

1984年長野県西部地震の地変および大加速度域の調査

黒磯 章夫・伊藤 潔・飯尾 能久
梅田 康弘・村松 郁栄

SURVEYS FOR SURFACE RUPTURES AND A HIGH ACCELERATION AREA OF THE WESTERN NAGANO PREFECTURE EARTHQUAKE OF SEPTEMBER 14, 1984

By Akio KUROISO, Kiyoshi ITO, Yoshihisa IIO,
Yasuhiro UMEDA and Ikuei MURAMATU

Synopsis

Surface ruptures and a high acceleration area were revealed from the survey at the source region of the Western Nagano Prefecture Earthquake of September 14, 1984 ($35^{\circ}49.3'N$, $137^{\circ}33.67'E$, $H=2$ km, $M=6.8$, JMA).

Cracks on paved roads and on ridge crests were developed within 10 km in length and 2 km in width from Yanagase to north of Matsukoshi, trending $N70^{\circ}E$ which is consistent with the strike of one nodal plane of the main shock as well as with the trend of the aftershock area. Since each of the cracks is believed to be tectonic in nature, the rupture region can show the imbedded earthquake fault, though the systematic displacement was not found on the surface.

More than 80 of boulders and fallen-trees on horizontal ground overturned off or thrown off out of their sockets were found near the epicenter of the main shock. The ground velocity calculated from the displacement of the boulder is about 200 cm/s, therefore, the ground acceleration is as high as $4\sim 13g$ at the assumed wave frequency of $2\sim 10$ Hz. We ascertained such a high acceleration by a simple experiment, using accelerometers and small stones. Additional evidence of the high acceleration was found; size segregation was observed for the boulders in the cracks. The size segregation must be caused by the high acceleration. However, houses in the Otaki Village were not severely damaged by the main shock. This is probably attributed to the high frequency (about 10 Hz) and the short duration time of the high-acceleration seismic waves.

The high acceleration area was clearly defined by detailed field surveys for the dislodged boulders and fallen trees. Most of them were found on the ridge crests but some in the valley. Boulders were shot out in the area of 1 km by 2 km and they were only shifted off in the area of 2 km by 4 km. Although the areas are much smaller than the aftershock area, the trend of the areas is consistent with that of the one nodal plane as well as the trend of the rupture region. The results of the field surveys must be important for the analysis of the detailed source processes of the main shock.

1. は し め に

1984年9月14日8時48分、長野県西部、王滝村を震源とする $M 6.8$ (JMA) の地震が起こり、御岳山南麓など数ヶ所で山体の大規模崩壊が発生し、死者および行方不明者29名という惨事をもたらした。震源の深さは、気象庁の結果は 2 km、名古屋大学のそれは 3.8 km であった¹⁾²⁾。深さの精度については、震央にくらべて誤差が大きいのので決定的なことはわからないが、かなり浅かったものと思われる。一方、震源が浅く、

しかも大規模な地変が生じたにもかかわらず、地震断層は地表変位としては現れなかった³⁾。これは、一つには、火山灰層、火山噴出物(溶岩)などの表層が数十～数百メートルもあるために顕著な変位として地表面に現れなかったものと思われる。

今回の調査の目的の一つは、系統的な地震断層は見られないまでも、本震の波形および余震分布から決定されたメカニズム解(主節面の走行は $N 70^{\circ} E$, JMA)から推定される地表面に沿って、崩落や陥没などの二次的地変ではなく、テクトニックな地変線があるかどうかであった。

一方、今回の地震の震央付近で石が飛んだという情報を得て調査したところ、半ば土中に埋まっていた石や倒木が飛び出したという現象を数多く発見した。これは、明らかに、その場所の地震動が重力加速度を越えていたことを示している。この領域の調査がもう一つの目的であった。

過去の研究において、物体が空中に飛び上ったとか、地面があたかも鉄で耕したような状態(shattered earth)になったとか、基盤岩が粉碎された(churned ground)とかいう例⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾は散発的には報告されているが、ほとんどが事実の紹介と、そこでは局所的に重力加速度よりも大きな加速度が作用したであろうという推定と簡単な考察のみで、系統だてて調査し報告している例はない。これは重力加速度をはるかに越える加速度が地面に働いたことを認めるには、今までの学問上の常識から、かなりの精神的抵抗があったことも一因と思われる。

石の飛んだ距離から松澤¹⁰⁾の方法に基づいて地動加速度を求めてみると、2～10 Hz に対して $4.2 \sim 12.5 g$ という信じられないような値を得た。このような大加速度が現実にあるかどうかチェックするために、小型の加速度計を板に固定し物を飛ばす簡単な実験を行った。

また、石や倒木が飛んだ尾根では必ず地割れが存在し、その走行は尾根に平行なものが多かった。特に、石の飛びが最も顕著であった場所の地割れの中は、まるで河原のように大小の石が浮き上っていた。これは粒度偏析¹¹⁾現象が生じたことを示し、大粒径の石礫が集散的に地表へ浮き上ってきたものである。土石流などで知られている粒度偏析¹²⁾⁽¹³⁾が地震動によっても起きたという事実を報告するのは、これが最初ではないかと思う。

以上のような現象は、ただ単に地震工学上だけでなく、地震の震源過程を研究する上でも非常に重要な意味を含んでいる。

2. 大加速度が働いた証拠

2.1 石および倒木の飛び

Fig. 1 に、伊藤ら¹⁴⁾の結果に基づき、重力加速度 $1 g$ を越える加速度が働いた領域を示す。

実線で囲んだ領域は石および倒木が飛んだ領域、すなわち、重力加速度をはるかに越えた領域である。黒くつぶした場所は、山の上の尾根部分で特に飛びが集中していたところである。飛びを確認したのは全体で80例余りであり、そのうちの9割近くがこの中で見つけられたが、これらの黒くつぶした部分に挟まれた谷および平地でも、数は少ないが飛びを確認している。

点線で囲んだ領域は、はっきり飛んだと確認することはむずかしいが、石が動いたために元の穴が広がったり、穴から石がずり上った状態になっている範囲、すなわち、おそらく $1 g$ 以上になったと思われる領域を示す。

これらの調査は慎重を期し、急斜面や崖崩れ地点など転石や落石と区別しにくい場所は除外し、なるべく平坦なところで、できるだけまなく行った。したがって、飛んだと確認したのは80例余りであるが、判定しえなかったもの、見落したもの、痕跡の残らない小さいものも含めると、はるかに多くの石や倒木が飛んだものと思われる。

Fig. 1 で 南側の点線の位置はあまり明瞭ではない。また、実線との距離もかなり離れている。これは、南

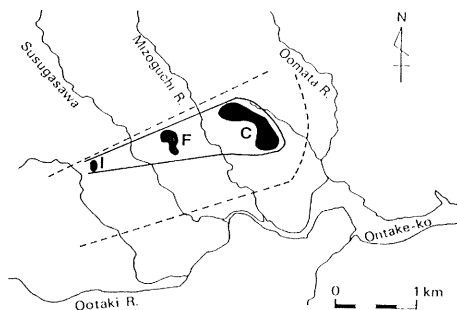


Fig. 1 High acceleration area derived from dislodged boulders and fallen-trees. In the area enclosed by a solid line, the acceleration is extremely higher than 1 g because boulders and fallen trees were thrown out from the ground, and in the area enclosed by a broken line, the acceleration is equal to or greater than 1 g because they were slightly tossed up or shifted off. The shaded areas (C, F and I) indicate the places where the phenomena were notably concentrated.



Photo. 1 Example of boulder No. 7 in Fig. 3 thrown off its socket

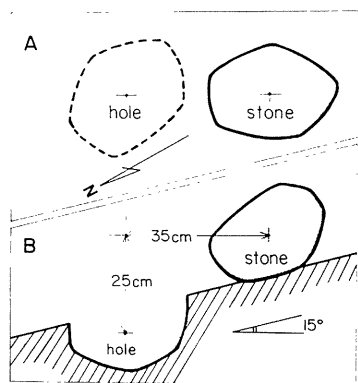


Fig. 2 Plane view (A) and cross section (B) of the boulder in Photo. 1.



Photo. 2 Example of a half buried fallen-tree bounced out from its former seat

側は王滝村の中心部で人家が多く、人為的要因のため証拠があいまいになることにもよる。しかし、実線の境界（石が確実に飛んだ領域）は全体にはっきりしている。特に、北側の境界は、全く同じような地形で尾根が北の方へ延びているにもかかわらず、物体が完全に飛ばされているところと物体が少しずれているところの境界（実線）および少しずれたところと全く動きもしなかったところとの境界（点線）はいずれも非常に明瞭であった。しかも実線と点線は大きくても 50 m 程度しか離れていない。北側の境界が非常に明瞭であることは、この現象が起こった付近の下部に大加速度源があったと推定され、震源過程を考える上で非常に興味深い問題を投げかけている。

石および倒木の飛びに対する判断の基準、石の飛んだ様子、その付近の地形、および踏査した各ルート の状況については伊藤ら¹⁴⁾が詳しく報告しているので、ここではその報告にない例について述べる。

Photo. 1 は Fig. 1 の I 地域で発見した例であり、Fig. 3 の No. 7 の石である。カラーでないので見にくいと思われるが石の上の方には苔が付着している。この写真の平面図 (A) と断面図 (B) を Fig. 2 に示す。石の最大寸法は $33 \times 28\text{ cm}$ 、高さ 26 cm で、重さは $20 \sim 25\text{ kg}$ と推定される。穴の深さは中心部で 16 cm

あった。**Fig. 2** からわかるように、この石は最大傾斜 (15°) の上方向 (N 30° E) へ、上下には反転せず、右まわりに約 45° 回転し、水平距離にして 35 cm 飛んでいた。元の穴の角は全くくずれておらず、すっぽり抜けたことがわかる。

Photo 2 の倒木は C 地域で見つけたものである。時間的制約で詳しい計測は行ななかったが、長さ約 120 cm、直径は太いところで 20 cm 以上あった。地面の傾斜は右下の方向に下がっており、着地した地点は右の元の穴より高く、転がったとは考えられない。穴との距離は 1 m 以上あった。この倒木は倒れてから長い年月を経たらしく、上部は苔むしていた。

Fig. 3 に、**Fig. 1** の I 地域で石の飛びが集中していた場所の全体的な状況を示す。尾根の幅は 6~8 m で、それほど急峻な場所ではなく南北に延びている。点線の丸は石の元の位置を、飛んだ距離と方向は矢印で示す。白抜き丸は反転しなかった石を、メッシュをほどこしたものは反転した石を示す。矢印のない白丸は動かなかった石で、メッシュのあるものはその場で反転した石である。ここでは、たまたま、ほとんどの石が西の方へ飛び、地割れも尾根を横断しているが、調査域全体からすれば、伊藤ら¹⁴⁾が報告しているように石の飛びに系統性はなく、尾根の走行に垂直な方向に飛んでいるものが多かった。また、地割れは尾根の走向に平行するものが大多数であった。

2.2 加速度の見積り

物体が空中を飛ぶには、重力加速度 1 g 以上の加速度が物体に与えられなければならないが、物体が飛んだところの地面はどれくらいの速度、加速度に達したのだろうか。

前節の **Photo 1**, **Fig. 2** の例について、伊藤ら¹⁴⁾と同じく松澤¹⁰⁾の方法に基づいて求めた結果が **Table 1** である。松澤は鳥取地震 (1943) のときの神社の狛犬が飛んだ距離から、上下、水平共等しい正弦波を仮定して地動加速度を求め、周期 3~0.5 秒に対し 1.5~3.0 g といずれも重力加速度 1 g を越える値を得ている。(この他に回転運動などによる方法も試みているが、結果はほとんど同じである。) 松澤はこのような大加速度は信じ難いと考え、土台と狛犬の衝突効果を考慮して最終的に周期 2 秒に対して 400 gal 程度の値を得ている。この仮定は石が最も速く飛ぶ場合であり、逆に求める地面の速度、加速度は最も小さい場合である。石と土の反発係数は 0 に近いと思われるが伊藤らにならって、ここでは 0.3 とした。この場合も、その分だけ地動速度、加速度を小さく見積もったことになる。参考のため、松澤¹⁰⁾の最終式を記しておく。

$$t_1 = \sqrt{2(\xi - \eta)/g} \dots\dots\dots (1) /$$

$$A = \xi / \{ (1 + e) \omega t_1 - \sin \omega t_1 \} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 t_1 は物体の飛行時間、 (ξ, η) は地面に固定した座標系、 e は反発係数、 ω は仮定した地動の角周波数、 A は地面の変位を表す。

しかし、ここでわかっているのは石の飛んだ距離 (ξ, η) だけであり、入射波の周期は不明である。そこで、採用すべき周期の目安を得るために、**Fig. 4** に 1984 年 10 月 3 日に起きた余震 (M 5.3, JMA) の水平成分 (N 30° W) の記録を示す。これは、村松が本震の震央から約 4 km 東に離れた牧尾ダムで行っている強震計 (速度型, 0.5 V/kine) 3 成分観測の記録の一つである。(S-P) time は 0.3 秒でほとんど真下 (深さ 2

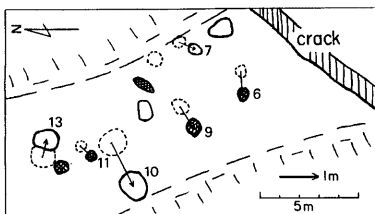


Fig. 3 Distribution of dislodged boulders on the ridge saddle around I area in **Fig. 1**. Boulders indicated by solid lines were thrown off from their sockets indicated by broken lines in the direction of arrows. Hatched boulders were overturned off and others were not overturned. Hatched boulders with no arrow were turned over at the places where they were. Boulders with no arrow indicated only by a solid line were not moved as they were almost hidden in the ground.

Table 1 Ground displacement, velocity and acceleration calculated from the displacement of the boulder in Fig. 2 for some frequencies of the ground motion

f (Hz)	2	5	8	10
A (m)	0.26	0.051	0.041	0.031
$A\omega$ (m/s)	3.2	1.6	2.1	2.0
$A\omega^2$ (m/s ²)	41	51	103	123

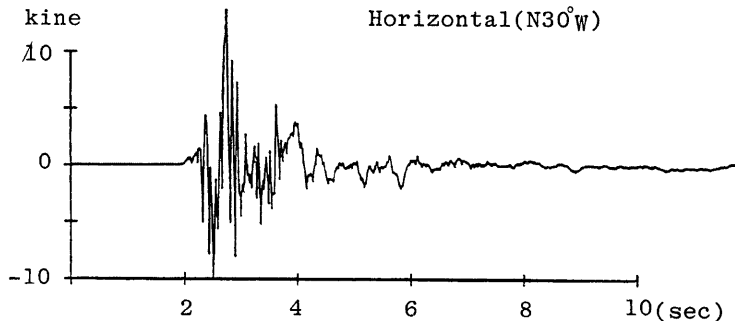


Fig. 4 Velocity seismogram of horizontal component (N30°W) for the aftershock of October 3, 1984 (M=5.3) recorded at Makio-dam. The shock occurred nearly right below the observation site.

km 以内)の地震であるが、記録から約 10 Hz と 1.5 Hz の周波数が卓越していることがわかる。さらに、1971年サンフェルナンド地震¹⁵⁾¹⁶⁾、1976年ガズリ地震¹⁷⁾および1979年インペリアル溪谷地震¹⁸⁾の震央付近で得られた 1 g を越える加速度計記録によれば、その周波数は 5~10 Hz である。したがって、地動の周波数を 2~10 Hz と仮定することは妥当であると思う。Table 1 に示したように、これらの周波数で地面が振動したとすれば、地動速度は 325~196 cm/s、加速度は 4.2~12.5 g という大きな値になる。

2.3 物体を飛ばす実験

伊藤ら¹⁴⁾は、さらに、震央に近い地域 (Fig. 1 C) で 2 m 以上飛んだ石をいくつも発見し、それらについては速度約 200 cm/s、加速度 6.4 g (5 Hz)~13 g (10 Hz) という地動を推定している。地震動によってこのような大加速度が生じることはこれまで知られておらず、大変驚くべきことである。

我々の推定方法に誤りがあるのではないか、特に石と土の間の振動時の相互作用については不明な点が多い。そこで次のような実験を行い、上記の大加速度が現実にあろうかどうかチェックした。

木の板に小型加速度計、上下、水平 2 成分を固定すると共にその横に物を置き、それをいろいろな距離、高さになるように飛ばした。飛距離、高さはビデオテープに収録したものをコマ送りして測定した。使用した加速度計は、TEAC 社製の圧電型 507 で 2 Hz~12 kHz の周波数範囲で 100 mV/g の感度を持ち、21 g まで測定可能である。加速度計の出力は熱ペン式レコーダーでモニターしながら磁気テープに収録した。物体は形や大きさの異なる石のほか、固さ、大きさ、形の異なる粘土を使用した。また、それぞれについて、物体と木板の間にクッションを敷く場合もテストした。測定周波数範囲は、いろいろと工夫して約 1 Hz から 25 Hz まで行うことができた。

実験結果の一例を Fig. 5 に示す。重さ 0.3 kg の石が水平に 1.9 m、高さ 0.6 m 飛んだ場合の加速度波形と速度波形である。石の下にはクッションが敷かれていた。この例では、加速度の周波数は約 4 Hz であり、上下に 8 g、水平に約 9 g であった。上下水平の加速度波形を積分して板の速度を求めたのが同図の下部に示した 2 つの波形である。上下に 300 cm/s、水平に 400 cm/s となっている。

板に粘着した粘土はうまく飛ばすことができなかった。また、石の形状によっては板の上を滑った場合もあった。現実にはこのような物体もあったと思われる。しかし、水平距離と高さが同じだけ飛んだ場合は、各種の組み合わせ（クッションのあるなし、物体の種類、形、大きさ）にかかわらず、速度、加速度共ほぼ一定であった。以上の実験結果は、前節で推定した速度、加速度の値が非現実的なものではないことを示している。

2.4 地割れと粒度偏析

地震によって発生した大きな地動速度および大加速度を裏づけるもう一つの証拠は、山の尾根でみられた地割れとその中で生じた粒度偏析 (size segregation)¹¹⁾ 現象である。

物体が飛んだところでは必ず地割れが生じていた。これらの地割れの走行は、例えばメカニズム解から期待されるような一定の方向を示すものではなく、深さ 50 cm～1 m で、尾根の走行に沿って 30～50 m と延び尾根を二分しているものも多く、中には開口部が 2 m 以上のものもあった。また、地割れの真上にあった直径約 50 cm の切株が真二つに引き裂かれ、割れ目の中にはこの木の根が多数露出しており、引き裂かれた部分は鋭利で生々しい跡が残っていた。これらは尾根に直交する方向に振動が増幅され、強大な力が作用したことを示している。

物体の飛びがもっとも激しかった地点の地割れの中は、あたかも河原のように大小の石がごろごろしていた。その例を Fig. 6 に示す。この図は写真からスケッチしたもので現実の様子を良くはあらわしていない。それはこの付近の調査をしたのが11月10日で、すでにカラマツ、朴などの落葉で覆われていたため、実際には石ころだらけで歩くのが困難であった。周囲の地質および他の地割れの様子から、土中 70 cm～1 m にこのような石礫の層が存在していたとは考えにくく、これは重力加速度 g をはるかに越える大加速度が働

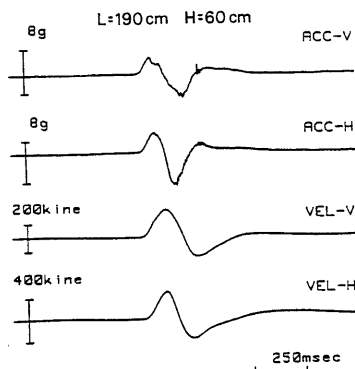


Fig. 5 Record of acceleration and velocity obtained from a simple experiment in which a stone was thrown off from a board with vertical and horizontal accelerometers in order to check the actual high acceleration of the ground motion

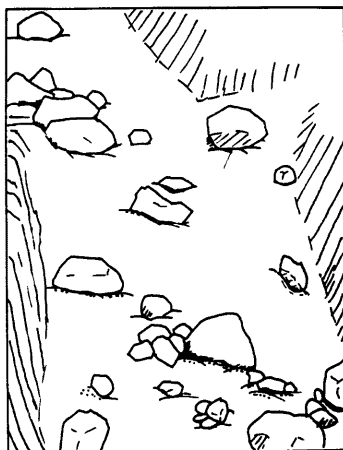


Fig. 6 Sketch of the crack in which size segregation was observed for the boulders

いたために土中の大粒径の石礫が集中的に地表に浮上してきたものと考えざるをえない。

このような現象は流動中の土石流や土石流堆積物においても認められており¹²⁾¹³⁾、逆級化 (inverse grading) と呼ばれている。土石流中に逆級化が起こる原因はいくつかあるが、その中で今回の現象に関係あるものは kinetic sieving effect (動的ふるい効果) である。kinetic sieving effect は一種の粒度偏析で、そのメカニズムは、重力場において径の異なる粒子の混合物に $1g$ を越える振動が加えられたり、激しい乱れが存在する場合に、大径粒子の空隙に小径粒子が落下して下部を埋め、結果的に大径粒子が浮上して逆級化が起るといものである。

諏訪ら¹³⁾は、異粒径粒子の混合物に振動を加えることによって逆級化の実験を行っている。その結果のうち今回の現象に関係のあるものを要約すると次のようになる。

1) 粒度偏析の発生条件は振動の加速度が $1g$ を上回ることと混合粒子の粒径比がある限界値より大きいこと。

2) 振動の加速度を $1g$ から漸次増大していくと偏析の進行速度は著しく増大する。

3) 混合粒子の粒径比が増大すると、一般に偏析度も増大する。

さらに、諏訪ら¹³⁾は同系の実験で、小径粒子中に大径粒子を1個だけ埋めた場合も行っている。この場合でも粒度偏析による逆級化は必ず発生し、振動の加速度を増大すると大径粒子の浮上速度は他の場合に比べて著しく増大することを確かめている。

諏訪ら¹³⁾は、大径粒子1個の単独での浮上現象は、kinetic sieving 効果のみでなく、振動によって大径粒子が上方に跳躍する度に、大径粒子の下方にできる空隙が小径粒子の再配列によって埋められていくことに起因すると考え、振動による粒度偏析は、これらの大径粒子の集団的浮上現象と単独的浮上現象という二つの要因の重複過程として進行したものと結論している。

しかし、果して今回の地割れの中の現象は粒度偏析過程による逆級化であると言えるであろうか。

まず、諏訪らの行った実験結果を土中の石礫に適用できるかという問題がある。実験に用いたガラス玉に比較して土中の石礫は土との粘性や摩擦が著しく大きい。しかし、これについては、粉体工学でも percolation と称せられ粒度偏析が認められていること、すなわち、微粒子でも成立すること、および諏訪ら¹³⁾の、試料に水を加えた実験では、振動の加速度が小さいうちは乾燥状態にくらべて粒度偏析は著しく抑制されるが、加速度が $15g$ 以上になると逆に水を加えた方が急激に増大することが確かめられていることから、振動の加速度が充分に大きければ土中の石礫に適用することは可能と思われる。

次に問題になるのは地震動の継続時間である。パルスのような瞬間的な衝撃力では粒度偏析現象は起こらない。継続時間に関する当地のデータはないが、現地の多くの人々の話によれば非常に短かったようである。しかし、Fig. 4 で示した M5.3 の余震の記録をみれば、大加速度は $1.5g$ 近く続いていることがわかる。本震とこの現象が生じた地表との距離は、Fig. 4 の記録をとった牧尾ダムとこの余震の距離とほとんど同等であると考えられる上に、本震のエネルギーはこの余震にくらべて 200 倍近く大きいことを考えれば、大加速度の継続時間は 2～3 秒はあったと思われる。さらに、2.2 節で引用した過去の地震の震央近くでの加速度計記録¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾をみても、大加速度は 2 秒近くは継続している。一方、諏訪 (私信) によれば、加速度が $10g$ 以上になれば粒度偏析現象は数秒で起こりうるのとことであった。しかも、今回の現象に関しては、粒度偏析現象は完成している必要は全くない。すなわち、振動の継続時間が短かいために我々の見た現象が過程の途中であったとしてもよく、ただ地割れの中が異常な状態になっておれば充分である。

最後に問題になるのは、再び $10g$ 以上という大加速度が現実に関したかということである。逆に言えば、Table 1 からわかるように、物体が飛ぶためには $1g$ 以上であれば初速度のみが問題になるので、振動数は $2Hz$ 以下であってもよい。しかし、加速度が大きくなるためには振動数が高くなければならない。Fig. 3 は速度記録であるが高い方の卓越周波数は約 $11Hz$ である。しかもこの記録を微分して加速度を求めてみると最大加速度は $800g$ となった。また、2.2 節でも述べているように、Table 1 の値は下限値である。現に、

2.3節の物体を飛ばす実験から得た板の加速度の値の約半分である。

以上から、今回の現象が生じた場所では、振動数 10 Hz 以上の地震動もあり、加速度 15 g 以上で 2 秒以上は地面が振動したと推定してもそれほど見当違いではないと思われる。

信じがたいことだが、地震動によっても粒度偏析現象は起こりうるということになる。

3. 地 変 の 調 査

3.1 調査方法と調査域

このたびの調査の目的の一つは、断層変位に直接かかわるとされる地変を踏査することであった。

最初の調査は、村松によって地震後11日経った9月25日に行われた。主に墓石転倒状況の調査であったが、このとき、王滝村上島地区北側の山で石および倒木の飛びを確認した。次の調査は、10月19日、20日に総勢6人で行ったが、まだ至るところ道路が遮断されていた上に、天候にも恵まれず、上島地区北側の山での飛んだ石と倒木および地割れの分布の調査と、王滝村中心部と溝口川、鈴ヶ沢一帯を調査するに止まった。

本格的な調査は11月8日から13日に行った。前回の調査の経験から、先ず被害地域全体を観察しておく必要性を痛感し、11月8日、軽飛行機での空からの調査を行った。あとで詳しく検討するために、カメラ数台と8ミリカメラでできるだけ多くの資料を収集した。この資料は、のちに空中写真および地上調査の結果と合わせて地変を調べる上で非常に役に立った。

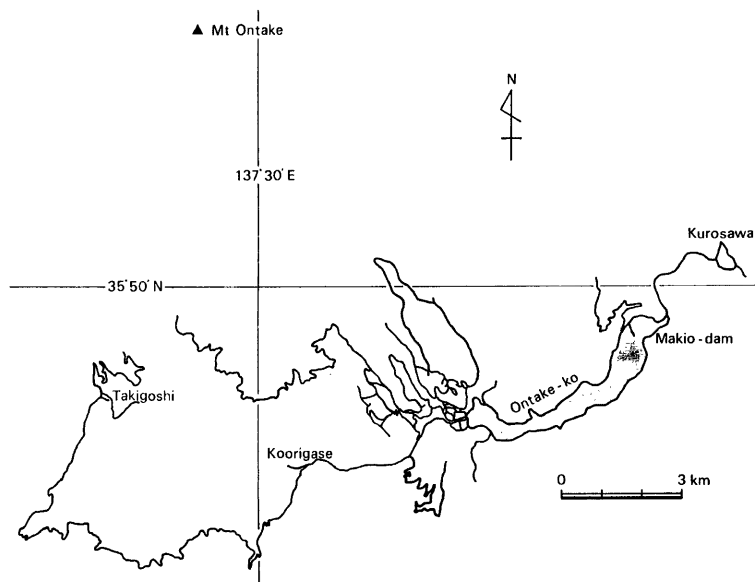


Fig. 7 Index map for the surveyed area. Solid lines show the surveyed routes.

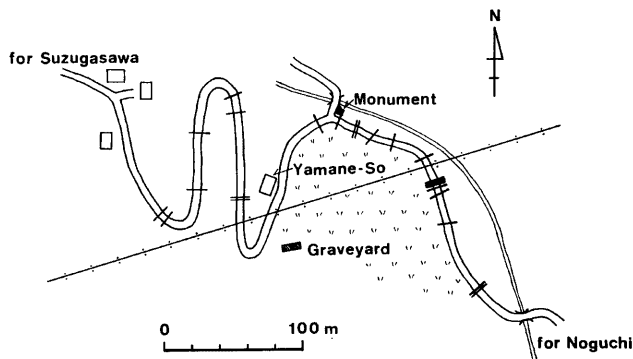


Fig. 8 An example of the concentrated features of cracks on a surveyed road.

Fig. 7 に今回行った地上調査の全ルートを示す。余震域全体を一応カバーし、地変のない場所の確認のために余震がほとんど起こっていない大滝川の南についても調査した。調査は、道路の路面や側溝の亀裂状況とその分布、および道路沿いの建造物、側壁、田畑の異常（転倒、亀裂、地くずれ）について、地形的な表層の現象と区別しながら行った。現地での聞き取り調査も時間の許す限り行った。

一方、この地域の山は山腹は急峻であるが尾根は比較的傾斜がゆるやかであることから、いくつかの尾根を南北に踏破し、地割れの走行、長さ、集中度の分布を調べ、その結果を同じような地形毎に分類して検討した。

3.2 地変の分布と地変線の推定

Fig. 8 に、道路亀裂の分布の一例として、鈴ヶ沢沿いの比較的広い範囲が平坦になっている場所の状況を示す。太い線はアスファルト道路上の亀裂を示す。図中右の高圧線の下に集中している割れ目はほとんどが右ずれで、一番大きなものは割れ目幅 12~15 cm、約 5 cm の右ずれを示していた。この図のすぐ北側の北上りの斜面の道路は約 200 m にわたり徒歩による通行も困難なほど崖くずれや道路の陥没を生じていた。図中の記念碑および墓地の墓石はすべて転倒し、墓石はすべて東の方向に倒れていた。民宿「やまめ荘」の玄関の約 3 cm のほぞのついた柱が石の土台から抜けて 15~20 cm 移動し、庭石が動いていた。地震のとき、この民宿の主人（55才前後）は戸外の道路上におり、その話によると、一瞬、脳貧血を起こしたかと思ったが、目の前の道路上に 2 条の亀裂が走り、前方（北側）の山腹が大音響とともに崖くずれを起こしたので地震とわかった。堅牢な木造の家屋は東に傾き、家の中の奥さんを救出するため戸をあけようとしてもあかず、鉄のバールでこじあけた。家の中は障子ふすまは言うに及ばず家具のほとんどが飛び、足の踏み場もないほどであった。車庫にあったワゴン車が道路上（東へ）約 1.5 m 移動した。もちろん、サイドブレーキはかけてあったとのことである。また、この図のすぐ南東の道路沿いの少し高くなっている平地にあった 100~300 kg の石は、ほとんどすべてが元の穴からずり上がるか穴が石の動きで大きくなっていった。さらに、図の北西は平坦な台地になっているが、ここを北西にのびる道路の亀裂はここから 300 m ほどまでは目立つが、それより北西側では極端に少なくなった。以上の状況から、この一帯の地変は有意であると考えられる。

Fig. 9 は、上記のような方法で行った調査結果と空からとった資料（写真と 8 ミリフィルム）および空中写真をもとに検討し、人為的要因や局所的な地表の現象を除外して作製した地変の分布図である。黒丸は山体の大規模深層崩壊を含む山くずれを表わし、丸の大きさと規模を示す。また、黒の短冊は道路上の亀裂と

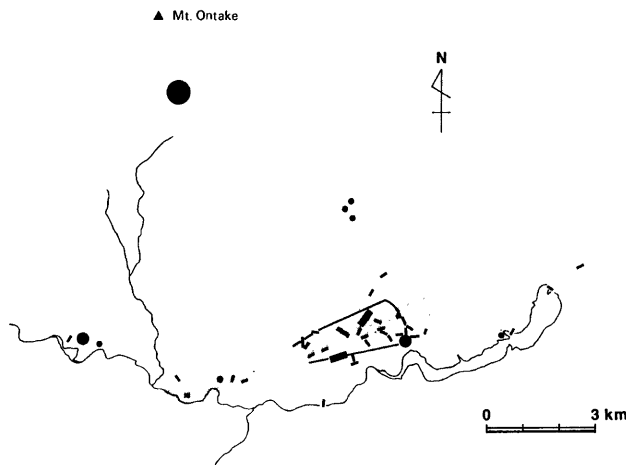


Fig. 9 Distribution of landslides and cracks which are believed to be the tectonic in nature. Solid circles indicates the catastrophic landslides and solid rectangles show the concentrated places of cracks on ridges and roads. The stippled belt indicates the cataclysmal line derived from the distribution of landslides and cracks. The solid line shows the area in which the cracks were remarkably concentrated.

山体の地割れを表わしている。

御岳山南麓，松越，滝越などの大規模崩壊の被害は最大級であったが，その発生要因としては，多くの専門家が指摘しているように³⁾¹⁹⁾²⁰⁾，その場所の地形，地質とその地下構成，および降雨など地震前の条件など，かなり二次的要因が作用していると思われる。このことは，我々の空からの観察から判断しても他に大崩壊を起こしてもよさそうな場所はかなりあったこと，この辺り一帯の墓石や御岳信仰による霊神碑（ほぞのあるものが多い）のほとんどが倒れていることなどから余震域の長さ約 15 km 程度のこの地域全体（特に推定断層の北側）は400～500ガル以上の加速度が働いたと推定されることおよび山体では地動が増幅されること⁷⁾⁸⁾⁹⁾²¹⁾²²⁾を考慮すればそれほど特異なことではない。

水ヶ瀬北西の地変は，次の二つの理由によって確定した。一つは，我々の空からとった写真を分析し，二つの高圧線の鉄塔に防御用のシートがかぶせてあったことによる。他の鉄塔はそのような処置がされておらず，また東の方の鉄塔はいくつか実際に調査したが非常に堅牢に作られておりほとんど被害はなかった。もう一つは，地震時丁度水ヶ瀬の西でジープを運転していた田中亮治氏の体験談を，防災研究所の奥田節夫教授らの御好意により，ビデオテープを見せていただき，その内容を検討した結果による。田中氏の話によれば，運転していたジープが地震のとき，あたかも羽子板でたたかれたかのように何度か飛びあがったとのことである。また，脱出途中の山の尾根で地割れの中から石がふき出す現象を見て，それがその時の体験の中で最も恐ろしい出来事であったと述べている。

Fig. 9 の太い実線で囲んだ領域は，これらの地変が大きくかつ集中していた場所を示す。地変は地表の地形や地質に影響され，円形か楕円形になるのではないかと考えていたが，**Fig. 1** に示した大加速度領域と非常に似かよった形となった。

砂目の帯は，これらの地変の分布から推定した地変線である。**Fig. 1** の大加速度領域とその走行も考慮し

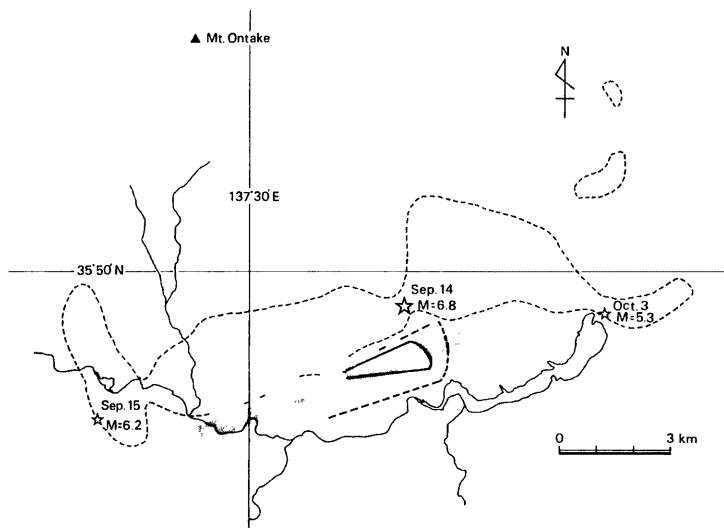


Fig. 10 Map showing the cataclysmal line in Fig. 9, high acceleration area in Fig. 1 and aftershock area enclosed by thin broken line (after Nagoya Univ., Sep. 14~Oct. 31, 1985). Stars are the epicenters of the main shock and two large aftershocks. It is noted that the aftershock area is not agreed with the cataclysmal line and high acceleration area.

た。地変線と言ったが、これは線ではなく帯となった。調査をする前は、潜在地震断層の変位を直接反映して、たとえ雁行したとしても線状になるのではないかと考えていたが、約 500 m の幅をもつ帯にせざるをえなかった。しかし、この結果は次のように考えれば当然なのかも知れない。

その一つは地質構造である。この地域の地質構造は、おおまかに言って、基盤は王滝川、御岳湖より南および千沢より西は中生代の濃飛流紋岩体から成り、本震が起こった場所は秩父系の古生層で、千沢を境として $N 45^{\circ} W$ の方向で濃飛流紋岩と接している。これらの基盤の上部は標高約 950 m で、その上に数十～数百 m で火山噴出物が覆い、さらにその上に薄い軽石層があり、最上部は火山灰層（ローム）から成っている²³⁾。当然、火山灰層の上部は、特に山では 20～30 cm 腐葉土化している。したがって、たとえ地下の断層変位は鋭利であったとしても、上層に伝播するときには局所的相互作用や上層の脆弱性により末広がりの的に広がっていくと思われる。

また、もう一つは、より本質的に、その結果として地震波を発生する地下の断層は一枚の面ではなく、かなりの幅をもつものかも知れないと考えられることである。この考えにたてば、大加加速度領域および大地変領域がその走行と直交する方向に広がりを持つことも容易に理解することができる。

4. 考 察

この調査では、多くの現象から、場所によっては 10 g 以上という大加加速度が働いたことを示した。これまでも、加速度計で 1 g 以上の記録をとった例はある。加速度記録の最も大きな値は、1979年のインベリアル深谷地震¹⁸⁾の 1.74 g であるが、非常に局所的なものとしている。地動加速度が重力加速度を越えたで

あろうと推定している研究⁵⁾⁶⁾⁷⁾はいくつかあるが、いずれも重力加速度を少し越えた程度と考えている。したがって、実際にどれくらいの加速度が働いたかという見積りは行われていない。これは一つには、加速度分布は、ほとんどの場合墓石の転倒から求められてきたが、墓石の形状から $0.4 \sim 0.5g$ で飽和してしまうことにもよる。しかし、これまでの論文を新しい観点で見直してみると、 $1g$ をはるかに越える加速度が働いたのではないかと推定される。例えば、1897年のインドのアッサム地震 ($M 8.7$) の Oldham の調査報告について、Richter⁵⁾ が紹介しているが、それによれば、地面の小石がまるで太鼓の腹の上におかれた豆のように爆ぜ飛び、巨礫や柱が元の穴の角を傷つけることなく飛び出していたと記している。また、1959年のヘブゲン湖地震について、Hadley⁹⁾ は churned ground という言葉を使って基盤岩がずたずたに壊れたと報告し、1971年のサンフェルナンド地震 ($M 6.6$) については、Nason⁷⁾ が約 $4.5m$ の幅の小高い尾根(街の道路から約 $6m$ 、反対の谷から $18m$ 高い)の土がまるで鋳で耕したように粉々になりひっくり返されていた (shattered earth) と報告している。さらに、Morrill⁶⁾ は、同じサンフェルナンド地震について、Nason の報告した場所から $5km$ ばかり離れた消防分署の当直の署員が、地震で寝ていたベッドから床にはね落され、彼の上にそのベッドが落ちてきた。また、ガレージに入れてあった消防自動車に床にスリッパ跡もつけず、前後左右に飛ばされ、飛び上ったとしか考えられないような傷をガレージの扉や壁につけ、ホース棚は床から $1.2m$ の高さのところから消防車の足乗せで壊されており、すぐ裏の低い丘が Nason の場合と同じく shattered earth になっていたと記している。これらの例は今回の現象と非常に良く似ている。かなり大きな加速度が働いたと考えるべきであろう。

これらの大加速度の発生は非常に局所的な現象なのであろうか。Nason と Hadley は地形の影響としているが、Morrill はその現象を調査した場所が比較的平坦なところであったことから、上下動の大加速度源が地下にあったと考えているようである。地形が地震動におよぼす影響については、これまで数多くの研究がなされているが、例えば、Boore⁸⁾ はモデル計算で、振動は地震波の波長と山体のスケールに依存するが、平坦地に比べて尾根では数倍に増幅されることを示している。また、西村ら²¹⁾ および Davis²²⁾ は山体に沿って地震計を置きその増幅度を調べている。西村らは、滋賀県大津市の逢坂山で、地殻変動観測所のトンネルと山頂およびふもとの平地で同時観測を行ない、ふもとに対して山頂では尾根に直交する水平動成分が $5Hz$ 付近で $6 \sim 7$ 倍に増幅されるという結果を得ている。しかし、 $6 \sim 10Hz$ に対しては $1.5 \sim 2$ 倍程度である。この逢坂山は弧立した山でスケールもそんなに大きくないので、尾根が縦横に走り、山また山という地形と比べるとかなり特殊なケースになるのではないかと思う。

確かに、今回の調査で石および倒木の飛びは尾根および山頂に圧倒的に集中していたことから、地形と地盤の影響が非常に大きいと思われる。尾根や急傾斜の崖では、波動の重疊によって振動が大きく増幅されると考えられる。しかし、谷沿いで石の飛びが全くなかったわけではなく3例は確認した。谷沿いは元々転石が多く確認しにくいこともある。また、2.1節でも記したように、同じような地形で尾根が北の方に延びていたにもかかわらず、石や倒木の飛んだ領域と飛ばなかった領域の境界が非常に明瞭であること、大加速度域が $1 \times 2km$ とある領域を持つことから単に地形や地盤のみで片付けことはできないと思う。少なくとも、大加速度領域では谷沿いでも $2 \sim 3g$ 程度にはなったのではないかと思う。

では、何故大加速度が推定された震央付近の集落は地震によって倒壊しなかったのだろうか。調査の印象では、建造物が倒れるかどうかは、構造上の要素が大きく左右すると思われた。実際、3.2節で記したように「やまめ」荘の主人は「家はかなり傾いたが倒れはしなかった。しかし、家の中の建具や家具はほとんど飛び散っていた。家は一ヶ月ぐらいでだんだんと復元してきた。」と述べていた。また集落の中の墓石で飛んだのではないかと思われるものもかなりあった。しかし、家が倒れなかった原因はこれだけではなく、振動の継続時間が非常に短かった ($2 \sim 3$ 秒) ことも一因であると思う。さらに、大加速度を発生したのは、Fig. 4 の記録からもわかるように $10Hz$ 程度である。梅田ら²⁴⁾ は、日本海中部地震などの記録の解析から、周波数の地震規模依存性について調べ、低周波側のスペクトルピークは、従来言われているように f^{-3}

の勾配で変化するが、高周波側にもう一つのピークがあり、この地震規模依存性は f^{-9} 程度であると述べている。Fig. 4 の M5.3 の余震は、梅田らのスケーリングの図によくのる。そこで、本震 (M6.8) をその図にあてはめると、低周波側が 0.3~0.5 Hz, 高周波側が 8~10 Hz となる。高周波側で大加速度が発生したと思われる。木造建築はこのような高い周波数には案外丈夫である。

Fig. 10 に、今回の調査から得られた大加速度域、地変線および名古屋大学が決めた本震、2つの大きな余震と1984年10月31日までの余震域をまとめて図示する。砂目で示した地変の帯は 500 m 程度の幅をもつことから、最初期待したように断層変位そのものの現れとするよりも、断層運動による地震動が最も激しかったところと考えた方がよいかも知れない。図を見て矛盾していることは、本震の震央、余震域と大加速度域、地変の帯との位置がずれていることである。これについての一つの解釈は、気象庁が決めた本震の位置はもう少し南東寄り而我々には都合がよいが、この地域が火山帯で地下構造が複雑であることや、観測点間の距離や配置を考えれば、この程度の誤差はあるのかも知れない。もう一つの解釈は、阿武山ネットの中周期低倍率速度計記録や伊豆半島で行っている観測記録をみると、最初の着震時から約1.5秒あとに大振幅の相が見られる。高感度の記録では、最初から振幅は飽和していてこの相は見えない。したがって、この震央は最初の波で決められたもので、大加速度領域、地変の帯はあとの大振幅が関与していると考えられることもできる。さらに、余震域がほとんど北側に偏っているのは、地表に現われた地変も北側に多いことから、北側の上盤のみが地震によって動いたと考えることもできる。

5. お わ り に

今回の調査で数多くの石および倒木の飛んだ様子を知り、地震動が重力加速度をはるかに越えたと思われる領域を見積ることができた。また、場所によっては、15 g 近くの大加速度となり、土石流などで知られている粒度偏析現象を見つけることができた。これらの大加速度領域は 12~16 km と推定される全体の破壊域に比べると、震央近くのごく限られた領域であった。一方、山の中の地割れ、道路の亀裂、その他の異常現象から推定地震断層とはほぼ一致すると思われる地変線を引くことができた。今後に残された問題の一つは、地形の凹凸による地震動の増幅度および周波数依存性について調べ、基盤ではどの程度の加速度が作用したのか推定し、震源過程の解釈に反映させていくことである。

謝 辞

長野県西部地震に関する田中亮治氏への聞き取り調査の貴重なビデオテープをお見せ下さった、防災研究所の奥田節夫教授並びに同研究室の諏訪浩助手に心から感謝の意を表します。また、諏訪浩助手には、粒度偏析現象に関する文献検索に、さらに当研究に対して有益なご助言をいただいたことを記し、謝意を表します。また、富山大学教養部地学科の小林武彦教授には、王滝村近辺の地質構造について有益なご教授をいただいた。厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 気象庁：昭和59年（1984年）長野県西部地震、地震予知連絡会々報、第33巻、1985、pp. 116-122.
- 2) 名古屋大学理学部：1984年長野県西部地震について、地震予知連絡会々報、第33巻、1985、pp. 123-134.
- 3) 松田時彦・山科健一郎・有山智雄：長野県西部地震の震源断層に対する調査、1984年長野県西部地震および災害の調査研究報告、自然災害特別研究(1)、1985、印刷中。
- 4) Kawasumi, H.: The Imaichi Earthquake of December 26th, 1949. General Description, Bull. Earthq. Res. Inst., the Univ. of Tokyo, 28, 1950, pp. 355-367.
- 5) Richter, C.F.: Elementary Seismology, Freeman, San Francisco, 1958, pp. 49-56.

- 6) Morrill, B.J.: Evidence of Record Vertical Accelerations at Kagel Canyon during the Earthquake, In the San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, U.S. Geological Survey Professional Paper 733, 1971, pp. 177-181.
- 7) Nason, R.D.: Shattered Earth at Wallaby Street, Sylmar, In the San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, U.S. Geological Survey Professional Paper 733, 1971, pp. 97-98.
- 8) Boore, D.M.: A Note on the Effect of Simple Topography on Seismic SH Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 1972, 62, pp. 275-284.
- 9) Hadley, J.B.: Landslides and Related Phenomena Accompanying the Hebgen Lake Earthquake of August 17, 1959, U.S. Geological Survey Professional Paper 435, 1964, pp. 107-138.
- 10) 松澤武雄: 鳥取大地震の時の狛犬の運動, 東大震研集報, 22, 1944, pp.60-65.
- 11) Williams, J.C.: The Segregation of Particulate Materials. A Review, Powder Technology, 15, 1976, pp. 245-251.
- 12) 諏訪 浩・奥田節夫: 焼岳上々堀沢扇状地における土石流の堆積構造, 京大防災研年報, 25号 B-1, 1982, pp. 307-321.
- 13) 諏訪 浩・奥田節夫・小川恒一: 土石流における岩屑の粒度偏析過程 その1——大径礫の先端集積と動的篩作用による逆級化——, 京大防災研年報, 27号 B-1, 1984, pp. 409-423.
- 14) 伊藤 潔・飯尾能久・黒磯章夫・梅田康弘・村松郁栄: 1884年長野県西部地震で加速度が $1g$ を越えた領域の調査, 1984年長野県西部地震および災害の調査研究報告, 自然災害特別研究(1), 1985, 印刷中.
- 15) Maley, R.P. and W.K. Cloud: Preliminary Strong-Motion Results from the San Fernando Earthquake of February 9, 1971, In the San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, U.S. Geological Survey Professional Paper 733, 1971, pp. 163-176.
- 16) Trifunac, M.D. and D.E. Hudson: Analysis of the Pacoima Dam Accelerogram, 1971, 61, pp. 1393-1411.
- 17) Hartzell, S.: Faulting Process of the May 17, 1976 Gazli, USSR Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 1980, 70, pp. 1715-1736.
- 18) Archuleta, R.J.: Analysis of Near-Source Static and Dynamic Measurements from the 1979 Imperial Valley Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 1982, 72, pp. 1927-1956.
- 19) 平野昌繁・石井孝行・藤田 崇・奥西一夫・奥田節夫: 王滝村崩壊にみられる地形・地質特性, 昭和59年度京大防災研研究発表講演会, 京大防災研, 1985.
- 20) 芦田和男・江頭進治: 御岳くずれについて, 自然災害シンポジウム要旨, 名古屋, 1985.
- 21) 西村敬一・森井 互: 地震動に及ぼす地形の影響の観測, 地震, 第2輯, 第36巻, 1983, pp. 383-392.
- 22) Davis, L.L. and L.R. West: Observed Effects of Topography on Ground Motion, Bull. Seism. Soc. Am., 1973, 63, pp. 283-298.
- 23) 小林武彦: 私信, 富山大学教養部地学科.
- 24) 梅田康弘・飯尾能久・黒磯章夫・伊藤 潔・村上寛史: 地震波スペクトルのスケーリング, 地震, 第2輯, 第37巻, 1984, pp. 559-567.