

減圧トンネルにおける 鉄車輪方式と磁気浮上方式の比較

長谷川 均* 齊藤 実俊** 岩松 勝***

Study of Railway Systems Applied to a Decompression Tunnel

Hitoshi HASEGAWA Sanetoshi SAITO Masaru IWAMATSU

In the high speed railway systems running on the ground surface, air resistance and noise have been very important problems. Significant favorable effect can be expected to these problems by decompressing the area around the train. In this report we have presented the results of the study on the railway systems running in a decompression tunnel, referring to the domestic and foreign research results. Furthermore, we developed the cost simulator, and implemented comparison of running performance of train between magnetic suspension railway and a conventional steel rail / wheel railway system on a set up model line in the decompressed tunnel.

キーワード：磁気浮上，超電導，リニアモータ，減圧トンネル

1. はじめに

鉄道の高速化については，各国の高速鉄道網の整備や磁気浮上方式鉄道の実用化など，積極的に実施されているところであるが，500km/hを超える高速化を目指す技術開発はあまり行われていない。地表を高速で走るシステムでは，空気抵抗や騒音が非常に大きな課題となっているためである。

これらの空気力学的課題への切り札である減圧トンネルについては，例えばスイスメトロのように古くから国内外で検討されてきた^{1) 2) 3)}。

最近では，鉄車輪-鉄レールの在来鉄道方式と超電導リニア同期モータ方式の二つのシステムに着目し，路線長等を考慮して，モデル線の条件を設定しトータルコストを検討した例が発表されている⁸⁾。そこでは，トータルコストを検討するに当たり，まだ不十分な点があるものの，想定する路線長等を入力とし建設コストと運営コストの算定基準を基本とするコストシミュレータを構築している。このシミュレータを用いた試算結果から，建設コストはトンネル断面積の影響が非常に大きく，減圧した場合にはどちらの方式においてもトンネル建設のコストが大きく占めることが示されている。また，運営コストも駆動にかかる電気代が減少する分で減圧した場合が常圧の場合より若干低くなっている。さらに，建設コストにおいても運営コストにおいても減圧するのに必要

な設備費や動力費は全体からすると非常に小さな割合であることなど，減圧トンネルによる高速鉄道はコスト面で非常に有利であるという結果が得られている。

本報告では，これまで検討されてきた減圧トンネルにおいて，特に鉄車輪方式と磁気浮上方式についてその得失について比較したい。なお，ここに記載する定量的な数字については文献⁸⁾によっている。

2. 減圧トンネルに適用する鉄道システム

2.1 対象とする速度

対象とする速度について，図1に通常トンネルにおける列車・トンネル断面積比 R と空気抵抗の関係を示す。トンネル内における空気抵抗は圧力波の影響で非定常的であるため，等速走行中の平均値を示した。速度の限界は，衝撃波なども考慮すると音速以下として，500km/h～900km/hを対象とするのが妥当と考えられる。

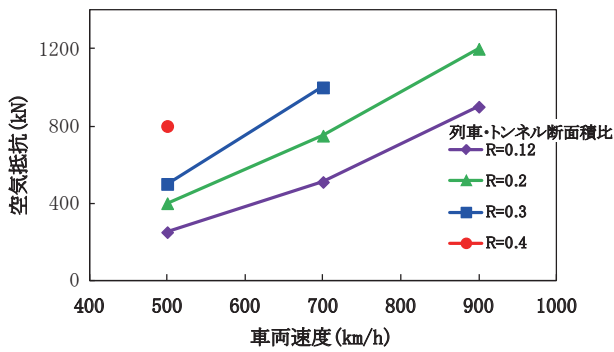
2.2 対象とする鉄道システム

駆動方式と支持方式をパラメータとして検討対象システムを整理したものが表1である。駆動方式は，回転型モータとリニアモータに分類し，リニアモータはそれぞれ誘導型，同期型，車上一次，地上一次に細分化した。支持方式は，鉄輪で支持する在来型鉄道と磁気吸引式浮上（以下EMS）及び電磁誘導式浮上（以下EDS）に分類した。「-」は事例がない領域である。ここでは，在来方式鉄道，JR-MAGLEV（EDS）の2通りの検討を行った。

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

** 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

*** 企画室



(トンネル 57km, 列車長 350m)

図1 車両速度と空気抵抗³⁾

3. 解決すべき課題

3.1 超高速や減圧した場合に想定される課題

検討するシステムは、土木構造物に関わる課題のほか、500km/h 超の高速域で想定される未知の課題も存在する。想定される課題を表2に示す。

3.2 解決すべき重要な課題

想定される課題の内、解決しないとシステムが成立しないような重要な課題について、現状技術での検討を行った例を以下に示す。

(1) トンネル構造に関するもの

減圧高速鉄道システムを実現するためには、減圧による荷重増加でトンネルが崩壊しないこと、減圧状態を維持できる気密性があること、がトンネル設計・施工上の必須条件となる。トンネルは設計や施工方法に応じて、山岳トンネル、シールドトンネル、開削トンネルに大別され、覆工構造の形状や材料、建設コスト等が異なる。

そのため、減圧高速鉄道において、最も工法の改良や事後の補修が少ないものを検討対象として選定する必要がある。これらの条件を総合するとシールドトンネルが最も気密性が高いと考えられ、これを減圧対象のトンネ

表2 超高速や減圧した場合に想定される課題

車両, 駆動システム	車体	車体強度 気密特性 車内換気 車上電源
	電気機器	地上コイル放熱 (浮上方式) 車載機器放熱 機械ブレーキ性能 (鉄輪方式) 軸受性能 (鉄輪方式) 集電 粘着特性 (鉄輪方式)
構造物	トンネル	建築限界 排熱 空気漏れ, 漏水対策 減圧装置
	駅	エアロック機構
異常時		緊急加圧 人体影響 火災対策 避難経路

ルとして検討する。

構造耐力に対する検討として鉄道構造物等設計標準⁴⁾、「シールドトンネル設計標準に関する手引き」、「粘性土地盤における設計計算例」を参考にして安全余裕を確認した。0.5気圧の減圧による荷重増加分は大気圧が101.3kN/m²であることから50.6kN/m²と仮定され、有限要素法による構造解析で、常圧と減圧で大差ないことがわかった。むしろ減圧した場合、周方向に様な荷重が作用し、軸圧縮力が増加して頑丈になるという結果も得られた。ただし、車両走行などにより減圧荷重が局部的に作用する場合の検討はあらためて必要となる。

漏水量に対する検討として、減圧トンネルではトンネル内に地下水が吸い込まれ、常圧に比べて湧水量は増加すると考えられる。減圧による荷重増分を地下水位で5mの上昇と推定すると、想定する土被りは5~28mであり、シールド標準⁴⁾によると0.5気圧下では常圧の2

表1 検討対象の鉄道システム

		支持方式				
		鉄輪方式	磁気吸引式 浮上 (EMS)	電磁誘導式 浮上 (EDS)		
			常電導技術	超電導技術	常電導技術	
駆動方式	回転型モータ	在来方式鉄道	-	-	-	
	リニア誘導モータ	車上一次	リニア地下鉄	HSST 仁川 Maglev	-	-
		地上一次	-	工場内搬送機	-	-
	リニア同期モータ	車上一次	-	スイスメトロ	-	-
地上一次		-	トランスラピッド スイスメトロ	JR-MAGLEV	GA-Maglev	

倍程度の設計湧水量を見込めばよいと考えられる。

(2) 空力問題に関するもの

減圧トンネルによる高速鉄道システムは、トンネル内を列車が高速かつ高閉塞率で走行するために、空力学的な課題を整理する必要がある。減圧トンネルの目的は車両空気抵抗の低減であることから、特に空気抵抗の予測は必須の課題である。このほか、トンネル内の流速（列車との相対速度）や気密破壊など非常時における衝撃波など、様々な課題が考えられる。

今回の検討では、減圧トンネルシステムの効果検証用モデル線のトンネル断面積を設定するために、トンネル内圧力変動シミュレーションによって列車の空気抵抗の予測を行った⁵⁾⁶⁾⁷⁾。シミュレーション結果より例えば、0.5気圧、最高速度450km/h、全長60kmの複線トンネルとした場合、走行抵抗を常圧のものと同程度以下にするためには、トンネル断面積を現状の約1/2以上にすればよいことが分かった。列車風に関しては、トンネルの両端が閉塞されていることから、列車通過時を除いてほとんど発生しない。また、車両側面風速が音速に到達することはないことも分かった。

(3) 車載換気に関するもの

車載換気装置に関しては、具体的な車体構造が決まらなると詳細については検討が難しい。ただし、乗客の搭乗空間の環境を維持するために、温度、湿度、酸素濃度、二酸化炭素濃度を基準内に保つ車内空調装置が必要であることは間違いない。

(4) トンネル換気に関するもの

青函トンネルのような全長50kmを超える長大トンネルや、比較的低速の列車が高密度タイヤで走行する地下鉄を代表とする都市部の鉄道トンネルは列車風による自然換気だけではトンネル内の温熱環境を適正に維持できない可能性があるため、機械換気設備の設置が行われている。減圧トンネルにおいても、密閉空間となるため自然換気以外の排熱方法を検討する必要がある。

トンネル内の発熱は、列車の走行抵抗、車両からの発熱、浮上式鉄道の場合は、地上コイルからの発熱も考えられる。

最も割合が大きいのが列車の走行抵抗であり、全発熱量の75%以上を占めると見積もられ、これらをトンネル換気装置で地上に排熱する必要がある。

(5) EDS 浮上支持方式に関するもの

常圧下での超電導磁気浮上方式鉄道については、現時点においても実用化に向けて研究開発が進められている段階であるが、減圧トンネルにおいてこのシステムを適用した場合に新たに発生すると予想される課題について検討した。トンネル換気のところでも述べたとおり、鉄輪式鉄道との大きな違いは地上コイルが設置されることであり、この排熱を検討しなければならない。

また超電導磁石を冷却するための車載冷凍機などが車両に設置されるため、これらの排熱も考慮しなければならない。

(6) 鉄輪方式に関するもの

鉄輪方式については、軌道レールと車輪と双方に関わる課題がある。ただし、レールと車輪の粘着に関しては、減圧下と常圧について大きな違いがないと考えられており、高速化にともなう課題が残る。例えば、速度100km/hの動的輪重と速度400km/h以上とのそれでは、2倍程度の差があることが分かっており、軌道敷設精度をより厳しく設定しなければならない。列車の動揺についても同様であり、軌道狂いあるいは変位の管理値の設定を適切に行わなければならない。

減圧下で最も問題となると思われるのは、軸受の潤滑である。車軸軸受の潤滑剤については減圧により潤滑剤の油分が蒸発する可能性が考えられるため、真空用の低蒸発量グリースや固体潤滑剤の使用が必要となる可能性が考えられる。また、0.5気圧では大気圧よりも飽和水蒸気量が低下するため、軸箱内の空気中の水蒸気が凝結し、軸受材料が腐食する可能性も考えられる。歯車装置の潤滑剤については高速で使用すると発熱による粘度低下や劣化を招き、潤滑不良を引き起こす可能性が考えられる。

4. コスト比較

4.1 前提条件

減圧トンネル利用の超高速鉄道モデル線を検討する上で、経済性を重視して建設コストの低減を狙う考え方（最高速度450km/h）と速達性を重視する考え方（最高速度900km/h）がある。今回の検討においては、小規模な線区として全長60km程度のモデル線で検討を行った。全長60km程度の距離では、最高速度を高くしても到達時間は短くならないため、450km/hと設定している。

コスト比較検討の方法は下記の通りである。

表3の前提条件を基に建設コストと運営コストの算定基準を定めた。これらの算出基準より、1kmあたりの建設コスト及び運営コストを求めた。なお、運営コストの

表3 モデル線の前提条件

項目	条件
路線長	60km
駆動方式	鉄輪方式／浮上式
圧力	0.5気圧
編成両数	3両
輸送力	約32,000人／片道・日 5分間隔、6-24時運行
最高速度	450km/h

表4 コスト計算に必要なパラメータ及び算定基準

(a) 建設コスト

システム	設備	積算
常圧	トンネル	断面積×トンネル単価
	立坑	個数×立坑÷延長
	駅	個数×駅単価÷延長
	用地	(トンネル直径+1m)×民地利用率×用地補償単価
	車両	車両数×車両単価÷延長
	変電所	電力×台数×変電所設備単価×複線÷延長
	き電配電	台数×区分開閉器単価(浮上方式)
	架線	架線単価(鉄輪方式)
	軌道	軌道単価
	換気装置	換気装置単価
	減圧	減圧ポンプ

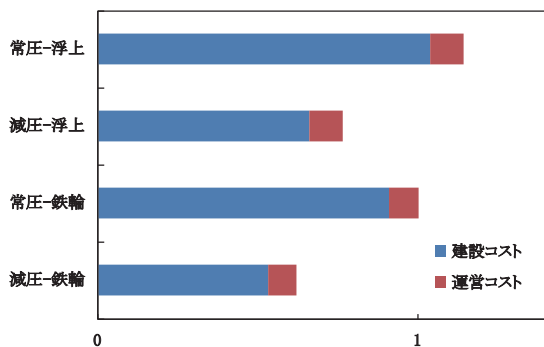
(b) 運営コスト

システム	設備	積算
常圧	電気代(駆動)	走行抵抗×走行回数×電気単価÷延長
	地上設備保守	メンテ単価×複線
	車両保守	(人件費+物件費)×車両数÷延長
減圧	電気代(減圧)	漏気費用+加減圧費用
	ポンプ交換	10年ごとに交換
	漏気対策	100年後に断面補修を20%実施

試算は30年間を想定した。コスト計算に必要なパラメータと積算方法を表4に示す。

4.2 シミュレーション結果例

図2に建設コストと運営コストを示す。いずれのグラフも常圧鉄輪支持方式の合計を1とした場合に規格化



トータルコストの比(常圧-鉄輪を1とした場合)

図2 トータルコスト例

した値である。これらの図より、建設コストは地上設備の影響が非常に大きく出ており、トンネル建設費が減圧した場合にはどちらの方式においても約1/2強の単価となっている。また、運営コストも駆動にかかる電気代が減少する分で減圧した場合が若干低くなっている。建設コストも運営コストも減圧するのに必要な設備費や動力費は全体からすると非常に小さな割合である。

これらの試算結果から判断すると、減圧トンネルによる高速鉄道はコスト面で非常に有利であるという結果となった。

5. おわりに

本報告では、これまでの研究成果より減圧トンネルを適用した高速鉄道システムの技術的な課題とコスト試算を抽出した。鉄道システムには、鉄輪方式と浮上方式(EDS)の双方を比較した。その結果、技術的な課題を解決できた場合に、モデル線において、減圧トンネルを使用した場合に建設コスト運営コストとも有利となる結果を得た。

ここでは緊急時や異常時の検討については詳しく述べなかったが、今後の課題となる。

文献

- 1) 土木学会構造工学委員会鉄道力学連絡小委員会減圧トンネル研究分科会：減圧高速鉄道の実現に向けた基礎研究報告書，土木学会，2007
- 2) 岩松他：減圧トンネル利用超高速鉄道システムへの展望，第17回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2010)，SS2-6, 2010
- 3) 土木学会：減圧高速鉄道に関する基礎研究調査報告，2005
- 4) (財)鉄道総研：鉄道構造物等設計標準・同解説(シールドトンネル)，2002
- 5) 山本彬也：列車とトンネルの空気力学，鉄道技術研究報告，No. 1230, 1983
- 6) 飯田雅宣他：トンネル内圧力変動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.4, No.7, pp. 55-62, 1990
- 7) 梶山博司他：大深度地下鉄道の空気流動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.7, No.7, pp. 51-58, 1993
- 8) 長谷川他：減圧トンネルに適用する磁気浮上式鉄道システムの検討，電気学会モータードライブ・リニアドライブ研究会予稿集，MD-13-042/LD-13-104, 2013