

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)

Development of REASA, an X Window Program for Retrieval of Earthquake Data and Analysis of Seismic Activities (2)

明田川 保¹

Tamotsu AKETAGAWA¹

(Received January 24, 2018; Accepted August 15, 2018)

1 はじめに

気象庁で利用している地震検索・地震活動解析プログラム (REASA ; Retrieval of Earthquake data and Analysis of Seismic Activities) は, 2000 年に震源データを検索するためのプログラムとして開発が始められ, 以後, 改良を重ね総合的な地震活動解析プログラムに発展させてきたものである. REASA の開発により, 地震活動調査に関するツールの操作性, 利便性は飛躍的に向上し, 地震調査研究推進本部の地震調査委員会に提供する地震活動評価のための資料をはじめとして, 多くの場面において利活用されてきた. 特に, プログラミングや UNIX または Linux システム にほとんど精通していない職員でも GUI を介して結果を確認しながら地震活動を様々な手法で容易に調査でき, 質の高い資料を作成することができる環境を整えたことは大きな成果であった.

初期の REASA については, 明田川・他 (2007), 伊藤・明田川 (2007), および明田川・伊藤 (2008) により可能な解析手法等について一通りの紹介がされている. その後, 地震調査委員会からの様々な解析の要請等に対応するため, さらに基本機能の改良や新機能の追加を行ってきた. 本報告では, それらの機能を中心にまとめ, 現状を報告する.

2 REASA の改良と追加機能

上記論文等で説明されている REASA の基本機能は, 概ね以下の通りである.

1) 震源データの各種検索

- 2) クラスタリング処理
- 3) 地震回数カウント処理
- 4) b 値の推定
- 5) 大森・宇津公式の適用
- 6) ETAS モデルの適用
- 7) 地震活動の指数化
- 8) 余震発生確率処理
- 9) 静穏化・活発化領域の検出

それぞれについて, 多少なりの改良や機能追加を行ってきているが, その中から試作的なものも含めて地震活動の評価や今後の調査等に役立ちそうなものを以下簡単に列記していく.

なお, 9) については, その利用の成果として例えば明田川 (2011) がある. さらに, 解析から結果の地図上への描画までを一体的に行うツール (Seisqa) として発展し, 林元・明田川 (2010) に報告されている. また, 吉川 (例えば, 吉川, 2015) はそのツールを利用して地震活動の静穏化現象の定量的評価を試みており, その結果を eMAP と呼んだ.

REASA や上記ツールにおける静穏化・活発化領域の解析単位となる領域作成手法には検出を主眼においた独特な方法が採用されている. それは, 等間隔に配置された格子点を領域の中心として結果を得るような均質な領域設定ではなく, 地震の震央位置を中心として円もしくは楕円の解析領域を作っていくもので, 検出された領域はその中心となった震源データで示される. すなわち, 地震活動の多寡によ

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

て解析頻度と密度が異なり、地震が多く発生した場所では微妙に中心位置の異なるたくさんの領域を作成して異常の検出を主目的とした解析を行う方法を採っている。その説明は林元・明田川（2010）に詳しい。なお、この手法は、以降に紹介する REASA に追加した領域検出機能に共通に採用している。ここではこれを Seisqa 手法と呼ぶ。

2.1 震源データの各種検索機能における改良

REASA は、読み込んだ震源データに様々な条件を与えて必要なものだけ検索し、その結果を用いて各種統計解析を行う。そのため、解析用のデータをその都度読み込むのではなく、メモリ上に記憶して様々な解析を同時に行えるようにしている。1997 年 10 月から気象庁は関係機関のデータを一元的に収集・整理する業務（いわゆる一元化業務）を開始し、震源データの量がそれ以前に比べて格段に増加した。そのため、できる限り多くのデータを一度に処理できる必要性が高まった。REASA は当初、5 万イベントを限度とし、それを超える場合は、自動的にファイルを分割して表示する仕様になっていた。それは、統計解析等において一度に扱うデータをマグニチュード（以下、 M と表記する）下限の調整等で 5 万イベント以内に納めなくてはならないことを意味したが、開発当初はそれでほとんど問題なかった。しかし、一元化業務によってカタログ化される地震数が年々飛躍的に増加しているため、検索条件を先に設定してそれを適用しながらファイルを読み込む機能を追加するとともに、プログラムのメモリの利用方法を大幅に改善し、現在は一度に扱える震源データを 50 万イベントとしている。

また、REASA は、96 カラムの気象庁カタログフォーマットの震源データ（あるいは検測値データ）を利用することを基本に設計されたが、現在は 192 カラムの発震機構データの利用も可能になっている。発震機構データについては、震源の諸元に対する検索条件の他に、発震機構の型（正断層型、逆断層型、横ずれ断層型）で分類することができるようにした。それぞれの型は、すべり角を 45 度以下で自由に与えることができる。また、三角ダイアグラム（Frohlich, 1992）における P 軸、T 軸、N 軸の角度による分類も可能である。発震機構データを用いた解析手法については後述する。

2.2 クラスタリング処理の改良

震源の検索条件のひとつとしてクラスタリング処理がある。基本機能は、リンク法（例えば、野口, 2007）によるクラスタ抽出処理とデクラスタ処理である。気象庁のリンク法は、時空間パラメータにより時系列順にクラスタを作るリンク法に若干の修正を加えており、先に発生した地震のクラスタ構成イベントが、後に発生したより M の大きい地震を含む別のクラスタ構成イベントにもなりうる場合は、後者のメンバーとなる仕様になっている。これは、例えば本震前に前震があり、それが本震と同じクラスタとして結びつかない程度に距離が離れていた場合、前震の作るクラスタに余震をたくさん含んでしまい、本震の作るクラスタに含まれる余震が少数になってしまうことなどを防ぐことができる。なお、リンク法と気象庁版リンク法の結果はクラスタ個々の構成が異なるものの、クラスタの数は同じなので、デクラスタ処理結果については残るイベントが多少異なるだけで数は同じになる。また、REASA ではこの気象庁版リンク法に加え、追加機能として改良リンク法（明田川, 2010）を利用可能とした。

クラスタリングパラメータについても、様々なスケールの現象に対応できるよう充実させている。具体には、時間パラメータに日単位と時間単位とを利用できる。距離パラメータも震央距離と震源距離を利用でき、それぞれ km 単位と 100m 単位とを使い分けられる。野口（2007）が試みた距離パラメータを M の関数とする方法も適用可能とした。ただし、この方法については、改良リンク法のほうが、より状況に見合った適切なクラスタリング処理ができることを明田川（2010）が報告している。

その他、ある特別なイベント（大きなイベントなど）のクラスタのみ取り出すことができるように、ある M 以上のイベントを含む場合のみクラスタリング処理を行う機能も追加している。また、デクラスタ処理等において、何をクラスタの代表とするかもいろいろとやり方があり、最大 M イベントをクラスタの代表とするのがポピュラーであるが、先頭や末尾イベントなどを代表にする方法を加えた。

2.2.1 ポアソン過程についての検定

デクラスタ処理は、地震活動のバックグラウンド的活動を抽出するために行うことが多々ある。それは

人為的なデータの変更であり、結果には正解がないが、できるだけランダムな発生間隔に近い結果を得ることをもってよし悪しを判断することが多い。そのため、REASA でデクラスタ処理をした際には、コルモゴロフ・スミルノフ検定により、得られたデータがポアソン過程と見なせるかを検定する仕様になっている。

REASA で採用している検定は、帰無仮説を「ポアソン過程である」とするものであり、処理結果の震源データがポアソン過程に従っていることを否定できない (見なしでもよい) との判断は、有意水準 5% で帰無仮説を棄却できないことを基準としている。つまり、ポアソン過程ではないと判断 (ポアソン仮説を棄却) した場合に、その判断が誤りである確率 (危険率) が 5% 以下とはいえない場合には、ポアソン過程と見なしでもよいとしている。このことは、95% 以上の確率でポアソン過程であると判定しているのではないことに注意されたい。また、検定結果はあくまでも参考情報として出力され、その後の処理には影響しない。つまり、データがポアソン過程と見なせようとも、そうでなくとも以後の処理を継続できる。

2.3 地震回数カウント処理に関する追加機能

地震回数カウント処理には、メッシュ回数カウント処理を追加した。この機能は緯度、経度をパラメータで指定した分単位でメッシュ化し、各メッシュ内の地震をカウントする。単に回数を数えるだけでなく、期間を前後 2 分割し、前の期間に対して指定した回数以上の増加や、指定倍以上の回数比になったところを検出することができる。なお、処理結果は、各メッシュの地震回数を、行列状のテキスト形式のリストとしてポップアップすることで表示される。

2.4 b 値の推定における M 下限の決定方法

b 値の推定は最尤法により行うが、その際の M の下限が重要である。REASA には Wiemer and Wyss (2000) による R 値を利用した M 下限の自動設定機能と、REASA オリジナルの自動設定機能があるが、明田川・他 (2007) では、前者についてはその時点で未搭載であり、また、後者の機能は有するがロジックには触れていない。後者については現在 REASA

の開発当初のロジックを改良していることもあり、以下に M 下限の自動設定について詳述する。

R 値は、ある M を下限として最尤法で b 値解析をしたときに、観測された積算度数分布と理論的な GR 式との適合の度合いを数値化したものであり、0.1 刻みの M ごとの積算度数と理論値との差を下限 M まで積算した値を基に計算される。そのため、データ数の多い小さな M での適合度合いが必然的に強く結果に影響する。すなわち、網羅的に地震を処理できていれば、積算度数分布は大きい M から小さい M に向かって片対数グラフ上で GR 則に従い直線的に増加するが、処理能力や検知能力の限界を超え増加の割合が鈍りはじめても、データ数の多いそうした部分の適合が良ければ R 値が大きくなる傾向がある。これは b 値をやや過小評価することに繋がる。また、R 値のスコアとして 90 以上を適用することが多いが、積算度数分布の形状によってスコアが 90 に達しない場合もあり、安定した結果を得られないこともある。

一方、REASA の自動設定では、まず、0.1 刻みの M の各ピンでの度数がピークとなる M (以下、M(p) とする) と、積算度数がはじめて 10 個以上になる M (以下、M(10) とする) の範囲において、積算度数の常用対数に最小二乗法を当てはめる。上述の通り、積算度数分布は片対数グラフ上で直線的に増加し、処理しきれない M で増加の割合が鈍ると上に凸の形に直線からはずれる。この性質を利用し、上記の最小二乗法の結果について、M(p) から M の大きい方向にみたときに、積算度数が最小二乗直線よりも最初に上になる (直線上の数より積算度数が多くなる) ところを下限 M とする。

図 1 に M 下限設定の具体例を示す。データは 2016 年 10 月 21 日の鳥取県中部の地震 (M6.6) 後の一連の地震活動 (本震発生以降から 2016 年 12 月 31 日まで) を用いた。図 1 の例では、わずかにではあるが、M2 あたりから小さい M に向かって緩やかに積算度数の増加が鈍っているようにも見える。また、M1.7 付近に若干の回数のギャップがある。R 値による下限 M と REASA の自動設定による下限 M の位置をそれぞれ図中に矢印で示した。R 値による下限 M はデータ数の多い小さな M の影響を受け M0.6 となっている。それに対し、REASA の自動設定は、上に凸の分布と回数ギャップを考慮した結果となっており、

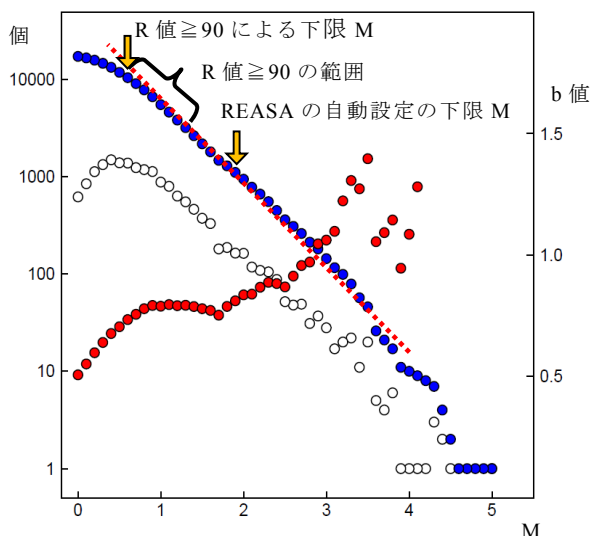


図 1 R 値による下限 M と, REASA の自動設定による下限 M の具体例.

データは 2016 年 10 月 21 日の鳥取県中部の地震 (M6.6) 後の一連の活動 (本震発生以降 ~2016 年 12 月 31 日まで).

青丸は M の大きい地震からの積算度数, 白丸は各ビンにおける度数, 赤丸は横軸の M を M 下限としたときの b 値である. 矢印で R 値 (スコア 90 以上) による下限 M と, REASA の自動設定による下限 M を示す. 赤点線は, REASA の自動設定による M 下限を求める際の最小二乗法による直線 (表示されている範囲は用いたデータの範囲に対応) を示す.

下限 M は M1.9 である.

図 2 は図 1 と同じデータについて R 値 (スコア 90) での M 下限自動設定による b 値解析の結果と, REASA の M 下限自動設定による結果を比較したものである. ここでは結果の良し悪しの議論はしないが, REASA の自動設定方法は, 図 1 のように R 値を使った結果よりもやや大きい値の下限 M になることが多く, 図 2 のようにより大きな M まで相対的

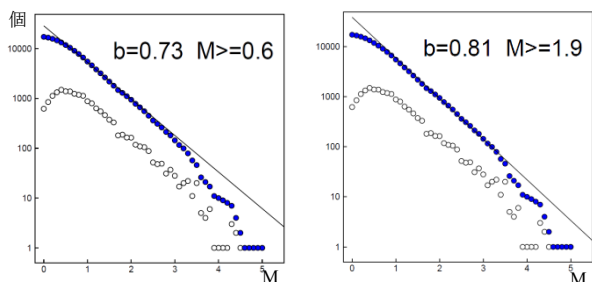


図 2 M 下限の自動設定による b 値解析の比較例. データは図 1 と同じ. 左: R 値 (スコア 90) による結果, 右: REASA の自動設定による結果.

に良く GR 直線があてはまる結果を得ることが多い. REASA の方法は余震発生確率処理において, 積算度数分布が上に凸となる場合に規模の大きい余震の発生確率をできるだけ過大評価しないよう, 大きい M での GR 則への当てはまり具合を特に注意している. また, 同様に余震発生確率処理への利用の観点から, REASA の自動設定は, M (p) から M (10) までの幅が 1.0 より小さく, M 下限を決めるために十分なデータが得られない場合でも, M (p) +0.5 を下限 M とし, それが M3.5 を超えるときは M3.5 に固定することにより M 下限を決定する. なお, M (p) そのものが M3.5 を超える場合は, M (p) を下限 M とする.

2.5 b 値解析を利用した追加機能

b 値解析については, 最近では, たとえば Nanjo et al. (2012) が平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の発生前に震源近傍で有意な低下がみられていたことを報告しており, あらためてその有効性が示されている. そのため, REASA においてもいくつかの機能を追加している.

2.5.1 b 値差異の検定

この機能は, ある時からを境に b 値に有意な変化がありそうな場合に, 全体でひとつの b 値を求めるべきか, 分割して求めるべきかを検定する. 検定手法は, 全体の結果の AIC と分割した結果の AIC とを比較し, 適合度に有意な差があるかをみるものである. この方法は, 地震活動総説 (宇津, 1999) の第 11.2.2 項 (d) に詳しい説明がある.

2.5.2 一定 b 値以上 (以下) 領域の検出

この機能は b 値の推定機能を面的に拡充したもので, 指定した b 値以上 (あるいは, 以下) の領域を検出するものである (付録第 1 章参照). 領域の設定方法は, Seisqa 手法に基づく.

なお, REASA における Seisqa 手法による解析結果は, 図情報として示されるのではなく, REASA の基本画面である X Window のリストウィジェットに表示されている震源リストのうち, 抽出された領域の中心となった震源が選択状態 (白黒反転) となることで示される. それは, 以下に示す他の領域検出機能についても同様である.

2.5.3 b 値変化領域の検出

この機能は第 2.5.1 項の機能を面的に拡張したもので、指定した日時を境に b 値に有意な変化があった領域を検出するものである。領域の設定方法は Seisqa 手法に基づく。

2.5.4 b 値算出 M 下限の一覧出力

この機能は、気象庁で定めた震央地名領域ごとにデータを分けて b 値を解析し、各領域の下限 M を一覧でリスト表示するものである。表 1 は例として、近畿・中国地方の陸域における b 値算出時の下限 M を、この機能を利用して震央地名領域別に示したものである。データは 2014 年から 3 年間の深さ 30km 以浅とした R 値のスコアが 90 以上となった領域のみを例示したが、R 値を用いた結果の下限 M (表中 Mth と表記) および b 値は、REASA の自動設定による値より、いずれも小さくなる傾向 (17 領域中 11

領域) が見て取れる。なお、残りの 6 領域については、3 領域が同じ値であり、REASA の自動設定のほうが小さい下限 M となったのは 3 領域である。それらの事例について個別に結果をみたところ、いずれもデータの少ない領域の場合であった。そのひとつである愛媛県南予の解析結果を図 3 に示す。

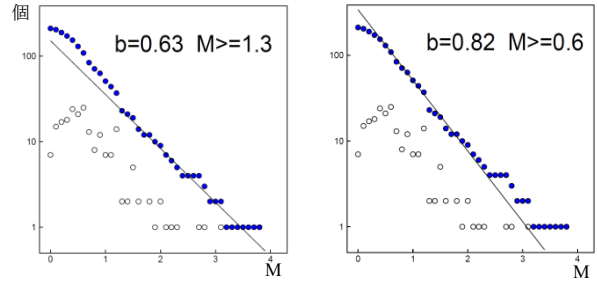


図 3 表 1 に示した愛媛県南予地域の M 下限の自動設定による b 値解析の比較。
左: R 値 (スコア 90) による結果, 右: REASA の自動設定による結果。

表 1 b 値解析における下限 M 一覧。

M (p) は度数がピークとなる M を示す。下限 M が R 値 < REASA 自動, かつ b 値 (R 値) < b 値 (REASA 自動) の事例には、震央地名に網掛けをした。

震央地名	M(p)	R 値による Mth 自動設定			REASA の Mth 自動設定	
		R 値	Mth	b 値	Mth	b 値
瀬戸内海中部	0.7	91.0	1.1	0.73	0.7	0.93
鳥取県中部	0.4	90.9	0.6	0.74	1.9	0.80
奈良県	0.3	90.8	0.3	0.77	0.5	0.81
広島県北部	0.4	90.7	0.4	0.81	0.4	0.81
島根県西部	0.3	90.4	0.2	0.81	0.3	0.85
高知県東部	0.3	90.4	0.2	0.82	0.3	0.90
京都府南部	0.5	90.3	0.3	0.81	1.5	0.86
愛媛県東予	0.4	90.3	0.4	0.78	0.4	0.78
岡山県北部	0.6	90.2	0.5	0.84	1.2	0.85
兵庫県南東部	0.7	90.1	0.7	0.91	1.0	0.94
兵庫県南西部	0.5	90.1	0.3	0.79	0.5	0.88
鳥取県西部	0.4	90.1	0.4	0.86	0.4	0.86
徳島県南部	0.2	90.1	0.3	0.84	0.5	0.89
高知県中部	0.3	90.1	0.2	0.85	0.3	0.88
徳島県北部	0.4	90.0	0.3	0.80	0.4	0.83
愛媛県南予	0.6	90.0	1.3	0.63	0.6	0.82
土佐湾	0.6	90.0	0.7	0.90	0.6	0.87

2.6 大森・宇津公式の適用における追加機能

大森・宇津公式 (改良大森公式) は、本震後の余震の時間的減衰の様相を公式化したものであり、パラメータは地震の活発さの度合いを示す K, 活動初期の時間調整のための c, 減衰の速さを規定する p の 3 つがあるが、これに定常的な活動として日あたりの発生率 μ をあらかじめ与えて適用する機能を追加した。これは、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震のように M の極めて大きな地震が発生し、定常的活動を無視できない長期間における解析の必要性が出てきたためである。

なお、現状では μ をフリーパラメータとして解析することはできないため、今後そうした機能も検討したい。

2.7 余震発生確率処理の追加機能

余震発生確率処理については、伊藤・明田川 (2007) 以降の修正はないが、解析の利便性を高めるための改良を行っている。それは、余震発生確率計算処理結果の表示画面上において、発生確率と平均発生個数のそれぞれの計算期間と下限 M (± 0.5 刻み) を自由に変えることを可能にしたことであり、図 4 に示す余震発生確率の解析結果画面におけるテキスト表示部の下のプルダウンメニュー群がそれに該当す

る。プルダウンメニューは発生確率と平均発生個数についてあり、それぞれについて変更が可能である。図 4 では、適用ボタンを押すことにより、発生確率を 3 日間から 7 日間に変え、下限 M を 6.0 から 5.5 に引き下げて再計算される。この機能によりパラメータを変えて同じ作業を何度もする必要がなくなり、効率的に作業ができる。

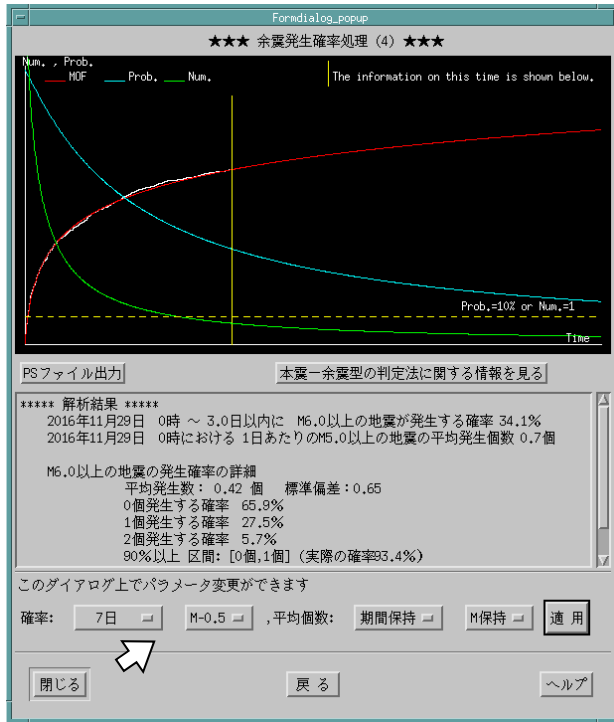


図 4 余震発生確率処理の解析結果画面例。矢印部分が追加された機能を示す。

2.8 その他の追加機能

REASA には、その有効性が明確でなくても、試作的にさまざまな機能を追加している。その中には、その後の調査につながり、結果的に地震調査委員会の報告書の元になったものもある。ここでは、主要なものをいくつか紹介する。

2.8.1 前震の抽出

この機能は、読み込んだデータの中から前震活動を伴ったケースを抽出する。処理の概要は以下の通りである（付録第 2 章参照）。

まず、ある指定 M 以上の地震を本震となりうる地震とし、それぞれの本震に対し余震と見なすべき地震を取り去る。ここで余震は本震より規模が小さく、

本震から指定距離以内、かつ指定期間内のものとする。距離や期間はパラメータで与えることができ、また、M に依存して変えることもできる。余震は本震より規模が小さいのが原則であるが、規模が本震に近い余震を、本震的イベントの続発と見なして取り除かないよう、余震と見なす地震の本震との M 差を指定できる。この差は通常は 0.1（本震より小さいものすべて）である。

余震を取り除いた結果に対して、前震から本震までの時間および震央距離が、指定した期間、指定した距離以内となった場合を前震－本震パターンとする。このとき、距離については Utsu (1961) による本震 M と余震域の長径 L についての以下の関係式から動的に与えることもできる。

$$\text{Log}_{10}(L) = 0.5M - 1.8 \quad (1)$$

この機能を利用した全国の前震活動の統計調査結果が、明田川・福満 (2011) にまとめられている。また、平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の発生においては、M6.5 の地震の後、M7.3 の地震が発生し、震度 7 が連続する未曾有の事態となった。そのため、さらに大きな地震に至ったケースが注目され、地震調査委員会は大地震後の地震活動の多様性を改めて議論し「大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方」報告書（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2016）としてまとめた。報告書の中では、規模の近い地震が続発した事例について述べられており、その調査には、REASA の本機能を利用し、前出の明田川・福満 (2011) の調査方法を最新のデータに適用した結果が示されている。

2.8.2 M 増大領域の検出

この機能は、Seisqa 手法による領域設定を行い、その中で M が指定期間内に指定回数以上増大して地震が起きている領域を検出する（付録第 3 章参照）。対象とする M の下限は、パラメータとして指定するか、あらかじめ REASA の検索機能により必要な M 以上のみにしておけば良い。さらに、ある指定した M 以上の地震にまで至っている場合のみ検出することも可能である。これは、地震活動の活発化領域の検出と似た考え方であるが、回数よりも規模の成長に着目した解析を行うものである。

2.8.3 地震の非発生期間の長さによる静穏領域の検出

この機能の考え方は単純である。ある解析期間におけるある M 以上の地震に着目したとき、その規模以上の地震が最後に発生してから期間の終わり（通常は現在）までの経過時間が、過去の地震の発生間隔より有意に長い領域を探すものである（付録第 4 章参照）。検出には、平均発生間隔の指定倍以上、過去における最長発生間隔の指定倍以上、指定した日数以上などを選択して指定できる。単純に、過去に経験のないほど地震が発生していないということに着目する解析方法である。領域の設定は Seisqa 手法による。

2.8.4 クラスタ数の増加曲線

この機能は、地震活動を個々の地震数でなく、クラスタの個数で数えるものである。クラスタ抽出の手法については、第 2.2 節と同様である。クラスタを数えるため、クラスタの代表となる地震はクラスタを構成する地震群の先頭イベントとしている。この機能は、比較的ローカルな領域の地震活動の推移をクラスタ数の増加によってみようとしたもので、調査の具体例としては、箱根における群発地震活動についての原田・他 (2012) の報告がある。

2.8.5 クラスタ数の発生率変化領域の検出

この機能は、第 2.8.4 項の機能を面的に拡張したものである。Seisqa 手法で領域設定し、解析期間を 2 つに分け、前半に比べ後半の期間でクラスタ数が指定倍以上増加した領域を検出する。これは、地震活動の活発化を個々の地震の数でなくクラスタ数を使って検出しようと意図するものである。

2.8.6 GR 異常領域の検出

この機能は、GR 則からある一定回数の発生が期待される地震が発生していない領域（ここではこれを GR 異常領域と呼ぶ）を検出する（付録第 5 章参照）。規模の大きな地震について GR 則からはずれていることを示す指標に η 値（宇津，1988）があり、弘瀬・前田（2017）は η 値に基づく地震予測モデルを提案している。REASA の機能では、以下の手法により GR 則からのずれを示す異常領域を定義した。

地震活動がある一定の b 値の GR 則に則っている

とき、大小 2 つの M における積算度数の理論値は、一方の M での個数が決まれば、もう一方も決まる。REASA の GR 異常領域の検出では、この関係を利用して、小さい方の M (M_a とする) での積算度数を指定し、それに対して指定した大きい方の M (M_b とする) での実データの積算度数が 0 個である領域を探す。例えば、ある領域における地震活動の b 値が 1 であると仮定したとき、 M_a での積算度数を 100 個以上とし、それに対する M_b を M_a に対して +2 大きくとれば、理論的には M_b 以上の地震が 1 個以上発生しているはずであるが、そうした地震が発生していない領域を異常と見なして検出する。 M_a に対して M_b を +1 大きく設定すれば、10 個以上発生しているはずの地震が全く発生していない、より異常性の高い領域を検出することになる。 M_a と M_b の値はパラメータとして自由に与えることができるが、当然のことながら、 b 値に従って決まる関係を理解して設定する必要がある。

また、上記の関係を各領域について実際に b 値解析を行って決定することも可能である。その場合は、予測対象となる M_b での積算度数の期待数を指定し、それに対応する M_a での積算度数が当該領域の b 値から期待される個数以上発生しているのに、 M_b での積算度数が 0 個である領域を検出する。これは M_a での積算度数を固定するのではなく、各領域の b 値に応じて変化させて解析することを意味する。

領域設定の基本は Seisqa 手法であるが、明示的にある大きさの領域を調べるよりも、上記のような領域の広がりを見つけないという趣旨から、領域の大きさは指定するのではなく、実際の地震活動から M_b 以上が発生していない円領域を自動作成することとした。そしてその直径が、 M_b の大きさに従って決定される範囲内であれば調査対象となる。

2.8.7 発震機構データを利用した機能

第 2.1 節において気象庁発震機構データファイルの利用が可能になったことを述べたが、それに関連して追加した機能を以下に述べる。

2.8.7.1 三角ダイアグラム解析

この機能は、Frohlich (1992) による三角ダイアグラムを描画する。解析結果は図描画され、また、各断層型の割合などが出力される。オプションメニュー

一により、P 軸 T 軸の分布を描画することもできる。

2.8.7.2 発震機構の型のリスト表示機能

この機能は、発震機構の二つの節面を断面としたときの型を、例えば、「東西方向に圧力軸を持つ逆断層型」といった日本語表記によりリスト表示する。リストは、個々の地震について逆断層の場合は圧力軸表記で、正断層の場合は張力軸表記で、また、横ずれ断層や型が定まらない場合は、圧力軸と張力軸の表記を併記した形式で表示される(図 5)。指定した地震の発震機構リスト表記と同じものをすべて抜き出すこともできる。また、REASA には正規表現の利用が可能な自由度の高い任意文字列による検索機能が搭載されており、この発震機構のリストも検索対象となる。たとえば「逆断層」の文字列を含むものをすべて抜き出すなどの処理ができ、マップ上で類似の発震機構の地震が起こっている場所などを確認することが容易にできる。

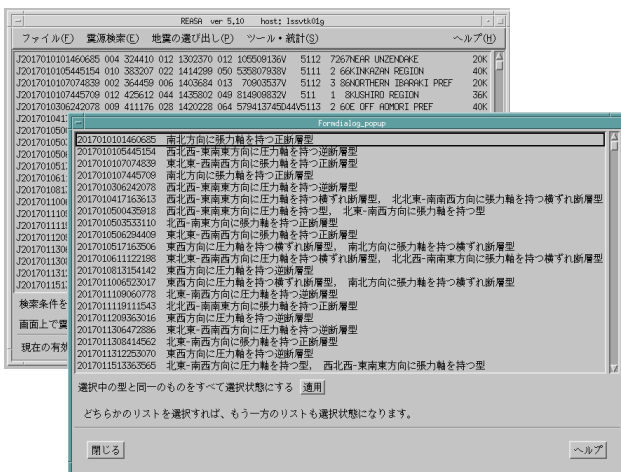


図 5 メカニズムの型のリスト表示結果例。
後面は、REASA の基本となる震源リスト。前面がメカニズムの型表示リスト。

2.8.8 地震発生間隔の累積曲線

この機能は、地震活動の発生間隔の長い方からの累積度数の対数をグラフ化したもので、地震活動がランダムに発生していれば右下がりの直線になる。また、相次ぐ地震の前後の発生間隔(指数表記)の相関図も表示する。これは 2 次元の矩形平面上に均等にプロットされればランダムにより近いことを示す。これらについては、地震活動総説(宇津, 1999)の第 10.2.2 項に詳しい説明がある。

第 2.2.1 項に述べた通り REASA でデクラスタ処理をした際には、コルモゴロフ・スミルノフ検定により、得られたデータがポアソン過程と見なせるかを検定する仕様になっているが、この機能はそれを視覚的に確認するためのものと言える。また、関連する機能として地震発生間隔の CSV データを簡単に作成することも可能となっている。

3 REASA 開発の趣旨と地震活動解析・調査の今後

地震活動の統計解析・調査は、事実関係の整理や分類のために行うほか、今後の地震活動の見通しの予測を意識して行う場合も多い。例えば、東京大学地震研究所が主体に行っている CSEP(地震活動の評価に基づく地震発生予測研究グループ, 2009)は後者の代表的な取り組みであるが、現在の地震学における地震活動の統計解析はどちらかと言えばマイナーな分野である。それは、微小地震等の解析によって地震の予測を行うことが一般的に困難と考えられているからだろう。しかし、過去に多くの先人達が地震活動の静穏化をはじめとしてさまざまな観点から行ってきた地震活動の研究は、当時の地震観測環境を考えると、多くは不完全なデータによるものだったようにも思われる。現在、気象庁で行っている一元化業務によって日々生産される地震活動のデータは、過去とは比較にならないほどの質と量を誇っている。そうしたデータを使って、過去に行われてきた地震活動の解析手法をあらためて適用し、調査する意義はないだろうか。

また、例えば過去における静穏化の議論は、その領域がほぼすべて事後に抽出され、任意性が高く不規則な形状をしていることが多かった。Seisqa 手法による領域設定は、そうした不規則領域をツールによって事前に見つけたいという思いがある。さらに、REASA では、組み込まれた機能の一つによって異常と判定された領域が見つかった場合、その領域だけを対象にして、引き続き別の機能の解析を行うことができるようにしている。それは、複数の解析手法で異常と判定される領域を見つけたいとの考えからである。

こうした考えに基づき REASA には様々な機能を搭載してきた。それらは直ちに地震活動の予測につながるものではないかもしれないし、現状は確かにそうであるが、準備を前もってしておくことが国内

の地震観測データを一元的に観測・処理する気象庁にとって重要であると考えられる。実際、熊本地震の際は、REASAに準備しておいた前震抽出の機能が、第2.8.1項に述べた通り、政府の報告書を短期間に作成する上で役立った。

一方、REASAに採用している Seisqa 手法による領域設定は、異常を見つけるという観点では効果があるものの、結果について検証しにくいという批判がある。確かに格子点解析のように固定した領域の結果が得られないため、事後評価が難しい。これについては筆者も認めるが、筆者は気象庁の使命として、何らかの異常を、異常として速やかに発見し認識することが重要であると考えている。統計的な事後調査には格子点を用いた解析手法等を併用するのが望ましいだろう (付録第6章参照)。

現在、気象庁では、熊本地震の経験を踏まえて、地震活動の推移をオンライン的に分析する仕組み (地震活動推移監視装置) を構築している。具体的には、これまでオフラインでしか行えなかった静穏化・活発化領域の検出、b 値の面的分布とその変化などの解析を自動処理による時々刻々の震源データを用いて自動解析するものであり、既に一部運用を開始している。そこには本報告に記載した REASA の機能が一部採用されているほか、さらに多くの機能を搭載すべく開発が進められている。気象庁内に地震活動を新たな視点で評価する動きが出てきたことに大いに期待したい。

4 おわりに

本報告は、気象庁で使用している地震活動の解析ツール REASA について、明田川・他 (2007) 以降に追加した機能をまとめたものである。ここで紹介した機能については、端末上で結果を確認しながら簡単に操作ができるのはもちろんのこと、気象庁震源ファイルの形式や、CSV 形式などで結果を出力することにより、二次的解析に利用できるようにもなっている。また、図についてはポストスクリプトファイルで出力でき、資料作成に便宜を図っている。

REASA は X Window System を用いたプログラムとして 2000 年から開発を始め、すでに 17 年を経過した。時代の趨勢とともに、気象庁における解析の主体は今後地震活動推移監視装置など、新たなシステムに移っていくことになるであろう。これまでに

準備した REASA の諸機能が、それらに発展的に組み込まれ、今後も地震活動評価解析業務や調査研究の一助となれば幸いである。

謝辞

本稿の改善にあたって、匿名の査読者からいただいたコメントは非常に有益でした。記して深く感謝します。

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 (2010): 地震クラスター抽出手法の改良—改良リンク法について—, 温地研報告, **42**, 33-48.
- 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 (2011): 東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動の活発化, 温地研報告, **43**, 13-21.
- 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**, 15-28.
- 宇津徳治 (1988): マグニチュードの分布の η 値と地震予知, 地震予知連絡会報, **39**, 380-386.
- 宇津徳治 (1999): 地震活動総説, 東京大学出版会, 876pp.
- 地震活動評価に基づく地震発生予測研究グループ (2009): 地震発生予測検証実験に関する公募, 地震学会ニューズレター, **20**, 7-10.
- 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 2018-01-24).
- 野口伸一 (2007): リンク法による本州中央部の地震クラスターの抽出とデクラスターリング, 防災科学技術研究所研究報告, **71**, 41-54.
- 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) —静穏化・活発化検出ツール (Seisqa) の開発—, 験震時報, **73**, 185-194.
- 原田昌武・明田川保・伊東博・本多亮・行竹洋平・板寺一洋・吉田明夫 (2012): 2011 年東北地方太平洋沖地震

によって誘発された箱根火山の群発地震活動, 地震 2, **64**, 135-142.

弘瀬冬樹・前田憲二 (2017): 本震前に現れる G-R 則からの逸脱と, その特徴に基づいた地震予測モデルの提案, 地震 2, **70**, 21-40.

吉川澄夫 (2015): 地震活動静穏化に基づく予測能力評価, 地震予知連絡会報, **93**, 410-414.

Frohlich, C. (1992): Triangle diagrams; ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **75**, 193-198.

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

Utsu, T. (1961): A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys. Mag.*, **30**, 521-605.

Wiemer, S. and M. Wyss (2000): Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs : Examples from Alaska, the western United States, and Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.* **90**, 859-869.

(編集担当 清水淳平)

付録 追加機能等の利用に際しての, パラメータ設定等に関する補足説明

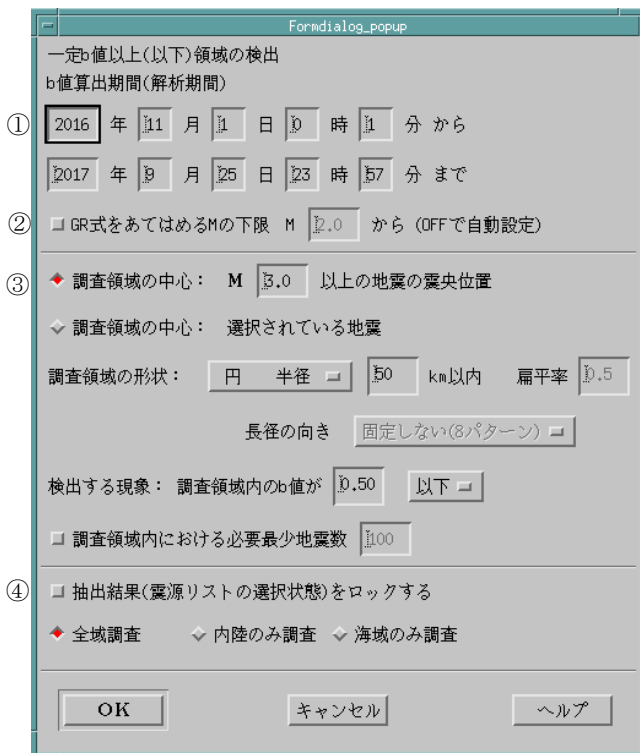
本報告で紹介した REASA の追加機能等について, 主なパラメータ設定画面等を示し, その解説について以下に簡単に記す. 実際の解析等に利用される場合の参考にしていただきたい.

パラメータ設定画面は X Window で通常使用されるボタン, プルダウンメニュー, テキストボックスなどで構成される. 以下に示す図において, 形状が□ (四角形) のボタンは任意の選択を意味するトグルボタン, ◇ (菱形) のボタンはどれか一つの選択を意味するラジオボタンである. また, ボタン状の四角形内にテキストとその右側に小さな□ (四角形) が描画されているのはプルダウンメニューである.

なお, 以下の説明における○囲みの数字は, 図中の○囲み数字の項目に対応している.

1 一定 b 値以上 (以下) 領域の検出

付図 1 にパラメータ設定画面を示し, 設定内容について以下に簡潔に記す.



付図 1 一定 b 値以上 (以下) 領域の検出機能のパラメータ設定画面.

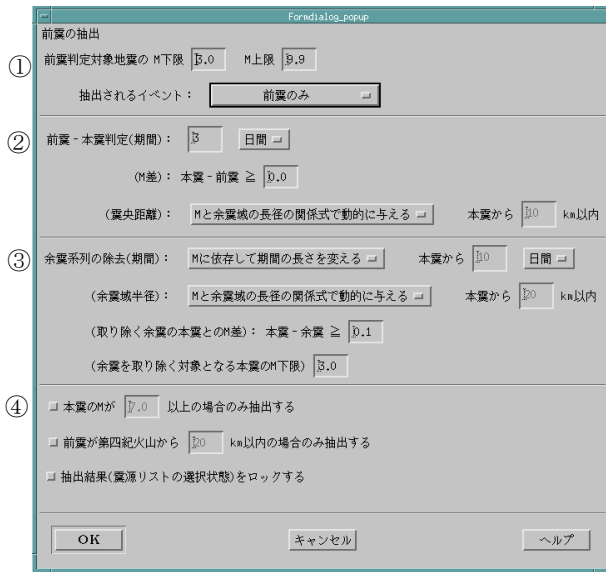
- ①解析期間の設定(デフォルトは震源リストの期間).
- ②マグニチュード (以下, M と表記する) 下限の設定.
- ③Seisqa 手法 (本文第 2 章参照) による領域の設定.
 - ・領域の中心となる地震の設定. 「選択されている地震」は, 他の解析機能による結果を使ってさらに解析したい場合等に使用する (以下付録第 3, 4, 5 章についても同様).
 - ・領域の形状.
 - ・検出する b 値の閾値の設定.
 - ・b 値算出に必要な最少イベント数の設定.
- ④その他 (結果画面のロック, 対象範囲設定).
 - ・結果のロックを選択すると, 解析結果 (領域の中心地震をリスト上で選択状態にする) がロックされ, 誤ってクリアされることを防ぐ.
 - ・対象範囲の設定は, 調査対象となる領域設定を内陸, 海域に限定して行う機能である. 内陸, 海域の区別は, 領域設定の中心となる地震の震央位置で行う. 内陸の範囲 (内陸, 海域の境界) は, 明田川・福満 (2011) で用いたものを利用している.

結果画面のロック, 対象範囲設定については, 以下の機能についても同様である.

2 前震の抽出

付図 2 にパラメータ設定画面を示す. この機能は震源リストの中から前震-本震のパターンとなっている事象を探すので, 期間設定はない. 設定内容の概要は以下の通りである.

- ①前震として判定される対象となる地震の M の設定. 処理の結果抽出されるイベントは, 前震, (前震を伴った) 本震, 前震+本震などをプルダウンメニューから選択.
- ②前震-本震パターンと判定するための条件設定.
 - ・前震と本震の時間差 (最長の時間差を設定).
 - ・前震と本震の M 差.
 - ・前震と本震の震央距離 (固定または本文第 2.8.1 項の (1) 式による動的設定).
- ③余震系列の除去に関する設定.
 - ・余震の期間 (固定または M による動的設定).



付図 2 前震の抽出機能のパラメータ設定画面.

なお、動的設定の場合は、本震の M に応じて M5.5 未満 : 30 日, M5.5 以上 M6.0 未満 : 60 日, M6.0 以上 M6.5 未満 : 90 日, M6.5 以上 M7.0 未満 : 150 日, M7.0 以上 M7.5 未満 : 240 日, M7.5 以上 : 360 日として設定される.

- ・余震域の半径 (固定または本文第 2.8.1 項の (1) 式による動的設定).
- ・本震と余震の M 差 (本震に近い M の余震をあえて残すことが可能).
- ・余震を取り除く対象となる本震の M 下限.

④その他.

- ・抽出対象となる本震の M を限定.
- ・第四期火山との距離と関連づける場合の設定.
- ・結果のロックの設定 (誤クリア防止).

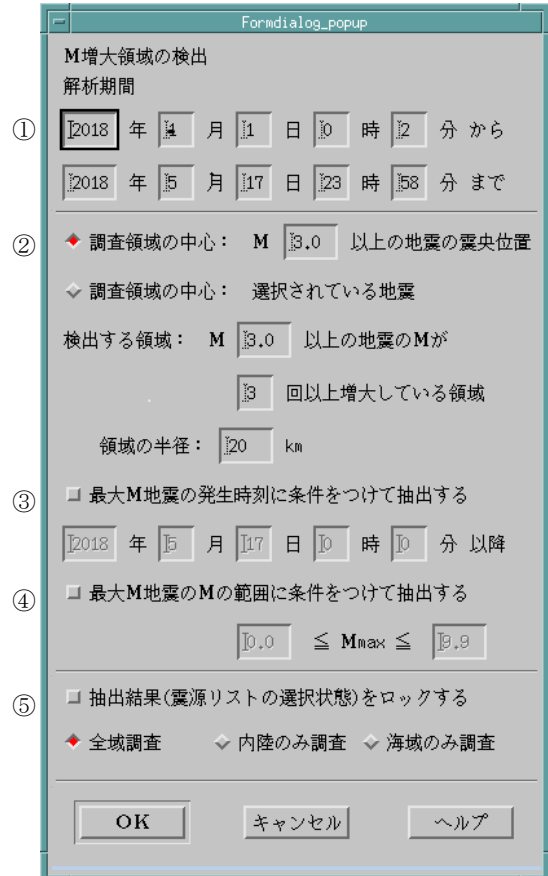
3 M 増大領域の検出

付図 3 にパラメータ設定画面を示す.

- ①解析期間の設定 (デフォルトは震源リストの期間).
- ②Seisqa 手法による領域の設定.
 - ・領域の中心となる地震の設定.
 - ・M 増大をカウントする地震の規模と, 増大回数 の設定.
 - ・増大をカウントする領域の半径の設定.
- ③最大 M 地震 (増大中の最新地震) の発生時刻の設定 (例えば, 最近になって M の増大が見られた

事象のみを抽出することが可能).

- ④最大 M 地震の M の範囲を設定 (増大の回数だけでなく, 大きさも考慮可能).
- ⑤その他 (結果画面のロック, 対象範囲設定).

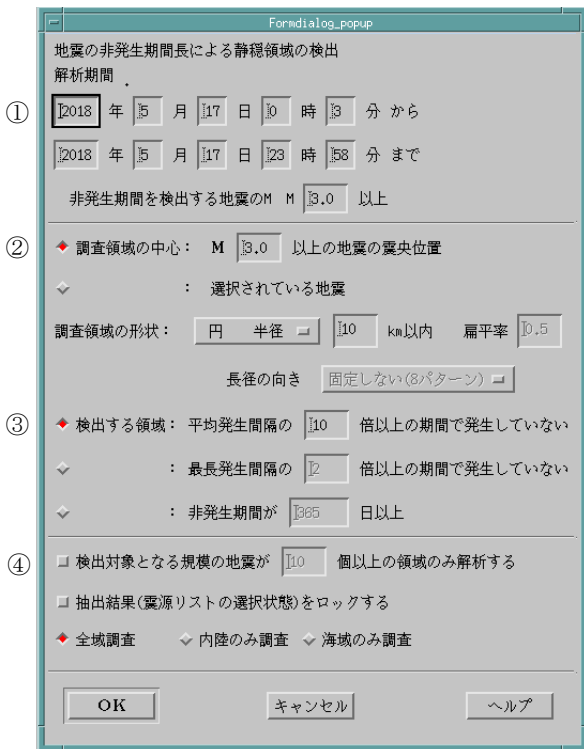


付図 3 M 増大領域の検出機能のパラメータ設定画面.

4 地震の非発生期間の長さによる静穏領域の検出

付図 4 にパラメータ設定画面を示す.

- ①解析期間 (デフォルトは震源リストの期間) と, 対象となる地震の規模の設定.
- ②Seisqa 手法による領域の設定.
 - ・領域の中心となる地震の設定.
 - ・領域の形状.
- ③非発生期間の条件設定 (3 通りの考え方を用意しており, 適宜選択の上設定).
- ④その他 (領域内の最小地震数, 結果画面のロック, 対象範囲設定).



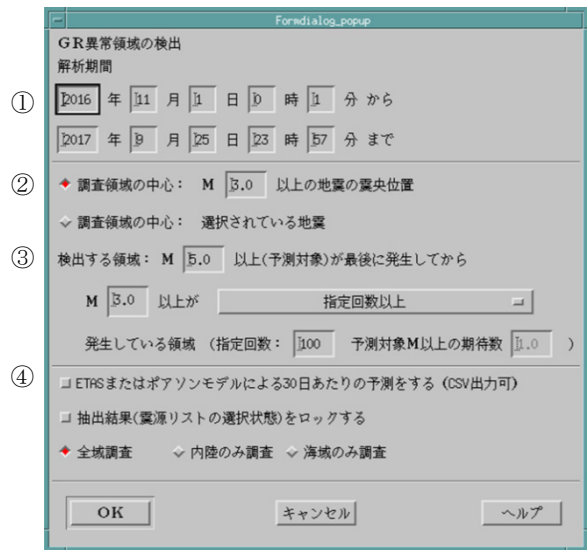
付図4 地震の非発生期間の長さによる静穏領域の検出機能のパラメータ設定画面。

5 GR 異常領域の検出

付図5にパラメータ設定画面を示す。この機能は筆者自身、試作の域を出ていないと考えているが、現状を掲載しておく。

- ①解析期間 (デフォルトは震源リストの期間)。
- ②Seisqa 手法による領域の設定。

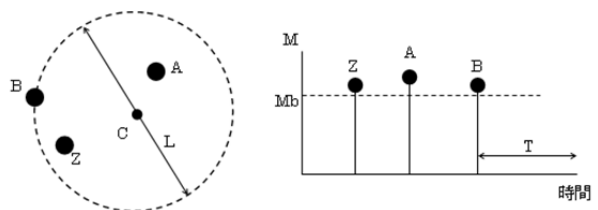
- ・領域の中心となる地震の設定。
- ・領域の大きさについては予測対象地震の規模 (本文第2.8.6項における M_b) によって決まるようにしている。その概念を付図6に示す。方法は以下の通りである。まず領域の中心となる地震 C から最も近いところにある M_b 以上の地震 A を探す (地震 C が M_b 以上なら、地震 C が地震 A となる)。次に地震 A より後に発生した M_b 以上の地震のうち、地震 C に最も近い地震 B を探す。地震 B が見つければ、地震 C を中心とし地震 B までの距離を半径 (図中では直径を L と表記) とする円領域内に、地震 B 発生以降 M_b 以上の地震が発生していないとする (図中ではその期間を T と表記)。



付図5 GR 異常領域の検出機能のパラメータ設定画面

このとき、地震 A だけで領域を作らないのは、実際に M_b 以上の地震が過去に発生した領域となることを担保するためである。また、境界線上の地震 B は領域内に含まれないとして扱った場合、地震 A 発生以降、 M_b 以上が発生していないとも見なせるが、広がりを持つ地震 B の震源域が領域内に含まれることを考慮して、地震 B を領域内の活動に含めて期間 T を設定している。

この方法は、領域の広がりを見つけることを念頭に置いたものであることは述べたが、地震



付図6 GR 異常領域の検出処理における、予測対象地震の規模 (M_b) 以上の地震が発生していない領域と期間の作成概念図。左図は領域の空間的イメージ。C は中心となる地震、A、B、Z は M_b 以上の地震。L は領域の直径である。右図は、地震 A、B、Z についての M-T 図のイメージ。T は領域内における M_b 以上の地震が発生していないとみなす期間を表す。なお、Z は B よりも C に近いが、A よりも前に発生しているため無視され、A より後に発生している B までで領域が形成される。

A が解析期間の地震リストに含まれる新しい地震（すなわち、それより後に発生した地震が少ない）であったり、地震活動そのものが疎な地域であったりすると、地震 B までの距離が極端に大きな領域を作ってしまうことがある（地震 B がない状況もありうる）。また、逆に活動が極めて活発なら極端に小さな領域を作ってしまう場合もある。そこで、ターゲットとする地震が発生していないと考える領域は、そうした地震の震源域を十分に含みうる広がりを持ち、GR 則が成り立つのが自然であると考えられる程度の大きさであるのが望ましいと考え、本文第 2.8.1 項に示した (1) 式を以下のように変えて、Mb の大きさに応じて領域の直径 L の適用範囲を Lmin 以上、Lmax 以下とした。これに従い、領域の直径 L が Lmin に満たない場合は、領域を作らない。また、直径 L が Lmax を超える場合や、地震 B がない場合は Lmax に固定し、T を地震 A 以降の期間とする。

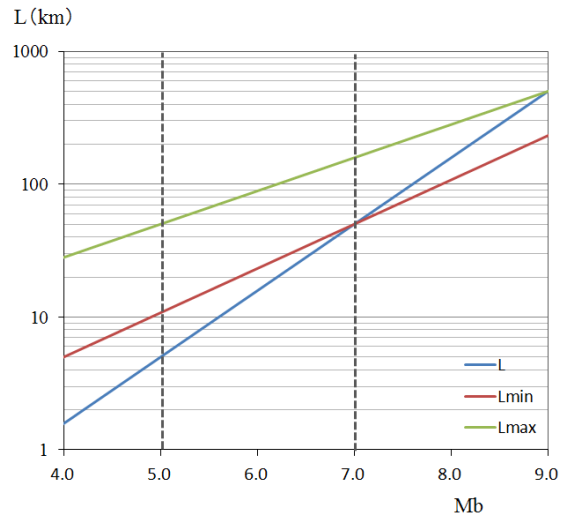
$$\text{Log}_{10}(\text{Lmin}) = 0.5 * \left(\text{Mb} + \frac{(7.0 - \text{Mb})}{3} \right) - 1.8$$

$$\text{Log}_{10}(\text{Lmax}) = 0.5 * \left(\text{Mb} + 1.0 + \frac{(7.0 - \text{Mb})}{2} \right) - 1.8 \quad (2)$$

付図 7 に (1) 式による L と (2) 式による Lmin, Lmax の、Mb による関係を示す。(2) 式を Mb について具体的に当てはめると、Mb が 7.0 のときは、M7.0 における L (約 50km) から M8.0 における L (約 160km) までとなる。Mb が 5.0 のときは、約 M5.7 における L (約 10km) から M7.0 までの L (約 50km) になる。(2) 式は M5 から M7 程度の地震を主たるターゲットとしてあくまでも将来的な自動処理による自動設定を想定し試行錯誤的に決めたため、M5 程度より小さい地震や、M7 を超えるような地震は現時点では考慮していない。

処理結果については、CSV 形式で、中心の地震の位置、領域の半径、地震が発生していない期間などをファイル出力することができるようにしてあり、作図に対する便宜も図っている。

なお、領域の作り方については、やや複雑で



付図 7 本文 (1) 式による L と、(2) 式による Lmin, Lmax の関係。
点線は、(2) 式の適用を想定した Mb の範囲 (M5.0~7.0) を示す。ただし、処理上は、Mb が点線の範囲内でなくても適用される。

わかりにくいことから単純に (1) 式あるいは一定の大きさを与える方法も検討したいと考えているが、そもそも半径を与えることに意味があるかということもあり、ここでは、まずは得られたデータから有意と考えられる大きさをもつ領域を探すことを第一の目的としている。

③GR 異常領域抽出条件.

条件設定は、各領域における予測対象規模 (Mb) 以上の地震が最後に発生した以降の期間、すなわち、Mb 以上の地震が 1 個も発生していない期間 (付図 6 の期間 T) において、以下の 2 パターンを選択できる。

- ・ Mb より小さな、指定した規模 (本文第 2.8.6 項における Ma) 以上の地震が設定回数以上発生している場合

- ・ 当該領域における b 値を解析した上で、Mb 以上の地震の期待回数が設定数以上になるだけ Ma 以上の地震が発生している場合

後者は、b 値が 1.0 ならば、期待値の設定を 1.0 とし、Mb = Ma + 2 とした場合、前者の Ma の設定を 100 回とした場合と同じ意味になる。

④その他.

- ・ 検出領域ごとの Ma 以上の地震について ETAS モデルとポアソンモデルをあてはめ、AIC に

基づいて適合の良いほうを使って M_a 以上の地震の平均発生数を求め、領域ごとに求めた b 値と組み合わせて、 M_b 以上の地震の、30日あたりの発生期待数と発生確率を計算する (ETAS による場合は、解析期間の終わりの時点における平均発生数によるもので、予測期間に発生した地震を加味したモンテカルロシミュレーションではない)。

- ・ 結果画面のロック, 対象範囲設定.

6 格子点による調査のヒント

これまで述べてきたように REASA は異常発見に重きを置く Seisqa 手法によって領域設定することを基本とするが、扱いによっては格子点での調査を行うことが可能である。現状においてそうした調査を行う場合に備えて、参考までにその方法を簡単に述べておく。

それは、本付録の第 1, 3, 4, および 5 章に示したような、ある条件を満たす領域を検出する解析を行う際に、震源データにダミーデータを付け加えることで可能である。Seisqa 手法は、単に地震が起こったことのある場所 (震央) を中心に領域を設定するだけなので、領域の中心となる地震は解析期間には関係しない。すなわち、解析期間外の震源時で、かつ格子状の緯経度データをもつダミーデータをあらかじめ作成し、 M を大きな値、例えば 9.9 としておけば良い。解析時には、調査領域の中心とするパラメータを $M_{9.9}$ 以上としておけば、ダミーデータの緯経度を中心とした格子状の領域での解析を行うことができる。

なお、本文第 2.5.2 項で述べた通り、REASA における Seisqa 手法を用いた領域設定による解析結果は、抽出された領域の中心となった震源データが X Window のリストウィジェット上で選択状態 (白黒反転) となることで示される。このため、ダミーデータを用いなくて格子点による解析を導入するには、解析結果の出力についての開発が必要になるが、今後、格子点解析についてもメニューに組み込むことを検討したい。