

音波のよもやま話 (その3)

音の伝播を見る 弦巻バネ

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

前回物質中に衝撃実験装置の中央の鋼球列が移動しない話をした。この中を音波が伝播している筈であるが、人は見ないと信じられない。音波を可視化する方法は幾つかあるが、まずは誰でも経験できるものとしよう。見えない限りは、現象を正確に把握できない。

◆弦巻バネ

固体中を伝播していく音を可視化する方法の中で一番簡単で且つ多くの情報を得られる方法は弦巻バネである。どういうバネかと言うと、通常のパネよりよりバネの線材の太さを細くし、軽くすると同時に張力を弱くする。フックの法則によると

$$F = kx \quad x : \text{伸び量} \quad F : \text{張力}$$

で伸びは張力に比例する。この比例定数 k を小さくする。大きな伸びでも、弱い力となる。 k は単に面積当たりの場合、ヤング率 (線の弾性率) と呼ばれる。一般に音の伝播する速度、即ち音速は以下の形式に成る

$$\text{音速} = \sqrt{\frac{\text{弾性率}}{\text{密度}}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

細い線状の場合は E : ヤング率、 ρ : 線密度
大きな物体の中を伝わる音の場合は弾性率に体積弾性率、密度に体積密度 (通常単に密度)

を使う。全体に音が伝播するのではなく、物体の一部に音が伝わる。一部が伸び縮するので、周囲から制限を受ける。その為、体積弾性率は

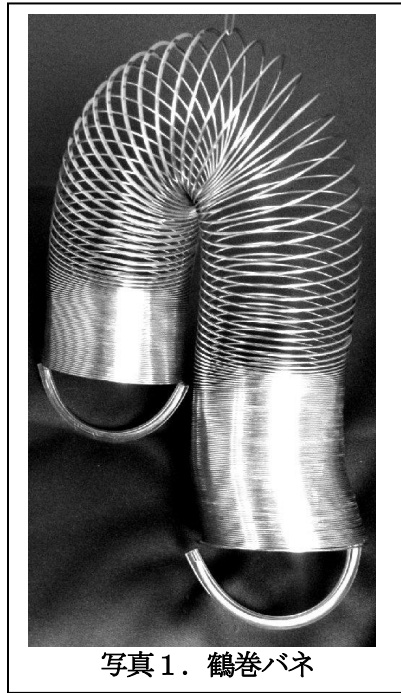


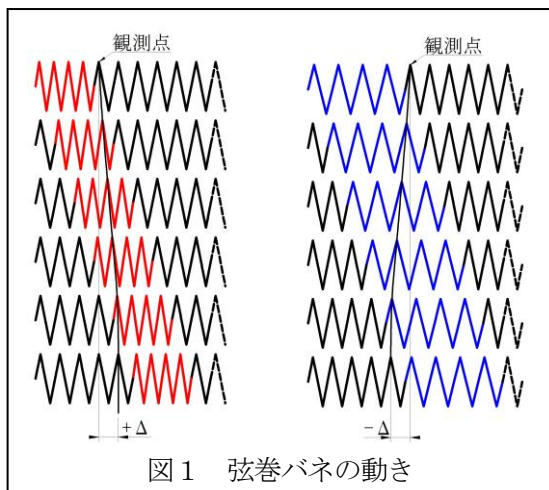
写真1. 鶴巻バネ

ヤング率より小さい事は理解できよう。バネの単位長さ当たりの重さを出来るだけ重くし、ヤング率をできるだけ小さくすると音速が遅くなる。これに相当するものが弦巻バネで音波実験用弦

巻バネとして教育用に安価に売られている (写真1)。「百聞は一見にしかず」で、買ってみるのも良かろう。縮んだ状態で 15 cm 300g 程度を 4m程度に伸ばした状態で実測すると、密度 80g/m、弾性率 300m/gf 程度となる。これを前式に代入すると約 2m/s と目で見て判る音速に成る。4m を伝わるのに 2 秒かかる。目の残

像は 0.1 秒以下なので 2 秒は意外と長く現象を観測するには十分である。事実その程度の速度の伝播現象が見える。これは音の伝播の模擬では無く、音そのものを観察できる非常に優れた教材である。それもポテンシャル・エネルギーと慣性エネルギーの両方が同時に観測できる。スプリングの巻き間隔が狭いと相対的に圧力が上がっており、広いと圧力が下がっている。ポテンシャル・エネルギー相当である。各点の速度運動が慣性エネルギー相当となる。見たい部分に色のマーカーを付ければ、その点の移動を観測できる。後述する色々な波はポテンシャルの観測はできるが、慣性エネルギーの観測が殆ど出来ない。弦巻バネは両方可能な優秀な実験器具である。

弦巻バネの左端を固定して、手で左端の一部を縮めたり、或いは広げたりして、ピッチの変化を与える。手を離すと図 1 の模式様にピッチが変化した部分が伝播する。これが音である。ピッチを狭めた場合他の部分より相対的に圧縮力が働いている。ポテンシャル・エネルギーが高い。この最初の動作は、音の発生の初期状態としてポテンシャル・エネルギーを与えている。端部を固定しないで、紐などで押さえ、ハンマーで叩けば、初期状態として運動エネルギーを



与えられるが、ケガをしそうなので止めておこう。圧縮された部分が伝わっていくが、この部

分は正の音圧の波ということに成る。一方ピッチを広げた部分はポテンシャル・エネルギーが低い。この部分は負の音圧の波ということに成る。さて初期にピッチが変化してない特定の点(矢印)を追ってみる。縮めた部分の伝播、即ち正の音圧が通過するとその点は右に移動する。一方広げた部分、即ち負の音圧が通過するとその点は左に移動する。正音圧は伝播すると伝播方向に物質を移動させる。負音圧は伝播すると伝播方向と逆に物質を移動させる。物の移動にエネルギーは必要ないので、音は物を移動させ続ける事がわかる。

弦巻バネの両端を固定しておく、固定端で反射して、同じ状態が往復する。固定端での反射現象である。図 2 にその様子を模擬する。①、②と右に圧縮波の音が伝播していく。右端に近づき⑤、右の固定点に当たると、縮んだ部分はより縮み⑦、逆方向に方向を変えて左に向かって伝播する。さらに左端に到達すると、⑥⑦⑧同様に一度、より縮んで向きを反転する。

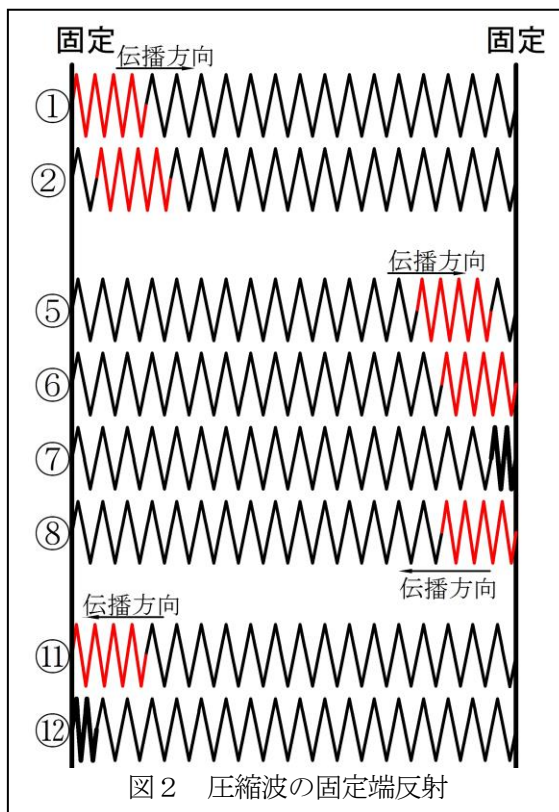


図 2 圧縮波の固定端反射

①②の半分になり、狭い範囲に2倍の圧力がある。

最初に手を放した状態は①より前にあり、図2の⑫と同じである。これが正確な初期状態(条件)である。図1では説明を抜いた。初期状態では各点は運動していない。手与えた歪量は伝播する音波の2倍である。①では場合に広がって歪が弱くなっている。右に壁に当たった⑦の状態は、右に運動する⑥と左に運動する⑧が重なった状態である。即ち⑦では慣性運動はゼロと言うことに成る。歪んでいる範囲は⑦では⑥や⑧の半分である。圧力は倍と言う事である。ポテンシャル・エネルギーは圧力の二乗に比例する。従ってエネルギー密度は4倍であるが、範囲が半分なので、ポテンシャル・エネルギー全体は倍となる。手で放した時に、伝播する音波ポテンシャル・エネルギーの2倍のポテンシャル・エネルギーを与えている。伝播し始めると、半分のエネルギーは慣性エネルギーとなり、残りの半分がポテンシャル・エネルギーとなる。エネルギーの保存則がどの位置でも成り立つこ

とが判る。

今度は端部が固定されていない、開放状態で見よう。最初歪を与える時だけ端部を固定しておいて、少し伝播した後解放した状態を図3に示す。⑤⑥の後を考える。もっと長くバネがある場合、全ての点、例えば⑥の端点は歪分 Δ だけ移動する筈である。圧縮部分の先端が Δ の位置に来た時も、慣性エネルギーを持っていて、端部では余計に歪分 Δ 伸び計 2Δ の位置に来る。⑧の様に伸ばされた状態になって、逆方向に伝播して戻る。音波理論で知られている様に、開放端部で音圧の位相反転がおきた事に成る。端部は自由なので、圧力はゼロの筈である。正と負の音圧が加わって計ゼロなので、理屈は合う。この負の音が左端に戻る際に、通過後各点は右に移動する。左に伝わる負圧は各点を右に送る。図1の右図と伝播方向は逆ですので右へ移動する。

この負の音が左端に戻ると、今度は反射する時、正の音圧に変化する。①同様正の音圧が右へ伝わる。

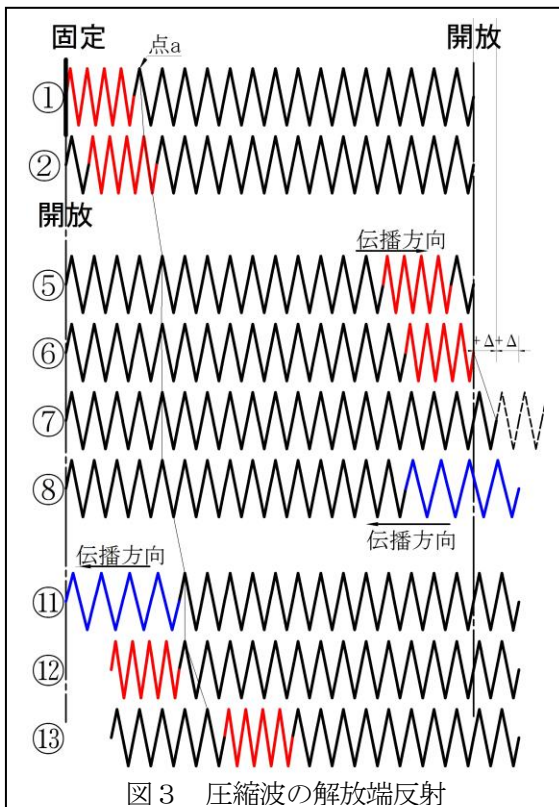
図3の点aを追跡すると、負音圧だろうが、正音圧だろうが、音が通過する度に右に Δ 移動する。バネを音波が往復する毎にバネは 2Δ だけ右に移動する。

金属製の弦巻バネは写真の様に30cm程度の縮んだ状態で伸ばして使うが、海外ではプラスチック製の超音波実験用の弦巻バネあり、元々巻線間に隙間がある。これを滑る床に置いて、片端を固定し、縮めた部分(正音圧)を放し、前述同様に音が伝播する。音が端から離れたら直ぐに手を放すと、バネ全体が前進する。

あらゆる物体は固有振動する。純粹に近い固有振動を持っているのは、例えば音叉である。

Aの音階の音叉は440.0Hzが発生し、耳に聞こえる。これは音叉の振動が空気を揺らして、空気の振動=音が耳に伝搬し聞こえる。弦巻バネでも、同じ伝搬経路で音が聞こえる筈である。

弦巻バネを5mに伸ばすと音が往復するのに



3秒ほどかかり、 $1/3$ 秒 ≈ 0.3 Hzの音が発生します。若い人の可聴周波数範囲 12Hz \sim 23kHzの外なので残念ながら、聞こえません。哺乳類で一番低周波まで聞こえると言われるシロナガスクジラが 5Hz \sim 1.2kHz、哺乳類では難しい。パイプオルガンの最低周波数は 16.4Hz で、音楽録音用のマイクロホンの下限は数 Hz でそれ以下は感度が悪く、検出できない。

地震で家屋が揺れますが、木造家屋、低層建物では 0.2 \sim 4Hz が共振周波数と言われる。地震計などの帯域範囲内だが、空気振動に対する感度が悪く検出できない。0.3Hz と低い周波数になると、空中音の検出用センサーが市販されていない。

ニュートン力学は剛体の質点の力学で、ケプラーなどの天体観測の結果を説明するには、点と見做してもよい。我々が目にする物体は点とは異なる。点とは見做せない有限な大きさを持っている。中高校でニュートン力学を習った時、多くの方は実際の物との関係が良くわからなかったらう。音が介在していたのである。全ての物体を動かしているのは音である。車も電車も音で動いている。

◆時間経過

音叉を叩いた後時間経過と共に音の強度は段々弱くなる。叩いた直後は高調波が多く含まれている。時間と共に澄んだ基本波が主な音になる。図3の様に、バネが振動しながら慣性運動していると、音が左右の端に来たとき大気を強く叩き、高調波を多く含んだ音が発生する。音のエネルギーが大気に放出され、振動が減衰していく。振幅は減るが、それだけでは、高調波成分が無くなる理由になりません。歪んでいる幅が広がって、高調波成分が減って、全体の共振周波数のみ長く残る。図4は図3のバネの歪の状態を示したものである。全体は音の往復伝搬で移動するが、左端の位置を合わせて書いてある。①は最初の状態です。

歪が端に集中している状態である。②は何度か往復し歪の音が右に移動している状態である。③は更に進んで全体に広がった状態であるが、音が右に移動している。①、②、③共に歪量は同じで、局部のみ歪んでいるか、全体が歪んでいるかである。③の状態では端面に音が伝わると右端から伸び始める。④は音が折り返したところで、①の歪を与える前の長さになる。更に進んで折り返した音が反対方向に伝搬すると⑤の様になり、負圧が左に進む状態、全体は更に伸びる。ここまでは全体は $\pm \Delta$ 分伸び縮みする。更に音が前後に広がり進むと、例えば⑦の様になり、丁度正負の音圧幅が全体幅相当である状態では、伸び縮みゼロになる。この場合、音は何処にあっても全体伸び縮みの合計はゼロで

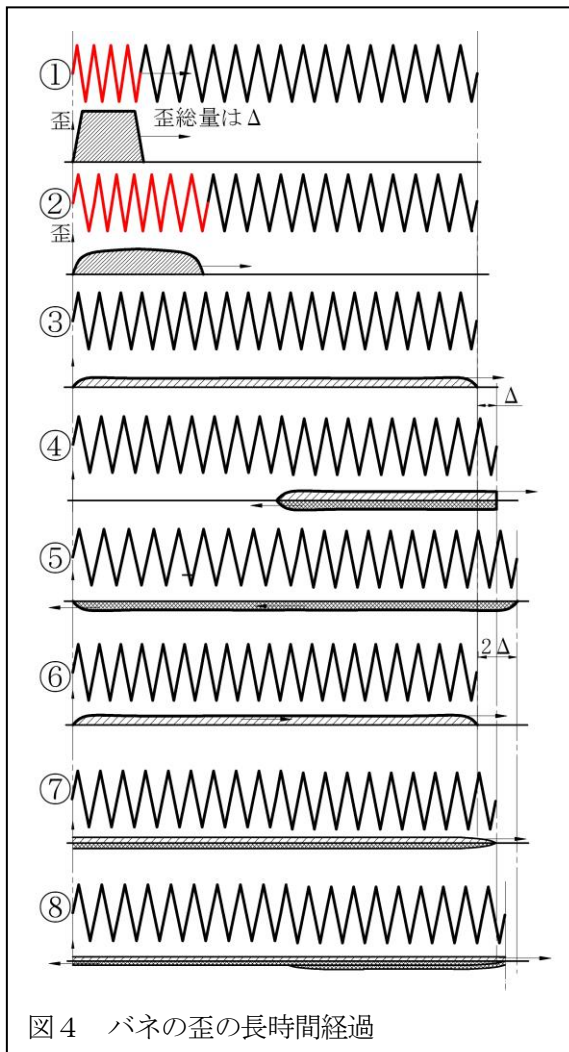


図4 バネの歪の長時間経過

ある。音の幅が共振周波数の波長の整数倍毎に延び縮しない状態が発生する。⑧の様に整数倍以外では正負の音圧の合計小さく、 $\pm \Delta$ より小さな振動をする。

◆実物の場合

図3、4の全体を300mの大型船だと想像してください。船の代わりに大きく柔らかいコンニャクや豆腐が水に浮かんでいる状態でもよい。図5の様に、左端、船尾をタグボートがドンと押したとする。船尾が Δ だけ少し前に変形移動、歪んで内部応力=音（応力波）が発生する。その時船首は動いていません。船の長さは Δ だけ短く $L-\Delta$ になる。音が前後に広がりながら前に伝わっていきますが、船首に到達するまでは $L-\Delta$ の長さのままです。音が船首に到達すると反射する。船首の位置は Δ の2倍移動する。先端では圧縮が引張、即ち正圧が負圧に変わる。所謂音の開放端での音の位相反転である。音は船尾方向に伝わりながら、各部を前方に移動させ

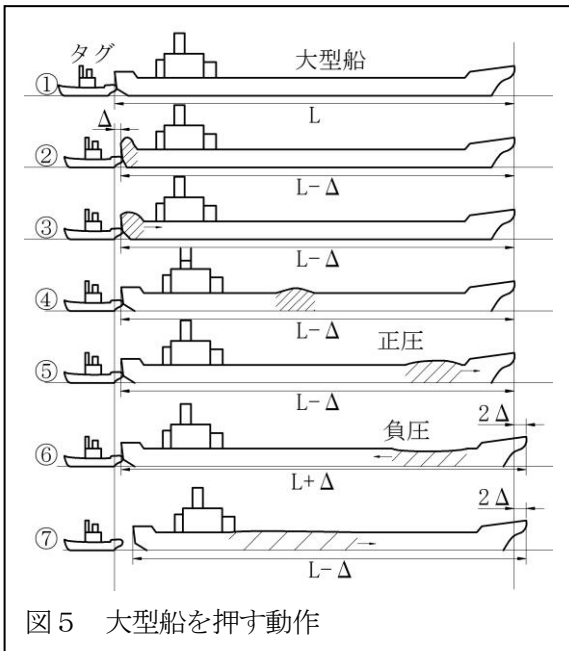


図5 大型船を押す動作

る。船尾にくるとタグボートが押すのを止めて停止していれば、船尾がタグボートから離れる。音は前後に広がりながら伝わりますが歪の総量

は変わりません。 $L+\Delta$ と $L-\Delta$ の長さで固有振動の尺取運動しながら前進し、音の部分が船長より遥かに広がり、正負の音が重なり合って振動としてかんそくできなくなると、全体が一定速度となり、尺取り運動は観測できなくなる。この段階では質点と考える高校物理のニュートン力学を使って解析できる。大きな工場で、大型の機械が急加速して動くときに、大きな唸り音が聞こえ、直ぐに消えるもの同様の過程である。特に弦巻バネの様に強度を弱くして音速を落とした構造物ではよくこの現象を観測できる。

ここまで音が進む方向に広がる事を何の説明なしに使った。音は力学的波動で、力学エネルギーの保存則が成り立つ。与えられた変位エネルギーは無くならないが、時間が経つと減衰して観測される。これが一般に音の減衰と言われる現象で、音速が分散する事による発生する現象で、後の回で説明する。

◆今回知った事

(1) バネの伸び量は引力に比例する（フックの法則）

(2) 音速は一般に

$$\text{音速} = \sqrt{\frac{\text{弾性率}}{\text{密度}}}$$

(3) 弦巻バネは音の伝播そのものを観測できる

(4) 正の音が伝播すると質点は音の進行方向に移動する

(5) 負の音が伝播すると質点は音の進行方向と逆に移動する

(6) 端部固定では音波は正の音は正の音で、負の音は負の音で方向を変える

(7) 端部解放では音波は正の音は負の音に、負の音は正の音に位相反転し方向を変える

(8) 端部解放では、音が通過する度に、

各点が一定量移動する。

- (9) 一定速で動いている物体も、運動の初期は尺取運動
- (10) 時間が経つと、尺取運動は収まり、一定速度で移動
- (11) 全ての有限物体（物）の運動は音により行われる
- (12) 移動の初期は、高い周波数の振動音が発生するが、直に基本波になる。

<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）