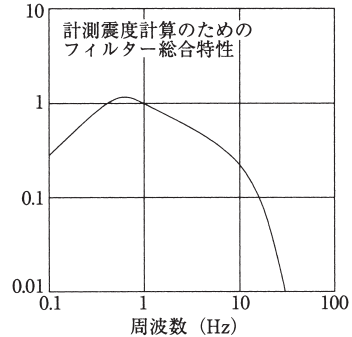


# 地 震

## 地震関係公式諸表

### 1. 気象庁震度階級(1996)

| 震度階級 | 計測震度          |
|------|---------------|
| 0    | 0.5 未満        |
| 1    | 0.5 以上 1.5 未満 |
| 2    | 1.5 以上 2.5 未満 |
| 3    | 2.5 以上 3.5 未満 |
| 4    | 3.5 以上 4.5 未満 |
| 5 弱  | 4.5 以上 5.0 未満 |
| 5 強  | 5.0 以上 5.5 未満 |
| 6 弱  | 5.5 以上 6.0 未満 |
| 6 強  | 6.0 以上 6.5 未満 |
| 7    | 6.5 以上        |



### 2. 気象庁震度階級

| 震度階級 | 人の体感・行動   | 屋内の状況  | 屋外の状況   |
|------|---|--|---|
| 0    | 人は揺れを感じないが、地震計には記録される。                                      | —  | —   |
| 1    | 屋内で静かにしている人の中には、揺れをわずかに感じる人がある。                             | —  | —   |
| 2    | 屋内で静かにしている人の大半が、揺れを感じる。眠っている人の中には、目を覚ます人もいる。                | 電灯などのつり下げ物が、わずかに揺れる。   | —   |
| 3    | 屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。歩いている人の中には、揺れを感じる人もいる。眠っている人の大半が、目を覚ます。 | 棚にある食器類が音を立てることがある。  | 電線が少し揺れる。   |
| 4    | ほとんどの人が驚く。歩いている人のほとんどが、揺れを感じる。眠っている人のほとんどが、目を覚ます。           | 電灯などのつり下げ物は大きく揺れ、棚にある食器類は音を立てる。座りの悪い置物が、倒れることがある。  | 電線が大きく揺れる。自動車を運転していて、揺れに気付く人がある。  |
| 5 弱  | 大半の人が、恐怖を覚え、物につかまりたいと感じる。                                   | 電灯などのつり下げ物は激しく揺れ、棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。座りの悪い置物の大半が倒れる。固定していない家具が移動することがあり、不安定なものも倒れることがある。 | まれに窓ガラスが割れて落ちることがある。電柱が揺れるのがわかる。道路に被害が生じることがある。                                       |
| 5 強  | 大半の人が、物につかまらなさと歩くことが難しいなど、行動に支障を感じる。                        | 棚にある食器類や書棚の本で、落ちることがある。テレビが台から落ちることがある。固定していない家具が倒れることがある。                                 | 窓ガラスが割れて落ちることがある。補強されていないブロック塀が崩れることがある。据付けが不十分な自動販売機が倒れることがある。自動車の運転が困難となり、停止する車もある。 |
| 6 弱  | 立っていることが困難になる。  | 固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。ドアが開かなくなることがある。  | 壁のタイルや窓ガラスが破損、落下することがある。  |
| 6 強  | 立っていることができず、はわないと動くことができな。揺れにほんろうされ、動くこともできず、飛ばされることもある。    | 固定していない家具のほとんどが移動し、倒れるものが多くなる。   | 壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する建物が多くなる。補強されていないブロック塀のほとんどが崩れる。                                     |
| 7    |   | 固定していない家具のほとんどが移動し倒れたりし、飛ぶこともある。   | 壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する建物がさらに多くなる。補強されているブロック塀も破損するものがある。                                  |

「計測震度」とは地震動の強さを表す指標として、つぎの算式により算出した  $I$  の小数第3位を四捨五入し、小数第2位を切り捨てたものをいう。

$$I = 2 \cdot \log(a_0) + 0.94$$

$a_0$  は、 $\int w(t, a) dt \geq 0.3$  を満たす  $a$  の最大値。  $t$  は時間(s),  $a$  は地震動の加速度に係るパラメータ ( $\text{cm/s}^2$ ) で、積分範囲は地震動が継続している時間とする。  $w(t, a)$  は、  $v(t) < a$  のとき 0,  $v(t) \geq a$  のとき 1 の値をとる関数。  $v(t)$  は、地震動の直交する3成分の加速度にそれぞれフィルターをかけた後、ベクトル合成した値 ( $\text{cm/s}^2$ )。 (気象庁告示およびホームページより)

フィルターの種類および算式

| フィルターの種類      | 算式  |
|---------------|---|
| 周期の効果を表すフィルター | $(1/f)^{1/2}$   |
| ハイカットフィルター    | $(1 + 0.694y^2 + 0.241y^4 + 0.0557y^6 + 0.009664y^8 + 0.00134y^{10} + 0.000155y^{12})^{-1/2}$ |
| ローカットフィルター    | $\{1 - \exp[-(f/0.5)^3]\}^{1/2}$  |

(注)  $f$  は地震動の周波数(Hz),  $y$  は  $f/10$ 。

関連解説表 (2009)

| 震度階級 | 木造建物(住宅)                     |  | 鉄筋コンクリート造建物   |  | 地盤の状況            | 斜面等の状況                             |
|------|------------------------------|--|---|--|------------------|------------------------------------|
|      | 耐震性が高い                       | 耐震性が低い   | 耐震性が高い  | 耐震性が低い   |                  |                                    |
| 5弱   | —                            | 壁などに軽微なひび割れ・亀裂がみられることがある。  | —   | —  | 亀裂や液状化が生じることがある。 | 落石やがけ崩れが発生することがある。                 |
| 5強   | —                            | 壁などにひび割れ・亀裂がみられることがある。   | —   | 壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が入ることがある。                                 | —                | —                                  |
| 6弱   | 壁などに軽微なひび割れ・亀裂がみられることがある。    | 壁などのひび割れ・亀裂が多くなる。壁などに大きなひび割れ・亀裂が入ることがある。瓦が落下したり、建物が傾いたりすることがある。倒れるものもある。 | 壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が入ることがある。                          | 壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が多くなる。                                    | 地割れが生じることがある。    | がけ崩れや地すべりが発生することがある。               |
| 6強   | 壁などにひび割れ・亀裂がみられることがある。       | 壁などに大きなひび割れ・亀裂が入るものが多くなる。傾くものや、倒れるものが多くなる。                               | 壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が多くなる。                             | 壁、梁(はり)、柱などの部材に、斜めやx状のひび割れ・亀裂がみられることがある。1階あるいは中間階の柱が崩れ、倒れるものがある。 | 大きな地割れが生じることがある。 | がけ崩れが多発し、大規模な地すべりや山体の崩壊が発生することがある。 |
| 7    | 壁などのひび割れ・亀裂が多くなる。まれに傾くことがある。 | 傾くものや、倒れるものがさらに多くなる。   | 壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂がさらに多くなる。1階あるいは中間階が変形し、まれに傾くものがある。 | 壁、梁(はり)、柱などの部材に、斜めやx状のひび割れ・亀裂が多くなる。1階あるいは中間階の柱が崩れ、倒れるものが多くなる。    | —                | —                                  |

\*「ライフライン・インフラ等への影響」, 「大規模構造物への影響」は省略した。

震度は、地震動の強さの程度を表すもので、震度計を用いて観測します。この「気象庁震度階級関連解説表」は、ある震度が観測された場合、その周辺で実際にどのような現象や被害が発生するかを示すものです。この表を使用される際は、以下の点にご注意ください。

- (1) 気象庁が発表する震度は、震度計による観測値であり、この表に記述される現象から決定するものではありません。
- (2) 震度が同じであっても、対象となる建物、構造物の状態や地震動の性質によって、被害が異なる場合があります。この表では、ある震度が観測された際に通常発生する現象を記述していますので、これより大きな被害が発生したり、逆に小さな被害にとどまる場合もあります。
- (3) 地震動は、地盤や地形に大きく影響されます。震度は、震度計が置かれている地点での観測値ですが、同じ市町村であっても場所によっては震度が異なることがあります。また、震度は通常地表で観測していますが、中高層建物の上層階では一般にこれより揺れが大きくなります。
- (4) 大規模な地震では長周期の地震波が発生するため、遠方において比較的低い震度であっても、エレベーターの障害、石油タンクのスロッシングなどの長周期の揺れに特有な現象が発生することがあります。
- (5) この表は、おもに近年発生した被害地震の事例から作成したものです。今後、新しい事例が得られたり、構造物の耐震性の向上などで実状と合わなくなった場合には、内容を変更することがあります。

### 3. マグニチュード $M$ の決め方

- 1) 最初の定義 (C.F.Richter, 1935)

$$M = \log A + \log B$$

$A$  はウッド・アンダーソン型地震計(固有周期 0.8 秒, 減衰定数 0.8, 倍率 2800, 水平動) の記録紙上最大片振幅 (単位は  $\mu\text{m}$ ) で、 $\log B$  は下に示すような震央距離  $\Delta$  (単位は km) の関数である。

| $\Delta$ | 50    | 100 | 150  | 200  | 250  | 300  | 350  | 400  | 450  | 500  | 550  | 600  |
|----------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\log B$ | -0.37 | 0   | 0.29 | 0.53 | 0.79 | 1.02 | 1.26 | 1.46 | 1.62 | 1.74 | 1.84 | 1.94 |

$\log B$  は地震波の減衰を補正する項であり、基準の震央距離 100 km でゼロとなるよう決めてある。カリフォルニアの浅い近地地震に対して定義されたもので、ローカルマグニチュード  $M_L$  と呼ばれることがある。リヒターによるマグニチュードの定義の要点は、振幅の常用対数を用いることであり、これがその後のさまざまな定義の基準となっている。

- 2) 表面波マグニチュード (B.Gutenberg, 1945)

$$M_S = \log A + \log B$$

$A$  は周期 20 秒前後の表面波の地動最大片振幅 (水平動 2 成分を合成したもので、単位は  $\mu\text{m}$ ) である。  $\log B$  は震央距離  $\Delta$  (単位は度) の関数で、  $\Delta$  が  $15^\circ$  から  $130^\circ$  の範囲では次式で表される。

$$\log B = 1.656 \log \Delta + 1.818$$

現在、国際的に広く用いられている表面波マグニチュードは、下に示すような Vaněk・他 (1962) によるものである。

$$M_s = \log(A/T) + 1.66 \log \Delta + 3.3$$

$T$  は表面波の周期 (単位は秒) で、この式は震央距離が  $20^\circ$  から  $160^\circ$  の範囲について用いられる。上下動の振幅を使うことも多い。

### 3) 実体波マグニチュード (B.Gutenberg, 1945)

$$m_B = \log(A/T) + Q(\Delta, h)$$

$A$  は実体波 (P, PP, S) の主要動の地動最大片振幅 (単位は  $\mu\text{m}$ )、 $T$  はその周期 (単位は秒) である。  $Q$  は震央距離  $\Delta$  と震源の深さ  $h$  の関数で、それぞれの実体波の上下動と水平動について、複雑なグラフによって示されている。このグラフは後に改訂され (Gutenberg-Richter, 1956)、現在でも広く用いられている。グーテンベルグやリヒターが  $m_B$  を決めた時代の地震計は比較的周期が長く、 $T$  は数秒程度である。最近の実体波マグニチュードは短周期地震計を用いて決めるため  $T$  も 1 秒前後であり、同じ式を使っても  $m_B$  とは同等でない。これを区別するために  $m_b$  と記すことがある。

### 4) 気象庁のマグニチュード (2003 年 9 月 25 日改訂)

下記の式を用いてできるだけ多くの観測点につき  $M$  を求めそれぞれの平均をとる。平均値は a), b), c) の順で優先される ( $H$  は震源の深さ)。

$$\text{a) } M = \log A + 1.73 \log \Delta - 0.83$$

$$\text{b) } M = \log A_h + \beta_b(\Delta, H) + C_b$$

$$\text{c) } M = \log A_z / 0.85 + \beta_v(\Delta, H) + C_v$$

$A_h$  は中周期変位型地震計による地動最大片振幅 (水平動 2 成分合成、周期 5 秒以下、単位は  $\mu\text{m}$ )、 $A$  は  $A_h$  のうち気象官署で観測されたもの。  $A_z$  は短周期速度型地震計による最大地動速度振幅 (上下動、単位は  $10^{-3} \text{ cm/s}$ )、 $\Delta$  は震央距離 (単位は km) で、 $C_b$ 、 $C_v$  は地震計の種類や設置状況に応じた補正項である。距離減衰項  $\beta_b(\Delta, H)$ 、 $\beta_v(\Delta, H)$  は表で示されている。  $M_f$  と表記されることがある。

### 5) 地震動の継続時間を用いたマグニチュード

$$M = C_1 \log(F - P) + C_2 \Delta + C_3$$

$F - P$  は、地震記録上の始まり ( $P$ ) から終わり ( $F$ ) までの継続時間であり、定数  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  は観測点や地震計の特性により異なった値となる。この式によれば、地震動が大きすぎて記録が振り切れ、最大振幅が読みとれないような地震についても、 $M$  を決めることができる。また、一般に  $C_2$  は小さいので、震源がわからな

くてもだいたい  $M$  を推定することができる。

6) 震度を用いたマグニチュード

河角(1943)は、震央距離 100 km における平均の震度(気象庁震度階)を規模  $M_k$  と定義した。この  $M_k$  と通常の  $M$  との関係を示す式が、いくつか求められている。このほか、ある震度以上の地域の面積や有感半径などを用いる方法もある。たとえば、震度 5 以上の地域の面積  $S_5$ (単位は  $\text{km}^2$ ) を用いたつぎの式がよく使われる。

$$M = \log S_5 + 3.2 \quad (\text{村松, 1969})$$

こうした方法によれば、地震計による観測のない時代や地方の地震についても  $M$  を推定することができる。

7) モーメントマグニチュード (金森, 1977)

$$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$$

$M_0$  は地震波の振幅、地殻変動などから求められる地震モーメント(単位は  $\text{N}\cdot\text{m}$ ) で、断層運動としての地震の大きさを表す量である。震源断層の面積を  $S$ 、平均変位量を  $D$ 、地震の起こった場所の剛性率を  $\mu$  とすると、地震モーメントは次式で表される。

$$M_0 = \mu DS$$

$M_s$  や  $m_b$  は限られた周期の地震計により決められるので、それぞれ 8.5, 7 程度で頭うちとなる現象が認められるが、モーメントマグニチュードにはこうした現象はない。

#### 4. 地震の規模とエネルギーとの関係

(Gutenberg-Richter)

$$\log E = 4.8 + 1.5 M$$

ただし、 $E$  : 地震波として出されたエネルギー (単位は J)

#### 5. 地震の規模と発生頻度との関係

(Gutenberg-Richter)

ある地域で一定期間に起こった地震について

$$\log n(M) = a - bM$$

$n(M)$  はマグニチュードが  $M$  の地震の数で、実際には  $dM$  を適当に選んでマグニチュード  $M$  から  $M+dM$  までの地震の数を使う。係数  $b$  はしばしば  $b$  値と呼ばれる。 $b$  値には地域性があるほか、前震、余震、群発地震で差があるといわれている。

北緯  $25\sim 48^\circ$ 、東経  $125\sim 150^\circ$  の範囲で、1961 年から 1999 年の間に気象庁が決めた  $M$  5 以上の地震の数はつぎの表のとおりである。横軸を  $M$ 、たて軸を地震数の対数としてグラフをつくってみると、グーテンベルグ-リヒターの関係がよく成り立っていることがわかる。

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $M$ | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 |
| 地震数 | 632 | 581 | 469 | 379 | 306 | 285 | 217 | 216 | 160 | 126 |
| $M$ | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 |
| 地震数 | 109 | 80  | 63  | 48  | 40  | 34  | 33  | 23  | 15  | 14  |
| $M$ | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 |
| 地震数 | 15  | 12  | 7   | 2   | 3   | 4   | 3   | 3   | 4   | 2   |
| $M$ | 8.0 | 8.1 |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 地震数 | 0   | 2   |     |     |     |     |     |     |     |     |

## 6. ある観測点で記録された地震動の 最大振幅と出現頻度との関係 (石本-飯田)

$$n = ka^{-m}$$

ただし,  $n$ : 最大振幅が  $a$  である地震の頻度.  $k$ : 定数  
 $m$ : 定数. 一般の地震, 余震について 1.8~2.2 程度

## 7. 被害等級

宇津 (1982, 地震研究所彙報, 57, 401-463) による被害等級は以下のとおり.

- 1: 壁や地面に亀裂が生じる程度の微小被害 (火山など特殊な場所の地割れなどは除く)
- 2: 家屋の破損, 道路の損壊などが生じる程度の小被害
- 3: 複数の死者または複数の全壊家屋が生じる程度 (ただし 4 には達しない)
- 4: 死者 20 人以上または家屋全壊 1000 戸以上 (ただし 5 には達しない)
- 5: 死者 200 人以上または家屋全壊 1 万戸以上 (ただし 6 には達しない)
- 6: 死者 2000 人以上または家屋全壊 10 万戸以上 (ただし 7 には達しない)
- 7: 死者 2 万人以上または家屋全壊 100 万戸以上

## 8. 津波規模

今村・飯田 (Iida, K., 1958, J. Earth Sci., Nagoya Univ., 6, 101-112) による津波規模は以下の通り.

| 規模階級 | 津波の高さ    | 被害程度                |
|------|----------|---------------------|
| -1   | 50 cm 以下 | 無被害                 |
| 0    | 1 m 程度   | 非常にわずかの被害           |
| 1    | 2 m 前後   | 海岸および船の被害           |
| 2    | 4~6 m    | 若干の内陸までの被害や人的損失     |
| 3    | 10~20 m  | 400 km 以上の海岸線に顕著な被害 |
| 4    | 30 m 以上  | 500 km 以上の海岸線に顕著な被害 |

### 9.地震記象に現れる種々の相の記号

- P：たて波，疎密波
- K：核の中を通るたて波
- I：内核の中を通るたて波
- S：よこ波，ねじれ波
- c：核の表面で反射した波
- J：内核の中を通るよこ波

P：震源から直接観測点に到達したP波。

S： // S波。

PP, PPP：P波が地表で1回，または2回反射して，P波として観測点に到達した波。

〔類例〕 SS, SSS

PS：P波が地表で1回反射して，S波に変わって観測点に到達した波。

〔類例〕 SP, PSS, SPP など

PcP：P波が核の表面で反射して，P波として観測点に到達した波。

〔類例〕 ScS, ScP, PcS

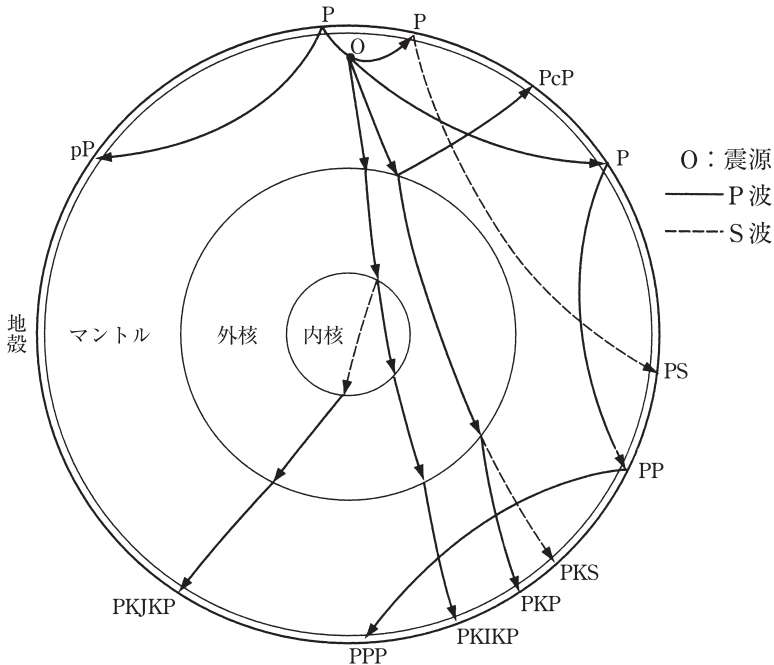
PKP：P波が屈折して核内に入り，核内をP波として伝わり，屈折した核外に出て，P波として観測点に到達した波。P'とも記す。

〔類例〕 SKS, PKS, SKP, PKKP など

PKPPKP：PKP波が地表で反射して，再びPKP波として観測点に到達した波。

〔類例〕 SKSSKS, SKPPKP など

地第 27 図 種々の地震波の伝播経路



PKIKP：PKP 波が内核に達し，そこを P 波として伝わった波。

PKJKP：PKP 波が内核に達し，そこを S 波として伝わった波。

pP：最初の p は，震源から水平より上向きに射出された P 波を表す。

〔類例〕 sP, pS, sS, pPP, nPS など

L：長周期の波，表面波，Lq：ラヴ波，Lr：レイリー波

これら各種の波が震央距離： $\Delta$  の地点まで伝わるに要する時間をグラフに表したものが地第 33 図の走時曲線である。

## 10. 震央距離の求め方

(地心緯度については地 3 参照)

$\varphi_0, \lambda_0$ ：震央の地心緯度，経度

$\varphi, \lambda$ ：観測所の地心緯度，経度

$\Delta$ ：角震央距離

$$\cos \Delta = \sin \varphi_0 \sin \varphi + \cos \varphi_0 \cos \varphi \cos (\lambda_0 - \lambda)$$

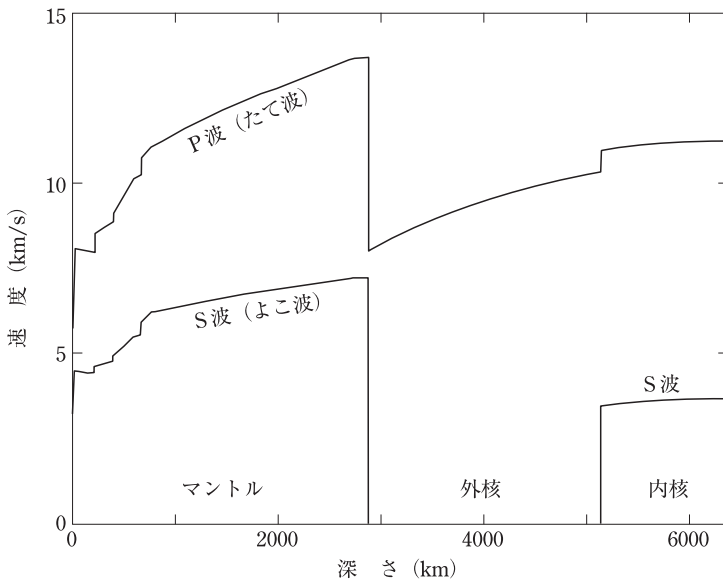
実際の計算には，

$$A = \cos \varphi_0 \cos \lambda_0, \quad B = \cos \varphi_0 \sin \lambda_0, \quad C = \sin \varphi_0$$

$$a = \cos \varphi \cos \lambda, \quad b = \cos \varphi \sin \lambda, \quad c = \sin \varphi$$

とすれば  $\cos \Delta = aA + bB + cC$

地第 28 図 地球内部における地震波速度の分布



Dziewonski & Anderson (1981) による。