蒸気機関車について

1-E 須藤　晟仁

1.機関車とは何か

世界の鉄道において、そのすべては産業革命の頃、起源はイギリスにあった。ワットによって蒸気機関が発明され、後に最新の移動手段として、蒸気機関車が生まれた。そこから長い月日が経ち、今日では世界で様々な鉄道が走っている。

さて、機関車とは何か。電車や気動車との違いは何か。まずはそこから考えてみたいと思う。

列車は、主に２つの動力配置に分けることができ、一方は動力分散方式、もう一方は動力集中方式である。動力分散方式とは、例えば5つの車両がつながった列車編成があるとする。うち、車両は動力車（モーターなどがついた車両）と付随車（モーターなどがついていない車両）に分かれ、車両5両のうち、2両以上が動力車であるものを指す。すなわち、私たちが日々お世話になっている電車や気動車などがこれに当てはまる。一方の動力集中方式とは、簡単に言ってしまうと貨物鉄道である。先ほど、車両は動力車と付随車に分かれるという話をしたが、列車編成のうち、進行方向に対して先頭車か後尾車のどちらかが動力車、その他の車両はすべて付随車、という編成方式である。一般的に、その動力車のことを機関車という。機関車とは、他の車両を牽引する車両のことである。

機関車は主に次の三種類に分類することができる。

・SL（Steam Locomotive;蒸気機関車）

主に石炭などで湯を沸かし、発生した蒸気圧を用いて車輪を回す機関車のことを指す。大きな音を立てて煙を吐き立てながら走る姿は非常に迫力があるが、石炭や水などの燃料をバカ喰いするため工ネルギー効率が極端に悪く、さらに走らせるための準備や運転方法、メンテナンスに非常に手間がかかるため、現在はあまり使用されていない。

・DL（Diesel Locomotive;ディーゼル機関車）

その名の通り、ディーゼルエンジンで動く機関車のことを指す。蒸気機関車に比べてかなり手間がかからず、また工ネルギー効率も良い。現在日本においては、非電化区間を走行できる機関車として用いられている。

・EL（Electric Locomotive;電気機関車）

電力でモーターを回して動く機関車のことを指す。挙げた三種のうち最も工ネルギー効率が良く（それでも50％に満たないが）、DLと同様、手間はかからない。現在日本においては、電化区間を走る機関車として、主に貨物列車や、新品の電車、また役目を終えた電車などを牽引するのに多用されている。

2.国産蒸気機関車について

日本に蒸気機関車の概念が伝わったのは、江戸時代末期、日本が開国した時、ペリー率いる黒船の艦隊が蒸気機関車の模型を披露したところから始まる。のちの明治時代、日本はイギリスから蒸気機関車を輸入した。一号機関車である。文明開化の合図として響いた汽笛は、日本に産業革命をもたらし、今後の鉄道にも大きな影響を与えた。

時代は大正になり、ここで初めて国産の蒸気機関車が生まれた。8620（ハチロク）型蒸気機関車である。後に続いて9600（キューロク）型、そして日本といえばの表記であるC11、C12、D51、C57、C62などの機関車が生まれた。

さて、ここで日本製蒸気機関車の型番について解説していこう。ハチロクやキューロクについては非常に複雑なので、細かな解説は割愛する。

まず、表記の頭にあるアルファベットだが、これは動輪の軸を表す。例えば、Aなら一軸、Bなら二軸、Cなら三軸である。次に続く数字二桁についてだが、10〜49ならタンク式、50〜99ならテンダ式であることを指す。最後に、間隔をあけて幾つかの数字が並んでいるが、それは何台目であるかを指す。一例として、真岡鐵道で走っているC12 66という機関車は、タンク式で動輪が三軸である、C12型の66号機であることを示す。

軽い説明となるが、動輪三軸の方が、四軸よりも客車牽引に優れていたようだ。

皆さんご存知、D51型及び52型。これらの機関車は、1000台以上も生産された。そして、これらの機関車が活躍したのは戦時下の時期である。なぜこんなにも多く生産されたのか。自明である。貨物列車として、多くの資源や兵器を輸送したのである。

では、なぜ四軸である、D型が用いられたのか。それまでに多く生産されていたC型ではダメだったのか。

C型で、貨物を輸送できない、またはD型で旅客輸送は向いていない、といえば大きな語弊になるが、かなりそういった傾向がある。

蒸気機関車は、動輪の数、直径、回転数、軸重によって大きく性能が変わる。重たい貨車を牽引するためには、大きなトルク（正確には動輪周牽引力、簡単にいえば、物体を回転させるために必要な力）とグリップ力が必要だ。一方、旅客は軽いがスピードにうるさい。しかし、蒸気機関車には、車やチャリのように、トランスミッション（変速ギア）が存在しない。ではどうしたか。

一般に、旅客牽引用として用いられたC型は、動輪径が大きいことに気がつく。動輪径が大きければ、低い回転数で高速を出せる。ピストンの往復回数が多ければさほど変化はないが、残念ながら400rpm程が限界だと言われている。さすれば、車輪を大きくするほかない。しかしながら、大きな動輪を使うと、トルクが小さくなり、たくさん履くと、軸間が広がり、日本のような細々とカーブがある路線だと、すぐに脱線してしまう。従って、高速化を目指した蒸気機関車たちは、三軸に落ち着いた。

一方で貨物特化の機関車はどうか。四軸のものが多い。速度を妥協して牽引力に振った設計になっている。なので動輪の直径を小さくして、動輪周牽引力に振り分けた。ではなぜ四軸なのか。これは車輪のグリップ力に関係している。チャリでも車でも電車でも、車輪があるものは地面と車輪の摩擦（引き摺るように滑るといけないので、ここでは静止摩擦力ですね）を使って走るが、鉄道において、この摩擦係数は0.15〜0.3と非常に小さい。これに耐えられなければ、滑って空転し、いくら馬力があったとしても、前進することができない。簡単に、機関車のグリップ力は静止摩擦係数と動輪にかかる重量にのみ依存する。結局のところ、動輪を増やしても機関車全体での軸重の重量は変わらない。三軸でも二軸でも良いのだ。いやこれがよくない。線路には対応できる軸重の限界がある。クソ重たい機関車を二軸で走らせると、一軸あたりの軸重がクソ重くなり、線路が潰れる。どうするか。簡単である。軸を増やす。すると、やはり何も四軸にこだわる必要はなくなる。先輪や従輪を増やせば良い。よくない。先述の通り、機関車の性能は動輪の軸重による。したがって、先輪や従輪

を増やすのではなく、動輪を増やしてそこにかかる重量を増やすことで、大きな牽引力を確保することができる。したがって、貨物用として製造された機関車たちは、四軸のものが多い。（んなもん気にしなければD型だって観光用列車に使えるんだい。）

3.蒸気機関車の牽引力及びスピードについて

長い前置きはここまでにし、いよいよ本題に入っていこうと思う。

さて、先述の通り、蒸気機関車の工ネルギー効率は非常に低い。そこで、どのくらい工ネルギー効率が低いのかを、計算によって導いていこうと思う。

まず、工ネルギー効率とは何か。物理学的な考え方において、それは、あるものを目的の状態にしようとして与えた工ネルギーに対して、どれだけ無駄なくその目的の成果を得られたか、という比率である。実例を挙げると、部屋を温めようとして、石油ストーブを点けたとする。目的は部屋を温めるため、つまり熱を発生させるためであるが、残念ながら火を燃やすと、無駄な工ネルギーである光までもが発生する。これにおいて、前者の比率が高ければ、工ネルギー効率が良い、逆に低ければ悪いと言える。

一般に、これを求める公式は以下である。

工ネルギー効率η = 有効出力W / 投入工ネルギーQ

ここでは、C12 66のデータを元に、考察していく。機関車の燃料搭載量は1500kg。一般的な石炭が持つ工ネルギー量は7000kcal / kg。つまり、機関車に搭載されている燃料が持つ工ネルギー量は10500000kcal。これが投入工ネルギーQである。

真岡鐵道の路線長は約42km。営業運転時、往復と下館一真岡間（16.5km）の往復をしているので、走行距離はおおよそ110km。平均牽引力Fを求める。

理論牽引力の計算式は、補正係数を0.85とすると、

$$F = \frac{0.85 \times \text{ボイラーの最高使用圧力} P \times (\text{シリンダーの内径} d^2) \times \text{ピストンの行程} L}{\text{動輪の直径} D}$$

P=14.0kg/cm^2　　d=40.0cm　　L=61.0cm　　D=140.0cm

この式の解説は後述する。①

これを計算すると、F=0.85x14.0x1600.0x61.0/140.0=8296≒8300（kg）

W=8300x110000/427=2138173.302≒2000000（kcal）

従って、η=2000000/10500000=0.19

結果、工ネルギー効率は約19％となった。この計算は、実際のものではなく、石炭を燃やし始めてからその距離を最大出力で走ったときの理論値であり、無論この間実際には駅に停車していたり、待避線で火を焚いたまま待っていたり、はたまた加減速や定速で出力0、湯を沸かしたりする時間も含まれているが、今回は考慮していない。

蒸気機関車のエネルギー効率は一般的に5％から7％であると知られている。つまり、この計算はかなりの夢物語を描いており、停車時間などにより多くの工ネルギーを割いている

ことがわかる。それに対し、DLは20〜35％、ELは30％以上（だが発電所や送電において口スする電力を無視した場合、機械効率のみになるので80％）。ここから、蒸気機関車を多用することは、経済損失につながると言える。

ではスピードについて見ていこう。比較的計算は簡単である（はずである）。が、すでにC12の最高速度（速さですね）は70km/h≒120000cm/minであるとわかっている。動輪の円周は140π=439.823≒440.0cm。

ここから、120000/440=272.727≒273rpm、C12のエンジン回転数ならぬピストン往復数は一分あたり273回、一秒に直すと、およそ4回（適当）である。

実際に文字を用いて表したいと思うのが理系派の生態である。なので、やってみる。

限界エンジン回転数n[rpm]は、平均ピストン速度における限界値（破損しやすくなる直前）の速度6~7[m/s]とピストン行程s[m]で求めることができる。n=速度6or7x60/2s=180/s。

最高速度V[km/h]は、動輪径D[m]とn[rpm]で求まる。

V=60Dnπ/1000。

さて、この公式は正しいのか。C12データ（D=1.4 s=0.61）を用いると、V=77.87……
C62データ（D=1.75 s=0.66 V=100~110（設計最高速度））を用いると、V=104.96……
D51データ（D=1.4 s=0.66 V=85）を用いると、V=83.97……

検証結果は、近しい値ではあるが参考値程度にしかならないことがわかった。

高速域になると、今度は蒸気の給排気能力によるかもしれないという予想を立てたが、計算が面倒だったので、省く。

最後に、最大牽引力について。

先述の通り、静止摩擦係数は0.15〜0.3である。ここでは0.25を用いる。摩擦力は基本的に垂直抗力と摩擦係数の積である。したがって、重力加速度9.8m/sと、機関車の重量M、軸数n、動輪軸数Nを用いて理論最大牽引力f

f=0.25x9.8xMN/n=2.45MN/n[kN]（全軸に均等に重量が配分されている時の式である）。式の解説として、最大静止摩擦力の公式はFmax=μMgである。Mは全体重量を軸数における動輪軸の割合でかけ、9.8MN/nで動輪軸重量となっている。これより大きな力を牽引しようとすると、空転してしまう。

では、シリンダー引張力について。（定義として、1kg/cm^2=0.098MPa）。ここでは、①の式が使われる。

$$F = \frac{0.85 \times \text{ボイラーの最高使用圧力} P \times (\text{シリンダーの内径} d^2) \times \text{ピストンの行程} L}{\text{動輪の直径} D}$$

まず、ピストンが押す力fについて。シリンダーの断面積（π(d/2)^2=(πd^2)/4）に圧力（P）をかけたものである。基本的に、安全性を考慮して85％分の圧力である。

f=(0.85Pπd^2)/4

次に、一回転でする仕事Wについて。

ピストンが往復して一回転であり、二気筒であるため、つまりピストンが押した距離は4ストローク分に相当する。

W=4fL=0.85PLπd^2

一方、動輪が一回転して進む距離Sについて。

円周分だけ進むので、
S=πD
最後に、Fを求める。仕事量を進んだ距離でわれば良い。
F=(PLd^2)/D

4.まとめ

これらの計算を行い、蒸気機関車について、また定理を調べていく中で、蒸気機関車はそれ自体が巨大なモーターであるがゆえに、さまざまな要因によって、走行性能にかなり影響を及ぼすことがわかった。さらに、非常に扱いにくく、経済面や環境面から見てみると、あまり良い代物ではないと思える。しかし、煙を吐き立てて轟音と共に走り抜けるその勇姿は、多くの人々の心を魅了することはいうまでもない。産業革命に生まれた鉄道という新たな移動方式の象徴として、鉄道の起点は蒸気機関車であり、文明開化から戦火の中、また復興して日本が先進国になるまで、彼らはいつも、私たちに勇気と希望を与えた。

そんな日本各地を走り回っていた蒸気機関車は今や数台ほどしか走っていない。どれも高齢であり、不調が起きているのも現実である。

乗れなくなってしまう前に、見れなくなってしまう前に、一度、生きた蒸気を味わって見てはいかがだろうか。