

石の投げ飛ばし実験

松尾 成光・伊藤 勝祥・梅田 康弘

UPTHROW EXPERIMENT OF STONE

By Shigemitsu MATSUO, Katsuyoshi ITO and Yasuhiro UMEDA

Synopsis

Many upthrown stones were found on the source area for four big earthquakes. To estimate such a high acceleration, a seesaw type upthrow machine was constructed and a boulder with a diameter greater than 25 cm was upthrown. Small accelerometers were attached on the boulder and the base of the machine. When the boulder fly horizontally at a distance of 50~60 cm, the base acceleration reaches to 5~6 g.

From the field survey for 1992 Landers, California, earthquake, it was found that small stones were not dislodged but only big stones with the weight of greater than 10 kg were upthrown. We examine a frequency response depending on a weight of stone, by using a vibrator. For a frequency range of 40~80 Hz, acceleration of big stone was about 3 times greater than that of small stone.

1. はじめに

強烈な地震動によって地表の物体が飛び散るという現象が、最近発生した4つの大地震の現地調査で確認されている。すなわち、1984年長野県西部地震 (M6.8)¹⁾、1989年ロマ・ブリエタ地震 (M7.1)²⁾、1990年ルソン島地震 (M7.8)³⁾、1992年ランダース地震 (M7.4)⁴⁾である。発見された飛翔物体は主に石であり、その数は1つの地震につき10数個~100個以上に及ぶ。飛び石の分布は震央付近の限られた範囲であるが、地震規模が大きくなるとその範囲も大きくなる傾向があり、1990年ルソン島地震では30 km×15 kmの範囲に分布していた。

震源近傍では、従来予想されなかったような大きな加速度が実在するものと考えられる。飛び石から地動速度及び加速度を見積もるために、これまでも小石を使った小型の実験⁵⁾や数値実験⁶⁾は行われたが、地震で実際に飛んだ10 kg以上の石を数10 cm飛ばした実験はまだ無い。地動を見積もるためには石と土の相互作用、すなわち粘着力や石の重量に依存する振動の応答特性も調べる必要がある。

そこで、今回は次の2つの実験を行った。1つは台に厚さ10 cm~20 cmの土を敷きつめ、その上に最大20 kgの石を乗せて石を飛ばすことのできる、やや大型の装置を作製し石飛ばし実験を行った。もう1つは地面に置かれた大小の石をバイブレータで振動させ、石の大小による加速度応答の違いを調べた。

2. 石飛ばし実験装置

実験機は Fig. 1 に示すようなシーソー型の振動装置で、中央の回転軸を中心に両端が±30 cm回転する。

この可動範囲を得るために長さは 250 cm となった。幅は 80 cm である。最大重量 50 kg を載せて 10 g 程度の加速度で振動させるため、台を構成するフレームにはスチール製のチャンネルを用いた。その結果実験機の総重量は 150 kg となった (写真 1)。

振動させる動力源は、現在の所人力である。人力を軽減するため、4 カ所に圧縮コイルバネを取り付けるようにした。バネ定数で振動周期を得るものではない。このバネは石と土の合計重量に応じて数と種類を変えるようになっている。

台の上下運動は変位計 (リニアックス) で検出する。台と石に小型加速度計を取り付けるが、石には上下成分のみである。石の水平飛距離を測りやすくするため、**Fig. 1** の受皿 (バスケット) には白いポリスチロールを敷いて、石の落下場所に跡が付くようにした。

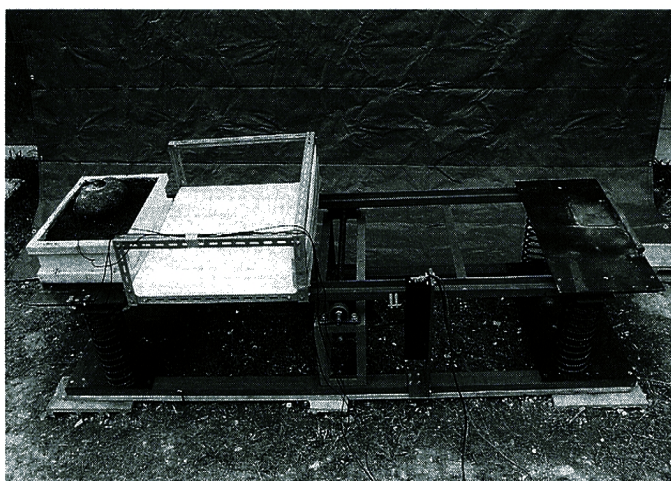


Photo. 1. Photograph of upthrow machine.

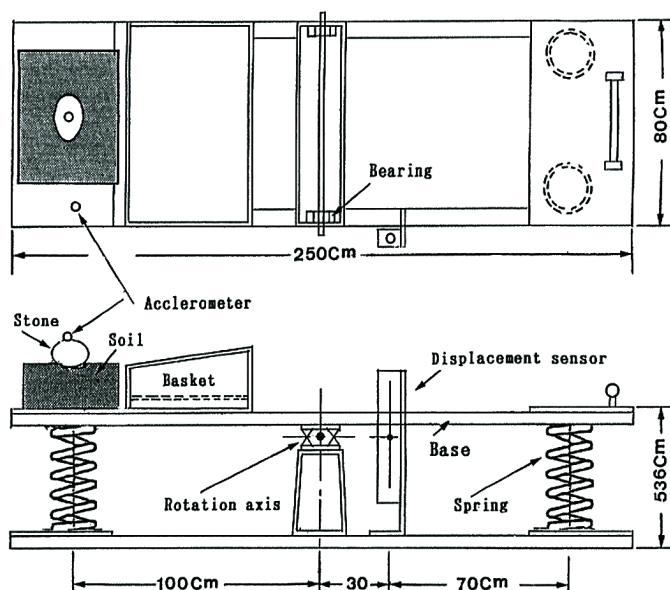


Fig. 1. Horizontal and vertical view of seesaw type upthrow machine.

3. 測定記録

実験記録の1例を Fig. 2 に示す。10.5 kg の石を水平に 20 cm 飛ばした時の、上から順に台の変位、石に取り付けた加速度計の出力、同じく台の上下加速度である。いずれも図中、太い横線が静止している状態を示しており、変位の場合は台が水平位置にあることを、加速度の場合は地球の重力加速度 ($1g$) がかかっている状態である。図中の加速度の方向は地球中心に向かう加速度が増加する方向を上にとってある。従って、静止位置 (図中太い横線) よりマイナスに $1g$ のところは、その物体の加速度がゼロであることを表している。石の加速度記録で、加速度がゼロで一定になっている部分、時間にして 0.24 秒間は石が空中に存在していることを示している。その直後のパルス状の正の大きな加速度振幅は、石が着地し何度もバウンドしたことを示している。なお、バウンドし終わっても石の加速度が元の位置に戻らないのは、石が横転したり反転している場合である。

石は飛び上がれば、その加速度はゼロになるが、台のそれはマイナス方向へ増え続け、この例では静止状態から測って $2g$ に達している。石の飛距離と台の加速度の関係を得る時に、台の加速度はこのように静止状態からピーク値までを測定した。

この例では台の変位は ± 20 cm であった。台の速度は変位の勾配から図中に示したように、 1.43 m/s と求められる。この例では石の飛んだ瞬間が最大速度であったが、これは必ずしも一致しない。石が台から離れる物理条件は石の加速度がゼロになることであるが、この条件を満足したときに、台の速度が最大とは限らず、物理条件を満たした時にはすでに最大速度を通過し、やや低速になってから飛び上がることもある。このような事情もあって今回は石の飛距離と台の速度の関係は求めなかった。

4. 石の飛距離と加速度

石の下に敷く土には色々なものを試したが、最終的には粘土質の土に砂と少量の水を混ぜたものを用いた。

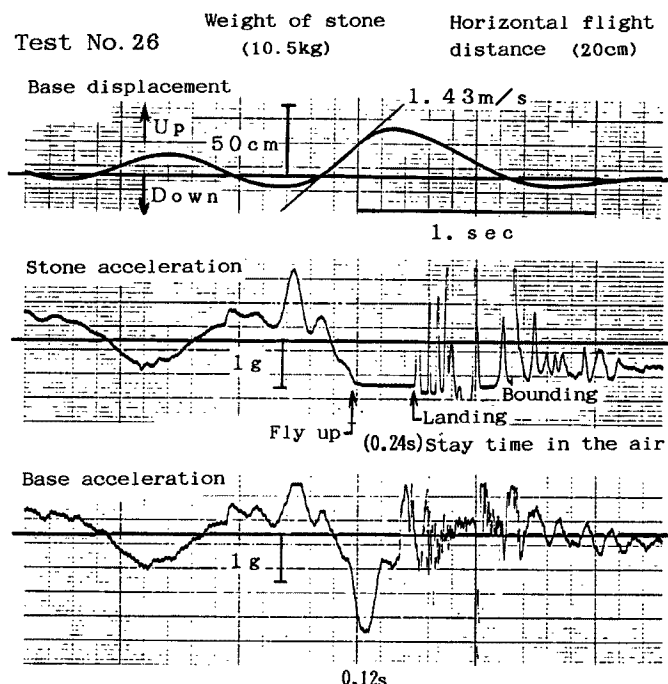


Fig. 2. An example of records. Upper trace: displacement of base of machine, middle trace: acceleration of stone, bottom trace: acceleration of base of machine.

飛ばす石は 10.5 kg の同じ石を用い、加速度を色々変えて水平飛距離を測定した。結果は Fig. 3 に示した。実験を繰り返していると土が次第に締まってくるので毎回土をはぐして石を少し埋めるようにした。これによって僅かながら石に粘着力を与えることができる。しかしこの作業は手作業なので毎回少しずつ状態が違っており、従って粘着力も一定でないという難点もある。

この影響は飛距離が短く、加速度が小さいときに顕著である。Fig. 3 で飛距離 30 cm 以下のときにバラツキが大きいのは粘着力のバラツキが表れている。ところが、飛距離 30 cm 以上、台の加速度 3 g 以上になるとバラツキはなくなる。この程度に加速度が大きくなると粘着力は無視されるものと思われる。この実験では石の水平飛距離が 50 cm～60 cm の場合の台の上下加速度は 5 g 程度に達することがわかった。

今回の実験では上下方向の加速度のみを測定したが、今後は上下・水平共測定すべきである。尚この実験装置では機構上、上下加速度に対する水平のそれは数分の 1 である。

加速度の周期について、Fig. 2 の例では図中に示したように、石が飛んだ時の台の加速度のパルス幅は 0.12 秒であった。次節で述べる振動実験の結果を見ると実際の地震動ではもっと短いのではないと思われる。パルス幅を短くする工夫をしたが最小でも 0.05 秒程度で、実験機の構造上これ以上短いパルス幅を得ることは困難であった。

5. 大石が飛び、小石は飛ばないのは粘着力か振動特性か。

地震動で石が飛んだ例はこれまでに 4 例あることは先に述べたが、いずれの場合も小石は飛ばない。地震動で飛ぶのはだいたい直径 25 cm 以上の巨礫である。その理由として、石と土との粘着力により、小石は

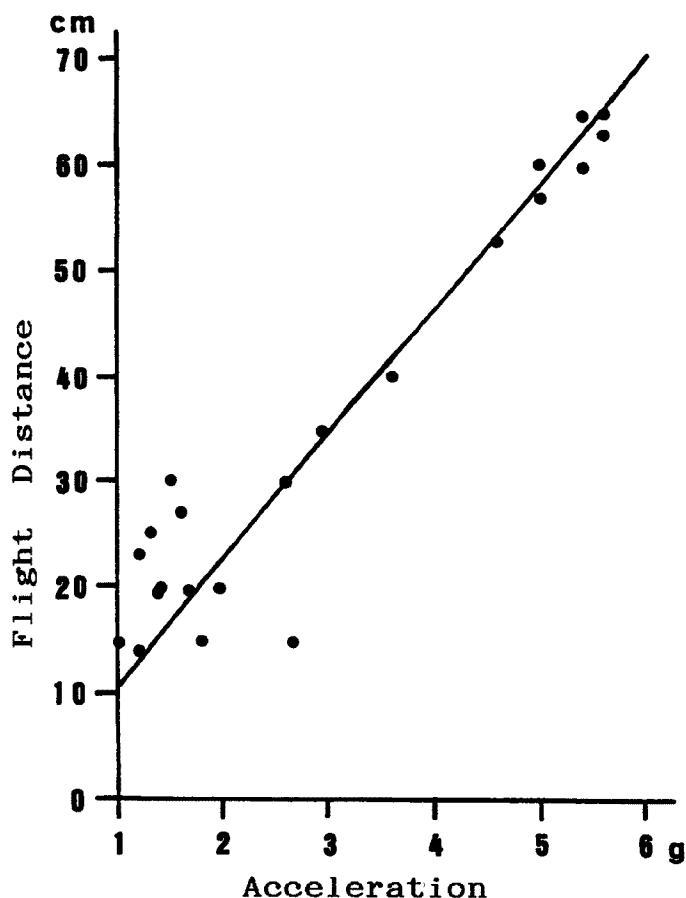


Fig. 3. A relationship between base acceleration and horizontal flight distance.

この力を振り切れないものと、かつては考えていた。ところが1992年ランダース地震の震源域は砂漠であり、砂地の石には粘着力はほとんど無い。調査地域で飛ばなかった石の粘着力を後で述べる方法で測定したところ、石の重量の数%から高々10%程度で非常に小さいものであった。従って粘着力だけでは上記の事実は説明出来ないことがわかった。

一方、震源域で飛んだ石と飛ばなかった石の重量を測定したところ、飛んだ石は10 kg 以上あり、5 kg 以下の石は飛んでいなかった。このことは、石の大小による振動特性、特にある周波数における増幅度が異なるのではないかと思わせた。

先に述べた粘着力の測定は、少しは粘着力のありそうな場所を選んで、以下のように行なった。飛ばなかった石に細い紐を、石を動かさないように注意深く巻き付ける。紐の一端をバネばかりでゆっくり持ち上げ、石が地面を離れた時のバネばかりの値を読む。その値と石の重量との差を粘着力とした。このようにして大小10個の石について測定した結果、大半の粘着力は0.2 kg~1.0 kg 程度であった。

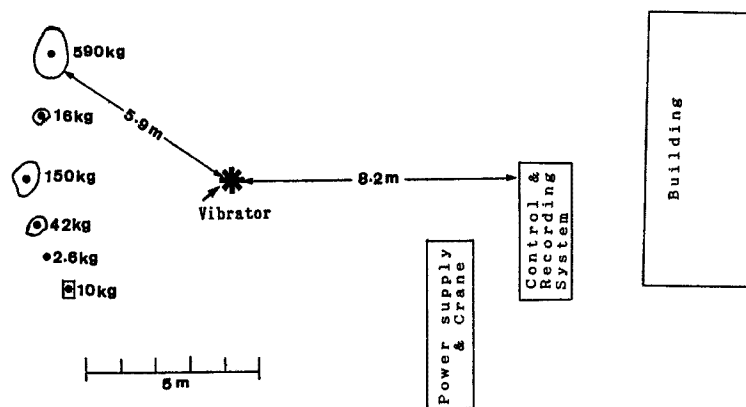


Fig. 4. Distribution of various weight of stones and vibrator. Star on each stone indicates a small seismometer. From the experiment, the frequency responses depending on the weight of stone were obtained.

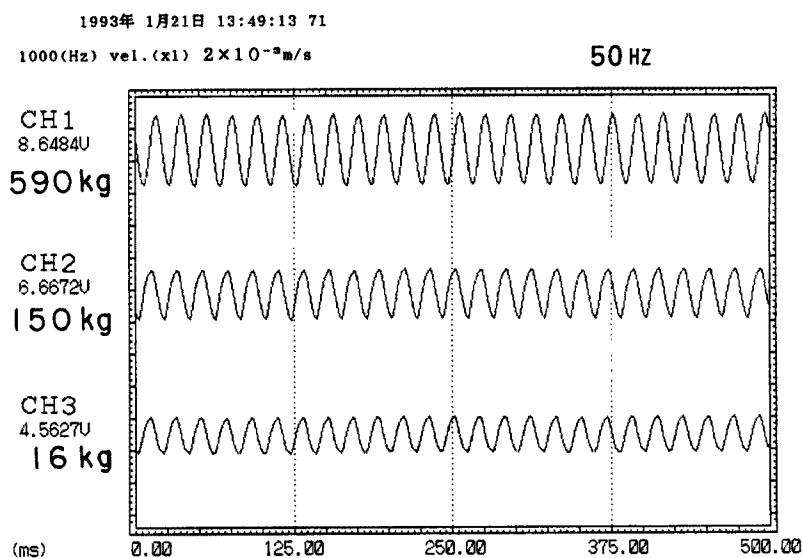


Fig. 5. An example of output signal (V) at vibrate frequency of 50 Hz, for three different weight of stone.

6. 振 動 実 験

石の大小による振動特性を知るために、防災研究所工場の西隣の平地に Fig. 4 に示すように大小の石を配置し、パイプレータによる振動実験を行なった。それぞれの石の上には小型上下動地震計（速度型：L22 D）を設置した。加振周波数が 50 Hz のときの、石の上の各地震計出力の 1 例を Fig. 5 に示した。小さい石より大きい石の振幅が大きいことがわかる。

パイプレータのすぐ側に加速度計を設置しており、これに対する石の応答加速度のスペクトルを石の大きさ別に示したのが、Fig. 6-a, -b である。Fig. 6-a は石と土を密着させた場合、Fig. 6-b は石を唯単に土の上に置いただけの場合である。どちらの場合もまたどの大きさの石の場合も、70 Hz 付近を中心としたピークが現れているが、これはおそらく、Fig. 6-a の右上に挿入した表層地盤⁷⁾の影響によるものと思われる。

石の大小によるスペクトル比の違いを Fig. 6-a について少し詳しく見ることにする。20 Hz 以下ではどの石も同じ振幅である。10 Hz 以下はパイプレータによるテストは行なっていないが、自然地震を観測した結果では石の大小に依らず、全く同じ波形であった。40 Hz～80 Hz では明らかに、大きい石ほど振幅が大きい。100 Hz 以上では逆に、大石の振幅が小さくなっている。

Fig. 6-b の場合は石と土が完全に密着していないこともあって、スペクトルはやや乱れるが、Fig. 6-a で述べた特徴に変わりはない。すなわち、低周波での振幅は石の大小に依らず同じで、40 Hz～80 Hz では小石に比べ大石の振幅が大きくなる。100 Hz 以上では、これが逆転し、小石の振幅の方が大きくなる。

前説で述べたように小石は飛ばず大石のみが飛ぶとすれば、以上の実験結果から、その周波数は 40 Hz～80 Hz であろうと推測できる。もっとも実験は宇治構内で行なっただけであるから、実際に石の飛んだ場所

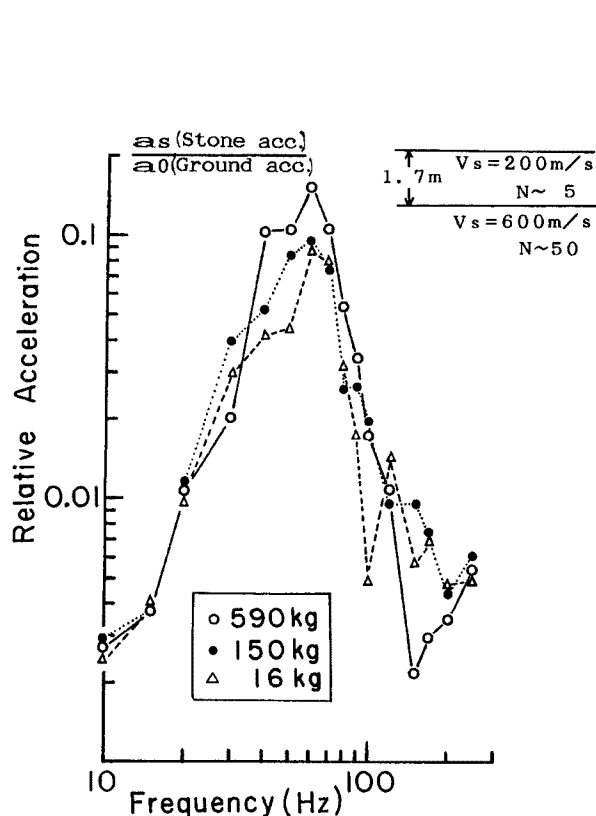


Fig. 6-a. Relative frequency response of stones. Each stone was slightly varied in the soil.

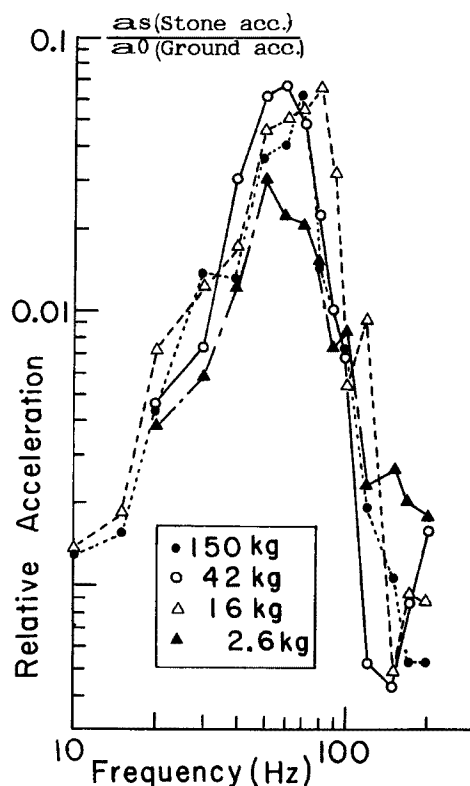


Fig. 6-b. Relative frequency response of stones. Each stone was not varied in the soil.

に即適用できるかわからない。今後、場所を変えての実験を行ないたいと考えている。

7. ま と め

これまでに4つの大地震について、それぞれの震央付近で地表の物体（主に石）が飛び散るといった現象が観測され、石の飛距離や飛び石の分布が調べられてきた。1992年ランダース地震では、粘着力のほとんど無い所で、10 kg 以上の石が飛び、5 kg 以下の石は飛ばないことが確認された。この事実を基に飛び石に関する2つの実験を行なった。

(1) 10 kg の石を実際に測定された距離を飛ばす実験装置を作り、台の加速度と飛距離の関係を調べた。飛距離 50~60 cm の場合、台の上下加速度は5~6 g に達することがわかった。石と台の間に土を敷いて、粘着力の影響も調べた。飛距離が20~30 cm と短い場合、従って台の加速度も小さい場合は粘着力が効いているが、30 cm 以上の飛距離がある場合は粘着力は無視できることがわかった。

(2) 石の大小による振幅応答の違いをバイブレータを使って調べた。周波数が20 Hz 以下の振幅は石の大小に依らず同じであった。40 Hz~80 Hz では大きい石ほど振幅が大きく、100 Hz 以上では逆に、大石の振幅が小さくなった。

以上のこと及び地震時には巨礫以上が飛ぶと言う事実から、地動周波数は40 Hz~80 Hz と推定できる。唯、上記の実験結果は字治構内でのことであるので、今後は場所を変えて同様の実験を行なう予定であるが、このように石の応答特性を調べることによって、石を飛ばすような強振動の周波数を見積もることが可能である。

謝 辞

この実験を行なうにあたり、本学理学部地球物理学教室の小林芳正先生、防災研究所地震動部門の入倉孝次郎先生には適切なご指導を戴いた。また地震予知研究センターの渡辺晃教授、住友則彦教授には色々議論していただき、行竹英雄先生には加速度計測に関する助言を戴いた。実験作業には小泉誠技官をはじめ多くの技術職員のお世話になった。厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Umeda, Y., A. Kuroiso, K. Ito and I. Muramatsu: High accelerations produced by the Western Nagano Prefecture, Japan, earthquake of 1984, Tectonophysics, 141, 1987, pp. 335-343.
- 2) 梅田康弘・M. J. Rymer: ロマ・ブリータ地震で飛び上がった石の調査, 地震学会講演予稿集, 1990, No. 1, p. 108.
- 3) 梅田康弘・伊藤 潔・加藤 護・R. D. Arboleda: 1990年フィリピン地震によって飛び跳ねた石, 京大防災研年報, 34号, B-1, 1991, pp. 211-219.
- 4) 梅田康弘: 1992, カリフォルニア, ランダース地震 (M7.4) による飛び石, 地震学会講演予稿集, 1992, No. 2, p. 125.
- 5) 黒磯章夫・伊藤 潔・飯尾能久・梅田康弘・村松郁栄: 1984年長野県西部地震の地変および大加速度域の調査, 京大防災研年報, 28号, B-1, 1985, pp. 171-184.
- 6) Ohmachi, T. and S. Midorikawa: Ground-motion intensity inferred from upthrow of boulders during the 1984 western Nagano prefecture, Japan, earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1992, pp. 44-60.
- 7) 清野純史 (私信).