

音波のよもやま話（その5）

波、音の発生

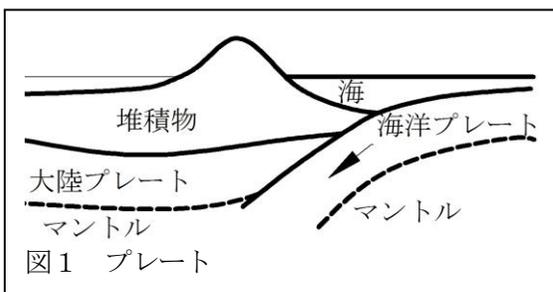
(葡)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

前回伝搬する音を光弾性可視化装置で観察できることを示した。具体的な音の挙動に関しては細かな説明はしなかった。音は非破壊や医療の超音波では圧電振動子で発生させる。この圧電振動子からどうやって音が発生するかの話の予備知識として、地震波や楽器などの音の発生原理について知ろう。次回以降に圧電素子からの音の発音原理を取り上げる。

◆地殻の構造

地殻は海洋プレートと大陸プレートに分かれる。海洋プレートは中央海嶺で生成し、大陸プレートの下に沈みこむ(図1)。相対的な話なので、大陸プレートが海洋プレートに乗っかると言っても良かろう。なお、昔は海洋プレート

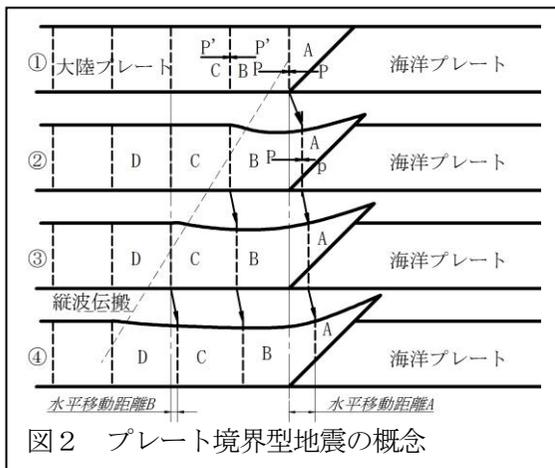


の移動はマンテルの移動につれて移動と思われていたが、現在は、移動しながら冷えて厚さを増し、更に冷えたため比重が大きくなって自重でマンテル内に沈み込んでいく海洋プレート

(スラブと呼ぶ)に依ってプレート全体が引きこまれると考える様になった。自然現象は再現実験が出来と限らないので、現象の起きる本当の理由を知るのははなはだ困難な事が多い。この考え方も変わるかもしれない。プレートの厚さは流動しないと言う意味では 40~100km とされている。硬い岩盤も高い熱と圧力に下では何度みたいなもので、境界の意義は難しいが、多くの場合、地震波のP波S波(縦波横波)の伝搬しやすさで区別している。海洋プレートの主成分は酸化シリコンを主体にした玄武岩で黒っぽく硬く重い(比重約3)。大陸プレートは玄武岩同様マグマから作られ似た成分で花崗岩が主成分である。玄武岩より白っぽく軽い(比重約2.7)。その重さの違いで海洋プレートが、大陸プレートの下に入ると考えられる。大陸プレートと海洋プレートの水平相対速度は数~数十cm/年程度であるから100年で数m~数十m相対移動する。大陸プレートと海洋プレート間は通常は固着していて、地震の時にずれる。多くはマグニチュードが8を超える大地震が起き、プレート境界型地震と呼ばれる。東日本大震災では溜まった5m以上の相対的ずれの歪が開放されたと考えられている。歪はプレートの圧縮歪や湾曲変形で貯められていると考えられるが、圧縮歪のみとして単純化すると図2①の様を示される。現象は連続的に起きるが、区間を区切

って離散的（デジタル的）に考えてみよう。また実際には海洋側も変化するが、ここでは海洋側の変化はなく、固定して考えている。

境界が滑る前は各区間には圧縮力 P が発生し



ている。各区間境界での圧縮圧力は左右から同じなので移動できない状態に吊りあっている。圧力 P の値は CD 間より BC 間の方が、 BC 間より AB 間の方が強かろう。マントルからの粘着力等があるので、圧縮力は境界から離れれば弱くなると考えられる。

境界部分 A が滑ると、 AB 間の右からの応力が P から p へと弱くなり、内部応力が減った分歪を開放する。 A の部分は伸び、さらに B の部分の応力も弱くなり B 内の歪もかいほうされ、 AB 境界は右に移動する。 B の歪が開放されると C を押す力が弱まり、 C 内の歪が開放され、 BC 境界が右に移動する。この様な現象を繰り返す。歪を開放した部分は厚さが薄くなる。この歪の開放の伝播は負圧縦波として観測され、 P (Primary) 波と呼ばれる。伝播速度は岩石の音速 6km/s 程度である。これに続く大きな揺れは S (Secondary) 波と呼ばれ音速 4km/s 弱である。初期微動とも呼ばれる P 波はガタガタと言う小刻みな振動と感じる。この振動は S 波受信まで続く。東北地方太平洋沖地震前後で男鹿半島では約 5m 東方に移動し、 1m ほど沈下した事が GPS データから判った。この時地震を感

じている人は水平に移動している。周りも一緒にゆっくり移動しているので、移動しているとは気が付かない。揺れが厚い地殻を水平に伝播しても地表に出にくい為、エネルギーが大きくても地表の我々に災害をもたらす事は少ない。境界型でなく、直下型の地震では P 波による揺れが一番大きく成る事もある。

東南海地震が高い確度で起きると考えられているが、駿河湾では海溝が海岸に近く、震源から民家までの距離を 30km とすると P 波は 5 秒、 S 波は 10 秒弱で到達することになる。東北地方太平洋沖の場合は仙台沖 70km と海溝が遠かったため、津波の到達は想定される東南海地震の場合より倍以上の時間がかかって到達したことになる。

図2の様な現象が海底で起きると、縦波伝播にともない広い範囲の海底面が沈下する。これにより引き波が起こされる。近くで起きた大きな津波の前に、引き波で海面が下がるのは地殻の歪が解放され、地殻の厚さが薄くなるからである。図2の様に沖から陸地に向かって沈下する事から、海底面付近の海水が沖に向かって流れると考えられる。津波の前の引き波が大きいと、津波も大きい事は知られている。

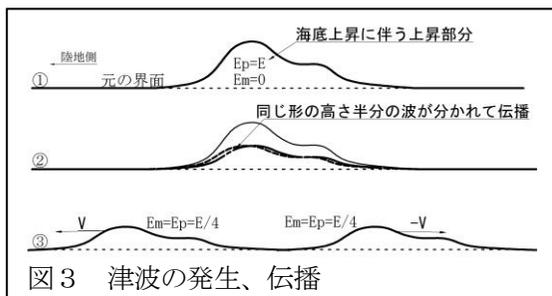
その後から来る津波本体は、引き波の沈下分余分にポテンシャル・エネルギーを得て速度を増す事になる。沖での津波の高さから計算されるより、引き波が大きい分危険な津波と言える。

歪の開放が音波の伝播である事が以上の説明で理解できたと思うが、慣性力を持った A や B の部分その後どうなるかは、余りに単純化したので図2で説明しにくい。「音波のよもやま話（その3）弦巻バネ」を思い出そう。端を縮めて瞬時離れた時の音の伝播である。慣性力が音圧を作って、応力のない部分にも伝播して行った。それと同じ現象が起きる。バネは一次元だが、地殻は3次元に繋がっており地震波は立体的に色々な方向に拡散していく。その分拡散による減衰が多くなる。（一般に音の減衰の最大原

因は拡散減衰による。) 一方表面を伝わる表面波などは、二次元の拡散なので縦波などの様に拡散減衰は激しくない。多くの表面波はS波が表面に接する部分でモード変換して発生する。S波が伝播するに従って表面波に変換していくので、震源直近より離れた方が表面波は強く成る傾向にある。

◆津波の発生と伝播

プレート境界型地震で図2の様大陸プレート先端が海洋プレートの上に上がる事は理解したと思うが、Aに着目すると、その移動はB,C,Dの歪が開放されるまで続く。主な開放される歪のあった部分が海溝から70kmあるとすると、音速6km/sとして10秒ほどかけてA部分が迫



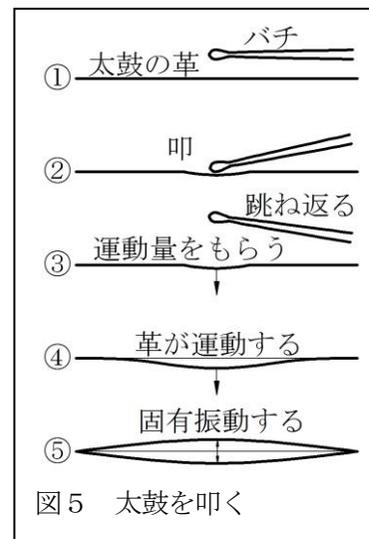
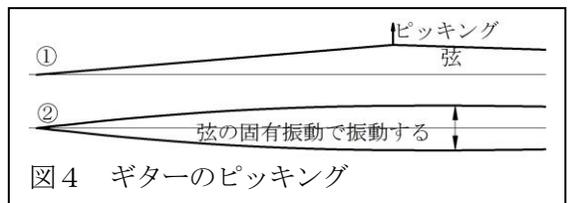
上がったことに成る。釜石沖に設置されたGPS波浪計の計測結果で7m近くの水位上昇を確認しており、この程度の水位上昇が10秒程度で起きることに成る。東北地方太平洋沖地震では地震が200秒以上続いた。10秒より長いが、震源から南北に海溝に沿って地震が進展したからであり、亀裂の進展速度は最大で横波音速相当である。その間海底が上昇する事象は南北に移動していく。それに伴ってしだいに南北に界面上昇した部分が広がる。数秒と言う事は、上昇する部分は100km単位で面積は広いので、km単位の面積に対しては一瞬で数m上昇したと考えてもよい。図3に上昇した時の海面の断面形状の例を①に示す。線形波動方程式を用いて初期条件を①で解くと、②の様に同じ形状の高さ半分の波に分かれて前後に運動する。ポテンシ

ヤル・エネルギーは高さの二乗に比例するので、②の左右に分かれる波はそれぞれ①の1/4のポテンシャル・エネルギーを持っている。それぞれの波は①のポテンシャル・エネルギーの1/4の運動エネルギーで逆方向に運動する。その結果総エネルギーは変わらない。最初に与えられたのは単なるポテンシャル・エネルギーで静止状態であるが、直ぐに動的な波に成って伝わっていくことが重要な現象である。波動方程式を初期値として静的ポテンシャル・エネルギーを与えて解くとこのことは確認できる。

非常に高い波の場合非線形運動方程式の解が必要となるが、我々の経験する波は殆どが線形現象と見做せる。

◆楽器の音の発生

打楽器、弦楽器、管楽器など色々な種類の楽



器があり、超音波振動子からの音の発生の原理を理解する上で参考になる。楽器で音を発生させる為のエネルギーの与え方から分類すると、打楽器は運動エネルギー、弦楽器

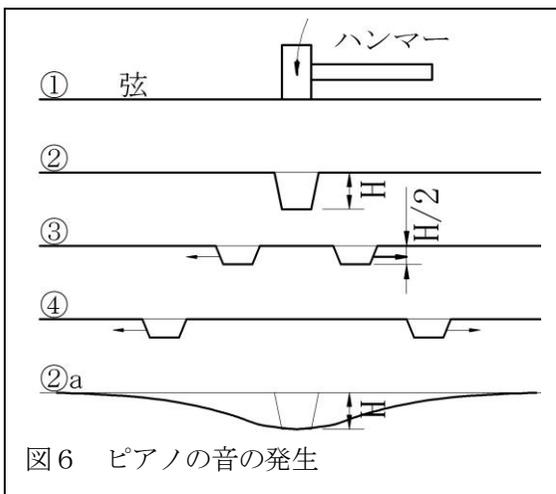
はポテンシャル・エネルギーが初期条件となる。管楽器はノイズを出しその中の特定の音を共振させる(フィルターリング)方法をとるので、

少し原理が異なる。

ギターをピッキングする事はポテンシャル・エネルギーを弦に与えて離す事になる。ブランコを引っ張って、ある高さのポテンシャル・エネルギーを与えて離すのと同じである。

一方打楽器は叩く時、運動エネルギーを与えている。例えば太鼓である。バチで太鼓を叩く場合、バチの運動量の一部を太鼓の革に与える。バチは直ぐ跳ね返り、同時に革が運動し始める。ブランコで言えば、停止中の一番下で運動量が与えられ、揺れる。

ピアノはギターと同じ様に弦を使うが、弦をハンマーで叩いて音を出す。太鼓と同じであるが、革と異なり一次元なので理論計算はより簡単である。



弦の中央で、運動エネルギーを与えると言う初期値で線形波動方程式を解くと、前述の津波と同じく、波がその点から左右に分かれて伝播する解が得られる。

図6①の様にピンと張った弦を硬いハンマーで瞬時叩くと②の様にハンマーの運動が弦に伝わり、その伝わった運動量により叩いた付近が瞬時変形する。図では変形をかなり大げさに表している。変形部分とその両側の移動してない部分では張力=即ちポテンシャル・エネルギーが発生する。音として、ポテンシャル・エネルギーと運動エネルギーを交換しながら、この変

形が左右に③④伝播する。この図の場合高調波成分が多く、余り良い音色ではない。そこで実際のピアノではハンマーは木材にフェルトを巻いたもの使っている。実際にピアノの場合、ハンマーで叩いた時の初期状態は②a の様な感じで、運動量のみを初期値としているとは言えない。このなだらかな形が左右に伝播する。この形を最高の音色にする為、調律師がフェルトに千枚通しで穴を開け硬さ調整などをする。

重ね合わせの原理で考えると、初期値は運動量、ポテンシャル何れでも、或いは両方同時でも同じ様に左右に分かれると言うことになる。

◆あとがき

自然現象の津波や人工物の楽器の波の発生原理を考えた。次号では探触子を構成する圧電振動子について述べる。その後に探触子からの音の発生について解説する。

◆今回知った事

- (1) 歪の開放、すなわち圧力の開放が音の発生。
- (2) 初期条件に静的ポテンシャル・エネルギー、或いは運動エネルギーを与えると前後に同じ形状の(動的)波が分かれて伝播する。
- (3) 津波は同じ形の波が両側に分かれて伝播する。
- (4) P波の地震を感じている人は水平に移動中
- (5) 引き波が大きい分危険な津波
- (6) 多くの弦楽器は初期にポテンシャル・エネルギーを与え、音を出す。
- (7) 多くの打楽器は初期に運動・エネルギーを与え、音を出す。
- (8) 弦楽器も打楽器も初期エネルギーを与えられた点から前後に音が伝播する。

<参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで (2015/04
初版 2刷、日刊工業新聞社)