

真空式及び圧縮空気式鉄道システムに関する研究

A study on the vacuum type and compressed-air type railway systems

08TM0347

溝上 純義
Sumiyoshi Mizokami

指導教員 佐藤 建吉

SYNOPSIS

The research has been performed to produce a vacuum type and a compressed air type railway models, and to obtain design information for practical application as urban transportation systems. The vacuum type is based on Brunel's atmospheric railway system but the square shape of the tube differs from that of round shape of the original. In the present model a trial has been done to compose a circle railway of 6 meters in length. The railway, then, was divided into eight zones with a specially designed rotary valve. However a rough clearance in the valve was resulted in failure in running the model train. On the other hand the compressed air type designed using a flat tub was well done to run the model train which a high school girl got on. A design guide line about the airports access between Narita and Haneda has been estimated as an example of the application of the pneumatic railway systems.

1. 緒論

1.1 鉄道の歴史概説

19世紀初頭までは陸上での交通に馬車や鉄道馬車などが利用された。イギリスの機械技術者であったリチャード・トレビシック (1771-1833) は、1804年に初めて軌道上を走る蒸気機関車を製作した。鉄道は、スチーブソン父子により改良された蒸気鉄道が実用化の最初であった。鉄道の有用性が認められ投資が盛んとなり、鉄道網が英国はじめ世界に普及した。

スチーブソン父子と対照的な取り組みを行なったのがイザムバード・キングダム・ブルネル (1806-1859) である。彼は安定性、高速性、大量輸送性を確保するとして、軌道の軌間をスチーブソンの1435mm (4ft8・1/2in) より大きい2140mm (7ft1/4in) の超広軌道を採用した。ブルネルの鉄道はロンドン～ブリストル、ブリストル～エクセターなど、イングランド南西部、ウエルズ南部に広がった。

日本では1872年に新橋～横浜間で鉄道が初めて開通した。蒸気機関車は大量のばい煙を撒き散らすため、都市近郊では電化が進められた。1964年には東海道新幹線が標準軌間 (1,435mm) で東京～大阪間が開通し高速鉄道時代が到来した。そして現在は最高時速300kmを越えている。

近年交通機関としてモノレールなどの新交通システムが運行され、LRVなども導入され、多彩となっている。さらに時速 500 km で走る超伝導リニアモーターカーも東京～名古屋間の路線建設が決定された。

1.2 地域交通と鉄道

日本における鉄道は1960年に総延長2万8千kmであったが、2006年では2.6万kmと減少した。廃止されたのはほとんどが地方路線であり、その原因は1960年代後半からの自動車の急速な普及と沿線人口の減少で乗客の減少、収益の悪化によるものである。高齢者や子供など交通弱者といわれる人々には鉄道は地域の交通手段として不可欠と言える。

鉄道は環境負荷が少ない交通手段であり、定時性、輸送力、観光力があるので、地方の特徴を活かすためには、重要で強力なアイテム (要素・システム) であると言える。

1.3 研究背景

著者の研究室では、エネルギーや環境との関わりに対して、自然エネルギーの普及のための啓発活動や理解形成のための活動を行っている。また、技術史としてこれまでの経緯を調べ、掘り起こす取り組みを行っている。そうした中で、鉄道に関して極めてユニークな大気圧鉄道という鉄道が前述したブルネルにより実用化されたことを著者は知り、これを「大気圧鉄道の実用化への検討～技術史および模型実験とモデル設計」と題する卒業論文としてまとめた。この論文では直径50mmの亚克力パイプの大気圧鉄道模型を用いて圧力差と推進速度などについて検討した。

1.4 研究目的

大気圧鉄道は、圧力差を大きくすれば地方鉄道としてのほか、高速鉄道として利用することも可能である。さらに鉄道の推進力を得るには、ブルネルの真空として圧力差を作り出す方法のほかに、圧縮空気により圧力差を作り出す方法もある。そこで本研究、本論文では、模型実験も行い特性について検討した。

本研究の目的と目標は以下の通りである。現在の鉄道輸送は多様化しているが、新幹線やリニアモーターカーによる大都市間を結ぶ高速幹線交通機関、大都市の通勤・通学用の交通機関、さらに観光地・温泉地・地域・構内などでの短距離低速な輸送機関などに分離できる。本論文では、主として低コスト、低速度、環境負荷の少ない鉄道の開発を目的とした。これは19世紀にブルネルによって開発された大気圧鉄道の現代技術による構築でもある。本論文の目標としては、この目的を達成するために、圧力差、パイプ径、そして推進力の大きさについての設計資料を呈示する事にあり、また真空や圧縮空気の気密保持やその為の構造について検討、提案することとした。

2. ブルネルの大気圧鉄道

2.1 ブルネル小括

イザムバード・キングダム・ブルネルは、今日では考えられないほどに多面的な設計や工事監督の活動をした。それらにはテムズ・トンネル工事、ブリストルのクリフトン吊橋、

グレート・ウエスタン鉄道工事、ロンドンのパディントン駅舎、グレート・イースタン号の蒸気船など橋、鉄道、船、駅舎、トンネル工事などの多分野の事業がある。

ブルネルは1833年グレート・ウエスタン鉄道（ロンドン～ブリストル間）建設の技術責任者に就任し、ゲージ幅は超広軌ゲージの2140mmを採用した。その後、南デボン鉄道の建設に当たり、蒸気機関車の問題点である騒音や煤煙の排出の解決のほか、線路の急勾配の走行を可能にするのは大気圧鉄道であると考えた。そのため、巧みな構造の大気圧鉄道を設計・施工した（修士論文2.3項、参照）。ブルネルの大気圧鉄道（Atmospheric Railway）は1847年から48年の約半年間だけ営業運転された。

しかし、走行してみると、パイプの真空を保つ弁の故障が多発し、推進力不足となり、パイプ径を太くするなど改善を加えなければならなかった。当時は駅-車両間の通信システムがなかったため、車両位置の把握や定常運行が出来ず、また運行経費もかさみ営業運転を続けることが出来なく失敗に終わった。

2.2 大気圧鉄道の小括

大気圧鉄道での蒸気機関は、真空ポンプを駆動するために利用され、駅に隣接して固定設置された、機関車には搭載されないため列車が小型・軽量化される。このことはレールや鉄橋などの強度を下げる事が可能となり軽量化することが出来た。蒸気機関車が走行中に騒音やばい煙を出すのに対して、大気圧鉄道はそれらの問題が無い、今日という環境負荷の少ない鉄道であり、ばい煙がない事は乗客を苦しめなくて済んだ。

一般の蒸気機関車はレールと車輪の粘着力（前後方向摩擦力）により走行するので線路の最大勾配は80パーミル（パーミル：1/1000）程度とされている。これに対して大気圧鉄道はパイプライン上での差圧によるピストンの推進力で走行するので、その推進力が十分であれば急勾配でも走行可能である。しかし大気圧鉄道ではパイプの真空を保持する構造とシール部に使用した皮革の耐候性が問題となり、大気圧鉄道の安定的な運行に障害となった。

以上のように、大気圧鉄道は利点があるものの、当時の材料技術や通信など周辺支援技術が十分でなかったため、撤退を余儀なくされた。

2.3 ブルネルの大気圧鉄道の原理と構造

- ① 線路に隣接してポンプハウスと呼ばれた建物があり蒸気機関と真空ポンプを設置する。蒸気機関により真空ポンプを駆動する。
- ② 軌道間に真空ポンプに接続されたパイプラインを敷設し、パイプライン内にピストンを挿入する。
- ③ パイプラインが真空引きされるとピストン前後の差圧（大気圧）によりピストンに推進力が発生する。
- ④ パイプラインにはライン方向にスリットが切られておりそのスリットを通してピストンと車両が連結され、ピストンの推進力が車両に伝達される。またスリット部はパイプラインの真空を保持するためにシールがされている。

2.4 模型製作と走行実験

ループ状軌道を真空式大気圧鉄道の車両が走行する模型を意図し、全長6.2mの周回軌道パイプラインを設計した。車両を連続的に走行させるためにはピストンの前後で真空/大気圧の作用を継続して行わなければならない。その

ため、パイプラインを図2-1のように8箇所（遮断弁）を開閉してゾーニングすることにした。弁の開閉を順次切り替えてピストンの前部を真空にし、ピストンの後部を大気圧にすることによりピストンに推進力を与え車両を走らせることにした。

弁の開閉およびパイプライン内を真空にするため、車両位置と連動するロータリーバルブを設計した。パイプラインにはw24×h14×t2mmの断面のステンレス角パイプを選定した。

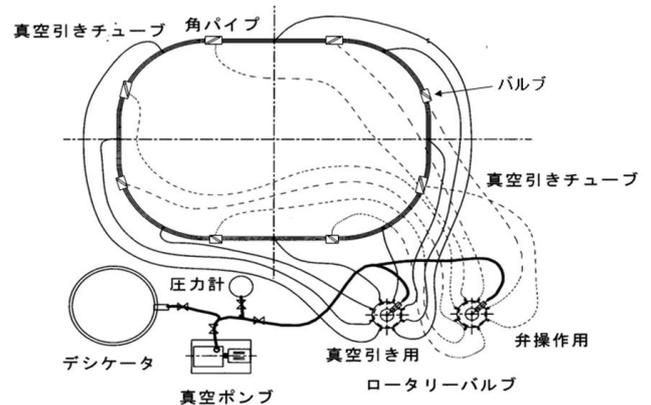


図 2-1 パイプの真空制御



図2-2 周回軌道：6.2m

2.5 検討と考察

設計図により製作されたパイプは、寸法が小さいので製作誤差の割合が大きいためにより空気漏洩が無視できない程度であり、パイプ内の真空度を高めることが出来ず、車両は走行不能であった。その原因の不具合について検討した。

- ① ステンレス角パイプ内面が平滑に製作されていない。
- ② パイプ内側断面20mm×10mmの断面積が小さすぎた。
- ③ スリット加工時に内側に発生したバリを削除出来ない。
- ④ パイプ内面とピストンとの隙間が大きくなった。
- ⑤ 加工精度が非常に悪かった。
- ⑥ フラップ弁の精度が悪く、空気漏れした。
- ⑦ ゴムシートによるスリットシールが出来なかった。
- ⑧ ロータリーバルブ内筒、外筒管の隙間精度が悪く空気が漏洩した。

不具合点は以上のように多く発生したが、それぞれにつ

いて対策を行なった。ここではその不具合の中でロータリーバルブの漏洩対策について述べる。図2-3において上部の真空ポンプ接続口より真空引きを行っても外気取り込み口より空気が内筒、外筒間隙間を抜ける。これを抑える隙間を求める。

設計条件を真空ポンプ接続部と外気の圧力差を50000Pa (0.05MPa) とする。その他諸条件は表2-1とする。

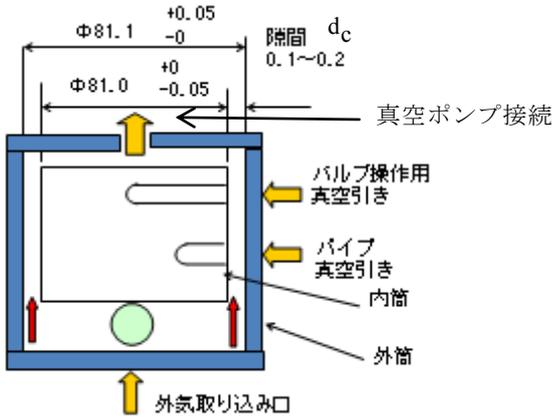


図 2-3 ロータリーバルブの空気流れ

表 2-1 ロータリーバルブの空気条件

真空ポンプ接続部			外気取り込み口		
圧力 p [Pa]	密度 ρ [kg/m ³]	流量 v [m ³ /s]	圧力 p_0 [Pa]	密度 ρ_0 [kg/m ³]	流量 v_0 [m ³ /s]
51300	0.631	0.000833	101300	1.204	0.000436

ロータリーバルブ内外筒間の隙間面積をよどみタンクの流速より求める。

よどみタンクから気体が噴出する場合の流速 V [m/s] の計算式は以下による。 k は比熱比を表し空気の場合は 1.4 とし、噴出口流速 V を求めた。

$$V = \sqrt{2 \left(\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p}{\rho} \right) \frac{k}{k-1}}$$

$$= \sqrt{2 \left(\frac{101300}{1.204} - \frac{51300}{0.631} \right) \frac{1.4}{1.4-1}}$$

$$\approx 141 \text{ [m/s]}$$

ここで内筒と外筒の隙間面積 A_c を求める。流量は表2-1 v_0 の値である。

$$A_c = v_0 / V = 0.000436 / 141$$

$$= 0.0000031 \text{ [m}^2\text{]} \quad (dp)$$

内筒と外筒の隙間間隔 d_c を求める。

$$d_c = A_c / \pi dp = 0.0000031 / (\pi \times 0.081)$$

$$= 0.000012 \text{ [m]}$$

ここで d_p は内筒外径を示す。

隙間間隔は $12 \mu\text{m}$ となる。模型製作においてこの隙間を保持する事によりロータリーバルブにおいて外気との圧力差を 0.05MPa が確保される事になる。隙間としては非常に小さい値であり対策としては真空ポンプ容量を大きくする。また内外筒間に O-リングをはめる等の対策を行うことが有効である。

2.6 まとめ

今回の模型製作においては課題が顕在化した。小型模型であるための問題でもあるので、ここで概念として考えたパイプスリットを設け、ピストンを挿入する機構については断念し、別の方法を検討することにした。しかし、本家で述べた課題と経験は、今後の真空式模型製作への設計指針として適用できる。

3. 圧縮空気式鉄道の模型製作

3.1 目的

圧縮空気方式の鉄道模型を製作し、その推進原理や構造について広めるため、日本技術史教育学会“2010年度サマーセミナー-in相馬”8月28日にて実演走行を行なった。

3.2 原理と構造

軌道間にパイプを敷設し、パイプにピストンを挿入しピストンと車両を連結し、圧縮空気でピストンの推進力により車両を走行させる (図3-1の圧力はゲージ圧を示す)。

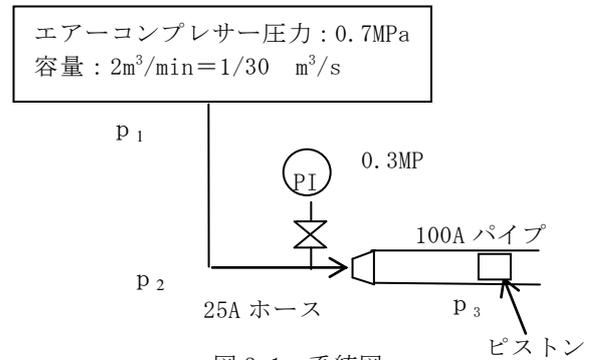


図 3-1 系統図

3.3 製作と敷設

パイプに 100A×3, 500mm×6本、全長21mの構造用鋼管 (STK) を使用した。長手方向が溶接加工前の鋼管を日鉄鋼管 (株) の御厚意により提供して頂いた。スリット幅は管の両端部で約18mm、それ以外の部分で9~10mmであった。この鋼管を用いて次のようにして、製作を進めた。



図 3-2 実演走行

- ① クランプで鋼管を木製軌道上に取り付ける。
- ② スリット部にコ形ゴムを背中合わせで取り付ける。
- ③ ピストンをパイプに挿入し車両に連結する
- ④ 車両に市販の子供用四輪車を利用する。

3.4 走行実験と特性

車両に一人乗って約6km/hの速度で走行した。スピードをさらに上げるために圧縮空気の圧力を上げると、シール部からゴムが外れ、その部分を山形鋼で押さえた。原因は管端部スリット幅が広く開きすぎていたために起こった。この問題は製品化された鋼管にスリット加工を行い幅寸法の管理をする事によって改善する事が可能である。

3.5 検証と実用化に向けた検討

系統図、図3-1において空気の条件は表3-1である。車両速度は前述の6km/h(1.67m/s)である。100Aパイプ内の空気流速は3.3m/sであり、この速度差がピストン部の空気漏洩量である。以下に漏洩の隙間間隔を求める。

表 3-1 圧縮空気の圧力、流量、流速

	エアー コンプレ サー出口	P I 取付部	100Aパイプ
圧力 [MPa]	$p_1 = 0.8013$	$p_2 = 0.4013$	$p_3 = 0.1178$
流量 [m ³ /s]	$q_1 = 0.00421$	$q_2 = 0.00841$	$q_3 = 0.02863$
流速 [m/s]	$v_1 = 8.6$	$v_2 = 17.1$	$v_3 = 3.3$

前記2.5項で用いた式により流速Vを求めた。

$$V = \sqrt{2 \left(\frac{117800}{1.4} - \frac{101300}{1.25} \right) \frac{1.4}{1.4-1}}$$

$$= 147 \text{ [m/s]}$$

表 3-2 よどみタンク（パイプ内）の空気条件表

100Aパイプ内		100Aパイプ噴出口	
圧力 p_0 [Pa]	密度 ρ_0 [kg/m ³]	圧力 p [Pa]	密度 ρ [kg/m ³]
117800	1.4	101300	1.25

隙間面積 A_c を求める。流量は表3.1により100Aパイプ内で0.02863m³/sである。

$$A_c = 0.02863 / 147 = 0.0001947 \text{ [m}^2\text{]}$$

次に、ピストンとパイプ内壁の隙間間隔 d_c を求める。

$$d_c = A_c / \pi d_p \quad d_p : \text{ピストン外径}$$

$$= 0.0001947 / (\pi \times 0.1)$$

$$= 0.00062 \text{ [m]}$$

$$= 0.62 \text{ [mm]}$$

ゆえに、隙間間隔は0.62mmとなる。

パイプ内径とピストン外径の差による隙間は2.65mmであるが計算の隙間が0.62mmとなったことはピストンに漏洩防止のために隙間テープを巻いた効果があったものである。表3-2に推進力と圧力、隙間の関係を示し、隙間の管理を行なうことにより推進力を増すことが出来る。

表3-3 推進力、圧力、隙間

推進力 [N]	パイプ内圧力 [Pa]	ピストン部隙間 [mm]
130	117800	0.62
200	126700	0.46
400	152200	0.30

3.6 まとめ

圧縮空気式鉄道模型の製作は検討から製作まで、3ヶ月程度と短期間でいった。それは、開催日が予め決まっていたからである。この模型システムでの重要な要件は、

- ①空気漏れを最小に抑えること
- ②走行抵抗を少なくすること

ことであった。①の課題は、実演走行で問題が管内圧を上げるとスリット部からシールゴムが外れる結果を生じたが、これは管端部から500mm程度の幅が大きい箇所を切除することにより改善可能である。また管内径とピストン外径の寸法差の管理は、①と②の両方の対策になるので、これは実用化に向けて要件となることが明らかになった。

4. 総括と結論

空気で行ける鉄道について、ブルネルの大気圧鉄道を典拠として真空方式と圧縮空気の両方について、模型製作を行い、実走行も行い、実用化へ向けた課題の抽出と設計情報の検討を行った。以下の点が明らかになった。

(1)軌道間にパイプを敷設しピストン前方を真空する大気圧鉄道模型周回軌道を真空、大気圧への切り替えるための弁の開閉、パイプの真空、大気開放の切り替えをロータリーバルブで行う模型の製作、実験、検証を行なった。

(2)上記とシステムは同じでピストンを圧縮空気で行う圧縮空気式鉄道軌間450mmの間に全長にわたってスリットの入った鋼管100A、外径114.3mm、長さ3.5mを6本接続、全長21mの管内にピストンを挿入し、圧縮空気を送りピストンの推進力で車両に人を乗せて走行させる模型の製作、走行実演、検証を行なった。

(3)チューブを用いた圧縮空気鉄道についても模型製作を行ない、その推進力について測定値を評価する計算式を誘導し比較した。対象とした推進部の構造はチューブを二個のローラーで挟み圧縮空気を封入した場合にチューブが膨張してローラーに推進力を与えるものである。測定値と計算式は、ほぼ一致した。

(4)空気式鉄道の適用例として、成田空港～羽田空港間のアクセス路線として検討した。乗客100人として大気圧鉄道で結ぶ場合のパイプ口径、圧力、推進力、速度、所要時間について検討を行なった。これによれば、管径600mmで0.6気圧(0.06MPa)の気圧差で、時速200kmで、成田～羽田間を26分で結ぶことが可能となる見込みである。

主な参考文献

- 1) R. アンガス・ブキャナン著(大川時夫訳)：『イザムバード・キングダム・ブルネルの生涯と時代』、技術史出版会、(2006)。
- 2) 佐藤建吉・白井靖幸・溝上純義：「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、(2008)。
- 3) 松岡祥浩ほか：『流れの力学』、コロナ社、(2004)。
- 4) 国土交通省：「羽田両空港間及び都心と両空港間の鉄道アクセス改善に係る調査概要①」(<http://www.mlit.go.jp/common/000161426.pdf>)。
- 5) 鉄道車両の走行抵抗調査分科会報告、No.63。