

# 音波のよもやま話 (その1)

## 重力鉄道とエネルギー

(葡)アイ・エス・エル 宇田川義夫

### ◆はじめに

若い人の連続波での可聴周波数範囲は概略20Hzから20kHzの為に、この範囲外の周波数を超音波と呼ぶことが多い。耳の良い人の可聴周波数範囲は12Hzから23kHzと言われ、個人差もある。犬、猫、鳥、イルカ、鳥などは可聴周波数の上限が50kHz以上と言われ、我々とは異なる音を聞いていることになる。第二次大戦で最初にイギリスで使われた潜水艦のソナーは、多くは人の可聴周波数範囲の5kHz~20kHzで使用されていた。低い方が遠くまで届き、敵より先に見つけられるので有利である。人の可聴周波数音も、超音波音も、同じ音の仲間、便宜上の分類である。同じ周波数帯域の振動でも分野により、超音波、弾性波或いは地震波と呼んだり、単に音と言ったりしている。何れも伝播する機械振動であり、変位の伝搬である。

可聴音やソナーは音の通信的利用である。超音波溶接機や超音波洗浄機などでは、音を動力として使っている。機械、車など動く装置

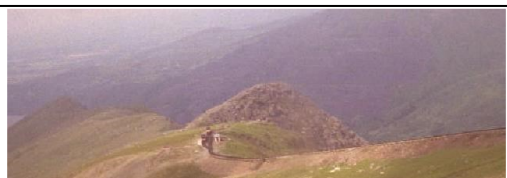


写真1 スノードン尾根伝いの観光鉄道

は、実は全て音の伝播で動いている。一般には知られていないが、「力の伝播」=「変位の伝播」=「音の伝播」なのである。車が音で動いていると=そんな馬鹿な、と思うかも知れないが、事実なのである。こう言った書物に書かれていない事も含め、音に関する色々な話を連載する。

なお、1940年代の物理学者達は「音はニュートン力学に基づく振動の伝搬現象」と結論し、それ以降は音に関しては関与していない様だ。

### ◆水上交通と重力式鉄道

新幹線が300km/hで走るという便利な世の中にいるので、昔は物を移送すると言う事が如何に大変だったかは実感が無い。

鉄道が開発されたのは産業革命後少し経ってからであるが、それ以前は輸送の主力は帆船やボートの水上輸送であった。現在ヨーロッパ内陸では運河が彼方此方繋がっていて、何処で



写真2 Rheilffordd yr Wyddfa のレール

もボートやヨットでいける。地殻変動の激しい日本に居るとイメージが湧かないが、陸地の傾斜は非常に緩やかである。例えばイギリス(正確にはグレートブリテン及び北アイルランド連合王国)ではスコットランドのハイランド地方



写真3 The Mount Washington Cog Railway

を除くと、一番高い山はロンドンの西北350km、赤いドラゴンの国旗で有名なウェールズ地方にあるスノードン山(1085m)である。中央高速道路の最高標高(1015m)と大差ない。写真1の様に麓の海拔100mの町スランベリス(Llanberis)から頂上まで尾根伝いに直線的に上っていく蒸気機関車の観光鉄道 Rheilffordd yr Wyddfa が走っている。(注: ff,dd,llなどはウェールズ語のアルファベットで一文字) 傾斜がゆるいと言っても、通常のレールと車輪の摩擦では滑るので、写真2の様に左右のレール中央に二列のギヤ(ラック)を配したラック・レールと車軸に付いたギヤ(ピニオン)がかみ合っていて、滑りを避けている。ラックの形状などで色々な種類が、蒸気機関車の時代に開発された。日本には3枚ギヤのアプト式のみ導入され、大井川鉄道等で見ることが出来る。この方式の最初は平地での機関車の駆動力を増やす目的で、1812年に英国のミドルトン鉄道である。最初の登山用ラック式鉄道は米国東海岸北部ニューハンプシャーのワシントン山コグ鉄道で、1868年である。コグ cog は歯車の歯で米国ではコグレールと呼ぶ。始発駅付近を写真3に示す。山の標高は1917mで米国東部での最高峰である。米国西部には、ロッキー山脈を始めとす

る高山があるが、東海岸はイギリス同様平坦である。東海岸のアパラチア山脈でも緩やかな山々である。ラックを使わないと鉄道では80% (パーミル、鉄道傾斜には $\% = 1/100$ でなく $1/1000$ を使う。即ち8%と同じ)の傾斜が限界である。鋼で出来たレールと動輪の摩擦係数は速度や雨など条件により異なるが、10%程度である。D51など蒸気機関車は上り坂で砂を線路に撒くのは、レールと動輪間摩擦を高めるためである。ワシントン山鉄道の最大傾斜は371%ある。スキーの滑降並みの傾斜である。比較に富士山の傾斜は概略300%前後である。

話しはイギリスにもどるが、スノードン山観光鉄道は1896年開業である。この鉄道の傾斜は180%である。山頂に上がって見渡しても、周りに高い山は見当たらない。イギリスの土地の高低差は少ない。その為ありとあらゆる場所が丘陵を避けながら運河で繋がってい



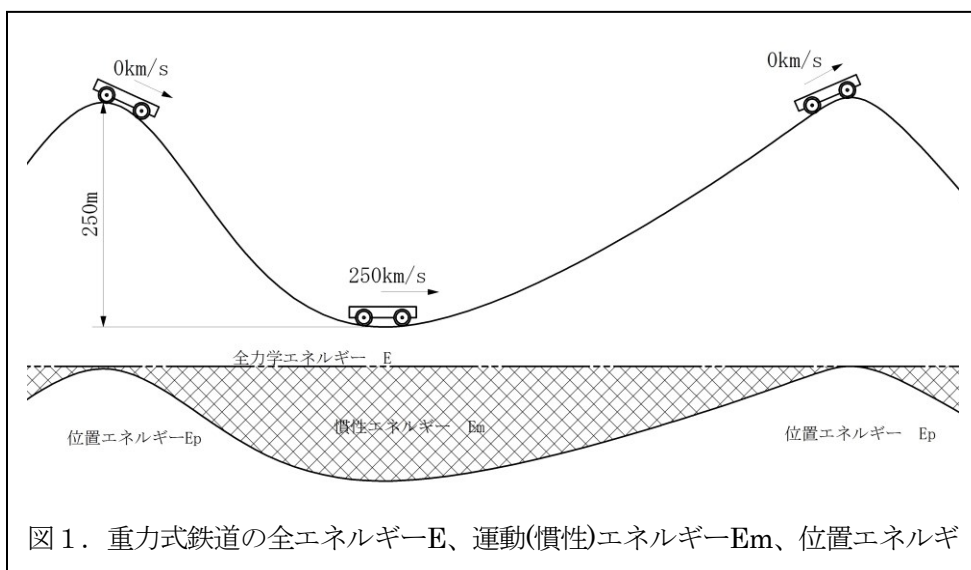
写真4 英国の運河

る。産業革命時には物資を運河で大量運送したのである。運河輸送が無ければ産業革命も遅れていたであろう。今でも運河の上に住むと税金が安く、船上生活をしている学生や若い労働者も多い。写真4に運河に浮かんでいるボートを示す。運河の幅は狭くボート2台が何とか行き交う程度である。それ以上広くすると運河建設費用が増すからであろう。運河の横にはボートを牽引する為の側道がある。昔は人や馬がボートを牽引していた。漕ぐの

ではなく、陸から引っ張るのでエネルギー効率が良い。運河の代わりに、鉄路の馬車を馬に引かせる方法も取られていた。それが蒸気機関車に繋がった。

イギリスでの最初の産業用運河はマンチェスターと近くの炭鉱をつなぐブリッジウオーター運河で1761年に完成した。その後1790年代に運河建設のブームが生まれる。当時作られ

た。アパラチア山脈は、イギリスの丘陵地帯と違って、それなりに傾斜がある。鉄鉱石は高低差の少ない五大湖の北のカナダ側にあり、安価な水上輸送で工業が発達したのである。西のシカゴ、東のピッツバークなどメガロポリスが出来たのもこのお陰である。東側はミシシッピ川などを用いたが、川から炭鉱までは山を越える必要があった。そこで蒸気機関車が開



発される以前に珍しい重力を用いた鉄道が作られた。ジェットコースターもどきである。が、速度が上がりすぎると危険な為か、降りには手動ブレーキで速度を制御し、登りは載せてあるラバを

た運河全長は6400kmであった。細長い日本国土に作った新幹線全長が3000kmに満たないことから、その長さが判るであろう。ヨーロッパでは北海から黒海まで繋がっており、ボートだけでヨーロッパ全体の観光も可能となるほどである。蒸気機関車が発達する19世紀までは、動力は馬か人で、10トン以下のボートが使われていた。馬車が2トン程度の運送しかできないので、輸送手段としては効率が良く安価であった。運河を使ってリバプールへも石炭を輸送していた。リバプールとマンチェスター間の運河使用料が高かった為、対抗して世界で最初の実用的な蒸気機関車を用いた1830年開業のリバプール・アンド・マンチェスター鉄道が出来たという有名な話がある。

英国での運河の利用を述べたが、米国ではどうだったか。アパラチア山脈に良い炭鉱があ

降ろして牽引となった。建設は石炭輸送の船会社が行い、1827年から操業した。ニューヨークへもここから無煙炭が輸送されたい。手動ブレーキを使わなくても危険でないなら、峰から峰へはラバの必要性もなかったであろう。筆者は日本に無いこの重力式鉄道を見に行ったことがある。ジェットコースターの様な急傾斜では無かった。興味のある人は Delaware and Hudson Canal Company Gravity Railroad で検索してほしい。

#### ◆運動エネルギー

前置きが長くなったがエネルギーの話である。物体の運動エネルギーは直線運動と回転運動のエネルギーの和である。

$$E_m = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}M\omega^2 \quad (1)$$

ここに $m$ は物体の質量、 $M$ は物体の慣性モーメント、 $V$ は速度、 $\omega$ は角速度である。右辺の第一項は直線運動のエネルギーであり、第二項は回転運動のエネルギーである。ここでは、簡単のために直線運動を中心に話を進めるが、現実には直線と回転の両方の運動が絡んでいる。例えばテニスでラケットの当たり方で直線運動と回転運動が発生し、ドロップショットなどとなる。現実には常に回転運動が絡む事を忘れて欲しない。

### ◆ポテンシャル・エネルギー

山の上の重力式鉄道のトロッコは高低差相当のエネルギーを持っている。これが運動のポテンシャル・エネルギーである。高さ位置エネルギーと言う事もある。素粒子の世界を除けば、ポテンシャル・エネルギーは重力場又は電界場によって発生する。例えば弾性エネルギーは電界場(電圧)によるポテンシャル・エネルギーの別名称である。電圧の事を英語ではポテンシャル(Potential)と呼ぶ。

ボルテージ(Voltage)は電圧の単位のこと、よく勘違いして使われている。

ポテンシャル・エネルギーは距離に反比例するので、これによって生じる現象は非線形現象となるが、多くの場合その一部を近似し線形で表現している。万有引力の場合ポテンシャル・エネルギーは

$$E_p = -G \frac{mM}{r} \quad (2)$$

ここに $G$ は万有引力定数 $=6.67 \times 10^{-11} \text{ mkg}^{-1}\text{s}^2$ 、 $M$ と $m$ は2つの質点の質量、 $r$ は質点間距離である。ポテンシャルは距離 $r$ に反比例し、ポテンシャル・エネルギーは無限距離で最大値になり、そこをゼロ基準として、負の値で表現している。エネルギーの値が負だからと言って、負のエネルギーがあるわけではない。エネルギーは全て正である。最大で0になる様に基準を決めただけである。物体同士の距離は無

限遠にはできても、物体の径合計以下にはできない。そこで無限遠基準の方が何かと便利である。地球重力場の地表付近では地球の径 $r$ が大きいので、高さ位置エネルギーはテーラー展開近似として良く知られる次式となる。

$$E_p = -G \frac{mM}{r+h} - \left( -G \frac{mM}{r} \right) \approx G \frac{mM}{r^2} h = mgh \quad (3)$$

ここに $h$ は高低差、 $M$ は地球質量、 $m$ は物体の質量、 $g$ は地表面での重力加速度 $G \frac{M}{r^2}$ である。

地表面付近では近似的に高さ位置 $h$ に比例すると言う線形になっている。

物体の持つ全力学的エネルギーは運動エネルギーとポテンシャル・エネルギーの和で

$$E = E_m + E_p \quad (4)$$

となる。エネルギー保存則により、外部とのエネルギーのやり取りが無い限り

$$E = E_m + E_p = \text{一定} \quad (5)$$

となる。ポテンシャル・エネルギー $E_p$ が最小0の時に、運動エネルギー $E_m$ は最大 $E$ になり、運動エネルギー $E_m$ が最小0の時ポテンシャル(位置)・エネルギー $E_p$ が最大になる。

重力式鉄道の図1の下に全エネルギー $E$ 、運動エネルギー $E_m$ 、高さ位置エネルギー $E_p$ の関係を示す。一番低い高さ位置でのエネルギーを基準にした図である。

重力鉄道の標高差は250m程度なので、摩擦を無視でき、ブレーキも掛けなければ、

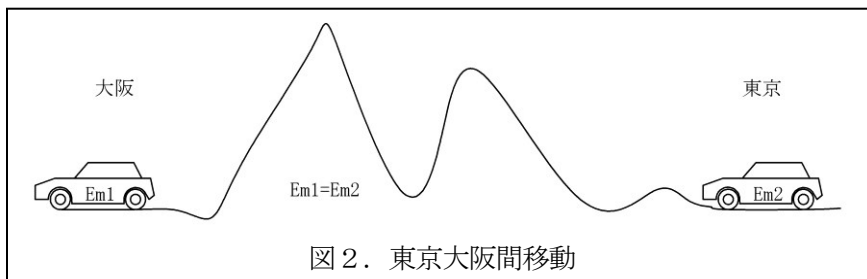
$$mg \times 250\text{m} = 1/2 mV^2 \quad (6)$$

なので、重力加速度を $9.8\text{ms}^{-2}$ として $V=70\text{m/s}$ となる。時速に直すと約 $250\text{km/h}$ で新幹線並みの速度となる。摩擦を無視できれば、250mの高さ位置エネルギーをもったトロッコが頂上から下り、谷底で $250\text{km/h}$ の速度相当の運動エネルギーとなり、次の峰の頂上に慣性力で登り高さ250mの高さ位置エネルギーを得、運動エネルギーを失い速度ゼロとなる。日本は地盤の悪い崖が多い。250m程度の高さから山津波が発生すると、新幹線同等の速度とな

るので逃げようが無い。泥流、火砕流なども摩擦が少ないと(事実少ない)、落差で簡単に高速度になる。200mを超える、ニューヨークや東京等の高層ビル(スカイスクレーパ)から物が落ちたら大変である。

#### ◆東京から大阪に

東京駅から大阪駅まで車でドライブすると、標高は共に3m程度と同じなので、速度が同じで、標高も同じと言う事で、車は東京でも大阪でも持っている全エネルギーはほぼ同じである。最新のハイブリッド自動車の燃費は40km/l程度である。加減速したり、山を登るとエネル



ギーを消費する。下りではブレーキを掛けて慣性エネルギーが増えて速度が上がるのを避ける必要がある。風を切れば空気をかき回して、空気にエネルギーを与える。色々な理由でエネルギーを失う。失うエネルギーがないときには、この東京大阪間500kmの移動にエネルギーが不要と言う事になる。空気が無く、移動の間に摩擦が無く、速度制限も無く、昇りに使ったエネルギーを下りに回生できれば、高度が同じ東京から大阪への移動には、エネルギーは不要と言う事になる。自動車の燃費消費率は、毎年良くなっている。ヨーロッパでは100km/lを目指している。エンジンの効率化と共に、ブレーキを使わず、減速時エネルギーを回生したり、空気抵抗、タイヤ、車軸、エンジンの運動部分など摩擦の発生を抑えれば十分可能になるであろう。最近の環状線の電車は加減速が多いのにも関わらず、回生ブレーキのお蔭で省電力となっている。ハイブリッドカー、

電気自動車回生技術が使われ、軽自動車まで実装し始めている。

ここで重要な事は、同じ標高の地点間の移動自体にはエネルギーが必要ない事である。同じ重力ポテンシャル間移動にはその移動の間に発生する摩擦など回生出来ない損失がある場合にその損失相当分のエネルギーが必要となる。

#### ◆今回知った事

- 1) 18世紀の蒸気機関車輸送の以前は、運河輸送が主だった
- 2) 直線慣性運動のエネルギーと回転慣性運動のエネルギーの和が運動エネルギー
- 3) 運動エネルギーとポテンシャル・エネルギーの和が力学的エネルギー
- 4) 地表上で250m落下すると、摩擦抵抗を無視できれば約250km/hの速度になる。
- 5) ポテンシャル・エネルギーは距離に反比例する。即ち非線形。
- 6) 地上では高度によるポテンシャル・エネルギーは近似的に高度に比例する線形。
- 7) 摩擦抵抗などを無視できれば、同じ標高(ポテンシャル)間への物体の移動にはエネルギーは不要

#### <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)