

地震クラスター抽出手法の改良 - 改良リンク法について -

明田川 保*

Improvement of the extraction method of earthquake clusters : Modified linking method

by

Tamotsu AKETAGAWA *

1. はじめに

大規模な地震の後の余震活動は本震の発生による応力場の乱れを解消する活動であり、本震が引き起こしたと解釈できる。群発地震も何らかの共通要因によって引き起こされた関連する地震活動と見なせるだろう。このような本震 - 余震活動や群発地震活動など、ある特定の領域内で続発した一連の地震活動（以下、クラスターと呼ぶ）の抽出は、地震活動の調査研究において大変重要である。例えば、前震 - 本震 - 余震活動や群発地震活動などの時空間的な発展過程を調査するためには、クラスターを合理的に抽出することが必要である。

一方、クラスターを本震など代表する地震のみを残して除群（以下、デクラスターと呼ぶ）した結果と、単発の地震とを併せた地震活動（以下、バックグラウンド活動と呼ぶ）をある程度広い範囲で眺めると、地震はでたらめに発生していると思なしたほうが良い場合が多い。でたらめとは、個々の地震が独立して発生し、地震の発生が次の地震の発生に影響しないことを意味するが、このようなバックグラウンド活動は、地震活動の定常性や長期変動などを見るために有効と考えられている。

例えば、原田ほか（2009）は、温泉地学研究所によって展開されている箱根火山帯を中心とする神奈川県西部の地震観測網による地震活動データをクラスターとバックグラウンド活動に分け、両者を用いて2001年以降、箱根地域の地震活動が活発化していることを明らかにするとともに、地震活動の変化と地殻変動の関係を考察している。

また、気象庁では、東海地震に関する「地震防災対策強化地域判定会」委員打ち合わせ会（月1回の定例会）において、東海地域のバックグラウンド活動に基づく地震活動の長期的変動の監視を続けている。東海地域以外にも静穏化検出ツール（林元・明田川，2010）を用いて日

本全国の地震活動の静穏化を定量的に検出する試み（例えば、太田ほか，2010）が行われており、静穏化領域の抽出にはバックグラウンド活動が用いられている。

クラスターの抽出には、リンク法（例えば、野口，2007）が一般的によく使われるが、これは次節に述べるように、地震活動スケールが大きい場合のクラスター抽出にやや問題がある。そこで、本稿では、リンク法の弱点を改善し、特に大規模スケールのクラスターをより効果的に抽出する手法（以下、改良リンク法と呼ぶ）を検討したので報告する。

2. リンク法

リンク法は、ある時空間的距離内の地震を結んで群を作っていく方法で、通常は、空間的距離 Δr (km) と時間 Δt (日) をパラメータとして処理され、地震数がある個数以上（通常は2個以上）のとき、それらの地震集団をクラスターと定義する。野口（2007）は、距離パラメータとして震源距離を用いているが、本稿ではすべて震央距離を使う。パラメータの設定においては、調査対象地域の地震活動度、扱う地震のMの下限、震源決定精度などの考慮が必要であるが、日常的な地震活動の範疇では、 Δr を数 km からせいぜい 10km 程度、 Δt を数日から一週間程度に設定すればよく、パラメータを常識的な範囲で変えても、処理結果は比較的鈍感で大きく影響をうけない。

リンク法でクラスターが形成されるイメージを図1に示す。図1には簡単のためにE1からE6の6個の地震を示した。クラスターは、E1を先頭に、半径 Δr の円内で Δt の期間内に発生したE3とE4が連結し、さらにE3がE5を、E4がE6を連結して成長する。例えば、E1を中心とした Δr 、 Δt の時空間内に100の地震があるとすれば、E1には100の地震が連結される。連結され

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田586
報告，神奈川県温泉地学研究所報告，第42巻，33-48，2010

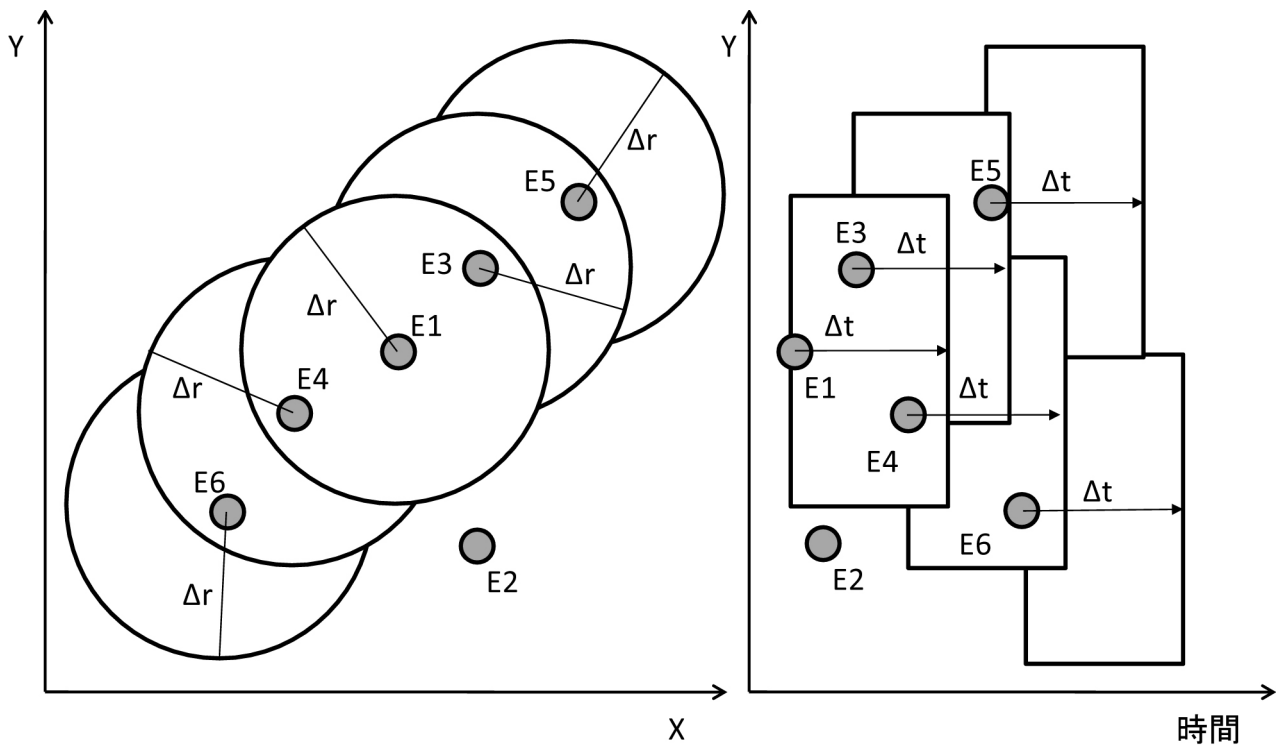


図1 リンク法によるクラスターの形成イメージ。

E1 から E6 は発生した地震、 r 、 t はリンク法における時空間パラメータである。

た 100 の地震は、それぞれがさらに Δr 、 Δt で連結を作っていく。したがって、E1 を先頭地震とするクラスターは時空間に広がる非常に複雑なつながりを持つが、クラスターに属する地震を時間順に並べれば、図 2 のように一次元の地震の連結として表現できる。

図 1 には E1 と時空間的にクラスターを成さない地震 E2 を示した。このような例は、M7 級などの大きな余震域が、設定した Δr を超えるケースによく見られ、余震活動がいくつもの小さなクラスターにされてしまうことがある。明らかな余震活動を本震と同一クラスターとするのがクラスター抽出の趣旨であるから、これはリンク法の弱点と言える。これを防ぐために Δr の値を大きくすることは理に適うが、一方で無関係な地震同士でクラスターを作ってしまう恐れが大きくなる。

野口 (2007) は、発生した地震のマグニチュード (以下、M と表記する) に依存して、 Δr や Δt を動的に変えることを試みている。空間的な大きさ Δr については、下限値を与え、M に依存する関係式による値がそれを超えたら関係式の値を使う。関係式は Utsu (1961) による本震の M と平均的な余震域の長径との関係を用いて $10^{0.5M-1.8}$ (km) とした。この方法は、大きな地震の場合に Δr を大きくできるが、本震の位置に対する余震活動の発展方向を考慮しないので、空間的に余震に属さない地震活動をクラスターとしてしまう可能性を否定でき

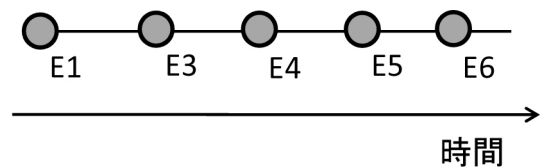


図2 図1のクラスターの時系列表現。

ない。野口 (2007) は時間についても同様な処理を試みているが、 Δt については一定がより安定した結果を得た。

2.1. リンク法の処理概要

野口 (2007) によるリンク法 (以下、N リンク法と呼ぶ) の計算機上における具体的な処理を論文から引用すると、次の 1) ~ 4) の流れとなる。1) まず地震の発生順の元データから最初の地震 E1 に対し、E1 より後の全地震との時間差と距離を求め、E1 とのリンク地震か非リンク地震かを判定する。2) 次に、E1 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指定した個数以上のとき、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、E1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E1とする。

上の説明からわかるように、Nリンク法は、先頭地震の時間が早く、先にできたクラスターから無条件に除かれていく。

気象庁においても、地震活動の調査にリンク法が使用されているが、Nリンク法と若干手法を異にする。気象庁のリンク法(以下、Jリンク法と呼ぶ)は、Nリンク法のように一つひとつのクラスターを完成させて、生成したクラスターを元データから除いていくのではなく、複数のクラスターを同時に作成しながらフラグをつけていく。このフラグはある条件のもとで書き換えられ、先頭地震の早いクラスターが必ずしも優先されない。どのクラスターに属するかは、クラスターに含まれる地震の規模によって決定される。

簡潔に言えば、クラスター生成における基本的な考え方は同じであるが、Nリンク法はクラスターの先頭地震の時間を優先し、Jリンク法はクラスターに含まれる地震のMの大小関係を優先する。この相違は、クラスターの抽出やデクラスターの結果に決定的違いを生むものではないが、個々のクラスターの構成に大きな差異を生じることがある。

前震 - 本震 - 余震型の活動を例に、ひとつ具体を述べる。例えば、前震から構成され、かつ本震を含まないクラスター(以下、前震クラスターと呼ぶ)があるとす。この場合、Nリンク法では前震クラスターに本震以降の余震活動が多数含まれてしまうことが容易に想像できる。それは、前震のほうが本震より早く始まるからである。これに対しJリンク法では、前震クラスターと、本震を含むクラスター(以下、本震クラスターと呼ぶ)の両方に属することのできる地震が見つければ、その地震より前までにおける両クラスターの最大地震のMを比較し、規模の大きいクラスターに属するよう処理される。つまり、前震クラスターは成長せず、本震クラスターが成長を続ける。

3. 改良リンク法

M7級もしくはそれ以上の本震 - 余震型の地震活動では、本震の震源域が広いために、本震直後は余震活動が分散して発生する事例がよくある。前節に述べたとおり、リンク法はこれらを本震クラスターとは別クラスターとしてしまうことが多い(以下、余震のみで構成されるク

ラスターを余震クラスターと呼ぶ)。しかし、このような余震クラスターは、時間が経過して余震活動が減衰するころには、本震クラスターとともにおよその震源域を示すひとまとまりの余震域を形成することが経験的に認められる。群発地震活動についても、結果的にその発生領域はそれ以外の領域と明確に区別できるひとまとまりの活動域として識別できるケースがほとんどである。

そこで、改良リンク法はこの経験的事実に基づき、大規模な地震を含むクラスターを効率よくリンクさせることを念頭におく。すなわち、クラスター形成手法としてより規模の大きな地震を含むクラスター(例えば本震クラスター)を成長させるJリンク法を採用し、そのクラスターに、より小規模な地震で構成されるクラスター(例えば余震クラスター)を合理的に結合させる。以下にその概要を述べる。

3.1. 接するクラスターの主従関係の構築

ある地震活動において、ある地震が複数のクラスターに含まれる場合、本稿ではこの地震を「接点」と呼び、この地震においてクラスターが接すると表現する。図3は、面的に広がるクラスターを図2で示したように地震の発生時間順のつながりとして表現し、クラスター同士が接するときのJリンク法の処理を示したものである。E7が接点であり、E1,E3,E5で構成されるクラスターと、E2,E4,E6で構成されるクラスターの最大地震のMを比較してE7がどちらに属するかが判定される。等号の場合がないが、その場合はその接点での判定はせず、先に作られたクラスターを優先する。図3は単純化されており、実際の地震活動では、より多くのクラスターの接点が多数存在することが想定される。しかし、その都度どちらのクラスターに属するべきかという判定を行ってより大きな規模の地震を含むクラスターを成長させていくだけなので、考え方は単純である。

改良リンク法では、結合処理を行う準備作業として、接点におけるクラスター同士の比較判定結果を記憶する。具体的には、図3のE1,E3,E5のクラスターが成長した場合であれば、E2,E4,E6のクラスターの先頭地震であるE2に、E1,E3,E5のクラスターの先頭地震であるE1の地震番号が記憶される。この作業をすべての接点について行う。本稿では、この関係をクラスターの主従関係と呼び、上記の場合E1,E3,E5のクラスターをE2,E4,E6のクラスターに対する「主クラスター」、E2,E4,E6のクラスターを「従クラスター」と呼ぶ。

すべてのクラスターが確定した段階では、クラスターは、先頭地震に主クラスターの情報を持つものと、

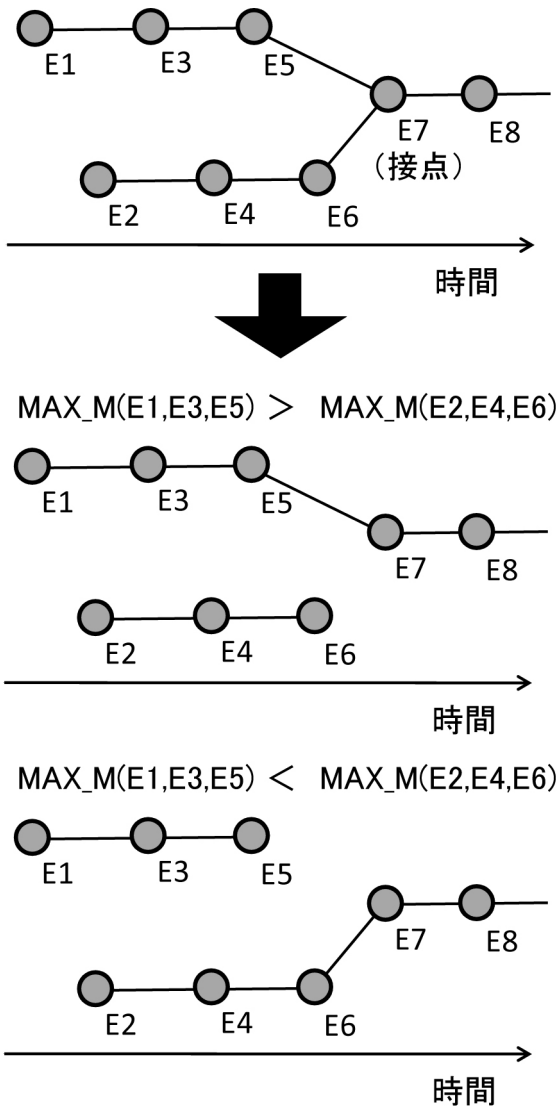


図3 Jリンク法におけるクラスターの成長判定。

クラスターはE7で接し、クラスターの規模の大小関係で成長するクラスターが決定される。MAX_M()は、()内の地震群の中での最大Mを表す。

持たないものができる。は、前震クラスターや余震クラスターが該当する。は、本震クラスターや孤立したクラスターが該当する。

クラスターの主従関係について考慮すべきことを、以下1)～5)に述べておく。

1) は従クラスターであるが、他のクラスターの主クラスターであるかもしれない。つまり、クラスターの主従関係は樹形図のように階層を持つ。

2) クラスターの接点は1個とは限らない。したがって、ひとつのクラスターは複数の主クラスターの情報を持ちうる。このため、ひとつのクラスターに対して、主クラスターの情報を最大で10個まで持てるようにしてある。11個目からは無視されるが、実際の地震活動においては、パラメータがよほど不適切でない限り多くて

もせいぜい2個程度である。

3) ある二つのクラスター同士は、あるときは主 - 従関係にあり、あるときは従 - 主関係になりうる。図4はその例で、E1を先頭とするクラスターとE2を先頭とするクラスターがE7とE12で接するとした。このような事例がどのように起こりうるかは、例えば、図1のXY平面においてE1から右上方向に発展したグループの地震がE7で、E1から左下方向に発展したグループの地震がE12と考えれば理解しやすい。この場合、E7とE12がそれぞれ同一の別クラスターと接した時点では両クラスターの構成要素が異なるため、Mの大小関係が逆転し主従関係の入れ子状態が発生する場合がある。その場合でも、それぞれのクラスターはお互いを主クラスターとして記憶する。なお、最終的には一方の関係は破棄され、主従関係が確定するが、それについては次節で述べる。

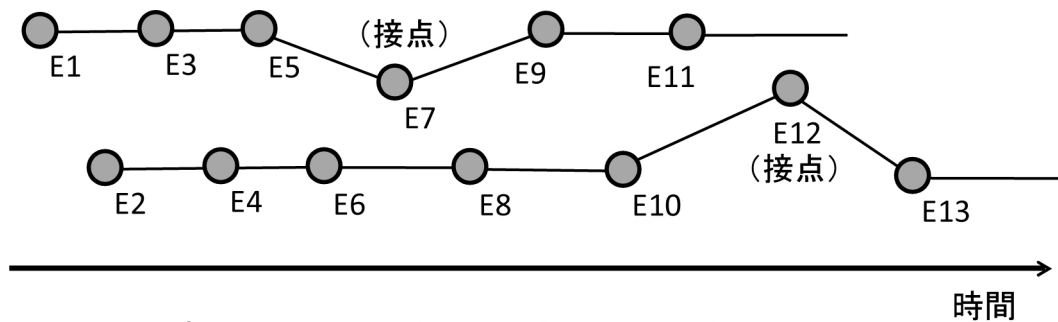
4) ある接点で3つ以上のクラスターが接するケースがある。これは可能性としてはあるが、クラスター生成過程においては、常に2つのクラスター同士の主従関係の判定なので、3つのクラスターを一度に判定することはない。したがって、順次、最大の地震を含むクラスターに属するように処理されていく。

5) ひとつの地震で構成される例外的なクラスターがある。2つのクラスターが接点を持つ関係は、両クラスターとも接点が2個目の地震、つまり最低3個の地震から成立する。この場合、Jリンク法ではMの小さいほうはクラスターを作らないで単独の地震となる(もちろん、その後他の地震とクラスターを形成する可能性はある)が、改良リンク法では、潜在的にクラスターを形成できる地震であることから従クラスターと見なされる。単独の地震とクラスターを形成する2個目の地震が、既に他のクラスターに属している場合も同様で、単独の地震のMが、接点より前のクラスター内の最大地震のMより小さければ、単独の地震として従クラスターとなる。

1)から4)は、主従関係が非常に複雑になる可能性を示すものであるが、実際にはそれほど複雑な関係にはならない。なぜなら、改良リンク法は、最大Mの地震を含むクラスターを成長させるJリンク法をベースにしているからである。実際の活動では、余震クラスター同士が深い階層を作ることには考えにくく、ほとんどの余震クラスターは本震クラスターと直接に接する可能性が高い。5)については、結合の効果を高める。

3.2. クラスターの結合処理

改良リンク法では、クラスターの形成と主従関係の構



E7において $\text{MAX}_M(E1, E3, E5) > \text{MAX}_M(E2, E4, E6)$

E12において $\text{MAX}_M(E1, E3, E5, E7, E9, E11) < \text{MAX}_M(E2, E4, E6, E8, E10)$

接点 E7 での判定では、E2 クラスターの主クラスターは E1 クラスターである。
 接点 E12 での判定では、E1 クラスターの主クラスターは E2 クラスターである。

図4 クラスター同士の主従関係が入れ子になるケース。

クラスターは E7 と E12 で接するとした。図の見方は図3と同じである。

築が終わった段階で、あらためて各クラスターについて最大地震の M とその地震番号を求める。前者は、前節 2) 3) の事例の最終的な主従関係を決定するために用いられ、後者は、地震データが時間順に並んでいるので、発生時間の情報を持つことと同義であり、後述の前震的な従クラスターの処理に必要な情報である。

クラスターをどこまで結合するかは、どこまでを余震と見なすかという問題に絡む。この点について、改良リンク法は、従クラスターが以下の条件を満たしてほぼ確実に主クラスターの余震のみで構成されていると判断できる場合に限って、階層的に接する余震クラスターをすべて本震クラスターに結合する。以下、クラスターの結合の実際を述べる。

まず、最後の地震からさかのぼって、従クラスターの先頭地震を探していく。それが見つかったら、その都度、主クラスターと結合するかどうかを判断していく。最後の地震から処理するのは、前節 1) で示した階層的な関係があれば、余震クラスター同士を先に処理し、その結果を本震クラスターの処理に反映させるためである。

クラスターの結合は、クラスター同士が接しただけの理由で行うのではなく、実際の地震活動に見合った合理的なものでなければならない。改良リンク法の基本概念は、本震クラスターに余震クラスターを結合することである。このため、クラスターの結合条件として以下の3つを設けている。

条件 主クラスター（複数ある時は、最大地震を含む主クラスター）の最大地震の M より、従クラスター

の最大地震の M が小さい

条件 主クラスター（同上）の最大地震の M を M_{max} とするとき、この最大地震と従クラスターの先頭地震との震央距離が $10^{0.5M_{\text{max}}-1.8}$ (km) 以内である

条件 主クラスター（同上）の最大地震は、従クラスターの先頭地震よりも先に発生している

これらをすべて満たせば、従クラスターは主クラスターの余震クラスターとされ、主クラスターに結合・吸収される。プログラム上では、従クラスターのフラグがすべて主クラスターのフラグに置き換わる。イメージを図5に示す。図5では、理解しやすいようクラスターの最大地震をそれぞれ E1, E4 と明示し、 $E1 > E4$ の関係をシンボルの大きさと表現した。図中の条件は、上記の条件の成立を関係式で表したものである。

各条件の意味を詳しく説明する。まず、いずれの条件も主クラスターが複数ある時は、最大の地震を含むものを選択し、それ以外は関係を破棄する。これで、主クラスターはひとつに絞られる。大方の場合、本震クラスターが主クラスターになると考えて差し支えない。

条件は、クラスターの主従関係を最終的に確定する。従クラスターが保持する主クラスターの情報は、あくまでもクラスターの主従関係が成立した時の関係であるから、クラスターが最終的に確定したときに M の大小関係がその後逆転した場合には、従クラスターは余震クラスターではないと判断される。また、前述のとおり、両クラスターで主従関係が入れ子になる場合は、どちらが主となり従となるかがこの条件で決まる。

条件は空間的条件で、従クラスターが、主クラス

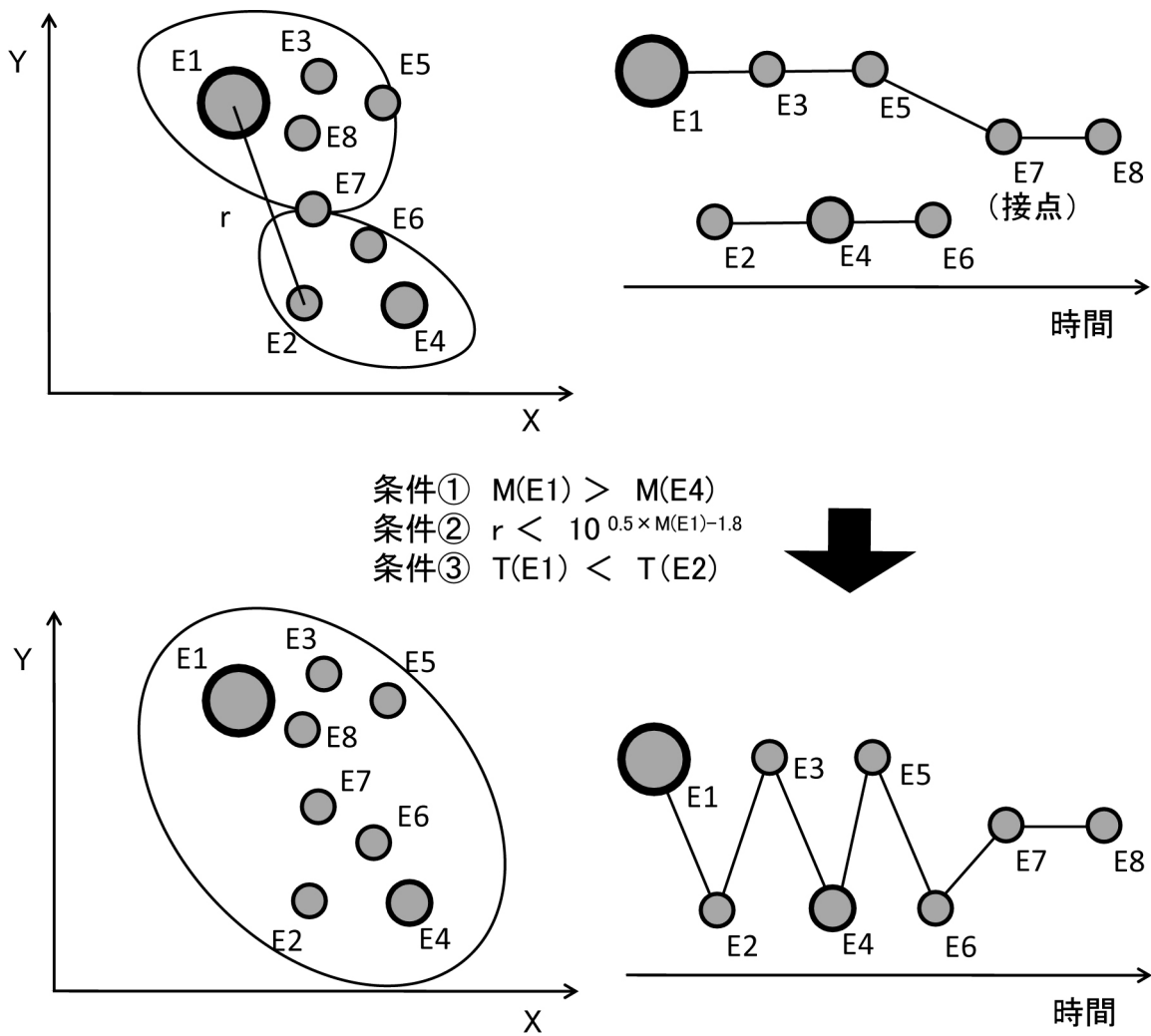


図5 完成した二つのクラスターの結合例。E1～E8のクラスターの最大地震をE1、E2～E4のクラスターの最大地震をE4とするとき、条件①～③がすべて成立すれば、両クラスターは結合する。条件式におけるMはマグニチュード、Tは震源時、rは震央距離を表す。

ターの最大地震のMに対する平均的な余震域の長径以内の距離で始まったかどうかを判定する。これは、Nリンク法の Δr を変化させる式と同じである。この式はもともとM5.5～8程度の地震についての関係であるが、宇津(2001)はM3～5程度でもほぼ成り立っているとされている。改良リンク法では小規模な地震しか含まない小さなクラスター同士をむやみに結合しないよう、M3未満にもあえて適用している。

条件③は時間的条件で、主クラスターの最大地震(例えば本震)より後から従クラスターの地震が始まっているかを判定する。

3.3. 前震的な従クラスターの処理

従クラスターの先頭地震が主クラスターの最大地震より早い場合、すなわち、従クラスターが前震的な活動を含むクラスターである場合は、条件①～③を満たしたと

しても、条件②を満たさず、主クラスターと従クラスターは別々のクラスターとして処理される。この関係が、大規模な地震の余震域の中の余震クラスター同士での関係であれば、ひとつの余震クラスターが結合から漏れてしまうことになるが、実際にはそのようなケースは起こりにくい。理由は、余震域内の従クラスターが、本震クラスターにまったく接しない状態で存在しなければならないからである。本震クラスターを優先して成長させるJリンク法をベースとした改良リンク法では、そのような状況は考えにくく、余震域の中では本震クラスターに接する可能性が高い。もし、このような事例があるとするれば、それは余震域から外れてはじまったものが余震クラスターに接した、つまり余震域の外側の活動の可能性を考えたほうが自然であり、別クラスターとするのが適当な場合が多いだろう。

従クラスターが前震的な活動を含む代表的な例とし

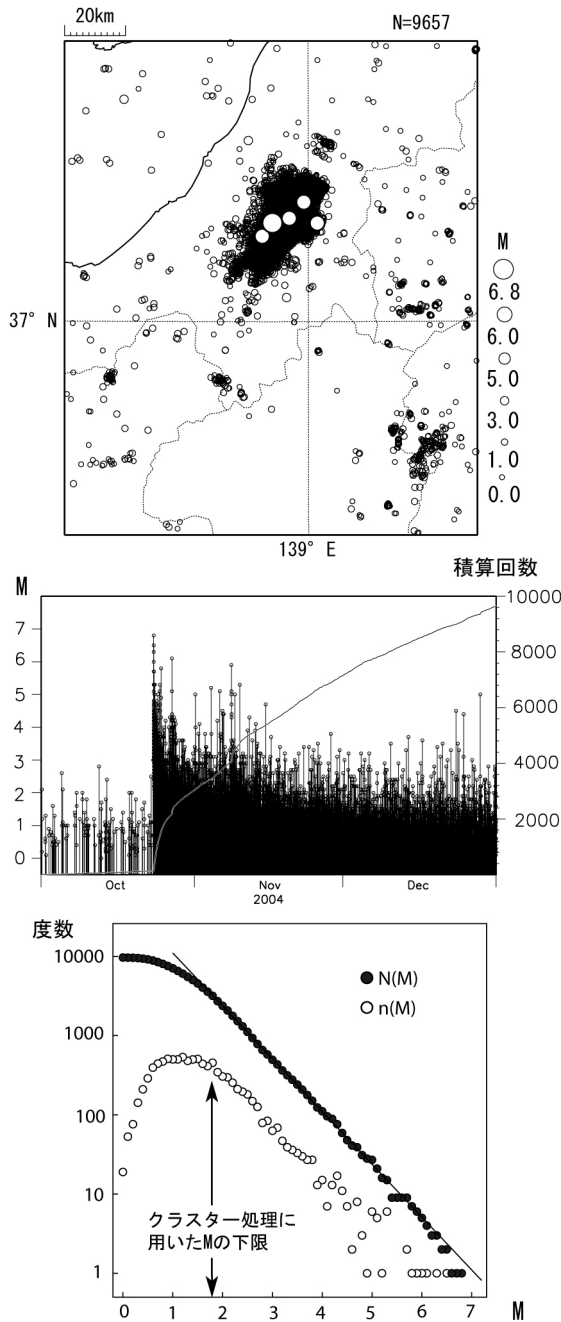


図6 新潟県中越地震前後の活動(2004年1月1日～12月31日)。上:震央分布(白抜きM6.0以上)中:活動経過(M-時間分布(左軸)と回数積算(右軸))、下:G-R分布(度数、積算度数)

で、前震-本震型の活動における前震クラスターと本震クラスターが接する場合が挙げられる。この事例においてデクラスター処理をし、例えば最大地震を代表とする場合には若干問題がある。従クラスターである前震クラスターは、主クラスターである本震クラスターと接する前に、既にある程度の余震を含む可能性があるため、前震クラスターの代表地震が余震から選ばれてしまう恐れがあるからである。これは、デクラスター結果を時系列

で捉えた場合、前震クラスターの代表が余震に埋もれてしまうということである。そこで、改良リンク法では、デクラスター処理をする場合に限り、主クラスターが他のクラスターの従クラスターになっていない(いずれの地震の前震クラスターでも余震クラスターでもない)本震クラスターであることを条件に、前震クラスターを特別に処理する。すなわち、条件を満たすが条件を満たさない前震クラスターは、前震活動と余震活動を含むものと解釈され、代表地震が主クラスターの最大地震(すなわち、本震)よりも前の地震から選ばれる。

4. 実例による比較

改良リンク法の効果を実際の活動を例にして見ていく。ここでは、Nリンク法、Jリンク法との比較を行う。Nリンク法は、パラメータを固定した基本的なケースと、距離のパラメータのみをMに依存させたケースとを併用した。なお、Nリンク法は、論文に基づき筆者がプログラミングした結果であり、野口のプログラムによるものではない。したがって、結果の責任はあくまでも筆者にある。また、デクラスター処理の代表地震の抽出において、Nリンク法では最大地震のMをクラスター構成要素全体から補正しているが、ここでは単に最大地震をそのまま代表とした。データは、気象庁の一元化震源カタログである。

4.1. 平成16年(2004年)新潟県中越地震

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震(M6.8)は、本震に続く極めて活発な余震活動が見られた本震-余震型の活動である。余震活動では、本震のM6.8に対してM6.0以上の余震が4回も発生した。また、小規模であるが、本震の約12時間前に本震の震央から南西に約10km離れたところで震度1を観測した前震的活動(M2.5)があった。

図6は、2004年10月1日から12月31日までの新潟県中越地方とその周辺の活動状況と、G-R分布である。震央分布にはM6.0以上の地震を白抜きで表示した。余震は、北東-南西方向に長径約40km、幅約20km程度の領域内で発生したことがわかる。G-R分布を見ると、おおよそM1.8の地震まではほぼもれなく震源決定されていると見なせる。

図7は、M1.8以上の地震について、Nリンク法(Δr を固定したケースと、動的に変化させたケース)、Jリンク法、改良リンク法でそれぞれデクラスター処理をしたバックグラウンド活動である。野口(2007)によれば、本州中央部の地震活動を用いて処理した結果、パラメー

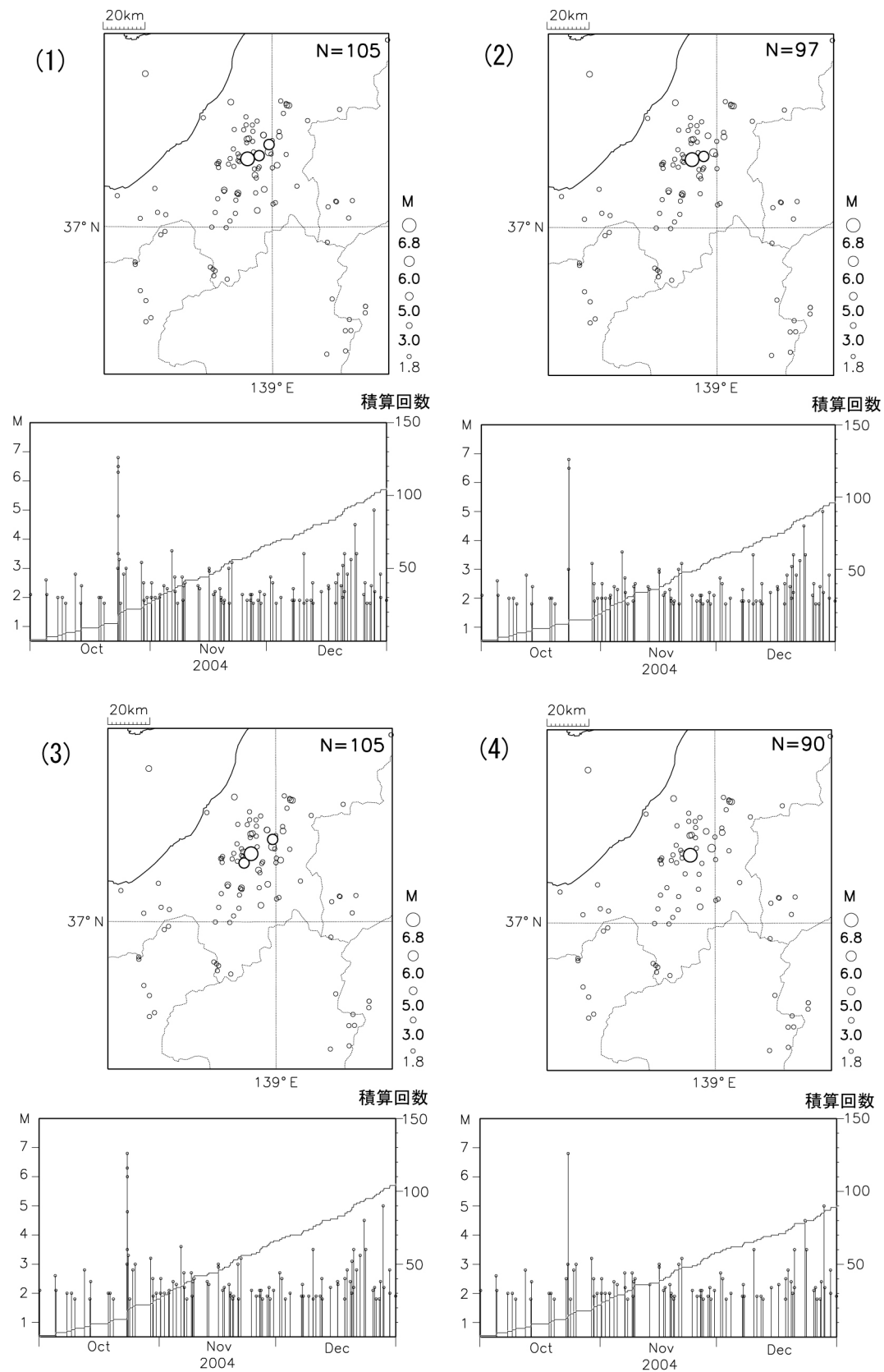


図7 図6のバックグラウンド活動 (デクラスターパラメータ $r: 5\text{km}$, $t: 3\text{日}$, $M: 1.8$)
 (1) Nリンク法 (r 固定), (2) Nリンク法 (r 変化), (3) Jリンク法, (4) 改良リンク法。

タが $\Delta r : 5\text{km}$ (ただし、 $M \leq 5.1$ のときは M に依存して変化) $\Delta t : 3$ 日のときに最も安定した結果が得られていることから、ここでも $\Delta r : 5\text{km}$ 、 $\Delta t : 3$ 日とした。

Nリンク法(図7(1))は、結果的に $M6.0$ 以上の余震を2個取りこぼした。そのうちの1個は前震クラスターの代表地震とされたものである(これについては後述する)。 Δr を動的に変化させた場合(図7(2))(この事例では $M5.1$ から Δr が 5km より大きくなる)は、前震クラスターの代表地震となった $M6.0$ の余震以外は取り除けたが、時系列分布をみると本震直後の地震がほとんどなくなっており、やや不自然である。例えば、この地域より地震活動度の高い地域であれば、この手法は、余震域の延びる方向とは無関係な方向にある地震も取り除いてしまうので、より不自然さが顕著になることが予想できる。

Jリンク法(図7(3))の結果は、Nリンク法と数は同じになるが、代表地震が異なる。 $M6.0$ 以上の余震は2個取りこぼした。そのうちひとつはNリンク法と同様に前震クラスターの代表イベントである。

改良リンク法(図7(4))の結果は、すべての $M6.0$ 以上の余震を取り除くことができている。基本手法はJリンク法なので、Jリンク法の結果(地震数105)から改良リンク法の結果(同90)の差が、結合処理による効果と見なせる。震央分布図をみると、この15個の差は、かなり明瞭な違いであり、改良リンク法の結果は、よりポアソンの分布を実現しているように見える。時系列をみても不自然さは小さい。

図8は、Nリンク法(Δr 固定)、Jリンク法、改良リンク法における、前震クラスター(図8(1)A~(3)A)と本震クラスター(図8(1)B~(3)B)である。Jリンク法と改良リンク法の前震クラスター(図8(2)Aと(3)A)は同結果となった。

Nリンク法の前震クラスター(図8(1)A)には、ほとんどの余震活動が含まれてしまっており、本震クラスター(図8(1)B)は高々11個の地震で構成されている。これに対し、Jリンク法と改良リンク法(図8(2)Bと(3)B)では、余震活動はほぼすべて本震クラスターとして表現されている。そして、前震クラスター(図8(2)Aと(3)A)は6個の地震で構成された。この6個には $M6.0$ の余震を含み、Jリンク法ではこれが代表となるが、改良リンク法では、本震以降は余震であるとの判断から、代表地震にならない。

Jリンク法の本震クラスターを改良リンク法のそれと比べると、ほとんど形状に差は見られない。これは、改良リンク法が余震域の外側の地震を不自然に結合したの

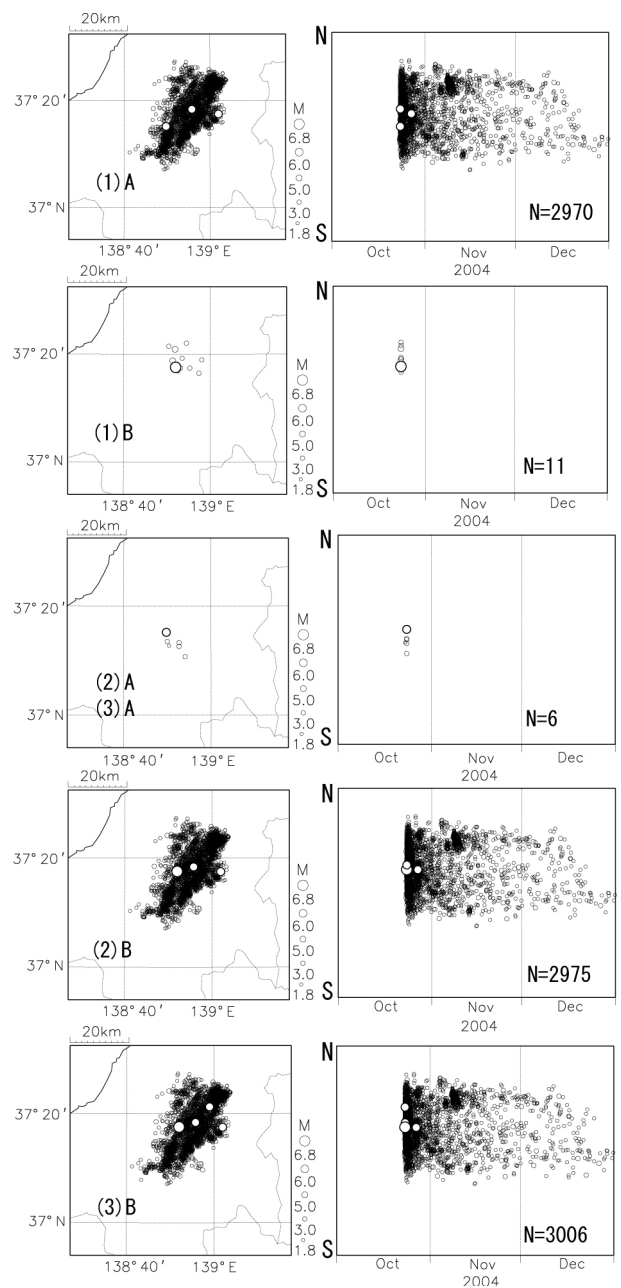


図8 新潟県中越地震の前震クラスター(A)と本震クラスター(B)。(1)Nリンク法(Δr 固定)、(2)Jリンク法、(3)改良リンク法。左図は震央分布、右図は時空間分布(南北投影)。

ではなく、リンク法で取りこぼしてしまうような余震域の中での時空間的にやや距離のある余震活動を適切に結合できたことを示唆している。リンク法で取りこぼされるような余震は、クラスターとしては小規模で代表地震が数多く残る。これが余震を取り切れないひとつの原因になっている。Jリンク法の本震クラスター(図8(2)B)の地震数は2975個であり、改良リンク法(図8(3)B)は3006個である。この違いは小さいが、取りこぼされる余震が平均で2個の地震で構成されるクラスターであ

るとすれば 15 個程度の独立事象の差として現れる。

4.2. 平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震

次に、2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震 (M8.0) を例に検討した。クラスターの抽出は、図 9 の G-R 分布から M2.0 以上の地震に対して行った。パラメータは、内陸の地震に比べて震源精度が劣ることと、M8 級の規模を考慮して $\Delta r: 10\text{km}$ 、 $\Delta t: 10$ 日とした。

図 10 は、デクラスター処理後のバックグラウンド活動である。N リンク法 (図 10 (1)) では、7 個ある M6.0 以上の余震を 1 個しか取り除けなかった。 Δr を M に依存して変化させた場合 (図 10 (2)) は、震央分布を見る限りは大幅に改善されているが、本震の Δr は 158km にもなるため時系列分布を見ると本震直後から活動が不自然に低調となっている。J リンク法 (図 10 (3)) も M6.0 の余震は 2 個しか取り除けなかった。

それらに対し、改良リンク法 (図 10 (4)) は M6.0 以上の余震をすべて取り除くことができた。震央分布には本震から北東に伸びる震源域に対応する空間が明瞭に見える。また、時系列分布を見ても、本震直後に一時的な活動の高まりがある程度で、M8.0 の地震発生後の周辺 (余震域の外) での誘発を考えれば、特に不自然さはない。

図 11 は、本震クラスターである。N リンク法 (図 11 (1)) では 84 個の地震しか本震と結びついていない。これは、余震が本震の震央付近では少なく、本震から離れた広い範囲で余震が発生したことを示唆している。 Δr を変化させた場合 (図 11 (2)) は、かなり改善されるが、震央分布は、本震を中心として円弧を描くような分布がみえ、明らかに余震域に含まれない孤立した地震を多く含んでしまっている。本震クラスターの継続期間も短い。J リンク法 (図 11 (3)) は、本震クラスターそのものについては N リンク法に比べて地震活動に見合ったものとなっている。ただし、図 10 に示したようにデクラスター処理後のバックグラウンド活動の地震数は同じであり、代表地震の選ばれ方が異なるだけである。

改良リンク法 (図 11 (4)) の結果は、本震クラスターが M8.0 の地震にふさわしい大きな広がりを持ち、かつ、独立的な孤立した地震をほとんど含んでいない。本震クラスターの地震数は 1603 個で、J リンク法の本震クラスター (1040 個) に対して 563 個も多い。これはすべて結合による増加分である。また、M6.0 以上の余震がすべて本震クラスターに属している。時系列分布から得られる地震の積算曲線は、前半が大森・宇津公式 (改良大森公式) に則った形で、後半はあまり減衰せずに群発的に継続した形になっており、この地震活動の特徴が

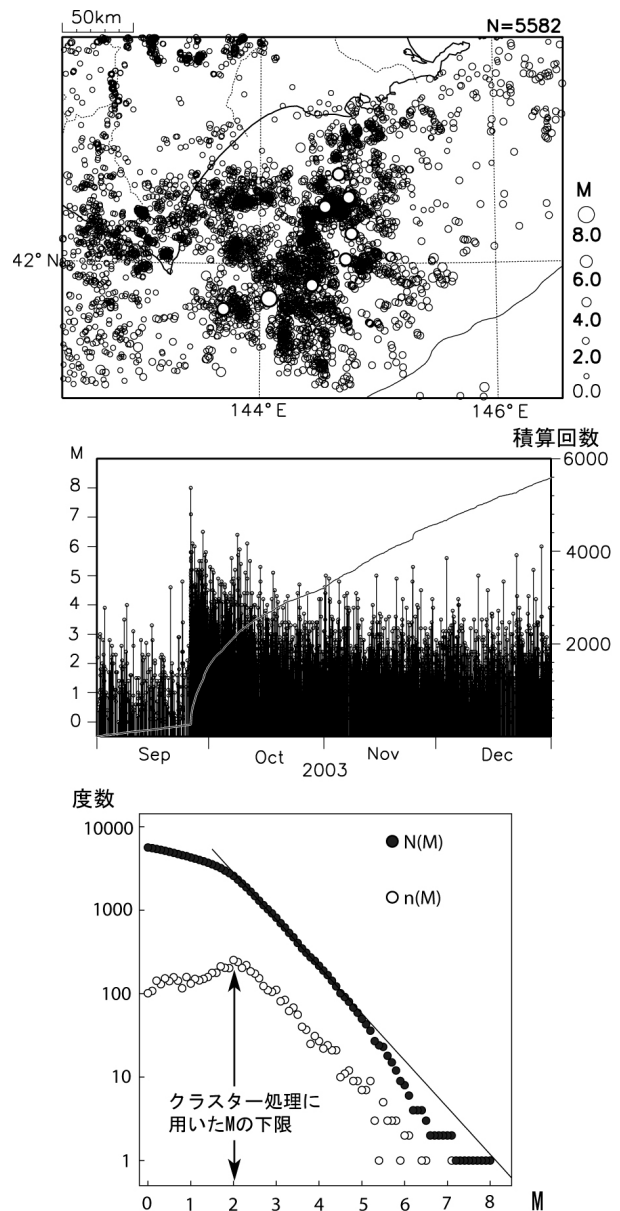


図 9 十勝沖地震前後の活動 (2003 年 9 月 1 日 ~ 12 月 31 日)。上: 震央分布 (白抜き M6.0 以上)、中: 活動経過 (M - 時間分布 (左軸) と回数積算 (右軸))、下: G-R 分布 (度数、積算度数)。

本震クラスターにそのまま表れている。

4.3. 平成 12 年 (2000 年) の三宅島 ~ 新島・神津島近海の群発地震

最後に、群発地震の例を示す。図 12 は、2000 年 6 月末頃から始まった三宅島から新島・神津島近海にかけての群発地震活動を含む、2000 年 1 月から 2001 年 12 月までの 2 年間の活動状況である。この群発地震は非常に活発で、活動域の南北総延長は 100km 近くにおよぶ。気象庁一元化震源データも完全には処理しきれていないため G-R 分布は直線的でないが、ここではあえ

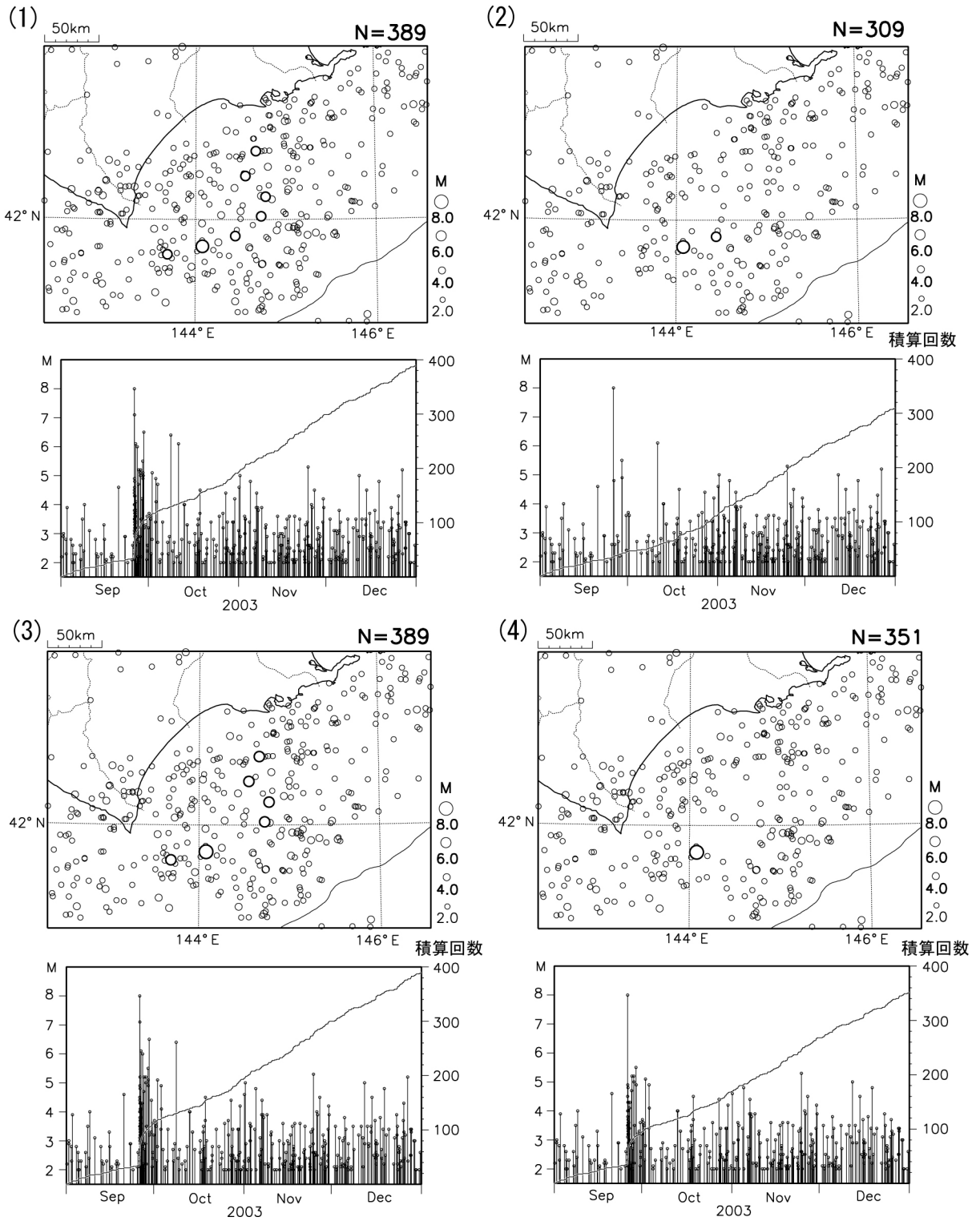


図10 図9のバックグラウンド活動(デクラスターパラメータ $r: 10\text{km}$, $t: 10$ 日、 $M: 2.0$)
 (1) Nリンク法 (r 固定) (2) Nリンク法 (r 変化) (3) Jリンク法、(4) 改良リンク法。

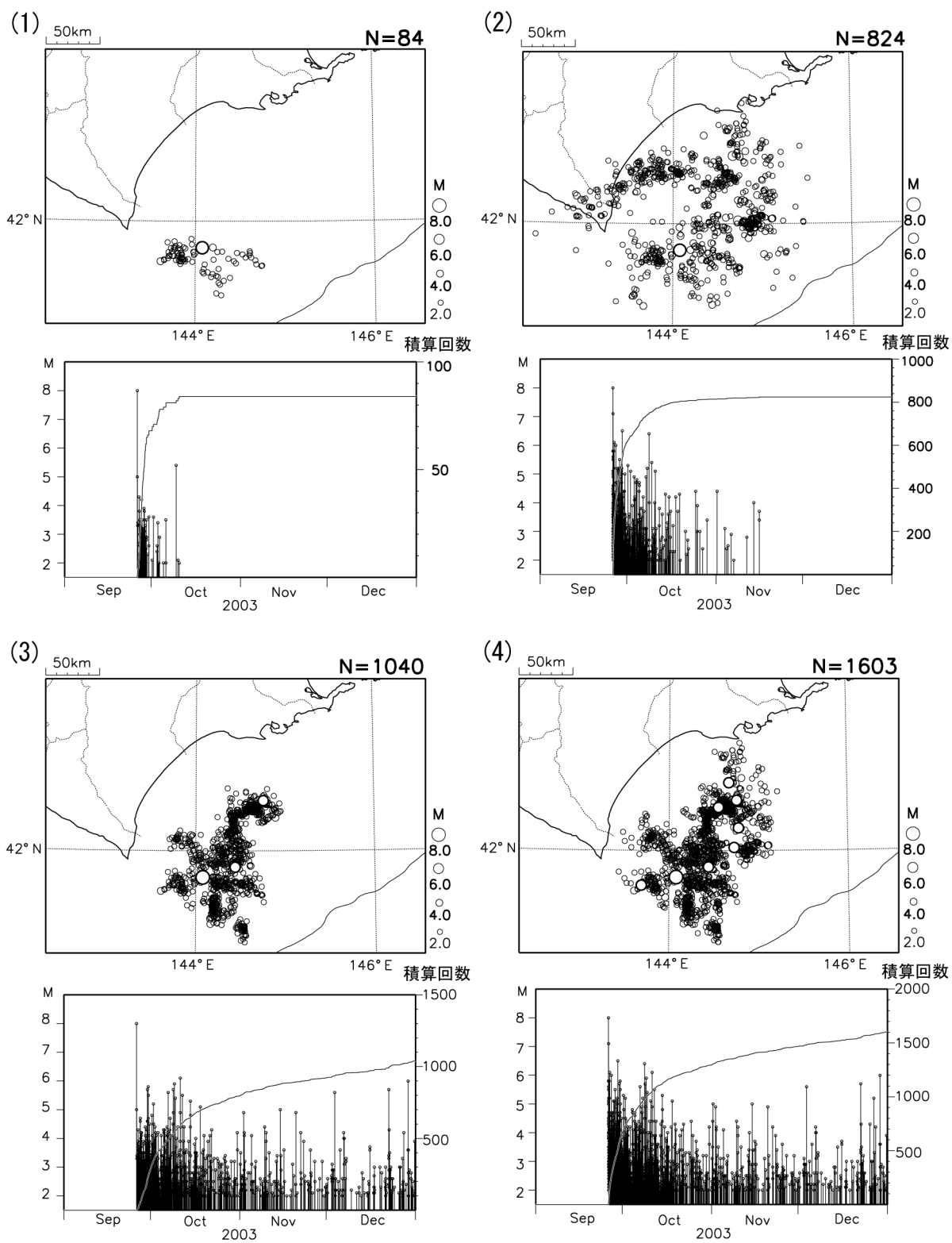


図 11 十勝沖地震の本震クラスター。

(1) Nリンク法 (r 固定) (2) Nリンク法 (r 変化) (3) Jリンク法、(4) 改良リンク法。

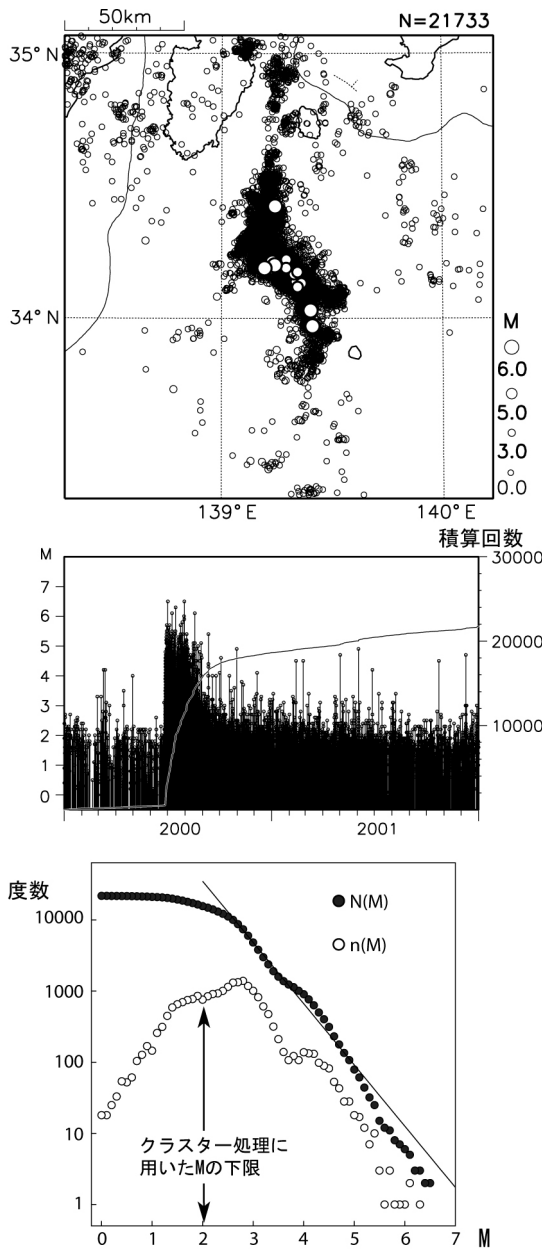


図12 三宅島～新島・神津島にかけての群発地震前後の活動(2000年1月1日～2001年12月31日)。上:震央分布(白抜きM5.5以上)、中:活動経過(M-時間分布(左軸)と回数積算(右軸))、下:G-R分布(度数、積算度数)

てM2.0以上の地震に対してクラスターの抽出を行った。パラメータは活動規模と精度を考慮して Δr :10km、 Δt :5日とした。

図13はデクラスター処理後のバックグラウンド活動である。Nリンク法は、 Δr を固定した場合も、動的に変動させた場合も結果は全く同じであった(図13(1)(2))。 Δr を10kmとしたため、M5.7から Δr は変化し、該当する地震は11個あった。最大はM6.5であり、このとき

の Δr は約28kmである。それにもかかわらず同じ結果になったのは、この群発地震活動が広範囲で同時期に複数のクラスターを形成したのではなく、震源が徐々に移動しながら活動域を拡大させたためであろう。

改良リンク法は、余震クラスターを本震クラスターに結合・吸収させるが、群発地震の場合は最大地震が飛び抜けて大きくないので、本震-余震型の活動に比べて条件を満たさないケースが多く、また、最大地震が活動の経過とともに更新されていくことが多々あるため、条件を満たさないケースも多いと考えられる。したがって、群発地震への適用効果は、本震-余震型の活動に比べて小さいはずであるが、改良リンク法(図13(4))のバックグラウンド活動は、Nリンク法、Jリンク法(図13(1)(2)(3))より地震数が少なく、M4.0以上の地震については2001年の初めころまで明らかに少ない。これは、改良リンク法が群発地震においてもより効果的にデクラスター処理できていることを示している。

5. 簡単な統計的検討

クラスター抽出の良し悪しは、デクラスター処理後のバックグラウンド活動がポアソン過程と見なせるかどうかで判断することが多い。そこで、前節で示した3事例について、 Δr を変えながら、コロモゴロフ・スミルノフ検定(日本数学会編,1985)によりポアソン過程と見なせるかを判定した。

表1がその結果である。×は「ポアソン過程である」という帰無仮説が有意水準5%で棄却された、すなわちポアソン過程とは見なせなかったもの、○は有意水準5%では棄却できない、すなわちポアソン過程と見なせるものを示す。いずれの結果も、改良リンク法は小さな Δr 値でポアソン過程と見なせる結果を実現した。つまり、より小さなパラメータで大規模な地震活動を効率よくクラスタリングできたことを示している。

6. おわりに

リンク法によるクラスター処理は地震活動の調査に一般的に使われている手法であるが、その結果については必ずしもコンセンサスを得られてはいない。今回提案した改良リンク法も、その意味では同様であるが、リンク法の弱点を、合理性をもって改良できたと考えられる。

大小様々なスケールをもつ地震活動を一括してクラスター処理するには、活動スケールに対する依存性が小さく、単一パラメータでできるだけ安定した結果を得られることが重要である。特に何らかのルーチンの処理を検討するならばなおさらである。この点において、Nリ

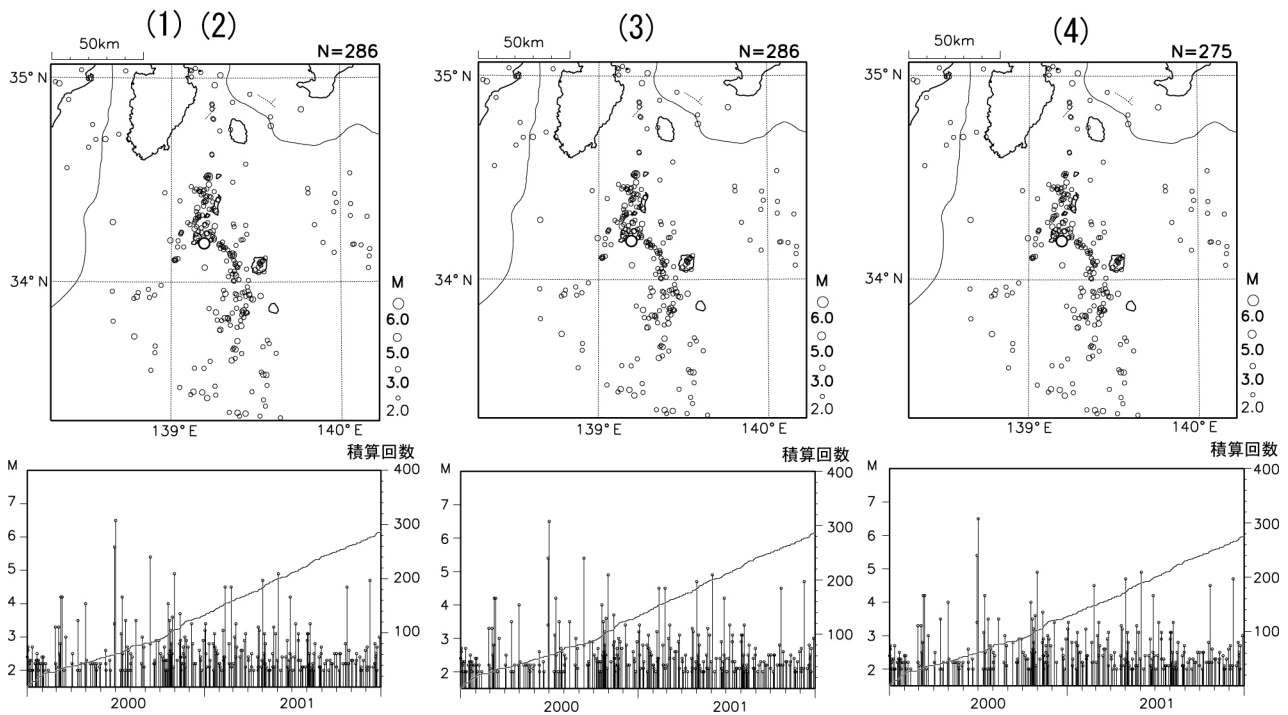


図 13 図 12 のバックグラウンド活動 (デクラスターパラメータ $r: 10\text{km}$ 、 $t: 5$ 日、 $M = 2.0$)
 (1) Nリンク法 (r 固定) (2) Nリンク法 (r 変化) (3) Jリンク法、(4) 改良リンク法。

リンク法、Jリンク法、改良リンク法の比較では、改良リンク法が最も効果的なクラスター処理と考えられ、より客観的な地震活動の調査を行うための有効なツールとなりうるだろう。今後は、温泉地学研究所におけるルーチン的な地震活動監視に取り入れ、客観的な活動推移の把握に利用していきたいと考えている。

謝辞

3名の匿名査読者からの指摘は、本稿の改善に大変有益でした。また、温泉地学研究所長 吉田明夫博士との議論は、本稿の改善に有益であるとともに、クラスター処理を用いた地震活動調査の今後に関して非常に示唆に富んだものでした。

本調査には、独立行政法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、独立行政法人海洋研究開発機構および気象庁による地震観測データを、気象庁・文部科学省が協力して処理した結果を使用しました。また、地震活動等の作図には、気象庁の地震解析ソフト (横山、1997、明田川ほか、2007) を使用しました。記して感謝します。

表 1 ポアソン過程についての検定結果

	パラメータ	Nリンク法	Jリンク法	改良リンク法
新潟県中越地震	5km3日	○	○	○
	4km3日	○	○	○
	3km3日	×	×	○
	2km3日	×	×	×
十勝沖地震	26km10日	○	○	○
	25km10日	×	×	○
	16km10日	×	×	○
	15km10日	×	×	×
	10km10日	×	×	×
三宅島群発地震	10km5日	○	○	○
	5km5日	○	○	○
	4km5日	×	×	○
	3km5日	×	×	×

参考文献

- 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.
- 宇津徳治 (2001) *地震学* 第3版、376pp、共立出版株式会社。
- 太田健治・林元直樹・宮岡一樹・明田川保・吉川澄夫 (2010) プレート境界型繰り返し地震発生前の静穏化域検出 (2)、*日本地球惑星科学連合 2010 大会*、SSS012-03.

- 日本数学会編 (1985) 数学辞典、第3版、岩波書店、1339 .
- 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リング、防災科学技術研究所研究報告、71,41-54.
- 原田昌武・小林昭夫・細野耕司・吉田明夫 (2009) 2001年箱根群発地震活動以後の箱根から富士山にかけての地殻変動、温地研報告、41, 7-14.
- 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.
- 横山博文 (1997) Xウィ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.
- Utsu T. (1961) :A statistical study on the occurrence of aftershocks, Geophys. Mag.,,521-605.

