

## 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リング

野口伸一\*

### Extraction of Earthquake Clusters by Linking Method and Declustering in Central Honshu, Japan

Shin-ichi NOGUCHI

\*Earthquake Research Department

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

shin@bosai.go.jp

#### Abstract

We examined earthquake clusters using a linking method for 31,672 earthquakes occurring in central Honshu (34.5-38.5°N, 136.0-141.0°E) in the last five years with depth  $\leq 20$  km and  $M \geq 1.0$ . Pairs of earthquakes were linked or unlinked through conditions based on origin time difference  $dt$  (day) and hypocentral distance  $ds$  (km). It is reasonable to assume that the link-conditions of many small and large earthquakes depend on magnitude  $M$ , so we used forms of  $dt(M)$  and  $ds(M)$  as the function of  $M$  and extracted clusters for seven different link-conditions. We then compared and studied the resulting differences in extracted clusters and independent earthquakes for seven cases. The largest cluster during the study period was extracted from remarkable aftershocks of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake  $M6.8$ . Results showed that the number of cluster-constituent events and the duration of cluster activity depend strongly on the link-condition. Judging from the stationary seismicity of independent earthquakes after declustering, we found a relatively stable link-condition overall to be  $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$  for  $M \geq 5.1$ ,  $ds < 5$  km for  $M < 5.1$  and  $dt \leq 3$  days independent of  $M$ .

**Key words** : Linking method, Earthquake cluster, Declustering, Hypocenter catalog, Independent earthquake

#### 1. はじめに

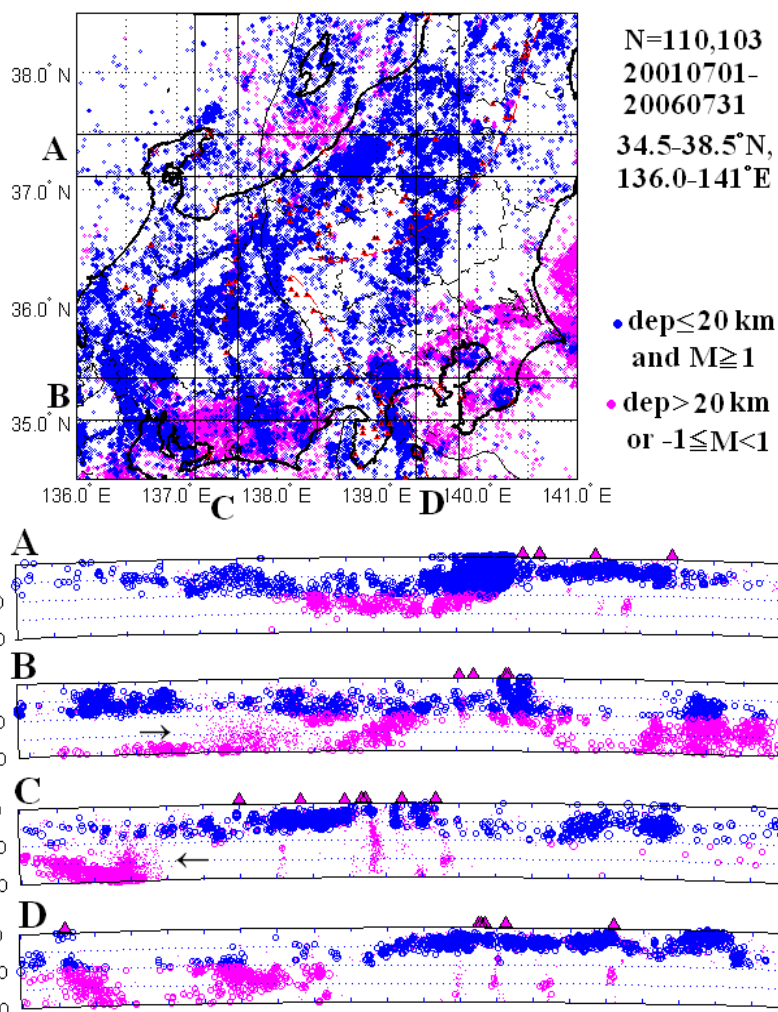
脆性域の破壊現象として地震活動の特性は、時間的空間的な集中傾向である。本震の後の余震活動や顕著な群発活動がその典型である。時間・空間的に近接するこのような地震群、すなわち地震クラスターは、地震活動の調査研究において特に重要で、様々に取り扱われてきた（例えば、尾形, 1993 ; 宇津, 1999 ; 尾形・宇津, 1999）。

地震クラスターの解析と処理は、調査研究の目的により概ね二つに大別される。ひとつは、クラスターを取り出す手法やクラスターの詳細な解析、すなわち本震・余震型、群発型等のタイプ分け、クラスターの時空間的発展過程の調査解析等である。もうひとつは、そのようなクラスターは、本震や主要な地震に起因して引き起こされた従属事象とみなし、除群（デクラスタリング）する

前処理である。デクラスタリングした後の地震を独立事象として扱い、地震活動の定常性や広域変動、長期的傾向をみようとするものである。いずれにしても、地震クラスターの調査では、クラスターを合理的に抽出することが重要となってくる。

本小論では、このような観点から、地震のクラスターをリンク法によって抽出する手法に力点を置いた調査を行なう。リンク法では、何らかの相互関係や特徴を持つ地震同士を次々と連結して、ひとつの地震集団が取り出される。ここでは、地震間の距離と震源時の差をパラメータとして、地震同士を連結することを試みる。そして、リンク条件によって、抽出されるクラスターとデクラスタリング後の地震活動がどのような特徴を持つかの検討を行う。具体的には、最近の観測網で得られた比較

\*独立行政法人 防災科学技術研究所 地震研究部



**図 1** 対象域の震央分布（深さ 0–40km）と東西と南北の 4 矩形域の震源断面分布．青の記号：20 km 以浅および  $M \geq 1$ ．紫の記号：深さ 20 km 以深，または  $-1 \leq M < 1$  の地震．赤三角：活火山．断面 B と C の矢印は，東海地域のフィリピン海スラブの震源の上方の低周波地震を示す．

**Fig. 1** Epicenter distributions (depth 0–40 km) and hypocenters projected onto the four EW and NS cross-sections for earthquakes in rectangles A to D. Blue symbols: foci with a depth of  $\leq 20$  km and  $M \geq 1$ . Magenta symbols: foci with a depth of  $> 20$  km or with  $-1 \leq M < 1$ . Red triangles: active volcanoes. Arrows in sections B and C indicate the low-frequency earthquakes occurring above hypocenters of the Philippine Sea slab in Tokai area.

的精度の良い震源データを対象に，リンク条件によるクラスターの割合，クラスターを構成する地震の数や時系列，クラスターのタイプ分け，デクラスタリング後の地震活動の定常性等を検討する．これによって，小さな地震を含む大量の震源データから，地震活動の評価・予測等に有用な情報を取り出そうとするものである．

以下，第 2 章では対象とする地域の震源データの特徴，精度について，第 3 章では地震間の距離と震源時の差に基づくリンク法の概念とクラスターの抽出，およびデクラスタリングの操作手順について述べる．第 4 章と第 5 章では実際の震源データに適用して，リンク条件と生成されるクラスター，デクラスタリング後の地震活動の特徴をまとめる．特に 2004 年新潟県中越地震の多数の余震活動から抽出されるクラスターが，リンク条件に大き

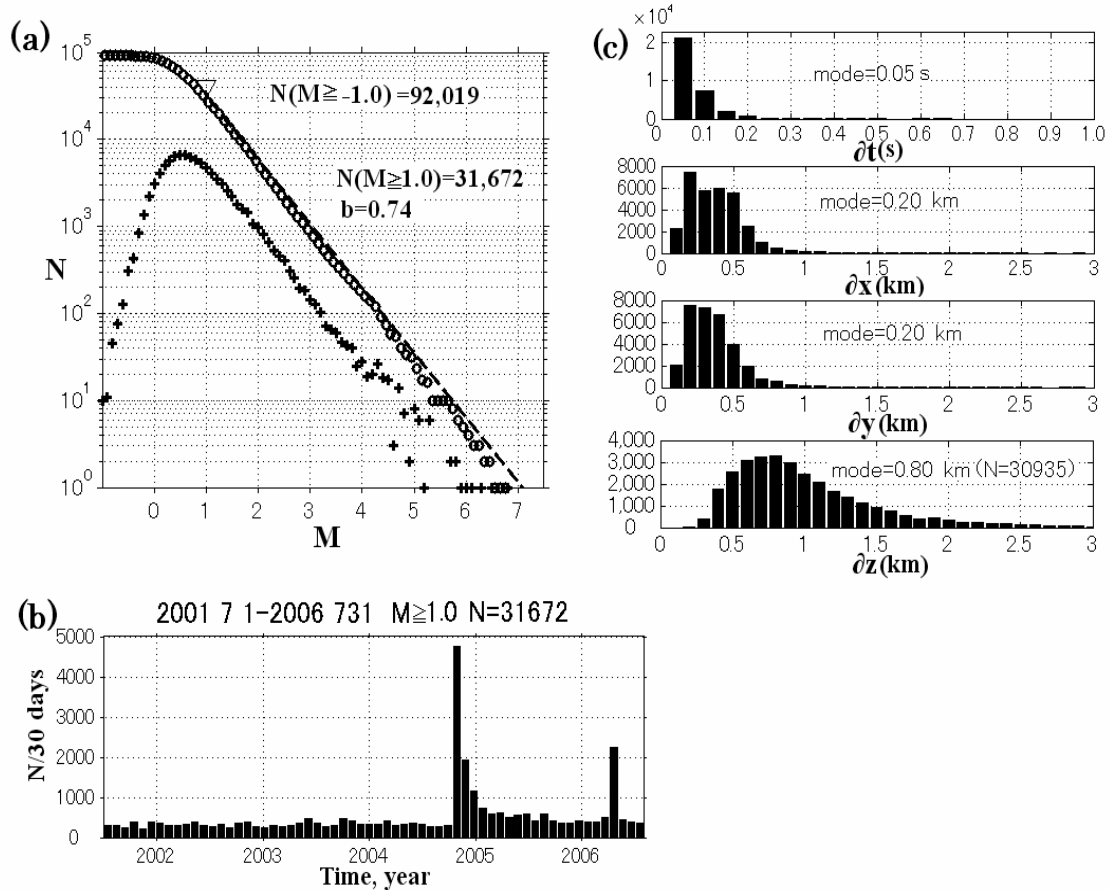
く左右されることについて検討する．

## 2. データ

震源データとして，防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net) や各大学等の関係機関のデータを統合処理した気象庁の一元化地震カタログを使用する．一元化地震カタログは 1997 年 10 月から作成されてきたが，特に Hi-net の展開 (Okada *et al.*, 2004 ; Obara *et al.*, 2005) 以降，小さな地震を含むデータ量が飛躍的に増大した．そのため，ここでは最近約 5 年間の比較的震源決定精度の良い地震データを以下のように選択して，解析データとする．

### 2.1 解析に用いる震源データの特徴

対象地域は図 1 の本州中央の主に内陸部である ( $34.5 - 38.5^\circ \text{N}$ ,  $136.0 - 141.0^\circ \text{E}$ )．図 1 には気象庁の一元化



**図 2** (a) 2001 年 7 月 1 日～2006 年 7 月 31 日の深さ 20 km 以浅の地震の規模別度数分布．解析は  $M \geq 1.0$  の 31,672 個について行なった．(b) 解析対象とする地震の 30 日毎の地震回数変化 ( $N-t$  図, 図 5 参照)  
**Fig. 2** (a) Frequency-magnitude distribution of earthquakes from July 1, 2001 through July 31, 2006, with depth  $\leq 20$  km. We restrict analysis for 31,672 earthquakes with  $M \geq 1.0$ . (b) Time variation in earthquake frequency for each of 30 days ( $N-t$  diagram: see Fig. 5). (c) Histograms and modes of origin time errors  $\Delta t$  (s), longitude errors  $\Delta x$  (km), latitude errors  $\Delta y$  (km), and depth  $\Delta z$  errors (km). Depth-fixed events are omitted in the  $\Delta z$  histogram.

震源カタログによる深さ 40 km 以浅,  $M \geq -1.0$  の震央分布と, 東西, 南北方向の矩形域の震源断面分布を示した. 期間は 2001 年 7 月～2006 年 7 月である. 青色の震源は深さ 20 km 以浅で  $M \geq 1$ , 紫色の震源は 20 km 以浅と 20 km 以浅の  $M < 1$  の地震である.

まず, 図 1 の震源の断面分布図 A～D をみると, 陸域プレート内の地震は主に 20 km 以浅に層状に分布し, その上限と下限が比較的明瞭である. これらの浅い地震の下側には, 活火山 (図 1 断面の赤三角) の近辺下の深さ 20～40 km に上下に分布する  $M < 1$  の地震, および太平洋側の海洋プレートの沈み込みに伴うスラブ内の地震がみられる. また図 1 の断面 B と C では, 東海地域下のフィリピン海スラブの地震の上方, 30 km 前後の深さにほとんどが  $M < 1$  の低周波地震が点在する (断面 B と C の矢印部分, 気象庁カタログに低周波イベントの情報が付されている). 以上の震源分布の特徴から, 検知率, 震源の

精度および空間的分解能が相対的に良い浅い地震を対象として, 解析する地震の震源の深さは 20 km 以浅に限定した.

次に, 震源データの時間的均質性をみるため,  $M-t$  図と  $M$  の度数分布の時間変化を調べた. その結果, 2001 年の半ばを境に比較的明瞭な検知率の変化がみられ,  $M 0.1$  毎の度数分布の最頻値は, 2001 年の半ば以前は 0.8～0.9 前後, 2001 年半ば以降は 0.5～0.6 前後であった. これは 2001 年に Hi-net がこの対象地域と周辺に展開され検知能力が向上したことに対応する. これらを考慮して, 解析する  $M$  の下限は 1.0, 解析期間は 2001 年 7 月以降 2006 年 7 月末までとした. 図 2 (a) に解析期間の  $M 0.1$  毎の度数分布と  $M$  の大きい方からの累積度数分布を示す. 以上のようにして, 本稿で解析対象とする地震は,  $M \geq 1.0$  及び 20 km 以浅の 31,672 個である.

これらの地震の 30 日毎の回数の時間変化 ( $N-t$  図) は

図 2 (b) のようになる。2004 年後半の顕著な峰は、2004 年 10 月 23 日 17 時 56 分の新潟県中越地震  $M6.8$  の余震活動を表わしている。また 2006 年前半の 2 番目の峰は、2006 年 4 月 17 日から始まった伊豆半島東沖の地震活動で、最大地震は 2006 年 4 月 21 日 02 時 50 分の  $M5.8$  である。これらの顕著な地震活動は後で示すように、特に地震数が多く継続期間が長いクラスターとして抽出される。

図 2 (c) は震源誤差のヒストグラムである。大多数は震源時誤差  $\partial t \leq 0.5$  s, 東西誤差  $\partial x \leq 2$  km, 南北誤差  $\partial y \leq 2$  km, および深さ誤差  $\partial z \leq 3$  km にあり、震源決定精度は高い。なお解析対象の地震には深さ固定で震源決定されたものが小数含まれ、ほとんど 2004 年新潟県中越地震の余震である。

### 2.2 地震データの震源時の差と震源間距離の分布

リンク法によるクラスター解析では、二つの地震がある時間と距離の範囲にあるとき連結され、その条件で次々と連結されてクラスター（地震群）が生成される。まず、解析の元のデータとなる上記 31,672 個の地震間の震源時の差と震源の距離が、どのように分布するかを見ることにする。

ある 2 個の地震の震源時の差を  $dt$  (days), 震源間の距離を  $ds$  (km) とする。  $N_a$  個の地震について、任意の 2 個の  $dt$  と  $ds$  を求める組合せの数は  ${}_a C_2$  となる。  $N_a = 31,672$  個では、  ${}_a C_2 = 501,541,956$  (5 億回強) の  $dt$  と  $ds$  の計算が

必要であるが、最近のパーソナルコンピュータとソフトウェアで比較的容易に計算される（本稿で使用了 Windows XP Professional Ver.5.1 と The MathWorks Inc. 製 Matlab Ver.7.3 では約 17 分で実行された）。

図 3 (a) は、各地震間の震源時の差  $dt$  (days) と震源間の距離  $ds$  (km) のうち、距離方向 ( $R$ ) 20 km 以内、時間方向 ( $T$ ) 20 日以内について、距離と時間の幅 ( $\Delta R$  と  $\Delta T$ ) 毎の度数分布を示したものである。ここでは、  $\Delta R = 0.5$  km,  $\Delta T = 0.5$  day として、  $T \leq dt < T + \Delta T$  と  $R \leq ds < R + \Delta R$  の度数を  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  として 3 次元表示した。

図 3 (b) は、各々  $R$  方向と  $T$  方向に総計した  $N(T \sim T + \Delta T)$  と  $N(R \sim R + \Delta R)$  を示している。これらのヒストグラムから以下の特徴が挙げられる。

(1) 図 3 (a) の  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  は、特に  $T \leq 4$  days 前後、  $R \leq 3 \sim 4$  km の限られた範囲で、度数が際立って高く、それより遠くの  $T$  と  $R$  で度数は急速に減少する。時間方向  $T$  の最頻値は  $T = 0 \sim 0.5$  day の範囲、距離方向  $R$  の最頻値は  $R = 1 \sim 1.5$  km にあり、極大の度数は  $N(0 \sim 0.5 \text{ day}, 1 \sim 1.5 \text{ km}) = 116,275$  である。震源時の差  $dt$  の最頻値が  $0 \sim 0.5$  day にあることは、半日以下で続発する地震の組が最も多いことを示し、本震後の余震活動や群発活動による時間的集中性を表している。

(2) この時間方向  $T$  の最頻値  $0 \sim 0.5$  day に対し、距離方向  $R$  の最頻値は  $R = 1 \sim 1.5$  km にあり、  $R = 0 \sim 0.5$  km では

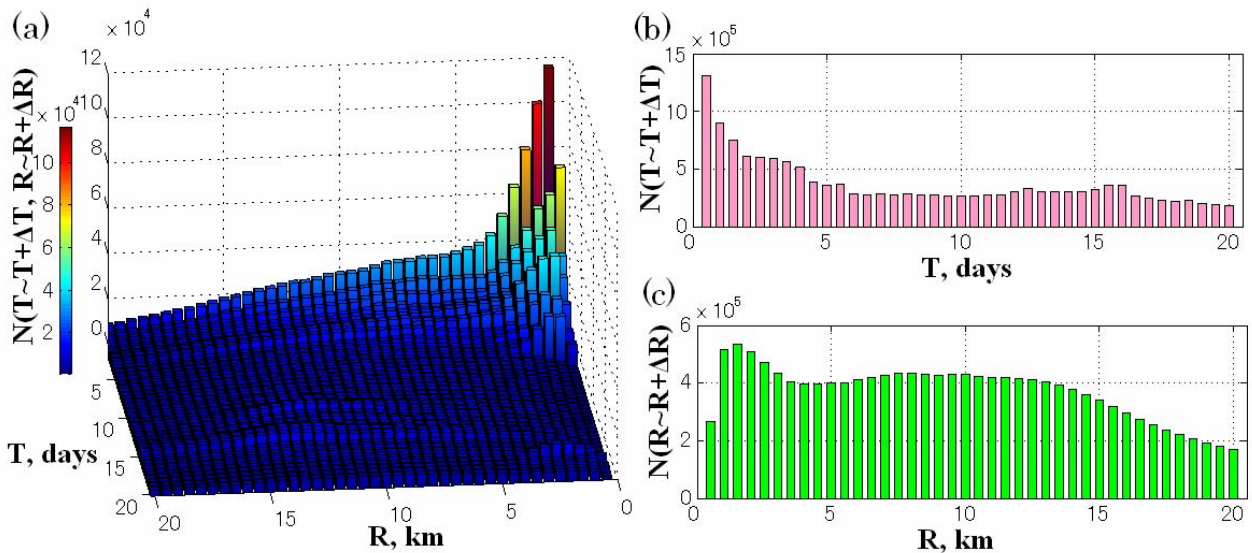


図 3 (a) 地震間の震源時の差  $dt$  (days) と震源間の距離  $ds$  (km) について、時間範囲  $T \leq dt < T + \Delta T$  と距離範囲  $R \leq ds < R + \Delta R$  に入る度数分布  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  の 3 次元表示。ここでは  $\Delta R = 0.5$  km,  $\Delta T = 0.5$  day として、  $R \leq 20$  km,  $T \leq 20$  日について示す。(b), (c)  $R$  方向と  $T$  方向に総計した  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  のヒストグラム

Fig. 3 (a) 3D view of frequency distribution  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  in ranges  $T \leq dt < T + \Delta T$  and  $R \leq ds < R + \Delta R$ , where origin time difference  $dt$  (day) and hypocenter distance  $ds$  (km) are obtained for all pairs of earthquakes. We take  $\Delta R = 0.5$  km,  $\Delta T = 0.5$  day shown for ranges  $T \leq 20$  days and  $R \leq 20$  km. (b), (c) Frequency distribution  $N(T \sim T + \Delta T)$  and  $N(R \sim R + \Delta R)$  cumulated along distance direction  $R$  and time difference direction  $T$ , respectively.

ない。脆性破壊として震源間距離の度数の極大は、本来なら最も短い距離範囲  $R=0\sim 0.5\text{ km}$  に表れるべきと推定される。この範囲で極大にならないのは、本稿で用いた震源データの誤差の大きさ (図 2 (c)) と空間分解能によるものであろう。特に深さの誤差  $\partial z$  の最頻値は  $0.8\text{ km}$  にあり、かつばらつきも大きく (図 2 (c) の  $\partial z$  のヒストグラム)、従って空間分解能も同程度に粗いと考えられ、 $R=1\sim 1.5\text{ km}$  で極大となるのであろう。

(3) 図 3 (a) の  $T$  と  $R$  の小さな範囲における著しく高い度数分布とともに、例えば  $T=4\text{ day}$  以内くらいで、 $R$  方向では  $R=20\text{ km}$  まで全体に度数の漸減がみられる。また  $T=15$  日前後、 $R=10\sim 15\text{ km}$  くらいの比較的長時間と長距離の地震間にもやや高い峰がみられる。これらは、ある期間を置いてある離れた地域同士で活動した地震を示すものであろう。特にこの中には、2004 年新潟県中越地震の余震活動とその 2 次余震の活動が推定される。図 3 (b) の時間方向  $T$  の度数  $N(T\sim T+\Delta T)$  では  $T\geq 4\text{ day}$  でほぼ一定、図 3 (c) の距離方向  $R$  の度数  $N(R\sim R+\Delta R)$  では  $R=7\sim 12\text{ km}$  位まで平坦な特徴がみられ、やはり主に新潟県中越地震の余震活動を反映したものと推定される。

以上、解析対象とする地震データについて、図 3 の震源時の差と距離の度数分布から、互いに概ね 3~4 日以内と  $5\text{ km}$  程度以内に発生する地震同士の集中傾向が特に強い。この集中性は様々な地震クラスターの活動を反映したもので、特に 2004 年新潟県中越地震の顕著な余震活動の影響が大きいであろう。次章では、地震間のこのような時間・空間分布に基づいて、クラスターを取り出す手法を扱う。

### 3. リンク法によるクラスター抽出手法

この章では、地震間の距離と時間差に基づいて、震源同士を連結するリンク法の概念について説明する。さらにリンク法で連結されたクラスターをひとつの地震へ変換するデクラスタリングについて述べる。また地震の規模  $M$  と断層の長さを考慮したリンク法については次章で扱うことにする。

#### 3.1 震源の連結法の概念

ある地震  $E$  の震源時 (発生時刻) を  $t$ 、震源位置を  $r$  とする。ただし  $r$  は 3 次元の空間座標である。このとき、ふたつの地震  $E_i(t_i, r_i)$  と  $E_j(t_j, r_j)$  の震源時の差を  $dt_{i,j}$  (単位は day)、震源間の距離を  $ds_{i,j}$  (単位は km) とすると、それぞれ次のように表される。

$$dt_{i,j} = t_j - t_i, \quad \text{但し } t_j \geq t_i \quad (1)$$

$$ds_{i,j} = |r_i - r_j| \quad (2)$$

ここで、時間・空間的に近接するふたつの地震を連結するリンク条件として次のように設定する。

$$dt_{i,j} \leq dt \quad \text{and} \quad ds_{i,j} \leq ds \quad (3)$$

すなわち、震源時の差が  $dt$  (day) 以内、かつ震源間の距離が  $ds$  (km) 以下のとき、ふたつの地震は連結される。

さらに、この (3) のリンク条件に合う地震を順次連結して、その地震数がある  $C_{min}$  個以上のとき、それらの地震集団を厳密な意味でクラスターと定義する。これに対し、(3) のリンク条件から外れる地震、すなわち、時間・空間的に他の地震と離れて発生する地震は、いわば他の地震とは無関係な孤立した地震で、ここでは単独地震、または後で述べるデクラスタリング後の地震とともに独立地震と呼ぶことにする。

多数の地震について、実際に (3) の条件に基づいてクラスターを生成するために、計算機上ではやや込み入った操作手順が必要となる。その概要は概ね次の 1)~4) のような流れとなる。1) まず地震の発生順の元データから、最初の地震  $E_1$  に対し、 $E_1$  より後の全地震との時間差と距離を求める。リンク条件 (3) から、 $E_1$  とのリンク地震か非リンク地震 (単独地震) かを判定する。2) 次に、 $E_1$  とリンクされた地震の中の最初の地震について、1) と同様に残りの非リンク地震との時間差と距離を求め、リンク条件 (3) から、リンク地震か非リンク地震かを判定する。この操作を残りの非リンク地震が、すべてリンク地震と非リンク地震に分類されるまで繰り返す。3) 最終的にリンク地震の地震数がある  $C_{min}$  個以上のとき、それらを一つのクラスターとする。4) 元データからクラスターをすべて除いたデータについて、1) に戻り 1)~4) を繰り返す。また、1)~4) でクラスター生成条件に達しない場合は、 $E_1$  を単独地震として元データから除き 1) に戻り、次の地震を  $E_1$  とする。

#### 3.2 クラスターの大きさと独立地震への変換 (デクラスタリング)

上記の手順で、元のデータの  $N_a$  個の地震は、最終的にリンク地震  $N_l$  個と非リンク (単独地震)  $N_r$  個に分けられる。すなわち、

$$N_a = N_l + N_r \quad (4)$$

さらに、抽出されたクラスターの数を  $N_c$  個、 $i$  番目のクラスターを構成する地震数を  $C_i$  とすると、 $N_l$  個のリンク地震の内訳は、

$$N_l = \sum_{i=1}^{N_c} C_i \quad (5)$$

となる。クラスターの平均構成地震数は  $N_l/N_c$  である。

次に、このように抽出されたクラスターを、全体としてひとつの地震へ変換する操作、すなわちデクラスタリング (除群) を行なう。ここでは、クラスターは本震や主要な地震のような独立事象と、それに起因して引き起こされた従属事象から成るとして、従属事象を除いて単独地震に変換する。そのため、単独地震の震源時と震源位置は、クラスターの最大地震で代表する。また単独地震のマグニチュード  $M_c$  は、 $M$  と地震波エネルギー  $E_s$  (J) の一般的な関係式  $\log E_s = 1.5M + 4.8$  (例えば、宇津, 2001)

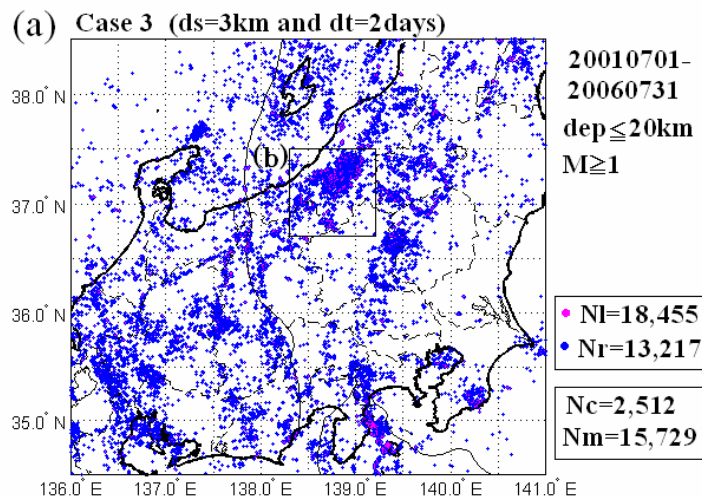


図 4 (a) 本文のリンク条件(3)式で  $ds=3\text{ km}$ ,  $dt=2\text{ days}$  としたときの(表 1 の Case 3), リンク地震と非リンク地震の震央分布. この条件で元の地震は, リンク地震  $N_l=18,455$  個(紫色)と非リンク地震  $N_r=13,217$  個(青色)に分けられた. クラスターを構成する最小地震数を  $C_{min}=2$  として, リンク地震から  $N_c=2,512$  個のクラスターが抽出された. 非リンク地震とクラスターを合わせたデクラスタリング後の独立地震は  $N_m=15,729$  となる.

Fig. 4 (a) Epicenter distribution of linked events and unlinked events in the case of  $dt=2\text{ days}$  and  $ds=3\text{ km}$  under condition (3) in the text (Case3 in Table 1). All events are divided into linked  $N_l=18,455$  (magenta) and unlinked  $N_r=13,217$  (blue). Extracted clusters number  $N_c=2,512$  when we define the minimum number of cluster-constituent earthquakes as  $C_{min}=2$ . The total number of independent events after declustering is the sum of unlinked events and clusters;  $N_m=N_r+N_c=15,729$ .

を用いて, クラスター構成地震を総計して次式で求める.

$$M_c = (\log \sum_{i=1}^C 10^{1.5M_i+4.8} - 4.8) / 1.5 \quad (6)$$

ここで,  $M_i$  はクラスターを構成する  $i$  番目の地震の  $M$  で  $C$  はクラスター構成地震総数である.

このデクラスタリング操作により,  $N_l$  個のリンク地震のうち,  $N_c$  個のクラスターが単独地震に変換される. したがって, リンク条件から外れた先の(4)式の  $N_r$  個の単独地震(非リンク地震)と合わせて, デクラスタリング後の単独地震の総数  $N_m$  は,

$$N_m = N_c + N_r \quad (7)$$

となる. これらの  $N_m$  個の地震を本稿では独立地震と呼ぶことにする. 独立地震は, クラスターの性質が除かれ, 後に示すように時間的・空間的な偏りが少ない(4.3 節と 4.4 節).

#### 4. リンク条件による観測データのクラスター構成とデクラスタリング

前章のリンク法を対象域の震源データに適用して, 地震同士の連結例を示す. また, リンク条件を 7 通り与え

て, リンク地震, 非リンク地震, クラスターの数, 独立地震の特徴と相違点を示す.

##### 4.1 クラスターの抽出例とデクラスタリング

まず, 前章の 3.1 の方法で求めたリンク地震とクラスターの抽出例を示す. 図 4 (a) は, リンク条件 (3) 式で  $dt=2\text{ days}$ ,  $ds=3\text{ km}$  としたときのリンク地震と非リンク(単独地震)の震央分布である. この条件で, リンク地震  $N_l=18,455$  個(図 4 (a) の紫色の震央)それ以外の単独地震  $N_r=13,217$  個(青色の震央)に分けられた. ここではクラスターを構成する最小地震数を  $C_{min}=2$  個と定め, リンク地震から  $N_c=2,512$  個のクラスターが抽出された. 一つのクラスターの地震数の平均は 7 個である.

図 4 (a) の一部を拡大し, さらに領域 A~C についてリンク地震を直線で結んだ震央分布を図 (4b) に示す. 領域 A は, 2004 年新潟県中越地震の余震域の一部の拡大で, 直線が集中する震源ほど周辺の多くの地震との連結を示している. 余震の多くは連結され大規模なクラスターを形成している. 図 4 (b) の領域 B では, 2004 年新潟県中越地震の前から単独地震(青色の震源)も含め小さな地震が断続的に活動していたが, 2005 年 6 月 20 日の  $M5.0$  とその余震活動でやや顕著なクラスターが形成された. 領域 C の新潟・長野県境付近(苗場山近辺)では, 比較的小さなクラスターが時折活動していたが(最

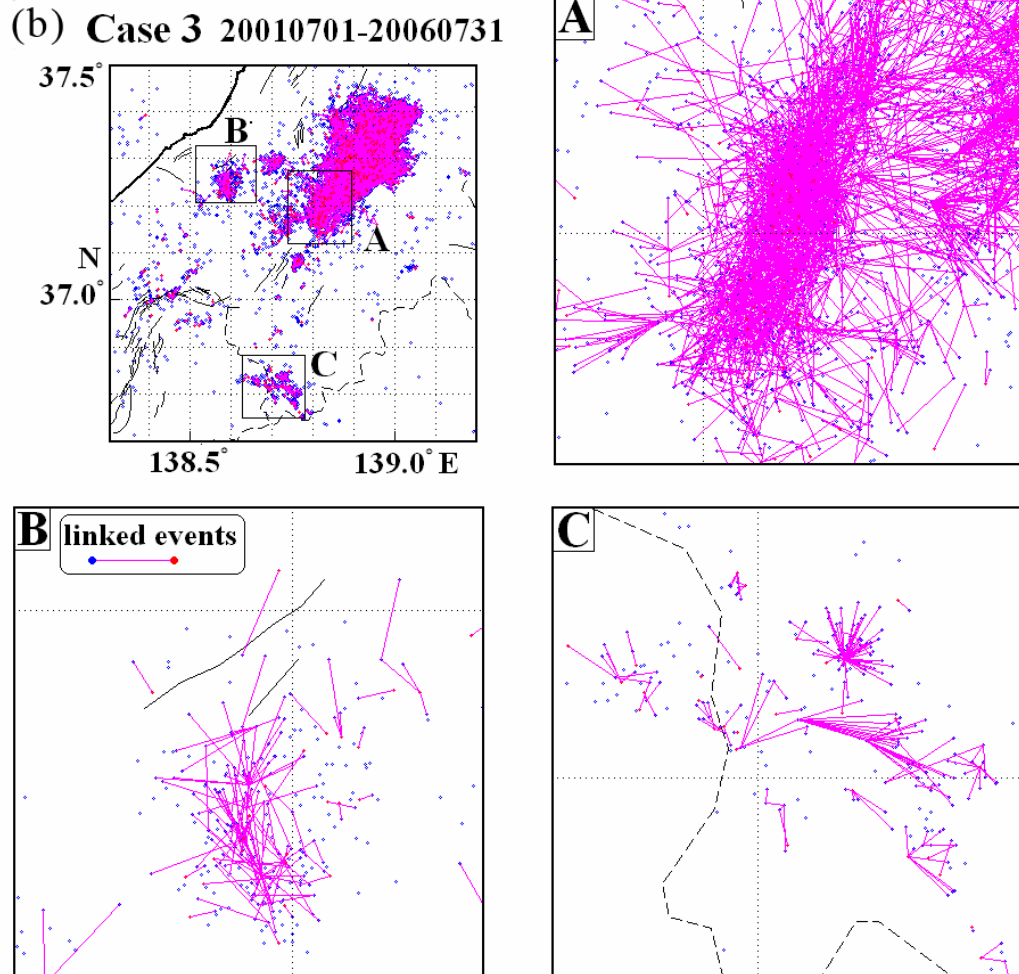


図 4 (b) 図 4 (a) のうち、2004 年新潟中越地震の余震域を含む地域を拡大し、さらに領域 A, B, C についてリンク地震を発生順に直線で結んで示す。

Fig.4 (b) Extended epicenter distribution map in Fig.4 (a) including the aftershock area of the 2004 Mid-Niigata earthquake and further magnifications of local areas A, B and C, where linked events are connected sequentially with lines in the order of occurrence.

大地震は 2003 年 12 月 16 日の  $M4.2$ ), やはり新潟県中越地震の後の 2005 年に活発化してやや大きなクラスターを形成した。

次に、このようなクラスターを 3.2 節の (6) 式から、それぞれ単独地震に変換した。これにより、非リンク地震 (単独地震) と合わせた独立地震の総数  $N_m$  は、(7) 式から  $N_m = N_c + N_r = 15,729$  個である。この結果、元の  $N_a = 31,672$  個に対しリンク地震の割合は  $N_l/N_a = 58.3\%$ 、デクラスタリング後の独立地震  $N_m$  の割合は  $N_m/N_a = 49.7\%$  となる。以上、(3) のリンク条件で  $dt \leq 2$  days,  $ds \leq 3$  km とした結果は、表 1 に Case3 として示した。

#### 4.2 $M$ に依存したクラスターとデクラスタリング

以上は、地震の大きさ  $M$  を考慮せず、点震源として (3) のリンク条件を適用した結果である。実際の地震は、断層運動して有限の長さを破壊伝播する。破壊伝播による時間的・空間的影響の範囲は、 $M$  が大きな地震ほ

ど大きいであろう。そこで、ここでは (3) を  $M$  に依存した  $ds = ds(M)$  と  $dt = dt(M)$  としてリンク条件を適用することにする。

$ds(M)$  の関数形として、本震の  $M$  と余震域との関係式 (例えば、宇津, 2001) を参照すると、例えば  $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$  の式が得られる。しかし、この式では、 $M=2$  で  $ds \leq 0.14$  km,  $M=3$  では  $ds \leq 0.45$  km と、 $M$  に対するリンク距離  $ds$  は極めて小さい値である。実際、第 2 章でみた震源データの誤差の大きさ (図 2 (c)) や空間分解能、また図 3 (a) の  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  の分布形の特徴から、この  $ds(M)$  の値はリンク条件として適当でない。そこで、ここでは、ある  $M$  より小さな地震では  $ds = \text{一定}$  として、 $ds$  の最小値  $ds_{min}$  を導入する。この  $ds_{min}$  に対応する  $M$  を  $M_l$  とすると、リンク条件は、 $M_l$  未満と  $M_l$  以上に分けて次の式で表される。

$$ds < ds_{min} \quad (M < M_l), \quad ds \leq 10^{0.5M-1.85} \quad (M \geq M_l) \quad (8)$$

**表 1** 対象地域の  $N_a=31,672$  個の地震を、本文中の式 (3), (8), (9) のリンク条件で解析した結果のまとめ。リンク条件は Case 1~Case 7 のように  $ds$  (km) と  $dt$  (day) を与え、リンク地震数の多い方から並べた。  $N_l$ : リンク地震数,  $N_r$ : 非リンク地震数,  $N_c$ : クラスタ総数,  $N_m$ : デクラスタリング後の単独地震数 ( $N_m=N_r+N_c$ )。

**Table 1** Summary of the  $N_a=31,672$  earthquakes in the target area examined by linking method using conditions (3), (8) and (9) in the text. Results are shown for seven cases (Cases 1 to 7) in descending number of linked events giving different conditions of distance  $ds$  (km) and time difference  $dt$  (day).  $N_l$ : number of linked events,  $N_r$ : number of unlinked events,  $N_c$ : number of clusters,  $N_m$ : number of independent events after declustering ( $N_m=N_r+N_c$ ).

20010701-20060731,  $M \geq 1.0$ ,  $dep \leq 20$  km,  $34.5-38.5^\circ N$ ,  $136.0-141.0^\circ E$ ,  $N_a=31,672$

Case	$ds$ (km)	$dt$ (day)	$N_l$	$N_l/N_a$ (%)	$N_r$	$N_r/N_a$ (%)	$N_c$	$N_c/N_a$ (%)	$N_m$	$N_m/N_a$ (%)	$N_r/N_m$	$N_c/N_m$ (%)
1	$ds < 10$ ( $M < 5.7$ ), $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ( $M \geq 5.7$ )	$dt \leq 5$	24221	76.5	7451	23.5	2537	8.0	9988	31.5	74.6	25.4
2	$ds < 5$ ( $M < 5.1$ ), $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ( $M \geq 5.1$ )	$dt \leq 3$	20848	65.8	10824	34.2	2500	7.9	13324	42.1	81.2	18.8
3	$ds \leq 3$	$dt \leq 2$	18455	58.3	13217	41.7	2512	7.9	15729	49.7	84.0	16.0
4	$ds < 3$ ( $M < 4.7$ ), $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ( $M \geq 4.7$ )	$dt \leq 10^{0.5M-1.0}$	17818	56.3	13854	43.7	1790	5.7	15644	49.4	88.6	11.4
5	$ds < 3$ ( $M < 4.7$ ), $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ( $M \geq 4.7$ )	$dt \leq 10^{0.5M-1.5}$	15452	48.8	16220	51.2	1708	5.4	17928	56.6	90.5	9.5
6	$ds < 2$ ( $M < 4.3$ ), $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ( $M \geq 4.3$ )	$dt \leq 10^{0.5M-1.5}$	15023	47.4	16649	52.6	1581	5.0	18230	57.6	91.3	8.7
7	$ds < 1$ ( $M < 3.7$ ), $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ( $M \geq 3.7$ )	$dt \leq 10^{0.5M-1.5}$	14022	44.3	17650	55.7	1310	4.1	18960	59.9	93.1	6.9

観測データに対して、どのような  $ds_{min}$  と  $M_l$  の値が適当かは予め明らかではない。それらの妥当な値の設定と検証が本稿の目的のひとつである。そのためここでは、 $ds_{min}=1, 2, 3, 5, 10$  km を与えて以下で検討する。これらの  $ds_{min}$  に対応する  $M_l$  は、 $M_l=3.7, 4.3, 4.7, 5.1, 5.7$  である。

また、 $M$  に依存する震源時の差  $dt(M)$  の関数形として、ここでは  $ds$  と同じ関数形を用いて、

$$dt \leq 10^{0.5M-1.5} \quad (9)$$

を用いた。例えば、 $M=2$  では  $dt \leq 0.3$  day,  $M=3$  では  $dt \leq 1$  day となる。

以上のようにして、リンク条件 (3), (8), (9) に基づいて、ここでは 7 通りの条件を設定して、3.1 節の手順 1)~4) で各々クラスターを解析した。それらの結果を Case 1~Case 7 として表 1 に示す。この中で Case 1~3 は  $dt$  の条件として  $M$  によらず  $dt \leq$  一定値とした場合、Case 4 は (9) 式を少し変えて  $dt \leq 10^{0.5M-1.0}$  とした場合である。表 1 で例えば Case 1 は、最も緩いリンク条件についての結果を示し、この場合リンク地震数  $N_l$  とクラスターの数  $N_c$  が最も多く、反対に単独地震数  $N_r$  とデクラスタリング後の独立地震数  $N_m=N_r+N_c$  が最も少ない。対照的にリンクの条件が厳しい Case 7 では、リンク地震数  $N_l$  は Case 1 の約 58%、クラスター数  $N_c$  も Case 1 の約半数に近いが、独立地震数  $N_m$  は表 1 の中で最も多い。

### 4.3 独立地震の地震回数の時間変化

表 1 のリンク条件による独立地震の違いを比べるため、以下にいくつかの Case についての例を示す。図 5 は、30 日毎の地震数の時間変化を、元の地震データと表 1 の Case 2, 3, 6 の独立地震についてみたものである。縦軸

の地震回数スケールが、元のデータと Case 2, 3, 6 の独立地震で異なることに注意する。矢印 a (↓a) は 2004 年 10 月 23 日の新潟県中越地震  $M6.8$  を含む期間、矢印 b (↓b) は 2006 年 4 月 21 日の伊豆半島東沖  $M5.8$  前後の活動期間を示している。

図 5 で、元のデータは新潟県中越地震を含む期間 (矢印 a) の地震数の極大が際立って高いのに対して、Case 2 ( $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ,  $M \geq 5.1; ds < 5$  km,  $M < 5.1; dt \leq 3$  days) ではこの極大は完全に消失し、著しい違いを示している。さらに、Case 3 ( $M$  によらず  $ds \leq 3$  km,  $dt \leq 2$  days) では、地震数の極大は、矢印 a より 1 期間後に表れ、Case 6 ( $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ,  $M \geq 4.3; ds < 2$  km,  $M < 4.3; dt \leq 10^{0.5M-1.5}$ ) では、地震数極大は矢印 a よりさらに 3 か月程後の 2005 年初めに顕著に表れて時間減衰している。このことは、リンク条件が Case 6→Case 3→Case 2 と緩くなるほど、リンク範囲が時空間的に広がって多数の余震がリンクされて規模の大きなクラスターとなり、それらがデクラスタリングされることを示している。特に Case 2 では、長期間の余震が多数リンクされ大規模なクラスターに成長し、それらが 1 個の独立地震にデクラスタリングされるため、地震回数に新潟県中越地震の前後でほとんど違いはみられず、回数変化は滑らかである。

一方、新潟県中越地震の前の地震回数変化は、Case 2, 3, 6 とほぼ同様のパターンで推移している。特に Case 2 は、全期間を通して 200 個 / 30 日前後で変化し概ね安定な定常性を示している。

### 4.4 独立地震の震源時の差と震源間距離の分布

表 1 の Case 2 と Case 6 について、独立地震の震源時の差と震源間距離の度数分布を、先の図 3 (a) と同様にして求め図 6 に示した。  $N(T \sim T+\Delta T, R \sim R+\Delta R)$  の度数のスケールが、図 3 (a) に比べて Case 2 が  $1/2000$ , Case 6 が



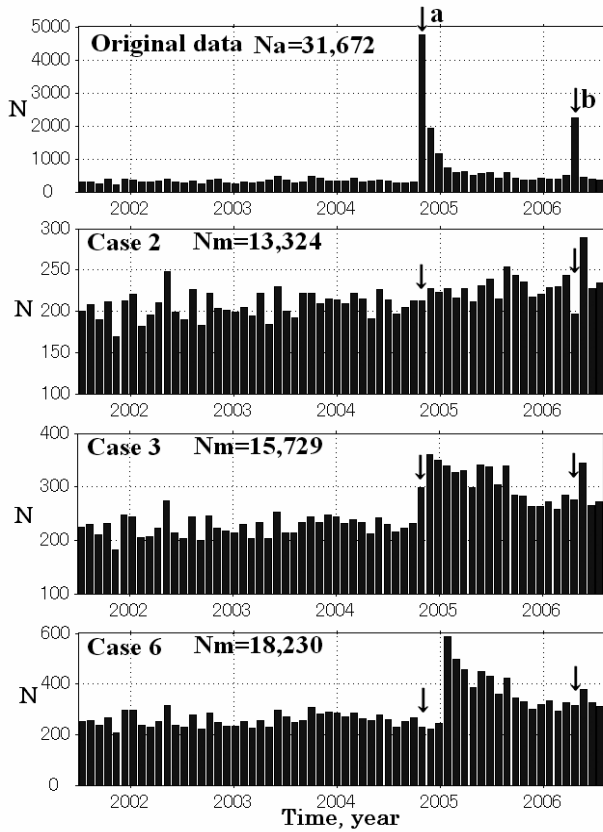


図 5 30 日毎の地震数の時間分布. 元の地震データ (図 2 (b) と同) と, 表 1 の Case 2, 3, 6 のデクラスタリング後の独立地震 ( $N_m$ ) について示す. 縦軸のスケールの違いに注意する. 矢印 a は 2004 年 10 月 23 日の新潟県中越地震  $M6.8$  を含む期間, 矢印 b は 2 番目に大きな 2006 年 4 月 21 日の伊豆半島東沖  $M5.8$  の前後の活動期間を示す.

Fig. 5 Time variation of earthquake frequency on each of 30 days ( $N-t$  diagram) for original earthquakes (same as Fig. 2 (b)), and for independent events ( $N_m$ ) obtained by declustering under different conditions of Cases 2, 3, and 6 shown in Table 1. Note that ordinates differ in scale for each case. Arrow a indicates the occurrence period of the largest cluster of 2004 Mid Niigata Prefecture earthquakes with main shock  $M6.8$  on October 23, 2004, and arrow b corresponds to the period of the second largest cluster east off Izu Peninsula in 2006 with the largest event  $M5.8$  on April 21, 2006.

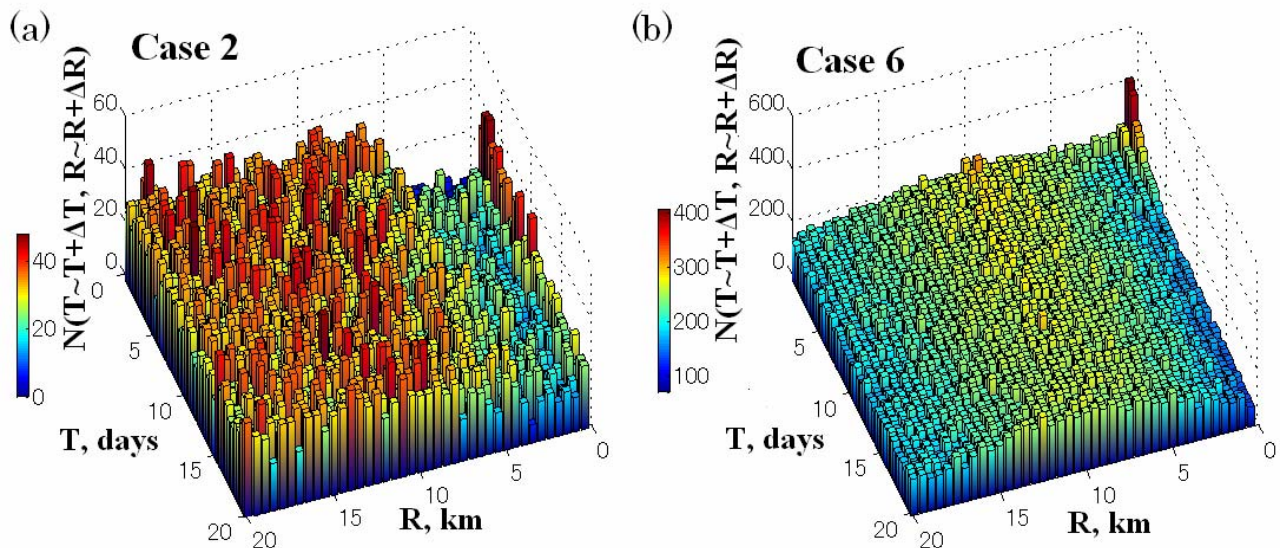
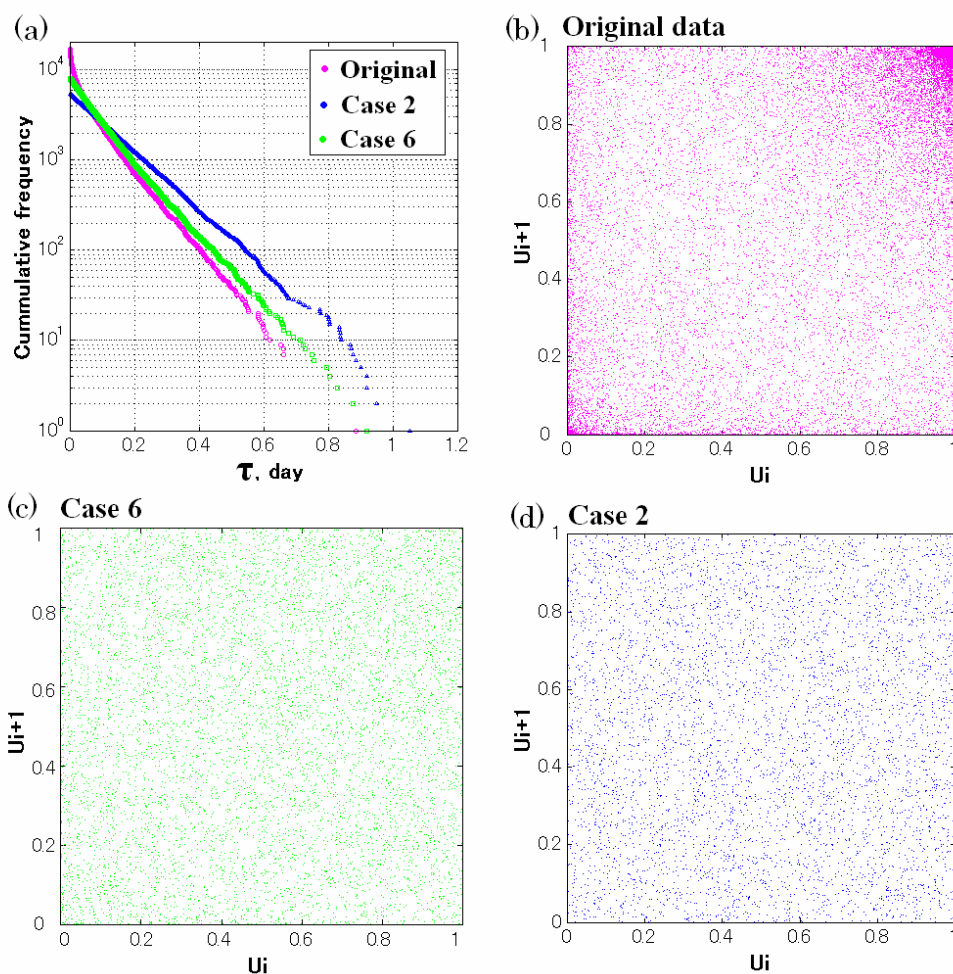


図 6 本文の (8), (9) 式の条件によるデクラスタリング後の独立地震  $N_m$  の度数分布  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  の 3 次元表示. (a) Case 2. (b) Case 6. 図 3 (a) の元のデータの  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  と比べて度数のスケールは著しく小さい.

Fig. 6 3D view of the frequency distribution  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  for independent earthquakes  $N_m$  obtained through link conditions (8) and (9) in the text. (a) Case 2. (b) Case 6. Compared to the  $N(T \sim T + \Delta T, R \sim R + \Delta R)$  of original data in Fig. 3, frequency scales are reduced notably for both (a) and (b).



**図 7** (a) 相次ぐ地震の時間間隔  $\tau$  の累積度数の分布. 元データ (紫), Case 2 (青), Case 6 (緑). (b), (c), (d)  $i$  番目の間隔を  $\tau_i (= t_{i+1} - t_i)$ ,  $\nu = N/T$  ( $N$  は観測期間  $T$  の地震数) として,  $U_i = \exp(-\nu\tau_i)$  の計算から,  $U_i$  (横軸) と  $U_{i+1}$  (縦軸) の関係をみたもの (宇津, 1999 の方法による).  $U_i$  対  $U_{i+1}$  の分布は, 時間間隔  $\tau$  がランダムな独立地震ほど, 元のデータ  $\rightarrow$  Case 6  $\rightarrow$  Case 3 のようにより均質に分布する.

**Fig. 7** (a) Cumulative number of time intervals  $\tau$  of successive events for original earthquakes (magenta), independent events of Case 2 (blue), and of Case 6 (green). (b), (c), (d) The relationship between  $U_i$  (abscissa) and  $U_{i+1}$  (ordinate), where  $U_i = \exp(-\nu\tau_i)$ ,  $\nu = N/T$  ( $N$  is the number of events during period  $T$ ), and  $\tau_i (= t_{i+1} - t_i)$  (after Utsu, 1999). The distribution of  $U_i$  vs  $U_{i+1}$  relationships becomes more homogeneous as time interval  $\tau$  is distributed more randomly for independent events in ascending order from original data, Cases 6 to 3.

1/200 であることに注意する. これは, 図 3 (a) の  $T$  と  $R$  が小さな範囲で際立って高い度数分布が, デクラスタリングの結果大幅に除かれたためである.

図 6 では, まず Case 2 の方が Case 6 よりもリンク条件が緩いため, 度数は一桁少ない. また Case 2 では,  $R < 5$  km 程度で相対的に度数が少ない. これは,  $M < 5.1$  で  $ds < 5$  km のリンク条件のため (表 1), 5 km 程度以下で, 小さな地震が多数連結されて除かれたためであろう. Case 6 では  $R \leq 2$  km と  $T \leq 2 \sim 3$  days 程度の狭い範囲で度数が極大となる. これはこの範囲で Case 6 のリンク条件から外れる  $M$  の小さな地震が相当数に昇るためと推定される.

次に, このような独立地震の発生時間のみに着目して, 相次ぐ地震の発生間隔がリンク条件によってどのように分布するかをみることにする. 図 7 (a) は, Case 2 と Case 6 の独立地震および元の地震データについて, 相次ぐ地震間の時間間隔  $\tau$  (days) を求め,  $\tau$  の大きい方からの累積度数  $W(\tau)$  の対数と  $\tau$  の関係をみたものである.  $\tau$  の分布がポアソン過程であれば,  $\log W(\tau)$  対  $\tau$  は直線関係にある (宇津, 1999) が, 元のデータ (図 7 (a) の紫の記号) は  $\tau$  の短い方で急増してポアソン過程から外れる. また, Case 6 (緑の記号) よりも Case 2 (青の記号) の方が直線の勾配が緩い.

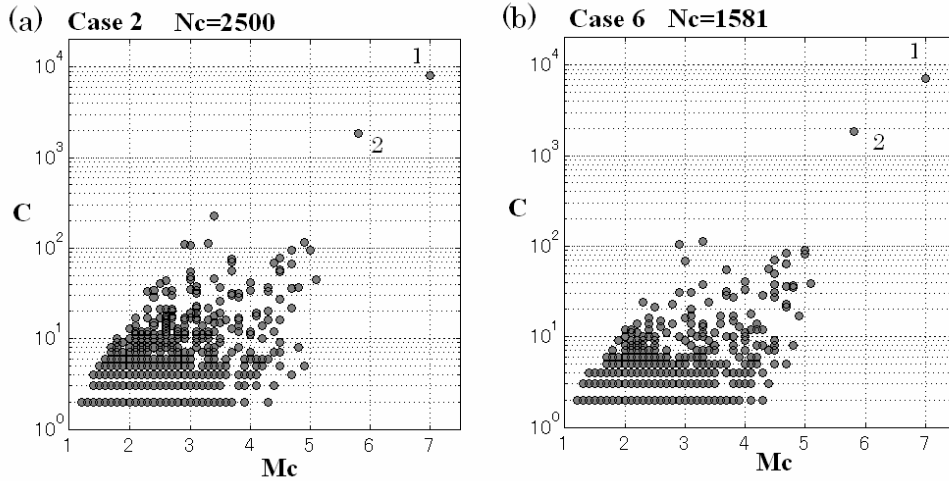


図8 (a) Case 2 と (b) Case 6 について、クラスターの  $M_c$  と構成地震数  $C$  の関係。クラスター構成の最小地震数  $C_{min}=2$  とした。クラスターの数 は Case 2 が  $N_c=2,500$  個、Case 6 が  $N_c=1,581$  個である。最大と2番目に大きなクラスター1と2の  $M-t$  図を図9に示す。

Fig. 8 Relationship between  $M_c$ , the magnitude of each cluster, and  $C$ , the number of cluster-constituent earthquakes, for Case2 (a) and Case6 (b). We take the minimum number of cluster-constitution earthquakes  $C_{min}=2$ . The number of clusters-constituent is  $N_c=2,500$  for Case2 and  $N_c=1,581$  for Case6.  $M-t$  diagrams of the largest and the second largest clusters (1 and 2) are shown in Fig. 9.

さらに図7 (b), (c), (d) は、宇津(1999)に基づいて、 $i$  番目の間隔を  $\tau_i (= t_{i+1}-t_i)$ 、 $v=N/T$  ( $N$  は観測期間  $T$  の地震数) として、 $U_i = \exp(-v\tau_i)$  を求め、 $U_i$  (横軸) と  $U_{i+1}$  (縦軸) の関係をみたものである。  $\tau$  の分布がポアソン過程であれば、 $U_i$  対  $U_{i+1}$  のプロットは、図の正方形内にランダムに分布し、 $\tau$  が独立でない場合、分布に偏りが生じる (宇津, 1999)。 実際図7 (b) のように、元のデータの  $U_i$  対  $U_{i+1}$  は、右上と左下に集中して偏って分布するが、Case 6, さらに Case 2 の順に分布はより均質となり、独立地震は時間的にランダムであることを示している。

### 5. クラスターを特徴付ける諸量とリンク条件

最後に、リンク法で抽出されたクラスターに着目し、クラスターを構成する地震が、リンク条件でどのように変わるかの例を示す。 図8 は、Case 2 と Case 6 のリンク条件で抽出されたクラスターについて、マグニチュード  $M_c$  と構成地震数  $C$  の関係を示している。この図で  $M_c$  は3章の(6)式で求めたものである。クラスター構成の最小地震数  $C_{min}=2$  として、クラスターの数 は、Case は  $N_c=2,500$  個、Case 6 は  $N_c=1,581$  個である。最大のクラスター (図8の番号1) は、2004年新潟県中越地震の本震  $M6.8$  と余震から成り、Case 2 と Case 6 とも  $M_c=7.0$  である。2番目のクラスター (番号2) は、2006年4月21日の伊豆半島東沖の最大地震  $M5.8$  とその前後の活動によるもので、 $M_c=5.8$  となり、ほとんど最大地震の  $M$  が寄与している。

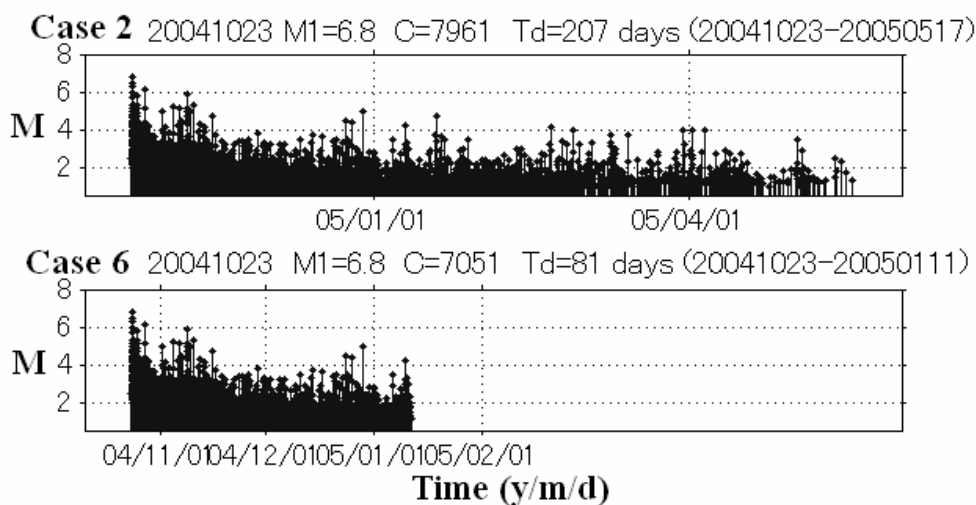
図8の  $M_c$  対  $\log C$  は、全体として概ね比例関係にあるが、ばらつきは相当大きい。例えば  $M_c=3$  のクラスターで、地震数は最小値の  $C_{min}=2$  から  $C=100$  くらいまでの違いがある。つまり、規模が同じでも、その構成地震数と時空間分布がクラスターによって著しく異なることを示している。

最大クラスターと2番目のクラスターの  $M-t$  図を図9に示した。 図9 (a) の最大クラスターの地震数は、Case2 は  $C=7,961$  個、Case6 は  $C=7,051$  個である。また、クラスターの最初と最後の地震の発生時間の差から求めたクラスターの継続時間  $T_d$  (day) は、最大クラスターの Case 2 では  $T_d=207$  日 (2004年10月23日~2005年5月17日)、Case 6 では  $T_d=81$  日 (2004年10月23日~2005年1月11日) となり、Case2の方が2倍以上長い。先の図5の独立地震の30日毎の回数変化にみられた新潟県中越地震の後の Case 2 と Case 6 の回数の顕著な違いは、この最大クラスターの構成地震数と継続時間の違いに起因している。

図9 (b) の2番目のクラスターの  $M-t$  図では、2006年4月21日の伊豆半島東沖の最大地震  $M5.8$  の発生の数日前から  $M3$  程度以下の小さな地震が多発した。つまり、リンク法によって最大地震の前の活動から順次連結され、その過程で最大地震が発生した例で、破壊の発展過程の解析にリンク法が有用なことを示している。また、図9 (a) の新潟県中越地震の余震と異なり、この図9 (b) の伊豆半島東沖のクラスターの  $M-t$  図、地震数  $C$ 、継続時間  $T_d$  は、Case 2 と Case 6 のリンク条件で大きな相違がないことが特徴である。

図9 (b) の2番目のクラスターの  $M-t$  図では、2006年4月21日の伊豆半島東沖の最大地震  $M5.8$  の発生の数日前から  $M3$  程度以下の小さな地震が多発した。つまり、リンク法によって最大地震の前の活動から順次連結され、その過程で最大地震が発生した例で、破壊の発展過程の解析にリンク法が有用なことを示している。また、図9 (a) の新潟県中越地震の余震と異なり、この図9 (b) の伊豆半島東沖のクラスターの  $M-t$  図、地震数  $C$ 、継続時間  $T_d$  は、Case 2 と Case 6 のリンク条件で大きな相違がないことが特徴である。

### (a) Largest cluster



### (b) Second largest cluster

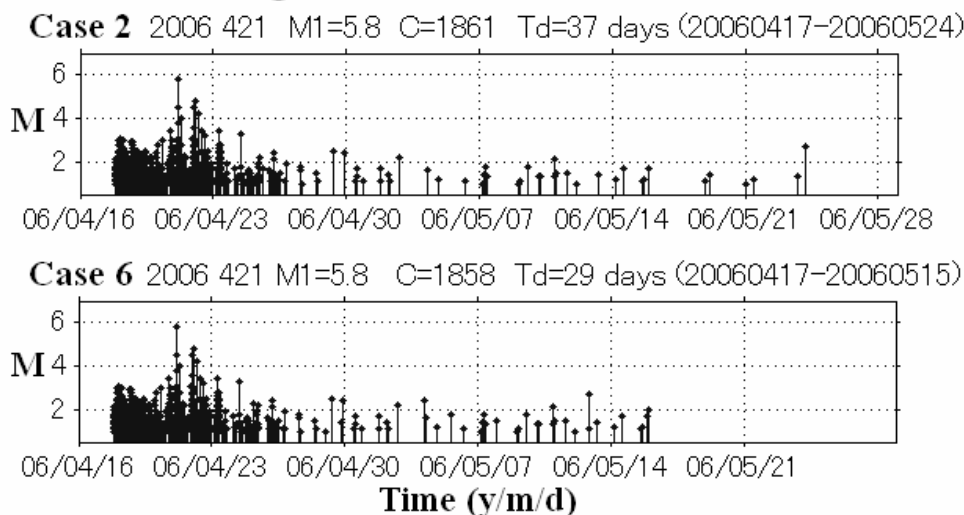


図 9 最大クラスター (a) と 2 番目のクラスター (b) の  $M-t$  図を, Case 2 と Case 6 について示す. (a) の最大クラスターは 2004 年新潟県中越地震の本震  $M6.8$  と余震活動から抽出され, 地震数は, Case 2 は  $C=7,961$  個, Case 6 は  $C=7,051$  個. また, クラスターの最初と最後の地震の発生時間の差をクラスターの継続時間  $T_d$  (day) とすると, 最大のクラスターの  $T_d$  は, Case 2 では  $T_d=207$  日, Case 6 では  $T_d=81$  日となる. (b) の 2 番目のクラスターは, 2006 年 4 月 21 の  $M5.8$  を最大とする伊豆半島東沖の活動から抽出された.

Fig. 9  $M-t$  diagrams of the largest (a) and second largest (b) clusters are shown for the two cases of link conditions of Case 2 and Case 6. (a) The largest cluster was extracted from main shock  $M6.8$  and aftershocks of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquakes. The number of cluster-constituent events is  $C=7,961$  for Case 2 and  $C=7,051$  for Case 6. The time duration of cluster activity  $T_d$ , defined as the time difference between initial and final earthquakes of the cluster, are  $T_d=207$  days for Case 2 and  $T_d=81$  days for Case 6. (b) The second largest cluster was extracted from the activity of 2006 east off Izu Peninsula earthquakes, with the largest event  $M5.8$  on April 21, 2006.

## 6. 考察とまとめ

前章までのように、リンク法によるクラスターの抽出手法を多数の地震データに適用して、リンク条件の違いによる解析結果を表 1 に示した。ここでは主な結果を整理・考察して、今後の課題についても触れることにする。

### 6.1 地震活動の複雑性とリンク条件

本稿で対象としたような比較的広域の地震活動は、応力場や脆性破壊域の不均質性を反映して、時空間的に様々に変動する。さらに、観測網やデータ処理システムの変遷による検知率、震源の誤差や分解能などの人為的な時空間的不均質性が観測データに付随する。本稿で使用した気象庁一元化震源データについては、第 2 章のように、震源の誤差や検知率の影響は、条件を付して概ね除いた。このようなデータに対して、すべての地震間の震源時の差  $dt$  と空間距離  $ds$  を求めて点震源として連結する場合と、地震の大きさを考慮して  $M$  に依存する  $dt(M)$ 、 $ds(M)$  として連結する場合を検討した(第 3 章)。

このうち  $M$  に依存するリンク条件は、デクラスタリングのもうひとつの方法であるウインドー法(たとえば、宇津, 1999)の手法も取り込んでいる。すなわち、ウインドー法では地震データのうち大きい地震から本震を指定し、本震の  $M$  で決まる時間範囲と空間範囲の地震を全て前震または余震とする。したがって、今回の  $M$  を考慮した地震間の距離と時間差に基づく連結操作は、ウインドー法とリンク法の混成法といえよう。この混成法による距離と時間のパラメータを具体的に評価するため、表 1 のような条件の組み合わせで解析して、その解析例を図 5~図 9 に示した。

リンク条件の違いは、特に 2004 年新潟県中越地震の顕著な余震活動の解析結果に表れた。余震の時間的な拡大と発生間隔の時間変化、および本震より遅れて発生した大規模な余震とその二次余震のため、余震の連結様式や割合、単独地震数は、リンク条件に大きく左右される結果となった。表 1 の Case 2 のように、比較的大きな  $M$  の地震のみ  $dt(M)$ 、 $ds(M)$  とする条件の場合、余震の多くは連結され、地震回数変化も、2004 年新潟県中越地震の本震の前後で滑らかとなる(図 5 の Case 2)。一方、比較的小さい  $M$  まで  $dt(M)$ 、 $ds(M)$  とする条件(例えば表 1 の Case 6, 7)では、 $M$  が小さいほど地震数は多いにもかかわらず、 $dt(M)$  と  $ds(M)$  が小さくなるために多くは連結されず、非リンク地震(単独地震)となる率が増す。本震と離れた顕著な余震と二次余震も、別のクラスターとして抽出される。したがって、2004 年新潟県中越地震の余震のような時空間的に大規模かつ複雑な活動のクラスター解析では、リンク条件の影響が大きいことが確かめられた。

一方、2004 年新潟県中越地震前の活動に対するクラスター解析では、例えば図 5 の Case 2~Case 6 の地震回数のように概ね同じ時間変化を示し、リンク条件による解析結果への影響は小さい。また、2006 年 4 月 21 日の伊豆半島東沖の  $M5.8$  を最大とする 2 番目に大きなクラスターも、図 9 の Case 2 と Case 6 の  $M-t$  図のように、リン

ク条件による違いは小さい。なお、図 5 の Case 2~Case 6 では、矢印 b より後に回数の増加が表れている。これは、2006 年 4 月 21 日  $M5.8$  の後、2006 年 4 月 30 日の  $M4.5$ 、2006 年 5 月 2 日の  $M4.3$  を最大とする活動が、 $M5.8$  のクラスターより 10 km 程度離れて発生したことによっている。

以上の解析結果から、調査の目的によって適当なリンク条件を選択する必要がある。今回対象とした地域、期間と使用した震源データに対する比較的合理的かつ現実的なリンク法の条件として、表 1 の Case 2 程度に比較的緩い条件が妥当なものといえよう。対象とする観測データから、最適なリンク条件をさらに合理的に決める手法の改良は今後の検討課題である。

### 6.2 クラスターの定量化

最後に、本稿ではリンク法で抽出された個々のクラスターの詳細な検討は紙数上省いたが、クラスターの時空間分布や大きさ分布の多面的な特徴を定量化して、クラスターを相互に比較・検討することから様々な情報が得られる(例えば、野口, 2001)。また、震源の精度と分解能を改善してクラスターの時空間的な連結過程の詳細を知ることは、メカニズム解の情報と合わせて、同一断面での繰り返し地震の判断や、破壊点の短時間の移動(マルチプルショック)や分岐断層運動の形態解明に必要である。そのようなクラスターの詳細な解析と観測諸量の相互比較や多変量解析から、各地域のクラスターの形成・発展過程を周辺の応力場や地殻構造・熱構造と合わせて合理的に整理し(参照データの作成)、最終的にはクラスターの連結方向や発展・停止の予測が可能となるような調査研究が重要と考えられる。

## 謝辞

本研究は、プロジェクト研究「地震観測データを利用した地殻活動の評価及び予測に関する研究」と萌芽研究(所内競争的資金)「自然災害に関わる非線形現象についての基礎的研究」によっている。関係各位のご支援とご協力に感謝いたします。また、有益なコメントをいただいた読者並びに編集委員会と事務局の方々にもお世話になった。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1)野口伸一(2001): 関東地域の震源分布のフラクタル性. 防災科学技術研究所研究報告, No.61, 107-118.
- 2)Obara, K., Kasahara, K., Hori, S., and Okada, Y. (2005): A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. Rev. Sci. Instrum., **76**, 021301.
- 3)尾形良彦(1993): 地震学とその周辺の地球科学分野に於ける統計モデルと統計的手法. 日本統計学会誌, **22**, 413-463.
- 4)尾形良彦・宇津徳治(1999): 前震を事前識別する統計モデルとその予測評価法. 統計数理, **47**,

- 223-241.
- 5) Okada, Y., Kasahara, K., Hori, S., Obara, K., Sekiguchi, S., Fujiwara H., and Yamamoto A. (2004): Recent progress of seismic observation networks in Japan - Hi-net, F-net, K-NET, and KiK-net. *Earth Planets Space*, **56**, 15-28.
- 6) 宇津徳治 (1999): 地震活動総説. 876pp, 東京大学出版会.
- 7) 宇津徳治 (2001): 地震学(第 3 版). 376pp, 共立出版株式会社.
- (原稿受理: 2007 年 5 月 7 日)

## 要 旨

本州中央部 (34.5-38.5° N, 136.0-141.0° E) で最近 5 年間に観測された 20 km 以浅,  $M \geq 1.0$  の地震 31,672 個を対象に, リンク法でクラスターを抽出し, クラスターとデクラスタリング後の独立地震の特徴を調べた. 大小の地震間の震源時の差  $dt$  (day) と震源距離  $ds$  (km) に基づいて地震同士を連結するリンク法では,  $M$  に依存してリンク条件を変える方が合理的と考えられる. そこで  $M$  の関数形として  $dt(M)$  と  $ds(M)$  を与えて, 7 通りのリンク条件でクラスターを抽出し, クラスターの構成地震数や独立地震数の相違を比較・検討した. 調査期間中の最大クラスターは, 2004 年新潟県中越地震  $M6.8$  の余震活動から抽出され, リンク条件に著しく左右される結果となった. デクラスタリング後の独立地震の定常性を基準にすると, 比較的安定なリンク条件は,  $M \geq 5.1$  では  $ds \leq 10^{0.5M-1.85}$ ,  $M < 5.1$  では  $ds < 5$  km, および  $M$  に係らず  $dt \leq 3$  days とする場合であった.

キーワード: リンク法, 地震クラスター, デクラスタリング, 震源カタログ, 独立地震