

# ニューマティック鉄道における真空方式と圧縮空気方式の比較

佐藤 建吉・溝上 純義 (千葉大学)

## A Comparison Between Vacuum System and Compressive Air System for Pneumatic Railway

Kenkichi SATO and Sumiyoshi Mizokami  
Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba

The authors have studied on Brunel's Atmospheric Railway (BAR) in the point of view from history of engineering. One of the authors has presented about Aeromovel that is a compressive air railway system, stimulated by BAR, has been used for 20 years in Indonesia. In this paper, two types of pneumatic systems, *i.e.*, vacuum and compressive air systems, have been studied through mechanics on the relationship among pressure deference, as a driving force, and running speed and distance. The design concept for pneumatic railway systems has been discussed using the analytical results. The pneumatic railway system has a possibility for using and developing a high speed commercial railway system as lower budget rather than linear motor propulsion system.

**Keywords :** history of engineering, Brunel, pneumatic railway, atmospheric railway

### 1 はじめに

筆者らは、19世紀に実用されたブルネルの大気圧鉄道のもつ原理のユニークさ、経済・環境・エネルギー面での優位性から、これを観光地などでの小規模、非高速鉄道として復活、再実用化することを意図して研究している<sup>1-3)</sup>。これに類似した圧縮空気方式の小規模、低速の鉄道が現在実用されている<sup>4)</sup>ことを知り、これらをニューマティック鉄道と呼び、両者について比較することを、本報の目的とする。同時に、大気圧鉄道は、高速鉄道としての利用にも長所があり、その面にも触れて、両者を以下に、比較検討する。

### 2 ニューマティック鉄道の推進原理の一般化

本報でいうニューマティック鉄道は、パイプラインにピストンを入れ進行方向の前方を真空(低圧)にして後方を大気圧にして推進する「大気圧鉄道」と、前方を大気圧(あるいは低圧)、後方を圧縮空気(高圧)にして推進する「圧縮空気鉄道」の両者を考える。はじめに、列車は、大気中の軌道上を走行するとする。それらの推進原理を一般化した力学的モデルを、Fig.1に示す。

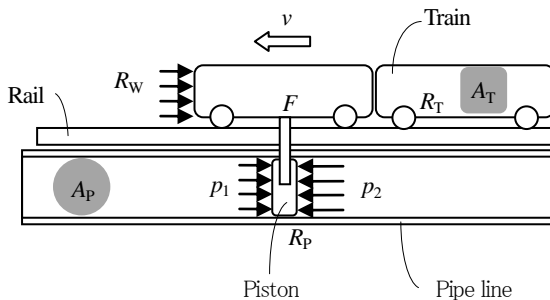


Fig.1 General description for pneumatic railway.

これらのニューマティック鉄道の推進力  $F$  は、ピストンの前後に作用する圧力  $p_1, p_2$  による圧力差がつくる力  $P$  がベースであるが、大気圧鉄道、圧縮空気鉄道ともに次のような抵抗力  $R$  がある。すなわち、 $R$  は、ピストンとパイプライン側での摩擦抵抗  $R_P$  と車両とレール側での走行抵抗  $R_T$  の和 ( $R = R_P + R_T$ ) で、ほかに車両の空気抵抗  $R_W$  がある。

$$F = P - R - R_W = (p_2 - p_1)A_P - (R_P + R_T) - R_W \quad (1)$$

ここで、 $A_P$  はピストン(パイプライン)の断面積である。 $R_W$  は、速度の2乗に比例するとすれば、次式となる。

$$R_W = kv^2 = (1/2)C_D \rho A_T v^2 \quad \because k = (1/2)C_D \rho A_T \quad (2)$$

ここで、 $C_D$  は車両の抗力係数、 $\rho$  は空気密度、 $v$  は走行速度、 $A_T$  は車両の断面積である。

大気圧鉄道では、 $p_2$  を大気圧  $p_0$ 、 $p_1$  を  $p_0$  に対する減圧比  $\alpha$  とすれば、 $p_2 = p_0$ 、 $p_1 = \alpha p_0$  であり、 $P = (p_2 - p_1)A_P = (1 - \alpha)p_0 A_P$  である。

圧縮空気鉄道では、 $p_1 = p_0$ 、 $p_2$  を  $p_0$  に対する高圧比  $\beta$  とすれば、 $P = (p_2 - p_1)A_P = (\beta - 1)p_0 A_P$  となる。

ここで、これらニューマティック鉄道の力学的検討を、次のように行う。ピストン部質量  $M_P$ 、車両質量  $M_T$  を全質量  $M$  とすると、上述の推進力や抵抗を考えた運動方程式は次のようになる。

$$M dv/dt = F(v) \quad \because M = M_P + M_T \quad (3)$$

$$\therefore (M_P + M_T) dv/dt = (P - R) - kv^2 \quad (4)$$

これを解くと次式となる。

$$v^2 = (P - R)/k - C \exp(-2k/M \cdot x) \quad (5)$$

境界条件、初期条件を、 $x=0$  で  $v=v_0$  とおくと、 $C = v_0^2 - (P - R)/k$  であり、

$$v = [(P - R)/k - \{ (P - R)/k - v_0^2 \} \exp(-2k/M \cdot x)]^{1/2} \quad (6)$$

上式により列車発車後の任意の速度が計算できる。この式(6)において、 $P$  に  $1 - \alpha$  を用いれば大気圧鉄道(真空方式)、 $\beta - 1$  を用いれば圧縮空気鉄道に適用できる。

なお、抵抗には、ピストンが進むときにパイプライン内にある空気を

圧送することによる抵抗  $R_{WP}$  もある。これも式(2)と同じ形式で示すと、総合的な空気抵抗  $R_{WIND}$  は、以下となる。

$$\begin{aligned} R_{WIND} &= R_W + R_{WP} = k_{WIND} v^2 \\ &= (1/2) C_D \rho A_T v^2 + (1/2) C_{DP} \rho' A_P v^2 \\ &= (1/2) \{ C_D \rho A_T + C_{DP} \rho' A_P \} v^2 \quad (7) \\ k_{WIND} &= (1/2) \{ C_D \rho A_T + C_{DP} \rho' A_P \} \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、 $k_{WIND}$  は抵抗係数で、 $C_{DP}$  はパイプ内での抗力係数、 $\rho'$  はパイプ内の空気の密度で、真空方式では  $\rho' = \alpha \rho$  で、圧縮方式では  $\rho' = \rho$  である。なお、ピストンとパイプには隙間がなく、漏れがないとして、 $C_{DP} = 1.0$  と仮定する。

ただし、ピストンの後方の空気はピストンが高速で走行しても、大気圧鉄道では大気圧の空気が、圧縮空気鉄道では  $\beta p_0$  の圧縮空気が遅れなく十分に供給されるものと仮定する。

式(8)の適用においては、式(6)の  $k$  を  $k_{WIND}$  に置き換えればよい。

### 3 計算結果と検討

例として、実用的な大きさを想定し、関係する値を以下のように定めて計算した結果を Fig.2 に示す ( $\alpha = 0.2$  と  $0.6$ ,  $\beta = 2.0$  と  $1.5$ ,  $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ ,  $A_P = 1.0 \text{ m}^2$ ,  $R_P = 980 \text{ N}$ ,  $R_T = 15.68 \text{ kN}$ ,  $C_D = 2.0$ ,  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $A_T = 6.25 \text{ m}^2$ ,  $M_P = 1.0 \text{ kg}$ ,  $M_T = 32.0 \text{ kg}$ )。Fig.2 の結果から、大気圧鉄道(真空方式)と圧縮空気鉄道(圧縮空気方式)では、推進力や走行速度は本質的に、ピストン前後の圧力差  $p_2 - p_1$  に依存し、大きな差はないことがわかる。圧縮空気方式は、高压の圧縮空気を十分に供給できれば、走行速度は高められるが、Fig.2 から、ピストン内の空気の影響を受けることがわかる。

上の計算条件では、走行速度が  $100 \text{ m/s}$  に達し、それは時速  $360 \text{ km}$  に達する。ニューマティック鉄道は、比較的容易に高速鉄道を実現できる方法であるといえる。しかし、パイプラインの中にあるピストンの駆動力を外部の鉄道車両に伝えるために、パイプラインの長手方向に沿って設けたスリット部を、接続板を通して行われる。この場合、スリット部からの空気漏れや真空漏れが生じる。また高速で走行する場合には、スリット部での接続板とその気密要素との摩擦・摩耗現象が大きな問題となる。ブルネルの大気圧鉄道が商業的に成功しなかった利用には、このスリット/接続板の摩耗問題、すなわち材料・気密問題があった。

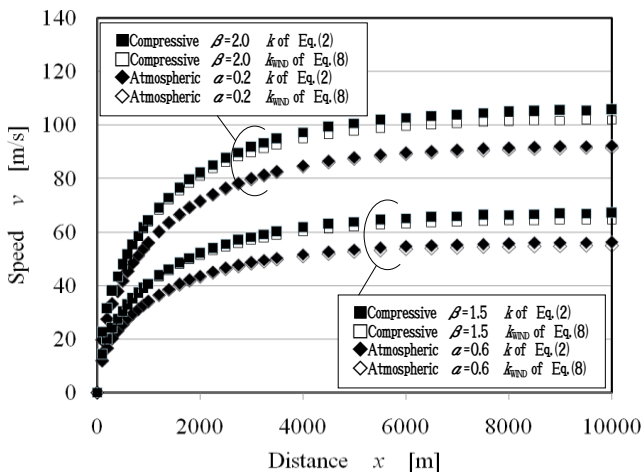


Fig.2 Calculated results for relationship between train speed  $v$  and running distance  $x$ .

### 4 設計要件

以上から、次の点は検討課題となる。

- ① 真空方式においては、進行方向のピストンより前方のパイプライン内をピストン(列車)の進行に障害にならないように、ある長さにわたって真空(低圧)にしておく必要がある。また、ピストンの後方においてもピストン(列車)の進行に障害にならないように、大気圧の空気を供給されなければならない。
- ② これらのためには、パイプラインをある長さを1ゾーンとしてゾーニングし、ピストンの前方のゾーンはピストン(列車)の進行に同期させて、真空引きとゾーンバルブの開閉を順次行うなどの必要がある。同時に、ピストンの後方では、大気圧に常に保つように仕組みをする必要がある。
- ③ 圧縮空気方式においては、ピストンの後方をピストン通過後も定圧の圧縮空気に調整しておく必要がある。またピストン前方の空気を障害なく排気されるようにする必要がある。
- ④ スリットと接続板の機構と構造、そして材料選定などについて実用的な設計する必要がある。
- ⑤ スリットからの空気漏れ、ピストンとパイプラインの隙間からの空気漏れについての検討は別報<sup>5)</sup>で述べている。
- ⑥ パイプラインの形状を円形にするか矩形にするかなども利便性にあわせて検討する必要がある。

上掲の①～③に関係して、パイプライン内部の圧力調整は、どの方式が容易で、エネルギー的には有利であるだろうか。真空ポンプとブロワー(送風機)の仕様や容量などを検討する必要がある。④と⑤の課題は、走行速度  $v$  の設計値により大幅に異なる。例えば、時速  $120 \text{ km}$  程度の走行速度では、 $\alpha = 0.7$ ,  $\beta = 1.3$ , つまり気圧差  $0.3$  気圧程度でもよいので、気密については容易に設計ができる。この場合は、実用上からゾーニングの最適な設計となりそうである。

著者らは、模型レベルでは、矩形断面(横  $20 \times$  高  $10 \text{ mm}$ )のパイプを用いて、周長  $6 \text{ m}$  の楕円状閉回路軌道の大気圧鉄道模型を製作中である。この場合、式(6)の計算では  $\alpha = 0.7$  で  $v = 1 \text{ m/s}$  の走行速度が得られる。このような取り組みにより、実用化に向けた設計、そのための設計情報の獲得を行いたい。

一方で、車両をパイプラインに入れた鉄道の可能性もあり、この場合には、さらに高速化と上述の④と⑤は不要となり、空気抵抗の影響も減少する。これも、考慮検討の対象となるだろう。

### 5 おわりに

ブルネルの大気圧鉄道に由来するニューマティック鉄道における気圧差と走行速度の関係を力学的解析し、設計課題について論じた。

#### 文献

- 1) 佐藤・白井・溝上, ブルネルの大気圧鉄道に関する研究(第1報, 文献調査), 日本機械学会論文集, C編, Vol.74.No.746, 84-88(2008).
- 2) 佐藤・松浦, 日本機械学会論文集(第2報, 現地調査), C編, Vol.74.No.746, 89-94(2008).
- 3) 佐藤・白井・赤坂, 日本機械学会論文集(第3報, 模型製作), C編, Vol.74.No.746, 95-100(2008).
- 4) 佐藤, 空気圧鉄道 Aeromovel の現地調査, 日本機械学会講演論文集, No.09-90, 79-82(2009).
- 5) 高村・佐藤・白井, ブルネルの大気圧鉄道を題材としたものづくり教育, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集, 明治大学(2010年3月).