

# 山地で起こった直下型地震

— 1997 年 5 月 13 日 鹿児島県北西部地震について —  
Reports on the May 13, 1997 North-West Kagoshima Earthquake

小長井 一 男\*  
Kazuo KONAGAI

## 1. はじめに

1997 年 3 月 24 日の鹿児島県北西部の地震 (M = 6.3) の後, その余震活動は次第に終息する気配を見せていたが, 5 月 13 日にさらに南西 5 km の地点を震央とする M = 6.2 の地震が発生した. この地震で川内市で震度 5 強 (5.43), 宮之城町で震度 6 弱 (5.92) の強い揺れを観測した.

この地震は, 計測震度システムの採用を告げた気象庁告示第 4 号<sup>1)</sup> (1996 年 2 月) 以降, 初めて震度 6 弱に至る強い揺れを生じさせたものである. しかし, その被害は“震度の割には軽微であった”と捉えるむきが多い. すなわち防災情報としての速報性を強く求められる計測震度が今回の被害の実感と必ずしも一致しなかったことへの指摘である. しかしながら一方で今回の地震が 3 月 26 日に起こった同規模の地震に引き続いて発生したことから, 構造物に蓄積されていた損傷がより深刻な形で顕在化したものも多く, 単独の地震荷重に対する構造物の挙動を考える耐震設計の枠組みや補修のありかたへの問題提起に繋がる重要な事例を含んでいる.

ここでは, 著者らが行った現地調査から以上の問題に関連が強いと思われる調査結果の一端を紹介する

## 2. 墓石の転倒・滑動調査

今回の鹿児島県北西部の地震は気象庁, および防災科学技術研究所の地震計のネットで多くの有用な加速度記録を残すことになった. これらは K-Net などのインターネット上のホームページに公開されていて, 容易にアクセスしこれらを活用することが可能であるので, ここではその内容には立ち入らない. 各観測地点での最大水平加速度 (Peak Horizontal Acceleration: PHA) は宮之城で 976.82 cm/s<sup>2</sup> 川内で 354.21 cm/s<sup>2</sup>, 出水で 755.74 cm/s<sup>2</sup> で

\*東京大学生産技術研究所 第 1 部

ある.

しかしながら, 過去に多くの研究者らが指摘してきたように, 被害の程度は PHA の大小と決して対応しない. そのために最大速度 (Peak Horizontal Velocity: PHV) や SI 値 (Response Spectrum Intensity), 累積絶対速度 (Cumulative Absolute Velocity: CAV) などの地震パラメータの提案がいくつもなされてきた. 気象庁は阪神・淡路大震災の後, 発生する広範な被害状況をより具体的に記述する必要性を満たし, 防災情報としての震度の速報性を増すために 1996 年 2 月, 気象庁告示第 4 号<sup>1)</sup> で計測震度の採用を報じている. この計測震度  $I$  は加速度記録に図 1 に示すようなフィルターをかけ, 以下の式により算出する.

$$I = 2 \cdot \log_{10} a_0 + 0.94 \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $a_0$  は加速度記録で  $a_0$  を越える部分の時間の総和が 0.3 秒となる条件を満たす加速度振幅で単位は cm/s<sup>2</sup> である. 図 1 のフィルターは 1 Hz ~ 10 Hz の範囲で -3 dB/oct の勾配を持っている. すなわちこの周波数領域で, 被害を考える上で重要な“加速度”と“速度”の双

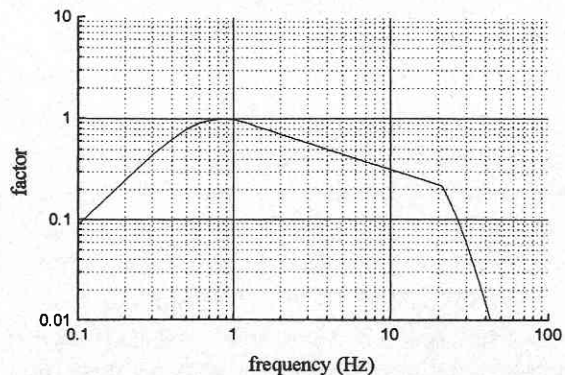


図 1 計測震度算出のためのフィルター

方に同じ重みをおいた指標を指向したものと思われる。

実際の被害と地震動の関連を考えるためには、観測点網が場所ごとの表層地盤条件のばらつきをカバーできるほどの密度には程遠いことを認識しなければならない。したがって今回は、墓石の変状を調査の一項目に置いている。これは古典的な手法であるが、地域ごとの地震動の強さを推定する上では最も信頼性の高い方法の一つだからである。従来の多くの地震調査では竿石の転倒率が地震動の強さの指標として用いられてきた。しかしながら竿石の転倒はいざ力学的に現象に忠実な議論を展開しようとする、あまりにも複雑かつ不確実な要因を多く含んでいる。また修復されるのも早く、これらを転倒率算定の対象から除外しなければならない。したがってその検討には細心の注意が必要で、むしろ竿石を支えている礎石部分の滑動などの方が力学的に明快な解釈が可能な場合も多い。今回は観察された墓石の転倒・滑動の様子から以下の手順にしたがって加速度、速度の推定を行うこととする。

(a) 竿石の転倒：

- 竿石 ( $b \times b \times h$ ) の aspect 比  $b/h$  から最大加速度の下限值  $a_{ov}$  の推定を行う。これは竿石が転倒しなくても礎石に打撃痕が残るなど、ロッキングを起こしたことが確実であれば成立すると考える。
- 竿石がロッキングして転倒に至ったことが明らかな場合はその重心が  $\Delta h = (\sqrt{b_2^2 + h_2^2} - h)/2$  だけ持ち上げられなければならないので、このポテンシャルエネルギーの増加分  $mg\Delta h$  と運動エネルギー  $mv_{ov}^2/2$  を等しいものとおいて得られる速度を  $v_{ov}$  ( $=\sqrt{2g\Delta h}$ ) とし、これが最大速度の下限值に対応するものとする。

(b) 礎石 (pedestal) 部分の滑動：

- 礎石は納骨室上部に置かれ、竿石のベースとなる。礎石の上下の接触面は通常、鏡面にならない程度に研磨仕上げするものが多い。この場合の摩擦係数  $\mu$  はおよそ 0.5 程度である。したがって、礎石部が滑ったことが確実であれば加速度  $a_{slip}$  はおよそ  $500 \text{ cm/s}^2$  以上であったと推測する。例えば礎石部が滑動せず、竿石 ( $b:h = 1:3$ ) がロッキングを起こしたことが明らかな場合、加わった加速度は  $333 \text{ cm/s}^2 \ll 500 \text{ cm/s}^2$  と推測されることになる。
- 礎石部が滑動した距離  $\Delta s$  が擦痕などから明らかな場合、摩擦によって消費されるエネルギーは  $mg\mu\Delta s$  であるので、これを運動エネルギー  $mv_{slip}^2/2$  と等しいとおいて得られる速度を  $v_{slip}$  ( $=\sqrt{2g\mu\Delta s}$ ) とする。

以上の手順で推定される、加速度、速度あるいはそれらの下限値は当然地震計で観測された最大加速度 (PHA)、最大速度 (PHV) と直接関連付けられるものではない。

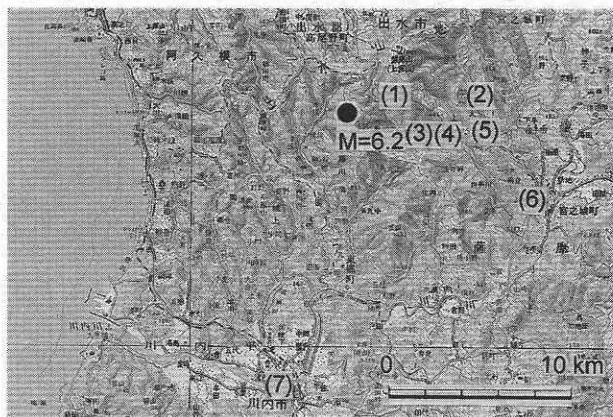


図2 調査地点



写真1 楠八重の墓地

また上下動の影響も無視している。しかしながらこれらの指標は地震計の設置されていない箇所でも震度を検討する重要な手がかりであり、著者は特に  $v_{slip}$  を加速度以上に実際の被害 (エネルギー) と関連する重要な指標と捉えている。  $v_{slip}$  は礎石と納骨室天版の摩擦係数が 0.5 として求められているが、この摩擦係数は結果的に砂の残留強度にほぼ等しいので地盤の破壊と関係した被害を論ずる上でも有力なパラメータになり得ると考えられる。阪神・淡路大震災で 60 cm の高さのコンクリートリングを積み上げたマンホールが扇状地地盤内に挟在する砂層の部分で数十 cm もずれていることが調査されているが<sup>2), 3)</sup>、こうした地盤内の破壊と礎石の滑りとの関連の検討が今後重要になると考えられる。

以下に宮之城、川内地域での調査結果をまとめる。調査した箇所は図2の番号が示す通りである。

(1) 楠八重 (北緯 31.9536, 東経 130.3635)

$$\Delta s = 20.9 \text{ cm}, v_{slip} = 143 \text{ cm/s},$$

$$a_{slip} > 500 \text{ cm/s}^2, a_{ov} \gg 342 \text{ cm/s}^2$$



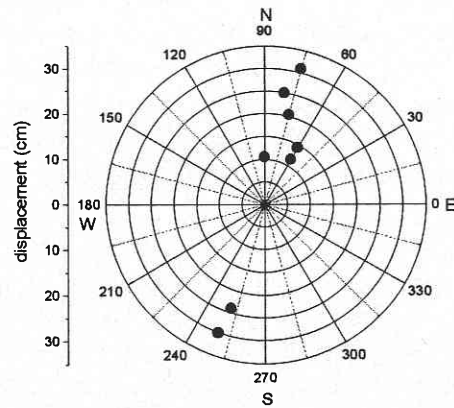
写真2 風化花崗岩の滑り面

(a) 向かって左側が大きくえぐられている。ここにあったと思われる直径2m程の丸みを帯びた花崗岩が道路下に転落している。道路手前の電柱(写真枠左外)には打撃痕が残り、傾いている。

(b) 写真中央には玉葱状に風化した丸い石がソケットにはまり込んでいる。その周りの滑り面は節理にそって発達した様子で階段状になっている。

調査した墓地の中では余震域から推定される断層面に最も近い。西向きの旧地滑り地形らしき斜面に棚田が広がり、墓地はこの地形を取り巻くならかな尾根に近い棚田最上段に位置し、8基の墓がある(写真1)。北西に150m離れて独立に1基の墓石がある。礎石はほとんどが南北方向に滑る。擦痕は不明瞭だが直線的である。一部回転したものは不陸部分が大きく、接触部分を軸に回転した模様。竿石は一基を残し全て転倒した(図3)。

このあたりは紫尾山花崗岩が貫入し、これが玉ねぎ状に風化した箇所です。玉石(直径1~2m)を含む斜面崩壊が多発した。宮之城町域での斜面崩壊箇所は5月16日時点で183箇所。内、75箇所が楠八重を含む泊野地区に集中している。写真2a, 2bは風化した花崗岩斜面の崩壊事例である。裸眼による立体視の練習をした人なら、このまま立体視できる。上段の写真からは左手の部分がえぐられている様子が認められる。下段の写真の中央には玉ねぎ状の風化が進んだ丸い岩がソケット状の窪みの中に残存している。



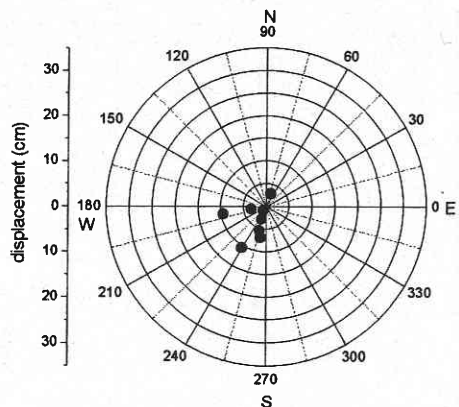
Lateral slip of pedestal (Kusubae)

図3 礎石の滑り量(楠八重)

(2) 大薄(北緯31.9595, 東経130.4135)

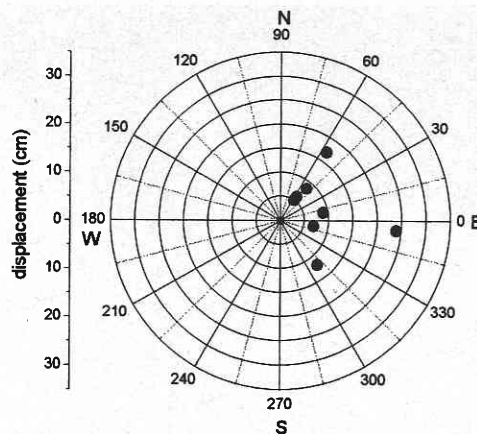
$$\Delta s = 5.35 \text{ cm}, v_{slip} = 72.4 \text{ cm/s},$$

$$a_{slip} > 500 \text{ cm/s}^2, a_{ov} >> 342 \text{ cm/s}^2$$



Lateral slip of pedestal (Oosuki)

図4 礎石の滑り量 (大薄)



Lateral slip of pedestal (Tomarino)

図5 礎石の滑り量 (泊野地区久木野)

国道沿いの墓地である。19基の竿石のうち3月25日には4～5基、5月13日には3～4基転倒したとの証言を得る。礎石の中には明らかに回転したものが7基あり、そのすべてが時計周りの方向に回転している。一般には数度前後の回転であるが中には30°に及ぶものもある (図4)。

(3) 久木野 (泊野地区) (北緯31.9401, 東経130.3731)

$$\Delta s = 11.1 \text{ cm}, v_{slip} = 104 \text{ cm/s},$$

$$a_{slip} > 500 \text{ cm/s}^2, a_{ov} \gg 342 \text{ cm/s}^2$$

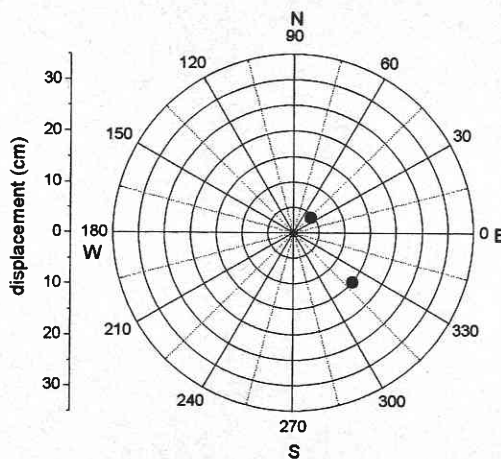
泊野地区久木野の国道沿いの丘陵地の谷地に沿って200mほど入る。谷地の右側の比高2～3mの尾根部に24基の墓がある (写真3)。このうち、東側11基は盛土上にある模様で納骨室そのものが沈下、傾斜している。したがって、残り13基を調査対象とした (図5)。このうち2基は納骨室が損壊し計測困難。1基は礎石そのものが落下している。礎石の落下したものには納骨室天版に北西方向と北東方向の直線的な擦痕がある。回転しているものもあるがその方向性はばらばらである。竿石はシリコン系接着剤で固定された1基を残しすべて落下している。計測中 (5月21日夕刻) に余震を感じる。

(4) 泊野川沿い平野部 (北緯31.9374, 東経130.3750)

$$\Delta s = 9.75 \text{ cm}, v_{slip} = 97.7 \text{ cm/s},$$

$$a_{slip} > 500 \text{ cm/s}^2, a_{ov} \gg 404 \text{ cm/s}^2$$

データは共同墓地ではなく泊野集会場近くの単体の墓石と泊野小学校校庭のプールサイドに置かれていたコンクリートのふたのずれで、後者の方が15cmと大きい (図6)。泊野小学校の柱には曲げクランクが入るがせん断クランクは認められない。泊野集会場のブロック門柱 (38cm×38cm×78cm) が東側に向かって転倒している。この門柱が転倒するためにはその重心が3.7cm持ち上が



Lateral slip of pedestal (Tomarino 2)

図6 礎石の滑り量 (泊野川沿いの平野部)

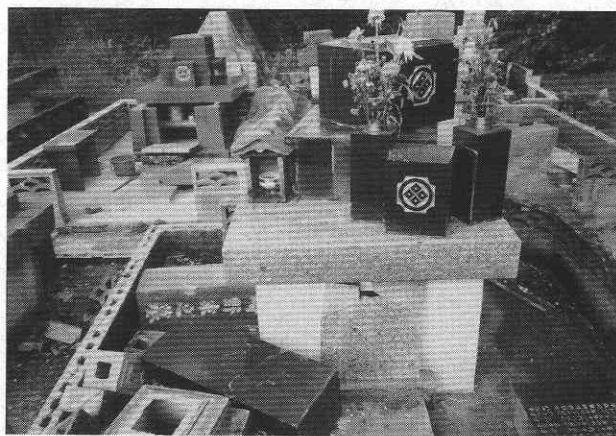


写真3 久木野地区墓地

らなければならないので、このポテンシャルエネルギーの増加と等しい運動エネルギーから換算される速度=85 cm/sで礎石などのずれから換算されたと整合する。

(5) 柿之木 (平川地区) (北緯 31.9405, 東経 130.4177)

$$\Delta s = 12.4 \text{ cm}, v_{slip} = 110 \text{ cm/s},$$

$$a_{slip} > 500 \text{ cm/s}^2, a_{ov} >> 342 \text{ cm/s}^2$$

平川小学校裏手 (北側) の丘陵地にある。砂岩の切り通し上に 20 基程度の墓石がある (図 7, 写真 4)。竿石はほとんど転倒した。平川小学校の RC 校舎の柱にせん断クラック (写真 5) が発生している。3 月 25 日の時点で開口が確認されていたものであるが、5 月 13 日の揺れでさらに 1 cm ほど大きく開いたものである。校舎裏では斜面崩壊 (写真 6) が発生した。

(6) 宗功寺 (北緯 31.9054, 東経 130.4399)

$$\Delta s = 3.0 \text{ cm}, v_{slip} = 54.2 \text{ cm/s},$$

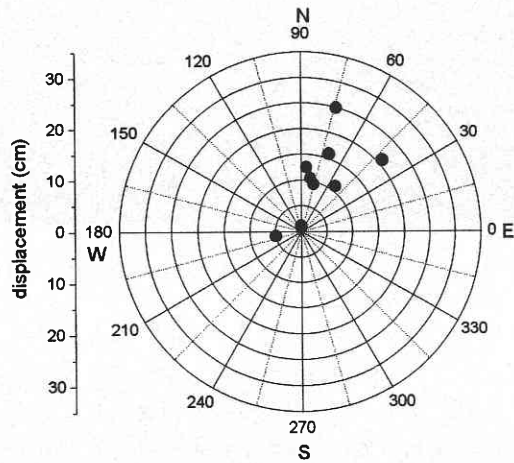
$$a_{slip} > 500 \text{ cm/s}^2, a_{ov} >> 342 \text{ cm/s}^2 \text{ および}$$

宮之城高校 (北緯 31.9000, 東経 130.4500)

$$\Delta s = 14.0 \text{ cm}, v_{slip} = 117 \text{ cm/s},$$

$$a_{slip} > 500 \text{ cm/s}^2, a_{ov} >> 342 \text{ cm/s}^2$$

宗功寺は宮之城町虎居地区にあり、被害のあった宮之城高校と川向の丘陵上に位置する。島津家累代の墓所である。累代の墓石は著しく形式が違うので、近年の墓石のみを調査対象とした (図 8 上段)。竿石はほとんど倒れるが確認できた礎石の移動は少ない。川内川がここで丘陵地を大きく蛇行して穿っているため、対岸の宮之城高校側の丘陵 (比高 40 m 程度) が突き出す形になって (図 9) 突き出し部の付け根の尾根部分を切り盛りして高校の敷



Lateral slip of pedestal (Kakinoki)

図 7 礎石の滑り量 (柿之木)

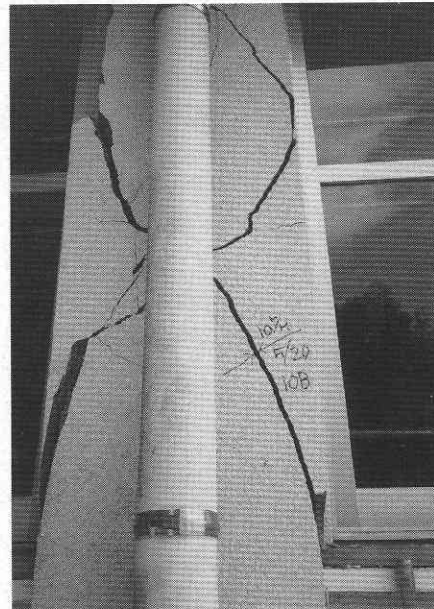


写真 5 平川小学校 RC 校舎の柱のせん断クラック

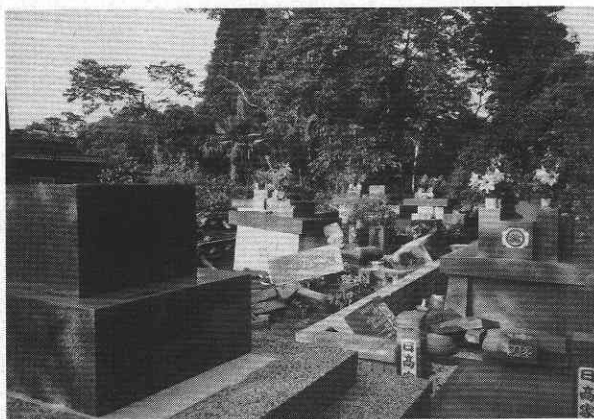
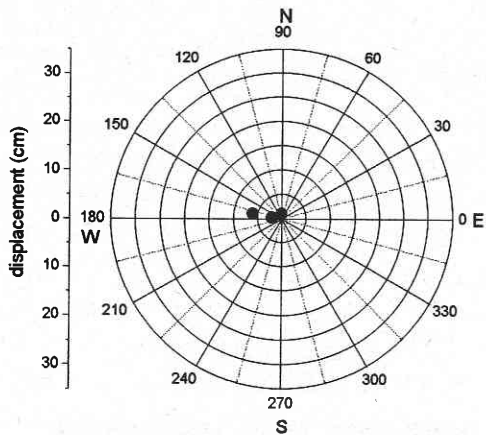


写真 4 柿木地区墓地



写真 6 平川小学校裏手の斜面崩壊



Lateral slip of pedestal (Sokoji)

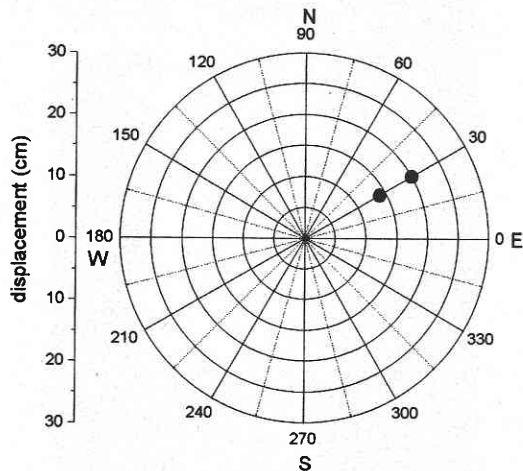
Lateral slip of pedestal  
(Miyanojo high school)

図8 礎石の滑り量  
(宮之城, 上段:宗功寺, 下段:宮之城高校)

地が造成されている。周辺の地形状況からこの高校を中心に3ないし4つの瘦せ尾根が放射状に広がっているものと推定される。そのうち体育館側(北)に伸びている尾根筋に一基の墓石があるが、これは壊滅的な被害を受けている(図8下段)。納骨室の天版はN60°Eの方角に20 cm滑り、また砂岩の丸石も同じ方向に14 cmずれている。ずれの方向は損壊した校舎(写真7)の妻手方向にはほぼ一致する。墓の付近の斜面に沿って亀裂が広がり、この部分は地形の影響もあって著しく強い地震動を受けたものと推察される。なおこの墓石の位置は科学技術庁の地震計の設置箇所からN50°Wの方角におよそ500 m離れた場所にある。

宮之城町の中央部、役場の向かいに盈進小学校がある(写真8)。この小学校校舎の西端部で多くの柱がせん断破

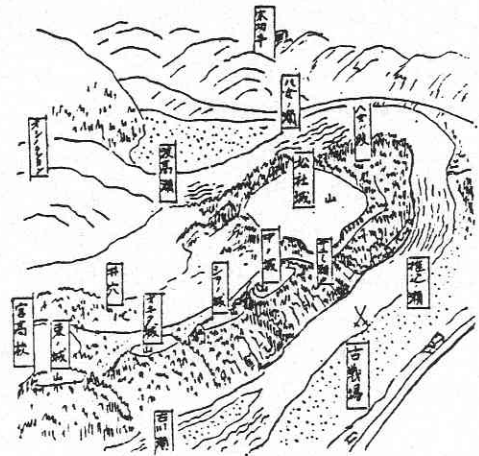
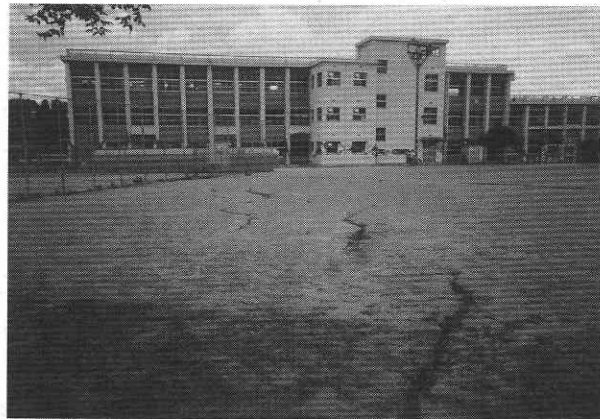
図9 宮之城高校周辺地形<sup>4)</sup>(虎居城跡)

写真7 宮之城高校  
校庭に亀裂。切土部、盛土部の境界に沿う形で生じたものと考えられる。

壊している(写真9)。この小学校の南側道路は西側に向かう下り勾配になっていて、校庭の西側の方が盛土の厚さが大きい様子である。校舎の被害を考える上で重要であると思われる。写真9の示す亀裂は、亀裂に差し込んだプリペイドカードの寸法と比較して明らかなように、4月20日の計測時点より大幅に広がっている。同じ規模の地震が多発する場合の様々な課題を示唆する写真である。

(7) 川内市宮内町(写真7.1, 北緯31.8167, 東経130.2917)

$$\Delta s = 1.25 \text{ cm}, v_{slip} = 35.0 \text{ cm/s},$$

$$a_{slip} > 500 \text{ cm/s}^2, a_{ov} >> 618 \text{ cm/s}^2 \text{ および}$$

川内市の中越パルプ工場の西側、河川堤防の背面にある墓地である(図10)。調査時点でほとんどの墓石の修復が終わっていたが、竿石には打撃痕が残りこれらが倒れた形跡がうかがえる。礎石は大きく滑った痕跡はなく、シリコン系接着剤などのついていない修復の跡のないも

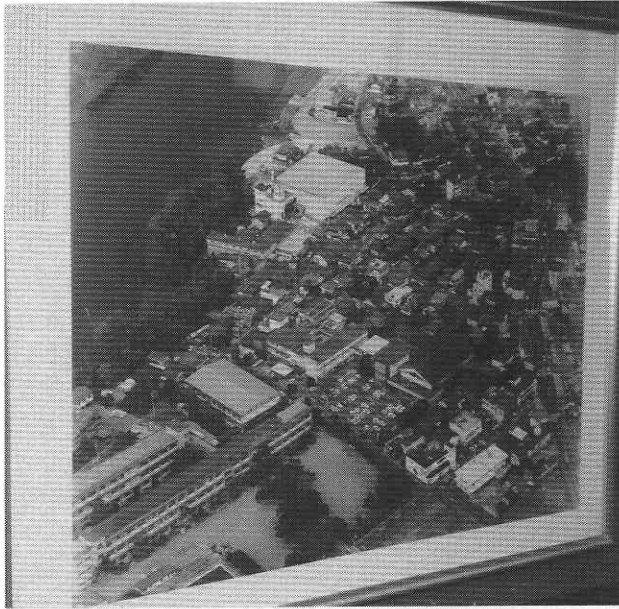


写真8 盈進小学校

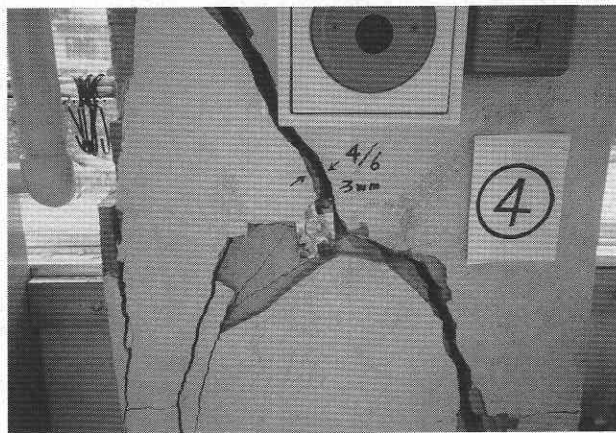
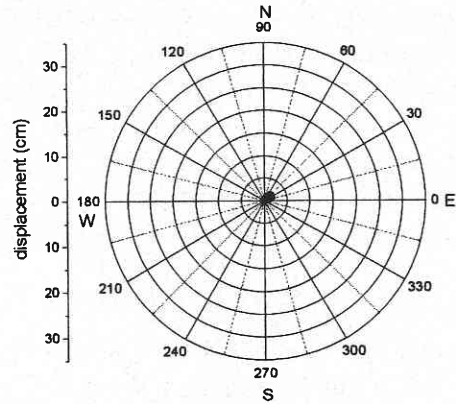


写真9 盈進小学校校舎の柱のせん断ひび割れ



Lateral slip of pedestal (Sendai)

図10 礎石の滑り量 (川内市宮内町)



写真10 川内市宮内町墓地

ので N55°E の方角に 1 cm 前後のずれが生じている。竿石の中で最もアスペクト比の大きなものは 34 cm × 34 cm × 55 cm (写真 10) でこの礎石に竿石が衝突した打撃痕が残っていることから、加速度は 618 cm/s<sup>2</sup> を越える大きさがあったものと推定される。しかし速度  $v_w$  はこの重心を 4.83 cm 持ち上げて倒すだけのレベルには到達しなかったようであり、礎石に残る滑りが 1 cm 前後であったことと整合的である。

以上の墓石の調査で得られたパラメータのうち、礎石部分の滑り量  $\Delta s$  の分布を図 11 に示す。加速度についてはいずれも 500 cm/s<sup>2</sup> を越える推定値が得られており、むしろエネルギーと関係の深い  $\Delta s$  のほうが地盤の関係した被害とより強い相関が得られると考えたからである。ここには 5 月 13 日～5 月 14 日に観測された余震分布も併せて示している。  $\Delta s$  は一般に余震域で大きく、これから離れ

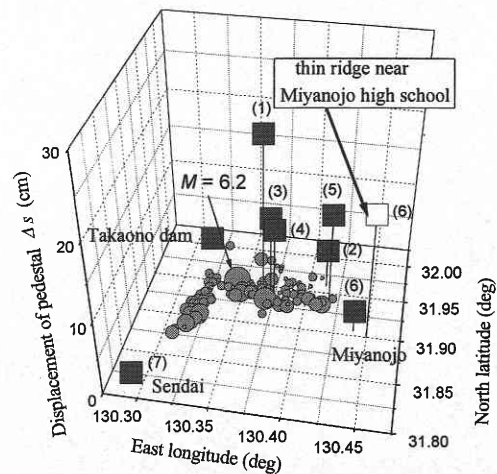


図11 礎石のずれと余震域

た地域（川内など）で小さい。また同じ地域内でも微地形の影響などで著しい差異が生じているものと考えられる（宮之城）。卓越した滑りの方向が見とめられるものが多い。楠八重，大薄，柿之木ではN20°E前後，泊野，宗功寺，宮之城高校では東西方向で，これらは地形的な影響があるとしても結果的に余震分布から推定される互いに共約な2つの断層面の方向に沿うようにも見える。

### 3. ま と め

鹿児島県北西部の一連の地震は人命を損なう事態には至らなかったが，規模の比較的大きな群発地震に対する課題を考えさせるものであった。また防災情報としての計測震度についても，被害との関連についての疑問が議論されることに繋がった。今回は墓石の礎石部分の滑りと被害を比較しながら調査を進めたが，その結果は余震域から推定される断層破壊面の地上部への投影部分で特に地震動が強かったことを示唆している。この投影部分がまさに人口の少ない山地にあっていたことも，地震による直接的な被害を報道される範囲に留めた一因と考えられる。しかしながら山地での斜面崩壊は土石流などの2次災害につながる潜在的な危険をはらんでいる。様々な

被害の規模や形態と相関の強い地震動の強さの指標を検討し，被害規模の推定に結びつく方法論の再検討が必要であろう。

### 謝 辞

本調査にあたり，宮之城町総務課交通消防係，川内市助役清水裕氏，建設省川内川工事事務所調査課から貴重な情報と資料の提供を得た。ここに深甚なる謝意を表します。

(1997年9月1日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 気象庁告示第4号，(kokuji4.gif at www.eri.u-tokyo.ac.jp)，Feb. 15, 1996.
- 2) Konagai, K., T. Matsushima and A. Mikami: Deformation Built up within a Granular Assemblage during an Intense Earthquake, *Intrn., Jour., Earthquake Engineering*, under review.
- 3) 小長井：1995年兵庫県南部地震によるマンホールのずれについて，*生産研究*，Vol. 49, No. 11, pp. 15-18, 1997. 11.
- 4) 宮之城町史，宮之城町。