

以下地震に関して思った事を記載する。

小生は地震の専門家ではない。主に超音波非破壊検査と言う業界に属するが、仕事の関係上で機械設計、破壊力学、材料学、流体力学、音波（弾性波）、土木、建築、電子回路、ソフトウェアなど広い範囲の勉強をせざるを得なかった。数学と物理は子供の頃から得意だった。親からは「自分の命の事だから、地震学者と医者言う事は信じるな」と言われた。

と言う事で学者とは違う視点から地震像を考えようと思う。

現状コメント出来る事は

- 1) 自治体は救助と逃げる経路の確保の為、主要道路沿いの建築は地震対策の規制をすべきだ。
- 2) 現状の主要道路沿いの建築は強制的に強度検査し、駄目なものは対策する。
- 3) 密集地帯に住む人は、逃げる経路を常に考えた方が良い。
- 4) 地震は避けようがないので、生活場所を選択するしかない。住む場所は、地盤が固い岩盤（音響インピーダンスが高い）で出来ているのが良い。柔らかい場所に家を建てるなら、土地の改良するのが良いが、バイブレータで土を固めただけでも震動を抑えられる。
- 5) 小生は断層を気にしていない。建物の真下に断層がある場合は、工事費が大変なので除くとして、断層が家の横で動いても、その場での振動と1km離れたところでの振動のどちらが建物に破損をもたらすか、状況しだいだ。
- 6) 2 x 4の家は地震強い。日本式の場合、銚をしっかりとしないと不味い。
- 7) 3階建てなど高くすると建物は弱くなる。屋根も重い瓦にしない方がよかろう。
- 8) 小生は（高層）ビルに余り気に入っていない。強度保証がどの程度されているかわからない。免震や制振構造の建物が増えているが、そのストロークなど疑問な設計をしているのが多い。また、適切なメンテナンスがされなければ、逆効果になる。
- 9) 免震や制振をしていなくても余裕をもった強度の建物が良い。外見からは、よく判らないので、大きなビルは出来るだけ遠慮している。
- 10) 構造物は現在の知見から耐震設計しているのであって、自然の奥まで知っている人は存在しない。要は全ての人工物は安全とは限らない。壊れても人に大きな被害を与えない掘立小屋が一番安全なのだが？
- 11) コンクリート建物も強度を上げる為に鉄筋を増やすのは良いが、増やしすぎてジャンカなどの見えない不良が増えているので、特に公共の建物は心配だ。高速道路など公共の構造物は不安が多い。阪神大震災でも高速道路が倒壊している。構造物の耐震基準は従来の経験から元にしていて、未経験＝想定外の現象は無視している。法律上問題の構造物を立てても、壊れないと言う保障は無い。お金があるなら、安全係数を掛けて丈

夫な建物を建てれば良い。公共は無駄な金を掛けられないので、そうは行かない。想定外が起きるのは仕方がないのである。

- 1 2) 同じ意味では、お金を掛けなくなかったり、俺が活着ている間に地震は無いと考えたり、手抜き工事で強度が落ちているものもある。民間の構造物も危険な場合がある。
- 1 3) 地上になにもない地下は安全と思っている。地上より振動は理論的に小さい。津波は気にしないと不味いが。地下車庫は地震で家がた倒壊しても、仮住まいに使える。
- 1 4) 勤務先や通勤途中、旅行中などでは、咄嗟の判断が必要となる。多少建築の勉強するのが良いか？
- 1 5) 家を建てるとき予算に余裕があるなら、柱のサイズを大きくすると良い。柱を元々の設計より少し太くするだけで可なり強度が上がる。大体柱のサイズアップはその 3 乗に比例する。倍壁を厚く上部にするのも良い。木造なら 3 x 6 がお勧め。

## 地震を考える上での基礎知識

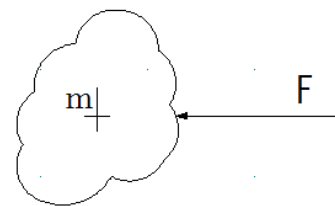
### 1) 波とは

地震は音声と同じ波である。音は見えないので、そのイメージが正しく理解されていない。また、多くの書物では音を単に数式で表し、物理的理解を深める様には書かれていない。音の本質を理解できないと、地震も理解できないので、まず音に関する予備知識である。結論から言うと、「音とは歪を移送するもの」となる。ある所に歪即ち応力を発生させるには外部から音を送る必要がある。車を加速する場合はエンジンからシャフトを通して音がタイヤに伝わり、音がタイヤを歪ませ回転力が発生する。「音が」と書くとは違和感を感じるかもしれない。が、事実なのである。地震波は音です。

学校の教科書で習う物理では、物の重さや力を抽象化しており、現実と異なる状況で説明している。質量  $m$  の物に力  $F$  を加えると加速度  $\alpha$  で物は加速して速度  $v$  を得る。

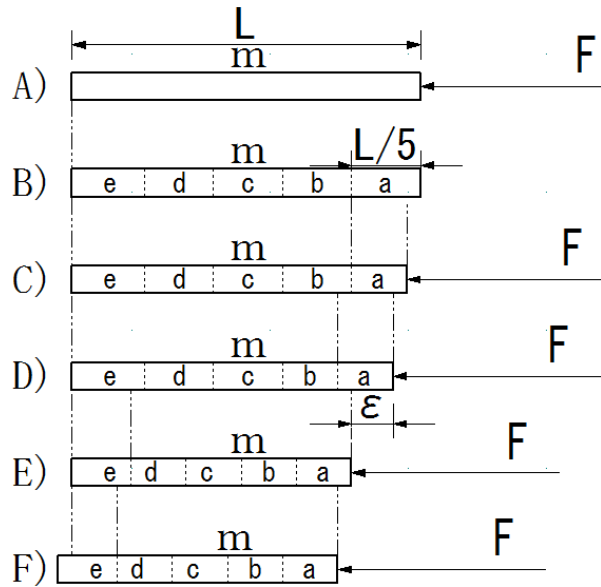
$$\alpha = \frac{F}{m}, v = \int \alpha$$

この概念は体積がある物を無限小の重心 1 点に集まっているとしている。重心にブラックホールが有るわけである。或いは剛体と言って、変形しないとしている。世の中に変形しないものは存在しない。後でわかるように、変形しないと力が伝わらない。大まかなことを考えるには良いシミュレーションである。が、現実ではない。競走馬の蹄が馬場を蹴ると、蹄と馬場が歪み、即ち力が発生する。蹄が歪すぎて破損しない様に蹄鉄が打たれている。考えやすいように、質量  $m$  の細い棒を力  $F$  で押す場合を考えよう。これも現実とは異なる状況であるが、少しはより現実に近い。A) の様に棒の方端に時刻 0 で力  $F$  が加わったとする。力が加わった後、長さ  $L$  のもの全体が一定の加速度  $\alpha$  で加速されるというのがニュートン力学的考えである。ここでニュートン力学と異なり、剛体では無いとしよう。長さ  $L$  を幾つかに分断する。多数(無限小)に分断するほど現実に近くなるが、面倒なので、とりあえず B) 図の様に 5 個に分断



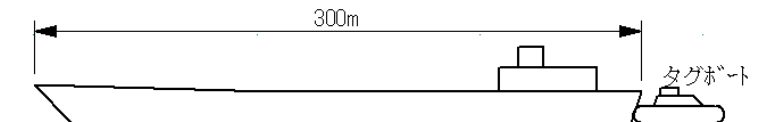
する。まず力が加わった直後、C)図の様に部分 a が変形するであろう。他の b~e 部分は、力が加わった直後であれば、何も起きない。慣性質量があるので、動くまいとする。部分 a は寸法が小さくなり、a 内部に応力  $\gamma$  が発生する。 $\gamma$  の全体は F と同じである。次の瞬間 a の左側面は応力  $\gamma$  となり、部分 b を押す。

D)図の様に部分 b が変形する。瞬間が 5 回分経つと、E)図の様に全体が歪み、その後 F)図の様に移動し始める。剛体でない物の端っこに力が加わると、歪がその点から伝播していく。この歪の伝播が音である。瞬間 5 個分を全長 L で割れば音速となる。



物は力 F が加わった瞬間から、力が加わった付近から加速が与えられ、少し遅れて全体が加速されることになる。全体の歪  $\epsilon$  は寸法的には堅い材料では 0.1% に成ることは少なく目には見えない。コンニャクなど柔らかい個体では観測が可能である。大きなものでは観測も可能である。

例えば 300m 長さの大きな船の後端をタグボートで押すとき、鋼の音速は 6km/S なので、タグボートが押し、



後部が動き始めてから  $300/6k=0.05$  秒遅れて先端が動く事になる。船は中がガラスで、全体は鋼より可なり柔らかく、実際には秒近く遅れる。

鉄鋼で作られた高層ビルが地震に遭うと、力=地震波が下から上へゆっくり伝わるので、下と上で位置のずれを生じて、大きく揺れ始める。

歪が伝播するには物の大きさを L、音速を  $v$  とすると  $t = \frac{L}{v}$  の時間がかかる事を記憶しておこう。

力の変化がある場合に音が発生し、伝播していく。力が変化ない=一定の場合は音の発生はない。力の時間変化が音 j ということになる。式では

$$j = \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 x}{\partial t^3}$$

が音ということになる。学校の教科書のニュートン力学で位置 x の時間 t で二回微分したら

加速度とは習うが三回微分が音とは習わない。小生は「ニュートンの忘れ物」と呼んでいるが、当時は音の概念自体がハッキリしなかった時代なので仕方ない。

では音=歪がどの程度 of 速度  $C$  で伝わるかと次の式となる。

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$
 と示される。  $K$  は弾性定数、  $\rho$  は質量

棒の場合はヤング率  $E$  と単位長さ当たりの質量を使えばよい。大きな三次元体の中を伝播する音は、体積弾性率  $K$  と比重  $\rho$  を使う。気体の様に圧縮すると温まる様なものは、温まる分誤差が生じる。

$$\text{大気圧は } 101325\text{N/m}^2 \text{ なので、空気の比重 } 1.3\text{kg/m}^3 \text{ を使えば、 } C = \sqrt{\frac{101325}{1.3}} = 280\text{m/S}$$

水の体積弾性率は  $2070000000\text{N/m}^2$  なので、気体の比重  $1000\text{kg/m}^3$  を使えば、

$$C = \sqrt{\frac{2030000000}{1000}} = 1440\text{m/S}$$
 と一般に知られている空気と水の音速  $330\text{m/S}$  と  $1500\text{m/S}$  に

近い値となる。気体液体に比べると緻密な固体では正確にあう。大まかな音速を知ることには有効なので、以下に示す。

液体は  $1\text{k}\sim 2\text{k}\text{m/S}$ 、プラスチック類は  $2\text{k}\sim 3\text{k}\text{m/S}$ 。氷は  $3\text{k}\text{m/S}$ 、金属類は  $3\text{k}\sim 6\text{k}\text{m/S}$  (鋼は  $5900\text{m/S}$ )、セラミックは音速が早くアルミナは  $10\text{k}\text{m/S}$  程度、ダイヤモンドは結晶で方向性あって(111)方向で  $18\text{k}\text{m/S}$  と物質中最大速度である。なお、音速が速い物質は多くは、熱の伝達も良い。両方とも原子の振動の伝搬が原因で、音は一定の方向を持って振動が伝搬し、熱ではランダム振動が拡散する。ダイヤモンドは熱伝達がすこぶる良い。(注意: 金属の様な自由電子があると熱伝導率が相対的に高くなる。)

発砲体は元の材料より音速が遅くなる。スポンジ・ケーキは  $100\sim 500\text{m/S}$ 、発砲プラスチックは多くは  $300\sim 1500\text{m/S}$ 。金属やセラミックも発砲率や気泡率に比例し元の材料より可なり低くなる。

岩石は多孔質のものは  $3\text{k}\text{m/S}$  以下、コンクリートに使う砕石は  $5\text{k}\text{m/S}$  弱、線路に使うバラストや浅い岩盤は  $6\text{k}\text{m/S}$  を超える。地下深く例えば約  $700\text{km}$  以上の深さの岩 (下部マントルと言う) は圧力が加わっている事もあって、これより高く  $10\text{k}\text{m/S}$  を超え最大  $15\text{k}\text{m/S}$  とダイヤモンドの音速に近づくと測定されている。当然熱伝導も良からう。(殆どの物質は圧力を上げると体積即ち比重の変化より弾性率の変化の方が大きい)

大雑把なイメージで言えば硬いと音速が早く、柔らかいと音速が遅い。物をハンマーで叩いて、甲高い音がする物は音速が早く、低い音がするものは音速が低い。

しかし、単一物質でないもの、コンクリート、CFRP など複合したものは、上記が当てはまらないのが多いので、注意が必要である。

硬いもの=弾性率が高い、弾性率に対して比重が軽いと音速が早くなる。ダイヤモンドは比重が軽く、且つ弾性率が高い。GFRP はダイヤモンドと同じ炭素繊維とプラスチックの複合体で繊維の方向には音速が非常に早く=硬い、直角方向には音速が遅い。複合材は

構造によっては複数の異なる複数の音速を同時に示す。

## 2) 波の種類

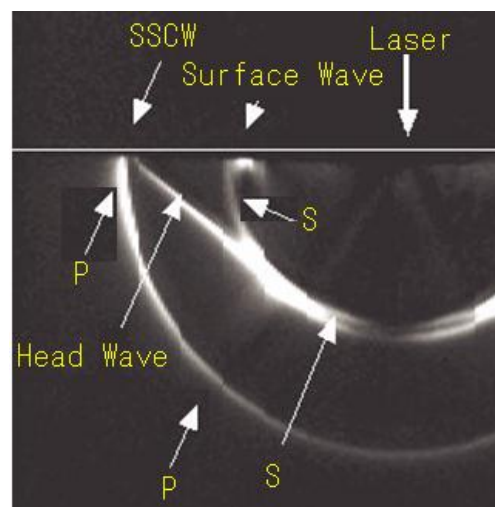
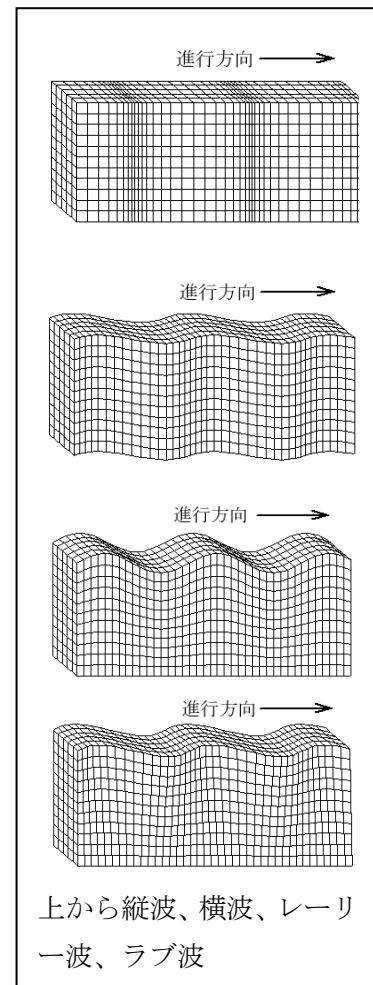
地震波は応力波であり、音である。地震波は耳で聞く空気中の音と同じ物理現象である。音響の分野では音、機械の分野では応力波、地震の分野では地震波と分野ごとに異なる呼び方をしているだけで、同じものである。気体液体中では縦波が主で横波は殆ど計測できない。横波は粘性が高い物質ほど伝播しやすい。気体液体は粘性が低いため横波が伝わりにくい。粘性の高い液体では横波も伝播することが観測される。固体中では縦波（又は圧縮波）を横波（又はせん断波）が容易に伝播する。右上の2図の様な振動をする波である。前述の様に波の伝わる速さは  $C$

$$C = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$
 と表せる。

$\rho$  は物質の密度、 $K$  は縦波の場合は体積弾性率、横波の場合は横弾性率を代入する。 $K$  や  $\rho$  は同じ材料でも温度、圧力で変化する。多くの物質で横波の音速はだまかには縦波の6割程度である。地震波が伝わる地殻の縦波音速は  $6k \sim 8km/S$  程度である。関東ローム層など柔らかい堆積物では  $5km/S$  以下である。通常の庭土は有機物を多く含み水を十分吸った状態では  $1km/S$  に達しないが、締め固めると  $3km/S$  を超える。山土は有機物を含まない分より高い音速を示す。

地震が発生すると、地下の色々な構造を通過しながらも、縦波成分が最初に観測されるのでこれを **Primary (P、第一) 波** と呼ぶ。横波成分は遅れて観測されるので **Secondary (S、第二) 波** と呼ぶ。別分野では **S 波** は表面波の意味で使われるので注意が必要である。材料の表面では縦波、横波はそのままでは存在できず、他の種類の波に変換する。物質の境界では横波や縦波が変形して、表面波と呼ばれる波となる。振動の方向でレーリー波、ラブ波と区別して呼んでいる。横波、縦波、表面波が相互に変化するのをモード変換とよんでいる。

地震の発生源は地球規模に比べ小さい。地殻

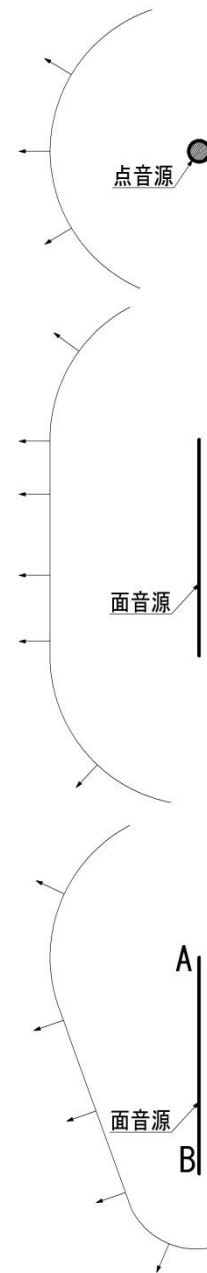


はガラス質（橄欖岩、大陸地殻は安山岩などで音速 6km/S、海洋地殻は玄武岩などで音速 7km/S、ガラス 5~6km/S）で出来ている。透明なガラスの表面に強いレーザーを照射し、音波を発生して音の伝わり方の観測をすると、均質と仮定した地殻の音波伝搬の良い模擬になる。右図の Laser と書かれた部分にパルス状レーザーを照射し応力波を発生させ、一定時間経た時の歪即ち音波を観測したものである。超音波可視化法と言う。P 波はレーザー照射点から一番離れた位置に到達している。地殻は薄く、多層状の異なる材質なので、下方向に向かった P 波は実際には一部反射する。P 波の表面近くは P 波の応力によって表面が凸又は凹になる。物に一方方向に応力を加えると、直角方向にも歪む。コンニャクを厚さ方向に押せば、面積が大きくなる。これと同じ現象である。この歪は SSCW と呼ばれている。この歪を地表に設置した地震計は P 波として観測している。P 波即ち縦波自体を検出している訳ではない。この SSCW からは横波が発生する。HeadWave と呼んでいる。表面に限らず、内部でも音響インピーダンスの不連続境界があると、色々な波種間の変換が行われる。

レーザー照射点から横波 S が伝わっているが、縦波の 60%程度まで進んだ位置である。この横波と HeadWave は繋がっている。S 波の表面に当たる部分は表面波(SurfaceWave)に変換される。内部の横波のエネルギーは徐々に表面に拡散して表面波に供給される。

レーザー照射点から垂直方向では縦波が強く、横波 S が弱く、45 度方向より角度の広い方向に横波 S 波が強いが縦波が弱い。この状況はレーザーを点照射したため、地震など発生のプロセスで異なる。音源の性質が異なる場合に関しては複雑になるので、ここでは割愛する。

平面で考えた場合、震源が点状の場合は、P 波と S 波は球面状に広がるので、モード変換の分と反射や減衰を無視すれば概略距離の二乗に反比例して(振動のエネルギー密度が)弱くなる。表面波は距離に反比例するのと横波からのエネルギー供給も相まってなかなか弱くならない。さらに震源が平面状の場合は何れの波もなかなか弱くならない(右図)。実際には一点から亀裂が周囲に広がるので、平面状にはならない。地震の場合同時に平面から音が出るのではない。亀裂が何処かから発生し、拡大していく。亀裂の進展速度は最大概略横波音速である。右図では A から亀裂が発生し、B まで進んだ場合を示す。この場合は傾いた平面波がでて、平面波の方向では遠くでも強い地震を感じるであろう。図では直線の A~B は、実際には地下の面であり、それも曲面である。また、亀裂の進展が不連続で起きる事が多いので綺麗な平面波の伝搬にはならない。この亀裂の進展しだいで、ある方向に強い地震波が伝播することが考えられる。単純に震源から離れば揺れは少ないとも言





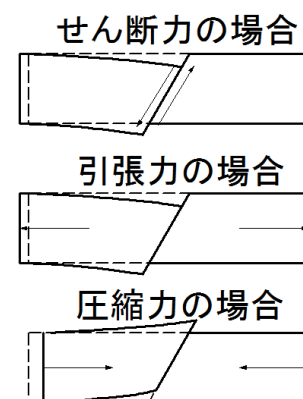
えない。

### 3) 地震とは

元々地震は人に感じる地面の震動と言える。が、人には感じない振動成分もある。象など動物が人より先に地震に反応したりする事もこの理由である。人の耳は 20Hz～20kHz が聴けると言われている。4kHz 付近の感度が高いが、20Hz や 20kHz は大きい音が聴ける程度である。小生みたいな年寄は 25～10kHz が限界である。皮膚の振動は 100Hz 付近に感度が高い部分があって、耳で聞こえない部分を風圧として補っている。体全体の振動は 0.1Hz～500Hz を感じ、一番感度の良のはい垂直方向で約 5Hz です。人はこの体全体で感じる音を地震としたのであろう。実際の地震波計測結果から 0.01Hz 以下 5kHz の成分を含んでいる。もっと広い周波数範囲かもしれない。

3.11 東日本大震災は太平洋プレートの動きに伴う歪をプレート全体でエネルギーを解放した地震でプレート境界型地震と呼ぶ。地震の中では滅多に起きない地震であるが、一般にそのエネルギーM8 以上と非常に大きい。また、プレート境界からの S 波は平面波的に地震波が伝わるので、遠くでも高い震度をしめす。日本の周りではプレート境界は太平洋の中にあるので津波を伴う。

阪神大震災の様な断層でのずれによる地震は頻繁に起き、これも元をたただせば各プレートの動きに伴う歪を局所で解放する時に発生する地震である。狭い範囲での構造変化の為、に伴う振動が球面波的に伝搬するので、距離が離れると急に震度は下がる。活断層と呼ばれる断層が日本にはたくさんあるが、これらの断層が動く事が多い。歪が溜まった時に、前に動いた亀裂＝断層があると、そこが動きやすいのは理解できる。条件によっては新しい断層が出来ることもあるので、断層が無い部分で地震が起きないと思わない方が良い。動き方には右図の 3 種類がある。右の図は圧縮力、引っ張り力、せん断力が加わった場合の断層の動きを示す。なお、判りやすくする為、図の右の部分は動かないとした。これらの地震が陸上で発生した場合、当然津波は伴わない。海底で起きると断層のずれ相当の津波の発生が考えられる。



断層が発生すると、応力が弱まり、その分縦波が発生する。縦波が明瞭に観測できる場合は縦波の先端の位相から圧縮か引張かの区別がつく。地震のエネルギーの大半は縦波であるが、縦波は直下型地震の場合以外では、あまり地表には影響しない。図の形状変化は横波であり、これが地表面で表面波となって住んでいる我々には大きな災害をもたらす。縦波も表面で SSCW と呼ばれる表面波となるが、振幅が弱い。前述の超音波可視化像を見れば横波の表面波が強い。

これ以外にマグマの上昇や火山噴火、斜面の崩落、地下空洞の陥没、雪崩、など色々な

理由で地震が起きる。地表と地下で大きな力の変化があれば地震として感じる。

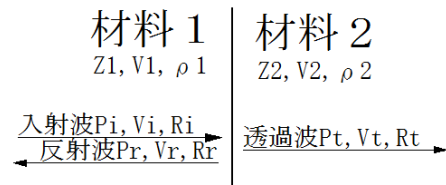
エネルギーとして最大級のものが 3.11 の様なプレート境界で発生する地震となる。

#### 4) 揺れと地盤

地震波が地中を伝わっていくが、色々な岩石や土壌を伝わる。音響的性質が異なると全部の地震波が伝わらない。この異なる材質間の音の伝わりやすさを示す音響インピーダンスと言う物理量があります。電気のインピーダンスと同じ様なものです。音響インピーダンス  $Z$  は次式で示されます。  $\rho$  密度  $\rho$ 、 $C$  音速、 $k$  弾性率

$$Z = \rho C = \sqrt{\rho k}$$

インピーダンスが同じ材質境界では音のエネルギーは全部伝わり、異なると一部透過し、残りは反射します。右図の様に境界の両側に  $Z_1$ 、 $Z_2$  の音響インピーダンスの物質があると次の式に従います。



$$\text{音圧の反射率は } R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{速度の反射率は } R_v = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

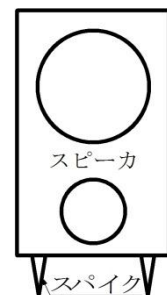
$$\text{強さ (エネルギー) の反射率は } R_r = \frac{V_r P_r}{V_i P_i} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

$$\text{音圧の透過率は } T_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \text{速度の透過率は } T_v = \frac{V_t}{V_i} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$\text{強さ (エネルギー) の透過率は } T_r = \frac{V_r T_r}{V_i T_i} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

あらゆるもので、面同士が綺麗に全面接触している場合は極わずかです。部分的に接触している場合は、音響インピーダンスは、接触面積比を考える必要があります。概略面積比で計算されます。

高級スピーカの足を見たことがあるでしょうか？多くは金属でできたスパイクと呼ばれる尖った足がついている。何故かと言うとスピーカの振動が、また床からの振動（音）が伝わるのを避ける為です。音は接触している面積が小さいので金属であっても音が余り伝わりません。面積が小さいので、実質的に音響インピーダンスが小さくなったと考えられます。昔はゴムを使用しましたが、それより金属スパイクの方が音は伝わらない。



表層近くの地盤を構成する物質の種類は場所です。阪神震災の時、神戸の山の上では殆ど建物の被害は無かったが、その麓では大きな被害になった。この理由の一つは岩盤の音響インピーダンスである。三角州など川で砂が堆積した部分、埋め立て地などは音響インピーダンスが低く、同じエネルギーの地震が伝わると振幅が大きく、六甲山麓の様に硬い岩盤の様な音響インピーダンスが大きいと振幅が小さい。岩盤の音響インピー



ダンスは高く、畑など土の音響インピーダンスは低い。関東ローム層、大阪、名古屋平野などでは揺れが相対的に大きくなる。また、建物の上層階の方が、地面より大きく揺れるのは構造物の等価音響インピーダンスが小さな事に依る。

また、音響インピーダンスが異なる部分では反射や屈折が起きる。阪神震災では、被害の大きかった地域では、真下に震源があって、下から来た波と、六甲山脈の堅い岩盤で反射屈折した波が重なったため被害が集中したと考えられている。

神鋼住宅を造成したとき、土を固め強度をあげる為に土の上を重いローラーが何度も往復したり、バイブレータで土をたたく。これで音響インピーダンスは倍以上変化する。しかし、石までの音響インピーダンスまでには成らない。

昔から土地や住宅購入の際はまづは古地図を見て、元々川、沼や低地などであった場所は避けるのが原則である。

地震計の設置場所は、特定の音響インピーダンスの場所では無いので、それぞれの地震計は、設置した場所での震度を測っている。個人の住まいで感じる震度と当然差がでる。

音響インピーダンスで地震波の伝わり方が計算できると上記したが、音響インピーダンスでは計算が厄介になる事もある。例えば高層ビルの地盤が水平方向移動すると高層ビル上部が追従できないで揺れる場合である。3.11 の時は東京の高層街では水平移動は少なかったが、東北では約 2 分で 4m を超える移動が観測されている。高層ビルの地盤にこの様な大きな移動がある場合の耐久性は計算されていない。低い共振周波数の建物は注意する必要がある。タンクのように大きなものが細い足で保持されている構造では問題が発生する可能性がある。

## 5) プレート境界型地震のプロセス

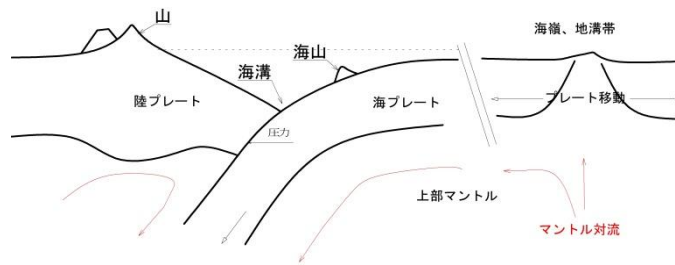
地震は震源付近で発生し、地震波は当然その付近で発生し、伝わって来ると思っている人が多い。これは間違いである。内陸型の場合は大まかにはそう考えても大差ないが、プレート境界型地震の場合は色々な現象の理解を誤る。

結論から言うと、縦波 P 波に関しては、計測点付近の応力が解放される際に発生する音波を観測し、横波 S 波に関しては震源面付近からの音波を観測している。

大昔南北アメリカの中央のカリブ海にアフリカが有った。現代の地図でジグソーパズルをすれば直ぐに気が付く。また、アフリカ、インド大陸がユーラシア大陸に衝突してアルプス、ヒマラヤやチベット高地が出来たという事は、ここ数十年のプレートテクトニクスの進歩で分かった事であるが、これが地震の元である。その駆動力は地球内部の熱対流で、マントル対流と呼ばれている。マントル対流は地球誕生から 4 回程度回ったと考えられていて、非常にゆっくりしている。速度はプレートによって異なるが今は数 cm/年である。

マントルは液体では無く、固体である。縦波と横波が伝わるのでそう判断できる。固体

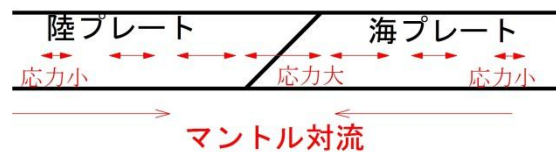
と言っても、例えばアスファルトは大型トラックが何度も通過すれば轍ができる。アスファルトも縦波横波が伝搬する。ガラスを温めコップ、風鈴や金魚鉢を作っている映像を見たことあるでしょう。適度の温度では粘性の非常に高い液体＝柔らかい固体になります。マントルも一種のガラスです。マントルは圧力と温度が高いので似た状態と思えば良い。



マントルが上昇して来る場所が地球上に何か所もあるが、大半は海にあり海嶺と呼ぶ。地上に出ている場合は大地溝帯と呼ばれる。アフリカのスエズ運河のある黄海北部が海嶺で途中から直線で南下するとアフリカ大陸の東部を横切る大地溝帯である。数万年経つとマダカスカルの横にもっと大きな島が出来るかもしれない。大西洋の海嶺が南北に横切って極寒のアイスランドにも大地溝帯がある。これらの海嶺や大地溝帯から湧き上った（と言っても必ずしも液体ではない）マントルが冷やされ海洋（性）プレートを作る。大陸のプレートの成分は海洋プレートに似てはいるが比重が軽い。その為大陸プレートと海洋プレートが衝突すると海洋プレートがもぐりこむ。また、海洋プレートは冷やされた為に、同じ際質の高温マントルより比重が高く、潜り込んだ後、融けるまでマントルの深い部分に沈んでいく。この動きにつられて、大陸プレートの下でマントル対流が出来る。マントルと海洋プレートの境目は温度が  $1k^{\circ}C$  程度と考えられ、この温度を超えると粘性が小さくなる。粘性が高い部分がプレートと言う**硬い固体**で、粘性の低い**柔らかい固体**部分が、深さ  $100km$  程度に位置する。この境界のみ音速が僅かに小さくなるので、その下のマントルは**より硬い**と思われる。なお、プレートと言うのは一体となって移動する、地殻を含む上部マントルの上の方の部分を指す。地殻は海洋では  $5km$  程度、陸地では場所により、最大  $50km$  に達する。日本海溝で深さ  $10km$  なので図は凸凹が大げさに書かれている。

海洋プレートと陸プレートの境界を考える

とお互いに押し力が働いている。マントル対流によって比較的硬いプレートが圧縮される。マントル対流からの粘着力を考えるとプレート境界に近づくほど応力が大きくなると考え



られる。海溝で海プレートが沈み込む所で断層ずれが発生しやすい。その場合、下はマントルで満たされているので、陸プレートが海プレートの上に乗上げる。元々沈み込み時に海水や海底沈殿物を巻き込んで滑りやすく＝粘性が低くなっている可能性も高い。融けたマグマの噴火する火山帯が海溝からプレート厚さ程度に分布する事実も、その可能性を高める。真実は判らないが、ある瞬間プレート境界が滑ったらどうなるかを考えよう。

一番初めに書いた音と歪の関係の様に、a~eの5区間に大陸側を分けます。海プレートも変化しますが、同時に考えるのが大変ですので、取りあえず固定し、陸側の動きが分かった

ら考えてください。単純化しないと説明できないので、a~d の歪は段々弱くなりますが、同じとおきましよう。まず A) では歪が溜まっています。B) で境界の何処かで亀裂が発生し、a が内部応力を解放し伸びた状態です。亀裂は有る一点から進展しますが、これも同時に全面滑ったとします。a が伸びると、応力変化ですので、音が出ます。伸びは負圧を発生します。左右方向に出ますが、右の斜めの境界での挙動は厄介なので取りあえず伸びて音は無くなったとします。C) では a から伝わった負圧の音によって区間 b が伸びる事が出来ます。伸びると同時に伸びた部分からは左右に負の音がでます。D) では b から c から伝わって音が伝わり、c が広がり、同様に両側に音がでます。b から右に出た音は a に伝わり、区間 a を移動させます。

同様な事が繰り返し、音=P 波が縦波音速  $C_p$  で伝わっていきます。

ここで d の地上にいる人が P 波を感じたという事は境界から来た P 波であると同時に自分の下で起きた歪解放のエネルギーの一部でもあります。その時刻は  $L/C_p$  です。

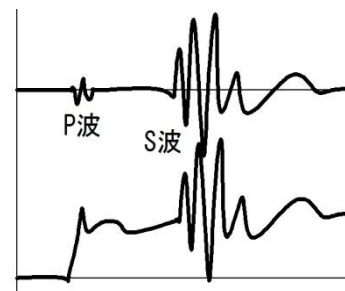
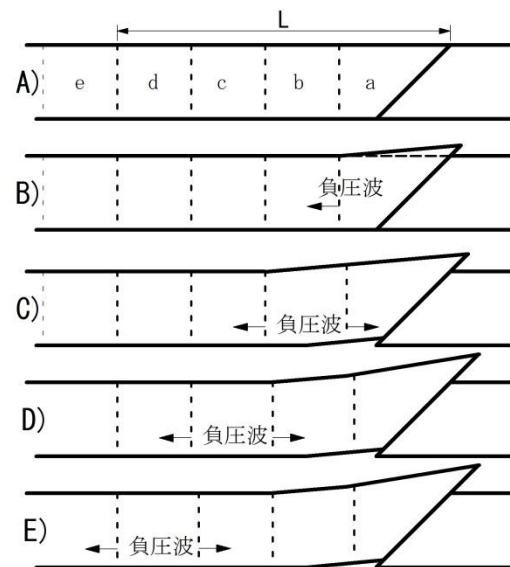
仮に e には歪が無いとすると、 $L/C_p$  の 2 倍の期間境界の先端は伸び続けます。

3.11 では境界から 200km 離れたところでも縦波を感じていますので、 $C_p$  を 6km/S として  $200k/6k \times 2 = 67$  秒間先端が伸び続けます。勿論境界の粘性が勝って滑りを止めたら、その時点で競り上がりは終わります。実際は亀裂の進展もありますので、もっと長い間他の部分が伸びます。P 波 SSCW の部分が地上で感じます。大して大きな振動で有りませんが、水平方向の移動を伴います。東北海岸では 5m 移動しましたので、大きな構造物があれば危険です。

境界先端の競り上がりは、上下振動で大きな横波を発生します。上記例では約 1 分間横波が発生し続けます。一方向に競り上がるので、発生源では片振れの振動でしょう。地震計には両振れ波形になりますが、地震計の帯域が狭い事と震源から離れると低周波成分が失われ両振れになります。また、仮定のように同時に面が滑る事はありません。

地震計では右図上の様な波形を観測しますが、地下では下の様になっている筈です。P 波のエネルギーが大半で、P 波のエネルギーの半分が境界に達して伸びたことによる振動で、地震のエネルギーの一部です。地震波形からマグニチュードの計算をします。気象庁はモーメントマグニチュード法での

計算をしていますが、論理的に正しいと思われません。それも横波のみのエネルギーに着



目しています。地下の歪の解放エネルギー全体を計測する方法がないので仕方ない事です。M9.1 と M9.5 の地震のどちらが大きいかは誰も言えないと言えます。あくまで目安です。

また、この競り上がりが津波を発生します。実際に表面での競り上がりが無くても、内部で滑り上方向の歪が出来れば、上向きの音波が発生し、変位が伝わり、海面を持ち上げます。

縦波 P 波の伝わった地域には新たな歪状態と成ります。それによって地震の頻度が上がります。境界で滑った領域の周りでも大きな歪が発生するでしょう。

長い時間で考えればプレートは水飴みたいなものです。自然と歪が解放される事もあります。

大まかには大陸下の圧縮歪が弱くなったので、マグマの生成が起きる可能性もあります。人間のスケールと自然のスケールは異なるので、呑気に構えるしかありません。

## 6) 地震波の計測

初期の地震記録計は、大きな重しを空間に浮かし、その位置を基準として地面の移動を記録した。地面の特定の点の移動量を記録した。変位計と言えよう。しかし、地震の無い時に中央に戻るように弱いバネを使っており、バネと重しで共振点があり、この周波数付近では共振の為測定誤差が大きく、その周波数以下では移動量の微分即ち速度を測っている事になる。元々人に感じる地震波を測定しようとしたので、あまり低い周波数成分は測定しなくてもよい。が、大型構造物が影響を受ける低い周波数は計測できない。

この機械式地震計は大きな振幅を計測できない。巻紙の幅は限られていて、実用的には±10cm 以下であった。

地震計の原理の種類は多いが、現在の主流は、重しをコイルの電磁力を用いて制御し、一定の位置に保つようにする。この時コイルに流れる電流が加速度に比例する。

玩具に搭載している半導体加速度センサーでも 4kgal 程度までの地震を十分な精度でその加速度を測定できる。

絶対位置を直接測定する方法以外は低周波成分と大振幅の測定に限界があって、巨大地震の振幅数 m、数十秒の周期から通常の人を感じる地震までを一つの地震計では測定できない。

K-NET に 2004 年に運用開始した強震計で最大 4kgal まで測定できる。加速度型の計測器の欠点は低い周波数の測定が苦手で、大振幅の低周波成分の計測には速度型が多く使われている。強震計の欠点を補うため作られた TST-2 型広帯域地震計では 100 秒の周期まで 10cm/S の揺れを計測できる。

地震域の大きさが数百キロの場合数百秒に及ぶ周期の長い地震波も考えられ現状機器で十分とは言えない。1k 秒ほどの計測でき方が良いと思われる。

余談であるが、多くの科学技術上の発見は、新しい計測機器の開発に伴うことが多い。

速度を積分すれば、加速度、加速度を積分すれば速度となるので、どれでも測定して、

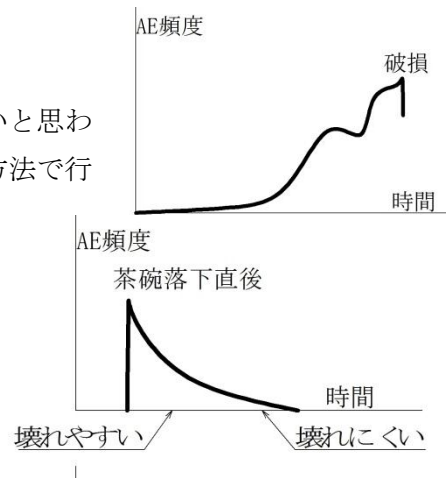
微分積分すればよいように思えるが、計測器の共振点を測定分解能から制限を受ける。地震計の記録の値をそのまま使うのは、地震の正体を見失う。特に低周波の大きな振幅成分は記録されていない可能性が高いと考えて、記録を見る必要がある。

一般的に同じ単位時間当たりのエネルギーの波は、周波数が低いほど変位振幅が大きくなる。例えばLPレコードやアナログ・テープで記録する際、低周波は振幅を押さえ、高周波は振幅を高くするRIAと呼ぶカーブで補正している。

## 7) 地震の予測

地震の予測は出来れば嬉しいが、可能性は非常に低いと思われる。金属など工業材料の破壊前兆を捉える事色々な方法で行われているが、何時起きるかは予測できていない。

アコースティック・エミッション (AE) と呼ばれる手法で、物が大きな破損する前に小さな破損が顕著になり小さな音 (AE 波) が出る現象を使って、もうそろそろ壊れると予想できるが、それからどの程度たったら壊れるか平均的期間は求められるが、それ



ぞれの物で期間が異なる。(右図 AE 頻度と経過時間の例) 要は予測できない。力を繰り返し加えると小さな亀裂が発生し、だんだん増えて行って、最後に壊れる。しかし、力を途中で加えるのを止めると、小さな亀裂が自己修復し、寿命が延びる。瀬戸物茶碗を落として割れなくても (場合によっては罅は入る)、茶碗には多くのクラックが発生している。落とした後小さな音を観測すると、落とした直後は頻繁に音が出て、段々少なくなっていく。自己修復しているのである。落とした直後はもう一回落とすと割れやすいが、少し時間が経てから落とすと割れにくい。過去の経歴が複雑に絡みあっていて、茶碗が割れるか割れないかも予想できない。AE 波は地震では大きな地震の前に起きる小さな沢山の地震と同じと考えられる。これを使って地震の予想をしようとする試みもあるが、震源付近の経歴の計測手段をもっていないので無理と思われる。茶碗でさえ無理である。しかし、危険性は深まったと言えるので、この傾向から地震への準備はできる。ただし、地殻の様な大きなものは県下の時間のスケールが大きいく j36E2WF9、年単位である。

本震の後の余震も茶碗同様の経過を示す。余震は一種の自己修復作用であって、その具合が次の大きな地震に影響する。

地震で発生した割れ=断層に関する自己修復の研究を小生は知らないが、予知を研究するなら、必要条件と思うが。

活断層は一般に過去に何度も動いた可能性のある断層であるが、将来動くかどうかは判らない。この断層が自己修復し、他より強く融着したら、次には異なる所で地震が起きる。起伏の多くは地震活動で出来たと考えられるので、起伏がある所地震ありと思った方がよからう。

Sunami,windbreaker,earthquake