

音波のよもやま話 (その33)

(音)波の重ね合わせの原理、干渉、独立性(1)

Superposition, Interference and Independence of Sound Wave

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

多くの波に関する理論は波の独立性や重ね合わせの理と呼ばれる事象を前提に展開している。これらの意味と物理的実体について詳細に検討しなおす。

◆高校の物理、光の干渉

高校の物理の本に色々な理論が書かれているが、過去の科学技術史で、殆どが最先端技術の実用に役立たないか、正しくない事が多い。

高校物理の前半のニュートン力学は「質点の力学」「剛体の力学」と言われるように、点又は剛体と考えても良い場合、例えば惑星などの運動ではかなりの正確さで計算できる。一方釣りをすると、竿やテグスがどう変化するかなど、複雑で計算は出来ない。

教科書の後半の波、光と音に関しても、古くからの教科書の継承に終わっている。海外の高校の教科書では光を量子力学で説明し、従来理論は物理的には誤った技術科学史として教えている。

例えば日本の物理の教科書では、光は干渉すると書かれているし、レーザー干渉計など干渉する事を示す名称の機器が売られている。光が干渉すると仮定すると、ランダムな光が発生する電球や太陽の光は干渉により暗くなるはずである。現代物理学では光は光子から構成されていて、光子間には相互作用が無い、即ち干渉しないとされる。光子と相互作用があるのは電荷で、多くの場合原子の周りにある電子である。光を目で見る場合、光りの振幅を検出しているのではなく、目の桿体細胞(暗い時働く細胞)が光子を6個ほど受け取ると励起され、イオン

電荷が発生し、神経に伝播し、脳で画像として認識するのである。1970年頃から微弱光を使って光子1個単位で各種光の現象が確認されている。電波、X線、ガンマ線も光子である。が、電波に関しては光子エネルギーが弱すぎて、人がデジタル音響機器で聞いても、アナログ信号としか認識できない様に、電波光子としての性質を確認できない。光子一個のエネルギーは以下の式で示され、周波数に比例する。例えば可視光は405T~790THz、電波周波数のFMラジオは100MHz程度、携帯電話の搬送波が2GHz程度とエネルギーがかけ離れており、FMラジオや携帯電話の搬送波はその光子のエネルギーが弱い分、アンテナでは膨大な数の光子を受信しないと検出レベルに達しないので、アナログ的波形しか観測できない。なお、エネルギーが高いガンマ線(約10keV以上がガンマ線)1MeV以上だと、光子のエネルギーは電子と陽電子に変換される事が多い。光子のエネルギー E は

$$E = hf \quad \text{式(1)}$$

で、ここに h はプランクの定数で $6.62 \times 10^{-34} \text{JHz}^{-1}$ 、 f は振動数(周波数 Hz)である。 f が100MHzだと、 E は $6.62 \times 10^{-26} \text{J} \approx 4 \times 10^{-7} \text{eV}$ となる。eVはJ(ジュール)と同様エネルギーの単位で、電子1個が1Vの電位差を移動したとき電子が得るエネルギーである。電子工学や物理学ではJより便利なので良く使う。電子一個が1.5Vの電池は1.5eV、3.7Vの電池は3.7eVのエネルギーを発生しており、100MHzの(電波の)光子のエネルギーが如何に弱いかがわかる。可視光の場合は1eV以上になり、発光ダイオードの印加電圧が1V以上である理由である。赤は1.5V、青は3Vの電圧が必要である。発光開

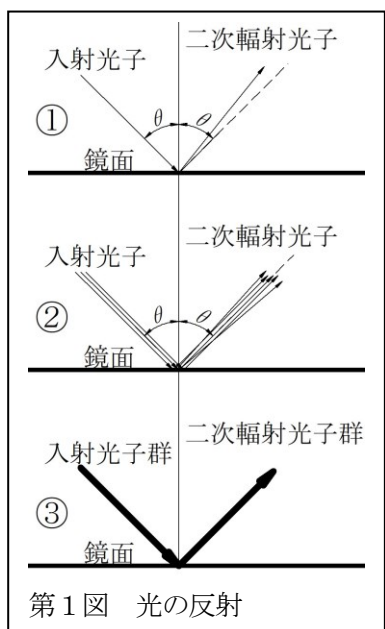
音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性

始電圧と色の関係からプランクの定数は逆算できる。

◆光の反射

光の反射は現代物理学的に説明すると以下となる。

一個の光子が鏡の面に入射すると、光子は鏡の面の電子に吸収され、再び放射される。この再放射される光子は二次放射光子と呼ばれる。入った光子がそのまま反射する訳ではない。この光子の方向は光の反射の法則に従うと観測されるとは限らない。確率的には入射角と反射角が同じになる場合が多い。第1図①にその様子を示す。



光子の数が増えると、②の様にほぼ反射の法則に従う光子が多数を占める。

更に多くなると、反射の法則に従わない光子の率は僅かになり、我々の通常の光学機器では一見全ての光(子)が反射の法

則に従っているかの様に観測される③。

地上に降り注ぐ太陽光子は1秒1m平方当たり約 10^{21} 個(約 1kW/m^2 約 1Mlx)と膨大な数で、学校の反射の実験では「入射角=反射角」としか計測結果を判断できない。

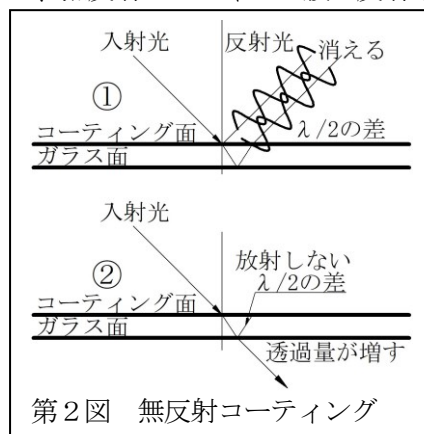
◆光の干渉

カメラのレンズは複数のレンズから構成されている。1枚のレンズの光の透過率は95%前後で、例えば10枚で構成されているズームレンズでは $0.95 \times \dots \times 0.95 = 0.6$ と半分程度しか透過せず暗くなる。そこで各レンズは「無反射コー

ティング」される。良いコーティングでは透過率が99.5%以上で、10枚レンズでも95%に透過が増える事になる。その為、10枚を超えるレンズでも暗くなることは無い。

レンズに吸収され他のエネルギーに変換されない限り「入射光エネルギー」=「反射光エネルギー」+「透過光エネルギー」とエネルギー保存則が成り立つはずである。

一般的「無反射コーティング」の説明としては、第2図①の様に、レンズ表面で反射する光と、無反射コーティング膜で反射される光の位



相が 180 度($\lambda/2$)異なるので、干渉して消えると書かれている。

実際には光子はレンズやコーティング表面

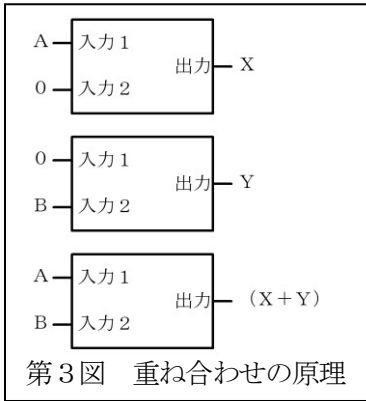
の電子に一度吸収され、電子から二次放射する時に、暗くなると計算される様な方向には光子は放射されず、その分他の方向に放射する。

レーザー干渉計では、干渉している訳でなく、干渉して弱まると考えら(計算さ)れる方向には二次放射光子が少なくなり、干渉して強まると考えら(計算さ)れる方向に二次放射光子が多く成る。

つまり電子に一度吸収され二次放射されると考えると「エネルギーの保存測」が守られ、より正しい説明となる。

どの方向に、どの程度二次放射されるかは「波動方程式」と呼ばれる確率計算により求まる。音波の「波動方程式」と同じ名称だが、全く異なる式で、区別する時は「シュレーディンガーの波動方程式」「確率分布関数」などと呼ぶ。ファインマンが高校生にもわかる様に位相子を使った図で確率を求める方法を提唱し、イギリスの高校の物理の教科書等では2000年頃から、これによる反射、屈折の法則などの光子による

音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性



説明が行われている。なお、光は粒子でもあり、波でもあるいわれるが、これは正確な表現ではなく、光子は粒子として或いは波として観測される、得体のしれな

いものである。

超音波に関して、例えばアレイ装置の原理など間違った宣伝や記述も多く、音についても古典の理屈を引きずらず、再度考え直す必要がある。

◆重ね合わせの理 (重畳原理) 一般論

重畳原理とも呼ばれる重ね合わせの原理の一般の書物に書かれている内容を述べる。

参考書籍「超音波技術入門—発信から受信まで」を書いた時、疑問も持ちながらもエビデンスが十分でなく、一般的な内容を引用した部分がある。専門書も多くの引用で構成されているので、読者はこれらを精査しながら読まなければいけない。ここで数学は頭の中で辻褃の合う理論的展開で記述できるので一人でも確認できる。しかし物理は自然相手で、実験や確証には多くの金と時間がかかり、一人ではできないので、引用は仕方がない。物理の教科書では音波の干渉や回折は重ね合わせから生じると書かれているが、それが正しいと言う根拠は書かれていない。エビデンスが無いが、以前からの引用で書いてしまう。

小生の専門の電気回路設計ではテブナンの法則など「重ね合わせの理」が至る所で使われて、その原理を元に設計し製作した回路は設計通りになる。便利な理論だ。しかし、極小の半導体内部解析や、コイル、アンテナなどエネルギーが回路を逸脱し空間に出ると相互作用の為、この法則が合わなくなる事を経験する。場合によっては、古典的原理法則は成り立たない。工学

は近似式でも役立てばよいが、物理学は少ない原理を元にして、多くの現象を説明できる事が求められる。

物理学とシステム工学では、重ね合わせの原理は以下の様に説明されている。

2つの「入力1」「入力2」と1つの「出力」がある系で、Aのみの「入力1」に対する「出力」(応答とも言う)がXで、Bのみの「入力2」に対する「出力」がYの場合、入力AとBが同時に与えられた場合の「出力」は(X+Y)となる。図で書くと第3図となる。電気回路の他、建物の梁のタワミ(歪)の計算に応用されている。計算と実際がよく一致する。

重ね合わせの原理が成り立つ条件の一つは入力に対する出力が線形性を持っている事である。式で表すと系の応答関数をFとして以下が成り立つ事になる。

$$F(a + b) = F(a) + F(b) \quad \text{式(2)}$$

$$F(kc) = kF(c) \quad \text{式(3)}$$

ここにkはスカラー値

「エネルギー保存則」が正しいとすると、エネルギーでは「重ね合わせの理」が成り立つ。エネルギーに比例関係の変数は、そのまま重ね合わせの理が成り立つ。しかし応力歪や音の音圧などエネルギーの二乗根に比例するパラメータでは、重ね合わせの理が成り立たない。物理全般で現象は非線形で「重ね合わせの理」は成り立たない。その非線形の一部を直線近似した場合に「重ね合わせの理」が成り立っているかの様に観測されると考えられている。この辺の話は連載の次回以降で説明する。

◆重ね合わせの原理 光の場合

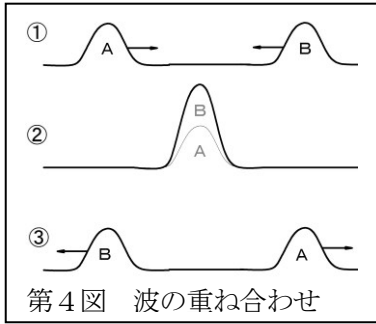
光の場合は、波ではなく、光子を検知している。低周波の電波でも、電界とか磁界とかを測定しているが、実際には光子の数に比例した値を測定していると言ってよい。光子はエネルギーであり、エネルギー保存則が成り立つので、「重ね合わせの理が成り立つ」。

◆重ね合わせの原理 波の場合

音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性

波の場合、最も判りやすいのは左右から同じ形の波が衝突する場合である。第4図①で波A、

Bが衝突する様に対向して運動する。少し時間が経た②では衝突して、二つの波の高さが足し算即ち式(2)が成り立つ



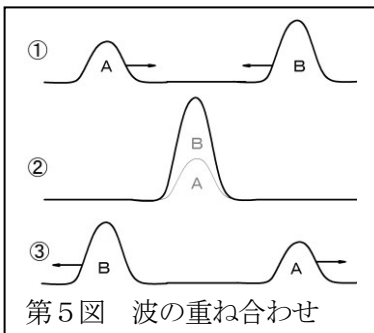
第4図 波の重ね合わせ

ように重なる。③では互いに何もなかったかのように離れていく。②の状態は重ね合わせの理を使って計算できる。

また波AはBと衝突しても何もなかったように通過するので、この事を「波の独立性」と言う。AとBの波は独立で、相互作用しないと言う意味である。

波の大きさがAとBで違う場合は第5図の様になる。実際に小さな水面の波を作って、実験するとほぼ図の様になっている様だ。②の状態ではAとB

の高さを単純に足したが、Aが上に来るのか、Bが上に来るのか、分離されているわけで無く、あるいはランダムに混



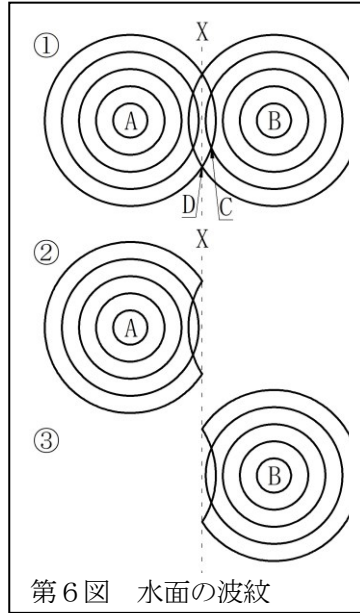
第5図 波の重ね合わせ

じっている可能性もある。

なお、アレイ探触子では各素子からの音が独立である事を前提に理論展開する事が多いが、振動子を綺麗に分割しても、媒質は分割されないで、独立性も無く、重ね合わせの理が成り立たない。また、素子から円柱波が出ている様な図が多いが、素子は伸び縮の運動をするので、厚さ方向に強い指向性を持ち単純ではない。

◆水面の波紋の場合

水面の波紋を見てみよう。桶に張った水で実際に観測するも良い。第6図①の様にABの2点から円状の波紋を作る。実線は高さのピークを示す。一見すると、点A,Bから発生した波紋は、お互いに「独立して」通り過ぎていくの様に見える。C、Dなどでは重なって「干渉」し波が高くなっている。波源AとBから等距離の線Xの所で常に干渉している。この場合、線Xの所に見えない壁があつて反射し、Aから出た波が反射した図②とBから出た波が線Xで反



第6図 水面の波紋

射した図③が重なった場合と区別はつかない。単に通り過ぎていくのか、互いに衝突して反射しているのかを、①をみただけでは外観からは判断できない。何事に対しても、人は自分の都合の良い様に解釈しがちだ。物事には色々な見方があつて、正しい

事はその内の一つであつたり、場合によってはどれも正しかつたりする。波紋の衝突は、透過しているのか、反射しているのか、外観だけでは判別できない。目の錯覚である。

◆ビリヤードの場合

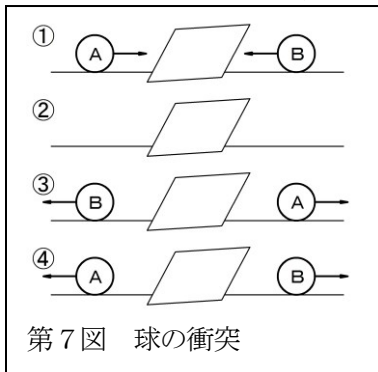
一般に波は表面を観察し、表面の外観を波として認識するので、海面の波も音の波も同じ現象として類推できるとして話は進める。他の物理現象を参考にすることは良い事だ

一般にはアナロジー(類似)と呼ばれる。1940年代に物理学者は「波はニュートン力学に従った力学運動」との共通認識となった。波は原子分子の運動の集合なので、一個の分子を剛体として考えてみよう。一番判りやすいのはビリヤ

音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性

ードだろう。分子は正面衝突では完全反射する事が知られており、エネルギー損失はない。ビリヤードでは少しエネルギー損失がある。

第7図の様に同じ外観のビリヤードの球を左右から飛ばす。波では外観に騙されている可能性があるの中央は紙で隠しておく。波の一般



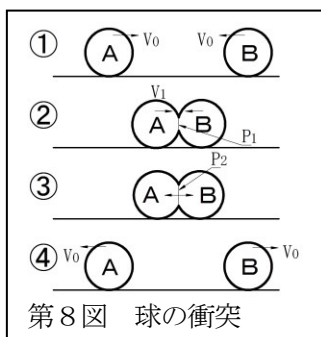
第7図 球の衝突

的考えと同じ状況を考えて、衝突前①、干渉状態②、干渉後③となる。②では衝突せずすり抜けた場合は③である。一方②で正面衝突し、反射する

場合④の可能性も考えられる。AB 外観が同じなら波の②の状態では人間の目には衝突して反射しているか、通過しているか、一部が反射し、一部が通過しているかは区別できない。

剛体で無い通常のビリヤードなどの球の衝突反射の状態を確認しておこう。

第8図①に示す様に質量の同じ球が同じ速度で対向し、衝突する。球が接触すると、②の様



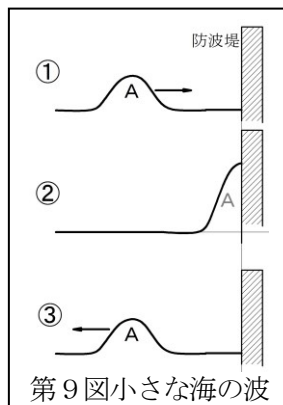
第8図 球の衝突

図では大きさに書いてある。軟式野球の球は大きく歪むが硬いビリヤードは目に見えない程度の歪である。運動エネルギーが圧力のエネルギーに変換して、速度は少し減る。球の平均運動エネルギーゼロになって、全て圧力エネルギー（実際は音のエネルギー）になると、③の状態で一瞬静止する。圧力エネルギーが球を離す方向に働くので、今度は球が離れる方向に運動を始め、すべての圧力エネルギーが運動エネルギーに変換され④の様に最初と同じ速度で離れて行く。球の完全反射では、運動エネルギー⇒圧力（歪）エネルギー

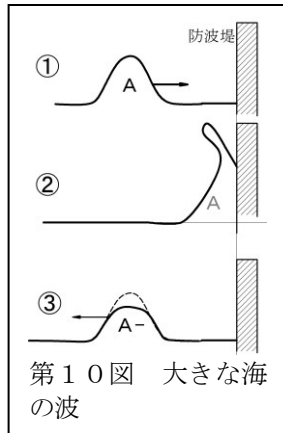
⇒運動エネルギーとエネルギーが変換される。圧力エネルギーのみの状態では球はほぼ停止している。なお、歪の伝播はつまり音なので、正確には玉の中の音の伝播を説明する必要があるが、連載の最初の方で概要を説明したので、省略する。水面の波なども、ビリヤードより小さいが、水分子の衝突なので、第8図同様かも知れない。

◆岸壁に打ち寄せる波の場合

岸壁に打ち寄せる波も容易に観測でき、参考にしよう。大きな波と小さな波では現象が異なる。先ずは小さな波。第9図の様に小さな波が防波堤に当たると、2倍の高さになって、また元に戻っていく。注意だが、波と言っても津波の場合は深さに対して波長が長く、後から後から水が押し寄せるので数倍になることがある。長い玩具の貨物列車を壁に当てれば、殆どの貨車が折り重なる。話を元に戻して、音の硬い境界での反射と同じである。一方波の高さが高いと事情が異なる。防波堤に当たると第10図



第9図 小さな海の波



第10図 大きな海の波

の様先端が崩れ飛沫となる。反射した波はもはや元の波 A とは異なる A' となる。

第11図の様防波堤が海に突き出しており、左右から防波堤を中心に対称な全く同じ高さの波 A, B が偶然来て衝突した場合を考えよう。波の防波堤に対する圧力は高さで異なるが、A, B と同じ形なので、それぞれ同じ高さでは同じ圧力 P1~P3 と考えられる。防波堤の左右の圧力は釣り合っており、防波堤の代わりに極

音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性

薄いフィルムでも同じように反射すると考えられる。防波堤が無くて互いの海水粒子は行きかう事はないのである。(熱運動による影響は無視して話している)

第9、10図の防波堤が無い、左右対称な図形を描いてみよう。第12、13図となる。

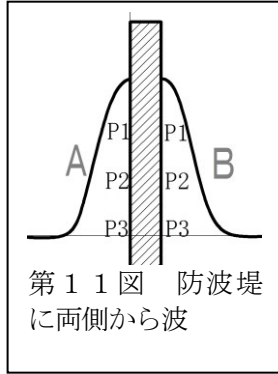
第12図は第5図②と形の上では差異は無い。但し、行きすぎるか、反射するかの違いである。第5図は間違いで、実際は第12図②の可能性が高い。

第13図②は危険な

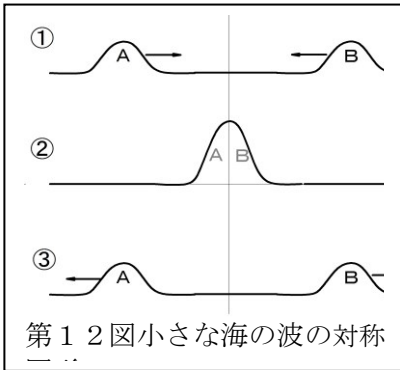
波として恐れられる三角波同様である。小舟は波に直角に進むと大きな波でも対応できるが、波と波が衝突した時の三角波が船の直近で発生すると転覆したりする。三角波の先端が割れるもの一般的な現象だ。

一度波の干渉が、通過では無く、反射と思うと、どの波紋の衝突を見ても反射に見えてくる。人の目は好い加減なものだ。

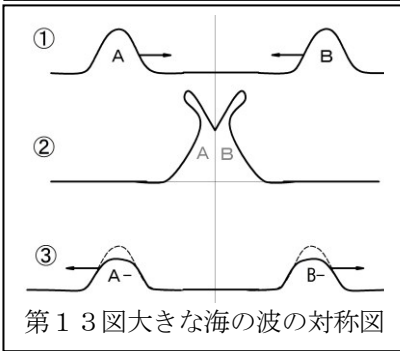
波の干渉を「二つの波源から出た波が重なって強め合ったり弱めあったり」と書かれている事が多いが、実際には、波が反射し、片側の波自身が重なり合っている事になる。第6図のC



第11図 防波堤に両側から波



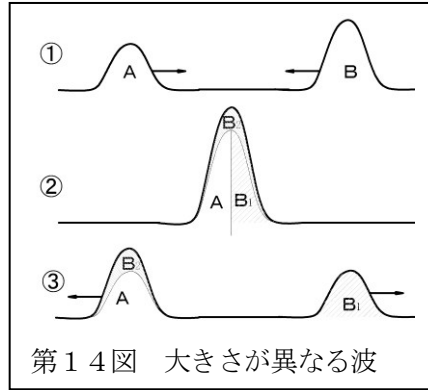
第12図 小さな海の波の対称



第13図 大きな海の波の対称図

やDは自身の重ね合わせである。一見反対側の波源からの干渉と錯覚しているだけである。

ここで左右の波の大きさが異なる場合どうなる



第14図 大きさが異なる波

衝突した場合、小さなほうの波相当(B₁)が反射し、残り部分(B₂)が通過する。③ではAとBの一部が上下に書かれているが、実際には直に熱運動でエネルギーは拡散し境界はあやふやになる。また、重要な事は静止しているAとB₁の上をB₂が通過する。

◆波動方程式と初期条件

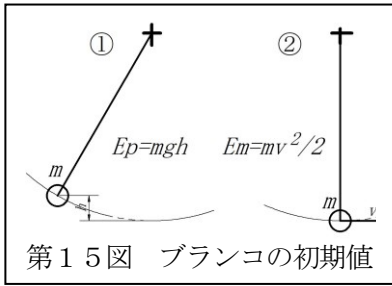
ニュートン力学の釣り合いの式から導いた波動方程式を使って音波の伝播を解くことができる。波動方程式の導き方や使用に関しては多くの書物に掲載されているので、そちらを参考にしてほしい。波動方程式を使って平面波や球面波に関してホイヘンスの原理が物理的意味を持たない事は数学的に証明されている。ここではギターの弦の様な一次元の場合の式のみを以下に示す。

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{T}{M} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{式(4)}$$

uは変位、Tは張力、Mは単位長さ当たりの質量である。弦の動きを求める場合には積分するのだが、偏微分方程式を積分する場合には境界条件と初期条件が必要で、境界条件は弦の場合、その端部でどうなっているかである。通常は固定されているが、端部がぶらぶらしている状態も計算できる。初期条件は、時刻ゼロで、どの位置が、どの程度変位しているかなどである。

音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性

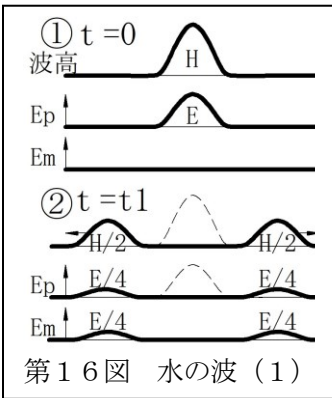
ブランコで考えると、第15図の様にブラン



コの漕ぎ方には、高い位置から離す場合①と低い位置で押す場合②の初期条件が

あり、前者は初期条件として、位置エネルギー E_p を与え、後者は運動エネルギー E_m を与えて漕ぐ事になる。2種類の初期条件があり、両方が同時に有っても良い。

水の波で考えると、ブランコの①は水面を持ち上げた状態、②は水面が平坦なままで、ある範囲の水を水平方向に速度を与えた状態に相当する。

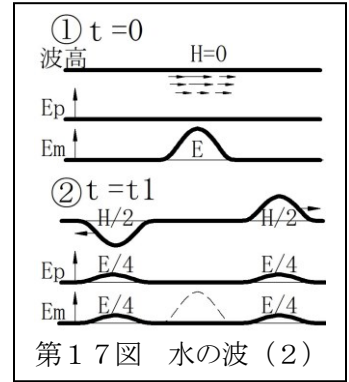


水の波の前者を第16図に示す。時刻0、即ち初期状態は単に動いていない高さ H の形がある。津波で言えば、海底が盛り上がった瞬間の状態①では、 E_p の位置エネルギーのみ

存在し、運動エネルギーは無い。音の場合、位置エネルギーは静圧のエネルギーと言い換えれば良い。少し時間が経った t_1 では半分の高さ $H/2$ の波が左右に移動していく。それぞれの波のエネルギーは元の E の半分 $E/2$ で、位置と運動のエネルギーに等分配されエネルギー保存則が成り立つ。波動方程式を解くと以上の計算結果を知る事が出来る。

第17図はブランコの場合の後者②相当の波の場合である。初期状態は外見上何もないが、水面下で中央の水が右に移動している。従って運動エネルギー E_m のみがある。一定時間 t_1 が経つと右に半分の高さ $H/2$ の波が右に、左には

$H/2$ の深さの凹みの波が左に伝わる。水粒子は左に移動するのではなく、右に移動している。波の左に有った粒子が右に移動する事により、凹みが左に移動すると考えればよい。初期状態は右



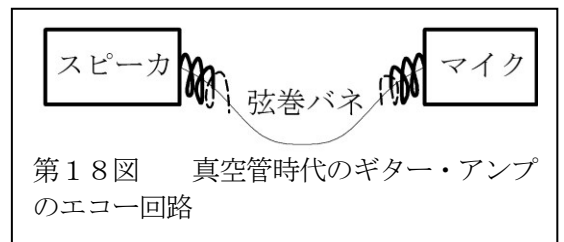
への粒子の運動でそれが伝搬する。最初の運動エネルギー E がそれぞれの波の位置と運動のエネルギーに前述同様 $E/4$ ずつ等分配される。なお、エネルギーはスカラー量なので負にはならない。理論書によっては可能な最大エネルギー状態を 0 として、負値でエネルギーを示す事もある。ここではエネルギー無を 0 としている。

凸と凹 (正ち負) の同じ大きさの波が衝突する場合は、第17図の時間を逆にして、 t_1 を始めの状態として、 $t=0$ を衝突状態と考えればよい。衝突すると一見何もない様に見えるが、内部で運動エネルギー E があるので、更に同じ t_1 経てば、また②の様に正負の波が反対側に表れる。

いずれの場合も、波の衝突では、一時的に波ではなく初期条件の様な「静止」状態となり、その結果、波高に関して重ね合わせの理が成り立っていると考えられる。

◆弦巻バネの場合

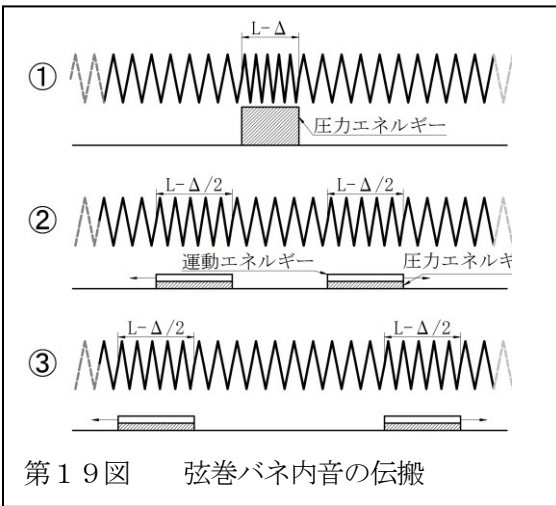
ここで、連載「その3」で出てきた目に見える弦巻バネの再登場である。弦巻バネは一次元空間の音の伝搬挙動を詳しく見る事ができる。ベンチャーズが流行ったころ、真空管時代のギター・アンプにはエコー回路が付いていた。大



音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性

きなコンサートホールで壁に反射する多重反射エコー、一般的には残響と呼ばれるのと同じ機能をさせる電気回路である。中身はスピーカとマイクに相当する電磁音響素子が弦巻バネの両端に付いている第18図の構造である。弦巻バネの中を音が往復し、多重エコーとなる。音速はバネのヤング率と長さ当たりの質量の比の平方根相当である。鶴巻バネの全長は長いので、50 cm幅のアンプボックスの中に組み込める大ききで十分な遅延時間を確保できる。ギターで低音を出すと、エコー回路の箱が揺れ、鶴巻バネが揺れ、音に変調される。アルバイト代を貯めて買ったエレキ・ギターの音がLPレコードの音とまるきり異なるので、エコー回路の改造を試みた。バネの種類、引っ張り具合を変えたり、複数のバネを使ったり、バネの代わりにピアノ線を使うなどした。また、取付け端面の材質を変えるなどしたが中学生の能力では悪くなくても良くなるはならなかった苦い思い出である。簡単な構造だが、どう改造しても高価なギター・アンプには近づかない。なお、当時のビートルズなどが使っていた高級製品はこれと同じ構造かどうか確認していない。

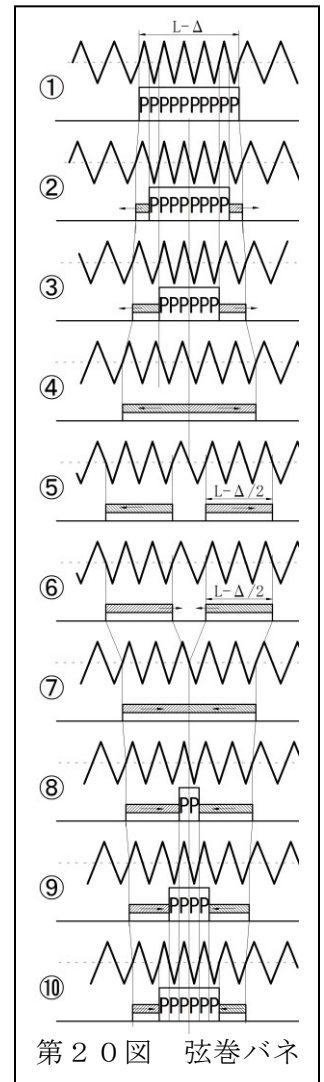
一次元弦巻バネの現象が二次元に拡張できるかは検討が必要だが、水面の平面波は実質一次元と考えてもよいだろう。連載「その3」では端部から音を発生させたが、今回中央を摘まんで離す場合を考える。弦巻バネの両側は剛体に取り付いていて、そのまま波が跳ね返されると



する。実際は減衰して中々以降の図の様に奇麗に観測は出来ないが、イメージはより明瞭になるので実際に試すと良い。

第19図の様中央に Δ の歪を与える。応力は Δ に比例するので静圧と考えて良い。①では静的な圧力エネルギー（ポテンシャル・エネルギー）のみが存在する。バネの図の下にエネルギー状態図を示す。離すと津波の様に左右に分かれる。①のポテンシャル・エネルギーの半分ずつが左右別れ、更にその半分が運動エネルギーに残りは歪 $\Delta/2$ 相当のポテンシャル・エネルギーになって②③と伝搬する。ポテンシャル・エネルギーは斜線なしで示し、運動エネルギーは斜線付きで示し、エネルギーには方向はないが判りやすい様に運動の方向を示す矢印を加えた。まず①の静的圧力から、波として伝わる②への変化を詳しく見よう。

第20図で中央を摘まんだ初期状態①では、摘まれた部分の圧力は何処でも一定のPである。離れた瞬間、摘んだ範囲の両端の部分を除けば、どの位置でも質点は左右から同じ圧力Pを受けるので、バネは動けない。左右両端の一山分が動くとき、②になる。①から②間は連続的に変化するが、分かりやすい様に一山ずつの離散的に表示した。圧力が下がったので更に内側が左右に運動し始め③となる。両端



音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性

っこから順序良く圧力が下がり、波として移動すると言える。両端から順にバネの歪の無い状態になっていくのである。④では静的圧力部分が全て波に変換した状態で、⑤で波が離れた状態である。

バネの両端が壁に接続されており、そこで⑤の波が反射し戻って来た状態を⑥に示す。⑤⑥の間は省略する。これが衝突した瞬間は⑦で、運動エネルギー即ち慣性力同士が第6図の球の衝突同様に圧力Pに変換し先端から順序良く⑧⑨⑩と静止状態となる。その後は全てが静止状態となり①に戻り、②③... と繰り返す事に成る。実際には音が空中に放射され端部での損失があり、音速の分散もあるので、段々弱くなっていく。

図の左右の音は中央で透過し合うのではなく、図の中央で反射し、中央を境に左右それぞれが単独で端部まで往復運動している。

振動子もお暗示である。空中の置かれた振動子の厚さ振動を励振すると、音が厚さを往復運動している様に思え、専門書ではその様な記述があるが、実際には中央で反射して合って、厚さの半分を往復している。厚さ全体を往復している訳ではない。なお、振動子で音を垂直に受ける場合は、音は厚さ全体を往復している。左右対称の場合を鏡像体と言って、中央を鏡央(Refraction)と言う。音波の場合は左右同じ性質であるが、分子の様に性質が異なる事もあるので注意が必要である。

こう考えると、音が衝突する時、一時的に音でなくなり単なる圧力になる事が判る。特に鏡央(中央部)は再び離れるまで長い時間静止する。歪んだ部分幅をL、音速Vとすると、静止している時間Tは

$$T = \frac{L}{2V} \quad \text{式(5)}$$

となる。市販の音波実験用弦巻バネの音速が2m/s程度なので、50cm部分を歪ませれば人の目にも確認できるかもしれない。

何れにしろ、音のエネルギー⇒圧力(歪)エネルギー⇒音のエネルギーとエネルギーは変換されるが同じエネルギーの音が干渉した瞬間は静止状態で、動的な要素がないから、その状態は音の状態ではないと言える。

書物には、「音は互いに干渉しなかったかの様に通る」と書かれている場合があるが、間違いなく干渉していて、一時的に音でない状態になっている。

干渉の元の英語 Interference は妨害の意味であり、音を音で無くす妨害を犯しているのである。

◆エネルギーの保存則

第19図の様な弦巻バネの中央を摘んだ場合、歪に蓄えられるエネルギー、弾性エネルギーUは

$$U = k\Delta^2 \quad \text{式(2)}$$

と歪Δの二乗に比例する。kはバネ係数である。音となって伝搬する時には、左右のそれぞれの歪によるエネルギーU_wはそれぞれ

$$U_w = k\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}k\Delta^2 \quad \text{式(6)}$$

となり、左右合計で丁度Uの半分となる。残りの半分はバネの運動エネルギーとなる。移動する歪即ち、音の状態では、運動エネルギーと圧力のポテンシャル・エネルギーが1:1となる。これは音の伝播中に弾性力と慣性力が釣り合っていないと、ニュートンの作用反作用の法則に反する為で、波動方程式は慣性力と弾性力の作用反作用の法則、即ち釣り合い方程式から導き出される。

固体内で音は歪の伝搬と同じである。固体物理学では音は弾性波、即ち弾性による歪の波と呼ぶ。物の端を押し、歪ませると、音が発生し、伝搬し歪を運び、物の各部に弾性エネルギーを貯める=歪み、応力分布が発生する。

◆あとがき

二次元や三次元の場合は書かなかったが、例えば二次元なら2つの軸の成分に分割して次元として考え、結果を合成すればよいと一般に考えられる。次回は単純には「重ね合わせの理」が成り立たない事や今回説明した「重ね合わせの理」が大きな前提条件の忘れ物をしている事を話す。

◆今回知った事

音の重ね合わせ,音の干渉,音の独立性

- (1) 光は鏡で反射するとき、鏡の面の電子に一度吸収され、二次放射される。
- (2) 光同士（光子同士）が干渉する事は無い。
- (3) 光が干渉して暗く成ったり明るくなったりするのではなく、光子が暗くなる方向には少なく放射され、明るくなる方向により多く放射される。
- (4) シュレーディンガーの波動方程式により光子の放出方向は計算できるが、ファインマンの位相子でも簡易的に考えられる。
- (5) エネルギーの保存則から、エネルギーの重ね合わせは成り立つが、一般変数は重ね合わせの理が成り立たない。
- (6) 球の完全反射では、運動エネルギー⇒圧力（歪）エネルギー⇒運動エネルギーとエネルギーが変換される。
- (7) 同じ形状の波が重なると、音のエネルギー⇒圧力（歪）エネルギー⇒音のエネルギーとエネルギーが変換される。
- (8) 正負の波が重なって波が無くなった瞬間は波としてエネルギーの状態ではない。
- (9) 一般に言われる「波に独立性」は無い。独立しているかのように観測される。
- (10) 波の干渉では、人は自然に騙されている。
- (11) 数学は辻褄が正しければいかようにしても良いが、物理にはそれなりの配慮が必要。

<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)

光と物質のふしぎな理論—私の量子電磁力学
リチャード・P. ファインマン(岩波現代文庫)
Advancing Physics A2 Student Book (2nd Revised 2008/5/14 IOP Publishing Ltd; 2nd Revised) 日本語版:アドバンスング物理 A2J.
オグボーン、M.ホワイトハウス 他(シュプリンガー・フェアラーク東京)