

震度は加速度ではない (震度の人体実験)

高 木 聖

Seismic Intensity Does Not Depend on Acceleration of Earthquake Motion

by

Sei Takagi

Meteorological Research Institute, Tokyo

(Received May 30, 1972)

Abstract

In the latter half of the 19th Century, J. MILNE thought that seismic intensity might be dependent on acceleration of earthquake motion. Later, in 1902, F. OMORI added the value of acceleration to his list of seismic intensity, in 1932 M. ISHIMOTO added acceleration values to the C.M.O. list of seismic intensity, and in 1943, H. KAWASUMI revised their values. The C.M.O. (Central Meteorological Observatory) list was made in 1908. This list has been used up to date.

But, in the cases of natural earthquakes, seismic intensities are often not in accord with accelerations of ground motion. So the author was doubtful of the acceleration values of the C.M.O. list of seismic intensity. As the shaking table was made in the year 1970, the author made an experiment on the seismic intensity. We vibrated this table, on which a man sat, and measured the intensity of the vibration. The periods of the table were from 0.26 sec to 9.82 sec, and their amplitudes from 2.5 cm to 8.1 cm.

The results of this experiment were tabulated and are now shown in Fig. 1. The vertical axis shows the amplitude of the shaking table, and the horizontal axis its period. Intensities of these vibrations are shown by marks. If we classify them by straight parallel lines, we can draw solid lines as shown in Fig. 1. Intervals of these lines are equal to each other. The broken lines are the long established intensity level depending on acceleration of ground motion. The result of this experiment does not agree with these broken lines. Fig. 2 shows this disagreement. So the author thinks that seismic intensity does not depend on acceleration of ground motion.

Fig. 1 shows that the intensity of the vibration depends on velocity or the square of velocity and so on. Fig. 3 shows the relation between intensity and velocity. Fig. 4 shows the relation between intensity and the square of velocity. These relations show good agreement. R. MALLET has reported that intensity depends on the

velocity of ground motion. But the author thinks that intensity depends on the energy of the ground motion. Because, in other physical phenomena (light and sound etc.), intensity depends on energy. So we emphasize that seismic intensity depends on the energy which passes through a unit area per unit time.

1. 震度について

1972年2月29日、八丈島近海の地震が発生した。この時、八丈島測候所は震度VI(烈震)と報告したが、その後、被害状況などから、3月21日に、この震度VIを震度V(強震)に訂正した。これは、どういうことなのか。しかも、この地震は、有感分布から判断すると、規模は関東地震より大きく、南海道地震よりすこし小さい程度である。したがって、震央距離150kmの八丈島で震度となっても、不合理ではない。観測規定には、震度は観測者の判断によってきめる、ことになっている。このような訂正がおこなわれたのは、震度の説明記事を教条的に受け取ったのも、原因していると思われる。震度VIの説明記事を見ると、家屋の倒潰は30%以下で、山くずれが起き、地割れを生じ、多くの人々は立っていることができない程度、となっている。しかし、この記事は、どこまでも、震度VIを判断する上での目安が書いてあるだけであって、山くずれ等が起きなければ、震度VIと判定してはいけないというものではない。この記事は、これぐらい強く振動すれば、山くずれ等が起こる可能性がある、という強さの程度を示したもので、実際には、山くずれ等が起きなくても、震度VIと判定してもかまわないのである。震度は、どこまでも、人間の感覚に訴える地震動の強さを示したものである。

震度というものは、以上のように、説明記事に書いてある現象によって判断するものではなく、人体感覚によって判断する地震動の強さであるので、自然地震を待つまでもなく、振動台の上で実験できる。

2. 振動台による人体実験

1970年、気象測器工場に、強震計検定用の振動台が完成した。これは、気象研究所の地方共同研究の一環として開発したものであるが、設計および製作は、主として、川上保技術主任が担当した。詳しいことは、測候時報第38巻第3号(1971)を参照して頂くことにする。

動力には無段変速電動機を用い、振動台はクランクで、レールの上を水平に Sine Motion するようになっている。周期は0.1秒から30秒まで、スライドする。振幅は2.5cmから8.1cmまで、自由に取れる。実験に用いたのは、振幅2.5cmから8.1cmまでで、周期は0.26秒から9.82秒までである。

この振動台に、永く地震課の現業観測に従事していた気象庁職員に乗って貰い、震度を観測した。観測結果は“震度の観測表”のようになった。

3. 震度は速度の自乗の対数に比例する

表の観測値を、両対数グラフを用いて図示すると、第1図となる。震度は記号で示してある。横軸に振動台の周期が取っており、縦軸に振動台の振幅が取ってある。これらの震度を直線で区わけするとすれば、実線の区わけとなる。これらの実直線は等間隔になっており、グラフの軸に対し45°傾斜している。と、いうことは、周期(T)と振幅(A)との関係は、同次

Table. 1. Measurement of Intensities

震度の観測表

Amplitude 振 幅 (A)	Period 周 期 (T)	Intensity 震 度	Acceleration 加 速 度 $4\pi^2 A/T^2$	$(A/T)^2$
2.5cm	9.50sec	0	1.080gal	0.0693cm ² /sec ²
	6.10	0	2.688	0.1680
	3.20	0	9.760	0.6104
	2.46	0	16.52	1.0331
	1.54	II	42.00	2.637
	1.42	II	49.60	3.094
	0.52	V	370.4	23.15
	0.38	VI	714.4	44.64
	0.26	VII	1428.4	89.29
4.1	9.82	0	1.700	0.1743
	6.26	0	4.184	0.4289
	3.12	I	16,844	1.7276
	1.50	III	72.89	7.471
	0.99	V	167.29	17.153
	0.54	VI	565.6	57.97
	0.32	VII	1601.6	168.10
6.1	9.34	0	2.80	0.465
	5.90	0	7.00	1.0689
	2.99	II	27.2	4.1622
	1.58	IV	97.6	14.884
	0.90	VI	301.2	45.94
	0.54	VII	841.2	128.31
8.1	9.46	0	3.62	0.7332
	6.04	I	8.88	1.7985
	3.14	III	32.8	6.654
	1.52	V	140.4	28.40
	0.96	VII	352.0	71.32
	0.78	VIII	531.2	107.56

関係である、ということである。すなわち、震度は、 A/T またわ A^2/T^2 、またわ A^3/T^3 、……等に関係した量であるということである。また、震度が等間隔の直線で区わけできることは、 A/T 、またわ A^2/T^2 、またわ A^3/T^3 、……等の対数が震度と比例することを示している。

もし、従来考えられていたように、震度が加速度の対数に比例するものならば、第1図の破線のような傾斜を持った直線で、震度は区わけされるはずである。この破線は河角広(1943)の level である。人体実験の結果は、第1図のように、どうしても、この傾斜の直線で区わけすることができない。これが、震度は加速度の対数に比例しないことの証明になっている。

このことがよく判るように、第2図を作成した。これは、片対数グラフであって、横軸に震

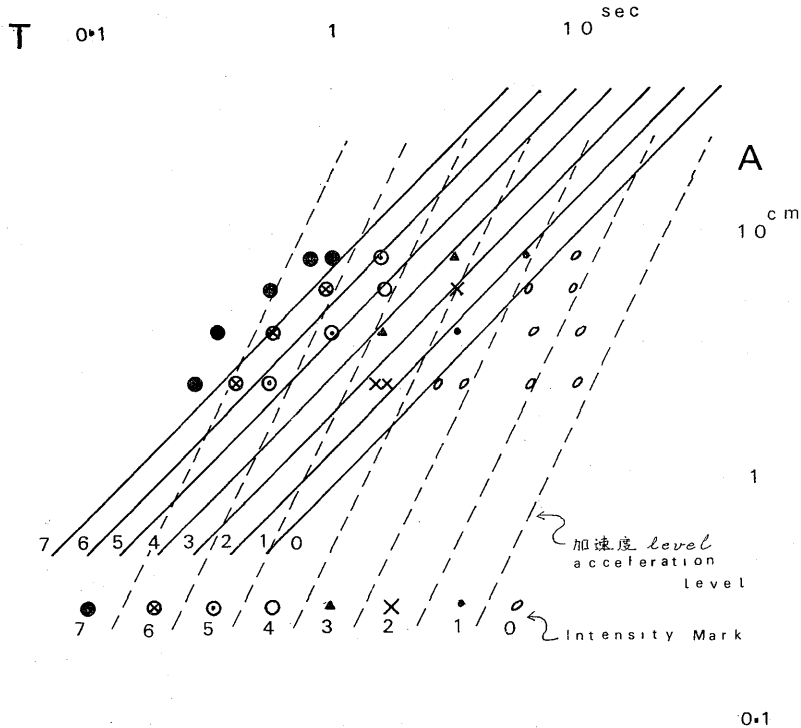


Fig. 1. Amplitude, Period and Intensity
 Solid lines show the energy level, broken lines show the acceleration level (long established).

度が取っており、縦軸に加速度の対数を取ってある。実線の階段は前記河角広 (1943) の level である。震度と加速度の対数とは、全々 match しないことが判るのである。この傾向は、筆者 (1969) が松代地震の時に調査した結果とよく似ている。

第3図は速度と震度との関係である。速度は、振幅 A と周期 T とが1次関係であるから、第1図からでも判るように、当然等間隔の階段に区わけされている。

第4図は $(A/T)^2$ と震度との関係である。これも、 A と T とが2次の同次関係にあるので、当然、等間隔の階段に区わけされる。

そこで、震度は、 A/T , $(A/T)^2$, $(A/T)^3$ ……の内、どれと比例関係にあると考えるのが妥当なのかが問題になって来る。物理学では、強さ (Intensity) という概念は、普通、energy で規定している。たとえば、光の強さは、単位時間に単位面積を垂直に通る平均の光の energy で規定しているし、音の強さは、単位時間に単位面積を通る音の energy で規定している。それゆえ、地震動の強さ (震度) も、単位時間に単位面積を通る地震波の energy で規定すべきではなかろうか。単位時間に単位面積を通る地震波の energy は、

$$2\pi^2\sqrt{\mu\rho}A^2/T^2$$

であるから、震度も A^2/T^2 の対数に比例すると考えるのが、物理学的であるように思う。

そうすると、地震動の場合も、人体感覚に訴える強さ (震度) は、単位時間に単位面積を通

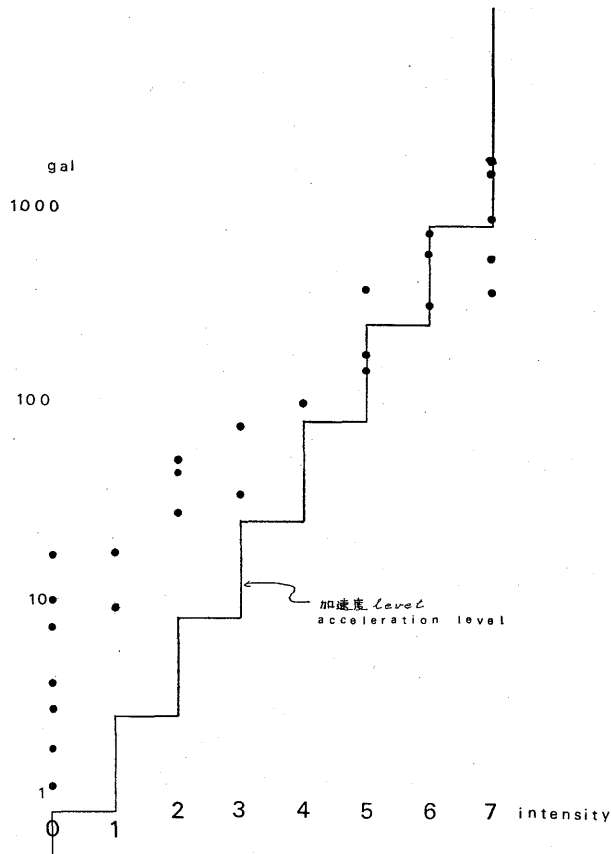


Fig. 2. Relation between acceleration and intensity
Intensity does not depend on acceleration of ground motion.

る地震波の energy で規定されることになる。従来のように、震度を加速度で規定するのは、まちがいである。

4. 震度階について

地震動の強さ（震度）に、何等かの階級を設けて表現しようという考えは、古くからあった。河角広（1943）によれば、最も古いのは、イタリアの医者、D. Pignataro の作った震度階ということになっている。Pignataro は1782年から1886年の間に起った地震を、自分の震度階によって整理している。この震度階は5階級になっていたらしい。

一方、震度に対する考え方も、いろいろあって、明治初年、日本で地震学を開拓した J. A. Ewing の好敵手、イギリスの R. Mallet は、震度は速度の大小によると考えていた。しかし、Ewing と同様に、日本で地震学を開拓した E. Milne は、震度は最大加速度によると考えていた。この考えは、大森房吉（1902）によって引きつがれ、石本巳四雄（1932）の実測を経て、河角広（1943）によって完成された。

1883年、イタリアの Rossi と Forel は、おのおのの震度階を調整して、Rossi-Forel の震

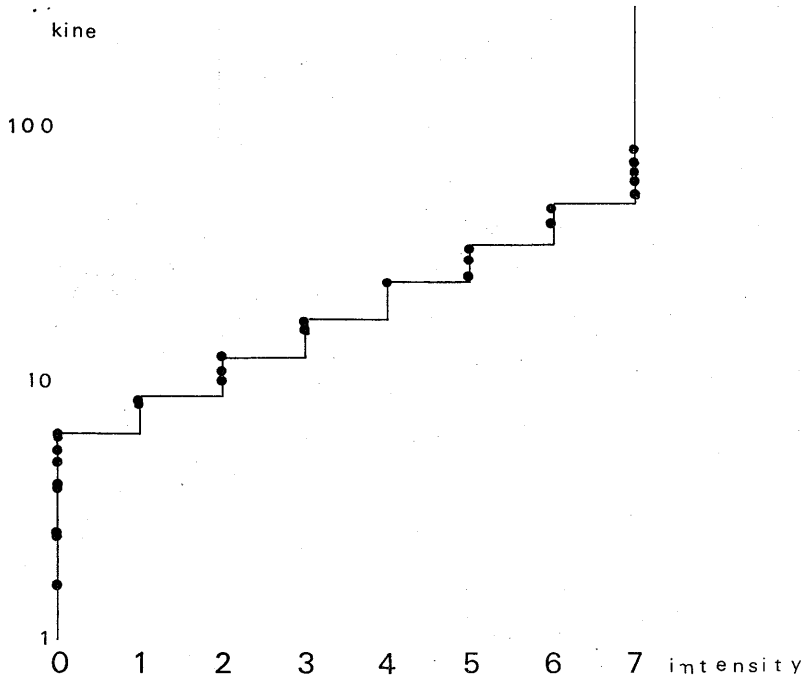


Fig. 3. Relation between velocity and intensity

度階というものを作成し、実用に供した。これは10階級に分れていた。Davison (1927) によれば、1874年には、すでにこの種の震度階が作られていたらしい。Mercali (1923) は、これをさらに細分して、12階級とした。これを Mercali 震度階という。

1884年には、日本で関谷清景等の努力によって、測候所等で用いるための中央気象台震度階が作られた。これは4階級になっていた。1898年には、これをさらに6階級に分け、1949年には、7階級にした。7階級にした理由は、震度VIが最高震度であるので、観測者が震度VIとすることを、ちゅうちょするので、その上の階級を設けることによって、心理的な障壁を除く意味と、河角広 (1943) の論文にもあるように、震度VIの範囲が広過ぎるので、河角が設けたように、震度VIIをつけ加えたものである。

1902年、大森房吉は加速度を加味して、大森震度階を作った。これは7階級に分れていた。

1903年、Cancani は、震度と加速度との間に、Weber-Fechner の法則があてはまることを主張し、Cancani の震度階を作った。その後、1932年には、改正 Mercali 震度階と言われている Mercali-Cancani の震度階を提出している。1932年、石本巳四雄は、はじめて、中央気象台震度階と加速度との関係を求め、1943年には、河角広によって、この表は補正され、理論的にも完全となった。

1963年、MSK 震度階といわれているものが、Medvedev (ソ連), Sponheuer (東独), Karnik (チェコ) の共同で発表され、ユネスコを通して、国際的に使用するように宣伝している。震度の表現が気象庁震度階 (旧名、中央気象台震度階) の表現に似ているが、12階級に分けるのは繁雑のように思う。どっちにしても、震度は体感により決めるものであって、構造

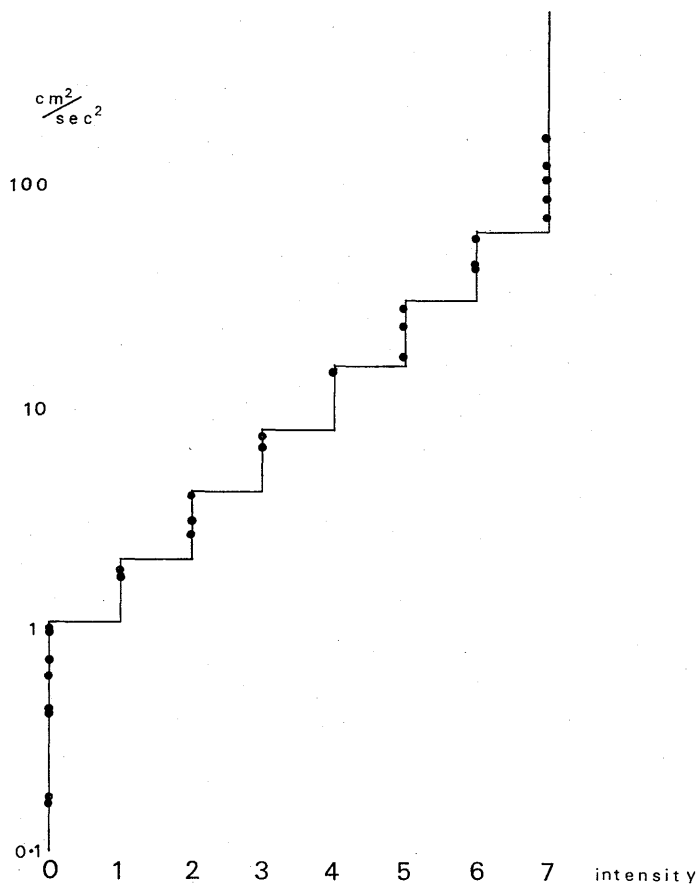


Fig. 4. Relation between the square of velocity and intensity

物の破損程度で決めるものではないから、構造物の破損程度を、いくらこまかく規定しても、意味がないように思う。

5. 生活と震度

震度は体感によって決めるものであるもので、物理的には、あまり重要視しなかった。しかし、構造物の破損が震度と関係があると思われるところから、危険を伴う産業は、震度によって点検するようになり、人口の稠密と産業の生長とにつれて、震度が人間生活に重要な要素をしめるようになってきた。

たとえば、国鉄の新幹線は、震度IV（中震）以上になると、自動的に電源を切断して、線路その他を点検することになっている。ところが、震度を従来のように加速度で規定していると、今回の実験の結果から判るように、震度II（軽震）でも震度III（弱震）でも、加速度は25 gal 以上になる場合があるから、新幹線は止まることになる。また、都市ガスは、震度ごとに点検箇所を指定しており、危険防止に必死である。地方自治体は、震度VI以上になると、災害救助法の発令等に関係してくる。

もし、構造物の破壊が加速度によって行なわれるならば、震度によって点検するのではなく、加速度によって点検するようにすればよいと思う。しかし、本当に、構造物は加速度によって破壊されるのであろうか。たとえば、地動の振幅が0.01cmで、周期が0.03秒だったとすると、地動の加速度は444 gal となり、加速度 level の震度VIに相当する。ところが、この振動は33cycleの振動であるから、大太鼓をたたいたぐらいの振動にすぎない。音の強さの level に換算すれば、せいぜい 35 phon (人間の話し声程度) 程度のものである。35 phon で家屋が破壊されるでしょうか。加速度は大きくても、この振動では家屋は破壊されません。この振動は、energy level の震度では、震度 0 (無感) であって、全々破壊とは関係ないはずで、それゆえ、やはり、震度を加速度で規定することは無理だと思う。構造物の破壊に対しても、やはり、energy の大小で規定するのが妥当だと思う。

6. 総括

Milne 以来、地震動の強さ(震度)は、その加速度の大小によると考えて来たが、人体実験の結果は、それを否定した。そうして、震度は地震動の速度の自乗の対数に比例することを示した。これは、単位時間に単位面積を通過する波動の energy の対数に比例すると考えるべきものである。他の物理現象、光も音も、その強さは、単位時間に単位面積を通過する energy で規定しているので、地震波動の強さ(震度)も、energy で規定するのが妥当だと思う。実験の結果は、全くそのようになっていた。

また、構造物等の破壊も、波動の加速度によるのではなく、energy の大小によると考えられる。

最後に、気象測器工場の矢亀紀一工場長、ならびに、小野崎誠一技術係長の応援を得たことを感謝します。特に、小野崎誠一係長には、実験台に乗って頂き、危険な思いをさせたことに対し、深謝します。また、1972年4月19日地震学会春季大会に於て、熱心に討論された諸氏に対し感謝します。

参考文献

- DAVISON, C., 1921: A Manual of Seismology. 1-256.
 ———, 1927: The Founders of Seismology. 1-240.
 ISHIMOTO, M., 1932: Echelle d'intensité sismique et accélération maxima. Bull. Earthq. Res. Inst., 10, 614-626.
 MILNE, J., 1885: Seismic experiments. Transaction of Seismological Society of Japan, 8, 1-82.
 OMORI, F., 1900: Note on the Great Mino-Owari Earthquake of Oct. 28th 1891. Publication of Earthquake Investigation Committee, 4, 13-24.
 ———, 1902: Macro-seismic measurement in Tokyo, II. and III. Publication of Earthquake Investigation Committee, 11, 1-95.
 河角 広, 1943: 震度と震度階. 地震, 15, 6-12. 187-192.
 気象測器工場, 1971: 一倍強震計の振動試験. 測候時報, 38, 103-105.
 大森房吉, 1898: 地震動の「強度」と被害との関係即絶対的震度階に就きての調査及報告. 震災予防調査会報告, 21, 45-50.
 高木 聖, 1969: 地震動の最大エネルギーと震度との関係. 気象研究所研究報告, 20, 79-89.

震 度 は 加 速 度 で は な い
— 震 度 の 人 体 実 験 —

高 木 聖

1970年、気象測器工場に、強震計検定用の振動台が出来たので、この上に、人間を乗せて、震度の人体実験をおこなった。

震度は人体感覚によって判定する以外に方法がないので、この実験が意味を持つことになる。

実験の結果は第1図に示してある。測定値は表になっている。震度は記号で表現した。これらの震度が、第1図の破線（従来の加速度 level）で区分出来ないのは、震度は加速度で規定出来ないことを示している。これらの震度は、第1図の実線で区分され、震度は energy に関係があることを示している。

それゆえ、震度は、単位時間に単位面積を通る地震波の energy の対数に比例する、と考えられる。