

# 音波のよもやま話 (その2)

## ブランコのエネルギーの話

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫

### ◆はじめに

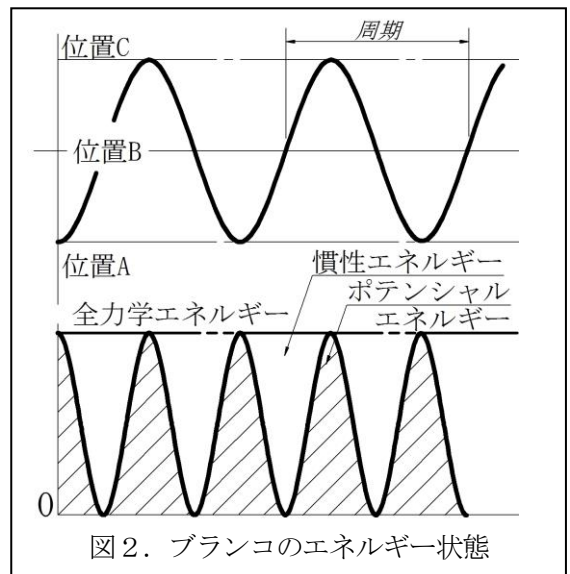
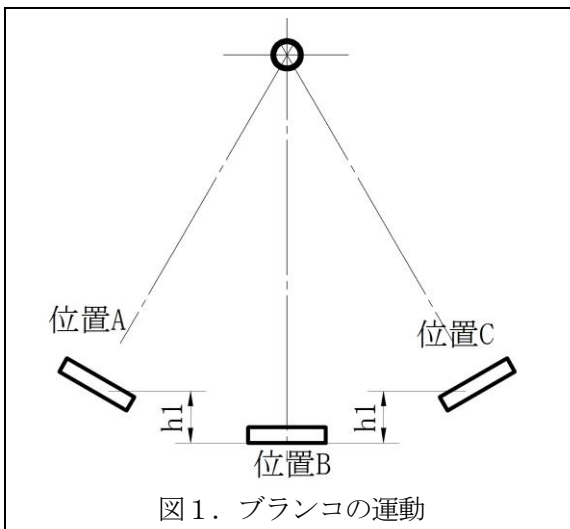
前回は慣性エネルギーとポテンシャル (位置) エネルギーを交換しながら移動する重力トロッコの話をした。同様な交換が行われる現象は沢山観察される。ジェットコースター、ブランコ、海の波、さざ波、そして楽器であり、音である。まずは目に見えるブランコの運動を眺めてみよう。

### ◆ブランコの運動

ブランコを一定の高さまで引っ張って、放した場合を考える。真空中で空気をかき混ぜないし、軸などに摩擦が無い理想の状態を考える。これは前回の重力鉄道同様に、図1で一番高い

位置、点Aと点Cで慣性エネルギーが最小で停止し、ポテンシャル (位置) ・エネルギーが最大となる。一番低い点Bでは、逆に慣性エネルギーが最大で、最速となり、ポテンシャル・エネルギーは最小となる。図の範囲だけを考える場合は「最小」=「ゼロ」と思って良い。地球は慣性運動しているの、その上のブランコも慣性エネルギーを持っている。何処をエネルギーの基準にするかで最少値は変わる。全てを考える場合は無限遠、宇宙の果てを基準にする。外部とのエネルギー授受がない限り、両エネルギーの合計、全力学エネルギーはブランコがどの位置でも変わらない。つまり

全エネルギー  $E = E_m + E_p$  となる。ここ



に  $E_m$  : 慣性エネルギー  $E_p$  : ポテンシャル・エネルギーである。

図2にブランコの位置とエネルギー状態を示す。全エネルギーは一定で、図の白部分は慣性エネルギー、斜線部分はポテンシャル・エネルギーである。左右は時間軸である。ブランコは人が

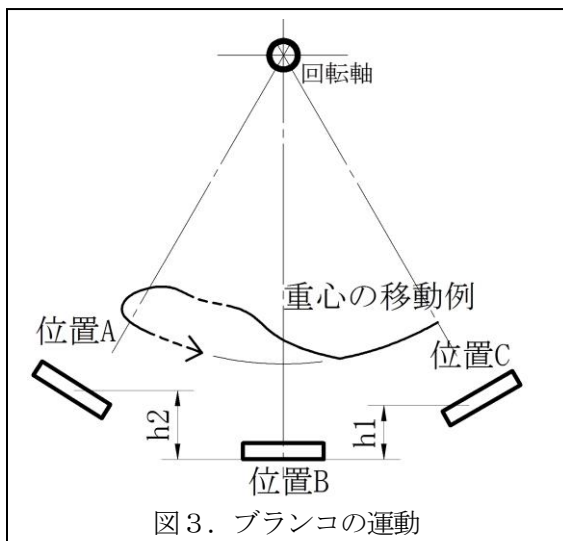


図3. ブランコの運動

乗れるので、人を通してブランコは外部とのエネルギーのやり取りが出来、ポテンシャル・エネルギー又は運動エネルギーを変化させる事ができる。例えば図3でブランコが一番下に来たときが速度最大であるが、この付近で足を地面に触れば速度ブレーキになり、運動エネルギーが減り、全運動エネルギーが減って、その分最高到達点  $h1$  が下がる。一方ブランコが一番下に来た付近で、乗っている人が足を延ばして、重心を上げれば、ブランコのワイヤが引っ張られ、ブランコの回転軸からワイヤを通してエネルギーを獲得する。図3の外まで考えると、地球を引っ張って、地球から位置エネルギーを獲得している。因みに飛び跳ねると言うのは、人が地面から上に移動するが、同時に地球を蹴って反対方向に移動させている。余りに重量が異なるので、地球が移動していない様に観測されるだけである。また、最高点に来た時、重心を元の状態に戻すと、即ち足を縮めると、その分重心の最高到達点が高くなる。この理屈を知ら

ない子供でも経験でブランコを大きく揺らす要領を習得できるが、論理的説明は前記である。この場合のエネルギーとブランコの位置の関係を図4に示す。ブランコのワイヤ下の全力学的

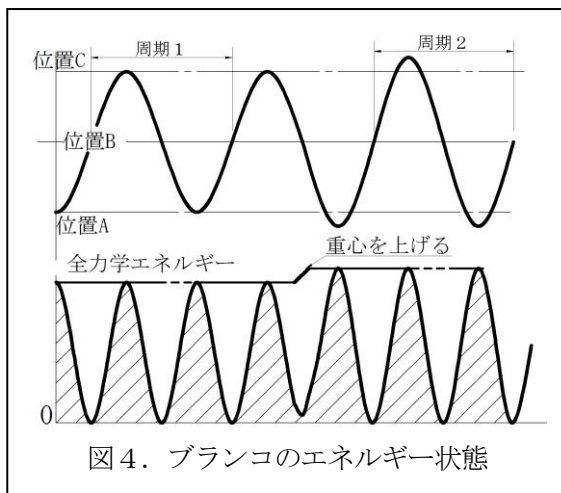


図4. ブランコのエネルギー状態

エネルギーは人が重心を上げるまでは一定で、重心を上げるとワイヤから貰った分エネルギーが増える。この時点での運動（慣性）エネルギーは変わらず、位置エネルギーが増える。最高速度の時に重心を上げるので、タイミングが難しい。ブランコを上手く漕げるかどうかは、タイミングが重要になる。ブランコが中央を同じ方向に通過する点の時刻間隔を固有周期と言う。固有周期の逆数は固有周波数である。固有周期はそれぞれの物固有に存在するが、ブランコのように綺麗な往復運動になるとは限らない。音叉では、叩いた直後は高調波成分が沢山含まれていて、時間経過と共に基本波の固有振動のみになる。ブランコや振り子では振る角度、即ち全運動エネルギーにより周期が多少変化する。±90度まで振ると20%程度周期が増える。振り子時計は振る角度を一定にしないと、その分時計の針の進む速さが変わる。水晶結晶で振動子を作るとその機械的な固有振動が全運動エネルギー量より殆ど変わらず、またATカットと呼ばれる角度で切断すると、温度に対して非常に安定するので時計のクロック源に使っている。1月間で10秒程度の誤差となる。水晶振動子の

場合、固有振動とは呼ばず（電氣的）共振周波数と呼ぶ。実際固有周波数と共振周波数は僅かに異なる。非破壊探傷器の超音波の送信や受信に半世紀前までは水晶が使われた。この場合は X カットと呼ばれる結晶の方向に切ったものが使われた。X カットの振動子は電圧を加えるとその厚さが変化する。厚さが変わるように外部から音が入ると、その音の強さに比例した電圧が発生する。この現象を使って超音波検査が行われる。水晶より精度が高い標準時を作るのに原子時計がある。原子や分子は特定の電磁波(光)を吸収したり放出したりする性質がある。この場合機械的固有周波数ではなく「共鳴周波数」と呼ばれる。この周波数が非常に安定で、「1 次周波数標準器」と呼ばれる世界の時計の基準に使っているものはセシウム原子を使ったもので誤差は 10 万年に 1 秒以下と恐ろしく安定だ。

われている。安価なルビジウム原子時計は数百年に 1 秒程度の誤差で趣味のオーディオにも使われているが効果のほどは？とは思いますが、小生のようなオーディオマニアは極限を追究するのである。

#### ◆衝撃実験装置



写真1 市販の5玉バランスボール

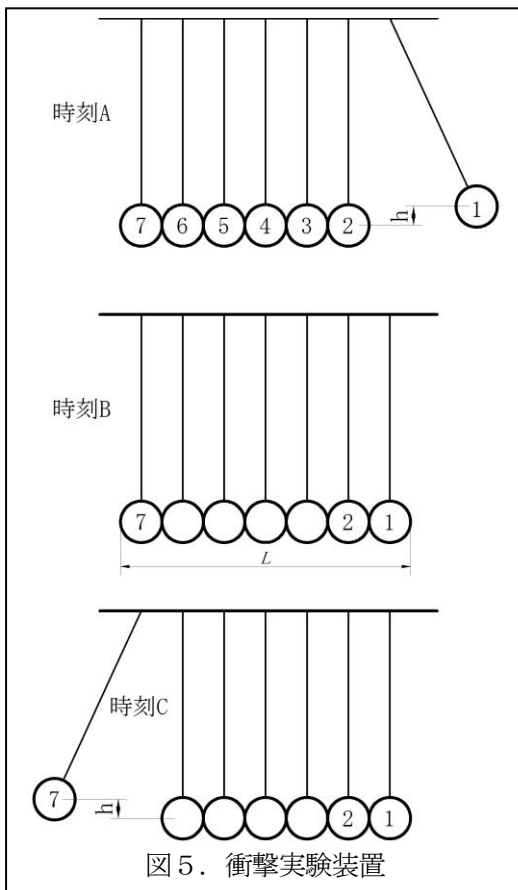


図5. 衝撃実験装置

ニュートンの時代に運動を観察するのに使った装置の一つに「衝撃実験装置」がある。現在はマジックの一つとしてバランスボールなどの名称で玩具としても売られている(写真1)。図5の様に同じ質量の鋼球が並んでいて、それぞれが一種のブランコである。静止した状態で、鋼球同士が接触している。鋼球を吊るしているワイヤは図では1本だが、実際は写真の様に2本で、ブランコ同様左右位置を制限して鋼球が並んだ一定の方向にしか運動出来ない様になっている。図5の時刻Aで右の鋼球1に高さhのポテンシャル・エネルギーを与えて、放す。鋼球1は並んだ鋼球列の先端鋼球2に当たるが、当たった時からごく短い一定時間Tの間、図の時刻Bの様な状態のままである。全ての鋼球が静止した様に見える。現象が速いので目視ではこの停止状態は判らない。目は残像が数十m秒あり、停止状態は数m秒と短い。高速ビデオカメラでスローモーション撮影すると、この静止的状态が確認できる。一定時間Tが過ぎると、反対側の鋼球7が離れ、右端の鋼球を放った高

セシウム原子時計はGPS衛星、放送局などに使

さ位置hまで振り上がる。その後、左の鋼球は落下し、鋼球列左端の鋼球6にあたり、時刻Bと同じ状態になる。以降、段々hは小さくなるが、左右の鋼球が交互に打ち出される。

時刻Aと時刻Cでは、左右の鋼球1,7はh相当の同じポテンシャル(位置)・エネルギーを持っている。右の鋼球1に位置エネルギーを与えた以降はエネルギーの出入りは無い。従って、この系の全力学エネルギーは最初に与えたポテンシャル・エネルギーのみである。ブランコ同様、鋼球列に当たるまでは、図6に示す様に、ポテンシャル・エネルギーが減る分、慣性エネルギーが増、速度が増す。時刻B同様の状態では左右鋼球1,7は静止している。運動していないので、運動エネルギーを持っていない。中央の鋼球も止まったままで運動エネルギーはな

変位波とも呼ばれる。歪は弾性体で発生するので、「弾性波」とも呼ぶが、何れも音の別名である。業界や分野で呼び方が異なるだけである。音が慣性力を図の右から左へ、左から右へと運ぶのである。右の鋼球1が当たってから、左の鋼球7が鋼球6から離れるまでには鋼球7個分を音が伝播する時間Tかかる。L/Tを音速と呼ぶ。中央の鋼球が無く、鋼球1と7のみの衝突の場合も、鋼球1が鋼球7に当たってから、歪波=音が鋼球2個分伝わる時間後に離れる。ビリヤードなどの衝突でも、当たって瞬間離れるのでは無く、音が伝播して、当たられた球に運動(慣性)エネルギーを移動させてから、離れるのである。並んだ鋼球の音速L/Tは、細い部分もあるので、大きな鋼の音速約6000m/sより遅い。

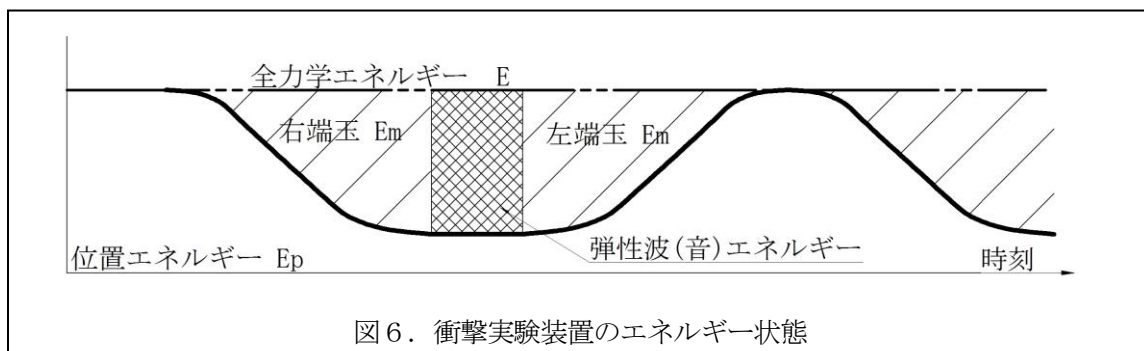


図6. 衝撃実験装置のエネルギー状態

い。エネルギーが消えてしまったかと思われるが、エネルギーは無くなることはない。(力学的)エネルギー保存則に反する現象は今だ誰も確認していない。従って、エネルギーが無いのではなく、目に見える形ではない何かがあると考えるのが良からう。一定時間T後反対側の鋼球が運動を始めるので、鋼球列長さLをTで運動量が伝播する見えない何かは、鋼球中を伝播する音波エネルギーである。次回以降この話の詳細をする。衝撃工学関係の方は「衝撃波」とも呼ぶが、音である。右の鋼球1が隣の鋼球2に当たると、当たった時の応力で鋼球の接触面は僅かに歪む。その歪が伝播していくので「歪波」とも呼ぶ。歪は物質内の変位であるので、

#### ◆コンクリート壁へのトラックの衝突

衝撃実験装置の様に、当たった面と反対側が変化する現象は良く事故でお目にする。コンクリートの壁にトラックが衝突事故で、当たった

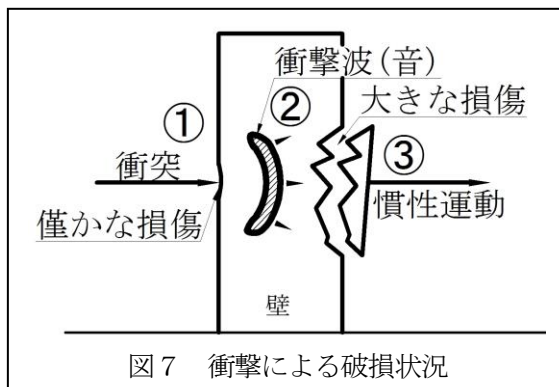


図7 衝撃による破損状況

面はそれ程ダメージが無いのに、壁の反対側に大きな破損が観測される事がある。衝撃実験装置と全く同じではないか。当たった面の力がそのまま反対面に伝わる。自宅の壁への事故では、当たった面だけ見て安心してはいけない。裏側も十分検査する必要がある。コンクリートに限らず、圧縮には強いが、引張りには弱い材料の場合に良く観測される現象である。コンクリートの強さは圧縮強度を  $N/mm^2$  (=MPa) の単位で表現される。1 気圧は約  $0.1 N/mm^2$  である。一般建築等に使われているコンクリートを普通コンクリートと呼ぶが、その圧縮強度は  $24N/mm^2$  で、大気圧の 200 倍の圧力まで耐えるのである。電柱や高層ビル用には  $50N/mm^2$  を超えたコンクリートも使われている。日曜大工で水を増やして少し流動性を良くすると  $10 N/mm^2$  程度である。しかし何れのコンクリートも引張強度は、圧縮強度の  $1/10$  程度と低い。古いコンクリートは引張強度が圧縮強度の  $1/100$  の事も有る。ガラスの圧縮強度はコンクリート

クリートの中に鉄筋を入れて鉄筋コンクリートとして使うのは、鉄筋の引張強さで、コンクリートの引張強さの弱点を補償しているのである。従って図 7 の様に、コンクリートの壁にトラックなどが衝突すると①、圧縮に強いので、衝突面は僅かな凹みでも、そこで発生した圧縮歪が音として反対側に伝播し②、鋼球 7 と同じように離れる方向に力が加わる。反対面で働く慣性力は当たった面とほぼ同じで、引張強度が慣性力より弱いと裏面が剥離する③。壁の様な薄いコンクリートでは殆ど弾性波は減衰しないので、衝撃が圧縮強度程度だと、引張強度がその  $1/10$  なので剥離する事になる。

コンクリートは石や砂とそれらの間を埋めるセメントから成っている。自然の特に川石や川砂は非常に強度が高い。圧縮強度で  $100N/mm^2$  を超える。鉄道の道床に使うバラスト石は更に倍程度の強度がある (J R 規格は  $80N/mm^2$  以上)。コンクリートは古いローマ時代から使われており、ローマン・コンクリートと呼ばれる。火山灰を用いたアルミナ系のセメントであり、我々が使っているポルトランド・セメントを使ったコンクリートの倍の強度がある。その為かアーチ形の 2000 年以上前の建造物が今でも多数存在する。

特に現在我々が使っているポルトランド・セメントは酸性に弱い。その為、寿命は 100 年程度と言われている。約 100 年前に作られたボストン・ストリート・ブリッジがワシントン州シアトルにある。土木の本にも載っているアーチ形のコンクリート橋である。アーチ形の為か、形は保っているが、1 \$ 硬化で擦るとボロボロと剥離する。材料の音速は強度に比例する傾向にあるので、測定したら、音速は  $5000m/s$  程度と日本の強度の高い新品コンクリート同様であった。圧縮強度を測ったら、これも十分だ。中の自然石や砂が劣化していないので高い音速と圧縮強度を示した様だ。が引張強度が殆ど無い。人間が作ったポルトランド・セメント部が劣化



写真 2 シアトルにある補修中のボストン・ストリート・ブリッジとコア・サンプル

のそのの 10 倍以上と強いが、やはり引張強度は圧縮強度の  $1/10$  程度である。一方鉄鋼の圧縮強度はガラスと同程度であるが、引張強度は圧縮とほぼ同じである。延伸性に富む金属類は「圧縮強度≒引張強度」と概略見做して良い。コン

し、自然物の石や砂は劣化していないと言う事だろう。人間の技術の危うさを感じた。

ローマン・コンクリートは酸に強く、塩害が無く、引張強度も高い。また、石積を基本とした設計なので、海中や海岸の古代の遺跡も含め楽しい観光が出来る。

#### ◆玄翁の頭のすげ替え

日頃同様の現象でお世話に成っているのは、ハンマー、玄能や金槌の柄の挿げ替えだろう。図8の写真の様に頭を下に向け、上から木槌で叩くのが原則だ。右図の様に叩かれた時柄が歪み、その歪波（音）が下に進行し、進む。頭は重いので慣性力で殆ど移動しない。頭と柄の間の粘着力があるが、音は関係なく通過する。③で

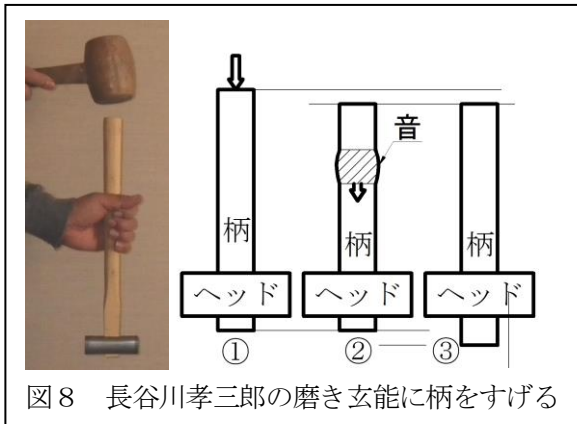


図8 長谷川孝三郎の磨き玄能に柄をすげる

柄下に引っ張られ細くなるので、粘着力に打ち勝って頭が柄に入っていくのだ。図では歪量を大きさに書いたが、極わずかだ。

橋の杭を打つ時、小さなハンマーで叩いて簡単に杭が沈む。それなのに橋を重たい荷馬車が通過しても沈まない。イタリアのガリレオ・ガリレイが理由が判らず悩んだ「ガリレオの杭の問題」だ。上記はそれを理解したことに成る。

衝撃実験装置の鋼球の歪は僅な為に、目視では伝播挙動を確認し難い。コンクリートを壊す強力な衝撃波音でさえ、その歪量は僅かだ（鋼材は0.2%程度の歪で変形する）。次回はこの歪と音を見てみよう。

余談だが、物が移動せずに運動（慣性）エネ

ルギーが移動する場合、多くは波が関与している。例えば海の波では、水分子はその場で回転運動をして、移動しない。波（エネルギー）は移動する。水分子は僅かしか移動せずに波の形がエネルギーと共に移動している。

#### ◆今回知った事

- 1) 同じ位置を同じ方向から通過する時刻の間隔を固有周期とよび、その逆数は固有振動数と呼ぶ
- 2) 半世紀まえの非破壊検査用水晶振動子は X カットで、厚さ振動である。
- 3) 弾性体の中で音は伝播するので弾性波と呼ぶ
- 4) 衝撃現象で発生伝播する波を衝撃波と呼ぶ
- 5) 衝撃波、弾性波、変位波、歪波は全て同じ音の別名
- 6) 音では物質は殆ど移動せずに慣性力を伝播
- 7) 延伸性に富む材料は「圧縮強度≒引張強度」
- 8) セラミック、ガラスやコンクリートの圧縮強度は高いが、引張強度は低い。
- 9) 複合物の強度検査は慎重に
- 10) ローマン・コンクリートはポルトランド・セメントを使ったコンクリートより寿命が長い
- 11) 玄能の挿げ替えは衝撃実験装置と同じ原理で要領よく
- 12) ガリレオの杭も同じ原理

#### <参考文献>

- (1) 超音波技術入門—発信から受信まで  
(2010/01 日刊工業新聞社)