

## 地震学の基礎知識「地震計」

### 1. 動いている紙に文字を書く

地震の記録は図1のような波の形をしている。この波形は手で描いた、つまり手を動かして描いたのだが、その際、紙がじっと静止していてくれないと思うようには描けない。実際に地震が起これば、紙はもちろん人間の手も机も家も大地もみんな一斉に動いてしまう。静止しているものはない。どうやって地震の揺れを正確に描くのだろう。

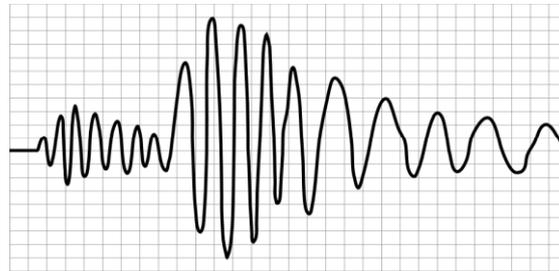


図1 紙に手で描いた地震の波形。紙が静止していたので描けた。

### 2. 地震計とは

正確にものを書く、正確に地震波形を記録するには、あらゆるものが揺れ動いても、絶対に動かない「不動点」が必要である。昔からいろいろな不動点の作り方が考案されてきたが、現在使われている地震計のほとんどは、なじみの深い「振り子」を使っている。その原理を図2で説明する。

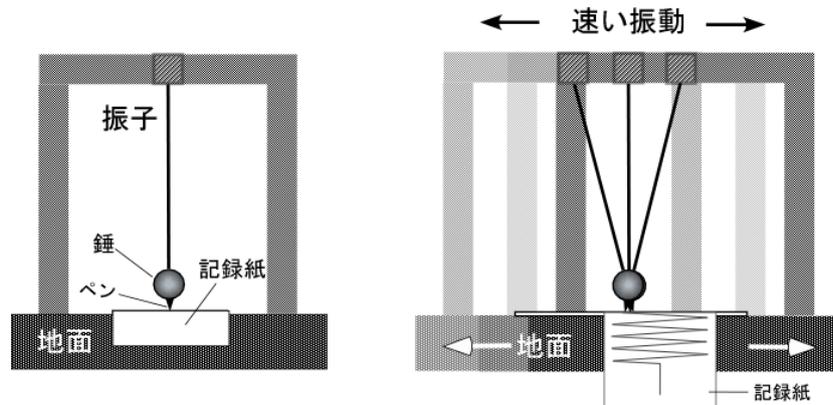


図2 左図：振り子。錘を吊っている柱は地面に固定されている。錘の先に取り付け記録紙上に地面の揺れを描かせる。

右図：地面が左右に揺れた。速い揺れだと振り子は静止している。

図2の左図は振り子で、地面に固定された枠（地震計では支柱という）の上から錘が吊るされている。揺れの記録は、錘の先に取り付けられたペンによって記録紙上に描かせるようになっている。地面が右の図のように左右に振動したとする。振動が速ければ、錘は動かない。つまり錘とペンは静止状態（不動点）になっている。ペンは動かず記録紙のほうに左右に動く。この状態で、記録紙を一定速度で手前に動かせば、地面の振動記録を描かせることができる。これが地震計の原理である。

### 3. いろいろな速さの振動に対して

図2では地面の揺れが速いとしたが、どのくらい速ければ地震計になるのか。図2の左図で、錘を左右に振らした時、錘が往復するのにかかる時間を、この振り子の「固有周期」という。仮に往復に1秒かかったとすれば固有周期は1秒である。固有周期よりずっと速い揺れに対して錘は静止しており、地震計となる。しかし実際の地震波にはいろいろな速さの揺れ（いろいろな周期の波）がある。地面の揺れの周期に対して図2の錘はどのように反応するか（どのように応答するか）を考える。煩わしいので以下の図では地面と枠は無しにする。

図3 (a) は図2の右図と同じで地面は、固有周期よりずっと速く振動している場合で、錘は不動点になっている。(b) は固有周期より少し速いくらいなので、錘は地面の揺れより少し余分に動いてしまっている。(c) は地面の振動が固有周期と同じ周期になったため、錘は共振して地面よりもはるかに大きく揺れてしまっている。公園のブランコを大きく揺らすのと同じである。

e) は固有周期よりずっとゆっくりした振動の場合で、錘は地面と同じように動いてしまっている。地面と錘が同じ動きをすれば記録紙には何も描かない。

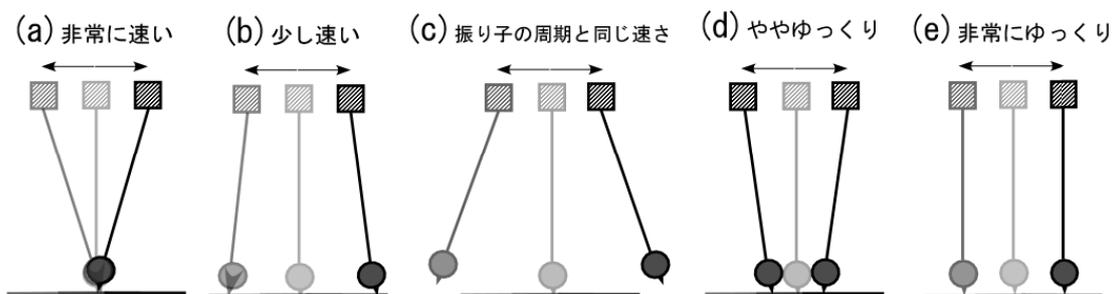


図3 いろいろな速さの揺れ（振動周期）によって異なる振り子の動き

### 4. 地震計の倍率

以上のように地震計の固有周期に対して地面の振動周期が短い（短周期）か、長い（長周期）か、あるいは同じか、などによって、記録紙に描かれる揺れの大きさが異なること

が分かった。この様子を連続的に見るため、地面の周期を横軸に、地面の揺れの大きさ（記録紙上の振幅）を縦軸にとったグラフを描くことにする。いま仮に地震計の固有周期は 1 秒としておく。1 秒より非常に速い振動の (a) の場合は地面が 1 cm 動けば記録紙にも 1 cm の振幅が描かれる。つまりこの地震計の倍率は 1 倍である。非常に速い振動として 0.1 秒とすると、図 4 で (a) のところにプロットされる。(b) は余分に動いたので、倍率は 1 倍より少し大きい。(c) は共振れているので、倍率はグラフにプロットできないほど大きい。図 4 では上向きの矢印をつけておいた。(d) はややゆっくりした振動なので、(a) に比べると錘は少し動いてしまっている。従って倍率は小さくなる。(e) は錘が地面と同じ動きなので記録紙に揺れは描かれない。つまり倍率はゼロである。図 4 のでは図の下の方になるという意味で下向き矢印を付けておいた。

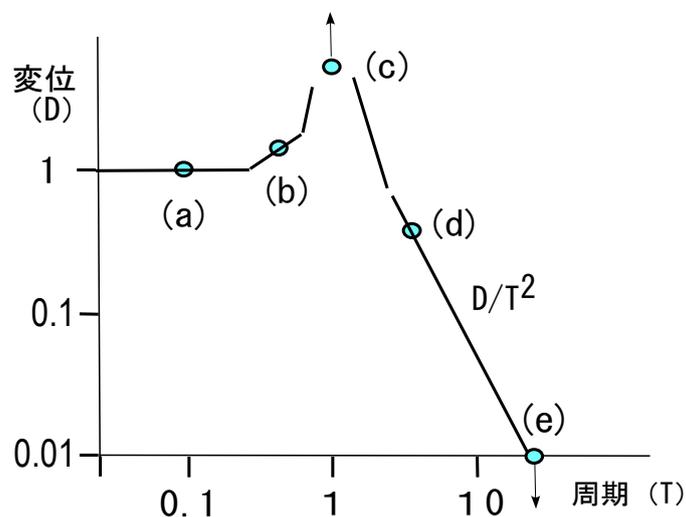


図 4 地震計の応答曲線（レスポンスカーブ）

図解してグラフ上にプロットできたのは 5 つだが、これらを線で結べば図 4 の実線のようにややぎこちない曲線が描ける。これを地震計の（地面）に対する**応答曲線**という、単に**レスポンスカーブ**とも呼んでいる。

## 5. 共振れを防ぐ

図 3 (c) のように共振れを起こすと、振子はいつまでもふらふら動いて地面の動きを正確に記録できない。そこで錘にダンパーをつける。車やドアに着いているダンパーと同じである。図 5 ではネバネバの強い（粘性の高い）オイルに錘を浸けた。これによって共振れは防げるが、錘の応答は図 5 の (c') のようになり動きが鈍くなる分、倍率は落ちる。これを応答曲線にプロットすると図 6 で (c) が (c') に下がってしまうことに相当する。同様に少し共振れしかけていた (b) も少し下に下がっている。こうしてダンパーを取り付け

た時の応答曲線は図6の実線のようになる。

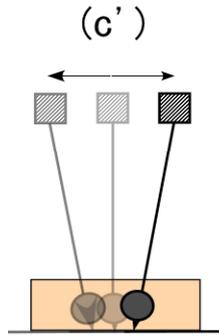


図5 錘をオイルに浸けた

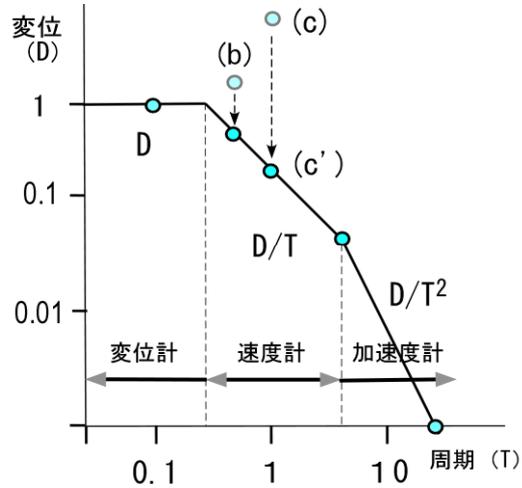


図6 ダンパーを付けた時の応答曲線

## 6. 変位計, 速度計, 加速度計

図6は応答“曲線”というものの、わかりやすくするため3つの直線で近似してある。0.1秒付近は(D)と描いた横線であり、1秒付近は(D/T)と描いた右下がりの斜め線、10秒付近は(D/T<sup>2</sup>)書いた、さらに右下がり大きい直線である。地震計の固有周期(今は取りあえず1秒としている)よりもずっと短周期の地動に対しては地面が1cm動けば記録も1cmで、地面の変位そのものを描く。これを「変位計」という。

1秒付近のD/Tの意味は、変位(長さ、あるいは距離と言ってもよい)を時間で割っているのが速度になっている。すなわちこの部分は地面の速度を記録することになるので「速度計」になっている。固有周期よりさらに長い周期の振動に対しては(D/T<sup>2</sup>)で、これは速度(D/T)をもう一回時間(T)で割っているのが加速度を表している。すなわち固有周期よりもずっと長い周期の地震波に対して「加速度計」になっている。

断層運動や震源の物理を研究している理学系の研究者は変位計を好んで用いる。いっぽう、加速度は「力」だから、「力」で変形したり、破壊する構造物の研究には加速度記録が主に用いられる。

## 7. 3種類の地震計

固有周期よりもずっと短い周期の地震波に対しては変位計になるのだから、逆に固有周期をずっと長くしておけば、それより短い周期の地震波に対して地動の変位を記録する「変位計」ができる。同様に、固有周期をずっと短くしておけば、それより長い周期の地動に対して「加速度計」になるし、粘性の強くしたダンパーを付ければ、図6の速度(D/T)の

部分がさらに下に下がって（左右に拡大し）広い周期領域で速度計となる。

## 8. 固有周期を長くする

固有周期が長ければ長いほど、あらゆる周期の地震波に対して変位計となるが、周期を長くすることは容易ではない。図2，図3のような振り子の場合，振子の長さ（上の支点からの錘の重心までの長さ）が25cmの場合，周期は1秒である。これを2秒にするには4倍の長さ1mが必要であり，10秒にするためには25mもの長さが必要になる。これでは周期の長い地震計はできない。

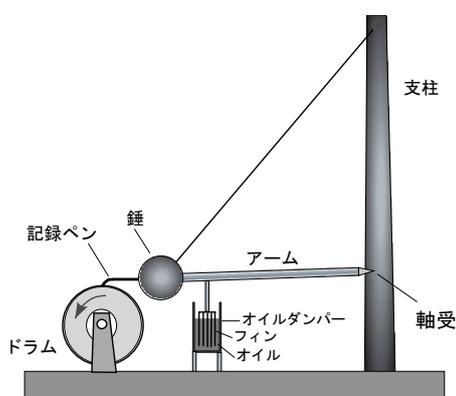


図7 水平動地震計

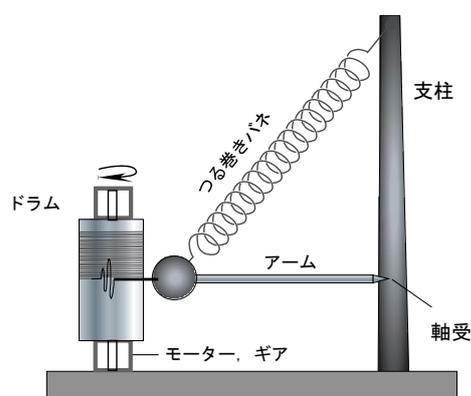


図8 上下動地震計

図7と図8は実際に使われている地震計の構造で，図7は水平動，図8は上下動である。実験してみるとすぐわかるように，錘を図7のように斜めに吊ると固有周期が長くなる。アームは水平ではなく，錘のほうが少し下がっている。錘を下げると固有周期は短くなり，上げるほど長くなるが，水平を超えると錘は支柱の反対側に行ってしまう。なるべく水平に近く，つまり固有周期を長くして且つ安定な状態にするのが設計上の条件である。

固有周期を長くするという事は，物理的に言えば，錘を元に戻す力（復元力という）を小さくすることである。錘をつる巻きバネで吊るした時，固いバネだと周期は短い，柔らかいバネだとふわふわとゆっくり振動する。上下動地震計で固有周期を長くするためには，バネを弱くして錘を重くすればよい。しかしこれは相矛盾したことで，地震計の固有周期を長くすることは，これまでにさまざまな工夫がなされたが，困難なことでもある。

## 9. 加速度型地震計，速度型地震計

加速度地震計は固有周期を短くするため，水平・上下ともバネを強くすればよい。比較的小型にできて建物やダムなどに埋設するなど広く使われてきた。変位計が気象庁や研究機関に限られていたのと比べるとずっと汎用性があった。

一方、振り子に強いダンピングをかけることによって広い周期範囲で速度型地震計になる。速度はエネルギーに対応するので、速度型地震計はもっと使われてもいいように思うが、余り製作されなかった。近年高速コンピュータが進歩して、速度計記録を簡単に変位記録に、あるいは加速度記録に換算できるようになって速度計が注目されるようになった。最近では広帯域（広い周期領域をカバーする）地震計と言えばほとんどが速度型地震計である。もっとも昔のようにオイルダンパーではなく、電磁氣的ダンパーであるが、電磁式地震計については機会があれば改めて説明することにする。

#### 10. 地震計は3つで1セット.

地震の揺れは、上下・左右、あらゆる方向に揺れる。それらを同時に記録するには3次元の記録装置が必要になる。実際には上下方向、東西方向、南北方向だけを記録するようにした3つの地震計をもって1組としている。

図7、8で支柱とアームの接点に「軸受」と記しているが、軸受は大抵が板バネで支えるようにしている。板バネは押せば曲ってしまうので、必ず常に引っ張りの力が働くようにしなければならない。

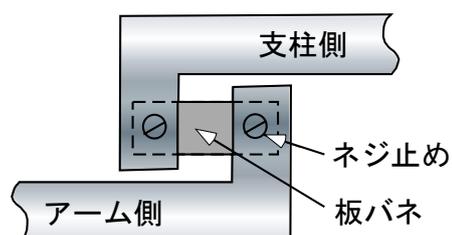


図9 軸受の構造

そのため、一般には図9のような構造にして、板バネには引っ張りの力のみが働くようにしている。図9は簡単のため、板バネ1枚だけの場合を描いているが、もう1枚を立て向きにも入れて立体的に支えるようにするのが普通である。ちょうど十文字のようになるのでクロスバネとも称している。固有周期を伸ばすために（復元力を小さくするために）せつかくバネを弱くしたのに、ここで強くなつては意味が無い。そこで弱いバネでも折れたりしないように、さまざまな機構上の工夫がなされている。そのためにこの部分は外から見てもなかなかわからない。

実際の地震計については、次ページからの「阿武山観測所の地震計」で詳しく述べます。

キーワードは「応答曲線（おうとうきょくせん）」「レスポンスカーブ」です。

2011年9月 梅田康弘