

熱工学的鉄道ファンからみた蒸気機関車

Steam Locomotive from the Point of View of a "Thermal Engineering Railway Fan"

吉田 敬介 (九州大学), 田坂 誠均 (住友金属)

Keisuke YOSHIDA (Kyushu University), Masahito TASAKA (Sumitomo Metal Industries)

1. はじめに

みなさん、蒸気機関車って知っていますか？
こう聞かれて、ほとんどの人は「知ってるよ、SLのことだろう!？」と答えるでしょう。確かに、蒸気機関車は鉄道で貨物列車や客車を引っ張る機関車のひとつで、SLは蒸気機関車の英語名 Steam Locomotive の略語です。

しかしよく考えると大変不思議です。観光客目当ての限定的な運行を除けば、現在の日本にはSLは走っていません。最後までSLが走っていた九州地区や北海道地区でも実質的には1960年代終わり、すなわち今から40年ほど前には姿を消していました。それなのになぜ、普通ではもう見かけないSLがこんなにもポピュラーなのでしょう。

著者らは周囲から鉄道ファンと思われていますが、実は二人ともSLにそれほど興味がありません。それは吉田が49歳、田坂が46歳であり、SL全盛時代を知らないからなのですが、だからこそ年配の方はともかくSLがポピュラーであり、今でも興味を持つ人が多いのが大変不思議です。

このコーナーはヒストリーQということになっていますが、SLの歴史を詳細に解説しようというものではありません。SLとは何か、何が魅力なのか、なぜSLが消えていったのか、を熱工学的鉄道ファンの立場から考えてみたいと思います。本会会員には（隠れを含めて）鉄道ファンが山ほどいます。また、SLの設計、保守にあたっての方もおられます。その中で我々がこのような記事を書くのは大変恥ずかしいのですが、伝熱シンポジウムの行き帰りに鉄道の未乗車区間を経由するなど恥ずかしいことを随分やっていますから、ここもその勢いで書くことにします。特に、若い方に読んで頂ければ幸いです。

本記事の執筆にあたり、さまざまな文献を参考にしましたが、直接引用した部分を除き、文献番

号を本文中に付しませんでした。また、使用単位は無理にSIに統一せず、鉄道界で使用されているまたは使用されていた単位をそのまま使用しました。(出力:1PS=0.7355kW, 圧力:1at=1kgf/cm²=0.09807MPa, ただし絶対圧を[ata]と書き, ゲージ圧(大気圧との差圧)を[atg]と書く, 0atg=1.0332ata=0.10133MPa.)

2. 蒸気機関車とは

狭義の蒸気機関車 蒸気機関車とは、「蒸気で動く機関車」という意味です。「そんなの当たり前だろう」と言われそうです。確かに電気機関車(Electric Locomotive, EL)は「電気で動く機関車」です。ではディーゼル機関車(Diesel Locomotive, DL)は「ディーゼルで動く機関車」でしょうか？蒸気機関車は作動媒体が蒸気であることを指し、電気機関車はエネルギー源を電気(作動媒体ともみなせるが)としている機関車で、ディーゼル機関車は熱機関として Diesel Engine と呼ばれる内燃機関を採用している機関車です。このように鉄道用語(に限らず工業的に使われる用語)は一貫性がないのが普通です。

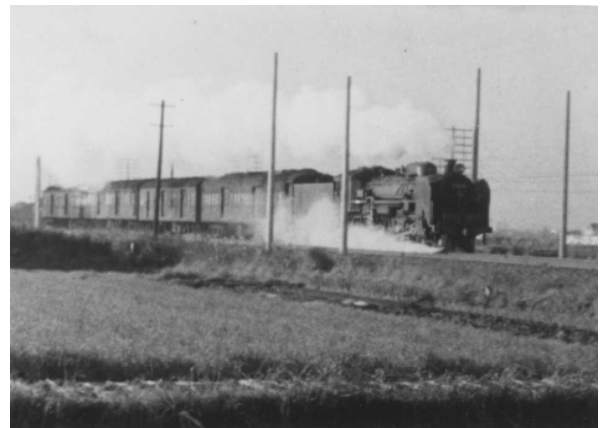


Figure 1 A Suburban Scene with Railway in 1960s (JNR Kagoshima Line).



Figure 2 Outlook of Steam Locomotive (Type C62 exclusively for Tsubame Super Express) [*]

広義の蒸気機関車 蒸気機関車は別名あるいは略称として「汽車」とも言われます(蛇足ながら中国語では「火車」と呼びます)。そして別に蒸気機関車に乗るわけではありませんが、蒸気機関車が引く客車列車に乗ることを「汽車に乗る」といいます。これはかつて、電車列車が近距離のためのもので、長距離は蒸気機関車が牽引する客車列車によっていたことの名残です。しかし、一部の寝台特急列車以外はすべて電車とディーゼルカーに置き換わった現在、ディーゼルカーに乗るときでさえ「電車に乗る」という人が増えている状況では、「汽車」などとっくの昔に死語になっているはずですが、まだ「汽車に乗る」が通じるとは不思議です。そう言えば、「汽車, 汽車, ポッポ, ポッポ, …」という「汽車」と題した童謡が今でも幼児向け CD に入っていることがあります。現存しないものを歌っている歌を幼児はどんな思いで聴くのでしょうか。が、どうやらこの場合の「汽車」とは、列車を指すのではなく鉄道システム全体を指しているようです。かつてまだ自動車のような移動手段を国民が持っていなかったとき、鉄道はあるときは隣町に、あるときは遠くの町に行くためのほとんど唯一の道具でした。そして客車を引く動力源としての蒸気機関車はその列車単位を代表していた、そのため「汽車」は鉄道システムの代名詞になった。そう考えると、なぜ今も汽車という言葉を使って違和感がないか、幼児に汽車の歌を聞かせて違和感がないか、が理解できるような気がします。もしかすると鉄道がある限り「汽車に乗

る」という言葉は、「書生さん」などと違って時代が変わってもある一定の割合で通じ続けるかも知れません。

蒸気機関車の誕生 蒸気機関車は、世界で初めての実用的な熱機関である Newcomen の蒸気機関(1712年)から 113年後、産業革命の原動力としてあまりに有名な Watt の蒸気機関(1769年)の誕生から 56年後の 1825年、英国の G. Stephenson によって実用化されました。Darlington と Stockton 間 40km を結んだ鉄道は、馬の代わりに Locomotion 号と呼ばれる機関車が人や荷物を運びました(図 3)。機関車の英語名 Locomotive の語源はこの Locomotion であるというのは鉄道ファンには常識ですが、鉄道というのは G. Stephenson が突然蒸気機関車を発明したものでなく、むしろ従来の鉄道に蒸気機関を利用した動力車を開発したと考えるのが正しいと思います。なお、それに遡ること 21年前の 1804年には英国の R. Trevithick が鉄道用の蒸気機関車を作っていましたが、レールの技術が未熟であったため実用化されませんでした。そういう意味では、蒸気機関車の発明者は R. Trevithick と言えるかも知れません(この R. Trevithick の孫である F.H. Trevithick と R.F. Trevithick の兄弟は 19世紀終わりの明治時代に来日し、日本の鉄道の黎明期に技術指導者として活躍しています)。いずれにしても 18世紀初頭というのはまだ Lavoisier の熱素説が信じられていたころ、すなわち熱がエネルギーの一形態であるという認識がなかった時代です。熱力学の第二法則

の原型である Carnot の「火の動力についての考察」が発表されたのでさえ 1824 年、G. Stephenson の Locomotion 号完成の 1 年前という状況です。そういう時代に英国では熱機関を利用した機関車が開発されたということになります。また、本誌別稿で吉田英生氏が取材されている Rocket 号や、G. Stephenson の息子である R. Stephenson が父と一緒に Locomotion 号に改良を加えた有名な Planet 号は Locomotion 号よりはるかに高性能であっただけでなく、その後の蒸気機関車の重要技術の多くを生み出しています。左右の動輪(ピストンの動力が伝えられる車輪)を回すクランクの位相差を 90°にして起動不能に陥ることがないようにしたことや、いわゆる煙管ボイラを採用して蒸発量の増大と燃料消費率を改善したことなどはその一例です。

関連分野の学問的裏づけが十分でない中で、すばらしい性能の蒸気機関や蒸気機関車を製造していった彼らとその彼らを生み出した時代を考えると、天才という言葉を使い出してしまう。そして、天才=スーパースターの登場が革新的技術を生み、それが社会に豊かさをもたらすとしても、それが公教育、とりわけ大学などの高等教育機関で育成可能なのか、改めて疑問に思ってしまう。Watt や Stephenson を持ち出すまでもなく、豊田佐吉や本田宗一郎、井深 大など、日本の天才的な技術者が育った環境を見れば論を待たない筈なのですが。

ともあれ、このようにして英国で生まれた蒸気機関車はその後 150 年にわたって貨物や旅客を運び続け、産業発展と人々の暮らしを支えていくこととなります。

ゲージの話 鉄道にとって大変重要な規格のひとつに 2 本のレール間隔、すなわちゲージ (gauge, 軌間ともいう) があります。これは機関車の設計の自由度を大きく左右します。

G. Stephenson が初めて蒸気機関車を走らせた Darlington-Stockton 間鉄道のゲージは 1435mm であり、その後のゲージの基準 (標準軌) となった、という話は鉄道ファンなら誰もが知っています (厳密には 1422mm だったようです)。が、前述のように鉄道そのものは Stephenson の実用化より前から存在しており、この鉄道より前からこの幅が使われていたと考えるのが自然です。日本の新

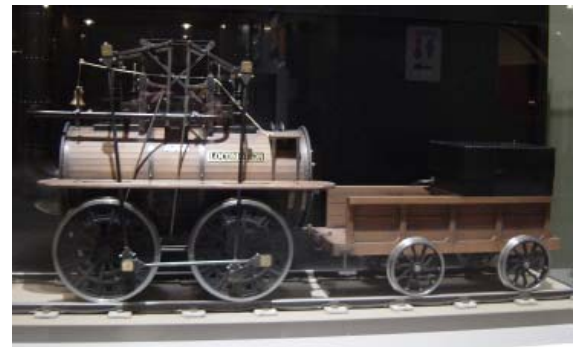


Figure 3 Replica of Stephenson's Locomotion [**]

幹線のゲージも 1435mm ですが、開発にあたっては別にこの幅にする必然性はなく、それまでの日本の在来線のゲージである 1,067mm (狭軌)より広く高速鉄道開発に有利なゲージを検討したものの、結局、英国を始め広範囲に使用されていた 1435mm を採用したとのこと。このように新しい概念で物を作るとき、寸法などの規格を決めるにあたっては、意外にもそれまでに存在していたものの寸法が基準となることがほとんどです。この Stephenson の軌間のルーツを求めて世界中を精力的に回っている人が、日本にいます[9]。

なお、前述のゲージ 1435mm と 1422mm, 1067mm は英国で生まれた単位系であるヤードポンド系に換算するとそれぞれ 4ft8.5in (8+1/2in), 4ft8in, 3.5ft (3+1/2ft) という切りの良い数値になります。家庭用冷蔵庫の冷凍室の設計温度が -18°C であることが多いですが、これは華氏 0°F であり、火力発電所の蒸気条件 538°C は 1000°F、市販のチーズの内容量が 225g \approx 0.5 \times 454g = 0.5 lb, 1 海里 = 1852m = 4 \times 10⁷ m / (360 \times 60 分), 即ち赤道上で 1 分動いた距離、携帯電話の距離別通話料金の境界は 160km = 100mile, JIS 規格の合板 1 枚の定尺 1.8m \times 0.9m \approx 1 間 \times 0.5 間 = 0.5 坪, など SI で表記すると端数が付くが、その規格が生まれた単位系での値を知っておくと物理量が理解しやすいものが世の中には山ほどあります。

蒸気機関車の原理と特徴 図 4 は典型的な蒸気機関車の断面図です。見るからに複雑そうですが、蒸気機関車の作動原理は大雑把に言えば次の通りです。すなわち、

- ①ボイラで燃料を燃焼させ、その熱で水を加熱・沸騰させて蒸気を発生させる。
- ②高圧蒸気と背圧(大気圧)の差によりシリンダ内

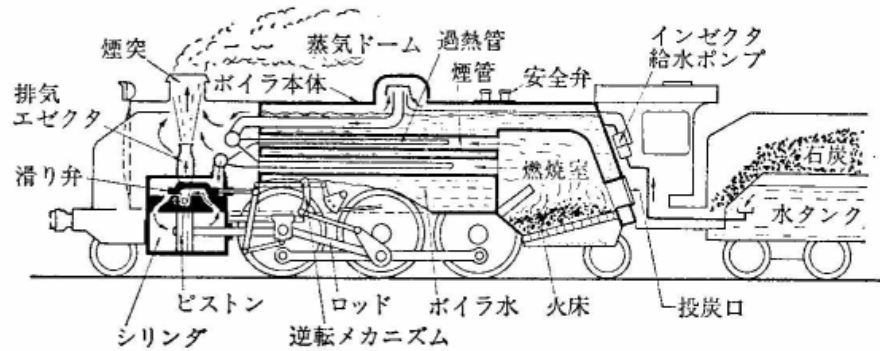


Figure 4 Cross Section of Steam Locomotive [2]

のピストンを押し、ピストンに繋がっているロッドを通して動輪を回す、
 ③ピストンを押しした後の蒸気（排気）は大気に捨てられる、
 というものです。すなわち、③を除けば原理的に火力発電所と同じであり、熱力学的にいえば「水を作動媒体とする開放型のランキンサイクル」となります。したがって、出力や熱効率を向上させる手法も原理的に火力発電所と同じです。例えば、水の蒸発量を増せば機関車の出力を大きくすることができ、ボイラでの蒸発圧力を上げたり蒸気を過熱したりして高温高压の蒸気を作れば出力、熱効率ともに向上させることができます。

ただし、火力発電所と違う制約条件がいくつかあります。第一に、鉄道車両であるがゆえに装置の寸法に大きな制限があることです。発電所であれば、出力を上げたければそれに見合った用地を確保すればよいだけの話ですが、車両は最初から幅や高さ(車両限界という)が決まっていますし、長さにしてもカーブを曲がらねばならぬため1両当たりの長さには制限が出てきます。また、線路やその下の構造物の強度制限から車両の重量も制限されます。鉄道の長所の一つである複数車両の連結(重連という)によって解決することも可能ですが、運転や保守が煩雑になります。

第二に、車両が動くことです。ボイラなどの重量物が路面から高いところにあれば機関車の重心が上がり不安定になりますし、水や燃料を入れるためその量によっても重心が変わってきます。また車両は発車すると加速減速を繰り返すため、激しい負荷変動に蒸気発生を追随させねばなりません。発電所のようにタービンをほぼ一定負荷で運転することはできません。この辺は自動車用エン

ジンと同じものが要求されますが、自動車よりはるかに大きな出力が要求されます。自動車は大型トラックでもせいぜい数百 PS 程度なのに対し、蒸気機関車は第二次世界大戦以前でも 1000PS 以上の要求が普通でした。

第三は、第二とも関連しますが、蒸気機関車で必要な動力は基本的に車両上で発生させた蒸気のエネルギーですべて賄わねばならないことです。火力発電所のように起動時に外部からの電力を借りるようなことは出来ません。給水ポンプの駆動、燃焼用空気の供給および燃焼ガスの通風装置、汽笛、照明などの電気を作るための発電機、ブレーキに必要な高压空気を作るための空気圧縮機、…、これらはすべて蒸気で駆動せねばなりませんし、その所要量は時々刻々変化するものです。

機関車用蒸気機関の構成要素 図5は熱機関としての蒸気機関車の主要な構成機器と火力発電所のそれとを比較したものです。なお、この機器構成は、20世紀初頭以降に製造された機関車でほぼ共通のものです。

動力発生装置はシリンダ・ピストン⑤であり、火力発電所のタービンに対応します。Watt の時代ならともかく、タービンでなくピストンが使われ続けてきたのは不思議に思われるかも知れませんが、タービンは高速回転するため、機関車の動輪を駆動するために高出力用減速歯車が必要になり、その製作・保守技術がなかったからと考えられています(1970年代後半に最新技術で蒸気機関車を設計しようという機運がアメリカで高まった際にも蒸気タービンの導入が検討されましたが、技術的に有利でないという結論から見送られました)。蒸気機関車では一般的にシリンダを2つとし、それぞれを車両の左右に一つずつ置いて動輪を左右

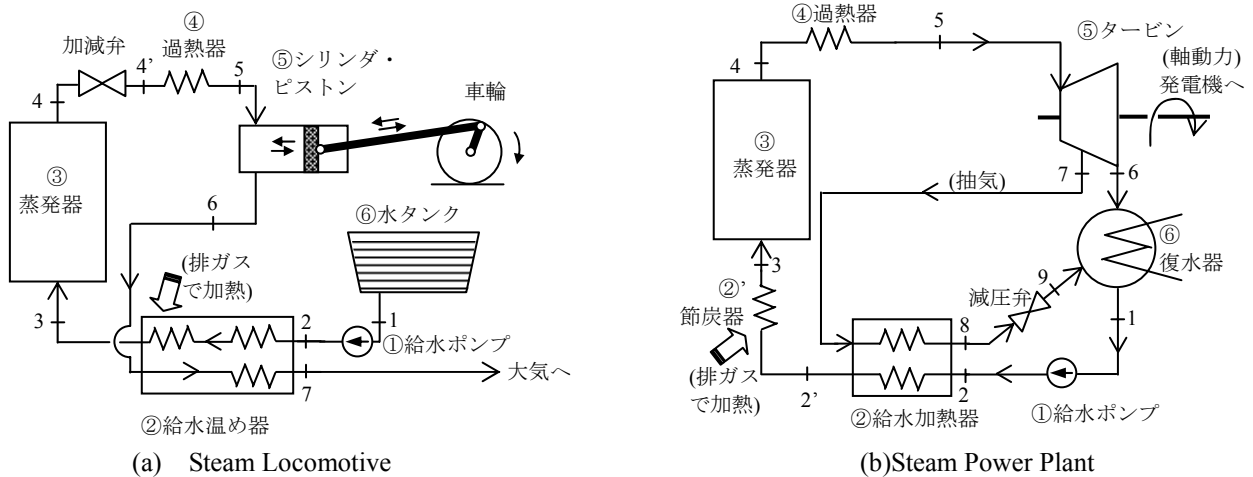


Figure 5 Basic Components of Steam Locomotive and Steam Power Plant

両側から駆動する方式が取られます (図 6). 大出力機関車や特別な場合にはシリンダを3つあるいはそれ以上に増やす場合もありますが, 日本ではごく限られた機関車 (C52 および C53 形式) しか用いられず, ほとんどすべて2シリンダでした. シリンダ内で膨張した蒸気は煙突から大気へ排出されますが, まだ圧力温度とも高いため, エネルギー変換効率と出力アップを狙い1段階で膨張させずに2段階で膨張させる方式もあり, 複式と呼びました(対比の意味で1段階膨張タイプを単式と呼ぶ). 複式は1887年にフランスのマレー(Mallet)が最初に開発したのでマレー型機関車とも言われ, 火力発電所のタービンと同様, 高圧シリンダ, 低圧シリンダとして配置されます. ただし, 日本では輸入車のみで国産車には採用されませんでした.

ボイラは, 火力発電所と基本的に同一ですが, 現在の火力発電所で主流の水管ボイラではなく, 横置き煙管ボイラと呼ばれる丸ボイラの一種が使われてきました. 図7は蒸気機関車用ボイラの断面図を示しています (注: 図4と機関車のタイプが若干異なるが実質的には同じ). ドラム缶のお化けのようなもの(ボイラ胴という)を横に寝かせた状態にし, ドラム缶の両側の蓋に穴をあけてその間に多数の鋼管を水平に渡し, さらに一端に燃焼室(火室という)を鋼材で作し, 他端に鋼材で部屋(煙室という)を作りそこに煙突を立てたものを連想して頂ければよいと思います. もちろん実際はドラム缶ではなく, 煙突室も燃焼室も鋼材を用いて一体で作りますが, この缶に水を入れ, 燃焼室

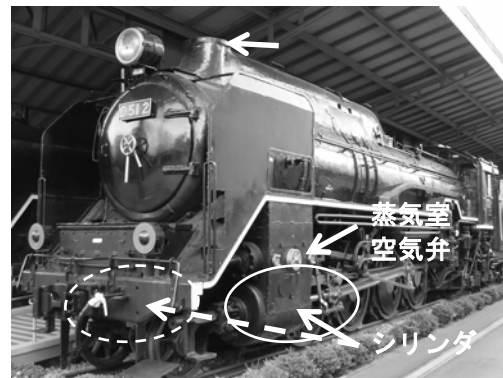
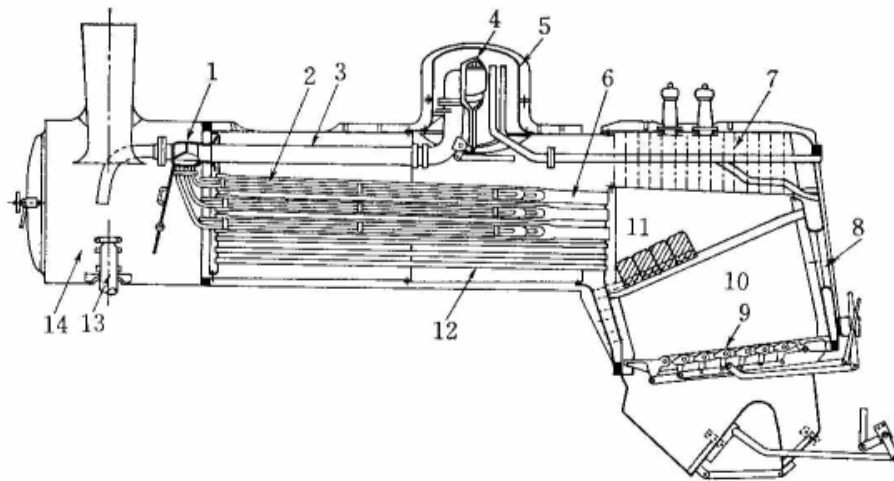


Figure 6 Two Cylinders and their Locations (Type D51) [**]

で燃料を焚くとドラム缶の中に通した水平管(煙管)を燃焼ガスが流れて水を加熱し蒸気が発生する, それが機関車ボイラのイメージです. このボイラが採用されてきたのは, 丸ボイラの中ではコンパクトであり, かつボイラ胴の中に溜める水の量(保有水量)が少なく相対的に伝熱面積が大きいので, 燃料を燃やし始めてから蒸気が出てくるまでの時間(起動時間)が早いからでした. 一方, このタイプのボイラは水管ボイラのようにあまり高圧に出来ず, 20atg (2MPa)程度が最高でしたが, 水管ボイラはスケール(湯垢)が内部に付着すると除去が困難なため煙管ボイラより高純度水の給水が必要で, 水補給が常に必要な蒸気機関車では採用不可能でした (これも前述のアメリカの最新技術による蒸気機関車設計のときに水管ボイラの採用が考えられましたが, メリットなしとの判断で見送られました).



- 1 管寄せ, 2 過熱器管,
- 3 乾燥管 (飽和蒸気管),
- 4 加減弁,
- 5 蒸気ドーム, 6 大煙管,
- 7 ステー, 8 焚き口,
- 9 火格子,
- 10 燃焼室(火室),
- 11 れんがアーチ,
- 12 小煙管,
- 13 排蒸気管(エゼクタ),
- 14 煙室

Figure 7 Cross Section of Smoke Tube Boiler for Steam Locomotive [11]

過熱器④はボイラ(蒸発器③)で発生した飽和蒸気をさらに加熱(過熱)してシリンダに送るもので、1898年にドイツの Schmitt によって蒸気機関車用のものが開発され、1910年ごろ以降に製造される機関車にはほとんど全てにこの方式が採用されました。過熱器設置のメリットは最高温度を上げることによる断熱熱落差の増大ならびにシリンダでの乾き度の増大によって不可逆損失を減らし出力と熱効率を改善するものであり、これを採用してからの蒸気機関車はそれ以前に比べ出力と燃料消費が20%程度改善したと言われています。

一方、火力発電所と異って特記すべきは、過熱器の前に加減弁と呼ばれる弁が付いていることで

す。これはシリンダに送り込まれる主蒸気量を制御するもので、自動車のアクセルに相当します。運転手(機関士または機関手と呼んだ)は運転室内左側(図8)にあるテコハンドルを操作して加減弁を開閉し車両の加速を制御しますが、ここで蒸気量を変化させれば必ず過熱器出口温度が大きく変動するはずで、これが運転の「効き」にどのように影響したのか大変興味があります。

なお、Schmitt の過熱器は過熱器管が煙管の一部に挿入される構造で、そのためその煙管だけ他の煙管より内径が大きくなっている(大煙管)という、火力発電所のボイラでは考えられない「仰天技術」が使われています。

前述の加減弁は図7に示すようにボイラ胴上部に設置され、胴内で沸騰し発生した飽和蒸気がそ



Figure 8 Driver's Cockpit of Type D51 [*] (Left Side)

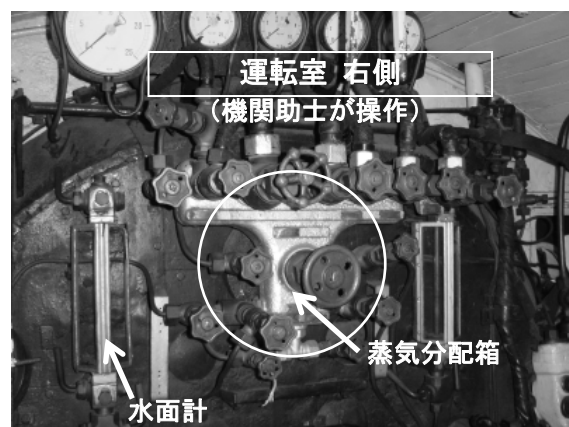


Figure 9 Driver's Cockpit of Type D51 [*] (Right Side)



Figure 10 Two Drivers for Steam Locomotive Operations [*]

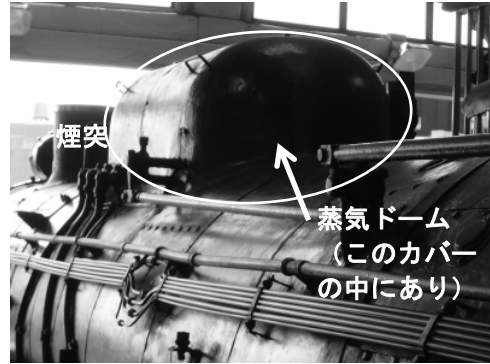


Figure 11 Steam Receiver (Outlook of Type C62) [*]

こを通過して行きますが、蒸気は通常わずかながら水液滴を同伴しており、そのままシリンダ内に入れると液滴が種々の問題を起こします。これは過熱器を設置しても同じことで、飽和蒸気への同伴液滴はボイラ出口で極力食い止めるような方策、すなわち汽水分離が図られます。汽水分離は火力発電所のボイラでも重要な技術ですが、蒸気機関車では加減弁回りに蒸気ドーム(蒸気だめともいう)と呼ばれる空間を作って汽水分離を促進します(外観で図11のように見える部分)。さらに加減弁を通った後の蒸気を乾燥管と呼ばれる部分で乾燥され過熱器に送る構造になっています。

給水温め器②は、火力発電所の給水加熱器に対応します。水タンクに溜めた水をボイラ本体に給水する前に予熱することによりボイラ本体の熱的ショックを和らげるとともに、その熱源としてシリンダで膨張した後の蒸気(排気)を使用することによって熱回収を行うものです。排気はまだ圧力・温度ともかなり高いので、給水予熱には効果的ですが、これを煙室に置くものも多く、排ガスの熱回収も兼ねることから、給水温め器は火力発電所の給水加熱器と節炭器を併せ持ったものも考えることができます。

一方、燃料を焚く側ですが、蒸気機関車は燃料として破碎された石炭(図12)を使用するため、火室内に火格子と呼ばれるものが設置されています。図13はその写真ですが、魚焼き網の化け物のようなもので、それに石炭を乗せ、下から空気を通して燃焼させます。現在の火力発電所では石炭焚きボイラのほとんどすべてが石炭を機械で微粒子化(数ミリのオーダ)にした微粉炭をバーナで噴出して燃焼させるので、この装置は蒸気機関車独特と

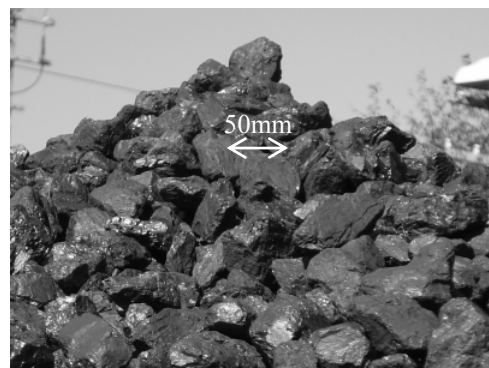


Figure 12 Coal for Steam Locomotives



Figure 13 Fire Grate of Steam Locomotive [*]

言えそうですが、かつては火力発電所のボイラも蒸気機関車と同じように火格子を使った燃焼方式が採用されていました。

特徴的なのは通風装置です。燃焼用空気および燃焼ガス(排ガス)の流動を確保するため、火力発電所ではモータによってファンを回し通風力を得ているのに対し、蒸気機関車では通風力を蒸気の排気により得ています。すなわち、排気が煙突に向かって排出する際に煙室内を高速で通過させ、

ベルヌーイの原理を利用して燃焼ガスを吸い出し通風させます(図4の排気エゼクタおよび図7の13.がこれに相当)。一方、火力発電所でポピュラーな、燃焼用空気を予熱するための空気予熱器は存在しません(後述の復水器と同様、この機器は大型になります)。

蒸気機関車ではすべての動力を蒸気で賄わねばなりません。排気を利用する装置を除けばすべて主蒸気を抽気して使用します。そのため、ボイラから運転室まで蒸気管が引かれ、そこに設置された分配器を通じて各機器へ配管されます。その分配器を蒸気分配箱(図9)といい、もう一人の運転手(機関助士または機関助手と呼んだ)が各機器への蒸気流量を弁操作によって調節します。これで操作される装置は、給水ポンプや発電機等の他に、給油機、燃焼室内の火格子の振動装置、D52やC62形式機関車に採用された自動給炭装置、さらには客車列車の暖房装置にまで及びます。蛇足ですが、昔の客車列車の暖房が蒸気によっていたため、電気機関車の時代になっても客車牽引用電気機関車では機関車内に蒸気発生器を備え、蒸気を客車に送っていました。

ところで、蒸気機関車には加減弁や後述の弁装置のように直接動力を制御するものだけでなく、種々の目的でいくつもの弁が用いられています。例えば、ボイラ破裂を防止するための安全弁、圧縮空気を所定の圧力まで下げる給気弁、ブレーキに使われる分配弁など機関車ならではの多彩さですが、その中でちょっと変わった弁があります。鉄道車両は走行抵抗が自動車等と比べ大変小さく、電車にせよ機関車にせよエネルギーを使って加速(力行という)、ある一定の速度に達した後は、かなり長い距離を惰性で走ること(惰行という)が可能です。もし蒸気機関車が力行から加減弁を閉じて惰行に移ろうとすると、そのままでは自動車のように「エンジンブレーキ」がかかってしまい、鉄道車両の長所が活かせません。この惰行時(絶気運転という)に「エンジンブレーキ」が利かないよう、シリンダ内が真空にならないよう大気開放するための弁、すなわち蒸気室空気弁(図6)が付いているのも蒸気機関車の特徴です。

この他、当然と言えば当然ですが、蒸気機関車のボイラの性能を表す指標は多くが火力発電所のそれと同じです。伝熱面積、火格子面積、火炉熱

発生率、火炉断面熱発生率、…、熱工学的鉄道ファンとしては、これらについても語りたいのですが、あまりに各論になり過ぎるので止めます。

弁装置 蒸気機関車の動力発生装置はシリンダ・ピストンです。蒸気機関車のシリンダでは、ピストン両面から交互に高圧蒸気を送り込むことで常に正の仕事が発生するようにします。これは Watt が考案した技術でしたが、当時、給気の切替えは手動で行っていました。その弁の自動切替え装置を考案したのは 1784 年、彼の会社の技師 W. Murdock であったと言われています。そのアイデ

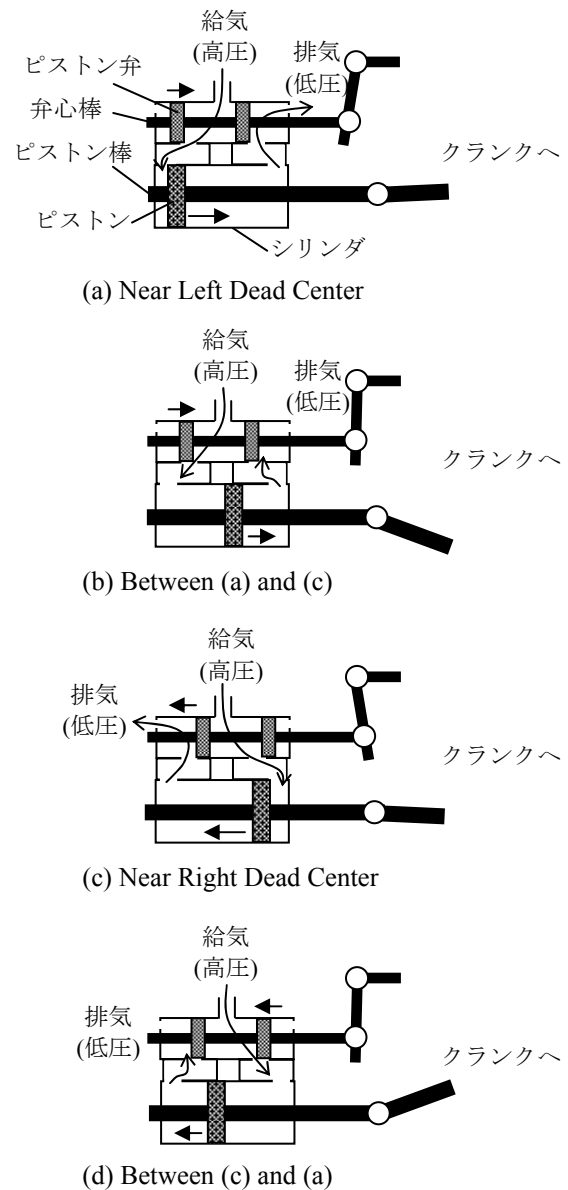


Figure 14 Principle of Steam Injection to Cylinder (Walschaet's Valve Gear)

アが R. Trevithick によって最初の蒸気機関車に応用され、G. Stephenson によって完成されます。彼の滑り弁式弁装置、いわゆるスチブソン式弁装置はその後 19 世紀末まで多くの機関車で採用されました。ただこの装置は耐久性や保守性に難があり、1880 年ごろから普及し始めたワルシャート (Walschaert) 式と言われる弁装置が開発されてからはあまり使われなくなりました。日本の国産機は 100% ワルシャート式です。図 14 にその模式図を示しますが、ピストンに並行してピストン弁と呼ばれる 2 つの弁が弁室にあり、ピストン棒の往復動にリンクして運動する弁心棒が弁室内を左右に動き、給気(高圧)側と排気(低圧)側の流路を制御することにより巧みにピストンを操るものです。すなわち、図 14(a)ではピストン左側に高圧蒸気が入り、右側は排気口に開放されるので、ピストンは右に動き始め、(b)を経て(c)になります。そこでは蒸気通路が反対になるため左に動き始めようとしており、やがて(d)を経て元の(a)に戻ります。

図 15 は弁装置の駆動によってシリンダ内で起きる行程の指圧線図(P-V 線図)を示したものです。ここで P_0 , P_1 はそれぞれ大気圧およびボイラ圧力で、 V_c および V_0 はすきま容積および行程容積と言われます。この系は以下の行程で構成されます。

- 1→2:等圧膨張 (給気口が開いた状態で高圧蒸気がシリンダ内に流入しながらピストンを押し、外部に仕事をする。)
- 2→3:断熱膨張 (給気口が閉じた状態で高圧蒸気がピストンを押し、膨張するにつれ圧力が低下、外部に仕事をする。)
- 3→4:等容膨張 (排気口が開いた状態で蒸気がシリンダ内から排出されながら膨張し、圧力が低下、仕事はしない。)
- 4→5:等圧圧縮 (排気口が開いた状態でピストンが反対方向に戻りながら、蒸気が排出され続ける。圧力差がないので仕事はしない。)
- 5→6:断熱圧縮 (排気口が閉じ、中に残った蒸気が圧縮される。外部から仕事をされる。)
- 6→1:等容圧縮 (給気口が開き、高圧蒸気がシリンダ内に流入してくる。仕事はしない。)

ただし、これは理想的な場合の状態変化であり、実際には内燃機関と同様、状態点 3 における給排気弁(ピストン弁)の開時間のオーバーラップや蒸気の慣性などにより指圧線図は太実線のようになり

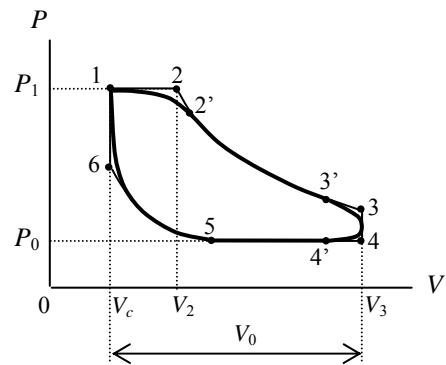


Figure 15 P-V Diagram of Cylinder System of Steam Locomotive (Cited from [1] with Minor Modifications)

ます。また、4→5の行程もピストンを移動するための仕事を外部からしてやらねばなりません。

オープンサイクルの意義 蒸気機関車が火力発電所と一番大きく異なる点はオープンサイクル、すなわち作られた蒸気はただか大気圧(飽和温度 100°C)までしか膨張できずに大気に捨てられることです。これは蒸気機関車が熱効率の面で大変損をするばかりか、走行中に燃料だけでなく水も定期的に補給しなければならないことを意味します。確かにこれは蒸気機関車の大きな短所ではありますが、実は長所でもあります。すなわち、オープンサイクルとすることにより復水器が不要になります。復水器は火力発電所でも非常に大きな寸法を占めていますが、鉄道の場合は冷却源が大気しかなく、海水を利用する火力発電所のものよりさらに大型になってしまいます。実はこれが省略できたからこそ蒸気機関が機関車の動力源として実用化されたのでした。その考案者が前述の R. Trevithick です。彼は Murdock が考案した弁装置を使って作った模型の蒸気車からヒントを得て、蒸気機関車を作ったのですが、Murdock の蒸気車がなければ、さらに Watt の蒸気機関がなければなかったかも知れない機関車でした。そして、実際に Trevithick の機関車は陽の目を見ず、その機関車を改良し、ちょうど鉄道に機関車の必要性が叫ばれた頃に登場した G. Stephenson が蒸気機関車の父として後世まで語り継がれています。「発明」とは、「発明者」とは一体何なのか考えさせられます。

燃料としての石炭 蒸気機関は外燃機関ですから、作動媒体が所定の温度圧力になりさえすれば本来

燃料は何でも良いのですが、基本的に石炭が使われています。石炭は、「燃える石」として古くから用いられてきた固体燃料で、かつては一般家庭でも風呂を沸かしたりストーブの燃料にしたり、粉にしたものを固めた豆炭(まめたん)、練炭(れんたん)という形にして調理や暖房に用いられましたが、現在では発電所の燃料や製鉄所のコークスの原料など産業界でしかお目にかかりません。

蒸気機関車で石炭が使われた理由として、固体燃料でハンドリングが楽だったからなどという人もいますが、それはおかしい話です。蒸気機関車では、ボイラに石炭を供給するために、かなり後の時代まで機関助手による投炭作業、すなわち石炭貯蔵タンクから石炭を定期的にシャベルですくい、ボイラの火室に投げ込む作業が必要でした。これが石油であればタンクから配管し、途中で弁を取り付けて流量を制御するだけで燃焼が可能です。石炭が燃料として採用されたのは、おそらく蒸気機関車が石炭の採掘がさかんに行われ燃料として最も普及していた英国で開発されたからだと思われます。これが中近東で開発されていたら最初の蒸気機関車は石油を燃料としていたかも知れません。

鉄道マニアの中には自分で超小型の蒸気機関車を所有する人がいますが、その中にはアルコールを燃料として走るものもありますし、第二次世界大戦中の日本の鉄道では、輸送用燃料にする石炭不足のため木を燃料とした時期もありました。著者の吉田は箱根越えの御殿場線を薪燃料で走る蒸気機関車の写真を見たことがあります。ただし、薪なら石炭と同じ熱量を得るのに10倍近い体積を必要とするので、燃料搭載スペースを考えただけでも現実的でないことは明らかです。

実は著者らも最近まで気がつかなかったのですが、今の若い人は産業界で石炭と関わっている人以外に石炭を見る機会がありません。かつての日本は石炭をたくさん産出していました。図12に示すように、北海道、福島、山口、北部九州などが代表的ですが、この他にも国内至るところで産出され、それらを使って蒸気機関車は走っていました。石炭はその成分や燃え方によって泥炭、褐炭、亜瀝青炭、瀝青炭、無煙炭に分類され、後者になるほど石炭中の炭素の割合が増加して燃焼時に煙の発生が少なくなる一方、揮発成分が少なくなる



Figure 16 Major Coal Mines in Japan (1960s)

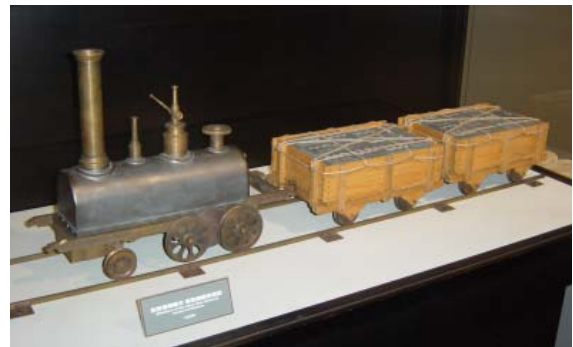


Figure 17 Replica of the First Miniature of SL in Japan Manufactured in 1855 by the Saga Clan.[**]

ため着火しにくくなります。蒸気機関車ではそのうち、瀝青炭や無煙炭が使われました。ただ、石炭は他の燃料に比べ産地による発熱量の差が大きいこと(20~35MJ/kg(低位発熱量)), 燃焼時に煙(正確には灰が含まれた煙)が出ることで、燃焼後に燃え殻が出てその処理が煩雑なこと、などから、鉄道用燃料として決してすばらしいものではありませんでした。工夫を凝らした投炭作業を行っても、燃料の発熱量不足で所定の圧力の蒸気発生に手間取り、列車が遅延するという事もありました。**日本における蒸気機関車の歴史** 鉄道ファンでなくても日本の鉄道は1872年(明治5年)10月14日に新橋(現在の日本テレビ社屋辺り)~横浜(現在の根岸線桜木町駅)間で開業したのが始まりであることは多くの方がご存知と思います。このときに

英国から輸入されたのが 150 形式蒸気機関車ですが、実はこれに先立つこと 17 年、佐賀鍋島藩では 1855 年に蒸気機関車のミニチュアが公開運転されています。おそらくこれが日本人による蒸気機関車の初めての走行であったものと思われます。そのときの機関車は現存せず、性能等も不明ですが、燃料はアルコールであったようです。なお、大阪市にある JR 西日本の交通科学博物館にその複製が置いてあります(図 17)。

日本では明治維新後の近代化政策により日本全国に鉄道が敷設されていきますが、官営鉄道の建設だけでは資金の面もあり建設スピードが上がらないということで、民営鉄道の敷設が奨励されていきます。特に日本鉄道、山陽鉄道、九州鉄道などは有名です。

鉄道敷設の話をしてしていると「伝熱」とはかけ離れるので止めますが、この民営鉄道の敷設が、鉄道関係技術が未熟で欧米諸国の技術に頼っていた当時の日本で、いろいろな蒸気機関車が輸入される原動力にもなりました。有名などころでは、ミカド型と呼ばれた日本鉄道 9700 形式機関車(アメリカ製(1897 年))、山陽鉄道 5900 形式(アメリカ製(1897 年))、九州鉄道 10 形式(ドイツ製(1899 年))、官鉄の北海幌内鉄道で義経号、弁慶号などと呼ばれた 7100 形式(アメリカ製(1880 年))などがあります。当時は蒸気機関車発祥の地であるイギリスだけでなく、フランスやドイツ、スイス、イタリアなどでも蒸気機関車が製造されていましたし、アメリカでも 1869 年に大陸横断鉄道が太平洋側まで到達しており、高性能な蒸気機関車が製造されていました。

日本の蒸気機関車が国産化されたのは、日清戦争の前年の 1893 年で、前出の R.F. Trevithick の指導により 330PS の機関車 860 形式が官営鉄道の神戸工場で製造されました。このように、最初のころは官営鉄道や民営鉄道の鉄道工場で製造されていた、というよりそういうところでしか製造できなかったのですが、だんだん鉄道会社以外の会社がビジネスとして製造するようになってきます。今はありません(川崎重工業に吸収されています)が、鉄道マニアなら誰もが知っている「汽車製造会社(後の汽車会社)」はそのような中で 1896 年に設立された会社で、1901 年に最初の蒸気機関車を製造しています。それは台湾向けのものであり、



Figure 18 First Japanese Locomotive manufactured in Japan (Type 230) [**]

最初に日本国内に納めたのは 1902 年に製造された官営鉄道 230 形式からで、前述の交通科学博物館に 233 号機(1903 年)が保存されています(図 18)。当時の国産というのはまだ外国の機関車と同じか類似のものを元図面を参照しながら製造するという、今で言えば「技術提携」のようなものでした。蒸気機関車は多くの鋼材を使いますが、その鋼材は 1901 年に官営八幡製鉄所の高炉が稼働し始めたことにより国産化の条件が整ってきます。18 世紀の蒸気機関車開発の時代と違い、熱工学などの学問に裏打ちされた理論的検討も可能になり始めるとともに、工作技術の進展と相まって、国産機関車製造の機運が高まっていきます。折しも 1906 年に公布された鉄道国有法により、前述のような多くの民鉄が国鉄(以下、国有鉄道の意味で使用)に繰り入れられます。その際、各民鉄が有していた輸入機関車の形式がまちまちで運用や保守に困るため、それらに代わる標準機の導入が必要となったことも国産化にとって追い風となります。そのような中、国鉄が自主設計により製造した最初の国産機が 1911 年(明治 44 年)の 6700 形式でした。しかし一般的には、その 2 年後の 1913 年(大正 2 年)に初めて作られた 9600 形式蒸気機関車(図 19)が本格的な初めての国産車とされているようです。これはその性能が当時輸入されていた高性能な外国製機関車に匹敵するものであったためです。国鉄(と機関車メーカー)はその後も日本の発展とともに高性能な蒸気機関車を続々と設計、製造し続け、蒸気機関車の黄金時代を築いていきます。

主なものを挙げると、貨物用の 9600 形式と時をほぼ同じくして製造された旅客用機関車 8620 形式、大正 8 年に製造された高速旅客用機関車で特急「燕」やお召し列車を引いた C51 形式(1919 年)、



Figure 19 Front View of Steam Locomotives (Type C11, 9600, D51) [*]

強力貨物用機関車 D50 形式(1923 年), 昭和に入り, アメリカで多数採用された 3 シリンダ方式を取り入れた大型旅客用機関車 C53 形式(1928 年), 国鉄の標準機とも言われた貨物用 D51 形式(1936 年, 図 19), 旅客用 C57 形式(1937 年), C58 形式(1938 年), C59 形式(1941 年)などでしょう。

なお, ここで貨物用, 旅客用という言葉を使いましたが, 同じ性能のボイラで蒸気機関車を作る場合, 貨物用はスピードより牽引力を重視するため動輪を小さめにして数を増やし, 旅客用は牽引力よりスピードを重視するため直径の大きな動輪にしてその数を減らす設計がなされました。上記の機関車はすべて貨物用が動輪 4 つで旅客用が 3 つです。国鉄では機関車形式の呼び方として, 冒頭に動輪数(軸数)をアルファベットで表記します。A, B, C, D, …, は, 動輪がそれぞれ 1, 2, 3, 4, …, 個(軸)であることを示します。この規則は今でも使われています。例えば C51 とは動輪が 3 つの蒸気機関車で, DD51 とは動輪が 4 つのディーゼル機関車, EH200 とは動輪が 8 つの電気機関車のことです。アルファベットの後の数字の付し方にも規則がありますが, これ以上は本稿と関係ないので止めます(このため鉄道マニアは国鉄関係者と同じように形式名だけで機関車の仕様がわかります)。

ところで, 日本は 1941 年(昭和 16 年)暮れからいわゆる大東亜戦争に突入しますが, すべての鉄道事業は「戦時体制」の名の下, 戦時物資輸送の確保と物資不足への対応が至上命令となります。

蒸気機関車も貨物輸送量の増加対応のために増備されますが, 既存形式 D51 など材料を節約したり代替材料にするなどの「減量」製造を余儀なくされ, さらに戦時設計車として D52 形式(1943 年)が製造されます。この D52 形式機関車は戦時体制における極限設計を目指したものでしたが, それが原因でボイラの破裂事故を起こしたりしたものの, 結果的にこの機関車で生まれた技術がその後の機関車設計はもとより, 広く鉄道車両設計手法の発展に大きく寄与したことは大変皮肉です。

戦争が敗戦で終わり, 戦時設計や製造による耐久力不足や戦時中の酷使で走れない蒸気機関車が多く残りました。また, 貨物輸送が激減して D51, D52 などの機関車が余る一方で, 買出しなどの旅客需要が増加していき, 旅客用の蒸気機関車が不足しました。そのような戦後の混乱期に設計されたのが旅客用 C61 および C62 形式であり, D51, D52 形式機関車の部品が数多く流用されました。しかしながら, 戦後の国鉄はこれ以上新しい蒸気機関車を作ろうとはしませんでした。結局, 幹線の交通ネックである急勾配区間(具体的には奥羽本線の板谷峠)への対応のため作られた機関車 E10 形式(1948 年)が最後の新設計機関車となりました。

1949 年に国鉄は国営鉄道から日本国有鉄道公社, いわゆる国鉄に変身します。国鉄は無煙化政策, すなわち幹線の電化と非幹線のディーゼル化により蒸気機関車を廃止していきます。蒸気機関車の製造も 1950 年が最後となり, それ以降は前述

Table 1 Performances of Major Steam Locomotives made in Japan [4]

| 形式 | 製造年 | 特 徴 | 出力 PS | 動 輪 数 | ボイラ 圧力 atg | 重量 ton | 出力/重量 比 PS/ton |
|-------|---------------|-----------------------------------------------------------------------|----------|-------------|------------------|-----------|----------------------|
| (150) | (1871) | (1872年の新橋～横浜間開業のために英国から輸入した機関車) | (240) | (2) | (9.8) | (21.7) | (11.1) |
| 9600 | 1913～ 1926 | 日本発の本格的国産機（貨物用） | 870 | 4 | 13 | 60.4 | 14.4 |
| C11 | 1932～ 1947 | 幹線用の中型機関車(旅客用) | 610 | 3 | 15 | 66.1 | 9.2 |
| D51 | 1936～ 1945 | いわゆるデゴイチ、標準機と言われる大型機関車（貨物用） | 1280 | 4 | 15 | 78.4 | 16.3 |
| C58 | 1938～ 1947 | 標準機と言われる地方線用万能機（貨客両用） | 880 | 3 | 16 | 58.7 | 15.0 |
| D52 | 1943～ 1946 | 戦時設計の幹線用大型機関車（貨物用）、自動給炭機など新技術を導入 | 1660 | 4 | 16 | 85.1 | 19.5 |
| C62 | 1948～ 1949 | 戦後作られた幹線用大型機関車（旅客用）、種車はD52（種車：元の車両の一部または大部分を使って新しい形式の車両を作る際の、元の車両のこと） | 1620 | 3 | 16 | 88.8 | 18.2 |

Table 2 Performances of Major Diesel and Electric Locomotives made in Japan [3]

| 形式 | 製造年 | 特 徴 | 速度制御方式 または電源方式 | 出力 | 動 輪 数 | 重量 ton | 出力/重量 比 PS/ton |
|-------|-----------------|----------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------|----------------|----------------------|
| DD13 | 1961～ 1967 | ヤードでの入替用ディーゼル機関車(ヤード：貨車を行先別の列車に並べ替えるための敷地) | 流体(トルクコンバータ)式 | 500PS | 4 | 56.0 | 8.9 |
| DF50 | 1958～ 1963 | 幹線用電気式ディーゼル機関車(ディーゼルエンジンで発電機を回し電気モータを駆動、旅客用) | 電気式 | 600kW(816PS) エンジンは 1060～1200PS | 6 | 81.0 | 10.1 |
| DD51 | 1962～ 1978 | 国鉄時代の代表的な幹線用中型ディーゼル機関車(旅客用) | 流体(トルクコンバータ)式 | 1000～1100PS | 4 | 84 | 12～13 |
| DF200 | 1992～ | JR化後発の大型ディーゼル機関車（貨物用） | 電気式 | 1920kW(2610PS),エンジンは 3400～3600PS | 6 | 96 | 27 |
| EF58 | 1952～ 1958 | 国鉄時代の代表的な直流電化区間用電気機関車（旅客用） | 直流式 | 1950kW (2650PS) | 6 | 115 | 31.3 |
| EF66 | 1966～ (1975) | 日本最大の幹線用直流電化区間用電気機関車(貨物用) ,JR化後も製造継続 | 直流式 | 3900kW (5300PS) | 6 | 100.8 | 52.6 |
| EF81 | 1968～ | 国鉄時代の代表的な交直流電化区間用電気機関車（貨客両用） | 交直流式 | 2550kW(DC), 2370kW(AC) | 6 | 100.8 | 34.4 32.0 |
| EH500 | 1997～ | JR化後初の大型電気機関車（貨物用）,通称「金太郎」 | 交直流式 | 3400kW(DC), 4000kW(AC) | 8 | 134.4 134.4 | 45.9 54.0 |

のD52形式など幹線用大型機関車が線路規格の低いローカル線区に入れるよう改造し、それに新形式を与えるに留まります。こうやって生まれたのがD60、D61、D62、C60形式などで1950年から1961年頃にかけてのことです。1964年10月1日には東海道新幹線が開業します。新幹線生みの親としてあまりにも有名な元国鉄技師長の島秀雄氏はC10、C11、C12、C54、C55、C56、C57、D51形式の

蒸気機関車の主任設計技師でもありました。日本の蒸気機関車の父とも言える彼の新幹線での名声は、蒸気機関車時代の終焉を象徴していたとも言えるようです。

さて、電化の進展とともにローカル線に追いやられた蒸気機関車は、ディーゼル機関車の完成、そしてモータリゼーションによるローカル線の凋落によってさらに行き場がなくなります。新幹線



Figure 20 Early Developed Electric Diesel Locomotive Type DF50 [**]

が博多まで延伸される 1975 年には蒸気機関車が牽引する列車が完全になくなりました。そして、1976 年 3 月 2 日には室蘭線追分駅において入れ替え機として使用されていた 9600 形式蒸気機関車が現役を引退し、日本から蒸気機関車が消えました。日本の SL の歴史は 103 年余りで幕を閉じたこととなります。

なお蒸気機関車の運命は世界中同じで、現在も現役で本格的に蒸気機関車を走らせているのは中国などごく一部になりました。中国に世界中の SL 好きの「鉄ちゃん」が集まっている映像を最近良く見かけます。

蒸気機関車の性能 では、その性能はどの程度だったのでしょうか。表 1 および表 2 は、国産の代表的な蒸気機関車およびディーゼル機関車と電気機関車の性能をそれぞれ示したものです。こうやってみると、我々が考えているほど蒸気機関車は性能的に劣っているとは言えないものです。1960 年代に非電化幹線で特急列車牽引まで任されていた DF50 型ディーゼル機関車 (図 20) など出力は 9600 形式蒸気機関車にも及びません。後述する DD51 でも D51 蒸気機関車より「非力」です。著者らは特に自分たちの体験から「汽車は遅い」というイメージがありますが、必ずしもそうではなさそうです。1956 年から運転された東京～博多間約 1200km を走る寝台特急「あさかぜ」が山陽本線や鹿児島本線が電化されていなかった当時から 17 時間 25 分で両都市を結んだことを考えれば、それは理解しておくべきでした。ちなみに、表定速度(距離を停車時間を含む所要時間で除した平均速度)は 68.7km/h で、現在でもこの速度が出せ

Table 3 Changes in Boiler Pressure and Power of Steam Locomotives [4]

| 製造初年 | 形式名等 (製造国) | ボイラ圧力 atg | 過熱式 | 動輪出力 PS |
|--------|----------------------|-----------|-----|---------|
| 1825 | Locomotive 号 (英) | 1.7 | × | — |
| 1829 | Rocket 号 (英) | 3.3 | × | 100 |
| 1834 | Norris 型 (米) | 4.2 | × | — |
| 1848 | リバプール号 (英) | 8.4 | × | 400 |
| 1867 | America 号 (米) | 8.5 | × | 300 |
| 1870 | Stirling 形 (英) | 9.8 | × | 490 |
| 1883 | Dean 形 (英) | 11.2 | × | 420 |
| 1887 | Malett 型 (仏) | 12 | × | 150 |
| 1880 | Teutonic 型 (英) | 12.3 | × | 570 |
| 1893 頃 | No.999 (米) | 12.7 | × | 860 |
| 1901 | ニュージ Q 形 (英) | 14 | × | 1120 |
| 1906 | Garratt 型 (英) | 13.7 | × | 410 |
| 1911 | 6700 形 (日) | 13 | × | 470 |
| 1912 | K3 形 (米) | 14.1 | ○ | 2330 |
| 1912 | E 形 (ソ) | 12 | × | 1920 |
| 1913 | 9600 形 (日) | 13 | ○ | 870 |
| 1914 | Mallet Triplex 型 (米) | 15 | ○ | 4310 |
| 1919 | 旧満州 Mikai 形 (米) | 13.4 | ○ | 2170 |
| 1921 | Pasisi 形 (満) | 14.1 | ○ | 2020 |
| 1921 | 231B 形 (仏) | 17 | ○ | 1850 |
| 1923 | D50 形 (日) | 13 | ○ | 1280 |
| 1925 | 01 形 (独) | 16 | ○ | 1930 |
| 1925 | 241A 形 (仏) | 17 | ○ | 1980 |
| 1926 | 9000 形 (英) | 15.5 | ○ | 4300 |
| 1936 | D51 形 (日) | 15 | ○ | 1280 |
| 1937 | C57 形 (日) | 16 | ○ | 1040 |
| 1941 | 4000 形 Big Boy (米) | 21 | ○ | 6020 |
| 1943 | D52 形 (日) | 16 | ○ | 1660 |
| 1959 | 前進形 (中) | 15 | ○ | 2920 |

注)日…日本, 英…イギリス, 仏…フランス, 独…ドイツ, 中…中国, ソ…旧ソ連

ない特急は日本中いたるところにあります。

一方、表 3 は日本を含む世界の主な機関車を年代別に示し、ボイラ圧力と出力の変遷をみたものですが、開発当初は飽和式であったため高圧化(=蒸発温度の高温化)が進み、Schmitt の過熱器が開発された段階で高圧化が鈍化し、その後は蒸発量の増大と蒸気の有効利用で対応していったというのが機関車高出力化の傾向のようです。なお、ボイラの高圧化については、日本では 16atg 以上に圧力を上げる試験を経て 16atg に落ち着いたこと、海外では米英で 20～21atg に達したものの、他の国々の大部分は日本と同程度圧力の蒸気機関車が設計上妥当であるとして製造されたことを述べておきます。

大出力蒸気機関車の頂点は 1941 年にアメリカ

で製造された 4000 形機関車（通称ビッグボーイ）で、6020PS という超高出力を誇りました。日本の最大出力蒸気機関車 D52 形式(1660PS)の 3.6 倍、最新鋭の大型電気機関車 EH500(交流時)と比較しても 1.1 倍です。この機関車は Union Pacific 鉄道(1,435mm ゲージ)で動いていたものですので、ボイラ寸法を大型化して蒸発量(=出力)を増大し難い日本の鉄道事情(1,067mm ゲージ)と単純には比較できませんし、旧満州鉄道(1,435mm ゲージ)用に日本が製造したパシナ形蒸気機関車(1934 年)でも 2,700PS であったことを考えると、技術力の差というより鉄道需要や設計に対する考え方の差と考えた方が良くと思います。いずれにしても蒸気機関車の力強さを認識せざるを得ないデータです。

一方、エネルギー変換効率の点からはどうだったのでしょうか。電気機関車が 80%程度、ディーゼル機関車が 30%程度に対して、蒸気機関車は 10%程度と言われています。後述するように、この効率は諸条件で大きく変わるものですが、一応の目安にはなるものです。電気機関車の場合、火力発電所での熱→電気の変換の際の熱効率が 40%程度と考えれば、ディーゼル機関車と大差ありません。それに比して、蒸気機関車の熱効率 10%程度というのは明らかに悪過ぎます。すなわち、蒸気機関車は地球温暖化や省エネルギーを叫ぶまでもなく燃料代がかさんだのです。これに水の補給や運転操作の難しさなどを考えれば、他の機関車が出現してきた時点で蒸気機関車には勝ち目がありません。

実は、本稿を執筆するにあたり、国内外の種々の機関車の熱効率を調査しようとしたのですが、いろいろな書物を見ても、関係者に聞いてもわかりませんでした。1932 年に発行された「最新 機関車の構造と理論」という本[19]の 115 ページにも「飽和蒸気機関車にありては大体 9~12%、過熱蒸気機関車は従来の試験成績によると 10~14%の範囲である」との記述がある程度で、個々の機関車に対する情報は得られませんでした。それではと、せめて過熱蒸気温度がわからないか、と調べてみましたが、これも「350℃~400℃の範囲である」としかわかりませんでした。これでは S L を設計した関係者から情報を頂くしか方法がありませんでした。

が、ここで大事なことに気がつきます。すなわち、熱機関に対しては既に熱力学的な考察が可能であった 1910 年代以降においてさえもそれらの情報収集が困難なこと自体が、鉄道車両用原動機としての蒸気機関の特徴を示しているということです。実際の設計や運転にはおそらく理論熱効率なるものをそこまでして計算する必要はなかったということでしょう。それは、不可逆過程が多く存在するため実際の熱効率を測定しないと意味がないことや、原動機の熱効率を知ることよりボイラ効率や機械効率などをすべて考慮した総合効率で考える必要があること、さらには負荷変動の激しい原動機では全負荷時の熱効率の優劣はあまり意味がないこと、また種々の機器を主蒸気によって駆動する以上、動輪(シリンダ・ピストン)以外による蒸気消費が無視できず、しかもそれが運転条件によって大きく異なること、そして投炭作業を行う機関助手とシリンダへの蒸気供給制御を行う機関手の技量差によって同じ区間を運転しても燃料消費量が大きく変わること、などがその理由でしょう。蒸気機関車の石炭消費量は 1km 走行あたり 10~20kg[4]、あるいは D51 が 40kg(梅小路蒸気機関車館の展示)などという大雑把な情報しかないことや、蒸気機関車に関する多くの書物では「蒸発圧力を高圧に上げて理論どおりに燃料は節約できない」などの表記があることも、それを裏付けているようです。そういえば、かつては自動車のカatalogにもエンジン性能曲線が載っており、そこに燃料消費率(g/PS/hr)という、一応熱効率に対応する物理量も掲載してありましたが、今では見ることがなく、10 モード燃費(=km/L)や 15 モード燃費という非常に大雑把な、しかし実際には経済性の目安として分かりやすい物理量に置き換わっています。しかも我々は、これらの値があくまで目安であり、その優劣が実際の燃費の優劣に直結せず、むしろ運転者や道路条件によって決定されることを経験的に知っています。

蒸気機関を熱機関として学問的に見ていると、つい熱効率という概念だけで見えてしまいますが、鉄道についてはやはり出力、牽引力、重量(質量)、実際の動力費、運転・保守のしやすさなどの性能を総合的に判断する必要があることを、蒸気機関車は教えてくれます。

ところで、表 1 および表 2 には機関車の出力だ

けでなく出力重量比も示していますが、ディーゼル機関車 DD51 を蒸気機関車 D52 と比較すると、前者は重量がほぼ同じにもかかわらず出力が後者の 0.7 倍しかなく、これから見る限りでは蒸気機関車のほうが良好です。実は国鉄の無煙化ではディーゼル機関車の開発が大きな問題となりました。ディーゼル機関は蒸気機関やモータと異なり、ある回転数(アイドリング回転数)以下では使用できず、車両の原動機として使うには停止状態から徐々に加速するための変速機構が必要になります。その主な方法として、(a)小型自動車に使用されるようなクラッチ板を断続させて車輪に動力を伝える方法(機械式)、(b)トルクコンバータと呼ばれる流体変速機を介して車輪を回す方法(流体式)、(c)ディーゼル機関で発電機を回して発電し、その電力でモータを回す方法(電気式)、の三つがあります。(a)は機関車のように出力が大きい車両には向かず、(c)は重量が大きくなるため、線路規格が低い非幹線への対応として(b)を採用する必要があったのですが、大容量トルクコンバータの開発が困難を極めました。DD51 はその目処がようやくつき、中型の流体式ディーゼル機関車として 1962 年に投入されたものですが、製造初年から 40 年以上経た現在でも日本の至る所で見かけます。蒸気機関車は同程度の距離を走るためにディーゼル機関車の数倍の重量の石炭と水を積みねばならないことを考えれば、ディーゼル機関車のこの程度の性能がそれまで製造された蒸気機関車の性能と同程度であったと考えるべきでしょう。

3. なぜSLはなくなったか

では、改めて“SLはなぜなくなった”のか考えてみましょう。それは鉄道が電化したからであり、電車はエネルギー変換効率が高いから？ それも確かに答えの一つではあるでしょう。馬力が弱いから？ これも間違いではありませんが、今まで見てきたSLは非力でないものも多くありました。

その答えとして、SLは火力発電所と一緒に抱いて走っていたようなものであり、構造が複雑でかつ運転が大変難しかったからと筆者らは考えています。ここでは蒸気機関車がなくなる原因となった構造や運転に関する問題点のいくつかを取り上げてみたいと思います。

前に蒸気機関車はオープンサイクルであると述

べましたが、これに起因する構造的な面倒（敢えて欠陥とは言いません）に“水補給”があります。有名な D51 形式で見ると、平均的な走行時に 1km 当たり約 100L の水を必要としましたから、炭水車 20m³ の水タンクを満タンにしても連続して走れる距離は高々 200km、東京-静岡間程度でした。

燃料である石炭も機関助士の投炭作業、機関車への補給、地上側での運搬、貯蔵と他の機関車に比べ大幅に人・時間・場所を必要とし不利でした。特に夏場の焚火作業、いわゆる「カマ焼き」が過酷を極めた重労働であったことは有名です。

乗務員の窒息事故も軽重含め頻発していました。特に 1928 年の北陸本線・柳ヶ瀬トンネル（現存せず）内での事故は、重量貨物を引いて登坂中の D50 形式が登り切れず停止、機関助士らが窒息死するという悲惨なものでした。

運転の難しさは電気・ディーゼル機関車の比ではなく、機関士と機関助士の技量や努力で機関車の発揮できる性能や消費燃料に大差が出ました。この点は熱工学、いや機械工学を学んだ者にとって興味の尽きない例が無数にあります。一例を挙げれば、登り勾配で重量列車を始動するため、アクセルに当たる加減弁とギアに当たる逆転機（これで弁の開度を調整出来ます）のハンドルを微妙に調節し、動輪が滑る限界で砂を撒くといった操作で設計値を上回る牽引性能を引き出すこともよくあったようです。これらの操作により、結果的にシリンダ内の圧力や温度、或いは車輪と線路の摩擦といったものを経験的にしかも見事に最適制御していた事実は驚嘆に値します。この例からも解るように蒸気機関車運転は非常にやり甲斐のある仕事でもあったことは関係者の一致した見解です。さて、話は蒸気機関車がなくなる理由から脱線しかけたので本題に戻します。

保守面でも大変苦勞の掛かる車両でした。ほぼ 2 日毎の仕業検査から数年に一度、解体して行う全般検査まで数々の検査があるのは最新の新幹線車両に至るまで同じですが、蒸気機関車固有の困難な作業を伴う検査が幾つもありました。その内作業員にとって最も過酷な作業は、約 11000km (40~60 日ピッチ) の走行毎に行われる「無火検査」と呼ばれるものであったようです。この検査は文字通りボイラの火を落とし、煙管の煤を一本ずつ払い除くと共に、ボイラ内の湯垢やスケールを洗

い落とす洗缶作業を伴うものでした。狭く汚い劣悪を極める環境でこの作業に従事した作業者が、誰よりも近代化を望んでいたことは想像に難くありません。ここまで述べた事柄の他にも、排煙による乗客への被害の頻発や沿線火災への潜在危険の存在、脱線転覆事故での蒸気によるやけどや火災等二次災害の発生といった蒸気機関車特有の安全におけるマイナス面がありました。このため蒸気機関車を他の機関車や電車等で代替していく努力、いわゆる無煙化が特に昭和30年代以降、強力に推進されていくことはほぼ全ての人々（機関車メーカーとマニア以外？）から歓迎されていたと言えます。

4. 蒸気機関車と鉄道

鉄道システムの一部としての蒸気機関車は既に消え去りました。それは路面電車が存続の危機に瀕しながらも生き残り、都市交通システムの一つのバージョンとして活路を見出したのとは大違いでした。が、それはこれまでに見てきた通り歴史の必然でしょう。蒸気機関車は終焉近くになって各地で存続運動や保存運動が起きました。京都市にあるJR西日本の梅小路蒸気機関車館は1972年に鉄道100周年を記念して設立されましたが、その頃繰り広げられた保存運動が当時の国鉄を動かしたと言っても過言ではないでしょう。しかし当時(1960年代)の国民の声は「国鉄は早く蒸気機関車を廃止して無煙化を急げ」が主流でした。敢えて誤解を恐れずに言えば、当時存続を唱えていた人たちは既に快適な電車に乗って生活していた都会在住の人々であり、なかなか無煙化の恩恵に浴せない人々にとっては迷惑なものでした。実際、著者らには子供のころ、親に連れられて鉄道に乗って隣町まで行くのに電車に乗れると思っていたら、蒸気機関車が引く茶色い客車でがっかりし、遅くてしかも煙が客室に入ってくるので慌てて窓を閉めたという経験や、鉄道をまたぐ跨(こ)線橋を渡っていたら蒸気機関車がやってきて煙を全身に浴び、大変怖かったという経験があります。同時に、無煙化が進み煙で汚れずに済む電車(電気機関車)やディーゼルカー(ディーゼル機関車)が蒸気機関車に置き換わっていく様子を目の当たりにしながら鉄道の近代化を感じ、それに心躍るものを感じていた時代があり、いつしか鉄道好き



Figure 21 A Scene of Steam Locomotive and Road Crossing and Gatekeeper in early 1960s

になっていったような気がします。

現在、著者らは鉄道記念物として蒸気機関車を見るとき、ドキドキするものを感じます。それはこのような精巧な仕組みの機械が設計され、製造され、運転され、保守されていたことに対する一種の畏敬の念を感じるからであり、同時に機械屋としての誇りを覚えるからであります。これが復活して日本の鉄道に走り回ることを望むことは決してありません。マニアは自分が楽しければそれでよいし、嫌になればその趣味を止めればよい、しかし機械を設計する者は、その機械が人間や社会に及ぼす影響を常に考えておくべきであり、そうすれば蒸気機関車復活などという願いは慎むべきであると思うからです。とはいえ、蒸気機関車が人間社会の発展に偉大な功績を残したことは間違いなく、この事実を後世に伝えるために蒸気機関車を動態保存したり、公園に置いたりすること



Figure 22 A Kid playing with his Railway (1960s)

は大変重要なことと信じているのもまた事実です。

ここで蒸気機関車が社会に貢献した具体例として、その牽引した列車の話題を挙げることにします。東海道本線（東京～神戸）が全通したのは新橋～横浜開業から17年後の1889年で、この時の各駅停車で直通する列車はイギリス製の機関車により東京～大阪間を約20時間で結びました。それよりほんの20年前までは歩いて10日以上かかっていたところが1日弱に縮まったのですから、その効果や影響は東海道新幹線が開通した時より遙かに大きかったと思われます。東京～大阪間はその後の蒸気機関車や地上設備の発展により少しずつ時間短縮され1896年の急行列車の新設で約16時間半に、1921年の新逢坂山トンネルの開通で特急列車（後の富士）が11時間弱で結ぶまでになりました。その頃の特急牽引に使われていた主力機関車は、当時の狭軌では世界最大の直径1750mmの動輪を有する名機C51形式でした。1930年にはこのC51形式が東海道本線の勾配区間や曲線区間で出し得る最高速度を積み上げた綿密な計画の基に、超特急「燕」が新設され東京～大阪を8時間20分とそれまでより一挙に2時間半短縮することに成功しました。この「燕」は当時の箱根越え（現在の御殿場線）のため後ろから押し上げる補助機関車を走りながら切り離したり、給水時間を惜しんで機関車の後ろに給水タンク車を繋いだり（これにより国府津～名古屋間300kmをノンストップで走破）といった究極の努力により成し遂げられた列車でした。その後1934年の丹那トンネル開通で更に20分短縮された到達時分8時間は、東海道本線全線が電化され、蒸気機関車の牽引が無くなる1956年まで20年以上も破られることの無いレコードとなりました。特急「燕」は太平洋戦争後その名を「つばめ」と変え、牽引する機関車もC51→C53→C59→C62→電気機関車と変えながら電化を経て、東海道新幹線の開通する1964年まで東京～大阪間の主力列車の地位を保ち続けたわけです。

蒸気機関車が全廃された1976年までの約10年間、その牽引する旅客列車は激減し、優等列車も数えるほどになりました。その中で日本最大の旅客用蒸気機関車C62形式が本州最後の活躍の場とした呉線で1971年まで牽引した急行「安芸」や、1972年まで重連で引いた函館本線の急行「ニセ

Figure 23 Time table in 1967 [18]

コ」を強く記憶されている方は少なくないでしょう。蒸気機関車最晩年の「安芸」や「ニセコ」は乗客輸送という本来業務よりは、終焉期の蒸気機関車を代表しその功績を改めて人々に認識させるという意味で貢献した列車であったように思われます。この急行「安芸」の運転時刻を1967年6月の交通公社時刻表から図23に抜粋してみました。

ところで、これまで本稿では「鉄道ファン」という言葉と「鉄道マニア」という言葉を敢えて混ぜて使用しました。この「道」の人間は「ファン」と「マニア」を区別したり、自分はマニアでなくファンであることを強調する人がいますが（著者らも？）、どうせ傍から見れば「同義」に違いありません。鉄道マニアと言われる人にはいくつかの「種類」があります。蒸気機関車についてもほぼ同様、大きく分けて「撮影マニア」「収集マニア」があります。前者は大井川鉄道や山口線、豊肥本線で蒸気機関車の運転日に車内外に現れて写真を撮るものであり、後者は蒸気機関車に関する部品を収集するものです。これらはある意味、一般的な鉄道マニアと変わりませんが、著者らにはSL独特のものとして、この2つの他に「回顧マニア」と呼ばれるべきものがあるように思えます。往年の峠越えで蒸気機関車が複数台(重連)で貨車や客車を牽引していた様子を撮影した現場を訪ねたり、そこに行って昔と同じアングルから撮影したりする人々です。つまり「廃線マニア」と通じるものがあります。前述の「撮影マニア」に分類してもよいのですが、ホームや線路脇に群がるマニアと異なり、山に登ったりしますし、一見「鉄ちゃん」にどことなく感じる「線の細さ」がないよ

うです。しかしやっていることは大して変わりません。おそらく、ここを読んでムツとした人、あなたはこの「道」のマニアでしょう。

Table 4 Chronological Table of Development of Steam Locomotives and Railways

| | 蒸気機関(車), 鉄道の発展 | 特徴 | その他の主な事件 |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1700 | Newcomen, 大気圧機関(英, 1712) | 世界初の実用的蒸気動力 | Celsius, 摂氏温度計(1714) 享保の改革(1716-1745) Fahrenheit, 華氏温度計(1717) |
| 1750 | Watt, 火力機関の燃料消費軽減: 特許(英, 1769) Cugnot, 蒸気自動車(仏, 1769) | いわゆる Watt の蒸気機関 フランスでは自動車発明者として有名 | アメリカ独立宣言(1776) Lavoisier, 熱素説(1789) フランス革命(1789) |
| 1800 | Trevithick, Penydarren 号(英, 1804) Fluton, 蒸気船(1807) | 世界初の鉄道用蒸気機関車 世界初の蒸気機関駆動の船 | Evans, 戻り煙道式ボイラ(1800) Trevithick, Cornish ボイラ (1802) Napoleon 皇帝に即位(1804) |
| 1825 | G. Stephenson, Locomotion 号(英, 1825) Stephenson 親子, Rocket 号(英, 1829) Norris, Washington 号(米, 1834) | いわゆる世界初の実用的蒸気機関車 前車の改良型, 後の技術標準的存在 アメリカ鉄道開業のために製造 | Carnot, 火の動力(1824) |
| 1850 | 佐賀藩, 蒸気機関車のミニチュア試運転(1855) | 日本最初の鉄道模型製作といわれる | 天保の改革(1841) Joule, 熱の仕事等量(1845) Clausius, エントロピーの概念(1854) 明治維新(1867) Babcock & Wilcox, 水管ボイラ(1867) |
| 1875 | 官営鉄道新橋～横浜間開業(1872) Malett, 複式蒸気機関車(仏, 1887) | 英国技師 E. Morel の指導 蒸気圧を 2 段階(複式)膨張させ動力を得る最初の SL, マレー型 | Otto, 4 行程ガス機関(1876) Siemens, 初の実用的電気機関車(1879) Persons, 蒸気タービン(1884) |
| 1900 | 860 形式(1893) 9700 形式(ミカド)(1897) 230 形式(1903) 鉄道国有法公布(1906) K3 形蒸気機関車(米, 1912), 国鉄車両研究会開催(1912-1922) 9600 形式(1913)・8620 形式(1914) | R.F. Trevithick 指導による初の国産 SL アメリカから輸入の大型 SL(870PS) 民間車両メーカー製造の初の国産 SL 過熱器を搭載 (以降過熱式が普及) SL の性能向上のための官民組織 初の本格的国産 SL (それぞれ貨物用, 旅客用) | 日本初の火力発電所, 東京茅場町(1887) 日清戦争(1894-1895) Diesel, 重油機関(Diesel Engine)(1899) 官営八幡製鉄所操業開始(1901) Wright 兄弟初飛行(1903) |
| 1925 | C51 形式(1919), D50 形式(1923) C53(1928), C50(1929), C10(1930), C54(1931), C11(1932), C12(1932), C55(1934), C56(1935)の各形式 D51 形式(1936), C57 形式(1937), C58 形式(1938), C59 形式(1941) Big Boy4000 形(米 1941) D52 形式(1943) C61 形式(1948), C62 形式(1948) E10 形式(1948) | 大型国産機 昭和初期の国産 SL 増備時代 国鉄の標準機ラインナップ完成 | 第一次世界大戦(1914-1918) |
| 1950 | 日本国有鉄道発足(1949) D60, D61, D62, C60 形式(1955-1961) 10 形 (独, 1956) DD51(1962) 東海道新幹線開業(1964) | ボイラ圧力 21atg, 6020PS の超大型 戦時設計, 後の性能向上技術も獲得 戦後最大級の SL 国鉄最後の新形式 SL | Nukiyama(抜山), 沸騰曲線(1934) 田熊, 水管ボイラ(1938) 第二次世界大戦(1939-1945) |
| 1975 | 山陽新幹線博多開業(1975) 国鉄 SL の運用完全廃止(1976) 国鉄民営化(1987) 新幹線 500 系 300km/h 運転開始(1996) 韓国 KTX 暫定開業(2004) | 国鉄最後の改造による新形式製造 西ドイツ最後の SL 国鉄初の幹線用 DL 国鉄室蘭線追分駅の入替用 SL 廃止(3月2日) この事実を東日本在住の人が意外に知らないの、ここに記す | サンフランシスコ講和条約(1951) 日本初の原子炉臨界, 東海村(1957) 日本伝熱研究会設立(1961) 東京オリンピック開催(1964) 第一次オイルショック(1973) ロッキード事件(1976) 第二次オイルショック(1978) |
| 2000 2006 | | | 日本伝熱学会設立(1994) |

5. おわりに

伝熱学会の会員には鉄道ファンが大変多いことを著者らは常日頃から感じています。故 小竹進先生がかつて本誌で、研究者の人間的な「個性の強さはほぼ取り扱っているエネルギーの強さに比例する」という内容の発言[5]をしておられましたが、まさに蒸気機関車は「核沸騰」現象を利用した熱機器であり、それが好きな人が本学会に多いというのは伝熱研究には「情熱家」が多いということでしょう。が同時に、鉄道システムというものが単純な物理法則だけで語れない「人の匂い」がする機械システムであることと密接な関係がありそうです。中でも蒸気機関車は産業革命がそのスタートであり、約150年にわたる長い歴史の中で鉄道システムの中核となってきました。その複雑な構造ゆえに我々の知的欲求をかき立てるとともに、設計した人間のすばらしさ、それを操作する人間のすばらしさ、そして技術のすばらしさを感じてしまうのではないのでしょうか。仮に現代の技術力で蒸気機関車を作るならば、大変高性能かつ運転が楽な機関車が製造可能でしょうが、その複雑な機構をほとんど手動で制御するからこそ魅力を感じるのでしょうか。SLマニアと違って発電所マニア[17]を作ろうとしてもなかなかできない理由がそこにあるようです。

蒸気機関車よ、永遠（とことわ）に！

謝辞

本稿を執筆するにあたり、職業能力開発総合大学の堤一郎氏に貴重な資料や情報をご提供頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

[1] 一色尚次, 内田秀雄, 柴山信三, 谷下市松, 応用熱力学, コロナ社, (1982), p154.

- [2] 一色尚次, 北山直方, 新蒸気動力工学, 森北出版, (1982), p27.
- [3] 久保田 博, 最新鉄道車両工学, 交友社, (1976).
- [4] 久保田 博, 蒸気機関車のすべて, グランプリ出版, (1999).
- [5] 小竹 進, 伝熱研究, 31,120, (1992), pp2-3.
- [6] 齋藤 晃, 蒸気機関車の興亡, NTT 出版, (1996).
- [7] 齋藤 晃, 蒸気機関車の挑戦, NTT 出版, (1998).
- [8] 佐々木富泰, 網谷りょういち, 事故の鉄道史, 日本経済評論社 (1995).
- [9] 塩津宣子, 緒方正則, 下間頼一, 日本機械学会年次大会講論(V), 06-01, (2006), pp365-366.
- [10] 田坂誠均, 伝熱, 44, 187, (2005), p29.
- [11] 谷下市松, 蒸気工学, 裳華房, (1984), p55.
- [12] 堤 一郎, 産業技術史(新体系日本史 11), 山川出版社, (2001), pp200-244.
- [13] 堤 一郎, 近代化の旗手, 鉄道, 山川出版社, (2001).
- [14] 西川兼康, 熱工学の歩み, オーム社, (1999).
- [15] 原田勝正, 日本鉄道史(刀水書房全書 53), 刀水書房, (2001).
- [16] 細川武志, 蒸気機関車メカニズム図鑑, グランプリ出版, (1998).
- [17] 吉田敬介, 伝熱, 42, 173, (2003), pp4-7.
- [18] 交通公社の時刻表, 日本交通公社, (1967).
- [19] 最新 蒸気機関車の構造と理論(上巻), 機関車工学会, 交友社, (1932).
- [20] 図説 蒸気機関車全史①, 学研, (2006).
- [21] 図説 蒸気機関車全史②, 学研, (2006).
- [22] 鉄輪の轟き(九州の鉄道 100 年記念誌), JR九州, (1989).
- [*] JR 西日本, 梅小路機関車館(京都市)にて撮影.
- [**] JR 西日本, 交通科学博物館(大阪市)にて撮影.