

最新の地震活動推移を監視するための統合的なツールの開発

Development of Multi-Integrated Monitor to Watch the Latest Seismic Activity

見須 裕美¹, 廣田 伸之¹

MISU Hiromi¹, HIROTA Nobuyuki¹

(Received February 28, 2019; Accepted January 29, 2020)

1 はじめに

「平成 28 年 (2016 年) 熊本地震」(以下, 熊本地震という)では, 2016 年 4 月 14 日に M6.5 の地震(最大震度 7)が発生した. 地震活動は極めて活発であったが, 気象庁では, 地震発生直後から多数の地震をリアルタイム処理し, 地震発生直後の報道発表時において, 震央分布図や地震活動経過図(以下, MT 図という)など, 活発な地震活動の様子が見える地震活動図を示すことができた(気象庁, 2018). その 2 日後の 2016 年 4 月 16 日に M7.3 の地震(最大震度 7)が発生し, 地震活動の度合いが長期間にわたり時々刻々と変化し, 活動領域が広域化するなど複雑な推移が見られた. 複雑な地震活動推移の状況は, 目視による定性的な監視では, 迅速かつ定量的にとらえることができず, 早期に情報に活用できなかつた.

同年 8 月に地震調査委員会によって「大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方」(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2016)が報告された. 同報告書では以下の考えが示された.

- ・活断層や海溝型地震の長期評価, 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.
- ・活断層や海溝型地震の想定震源域(以下「活断層等」という)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等があれば, 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.

・周辺の活断層等の存在について言及するとともに, 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.

これらのことに対応するためには, 活動領域の拡大など時々刻々と変化する複雑な地震活動推移, 周辺の活断層等の存在やそこでの地震活動の状況, 過去事例や地域特性を迅速かつ的確に把握する必要があると考える.

こうした動きを受け, 我々は, 次章以降に述べる「地震活動推移監視装置」を整備し, 最新の地震活動推移を監視するための統合的なツールとして, 解析結果等を準リアルタイム表示する「地震活動推移監視画面」を開発した. 本稿では, 特に「地震活動推移監視画面」について, 利用例などを示しながら, 表示の仕組み, 表示している要素の説明を中心に報告する. 本稿の構成は以下のとおりである. 第 2 章と第 3 章で開発の基本概念とシステム概要について述べる. 第 4 章では地震活動推移監視画面の表示内容とその具体の活用事例を示す. 第 5 章で今後の課題と展望を述べ, 第 6 章にまとめる.

本稿において, リアルタイムと準リアルタイムは以下のように区別することとする. 震源データや発震機構解の自動解析のように, 現象を観測してから, 即時もしくは短い時間を置いて処理することを「リアルタイムに処理」等と表現する. 一方で, そのリアルタイムに処理されたデータを表示するための処理(例えば, フォーマット変換, 図の作成等)や統計解析等のように, 数分から 1 日程度置いて処理することを「準リアルタイムに処理」等と表現する.

¹ 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department

地震活動推移監視画面

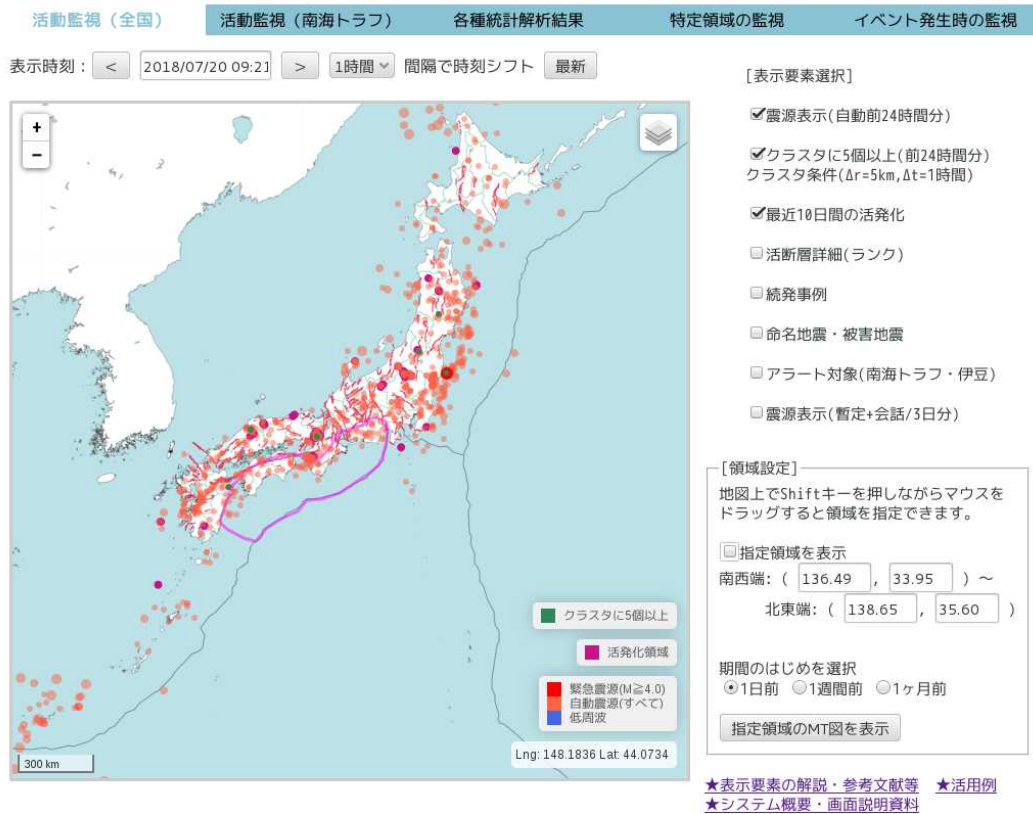


図 1 地震活動推移監視画面のトップページ。

前 24 時間分の PF 自動震源をオレンジ色，地震情報（震源・震度に関する情報）を発表した地震の速報震源を赤色，一元化震源による低周波地震（微動）を青色で表示している。また，直観的に地震活動の活発化が分かるように，地震がまとまって発生している領域を自動解析した結果も表示している（緑色，赤紫色）。その他，表示内容の詳細は付表 1 及び付表 2 を参照。

2 地震活動推移監視画面の開発

上述のように，熊本地震では，ある程度地震活動を準リアルタイムで追跡することができたものの，複雑な地震活動の推移を分析し，その変化などを検知して防災情報に役立てることはできなかった。こうしたことを実現するには，我々は以下の 2 点が必須であると考えている。

- ①リアルタイムで精度よく決定され，質，量ともに地震活動評価に十分な震源データ。
- ②震源データを準リアルタイムに表示・解析し，監視・評価するための環境。

気象庁では，1997 年 10 月から文部科学省と協力して気象庁，防災科学技術研究所，大学等関係機関から地震波形データを一元的に収集し，全国で発生した地震の震源を日々決定している（以下，この作業を「一元化处理」といい，それにより生成される震源データ

を「一元化震源」という）。従来の気象庁における一元化处理は，全ての震源決定に職員の手作業が必要であり，大地震発生後等の地震活動が活発な場合は，震源データの生成が遅れ，準リアルタイムでの詳細な地震活動の把握が困難であった。

こうした状況を改善するため，2016 年 4 月，気象庁では溜淵・他（2016）による PF 法を用いた自動震源決定方法を導入し，一元化处理の自動化を進めた（以下，PF 法により自動決定された震源データを「PF 自動震源」という）。PF 法を導入したことで，①については，ほぼ必要なデータが得られるようになった。

一方，②については以下のような課題があると考えられる。

- ・地震活動の監視に必要な地震活動図等の作成，更新には，その都度，職員による手作業が必要であり，準リアルタイムでの監視が困難。

・目視による定性的な監視では、複雑な地震活動推移の状況を的確に把握することが困難であり、定量的で客観的な評価が必要。

大地震発生前後の地震活動の変化についての論文等として、例えば、宇津（1968）は、1952年十勝沖地震の震源域で本震前の地震活動（ $M \geq 5.0$ ）の空白を指摘しており、Mogi（1969）は、大地震発生の数年前からその震源域の地震活動の低下と周辺地域の活動の増大を指摘した。この他にも茂木（1985）、宮岡・吉田（1993）など、大地震前の地震活動の静穏化を報告したものはいくつかある。また、大地震の前後でその地域の地震活動の**b**値が変化したという報告も多数あり、井元（1987）は、東海地方の微小地震について**b**値の時空間変化を調べ、地震前の**b**値の低下や、地震後の**b**値の増加を見出した。Nanjo et al.（2012, 2016）は、「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」（ $M9.0$ 、最大震度7）や熊本地震の本震前の**b**値の低下を報告した。大地震発生前に前震活動が見られた例も数多くある。例えば、「平成7年（1995年）兵庫県南部地震」（ $M7.3$ 、最大震度7）（気象庁、1997）、2014年11月22日の長野県北部の地震（ $M6.7$ 、最大震度6弱）（東京管区気象台、2014）等がある。最近では、熊本地震も前震活動を伴った地震である（気象庁、2018）。熊本地震については、Kato et al.（2016）が、2016年4月14日に発生した $M6.5$ の地震に続く一連の地震活動域が、同月16日に発生した $M7.3$ の地震前に拡大していたことを報告している。こうした地震活動の変化を把握し、解析するための指標となるものとしては、地震活動の指数化（塚越・石垣、2003）、静穏化活発化領域の検出（明田川・伊藤、2008）、**b**値解析など様々なものがこれまでに提案されてきた。ツールとしても、気象庁内では、横山（1997）による震源表示プログラム（hypdsp）、明田川・他（2007）、明田川（2018）による地震検索・地震活動解析プログラム（REASA）、林元・明田川（2010）による静穏化・活発化検出ツール（Seisqa）などが整えられてきた。これらの指標やツールは、地震活動の詳細な解析を行う場合に非常に有効なものである。しかし、これらは主に事後の詳細な解析や調査、資料作成に利用するもので、中には操作方法が複雑なものもあり、準リアルタイム監視への活用には適さない。

そこで、気象庁では、①を活用して最新の地震活動の推移を的確に把握し、さらに準リアルタイムでの統

計処理による地震活動監視まで行うための装置として地震活動推移監視装置を2017年度から整備し、地震活動推移監視画面の開発を進めてきた。地震活動推移監視装置は、リアルタイムに生成されるPF自動震源や一元化震源を活用して、地震活動図の作成や上記の各種統計解析を自動処理することを最大の特徴とする。また、最新の地震活動の状況を見ることができるようにするため、解析の結果を即時に表示、共有できるWebサーバーとしての機能を持っている。地震活動推移監視画面は、このサーバー機能によるWebアプリケーションであり、地震活動の推移や統計処理結果等をWebブラウザ上で見ることができ、緊迫した緊急時であっても複雑な操作を必要とせず誰でも簡単に最新の地震活動の状況を定量的に把握できる（図1）。さらに、従来は、個々の解析結果や地震活動図をそれぞれ資料として作成し評価することが多かったが、地震活動推移監視画面では、様々な解析結果やデータを画面上に容易に統合して見ることができるよう、出力フォーマットをGeoJSONフォーマット（Butler et al., 2008）に統一し、同じ地図上に重ね合わせられるようにした。これは、露木・他（2017）の仕組みを参考にしている。

3 システム及び表示処理の概要

3.1 システムの概要

気象庁における地震観測業務システムには、文部科

地震活動推移監視画面で表示するデータの流れ（イメージ）

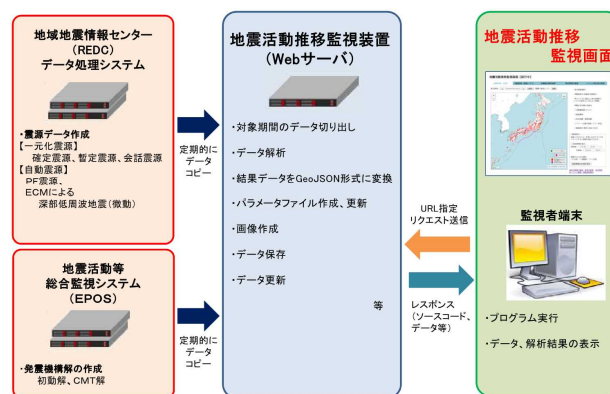


図2 地震活動推移監視画面で表示するデータの流れ（イメージ）。

地震活動推移監視装置では、REDCやEPOSからデータを定期的に受け取り、フォーマット変換、地震活動図の作成、統計解析等を行う。利用者は、端末上でWebブラウザを立ち上げ、地震活動推移監視画面を表示し、結果を確認できる。

表 1 地震活動推移監視装置で利用している震源データ等.

データ名		解説	作成タイミング	データ配布の タイミング	
1	PF自動震源	・PF法により自動的に決定された震源	地震発生後、およそ2~3分	10分間隔	
2	自動+緊急震源 (PFKINKYU)	・PF自動震源のうち一定の精度以上の震源と地震情報で発表した速報震源をマージした震源 <PFKINKYUの内容> ・PF自動震源のうち以下の条件を満たす震源 【震源誤差】 (特定領域)OT誤差:0.2秒以内、水平誤差:0.5分以内 (一般領域)OT誤差:0.5秒以内、水平誤差:1.0分以内 【計算使用観測点】5点以上 【Mの下限】M0.1以上 ・地震情報で発表した地震は、速報震源の震源要素に置き換えている。	地震発生後、およそ20分		
3	速報震源	・地震情報(震源震度に関する情報)で発表した地震の震源 ・震源要素は地震情報で使った値	地震情報発信後		
4	通常地震	・職員が精査、波形確認した震源	職員が登録したタイミング		
5	会話震源 深部低周波地震	・職員が精査、波形確認した震源 ・Matched Filter法により自動決定された深部低周波地震の震源 (職員による波形確認以前の震源)	・職員が登録したタイミング ・MF法による震源は1時間に1回、前1時間分が自動作成され、会話震源にマージされる。このため、最新の自動処理結果が会話震源に随時登録される。その後、職員による精査でノイズ等を消去する。		
6	暫定震源	・職員が精査、波形確認した震源	翌日午後		
7	確定震源	・職員が精査、波形確認した震源	約半年~1年後		
8	深部低周波地震 (エンベロープ相関法 による自動処理)	・エンベロープ相関法により自動決定された深部低周波地震の震源	1時間に1回(前1時間分)		
9	発震機構 解	初動解(自動)	・地震発生直後に自動的に解析した速報値 【自動解析条件】 東海周辺:地震情報を発表した全ての地震 陸域:M3.2以上の地震 海域:M3.2(陸寄)~M5.0(沖合)以上の地震		対象地震発生後、およそ5分
10		初動解(手動)	・職員が精査した発震機構解		翌日午後以降
11		CMT解(自動)	・地震発生直後に自動的に解析した速報値 【自動解析条件】 M4.5以上の地震		対象地震発生後、およそ15分
12		CMT解(手動)	・職員が精査した発震機構解		翌日午後以降

学省と協力して設置した地震観測データの一元的な収集・処理のための地域地震情報センターデータ処理システム (REDC) と、主として大地震や津波発生時における緊急処理とそれらの情報発表のための地震活動等総合監視システム (EPOS) がある。地震活動推移監視装置は、これらのシステムから直接データを受け取る。

図 2 に示したように、地震活動推移監視装置は、REDC からは PF 自動震源などの震源データ、EPOS からは発震機構解のデータを定期的に受け取り、フォーマット変換、地震活動図の作成、統計解析等を行う。地震活動推移監視装置で利用している震源データ等については、表 1 にまとめた。例えば、REDC では、通常、地震発生の 2~3 分後には、自動的に PF 法により震源を決定し、10 分間隔で PF 自動震源を配布する。これらの最新データを用いて、地震活動図の作成や更新、統計解析を行い、結果ファイルとして保存する。早ければ 15 分程度で最新の震央分布図を見ることができる。

地震活動推移監視画面の利用者は、Web ブラウザを立ち上げ、URL を指定することで画面を表示し、最新

の震央分布図をはじめとする地震活動図や統計解析結果を確認できる。なお、地震活動推移監視画面の表示は、気象庁内のネットワーク (EPOS や REDC の端末、もしくはそれらと同じネットワーク) のみで可能であり、気象庁の Web サイト等のインターネットでは公開していない。

3.2 画面表示の仕組み

地震活動推移監視画面の特徴を以下に挙げる。

- ・同じ地図上に複数の指標 (解析結果等) を重ね合わせることができる。
- ・地図の拡大縮小が自由自在であり、背景地図を国土地理院地図に切り替えることもできる。
- ・静穏化・活発化等の統計解析を準リアルタイムで行い、自動更新する。
- ・地震活動図を自動作成・自動更新する。

この画面を実現するために、Ajax (Asynchronous JavaScript + XML: JavaScript による非同期通信で、XML データをクライアントとサーバーサイドでやり取りを行う技術であり、ページの遷移なしに Web ブラウザの画面を動的にかえていくことができる) や、Leaflet

(Agafonkin, Web 地図のための JavaScript ライブラリ), D3 (Mike, Data-Driven Document : データビジュアライゼーションのための JavaScript ライブラリ) といった Web アプリケーション技術を利用している。

特に, Leaflet は広く使われている Web 地図のための JavaScript ライブラリであり, タイルベースの Web 地図 (地図タイル) を表示できる。地図タイルは, あらかじめ地図全体を複数の縮尺で描画した地図画像のことであり, 地図表示のリクエストに対して, これらの画像を返すことで, Web 上での地図表示を高速化している。このため, 地図の移動や拡大縮小もマウス操作だけで自由にできる。Leaflet は, 国土地理院が公開している各種地理院タイル (国土地理院) も利用できるように, 背景地図を国土地理院の標準地図に切り替えることも可能である。また, 以下に記す GeoJSON フォーマットのファイルを読み込むことにより, 地図上に表示されたシンボルをクリックすると情報がポップアップする等, 利用者が対話するような形式で直観的に操作ができる画面を作ることができる (図 3)。

GeoJSON フォーマットは, JavaScript Object Notation (JSON) を基にした地理空間データ交換フォーマットである。地図上のポイント (座標)・ライン (境界線)・ポリゴン (地域) 等の地理的情報と追加属性を与えられるとともに, JavaScript のオブジェクト構造を持っているため, プログラムからの利用が容易である。地震活動推移監視画面では, 震源データをはじめ, 活断層やプレート上面の等深線, 南海トラフ巨大地震の想定震源域など, 異種のデータを GeoJSON フォーマットに統一することにより, 同一地図上に容易に表示できるようにしている。同一地図上に表示できる要素については, 次章で詳しく述べるが, 地震活動推移監視画面では, 画面のチェックボックスで表示, 非表示を切り替えられ, チェックした順番で, 層のようにレイヤーを重ねることができる。様々な要素を重ねて表示した画面は自動更新される。必要なデータは非同期通信で取得されるため, 画面の遷移なく更新でき, 操作も継続できる。こうして, マウス操作だけで, 地図上の見たい範囲を自由に変えることができ, 見たい要素だけを選択することが可能となっている。

一方で, 地震活動図の自動作成・自動更新には, hypdsp の機能を活用している。hypdsp には, 「aprm ファイル (全描画パラメータ)」という地図や描画する震源データの条件などをまとめた専用のパラメータフ

■GeoJSON フォーマット例 (命名地震・被害地震)

```
{
  "type": "FeatureCollection",
  "features": [
    {
      "type": "Feature",
      "geometry": {
        "type": "Point",
        "coordinates": [142.007, 42.691]
      },
      "properties": {
        "date": "2018/09/06.03:07:59.33",
        "dep": "37.0",
        "mag": "6.7",
        "aflag": "1",
        "flag": "K",
        "file": "1",
        "filename": "meimei_hyp.data",
        "eq_name": "「平成30年北海道胆振東部地震」"
      }
    }
  ]
}
```



図 3 GeoJSON フォーマット例 (命名地震・被害地震) と画面表示。

上部: 命名地震・被害地震の震源データを GeoJSON フォーマットに変換した例 (一部抜粋)。

下部: 上部の GeoJSON ファイルを読み込み, 命名地震・被害地震の震央をシンボル (薄いグレーの丸) で地図上に表示したもの。クリックすると発震時, 緯度経度, マグニチュード, 地震名などの付属情報がポップアップする。

ファイルを用いて視覚的に作図する方法の他, 「プロットパラメータファイル」というテキスト形式で描画条件を記述したパラメータファイルを用いて作図する方法がある。職員の手作業による詳細な資料作成や解析には前者の方法を用いることがほとんどである。一方, 地震活動推移監視画面では後者の方法を用いている。地震活動推移監視画面では, この「プロットパラメータファイル」に記載してあるデータ期間, 地図の範囲等の部分をシェルプログラム等で自動的に書き換え, hypdsp 付属の hypopl というプログラム (ポストスクリプトファイル等を作成するプログラム) に読み込ませることで, 画像ファイルを作成することができる (図 4)。雛形となるプロットパラメータファイルは, 担当者が予めオフラインで作成する。地震活動図の種類やレイアウトは, 地震活動の状況に応じて, 雛形のプロットパラメータファイル作成時に自由に設定することが可能である。プロットパラメータファイルと hypopl を使用するこの方法は, コマンドラインで実行できるため, 手作業による hypdsp の操作を行うことなく地震活動図等の画像ファイルを作成することが

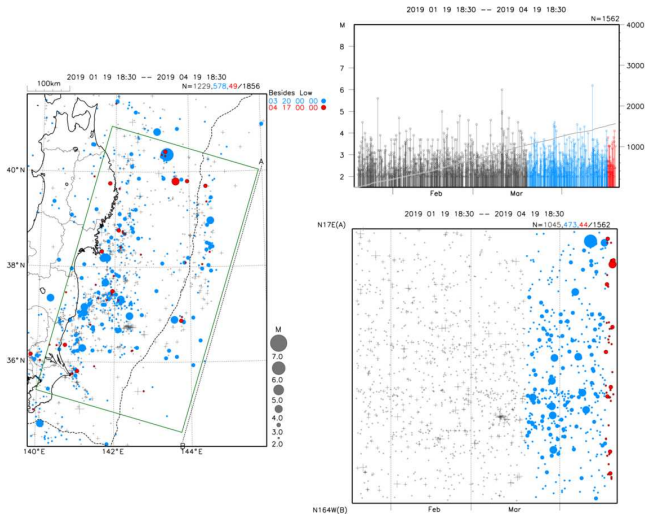


図 4 地震活動図の作成例（「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」の例）。

【図の種類】

- 左：震央分布図（ $M \geq 2.0$ ，深さ 0~100km）
- 右上：震央分布図の緑色矩形内の MT 図及び回数積算図
- 右下：震央分布図の緑色矩形内の時空間分布図（A-B 投影）

【表示期間】過去 3 か月間（2019 年 1 月 19 日 18 時 30 分~4 月 19 日 18 時 30 分）

【震源の色】

- 灰色：3 か月前から 1 か月前
- 水色：1 か月前から 3 日前の 24 時
- 赤色：2 日前の 0 時から最新の時刻

【震源データ】

確定震源，暫定震源が作成済みの期間：確定震源，暫定震源

暫定震源が未作成の期間：PF 自動震源

【更新間隔】1 時間に 1 回自動更新

できる。

4 表示内容と主な活用例

地震活動推移監視画面は，①活動監視（全国），②活動監視（南海トラフ），③各種統計解析結果，④特定領域の監視，⑤イベント発生時の監視の 5 画面で構成される。①は直近の日本全国の地震活動を概観するためのページ，②は南海トラフ領域に特化したページである。③は静穏化・活発化領域，b 値，ETAS など各種統計解析結果を表示している。④と⑤は特に注目したい領域について，震央分布図や MT 図などを表示し自動更新するページである。⑤は予め定めた基準以上の地震が発生した場合，活動図を自動作成する機能も搭載しているという点で④とは異なっている。

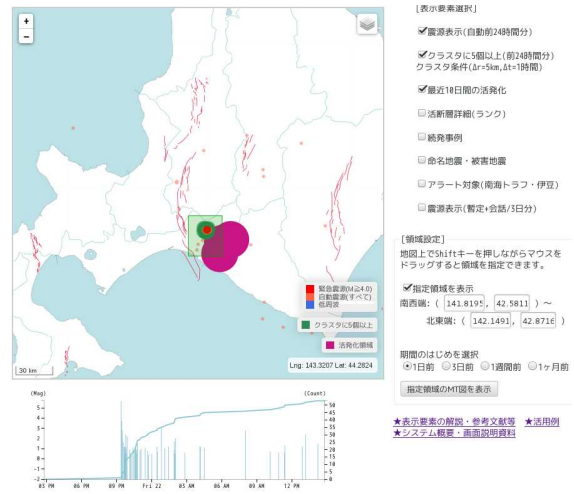


図 5 任意の領域を選択して，その領域の MT 図と回数積算図を表示した例。

緑色の半透明の矩形が選択領域を示している。

以下，各画面について，主な特徴を紹介する。また，地震活動推移監視画面は，様々な場面での活用が想定できる。本章では，これまでに実際に活用した例，有効活用が想定される例も紹介する。各画面の表示要素，更新タイミング，基準等の内容の詳細については，付録の表（付表 1~4）にまとめた。

4.1 活動監視（全国），活動監視（南海トラフ）

4.1.1 表示内容

このページは，直近の日本全国あるいは南海トラフ周辺の地震活動を一目で概観できるように作成した。熊本地震を踏まえ，地震活動域の周辺に，活断層等があれば，その存在を示すと同時に，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（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2016）とされたため，特に活断層と地震活動の活発化している領域との位置関係がすぐにわかる表示としている。また，南海トラフ周辺は，気象庁による「南海トラフ地震に関連する情報」の発表のために常時監視しておく必要があるため，当該領域を拡大したページを予め用意した。表示しているデータ等は，全てチェックボックスの ON・OFF の簡単な切り替え操作で表示と非表示を選択できるため，利用者が見たいものだけ選択し重ねて表示することが可能である。

震源データは前 24 時間分の PF 自動震源の表示を基

2018年12月3日の和歌山県北部の地震(M4.0)

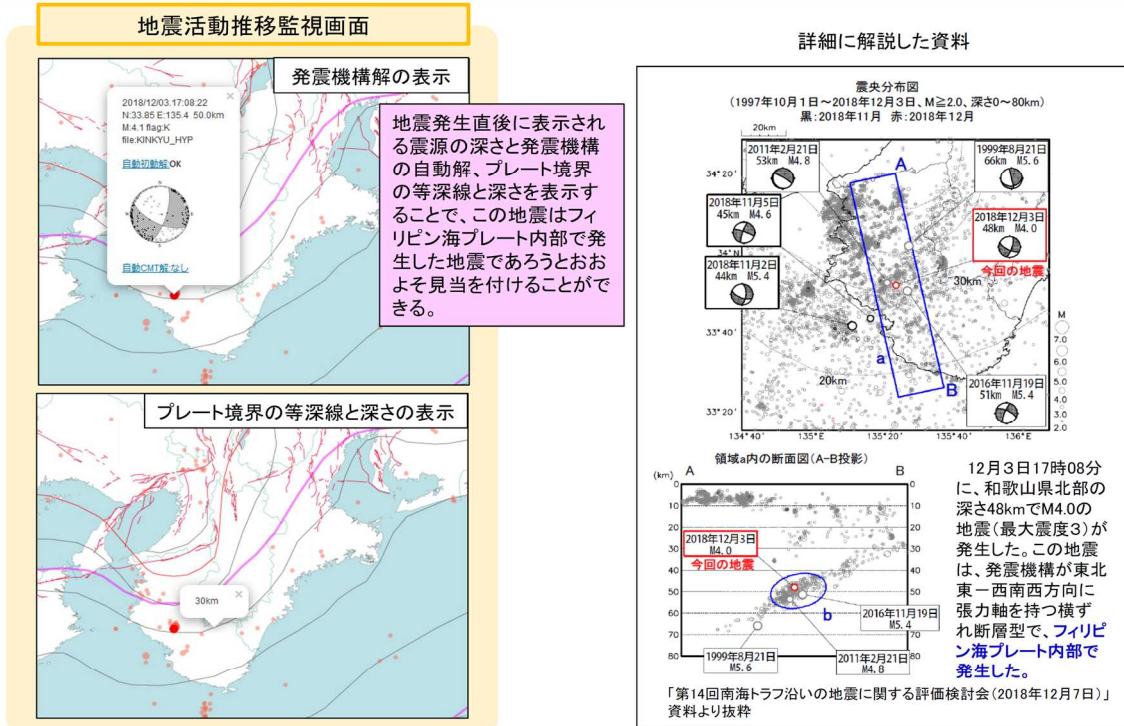


図6 発震機構解、プレート境界の等深線と深さの表示で発生場所を把握した例(2018年12月3日の和歌山県北部の地震の例)。
左: 地震活動推移監視画面で、発震機構の自動解とフィリピン海プレート上面の等深線を同時に表示した例を示している。右: 南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会の資料。

本とし、そこに、地震情報(震源震度に関する情報)を発表した地震の速報震源や一元化震源による低周波地震(微動)を併せて表示している(図1)。PF自動震源は10分間隔で更新し、それに合わせて画面を定期的に更新する設定にしており、常に表示して地震活動を準リアルタイムに監視することを意識している。震源にカーソルを合わせ、左クリックすると、発震時刻や緯度・経度、震源の深さ、マグニチュードといった震源要素等を表示できる。特に、速報震源のうち一定の規模以上の震源については、自動初動解や自動CMT解(中村, 2002; 碓井・他, 2013)も表示する。

また、地震がまとまって発生している領域を自動解析した結果も表示している。震央分布図だけでは、地震活動が活発になっている場所を把握することは難しい場合もあるが、活発化している領域を表示することで、地震活動の変化を準リアルタイムに把握できる。図5の中に緑色で示した円がその領域である。具体的には、震央距離 $\Delta r=5\text{km}$ 以内、時間差 $\Delta t=1$ 時間以内

の地震を次々につなげたクラスタに地震が5個以上ある場合に、クラスタ内の地震の震央を中心とした半径 Δr の円を描き、緑色で表示している。これは1時間に1回、前24時間分のPF自動震源を用いて計算し、更新している。図5において赤紫色で示した円は、最近10日間の地震活動が、それ以前と比較して相対的に活発化した領域を示している。活発化は、前1年間の地震活動を基準とし、地震活動指数を用いて判断することを基本としているが、この他にも、より適切に活発化領域を検出できるように工夫している(詳細は付表2参照)。これは1日1回更新する。従来、地震活動の活発化の把握には、hypdspにより手作業で震央分布図を作成し、MT図や回数積算図を描く必要があったが、地震活動推移監視画面では、準リアルタイムで解析された結果を画面上に自動で表示、更新する。

この他、活断層のトレース、火山の位置、過去に発生した主な被害地震(気象庁a, 気象庁b)、続発事例、一元化震源、南海トラフと伊豆東部の地震活動におけ

2018年6月の房総半島付近のゆっくりすべりに同期した地震活動の活発化

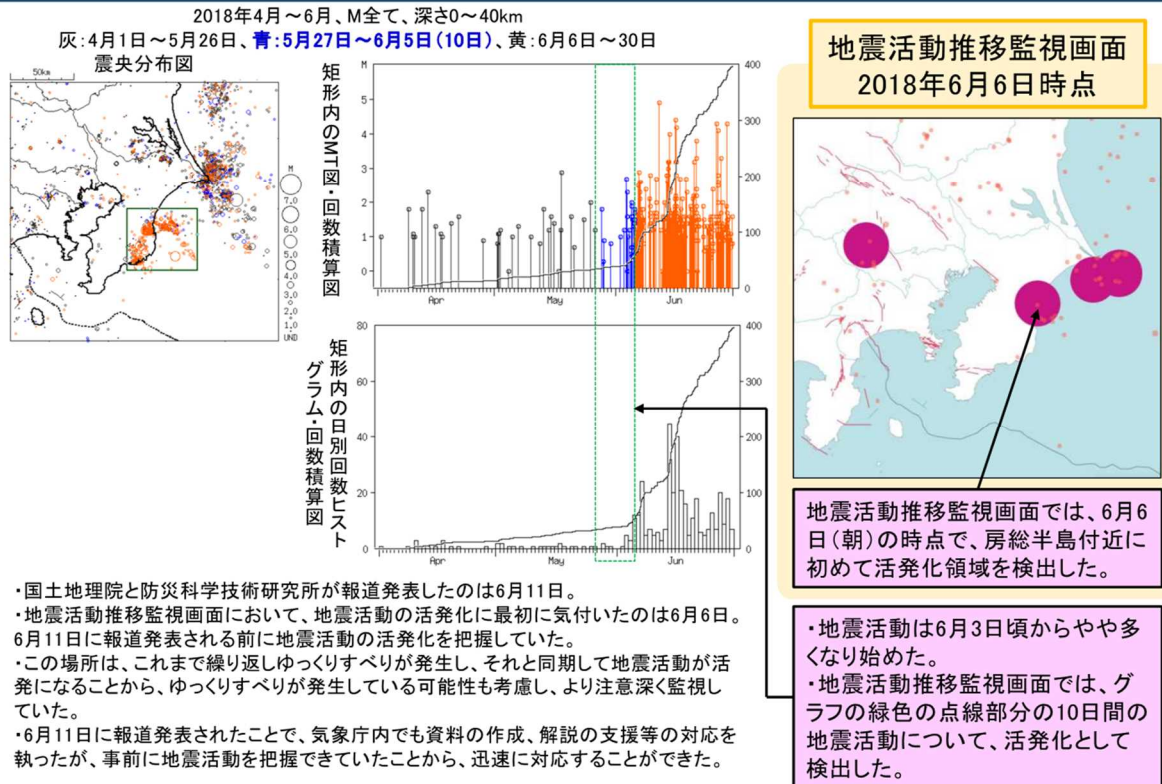


図 7 微小地震活動の活発化を検出した例 (2018年6月の千葉県東方沖の地震活動の例)。

地震活動推移監視画面に表示している赤紫色の円領域が最近10日間に地震活動が活発化している領域を示す。

る気象庁地震現業での準リアルタイム監視対象地震、熊本地震や「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」等の主な地震活動の領域、フィリピン海プレートや太平洋プレート上面の等深線等を表示できる(付表1及び付表2参照)。

簡単な操作で活動の時間変化を見る機能として、任意の領域のMT図と回数積算図を地図表示部の下に表示するようにした(図5)。地図上でShiftキーを押しながらマウスをドラックすることで領域を指定でき、期間のはじめを選択した後に、「指定領域のMT図を表示」のボタンを押すと、その領域内の地震のMT図と回数積算図が表示される。

4.1.2 主な活用例

(1) 発生場所の把握

地震活動の監視においては、その地震の発生場所(地殻内、プレート内、プレート境界)を把握することが重要である。特に南海トラフ沿いの地震活動の監視においては、プレート境界で発生した地震かどうか

の把握は非常に重要である。発生場所の詳細な検討には、発震機構解、付近の鉛直断面図やプレート境界の深さ、過去の活動等を把握した上で総合的な判断が必要であるが、おおよそ見当を付ける程度であれば、地震活動推移監視画面で十分可能な場合も多い。例えば、最大震度1以上を観測した地震のうち発震機構解が決定できた地震については、画面上に初動解とCMT解(いずれも自動解)、震源の深さを表示し、さらにレイヤー機能によりフィリピン海プレート上面、太平洋プレート上面の等深線を重ね合わせて表示することで発生場所の見当をつけることが可能である(図6)。

(2) 最近の活発化の把握

図7は、「2018年6月の千葉県東方沖の地震活動」における活発化の検出例である。2018年6月初めから、房総半島の南東沖でゆっくりすべりが発生し、それと同期して地震活動が活発になった。この場所は、これまでも繰り返しゆっくりすべりが発生しており、それと同期して地震活動が活発になることが知られている。2018年6月のゆっくりすべりの発生は、国

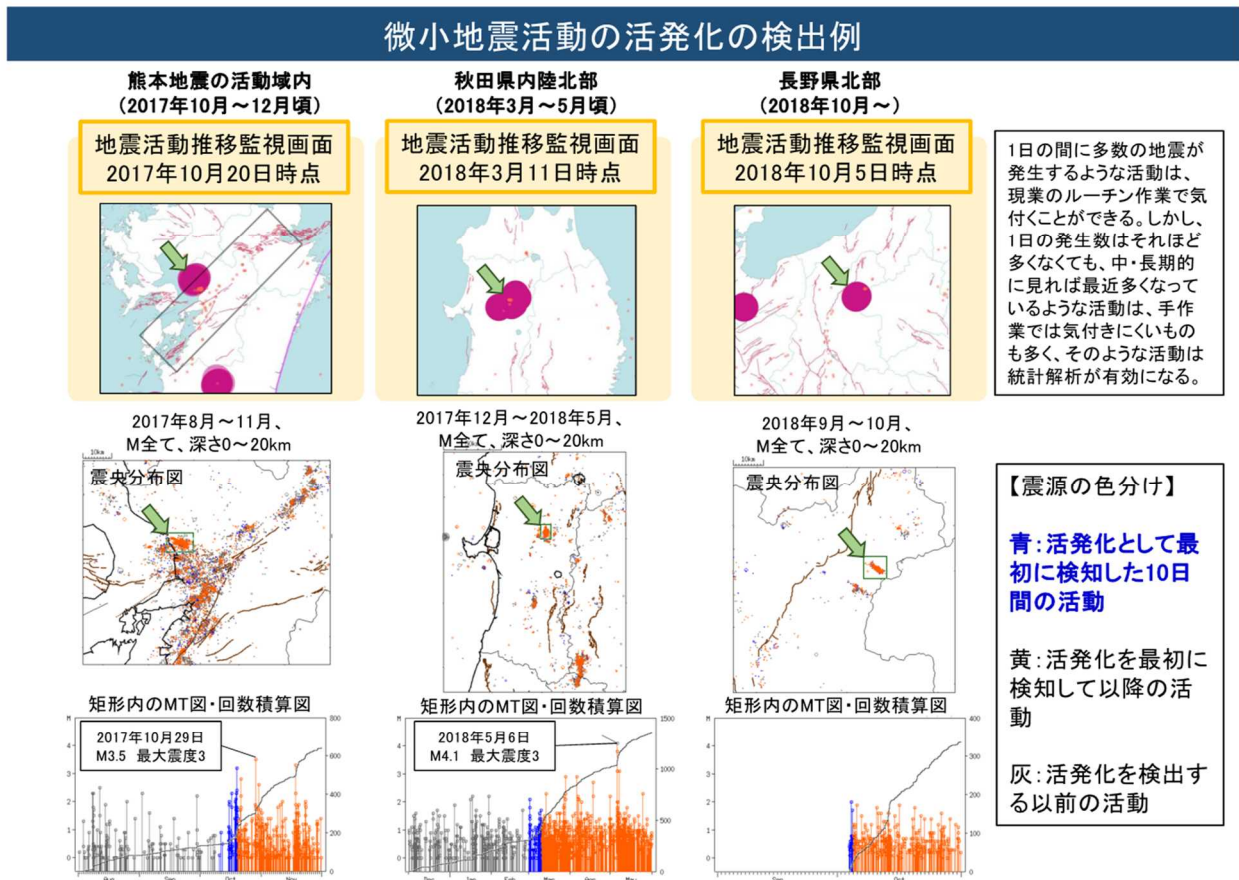


図 8 微小地震活動の活発化を検出した例。

地震活動推移監視画面に表示している赤紫色の円領域が最近 10 日間に地震活動が活発化している領域を示す。

土地理院と防災科学技術研究所が地殻変動を観測したことで明らかとなり、2018年6月11日にそれぞれの機関から報道発表された(国土地理院, 2018; 防災科学技術研究所, 2018)。一方、気象庁は、6月6日の時点で地震活動の活発化を把握していた。地震活動推移監視画面で地震活動の活発化領域として自動検出されたことから、早期に活発化を把握することができた。過去事例を踏まえると、地震活動の活発化はゆっくりすべりの発生を示唆している可能性があることを考慮し、より注意深く監視していた。6月11日の報道発表を受けて、気象庁内でも資料の作成、解説の支援等の対応を執ったが、事前に地震活動を把握していたことから、迅速に対応することができた。

図 8 は、微小地震活動の活発化を検出した例である。図 8 の左列の図は「熊本地震の活動域付近における 2017 年 10 月頃からの活発化」の検出例である。2017 年 10 月頃から熊本地震の活動域で地震活動が活発になった。この活動は、活発化した直後から地震活動推

移監視画面で検知できており、活発化した後最大震度 3 を観測する地震も発生した。発生場所が熊本地震の活動域内であったことから、詳細な資料を作成し地震調査委員会で説明した。

(3) 活断層, 続発事例, 命名地震の表示

これらは、特に最大震度 5 弱以上の地震が発生した場合等に気象庁で報道発表を行う時に有効活用している。2016 年 8 月から、規模の大きな地震発生後の報道発表では、周辺で同規模程度の地震が続発した例、付近の活断層についても説明することとなった。このため、周辺の過去の地震活動や付近の活断層については、これまで以上に迅速に把握することが必要となった。報道発表作業は、限られた時間と人員で、多くのことを調べ資料作成する必要がある。地震活動推移監視画面では、例えば、「活断層詳細(ランク)」のチェックボックスにチェックを入れることで、地震調査研究推進本部地震調査委員会による長期評価の対象となった活断層(付表 2 参照)をランク別に色分けして

2018年10月23日 (M6.1)・24日 (M6.3) の与那国島近海の地震

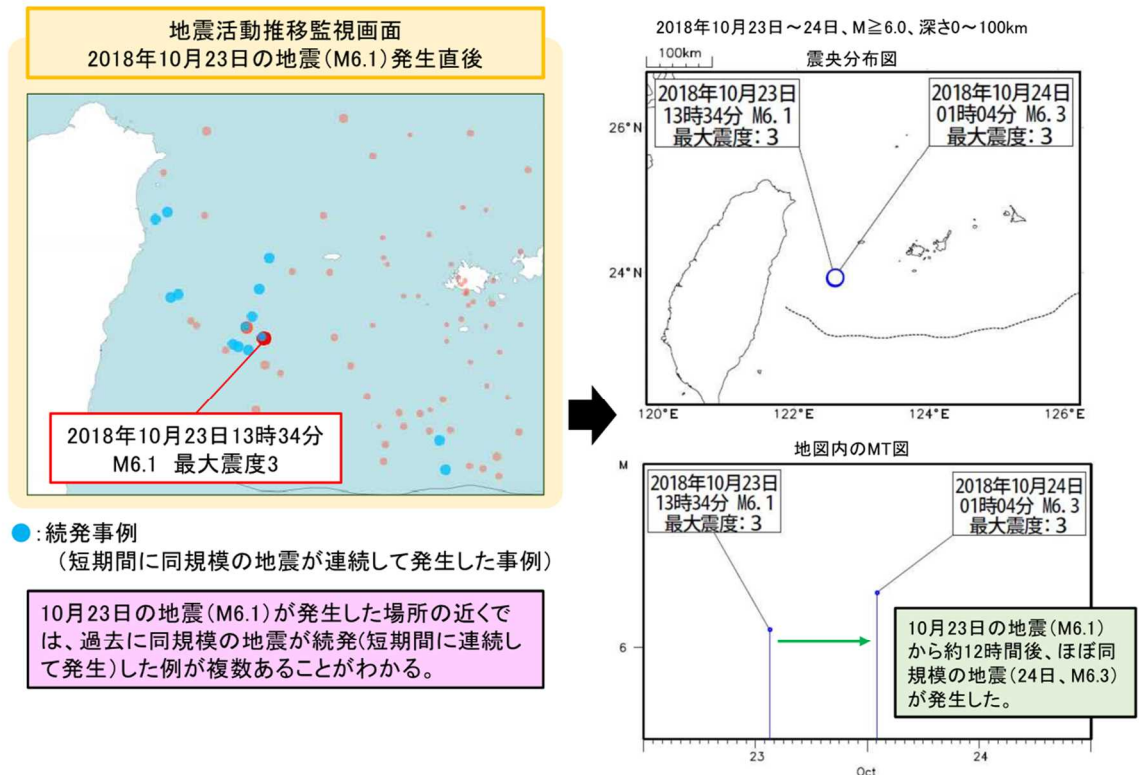


図9 続発事例の把握 (2018年10月23日の与那国島近海の地震 (M6.1) の発生時の例)。

表示できる。これを見ることで、発生した地震と、付近の活断層との位置関係が一目瞭然である。「命名地震」や「続発事例」(付表2参照)も同様で、チェックボックスにチェックを入れるだけですぐに把握することができる。従来は、地震調査研究推進本部のWebサイト (https://www.jishin.go.jp/evaluation/evaluation_summary/#danso) をはじめ、様々な資料を用いて調べていたことが、地震活動推移監視画面では、1つの画面で手軽に調べることが可能となった。

図9は、2018年10月23日の与那国島近海の地震 (M6.1) の発生直後、発生した地震と続発事例を表示した例である。この地震の発生場所付近では続発事例があることがわかる。この地震の発生翌日には M6.3 の地震が発生した。図10には、2018年6月18日の大阪府北部の地震 (M6.1, 最大震度6弱)、「平成30年北海道胆振東部地震」(最大規模の地震は2018年9月6日、M6.7, 最大震度7)の活動域周辺の活断層と命名地震を表示している。両地震とも、発生直後から付近の活断層との位置関係等が迅速に把握できた。

(4) 発生した地震 (地震活動) の地理的な位置関係等の把握

ベースの地図は、国土地理院の標準地図に切り替えることもでき、震源と重ね合わせることで地震が発生した地理的な場所、近隣市町村との位置関係等も簡単に把握できる。

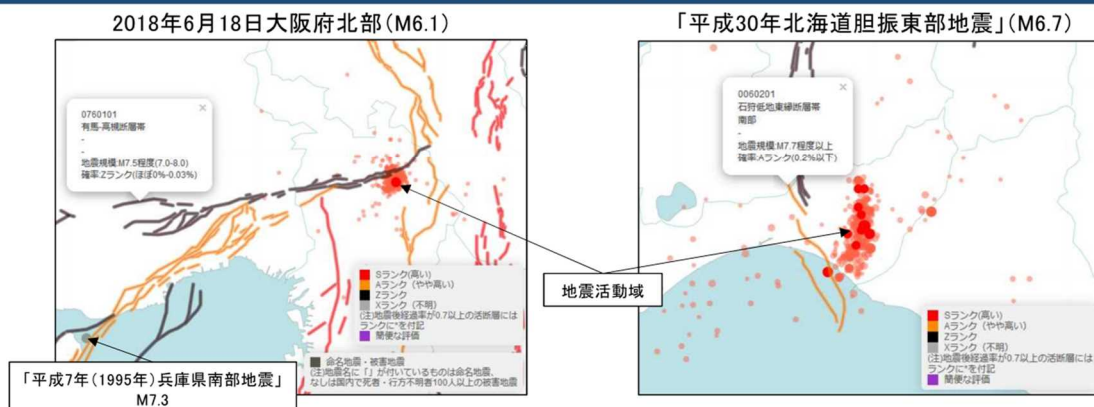
(1), (3), (4) の活用例は、地震活動推移監視画面の特徴の1つである「複数の要素の重ね合わせ」を最大限活用した例である。このように、今までは、いろいろな資料をつきあわせて見ていたことを、このページですばやく簡単に確認できるようになった。

4.2 特定領域の監視

4.2.1 表示内容

規模の大きな地震発生後の地震活動は、発生直後だけでなく、ある程度長期間に渡って継続的に把握しておくことが必要な場合がある。また、南海トラフ周辺や伊豆東部の地震活動は、気象庁が発表する防災情報にも直結することから、常時把握しておくことが必要

2018年6月18日大阪府北部(M6.1)、「平成30年北海道胆振東部地震」(M6.7)の活動域付近の活断層



「規模の大きな地震発生直後の防災上の呼びかけ」において、2016年8月から新たに加わったこと
 ★最初の地震と同程度の地震に注意することを基本とし、過去に続発事例がある場所では、より大きな地震が発生する可能性もあることをふまえて注意喚起する。【続発事例】
 ★活動域の周辺に活断層がある場合には、その存在について示す。【活断層】
 →2016年8月以降、気象庁の記者会見においても、これらの点について呼びかけを行った例がある。

これまで以上に、活断層や過去の活動(続発事例)について、地震発生直後から把握しておく必要がある。地震活動推移監視画面では、それが可能となる。

図 10 活動域付近の活断層帯や命名地震の把握例。

左：2018年6月18日の大阪府北部の地震(M6.1)の活動域付近の活断層帯と命名地震

右：「平成30年北海道胆振東部地震」(M6.7)の活動域付近の活断層帯

【震源】 橙：PF自動震源 赤：地震情報で発表した速報震源(M4.0以上の地震のみ) 灰：気象庁が名称を定めた地震

【活断層】 地震調査研究推進本部の長期評価による活断層(ランクにより色分け表示)

である。こうした活動の把握は、hypdspで活動図を描くことで可能であるが、日々これらの作業をするのは手間がかかり、また、活動の変化を迅速に捉えにくい。hypdspで作成する活動図と同じものを画面に表示し自動更新することができれば、ブラウザを開くだけでほぼ最新の状況の活動図を見ることができる。このような画面があることで、職員の手作業を大幅に軽減し、誰でも同じ条件で常時活動を把握することが可能となるだけでなく、小さな活動の変化も捉えやすくなるはずである。こうしたことを念頭に置き、監視したい領域や内容を予め決めパラメータを設定すれば、それに合わせて地震活動図を自動で作図し表示するのが、「特定領域の監視」ページである。本ページでの作図の手法は3章で述べている。

「特定領域の監視」ページの大きな特徴は以下の3点である。

(1) 監視したい活動に合わせた活動図の設定

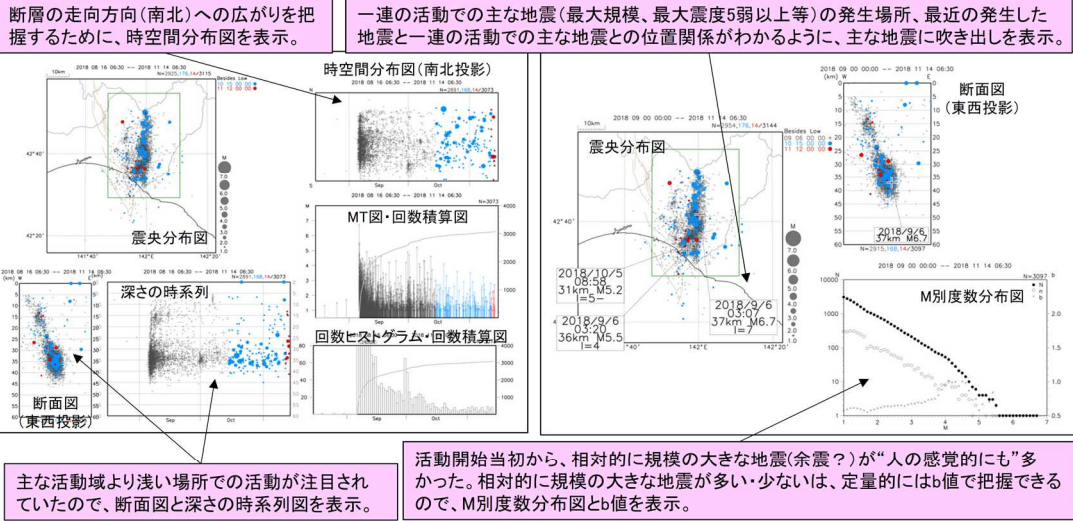
「活動監視(全国)」や「活動監視(南海トラフ)」は、地図を自由に操作できる利点がある一方で、データの描画条件や解析条件は日本全国全て同じである。また、時空間分布図や断面図等を描画することができない。しかし、地震活動は、個々の活動によって様々な特徴があり、当然、監視したい要素も異なってくる。例えば、時間変化を把握したい場合でも、活動の盛衰や規模を見たい場合にはMT図や回数積算図が有効であり、空間的な移動を把握したい場合は時空間分布図が有効である。また、深さを把握したい場合には、断面図が必要である。このページでは、このように活動の特徴に合わせて、監視したい要素を自由に設定できる。

(2) 最新のデータの使用

最新の活動状況を把握できるように、PF自動震源を活用しているほか、用途に合わせて様々なデータを用意した。設定した表示要素、震源データ等は付表4に

「平成30年北海道胆振東部地震」(M6.7)

★特定領域の監視のページでは、規模の大きな地震発生後、長期間に渡って活動を把握しておきたい活動について、各種地震活動図を1時間に1回、最新の震源データを用いて自動更新している。



地震活動は、その活動によって特徴は様々であるため、監視しておきたい内容も活動によって異なる。このページでは、個々の活動に合わせて、監視しておきたいことがわかるように活動図を自由に設定できる。

図 11 規模の大きな地震発生後の活動経過の把握例

【表示期間】

左：過去3か月間（2018年8月16日06時30分～11月14日06時30分）
 右：活動開始以降（2018年9月6日00時00分～11月14日06時30分）

【震源の色】

灰色：3か月前から1か月前 水色：1か月前から3日前の24時 赤色：2日前の0時から最新の時刻

【震源データ】

確定震源、暫定震源が作成済みの期間：確定震源，暫定震源
 暫定震源が未作成の期間：PF震源

【更新間隔】 1時間に1回自動更新

※震央分布図中の茶色の細線は、地震調査研究推進本部の長期評価による活断層を示す。

示した。現在、本ページの活動図は全て1時間に1回自動更新している。

(3) 時系列の変化の把握

地震活動の監視において、時間変化の把握は必須である。本ページでは、これまでに述べてきたように時系列図の表示により地震活動の時間変化を手軽に把握できる。これは地震活動推移監視画面の最大の特徴の1つである。

震源データの自動更新だけであれば、気象庁のWebサイト (<https://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/hypo/>)でも見ることができる。しかし、気象庁のWebサイトで閲覧できる活動図は、震央分布図だけであり、詳細な時間変化(盛衰や移動)の把握は難しい。地震活動推移監視画面では、震央分布図だけでなく、MT図、

回数積算図、時空間分布図などの時系列図を自動更新して表示することが可能であり、詳細な時間変化を把握することができる。

4.2.2 主な活用例

(1) 規模の大きな地震後の地震活動の把握

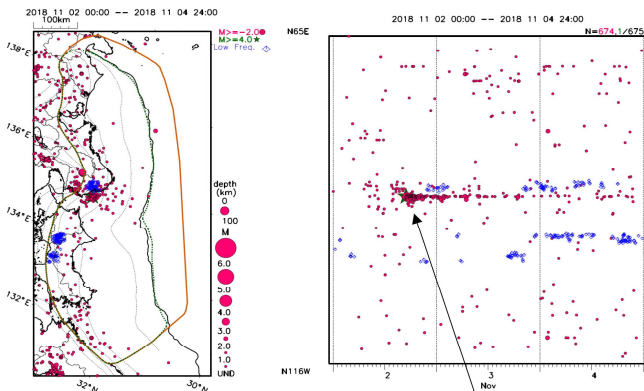
図 11 は、「平成 30 年北海道胆振東部地震」の活動図である。この地震活動は、以下のような特徴が見られた。

- ・M6.7の地震以降、相対的に規模の大きな地震が多い。
- ・主な活動域より浅い場所でも地震活動が活発であり、最大震度1以上を観測する地震も発生している。

このような特徴を十分監視できるように、震央分布図とMT図だけでなく、断面図や深さの時系列、M別

南海トラフ沿いの地震活動と深部低周波地震（微動）活動

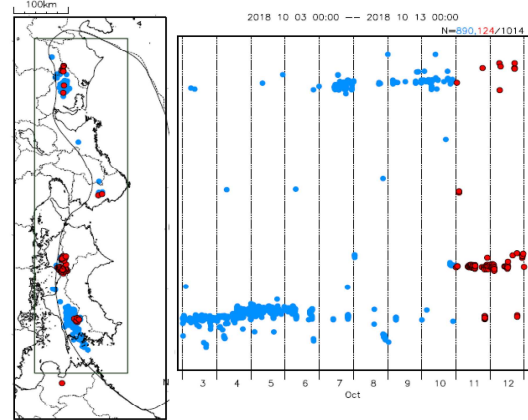
最近3日間の南海トラフ地震想定震源域付近の活動



通常の地震と深部低周波地震（微動）を1つの活動図に表示することで、南海トラフ地震想定震源域内の活動の全体を概観できる。

11月2日の紀伊水道の地震(M5.4)発生後、隣接地域で深部低周波地震（微動）活動が活発なことがよくわかる。紀伊水道の地震活動が継続していることがよくわかる。

最近10日間の深部低周波地震（微動）活動



南海トラフ沿いの深部低周波地震（微動）活動の発生状況、移動状況等について、全体を概観できる。

図 12 南海トラフ周辺の地震活動と深部低周波地震（微動）活動の把握。

左：

- 【表示データ】 赤：通常地震 青：深部低周波地震（微動）
- 【表示期間】 過去3日間（2018年11月2日00時00分～11月4日24時00分）
- 【震源データ】 通常地震：PF自動震源 深部低周波地震（微動）：エンベロップ相関法
- 【更新間隔】 1時間に1回自動更新

右：

- 【表示データ】 深部低周波地震（微動）
- 【表示期間】 過去10日間（2018年10月3日00時00分～10月13日00時00分）
- 【震源データ】 一元化震源
- 【震源の色】 水色：10日前から3日前の24時 赤色：2日前の0時から最新の時刻
- 【更新間隔】 1時間に1回自動更新

度数分布図等も自動更新するよう設定した。毎時自動更新される活動図により、24時間交替制勤務の地震現業における毎朝の引継ぎ等で最新の活動状況を把握した他、規模の大きな地震が発生した場合には、即時的にこれまでの活動との位置関係や最近の活動の盛衰を把握できた。M6.7の地震発生から約1か月後の2018年10月5日に発生した地震（M5.2）で、最大震度5弱を観測した際の報道発表作業においては、地震活動推移監視画面で自動更新している活動図をそのまま参考資料として活用もした。

(2) 南海トラフ周辺の地震活動と深部低周波地震（微動）活動の把握

図 12（左）は、直近3日間の通常の地震と深部低周波地震（微動）を1つの活動図で表示したものである。

図の例は、2018年11月2日から11月4日の3日間を表示している。この図を見ると、11月2日の紀伊水道の地震（M5.4）発生後に地震活動が継続していること、同地震発生直後から隣接する場所で深部低周波地震（微動）活動が活発化していることを把握することができる。

図 12（右）は、直近10日間の深部低周波地震（微動）を表示したものである。震央分布図だけでなく、時空間分布図も表示することで、時空間的な変化を把握することが可能となっている。図の例は、2018年10月3日から10月13日の10日間の深部低周波地震（微動）活動の震央分布図と時空間分布図である。この期間、愛媛県から豊後水道、徳島県、愛知県で活発な深部低周波地震（微動）活動が見られ、同期して地殻変

地震活動図の自動更新の手法
(特定領域の活動監視、イベント発生時の監視)

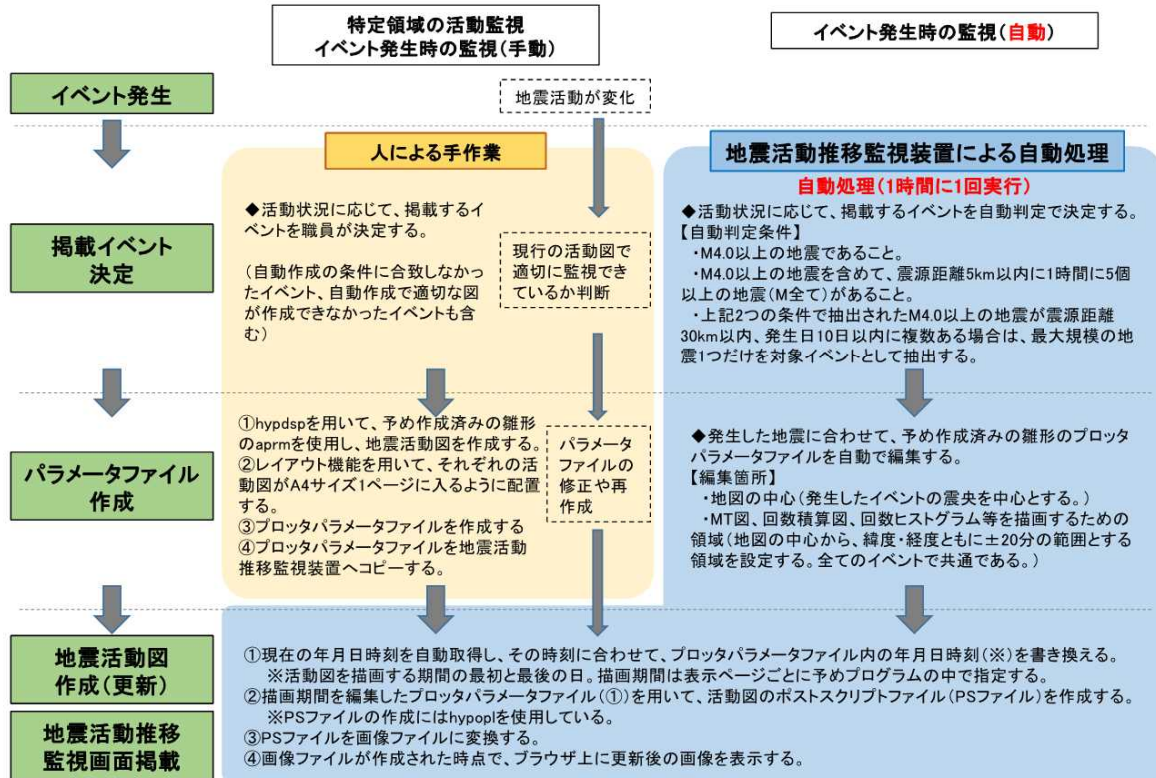


図 13 地震活動図の自動更新の手法 (特定領域の活動監視、 イベント発生時の監視)。

特定領域の活動監視 (左) と、 イベント発生時の監視 (右) において、 地震活動図が地震活動推移監視画面に表示されるまでの処理の流れを示している。 イベント選択、 パラメータファイル作成に違いがある。

動も観測された。これらは短期的ゆっくりすべりに起因するものであり、場所を移動しながら活動が1週間以上継続することもある。この図を見ることで、最新のデータで活動の開始や移動の状況等を随時把握することができる。

4.3 各種統計解析結果

このページは、各種統計解析の結果をまとめて表示できる。ここで表示させているものは、主に静穏化・活発化領域、地震活動指数や b 値、ETAS 等の統計解析結果である。統計解析は、「活動監視 (全国)」に比べて、データ期間が長く、更新間隔も長く設定しており、常にモニターするというよりも、長期的な活動変化の傾向等を知るのに役に立つと考えている。これらについて、その特徴等を以下に述べる。

(1) 静穏化・活発化領域の検出

静穏化・活発化領域の検出については、Seisqa を利用している。数日程度の短期的な活発化領域は、「活動監視 (全国)」で監視が可能である。ここでは比較的長

期間の活発化領域と静穏化領域を把握することができる。短期間の活発化は、現業作業による震源決定作業でも気付くことも多いが、長期間の活動の変化は、現業作業をはじめとした手作業では気付くことが難しく、特に静穏化はほとんど気付くことができない。このように、人の手作業では気付くことが難しい静穏化や長期間の活発化は、統計処理による解析が非常に有効である。

(2) 地震活動指数、b 値の時間変化、ETAS の統計解析

定常的に地震活動を把握しておく必要がある活動や領域について、震央分布図、時空間分布図、MT 図、回数積算図の基本的な活動図の他、地震活動指数、b 値の時間変化、ETAS の統計解析結果を1か月に3回、旬ごとに更新している。

4.4 イベント発生時の監視

4.4.1 表示内容

4.2 節で述べた「特定領域の監視」ページは、地震発

表 2 イベント選択, 活動図の作成を手作業で行った場合と全自動処理で行った場合の処理の違い, メリット・デメリット .

	①職員による手作業	②地震活動推移監視装置による全自動処理
イベント選択	<ul style="list-style-type: none"> 発生した地震の規模、その前後の地震活動の状況を考慮し、常時監視しておく必要があると判断したイベントを選択。 	<ul style="list-style-type: none"> 予め条件を設定しておき、その条件に合う地震を自動で選択。
活動図の雛形の作成	<ul style="list-style-type: none"> 発生した地震の活動状況に応じて、監視に有効な活動図を手作業で作成して決定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 選択されたイベントに対して、予め定めた形式の活動図が自動で作成される。
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 監視したいイベントだけ掲載できる。 活動状況に見合った活動図を作成できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 担当職員が不在の場合でも、一定の条件以上の地震が発生した場合には自動で活動図を作成、自動更新できる。 イベント発生から、地震活動推移監視画面掲載までに時間がかからない。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 担当職員が不在の場合(夜間、休日等)に活動図を作成することができない。 イベント発生から、地震活動推移監視画面に掲載するまでに時間がかかる。 	<ul style="list-style-type: none"> 監視の必要のないイベントが掲載される場合や、監視したいイベントが掲載されない場合がある。 活動図の描画条件(深さ、地図の範囲、領域の広さ、活動図の種類等)は全てのイベントで共通であるため、適切な活動図が作成できない場合がある。

生から数か月から数年経過後も長期的に監視しておきたい活動や、常時監視しておく必要がある領域の活動を対象とし、活動の様子がある程度把握できた後、その活動に合わせて監視したい要素やパラメータを設定して表示している。

一方、「イベント発生時の監視」ページは、規模の大きな地震や活発な活動等が発生した場合に、その直後から簡易的に準リアルタイム監視できるように、震央分布図やMT図等を1時間に1回自動更新し表示できる。特定領域の監視のページで述べたように、監視に必要な活動図を自動更新し表示することで、作業者はhypdspの操作(活動図の作図)を行うことなく、ブラウザ上の地震活動推移監視画面を見るだけで最新の活動状況を把握することができる。活動図を自動更新する手法やデータは「特定領域の監視」ページと同様である。

「イベント発生時の監視」ページは、手作業と全自動処理による2種類の手法でイベント選択、活動図の作成を行っている。それぞれの具体的な処理の流れや条件は図13、メリット・デメリットは表2に示している。表2の②では、掲載イベントの判定から活動図の作成、更新までを全て自動で行うため、適切なイベントが選択されないことや、適切な活動が描画できない可能性もある。しかし、このような制約があるにして

も、地震発生直後からその前後の地震活動の状況を、全自動かつ準リアルタイムに監視できる環境はこれままでになかったものであり、地震活動推移監視画面の大きな成果の1つである。

4.4.2 主な活用例

図14は、2018年11月下旬頃から活発な活動となった岐阜県飛騨地方の活動について、表2の①で示した「職員による手作業」で設定した例を示す。図15は、2018年9月6日のM6.7の地震(「平成30年北海道胆振東部地震」)発生直後、表2の②で示した「地震活動推移監視画面による全自動処理」で作成した例を示す。発生直後に全自動で活動図を作成し、その後、毎時最新のデータで自動更新することで、準リアルタイムに活動監視を行った一例である。

5 課題と今後に向けて

地震活動の準リアルタイム監視のために有効なデータ、解析手法は、現在地震活動推移監視画面に搭載したもの以外にも様々なものがある。また、表示方法を工夫することでより役立つものもあると考えられる。今後、さらに有益なツールとなるように以下に挙げるいくつかの課題を検討しながら改良を進めていきたいと考えている。

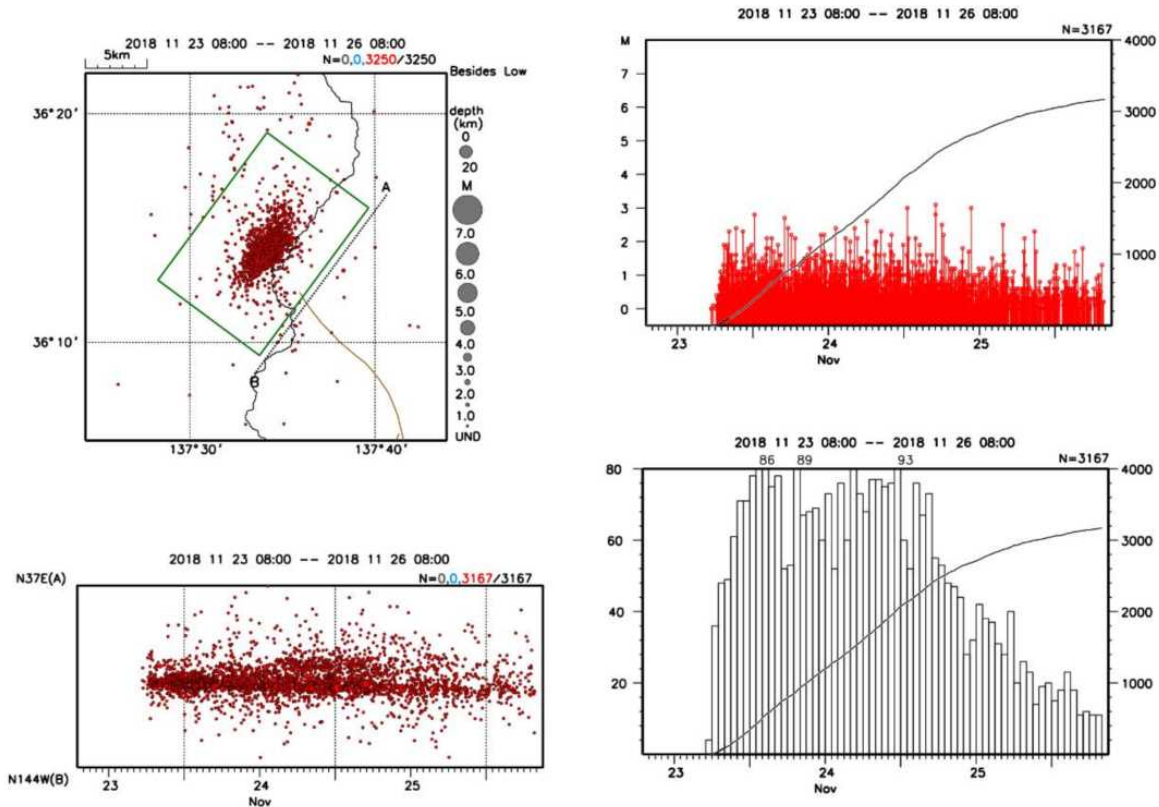


図 14 「イベント発生時の監視」ページにおける手動設定の表示例（表示している例は、「2018 年 11 月下旬からの岐阜・長野県境付近の活動」の活動図）

【図の種類】

左上：震央分布図（M 全て、深さ 0~20km）

左下：震央分布図の緑色矩形内の時空間分布図（A-B 投影）

右上：震央分布図の緑色矩形内の MT 図及び回数積算図

右下：震央分布図の緑色矩形内の日別回数ヒストグラム及び回数積算図

【表示期間】過去 3 日間（2018 年 11 月 23 日 08 時 00 分~11 月 26 日 08 時 00 分）

【震源データ】暫定震源，PF 自動震源

【更新間隔】1 時間に 1 回自動更新

(1) 統計解析のパラメータについて

地震活動推移監視画面の大きな特徴の 1 つは、定量的かつ客観的に地震活動の変化を監視できるように全自動で統計解析を行いその結果を手軽に見ることができることである。しかし、統計解析においては多くの課題もある。地震活動の統計解析には様々なパラメータが必要である。例えば、図 5 に示す赤紫色の円は、最近 10 日間の地震活動がそれ以前の 1 年間の活動と比較して活発な場所を示している。この統計解析においては、活発化を検出する期間として 10 日間、比較する期間としてそれ以前の 1 年間としている。「10 日」や「1 年」が解析におけるパラメータの 1 つであるが、このパラメータをどのように設定するかによって、結果が大きく異なり、目的に合う最適なパラメータを設定することが難しい。地震活動推移監視装置で

は、自動で定期的に解析を行うという性質上、日本全国一律のパラメータで解析しているため、現状では必ずしも監視に有効な結果が得られているとはいえない。より適切なパラメータを設定するためには、今後、さらに多くの事例解析やその結果の収集が必要になると思われる。また、現状では、統計解析結果から異常を把握するには、能動的に統計解析のページを見ることが必要である。このため、たとえ異常が検知されても見逃す可能性もある。今後は、トップページに統計解析結果のアラートを掲載するなどの工夫も検討したい。

(2) b 値，ETAS 等の統計解析を用いた活動監視

「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」は、発生の日前に M7.3 の地震が発生した。地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016)によると、この M7.3

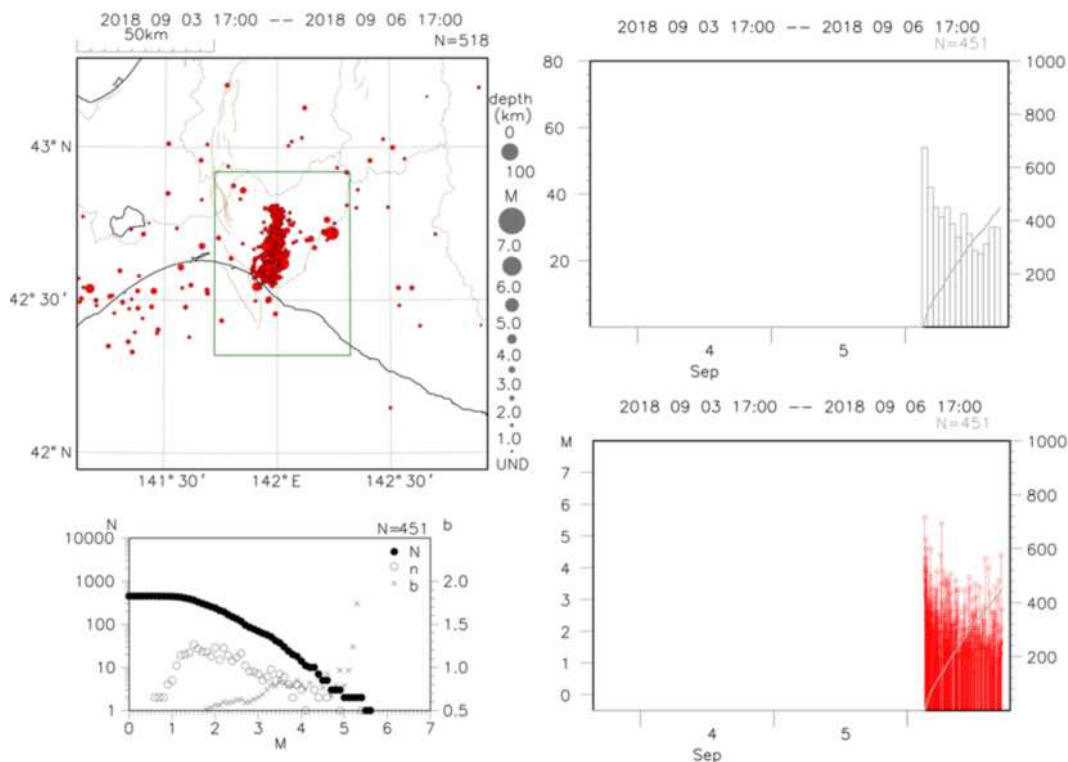


図 15 「イベント発生時の監視」ページにおける自動設定の表示例（表示している例は、「平成 30 年北海道胆振東部地震」の活動図）

【図の種類】

左上：震央分布図（M 全て、深さ 0~100km）

左下：震央分布図の緑色矩形内の M 別度数分布図

右上：震央分布図の緑色矩形内の時間別回数ヒストグラム及び回数積算図

右下：震央分布図の緑色矩形内の MT 図及び回数積算図

【表示期間】過去 3 日間（2018 年 9 月 3 日 17 時 00 分~9 月 6 日 17 時 00 分）

【震源データ】暫定震源, PF 自動震源

【更新間隔】1 時間に 1 回自動更新

の地震発生から本震発生までの b 値は 0.429 と非常に小さな値であり、同地震も含めて、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 b 値を調査すると、明らかな違いは見られないものの b 値が 0.6 より小さい場合は、4 事例中 3 例が前震活動であることがわかった。地震調査研究推進本部地震調査委員会（2016）では、こうしたことを勘案し、 b 値が 0.6 より小さい場合には、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、防災上の呼びかけに付加することが適当であるとされている。このため、地震活動の監視における b 値の把握は重要であると考えられる。しかし、地震活動推移監視画面において、規模の大きな地震発生後に活動図を自動更新する「特定領域

の監視」ページや「イベント発生時の監視」ページの要素は、現在は定性的な地震活動図だけである。今後は、規模の大きな地震発生後の監視においても b 値等の統計解析を用いた監視ができるようにしたいと考えている。

定常的な地震活動の監視においては、現在は活発化・静穏化領域の検出のみ日々更新し、面的表示している。 b 値、ETAS の統計解析結果も、予め定めた領域については月に 3 回更新しているが、面的に全国を概観できる環境にはなっていない。今後は、 b 値の面的な分布や時空間 ETAS (Ogata and Zhuang, 2006) 等の統計解析の結果も表示し、面的な監視ができるようにしたいと考えている。

(3) 地震解説資料への活用

4.4 節で述べたとおり、地震活動推移監視画面では、

地震活動図を自動作成し、その後自動更新することが可能となった。これらの機能は、報道発表資料や地震解説資料にも有効活用できると考えられる。規模の大きな地震発生直後の報道発表資料において、最新の地震活動の状況を解説する資料に、地震活動推移監視画面を活用することも今後検討したい。

(4) 様々な観測データの活用

地震活動推移監視画面の特徴を生かして、地震だけではなく、GNSS 観測の結果も一緒に表示させるなど、複数の違う観測結果を同一画面上に表示させることができれば、さらに監視、評価に役立つものになると考えている。

6 まとめ

準リアルタイムに地震活動の推移をモニターできるツールとして、地震活動推移監視画面を開発した。地震活動推移監視画面は、これまで気象庁で使用していたツールや Web サイトにはなかった機能を多数搭載し、準リアルタイムに地震活動を監視する非常に有効なツールであると考えている。

地震活動推移監視画面の主な特徴は以下のとおりである。

- ① PF 自動震源をはじめとした自動処理結果を多く活用しているため、最新の地震活動の推移を随時把握できる。
- ② 表示する震源データ、解析結果、地震活動図を、人手を介さず自動更新する。
- ③ 地震活動図の自動更新による地震活動推移の定性的な把握を可能とするだけでなく、統計解析等による定量的な解析結果を表示することで、より客観的な監視が可能である。
- ④ 地震活動図は、その描画要素を自由に設定でき、個々の活動に応じた時空間変化を把握できる。
- ⑤ ブラウザ表示のため、誰でも手軽に操作できる。
- ⑥ 1 枚の地図上に様々なデータや解析結果を重ねて表示でき、総合的な監視、評価が可能である。

このような特徴を備えた地震活動推移監視画面を活用することで、今まで以上に、準リアルタイムに、より詳細に、客観的に、そして手軽に地震活動の把握が可能となった。実際に、4 章でも紹介したとおり、地震活動推移監視画面を活用したことで、即時的な地震活動の監視、把握に役立った具体事例が得られている。地震活動推移監視画面が、今後の気象庁における

地震活動監視の新たな一歩となることを期待している。

謝辞

地震活動推移監視画面は、露木・他 (2017) の地殻活動総合監視画面を雛形にしており、気象研究所の露木貴裕氏には本画面の構想、仕組みについて多大なるアドバイスをいただいた。また、気象研究所の弘瀬冬樹氏、気象庁地震火山部地震予知情報課の明田川保氏、前田憲二氏、上野寛氏、岩切一宏氏、森田裕貴氏には統計解析の手法や、解析結果の理解について多くの知見を与えていただいた。気象研究所の橋本徹夫氏には、本稿の執筆にあたり、丁寧なアドバイスをいただいた。記して感謝する。本文中の図の作成には GMT (Wessel and Smith, 1998) を使用した。また、地震活動推移監視画面のベースマップの 1 つとして国土地理院の地理院タイル (標準地図) (国土地理院) を利用させていただいている。

文献

- 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**, 51-66.
- 明田川保・伊藤秀美 (2008): 静穏化・活発化の定量的評価への取り組み — 地震活動評価のための静穏化・活発化検出プログラムの開発 —, 験震時報, **71**, 93-102.
- 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**, 17-28.
- 明田川保 (2018): 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 (その 2), 験震時報, **82** : 2.
- 井元政二郎 (1987): 東海地域における最近の b 値の時空間変化について, 地震, **40**, 19-26.
- 碓井勇二・山内崇彦・瀬戸博巳 (2013): 気象庁における CMT 解析の改良, 験震時報, **77**, 39-45.
- 宇津徳治 (1968): 北大地球物理学研究報告, **20**, 51-75.
- 宇津徳治 (1999): 地震活動総説, 東京大学出版会, 876pp.
- 気象庁 a: 過去の地震津波災害, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai-1995.html>, (参照 2019-02-28).
- 気象庁 b: 気象庁が名称を定めた気象・地震・火山現象一覧, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/meishou/meishou_ichiran.html, (参照 2019-02-28).

- 気象庁 (1997): 平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震調査報告, 気象庁技術報告, 第 119 号.
- 気象庁 (2018): 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震調査報告, 気象庁技術報告, 第 135 号.
- 国土地理院 (2018): 平成 30 年 (2018 年) 6 月 房総半島の非定常地殻変動, https://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_bousou_sse20180611.html, (参照 2019-02-28).
- 国土地理院, 地理院タイル, 地理院タイル (標準地図), <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>, (参照 2019-02-28).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 a: 主要活断層の長期評価, https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/major_active_fault/, (参照 2019-02-28).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 b: 活断層の地域評価, https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/regional_evaluation/, (参照 2019-02-28).
- 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, <http://www.jishin.go.jp/main/yoshin2/index.htm>, (参照 2019-02-28).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016): 大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方, https://www.jishin.go.jp/main/yosoku_info/honpen.pdf, (参照 2019-02-28).
- 溜瀧功史・森脇健・上野寛・東田進也 (2016): バイズ推定を用いた一元化震源のための自動震源推定手法, 験震時報, **79**, 1-13.
- 塚越利光・石垣祐三 (2003): 東海地域の地震活動レベルの評価, 月刊地球号外, **41**, 101-109.
- 露木貴裕・長谷川浩・近澤心・木村久夫・棚田理絵・沼野あかね (2017): 新しい地震活動等総合監視システム (EPOS) における地殻変動監視手法の改善, 験震時報 **81**: 5.
- 東京管区気象台 (2014): 平成 26 年 11 月 22 日の長野県北部の地震, 災害時自然現象報告書, 第 3 号.
- 中村雅基 (2002): P 波初動極性を用いた発震機構解の自動決定処理, 気象研究所研究報告, **52**, 81-94.
- 林元直樹・明田川保 (2010): 静穏化・活発化の定量的評価への取り組み (その 2), 験震時報, **73**, 185-194.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭 (2008): Double-Difference Tomography 法による関東地方の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, 地震 **2**, **60**, 123-138.
- 防災科学技術研究所 (2018): 房総半島沖で「スロー地震」を検出, http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/press/2018/pdf/20180611_01.pdf, (参照 2019-02-28).
- 宮岡一樹・吉田明夫 (1993): 日本海溝沿いのプレート間大地震の前の地震活動の静穏化と先駆的活動, 地震 **2**, **45**, 395-405.
- 茂木清夫 (1985): 1983 年日本海中部地震 (M7.7) の発生と東北日本のサイスマテクトニクス, 地震研彙報, **60**, 401-428.
- 森脇健 (2017): Matched Filter 法を用いた西南日本の深部低周波地震の自動検出, 験震時報, **81**: 3.
- 横山博文 (1997): X ウインドウシステムを用いた地震活動解析プログラム, 験震時報, **60**, 37-51.
- Agafonkin, V.: Leaflet, <http://leafletjs.com/>, (参照 2019-02-28).
- Baba, T.; Tanioka, Y.; Cummins, P. R.; and Uehira, K. (2002), The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **132**, 59-73.
- Butler, H.; Daly, M.; Doyle, A.; Gillies, S.; Schaub, T.; and Schmidt, C. (2008): The GeoJSON format specification, <http://geojson.org/geojson-spec.html>, (参照 2019-02-28).
- Hirose, F.; Nakajima, J.; and Hasegawa, A. (2008): Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, **113**, B09315, doi:10.1029/2007JB005274.
- Kato, A.; Fukuda, J.; Nakagawa, S.; and Obara, K. (2016): Foreshock migration preceding the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett. Online Edition*: 2016/08/16 (Japan time), doi:10.1002/2016GL070079.
- Kita, S.; Okada, T.; Hasegawa, A.; Nakajima, J.; and Matsuzawa, T. (2010): Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth Planet. Science Lett.*, **290**, 415-426.
- Mike, B.: Data-Driven Documents, <https://d3js.org/>, (参照 2019-02-28).
- Mogi, K. (1969): Some Features of Recent Seismic Activity in and near Japan (2): Activity before and after Great Earthquakes, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **47**, 395-417.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2006): Anomalous low-velocity

zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L16309, doi:10.1029/2006GL026773.

Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2007): Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, **112**, B08306, doi:10.1029/2006JB004770.

Nakajima, J.; Hirose, F.; and Hasegawa A. (2009): Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, **114**, B08309, doi:10.1029/2008JB006101.

Nanjo, K. Z.; Hirata, N.; Obara, K.; and Kasahara, K. (2012): Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20304, doi:10.1029/2012GL052997.

Nanjo, K. Z.; Izutsu, J.; Orihara, Y.; Furuse, N.; Togo, S.; Nitta, H.; Okada, T.; Tanaka, R.; Kamogawa, M.; and Nagao, T. (2016): Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, *Earth Planets Space* 2016, **68** : 187, doi:10.1186/s40623-016-0558-2.

Obara, K. (2002): Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679-1681.

Ogata, Y. and Zhuang, J. (2006): Space-time ETAS models and an improved extension, *Tectonophysics*, **423**, 13-23.

Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1991) : Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, **72**, 441, 445-446.

Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998): New, improved version of the generic mapping tools released, *EOS trans. AGU*, **79**, 579.

(編集担当 岩切一宏, 竹中 潤)

最新の地震活動推移を監視するための統合的なツールの開発

付録 地震活動推移監視画面を構成する各画面の表示要素，更新タイミング，基準等の内容の詳細についてまとめた表を掲載する。

付表 1 地震活動推移監視画面の表示要素，基準，更新タイミング等（活動監視（共通））。

	表示要素	更新 タイミング	内容(詳細)
活動監視 (全国) ・活動監視 (南海トラフ)	活断層	-	<ul style="list-style-type: none"> 地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価による活断層を表示する(地震調査研究推進本部地震調査委員会a, 地震調査研究推進本部地震調査委員会b)。 チェックボックスをONにすることで、ランクにより色分けして表示する。 マウスカーソルを活断層の線上に置くと、断層名、ランク等を表示する。
	火山	-	日本の活火山
	東海地震想定震源域	-	南海トラフ地震に関連する領域を表示する。
	東南海地震想定震源域	-	
	南海地震想定震源域	-	
	南海トラフ想定震源域	-	
	伊豆東部情報発表領域	-	伊豆東部の地震活動の見通しに関する情報の発表対象領域を表示する。
	南海トラフ地震、伊豆東部の地震活動の監視対象領域	-	南海トラフ地震、伊豆東部の地震活動の監視対象領域を表示する。
	東北地方太平洋沖地震余震域	-	過去に発生した主な地震の活動域(余震域)を表示する。
	熊本地震活動域	-	
北海道胆振東部地震活動域	-		
共通	続発領域	-	群発領域(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)と、地震調査研究推進本部地震調査委員会(1998)の続発領域(択捉島沖と三陸沖の多角形)を表示する。
	フィリピン海プレート等深線	-	Baba et al. (2002), Nakajima and Hasegawa (2007), Hirose et al. (2008) によるフィリピン海プレートの形状の数値データを利用している。
	太平洋プレート等深線	-	Kita et al. (2010), Nakajima and Hasegawa (2006), Nakajima and Hasegawa (2007), 弘瀬・他 (2008), Nakajima et al. (2009) による太平洋プレートの形状の数値データを利用している。

付表 2 地震活動推移監視画面の表示要素，基準，更新タイミング等（活動監視（全国））。
震源データ欄の数字は本文表 1 の番号と対応する。

	表示要素	更新 タイミング	内容(詳細)	震源 データ
活動監視（全国）	震源表示 (自動前24時間分)	10分に 1回	<ul style="list-style-type: none"> 以下の震源を表示する。 <ul style="list-style-type: none"> ■PF自動震源 ■地震情報(震源震度に関する情報)で発表した地震の速報震源 ■一元化震源の低周波震源(微動) 更新時に、24時間前から最新のデータまでを切り出して表示する。 (注:データの作成タイミングによって、最新データが異なる。) 	1,3,5
	クラスタに5個以上 (前24時間分)	1時間に 1回	<ul style="list-style-type: none"> 震央距離 $\Delta r=5$ km以内、$\Delta t=1$時間以内の地震が次々につなげられたクラスタの中に震源が5個以上あった場合に、クラスタ内の地震の震央を中心とした半径 Δrの円を描き、円を緑色で塗って表示する。 更新時に、24時間前から最新のデータまでを切り出し、切り出した震源に対して処理を行う。 	1
	最近10日間の活発化	1日1回	<ul style="list-style-type: none"> 最近10日間の地震活動が、その前1年間と比べて活発化した領域を表示する。抽出手法は以下の通り。 <ol style="list-style-type: none"> 基準期間と解析期間(最近10日間)に発生した、M0.1以上の全ての地震の震央を中心とした半径15kmの円を描く。 円内の震源について、解析期間の地震活動指数を算出する。デクラスタ処理は行わない。 解析期間の地震活動指数がレベル8(出現確率1%以下)の場合は活発化と判定する。活発化と判定された領域(その領域の中心となる震源)を抽出する。レベルの値は、基準期間の地震発生回数の平均と比較して、解析期間の地震発生回数が多いのか少ないのかを表している。 円内の震源について、解析期間の震源の個数をカウントし、10個以上ある領域(その領域の中心となる震源)を抽出する。 ③と④の両方で抽出された領域(その領域の中心となる震源)を「最近10日間の活発化領域」とする。 通常の地震活動指数による活発化領域検出とは異なり、活発化領域をより適切に検出するために以下の工夫をしている。 <ul style="list-style-type: none"> ■デクラスタをしていない。 ・短期間かつ狭い領域の活発化検出を目的としているため、デクラスタをすると震源の数が少なくなってしまう、活発化を検出できなくなる。このため、デクラスタ処理を行っていない。 ■解析期間の10日間に、対象領域内で最低10個以上のイベントがある場合のみ表示。 ・通常の地震活動指数は、基準期間と比較して解析期間の地震が多いか少ないかを相対的に判断するのみである。しかし、相対的な評価だけの場合、基準期間の活動がほとんどない場合、解析期間の地震が少数であっても活発化と判定される場合もある。そこで、解析期間の10日間に最低10個以上の地震があることを条件に加え、少数の地震で判定されることを防いでいる。 	1,6,7
	活断層詳細(ランク)	-	<ul style="list-style-type: none"> 地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価による活断層を表示する(地震調査研究推進本部地震調査委員会a, 地震調査研究推進本部地震調査委員会b)。 ・チェックボックスをONにすることで、ランクにより色分けして表示する。 ・マウスカーソルを活断層の線上に置くと、断層名、ランク等を表示する。 	-
	続発事例	-	<ul style="list-style-type: none"> ・日本周辺で、大きな地震発生後30日以内に、規模の近い地震(最初の地震とのMの差が0.5以下。Mが上回るものを含む)が続発した過去の事例を表示する。地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016)の報告書「大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方」に記載されている続発事例リストの地震について、最初の地震と続発の地震を表示する。 	-
命名地震・被害地震	-	<ul style="list-style-type: none"> ・気象庁が名称を定めた地震と、国内で100人以上の死者・行方不明者を出した地震を表示する(気象庁a, 気象庁b)。 	6,7	

最新の地震活動推移を監視するための統合的なツールの開発

付表2 地震活動推移監視画面の表示要素，基準，更新タイミング等（活動監視（全国））前頁の続き。

	表示要素	更新 タイミング	内容(詳細)	震源 データ
活動監視 (全国)	南海トラフ・伊豆東部の準リアルタイム監視対象地震	10分に 1回	・南海トラフ地震の監視対象領域内、伊豆東部の地震活動の監視対象領域内で発生した地震のうち、気象庁地震現象において準リアルタイム監視の対象となる地震活動を表示する。	1
	震源表示 (暫定+会話/3日分)	1時間に 1回	・暫定震源と会話震源を表示する。 ・更新時に、3日前から最新のデータまでのを切り出して表示する。	4,6
	指定領域のMT図を表示	操作時	・地図画面上で、Shiftキーを押しながらマウスをドラッグすると領域を指定できる(緑色の矩形)。画面右下で期間のはじめを選択し、「指定領域のMT図を表示」というボタンを押すと、地図画面の下にMT図と回数積算図が表示できる。	1

付表3 地震活動推移監視画面の表示要素，基準，更新タイミング等（活動監視（南海トラフ））。

	表示要素	更新 タイミング	内容(詳細)	震源 データ	
活動監視 (南海トラフ)	(自動前震源表示 24時間分)	10分に 1回	プレート境界より浅い	<ul style="list-style-type: none"> ・以下の震源を表示する。 ■ PF自動震源 ■ 地震情報(震源震度に関する情報)で発表した地震の速報震源 ・ Hirose et al. (2008), Baba et al. (2002)によるフィリピン海プレート上面の深さと比較して、震源の深さがプレート上面の深さより3km以上浅い地震を「プレート境界より浅い地震」、3km以上深い地震を「プレート境界より深い地震」、±3km未満の地震を「プレート境界付近」として表示している。 ・ 更新時に、24時間前から最新のデータまでを切り出して表示する。 (注: データの作成タイミングによって、最新データが異なる。) 	1
			プレート境界付近		
			プレート境界より深い		
	低周波	■ 一元化震源の低周波震源(微動)	5		

付表 4 地震活動推移監視画面の表示要素、基準、更新タイミング等（特定領域・イベント発生時の監視）.

表示要素		更新 タイミング	内容(詳細)	震源 データ
南海トラフ	通常の地震活動と深部低周波地震活動	1時間に1回	<ul style="list-style-type: none"> 通常の地震と深部低周波地震を同時に表示する。 直近から約3日間表示する。 M4.0以上の地震は、緑色の星で目立つように表示する。 (通常の地震) PF自動震源 (深部低周波地震) エンベロープ相関法による自動処理結果 震央分布図と時空間分布図を表示する。 	1,8
	深部低周波地震活動 ・一元化震源 ・エンベロープ相関法	1時間に1回	<ul style="list-style-type: none"> 一元化震源、エンベロープ相関法による自動処理結果をそれぞれ表示する。 直近から10日間表示する。 震央分布図と時空間分布図を表示する。 	5,8
	発震機構解の分布	1時間に1回	<ul style="list-style-type: none"> 初動解とCMT解の震央分布図と時空間分布図を表示する。 手動解析が終わっている場合は、手動解析の結果を表示する。 手動解析が終わっていない場合は、自動解を表示する。 	9,10,11,12
特定領域の監視	伊豆東部	1時間に1回	<ul style="list-style-type: none"> 伊豆東部の地震活動は、「伊豆東部の地震活動の見通しに関する情報」を表す上で、常時監視が必要な領域である。活動の開始(活発化)だけでなく、深さの変化が重要な監視ポイントであることから、それらを把握できるように設定している。 地震現業での監視対象領域内及び情報発表対象領域内の活動について、直近3日間の活動図を表示する。 震源データはPF自動震源のうち、水平誤差0.5分以内、OT誤差0.2秒以内、観測点数5点以上、M0.1以上を全て満たす震源を表示している。これは地震現業での監視、「伊豆東部の地震活動の見通しに関する情報」作成のための解析で採用している条件と同じである。 	1
	その他 (過去に発生した規模の大きな地震のその後の地震活動)	1時間に1回	<ul style="list-style-type: none"> 東北地方太平洋沖地震や熊本地震等、過去に発生した規模の大きな地震は、数年経過した現在でも活動が継続しているものもある。これらの活動は時々規模の大きな地震(余震)が発生し、その後再び活発化することもある。また、地震発生から数か月間は、活動の盛衰、活動域の広がり等も把握しておくことが必要である。 地震活動に応じて監視したい要素、内容は様々であることから、活動に応じて監視したいことが把握できるように設定している。 図は上下2段構成になっており、上段は過去3か月の活動図、下段は活動開始からの活動図となっている。上段の過去3か月には時系列の図も設定し、過去と比較して現在の活動がどのようになっているかを一目で把握できるようにしている。一方、下段は活動開始からの震央分布図のみ設定している。震央分布図だけではあるが、色で期間を分けていることで、活動域の広がりや現在の活動域と過去の活動域を比較する(例えば、現在は一連の活動域の中のどこで活発化等を把握する)ことも可能である。 2019年2月現在、以下の地震活動を表示している。 <ul style="list-style-type: none"> ■「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」(2011年3月11日、M9.0、最大震度7) ■「平成28年(2016年)熊本地震」(2016年4月16日、M7.3、最大震度7) ■2016年10月21日 鳥取県中部の地震(M6.6、最大震度6弱) ■2016年12月28日 茨城県北部の地震(M6.3、最大震度6弱) ■2017年6月25日 長野県南部の地震(M5.6、最大震度5強) ■2017年7月11日 鹿児島湾の地震(M5.3、最大震度5強) ■2018年4月9日 島根県西部の地震(M6.1、最大震度5強) ■2018年6月18日 大阪府北部の地震(M6.1、最大震度6弱) ■「平成30年北海道胆振東部地震」(2018年9月6日、M6.7、最大震度7) 	1,6,7
イベント発生時の監視	自動領域設定	1時間に1回	<ul style="list-style-type: none"> 予め定めた条件に合致する地震が発生した場合、自動的に活動図を作成し、その後1時間に1回自動更新する。 自動判定基準、地図や領域の範囲設定の詳細は、図13に示す。 	1
	手動領域設定	1時間に1回	<ul style="list-style-type: none"> 規模の大きな地震発生後、活発な地震活動が継続している場合等、常時監視しておきたい活動を設定し、活動図を自動更新する。描画する活動図は、個々の活動に合わせて自由に設定することができる。 	1