

1990年フィリピン地震によって飛び跳ねた石

梅田 康弘・伊藤 潔・加藤 護・R. D. ARBOLEDA

THROWN-OUT STONES BY THE 1990 PHILIPPINE EARTHQUAKE

By Yasuhiro UMEDA, Kiyoshi ITO, Mamoru KATO and R. D. ARBOLEDA

Synopsis

A large earthquake ($M=7.8$) struck the central area of Luzon Island on July 16, 1990. A number of stones were thrown out from the former sockets by severe shaking of the main shock. The dislodged boulders and cobbles were distributed within 30 km in north-south and about 10 km in east-west directions from the town of Rizal. The high accelerations of $2.6 \sim 3.3g$ were estimated from the dislodged distances of 45 ~ 58 cm, assuming that the seismic waves had a frequency of 3 Hz.

By using the dislodged distances of 71 stones which were measured at various areas, the source of great vibration was determined at 7 km south-southeast of Rizal town. The displacement as well as calculated ground accelerations and velocities decrease with distance from this source. The result shows that the survey of thrown-out stones in the epicentral area is effective to estimate the high accelerations exceeding earth's gravity ($1g$).

1. はじめに

1990年7月16日のフィリピン地震 ($M=7.8$) によって、震央付近の数多くの石が飛散した。この事実は地震時に、地球の重力加速度 ($1g$) を越える大きな振動が生じたことを示すものである。地震によって地表の物体が飛び上がった事実を記載したものは、これまでもいくつかある。例えば、1897年アッサム地震¹⁾、1943年鳥取地震²⁾、1949年今市地震³⁾、1967年ムドウルヌ地震⁴⁾などである。また加速度計によって $1g$ を越える記録が得られた例も数例ある。例えば、1971年サンフェルナンド地震⁵⁾、1976年ガズリ地震⁶⁾、1979年インペリアルバレー地震⁷⁾、1985年ナハニ地震⁸⁾などである。これらの例はいずれも1カ所、あるいは1地点のみで得られた記録であったため、その原因はなにか特別な条件、たとえば地形とか人工物上あるいは震源との特殊な位置関係によるものと解釈されてきた。ところが、1984年長野県西部地震⁹⁾、1989年ロマブリエタ地震¹⁰⁾及び今回のフィリピン地震では、いずれも震央付近のある領域で数多くの地表物体が飛散したことが確認された。事例はまだ3例であるが、浅い大地震の場合は一般にこのような大振動が発生するのではないと思われる。

震央近傍での大振動を震源過程や地震波の経路あるいは地形・地質・地盤とも合わせて理解するためには、唯1点の振動の大きさだけでなく、面的な振動分布が是非必要である。このような研究目的のために、日本では古くから墓石の転倒による加速度の見積り及びその分布が調べられてきた。しかし、よく知られているように、日本の墓石は背の低いものでも、その縦横比は2:1であるため、 $1/2g$ 以上の水平加速度で転倒してしまう。つまり、墓石の転倒から求められる地震動の最大加速度は高々 $0.5g$ 程度であり、それ以上の加速度が存在しても飽和してわからないということである。事実このような方法で求められた

加速度分布¹⁾は震源域の広い範囲にわたって頭打ちとなっている。本稿で述べる震央付近の飛翔物体（主に石）は1g以上の加速度について上限はなく、また石の分布は一般的であるので上記の目的のためには新しい指標となりうる。

2. 飛翔物体

今回の地震による飛翔物体はほとんど地面上の石である。Fig. 1に示した網目の領域でおびただしい石が飛散していた。リサール町を中心に南北約30kmの範囲である。リサール町の北北西に続く丘は2～3の段丘面で形成されており、それぞれの面は平坦で牧場になっている。この段丘面の1番下の草地で発見された飛び石の1例をFig. 2に示す。長さ40cm、巾27cm、高さ8cmあり、石の種類はわからなかったが、重さは30kg程度と思われる。Fig. 2の平面図で点線で囲んだ部分が石の元の場所（ソケット）であり、Photo 1では右側の草の生えていない所がそれに対応する。石はソケットから北に、45cm離れたところで上下反転していた。このあたり一帯の石は元の上部が黒く、下側（土と接触していた部分）は白い。したがって、その石が反転したかどうかの判別は容易にできた。この石のように割合扁平な石は転がった形跡もなく、唯1度ある高さまで跳ね上げられ、空中で回転して着地したものと思われる。Photo 2はこの段丘面の第2ステップにおける調査風景である。1つの石について、その元の位置（ソケット）の確認ができた場合には、石の飛んだ距離とその方向、石の大きさ、反転したかどうかの区別、地面

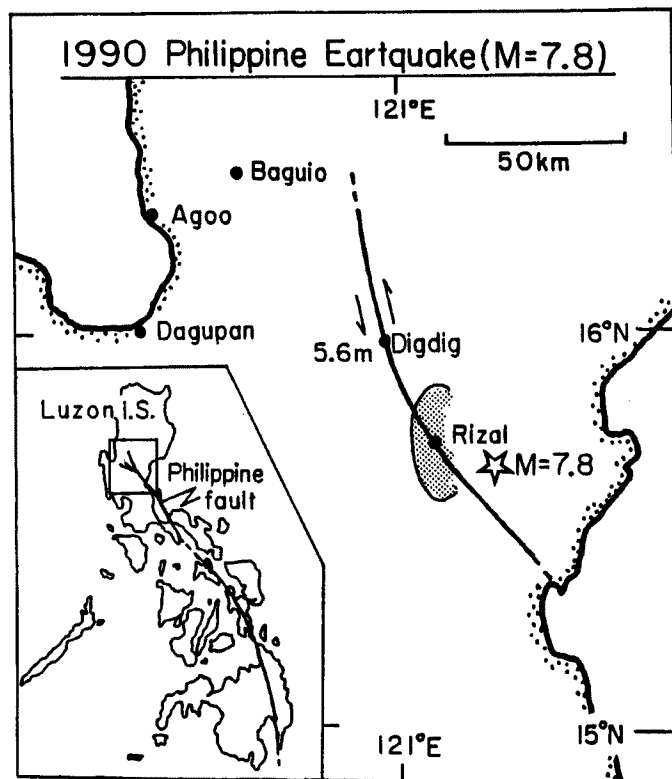


Fig. 1. Seismic fault (thick straight line) and epicenter (star) determined by U. S. Geological Survey. Shadow shows the area struck by high acceleration exceeding earth's gravity.

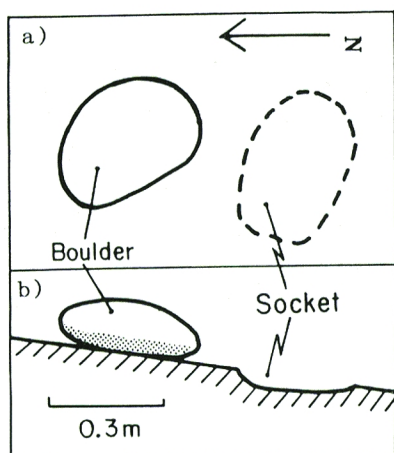


Fig. 2. An example of thrown-out boulder. a) and b) is plane view and vertical section, respectively.

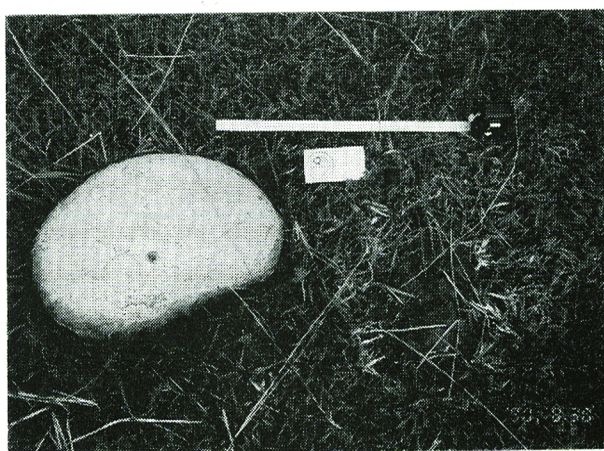


Photo 1. Photograph of thrown-out boulder corresponding to Fig. 2.



Photo 2. Survey for throwm-out stones, near Rizal town (A-region in Fig. 4).



Photo 3. Tossed up and overturned stones at B-region in Fig. 4.

の傾斜などを測定した。

以下いくつかの例を示す。**Photo 3, 4** はリサール町の北 3 km の山裾で発見されたものであり、いずれも反転していた。このあたり一帯はゆるやかな丘陵地であり、ほとんどの飛び石は山裾の平地に近い牧草地で発見された (**Photo 5**)。 **Photo 6** はリサール町の南約 14 km のマルコス村で発見された飛び石であり、平坦な地面で発見された石のなかでは最大の飛距離、58 cm あった。いくつかの地点では、**Photo 7** のように 1 カ所で数多くの石が飛散していた。残念ながら、このように石が密集しているとそれぞれの石のソケットが確認できず、飛距離等の調査はできなかった。白く写っているのは反転した石であり、黒いものは動かなかったか、動いても反転しなかった石である。この地点はリサール町より北へ 6 km 離れた、やはり牧場である。このようにリサール町から遠くへ離れると飛ばなかった石の割合も増える。さらに離れると、石の飛距離も小さくなり、飛んだか、ずれたかの判別もできないほどになる。やがて石は全く動かなかった領域となる。このようにして **Fig. 1** に網目で示したように石の飛んだ範囲を限定することができた。ただ、リサール町の東側は洪水のため川を渡ることができず未調査である。

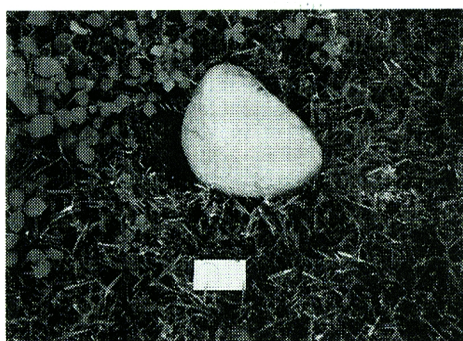


Photo 4. Tossed up and overturned stone.



Photo 5. Distribution of dislodged stones at L-region in Fig. 4.



Photo 6. Thrown-out cobble at Marcos village (E-region in Fig. 4).



Photo 7. Distribution of dislodged stones at M-region in Fig. 4.

3. 地動速度、加速度

石の飛んだ距離から地動変位・速度・加速度を求める方法は伊藤等¹²⁾に述べられているのでここでは省略し、用いる結果の式のみを記しておく。

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

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

t_1 は物体の飛行時間（滞空時間）で、石の飛距離（ ξ : 水平）, (η : 垂直）から求められる。 ω は地動の角周波数, A は変位振幅である。角周波数（ ω ）は未知量であるが、1節で述べた地震で $1g$ を越える加速度計記録をみると、その卓越周波数は $1 \sim 10$ Hz であるので、この範囲でいくつかの ω を仮定することにする。地動速度及び加速度はそれぞれ $A\omega$, $A\omega^2$ で求められる。 e は正符号のとき、石と土との反発係数、負の値は便宜上、粘着係数と考える。今回の地震では草地の転石が飛散したものが大半で、石と土との反発係数は小さい。またソケットの深さもほとんどないので、粘着力を含む土との相互作用も無視することにする。

以上のような簡単な方法と仮定のもとで、Fig. 2 の例について求めた地動変位・速度・加速度を表 1 に示した。表の最下段は加速度を重力加速度との比に換算してある。 $1 \sim 5$ Hz で地動速度が $1.3 \sim 3$ m/s という値は断層の変位速度から見てもおかしくない値である。一方、 $1 \sim 3$ Hz での加速度 $1.6 \sim 2.6g$ はよいとして、 5 Hz での $4.7g$ はやや大きい値のように思われる。上述の計算方法では、いわゆる石の応答特性が考慮されていないので、周波数によっては地動を過大評価することがある。

Table 1. Ground displacement, velocity and acceleration calculated from the dislodged distance of the stone showing in Fig. 2 and Photo. 1

Frequency	1	2	3	5	(Hz)
Displacement	0.47	0.10	0.07	0.05	(m)
Velocity	2.95	1.28	1.36	1.47	(m/s)
Acceleration	18.5	16.0	25.6	46.2	(m/s ²)
Gravity ratio	1.9	1.6	2.6	4.7	(g)

大町等¹³⁾, 翠川等¹⁴⁾は応答特性を考慮した石の跳躍現象のシミュレーションを行い, 石がソケットから飛び出すには水平加速度 $2g$ 程度, 上下加速度 $1g$ 程度が必要であるとの結果を得た。また周波数によって, 石の応答は地盤の振動に比べて 10 倍程度増幅される場合があるこ

とも示している。このような点も考慮すると, 飛距離 45 cm の場合, 周波数 2~3 Hz で地動速度 1.3 m/s 程度, 同加速度 1.6~2.6 g が現実に近いものと思われる。なお, マルコス村で発見された飛距離 58 cm (Photo 6) の石からは 1.7 m/s, 3.3 g という値が求められている。地震によって飛び上がったことを確認できた石は 100 個余りである。飛距離 (ξ , η) を測定したもの 72 個のうち, 地形上特別な場所にあった 1 例を除く 71 個について地動周波数を 3 Hz と仮定し, 上述の方法で地動速度・加速度を求めた。Fig. 4 には各地点での石の最大飛距離と, 周波数を 3 Hz としたときの最大加速度を示した。

4. 大振動の発生源

前節で得られた速度あるいは加速度の距離に対する減衰効果を調べるためには, 座標の原点, すなわち発生源を知る必要がある。通常この様な目的には地震断層を 1 つの座標軸とし, それからの距離が用いられることが多い。飛翔物体が発見されたのはリサル町を中心に南北約 30 km であるが, 地震断層の全長 120 km (例えば, 中田等¹⁵⁾) に比べると, 約 1/4 の寸法である。従って, この様な大振動は地震断層の至る所から放出されたものではないことは確かである。事実, 断層からの距離にたいする加速度をプロットした結果を Fig. 3 に示したが, 減衰性は認められない。

別の原点としては震央をとることも考えられる。震央は USGS が決めたものと PHIVOLCS が決めたものがあるが, いずれを原点としても速度や加速度に関しての距離減衰は認められなかった。そこで, 次のような操作をして, 我々の測定結果から大振動の源を求めることにした。Fig. 4 で示したように, ある小領域での飛距離の逆数に適当な係数を乗じる。この値を半径とする円を, その領域を中心にして地図上に描く。各小領域毎にこの円を描き, 各々の円の交点を直線で結ぶ。この直線群の交点を発生源と仮定する。この方法は, 地震波の (S-P) time を用いて震源決定する場合と同様の考え方である。時間軸の情報はないので, 減衰するであろうと推定している振幅を用いた。乗じる係数を変えて色々な円をいくつも描いたが, 結果はそれほどうまくゆかず, 円の交点を結ぶ直線群はほとんどの場合交叉しなかった。しかし, いくつかの図を眺めているとリサル町の南にこの直線群がややまとまる傾向が見られたので, やや乱暴ではあるが, Fig. 4 で◎印の位置を原点とすることにした。リサルの南南東 7 km の地点 (121°08' E, 15°39' N) である。

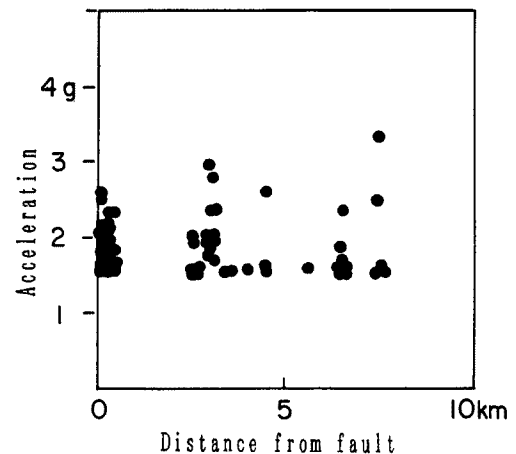


Fig. 3. Acceleration as a function of distance from the fault.



Fig. 4. Dislodged distance (upper numeral) and calculated acceleration (lower numeral) at each region.

5. 石の飛距離及び速度・加速度の減衰

前節で決めた地点を原点とし各領域までの距離を横軸にとった場合の石の飛距離を Fig. 5 に示した。同様に、周波数を 3 Hz と仮定したときの地動速度を Fig. 6 に、加速度を Fig. 7 に示した。原点の決め方はやや乱暴であったが、いずれの場合も距離に対する減衰性がよく表れている。

この様に距離に対する減衰を示す図ができたということは、もちろん飛翔物体については初めてであり、このことは次のような重要な意味を持っている。従来、地震で地表物体が飛び上がるという現象は稀なこと、あるいは特別な事情によって、などと考えられていた。しかしそれは決して偶発的な現象ではなく、物体を飛散させるのは、この図が示すように距離と共に減衰する現象、すなわち伝播波動であることを示している。また 1 節で述べたように、墓石の転倒から求められる加速度はおよそ $0.5g$ で飽和するし、地震計も $1g$ を越えるような大加速度を記録することは稀であった。このような事情もあって、重力加速度を越える大きな振動の研究はもとより、その存在ですら広くは認識されてこなかった。飛翔物体から求められる加速度には、墓石転倒の場合のような上限はなく、 $1g$ を越える大振動の研究に対して新しい指標となるだろう。石は通常、広くかつ数多く分布しており、それを使って距離減衰が描けるということは、震源近傍における大振動の面的分布も描くことができることを示している。

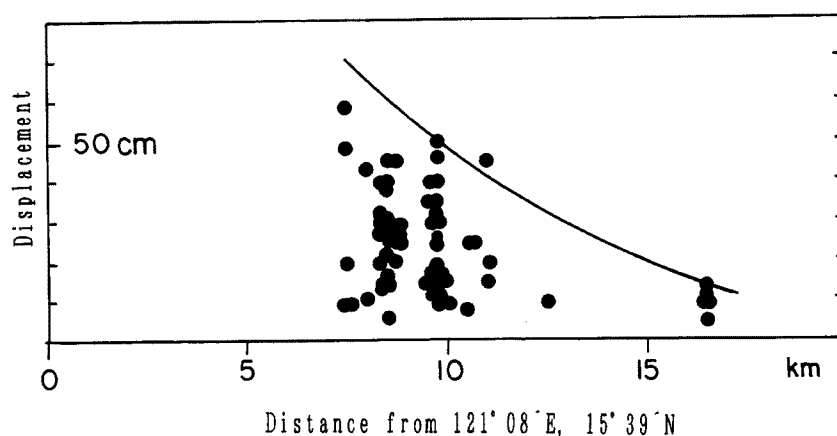


Fig. 5. Dislodged distances of stones as a function of distance from the point of double circle in Fig. 4.

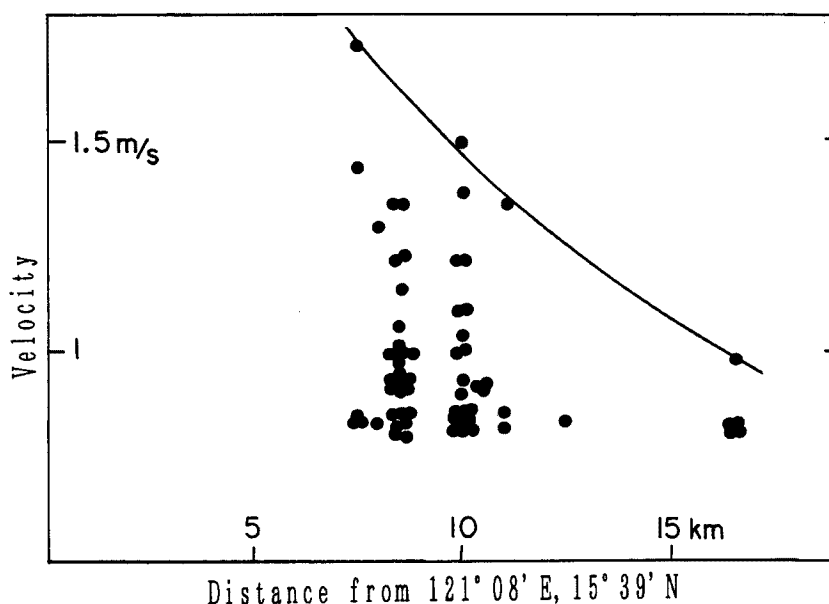


Fig. 6. Attenuation of ground velocity.

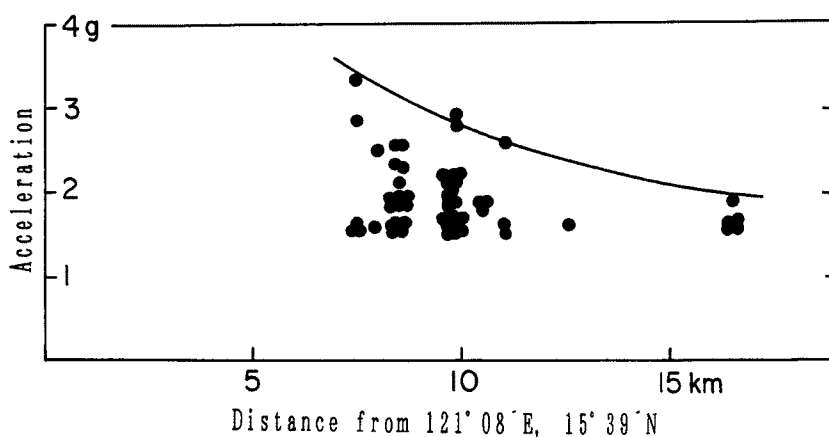


Fig. 7. Attenuation of ground acceleration.

6. まとめと議論

1990 年フィリピン地震 ($M=7.8$) では震央付近のリサル町を中心に南北およそ 30 km の範囲で、おびただしい石が飛散した。その内、71 個の石について飛距離をしらべ、この値を基に、各地点での地動速度及び加速度を簡単な方法で算出した。地動の周波数を 3 Hz と仮定すると、リサル町では最大加速度 $2.6g$ 、同速度 1.4 m/s 、またマルコス村では $3.3g$ 、 1.7 m/s という大きな振動が見積もられた。

地震断層から、あるいは USGS と PHIVOLCS が決めた震央からの距離に対して、振動の大きさは減衰性を示さなかった。そこで、各地点における最大飛距離を基に、独自に大振動の発生源を推定することを試みた。おおざっぱではあるが、リサル町の南南東 7 km の地点を大振動発生源と推定した。その地点を原点にとり、石の飛距離、それから求められた地動速度及び加速度を距離に対してプロットした結果、

いずれも距離に対する減衰が見られた。このことは石を飛散させた直接の原因が伝播性波動であることを立証すると共に、今後震源の極近傍における1*g*以上の振動に関する研究を進める際、新しい指標として飛翔物体を用いることができることを示している。

石の飛んだ、すなわち大きな振動が推定されたりサール町では主断層が枝分かれしていた。明瞭に変位が観察できたのは3本で、それぞれ左ずれであり、合計変位は5 m強であった。この他にもいくつかの地割れが出現していた。この様な断層の分岐、地割れが地表物体の飛散と密接な関係があると思われる。一方、リサール町の家屋は断層直上のそれらを除けばほとんど倒れていなかった。家屋の一般的な造りは、トタンまたはココナツの葉で葺いた屋根。壁や窓は竹を編んだものが用いられており、下部はブロックで50～70 cm積み上げられている。全体として非常に軽量の造りである。石を飛ばすような大加速度の継続時間は非常に短く、おそらく一瞬であったと思われる。我々が調査した飛び石も、何度も跳躍したという形跡はなく、唯1回の大きな振動によって飛散したものと思われる。軽量な家屋はこのような瞬間的な振動に対して、それがたとえ1*g*を越えるような大振動であっても充分耐えうるものと思われる。

この調査に関して、Philippine Institute of Volcanology and Seismology (PHIVOLCS) の R. S. Punongbayan 所長、東京大学地震研究所長・伯野元彦教授、京都大学防災研究所長・土屋義人教授、同地震予知研究センター主任・岸本兆方教授、安藤雅孝教授にはお世話になりました。

参 考 文 献

- 1) Oldham, R. D.: Report on the great earthquake of 12 th June 1897, Mem. Geol. Survey India, Vol. 29, 1899, pp. 1 - 379.
- 2) 松澤武雄: 鳥取大地震の時の狛犬の運動, 東大地震研究所彙報, 22, 1944, pp. 60 - 65.
- 3) Kawasumi, H.: The Imaichi earthquake of December 26 th, general description, Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. of Tokyo, 28, 1950, pp. 355 - 367.
- 4) Ambraseys N. N. and A. Zatopek: The Mudurnu valley, west Anatoria, Turkey, earthquake of 22 July 1967, Bull. Seism. Soc. Am., 59, 1969, pp. 521 - 589.
- 5) Maley, R. P. and W. K. Cloud: Preliminary strong-motion results from the San Fernando earthquake of February 9, 1971, The San Fernando, California earthquake of February 9, 1971, U. S. Geol. Survey Professional Paper 733, 1971, pp. 163 - 176.
- 6) Hartzell, S.: Faulting process of the May 17, 1976 Gazli, USSR earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 70, 1980, pp. 1715 - 1736.
- 7) Archuleta, R. J.: Analysis of near-source static and dynamic measurements from the 1979 Imperial valley earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 72, 1982, pp. 1927 - 1956.
- 8) Weichert, D. H., R. J. Wetmiller and P. Munro: Vertical earthquake acceleration exceeding 2*g*? the case of the missing peak, Bull. Seism. Soc. Am., 76, 1986, pp. 1473 - 1478.
- 9) 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.
- 10) 梅田康弘, M. J. Rymer: ロマ・プリエタ地震で飛び上がった石の調査, 地震学会講演予稿集, No. 1, 1990, p. 103.
- 11) 表俊一郎・三宅昭春・檜橋秀衛: 大地震時の震央域における地動大加速度の評価, 地質工学, 第11輯, 1979, pp. 1 - 17.
- 12) 伊藤潔・飯尾能久・黒磯章夫・梅田康弘・村松郁米: 1984年長野県西部地震で加速度が1*g*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，pp. 89-96.
- 13) 大町達夫・荒井靖博・竹田尚史：地震による半埋没物体の跳躍について，構造工学論文集，33 A，1987，pp. 595-606.
 - 14) 翠川三郎・竹田尚史・年縄巧・大町達夫：1984年長野県西部地震で石の跳躍現象から推定した震源域の地震動の強さ，地震2，41，1988，pp. 381-388.
 - 15) 中田高・堤浩之・Raymundo S. Punongbayan：1990年フィリピン地震（M=7.7）に伴う地震断層について（速報），活断層研究，8，1990，pp. 1-8.