

## 薩摩半島南方沖の稍深発地震に見られる異常震度分布

著者	角田 寿喜, 後藤 和彦, 平野 舟一郎
雑誌名	鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学
巻	26
ページ	85-100
別言語のタイトル	Anomalous Seismic Intensity Distribution for an Intermediate-Depth Earthquake Occurring South-off Satsuma Peninsula, Kagoshima Prefecture, Japan
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10232/00009990">http://hdl.handle.net/10232/00009990</a>

## 薩摩半島南方沖の稍深発地震に見られる異常震度分布

角田寿喜・後藤和彦・平野舟一郎

(1993年9月8日受領)

Anomalous Seismic Intensity Distribution for an Intermediate-Depth Earthquake  
Occurring South-off Satsuma Peninsula, Kagoshima Prefecture, Japan

Toshiki KAKUTA, Kazuhiko GOTO and Shuichiro HIRANO

### Abstract

A questionnaire survey for an intermediate-depth event of  $M = 5.9$  occurring south off Satsuma Peninsula on September 23, 1992 was made to reveal anomalous seismic intensity distribution in South Kyushu and Nansei-Shoto (Ryukyu Islands).

Intensities in the fore-arc region including Tanegashima and Yakushima Islands, where relatively low intensities have been reported by JMA, decrease systematically with epicentral distance. On the other hand, intensities in the back-arc region are significantly complicated in distribution. Many people at some places in Satsuma Peninsula felt shocks comparable to those in the fore-arc region, while only a few residents perceived weak shocks in the northwestern marginal area of Kagoshima Prefecture. Shocks were also fairly weakened around the Aira caldera and most people in the neighbourhood of Kaimon-dake Volcano as well as those in the volcanic islands did not notice anything shaking. A schematic model for attenuation structure in the upper mantle in South Kyushu is proposed: the extremely high attenuation zone does not widely distribute in the back-arc region but exists immediately under the volcanic area, although a localized zone may be possible. The western marginal area including Okinawa Trough is also a zone of considerably higher attenuation.

**Key words:** Questionnaire survey, Seismic intensity, Intermediate-depth event, Attenuation structure.

## はじめに

島弧域の深発地震面上で規模の大きな地震が発生すると、highQ プレートとその上方に位置する lowQ 域の存在が原因となって異常震域現象が起こることは良く知られている (Utsu, 1966, 1967, 1968). 九州とその周辺域も例外でなく (宇津, 1969), 例えば熊本・宮崎・鹿児島 の 3 県が接する県境付近の深さ 130 km に起きた 1967 年 11 月 28 日の地震 (M6.2) では、前弧側の宮崎での震度Ⅳに対して背弧側の熊本ではほぼ等距離にありながらⅡとなり、また太平洋側に位置する高知は震央距離約 300km でもⅢであるのに、背弧側の佐賀・長崎は 120~140km で無感であった。

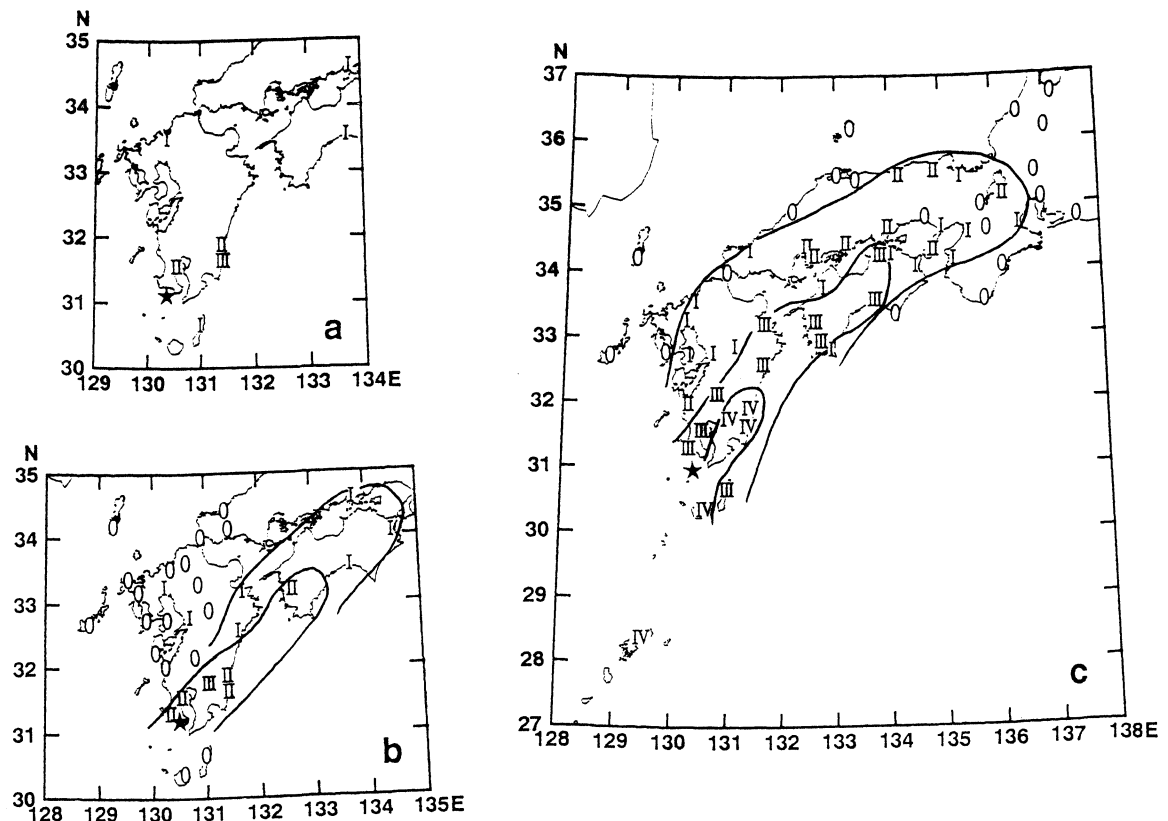


Fig. 1 Seismic intensity distributions reported by JMA for intermediate-depth events south off Satsuma Peninsula, South Kyushu: (a) M=5.9 at a depth of 160km on September 23, 1992, (b) M=5.9 at 160km on July 3, 1987, and (c) M=6.7 at 161km on May 23, 1978. The stars refer to the respective epicenters.

1992年9月23日薩摩半島南方海域に発生した稍深発地震 (M5.9) について、福岡管区气象台 (FMO) が発表した油津Ⅲ、宮崎・鹿児島・名瀬Ⅱ、福岡・種子島・高知・岡山Ⅰの震度分布においても、名瀬 (震央距離 $\Delta \approx 310$ km) および高知 ( $\Delta \approx 400$ km) と岡山 ( $\Delta \approx 520$ km) の震度は島弧域で一般的に見られる異常震域現象として説明できそうである (Fig. 1a). しかし種子島 ( $\Delta \approx 80$ km) の震度Ⅰは太平洋側に位置する観測点としては相対的に小さく、また火山フロントより背弧側にある福岡 ( $\Delta \approx 270$ km) の震度Ⅰは、熊本 ( $\Delta \approx 200$ km) が無感であることを考慮すれば相対的に大きすぎる。同じ領域に発生した1987年7月3日の地震 (H160km, M5.9) でも類似の震度分布が観測され (福岡管区气象台, 1991), このときは都城Ⅲ、宮崎・油津Ⅱに対し

て種子島では無感、また背弧側の熊本・佐賀でⅠを観測した (Fig. 1b). 顕著な異常震域が観測された1978年5月23日の地震 (H161km, M6.7) においても、種子島は背弧側に位置する枕崎・鹿児島・人吉と並んでⅢであった (Fig. 1c; 気象庁, 1983).

前弧域の種子島で相対的に震度が小さく、背弧域でばらつきを示すこのような震度分布はプレート効果による異常震域現象とは若干様相が異なっている。薩摩半島南方海域は稍深発地震活動がきわめて活発で、深さ177km から119km まで開闢岳に向かって地震がほぼ鉛直方向に並び、プレート断裂や火山エネルギー供給との関連が推定されている領域である (角田ほか, 1991). したがって、highQ プレートとその上方に位置する lowQ 域によって異常震域現象を大局的に説明できるとしても、火山活動の活発な九州では減衰構造が複雑である可能性がある。

九州—南西諸島弧の複雑な上部マントル構造の証拠ともなりうるこれらの異常震域現象を確かめるために、1992年9月23日薩摩半島南方海域に発生した稍深発地震 (M5.9) について太田ほか (1979) の質問を簡略化したアンケート用紙を作成し、九州南部および南西諸島域を対象に調査をおこなった。アンケート用紙の配付と回収は、高等学校および中学校の理科担当教諭や市役所の職員等に依頼した。

### 震度の評価

調査票は、太田ほか (1979) の附録に示されたものが基本である。ただし震度は最大Ⅲ程度なので、屋外に居る場合の質問項目は最初から除外した。また項目11「地震の時、電灯とかスイッチのひも、カレンダーなど、吊るしてあるものがゆれ動くのを認めましたか」に対し、用意された選択肢3「かすかにゆれた」と4「かなり激しくゆれた」とのギャップが他に比して大きい感じを受けるため、「はっきりゆれるのが認められた」という選択肢を挿入した。ただし震度係数は太田ほか (1979) の表から2つの選択肢に対する値の中央値とした。同様の挿入は項目12 (「台所の洗い桶、…」)、項目14 (「すわりの悪いもの、…」)、項目16 (「家 (建物) 全体としてのゆれ…」) に対してもおこなった。

岡田 (1992, 私信) によれば、震度調査用アンケート票から震度を算定する際、項目19および26~28を除外し、項目11~29を屋内に関する事項、項目30~32を屋外事項として扱う。回答者が地震を「感じた」にマークした場合、項目11~29の選択肢に指定された震度係数を積算し、項目7~10の回答に応じて与えられる条件係数で割る。これに項目30~32に対する震度係数の和を加え、有効回答項目数で割ることによってアンケート震度を算定する。すなわち、k 番目の回答者に対するアンケート震度は

$$I_Q(k) = \left\{ \sum_{i=1}^{15} f_i S_{in}(i) / C(k) + \sum_{j=1}^3 f_j S_{out}(j) \right\} / N_{ef} \quad (1)$$

ここで  $C(k)$  は k 番目の回答者に対する条件係数、 $S_{in}(i)$  は i 番目の屋内事項、 $S_{out}(j)$  は j 番目の屋外事項に対する震度係数である。各事項に対する回答が有効であるとき  $f$  は 1、無効であるときは 0 であり、屋内事項と屋外事項に対する有効回答数の和が  $N_{ef}$  である。

気象庁震度階への換算は

$$I_{JMA}(k) = 2.958 \times \{I_Q(k) - 1.456\}^{0.547} \quad (2)$$

が用いられ、地域毎の震度はその平均として、

$$\bar{I}_{JMA} = \sum_{k=1}^M I_{JMA}(k) / M \quad (3)$$

によって求められる。ここでMはその地域の有効回答者数、すなわち、地震を「感じた」者と「感じなかった」者の和である。

ところで、震度係数は家屋の揺れ（項目16）に対する回答分布を基準に、他の項目の回答分布がこれに一致するように与えられている（太田・後藤，1974；太田ほか，1979；太田・鏡味，1987）。しかし、いくつかの項目に関しては機械的に求めた平均値で与えられている場合があり、太田・鏡味（1987）は項目15（重い家具の動き）の選択肢1「動かなかった」に対する数値2.266を一例として挙げている。地震を感じたが家のゆれは認められなかった場合の係数が1.0であるから、これは過大評価の可能性が高い。項目11と12の選択肢2「見たが動きは認められなかった」に対する係数0.339と1.395，項目21（地震に対する驚き），項目22（こわさの程度）および項目23（地震時の行動）におけるそれぞれの選択肢1，「全然驚かなかった」に1.561，「なんとも思わなかった」に1.759，「なにもする必要を感じなかった」に1.868，また項目25（地震のとき動いていた人）の「行動に支障を感じなかった」に2.284を与えたことも同様であろう。さらに項目18（ゆれている時間）の「非常に短かった」に負の係数（-0.076）を与えたことも理解できない。

太田ほか（1979）による条件係数  $C(k)$  は0.98~1.10の範囲にあるから、算定式(1)を考慮すれば、アンケート震度は震度係数の平均と考えて差し支えないであろう。したがって各選択肢に対する震度係数は回答者が感じた震度に対応することになる。一方気象庁震度階の最大は7であり、したがって換算式(2)から  $I_0$  の上限は6.285となる。ゆえに(2)式を導く際に用いた資料が  $2 \leq I_{JMA} \leq 5$  に対するものであることを考慮しても、項目17（建物の被害）に対して9を越える係数が与えられているのは問題であろう。

今回の地震は最大震度がⅢ程度であり質問項目17は無関係である。しかしその他に関しては回答例があり、特に項目15および25は過大評価を与える可能性がある。震度係数については様々な震度階級の定義を参考にして再評価も試みたが、「震度係数をむやみに変えることは混乱をもたらすだけ」という岡田（1992，私信）の指摘もあり、また不相当と考えられる震度係数を削除しても大勢に変化はなかったことから、ここでは太田ほか（1979）の震度係数をそのまま用いる。

### 震源要素とメカニズム

南西島弧地震火山観測所（NOEV）の長屋山（CHOA）・桜島（SAKR）・甕島（KOSK）・串間（KUSM）・西都（SAIT）の5観測点とFMOの観測データを用いて再決定された震源は、JMA震源に比べて震央で5kmほど西北西側に位置し深さは10kmほど浅くなる（Table 1）。またFMO震源はJMA震源に比べて、深さに変わりはないものの西北西側に偏り、再決定された震源はFMO震源よりさらに西北西側に位置する。FMO震源に比してJMA震源が東側に位置しかつ深くなることはすでに高橋（1987）が指摘し、近傍観測点の効果がJMA震源で相対的に小さくなるのが原因とされている。再決定された震源がJMA震源等に対し全く同様の傾向を示すことは、震源の北側あるいは北西側に位置する近傍観測点CHOAおよびKOSKの存在が大きく寄与することを示唆している。

Table 1. Focal parameters estimated by various observatories for the intermediate-depth event on September 23, 1992.

origin time (JST)	latitude (N)	longitude (E)	depth (km)	
22h38m37.99s $\pm$ 0.10s	31° 07.2' $\pm$ 0.6'	130° 18.1' $\pm$ 1.0'	151	NOEV
37.5 s $\pm$ 0.2 s	31° 06.4' $\pm$ 0.7'	130° 19.7' $\pm$ 1.4'	160.8 $\pm$ 2.3	FMO
37.5 s	31° 05.9'	130° 21.3'	160.4	JMA

Table 2. Focal mechanism parameters for the intermediate-depth events occurring south off Satsuma Peninsula, Kyushu.

Date	Depth (km)	M	Plane-1		Plane-2		P-axis		T-axis		Ref.
			Str.	Dip	Str.	Dip	Azm.	Plg.	Azm.	Plg.	
Sep. 23, 1992	151	5.9	265°	45°	165°	80°	114°	38°	223°	22°	NOEV
	160	5.9	245°	46°	16°	56°	129°	5°	229°	63°	JMA
Mar. 4, 1960	140	6.5	229°	30°	356°	71°	103°	22°	234°	57°	SHI
Jan. 9, 1963	157	5.7	225°	27°	5°	70°	103°	24°	244°	60°	TKA
Aug. 6, 1964	158	5.2	230°	45°	15°	50°	122°	3°	220°	70°	TKA
July 3, 1967	178	5.3	230°	40°	5°	60°	115°	12°	228°	62°	TKA
May 23, 1978	161	6.7	233°	17°	33°	74°	126°	29°	298°	60°	SAT
July 3, 1987	160	5.9	353°	0°	173°	90°	83°	45°	263°	45°	FMO

Str., strike; Azm., azimuth; Plg., plunge; Ref, reference. SHI, Shiono (1977); TKA, Takahashi et al. (1987); SAT, Satake (1984).

September 23 1992

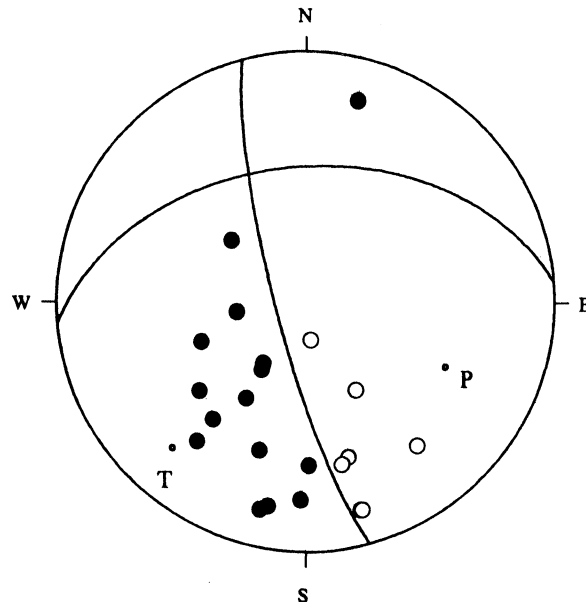


Fig. 2 Focal mechanism estimated from a data set of NOEV and FMO stations for the event on September 23, 1992 (lower hemisphere). The closed and open circles refer to compressional and dilatational initial motions of P waves, respectively.

薩摩半島南方海域は M3クラスの稍深発地震活動のきわめて活発な領域であり、1991年だけを取上げても、北緯30~33°の範囲に含まれる九州とその周辺域の深さ100km以上に震源が推定された地震55個のうち65%はこの領域にある(角田ほか, 1992)。九州南部から四国におよぶ広い範囲で有感となるような M6クラスの地震も10年に1回程度の割合で発生する。これまで1960年3月4日の地震をはじめ6個についてメカニズム解が求められ、いずれも逆断層成分が卓越して T 軸は西側に傾き、フィリピン海プレートの沈み込み方向に引き伸ばされるような力によって生じた down-dip extension 型と推定されている (Table 2)。JMA が今回の地震について推定した解も似たような傾向にある。しかし NOEV のデータを加えとかなり異なったメカニズムが推定される (Fig. 2)。震源要素は再決定されたものを用いているが、我々の解では Plane-1 に対する制約は乏しいものの Plane-2 の自由度は小さく、しかも JMA の観測データをほとんど矛盾なく説明できる。

### 有感比率の地理的分布

九州南部一南西諸島域における調査対象地点の地理的分布を考慮しながら、高等学校または中学校の理科担当教員を中心として計59機関にそれぞれアンケート用紙20枚を送付し回収を依頼したが、協力を得られたのは42機関であった(付図および付表参照)。地震時に回答者がいた場所の記載がないもの、あるいは屋外にいたもの等を除く有効回答数は452通あり、市町村単位にまとめて平均震度を求めることとした。ただし、回答数が極端に少ない場合は隣接市町村と一括して表示することとし、例えば肝属郡申良町から寄せられた回答2通、東申良町・吾平町・高山町からの各1通は、申良町の5通として処理した。調査がおこなわれた時期は地震発生から既に半月が過ぎていたが、人々が家に落ち着く祭日の22時38分という時間帯に地震が発生し、また有感地震が少ない地域ということが幸いして、地震を感じた住民は強く記憶に残っていたようである。しかし、有感地震が頻繁に起る奄美大島では、調査の数日前にも震度Ⅱの地震があって印象が薄れたためか、名瀬測候所で震度Ⅱを観測したにもかかわらず、名瀬市では有効解答者18名のうち1名のみが有感、周辺町村でも奄美大島南端部瀬戸内町の1名を除き7名が無感と回答した (Table 3)。

火山フロントより前弧側に位置する大隅半島では、震度の大きさを反映して有効回答数に占める有感比率が高くなっている。相対的に震源に近い肝属郡田代町と申良町および鹿屋市・垂水市・串間市から寄せられた回答はすべて有感、曾於郡有明町も1名を除いて有感であり、FMO が震度Ⅲを報告した日南市からは25名の回答者中20名が有感と答えた (Table 3)。FMO 報告で相対的に震度が小さかった種子島では、北部域(西之表市)で回答者41名中38名、中部域(中種子町)で16名全員、南部域(南種子町)では13名中11名が有感と答え、屋久島でも北西部(上屋久町永田地区)で9名中8名、南部(屋久町尾之間~栗生地区)で9名全員が有感と答えている。したがって有感と答えた比率の高さで見ると、種子島と屋久島も、震源に近い大隅半島域の観測点に比べて遜色ない。ただし、種子島南部域島間の協力者の居住地周辺ではほとんどの者が地震を感じておらず、また北部域の1中学校で3年生20名中地震を感じた11名にアンケートを書かせたとのコメントがあり、場所により顕著な違いのあったことが伺える。

火山列に沿って震源域から南方へ連なる南西諸島では、屋久島の南西に位置する口之島で4名中1名、諏訪之瀬島で6名中1名が有感と答えた以外、すべて無感であった。震央距離40~50kmの薩摩硫黄島および黒島から計11通、約70kmの口永良部島から6通、さらに南方の平島・

Table 3. Seismic intensity distribution estimated by a questionnaire survey for the intermediate-depth event on September 23, 1992. Note the difference in distribution between fore-arc and back-arc regions. The numbers of persons feeling the shock and available answers in a locality are listed in the last column. Epicentral distance in the second column is roughly counted in ten kilometers.

fore-arc region				back-arc region			
locality	$\Delta$ (km)	intensity	felt/ans.	locality	$\Delta$ (km)	intensity	felt/ans.
(South Kyushu)				(South Kyushu)			
Tashiro-cho	50	2.82 ± 0.59	21/21	Makurazaki City	20	1.66 ± 1.30	3/ 4
Kanoya City	60	2.93 ± 0.49	11/11	Kawanabe-cho	30	2.92 ± 0.72	4/ 4
Tarumizu City	60	2.75 ± 0.53	9/ 9	Kaseda City	30	0.00	0/ 3
Kushira-cho	70	2.85 ± 0.35	5/ 5	Yamakawa-cho	30	0.39 ± 0.91	3/18
Ariake-cho	80	2.58 ± 1.19	6/ 7	Kagoshima City	60	1.10 ± 1.23	9/17
Kushima City	100	2.74 ± 0.44	10/10	Ijuin-cho	60	2.53 ± 0.68	19/19
Miyakonojo City	100	1.88 ± 1.18	17/22	Sendai City	80	0.29 ± 0.74	4/24
Nichinan City	120	1.59 ± 1.21	20/25	Kajiki-cho	80	0.43 ± 0.92	5/19
Kiyotake-cho	130	1.15 ± 1.08	11/18	Kokubu City	80	1.61 ± 1.60	4/ 7
Miyazaki City	140	1.29 ± 1.23	6/ 7	Makizono-cho	90	1.72 ± 1.19	9/12
(Nansei-Shoto)				Miyanojo-cho	90	0.30 ± 0.72	2/ 9
Nishino-omote City	80	2.42 ± 1.00	38/41	Izumi City	110	0.00	0/ 5
Nakatane-cho	90	2.53 ± 0.43	16/16	Nagashima-cho	120	0.00	0/ 6
Minamitane-cho	100	2.07 ± 1.22	11/13	Kobayashi City	120	1.51 ± 1.19	9/14
Kamiyaku-cho	80	2.44 ± 1.05	8/ 9	(Nansei-Shoto)			
Yaku-cho	100	2.24 ± 0.45	9/ 9	Iwo-jima	40	0.00	0/ 4
Naze City	310	0.11 ± 0.48	1/18	Kuro-shima	50	0.00	0/ 7
Sumiyou-son	330	0.16 ± 0.46	1/ 8	Kuchinoerabu-jima	70	0.00	0/ 6
				Kuchino-shima	130	0.47 ± 0.94	1/ 4
				Taira-jima	180	0.00	0/ 7
				Suwanose-jima	180	0.44 ± 1.08	1/ 6
				Akuseki-jima	200	0.00	0/ 2
				Takara-jima	240	0.00	0/ 5



悪石島・宝島から計14通の解答が寄せられ、特に硫黄島・口永良部島・悪石島では有線放送や口答でも尋ねたが、地震に気づいた者は皆無であったという (Table 3)。ただし、悪石島では22時40分頃の時間帯には島民 (計57名) の8割はすでに就寝しているとコメントが付されている。就寝時間が早いのは高齢者の多い小さな離島に共通して見られる傾向であるが、このような状況では振動が小さければ目が覚めなかった可能性もある。

これに対し、震源の北方にあって火山列より背弧側に位置する薩摩半島の震度分布はきわめて複雑である。すなわち、枕崎市の4名中の1名を除き、川辺郡川辺町周辺 (4名) と日置郡伊集院町周辺 (19名) の回答者全員が有感と答える一方で、震源に近い揖宿郡山川町周辺 (指宿市を含む) の18名中15名、および加世田市の3名すべてが無感である。伊集院高校教諭沢田 (1993, 私信) によれば、伊集院町妙円寺団地ではほとんどの生徒が地震を感じたが、串木野市・市来町・吹上町から来ている生徒は無感が多かった。また開聞岳北方に隣接する揖宿郡頰娃町の頰娃高校では、授業の折に数クラスの生徒に尋ねたが地震を感じた者は皆無であったという (永正, 1992, 私信)。一方、FMO が震度Ⅱを報告した鹿児島市では17名中9名、川内市周辺で24名中僅かに4名、薩摩郡宮之城町では9名中の2名のみが有感であった。また火山域の影響が大きいと予想されるにもかかわらず、霧島山の北東部に隣接する小林市 (加久藤カルデラ内に位置するえびの市を含む) では14名中9名、霧島山南麓の始良郡牧園町 (隼人町を含む) で12名中9名が有感と答えている。調査票の配付に際し、一部に、地震を感じた者のみを対象としたという問題はあるものの、日置郡伊集院町の回答数は19通あり、かなり多くの住民が有感であったことがわかる。それに比べて有感比率の低い地域では、地震を感じた者を見つけようとしてもほとんどいなかった。

### アンケート震度分布

市町村を単位として式(1)~(3)を用いて計算された最大震度は、大隅半島の鹿屋市における  $2.9 \pm 0.5$  であり、FMOが震度Ⅲを報告した日南市 (油津) は  $1.6 \pm 1.2$  であった (Table 3, Fig. 3a) [標準偏差 (不偏推定値) は標本数が十分ないため統計的意味は持たないが、ここでは分布のばらつきの大きさを示すパラメータとして用いる]。薩摩半島域で目につくところは川辺郡川辺町の  $2.9 \pm 0.7$  と日置郡伊集院町の  $2.5 \pm 0.7$  である。ただし先にも述べたように、ここではアンケートが「地震を感じた」者を対象におこなわれた点も考慮すべきであろう。ちなみに FMO が震度Ⅱとし、筆者達もその程度の揺れを感じた鹿児島市は  $1.1 \pm 1.2$  とばらつきが大きく、回答の分布は無感から2.95におよんだ。

前弧側に位置する大隅半島域における震度は、上記の鹿屋市  $2.9 \pm 0.5$  を始めとして、田代町  $2.8 \pm 0.6$ 、串良町  $2.9 \pm 0.4$ 、垂水市  $2.8 \pm 0.5$ 、有明町  $2.6 \pm 1.2$ 、串間市  $2.7 \pm 0.4$  と、震央に近い薩摩半島南端部の枕崎市等に比して相対的に大きい。しかも背弧側の薩摩半島域とは違って調査地点による震度分布のばらつきは小さく、基本的には震央距離増加に伴う逓減を表している (Fig. 4)。先にも記したように、有感比率の高さは、「地震を感じた」者のみを対象に配付した危険性を含んでいるが、大隅半島域の回収率が高く震度分布にばらつきが小さいことは、実際に「地震を感じた」者が多かったことを示すものと考えられよう。

FMO によって「異常に小さい震度」が報告された種子島は、1947~1970年の震度観測 (気象庁地震課, 1971) を見ても、有感地震のきわめて少ない観測点である。福岡管区气象台 (1991) による1984~1990年および福岡管内有感地震観測表による1991年以後の観測データを見れば、最も

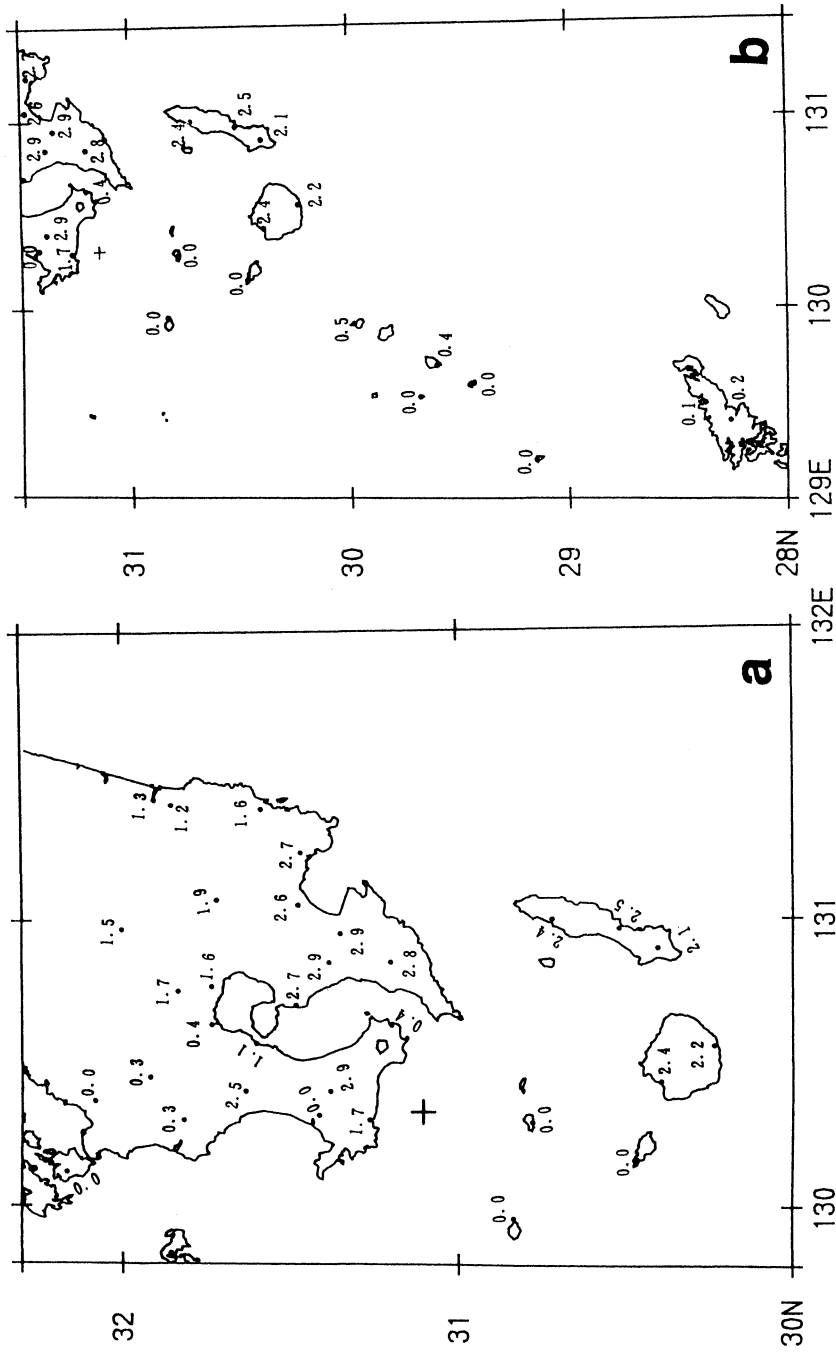


Fig. 3 Seismic intensity distributions estimated from a questionnaire survey for the event on September 23, 1992. (a) the region of South Kyushu, inclusive of Tanegashima and Yakushima Islands, and (b) the Nansei-Shoto region.

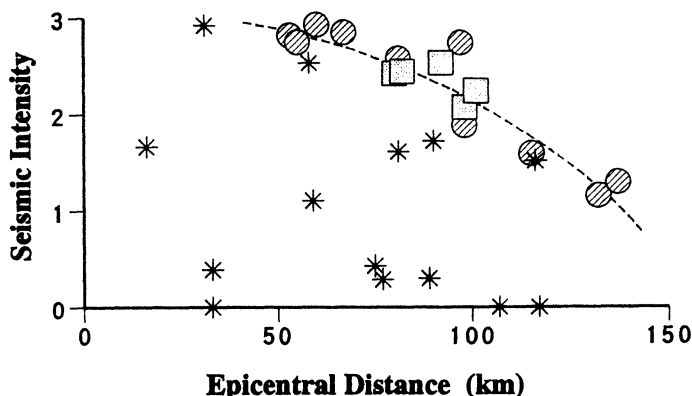


Fig. 4 Seismic intensity versus epicentral distance for the event on September 23, 1992. The broken curve shows an approximated relation of intensities with distance in the fore-arc region: the shaded circles refer to intensities in South Kyushu and the squares to those in Tanegashima and Yakushima Islands. In the back-arc region in South Kyushu, intensities shown with the asterisks are noticeably scattered.

回数の多かったのは1988年であるが、この時でも震度ⅡとⅠがそれぞれ2回であり、1985、1987、1989および1991年には有感地震は皆無であった。これに対し屋久島では、測候所が上屋久町一湊地区にあった時代には震度Ⅳを含むかなりの数の有感地震が観測されながら、屋久島空港に移設後は1985～1986年および1991～1992年に震度Ⅰが各年に1回、1987～1989年は皆無、1990年は震度Ⅲ2回、Ⅱ1回と激減する。屋久島における震度が、Fig. 1cでは前弧域の都城・油津・宮崎と並んでⅣが観測され、Fig. 1bではゼロとなった顕著な違いはその反映である。アンケート調査によって推定された種子島と屋久島の震度2.1～2.5は、前弧側領域の地点に対する震度～震央距離曲線上にのる (Fig. 4)。従って種子島と屋久島で観測された“異常に小さい震度”は、観測点固有の地盤特性であると結論される。

南西諸島域の火山島においては、震央距離130kmの口之島と180kmの諏訪之瀬島で各1名が吊るしてあるものの「かすかなゆれ」と家全体の「わずかなゆれ」を認めた以外、住民のほとんどは無感であった。震度 $2.4 \pm 1.1$ と推定された上屋久町永田地区の西方20kmほどに位置する口永良部島では、永田地区より10kmほど震央に近いにもかかわらず、地震を感じた者は見つからなかった。震央距離40～50kmの薩摩硫黄島および黒島でも同様であった。原因のひとつとしてメカニズム (Fig. 2) の効果も考えられるが、ヌル軸 (方位 $346^\circ$ 、傾斜 $43^\circ$ ；下半球投影) の付近に位置する屋久島で観測された震度2.2～2.4は説明できない。

一方薩摩半島域では、震央距離20～30kmにあって阿多カルデラ内の活発な地熱地帯に属する揖宿郡山川町周辺では $0.4 \pm 0.9$ 、開聞岳近傍に位置する顛娃町でも地震を感じた者がほとんど見つからないのに、加久藤カルデラと霧島火山の影響が考えられる小林市 (えびの市を含む) では、震央から120km隔たっても $1.5 \pm 1.2$ が観測された。また始良カルデラ周縁部にあって火山フロント直上付近に位置する始良郡加治木町 (始良町を含む)、始良郡牧園町 (隼人町を含む) および国分市では、震央距離80～90kmでそれぞれ $0.4 \pm 0.9$ 、 $1.7 \pm 1.2$ および $1.6 \pm 1.6$ であった。したがって、薩摩半島域では火山周辺域であるからといって必ずしも震度が異常に小さくなる訳ではないことに注目すべきであろう。

火山島に地震を感じた者がほとんどいないのは、火山体そのものの構造に原因があるか、ある

いは地殻と上部マントルの減衰の大きな領域に火山が存在することを示唆する。火山体が何枚もの溶岩流と火山灰層の重なりで構成されるとすれば、火山灰層が一種のクッションとなって振動を吸収する可能性がある。これが主たる原因であれば、震源の深い地震のみならず浅い地震についても、震度は“異常に小さくなる”はずである。火山島での震度観測はおこなわれていないが、測候所のある阿蘇山と雲仙岳について見れば、宮崎・延岡・油津・大分・熊本で震度Ⅳを観測した1984年8月7日の日向灘北部地震（H33km；M7.1）における震度は、都城・鹿児島・人吉・日田・佐賀・福岡と並んでともにⅢであったし、宮崎で震度Ⅴを観測した1987年3月18日日向灘中部地震（H48km，M6.6）では、阿蘇山は油津・都城・延岡・人吉・熊本・大分・佐賀とともにⅣ、雲仙岳は日田・福岡と同じくⅢを観測した（福岡管区気象台，1991）。また薩摩半島南方海域の稍深発地震においても、Fig. 1cに見るように、阿蘇山と雲仙岳では熊本・福岡・佐賀と同じく震度Ⅰを観測している。したがって、火山域の波動減衰の主たる原因は地盤効果ではないと考えられる。

薩摩半島域の震度分布を考慮すると、前弧側に比べて背弧側は相対的に震度が小さくなる傾向は認められるものの、背弧域における火山フロント近傍の減衰の大きさにはばらつきがあり、平均的減衰域の中にとりわけ大きな減衰域が存在すると言えそうである。おそらく減衰の大きな領域は火山直下域に集中的に存在する。トカラ列島は火山島で構成されるため、全域の震度が一律に小さくなっているように見えるが、減衰域はおそらく火山直下域に限定されたものであろう。背弧側火山フロント近傍の減衰域が局所的存在ならば、熊本では無感なのに、遠方の福岡や佐賀で時折有感となることも説明できる。

九州南部の西縁域にあって火山との直接的かかわりはないと考えられる川内市および薩摩郡宮之城町ではともに $0.3 \pm 0.7$ 、加世田市、出水市および出水郡長島町ではすべて無感であった。沖縄トラフ域における震度観測は欠如しているが、NOEVの観測点阿久根（AKNE）および甑島（KOSK）では薩摩半島南方沖の稍深発地震が大きな減衰を受けることは従来から知られている（角田ほか，1991）。先に紹介した1984年8月7日の日向灘北部地震（H33km）では、都城・鹿児島・人吉・阿蘇山・日田・雲仙岳・佐賀・福岡で震度Ⅲが観測されながら、九州西縁域の枕崎・牛深・長崎はⅠであったし、熊本・佐賀など広範囲にわたって震度Ⅳが観測された1987年3月18日の日向灘中部地震（H48km）でも、日田・福岡・雲仙岳のⅢに対し、福岡より震源に近い牛深はⅡ、阿久根Ⅰ、長崎は0であった（福岡管区気象台，1991）。一方、鹿児島・宮崎・熊本3県が接する領域の地殻浅部に発生した1968年えびの地震（M6.1）では、震度Ⅳは阿久根・枕崎・宮崎・延岡、Ⅲは鹿児島・油津・熊本・島原・佐賀・大分と、Ⅲ～Ⅳの領域は九州西縁部を含んでほぼ同心円状の広がりを示す（宮崎県総務部消防防災課，1969；気象庁，1983；宇津，1969）。これに対し1928年6月3日の九州西方沖地震（M6.4）では、鹿児島市で震度Ⅴが観測されながら、火山フロントを越えた九州東部域は無感である（気象庁，1983；長宗・中村，1986）。長宗ほか（1985）および長宗（1988）は、日向灘に発生する地震において、九州では等震度線がほぼ南北方向に並び、西部域の等震度線間隔が非常に狭くなることを指摘している。火山フロント上で発生した浅発地震の波動エネルギーは九州西縁部にも広がるのに、沖縄トラフ域に生じた地震では火山フロントで減衰するという顕著な差違は、九州西縁～沖縄トラフ域の地殻内の減衰が大きいことを示すと考えられる。南方域の稍深発地震を除けば九州西方域にはマントルに発生する地震が欠如するため、マントル中の減衰構造に関する比較はできないが、地殻熱流量が大きいことを考慮に入れば、マントルについても地殻と同様の関係にあると考えるのが妥当であろう。

九州西縁～沖縄トラフ域の減衰の大きさの程度を火山直下部と比較するためにNOEV観測網に

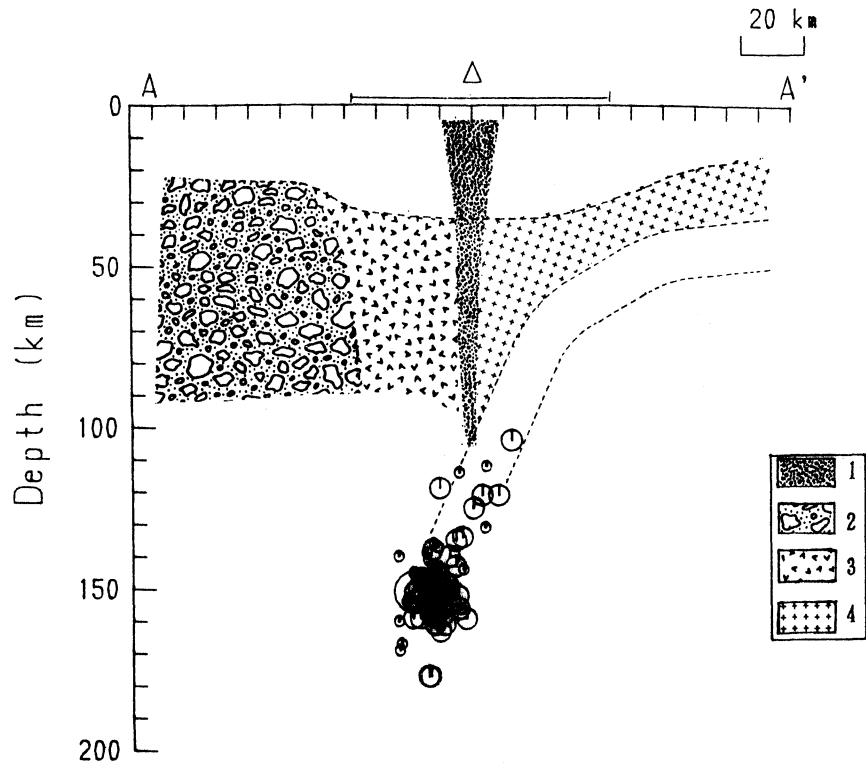


Fig. 5 A schematic model for attenuation structure in the upper mantle in South Kyushu. Attenuation: 1, extremely high; 2, very high; 3, rather high; 4, low. Circles are vertical projections of the foci of intermediate-depth earthquakes occurring in a region south off Satsuma Peninsula. The seismic plane of about 20 km thick enveloped with two broken lines is estimated from a WNW-ESE narrow region including Kirishima Volcanoes. The triangle represents the volcano of Mt. Kaimon-dake and the extent of the land area in South Kyushu is shown by a horizontal line along the surface.

おける稍深発地震の波形記録を較べて見てもシステムや地盤条件の違いが大きく影響しており、現段階で結論を下すのは難しいが、KUCH や SAKR では、相対的に規模の大きな地震以外、薩摩半島南方海域の稍深発地震を検出できないのも確かである。火山は地盤条件の制約から地表設置型では地震計の感度が上らないことを考慮する必要があるとしても、火山直下部がマグマ活動の場であること、および今回の稍深発地震で薩摩半島南端部の山川町や薩摩硫黄島など震源直上域の火山域で無感であったことは、ここでの減衰がきわめて大きくなっている可能性の高いことを示唆している。

これらの観測結果を総合した上部マントルの減衰構造モデルが Fig. 5 である。ただし、震源断面は薩摩半島南方沖における稍深発地震の投影であるが、現段階ではこの部分の地震面の形状は不確定なので、桜島と霧島間の幅約50km の震源分布断面から推定した。地表中央部に示された△は薩摩半島南端部の開聞岳の投影であり、幅約80km の横線は大隅半島と薩摩半島を含む九州南部陸域の範囲を示す。減衰の極度に大きな領域は火山直下域に集中し、その周辺域ではおそらく存在しても局部的であろう。火山直下の減衰域は、マグマ生成に密接に関係すると考えられるプレート上面まで伸びる可能性がある。また沖縄トラフ域は活発な熱活動を反映して、火山直下

域に次ぐ大きさの減衰を示す。

### むすび

1992年9月23日薩摩半島南方海域に発生した稍深発地震 (M5.9) について、九州南部一南西諸島域を対象に震度に関するアンケート調査をおこなった。42機関から寄せられた有効回答452通を市町村単位に集約した結果、背弧側に位置する震央周辺域に比して前弧側の大隅半島域で震度が大きくなる“異常震域現象”が確認された。また最大震度は震央距離約60kmの鹿屋市の $2.9 \pm 0.5$ であった。種子島および屋久島の震度2.1~2.5を含め、前弧域で観測されたアンケート震度は震央距離の増加とともに通減する1つの曲線で表わすことができる。したがって FMO 報告による種子島および最近の観測における屋久島の“異常に小さな震度”の原因は観測点固有の地盤特性と考えられる。

今回の調査で明らかになった最も顕著な特徴は、薩摩硫黄島・黒島等、南西諸島域の火山島では住民の大部分が無感であるのに、火山フロントより背弧側に位置する薩摩半島では震度2.5~2.9を含むなど、ばらつきが大きいことである (Fig. 4)。また霧島火山域の影響が大きいと考えられる小林市では震央距離が120kmあるにもかかわらず、震度 $1.5 \pm 1.2$ が観測された。火山フロントより背弧側に位置する領域で見られるこのような震度分布は、単なる観測点固有の地盤特性に起因する局所異常に止まらず、上部マントルに存在する減衰域の構造がきわめて複雑であることを示唆している。すなわち、背弧域は前弧域に比して減衰は大きいとはいえ、極度に大きな領域は火山直下部にのみ集中的に存在する可能性が高い。また火山フロント上に位置する浅発地震の震度分布等から、九州西縁~沖縄トラフ域における減衰は火山直下部に次ぐ程度の大きさと考えられる。

広域にわたるおおまかな減衰構造を把握するための手段として、アンケート調査が有効であることが実証された。特に種子島や屋久島に見るように観測地点固有の地盤特性の影響が大きな場合にも、広い範囲を対象とすることによって地盤効果を抑え、広域構造を反映した震度データを得ることができる。ただし、減衰構造の違いを見るには無感と震度Iとの差は微妙なので、調査対象とする地震はM6.5以上が望ましいであろう。

JMA 震度が2~5の範囲の資料に基づいて導かれた太田・後藤 (1974) による震度係数は、2未満の震度に対しては過大評価を与える可能性があり、また九州の稍深発地震発生域が偏在するため3次元的形状を求めるには困難を伴うが、地殻—上部マントルにおける減衰構造は九州南部域の活発な熱活動とも密接に関連するため精査が必要である。広域地震観測網の充実が肝要であるが、震度係数の改訂を含む検討など調査準備を整え、アンケート調査を広域にわたって高い密度で実施することも効果的であろう。

### 謝 辞

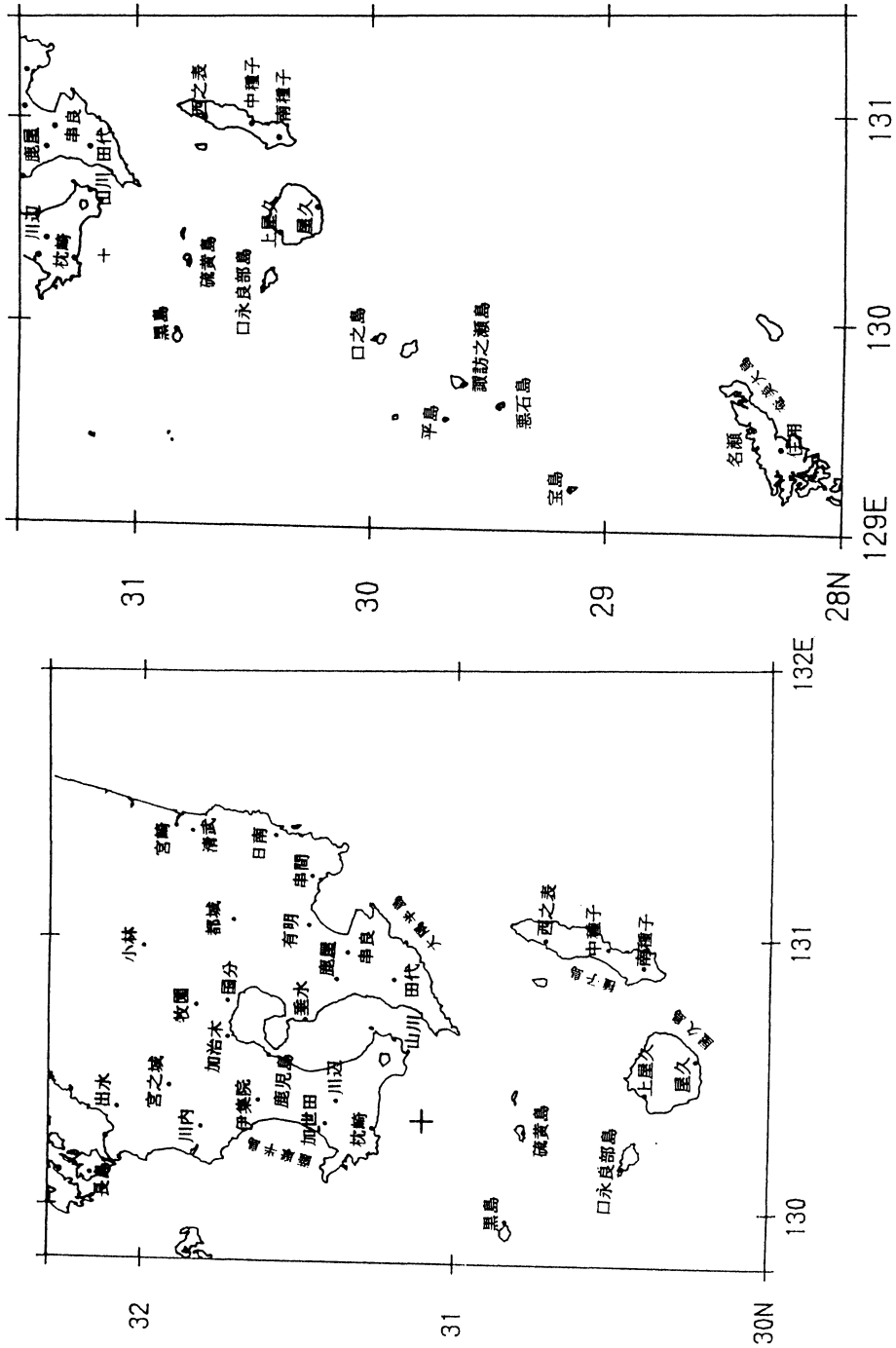
岡田成幸助教授 (北海道大学工学部建築工学教室) には、震度評価に関してご教示いただくとともに、プログラムリストおよび貴重な関連資料をお送りいただいた。またメカニズム解については勝間田明男氏 (気象庁地震火山部)、観測データについては石原和彦氏 (福岡管区気象台観測課地震津波火山監視センター) より提供いただいた。選択肢に関する一部改変を含むアンケート利用についてお許しいただいた太田裕教授 (東京大学地震研究所応用地震学部門)、データ処理についてご教示いただいた長宗留男氏、およびアンケート調査にご協力いただいた方々に感謝

します。特に調査票の配付と回収にご協力いただいた諸氏および諸機関についてはお名前を付表に記しました。

この研究は財団法人東京海上各務記念財団より助成を受けた「南九州—南西諸島の地震および火山のテクトニクス研究」の一環としておこなった。関係者各位に厚く御礼申上げる。

## 文 献

- 福岡管区气象台, 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一. 福岡管区气象台要報, 46.
- 角田寿喜・宮町宏樹・高木章雄, 1991. 九州—琉球弧北部域の稍深発地震. 地震2, 44, 63-74.
- 角田寿喜・内田敬・宮町宏樹・後藤和彦・石原和彦, 1992. 九州南部の地震活動 (1991年). 地震学会講演予稿集, 2, 75.
- 気象庁, 1983. 日本付近の地域・海域別の被害地震・津波地震の表および震度分布図. 気象庁.
- 気象庁地震課, 1971. 日本における震度観測の記録. 気象庁技術報告, 76.
- 宮崎県総務部消防防災課, 1969. えびの地震の記録. 宮崎県.
- 永濱功治・角田寿喜・後藤和彦, 1992. 振動継続時間によるマグニチュード—南西島弧地震火山観測所における経験式一. 鹿大理紀要 (地学・生物学), 25, 85-94.
- 長宗留男・角田寿喜・三木祐次, 1985. アンケート調査による鹿児島市内の震度分布. 鹿大理紀要 (地学・生物学), 18, 77-88.
- 長宗留男・中村利巳, 1986. 鹿児島県西方海域における地震活動. 地震2, 39, 123-128.
- 長宗留男, 1988. 日向灘における大地震の活動. 鹿大理紀要 (地学・生物学), 21, 1-21.
- 太田裕・後藤典俊, 1974. アンケートによる震度の推定および Seismic Microzoning Map 作成の試み—1973年根室半島沖地震を例として—. 自然災害資料解析, 1, 14-24.
- 太田裕・後藤典俊・大橋ひとみ, 1979. アンケートによる地震時の震度の推定. 北大工研究報告, 92, 117-128.
- 太田裕・鏡味洋史, 1987. 高密度震度調査の実施・解析法の改善, 地震災害事象の通信・面接・現地調査法にもとづく組織的研究. 自然災害特別研究計画研究成果, 9-19.
- Satake, K. 1984. Determination of source parameters of deep earthquakes around Japan from long-period Rayleigh waves. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 7, 269-280.
- Shiono, K. 1977. Focal mechanisms of major earthquakes in southwest Japan and their tectonic significance. *J. Phys. Earth*, 25, 1-126.
- 高橋道夫・西辻和也・後藤主夫, 1987. テレメータシステムの整備により明らかになった九州地方の地震活動の特徴. 研究時報, 39, 27-48.
- 高橋道夫, 1987. 九州下の稍深発地震面の非二重性. 地震2, 40, 115-117.
- Utsu, T. 1966. Regional differences in absorption of seismic waves in the upper mantle as inferred from abnormal distributions of seismic intensities. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 2, 359-374.
- Utsu, T. 1967. Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (I). *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 3, 1-25.
- Utsu, T. 1968. Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (II). *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 3, 65-84.
- 宇津徳治, 1969. 西日本の異常震域. 北大地理物研究報告, 21, 45-52.



付図. アンケート集約をおこなった市町村および地区



付表. 震度アンケート調査に対する協力者および協力機関（敬称略）

地名	協力者	所属・協力機関
宮崎市内海		内海小学校
宮崎郡清武町	森 勝彦	宮崎医科大附属病院
小林市		小林中学校
都城市	深野木 嘉和	都城高等学校
日南市油津	金 丸 厚	油津中学校
日南市酒谷		酒谷中学校
串間市西方		福島中学校
串間市都井		都井中学校
出水郡長島町	引 地 誠 朗	長島高等学校
薩摩郡宮之城町	吉 永 敬一郎	宮之城中学校
始良郡牧園町	徳 留 孝次郎	牧園高等学校
始良郡加治木町	野 崎 泰 宏	加治木高等学校
国分市	中 園 武 志	国分南中学校
川内市	米 丸 一 己	川内市役所
日置郡伊集院町	沢 田 哲 朗	伊集院高等学校
曾於郡有明町	大 窪 令 子	有明中学校
垂水市		垂水中学校
鹿屋市	立 石 賢 二	鹿屋高等学校
肝属郡田代町	日 高 茂	田代中学校
揖宿郡山川町	永 濱 功 治	山川中学校
加世田市	西 健一郎	加世田高等学校
枕崎市		枕崎中学校
西之表市現和	川 邊 宰	現和中学校
西之表市国上	今 村 英 一	国上中学校
西之表市住吉	鮫 嶋 茂 基	住吉中学校
西之表市古田		古田中学校
熊毛郡中種子町	下 平 讓	増田中学校
熊毛郡中種子町田島	森 山 栄二郎	南界中学校
熊毛郡南種子町島間	本 田 允 章	島間中学校
熊毛郡南種子町西之	内 山 伸 明	西野中学校
熊毛郡屋久町小島	行 田 義 三	岳南中学校
熊毛郡上屋久町永田	切 手 勝 二	永田中学校
上屋久町口永良部島	國 崎 敏 廣	金岳中学校
三島村黒島	上 野 浩 史	大里中学校
三島村硫黄島	今 村 克 行	三島中学校
十島村口之島	東 正 巳	口之島中学校
十島村平島	山 口 浩 樹	平島中学校
十島村諏訪之瀬島	岡 元 次 郎	平島中学校諏訪之瀬島分校
十島村悪石島	山 下 聖 和	悪石島小学校
十島村宝島	鎌 田 兼 宣	宝島中学校
名瀬市	前 田 利 久	大島高等学校
大島郡住用村	和 田 勝 典	住用中学校