

(1) 鹿児島県北西部地震のテクトニクスの背景

角田 寿喜

鹿児島大学理学部附属南西島弧地震火山観測所

Tectonic Background for the 1997 Northwestern Kagoshima Earthquakes

Toshiki KAKUTA

Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes,

Faculty of Science, Kagoshima University

10861 Yoshino, Kagoshima 892-0871, Japan

The 26 March event ($M_{JMA}6.5$) of the 1997 Northwestern Kagoshima earthquakes occurred in a zone branching off to the west at the Kakuto caldera area from a narrow seismic zone already known from the micro-earthquake observations in South Kyushu. On the basis of the aftershock distribution and initial motions, a left-lateral strike-slip fault of about 17km long striking nearly WNW-ESE was estimated for the event. It is very similar to the focal mechanisms of the major earthquakes in the region, such as the 1961 Yoshimatsu Earthquakes ($M_{max}5.5$), 1968 Ebino Earthquakes ($M_{max}6.1$) and 1994 Northern Kagoshima Earthquake ($M5.7$). Accordingly, we infer a left-lateral movement along the zone extending to the west-north-west through the crust in South Kyushu. It is presumably caused under some action of the subducting plate, because the narrow seismic zone nearly parallel to the subduction lies on an extension of a block boundary of seismicity for the Hyuganada earthquakes in the Philippine plate. The block boundary for the Hyuganada earthquakes implies probably that the subducting plate splits into several blocks and that each block subducts almost independently. The left-lateral strike-slip movement is possibly caused by differential block movements of the splitted oceanic plate.

An L-shaped aftershock distribution consisting of branches striking WNW-ESE and NEN-SWS was observed for the 13 May event ($M_{JMA}6.3$). Considering the event located on the WNW-ESE branch, we know that two left-lateral faults steeply dipping parallel to each other at a distance no more than 5km move successively at an interval of 48 days. Successive occurrences of large shocks in a sequence have often been observed for crustal earthquakes in Kyushu. Such movements are hardly caused by an increase of static stress due to the first event or by a release of strain energy stored in the upper crust only, because both events of $M_{JMA}6.5$ and $M_{JMA}6.3$ are the largest class crustal earthquakes in South

Kyushu. Consequently, it is surely necessary to consider a retarded left-lateral movements in the lower crust.

On the other hand, we know from the GPS observations that an extensional stress in the crust prevails in a south-easterly direction in Kyushu. Thus, another extensional force system will be necessary for driving the crust to the east or south-east: upwelling of the mantle at the Okinawa trough or spreading of the Asian continental plate.

1. はじめに

フィリピン海プレートが東南東から沈み込む九州では、別府-島原地溝および雲仙-天草灘地溝を経て甑島西方の沖縄トラフ延長部に続く領域、および日奈久断層系に沿って阿蘇カルデラ西方から甑海峡へ延びる領域の内陸地震活動が特に活発である(福岡管区気象台, 1991, 1998; 清水・他, 1993, 1995)。大局的に見た地震列の並びはNE-SW, これにほぼ平行して, 中央構造線の延長と考えられる臼杵-八代構造線が中部域を貫き, また南部中央域には, N-S方向に延びる鹿児島地溝(露木, 1969)に沿って活動的火山とカルデラが分布する(Fig. 1)。いずれも走向はプレートの沈み込み方向にほぼ直交し, 特に, 中部域の被害地震はほとんどこの領域に集中している。発震機構はNW-SEまたはN-S方向にT軸を有する右横ずれあるいは正断層型が卓越するが(清水・他, 1993), 多田(1993)は, これらの発震機構および同方向の伸張を示す水平地殻歪みにもとづき, 別府-島原地溝の分裂拡大が起こっていると考えている。ただし, 別府-島原地溝に発生した1975年大分県中部地震(M6.4)では, 本震直後にNW-SE方向に並ぶ余震活動が観測され, 地殻変動から, 長さ10km×幅20km, 南西側に70°傾斜したNW-SE走向の断層面が推定されている(久保寺・他, 1976)。

一方, 九州北部では, 地震活動はあまり活発ではないものの, 福智山断層, 警固断層, 西山断層系など, NW-SEあるいはNNW-SSE走向の活断層が卓越する(福岡県, 1997a, b; 下山, 1998)。また, 南部には, E-WないしWNW-ESE走向の左横ずれを示す地震列が見られ, 被害地震は, むしろ, この走向の列上に起こっている(長宗・中村, 1986; 角田・他, 1992, 1995)。南北方向に地殻伸張を引き起こす応力場が存在すれば, NE-SW走向の右横ずれと, これに共役なNW-SE走向の左横ずれの断層運動が起こりうる。1997年5月13日の鹿児島県北西部地震($M_{JMA}6.3$)に伴って, 対で出現したWNW-ESE走向の余震列とNNE-SSW走向の余震列は共役である(角田・他, 1997, 1998a)。しかし, Fig. 1に見るように, 右ずれを伴ったNE-SW走向の断層系(布田川-日奈久断層系・出水断層系)が中部から南部域に, 左ずれを伴ったNW-SE走向の断層系(西山断層系・警固断層系)が北部域に卓越するのは, これでは説明できない。また, 同様に, 南部域のE-WないしWNW-ESE走向の地震列も, 九州西方沖に見られるNE-SW走向の地震列に対する共役系として現われたものではない。すなわち, 北部および南部域には島弧軸に直交する走向の左横ずれを伴った構造運動が進行しており, これが1997年鹿児島県北西部地震を引き起こしたと考えられる。

2. 島弧軸に直交する線状配列

余震がWNW-ESE方向に延びる長さ約17kmのほぼ垂直な面上に分布し, 発震機構が明瞭な高角の左横ずれを示した1997年3月26日の鹿児島県北西部地震($M_{JMA}6.5$)に見るように(角田・他, 1997, 1998a), 南部域の被害地震との関連で注目すべきは, E-WあるいはWNW-ESE走向の地震列である。

九州西方沖の海底地形を見ると、甌島列島と宇治群島の北西側に沿ったNE-SW走向の急崖は、この間の左横ずれを示すように明瞭に食い違っている。長宗・中村(1986)によれば、甌島列島と宇治群島の間には、E-W走向の地震列が推定され、1928年の地震(M6.4)や1953年の地震(M6.0)など、比較的規模の大きな地震は、震央がほぼE-W方向に並び、NW-SE方向のT軸を有する横ずれ型の発震機構が卓越する。この地震列はFig.2の配列aに対応するが、その後の微小地震観測によると、鹿児島湾まで延びると考えられる。近傍には、1913年日置地震(M5.7, 5.9)および1914年桜島地震(M7.1)が起こっている(今村,1920)。前者は串木野南方沖に、後者は鹿児島湾に発生した地震であり、それぞれの震源は薩摩半島を挟んでほぼ東西に分布する。したがって、発震機構は不明であるが、地震列が鹿児島湾まで延びるとすれば、これらはともにE-W走向の地震列上の活動であった可能性がある。長宗・中村(1986)が指摘したように、地震列は比較的活動度が高く、被害をもたらすような地震発生の可能性が高い領域である。しかるに、2つの地震の震源域の間、すなわち、鹿児島市西部から西方沿岸部にまたがる約20kmの領域には、これまで規模の大きな地震が起こっていない。ゆえに、この領域の歪みはまだ解放されておらず、M6.5程度の地震が起こる可能性がある。1996年11月23日には鹿児島市南部海域においてM3.0の地震が発生し、また1997年7月中旬から下旬にかけて薩摩半島沿岸部にM3.2を含む群発地震が起こっている(Fig.3)。前者は1914年桜島地震、後者は1913年日置地震の震源域付近に起こっている。周辺域の地震活動の高まりが限界に近づいた歪みの表われとすれば、油断できない状況にあると考えられる。

第2の配列は、宮崎市南部からWNW方向に延び、霧島火山域においてWNWとW方向に分岐する地震列である(Fig.2)。分岐点付近に位置する霧島火山の北西麓は、1915年栗野群発地震($M_{max}5.0$)、1961年吉松地震(M5.5)、1968年えびの地震(M6.1)など、被害地震が近接して発生した活動域として知られている。しかし、この領域を除くと、周辺には、1911年2月18日宮崎市南部(M5.6)、1935年7月3日宮崎県南部高岡町付近(M4.6)、1979年3月17日鹿児島県北部菱刈町付近の地震(M4.9)が目につく程度で、これらに相互的な関連を見るのは困難であった。しかるに、鍵山・他(1989)は、霧島火山とその近傍に展開した局所的観測網という点で精度に問題はあったが、宮崎平野南縁と八代海南縁を結ぶ線上に微小地震の配列が見られることを指摘した。また、1989年後半から、 $M \geq 3$ の地震が天草灘へ続く領域にWNW-ESE方向に連なって次々と起こり始め(Fig.2の配列b)、1990年には、列としての存在が明瞭になった(角田・他,1992)。いくつかの地震の発震機構、および吉松地震とえびの地震がほぼE-W方向に伸びる余震列とNW-SE方向にT軸を有する横ずれ型の発震機構を示すこと(Minakami et al., 1968, 1969; 角田, 1987)から、動きが左ずれであることも分かってきた。これらの推定を決定づけたのは、余震分布とP波初動の押引き分布から、ほぼE-W走向の高角左横ずれの震源断層が明瞭に推定された1994年鹿児島県北部地震(M5.7)であった。WNW-ESE走向の地震列上に発生したこの地震によって、高角左横ずれを示す内陸地震列の存在はもはや疑いないものとなった。

一方、我々の観測によれば、Fig.2に配列cとして示した霧島火山域からW方向に分岐する地震列上に検出された微小地震は、1990年後半には僅か3個であったが(角田・他,1992)、1991年には明瞭な線状配列が認められた(角田,1994)。ただし、福岡管区気象台によるテレメータシステム整備後の震央分布を見ると、1984~1990年の期間にはWNW方向の列より明瞭であり(福岡管区気象台,1991, p.78)、以前から活動は活発であったと考えられる。

特に目を引くのは、1994年鹿児島県北部地震後の活動である。先に述べたように、これはWNW-ESE走向の分枝上に発生した地震であるが、1994年には、WNW-ESE走向の分枝には余震を除けば顕著な地震はほとんど見られないのに対し、E-W走向の分枝上には2ヶ所に活動集中域が見られる (Fig. 4)。そのうちの一つ、阿久根市西方沖に見られるクラスターaは、主として、6月14日、6月21~22日、および10月9~11日の群発的活動である。最大はいずれもM3クラスである。観測網の検知能力が不十分であったにも拘らず、それぞれ10個程度の震源が決まっている。ここには、1997年鹿児島県北西部地震 (M_{JMA}6.5) の約4時間後にも、M4.1が起こっている。この小区域は、しばしば発生する群発的活動が示すように、活動度が高く、応力集中の起こりやすい箇所と考えられる。また、鹿児島県北部地震 (M5.7) の南西約10kmに見られるクラスターbは、主に11月4~6日および11月17日に発生した群発的活動である。この期間、この領域に震源が決まった地震は計16個、最大はM2.9であるが、1997年鹿児島県北西部地震の震源域東端部付近に起こった点が注目される。

1995年前半には、この地震列に沿って活動域が次々と西方へ移動するような群発的活動が発生した (Fig. 5)。すなわち、領域aにおいて、N-S方向の共役系列を含む鹿児島県北部地震の余震活動が約3年にわたって継続する中で、領域bには、3月6日にM4.0、7日にM4.3が発生し、活発な活動を展開した。前年6月および10月に群発的活動が見られた領域である。その後、活動はいったん治まるが、4月初めからやや活発化し、その状態が約1年間にわたって継続する。この領域に起こったM4クラスの地震は、1980年4月5日 (M4.2) 以来であるから、きわめて稀な現象である。これに続いて、領域dでは6月18日にM4.2および3.9が発生し、活動が活発化する。やはりM4クラスの地震はめったに発生しない珍しい現象である。これらに比べれば、地震規模は小さく、さほど顕著ではないが、領域cのややまとまった数の地震は、領域dの活動に先行して発生しているように見える。

このような現象は、地震列に沿って活動が活発化していることを示すものである。特に、W方向に分岐する地震列上に発生した1997年鹿児島県北西部地震 (M_{JMA}6.5, 6.3) では、それまで微小地震活動が相対的に不活発であった部分が震源域となった (角田・他, 1997)。ただし、周辺域では活動が活発化しており、あたかも、九州南部をほぼ東西方向に横断する左ずれを生じさせるような広域応力場のもとで、まず構造的に弱い周辺部分で小規模破壊が進行し、固着していたバリエーがついに外れたかのように見える。

3. 規模の大きな地震の続発

今回の活動のひとつの特徴は、M6クラスの地震が近接した位置に連続して発生した点である。九州内陸部に発生したM \geq 5の被害地震を見ると、1890年以降に発生した25回の活動中の11回において、本震と同じかそれに匹敵する規模の地震が数年以内に起こっている (角田・他, 1998a)。したがって、規模の大きな地震の続発はかなりの頻度で発生しており、九州内陸部の地震発生の仕組みを考える上で重要な問題を提起しているように思われる。

続発する地震の震源は、これまで多くの場合、同じであった。ただし、被害分布は異なるのが普通であり、同じに見えるのは分解能がないためと考えられる。最近では観測網が充実し、今回の活動と同様、震源域の違いが明らかにされている。例えば、日向灘に発生し、ともに逆断層型の地震であった1996年10月19日の地震 (M_{JMA}6.6) と12月3日の地震 (M_{JMA}6.6) では、前者に比べて後者は陸側よりのやや深部に発生した。また、奄美大島東方海域に発生した1995年10月18日の地震 (M_{JMA}6.7)

と19日の地震 ($M_{JMA}6.6$) は、震源域が隣接し、走向を同じくする正断層型の地震であった(後藤・他, 1997)。日向灘地震はプレート境界、奄美大島近海地震はプレート内の活動であるが、これらは、いずれの場合も、同じ仕組みの破壊が2回に分けて起こったとして説明できる。

ところが、1997年3月26日と5月13日の鹿児島県北西部地震 ($M_{JMA}6.5, 6.3$) は、ともに走向がWNW-ESE、ほぼ垂直で左ずれの動きを示したが、震源断層は僅か3km離れた位置に平行して形成された。高角横ずれ断層の場合、最初の地震によって、断層の延長方向および断層端付近の直交方向の静的応力が増加し、地震が発生しやすくなる。したがって、第1地震と第2地震がそのような位置関係にあるならば、破壊が2回に分けて起こることも考えられる。しかし、平行な高角横ずれ断層を発生させる仕組みは、きわめて考えにくい。地震発生層の厚さを考えると、M6クラスは鹿児島県北西部に起こりうる最大規模の地震である(角田・他, 1997, 1998a, 1998b)。上部地殻に広域的な応力が作用する場を考えれば、最初のM6.5の地震によって、蓄積限度に近い応力が解放され、僅か3kmほど離れて平行する領域に、もはや同程度の地震を引き起こすエネルギーは残らないはずである。しかし、それにも拘らず、やがてM6.3の地震が発生する領域には、有感地震を含む前震がかなり活発に発生しており、応力の蓄積を示す現象が進行していた(角田・他, 1998b)。このような状況を、広域応力場の作用下で歪みが限界に達し、地震が発生するという単純なモデルによって説明するのは困難である。

霧島火山域から宮崎市南方へ延びるWNW-ESE走向の地震列を東方へ延長すると、日向灘海域の地震活動を区分する境界に一致する(石原・吉田, 1992; Utsu, 1974)。すなわち、このラインより北の領域は地震活動度が高く、M7クラスの地震がかなり頻繁に発生する。それに対して、南の領域の活動度は相対的に低く、M7クラスの地震は僅かに1961年の地震(M7.0)が見られるのみである(福岡管区気象台, 1998, p. 306-308)。日向灘地震の活動境界は、フィリピン海プレートの沈み込み方向への断裂を反映すると考えられる(角田・他, 1995)。内陸地震活動との間に見られるこのような関係は、直下のプレート断裂がWNW-ESE走向の内陸地震列形成に深く関わっていることを示唆するものである。

内陸地震列とプレート断裂が関連するならば、断裂の影響は、マントル上部の物質流動を通して地殻全体におよぶと考えられる。すなわち、断裂したプレートが左ずれを伴いながら沈み込むため、これに引きずられた下部地殻に左ずれを生じ、上部地殻に高角左横ずれの内陸地震列が形成される。左横ずれの地震列は一種の破碎帯である。不均質であるため、ここには、いく筋もの平行なずれ(震源断層)が雁行する。その際、brittle域からの移り変わりが遷移的と考えられる ductile域上部にも、雁行状の“ずれ”が生じるであろう。火山直下の地殻下部に低周波地震が起こることを考えれば、不均質は下部地殻全体に及ぶ可能性もある。ただし、brittle域における“ずれ”はイベント的であるのに対し、ductile域での“ずれ”はクリープ的であるから、M6クラスの地震によって上部地殻の歪みが解放されても、下部地殻では依然として左横ずれが進行しうる。

このような条件があれば、マントル上部に進行する左横ずれによって、下部地殻の不均質部に雁行状の“ずれ”を生じ、“ずれ”が大きい箇所の直上の brittle域がまず破壊し、やがて隣接域に雁行する下部地殻でも“ずれ”が成長して2度目の破壊が発生する。

4. 議論

九州の内陸地震では、横ずれまたは正断層型の発震機構が卓越し、逆断層型はほとんど見られない。最近の GPS 観測結果 (国土地理院, 1999) を見ても、新潟県の大潟を固定点としたとき、フィリピン海プレートの影響を受ける四国の変動ベクトルは向きが北西であるのに対し、九州の向きは南東である。また、九州南部域を WNW-ESE 方向に横断する地震列を境に、南部の変動量は、北部および中部域に比べて大きくなっているように見える。固定局から遠いという問題点はあるものの、この地震列上で左横ずれ型の地震活動が活発であることと調和的である。

これらの現象は、九州全体が拡大の場にあることを示している。九州-南西諸島域が拡大の場になる要因としては、ユーラシアプレートの東方への押出しとともに、沖縄トラフの役割が大きいと考えられる。すなわち、沖縄トラフは、九州西方沖の水深が400m以深の領域で存在が明瞭になる。その北限は、九州南部を東西に横断する地震列の延長上にあつて、阿久根市と福江海盆を結ぶラインにあたる。トラフは南方に向かって段階的に発達し、水深はトカラ海峡より南で1000mを越え、慶良間海裂以南で2000mを越える。トカラ海峡および慶良間海裂は、ともにこれに沿った左横ずれの構造線が推定され (小西, 1965; Kizaki, 1978), 直下域にプレート断裂が推定される領域である (Carr et al., 1973; Shiono et al., 1980; 長宗, 1987)。九州-南西諸島の東方沖に連なる南海トラフ-琉球海溝もまた南に向かって不連続的に水深を増すが、海溝とトラフ間で不連続の位置はそれぞれ対応しているように見える。したがって、島弧軸に直交する走向の左ずれには、断裂して沈み込むプレートとともに、南部ほど大きな速度で拡大する沖縄トラフが関与すると考えられる。プレート断裂は、この外、稍深発地震の震源分布から、阿蘇・始良・阿多・鬼界の各カルデラ直下域に推定されている (長宗・田代, 1989; 角田, 1992, 1995)。さらに、奄美大島-徳之島間の海峡にも、同様の構造線があると考えられる (Kizaki, 1978; 角田・他, 1997)。これらはすべて左ずれである。

フィリピン海プレートが沈み込む場にありながら、九州-南西諸島域が拡大の場にあるのは、プレート間のカップリングが弱いことを意味している。これはM8クラスのプレート境界地震がほとんど発生しないこととも調和する。推定された断裂に対応する箇所のすべてにおいて沖縄トラフが明瞭な形状の不連続を示すわけではなく、また、九州-南西諸島域における微小地震観測の歴史が浅いこともあって、いまのところ、明瞭な内陸地震列が見られるのは九州南部のみであるが、島弧軸に直交する走向の内陸地震列の形成には、フィリピン海プレートの沈み込みや背弧域の拡大など、ダイナミックな熱的循環を伴った上部マントルの物質流動が関与していると考えられる。

5. まとめ

霧島火山域から西方に延びる地震列上に発生した1997年3月26日の鹿児島県北西部地震 (M_{JMA}6.5) では、余震はWNW-ESE方向の長さ約17kmのほぼ垂直な面上に分布し、発震機構は明瞭な高角の左横ずれを示した。これらの現象は、九州南部をE-W方向に横断する地震列の性質としてほぼ予想されたものであり、角田・他 (1995) が述べた左ずれの構造運動を改めて裏付ける結果となった。しかるに、約1ヶ月半の時間をおいて発生した5月13日の地震 (M_{JMA}6.3) では、最初の地震と同じWNW-ESE走向左ずれの震源断層が僅か3km離れて南方に出現した。九州では、かなりの率で規模の大きな内陸地震が同一震源域に続発しており、当初は予測していなかったものの、M6クラスの地震が再び発生したことは考えられないことではなかった。しかし、横ずれ断層がごく近傍に平行して現れたことは、こ

れまでの地震学的常識を越えた全く予想外の事態であった。

九州内陸部が拡大の場にあることを考えると、大陸プレートの東方への押出しを底流とし、断裂したプレートの沈み込みや沖縄トラフの段階的拡大を伴った物質流動が上部マントルに起こっていると考えられる。これが左横ずれを示すE-W走向の地震列の要因とすれば、上部地殻の歪みは下部地殻を通してもたらされたと考えられる。したがって、ductile的で地震が発生しない下部地殻にも左ずれを起こすような力が加わり、ある程度の不均質があれば、ここにも雁行状の“ずれ”を生じうる。下部地殻に存在する雁行状の“ずれ”は、その上に載った上部地殻に歪みを生じ、そのうちの一つで左ずれの地震が発生する。上部地殻で歪みが解放されても、下部地殻は ductile であるため、隣接部では依然として“ずれ”が進行する。やがて、成長した“ずれ”直上部の上部地殻に、第2の地震が発生する。

高角横ずれの震源断層を有する規模の大きな地震が隣接域に平行して発生する仕組みを、地震が発生しない ductile 域における雁行状の“ずれ”にもとめるのは大胆であり、証明は困難である。しかし、これを上部地殻のみに生じた応力場によって説明するのは、多少の不均質を考慮しても、不可能と思われる。

謝 辞

解析には、九州大学地震火山観測研究センターと気象庁の観測データの一部も併せて使用した。

参考文献

- Carr, M. J., R. E. Stoiber and C. L. Drake, 1973, Discontinuities in the deep seismic zones under the Japanese arcs, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, 2917-2930.
- 福岡管区気象台, 1991, 九州地方の地震活動(1984年~1990年) - テレメータシステム整備後の地震資料 -, 福岡管区気象台要報, 46.
- 福岡管区気象台, 1998, 九州・山口県の地震・津波, 福岡管区気象台要報, 53.
- 福岡県, 1997a, 西山断層系(帯)に関する調査, 平成7年度・平成8年度地震調査研究交付金成果報告会予稿集, 科学技術庁, 141-143.
- 福岡県, 1997b, 警固断層系に関する調査, 平成7年度・平成8年度地震調査研究交付金成果報告会予稿集, 科学技術庁, 148-152.
- 後藤和彦・清水 力・中辻 剛・金沢敏彦・山田知樹・島村英紀・塩原肇・日野亮太・西澤あずさ・笠原順三・佐藤利典・角田寿喜・宮町宏樹・平野舟一郎, 1997, 1995年奄美大島近海地震群の活動, *地学雑誌*, 106, 503-513.
- 今村明恒, 1920, 九州地震帯, 震災予防調査会報告, 92, 1-94.
- 石原和彦・吉田明夫, 1992, 九州下フィリピン海スラブの形状と地震活動, *地震* 2, 45, 45-51.
- 鍵山恒臣・山口 勝・増谷文雄, 1989, 霧島火山群東麓の地震活動, *日本火山学会講演予稿集*, 1, 83.
- 角田寿喜, 1987, 1961年「吉松地震」について, *鹿児島県の地震と火山*, 17, 145-155.
- 角田寿喜・宮町宏樹・久保田裕史・高木章雄, 1992, 九州の内陸地震活動, *地震* 2, 45, 229-237.

- 角田寿喜, 1994, マグマの動きを監視する, 火山の総合的研究の展開法に関する調査研究報告書—火山と地域産業—, 鹿児島大学(代表者:田中穰), 26-72.
- 角田寿喜・後藤和彦・宮町宏樹・平野舟一郎・石原和彦, 1995, 地震活動からみた九州南部—南西諸島のテクトニクス, 月刊地球, 17, 414-418.
- 角田寿喜・宮町宏樹・後藤和彦・八木原 寛・平野舟一郎・福満修一郎・関谷 博・金子和弘・岩切一宏・清水 力, 1997, 地震活動の特徴, 1997年鹿児島県北西部地震被害調査報告書—速報版—, 鹿大県北西部地震被害調査研究会・(財)鹿児島県建設技術センター, 1-12.
- 角田寿喜・宮町宏樹・後藤和彦・八木原 寛・平野舟一郎・福満修一郎・関谷 博・金子和弘・岩切一宏・清水 力, 1998a, 薩摩地方北部域における最大クラスの内陸地震活動, 「1997年鹿児島県北西部地震の総合的調査研究」報告書, 鹿児島大学自然災害研究会, 9-20.
- 角田寿喜・宮町宏樹・津野拓士・後藤和彦・八木原 寛・平野舟一郎・岩切一宏・関谷 博・金子和弘・福満修一郎・清水 力, 1998b, 薩摩北部域に発生した最大クラスの内陸地震, 1997年鹿児島県北西部地震被害調査研究報告書, 鹿大県北西部地震被害調査研究会, 1-13.
- Kizaki, K., 1978, Tectonics of the Ryukyu island arc, J. Phys. Earth, 26 suppl., 301-307.
- 久保寺章・表俊一郎・三浪俊夫, 1976, 大分県中部地震(1975年4月21日)の地震学的調査研究, 総括および今後の問題点, 1975年大分県中部地震の活動と被害に関する調査研究報告, 57-65.
- 国土地理院, 1999, G P S 連続観測から求めた全国の水平地殻変動速度, 地震予知連会報, 61, 555-573.
- 小西健二, 1965, 琉球列島(南西諸島)の構造区分, 地質学雑誌, 71, 437-457.
- Minakami, T., D. Shimosuru, T. Miyazaki, S. Hiraga and M. Yamaguti, 1968, The 1959 eruption of Simcoe-dake and the 1961 Imori-yama earthquake swarm, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 46, 965-992.
- Minakami, T., S. Utibori, M. Yamaguchi, N. Gyoda, T. Utsunomiya, M. Hagiwara and K. Hirai, 1969, The Ebino earthquake swarm and the seismic activity in the Kirisima volcanoes, in 1968-1969, part 1. Hypocentral distribution of the 1968 Ebino earthquakes inside the Kakuto caldera, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 47, 721-743.
- 長宗留男・中村利巳, 1986, 鹿児島西方海域における地震活動, 地震2, 39, 123-128.
- 長宗留男, 1987, 九州—琉球列島における稍深発地震とテクトニクス, 地震2, 40, 417-423.
- 長宗留男・田代秀樹, 1989, 九州下における和達—ベニオフゾーンの形状, 地震2, 42, 13-19.
- 清水 洋・馬越孝道・松尾紉道, 1993, 九州中・北部の地震活動, 地質学論集, 41, 13-18.
- 清水 洋・馬越孝道・松尾紉道, 1995, 九州西部の微小地震活動とS波偏光異方性, 月刊地球, 17, 402-405.
- 下山正一, 1998, 福岡県の活断層調査結果と今後の活動について, 第18回地盤振動地域交流会講演会配付資料, 九州産業大学.
- Shiono, K., T. Mikumo and Y. Ishikawa, 1980, Tectonics of the Kyushu-Ryukyu arc as evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow and intermediate-depth earthquakes, J. Phys. Earth, 28, 17-43.

- 多田 堯, 1993, 九州中部地方の地殻変動とテクトニクスー別府ー島原地溝の分裂拡大ー, 地質学論集, 41, 1-12.
- 露木利貞, 1969, 九州地方における温泉の地質学的研究(第5報)ー鹿児島地溝内の温泉ー特に温泉貯留体について, 鹿大理紀要(地学・生物学), 2, 85-101.
- Utsu, T., 1974, Space-time pattern of large earthquakes occurring off the Pacific coast of Japanese islands, J. Phys. Earth, 22, 325-342.

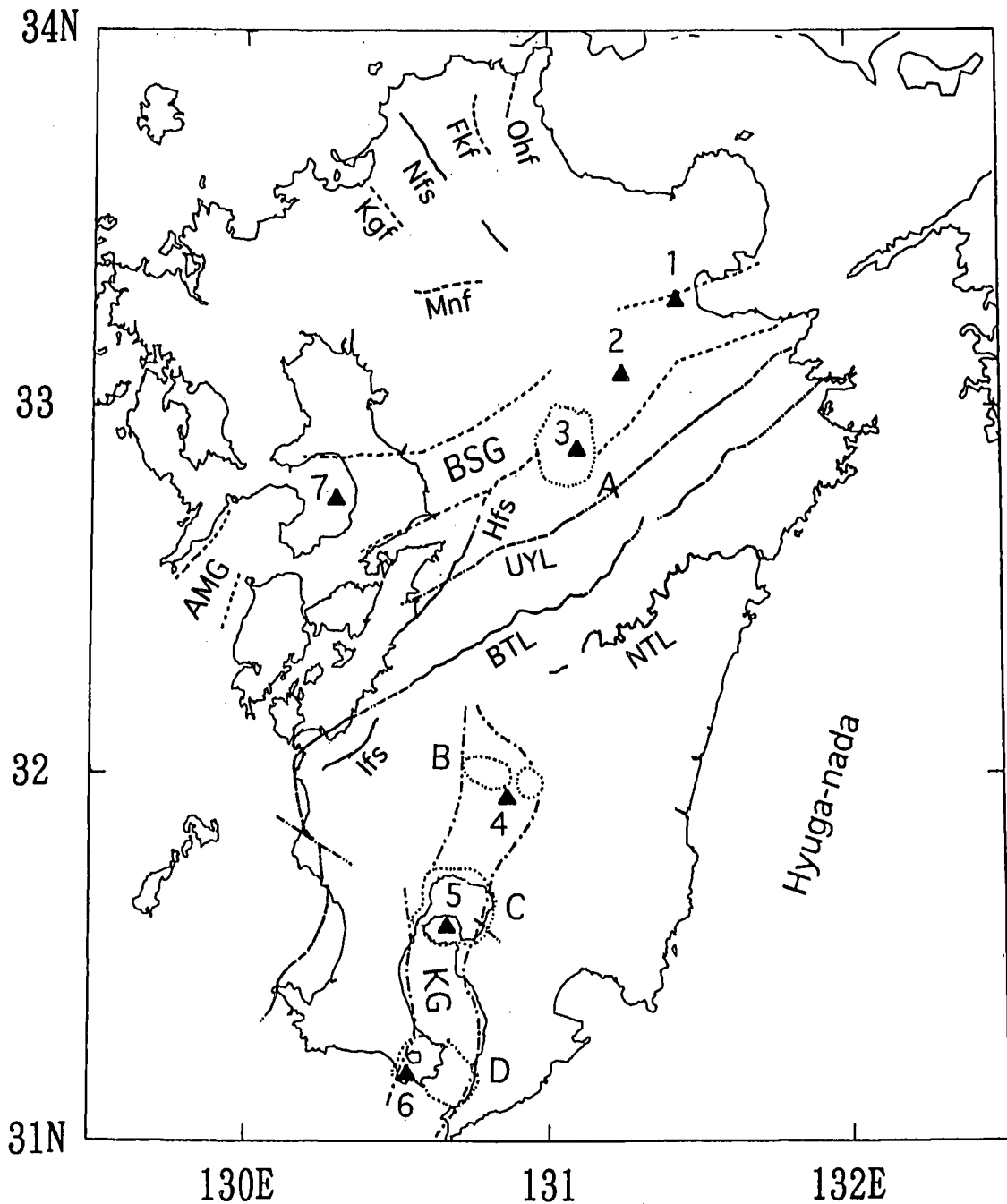


Fig. 1 Major geological structure, tectonic lines, active faults and active volcanoes in Kyushu. BSG: Beppu-Shimabara graven, AMG: Unzen-Amakusanada graven, KG: Kagoshima graven, UYL: Usuki-Yatsushiro tectonic line, BTL: Butsuzo tectonic line, NTL: Nobeoka tectonic line, Ohf: East Kokura faults, Fkf: Fukuchiyama faults, Kgf: Kego faults, Nfs: Nishiyama faults, Ifs: Futagawa-Hinagu faults, 1: Yufu volcano, 2: Kuju volcano, 3: Aso volcano, 4: Kirishima volcanoes, 5: Sakurajima volcano, 6: Kaimon volcano, 7: Unzen volcano, A: Aso caldera, B: Kakuto caldera, C: Aira caldera, D: Ata caldera.

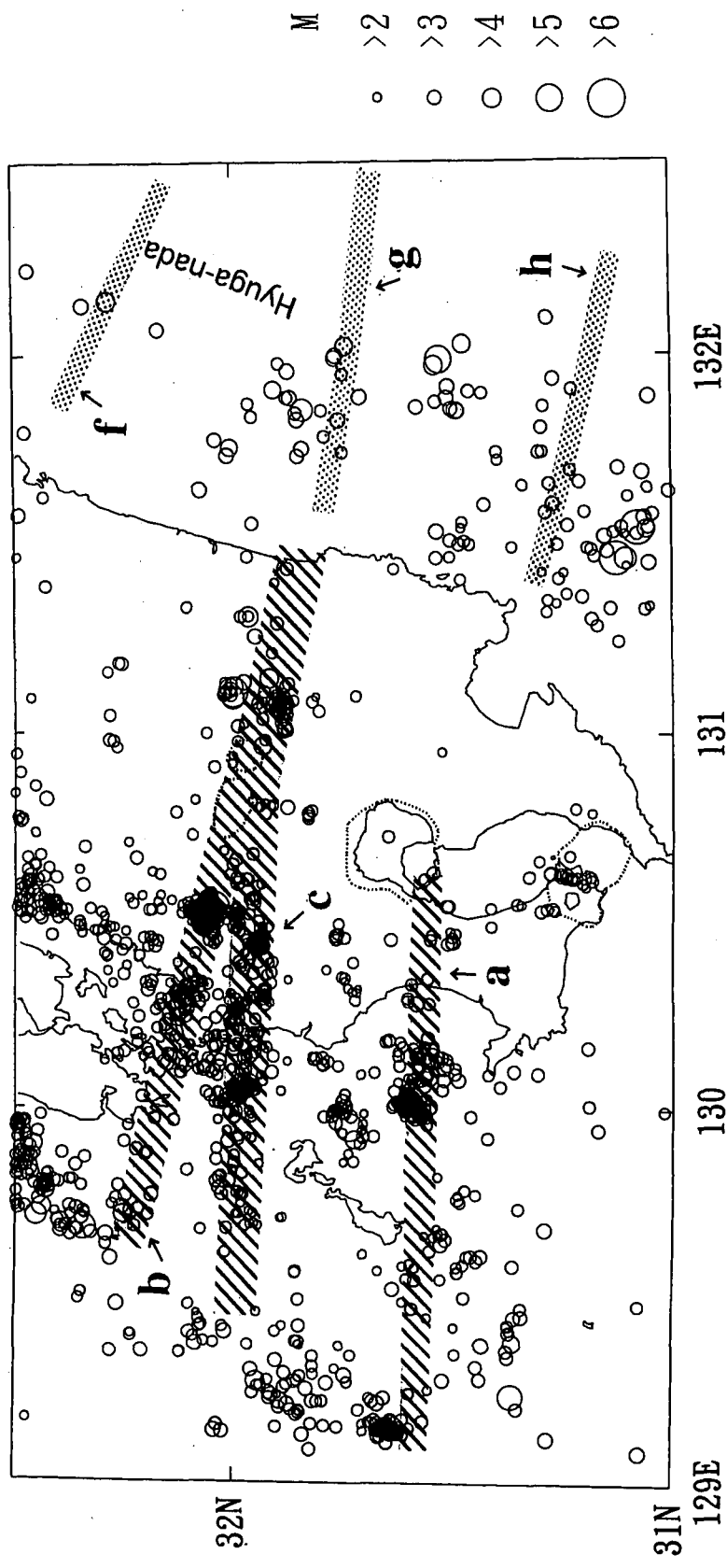


Fig. 2 Narrow seismic zones for crustal earthquakes nearly parallel to the subduction in South Kyushu. Steeply dipping left-lateral faults are expected for most of major earthquakes in the hatched areas (a, b, c). The dotted segments (f, g, h) correspond to block boundaries for Hyuga-nada earthquakes.

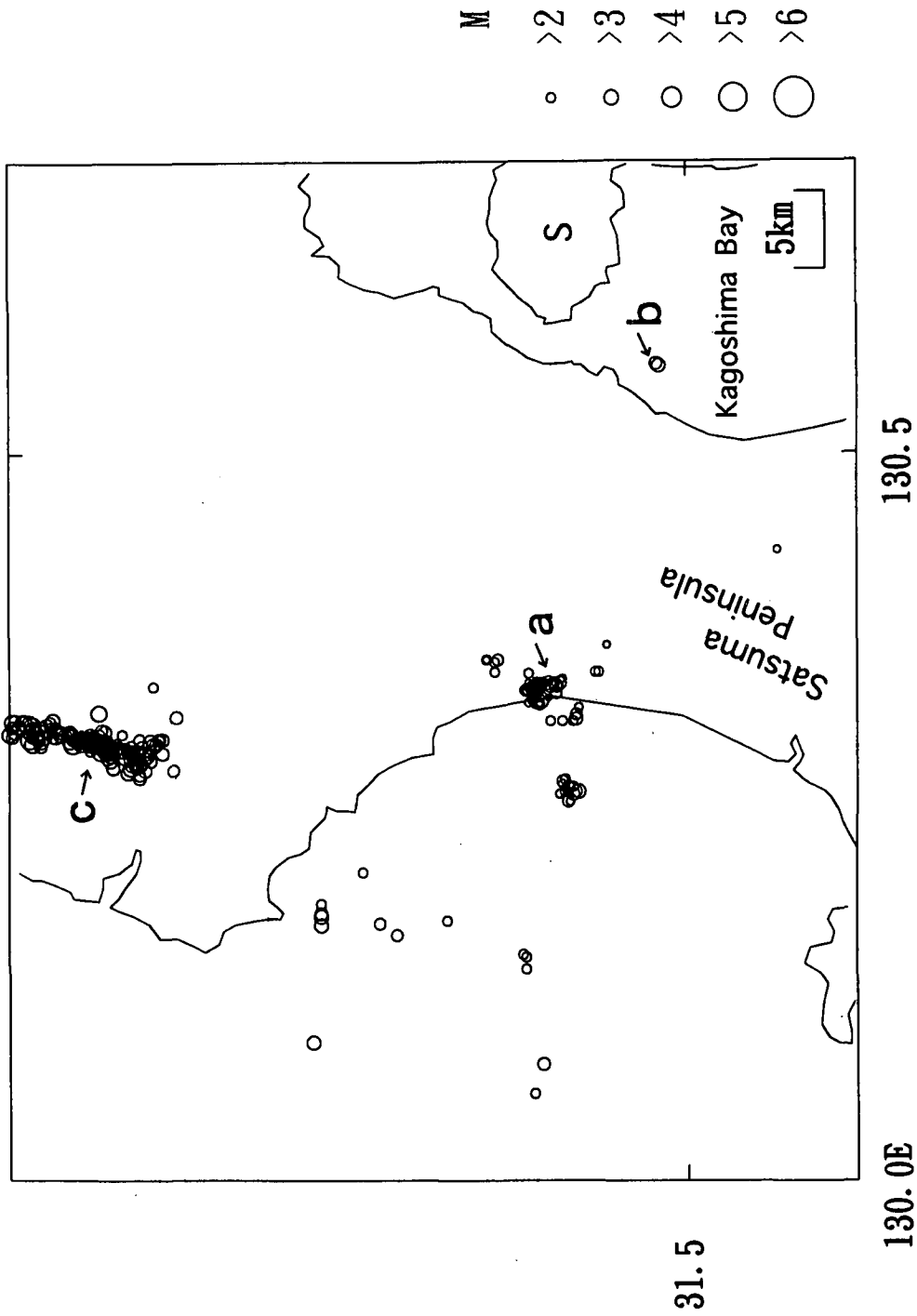


Fig. 3 Crustal earthquakes in the middle of Satsuma peninsula.
 a: Swarm ($M_{max}3.2$) from 16 through 29 July, 1997, in the coast area west of Kagoshima City. b: The 23 November 1996 events ($M_{max}3.0$) in the Kagoshima bay. c: Aftershocks of the 1997 Northwestern Kagoshima Earthquakes.

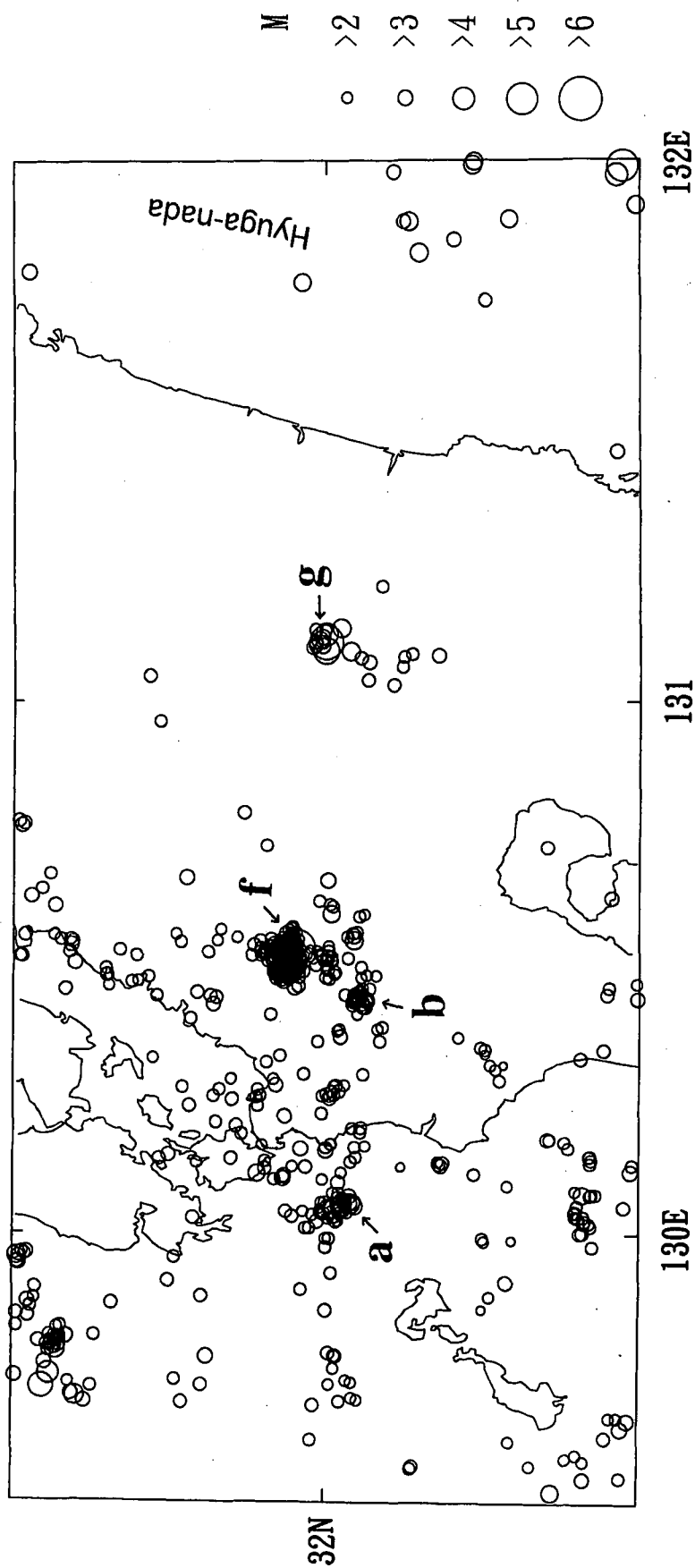


Fig. 4 Epicenters of shallow earthquakes in a northern part of South Kyushu in 1994.
 a: Events west of Akune ($M_{max}3.7$). b: Events in the east of Miyanojo ($M_{max}2.9$). f: The Northern Kagoshima Earthquake on 13 February, 1994, and its aftershocks. g: The Southwestern Miyazaki Earthquake on 7 September, 1994, and its aftershocks.

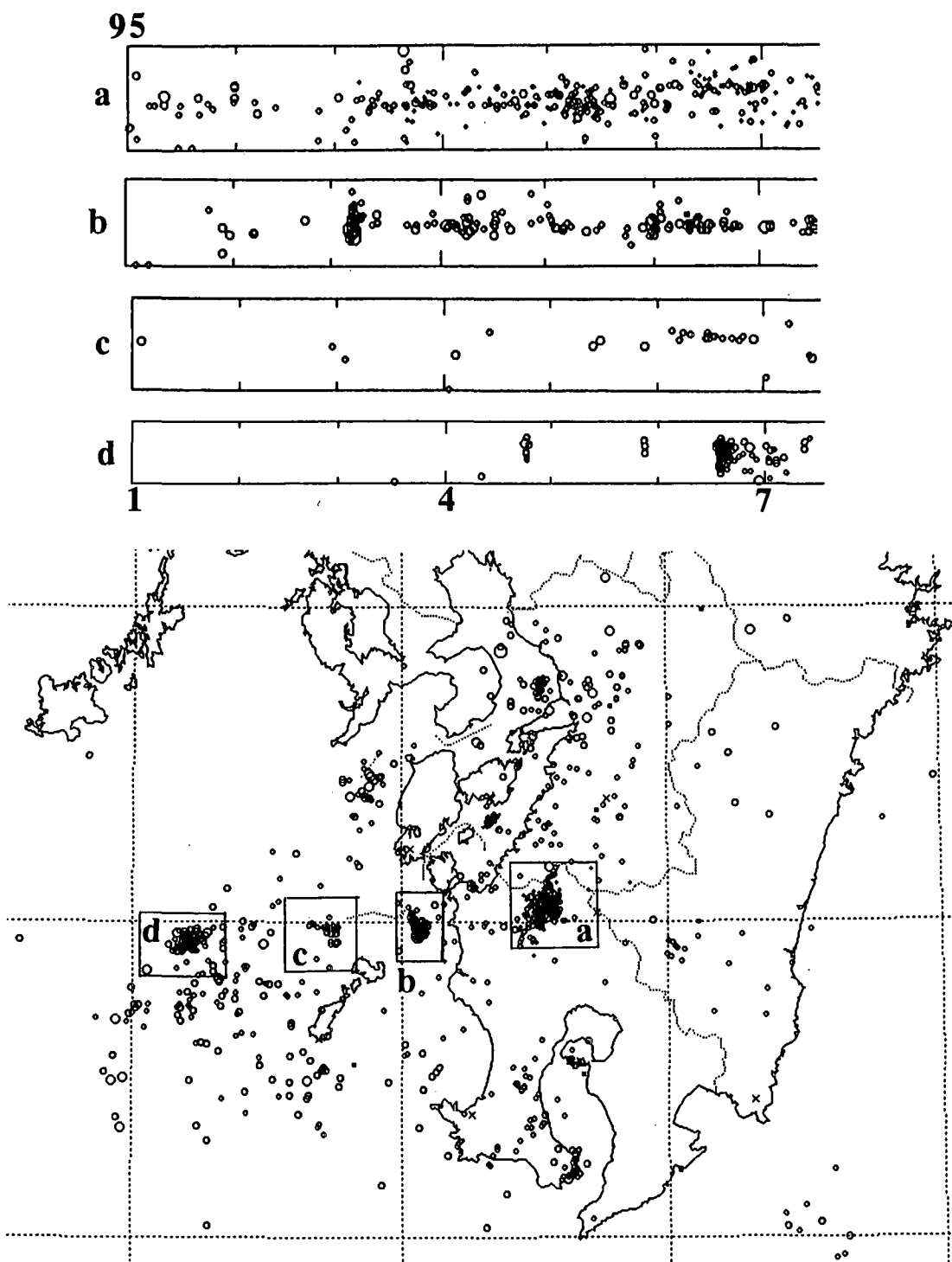


Fig. 5 Westward migration of seismic activity was observed before the 1997 Northwestern Kagoshima Earthquakes along the narrow active zone parallel to the subduction in South Kyushu. The upper figures show outbreaks of earthquakes versus time from January through July, 1995, in the areas a to d in the lower figure. a: Aftershocks of the 1994 Northern Kagoshima Earthquakes, b: swarm west off Akune (M_{max} 4.3), c: swarm