または $M \geq 6.0$ (海域)、深さ $> 80\text{km}$ 、1923年～2016年6月) について、図6-1に示す方法により、地震発生から30日以内に、最初の地震とのMの差が0.5以下の地震 (Mが上回るものを含む) が発生した事例を抽出した。

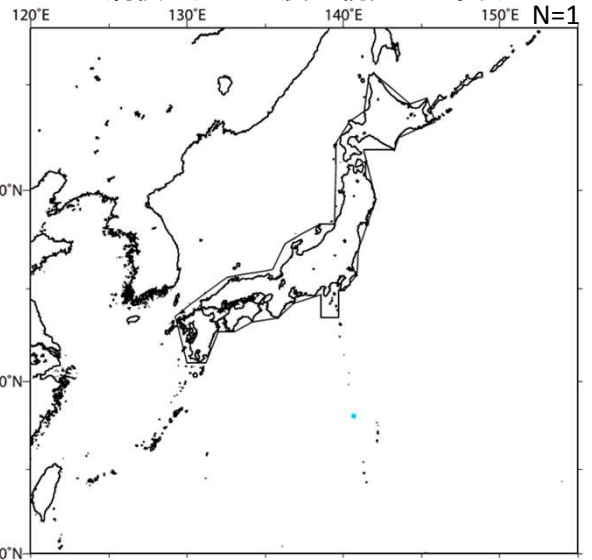
最初の地震の発生年月日	最初の地震の震央地名	最初の地震のM (Mf)	後続の地震のM (Mf-M ≤ 0.5)	地震間の期間差	前震一本震型	最初の地震付近の地震本部長期評価対象海溝型地震	備考
1955/4/24	小笠原諸島西方沖	6.1	6.4	20.5日	○	-	太平洋プレート内部の地震

深い地震全て

($M \geq 5.5$ (内陸) または $M \geq 6.0$ (海域)、深さ $> 80\text{km}$ 、1923年～2016年6月) N=442



上記の条件で抽出された規模が近い地震が続発した事例



・内陸 $M \geq 5.5$ (130個)、海域 $M \geq 6.0$ (308個) の地震の場合
 図6-1で示した抽出方法2. の余震除去後の地震は438個。このうち、より大きな規模の地震が発生したのは1例 ($M6.1 \rightarrow M6.4$) で、0.2% (1個/438個)。

図8. 深さ80kmより深い場所で発生した事例

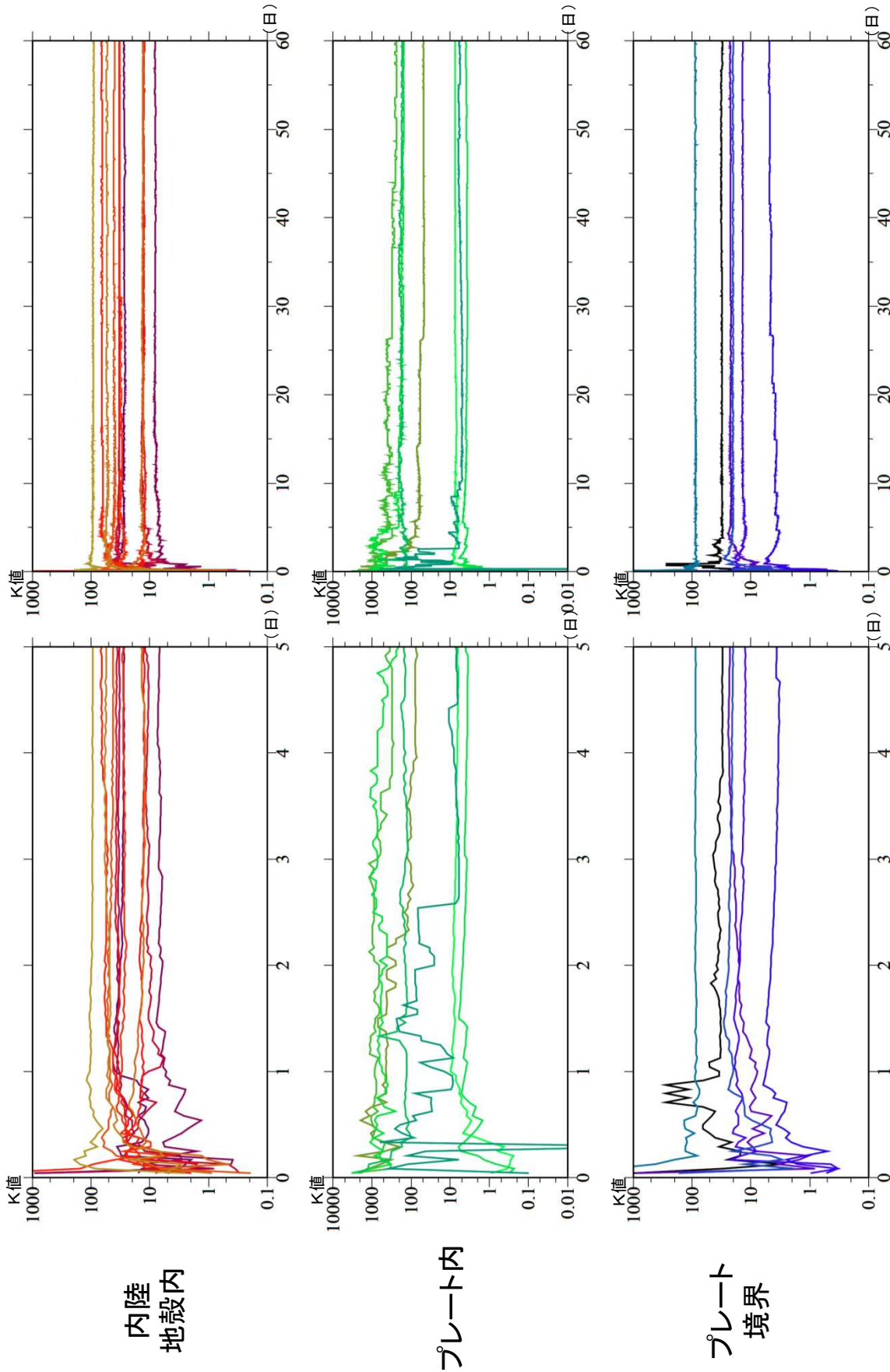


図9. 余震活動パラメータ(K値)の時間変化

1983年～2011年に発生した日本周辺の主な地震(下記)の余震活動については、大森・宇津公式にあてはめて求めたK値の時間変化を地震の発生場所別(内陸地殻内、プレート内、プレート境界)に示した。

- 【内陸地殻内】1984年長野県西部地震(M6.8)、1993年能登半島沖の地震(M6.6)、1997年鹿児島薩摩地方の地震(M6.6)、2000年鳥取県西部地震(M7.3)、2003年宮城県北部の地震(M6.4)、2004年新潟県中越地震(M6.8)、2005年福岡県西方沖の地震(M7.0)、2007年能登半島地震(M6.9)、2007年新潟県中越沖地震(M6.8)、2008年岩手-宮城内陸地震(M7.2)、2011年福島県浜通りの地震(M7.0)
- 【プレート内】1994年北海道東方沖地震(M8.2)、2000年根室半島南東沖の地震(M7.0)、2003年宮城県沖の地震(M7.1)、2004年三重県南東沖の地震(M7.4)、2005年三陸沖の地震(M7.2)、1983年日本海中部地震※(M7.7)、1993年7月12日北海道南西沖地震※(M7.8) <※の地震は便宜上、このカテゴリに含めた>
- 【プレート境界】1994年三陸はるか沖地震(M7.6)、2003年十勝沖地震(M8.0)、2004年釧路沖の地震(M7.1)、2005年宮城県沖の地震(M7.2)、2008年茨城県沖の地震(M7.0)、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)

主な地震のETASモデルの α 比較

(熊本地震はMth3.6、東北地方太平洋沖地震はMth5.0、他の地震はMth2.5で推定)

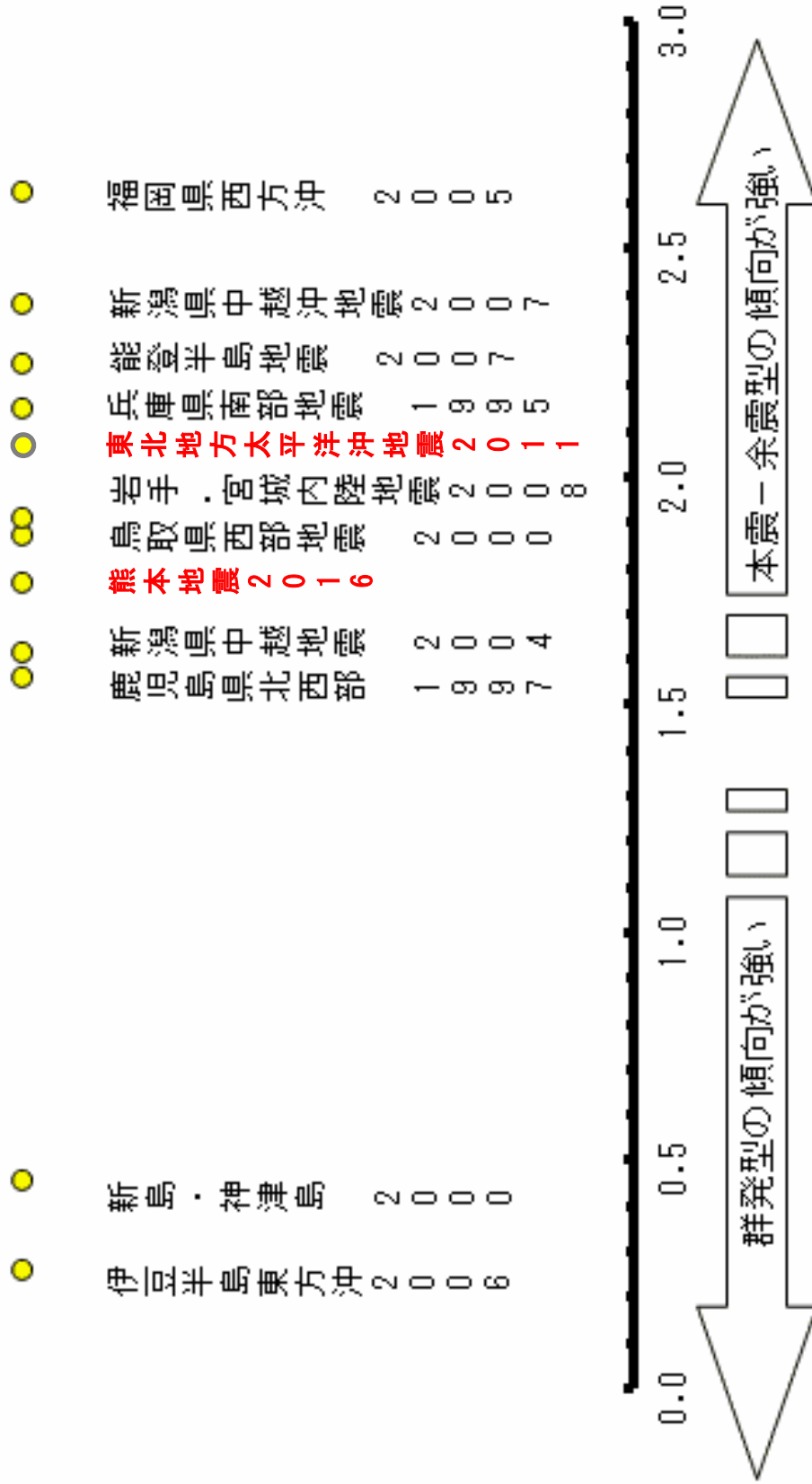
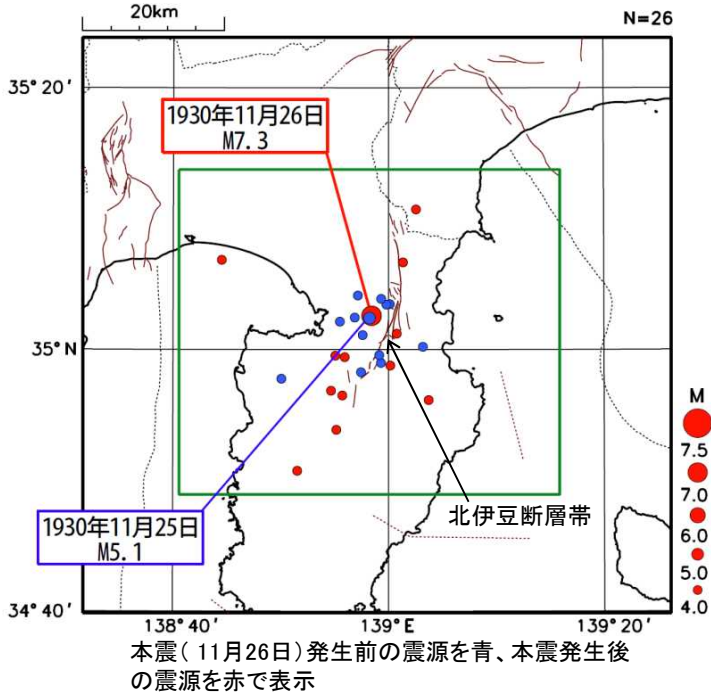
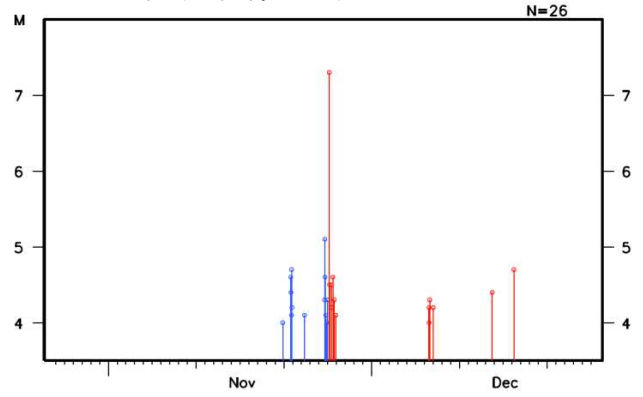


図10. ETASモデルのパラメータ(α 値)

震央分布図(1930年10月26日~1930年12月25日、 $M \geq 4.0$ 、30km以浅)



M-T図(左図矩形内)



時空間分布図(左図矩形内、南北投影)

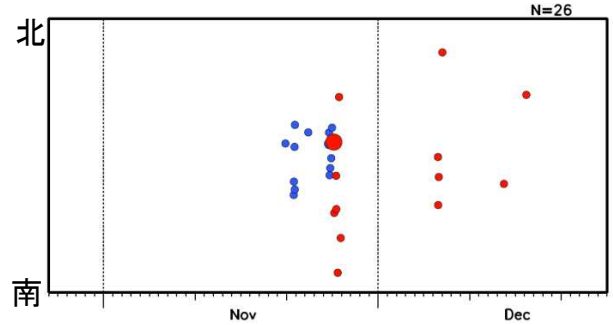
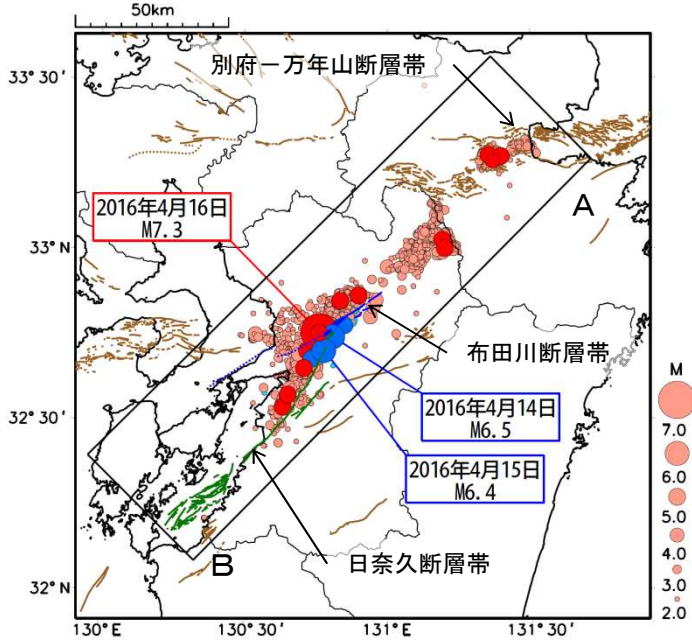
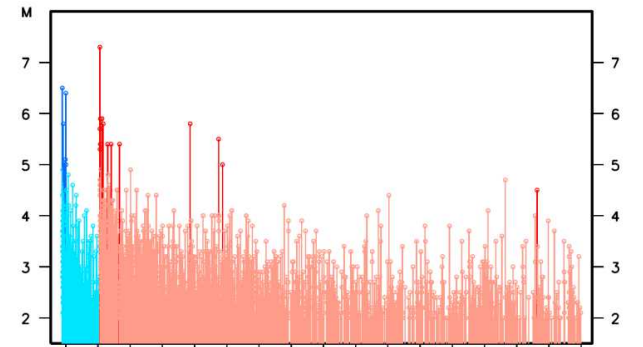


図11-1. 地震活動が当初のものから拡大した例(北伊豆地震)

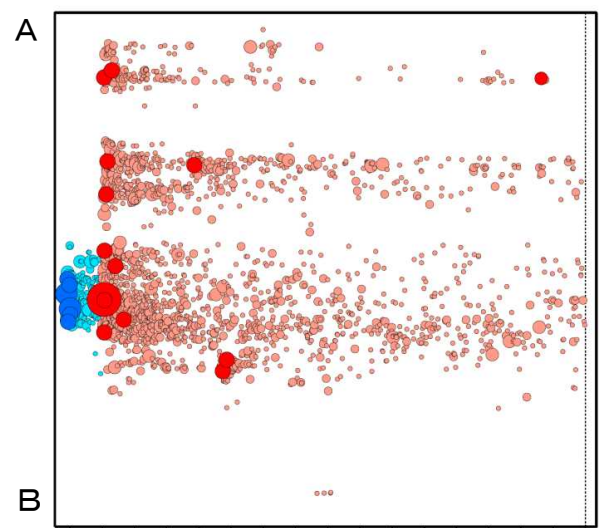
震央分布図(2016年4月14日~4月30日、 $M \geq 2.0$ 、20km以浅)



M-T図(左図矩形内)



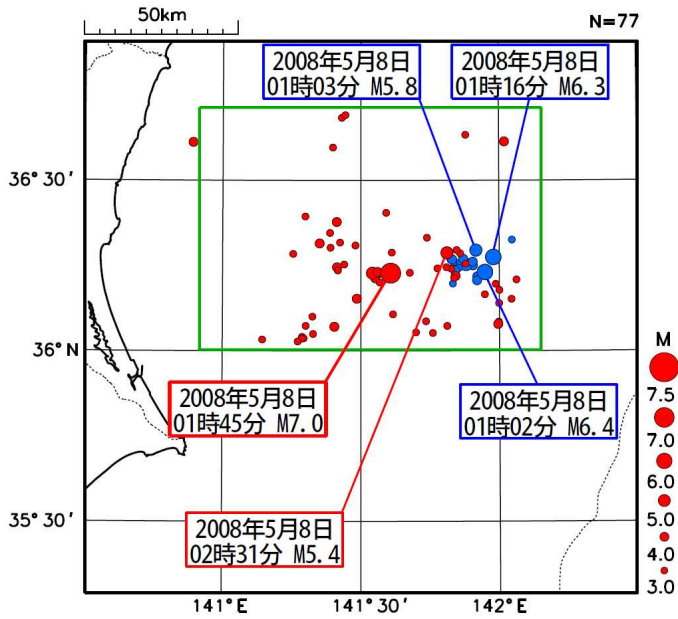
時空間分布図(左図矩形内、AB投影)



M7.3の地震(4月16日)発生前の震源を青または水色、同地震発生後の震源を赤またはピンクで表示。このうち、手作業により精査した震源を濃く(青または赤)、それ以外の震源(自動処理による震源)を薄く(水色またはピンク)表示。

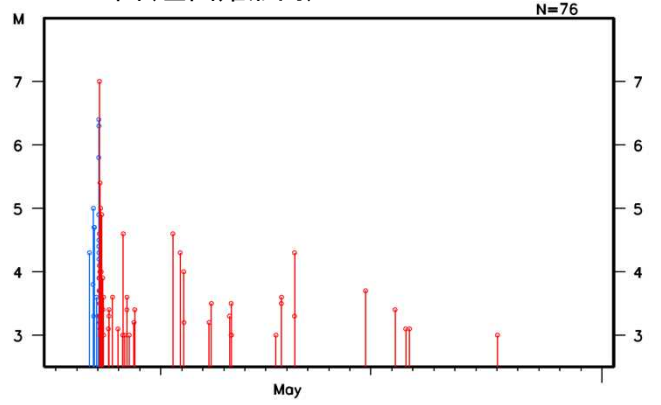
図11-2. 地震活動が当初のものから拡大した例(熊本地震)

震央分布図(2008年5月6日～2008年5月31日、 $M \geq 3.0$ 、60km以浅)



本震(5月8日01時45分)発生前の震源を青、本震発生後の震源を赤で表示

M-T図(左図矩形内)



時空間分布図(左図矩形内、東西投影)

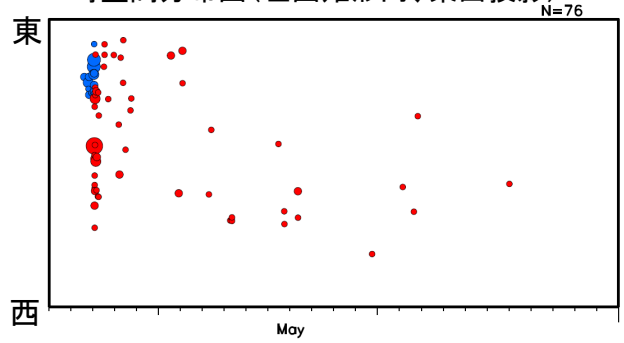


図11-3. 地震活動が当初のものから拡大した例(2008年茨城県沖の地震)

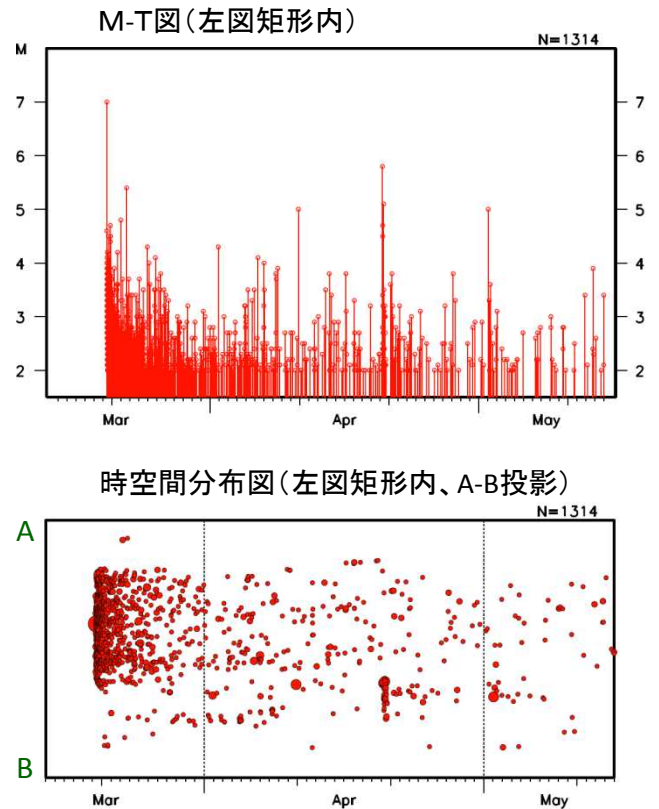
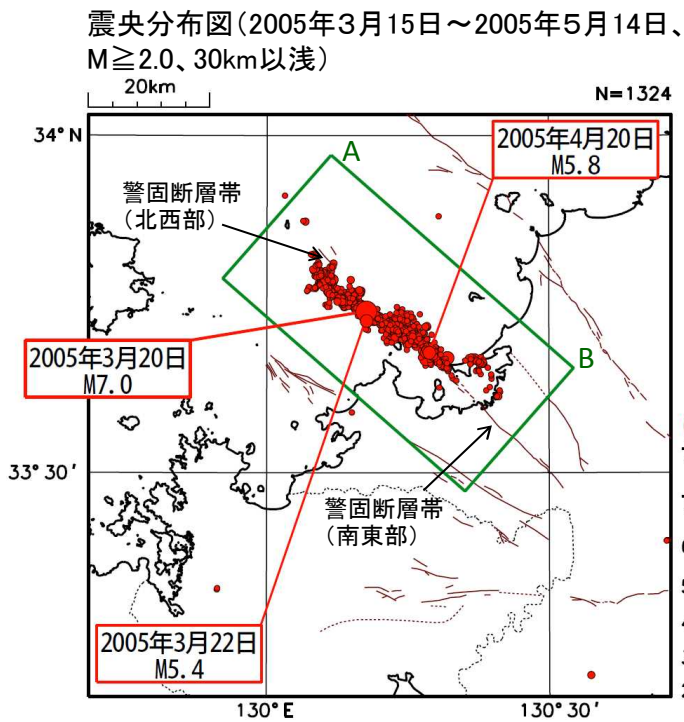


図11-4. 地震活動が当初のものから拡大しなかった例(2005年福岡県西方沖の地震)

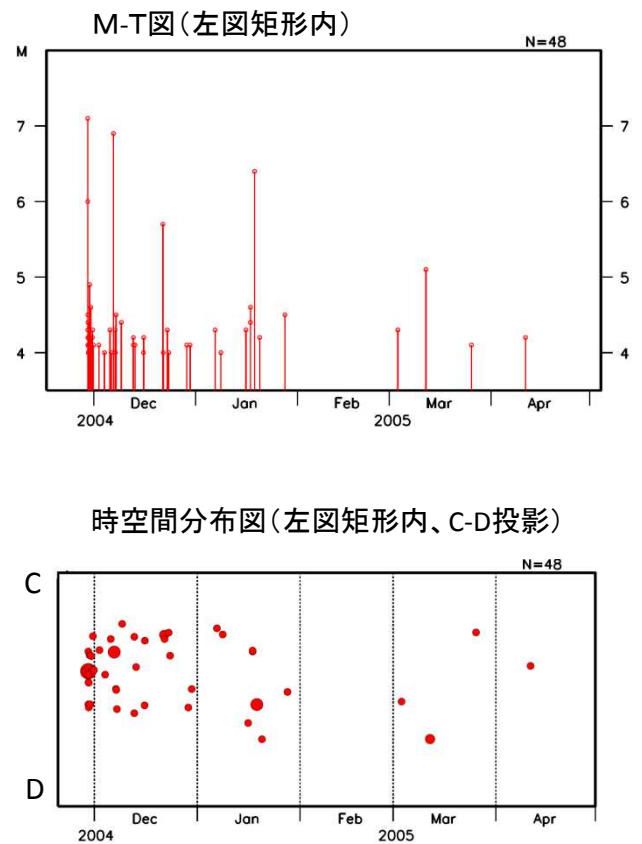
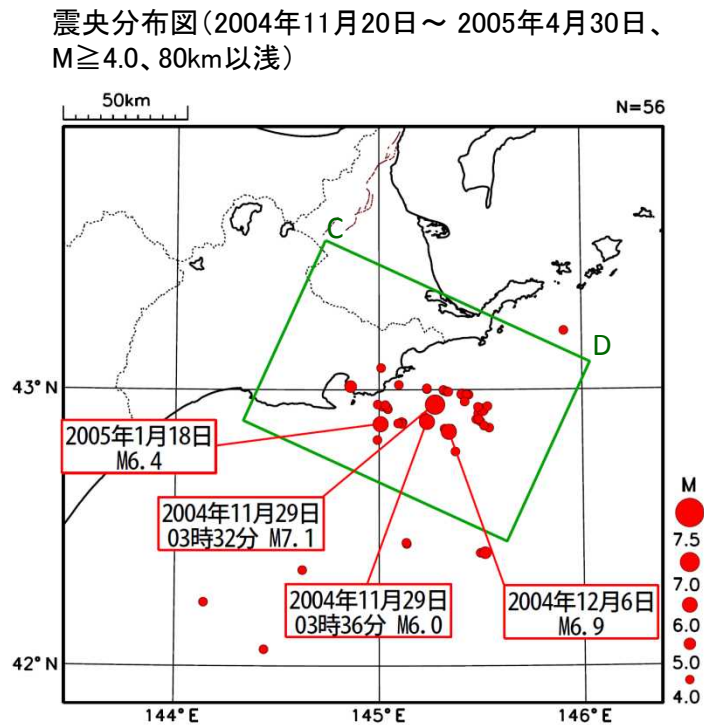


図11-5. 地震活動が当初のものから拡大しなかった例(2004年釧路沖の地震)

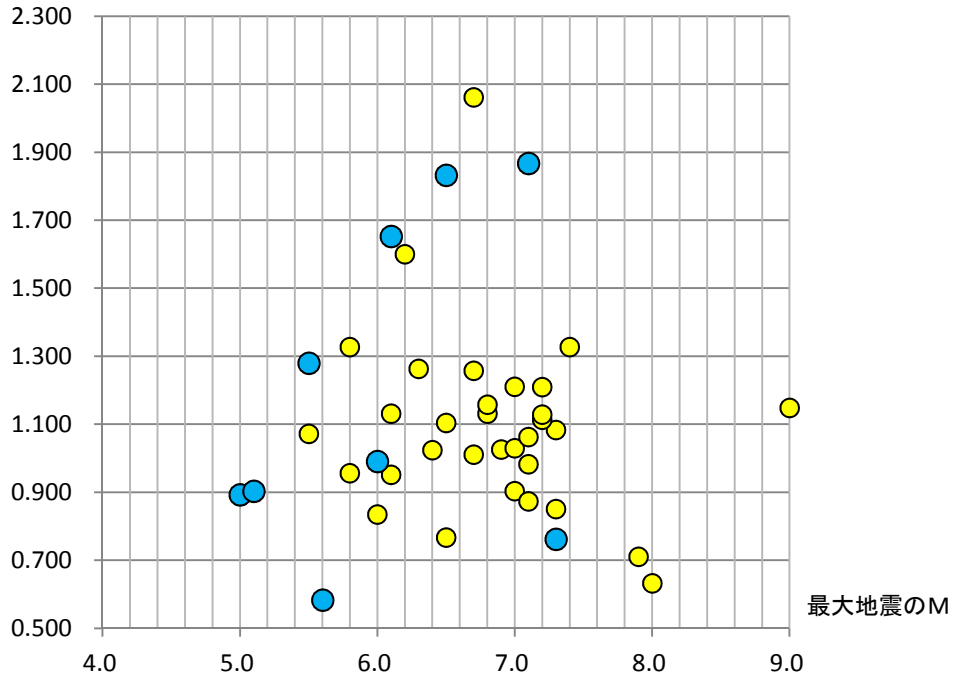
表6. 1997年10月以降の主な地震の余震活動パラメータ

水色は次行の地震活動の前に発生した前駆的活動等で、次行の活動の最大地震の前までの期間でパラメータを求めている(それ以外は、最大地震発生後1週間でパラメータを求めている)。なお、平成23年東北地方太平洋沖地震から1年間に発生した地震は対象から除外している。

※cは「内陸地殻内」、pは「プレート境界または海洋プレート内」を表す。

年月日	地震名または震央地名	発生場所(※)	最大地震のM	二番目に大きな地震のM	b値	余震確率モデルパラメータ						通常時のb値
						Mth	logK(M3)	K	c	p	AIC	
1998年9月3日	岩手県内陸北部	c	6.2	4.3	0.84	1.5	-0.3	8.84	0.051	1.600	-606.2	0.99
2000年1月28日	根室半島南東沖	p	7.0	4.3	0.87	2.6	0.9	17.19	0.010	0.903	-548.2	0.81
2000年10月6日	鳥取県西部地震	c	7.3	5.6	0.89	2.5	1.6	99.46	0.053	1.083	-4403.9	0.91
2001年3月24日	芸予地震	p	6.7	5.2	0.71	2.8	0.8	8.28	0.107	1.257	-125.6	0.84
2003年5月26日	宮城県沖	p	7.1	4.9	0.83	2.8	1.5	47.40	0.018	0.982	-2118.8	0.85
2003年7月26日	宮城県北部(～7月26日M6.4発生前)	c	5.6	3.7	0.71	2.1	0.9	30.77	0.003	0.583	-304.5	0.76
2003年7月26日	宮城県北部	c	6.4	5.5	0.71	2.1	1.2	66.41	0.034	1.024	-2875.7	0.76
2003年9月26日	十勝沖地震	p	8.0	7.1	0.65	4.2	2.0	16.71	0.006	0.632	-322.4	0.91
2004年9月5日	紀伊半島南東沖(～9月5日M7.4発生前)	p	7.1	5.0	0.72	3.0	1.6	37.85	0.251	1.867	-532.7	0.92
2004年9月5日	紀伊半島南東沖	p	7.4	6.5	0.79	3.0	2.2	173.15	0.448	1.327	-3005.2	0.92
2004年10月23日	新潟県中越地震	c	6.8	6.5	0.62	3.0	1.8	62.55	0.041	1.131	-2974.2	0.74
2004年11月29日	釧路沖	p	7.1	5.9	0.66	2.5	1.1	28.54	0.016	0.873	-910.5	0.71
2004年12月14日	留萌支庁南部	c	6.1	4.8	0.72	2.0	0.4	13.78	0.022	1.131	-554.9	0.97
2005年3月20日	福岡県西方沖	c	7.0	5.8	0.68	2.0	1.7	233.26	0.156	1.210	-8536.8	0.94
2005年7月23日	千葉県北西部	p	6.0	4.6	0.68	1.6	0.1	11.83	0.007	0.835	-289.3	0.69
2005年8月16日	宮城県沖	p	7.2	4.7	0.87	3.0	0.7	4.86	0.010	1.209	-271.2	0.80
2005年11月15日	三陸沖	p	7.2	4.9	1.09	3.0	1.8	67.35	0.162	1.113	-1673.6	0.95
2006年10月1日	千島列島(～11月15日M7.9発生前)	p	6.8	6.6		5.3		-	-	-	-	1.26
2006年11月15日	千島列島	p	7.9	6.6	1.36	5.3	3.8	4.72	0.096	0.710	-4.6	1.26
2007年3月25日	能登半島地震	c	6.9	5.3	0.91	3.2	1.6	26.24	0.009	1.026	-1385.3	0.90
2007年4月20日	宮古島北西沖(～4月20日M6.7発生前)	c	6.3	5.5	0.91	3.6		-	-	-	-	
2007年4月20日	宮古島北西沖	c	6.7	6.1	0.72	3.6	1.2	6.33	0.105	2.061	-256.6	0.86
2007年7月16日	新潟県中越沖地震	c	6.8	5.8	0.84	3.0	1.1	12.94	0.017	1.157	-636.3	0.77
2007年8月1日	沖縄本島近海(～8月7日M6.3発生前)	c	6.1	4.5	0.93	2.7	1.0	20.03	0.174	1.652	-511.3	0.94
2007年8月7日	沖縄本島近海	c	6.3	5.1	1.04	2.7	0.3	4.01	0.019	1.263	-171.6	0.94
2008年5月5日	茨城県沖(～5月8日M7.0発生前)	p	6.4	6.3	0.50	3.5		-	-	-	-	0.68
2008年5月8日	茨城県沖	p	7.0	5.8	0.70	3.5	1.3	8.46	0.025	1.029	-201.1	0.68
2008年6月14日	岩手・宮城内陸地震	c	7.2	5.7	0.83	3.0	1.7	52.76	0.026	1.128	-2906.1	0.90
2008年9月11日	十勝沖	p	7.1	5.7	0.57	3.3	0.8	4.55	0.047	1.062	-51.7	0.60
2009年8月11日	駿河湾	p	6.5	4.5	0.82	2.5	0.5	7.68	0.008	1.104	-368.3	0.99
2011年2月27日	岐阜県飛騨地方(～2月27日M5.5発生前)	c	5.0	3.3	0.65	1.1	0.3	32.13	0.006	0.893	-769.7	0.84
2011年2月27日	岐阜県飛騨地方	c	5.5	4.0	0.74	1.1	0.4	56.45	0.032	1.072	-2576.2	0.84
2011年3月9日	三陸沖(～3月11日M9.0発生前)	p	7.3	6.8	0.429	3.5	1.7	31.61	0.029	0.762	-653.6	0.87
2011年3月11日	東北地方太平洋沖地震	p	9.0	7.6	0.814	5.0	3.6	91.75	0.036	1.148	-3207.5	0.87
2012年4月25日	千葉県北東部(～4月29日M5.8発生前)	p	5.5	4.3	0.729	2.0	-0.3	2.91	0.008	1.280	-211.4	0.64
2012年4月29日	千葉県北東部	p	5.8	3.7	0.616	2.0	-0.3	2.23	0.038	0.956	-2.7	0.64
2012年9月14日	千葉県北東部(前震)	p	5.1	3.8	0.99	2.1	-0.3	3.65	0.002	0.903	48.8	0.84
2012年10月12日	千葉県北東部	p	5.8	3.6	0.982	2.1	-0.5	2.55	0.016	1.327	-131.7	0.84
2012年5月20日	三陸沖(～5月20日M6.5発生前)	p	6.0	5.8	0.539	3.5	0.5	1.72	0.002	0.991	-45.4	0.65
2012年5月20日	三陸沖	p	6.5	5.7	0.702	3.5	1.4	11.82	0.009	0.767	-233.3	0.65
2012年8月22日	十勝支庁南部(～8月25日M6.1発生前)	p	5.2	0.8								0.70
2012年8月25日	十勝支庁南部	p	6.1	3.6	0.695	2.1	0.0	3.89	0.008	0.951	-72.1	0.70
2013年12月14日	千葉県東方沖(～12月21日M5.5発生前)	p	5.5	2.7								0.69
2013年12月21日	千葉県東方沖(双発)	p	5.5	3.4								0.69
2014年11月22日	長野県北部	c	6.7	4.5	0.83	2.0	0.6	26.84	0.012	1.011	-1232.1	1.05
2016年4月14日	熊本地震(～4月16日M7.3発生前)	c	6.5	6.4	0.762	3.6	1.4	8.20	0.098	1.832	-449.1	0.97
2016年4月16日	熊本地震(4月16日M7.3発生後)	c	7.3	5.9	0.981	3.6	1.9	22.51	0.003	0.851	-870.9	0.97

余震活動パラメータ
(p値)



余震活動パラメータ
(b値)

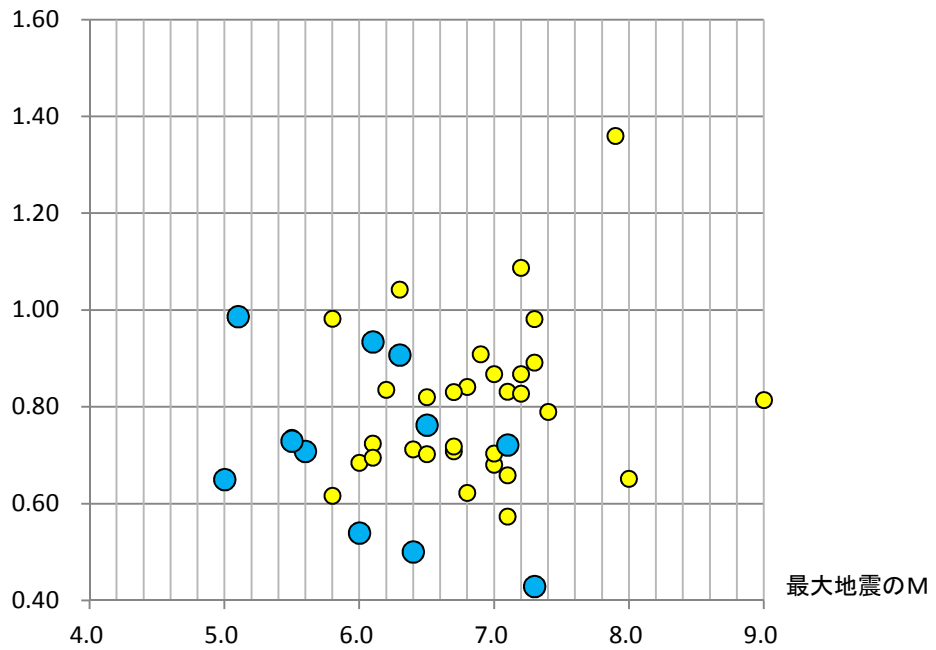


図12. 主な地震の余震活動パラメータ(p値、b値)の分布

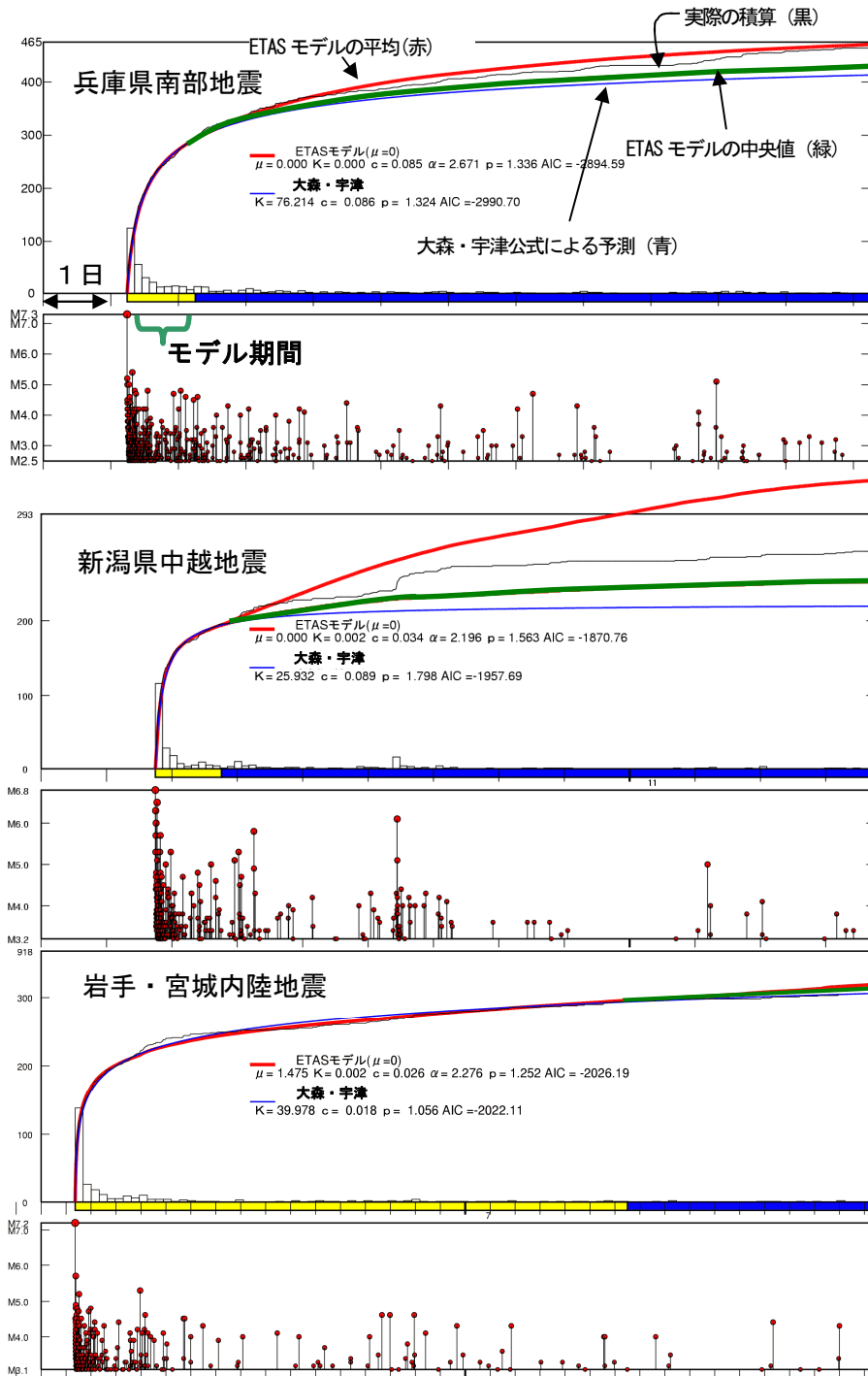


図13. ETASモデルによるシミュレーション予測の例

(上段:平成7年兵庫県南部地震($M \geq 2.5$)、中段:平成16年新潟県中越地震($M \geq 3.2$)、
 下段:平成20年岩手・宮城内陸地震($M \geq 3.1$))

- ・地震毎にそれぞれ、上側に地震回数時系列、下側にMT図を示す(横軸の目盛幅は1日)。
- ・上側の黒線は実際の地震回数積算、赤線はETASモデルによる同予測の平均値、緑線はETASモデルによる同予測の中央値、青線は大森・宇津公式による同予測をそれぞれ示す。
- ・ETASモデルと大森・宇津公式のパラメータは黄色区間のデータで求め、引き続き10日間の予測期間(青色区間)の予測値と合わせて示した。

別添

「大地震後の地震活動の見通しに関する情報」発表の 基本的な流れ

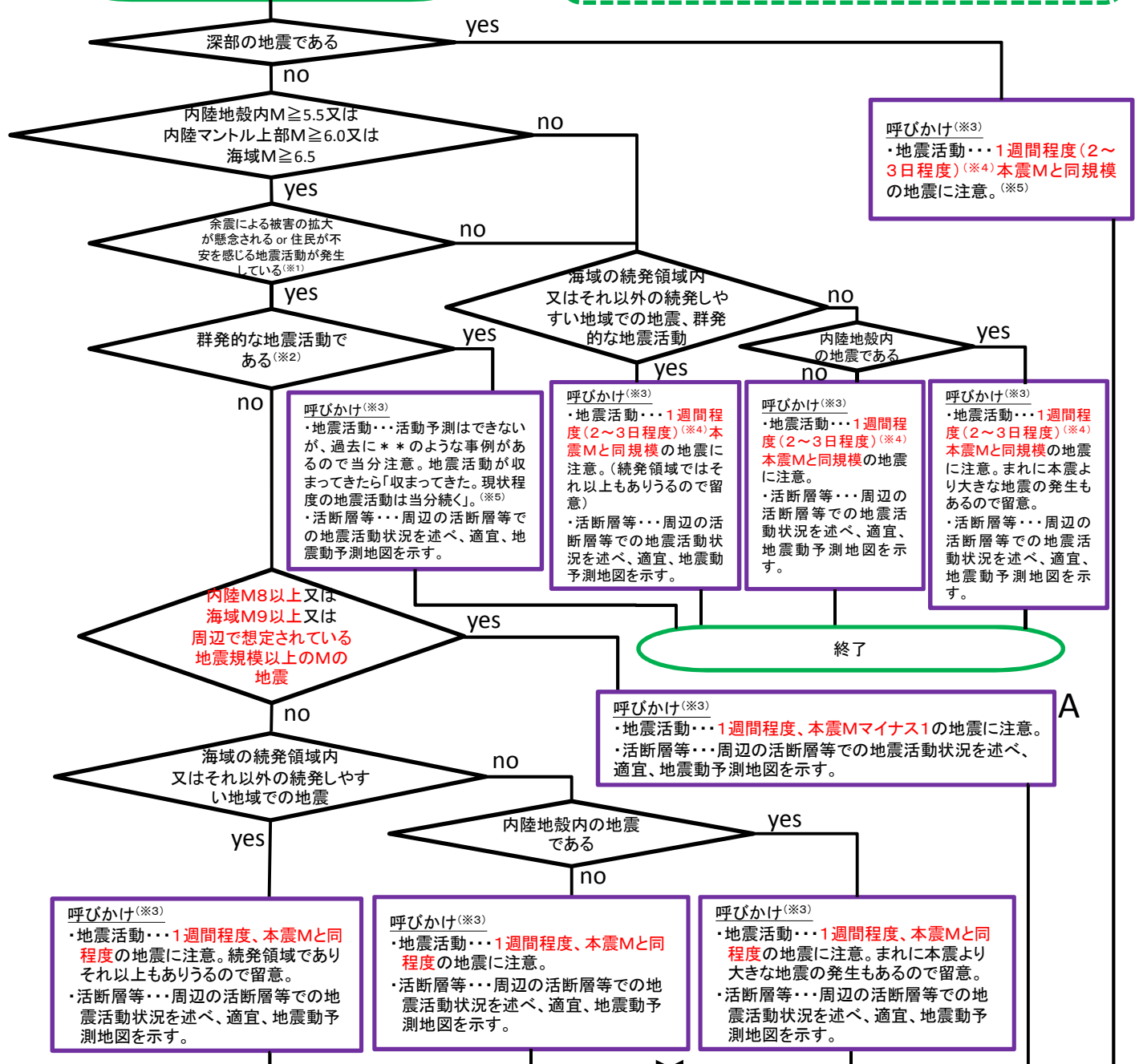
本別添は、報告書で示された指針に基づいて「大地震後の地震活動の見通しに関する情報」を発表する場合の、具体的な手順と流れをフローチャートで示したものである。

このフローチャートはあくまで指針であり、運用の際は、実際の地震活動状況を見つ、適切な対応がなされることが望ましい。

[見通し情報の発表基準及び地震発生直後～約1週間の防災上の呼びかけ]

フローの途中で以下の状況になった場合
 ☆地震活動域で当初の大きな地震より**大きい地震**が発生した場合→最大Mの地震の情報をもって再度**最初から**スタート。
 ☆**当初の活動域から離れた場所**(近接した場所)で大きな地震が発生した場合→余震発生確率適用可否や活動域の分割の仕方につき**地震調査委員会が評価**→評価に基づき、**各々の領域について最初から**スタート

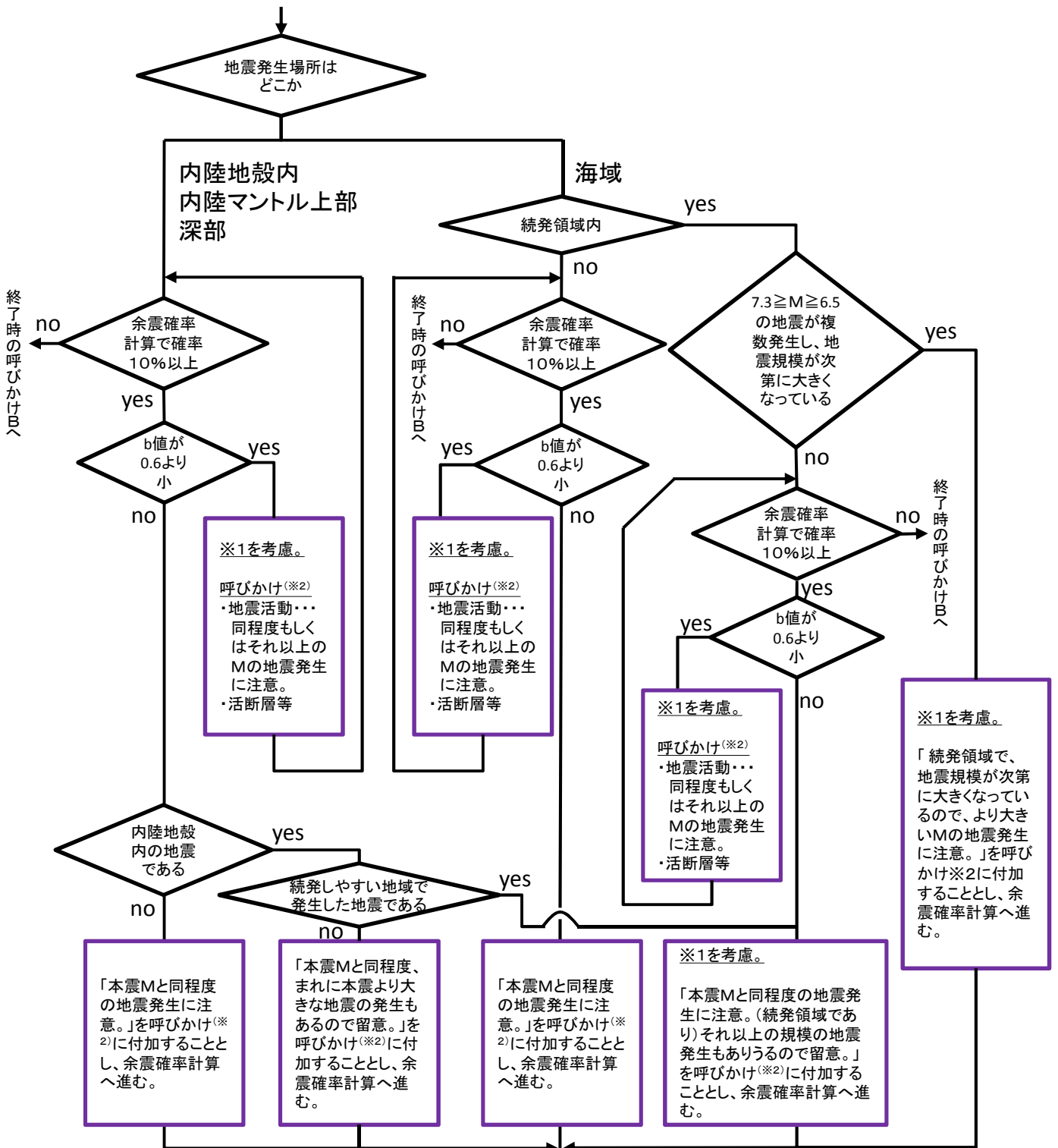
最大震度5弱以上の地震発生(震度4以下でも地震が多発するなど、必要と認める場合)



※1 具体的には以下のような場合。
 [1]本震による被害が大きい場合(最大震度6弱以上が目安)
 [2]本震による被害範囲が広いことが考えられる場合(震度5弱の範囲が広いことが目安)
 [3]最大震度1以上の地震が多く発生している場合
 ※2 周辺の過去の事例や実際の地震活動状況で判断。
 ※3 呼びかけはMではなく対応する震度で行う(必要に応じてMも補足)。「地震発生直後の2~3日程度は大きな規模の地震が発生することが多いので注意」、「震源の位置によっては最初に発生した地震と同等かそれよりも揺れが大きくなる可能性がある」を適宜付加。余震を含めた地震活動...今後の地震のM目安(群発的な地震活動の場合は除く)を示して呼びかけを行う。活断層等...周辺にあれば、そこでの地震活動状況について言及し、適宜、地震動予測地図を示す。
 ※4 余震確率が求まるなら、10%切り日をもって「**日間程度」と言う。
 ※5 地震活動経過から、仮に余震確率評価手法が適用できると考えられる場合は適用。
 ※6 余震確率算出に必要なパラメーターがある程度安定したら、「今後〇日程度は震度5弱以上となる可能性が高い」も適宜付加(30%切りで計算)。階段グラフ(例:M3.5以上、M5.0以上)を適宜示す。

数時間後以降の呼びかけの地震活動部分に、地震回数多寡の情報を付加 ※6。
 b値が安定して求まる頃(概ね1日後)以降、b値が0.6より小さい場合、地震活動部分に「もしくはそれ以上のM」を付加。
 地震調査委員会の評価(活動した活断層等の特定、割れ残りがあるか、周辺の活断層等で大きな地震が発生する可能性、地殻変動の状況等)があれば、それに基づいた呼びかけを行う。
 1週間程度経過後、余震確率に基づいた情報に付加する呼びかけの検討へ進む(Aは「本震M-1」を呼びかけに付加し余震確率の計算へ進む)

[余震確率に基づいた情報に付加する呼びかけの検討]



※1 地震活動域で当初の大きな地震より大きい地震が発生する可能性。
 ※2 呼びかけはMではなく対応する震度で行う(必要に応じてMも補足)「震源の位置によっては最初に発生した地震と同等かそれよりも揺れが大きくなる可能性がある」を適宜付加。
 余震を含めた地震活動…今後の地震のM目安を示して呼びかけを行う。
 活断層等…地震調査委員会の評価(活動した活断層等の特定、割れ残りがあるか、周辺の活断層や海溝型地震想定震源域で大きな地震が発生する可能性、地殻変動の状況等)があれば、それに基づき呼びかけを行う。適宜、関係する地震動予測地図を示す。

余震確率の計算へ

[余震確率計算]

