

ブルネルの技術史から学ぶ圧縮空気方式鉄道システム

Compressed Air Railway System Studied From Brunel's Engineer Spirit

学 高村泰広 (相馬高校), 溝上純義 (千葉大院), 正 佐藤建吉 (千葉大院)

Yasuhiro TAKAMURA, Soma High School, Graduate School of Engineering, Chiba University
Sumiyoshi MIZOKAMI, Graduate School of Engineering, Chiba University
Kenkichi SATO, Graduate School of Engineering, Chiba University

The British innovative engineer, Isambard Kingdom Brunel (1806 -1859) had developed the atmospheric railway system and serviced commercially in South West in England during the half a year in 1847 to 1848. The driving force of the railway system was based on a vacuum force produced by pressure difference between vacuum and atmospheric pressures. The system was environmental friendly because of no-smoke, no-noise, and no-spew. In the present paper, the authors introduce a similar but different railway system which runs by compressed air pressure. This project has been conducted as monodzukuri education for students of Soma High School, Fukushima. The small scale model of the compressed air railway system has produced and tested. The driving force of the system is generated by expansion force of and at a flat tube constrained tightly by two rollers. The students were devoted to study the mechanism and performance of the system. The railway system has a potential to be used in public transportation under horizontal and inclined surface and subsurface ways in future.

Key Words: history of technology, Brunel, engineer's spirit, monodzukuri, compressed air railway

1. はじめに

著者らは、イザムバード・キングダム・ブルネル (Isambard Kingdom Brunel, 1806-1859)¹⁾の技術史について研究してきた²⁻⁵⁾が、その中で着目したのは、大気圧鉄道であった。理由は、蒸気鉄道の時代に、次のような特徴を有していたからである。

①蒸気機関を駅構内にポンプステーションとして定置し、真空ポンプを駆動し、線路軌道に沿って敷設したパイプライン (チューブ) 内の空気を排気し、その圧力差 (負圧) を利用して内蔵したピストンに生じる力を、鉄道の推進力とした。

②鉄道車両に機関を搭載しないので、走行時に煙を出さない、熱水が飛び散らない、騒音が生じないなど、今日の環境影響が少ない。

③同じく理由で、重量軽減、空気抵抗を大幅に軽減した。

④さらに重要なことは、レールと車輪の摩擦力で推進する粘着式鉄道でなく、ピストン推力を利用するので、勾配がきつい登坂軌道も走行できた。

これらには、技術的に優れた先見性があり、今日でも適用したい鉄道機構である。一方、この大気圧鉄道には、次のような困難がみられた。

⑤機構上からピストン推力をチューブ内部から外部に伝達する必要があり、空気漏れシールを開閉しながら走行する必要があり、1840年代の当時では、自然素材の牛革を利用せざるを得ず、耐摩耗性に困難があった。

⑥同時に、当時は車両-駅間の通信システムがなく、いつ車両が来るかがわからず、駆動して待つ真空ポンプが多数に達し、燃料の石炭消費が増し、経済性がよくなかった。

今日では、この二つの課題は、解決できる時代背景となっている。

以上の点から、著者らは真空方式の鉄道機構について模型製作と技術開発を、技術教育と技術史教育のメニューとして取り入れてきた。この鉄道は、原理的には「圧力差」を利用するものであり、圧縮空気として大気圧以上の高压 (正圧) をチューブに供給して走行することも可能である。この方が圧力差を1気圧以上にできるので、小型化や高速化の可能性もある。また、負圧方式では、真空漏れの圧力低下が1気圧に含まれるが、正圧方式では空気漏れを圧力付加で補てんすることが可能であり、走行安定性に対策できるなどの利点がある。

以上のことから、これまで圧力差の効果について検討し⁵⁾、さらに高校生乗車して走行できる圧縮空気鉄道を製作し、実証した^{6,7)}。

本稿では、これらのことを踏まえて、圧縮空気方式の鉄道模型を製作し、走行実験を行ったので報告する。

2. 圧縮空気方式鉄道模型の設計の製作

本模型の製作は、福島県立相馬高等学科理数科生徒 (1~3年生) の課題研究活動として行った。理数科生徒は大学進学を目指しているが、この活動をとおして教科書では教えない科学や技術について学ぶことができる。課題の発見、実験装置の組み立て、測定を行い、結果の整理・考察、そしてプレゼンテーションなどを体験する。こうして、生徒の興味分野や適性を見極めた進学先の選択や職業選択という将来への展望を培うものである。モノづくり教育は広範であるが、ここでは同校生徒に対応できる模型の製作を立案した。

これまでの真空方式の大気圧鉄道の模型製作から真空漏れは、大きな性能低下を導くことが判明したので、圧縮空気方式の課題研究としては、次のような空気漏れが生じないようにチューブを可撓 (とう) 性あるプラスチック製チューブを使用することにした。さらに、チューブ内部にピストンを入れるのではなく、このチューブを2本のローラで挟み、チューブに内圧を付加すれば、ローラを押し出す、即ちローラは移動するのでこれを、鉄道の推進力とすることにした。

その概念図を図1に、写真を図2に示す。用いたチューブは、農場ハウスなどでの散水に用いるチューブ (住化農業資材製、スミチューブ、厚さ $t=0.1\text{mm}$ 、内径 $D=27.2\text{mm}$ (20A))

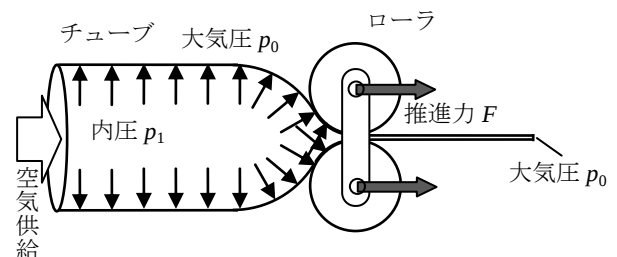


図1 推進力が発生する概念図

(ローラで拘束されたチューブに圧縮空気を供給すると、その圧力 p_1 による膨張力により、ローラが推進させる)



図2 製作した模型と実験の様子

である。これは、内圧 $p_1=0.04\text{MPa}$ (0.4 気圧) まで常用できる。ローラで挟まれると厚さは $2t=0.2\text{mm}$ で、幅 $b=43\text{mm}$ (チューブの全幅 50mm) である。ローラは水道パイプ (塩ビ製、直径 $d=25\text{mm}$) を用いた。

3. 実験

内圧 p_1 (これはチューブ内の背圧とも言える) を一定にしてチューブを膨らました時の推進力の大きさ F は、ローラ径 r の大きさに関係すると考えられる。その内圧 p_1 は、ローラで締め付けられたチューブ内壁間の隙間 c により、空気漏れ量 q が変わるので、 F は、内圧 p_1 、隙間 c 、に関係すると考えられる。図3に実験結果を示す。

図3によれば、チューブ内外の圧力差 $\Delta p=p_1-p_0=46.5\sim 48.5\text{hPa}$ (約 0.05 気圧) において、約 1.5N の推進力 F が得られている。チューブの供給口からの距離によらず、ほぼ一定となっている。

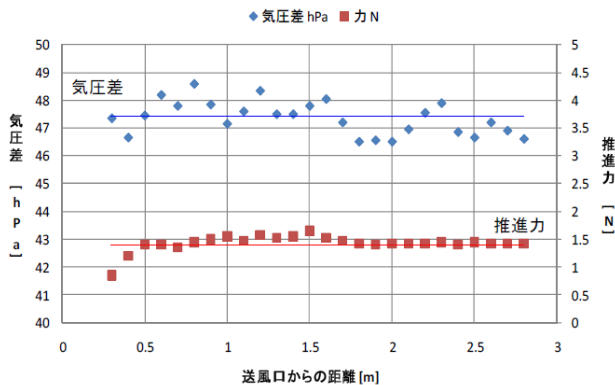


図3 実験結果 (気圧差と推進力の関係)

4. 考察

推進力の大きさについて検討する。チューブ内径の断面積 A と圧力差 Δp を基に推進力 F を求めれば、

$$F = \Delta p \times A = 47.5[\text{hPa}] \times 3.14/4 \times 27.2^2[\text{mm}^2] = 2.76[\text{N}]$$

となる。この大きさは、実験値に比べ大きい (図3)。

図2や既述したように、この機構の推進力は、チューブへの膨張力がローラに及ぼす力である。その大きさ F は図4の模式図に示すように、ローラの微小領域に及ぼす力 dP の水平成分 dP_x の総和 (積分) で与えられる。すなわち、

$$\begin{aligned} F &= 2 \cdot P_x = 2 \cdot \int dP_x = 2 \cdot \int b (p_1 - p_0) r \sin \theta d\theta \quad (\text{積分範囲は } 0 \sim \theta_0) \\ &= 2 \cdot b (p_1 - p_0) r \int \sin \theta d\theta = 2 \cdot b (p_1 - p_0) r [-\cos \theta]_0^{\theta_0} \\ &= 2 \cdot b (p_1 - p_0) R r (1 - \cos \theta_0) \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここに、 R : チューブの半径 ($=D/2$)、 r : ローラの半径 ($=d/2$)、 b : チューブの幅、 $\theta_0 = \cos^{-1}(r/(R+r))$ 。

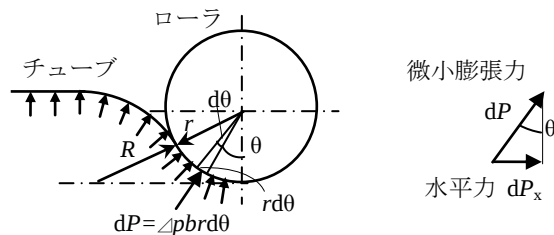


図4 膨張力の模式図

図3の条件で計算すると、 $b=43\text{mm}$ 、 $R=13.6\text{mm}$ 、 $r=12.5\text{mm}$ 、 $\Delta p=p_1-p_0=47.5\text{hPa}$ であり、 $F=2.66\text{N}$ が得られる (図5)。この値は実験結果の約2倍である。チューブの実際の膨らみは中央では図4の通り R であるが、中央から離れるとともに R は小さくなる。したがってローラがチューブから押される面積は式(1)よりも小さい。以上を考慮して、式(1)の値を1/2とすると、実験値とよく一致する (図5の $F/2$ の点線)。式(1)から、推進力 F を大きくするには、チューブ内径 D が一定 (R が一定) の場合には、ローラ径 ($d=2r$) を大きくするのがよいことが分かる。

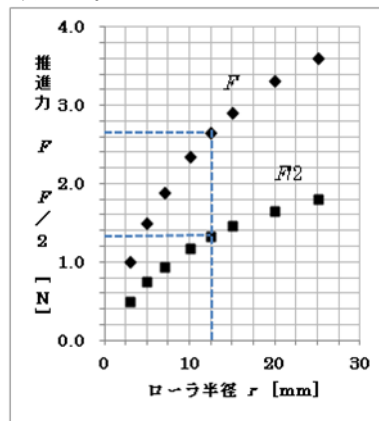


図5 ローラ半径 r による推進力 F の変化

5. おわりに

圧縮空気方式鉄道は、非粘着駆動方式であり勾配のある場合にも利用できる。また、原理が簡単であるので、舗道などにも簡単に適用する可能性がある。圧縮空気を液体に替えることもできる。

今後の研究としては、チューブのローラと接触する形状 (面積) の把握 (ローラ軸方向での R の決定)、起動・停止の制御や周回軌道への適用などを行わなければならない。以上、真空方式の大気圧鉄道から圧縮空気方式の鉄道模型を、高校生への技術教育、技術史教育の実践と関連付けて検討した。

文献

- 1) 佐藤、ブルネルの偉大なる挑戦、日刊工業新聞社、(2006)
- 2) 佐藤ほか、ブルネルの大気圧鉄道に関する研究、日本機械学会論文集(C編)、74巻746号、2418-2422、(2008)
- 3) 同上、同誌、2423-2428、(2008)
- 4) 同上、同誌、2429-2434、(2008)
- 5) 佐藤・溝上、ニューマティック鉄道における真空方式と圧縮方式の比較、日本機械学会関東支部第16期総会講演会講演論文集、No.100-1、409-410、(2008)
- 6) 福島民友、「大気圧鉄道」軽やかに、2010年8月30日掲載
- 7) 高村ほか、ブルネルの大気圧鉄道による科学と技術教育の実践、日本技術史教育学会関東支部2010年度研究発表講演論文集、15-19、(2011)