

## 特定方向に連動する地震活動検出の試み

片尾 浩

### 要 旨

面的な微小地震を示す丹波山地の中で、時おり短期間に直線状に地震が並んで発生することがある。2001年8月の京都府中部M5.1の地震後に、余震域の南西に少し離れた場所に現れた北東-南西方向に並ぶ直線状の微小地震活動に注目し、同様の地震活動を過去の震源データから機械的に検出する簡便な方法を考案した。

丹波山地の中央部では、ほぼ常時北東-南西方向にややのびた微小地震分布が存在し、ある期間には震央分布の直線性が非常によくなる例があることがわかった。また、三峠断層沿いに連動する地震活動が存在することがわかった。

キーワード：地震活動，線状分布，誘発地震，丹波山地

### 1. はじめに

定常観測網で微小地震活動を観察していると、一定の時間範囲内に特定の方向に沿ってほぼ直線上に地震が並んで発生する事例があることに気付く。大地震の余震域や跡津川断層のような活動的な断層沿いであれば、直線的に地震が並んで発生することは当然である。しかし丹波山地のように面的に広く地震が分布する地域でもこのような地震の並びが現れることがある。

丹波山地は比較的広域にわたって微小地震活動が定常的に活発な地域である。地震は小さなクラスターを形成しつつ2次元的に広がって分布している。この地域に存在する活断層やリニアメントは概ね北西-南東の走向を持つが、地震分布との相関はあまり見られない。一方、丹波山地は近畿三角帯の西の境界にあたり、また最近GPSの全国観測網（Geo-

net）の観測から提唱されている新潟神戸歪集中帯（Sagiya et al., 2000）の一翼を担う場所であり、テクトニクス的に北東-南西方向の地殻ブロック境界の存在が強く示唆される地域である。

例えば、1999年3月には4日間で3回の有感地震が北東-南西方向に並んで発生した。2001年8月の京都府中部のM5.1の地震の後、余震域から南西方向に遠く離れた場所で北東-南西方向に並ぶ微小地震活動が観測された。また、長期にわたる一般的な震央分布図では地震が重なりあい分からなくなる特徴として、丹波山地の中でも最も活動的な部分にはやはり北東-南西方向のトレンドがみられる（片尾，2002）。

本研究では丹波山地を例にとり、上に挙げたような事例が過去に他にも起こっていなかったか、一見面的に発生している地震活動に何らかの方向性があるかどうかを検証する。

## 2. 過去の事例

前節で述べた1999年3月の事例は、3月12日亀岡市南部M4.0、3月14日京北町付近M3.5、3月16日に比良山系M4.9と連続して有感地震が発生したもので、時間的にも空間的にもほぼ等間隔に南西から北東へ活動が移動して行ったように見える（Fig.1; 以下、事例Aと呼ぶ）。このように有感クラスの地震が続発する例が過去にもあったか調べることは比較的容易である。1976年1月から2001年9月の間、防災研究所地震予知研究センター阿武山系観測網で観測された有感地震（ここでは単にM3.5以上の地震とする）は112個に過ぎない。このうち数日以内に続発した例があるかどうかは、単にM3.5以上の地震リストを見るだけで調べることができる。4日以内に複数の有感地震が発生した例は8例あったが、そのうち4例は余震活動もしくは群発活動によるもので、お互い非常に近接して起きたものであった。中規模地震の破壊域の大きさを越えた十分な距離を置いて続発した残りの4例のうち、2例は2個の有感地震が続発したもので方向性を議論できる例ではない。残りの1例（2000年5月）も時間間隔、空間配置ともに事例Aのようにきれいな直線状の関係にはなかった。連続して起きたと考える期間の長さ（上例では4日間）や、対象とする地震のマグニチュードの下限な

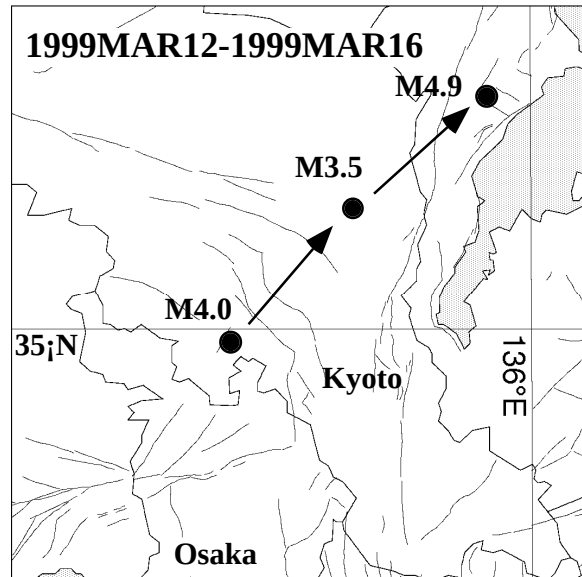


Fig. 1: Sequence of 3 moderate earthquakes observed in 1999.

どを変えて調べることも必要かもしれないが、結論として事例Aは偶然によるものである可能性が高いと言える。

1994年には5月28日滋賀県東部M5.2、6月28日京北町付近M4.6、7月27日に兵庫県猪名川町でM3.5を含む小群発地震と顕著な活動が続いた。ほぼ1ヶ月の間隔で地震活動が移動していった延長上に明石海峡があるため、翌年の兵庫県南部地震の前兆だったのではないかと一時期マスコミなど学界外の人々の注

## 2001AUG01-SEP13 Depth<20km, M>0.0 (SATARN.ABU)

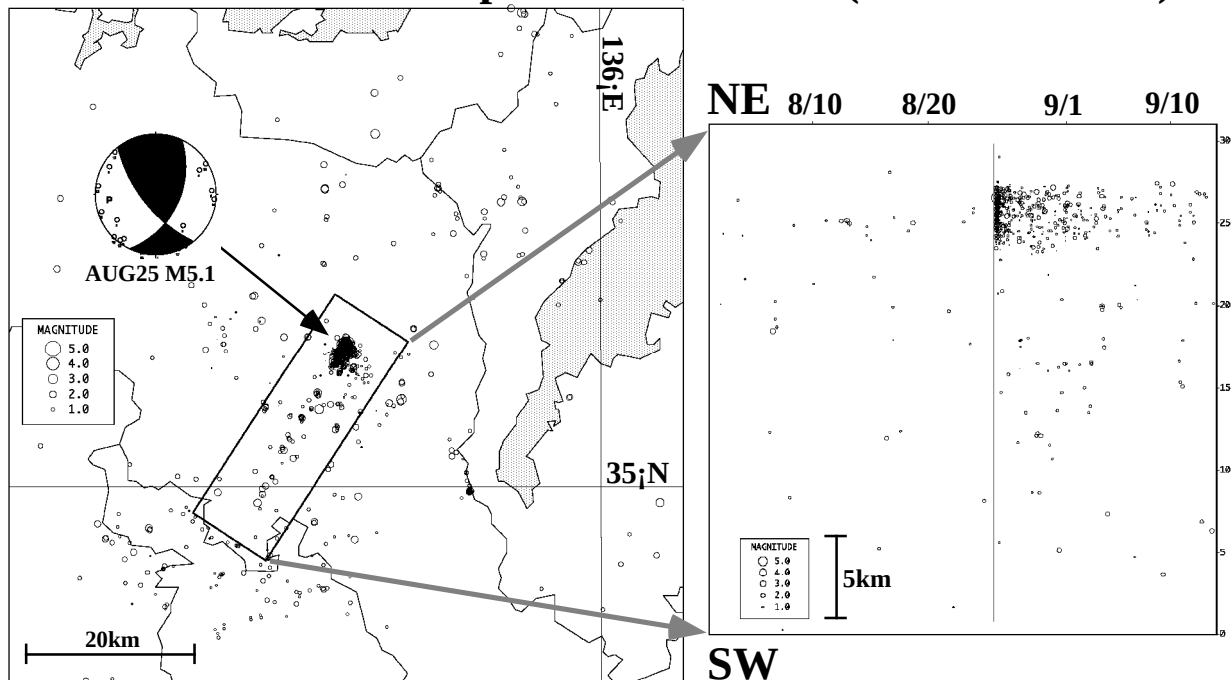


Fig. 2: The linear microearthquake distribution observed after the M5.1 earthquake on AUG25, 2001.

目を集めた。しかし、最初の滋賀県地震は東海地方から沈み込んだフィリピン海プレートの先端で起きたやや深発地震、2番目の京都府中部地震は同年2月ごろから顕著な前震活動が続いた後に発生したものである。したがって、これらの地震相互の因果関係や移動性は極めて疑わしい。これも事例Aと同じく、印象に残る有感地震が偶然連続して起きたものと考えられる。

2001年8月25日22時21分、京都府中部（気象庁の区域分けでは京都府南部）で気象庁マグニチュード5.1の地震が発生した。震源は北緯35.152度、東経135.668度、深さ6.9kmで、震央は京都市北部で京北町との境界付近である。M5.1というのは1976年の京都大学阿武山系観測網のテレメータ観測開始以来、丹波山地内では最大のものである。P波初動の押し引き分布から求めた発震機構解は東西圧縮の逆断層であることを示す（京都大学防災研究所地震予知研究センター、2002）。Fig. 2の震央分布に見られるように、この地震の余震域から南西方向に約20kmにわたってほぼ一直線状に微小地震が並んでいる。この南西延長部の活動は、M5.1の地震の余震活動よりも深い、深さ10km以上のところで起きている。この活動は8月25日の本震後活発化したもので、これらの地震の並ぶ方向（北東-南西方向）は、本震の発震機構や余震分布から推定される本震の主破壊面の延長方向にあたり、本震により誘発された活動である可能性が高い。特筆すべきは、この延長部の走向は、現在知られている丹波山地内の活断層（神吉・越畑断層、亀岡断層、西山断層系など）とはほぼ直交する方向にあることである。以下ではこれを事例Bと呼ぶことにする。

事例Bのように有感地震の発生など目立ったイベントの近辺である場合、あるいは常時監視する必要のある主要な活断層沿いでなければ、このような微小地震のみによる現象は通常地震活動解析の過程では見落とされることが多いと思われる。次節では事例Bに類似した現象が他にも起こっていたかどうかを検証する方法を考える。

### 3. 方法

事例Bのように微小地震を対象とする場合、膨大な地震カタログの中からこのような直線性を抽出するには、なんらかの自動化が必要となる。

Mori and Katao (1999)は、1995年兵庫県南部地震の余震域と丹波山地を結ぶ北東-南西方向の区域内での地震活動の移動性に注目し解析を行った。その方法は地震の空間分布を擬似的な地震波形に変換し、波形処理で用いられるスラントスタックの技法を応用するというユニークなものであった。しかし、彼らは北東-南西方向以外の方向を扱わなかったし、この方法では地震活動が一定方向に等速度で移動する場合でしか有効ではない。事例Bの場合、北東-南西方向に沿った直線性はよいが、活動は全域にわたってほぼ同時に始まり、約半月の間継続して地震が発生しており、ある方向に活動が移動しているものではない。

本研究では以下に述べるような簡便な方法で、過去の地震カタログを調べることにした。地震発生域を細長い長方形の小区域で分割し、各小区域内の地震数をカウントする。長方形の小区域群を回転させながら同様の操作を繰り返す（Fig. 3）。こうして時

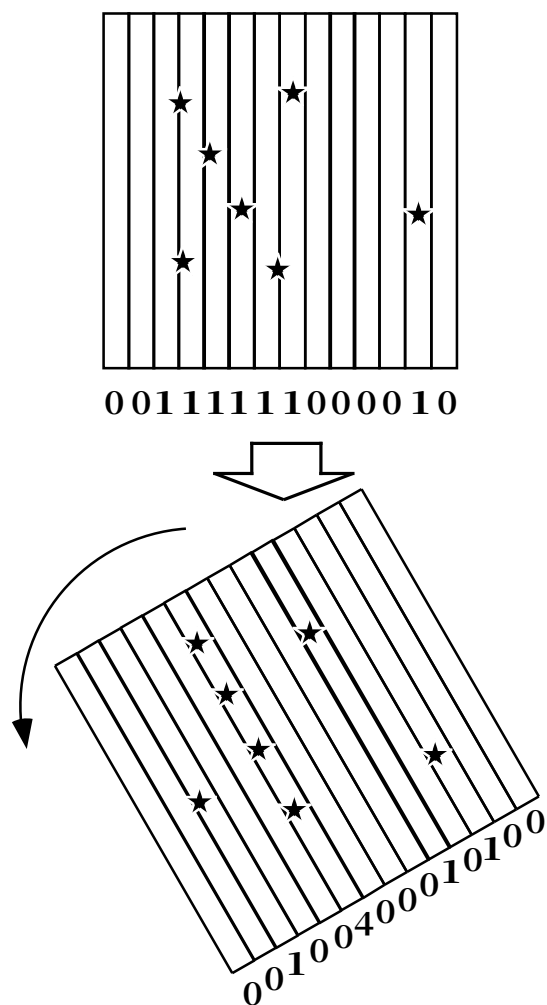


Fig. 3: Scheme of earthquake counting to detect linear distributions.

間・空間・方向をしらみつぶしに調べていくという単純な方法である。検出したい事象の特徴にあわせて、時間範囲、区域の中、カウントの方法などを適宜変えながら行う。通常に比べて有意に大きなカウント数を示す「時間・空間・方向」があれば、そこで特定方向に連動する活動があったことになる。カウント方法として今回は単に地震数としたが、重みをつける意味で個々の地震のマグニチュードの積算とするなどの工夫も可能である。

Fig. 4に示すように丹波山地の微小地震活動が最も活発で、かつ面的な震央分布となっている70km四方の領域を解析対象とした。この正方形の領域を幅5km長さ70kmの長方形の小区域に分割する。小区域は2.5kmごとに重複するように設定し、合計27の区域に分けられる。したがって1つの地震は、重なりあう2つの小区域に属するものとして重複してカウントされる。これは地震の並びがちょうど小区域の境界線に重なった場合を想定した措置である。回転中心は、領域中央の北緯35.0451度東経135.6644度とし、5度ずつ小区域群を回転させながら解析する。データとして用いたのは京都大学防災研究所地震予知研究センター阿武山系微小地震観測網による再観測震源リストである。丹波山地中央部は観測点が高密度に配置されているので、検知能力に地域差は無いものとしてマグニチュードの下限は設定していない。

まず、事例Bがどのように解析結果に表れるかをみるために、2001年8月25日（M5.1本震当日）から9月24日までのヶ月間の結果をFig. 5に示す。横軸は小区域の番号（小区域の長辺が南北方向に長く並ぶ時に西から順に数える）で、縦軸は小区域の長辺の方位（走向）で北から反時計回りの角度である。色の濃さが各小区域内の地震数を表す。一見して分かるように図中に弧状に地震数の多い区域が現れている。これは、本震に続く余震活動によるものである。中規模地震の余震など特定の場所に点状に集中して起きる活動は、全方位にわたっていずれかの小区域に含まれることになり、自動的な検出の妨げになることがわかる。

そこで顕著な余震活動をあらかじめ震源カタログから除去するデクラスター操作が必要になる。Fig. 6は、震源リストから8月25日のM5.1に続く余震のみを除去したデータセットについて解析したものである。Fig. 5にみられた全方位に現れる弧状の分布

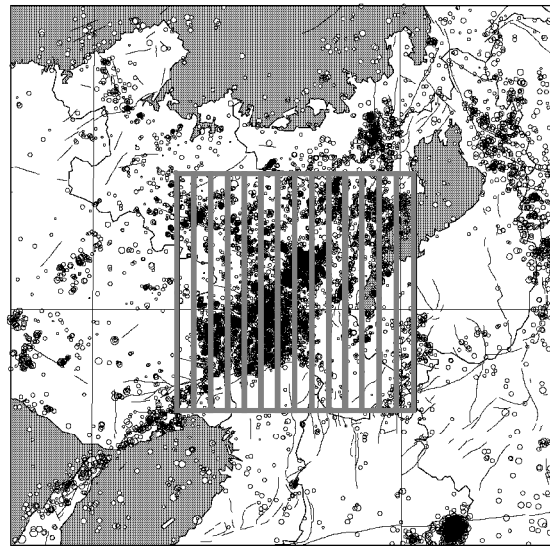


Fig. 4: Analyzed area.

は消え、いくつかの極大値が見られるようになった。このうち最大値を示すものが、Fig. 6中央下寄りにみられるもので、これが事例Bの地震列に相当する。しかしながら、丹波山地における中規模地震の余震活動は活動度や減衰係数等の個性が強く、単純な方法でデクラスターするには限界がある。さらに、それより小さな微小～極微小地震であっても、小規模な余震活動を伴うものや続発性を示すこと

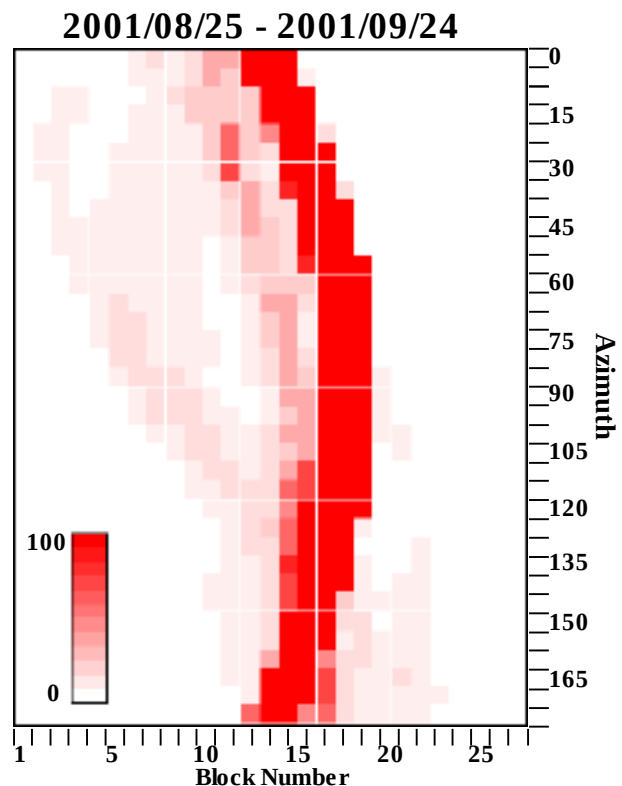


Fig. 5: Result by the simple counting method.

2001/08/25 - 2001/09/24 (decluster)

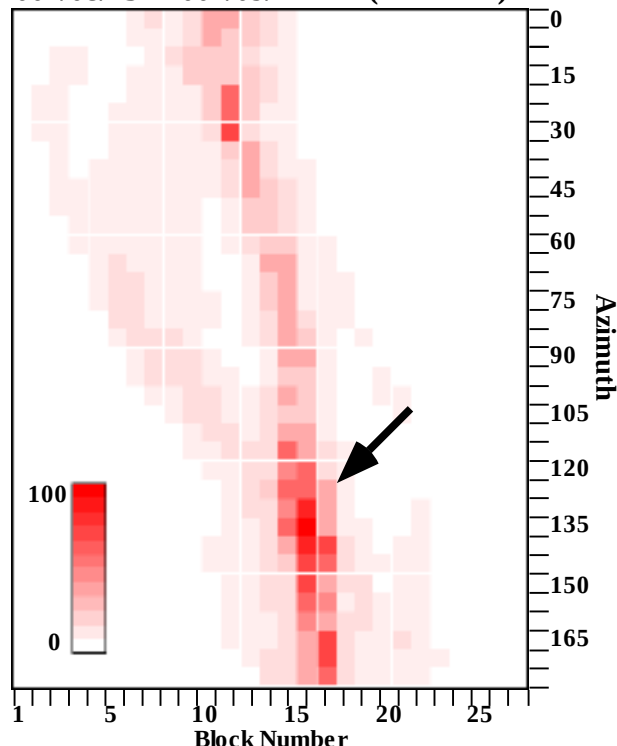


Fig. 6: Result for the declustered data.

は、一般的によく見られるものである。

恣意的なデクラスター操作を行わなくても、微小地震の線状分布を検出できる方法として以下のような方法を用いることにした。上述の方法で用いた5km×70kmの長方形の小区域の中を、さらに5km四方の正方形に分割する。各々の正方形の中に地震があるかどうかを調べ、ある場合は1、ない場合は0を与え長方形の小区域ごとにその値を集計する (Fig. 7A図)。こうするとM5以下の中規模地震の余震域のディメンジョンは5kmよりも小さいので、どんなに活発な余震活動があっても余震域を含む正方形の値は1より大きくなり、解析領域全体に悪影響をおよぼすことはなくなるはずである。この方法で行った解析結果をFig. 8に示す。濃淡はあるものの、全体に高い値を示す領域が多く見られ、どれが真の線状分布を示しているのか分からない。この原因は、解析期間として1ヶ月をとっているのも、バックグラウンド的に丹波山地のほぼ全域で地震が発生しているためである。この問題を避けるためには解析期間を短くすればよいが、あまりに短期間であると検出すべき線状の活動自体が認識されないおそれがある。解析期間の長さをバックグラウンドの活動度と線状分布の活動度とを比較の上慎重に決めなければならないわけだが、これでは未知の線状活

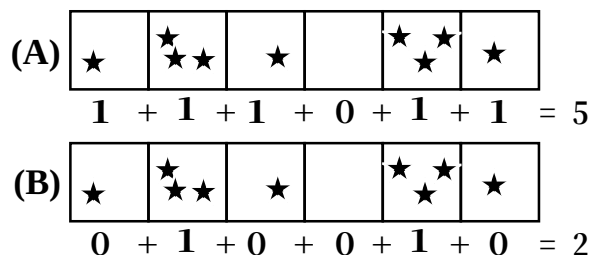


Fig. 7 Two type of counting method in the long rectangles.

動を検出するには都合が悪い。

改良案として、Fig. 7Bに示すように各正方形区域の中に地震があるか無いかではなく、ある一定数 (図の例では3) 以上あればその正方形は1の値をととする。これはある程度活発な活動しか認知しないという意味があり、解析期間を非常に長くならない限りバックグラウンドのランダムな地震活動は無視されるという効果がある。正方形内に5つ以上地震があればカウントするという条件で、事例Bについて解析を行った結果がFig. 9である。Fig. 8と比較すると、大きな値を示す部分は限定されており、そのうち最大値を持つものは方位N150W、小区域番号15あたりに存在する。これは、事例Bの線状地震分布に一致するものである。Fig. 10は同じ条件で

2001/08/25 - 2001/09/24

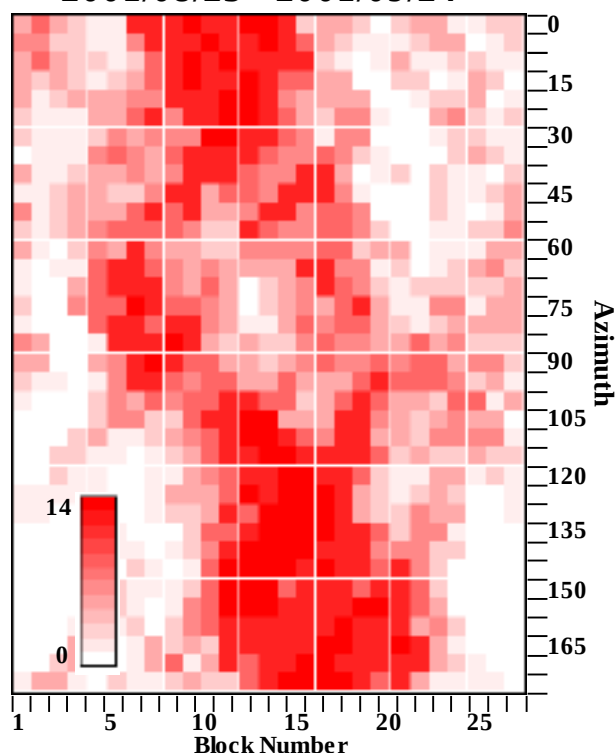


Fig. 8: Result by the counting method A of Fig.7.

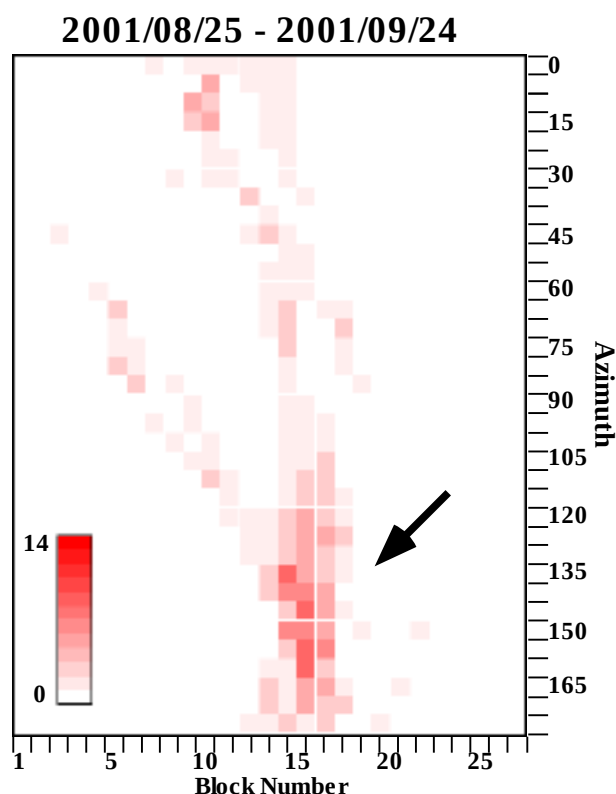


Fig. 9: Result by the counting method B of Fig.7 for the period AUG25-SEP24, 2001.

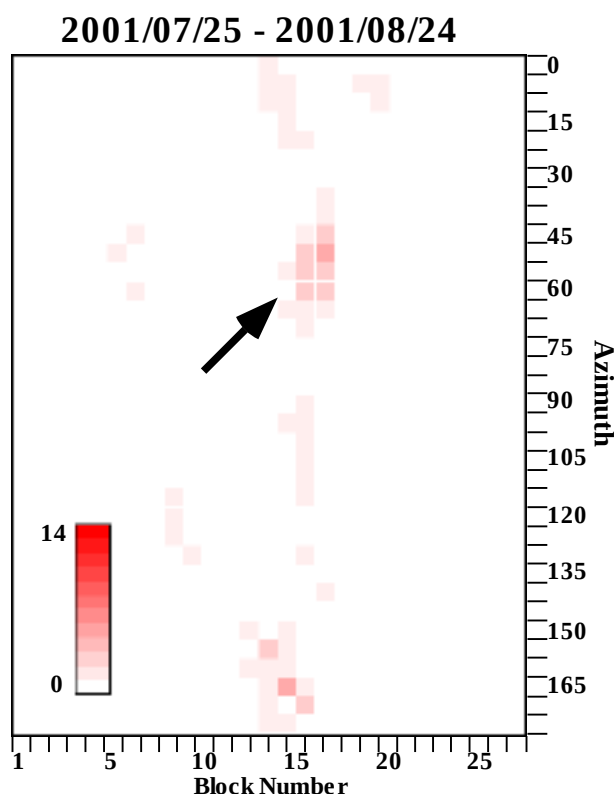


Fig. 10: Result by the counting method B of Fig.7 for the period JUL25-AUG24, 2001.

2001年7月25日から8月24日（M5.1本震前日）までの期間を解析したものである。方位N50W、小区域番号16に最大値を持つ領域が存在し、これは三峠断層系に沿った領域であることがわかる。また、事例Bの線状分布が現れた地域には、M5.1の本震前には線状分布を示す活動は無かったこともわかる。

#### 4. やや長期にわたる解析結果と考察

1997年10月から2001年9月の期間、前節の最後に述べた方法により、直線的地震活動の探索を行った。前節の例と同じく個別の解析期間は約1ヶ月間とし、空間範囲、区域のとりかた、回転角と回転中心も同じである。

その結果、例えば1998年8月25日～9月24日の期間、事例Bとほぼ同じ場所で類似の線状分布が現れていたことがわかった（Fig.11）。また、この事例Bの「方向及び区域」の近辺には、ほぼ常に他より大きな値が現れていることもわかった。つまり、事例Bの現象が見えた地域には、常時北東-南西方向にのびた分散した活動がある。言い換えると、ここが丹波山地の最も活動的な場所で、その分布は北東-南

西方向に伸びた形を示すということである。これは最初の節で述べたように、丹波山地全体を見た場合も、完全に2次元的にランダムな分布ではなく、北東-南西方向に沿って最も活動的な部分が分布することから、単に確率分布として北東-南西方向に地震が並ぶ確率が高いということを示しているに過ぎないのかもしれない。その中で、ある時間範囲を限定すると偶然に、さらに直線性の良い分布となることがあり得る。あるいは中規模地震に誘発されるとき、大局的な北東-南西トレンドの内部にさらに直線性を示す構造が伏在する等の理由により半ば必然的に直線状の分布が現れてくる例もあるのかもしれない。

1999年2月25日～3月24日の期間にもほぼ同じ位置に高いカウント数が現れる。これは、事例Aの3連続の有感地震を含むものである。上述の常時みられる北東-南西方向のトレンドに加え、その延長上にも活動があった例で、本解析にも顕著に現れたものである。

今回自動探索に用いたパラメータは、事例Bを最もよく検出できるように調整したものである。今後例えば、解析期間の長さや、小正方形内にいくつ以上地震があればカウントするかという条件などをい



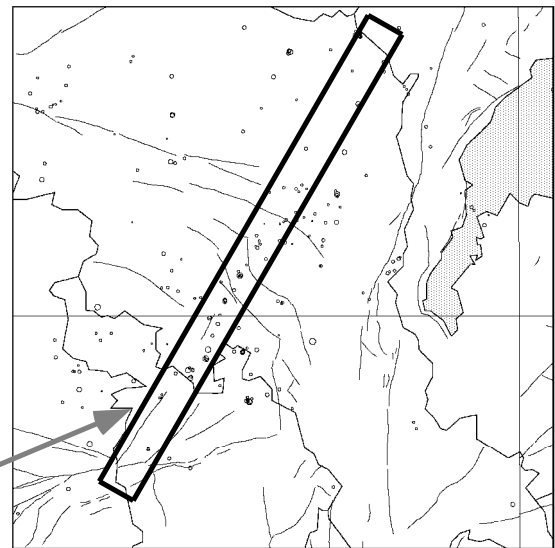
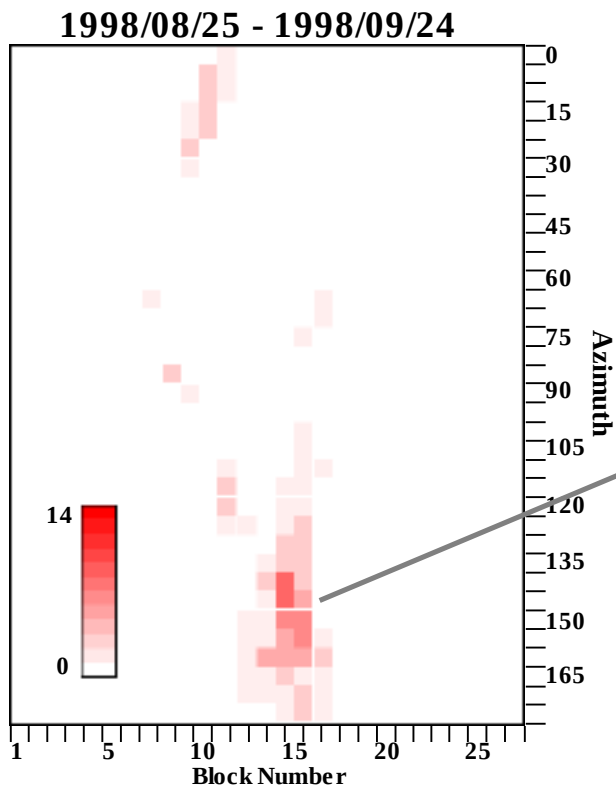


Fig. 11: NE-SW linear distribution detected during AUG25-SEP24, 1998.

ろいろ変えて解析を行う必要がある。また、1997年10月以前についても同様の解析を行ってみる必要がある。

Fig. 10で三峠断層沿いに現れたピークについて調べてみる。三峠断層系は丹波山地北部を西北西-東南東に走る活断層で、1968年の和知地震（M5.6）や本研究で注目した2001年8月のM5.1もこの延長線上にある。この断層系に沿った時空間分布をFig. 12に示す。断層系全体にわたってほぼ同時に活動が活発化する現象が何度かあったことがわかる。よくみると、毎回活動する場所は少数に限定されている。これはまた違うタイプの連動性を示すもので、必ずしも今回用いた解析法が有効ではないかもしれない。

なお、事例Aに含まれる1994年6月のM4.6と事例Bの2001年8月のM5.1は、震源域の深さが異なるもののほぼ同じ震央位置で発生したものである。ここは丹波山地の地震活動の北東-南西方向のトレンドと三峠断層系が交わる場所にあたり、活発な活動を励起するなんらかのテクトニックな構造があるのかもしれない。

## 5. まとめ

丹波山地でみられた直線状の地震活動の事例について検証した。特に2001年8月の京都府中部のM5.1

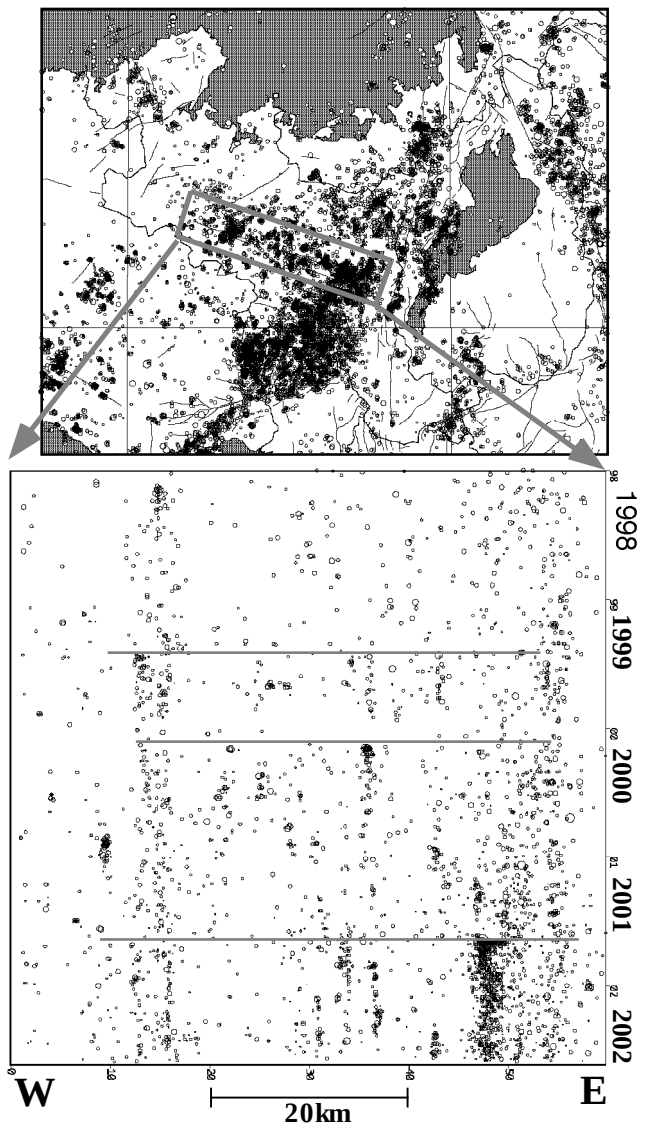


Fig. 12: Seismicity along the Miyoko fault.

の地震後に現れた北東-南西方向に並ぶ線状活動に注目し、同様の地震活動を地震カタログから機械的に検出する簡便な方法を開発した。

2001年8月に現れた地震列の周辺では、ほぼ常時北東-南西方向にややのびた分布の地震活動が存在し、時にはその直線性が非常によくなる例があることがわかった。

また三峠断層沿いでは、同断層に沿った複数の場所で連動する地震活動が存在することがわかった。

#### 参考文献

片尾 浩 (2002) : 丹波山地の地震活動, 月刊地球, 号外No.38, 42-49.

京都大学防災研究所地震予知研究センター

(2002) : 2001年8月25日京都府南部の地震

(M5.1) について, 地震予知連絡会会報, 67, 390-397.

Mori, J. and H. Katao (1999): Slant-stacking space-time seismicity in the region of Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake, AGU Fall meeting.

Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada (2000):

Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, Pure Appl. Geophys., 157, 2303-2322.

## Detection of linear activity of microearthquake

Hiroshi KATAO

### Synopsis

In the Tamba plateau, microearthquake activities show sometimes linear distribution. After the M5.1 earthquake in 2001, linear activity with 20km length was observed. We developed a simple method to detect such linear trend of seismicity from the earthquake catalogue. In the middle of the Tamba region, NE-SW linearity is detected almost continuously. Along the Mitoke fault, many microearthquakes occurred simultaneously.

**Keywords:** seismicity, linear distribution, triggered earthquake, Tamba plateau