

## 6章 地震動を知る

### 6回 地震動を知る

#### (1) 地震動とは

地震動とは、地震によって引き起こされる地表の揺れをいう。地球内部の特定部分（断層）に蓄積された歪が限界に達し、それが一時に解放されて弾性波が生じる現象が地震である。この弾性波が地盤を伝わって所定の地点（サイト）に達するが、この地中（あるいは地表）を伝わる波が地震波であるが、これを地震動と呼ぶこともある。また、一般的には地震動そのものを地震と呼ぶ場合が多い。

ここでは、下記のように表現を統一する。

地震：蓄積された歪が解放されて弾性波を発生させること

地震波：断層からサイトまで伝わっていく波動

地震動：サイトの地表や構造物の基礎位置での揺れ

#### (2) 地震波の伝わり方（地震波の伝播）

断層で発生した地震波は、2つのルートで特定の地点に伝わる（図1）。1つのルートは断層からサイトまで地中を伝わっていくルートで、このルートを通る地震波を実体波と呼ぶ。もう1つのルートは、一度地表に達した後に地表に沿ってサイトまで伝わるルートで、地表に沿って伝わる地震波を表面波と呼ぶ。

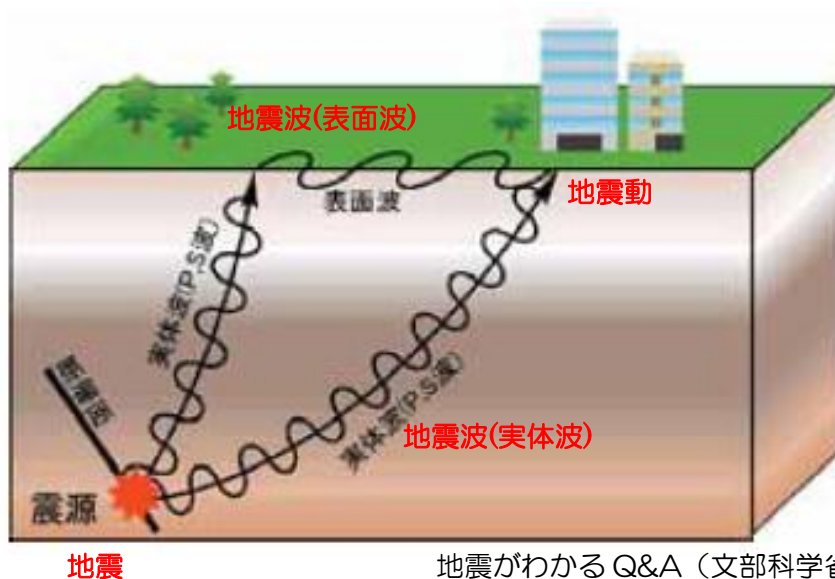


図1 地震波の伝わり方

## 6章 地震動を知る

図2に示すように、実体波には地震の進行方向と振動の方向が一致するP波(Primary Wave)と、進行方向に対して直角方向に振動するS波(Secondary Wave)がある。

P波は疎密波で固体、液体、気体を伝わる。その速度は岩盤中で5~7km/sと早く、地震が発生したときに最初に到達し、初期微動を起こす。S波はせん断波で固体のみを伝わる。その速度は岩盤中で3~4km/sで、P波に続いてサイトに到達し、主要動と呼ばれる大きな揺れを起こす。

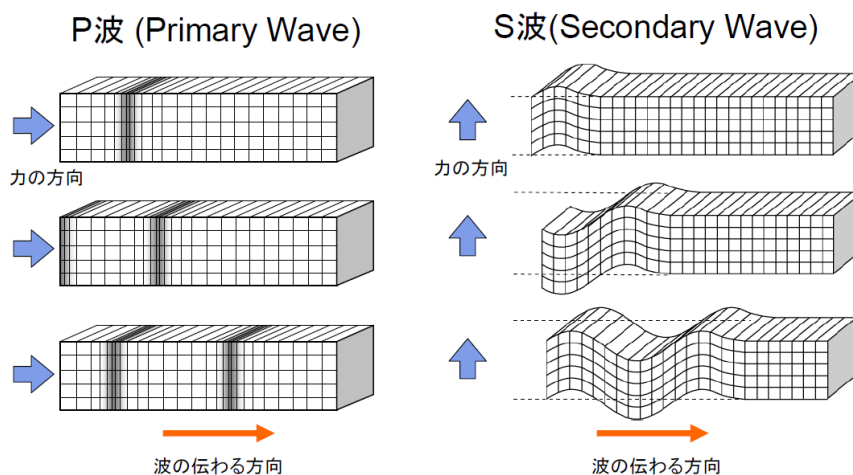
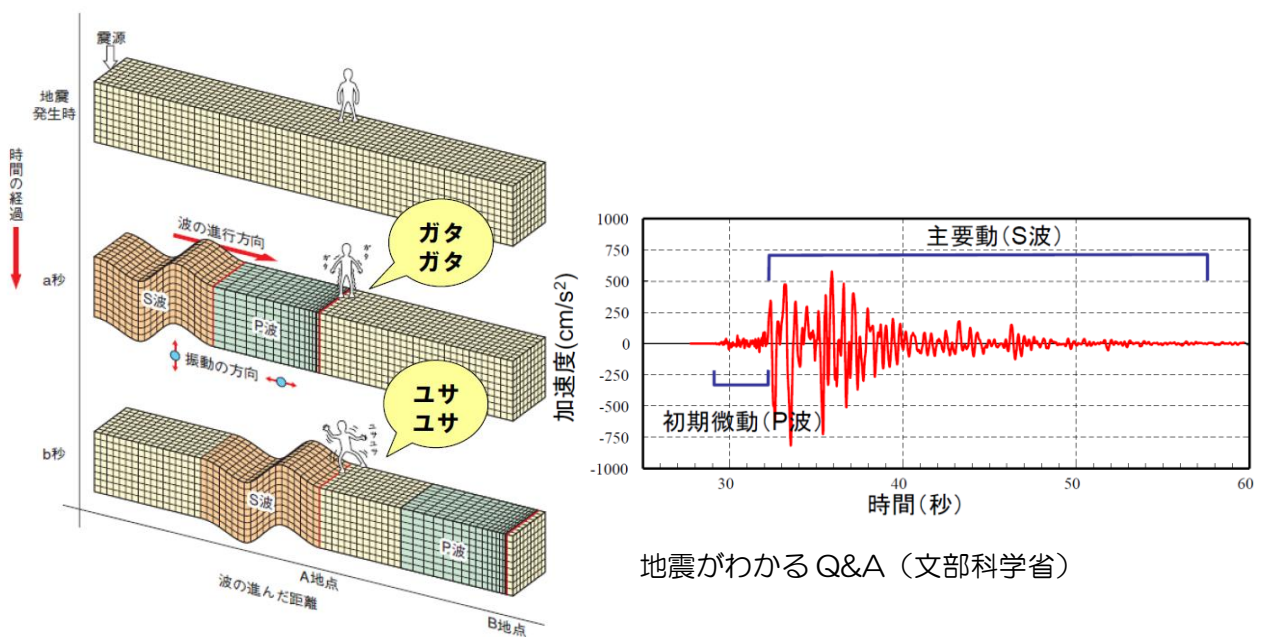


図2 地震波の伝わり方(実体波)



地震がわかるQ&A(文部科学省)

図3 地震波の感じ方

## 6章 地震動を知る

地盤は一般に深い地点ほど固く（波が伝わりやすく）、浅い地点ほど柔らかい（波が伝わりにくい）。このような媒質の中を波が通過するときは層の境界で屈折が生じ、その結果、断層から遠いサイトでは地震動が真下から入射することになる（図4）。よってP波では縦方向の揺れが、S波では横方向の揺れが支配的となる。

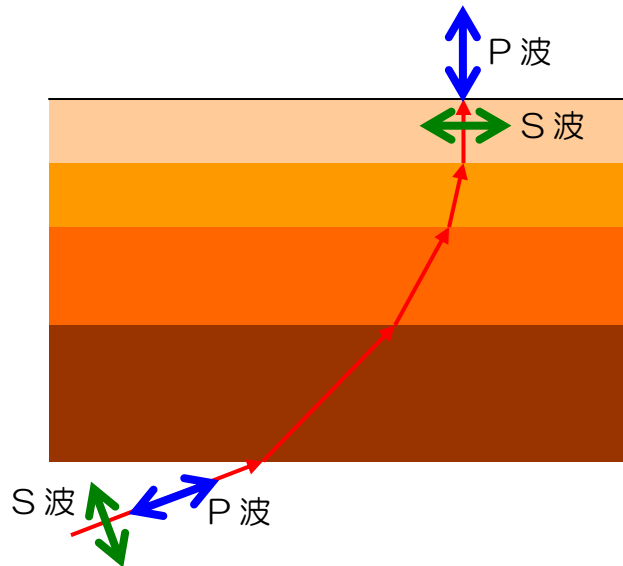


図4 地震波の入射と屈折

表面波は固体と気体（空気）あるいは液体（海）との間で発生するため、境界波とも呼ばれる。振動の方向によってラブ波（水平に振動）とレイリー波（上下に振動）があり、その速度はS波よりもやや遅いといわれている。振動の周期が長く、振幅が大きい。また、P波やS波に比べて減衰しにくいという特徴がある。

断層から地震基盤（せん断波速度2～3km/sの硬い地盤）まで伝わってきた地震波は、表層の地盤を介して地表に伝わり地震動となる（図5）。このとき、地震波は表層地盤の影響を受ける。一般には硬い地盤ほど揺れの増幅は小さく、地盤が軟らかくなるに従い増幅が大きくなるとともに、地盤の揺れ方の特徴が現れる（特定の周期が揺れやすい等）。

また、表層地盤の形によっては、地震基盤に入射した地震波が一点に集中して（レンズ効果）、より大きな地震動を起こすことも指摘されている。

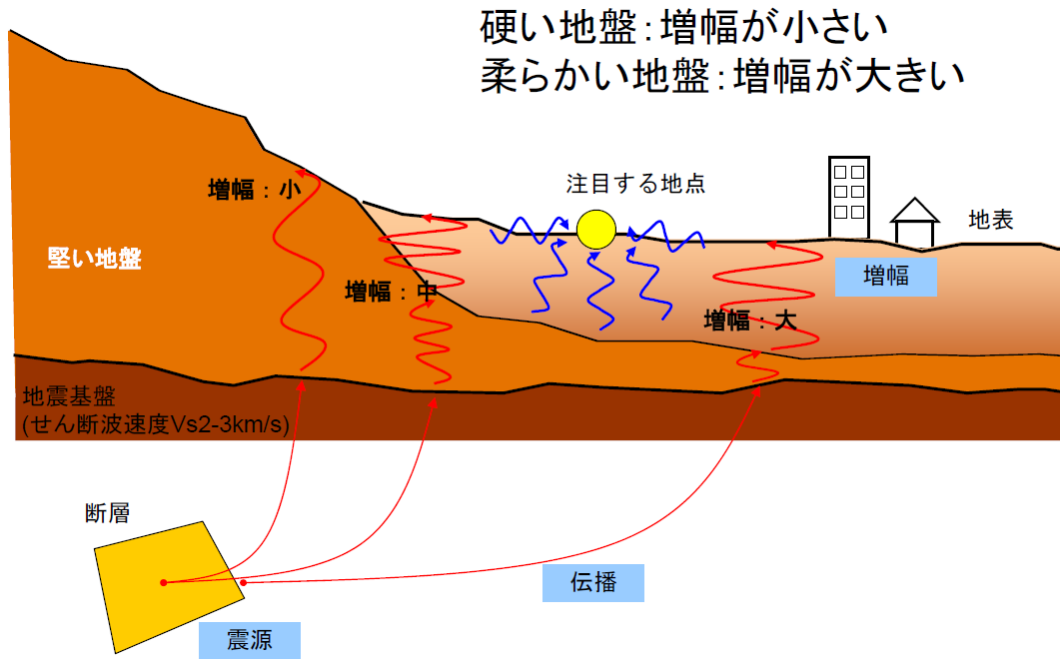


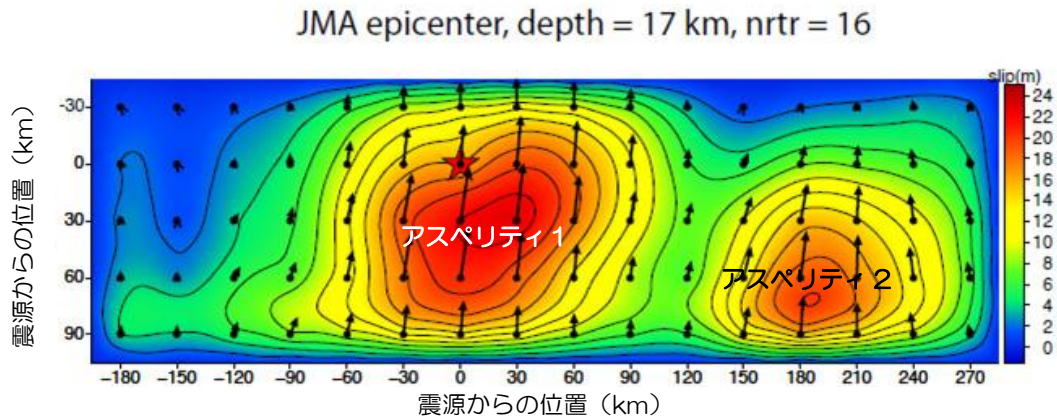
図5 地震動の伝播と表層地盤の影響

以上のような複雑な経路を通過して発生した地震動は、次の要素によって特徴づけられている。

- 震源における、断層の破壊様式（領域と順序）
- 伝播経路（断層からサイト（地震基盤位置））までの距離と媒質の影響
- 地点（サイト）における表層地盤の影響（地盤増幅）

断層の破壊様式は、そこで発生する弾性波を特徴づける（振動の大きさや周波数成分）。また、巨大地震のように複数のアスペリティ（断層の中で大きな地震波を発生させる部分）が存在する場合には、破壊時期がずれることによって複数のピークを持つ地震波と地震動が発生する。

図6に東北地方太平洋沖地震の震源モデルと宮城県築館での観測波形を示す。震源には大小2つのアスペリティが存在し、その間隔はおおよそ180kmである。断層の破壊速度を3.5km/sと仮定すると、最初のアスペリティから地震が発生し、次のアスペリティで地震は発生するまで50s程度かかることになり、このことは観測波形と良く調和していることがわかる。



アスペリティ：滑り量が大きく、断層の中で時に大きな地震波を引き起こす部位

<http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/wordpress/wp-content/uploads/2011/03/Poiata2011.jpg>

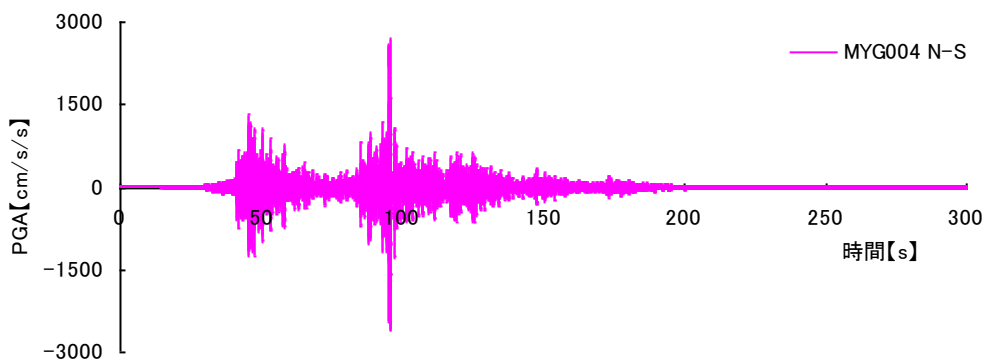


図6 アスペリティと地震動波形（宮城県築館）

地震波が伝わる媒質（岩盤）によっても地震波が影響づけられる。例えば、硬質な地盤よりも軟質な地盤の方減衰が大きく、震源からの距離が等しくても地盤の硬軟によって地震動の強さに差異が現れる。特に短周期成分は減衰が大きいため、軟弱な媒質を通過した地震波は長周期成分が卓越する。同様のことは震源とサイトの距離によっても起こり、震源からの距離が長いほど、相対的に長周期成分が大きくなる。

サイト特性については、前述したように表層地盤の硬軟によって周波数特性に影響が現れる。

### （3）地震動を見る（地震動波形のとらえ方）

地震動は波形（時間と振幅の関係）として表現される。地震動波形は、振幅、周波数特性、位相特性の3特性で表現することができる。

振幅はその名のとおりに、波形の絶対的な大きさを、音でいえば「音の大きさ」に相当するものである。なお、振幅については、揺れの加速度や速度が用いられることが多い



## 6章 地震動を知る

が、稀に変位が用いられることがある。

変位の単位時間あたりの変化が速度であり、速度の単位時間あたりの変化が加速度であるので、いずれかの波形が得られたならば、それを積分あるいは微分することで他の波形を求めることができる。どの指標を用いるかは任意であるが、たとえば構造物の応答や損傷との整合性を考えた場合、短周期構造物には加速度、中周期構造物には速度、長周期構造物には変位が適切であると言われている。

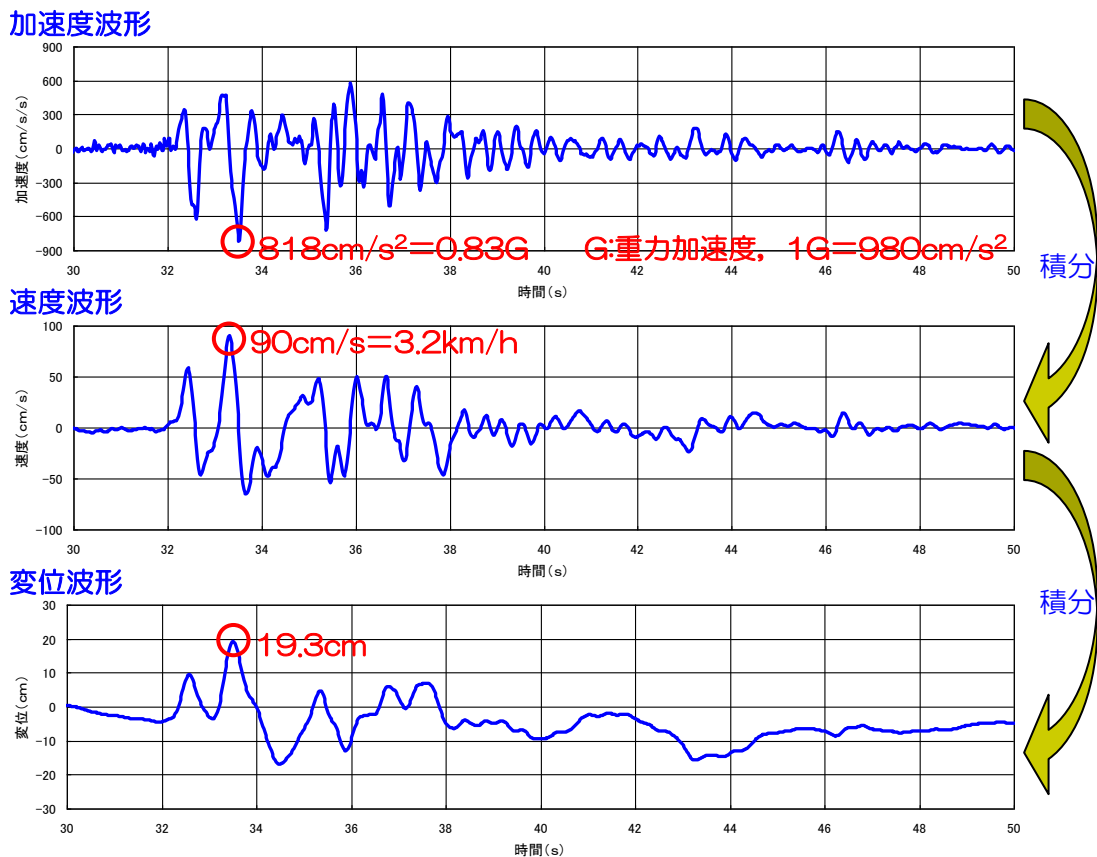


図7 兵庫県南部地震の地震動波形（神戸海洋気象台）の振幅

周期特性は、音でいえば「音の高さや音色」に相当する。振動数（周期の逆数）が高いほど高音であるように、素早い揺れやゆっくりとした揺れの違いが周期特性として現れる。また、同じ「うの音」でもギターとピアノでは音色が違うのは、それらが単純な正弦波ではなく、異なる周波数の音を含むからである。地震動も同様に様々な周波数成分の揺れを含んでいる。どのような成分の揺れが卓越するのかを求めることは、それによってどのような構造物が影響を受けるのかを判断する上で重要である。

## 6章 地震動を知る

図 8 には、兵庫県南部地震の地震動波形の一部と東北地方太平洋沖地震の地震動波形の一部をそれぞれ示す。兵庫県南部地震の地震動は 0.4~0.7 秒程度の周期を持つため、構造物に大きな被害を与えた。東北地方太平洋沖地震の地震動は約 0.25 秒という比較的短い周期を持つため、低層建物以外には大きな被害を与えていない。なお、波形には高次の成分（波形の細かなギザギザに相当）も含まれており、フーリエスペクトルや応答スペクトルによってその影響を評価することになる。



図 8 地震動波形（観測波）の固有周期

位相特性は経時特性とも呼ばれ、音でいえば、「立ち上がりや収斂、あるいはうねり」に相当する。地震動では継続時間や非定常性として扱われる。線形応答（の最大値）に対しては位相特性は大きな影響を与えないが、非線形応答を扱う場合には、位相は応答に大きく影響すると言われている。また、構造物に投入されるエネルギーによって応答や損傷を評価する場合には、継続時間の評価も重要になってくる。

図 9 は兵庫県南部地震での地震動波形を示したものであるが、同図に示されるように、主要動は 32 秒付近から始まり、34~37 秒付近で最大震幅を示し、その後収斂してい

## 6章 地震動を知る

く。前述したように、P波は速度がS波よりも速いため先に到達（29秒付近）している。

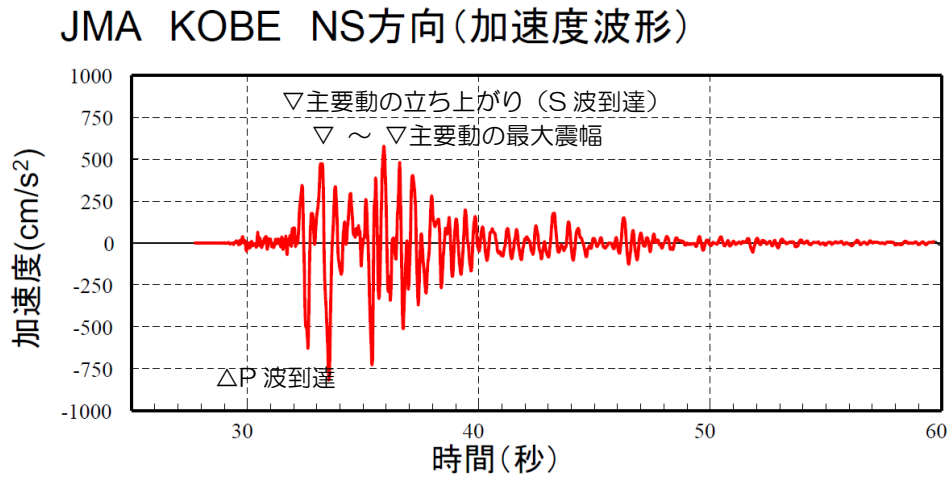


図9 地震動波形（観測波）の経時変化

震源からサイトまでの距離を  $X$  (km)、P波の到達時間と速度を  $t_p$  (s) と  $V_p$  (km/s)、S波の到達時間と速度を  $t_s$  (s) と  $V_s$  (km/s) とする。 $t_p \cdot V_p = t_s \cdot V_s = X$  であるので、 $X = (t_s - t_p) / (1/V_s - 1/V_p)$  を得る。 $V_p$  の代表値として  $6.0 \text{ km/s}$ 、 $V_s$  の代表値として  $3.5 \text{ km/s}$  を採用した場合、おおよそであるが  $X = 8 \cdot (t_s - t_p)$  が得られる。

以上のことは、地震波の速度が既知であれば、観測記録により震源からサイトまでの距離がわかることを示している。このようにして、複数の観測点での記録により震源の位置を特定することができる。

### (4) 地震動を測る

時間と振幅の関係として求められる地震動は、(3)で示したように、いくつかの特性を有している。したがって、地震動を定量化するには複数の指標が必要となってくる。一方、1つの指標で地震動を定量化することは、地震動の相对比较を可能にし、また、構造物の耐震設計や耐震評価に用いるときに都合がよい。

そのような指標の一つに震度がある。震度は最大加速度や最大速度と異なり設計には直結していないが、災害との関連付けが容易であり、被害状況の想定においては便利な指標である。



## 6章 地震動を知る

震度の計測であるが、かつては、体感や周囲の状況を基に推測していたが、平成8年（1996年）4月以降は、計測震度計により自動的に観測し、速報を出している。気象庁が発表する震度は、気象庁、地方公共団体及び（独）防災科学研究所が全国各地に設置した震度観測点で観測した震度である。このような震度（計測震度）は震度階と異なり連続量であるため、しきい値に従って、震度0、1、2、3、4、5弱、5強、6弱、6強、7の10階級の震度を求めている。

震度階級，計測震度，最大加速度，最大速度の関係を表1に示す。なお，ここに示す最大加速度と最大速度は目安である。

表1 震度階級，計測震度，最大加速度，最大速度の関係

震度階級	計測震度	最大加速度 (cm/s/s)	最大速度 (cm/s)
0	~0.4	~1	~0.13
1	0.5~1.4	1~3	0.13~0.4
2	1.5~2.4	3~10	0.4~1.3
3	2.5~3.4	10~25	1.3~3.7
4	3.5~4.4	25~80	3.7~12.5
5弱	4.5~4.9	80~140	12.5~22.8
5強	5.0~5.4	140~250	22.8~41.6
6弱	5.5~5.9	250~450	41.6~75.8
6強	6.0~6.4	450~800	75.8~138.1
7	6.5~	800~	138.1~

最大加速度と最大速度の数値は目安

## 6章 地震動を知る

気象庁では、震度階級に対する被害の様相を「気象庁震度階級関連解説表」として示している。

表 2 気象庁震度階級関連解説表-1

震度階級	人の体感・講堂	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いる。		
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、揺れに気付く人がいる。
5弱	大半の人が、恐怖を覚え、物につかまらなそうと感じる。	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、不安定なものは倒れることがある。	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、物につかまらなそう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、落ちるものが多くなる。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い。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たり倒れたりし、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。

表3 気象庁震度階級関連解説表-2

震度階級	木造建物（住宅）		鉄筋コンクリート造建物	
	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。	—	—
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。
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
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。

表4 気象庁震度階級関連解説表-3

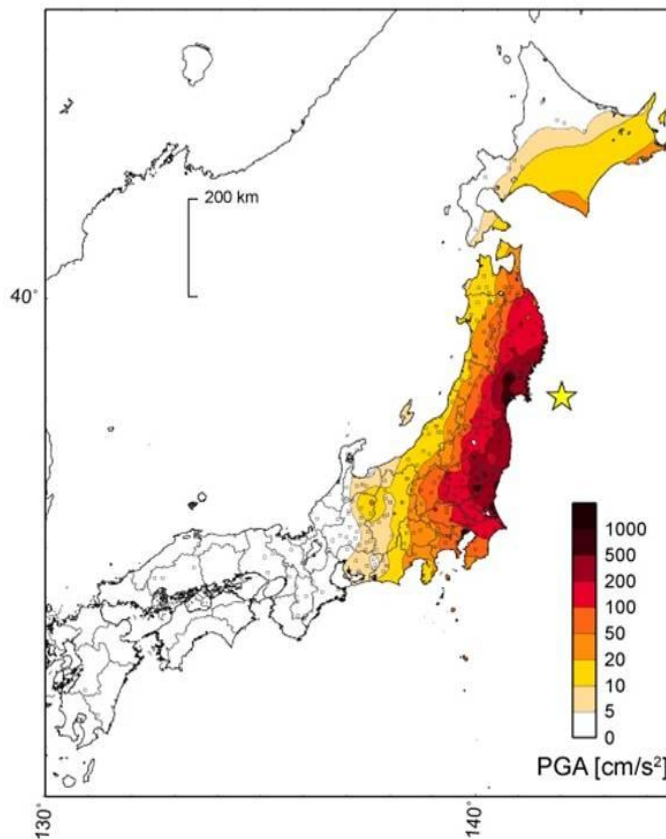
ガス供給の停止	安全装置のあるガスメーター（マイコンメーター）では震度5弱程度以上の揺れで遮断装置が作動し、ガスの供給を停止する。 さらに揺れが強い場合には、安全のため地域ブロック単位でガス供給が止まることもある。
断水、停電の発生	震度5弱程度以上の揺れがあった地域では、断水、停電が発生することがある。
鉄道の停止、 高速道路の規制等	震度4程度以上の揺れがあった場合には、鉄道、高速道路などで、安全確認のため、運転見合わせ、速度規制、通行規制が、各事業者の判断によって行われる（安全確認のための基準は、事業者や地域によって異なる）。
電話等通信の障害	地震災害の発生時、揺れの強い地域やその周辺の地域において、電話・インターネット等による安否確認、見舞い、問合せが増加し、電話等がつながりにくい状況（ふくそう）が起こることがある。そのための対策として、震度6弱程度以上の揺れがあった地震などの災害の発生時に、通信事業者により災害用伝言ダイヤルや災害用伝言板などの提供が行われる。
エレベーターの停止	地震管制装置付きのエレベーターは、震度5弱程度以上の揺れがあった場合、安全のため自動停止する。運転再開には、安全確認などのため、時間がかかることがある。

## 6章 地震動を知る

➤ キーワード（重要語）を10個程度書きだせ。

➤ 課題

1. 地震波を光に置き換えたとき、震源特性、伝播特性、震度に相当するものを考えよ。
2. 下図は東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日発生）による最大加速度マップである（図中の、☆は震源を表す）。最大加速度のコンターの濃淡により、地震動の強さを観察せよ。また、太平洋側に比べて日本海側の加速度が小さい。その理由を考えよ。



<http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/wordpress/wp-content/uploads/2011/03/PGA.jpg>

3. 地震波と音（または音波）とを比較し、その類似点について列記せよ。